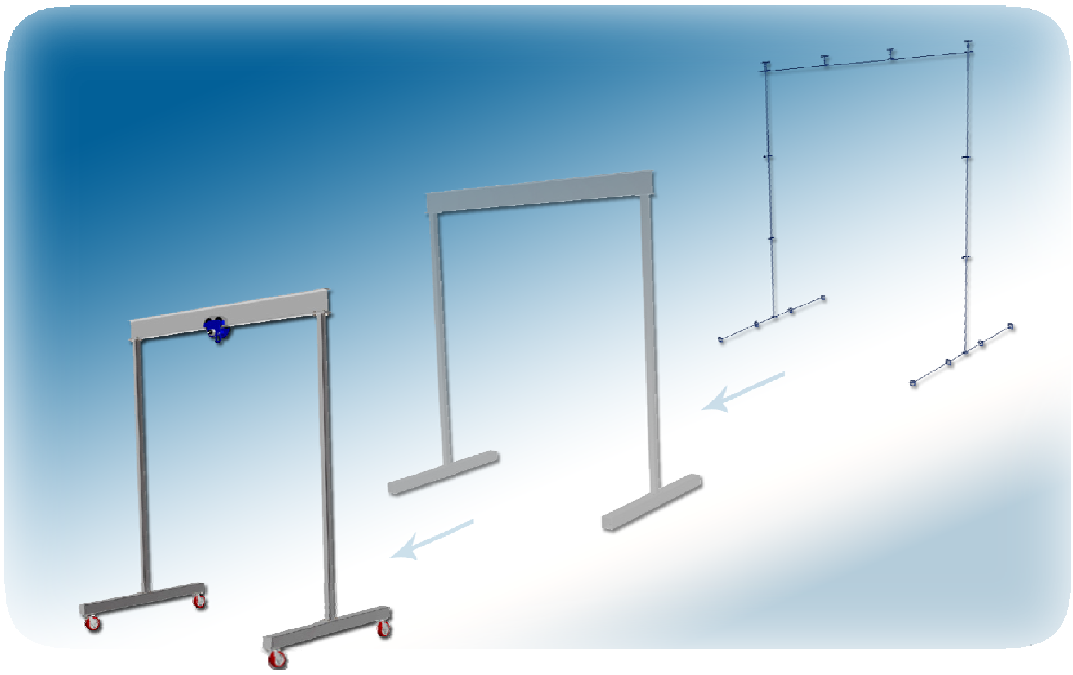
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

Τμήμα μηχανολογίας



Πτυχιακή εργασία

Σχεδιασμός τροχήλατης γερανογέφυρας με χρήση παραμετρικού CAD/CAE λογισμικού

Παπαδέας Οδυσσέας ΑΜ 4300

Επόπτης Καθηγητής: Πετούσης Μάρκος

Ηράκλειο 2008-2009

Περίληψη

Η ακόλουθη πτυχιακή εργασία ασχολείται με το σχεδιασμό και την ανάλυση ενός τρισδιάστατου μοντέλου γερανογέφυρας με τη χρήση της παραμετρικής τεχνολογίας. Ο σχεδιασμός μιας κατασκευής αποτελεί το βασικότερο στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας. Η νέα τάση στον τομέα του σχεδιασμού είναι ο σχεδιασμός της κατασκευής στον υπολογιστή και στην συνέχεια η ανάλυση της με ειδικευμένα προγράμματα, τα οποία είναι ικανά να εξάγουν αποτελέσματα με ταχύτητα και ακρίβεια που για τον ανθρώπινο νου είναι ασύλληπτες. Στην αγορά υπάρχουν διαθέσιμα αρκετά αξιόπιστα προγράμματα, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα τόσο του σχεδιασμού όσο και της ανάλυσης των μοντέλων, εξοικονομώντας χρήματα και εξασφαλίζοντας τη συμβατότητα των δεδομένων. Το pro/engineer-mechanica είναι ένα από αυτά, που σαν αντικείμενο τους έχουν το σχεδιασμό με τη χρήση της παραμετρικής τεχνολογίας και την ανάλυση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μέσω του pro/engineer θα πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός της γερανογέφυρας και με το pro/Mechanica θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση δίνοντας έμφαση στις εντολές που θα χρησιμοποιηθούν στο pro/Mechanica. Καθώς και μια σειρά άλλων αναλύσεων όπως η ανάλυση για την επίδραση της βαρύτητας στο μοντέλο της γερανογέφυρας και η ανάλυση της κύρτωσης (λυγισμού) λόγω του φορτίου του ενός (1) τόνου. Γίνεται, επίσης, αναφορά και στον τρόπο με τον οποίο ένα μοντέλο μεταφέρεται από τον πραγματικό κόσμο στον εικονικό κόσμο του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολους τους ανθρώπους οι οποίοι βοήθησαν στην περάτωση αυτης της εργασίας. Θα ηταν παράλειψη να μην αναφερθώ σε ολους εκείνους που μου συμπαραστάθηκαν σε αυτην την προσπάθεια.

Κατά κύριο λόγω, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου από το Τ.Ε.Ι Κρήτης κ. Πετούση Μάρκο, ο οποίος με υποστήριξε καθ'όλη τη διάρκεια της πτυχιακής εργασίας και μου εξασφάλισε την παροχή της απαραίτητης υλικοτεχνικής υποδομής, για την ολοκληρωση της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τους γονείς μου, Γεώργιο και Αγγελική Παπαδέα και τα αδέλφια μου Δημήτρη και Ελένη για την εμπιστοσύνη και την υποστήριξη τους σε κάθε επιλογή μου.

Επίσης θα ηθελα να ευχαριστήσω και τους Παναγιώτη Λουκίνα, Όλγα Χαβιάρη, Αθανάσιο Ρήγα, Θοδωρή Θεοδώρου και Μανώλη Καρυωτάκη για την βοήθεια και την απεριόριστη ψυχολογική υποστήριξη και κατανόηση που μου παρείχαν οποτε αυτή χρειάστηκε.

Παπαδέας Οδυσσέας

Ηράκλειο, Οκτώβριος 2009

Περιεχόμενα

I. Εισαγωγή 6
II. Στόχος της εργασίας 6
III. Διάρθρωση εργασίας 6
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία. 8
1.1 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. [Finite Element Analysis (FEA)] 8
1.2 Η εξέλιξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. 9
1.3 Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων και τα γενικά στάδια επεξεργασίας. 10
1.4 Βήματα προετοιμασίας για ανάλυση 12
1.5 Μέθοδοι δημιουργίας πλέγματος. 14
1.5.1 Μέθοδος H-στοιχείων 14
1.5.2 Μέθοδός P-στοιχείων [Μέθοδος Mechanica]. 15
1.5.3 Πλεονεκτήματα της P-μεθόδου. 17
1.6 Ακρίβεια σε μια ανάλυση. 17
1.7 Πηγές λαθών. 17
1.8 Διαφορές σχεδιαστικού μοντέλου και μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. 18
1.9 Προσοχή στη χρήση των προγραμμάτων FEA. 19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εισαγωγή στο Pro/mechanica. 21
2.1 Εισαγωγή στο λογισμικό pro/mechanica. 21
2.2 Ενότητες λειτουργίας. 21
2.3 Τρόποι λειτουργίας. 22
2.4 Τύποι μοντέλων και στοιχείων. 23
2.5 Περιβάλλον εργασίας pro/mechanica. 24
2.6 Μέθοδοι σύγκλησης. 25
2.8 Αρχεία πού παράγει το mechanica. 27
2.7 Συστήματα μονάδων. 26
2.9 Οδηγός διαδικασίας (process guide). 29
2.10 Βοήθεια που παρέχει το pro/mechanica (help center). 29
2.11 Στοιχεία δοκών (beams element). 30
2.11.1 Σύστημα συντεταγμένων σχήματος δοκού. 30
2.11.2 Σύστημα συντεταγμένων δράσης των δοκών 31

2.12 Φορτίο βαρύτητας [Gravity Load]. 32
2.13 Φορτίο λυγισμού [buckling Load]. 33
2.13.1 Συντελεστής φορτίου λυγισμού (BLF). 34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ανάλυση της γερανογέφυρας 35
3.1 Προμελέτη γερανογέφυρας. 35
3.2 Περιγραφή σχεδίασης. 37
3.2 Προετοιμασία του μοντέλου για ανάλυση. 39
3.3 Ξεκινώντας το pro/mechanica. 39
3.4 Δημιουργία επιφάνειας. 40
3.5 Προσδιορίζοντας το υλικό. 41
3.6 Εφαρμόζοντας τους περιορισμούς. 42
3.7 Εφαρμόζοντας το φορτίο. 44
3.8 Επεξεργασία οθόνης. 45
3.9 Δημιουργία της ανάλυσης. 46
3.10 Υλοποίηση της ανάλυσης. 47
3.11 Εμφάνιση αποτελεσμάτων. 49
3.12 Παράθυρα αποτελεσμάτων. 49
3.13 Εφαρμογή Φορτίου βαρύτητας. 51
3.14 Ανάλυση λυγισμού. 52
3.15 Δημιουργία και επεξεργασία πλέγματος. 53
3.15.1 Συμπέρασμα. 56
Επίλογος. 57
Παράρτημα: υπολογισμός αντοχής. 58
Βιβλιογραφία. 66

I. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η διαδικασία σχεδιασμού έχει αλλάξει ριζικά σε σχέση με το παρελθόν και αυτό οφείλεται στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων. Τα χρονοβόρα και υψηλού κόστους πρότυπα έχουν αντικατασταθεί από τρισδιάστατα εικονικά μοντέλα που σχεδιάζονται και αναλύονται μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών, μειώνοντας σημαντικά το κόστος παραγωγής. Στην αγορά υπάρχουν αρκετά αξιόπιστα πακέτα που είναι ικανά να ανταπεξέλθουν ακόμα και στο πιο απαιτητικό σχεδιαστικό πρόβλημα, με ταχύτητα που για τον ανθρώπινο νου είναι ασύλληπτη. Η τεχνολογία αυτή συνεχώς εξελίσσεται δημιουργώντας μια νέα προοπτική στον κλάδο της μηχανολογίας, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί τον πλέον αξιόπιστο τρόπο σχεδιασμού και ανάλυσης των κατασκευών.

II. Στόχος της εργασίας

Η εργασία που πραγματοποιήθηκε έχει σαν στόχο τη μελέτη και την κατανόηση των συγχρόνων μεθόδων σχεδιασμού, ειδικότερα να εξετάσει το pro/mechanica σαν εργαλείο σχεδιασμού, με αντικείμενο σχεδιασμού μια γερανογέφυρα αντοχής ενός (1) τόνου.

III. Διάρθρωση εργασίας .

Η εργασία χωρίζεται σε τρία κεφάλαια και έχει την εξής δομή:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, χωρίς μαθηματική προσέγγιση, παρουσιάζοντας, κυρίως, ιστορικά στοιχεία και πληροφορίες που αφορούν περισσότερο τη σχεδιαστική προσέγγιση της μεθόδου. Παράλληλα, γίνεται αναφορά στα στάδια επεξεργασίας που πρέπει να γίνουν, έτσι ώστε να μπορεί να μεταφερθεί ένα μοντέλο από τον πραγματικό κόσμο στον κόσμο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.

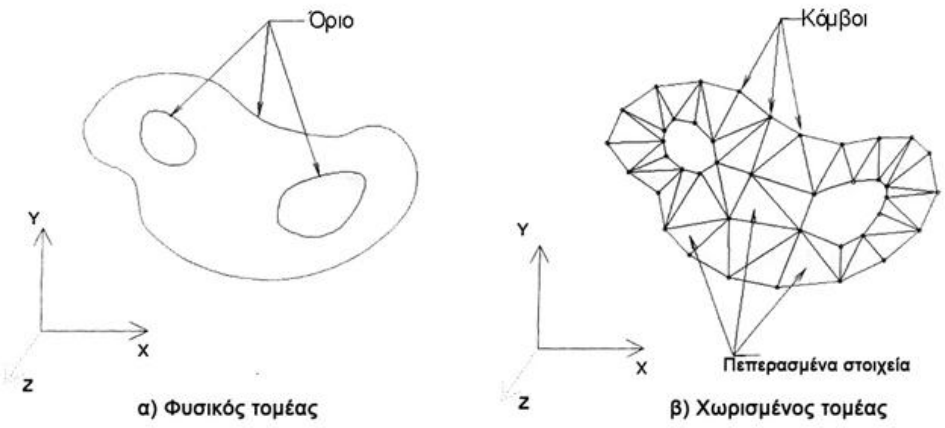
Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες βασικές αρχές του pro/mechanica, του προγράμματος, δηλαδή, μέσω του οποίο θα αναλυθεί η γερανογέφυρα. Ακόμα, γίνεται αναφορά στους τρόπους λειτουργίας και στις ενότητες που είναι διαθέσιμες προς το χρήστη, στα είδη των μοντέλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στις μεθόδους σύγκλησης που παρέχονται από το πρόγραμμα. Παρουσιάζονται επίσης οι νέες εντολές που εμφανίζονται στο περιβάλλον εργασίας του pro/mechanica, τα διαθέσιμα συστήματα μονάδων και τα αρχεία που δημιουργούνται τόσο κατά τη διάρκεια όσο και στο τέλος της ανάλυσης. Τέλος, παρουσιάζονται τα στοιχεία δοκών (beams elements) που υποστηρίζει το πρόγραμμα μέσω των οποίων θα γίνει η προμελέτη της γερανογέφυρας.

Το τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο αποτελείται από το σχεδιασμό και την ανάλυση της κατασκευής. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη περιγραφή για το σχεδιασμό της γερανογέφυρας μέσω του pro/E, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται η εφαρμογή στο pro/mechanica, στην οποία πρώτα παρουσιάζεται η προμελέτη και μετά ακολουθεί η μελέτη του τρισδιάστατου μοντέλου. Στη διαδικασία αυτή δίνεται βαρύτητα στις εντολές του προγράμματος που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του υλικού κατασκευής της γερανογέφυρας, στους περιορισμούς και στον τρόπο που εφαρμόζουμε στο μοντέλο τα φορτία που αναπτύσσονται. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων και αξιολογούνται.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία.

1.1 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. [Finite Element Analysis (FEA)]

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEA) αποτελεί μία αξιόπιστη υπολογιστική τεχνική, η οποία δημιουργεί προσεγγιστικές λύσεις για μία ποικιλία "πραγματικών" κατασκευαστικών προβλημάτων, αναπτυσσόμενα σε διάφορα πεδία εφαρμογών. Η μέθοδος αυτή έχει εξελιχτεί στη βασική μέθοδο για τη σχεδίαση και τη μοντελοποίηση ενός εξαρτήματος σε διάφορες εφαρμογές της μηχανικής. Η βασική ιδέα της FEA μεθόδου, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1, συνίσταται στην υποδιαίρεση του εξαρτήματος σε ένα πεπερασμένο αριθμό υποπεδίων, που ονομάζονται στοιχεία (elements), για τα οποία μπορούμε να προσδιορίσουμε μία προσεγγιστική λύση, θεωρώντας ότι αυτή περιγράφεται από μία αναλυτική μαθηματική συνάρτηση, πολυωνυμικής ή άλλης μορφής. Το όριο (boundary) κάθε στοιχείου προσδιορίζεται από χαρακτηριστικά σημεία, που ονομάζονται κόμβοι (nodes). Με αυτόν τον τρόπο η μέθοδος FEA επικεντρώνεται στην επίλυση κάθε στοιχείου, δηλαδή στην εύρεση της συνάρτησης (συνάρτηση παρεμβολής) που ισχύει για κάθε κόμβο. Γειτονικά στοιχεία έχουν ορισμένους κόμβους κοινούς, ενώ η συνολική λύση για ολόκληρο το εξάρτημα προκύπτει από το αθροιστικό αποτέλεσμα των λύσεων σε κάθε στοιχείο. Ενώνοντας τους κόμβους με ευθύγραμμα τμήματα παράγεται το πλέγμα (mesh) του συγκεκριμένου πεδίου. Το πλέγμα αυτό, εκτός από το ότι αποτελεί ένα μέσο οριοθέτησης του χώρου που καταλαμβάνει το πεδίο, αποτελεί και το φορέα της φόρτισης και της παραμόρφωσής του. Η πυκνότητα του πλέγματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια του αποτελέσματος, ιδιαίτερα σε σημεία όπου εφαρμόζονται φορτία και περιορισμοί.



Σχήμα 1.1 Η βασική ιδέα της FEA μεθόδου.

Ευτυχώς σήμερα η επίλυση των πολύπλοκων εξισώσεων είναι αποκλειστικά δουλειά του υπολογιστή, προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Στην αγορά υπάρχουν άφθονα προγράμματα για αυτόν το σκοπό και το μόνο που χρειάζεται είναι η σωστή εισαγωγή των δεδομένων (γεωμετρία, επιλογή υλικού, φόρτιση, συνοριακές συνθήκες) για την εξαγωγή των σωστών αποτελεσμάτων. Οι κατασκευάστριες εταιρείες αυτών των λογισμικών ισχυρίζονται ότι δε χρειάζονται ειδικές γνώσεις για τη χρησιμοποίηση των προγραμμάτων τους.

Στην πράξη όμως αποδεικνύεται ότι, όταν υπάρχει θεωρητικό υπόβαθρο, ο χειρισμός αυτός των προγραμμάτων και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιούνται με μεγαλύτερη αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα.

Τα βασικά οφέλη που αποκομίζουμε από τη χρήση FEA στη σχεδίαση των προϊόντων της είναι τα εξής:

- Μείωση του χρόνου ανάπτυξης και του κόστους παραγωγής του προϊόντος.
- Αύξηση των καινοτομιών και της δημιουργικότητας.
- Παραγωγή προϊόντων ανώτερης ποιότητας.

1.2 Η εξέλιξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι πρώτες αναφορές στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων βασίζονται στη μητρωική μέθοδο (matrix method) και προέρχονται από έρευνα στην ανάλυση αεροπορικών κατασκευών, ταυτίζονται δε με την ανάπτυξη των πρώτων στοιχειωδών συστημάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ο Hernikoff (1941) παρουσίασε λύση προβλημάτων ελαστικότητας με τη μέθοδο του ‘frame work’. Ο Courant (1943) χρησιμοποίησε συνεχείς κατά τμήματα συναρτήσεις με μεταβαλλόμενες (variational) μεθόδους για τη λύση προβλημάτων στρέψης. Οι Turner, Clough (1956) παρουσίασαν μητρώα δυσκαμψίας για ράβδους και δοκούς. Ο Clough (1960) εισήγαγε τον όρο ‘‘πεπερασμένα στοιχεία (Finite elements)’’, ενώ οι Argyris (1955) και Zienkiewicz (1967) έγραψαν τα πρώτα βιβλία για την μέθοδο. Στις δεκαετίες 1960-70, η μέθοδος εφαρμόζεται σε προβλήματα ελαστικότητας, μεταφοράς θερμότητας, ρευστών και μη γραμμικά προβλήματα. Παράλληλα, εμφανίζονται τα πρώτα πακέτα για ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, NASTRAN, SAP, κλπ. Τα πακέτα αυτά τρέχουν σε κεντρικούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές (mainframes) από μικρό αριθμό έμπειρων χρηστών.

Στη δεκαετία του 1980, η μέθοδος αρχίζει να εφαρμόζεται ευρέως και να χρησιμοποιείται από μηχανικούς, μικρές επιχειρήσεις και πανεπιστήμια, πράγμα που οφείλεται στην ανάπτυξη των μικρών κέντρων εργασίας και των προσωπικών υπολογιστών (PCs). Η διαθεσιμότητα γραφικών περιβάλλοντων για την ευκολότερη ανάπτυξη μοντέλων και την παρουσίαση (visualization) των αποτελεσμάτων συνέβαλε επίσης στην διάδοση της μεθόδου. Την ίδια περίοδο, αρχίζει η ολοκλήρωση της μεθόδου σε περιβάλλοντα υπολογιστικού σχεδιασμού CAD/CAE (Computer Aided Design) και CAM (Computer Aided Manufacturing).

Στη δεκαετία του 1990, η μέθοδος εφαρμόζεται σε πολύπλοκα προβλήματα ρευστομηχανικής, συζευγμένα προβλήματα πολλαπλών πεδίων και περιοχών (coupled multi-disciplinary analysis) και στην επίλυση προβλημάτων μεγάλης κλίμακας σε παράλληλους υπολογιστές (parallel computers). Γίνεται, επίσης, ευρεία χρήση της μεθόδου στην ανάλυση και σχεδιασμό σε προσωπικούς υπολογιστές και σταθμούς εργασίας (workstations).

