



Πολυτεχνείο Κρήτης

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Δομική και Θερμική Ανάλυση Τρισδιάστατων Μοντέλων

Μπούνταλης Σταύρος

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Μπιλάλης

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1. Εισαγωγή	
1.1 Pro Engineer	4
1.2 Pro Mechanical	4
1.2.1 Structure	5
1.2.2 Thermal	5

Κεφάλαιο 2 Δομική Ανάλυση

2. Structure Analysis	7
2.1 Define Materials	8
2.1.1 Structural	9
2.1.2 Thermal	11
2.1.3 Miscellaneous	11
2.1.4 Appearance	12
2.1.5 User Defined	13
2.2 Material Assignment	14
2.3 Constraint	14
2.4 Loads	17
2.4.1 Structure Loads	18
2.4.1.1 Force and Moment Loads	18
2.4.1.2 Bearing Loads	23
2.4.1.3 Centrifugal Loads	24
2.4.1.4 Gravity Loads	26
2.4.1.5 Pressure Loads	27
2.4.1.6 Temperature Loads	28
2.4.1.6.1 Global Temperature	29
2.4.1.6.2 External Temperature	30
2.4.1.7 Mechanism Load	30
2.4.1.7.1 Δημιουργία Αντικειμένων	31
2.4.1.7.2 Συναρμολόγηση	32
2.4.1.7.3 Mechanism Design	36
○ Gravity	37
○ Cam-Follower Connection	37
○ Spring	38
○ Damper	39
○ Servo Motor	40
2.4.1.7.4 Mechanism Analysis	42
2.4.1.7.5 Export Load	48
2.5 Static Analysis	51
2.6 Buckling Analysis	75
2.7 Modal Analysis	84
2.8 Standard Design Study	89
2.9 Sensitivity Design Study	91
2.9.1 Global Sensitivity	91
2.9.2 Local Sensitivity	94
2.10 Optimization Study	95

2.11 Συναρμογές	109
2.11.1 Μηχανισμός	109
2.11.2 Συναρμογή	110
2.11.2.1 Contact Analysis	114

Κεφάλαιο 3 Θερμική Ανάλυση

3. Thermal Analysis	116
3.1 Heat Load	117
3.2 Prescribed Temperature	119
3.3 Convection Condition	120
3.4 Steady State Thermal Analysis	122
3.5 Transient Thermal Analysis	125

Παράρτημα

- Βιβλιογραφία
- Πηγές

1. Εισαγωγή

Ένας μηχανικός παραγωγής και διοίκησης έχει γνώσεις σχετικά με την διαδικασία παραγωγής προϊόντων από την αρχική ιδέα, τον σχεδιασμό, την κατασκευή έως και την απόσυρση αυτών. Σε μία γραμμή παραγωγής τα συστήματα CAD (Computer aided design) που διδάσκονται στο Πολυτεχνείο Κρήτης ασχολούνται με τον σχεδιασμό με την βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών. Στα πλαίσια του εργαστηρίου του μαθήματος ο φοιτητής κατασκευάζει ένα τρισδιάστατο αντικείμενο με την χρήση ενός λογισμικού. Σε αυτό το σημείο η ενασχόλησή μου με την εργασία αυτή με παρότρυνε στο να θελήσω να εντρυφήσω περισσότερο στην διαδικασία που ακολουθείται μετά την κατασκευή του αντικειμένου.

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η πραγματοποίηση μίας έρευνας γύρω από την δομική και τη θερμική ανάλυση, τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται, οι μέθοδοι και αλγόριθμοι με τους οποίους επεξεργάζονται όλα τα στοιχεία στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και οι δυνατότητες του προγράμματος που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο. Για τον σκοπό αυτό θεωρήθηκε αναγκαία η δημιουργία διάφορων αντικειμένων και μέσα από παραδείγματα όπως αυτά θα παρουσιαστούν στην συνέχεια της εργασίας να αναλύσουμε τις δυνατότητες που μας προσφέρει το λογισμικό. Το κομμάτι αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί ακόμα και ως ένα βοήθημα για την χρήση του Pro\Mechanica στην ανάλυση διάφορων μοντέλων στα πλαίσια του εργαστηρίου.

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή των τρισδιάστατων μοντέλων είναι το Pro Engineer Wildfire 5.0 και για την ανάλυση χρησιμοποιήσαμε το Pro\Mechanica.

1.1 Pro Engineer Wildfire 5.0

Το Pro Engineer Wildfire 5.0 γνωστό πλέον και ως Creo Elements/Pro είναι το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της εργασίας. Είναι ένα πρόγραμμα παραμετρικής μοντελοποίησης που δημιουργήθηκε από την εταιρεία PTC (Parametric Technology Corporation). Η εφαρμογή παρέχει στερεά μοντελοποίηση, δυνατότητα συναρμολόγησης και κίνησης, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και άλλα εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μηχανικούς. Είναι μία λύση όσο αφορά στην σχεδίαση και την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων που χρησιμοποιείται στα CAD/CAM συστήματα. Η παραμετρική μοντελοποίηση χρησιμοποιεί ως παραμέτρους διάφορα στοιχεία του στερεού όπως τις διαστάσεις, τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς μεταξύ των σχέσεων των αντικειμένων με στόχο τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και την ανάπτυξη του προϊόντος. Το Pro/Engineer παρέχει ένα πλήρες πακέτο εργαλείων σχεδιασμού και αναλύσεων των δυνατοτήτων κατασκευής ενός αντικειμένου. Για την λειτουργία του απαιτούνται γνώσεις και ικανότητες που αφορούν θέματα όπως η στερεά μοντελοποίηση, οι ανοχές των διαστάσεων και της γεωμετρίας, ο φωτορεαλισμός, η μεταφορά και η μετάφραση δεδομένων και η προσομοίωση. Οι χρήστες του Pro Engineer δημιουργούν μέσα από αυτό ένα πλήρες ψηφιακό 3D μοντέλο των προϊόντων τους.

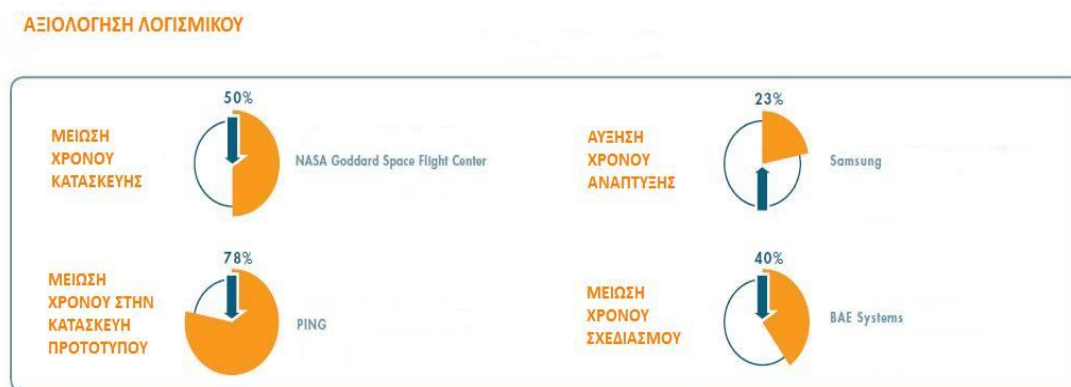
1.2 Pro/Mechanica

Στο βασικό εξοπλισμό του προγράμματος συμπεριλαμβάνεται το Pro/Mechanica, είναι το κύριο εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στην εκπόνηση της εργασίας. Με το Pro/Mechanica μπορούμε να προσομοιώσουμε τη συμπεριφορά αντικειμένων και συναρμολογών και να εξάγουμε αποτελέσματα για την αντοχή των υλικών. Μας δίνει τη δυνατότητα να τοποθετήσουμε στηρίξεις, φορτία, και να καθορίσουμε το υλικό κατασκευής επίσης διαθέτει ένα μεγάλο εύρος στα είδη των αναλύσεων που μπορούν να πραγματοποιηθούν με αποτέλεσμα να μπορεί να μελετηθεί πλήρως η συμπεριφορά των αντικειμένων πριν ακόμα κατασκευαστούν. Βασιζόμενοι στις δυνατότητες που μας προσφέρει το λογισμικό μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι τα προϊόντα ανταποκρίνονται στις προσδοκίες των πελατών και είμαστε σε θέση να προβλέψουμε τη συμπεριφορά τους σε πραγματικές συνθήκες ακόμα μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε τον σχεδιασμό των προϊόντων ανάλογα με τις προδιαγραφές που πρέπει να έχει το κάθε αντικείμενο.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης του Pro/Mechanica συνοψίζονται εδώ:

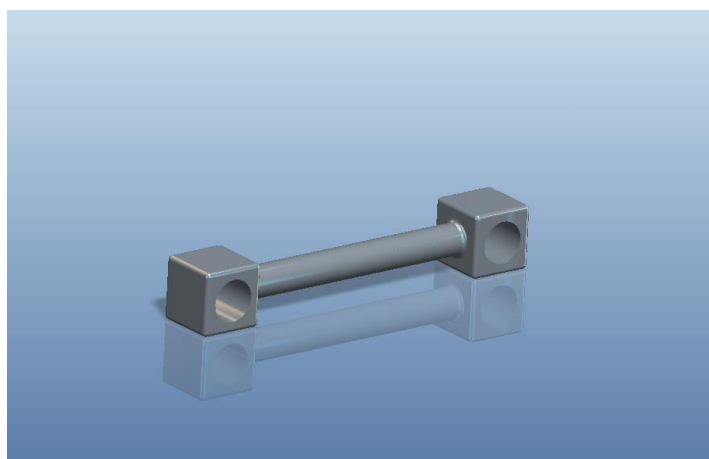
- Μειώνει το κόστος κατασκευής και ανάπτυξης του προϊόντος
- Αυξάνει τη δημιουργικότητα του χρήστη καθώς σε λιγότερο χρόνο μπορεί να επεξεργάζεται περισσότερα σχέδια για ένα προϊόν.
- Βελτιστοποίηση του προϊόντος έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες.

Το λογισμικό της PTC χρησιμοποιείται από διάφορες εταιρίες ανάπτυξης και κατασκευής προϊόντων, ενδεικτικά παρουσιάζονται τα οφέλη που αποκόμισαν μερικές από αυτές με τη χρήση του Pro Engineer.



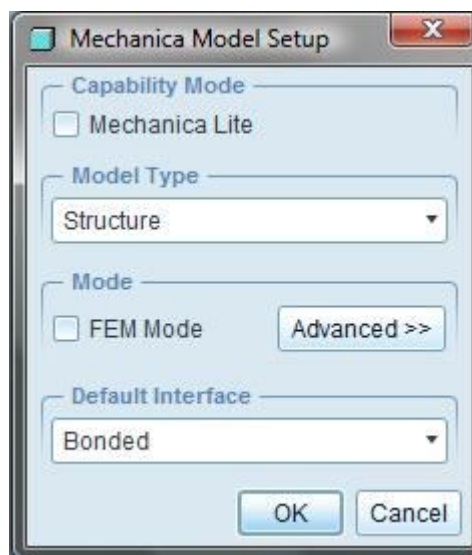
Εικόνα 1: Πλεονεκτήματα χρήσης του Pro\Engineer

Στην συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα παρουσιαστεί ένα αναλυτικό εγχειρίδιο λειτουργίας της εφαρμογής Pro/Mechanica. Για την καλύτερη κατανόηση των επιλογών που προσφέρονται από το λογισμικό θα χρησιμοποιηθούν διάφορα αντικείμενα ως παραδείγματα. Το πρώτο αντικείμενο που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ένας σύνδεσμος, δεν θα δοθεί έμφαση στον τρόπο κατασκευής σύνθετων αντικειμένων καθώς δεν είναι το αντικείμενο της εργασίας η κατασκευή αλλά η μελέτη των αντικειμένων κάτω από διάφορες συνθήκες.



Εικόνα 2: Αντικείμενο σύνδεσμος

Επιλέγοντας από την γραμμή εργαλείων Applications→Mechanica εμφανίζεται μια νέα καρτέλα (Mechanica Model Setup). Στο σημείο αυτό πρέπει να επιλέξουμε αν θα πραγματοποιήσουμε ανάλυση δομής (Structure) ή θερμική ανάλυση (Thermal), καθεμία από τις οποίες εστιάζει σε διάφορες πτυχές της μηχανικής συμπεριφοράς του αντικειμένου.



Εικόνα 3: Mechanica Model Setup

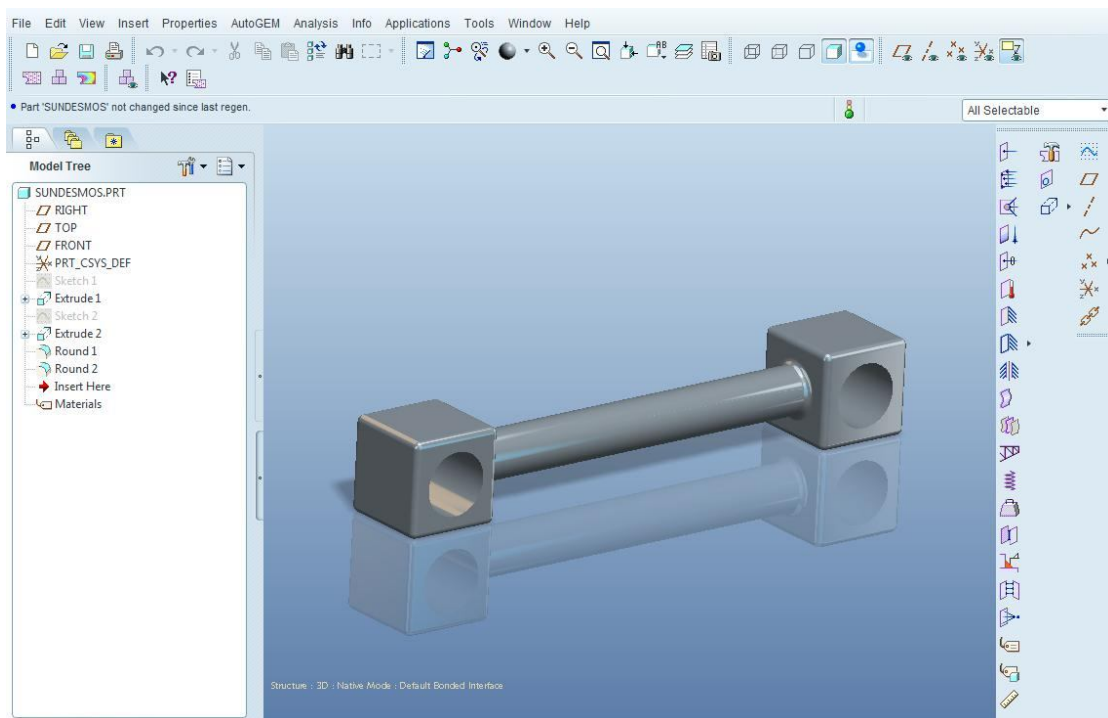
1.2.1 Structure

Επιλέγοντας αυτήν την ενότητα μπορούμε να αξιολογήσουμε τη δομική συμπεριφορά ενός αντικειμένου ή μιας συναρμογής. Αυτή η ενότητα μας παρέχει τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε δομικά φορτία και στηρίξεις στο μοντέλο. Στη συνέχεια μπορούμε να εκτελέσουμε τις εξής αναλύσεις: στατική, ιδιομορφική, προέντασης, λογισμού και αναλύσεις κραδασμών. Μπορούμε επίσης να αξιολογήσουμε τον κύκλο ζωής του μοντέλου και να λύσουμε προβλήματα αντικειμένων που βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους. Η κυριότερη χρήση της ανάλυση δομής είναι τα προβλήματα όπου η παραμόρφωση είναι μικρή και γραμμική, μπορούμε κάλλιστα να επιλύσουμε και προβλήματα που παρουσιάζουν μεγάλη παραμόρφωση.

1.2.2 Thermal

Στην ενότητα Thermal μπορούμε να αξιολογήσουν τη θερμική συμπεριφορά ενός αντικειμένου ή μιας συναρμογής. Μπορούμε να ορίσουμε φορτία θερμότητας, προβλεπόμενες θερμοκρασίες και συνθήκες μεταφοράς. Στη συνέχεια μπορούμε να εκτελέσουμε θερμικές αναλύσεις, τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη μεταφοράς θερμότητας στο μοντέλο, επίσης τα αποτελέσματα μιας θερμικής ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην δομική ανάλυση.

2. Structure Analysis



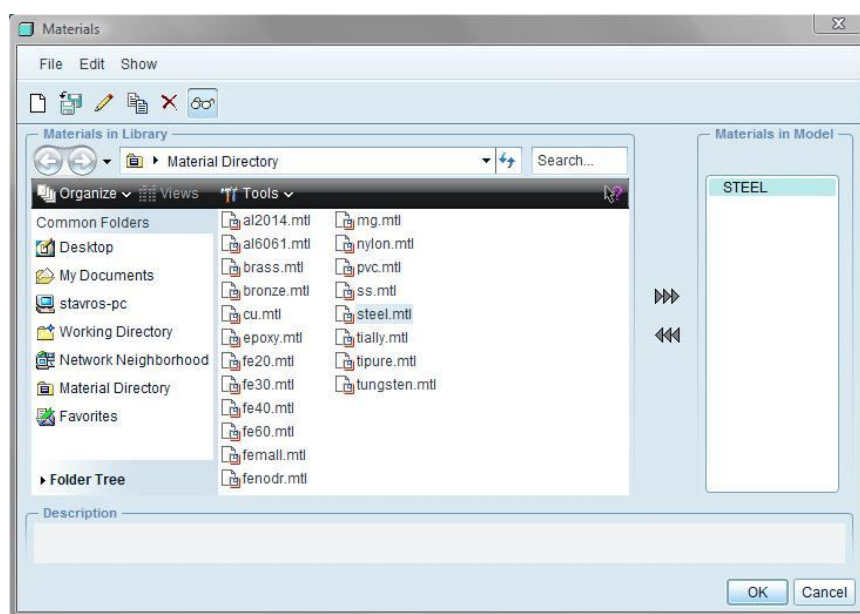
Εικόνα 4: Μενού Pro\Engineer

Στο πάνω μέρος του παράθυρου εξακολουθεί να εμφανίζεται η βασική γραμμή εργαλείων όπως ήταν αρχικά στο βασικό μενού. Στα αριστερά παρατηρείται το model tree (παρουσιάζει αναλυτικά τα στάδια για την κατασκευή του αντικειμένου). Στο δεξί μέρος του παράθυρου εμφανίζεται η βασική εργαλειοθήκη του Pro/Mechanica. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στάδια που πρέπει να ακολουθήσει ο χρήστης για να ορίσει τις απαραίτητες παραμέτρους πριν την ανάλυση.

- 1. Define Materials**
- 2. Material Assignment**
- 3. Constraint**
- 4. Loads**

2.1 Define Materials

Αρχικά ορίζουμε το υλικό κατασκευής του αντικειμένου, επιλέγουμε το εικονίδιο Define Materials από τη γραμμή εργαλείων και εμφανίζεται το ακόλουθο παράθυρο. Στο κέντρο εμφανίζονται όλα τα διαθέσιμα υλικά που υπάρχουν στη βιβλιοθήκη. Επιλέγουμε τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε στην κατασκευή μας και με το δεξί βέλος τοποθετούμε τα υλικά στο μοντέλο.



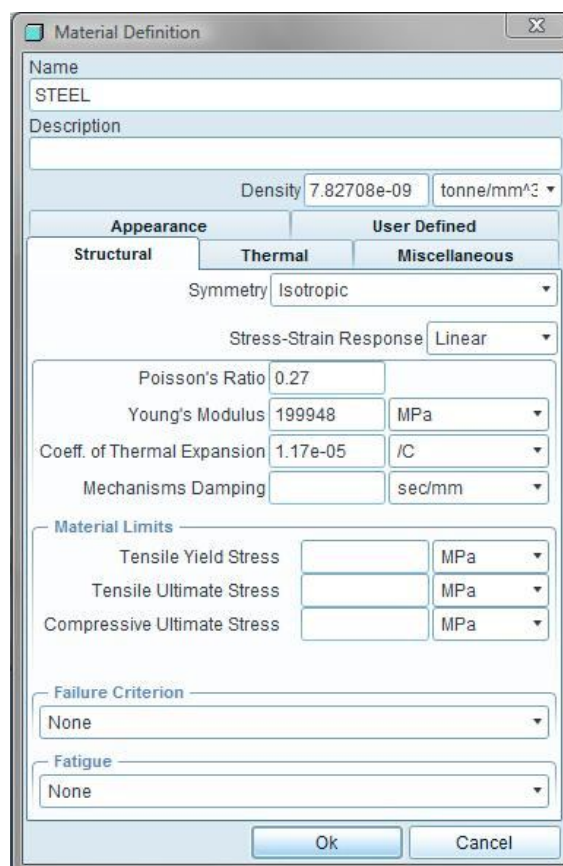
Εικόνα 5: Παράθυρο Define Materials

Υπάρχει πληθώρα υλικών στη βιβλιοθήκη του λογισμικού που διευκολύνει το χρήστη στην επιλογή του κατάλληλου υλικού. Στα υλικά της βιβλιοθήκης μας δίνεται η δυνατότητα να τροποποιήσουμε τις ιδιότητες τους ακόμα και να δημιουργήσουμε εξ'αρχής ένα υλικό. Επιλέγοντας Edit από τη γραμμή εργαλείων εμφανίζεται το παράθυρο Material Definition. Στο νέο παράθυρο μπορούμε να επεξεργαστούμε το υλικό στις εξής κατηγορίες:

- **Structural**
- **Thermal**
- **Miscellaneous**
- **Appearance**
- **User Defined**

2.1.1 Structural

Στο πάνω μέρος ορίζουμε το όνομα του υλικού και αναγράφεται η πυκνότητα (Density) του υλικού που έχουμε επιλέξει για επεξεργασία. Στην υποκατηγορία Structural μπορούμε να ορίσουμε τη συμμετρία (Symmetry) του υλικού, οι επιλογές είναι οι εξής: Ισοτροπικό (Isotropic), το υλικό έχει τις ίδιες ιδιότητες και στις τρεις διευθύνσεις. Ορθότροπο (Orthotropic), το υλικό έχει διαφορετικές ελαστικές ιδιότητες κατά την διεύθυνση των τριών αξόνων. Εγκάρσια ισοτροπικό (Transversely Isotropic), το υλικό παρουσιάζει όμοιες ιδιότητες μόνο σε μια διεύθυνση.

The image shows a software window titled "Material Definition" with a close button (X) in the top right corner. The window is divided into several sections. At the top, there is a "Name" field containing "STEEL" and a "Description" field which is empty. Below these is a "Density" field with the value "7.82708e-09" and a unit dropdown menu set to "tonne/mm^3". The main area of the window is divided into two tabs: "Appearance" and "User Defined". The "User Defined" tab is active and contains three sub-tabs: "Structural", "Thermal", and "Miscellaneous". The "Structural" sub-tab is selected. Under "Symmetry", a dropdown menu is set to "Isotropic". Below that, "Stress-Strain Response" is set to "Linear". A section for material properties includes: "Poisson's Ratio" (0.27), "Young's Modulus" (199948 MPa), "Coeff. of Thermal Expansion" (1.17e-05 /C), and "Mechanisms Damping" (sec/mm). Below this is a "Material Limits" section with fields for "Tensile Yield Stress", "Tensile Ultimate Stress", and "Compressive Ultimate Stress", each with a unit dropdown set to "MPa". At the bottom, there are "Failure Criterion" and "Fatigue" sections, both with dropdown menus set to "None". "Ok" and "Cancel" buttons are at the very bottom.

Εικόνα 6: Material Definition Structural

Επομένη επιλογή είναι ο τρόπος που αντιδρά το υλικό στην πίεση που του ασκείται (Stress-Strain Response). Οι τρόποι αντίδρασης του υλικού είναι οι εξής: Γραμμικά (Linear), το υλικό ανταποκρίνεται γραμμικά στα φορτία που ασκούνται. Υπερελαστικό (Hyperelastic), τα υλικά που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία έχουν την ιδιότητα να δέχονται μεγάλες ελαστικές φορτίσεις που προκαλούνται από μικρές δυνάμεις χωρίς να χάνουν τις ελαστικές τους ιδιότητες. Τα υπερελαστικά υλικά έχουν μη γραμμική συμπεριφορά πράγμα που σημαίνει ότι η παραμόρφωση τους δεν είναι ανάλογη του φορτίου που ασκείται. Ελαστοπλαστικά (Elastoplastic), τα υλικά που ανήκουν στη συγκεκριμένη κατηγορία παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά. Η ιδιότητα τους είναι ότι τείνουν να επανέλθουν στο αρχικό τους σχήμα όταν η δύναμη που ασκείται δεν ξεπερνά το κρίσιμο σημείο (ποικίλει ανάλογα το υλικό) και παρουσιάζουν μόνιμη παραμόρφωση όταν η ασκούμενη δύναμη το ξεπερνά.

Στη συνέχεια ορίζονται κάποιες σταθερές που αποτελούν χαρακτηριστικά του κάθε υλικού όπως ο λόγος Poisson (Poisson's Ratio), η σταθερά του Young (Young's Modulus), ο συντελεστής θερμικής διαστολής

(Coeff. Of Thermal Expansion) και οι μηχανισμοί απόσβεσης (Mechanisms Damping).

Επίσης μπορούμε να ορίσουμε τα όρια αντοχής του υλικού (Material Limits) που είναι απαραίτητα για την επιλογή του κατάλληλου κριτηρίου αστοχίας (Failure Criterion) και της κόπωσης (Fatigue) που παρουσιάζονται παρακάτω. Ορίζουμε την εφελκυστική τάση διαρροής (Tensile Yield Stress), είναι η ανώτερη και κατώτερη τάση που ορίζουν την ασταθή περιοχή που ακολουθεί την ελαστική περιοχή και στην οποία παρατηρούμε σημαντική αύξηση στη παραμόρφωση, χωρίς να έχουμε ανάλογη αύξηση στη τάση. Το όριο θραύσης (Ultimate Tensile Stress), είναι η τιμή της τάσης μετά την οποία το δοκίμιο σχηματίζει λαιμό και τελικά σπάει. Απόλυτη τάση συμπίεσης (Ultimate Compressive Stress), είναι η τιμή της τάσης μετά την οποία το δοκίμιο συνθλίβεται.

Ακόμα μπορούμε να επιλέξουμε ποιο κριτήριο αστοχίας θα εφαρμόσουμε. Τα κριτήρια αστοχίας του υλικού (Failure Criterion) είναι τα εξής:

- **Modified Mohr**
- **Maximum Shear Stress (Tresca)**
- **Distortion Energy (von Mises)**

Τέλος μπορούμε να ορίσουμε την κόπωση (Fatigue) που συσσωρεύεται σε ένα υλικό, η μελέτη της κόπωσης είναι πολύ σημαντικός παράγοντας διότι οι περισσότερες αστοχίες των υλικών δημιουργούνται από την κόπωση που συσσωρεύεται και όχι από στιγμιαία φορτία. Αρχικά ορίζουμε το συντελεστή μείωσης αντοχής (Strength Reduction Factor). Επιλεγούμε τον τύπο του υλικού (Material Type), μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε αμιγή μέταλλα (Unalloyed Steels), μέταλλα με μικρές προσμίξεις (Low Alloy Steels), κράματα τιτανίου (Titanium Alloys), και κράματα αλουμινίου (Aluminium Alloys). Στη συνέχεια επιλέγουμε το φινίρισμα της επιφάνειας (Surface Finish) από της παρακάτω επιλογές.

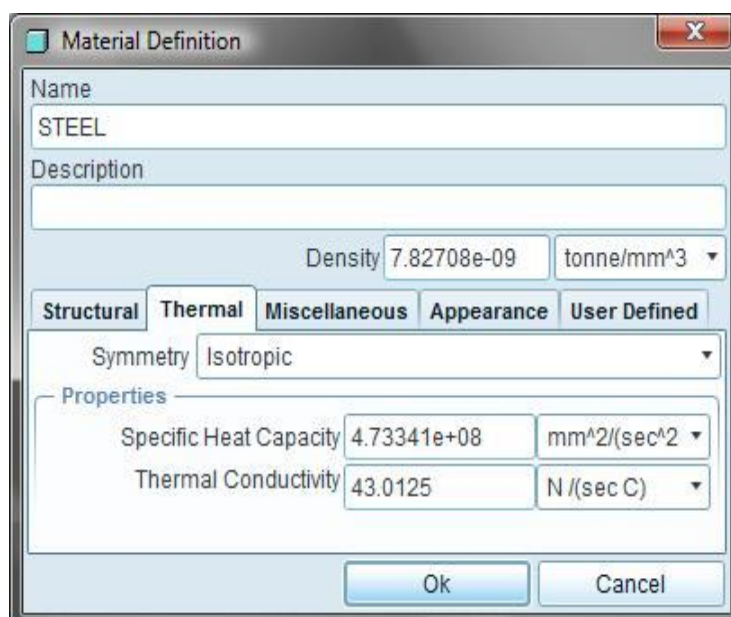
Polished
Ground
Good Machined
Average Machined
Poor Machined
Hot Rolled
Forged
Cast
Water Corroded
Sea Water Corroded
Nitrided
Cold Rolled
Shot Peened

Εικόνα 7: Φινίρισμα επιφανειών

2.1.2 Thermal

Στην καρτέλα Thermal μπορούμε να καθορίσουμε τις θερμικές ιδιότητες για ένα υλικό. Ορίζουμε την ειδική θερμοχωρητικότητα (Specific Heat Capacity) δηλαδή την ικανότητα ενός σώματος να αποθηκεύει θερμότητα κατά τη θέρμανσή του, φανερώνει πόσο εύκολα θερμαίνεται ή ψύχεται το σώμα αυτό. Επίσης ορίζουμε την θερμική αγωγιμότητα (Thermal Conductivity), είναι η

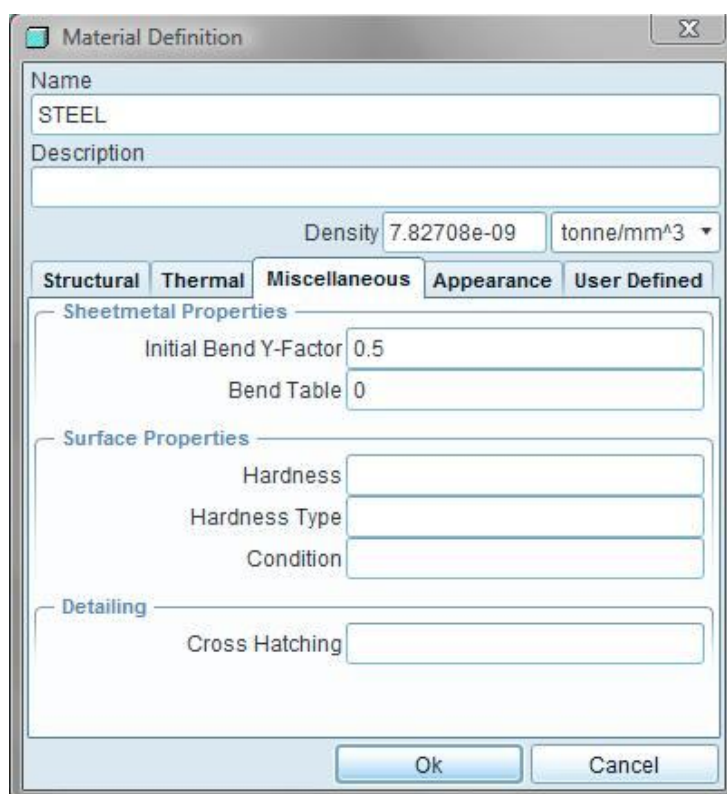
χαρακτηριστική ιδιότητα του υλικού που προσδιορίζει την ευκολία ή δυσκολία διάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό του.

The image shows the 'Material Definition' dialog box with the 'Thermal' tab selected. The 'Name' field contains 'STEEL'. The 'Description' field is empty. The 'Density' field is set to '7.82708e-09' with a unit dropdown set to 'tonne/mm^3'. The 'Symmetry' dropdown is set to 'Isotropic'. Under the 'Properties' section, 'Specific Heat Capacity' is set to '4.73341e+08' with a unit dropdown set to 'mm^2/(sec^2)', and 'Thermal Conductivity' is set to '43.0125' with a unit dropdown set to 'N/(sec C)'. At the bottom are 'Ok' and 'Cancel' buttons.

Εικόνα 8: Material Definition Thermal

2.1.3 Miscellaneous

Στη καρτέλα μπορούμε να καθορίσουμε τις ιδιότητες ελασμάτων (Sheet Metal), τις επιφανειακές ιδιότητες (Surface Properties), καθώς και τις λεπτομέρειες του υλικού (Detailing). Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να ορίσουμε τις παραμέτρους που αφορούν στην κάμψη του ελάσματος, τη σκληρότητα της επιφάνειας και την αρχική της κατάσταση.

The image shows the 'Material Definition' dialog box with the 'Miscellaneous' tab selected. The 'Name' field contains 'STEEL'. The 'Description' field is empty. The 'Density' field is set to '7.82708e-09' with a unit dropdown set to 'tonne/mm^3'. Under the 'Sheetmetal Properties' section, 'Initial Bend Y-Factor' is set to '0.5' and 'Bend Table' is set to '0'. Under the 'Surface Properties' section, 'Hardness', 'Hardness Type', and 'Condition' are empty fields. Under the 'Detailing' section, 'Cross Hatching' is an empty field. At the bottom are 'Ok' and 'Cancel' buttons.

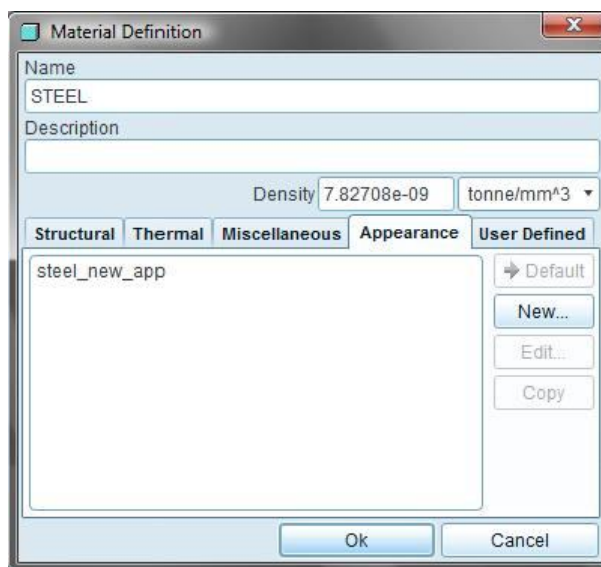
Εικόνα 9: Material Definition Miscellaneous

2.1.4 Appearance

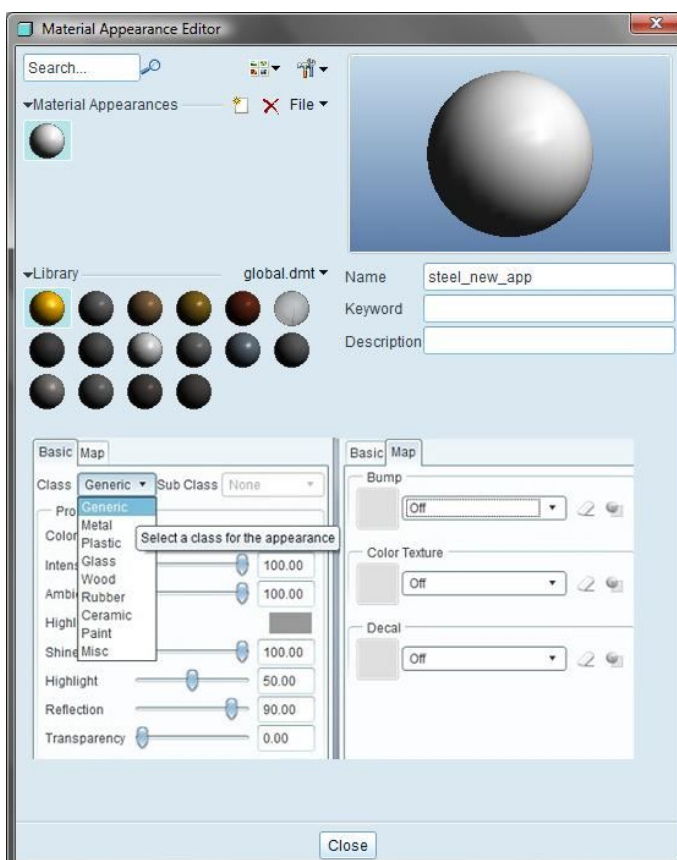
Στην καρτέλα Appearance διαμορφώνουμε την εμφάνιση του υλικού. Επιλεγούμε New για να δημιουργήσουμε μια νέα εμφάνιση στο υλικό. Η εμφάνιση των υλικών δεν είναι βασικό σκέλος στην ανάλυση, με την εμφάνιση των υλικών ασχολείται κυρίως το τμήμα του φωτορεαλισμού. Για το λόγο αυτό δεν θα εμβαθύνουμε στο θέμα αυτό παρουσιάζοντας

επιφανειακά τις επιλογές που παρέχονται στο χρηστή.

Επιλέγοντας New εμφανίζεται η καρτέλα Material Appearance Editor. Πάνω δεξιά υπάρχει η προεπισκόπηση του υλικού όπου παρατηρούμε τις αλλαγές που γίνονται στο υλικό. Στην κατηγορία Library απεικονίζονται τα βασικά υλικά που είναι διαθέσιμα από την βιβλιοθήκη. Στην καρτέλα Basic επιλέγουμε το είδος του υλικού (μέταλλο, ξύλο, γυαλί, πλαστικό κ.τ.λ.), επίσης επεξεργαζόμαστε το χρώμα, τη φωτεινότητα, τη λάμψη, την αντανάκλαση, τη διαφάνεια κ.α. Στην καρτέλα Map μπορούμε να εισάγουμε εικόνες για να δώσουμε υφή στο υλικό.



Εικόνα 10: Material Definition Appearance



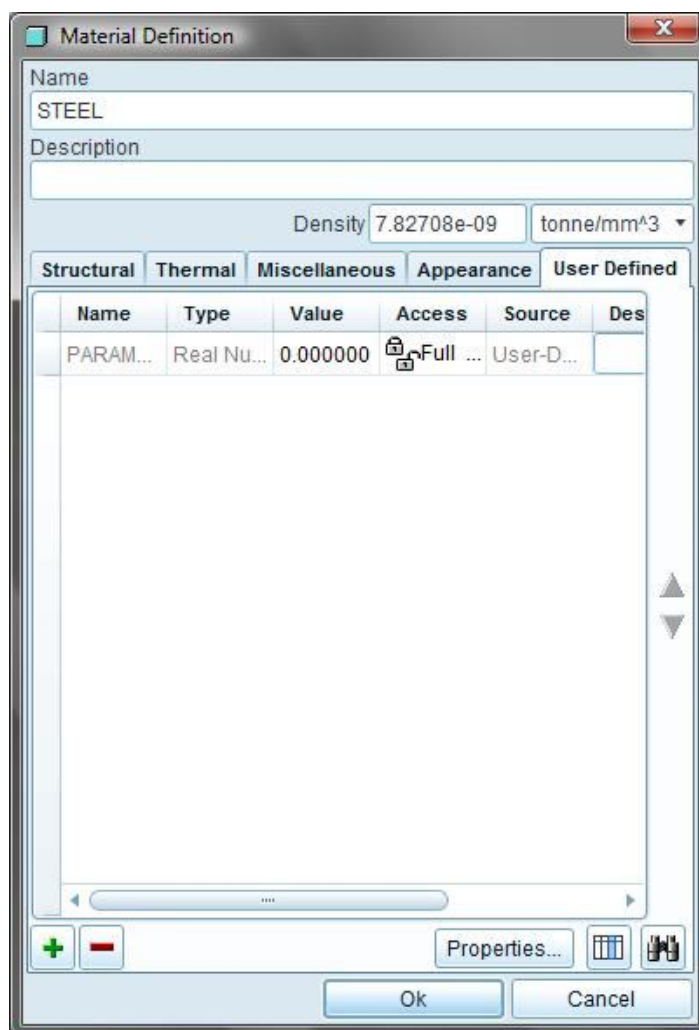
Εικόνα 11: Material Appearance Editor

2.1.5 User Defined

Στην καρτέλα User Defined καθορίζουμε τις παραμέτρους και να τις προσθέσουμε στη βάση δεδομένων των υλικών. Επιλέγουμε το εικονίδιο Add a new parameter, στη συνέχεια ορίζουμε το όνομα, τον τύπο (Type), δηλαδή το είδος της παραμέτρου, μπορεί να είναι πραγματικός αριθμός (Real Number), ακέραιος (Integer), συμβολοσειρά (String), αποδοχής-απόρριψης (Yes-No). Στο κελί Value ορίζουμε την επιθυμητή τιμή. Στο κελί Access ορίζουμε την πρόσβαση που θα έχει ο χρήστης στην παράμετρο, διαχωρίζεται σε ελεύθερη

(Full), περιορισμένη (Limited), κλειδωμένη (Locked). Στο επόμενο κελί (Source) αναγράφεται η προέλευση της παραμέτρου. Τέλος προαιρετικά μπορούμε να δώσουμε μια σύντομη περιγραφή για την παράμετρο που ορίσαμε στο κελί (Description).

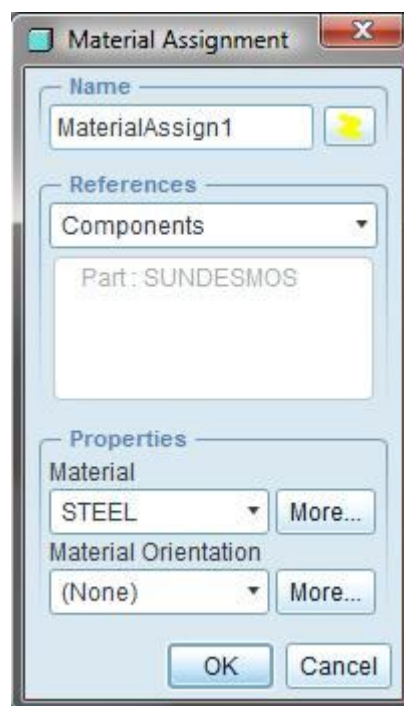
Έχοντας ολοκληρώσει τις παραπάνω διαδικασίες έχουμε ορίσει πλήρως τις ιδιότητες ενός υλικού που επιθυμούμε να προσθέσουμε σε ένα αντικείμενο. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι απαραίτητο να ορίσουμε όλες τις ιδιότητες που προαναφέρθηκαν, πρέπει να ξεχωρίσουμε ποιες είναι οι αναγκαίες ιδιότητες που πρέπει να ορίσουμε ανάλογα με τη χρήση του αντικειμένου και τον τύπο της ανάλυσης που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε. Θα ήταν λανθασμένη η ενεργεία αν καθορίζαμε όλες τις ιδιότητες του υλικού διότι θα είχαμε μεγάλο υπολογιστικό κόστος.



Εικόνα 12: Material Definition User Defined

2.2 Material Assignment

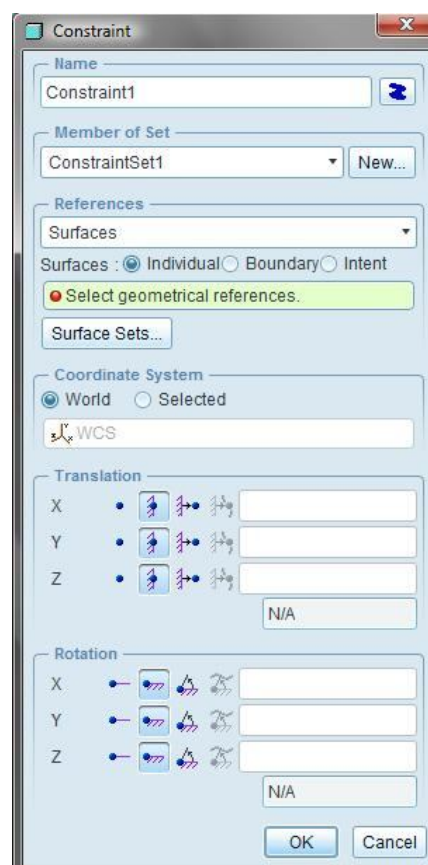
Για να εκχωρήσουμε τις ιδιότητες του υλικού στο αντικείμενο επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Material Assignment. Εμφανίζεται η αντίστοιχη καρτέλα όπου αρχικά ορίζουμε το όνομα και το χρώμα. Στη συνέχεια έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε σε πιο αντικείμενο θα εισάγουμε το υλικό, στη προκειμένη περίπτωση έχουμε ένα μόνο αντικείμενο (Part: Sundesmos). Στην περίπτωση που επεξεργαζόμαστε μια συναρμογή μπορούμε να επιλέξουμε διαφορετικά υλικά για το κάθε τμήμα της. Ως προτεινόμενο υλικό εμφανίζεται εκείνο που τροποποιήσαμε στο προηγούμενο στάδιο, εάν επιθυμεί ο χρήστης την επιλογή άλλου υλικού επιλέγοντας το εικονίδιο More μεταφέρεται σε νέα καρτέλα όπου μπορεί να επιλέξει ένα υλικό από τη βιβλιοθήκη.



Εικόνα 13: Material Assignment

2.3 Constraint

Για να εισάγουμε τους περιορισμούς στο αντικείμενο επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Displacement Constraint. Εμφανίζεται η αντίστοιχη καρτέλα όπου αρχικά ορίζουμε το όνομα και το χρώμα του περιορισμού. Στη συνέχεια στο κελί Member of Set μπορούμε να δημιουργήσουμε διαφορετικά σύνολα περιορισμών. Στο κελί References μπορούμε να ορίσουμε τα σημεία αναφοράς, δηλαδή σε ποια σημεία θα εφαρμοστούν οι περιορισμοί. Έχουμε τις ακόλουθες επιλογές: Επιφάνειες (Surfaces), είναι η προεπιλογή. Μπορούμε να επιλέξουμε μία ή περισσότερες επιφάνειες, τα όρια του αντικειμένου, ή σύνολα επιφανειών. Ακμές/Καμπύλες (Edges/Curves), μπορούμε

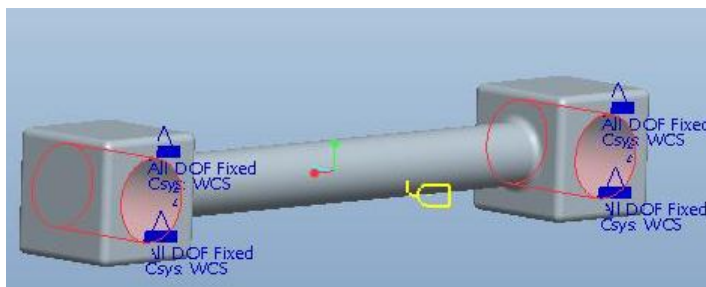


Εικόνα 14: Displacement Constraint

να επιλέξουμε άκρες (ακμές), καμπύλες και σύνθετες καμπύλες. Σημεία (Points), μπορούμε να επιλέξουμε ένα ή περισσότερα σημεία, κορυφές και χαρακτηριστικά σημεία. Στο επόμενο κελί μπορούμε να επιλέξουμε το σύστημα συντεταγμένων (coordinate system). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το σύστημα συντεταγμένων World, παρουσιάζεται ως προεπιλογή και είναι το αρχικό σύστημα που χρησιμοποιήσαμε στη σχεδίαση του αντικειμένου ή να ορίσει ένα νέο σύστημα συντεταγμένων (Selected). Στη συνέχεια ορίζουμε τους τύπους των περιορισμών που επιθυμούμε να εφαρμόσουμε στο μοντέλο.

Μετακίνηση (Translation), ορίζουμε σε τι βαθμό επιτρέπουμε στο αντικείμενο να κινηθεί κατά μήκος ενός κύριου άξονα του συστήματος συντεταγμένων. Περιστροφή (Rotation), ορίζουμε σε τι βαθμό επιτρέπουμε στο αντικείμενο να περιστραφεί σε σχέση με ένα κύριο άξονα του συστήματος συντεταγμένων. Οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής: Free, επιτρέπει στο αντικείμενο να κινηθεί ή να περιστραφεί ελεύθερα στον επιλεγμένο άξονα. Fixed, δεν επιτρέπει καμία κίνηση ή περιστροφή. Prescribed, καθορίζονται όρια από το χρήστη για το πόσο θα μπορεί το αντικείμενο να κινηθεί ή να περιστραφεί.

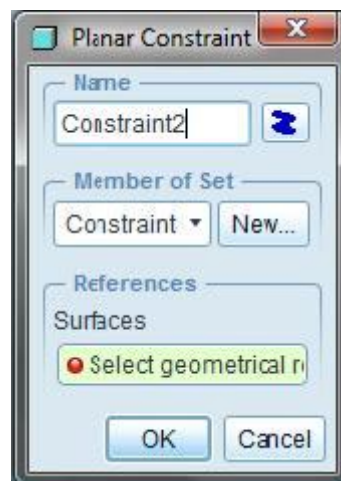
Για παράδειγμα επιλέξαμε τις εσωτερικές επιφάνειες από τις οπές του αντικειμένου και ορίσαμε ότι δεν μπορούν να κινηθούν ή να περιστραφούν.



Εικόνα 15: Αντικείμενο σύνδεσμος με οριακές συνθήκες στις οπές

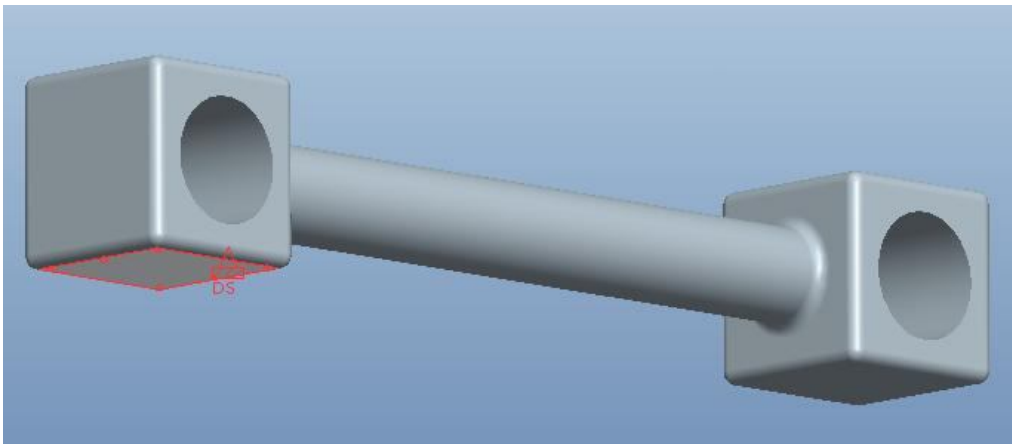
Στο μενού προσφέρονται και άλλες μορφές περιορισμών έκτος από τη γενική μορφή που παρουσιάστηκε παραπάνω.

Επίπεδος περιορισμός (Planar Constraint): Δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει έναν περιορισμό που επιτρέπει την πλήρη επίπεδη κίνηση, αλλά περιορίζει την μετατόπιση εκτός του επιλεγμένου επιπέδου, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε επίπεδες επιφάνειες. Επιλέγοντας από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Planar Constraint, στο νέο παράθυρο που εμφανίζεται μπορούμε να ορίσουμε το όνομα του περιορισμού, σε ποιο σύνολο θα ανήκει και σε ποια επιφάνεια θα εφαρμόζεται.



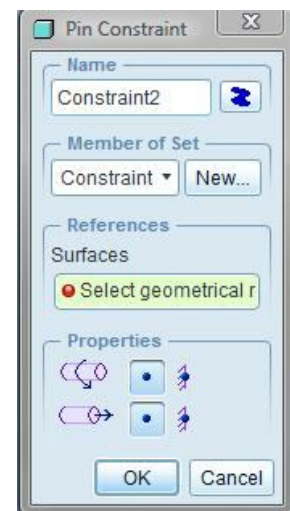
Εικόνα 16: Planar Constraint

Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα.



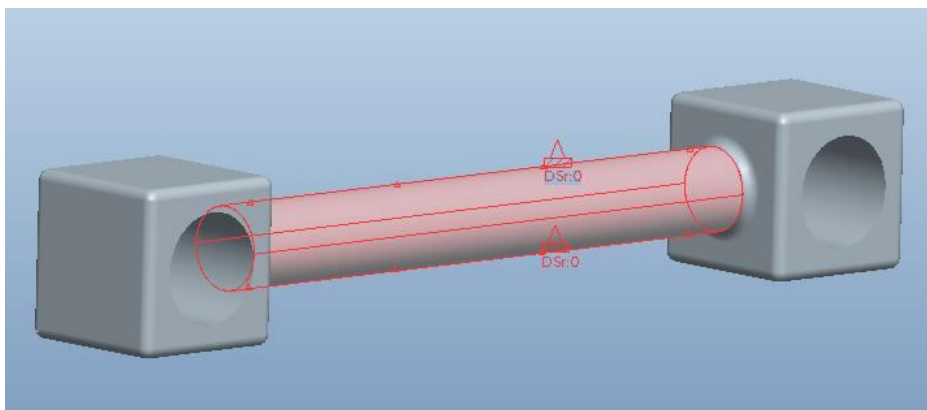
Εικόνα 17: Αντικείμενο σύνδεσμος με οριακές συνθήκες σε επίπεδη επιφάνεια

Κυλινδρικός περιορισμός (Pin Constraint): Μπορούμε να επιλέξουμε μόνο κυλινδρικές επιφάνειες για αυτό το είδος του περιορισμού. Δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ελέγχει τη μεταφορά και την περιστροφή γύρω από τον άξονα της κυλινδρικής επιφάνειας σε 3D αντικείμενα. Ο κυλινδρικός περιορισμός είναι ιδιαίτερα χρήσιμος όταν απαιτείται η επιφάνεια να κινείται σε μία ή περισσότερες κατευθύνσεις, αλλά να συγκρατείται στη θέση της στις υπόλοιπες κατευθύνσεις, για παράδειγμα ένα έμβολο που ολισθαίνει μέσα σε έναν κύλινδρο, παραμένει σφιχτά στο εσωτερικό τοίχωμα του κυλίνδρου και δεν περιστρέφεται. Επιλέγοντας από τη γραμμή εργαλείων το



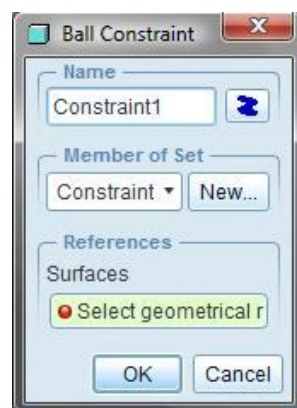
Εικόνα 18: Pin Constraint

εικονίδιο Pin Constraint, στο νέο παράθυρο που εμφανίζεται μπορούμε να ορίσουμε το όνομα του περιορισμού, σε ποιο σύνολο θα ανήκει, σε ποια επιφάνεια θα εφαρμόζεται, τέλος επιλέγουμε την κίνηση που επιθυμούμε να εκτελεί. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα

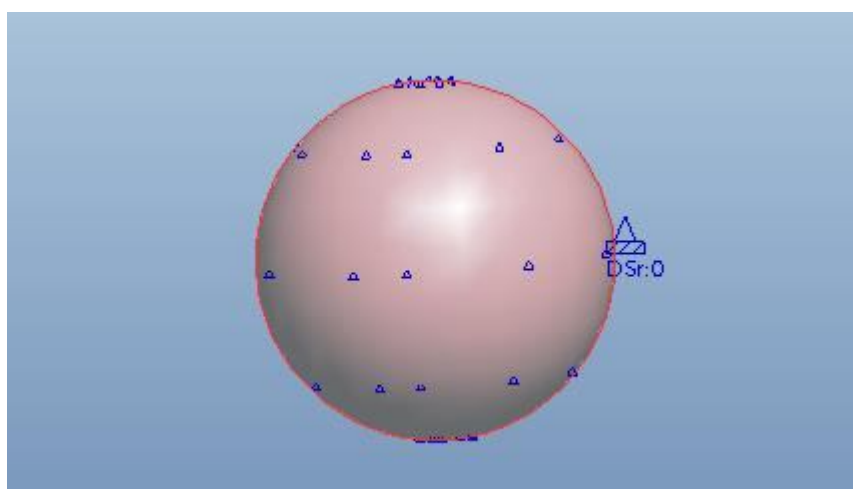


Εικόνα 19: Αντικείμενο σύνδεσμος με οριακές συνθήκες Pin Constraint

Σφαιρικός περιορισμός (Ball Constraint): Μπορούμε να επιλέξουμε μόνο σφαιρικές επιφάνειες για αυτό το είδος του περιορισμού. Ένας σφαιρικός περιορισμός αντιπροσωπεύει μια σφαιρική άρθρωση στην οποία περιορίζεται η μεταφορά ενώ είναι ελεύθερη η περιστροφή. Επιλέγοντας από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Ball Constraint στο νέο παράθυρο που εμφανίζεται μπορούμε να ορίσουμε το όνομα του περιορισμού, σε ποιο σύνολο θα ανήκει και σε ποια επιφάνεια θα εφαρμόζεται. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 20: Ball Constraint



Εικόνα 21: Σφαιρικό μοντέλο με οριακές συνθήκες Ball Constraint

2.4 Loads

Οι περιορισμοί και τα φορτία καθορίζουν το περιβάλλον του μοντέλου και τις συνθήκες που θα αντιμετωπίσει στον πραγματικό κόσμο. Το Pro/Mechanica προσομοιώνει τη συμπεριφορά του μοντέλου σύμφωνα με τα φορτία που καθορίζουμε κατά την εκτέλεση κανονικής ανάλυσης (standard analyses) και στη μελέτη ευαισθησίας (sensitivity studies). Στη δομική ανάλυση (structural analysis), ως φορτίο θεωρείται μια δύναμη, η πίεση, η επιτάχυνση, η ταχύτητα, και η θερμοκρασία που εφαρμόζονται σε ένα τμήμα του μοντέλου. Στη θερμική ανάλυση, ως φορτίο θεωρείται μια κατάσταση θερμότητας που εφαρμόζεται σε ένα τμήμα του μοντέλου. Ο τρόπος εισαγωγής των φορτίων και το είδος του φορτίου που εφαρμόζεται σε ένα μοντέλο αποτελεί το βασικότερο τμήμα στο σχεδιασμό μίας ανάλυσης για το λόγο αυτό το λογισμικό μας προσφέρει μια μεγάλη γκάμα επιλογών ώστε ο χρήστης να μπορέσει να αποδώσει την ακριβή συμπεριφορά του μοντέλου σε πραγματικές συνθήκες.

Ανάλογα με την ανάλυση που επιθυμούμε να πραγματοποιήσουμε Δομική ή Θερμική επιλέγουμε και τα αντίστοιχα φορτία (Δομικά ή Θερμικά). Για να εκτελέσουμε μια ανάλυση πρέπει να τοποθετήσουμε τουλάχιστον ένα φορτίο σε μια περιοχή του μοντέλου. Στη δομική ανάλυση εκτός από τα δομικά φορτία μπορούν να εφαρμοστούν και θερμικά φορτία, τα φορτία αυτά μπορούν να εισαχθούν από τη γραμμή εργαλείων ή να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από μια θερμική ανάλυση. Επίσης στη δομική ανάλυση μπορούμε να εισάγουμε φορτία από τη μελέτη ενός μηχανισμού.

2.4.1 Structure Loads

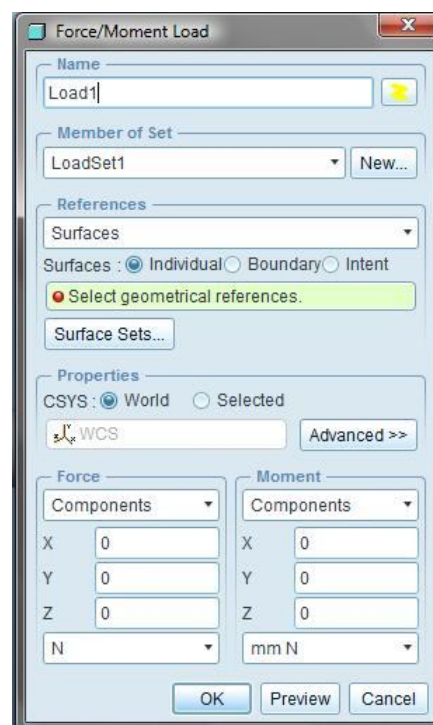
Μπορούμε να δημιουργήσουμε τους παρακάτω τύπους δομικών φορτίων, ανάλογα με το μοντέλο που έχουμε δημιουργήσει.

- **Force and Moment Loads**
- **Bearing Loads**
- **Centrifugal Loads**
- **Gravity Loads**
- **Pressure Loads**
- **Temperature Loads**
- **Mechanism Loads**

Τα είδη των φορτίων που μπορούμε να τοποθετήσουμε σε ένα μοντέλο παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

2.4.1.1 Force and Moment Load

Τα φορτία αυτά είναι τα ευρέως χρησιμοποιούμενα στο Pro/Mechanica. Για να εισάγουμε μια δύναμη ή μια ροπή επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Force and Moment Load και εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε τις εξής επιλογές: Το όνομα και το χρώμα του φορτίου καθώς και σε ποιο σύνολο θα ανήκει. Στο κελί References μπορούμε να ορίσουμε τα σημεία αναφοράς, δηλαδή σε ποια σημεία θα εφαρμοστούν οι δυνάμεις. Έχουμε τις ακόλουθες επιλογές:



Εικόνα 22: Μενού Force/Moment Load

Επιφάνειες (Surfaces), είναι η προεπιλογή. Μπορούμε να επιλέξουμε μία ή περισσότερες επιφάνειες, τα όρια του αντικειμένου, ή σύνολα επιφανειών. Άκρες/Καμπύλες (Edges/Curves), μπορούμε να επιλέξουμε άκρες (ακμές), καμπύλες και σύνθετες καμπύλες. Σημεία (Points), μπορούμε να επιλέξουμε ένα ή περισσότερα σημεία, κορυφές και χαρακτηριστικά σημεία. Στο επόμενο κελί μπορούμε να επιλέξουμε το σύστημα συντεταγμένων (coordinate system). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το σύστημα συντεταγμένων World, παρουσιάζεται ως προεπιλογή και είναι το αρχικό σύστημα που χρησιμοποιήσαμε στη σχεδίαση του αντικειμένου ή να ορίσει ένα νέο σύστημα συντεταγμένων (Selected). Δίπλα από την επιλογή του συστήματος συντεταγμένων επιλέγοντας το εικονίδιο Advanced αναπτύσσεται το παράθυρο και εμφανίζονται δυο νέα πεδία:

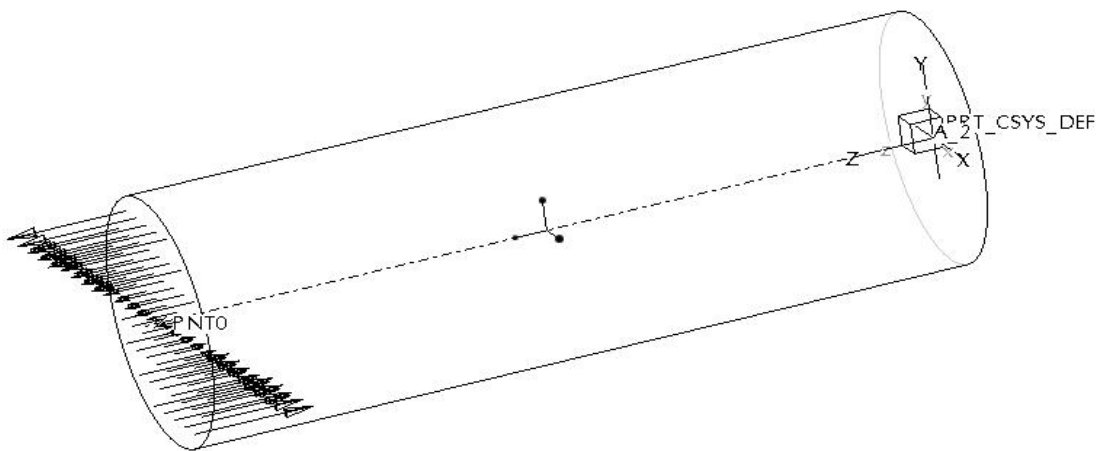
1. **Distribution (Κατανομή):** Στο κελί αυτό μπορούμε να επιλέξουμε με ποιο τρόπο θα κατανεμηθεί το φορτίο που δημιουργήσαμε. Οι επιλογές που έχει ο χρήστης είναι οι εξής:

Για επιφάνειες και ακμές έχουμε τις παρακάτω επιλογές.

