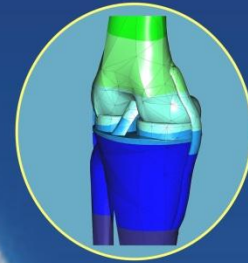
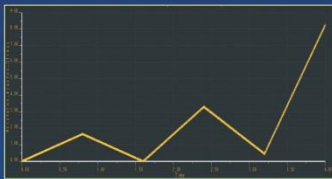




Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

Τμήμα μηχανολογίας



Πτυχιακή εργασία

Μελέτη δυναμικών φορτίσεων σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων

Τσαίνης Ανδρέας - Μάριος Α.Μ 5198

Επόπτης Καθηγητής: Δρ. Πετούσης Μάρκος

Ηράκλειο 2012 - 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η δυναμική των κατασκευών γίνεται εργαλείο του μηχανικού για τη μελέτη της δυναμικής αποκρίσεως των κατασκευών με την εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών στα μέσα του προηγούμενου αιώνα. Σήμερα οι φθηνοί, γρήγοροι και με μεγάλη χωρητικότητα υπολογιστές και η παράλληλη ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων επιλύσεως των προβλημάτων της δυναμικής επιτρέπουν την ασφαλή μελέτη πολύπλοκων κατασκευών υπό δυναμικά φορτία. Αεροσκάφη, μεγάλες γέφυρες, πλοία, ψηλά κτίρια, φράγματα, γρήγορα τρέινα κ.α. υπολογίζονται σήμερα με ασφάλεια.

Τα πεπερασμένα στοιχεία επέτρεψαν τη δυναμική ανάλυση συνεχών συστημάτων προσεγγίζοντας τα με διακριτά αποτελέσματα, τα δε συνοριακά στοιχεία αναλύουν με μεγάλη ακρίβεια συστήματα που περιγράφονται με μερικές διαφορικές εξισώσεις, η δε ζεύξη των δύο μεθόδων ανοίγει το δρόμο επιλύσεως πολύ δύσκολων προβλημάτων της δυναμικής, όπως η αλληλοεπίδραση της κατασκευής με το έδαφος ή με τα ρευστά καθώς και η ανάλυση συστημάτων με μεγάλες παραμορφώσεις και μη γραμμικές καταστατικές εξισώσεις.

Ο μηχανικός της πράξης μπορεί να χρησιμοποιεί επαγγελματικά προγράμματα υπολογιστή για τη μελέτη δύσκολων προβλημάτων. Η χρήση όμως των προγραμμάτων αυτών απαιτεί βαθιά θεωρητική γνώση της δυναμικής των κατασκευών, για να μπορέσει ο μηχανικός να ερμηνεύσει τα αποτελέσματα που παίρνει από τον υπολογιστή και να ελέγξει την αξιοπιστία τους. Αλλιώς ο υπολογιστής από χρήσιμο υπολογιστικό μέσο μπορεί να μετατραπεί σε επικίνδυνο εργαλείο αναλύσεως.

Η γνώση της δυναμικής των κατασκευών είναι ιδιαίτερως απαραίτητη για τους Έλληνες μηχανικούς, οι οποίοι πρέπει να μελετήσουν τις κατασκευές τους σε δυναμική καταπόνηση συνεπεία σεισμικής κινήσεως του εδάφους.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της μεθοδολογίας και ο προσδιορισμός των δυνατοτήτων και των παρεχόμενων εργαλείων για τη μελέτη δυναμικών φορτίσεων σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Στα πλαίσια της εργασίας θα γίνει αναφορά στη μαθηματική προσεγγιστική μέθοδο με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, στη θεωρία για τη μελέτη δυναμικών φορτίσεων και στο πως προσομοιώνονται σε υπολογιστικό λογισμικό.

Στην συνέχεια, θα γίνει περιγραφή των διαθέσιμων εργαλείων και των δυνατοτήτων υπολογισμού του λογισμικού μέσω ανάπτυξης παραδειγμάτων και θα γίνει ανάλυση τάσεων.

Τέλος, θα σχεδιαστεί και θα υλοποιηθεί ένα ολοκληρωμένο παράδειγμα χρήσης των εργαλείων του υπολογιστικού λογισμικού, για επίδειξη των παρεχόμενων δυνατοτήτων του.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους οι οποίοι με βοήθησαν και με στήριξαν καθ' όλη την διάρκεια της προσπάθειας μου για την εκπλήρωση της εργασίας. Θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθώ σε όλους εκείνους που μου συμπαραστάθηκαν σε αυτήν την προσπάθεια.

Κατά κύριο λόγο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου από το Α.Τ.Ε.Ι Ηρακλείου Κρήτης Δρ. Πετούση Μάρκο, για το πολύ ενδιαφέρον θέμα που μου εμπιστεύθηκε καθώς και για την εποικοδομητική καθοδήγηση, υποστήριξη και εμπιστοσύνη του καθ' όλη την διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους γονείς μου, Θεόδωρο και Ουρανία Τσαϊνή και τον αδελφό μου Αντώνη για την υποστήριξη τους σε κάθε επιλογή μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αρραβωνιαστικιά μου Μαρία Παντελίδου για την ψυχολογική υποστήριξη και την απεριόριστη υπομονή που έδειξε καθ' όλη την διάρκεια της φοίτησής μου.

Και τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Παπαζαφειρόπουλο Γιώργο (Υποσηναγός Μηχανικός Εγκαταστάσεων, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, Μ.Sc. και Υποψήφιος Διδάκτωρ Τομέα Δομοστατικής ΕΜΠ) στον οποίο χρωστάω ένα μεγάλο κομμάτι των γνώσεων μου και της αγάπης μου για την υπολογιστική μηχανική.

Τσαϊνης Ανδρέας - Μάριος

Ηράκλειο, Μάιος 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

I. Πρόλογος.....	1
II. Εισαγωγή.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Αριθμητική μέθοδος στατικής και δυναμικής ανάλυσης με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων.....	6
1.1 Γενικές πληροφορίες.....	6
1.2 Βασικές έννοιες της μεθόδου.....	7
1.3 Θεμελίωση της ΜΠΣ με τη μέθοδο των μετατοπίσεων.....	11
1.3.1 Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου άμεσης ακαμψίας.....	12
1.4 Βασικές έννοιες της δυναμικής των κατασκευών.....	15
1.4.1 Παράδειγμα δυναμικής ανάλυσης συστήματος με κατανεμημένη μάζα και ελαστικότητα.....	17
1.5 Είδη δυναμικών φορτίων.....	19
1.6 Διαδικασία προσομοίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό παραμετρικής σχεδίασης Creo Simulate.....	23
2.1 Διαδικασία εισαγωγής δεδομένων στο λογισμικό CREO SIMULATE.....	23
2.2 Ρύθμιση των βασικών παραμέτρων – οδηγός διαδικασίας.....	28
2.2.1 Προσδιορισμός υλικών.....	28
2.2.2 Δήλωση στηρίξεων.....	31
2.2.3 Ορισμός συνδέσεων.....	32
2.3 Εισαγωγή μετρητικών οργάνων.....	37
2.4 Εισαγωγή φορτίσεων.....	38
2.5 Δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων.....	49
2.6 Διαδικασία επιλογής είδους ανάλυσης.....	67
2.7 Διαδικασία για την διεξαγωγή στατικής ανάλυσης (Static Analysis).....	68
2.8 Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης φυσικών συχνοτήτων (Modal Analysis).....	74
2.9 Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης λυγισμού (Buckling Analysis).....	76
2.10 Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης κόπωσης (Fatigue Analysis)	78
2.10.1 Υπολογισμός ράβδου σε αξονική φόρτιση εντός καθορισμένου αριθμού κύκλων φόρτισης.....	80
2.11 Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης	

προέντασης (Prestress Analysis).....	85
2.12 Είδη δυναμικών αναλύσεων που υποστηρίζονται	
από το Creo Simulate.....	87
2.12.1 Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης χρόνου (Time Analysis).....	88
2.12.2 Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης συχνοτήτων (Frequency Analysis).....	90
2.12.3 Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης κρούσης (Shock Analysis).....	92
2.12.4 Διαδικασία για την διεξαγωγή στοχαστικής ανάλυσης (Random Analysis).....	94
2.12 Μέθοδοι εξαγωγής αποτελεσμάτων (Results).....	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Χρήση του λογισμικού για στατική ανάλυση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.....	105
3.1 Υπολογισμός δοκού σε καμπτική φόρτιση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων με αναλυτικό υπολογισμό.....	105
3.2 Υπολογισμός τριών προσομοιωμάτων άρθρωσης ανθρώπινου γονάτου.....	112
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Χρήση του λογισμικού για δυναμική ανάλυση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.....	117
4.1 Υπολογισμός τάσεων και μετατοπίσεων συναρτήσει του χρόνου σημειακού φορτίου το οποίο μεταβάλλεται περιοδικά.....	117
4.2 Υπολογισμός τάσεων και μετατοπίσεων συναρτήσει του χρόνου στην περίπτωση όπου εφαρμόζετε αξονική φόρτιση στο πόδι ενός ανθρώπου.....	122
4.3 Δυναμική ανάλυση προβόλου δοκού με ημιτονοειδή φόρτιση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων.....	146
4.4 Δυναμική ανάλυση κύβου μετά από συναρμολόγηση με φασματική φόρτιση.....	152
Επίλογος.....	157
Βιβλιογραφία.....	158

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

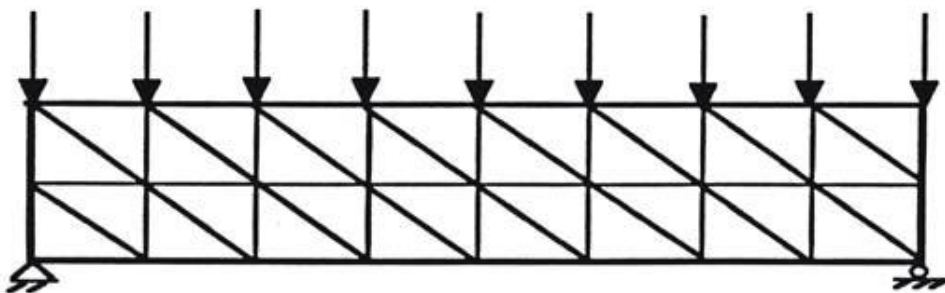
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή στην γένεση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, επεξηγούνται βασικές έννοιες και επιλύονται αντίστοιχα παραδείγματα.

1.1 Γενικές πληροφορίες.

Η αρχική διατύπωση της μεθόδου έγινε με βάση την μητρική ανάλυση, αργότερα όμως δόθηκε ευρύτερη και πιο θεμελιώδης θεωρητική βάση. Αρχικά θα θεωρήσουμε την μέθοδο ως επέκταση της μητρικής ανάλυσης στην ανάλυση των συνεχών μέσων (ελάσματα, κελύφη).

Το χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων. Μια από τις πρώτες δημοσιεύσεις στις οποίες παρουσιάστηκε η ιδέα αυτή είναι των Turner, Clough, Martin, και Topp (1956), ορισμένα όμως χαρακτηριστικά της είχαν ήδη περιγραφεί από τους Courant (1943), Hrenikoff (1941), McHenry (1943) και άλλους. Ακολούθησαν πολλές δημοσιεύσεις, συμπεριλαμβανομένων και αυτών του Αργύρη και των συνεργατών του την περίοδο 1954-60. Τα πρώτα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σε προβλήματα επίπεδης εντατικής κατάστασης, αργότερα όμως διατυπώθηκαν στοιχεία και για τρισδιάστατα στερεά, ελάσματα υπό κάμψη, παχεία κελύφη, και άλλες μορφές κατασκευών. Μετά την καθιέρωσή τους στη γραμμική ελαστική περιοχή εφαρμόστηκαν και σε δυσκολότερα προβλήματα όπως η δυναμική συμπεριφορά, ο λυγισμός και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού. Για να επιλυθούν δε προβλήματα με μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού απαιτείται επαναληπτική διαδικασία.



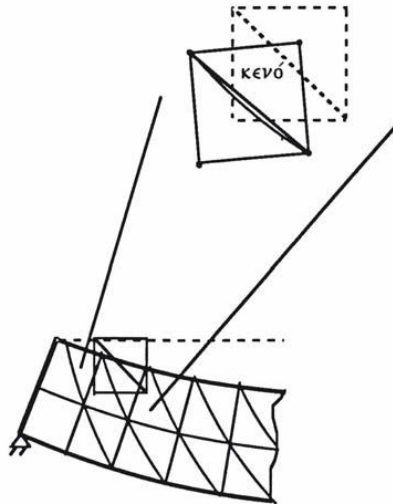
Σχήμα 1.1: Χρήση τριγωνικών στοιχείων για τη διακριτοποίηση αμφιέρειστης δοκού υπό καμπτική φόρτιση.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1960 αναγνωρίστηκε ότι η μέθοδος αποτελεί συγκεκριμένη μορφή της μεθόδου Ritz, και το 1964 οι Zienkiewicz και Cheung έδειξαν ότι μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλα τα προβλήματα πεδίου που έχουν μεταβολική διατύπωση. Για προβλήματα κατασκευών υπάρχει τώρα ένας ικανός αριθμός προγραμμάτων γενικής χρήσης και το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με τις δυνατότητες της μεθόδου έχει οδηγήσει στην ραγδαία εξέλιξη και χρήση της τα τελευταία χρόνια.

1.2. Βασικές έννοιες της μεθόδου.

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρική ανάλυση, η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί φυσιολογική προσομοίωση των πλαισίων, καθώς αυτά αποτελούνται από δοκούς που είναι συνδεδεμένες στα άκρα τους. Σε μία συνεχή όμως κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα.

Το **(Σχήμα 1.1)** δείχνει τον κορμό δοκού υποδιαιρεμένο σε τριγωνικά στοιχεία. Για να γίνει χρήση μητρικών μεθόδων απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται και οι παράγωγοι γίνεται λόγος για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις. Με αυτό τον τρόπο οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους και το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρ' όλο που μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός κομβικών μετατοπίσεων ο αριθμός τους είναι πεπερασμένος. Το πρόβλημα εκφράζεται τότε ως ένα σύνολο (σύστημα) γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρικές) μεθόδους.



Σχήμα 1.2: Παραμόρφωση στοιχείων.

Για να επιτευχθεί ακριβής λύση ενός συγκεκριμένου προβλήματος στη διακριτοποιημένη μορφή του, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβατότητας στο εσωτερικό των στοιχείων αλλά και στα σύνορά τους. Οι απαιτήσεις αυτές ανάγονται στην ικανοποίηση τεσσάρων συνθηκών. Ας θεωρηθεί, για παράδειγμα, η συμβατότητα μεταξύ των στοιχείων. Σε μία συνεχή κατασκευή όπως το έλασμα του σχήματος (**Σχήμα 1.2**) ισχύει συνέχεια των μετατοπίσεων στα κοινά όρια των στοιχείων. Συνεπώς στο αριθμητικό μοντέλο (πεπερασμένα στοιχεία) δεν επαρκεί να ικανοποιείται η συνθήκη της συνέχειας των μετατοπίσεων στους κόμβους και μόνο. Εάν δηλαδή δεν διατυπωθούν περιορισμοί στις μετατοπίσεις κατά μήκος των ορίων των στοιχείων το θεωρητικό μοντέλο της κατασκευής θα είναι περισσότερο εύκαμπτο επειδή θα δημιουργηθούν κενά, όπως δείχνει το σχήμα (**Σχήμα 1.2**).

Ένας τρόπος να περιορισθεί το σφάλμα είναι να χρησιμοποιηθούν μικρότερα και περισσότερα στοιχεία διότι έτσι θα δημιουργηθούν περισσότεροι κόμβοι και συνεπώς περισσότερα σημεία στα οποία θα ικανοποιείται η συμβατότητα. Μία διακριτή προσομοίωση δεν μπορεί όμως να αποδώσει με απόλυτη ακρίβεια την συμπεριφορά ενός συνεχούς μέσου, ανεξαρτήτως του αριθμού των διακριτών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται. Υπάρχει δηλαδή πάντοτε ένα *σφάλμα*, το οποίο όμως μπορεί να περιορισθεί και να γίνει αμελητέο και τοπικό. Δεν είναι συνεπώς δυνατόν να ικανοποιηθούν όλες οι προαναφερθείσες συνθήκες με απόλυτη ακρίβεια, έστω και αν γίνει χρήση μεγάλου αριθμού στοιχείων. Είναι όμως δυνατό, με σωστή επιλογή των ιδιοτήτων των στοιχείων και κατάλληλη διακριτοποίηση, να περιορισθεί το αριθμητικό σφάλμα. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των στοιχείων αποτελεί ένα από τα βασικότερα στάδια διατύπωσης μιας λύσης. Θα πρέπει τότε να γίνεται αυτό έτσι ώστε να ικανοποιούνται επαρκώς οι συνθήκες συμβατότητας

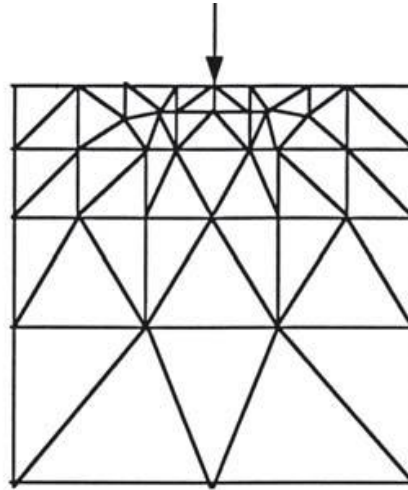
χωρίς να χρειασθεί να γίνει χρήση υπερβολικά μικρών στοιχείων. Η συμπεριφορά των στοιχείων καθορίζεται από συναρτήσεις οι οποίες ορίζουν τον τρόπο μεταβολής των τάσεων ή των μετατοπίσεων στο εσωτερικό τους. Με άλλα λόγια, προκαθορίζεται ο τρόπος συμπεριφοράς των διαφόρων μεταβλητών. Το αποτέλεσμα είναι ότι, παρ όλο που οι συνθήκες ισορροπίας και συμβατότητας ικανοποιούνται μόνο στους κόμβους, η προδιαγεγραμμένη συμπεριφορά στο εσωτερικό κάθε στοιχείου εξασφαλίζει ότι η συμβατότητα ικανοποιείται επαρκώς στο εσωτερικό και στα σύνορά τους. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι απαιτείται προσοχή κατά την υποδιαίρεση (διακριτοποίηση) της κατασκευής, καθώς επίσης και κατά την επιλογή της συνάρτησης που περιγράφει τη συμπεριφορά στο εσωτερικό του κάθε στοιχείου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ακρίβεια της μεθόδου αυξάνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων, ή καλύτερα, των κόμβων. Όσο αυξάνεται όμως ο αριθμός των στοιχείων, τόσο αυξάνονται ο χρόνος υπολογισμού και το κόστος. Σε πολλές περιπτώσεις η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων χρησιμοποιείται για να αποκτηθεί ακριβέστερη εικόνα της τοπικής συμπεριφοράς (σε συγκεντρώσεις τάσεων, σε ανοίγματα, κοντά στο σημείο εφαρμογής του εξωτερικού φορτίου, κλπ). Η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων είναι ένας εφικτός τρόπος ελάττωσης του κόστους χωρίς να μειωθεί ακρίβεια της λύσης του προβλήματος. Λόγω όμως της μεγάλης ποικιλίας κατασκευών και φορτίσεων δεν είναι δυνατό να δοθεί γενικός κανόνας σχετικά με τον αριθμό ή το μέγεθος των στοιχείων ή τον τρόπο διακριτοποίησης που απαιτούνται για επαρκή ακρίβεια. Σε κάθε περίπτωση ο τρόπος διακριτοποίησης πρέπει να βασίζεται στην εμπειρία συμπεριφοράς και μελέτης παρόμοιων κατασκευών. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό πρέπει να επιλυθεί σειρά προβλημάτων με διαφορετικές διακριτοποιήσεις και να υπολογισθεί ο βαθμός σύγκλισης στην ακριβή λύση. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η ακρίβεια της λύσης για το συγκεκριμένο πρόβλημα **(Σχήμα 1.3)**.

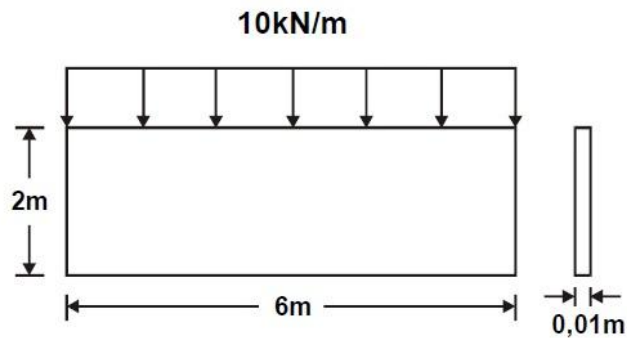
Στο σχήμα **(Σχήμα 1.4)** δείχνεται ότι η εξωτερική φόρτιση παριστάνεται με σύνολα αντίστοιχων σημειακών φορτίων τα οποία εφαρμόζονται στους κόμβους των στοιχείων. Στην περίπτωση συγκεντρωμένων φορτίων ο προφανής τρόπος είναι να επιλεγεί κόμβος στο σημείο εφαρμογής του φορτίου. Για κατανεμημένα φορτία πρέπει να επιλεγούν στατικά ισοδύναμα σημειακά φορτία στους αντίστοιχους κόμβους. Τα περισσότερα στοιχεία επίπεδης εντατικής κατάστασης δεν έχουν στρεπτικό βαθμό ελευθερίας και συνεπώς δεν είναι δυνατό να γίνει χρήση αντίστοιχων ροπών στους κόμβους. Αυτό δεν είναι όμως σοβαρό πρόβλημα διότι οι κόμβοι είναι αρκετά κοντά ο ένας στον άλλο και έτσι οι δυνάμεις στους κόμβους αποτελούν ικανοποιητική προσομοίωση του κατανεμημένου φορτίου. Για παράδειγμα, το σχήμα **(Σχήμα 1.4)** δείχνει τον κορμό της δοκού που θεωρήθηκε

προηγουμένως, με μήκος 6 m και κατανεμημένο φορτίο 10 kN/m. Η επιλογή των ισοδύναμων φορτίων στους κόμβους είναι προφανής και δίνεται στο σχήμα αυτό.

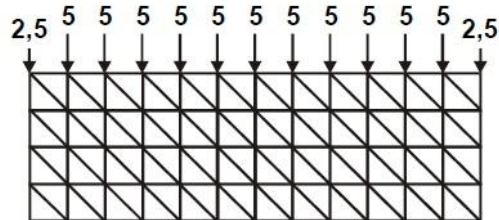
σημειακό φορτίο



Σχήμα 1.3: Βαθμιαία ελάττωση του μεγέθους των στοιχείων.



σημειακά φορτία



Σχήμα 1.4: Ισοδύναμα επικόμβια φορτία.

1.3. Θεμελίωση της ΜΠΣ με τη μέθοδο των μετατοπίσεων.

Ο πλέον διαδεδομένος τρόπος διατύπωσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για γραμμικά στατικά προβλήματα βασίζεται στη μέθοδο των μετατοπίσεων.

Άλλοι τρόποι κάνουν χρήση της ισορροπίας δυνάμεων, ή άλλων υβριδικών ή και μικτών μεθόδων. Τα βασικά στάδια της μεθόδου είναι:

1. Η προσομοίωση (διακριτοποίηση) της κατασκευής με ένα σύνολο στοιχείων που συνδέονται σε συνοριακούς κόμβους.
2. Ο προσδιορισμός των γενικευμένων (άγνωστων) μετατοπίσεων που θα καθορίσουν πλήρως την απόκριση της κατασκευής.
3. Η διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας που αντιστοιχούν στις άγνωστες κομβικές μετατοπίσεις και η επίλυσή τους.
4. Ο υπολογισμός των εσωτερικών κατανομών των τάσεων των στοιχείων, για δεδομένες μετατοπίσεις στους κόμβους.
5. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, (μετατοπίσεις και τάσεις), με βάση τις δεδομένες παραδοχές του προβλήματος.

Κατά την πρακτική μελέτη της συμπεριφοράς κατασκευών, από τα πιο σημαντικά βήματα της όλης διαδικασίας είναι η κατάλληλη διακριτοποίηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Για να επιτευχθεί σωστή διακριτοποίηση πρέπει να θεωρηθούν διάφορα μοντέλα, το οποία σταδιακά γίνονται περισσότερο σύνθετα.

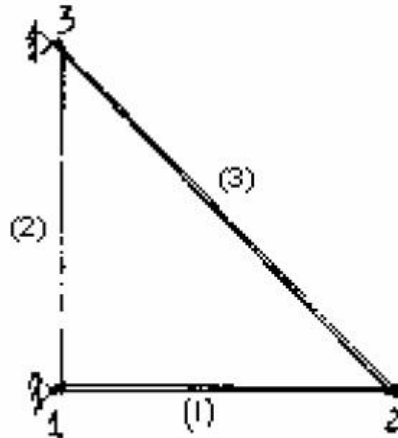
Το γενικό μητρώο ακαμψίας που αντιστοιχεί στο σύνολο των στοιχείων της κατασκευής, αποκτάται με τη μέθοδο της άμεσης ακαμψίας, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$K = \sum_m K^{(m)} \quad (1)$$

Για να αποκτηθεί το άθροισμα των ακαμψιών οι ακαμψίες των επί μέρους στοιχείων διατυπώνονται ως μητρώα ίδιας τάξης με το γενικό μητρώο ακαμψίας της κατασκευής, στα οποία οι όροι που αντιστοιχούν με τα υπόλοιπα στοιχεία είναι ίσοι με μηδέν.

1.3.1. Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου άμεσης ακαμψίας.

Να συνταχθεί το μητρώο ακαμψίας της κατασκευής του σχήματος.



Σχήμα 1.5: Κατασκευή αποτελούμενη από τρία στοιχεία.

Το διάνυσμα των εξωτερικών δυνάμεων είναι:

$$\mathbf{F}'^T = \begin{bmatrix} F'_{x1} & F'_{y1} & F'_{x2} & F'_{y2} & F'_{x3} & F'_{y3} \end{bmatrix}$$

ενώ το διάνυσμα των μετατοπίσεων στους κόμβους είναι:

$$\mathbf{u}'^T = \begin{bmatrix} u'_1 & v'_1 & u'_2 & v'_2 & u'_3 & v'_3 \end{bmatrix}$$

Λύση

Η μητρική εξίσωση ισορροπίας του στοιχείου 1 είναι:

$$\begin{bmatrix} F'_{x1} \\ F'_{y1} \\ F'_{x2} \\ F'_{y2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k'_{11} & k'_{12} & k'_{13} & k'_{14} \\ k'_{21} & k'_{22} & k'_{23} & k'_{24} \\ k'_{31} & k'_{32} & k'_{33} & k'_{34} \\ k'_{41} & k'_{42} & k'_{43} & k'_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_1 \\ v'_1 \\ u'_2 \\ v'_2 \end{bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_1 \\ v'_1 \\ u'_2 \\ v'_2 \end{bmatrix}$$

Η μητρική εξίσωση ισορροπίας του στοιχείου 2 είναι:

$$\begin{bmatrix} F'_{x1}^{(2)} \\ F'_{y1}^{(2)} \\ F'_{x3}^{(2)} \\ F'_{y3}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k'_{11}^{(2)} & k'_{12}^{(2)} & k'_{13}^{(2)} & k'_{14}^{(2)} \\ k'_{21}^{(2)} & k'_{22}^{(2)} & k'_{23}^{(2)} & k'_{24}^{(2)} \\ k'_{31}^{(2)} & k'_{32}^{(2)} & k'_{33}^{(2)} & k'_{34}^{(2)} \\ k'_{41}^{(2)} & k'_{42}^{(2)} & k'_{43}^{(2)} & k'_{44}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_1 \\ v'_1 \\ u'_3 \\ v'_3 \end{bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_1 \\ v'_1 \\ u'_3 \\ v'_3 \end{bmatrix}$$

Η μητρική εξίσωση ισορροπίας του στοιχείου 3 είναι:

$$\begin{bmatrix} F'_{x2}^{(3)} \\ F'_{y2}^{(3)} \\ F'_{x3}^{(3)} \\ F'_{y3}^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k'_{11}^{(3)} & k'_{12}^{(3)} & k'_{13}^{(3)} & k'_{14}^{(3)} \\ k'_{21}^{(3)} & k'_{22}^{(3)} & k'_{23}^{(3)} & k'_{24}^{(3)} \\ k'_{31}^{(3)} & k'_{32}^{(3)} & k'_{33}^{(3)} & k'_{34}^{(3)} \\ k'_{41}^{(3)} & k'_{42}^{(3)} & k'_{43}^{(3)} & k'_{44}^{(3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_2 \\ v'_2 \\ u'_3 \\ v'_3 \end{bmatrix} = \frac{EA}{\sqrt{2}L} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_2 \\ v'_2 \\ u'_3 \\ v'_3 \end{bmatrix}$$

Στον **(Πίνακας 1.1)** δίνεται η αντιστοιχία βαθμών ελευθερίας στο τοπικό και το γενικό σύστημα αναφοράς, σύμφωνα με τα παραπάνω μητρώα.

Στοιχείο	Τοπική αρίθμηση	Γενική αρίθμηση
(1)	1	1
	2	2
(2)	1	1
	2	3
(3)	1	2
	2	3

Πίνακας 1.1: Βαθμοί ελευθερίας σε σχέση με το τοπικό και το γενικό σύστημα αναφοράς.

Επιβάλλουμε τις εξισώσεις ισορροπίας στους κόμβους της κατασκευής. Για παράδειγμα, στον κόμβο 2 θα έχουμε:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}'_{x2} &= \mathbf{F}'_{x2}^{(1)} + \mathbf{F}'_{x2}^{(3)} = \\
 &= k'_{31} u'_1 + k'_{32} v'_1 + k'_{33} u'_2 + k'_{34} v'_2 + \\
 &\quad + k'_{11} u'_2 + k'_{12} v'_2 + k'_{13} u'_3 + k'_{14} v'_3 = \\
 &= k'_{31} u'_1 + k'_{32} v'_1 + [k'_{33} + k'_{11}] u'_2 + [k'_{34} + k'_{12}] v'_2 + \\
 &\quad + k'_{13} u'_3 + k'_{14} v'_3 \\
 \mathbf{F}'_{y2} &= \mathbf{F}'_{y2}^{(1)} + \mathbf{F}'_{y2}^{(3)} = \\
 &= k'_{41} u'_1 + k'_{42} v'_1 + k'_{43} u'_2 + k'_{44} v'_2 + \\
 &\quad + k'_{21} u'_2 + k'_{22} v'_2 + k'_{23} u'_3 + k'_{24} v'_3 \\
 &= k'_{41} u'_1 + k'_{42} v'_1 + [k'_{43} + k'_{21}] u'_2 + [k'_{44} + k'_{22}] v'_2 + \\
 &\quad + k'_{23} u'_3 + k'_{24} v'_3
 \end{aligned}$$

Σύνθεση του μητρώου ακαμψίας της κατασκευής

$$\begin{bmatrix} F'_{x1} \\ F'_{y1} \\ F'_{x2} \\ F'_{y2} \\ F'_{x3} \\ F'_{y3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k'_{31} & k'_{32} & k'_{33} + k'_{11} & k'_{34} + k'_{12} & k'_{13} & k'_{14} \\ k'_{41} & k'_{42} & k'_{43} + k'_{21} & k'_{44} + k'_{22} & k'_{23} & k'_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_1 \\ v'_1 \\ u'_2 \\ v'_2 \\ u'_3 \\ v'_3 \end{bmatrix}$$

Παρομοίως και από τις συνθήκες ισορροπίας στους άλλους κόμβους. Επομένως, εισάγονται οι όροι στο γενικό μητρώο ακαμψίας κατά τρόπο ώστε να υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ της τοπικής και της γενικής αρίθμησης.

Στοιχείο	Τοπική αρίθμηση		Γενική αρίθμηση		Σειρά στο διάνυσμα μετατοπίσεων
(1)	1	u'_1	1	u'_1	1
		v'_1		v'_1	2
	2	u'_2	2	u'_2	3
		v'_2		v'_2	4
(2)	1	u'_1	1	u'_1	1
		v'_1		v'_1	2
	2	u'_2	3	u'_3	5
		v'_2		v'_3	6
(3)	1	u'_1	2	u'_2	3
		v'_1		v'_2	4
	2	u'_1	3	u'_3	5
		v'_1		v'_3	6

Πίνακας 1.2: Τα στοιχεία σε σχέση με την τοπική και την γενική αρίθμηση.

1.4. Βασικές έννοιες της δυναμικής των κατασκευών.

Η εφαρμογή των Νόμων της Κινήσεως οδηγεί σε μαθηματικά προσομοιώματα που περιγράφονται με διαφορικές εξισώσεις, συνήθεις ή μερικές, η προσπάθεια επιλύσεως των οποίων έδωσε μεγάλη ώθηση στην εξέλιξη της μηχανικής. Δυστυχώς όμως οι αναλυτικές λύσεις περιορίζονται σε απλά σχετικά προβλήματα, όπως ταλαντώσεις διακριτών συστημάτων με μικρό βαθμό ελευθερίας κινήσεως, γραμμικές ταλαντώσεις δοκών, μεμβρανών, πλακών και κελυφών με απλή γεωμετρία και απλές συνθήκες στηρίξεως από υλικά με γραμμική, ως επί το πλείστον, συμπεριφορά. Οι λύσεις αυτές, ενώ είναι χρήσιμες για την εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων για τη δυναμική απόκριση των κατασκευών, δεν προσφέρονται για την επίλυση ρεαλιστικών προβλημάτων της πράξης, όπου η γεωμετρία και οι φορτίσεις είναι πολύπλοκες και σύνθετες, ενώ η συμπεριφορά είναι εν γένει μη γραμμική.

Την αδυναμία αυτή καλύπτουν οι λεγόμενες αριθμητικές μέθοδοι. Η δυναμική των κατασκευών έγινε εργαλείο του μηχανικού για τη μελέτη της δυναμικής αποκρίσεως των κατασκευών με την εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών στα μέσα του προηγούμενου αιώνα. Σήμερα οι φθηνοί, γρήγοροι και με μεγάλη χωρητικότητα υπολογιστές και η παράλληλη ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων επιλύσεως των προβλημάτων της δυναμικής επιτρέπουν την ασφαλή μελέτη πολύπλοκων κατασκευών υπό δυναμικά φορτία. Αεροσκάφη, μεγάλες γέφυρες, πλοία, υψηλά κτίρια, φράγματα, γρήγορα τρέινα κ.α. υπολογίζονται σήμερα με ασφάλεια. Τα πεπερασμένα στοιχεία επέτρεψαν τη δυναμική ανάλυση

συνεχών συστημάτων προσεγγίζοντας τα με διακριτά, τα δε συντομικά στοιχεία αναλύουν με μεγάλη ακρίβεια συστήματα που περιγράφονται με μερικές διαφορικές εξισώσεις, η δε ζεύξη των δύο μεθόδων ανοίγει το δρόμο επιλύσεως πολύ δύσκολων προβλημάτων της δυναμικής, όπως η αλληλεπίδραση κατασκευής με το έδαφος ή με τα ρευστά καθώς και η ανάλυση συστημάτων με μεγάλες παραμορφώσεις και μη γραμμικές καταστατικές εξισώσεις. Ο μηχανικός της πράξης μπορεί να χρησιμοποιεί επαγγελματικά προγράμματα υπολογιστή για τη μελέτη δύσκολων προβλημάτων. Η χρήση όμως των προγραμμάτων αυτών απαιτεί βαθιά θεωρητική γνώση της δυναμικής των κατασκευών, για να μπορέσει ο μηχανικός να ερμηνεύσει τα αποτελέσματα που παίρνει από τον υπολογιστή και να ελέγξει την αξιοπιστία τους. Αλλιώς ο υπολογιστής από χρήσιμο υπολογιστικό μέσο μπορεί να μετατραπεί σε επικίνδυνο εργαλείο αναλύσεως.

Ο προσδιορισμός της παραμορφώσεως και εντάσεως σε μία κατασκευή, όταν αυτή υποβάλλεται σε δυναμική φόρτιση, αποτελεί το αντικείμενο της Δυναμικής Αναλύσεως των Κατασκευών. Οι κατασκευές εκτός από στατικά φορτία είναι δυνατόν να υποβάλλονται και σε δυναμικά φορτία, δηλαδή φορτία των οποίων το μέγεθος, η διεύθυνση ή και η θέση μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου. Μεταξύ της στατικής και της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών υπάρχουν δύο ουσιώδεις διαφορές.

(α) Στη στατική φόρτιση τα φορτία είναι σταθερά, η δε ένταση και παραμόρφωση που αναπτύσσονται είναι μοναδικές, τουλάχιστο στη γραμμική θεωρία. Αντίθετα, στη δυναμική φόρτιση η ένταση και η παραμόρφωση του φορέα είναι συναρτήσεις του χρόνου, δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή αναπτύσσονται στο φορέα διαφορετική παραμορφωσιακή και εντατική κατάσταση.

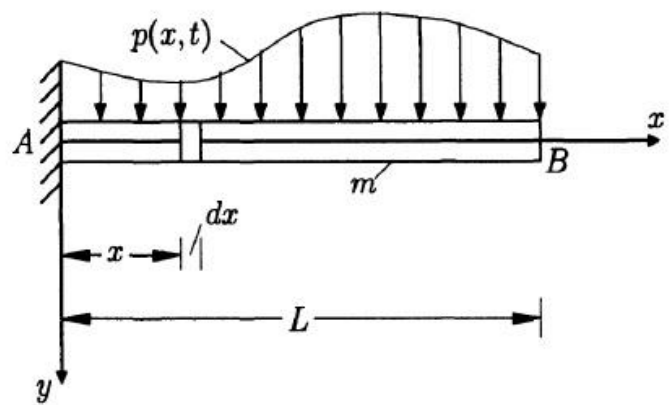
(β) Στη δυναμική φόρτιση τα σημεία του φορέα αλλάζουν θέση συναρτήσει του χρόνου, δηλαδή κινούνται, επομένως έχουν ταχύτητα και επιτάχυνση. Επειδή ο φορέας έχει μάζα αναπτύσσονται αδρανειακές δυνάμεις συνεπεία της επιταχύνσεως των υλικών σημείων της κατασκευής. Οι αδρανειακές αυτές δυνάμεις αποτελούν πρόσθετη φόρτιση της κατασκευής, η οποία δεν μπορεί να αμεληθεί.

Είναι φανερό ότι το μέγεθος των αδρανειακών δυνάμεων εξαρτάται από το μέγεθος της επιταχύνσεως. Όταν οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις είναι πολύ μικρές, η φόρτιση που οφείλεται στις αδρανειακές δυνάμεις είναι επίσης μικρή και μπορεί να παραλειφθεί. Στην περίπτωση αυτή ο χρόνος υπεισέρχεται μόνο ως παράμετρος και η συμπεριφορά του φορέα λέγεται *ψευδοδυναμική* ή *οιονεί στατική* (quasi-static). Οι αδρανειακές δυνάμεις, όπως θα δούμε, εμφανίζονται στις εξισώσεις κινήσεως του φορέα με τις δεύτερες παραγώγους των συνιστωσών των μετατοπίσεων ως προς το χρόνο. Κατά συνέπεια, στη Δυναμική Ανάλυση οι εξισώσεις που πρέπει να επιλυθούν για να προσδιοριστεί η παραμόρφωση και η

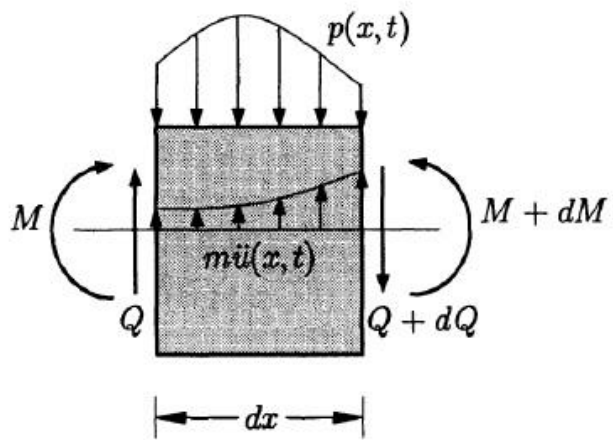
ένταση του φορέα είναι διαφορικές εξισώσεις και όχι αλγεβρικές, όπως στην περίπτωση της Στατικής Αναλύσεως. Για τον λόγο αυτό ο τρόπος επιλύσεως των φορέων στη Δυναμική Ανάλυση είναι διαφορετικός από εκείνους που χρησιμοποιούνται στη στατική ανάλυση.

1.4.1. Παράδειγμα δυναμικής ανάλυσης συστήματος με κατανεμημένη μάζα και ελαστικότητα.

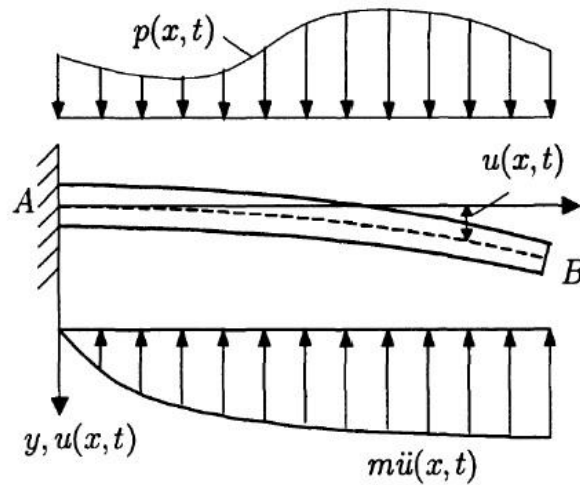
Έστω θεωρείτε πρόβολος του (Σχήμα 1.6). Ο πρόβολος έχει σταθερή μάζα m ανά μονάδα μήκους, σταθερή ροπή αδράνειας I και υποβάλλεται σε δυναμικό φορτίο $p(x,t)$ (Σχήμα 1.6). Για να διατυπώσουμε την εξίσωση δυναμικής ισορροπίας του προβόλου εξετάζουμε, όπως και στη στατική, την ισορροπία ενός στοιχείου της (Σχήμα 1.7). Κατά τη στατική θεώρηση το στοιχείο σε κάθε χρονική στιγμή ισορροπεί υπό την επενέργεια των εντατικών μεγεθών $Q=Q(x,t)$, $M=M(x,t)$ και του εξωτερικού φορτίου $p(x,t)dx$



Σχήμα 1.6: Πρόβολος υποβαλλόμενος σε δυναμική φόρτιση $p(x,t)$.



Σχήμα 1.7: Στοιχείο dx του προβόλου.



Σχήμα 1.8: Ο πρόβολος με τις φορτίσεις $p(x,t)$ $m\ddot{u}(x,t)$.

Επειδή όμως το βέλος κάμψεως είναι συνάρτηση όχι μόνο της διατομής x αλλά και του χρόνου t , δηλ. $U=u(x,t)$, στο στοιχείο που έχει μάζα $m dx$ αναπτύσσεται αδρανειακή δύναμη $m\ddot{u} dx$, η οποία σύμφωνα με την αρχή του d'Alembert αντιτίθεται στην κίνηση, δηλαδή για θετική μετατόπιση $u(t)$ προς τα κάτω η αδρανειακή δύναμη κατευθύνεται προς τα άνω (βλ. Σχήμα 1.8). Συνεπώς, εάν γράψουμε την εξίσωση δυναμικής ισορροπίας κατά τον κατακόρυφο άξονα y , θα έχουμε

$$-Q + Q + dQ + p(x,t)dx - m\ddot{u}dx = 0$$

ή

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = -p(x,t) + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.1.1)$$

Η παράγωγος ως προς το χρόνο συμβολίζεται είτε με μία τελεία πάνω από το σύμβολο της συναρτήσεως, είτε με τον τελεστή d/dt , όταν πρόκειται για συνήθη παράγωγο, ή τον $\partial/\partial t$, όταν πρόκειται για μερική παράγωγο.

Από τη θεωρία της δοκού, με παράλειψη της στροφικής αδράνειας του στοιχείου, έχουμε

$$Q = -EI \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \quad (1.1.2)$$

Η σχέση (1.1.1) με την βοήθεια της (1.1.2) δίδει

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = p(x, t) \quad (1.1.3)$$

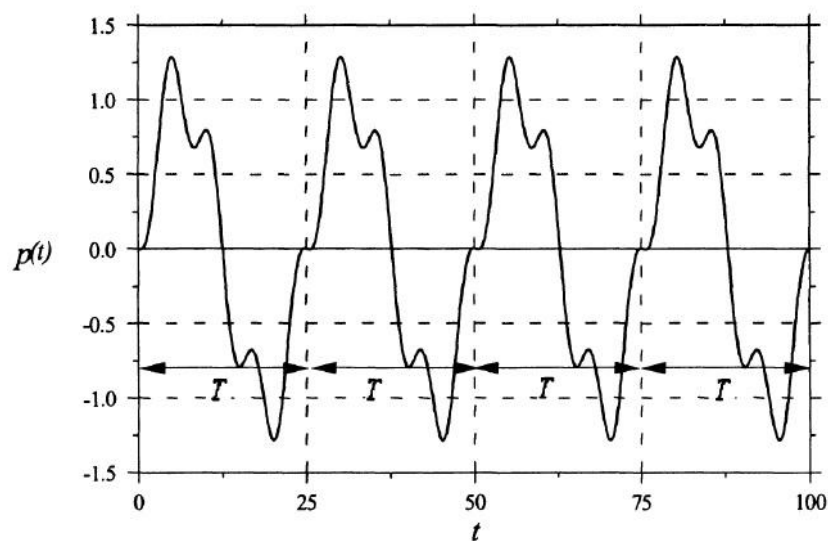
Η εξίσωση (1.1.3) είναι η γνωστή εξίσωση δυναμικής ισορροπίας ή εξίσωση κινήσεως της ταλαντευόμενης δοκού. Είναι προφανές ότι, αν στη σχέση (1.1.3) παραλείψουμε τον όρο $m \partial^2 u / \partial t^2$ που οφείλεται στις αδρανειακές δυνάμεις, προκύπτει η γνωστή εξίσωση της ελαστικής γραμμής δοκού για στατική φόρτιση. Δηλαδή

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = p(x) \quad (1.1.4)$$

Στο **(Σχήμα 1.8)** φαίνονται και οι αδρανειακές δυνάμεις που αντιστοιχούν σε κάποια χρονική στιγμή. Οι δυνάμεις αυτές αντιτίθενται στην κίνηση.

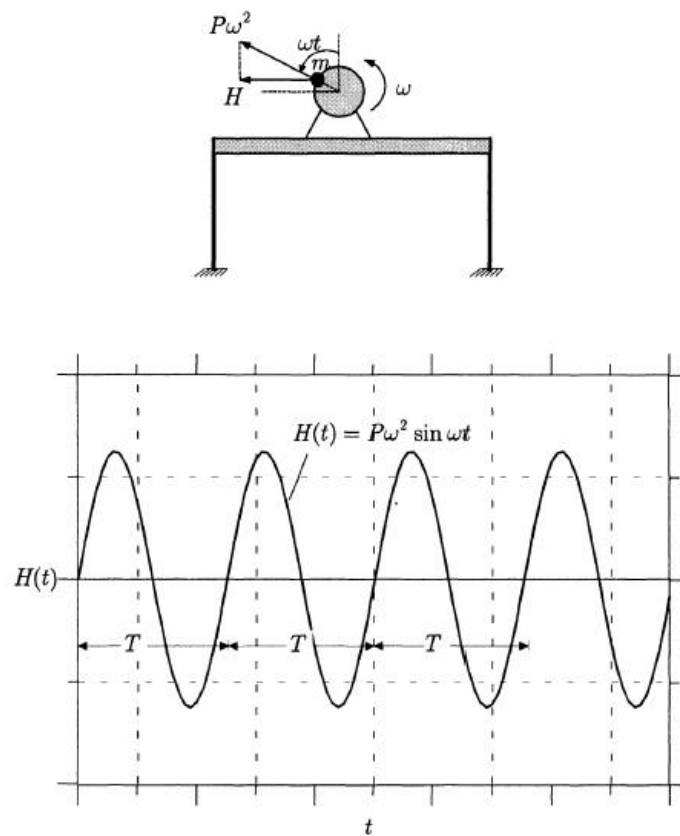
1.5. Είδη δυναμικών φορτίων.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, δυναμικά φορτία είναι εκείνα, των οποίων η ένταση ή και η θέση μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου. Τέτοια είναι π.χ. τα φορτία που οφείλονται σε κίνηση μηχανών, σε έκρηξη, σε κίνηση οχημάτων, σε ανεμοπίεση κλπ. Η κίνηση της στηρίξεως ενός φορέα, και όταν ακόμα δεν υπάρχουν εξωτερικές δυνάμεις, παράγει επίσης δυναμική καταπόνηση. Τέτοια είναι η περίπτωση της σεισμικής κινήσεως του εδάφους. Στην περίπτωση αυτή η κίνηση του εδάφους, μπορεί να αναχθεί σε ένα ισοδύναμο δυναμικό φορτίο.



Σχήμα 1.9: Περιοδική φόρτιση.

Τα δυναμικά φορτία διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στα ντετερμινιστικά ή αιτιοκρατικά και στα τυχαία ή στοχαστικά. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα φορτία των οποίων η χρονική τους μεταβολή είναι γνωστή σε όλη τη χρονική διάρκεια που εξετάζετε η δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής και είναι δυνατό να παραχθούν με μία συνήθη αναλυτική ή γενικευμένη (Dirac ή Heaviside) συνάρτηση. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα φορτία των οποίων η χρονική μεταβολή τους δεν είναι πλήρως γνωστή αλλά μπορούν να προσδιοριστούν με στοχαστικές μεθόδους. Τα φορτία που θα εξεταστούν στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα είναι αποκλειστικά ντετερμινιστικά.



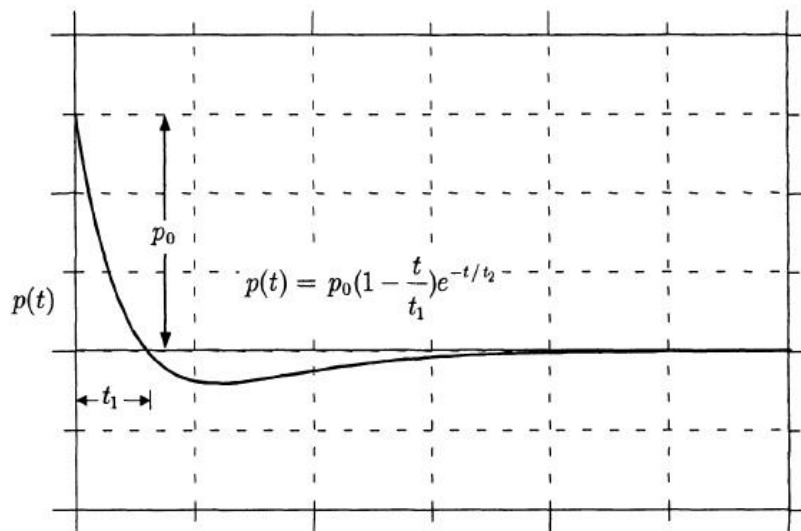
Σχήμα 1.10: Αρμονική φόρτιση οφειλόμενη στην περιστροφική κίνηση έκκεντρης μάζας.

Ένας βασικός διαχωρισμός των ντετερμινιστικών φορτίων είναι σε *περιοδικά* και *απεριοδικά*. Τα περιοδικά φορτία είναι εκείνα των οποίων η χρονική μεταβολή επαναλαμβάνεται διαρκώς μετά από παρέλευση ενός σταθερού χρονικού διαστήματος T . Αυτά μπορούν να παρασταθούν με μία περιοδική συνάρτηση

$$p(t) = p(t + nT)$$

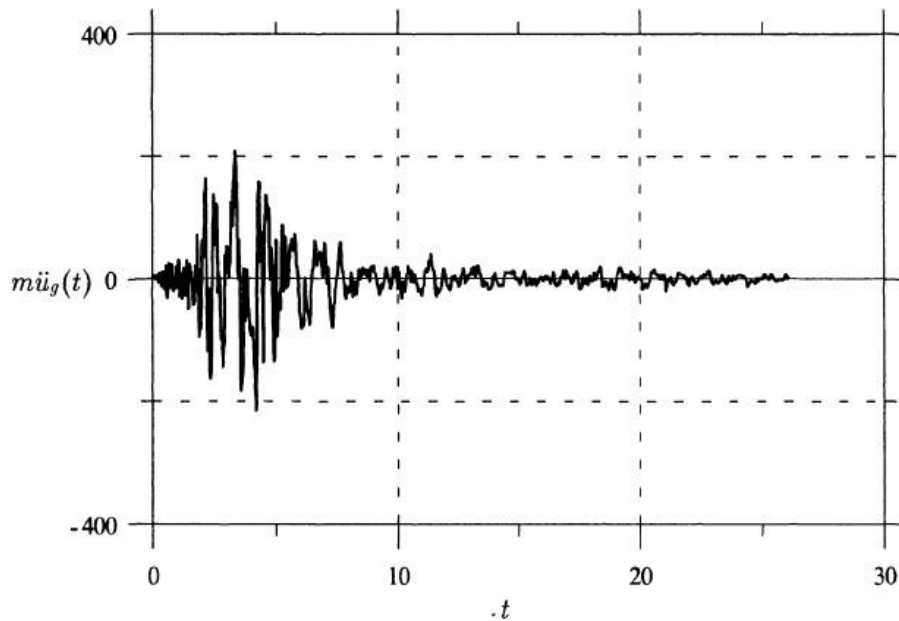
Όπου n φυσικός αριθμός.

Η σταθερά T , η οποία εκφράζει τον ελάχιστο χρόνο για τον οποίο ισχύει η σχέση (1.2.1), ονομάζεται περίοδος της φορτίσεως. Οι περιοδικές φορτίσεις οφείλονται κυρίως στη λειτουργία μηχανών που δημιουργούν κρούσεις ή έχουν έκκεντρα περιστρεφόμενες μάζες. Απεριοδικά είναι όλα τα μη περιοδικά φορτία. Τα δυναμικά φορτία των οποίων η χρονική διάρκεια είναι μικρή ονομάζεται *ωστικά φορτία ή πλήγματα*. Πλήγματα είναι αυτά που οφείλονται σε κρούσεις ή σε εκρήξεις. Ο σεισμός αποτελεί ξεχωριστή φόρτιση, η οποία οφείλεται στην κίνηση του εδάφους στηρίζεως της κατασκευής και μπορεί να αναχθεί, σε ένα ισοδύναμο δυναμικό φορτίο, όταν είναι γνωστό το επιταχυνσιογράφημα του σεισμού. Στα σχήματα (**Σχήμα 1.9**) έως (**Σχήμα 1.12**) παρουσιάζονται διάφοροι τύποι δυναμικών φορτίων.



Σχήμα 1.11: Απεριοδική φόρτιση οφειλόμενη σε έκρηξη.

Αν εξεταστεί πιο λεπτομερώς η στατική φόρτιση παρατηρείται ότι και τα φορτία που ονομάζονται στατικά είναι στην πραγματικότητα δυναμικά. Η ένταση τους αρχίζει από μηδενική τιμή και φθάνει την τελική μετά από παρέλευση κάποιου χρόνου. Ο τρόπος επιβολής των στατικών φορτίων είναι τέτοιος ώστε οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις να είναι αμελητέες. Αυτό συμβαίνει, όταν ο χρόνος επιβολής του φορτίου είναι μεγαλύτερος της ιδιοπεριόδου της κατασκευής. Θα μπορούσε συνεπώς, η συμπεριφορά ενός φορέα, που υποβάλλεται σε στατική φόρτιση, να θεωρηθεί ως μερική περίπτωση της δυναμικής με αμελητέες επιταχύνσεις.



Σχήμα 1.12: Ισοδύναμο δυναμικό φορτίο $p(t) = m\ddot{u}_g(t)$ οφειλόμενο σε σεισμική κίνηση του εδάφους.

1.6. Διαδικασία προσομοίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

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

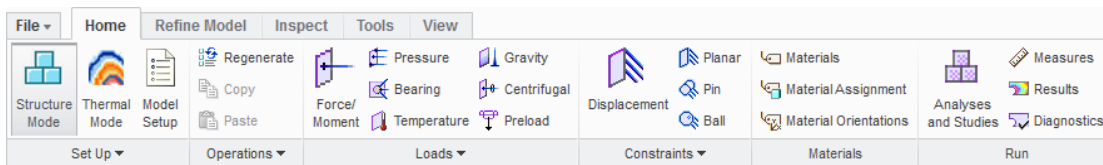
1. Ενασχόληση με τη μαθηματική προσεγγιστική μέθοδο υπολογισμού με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.
2. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα προεπεξεργασίας (pre processor).
3. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται επιλύτες (solvers) και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.
4. Όταν τελειώσει η επίλυση πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων (post processor), για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ CREO SIMULATE

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής παρουσίαση της διαδικασίας εισαγωγής και επίλυσης προσομοιωμάτων Π.Σ. στο CREO SIMULATE, καθώς και των διαφόρων δυνατοτήτων του προγράμματος.