Η ολοκλήρωση της μεθόδου σε περιβάλλοντα CAD και CAE γίνεται σχεδόν χωρίς προβλήματα συμβατότητας και ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των πακέτων που υπάρχουν στην αγορά.

1.3 Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων και τα γενικά στάδια επεξεργασίας.

Κατ' αρχήν πρέπει να έχουμε ξεκάθαρη εικόνα για το τι εννοούμε όταν λέμε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEA model). Για να μεταφερθεί ένα πρόβλημα από τον πραγματικό κόσμο στην προσεγγιστική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, πρέπει να γίνουν κάποια βήματα, κάποιες παραδοχές ή κάποιες απλουστεύσεις (σχήμα 1.2), προκειμένου να επιτευχθεί ένα λειτουργικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Λειτουργικό είναι ένα μοντέλο που επιτρέπει τον υπολογισμό κάποιας παραμέτρου που ενδιαφέρει τον εκάστοτε χρήστη, όπως για παράδειγμα τη μέγιστη τάση ενός μοντέλου, με επαρκή ακρίβεια και σε λογικό χρόνο. Αφενός ένα τέλειο σχεδιαστικά μοντέλο δεν είναι λειτουργικό, καθώς οι υπολογισμοί, λόγω πολύπλοκης γεωμετρίας, είναι μία αρκετά χρονοβόρα διαδικασία, αφετέρου η δημιουργία ενός υπεραπλουστευμένου μοντέλου δεν θα επέτρεπε την εξαγωγή αποτελεσμάτων με την απαιτούμενη ακρίβεια. Η ισορροπία ανάμεσα στις δύο ακραίες αυτές περιπτώσεις επιτυγχάνεται με την αποδοχή μιας λύσης με μικρότερη ακρίβεια αλλά σε λογικό χρονικό διάστημα. Σημαντικό, επίσης, είναι να γνωρίζει ο χρήστης, έστω και προσεγγιστικά, την ακρίβεια στην οποία αποσκοπεί, ώστε να μειωθεί ο χρόνος διεκπεραίωσης των υπολογισμών.

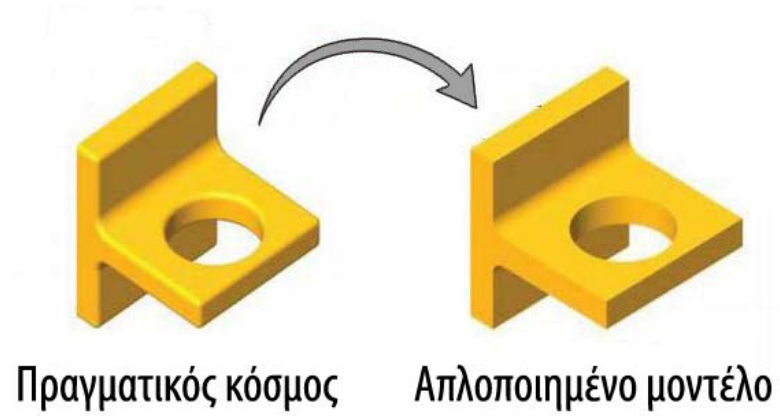


Σχήμα 1.2 Συνοπτικά τα στάδια επεξεργασίας.

Τα στάδια που πρέπει να ακολουθηθούν (σχήμα 1.2), για να δημιουργηθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι τα εξής:

1. Πραγματικός κόσμος → Απλοποιημένο μοντέλο

Στο απλουστευτικό αυτό βήμα (σχήμα 1.3) πρέπει να γίνουν μερικές υποθέσεις σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες και τη γεωμετρία του προβλήματος. Για παράδειγμα, συχνά υποθέτουμε ότι τα υλικά είναι ομογενή[1] και ισοτροπικά[2] και δεν παρουσιάζουν εσωτερικά ελαττώματα ή ατέλειες. Στη συνέχεια, αφαιρούμε πτυχές της γεωμετρίας που δεν έχουν καμία επίπτωση στα αποτελέσματα.

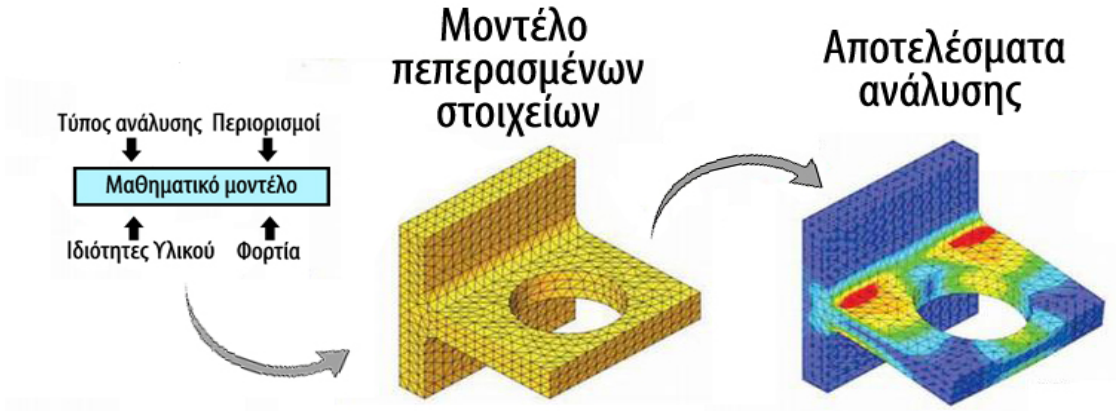


Σχήμα 1.3 Το πρώτο βήμα απλούστευσης.

2. Απλοποιημένο μοντέλο → Μαθηματικό μοντέλο

Για την πραγματοποίηση του μαθηματικού μοντέλου πρέπει να γίνουν κάποιες παραδοχές, όπως η γραμμικότητα των ιδιοτήτων των υλικών και η εξιδανίκευση στις συνθήκες φόρτωσης. Συχνά υποθέτουμε ότι η φόρτιση είναι σταθερή και ότι τα σημεία είναι απόλυτα σταθερά. Το μαθηματικό μοντέλο συνήθως αποτελείται από μια ή περισσότερες διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη βαρύτητα των μεταβλητών, που αφορούν τη φόρτιση του μοντέλου. Ένα σωστό μαθηματικό μοντέλο συμπεριλαμβάνει χαρακτηριστικά που απαιτούνται ώστε να ληφθούν οι αποφάσεις του σχεδιασμού. (φορτία, περιορισμοί κλπ.)

[1] Ομογενές είναι ένα σώμα που παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες σε όλα τα σημεία της μάζας του. Η ομοιογένεια αυτή εξασφαλίζει την ομοιομορφία των ιδιοτήτων από σημείο σε σημείο.
[2] Ισοτροπικά είναι τα υλικά των οποίων οι ιδιότητες έχουν την ίδια τιμή και κατά τις τρεις διευθύνσεις του χώρο.



Σχήμα 1.4 Το δεύτερο και τρίτο βήμα της δημιουργίας μοντέλου FEA.

3. Μαθηματικό μοντέλο → Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Η απλοποιημένη γεωμετρία του μοντέλου υποδιαιρείται σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων (Σχήμα 1.4) με τη δημιουργία πλέγματος (meshing), το οποίο αντικαθιστά τη συνεχή γεωμετρία με κόμβους, που συνδέονται μεταξύ τους με γραμμές, μετατρέποντας το μαθηματικό μοντέλο σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι οι διαφορικές εξισώσεις, που έχουν προκύψει στο προηγούμενο βήμα, μπορούν να ξαναγραφτούν με πολλές ταυτόχρονες γραμμικές εξισώσεις, οι οποίες εκπροσωπούν τη συναρμολόγηση των στοιχείων στο μοντέλο.

Στη λειτουργία των λογισμικών με πεπερασμένα στοιχεία, όπως και στο mechanica, αυτά τα τρία βήματα είναι συγχωνευμένα. Το mechanica αυτόματα υποθέτει ότι τα υλικά είναι ομογενή, ισοτροπικά και γραμμικά και με αυτόν τον τρόπο λύνει τις εξισώσεις. Παρέχεται, πάντως, η δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει αυτές τις παραμέτρους. Γενικότερα, είναι χρήσιμο να γνωρίζει ο χρήστης αυτές τις χωριστές πτυχές, γιατί κάθε μία από αυτές αποτελεί δυνητική πηγή λαθών, που οδηγεί σε ανακριβή αποτελέσματα.

1.4 Βήματα προετοιμασίας για ανάλυση.

Για τη δημιουργία και την ανάλυση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να γίνουν τα εξής βήματα (σχήμα 1.5):

1. Το μοντέλο σχεδιάζεται στο pro engineer.

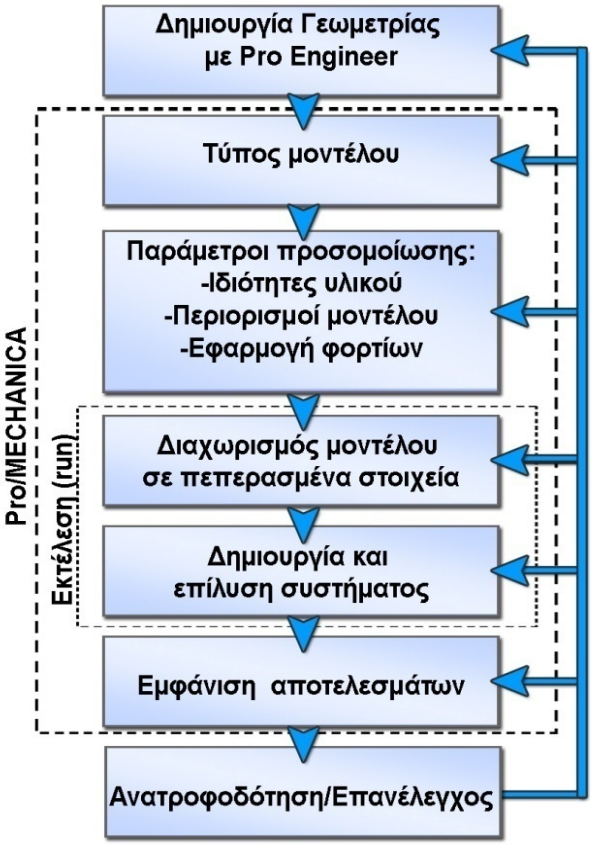
2. Μπαίνοντας στο mechanica πρέπει να οριστεί ο τύπος του μοντέλου. (Η προεπιλεγμένη επιλογή είναι τρισδιάστατο στερεό μοντέλο).

3.

I. Στην συνέχεια πρέπει να οριστούν οι ιδιότητες του υλικού ή των υλικών, σε περίπτωση που υπάρχουν εξαρτήματα από διαφορετικά υλικά. Τα περισσότερα πακέτα πεπερασμένων στοιχείων περιέχουν βιβλιοθήκες με τις ιδιότητες κοινών υλικών (χάλυβα, σιδήρου, αλουμινίου κλπ.).

II. Το επόμενο βήμα είναι να οριστούν οι περιορισμοί (βαθμοί ελευθερίας) της ανάλυσης, όπως για παράδειγμα, πακτωμένες επιφάνειες ή σημεία ελεύθερα να κινηθούν σε συγκεκριμένους άξονες.

III. Τέλος, θα πρέπει να οριστούν τα φορτία που αναπτύσσονται στο μοντέλο (σημειακά φορτία, κατανεμημένα φορτία κλπ.).



Σχήμα 1.5 Βήματα προετοιμασίας για ανάλυση.

4. Όταν οριστούν οι παραπάνω παράμετροι, το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία και η εκτέλεση της ανάλυσης για να βρεθεί η λύση του προβλήματος. Το πρόγραμμα παρέχει αυτόματα τη δημιουργία πλέγματος με την υπορουτίνα AutoGEM. Στο σημείο αυτό, εντοπίζονται τυχόν παραλήψεις, όπως για παράδειγμα, στοιχεία που δεν τους έχουν οριστεί ιδιότητες υλικού. Στην συνέχεια, ο επεξεργαστής του προγράμματος λύνει τις εξισώσεις του συστήματος, που ανάλογα με την ανάλυση μπορεί να είναι και εκατοντάδες, και παρέχει δεδομένα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

5. Η ανάλυση παρέχει τεράστιο αριθμό εξαγόμενων δεδομένων και ο μόνος κατανοητός τρόπος για να εξεταστούν είναι γραφικά. Το mechanica έχει πολύ ισχυρό σύστημα υποστήριξης γραφικών με τρισδιάστατες απεικονίσεις και αναπαραστάσεις της εκάστοτε φόρτισης. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα δημιουργίας έκθεσης (report), καθώς και ιστοσελίδας που να περιέχει αποτελέσματα, εικόνες και σχόλια.

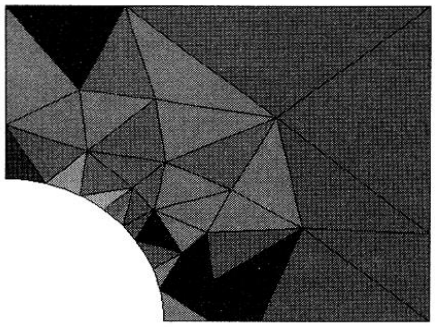
6. Τέλος, τα αποτελέσματα πρέπει να επανεξετάζονται αυστηρά. Θα πρέπει, δηλαδή, να διαπιστωθεί αν συμφωνούν με τους αρχικούς σχεδιαστικούς στόχους. Εάν, όμως, υπάρχει αμφιβολία για τα αποτελέσματα, θα πρέπει ο χρήστης να επανεξετάσει διάφορες πτυχές του μοντέλου και να προβεί εκ νέου σε ανάλυση για να εντοπιστούν τυχόν σφάλματα ή παραλείψεις.

1.5 Μέθοδοι δημιουργίας πλέγματος.

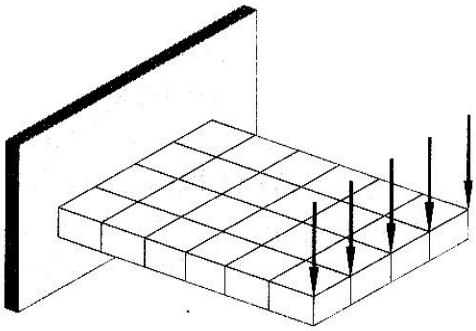
Μια από της μεγαλύτερες διαφορές ανάμεσα στο Mechanica και στα περισσότερα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων είναι ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται το πλέγμα.

1.5.1 Μέθοδος H-στοιχείων

Ακολουθώντας την κλασική μέθοδο, αρκετά προγράμματα χρησιμοποιούν πολυώνυμα χαμηλού βαθμού για το κάθε στοιχείο. Αυτό όμως έχει σημαντικές επιπτώσεις, ειδικά στην ανάλυση των τάσεων, στην οποία οι κύριες μεταβλητές για την επίλυση είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων. Τα πολυώνυμα είναι γραμμικά πρώτου βαθμού σε κάθε στοιχείο, ενώ η αντοχή επιτυγχάνεται με τη λήψη των παραγώγων της μετατόπισης που έχει κατατεθεί και η τάση υπολογίζεται από το υλικό του. Η χρήση πρώτου βαθμού πολυωνύμων σημαίνει, ότι η δύναμη και κατ' επέκταση η τάση στο εξάρτημα είναι σταθερή εξ ολοκλήρου στο στοιχείο όπου ασκείται, όπως απεικονίζεται στην σχήμα 1.6 όπου παρουσιάζεται η τάση Von Mises ενός λεπτού πλακιδίου σε κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Τέτοια ασυνέχεια μεταξύ των στοιχείων στο πεδίο φόρτισης φυσικά και δεν είναι ρεαλιστική και θα οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα για τη μέγιστη τάση. Τα χαμηλού βαθμού στοιχεία είναι αναξιόπιστα ειδικά στις περιοχές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, εκεί, δηλαδή, όπου συνήθως υπάρχουν μεγάλες κλίσεις στο πραγματικό αντικείμενο. Μια πιο καταστροφική κατάσταση απεικονίζεται στην σχήμα 1.7, όπου φαίνεται μία πακτωμένη στο ένα άκρο δοκός, η οποία έχει χωριστεί σε στερεά κυβικά στοιχεία και της ασκείται ομοιόμορφο κάθετο φορτίο. Χρησιμοποιώντας μόνο πρώτου βαθμού στοιχεία, η τάση που θα προκύψει θα είναι η ίδια στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια, πράγμα το οποίο είναι λάθος.

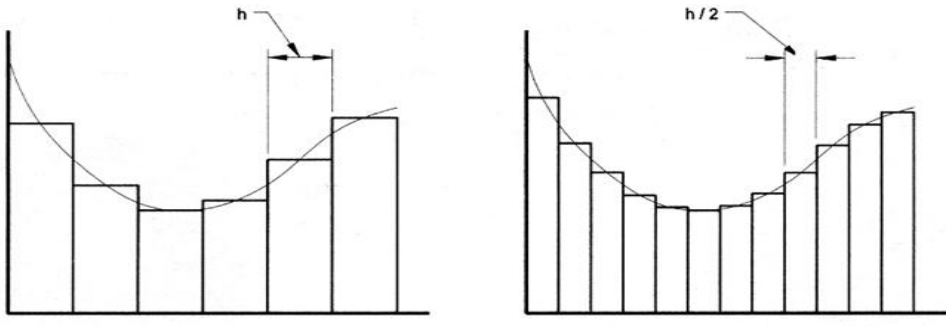


Σχήμα 1.6 Ασυνέχεια μεταξύ των στοιχείων στο πεδίο φόρτισης.



Σχήμα 1.7 Πακτωμένη δοκός με ομοιόμορφο φορτίο.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται χαμηλού βαθμού στοιχεία (h-μέθοδος), για να υπολογιστεί πιο αποτελεσματικά η τάση είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν μικρότερα στοιχεία στο πλέγμα, μια διαδικασία που ονομάζεται εκλέπτυνση πλέγματος (mesh refinement) (σχήμα 1.8). Βέβαια, δεν είναι πάντα εύκολο να βρεθεί η περιοχή η οποία χρειάζεται βελτίωση και για τον λόγο αυτό συνήθως είναι απαραίτητο να γίνει εξολοκλήρου επεξεργασία στο πλέγμα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να μην υπάρχουν μεγάλες διαφορές, μεγαλύτερες, δηλαδή, από 15% μεταξύ των λύσεων που προκύπτουν. Ως συνέπεια της συνεχόμενης εκλέπτυνσης του πλέγματος, το μέγεθος των υπολογισμών γίνεται όλο και μεγαλύτερο και υπάρχει ενδεχόμενο να δημιουργηθούν πρακτικά προβλήματα, όπως πολύ μεγάλος χρόνος λύσης και υπέρβαση της χρησιμοποιουμένης μνήμης του υπολογιστή πριν επιτευχθεί η σύγκλιση μίας αποδεκτής λύσης.

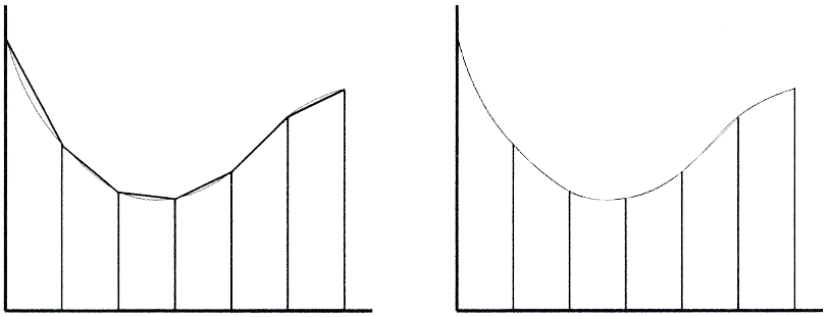


Σχήμα 1.8 Εκλέπτυνση πλέγματος.

1.5.2 Μέθοδός P-στοιχείων [Μέθοδος Mechanica].

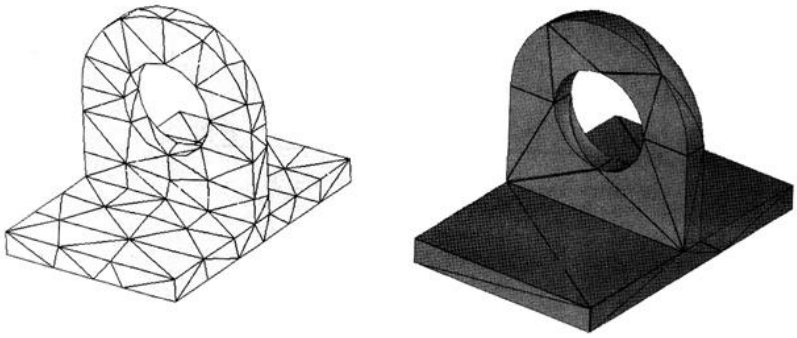
Η κύρια διαφορά που έχει ενσωματωθεί στο mechanica είναι η εξής: αντί να δημιουργείται καινούργιο πλέγμα σε κάθε επανάληψη, η σύγκληση επιτυγχάνεται με

την αύξηση της τάξης του πολυώνυμου παρεμβολής σε κάθε στοιχείο. Το πλέγμα παραμένει το ίδιο σε όλες τις επαναλήψεις, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9 Αύξηση της τάξης του πολυώνυμου παρεμβολής.