- **Total Load:** Η συγκεκριμένη επιλογή χρησιμοποιήστε όταν επιθυμούμε να παραμείνει το φορτίο σταθερό ανεξάρτητο από το μέγεθος της επιφάνειας ή το μήκος της ακμής που ασκείται δηλαδή το ολοκλήρωμα του φορτίου πάνω στην επιλεγμένη οντότητα να ισούται με την αρχική ποσότητα που ορίσαμε. Για καμπύλες και ακμές το φορτίο κατανέμεται ως φορτίο ανά μήκος τόξου και για επιφάνειες το φορτίο κατανέμεται ως φορτίο ανά μονάδα επιφανείας. Για παράδειγμα, αν ορίσουμε ένα φορτίο 100 N σε μια επιφάνεια 10cm² σε κάθε 1 cm² της επιφάνειας θα ασκείται φορτίο 10N. Σε περίπτωση που πραγματοποιήσουμε βελτιστοποίηση της επιφάνειας, και το τελικό εμβαδό της συρρικνωθεί σε ένα 1 cm² το αρχικό φορτίο των 100N που ορίσαμε αρχικά θα ασκείται στη νέα επιφάνεια.
- **Force Per Unit Type:** Ο τύπος μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το που εφαρμόζεται το φορτίο. Μπορεί να είναι μήκος, εμβαδόν, ή όγκος. Εφαρμόζοντας την συγκεκριμένη επιλογή ορίζουμε το φορτίο ανά μονάδα μέτρησης δηλαδή αν το μήκος ή έκταση της οντότητας αλλάξει, μέσω των αλλαγών που κάνουμε στο μοντέλο ή μέσω αλλαγών που πραγματοποιεί το Pro/Mechanica κατά τη διάρκεια μιας μελέτης σχεδιασμού ευαισθησίας ή βελτιστοποίησης, το συνολικό φορτίο που ασκείται μεταβάλλεται ανάλογα. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να εφαρμόσουμε ένα φορτίο 100 N σε μια

επιφάνεια 10cm^2 χρησιμοποιώντας τη μέθοδο δύναμη ανά μονάδα μέτρησης, θα ορίσουμε φορτίο 10N σε κάθε 1cm^2 της έκτασης της επιφάνειας. Η σωρευτική επίδραση του φορτίου είναι 100N . Σε αυτή την περίπτωση, αν η επιφάνεια μειωθεί στο 1cm^2 κατά τη βελτιστοποίηση, το φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας δεν θα μεταβληθεί θα παραμείνει δηλαδή στα 10N . Το συνολικό φορτίο θα μεταβληθεί, από 100N θα μειωθεί σε 10N .

- Total Load At Point:** Η συγκεκριμένη επιλογή χρησιμοποιήστε όταν επιθυμούμε να εφαρμόσουμε ένα κατανεμημένο φορτίο σε μία καμπύλη ή σε μία επιφάνεια που είναι στατικά ισοδύναμη με ένα φορτίο που εφαρμόζεται σε ένα μόνο σημείο. Το σημείο μπορεί να είναι είτε ένα προκαθορισμένο σημείο στο μοντέλο ή μια κορυφή. Μπορούμε να επιλέξουμε ένα μόνο σημείο. Το συνολικό φορτίο δρα επάνω στο προκαθορισμένο σημείο αναφοράς ή την κορυφή προς την κατεύθυνση που καθορίζουμε. Για παράδειγμα, για να δημιουργήσουμε μια ροπή στο σημείο PNT0 στην κατεύθυνση X, ορίζουμε το μέτρο της ροπής στο κελί X και επιλέγουμε το εικονίδιο Preview (προεπισκόπηση) το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 23: Συνολικό φορτίο εφαρμοζόμενο σε σημείο

- Total Bearing Load at Point:** Το συνολικό φορτίο έδρασης σε σημείο (TBLAP) αντιπροσωπεύει την δύναμη και τη ροπή που ασκεί ένα αντικείμενο κυλινδρικού σχήματος σε ένα άλλο. Είναι μια προηγμένη κατανομή φορτίου σε κυλινδρικές επιφάνειες, κυκλικές και καμπύλες που ορίζεται από μια συνισταμένη δύναμη και ροπή σε οποιοδήποτε επιλεγμένο σημείο στο μοντέλο. Το Pro/Mechanica εφαρμόζει ομαλά κατανεμημένα φορτία στην επιλεγμένη γεωμετρία που είναι ισοδύναμα με την εφαρμοζόμενη δύναμη και ροπή. Οι συνιστώσες της καθορισμένης δύναμης και ροπής είναι κάθετες προς

τον άξονα που εφαρμόζεται η δύναμη και μπορούν να μεταβάλλονται κατά μήκος της διεύθυνσης.

Για σημεία έχουμε τις παρακάτω επιλογές.

- **Total Load:** Μοιράζει το φορτίο σε όλα τα σημεία που έχουμε επιλέξει. Χωρίζει το φορτίο που έχουμε ορίσει στον αριθμό των σημείων που έχουμε επιλέξει. Για παράδειγμα, αν ορίσουμε ένα φορτίο 100N και επιλέξουμε 4 σημεία κάθε σημείο θα φέρει ένα φορτίο 25 N.
- **Load Per Point:** Τοποθετεί το φορτίο που έχουμε ορίσει σε κάθε ένα από τα σημεία που θα επιλέξουμε. Για παράδειγμα αν ορίσουμε ένα φορτίο 100N και επιλέξουμε 4 σημεία, σε κάθε σημείο θα ασκείται φορτίο 100N και το συνολικό φορτίο θα είναι 400N.

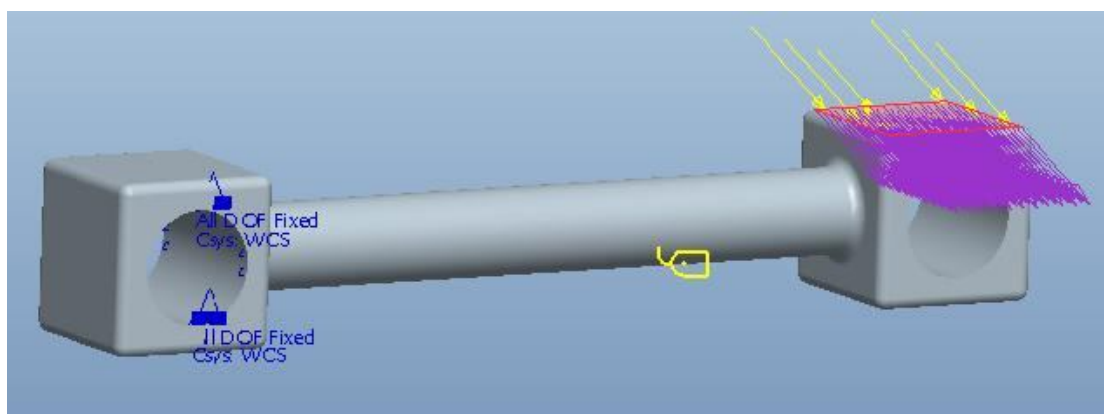
2. Spatial Variation (Χωρική Διακύμανση): Αυτή η επιλογή δεν εμφανίζεται εάν έχουμε επιλέξει Total Load At Point στις επιλογές της κατανομής φορτίου. Η χωρική διακύμανση μας δίνει τη δυνατότητα να προσομοιώσουμε απλές και σύνθετες διακυμάνσεις του φορτίου στους φορείς που καθορίζουν το φορτίο. Η επιλογή αυτή είναι χρήσιμη στα μοντέλα που έχουν τοπικές συγκεντρώσεις φορτίου. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την συγκεκριμένη επιλογή για να προσδιορίσουμε ανομοιόμορφα φορτία που εφαρμόζονται στη γεωμετρία του μοντέλου μας. Η πολυπλοκότητα της μεταβολής εξαρτάται από την επιλογή που θα επιλέξουμε. Η χωρική διακύμανση είναι διαθέσιμη στη θερμική και τη δομική ανάλυση, εξαιρούνται μόνο τα φορτία έδρασης. Μπορούμε να επιλέξουμε μία από τις παρακάτω επιλογές για τον καθορίσουμε τη διακύμανση του φορτίου.

- **Uniform (Ομοιόμορφο):** Χρησιμοποιώντας αυτή την επιλογή το φορτίο θα εφαρμοστεί ομοιόμορφα. Οι τιμές που εισάγονται πολλαπλασιάζεται με το 1 στους επιλεγμένους φορείς. Το φορτίο δεν έχει χωρική διακύμανση.
- **Function of Coordinates (Συνάρτηση Συντεταγμένων):** Με την επιλογή αυτή μπορούμε να ορίσουμε την διακύμανση, καθορίζοντας μια συνάρτηση που χρησιμοποιείται ως συντελεστής. Επιλέγοντας το εικονίδιο List Available Functions ανοίγει ένα νέο παράθυρο (Functions) όπου μπορούμε να εισάγουμε έτοιμες συναρτήσεις ή να δημιουργήσουμε νέες που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του φορτίου.

Στο κάτω μέρος του παράθυρου Force and Moment Load μπορούμε να ορίσουμε το μέτρο, τη διεύθυνση και τις μονάδες της δύναμης(Force) και της ροπής(Moment) που επιθυμούμε να ασκήσουμε στο μοντέλο. Μπορούμε να επιλέξουμε με ποιο τρόπο θα ορίσουμε το μέτρο και τη διεύθυνση της δύναμης και της ροπής. Έχουμε τις εξής επιλογές:

- **Components(Συνιστώσες):** Ορίζουμε τις συνιστώσες της δύναμης ή της ροπής σε κάθε κατεύθυνση. Το λογισμικό υπολογίζει την κατεύθυνση και το μέτρο της δύναμης ή της ροπής από τα στοιχεία που ορίσαμε και τοποθετεί το φορτίο στο μοντέλο.
- **Dir Vector & Mag(Μοναδιαίο Διάνυσμα & Μέγεθος):** Ορίζουμε το μοναδιαίο διάνυσμα στο πλαίσιο εισαγωγής Direction και το μέτρο στο πλαίσιο εισαγωγής Mag. Εάν εισάγουμε ένα θετικό μέγεθος, το λογισμικό εφαρμόζει τη δύναμη ή τη ροπή κατά την ίδια κατεύθυνση με το φορέα αντίθετα εάν χρησιμοποιήσουμε μια αρνητική τιμή η κατεύθυνση είναι αντίθετη με αυτή του διανύσματος.
- **Dir Points & Mag(Φορέας Σημείων & Μέγεθος):** Εισάγουμε την κατεύθυνση της δύναμης ή της ροπής επιλέγοντας δύο σημεία και στη συνέχεια εισάγουμε το μέτρο στο πλαίσιο εισαγωγής Mag. Εάν εισάγουμε ένα θετικό μέγεθος το λογισμικό εφαρμόζει τη δύναμη ή τη ροπή κατά την ίδια κατεύθυνση με το φορέα αντίθετα εάν χρησιμοποιήσουμε μια αρνητική τιμή η κατεύθυνση είναι αντίθετη με αυτή του φορέα.

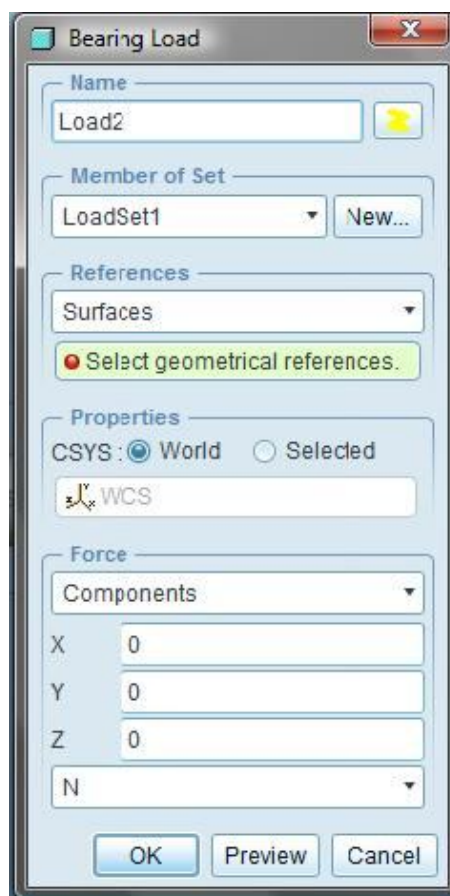
Τέλος επιλέγουμε το εικονίδιο Preview για να δούμε το φορτίο που δημιουργήσαμε. Στο αντικείμενο που χρησιμοποιούμε ως παράδειγμα (σύνδεσμος) ορίσαμε μια δύναμη που ασκείται στην εσωτερική επιφάνεια της οπής με τις εξής συνιστώσες: -100N στον άξονα X, -100N στον άξονα Y και 0N στον άξονα Z. Το φορτίο που δημιουργήσαμε παρουσιάζεται στην εικόνα παρακάτω.



Εικόνα 24: Αντικείμενο σύνδεσμος με εφαρμοσμένο φορτίο

2.4.1.2 Bearing Load

Με τα φορτία έδρασης μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα φορτίο που ασκείται στην επιφάνεια ή την ακμή μιας οπής. Τα φορτία έδρασης προσεγγίζουν την κατανομή μιας δύναμης σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, για παράδειγμα η δύναμη που ασκείται από ένα κοχλία σε μια οπή. Γενικά τα φορτία έδρασης προσεγγίζουν την πίεση που εφαρμόζεται σε μια οπή (3D) ή σε ένα δακτύλιο (2D) από ένα άκαμπτο πείρο ή άξονα που διέρχονται από το κέντρο μιας οπής ή ενός δακτυλίου αντίστοιχα. Για να εισάγουμε ένα φορτίο έδρασης επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Bearing Load και εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε τις εξής επιλογές: Το όνομα και το χρώμα του φορτίου καθώς και σε ποιο σύνολο θα ανήκει. Στο κελί References

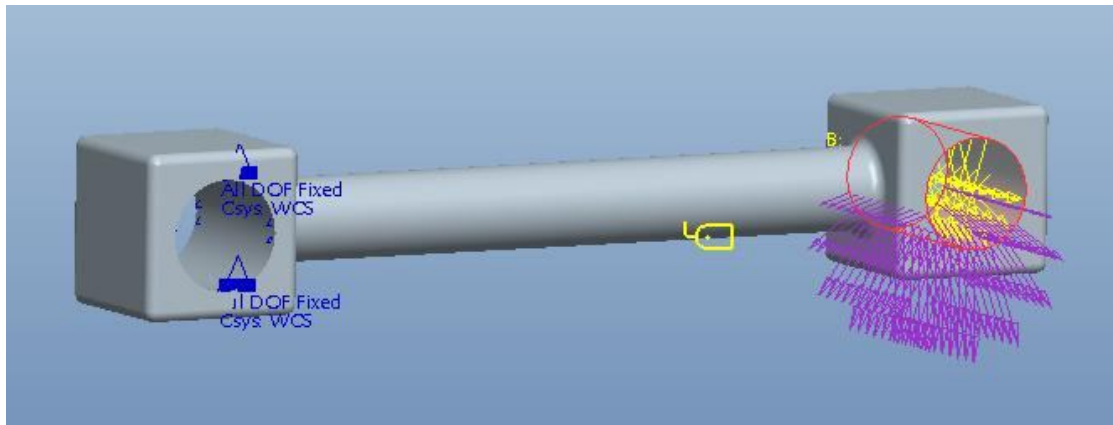


Εικόνα 25: Μενού Bearing Load

μπορούμε να ορίσουμε τα σημεία αναφοράς, δηλαδή σε ποια σημεία θα εφαρμοστούν οι δυνάμεις. Έχουμε τις ακόλουθες επιλογές: Επιφάνειες (Surfaces), είναι η προεπιλογή. Μπορούμε να επιλέξουμε μόνο κυκλικές επιφάνειες, δεν μπορούμε να επιλέξουμε ελλειπτικές επιφάνειες. Η επιλογή Surfaces δεν είναι διαθέσιμη για 2D μοντέλα. Άκρες/Καμπύλες (Edges/Curves), μπορούμε να επιλέξουμε ακμές από κυλινδρικές επιφάνειες ή οπές. Μπορούμε να επιλέξουμε μόνο κυκλικές καμπύλες και όχι ελλειπτικές. Η επιλογή Edges/Curves δεν είναι διαθέσιμη για 3D μοντέλα. Στο επόμενο κελί μπορούμε να επιλέξουμε το σύστημα συντεταγμένων (coordinate system). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το σύστημα συντεταγμένων World, είναι το αρχικό σύστημα που χρησιμοποιήσαμε στη σχεδίαση του αντικειμένου ή να ορίσει ένα νέο σύστημα συντεταγμένων (Selected). Στο κάτω μέρος του παραθύρου Bearing Load μπορούμε να ορίσουμε το μέτρο, τη διεύθυνση και τις μονάδες του φορτίου που επιθυμούμε να ασκήσουμε στο μοντέλο.. Έχουμε τις εξής επιλογές (αναφέρονται αναλυτικότερα στην παράγραφο Force and Moment Load):

- Components(Συνιστώσες)
- Dir Vector & Mag(Μοναδιαίο Διάνυσμα & Μέγεθος)
- Dir Points & Mag(Φορέας Σημείων & Μέγεθος)

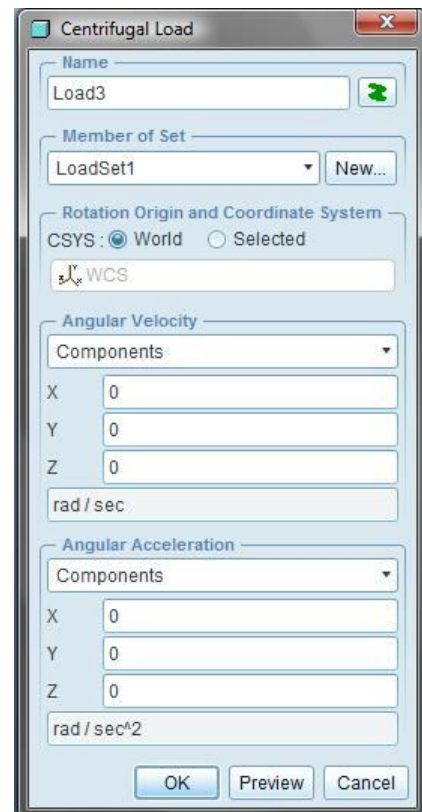
Τέλος επιλέγουμε το εικονίδιο Preview για να δούμε το φορτίο που δημιουργήσαμε. Στο αντικείμενο που χρησιμοποιούμε ως παράδειγμα (σύνδεσμος) ορίσαμε μια δύναμη που ασκείται στην εσωτερική επιφάνεια της οπής με τις εξής συνιστώσες: 0N στον άξονα X, -100N στον άξονα Y και -100N στον άξονα Z. Το φορτίο που δημιουργήσαμε παρουσιάζεται στην εικόνα παρακάτω.



Εικόνα 26: Αντικείμενο σύνδεσμος με εφαρμοσμένο φορτίο

2.4.1.3 Centrifugal Loads

Τα φυγοκεντρικά φορτία προσομοιώνουν την άκαμπτη περιστροφή του μοντέλου. Όταν ορίζουμε ένα φυγοκεντρικό φορτίο μπορούμε να καθορίσουμε τη γωνιακή ταχύτητα τη γωνιακή επιτάχυνση ή και τα δύο. Τα φορτία που προκύπτουν δρουν στις αντίθετες διευθύνσεις από τις διευθύνσεις της κεντρομόλου και της εφαπτομενικής επιτάχυνσης. Για να εισάγουμε ένα φυγοκεντρικό φορτίο επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Centrifugal Load και εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε τις εξής επιλογές: Το όνομα και το χρώμα του φορτίου καθώς και σε ποιο σύνολο θα ανήκει. Μπορούμε να ορίσουμε μόνο ένα φυγόκεντρο φορτίο ανά σετ. Στο επόμενο κελί μπορούμε να

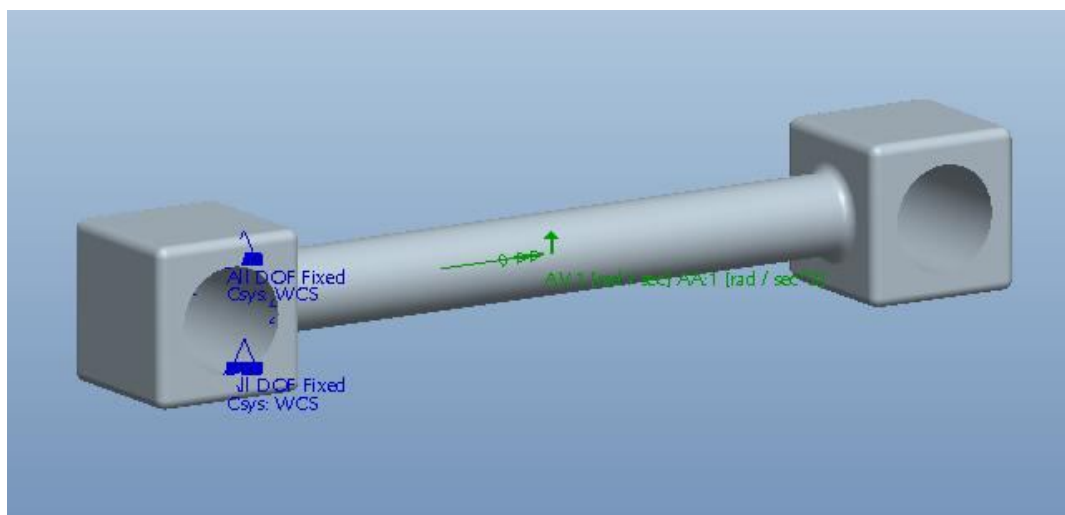


Εικόνα 27: Μενού Centrifugal Load

επιλέξουμε το σύστημα συντεταγμένων (coordinate system). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το σύστημα συντεταγμένων World, είναι το αρχικό σύστημα που χρησιμοποιήσαμε στη σχεδίαση του αντικειμένου ή να ορίσει ένα νέο σύστημα συντεταγμένων (Selected). Στη συνέχεια ορίζουμε τη γωνιακή ταχύτητα (angular velocity), εισάγουμε την ταχύτητα περιστροφής σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο. Μπορούμε να εισάγουμε θετικές ή αρνητικές τιμές. Πρέπει επίσης να επιλέξουμε με ποιο τρόπο θα ορίσουμε το μέτρο και τη διεύθυνση της δύναμης. Έχουμε τις εξής επιλογές(αναφέρονται αναλυτικότερα στην παράγραφο Force and Moment Load):

- Components(Συνιστώσες)
- Dir Vector & Mag(Μοναδιαίο Διάνυσμα & Μέγεθος)
- Dir Points & Mag(Φορέας Σημείων & Μέγεθος)

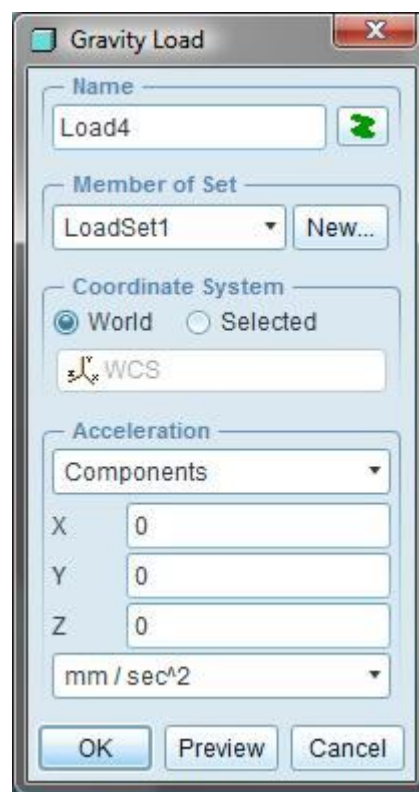
Στη συνέχεια ορίζουμε τη γωνιακή επιτάχυνση (angular velocity), εισάγουμε την ταχύτητα περιστροφής σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο στο τετράγωνο. Μπορούμε να εισάγουμε θετικές ή αρνητικές τιμές. Πρέπει επίσης να επιλέξουμε με ποιο τρόπο θα ορίσουμε το μέτρο και τη διεύθυνση της δύναμης οι επιλογές που έχουμε είναι όμοιες με αυτές της γωνιακής ταχύτητας. Το διάνυσμα της γωνιακής επιτάχυνσης είναι ο ρυθμός μεταβολής του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας. Επίσης για να καθορίσουμε την φορά της περιστροφής εφαρμόζουμε τον κανόνα του δεξιού χεριού. Στο αντικείμενο που χρησιμοποιούμε ως παράδειγμα ορίσαμε ως συνιστώσα της γωνιακής ταχύτητας -1rad/sec στον άξονα X και ως συνιστώσα της γωνιακής επιτάχυνσης -1rad/sec^2 . Τέλος επιλέγουμε το εικονίδιο Preview για να δούμε το φορτίο που δημιουργήσαμε. Παρατηρούμε τα βέλη που έχουν προστεθεί στο μοντέλο που υποδεικνύουν την κατεύθυνση της γωνιακής ταχύτητας και της γωνιακής επιτάχυνσης. Η γωνιακή ταχύτητα έχει ως εικονίδιο ένα βέλος με μία αιχμή, ενώ η γωνιακή επιτάχυνση έχει ως εικονίδιο ένα βέλος με δύο αιχμές, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 28: Αντικείμενο σύνδεσμος με εφαρμοσμένο φορτίο

2.4.1.4 Gravity Load

Εκτός από τα φορτία που ορίζουμε υπάρχει και η βαρύτητα που ασκείται σε όλα τα αντικείμενα. Μπορούμε να ορίσουμε μόνο ένα βαρυτικό φορτίο ανά σύνολο. Τα βαρυτικά φορτία ασκούνται σε ολόκληρο το σώμα του μοντέλου και είναι διαθέσιμα μόνο στη δομική ανάλυση. Τα φορτία αυτά προσομοιώνουν τη δύναμη της βαρύτητας που επηρεάζει το μοντέλο. Όταν ορίζουμε ένα βαρυτικό φορτίο μπορούμε να καθορίσουμε τις βαρυτικές συνιστώσες του φορτίου σε κάθε κατεύθυνση συντεταγμένων. Για τον καθορισμό της βαρύτητας εισάγουμε τιμές που καθορίζουν την επιτάχυνση της βαρύτητας, εκφράζεται ως απόσταση/χρόνο². Μπορούμε να εισάγουμε θετικές ή αρνητικές τιμές. Το πρόσημο καθορίζει την κατεύθυνση

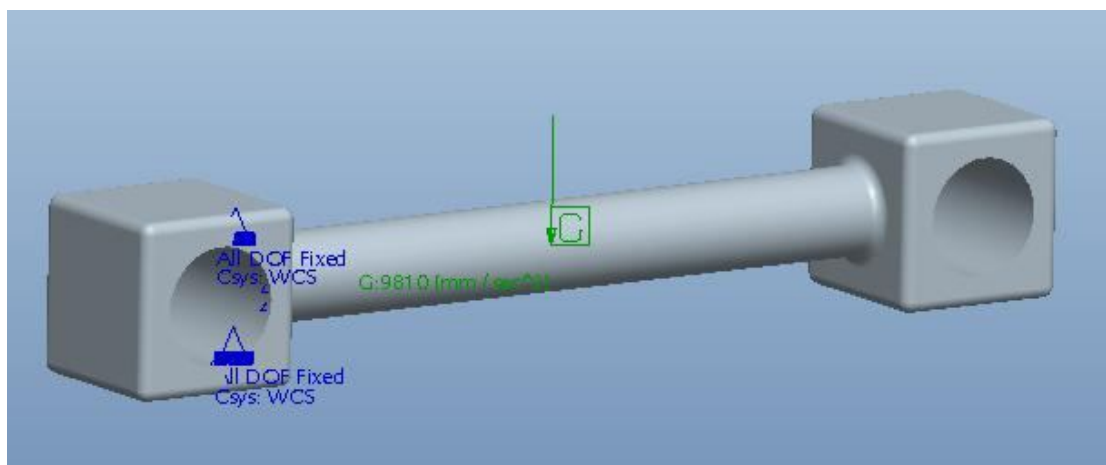


Εικόνα 29: Μενού Gravity Load

της βαρύτητας σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων. Όταν επιλέγουμε αρνητικό πρόσημο, η αρνητική τιμή αντιτίθεται στην κατεύθυνση των συντεταγμένων. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να προσομοιώσουμε μια βαρυτική δύναμη προς τα κάτω της τάξης του 1G (9,81 m/sec²) στην κατεύθυνση Y, εισάγουμε -981,4 στο πλαίσιο εισαγωγής Y. Αν εισάγουμε 981,4, η βαρυτική δύναμη θα είναι προς τα πάνω. Για να εισάγουμε ένα βαρυτικό φορτίο επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Gravity Load και εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε τις εξής επιλογές: Το όνομα και το χρώμα του φορτίου καθώς και σε ποιο σύνολο θα ανήκει. Στο επόμενο κελί μπορούμε να επιλέξουμε το σύστημα συντεταγμένων (coordinate system). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το σύστημα συντεταγμένων World, είναι το αρχικό σύστημα που χρησιμοποιήσαμε στη σχεδίαση του αντικειμένου ή να ορίσει ένα νέο σύστημα συντεταγμένων (Selected). Στη συνέχεια ορίζουμε τη βαρυτική επιτάχυνση, εισάγουμε την βαρυτική επιτάχυνση σε χιλιοστά ανά δευτερόλεπτο². Πρέπει επίσης να επιλέξουμε με ποιο τρόπο θα ορίσουμε το μέτρο και τη διεύθυνση της δύναμης. Έχουμε τις εξής επιλογές:

- Components(Συνιστώσες)
- Dir Vector & Mag(Μοναδιαίο Διάνυσμα & Μέγεθος)
- Dir Points & Mag(Φορέας Σημείων & Μέγεθος)

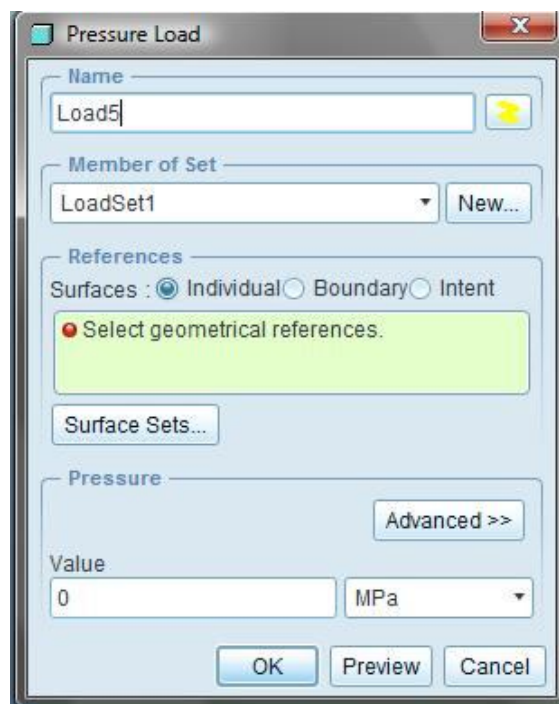
Τέλος επιλεγουμε το εικονίδιο Preview για να δουμε το φορτιο που δημιουργησαμε. Αφού ολοκληρώσουμε τις διαδικασίες εμφανίζεται ένα εικονίδιο στην αφετηρία του συστήματος συντεταγμένων με ένα διάνυσμα που δείχνει προς την κατεύθυνση του φορτίου και το γράμμα G στο τελικό σημείο του διανύσματος. Το φορτίο βαρύτητας δρα στο κέντρο βάρους του μοντέλου ή της συναρμογής. Μπορούμε να παρατηρήσουμε το διάνυσμα της βαρυτικής δύναμης στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 30: Αντικείμενο σύνδεσμος με εφαρμοσμένο φορτίο

2.4.1.5 Pressure Load

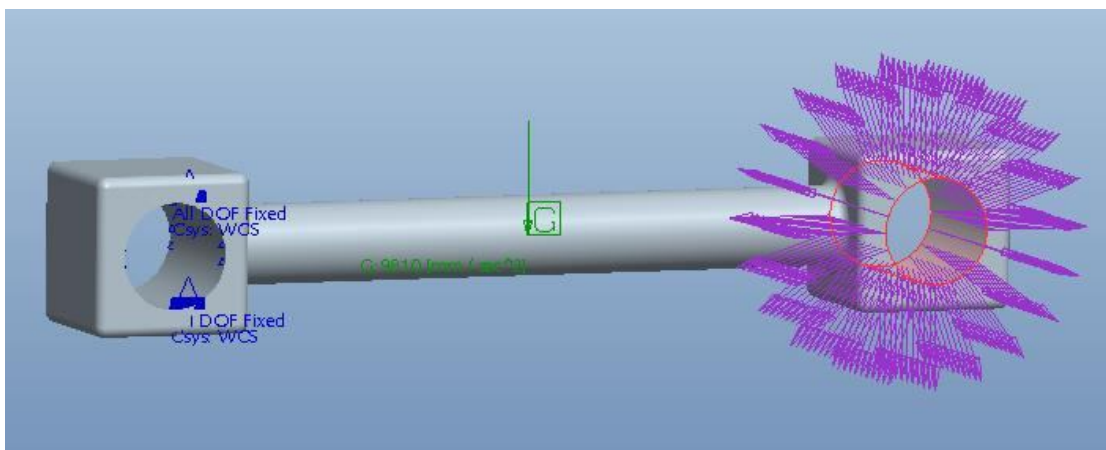
Σε 3D μοντέλα μπορούμε να εφαρμόσουμε φορτία πίεσης μόνο σε επιφάνειες ενώ σε 2D μοντέλα μπορούμε να εφαρμόσουμε τα φορτία πίεσης σε μια ακμή ή σε μια καμπύλη η οποία είναι το όριο μίας επιφάνειας. Δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε φορτία πίεσης σε σημεία. Επίσης τα φορτία πίεσης είναι ανεξάρτητα από το σύστημα συντεταγμένων έτσι δεν χρειάζεται να επιλέξουμε κάποιο σύστημα συντεταγμένων. Για να εισάγουμε ένα φορτίο πίεσης επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο



Εικόνα 31: Μενού Pressure Load

Pressure Load, εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο όπου μπορούμε να

επεξεργαστούμε τις εξής επιλογές: Το όνομα και το χρώμα του φορτίου καθώς και σε ποιο σύνολο θα ανήκει. Στο κελί References μπορούμε να ορίσουμε τα σημεία αναφοράς, δηλαδή σε ποιο σημείο θα εφαρμοστεί η πίεση. Στα φορτία πίεσης η μόνη επιλογή είναι οι επιφάνειες (Surfaces). Μπορούμε να επιλέξουμε μία ή περισσότερες επιφάνειες, τα όρια του αντικειμένου, ή σύνολα επιφανειών. Στο κάτω μέρος του παράθυρου επιλέγοντας το εικονίδιο Advanced αναπτύσσεται το παράθυρο και εμφανίζονται το πεδίο Spatial Variation (αναφέρεται αναλυτικότερα στην παράγραφο Force and Moment Load). Τέλος μπορούμε να εισάγουμε ένα πραγματικό αριθμό, μία αριθμητική έκφραση, ή μια παράμετρο (που έχουμε ορίσει προηγουμένως) για το μέγεθος του φορτίου πίεσης. Εάν εισάγουμε ένα αρνητικό μέγεθος, η κατεύθυνση της πίεσης συμπίπτει με την κανονική κατεύθυνση. Επίσης επιλέγουμε τις κατάλληλες μονάδες της πίεσης από τη διπλανή λίστα. Επιλέγοντας το εικονίδιο Preview μπορούμε να δούμε το φορτίο που δημιουργήσαμε. Στο μοντέλο που χρησιμοποιούμε ως παράδειγμα εφαρμόσαμε ένα φορτίο πίεσης στην εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια με μέτρο 10MPa όπως παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 32: Αντικείμενο σύνδεσμος με εφαρμοσμένο φορτίο

2.4.1.6 Temperature Loads

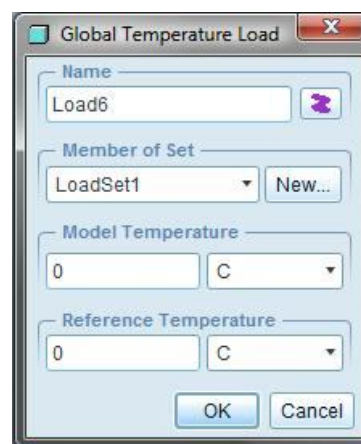
Τα φορτία θερμοκρασίας εφαρμόζονται σε ολόκληρο το σώμα του μοντέλου και είναι διαθέσιμα μόνο στη δομική ανάλυση. Χρησιμοποιούμε τα θερμικά φορτία για να προσομοιώσουμε τη θερμοκρασία που εφαρμόζεται στο σώμα του μοντέλου. Μπορούμε να ορίσουμε πολλά φορτία θερμοκρασίας σε ένα σύνολο φορτίων. Το σύνολο φορτίων μπορεί να περιέχει μια θερμοκρασία περιβάλλοντος και ένα δομικό φορτίο θερμοκρασίας. Εάν έχουμε θερμοκρασία περιβάλλοντος και ένα δομικό φορτίο θερμοκρασίας, η θερμοκρασία περιβάλλοντος ισχύει παντού εκτός από τα μέρη όπου ασκείται το δομικό φορτίο θερμοκρασίας. Επίσης μπορεί να ασκούνται περισσότερα από ένα

δομικά φορτία θερμοκρασίας σε ένα σύνολο φορτίου, αρκεί το κάθε φορτίο να ασκείται σε διαφορετικό τομέα. Εάν δεν ορίσουμε θερμοκρασία περιβάλλοντος το λογισμικό τοποθετεί σαν προεπιλογή τους μηδέν βαθμούς.

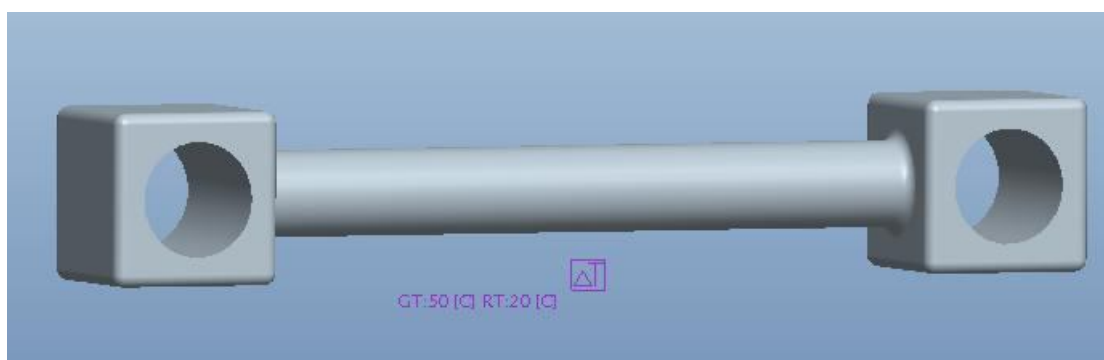
Τα φορτία θερμοκρασίας μας δίνουν τη δυνατότητα να προσομοιώσουμε την αλλαγή της θερμοκρασίας στο μοντέλο μας. Επίσης παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για το πώς παραμορφώνεται η δομή του μοντέλου λόγω της αλλαγής της θερμοκρασίας. Υπάρχουν δυο είδη θερμικών φορτίων που μπορούμε να εισάγουμε στο μοντέλο. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος (Global Temperatures) και τα εξωτερικά θερμικά φορτία (External Temperatures).

2.4.1.6.1 Global Temperature

Για να εισάγουμε ένα φορτίο θερμοκρασίας επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Global Temperature και εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε τις εξής επιλογές: Το όνομα και το χρώμα του φορτίου καθώς και σε ποιο σύνολο θα ανήκει. Στη συνέχεια επιλέγουμε την θερμοκρασία που επιθυμούμε να αποκτήσει το μοντέλο (Model Temperature). Τέλος επιλέγουμε από τη διπλανή λίστα της μονάδες θερμοκρασίας που χρησιμοποιούμε. Στο επόμενο κελί επιλέγουμε τη θερμοκρασία αναφοράς (την αρχική θερμοκρασία του μοντέλου). Η θερμοκρασία αναφοράς είναι η θερμοκρασία δωματίου ή κάποια άλλη θερμοκρασία που έχει το μοντέλο. Τέλος επιλέγουμε από τη διπλανή λίστα της μονάδες θερμοκρασίας που χρησιμοποιούμε. Αφού επιλέξουμε τις τιμές και τις μονάδες της θερμοκρασίας επιλέγουμε το εικονίδιο OK και τοποθετούμε το φορτίο θερμοκρασίας στο μοντέλο όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του μοντέλου και τη θερμοκρασία αναφοράς είναι η ποσότητα της μεταβολής της θερμοκρασίας στο μοντέλο.



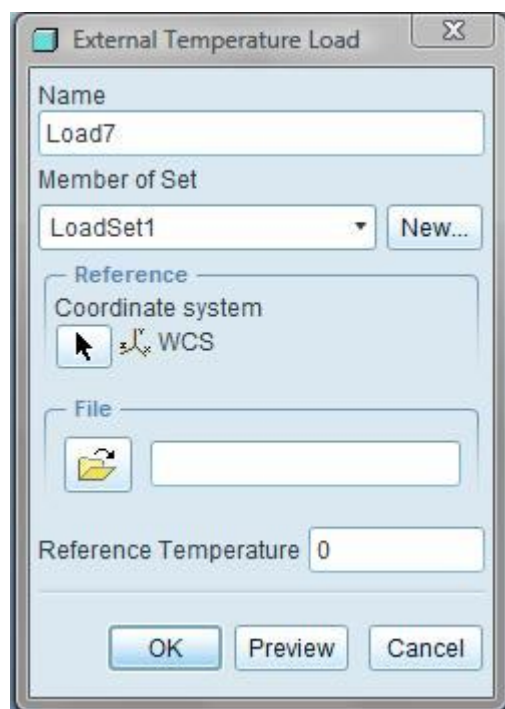
Εικόνα 32: Μενού Global Temperature



Εικόνα 34: Αντικείμενο σύνδεσμος με εφαρμοσμένο φορτίο

2.4.1.6.2 External Temperatures

Για να εισάγουμε ένα εξωτερικό φορτίο θερμοκρασίας στη δομική ανάλυση πρέπει πρώτα να έχουμε πραγματοποιήσει μια θερμική ανάλυση στο μοντέλο ή στη συναρμογή που θέλουμε να μελετήσουμε. Στη θερμική ανάλυση θα αναφερθούμε στη συνέχεια, στο σημείο αυτό θα δείξουμε τον τρόπο με τον οποίο εισάγουμε το φορτίο. Αρχικά επιλέγουμε από τη γραμμή εντολών **Insert ► Temperature Load ► External** και εμφανίζεται το αντίστοιχο παράθυρο. Επιλέγουμε το όνομα του φορτίου και σε ποιο σύνολο φορτίων θέλουμε να το εντάξουμε. Στην περιοχή



Εικόνα 35: Μενού External Temperature Load

Reference επιλέγουμε το σύστημα συντεταγμένων που θα χρησιμεύσει ως βάση για το φορτίο. Μπορούμε να επιλέξουμε ένα καρτεσιανό, κυλινδρικό ή σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων. Το Pro/Mechanica χρησιμοποιεί το WCS ως προεπιλογή. Στην περιοχή File εισάγουμε το όνομα του εξωτερικού αρχείου θερμοκρασίας ή επιλέγουμε το εικονίδιο File open ώστε να επιλέξουμε το αρχείο από το φάκελο που βρίσκεται. Τέλος επιλέγουμε τη θερμοκρασία του μοντέλου τη χρονική στιγμή πριν αρχίσει η ανάλυση.

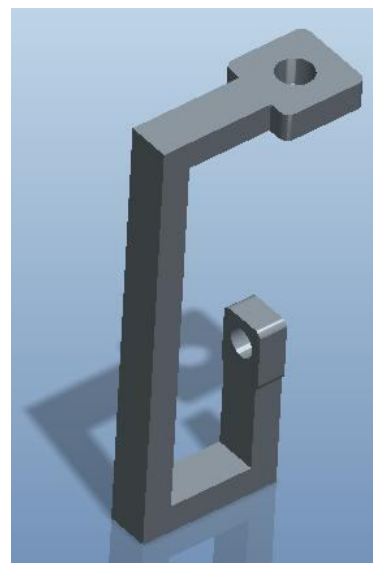
2.4.1.7 Mechanism Load

Τα φορτία που προέρχονται από μηχανισμούς είναι εξωτερικά φορτία που μπορούμε να εισάγουμε στο μοντέλο αφού πρώτα έχουμε δημιουργήσει ένα μηχανισμό. Για να εισάγουμε φορτία που προέρχονται από την ανάλυση ενός μηχανισμού επιλέγουμε από τη γραμμή εντολών **Insert ► Mechanism Load**. Πριν από τη χρήση αυτής της εντολής, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την εντολή **Use In Structure** στο σχεδιασμό του μηχανισμού για να δημιουργήσουμε το σύνολο του φορτίου με βάση τα αποτελέσματα μιας δυναμικής ανάλυσης. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να μελετήσουμε τις φορτίσεις που προκαλούνται από ένα σύνολο σε ένα αντικείμενο. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε αναλυτικά την κατασκευή ενός μηχανισμού για να γίνει καλύτερα κατανοητή η χρησιμοποίηση εξωτερικών φορτίων.

2.4.1.7.1 Δημιουργία αντικειμένων

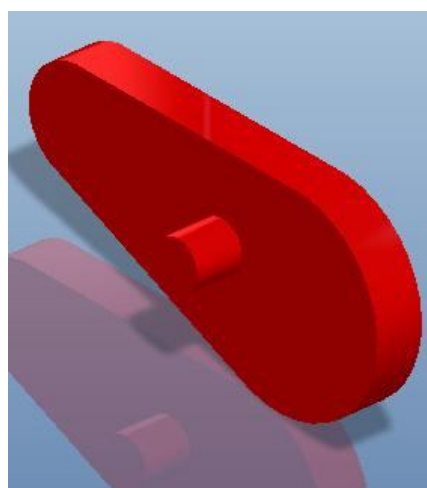
Στην συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιάσουμε τα αντικείμενα που αποτελούν ένα απλό μηχανισμό ανάρτησης. Με τη δημιουργία ενός μηχανισμού ορίζουμε τη σχέση που συνδέει τα αντικείμενα, τον τρόπο που κινούνται καθώς και τα όρια που μπορούν να κινηθούν. Δεν θα δοθεί έμφαση στην δημιουργία αλλά στον τρόπο με τον οποίο συνδέονται και κινούνται. Τα αντικείμενα που θα χρησιμοποιήσουμε είναι τα εξής:

1. Το πρώτο αντικείμενο που δημιουργήσαμε είναι η βάση όπου θα τοποθετήσουμε τα υπόλοιπα αντικείμενα. Η βάση αποτελείται από ένα πλαίσιο ορθογώνιας διατομής 15x10 mm μήκους 180mm. Στις άκρες του πλαισίου δημιουργήσαμε στηρίξεις με κυκλικές οπές 10mm. Οι διαστάσεις επιλεχτήκαν τυχαία χωρίς κάποια σκοπιμότητα. Στις οπές της βάσης θα τοποθετήσουμε τα υπόλοιπα αντικείμενα.



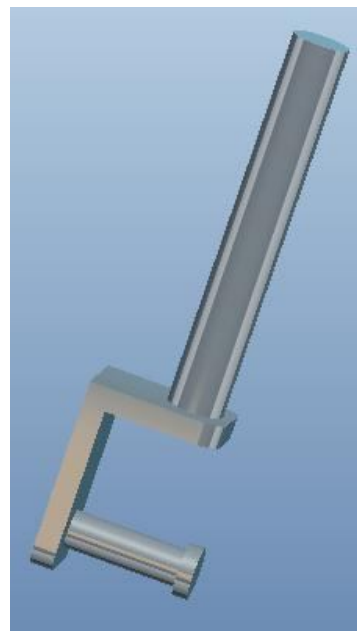
Εικόνα 36: Αντικείμενο βάση

2. Το επόμενο αντικείμενο ονομάζεται roller1. Το αντικείμενο έχει ύψος 30mm μήκος 80mm και πλάτος 10mm. Στη μια μεριά του έχουμε σχεδιάσει ένα κύλινδρο με διάμετρο 10mm και μήκος 15mm. Θα τοποθετήσουμε τον κύλινδρο στην οπή στο κάτω μέρος της βάσης.



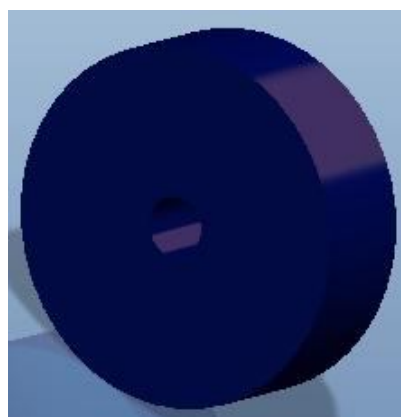
Εικόνα 37: Αντικείμενο Roller1

3. Το επόμενο αντικείμενο ονομάζεται follower. Το αντικείμενο έχει συνολικό μήκος 75mm, αποτελείται από ένα κύλινδρο διαμέτρου 7.5mm και μήκους 53mm. Στο κάτω μέρος του κυλίνδρου δημιουργήσαμε μια βάση για να ενώσουμε το επόμενο αντικείμενο. Οι διαστάσεις της βάσης δεν έχουν κάποια σκοπιμότητα εκτός από τη διάμετρο του μικρού κυλίνδρου που είναι 5mm. Το αντικείμενο follower θα το συνδέσουμε με την πάνω οπή της βάσης.



Εικόνα 38: Αντικείμενο Follower

4. Τέλος δημιουργήσαμε το αντικείμενο roller2, ένας κύλινδρος διαμέτρου 30mm και μήκους 10mm στο κέντρο του κυλίνδρου δημιουργήσαμε μια οπή διαμέτρου 5mm. Το αντικείμενο roller2 θα το τοποθετήσουμε στο μικρό κύλινδρο του αντικείμενου follower.



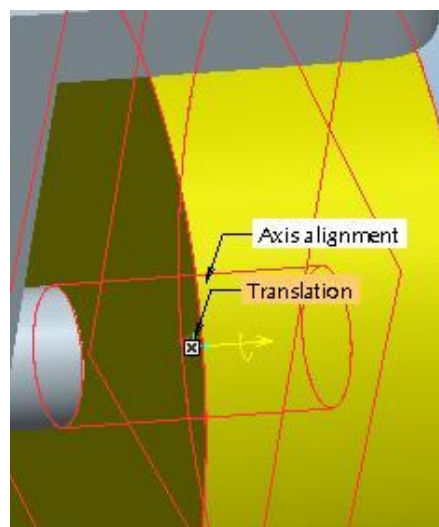
Εικόνα 39: Αντικείμενο Roller2

2.4.1.7.2 Συναρμολόγηση

Αρχικά ομαδοποιούμε τα αντικείμενα που έχουν άμεση σχέση σε υποσυναρμογές. Είναι πιο εύκολο για το χρήστη να τοποθετεί ομάδες αντικειμένων σε μια κύρια συναρμογή παρά κάθε αντικείμενο ξεχωριστά, είναι πολύ αποτελεσματική μέθοδος συναρμολόγησης ιδιαίτερα εάν αποτελούνται από πολλά αντικείμενα. Επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο New και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε να δημιουργήσουμε μια νέα συναρμογή (Assembly). Ονομάζουμε τη συναρμογή subassembly και επιλέγουμε Ok. Μεταφερόμαστε σε ένα νέο περιβάλλον του προγράμματος όπου μπορούμε να συναρμολογήσουμε το μοντέλο. Αρχικά επιλέγουμε πιο αντικείμενο θα τοποθετήσουμε πρώτα, το αντικείμενο αυτό θα χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς της συναρμογής. Επιλέγουμε από την γραμμή εργαλείων

το εικονίδιο Assemble, εμφανίζεται μια λίστα με τα αντικείμενα που έχουμε δημιουργήσει. Επιλέγουμε να τοποθετήσουμε το αντικείμενο follower ως αντικείμενο αναφοράς. Το αντικείμενο τοποθετείται στην επιφάνεια εργασίας και επιλέγουμε από τη νέα γραμμή εργαλείων που εμφανίζεται την επιλογή Default, το σύστημα συντεταγμένων του follower θα είναι και σύστημα συντεταγμένων ολόκληρης της συναρμογής. Για να αποθηκευτούν οι αλλαγές επιλέγουμε Ok. Στη συνέχεια επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Assemble και προσθέτουμε τον αντικείμενο roller2. Για να συνδέσουμε το αντικείμενο roller2 με το αντικείμενο follower επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων τη συνδεσμολογία Pin, ο συγκεκριμένος τύπος σύνδεσης επιτρέπει στο αντικείμενο να περιστρέφεται γύρω από ένα άξονα χωρίς όμως να μετακινείται στο χώρο. Για να ορίσουμε την σύνδεση Pin πρέπει να καθορίσουμε δυο παραμέτρους:

- Ευθυγράμμιση αξόνων (Axis alignment): Επιλέγουμε τον άξονα της οπής από το αντικείμενο roller2 και τον άξονα του κυλίνδρου του follower. Το αντικείμενο roller2 θα περιστρέφεται γύρω από τους ευθυγραμμισμένους άξονες.
- Περιορισμοί (Translation): Επιλέγουμε το επίπεδο front του αντικειμένου roller2 και το επίπεδο front του αντικειμένου follower. Τα δυο επίπεδα εφάπτονται και το αντικείμενο roller2 τοποθετείται στο αντικείμενο follower.



Εικόνα 40: Σύνδεση Follower με Roller2

Η σύνδεση των δυο αντικειμένων ολοκληρώθηκε και η συναρμογή subassembly έχει την εξής μορφή.



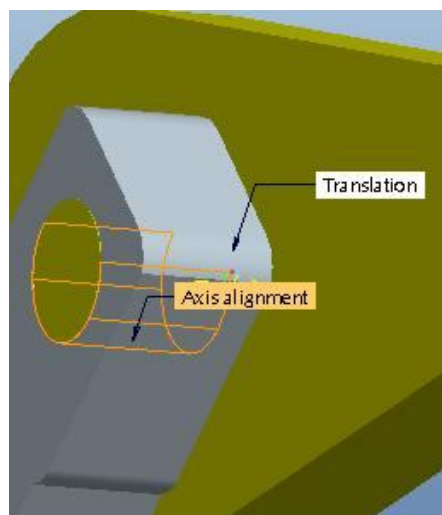
Εικόνα 41: Subassembly

Ολοκληρώσαμε τη δημιουργία της υποσυναρμογής subassembly και συνεχίζουμε για να δημιουργήσουμε την κύρια συναρμογή. Επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο New και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε να δημιουργήσουμε μια νέα συναρμογή (Assembly). Ονομάζουμε τη συναρμογή anartisi και επιλέγουμε Οκ. Επιλέγουμε να τοποθετήσουμε το αντικείμενο vasi ως αντικείμενο αναφοράς. Το αντικείμενο τοποθετείται στην επιφάνεια εργασίας και επιλέγουμε από τη νέα γραμμή εργαλείων που εμφανίζεται την επιλογή Default, το σύστημα συντεταγμένων του αντικειμένου vasi θα είναι και σύστημα συντεταγμένων ολόκληρης της συναρμογής

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι ο σωστός προσανατολισμός στην δημιουργία των αντικειμένων είναι πολύ σημαντική παράμετρος, ειδικά εάν πρόκειται για αντικείμενα που θα χρησιμοποιήσουμε σε μια ανάλυση. Εάν το σύστημα συντεταγμένων του αντικειμένου συμπίπτει με το σύστημα συντεταγμένων του λογισμικού είναι πιο εύκολο για το χρήστη να τοποθετήσει τα φορτία στη σωστή κατεύθυνση. Οι συντεταγμένες του αντικειμένου μπορούν να τροποποιηθούν και μετά την δημιουργία του κάτι τέτοιο όμως είναι χρονοβόρο και πολύπλοκο ειδικά στις συναρμογές, για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να ορίζεται σωστά το σύστημα συντεταγμένων στο αντικείμενο που θα τοποθετηθεί αρχικά σε μια συναρμογή.

Στη συνέχεια επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Assemble και προσθέτουμε τον αντικείμενο roller1. Για να συνδέσουμε το αντικείμενο roller1 με το αντικείμενο vasi επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων τη συνδεσμολογία Pin.

- Ευθυγράμμιση αξόνων (Axis alignment): Επιλέγουμε τον άξονα της οπής από το αντικείμενο vasi και τον άξονα του κυλίνδρου στο αντικείμενο roller1. Το αντικείμενο roller1 θα περιστρέφεται γύρω από τους ευθυγραμμισμένους άξονες.
- Περιορισμοί (Translation): Επιλέγουμε την καθετή στην οπή επιφάνεια στο αντικείμενο vasi και την επιφάνεια που εφάπτεται ο κύλινδρος στο αντικείμενο roller1. Οι δυο επιφάνειες εφάπτονται και το αντικείμενο roller1 τοποθετείται πάνω στη βάση.

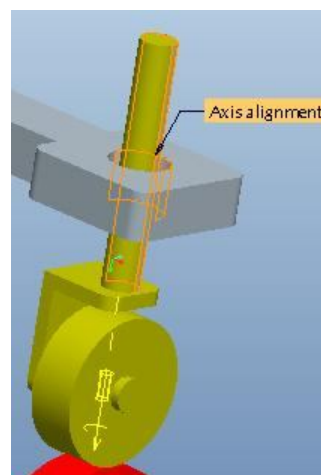


Εικόνα 42: Σύνδεση Vasi με Roller1

Επιλέγουμε Οκ για να ολοκληρωθεί η σύνδεση. Για να διαπιστώσουμε αν το αντικείμενο πραγματοποιεί την κίνηση που επιθυμούμε μπορούμε να επιλέξουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Drag Components και να κινήσουμε το αντικείμενο. Επιλέγοντας το αντικείμενο roller1 μπορούμε να δούμε ότι περιστρέφεται χωρίς να μετακινείται.

Επόμενο βήμα είναι η τοποθέτηση της υποσυναρμογής στην κύρια συναρμογή. Επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Assemble και τοποθετούμε την υποσυναρμογή subassembly. Επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων τη συνδεσμολογία Cylinder, ο συγκεκριμένος τύπος σύνδεσης επιτρέπει στο αντικείμενο να περιστρέφεται γύρω από ένα άξονα και να κινείται στο χώρο πάνω στον συγκεκριμένο άξονα. Για να ορίσουμε την σύνδεση Cylinder πρέπει να καθορίσουμε την εξής παράμετρο:

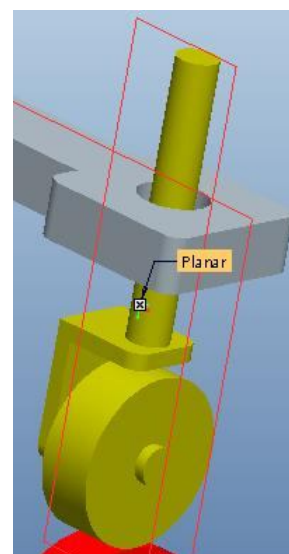
- Ευθυγράμμιση αξόνων (Axis alignment): Επιλέγουμε τον άξονα της οπής από το αντικείμενο vasi και τον άξονα του κυλίνδρου στην υποσυναρμογή subassembly. Η υποσυναρμογή θα περιστρέφεται και θα μετακινείται γύρω από τους ευθυγραμμισμένους άξονες. Η συνδεσμολογία φαίνεται στην διπλανή εικόνα.



Εικόνα 43: Σύνδεση Cylinder

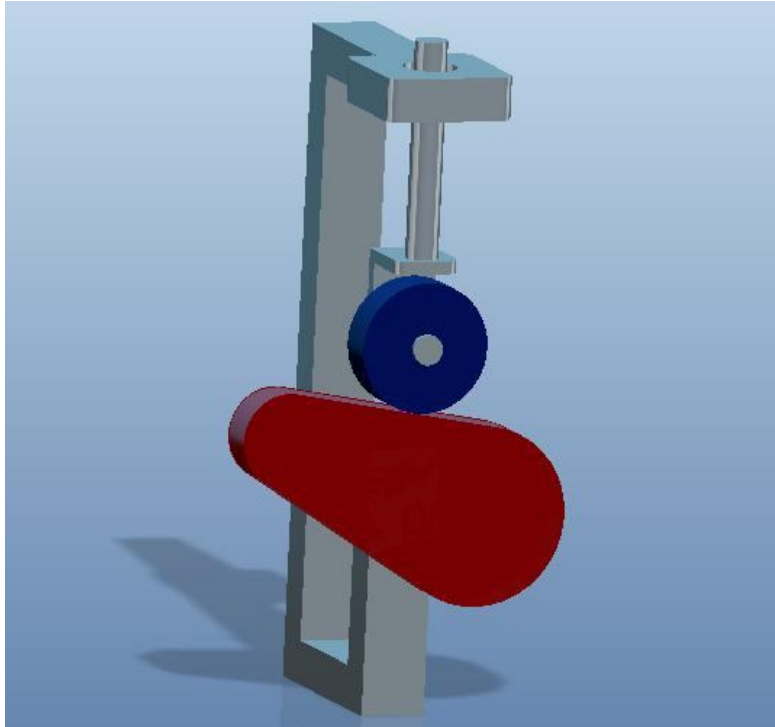
Στη συγκεκριμένη σύνδεση δεν επιθυμούμε το αντικείμενο να περιστρέφεται παρά μόνο να μετακινείται πάνω στον άξονα, για να περιορίσουμε την περιστροφική κίνηση επιλέγουμε από το μενού της συνδεσμολογίας New set και χρησιμοποιούμε τη σύνδεση Planar, ο συγκεκριμένος τύπος σύνδεσης επιτρέπει στο αντικείμενο να μετακινείται στην ένωση δυο επίπεδων ή δυο επιφανειών. Για να ορίσουμε την σύνδεση Planar πρέπει να καθορίσουμε την εξής παράμετρο:

- Περιορισμοί (Translation): Επιλέγουμε το επίπεδο front της υποσυναρμογής και το επίπεδο right της βάσης. Τα δυο επίπεδα εφάπτονται και δεν επιτρέπουν στην υποσυναρμογή την περιστροφική κίνηση. Η συνδεσμολογία φαίνεται στην διπλανή εικόνα.