2.1. Διαδικασία εισαγωγής δεδομένων στο λογισμικό CREO SIMULATE.



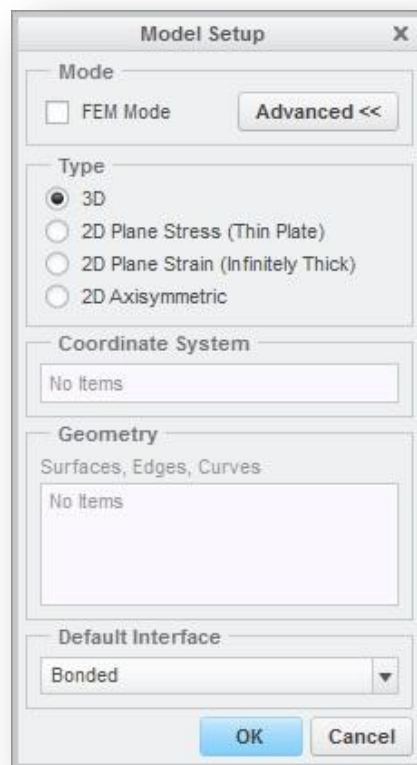
Σχήμα 2.1: Καρτέλα επιλογών και επιμέρους τομείς.

Η εισαγωγή του μοντέλου γίνεται χρησιμοποιώντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Creo Simulate. Αρχικά, πρέπει να επιλεγεί το είδος της ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί μέσω της πρώτη καρτέλας επιλογών **Home**, του πρώτου τομέα **Set Up** (Σχήμα 2.1).

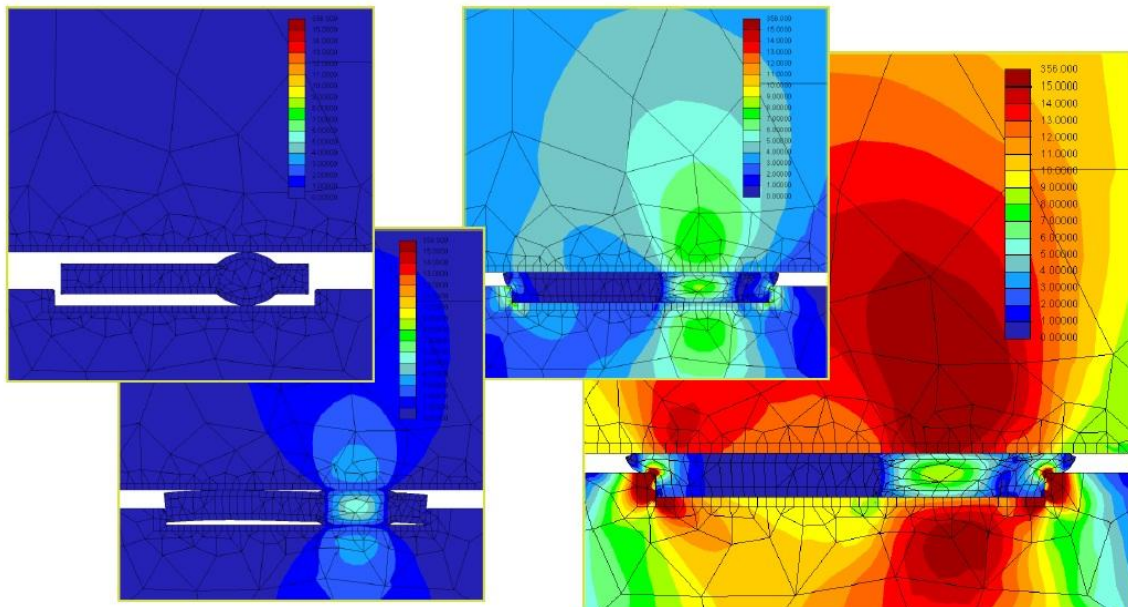
Αυτό επιτυγχάνεται μέσω τεσσάρων βασικών ενοτήτων (Σχήμα 2.2):

- **Mode type**
- **Model type**
- **FEM mode**
- **Default interface**

Σύμφωνα με την πρώτη ενότητα **Mode type** ο χρήστης καλείται να επιλέξει μεταξύ δύο βασικών-κύριων *διαδρομών*. Η πρώτη επιλογή **Structure Mode** υποστηρίζει μηχανικές αναλύσεις, ενώ από την άλλη, η δεύτερη επιλογή **thermal mode** υποστηρίζει κυρίως θερμικές αναλύσεις. Στην παρούσα μελέτη θα χρησιμοποιηθεί η πρώτη επιλογή **Structure Mode**.



Σχήμα 2.2: Παράθυρο δήλωσης τύπου ανάλυσης.



Σχήμα 2.3: Αναλύσεις σε επίπεδο δύο διαστάσεων.

Σύμφωνα με την δεύτερη ενότητα **Model type** ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ τεσσάρων κριτηρίων (**Σχήμα 2.2**):

- a. **3D**. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται για την περίπτωση ανάλυσης ενός τρισδιάστατου μοντέλου.
- b. **2D Plane Stress (Thin Plate)**. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται για την περίπτωση ανάλυσης μιας λεπτής, επίπεδης πλάκας δύο διαστάσεων.
- c. **2D Plane Strain (Infinitely Thick)**. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται για την περίπτωση όπου η παραμόρφωση ως προς μία κατεύθυνση είναι αμελητέα. Αυτή είναι μία τυπική περίπτωση που μία κατασκευή αρκετά μεγάλου μήκους (π.χ μεγάλου μήκους σωληνώσεις) δέχεται εγκάρσια φορτία. Η επιλογή αυτή αντιπροσωπεύει μια δισδιάστατη «φέτα» μοναδιαίου πάχους του πραγματικού τρισδιάστατου μοντέλου.
- d. **2D Axisymmetric**. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται αν η γεωμετρία του μοντέλου, τα φορτία και οι περιορισμοί που πρόκειται να τοποθετηθούν πάνω του είναι συμμετρικά γύρω από έναν άξονα. Π.χ κυλινδρικές και κωνικές κατασκευές όπως δεξαμενές, φλάντζες ή ορισμένους σφιγκτήρες. Η επιλογή αυτή αντιπροσωπεύει μία δισδιάστατη «φέτα» του πραγματικού τρισδιάστατου μοντέλου, όπου αν περιστραφεί γύρω από έναν άξονα του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, θα ξαναδώσει την αρχική εικόνα του μοντέλου.

Σε κάθε περίπτωση 2D Model type (**Σχήμα 2.3**), θα πρέπει οπωσδήποτε να επιλεγεί η γεωμετρία στην οποία θα εκτελεστεί μια ανάλυση 2D. Θα πρέπει επίσης να επιλεγθεί ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων αναφοράς. Μπορεί να χρειασθεί να δημιουργηθεί ένα σύστημα συντεταγμένων αναφοράς για το οποιοδήποτε μοντέλο, έτσι ώστε η γεωμετρία που θα επιλεγεί να βρίσκεται στο επίπεδο XY.

Σύμφωνα με την τρίτη ενότητα **FEM mode** ο χρήστης έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει ένα μαθηματικό μοντέλο ενός εξαρτήματος ή μίας συναρμολόγησης εξαρτημάτων και να προχωρήσει μέχρι το στάδιο δημιουργίας του πλέγματος. Στην συνέχεια θα πρέπει να εξαχθεί το μοντέλο σε ένα από τα υποστηριζόμενα FEA solvers (NASTRAN, ANSYS, COSMOS), τα οποία αναλύουν την δομική ή θερμική ακεραιότητα του μοντέλου σύμφωνα με τα δεδομένα της προσομοίωσης που έχουν επιλεγεί.

Σύμφωνα με την τέταρτη ενότητα **Default interface** ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ορίσει το είδος των σχέσεων και των περιορισμών μεταξύ δύο ή και περισσότερων εξαρτημάτων. Η ρύθμιση αυτή υποστηρίζει τρεις βασικές επιλογές:

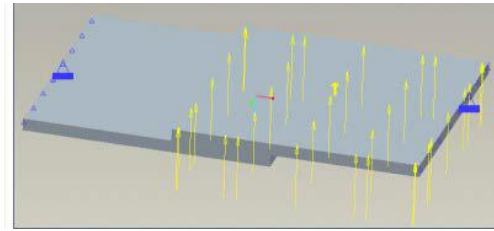
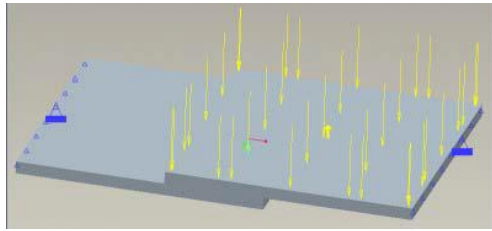
- a. **Bonded**
- b. **Free**
- c. **Contact.**

Η πρώτη επιλογή **Bonded** έχει την ιδιότητα όταν εφαρμοστεί μεταξύ δύο επιφανειών ή δύο εξαρτημάτων (στα οποία το Creo Simulate ανιχνεύει αυτόματα τις συνεργαζόμενες επιφάνειες και ενώσεις) να δημιουργεί άκαμπτους δεσμούς, κατά την δημιουργία του πλέγματος, μεταξύ των κόμβων του κάθε στοιχείου των επιλεγμένων επιφανειών, έχοντας ως αποτέλεσμα την μεταφορά δυνάμεων και παραμορφώσεων μεταξύ των εξαρτημάτων αυτών, όπως φαίνεται στο **(Σχήμα 2.4)**.

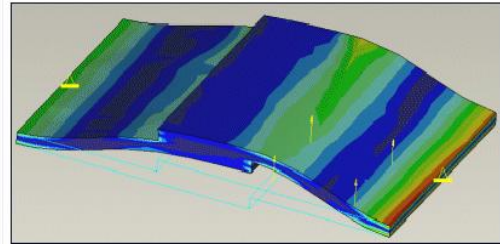
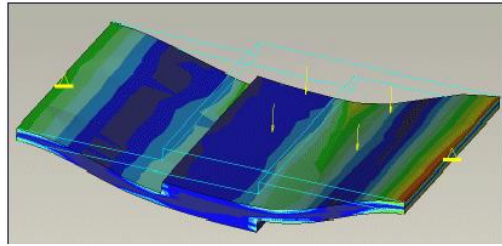
Η δεύτερη επιλογή **Free** έχει την ιδιότητα όταν εφαρμοστεί μεταξύ δύο επιφανειών ή δύο εξαρτημάτων (στα οποία το Creo Simulate ανιχνεύει αυτόματα τις συνεργαζόμενες επιφάνειες και ενώσεις) να μην δημιουργεί δεσμούς, κατά την δημιουργία του πλέγματος, μεταξύ των κόμβων του κάθε στοιχείου των επιλεγμένων επιφανειών. Έχοντας ως αποτέλεσμα την μη άμεση μεταφορά δυνάμεων και παραμορφώσεων μεταξύ των εξαρτημάτων αυτών, όπως φαίνεται στο **(Σχήμα 2.4)**.

Η Τρίτη και τελευταία επιλογή **Contact** έχει την ιδιότητα όταν εφαρμοστεί μεταξύ δύο επιφανειών ή δύο εξαρτημάτων (στα οποία το Creo Simulate ανιχνεύει αυτόματα τις συνεργαζόμενες επιφάνειες και ενώσεις) να επιτρέπει την μεταφορά δυνάμεων μόνο όταν αυτές δημιουργούνται από άπωση, όπως φαίνεται στο **(Σχήμα 2.4)**.

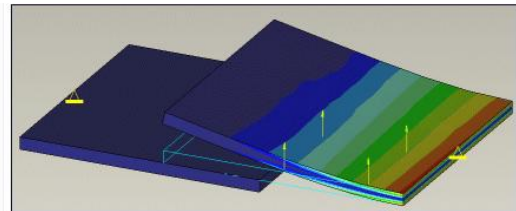
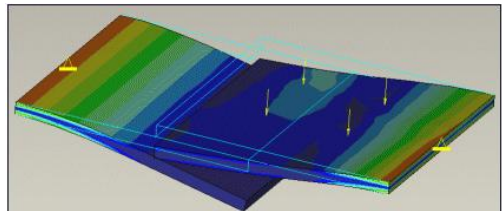
Επίσης, δίνονται οι επιλογές **Selection Filtering Tolerance** και **Properties**. Στην πρώτη επιλογή μπορεί να δηλωθεί η απόσταση μεταξύ των διαχωριστικών επιφανειών στις οποίες εφαρμόζεται η συγκεκριμένη σχέση (αν οι επιφάνειες δεν είναι επίπεδες τότε αναγράφεται η μέση τιμή) και η γωνία μεταξύ των επίπεδων επιφανειών. Στην δεύτερη επιλογή μπορεί να δηλωθεί (όταν υπάρχουν επιφάνειες οι οποίες συμπίπτουν μεταξύ τους αλλά έχουν διαφορετικές συνοριακές συνθήκες), να διαχωριστούν κατά την διάρκεια δημιουργίας του δικτύου. Αν γίνει αυτό, δίνεται μια επιπλέον δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει αν θέλει να δημιουργηθεί συμβατό πλέγμα μεταξύ των επιφανειών αυτών. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής τραχύτητας και δημιουργίας δεικτών ολίσθησης μεταξύ των τριβόμενων επιφανειών.



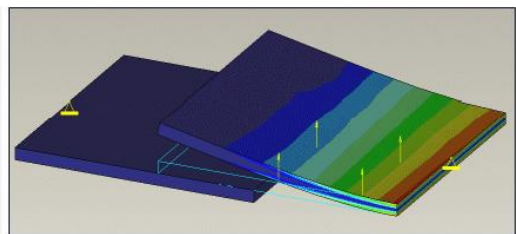
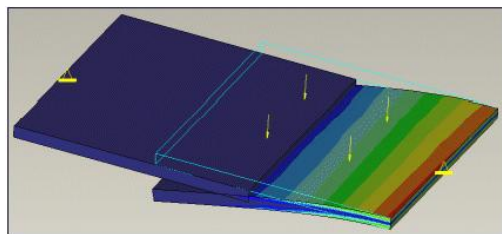
Τοποθέτηση φορτίων



Συμπεριφορά Bonded Interface



Συμπεριφορά Contact Interface



Συμπεριφορά Free Interface

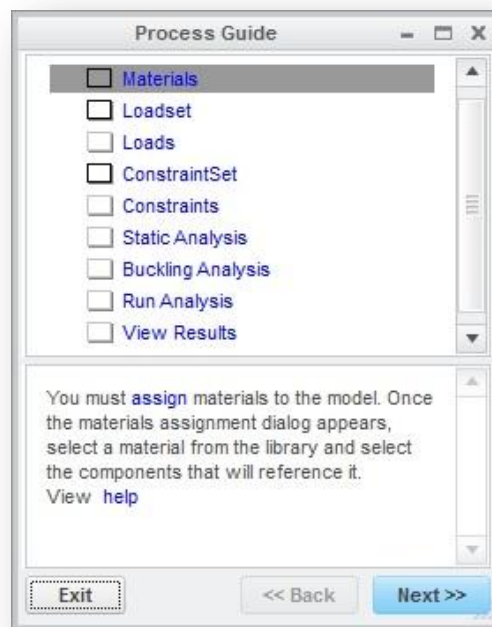
Σχήμα 2.4: Παραδείγματα εφαρμογής και των τριών τύπων Interface.

Οι επιλογές της ενότητας **Default interface** χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που ο χρήστης δεν θα δηλώσει κάποιο interface μέσα στην κύρια εφαρμογή του Creo Simulate.

Μετά την ολοκλήρωση των προαναφερθέντων βημάτων, ολοκληρώνεται η εισαγωγή του μοντέλου στο Creo Simulate.

2.2. Ρύθμιση των βασικών παραμέτρων – οδηγός διαδικασίας.

Το Creo Simulate παρέχει ένα προαιρετικό εργαλείο, τον **Οδηγό διαδικασίας (Σχήμα 2.5)** μέσω της τέταρτης καρτέλας επιλογών **Tools**, του τρίτου τομέα **Materials** και επιλέγοντας **Run Session**, με σκοπό να καθοδηγήσει κυρίως το νέο χρήστη που δεν είναι εξοικειωμένος με το πρόγραμμα, τόσο στη δημιουργία όσο και στην εκτέλεση της ανάλυσης. Ο οδηγός αυτός ενημερώνει τον χρήστη για τις παραμέτρους που είναι απαραίτητες να οριστούν για μια ολοκληρωμένη ανάλυση. Με τη χρήση του οδηγού αυτού μειώνεται η πιθανότητα παράλειψης κάποιας εντολής, καθώς ο χρήστης καθοδηγείται βήμα προς βήμα. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να προσαρμόσει τον οδηγό ή ακόμα και να τον γράψει από την αρχή θέτοντας δικά του κριτήρια χρησιμοποιώντας την επιλογή **Edit Template**. Αυτό βέβαια απαιτεί εμπειρία και εξοικείωση με το πρόγραμμα. Στο (Σχήμα 2.5) απεικονίζεται ολοκληρωμένη η διαδικασία του οδηγού.



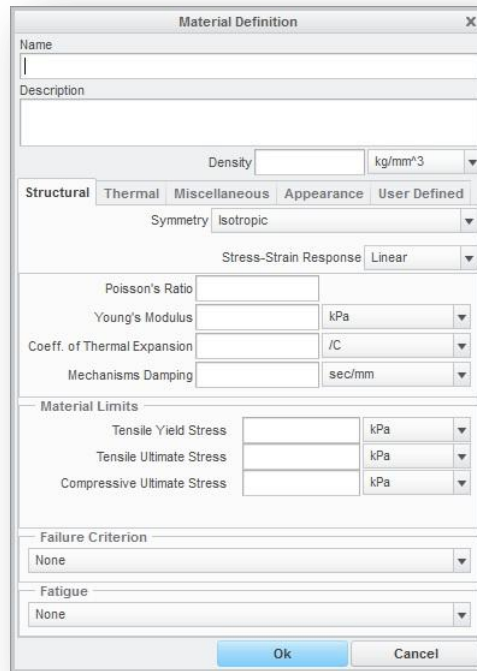
Σχήμα 2.5: Οδηγός διαδικασίας.

2.2.1. Προσδιορισμός υλικών (Materials).

Ο ορισμός ιδιοτήτων του υλικού ενός εξαρτήματος γίνεται μέσω της πρώτης καρτέλας επιλογών **Home**, του πέμπτου τομέα **Materials** (Σχήμα 2.6). Για τον ορισμό των ιδιοτήτων των υλικών υπάρχει βιβλιοθήκη η οποία διαθέτει ένα πλήθος βασικών υλικών. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας νέου υλικού.

Πηγαίνοντας στην επιλογή **Materials**→**File**→**New** εμφανίζεται η φόρμα δημιουργίας νέου υλικού, όπου αποτελείται από 5 βασικά τμήματα:

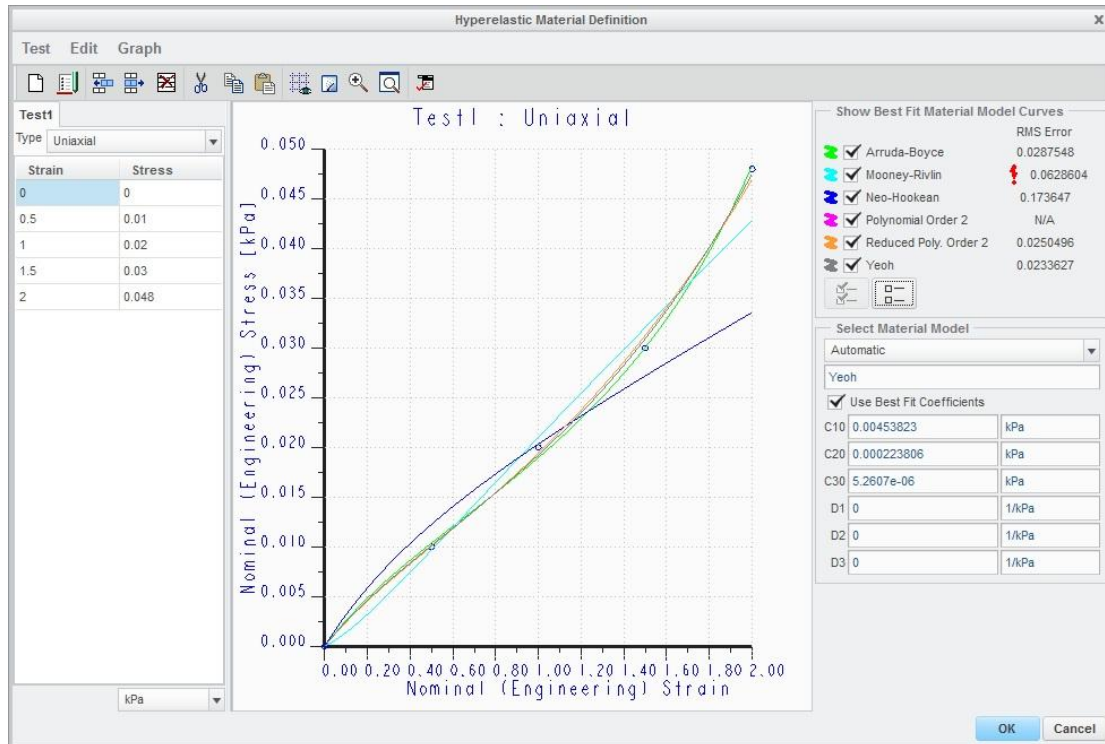
- a. **Structural**
- b. **Thermal**
- c. **Miscellaneous**
- d. **Appearance**
- e. **User defined**



Σχήμα 2.6: Παράθυρο δήλωσης ιδιοτήτων υλικών.

Το πρώτο τμήμα **Structural** αναφέρεται στην δήλωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Επίσης, μπορεί να ορισθεί μέσω του **Symmetry** αν το υλικό θα είναι ιστροπικό, ορθοτροπικό ή εγκάρσια ορθοτροπικό. Στην πρώτη επιλογή όπου το υλικό είναι ιστροπικό μέσω του **Stress-Strain Response** μπορούν να επιλεγούν υλικά με γραμμικές, μη γραμμικές (υπερελαστικές) και ελαστοπλαστικές ιδιότητες. Τα μη γραμμικά υλικά υποστηρίζουν έξι τύπους μη γραμμικότητας: **Arruba-Boyce**, **Mooney-Rivlin**, **Neo-Hookean**, **Polynomial Order 2**, **Reduced Poly. Order 2** και **Yeoh**.

Ο ορισμός ενός υλικού με μη γραμμικές ιδιότητες (υπερελαστικές) γίνεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος **Structural**→**Material Model**→**Define By Tests**→**Edit** πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα και τοποθετώντας τα σε ένα διάγραμμα Ονομαστικής (Μηχανικής) Τάσης - Ονομαστικής (Μηχανικής) Παραμόρφωσης, όπως φαίνεται στο **(Σχήμα 2.7)**.



Σχήμα 2.7: Περιοχή δήλωσης μη γραμμικών (υπερ ελαστικών) υλικών.

Ο δεύτερος τρόπος **Structural**→**Material Model** πραγματοποιείται δίνοντας στο πρόγραμμα, ανάλογα με τον τύπο της μη γραμμικότητας του υλικού, τους κατάλληλους συντελεστές.

Το δεύτερο τμήμα **Thermal** αναφέρεται στην δήλωση των θερμικών ιδιοτήτων του υλικού.

Το τρίτο τμήμα **Miscellaneous** αναφέρεται στην δήλωση των ιδιοτήτων ελάσματος (λαμαρίνα), επιφανειών και τομών του υλικού αν είναι απαραίτητες.

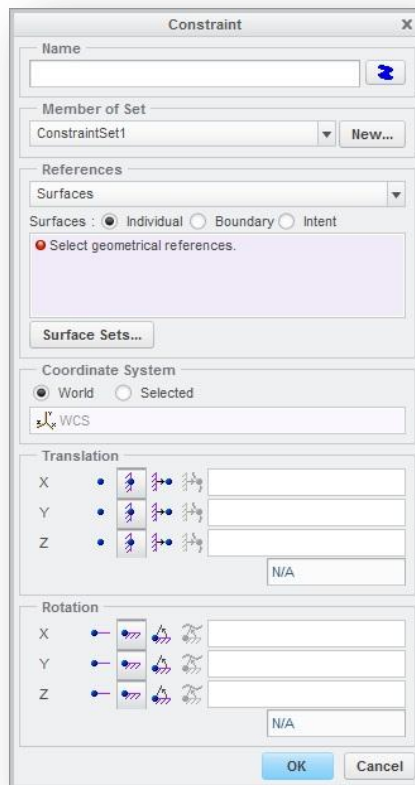
Το τέταρτο τμήμα **Appearance** αναφέρεται στην επεξεργασία των χρωματισμών του υλικού.

Στο πέμπτο και τελευταίο βήμα **User defined** δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας βιβλιοθήκης υλικών τα οποία μπορεί να είναι αυτά που χρησιμοποιεί περισσότερο ο χρήστης.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση θα χρησιμοποιηθούν κανονικά, γραμμικά και μη γραμμικά υλικά (υπερελαστικά) τύπου **Neo-Hookean**, τα οποία επιλέχθηκαν βάσει των φυσικών και μηχανικών τους ιδιοτήτων.

2.2.2. Δήλωση στηρίξεων (Constraints).

Στο περιβάλλον του Creo Simulate όπως και στην πραγματικότητα, οποιοδήποτε αντικείμενο στο χώρο έχει έξι βαθμούς ελευθερίας. Οι πρώτοι τρεις υπάρχουν λόγω της μετατόπισης του αντικειμένου κατά μήκος των κύριων αξόνων XYZ του αναφερόμενου καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Οι υπόλοιποι τρεις υπάρχουν λόγω της περιστροφής του αντικειμένου γύρω από αυτούς τους άξονες.



Σχήμα 2.8: Παράθυρο δήλωσης περιορισμών μετατοπίσεων.

Με τον περιορισμό μερικών εκ των βαθμών ελευθερίας του αντικειμένου, αλλάζουν και οι αντιδράσεις λόγω των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν σε αυτό. Πηγαίνοντας στην πρώτη καρτέλα επιλογών **Home**, στον τέταρτο τομέα **Constraints**, υπάρχουν πέντε επιλογές:

- a. **Displacement**
- b. **Planar**
- c. **Pin**
- d. **Ball**
- e. **Symmetry**

Η πρώτη επιλογή **Displacement** μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε είδους μορφής επιφάνειας, ακμής ή σημείου στο χώρο και έχει την δυνατότητα περιορισμού των μετατοπίσεων και περιστροφών του αντικειμένου σε σχέση με τους κύριους άξονες XYZ μέσω τριών θέσεων: free “ελευθερία κινήσεων”, fixed “πάκτωση κινήσεων”, και prescribed “καθορισμός εύρους κινήσεων”, όπως φαίνεται στο **(Σχήμα 2.8)**.

Η δεύτερη επιλογή **Planar** μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε επίπεδες επιφάνειες στο χώρο και έχει προεπιλεγμένη την θέση fixed όπου θέτει υπό περιορισμό τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές του αντικειμένου σε σχέση με τους κύριους άξονες XYZ.

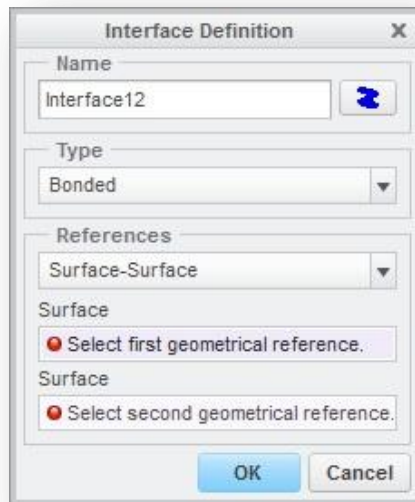
Η τρίτη επιλογή **Pin** μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε κυλινδρικές επιφάνειες στο χώρο και έχει προεπιλεγμένη την θέση fixed όπου θέτει υπό περιορισμό τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές του αντικειμένου σε σχέση με τους κύριους άξονες XYZ.

Η τέταρτη επιλογή **Ball** μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε σφαιρικές επιφάνειες στο χώρο και έχει προεπιλεγμένη την θέση fixed όπου θέτει υπό περιορισμό τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές του αντικειμένου σε σχέση με τους κύριους άξονες XYZ.

Η πέμπτη και τελευταία επιλογή **Symmetry** διαθέτει δύο τύπους περιορισμών, **cyclic** και **mirror**. Ο πρώτος περιορισμός επιτρέπει την ανάλυση μίας τομής ενός κυκλικού συμμετρικού μοντέλου που προσομοιώνει την συμπεριφορά του συνολικού μοντέλου ή μίας συναρμολόγησης. Αυτός ο σχεσιακός περιορισμός μειώνει τον χρόνο της διακριτοποίησης αλλά και της ανάλυσης. Ο δεύτερος περιορισμός επιδιορθώνει τους βαθμούς ελευθερίας της μετατόπισης, κάθετα στο επίπεδο συμμετρίας και αποδεσμεύει τους βαθμούς ελευθερίας της περιστροφής γύρω από τον άξονα, κάθετα στο επίπεδο συμμετρίας.

2.2.3. Ορισμός συνδέσεων (Connections).

Ο ορισμός των συνδέσεων-συσχετισμών μεταξύ των κομματιών που έρχονται σε επαφή γίνεται μέσω της δεύτερης καρτέλας επιλογών **Refine Model**, στον τρίτο τομέα **Connections→interfaces** τα οποία περιέχουν τρεις τύπους συνδέσεων **Bonded**, **Free**, **contact**, που έχουν προαναφερθεί σε προηγούμενη διατύπωση **(Σχήμα 2.9)**.



Σχήμα 2.9: Παράθυρο δήλωσης συσχετισμών μεταξύ διαφόρων εξαρτημάτων.

Επίσης, ο τομέας **Connections** περιέχει τέσσερις κύριες συνδέσεις (**Σχήμα 2.10**):

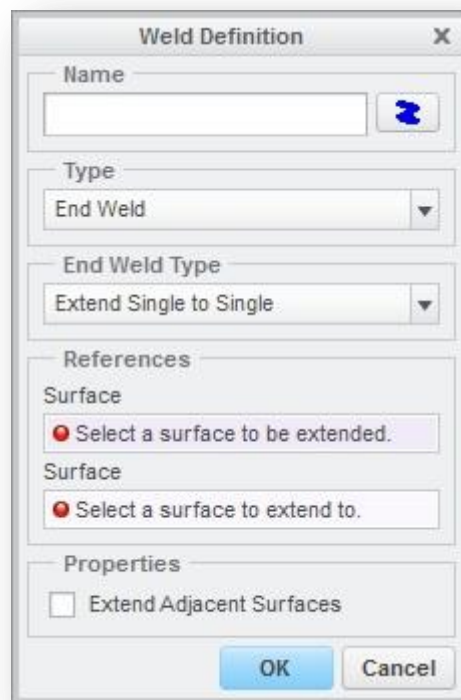
- a. **Weld**(End Weld, Perimeter Weld, Spot Weld και Weld Feature)
- b. **Rigid Link**
- c. **Weighted Link**
- d. **Fastener**

Ο πρώτος τρόπος σύνδεσης **Weld** αφορά τις συγκολλήσεις (**Σχήμα 2.10**). Η πρώτη περίπτωση συγκόλλησης **Weld**(End Weld) χρησιμοποιείτε σε μοντέλα συναρμογής για την σύνδεση πλακών. Οι πλάκες μπορεί να είναι καμπυλόμορφες και να τοποθετούνται σε λοξή ή ορθή γωνία, ώστε να συγκολληθούν, σχηματίζοντας T ή L διατάξεις (**Σχήμα 2.11**).

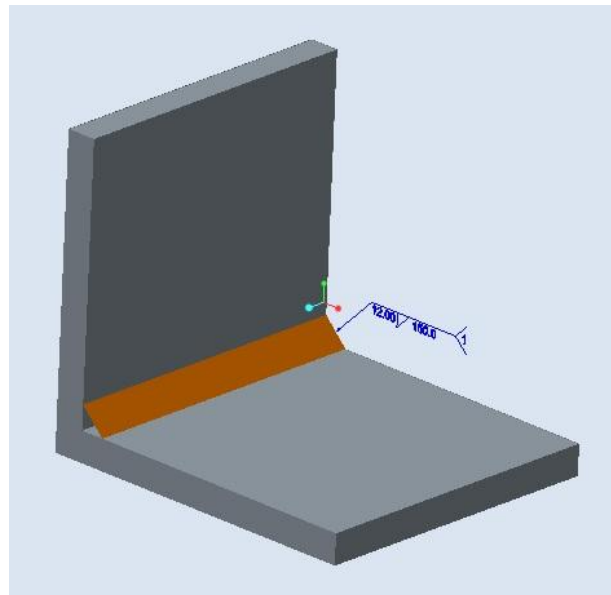
Η δεύτερη περίπτωση συγκόλλησης **Weld**(Perimeter Weld) χρησιμοποιείτε σε μοντέλα συναρμογής για την σύνδεση πλακών. Οι πλάκες μπορεί να είναι καμπυλόμορφες και να τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους, ώστε να συγκολληθούν.

Η Τρίτη περίπτωση συγκόλλησης **Weld**(Spot Weld) χρησιμοποιείτε για να συνδεθούν δύο κάπως παράλληλες επιφάνειες σε ένα σημείο αφετηρίας που έχει ορισθεί από τον χρήστη.

Η τέταρτη και τελευταία περίπτωση συγκόλλησης **Weld**(Weld Feature) χρησιμοποιείτε για να συμπεριληφθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μίας οποιασδήποτε συγκόλλησης, που έχει δημιουργηθεί σε ένα μοντέλο, μέσα στο Creo Simulate.



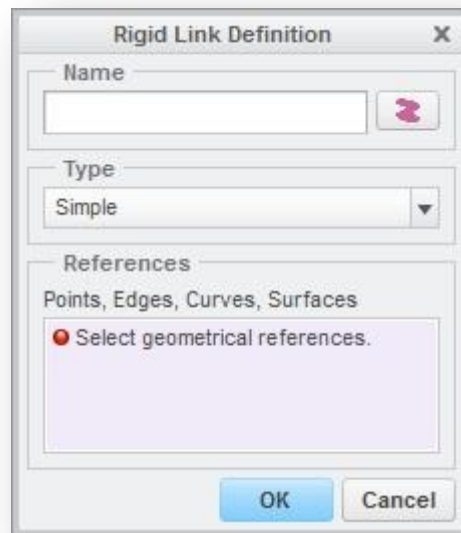
Σχήμα 2.10: Παράθυρο ορισμού συγκολλήσεων.



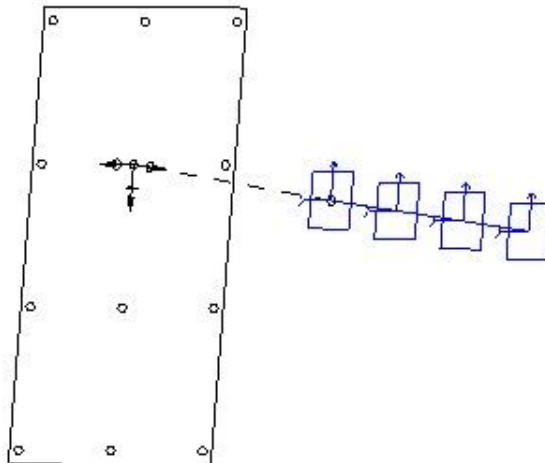
Σχήμα 2.11: Παράδειγμα συγκόλλησης.

Ο δεύτερος τρόπος σύνδεσης **Rigid Link** αφορά τη σύνδεση με άκαμπτους δεσμούς (Σχήμα 2.12). Μία άκαμπτη σύνδεση είναι ένα είδος σύνδεσης που συνδέει γεωμετρικές οντότητες όπως επιφάνειες και καμπύλες με σημεία, έτσι ώστε να παραμένουν σταθερά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Ο τρόπος αυτός δίνει την

δυνατότητα στον χρήστη να διαμορφώσει την σύνδεση που επιθυμεί περιορίζοντας όποιον από τους έξι βαθμούς ελευθερίας επιθυμεί. Η διαφορά της σύνδεσης δύο εξαρτημάτων με άκαμπτους δεσμούς και με την χρήση της σύνδεσης **Bonded**, είναι ότι τα εξαρτήματα δεν χρειάζεται να έρχονται σε επαφή μέσω κάποιων επιφανειών μεταξύ τους. Οι δυνάμεις και οι παραμορφώσεις μεταφέρονται μέσω των άκαμπτων δεσμών μεταξύ των εξαρτημάτων (**Σχήμα 2.13**).

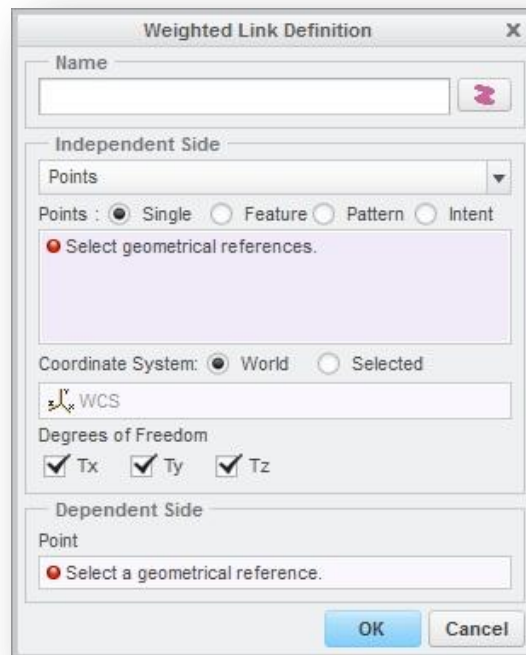


Σχήμα 2.12: Παράθυρο ορισμού άκαμπτων δεσμών.



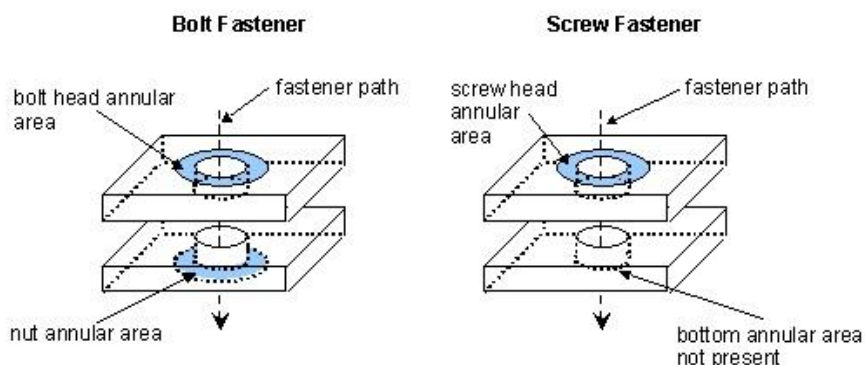
Σχήμα 2.13: Παράδειγμα εφαρμογής άκαμπτων δεσμών.

Ο τρίτος τρόπος σύνδεσης **Weighted Link** λαμβάνει την επενέργεια της μάζας ή τα φορτία που ενεργούν σε ένα μόνο κόμβο και την διανέμει σε μια συλλογή κόμβων (**Σχήμα 2.14**). Ο τρόπος αυτός δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να διαμορφώσει την σύνδεση που επιθυμεί περιορίζοντας μόνο τους τρεις (περιορισμός περιστροφών) από τους έξι βαθμούς ελευθερίας.



Σχήμα 2.14: Παράθυρο ορισμού σταθμισμένης σύνδεσης.

Ο τέταρτος τρόπος σύνδεσης **Fastener** αφορά τη συναρμολόγηση εξαρτημάτων με την χρήση κοχλιοσυνδέσμων (μπουλονιού ή βίδας) (Σχήμα 2.15). Μέσω των **properties** μπορούν να ορισθούν οι διαστάσεις, το υλικό και ο δείκτης δυσκαμψίας του κοχλία και του περικοχλίου. Επίσης, μπορεί να ορισθεί ο τύπος των εξαρτημάτων που θα συναρμολογηθούν **connecting solids** (στερεά αντικείμενα), **connecting shells** (κελύφη) και αν θα υπάρξει τριβή μεταξύ των κοχλίων και των εξαρτημάτων.



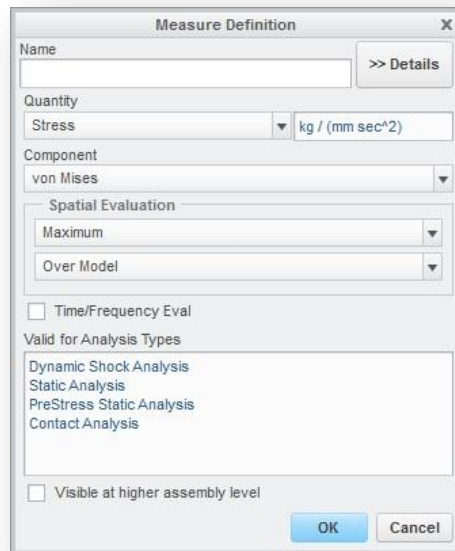
Σχήμα 2.15: Παράδειγμα εφαρμογής κοχλιοσυνδέσμων.

2.3. Εισαγωγή μετρητικών οργάνων (Measures).

Η εισαγωγή των μετρητικών οργάνων (**Σχήμα 2.16**) γίνεται μέσω της πρώτης καρτέλας επιλογών **Home**, στον έκτο τομέα **Run→Measures→New**. Στην επιλογή **Quantity** υπάρχει μια λίστα στην οποία βρίσκονται όλα τα φυσικά μεγέθη που μπορούν να μετρηθούν κατά την εκτέλεση μιας ανάλυσης. Αυτά τα μεγέθη είναι: Τάση, παραμόρφωση, μετατόπιση, περιστροφή γύρω από κάποιον άξονα, ταχύτητα, επιτάχυνση, περιστροφική ταχύτητα, περιστροφική επιτάχυνση, φάση, δείκτης αποτυχίας, κόπωση, δυνάμεις, ροπές, ροπή αδράνειας, συντεταγμένες κέντρου μάζας, χρόνος.

Στην επιλογή **Component** υπάρχει η δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένης διεύθυνσης ως προς τους άξονες XYZ εξαγωγής των αποτελεσμάτων της οποιασδήποτε μέτρησης, σύμφωνα με το προκαθορισμένο σύστημα συντεταγμένων. Στην επιλογή **Spatial Evaluation** είναι δυνατόν να μετρηθούν τα μεγέθη αυτά κατά τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές τους, ακόμα και επάνω σε σημεία. Επίσης, μπορεί να επιλεγεί το <<μέρος>> στο οποίο θα εφαρμοστούν οι μετρητικές αυτές μηχανές. Π.χ κοντά σε σημείο, σε ολόκληρο το μοντέλο, σε επιλεγμένες εξιδανικευμένες επιφάνειες, σε επιλεγμένα εξαρτήματα, σε επιλεγμένα στρώματα και σε επιλεγμένες γεωμετρίες. Χρησιμοποιώντας την επιλογή **Time/Frequency Eval** το είδος της μέτρησης που έχει επιλεγεί από τον χρήστη μπορεί να εξαχθεί για χρονική ανάλυση και ανάλυση συχνοτήτων.

Ένα σημαντικό εργαλείο που παρέχεται είναι ο πίνακας **Valid for Analysis Types**, όπου όταν ο χρήστης επιλέξει να πάρει μία μέτρηση εμφανίζονται στον πίνακα όλες εκείνες οι αναλύσεις στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέτρηση. Ακόμα, μέσω του **Details→Specify Allowables** μπορεί ο χρήστης να ορίσει μία ελάχιστη τιμή και μία μέγιστη (εύρος τιμών) στο οποίο θα εμπεριέχονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που θα επιλέξει ο ίδιος.



Σχήμα 2.16: Παράθυρο ορισμού μετρητικών οργάνων.

2.4. Εισαγωγή φορτίσεων (Loads).

Ο ορισμός των φορτίσεων στο γεωμετρικό μοντέλο γίνεται μέσω της πρώτης καρτέλας επιλογών **Home**, στον τρίτο τομέα **Loads**. Ο τομέας αυτός συμπεριλαμβάνει επτά είδη φορτίσεων:

- a. **Force/Moment**
- b. **Pressure**
- c. **Bearing**
- d. **Temperature**
- e. **Gravity**
- f. **Centrifugal**
- g. **Preload**

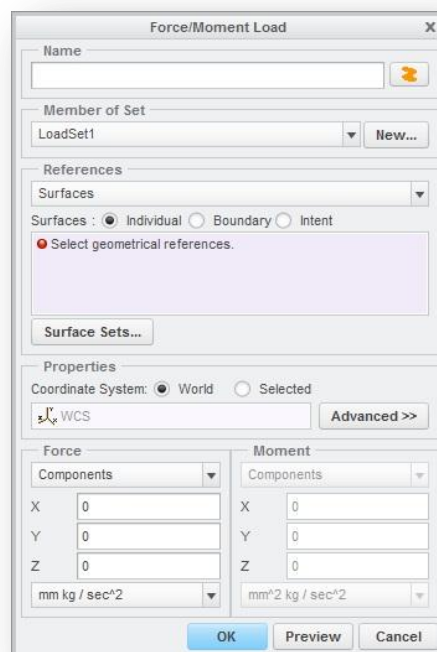
Στο πρώτο είδος φόρτισης **Force/Moment (Σχήμα 2.17)** ο χρήστης έχει τη δυνατότητα εισαγωγής δύναμης ή ροπής. Για να εφαρμοστεί η δύναμη απαιτείται να επιλεγεί μέσω του **References** επιφάνεια, ακμή ή σημείο καθώς και μέσω του **Force** άξονες στους οποίους θα εφαρμοστούν οι δυνάμεις, σύμφωνα με το προκαθορισμένο από τον χρήστη σύστημα συντεταγμένων. Επίσης, μέσω του **Force** μπορεί να ορισθεί και ο τρόπος με τον οποίο θα εφαρμοστεί μια δύναμη. Υπάρχουν τρεις επιλογές:

1. **Components**
2. **Dir Vector & Mag**
3. **Dir Points & Mag**

Η πρώτη επιλογή είναι ο απλός τρόπος εφαρμογής μίας δύναμης, όπου χρειάζεται μόνο να αναγραφεί η τιμή της δύναμης σε έναν από τους τρεις άξονες του συστήματος συντεταγμένων, έτσι ώστε να ορισθεί η κατεύθυνση του διανύσματος της δύναμης.

Στην δεύτερη επιλογή χρειάζεται να αναγραφεί η τιμή της δύναμης σε ένα από τους τρεις άξονες του συστήματος συντεταγμένων, (έτσι ώστε να ορισθεί η κατεύθυνση του διανύσματος της δύναμης), όπως επίσης και το μέγεθος του φορτίου. Αν εισαχθεί θετικό μέγεθος τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη δύναμη κατά την ίδια κατεύθυνση με αυτή που έχει ορισθεί αρχικά. Αν εισαχθεί αρνητικό μέγεθος τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη δύναμη κατά την αντίθετη κατεύθυνση με αυτή που είχε ορισθεί αρχικά.

Η Τρίτη επιλογή χρειάζεται δύο σημεία και το μέγεθος του φορτίου. Το πρώτο σημείο θα είναι το σημείο αναφοράς του διανύσματος της δύναμης και το δεύτερο σημείο είναι εκείνο που με την εφαρμογή του τελικά καθορίζετε η κατεύθυνση του διανύσματος της δύναμης. Αν εισαχθεί θετικό μέγεθος φορτίου τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη δύναμη κατά την ίδια κατεύθυνση με αυτή που έχει ορισθεί αρχικά. Αν εισαχθεί αρνητικό μέγεθος τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη δύναμη κατά την αντίθετη κατεύθυνση με αυτή που είχε ορισθεί αρχικά.



Σχήμα 2.17: Παράθυρο εφαρμογής δύναμης ή ροπής.

Μέσω της επιλογής **Advanced→Distribution→Total Load at Point→Moment** ορίζεται ο τρόπος με τον ποίο εφαρμόζεται μια ροπή. Υπάρχουν τρεις επιλογές:

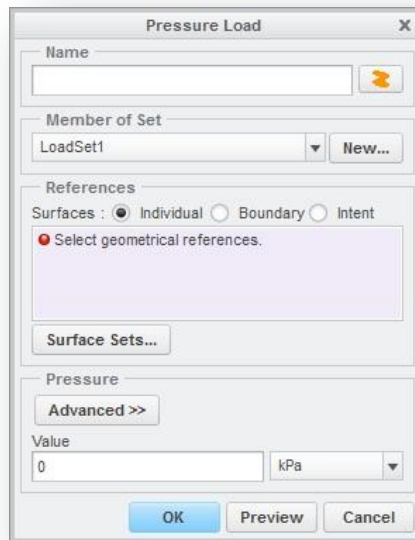
1. **Components**
2. **Dir Vector & Mag**
3. **Dir Points & Mag**

Η πρώτη επιλογή είναι ο απλός τρόπος εφαρμογής μίας ροπής, όπου χρειάζεται μόνο να αναγραφεί η τιμή της ροπής σε έναν από τους τρεις άξονες του συστήματος συντεταγμένων και να επιλεγεί ένα σημείο, έτσι ώστε ταυτόχρονα να ορισθεί η κατεύθυνση του διανύσματος της ροπής γύρω από το σημείο αυτό.

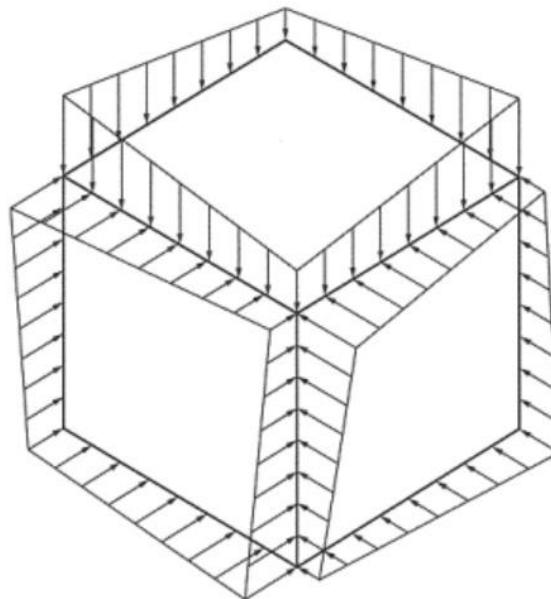
Στην δεύτερη επιλογή χρειάζεται να αναγραφεί η τιμή της ροπής σε έναν από τους τρεις άξονες του συστήματος συντεταγμένων και να επιλεγεί ένα σημείο, έτσι ώστε ταυτόχρονα να ορισθεί η διεύθυνση του διανύσματος της ροπής γύρω από το σημείο αυτό. Επίσης χρειάζεται να αναγραφεί και το μέγεθος φορτίου. Αν εισαχθεί θετικό μέγεθος τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη ροπή κατά την ίδια κατεύθυνση με αυτή που έχει ορισθεί αρχικά. Αν εισαχθεί αρνητικό μέγεθος τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη ροπή κατά την αντίθετη κατεύθυνση με αυτή που είχε ορισθεί αρχικά.

Η Τρίτη επιλογή χρειάζεται δύο σημεία (όσον αφορά την κατεύθυνση του διανύσματος της ροπής), ένα τρίτο σημείο (γύρω από το οποίο θα περιστρέφεται εφαπτομενικά το διάνυσμα της ροπής) και το μέγεθος του φορτίου. Το πρώτο σημείο θα είναι το σημείο αναφοράς του διανύσματος της ροπής και το δεύτερο σημείο είναι εκείνο που με την εφαρμογή του τελικά καθορίζετε η κατεύθυνση του διανύσματος της ροπής. Αν εισαχθεί θετικό μέγεθος φορτίου τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη ροπή κατά την ίδια κατεύθυνση με αυτή που έχει ορισθεί αρχικά. Αν εισαχθεί αρνητικό μέγεθος τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη ροπή κατά την αντίθετη κατεύθυνση με αυτή που είχε ορισθεί αρχικά.

Στο δεύτερο είδος φόρτισης **Pressure (Σχήμα 2.18)** ο χρήστης έχει τη δυνατότητα άσκησης πίεσης επάνω σε μία επιφάνεια. Αυτό επιτυγχάνεται δηλώνοντας στα **References** την επιφάνεια στην οποία θα ασκηθεί η πίεση, στην επιλογή **Pressure→Value** το μέτρο και προαιρετικά στο **Advanced→Spatial Variation** το είδος κατανομής του φορτίου.



Σχήμα 2.18: Παράθυρο εφαρμογής πίεσης.



Σχήμα 2.19: Σύνθετο συμπιεστικό φορτίο εφαρμοζόμενο σε έναν κύβο.

Στο τρίτο είδος φόρτισης **Bearing (Σχήμα 2.20)** ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει μεταφερόμενα διανεμισμένα φορτία μέσα από σύνδεση με έδρανα κύλισης, σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Το είδος των φορτίων αυτών προσεγγίζει την πίεση που εφαρμόζεται σε μία επιφάνεια τρισδιάστατη (οπή) ή ένα δισδιάστατο κυκλικό τομέα (δακτύλιος), από ένα άκαμπτο πείρο ή άξονα που διέρχεται από το κέντρο μιας οπής ή δακτυλίου. Αυτό επιτυγχάνεται δηλώνοντας στα **References** την επιφάνεια ή την ακμή στην οποία θα ασκηθεί το φορτίο. Επίσης,

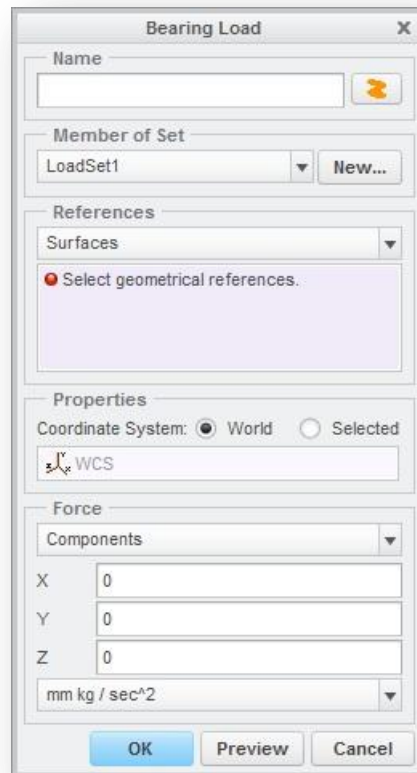
μέσω του **Force** μπορεί να ορισθεί και ο τρόπος με τον οποίο θα εφαρμοστεί μια δύναμη. Υπάρχουν τρεις επιλογές:

- 1. Components**
- 2. Dir Vector & Mag**
- 3. Dir Points & Mag**

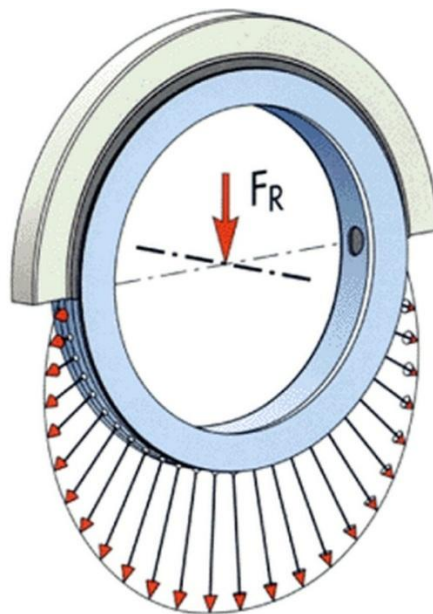
Η πρώτη επιλογή είναι ο απλός τρόπος εφαρμογής μίας δύναμης, όπου χρειάζεται μόνο να αναγραφεί η τιμή του φορτίου σε έναν από τους τρεις άξονες του συστήματος συντεταγμένων, έτσι ώστε να ορισθεί η κατεύθυνση του διανύσματος της δύναμης.

Στην δεύτερη επιλογή χρειάζεται να αναγραφεί η τιμή του φορτίου σε έναν από τους τρεις άξονες του συστήματος συντεταγμένων, (έτσι ώστε να ορισθεί η κατεύθυνση του διανύσματος της δύναμης), όπως επίσης και το μέγεθος του φορτίου. Αν εισαχθεί θετικό μέγεθος τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη δύναμη κατά την ίδια κατεύθυνση με αυτή που έχει ορισθεί αρχικά. Αν εισαχθεί αρνητικό μέγεθος τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη δύναμη κατά την αντίθετη κατεύθυνση με αυτή που είχε ορισθεί αρχικά.