Επιπλέον, το mechanica μπορεί να καταγράψει το αναμενόμενο σφάλμα της λύσης και αυτόματα να αυξήσει το βαθμό πολυωνύμου μόνο στα στοιχεία πού είναι απαραίτητο. Άρα, η σύγκληση γίνεται απολύτως αυτόματα και οι επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας που έχει θέσει ο χρήστης. Το mechanica έχει όριο εννέα (9) επαναλήψεων, το οποίο θεωρητικά θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερο αλλά το υπολογιστικό κόστος θα αυξανόταν ραγδαία. Σε περίπτωση πού δεν επιτευχθεί λύση κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων, είναι απαραίτητο να ξαναδημιουργηθεί το πλέγμα με ελαφρώς υψηλότερη πυκνότητα στοιχείων, έτσι ώστε τα χαμηλότερου βαθμού πολυώνυμα να είναι αποτελεσματικά. Βεβαίως οι περιπτώσεις αυτές είναι πολύ σπάνιες.



Σχήμα 1.10 Σύγκριση πλέγματος της h-μεθόδου και της p-μεθόδου.

1.5.3 Πλεονεκτήματα της P-μεθόδου.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης της P-μεθόδου είναι τα ακόλουθα :

- Το ίδιο πλέγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις επαναλήψεις κατά την διάρκεια της ανάλυσης, παρά να δημιουργεί εκ νέου πλέγματα (re-meshing) ή τοπικές τελειοποιήσεις που απαιτεί η h-μέθοδος. Πράγμα που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για πολύπλοκες γεωμετρίες, καθώς απαιτείται σημαντικά λιγότερος χρόνος cpu.

- Το πλέγμα, οπτικά, είναι πιο χονδροκομμένο και περιέχει λιγότερα στοιχεία αλλά μεγαλύτερου βαθμού σε σχέση με την h-μέθοδο. (σχήμα 1.10)

- Οι περιορισμοί ως προς το μέγεθος του στοιχείου δεν είναι τόσο περιοριστικοί όσο στην h-μέθοδο.

- Η αυτόματη δημιουργία πλέγματος είναι πιο αξιόπιστη σε σύγκριση με την h-μέθοδο.

- Το πλέγμα προσαρμόζεται στη γεωμετρία και αυτό είναι το κλειδί του mechanica, που του επιτρέπει να μη δημιουργεί εκ νέου πλέγματα όταν υλοποιείται η ανάλυση για τη βελτιστοποίηση (optimization) των μοντέλων.

1.6 Ακρίβεια σε μια ανάλυση.

Λόγω των εικασιών και των απλουστεύσεων που γίνονται για να επιτευχθούν οι λύσεις στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, θα πρέπει τα αποτελέσματα και κατ' επέκταση τα συμπεράσματα να αξιολογούνται με μεγάλη προσοχή. Καμία λύση δε θα πρέπει να θεωρείται αξιόπιστη, εάν δεν εξεταστούν πρώτα ορισμένοι πολύ σημαντικοί παράγοντες. Οι δύο παράγοντες που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για να δείξουν τη συμπεριφορά ενός εξαρτήματος είναι η τάση Von mises και η συνολική ενέργεια (strain energy). Αξίζει να σημειωθεί, ότι κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων η τάση γενικά αυξάνεται. Για το λόγο αυτό, η συνολική ενέργεια είναι καλύτερο μέγεθος για την αξιολόγηση των λύσεων.

1.7 Πηγές λαθών.

Τυχόν λάθη που μπορούν να γίνουν κατά την προετοιμασία για ανάλυση είναι τα ακόλουθα:

- **Σφάλμα στον ορισμό του προβλήματος:** Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξετάζεται αν η γεωμετρία, τα φορτία και οι περιορισμοί έχουν τοποθετηθεί σωστά, καθώς και αν οι ιδιότητες του υλικού είναι οι σωστές και έχουν οριστεί κατάλληλα.
- **Σφάλμα κατά τη δημιουργία του απλοποιημένου μοντέλου:** Για να αποφευχθούν λάθη κατά τη δημιουργία του απλοποιημένου μοντέλου, θα πρέπει να εξετάζεται, αν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συμμετρία του μοντέλου και αν η χρησιμοποίηση της θα έχει αρνητική επίπτωση στο αποτέλεσμα.
- **Σφάλμα κατά τη δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου:** Θα πρέπει να διαπιστωθεί, αν οι παράμετροι είναι οι απαιτούμενοι για να διαπιστωθεί αν το μοντέλο θα έχει την επιθυμητή συμπεριφορά και να διαπιστωθεί, αν το μαθηματικό μοντέλο αναπαριστά ρεαλιστικά τα φυσικά φαινόμενα που αναπτύσσονται στο πραγματικό μοντέλο.
- **Στη δημιουργία του πλέγματος:** Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στη δημιουργία του πλέγματος, δηλαδή, αν το πλέγμα είναι χονδροκομμένο ή αν είναι υπερβολικά λεπτό. Επίσης, πρέπει να διαπιστωθεί, αν ο χρήστης έχει ξεχάσει να αφαιρέσει διακοσμητικά στοιχεία, τα οποία δημιουργούν προβλήματα στο πλέγμα, όπως για παράδειγμα οι στρογγυλεμένες ακμές, οι οποίες δεν μπορούν να ενσωματωθούν στο πλέγμα.
- **Σφάλμα κατά την επίλυση:** Όταν αντιμετωπίζονται προβλήματα, που απαιτούν πολλούς υπολογισμούς, θα πρέπει πάντα να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε τυχόν συσσωρευμένα σφάλματα στρογγυλοποίησης, σε περίπτωση που αυτά μπορούν να εκτιμηθούν.
- **Σφάλμα κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων:** Σημαντικό είναι να γίνεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με τον ενδεδειγμένο, για τη συγκεκριμένη ανάλυση, τρόπο και να γίνονται κατανοητά τα όρια, που θέτει ο χρήστης.

1.8 Διαφορές σχεδιαστικού μοντέλου και μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Μια από τις πιο συνηθισμένες παρανοήσεις είναι η ταύτιση ενός σχεδιαστικού μοντέλου (CAD MODEL) και ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (FEA MODEL), ενώ στην πραγματικότητα αυτό είναι ανεπιθύμητο, γιατί τα δύο μοντέλα έχουν δημιουργηθεί για διαφορετικό σκοπό.

- Ένα **σχεδιαστικό μοντέλο** συνήθως αναπτύσσεται για να παρέχει κατασκευαστικά δεδομένα. Συνεπώς, οι διαστάσεις του πρέπει να είναι πλήρως ορισμένες, συμπεριλαμβανομένων και των ανοχών. Ομοίως και για τα λεπτά χαρακτηριστικά, όπως τα στρογγυλέματα (fillets), τα κοψίματα (chamfers) και οι τρύπες (holes).

- Ένα **μοντέλο πεπερασμένων** στοιχείων επικεντρώνεται στη διαπίστωση άλλων πληροφοριών (μέγιστη τάση, παραμόρφωση κλπ.). Για να γίνει αυτό αποτελεσματικά ενίοτε απαιτείται να είναι τελείως διαφορετικό από ένα σχεδιαστικό μοντέλο. Για παράδειγμα, προκειμένου να αποφύγουμε τις χρονοβόρες αναλύσεις εκμεταλλευόμαστε τη συμμετρία ενός αντικειμένου, αν φυσικά υπάρχει, σχεδιάζοντας το μισό και διπλασιάζοντας τα αποτελέσματα. Επίσης, στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αγνοούνται τα λεπτά χαρακτηριστικά, όπως τα στρογγυλέματα (fillets), τα κοψίματα (chamfers) και οι τρύπες (holes) και άλλα διακοσμητικά χαρακτηριστικά, εκτός και αν έχουν επιπτώσεις στην εν λόγω ανάλυση και κατ' επέκταση στα αποτελέσματα.

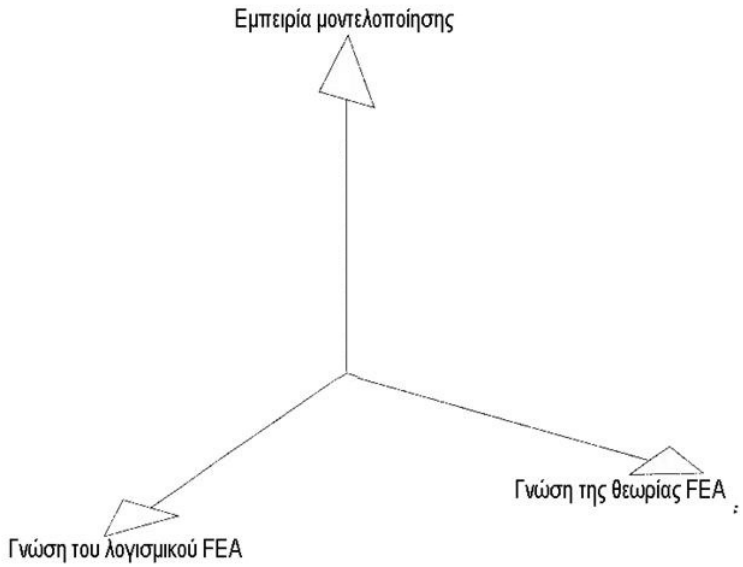
Τέλος, ο απώτερος στόχος της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (FEA) ή χρυσός κανόνας (Golden rule) θα μπορούσε να εκφραστεί ως εξής :

"Χρησιμοποιήστε το όσο το δυνατόν πιο απλό μοντέλο, που θα αποφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα με το χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος."

1.9 Προσοχή στη χρήση των προγραμμάτων FEA.

Πρέπει να αναφερθεί, ότι, όπως και σε άλλους τομείς των εφαρμογών πληροφορικής, έτσι και στα προγράμματα FEA μπορεί να παρουσιαστεί το φαινόμενο **"GIGO"** (Garbage In = Garbage Out) που σημαίνει δηλαδή, ότι αν ο χρήστης εισάγει εν αγνεία του λανθασμένα δεδομένα, τότε και τα δεδομένα που θα εξάγει θα είναι λανθασμένα. Ένα συχνό φαινόμενο σε τέτοιου τύπου προγράμματα είναι η τυφλή αποδοχή των εντολών από τους απείρους χρήστες, πράγμα που μπορεί να τους οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα. Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να μπερδεύει ο χρήστης τα όμορφα γραφήματα με τα σωστά και ακριβή αποτελέσματα. Ακόμα και ένας έμπειρός χρήστης πρέπει να έχει ιδιαίτερες γνώσεις και χρόνια εξάσκηση στον τομέα αυτό, για να μπορέσει να υλοποιήσει ένα περίπλοκο πρόβλημα χωρίς να οδηγηθεί σε λανθασμένα συμπεράσματα. Επίσης, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη του και τα μικρά γράμματα που συνοδεύουν την άδεια χρήσης του προγράμματος, που μεταξύ άλλων αναφέρουν, ότι η εταιρία που κατασκευάζει το πρόγραμμα δε φέρει καμία εύθηνη για τα αποτελέσματα που εξάγονται. Συνεπώς, ο χρήστης φέρει την εύθηνη για οποιαδήποτε συμπεράσματα επιτευχθούν μέσω οποιουδήποτε προγράμματος FEA.

Τέλος, θα μπορούσαμε να πούμε ότι το τρίπτυχο για την επιτυχή χρησιμοποίηση των προγραμμάτων FEA, που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.11, είναι η γνώση της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων, η γνώση του αντίστοιχου λογισμικού για την ανάλυση και η εμπειρία μοντελοποίησης.



Σχήμα 1.11 Τρίπτυχο για την επιτυχή χρησιμοποίηση των προγραμμάτων FEA.

Συνοψίζοντας, αξίζει να αναφερθούν μερικά αποφθέγματα που αφορούν την χρήση των προγραμμάτων FEA.

"Μην μπερδεύετε την ταχύτητα με την ακρίβεια."

Οι υπολογιστές γίνονται όλο και πιο γρήγοροι. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να λύσουν ένα λανθασμένο πρόβλημα πολύ πιο γρήγορα από ότι πριν. Μια λανθασμένη απάντηση σε λίγο χρόνο δε θεωρείται βελτίωση.

"Τα προγράμματα FEA κάνουν τους κάλους μηχανικούς καλύτερους και τους κακούς επικινδύνους. "

Όσο τα εργαλεία που παρέχονται στους μηχανικούς γίνονται πιο ειδικευμένα, επικρατεί η τάση της τυφλής εμπιστοσύνης σε αυτά, πράγμα που μερικές φορές μπορεί να είναι επικίνδυνο.

Τα προγράμματα FEA είναι εργαλεία που χρησιμοποίει ένας μηχανικός για να διευρύνει τις σχεδιαστικές του ικανότητες και όχι για να τις ορίζει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εισαγωγή στο Pro/mechanica.

2.1 Εισαγωγή στο λογισμικό pro/mechanica.

Το pro/mechanica είναι ένα πολύ-εργαλείο CAE (Computer Aided Engineering) που επιτρέπει την προσομοίωση της φυσικής συμπεριφοράς ενός μοντέλου με απώτερο σκοπό την κατανόηση και τη βελτίωση τόσο της διαδικασίας σχεδιασμού όσο και του τελικού προϊόντος. Έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει άμεσα τάσεις, παραμορφώσεις, μεταφορά θερμότητας, καθώς και άλλους παράγοντες, δείχνοντας το πώς θα συμπεριφερθεί το μοντέλο σε ένα εργαστήριο δοκιμών ή στον πραγματικό κόσμο. Το ευρύ φάσμα λύσεων που παρέχει το Mechanica σε συνδυασμό με τις εξαιρετικές ικανότητες μοντελοποίησης και την ευελιξία, το καθιστούν ένα από τα ισχυρότερα λογισμικά εργαλεία για σχεδιασμό, ανάλυση και προσομοίωση.

2.2 Ενότητες λειτουργίας.

Το Pro/Mechanica αποτελείται από δύο ενότητες: την ενότητα της δομή (Structure) και τη θερμική ενότητα (Thermal), κάθε μια από τις οποίες επιλύει διαφορετικής κατηγορίας μηχανικά προβλήματα. Η Δομή επικεντρώνεται στη δομική ακεραιότητα του μοντέλου, ενώ η Θερμική αξιολογεί χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας.

Η **Δομή** (Structure) χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της δομικής συμπεριφοράς ενός μοντέλου ή μιας συναρμολόγησης (assembly). Επιτρέπει, επίσης, την προσομοίωση φορτίων και περιορισμών που αναπτύσσονται στο μοντέλο και μπορεί να αξιολογεί την κόπωση του, καθώς και να επιλύει προβλήματα σύνδεσης. Παράλληλα, η ενότητα αυτή πραγματεύεται την επίλυση γραμμικών προβλημάτων, δηλαδή προβλημάτων με μικρή παραμόρφωση, αλλά χρησιμοποιείται και για την επίλυση προβλημάτων με μεγάλη παραμόρφωση.

Η **Θερμική** (Thermal) ενότητα υποστηρίζει την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς ενός μοντέλου ή μιας συναρμολόγησης (assembly). Η ενότητα αυτή δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης φορτίων θερμότητας και συνθηκών μεταφοράς θερμότητας στο μοντέλο, ενώ στη συνέχεια υλοποιεί θερμικές αναλύσεις, τα αποτελέσματα των οποίων εξάγουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας στο μοντέλο. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού των αποτελεσμάτων της θερμικής ανάλυσης με τη δομή.

2.3 Τρόποι λειτουργίας.

Το pro/mechanica είναι διαθέσιμο σε δύο τρόπους λειτουργίας, τον ενιαίο (integrated) και τον ανεξάρτητο (independent). Ο τρόπος που επιλέγεται διέπει το περιβάλλον εργασίας (user interface), καθώς και το πως εφαρμόζονται τα φορτία και οι περιορισμοί. Ορίζει, επίσης, τις λειτουργικές δυνατότητες μοντελοποίησης (π.χ. αλλαγή γεωμετρίας μοντέλου) αλλά και τα είδη των αναλύσεων που μπορούν να εκτελεσθούν.

Στον **ενιαίο τρόπο λειτουργίας** (integrated) η εκτέλεση όλων των εντολών γίνεται σε περιβάλλον pro/engineer. Αυτή η έκδοση προσφέρει την άνεση και τη δυναμική του pro/engineer, δηλαδή, παρέχει ταυτόχρονα στο χρήστη χαρακτηριστικά παραμετρικής τεχνολογίας σε συνδυασμό με πλήρες λογισμικό Mechanica. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν, ακόμα, να δημιουργηθούν, να αναλυθούν και να βελτιστοποιηθούν μοντέλα σχεδιασμένα μόνο στο pro/engineer. Επιτρέπει, επίσης, τη χειροκίνητη αλλαγή μεταξύ του pro/engineer και του pro/Mechanica. Συνεπώς, αποτελεί την πιο ορθολογική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση μοντέλου ή συναρμολόγησης. Ειδικότερα, ο χρήστης καλείται να επιλέξει ανάλογα με τις ανάγκες της σχεδίασης σε ποια από τα δύο υπό-προγράμματα θα εργαστεί, μεταξύ της μητρικής (Native mode) και της FEM mode.

- Η **μητρική λειτουργία** (Native mode) υποστηρίζει τη δημιουργία φορτίων, περιορισμών, εξιδανικεύσεων (idealizations), συνδέσεων κλπ. Η δημιουργία του πλέγματος (mesh) ενός μοντέλου πραγματοποιείται με τον P-κώδικα στοιχείων (P-code elements) και χρησιμοποιεί προσαρμοστικούς επιλύτες (solver) για την εξεύρεση λύσης.

- Επιλέγοντας την **FEM Mode** ο χρήστης μπορεί να εφαρμόσει φορτία και περιορισμούς αλλά και να ορίσει υλικό στο μοντέλο. Παράλληλα, έχει τη δυνατότητα υλοποίησης της ανάλυσης, στερείται όμως της δυνατότητας εξαγωγής αποτελεσμάτων. Επειδή ορισμένα προγράμματα (CAD, CAE) δεν έχουν εύχρηστο περιβάλλον εργασίας για τη σχεδίαση και ανάλυση του μοντέλου, προτιμάται η FEM Mode. Συγκεκριμένα, η λειτουργία αυτή παράγει κατάλληλα διαμορφωμένα αρχεία για άλλα εμπορικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων FEA (NASTRAN, ANSYS). Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το pro/engineer για τη δημιουργία και την ανάλυση του μοντέλου και στη συνέχεια να μεταφερθεί σε άλλο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην FEM Mode το πλέγμα δημιουργείται μέσω του H-κωδικού στοιχείων (H-code elements) σε αντίθεση με τη μητρική λειτουργία.

Στον **ανεξάρτητο τρόπο λειτουργίας** (independent), ο οποίος χρησιμοποιείται ξεχωριστά από το pro/engineer, ο χρήστης συναντά ένα διαφορετικό περιβάλλον εργασίας για τη μοντελοποίηση αλλά και για την ανάλυση. Πρώτα, βέβαια, υπάρχει η δυνατότητα να σχεδιαστεί το γεωμετρικό μοντέλο εξ' ολοκλήρου στον ανεξάρτητο τρόπο λειτουργίας ή να γίνει εισαγωγή ενός μοντέλου από το διαφορετικά υποστηριζόμενο MathCAD περιβάλλον (πχ. unigraphics). Εναλλακτικά, μπορεί να σχεδιαστεί το μοντέλου και η συναρμολόγησή του στο pro/engineer προκειμένου στη συνέχεια να γίνει η μεταφορά του μοντέλου στον ανεξάρτητο τρόπο λειτουργίας, έτσι ώστε να εκτελεστεί η προσομοίωση και η ανάλυση.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι αν μεταφερθεί και στη συνεχεία αποθηκευτεί ένα μοντέλο pro/engineer στον ανεξάρτητο τρόπο λειτουργίας, δεν είναι δυνατή η επιστροφή του μοντέλου ή όποιων αλλαγών του για ανάλυση και εξαγωγή των αποτελεσμάτων στον ενιαίο τρόπο λειτουργίας, δηλαδή στο Pro/ENGINEER περιβάλλον.

2.4 Τύποι μοντέλων και στοιχείων.