Εικόνα 44: Σύνδεση Planar

Μετά την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης η συναρμογή έχει την εξής μορφή:



Εικόνα 45: Τελική μορφή του μηχανισμού

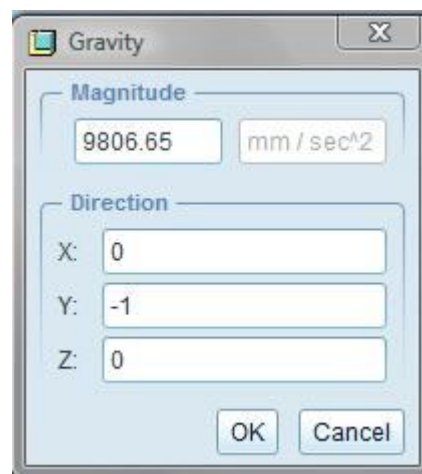
2.4.1.7.3 Mechanism

Έχουμε ολοκληρώσει την διαδικασία της συναρμολόγησης και επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων Applications→Mechanism. Μεταφερόμαστε στο παράθυρο εργασίας της εφαρμογής Mechanism, παρατηρούμε ότι στο αριστερό μέρος όπου αναπτυσσόταν το Model Tree εμφανίζεται το Mechanism Tree όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε όλες τις παραμέτρους, επίσης παρατηρούμαι με κίτρινα βέλη τις συνδέσεις που δημιουργήσαμε στη συναρμολόγηση. Δεν θα αναλύσουμε όλες τις επιλογές που προσφέρονται παρά μόνο εκείνες που είναι απαραίτητες για την δημιουργία του φορτίου που επιθυμούμε να εξάγουμε. Στο μηχανισμό της ανάρτησης θα επεξεργαστούμε τις εξής παραμέτρους:

- **Gravity**
- **Cam-Follower Connection**
- **Spring**
- **Damper**
- **Servo Motor**
- **Mechanism Analysis**
- **Export Load**

Gravity

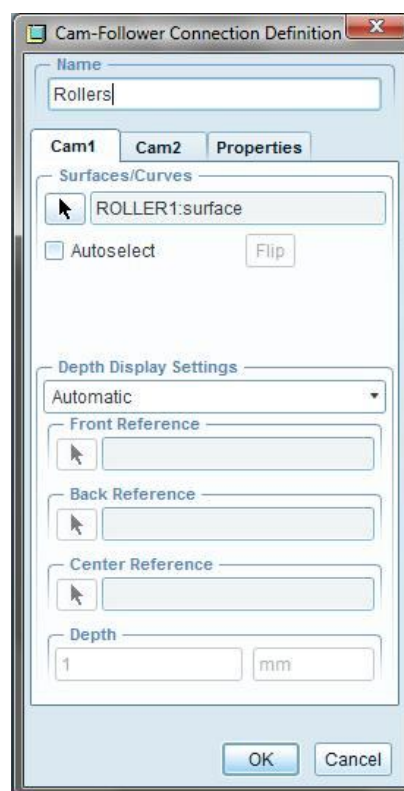
Καθορίζοντας τη βαρύτητα προσομοιώνουμε την επίδραση της βαρυτικής δύναμης στην κίνηση της συναρμογής. Για να ορίσουμε τη βαρύτητα επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Gravity, εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο και ορίζουμε το διάνυσμα επιτάχυνσης της βαρύτητας. Το διάνυσμα αυτό προσομοιώνει τη βαρύτητα, η θεμελιώδης φυσική δύναμη που τραβά ένα σώμα προς ένα άλλο. Μόλις οριστεί η βαρυτική δύναμη εφαρμόζεται σε ολόκληρη την συναρμογή. Όλα τα αντικείμενα με εξαίρεση εκείνο που τοποθετήσαμε πρώτο στη συναρμογή θα κινηθούν προς την κατεύθυνση της βαρύτητας. Αν θέλουμε να περιλαμβάνεται η βαρύτητα στους υπολογισμούς σε μια δυναμική, στατική, ή ανάλυση ισορροπίας, επιλέγουμε το πλαίσιο Enable Gravity στην καρτέλα Ext Loads στο παράθυρο της ανάλυσης.



Εικόνα 46: Τοποθέτηση βαρυτικής δύναμης

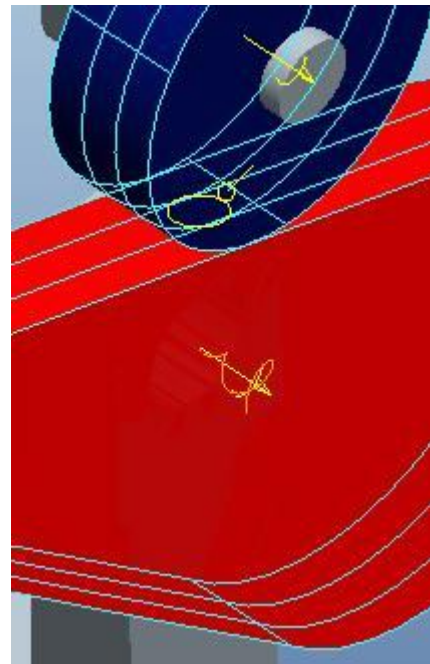
Cam-Follower Connection

Με την επιλογή Cam-Follower μπορούμε να προσομοιώσουμε την ολίσθηση ενός σώματος πάνω σε ένα άλλο. Μπορούμε να επιλέξουμε επιφάνειες ή ακμές που θα ολισθαίνουν. Για την ομαλή λειτουργία της παραμέτρου πρέπει να αποφεύγονται αντικείμενα που έχουν ευθείες επιφάνειες, εάν δεν είναι δυνατή η αποφυγή τους πρέπει να καθορίζουμε με ακρίβεια την φορά ολίσθησης στα κρίσιμα σημεία που ενώνονται οι επιφάνειες που είναι ευθείες. Επίσης οι επιφάνειες που επιλέγονται δεν πρέπει να έχουν σφαιρικό σχήμα, πρέπει να είναι κυρτές ή κοίλες μόνο σε μια διεύθυνση. Τέλος οι επιφάνειες και οι ακμές πρέπει να είναι ομαλές διότι δεν θα έχουμε σωστά αποτελέσματα.



Εικόνα 47: Μενού δημιουργίας σύνδεσης Cam-Follower

Είναι σημαντικό να εξετάζουμε τις επιφάνειες και τις ακμές πριν δημιουργήσουμε τις συνθήκες ολίσθησης για τυχόν λάθη. Για να δημιουργήσουμε συνθήκες ολίσθησης σε δυο αντικείμενα επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Cams και εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θέλουμε να εφαρμόσουμε συνθήκες ολίσθησης ανάμεσα στο αντικείμενο roller1 και στο αντικείμενο roller2. Ονομάζουμε την ολίσθηση Rollers, επιλέγουμε στο πλαίσιο Cam1 το αντικείμενο roller1 και διαλέγουμε σαν επιφάνειες ολίσθησης τα ημικύκλια και τις δυο ευθείες που τα συνδέουν. Στη συνέχεια επιλέγουμε στο πλαίσιο Cam2 το αντικείμενο roller2 και διαλέγουμε την κυκλική επιφάνεια του αντικειμένου. Στο παρακάτω πλαίσιο Depth Display Settings επιλέγουμε Automatic για να κεντράρει τις δυο επιφάνειες αυτόματα, εάν επιθυμούμε κάποια διαφορετική προσέγγιση των επιφανειών ορίζουμε μονοί μας τις επιλογές. Επιλέγουμε Οκ και ολοκληρώνουμε τη συνθήκη ολίσθησης των δυο αντικειμένων. Παρατηρούμε στη διπλανή εικόνα τις επιφανείες που ολισθαίνουν με μπλε περίγραμμα και στο σημείο ένωσης το εικονίδιο Cam-Follower. Δημιουργήσαμε την συγκεκριμένη συνθήκη διότι θέλουμε το αντικείμενο roller2 να ακολουθεί το αντικείμενο roller1 κατά την διάρκεια που περιστρέφεται.

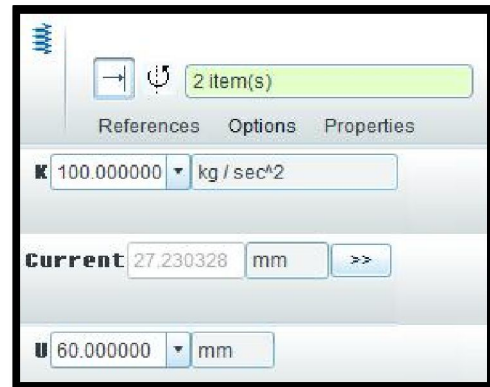


Εικόνα 48: Επιλογή επιφανειών για τη δημιουργία σύνδεσης Cam-Follower

Spring

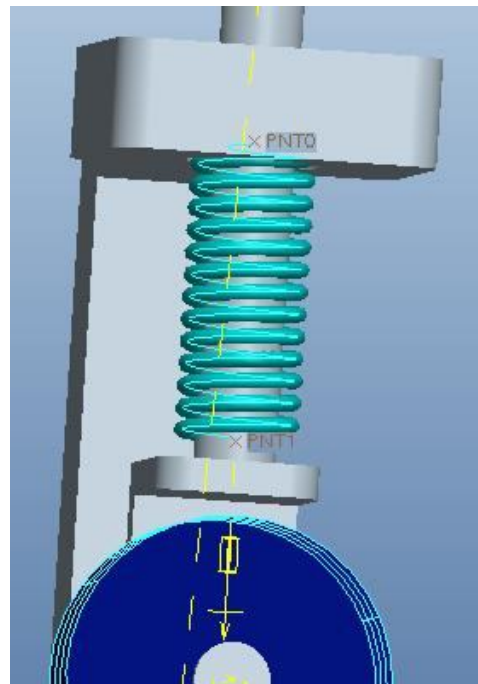
Ένα ελατήριο δημιουργεί μια μεταφορική ή περιστροφική δύναμη σε ένα μηχανισμό. Παράγει μία γραμμική δύναμη όταν τεντώνεται ή συμπιέζεται και παράγει μία δύναμη στρέψης όταν περιστρέφεται. Η δύναμη αυτή επαναφέρει το ελατήριο προς μία θέση ισορροπίας δηλαδή στη θέση στην οποία δεν επηρεάζεται από οποιαδήποτε εξωτερική δύναμη (χαλάρωση). Το μέγεθος της δύναμης του ελατηρίου είναι ανάλογο με την απόσταση τη θέση ισορροπίας. Ένα ελατήριο που δημιουργούμε στο Mechanism δεν είναι ορατό στη κανονική λειτουργία. Για να δημιουργήσουμε ένα ελατήριο επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Spring, στο πάνω μέρος του παράθυρου

εμφανίζεται ένα πλαίσιο όπου καθορίζουμε τις ιδιότητες του ελατήριου. Αρχικά επιλέγουμε αν θα δημιουργήσουμε ελατήριο που παράγει γραμμική δύναμη ή δύναμη στρέψης. Στη συνέχεια επιλέγουμε στο πλαίσιο References το τέλος και την αρχή του ελατήριου, στο παράδειγμα που εξετάζουμε επιλέγουμε το PNT0 στη vasi



Εικόνα 49: Μενού επιλογής ελατήριου

και το PNT1 στο follower. Τα σημεία δημιουργήθηκαν κατά την κατασκευή των αντικειμένων στο αρχικό στάδιο, εάν όμως δεν έχουμε δημιουργήσει εξ'αρχής τα σημεία που χρειαζόμαστε μπορούμε να τα προσθέσουμε από το βασικό μενού του Mechanism. Στο πλαίσιο Options μπορούμε να ορίσουμε τη διάμετρο του ελατήριου και στο πλαίσιο Properties το όνομα του. Στη συνέχεια συμπληρώνουμε την σταθερά του ελατήριου στο πλαίσιο **K** και το φυσικό μήκος του ελατήριου στο πλαίσιο **U**, οι τιμές που ορίσαμε παρουσιάζονται στην παραπάνω εικόνα. Στο πλαίσιο **Current** αναγράφεται το μήκος του ελατήριου τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, παρατηρούμε ότι η τιμή είναι μικρότερη από εκείνη που ορίσαμε αρχικά αρά το ελατήριο βρίσκεται σε κατάσταση συμπίεσης. Η τελική μορφή του ελατηρίου παρουσιάζεται στην διπλανή εικόνα.

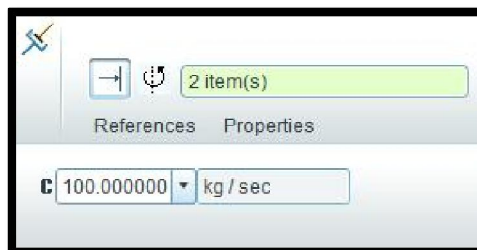


Εικόνα 50: Τοποθέτηση ελατήριου στην υποσυναρμογή

Damper

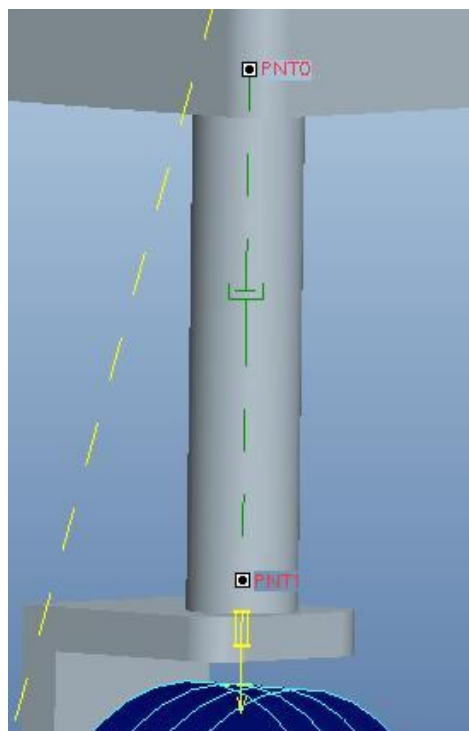
Ο αποσβεστήρας είναι ένα είδος φορτίου που δημιουργούμε για την προσομοίωση πραγματικών δυνάμεων που ασκούνται στο μηχανισμό. Μπορεί να απορροφήσει μια μεταφορική ή περιστροφική δύναμη. Η δύναμη που παράγεται από τον αποσβεστήρα αφαιρεί ενέργεια από ένα κινούμενο μηχανισμό και λειτουργεί ανασταλτικά την κίνησή του. Η δύναμη απόσβεσης είναι πάντα ανάλογη με την ταχύτητα που κινείται το μοντέλο στο οποίο έχουμε προσθέσει έναν αποσβεστήρα και ενεργεί πάντα προς την αντίθετη κατεύθυνση της κίνησης. Για να δημιουργήσουμε έναν αποσβεστήρα

επιλεγούμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Damper, στο πάνω μέρος του παράθυρου εμφανίζεται ένα πλαίσιο όπου καθορίζουμε τις ιδιότητες του αποσβεστήρα. Αρχικά επιλέγουμε αν θα



Εικόνα 51: Μενού επιλογής αποσβεστήρα

δημιουργήσουμε αποσβεστήρα που απορροφά γραμμική δύναμη ή δύναμη στρέψης. Στη συνέχεια επιλέγουμε στο πλαίσιο References το τέλος και την αρχή του αποσβεστήρα, στο παράδειγμα που εξετάζουμε επιλέγουμε το PNT0 στη vasi και το PNT1 στο follower. Στο πλαίσιο Properties μπορούμε να ορίσουμε το όνομα του αποσβεστήρα. Στη συνέχεια συμπληρώνουμε την σταθερά του αποσβεστήρα στο πλαίσιο C. Η τελική μορφή του αποσβεστήρα παρουσιάζεται στην διπλανή εικόνα.

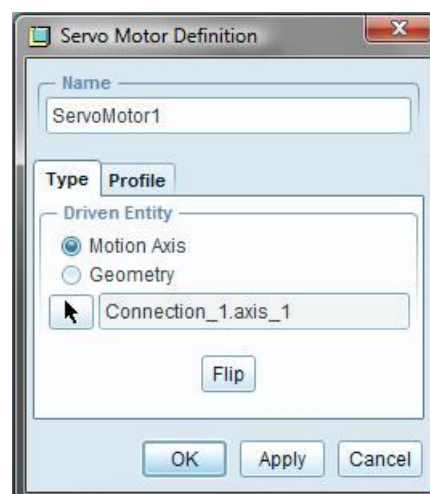


Εικόνα 52: Τοποθέτηση αποσβεστήρα στην υποσυναρμολογή

Με την τοποθέτηση του ελατήριου και του αποσβεστήρα στο μηχανισμό δημιουργήσαμε μια ανάρτηση που έχει παρόμοιες αρχές λειτουργίας με εκείνες που χρησιμοποιούνται στα οχήματα.

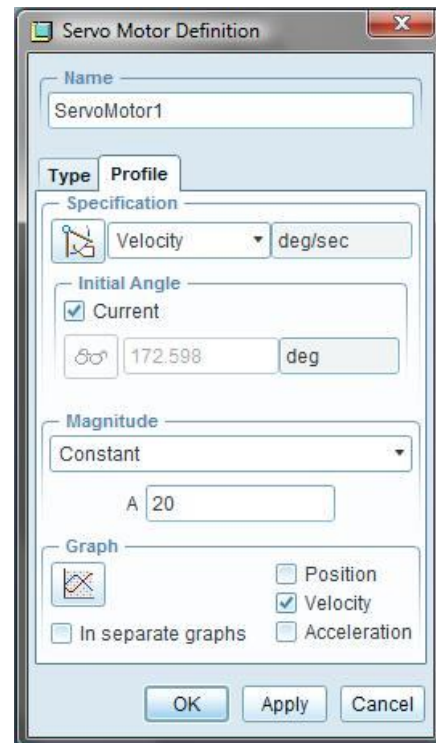
Servo Motor

Για να θέσουμε σε κίνηση ένα μηχανισμό χρησιμοποιούμε σερβοκινητήρες. Ο σερβοκινητήρας προκαλεί την κίνηση μεταξύ δύο αντικειμένων που έχουν ένα βαθμό ελευθερίας μεταξύ τους. Οι σερβοκινητήρες έχουν τα εξής προφίλ για την κίνηση των αντικειμένων: θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης ως συνάρτηση του χρόνου, και μπορεί να προκαλέσει είτε μεταφορική είτε περιστροφική κίνηση. Επίσης μπορούμε να ορίσουμε το προφίλ λειτουργίας του σερβοκινητήρα επιλέγοντας έτοιμες συναρτήσεις που διαθέτει το λογισμικό ή



Εικόνα 53: Μενού επιλογής σερβοκινητήρα

μπορούμε να κατασκευάσουμε δίκες μας. Τέλος σε ένα μηχανισμό μπορούμε να ορίσουμε όσους σερβοκινητήρες θέλουμε. Για να εισάγουμε ένα σερβοκινητήρα επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Servo Motor και εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο όπου στο πλαίσιο Type επιλέγουμε τη σύνδεση (Motion Axis) που θέλουμε να εφαρμοστεί ο κινητήρας ή τη γεωμετρία που θα εφαρμόσουμε την κίνηση (Geometry). Στο παράδειγμα του μηχανισμού της ανάρτησης επιλέγουμε τον πρώτο τύπο εισαγωγής του σερβοκινητήρα γιατί θέλουμε να θέσουμε σε περιστροφική κίνηση το αντικείμενο roller1. Για να ορίσουμε το πλαίσιο Type επιλέγουμε ως άξονα περιστροφής τον άξονα της σύνδεσης του αντικείμενου vasi με το αντικείμενο roller1. Επιλέγουμε το εικονίδιο Profile και ανοίγει το δεύτερο πλαίσιο στο παράθυρο ορισμού του σερβοκινητήρα. Στο πλαίσιο Specification μπορούμε να ορίσουμε την αρχική θέση που θα βρίσκονται τα κινούμενα μέρη επιλέγοντας το εικονίδιο Define Motion Axis Settings, στο διπλανό κελί επιλέγουμε τον τύπο της κίνησης, οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής:



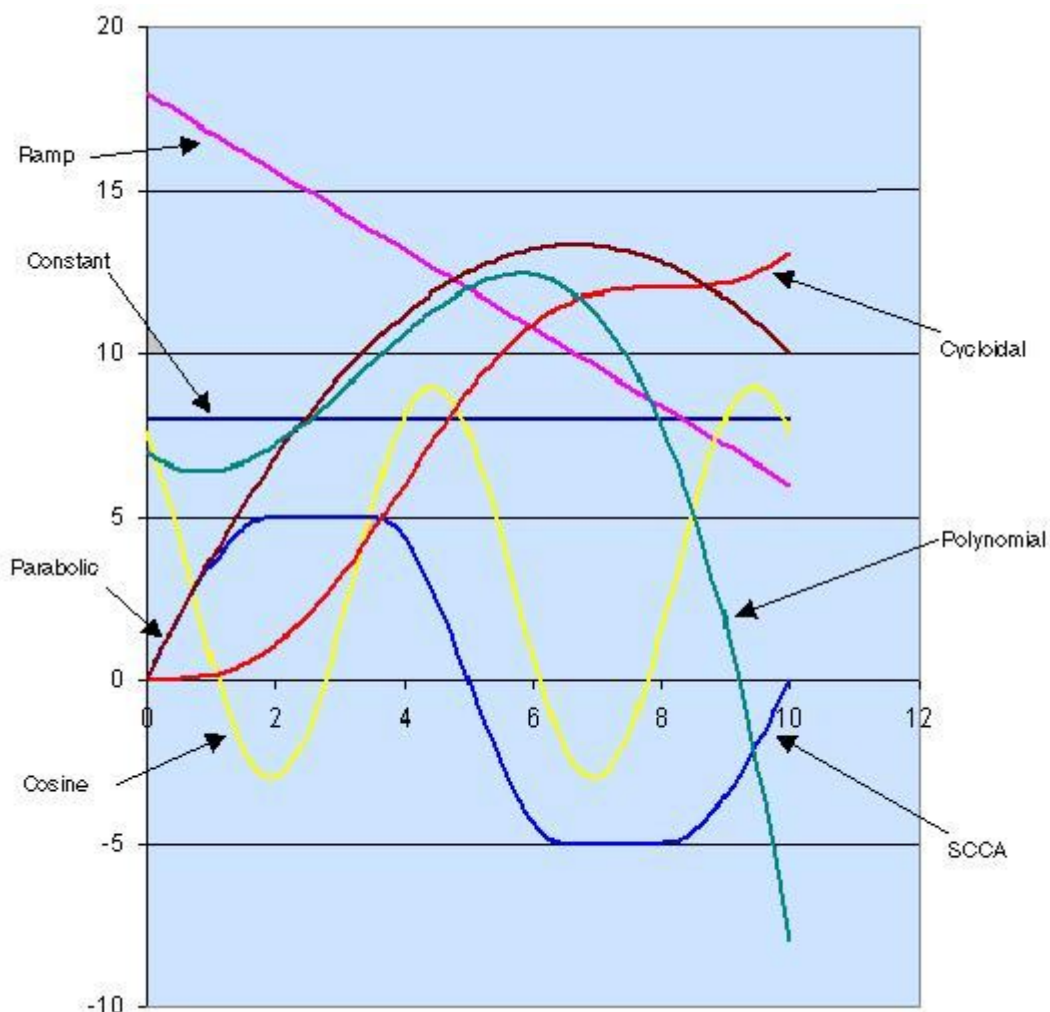
Εικόνα 54: Ορισμός παραμέτρων σερβοκινητήρα

- **Position:** Με την επιλογή θέσης μπορούμε να μετακινήσουμε ή να περιστρέψουμε ένα αντικείμενο σε μια συγκεκριμένη θέση. Στο παράδειγμα που χρησιμοποιούμε έχουμε επιλέξει την περιστροφική κίνηση. Το αντικείμενο από την αρχική θέση θα μετακινηθεί σε μια επομένη χωρίς να έχουμε συνεχόμενη περιστροφή αλλά μια απλή μετάβαση από ένα σημείο σε ένα άλλο.
- **Velocity:** Επιλέγοντας τον τύπο της ταχύτητας μπορούμε να ορίσουμε την ταχύτητα περιστροφής του αντικείμενου γύρω από τον άξονα σύνδεσης. Γνωρίζοντας το μέγεθος της ταχύτητας, το χρόνο περιστροφής και την αρχική θέση του αντικειμένου μπορούμε να υπολογίσουμε την τελική του θέση. Η αρχική θέση του αντικειμένου μπορεί να τροποποιηθεί στο πλαίσιο Initial Angle καθώς στο κελί αναγράφεται η παρούσα θέση του αντικειμένου. Απενεργοποιώντας το κελί Current μπορούμε να ορίσουμε εμείς την αρχική θέση δίνοντας την επιθυμητή τιμή. Τέλος επιλέγοντας το εικονίδιο Preview Position μπορούμε να μεταφερθούμε στη θέση που ορίσαμε, ενεργοποιώντας στη

συνέχεια το κελί Current ορίζουμε ως αρχική γωνία τη θέση που επιλέξαμε προηγούμενος.

- **Acceleration:** Στον τύπο της επιτάχυνσης ορίζουμε την επιταχυνόμενη κίνηση που πραγματοποιεί το μοντέλο μας. Γνωρίζοντας το μέγεθος της επιτάχυνσης, το χρόνο περιστροφής, την αρχική ταχύτητα και την αρχική θέση του αντικειμένου μπορούμε να υπολογίσουμε την τελική του θέση. Όμοια με τον τύπο της ταχύτητας μπορούμε και εδώ να ορίσουμε την αρχική θέση στο πλαίσιο Initial Angle. Επιπλέον μπορούμε να ορίσουμε την αρχική γωνιακή ταχύτητα (Initial Angular Velocity).

Στο πλαίσιο Magnitude μπορούμε να επιλέξουμε τον τύπο της συνάρτησης που θα περιγράφει την κίνηση του αντικειμένου. Το λογισμικό παρέχει αρκετές γνώστες συναρτήσεις επίσης δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει συναρτήσεις με τη μορφή αρχείου και να συντάσσει τις δίκες του. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται οι συναρτήσεις που είναι διαθέσιμες από το λογισμικό.



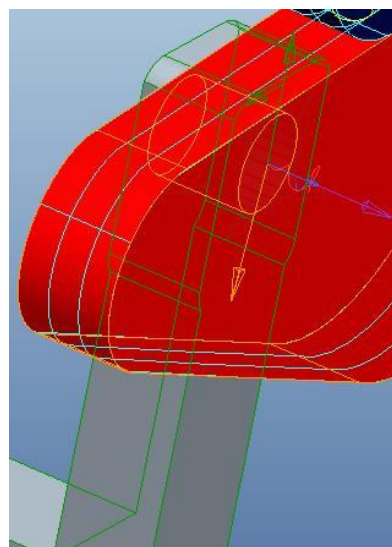
Διάγραμμα 1: Γράφημα έτοιμων συναρτήσεων του λογισμικού

Τέλος στο παράθυρο Graph μπορούμε να δούμε σε διάγραμμα τη συνάρτηση που ορίσαμε. Στη αρχή επιλέγουμε ποια μεγέθη θέλουμε να εμφανίζονται στο διάγραμμα και επιλέγουμε το εικονίδιο Graph. Ενεργοποιώντας την επιλογή in separate graphs μπορούμε να έχουμε ξεχωριστό διάγραμμα για κάθε μέγεθος. Με την παρατήρηση των διαγραμμάτων μπορούμε πολύ εύκολα να αντιληφθούμε εάν έχουμε κάποιο λάθος στη συνάρτηση που έχουμε χρησιμοποιήσει είτε στη μορφή της είτε στις αρχικές τιμές που έχουμε ορίσει. Τα διαγράμματα που δημιουργούνται μπορούμε να τα εξάγουμε σε μορφή Excel ή txt. Στο παράδειγμα της ανάρτησης το διάγραμμα για την μετατόπιση και την ταχύτητα είναι το εξής:



Διάγραμμα 2: Γράφημα ταχύτητας-μετατοπισης

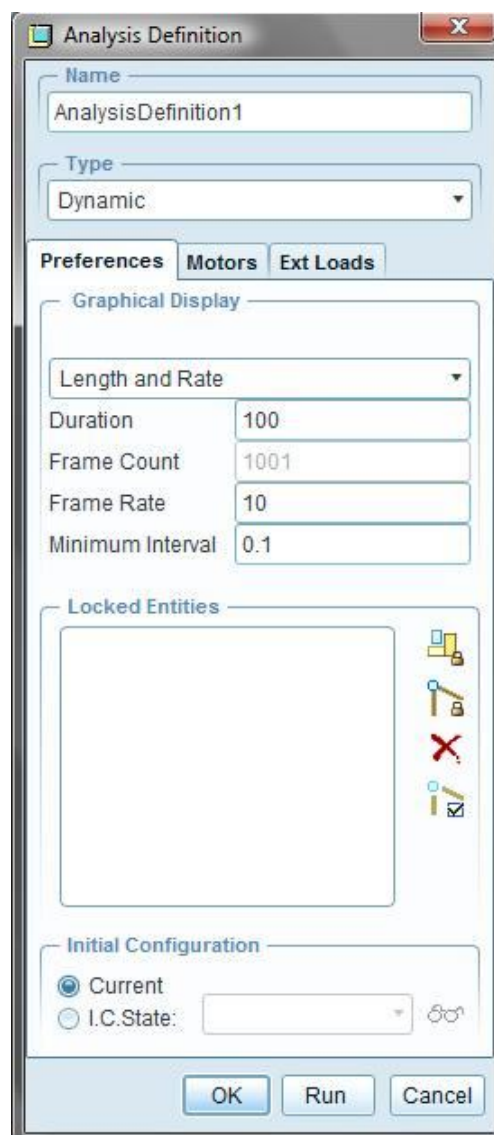
Στο μηχανισμό Anartisi τα χαρακτηριστικά του σερβοκινητήρα που χρησιμοποιήσαμε είναι τα εξής: Ορίσαμε τον τύπο της κίνησης σε «ταχύτητα», να έχει μία σταθερά σαν συνάρτηση (Constant) και ορίσαμε το μέγεθος της σταθεράς σε 20deg/sec. Στο παράθυρο του Mechanism παρουσιάζεται σαν ελικοειδές ελατήριο. Στη διπλανή εικόνα παρουσιάζεται ο κινητήρας αφού έχει τοποθετηθεί στο μηχανισμό. Με πράσινο περίγραμμα είναι το αντικείμενο που αποτελεί τη βάση ενώ με πορτοκαλί περίγραμμα είναι εκείνο που περιστρέφεται.



Εικόνα 55: Τοποθέτηση σερβοκινητήρα στο μηχανισμό

2.4.1.7.4 Mechanism Analysis

Μέχρι στιγμής έχουμε ορίσει τον τρόπο με τον οποίο ο μηχανισμός κινείται με την προσθήκη φορέων μοντελοποίησης, όπως οι κινητήρες, οι δυνάμεις, οι ροπές και βαρύτητα. Στη συνέχεια μπορούμε να εκτελέσουμε μια ανάλυση για να διαπιστώσουμε πως αντιδρά ο μηχανισμός στα δεδομένα που έχουμε ορίσει. Μπορούμε να δημιουργήσουμε πολλαπλές αναλύσεις, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς κινητήρες ή δυνάμεις καθώς και περιορισμούς στην κίνηση διάφορων εξαρτημάτων ενός μηχανισμού χωρίς να χρειάζεται κάθε φορά να δημιουργούμε νέα αντικείμενα παρά μόνο αλλάζοντας τα δεδομένα για κάθε τύπο φόρτισης που χρησιμοποιούμε. Για να πραγματοποιήσουμε μια ανάλυση επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Mechanism Analysis και εμφανίζεται το αντίστοιχο παράθυρο. Αρχικά επιλέγουμε το όνομα της ανάλυσης και στη συνέχεια τον τύπο της ανάλυσης. Υπάρχουν πέντε είδη αναλύσεων:



Εικόνα 56: Μενού Analysis Definition

- **Position:** Χρησιμοποιούμε την ανάλυση θέσης για να ερευνήσουμε αν ο μηχανισμός μπορεί να συναρμολογηθεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις των εφαρμοζόμενων σερβοκινητήρων και συνδέσεων.
- **Kinematic:** Χρησιμοποιούμε μια κινηματική ανάλυση για να θέσουμε σε κίνηση το μηχανισμό με ένα σερβοκινητήρα και να αναλύσουμε την κίνηση του μηχανισμού χωρίς την επίδραση των δυνάμεων που δρουν στο σύστημα.
- **Dynamic:** Χρησιμοποιούμε μια δυναμική ανάλυση για να μελετήσουμε τη σχέση μεταξύ των αδρανειακών δυνάμεων, βαρυτική και εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται από τη μάζα των αντικειμένων στο μηχανισμό.

- **Static:** Χρησιμοποιούμε μια στατική ανάλυση για να μελετήσουμε τις δυνάμεις που ενεργούν σε ένα σώμα, όταν αυτό είναι σε ισορροπία.
- **Force Balance:** Χρησιμοποιούμε μια ανάλυση δυνάμεων ισορροπίας για να καθορίσουμε τις δυνάμεις που απαιτούνται για να παραμείνει ο μηχανισμός σε μια συγκεκριμένη διαμόρφωση.

Στο μηχανισμό που εξετάζουμε θα πραγματοποιήσουμε δυναμική ανάλυση διότι μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στα αντικείμενα που αποτελούν το μηχανισμό.

Στο πλαίσιο Preferences μπορούμε να καθορίσουμε το πεδίο του χρόνου, κλειδώματα αντικειμένων και τις αρχικές πληροφορίες διαμόρφωσης. Δεν μπορούμε να καθορίσουμε την ώρα έναρξης μιας δυναμικής ανάλυσης. Οι σερβοκινητήρες, τα ελατήρια, τα αμορτισέρ και τα γρανάζια είναι ενεργά για όλη τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης. Η ανάλυση πρέπει να ξεκινά από τη στιγμή που αυτά έχουν ενεργοποιούνται έτσι ώστε οι τυχόν επιπτώσεις από την εφαρμογή τους στο μηχανισμό να λαμβάνονται υπόψη.

Αρχικά επιλέγουμε μία από τις επιλογές από τη λίστα γραφική απεικόνιση. Οι παράμετροι που θα χρησιμοποιήσουμε για να καθορίσουμε το πεδίο του χρόνου εξαρτώνται από το ποιο στοιχείο θα επιλέξουμε. Εισάγουμε τις τιμές όπως εξηγείται παρακάτω για να καθορίσουμε το πεδίο του χρόνου της ανάλυσης

- **Length and Rate:** Εισάγουμε τη διάρκεια (Duration) και το ρυθμό καρέ (Frame Rate) ή το ελάχιστο διάστημα (Minimum Interval) μεταξύ των καρέ για να καθορίσουμε τη διάρκεια της ανάλυσης.
- **Length and Frame Count:** Εισάγουμε τη διάρκεια και τον αριθμό των καρέ (Frame Count) για να καθορίσουμε τη διάρκεια της ανάλυσης.
- **Rate and Frame Count:** Εισάγουμε τον αριθμό των καρέ και τον ρυθμό καρέ ή το ελάχιστο διάστημα για να καθορίσουμε τη διάρκεια της ανάλυσης.

Σημείωση: Αν θέλουμε να αξιολογήσουμε τη θέση, την ταχύτητα, την επιτάχυνση και τις δυνάμεις αντίδρασης των φορέων στο μηχανισμό εισάγουμε το 0 στη διάρκεια. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη μέθοδο ως ένα γρήγορο έλεγχο πριν από την εκτέλεση μιας μεγάλης δυναμικής ανάλυσης. Ακόμα ο ρυθμός καρέ και το ελάχιστο διάστημα είναι συμπληρωματικά το ένα με το άλλο. Το μήκος, ο αριθμός καρέ, ο ρυθμός καρέ και το διάστημα της διαδρομής κίνησης συνδέονται με τους ακόλουθους τύπους:

$$\text{Frame Rate} = 1/\text{Interval} \quad \text{και} \quad \text{Frame Count} = \text{Frame Rate} * \text{Length} + 1$$

Στο πλαίσιο Locked Entities (κλειδωμά αντικειμένων) μπορούμε να καθορίσουμε ποια αντικείμενα ή συνδέσεις στο μηχανισμό παραμένουν κλειδωμένες κατά τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης. Όσον αφορά τα αντικείμενα, κλειδώνουν σε μια θέση σε σχέση με τα άλλα αντικείμενα κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Για το κλειδωμά των συνδέσεων αφαιρούμε τους βαθμούς ελευθερίας που είχαμε ορίσει για τη συγκεκριμένη σύνδεση κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Επίσης μπορούμε να απενεργοποιήσουμε μια σύνδεση προσωρινά και να αγνοηθεί κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.

1. Για να κλειδώσουμε δύο ή περισσότερα αντικείμενα επιλέγουμε το εικονίδιο Create Body Lock. Αρχικά επιλέγουμε το κύριο αντικείμενο δηλαδή ποιο αντικείμενο θα αποτελεί τη βάση του κλειδώματος. Στη συνέχεια επιλέγουμε όλα τα αντικείμενα που θέλουμε να είναι κλειδωμένα στο κύριο αντικείμενο. Για να κλειδώσουμε όλα τα αντικείμενα στο έδαφος κάνουμε μεσαίο κλικ όταν μας ζητηθεί να ορίσουμε το αντικείμενο που θα λειτουργεί ως βάση.
2. Για να κλειδώσουμε μια σύνδεση επιλέγουμε το εικονίδιο Create Connection Lock και επιλέγουμε τη σύνδεση που θέλουμε να κλειδώσουμε. Ο περιορισμός αυτός χρησιμοποιείται όταν θέλουμε η σύνδεση να παραμείνει στη παρούσα μορφή της κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.
3. Για να απενεργοποιήσουμε μια σύνδεση επιλέγουμε το εικονίδιο Enable/Disable Connection και επιλέγουμε τη σύνδεση που θέλουμε να απενεργοποιήσουμε. Αντίστοιχες ενέργειες εφαρμόζουμε όταν θέλουμε να ενεργοποιήσουμε μια σύνδεση.

Σημείωση: Μπορούμε επίσης να κλειδώσουμε συνδέσεις ολίσθησης (Cam Connections) και συνδέσεις αυλακώσεως (Slot Connections). Για να κλειδώσουμε μια σύνδεση γραναζιών (Gear Connection) πρέπει να κλειδώσουμε έναν από τους άξονες περιστροφής των γραναζιών.

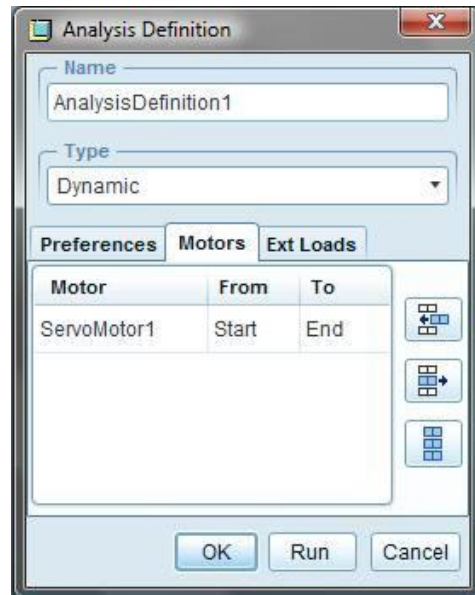
Στο πλαίσιο Initial Condition μπορούμε να ορίσουμε τη διαμόρφωση και τις αρχικές συνθήκες τις ταχύτητας στην έναρξη της δυναμικής ανάλυσης. Οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής:

- Current: Επιλέγουμε την τρέχουσα θέση των αντικειμένων όπως εμφανίζονται στην οθόνη.
- Initial Condition: Επιλέγουμε την αρχική κατάσταση που έχουμε ορίσει σε προηγούμενο στάδιο. Μπορούμε επίσης επιλέγοντας το εικονίδιο Preview the specified snapshot να δούμε τη διαμόρφωση της αρχικής κατάστασης.

Στην καρτέλα Motors μπορούμε να προσθέσουμε, να διαγράψουμε ή να επιλέξουμε κινητήρες που θα χρησιμοποιήσουμε στην ανάλυση. Ως προεπιλογή εμφανίζονται όλοι οι κινητήρες που έχουμε εφαρμόσει στο μοντέλο, εάν θέλουμε να προσθέσουμε ή να αφαιρέσουμε κάποιο κινητήρα επιλέγουμε αντίστοιχα τα εικονίδια Add new Row/Delete highlighted Row. Επίσης σε κάθε κινητήρα η προεπιλεγμένη διάρκεια λειτουργίας του είναι από τη αρχή έως το τέλος της διάρκειας της ανάλυσης. Ακόμα μπορούμε να ταξινομήσουμε τους κινητήρες αλφαβητικά ή ανάλογα με τη χρονική διάρκεια που δρουν στο μηχανισμό. Η καρτέλα Motors χρησιμοποιείται ελαφρώς διαφορετικά για κάθε τύπο ανάλυσης. Στην περίπτωση που διενεργούμε δυναμική ανάλυση έχουμε τις εξής ιδιαιτερότητες:

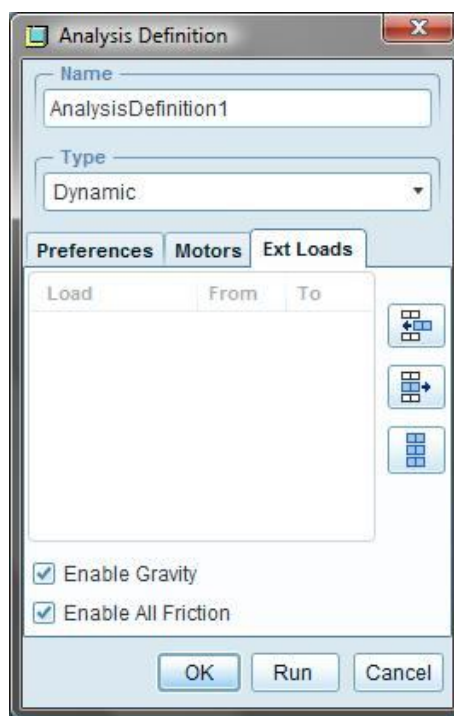
- Οι κινητήρες που χρησιμοποιούμε είναι ενεργοί κατά τη διάρκεια όλης της ανάλυσης, δεν μπορούμε να επεξεργαστούμε το χρονικό σημείο έναρξης και λήξης.
- Οι σερβοκινητήρες που προκαλούν κίνηση σε σημεία ή επίπεδα δεν έχουν καμιά επίδραση στη δυναμική ανάλυση, για το λόγο αυτό δεν εμφανίζονται στη λίστα.

Σημείωση: Επειδή μπορούμε να ορίσουμε πολλούς κινητήρες σε ένα αντικείμενο πρέπει να γνωρίζουμε τις κινήσεις που προκαλούν στο μοντέλο και τα χρονικά διαστήματα που εφαρμόζονται για να αποφεύγονται τυχόν λάθη. Επίσης για να αποφύγουμε μια πιθανή αποτυχία της ανάλυσης ή να έχουμε λανθασμένα αποτελέσματα είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούμε ένα κινητήρα ανά αντικείμενο κάθε φορά. Για παράδειγμα εάν δημιουργήσουμε ένα μηδενικό σερβοκινητήρα θέσεως και ένα σταθερό μη μηδενικό σερβοκινητήρα ταχύτητας στον ίδιο άξονα περιστροφής δεν πρέπει να τους ενεργοποιήσουμε ταυτόχρονα στην ίδια ανάλυση. Επίσης εάν ορίσουμε δύο κινητήρες δύναμης (Force Motors) που ενεργούν στον ίδιο άξονα κίνησης και τους ενεργοποιήσουμε ταυτόχρονα σε μια δυναμική ανάλυση η εφαρμοζόμενη δύναμη θα είναι το άθροισμα των δυνάμεων που προκαλούν οι δύο κινητήρες.



Εικόνα 57: Επιλογή σερβοκινητήρα για την ανάλυση

Στην καρτέλα Ext Loads μπορούμε να προσθέσουμε, να διαγράψουμε ή να επιλέξουμε εξωτερικές φορτίσεις που θα χρησιμοποιήσουμε στην ανάλυση. Ως προεπιλογή εμφανίζονται όλες οι φορτίσεις που έχουμε εφαρμόσει στο μοντέλο, εάν θέλουμε να προσθέσουμε ή να αφαιρέσουμε κάποια φόρτιση επιλέγουμε αντίστοιχα τα εικονίδια Add new Row/Delete highlighted Row. Στο κάτω μέρος της καρτέλας μπορούμε να ενεργοποιήσουμε τη βαρύτητα (Gravity) και τις τριβές (Friction) που αναπτύσσονται στις συνδέσεις (ολίσθησης – αυλακώσεως) που έχουμε δημιουργήσει.



Εικόνα 58: Καρτέλα εισαγωγής εξωτερικών φορτίων

Σημείωση: Για να έχει επίδραση η βαρύτητα στον μηχανισμό κατά τη διάρκεια μιας δυναμικής ανάλυσης πρέπει να έχουμε ορίσει τις ιδιότητες της μάζας των αντικειμένων (Mass Properties). Επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Mass Properties και το αντικείμενο που θέλουμε να ορίσουμε τις ιδιότητες του, το λογισμικό υπολογίζει αυτόματα τον όγκο και το κέντρο βάρους του κάθε αντικειμένου και προσθέτει τις πληροφορίες στο αντικείμενο.

Τέλος επιλέγουμε Run για να αρχίσει η λειτουργία του μηχανισμού και κατ' επέκταση η δυναμική ανάλυση. Αφού ολοκληρωθούν οι κινήσεις που έχουμε ορίσει επιλέγουμε Ok και αποθηκεύονται τα δεδομένα της ανάλυσης στο μηχανισμό. Μπορούμε να εξάγουμε μετρήσεις και αποτελέσματα από την ανάλυση του μηχανισμού για να διαπιστώσουμε αν λειτουργεί σωστά, το ζητούμενο όμως είναι η εξαγωγή των δυνάμεων που ασκούνται στο μηχανισμό για περαιτέρω ανάλυση των αντικειμένων.

2.4.1.7.5 Export Load

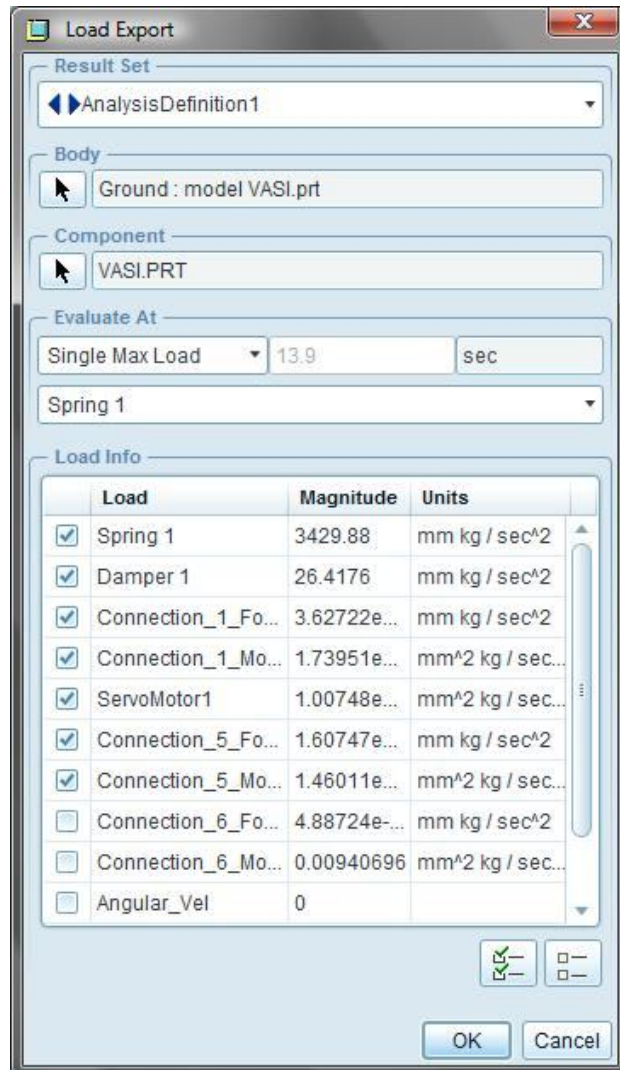
Αφού ολοκληρώσαμε την δυναμική ανάλυση επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων File→Use in Structure, ανοίγει το παράθυρο Load Export. Στο νέο παράθυρο έχουμε τις εξής επιλογές:

- Στο πλαίσιο Result Set επιλέγουμε από ποια ανάλυση θα αντλήσουμε τα αποτελέσματα. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αποτελέσματα από δυναμική, στατική και ανάλυση ισορροπίας.
- Στο πλαίσιο Body επιλέγουμε ένα αντικείμενο από τη συναρμογή που θα χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση των φορτίων κατά τη διάρκεια της επιλεγμένης ανάλυσης.
- Στο πλαίσιο Component επιλέγουμε ένα αντικείμενο, μια υποσυναρμογή ή ολόκληρη τη συναρμογή. Το σύνολο των φορτίσεων που αναπτύσσονται στο αντικείμενο που επιλέξαμε στο πλαίσιο Body αποθηκεύεται ως μέρος του αρχείου του σώματος στο πλαίσιο Component. Στην προκειμένη περίπτωση θέλουμε να εξετάσουμε κάθε αντικείμενο ξεχωριστά, έτσι επιλέγουμε το ίδιο αντικείμενο και στα δυο πλαίσια για να αποθηκεύονται οι φορτίσεις που ασκούνται στο αρχείο του αντικειμένου.
- Στο πλαίσιο Evaluate At επιλέγουμε μία από τις επιλογές στη λίστα για να προσδιορίσουμε πώς το λογισμικό θα καθορίσει τα φορτία. Για την ανάλυση ισορροπίας και τη στατική ανάλυση αυτή η περιοχή είναι ανενεργή και σαν προεπιλογή είναι η μέτρηση των φορτίσεων στο τέλος του χρόνου της ανάλυσης. Οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής:
 - Time: Εισάγουμε ένα θετικό αριθμό στο πλαίσιο εισαγωγής. Η λίστα με τα φορτία εμφανίζει τις τιμές κάθε φορτίου για την επιλεγμένη χρονική στιγμή και το μοντέλο λαμβάνει την αντίστοιχη θέση σύμφωνα με το χρόνο που ορίσαμε.
 - Start or End: Το λογισμικό υπολογίζει και αποθηκεύει τις τιμές των φορτίων στην αρχή και στο τέλος της ανάλυσης.
 - Single Load Max: Με βάση τη μέγιστη τιμή του επιλεγμένου φορτίου προσδιορίζουμε τη χρονική στιγμή κατά την διάρκεια της ανάλυσης και εξάγουμε τα μεγέθη των υπολοίπων φορτίων τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Όταν επιλέγουμε Single Load Max εμφανίζεται μια λίστα που περιέχει όλα τα διαθέσιμα φορτία. Επιλέγουμε το φορτίο που μας ενδιαφέρει για να προσδιορίσουμε τη χρονική στιγμή. Η λίστα που περιέχει τα φορτία εμφανίζει την μέγιστη τιμή για το επιλεγμένο φορτίο και την τιμή για όλα τα άλλα φορτία.
 - Max for All Loads: Το λογισμικό εμφανίζει την μέγιστη τιμή για κάθε φορτίο στη λίστα ανεξάρτητα από το πότε αυτό συμβαίνει κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.
- Στο πλαίσιο Load Info παρουσιάζεται ο κατάλογος των φορτίων που συνδέονται με το αντικείμενο. Επιλέγουμε τα πλαίσια δίπλα από τα φορτία που θέλουμε να συμπεριλάβουμε στη δομική ανάλυση. Στο κάτω μέρος της λίστας υπάρχουν δυο εικονίδια που επιλεγούν όλα τα φορτία ή διαγράφουν

όλα τα φόρτια. Όταν επιλέγουμε ένα φορτίο εμφανίζεται ένα βέλος στο μοντέλο που μας δείχνει την κατεύθυνση δράσης του φορτίου.

Τέλος επιλέγουμε το εικονίδιο Οκ για να αποθηκεύσουμε τα επιλεγμένα φόρτια στο αντικείμενο. Στον μηχανισμό της ανάρτησης οι παράμετροι που επιλέξαμε παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.

Όπως φαίνεται και στη διπλανή εικόνα επιλέξαμε να εξάγουμε δεδομένα από την ανάλυση AnalysisDefinition1 για το αντικείμενο VASI και να αποθηκεύσουμε τα επιλεγμένα φόρτια στο ίδιο αντικείμενο. Για τον υπολογισμό της χρονικής στιγμής που ασκούνται τα φόρτια στο αντικείμενο επιλέξαμε ως σημείο αναφοράς το μέγιστο φορτίο του ελατηρίου. Στο πλαίσιο Load info παρατηρούμε τα φόρτια που επιλέξαμε να εφαρμόσουμε στο αντικείμενο. Για να δούμε τα φόρτια να τοποθετούνται στο μοντέλο πρέπει να μεταβούμε στην εφαρμογή Mechanica.



Εικόνα 59: Επιλογή εξαγόμενων φορτίων

Στο σημείο αυτό έχουμε ολοκληρώσει τις διαδικασίες που είναι απαραίτητες για την προετοιμασία ενός αντικειμένου για την πραγματοποίηση ανάλυσης στην εφαρμογή Mechanica. Δείξαμε πως επεξεργαζόμαστε τα υλικά κατασκευής και την τοποθέτηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων στα αντικείμενα, επίσης αναλύσαμε την μεθοδολογία για την εφαρμογή περιορισμών στο μοντέλο καθώς και την τοποθέτηση φορτίων στα αντικείμενα. Τέλος παρουσιάσαμε την κατασκευή και την συνδεσμολογία ενός μηχανισμού καθώς και την εξαγωγή φορτίων από την ανάλυση του. Στη

συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα είδη των αναλύσεων που μπορούμε να πραγματοποιήσουμε στην εφαρμογή Mechanica. Για την πραγματοποίηση των αναλύσεων θα συμπεριλάβουμε την πλειονότητα των παραπάνω παραμέτρων που αναλύσαμε μέσα από διάφορα παραδείγματα. Επίσης θα κάνουμε μια μικρή αναφορά στο σχεδιαστικό τμήμα του Pro/Engineer καθώς και σε διαφορές παραμέτρους που δεν αφορούν το σύνολο των περιπτώσεων αλλά βοηθούν στην επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων.

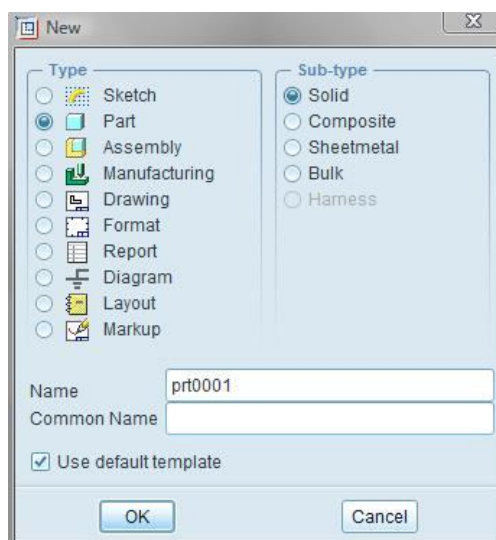
Τα είδη των αναλύσεων που μπορούμε να δημιουργήσουμε είναι τα εξής:

- **Static Analysis**
- **Buckling Analysis**
- **Modal Analysis**

2.5 Static Analysis

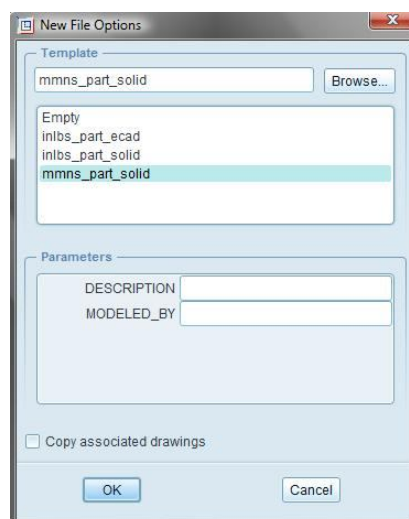
Για να πραγματοποιήσουμε στατική ανάλυση θα χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα μια δοκό. Θα αναφερθούμε στην κατασκευή της δοκού για να δείξουμε τις βασικές λειτουργίες για τον σχεδιασμό ενός αντικειμένου.

Αρχικά ανοίγουμε το Pro Engineer και επιλεγούμε το φάκελο όπου θα αποθηκεύσουμε τα αρχεία [File]→ [Set Working Directory], στη συνέχεια επιλέγουμε [File]→ [New] και εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο όπου επιλέγουμε τον τύπο του αντικειμένου που θα κατασκευάσουμε. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέγουμε solid part και απενεργοποιούμε την επιλογή Use default template έτσι ώστε να μπορέσουμε να καθορίσουμε το σύστημα μονάδων που θα εργαστούμε. Επιλέγοντας Ok εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο, επιλέγουμε mmns_part_solid. Επιλέγοντας mmns_part_solid οι μονάδες μέτρησης του μήκους, της δύναμης και του χρόνου ορίζονται ως χιλιοστά, Newton και δευτερόλεπτα αντίστοιχα.

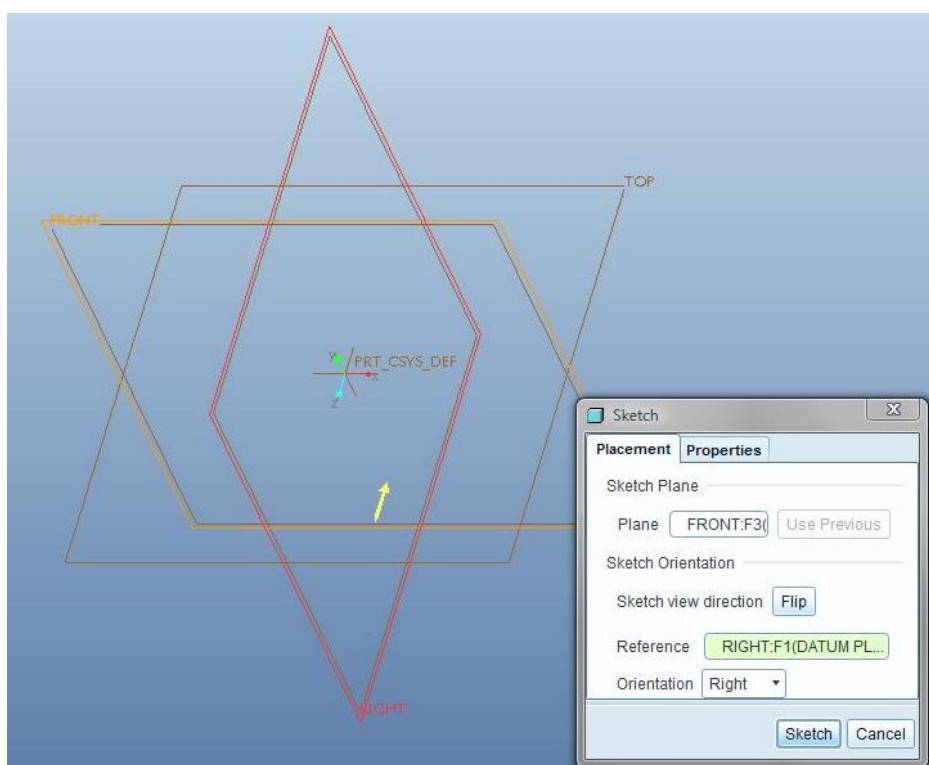


Εικόνα 60: Παράθυρο επιλογής νέου μοντέλου

Επιλέγοντας **Οκ** μεταφερόμαστε στο παράθυρο εργασίας του προγράμματος. Στη συνέχεια επιλέγουμε το εργαλείο **Sketch Tool** για να δημιουργήσουμε την διατομή της δοκού, εμφανίζετε ένα νέο παράθυρο (**Sketch**) όπου επιλέγουμε ως επίπεδο αναφοράς **FRONT** και **Sketch** ώστε να μεταφερθούμε στο χώρο όπου θα σχεδιάσουμε τη διατομή. (Η διαδικασία παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα)

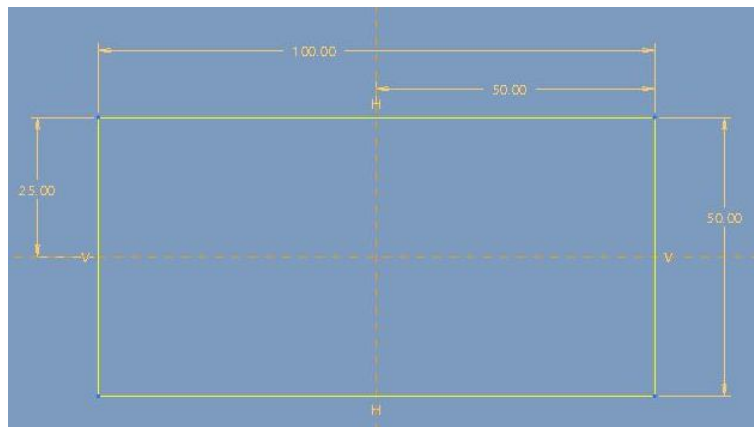


Εικόνα 61: Παράθυρο επιλογής μονάδων



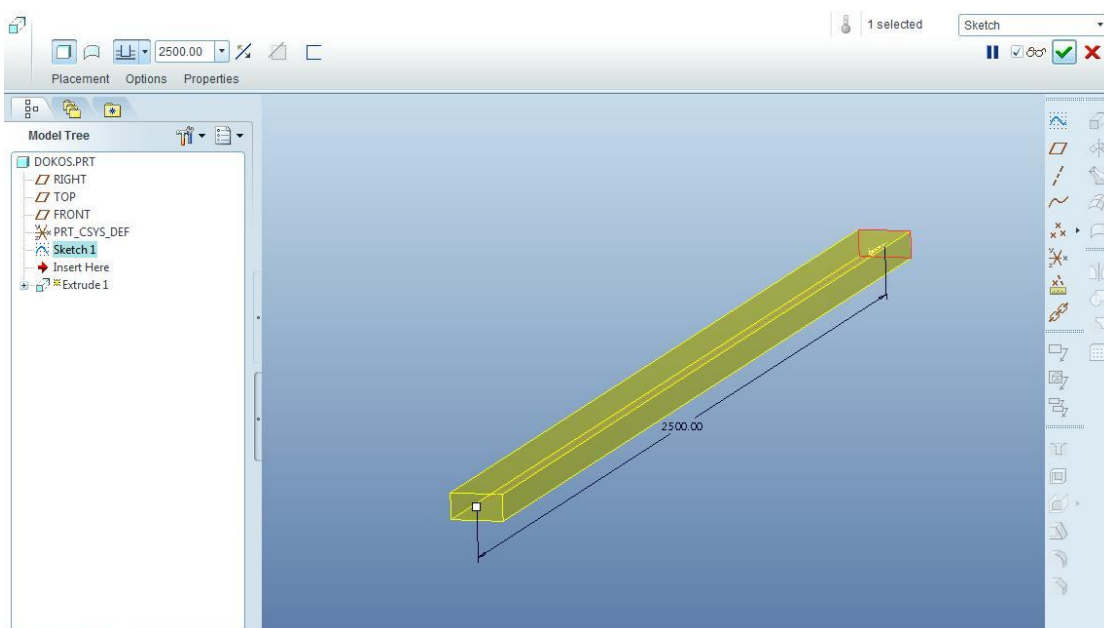
Εικόνα 62: Επιλογή επίπεδου σχεδίασης

Το νέο παράθυρο ανοίγει με διαφορετική παλέτα εργαλείων, επιλέγουμε από τις έτοιμες διατομές το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο και με ένα αριστερό κλικ στο φόντο τοποθετούμε την μια γωνία, μετακινώντας τον κέρσορα δημιουργείτε μια διατομή, κάνοντας αριστερό κλικ τοποθετούμε τη διατομή στο χώρο. Οι διαστάσεις του σχήματος και οι αποστάσεις από του άξονες είναι τυχαίες, με διπλό κλικ μπορούμε να διαμορφώσουμε τις διαστάσεις. Η διατομή παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 63: Σχεδίαση διατομής

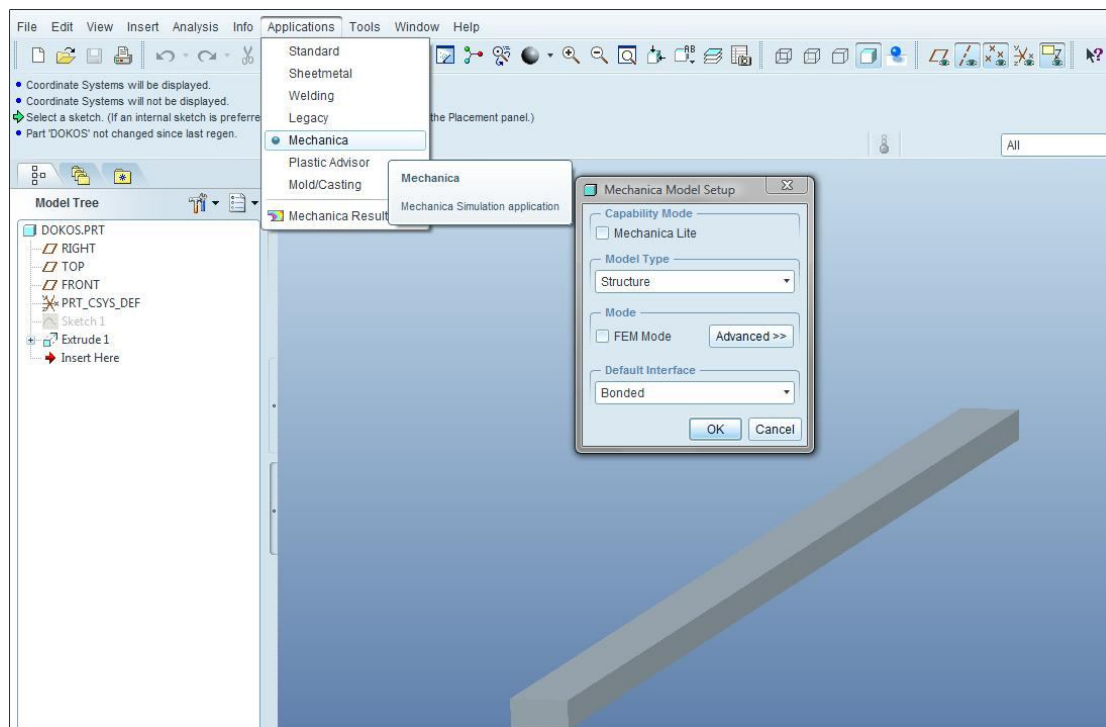
Αφού ολοκληρώσουμε το Sketch επιστρέφουμε στο αρχικό παράθυρο όπου εμφανίζεται η διατομή που σχεδιάσαμε, με το εργαλείο Extrude προσδίδουμε όγκο επεκτείνοντας τη διατομή στο επιθυμητό μήκος. Στην προκειμένη περίπτωση το μήκος που ορίσαμε είναι 2500 mm. Η δοκός στην τελική της μορφή παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα. Τέλος πρέπει να επισημανθεί ότι η επιλογή του επιπέδου σχεδίασης δεν είναι μια τυχαία επιλογή καθώς στην ανάλυση που παρουσιάζεται παρακάτω λαμβάνουμε στους υπολογισμούς και τις βαρυτικές δυνάμεις που ασκούνται στη δοκό.