Η Τρίτη επιλογή χρειάζεται δύο σημεία και το μέγεθος του φορτίου. Το πρώτο σημείο θα είναι το σημείο αναφοράς του διανύσματος του φορτίου και το δεύτερο σημείο είναι εκείνο που με την εφαρμογή του τελικά καθορίζετε η κατεύθυνση του διανύσματος του φορτίου. Αν εισαχθεί θετικό μέγεθος φορτίου, τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη δύναμη κατά την ίδια κατεύθυνση με αυτή που έχει ορισθεί αρχικά. Αν εισαχθεί αρνητικό μέγεθος, τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη δύναμη κατά την αντίθετη κατεύθυνση με αυτή που είχε ορισθεί αρχικά.

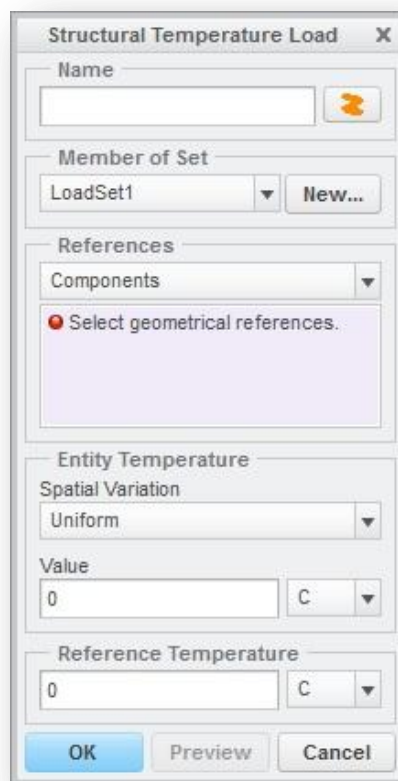


Σχήμα 2.20: Παράθυρο εφαρμογής μεταφερόμενου διανεμισμένου φορτίου.

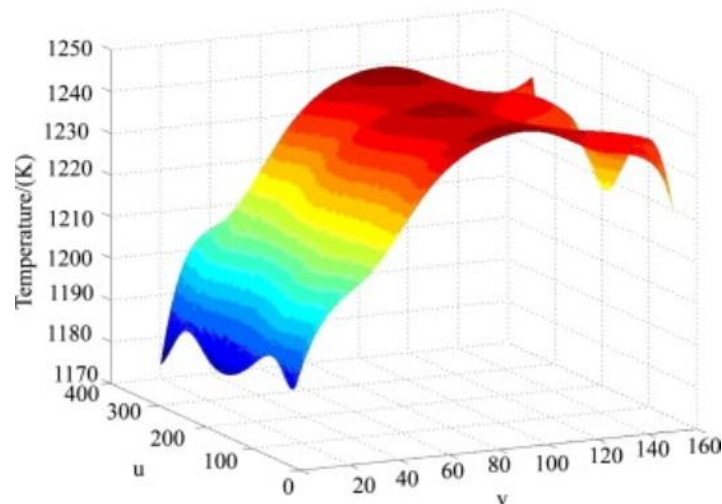


Σχήμα 2.21: Αναπαράσταση εδράνου κύλισης στο οποίο εφαρμόζεται μεταφερόμενο διανεμισμένο φορτίο.

Το τέταρτο είδος φόρτισης **Temperature (Σχήμα 2.22)** δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να προσομοιώσει μια κατάσταση αλλαγής της θερμοκρασίας, σε ένα μοντέλο. Μέσω αυτού του είδους φόρτισης ο χρήστης μπορεί να αντλήσει πολύτιμες πληροφορίες για το πώς η δομή του εξεταζόμενου μοντέλου παραμορφώνεται λόγω της αλλαγής της θερμοκρασίας. Αρχικά, πρέπει να επιλεγεί στα **References** το εξάρτημα, η επιφάνεια, η ακμή/καμπύλη ή ο όγκος στα οποία θα έχει επίδραση η μεταβολή της θερμοκρασίας και αργότερα μέσω του **Reference Temperature** (αρχική θερμοκρασιακή κατάσταση) και του **Entity Temperature** (τελική θερμοκρασιακή κατάσταση) να δηλωθούν οι τιμές των θερμοκρασιών. Στο **Entity Temperature** μπορεί να δοθεί το είδος της θερμοκρασιακής μεταβολής.



Σχήμα 2.22: Παράθυρο εφαρμογής θερμικού φορτίου.



Σχήμα 2.23: Αναπαράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας.

Το πέμπτο είδος φόρτισης **Gravity (Σχήμα 2.24)** χρησιμοποιείτε για να προσομοιωθούν σε μία κατασκευή οι βαρύτικές συνθήκες, έτσι ώστε να λυφθεί υπόψη σε μία ανάλυση το ίδιο βάρος της κατασκευής. Μέσω του **Acceleration** μπορεί να ορισθεί και ο τρόπος με τον οποίο θα εφαρμοστεί η επιτάχυνση της βαρύτητας. Υπάρχουν τρεις επιλογές:

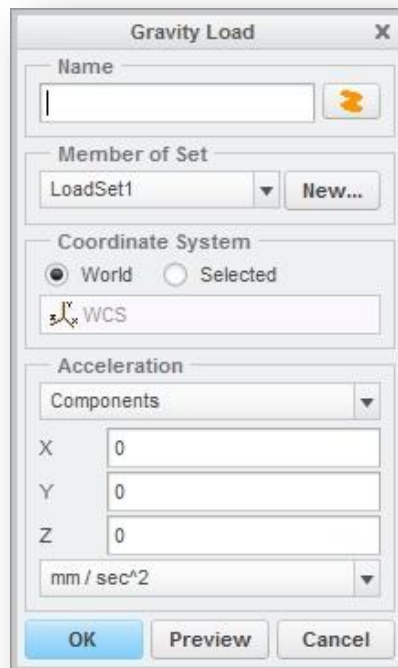
1. **Components**
2. **Dir Vector & Mag**
3. **Dir Points & Mag**

Η πρώτη επιλογή είναι ο απλός τρόπος εφαρμογής της επιτάχυνσης, όπου χρειάζεται μόνο να αναγραφεί η τιμή της επιτάχυνσης σε έναν από τους τρεις άξονες του συστήματος συντεταγμένων, έτσι ώστε να ορισθεί η κατεύθυνση του διανύσματος της επιτάχυνσης.

Στην δεύτερη επιλογή χρειάζεται να αναγραφεί η τιμή της επιτάχυνσης σε έναν από τους τρεις άξονες του συστήματος συντεταγμένων, (έτσι ώστε να ορισθεί η κατεύθυνση του διανύσματος της επιτάχυνσης), όπως επίσης και το μέγεθος του φορτίου της επιτάχυνσης. Αν εισαχθεί θετικό μέγεθος, τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη επιτάχυνση κατά την ίδια κατεύθυνση με αυτή που έχει ορισθεί αρχικά. Αν εισαχθεί αρνητικό μέγεθος, τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη επιτάχυνση κατά την αντίθετη κατεύθυνση με αυτή που είχε ορισθεί αρχικά.

Η Τρίτη επιλογή χρειάζεται δύο σημεία και το μέτρο της επιτάχυνσης. Το πρώτο σημείο θα είναι το σημείο αναφοράς του διανύσματος της επιτάχυνσης και το δεύτερο σημείο είναι εκείνο που με την εφαρμογή του τελικά καθορίζετε η κατεύθυνση του διανύσματος της επιτάχυνσης. Αν εισαχθεί θετικό μέγεθος φορτίου, τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει την επιτάχυνση κατά την ίδια κατεύθυνση με αυτή που έχει ορισθεί αρχικά. Αν εισαχθεί αρνητικό μέγεθος, τότε το πρόγραμμα

εφαρμόζει την επιτάχυνση κατά την αντίθετη κατεύθυνση με αυτή που είχε ορισθεί αρχικά.



Σχήμα 2.24: Παράθυρο εφαρμογής φορτίου βαρύτητας.

Στο έκτο είδος φόρτισης **Centrifugal (Σχήμα 2.25)** υπάρχει η δυνατότητα να οριστούν φυγοκεντρικά φορτία δυνάμεων. Αυτό μπορεί να γίνει είτε στο **Angular Velocity** ορίζοντας την γωνιακή ταχύτητα, είτε στο **Angular Acceleration** ορίζοντας την γωνιακή επιτάχυνση. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχουν τρεις επιλογές:

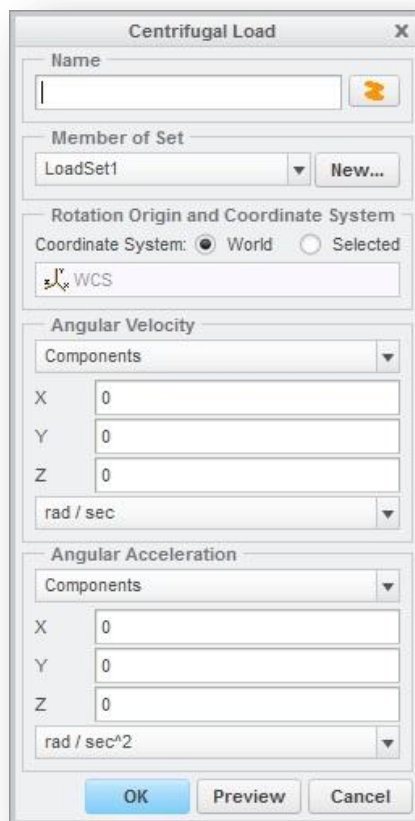
1. **Components**
2. **Dir Vector & Mag**
3. **Dir Points & Mag**

Η πρώτη επιλογή είναι ο απλός τρόπος εφαρμογής της γωνιακής ταχύτητας/γωνιακής επιτάχυνσης, όπου χρειάζεται μόνο να αναγραφεί η τιμή της γωνιακής ταχύτητας/επιτάχυνσης σε έναν από τους τρεις άξονες του συστήματος συντεταγμένων, έτσι ώστε να ορισθεί η κατεύθυνση του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας/επιτάχυνσης.

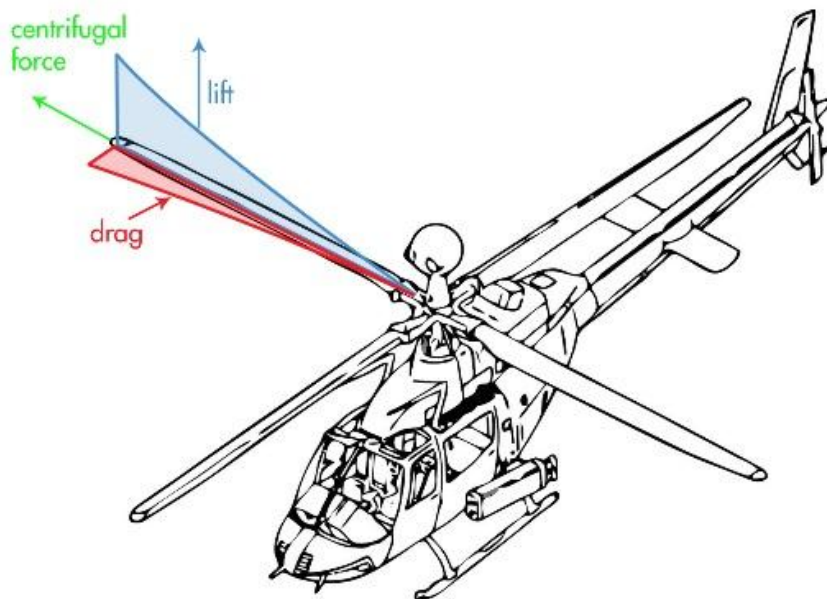
Στην δεύτερη επιλογή χρειάζεται να αναγραφεί η τιμή της γωνιακής ταχύτητας/επιτάχυνσης σε ένα από τους τρεις άξονες του συστήματος συντεταγμένων, (έτσι ώστε να ορισθεί η κατεύθυνση του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας/επιτάχυνσης), όπως επίσης και το μέγεθος του φορτίου της γωνιακής ταχύτητας/επιτάχυνσης. Αν εισαχθεί θετικό μέγεθος, τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει

τη γωνιακή ταχύτητα/επιτάχυνση κατά την ίδια κατεύθυνση με αυτή που έχει ορισθεί αρχικά. Αν εισαχθεί αρνητικό μέγεθος, τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη γωνιακή ταχύτητα/επιτάχυνση κατά την αντίθετη κατεύθυνση με αυτή που είχε ορισθεί αρχικά.

Η Τρίτη επιλογή χρειάζεται δύο σημεία και το μέτρο της γωνιακής ταχύτητας/επιτάχυνσης. Το πρώτο σημείο θα είναι το σημείο αναφοράς του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας/επιτάχυνσης και το δεύτερο σημείο είναι εκείνο που με την εφαρμογή του τελικά καθορίζετε η κατεύθυνση του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας/επιτάχυνσης. Αν εισαχθεί θετικό μέγεθος, φορτίου τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη γωνιακή ταχύτητα/επιτάχυνση κατά την ίδια κατεύθυνση με αυτή που έχει ορισθεί αρχικά. Αν εισαχθεί αρνητικό μέγεθος, τότε το πρόγραμμα εφαρμόζει τη γωνιακή ταχύτητα/επιτάχυνση κατά την αντίθετη κατεύθυνση με αυτή που είχε ορισθεί αρχικά.

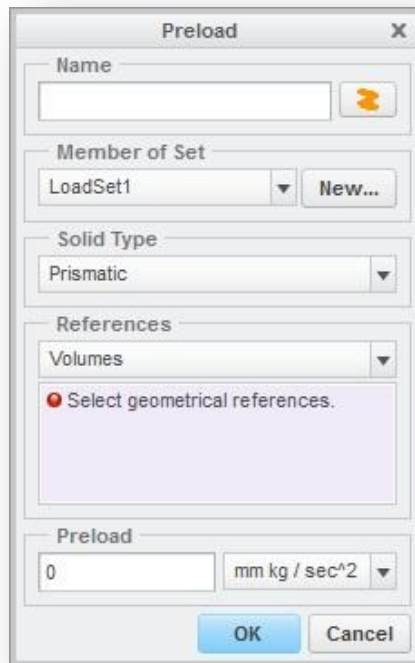


Σχήμα 2.25: Παράθυρο εφαρμογής φυγοκεντρικών φορτίων.



Σχήμα 2.26: Παράδειγμα φυγοκεντρικού φορτίου.

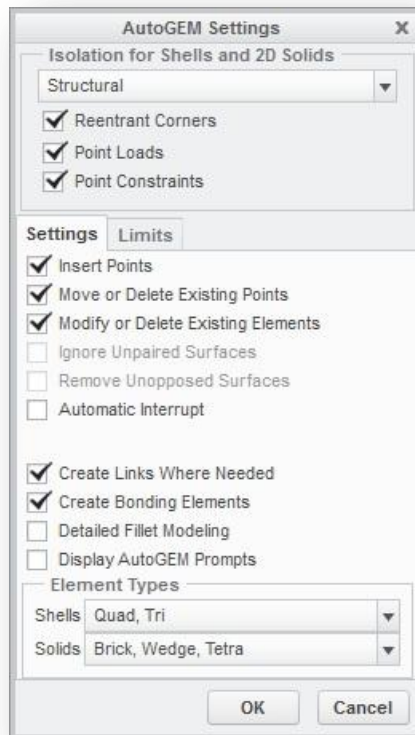
Στο έβδομο και τελευταίο είδος φόρτισης **Preload (Σχήμα 2.27)** υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής προφόρτισης, η οποία περιγράφει το φορτίο που εφαρμόζετε σε ένα προσδετήρα απλώς ως ένα αποτέλεσμα του να προσδεθεί (πριν από την εφαρμογή κάθε εξωτερικού φορτίου). Αυτό επιτυγχάνεται δηλώνοντας στα **References** το εξάρτημα ή τον όγκο στα οποία θα εφαρμοστεί η προφόρτιση και στο **Preload** το μέτρο της προφόρτισης.



Σχήμα 2.27: Παράθυρο εφαρμογής προφόρτισης.

2.5. Δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων (AutoGEM).

Για να είναι σε θέση το πρόγραμμα να υπολογίσει ένα οποιοδήποτε είδος ανάλυσης, θα πρέπει πρώτα το υπό μελέτη μοντέλο να διακριτοποιηθεί σε ένα πεπερασμένο αριθμό γεωμετρικών γραμμικών στοιχείων τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με κόμβους. Οι ρυθμίσεις που γίνονται πριν την δημιουργία του δικτύου, επηρεάζουν σημαντικά το μέγεθος, το είδος αλλά και τον αριθμό των στοιχείων. Η διαδικασία αυτή γίνεται χρησιμοποιώντας στην δεύτερη καρτέλα επιλογών **Refine Model**, στον έβδομο τομέα **AutoGEM**. Αρχικά στο **AutoGEM→Isolation for Shells and 2D Solids** υπάρχουν δύο διαδρομές που μπορούν να ακολουθηθούν, **Structural** και **Thermal** και δίνουν την δυνατότητα βελτίωσης του δικτύου, (όποια διαδρομή και αν επιλεχτεί), κοντά σε ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οποιοδήποτε μοντέλου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτή η επιλογή για να δημιουργηθεί από το πρόγραμμα ένα πιο εκλεπτυσμένο δίκτυο σε ορισμένους τύπους ανωμαλιών στο μοντέλο. Όταν η επιλογή αυτή είναι ενεργή, συμπληρώνει την περιοχή γύρω από κάθε ιδιομορφία με μικρά στοιχεία. Το μέγεθος των στοιχείων που δημιουργούνται τοπικά αυξάνεται ομαλά έτσι ώστε να μπορεί ομογενοποιηθεί με το υπόλοιπο δίκτυο του μοντέλου.



Σχήμα 2.28: Παράθυρο ρύθμισης της διαδικασίας της διακριτοποίησης.

Επίσης, στο **AutoGEM→Settings** υπάρχουν οκτώ επιλογές (**Σχήμα 2.28**):

1. **Insert Points**
2. **Move or Delete Existing Points**
3. **Modify or Delete Existing Points**
4. **Automatic Interrupt**
5. **Create Links Where Needed**
6. **Create Bonding Elements**
7. **Detailed Fillet Modeling**
8. **Display AutoGEM Prompts**

Αν ο χρήστης διαλέξει την πρώτη επιλογή, μπορεί να προσθέσει επιπλέον σημεία όταν αυτό απαιτείται, για να ολοκληρωθεί ένα δίκτυο ορθά. Υπάρχουν δύο τύποι σημείων, **Boundary Points**: Σημεία πάνω σε επιφάνειες όπου υπάρχουν σχηματισμένες συνοριακές καμπύλες και **Interior Points**: Εσωτερικά σημεία σε επιφάνειες και όγκους.

Η δεύτερη επιλογή, χρησιμοποιείτε για να μετακινηθούν ή να διαγραφούν υπάρχοντα σημεία, όταν χρειάζεται να βελτιστοποιηθεί η διαμόρφωση του στοιχείου για το μοντέλο. Μερικές φορές δεν μπορεί να δημιουργηθεί ένα πλήρες σύνολο στοιχείων σε μια επιφάνεια ή έναν όγκο που έχουν πολύπλοκη γεωμετρία.

Αν ο χρήστης διαλέξει την επιλογή αυτή, είναι ποιο πιθανό να καλύψει πλήρως την επιφάνεια ή τον όγκο με στοιχεία.

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την τρίτη επιλογή, εάν θέλει να τροποποιήσει ή να διαγράψει υπάρχοντα στοιχεία όταν αυτό απαιτείται, για να βελτιστοποιηθεί η διαμόρφωση των στοιχείων του μοντέλου. Στην περίπτωση αυτή δεν μπορούν να τροποποιηθούν ή να διαγραφούν **Wedge Elements** και **Brick Elements**.

Η τέταρτη επιλογή, είναι χρήσιμη στην περίπτωση όπου ο χρήστης επιθυμεί να σταματήσει η αυτόματη δημιουργία του δικτύου, εφόσον έχει δημιουργηθεί ένα ποσοστό στοιχείων. Αν τεθεί σε λειτουργία η επιλογή αυτή, εμφανίζεται μια επιπλέον επιλογή **at Completion Percentage** μέσω της οποίας εισάγετε το επιθυμητό ποσοστό ολοκλήρωσης.

Η Πέμπτη επιλογή, χρησιμοποιείτε για την δημιουργία δεσμών μεταξύ των **Shell Elements** και των **Solid Elements** ή μεταξύ επιφανειών **Solid Quad** και **Solid Tri**. Αυτή η επιλογή αναγκάζει τα άκρα των **Shell Elements** που είναι συνδεδεμένα με **Solid Elements** να συνδέονται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε τα **Shell Elements** να μην έχουν αποδεσμευμένους τους βαθμούς ελευθερίας της περιστροφής. Σε ορισμένες περιπτώσεις μοντέλων, η επιλογή αυτή μπορεί να αυξήσει σημαντικά το χρόνο επίτευξης της ανάλυσης.

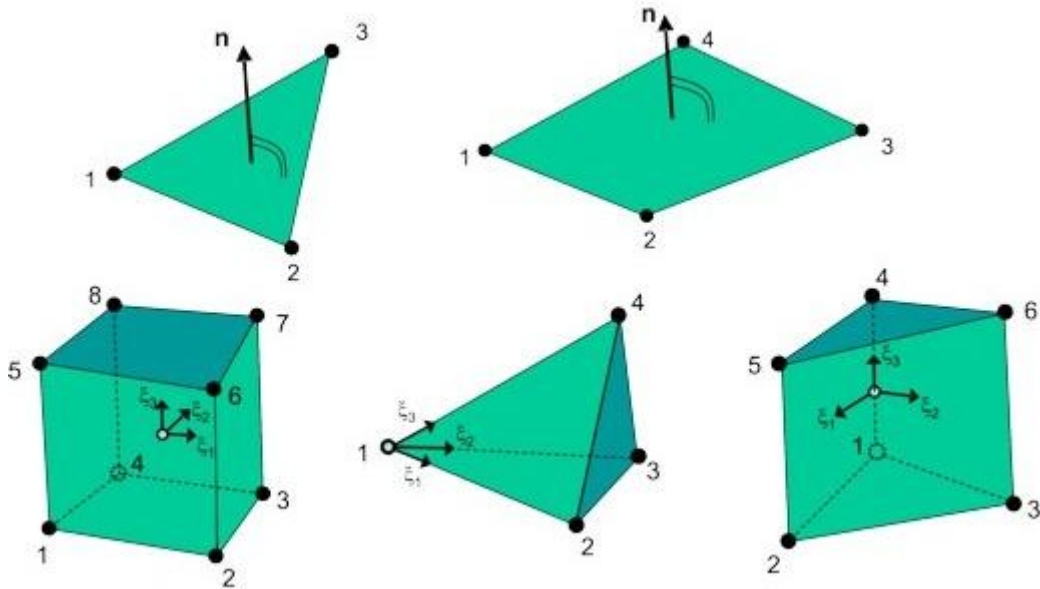
Η έκτη επιλογή, δημιουργεί ένα μεγαλύτερο αριθμό συγκεκριμένων στοιχείων κοντά στα σημεία της γεωμετρίας όπου έχει δημιουργηθεί συγκόλληση. Αν απαιτούνται ακριβέστερα και ομαλότερα αποτελέσματα κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, θα ήταν καλό να προστεθούν επιπλέον σημεία στις συγκεκριμένες περιοχές.

Η έβδομη επιλογή, δημιουργεί ένα μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων κοντά στα σημεία της γεωμετρίας όπου υπάρχει καμπυλότητα. Αν απαιτούνται ακριβέστερα και ομαλότερα αποτελέσματα κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, θα ήταν καλό να προστεθούν επιπλέον σημεία στις συγκεκριμένες περιοχές.

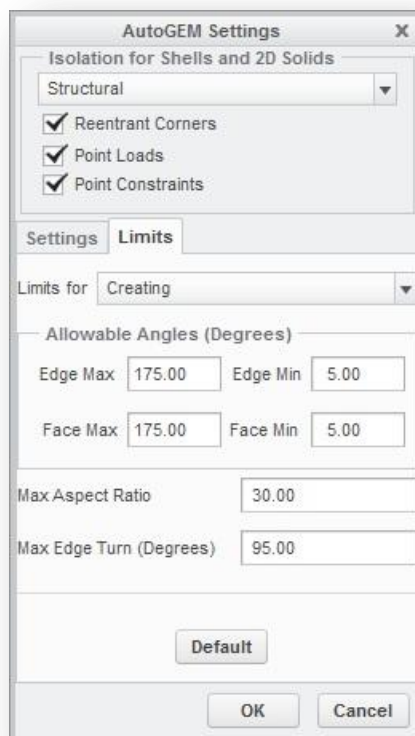
Η όγδοη και τελευταία επιλογή, εμφανίζει μηνύματα κατά την διάρκεια δημιουργίας του δικτύου ή κατά την διάρκεια της διεξαγωγής της ανάλυσης. Αν καταργηθεί η επιλογή αυτή, δεν θα εμφανίζονται πλέον μηνύματα.

Μέσω του **AutoGEM→Settings→Element Types→(Solids ή Shells)** επιλέγεται το είδος των στοιχείων (**Σχήμα 2.28**). Για στερεά μοντέλα, δίνεται η επιλογή τριών ειδών στοιχείων (**Σχήμα 2.29**), **Brick** (παραλληλεπίπεδα <<τούβλα>>), **Wedge** (σφηνοειδούς μορφής) και **Tetra** (τετράεδρα) ή ο συνδυασμός δύο ειδών στοιχείων, **Wedge** (σφηνοειδούς μορφής) και **Tetra** (τετράεδρα). Για λεπτότοιχα μοντέλα δίνεται η επιλογή δύο ειδών στοιχείων (**Σχήμα 2.29**), **Quad** (τετραγωνικά)

και **Tri** (τριγωνικά) ή ενός στοιχείου μόνο **Tri** (τριγωνικά). Το κάθε είδος, στην διαδικασία της επίλυσης, χρησιμοποιεί διαφορετικούς μαθηματικούς αλγόριθμους.



Σχήμα 2.29: Τύποι στοιχείων που χρησιμοποιεί το Creo Simulate.

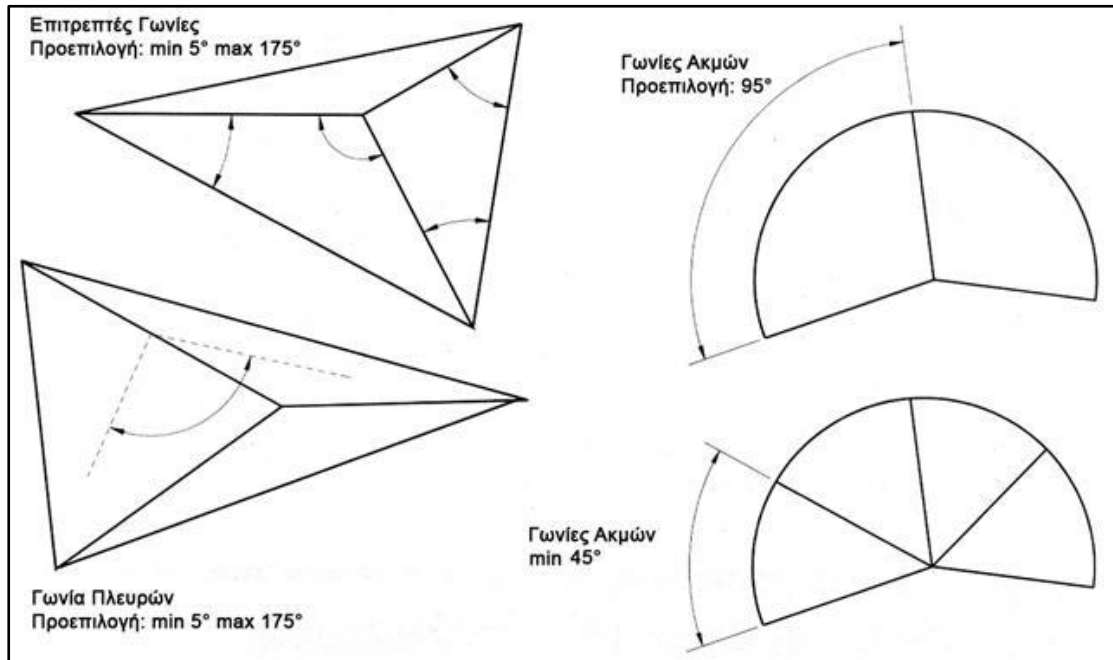


Σχήμα 2.30: Παράθυρο επεξεργασίας των στοιχείων που χρησιμοποιούνται.

Στο **AutoGEM**→**Limits**→**Limits for**→**Creating** ο χρήστης μπορεί να επηρεάσει έμμεσα τον αριθμό των στοιχείων που θα δημιουργηθούν μέσω τριών παραδοχών (**Σχήμα 2.30**):

1. **Allowable Angles (Degrees)**
2. **Max Aspect Ratio**
3. **Max Edge Turn (Degrees)**

Μέσω της πρώτης παραδοχής, ρυθμίζονται οι επιτρεπτές γωνίες μεταξύ των ακμών και των πλευρών ενός στοιχείου. Η δεύτερη παραδοχή, σχετίζεται με τον λόγο των διαστάσεων ο οποίος είναι περίπου η αναλογία του μήκους και του πλάτους ενός στοιχείου. Μέσω της τρίτης παραδοχής, ορίζεται η γωνία μεταξύ των ακμών του στοιχείου. Δηλαδή, στην ουσία είναι το εύρος του τόξου που μπορεί να επιτραπεί σε μια ακμή. Στο κάθε ένα από τα παραπάνω προϋπάρχει μια τιμή η οποία αναφέρει τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές που μπορούν πάρουν τα στοιχεία κατά τη διακριτοποίηση. Το πρόγραμμα χωρίζει τη γεωμετρία ανάλογα με τα επιτρεπόμενα όρια που έχουν οριστεί από τον χρήστη. Στις περιοχές με μικρή γεωμετρική πολυπλοκότητα, δημιουργούνται μεγάλα στοιχεία, ενώ σε περιοχές με μεγαλύτερη γεωμετρική πολυπλοκότητα δημιουργούνται μικρά και πολλή περισσότερα στοιχεία.

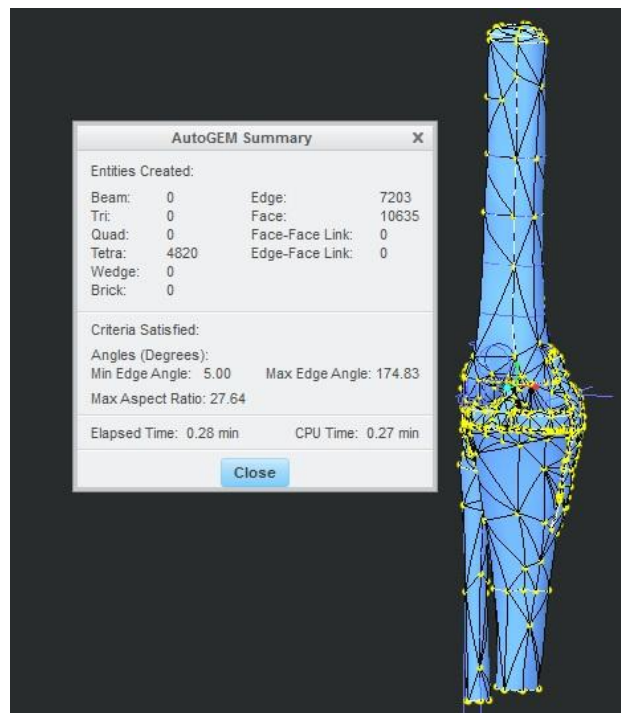


Σχήμα 2.31: Επιτρεπτές γωνίες μεταξύ των ακμών των στοιχείων.

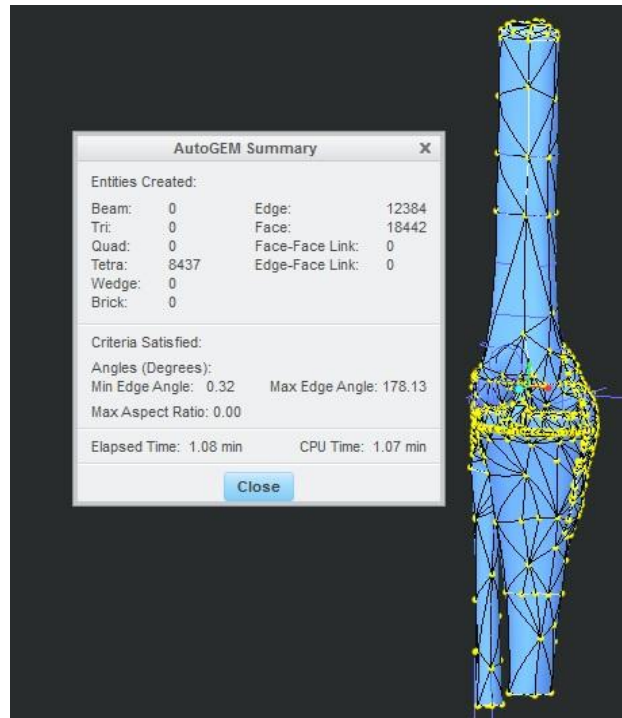
Για παράδειγμα μειώνοντας, την μέγιστη επιτρεπτή γωνία των στοιχείων μέσω της πρώτης παραδοχής **Allowable Angles (Degrees)**, τα μεγάλα στοιχεία του πλέγματος θα περιοριστούν, οπότε θα αυξηθεί και ο αριθμός τους. Ενώ μειώνοντας

τις ελάχιστες γωνίες, τα μικρά στοιχεία εάν χρειάζεται θα γίνουν μικρότερα, και περισσότερα (**Σχήμα 2.31**).

Αυτοί οι περιορισμοί γίνονται διότι εξοικονομείτε αρκετός χρόνος και μειώνεται η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς. Για παράδειγμα, η αρχική τιμή της μέγιστης γωνίας μεταξύ των ακμών ενός στοιχείου στο **Allowable Angles (Degrees)** είναι 175. Με αυτά τα δεδομένα θα δημιουργηθεί το πλέγμα επιλέγοντας το **AUTOGEM**. Έπειτα αυτή η τιμή θα μειωθεί από 175 σε 150 και θα γίνει ξανά η ίδια διαδικασία με τις αλλαγές, για να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Φαίνεται στις απεικονίσεις των σχημάτων (**Σχήμα 2.32**) και (**Σχήμα 2.33**) ότι για μικρή ποσοστιαία αλλαγή στην μέγιστη γωνία κατά ~14%, τα στοιχεία που δημιουργήθηκαν είναι περίπου τα διπλάσια των αρχικών, καθώς και ο χρόνος υπολογισμού αυξήθηκε κατά ~220%.



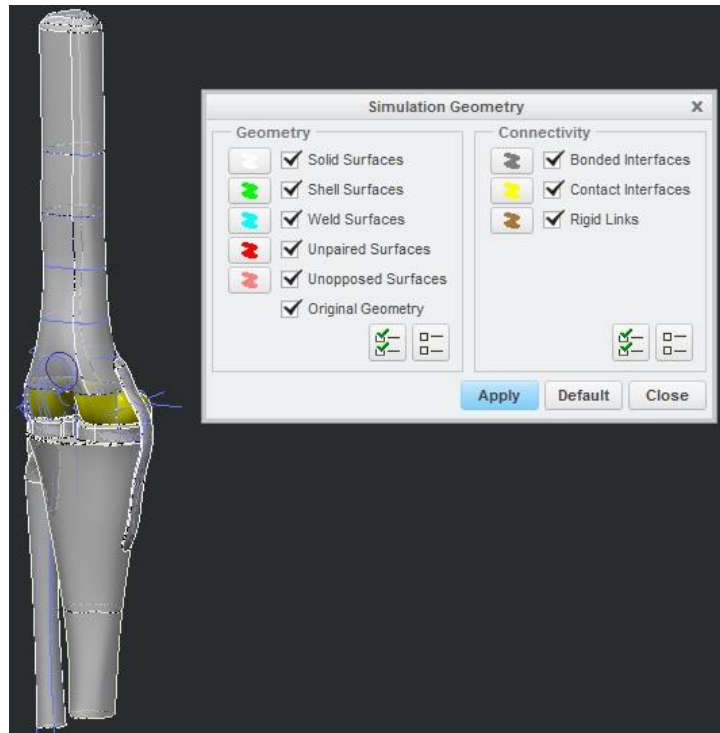
Σχήμα 2.32: Δημιουργία πλέγματος με προεπιλεγμένες από το πρόγραμμα τιμές επιτρεπτών γωνιών μεταξύ των ακμών των στοιχείων.



Σχήμα 2.33: Δημιουργία πλέγματος με διαφορετικές τιμές.

Φυσικά αυτοί οι χρόνοι είναι σχετικά μικροί λόγο του μοντέλου το οποίο δεν είναι αρκετά μεγάλο σε μέγεθος. Σε άλλα μεγαλύτερα μοντέλα σε μέγεθος τα οποία χρησιμοποιούν πιο πολύπλοκους μηχανισμούς και έχουν αρκετά μέρη συναρμολόγησης, ο χρόνος των αναλύσεων μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος. Μια τέτοια περίπτωση ανάλυσης μπορεί να διαρκέσει μέχρι και εβδομάδες ακόμα και αν χρησιμοποιούνται υπολογιστές μεγάλης ισχύος.

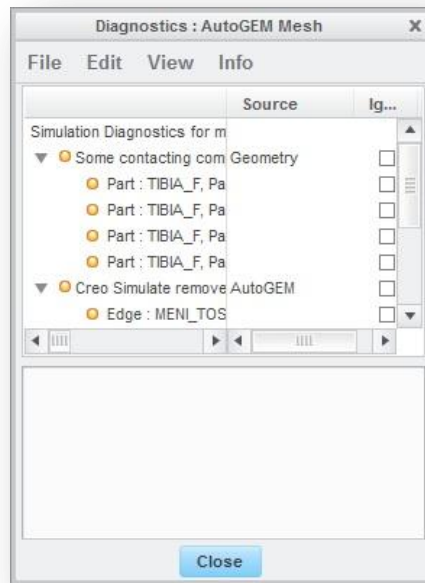
Τέλος, υπάρχουν ακόμα δύο εργαλεία τα οποία βοηθάνε αρκετά τον χρήστη για την δημιουργία του πλέγματος. Το πρώτο εργαλείο είναι το **Review Geometry (Σχήμα 2.34)** όπου μέσω του **Simulation Geometry→Geometry** μπορεί ο χρήστης να δει τα διάφορα είδη επιφανειών του μοντέλου (στέρεες επιφάνειες, λεπτότοιχες επιφάνειες, συγκολλητές επιφάνειες, επιφάνειες η οποίες δεν ταιριάζουν μεταξύ τους και ομόφωνες επιφάνειες) με διαφορετικούς χρωματισμούς βοηθώντας έτσι τον χρήστη να δει τις κινήσεις που θα πρέπει να ακολουθήσει. Επίσης, μέσω του **Simulation Geometry→Connectivity** μπορούν να εμφανιστούν οι επιφάνειες που έχουν οριστεί ως **bonded** και **contact** ή τα σημεία όπου υπάρχουν **rigid links** στο μοντέλο.



Σχήμα 2.34: Παράθυρο επιλογής εύρεσης τύπου επιφανειών και επεξεργασίας τους σε ένα οποιοδήποτε μοντέλο.

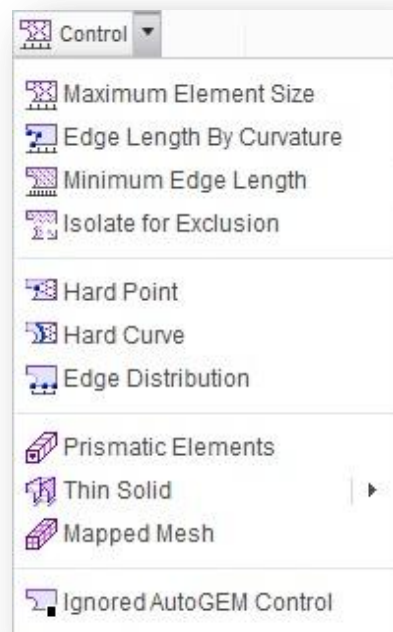
Το δεύτερο εργαλείο **Diagnostics (Σχήμα 2.35)** παρέχει στον χρήστη πολύτιμες πληροφορίες για την διεξαγωγή της ανάλυσης ή του δικτύου στην προκειμένη περίπτωση. Κατά την διάρκεια κάποιας διεργασίας εμφανίζονται ορισμένα σύμβολα τα οποία αναφέρονται σε προειδοποιήσεις, σε σφάλματα και στην επιτυχία των επιμέρους βημάτων της διεργασίας αυτής.

Τα σύμβολα με πορτοκαλί χρώμα, αναφέρονται σε προειδοποιήσεις, δηλαδή σε πιθανές δυσλειτουργίες κάποιου σημείου της διεργασίας που έχει ορισθεί, η οποία μειώνει άλλες φορές λιγότερο και άλλες περισσότερο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αν ο χρήστης επιλέξει τα σύμβολα αυτά δίνεται πλήρης επεξήγηση επί της ειδοποίησης. Τα κόκκινα σύμβολα, αναφέρονται σε σφάλματα, δηλαδή σε σοβαρές συνθήκες που δεν μπορεί να εκτελέσει το πρόγραμμα διότι επηρεάζονται από κάποια σοβαρή δυσλειτουργία η οποία είτε αφορά το μοντέλο είτε τα δεδομένα που έχουν ορισθεί κατά το αρχικό στάδιο της διεργασίας. Αν ο χρήστης επιλέξει τα σύμβολα αυτά δίνεται πλήρης επεξήγηση επί της ειδοποίησης. Τα μπλε σύμβολα, αναφέρονται στην επιτυχή εκτέλεση των επιμέρους βημάτων της διεργασίας που έχουν ορισθεί από τον χρήστη.



Σχήμα 2.35: Παράθυρο πληροφοριών-ενημέρωσης.

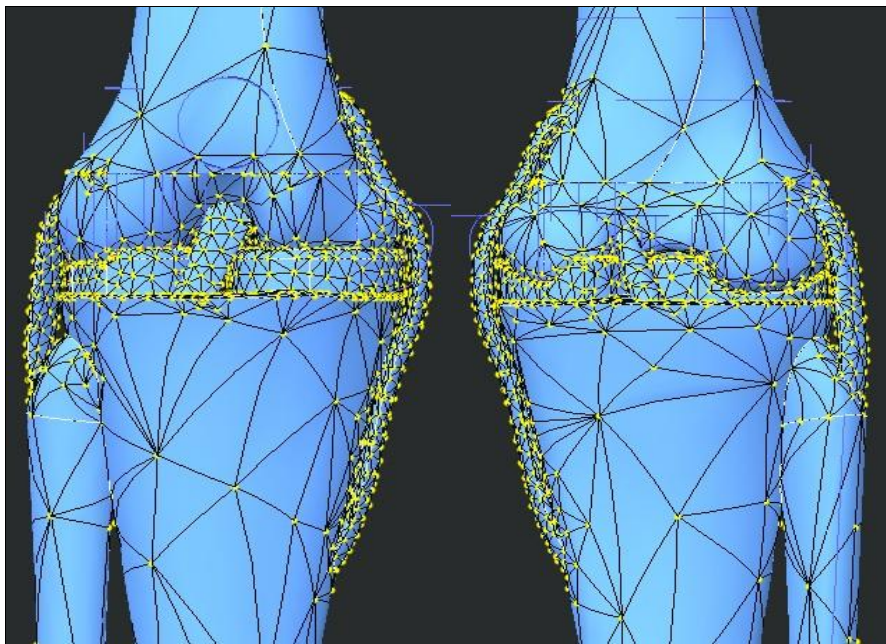
Στο **AutoGEM→Control** ο χρήστης έχει την δυνατότητα να διαλέξει ανάμεσα σε δέκα <<εργαλεία>> τα οποία των βοηθάνε να δημιουργήσει με τον ευκολότερο και πιο αποτελεσματικό τρόπο το δίκτυο στο μοντέλο το οποίο μελετά (Σχήμα 2.36). Αυτά είναι:



Σχήμα 2.36: Παράθυρο επιλογής τύπου εργαλείου για την διαδικασία της διακριτοποίησης.

1. **Maximum Element Size**
2. **Edge Length By Curvature**
3. **Maximum Edge Length**
4. **Isolate for Exclusion**
5. **Hard Point**
6. **Hard Curve**
7. **Edge Distribution**
8. **Prismatic Elements**
9. **Thin Solid**
10. **Mapped Mesh**
11. **Ignore AutoGEM Control**

Το πρώτο εργαλείο **Maximum Element Size (Σχήμα 2.37)** ρυθμίζει το μέγεθος των στοιχείων μεταβάλλοντας το μήκος των ακμών τους από κόμβο σε κόμβο ομοιόμορφα. Αυτό επιτυγχάνετε επιλέγοντας κομμάτι, όγκο, επιφάνεια ή μια ακμή/καμπύλη και δίνοντας μια τιμή στο **Element Size**.

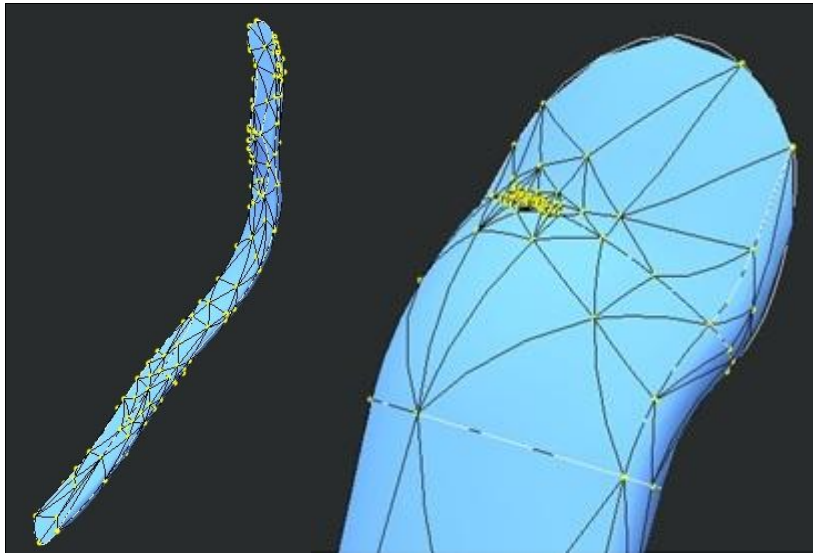


Σχήμα 2.37: Διακριτοποιημένο μοντέλο στο οποίο χρησιμοποιήθηκε η επιλογή **Maximum Element Size**.

Το δεύτερο εργαλείο **Edge Length By Curvature (Σχήμα 2.38)** δημιουργεί αυτόματα πυκνότερο δίκτυο στα σημεία όπου αυξάνεται ο λόγος καμπυλότητας στο μοντέλο. Αυτό επιτυγχάνετε καθορίζοντας μια τιμή που είναι ο λόγος του αναμενόμενου μήκους της ακμής των στοιχείων προς την ακτίνα μιας κοίλης επιφάνειας **Edge Length / Radius of Curvature ratio** έτσι ώστε να δημιουργήσει ένα πυκνό δίκτυο στοιχείων δίπλα σε περιοχές όπως καμπύλες, λεπτού πάχους τοιχώματα και οπές

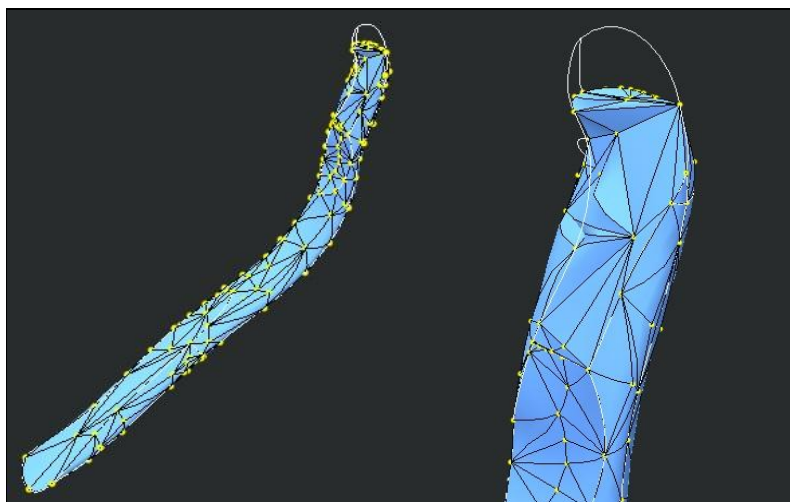
που είναι πιθανό να έχουν υψηλή συγκέντρωση τάσεων σε ένα κατά τα άλλα απλό μοντέλο. Επίσης, πρέπει να επιλεγεί ένα κομμάτι ή μια επιφάνεια στην οποία θα εφαρμοστεί.

Η επιλογή **Ignore Radius of Curvature below** χρησιμεύει για να αγνοηθούν οι καμπύλες με ακτίνα καμπυλότητας που είναι χαμηλότερη από ό, τι μια καθορισμένη τιμή.



Σχήμα 2.38: Διακριτοποιημένο μοντέλο στο οποίο χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Edge Length By Curvature.

Στο τρίτο εργαλείο **Minimum Edge Length (Σχήμα 2.39)** καθορίζοντας το μήκος της ακμής, αγνοεί ακμές και καμπύλες αναφοράς με μήκος μικρότερο ή ίσο με το μήκος που καθορίζετε. Στο **To keep** μπορεί ο χρήστης να διαλέξει ποιές ακμές θέλει για την λειτουργία αυτή.



Σχήμα 2.39: Διακριτοποιημένο μοντέλο στο οποίο χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Minimum Edge Length.

Το τέταρτο εργαλείο **Isolate for Exclusion** χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και την απομόνωση των ιδιοτεροτήτων σε ένα μοντέλο. Οι ιδιομορφίες είναι περιοχές όπου θεωρητικά αναπτύσσονται σε αυτές τάσεις με άπειρο μέτρο, πράγμα που είναι ανεπιθύμητο διότι μπορεί να παραποιήσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Για παράδειγμα, ένα σημειακό φορτίο είτε σε μια δομή ελάχιστου πάχους είτε σε ένα στέρεο σώμα δημιουργεί ανώμαλη συμπεριφορά ή υψηλή συγκέντρωση τάσεων. Στην περίπτωση αυτή, η επίλυση της ανάλυσης αντανακλά κυρίως αυτές τις συγκεντρώσεις τάσεων, παρεμποδίζοντας έτσι την ικανότητα του χρήστη να επικεντρωθεί στη συνολική συμπεριφορά των τάσεων που εμφανίζονται στο μοντέλο, πράγμα το οποίο ίσως τον ενδιαφέρει περισσότερο.

Με τη επιλογή αυτή, αγνοούνται οι καταπονήσεις και οι πιθανές μετατοπίσεις που μετρώνται στις επιλεγμένες από τον χρήστη περιοχές και κατ' επέκταση στα στοιχεία του δικτύου, περιορίζοντας έτσι την πολυωνυμική τάξη των ακμών των στοιχείων και ενδεχομένως αγνοώντας τις τάσεις όταν ομαλοποιούνται τα σφάλματα κατά την διάρκεια ενός και μόνο περάσματος. Η μέθοδος **(SPA)** επίσης αγνοεί τις τάσεις όπου αναπτύσσονται σε στοιχεία τα οποία έχουν αποκλειστεί από τον χρήστη, κατά τον υπολογισμό της τοπικής εκτίμησης σφάλματος. Αγνοώντας τέτοιου είδους ανωμαλίες σε ένα μοντέλο, εξοικονομείτε αρκετός χρόνος από την ανάλυση και ο χρήστης παίρνει ακριβέστερα αποτελέσματα στις υπόλοιπες περιοχές εκτός των ανωμαλιών. Μέσω του **Preselect Singularities** ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει με ποιόν τρόπο θα εντοπίσει τις ανωμαλίες στο μοντέλο. Υπάρχουν πέντε επιλογές:

1. **Reentrant corners less than....**
2. **Point Loads**
3. **Edge Loads**
4. **Point Constraints**
5. **Edge Constraints**

Σύμφωνα με την πρώτη επιλογή, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να αποκλειστούν όποιες εσωτερικές γωνίες επιθυμεί δίνοντας μόνο σαν δεδομένο τις μοίρες ή τα ακτίνια του τόξου της γωνίας αυτής. Χρησιμοποιώντας την δεύτερη επιλογή, αποκλείονται όλα εκείνα τα σημεία στα οποία έχουν εφαρμοστεί φορτία οποιουδήποτε είδους.

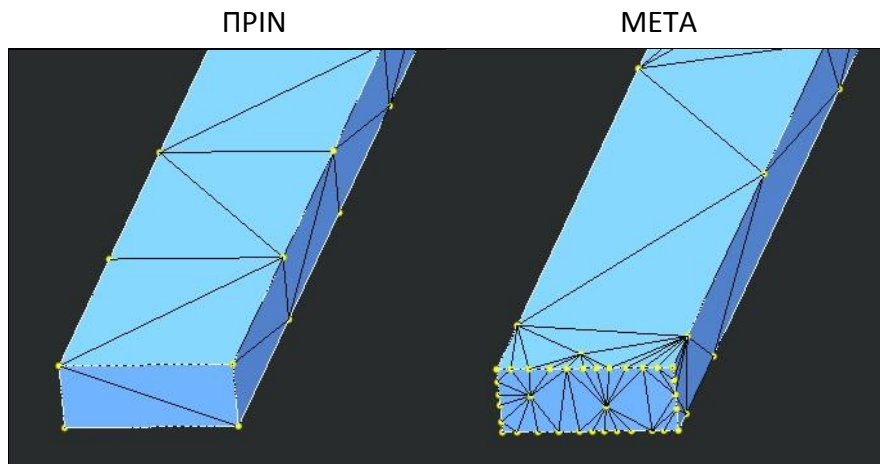
Με την τρίτη επιλογή, αποκλείονται όλες οι ακμές του μοντέλου στις οποίες έχουν εφαρμοστεί φορτία οποιουδήποτε είδους.

Η τέταρτη επιλογή, αποκλείει εκείνα τα σημεία του μοντέλου στα οποία έχουν ορισθεί περιορισμοί από τον χρήστη.

Και τέλος, η πέμπτη επιλογή, χρησιμοποιείται για να αποκλειστούν όλες οι ακμές στις οποίες έχουν ορισθεί περιορισμοί. Στην περίπτωση των μοντέλων όπου

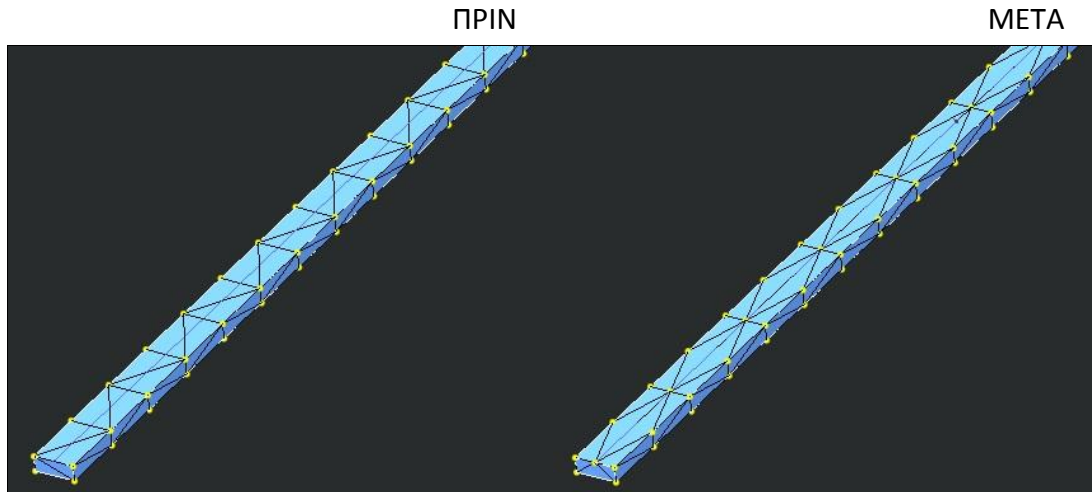
αποτελούνται από μια λεπτότοιχη δομή, το δίκτυο μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με τον έλεγχο του αριθμού των στοιχείων κοντά στις ιδιομορφίες χρησιμοποιώντας στο **Isolation for Shells and Boundary Mesh** μία από τις τρεις επιλογές (**Automatic**, **None** ή **Maximum Element Size**). Για τα στερεά μοντέλα, μπορεί να βελτιωθεί το δίκτυο κοντά τις ιδιομορφίες με τον έλεγχο του μεγέθους των στοιχείων, χρησιμοποιώντας στο **Isolation for Solids** μία από τις δύο επιλογές (**None** ή **Maximum Element Size**). Και στις δύο περιπτώσεις η επιλογή **None** απλά δεν επηρεάζει καθόλου το δίκτυο.

Το πέμπτο εργαλείο **Hard Point** (**Σχήμα 2.40**) δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να τοποθετήσει κόμβους σε ένα μοντέλο σε όποιο σημείο επιθυμεί ο ίδιος, ανεξαρτήτου της απόστασης και του λόγου συμμετρίας μεταξύ των κόμβων. Σύμφωνα με την τοποθέτηση των κόμβων στο μοντέλο θα δημιουργηθούν ανάλογα και οι ομάδες των στοιχείων. Αυτό επιτυγχάνετε απλά επιλέγοντας ένα σημείο ή ένα πλήθος σημείων σε οποιοδήποτε μέρος του μοντέλου.