Εκτός από τρισδιάστατα (3D) μοντέλα, όπως στερεά, κελύφη κλπ., το pro/mechanica υποστηρίζει και στους δύο τύπους λειτουργίας μοντέλα δύο διαστάσεων (2D), δηλαδή μοντέλα με επίπεδη ή κάθετη φόρτιση και μοντέλα συμμετρικά ως προς κάποιον άξονα. Γίνεται κατανοητό, ότι όλα τα χαρακτηριστικά της ανάλυσης, όπως τα φορτία και οι περιορισμοί, πρέπει να ορίζονται στους δυο άξονες που διέπουν το σύστημα συντεταγμένων που έχει προεπιλεγεί. Ακόμα και ένα πολύ λεπτό προφίλ μπορεί να σχεδιαστεί ως δυσδιάστατο, μόνο όμως σε περίπτωση που το ασκούμενο φορτίο το επιτρέπει (είναι δηλαδή κάθετο ή εγκάρσιο). Αξίζει να σημειωθεί ότι, ο ανεξάρτητος τρόπος λειτουργίας (independent mode) παρέχει αρκετά εργαλεία για το σχεδιασμό 3D και 2D μοντέλων, αλλά λόγω πολυπλοκότητας των εντολών του, προτιμάται ο σχεδιασμός των μοντέλων σε αλλά προγράμματα.

Τα είδη των στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο pro/mechanica για να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1. Επίσης, είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν και διαφορετικοί τύποι στοιχείων στο ίδιο μοντέλο, συνδυάζοντας στέρεα στοιχεία με στοιχεία δοκών και ελατηρίων για την επίλυση κάποιου προβλήματος.

Πίνακας 2.1 Τύποι μοντέλων και στοιχείων.

Τύποι μοντέλων	**3D** **Επίπεδη φόρτιση** **Κάθετη φόρτιση** **Συμμετρικά ως προς άξονα**	**Βασική δομή μοντέλων**
Τύποι στοιχείων	Κελύφη Δοκοί Στέρεα Ελατήρια Μάζες	Στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο

2.5 Περιβάλλον εργασίας pro/mechanica.

Στον ενιαίο τρόπο λειτουργίας του pro/mechanica το περιβάλλον εργασίας είναι σχεδόν ίδιο με αυτό του pro/engineer. Εμφανίζονται, όμως, νέες επιλογές στη δεξιά και στην κεντρική εργαλειοθήκη του προγράμματος. Στη δεξιά εργαλειοθήκη τη θέση των σχεδιαστικών εντολών παίρνουν οι συντομεύσεις για τη δημιουργία περιορισμών, φορτίων και εξιδανικεύσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Εικονίδια της δεξιάς εργαλειοθήκης του Pro/mechanica.

Οι εντολές αυτές είναι διαθέσιμες και στο κεντρικό μενού, στο επάνω μέρος της οθόνης. Επίσης, στην κεντρική εργαλειοθήκη εμφανίζονται κάποια καινούργια κουμπιά τα οποία έχουν να κάνουν περισσότερο με τη δημιουργία της ανάλυσης και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τα νέα αυτά κουμπιά είναι τα εξής:

Η ***δημιουργία πλέγματος*** : χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πλέγματος χωρίς να έχει αρχίσει η επίλυση του προβλήματος. Αυτή η λειτουργία δίνει την ευκαιρία στον χρήστη να πειραματιστεί με τις ρυθμίσεις ελέγχου του πλέγματος.

Η ***εκτέλεση μελέτης σχεδιασμού*** : χρησιμοποιείται για τον ορισμό και τη διαχείριση των παραμέτρων της ανάλυσης και της μελέτης σχεδιασμού.

Η ***αναθεώρηση των αποτελεσμάτων*** : επιτρέπει την πρόσβαση σε εντολές για την προβολή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων, όπως για παράδειγμα, τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων (graphs) ή κινούμενης απεικόνισης (animation).

Η ***ρύθμιση οθόνης προσομοίωσης*** : επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει τα στοιχεία της προσομοίωσης που θα εμφανίζονται στην οθόνη και κατ' επέκταση στο μοντέλο. Η λειτουργία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν το εξεταζόμενο μοντέλο είναι περίπλοκο και αρκετές πληροφορίες καθιστούν δύσκολη την κατανόηση του.

Ο ***οδηγός διαδικασίας*** : είναι ένα εργαλείο καθοδήγησης του χρήστη για την ολοκλήρωση της ανάλυσης ενός μοντέλου.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι η επιλογή της δημιουργίας επιπέδου ή και σημείων παραμένει ενεργή στο νέο περιβάλλον εργασίας. Αυτό υποδεικνύει ότι υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας επιπέδου ή σημείου και στο pro/mechanica, το οποίο όμως θα είναι ενεργό και κατ' επέκταση ορατό στο μοντέλο μόνο όταν ο χρήστης βρίσκεται σε περιβάλλον pro/mechanica.

Τέλος, το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων (WCS) δημιουργείται αυτόματα από το πρόγραμμα, το οποίο εμφανίζεται στην οθόνη με πράσινο χρώμα. Οι άξονες (X,Y,Z) του συστήματος αυτού αποτελούν τη βάση για το πώς θα εφαρμοστούν οι δυνάμεις και οι περιορισμοί.

2.6 Μέθοδοι σύγκλησης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το pro/mechanica χρησιμοποιεί τη μέθοδο των P-στοιχείων για να υλοποιήσει μια ανάλυση. Με τις τρεις παρακάτω επιλογές μπορεί ο εκάστοτε χρήστης να παρακολουθεί τη λύση και να τροποποιεί το βαθμό πολυωνύμου, έως ότου επιτευχθεί μια λύση με συγκεκριμένη ακρίβεια.

- **Ταχεία επαλήθευση** (Quick check): Για την ακρίβεια, δεν αποτελεί μέθοδο σύγκλησης, από τη στιγμή που το μοντέλο επιλύεται με μικρό βαθμό πολυωνύμου. Τα αποτελέσματα της ταχείας επαλήθευσης δεν πρέπει να αποτελούν αντικείμενο εμπιστοσύνης και αυτό γιατί η ταχεία επαλήθευση χρησιμοποιείται κυρίως για να διαπιστωθεί αν έχουν γίνει λάθη στο μοντέλο, όπως για παράδειγμα η λάθος τοποθέτηση της πάκτωσης ή των φορτίων. Επίσης, με μια σύντομη ματιά στα αποτελέσματα που εξάγει η ταχεία επαλήθευση μπορεί να εντοπιστούν προβληματικές περιοχές οι οποίες έχουν προκύψει από σχεδιαστικά σφάλματα.

- **Μονό Προσαρμοστικό πέρασμα** (single-pass adaptive): Είναι κάτι περισσότερο από μια ταχεία επαλήθευση, αλλά και κάτι λιγότερο από μια ολοκληρωμένη μέθοδο σύγκλησης. Το προσαρμοστικό πέρασμα εκτελεί, αρχικά, ένα πέρασμα με χαμηλό βαθμό πολυωνύμου και αξιολογεί την ακρίβεια της λύσης. Στη συνέχεια, αν αυτό είναι απαραίτητο, μετατρέπει το βαθμό των προβληματικών στοιχείων σε βαθμό ικανό, ώστε να δοθεί μια λογική λύση, και τέλος εκτελεί ένα τελευταίο πέρασμα (final pass). Εάν το μοντέλο δεν έχει αρκετούς υπολογισμούς και η λύση που προκύπτει είναι κατανοητή, αυτή η μέθοδος μπορεί να εξοικονομήσει αρκετό χρόνο. Παράλληλα, η συγκεκριμένη μέθοδος συνίσταται για τους περισσότερους τύπους μοντέλων. Σε περίπτωση που ο χρήστης διαπιστώσει προβλήματα στο μοντέλο ή θέλει περαιτέρω εξακρίβωση τότε θα πρέπει να επιλέξει την τελευταία επιλογή, το πολύ-προσαρμοστικό πέρασμα.

- **Πολύ-προσαρμοστικό πέρασμα** (multi-pass adaptive): Αποτελεί την απόλυτη μέθοδο σύγκλισης στην ανάλυση. Κατά τη διάρκεια της επίλυσης γίνονται πολλαπλά περάσματα, με το βαθμό των προβληματικών στοιχείων να αυξάνει κατά ένα ή δυο βαθμούς. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι η λύση να φτάσει σε ένα επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας ή να επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που υποστηρίζει το πρόγραμμα (αρχική επιλογή : 6 μέγιστη: 9). Σε περίπτωση που δεν επιτευχθεί λύση, θα πρέπει ο χρήστης να επανεξετάσει τις παραμέτρους του προβλήματος για τυχόν σφάλματα. Η λύση καταγράφεται παρατηρώντας μία ή περισσότερες παραμέτρους ή άλλες αριθμητικές πτυχές της λύσης. Τυπικές παράμετροι είναι η μέγιστη τάση Von Misses, η ενέργεια και η παραμόρφωση.

2.7 Συστήματα μονάδων.

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι που χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή είναι αυτό της επιλογής του συστήματος μονάδων. Ο χρήστης θα πρέπει να έχει αποφασίσει εκ των προτέρων ποιο σύστημα μονάδων επιθυμεί να χρησιμοποιήσει και να το επιλέξει. Αυτό και γιατί το μοντέλο θα σχεδιαστεί σε ένα συγκεκριμένο σύστημα μονάδων αλλά και επειδή τα δεδομένα της ανάλυσης όπως τα φορτία (δυνάμεις, πίεση, ιδιότητες του υλικού κλπ.) θα πρέπει να καθοριστούν με συνέπεια στο ίδιο σύστημα μονάδων. Στον πίνακα 2.2 απεικονίζονται τα συστήματα μονάδων που υποστηρίζει το pro/mechanica[3].

Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμική ενότητα (Thermal) περιέχει και άλλα φυσικά μεγέθη, όπως η μεταφορά θερμότητας, η θερμική ροή και η θερμική αγωγιμότητα, τα οποία είναι εξίσου σημαντικά αλλά η περαιτέρω αναφορά σε αυτά θα ξέφευγε από τους στόχους της εργασίας.

[3] Το Pro/ENGINEER έχει προεπιλεγμένο το αγγλικό σύστημα μονάδων (English IPS, in-lb-sec).

Πίνακας 2.2 Συστήματα μονάδων.

Φυσικά μεγέθη	**Συστήματα και μονάδες**			
	SI MMSec	**Μετρικό mm – N – sec**	**Αγγλικό FPS ft – lb – sec**	**Αγγλικό IPS in – lb – sec**
Μήκος	m	mm	ft	in
Χρόνος	sec	sec	sec	sec
Βάρος	kg	tonne (1000 kg)	Slug	$Lbf - sec^2/in$
Πυκνότητα	kg/m^3	$tonne/mm^3$	$Slug/ft^3$	$Lbf - sec^2/in^4$
Επιτάχυνση Βαρύτητας, g	$9.81\ m/s^2$	$9810\ mm/s^2$	$32.2\ ft/sec^2$	$386.4\ in/sec^2$
Δύναμη	N	N	lbf	lbf
Τάση, Πίεση Young's Modulus	$N/m^2 = Pa$	$N/mm^2 = MPa$	lbf/lbf^2	$lbf/in^2 = psi$

2.8 Αρχεία πού παράγει το mechanica.

Από τη στιγμή που μία ανάλυση εκτελείται στον ενιαίο τρόπο λειτουργίας, τα αρχεία της προσομοίωσης εμπεριέχονται σε αυτά του pro/engineer και δεν αποθηκεύονται κάπως διαφορετικά. Η προσομοίωση περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα που έχουν δοθεί στο μοντέλο (φορτία, περιορισμούς κλπ.), τα οποία εμφανίζονται στην οθόνη όταν γίνει η αλλαγή από το pro/engineer στο pro/mechanica. Το pro/mechanica παράγει μια σειρά από διαφορετικά αρχεία, τα οποία αποθηκεύονται στον κατάλογο εργασίας (working directory), τον οποίο έχει ορίσει ο χρήστης στην αρχή της διαδικασίας σχεδιασμού. Οι περιοχές που αποθηκεύονται τα αρχεία μπορούν να αλλάξουν σε συγκεκριμένα σημεία του προγράμματος.

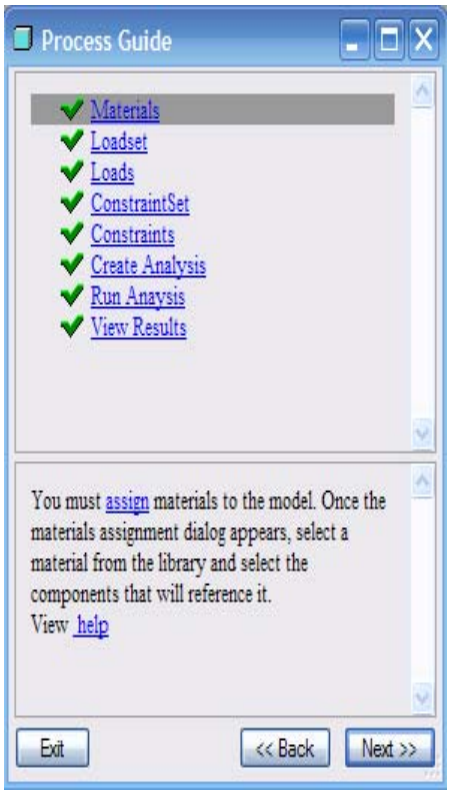
Για παράδειγμα, πριν πραγματοποιηθεί η εκτέλεση μιας μελέτης σχεδιασμού, μπορεί ο χρήστης να ορίσει την διεύθυνση του υποκαταλόγου όπου θα τοποθετηθούν τα εξαγόμενα αρχεία της μελέτης. Τα πιο σημαντικά αρχεία απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.3 Αρχεία που παράγει το Pro/Mechanica.

Τύπος αρχείου	**Αρχείο / Όνομα καταλόγου**	**Σχόλια**
Αρχεία μοντέλου	Όνομα_μοντέλου.mdb Όνομα_μοντέλου.mbk	Το αρχείο **.mdb** περιέχει τα δεδομένα του τελευταίου χρονικά αποθηκευμένου σχεδιαστικού μοντέλου. Το αρχείο **.mbk** είναι αρχείο ασφαλείας (backup) σε περίπτωση πού το **.mdb** αρχείο χαθεί η καταστραφεί.
Αρχεία μηχανής	/Study/study.mdb /Study/study.cnv /Study/study.hst /Study/study.opt /Study/study.res /Study/study.rtp	Περιέχει όλα τα δεδομένα του μοντέλου.
Ανταλλαγή αρχείων	Όνομα_αρχείου.dxf Όνομα_αρχείου.igs	Ο τύπος αυτού του αρχείου χρησιμοποιείται για εισαγωγή / εξαγωγή των πληροφοριών της γεωμετρίας.
Προσωρινά αρχεία	/Study.tmp/*.tmp /Study.tmp/*.bas	Διαγράφονται αυτόματα όταν τελειώσει η ανάλυση.
Αρχεία αποτελεσμάτων	Όνομα_αρχείου.rwd Όνομα_αρχείου.rwt Όνομα_αρχείου.grt	Τα αρχεία αυτά αποθηκεύονται στο παράθυρο διαλόγου των αποτελεσμάτων και περιέχουν: - Αποτελέσματα ανάλυσης - Γραφικές παραστάσεις
Autogem files	Όνομα_μοντέλου.agm	Παρέχει πληροφορίες για την πιο πρόσφατη Autogem λειτουργία. Σε περίπτωση που δεν έχει όνομα το μοντέλο, το αρχείο θα εμφανιστεί σαν untitled.agm.

2.9 Οδηγός διαδικασίας (process guide).

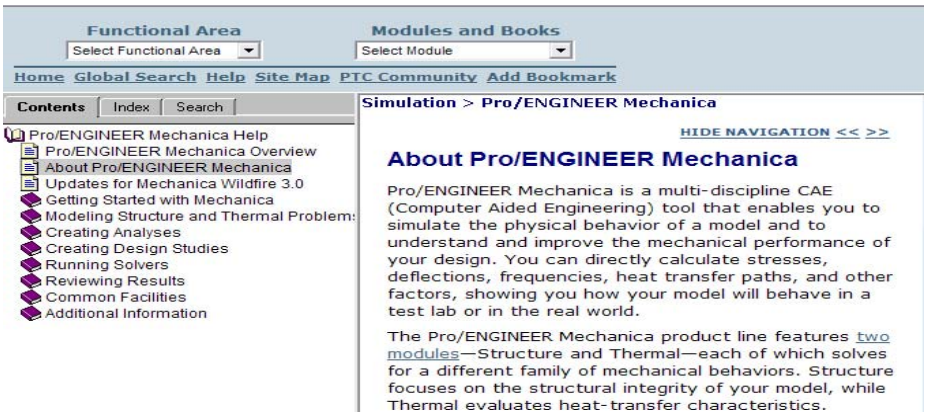
Το mechanica παρέχει ένα προαιρετικό εργαλείο, τον Οδηγό διαδικασίας (σχήμα 2.2), με σκοπό να καθοδηγήσει κυρίως το νέο χρήστη που δεν είναι εξοικειωμένος με το πρόγραμμα, τόσο στη δημιουργία όσο και στην εκτέλεση της ανάλυσης. Ο οδηγός αυτός ανοίγει σε ξεχωριστό παράθυρο διαλόγου και ενημερώνει το χρήστη για τις παραμέτρους που είναι απαραίτητες να οριστούν για μια ολοκληρωμένη ανάλυση. Με τη χρησιμοποίηση του οδηγού αυτού μειώνεται η πιθανότητα παράληψης κάποιας εντολής, καθώς ο χρήστης καθοδηγείται βήμα βήμα. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να προσαρμόσει τον οδηγό ή ακόμα και να τον γράψει από την αρχή θέτοντας δικά του κριτήρια. Αυτό βέβαια απαιτεί εμπειρία και εξοικείωση με το πρόγραμμα. Στο σχήμα 2.2 απεικονίζεται ολοκληρωμένη η διαδικασία του οδηγού για μια τυχαία στατική ανάλυση.



Σχήμα 2.2 Ολοκληρωμένη η εικόνα του οδηγού.

2.10 Βοήθεια που παρέχει το pro/mechanica (help center).

Όπως στο pro/engineer έτσι και στο pro/mechanica, ο χρήστης μπορεί ανά πάσα στιγμή να απευθυνθεί στη βοήθεια που παρέχει το πρόγραμμα (σχήμα 2.3), όπου υπάρχουν αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία των εντολών.



Σχήμα 2.3 Το κεντρικό παράθυρο του help.

2.11 Στοιχεία δοκών (beams element).

Οι δοκοί είναι θεμελιώδη δομικά στοιχεία. Στο pro/mechanica αντιμετωπίζονται ως εξιδανικεύσεις δηλαδή απεικονίζονται με τη μορφή γραμμών και δεν εμφανίζονται σε στερεή τρισδιάστατη μορφή. Οι δοκοί είναι μονοδιάστατα στοιχεία και μπορεί να αποτελούνται από ευθύγραμμα (straight) τμήματα ή κυρτά (καμπύλα-curved) τμήματα. Στον ενιαίο τρόπο λειτουργίας η διατομή της δοκού πρέπει να είναι σταθερή σε όλο το μήκος της. Ένα μοντέλο μπορεί να αποτελείται εξολοκλήρου από στοιχεία δοκού (beam elements) ή να συνδυαστεί με διαφορετικού τύπου στοιχεία όπως για παράδειγμα κελύφη (shells) ή ελατήρια (springs). Όταν δημιουργείται μια δοκός στο pro/mechanica, για να πραγματοποιηθεί σωστά η ανάλυση, θα πρέπει να οριστούν κάποιοι παράμετροι, όπως ο ορισμός του υλικού, ο προσανατολισμός και η επιλογή της διατομής της δοκού. Η πιο σημαντική ιδιότητα που πρέπει να καθοριστεί είναι ο προσανατολισμός της, δηλαδή η θέση της στο τρισδιάστατο περιβάλλον. Ο προσανατολισμός επηρεάζει το πώς η δοκός συνδέεται με το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων (WCS), μέσω του οποίου το λογισμικό εφαρμόζει τα φορτία, και το πώς το λογισμικό υπολογίζει τα αποτελέσματα. Για να γίνει κατανοητό το πώς ορίζεται ο προσανατολισμός μιας δοκού θα πρέπει πρώτα να αναφερθούν τα δύο διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων πού χρησιμοποιεί το pro/mechanica.