Εικόνα 64: Επιμήκυνση διατομή με το εργαλείο Extrude

Η κατασκευή της δοκού ολοκληρώθηκε και μπορούμε να συνεχίσουμε με την ανάλυση στο Mechanics. Επιλέγουμε [Applications]→[Mechanics]

Στο νέο περιβάλλον εμφανίζεται αρχικά το παράθυρο Mechanics Model Setup επιλέγουμε Structure για να συνεχίσουμε.



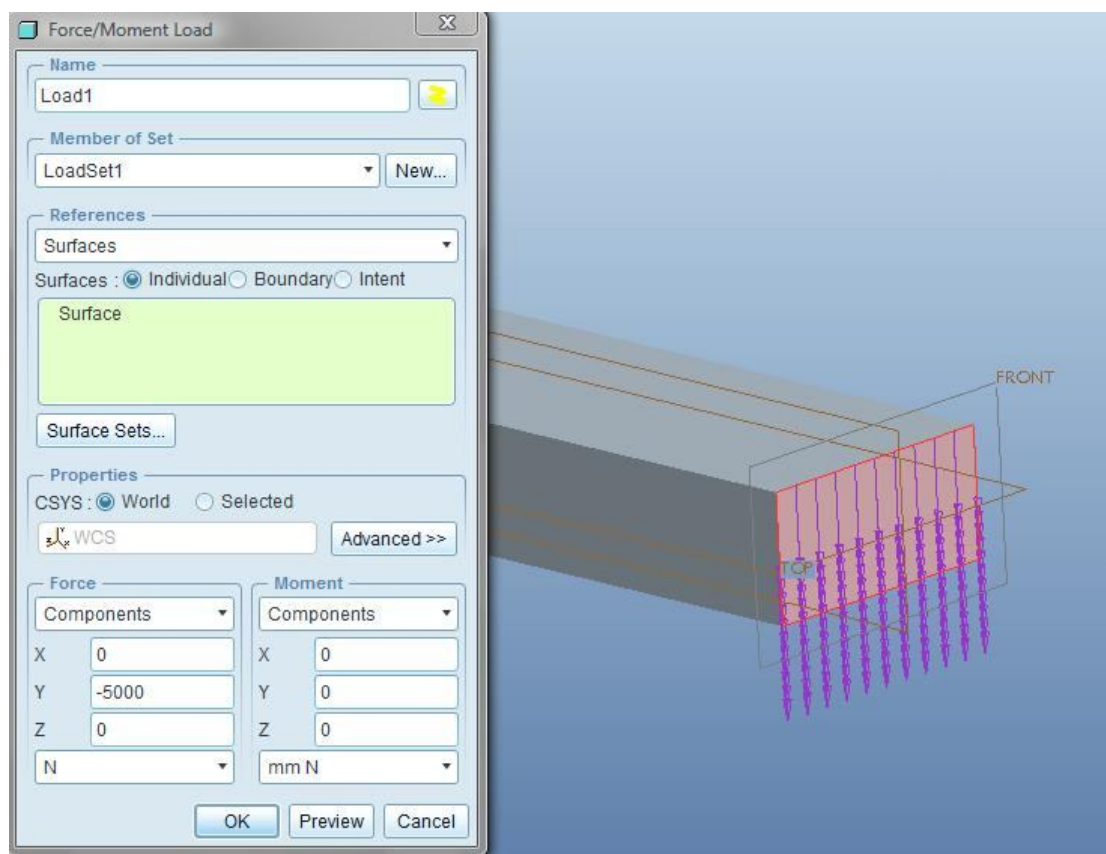
Εικόνα 65: Διαδικασία για τη μετάβαση από το Pro\Engineer στο Pro\Mechanica

Στη δοκό που κατασκευάσαμε δεν έχουμε ορίσει το υλικό κατασκευής, επιλέγουμε το εικονίδιο Define material από το μενού και ανοίγει το παράθυρο materials, επιλέγουμε το υλικό κατασκευής από τη βιβλιοθήκη και με κλικ στο δεξί βέλος προσθέτουμε το υλικό στο αντικείμενο. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέγουμε AL2014.

Στη συνέχεια επιλέγουμε το εικονίδιο New Material Assignment για να εκχωρήσουμε τις ιδιότητες του υλικού (al2014) στη δοκό. Στο παράδειγμα που παρουσιάζετε υπάρχει ένα μόνο αντικείμενο προς ανάλυση για το λόγο αυτό υπάρχει ένα υλικό κατασκευής. Εάν επιθυμούσαμε να πραγματοποιήσουμε ανάλυση σε μια συναρμογή που τα μέρη της είναι κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά πρέπει αρχικά να ορίσουμε τα υλικά κατασκευής (Define material) και στη συνέχεια να ορίσουμε το υλικό κατασκευής και τις ιδιότητες του σε κάθε τμήμα της συναρμογής (New Material Assignment). Όμοια διαδικασία θα ακολουθούσαμε αν το αντικείμενο ήταν κατασκευασμένο από δυο επιμέρους υλικά για παράδειγμα εάν ο πυρήνας αποτελούνταν από διαφορετικό υλικό από εκείνο της επιφάνειας.

Στο επόμενο στάδιο θα καθορίσουμε τους περιορισμούς στη δοκό. Επιλέγουμε το εικονίδιο New Displacement Constraint από τη γραμμή εργαλείων, εμφανίζεται το παράθυρο Constraint όπου επιλέγουμε τους βαθμούς ελευθερίας σε κάθε άξονα (μεταφορά και περιστροφή). Επιλέγουμε μια από τις άκρες της δοκού για να εφαρμόσουμε τους περιορισμούς. Επιθυμούμε το άκρο της δοκού να είναι πακτωμένο έτσι επιλέγουμε οι άξονες να μην έχουν ελευθερία κινήσεων(fixed). Τέλος ονομάζουμε τη στήριξη για να μπορούμε να ξεχωρίζουμε τις στήριξεις στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε περισσότερες από μία.

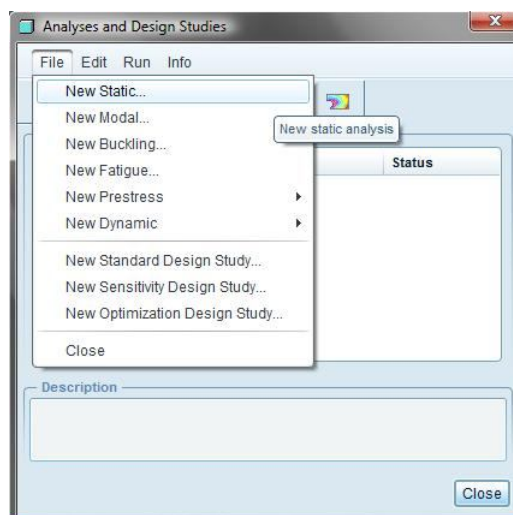
Επόμενο βήμα είναι να ορίσουμε το φορτίο που ασκείται στη δοκό. Επιλέγουμε το εικονίδιο New Force/Moment Load από τη γραμμή εργαλείων και εμφανίζεται το παράθυρο Force/Moment Load, τοποθετούμε τη δύναμη στην ελεύθερη επιφάνεια της δοκού. Επιλέγουμε να ασκήσουμε μια δύναμη 5000N στον κατακόρυφο άξονα Y στην αρνητική διεύθυνση, ορίζουμε ως συνιστώσα στον Y άξονα την τιμή -5000. Επιλέγοντας Preview μπορούμε να δούμε σχηματικά εάν έχουμε ορίσει σωστά το φορτίο. Τέλος ονομάζουμε το φορτίο. Αξίζει να σημειωθεί ότι το υλικό κατασκευής του αντικείμενου, οι οριακές συνθήκες και το φορτίο που ασκείται στο αντικείμενο είναι απαραίτητα στοιχεία που πρέπει να καθορίσουμε υποχρεωτικά πριν από κάθε είδος ανάλυσης.



Εικόνα 66: Τοποθέτηση φορτίου στο άκρο της δοκού

Έχουμε ορίσει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους και μπορούμε να ξεκινήσουμε την ανάλυση στη δοκό. Αρχικά επιλέγουμε το εικονίδιο Run a Design Study και εμφανίζεται το παράθυρο Analyses and Design Studies. Επιλέγουμε [File]→[New Static] και εμφανίζεται το παράθυρο Static Analysis Definition όπου περιλαμβάνει τη στήριξη και το φορτίο που ορίσαμε στο

προηγούμενο στάδιο.



Εικόνα 67: Δημιουργία νέας στατικής ανάλυσης

Στο παράθυρο Static Analysis Definition αρχικά ορίζουμε το όνομα της αναάλυσης και αν επιθυμούμε προσθέτουμε κάποια σχόλια στο πλαίσιο Description. Στο πλαίσιο Constraints επιλέγουμε ποιο περιορισμό θα χρησιμοποιήσουμε, υπάρχει και η επιλογή να χρησιμοποιήσουμε περισσότερους από έναν περιορισμό σε συνδιασμό επιλέγοντας το πλαίσιο Combine Constraint Sets. Στο πλαίσιο Loads επιλέγουμε το φορτίο που θα χρησιμοποιήσουμε, επιλέγοντας το πλαίσιο Sum Load Sets μπορούμε να συμπεριλάβουμε περισσότερα φορτία στην ανάλυση χρησιμοποιώντας τα φορτία αθρηστικά. Εάν η παραμόρφωση του αντικειμένου είναι μη γραμμική επιλέγουμε το πλαίσιο Nonlinear,



Εικόνα 68: Επιλογή παραμέτρων στη στατική ανάλυση

εμφανίζεται το πλαίσιο Nonlinear Options όπου μπορούμε να επιλέξουμε τα πλαίσια Calculate large deformations για να μπορούμε να υπολογίσουμε μεγάλες παραμορφώσεις του αντικειμένου. Ενεργοποιώντας το προηγούμενο πλαίσιο έχουμε πρόσβαση στο πλαίσιο Load intervals που μέχρι στιγμής ήταν ανενεργό. Μπορούμε να ορίσουμε από πόσα διαστήματα θα απαρτίζεται το φορτίο που ασκείται καθώς και να χωρίσουμε ισόποσα το φορτίο με την επιλογή Space equally. Κάτω από το πλαίσιο Loads υπάρχει το πλαίσιο Inertia

Relief. Χρησιμοποιούμε την επιλογή αδράνειας για να πραγματοποιήσουμε ανάλυση σε ένα μοντέλο χωρίς περιορισμούς. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτήν την επιλογή μόνο για μια γραμμική στατική ανάλυση. Χρησιμοποιώντας αυτή την επιλογή το Mechanica αναλύει το μοντέλο σαν να επιπλέει ελεύθερα στο χώρο χωρίς περιορισμούς μόνο με τα φορτία που ασκούνται. Στη συνέχεια μπορούμε να επεξεργαστούμε διάφορα στοιχεία στις εξής καρτέλες:

1. **Load intervals:** Αναφερθήκαμε και προηγουμένως στη συγκεκριμένη καρτέλα. Επιλέγοντας το πλαίσιο Nonlinear στις επιλογές που προσφέρονται στο χρηστή αναλογα με το είδος του υλικού διαφοροποιούνται, δηλαδή μπορούμε να συμπεριλάβουμε στους υπολογισμούς μας την υπερελαστικότητα και την πλαστικότητα (Hyperelasticity-Plasticity) εάν το υλικό κατασκευής που επιλέξαμε έχει τις αντίστοιχες ιδιότητες. Επίσης υπάρχει και το πλαίσιο Include Contacts που ενεργοποιείται όταν ορίσουμε τα σημεία επαφής μεταξύ δυο αντικειμένων όταν μελετούμε μια συναρμογή. Το συγκεκριμένο πλαίσιο ενεργοποιείται αυτόματα όταν ορίσουμε μια επαφή, εάν δεν θέλουμε να συμπεριλάβουμε τις επαφές μεταξύ των αντικειμένων πρέπει να απενεργοποιήσουμε την συγκεκριμένη επιλογή.
2. **Temperature Distributions:** Στη συγκεκριμένη καρτέλα μπορούμε να επεξεργαστούμε την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο αντικείμενο και στο περιβάλλον καθώς και θερμοκρασιακά φορτία που εφαρμόζονται στο αντικείμενο. Το πλαίσιο παραμένει ανενεργό όταν δεν ορίζονται φορτία θερμότητας.
3. **Convergence:** Στην καρτέλα για τον καθορισμό της σύγκλισης έχουμε τρεις επιλογές. Αρχικά θα αναφερθούμε στους τρόπους λειτουργίας των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται και στη συνέχεια θα αναφερθούμε στις παραμέτρους που μπορούμε να ορίσουμε για τον κάθε ένα ξεχωριστά.

Multi-Pass Adaptivity (MPA)

Ο αλγόριθμος Multi-Pass Adaptivity (επίλυση με διαδοχικά περάσματα) ήταν η πρώτη μέθοδος προσαρμογής της λύσης που χρησιμοποιήθηκε από το Pro / Mechanica. Αντί για την αύξηση του πολυωνύμου σε όλο το πλέγμα για κάθε πέρασμα, ο αλγόριθμος MPA προσπαθεί να προσδιορίσει ποιες περιοχές του μοντέλου απαιτούν πρόσθετη ακρίβεια και αυξάνει το πολυώνυμο κατά ένα ή δύο βαθμούς σε κάθε πέρασμα στις περιοχές αυτές.

Για τον εντοπισμό των ακμών που χρειάζονται μια πολυωνυμική αύξηση ο αλγόριθμος MPA συγκρίνει τις μετατοπίσεις και τις δυνάμεις στο τελευταίο πέρασμα με τις αντίστοιχες τιμές στην προηγούμενη διέλευση. Όταν η διαφορά είναι μεγαλύτερη από την ακρίβεια που έχει καθορίσει ο χρήστης, το πολυώνυμο αυξάνεται. Σε αντίθετη περίπτωση παραμένει αμετάβλητο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου τα απαιτούμενα κριτήρια σύγκλισης της λύσης συμπίπτουν με εκείνα που έχει ορίσει ο χρήστης. Τα κριτήρια αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν ποσοστιαίες διαφορές των ποσοτήτων για παράδειγμα η μετατόπιση και η τάση που αναπτύσσονται στο αντικείμενο αλλά μπορεί επίσης να περιλαμβάνει μετρήσεις που ορίζονται από το χρήστη.

Ο αλγόριθμος MPA χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές που αναπτύχθηκαν για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα να χαθούν πληροφορίες για τις περιοχές του μοντέλου που απαιτούν αυξημένη προσοχή, αν και οι τεχνικές αυτές βασίζονται κυρίως στην εμπειρία του χρήστη χρησιμοποιούνται αυτοματισμοί που επικεντρώνονται στα κρίσιμα σημεία του μοντέλου για να τελειοποιηθεί η λύση.

Παρόλο που δεν υπάρχει απόλυτη θεωρητική βάση για την προσέγγιση που βασίζεται στη σύγκριση ενός περάσματος με το επόμενο, μπορεί να εγγυηθεί την αποφυγή προβλημάτων στη σύγκλιση της λύσης. Εκ πείρας έχει αποδειχτεί ότι για τα περισσότερα προβλήματα μηχανικής ο αλγόριθμος MPA παρέχει μια καλή λύση ειδικά όταν οι περιορισμοί καθορίζονται από το χρήστη. Με τη βοήθεια του αλγορίθμου και την πείρα που διαθέτει ο χρήστης μπορούμε να εξάγουμε αποτελέσματα με εξαιρετική ακρίβεια σε περιοχές ειδικού ενδιαφέροντος (π.χ. για την συγκέντρωση τάσεων και τη δημιουργία ρωγμών στο μοντέλο).

Single-Pass Adaptivity (SPA)

Τα τελευταία χρόνια το Pro / Mechanics εισήγαγε έναν εναλλακτικό και θεωρητικά ανώτερο αλγόριθμο που ονομάζεται Single-Pass Adaptivity (προσαρμογή της λύσης με ένα πέρασμα) ο οποίος χρησιμοποιεί μια πιο αυστηρή μέθοδο για την εκτίμηση και τη βελτίωση της ακρίβειας της λύσης. Ο αλγόριθμος υπολογίζει τις τάσεις που ασκούνται στο μοντέλο με βάση την μετατόπιση που παρατηρείται μεταπηδώντας από ένα στοιχείο του πλέγματος στο επόμενο. Υπολογίζοντας τη διαφορά τάσης που παρατηρείται μεταξύ των στοιχείων του πλέγματος ο αλγόριθμος είναι εξαιρετικά ακριβής χωρίς να είναι απαραίτητο κάποιο άλλο πέρασμα, με τον τρόπο αυτό ο αλγόριθμος SPA υπολογίζει την μέση τάση που ασκείται γύρω από ένα στοιχείο.

Ο βαθμός του πολυώνυμου αυξάνεται στις ακμές των στοιχείων όπου παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές και παραμένει αμετάβλητος στα στοιχεία που παρουσιάζουν ομαλές μεταβάσεις.

Πειραματικά έχει αποδειχτεί ότι η μεγαλύτερη ακρίβεια με το μικρότερο λειτουργικό κόστος παρατηρείται στο πρώτο πέρασμα. Επομένως, ο πιο αποδοτικός τρόπος προσέγγισης είναι να ξεκινήσουμε με ένα πολυώνυμο χαμηλής τάξης. Παρατηρήθηκε ότι το πολυώνυμο τρίτου βαθμού $p=3$ είναι ο καλύτερος συμβιβασμός μεταξύ ακρίβειας και απόδοσης. Η μείωση του κόστους οφείλεται στο γεγονός ότι ο βαθμός του πολυωνύμου παραμένει αμετάβλητος για την πλειοψηφία των ακμών στο μοντέλο και αυξάνεται σε ένα μικρό ποσοστό ακμών στις κρίσιμες περιοχές.

Βασιζόμενοι στην εμπειρία των χρηστών και των μηχανικών ανάπτυξης του λογισμικού της PTC έχει αποδειχτεί ότι για την πλειονότητα των μηχανολογικών προβλημάτων, ο αλγόριθμος SPA παρέχει συνήθως μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τον MPA με σημαντικά χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος. Εμπειρικά και σε συνδυασμό με την καλή θεωρητική βάση στην οποία στηρίζεται ο αλγόριθμος SPA, σημαίνει ότι ο SPA θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως η προτιμώμενη μέθοδος σύγκλισης, όπου ενδείκνυται.

Quick Check

Εκτός από τι δυο μεθόδους προσαρμογής της λύσης μπορούμε να διενεργήσουμε και ένα γρήγορο έλεγχο για να βρούμε τη βέλτιστη λύση. Χρησιμοποιώντας την επιλογή Quick Check ορίζουμε ένα πολυώνυμο τρίτου βαθμού χωρίς να αυξάνουμε το βαθμό έτσι έχουμε μια γρήγορη και ακριβής προσέγγιση της λύσης. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως το πολυώνυμο τρίτου βαθμού $p=3$ είναι ο καλύτερος συμβιβασμός μεταξύ ακρίβειας και απόδοσης.

Αφού ολοκληρώσαμε την περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται θα δείξουμε τις παραμέτρους που μπορούμε να επεξεργαστούμε σε κάθε τύπο σύγκλισης.

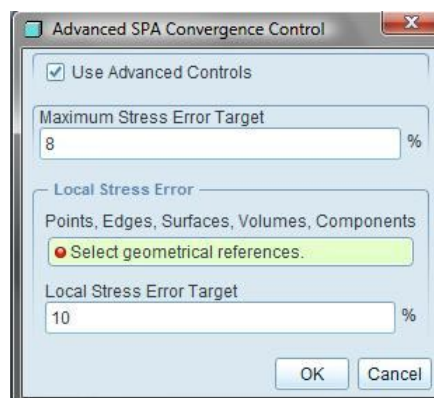
- Multi-Pass Adaptive: Στο συγκεκριμένο πλαίσιο μπορούμε να επεξεργαστούμε τον ελάχιστο και το μέγιστο βαθμό του πολυώνυμου. Οι τιμές που ορίζουμε για το ελάχιστο και το μέγιστο βαθμό του πολυώνυμου χρησιμοποιούνται από το Mechanica για την ανάλυση του μοντέλου. Μπορούμε να εισάγουμε έναν αριθμό από το 1 έως το 9. Η ελάχιστη προεπιλεγμένη τιμή είναι το 1 ενώ η μέγιστη προεπιλεγμένη

τιμή είναι το 6. Ο αλγόριθμος ξεκινά με όλες τις ακμές των στοιχείων στην ελάχιστη τιμή του πολυώνυμου και επαναλαμβάνει υπολογισμούς σε όλο και μεγαλύτερο βαθμό πολυώνυμο για κάθε ακμή μέχρι να φθάσει μία από τις ακόλουθες συνθήκες: Στο μέγιστο βαθμό πολυώνυμου που ορίσαμε ή το ποσοστό σύγκλισης. Ακόμα μια παράμετρος που μπορούμε να επεξεργαστούμε είναι και ο βαθμός σύγκλισης που προαναφέραμε. Ως βαθμός σύγκλισης ορίζεται η διαφορά των δύο τελευταίων υπολογισμών εάν η τιμή επαληθεύει το βαθμό σύγκλισης τότε η ανάλυση ολοκληρώνεται. Τέλος μπορούμε να ορίσουμε τα μεγέθη που θα συγκρίνει ο αλγόριθμος για να υπολογίσει το βαθμό σύγκλισης.

- Local Displacement and Local Strain Energy: Το Mechanica υπολογίζει τη σύγκλιση της λύσης από τη σύγκριση της μετατόπισης κατά μήκος κάθε ακμής και της συνολικής ενέργειας κάθε στοιχείου.
- Local Displacement, Local Strain Energy and Global RMS Stress: Ακολουθείται ίδια διαδικασία με την προηγούμενη επιλογή με ένα επιπλέον στοιχείο. Το Mechanica χρησιμοποιεί τη μέση τετραγωνική ρίζα (RMS) της πίεσης που δέχεται το αντικείμενο για να υπολογίσει το βαθμό σύγκλισης. Η μέση τετραγωνική ρίζα υπολογίζεται με βάση τα αποτελέσματα των τριών τελευταίων υπολογισμών. Αυτό έχει ως αποτελέσματα την αύξηση του χρόνου σύγκλισης. Η επιλογή παρέχει υψηλή ακρίβεια αλλά μπορεί επίσης να χρειάζεται μεγαλύτερο χρόνο υπολογισμού.
- Measures: Το Mechanica μπορεί να χρησιμοποιεί μια ή περισσότερες μετρήσεις για τον καθορισμό της σύγκλισης. Χρησιμοποιούμε αυτή την επιλογή για τον υπολογισμό της σύγκλισης αν ενδιαφερόμαστε για συγκεκριμένες παραμέτρους ή τοποθεσίες του αντικειμένου. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να βελτιώσουμε την ακρίβεια και να μειώσουμε τον χρόνο υπολογισμού.
- Single-Pass Adaptive: Στο συγκεκριμένο πλαίσιο μπορούμε να επεξεργαστούμε τις εξής επιλογές:
 - Localized Mesh Refinement: Με την επιλογή Εντοπισμένη βελτίωση του πλέγματος μπορούμε να βελτιώσουμε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων στα σημεία επαφής. Αυτή η

επιλογή είναι διαθέσιμη μόνο όταν πραγματοποιούμε ανάλυση σε συναρμογές.

- **Converge on contact forces:** Με την επιλογή Σύγκλιση στις δυνάμεις επαφής μπορούμε να εστιάσουμε στις δυνάμεις επαφής για τον βαθμό της σύγκλισης που επιθυμούμε. Αυτή η επιλογή είναι διαθέσιμη μόνο όταν πραγματοποιούμε ανάλυση σε συναρμογές.
- **Advanced Control:** Με την επιλογή Σύνθετος έλεγχος μπορούμε να στοχοποιήσουμε ένα σημείο, μια ακμή, μια επιφάνεια, έναν όγκο, ένα αντικείμενο για να ορίσουμε τις παραμέτρους που είναι απαραίτητες για τη σύγκλιση της λύσης. Επιλέγοντας το εικονίδιο **Advanced**



Εικόνα 69: Επιλογή σημείου σύγκλισης

Control εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε τις εξής επιλογές:

- 1) **Maximum Stress Error Target:** Ορίζουμε μια τιμή κινητής υποδιαστολής μικρότερη ή ίση με το 100 για τον στόχο του σφάλματος της μέγιστης τάσης στο μοντέλο. Η προεπιλεγμένη τιμή του μέγιστου στόχου σφάλματος εξαρτάται από το είδος της ανάλυσης, για την στατική ανάλυση η προεπιλογή είναι 8. Χρησιμοποιούμε μικρότερη τιμή για να αυξήσουμε την ακρίβεια της ανάλυσης
 - 2) **Local Stress Error:** Στο συγκεκριμένο πλαίσιο μπορούμε να επιλέξουμε διαφορετικές θέσεις στο αντικείμενο ως στόχο. Κρατάμε πατημένο το πλήκτρο CTRL για να επιλέξουμε περισσότερους από ένα στόχους.
 - 3) **Local Stress Error Target:** Ορίζουμε μια θετική τιμή κινητής υποδιαστολής μικρότερη του 100 για τον στόχο σε τοπικό επίπεδο. Ο τοπικός στόχος σφάλματος στρες έχει προκαθορισμένη τιμή 10%. Χρησιμοποιούμε μικρότερη τιμή για να αυξήσουμε την ακρίβεια της ανάλυσης.
- **Quick Check:** Στο πλαίσιο γρήγορος έλεγχος δεν μπορούμε να επεξεργαστούμε κάποιες παραμέτρους. Ο προεπιλεγμένος βαθμός του πολυωνύμου είναι 3.

Σημείωση: Εάν το πλαίσιο Nonlinear είναι ενεργοποιημένο, στις μεθόδους σύγκλισης SPA και Quick Check παρατηρείται το πλαίσιο επιλογής Include Snap-through. Με την χρήση της συγκεκριμένης επιλογής μπορούμε να μελετήσουμε τα κρίσιμα σημεία σε μια μη γραμμική παραμόρφωση. Ως κρίσιμα σημεία ορίζονται εκείνα που παρατηρείται παραμόρφωση στη δομή του αντικειμένου χωρίς την μεταβολή της ασκούμενης δύναμης.

4. **Output:** Στη συγκεκριμένη καρτέλα μπορούμε να επιλέξουμε ποια μεγέθη θα υπολογίσει το Mechanica.

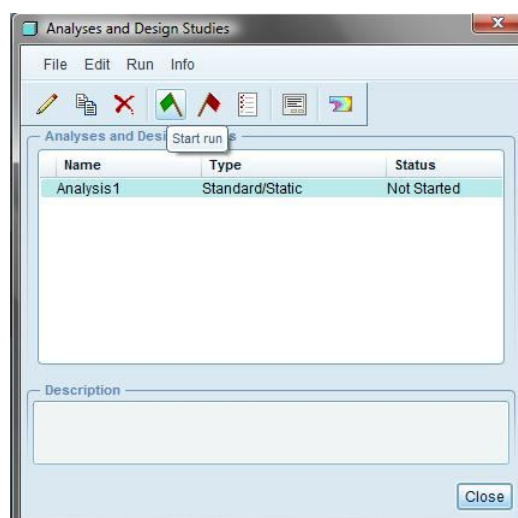
- **Stresses:** Επιλέγοντας το συγκεκριμένο πλαίσιο κατευθύνουμε το Mechanica να υπολογίσει τις τάσεις που ασκούνται. Αν δεν χρειαζόμαστε τα αποτελέσματα των τάσεων ειδικά στην ιδιομορφική ανάλυση (modal) και στη δυναμική ανάλυση (dynamic), δεν επιλέγουμε το πλαίσιο έτσι μπορούμε να εξοικονομήσουμε χώρο και χρόνο καθώς μειώνει δραματικά το χρόνο ανάλυσης.
- **Rotations:** Επιλέγοντας το συγκεκριμένο πλαίσιο κατευθύνουμε το Mechanica να υπολογίσει την περιστροφή γύρω από κάθε άξονα στο μοντέλο.
- **Reactions:** Επιλέγοντας το συγκεκριμένο πλαίσιο κατευθύνουμε το Mechanica να υπολογίσει τις δυνάμεις και τις ροπές που υπάρχουν σε σημεία που έχουμε ορίσει περιορισμούς και στα άκρα.
- **Local Stress Errors:** Επιλέγοντας το συγκεκριμένο πλαίσιο κατευθύνουμε το Mechanica να υπολογίσει τις τοπικές εκτιμήσεις σφάλματος.

Έκτος από τα είδη των αποτελεσμάτων που μπορούμε να εξάγουμε, στο πλαίσιο Output μπορούμε να διαμορφώσουμε τη χάραξη του πλέγματος (Plotting Grid). Όταν ορίζουμε μια ανάλυση, μπορούμε να καθορίσουμε τη βελτίωση της σχεδίασης πλέγματος, την οποία θα χρησιμοποιήσει το Mechanica για να εξάγει τα αποτελέσματα. Η τιμή που ορίζουμε καθορίζει τον αριθμό των διαστημάτων κατά μήκος κάθε ακμής του κάθε στοιχείου που αποτελεί το πλέγμα. Το Mechanica υπολογίζει τις τιμές στα σημεία τομής των γραμμών του πλέγματος. Μπορούμε να εισάγουμε ένα αριθμό από το 2 έως το 10 για να καθορίσουμε το επίπεδο λεπτομέρειας. Όσο μεγαλύτερη τιμή επιλέγουμε τόσο μεγαλύτερη λεπτομέρεια έχει το πλέγμα. Η προεπιλεγμένη για τη σχεδίαση του δικτύου του 4, συνήθως είναι επαρκής. Αυξάνουμε τη λεπτομέρεια του πλέγματος όταν παρατηρήσουμε ότι η τάση μεταβάλλεται γρήγορα πάνω από ένα στοιχείο, έτσι επιλέγουμε μια μεγαλύτερη τιμή ώστε να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια. Η στρατηγική αυτή βελτιώνει την ποιότητα της

ανάλυσης αλλά αυξάνει το χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση της καθώς και το μέγεθος των εξαγόμενων αρχείων.

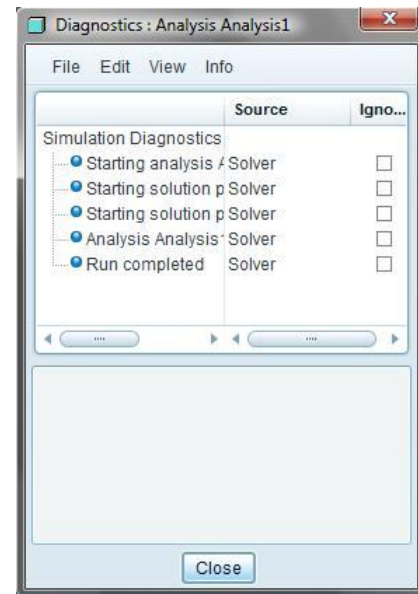
5. **Exclude Elements:** Στη καρτέλα Αποκλεισμός στοιχείων μπορούμε να αποκλείσουμε κάποια στοιχεία από την ανάλυση τα οποία έχουν επιλέγει αυτόματα από τον καθορισμό του πλέγματος. Επιλέγοντας το πλαίσιο Exclude Elements μπορούμε να επεξεργαστούμε τις παρακάτω επιλογές.
- Ignore for normalizing stress errors: Αυτή η επιλογή είναι διαθέσιμη μόνο στη σύγκλιση Single-Pass Adaptive. Μπορούμε να κατευθύνουμε το Mechanica να αγνοεί πιέσεις σε συγκεκριμένες περιοχές όπου δεν παρατηρούνται λάθη κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Βελτιώνει τη συνολική ακρίβεια και τη διάρκεια της ανάλυσης.
 - Στο πλαίσιο Ignore μπορούμε να επιλέξουμε ποια κριτήρια θα αγνοήσει το λογισμικό σε περιοχές που δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον όταν έχουμε επιλέξει Multi-Pass Adaptive ως μέθοδο σύγκλισης. Μπορούμε να επιλέξουμε μία από τις παρακάτω επιλογές:
 - Stresses: Το Mechanica αγνοεί τις καταπονήσεις που δέχονται τα αποκλεισμένα στοιχεία στους υπολογισμούς κατά τη διάρκεια του ελέγχου σύγκλισης.
 - Stresses and Displacements: Το Mechanica αγνοεί τις καταπονήσεις και τις μετατοπίσεις που δέχονται τα αποκλεισμένα στοιχεία στους υπολογισμούς κατά τη διάρκεια του ελέγχου σύγκλισης.
 - Στο πλαίσιο Limit μπορούμε να επιλέξουμε μέχρι ποιο σημείο της σύγκλισης θα πραγματοποιείται έλεγχος στα αποκλεισμένα στοιχεία. Επιλέγουμε το βαθμό του πολυωνύμου σαν όριο για τη χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων στη μέθοδο σύγκλισης MPA. Αν δεν επιλέξουμε κάποιο όριο τα αποτελέσματα δεν λαμβάνονται υπόψη.

Για να ξεκινήσουμε την ανάλυση επιλέγουμε την πράσινη σημαία (Run Study) από τη γραμμή εργαλείων στο παράθυρο Analyses and Design Studies.



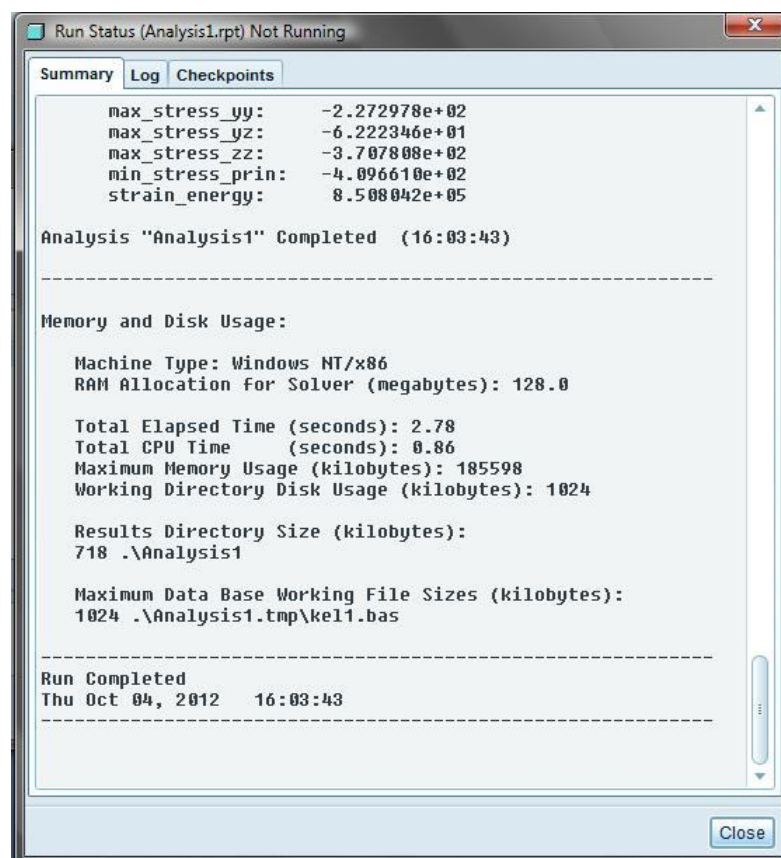
Εικόνα 70: Παράθυρο επεξεργασίας της ανάλυσης

Αρχικά ζητείτε να πραγματοποιηθεί διαγνωστικός έλεγχος για τυχόν λάθη και παραλείψεις στο αντικείμενο, εμφανίζετε το παράθυρο “Diagnostics” και διεξάγεται έλεγχος. Εφόσον δεν διαπιστωθούν λάθη συνεχίζουμε κλείνοντας το παράθυρο.



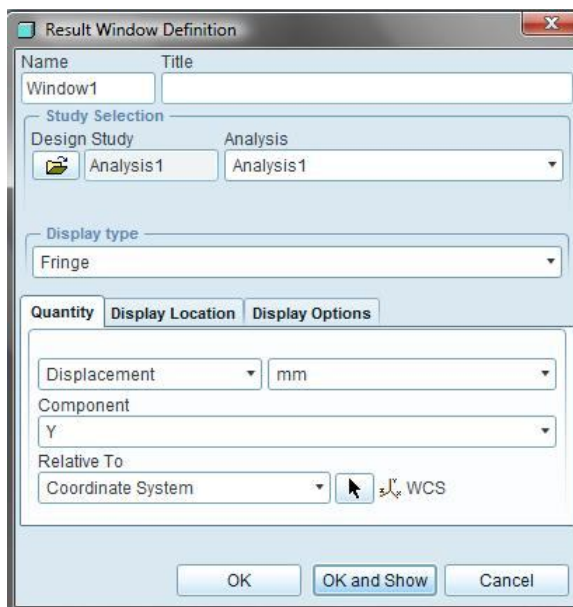
Εικόνα 71: Παράθυρο διάγνωσης αστοχιών

Επιλέγουμε το εικονίδιο Display Study Status όπου εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις που ασκούνται στο μοντέλο.



Εικόνα 72: Παράθυρο αναλυτικής παρουσίασης της ανάλυσης

Όταν ολοκληρωθεί η ανάλυση επιλέγουμε το εικονίδιο “Review Results of a Design Study or Finite Element Analysis” και εμφανίζεται το παράθυρο “Result Window Definition” όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα που θα εξάγουμε από την ανάλυση που πραγματοποιήσαμε. Αρχικά επιλέγουμε το όνομα και τον τίτλο του παραθύρου που πρόκειται να δημιουργήσουμε. Στη συνέχεια



Εικόνα 73: Παράθυρο επεξεργασίας εμφάνισης των αποτελεσμάτων στη στατική ανάλυση

στο πλαίσιο Study Selection επιλέγουμε την σχεδιαστική μελέτη και την ανάλυση που θα

χρησιμοποιήσει το λογισμικό για να δημιουργήσει τα αποτελέσματα. Στο επόμενο πλαίσιο Display Type μπορούμε να επιλέξουμε τον τύπο απεικόνισης των αποτελεσμάτων, οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής:

- **Fringe:** Επιλέγοντας τον συγκεκριμένο τύπο απεικόνισης δημιουργείται μια γραφική αναπαράσταση του μοντέλου. Οι μετρήσεις για την ποσότητα που έχουμε ορίσει παρουσιάζονται με διάφορα χρώματα όπου το κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε μια αριθμητική κλίμακα. Μπορούμε επίσης με τον συγκεκριμένο τύπο να δημιουργήσουμε το περίγραμμα του μοντέλου στην αρχική του μορφή.
- **Vectors:** Επιλέγοντας τον συγκεκριμένο τύπο απεικόνισης δημιουργείται μια γραφική αναπαράσταση του μοντέλου που παρουσιάζει τις μετρήσεις και τις κατευθύνσεις της ποσότητας που έχουμε επιλέξει ως χρωματιστά διανύσματα.
- **Graph:** Επιλέγοντας τον συγκεκριμένο τύπο απεικόνισης δημιουργείται ένα γράφημα που παρουσιάζει τη συμπεριφορά του μοντέλου. Στο γράφημα η μια συνιστώσα είναι η ποσότητα που έχουμε επιλέξει και η άλλη διαφέρει ανάλογα με το είδος της ανάλυσης που πραγματοποιούμε, μπορεί να είναι ο χρόνος, η συχνότητα, τα περάσματα που πραγματοποιεί ο αλγόριθμος, μια ακμή ή μια καμπύλη. Επιλέγοντας το πλαίσιο Graph απενεργοποιούνται οι καρτέλες Display Location και Display Options ενώ στην καρτέλα Quantity πρέπει να επιλέξουμε τις συνιστώσες των αξόνων του γραφήματος.

- Model: Επιλέγοντας τον συγκεκριμένο τύπο απεικόνισης δημιουργείται μια γραφική αναπαράσταση του μοντέλου που παρουσιάζει τη γεωμετρία του μοντέλου σε αρχική ή σε παραμορφωμένη κατάσταση. Οι αναπαραστάσεις του μοντέλου είναι χρήσιμες αν θέλουμε να παρουσιάσουμε ένα βίντεο για το πώς το μοντέλο παραμορφώνεται ή εάν θέλουμε να δούμε το βελτιστοποιημένο σχήμα του μοντέλου.

Στο κάτω μέρος του παράθυρου μπορούμε να επεξεργαστούμε διαφορές παραμέτρους στις παρακάτω καρτέλες.

1. Quantity: Στην καρτέλα ποσότητα μπορούμε να επιλέξουμε το μέγεθος που θα παρουσιάσουμε στη γραφική απεικόνιση. Αφού επιλέξουμε μια ποσότητα από το πρώτο μενού επιλογών, μπορεί να παρουσιαστούν επιπλέον μενού επιλογών ή εικονίδια που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ανάλογα με το ποια ποσότητα έχουμε επιλέξει. Οι κυρίες επιλογές που έχουμε είναι οι εξής:

➤ Stress: Στο συγκεκριμένο πλαίσιο το Mechanics υπολογίζει την τάση που ασκείται στο μοντέλο. Μπορούμε να επιλέξουμε τις μονάδες μέτρησης καθώς και τις συνιστώσες της τάσης στο πλαίσιο Components. Μπορούμε να επιλέξουμε μια από τις παρακάτω συνιστώσες.

- Max Principal: Μέγιστη κύρια τάση.
- Min Principal: Ελάχιστη κύρια τάση.
- Mid Principal: Η κύρια τάση που έχει αριθμητική τιμή μεταξύ της μέγιστης και της ελαχίστης κύριας τάσης.

Σημείωση: Μπορούμε να επιλέξουμε όλες τις κυρίες τάσεις όταν έχουμε επιλέξει ως τύπος απεικόνισης τα διανύσματα (Vectors).

- von Mises: Συνδυασμός όλων των συνιστωσών της τάσης.
- Maximum Shear: Μεγίστη διατμητική τάση. Το ήμισυ της μέγιστης απόλυτης διαφοράς μεταξύ των κύριων τάσεων.
- XX: Κανονική τάση κατά μήκος του άξονα X.
- XY: Διατμητική τάση που ενεργεί στην κατεύθυνση Y σε επίπεδο που είναι παράλληλο προς τον άξονα X.
- XZ: Διατμητική τάση που ενεργεί κατά τη διεύθυνση Z σε επίπεδο που είναι παράλληλο προς τον άξονα X. Αυτή η συνιστώσα είναι διαθέσιμη μόνο για 3D μοντέλα.
- YY: Κανονική τάση κατά μήκος του άξονα Y.
- YZ: Διατμητική τάση που ενεργεί κατά τη διεύθυνση Z σε επίπεδο που είναι παράλληλο προς τον άξονα Y. Αυτή η συνιστώσα είναι διαθέσιμη μόνο για 3D μοντέλα.

- ZZ: Κανονική τάση κατά μήκος του άξονα Z. Αυτή η συνιστώσα είναι διαθέσιμη μόνο για 3D μοντέλα.
 - Displacement: Στο συγκεκριμένο πλαίσιο το Mechanica υπολογίζει την μετατόπιση που υφίσταται το μοντέλο. Μπορούμε να επιλέξουμε τις μονάδες μέτρησης καθώς και τις συνιστώσες της μετατόπισης στο πλαίσιο Components. Μπορούμε να επιλέξουμε μια από τις παρακάτω συνιστώσες.
 - X: Η μετατόπιση στον άξονα X.
 - Y: Η μετατόπιση στον άξονα Y.
 - Z: Η μετατόπιση στον άξονα Z. Αυτή η συνιστώσα είναι διαθέσιμη μόνο για 3D μοντέλα.
 - Magnitude: Η μετατόπιση του μοντέλου και στις τρεις διευθύνσεις.
 - Strain: Στο συγκεκριμένο πλαίσιο το Mechanica υπολογίζει την παραμόρφωση που υφίσταται το μοντέλο. Μπορούμε να επιλέξουμε τις συνιστώσες της παραμόρφωσης στο πλαίσιο Components. Οι συνιστώσες που μπορούμε να επιλέξουμε είναι όμοιες με τις συνιστώσες της τάσης εκτός από τις επιλογές von Mises και Maximum Shear.
 - Strain Energy: Στο συγκεκριμένο πλαίσιο το Mechanica υπολογίζει την ενεργεία παραμόρφωσης. Εμφανίζει την ενεργεία που ασκείται σε όλο το μοντέλο.
 - P-Level: Στο συγκεκριμένο πλαίσιο το Mechanica εμφανίζει το πλέγμα των στοιχείων που αποτελούν το μοντέλο. Το πολυώνυμο υπολογίζει τα μεγέθη που έχουμε επιλέξει κατά μήκος κάθε ακμής κάθε στοιχείου στο πλέγμα. Το πάχος των γραμμών που αντιπροσωπεύουν τις ακμές του στοιχείου εξαρτάται από βαθμό του πολυωνύμου. Όσο αυξάνεται ο βαθμός του πολυωνύμου τόσο αυξάνεται και το πάχος της γραμμής.
2. Display Location: Στη καρτέλα εμφάνιση τοποθεσίας μπορούμε να επιλέξουμε ποια στοιχειά θα παρουσιάζονται στην αναπαράσταση του μοντέλου. Μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε καμπύλες (Curves), επιφάνειες (Surfaces), όγκους (Volumes), συνιστώσες/στρώσεις (Components/Layers), η προεπιλογή από το λογισμικό είναι να εμφανίζονται όλα τα στοιχειά. Οι επιλογές διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο απεικόνισης που έχουμε επιλέξει αρχικά. Στους τύπους απεικόνισης Fringe και Vectors είναι διαθέσιμες όλες οι παραπάνω επιλογές, στην απεικόνιση Graph η καρτέλα Display Location είναι απενεργοποιημένη και στον τύπο Model εμφανίζονται όλα τα στοιχειά.

3. Display Options: Στη καρτέλα επιλογές εμφάνισης μπορούμε να επεξεργαστούμε την εμφάνιση του μοντέλου στην γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, οι επιλογές διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο απεικόνισης που έχουμε επιλέξει αρχικά. Θα αναλύσουμε τις επιλογές που προσφέρονται από το λογισμικό ανά τύπο απεικόνισης.

➤ Fringe

- Continuous Tone: Εμφανίζει τα περιθώρια του μοντέλου με συνεχείς χρωματισμούς δηλαδή η μετάβαση από τον ένα χρωματισμό στον άλλο γίνεται ομοιόμορφα. Αν δεν επιλέξετε τους συνεχείς χρωματισμούς οι διακυμάνσεις των μεγεθών στο μοντέλο εμφανίζονται σε διακριτά χρώματα. Επίσης μπορούμε να επιλέξουμε πόσα διαφορετικά χρώματα θα χρησιμοποιούνται, η προεπιλογή είναι 9, η ελάχιστη τιμή είναι 2 ενώ η μέγιστη 15.
- Contour: Εμφανίζει διακυμάνσεις των μεγεθών στο μοντέλο με ισοϋψείς καμπύλες. Επιλέγοντας το συγκεκριμένο πλαίσιο ενεργοποιούνται τα πλαίσια Contours Label και IsoSurfaces. Η απεικόνιση του μοντέλου με γραμμές περιγράμματος συνίσταται για 2D μοντέλα. Για στερεά μοντέλα μπορούμε να έχουμε μια πιο κατατοπιστική απεικόνιση του μοντέλου, εάν επιλέξουμε το πλαίσιο IsoSurfaces. Επιλέγουμε το πλαίσιο Contours Label για να εμφανίσουμε την τιμή κάθε καμπύλης περιγράμματος απευθείας στο παράθυρο αποτελεσμάτων. Τα χρωματιστά περιγράμματα παρέχουν αρκετές πληροφορίες για τις διακυμάνσεις των μεγεθών στο μοντέλο. Επιλέγουμε το πλαίσιο IsoSurfaces για να απεικονίσουμε το περίγραμμα με ισοεπιφάνειες αντί για γραμμές. Οι ισοεπιφάνειες μπορεί να μας βοηθήσουν να χαρτογραφήσουν το εσωτερικό του μοντέλου επειδή μας επιτρέπουν να δούμε πώς μια ποσότητα μεταβάλλεται μέσα σε στερεά στοιχεία.
- Deformed: Εμφανίζει μοντέλο στην παραμορφωμένη κατάσταση του. Επιπλέον μπορούμε να εμφανίσουμε μια μη παραμορφωμένη κατάσταση του μοντέλου πάνω από το παραμορφωμένο μοντέλο με τη μορφή πλέγματος ή μια διαφανή έκδοση του μοντέλου. Ενεργοποιώντας το πλαίσιο Deformed μπορούμε να επιλέξουμε τα παρακάτω πλαίσια. Overlay Undeformed: Προσθέτει το μη παραμορφωμένο μοντέλο σε μορφή πλέγματος πάνω από το παραμορφωμένο μοντέλο στο παράθυρο αποτελεσμάτων. Transparent Overlay: Προσθέτει το μη παραμορφωμένο μοντέλο σε διαφανή μορφή πάνω από το παραμορφωμένο μοντέλο στο παράθυρο αποτελεσμάτων. Scaling: Εισάγουμε ένα θετικό πραγματικό αριθμό ή μια τιμή για το ποσοστό κλιμάκωσης. Για να

ορίσουμε το ποσοστό κλιμάκωσης θα πρέπει να επιλέξουμε το πλαίσιο % μετά από την τιμή, η προεπιλογή είναι 10% . Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι το μέγεθος του μοντέλου είναι 10 mm και η μέγιστη μετατόπιση του είναι 0.05 mm. Εάν εισάγουμε ένα συντελεστή κλίμακας της τάξης του 3% τότε το Mechanica εμφανίζει ένα παραμορφωμένο μοντέλο με μέγιστη μετατόπιση ίση με $10 \text{ mm} * 0,03$ (δηλαδή 3%) = 0,3 mm. Εάν εισάγουμε ως συντελεστή κλίμακας 3 τότε το Mechanica εμφανίζει ένα παραμορφωμένο μοντέλο με μέγιστη μετατόπιση ίση με $0,05 \text{ mm} * 3 = 0,15 \text{ mm}$.

- Show Element Edges: Εμφανίζει τα άκρα των στοιχείων στο μοντέλο στο παράθυρο των αποτελεσμάτων.
- Show Loads: Εμφανίζει τα εικονίδια των φορτίων που ασκούνται στο μοντέλο στο παράθυρο των αποτελεσμάτων.
- Show Constraints: Εμφανίζει τα εικονίδια των περιορισμών του μοντέλου στο παράθυρο των αποτελεσμάτων.
- Show Bonding Elements: Εμφανίζει τα στοιχεία σύνδεσης στο μοντέλο στο παράθυρο των αποτελεσμάτων.
- Animate: Επιλέγοντας το συγκεκριμένο πλαίσιο μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα βίντεο που παρουσιάζονται οι μέτρησης των επιλεγμένων μεγεθών στο παράθυρο των αποτελεσμάτων. Στο βίντεο που δημιουργείται οι τιμές της ποσότητας που έχουμε επιλέξει εμφανίζονται σταδιακά σε βήματα. Στο πρώτο καρέ παρουσιάζεται το μοντέλο χωρίς φορτία ενώ στο τελευταίο καρέ παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα. Στα ενδιάμεσα στάδια παρουσιάζεται το μοντέλο υπό την επήρεια του αυξανόμενου φορτίου. Ενεργοποιώντας το πλαίσιο Animate ενεργοποιούνται και τα παρακάτω πλαίσια. Auto Start: Ξεκινά το βίντεο μόλις ενεργοποιείται το παράθυρο αποτελεσμάτων. Playback Mode: Στο συγκεκριμένο πλαίσιο μπορούμε να επιλέξουμε τον τρόπο αναπαραγωγής, οι επιλογές είναι οι παρακάτω. Repeat: Επαναλαμβανομένη κίνηση, το μοντέλο κινείται από τη μηδενική έως τη μέγιστη παραμόρφωση σε ίσα βήματα. Reverse: Αντίστροφη κίνηση, το μοντέλο κινείται από τη μηδενική έως τη μέγιστη παραμόρφωση και πίσω στην αρχική θέση σε ίσα βήματα. Alternating: Παλινδρομική κίνηση, το μοντέλο κινείται από τη μηδενική έως τη μέγιστη παραμόρφωση και πίσω στην αρχική θέση, στη συνέχεια κινείται στη μέγιστη αρνητική παραμόρφωση και κατόπιν πίσω στην αρχική θέση σε άνισα βήματα.

- Frames: Εισάγουμε τον αριθμό των καρέ που θέλουμε να υπάρχουν στο βίντεο σε ένα κύκλο. Ο προεπιλεγμένος αριθμός των καρέ είναι 8 επίσης ο αριθμός των καρέ πρέπει να είναι πολλαπλάσιο του 4 για να μπορεί το μοντέλο να εκτελέσει μια πλήρη κίνηση.

➤ Vectors

- Wireframe Vectors - Shaded Vectors: Επιλέγουμε αν τα διανύσματα θα εμφανίζονται ως νήματα ή ως πολύγωνα.
- Legend Levels: Επιλέγουμε τον αριθμό των χρωματισμών που χρησιμοποιούνται στο παράθυρο των αποτελεσμάτων. Η ελάχιστη τιμή είναι 2 και η μέγιστη 15. Επίσης η προεπιλογή είναι 9.
- Max Length: Εισάγουμε ένα πραγματικό θετικό αριθμό για να ορίσουμε το μέγιστο μήκος των διανυσμάτων. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 5.
- Οι υπόλοιπες επιλογές στον τύπο απεικόνισης Vectors είναι όμοιες με εκείνες στον τύπο Fringe όσον αφορά το πλαίσιο Deformed και το πλαίσιο Animate.

➤ Graph

Στον τύπο απεικόνισης των αποτελεσμάτων με γραφήματα δεν μπορούμε να δημιουργήσουμε βίντεο για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων έτσι η καρτέλα Display Options είναι απενεργοποιημένη.

➤ Model

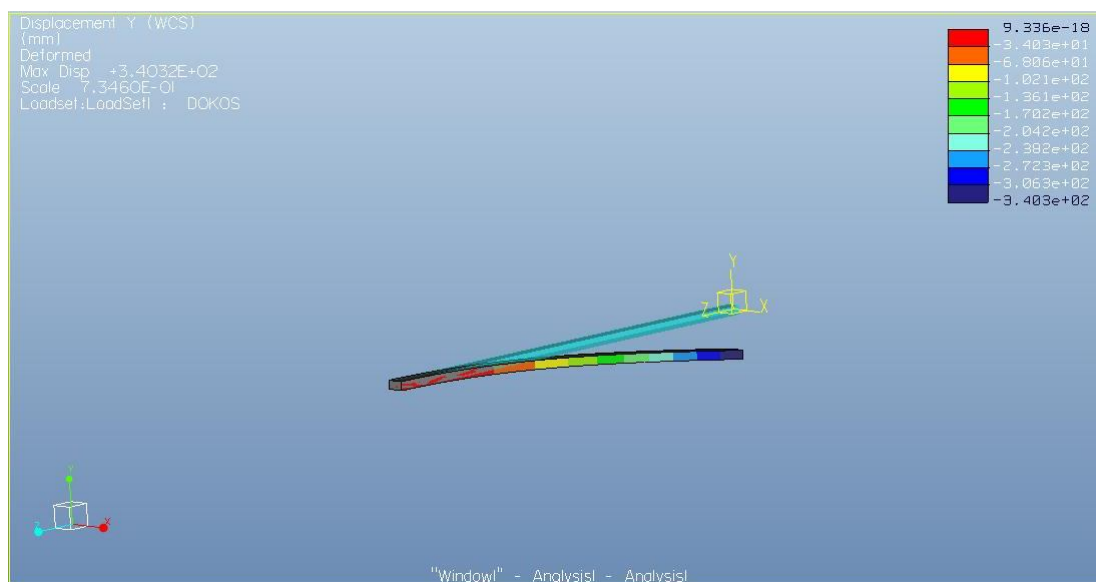
Στον τύπο απεικόνισης Model τα πλαίσια που μπορούμε να ενεργοποιήσουμε είναι τα εξής:

- Show Element Edges
- Show Loads
- Show Constraints
- Show Bonding Elements

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης της δοκού χρησιμοποιώντας διάφορους τρόπους απεικόνισης για τα εξεταζόμενα μεγέθη για να κατανοήσουμε καλύτερα τη χρήση των διάφορων επίλογων που προσφέρονται από το λογισμικό.

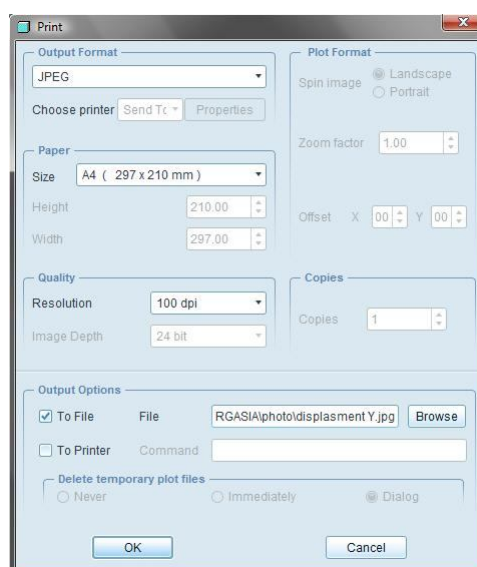
Αρχικά θα μελετήσουμε τη μετατόπιση που έχει υποστεί η ράβδος από τη δύναμη που ασκήθηκε. Επιλέγουμε τον τύπο απεικόνισης Fringe και ως εξεταζόμενο μέγεθος επιλέγουμε Displacement. Θα μελετήσουμε την μετατόπιση στον άξονα Y αφού μόνο στον συγκεκριμένο άξονα ασκείται το φορτίο που έχουμε ορίσει. Στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στη καρτέλα Display Options αφήνουμε απενεργοποιημένο το πλαίσιο Continuous Tone ενώ στο πλαίσιο Deformed επιλέγουμε Transparent Overlay.

Για να συνεχίσουμε στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων επιλέγουμε “Ok and Show”. Στο νέο παράθυρο παρατηρούμε πάνω αριστερά τις παρέδρους της ανάλυσης και την μέγιστη μετατόπιση που παρατηρείται. Στο κέντρο παρατηρείται η δοκός με διαβάθμιση χρωμάτων και πάνω δεξιά η κλίμακα που χρησιμοποιείται στην ανάλυση.