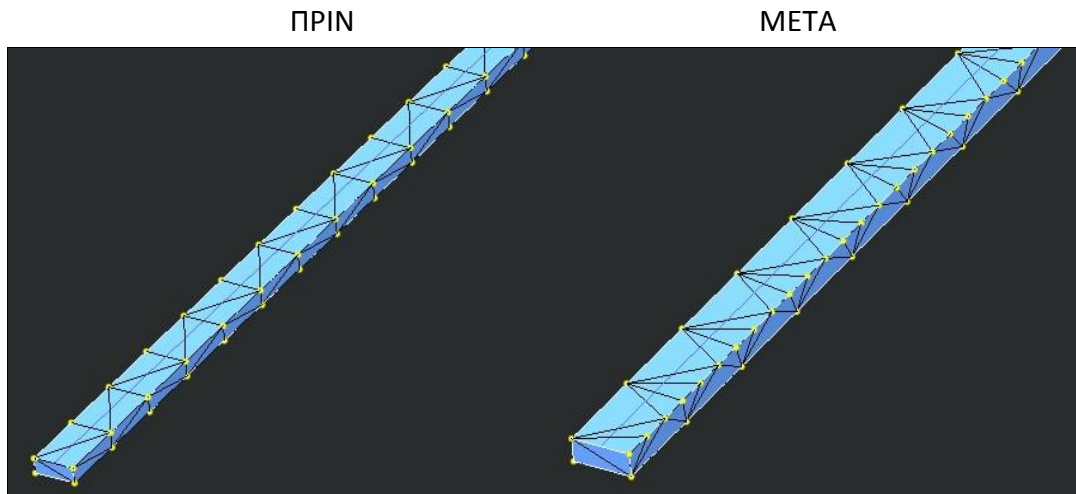
Σχήμα 2.40: Διακριτοποιημένο μοντέλο στο οποίο χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Hard Point.

Το έκτο εργαλείο **Hard Curve** (**Σχήμα 2.41**) δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να τοποθετήσει κόμβους σε ένα μοντέλο σε όποια ακμή επιθυμεί ο ίδιος, ανεξαρτήτου της απόστασης και του λόγου συμμετρίας της μεταξύ μιας ομάδας ακμών. Σύμφωνα με την τοποθέτηση των κόμβων στο μοντέλο θα δημιουργηθούν ανάλογα και οι ομάδες των στοιχείων. Αυτό επιτυγχάνετε απλά επιλέγοντας μία ακμή ή ένα πλήθος ακμών σε οποιοδήποτε μέρος του μοντέλου. Στην περίπτωση αυτή, η επιλογή του πλήθους των κόμβων που θα σχηματιστούν πάνω σε μία ακμή γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα με τον βέλτιστο ανά περίπτωση τρόπο.



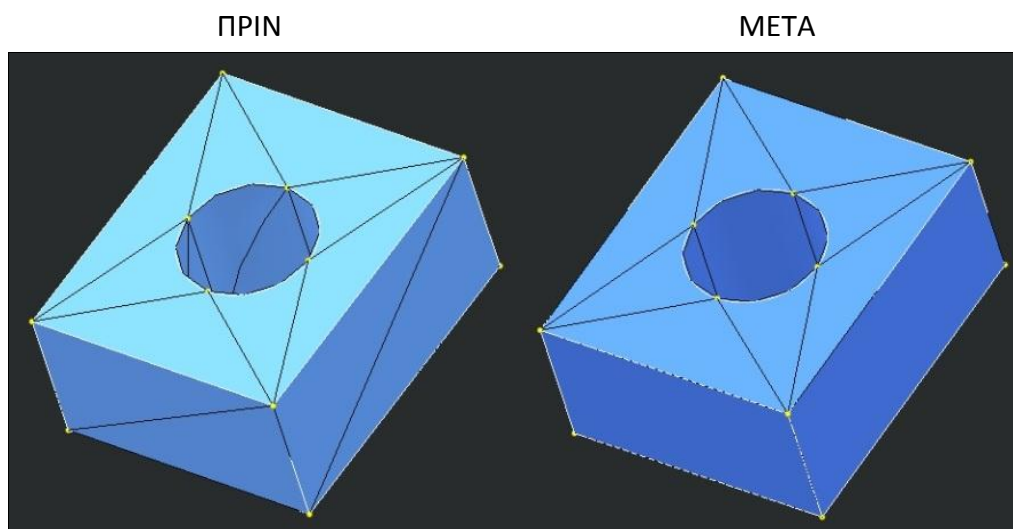
Σχήμα 2.41: Διακριτοποιημένο μοντέλο στο οποίο χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Hard Curve.

Το έβδομο εργαλείο **Edge Distribution (Σχήμα 2.42)** χρησιμοποιείτε για να καθοριστεί ο αριθμός των κόμβων και να προσδιοριστεί η αναλογία του πρώτου και του τελευταίου διαστήματος μεταξύ των κόμβων καθώς τοποθετούνται κατά μήκος μιας ακμής ή ενός συνόλου ακμών. Για παράδειγμα, εάν εισαχθεί ο αριθμός 3 ως ο λόγος, το τελευταίο διάστημα θα είναι 3 φορές το μήκος του πρώτου διαστήματος. Το πρόγραμμα τοποθετεί τους ενδιάμεσους κόμβους σε διαστήματα ανάλογα προς το λόγο που θα οριστεί. Εάν εισαχθεί μια αναλογία 1, όλα τα διαστήματα θα είναι σε ίση απόσταση μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτόν ο χρήστης μπορεί να έχει τον πλήρη έλεγχο των ακμών που περιέχει ένα μοντέλο. Σύμφωνα με την τοποθέτηση των κόμβων που θα εφαρμοστούν πάνω σε μια ακμή, θα δημιουργηθούν ανάλογα και οι ομάδες των στοιχείων γύρω από την ακμή αυτή. Στο **Properties**→**Number of Nodes** τοποθετείτε ο επιθυμητός αριθμός των κόμβων και στην επιλογή **First/Last Nodal Interval Ratio** τοποθετείτε ο λόγος μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου διαστήματος των κόμβων. Μέσω του **Prevent Additional Nodes** αν δεν έχει οριστεί επαρκής αριθμός κόμβων, το πρόγραμμα εμφανίζει μια προειδοποίηση και μπορεί να εισάγει επιπλέον κόμβους με βάση της απαιτήσεις δημιουργίας του δικτύου.



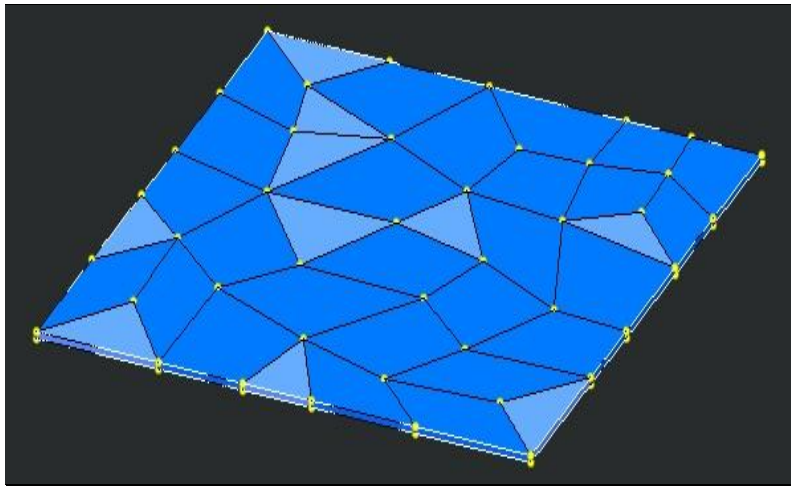
Σχήμα 2.42: Διακριτοποιημένο μοντέλο στο οποίο χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Edge Distribution.

Το όγδοο εργαλείο **Prismatic Elements (Σχήμα 2.43)** μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικό σε μερικές περιπτώσεις μοντέλων, διότι χρησιμοποιεί των συνδυασμό τετράεδρων και σφηνοειδούς μορφής στοιχείων αντί μόνο τετράεδρων στοιχείων, αντιμετωπίζοντας έτσι κάποια τυχών ιδιομορφία του μοντέλου με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ειδικότερα, τα πρισματικά δίκτυα προσφέρουν καλή ορθογωνιότητα και δυνατότητες ομαδοποίησης. Η αλγεβρική διαδικασία βαδίζοντας, είναι εξαιρετικά γρήγορη και αποτελεσματική. Για να ορισθούν οι ιδιότητες αυτού του εργαλείου χρειάζεται να επιλεγεί στο **References** το κομμάτι ή ο όγκος στον οποίο θα εφαρμοστούν τα στοιχεία και στο **Extrude Direction** η κατεύθυνση στην οποία θα κινηθεί το πρισματικό δίκτυο το οποίο θα δημιουργηθεί.



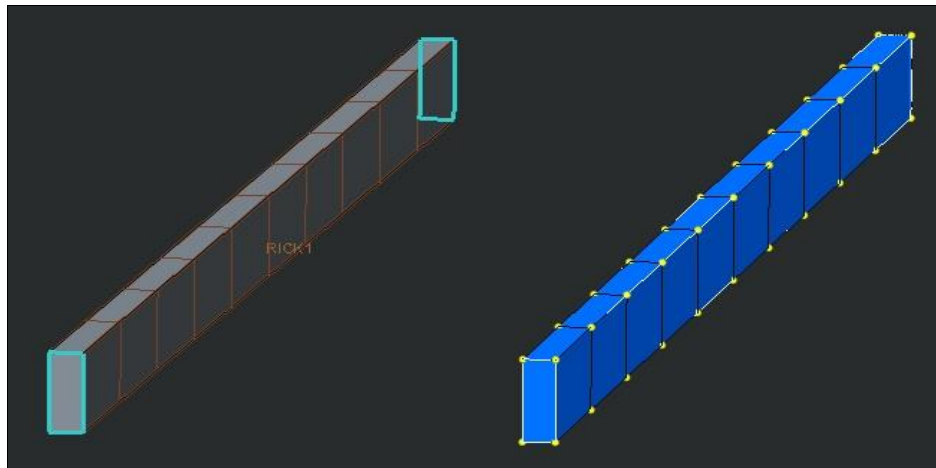
Σχήμα 2.43: Διακριτοποιημένο μοντέλο στο οποίο χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Prismatic Elements.

Στο ένατο εργαλείο **Thin Solid (Σχήμα 2.44)** στην περίπτωση όπου υπάρχουν λεπτές περιοχές σε ένα μοντέλο, είναι συχνά πιο αποτελεσματικό να χρησιμοποιήσει των συνδυασμό τετράεδρων και σφηνοειδούς μορφής στοιχείων αντί μόνο τετράεδρων στοιχείων. Αρχικά, πρέπει να επιλεγούν στο **References** οι επιφάνειες στις οποίες θα δημιουργηθεί το δίκτυο. Αν χρησιμοποιηθεί η επιλογή **Auto Select Opposing Surfaces** τότε ο χρήστης χρειάζεται να επιλέξει μόνο την μια επιφάνεια διότι η άλλη επιλέγεται αυτόματα. Σε περίπτωση όπου υπάρχει μια συναρμολόγηση δύο λεπτότοιχων επιφανειών και ο χρήστης επιθυμεί να δημιουργηθεί ξεχωριστό πλέγμα μεταξύ των επιφανειών αυτών, μπορεί να χρησιμοποιήσει την επιλογή **Split Surfaces** με την οποία θα διαχωριστούν οι επιφάνειες κατά την δημιουργία του δικτύου.

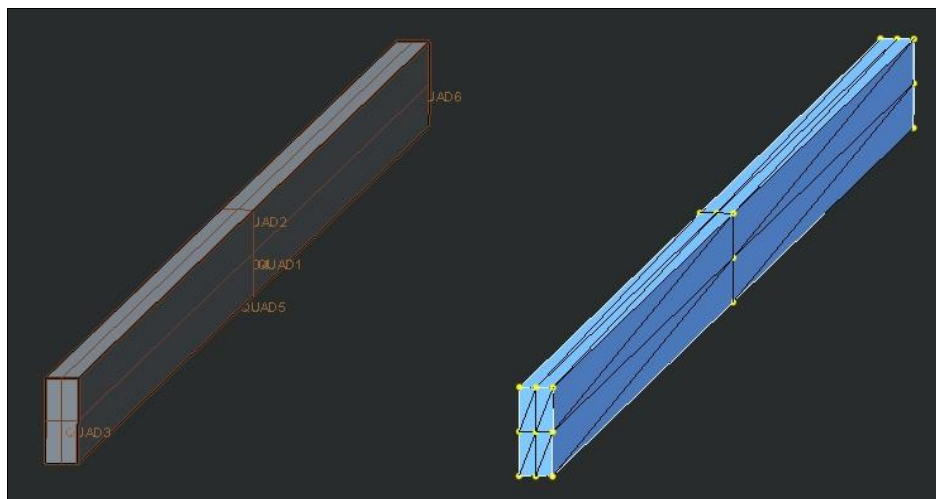


Σχήμα 2.44: Διακριτοποιημένο μοντέλο στο οποίο χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Thin Solid.

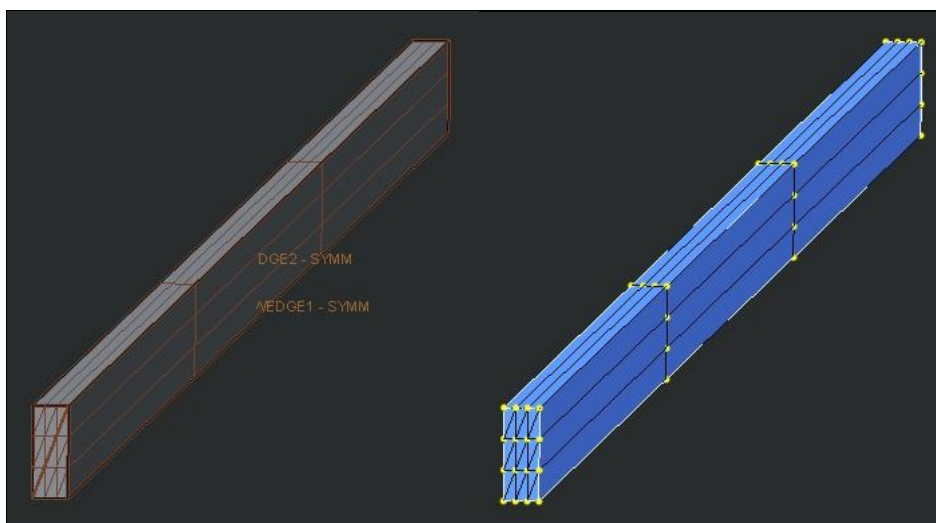
Το δέκατο εργαλείο **Mapped Mesh (Σχήμα 2.45-2.48)** δημιουργεί ένα συμμετρικό σχηματισμό στοιχείων που συχνά λειτουργούν πιο αποτελεσματικά από ένα μη δομημένο δίκτυο. Μια τέτοια τακτική, μπορεί να ακολουθηθεί σε περιοχές του μοντέλου που μπορεί να απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, όπως σε επιφάνειες όπου έχουν ορισθεί δεσμοί επαφών μεταξύ τους ή σε πολύ λεπτές περιοχές. Για να δημιουργηθεί ένα τέτοιο δίκτυο, πρέπει να ορισθούν επιφάνειες ή σημεία στα **References for the First Face, References for the Second Face** και ο τύπος των στοιχείων που θα πλαισιώσουν το δίκτυο αυτό στο **Region Shape**. Ο χρήστης έχει να επιλέξει ανάμεσα σε τέσσερα είδη στοιχείων **Brick, Wedge, Quad** και **Tri**. Χρησιμοποιώντας την επιλογή **Subvisions→Default** υπάρχει η δυνατότητα το δίκτυο να γίνεται ομοιόμορφα ποιο πυκνό ή ποιο αραιό, ενώ στην επιλογή **Edge Sets** μπορούν να επιλεγούν ακμές σαν αναφορά της κατεύθυνσης για το σχηματισμό του δικτύου, με αποτέλεσμα ο χρήστης να μπορεί να επεξεργαστεί το δίκτυο ξεχωριστά και με διαφορετικό τρόπο ως προς κάθε κατεύθυνση.



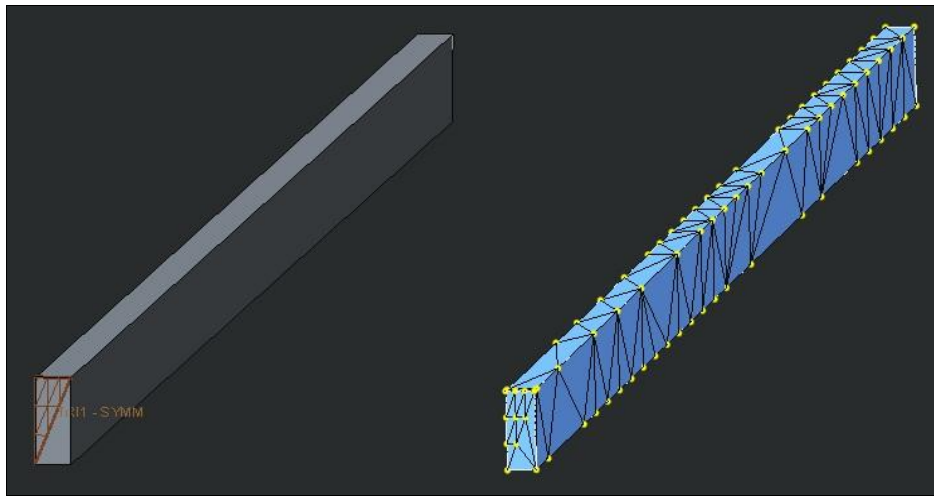
Σχήμα 2.45: Διακριτοποίηση με την χρήση Brick Elements.



Σχήμα 2.46: Διακριτοποίηση με την χρήση Quad Elements.



Σχήμα 2.47: Διακριτοποίηση με την χρήση Wedge Elements.



Σχήμα 2.48: Διακριτοποίηση με την χρήση Tri Elements.

Το ενδέκατο και τελευταίο εργαλείο **Ignore AutoGEM Control** έχει την δυνατότητα να αγνοεί την δημιουργία δικτύου σε οποιοδήποτε κομμάτι μιας συναρμολόγησης που θεωρεί ο χρήστης πως δεν είναι σημαντικό. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να μειωθεί σημαντικά ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου. Στο **References** ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τα κομμάτια που επιθυμεί, να μην υπολογιστούν κατά την επίλυση της ανάλυσης, ενώ στο **Type of AutoGEM Control** μπορεί να επιλεγεί ο τύπος των προαναφερθέντων εργαλείων που δεν θα χρησιμοποιηθούν.

Τόσο στην εφαρμογή φορτίου όσο και στην επιλογή του τύπου της διακριτοποίησης η δυνατότητα επιλογής της επιφάνειας ή του όγκου που θα χρησιμοποιηθεί, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Μέσω της δεύτερης καρτέλας επιλογών **Refine Model**, στον τέταρτο τομέα **Regions**, υπάρχουν δύο επιλογές:

1. **Surface Region**
2. **Volume Region**

Μέσω της πρώτης επιλογής ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει πάνω σε μια επιφάνεια ενός είδους υπάρχοντος μοντέλου, τα όρια στα οποία θέλει αργότερα να περιορίζεται το φορτίο που θα ορίσει ή ο τύπος της διακριτοποίησης που θα χρησιμοποιήσει. Η διαδικασία αυτή είναι χρήσιμη διότι ο χρήστης πραγματοποιώντας τις κινήσεις αυτές μπορεί να πάρει αρκετά πιο ακριβείς τιμές στα αποτελέσματα που αναμένει να βγάλει. Αυτό επιτυγχάνεται αρχικά επιλέγοντας **Surface Region** → **Select a Component** όπου πρέπει να επιλεγεί κομμάτι, αργότερα στην επιλογή **Surfaces** επιλέγεται η επιφάνεια στην οποία επιθυμεί ο χρήστης να σχεδιαστούν τα όρια και τέλος στο **Sketch** επιλέγεται το σχέδιο που έχει προσχεδιαστεί.

Μέσω της δεύτερης επιλογής ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει σε ένα είδη υπάρχον μοντέλο μερικούς όγκους, η οποίοι αργότερα μπορεί να του είναι χρήσιμη στο να δημιουργήσει ένα τοπικό δίκτυο στον όγκο και έτσι να πάρει καλύτερες μετρήσεις στα σημεία του μοντέλου που κρίνει σημαντικότερα εκείνος. Αυτό επιτυγχάνεται αρχικά επιλέγοντας **Volume Region** και τον τύπο της διαδικασίας σχηματισμού του όγκου που θα διαχωριστεί μέσω έξι επιλογών:

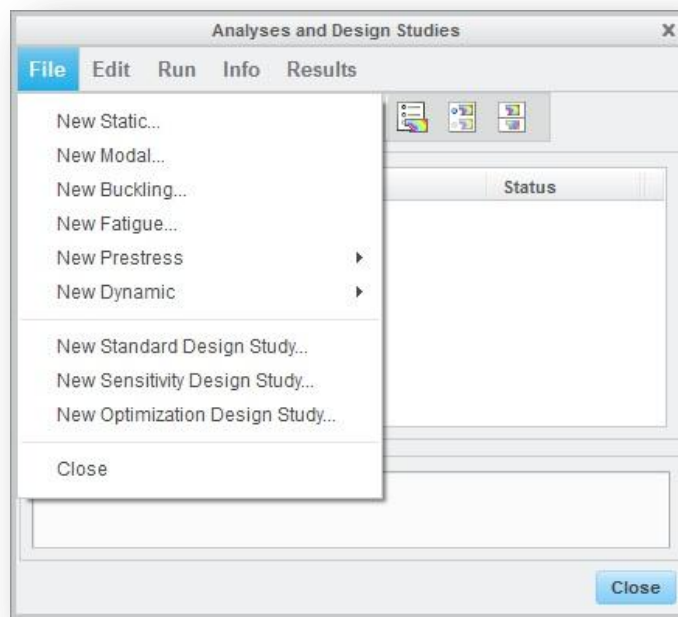
1. **Extrude**
2. **Revolve**
3. **Sweep**
4. **Helical Sweep**
5. **Swept Blend**
6. **Blend**

Αφού επιλεγεί ο τύπος, στην συνέχεια σχεδιάζεται ο όγκος και διαχωρίζεται από το υπόλοιπο μοντέλο. Και οι δύο εφαρμογές χρησιμοποιούνται για την απομόνωση κάποιων επιφανειών ή όγκων του μοντέλου. Αυτό ωφελεί στην ελαχιστοποίηση του χρόνου κατά την διάρκεια των υπολογισμών που κάνει ο υπολογιστής όταν τρέχει την ανάλυση ή όταν τρέχει την διαδικασία δημιουργίας του δικτύου. Επίσης, οδηγεί και στην καλύτερη αξιολόγηση του προβλήματος που έχει τεθεί, διότι σύμφωνα με τις επιλογές που μπορεί να ακολουθήσει ο χρήστης, δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στα συγκεκριμένα σημεία κατά την διάρκεια των υπολογισμών των αποτελεσμάτων.

2.6. Διαδικασία επιλογής είδους ανάλυσης.

Η διαδικασία επιλογής κάποιου τύπου αναλύσεις γίνεται χρησιμοποιώντας την πρώτη καρτέλα επιλογών **Home**, στον έκτο τομέα **Run**. Μέσω του **Home**→**Run**→**Analyses and Studies**→**File** δίνεται ένα εύρος επιλογών ανάμεσα σε εννέα βασικά είδη αναλύσεων (**Σχήμα 2.49**):

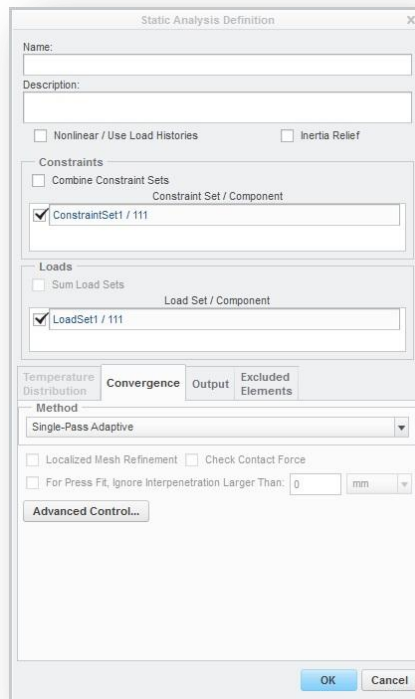
1. **New Static**
2. **New Modal**
3. **New Buckling**
4. **New Fatigue**
5. **New Prestress**
 - **Static**
 - **Modal**
6. **New Dynamic**
 - **Time**
 - **Frequency**
 - **Shock**
 - **Random**



Σχήμα 2.49: Παράθυρο επιλογής τύπου αναλύσεων.

2.7. Διαδικασία για την διεξαγωγή στατικής ανάλυσης (Static Analysis).

Το πρώτο είδος **New Static** (Σχήμα 2.50) αφορά ανάλυση μοντέλων υπό στατικά φορτία. Η επιλογή αυτή υποστηρίζει τον υπολογισμό μοντέλων όταν υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις, τον υπολογισμό μοντέλων (συναρμολογημένων εξαρτημάτων) όταν οι μεταξύ των εξαρτημάτων σχέσης έχουν οριστεί ως **Contact**, υπερελαστική συμπεριφορά μοντέλων, πλαστική συμπεριφορά μοντέλων και την μη γραμμικότητα μοντέλων ελατηρίων.



Σχήμα 2.50: Παράθυρο ορισμού στατικής ανάλυσης.

Τα τρία βασικά βήματα που απαιτούνται για την διεξαγωγή μιας στατικής ανάλυσης είναι:

1. Επιλογή **Constraints**
2. Επιλογή **Loads**
3. Επιλογή μεθόδου προσαρμοστικότητας αποτελεσμάτων

Στην πρώτη επιλογή **Constraints**→**Constraint Set/Component** επιλέγεται ο/οι περιορισμός-οί που ο χρήστης έχει εφαρμόσει στο μοντέλο. Επίσης, υπάρχει μια πρόσθετη επιλογή **Time Dependence** όπου επιτρέπει στον/στους περιορισμούς να εφαρμοστεί στο μοντέλο συναρτήσει του συντελεστή περιορισμού.

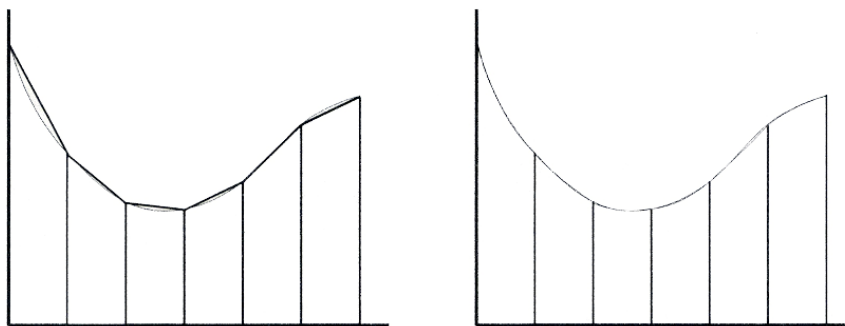
Στην δεύτερη επιλογή **Loads**→ **Load Set/Component** επιλέγεται το/τα φορτίο-α που ο χρήστης έχει εφαρμόσει στο μοντέλο. Επίσης, υπάρχει μια πρόσθετη επιλογή **Time Dependence** όπου επιτρέπει στο/στα φορτίο-α να εφαρμοστεί στο μοντέλο συναρτήσει του συντελεστή φόρτισης.

Η τρίτη επιλογή **Convergence**→**Method**, αποτελείται από τρεις μεθόδους προσαρμοστικότητας:

- **Quick Check**
- **Single-Pass Adaptive (SPA)**
- **Multi-Pass Adaptive (MPA)**

Κατά την εκτέλεση μίας ανάλυσης, τα αποτελέσματα που θα παραχθούν δεν είναι γνωστό αν είναι σωστά. Είναι πολύ σημαντικό να ελέγξει ο χρήστης αν τα αποτελέσματα συγκλίνουν. Η λέξη σύγκλιση χρησιμοποιείται επειδή τα αποτελέσματα που βγάξει το Creo simulate συγκλίνουν σε ένα ενιαίο αποτέλεσμα. Προκειμένου να ελεγχθεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων, απαιτούνται τουλάχιστον δύο λύσεις στο ίδιο πρόβλημα. Τα αποτελέσματα ελέγχονται με υψηλή ακρίβεια. Αν το αποτέλεσμα με την υψηλότερη ακρίβεια έχει μεγάλη διαφορά από το πραγματικό που αναμενόταν, τότε το αποτέλεσμα δεν συγκλίνει. Ωστόσο αν το ποσοστό μη σύγκλισης του αποτελέσματος είναι μικρότερο του 15%, τότε θεωρείται πως το αποτέλεσμα συγκλίνει.

Το Creo simulate χρησιμοποιεί την μέθοδο **P-Element Method** για την σύγκλιση, η οποία προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αυξάνει την τάξη του πολυωνύμου (**Σχήμα 2.51**) και έτσι το δίκτυο δεν χρειάζεται να αλλάξει στα κρίσιμα σημεία του μοντέλου. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει στο πρόγραμμα να παρακολουθεί την λύση του αποτελέσματος ανά πέρασμα και να τροποποιεί αντίστοιχα την προσεγγιστική πολυωνυμική τάξη, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να εκφραστεί με μεγάλη ακρίβεια. Η διαδικασία η οποία επαναλαμβάνεται, κάθε φορά που το πρόγραμμα δίνει κάποιο σύνολο αποτελεσμάτων και αυτό συγκρίνεται με ένα προηγούμενο (έτσι ώστε να εντοπιστεί το ποσοστό σύγκλισης) ονομάζεται **P-Loop Pass Convergence**.



Σχήμα 2.51: Αύξηση της τάξης του πολυωνύμου παρεμβολής.

Η απλούστερη μέθοδος **Quick Check** εκτελεί μόνο ένα πέρασμα σε όλα τα στοιχεία με πολυώνυμο παρεμβολής τρίτης τάξης. Η επιλογή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έναν αρκετά γρήγορο έλεγχο ενός μοντέλου, πρώτου ο χρήστης εκτελέσει μια από τις παρακάτω δύο μεθόδους.

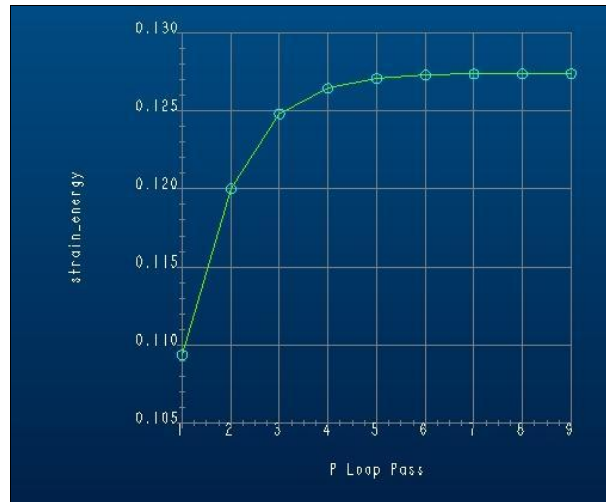
Η μέθοδος **(SPA)** εκτελεί δύο περάσματα σε όλα τα στοιχεία του πλέγματος του μοντέλου, με πολυώνυμο παρεμβολής έως έκτης τάξης. Η επίλυση του προβλήματος ξεκινάει με το πρώτο πέρασμα και την χρήση χαμηλής πολυωνυμικής τάξης (πολυώνυμο 3^{ης} τάξης). Σύμφωνα με το πρώτο πέρασμα γίνεται εκτίμηση σφάλματος σε όλο το μοντέλο και στην συνέχεια στο δεύτερο πέρασμα επαναλαμβανόμενης της λειτουργίας αυτής αυξάνεται το πολυώνυμο.

Η μέθοδος **(MPA) (Σχήμα 2.52)** αποτελείται από μία ομοιόμορφη πολυωνυμική κλιμάκωση. Η επίλυση του προβλήματος ξεκινάει με την χρήση χαμηλής πολυωνυμικής τάξης (πολυώνυμο 1^{ης} τάξης) και στην συνέχεια επαναλαμβανόμενης της λειτουργίας αυτής αυξάνεται το πολυώνυμο ανά πέρασμα επίλυσης σε όλα τα στοιχεία του δικτύου μέσα σε ένα προκαθορισμένο από το χρήστη εύρος πολυωνυμικής τάξης ($1 \leq$ τάξη πολυωνύμου ≤ 9). Η μέθοδος αυτή διακόπτετε όταν η επιθυμητή ακρίβεια επιτευχθεί.

Σχήμα 2.52: Παράθυρο εφαρμογής του (MPA) τύπου σύγκλισης.

Ο καλύτερος τρόπος για να γίνει έλεγχος αν τα αποτελέσματα συγκλίνουν είναι η απεικόνιση ενός γραφήματος **(Σχήμα 2.53)** το οποίο εμφανίζει μια μεταβλητή και τα περάσματα τα οποία έχουν εκτελεστεί. Η σύγκλιση μπορεί να ελεγχθεί με τη χρήση πολλών διαφορετικών μεταβλητών. Η καλύτερες μεταβλητές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι **strain energy, maximum displacements, maximum stresses**. Ωστόσο, η καλύτερη μεταβλητή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξ' αυτών είναι η **strain energy**. Αυτή παρέχει τις ομαλότερες ενδείξεις. Έλεγχος σύγκλισης με βάση τις μέγιστες τιμές της τάσης γενικά δεν συνιστάτε, διότι οι τιμές

της μέγιστης τάσης μετρώνται τοπικά στο μοντέλο. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.53) φαίνεται η **strain energy** κατά την διεύθυνση του X άξονα σε σχέση με την επανάληψη.



Σχήμα 2.53: Διάγραμμα σύγκλισης Strain Energy – P Loop Pass.

Επιλέγοντας, **Convergence→Method→(MPA)→Polynomial Order** μπορεί να ορισθεί το εύρος της τάξης του πολυωνύμου που θα χρησιμοποιηθεί (1<= τάξη πολυωνύμου<=9). Στο **Convergence→Method→(MPA)→Limits→Percent Convergence** μπορεί να ορισθεί το επί (%) ποσοστό ακρίβειας της σύγκλισης των αποτελεσμάτων. Στο **Convergence→Method→(MPA)→Converge on** επιλέγεται μέσω ποιόν αναφορικών μετρήσεων - αποτελεσμάτων (**Local Displacement, Local Strain Energy And RMS Stress/ Local Displacement and Local Strain Energy/ Measures**) θα πραγματοποιηθούν τα περάσματα κατά τον υπολογισμό της σύγκλισης. Κατά την περίπτωση όπου το πρόγραμμα διαχειρίζεται μοντέλα τα οποία απαιτούν υπολογισμό μεγάλων παραμορφώσεων, τον υπολογισμό μοντέλων (συναρμολογημένων εξαρτημάτων) όταν οι μεταξύ των εξαρτημάτων σχέσης έχουν οριστεί ως **Contact**, υπερελαστική συμπεριφορά μοντέλων, πλαστική συμπεριφορά μοντέλων και την μη γραμμικότητα μοντέλων ελατηρίων, η μέθοδος (**MPA**) δεν υποστηρίζεται.

Επιλέγοντας, **Convergence→Method→(QC)ή(SPA)→Include Snap-Through** [μόνο στις περιπτώσεις όπου το πρόγραμμα διαχειρίζεται μοντέλα τα οποία απαιτούν υπολογισμό μεγάλων παραμορφώσεων, τον υπολογισμό μοντέλων (συναρμολογημένων εξαρτημάτων) όταν οι μεταξύ των εξαρτημάτων σχέσης έχουν οριστεί ως **Contact**, υπερελαστική συμπεριφορά μοντέλων, πλαστική συμπεριφορά μοντέλων και την μη γραμμικότητα μοντέλων ελατηρίων], ο χρήστης έχει την δυνατότητα να παρακολουθεί αναλυτικά τους υπολογισμούς τους οποίους ακολουθεί το πρόγραμμα κατά την εκτέλεση της ανάλυσης μέσω των **Output Files**

(Summary, Log, Checkpoints) τα οποία βρίσκονται **Home→Run→Analyses and Studies→Display Study Status**. Η επιλογή αυτή δεν ισχύει στην περίπτωση όπου έχουν ορισθεί υλικά με γραμμική συμπεριφορά. Επίσης, η μέθοδος **(MPA)** δεν υποστηρίζεται από το πρόγραμμα στη παραπάνω περίπτωση.

Επιπλέον, στο **Convergence→Advanced Control→Used Advanced Control** και στις τρεις μεθόδους **[(QC),(SPA),(MPA)]** ο χρήστης μπορεί να ελέγξει το επί (%) ποσοστό σφάλματος της αναπτυσσόμενης τάσης ενός μοντέλου, το οποίο επηρεάζει σημαντικά την διαδικασία σύγκλισης των αποτελεσμάτων.

Αν επιλεγεί **Contact Analysis**, εμφανίζονται τρεις επιπλέον επιλογές:

1. **Localized Mesh Refinement**
2. **Check Contact Force**
3. **For Press Fit, Ignore Interpenetration Larger Than:**

Η πρώτη επιλογή δημιουργεί αυτόματα πυκνότερο πλέγμα στις περιοχές του μοντέλου όπου απαιτείται.

Η δεύτερη επιλογή χρησιμοποιείτε όταν ο χρήστης επιθυμεί να γίνει έλεγχος των δυνάμεων που δημιουργούνται-αναπτύσσονται μέσω τις επαφής επιφανειών.

Η Τρίτη επιλογή χρησιμοποιείτε όταν ο χρήστης εν γνώσει του, επιθυμεί να αγνοηθεί σε κάποια σημεία του μοντέλου που υπάρχει επαφή μεταξύ επιφανειών, η πιθανή διείσδυση μεταξύ τους. Αυτό μπορεί να συμβεί για ένα εύρος τιμών.

Στο **Output→Calculate** δηλώνονται τα μεγέθη **(Stresses, Rotations, Reactions, Local Stress Errors)** τα οποία ο χρήστης επιθυμεί να συμπεριληφθούν στα αποτελέσματα που θα εξαχθούν προς ανάγνωση. Στο **Output→Plot→Plotting Grid** ρυθμίζεται το πλήθος των κόμβων ανά στοιχείο του δικτύου, λαμβάνοντας έτσι ο χρήστης την ακριβέστερη αναφορά την οποία επιθυμεί, μέσω των αποτελεσμάτων που εξάγει ο κάθε κόμβος. Μέσω του **Output→Output Steps** [μόνο στις περιπτώσεις όπου το πρόγραμμα διαχειρίζεται μοντέλα τα οποία απαιτούν υπολογισμό μεγάλων παραμορφώσεων, το υπολογισμό μοντέλων (συναρμολογημένων εξαρτημάτων) όταν οι μεταξύ των εξαρτημάτων σχέσης έχουν οριστεί ως **Contact**, υπερελαστική συμπεριφορά μοντέλων, πλαστική συμπεριφορά μοντέλων και την μη γραμμικότητα μοντέλων ελατηρίων], υπάρχουν δύο επιλογές **Automatic Steps within Range** και **User-defined Output Steps** σύμφωνα με τις οποίες μπορεί να οριστεί συντελεστής φόρτισης, όπου συμβάλει στην ομαλότερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων και στον καλύτερο έλεγχο των φορτίων που θα ορισθούν.

Η μέθοδος **(MPA)** δεν υποστηρίζεται από το πρόγραμμα για την παραπάνω περίπτωση. Χρησιμοποιώντας την επιλογή **Exclude Elements→Ignore** και στις τρεις μεθόδους **[(QC),(SPA),(MPA)]** γίνεται να μην συμπεριληφθούν οι επιλογές **(Stresses,**

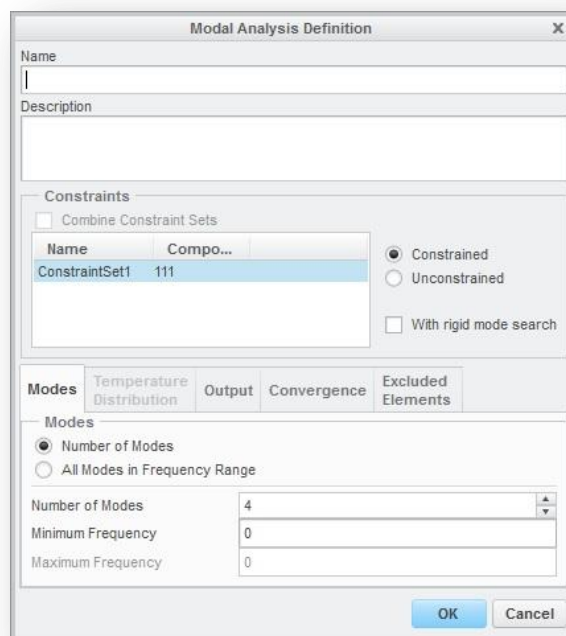
Stresses and Displacements) κατά την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων. Επίσης, μέσω της επιλογής **Exclude Elements**→**Limit**→**Polynomial Order** ο χρήστης μπορεί να ορίσει την τάξη του πολυωνύμου που επιθυμεί.

2.8. Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης φυσικών συχνοτήτων (Modal Analysis).

Το δεύτερο είδος ανάλυσης **New Modal (Σχήμα 2.54)** χρησιμοποιείται για να βρεθεί η δυναμική απόκριση των κατασκευών η οποία χαρακτηρίζεται από τις ιδιοσυχνότητες, τι ιδιομορφές και την λειτουργία απόσβεσης. Αυτοί οι παράγοντες είναι αρκετά σημαντικοί για μοντέλα που υποβάλλονται σε κυκλικά φορτία ή φορτία κραδασμών.

Μπορεί να υπολογισθούν οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές ενός μοντέλου για τους ακόλουθους τύπους εξαρτημάτων:

- Ένα ελεύθερο μοντέλο (όταν έχει έξι βαθμούς ελευθερίας).
- Ένα μερικώς πακτωμένο μοντέλο (όταν ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας είναι μικρότερος από έξι).
- Ένα πλήρες σταθερό μοντέλο (όταν δεν υπάρχει κανένας βαθμός ελευθερίας).



Σχήμα 2.54: Πίνακας ορισμού ανάλυσης φυσικών συχνοτήτων.

Για όλους τους παραπάνω τρόπους υπάρχει μια ιδιοσυχνότητα. Εάν ένα δυναμικό φορτίο εφαρμοστεί σε ένα μοντέλο κοντά στην ιδιοσυχνότητά του, το μοντέλο επιδεικνύει μια μεγαλύτερη ταλάντωση από το φυσιολογικό. Χωρίς την κατάλληλη απόσβεση, η ταλάντωση αυτή μπορεί να γίνει ανεξέλεγκτη και να προκαλέσει την καταρρεύσει του μοντέλου.

Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα, το Creo simulate προβλέπει την ιδιοσυχνότητα του μοντέλου, έτσι ώστε να μπορεί να αναλυθεί το μοντέλο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Τα αποτελέσματα του τρόπου εκτέλεσης της ανάλυσης βοηθάνε να προσδιοριστεί εάν ένα μοντέλο απαιτεί περισσότερο ή λιγότερο απόσβεση ώστε να εμποδίσει την αποτυχία. Χρησιμοποιείτε μια ιδιομορφική ανάλυση για να βρεί τις συχνότητες συντονισμού για μια δομή κάτω από συγκεκριμένους δυναμικούς περιορισμούς.

Κάθε αντικείμενο που ταλαντώνεται έχει ένα βαθμό ελευθερίας. Οι βαθμοί ελευθερίας είναι ο αριθμός των κατευθύνσεων στην οποία το αντικείμενο μπορεί να ταλαντωθεί. Ένα αντικείμενο με ένα μόνο βαθμό ελευθερίας μπορεί να κινείται μπρος-πίσω σε μία κατεύθυνση μόνο. Ένα αντικείμενο με πολλαπλούς βαθμούς ελευθερίας μπορεί να κινηθεί εμπρός και πίσω σε περισσότερες από μία κατεύθυνση.

Βαθμούς ελευθερίας μπορεί επίσης να ορίζεται από τον αριθμό των αντικειμένων που κινούνται. Για παράδειγμα, δύο αντικείμενα που συνδέονται με ένα ελατήριο. Το πρώτο αντικείμενο μπορεί να κινηθεί εμπρός και πίσω σε μία μόνο κατεύθυνση. Το δεύτερο μπορεί να κινηθεί εμπρός και πίσω μόνον στην ίδια διεύθυνση όπως το πρώτο. Το σύστημα λοιπόν αυτό έχει δύο βαθμούς ελευθερίας. Εάν το σύστημα είχε περισσότερους από ένα βαθμό ελευθερίας, οι συνδυασμένες δυνάμεις των δύο αντικειμένων, μπορεί να αποδίδανε μια συχνότητα η οποία να επηρέαζε το μοντέλο.

Η απόσβεση χρησιμοποιείται για να διαλύσει την δονητική ενέργεια σε ένα μοντέλο ή τμήμα. Όλα τα μοντέλα και τα εξαρτήματα έχουν κάποια εγγενή απόσβεση. Ωστόσο, η ποσότητα της απόσβεσης μπορεί να αυξηθεί για να διαχέει την ενέργεια σε συγκεκριμένους ιδιομορφές. Αφού εκτελεστεί μια ανάλυση σε ένα μοντέλο, ο χρήστης μπορεί να αποφασίσει εάν απαιτείται περισσότερο ή λιγότερο απόσβεση.

Οι ιδιομορφές μετρούν τη ταλάντωση ενός αντικειμένου σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Κάθε λειτουργία έχει έναν αριθμό. Η χαμηλότερη ταχύτητα με την οποία ταλαντώνεται μια δομή, αφότου όλα τα εξωτερικά φορτία απομακρύνονται, έχει εκχωρηθεί στην ιδιομορφή 1. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται ελεύθερη ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης, διότι δεν αποσβένει. Κάθε ιδιομορφή έχει εκχωρήσει μια διαφορετική συχνότητα. Για παράδειγμα, η ιδιοσυχνότητα 1

(ελεύθερη ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης) ενός μοντέλου θα μπορούσε να είναι 255,6 Hz, και η ιδιοσυχνότητα 2 θα μπορούσε να είναι 868.7Hz. Οποιοσδήποτε αριθμός ιδιοσυχνότητας μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα συγκεκριμένο μέρος. Το Creo Simulate μπορεί να αναλύσει μέχρι και 9999 διαφορετικές ιδιοσυχνότητες.

Κάθε λειτουργία χαρακτηρίζεται από ένα παραμορφωμένο σχήμα που ονομάζεται ιδιομορφή. Οποιοσδήποτε αριθμός των ιδιομορφών μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα συγκεκριμένο μέρος. Χρησιμοποιώντας το Creo Simulate, μπορεί να απεικονίσει τις ιδιομορφές και τις ιδιοσυχνότητες που συνδέονται με αυτά. Με την προβολή των ιδιομορφών, μπορεί ο χρήστης να δει πώς αντιδρά ένα μοντέλο σε διαφορετικές συχνότητες.

Αρχικά, το βασικότερο είναι να ορισθούν **Constraints** μέσω του **Constraints→Constraint Set/Component**. Υπάρχουν δύο βασικές επιλογές:

1. **Constrained**
2. **Unconstrained**

Η πρώτη επιλογή χρησιμοποιεί τους περιορισμούς που έχουν εφαρμοστεί στο μοντέλο, για την διαδικασία της ανάλυσης.

Η δεύτερη επιλογή δεν χρησιμοποιεί καθόλου περιοριστικές συνθήκες στο μοντέλο, για την διαδικασία της ανάλυσης.

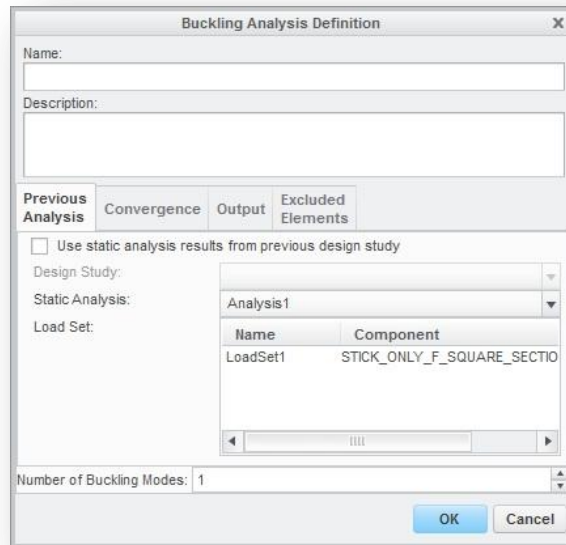
Επίσης, δίνεται μια επιπλέον επιλογή **Constraints→With rigid mode search** μέσω της οποίας αναζητούνται και αναφέρονται μορφές άκαμπτων σωμάτων. Στην επιλογή **Modes→Number of Modes** μπορεί να ορισθεί αριθμός ιδιομορφών και τιμή ελάχιστης συχνότητας. Στην επιλογή **Modes→All Modes in Frequency Range** μπορεί να ορισθεί το εύρος της συχνότητας για την οποία θα βρεθούν οι αντίστοιχες ιδιομορφές.

Επίσης, δίνονται οι επιλογές **Output→Calculate(Stresses, Rotations, Reactions, Local Stress Errors), Convergence→Method→[(QC),(SPA),(MPA)], Excluded Elements**.

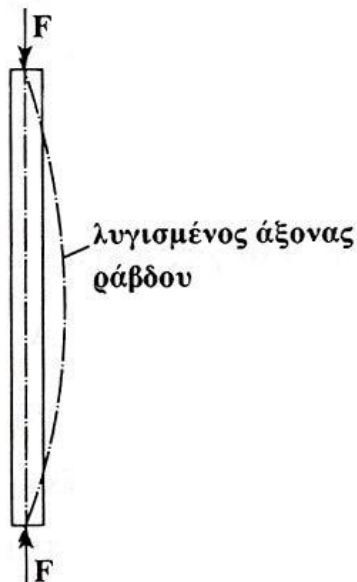
2.9. Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης λυγισμού (Buckling Analysis).

Το τρίτο είδος ανάλυσης **New Buckling (Σχήμα 2.55)** χρησιμοποιείτε για να υπολογιστεί το κρίσιμο φορτίο στο οποίο μια δομή θα υποστεί λυγισμό, καθώς και οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις κατά την έναρξη του λυγισμού. Σε αυτό το είδος ανάλυσης το πρόγραμμα υπολογίζει τον συντελεστή φόρτισης λυγισμού και τις ιδιομορφές του μοντέλου που εξετάζονται. Ο συντελεστής φόρτισης λυγισμού (**Buckling Load Factor**) είναι ο συντελεστής μεγένθυσης, με τον

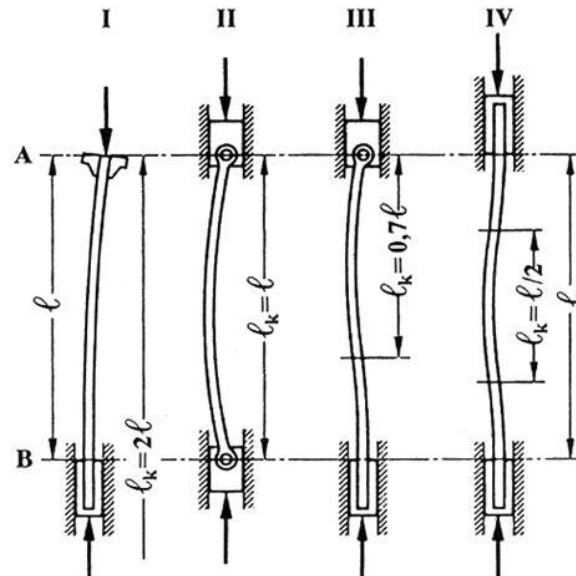
οποίο τα φορτία που εφαρμόζονται σε μια στατική ανάλυση θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν για να παραχθεί το κρίσιμο φορτίο λυγισμού.



Σχήμα 2.55: Παράθυρο ορισμού ανάλυσης λυγισμού.



Σχήμα 2.56: Ράβδος κατά τον λυγισμό.



Σχήμα 2.57: Διάφορες περιπτώσεις λυγισμού.

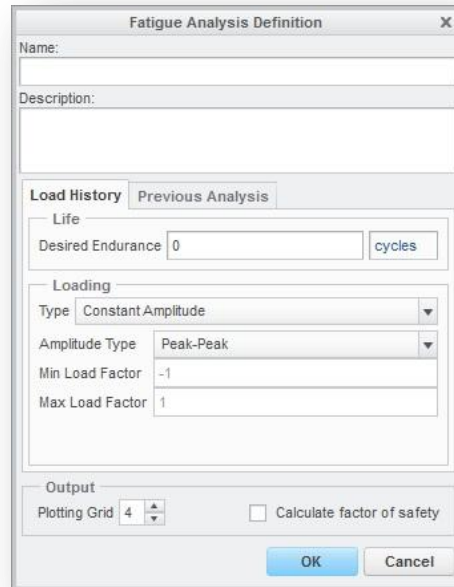
Αρχικά, θα πρέπει να διεξαχθεί μια στατική ανάλυση, στην οποία υπολογίζετε η δυσκαμψία του μοντέλου λόγω των δυνάμεων που έχουν εφαρμοστεί. Η ανάλυση αυτή δεν υποστηρίζει περιπτώσεις όπου το πρόγραμμα διαχειρίζεται μοντέλα τα οποία απαιτούν υπολογισμό μεγάλων παραμορφώσεων, το υπολογισμό μοντέλων (συναρμολογημένων εξαρτημάτων) όταν οι μεταξύ των εξαρτημάτων σχέσης έχουν οριστεί ως **Contact**, υπερελαστική συμπεριφορά μοντέλων, πλαστική συμπεριφορά μοντέλων και την μη γραμμικότητα μοντέλων ελατηρίων.

Διαθέτει και τις τρεις μεθόδους σύγκλισης **[(QC),(SPA),(MPA)]**. Στην επιλογή **Output→Calculate** υπάρχουν οι επιλογές των μεγεθών (**Stresses, Rotations, Reactions, Local Stress Errors, Filter negative buckling load factors**). Επίσης, υπάρχει η επιλογή **Output→Plot→Plotting Grid** και η επιλογή **Excluded Elements**, οι οποίες αναλύονται σε παραδείγματα.

2.10. Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης κόπωσης (Fatigue Analysis).

Το τέταρτο είδος ανάλυσης **New Fatigue (Σχήμα 2.58)** χρησιμοποιείτε για να διαπιστωθεί αν το υπό μελέτη μοντέλο είναι ευαίσθητο σε κόπωση όταν υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση. Πριν την δημιουργία μιας ανάλυσης κόπωσης πρέπει πρώτα να πραγματοποιηθεί μια στατική ανάλυση. Επίσης, πρέπει να εφαρμοστούν επιπλέον ιδιότητες κατά τον ορισμό των υλικών όσον αφορά τα κριτήρια κόπωσης, έτσι ώστε τα αποτελέσματα της ανάλυσης να είναι έγκυρα. Αρχικά, στο **Load History→Life→Desired Endurance** εισάγετε ο αριθμός των κύκλων ζωής. Στο **Load History→Loading** ορίζεται το πλάτος φόρτισης μέσω δύο

επιλογών, **Constant Amplitude** (Σταθερό πλάτος φόρτισης) και **Variable Amplitude** (Μεταβλητό πλάτος φόρτισης).



Σχήμα 2.58: Παράθυρο ανάλυσης κόπωσης.

Επίσης, υπάρχει και η δυνατότητα επιλογής **Amplitude Type** (μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιείτε η επιλογή **Constant Amplitude**) όπου με τον τρόπο αυτό ο χρήστης μπορεί να διαλέξει τον τύπο του πλάτους. Υπάρχουν τρεις τύποι:

1. **Peak-Peak**
2. **Zero-Peak**
3. **User-Defined**

Ο πρώτος τύπος χρησιμοποιεί έναν ελάχιστο συντελεστή φόρτισης -1.0 και έναν μέγιστο συντελεστή φόρτισης 1.0 και αναφέρεται σε εναλλασσόμενη φόρτιση.

Ο δεύτερος τύπος χρησιμοποιεί έναν ελάχιστο συντελεστή φόρτισης 0 και έναν μέγιστο συντελεστή φόρτισης 1.0 και αναφέρεται σε κυμαινόμενη φόρτιση.

Ο τρίτος τύπος επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει έναν πίνακα και να εισάγει ένα πλήθος τιμών που θα εκφράζουν τον ελάχιστο και μέγιστο συντελεστή φόρτισης.