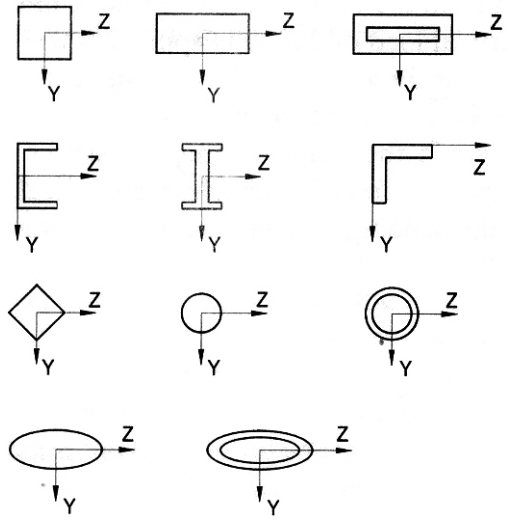
- Σύστημα συντεταγμένων σχήματος δοκού (BSCS) – Το λογισμικό σχεδιάζει την δοκό με γνώμονα το σύστημα συντεταγμένων σχήματος δοκού.

- Σύστημα συντεταγμένων δράσης δοκού (BACS) – Το λογισμικό εφαρμόζει τα φορτία σε περιοχές των δοκών, που είναι ορισμένες με συνέπεια στο σύστημα συντεταγμένων δράσης των δοκών.

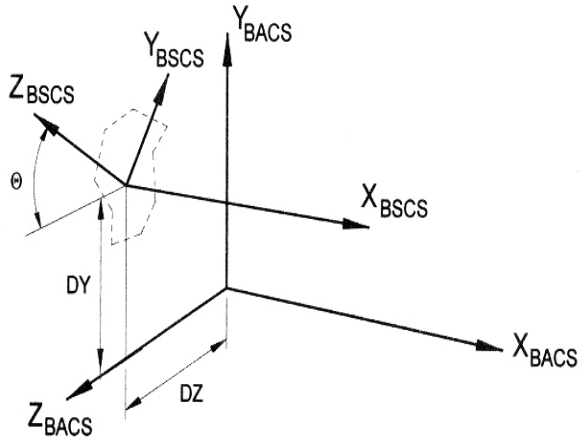
2.11.1 Σύστημα συντεταγμένων σχήματος δοκού.

Beam Shape Coordinate System (BSCS)

Το pro/mechanica ορίζει τη διατομή και τη θέση μιας δοκού σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων σχήματος δοκού (BSCS). Ο X άξονας εκτείνεται κατά μήκος της δοκού, ενώ οι άλλοι δύο, ο Y και ο Z, καθορίζονται αυτόματα από το λογισμικό. Οι τυποποιημένες διατομές που περιέχονται στο pro/mechanica απεικονίζονται στο σχήμα 2.4 . Στις περισσότερες διατομές το BSCS συμπίπτει με το κέντρο της διατομής. Ο X άξονας του BSCS, ο οποίος εκτείνεται κατά μήκος της δοκού, είναι πάντα παράλληλος με τον X-άξονα του BACS, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να σχεδιάσει μέσω του sketcher τη δική του διατομή, σε περίπτωση πού αυτή δεν υπάρχει στη βιβλιοθήκη.

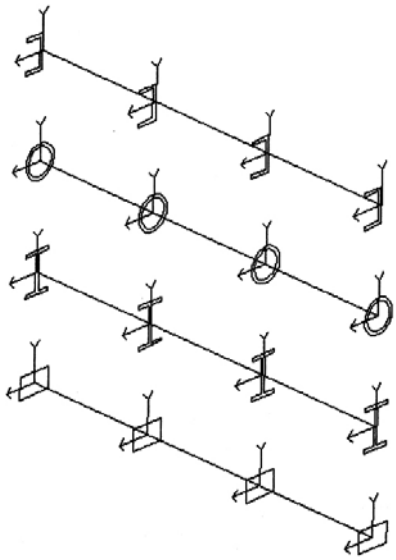


Σχήμα 2.4 Τυποποιημένες διατομές.



Σχήμα 2.5 Ορισμός του BSCS.

Όταν οριστούν οι παράμετροι της δοκού (διατομή, υλικό και προσανατολισμός) εμφανίζεται στην οθόνη το προφίλ της σε τέσσερα σημεία σε όλο το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος σε κανονική κλίμακα. Αυτό γίνεται για να μπορεί ο χρήστης να επαληθεύσει ότι, το σχήμα, το μέγεθος και ο προσανατολισμός της δοκού έχουν οριστεί σωστά, ενώ μερικά παραδείγματα παρουσιάζονται στο σχήμα 2.6. Ο Y-άξονας είναι η ουρά του βέλους (V) και ο Z-άξονας είναι η μύτη του βέλους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το pro/mechanica έχει την δυνατότητα να δημιουργεί ταυτόχρονα δοκάρια πού έχουν τις ίδιες ιδιότητες.



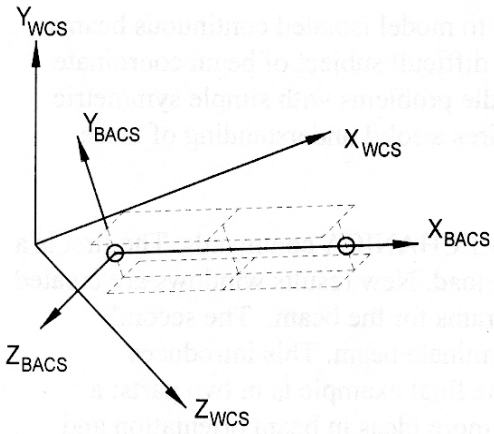
Σχήμα 2.6 Προφίλ δοκών.

2.11.2 Σύστημα συντεταγμένων δράσης των δοκών .

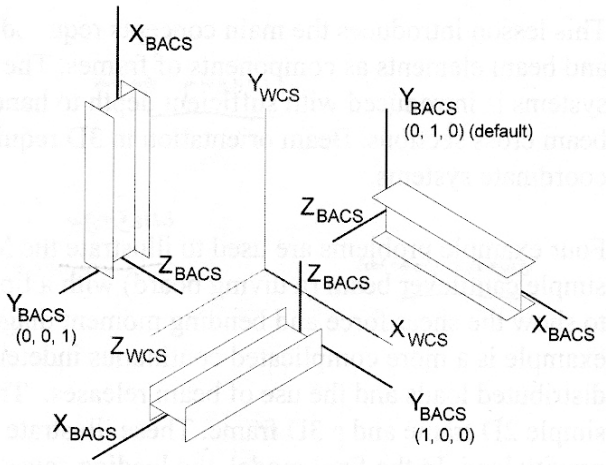
Beam Action Coordinate System (BACS)

Οι φορτίσεις, οι δυνάμεις και οι ροπές εφαρμόζονται στις δοκούς μέσω του συστήματος συντεταγμένων δράσης της δοκού (BACS). Στο περιβάλλον εργασίας τα στοιχεία των δοκών (beams elements) παρουσιάζονται με γαλάζιες γραμμές, ενώ οι δοκοί συνδέονται μεταξύ τους με γεωμετρικές ευθείες ή καμπύλες, που ενώνουν δύο ή περισσότερα σημεία στο χώρο, τα οποία ανήκουν στο WCS. Οι ευθείες και τα σημεία μπορούν να δημιουργηθούν στο pro/engineer ως σχεδιαστικά δεδομένα (datum's features) ή να δημιουργηθούν στο pro/mechanica ως χαρακτηριστικά προσομοίωσης (simulation features).

Τα ενωμένα σημεία ορίζουν τον X-άξονα (τοπικό άξονα) στο σύστημα συντεταγμένων της δοκού (BACS), όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.7, ενώ οι άλλοι δύο άξονες (τοπικοί) της δοκού, Y και Z είναι κάθετοι στη δοκό. Η περιστροφή γύρω από τον τοπικό άξονα X ορίζεται από την κατεύθυνση που δείχνει ο τοπικός άξονας Y (σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.7 Ορισμός X άξονα.



Σχήμα 2.8 Προσανατολισμός Y άξονα.

2.12 Φορτίο βαρύτητας [Gravity Load].

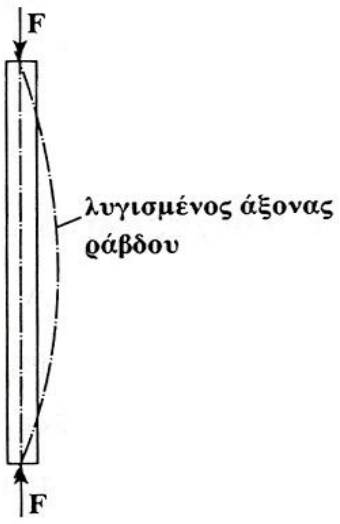
Το pro/mechanica παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να μπορεί να εφαρμόζει φορτίο βαρύτητας στην κατασκευή και να διαπιστώσει το αντίκτυπο που θα έχει στο μοντέλο. Για να μπορέσει ο χρήστης να εξομοιώσει την δύναμη της βαρύτητας και να την εφαρμόσει στο μοντέλο θα πρέπει να λάβει υπόψη του τα εξής:

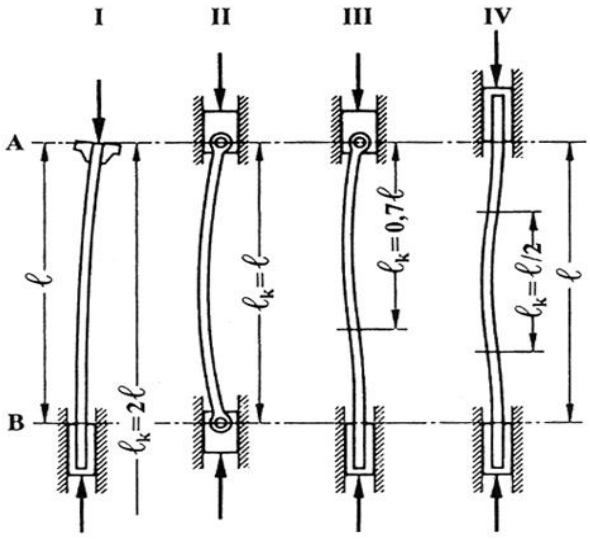
- Μπορεί να οριστεί μόνο ένα φορτίο βαρύτητας στο μοντέλο ή τη συναρμολόγηση.
- Το φορτίο της βαρύτητας είναι διαθέσιμο μόνο στην ενότητα της δομής και το φορτίο αυτό εξομοιώνει τη δύναμη της βαρύτητας και τις επιπτώσεις που έχει στο μοντέλο. Όταν το pro/mechanica ορίζει ένα φορτίο βαρύτητας, ορίζει τις βαρυτικές συνιστώσες του φορτίου σε κάθε κατεύθυνση του συστήματος συντεταγμένων.
- Όταν ορίζεται το φορτίο της βαρύτητας, πρέπει να γίνεται κατανοητό ότι το αρνητικό πρόσημο αναφέρεται στη διεύθυνση του φορτίου σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων. Για παράδειγμα, εάν θέλουμε να εξομοιώσουμε την κατακόρυφη δύναμη της βαρύτητας της Γής και εργαζόμαστε στο S.I, εισάγουμε στον Y-άξονα, -9.81 (m/s^2). Εάν απλά εισάγουμε 9.81, η δύναμη της βαρύτητας θα είναι προς τα πάνω (!).

- Για τα μοντέλα τριών διαστάσεων (3D), η βαρύτητα ασκείται σε σχέση με το wcs ή κάποιο άλλο σύστημα συντεταγμένων που ορίζει ο χρήστης. Για δισδιάστατα (2D) μοντέλα η βαρύτητα ασκείται σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων του δισδιάστατου μοντέλου ή κάποιο άλλο σύστημα συντεταγμένων που ορίζει ο χρήστης.
- Όταν εφαρμοστεί το φορτίο της βαρύτητας, το λογισμικό εμφανίζει στην οθόνη ένα σύμβολο στο σημείο που είναι και το WCS. Το σύμβολο αυτό περιέχει και την κατεύθυνση του φορτίου. Σε περίπτωση που η διεύθυνση δεν είναι αυτή που επιθυμεί ο χρήστης, θα πρέπει να την διορθώσει.

2.13 Φορτίο λυγισμού [buckling Load].

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες που οδηγούν στην αποτυχία μιας μηχανολογικής διάταξης. Η πρώτη είναι η αστοχία του υλικού, για την οποία θα πρέπει να εξετάσει το όριο διαρροής (yield stress) για όλκιμα υλικά και το όριο θραύσης (ultimate stress) για ψαθυρά υλικά και η δεύτερη η διαρθρωτική αστάθεια, η οποία συχνά αποκαλείται και ως λυγισμός. Το φαινόμενο του λυγισμού παρατηρείται και όταν το μήκος μιας ράβδου που φορτίζεται σε θλίψη είναι μεγάλο σε σχέση με τη διάμετρό της, τότε είναι δυνατόν η ράβδος να ξεφύγει από την ευθεία γραμμή της και να καμφθεί, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.4. Διακρίνονται τέσσερις (4) τρόποι στήριξης των ράβδων για τον υπολογισμό του λυγισμού, όπως φαίνονται στο εικόνα 2.5. Το φορτίο στο οποίο εμφανίζεται ο λυγισμός εξαρτάται από την ακαμψία των εξαρτημάτων μιας κατασκευής και όχι από την αντοχή των υλικών της. Ο λυγισμός αναφέρεται στην απώλεια της σταθερότητας του ενός στοιχείου και είναι συνήθως ανεξάρτητος από αντοχή υλικών του. Αυτή η απώλεια της σταθερότητας εμφανίζεται συνήθως κατά την ελαστική περιοχή του υλικού.





Σχήμα 2.9 Ράβδος που υπόκεινται σε λυγισμό. Σχήμα 2.10 Περιπτώσεις λυγισμού.

2.13.1 Συντελεστής φορτίου λυγισμού (BLF).

Για τον έλεγχο του λυγισμού, το pro/Mechanica, όπως και άλλα προγράμματα fea, διαθέτει το συντελεστή φορτίου λυγισμού (BLF[4]). Ο συντελεστής φορτίου λυγισμού (BLF) αποτελεί το συντελεστή ασφαλείας κατά του λυγισμού. Στον πίνακα 4 παρουσιάζεται η ερμηνεία των πιθανών τιμών του BLF που επιστρέφονται από το pro/mechanica.

Πίνακας 2.4 Ερμηνεία πιθανών τιμών του BLF.

Τιμή BLF	Κατάσταση Λυγισμού	Παρατηρήσεις
1 < BLF	Δεν προβλέπεται λυγισμός	Τα αναπτυσσόμενα φορτία είναι μικρότερα από τα προβλεπόμενα κρίσιμα φορτία. Δεν αναμένεται να εμφανιστεί λυγισμός.
0 < BLF < 1	Προβλέπεται λυγισμός	Τα αναπτυσσόμενα φορτία υπερβαίνουν τα προβλεπόμενα κρίσιμα φορτία. Σε αυτή την περίπτωση σίγουρα θα εμφανιστεί λυγισμός.
BLF = 1	Προβλέπεται λυγισμός	Τα αναπτυσσόμενα φορτία είναι ακριβώς ίδια με τα προβλεπόμενα κρίσιμα φορτία. Αναμένεται να εμφανιστεί λυγισμός.
BLF = −1	Δεν προβλέπεται λυγισμός	Το μοντέλο υπόκειται σε θλίψη και δεν αναμένεται να εμφανιστεί λυγισμός.
-1 < BLF < 0	Δεν προβλέπεται λυγισμός	Αναμένεται να εμφανιστεί λυγισμός αν αντιστραφούν όλα τα αναπτυσσόμενα φορτία.
BLF < −1	Δεν προβλέπεται λυγισμός	Δεν αναμένεται να εμφανιστεί λυγισμός ακόμα και αν αντιστραφούν όλα τα αναπτυσσόμενα φορτία.

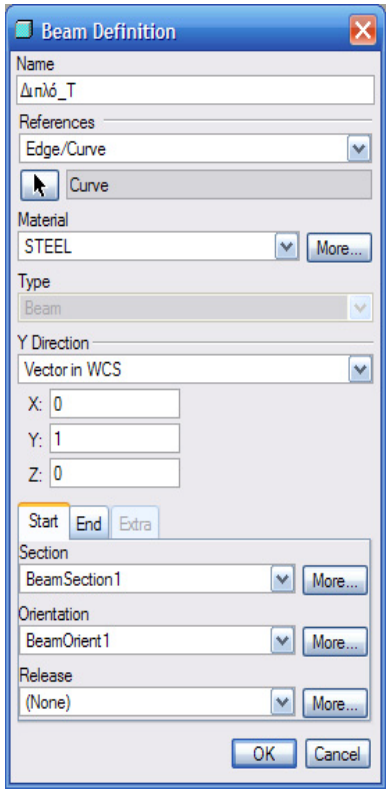
[4] Εάν χρησιμοποιείται συμμετρία στο μοντέλο ανάλυσης υπάρχει πιθανότητα ο BLF να μην υπολογιστεί σωστά και η τιμή του να αναφέρεται μόνο στο κομμάτι που εξετάζεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ανάλυση της γερανογέφυρας

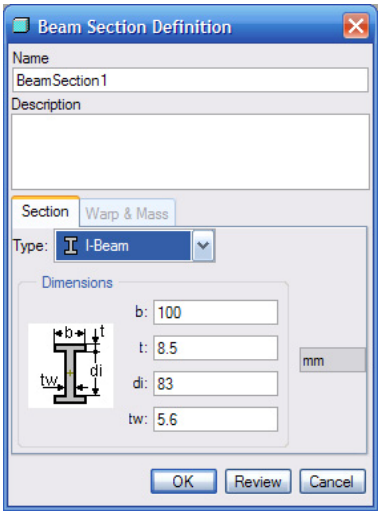
3.1 Προμελέτη γερανογέφυρας.

Το pro/mechanica παρέχει τη δυνατότητα προμελέτης ενός μοντέλου με τη χρήση εξιδανικεύσεων κι αυτό για να μπορεί ο εκάστοτε χρήστης να έχει μια πρώτη εικόνα για τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που αναμένεται να παρουσιαστούν στο μοντέλο. Συνεπώς, από τη στιγμή που το μοντέλο αποτελείται από δοκάρια, ο κατάλληλος τρόπος προμελέτης είναι τα ***beams elements*** (κεφ. 2 σελ.30). Θα πρέπει πρώτα να σχεδιαστούν και στη συνέχεια να οριστούν οι δοκοί που θέλει ο χρήστης, δηλαδή, ποια γραμμή θα προσομοιώνει το διπλό Τ και ποιες γραμμές θα προσομοιώνουν τις κοιλοδοκούς. Για να γίνει αυτό θα πρέπει από τη δεξιά εργαλειοθήκη να επιλεχθεί το εικονίδιο με τα στοιχεία δοκών.

Στην οθόνη εμφανίζεται το παράθυρο ορισμού δοκών. Στο πρώτο πεδίο γράφεται ένα όνομα όπως για παράδειγμα ‘‘Διπλό Τ’’ και στη συνέχεια επιλέγεται στο σχέδιο η οριζόντια γαλάζια γραμμή ως references. Στη συνέχεια επιλέγεται το υλικό του διπλού Τ από τη βιβλιοθήκη όπου και διαλέγεται το ***STEEL***. Στο τέταρτο πεδίο πρέπει να οριστεί ο προσανατολισμός του άξονα Y (Κεφ. 2 σελ. 31) με αναφορά το ***WCS*** όπου και τοποθετείται στο πεδίο του Y= 1, δηλαδή ο **Y** άξονας της δοκού θα είναι κάθετος στη γαλάζια γραμμή. Έπειτα καλείται ο χρήστης να επιλέξει τον τύπο της δοκού στο πεδίο Section όπου επιλέγεται η επιλογή more, η οποία και οδηγεί στο παράθυρο που θα επιλεγεί το προφίλ της δοκού.



Σχήμα 3.1 Ορισμός δοκού.



Σχήμα 3.2 ορισμός διατομής δοκού.

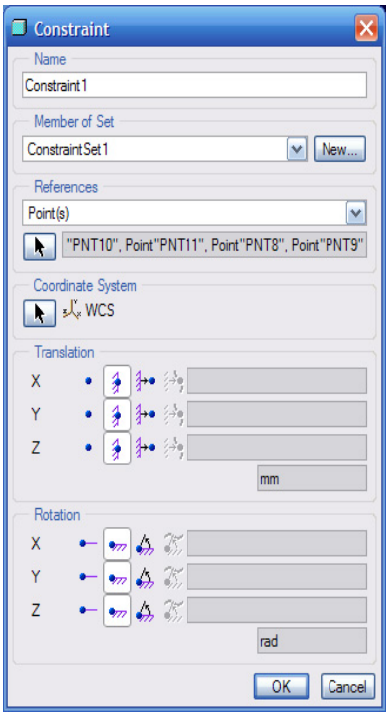
Επιλέγεται στο πεδίο ***Type: I-Beam*** και γράφονται οι επιλεγμένες διαστάσεις που απαιτούνται από τον πίνακα 1 (σελ.63). Επιλέγοντας το ***preview*** δίνεται η δυνατότητα απεικόνισης των πληροφοριών σχετικά με το Διπλό Τ, όπως για παράδειγμα η ροπή αδράνειας. Πατώντας το ***OK*** εμφανίζεται στην οθόνη η διατομή του Διπλού Τ σε κόκκινο πλαίσιο.