Εικόνα 74: Απεικόνιση μέγιστης μετατόπισης

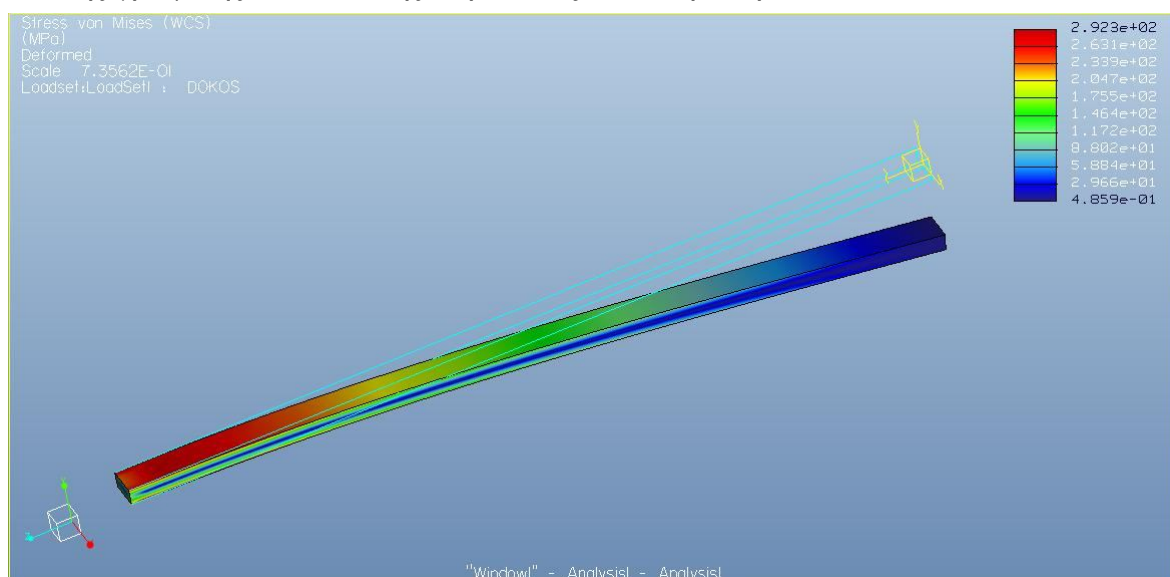
Για να αποθηκεύσουμε τα αποτελέσματα επιλέγουμε [File] → [Export] → Image ορίζουμε τον φάκελο που θα αποθηκευτεί, το όνομα, και το είδος της εικόνας.



Εικόνα 75: Εξαγωγή αποτελεσμάτων μέσω εικόνων

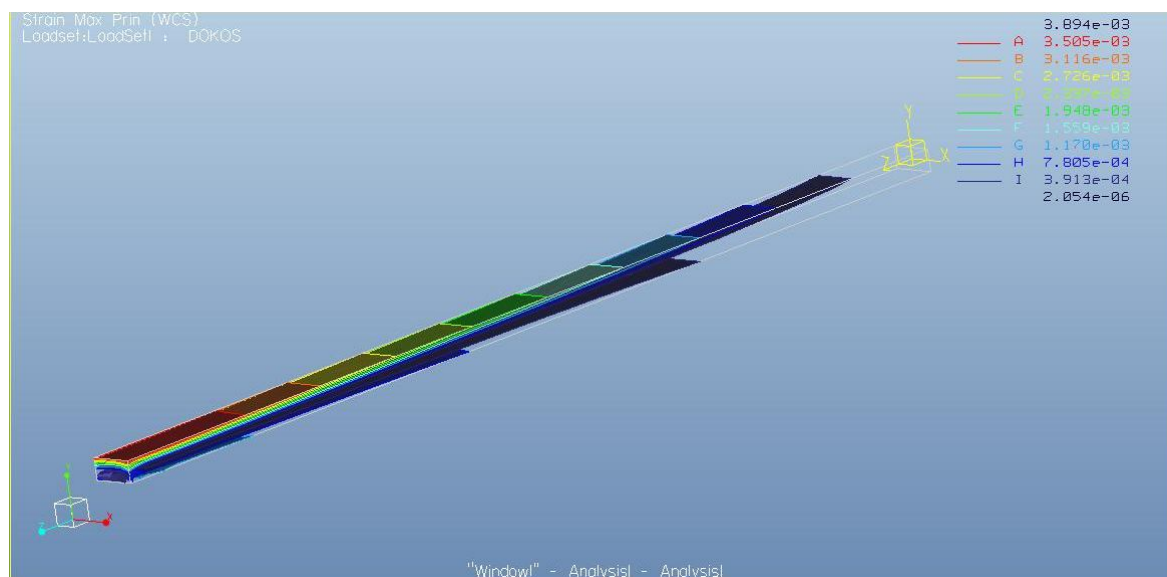
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία μπορούμε να εξάγουμε διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με ζητούμενο αποτέλεσμα. Στο επόμενο παράδειγμα εξετάζουμε την τάση που αναπτύσσεται στη δοκό εάν ασκήσουμε ένα φορτίο 5000N στην άκρη της. Επιλέγουμε τον τύπο απεικόνισης Fringe και ως εξεταζόμενο μέγεθος Stress. Στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στη καρτέλα Display Options ενεργοποιούμε το πλαίσιο Continuous Tone

ενώ στο πλαίσιο Deformed επιλέγουμε Overlay Undeformed. Το αποτέλεσμα της γραφικής απεικόνισης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



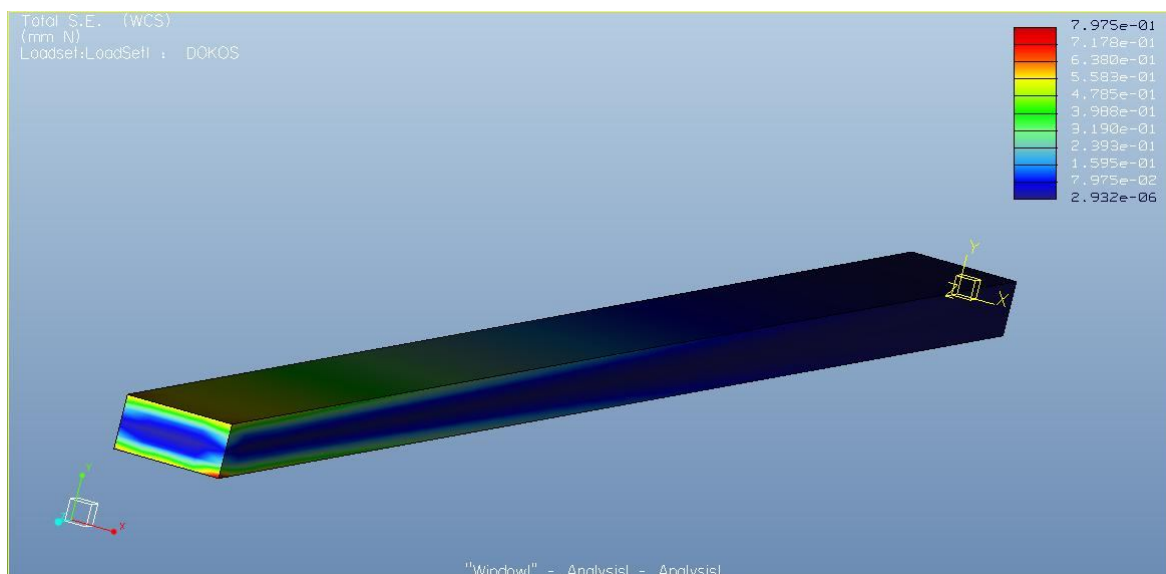
Εικόνα 77: Απεικόνιση μέγιστης τάσης

Για να δημιουργήσουμε ένα νέο παράθυρο εμφάνισης αποτελεσμάτων δεν είναι απαραίτητο να ανατρέχουμε συνεχώς στο αρχικό παράθυρο καθορισμού των παραμέτρων, μπορούμε να επιλέξουμε στο παράθυρο αποτελεσμάτων το εικονίδιο Copy the selected definition και να συνεχίσουμε με την επιλογή ενός νέου μεγέθους ή ακόμα να τροποποιήσουμε τις επιλογές στο παράθυρο αποτελεσμάτων. Στη παρακάτω απεικόνιση επιλέγουμε ως τύπο απεικόνισης Fringe και ως εξεταζόμενο μέγεθος την παραμόρφωση (Strain). Ως συνιστώσα της παραμόρφωσης επιλέγουμε Max Principal. Στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στη καρτέλα Display Options ενεργοποιούμε το πλαίσιο Contour και το πλαίσιο IsoSurfaces και αφήνουμε απενεργοποιημένο το πλαίσιο Deformed. Το αποτέλεσμα της γραφικής απεικόνισης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



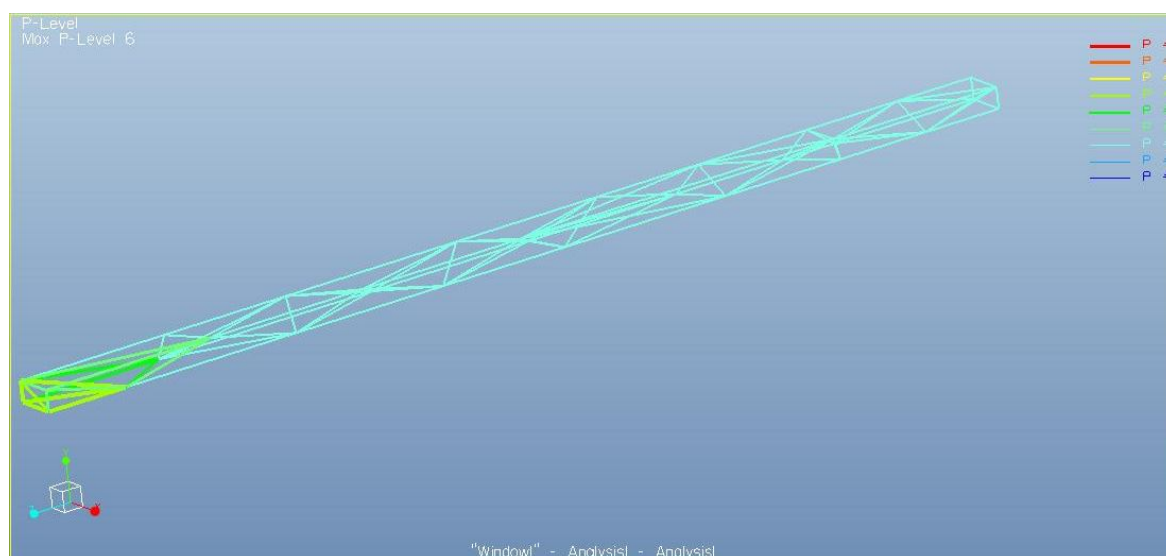
Εικόνα 76: Απεικόνιση της παραμόρφωσης σε στρώματα

Στη παρακάτω απεικόνιση επιλέγουμε ως τύπο απεικόνισης Fringe και ως εξεταζόμενο μέγεθος την συνολική ενεργεία παραμόρφωσης (Total Strain Energy). Στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στη καρτέλα Display Options ενεργοποιούμε το πλαίσιο Continuous Tone και αφήνουμε απενεργοποιημένο το πλαίσιο Deformed. Το αποτέλεσμα της γραφικής απεικόνισης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



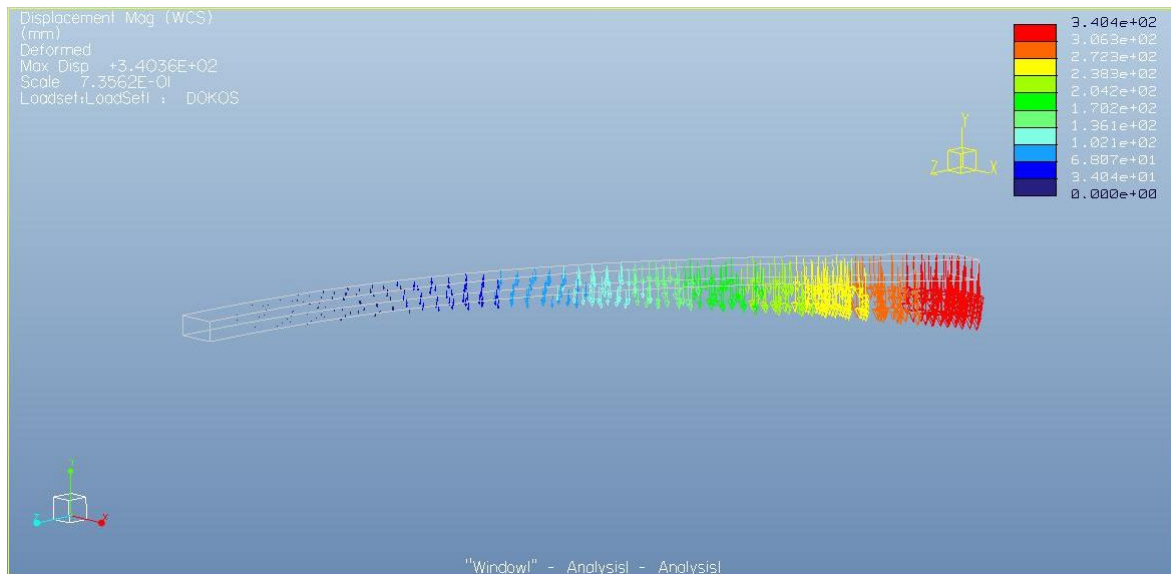
Εικόνα 78: Απεικόνιση της ενεργείας παραμόρφωσης

Στην παρακάτω απεικόνιση χρησιμοποιήσαμε τον τύπο Fringe και ως εξεταζόμενο μέγεθος ορίζουμε τον βαθμό του πολυωνύμου που χρησιμοποιήθηκε από το λογισμικό για τη μελέτη της συμπεριφοράς κάθε στοιχείου. Ανάλογα με το χρώμα των ακμών μπορούμε να παρατηρήσουμε τι βαθμό του πολυωνύμου που χρησιμοποιήθηκε.



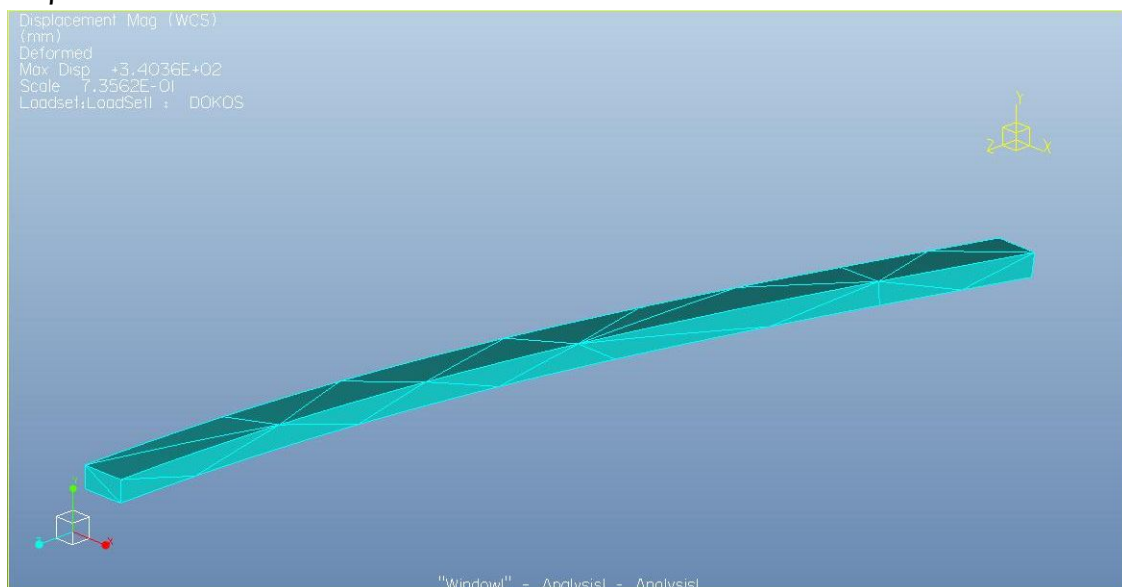
Εικόνα 79: Απεικόνιση του πλέγματος και του βαθμού πολυωνύμου σε κάθε στοιχείο

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε απεικονίσεις αποτελεσμάτων με τη χρήση και των υπολοίπων τύπων απεικόνισης. Στη παρακάτω απεικόνιση επιλέγουμε ως τύπο απεικόνισης Vectors και ως εξεταζόμενο μέγεθος την μετατόπιση (Displacement). Στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στη καρτέλα Display Options επιλέγουμε Wireframe Vectors, για τον αριθμό των χρωματισμών και το μέγιστο μήκος των διανυσμάτων χρησιμοποιούμε την προεπιλογή του λογισμικού. Επίσης ενεργοποιούμε το πλαίσιο Deformed. Το αποτέλεσμα της γραφικής απεικόνισης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 80: Απεικόνιση της μετατόπισης με τον τύπο διανυσμάτων (Vectors)

Στη παρακάτω απεικόνιση επιλέγουμε ως τύπο απεικόνισης Model και ως εξεταζόμενο μέγεθος την μετατόπιση (Displacement). Στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στη καρτέλα Display Options επιλέγουμε Shade Surfaces. Επίσης ενεργοποιούμε το πλαίσιο Deformed και το πλαίσιο Show Element Edges. Το αποτέλεσμα της γραφικής απεικόνισης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

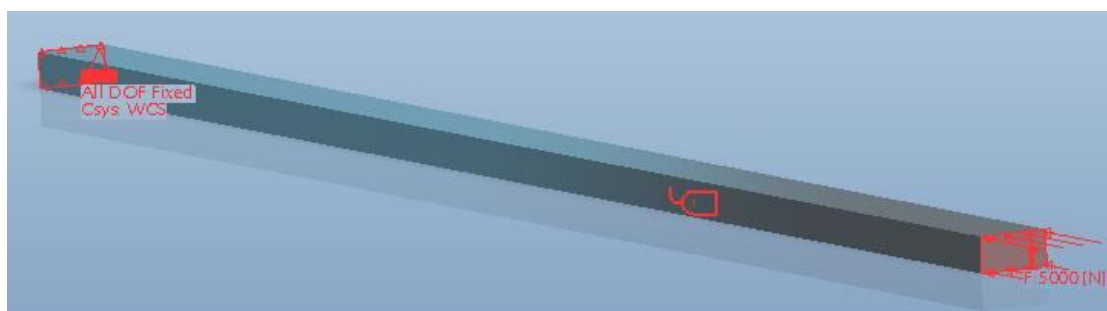


Εικόνα 81: Απεικόνιση της μετατόπισης με τον τύπο Model

2.6 Buckling Analysis

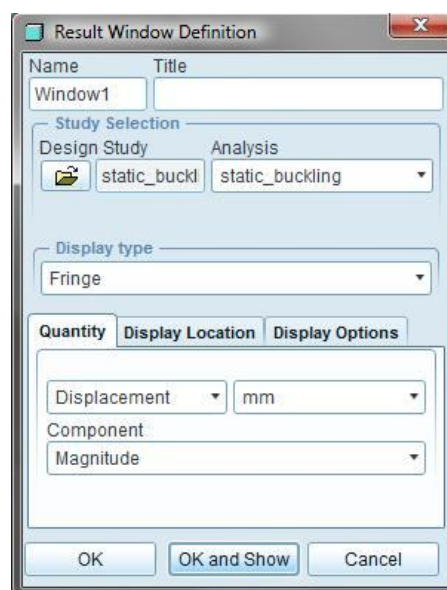
Στην ανάλυση λογισμού θα χρησιμοποιήσουμε το ίδιο αντικείμενο που χρησιμοποιήσαμε και στην στατική ανάλυση. Με την ανάλυση λογισμού μπορούμε να υπολογίσουμε τα κρίσιμα φορτία που θα λυγίσουν το αντικείμενο. Το Mechanica υπολογίζει διάφορους συντελεστές λογισμού που με την εφαρμογή τους υπολογίζονται τα κρίσιμα φορτία.

Αρχικά μεταβαίνουμε στο παράθυρο εργασίας του Mechanica και επιλέγουμε υλικό κατασκευής για το αντικείμενο τους περιορισμούς και το φορτίο που ασκείται. Η δοκός μετά τον καθορισμό των παραμέτρων έχει την εξής μορφή.



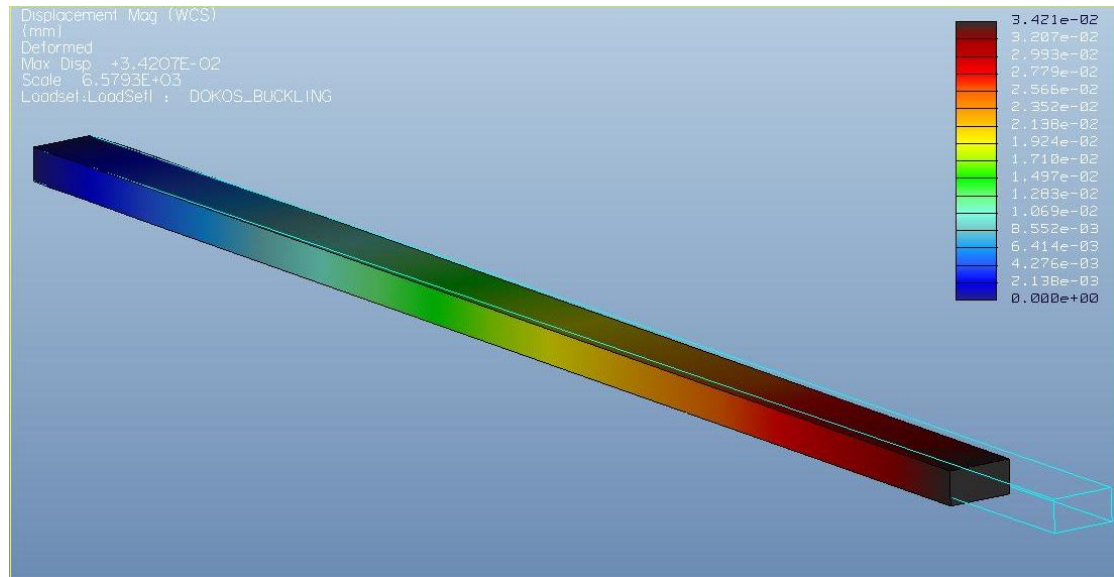
Εικόνα 82: Απεικόνιση αντικειμένου με τοποθέτηση υλικού, οριακών συνθηκών και φορτίου

Στη μια άκρη της ράβδου τοποθετήσαμε τους περιορισμούς και στην άλλη ένα φορτίο 5000N με φορά προς το εσωτερικό της ράβδου. Ως υλικό κατασκευής χρησιμοποιήσαμε Al2014. Στο παράθυρο Analyses and Design Studies επιλέγουμε να δημιουργήσουμε μια νέα στατική ανάλυση. Δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις ήδη υπάρχουσες γιατί έχουμε αλλάξει τη φορά του φορτίου. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούμε για την νέα ανάλυση είναι όμοιες με εκείνες που χρησιμοποιήσαμε στην προηγούμενη στατική ανάλυση της ράβδου. Αφού ολοκληρωθεί η ανάλυση επιλέγουμε το εικονίδιο Review Results of a Design Study or Finite Element Analysis και εμφανίζεται το παράθυρο Result Window Definition. Επιλέγουμε ως τύπο απεικόνισης Fringe, στην καρτέλα Quantity επιλέγουμε ως εξεταζόμενο μέγεθος Displacement, στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στην καρτέλα Display Options ενεργοποιούμε το κουτί Continuous Tone, αυξάνουμε τον αριθμό στο πλαίσιο Legend Levels από 9 σε 15 και ενεργοποιούμε τα



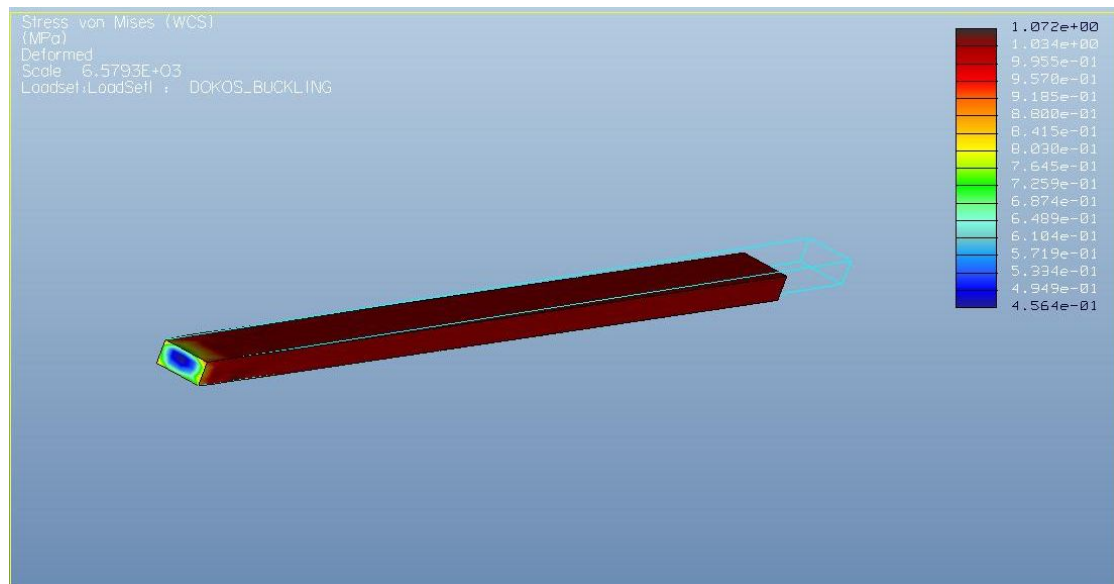
Εικόνα 83: Παράθυρο επεξεργασίας εμφάνισης των αποτελεσμάτων στη στατική ανάλυση

κουτιά Deformed και Overlay Undeformed. Επιλέγοντας Ok and Show παρουσιάζεται η ζητούμενη απεικόνιση. Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία με διάφορα ότι για την νέα απεικόνιση επιλέγουμε στην καρτέλα Quantity εξεταζόμενο μέγεθος Stress von Mises. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 84: Απεικόνιση μετατόπισης

Στο γραφικό αποτελέσματα για την μέγιστη μετατόπιση παρατηρούμε ότι το άκρο που εφαρμόζεται το φορτίο μετατοπίζεται κατά 3.42mm.



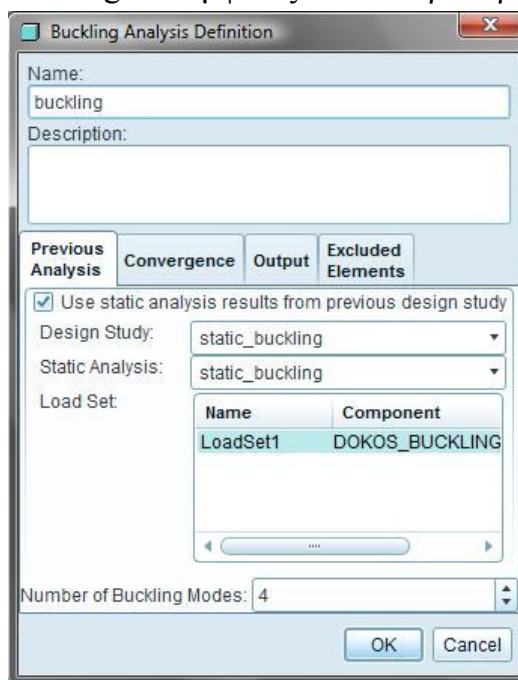
Εικόνα 85: Απεικόνιση τάσης

Στο γραφικό αποτελέσματα για την μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο μοντέλο παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή είναι 1MPa.

Παρουσιάσαμε τα παραπάνω αποτελέσματα για να τα συγκρίνουμε με τα αποτελέσματα από την ανάλυση λογισμού που θα πραγματοποιήσουμε στη συνέχεια. Το βασικό μέγεθος που θα εξετάσουμε είναι η μέγιστη μετατόπιση.

Για να δημιουργήσουμε μια νέα ανάλυση λογισμού επιλέγουμε το εικονίδιο Run a Design Study. Στο παράθυρο Analyses and Design Studies που εμφανίζεται επιλέγουμε File→New Buckling και εμφανίζεται το παράθυρο Buckling Analysis Definition. Στο αρχικό πλαίσιο επιλέγουμε το όνομα της ανάλυσης και γράφουμε μια σύντομη περιγραφή στο πλαίσιο Description. Στη συνέχεια μπορούμε να επεξεργαστούμε διάφορα στοιχεία στις παρακάτω καρτέλες.

1. Previous Analysis: Στη πρώτη καρτέλα μπορούμε να ενεργοποιήσουμε το κουτί Use static analysis results from previous design study για να χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα μιας προηγούμενης στατικής ανάλυσης στην ανάλυση λογισμού. Στη συνέχεια επιλέγουμε

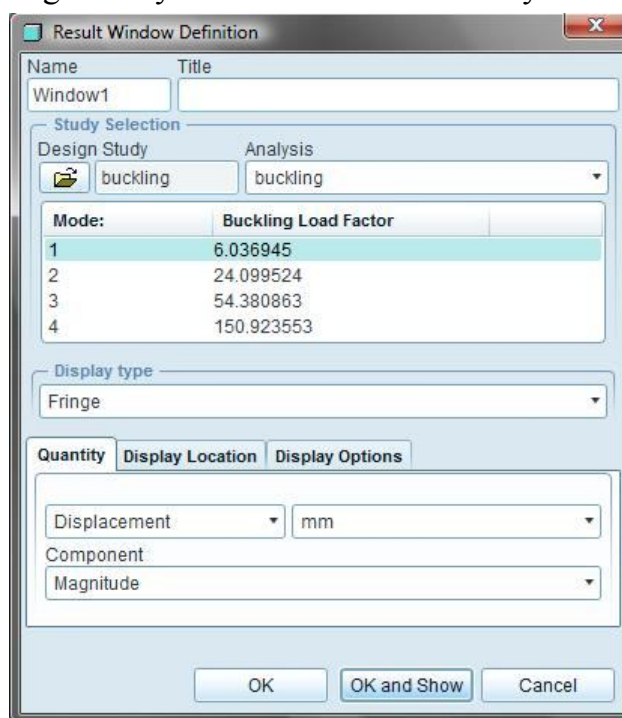


Εικόνα 86: Επιλογή παραμέτρων στην ανάλυση λογισμού

από ποια στατική ανάλυση θα εξάγουμε αποτελέσματα και ποιο φορτίο θα χρησιμοποιήσουμε. Τέλος στο πλαίσιο Number of Buckling Modes επιλέγουμε πόσους συντελεστές λογισμού θα υπολογίσουμε. Ο συντελεστής λογισμού (BLF) είναι ένας πραγματικός αριθμός που εκφράζει ένα πολλαπλασιαστή. Ο συντελεστής πολλαπλασιάζεται με το φορτίο που έχουμε ορίσει και καθορίζει τα κρίσιμα φορτία λογισμού του αντικειμένου. Για κάθε ένα συντελεστή που υπολογίζει το Mechanica ο λογισμός του αντικειμένου διαφέρει με τον προηγούμενο χωρίς όμως να μεταβάλλεται η μέγιστη μετατόπιση. Ουσιαστικά το Mechanica υπολογίζει τα φορτία που αλλάζουν τον τρόπο λογισμού του αντικειμένου έχοντας ως συνιστώσα την μέγιστη μετατόπιση που παρουσιάζει το αντικείμενο. Ο συντελεστής παίρνει θετικές και αρνητικές τιμές. Αν ο συντελεστής είναι θετικός το αρχικό φορτίο που έχουμε ορίσει δεν ξεπερνά το κρίσιμο φορτίο λογισμού ενώ αν είναι αρνητικός το εφαρμοζόμενο φορτίο έχει ξεπεράσει το κρίσιμο φορτίο. Για παράδειγμα αν το φορτίο που ασκείται είναι 100N και ο BLF είναι 2 τότε ένα κρίσιμο φορτίο είναι τα 200N.

2. **Convergence:** Στη καρτέλα για τον καθορισμό της σύγκλισης οι επιλογές που παρουσιάστηκαν στην αντίστοιχη καρτέλα στην στατική ανάλυση παραμένουν όμοιες με τη μόνη διαφορά να παρατηρείται στη μέθοδο Multi-Pass Adaptive όσον αφορά τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τη σύγκλιση. Πιο συγκεκριμένα το Mechanica συγκρίνει το συντελεστή λογισμού (Buckling Load Factor) αντί τη μετατόπισης (Local Displacement) όπως γινόταν στην στατική ανάλυση.
3. **Output:** Στη συγκεκριμένη καρτέλα μπορούμε να επιλέξουμε τα ίδια πλαίσια με εκείνα στην στατική ανάλυση που παρουσιάσαμε παραπάνω.
4. **Excluded Elements:** Η καρτέλα αποκλεισμός στοιχείων είναι όμοια με εκείνη που παρουσιάσαμε στη στατική ανάλυση.

Αφού ολοκληρώσουμε τον καθορισμό των παραμέτρων επιλέγουμε Οκ και πραγματοποιούμε διαγνωστικό έλεγχο πριν ξεκινήσουμε την ανάλυση. Επιλέγουμε Run για να ξεκινήσει η ανάλυση και αφού τελειώσει επιλέγουμε το εικονίδιο Review Results of a Design Study or Finite Element Analysis και εμφανίζεται το παράθυρο Result Window Definition όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα που θα εξάγουμε από την ανάλυση που πραγματοποιήσαμε. Αρχικά επιλέγουμε το όνομα και τον τίτλο του παραθύρου που πρόκειται να δημιουργήσουμε. Στη συνέχεια στο πλαίσιο Study Selection επιλέγουμε την σχεδιαστική μελέτη και την ανάλυση που θα χρησιμοποιήσει το λογισμικό για να δημιουργήσει τα



Εικόνα 87: Παράθυρο επεξεργασίας εμφάνισης των αποτελεσμάτων στην ανάλυση λογισμού

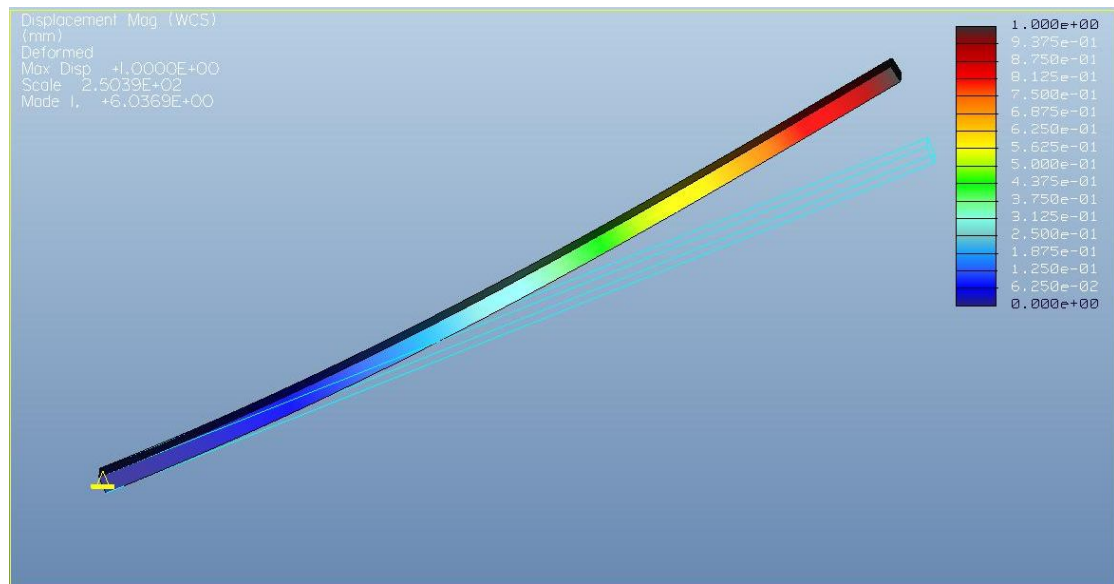
αποτελέσματα. Στο επόμενο πλαίσιο μπορούμε να επιλέξουμε ποιο συντελεστή λογισμού θα χρησιμοποιήσουμε για να εξάγουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Οι τύποι απεικόνισης και οι καρτέλες Quantity, Display Location, Display Options έχουν όμοιες επιλογές με εκείνες που αναλύσαμε στη στατική ανάλυση. Για κάθε συντελεστή λογισμού θα παρουσιάσουμε τον τρόπο με τον οποίο λυγίζει το αντικείμενο με τη μέγιστη μετατόπιση να παραμένει σταθερή καθώς και την μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο αντικείμενο. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως η

απεικόνιση της μορφής που παίρνει το αντικείμενο είναι το ζητούμενο αποτέλεσμα στην συγκεκριμένη ανάλυση καθώς θέλουμε να υπολογίσουμε τον τρόπο που αντιδρά το αντικείμενο σε διαφορετικές φορτίσεις. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση λογισμού για αντικείμενα που είναι μέρος μιας συναρμογής καθώς θέλουμε να γνωρίζουμε την ακριβή θέση τους για να μην έχουμε αστοχίες στη συναρμολόγηση. Υπολογίζονται επίσης και άλλα μεγέθη όπως η μεγίστη τάση και η ενεργεία παραμόρφωσης αλλά είναι δευτερεύοντα στοιχεία στην ανάλυση και χρησιμοποιούνται ως βοηθητικά στοιχεία για τον καθορισμό του φορτίου που θα εφαρμόσουμε τελικά στο αντικείμενο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω για τον κάθε συντελεστή λογισμού ξεχωριστά.

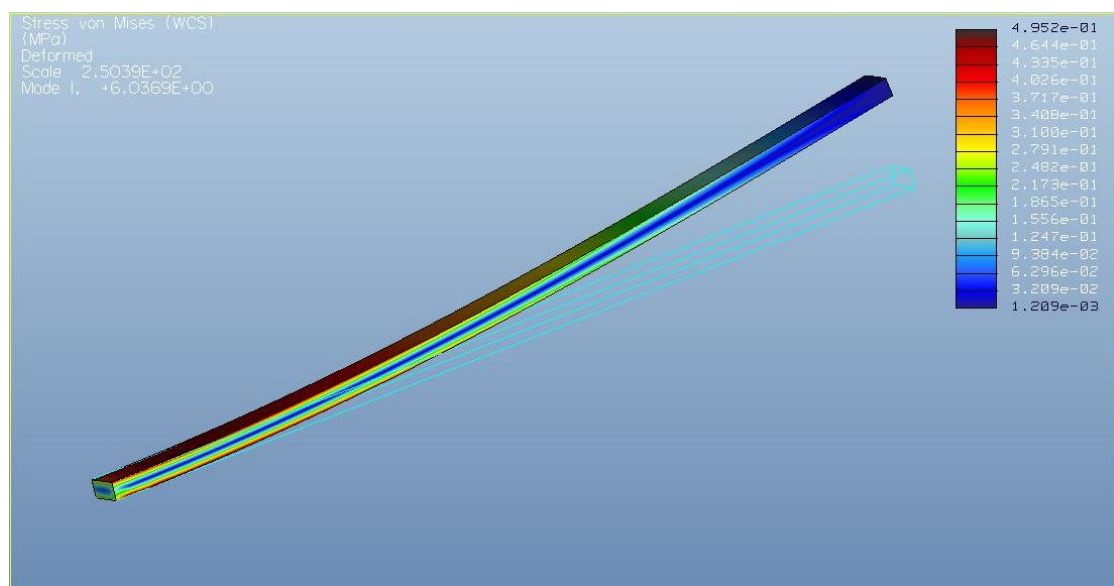
Για να δημιουργήσουμε τη γραφική απεικόνιση επιλέγουμε αρχικά τον συντελεστή λογισμού και στη συνέχεια επιλέγουμε ως τύπο απεικόνισης Fringe, στην καρτέλα Quantity επιλέγουμε ως εξεταζόμενο μέγεθος Displacement, στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στην καρτέλα Display Options ενεργοποιούμε το κουτί Continuous Tone, αυξάνουμε τον αριθμό στο πλαίσιο Legend Levels από 9 σε 15 και ενεργοποιούμε τα κουτιά Deformed και Overlay Undeformed. Επιλέγοντας Ok and Show παρουσιάζεται η ζητούμενη απεικόνιση. Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία με διαφορά ότι για την νέα απεικόνιση επιλέγουμε στην καρτέλα Quantity εξεταζόμενο μέγεθος Stress von Mises. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

BLF: 6.036945

Η μορφή που παίρνει το αντικείμενο παρουσιάζεται στην απεικόνιση για τη μεγίστη μετατόπιση. Στο αριστερό μέρος του παράθυρου διακρίνουμε τα στοιχεία που έχουμε ορίσει για τη γραφική απεικόνιση στο παράθυρο Result Window Definition όπως το εξεταζόμενο μέγεθος, την επιλογή Deformed που ενεργοποιήσαμε και το σώμα παρουσιάζεται παραμορφωμένο, την μεγίστη μετατόπιση που παρατηρείται, την κλίμακα της απεικόνισης σε σχέση με την πραγματική μορφή και το συντελεστή λογισμού που χρησιμοποιήσαμε.



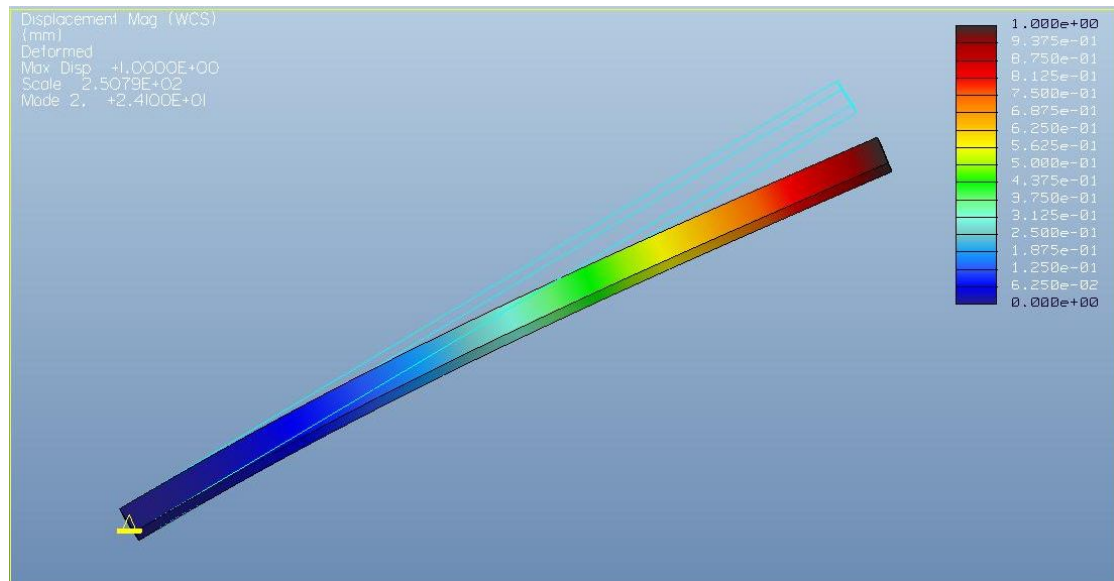
Εικόνα 88: Απεικόνιση μετατόπισης με τη χρήση του πρώτου συντελεστή λυγισμού



Εικόνα 89: Απεικόνιση τάσης με τη χρήση του πρώτου συντελεστή λυγισμού

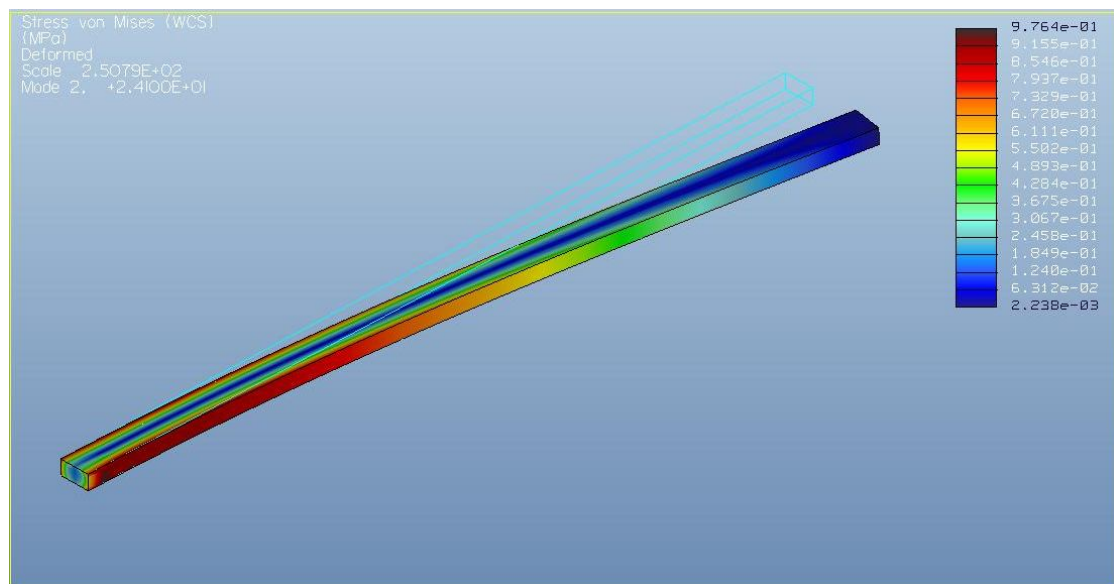
Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε την μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο μοντέλο καθώς και τις περιοχές που καταπονούνται περισσότερο στο αντικείμενο.

BLF: 24.099524



Εικόνα 90: Απεικόνιση μετατόπισης με τη χρήση του δεύτερου συντελεστή λυγισμού

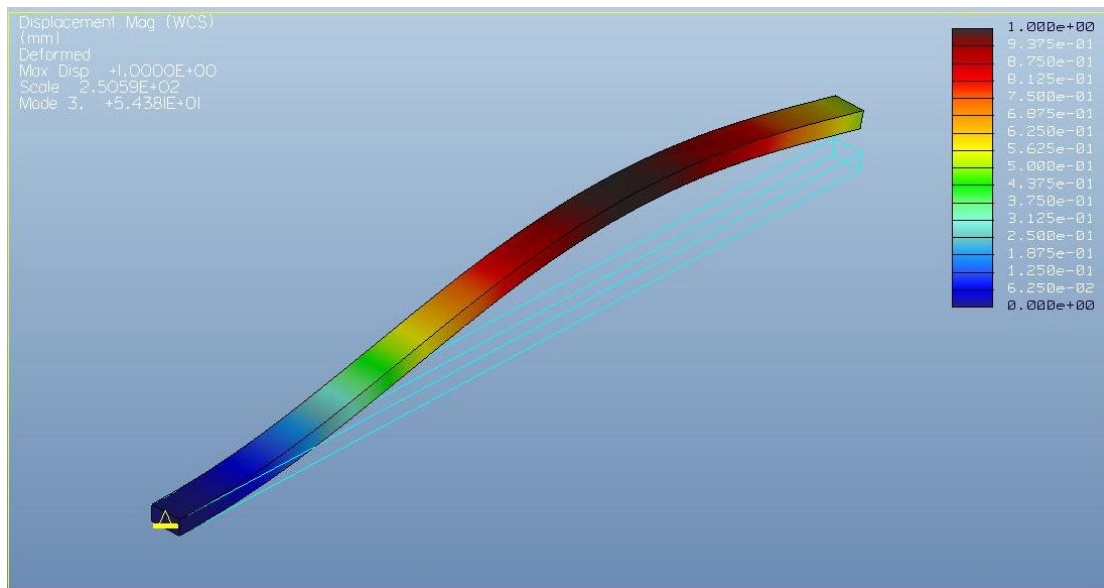
Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η μορφή που παίρνει το αντικείμενο για τον επιλεγμένο συντελεστή λογισμού.



Εικόνα 91: Απεικόνιση τάσης με τη χρήση του δεύτερου συντελεστή λυγισμού

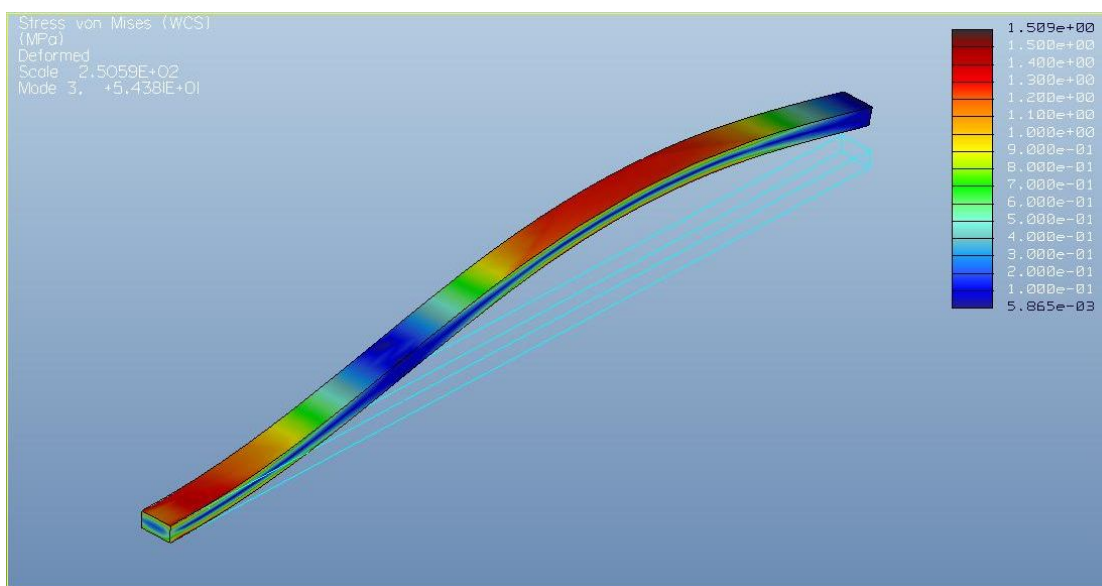
Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε την μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο μοντέλο καθώς και τις περιοχές που καταπονούνται περισσότερο στο αντικείμενο.

BLF: 54.380863



Εικόνα 92: Απεικόνιση μετατόπισης με τη χρήση του τρίτου συντελεστή λυγισμού

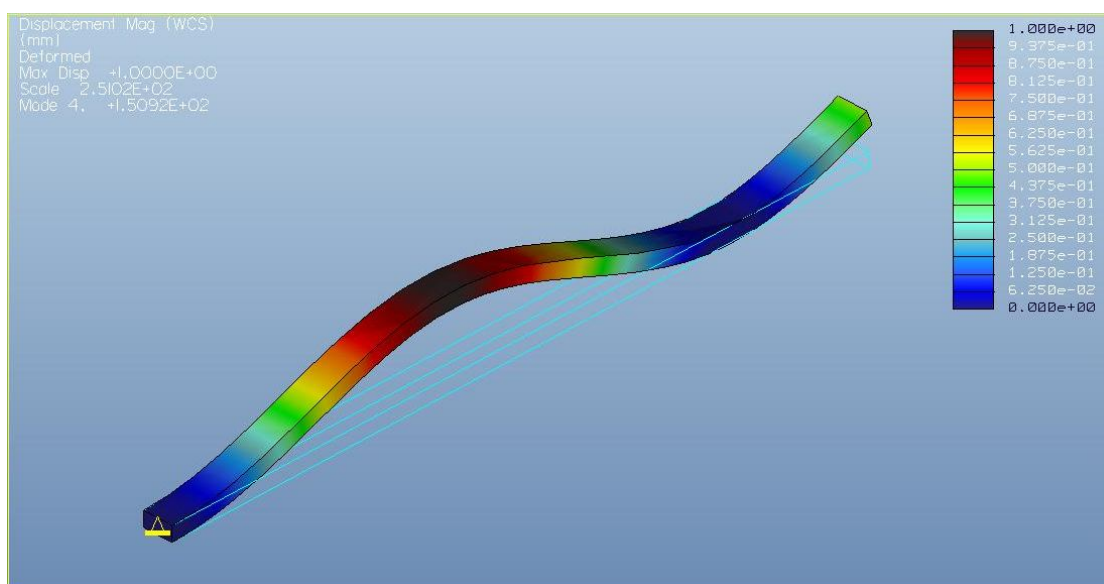
Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η μορφή που παίρνει το αντικείμενο για τον επιλεγμένο συντελεστή λογισμού.



Εικόνα 93: Απεικόνιση τάσης με τη χρήση του τρίτου συντελεστή λυγισμού

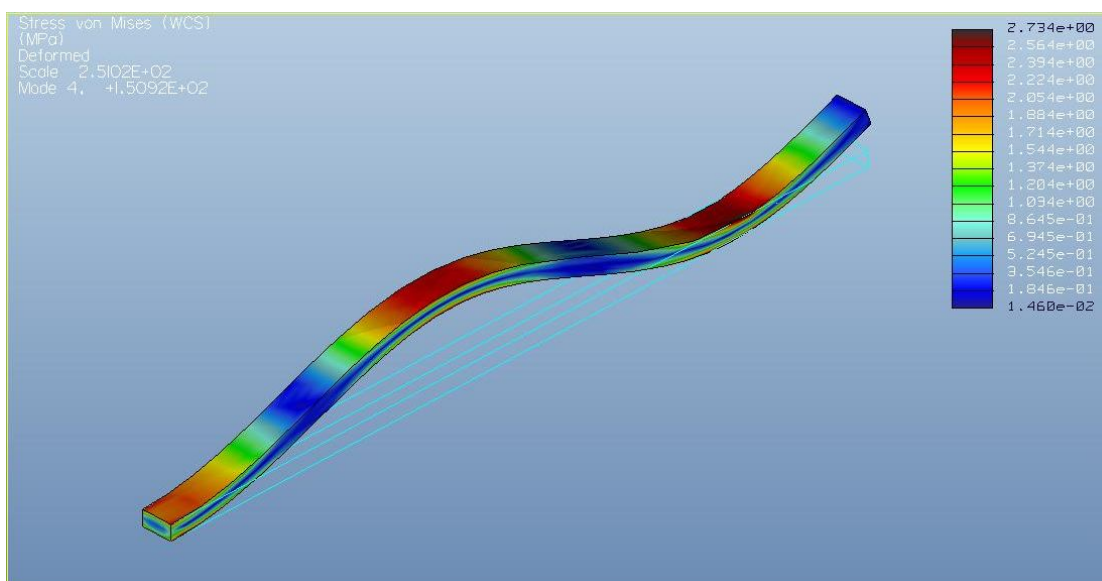
Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε την μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο μοντέλο καθώς και τις περιοχές που καταπονούνται περισσότερο στο αντικείμενο.

BLF: 150.923553



Εικόνα 94: Απεικόνιση μετατόπισης με τη χρήση του τέταρτου συντελεστή λυγισμού

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η μορφή που παίρνει το αντικείμενο για τον επιλεγμένο συντελεστή λυγισμού.



Εικόνα 95: Απεικόνιση τάσης με τη χρήση του τέταρτου συντελεστή λυγισμού

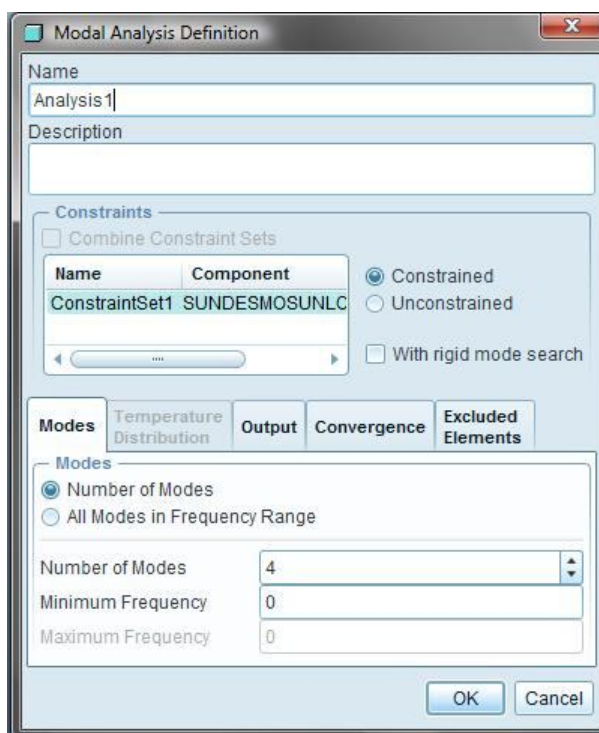
Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε την μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο μοντέλο καθώς και τις περιοχές που καταπονούνται περισσότερο στο αντικείμενο.

Τα αποτελέσματα της μελέτης λογισμού είναι πολύ χρήσιμα διότι ένα αντικείμενο μπορεί να παρουσιάσει αστοχία στην κατασκευή πριν ακόμα φτάσει στο όριο θραύσης. Το θλιπτικό φορτίο που εφαρμόζεται στο αντικείμενο μειώνει την ελαστική ακαμψία του αντικειμένου, όταν η ελαστική ακαμψία του μοντέλου μηδενιστεί το αντικείμενο έχει λυγίσει πλήρως και δεν μπορεί να επανέλθει στην αρχική του θέση.

2.7 Modal Analysis

Με την ανάλυση συντονισμού μπορούμε να μελετήσουμε την επίδραση των φυσικών συχνотήτων στο μοντέλο που έχουμε δημιουργήσει. Ως παράδειγμα για τη συγκεκριμένη ανάλυση θα χρησιμοποιήσουμε το αντικείμενο SUNDESMOS που χρησιμοποιήσαμε αρχικά για να παρουσιάσουμε τις παραμέτρους που πρέπει να ορίσουμε πριν την ανάλυση. Οι παράμετροι που πρέπει να ορίσουμε για την ανάλυση συντονισμού είναι το υλικό κατασκευής και οι περιορισμοί του αντικειμένου. Επιλέγουμε ως υλικό κατασκευής STEEL και επιλέγουμε η μια οπή του αντικειμένου να έχει μηδενικό βαθμό ελευθερίας. Στη συνέχεια επιλέγουμε το εικονίδιο Run a Design Study. Στο παράθυρο Analyses and Design Studies που εμφανίζεται επιλέγουμε File→New Modal και εμφανίζεται το παράθυρο Modal Analysis Definition.

Στο παράθυρο Modal Analysis Definition αρχικά ορίζουμε το όνομα της ανάλυσης και αν επιθυμούμε προσθέτουμε κάποια σχόλια στο πλαίσιο Description. Στο πλαίσιο Constraints επιλέγουμε ποιο περιορισμό θα χρησιμοποιήσουμε, υπάρχει και η επιλογή να χρησιμοποιήσουμε περισσότερους από ένα περιορισμούς σε συνδιασμό επιλέγοντας το πλαίσιο Combine Constraint Sets. Επίσης μπορούμε να εργαστούμε χωρίς την εφαρμογή περιορισμών επιλέγοντας το πλαίσιο Unconstrained. Ως προεπιλογή



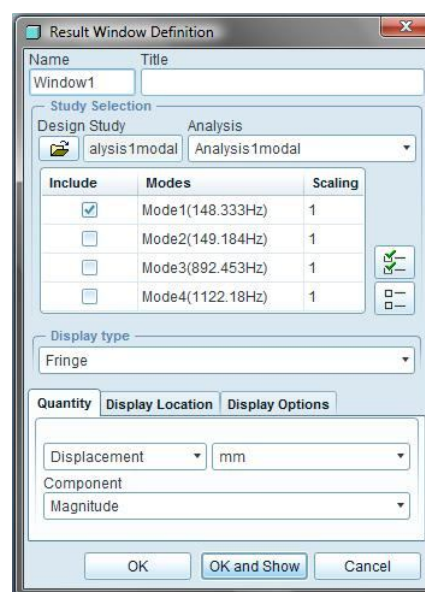
Εικόνα 96: Επιλογή παραμέτρων στην ανάλυση συντονισμού

στο αντικείμενο ασκούνται οι περιορισμοί που έχουμε ορίσει αρχικά. Επίσης μπορούμε να ενεργοποιήσουμε το πλαίσιο With Rigid Mode Search για να βρεί το Mechanica τα άκαμπτα σημεία στο μοντέλο όταν δεν είναι πλήρως περιορισμένο. Το πλαίσιο ενεργοποιείται αυτόματα όταν επιλέξουμε το πλαίσιο Unconstrained. Στη συνέχεια μπορούμε να επεξεργαστούμε διαφορα στοιχεία στις παρακάτω καρτέλες.

1. **Modes:** Στο πλαίσιο Number of modes επιλέγουμε τον αριθμό των συχνοτήτων και τη μικρότερη συχνότητα που εφαρμόζεται. Στο πλαίσιο All Modes in Frequency Range παρουσιάζονται όλες οι καταστάσεις στο εύρος συχνοτήτων που ορίζουμε (min-max).
2. **Temperature Distribution:** Στη συγκεκριμένη καρτέλα μπορούμε να επεξεργαστούμε την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο αντικείμενο και στο περιβάλλον καθώς και θερμοκρασιακά φορτία που εφαρμόζονται στο αντικείμενο. Το πλαίσιο παραμένει ανενεργό όταν δεν ορίζονται φορτία θερμότητας.
3. **Output:** Στη συγκεκριμένη καρτέλα μπορούμε να επιλέξουμε τα ίδια πλαίσια με εκείνα στην στατική ανάλυση που παρουσιάσαμε παραπάνω.
4. **Convergence:** Στη καρτέλα για τον καθορισμό της σύγκλισης οι επιλογές που παρουσιάστηκαν στην αντίστοιχη καρτέλα στην στατική ανάλυση παραμένουν όμοιες με τη μόνη διαφορά να παρατηρείται στη μέθοδο Multi-Pass Adaptive όσον αφορά τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τη σύγκλιση. Πιο συγκεκριμένα το Mechanica συγκρίνει τη συχνότητα (Frequency) αντί τη μετατόπισης (Local Displacement) όπως γινόταν στην στατική ανάλυση.
5. **Excluded Elements:** Η καρτέλα αποκλεισμός στοιχείων είναι όμοια με εκείνη που παρουσιάσαμε στη στατική ανάλυση.

Αφού ολοκληρώσουμε τον καθορισμό των παραμέτρων επιλέγουμε Οκ και πραγματοποιούμε διαγνωστικό έλεγχο πριν ξεκινήσουμε την ανάλυση. Επιλέγουμε Run για να ξεκινήσει η ανάλυση και αφού τελειώσει μπορούμε να δούμε συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα επιλέγοντας το εικονίδιο Display Study Status.