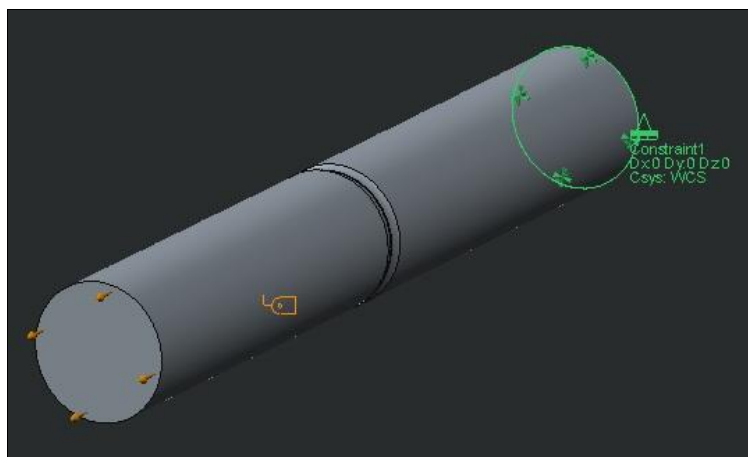
Επιπλέον, υπάρχει η επιλογή **Output→Plotting Grid** και η επιλογή **Calculate factor of safety** με την οποία το πρόγραμμα υπολογίζει ταυτόχρονα και τον συντελεστή ασφαλείας του μοντέλου.

2.10.1 Υπολογισμός ράβδου σε αξονική φόρτιση εντός καθορισμένου αριθμού κύκλων φόρτισης.

Για την περίπτωση αυτή αναπτύχθηκε η επίλυση ενός παραδείγματος μίας χαλύβδινης ράβδου St37-2 (Πίνακας 2.1), διαμέτρου 20mm και μήκους 140mm (Σχήμα 2.60), σύμφωνα με το σχήμα (Σχήμα 2.59).

Ιδιότητες Υλικού				
Density(Kg/m ³)	Poisson's Ratio	Young's Modulus(GPa)	Tensile Yield Stress(Mpa)	Tensile Ultimate Stress(Mpa)
7800	0,28	210	235	360

Πίνακας 2.1: Ιδιότητες χάλυβα St37-2.



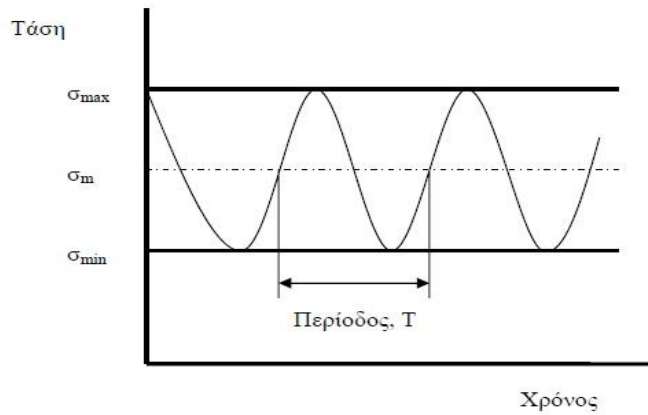
Σχήμα 2.59: Χαλύβδινη ράβδος στην οποία φαίνεται ο ορισμός του φορτίου και του περιορισμού.

D [mm]	d [mm]	r/d	δ, μm	Kt	Kf	ke	ktot	Rm ή ft	σε	σα	σA	σA >> σα
8	7,62	0,394	190	1,29	1,23	0,81	0,424	696	147,7	99,9	75	OXI
10	9,52	0,315	238	1,36	1,29	0,78	0,406	696	141,3	95,6	75	OXI
12	11,43	0,263	286	1,43	1,34	0,74	0,389	696	135,4	91,6	75	OXI
14	13,33	0,225	333	1,49	1,39	0,72	0,376	684	128,5	86,2	75	OXI
16	15,24	0,197	381	1,54	1,43	0,70	0,365	679	124,0	82,9	75	OXI
20	19,05	0,158	476	1,64	1,51	0,66	0,346	679	117,4	78,5	75	OXI
25	23,81	0,126	595	1,73	1,58	0,63	0,330	679	112,1	74,9	75	NAI
30	28,57	0,105	714	1,82	1,66	0,60	0,316	687	108,5	72,9	75	NAI
40	38,10	0,079	952	1,96	1,77	0,57	0,296	687	101,6	68,3	75	NAI
q = 0,80												
D/d =	1,05	d/D =	95,2%									
r [mm] =	3,00	δ/D =	2,4%									
σmax =	300	MPa	σm =	225	MPa							
σmin =	150	MPa	σA =	75	MPa							

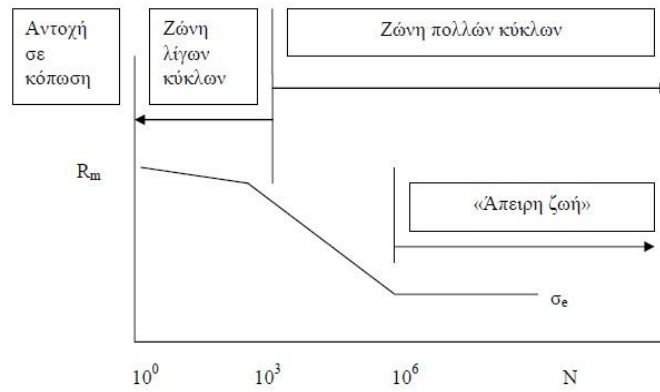
Σχήμα 2.60: Αποτελέσματα του προσομοιώματος για ΧΟΣ διαφόρων διαμέτρων. Οι τιμές του ορίου θραύσεως (Rm ή ft) είναι οι μέσες πειραματικές. Οι τιμές του Kt ελήφθησαν με μεγαλύτερη ακρίβεια (Shigley et al, 1989).

Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3, και τον Ευρωκώδικα EN 1992-1-1, το προϊόν υποβαλλόμενο σε αξονική φόρτιση θα πρέπει να αντέχει ένα καθορισμένο αριθμό κύκλων. Η τάση θα μεταβάλλεται με ημιτονοειδή μορφή (**Σχήμα 2.61**) εντός του καθορισμένου διαστήματος τάσεων (σmin έως σmax) με εύρος 2σA και μέγιστη τιμή σmax. Οι τιμές των δυνάμεων που αντιστοιχούν στο εύρος (2σA) και στη μέγιστη τιμή (σmax) αντίστοιχα, θα υπολογίζονται με βάση την ονομαστική (και όχι την πραγματική) διατομή της ράβδου ή του σύρματος. Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3, ένα κατάλληλο δείγμα ΧΟΣ τοποθετημένο σε μηχανή εφελκυσμού περνάει επιτυχώς τον έλεγχο κόπωσης όταν υφίσταται εναλλασσόμενη φόρτιση με παραμέτρους:

- Η μέγιστη τάση σmax θα είναι 300 MPa. Το εύρος διακύμανσης τάσεων, 2σA θα είναι 150 MPa, οπότε σmin = 150 MPa.
- Ο καθορισμένος αριθμός κύκλων στον οποίο θα πρέπει να αντέχει το δοκίμιο, θα είναι $2 \cdot 10^6$.
- Η συχνότητα μεταβολής του φορτίου θα είναι μικρότερη ή ίση από 200 Hz.
- Το ελάχιστο ελεύθερο μήκος δοκιμίου θα είναι το max(140mm, 14d).

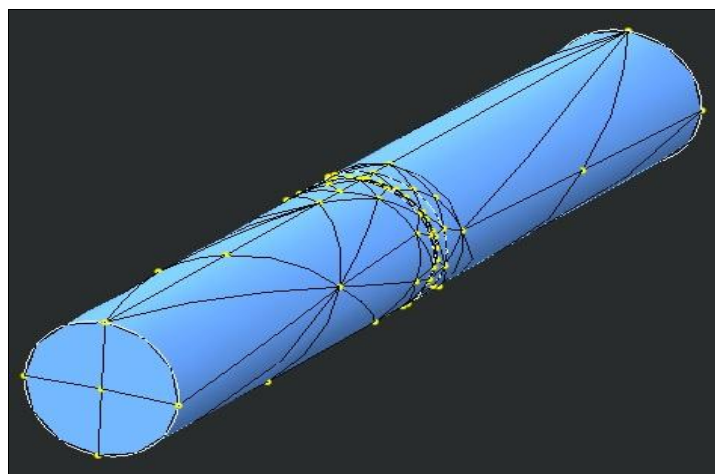


Σχήμα 2.61: Μορφή επιβαλλόμενης τάσεως στο δοκίμιο για έλεγχο κόπωσης.



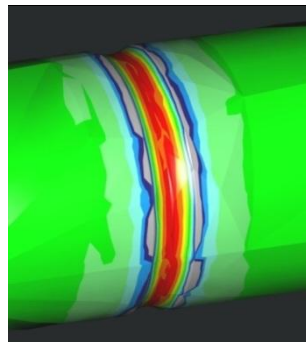
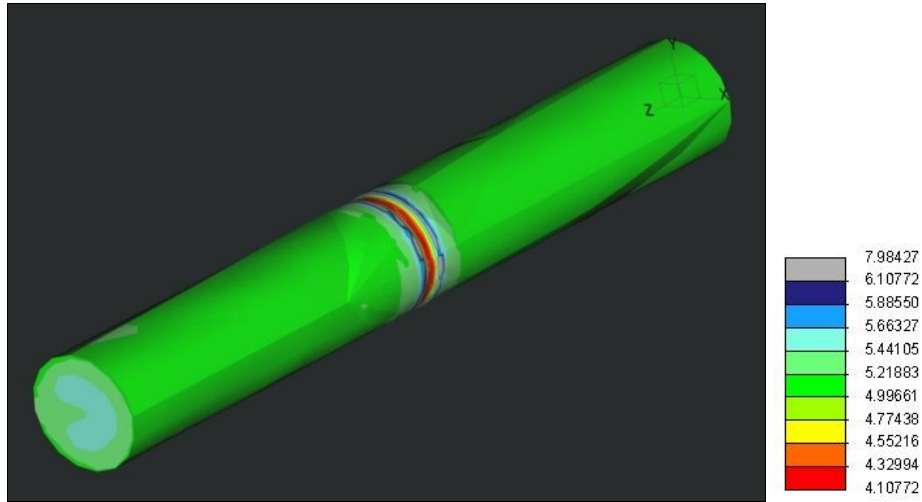
Σχήμα 2.62: Τυπική μορφή γραφήματος S-N ή γραμμών Wöhler.

Στην ράβδο δημιουργήθηκαν 516 Solid Tetra Elements, 781 Edge και 1143 Face χρησιμοποιώντας το είδος Edge Length by Curvature (**Σχήμα 2.63**).

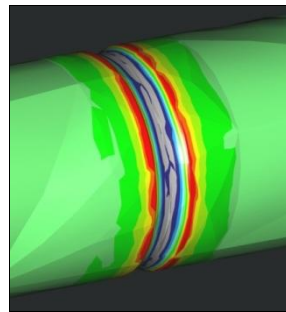
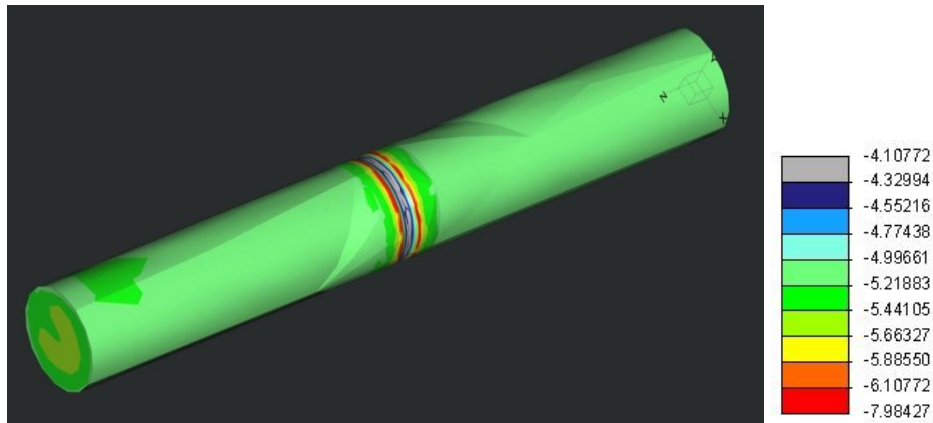


Σχήμα 2.63: Διακριτοποιημένη χαλύβδινη ράβδος.

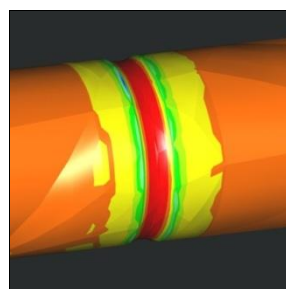
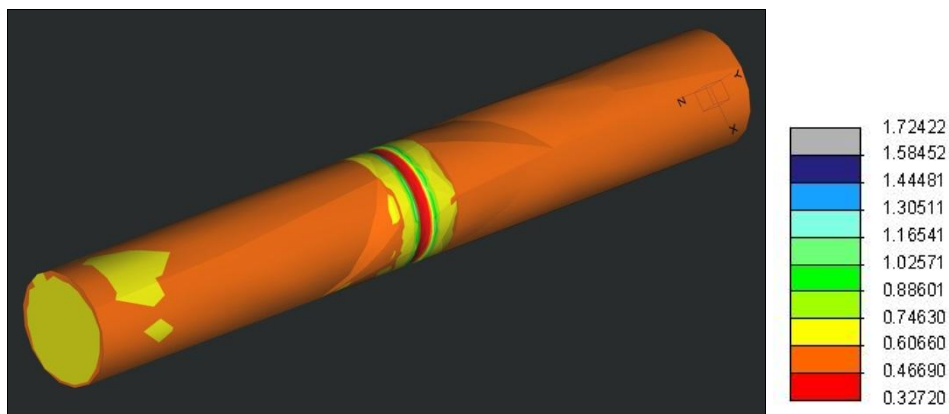
Αρχικά, εκτελέστηκε μια στατική ανάλυση στο μοντέλο η οποία είναι προαπαιτούμενη από το πρόγραμμα. Εφόσον τηρηθήκαν οι παραπάνω προϋποθέσεις και επιλέχτηκε το είδος της ανάλυσης, το πρόγραμμα υπολόγισε το μοντέλο και έδωσε τα εξής αποτελέσματα:



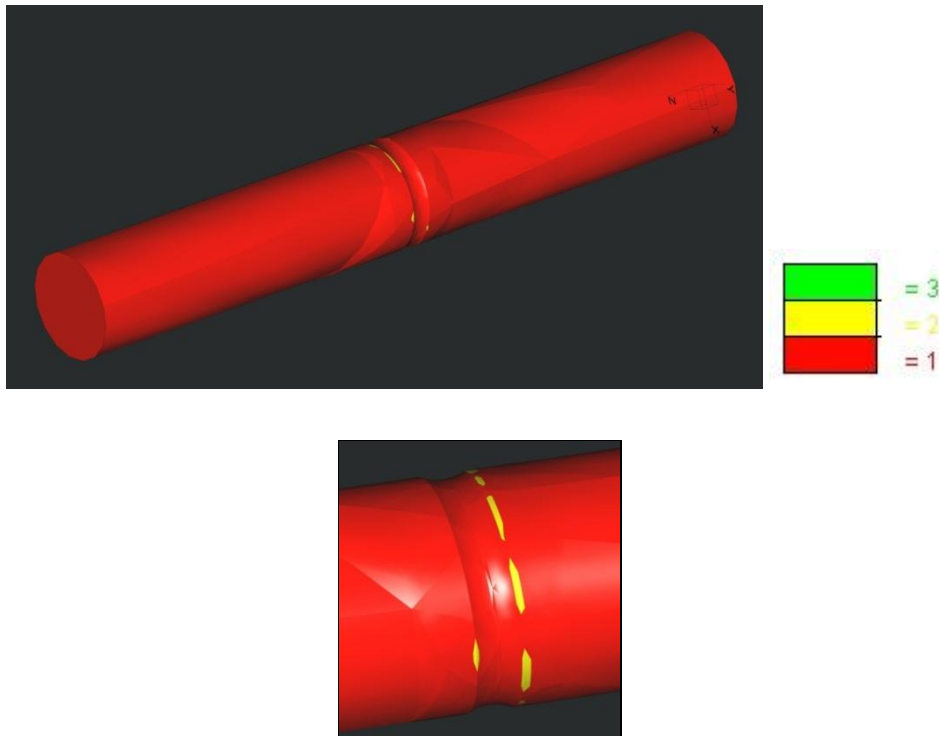
Σχήμα 2.64: Αποτελέσματα Fatigue Log Life(WCS). Βάση της χρωματικής κλίμακας και των τιμών που αναγράφονται διακρίνετε ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία, σε οποιοδήποτε σημείου της ράβδου (Λόγω της εκθετικής φύσης της κόπωσης, είναι χρήσιμο να εκφράσουμε τη ζωή ως λογάριθμο).



Σχήμα 2.65: Αποτελέσματα Fatigue Log Damage (WCS). Είναι η αναλογία μεταξύ της συσσωρευμένης κόπωσης των κύκλων φόρτισης και του συνολικού αριθμού των κύκλων μέχρι την βλάβη.



Σχήμα 2.66: Αποτελέσματα Fatigue Factor of Safety (WCS). Είναι ο επιτρεπόμενος συντελεστής ασφαλείας του μοντέλου σε σχέση με το φορτίο εισόδου.



Σχήμα 2.67: Αποτελέσματα Fatigue Confidence of Life (WCS). Είναι η αναλογία μεταξύ της ζωής που πρόβλεψε ο χρήστης και αυτής που τελικά βγήκε από το σχέδιο. Το κόκκινο χρώμα συμβολίζει πως το μοντέλο αντέχει από 0 κύκλους φόρτισης έως και $2 \cdot 10^6$ που εισήχθη ως δεδομένο στην αρχή. Το κίτρινο χρώμα συμβολίζει πως το μοντέλο αντέχει από τους κύκλους φόρτισης που του εδόθησαν αρχικά έως και τρεις φορές τον αριθμό αυτό. Και τέλος το πράσινο χρώμα συμβολίζει οποιοδήποτε αριθμό κύκλων φόρτισης πάνω από την οριακή ζωή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η χαλύβδινη ράβδος θα αντέξει την διαδικασία αυτή.

2.11. Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης προέντασης (Prestress Analysis).

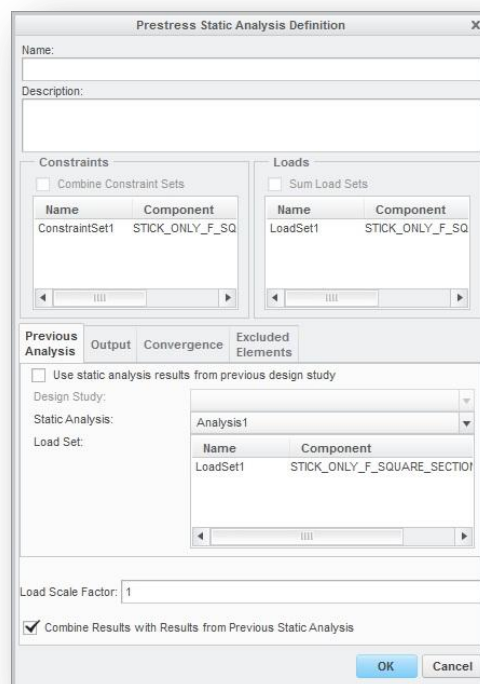
Το πέμπτο είδος ανάλυσης **New Prestress** εξετάζει παρόμοιες πτυχές της δομικής συμπεριφοράς ενός μοντέλου με την στατική ανάλυση. Δίνονται δύο επιλογές ανάλυσης:

- **Static**
- **Modal**

Σύμφωνα με την πρώτη **Static** επιλογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στατική ανάλυση προέντασης για να προσομοιωθεί πως μια προεντεταμένη δομή επηρεάζει τις τάσεις, παραμορφώσεις και μετατοπίσεις ενός μοντέλου (**Σχήμα 2.68**). Προεντεταμένη δομή είναι εκείνη της οποίας η συνολική ακεραιότητα, σταθερότητα και ασφάλεια εξαρτάται κατά κύριο λόγο από μια προένταση. Προένταση είναι η σκόπιμη δημιουργία μόνιμων τάσεων σε μια δομή, με σκοπό την βελτίωση της

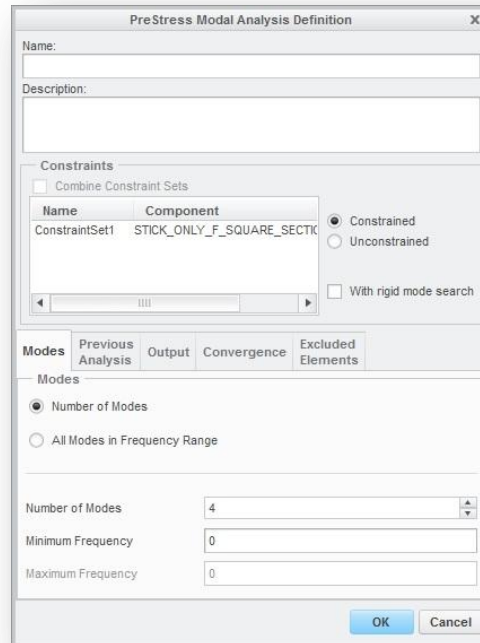
απόδοσης της υπό διάφορες συνθήκες υπηρεσίας. Με την στατική ανάλυση προέντασης μπορεί να καθοριστεί η ενίσχυση ή η αποδυνάμωση ενός μοντέλου λόγω των εφαρμοζόμενων φορτίων.

Πριν την δημιουργία μιας στατικής ανάλυσης προέντασης πρέπει πρώτα να πραγματοποιηθεί μια στατική ανάλυση. Αρχικά, πρέπει να επιλεγούν **Constraints** και **Loads** (η διαδικασία επιλογής τους είναι παρόμοια με των υπόλοιπων αναλύσεων). Ύστερα πρέπει να ορισθεί συντελεστής φόρτισης από **Previous Analysis** → **Load Scale Factor**. Στο **Output** → **Calculate** δηλώνονται τα μεγέθη (**Stresses, Rotations, Reactions**) τα οποία ο χρήστης επιθυμεί να συμπεριληφθούν στα αποτελέσματα που θα εξαχθούν προς ανάγνωση. Στο **Convergence** → **Method** υποστηρίζονται μόνο **[(QC),(MPA)]**. Επίσης υπάρχει και η επιλογή **Excluded Elements**. Το είδος αυτής της ανάλυσης δεν υποστηρίζει περιπτώσεις όπου το πρόγραμμα διαχειρίζεται μοντέλα τα οποία απαιτούν υπολογισμό μεγάλων παραμορφώσεων, τον υπολογισμό μοντέλων (συναρμολογημένων εξαρτημάτων) όταν οι μεταξύ των εξαρτημάτων σχέσης έχουν οριστεί ως **Contact**, υπερελαστική συμπεριφορά μοντέλων, πλαστική συμπεριφορά μοντέλων και την μη γραμμικότητα μοντέλων ελατηρίων.



Σχήμα 2.68: Παράθυρο εφαρμογής φορτίου προ έντασης για στατική ανάλυση.

Σύμφωνα με την δεύτερη επιλογή **Modal** μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθούν οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές ενός μοντέλου (**Σχήμα 2.69**).



Σχήμα 2.69: Παράθυρο εφαρμογής φορτίου προ έντασης για ανάλυση φυσικών συχνοτήτων.

Πριν την δημιουργία μιας προεντατικής ανάλυσης φυσικών συχνοτήτων, πρέπει πρώτα να πραγματοποιηθεί μια στατική ανάλυση. Όλα τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για την πραγματοποίηση αυτής της ανάλυσης είναι ακριβώς τα ίδια με την απλή ανάλυση φυσικών συχνοτήτων.

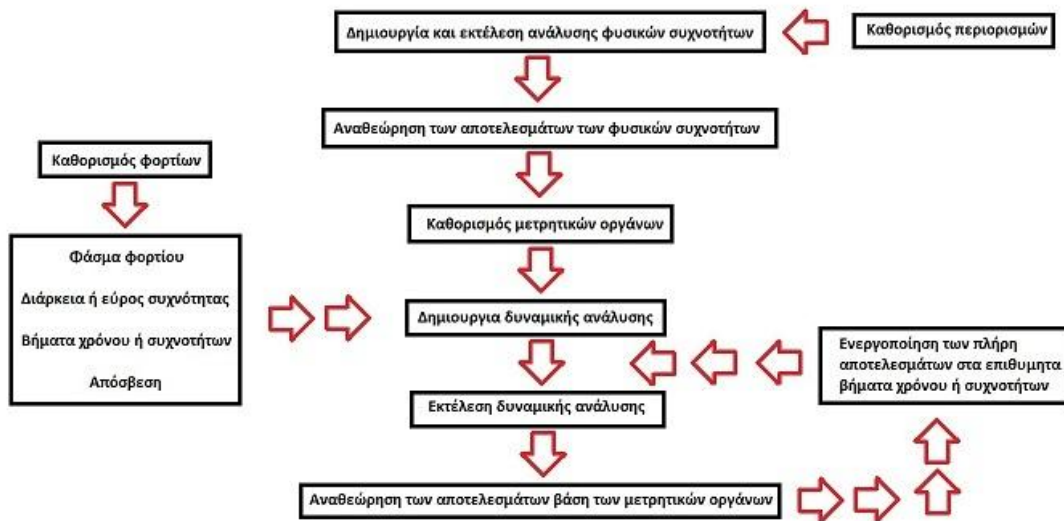
2.12. Είδη δυναμικών αναλύσεων που υποστηρίζονται από το Creo Simulate.

Το έκτο είδος ανάλυσης **New Dynamic** χρησιμοποιείτε για την επίλυση μοντέλων υπό δυναμικές φορτίσεις. Δίνονται τέσσερις επιλογές ανάλυσης:

1. **Time**
2. **Frequency**
3. **Shock**
4. **Random**

Το παρακάτω διάγραμμα ροής (**Σχήμα 2.70**) δείχνει τα βήματα που απαιτούνται για τη λειτουργία μιας δυναμικής ανάλυσης **Time**, **Frequency**, **Shock** και **Random**.

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ



Σχήμα 2.70: Διαδικασία εφαρμογής της δυναμικής ανάλυσης.

“Απαραίτητο εργαλείο για κάθε δυναμική ανάλυση είναι οι τιμές απόσβεσης του συστήματος που μελετάτε” (Σχήμα 2.71).

Typical Damping Values

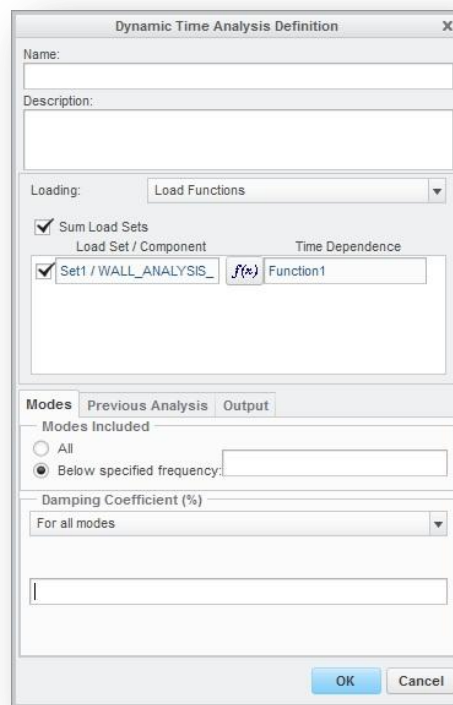
Small machined metal or ceramic parts	0.01 - 0.1 %
Small plastic parts	1.0 - 5.0%
Larger machined metal or ceramic parts	0.1 - 0.2 %
Metal or ceramic assemblies (glued)	0.2 - 1.0%
Welded assemblies	0.5 - 2.0%
Bolted assemblies	1.0 - 2.0%
Constrained layer damped assemblies	2.0 - 10.0%
Building structures	5.0 - 10.0%
Shock mount dampers	5.0 - 30.0%

Lower damping will result in higher amplitude response.

Σχήμα 2.71: Τυπικές τιμές απόσβεσης.

2.12.1. Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης χρόνου (Time Analysis).

Σύμφωνα με την πρώτη επιλογή **Time** ο χρήστης μπορεί να ορίσει φορτία, των οποίων το μέγεθος, η διεύθυνση ή και η θέση μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου (Σχήμα 2.72).



Σχήμα 2.72: Παράθυρο εφαρμογής φορτίων συναρτήσεως του χρόνου.

Για την διεξαγωγή της ανάλυσης χρειάζεται να ορισθούν, φορτίο-α στο **Loading**→**Load Functions**→**Sum Load Sets**(αν εφαρμόζεται πλήθος φορτίων)→**Load Set/Component** ή η επιλογή **Loading**→**Base Excitation** η οποία υποθέτει ότι το φορτίο εισόδου θα διεγείρει οποιοδήποτε τμήμα της δομής που έχει έναν περιορισμό ή συνδέεται με ένα ελατήριο προς την γείωση. Η διέγερση ορίζεται πάντα ως μία γραμμική επιτάχυνση. Δίνονται τρεις επιλογές: **Uni-directional Translation**(επιλέγετε η διεύθυνση και το μέγεθος της διέγερσης), **Translations & Rotations**(προσθήκη τιμών διέγερσης και στους έξι βαθμούς ελευθερίας), **Translations at 3 Points**(προσθήκη τιμών διέγερσης σε τρία σημεία του μοντέλου στους τρεις άξονες μετατοπίσεων XYZ).

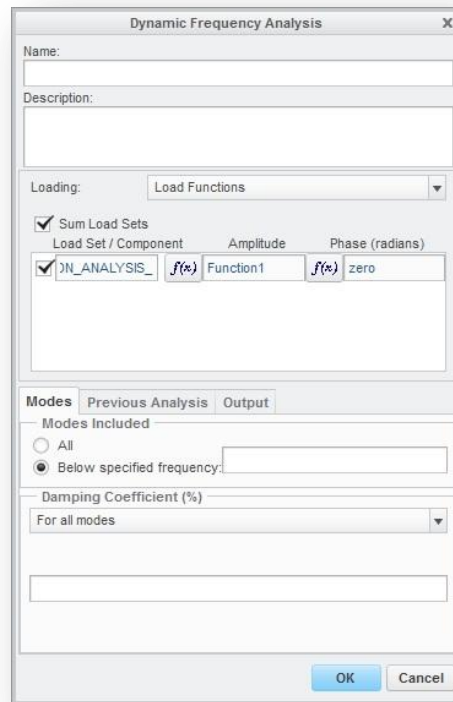
Επίσης, πρέπει να ορισθεί ο συσχετισμός των φορτίων συναρτήσεως του χρόνου στο **Time Dependence**, η εφαρμογή της ανάλυσης σε όλες τις ιδιομορφές-ιδιοσυχνότητες του μοντέλου μέσω (**Modes**→**Modes Included**→**All**) ή εντός καθορισμένου εύρους συχνότητας (**Modes**→**Modes Included**→**Below specified frequency**), συντελεστή απόσβεσης στο **Damping Coefficient(%)** μέσω τριών επιλογών **For all modes**(σε όλες τις ιδιομορφές-ιδιοσυχνότητες), **For individual modes**(για κάθε ιδιοσυχνότητα-ιδιομορφή ξεχωριστά), **Function of frequency**(δημιουργία πίνακα ο οποίος χρησιμοποιεί τιμές συχνοτήτων συναρτήσεως συντελεστών απόσβεσης).

Στο **Output→Calculate**(για **Loading→Load Functions**) δηλώνονται τα μεγέθη (**Stresses, Rotations**) για (**Loading→Base Excitation**) δηλώνονται τα μεγέθη [**Stresses, Rotations, Mass Participation Factors (Mode->αριθμός ιδιομορφής, Frequency->συχνότητα της αναγραφόμενης ιδιομορφής, Mass Participation Factor-> δείκτης της σχετικής συμμετοχής της ιδιομορφής, Effective Mass->δείκτης του ποσοστού συμμετοχής της ιδιομορφής**. Αυτή είναι η αναλογία του παράγοντα συμμετοχής της μάζας προς την συνολική μάζα στο τετράγωνο, **Total Effective Mass-> δείκτης του ποσοστού συμμετοχής των ιδιομορφών συμπεριλαμβανομένων και των ενδεδειγμένων ιδιομορφών**. Αυτό είναι το άθροισμα των ενεργών μαζών των ιδιομορφών συμπεριλαμβανομένων και των ενδεδειγμένων ιδιομορφών)] και για **Output→Calculate→Displacements, Velocities, Accelerations Relative To:** δηλώνεται η γείωση (σημείο στο χώρο που δεν κινείται) και οι στηρίξεις (π.χ ελατήρια).

Μέσω του **Output→Output Steps** υπάρχουν δύο επιλογές **Automatic Steps within Range** και **User-defined Output Steps** σύμφωνα με τις οποίες μπορεί να οριστεί το εύρος του χρόνου που επιθυμεί ο χρήστης και ο συντελεστής φόρτισης, όπου συμβάλει στην ομαλότερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων και στον καλύτερο έλεγχο των φορτίων που θα ορισθούν. Πριν την δημιουργία μιας ανάλυσης **Time** πρέπει πρώτα να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση φυσικών συχνοτήτων.

2.12.2. Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης συχνοτήτων (**Frequency Analysis**).

Σύμφωνα με την δεύτερη επιλογή **Frequency** τα φορτία εισάγονται σε μια κατασκευή συναρτήσει της συχνότητας. Για παράδειγμα μια τέτοια περίπτωση μπορεί να είναι μια δοκιμή ημιτονοειδούς σάρωσης μιας βάσης ενός αναδευτήρα χρησιμοποιώντας καθαρή ημιτονοειδή είσοδο. Το φορτίο μπορεί να είναι φορτίο διέγερσης-επιτάχυνσης της βάσης ή δυνάμεις που εφαρμόζονται στη δομή του μοντέλου (**Σχήμα 2.73**).



Σχήμα 2.73: Παράθυρο εφαρμογής φορτίων συναρτήσεως της συχνότητας.

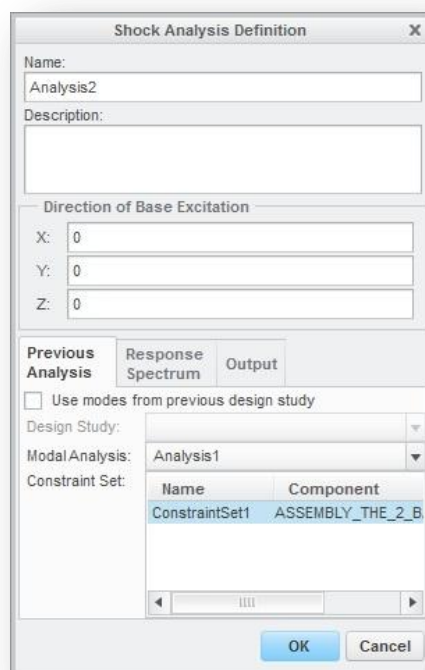
Αρχικά, πρέπει να ορισθούν φορτίο-α στο **Loading**→**Load Functions**→**Sum Load Sets**(αν εφαρμόζεται πλήθος φορτίων)→**Load Set/Component** ή **Loading**→**Base Excitation**. Υπάρχει η δυνατότητα μέσω του **Load Set/Component**→**Amplitude** να ορισθεί το πλάτος του ημιτονοειδούς φορτίου. Αν εφαρμόζονται περισσότερα από ένα φορτία στο μοντέλο τότε μπορεί να οριστεί η φάση του φορτίου μέσω του **Load Set/Component**→**Phase(radians)**. Ύστερα, πρέπει να οριστεί η εφαρμογή της ανάλυσης σε όλες τις ιδιομορφές-ιδιοσυχνότητες του μοντέλου μέσω (**Modes**→**Modes Included**→**All**) ή εντός καθορισμένου εύρους συχνότητας (**Modes**→**Modes Included**→**Below specified frequency**) και ο συντελεστής απόσβεσης στο **Damping Coefficient(%)**. Στο **Output**→**Calculate**(για **Loading**→**Load Functions**) δηλώνονται τα μεγέθη (**Stresses, Rotations**) για (**Loading**→**Base Excitation**) δηλώνονται τα μεγέθη [**Stresses, Rotations, Mass Participation Factors**(αντιπροσωπεύει το ποσό της δώσας ιδιομορφικής μάζας του συστήματος που συμμετέχει στην λειτουργία αυτή)] και για **Output**→**Calculate**→**Displacements, Velocities, Accelerations Relative To:** δηλώνεται η γείωση (σημείο στο χώρο που δεν κινείται) και οι στηρίξεις (π.χ ελατήρια).

Μέσω του **Output**→**Output Steps** υπάρχουν δύο επιλογές **Automatic Steps within Range** και **User-defined Output Steps** σύμφωνα με τις οποίες μπορεί να

οριστεί το εύρος της συχνότητας που επιθυμεί ο χρήστης και ο συντελεστής φόρτισης, όπου συμβάλει στην ομαλότερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων και στον καλύτερο έλεγχο των φορτίων που θα ορισθούν. Πριν την δημιουργία μιας ανάλυσης **Frequency** πρέπει πρώτα να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση φυσικών συχνοτήτων.

2.12.3. Διαδικασία για την διεξαγωγή ανάλυσης κρούσης (Shock Analysis).

Η τρίτη επιλογή **Shock** αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό ή την εκτίμηση της μέγιστης απόκρισης της κατασκευής σε ένα κρουστικό φορτίο ή ένα παροδικό φορτίο εισόδου, όπως μια σεισμική δόνηση ή μια έκρηξη (**Σχήμα 2.74**). Το φορτίο εισόδου είναι η διέγερση της βάσης με ένα φάσμα απόκρισης.



Σχήμα 2.74: Παράθυρο ορισμού ανάλυσης κρούσης.

Για την εκτέλεση αυτής της ανάλυσης πρέπει αρχικά να ορισθούν οι περιορισμοί των κινήσεων του μοντέλου που θα εφαρμοστούν σε σχέση με την βάση διέγερσης στους άξονες XYZ του προκαθορισμένου συστήματος συντεταγμένων στο **Direction of Base Excitation** και οι τιμές συχνοτήτων. Στο **Response Spectrum** $\rightarrow f(x)$ μπορεί να επιλεγεί μια συνάρτηση συχνοτήτων για να καθοριστεί η καμπύλη απόκρισης του φάσματος. Η προεπιλεγμένη καμπύλη απόκρισης του φάσματος είναι ομοιόμορφη, πράγμα που σημαίνει ότι η εξάρτηση της συχνότητας της βάσης διέγερσης είναι ομοιόμορφη σε όλο το φάσμα

συχνοτήτων. Επίσης, πρέπει να ορισθεί το είδος του φάσματος αποκρίσεις στο **Spectrum of:(Displacement, Velocity, Acceleration)** και η μέθοδος συνδυασμού ιδιομορφών [**SRSS(Square-Root-of-Sum-of-Squares)** ή **Absolute sum**].

Στην **SRSS(Square-Root-of-Sum-of-Squares)** η απάντηση x δίνεται από:

$$x = \sqrt{\sum_{i=1}^m x_i^2} \max \quad (1)$$

Στην πρώτη μέθοδο συνδυασμού ιδιομορφών **SRSS(Square-Root-of-Sum-of-Squares)** οι μέγιστες τιμές των ιδιομορφικών αποκρίσεων τετραγωνίζονται, συνοψίζονται και τότε η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος λαμβάνεται για να επιτευχθεί η συνολική απόκριση αιχμής. Ο συνδυαστικός αυτός κανόνας παρέχει γενικά μια καλή εκτίμηση της συνολικής απόκρισης αιχμής της κατασκευής και χωρίζονται με φυσικές συχνότητες. Όταν οι φυσικές συχνότητες δεν είναι πολύ καλά διαχωρισμένες, το σφάλμα στην εκτίμηση της συνολικής απόκρισης αιχμής καθίσταται σημαντικό. Η υποκείμενη έννοια της εξίσωσης (1) είναι ότι οι ιδιομορφικές αποκρίσεις αιχμής υποτίθεται ότι είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές. Ωστόσο, υπάρχει πάντα κάποιος βαθμός συσχέτισης μεταξύ των ιδιομορφικών αποκρίσεων, ο οποίος μπορεί να είναι πολύ μικρός και συνεπώς μπορεί να αγνοηθεί όταν οι φυσικές συχνότητες είναι καλά διαχωρισμένες.

Η δεύτερη μέθοδος **Absolute sum** σημαίνει το άθροισμα των απόλυτων μέγιστων τιμών της απόκρισης. Έτσι, αν το x είναι η ποσότητα της απόκρισης του **Absolute sum** τότε προκύπτει:

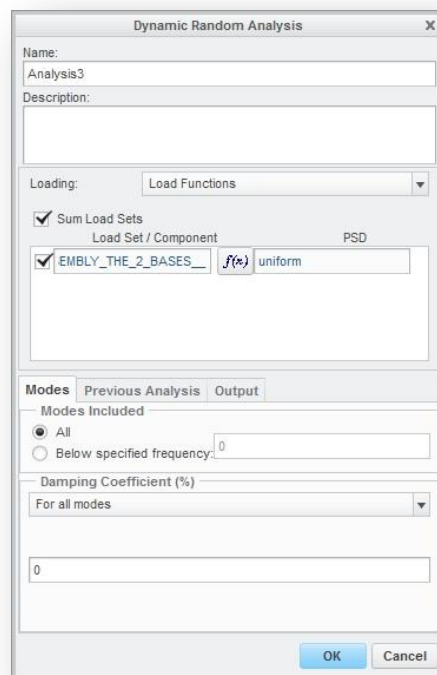
$$x = \sum_{i=1}^m |x_i| \max \quad (2)$$

στην οποία το $|x_i| \max$ είναι η απόλυτη τιμή της μέγιστης απόκρισης για την i ιδιομορφή της δόνησης. Ο συνδυαστικός κανόνας δίνει ένα άνω φράγμα στην υπολογισμένη τιμή της συνολικής απόκρισης για δύο λόγους: **(i)** υποτίθεται ότι η μέγιστες ιδιομορφικές αποκρίσεις συμβαίνουν ταυτόχρονα και **(ii)** αγνοεί το αλγεβρικό πρόσημο της απόκρισης. Η πραγματική χρονική ανάλυση δείχνει ότι οι μέγιστες αποκρίσεις (λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα αρνητικά όσο και τα θετικά μέγιστα) συμβαίνουν σε διαφορετικούς χρόνους σε διαφορετικές ιδιομορφές. Επίσης, η συνολική μέγιστη απόκριση συμβαίνει σε διαφορετικό χρόνο από εκείνες των μέγιστων ιδιομορφών. Έτσι, ο συνδυαστικός κανόνας παρέχει μια συντηρητική εκτίμηση της συνολικής μέγιστης απόκρισης και επομένως δεν χρησιμοποιείται πολύ συχνά για τον σεισμικό σχεδιασμό κατασκευών.

Και τέλος, στο **Output**→**Calculate** δηλώνονται τα μεγέθη [**Stresses, Rotations, Mass Participation Factor**]. Πριν την δημιουργία μιας ανάλυσης **Shock** πρέπει πρώτα να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση φυσικών συχνοτήτων. Το Creo Simulate υπολογίζει το **RMS [(root mean square)=μέση τετραγωνική ρίζα]** αξία του μέτρου πάνω από την περιοχή (εύρος) συχνοτήτων. Αυτή η επιλογή είναι διαθέσιμη για ορισμένες ποσότητες.

2.12.4. Διαδικασία για την διεξαγωγή στοχαστικής ανάλυσης (Random Analysis).

Τέλος η πέμπτη επιλογή **Random** μετρά την απόκριση ενός συστήματος σε μια δυναμική φασματική συνάρτηση πυκνότητας (**PSD**) **Power Spectral Density (Σχήμα 2.75)**. Η είσοδος του φορτίου είναι δύναμη ή επιτάχυνση (**PSD**) σε ένα εύρος συχνοτήτων (**Σχήμα 2.76**). Οι καμπύλες φασματικής πυκνότητας που λαμβάνονται με δειγματοληψία κατά την διάρκεια μιας περιόδου, όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος δειγματοληψίας, τόσο πιο ακριβής είναι η καμπύλη.



Σχήμα 2.75: Παράθυρο ορισμού ανάλυσης δόνησης.

Σε μια ανάλυση **Random** το πρόγραμμα υπολογίζει αυτές τις φασματικές πυκνότητες ενέργειας και τις **RMS** τιμές των μετατοπίσεων, ταχυτήτων, επιταχύνσεων σε σημεία του μοντέλου απαντώντας σε ένα φορτίο το οποίο καθορίζεται (**PSD**). Υπολογίζει επίσης, όλες τις έγκυρες μετρήσεις (που μπορούν να παρθούν σε δυναμικές αναλύσεις) που έχουν ορισθεί στο μοντέλο. Αν ο χρήστης ενδιαφέρεται για αξιολόγηση των **RMS** αποτελεσμάτων τότε η τοποθέτηση φορτίων

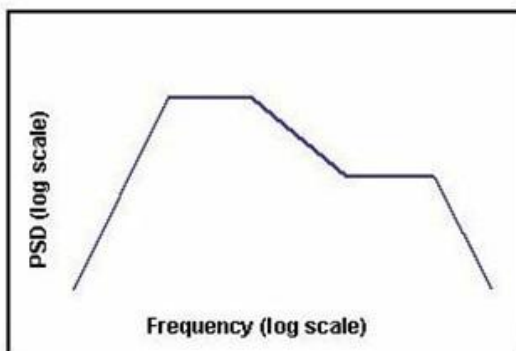
στο μοντέλο μπορεί να περιγραφεί στατιστικά με μία **Random** ανάλυση. Αν όμως ο χρήστης ενδιαφέρεται για αξιολόγηση των **(PSD)** τότε ισχύει η περίπτωση όπου χρησιμοποιείτε βάση διέγερσης και όχι φορτίο. Υπάρχει η δυνατότητα να παρθούν αποτελέσματα για το **(PSD)** μιας ποσότητας σε ένα σημείο με τον καθορισμό των ανάλογων μέτρων. Μπορεί επίσης να ορισθούν τα μέτρα που δίνουν την αξία **RMS** ή την φαινομενική συχνότητα της ποσότητας.

Μπορεί ο χρήστης να ορίσει το ισοδύναμο μίας υπόθεσης βάσης διέγερσης με την τοποθέτηση ενός φορτίου βαρύτητας στο μοντέλο. Το **(PSD)** στην περίπτωση αυτή είναι ίσο με το τετράγωνο της βαρύτητας πάνω από τη συχνότητα (**PSD = Z ^ 2 / F**). Το φορτίο μπορεί να είναι φορτίο διέγερσης-επιτάχυνσης της βάσης ή δυνάμεις που εφαρμόζονται στη δομή του μοντέλου. Αρχικά, πρέπει να ορισθούν φορτίο-α στο **Loading→Load Functions→Sum Load Sets(αν εφαρμόζεται πλήθος φορτίων)→Load Set/Component** ή **Loading→Base Excitation**. Υπάρχει η δυνατότητα μέσω του **Load Set/Component→Amplitude** να ορισθεί το **(PSD)**. Ύστερα, πρέπει να οριστεί η εφαρμογή της ανάλυσης σε όλες τις ιδιομορφές-ιδιοσυχνότητες του μοντέλου μέσω **(Modes→Modes Included→All)** ή εντός καθορισμένου εύρους συχνότητας **(Modes→Modes Included→Below specified frequency)** και ο συντελεστής απόσβεσης στο **Damping Coefficient(%)**.

Random Vibration Input

Η είσοδος της Random Vibration analysis δεν είναι περιοδική. Ορίζεται ως μια καμπύλη φασματικής πυκνότητας ισχύος (PSD) πάνω από κάποια ζώνη συχνοτήτων.

Οι επιταχύνσεις είναι παρούσες συνεχώς, σε όλες τις συχνότητες για το δεδομένο εύρος ζώνης.



PSD Units
$\frac{\text{Acceleration}^2}{\text{Hz}}$
$\frac{\text{Velocity}^2}{\text{Hz}}$
$\frac{\text{Displacement}^2}{\text{Hz}}$
$\frac{\text{Load}^2}{\text{Hz}}$

Οι τυπικές PSD καμπύλες εισόδου ορίζονται ως

$$\frac{G^2}{\text{Hz}}$$

Αυτά πρέπει να μετατρέπονται σε μονάδες επιτάχυνσης. Πολλαπλασιάζονται με την βαρύτητα

Σχήμα 2.76: Βασικές αρχές της ανάλυσης δόνησης.

Στο **Output→Calculate(για Loading→Load Functions)** δηλώνονται τα μεγέθη **(Full RMS Results for Displacement and Stresses)** για **(Loading→Base Excitation)** δηλώνονται τα μεγέθη **[Full RMS Results for Displacement and Stresses, Mass Participation Factors** και για **Output→Calculate→Displacements, Velocities, Accelerations Relative To:** δηλώνεται η γείωση (σημείο στο χώρο που δεν κινείται) και οι στηρίξεις (π.χ ελατήρια).). Μέσω του **Output→Output Steps** υπάρχουν δύο επιλογές **Automatic Steps within Range** και **User-defined Output Steps** σύμφωνα με τις οποίες μπορεί να οριστεί το εύρος της συχνότητας που επιθυμεί ο χρήστης και ο συντελεστής φόρτισης, όπου συμβάλει στην ομαλότερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων και στον καλύτερο έλεγχο των φορτίων που θα ορισθούν. Πριν την δημιουργία μιας ανάλυσης **Random** πρέπει πρώτα να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση φυσικών συχνοτήτων.

Σημείωση: RMS Μέτρα και αποτελέσματα για Random Analysis ...

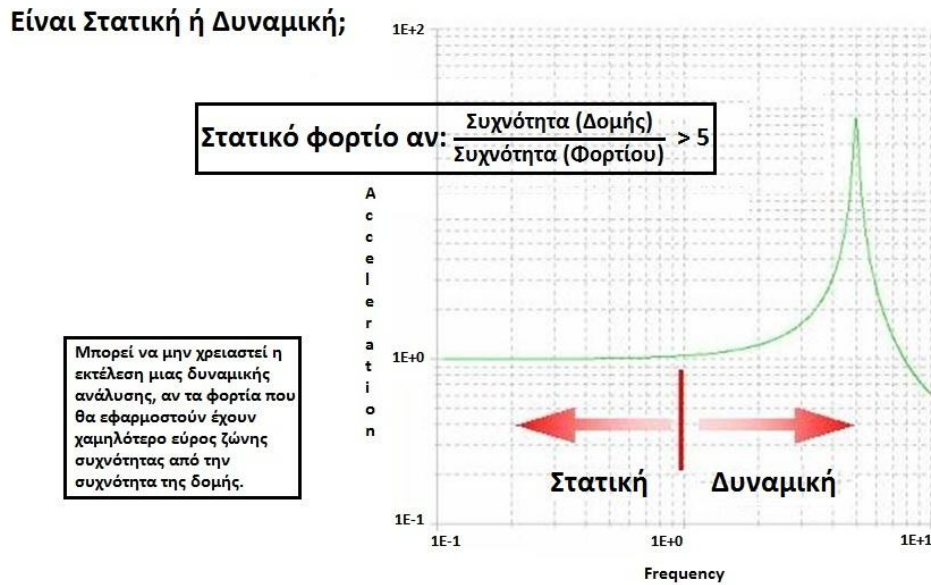
Συνήθως τα πιο σημαντικά μέτρα για **Random Vibration Analysis** προβλήματα είναι τα μέτρα **RMS**. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όλες οι συχνότητες λειτουργούν ταυτόχρονα και οι τιμές **RMS** αντιπροσωπεύουν την τετραγωνική ρίζα της περιοχής κάτω από την καμπύλη **PSD**. Όταν τα **RMS** μέτρα που δημιουργήθηκαν ή η επιλογή για τον υπολογισμό πλήρη αποτελέσματα **RMS** έχει επιλεγεί, το πρόγραμμα πρέπει να υπολογίζει ένα πλήρες σύνολο των αποτελεσμάτων της μετατόπισης και της τάσης σε κάθε βήμα συχνότητας. Αυτό θα αυξήσει σημαντικά το χρόνο εκτέλεσης μερικές φορές κατά τάξεις μεγέθους.

$$RMS = (PSD * (f2 - f1))^{\frac{1}{2}}$$

Η **Random Vibration Analysis** θα υπολογίσει RMS τιμές για κάθε κατεύθυνση μετατόπισης και συνιστώσα της τάσης. Δεδομένου ότι αυτές οι τιμές είναι Root-Mean-Square (RMS) θα είναι πάντα θετικές. Αυτό σημαίνει ότι ο συνδυασμός αυτών των τιμών για να ληφθεί ένα μέγιστο προκύπτουν δεν είναι αμιγώς έγκυρος. Πολλοί κώδικες πεπερασμένων στοιχείων συμπεριλαμβανομένων του **Creo Simulate** θα υπολογίσουν τη μέγιστη μετατόπιση, τις von Mises τάσης ή τις κύριες τάσεις με βάση τα αποτελέσματα του **Random Vibration**. Είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι οι υπολογισμοί αυτοί βασίζονται σε όλες τις θετικές τιμές των συνιστωσών και δεν θα είναι ακριβής.

Το πρώτο βήμα πριν την εκτέλεση μιας δυναμικής ανάλυσης είναι να καθοριστεί εάν είναι απαραίτητο να γίνει η δυναμική ανάλυση (**Σχήμα 2.77**). Για να γίνει αυτό θα πρέπει να υπάρχει κάποια εκτίμηση από την πρώτη φυσική συχνότητα της δομής είτε με την εκτέλεση ενός υπολογισμού με το χέρι ή ένα μια ανάλυση

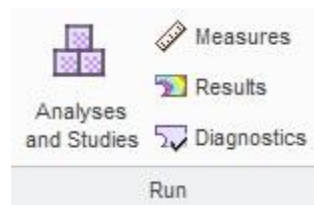
φυσικών συχνοτήτων. Υπάρχει ένας κανόνας που λέει ότι εάν η πρώτη φυσική συχνότητα της δομής είναι 5 φορές η συχνότητα του δυναμικού φορτίου, τότε η κατασκευή θα συμπεριφέρεται σαν το φορτίο να ήταν στατικό και τότε η δυναμική ανάλυση δεν είναι αναγκαία. Καθώς η συχνότητα της δομής πλησιάζει πιο κοντά στην συχνότητα του φορτίου εισόδου θα παρθεί κάποια δυναμική διεύρυνση και τότε μια δυναμική ανάλυση μπορεί να είναι απαραίτητη.



Σχήμα 2.77: Διαδικασία επιλογής του είδους της ανάλυσης.

2.13. Μέθοδοι εξαγωγής αποτελεσμάτων (Results).

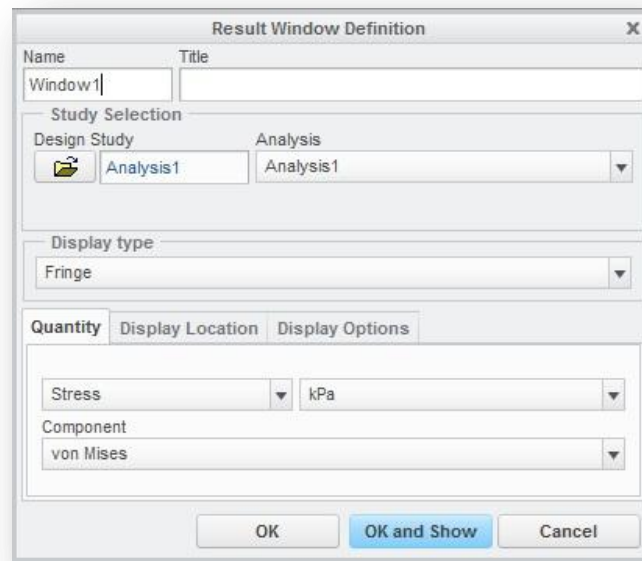
Για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων κάποιας ανάλυσης γίνεται μέσω της πρώτης καρτέλας επιλογών **Home**, στον έκτο τομέα **Run**. Ο τομέας αυτός συμπεριλαμβάνει τέσσερις επιλογές (Σχήμα 2.78):



Σχήμα 2.78: Τομέας Run.

- **Analyses and Studies**
- **Measures**
- **Results**
- **Diagnostics**

Οι πρώτες δύο επιλογές έχουν προαναφερθεί είδη. Είτε μέσω της επιλογής **Results** είτε μέσω της επιλογής **Analyses and Studies** ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εμφανίσει τα αποτελέσματα με τον τρόπο που επιθυμεί ο ίδιος. Αφού λοιπόν επιλέξει ο χρήστης, στην συνέχεια εμφανίζεται το εξής menu επιλογών (Σχήμα 2.79).



Σχήμα 2.79: Παράθυρο ρύθμισης απεικόνισης των αποτελεσμάτων.

Στο **Display type** μπορεί ο χρήστης να διαλέξει ανάμεσα σε τέσσερις επιλογές:

1. **Fringe**
2. **Vectors**
3. **Graph**
4. **Model**

Η πρώτη επιλογή **Fringe** εμφανίζει το υπό μελέτη μοντέλο και τις μετρήσεις (**Stress, Displacement, Strain, P-Level, Strain Energy Per Unit Volume**) που θα επιλέξει ο χρήστης να πάρει.