Ακολουθώντας την ιδία διαδικασία ορίζονται και οι κοιλοδοκοί, με τη διαφορά ότι επιλέγονται οι κάθετες γαλάζιες γραμμές αυτή τη φορά και ότι στον ορισμό του προφίλ επιλέγεται **Type: *Hollow Rect*** και γράφονται οι επιλεγμένες διαστάσεις από τον πίνακα 2 (σελ.63).

Για να αναπαρασταθούν οι πακτώσεις, θα πρέπει να εφαρμοστούν περιορισμοί στα σημεία της βάσης. Επιλέγεται από τη δεξιά εργαλειοθήκη :

New displacement constraint  (Νέος περιορισμός μετατόπισης)

Στην οθόνη εμφανίζεται το παράθυρο που απεικονίζεται στο σχήμα 3.3. Στο πρώτο πεδίο γράφεται ένα όνομα για παράδειγμα Constraint_1. Στο τρίτο πεδίο επιλέγονται τα σημεία στα οποία θα τοποθετηθούν οι πακτώσεις, επιλέγονται τα «Point"PNT8", Point"PNT11", Point"PNT10", Point"PNT9"» δηλαδή οι τέσσερεις άκρες στη βάση της γερανογέφυρας. Η προεπιλεγμένη επιλογή είναι η πάκτωση για όλους τους άξονες. Αυτή η επιλογή θα χρησιμοποιηθεί και για τα παραπάνω σημεία. Τέλος, επιλέγεται το ***OK***.

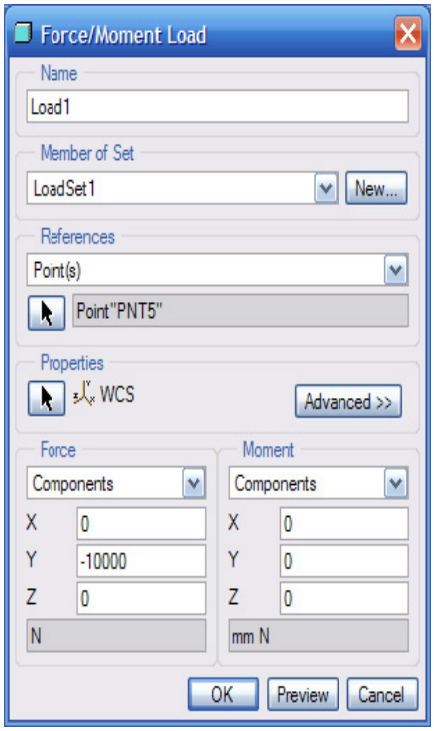


Σχήμα 3.3 ορισμός πάκτωσης.

Στη συνέχεια θα πρέπει να εφαρμοστεί το φορτίο του ενός (1) τόνου στο σημείο Point 5, το οποίο βρίσκεται στη μέση της οριζόντιας δοκού δηλαδή στη δυσμενέστερη θέση. Επιλέγεται το εικονίδιο:

New Force/Moment Load  (Νέα δύναμη/ φορτίο).

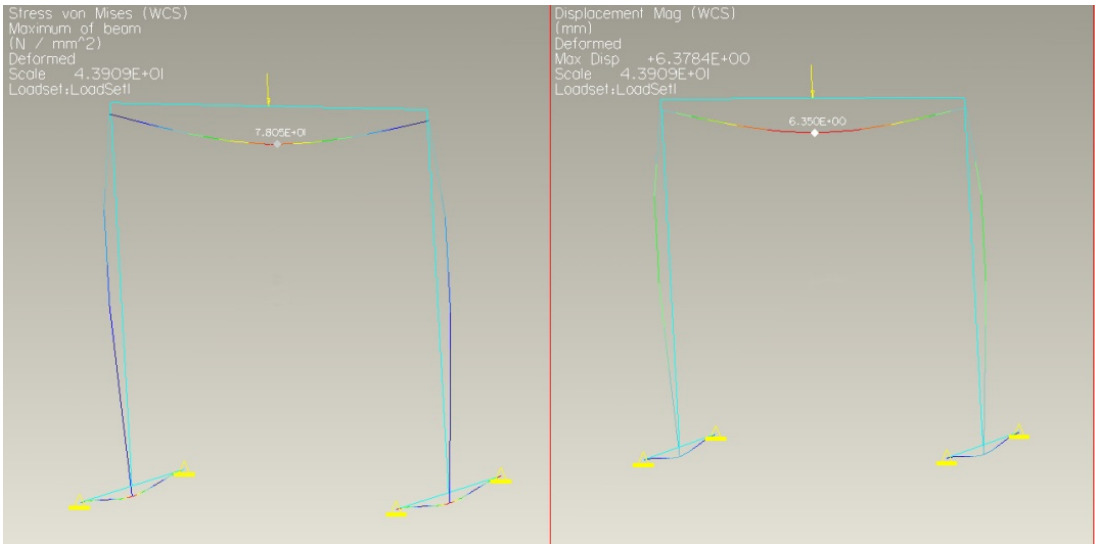
Ανοίγεται το παράθυρο της εικόνας 3.2. Στο πρώτο πεδίο γράφεται ένα όνομα π.χ. Load1 και στο τρίτο πεδίο επιλέγεται το σημείο Point 5 και στο κάτω μέρος του παραθύρου γράφεται το φορτίο του ενός (1) τόνου σε N (1tn=10000N). Το αρνητικό πρόσημο έχει να κάνει με τη διεύθυνση του φορτιού σε σχέση με το WCS. Επιλέγοντας το ***preview*** μπορεί να φανεί πως θα είναι το φορτίο, και το παράθυρο κλείνει επιλέγοντας το ***OK***.



Σχήμα 3.5 Παράθυρο ορισμού φορτίων.

Τέλος υλοποιείται η ανάλυση επιλέγοντας ***File > New static*** και πατώντας run η ανάλυση ξεκινάει και διαρκεί μόνο μερικά δευτερόλεπτα. (Όλες οι εντολές για τη δημιουργία των αναλύσεων και των παραθύρων αποτελεσμάτων παρουσιάζονται αναλυτικά στις παραγράφους με την ανάλυση της γερανογέφυρας).

Τα αποτελέσματα που έχουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η τάση Von Mises που αναπτύσσεται στο κέντρο της δοκού η οποία είναι ίση με **78 MPa** και η παραμόρφωση της που ισούται με **6.3 mm**.



Σχήμα 3.6 Αποτελέσματα προμελέτης τάση von Mises – παραμόρφωση.

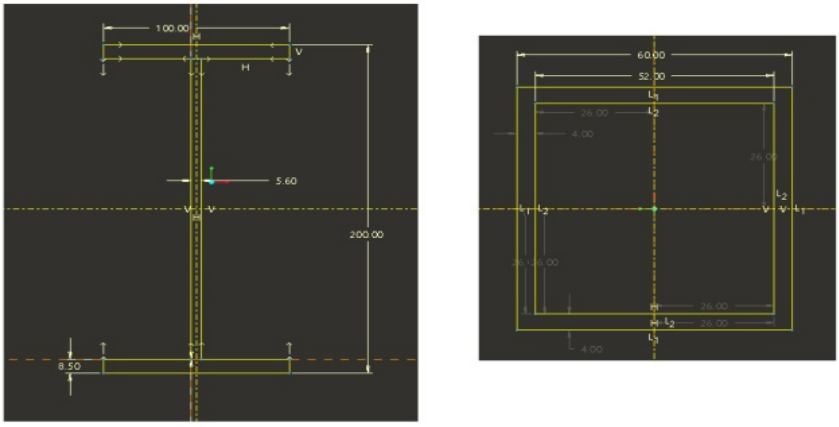
Συνοψίζοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι τα φορτία και οι πακτώσεις είναι σημειακά και για αυτό τα αποτελέσματα δεν είναι απόλυτα ρεαλιστικά. Η προμελέτη είναι μία γρήγορη εκτίμηση για το πώς αναμένεται να συμπεριφερθεί το μοντέλο και δεν αποτελεί κανονική μελέτη, ενώ σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να εμπιστευόμαστε τα αποτελέσματα που εξάγονται από αυτή. Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της ανάλυσης της γερανογέφυρας.

3.2 Περιγραφή σχεδίασης.

Για να σχεδιαστεί το τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο και λόγω του ότι θα πρέπει να απλοποιηθεί στη συνέχεια για να γίνει η ανάλυση, είναι προτιμότερο να σχεδιαστεί η γερανογέφυρα με απλές εντολές5. Για αυτόν τον λόγο θα χρησιμοποιηθούν οι έτοιμες διατομές που είναι διαθέσιμες στο sketch για τη δημιουργία των κοιλοδοκών, του διπλού Τ και των κοιλοδοκών (διαστάσεις βλ.

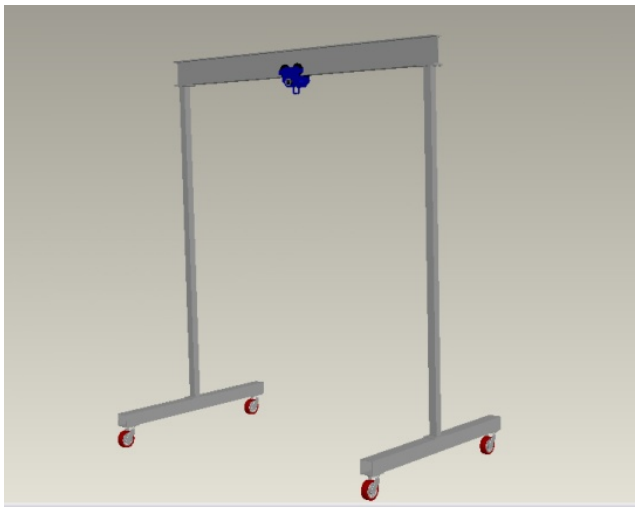
[5] Η περιγραφή των εντολών σχεδίασης βήμα βήμα ξεφεύγει από τους στόχους της εργασίας.

πίνακες σελ. 62), όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 3.7. Έπειτα σχεδιάζεται και το μέσο σύνδεσης (φλάντζα) μεταξύ των κοιλοδοκών.



Σχήμα 3.7 Διατομή διπλού Τ και κοιλοδοκού.

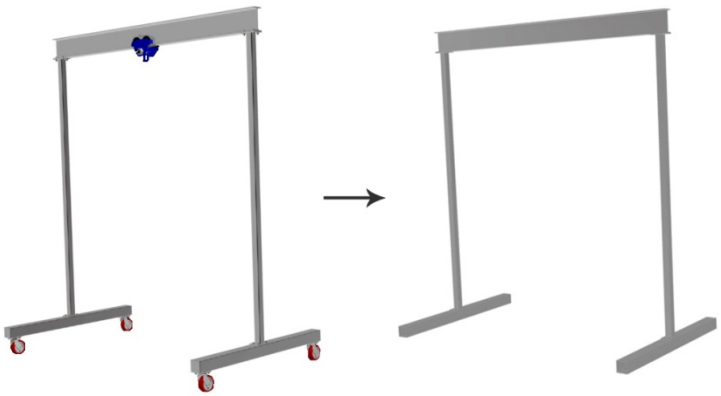
Στη συνέχεια ανοίγονται τρύπες οπού χρειάζεται για να τοποθετηθούν οι βίδες και στη συνέχεια συναρμολογείται το μοντέλο μαζί με τα περιφερειακά, τις ρόδες και το τρόλεϊ μέσω του assembly, ενώ η τελική εικόνα του μοντέλου πριν την εισαγωγή στο Mechanica παρουσιάζεται στο σχήμα 3.8. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί, ότι εάν κατά τη σχεδίαση δημιουργηθούν επίπεδα ή σημεία θα είναι ενεργά και στο pro/Mechanica, ενώ το αντίθετο δεν ισχύει. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάζει κάνεις, μπορεί να έχει επίπτωση στο αποτέλεσμα της ανάλυσης η οποία βέβαια δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα.



Σχήμα 3.8 Τελική εικόνα σχεδιαστικού μοντέλου.

3.2 Προετοιμασία του μοντέλου για ανάλυση.

Πριν ξεκινήσει το pro/mechanica, όπου και θα γίνει η ανάλυση της γερανογέφυρας, θα πρέπει να απλοποιηθεί το μοντέλο, δηλαδή, όλα τα κοσμητικά χαρακτηριστικά του, όπως για παράδειγμα οι στρογγυλεμένες ακμές του διπλού Τ και των κοιλοδοκών. Παράλληλα, θα πρέπει να αφαιρεθούν και τα εξαρτήματα που δεν θα συμμετέχουν στην ανάλυση (ρόδες, βίδες και τρόλεϊ).



Σχήμα 3.9 Μοντέλο pro/E ⟹ μοντέλο pro/mechanica.

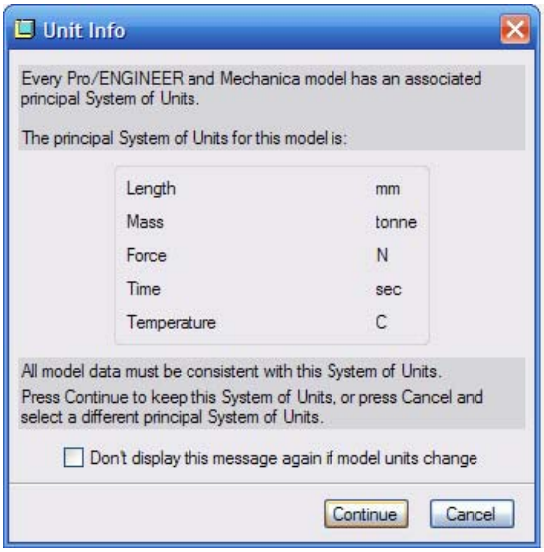
3.3 Ξεκινώντας το pro/mechanica.

Με την απλοποιημένη γεωμετρία έτοιμη, ήρθε η κατάλληλη στιγμή να τεθεί σε λειτουργία το pro/mechanica. Από την κεντρική εργαλειοθήκη του pro/engineer επιλέγεται:

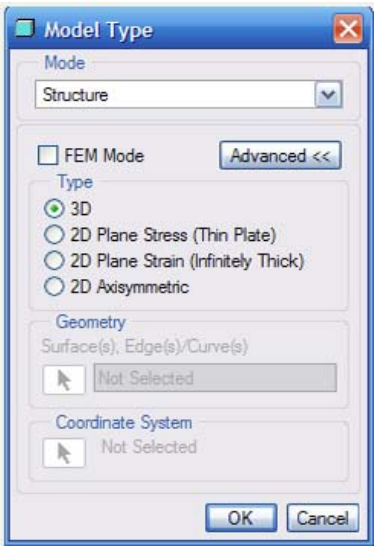
Applications > Mechanica

Το παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται (unit info), όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.10, δίνει τις σχετικές πληροφορίες για το σύστημα μονάδων που είναι επιλεγμένο για το μοντέλο και επιλέγεται το ***Continue*** για να συνεχιστεί η εν λόγω διαδικασία. Σε περίπτωση που κάποια από τα εξαρτήματα είναι σχεδιασμένα σε διαφορετικό σύστημα μονάδων, το πρόγραμμα ενημερώνει, ότι θα πρέπει να γίνει αλλαγή στο προεπιλεγμένο σύστημα μονάδων και την κάνει αυτόματα. Επίσης, στο κάτω μέρος του παραθύρου υπάρχει η επιλογή να μην εμφανίζεται το συγκεκριμένο παράθυρο κάθε φορά που ανοίγει το pro/mechanica, η οποία επιλογή όμως δε συνίσταται να ενεργοποιείται.

Η μεταφορά στο pro/mechanica διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα. Στο επόμενο παράθυρο διαλόγου (model type_σχήμα 3.11), ζητείται να επιλεγεί η ενότητα στην οποία θα γίνει η συγκεκριμένη εργασία, καθώς και ο τύπος του μοντέλου που θα αναλυθεί. Επιλέγεται η ενότητα Structure (δομή) και ο τύπος του μοντέλου επιλέγουμε 3D (τρισδιάστατο).



Σχήμα 3.10 Παράθυρο συστήματος μονάδων.



Σχήμα 3.11 Παράθυρο επιλογής τύπου μοντέλου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η επιλογή FEM Mode δεν υποστηρίζει την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Με την επιλογή αυτή ενεργή παρέχεται η δυνατότητα να εφαρμοστούν φορτία, περιορισμοί και να οριστεί υλικό στο μοντέλο, δεν μπορεί όμως να υλοποιηθεί η ανάλυση. Αυτή η επιλογή είναι κατάλληλη για την προετοιμασία μοντέλων, τα οποία πρόκειται να αναλυθούν σε άλλα λογισμικά προγράμματα FEA. Αυτό γίνεται γιατί αλλά πακέτα δεν έχουν εύχρηστο περιβάλλον εργασίας. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το wildfire για να στηθεί το μοντέλο πολύ πιο εύκολα.

Άρα, από τη στιγμή που θα χρησιμοποιηθεί το pro/mechanica για την ανάλυση της γερανογέφυρας, η επιλογή FEM Mode θα πρέπει να απενεργοποιηθεί.

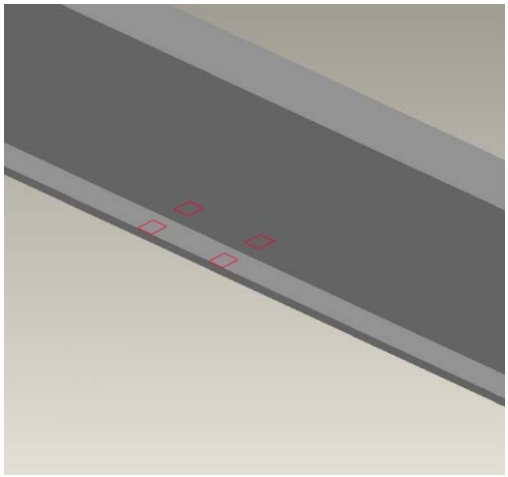
3.4 Δημιουργία επιφάνειας.

Για να μπορέσει να αναπαρασταθεί το φορτίο και οι περιορισμοί όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά, θα πρέπει να ξεχωρίσουν οι επιφάνειες που ακουμπάνε οι ρόδες, αλλά και οι επιφάνειες που ακουμπάει το τρόλεϊ από την υπόλοιπη κοιλοδοκό και το διπλό Τ αντίστοιχα. Αυτό θα επιτευχθεί με μια ειδικευμένη εντολή του pro/mechanica, την περιοχή επιφανείας. Από τη δεξιά εργαλειοθήκη επιλέγεται το εξής εικονίδιο:

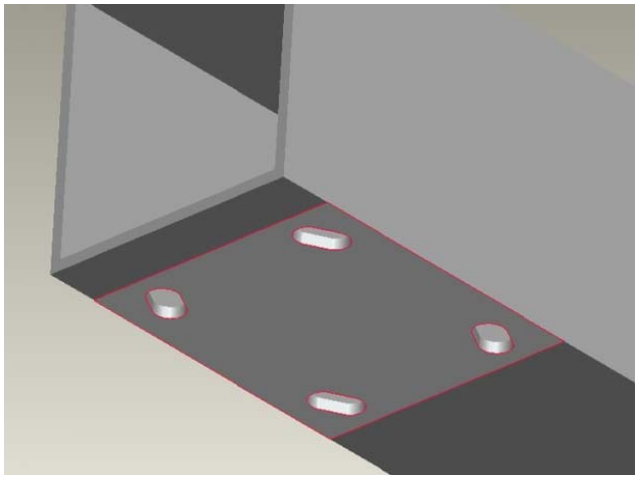
Surface Region  (περιοχή επιφάνειας)

Εδώ καλείται ο χρήστης να σχεδιάσει τα αποτυπώματα των εξαρτημάτων στην γερανογέφυρα. Συνοπτικά η διαδικασία υλοποιείται ως εξής:

Αφού επιλεγεί πρώτα το εικονίδιο, ***Surface Region,*** το πρόγραμμα καλεί το χρήστη να επιλέξει το εξάρτημα στο οποίο θα δημιουργηθεί η υποπεριοχή. Επιλέγεται το διπλό Τ και στη συνέχεια το ***sketch,*** ενώ έπειτα επιλέγεται η επιφάνεια στην οποία θα σχεδιαστεί το αποτύπωμα του τρόλεϊ. Μετά επιλέγεται η κάτω εσωτερική επιφάνεια, σχεδιάζεται το αποτύπωμα και γίνονται αποδεκτά τα επόμενα τρία παράθυρα διαλόγου. Παρατηρώντας το μοντέλο φαίνεται το αποτύπωμα με κόκκινη απόχρωση του τρόλεϊ, όπως παρατηρείται στο σχήμα 3.12. Για να γίνουν και τα αλλά τρία αποτυπώματα ακολουθείται η ίδια διαδικασία.