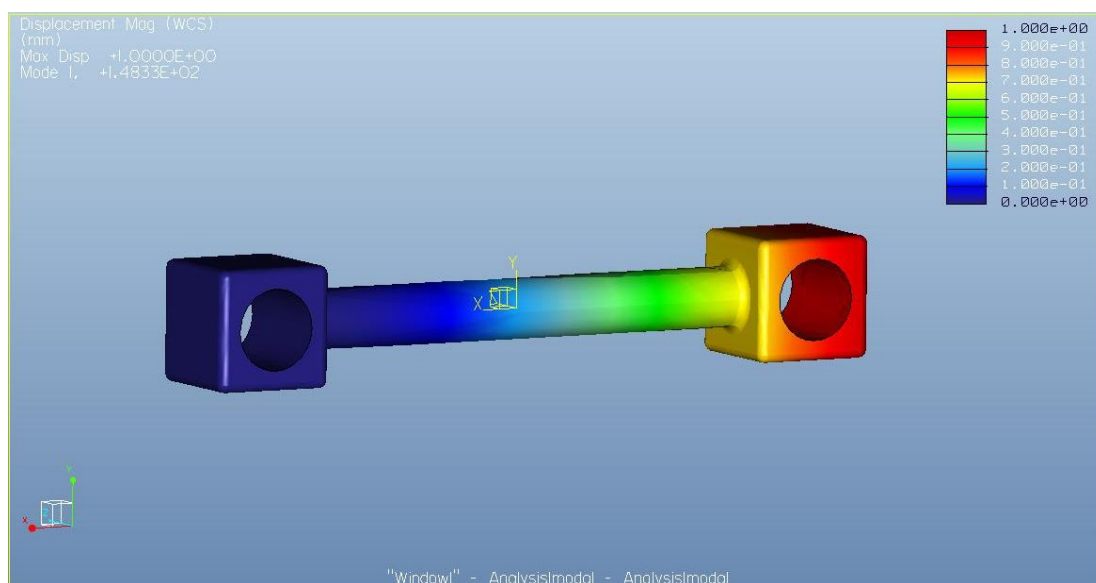
Στη συνέχεια επιλέγουμε το εικονίδιο Review Results of a Design Study or Finite Element Analysis και εμφανίζεται το παράθυρο Result Window Definition όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα που θα εξάγουμε από την ανάλυση που πραγματοποιήσαμε. Αρχικά επιλέγουμε το όνομα και τον τίτλο του παραθύρου που πρόκειται να δημιουργήσουμε. Στη συνέχεια στο πλαίσιο Study Selection επιλέγουμε την σχεδιαστική μελέτη και την ανάλυση που θα χρησιμοποιήσει το λογισμικό για να δημιουργήσει τα αποτελέσματα. Στο επόμενο πλαίσιο μπορούμε να επιλέξουμε μια ή



Εικόνα 97: Παράθυρο επεξεργασίας εμφάνισης των αποτελεσμάτων στην ανάλυση συντονισμού

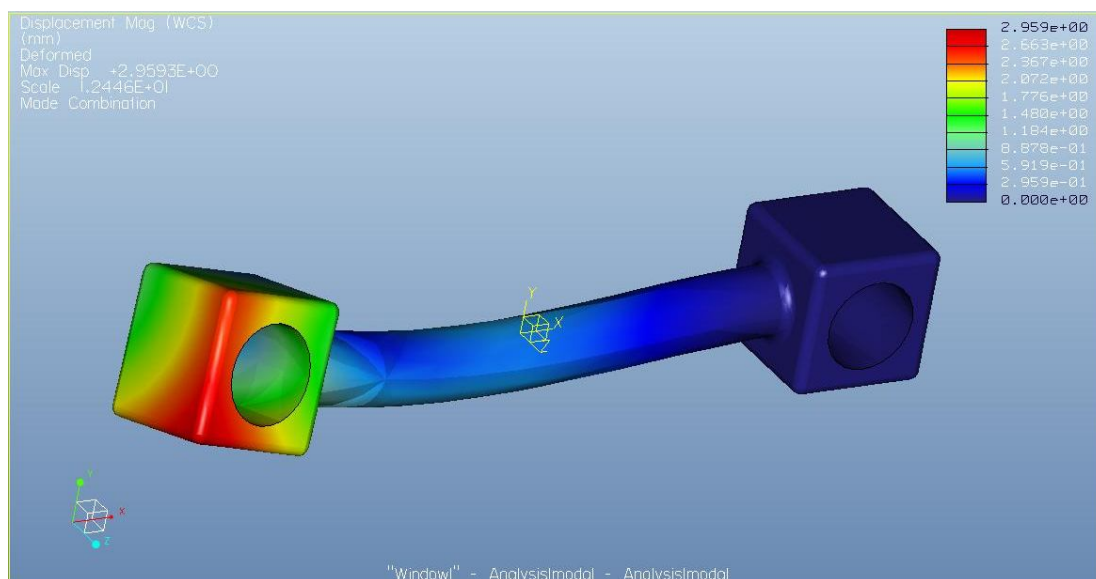
περισσότερες συχνότητες που καταπονούν το μοντέλο και να εξάγουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Οι τύποι απεικόνισης και οι καρτέλες Quantity, Display Location, Display Options έχουν όμοιες επιλογές με εκείνες που αναλύσαμε στη στατική ανάλυση.

Αρχικά θα μελετήσουμε τη μετατόπιση που έχει υποστεί η ράβδος. Επιλέγουμε την πρώτη συχνότητα (148.333Hz). Στη συνέχεια επιλέγουμε τον τύπο απεικόνισης Fringe και ως εξεταζόμενο μέγεθος επιλέγουμε Displacement. Στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στη καρτέλα Display Options ενεργοποιούμε το πλαίσιο Continuous Tone.



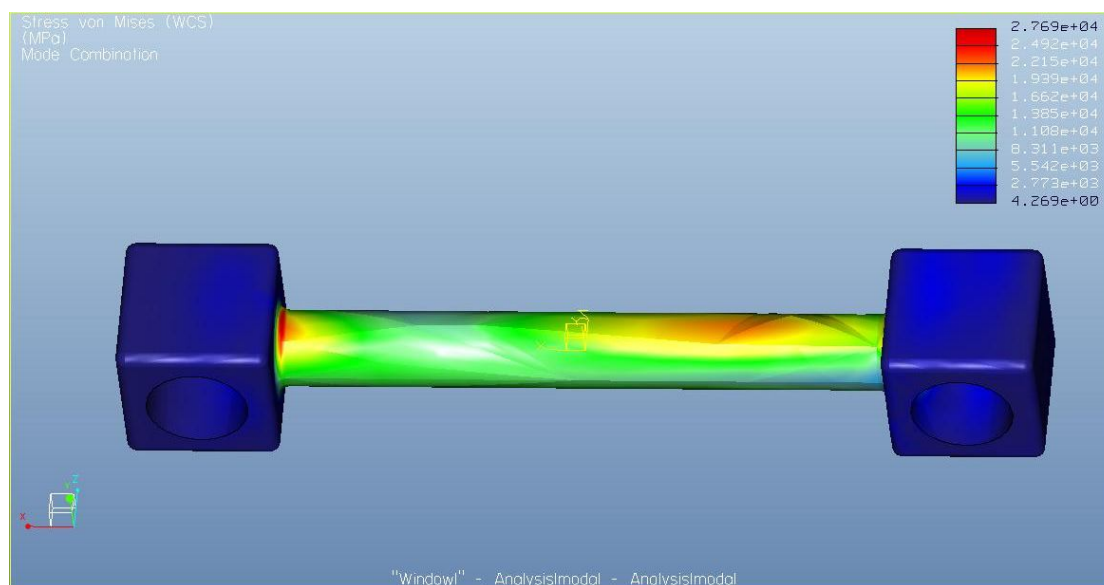
Εικόνα 98: Απεικόνιση της μετατόπισης με τη χρήση της συχνότητας 148.333Hz

Επιλέγουμε τις ίδιες παραμέτρους με την προηγούμενη απεικόνιση αλλά επιλέγουμε όλες τις συχνότητες και ενεργοποιούμε το πλαίσιο Deformed.



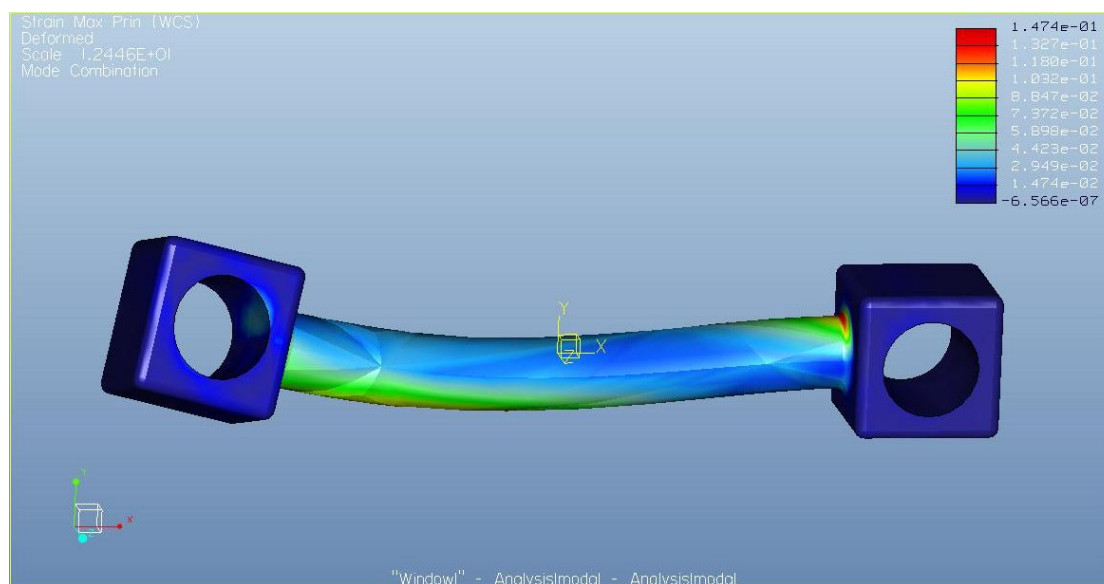
Εικόνα 99: Απεικόνιση της μετατόπισης με τη χρήση όλων των συχνοτήτων

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία μπορούμε να εξάγουμε διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με το εξεταζόμενο μέγεθος. Στο επόμενο παράδειγμα εξετάζουμε την τάση που δέχεται ο σύνδεσμος. Επιλέγουμε όλες τις συχνότητες και επιλέγουμε ως τύπο απεικόνισης Fringe και ως εξεταζόμενο μέγεθος Stress. Στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στη καρτέλα Display Options ενεργοποιούμε το πλαίσιο Continuous Tone. Το αποτέλεσμα της γραφικής απεικόνισης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



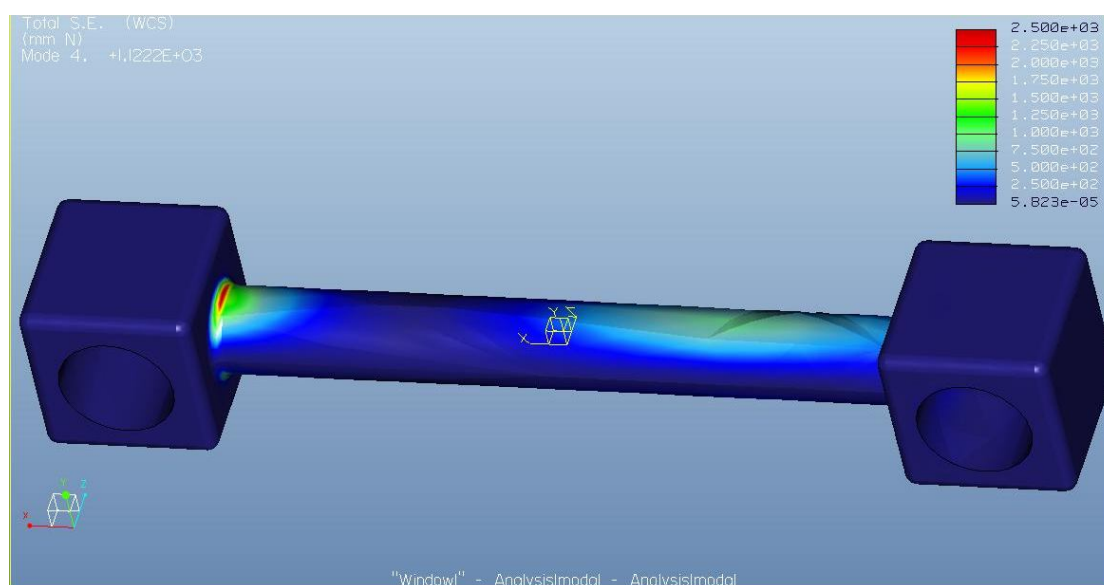
Εικόνα 100: Απεικόνιση της τάσης με τη χρήση όλων των συχνοτήτων

Στη παρακάτω απεικόνιση επιλέγουμε όλες τις συχνότητες. Ως τύπο απεικόνισης Fringe και ως εξεταζόμενο μέγεθος την παραμόρφωση (Strain). Ως συνιστώσα της παραμόρφωσης επιλέγουμε Max Principal. Στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στη καρτέλα Display Options ενεργοποιούμε το πλαίσιο Continuous Tone και το πλαίσιο Deformed. Το αποτέλεσμα της γραφικής απεικόνισης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



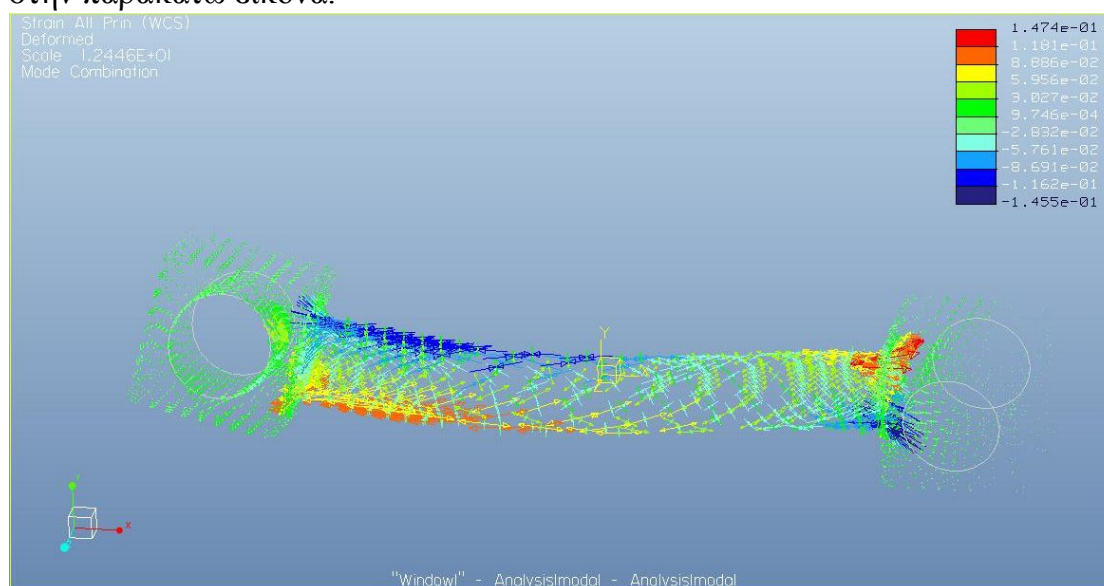
Εικόνα 101: Απεικόνιση της παραμόρφωσης με τη χρήση όλων των συχνοτήτων

Στη παρακάτω απεικόνιση επιλέγουμε τη συχνότητα (1122.18Hz), στο συγκεκριμένο μέγεθος μπορούμε να επιλέξουμε μόνο μια συχνότητα. Ως τύπο απεικόνισης επιλέγουμε Fringe και ως εξεταζόμενο μέγεθος την συνολική ενεργεία παραμόρφωσης (Total Strain Energy). Στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στη καρτέλα Display Options ενεργοποιούμε το πλαίσιο Continuous Tone. Το αποτέλεσμα της γραφικής απεικόνισης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 102: Απεικόνιση της ενέργειας παραμόρφωσης με χρήση της συχνότητας 1122.18Hz

Στη παρακάτω απεικόνιση επιλέγουμε όλες τις συχνότητες. Ως τύπο απεικόνισης επιλέγουμε Vectors και ως εξεταζόμενο μέγεθος την παραμόρφωση (Strain). Στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στη καρτέλα Display Options επιλέγουμε Wireframe Vectors και ενεργοποιούμε το πλαίσιο Deformed. Το αποτέλεσμα της γραφικής απεικόνισης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 103: Απεικόνιση της παραμόρφωσης με χρήση όλων των συχνοτήτων σε μορφή διανυσμάτων

Οι αναλύσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι οι κυριότερες που μπορεί να πραγματοποιήσει ένας χρήστης. Υπάρχουν και άλλα είδη όπως η ανάλυση κόπωσης που απαιτεί συγκεκριμένη άδεια λογισμικού που δεν είναι διαθέσιμη στη βασική έκδοση. Μετά το πέρας μιας ανάλυσης το επόμενο βήμα είναι η μελέτη σχεδιασμού (design study). Όπως και στα είδη των αναλύσεων έτσι και στη μελέτη σχεδιασμού έχουμε διάφορα είδη που μπορούμε να πραγματοποιήσουμε ανάλογα με τα αποτελέσματα που θέλουμε να εξάγουμε. Ο χρήστης έχει τις εξής επιλογές:

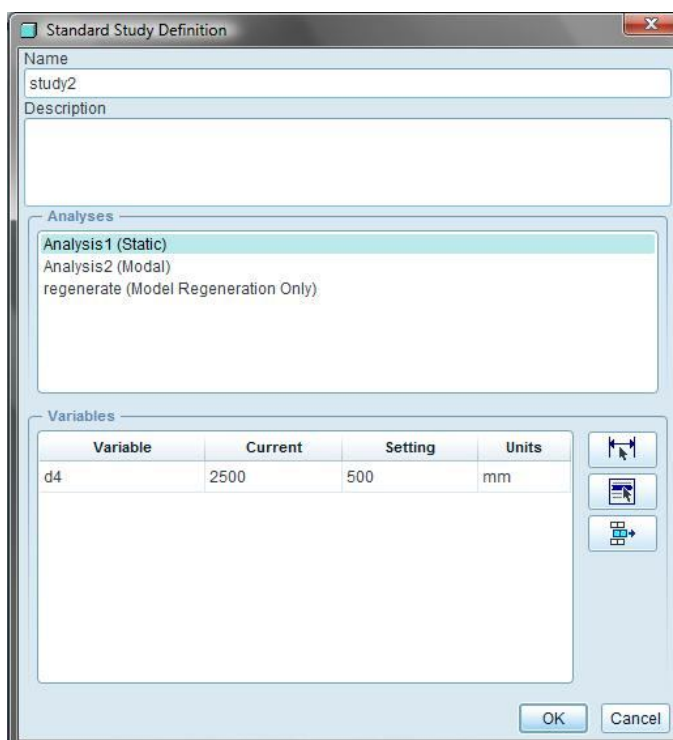
- **Standard Design Study**
- **Sensitivity Design Study**
- **Optimization Design Study**

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε αναλυτικά την κάθε μελέτη χρησιμοποιώντας ως παραδείγματα τα αντικείμενα από τις αναλύσεις που πραγματοποιήσαμε παραπάνω.

2.8 Standard Design Study

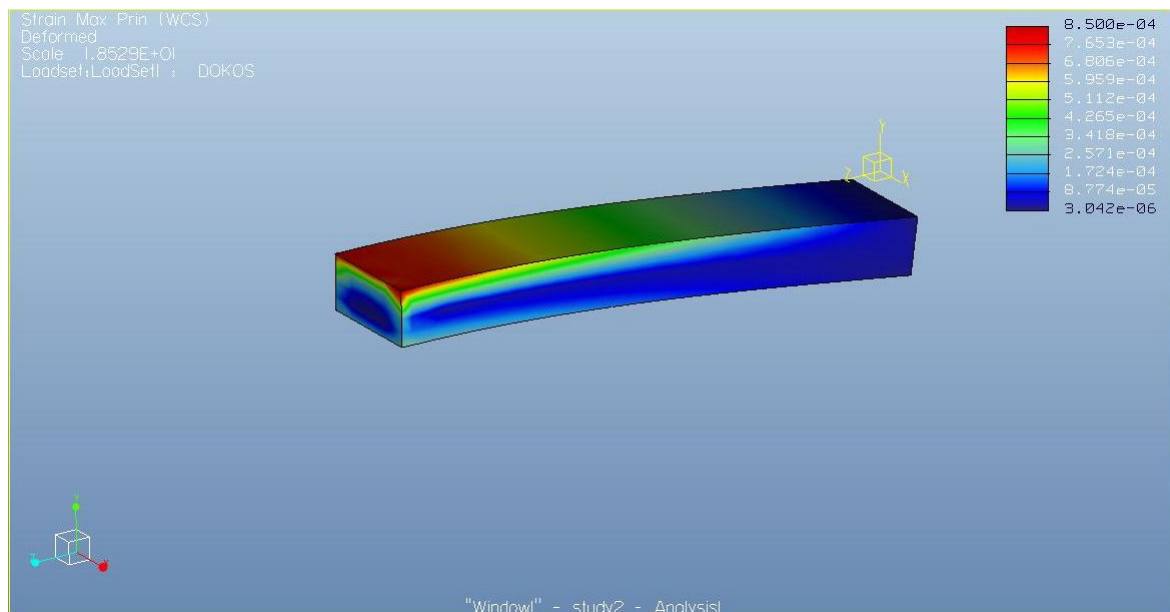
Στη πρότυπη μελέτη σχεδιασμού θα χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα τη δοκό και τις αναλύσεις που πραγματοποιήσαμε στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Με την πρότυπη μελέτη σχεδιασμού μπορούμε να τροποποιήσουμε τις μεταβλητές του αντικειμένου ώστε να εξάγουμε διαφορετικά αποτελέσματα από αυτά που είχαμε στην αρχική μελέτη.

Αρχικά επιλέγουμε το εικονίδιο Run a Design Study και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε την πρότυπη ανάλυση. Το νέο παράθυρο που εμφανίζεται έχει την διπλανή εικόνα. Ορίζουμε το όνομα της μελέτης και προσθέτουμε μια σύντομη περιγραφή εάν είναι απαραίτητη. Στη συνέχεια επιλέγουμε κάποια από τις προϋπάρχουσες αναλύσεις ή επιλέγουμε σκέτο το αντικείμενο



Εικόνα 104: Επιλογή παραμέτρων στη πρότυπη μελέτη σχεδιασμού

(regenerate) χωρίς την εισαγωγή δεδομένων από τις αναλύσεις που πραγματοποιήσαμε. Επόμενο βήμα στο πλαίσιο Variables είναι να επιλέξουμε τη μεταβλητή που θέλουμε να μελετήσουμε. Για να εισάγουμε μια μεταβλητή μπορούμε να επιλέξουμε το πρώτο εικονίδιο από πάνω και να επιλέξουμε μια διάσταση από το μοντέλο ή να επιλέξουμε το μεσαίο εικονίδιο και να εισάγουμε μια μεταβλητή από τη λίστα των παραμέτρων. Τέλος για να διαγράψουμε μια μεταβλητή επιλέγουμε τη γραμμή που αναγράφεται και επιλέγουμε το τελευταίο εικονίδιο. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέξαμε να εισάγουμε δεδομένα από την στατική ανάλυση που είχαμε πραγματοποιήσει αρχικά και ως μεταβλητή το μήκος της ράβδου. Στη γραμμή της μεταβλητής αναγράφεται το όνομα, το τρέχον μέγεθος, το μέγεθος όπου θα πραγματοποιηθεί η μελέτη καθώς και οι μονάδες της μεταβλητής. Σε μια μελέτη μπορούμε να επιλέξουμε παραπάνω από μια μεταβλητές. Στη μελέτη που πραγματοποιήσαμε, ορίσαμε στη μεταβλητή του μήκους την τιμή 500mm. Τέλος επιλέγουμε Ok και Run στο παράθυρο Analyses and Design Studies. Όταν ολοκληρωθεί η μελέτη επιλέγουμε το εικονίδιο Review Results. Στην οθόνη εμφανίζεται το παράθυρο Result Window Definition όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε την απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Επιλέγουμε ως τύπο απεικόνισης Fringe και ως εξεταζόμενο μέγεθος την παραμόρφωση (Strain). Ως συνιστώσα της παραμόρφωσης επιλέγουμε Max Principal. Στη καρτέλα Display Location επιλέγουμε All και στη καρτέλα Display Options ενεργοποιούμε το πλαίσιο Continuous Tone και το πλαίσιο Deformed. Το αποτέλεσμα της γραφικής απεικόνισης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 105: Απεικόνιση της παραμόρφωσης στη τροποποιημένη δοκό

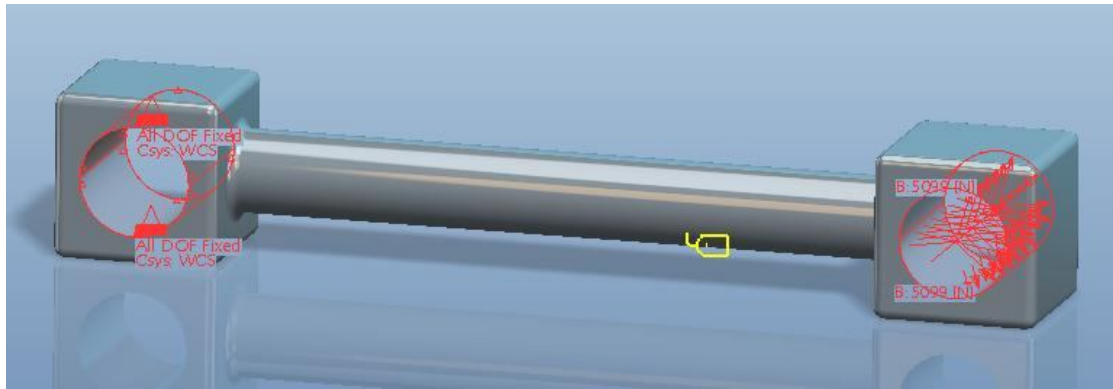
Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι είναι διαφορετικό το αποτέλεσμα από την αρχική στατική ανάλυση που πραγματοποιήσαμε παραπάνω. Παρατηρούμε ότι το μέγεθος της ράβδου είναι διαφορετικό αφού αλλάξαμε την τιμή της μεταβλητής από 2500mm σε 500mm άλλα και η μεγίστη παραμόρφωση που παρατηρείται στο αντικείμενο είναι διαφορετική από την αρχική που είχαμε υπολογίσει. Όμοια μπορούμε να εξετάσουμε πως μεταβάλλονται τα μεγέθη που εξετάζουμε στο αντικείμενο σε σχέση με τη μεταβλητή που ορίσαμε.

2.9 Sensitivity Design Study

Στη μελέτη ευαισθησίας μπορούμε να μελετήσουμε πως επιδρά η αλλαγή της τιμής μιας μεταβλητής. Υπάρχουν δυο είδη μελέτης που μπορούμε να διενεργήσουμε. Αρχικά μπορούμε να μελετήσουμε ένα επιλεγμένο μέγεθος π.χ ενεργεία παραμόρφωσης πως μεταβάλλεται σε σχέση με την μεταβλητή. Η μεταβλητή έχει μια αρχική τιμή και ο χρήστης μπορεί να ορίσει ένα ευρύς τιμών όπου μπορεί να κινηθεί η μεταβλητή. Το Mechanica υπολογίζει το εξεταζόμενο μέγεθος σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής σε κάθε βήμα. Η παραπάνω μέθοδος ονομάζεται Global Sensitivity. Υπάρχει και μια διαφορετική προσέγγιση για τον υπολογισμό της επιθυμητής τιμής της μεταβλητής. Αφού πραγματοποιήσουμε μελέτη ευαισθησίας για το σύνολο των τιμών της μεταβλητής επιλέγουμε την επιθυμητή τιμή, στη συνέχεια πραγματοποιούμε εκ νέου μια ανάλυση ευαισθησίας όπου επιλέγουμε μια συγκεκριμένη τιμή για τη μεταβλητή και ορίζουμε στο λογισμικό τα διαστήματα γύρω από την τιμή που επιλέξαμε αρχικά ώστε να έχουμε λεπτομερέστερα αποτελέσματα. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Local Sensitivity. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε ένα παράδειγμα και με τις δυο μεθόδους για την καλύτερη κατανόηση τους

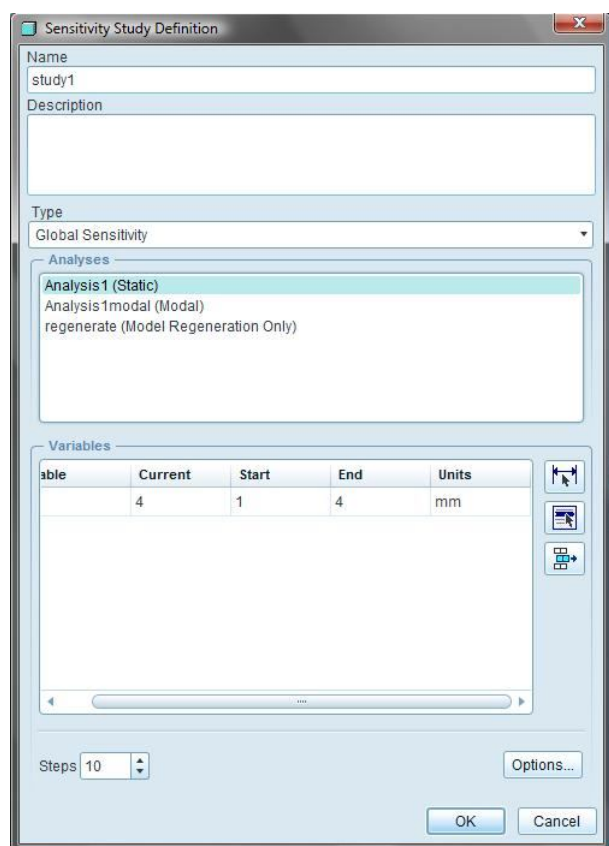
2.9.1 Global Sensitivity

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα επιλέξουμε το αντικείμενο Sundesmos που παρουσιάστηκε παραπάνω. Για την μελέτη ευαισθησίας πραγματοποιούμε μια νέα στατική ανάλυση. Ορίζουμε τους περιορισμούς και τα φορτία εκ νέου όπως παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Στην μια οπή του αντικειμένου ορίζουμε τον περιορισμό όπου πακτώνουμε το αντικείμενο ενώ στην άλλη οπή τοποθετούμε ένα φορτίο έδρασης με τις εξής συνιστώσες: -5000N στον άξονα X και 1000N στον άξονα Y. Τρέχουμε την στατική ανάλυση και συνεχίζουμε με την ανάλυση ευαισθησίας.



Εικόνα 106: Απεικόνιση αντικειμένου με τοποθέτηση υλικού, οριακών συνθηκών και φορτίου

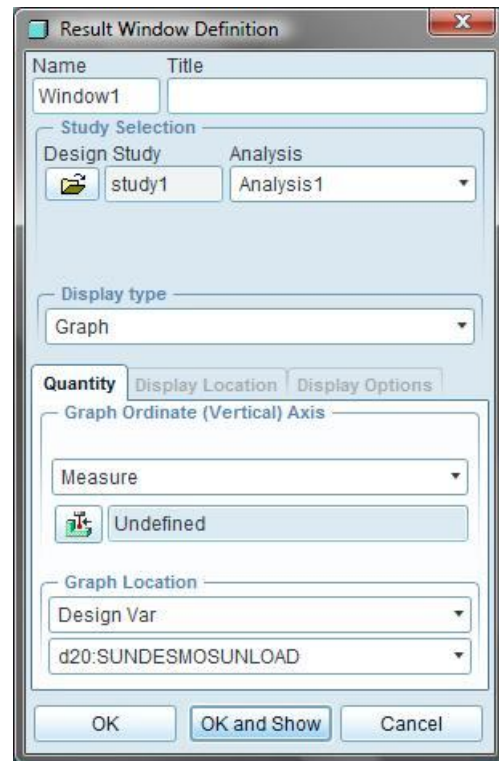
Αρχικά επιλέγουμε στο παράθυρο Analyses and Design Studies να πραγματοποιήσουμε μια νέα ανάλυση ευαισθησίας. Στο νέο παράθυρο που εμφανίζεται ορίζουμε το όνομα της ανάλυσης και προσθέτουμε μια περιγραφή της διαδικασίας εάν είναι απαραίτητο. Στο πλαίσιο Type επιλέγουμε τον τύπο της μελέτης που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε και συνεχίζουμε επιλέγοντας την ανάλυση από την οποία θα εξάγουμε τα αποτελέσματα. Τέλος επιλέγουμε την μεταβλητή που θα μελετήσουμε. Στο συγκεκριμένο αντικείμενο



Εικόνα 107: Επιλογή παραμέτρων στη μελέτη ευαισθησίας

παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες φορτίσεις παρουσιάζονται στην ένωση του κυλίνδρου με τον κύβο όπου έχουμε κάνει round για να ομαλοποιηθεί η ένωση. Για το λόγο αυτό επιλέγουμε ως μεταβλητή την ακτίνα του τεταρτοκυκλίου που είναι ανάμεσα στον κύβο και τον κύλινδρο. Η παρούσα τιμή είναι 4mm και επιλέγουμε το εύρος όπου θα πραγματοποιηθεί η μελέτη να είναι από 1 έως 4 mm. Τέλος στο κάτω μέρος του παράθυρου επιλέγουμε τα βήματα της μετάβασης από την αρχική στην τελική τιμή, στο παράδειγμα που παρουσιάζουμε επιλέξαμε 10 βήματα. Επιλέγουμε Ok και Run στο παράθυρο Analyses and Design Studies, αφού πραγματοποιήσουμε διαγνωστικό έλεγχο για τυχόν λάθη στη διεξαγωγή

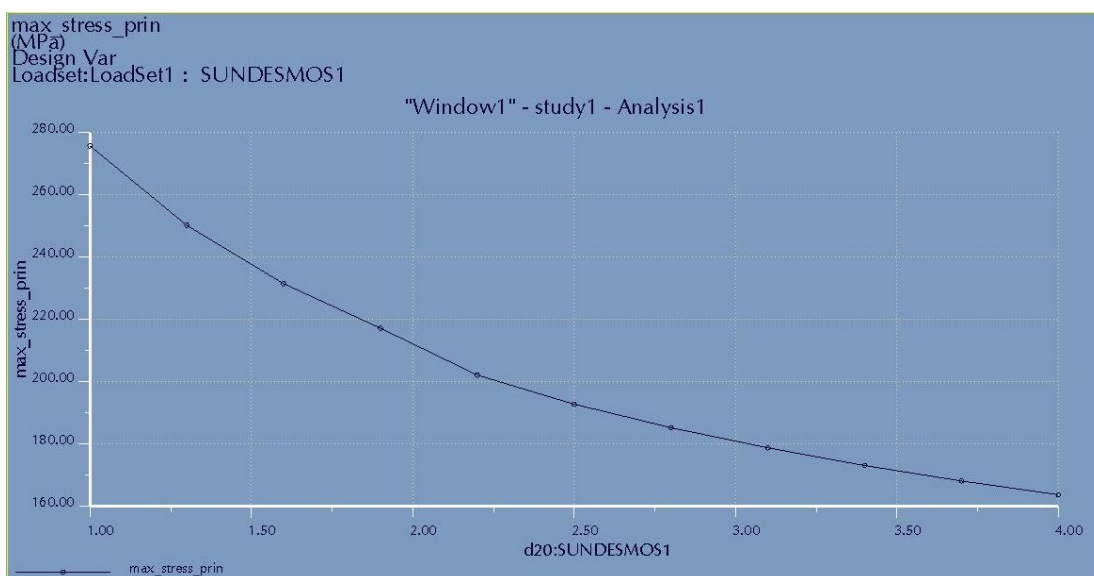
της μελέτης, εάν δεν διαπιστωθεί κάποιο σφάλμα περιμένουμε μέχρι να τελειώσει η μελέτη. Διάρκει γύρω στα 5 λεπτά ανάλογα με τις δυνατότητες του υπολογιστή που χρησιμοποιούμε. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι όσο μεγαλώνει το εύρος και ο αριθμός των βημάτων αυξάνεται και το υπολογιστικό κόστος και κατά συνέπεια και ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση. Αφού ολοκληρωθεί η μελέτη επιλέγουμε το εικονίδιο Review Results και εμφανίζεται το παράθυρο Result Window Definition. Στο αρχικό πλαίσιο αναγράφεται το όνομα της μελέτης και η ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε. Στο πλαίσιο Display



Εικόνα 108: Παράθυρο επεξεργασίας εμφάνισης των αποτελεσμάτων στη μελέτη ευαισθησίας

Type υπάρχει ως μοναδική επιλογή ο τύπος απεικόνισης Graph. Τέλος στο πλαίσιο Quantity επιλέγουμε ποιο θα είναι το μέγεθος που θα εξετάσουμε.

Επιλέγοντας το αντίστοιχο εικονίδιο εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο όπου περιέχονται όλα τα εξεταζόμενα μεγέθη. Ως μεταβλητή έχουμε ορίσει τη d20 που αντιστοιχεί στην ακτίνα του τεταρτοκύκλιου. Αρχικά επιλέγουμε ως εξεταζόμενο μέγεθος τη μέγιστη τάση εφελκυσμού (max tensile). Η γραφική παράσταση παρουσιάζεται παρακάτω.



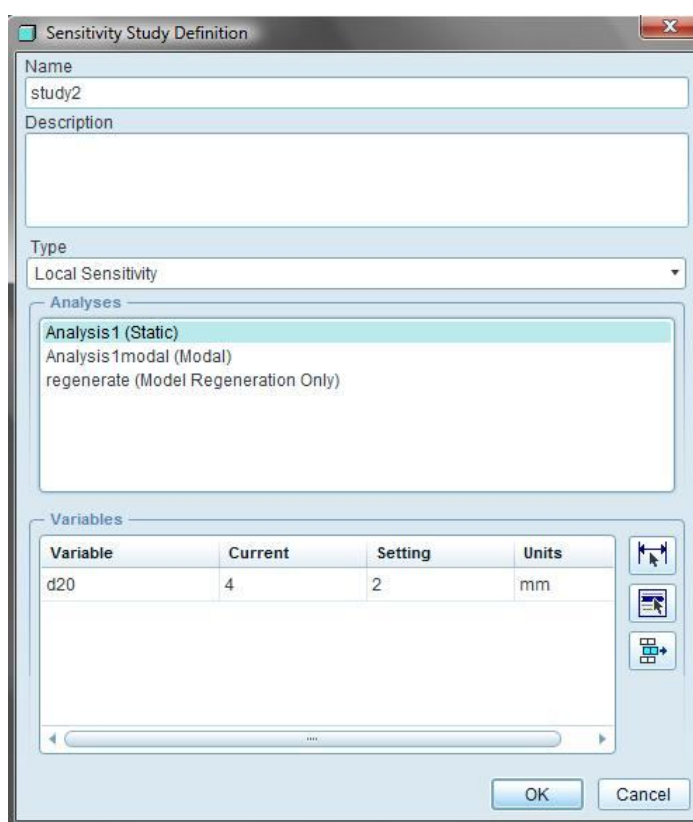
Διάγραμμα 3: Μεταβολή μέγιστης τάσης σε σχέση με την τιμή της ακτίνας

Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ακτίνα τόσο μειώνεται η τάση εφελκυσμού που παρατηρείται στο μοντέλο. Η παραπάνω γραφική παράσταση είναι χρήσιμη για τον χρήστη αφού εάν γνωρίζει τη μέγιστη τάση που θα ασκηθεί στο αντικείμενο μπορεί να υπολογίσει την εξεταζόμενη διάσταση. Για παράδειγμα εάν η μέγιστη τάση εφελκυσμού που θα ασκηθεί στο αντικείμενο είναι 200 MPa η ακτίνα είναι περίπου 2mm. Στο σημείο αυτό έχουμε κάνει μια πολύ καλή προσέγγιση στην ζητούμενη μεταβλητή, εάν επιθυμούμε να υπολογίσουμε ακριβώς την τάση εφελκυσμού θα πρέπει να πραγματοποιήσουμε τοπική ανάλυση ευαισθησίας.

2.9.2 Local Sensitivity

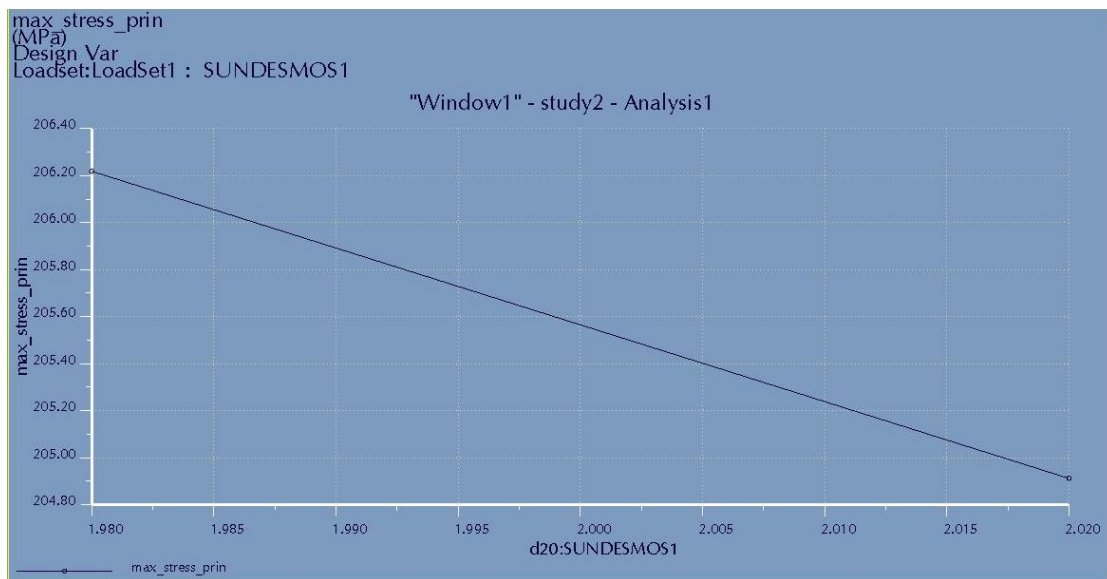
Ξεκινάμε τη διαδικασία όπως πριν επιλέγοντας να δημιουργήσουμε μια νέα ανάλυση ευαισθησίας.

Στο πλαίσιο Type επιλέγουμε Local Sensitivity και επιλέγουμε την στατική ανάλυση που είχαμε πραγματοποιήσει στο προηγούμενο στάδιο για εξαγωγή αποτελεσμάτων. Στο πλαίσιο της εισαγωγής μεταβλητής ακολουθούμε την ίδια διαδικασία. Η διάφορα εστιάζεται στο γεγονός ότι πρέπει να εισάγουμε μια συγκεκριμένη τιμή της μεταβλητής και όχι ένα εύρος τιμών όπως στην προηγούμενη περίπτωση.



Εικόνα 109: Επιλογή παραμέτρων στη τοπική μελέτη ευαισθησίας

Επιλέγουμε την τιμή 2mm για να υπολογίσουμε την ακριβή τιμή της μέγιστης εφελκυστικής τάσης. Τέλος επιλέγουμε Ok και Run. Αφού ολοκληρωθεί η μελέτη επιλέγουμε το εικονίδιο Review Results και εμφανίζεται το παράθυρο Result Window Definition. Το παράθυρο Result Window Definition είναι όμοιο με εκείνο στη μελέτη Global Sensitivity. Επιλέγουμε ως εξεταζόμενο μέγεθος τη μέγιστη τάση εφελκυσμού (max tensile) και ως μεταβλητή έχουμε ορίσει τη d20 που αντιστοιχεί στην ακτίνα του τεταρτοκύκλιου. Η γραφική παράσταση παρουσιάζεται παρακάτω.



Διάγραμμα 4: Μεταβολή μέγιστης τάσης γύρω από την επιλεγμένη τιμή ακτίνας

Όπως και στο προηγούμενο διάγραμμα όσο αυξάνεται η ακτίνα μειώνεται η μέγιστη εφελκυστική τάση με τη διάφορα όμως σε αυτό το διάγραμμα είναι ότι η ακρίβεια στη μεταβλητή είναι σε χιλιοστά του χιλιοστού. Για τη ζητούμενη ακτίνα δηλαδή 2mm η μέγιστη εφελκυστική τάση είναι 205.55 MPa.

Η μελέτη ευαισθησίας είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για να υπολογίζουμε τις ακριβείς διαστάσεις εάν γνωρίζουμε την ακριβή τιμή ενός μεγέθους και αντίστροφα.

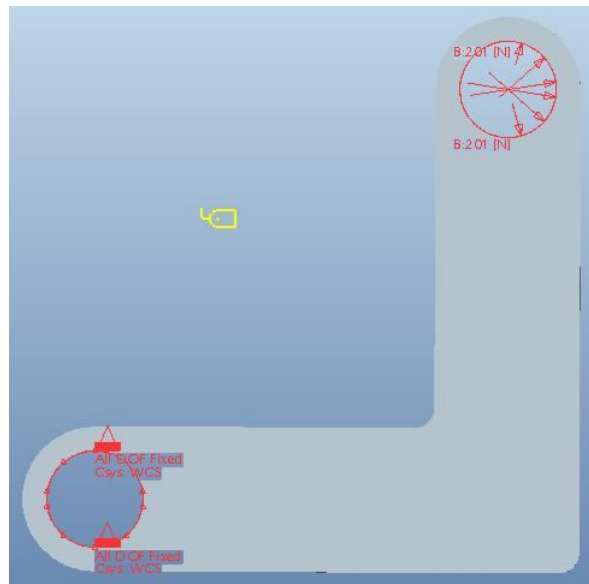
2.10 Optimization Design Study

Στη μελέτη βελτιστοποίησης μπορούμε να τροποποιήσουμε τις διαστάσεις ενός αντικειμένου εάν γνωρίζουμε τις μηχανικές ιδιότητες που πρέπει να έχει το συγκεκριμένο αντικείμενο. Παρακάτω παρουσιάζεται μια μελέτη βελτιστοποίησης όπου αναλύονται οι παράμετροι που πρέπει να οριστούν από το χρήστη. Αρχικά θα πραγματοποιήσουμε μια στατική ανάλυση για να έχουμε έτοιμα δεδομένα, στη συνέχεια θα πραγματοποιήσουμε μια ανάλυση ευαισθησίας. Τέλος βασιζόμενοι στα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης και της μελέτης ευαισθησίας θα πραγματοποιήσουμε την μελέτη βελτιστοποίησης. Το αντικείμενο που θα χρησιμοποιήσουμε παρουσιάζεται δίπλα.



Εικόνα 110: Απεικόνιση αντικειμένου

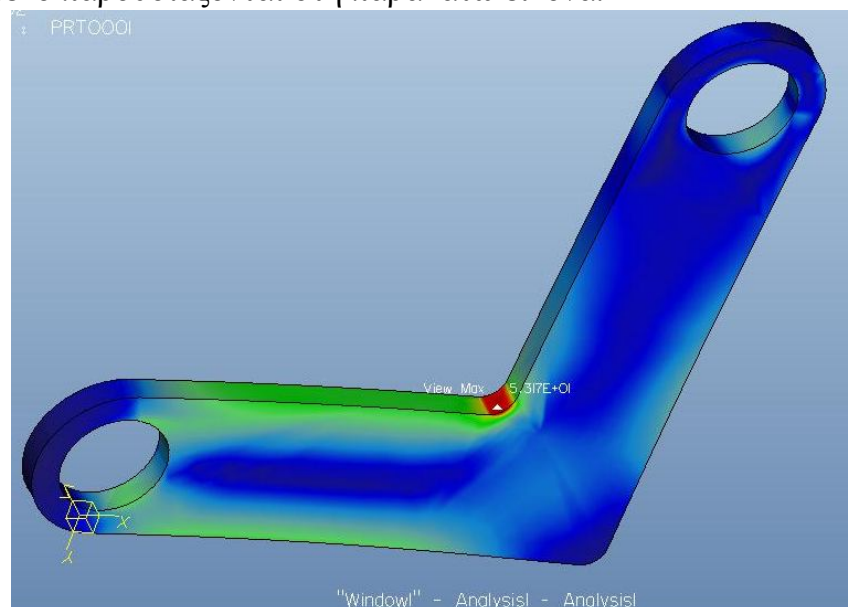
Θα ξεκινήσουμε με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της στατικής ανάλυσης. Τοποθετούμε ένα φορτίο εδράσεις στην μια οπή και τους περιορισμούς στην άλλη, ακόμα επιλέγουμε το υλικό κατασκευής του αντικειμένου (steel). Πραγματοποιούμε τη στατική ανάλυση και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν για την κατασκευή του αντικειμένου. Τα μεγέθη που θα εξετάσουμε είναι η μέγιστη παραμόρφωση και η μέγιστη τάση



Εικόνα 111: Απεικόνιση αντικειμένου με τοποθέτηση υλικού, οριακών συνθηκών και φορτίου

που παρατηρείται στο μοντέλο. Επιλέξαμε τα παραπάνω μεγέθη διότι θέλουμε το αντικείμενο να πληροί κάποιες προδιαγραφές για την αντοχή και την μετατόπιση καθώς θα τοποθετηθεί σε μια συναρμογή.

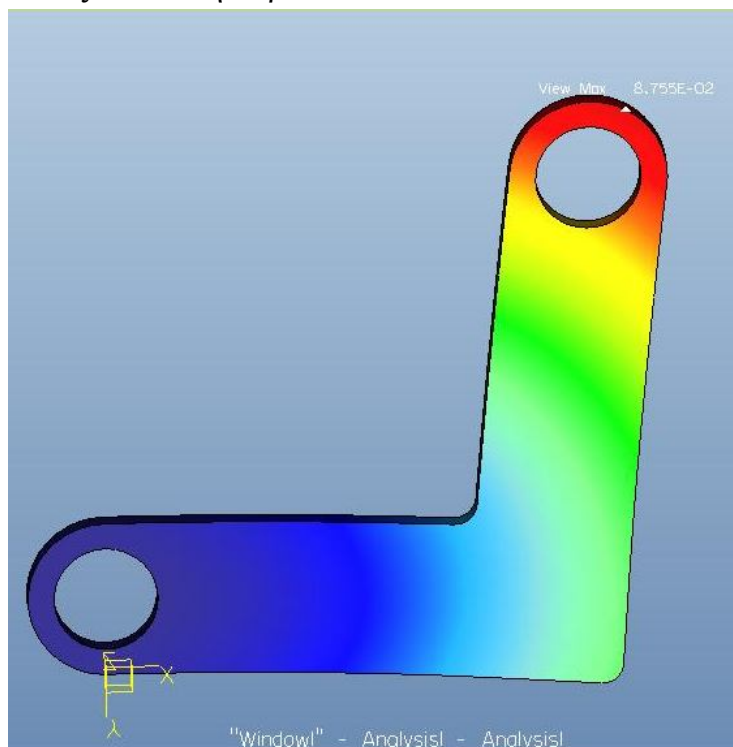
Τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης για την τάση που αναπτύσσεται στο μοντέλο παρουσιάζονται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 112: Απεικόνιση μέγιστης τάσης

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τάση παρατηρείται στην γωνία του αντικειμένου κάτι αναμενόμενο. Για να δούμε ποια είναι η μέγιστη τιμή και σε ποιο σημείο εφαρμόζεται επιλέγουμε από το παράθυρο των αποτελεσμάτων το εικονίδιο Info και στη συνέχεια από τη λίστα που ανοίγει επιλέγουμε View Max.

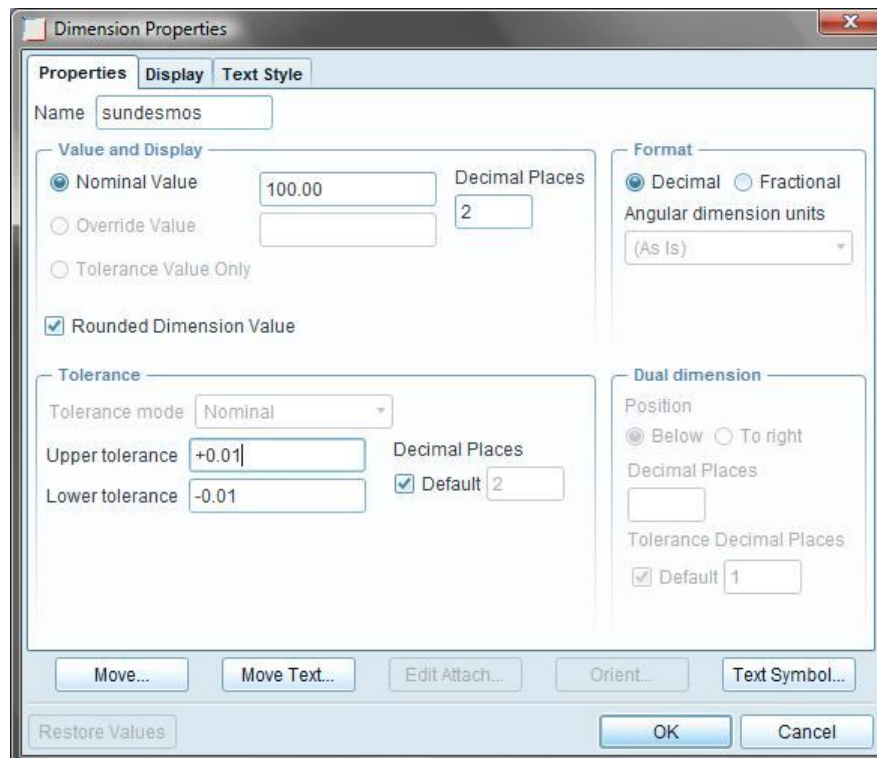
Τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης για την μετατόπιση στο μοντέλο παρουσιάζονται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 113: Απεικόνιση μέγιστης μετατόπισης

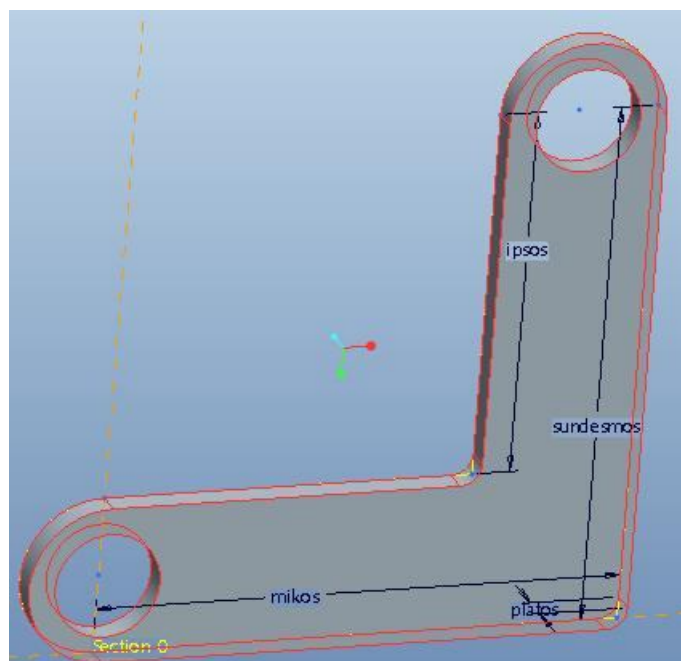
Ολοκληρώσαμε την στατική ανάλυση και υπολογίσαμε τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν για την κατασκευή του μοντέλου. Οι αρχικές διαστάσεις που χρησιμοποιήσαμε κατά την κατασκευή μπορούν να τροποποιηθούν κατά ένα βαθμό έτσι ώστε να μπορεί το αντικείμενο να τοποθετηθεί στη συναρμογή. Τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης έχουν ως εξής. Η μέγιστη τάση που παρατηρείται στο μοντέλο εντοπίζεται στη γωνία του αντικειμένου και είναι 53MPa και η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στο άκρο όπου ασκείται το φορτίο και είναι 0.087mm. Οι τιμές των μεγεθών που υπολογίσαμε δεν είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια για το λόγο αυτό πρέπει να επανασχεδιάσουμε το αντικείμενο. Η μέγιστη τάση που πρέπει να ασκείται στο αντικείμενο είναι 24MPa και η μέγιστη μετατόπιση που πρέπει να παρατηρείται στο αντικείμενο είναι 0.05mm. Η τακτική που θα ακολουθήσουμε είναι να πραγματοποιήσουμε μια μελέτη ευαισθησίας ώστε να υπολογίσουμε περίπου τις διαστάσεις του αντικειμένου. Αρχικά θα αλλάξουμε το όνομα των διαστάσεων για να μπορούμε να διακρίνουμε ευκολότερα ποιες διαστάσεις μεταβάλλονται καθώς και να μπορέσουμε να ορίσουμε τις σχέσεις που πρέπει να αναπτύσσονται μεταξύ των διαστάσεων. Για να αλλάξουμε τα ονόματα των διαστάσεων ακολουθούμε την εξής διαδικασία. Μεταβαίνουμε στην Standard επιλογή του Pro\Engineer και επιλέγουμε από το model tree το Extrude1, πατάμε παρατεταμένα δεξί κλικ, από τη λίστα που ανοίγει επιλέγουμε Edit και

εμφανίζονται οι διαστάσεις πάνω στο αντικείμενο. Στη συνέχεια επιλέγουμε με αριστερό κλικ την διάσταση που θέλουμε να μετονομάσουμε και με δεξί παρατεταμένο κλικ επιλέγουμε από τη λίστα που εμφανίζεται Properties, ένα νέο παράθυρο ανοίγει όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε τις λεπτομέρειες των διαστάσεων. Στο πάνω μέρος αλλάζουμε το όνομα και επιλέγουμε Οκ. Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία για όλες τις διαστάσεις. Το παράθυρο με τις ιδιότητες των διαστάσεων παρουσιάζεται παρακάτω.



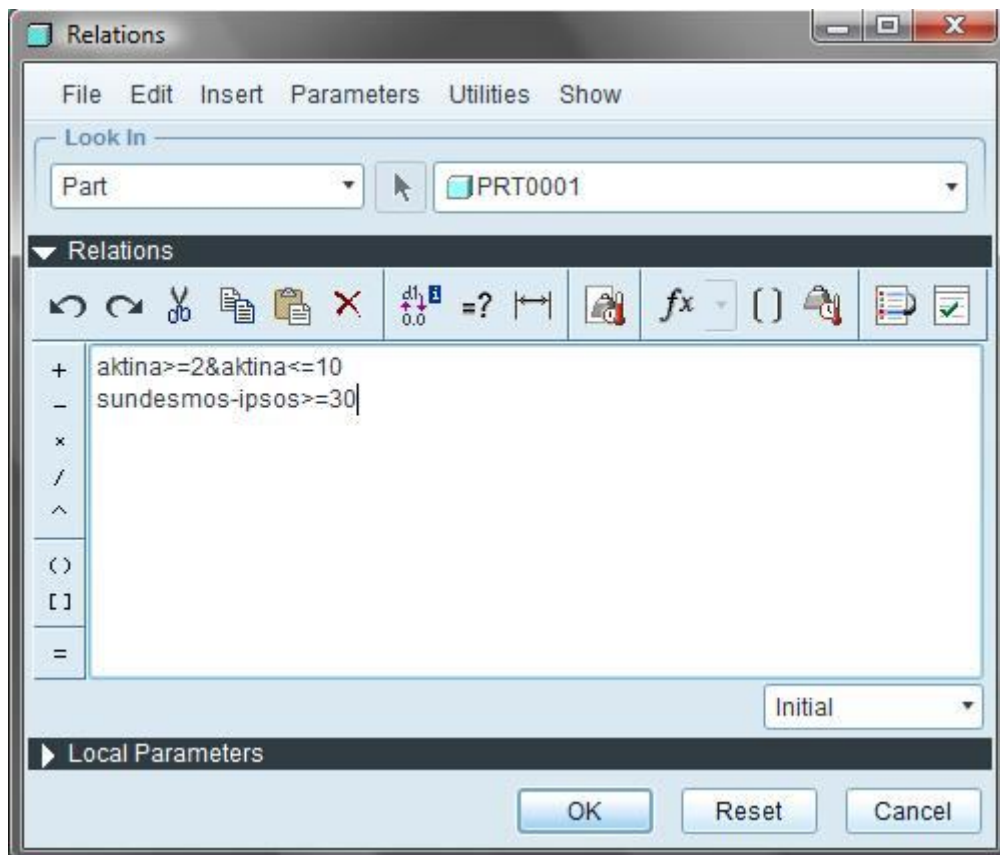
Εικόνα 114: Παράθυρο με τις ιδιότητες των διαστάσεων

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία για όλες τις διαστάσεις. Αφού τελειώσουμε με όλες τις διαστάσεις επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Info→Switch Dimensions και το αντικείμενο έχει την εξής μορφή.



Εικόνα 115: Απεικόνιση των διαστάσεων με ονόματα

Στη συνέχεια ορίζουμε τις σχέσεις μεταξύ των διαστάσεων που πρέπει να βρίσκονται μέσα σε όρια. Οι διαστάσεις που οριοθετούμε είναι οι εξής: aktina, syndesmos, ipsos. Οι σχέσεις που δημιουργήσαμε παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 116: Παράθυρο ορισμού των σχέσεων των διαστάσεων

Η ακτίνα πρέπει να είναι από 2 έως 10 mm ενώ η διάφορα των δυο άλλων διαστάσεων πρέπει να είναι μεγαλύτερη όση των 30mm.

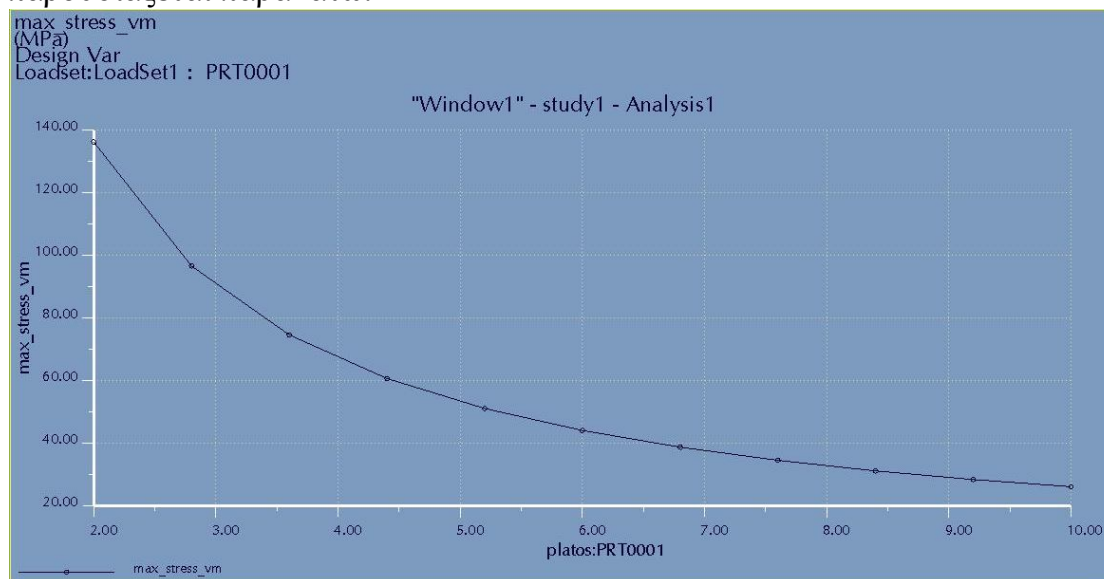
Έχουμε ολοκληρώσει την διαδικασία προετοιμασίας και μπορούμε να συνεχίσουμε με την ανάλυση ευαισθησίας. Επιλέγουμε ως τύπο μελέτης Global Sensitivity και εξάγουμε δεδομένα από την ανάλυση Analysis1 Static. Η μεταβλητή που επιλέγουμε είναι το platos και οι τιμές που επιλέγουμε παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.