Η δεύτερη επιλογή **Vectors** εμφανίζει το υπό μελέτη μοντέλο και τα διανύσματα των μετρήσεων (**Stress, Displacement, Strain**) που θα επιλεγούν.

Η τρίτη επιλογή **Graph** εμφανίζει τα διαγράμματα των μετρήσεων που έχουν επιλεγεί.

Και η τέταρτη και τελευταία επιλογή **Model** εμφανίζει (**Stress Linearized, Displacement** και **Reactions at Point Constraints**→Υπολογίζει την κάμψη, την μέγιστη και συνολική τάση κατά μήκος ενός ευθύγραμμου μονοπατιού).

Υπάρχουν τρεις υποκατηγορίες για την βασική ρύθμισή των αποτελεσμάτων :

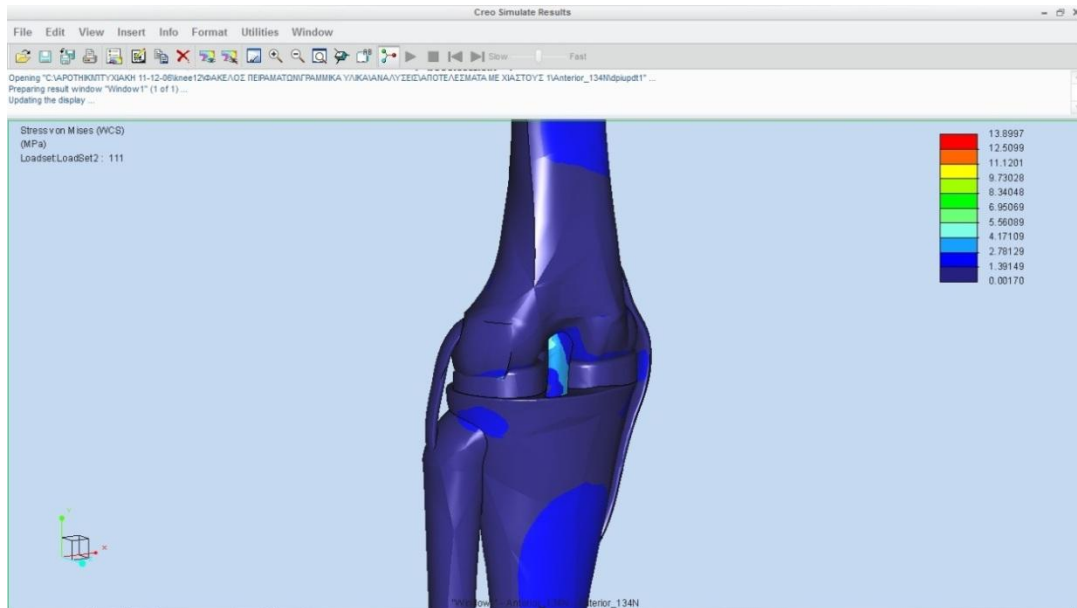
- **Quantity**
- **Display location**
- **Display options**

Η πρώτη υποκατηγορία **Quantity** δίνει την δυνατότητα επιλογής του φυσικού μεγέθους που μελετάται όπως και την δυνατότητα επιλογής των μονάδων που επιθυμούνται.

Η δεύτερη υποκατηγορία **Display location** δίνει την δυνατότητα επιλογής σε ποιο κομμάτι της κατασκευής θα εμφανιστούν τα αποτελέσματα(**All, Curves, Surfaces, Volumes, Component/Layers**).

Η τρίτη υποκατηγορία **Display options** δίνει την δυνατότητα επιλογής του τρόπου και της μορφής αναπαράστασης των αποτελεσμάτων. Μέσω του **Continuous tone** ρυθμίζετε το εύρος των χρωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση των αποτελεσμάτων επάνω στο μοντέλο καθώς και απόκριση των χρωμάτων. Μπορεί να δείξει την παραμόρφωση της κατασκευής χρησιμοποιώντας μια επί (%) κλίμακα αλλά και τον συνδυασμό της απαραμόρφωτης και παραμορφωμένης κατασκευής είτε σχηματίζοντας το περίγραμμα της απαραμόρφωτης κατασκευής είτε δείχνοντας το <<φάντασμα>> της.

Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα του να φαίνονται τα στοιχεία επάνω στο μοντέλο, όπως τα φορτία και οι περιορισμοί. Υπάρχει η δυνατότητα να εμφανίζονται για παράδειγμα τα περιγράμματα των τάσεων στις περιοχές που αναπτύσσονται σε ένα μοντέλο (**Contour**), η αρίθμηση των περιγραμμάτων αυτών (**Label Contour**), οι επιφάνειες στις οποίες αναπτύσσονται τάσεις για κάθε τιμή της χρωματικής κλίμακας (**IsoSurfaces**), αλλά και τα μέτρα τους. Ένα από τα βασικότερα εργαλεία είναι το **Animate** μέσω του οποίου ο χρήστης μπορεί να πάρει μια ιδέα για το πώς συμπεριφέρεται το μοντέλο μέσω μιας κινησιολογικής αναπαράστασης. Διαλέγοντας μία από τις παραπάνω επιλογές και επιλέγοντας **Ok and Show** θα εμφανιστούν τα αποτελέσματα στο **Creo Simulate Results (Σχήμα 2.80)**.



Σχήμα 2.80: Επιφάνεια προβολής των αποτελεσμάτων.


Μετά την επιλογή αυτή, εμφανίζεται το μοντέλο σε ένα παράθυρο με τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Στην δεξιά πλευρά του παραθύρου, υπάρχει μια χρωματική κλίμακα. Η κλίμακα αυτή αντιπροσωπεύει την επίδραση του μεγέθους που έχει επιλεγεί να μετρηθεί, επάνω στο μοντέλο, σύμφωνα με την αναλογία των χρωμάτων και των τιμών που αντιστοιχούν σε αυτά. Στα δύο άκρα της χρωματικής κλίμακας βρίσκονται οι μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του μετρούμενου μεγέθους και στην υπόλοιπη κλίμακα οι ενδιάμεσες αναπτυσσόμενες τιμές.

Κατά την διάρκεια εμφανίσεις των αποτελεσμάτων ο χρήστης έχει στην διάθεση του διάφορες επιλογές που του δίνουν την ευχέρεια να πάρει αποτελέσματα από οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής. Μέσω του **Insert**→**Cutting/Capping Surfs...** ο χρήστης έχει δύο επιλογές: **(i)Cutting Surface** και **(ii)Capping Surface**. Και οι δύο επιλογές καθορίζονται στο **Define by** από **(WCS, Three Points, UCS, Screen, Isosurface)**.

Η πρώτη επιλογή **(i)** χρησιμοποιείτε, έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να δει το τι συμβαίνει μέσα στην κατασκευή κόβοντας <<φέτες>> αμελητέου πάχους. Οι φέτες αυτές μπορούν να βρίσκονται σε οποιοδήποτε μέρος της κατασκευής φθάνει να οριστεί το επίπεδο στο οποίο θα είναι XY, XZ, YZ μέσω της επιλογής **Plane** το σημείο σε κάθε επίπεδο μέσω της επιλογής **Depth** χρησιμοποιώντας μια επί (%) κλίμακα(0-100) ή την απόσταση σε mm(ανάλογα με τις διαστάσεις της κατασκευής). Στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να κάνει με χειροκίνητο τρόπο την επιλογή του σημείου που θα βρίσκετε κάθε επίπεδο, μπορεί να το κάνει μέσω της επιλογής **Dynamic**.

Η δεύτερη επιλογή **(ii)** χρησιμοποιείτε, έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να δει το τι συμβαίνει μέσα στην κατασκευή αφαιρώντας υλικό από την κατασκευή. Για να προσδιοριστεί η διεύθυνση και το σημείο αφαίρεσης υλικού ακολουθούνται ακριβώς τα ίδια βήματα και με την επιλογή **Cutting Surface**.

Επιπροσθέτως, μέσω του **Info→Dynamic Query** μπορεί να δοθεί αναφορά του μεγέθους το οποίο μετράτε, επιλέγοντας ένα σημείο ή σημεία σε οποιοδήποτε μέρος της κατασκευής. Ακόμη, μέσω των επιλογών **View Max, View Min, Model Max, Model Min** μπορεί το πρόγραμμα να δείξει τις μέγιστες ή ελάχιστες τιμές του μεγέθους που μετράτε είτε σε ολόκληρο το μοντέλο είτε στο περίπου σε όποιο μέρος της κατασκευής επιθυμεί ο χρήστης. Μέσω της επιλογής **Info→Measures** εμφανίζονται όλα τα μετρούμενα μεγέθη που έχουν προεπιλεχτεί. Διαλέγοντας τα και χρησιμοποιώντας την επιλογή **Create Annotation**, εμφανίζονται στην κατασκευή τα σημεία στα οποία βρίσκονται αυτές οι μετρήσεις και αναγράφονται οι απαραίτητες πληροφορίες για αυτά. Τέλος, μέσω του **Format→Legend** ο χρήστης μπορεί να κάνει οποιαδήποτε ρύθμιση αφορά την χρωματική κλίμακα των αποτελεσμάτων.

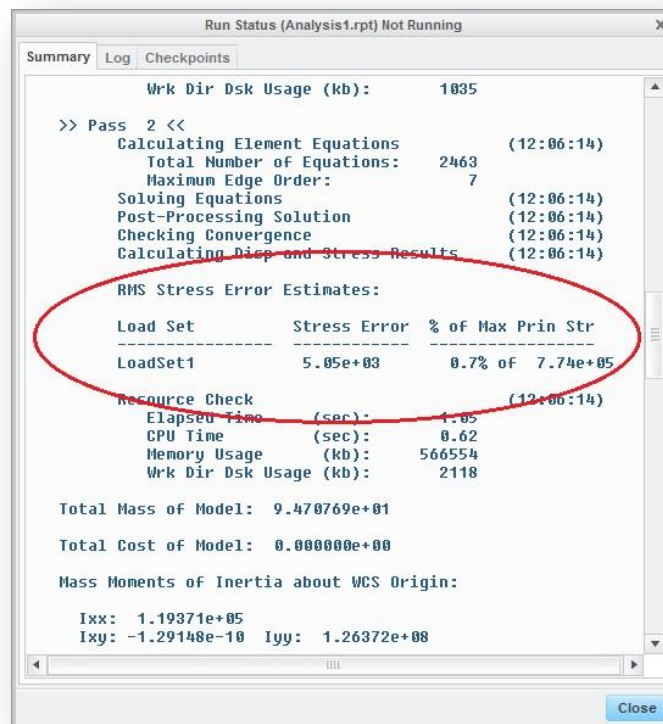
Στο παράθυρο το οποίο χρησιμοποιείτε για την διαλογή και εφαρμογή τύπου ανάλυσης υπάρχει και η επιλογή **Display Study Status**  μέσω της οποίας μπορεί ο χρήστης να πάρει πληροφορίες για την εκτέλεση της ανάλυσης αλλά και για τα βήματα που εκπληρώθηκαν, αναλυτικά. Υπάρχουν τρεις επιλογές:

1. **Summary** (ο χρήστης μπορεί να πάρει πληροφορίες για το δίκτυο και την δημιουργία του, τα βήματα που ακολουθεί το πρόγραμμα και τα αποτελέσματα τα οποία εξάγονται).
2. **Log** (ενημερώνει τον χειριστή για την κατάσταση του υπολογιστή, δηλαδή στο πώς διαχειρίζεται της πράξεις που του έχουν ανατεθεί και πόση υπολογιστική ισχύ καταναλώνει).
3. **Checkpoints** (ενημερώνει βήμα προς βήμα τον χειριστή για τις πράξεις που εκτελούνται κατά την διάρκεια της ανάλυσης).

Το παράθυρο αυτό δίνει μια πολύτιμη πληροφορία για τον μηχανικό, η οποία είναι η τιμή **RMS (Root-Mean-Square) Stress Error Estimates**. Το Creo Simulate εμφανίζει μία τιμή **RMS** εκτίμησης σφάλματος, η οποία χρησιμοποιείτε σε όλες τις αναλύσεις που χρησιμοποιούν το ενιαίο πέρασμα προσαρμοστικής μεθόδου σύγκλισης. Το σφάλμα αυτό δεν περιλαμβάνει περιοχές με πιθανές ανωμαλίες. Το πρόγραμμα δεν εξάγει τις πληροφορίες αυτές όταν όλες οι εξωτερικές ακμές έχουν ιδιομορφίες. Για στατικές αναλύσεις (Static Analysis) και αναλύσεις επαφών (Contact Analysis) το **Display Study Status** στο **RMS (Root-Mean-Square) Stress Error Estimates** εμφανίζει τις ακόλουθες πληροφορίες (**Σχήμα 2.81**):

1. **Load Set Name:** Το όνομα του συνόλου του φορτίου στο οποίο η τιμή RMS απευθύνεται.
2. **Stress Error:** Προέρχεται από δειγματοληψία τοπικών σφαλμάτων τα οποία εκτιμώνται κατά μήκος των εξωτερικών ακμών. Η εκτίμηση αποκλείει περιοχές με πιθανές ανωμαλίες (περιορισμούς, εσοχές κλπ).
3. **% Of Max Prin Str:** Αν η μέγιστη κύρια τάση εμφανίζεται σε μια μοναδική περιοχή του μοντέλου, το πρόγραμμα την εξαιρεί από την δειγματοληψία κατά την αξιολόγηση της εκτίμησης του σφάλματος της τάσης. Στην περίπτωση αυτή, το **% Of Max Prin Str** μπορεί να είναι χαμηλό.

“Σφάλμα της τάσης μεγέθους έως 15% θεωρείται αποδεκτό”.



Σχήμα 2.81: Παράθυρο εξαγωγής αποτελεσμάτων.

Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής των διαφόρων αποτελεσμάτων σε **Creo View, Image**(εξάγει εικόνες-στιγμιότυπα από την ανάλυση), **Direct VRML**(εξάγει την γεωμετρία του μοντέλου η οποία αναπαριστάται γραφικά με πολλά σκιασμένα τρίγωνα τα οποία συνθέτουν τη μορφή και το σχήμα του μοντέλου), **HTML Report**[εξάγει μια πλήρης αναφορά για το μοντέλο η οποία περιλαμβάνει εικόνες, **direct VRML, summary file** ή αλλιώς **.rpt file, result report**(το οποίο εμπεριέχει **material assignments, mesh control, load/constraints,**

load sets/constraint sets και materials)], Graph Report, Excel, Movie, NASTRAN mesh (undeformed) και NASTRAN mesh (deformed).

Τύπος αρχείου	Αρχείο / Όνομα καταλόγου	Σχόλια
Αρχεία Μοντέλου	Όνομα_μοντέλου.mdb Όνομα_μοντέλου.mbk	Το αρχείο .mdb περιέχει τη βάση δεδομένων του τελευταίου χρονικά αποθηκευμένου μοντέλου. Το αρχείο .mdk χρησιμοποιείτε ως αντίγραφο ασφαλείας.
Αρχεία Μηχανής (Engine Output Files)	/Study/study.mdb /Study/study.cnv /Study/study.hst /Study/study.opt /Study/study.res /Study/study.rtp	Εμπεριέχει όλα τα δεδομένα του μοντέλου τα οποία χαρακτηρίζουν πλήρως την ανάλυση.
Ανταλλαγή Αρχείων	Όνομα_αρχείου.dxf Όνομα_αρχείου.igs	Ο συγκεκριμένος τύπος αρχείων χρησιμοποιείτε για την εισαγωγή /εξαγωγή των πληροφοριών της γεωμετρίας του μοντέλου.
Προσωρινά Αρχεία (temporary files)	/Study.tmp/*.tmp /Study.tmp/*.bas	Δημιουργούνται κατά την διάρκεια της ανάλυσης και στην συνέχεια διαγράφονται αυτόματα όταν τελειώσει η ανάλυση.
Αρχεία Αποτελεσμάτων (Results files)	Όνομα_αρχείου.rwd Όνομα_αρχείου.rwt Όνομα_αρχείου.grt	Τα συγκεκριμένα αρχεία που αποθηκεύονται, εμπεριέχουν στοιχεία από τα αποτελέσματα

		της ανάλυσης, όπως επίσης και τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις.
AutoGEM Files	Όνομα_μοντέλου. agm	Εμπεριέχει όλα τα στοιχεία που δημιουργήθηκαν κατά την επιλογή της AutoGem λειτουργίας.
FEM Mode Files	Όνομα_μοντέλου. ans Όνομα_μοντέλου. nas Όνομα_μοντέλου. fnf Όνομα_μοντέλου. bde Όνομα_μοντέλου. fmp Όνομα_μοντέλου. fma Όνομα_μοντέλου. frd Όνομα_μοντέλου. inf Όνομα_μοντέλου. plt	Εμπεριέχει όλα τα δεδομένα του διακριτοποιημένου μοντέλου τα οποία χαρακτηρίζουν πλήρως την διαδικασία κατά την οποία δημιουργείτε το πλέγμα. Τα αρχεία αυτά μπορούν να εξαχθούν σε ένα πρόγραμμα FEA για να εκτελεστεί μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Πίνακας 2.2: Αρχεία τα οποία εξάγει το Creo Simulate μετά αλλά και κατά την διάρκεια της ανάλυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των δυνατοτήτων του προγράμματος μέσω της επίλυσης δυο παραδειγμάτων, εκ' των οποίων τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν στο ένα από τα δύο θα επαληθευτούν, για να γίνει αξιολόγηση της ακρίβειας που επιτυγχάνει το Creo Simulate.

3.1. Υπολογισμός δοκού σε καμπτική φόρτιση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων με αναλυτικό υπολογισμό.

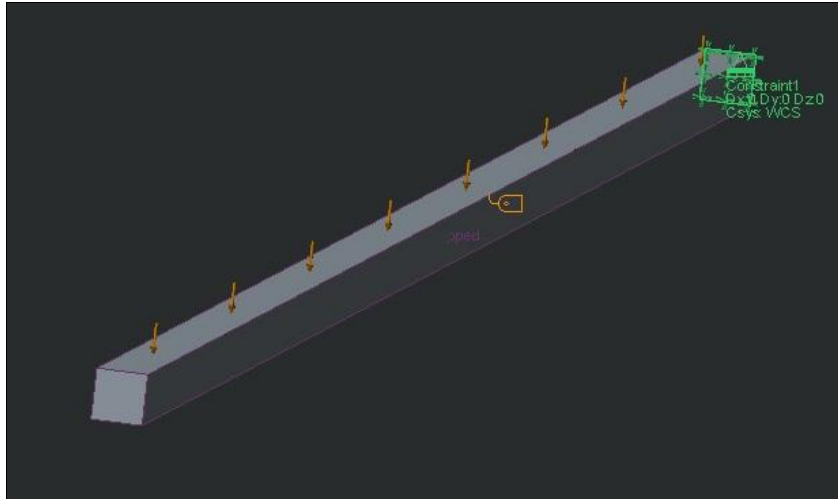
Το παράδειγμα που παρουσιάζεται στην ενότητα αυτή αναφέρεται στον υπολογισμό των αντιδράσεων στήριξης μιας μονόπακτης δοκού (προβόλου) **(Σχήμα 3.1)** τετραγωνικής διατομής 55X55mm και μήκους 4000mm και των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτή με εφαρμογή του λογισμικού Creo Simulate καθώς και επαλήθευση των αποτελεσμάτων με αναλυτικό υπολογισμό με μεθόδους κλασικής στατικής.

Εφαρμόστηκε στο ένα άκρο της δοκού περιορισμός πάκτωσης ως προς τους έξι βαθμούς ελευθερίας, προστέθηκε επιφανειακό φορτίο 36,36 KPa και ορίστηκαν οι ιδιότητες του υλικού. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι γραμμικά ελαστικός χάλυβας και οι ιδιότητες του είναι **(Πίνακας 3.1)**:

Ιδιότητες Υλικού		
Density(Kg/m ³)	Poisson's Ratio	Young's Modulus(GPa)
7800	0,28	210

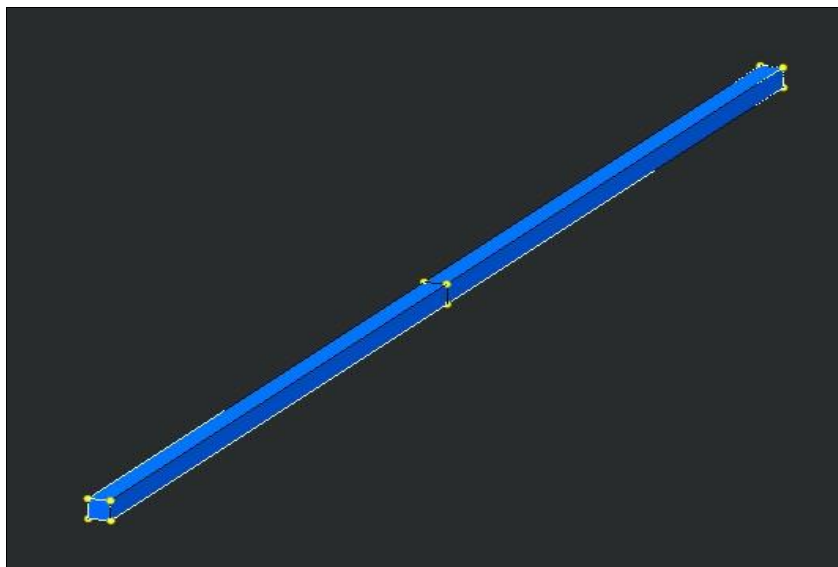
Πίνακας 3.1: Ιδιότητες γραμμικά ελαστικού χάλυβα.

Δεν χρησιμοποιήθηκε ο παράγοντας της βαρύτητας διότι ελέγχουμε την δοκό σε ιδανικές συνθήκες και τυχόν εφαρμογή της θα αλλοίωνε αρκετά τα αποτελέσματα. Στην συνέχεια, εφόσον εκπληρωθούν τα απαραίτητα βήματα για την διεξαγωγή της ανάλυσης τα αποτελέσματα θα επαληθευτούν με την βοήθεια του μαθηματικού πακέτου MATLAB.



Σχήμα 3.1: Δοκός στην οποία φαίνεται ο ορισμός φορτίων και περιορισμών.

Στην δοκό δημιουργήθηκαν 2 Brick solid elements, 20 edges και 11 faces, χρησιμοποιώντας το εργαλείο **Mapped Mesh** για την δημιουργία του δικτύου (**Σχήμα 3.2**). Όλοι οι κόμβοι μεταξύ τους συνδέονται με άκαμπτους δεσμούς. Οι κόμβοι που βρίσκονται στην επιφάνεια της δοκού όπου έχει ορισθεί ο περιορισμός, είναι πακτωμένη με αποτέλεσμα να μην εκπληρώνουν κάποια ενέργεια σε κανένα από τους έξι βαθμούς ελευθερίας έναντι των υπόλοιπων κόμβων της κατασκευής όπου ενεργούν ελεύθερα.

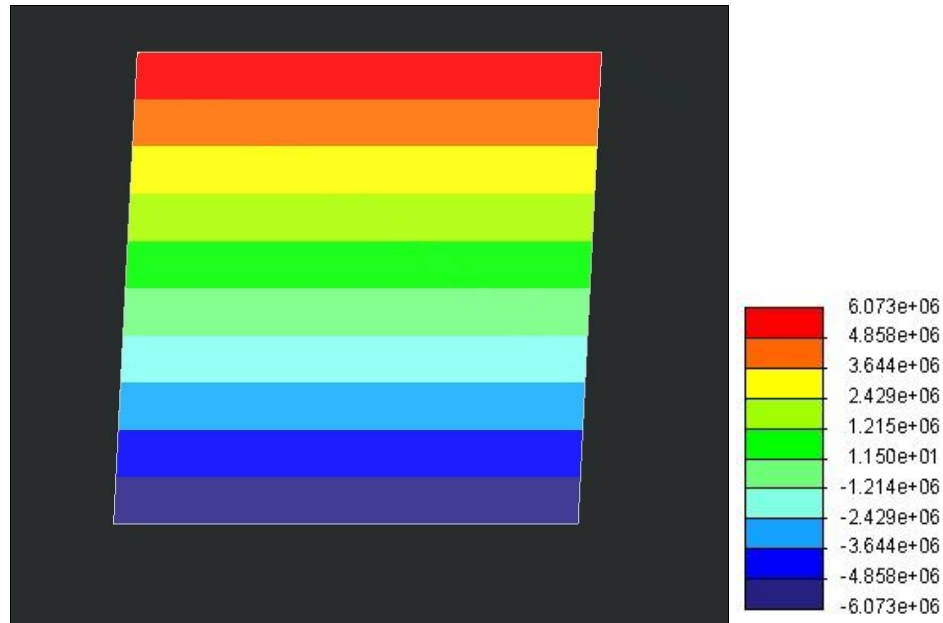


Σχήμα 3.2: Διακριτοποιημένη δοκός.

Όλα τα απαραίτητα στάδια εκπληρώθηκαν επιτυχώς. Εν συνεχεία, θα αναλυθούν και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα τα οποία διεξήχθησαν από το Creo Simulate με αυτά της επαλήθευσης μέσω του μαθηματικού πακέτου MATLAB.

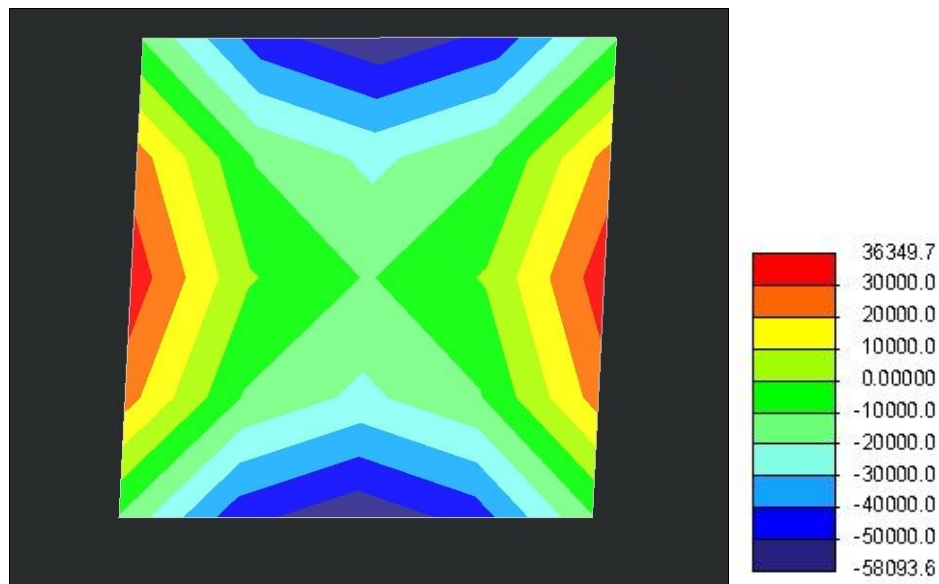
ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ CREO SIMULATE

ΟΡΘΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΑΚΤΩΣΗ

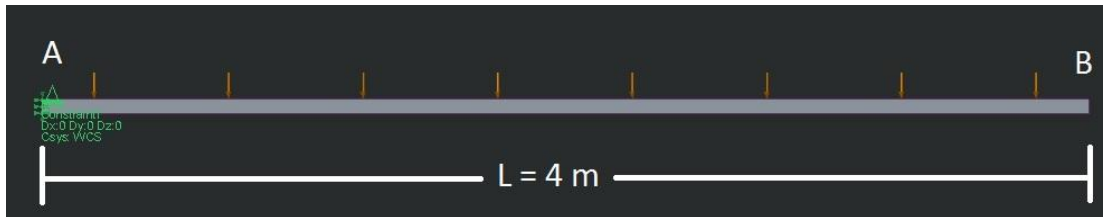


Σχήμα 3.3: Κατανομή ορθών τάσεων στην δοκό σε Κρα.

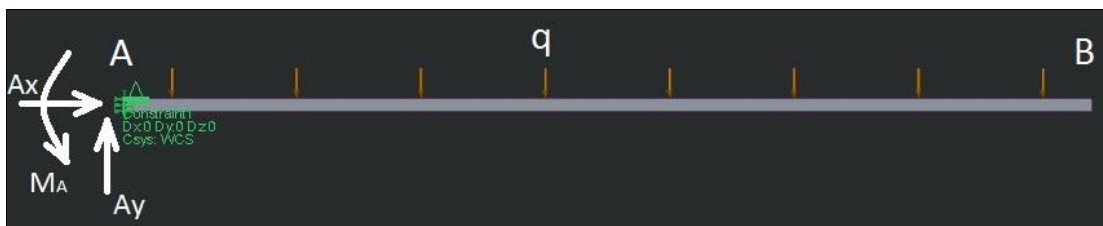
ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ



Σχήμα 3.4: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην δοκό σε Κρα.

ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.5: Μονόπακτη δοκός.



Σχήμα 3.6: Μονόπακτη δοκός και αντιδράσεις στήριξης.

Αντικαθιστούμε την πάκτωση στο A (Σχήμα 3.6), με τις δύο κάθετες μεταξύ τους αντιδράσεις (A_x , A_y) και με ροπή πάκτωσης M_A , με (αυθαίρετες) φορές, έστω αυτές που φαίνονται στο (Σχήμα 3.6). Δηλαδή αντικαθιστούμε την πάκτωση με τρία άγνωστα μεγέθη (A_x , A_y , M_A). Αυτά μπορούν να υπολογιστούν από τις τρεις εξισώσεις στατικής ισορροπίας της δοκού.

Εξισώσεις ισορροπίας:

Εκφράζονται αυτές στο Δ.Ε.Σ. της δοκού (Σχήμα 3.6), παρατηρούμε ότι:

- i. Στον οριζόντιο άξονα x δρα μόνον η άγνωστη A_x , οπότε πρέπει:

$$\sum F_x = 0 \quad : \quad \boxed{A_x = 0} \quad (1)$$

Η $A_x = 0$ ήταν αναμενόμενη αφού δεν υπάρχουν οριζόντιες εξωτερικές δυνάμεις.

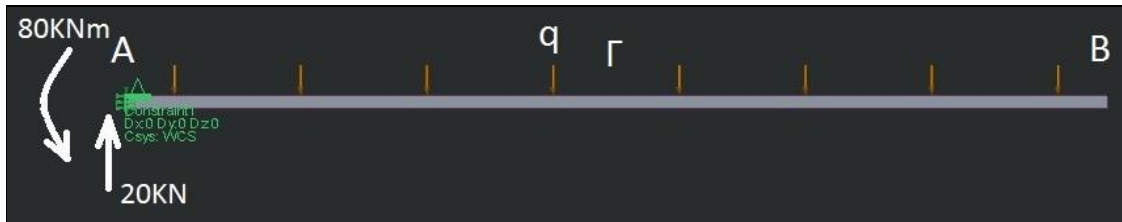
- ii. Στον κατακόρυφο άξονα y δρα η άγνωστη A_y και η γνωστή q . Η A_y έχει την φορά του άξονα +y, ενώ η q του -y (Σχήμα 3.6), οπότε πρέπει:

$$\sum F_y = 0 \quad : \quad A_y - q = 0 \Rightarrow \boxed{A_y = q = 80 \text{KN}} \quad (2)$$

- iii. Παίρνοντας ροπές ως προς το σημείο A, δεν πρέπει να αμελήσουμε ότι εκεί υπάρχει και η άγνωστη ροπή M_A (αριστερόστροφη). Η q δίνει ροπή $q \cdot L$ (δεξιόστροφη), ενώ η A_x και η A_y δίνουν μηδενικές ροπές. Με θετικές τις δεξιόστροφες, θα πρέπει να ισχύει:

$$\sum MA = 0 : -MA + 0 + 0 - q \cdot L \cdot (L/2) = 0 \Rightarrow \boxed{MA = 160 \text{KNm}} \quad (3)$$

Σημειώνουμε ότι η φορά της ροπής MA προεπιλέχθηκε (τυχαία) αριστερόστροφη και επειδή το αποτέλεσμα προέκυψε θετικό, σημαίνει ότι πράγματι αυτή είναι αριστερόστροφη. Το τελικό Δ.Ε.Σ. του προβόλου μετά τον υπολογισμό των Ax, Ay, MA φαίνεται στο **(Σχήμα 3.7)**.



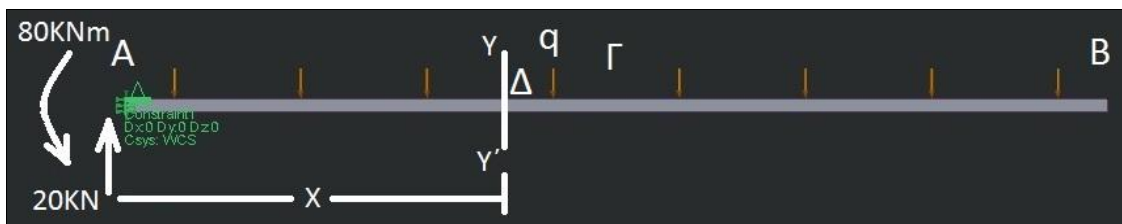
Σχήμα 3.7: Μονόπακτη δοκός και αντιδράσεις στήριξης.

Επαλήθευση των πράξεων:

Θα πρέπει, το αλγεβρικό άθροισμα των ροπών ως προς οποιοδήποτε σημείο να είναι μηδέν. Έστω το μέσον Γ της δοκού **(Σχήμα 3.8)**, οπότε έχουμε:

$$\sum M_{\Gamma} = -160 \text{KNm} + 80 \text{KN} \cdot 2 = 0$$

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ [N], [Q], [M] ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ.



Σχήμα 3.8: Σχεδιασμός της τομής που απαιτείται, για να βρεθούν τα διαγράμματα [N], [Q], [M].

Σε τυχαία απόσταση X μεταξύ των A και B (σημείο Γ), θεωρούμε νοητή τομή YY' **(Σχήμα 3.8)**. Αυτή χωρίζει την δοκό σε δύο τμήματα.

Εξετάζουμε το ένα από αυτά.

“Εξέταση αριστερού τμήματος”.

Εξετάζουμε το αριστερά της τομής τμήμα ΑΓ **(Σχήμα 3.8)**. Σε αυτό ασκείται η τέμνουσα δύναμη Ay και η αριστερόστροφη ροπή MA, οπότε:

Αξονική δύναμη N(x):

Επειδή δεν ασκείται καμία οριζόντια (δηλ. αξονική) δύναμη θα είναι:

$$N(x) = 0 \tag{1}$$

Τέμνουσα δύναμη Q(x):

Τέμνουσες δυνάμεις στο τμήμα αυτό έχουμε την Ay και την q*x, οπότε:

$$Q(x) = 80 - 20X \tag{2}$$

Για x=0: Q(x)=80KN

Για x=2: Q(x)=40KN

Για x=4: Q(x)=0KN

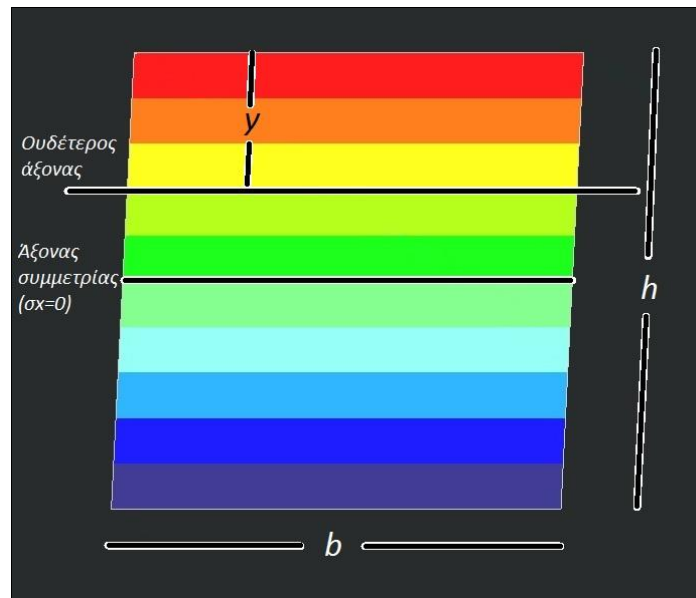
Ροπή κάμψης M(x):

Παίρνοντας ροπές υποχρεωτικά ως προς το σημείο τομής Δ (Σχήμα 3.8), με θετικές πάντα τις δεξιόστροφες, έχουμε:

$$M(x) = -160 + 80X - 10X^2 \tag{3}$$

ΟΡΘΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΑΚΤΩΣΗ ΛΟΓΟ ΤΩΝ ΡΟΠΩΝ

$\sigma_x = \frac{M}{I} * y$, όπου το M:Ροπή, I:Ροπή αδράνειας και το y: απόσταση από τον ουδέτερο άξονα.



Σχήμα 3.9: Κατανομή ορθών τάσεων στην δοκό σε Κρα. Η μέγιστη τάση είναι 6,062e+06 Κρα.

Αρχικά, πρέπει να υπολογιστεί η ροπή αδράνειας:

$$I = \frac{bh^3}{12} = 0,7625 * 10^{-6} m^4$$

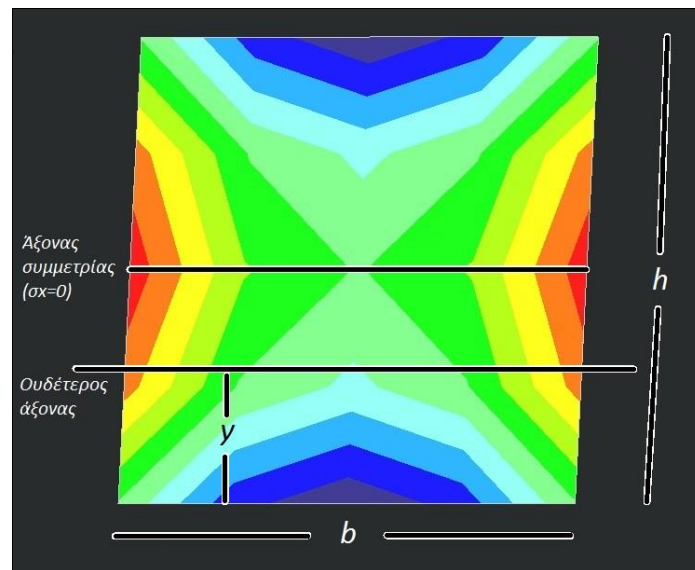
Και στην συνέχεια, υπολογίζετε η μέγιστη και ελάχιστη ορθή τάση στην πάκτωση.

$$Max\sigma_x = \frac{M}{I} * \frac{h}{2} = 5,77 * 10^6 KPa$$

$$Min\sigma_x = \frac{M}{I} * \left(-\frac{h}{2}\right) = -5,77 * 10^6 KPa$$

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΑΚΤΩΣΗ

$\tau_{zy} = \frac{QS}{Ib}$, όπου Q: Τέμνουσα δύναμη, $S = by\left(\frac{h}{2} - \frac{y}{2}\right)$: Στατική ροπή ως προς τον άξονα συμμετρίας ($y=H$ θέση που βρίσκεται ο ουδέτερος άξονας), I: Ροπή αδράνειας και το b: Πλάτος διατομής.



Σχήμα 3.10: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην δοκό σε Kpa. Η μέγιστη τάση είναι $3,623e+04$ Kpa.

Επομένως, έχουμε:

$$Max\tau_{zy} = \frac{Qby\left(\frac{h}{2} - \frac{y}{2}\right)}{Ib} = 3,97 * 10^4 KPa$$

Για $y=0,0275$:

$$Min\tau_{zy} = \frac{Qby\left(\frac{h}{2} - \frac{y}{2}\right)}{Ib} = 0\text{KPa}$$

Για $\gamma=0,055$:

Επειδή τα γραμμικά στοιχεία που χρησιμοποιεί το Creo Simulate δεν μπορούν να προσομοιώσουν επαρκώς τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στην δοκό, παρατηρείτε μια μικρή διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων κατά την σύγκριση τους (**Πίνακας 3.2**). (Τα αποτελέσματα αυτά θα βελτιώνονταν αρκετά και σχεδόν θα εκμηδενίζονταν, στην περίπτωση που θα υπήρχε η δυνατότητα χρήσης παραβολικών στοιχείων).

	Creo Simulate	MATLAB
Ορθές Τάσεις(KPa)	6,062e+06	5,77e+06
Διατμητικές Τάσεις(Kpa)	3,623e+04	3,97e+04

Πίνακας 3.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων.

3.2. Υπολογισμός τριών προσομοιωμάτων άρθρωσης ανθρώπινου γονάτου.

Το δεύτερο παράδειγμα αναφέρεται σε τρία σύνθετα μοντέλα τα οποία αναφέρονται σε μία άρθρωση ενός ανθρώπινου γονάτου (**Σχήμα 3.11**). Το πρώτο μοντέλο αναφέρεται σε μια υγιή άρθρωση, το δεύτερο σε μια άρθρωση όπου υπέστη ρήξη του μπροστινού χιαστού και το τρίτο μοντέλο αναφέρεται στην περίπτωση της άρθρωσης που έχει υποστεί ρήξη του μπροστινού χιαστού προστιθέμενου ενός εξαρτήματος το οποίο αποσκοπεί στην πλήρη αποκατάσταση του.

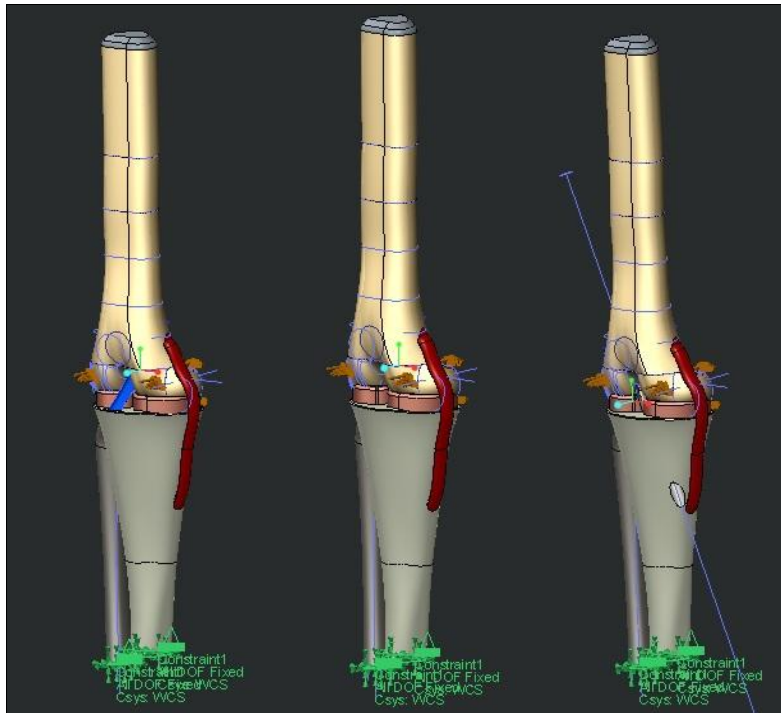
Το παράδειγμα αυτό δεν θα αναλυθεί περαιτέρω, θα δοθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης τα οποία συγκρίνονται με τα αποτελέσματα μιας δημοσιευμένης εργασίας και τα αποτελέσματα ενός συναδέλφου που εργάστηκε πάνω στο ίδιο θέμα καθώς και οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, στους πίνακες (**3.3 - 3.10**).

	Γραμμικές Ιδιότητες Υλικού		
	Density(Kg/m ³)	Poisson's Ratio	Young's Modulus(GPa)
BONE	1270	0,36	17
LIGAMENT	1200,14	0,4	0,039
MENISCUS	1300	0,46	0,003
TI6AL4V TITANIUM ALLOY	4430	0,34	113,8

Πίνακας 3.3: Ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και στις τρεις αρθρώσεις γονάτου.

Μη Γραμμικές Ιδιότητες Υλικού		
	C1	D
MCL	1,44	0,00126
LCL	1,44	0,00126
ACL	1,95	0,00683
PCL	3,25	0,0041

Πίνακας 3.4: Ιδιότητες μη γραμμικών υλικών και στις τρεις αρθρώσεις γονάτου.



Σχήμα 3.11: Υγιή άρθρωση, άρθρωση η οποία υπέστη ρήξη χιαστού και αποκατεστημένη άρθρωση ανθρώπινου γονάτου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Γραμμικά υλικά

ΚΑΝΙΚΟ ΓΟΝΑΤΟ									
Force (N)	Displacement(mm)					Stress(kpa)			
	Paper		Αρχικές		Αντρέας				
	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	without dir
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,025	0,2	0,01798	0,1578	0,01553	0,15708	1300,11	773,949	9,785*10 ²
20	0	0,4	0,03596	0,3155	0,03106	0,31416	2600,21	1547,9	1,957*10 ³
30	0,025	0,6	0,05394	0,4733	0,04659	0,47124	3900,32	2321,85	2,936*10 ³
40	0	0,8	0,07192	0,631	0,06212	0,62833	5200,43	3095,8	3,914*10 ³
50	0,025	1	0,08991	0,7888	0,07765	0,78541	6500,53	3869,75	4,893*10 ³
60	0	1,2	0,1079	0,9466	0,09318	0,94249	7800,64	4643,7	5,871*10 ³
70	0,025	1,4	0,1259	1,104	0,10871	1,09957	9100,74	5417,65	6,850*10 ³
80	0	1,6	0,1438	1,262	0,12424	1,25665	10400,9	6191,6	7,828*10 ³
90	0,025	1,8	0,1618	1,42	0,13977	1,41373	11701	6965,54	8,807*10 ³
100	0	2	0,1798	1,578	0,1553	1,57082	13001,1	7739,49	9,785*10 ³

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα στατικών αναλύσεων (για γραμμικά υλικά) στην υγιή άρθρωση του γονάτου.

ΓΟΝΑΤΟ ΧΩΡΙΣ ΧΙΑΣΤΟ									
Force(N)	Displacement(mm)					Stress(Kpa)			
	Paper		Αρχικές		Αντρέας				
	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	without dir
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,2	1,25	0,4286	1,538	0,50243	1,5593	3265,36	2804,41	3,830*10^3
20	0,34	3	0,8573	3,076	1,00486	3,1186	6530,72	5608,81	7,660*10^3
30	0,9	5,6	1,286	4,613	1,50729	4,6779	9796,07	8413,22	1,149*10^4
40	1,15	6,6	1,715	6,151	2,00972	6,2372	13061,4	11217,6	1,532*10^4
50	1,45	8,5	2,143	7,689	2,51215	7,7965	16326,8	14022	1,915*10^4
60	1,8	10	2,572	9,227	3,01458	9,3558	19592,1	16826,4	2,298*10^4
70	2	10,9	3	10,76	3,51701	10,9151	22857,5	19630,8	2,681*10^4
80	2,2	11,5	3,429	12,3	4,01944	12,4744	26122,9	22435,3	3,064*10^4
90	2,3	12,5	3,858	13,84	4,52187	14,0337	29388,2	25239,7	3,447*10^4
100	2,35	14,4	4,286	15,38	5,0243	15,593	32653,6	28044,1	3,830*10^4

Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα στατικών αναλύσεων (για γραμμικά υλικά) στην τραυματισμένη άρθρωση του γονάτου.

ΑΠΟΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟ					
Force(N)	Displacement(mm)		Stress(Kpa)		
			Αντρέας		
	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	without dir
0	0	0	0	0	0
10	0,01711	0,1676	1117,01	647,006	1,015*10^3
20	0,03421	0,33528	2234,02	1294,01	2,030*10^3
30	0,05132	0,50293	3351,03	1941,02	3,046*10^3
40	0,06843	0,67057	4468,04	2588,02	4,061*10^3
50	0,08553	0,8382	5585,05	3235,03	5,076*10^3
60	0,10264	1,00585	6702,06	3882,03	6,091*10^3
70	0,11975	1,1735	7819,07	4529,04	7,107*10^3
80	0,13685	1,34114	8936,08	5176,04	8,122*10^3
90	0,15396	1,50878	10053,1	5823,05	9,137*10^3
100	0,1711	1,676	11170,1	6470,06	1,015*10^3

Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα στατικών αναλύσεων (για γραμμικά υλικά) στην αποκατεστημένη άρθρωση του γονάτου.

Μη Γραμμικά Υλικά

ΚΑΝΙΚΟ ΓΟΝΑΤΟ									
Force (N)	Displacement(mm)					Stress(kpa)			
	Paper		Αρχικές		Αντρέας				
	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	without dir
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,025	0,2	0,01837	0,1689	0,01713	0,1687	1387,62	787,117	1,071*10^3
20	0	0,4	0,03674	0,338	0,03426	0,33762	2775,22	1574,22	2,143*10^3
30	0,025	0,6	0,05509	0,5073	0,05141	0,50676	4162,8	2361,3	3,214*10^3
40	0	0,8	0,07343	0,6768	0,06856	0,67611	5550,37	3148,36	4,285*10^3
50	0,025	1	0,09176	0,8465	0,08572	0,8457	6937,92	3935,41	5,357*10^3
60	0	1,2	0,1011	1,016	0,10289	1,01549	8325,45	4722,44	6,429*10^3
70	0,025	1,4	0,1284	1,187	0,12007	1,18552	9712,97	5509,46	7,500*10^3
80	0	1,6	0,1467	1,357	0,13725	1,35577	11100,5	6296,46	8,572*10^3
90	0,025	1,8	0,165	1,528	0,15445	1,52625	12488	7083,43	9,644*10^3
100	0	2	0,1833	1,698	0,17166	1,697	13875,4	7870,4	1,072*10^4

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα στατικών αναλύσεων (για μη γραμμικά υλικά) στην υγιή άρθρωση του γονάτου.

ΓΟΝΑΤΟ ΧΩΡΙΣ ΧΙΑΣΤΟ									
Force(N)	Displacement(mm)					Stress(Kpa)			
	Paper		Αρχικές		Αντρέας				
	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	without dir
0	0	0			0	0	0	0	0
10	0,2	1,25			1,46594	5,61704	16136,6	16389	1,572*10 ⁴
20	0,34	3			2,39396	11,8235	36128,4	36646,9	2,778*10 ⁴
30	0,9	5,6			2,87225	17,4091	67348,6	71241	4,081*10 ⁴
40	1,15	6,6			3,95823	28,0459	76787,5	75630,4	6,084*10 ⁴
50	1,45	8,5			5,14301	43,1656	92869,2	84310,5	8,686*10 ⁴
60	1,8	10			6,37749	60,8633	105738	9,591*10 ⁴	9,720*10 ⁴
70	2	10,9			10,4814	82,1026	115324	9,146*10 ⁴	8,161*10 ⁴
80	2,2	11,5			18,4586	106,283	1,212*10 ⁵	1,303*10 ⁵	1,027*10 ⁵
90	2,3	12,5			36,3025	143,796	1,278*10 ⁵	1,169*10 ⁵	1,331*10 ⁵
100	2,35	14,4			26,1417	123,471	1,278*10 ⁵	1,215*10 ⁵	9,075*10 ⁴

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα στατικών αναλύσεων (για μη γραμμικά υλικά) στην τραυματισμένη άρθρωση του γονάτου. **Στην περίπτωση φόρτισης 100N το μοντέλο αστοχεί.**

ΑΠΟΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟ					
Force(N)	Displacement(mm)			Stress(Kpa)	
	Αντρέας				
	med/lat	post/ant	med/lat	post/ant	without dir
0	0	0	0	0	0
10	0,01769	0,1738	1370,64	575,285	1,198*10 ³
20	0,03539	0,34775	2741,42	1150,57	2,396*10 ³
30	0,0531	0,52199	4112,35	1725,87	3,594*10 ³
40	0,07082	0,69648	5483,43	2301,17	4,793*10 ³
50	0,08855	0,8712	6854,65	2876,47	5,992*10 ³
60	0,1063	1,04622	8226,01	3451,78	7,191*10 ³
70	0,12406	1,22147	9597,52	4027,09	8,391*10 ³
80	0,14183	1,39697	10969,2	4602,4	9,591*10 ³
90	0,15961	1,57274	12341	5177,72	1,079*10 ⁴
100	0,17741	1,749	13712,9	5753,04	1,199*10 ⁴

Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα στατικών αναλύσεων (για μη γραμμικά υλικά) στην αποκατεστημένη άρθρωση του γονάτου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των δυνατοτήτων του προγράμματος μέσω της επίλυσης τριών παραδειγμάτων, εκ' των οποίων τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν στο ένα από τα τρία θα επαληθευτούν, για να γίνει αξιολόγηση της ακρίβειας που επιτυγχάνει το Creo Simulate.

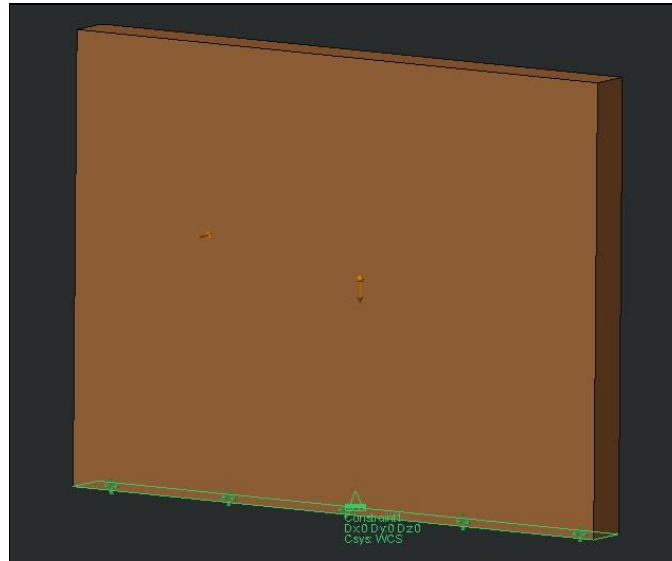
4.1. Υπολογισμός τάσεων και μετατοπίσεων συναρτήσει του χρόνου σημειακού φορτίου το οποίο μεταβάλλεται περιοδικά.

Το πρώτο παράδειγμα προσομοιώνει ένα απλό περιοδικό χτύπημα το οποίο ένας άνθρωπος εκτελεί σε έναν τοίχο με τα ακροδάχτυλα του χεριού του. Ο τοίχος έχει διαστάσεις 3000X4000X300mm και οι μηχανικές, φυσικές του ιδιότητες είναι (Πίνακας 4.1):

Ιδιότητες Υλικού		
Density(Kg/m ³)	Poisson's Ratio	Young's Modulus(GPa)
1800	0,17	3

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες τοιχίου.

Εφαρμόστηκε στο μοντέλο εγκάρσια φόρτιση σε τυχαίο σημείο πάνω στον τοίχο (**Σχήμα 4.1**). Το φορτίο εισήχθη συναρτήσει του χρόνου (**Πίνακας 4.2**), με σταθερή περίοδο 0,5sec και μικρές αλλαγές της δύναμης ανά τον χρόνο διότι ο άνθρωπος δεν μπορεί να υπολογίσει ακριβώς την δύναμη που θα ασκηθεί για πάνω από μια φορές σε ένα σημείο ώστε κάθε φορά να κτυπάει με την ίδια δύναμη. Επίσης στο κάτω μέρος του μοντέλου εφαρμόστηκε περιορισμός πάκτωσης.



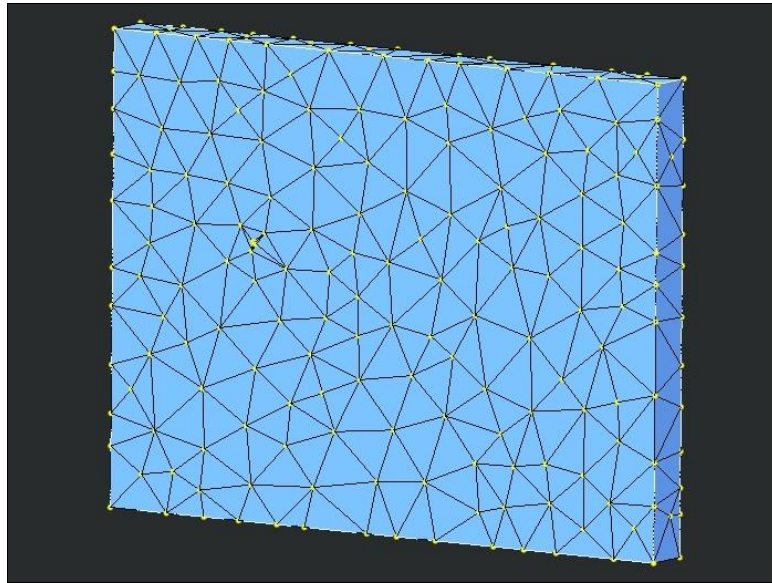
Σχήμα 4.1: Τοίχιο στο οποίο φαίνεται ο ορισμός του φορτίου και του περιορισμού.

TIME	FORCE
0	0
0,5	10.235
1	0
1,5	9.756
2	0
2,5	8.765
3	0
3,5	7.998
4	0

Πίνακας 4.2: Χρονοιστορία δύναμης.

Τα **steps** στη χρονοιστορία αυτή πρέπει να είναι μικρότερα από το χρόνο που χρειάζεται το κύμα ταχύτητας u να διασχίσει ένα πεπερασμένο στοιχείο (τη μικρότερη πλευρά του ή αλλιώς το **Minimum element size**), αν θέλει ο χρήστης να έχει ομαλοποιημένα αποτελέσματα κατά την διάρκεια προβολής τους σε γραφικές παραστάσεις.