Σχήμα 3.12 Αποτύπωμα τρόλεϊ.



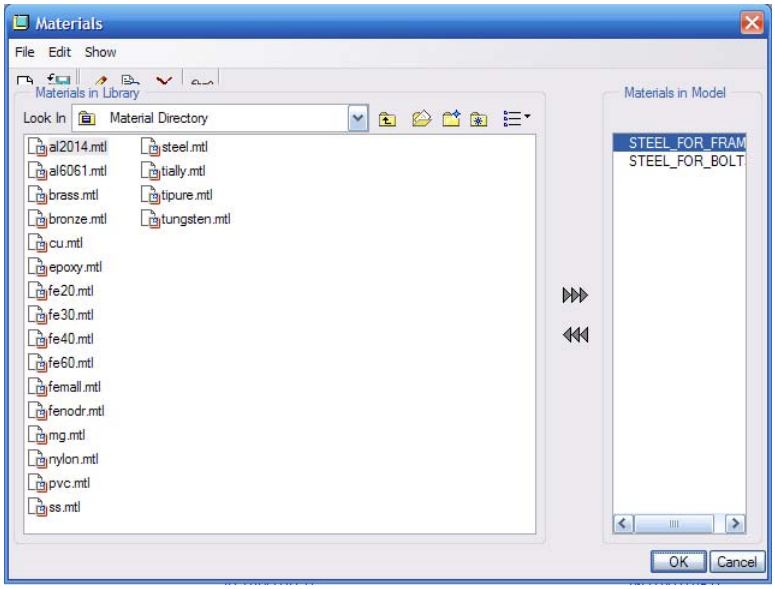
Σχήμα 3.13 Αποτύπωμα επιφάνειας ρόδας.

Με την ολοκλήρωση της εντολής αυτής, δεν παρατηρείται οπτικά καμιά αλλαγή, αλλά αν περάσει το ποντίκι από την επιφάνεια που μόλις σχεδιάστηκε, θα διαπιστωθεί ότι σημαδεύεται με άσπρο πλαίσιο. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία για να σχεδιαστούν οι υποπεριοχές που θα τοποθετηθούν οι πακτώσεις (σχήμα 3.13), επιλέγοντάς την κοιλοδοκό και σχεδιάζοντας την υποπεριοχή στο κάτω μέρος, εκεί δηλαδή που θα τοποθετηθούν οι ροδές.

3.5 Προσδιορίζοντας το υλικό.

Για να οριστεί υλικό στο μοντέλο πρέπει να γίνουν δύο βήματα: πρώτον να επιλεγεί το υλικό από την βιβλιοθήκη και δεύτερον να οριστεί στο μοντέλο. Από τη δεξιά εργαλειοθήκη επιλέγεται το εικονίδιο:

Define material  (Επιλογή υλικού)



Σχήμα 3.14 Βιβλιοθήκη υλικών pro/mechanica.

Το παράθυρο που εμφανίζεται, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.14, περιέχει τα διαθέσιμα υλικά του προγράμματος. Στη λίστα στα αριστερά μπορεί να βρει το υλικό που επιθυμεί ο χρήστης, επιλέγεται ο χάλυβας (steel.mtl) πατώντας το τριπλό βέλος με τη δεξιά κατεύθυνση, μεταφέρεται το υλικό στο μοντέλο και κλείνει το παράθυρο πατώντας **OK.** Σε αυτό το σημείο πρέπει να ειπωθεί ότι κάνοντας δεξί κλικ πάνω στο επιλεγμένο υλικό δίνεται η δυνατότητα να οριστούν οι ιδιότητες (properties) του υλικού, όπως η πυκνότητα (density), ο λόγος Πουασόν (Poisson's ratio) κλπ. Το πιο σημαντικό, όμως, είναι ότι σε αυτό το παράθυρο διαλόγου ορίζεται και το κριτήριο αστοχίας του υλικού (failure criterion). Επιλέγεται ως κριτήριο αστοχίας η τάση Von Mises για εφελκυστική τάση διαρροής, που στην περίπτωση του χάλυβά St 37-2 (κατά DIN 17100) είναι 235 MPA (πίνακας 3 σελ 64) .

Στη συνέχεια, θα πρέπει να οριστούν τα εξαρτήματα της γερανογέφυρας που θα είναι από χάλυβα. Από τη δεξιά εργαλειοθήκη επιλέγεται το εικονίδιο:

Assign material  (Ορισμός υλικού)

Έπειτα, επιλέγονται, ένα ένα, όλα τα εξαρτήματα της συναρμολόγησής. Για να εφαρμοστεί το επιλεγμένο υλικό στο μοντέλο επιλέγεται το ***OK*** στο παράθυρο διαλόγου και ένα νέο εικονίδιο εμφανίζεται στο μοντέλο για να δείξει ότι το υλικό έχει οριστεί σωστά.

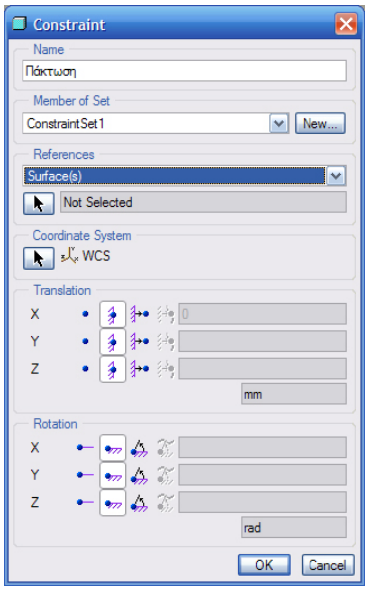
3.6 Εφαρμόζοντας τους περιορισμούς.

Θα πρέπει με κάποιο τρόπο να αναπαρασταθούν οι στηρίξεις της γερανογέφυρας και να προσδιοριστούν οι βαθμοί ελευθερίας στους X,Y,Z άξονες.

Αυτό θα γίνει εφαρμόζοντας περιορισμούς στο μοντέλο. Συγκεκριμένα, θα τοποθετηθεί πάκτωση στα τέσσερα σημεία που θα μπουν οι ρόδες. Επιλέγεται λοιπόν το εικονίδιο:

New displacement constraint  (Νέος περιορισμός μετατόπισης)

Ένα νέο παράθυρο διαλόγου ανοίγει, το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 3.15 (Περιορισμοί μοντέλου). Στο πρώτο πεδίο βάζει ο χρήστης ένα όνομα π.χ. πάκτωση, ενώ στο δεύτερο πεδίο καλείται να επιλέξει τις πλευρές, τα σημεία ή τις επιφάνειες που επιθυμεί να τοποθετηθεί η πάκτωση. Επιλέγει, λοιπόν, τις επιφάνειες που σχεδιάστηκαν νωρίτερα με την βοήθεια της εντολής ***Surface Region.*** (σελ.40-41)



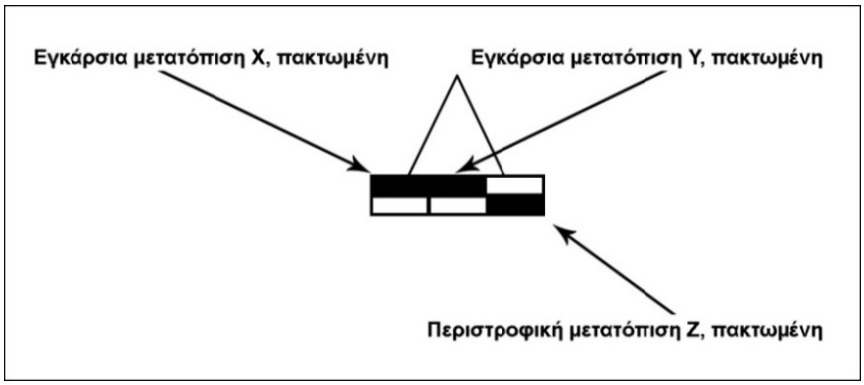
Σχήμα 3.15 Περιορισμοί μοντέλου.

Στο κάτω μέρος του ίδιου παραθύρου ορίζονται οι βαθμούς ελευθερίας, που είναι τρεις για την εγκάρσια κίνηση και τρεις για την περιστροφική[6]. Κάθε περιορισμός έχει τέσσερις επιλογές από αριστερά προς τα δεξιά και είναι οι εξής :

- Ελεύθερο (free)
- Πακτωμένο (fixed)
- Προβλεπόμενη θέση (prescribed position)
- Λειτουργία συντεταγμένων (function of coordinates) - Διαθέσιμη μόνο στην FEA mode

Η προεπιλεγμένη επιλογή είναι η πάκτωση για όλους τους άξονες. Αυτή η επιλογή θα χρησιμοποιηθεί και για το συγκεκριμένο κομμάτι της επιφάνειας που θα τοποθετηθούν οι ρόδες. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι όποιο στοιχείο είναι σε αυτή την περιοχή δε θα μπορεί να κινηθεί καθόλου (απόλυτα πακτωμένο). Για να ολοκληρωθεί το παράθυρο διαλόγου με τους περιορισμούς (σχήμα 3.15) επιλέγεται το ***OK***. Ένα μοτίβο από μικρά κόκκινα τρίγωνα εμφανίζεται στην επιλεγμένη επιφάνεια, καθώς και ένα μεγαλύτερο τρίγωνο με έξι κουτιά στην βάση, όπως στο σχήμα 3.16. Το κάθε κουτί αντιστοιχεί σε κάθε άξονα.

[6] Οι περιστρεφόμενοι περιορισμοί είναι άνευ σημασίας στην περίπτωση των στερεών στοιχείων, καθώς οι κόμβοι τους έχουν μόνο τους εγκάρσιους βαθμούς ελευθερίας.



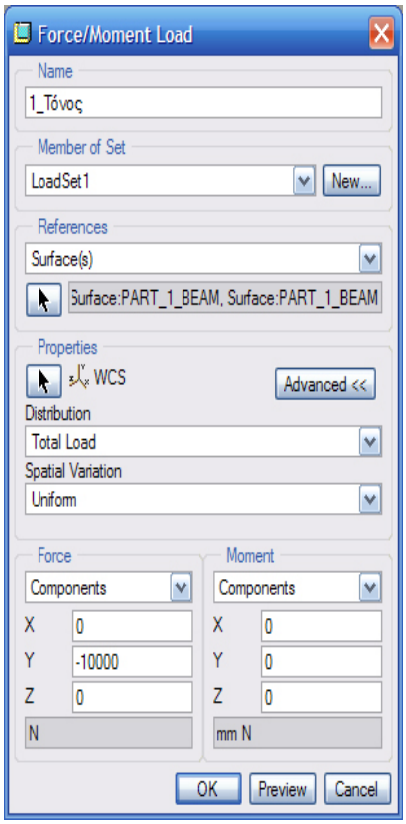
Σχήμα 3.16 Τρίγωνο βαθμών ελευθερίας.

3.7 Εφαρμόζοντας το φορτίο.

Το φορτίο που ασκείται στη γερανογέφυρα θα εφαρμοστεί επιλέγοντας πρώτα το εικονίδιο:

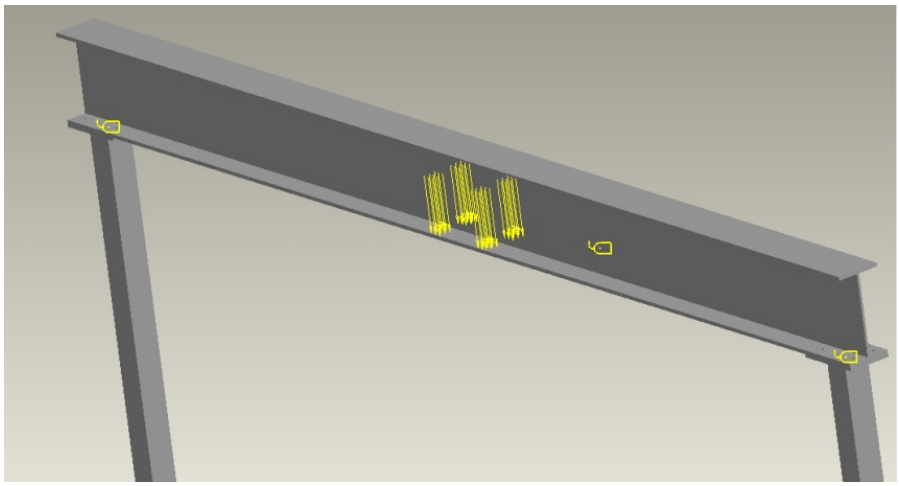
New Force/Moment Load  (Νέα δύναμη /φορτίο)

Το συγκεκριμένο εικονίδιο ανοίγει το παράθυρο διαλόγου (σχήμα 3.17), μέσω του οποίου θα εφαρμοστεί το φορτίο του ενός τόνου στην κατασκευή. Η δυσμενέστερη θέση στη γερανογέφυρα είναι το κέντρο του οριζόντιου δοκαριού (διπλό Τ). Συνεπώς, θα πρέπει να διαπιστωθεί αν εκείνο το σημείο αντέχει το συγκεκριμένο φορτίο. Στο πρώτο πεδίο αναγράφεται το όνομα του φορτίου π.χ. 1_Τόνος. Στη συνέχεια, επιλέγονται οι επιφάνειες στις οποίες θα εφαρμοστεί το φορτίο. Πατώντας την επιλογή ***Advanced*** παρατηρούνται άλλες δύο επιλογές, η επιλογή ***distribution*** (κατανομή) και η επιλογή ***spatial voriation*** (διακύμανση του φορτίου). Επιλέγεται στη μία ***total load*** (συνολικό φορτίο) και στην άλλη ***uniform*** (ομοιόμορφο). Τέλος, στο κάτω μέρος του παραθύρου θα πρέπει να δοθεί το μέγεθος και την κατεύθυνση σύμφωνα με το ***WCS***. Γράφεται τέλος στο πεδίο του κατακόρυφου άξονα Y η τιμή σε Newton, δηλαδή, ένας (1)_τόνος =10.000 N.



Σχήμα 3.17 Ορισμός φορτίου στο μοντέλο.

Για να διαπιστωθεί ότι το φορτίο έχει οριστεί σωστά στο μοντέλο, επιλέγεται η εντολή ***preview*** (πρώτη προβολή) και στην συνέχεια το ***OK.*** Το μοντέλο με το φορτίο απεικονίζεται στο σχήμα 3.18.



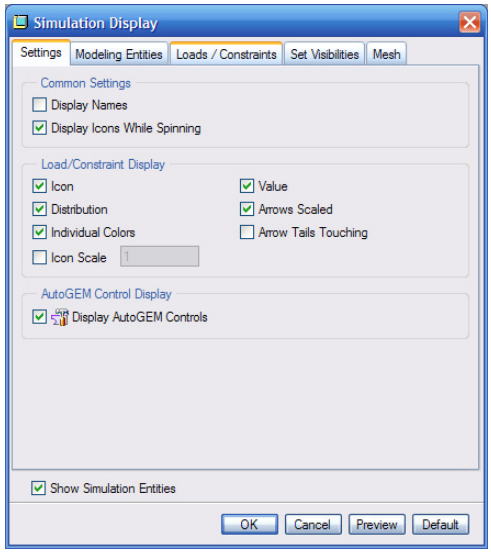
Σχήμα 3.18 Εμφάνιση φορτίου στο μοντέλο.

3.8 Επεξεργασία οθόνης.

Πριν υλοποιηθεί η ανάλυση υπάρχει η δυνατότητα να εξερευνηθούν μερικές λειτουργίες που αφορούν την απεικόνιση του μοντέλου. Τον τρόπο, δηλαδή, που θα εμφανίζονται οι παράμετροι προσομοίωσης, όπως για παράδειγμα τα φορτία και οι περιορισμοί στο μοντέλο. Από την κεντρική βιβλιοθήκη επιλέγεται το εικονίδιο:

Simulations display  (Προσομοίωση οθόνης)

Στην οθόνη εμφανίζεται το παράθυρο επεξεργασίας της εικόνας (σχήμα 3.19), το οποίο επιτρέπει να γίνει επεξεργασία στην εμφάνιση του μοντέλου. Υπάρχουν διάφορες εντολές, άλλες ενεργοποιημένες και άλλες όχι. Μπορούν να γίνουν κάποια πειράματα επιλέγοντας κάποιες από αυτές τις εντολές, όπως για παράδειγμα τις επιλογές ***display Names*** (εμφάνιση ονομάτων) και ***load value*** (τιμή φορτίου), που αν ενεργοποιηθούν θα εμφανιστεί στο μοντέλο το όνομα και η τιμή των φορτίων, πράγμα ιδιαίτερα χρήσιμο όταν πρόκειται να εκτυπωθεί η συγκεκριμένη εικόνα.



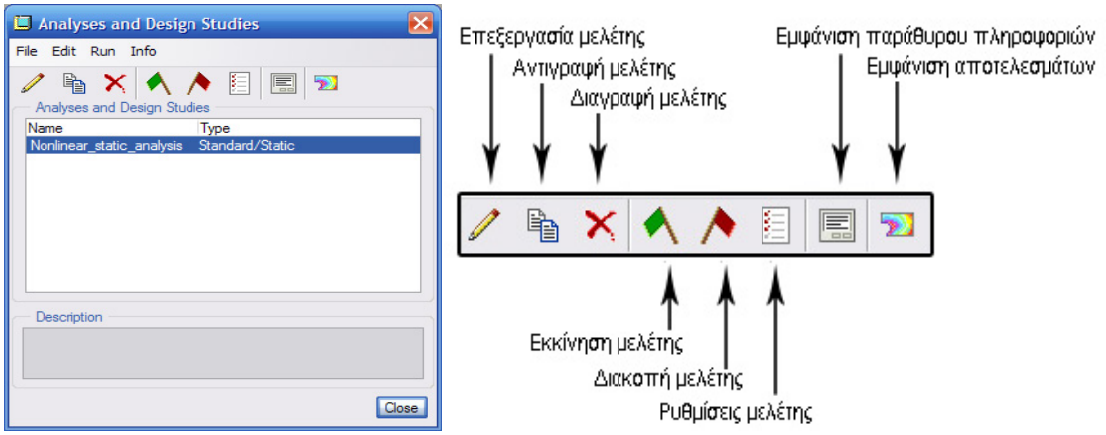
Σχήμα 3.19 Παράθυρο επεξεργασίας εικόνας.

Επίσης, το συγκεκριμένο παράθυρο διαλόγου είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν το μοντέλο είναι περίπλοκο, όπου υπάρχει η επιτακτική ανάγκη να απαλλαχθεί η οθόνη από περιττές πληροφορίες. Τέλος, πατώντας την επιλογή ***Default*** επανέρχονται οι εντολές στην αρχική τους κατάσταση και κλείνει το παράθυρο διαλόγου.

3.9 Δημιουργία της ανάλυσης.

Έχοντας ορίσει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους για να υλοποιηθεί η ανάλυση, επιλέγεται από την κεντρική εργαλειοθήκη το εικονίδιο:

Run a design study  (εκτέλεση μελέτης σχεδιασμού)



Σχήμα 3.20 Παράθυρο διαλόγου για αναλύσεις – Επεξήγηση εικονιδίων.

Στην οθόνη εμφανίζεται το κεντρικό παράθυρο διαλόγου για τις αναλύσεις (σχήμα 3.20), (analysis and design studies). Το παράθυρο αυτό επιτρέπει την πρόσβαση σε όλες τις εντολές που αφορούν το μοντέλο, όπως τι είδους ανάλυση θα επιλεγεί, με ποια μέθοδο σύγκλησης, πού θα τοποθετηθούν τα αποτελέσματα κλπ. Ειδικότερα, θα πραγματοποιηθεί στατική ανάλυση, άρα, από το μενού επιλέγεται:

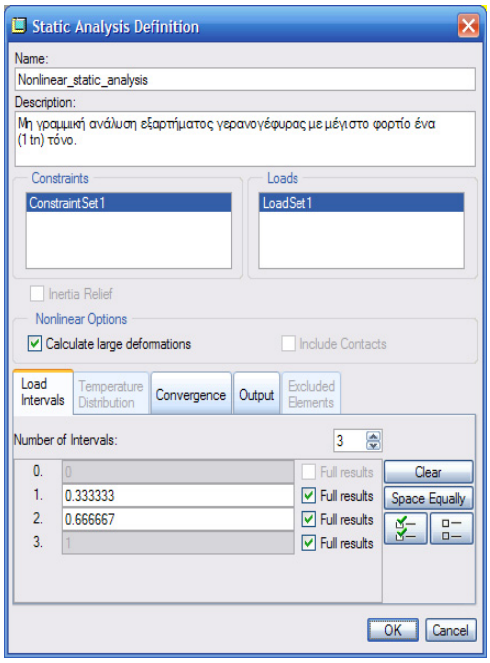
File > New static

Στην οθόνη εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου για τον ορισμό των παραμέτρων της ανάλυσης (σχήμα 3.21). Στο πρώτο πεδίο τοποθετείται το όνομα της ανάλυσης όπως για παράδειγμα «Μη γραμμική στατική ανάλυση[7]». Στο δεύτερο πεδίο, υπάρχει η δυνατότητα, χωρίς να είναι απαραίτητο, να γραφτεί μία σύντομη

[7] Το όνομα της ανάλυσης που δόθηκε θα είναι και το όνομα του υποφάκελου ο οποίος θα περιέχει όλα τα αρχεία με τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Είναι το αρχείο study που αναφερθεί στον πίνακα 2.3 σελ.28.