Variable	Current	Start	End	Units
platos	5	2	10	mm

Εικόνα 117: Εύρος τιμών της διάστασης platos

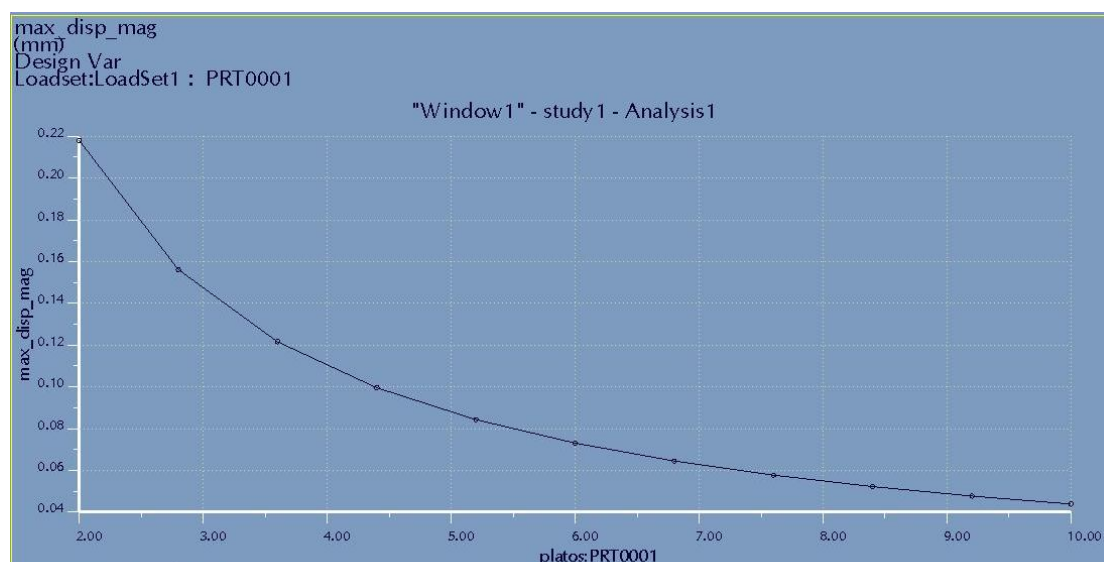
Επιλέγουμε Ok και Run, αφού ολοκληρωθεί η μελέτη επεξεργαζόμαστε τα παρακάτω μεγέθη.

Πρώτα δημιουργούμε το διάγραμμα για τη μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο μοντέλο σε σχέση με το πλάτος, το γραφικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται παρακάτω.



Διάγραμμα 5: Μεταβολή μέγιστης τάσης σε σχέση με το πλάτος

Παρατηρούμε ότι μέχρι τα 6mm η γραφική παράσταση παρουσιάζει μεγάλη κλίση ενώ μετά τα 6mm ομαλοποιείται η κλίση της καμπύλης. Επίσης παρατηρούμε ότι για να πλησιάσουμε το όριο των 24MPa πρέπει το πλάτος να αυξηθεί. Ακολουθεί το διάγραμμα για τη μέγιστη μετατόπιση σε σχέση με το πλάτος. Η γραφική παράσταση παρουσιάζεται παρακάτω.



Διάγραμμα 6: Μεταβολή μέγιστης μετατόπισης σε σχέση με το πλάτος

Όμοια με το προηγούμενο διάγραμμα παρατηρούμε ότι μέχρι τα 6mm η γραφική παράσταση παρουσιάζει μεγάλη κλίση ενώ μετά τα 6mm ομαλοποιείται η κλίση της καμπύλης. Επίσης για να πλησιάσουμε στο όριο των 0.05mm πρέπει να αυξηθεί το πλάτος του αντικειμένου.

Στο επόμενο βήμα για τον υπολογισμό του πλάτους του αντικειμένου θα πραγματοποιήσουμε μελέτη βελτιστοποίησης. Στόχος είναι το αντικείμενο να βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων και να έχει τη μικρότερη μάζα. Αρχικά επιλέγουμε να δημιουργήσουμε μια νέα μελέτη βελτιστοποίησης από το παράθυρο Analyses and Design Studies, το παράθυρο που εμφανίζεται παρακάτω.

Optimization Study Definition

Name: study3

Description:

Type: Optimization

Goal: Minimize total_mass

Design Limits:

Measure		Value	Units
max_disp...	<	0.050000	mm
max_stre...	<	24.000000	N / mm^2

Analysis: Analysis1

Loadset:

Name	Component
LoadSet1	PRT0001

Variables:

Variable	Current	Minimum	Initial	Maximum	Units
aktina	4	3	4	8	mm
platos	5	4	5	9	mm

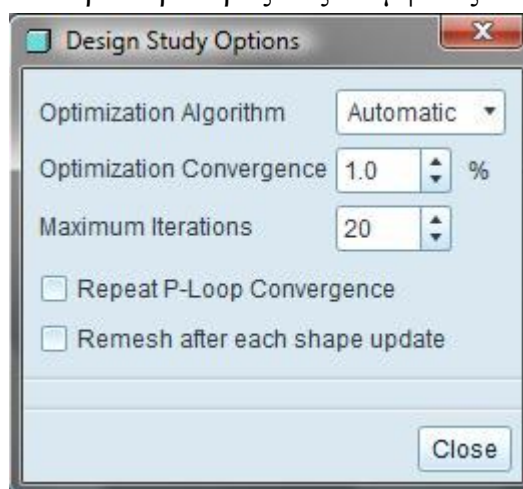
Options...

OK Cancel

Εικόνα 118: Επιλογή παραμέτρων στη μελέτη βελτιστοποίησης

Στα πλαίσια Name και Description ορίζουμε το όνομα και την περιγραφή της μελέτης. Στο πλαίσιο Type επιλέγουμε το είδος της μελέτης και παρακάτω επιλέγουμε να ελαχιστοποιήσουμε τη συνολική μάζα του αντικειμένου. Στη συνέχεια επιλέγουμε τα όρια των μεγεθών, στο συγκεκριμένο παράδειγμα η μέγιστη μετατόπιση πρέπει να είναι μικρότερη από 0.05mm και η μέγιστη τάση πρέπει να είναι μικρότερη από 24MPa. Τα πλαίσια Analysis και LoadSet συμπληρώνονται αυτόματα από το λογισμικό.

Τέλος στο πλαίσιο Variables εισάγουμε τις μεταβλητές aktina και platos ορίζουμε τις τιμές για κάθε μεταβλητή. Από αριστερά προς δεξιά εμφανίζεται η παρούσα τιμή της μεταβλητής, η ελάχιστη τιμή, η αρχική τιμή και η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει. Στη συνέχεια επιλέγουμε το εικονίδιο Options και εμφανίζεται το παράθυρο Design study options. Στο συγκεκριμένο παράθυρο μπορούμε να επιλέξουμε ποιο αλγόριθμο βελτιστοποίησης θα χρησιμοποιήσουμε στη μελέτη. Οι επιλογές που έχουμε



είναι οι εξής:

Εικόνα 119: Επιλογή αλγορίθμου και ποσοστό σύγκλισης στη μελέτη βελτιστοποίησης

- **Automatic:** Επιλέγοντας την αυτόματη επιλογή αλγορίθμου το Mechanica ξεκινά την μελέτη χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο SQP. Ωστόσο αν το Mechanica συναντήσει ένα μη έγκυρο μοντέλο κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης και αποτυγχάνει να ανακτήσει το μοντέλο με αποτέλεσμα να μην μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα τότε μεταβαίνει αυτόματα στον αλγόριθμο GDP για το υπόλοιπο της μελέτης.
- **SQP (Sequential Quadratic Programming):** Επιλέγουμε τον ακολουθητικό τετραγωνικό προγραμματισμό για να υπολογίσουμε το βέλτιστο σχεδιασμό ταχύτερα από τον GDP. Το μειονέκτημα είναι ότι ο SQP δεν εγγυάται ότι το μοντέλο πληροί τα όρια στο τέλος κάθε επανάληψης. Εγγυάται μόνο ότι ο βέλτιστος σχεδιασμός ικανοποιεί τα όρια που έχουμε θέσει. Αυτό σημαίνει ότι αν ο SQP δεν μπορεί να βρει τη βέλτιστη λύση μπορεί να μην υπάρχουν ενδιάμεσα σχέδια που είναι βελτιώσεις του αρχικού μοντέλου.
- **GDP (Gradient Projection):** Επιλέγουμε τον αλγόριθμο τύπου Gradient εάν η ταχύτητα δεν είναι σημαντικός παράγοντας για τη βελτιστοποίηση ενός μοντέλου. Ο GDP παράγει μια σειρά από ενδιάμεσα σχέδια που ικανοποιούν τα όρια που έχουμε ορίσει, ενώ πλησιάζει όλο και περισσότερο στο ζητούμενο στόχο.

Στη συνέχεια χρησιμοποιούμε τη σύγκλιση βελτιστοποίησης για να καθορίσουμε το ποσοστό που θα χρησιμοποιεί το Mechanica για να καθορίσει τότε η βελτιστοποίηση έχει συγκλίνει. Το Mechanica προσαρμόζει το μοντέλο σε μια σειρά από βήματα μέχρι η λύση να ικανοποιεί ένα από τα παρακάτω κριτήρια:

- Η μεταβολή του μεγέθους από το προηγούμενο στάδιο βελτιστοποίησης σε σχέση με την αρχική τιμή του να είναι μικρότερη από την τιμή σύγκλισης.
- Η μεταβολή του μεγέθους σε σχέση τις μεταβλητές σχεδιασμού είναι εντός της τιμής σύγκλισης (η κλίση της γραφικής παράστασης μεγέθους-μεταβλητών σχεδιασμού είναι κοντά στο μηδέν).
- Το αντικείμενο δεν μπορεί να βελτιωθεί περισσότερο χωρίς να παραβιάζονται ένα ή περισσότερα από τα καθορισμένα όρια.

Το Mechanica συνεχίζει τη μελέτη βελτιστοποίησης μέχρι να φτάσει είτε την τιμή σύγκλισης ή τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που ορίσαμε.

Ως τιμή σύγκλισης μπορούμε να εισάγουμε οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 0 και 100. Ωστόσο αν εισάγουμε έναν αριθμό κάτω του 0,1 ή άνω του 25 όταν κάνουμε κλικ στο εικονίδιο Close το Mechanica μας ζητά να επιβεβαιώσουμε την τιμή που δώσαμε.

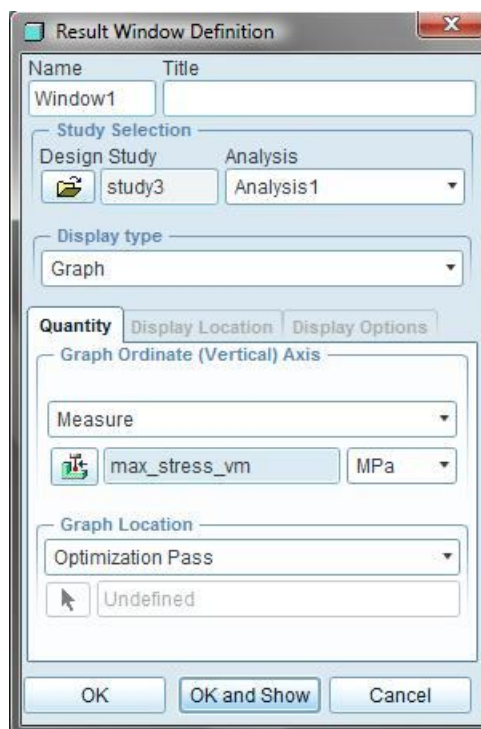
Στο πλαίσιο Maximum Iterations ορίζουμε τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των επαναλήψεων τόσο περισσότερο αυξάνεται ο χρόνος βελτιστοποίησης. Η μικρότερη τιμή για τον αριθμό επαναλήψεων που μπορούμε να επιλέξουμε είναι 1. Ωστόσο αν επιλέξουμε περισσότερες από 50 επαναλήψεις όταν κάνουμε κλικ στο εικονίδιο Close το Mechanica μας ζητά να επιβεβαιώσουμε την τιμή που δώσαμε.

Στη συνέχεια μπορούμε να ενεργοποιήσουμε ή να απενεργοποιήσουμε την επιλογή Repeat P-Loop Convergence. Όταν είναι ενεργοποιημένη η επιλογή το Mechanica υπολογίζει μετά από κάθε πέρασμα τον αριθμό του πολυωνύμου που απαιτείται για κάθε ένα από τα στοιχεία του πλέγματος. Ενεργοποιώντας την συγκεκριμένη επιλογή αυξάνουμε αρκετά τον χρόνο υπολογισμού της βέλτιστης λύσης, έχουμε όμως καλύτερο αποτέλεσμα εάν θέλουμε να αλλάξουμε σε μεγάλο βαθμό το σχήμα του αντικειμένου.

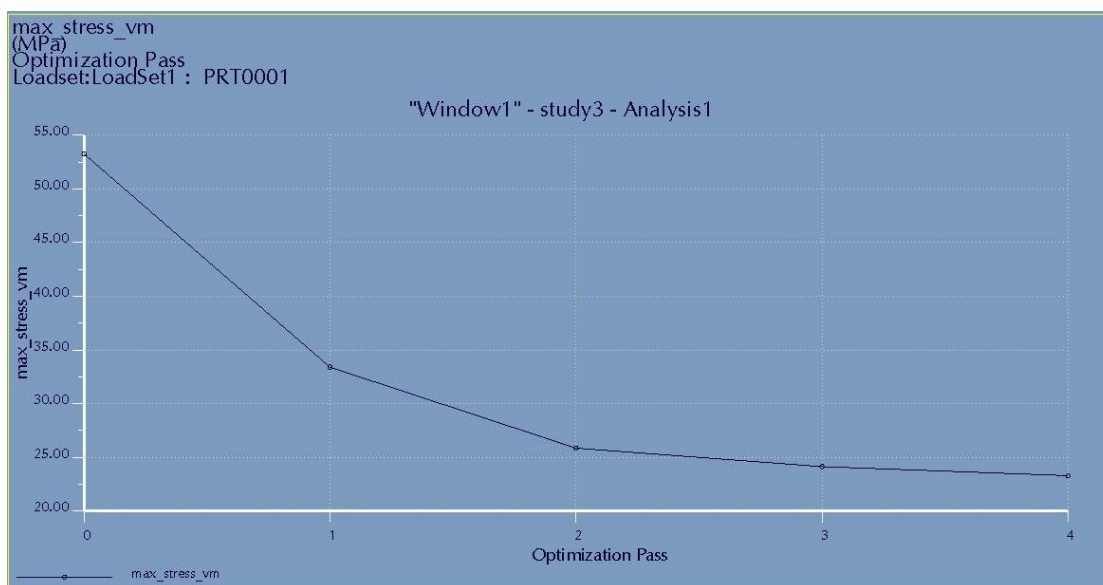
Τέλος μπορούμε να ενεργοποιήσουμε ή να απενεργοποιήσουμε την επιλογή Remesh after each shape update. Ενεργοποιώντας την επιλογή το Mechanica επαναπροσδιορίζει το πλέγμα του αντικειμένου μετά από κάθε βήμα.

Έχουμε καθορίσει όλες τις παραμέτρους στο παράθυρο Optimization Study Definition και μπορούμε να ξεκινήσουμε τη μελέτη βελτιστοποίησης. Επιλέγουμε Ok → Run και πραγματοποιούμε διαγνωστικό έλεγχο. Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της ανάλυσης κυμαίνεται στα 10 λεπτά. Τα αποτελέσματα της μελέτης βελτιστοποίησης παρουσιάζονται παρακάτω.

Στο παράθυρο Result Window Definition επιλέγουμε ως τύπο απεικόνισης Graph και ως εξεταζόμενο μέγεθος επιλέγουμε Measure. Από τη λίστα που εμφανίζεται επιλέγουμε αρχικά max_stress_vm και στη συνέχεια max_disp_mag. Οι γραφικές παραστάσεις παρουσιάζονται παρακάτω.

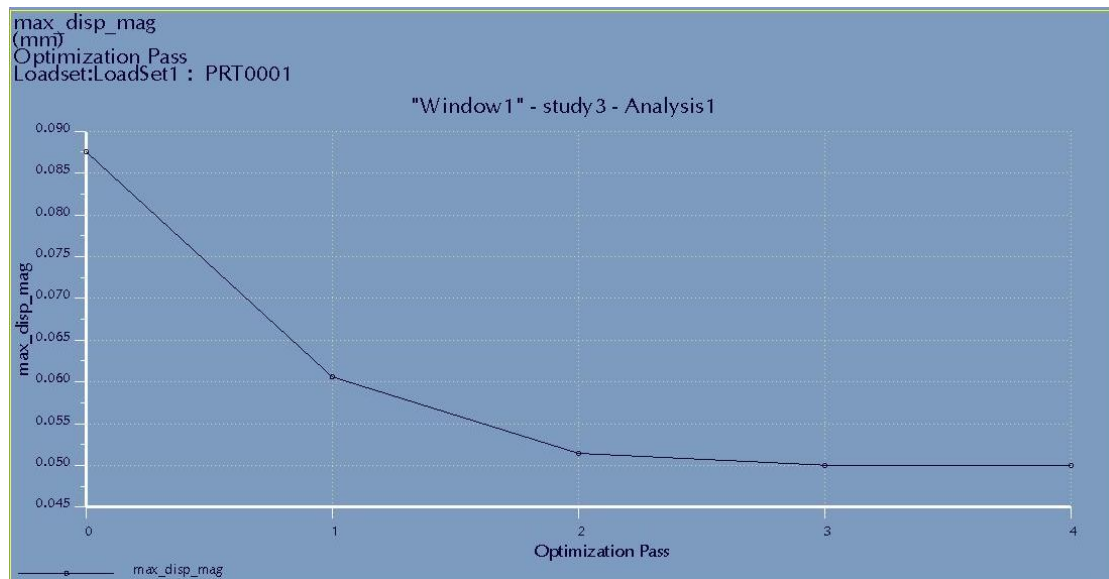


Εικόνα 120: Παράθυρο επεξεργασίας εμφάνισης των αποτελεσμάτων στη μελέτη βελτιστοποίησης



Διάγραμμα 7: Απεικόνιση της μέγιστης τάσης σε κάθε πέρασμα του αλγορίθμου

Στο γράφημα παρατηρούμε ότι η μέγιστη τάση μειώνεται σε κάθε βήμα βελτιστοποίησης μέχρι το τέταρτο πέρασμα όπου σταματά η βελτιστοποίηση καθώς φτάνουμε στο στόχο που είχαμε ορίσει (24MPa). Η διαδικασία διακόπτεται καθώς έχουμε επιλέξει να ελαχιστοποιήσουμε τη συνολική μάζα του αντικειμένου. Ακολουθεί το γράφημα για τη μέγιστη μετατόπιση.



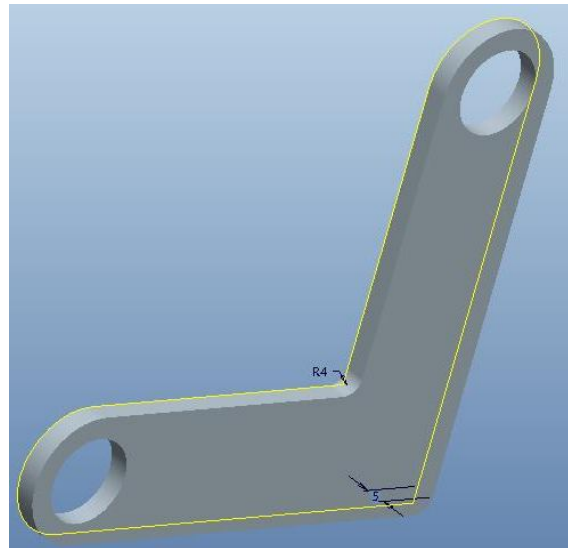
Διάγραμμα 8: Απεικόνιση της μέγιστης μετατόπισης σε κάθε πέρασμα του αλγορίθμου

Στο γράφημα παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση μειώνεται σε κάθε βήμα βελτιστοποίησης μέχρι το τρίτο πέρασμα όπου σταματά η βελτιστοποίηση καθώς φτάνουμε στο στόχο που είχαμε ορίσει (0.05mm), η βελτιστοποίηση συνεχίζεται καθώς στο τρίτο βήμα δεν έχει ικανοποιηθεί ο περιορισμός της μέγιστης τάσης.

Κλείνουμε το παράθυρο που παρουσιάζονται τα διαγράμματα και επιλέγουμε τη μελέτη βελτιστοποίησης που έχουμε δημιουργήσει. Από τη γραμμή εργαλείων του παράθυρου Analyses and Design Studies επιλέγουμε Info→Optimize History. Στο πάνω μέρος του κεντρικού παράθυρου εμφανίζεται ένα πλαίσιο με την εξής ερώτηση: Do you want to review the next shape?. Επιλέγουμε το γράμμα y που αντιστοιχεί στην απάντηση yes και προχωρούμε στο επόμενο σχήμα που έχει υποστεί βελτιστοποίηση. Σε κάθε βήμα μπορούμε να παρατηρήσουμε πάνω στο μοντέλο τις διαστάσεις που αντιστοιχούν σε κάθε βήμα. Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία μέχρι να ολοκληρωθούν όλα τα βήματα της βελτιστοποίησης, στο τέλος εμφανίζεται η ερώτηση: Leave the model at the optimized shape?. Απαντάμε πάλι y για να κρατήσουμε το βελτιστοποιημένο αντικείμενο. Αν επιθυμούμε να μελετήσουμε τις τιμές των μεγεθών και των διαστάσεων σε κάθε βήμα μπορούμε να επιλέξουμε Info→Status και θα έχουμε λεπτομερή αναφορά για κάθε βήμα που ακολουθήθηκε.

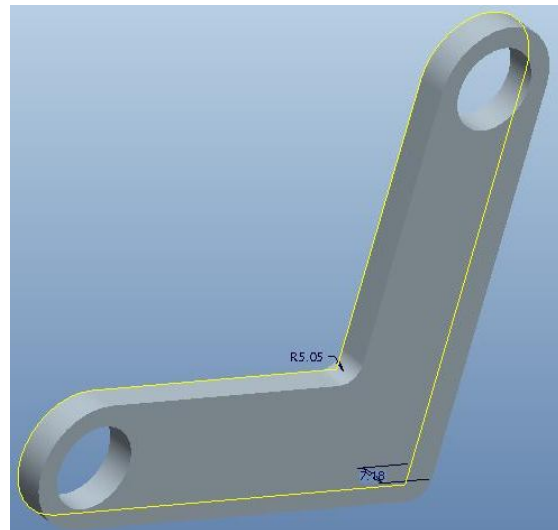
Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τη σταδιακή αλλαγή του αντικειμένου μέσα από μια σειρά εικόνων. Η σειρά των εικόνων αντιστοιχεί και στη σειρά των βημάτων που ακολουθήθηκαν.

- aktina: 4mm
- platos: 5mm
- max stress: 53.26MPa
- max disp: 8.75mm



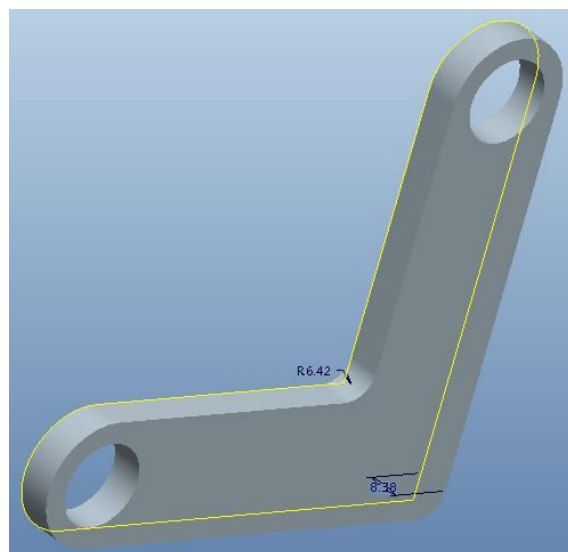
Εικόνα 121: Απεικόνιση αντικειμένου στο πρώτο πέρασμα

- aktina: 5.04mm
- platos: 7.18mm
- max stress: 33.3MPa
- max disp: 6.05mm



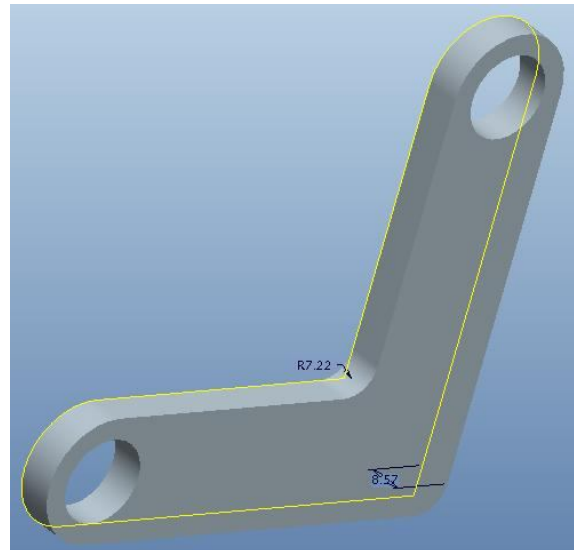
Εικόνα 122: Απεικόνιση αντικειμένου στο δεύτερο πέρασμα

- aktina: 6.41mm
- platos: 8.38mm
- max stress: 25.8MPa
- max disp: 5.14mm



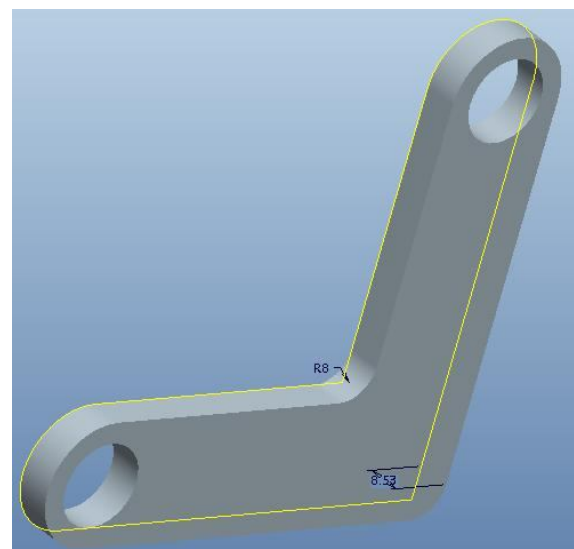
Εικόνα 123: Απεικόνιση αντικειμένου στο τρίτο πέρασμα

- aktina: 7.22mm
- platos: 8.57mm
- max stress: 24.13MPa
- max disp: 5.002mm



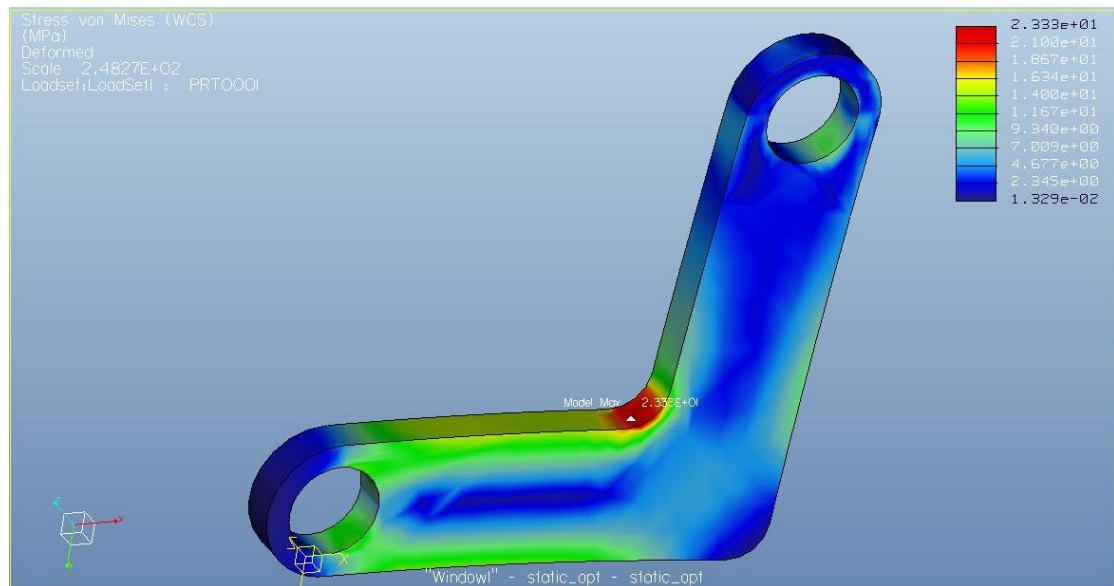
Εικόνα 124: Απεικόνιση αντικειμένου στο τέταρτο πέρασμα

- aktina: 8mm
- platos: 8.53mm
- max stress: 23.29MPa
- max disp: 4.99mm



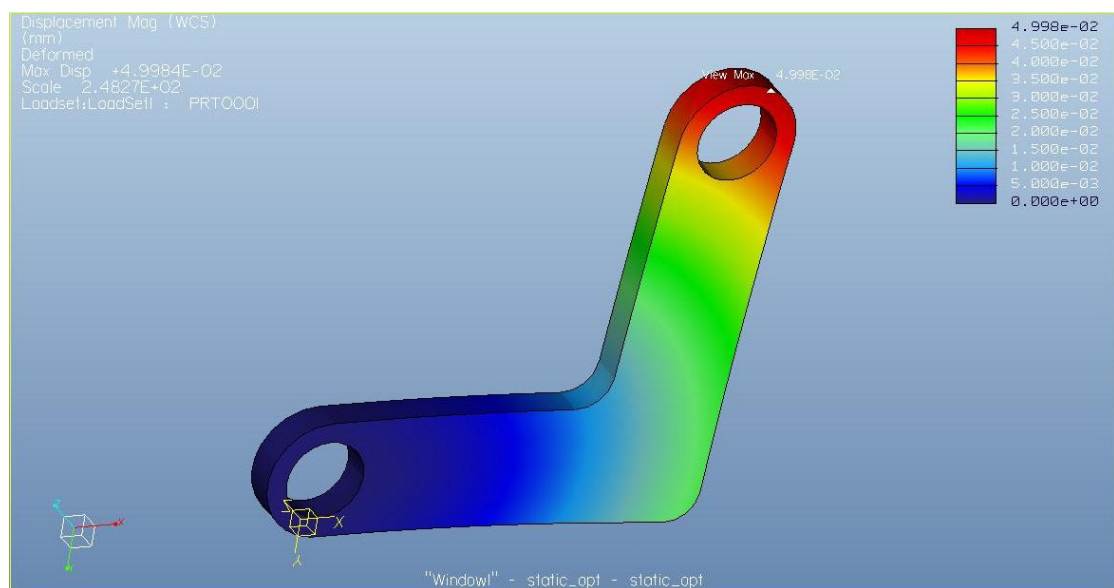
Εικόνα 125: Απεικόνιση αντικειμένου στο πέμπτο πέρασμα

Οι τιμές των μεγεθών και των μεταβλητών που έχουμε ορίσει προς βελτιστοποίηση παρουσιάζονται στην τελευταία εικόνα. Στη συνέχεια αποθηκεύουμε το αντικείμενο για να διατηρήσει τη μορφή του. Τέλος μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μια νέα στατική ανάλυση έτσι ώστε να επαληθεύσουμε τα αποτελέσματα. Επιλέγουμε να δημιουργήσουμε μια νέα στατική ανάλυση, τα φορτία και οι περιορισμοί παραμένουν όμοια, πραγματοποιούμε την στατική ανάλυση και επιλέγουμε να δούμε την μέγιστη τάση που παρατηρείται στο μοντέλο (stress vm). Σύμφωνα με τη βελτιστοποίηση που πραγματοποιήσαμε στο προηγούμενο στάδιο η μέγιστη τιμή της τάσης πρέπει να είναι 24MPa. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης.



Εικόνα 126: Απεικόνιση της μέγιστης τάσης στο βελτιστοποιημένο μοντέλο

Η μέγιστη τάση παρατηρείται στο ίδιο σημείο με το αρχικό σχέδιο αλλά έχει μειωθεί στα επιτρεπτά όρια.



Εικόνα 127: Απεικόνιση της μέγιστης μετατόπισης στο βελτιστοποιημένο μοντέλο

Η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στο ίδιο σημείο με το αρχικό σχέδιο αλλά έχει μειωθεί στα επιτρεπτά όρια.

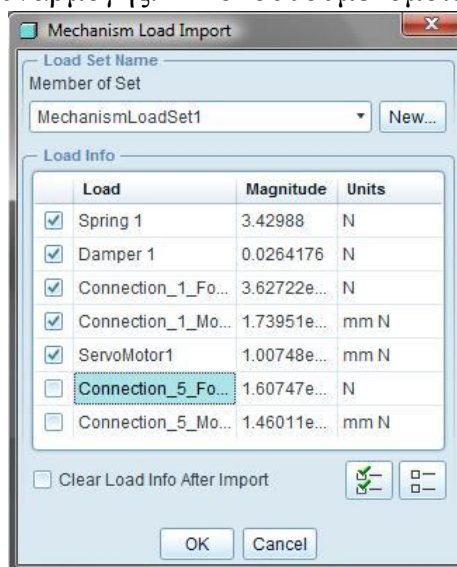
Έχουμε ολοκληρώσει την παρουσίαση των αναλύσεων και των μελετών που μπορούμε να διεξάγουμε με το Pro\Mechanica. Δεν έχουμε καλύψει όμως όλο το εύρος προβλημάτων που μπορούμε να επιλύσουμε με το Pro\Mechanica στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε σύνθετα παραδείγματα.

2.11 Συναρμογές

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε πως πραγματοποιούμε αναλύσεις και μελέτες σε συναρμογές και όχι μεμονωμένα αντικείμενα για καλύτερη προσέγγιση σε προβλήματα που αντιμετωπίζει ο χρήστης σε πραγματικό επίπεδο. Τα προβλήματα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, στους κινούμενους μηχανισμούς και στις στατικές συναρμογές. Στην πρώτη περίπτωση τα αντικείμενα που αποτελούν τη συναρμογή μπορούν να κινούνται ενώ στη δεύτερη περίπτωση τα αντικείμενα είναι σταθερά. Για την επίλυση των κινούμενων μηχανισμών η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι εκείνη που παρουσιάσαμε στην παράγραφο Mechanism Load δηλαδή κατασκευάζουμε το μηχανισμό ορίζουμε τους περιορισμούς, τις δυνάμεις και τα είδη των κινήσεων που πραγματοποιούν τα αντικείμενα που αποτελούν το μηχανισμό και εξάγουμε τις δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε ένα αντικείμενο ξεχωριστά. Στην περίπτωση των στατικών συναρμογών η μεθοδολογία είναι διαφορετική. Αφού κατασκευάσουμε τα αντικείμενα που αποτελούν τη συναρμογή, τα συναρμολογούμε και στη συνέχεια εισάγουμε ολόκληρη τη συναρμογή στο Mechanica όπου ορίζουμε τα σημεία και το είδος της επαφής των αντικειμένων. Στη συνέχεια ακολουθείται όμοια διαδικασία με εκείνη που ακολουθήσαμε στις αναλύσεις που παρουσιάσαμε παραπάνω.

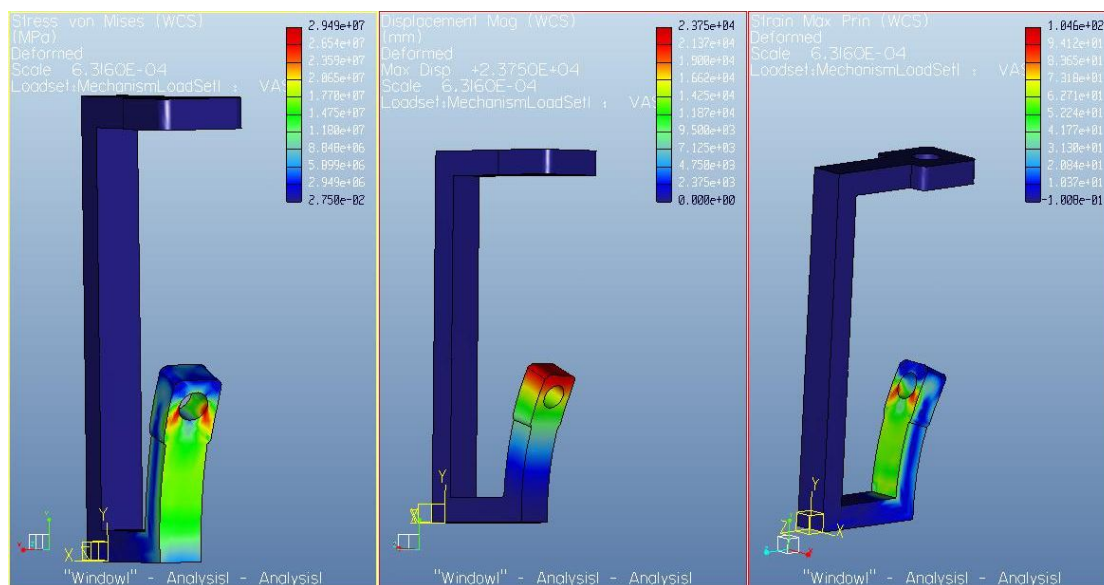
2.11.1 Μηχανισμοί

Θα χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα της ανάρτησης που παρουσιάστηκε αναλυτικά η κατασκευή και συνδεσμολογία σε προηγούμενο κεφάλαιο. Επιλέγουμε το αντικείμενο vasi που έχουμε αποθηκεύσει το φορτίο που ασκείται από τα υπόλοιπα μέρη της συναρμογής. Ακολουθούμε όμοια διαδικασία με τις προηγούμενες στατικές αναλύσεις που πραγματοποιήσαμε, ορίζουμε το υλικό κατασκευής και τους περιορισμούς. Το σκέλος της διαδικασίας που διαφοροποιείται είναι η προσθήκη των φορτιών που είναι αποθηκευμένα στο αντικείμενο. Επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων Info→Mechanism Load και ανοίγει το αντίστοιχο παράθυρο. Επιλέγουμε από τη λίστα ποια φορτία θα εισάγουμε στο αντικείμενο και πατάμε Οκ. Στη συνέχεια από το δένδροδιάγραμμα επιλέγουμε κάθε φορτίο και με δεξί κλικ



Εικόνα 128: Εισαγωγή φορτίου από την ανάλυση μηχανισμού

εμφανίζεται μια λίστα, επιλέγουμε Edit definition και ανοίγει το παράθυρο όπου ορίζουμε τις παραμέτρους κάθε φορτίου. Πρέπει να ορίσουμε σημείο εφαρμογής του φορτίου. Ανάλογα με το φορτίο ορίζουμε και διαφορετικό σημείο εφαρμογής. Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία για κάθε φορτίο ξεχωριστά. Αφού ορίσουμε τα σημεία εφαρμογής για όλα τα φορτία μπορούμε να προχωρήσουμε με την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 129: Απεικόνιση της τάσης, της μετατόπισης, της ενέργειας παραμόρφωσης

Για να παρουσιάσουμε συνεπτυγμένα τα αποτελέσματα σε ένα παράθυρο αποτελεσμάτων επιλέγουμε στο τρέχων παράθυρο Edit→Copy και επιλέγουμε ένα νέο μέγεθος.

2.11.2 Συναρμογή

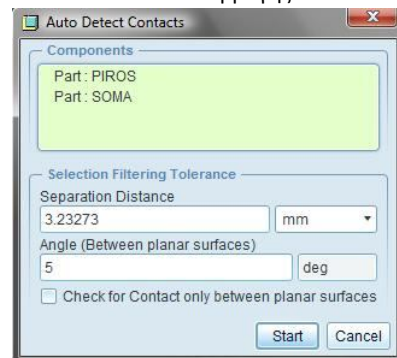
Η διαδικασία που ακολουθούμε για να πραγματοποιήσουμε μια ανάλυση σε συναρμογή απαιτεί των καθορισμό κάποιων πρόσθετων παραμέτρων σε σχέση με την διαδικασία που ακολουθείται σε μεμονωμένα αντικείμενα. Η διαδικασία για την επίλυση του προβλήματος είναι αρκετά χρονοβόρα ακόμα και όταν η συναρμογή αποτελείται από λίγα μέρη. Το αντικείμενο που θα χρησιμοποιήσουμε σαν παράδειγμα αποτελείται από τρία επιμέρους αντικείμενα. Η κατασκευή τους είναι απλή και δεν θα δοθεί έμφαση στο πως δημιουργήθηκαν τα αντικείμενα.

Η συναρμογή που θα χρησιμοποιήσουμε για παράδειγμα παρουσιάζεται στην διπλανή εικόνα. Αρχικά δημιουργούμε τη συναρμογή και στη συνέχεια μεταβαίνουμε στο παράθυρο εργασίας του Mechanica. Ακολουθούμε την γνωστή διαδικασία, εισάγουμε υλικό κατασκευής σε όλα τα αντικείμενα, επιλέγουμε σε ποιο μέρος θα θέσουμε τους περιορισμούς και τοποθετούμε το φορτίο. Ως υλικό κατασκευής επιλέγουμε STEEL και για τα τρία αντικείμενα. Στον πάνω πύρο με την οπή εφαρμόζουμε τους περιορισμούς. Επιλέγουμε την επιφάνεια της οπής και κλειδώνουμε την κίνηση του μοντέλου. Τέλος τοποθετούμε το φορτίο στην εσωτερική επιφάνεια του γάντζου στην κοίλη επιφάνεια. Το μέτρο της δύναμης είναι 100000N και έχει φορά προς τα



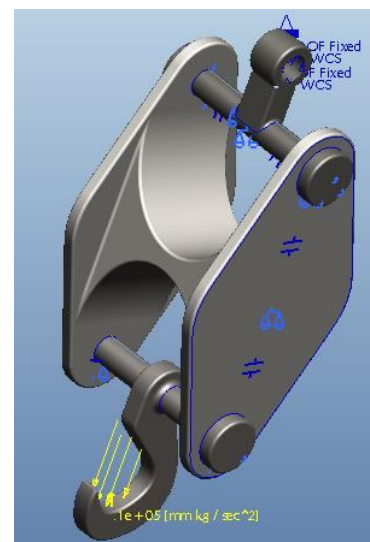
Εικόνα 130: Απεικόνιση συναρμογής

κάτω. Το επόμενο βήμα είναι να ορίσουμε τα σημεία επαφής μεταξύ των αντικειμένων. Αν δεν επιλέξουμε σημεία επαφής το Mechanica θεωρεί τη συναρμογή ως ένα ενιαίο αντικείμενο και δεν υπολογίζει σωστά τα ζητούμενα μεγέθη. Επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων Insert→Connection→Auto Detect and Create



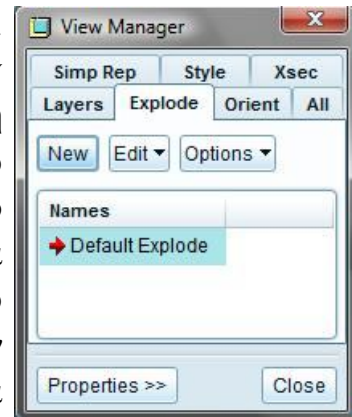
Εικόνα 133: Αυτόματη δημιουργία επαφών

Contacts και εμφανίζεται το αντίστοιχο παράθυρο. Επιλέγουμε ποια αντικείμενα έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και στο πλαίσιο Selection Filtering Tolerance καθορίζουμε την μέγιστη απόσταση (Separation Distance) μεταξύ δυο επιφανειών και τη μέγιστη γωνία (Angle) μεταξύ δυο επίπεδων επιφανειών που μπορεί να δημιουργηθεί σύνδεση. Η μέγιστη απόσταση υπολογίζεται αυτόματα από το Mechanica σύμφωνα με το συνολικό μέγεθος της συναρμογής ενώ η γωνία έχει ως προεπιλογή την τιμή 5 μοίρες. Τέλος μπορούμε να περιορίσουμε την δημιουργία επαφών μόνο ανάμεσα σε επίπεδες επιφάνειες επιλέγοντας το κουτί Check for Contact only between planar surfaces. Τέλος επιλέγουμε Start. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας η συναρμογή παρουσιάζεται όπως στην εικόνα 132.



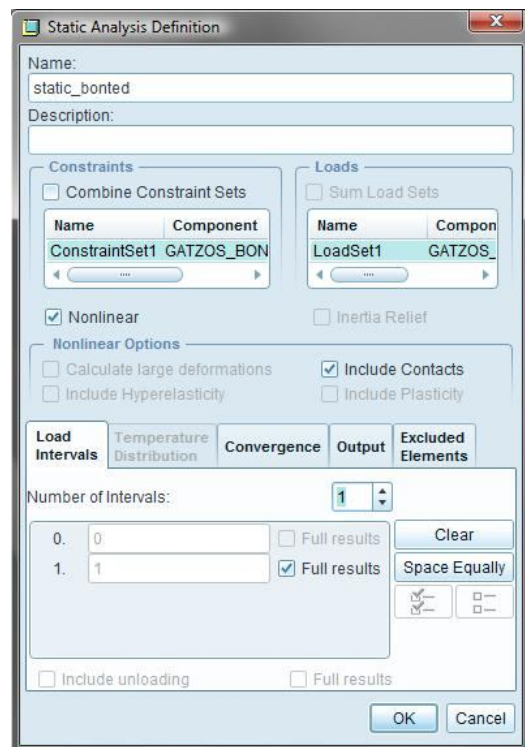
Εικόνα 132: Απεικόνιση συναρμογής με εμφάνιση των σημείων επαφής

Πριν ξεκινήσουμε την ανάλυση πρέπει να επαναπροσδιορίσουμε τις θέσεις των αντικειμένων στην αποσυναρμολογημένη μορφή της συναρμογής. Επιλέγουμε από την γραμμή εργαλείων View→Explode→Explode view. Η συναρμογή αποσυναρμολογείται και τα αντικείμενα που την αποτελούν τοποθετούνται σε τυχαίες θέσεις. Θέλουμε τα αντικείμενα να μην εφάπτονται σε κανένα σημείο για να μπορούμε μετά την ανάλυση να παρατηρήσουμε ολόκληρη την επιφάνεια των αντικειμένων. Επιλέγουμε από την γραμμή εργαλείων View→View Manager και επιλέγουμε το Default Explode, στη συνέχεια επιλέγουμε Edit και από τη λίστα που ανοίγει Edit Position. Στο κεντρικό παράθυρο μπορούμε τώρα να μετακινήσουμε τα αντικείμενα στη θέση που επιθυμούμε να εμφανίζονται. Αφού ολοκληρώσουμε την τοποθέτηση των αντικειμένων επιλέγουμε Edit→Save και αποθηκεύουμε τη νέα αποσυναρμολογημένη μορφή.

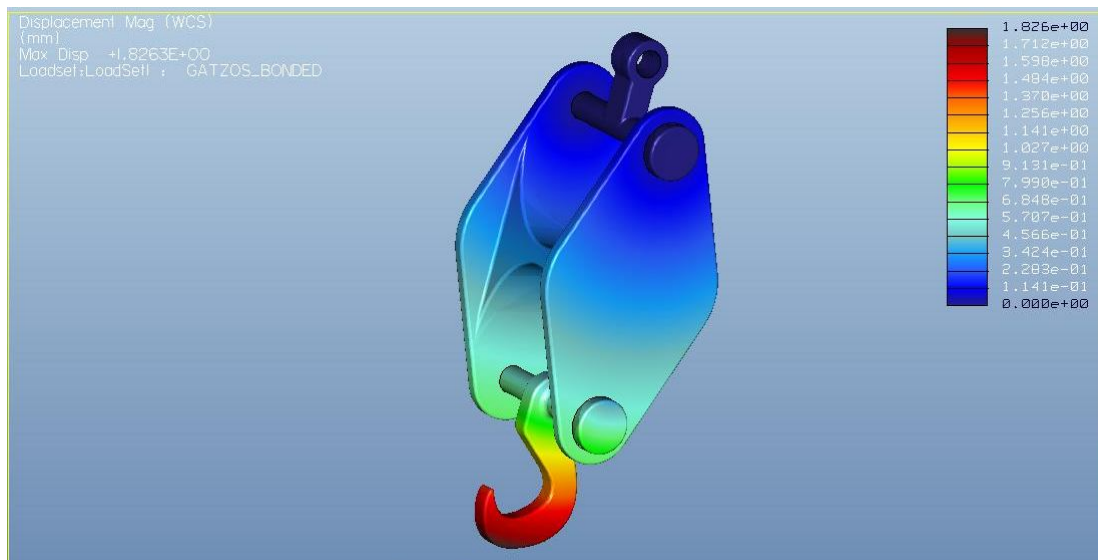


Εικόνα 131: Δημιουργία αποσυναρμολογημένης μορφής

Έχουμε ολοκληρώσει την προετοιμασία της συναρμογής και μπορούμε να προχωρήσουμε στην δημιουργία της ανάλυσης. Επιλέγουμε να πραγματοποιήσουμε μια νέα στατική ανάλυση. Στο παράθυρο Static Analysis Definition που ανοίγει ενεργοποιούμε το κουτί Nonlinear και στο πλαίσιο που ανοίγει ενεργοποιούμε το κουτί Include Contacts και αφήνουμε τα διαστήματα που χωρίζεται το φορτίο σε 1 για ασκηθεί ολόκληρο το φορτίο σε ένα πέρασμα. Στη καρτέλα Convergence επιλέγουμε τη μέθοδο Single-Pass Adaptive και ως μέτρο σύγκλισης επιλέγουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στις επαφές (Converge on Contact Forces). Έχουμε ορίσει όλες τις παραμέτρους και προχωράμε με την διεξαγωγή της ανάλυσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

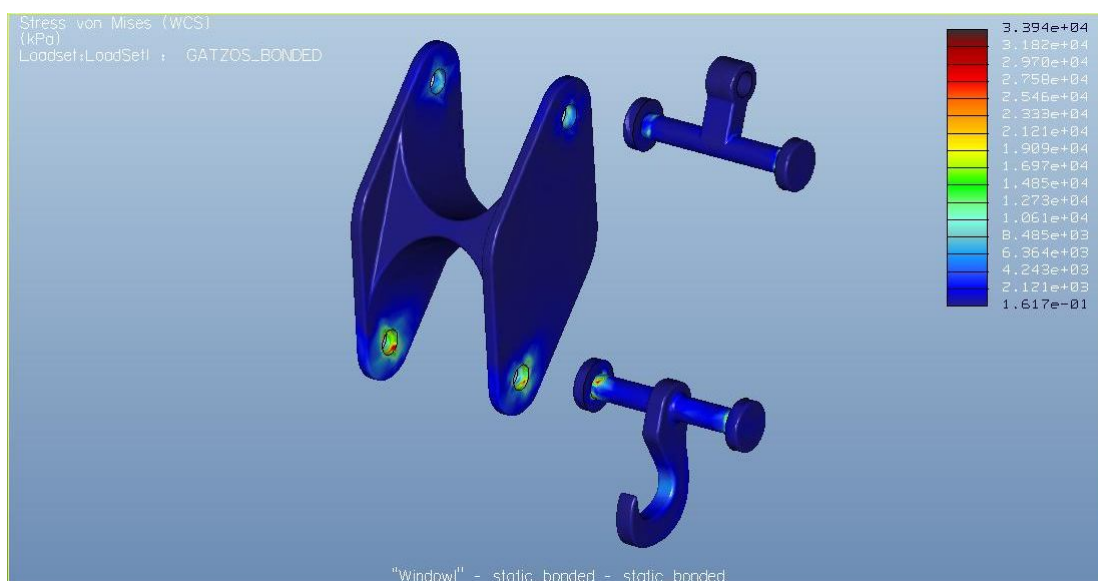


Εικόνα 132: Επιλογή παραμέτρων στην στατική ανάλυση επαφής



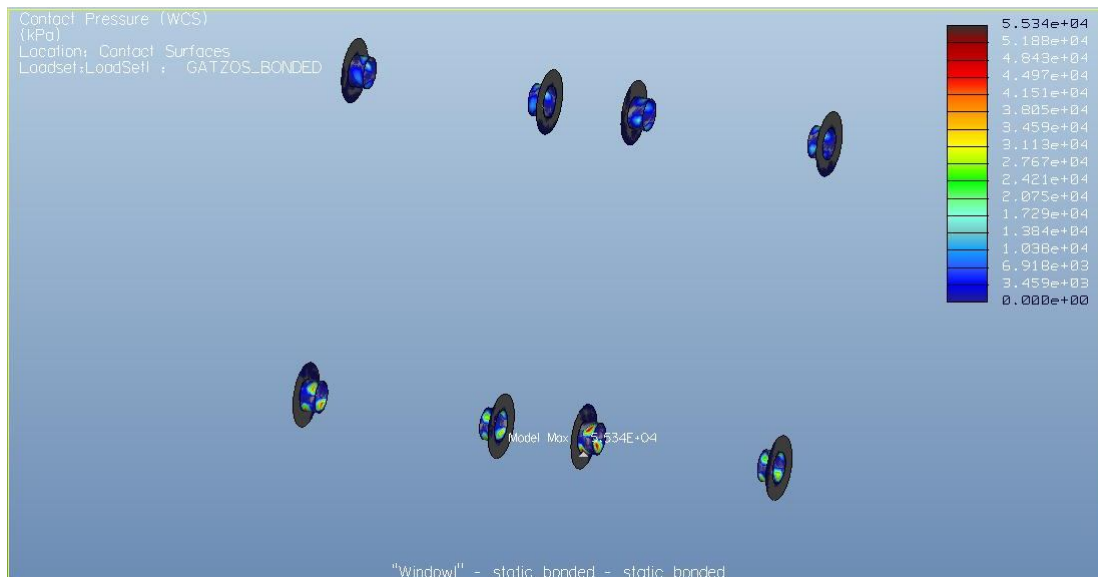
Εικόνα 133: Απεικόνιση της μετατόπισης σε ολόκληρη τη συναρμογή

Στην παραπάνω εικόνα μπορούμε να διακρίνουμε τη μέγιστη μετατόπιση της συναρμογής και πως επηρεάζεται συνολικά όλη η συναρμογή από ένα φορτίο που ασκείται σε ένα αντικείμενο.



Εικόνα 134: Απεικόνιση της τάσης σε αποσυναρμολογημένη μορφή

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε την αποσυναρμολογημένη μορφή της συναρμογής έτσι όπως την δημιουργήσαμε αρχικά. Για να αποσυναρμολογήσουμε την συναρμογή στο παράθυρο των αποτελεσμάτων επιλέγουμε στο View→Explode και τα αντικείμενα παίρνουν τη θέση που τους είχαμε ορίσει. Παρατηρούμε ότι τα ευαίσθητα σημεία της συναρμογής είναι τα σημεία επαφής των αντικειμένων.



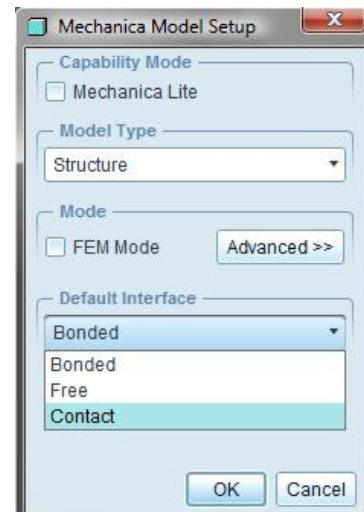
Εικόνα 135: Απεικόνιση της πίεσης στα σημεία επαφής

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε τις επιφάνειες επαφής αποσυναρμολογημένες και την πίεση που αναπτύσσεται ανάμεσα στις επιφάνειες που εφάπτονται.

2.11.2.1 Contact Analysis

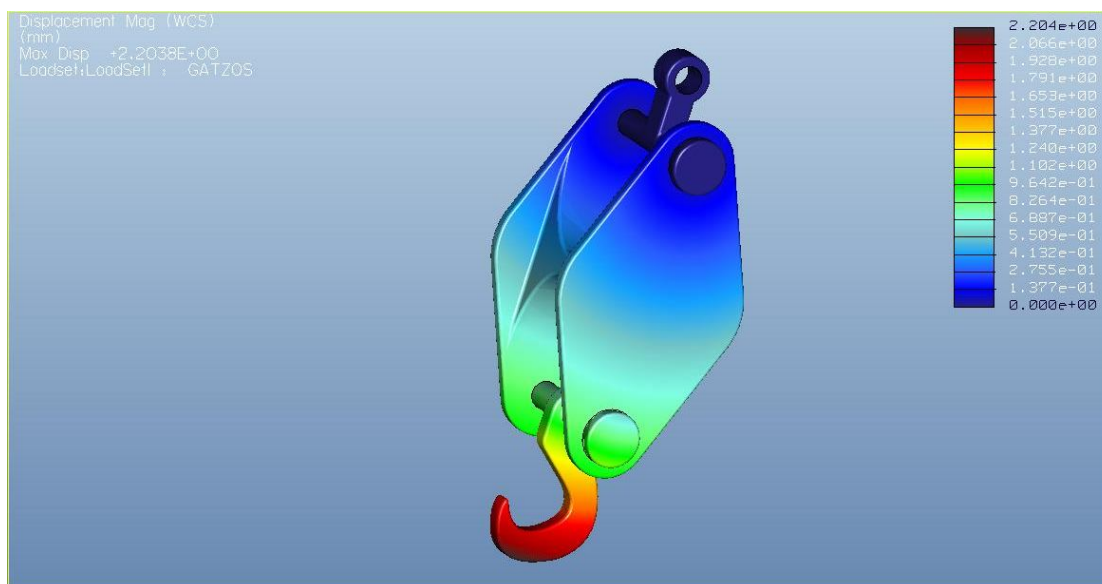
Στην παραπάνω ανάλυση στο παράθυρο Mechanics Model Setup επιλέξαμε ως τύπο διεπαφής Bonded (συνδεδεμένα). Στον συγκεκριμένο τύπο διεπαφής τα αντικείμενα ακουμπούν μεταξύ τους σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης, επίσης οι δυνάμεις που ασκούνται μεταφέρονται από το ένα αντικείμενο στο άλλο. Το πλέγμα που σχηματίζεται είναι ενιαίο και δεν ξεχωρίζει τα αντικείμενα στη συναρμογή. Υπάρχουν άλλοι δυο τύποι διεπαφής:

- **Contact:** Στο τύπο διεπαφής Contact τα αντικείμενα έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και το πλέγμα που δημιουργείται είναι ανεξάρτητο για κάθε αντικείμενο. Οι δυνάμεις μεταφέρονται μεταξύ των αντικειμένων όταν αυτά έρχονται σε επαφή.
- **Free:** Στο συγκεκριμένο τύπο διεπαφής τα αντικείμενα που αποτελούν μια συναρμογή είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και οι δυνάμεις που ασκούνται δεν μεταφέρονται μεταξύ των αντικειμένων. (Δεν θα ασχοληθούμε με τον συγκεκριμένο τύπο διεπαφής διότι δεν είναι κατάλληλος για ανάλυση συναρμογών.)



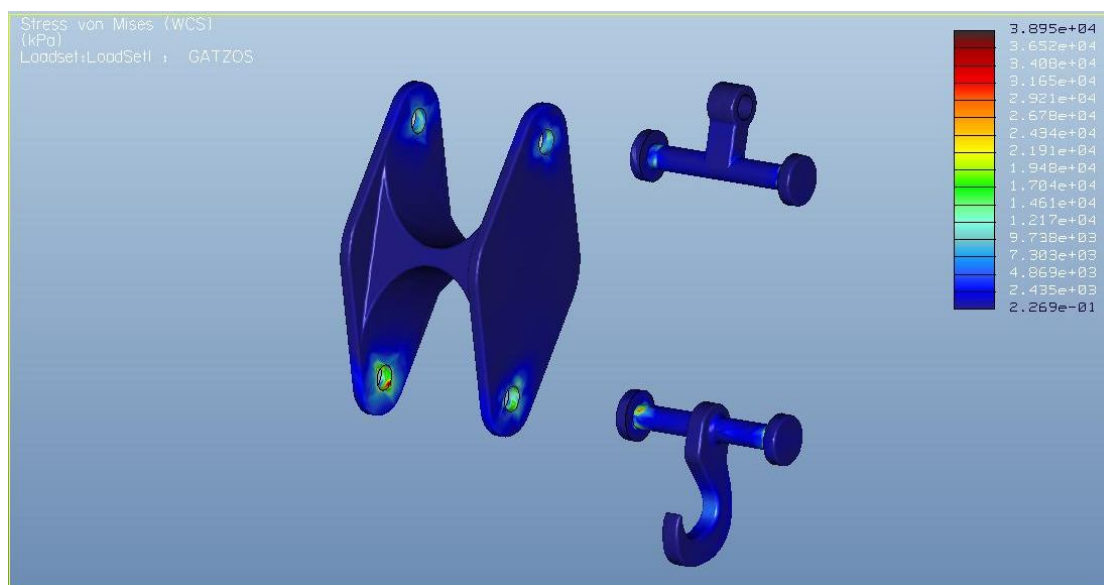
Εικόνα 136: Επιλογή τύπου διεπαφής Contact

Στο παράδειγμα που ακολουθεί έχουμε χρησιμοποιήσει την ίδια συναρμογή με το προηγούμενο παράδειγμα (όμοια υλικά κατασκευής, περιορισμοί, φορτίο) αλλά έχουμε επιλέξει ως τύπο διεπαφής Contact. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ακριβώς η ίδια με την προαναφερθείσα, για το λόγο αυτό θα παρουσιάσουμε απευθείας τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης.



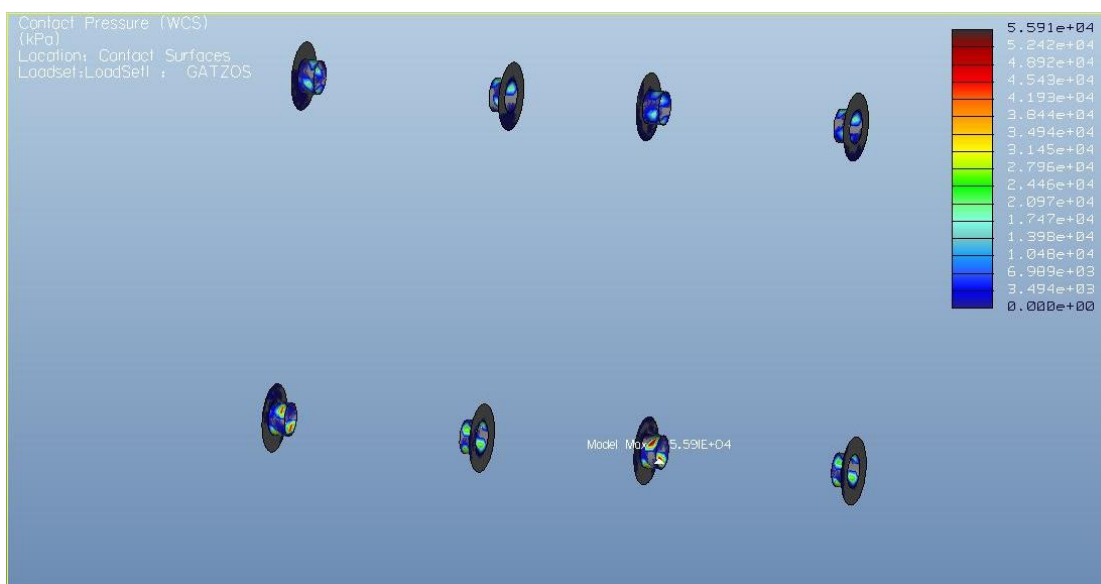
Εικόνα 137: Απεικόνιση της μετατόπισης σε ολόκληρη τη συναρμογή

Στη παραπάνω εικόνα παρατηρούμε ότι επηρεάζεται όλη η συναρμογή από ένα φορτίο που ασκείται σε ένα αντικείμενο. Η μέγιστη μετατόπιση είναι 2.204mm. Εντοπίζεται μια διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση όπου η μέγιστη μετατόπιση ήταν 1.826mm.