Στον τοίχο δημιουργήθηκαν 933 Solid Tetra Elements, 1601 Edge και 2192 Face χρησιμοποιώντας το εργαλείο **Maximum Element Size** για την δημιουργία του δικτύου (**Σχήμα 4.2**). Όλοι οι κόμβοι μεταξύ τους συνδέονται με άκαμπτους δεσμούς. Οι κόμβοι που βρίσκονται στην επιφάνεια του τοίχου όπου έχει ορισθεί ο περιορισμός, είναι πακτωμένη με αποτέλεσμα να μην εκπληρώνουν κάποια ενέργεια σε κανένα από τους έξι βαθμούς ελευθερίας, έναντι των υπόλοιπων κόμβων της κατασκευής όπου ενεργούν ελεύθερα.



Σχήμα 4.2: Διακριτοποιημένο τοίχιο.

Για να βρεθεί το εύρος της συχνότητας που θα εφαρμοστεί στο τοίχιο πρέπει γενικά το μικρότερο μήκος κύματος μεταξύ των κυμάτων που διαδίδονται μέσα στο υλικό του τοιχίου κατά την δυναμική του απόκριση να είναι τουλάχιστον δεκαπλάσιο από το χαρακτηριστικό μήκος των στοιχείων του δικτύου της ράβδου. Το χαρακτηριστικό μήκος του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων (internodal interval) που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσο με 0.4m. Άρα θα πρέπει:

$$\lambda \geq 10 \cdot 0.4 = 4m \quad (1.1.1)$$

Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος δίνεται από τη σχέση:

$$u = \lambda * f, \quad (1.1.2)$$

όπου u η ταχύτητα διάδοσης του κύματος, λ το μήκος κύματος και f η συχνότητα του κύματος. Η (1.1.1) λόγω της (1.1.2) γίνεται:

$$\frac{u}{f} \geq 4m \quad (1.1.3)$$

Η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (που είναι γενικά αυτά με το μικρότερο μήκος κύματος) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 843,95m / sec$$

Όπου G το μέτρο διάτμησης υπολογιζόμενο ως

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 1,28 \text{ GPa},$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας, ν ο λόγος Poisson και ρ η πυκνότητα.

Τελικά η (1.1.3) γίνεται

$$f \leq \frac{u}{4} \Rightarrow f_{\max} = 0,211 \text{ kHz}$$

Επομένως, το εύρος της συχνότητας που θα χρησιμοποιηθεί κατά την εξαγωγή των ιδιοσυχνοτήτων θα είναι $[0, 0,211 \text{ kHz}]$.

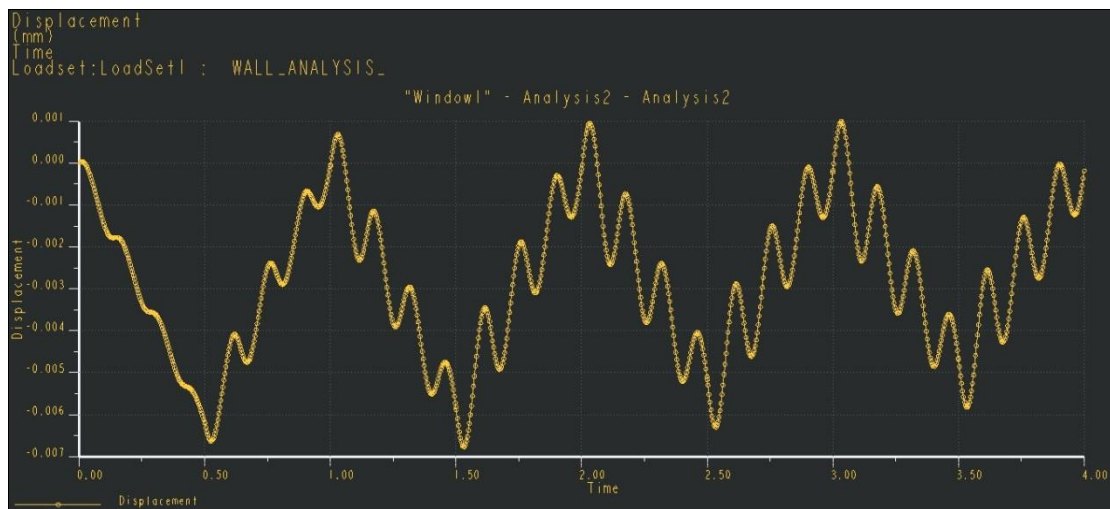
Αρχικά έγινε μια ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων για τον πρόβολο του παραδείγματος (Modal analysis) η οποία έδωσε τα εξής αποτελέσματα:

Mode Number	Eigenfrequency (Hz)
Mode1	6.98215
Mode2	14.1515
Mode3	33.8962
Mode4	42.1458
Mode5	51.7678
Mode6	52.7601
Mode7	73.0971
Mode8	79.5176
Mode9	107.854
Mode10	110.925
Mode11	117.301
Mode12	121.075
Mode13	121.718
Mode14	129.37
Mode15	146.421
Mode16	150.271
Mode17	170.344
Mode18	178.707
Mode19	185.788

Mode20	198.063
Mode21	198.881
Mode22	202.539
Mode23	210.541

Πίνακας 4.3: Ιδιοσυχνότητες.

Στην συνέχεια ακολουθούν τα γραφήματα **(Πίνακας 4.3)** και **(Πίνακας 4.4)** των αποτελεσμάτων των δυναμικών αναλύσεων χρόνου.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου σε (mm/sec).



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα τάσης – χρόνου σε (Kpa/sec).

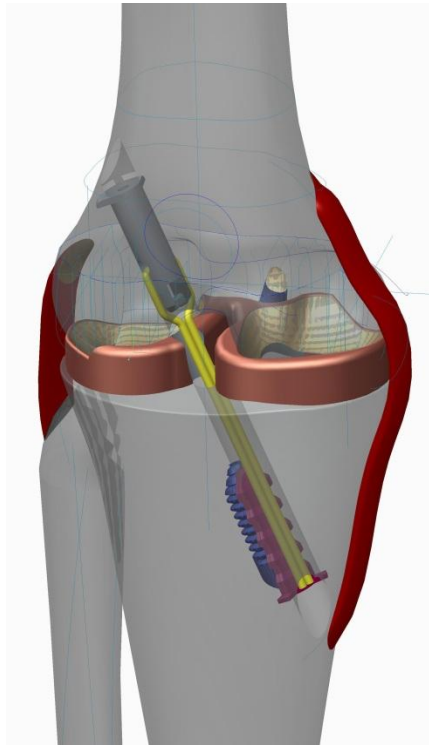
4.2. Υπολογισμός τάσεων και μετατοπίσεων συναρτήσει του χρόνου στην περίπτωση όπου εφαρμόζετε αξονική φόρτιση στο πόδι ενός ανθρώπου.

Το δεύτερο παράδειγμα αναφέρεται σε τρία σύνθετα μοντέλα τα οποία αναφέρονται σε μία άρθρωση ενός ανθρώπινου γονάτου (**Σχήμα 4.6**). Το πρώτο μοντέλο αναφέρεται σε μια υγιή άρθρωση, το δεύτερο σε μια άρθρωση όπου υπέστη ρήξη του μπροστινού χιαστού και το τρίτο μοντέλο αναφέρεται στην περίπτωση της άρθρωσης που έχει υποστεί ρήξη του μπροστινού χιαστού προστιθέμενου επιπλέον ενός εξαρτήματος το οποίο αποσκοπεί στην πλήρη αποκατάσταση του. Εφαρμόζεται ένα φορτίο στο κάτω μέρος των μοντέλων για να φανεί πως συνεργάζονται οι χιαστοί ή το εμφύτευμα μεταξύ τους ώστε να ισορροπεί το σύστημα. Η ανάλυση αυτή θα εφαρμοστεί για γραμμικά υλικά.

Στην τραυματισμένη άρθρωση γονάτου διορθώθηκε αρχικά η συσχέτιση μεταξύ του μηριαίου οστού και του μηνίσκου από **Bonded** σε **Contact** αλλά υπήρχε σοβαρό πρόβλημα στην επίλυση των εξισώσεων και κατ' επέκταση της ανάλυσης (οι επιφάνειες που έρχονταν σε επαφή δεν ήταν επίπεδες αλλά υπήρχαν καμπύλες επιφάνειες και αρκετές ακμές). Μετά από αρκετά πειράματα ορίστηκε μεταξύ του μηριαίου οστού και του μηνίσκου σύνδεση **Free**. Η αλλαγή αυτή έγινε δεκτή διότι τα αποτελέσματα μετά από μερικές αναλύσεις με την χρήση και των δύο τρόπων συνδέσεων, παρατηρήθηκε πως διαφέρουν ελάχιστα (π.χ δέκατα του χιλιοστού).

Επίσης, στην αποκατεστημένη άρθρωση υπήρχε σοβαρό πρόβλημα με την βίδα του εμφυτεύματος κατά την διαδικασία της διακριτοποίησης. Ακλουθώντας την διαδικασία του **Cut Out** είχε δημιουργηθεί μια πολύπλοκη γεωμετρία εσωτερικά της κνήμης. Το **AutoGEM** είχε πρόβλημα στο να αναγνωρίσει αυτές τις πολύπλοκες εσοχές με αποτέλεσμα να προσπαθεί να γεμίσει τα κενά αφαιρώντας περισσότερες επιφάνειες και ακμές από το υπόλοιπο μοντέλο απ' ότι θα έπρεπε, πράγμα το οποίο θα είχε μεγάλη απόκλιση στα αποτελέσματα μιας απλής στατικής ανάλυσης.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού σχεδιάστηκε μια απλή σφήνα η οποία είχε παρόμοιο όγκο με αυτών της βίδας και αντικαταστάθηκε ακριβώς στην ίδια τοποθεσία μέσα στην κνήμη. Χρονοβόρο και αρκετά μεγάλης δυσκολίας ήταν η ακριβής τοποθέτηση του εμφυτεύματος (**Σχήμα 4.5**) αυτού στην κατάλληλη θέση ώστε να τρώει όσο το δυνατόν λιγότερο υλικό, να μην τραυματίσει τους πλάγιους χιαστούς, ο μηνίσκος να υποστεί όσο το δυνατόν λιγότερη ζημία και το εμφύτευμα του τένοντα να έχει το κατάλληλο μήκος και να τοποθετηθεί με την κατάλληλη γωνία μέσα στο μηριαίο οστό αλλά και στην κνήμη, έτσι ώστε να είναι αρκετά ισχυρό για να αποκαταστήσει την ζημιά που έχει υποστεί ο εμπρόσθιος χιαστός.

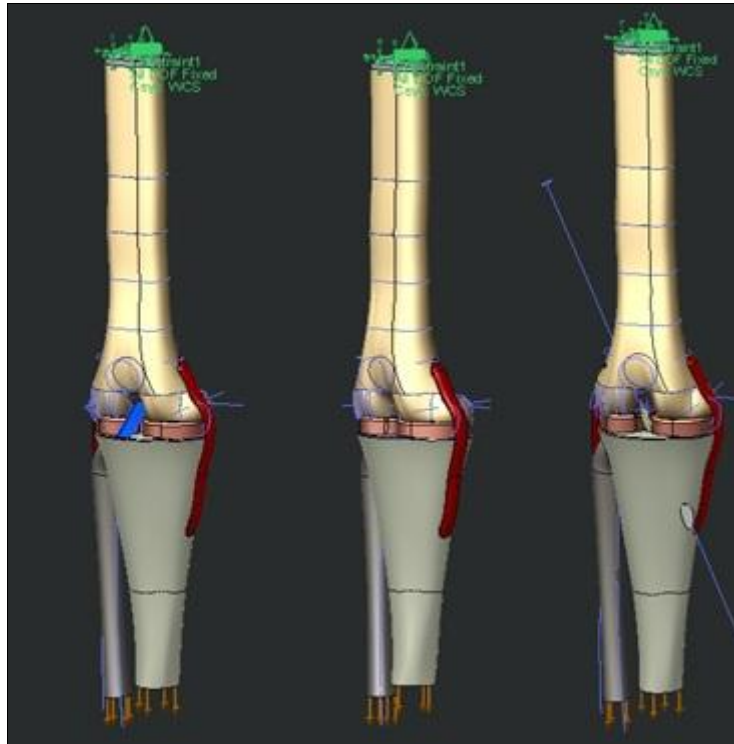


Σχήμα 4.5: Τοποθέτηση του εμφυτεύματος.

Ο τρόπος με τον οποίο ο τένοντας συνδέεται με την σφήνα ήταν ένα ακόμη πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπιστεί άμεσα. Αρχικά ο τένοντας διαπερνούσε ολόκληρη την σφήνα και ερχόταν πρόσωπο με την έξω πλευρά της σφήνας. Με την κατάσταση αυτή κάνοντας μια απλή στατική ανάλυση η αρχική διάμετρος του τένοντα μίκραινε αρκετά και ο τένοντας τελικά ξεκολλούσε από την σφήνα. Τοποθετήθηκε λοιπόν ο τένοντας εσωτερικά της σφήνας έως ένα συγκεκριμένο σημείο το οποίο ήταν ανεκτό, μετά από αρκετές δοκιμές. Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και στα τρία μοντέλα φαίνονται στον **(Πίνακα 4.4)**.

	Ιδιότητες Υλικού		
	Density(Kg/m ³)	Poisson's Ratio	Young's Modulus(GPa)
BONE	1270	0,36	17
LIGAMENT	1200,14	0,4	0,039
MENISCUS	1300	0,46	0,003
TI6AL4V TITANIUM ALLOY	4430	0,34	113,8

Πίνακας 4.4: Ιδιότητες υλικού των αρθρώσεων.



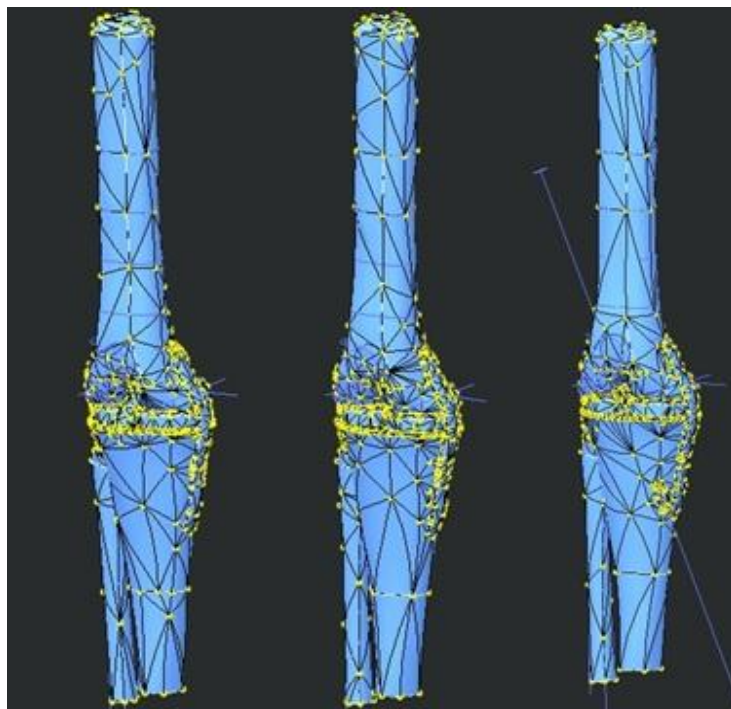
Σχήμα 4.6: Υγιή άρθρωση, άρθρωση η οποία υπέστη ρήξη χιαστού και αποκατεστημένη άρθρωση ανθρώπινου γονάτου.

Κατά την διαδικασία της διακριτοποίησης υπήρχε πρόβλημα, με αποτέλεσμα η διαδικασία να αστοχεί και κατ' επέκταση τα αποτελέσματα των αναλύσεων να είναι ανακριβή. Το πρόβλημα εντοπίστηκε στο μηριαίο οστό (Femur) όπου υπήρχαν κάποιες εσοχές, πολλές από τις οποίες βρίσκονταν στο κάτω μέρος του μηριαίου οστού, με αποτέλεσμα κατά την διαδικασία του **Cut Out** να δημιουργούνται αντίστοιχες εσοχές και στον μηνίσκο. Το Creo Simulate αντιμετώπιζε πρόβλημα στο να δημιουργήσει πλέγμα, διότι αντιλαμβανόταν τις εσοχές αυτές και προσπαθώντας να τις γεμίσει με στοιχεία αφαιρούσε περισσότερες από όσες χρειαζότανε ακμές και επιφάνειες από το υπόλοιπο μοντέλο. Για την καταπολέμηση του προβλήματος αυτού χρειάστηκε να γεμίσουν οι εσοχές αυτές με υλικό και να ξανά πραγματοποιηθεί η διαδικασία του **Cut Out** έτσι ώστε να διορθωθεί το μηριαίο οστό και ο μηνίσκος.

Στο πρώτο μοντέλο δημιουργήθηκαν 7015 Solid Tetra Elements, 10097 Edge και 15246 Face χρησιμοποιώντας το δεύτερο εργαλείο για την δημιουργία του δικτύου, το **Edge Length by Curvature (Σχήμα 4.7)**.

Στο δεύτερο μοντέλο δημιουργήθηκαν 6392 Solid Tetra Elements, 9607 Edge και 14122 Face χρησιμοποιώντας το δεύτερο εργαλείο για την δημιουργία του πλέγματος, το **Edge Length by Curvature (Σχήμα 4.7)**.

Στο τρίτο μοντέλο δημιουργήθηκαν 12065 Solid Tetra Elements, 16871 Edge και 25877 Face χρησιμοποιώντας το δεύτερο εργαλείο για την δημιουργία του πλέγματος, το **Edge Length by Curvature (Σχήμα 4.7)**.



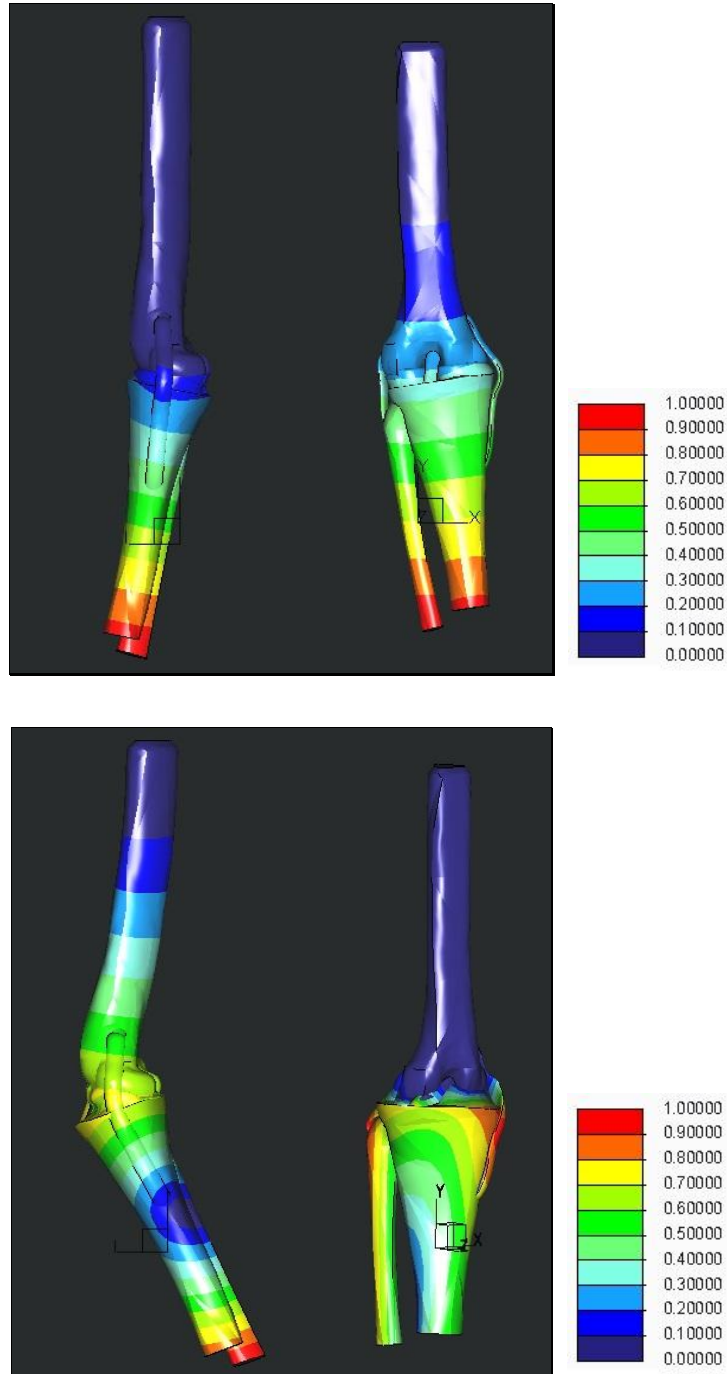
Σχήμα 4.7: Διακριτοποιημένα μοντέλα άρθρωσης ανθρώπινου γονάτου.

Για τον υπολογισμό της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν οι πρώτες τέσσερις ιδιομορφές οι οποίες υπολογίζονται από προεπιλογή του προγράμματος. Αυτό έγινε για να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος του προβλήματος δεδομένου ότι λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας του μοντέλου, το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε ήταν πολύ πυκνό.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

[ΥΓΙΗ ΑΡΘΡΩΣΗ ΓΟΝΑΤΟΥ]

ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ-ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ



Σχήμα 4.8: Ιδιομορφές υγιούς άρθρωσης γονάτου για μοναδιαία μετατόπιση.

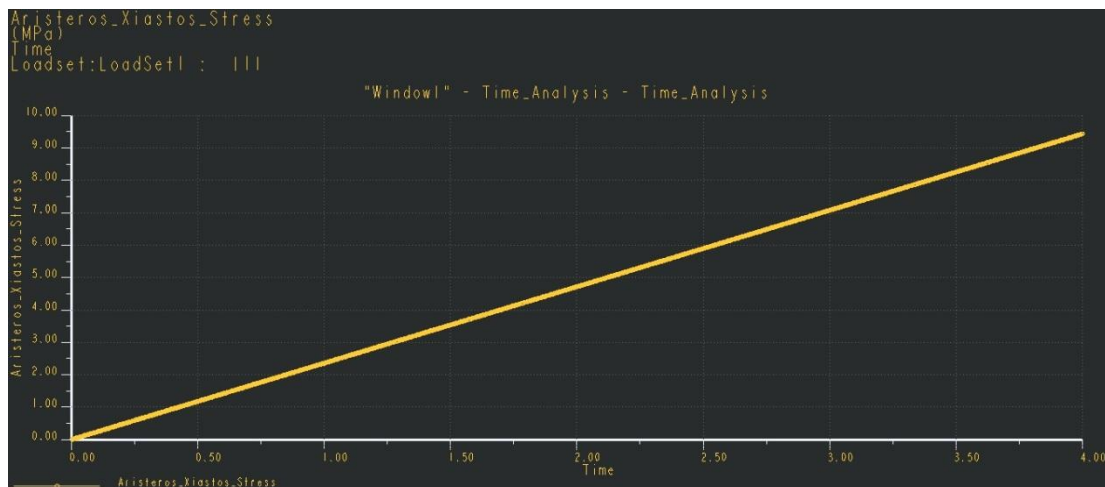
Η πρώτη ιδιομορφή αναφέρεται σε καμπτική απόκριση κατά z με ελεύθερο το κάτω άκρο, η δεύτερη ιδιομορφή αναφέρεται σε καμπτική απόκριση κατά x, η τρίτη ιδιομορφή αναφέρεται σε καμπτική απόκριση κατά z με ελεύθερο το μέσο του μοντέλου και τέλος η τέταρτη ιδιομορφή αναφέρεται σε περιστροφή γύρο από τον y άξονα.

Mode Number	Eigenfrequency (Hz)
Mode1	6.98215
Mode2	14.1515
Mode3	33.8962
Mode4	42.1458

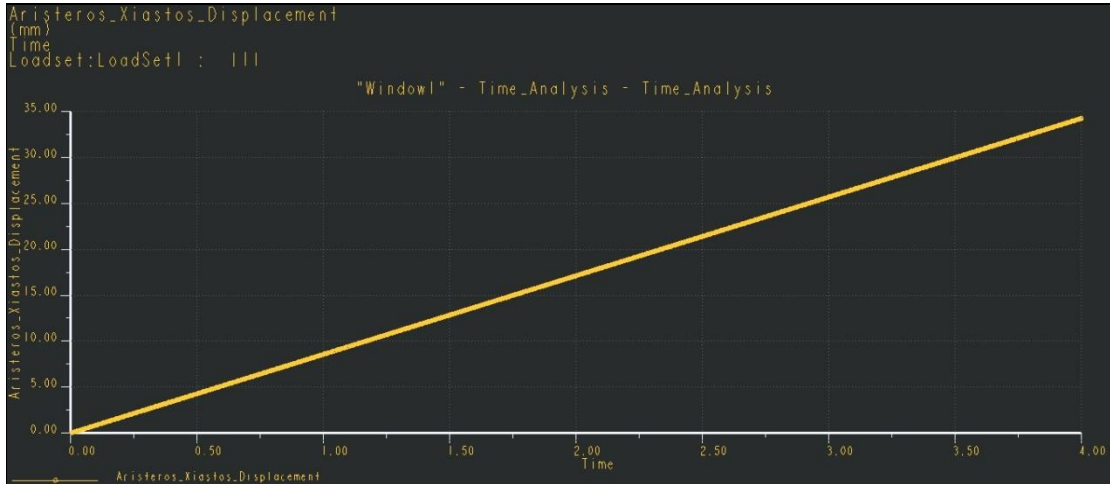
Πίνακας 4.5: Ιδιομορφές - ιδιοσυχνότητες.

Στην συνέχεια ακολουθούν τα γραφήματα των αποτελεσμάτων των δυναμικών αναλύσεων χρόνου.

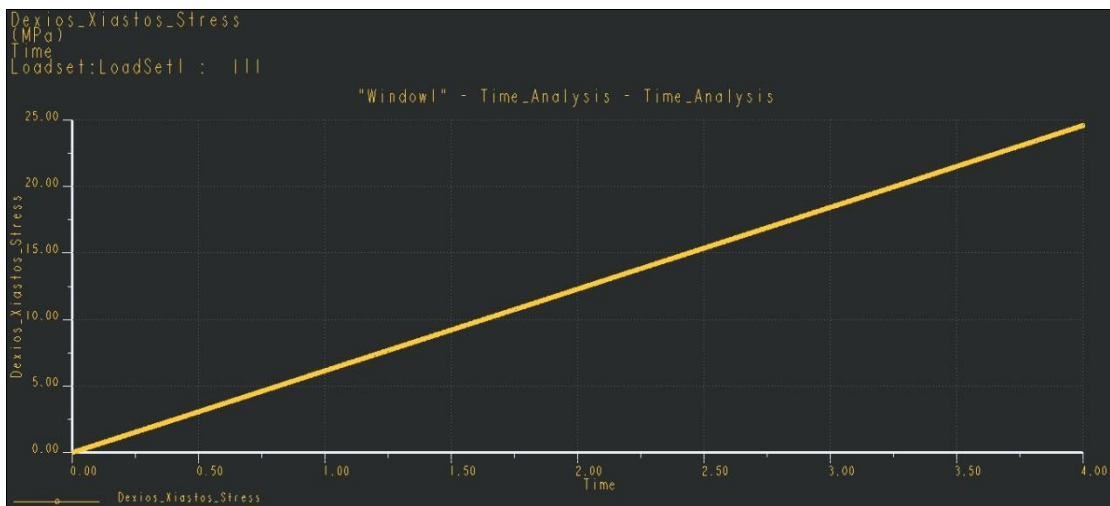
ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα αριστερού χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα αριστερού χιαστού μετατόπισης – χρόνου.



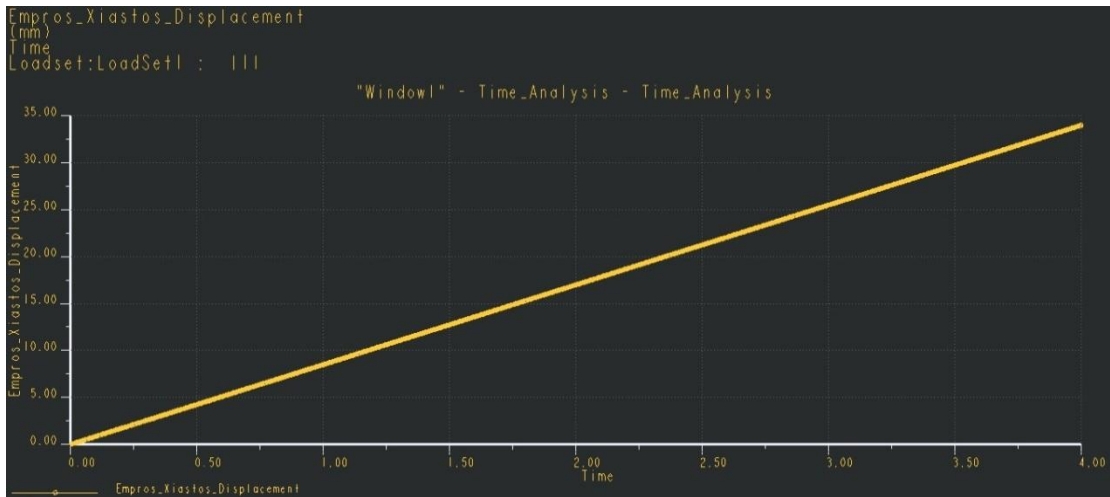
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα δεξιού χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα δεξιού χιαστού μετατόπισης – χρόνου.



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα εμπρόσθιου χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα εμπρόσθιου χιαστού μετατόπισης – χρόνου.



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα πίσω χιαστού τάσης – χρόνου.

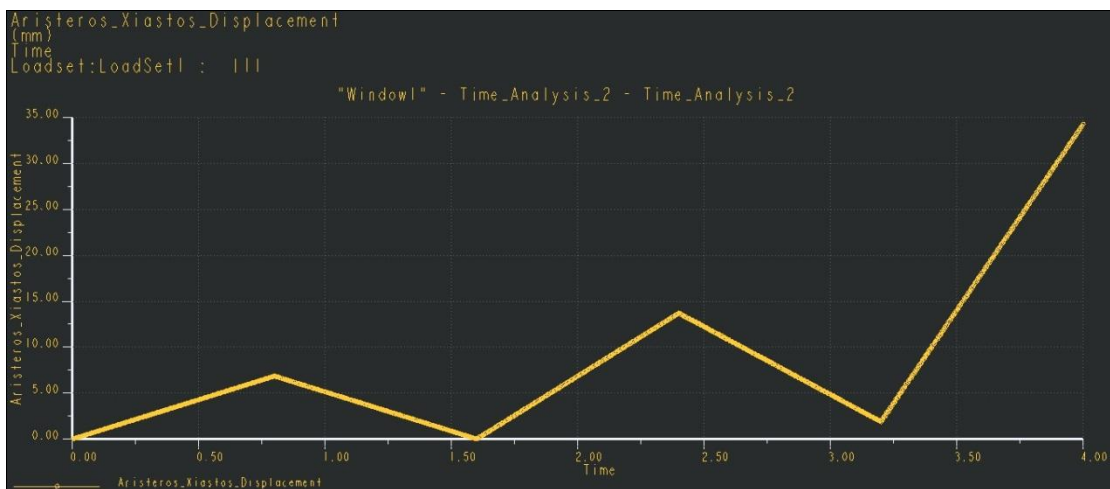


Σχήμα 4.16: Διάγραμμα πίσω χιαστού μετατόπισης – χρόνου.

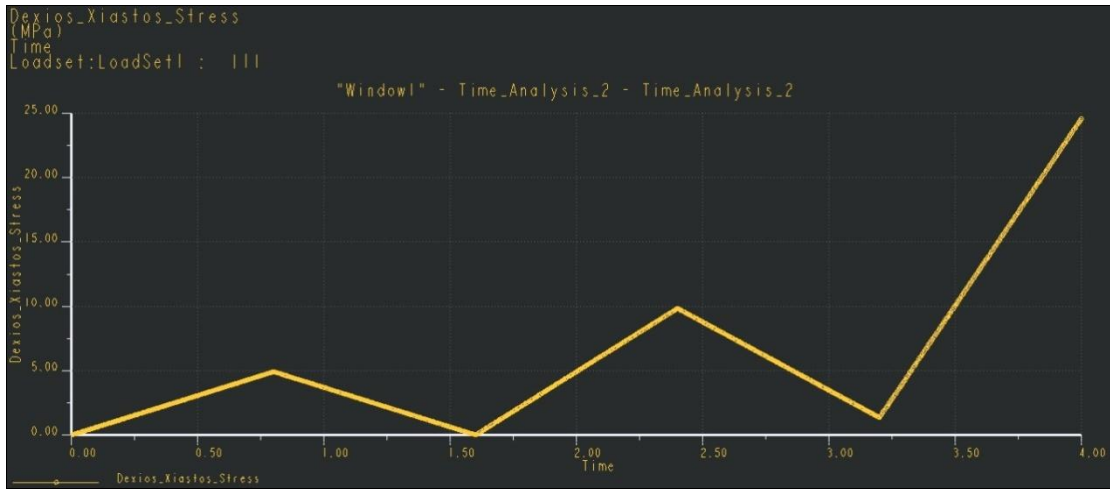
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ



Σχήμα 4.17: Διάγραμμα αριστερού χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα αριστερού χιαστού μετατόπισης – χρόνου.



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα δεξιού χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.20: Διάγραμμα δεξιού χιαστού μετατόπισης – χρόνου.



Σχήμα 4.21: Διάγραμμα εμπρόσθιου χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.22: Διάγραμμα εμπρόσθιου χιαστού μετατόπισης – χρόνου.



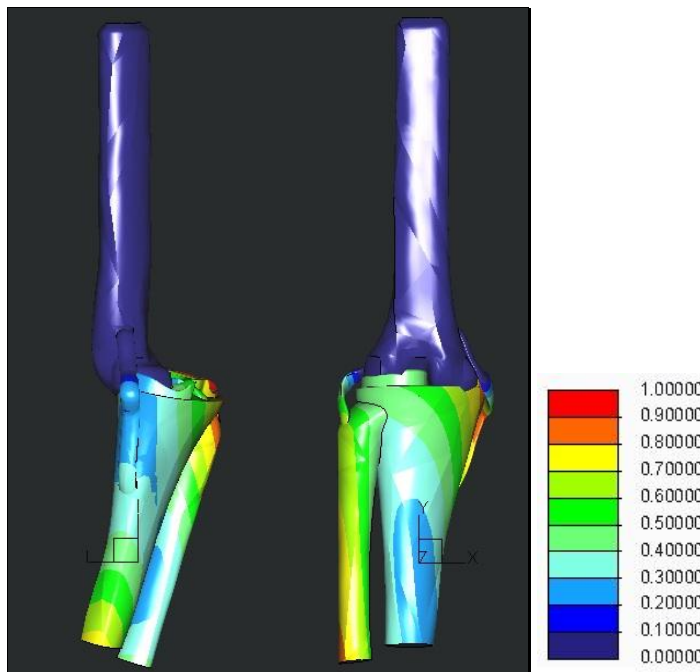
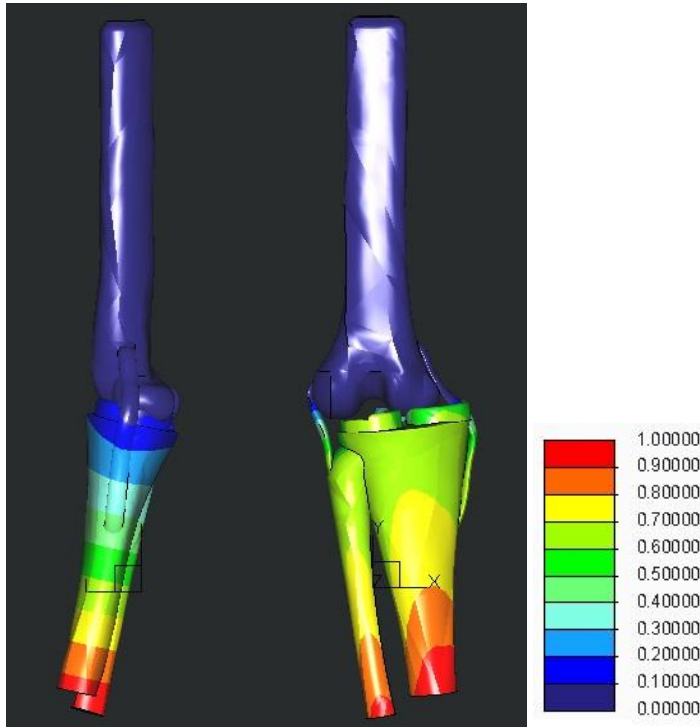
Σχήμα 4.23: Διάγραμμα πίσω χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.24: Διάγραμμα πίσω χιαστού μετατόπισης – χρόνου.

[ΤΡΑΥΜΑΤΙΣΜΕΝΗ ΑΡΘΡΩΣΗ ΓΟΝΑΤΟΥ]

ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ-ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ



Σχήμα 4.25: Ιδιομορφές υγιούς άρθρωσης γονάτου για μοναδιαία μετατόπιση.

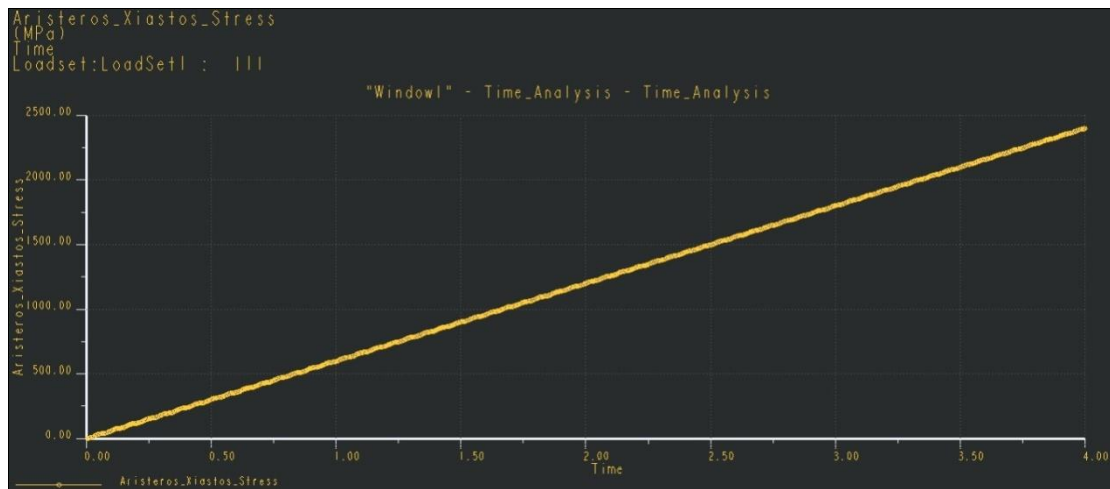
Η πρώτη ιδιομορφή αναφέρεται σε καμπτική απόκριση κατά z με ελεύθερο το κάτω άκρο, η δεύτερη ιδιομορφή αναφέρεται σε καμπτική απόκριση κατά x, η τρίτη ιδιομορφή αναφέρεται σε καμπτική απόκριση κατά z με ελεύθερο το μέσο του μοντέλου και τέλος η τέταρτη ιδιομορφή αναφέρεται σε περιστροφή γύρο από τον y άξονα.

Mode Number	Eigenfrequency (Hz)
Mode1	7.92678
Mode2	15.2681
Mode3	41.1234
Mode4	53.1418

Πίνακας 4.6: Ιδομορφές – ιδιοσυχνότητες.

Στην συνέχεια ακολουθούν τα γραφήματα των αποτελεσμάτων των δυναμικών αναλύσεων χρόνου.

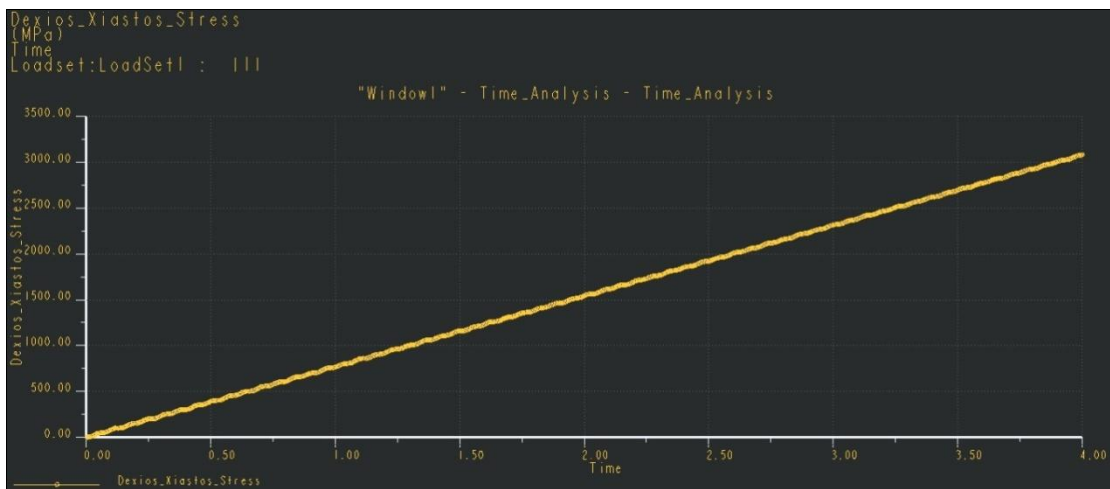
ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ



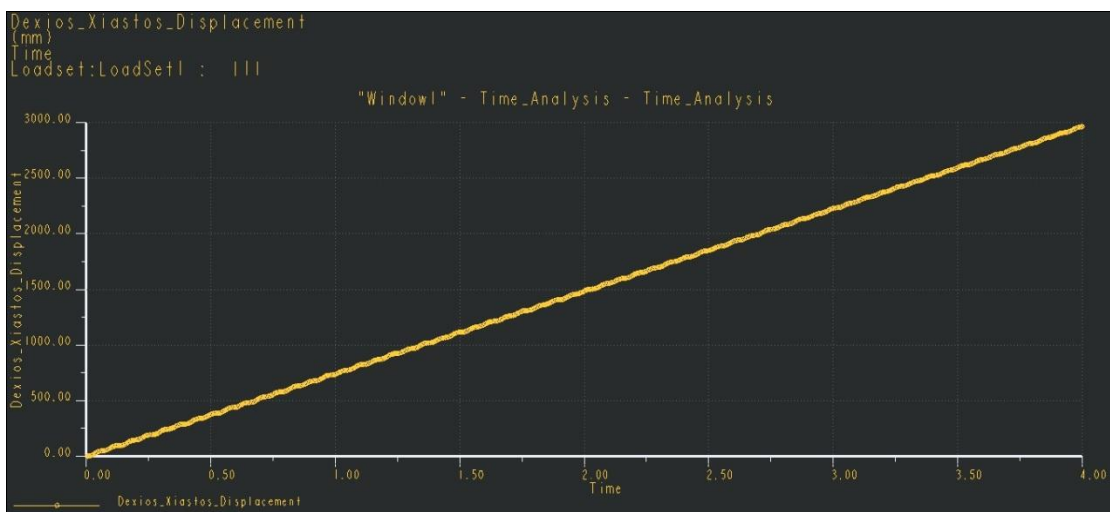
Σχήμα 4.26: Διάγραμμα αριστερού χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.27: Διάγραμμα αριστερού χιαστού μετατόπισης – χρόνου.



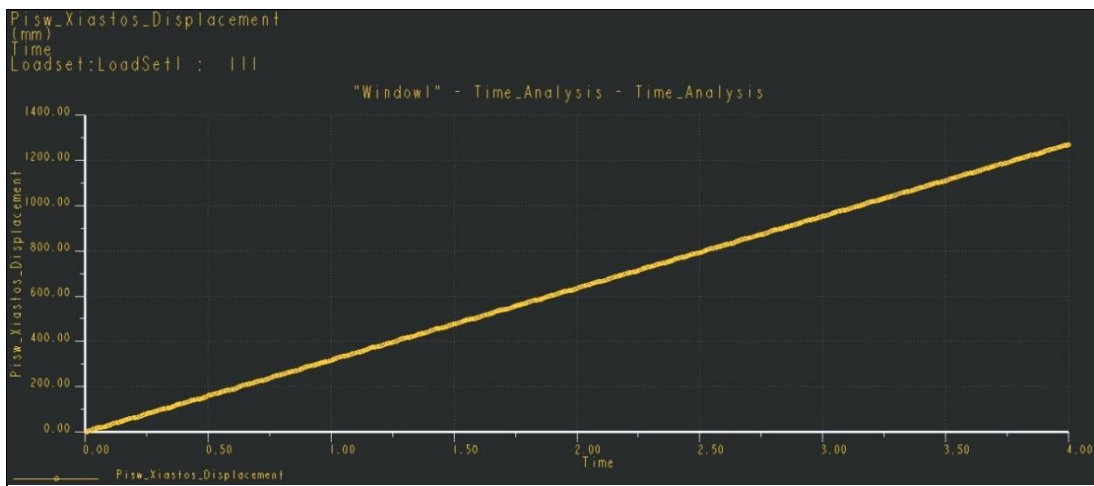
Σχήμα 4.28: Διάγραμμα δεξιού χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.29: Διάγραμμα δεξιού χιαστού μετατόπισης – χρόνου.

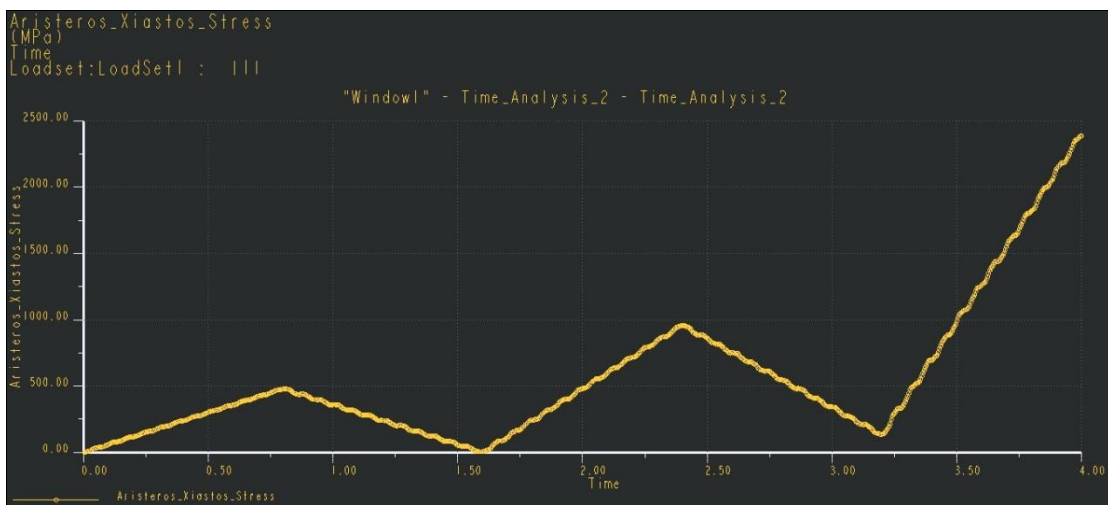


Σχήμα 4.30: Διάγραμμα πίσω χιαστού τάσης – χρόνου.

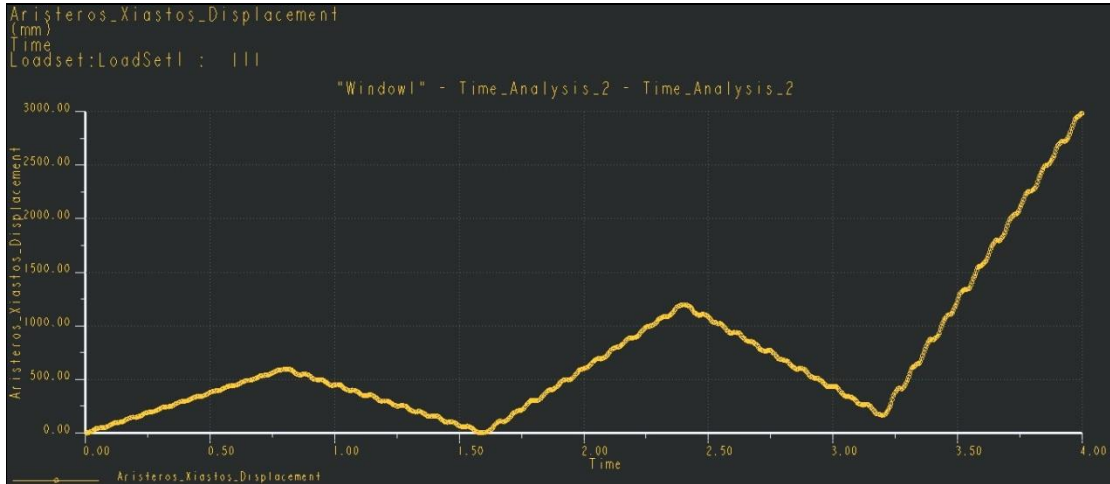


Σχήμα 4.31: Διάγραμμα πίσω χιαστού μετατόπισης – χρόνου.

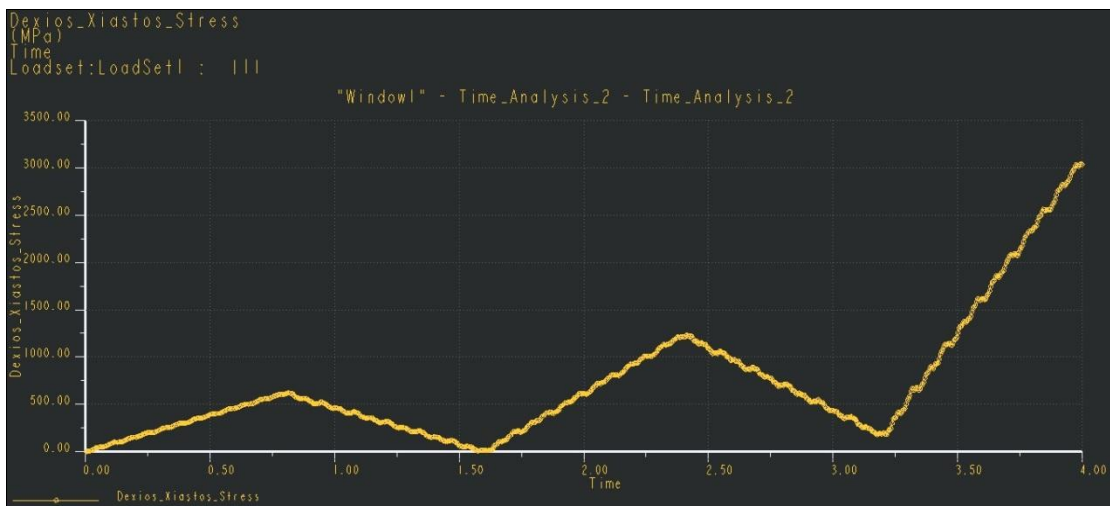
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ



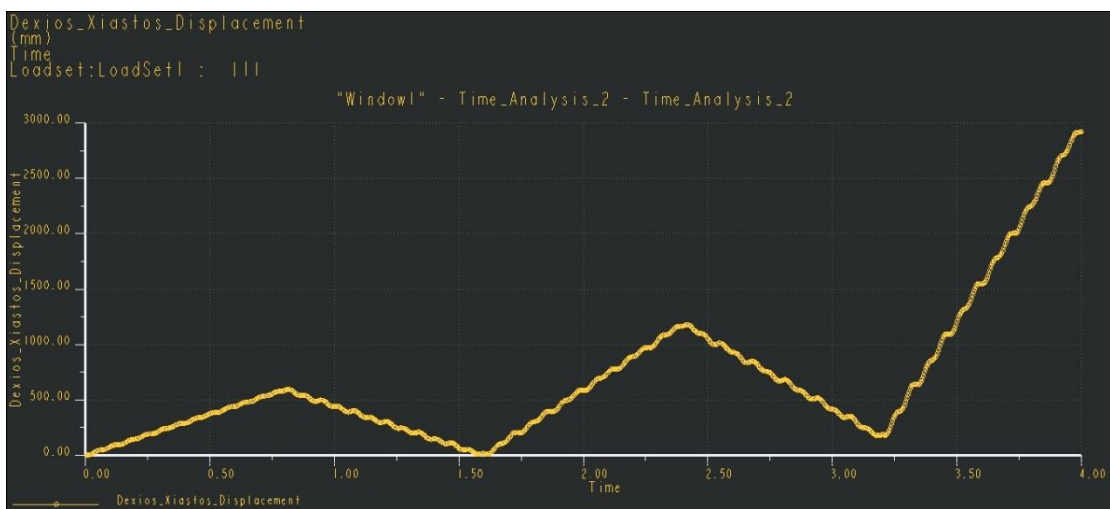
Σχήμα 4.32: Διάγραμμα αριστερού χιαστού τάσης – χρόνου.



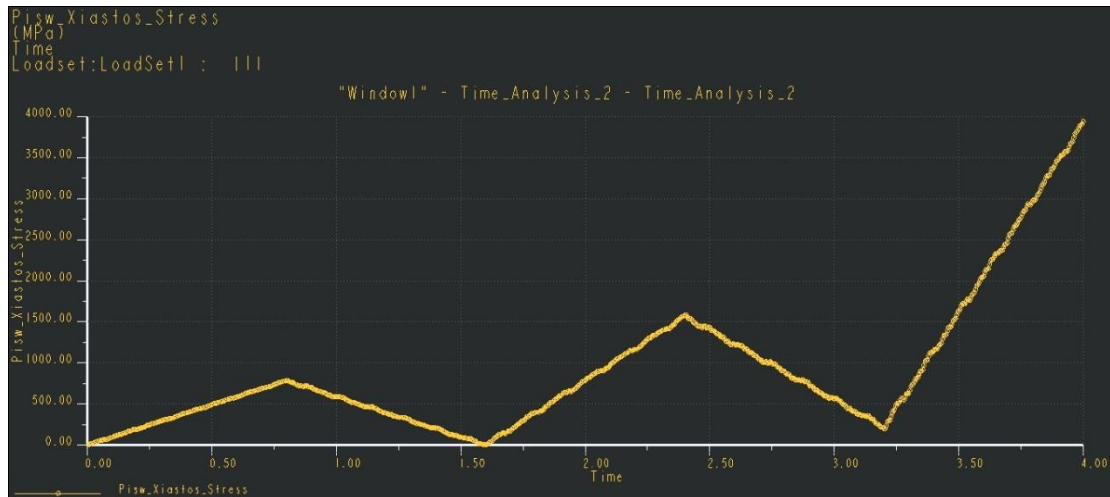
Σχήμα 4.33: Διάγραμμα αριστερού χιαστού μετατόπισης – χρόνου.



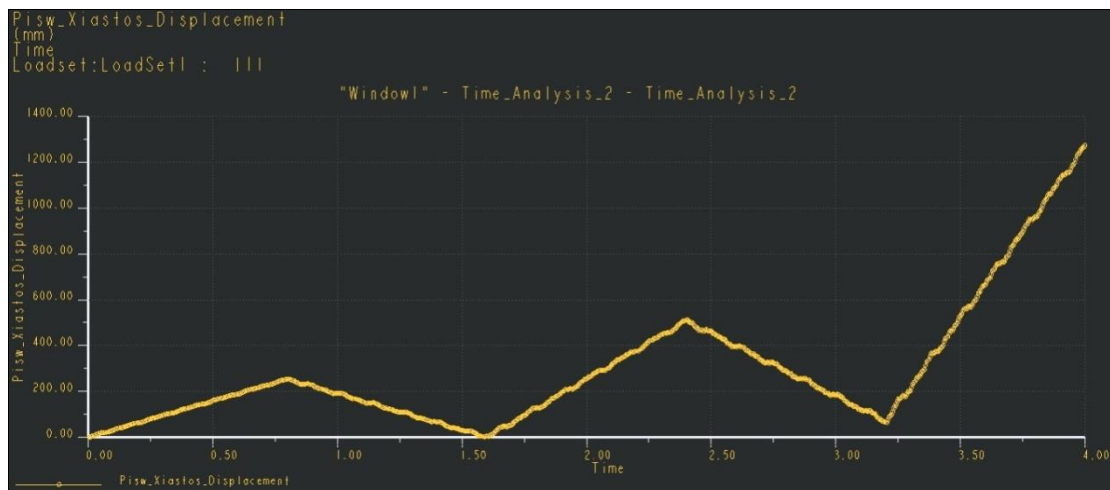
Σχήμα 4.34: Διάγραμμα δεξιού χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.35: Διάγραμμα δεξιού χιαστού μετατόπισης – χρόνου.