Εικόνα 138: Απεικόνιση της τάσης σε αποσυναρμολογημένη μορφή

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε την μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στη συναρμογή. Η τιμή της μέγιστης τάσης είναι 38.95KPa ενώ στην προηγούμενη ανάλυση η τιμή της μέγιστης τάσης ήταν 33.94KPa.



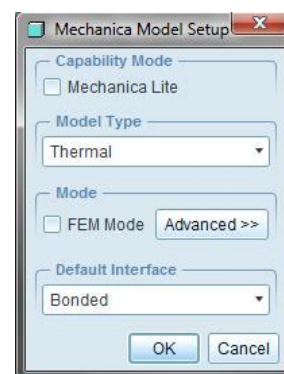
Εικόνα 139: Απεικόνιση της πίεσης στα σημεία επαφής

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε την πίεση που αναπτύσσεται ανάμεσα στις επιφάνειες που εφάπτονται. Η μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται ανάμεσα στις επιφάνειες είναι 55.91KPa. Σε σύγκριση με το προηγούμενο αποτέλεσμα (55.34KPa) η πίεση που παρατηρείται είναι λίγο μεγαλύτερη, αλλάζει όμως το σημείο που εφαρμόζεται όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα και των δυο αναλύσεων.

Βασιζόμενοι στη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων και στον τρόπο δημιουργίας του πλέγματος των αντικειμένων που αποτελούν τη συναρμογή καταλήγουμε ότι ο τύπος διεπαφής Contact παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα στις συναρμογές συγκριτικά με τον τύπο διεπαφής Bonded. Ο τύπος διεπαφής Bonded παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα όταν οι εφαπτόμενες επιφάνειες είναι επίπεδες.

3. Thermal Analysis

Για να πραγματοποιήσουμε μια θερμική ανάλυση μεταβαίνουμε στο παράθυρο εργασίας του Pro\Mechanica και στο παράθυρο Mechanica model setup επιλέγουμε Thermal στο πλαίσιο Model Type. Μεταφερόμαστε στο κεντρικό παράθυρο του Mechanica όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε τις παρακάτω επιλογές:



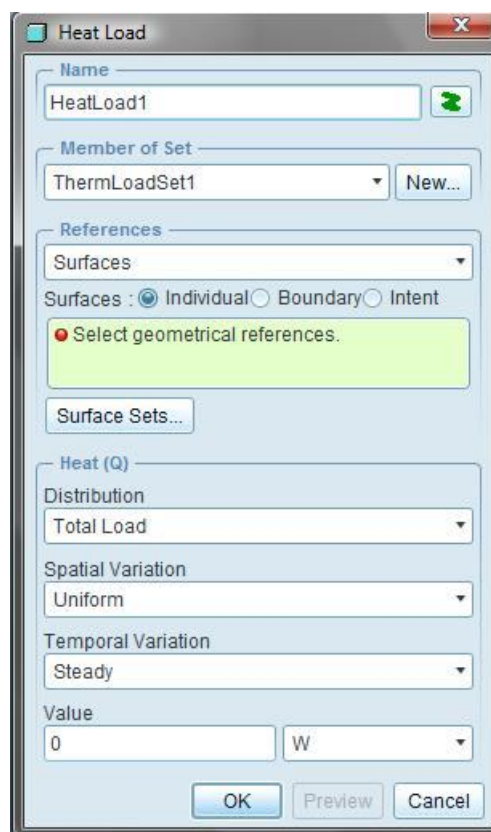
Εικόνα 140:
Δημιουργία θερμικής
ανάλυσης

- Heat Load
- Prescribed Temperature
- Convection Condition

Όπως και στην στατική ανάλυση πριν ορίσουμε τα φορτία και τους περιορισμούς πρέπει να επιλέξουμε υλικό κατασκευής (Define Material) και να εισάγουμε τις ιδιότητες του υλικού στο αντικείμενο (Material Assignment). Τα στάδια αυτά δεν θα τα αναλύσουμε εκ νέου διότι είναι όμοια με εκείνα που αναλύσαμε στην στατική ανάλυση.

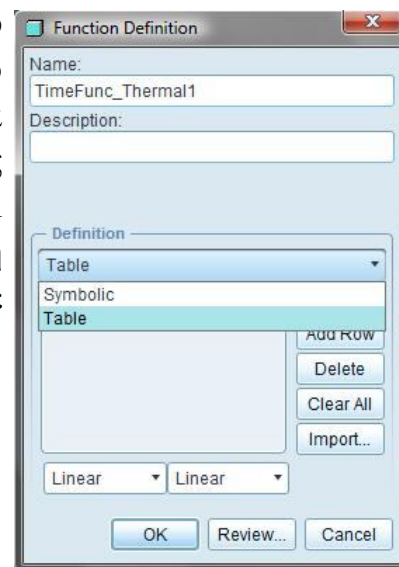
3.1 Heat Load

Για να εισάγουμε ένα θερμικό φορτίο στο αντικείμενο επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων Heat Load και εμφανίζεται το αντίστοιχο παράθυρο όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε τις εξής επιλογές: Αρχικά επιλέγουμε το όνομα του φορτίου και σε ποιο σύνολο φορτιών θα το εντάξουμε. Στη συνέχεια στο πλαίσιο References επιλέγουμε που θα τοποθετήσουμε το φορτίο. Οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής: Components (Αντικείμενα), Volumes (Όγκοι), Surfaces (Επιφάνειες), Edges/Curves (Ακμές/Καμπύλες), Points (Σημεία). Αφού επιλέξουμε που θα τοποθετήσουμε το φορτίο μπορούμε να επεξεργαστούμε το ίδιο το φορτίο στο πλαίσιο Heat(Q). Αρχικά επιλέγουμε τον τρόπο κατανομής του φορτίου (Distribution). Μπορούμε να επιλέξουμε Total Load και Load per Unit Type. Οι διαφορές που παρουσιάζουν οι δυο επιλογές παρουσιάζονται αναλυτικότερα παραπάνω στα δομικά φορτία. Στο επόμενο πλαίσιο μπορούμε να επιλέξουμε την χωρική διακύμανση (Spatial Variation) που επίσης παρουσιάζετε αναλυτικότερα παραπάνω. Στο επόμενο πλαίσιο μπορούμε να επιλέξουμε τη χρονική διακύμανση (Temporal Variation) του φορτίου. Αν επιλέξουμε Steady το φορτίο δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, μπορούμε όμως να επιλέξουμε Function of Time και το

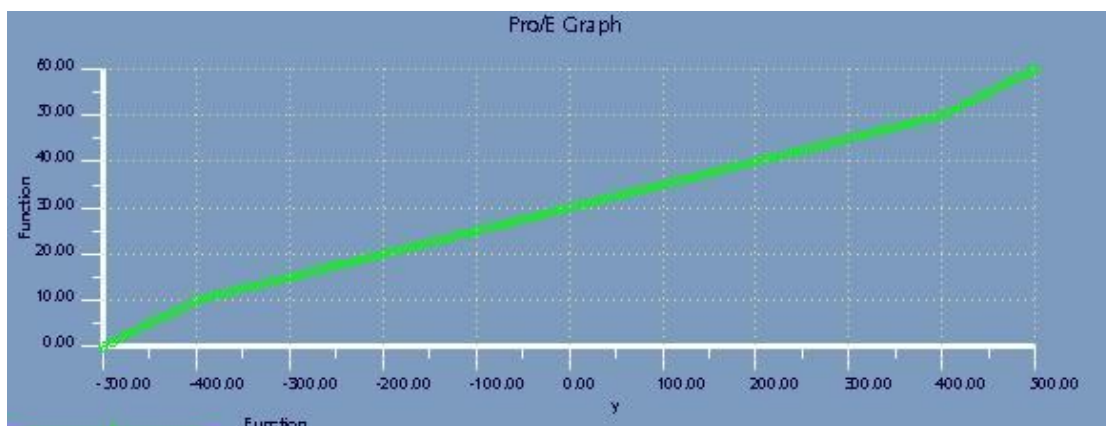


Εικόνα 141: Μενού επιλογής θερμικού φορτίου

φορτίο να μεταβάλλεται με το χρόνο. Αν επιλέξουμε να δημιουργήσουμε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο φορτίο πρέπει να εισάγουμε και τη συνάρτηση που συνδέει το φορτίο με το χρόνο. Επιλέγουμε το εικονίδιο List Available Functions κάτω από το πλαίσιο Temporal Variation και εμφανίζεται το παράθυρο Function Definition. Αρχικά επιλέγουμε το όνομα της συνάρτησης και δίνουμε μια σύντομη περιγραφή. Στο πλαίσιο Definition μπορούμε να επιλέξουμε τον τρόπο εισαγωγής της συνάρτησης. Μπορούμε να επιλέξουμε Symbolic και να συντάξουμε μια δική μας συνάρτηση χρησιμοποιώντας τις έτοιμες συναρτήσεις που προσφέρονται από το λογισμικό ή να επιλέξουμε Table και ορίσουμε τις τιμές του φορτίου κάθε χρονική στιγμή. Αφού τελειώσουμε με την εισαγωγή της συνάρτησης επιλέγοντας το εικονίδιο Review μπορούμε να δούμε την γραφική παράσταση της συνάρτησης που δημιουργήσαμε. Τέλος επιλέγουμε την τιμή του φορτίου και τη μονάδα μέτρησης του. Στο αντικείμενο που χρησιμοποιούμε για παράδειγμα επιλέξαμε την εξωτερική επιφάνεια της σωλήνας για να τοποθετήσουμε το φορτίο. Επιλέξαμε Total load για την κατανομή του φορτίου και για τη χωρική διακύμανση του φορτίου δημιουργήσαμε μια συνάρτηση με τον τρόπο εισαγωγής Table.

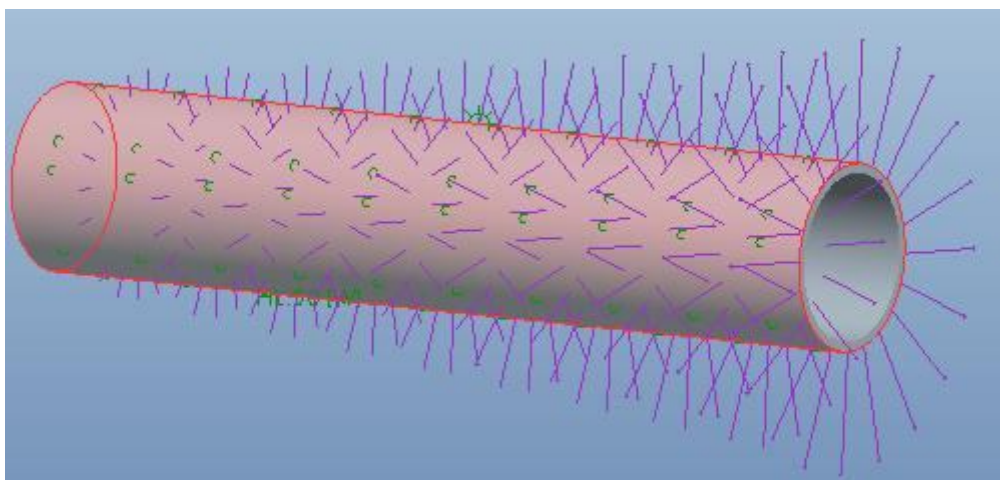


Εικόνα 142: Εισαγωγή συνάρτησης



Διάγραμμα 9: Χωρική διακύμανση θερμικού φορτίου

Το φορτίο που δημιουργήσαμε παρουσιάζεται τοποθετημένο στο αντικείμενο στην παρακάτω εικόνα.



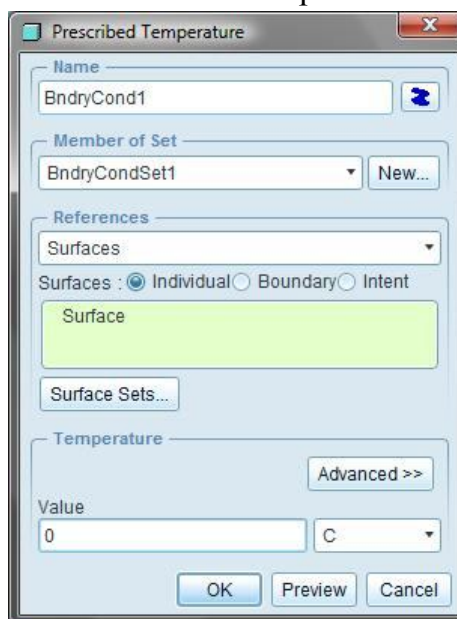
Εικόνα 143: Απεικόνιση του μοντέλου με τοποθετημένο θερμικό φορτίο

3.2 Prescribed Temperature

Για να εισάγουμε μια προκαθορισμένη θερμοκρασία στο αντικείμενο επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Prescribed Temperature και εμφανίζεται το αντίστοιχο παράθυρο. Η προκαθορισμένη θερμοκρασία είναι το αντίστοιχο μέγεθος με τους περιορισμούς στη στατική ανάλυση. Δηλαδή η θερμοκρασία στο επιλεγμένο σημείο δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή που έχουμε ορίσει. Αρχικά επιλέγουμε το όνομα του περιορισμού και σε ποιο σύνολο περιορισμών θα το εντάξουμε. Στη συνέχεια στο πλαίσιο References επιλέγουμε που θα τοποθετήσουμε τον περιορισμό. Οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής: Surfaces (Επιφάνειες), Edges/Curves

(Ακμές/Καμπύλες), Points (Σημεία). Στο πλαίσιο Temperature επιλέγουμε την τιμή και τις μονάδες της θερμοκρασίας. Στο ίδιο πλαίσιο επιλέγοντας το εικονίδιο Advanced μπορούμε να επεξεργαστούμε την χωρική διακύμανση της θερμοκρασίας. Οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής:

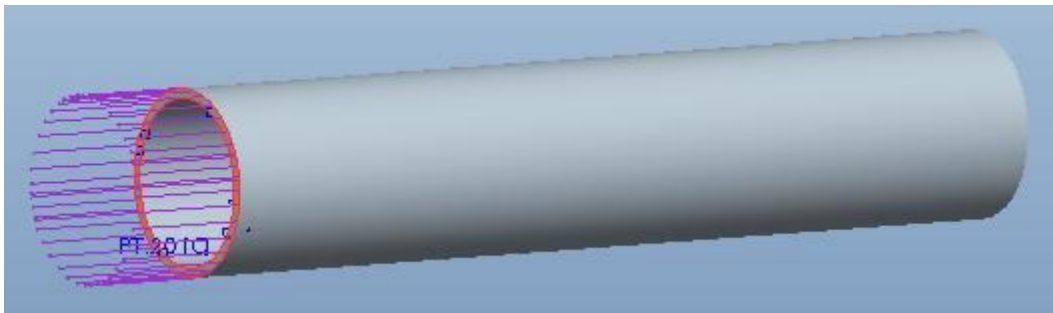
- Uniform: Η τιμή που έχουμε ορίσει για την καθορισμένη θερμοκρασία σε ένα μέρος του αντικείμενου είναι έχει ομοιόμορφη κατανομή σε όλη την επιφάνεια ή την ακμή που έχουμε επιλέξει.



Εικόνα 144: Μενού επιλογής προκαθορισμένης θερμοκρασίας

- **Function of Coordinates:** Με αυτή την επιλογή μπορούμε να ορίσουμε την διακύμανση, δημιουργώντας μια συνάρτηση που χρησιμοποιείται ως συντελεστής. Επιλέγοντας το εικονίδιο List Available Functions ανοίγει ένα νέο παράθυρο (Functions) όπου μπορούμε να εισάγουμε έτοιμες συναρτήσεις ή να δημιουργήσουμε νέες.
- **Interpolated over Entity:** Χρησιμοποιούμε την συγκεκριμένη επιλογή όταν θέλουμε η χωρική διακύμανση της θερμοκρασίας να μεταβάλλεται σύμφωνα με μια παρεμβολή ανάμεσα σε δυο σημεία της επιλεγμένης επιφάνειας. Μπορούμε να δημιουργήσουμε γραμμική, τετραγωνική και κυβική παρεμβολή.

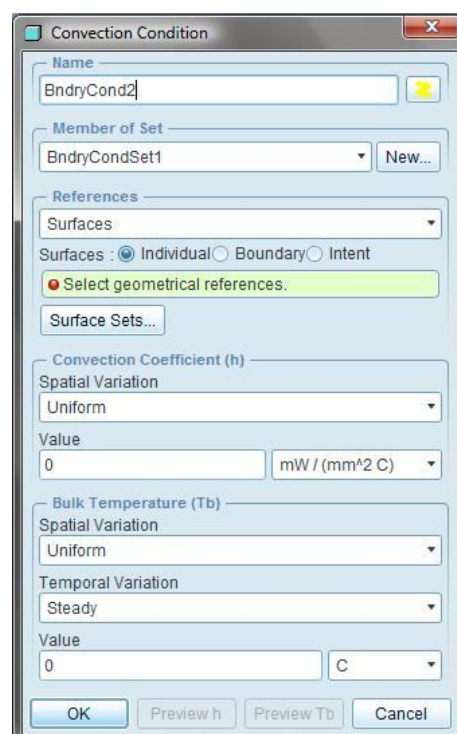
Στο παράδειγμα που χρησιμοποιούμε επιλέξαμε την επίπεδη επιφάνεια στο πίσω μέρος της σωλήνας και ορίσαμε ως τιμή θερμοκρασίας τους 20° C. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 145: Απεικόνιση του μοντέλου με εισαγωγή προκαθορισμένης θερμοκρασίας

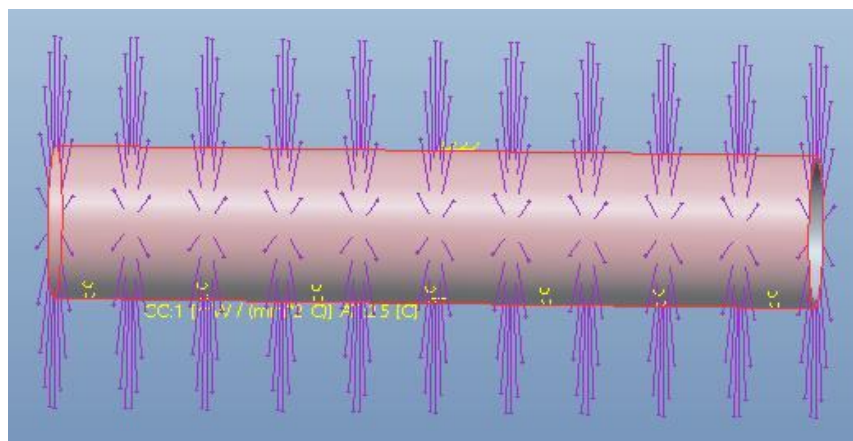
3.3 Convection Condition

Χρησιμοποιούμε τις οριακές συνθήκες συναγωγής για να καθορίσουμε μια γραμμική μεταγωγική κατάσταση ανταλλαγής θερμότητας σε ένα αντικείμενο. Επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Convection Condition και εμφανίζεται το αντίστοιχο παράθυρο. Αρχικά επιλέγουμε το όνομα του περιορισμού και σε ποιο σύνολο περιορισμών θα το εντάξουμε. Στη συνέχεια στο πλαίσιο References επιλέγουμε που θα τοποθετήσουμε τον περιορισμό. Οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής: Surfaces (Επιφάνειες), Edges/Curves (Ακμές/Καμπύλες), Points (Σημεία). Στο πλαίσιο Convection Coefficient (h) επιλέγουμε την χωρική διακύμανση (Spatial Variation) και την τιμή (Value).



Εικόνα 146: Μενού οριακών συνθηκών συναγωγής

επιλέγουμε το συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (h) στη συναγωγή σχετίζεται με την ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται μεταξύ ενός κινούμενου ρευστού υγρού ή αερίου και μίας οριοθετημένης επιφάνειας. Ισούται με το ποσοστό θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας και διαφορά θερμοκρασίας. Χρησιμοποιούμε μόνο πραγματικούς αριθμούς και οι μονάδες που χρησιμοποιούμε πρέπει να ταυτίζονται με εκείνες που χρησιμοποιούνται και στο υπόλοιπο μοντέλο. Στο πλαίσιο Spatial Variation μπορούμε να επιλέξουμε την χωρική διακύμανση που παρουσιάζεται αναλυτικότερα παραπάνω. Οι επιλογές που έχουμε είναι Uniform, Function of Coordinates και External File Data. Στην επιλογή External File Data εισάγουμε το συντελεστή από ένα εξωτερικό αρχείο που έχουμε δημιουργήσει από μια προηγούμενη ανάλυση. Η επιλογή αυτή είναι διαθέσιμη μόνο όταν έχουμε επιλέξει να πραγματοποιηθεί η συναγωγή σε μια επιφάνεια και αναφέρεται μόνο όταν εξετάζουμε τρισδιάστατα μοντέλα. Στο πλαίσιο Bulk Temperature επιλέγουμε την θερμοκρασία του περιβάλλοντα χώρου του αντικείμενου. Στις περισσότερες περιπτώσεις αναφέρεται στην θερμοκρασία του αέρα που περιβάλλει το αντικείμενο όμως μπορεί να αναφέρεται και στη θερμοκρασία κάποιου υγρού όταν το αντικείμενο είναι βυθισμένο μέσα σε αυτό. Στο πλαίσιο Spatial Variation μπορούμε να επιλέξουμε την χωρική διακύμανση και οι διαθέσιμες επιλογές είναι όμοιες με εκείνες στο πλαίσιο Convection Coefficient. Στο επόμενο πλαίσιο μπορούμε να επιλέξουμε τη χρονική διακύμανση (Temporal Variation) της θερμοκρασίας. Αν επιλέξουμε Steady η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, μπορούμε όμως να επιλέξουμε Function of Time και η θερμοκρασία να μεταβάλλεται με το χρόνο. Για το πως δημιουργούμε μια χρονική συνάρτηση αναφερθήκαμε εκτενέστερα στην παράγραφο Heat Load. Τέλος επιλέγουμε την θερμοκρασία του περιβάλλοντα χώρου και τη μονάδα θερμοκρασίας που χρησιμοποιούμε. Στο παράδειγμα που χρησιμοποιούμε επιλέξαμε ομοιόμορφα κατανεμημένο συντελεστή συναγωγής με τιμή $1\text{mW}/(\text{mm}^2\text{ C})$ και ομοιόμορφα κατανεμημένη και σταθερή θερμοκρασία 25°C . Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 147: Απεικόνιση του μοντέλου με οριακές συνθήκες συναγωγής στην εξωτερική επιφάνεια

Παραπάνω παρουσιάσαμε όλα τα είδη φορτιών και περιορισμών που μπορούμε να εισάγουμε σε μια θερμική ανάλυση. Στη συνέχεια θα πραγματοποιήσουμε τα είδη των αναλύσεων που προσφέρονται από το λογισμικό.

3.4 Steady State Thermal Analysis

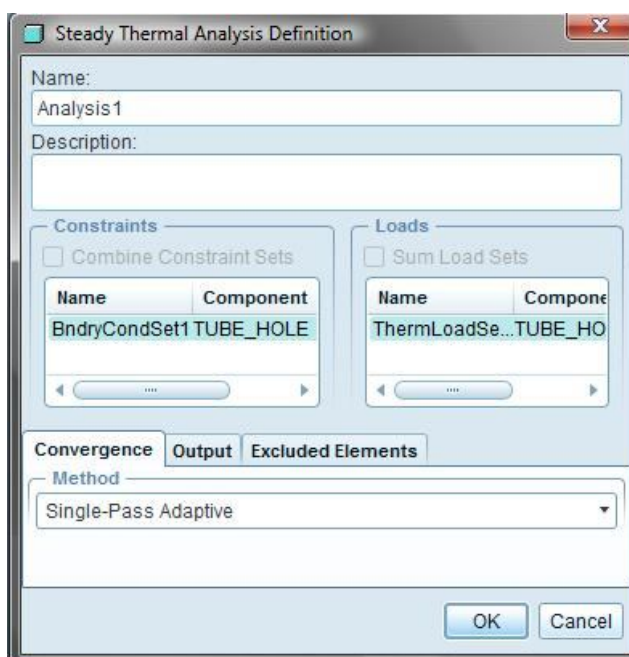
Χρησιμοποιούμε θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης για να υπολογίσουμε τη θερμική απόκριση του μοντέλου σε θερμικά φορτία ανάλογα με τις προβλεπόμενες θερμοκρασίες, τις εφαρμοζόμενες συνθήκες μεταφοράς θερμότητας ή συνδυασμό και των δυο. Η σταθερή θερμική ανάλυση βασίζεται σε μία σταθερή κατάσταση για όλα τα θερμικά φορτία και τις οριακές συνθήκες. Στη συγκεκριμένη μορφή ανάλυσης δεν χρησιμοποιούνται φορτία και οριακές συνθήκες που μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου.

Για να δημιουργήσουμε μια θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων το εικονίδιο Mechanica Analyses/Studies και εμφανίζεται το παράθυρο Analyses and Design Studies.

Επιλέγουμε File→New Steady State Thermal και εμφανίζεται το παράθυρο Steady Thermal Analysis Definition. Αρχικά ονομάζουμε την ανάλυση και στη συνέχεια προσθέτουμε μια περιγραφή στο πλαίσιο Description. Στα πλαίσια Loads και Constraints εμφανίζονται τα φορτία και οι οριακές συνθήκες που έχουμε δημιουργήσει. Στη καρτέλα Convergence επιλέγουμε τη μέθοδο σύγκλισης που θα

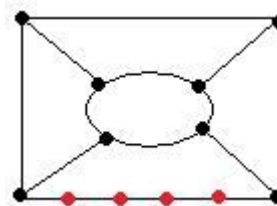
χρησιμοποιήσουμε. Οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής:

- Quick Check
- Single-Pass Adaptive
- Multi-Pass Adaptive



Εικόνα 148: Επιλογή παραμέτρων στη θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης

Οι δυο πρώτες μέθοδοι σύγκλισης είναι όμοιες με εκείνες που έχουν παρουσιαστεί. Στη μέθοδο Multi-Pass Adaptive διαφέρουν τα μεγέθη που χρησιμοποιεί το Mechanica για τη σύγκλιση. Στη θερμική ανάλυση χρησιμοποιούνται ως μεγέθη σύγκλισης η θερμοκρασία και η θερμική ενεργεία. Στη καρτέλα Output επιλέγουμε τα μεγέθη που θα υπολογίσουμε και την ακρίβεια του πλέγματος που θα χρησιμοποιήσουμε. Η προεπιλεγμένη τιμή για την ακρίβεια του πλέγματος είναι 4. Ο αριθμός 4

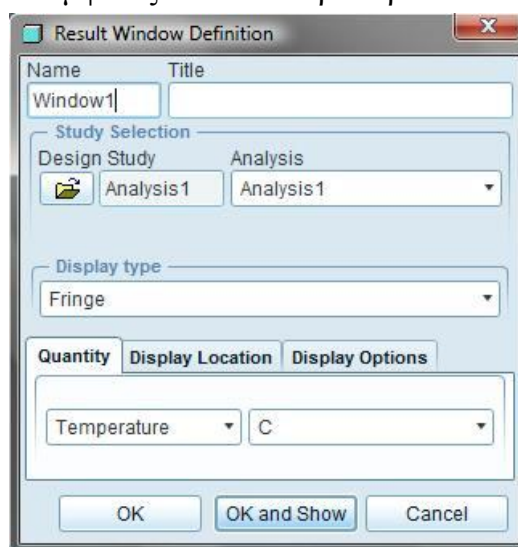


Εικόνα 149: Καθορισμός πλέγματος

εκφράζει πόσα σημεία θα δημιουργήσει το λογισμικό ανάμεσα από δυο κόμβους ενός στοιχείου. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στη διπλανή εικόνα. Με μαύρο χρώμα παρουσιάζονται οι βασικοί κόμβοι του πλέγματος ενώ με κόκκινο οι πρόσθετοι κόμβοι που επιλέξαμε να δημιουργηθούν. Στη καρτέλα Excluded Elements μπορούμε να αποκλείσουμε κάποια στοιχεία από την ανάλυση τα οποία έχουν επιλεγεί αυτόματα από τον καθορισμό του πλέγματος.

Στο παράδειγμα που χρησιμοποιούμε επιλέξαμε το θερμικό φορτίο που δημιουργήσαμε στη καρτέλα Heat Load και ως οριακές συνθήκες χρησιμοποιήσαμε τη θερμοκρασία που ορίσαμε στην καρτέλα Prescribed Temperature. Επιλέγουμε ως μέθοδο σύγκλισης Single-Pass Adaptive και επιλέγουμε Ok και Run για να ξεκινήσει η ανάλυση. Πραγματοποιούμε διαγνωστικό έλεγχο και περιμένουμε να ολοκληρωθεί η ανάλυση. Όταν ολοκληρωθεί η ανάλυση επιλέγουμε από το παράθυρο Analyses and Design Studies το εικονίδιο Review Results και εμφανίζεται το παράθυρο Result Window Definition. Στο πλαίσιο Display Type επιλέγουμε τον τύπο απεικόνισης, οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής: Fringe, Vector, Graph. Στη καρτέλα Quantity επιλέγουμε το μέγεθος που θέλουμε να προβάλουμε, οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής:

- Temperature: Επιλέγουμε το μέγεθος της θερμοκρασίας αν επιθυμούμε να δούμε τη θερμοκρασία στο μοντέλο.
- Temp Gradient: Επιλέγουμε το μέγεθος της μεταβολής της θερμοκρασίας σε σχέση με την απόσταση για δούμε τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

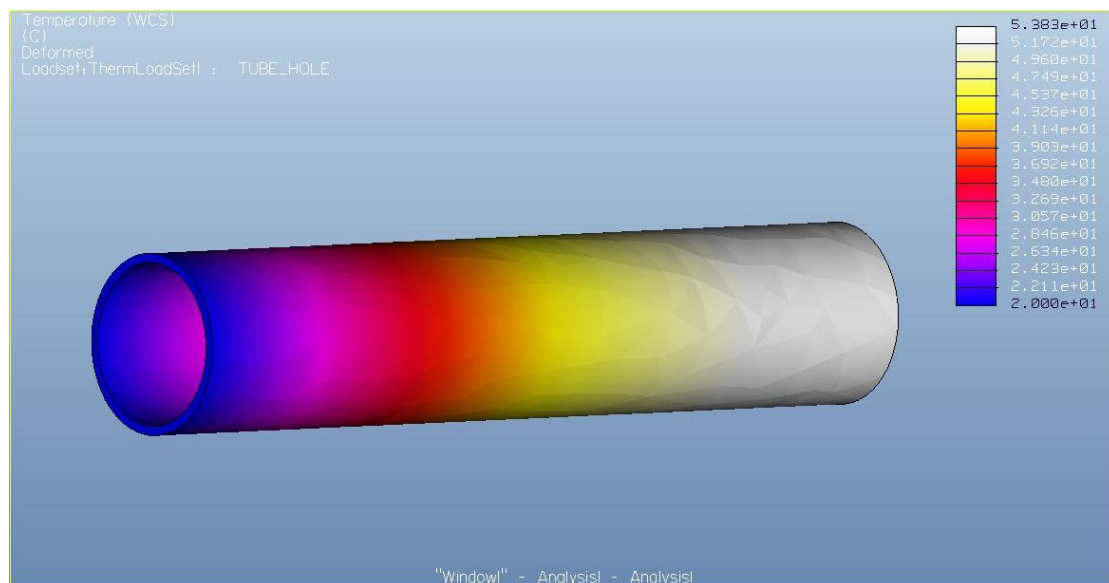


Εικόνα 150: Επιλογή απεικόνισης θερμικής ανάλυσης

- Flux: Επιλέγουμε το συγκεκριμένο μέγεθος για να δούμε τη ροή θερμότητας στο μοντέλο.
- P-Level: Επιλέγουμε το συγκεκριμένο μέγεθος για να δούμε το πλέγμα του αντικειμένου καθώς και το βαθμό του πολυωνύμου.

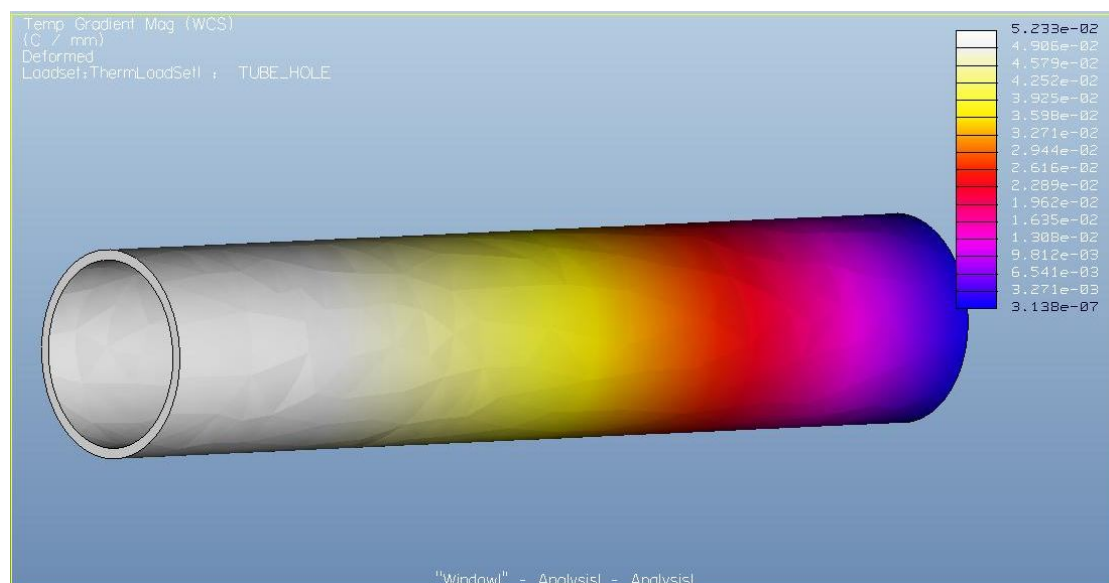
Στις καρτέλες Display location και Display Options έχουμε τις ίδιες επιλογές που έχουμε αναλύσει παραπάνω.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης σταθερής κατάστασης.



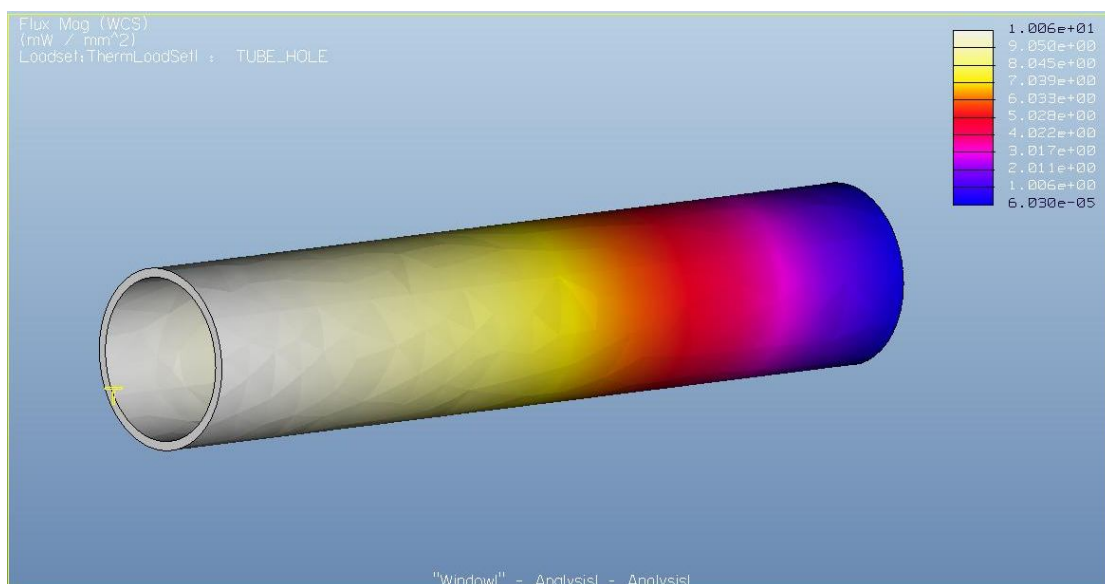
Εικόνα 152: Απεικόνιση θερμοκρασίας στο μοντέλο

Στη παραπάνω εικόνα παρατηρούμε τη θερμοκρασία σε κάθε σημείο του μοντέλου. Η ελάχιστη θερμοκρασία είναι 20°C στο άκρο όπου τοποθετήσαμε τις οριακές συνθήκες ενώ η μέγιστη παρατηρείται στο άλλο άκρο με τιμή 53.83°C



Εικόνα 151: Απεικόνιση της μεταβολής της θερμοκρασίας ανά μονάδα μήκους

Στη παραπάνω εικόνα παρατηρούμε τη μεταβολή της θερμοκρασίας ανά μονάδα μήκους. Η μέγιστη μεταβολή παρατηρείται στο άκρο όπου έχουμε ορίσει τις οριακές συνθήκες.

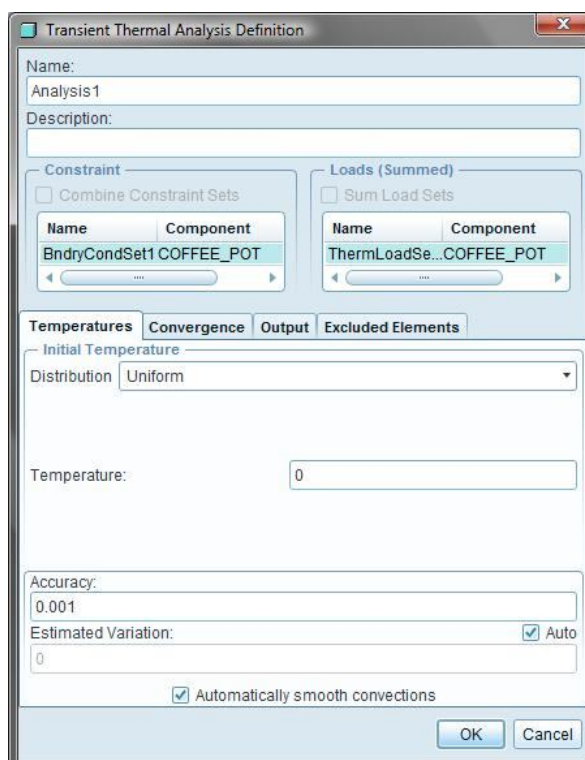


Εικόνα 153: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στο μοντέλο

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε τη ροή θερμότητας στο μοντέλο. Η ροή είναι προς το άκρο όπου έχουμε ορίσει τις οριακές συνθήκες με μέγιστη τιμή 10.06 mW/mm².

3.5 Transient Thermal Analysis

Χρησιμοποιούμε την χρονικά μεταβαλλόμενη θερμική ανάλυση για να υπολογίσουμε τις θερμικές μεταβολές στο μοντέλο κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Για να δημιουργήσουμε μια χρονικά μεταβαλλόμενη θερμική ανάλυση επιλέγουμε από τη γραμμή εργαλείων στο παράθυρο Analyses and Design Studies File→Transient Thermal Analysis και εμφανίζεται το παράθυρο Transient Thermal Analysis Definition. Στα πλαίσια Constraint και Loads επιλέγουμε τις οριακές



Εικόνα 154: Επιλογή παραμέτρων στη χρονικά μεταβαλλόμενη θερμική ανάλυση

συνθήκες και τα φορτία που θα χρησιμοποιήσουμε. Στη συνέχεια μπορούμε να επεξεργαστούμε τις επιλογές που προσφέρονται στην συγκεκριμένη ανάλυση στις εξής καρτέλες.

- Temperatures: Στη καρτέλα Θερμοκρασίες επιλέγουμε στο πλαίσιο Initial Temperature την κατανομή της θερμοκρασίας στην αρχική κατάσταση της ανάλυσης. Οι επιλογές που έχουμε είναι:

1. Uniform: Εισάγουμε μία ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή πάνω στο μοντέλο και ορίζουμε την αρχική θερμοκρασία στο πλαίσιο της θερμοκρασίας. Εάν έχουμε οριακές συνθήκες θερμοκρασίας η τιμή της εφαρμοζόμενης θερμοκρασίας πρέπει να είναι όμοια με εκείνη της οριακής συνθήκης. Αν δεν υπάρχουν προβλεπόμενες θερμοκρασίες μπορούμε να ορίσουμε οποιαδήποτε τιμή για την αρχική θερμοκρασία.
2. MecT: Εισάγουμε τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας από μια σταθερή θερμική ανάλυση για να καθορίσουμε την αρχική θερμοκρασία στη χρονικά μεταβαλλόμενη θερμική ανάλυση. Πριν κάνουμε αυτή την επιλογή θα πρέπει να δημιουργήσουμε μια σταθερή θερμική ανάλυση. Όταν επιλέγουμε MecT εμφανίζεται το αντίστοιχο το παράθυρο διαλόγου όπου παρουσιάζεται η σταθερή θερμική ανάλυση και το θερμικό φορτίο που έχουμε χρησιμοποιήσει. Αν έχουμε δημιουργήσει διάφορες αναλύσεις για το συγκεκριμένο φορτίο ή έχουμε χρησιμοποιήσει πολλαπλά σύνολα φορτίων έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε ποια ανάλυση και ποιο φορτίο θα χρησιμοποιήσουμε. Το Mechanica εκτελεί τη σταθερή θερμική ανάλυση που επιλέγουμε πριν από την εκτέλεση της χρονικά μεταβαλλόμενης θερμικής ανάλυσης.

Στο πλαίσιο Accuracy εισάγουμε την τιμή της ακριβείας για την μεταβολή της θερμοκρασίας, η προεπιλεγμένη τιμή είναι 0.001. Η τιμή της ακρίβειας σε συνδυασμό με την διακύμανση της θερμοκρασίας στο μοντέλο καθορίζουν τα χρονικά βήματα που θα χρειαστούν για να υπολογίσουμε τα ζητούμενα μεγέθη.

Στο πλαίσιο Estimated Variation εισάγουμε μια τιμή για να ορίσουμε την αναμενόμενη διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας στο μοντέλο κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Μπορούμε να εισάγουμε μια τιμή ή να επιλέξουμε Auto. Επιλέγοντας Auto το Mechanica υπολογίζει μια τιμή από τα εφαρμοζόμενα φορτία θερμότητας και τις συνθήκες μεταφοράς. Αν εισάγουμε μια τιμή θα πρέπει να αντιστοιχεί στην μεταβολή της θερμοκρασίας που περιμένουμε να παρουσιάσει το μοντέλο κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Η τιμή αυτή πρέπει να είναι θετικός αριθμός καθώς πολλαπλασιάζεται με την τιμή που

έχουμε ορίσει στο πεδίο Accuracy για τον έλεγχο της ακρίβειας του χρόνου ολοκλήρωσης.

Τέλος το πλαίσιο Automatically Smooth Convections είναι ενεργοποιημένο από προεπιλογή και μειώνει τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια των υπολογισμών αυξάνοντας σταδιακά τις συνθήκες μεταφοράς. Τα αριθμητικά σφάλματα δημιουργούνται όταν η συναλλαγή θερμότητας πραγματοποιείται με γρήγορο ρυθμό.

- Convergence: Στην καρτέλα που επιλέγουμε τον τύπο σύγκλισης μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε Single-Pass Adaptive και Quick Check.
- Output: Στη καρτέλα Output μπορούμε να επιλέξουμε ποια μεγέθη θα υπολογιστούν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Το πλαίσιο Heat Flux είναι ενεργοποιημένο και η διαμόρφωση του πλέγματος έχει την προεπιλεγμένη τιμή 4. Στο πλαίσιο Output Intervals μπορούμε να επιλέξουμε σε ποια χρονικά διαστήματα θα υπολογίσει το Mechanica τα επιλεγμένα μεγέθη, οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής:
 1. Automatic Intervals with Range: Στο συγκεκριμένο πλαίσιο το Mechanica επιλέγει αυτόματα τα διαστήματα στα οποία θα υπολογιστούν τα μεγέθη. Έχουμε την επιλογή να ορίσουμε το μέγιστο χρονικό διάστημα αν απενεργοποιήσουμε το κουτί Auto σε αντίθετη περίπτωση το μέγιστο χρονικό διάστημα επιλέγεται πάλι αυτόματα.
 2. User-defined Output Intervals: Στο συγκεκριμένο πλαίσιο μπορούμε να ορίσουμε τον αριθμό των διαστημάτων στο πλαίσιο Number of Master Intervals. Σε κάθε διάστημα μπορούμε να επιλέξουμε τα μεγέθη που θα υπολογιστούν. Ενεργοποιώντας το κουτί Full results υπολογίζονται όλα τα επιλεγμένα μεγέθη στο αντίστοιχο διάστημα ενώ ενεργοποιώντας το κουτί Temp load επιλέγουμε να αποθηκευτούν τα αποτελέσματα των επιλεγμένων διαστημάτων για περεταίρω χρήση σε μια δομική ανάλυση. Τέλος επιλέγοντας το εικονίδιο User-defined Steps μπορούμε να ορίσουμε το μέγεθος των διαστημάτων που έχουμε δημιουργήσει. Μπορούμε να χωρίσουμε τα διαστήματα ισόποσα επιλέγοντας το εικονίδιο Space Equally ή να εισάγουμε δικές μας τιμές. Σε αντίθετη περίπτωση αν δεν επιλέξουμε το εικονίδιο User-defined Steps το Mechanica υπολογίζει αυτόματα το μέγεθος των διαστημάτων που έχουμε δημιουργήσει.
- Excluded Elements: Στη καρτέλα Excluded Elements μπορούμε να αποκλείσουμε κάποια στοιχεία από την ανάλυση τα οποία έχουν επιλεγεί αυτόματα από τον καθορισμό του πλέγματος.

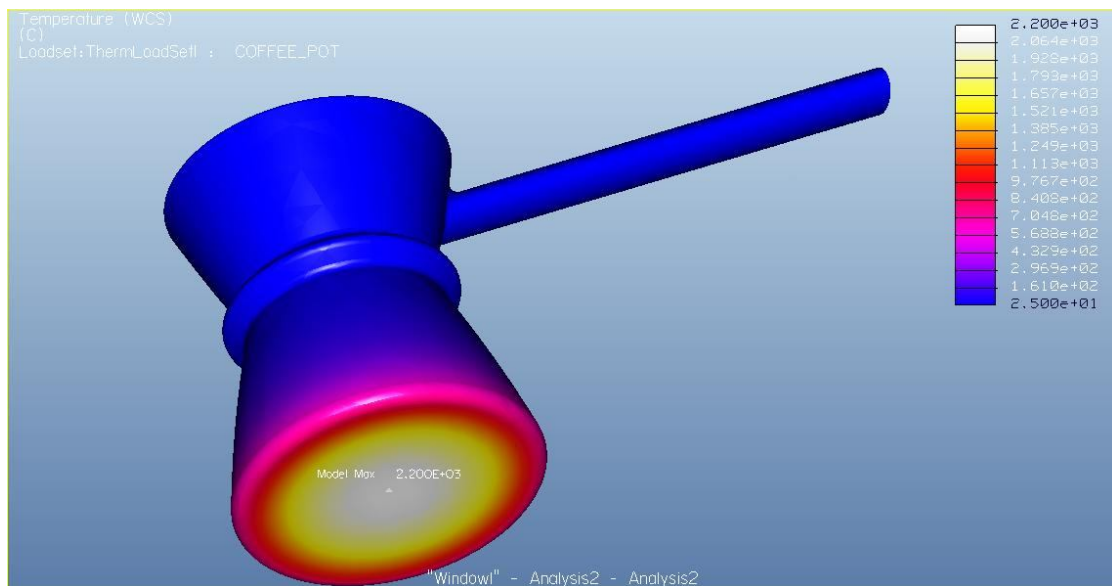
Για την παρουσίαση της χρονικά μεταβαλλόμενης θερμικής ανάλυσης θα χρησιμοποιήσουμε ένα σκεύος που θερμαίνεται στο κάτω μέρος του. Το αντικείμενο που θα χρησιμοποιήσουμε παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 155: Τρισδιάστατο μοντέλο coffee pot

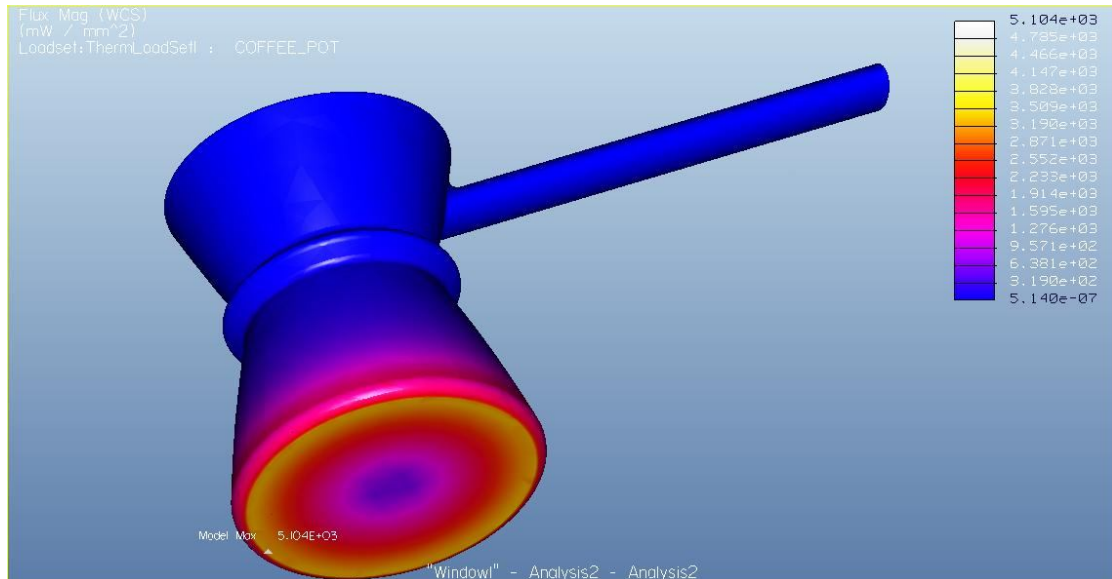
Αρχικά θα πραγματοποιήσουμε μια σταθερή θερμική ανάλυση για να υπολογίσουμε τις μέγιστες τιμές των ζητούμενων μεγεθών καθώς και τα σημεία που εφαρμόζονται. Στη συνέχεια θα πραγματοποιήσουμε χρονικά μεταβαλλόμενη θερμική ανάλυση για να υπολογίσουμε πόσος χρόνος χρειάζεται για να φτάσουν τα επιλεγμένα μεγέθη την μέγιστη τιμή.

Στο πρώτο στάδιο δημιουργήσαμε το αντικείμενο στο βασικό παράθυρο του Pro\Engineer και μεταφερθήκαμε στο παράθυρο εργασίας του Mechanical. Επιλέξαμε να δημιουργήσουμε μια θερμική ανάλυση και ορίσαμε ως υλικό κατασκευής του αντικείμενου τον μπρούτζο (ανάλογα χρωματίστηκε και το αντικείμενο). Στη συνέχεια τοποθετήσαμε ένα θερμικό φορτίο στη κάτω επιφάνεια του αντικειμένου θέλοντας να προσομοιώσουμε την τοποθέτηση του αντικειμένου πάνω σε μια ηλεκτρική εστία ή πάνω σε μια εστία φωτιάς. Το φορτίο που τοποθετήσαμε έχει ομοιόμορφη κατανομή και η τιμή του είναι 3500000mW. Σαν οριακή συνθήκη χρησιμοποιήσαμε την οριακή συνθήκη συναγωγής. Επιλέξαμε όλες τις επιφάνειες του αντικειμένου εκτός από την επιφάνεια που τοποθετήσαμε το φορτίο και εισάγαμε συντελεστή συναγωγής $0.33\text{mW}/(\text{mm}^2 \text{ C})$ και σταθερή θερμοκρασία παραβάλλοντος 25°C . Ως μέθοδο σύγκλισης επιλέξαμε Single-Pass Adaptive. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σταθερής θερμικής ανάλυσης.



Εικόνα 156: Απεικόνιση μέγιστης θερμοκρασίας στο μοντέλο

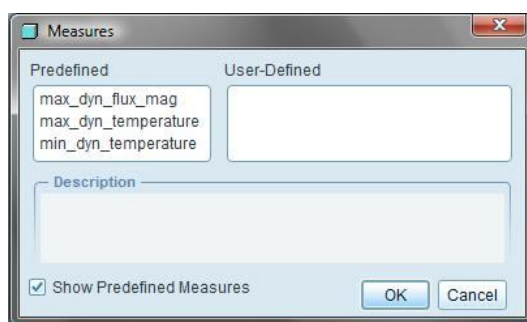
Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο μοντέλο είναι 2200°C και παρατηρείται στο κέντρο της επιφάνειας που τοποθετήσαμε το φορτίο.



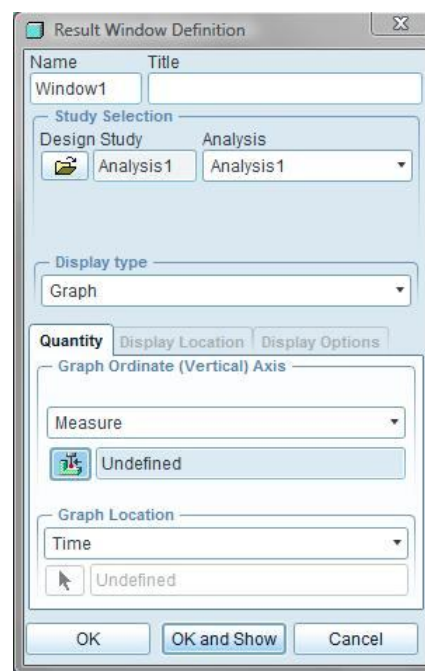
Εικόνα 157: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στο μοντέλο

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε τη ροή θερμότητας στο αντικείμενο με μέγιστη τιμή $5104 \text{ mW}/(\text{mm}^2 \text{ C})$ και παρατηρείται στο άκρο της επιφάνειας που τοποθετήσαμε το φορτίο.

Επόμενο βήμα είναι να δημιουργήσουμε τη χρονικά μεταβαλλόμενη θερμική ανάλυση. Χρησιμοποιήσαμε τα ίδια φορτία και τις οριακές συνθήκες με την προηγούμενη ανάλυση. Στο παράθυρο Transient Thermal Analysis Definition επιλέξαμε ομοιόμορφη κατανομή αρχικής θερμοκρασίας με τιμή 0°C και ακρίβεια 0.001. Ως μέθοδο σύγκλισης επιλέξαμε Single-Pass Adaptive και επιλέξαμε την αυτόματη δημιουργία των διαστημάτων με αυτόματο υπολογισμό της μέγιστης χρονικής διάρκειας. Στη συνέχεια τρέξαμε την ανάλυση και επιλέξαμε από το παράθυρο Analyses and Design Studies το εικονίδιο Review Results και εμφανίζεται το παράθυρο Result Window Definition. Στο πλαίσιο Display Type η επιλογή που έχουμε είναι Graph. Για να δημιουργήσουμε τα γραφήματα επιλέγουμε το εικονίδιο Insert Measure και ανοίγει το αντίστοιχο παράθυρο.

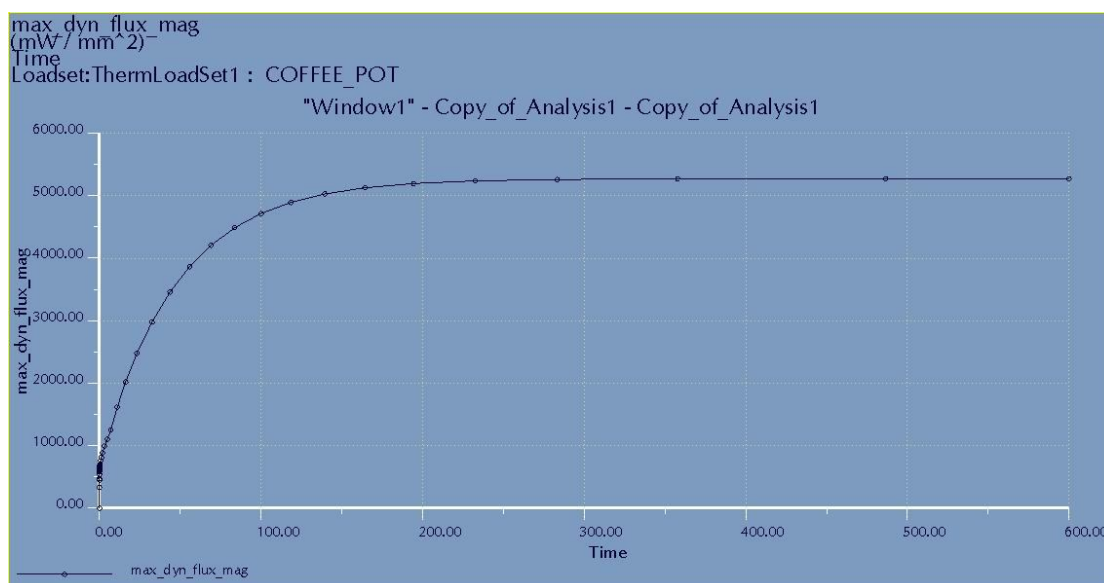


Εικόνα 158: Επιλογή προβαλλόμενου μεγέθους



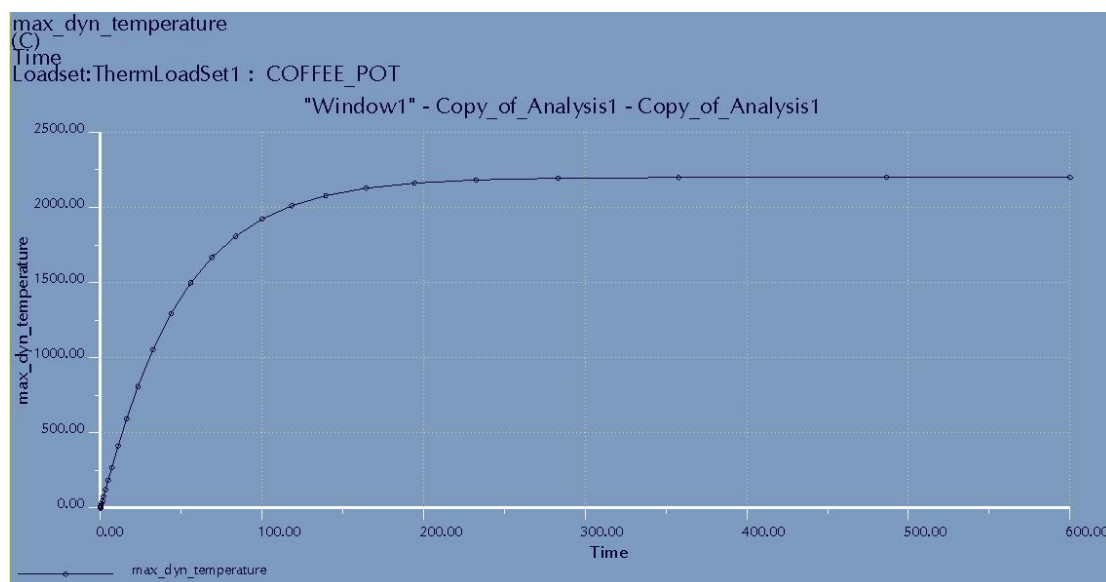
Εικόνα 159: Επιλογή παραμέτρων απεικόνισης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που δημιουργήσαμε.



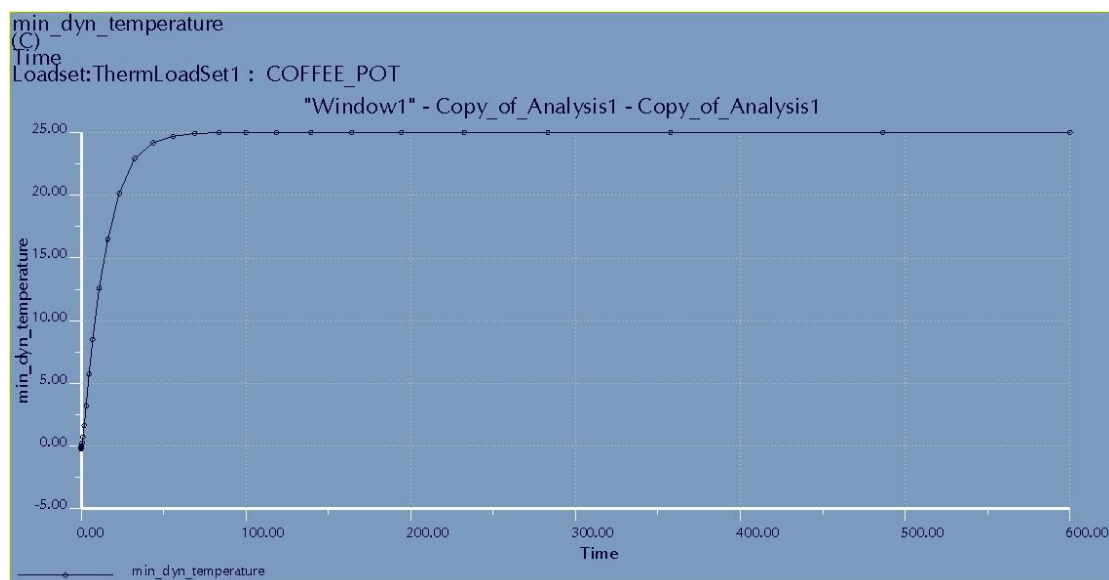
Διάγραμμα 10: Χρονικό διάστημα που απαιτείται για να φτάσει η ροή θερμότητας στη μέγιστη τιμή

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της ροής της θερμότητας στο μοντέλο στη χρονική περίοδο που έχουμε ορίσει. Παρατηρούμε ότι για να αποκτήσει τη μέγιστη τιμή απαιτούνται περίπου 250 δευτερόλεπτα.



Διάγραμμα 11: Χρονικό διάστημα που απαιτείται για να φτάσει η μέγιστη θερμοκρασία στη μέγιστη τιμή

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε τη μέγιστη θερμοκρασία στο μοντέλο και πως αυτή μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου.



Διάγραμμα 12: Χρονικό διάστημα που απαιτείται για να φτάσει η ελάχιστη θερμοκρασία στη μέγιστη τιμή

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε την ελάχιστη θερμοκρασία στο μοντέλο και πως αυτή μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου.

Παράρτημα

Βιβλιογραφία:

- **Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία για μηχανικούς.** Tirupathi R. Chandrupalta, Ashok D. Belegundu.
- **Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση.** Μπιλάλης Νικόλαος, Μαραβελάκης Εμμανουήλ
- **Pro/Mechanica Structure: Elements and Application.** Yves, Gargon.
- **Pro/Mechanica Tutorial Structure, Release 2000i.** Roger, Toogood

Πηγές από το διαδίκτυο:

- : www.ptc.com
- : www.imakenews.com
- : www.brighthubengineering.com
- : www.wikipedia.com
- : www.cadlab.tuc.gr