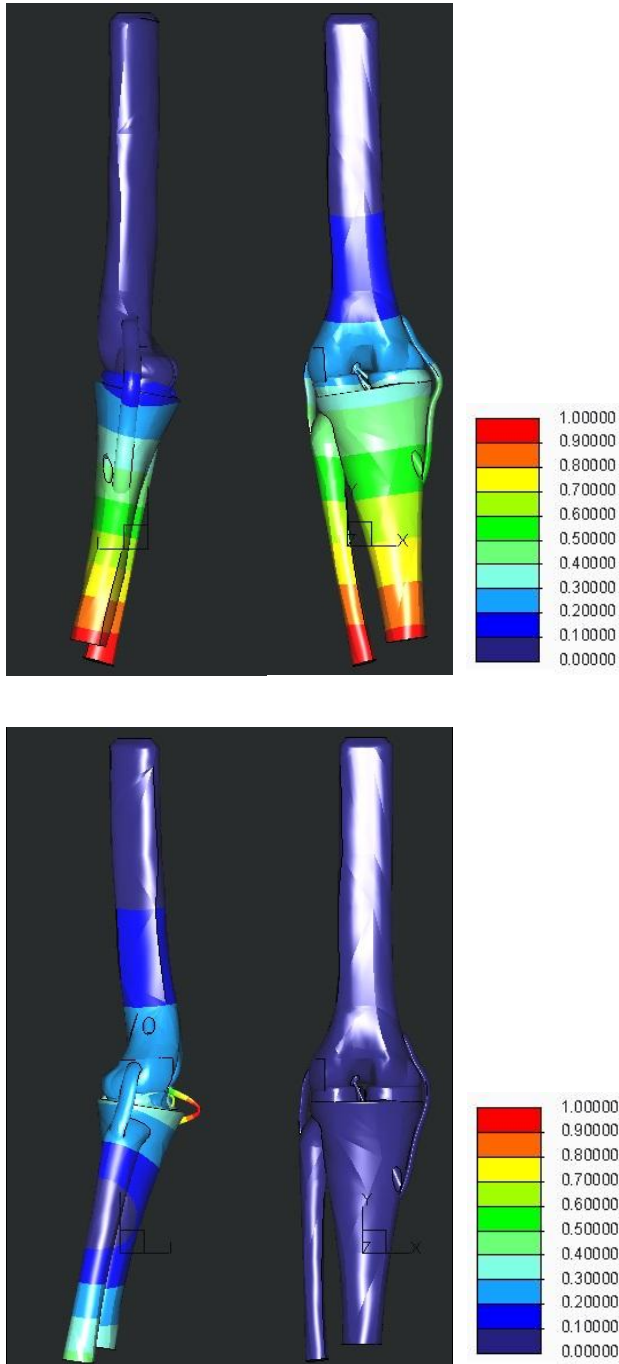
Σχήμα 4.36: Διάγραμμα πίσω χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.37: Διάγραμμα πίσω χιαστού μετατόπισης – χρόνου.

Μέσω των γραφημάτων φαίνεται πώς το γόνατο χωρίς τον εμπρόσθιο χιαστό είναι αρκετά ευάλωτο σε εξωτερικά φορτία και στην συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχει **αστοχία**.

[ΑΠΟΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΑΡΘΡΩΣΗ ΓΟΝΑΤΟΥ]

ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ-ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ

Σχήμα 4.38: Ιδιομορφές υγιούς άρθρωσης γονάτου για μοναδιαία μετατόπιση.

Η πρώτη ιδιομορφή αναφέρεται σε καμπτική απόκριση κατά z με ελεύθερο το κάτω άκρο, η δεύτερη ιδιομορφή αναφέρεται σε καμπτική απόκριση κατά x , η τρίτη ιδιομορφή αναφέρεται σε καμπτική απόκριση κατά z με ελεύθερο το μέσο του

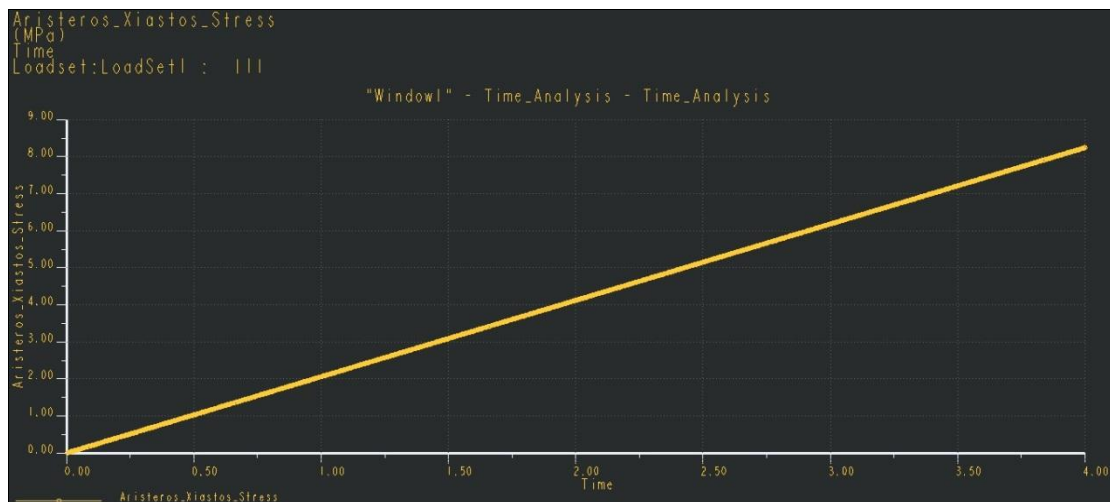
μοντέλου και τέλος η τέταρτη ιδιομορφή αναφέρεται σε περιστροφή γύρω από τον γ άξονα.

Mode Number	Eigenfrequency (Hz)
Mode1	48.2687
Mode2	76.9844
Mode3	162.755
Mode4	202.559

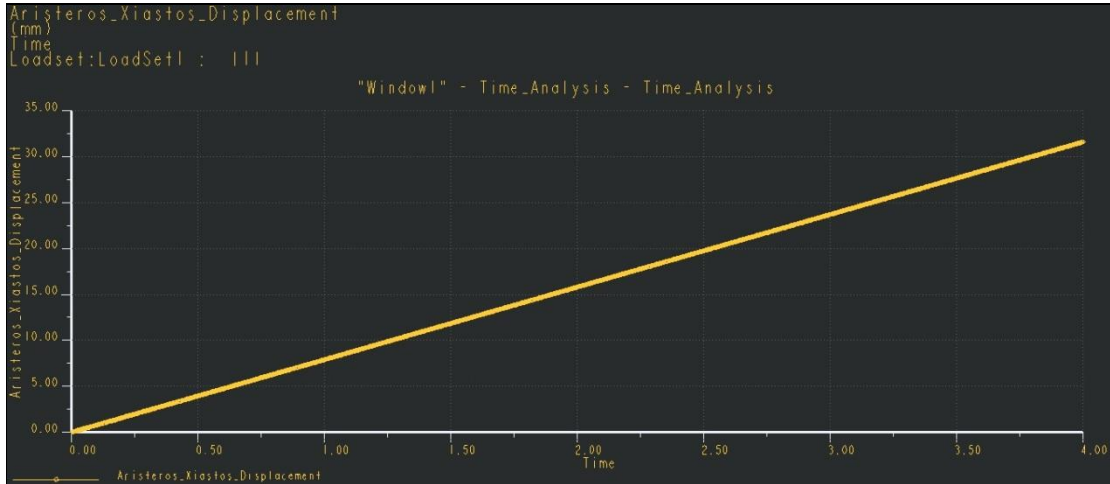
Πίνακας 4.7: Ιδομορφές – ιδιοσυχνότητες.

Στην συνέχεια ακολουθούν τα γραφήματα των αποτελεσμάτων των δυναμικών αναλύσεων χρόνου.

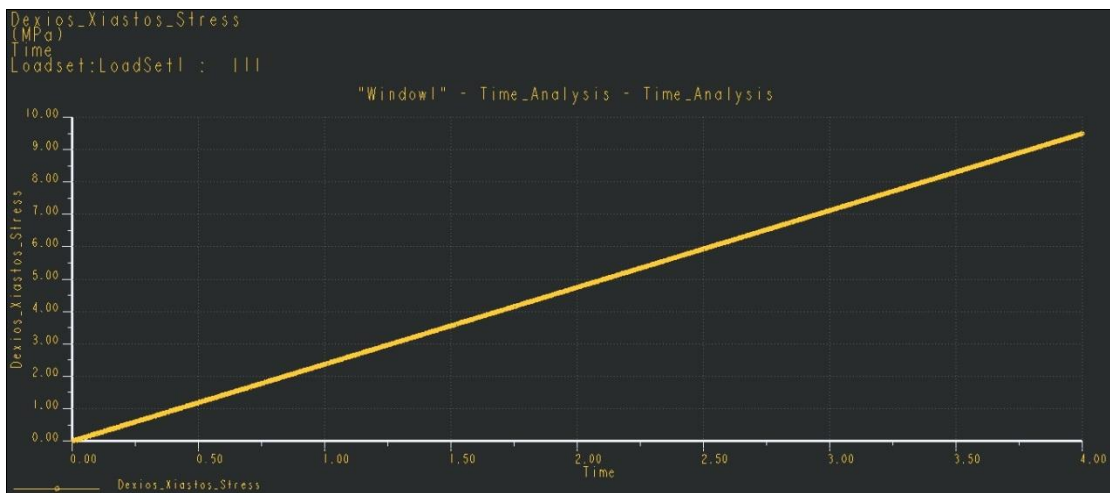
ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ



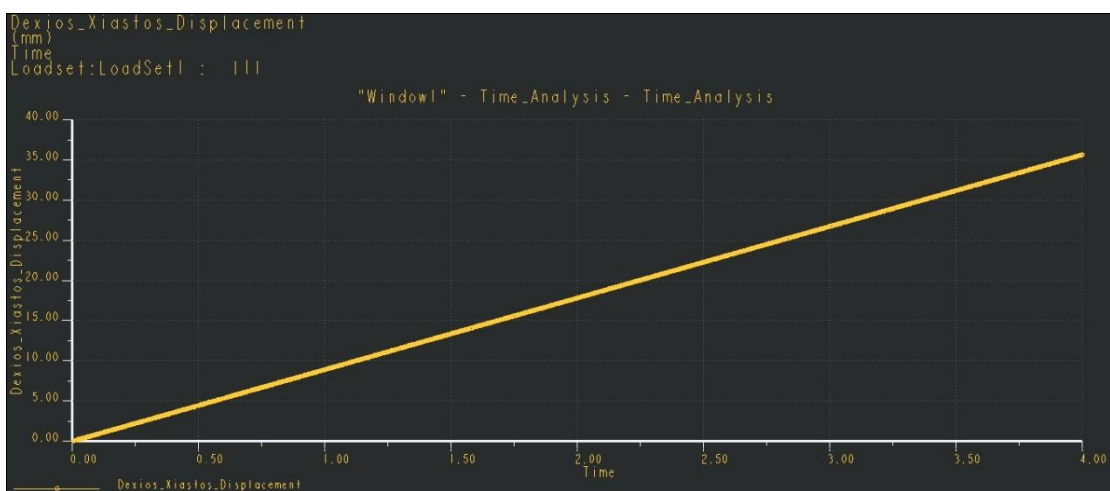
Σχήμα 4.39: Διάγραμμα αριστερού χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.40: Διάγραμμα αριστερού χιαστού μετατόπισης – χρόνου.



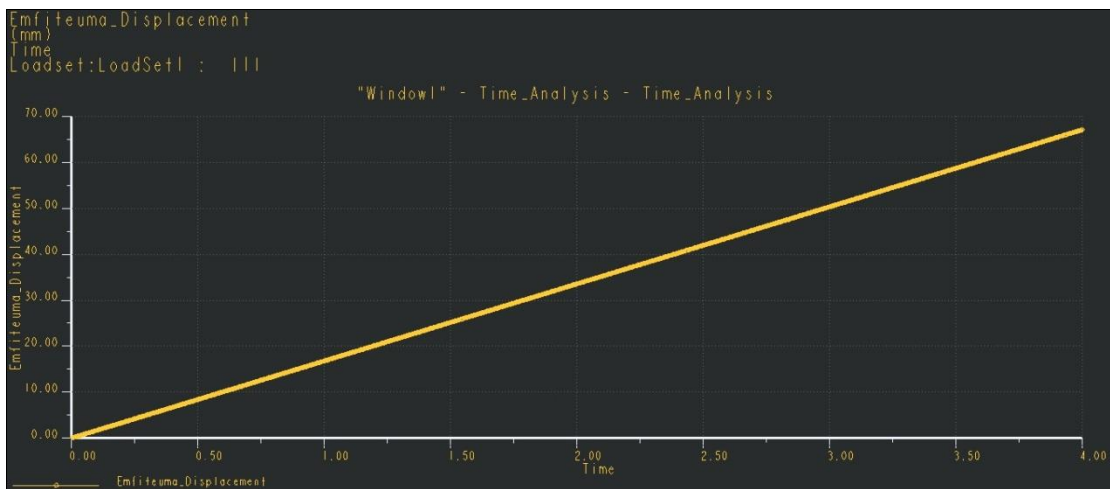
Σχήμα 4.41: Διάγραμμα δεξιού χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.42: Διάγραμμα δεξιού χιαστού μετατόπισης – χρόνου.



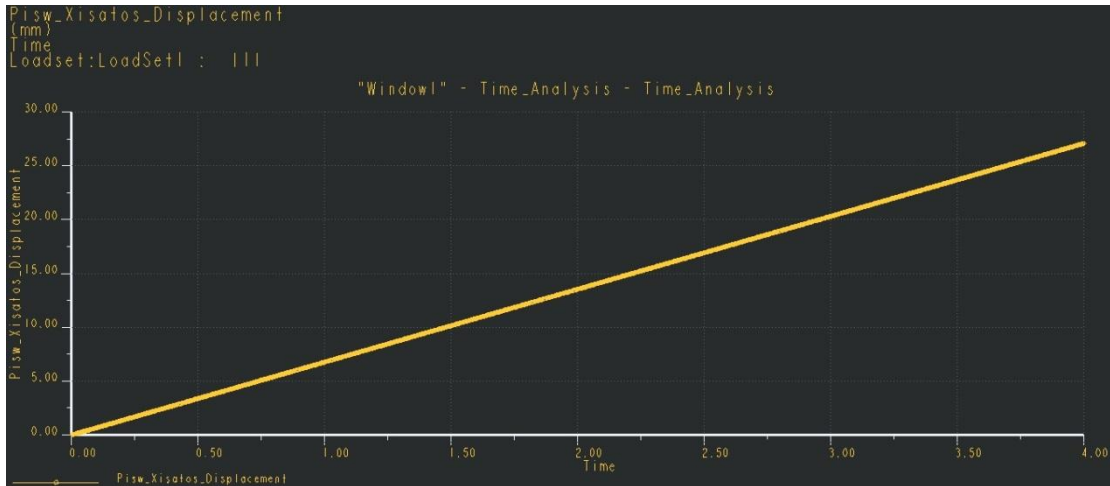
Σχήμα 4.43: Διάγραμμα εμφυτεύματος τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.44: Διάγραμμα εμφυτεύματος μετατόπισης – χρόνου.



Σχήμα 4.45: Διάγραμμα πίσω χιαστού τάσης – χρόνου.

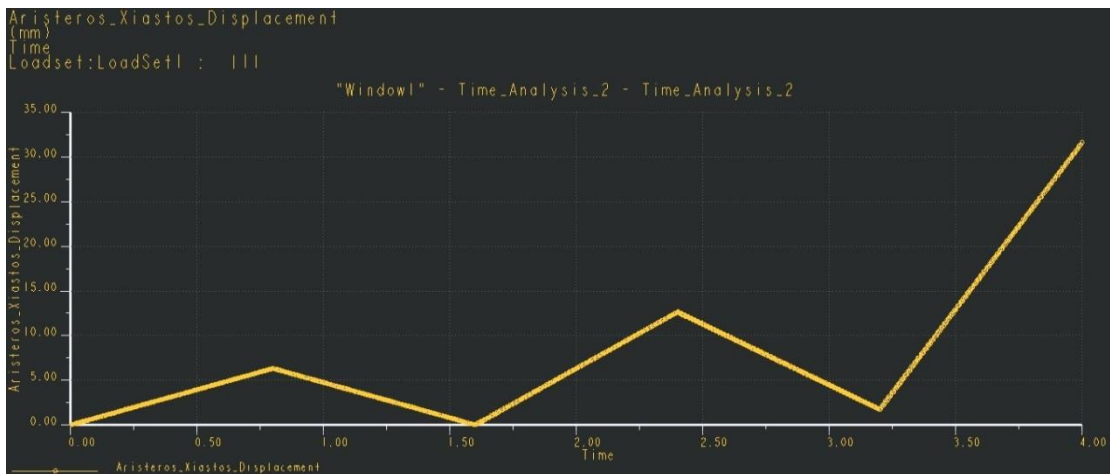


Σχήμα 4.46: Διάγραμμα πίσω χιαστού μετατόπισης – χρόνου.

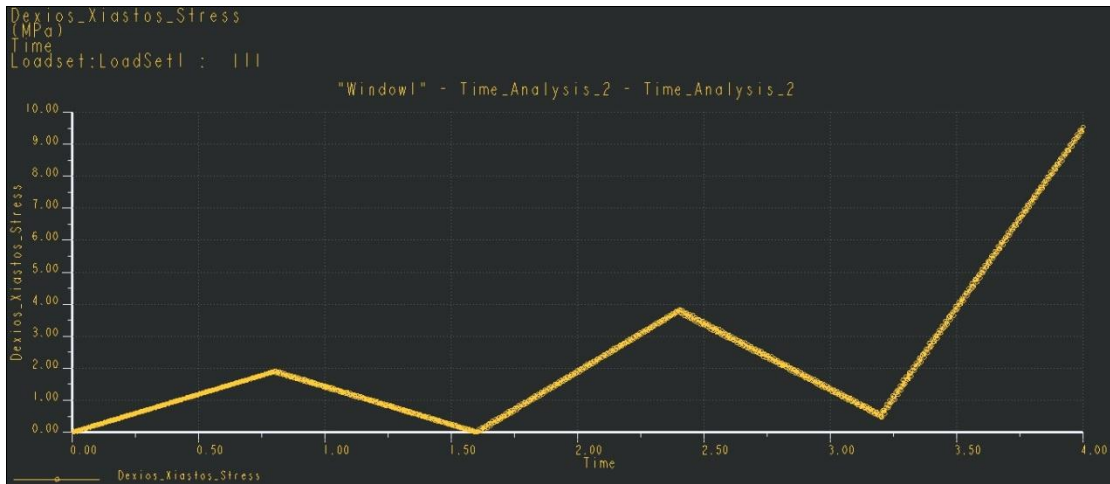
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ



Σχήμα 4.47: Διάγραμμα αριστερού χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.48: Διάγραμμα αριστερού χιαστού μετατόπισης – χρόνου.



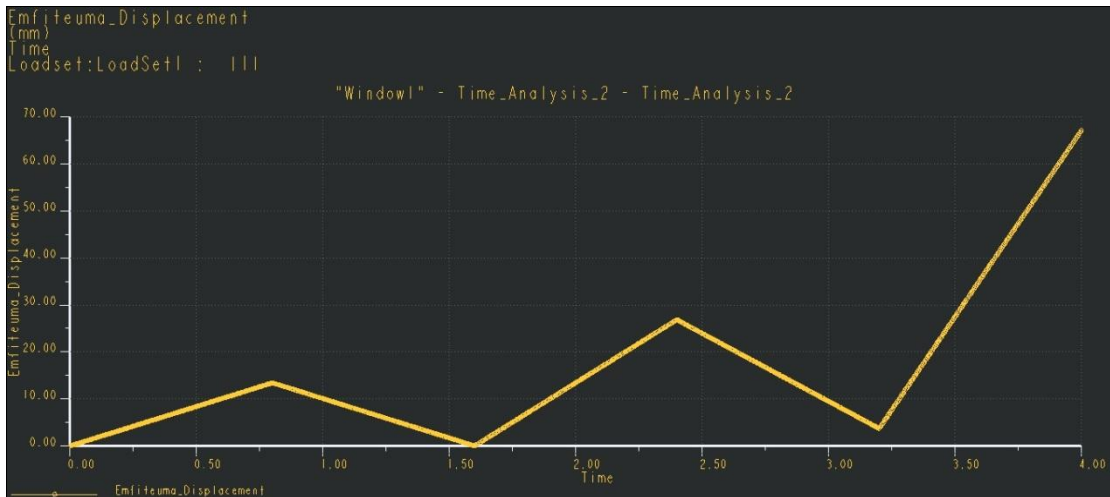
Σχήμα 4.49: Διάγραμμα δεξιού χιαστού τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.50: Διάγραμμα δεξιού χιαστού μετατόπισης – χρόνου.



Σχήμα 4.51: Διάγραμμα εμφυτεύματος τάσης – χρόνου.



Σχήμα 4.52: Διάγραμμα εμφυτεύματος μετατόπισης – χρόνου.



Σχήμα 4.53: Διάγραμμα πίσω χιαστού τάσης – χρόνου.



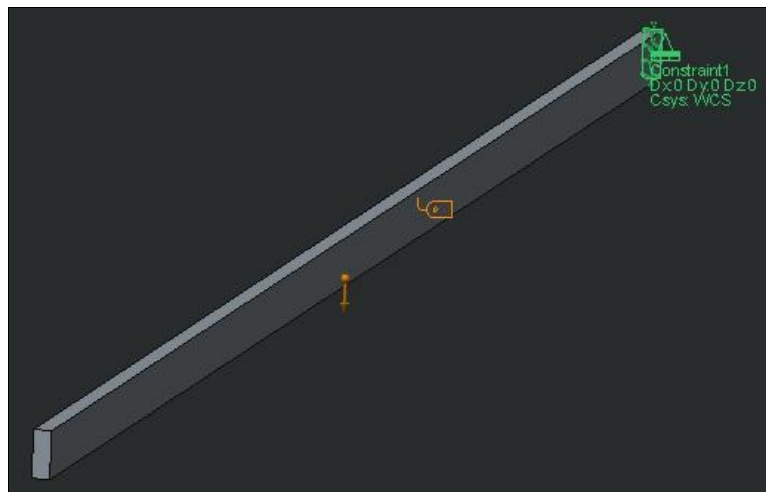
Σχήμα 4.54: Διάγραμμα πίσω χιαστού μετατόπισης – χρόνου.

4.3 Δυναμική ανάλυση προβόλου δοκού με ημιτονοειδή φόρτιση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων.

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται η επίλυση ενός παραδείγματος μίας μονόπακτης συμπαγής δοκού ορθογωνικής διατομής 45X120mm και μήκους 6000mm (**Σχήμα 4.55**). Η δοκός αυτή υποβάλλεται σε φορτίο που μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο και η απόκριση υπολογίζεται όταν αυτή έχει περιέλθει σε ταλάντωση μόνιμης κατάστασης (steady-state). Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι χάλυβας με απεριόριστα ελαστική συμπεριφορά (**Πίνακας 4.8**). Σε αντίθετη περίπτωση εισάγεται μη γραμμικότητα υλικού στο φορέα και συνεπώς δεν μπορεί να εκτελεστεί ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων και εν συνεχεία δυναμική ιδιομορφική ανάλυση.

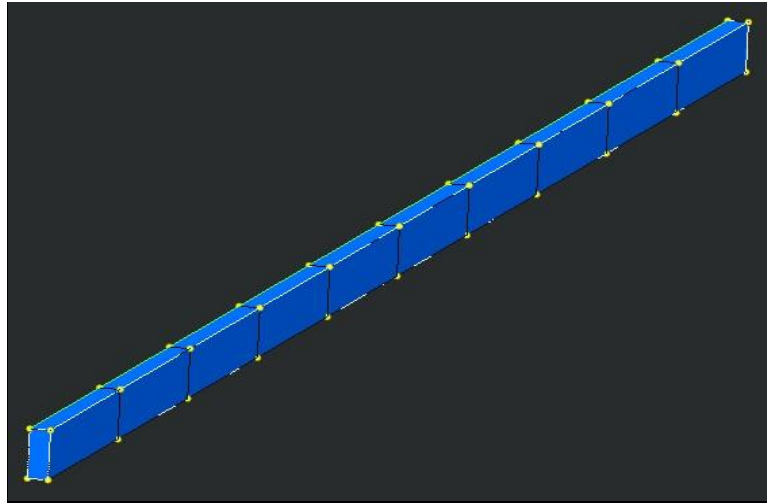
Ιδιότητες Υλικού		
Density(Kg/m ³)	Poisson's Ratio	Young's Modulus(GPa)
7800	0,28	210

Πίνακας 4.8: Ιδιότητες γραμμικά ελαστικού χάλυβα.



Σχήμα 4.56: Χαλύβδινη δοκός στην οποία φαίνεται ο ορισμός του φορτίου και του περιορισμού.

Στη δοκό δημιουργήθηκαν 10 Solid Brick Elements, 84 Edge και 51 Face χρησιμοποιώντας το είδος Mapped Mesh (**Σχήμα 4.57**). Οι κόμβοι που βρίσκονται στην επιφάνεια του τοίχου όπου έχει ορισθεί ο περιορισμός είναι πακτωμένη με αποτέλεσμα να μην εκπληρώνουν κάποια ενέργεια σε κανένα από τους έξι βαθμούς ελευθερίας, έναντι των υπόλοιπων κόμβων της κατασκευής όπου ενεργούν ελεύθερα.



Σχήμα 4.57: Διακριτοποιημένη δοκός.

Για να βρεθεί το εύρος της συχνότητας που θα εφαρμοστεί στην δοκό πρέπει γενικά το μικρότερο μήκος κύματος μεταξύ των κυμάτων που διαδίδονται μέσα στο υλικό της ράβδου κατά την δυναμική της απόκριση να είναι τουλάχιστον δεκαπλάσιο από το χαρακτηριστικό μήκος των στοιχείων του δικτύου της ράβδου. Το χαρακτηριστικό μήκος του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων (internodal interval) που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσο με 0.6m. Άρα θα πρέπει:

$$\lambda \geq 10 \cdot 0.6 = 6m \quad (1.1.1)$$

Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος δίνεται από τη σχέση:

$$u = \lambda * f, \quad (1.1.2)$$

όπου u η ταχύτητα διάδοσης του κύματος, λ το μήκος κύματος και f η συχνότητα του κύματος. Η (1.1.1) λόγω της (1.1.2) γίνεται:

$$\frac{u}{f} \geq 6m \quad (1.1.3)$$

Η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (που είναι γενικά αυτά με το μικρότερο μήκος κύματος) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 3242,96m / sec$$

Όπου G το μέτρο διάτμησης υπολογιζόμενο ως

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 82 \text{ GPa},$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας, ν ο λόγος Poisson και ρ η πυκνότητα.

Τελικά η (1.1.3) γίνεται

$$f \leq \frac{u}{6} \Rightarrow f_{\max} = 0,54 \text{ kHz}$$

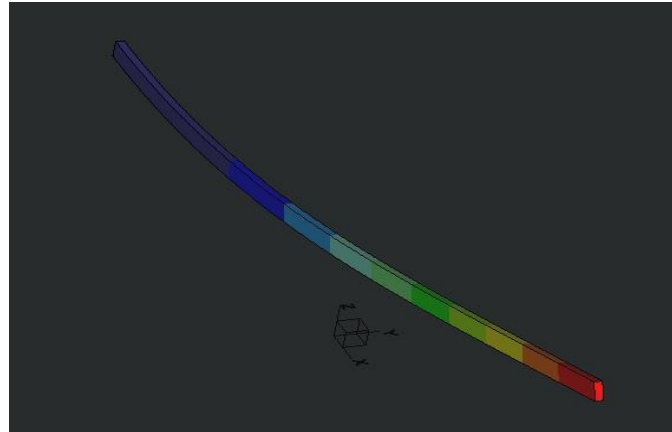
Επομένως, το εύρος της συχνότητας που θα χρησιμοποιηθεί κατά την εξαγωγή των ιδιοσυχνοτήτων θα είναι [0, 0.54kHz].

Αρχικά έγινε μια ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων για τον πρόβολο του παραδείγματος (Modal analysis) η οποία έδωσε τα εξής αποτελέσματα:

Mode Number	Eigenfrequency (Hz)
Mode1	1.051
Mode2	2.799
Mode3	6.583
Mode4	17.506
Mode5	18.424
Mode6	36.084
Mode7	48.874
Mode8	59.606
Mode9	83.491
Mode10	88.962
Mode11	95.367
Mode12	124.123
Mode13	156.791
Mode14	165.057
Mode15	211.730
Mode16	216.364
Mode17	232.675
Mode18	250.476
Mode19	264.108
Mode20	322.187
Mode21	322.484

Mode22	385.899
Mode23	417.495
Mode24	425.618
Mode25	455.242
Mode26	530.218

Πίνακας 4.9: Ιδιοσυχνότητες.



Σχήμα 4.58: Ιδιομορφή 2 (MODE 2).

Από αυτές τις ιδιομορφές, η ιδιομορφή Νο 1 αντιστοιχεί σε κάμψη κατά y και η ιδιομορφή Νο 2 (**Σχήμα 4.58**) σε κάμψη κατά z . Και οι δύο είναι θεμελιώδεις ιδιομορφές για τον άξονά τους. Οι ιδιοσυχνότητες αυτές προκύπτουν και με αναλυτικό υπολογισμό. Η ιδιοσυχνότητα της ιδιομορφής Νο 2 επαληθεύεται αναλυτικά ως ακολούθως. Η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα για κάμψη προβόλου με ομοιόμορφα κατανεμημένη δυσκαμψία και μάζα κατά μήκος του δίνεται από τη σχέση (Chorpa, 1996):

$$\omega_1 = \frac{3.516}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

Η ροπή αδράνειας της διατομής I υπολογίζεται ως:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.045 \cdot 0.12^3}{12} = 6.48 \cdot 10^{-6} m^4$$

Η κατανομή της μάζας κατά μήκος της δοκού m υπολογίζεται ως η μάζα ανα τρέχον μέτρο μήκους της δοκού:

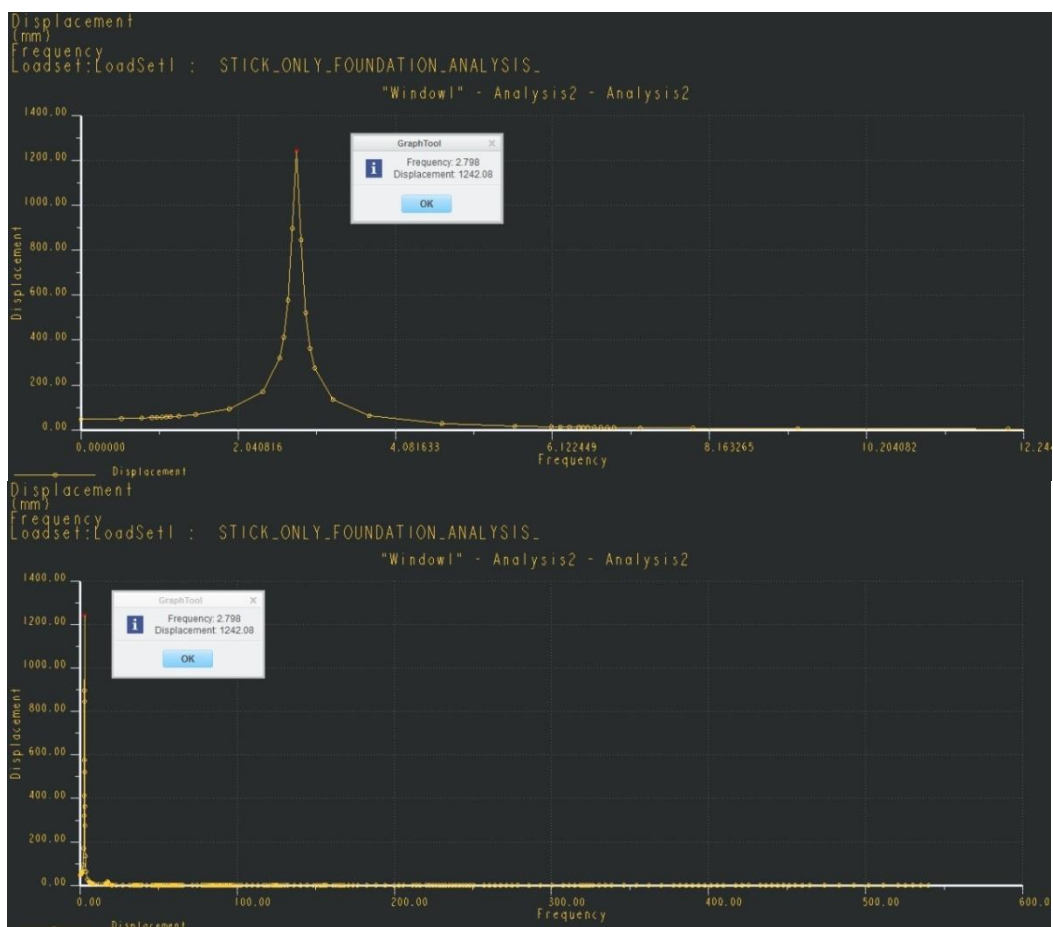
$$m = A \cdot \rho = b \cdot h \cdot \rho = 0.045 \cdot 0.12 \cdot 7800 = 42.12 kg / m$$

Συνεπώς η κυκλική ιδιοσυχνότητα ω_1 είναι:

$$\omega_1 = \frac{3.516}{6^2} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 6.48 \cdot 10^{-6}}{42.12}} = 17.55 \text{ rad / sec}$$

Δηλαδή η ιδιοσυχνότητα ισούται με $f_1 = 17.55 / (2 \cdot \pi) = 2.793 \text{ Hz}$ η οποία σχεδόν ταυτίζεται με αυτή της 2^{ης} ιδιομορφής.

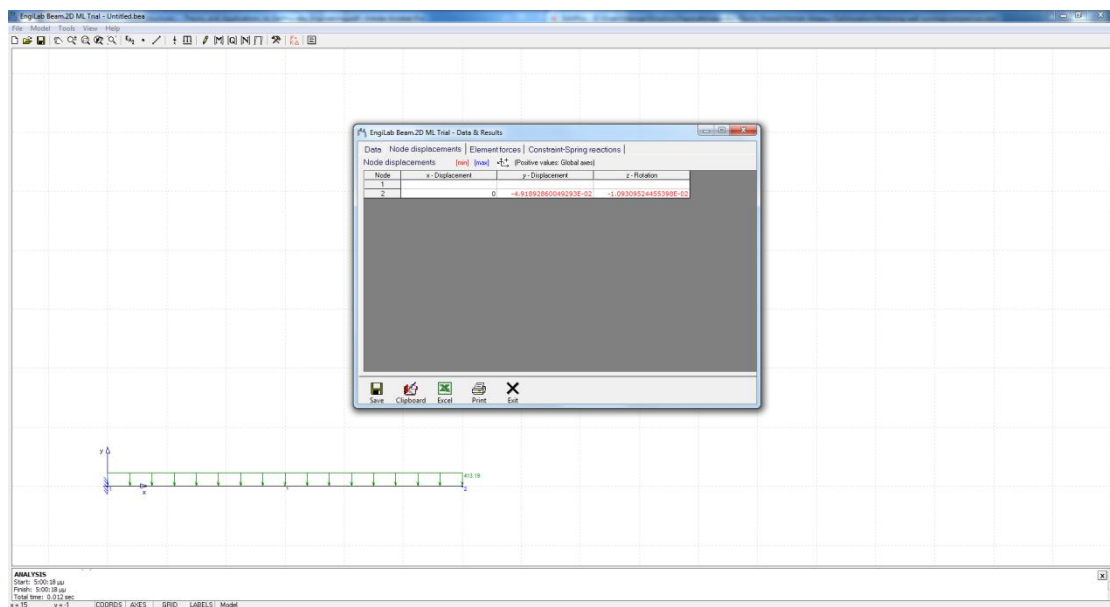
Στη συνέχεια έγινε μια δυναμική ιδιομορφική ανάλυση (**dynamic frequency analysis**) κατά την οποία επιβλήθηκε στη δοκό ομοιόμορφο φορτίο κατά την αρνητική κατεύθυνση του άξονα z το οποίο ενεργεί μέσω επιβαλλόμενης επιτάχυνσης ίσης με 9.81 m/s^2 (φορτίο βαρύτητας). Το φορτίο επιβλήθηκε με συχνότητα ίση με τη ιδιοσυχνότητα της θεμελιώδους καμπτικής ιδιομορφής κατά z με αποτέλεσμα να οδηγήσει το φορέα σε συντονισμό. Ο συντελεστής απόσβεσης τέθηκε ίσος με 2% για όλες τις ιδιομορφές που υπολογίστηκαν κατά την ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων και ανήκουν στο εύρος [0, 540Hz]. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης όσον αφορά την καμπτική απόκριση κατά z φαίνονται στο σχήμα (**Σχήμα 4.59**).



Σχήμα 4.59: Διάγραμμα μετατόπισης – συχνότητας.

Στη δυναμική απόκριση της δοκού συμμετέχουν όλες οι ιδιομορφές που υπολογίστηκαν κατά την ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων. Επειδή όμως μία από αυτές έχει ιδιοσυχνότητα που σχεδόν ταυτίζεται με αυτή του δυναμικά επιβαλλόμενου φορτίου «βαρύτητας», η ιδιομορφή αυτή θα παίξει κυρίαρχο ρόλο στη διαμόρφωση της απόκρισης του φορέα, καθόσον το πλάτος της, λόγω συντονισμού, θα είναι πολύ μεγαλύτερο από το πλάτος των υπολοίπων. Το ότι ο φορέας συντονίζεται στη δεύτερη ιδιομορφή φαίνεται και από τα προηγούμενα σχήματα. Λόγω του συντονισμού, το πλάτος της δυναμικής απόκρισης του φορέα θα είναι σχεδόν ίσο με το πλάτος της ιδιομορφής με την οποία συντονίζεται (εφόσον η συνεισφορά των υπολοίπων ιδιομορφών στο συνολικό πλάτος είναι αμελητέα). Έτσι, από μια απλή στατική ανάλυση κατά την οποία το φορτίο βαρύτητας επιβάλλεται στατικά, προκύπτει βύθιση του ελεύθερου άκρου της δοκού ίση με 0.04918m.

Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιήθηκε απλό πρόγραμμα στατικής ανάλυσης (Beam2D) (Σχήμα 4.60) το οποίο έχει τη δυνατότητα να κάνει στατικές αναλύσεις επιπέδων πλαισίων υπό κατανεμημένα και συγκεντρωμένα φορτία, καθώς και στηρίξεις πλήρους και ελαστικής δέσμευσης (ελατήρια). Το κατανεμημένο φορτίο που επιβλήθηκε στο φορέα κατά την επίλυση στο Beam2D προκύπτει από το γινόμενο της μάζας ανά τρέχον μέτρο m και της σταθεράς της βαρύτητας g , και ισούται με $m \cdot g = 42.12 \cdot 9.81 = 413.19 \text{ N/m}$. Το μοντέλο που επιλύθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.60: Επιφάνεια εργασίας του προγράμματος Beam2D.

Εξάλλου, ο δυναμικός συντελεστής απόκρισης μετατόπισης (displacement dynamic response factor) για μονοβάθμιο ταλαντωτή απόσβεσης ξ δίνεται από τη σχέση (Chopra 1996, σχέση 3.2.22):

$$R_d = \frac{1}{2 \cdot \xi \cdot \sqrt{1 - \xi^2}}$$

Η οποία δίνει για $\xi=2\%$ $R_d \approx 25$. Το πλάτος της ταλάντωσης κατά τη δυναμική απόκριση του φορέα δίνεται θεωρητικά από τη σχέση:

$$A_{dyn} = R_d \cdot A_{st}$$

Όπου A_{dyn} είναι το πλάτος της ταλάντωσης της δοκού κατά το συντονισμό, A_{st} είναι η παραμόρφωση της δοκού λόγω στατικής επιβολής του φορτίου και R_d είναι ο δυναμικός συντελεστής απόκρισης μετατόπισης. Έτσι θα είναι:

$$A_{dyn} = R_d \cdot A_{st} = 25 \cdot 0.04918m = 1.23m$$

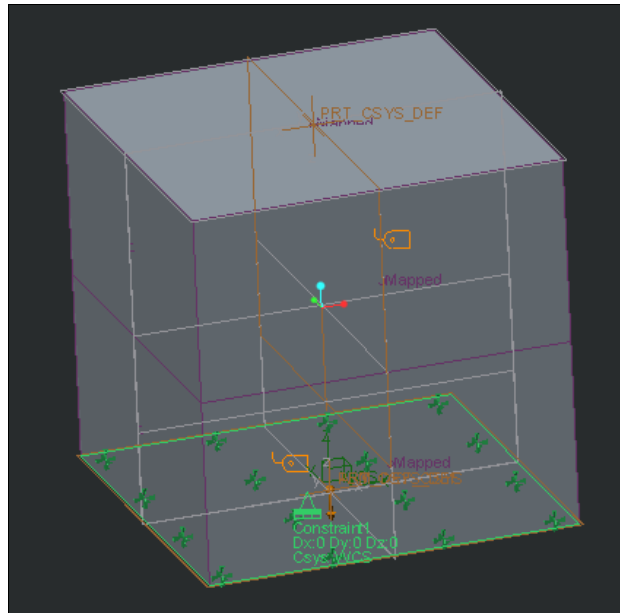
Από το γράφημα **(Σχήμα 4.59)** προκύπτει ότι η μέγιστη μετατόπιση στο ελεύθερο άκρο της δοκού ισούται με 1.24m που είναι πολύ κοντά στο θεωρητικό αποτέλεσμα 1.23m. Η διαφορά που υπάρχει μεταξύ των δυο τιμών οφείλεται κατά κύριο λόγο στο ότι το δυναμικά επιβαλλόμενο φορτίο «βαρύτητας» δεν επιβλήθηκε με συχνότητα ακριβώς ίση με την ιδιοσυχνότητα συντονισμού της δοκού, αλλά με πολύ μικρή διαφορά ως προς αυτή.

4.4. Δυναμική ανάλυση κύβου μετά από συναρμολόγηση με φασματική φόρτιση.

Για τον συγκεκριμένο τύπο ανάλυσης αναπτύχθηκε ένα απλό παράδειγμα που πληρεί τις προϋποθέσεις της εφαρμογής της ανάλυσης σε αρκετά υψηλό βαθμό. Το παράδειγμα αυτό απευθύνεται στον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων, που δημιουργούνται κοντά στις αντιδράσεις στήριξης μιας συναρμογής ενός κύβου **(Σχήμα 4.61)** μήκους 50mm, πλάτους 50mm και ύψους 50mm, μετά την είσοδο ενός φάσματος επιτάχυνσης 9806 mm/sec² ως προς τον X άξονα. Εφαρμόστηκε στο κάτω μέρος του κύβου περιορισμός πάκτωσης ως προς τους έξι βαθμούς ελευθερίας, προστέθηκαν οι βαρυτικές συνθήκες και ορίστηκαν οι ιδιότητες του υλικού. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι χάλυβας με απεριόριστα ελαστική συμπεριφορά **(Πίνακας 4.10)**. Σε αντίθετη περίπτωση εισάγεται μη γραμμικότητα υλικού στο φορέα και συνεπώς δεν μπορεί να εκτελεστεί ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων και εν συνεχεία δυναμική ιδιομορφική ανάλυση.

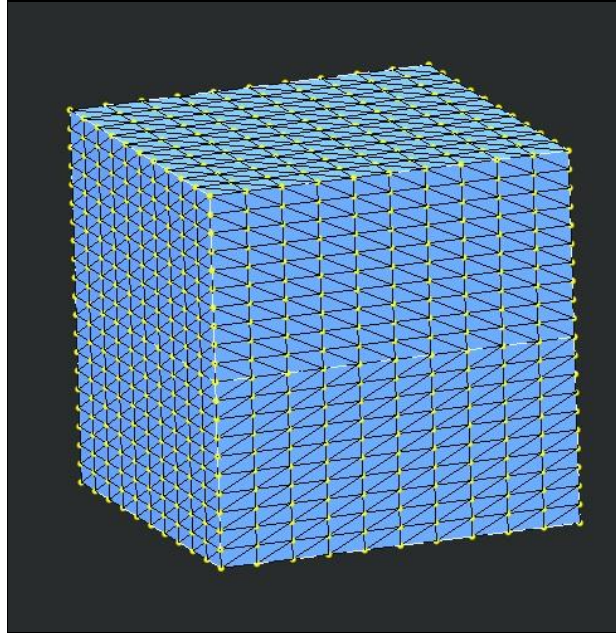
Ιδιότητες Υλικού		
Density(Kg/m ³)	Poisson's Ratio	Young's Modulus(GPa)
7800	0,28	210

Πίνακας 4.10: Ιδιότητες γραμμικά ελαστικού χάλυβα.



Σχήμα 4.61: Συναρμολόγηση κύβου στην οποία φαίνεται ο ορισμός φορτίων και περιορισμών.

Στον κύβο δημιουργήθηκαν 2875 Tetra solid elements, 2017 edges και 4814 faces, χρησιμοποιώντας το εργαλείο **Mapped Mesh→Quad** για την δημιουργία του πλέγματος (**Σχήμα 4.62**). Όλοι οι κόμβοι μεταξύ τους συνδέονται με άκαμπτους δεσμούς. Οι κόμβοι που βρίσκονται στην επιφάνεια του τοίχου όπου έχει ορισθεί ο περιορισμός είναι πακτωμένη με αποτέλεσμα να μην εκπληρώνουν κάποια ενέργεια σε κανένα από τους έξι βαθμούς ελευθερίας, έναντι των υπόλοιπων κόμβων του κύβου όπου ενεργούν ελεύθερα.



Σχήμα 4.62: Διακριτοποιημένος κύβος.

Για να βρεθεί το εύρος της συχνότητας που θα εφαρμοστεί στο τοιχίο πρέπει γενικά το μικρότερο μήκος κύματος μεταξύ των κυμάτων που διαδίδονται μέσα στο υλικό του τοιχίου κατά την δυναμική του απόκριση να είναι τουλάχιστον δεκαπλάσιο από το χαρακτηριστικό μήκος των στοιχείων του δικτύου της ράβδου. Το χαρακτηριστικό μήκος του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων (internodal interval) που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσο με 0.4m. Άρα θα πρέπει:

$$\lambda \geq 10 \cdot 0,005 = 0,05m \quad (1.1.1)$$

Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος δίνεται από τη σχέση:

$$u = \lambda * f, \quad (1.1.2)$$

όπου u η ταχύτητα διάδοσης του κύματος, λ το μήκος κύματος και f η συχνότητα του κύματος. Η (1.1.1) λόγω της (1.1.2) γίνεται:

$$\frac{u}{f} \geq 0,05m \quad (1.1.3)$$

Η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (που είναι γενικά αυτά με το μικρότερο μήκος κύματος) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 3242,96m / sec$$

Όπου G το μέτρο διάτμησης υπολογιζόμενο ως

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 82 \text{ GPa},$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας, ν ο λόγος Poisson και ρ η πυκνότητα.

Τελικά η (1.1.3) γίνεται

$$f \leq \frac{u}{0,05} \Rightarrow f_{\max} = 64,859 \text{ kHz}$$

Επομένως, το εύρος της συχνότητας που θα χρησιμοποιηθεί κατά την εξαγωγή των ιδιοσυχνοτήτων θα είναι $[0, 64,859 \text{ kHz}]$.

Αρχικά έγινε μια ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων για τον πρόβολο του παραδείγματος (Modal analysis) η οποία έδωσε τα εξής αποτελέσματα:

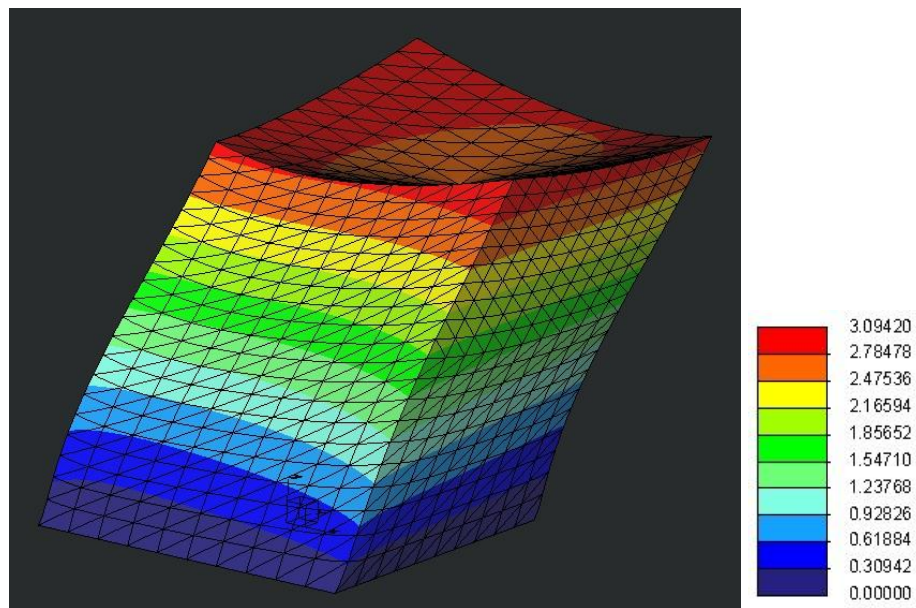
Mode Number	Eigenfrequency (Hz)
Mode1	11038.1
Mode2	11038.8
Mode3	15109.2
Mode4	26301.2
Mode5	29291.7
Mode6	29292.4
Mode7	36200.6
Mode8	42913.2
Mode9	44698.9
Mode10	45521.9
Mode11	45525.2
Mode12	45583.6
Mode13	48432.1
Mode14	50213.4
Mode15	50763.7
Mode16	50764.5
Mode17	54116
Mode18	54620.5
Mode19	54627.5

Mode20	59019.8
Mode21	63955.9
Mode22	63969.4
Mode23	64486.3

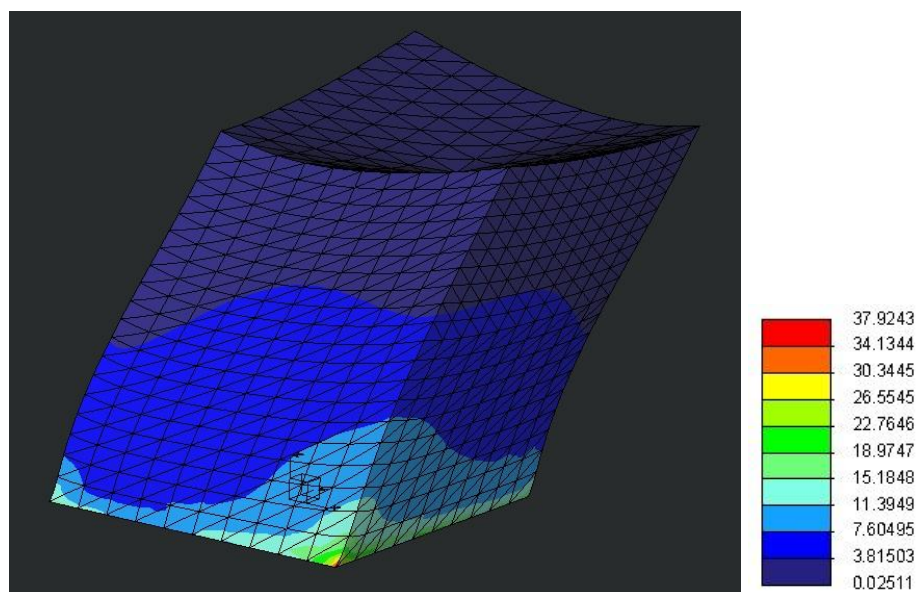
Πίνακας 4.11: Ιδιοσυχνότητες.

Στην συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης κρούσης.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Σχήμα 4.63: Μετατόπιση του κύβου εκφρασμένη σε nm.



Σχήμα 4.64: Κατανομή τάσεων στον κύβο εκφρασμένες σε Kpa.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Με την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στο βιομηχανικό κλάδο, σημειώθηκε σημαντική αύξηση της παραγωγικότητας και περιορίστηκε αρκετά ο παράγοντας λάθους ανά παραγόμενο προϊόν και τα χρονοδιαγράμματα παραγωγής τους.

Βέβαια, η μέθοδος αυτή έχει πολλές εφαρμογές σε πληθώρα επιστημών. Ο κλάδος της εμβιομηχανικής είναι ένας από αυτές ο οποίος μελετάει την ανθρώπινη συμπεριφορά στις καθημερινές δραστηριότητες του, έχοντας ως απώτερο σκοπό την παροχή σημαντικής βοήθειας μελετώντας και αποκαθιστώντας σχεδόν κάθε ορθοπεδικό πρόβλημα.

Με την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αυξάνονται κατά πολύ οι πιθανότητες αποκατάστασης αρκετά σοβαρών ατυχημάτων, δημιουργώντας έτσι έναν ισχυρό δεσμό μεταξύ της επιστήμης της ιατρικής και της μηχανικής, όπου το άθροισμα τους ισούται με την επίτευξη της ανθρώπινης ακεραιότητας. Είναι ένας επιστημονικός τομέας ο οποίος μέσω των εφαρμογών αυτών βελτιώνεται συνεχώς. Ακόμα βρίσκεται σε ένα αρχικό στάδιο το οποίο όμως είναι μια γερή βάση για το μέλλον της ανθρωπότητας.

Μέσα στην εργασία αναφέρεται η διαδικασία αποκατάστασης σε περίπτωση ολικής ρήξης συνδέσμων, όπου γίνεται εγχείρηση και ο κατεστραμμένος τένοντας αντικαθιστάται από τένοντες οι οποίοι αφαιρούνται από τον μηρό. Ο βέλτιστος τρόπος σχεδίασης αλλά και η κατάλληλη τοποθέτηση των εξαρτημάτων που θα συγκρατούν τον τένοντα ανάμεσα στο μηριαίο οστό και την κνήμη είναι ένας δύσκολος στόχος όπου η μηχανική θέτει ως υψηλό στόχο. Κάθε απρόσμενο λάθος μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τον μηνίσκο ακόμη και την δομή των οστών, καθώς η κλίση με την οποία θα τοποθετηθούν τα εξαρτήματα συγκρατήσεις του τένοντα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο διότι μπορεί να αφαιρεθεί περίσσιο υλικό η ακόμα και να τραυματιστούν οι χιαστοί.

Χρησιμοποιώντας την βοήθεια των μεθόδων αυτών μπορεί να επιτευχθεί βελτιστοποίηση σε πολύ μεγάλο βαθμό και να προβλεφτούν πιθανοί τραυματισμοί στο μέλλον. Το συγκεκριμένο μοντέλο στην εργασία αυτή δοκιμάστηκε σε απλές περιπτώσεις στατικών φορτίων αλλά και σε σύνθετα δυναμικά προβλήματα στα οποία ένας άνθρωπος εκτίθεται επί καθημερινής βάσης.

Η δυνατότητα προσομοιώσεις δυναμικών προβλημάτων με την χρήση προγραμμάτων CAD/CAE είναι πλέον απαραίτητο εργαλείο για τον έλληνα μηχανικό ο οποίος έχει να αντιμετωπίσει αρκετά προβλήματα δυναμικής φύσεως.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Woo, S. L-Y., Almarza, A.J., Liang, R., Fisher, M. B., 2007, "Functional Tissue Engineering of Ligament and Tendon Injuries", *Translational Approaches In Tissue Engineering And Regenerative Medicine*, Book Chapter no 9, Artech House Publisher, ISBN-10: 1596931116, ISBN-13: 978-1596931114.
- [2] Yousif, A.E., Al-Ruznamachi, S.R.F., 2009, "A Statical Model of the Human Knee Joint", *25th Southern Biomedical Engineering Conference 2009*, IFMBE Proceedings, **24**, pp. 227-232.
- [3] Song, Y., Debski, R.E., Musahl, V., Thomas, M., Woo, S. L.-Y., 2004, "A three-dimensional finite element model of the human anterior cruciate ligament: a computational analysis with experimental validation", *J. Biomech*, **37**, pp. 383-390.
- [4] Petousis, M., Vairis, A., Yfanti, S., Kandyla, B., Chrysoulakis, Chr., 2011, "Study of a 3D knee model", *7th International Conference on New Horizons in Industry, Business and Education*, Chios island, Greece
- [5] Pena, E., Calvo, B., Martinez, M.A., Doblare, M., 2006, "A three-dimensional finite element analysis of the combined behaviour of ligaments and menisci in the healthy human knee joint", *Journal of Biomechanics*, **39**, pp. 1686–1701.
- [6] Moglo, K.E., Shirazi-Adl, A., 2003 "Biomechanics of passive knee joint in drawer: load transmission in intact and ACL-deficient joints", *Knee*, **125**, pp. 265-276.
- [7] Σχεδιασμός τροχίλατης γερανογέφυρας με χρήση CAD / CAE λογισμικού (Πτυχιακή εργασία, Παπαδέας Οδυσσέας).
- [8] Τρισδιάστατη μοντελοποίηση άρθρωσης γονάτου και μελέτη τάσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Πτυχιακή εργασία, Χρυσουλάκης Χρίστος).
- [9] Μηχανική του απαραμόρφωτου στερεού – Στατική Δρ. Π.Α. Βουθούνης Αθήνα 2003 ISBN: 960-85431-3-4.