περιγραφή για την ανάλυση που θα ακολουθήσει. Έπειτα, επιλέγεται το φορτίο και ο περιορισμός που δημιουργήθηκε και ενεργοποιείται η επιλογή υπολογισμού μεγάλων παραμορφώσεων (calculate large deformations), επειδή το μοντέλο είναι συναρμολόγηση.

Στη συνέχεια, θα πρέπει να επιλεγεί η μέθοδος σύγκλισης (βλ. σελ.25) για την ανάλυσή. Επιλέγεται η ταχεία επαλήθευση (Quick Check), τα αποτελέσματα της οποίας όμως δεν είναι αξιόπιστα. Ο λόγος για τον οποίο γίνεται αυτή η ανάλυση είναι για να διαπιστωθεί ότι το μοντέλο είναι επιλύσιμο. Για παράδειγμα, αν έχει τοποθετηθεί λάθος κάποιο φορτίο ή κάποιος περιορισμός, το πρόγραμμα θα δώσει το κατάλληλο μήνυμα σφάλματος. Το ολοκληρωμένο παράθυρο διαλόγου απεικονίζεται στο σχήμα 3.21 στο οποίο επιλέγεται το ***OK***. Στο προηγούμενο παράθυρο φαίνεται τώρα η ανάλυση στην λίστα, όπως στο σχήμα 3.21.



Σχήμα 3.21 Παράθυρο διαλόγου μη γραμμικής στατικής ανάλυσης.

Τέλος, για να διαπιστωθεί αν έχει γίνει κάνει κάποιο ακαθόριστο σφάλμα επιλέγεται η εντολή : ***Info > Check model.*** Έτσι, γίνονται αντιληπτά αρκετά είδη σφαλμάτων που αφορούν το μοντέλο, όπως για παράδειγμα να μην έχει οριστεί το υλικό σε κάποιο εξάρτημα. Αφού δεν παρουσιάστηκε σφάλμα κατά τον έλεγχο, όλα είναι έτοιμα για την ανάλυση.

3.10 Υλοποίηση της ανάλυσης.

Επιλέγεται από το μενού το κεντρικό παράθυρο διαλόγου για τις αναλύσεις (analysis and design studies):

Run > start 

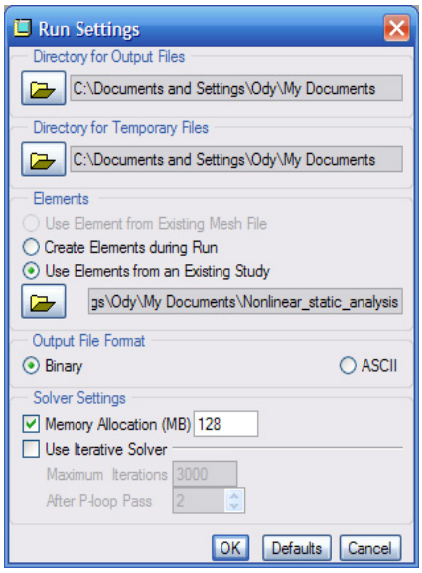
Η ανάλυση του μοντέλου ξεκίνησε. Το mechanica υλοποιεί τη διαδικασία αυτόματα, δηλαδή, δημιουργεί το πλέγμα με τα πεπερασμένα στοιχεία, διαμορφώνει και στη συνέχεια λύνει τις εξισώσεις. Η όλη διαδικασία μπορεί να παρακολουθηθεί επιλέγοντας το εικονίδιο απεικόνισης πληροφοριών μελέτης (Display study status). Η αυτόματη δημιουργία του πλέγματος, AutoGEM, δημιουργεί 10.420 στερεά στοιχεία,

ενώ δίνονται ακόμα πολλές πληροφορίες, όπως ποιο σύστημα μονάδων χρησιμοποιείται και πόση υπολογιστική μνήμη απαιτείται για την ανάλυση. Εδώ αυτό που ενδιαφέρει είναι να ολοκληρωθεί η ταχεία επαλήθευση χωρίς να παρουσιαστεί σφάλμα στο μοντέλο. Έχοντας υλοποιήσει την ταχεία επαλήθευση χωρίς σφάλμα, το επόμενο βήμα είναι να αλλαχθεί η μέθοδος σύγκλησης σε μονό προσαρμοστικό πέρασμα (single-pass adaptive), (σελ.25).

Από το κεντρικό παράθυρο διαλόγου για τις αναλύσεις (σχήμα 3.20) επιλέγεται η ανάλυση που θα υλοποιηθεί, δηλαδή, η «μη γραμμική στατική ανάλυση». Στη συνέχεια, επιλέγεται: ***Edit > analysis*** (επεξεργασία > ανάλυσης), γίνεται αλλαγή στη μέθοδο σύγκλησης από ***quick check*** σε ***single-pass adaptive*** και τέλος επιλέγεται το ***OK***.

Πριν υλοποιηθεί η ανάλυση και προκειμένου να εξοικονομηθεί υπολογιστικός χρόνος, επιλέγεται από το κεντρικό παράθυρο (σχήμα 3.20) : ***Settings***  η εντολή αυτή ανοίγει ένα νέο παράθυρο σχήμα (3.22).

Στο παράθυρο αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι το τρίτο πεδίο, που αναφέρεται στα στοιχεία (elements). Εκεί επιλέγεται η εντολή ***use elements from an existing study*** (χρήση στοιχείων από υπάρχουσα ανάλυση). Από τη στιγμή που το μοντέλο δεν έχει αλλάξει, δεν είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν τα στοιχεία ξανά από την αρχή (αφού υπάρχουν ήδη). Παρατηρείται, επίσης, ότι σε αυτό το παράθυρο μπορεί να αλλάξει η τοποθεσία των εξαγόμενων αρχείων αλλά και να ρυθμιστεί η μνήμη που χρησιμοποιεί ο υπολογιστής κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Τέλος, το παράθυρο κλείνει πατώντας το ***OK***.



Σχήμα 3.22 Πληροφορίες ανάλυσης.

Στην συνέχεια επιλέγεται η εντολή ***run*** . Το mechanica εντοπίζει τα αρχεία της προηγούμενης ανάλυσης (ταχεία επαλήθευση), τα οποία διαγράφονται και γίνεται αποδοχή του ελέγχου για τυχόν σφάλματα, πράγμα που ουσιαστικά δε χρειάζεται αυτήν τη φορά αφού το μοντέλο έχει ήδη ελεγχθεί. Αφού ανοιχτεί, έπειτα, το παράθυρο πληροφοριών, παρατηρούνται τα δεδομένα. Με το τέλος της ανάλυσης μπορούν να ελεγχθούν τα αποτελέσματα[8]. Αυτό θα επιτευχθεί δημιουργώντας παράθυρα αποτελεσμάτων ανάλογα με τις παραμέτρους που πρέπει να ελεγχθούν.

[8] Τα αποτελέσματα της σύγκλισης μπορεί να διαφέρουν σε κάποιο βαθμό ανάλογα με το πώς δημιουργήθηκε το μοντέλο και ανάλογα με την έκδοση του λογισμικού.

3.11 Εμφάνιση αποτελεσμάτων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων παράγει ένα τεράστιο ποσό εξαγόμενων δεδομένων. Το αρχείο με τα αποτελέσματα της ανάλυσης (Nonlinear static analysis) είναι μόνο του 130 MB, δηλαδή, αρκετά μεγάλο για ένα «σχετικά» απλό μοντέλο. Για επανεξέταση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων ο πιο κατανοητός τρόπος είναι αυτός της τρισδιάστατης απεικόνισης του μοντέλου, μαζί με τα φορτία και τους περιορισμούς, μέσω του pro/mechanica.

3.12 Παράθυρα αποτελεσμάτων.

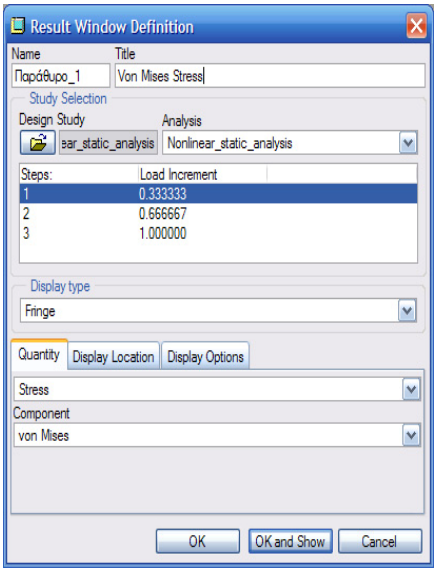
Στο mechanica μπορούν να εμφανιστούν τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης με τη βοήθεια των παραθύρων αποτελεσμάτων (result windows). Το κάθε παράθυρο έχει μοναδικό όνομα και το περιεχόμενο του ορίζεται από προεπιλεγμένες εντολές, που αφορούν τα χρώματα του φόντου και τις γραμματοσειρές του κειμένου, οι οποίες μπορούν να αλλαχθούν. Επίσης, αποτελέσματα πολλών μοντέλων μπορούν να εμφανιστούν ταυτόχρονα στην ίδια οθόνη σε ξεχωριστά παράθυρα.

Τα βήματα που πρέπει να γίνουν για να εμφανιστούν τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

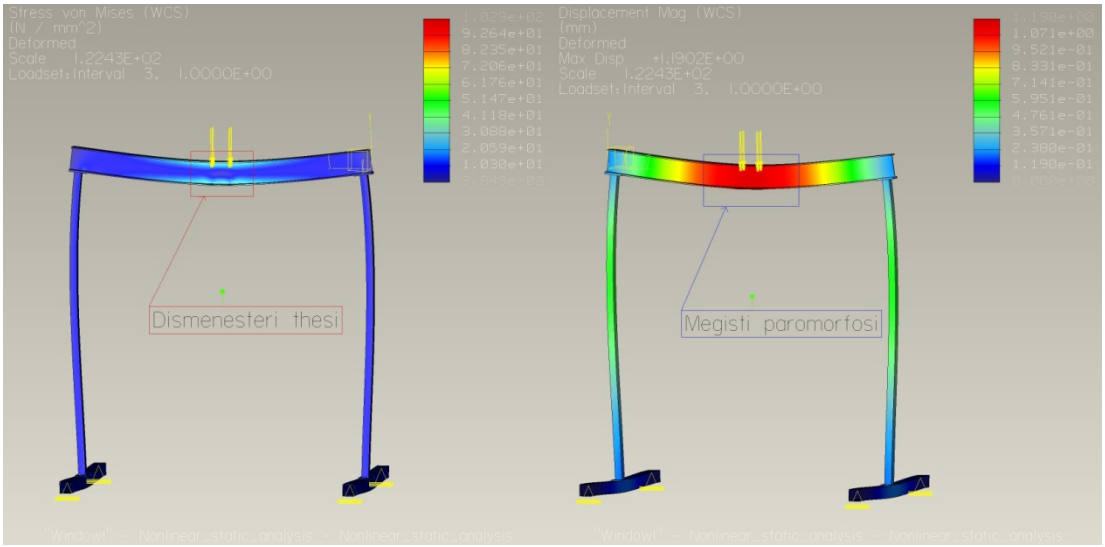
I. Δημιουργία και ονομασία του παραθύρου αποτελεσμάτων.
II. Ορισμός διεύθυνσης του παραθύρου των αποτελεσμάτων.
III. Ορισμός δεδομένων που θα εμφανιστούν στο παράθυρο αποτελεσμάτων.
IV. Εμφάνιση αποτελεσμάτων – επεξεργασία οθόνης.

Για να ξεκινήσει η διαδικασία εμφάνισης των αποτελεσμάτων από την κεντρική εργαλειοθήκη επιλέγεται: ***Review Results*** . Εμφανίζεται στην οθόνη ένα νέο παράθυρο διαλόγου (σχήμα 3.23). Σε αυτό θα οριστούν οι παράμετροι για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων.

Πληκτρολογείται, λοιπόν, παράθυρο_1 στο πρώτο πεδίο. Στο πεδίο του τίτλου (επάνω δεξιά) γράφεται Von Mises Stress. Οι προεπιλεγμένες εντολές στα υπόλοιπα πεδία είναι: ***Display type > Fringe, Quantity > Stress*** και ***Component > Von Mises***. Επιλέγοντας τους άλλους δυο υποφακέλους μπορεί να διαμορφωθεί η απεικόνιση του μοντέλου. Εάν, για παράδειγμα, είναι επιθυμητό να εμφανίζονται τα όρια των στοιχείων (πλέγμα) επιλέγεται στο δεύτερο υποφάκελο ***Display options*** (Επιλογές εμφάνισης) και ενεργοποιείται η επιλογή ***Show Elements Edges.*** Τέλος, επιλέγεται ***OK and Show*** στο κάτω μέρος του παραθύρου.



Σχήμα 3.23 Παράθυρο ορισμού αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3.24 α. Δυσμενέστερη θέση – β. Μέγιστη παραμόρφωση.

Στην οθόνη εμφανίζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση της γερανογέφυρας με χρώματα, όπως στο σχήμα 3.24 α. Στα δεξιά της οθόνης είναι το υπόμνημα με την αντιστοιχία τάσης και χρωμάτων. Παρέχεται, επίσης, η δυνατότητα περιστροφής του μοντέλο, μεγέθυνσης του αλλά και επεξεργασίας της οθόνης, όπως της φωτεινότητα των χρωμάτων, του υπομνήματος κλπ., χρησιμοποιώντας τις εντολές της επιλογής ***View.*** Για να δημιουργηθεί το επόμενο παράθυρο (σχήμα 3.24 β), αυτό με τη συνολική παραμόρφωση, το μόνο που χρειάζεται είναι να επιλεγεί το **copy** και να αλλαχθούν οι επιλογές στα πεδία του παραθύρου. Ως όνομα πληκτρολογείται Παράθυρο_2 και στο πεδίο του τίτλου γράφεται Displacement.

Στο τρίτο πεδίο επιλέγεται ***Display type*** **>** **Fringe**, στο τέταρτο ***Quantity*** **>** **Displacement** και στο τελευταίο πεδίο ***component*** **>** **Magnitude**. Για να υπάρξει πληρέστερη εικόνα της παραμόρφωσης της γερανογέφυρας θα δημιουργηθεί κινούμενη απεικόνιση (Animation) από τον τρίτο υποφάκελο ***Display option,*** όπου ενεργοποιείται η επιλογή ***Animate*** και επιλέγεται το ***OK.*** Παρακολουθώντας την κινούμενη απεικόνιση υπάρχει η δυνατότητα να εντοπιστούν πιθανά λάθη στην τοποθέτηση των φορτίων, όπως για παράδειγμα, η λάθος κατεύθυνση. Το γεγονός αυτό καθιστά την κινούμενη απεικόνιση ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο.

Στην οθόνη εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο που απεικονίζει την παραμόρφωση, που δέχεται η γερανογέφυρα. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί, ότι η παραμόρφωση μεγεθύνεται με ένα μεγάλο συντελεστή κλίμακας για να είναι ορατή από το ανθρώπινο μάτι. Στην πραγματικότητα η παραμόρφωση είναι 1.245 mm. Μία άλλη σημαντική πληροφορία που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι να παρατηρηθεί σε ποιο σημείο της γερανογέφυρας αναπτύσσεται η μέγιστη παραμόρφωση. Το pro/mechanica δίνει και αυτή τη δυνατότητα.

Αφού σταματήσει το Animation, επιλέγεται ***Info*** **>** ***model max*** από την κεντρική εργαλειοθήκη του παραθύρου αποτελεσμάτων. Στο μοντέλο, λοιπόν, εμφανίζεται η μέγιστη παραμόρφωση στο κέντρο του κεντρικού δοκαριού, όπως αναμενόταν.

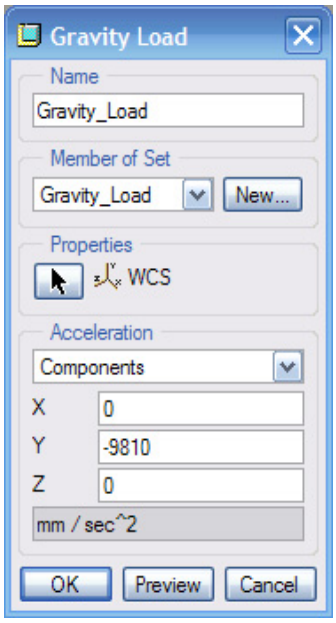
3.13 Εφαρμογή Φορτίου βαρύτητας.

Για να διαπιστωθεί, αν η κατασκευή αυτή αντέχει το βάρος της, θα πρέπει να εφαρμοστεί το φορτίο που αντικαθιστά την βαρύτητα (Gravity load) το οποίο είναι διαθέσιμο στην δεξιά εργαλειοθήκη. Επιλέγεται λοιπόν το εικονίδιο:

Gravity load  (φορτίο βαρύτητας)

Στο νέο παράθυρο διαλόγου που ανοίγει στην οθόνη, θα οριστούν οι παράμετροι για το φορτίο της βαρύτητας. Στο πρώτο πεδίο γράφεται ένα όνομα, πχ Gravity_load. Στο δεύτερο πεδίο πρέπει να επιλεγεί αν το φορτίο αυτό θα υπολογιστεί σε ένα σετ ή σε ξεχωριστό από το πραγματικό φορτίο. Επιλέγεται το δεύτερο, επειδή πρέπει να υπολογιστεί ξεχωριστά το φορτίο της βαρύτητας από το φορτίο της κατασκευής μας, και επιλέγεται το ***New*** και ονομάζεται το νέο σετ Gravity_load. Παρατηρείται ότι η βαρύτητα ασκείται σε σχέση με το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων (WCS).

Η επιτάχυνση της βαρύτητας δίνεται στον πίνακα 2.2 (σελ.27) και για το μετρικό σύστημα μονάδων που χρησιμοποιούμε είναι $9810\,mm/s^2$. Βάση λοιπόν του WCS ο κατακόρυφος άξονας είναι ο **Y** και σε αυτόν θα πρέπει να εφαρμοστεί η επιτάχυνση της βαρύτητας. Πατώντας το ***preview*** μπορεί να διαπιστωθεί, αν έχει οριστεί σωστά η κατεύθυνση του φορτίου βαρύτητας. Τέλος, το παράθυρο του φορτίου βαρύτητας έχει την μορφή του σχήματος 3.25, επιλέγεται το ***OK*** και ένα νέο πράσινο σύμβολο, που υποδεικνύει τη φορά της δύναμης, εμφανίζεται στην γωνία της γερανογέφυρας[9].



Σχήμα 3.25 Παράθυρο ορισμού φορτιού βαρύτητας.

Επιλέγεται η εντολή ***run***  και εκτελείται στατική ανάλυση επιλέγοντας ως ασκούμενο φορτίο μόνο το Gravity_load. Η διαδικασία που υλοποιείται μπορεί να παρακολουθηθεί μέσω του εικονιδίου απεικόνισης πληροφοριών μελέτης (Display study status). Όταν τελειώσει, γίνεται εστίαση στις παραμέτρους που έχουν το περισσότερο ενδιαφέρον. Πρώτον, στην τάση Von_Mises (**max_stress_vm**), που είναι **11.439 (MPa),** όπου και παρατηρείται ότι είναι πολύ μικρότερη από την τάση που αναπτύσσεται κατά την εφαρμογή του φορτιού. Δεύτερον, στην παραμόρφωση στον άξονα Y (**max_disp_Y**), που είναι **0.05** (**mm**) και είναι ουσιαστικά αμελητέα, αν συγκριθεί με αυτήν του πραγματικού φορτιού (**max_disp_mag**), που είναι **1.245** (**mm**).

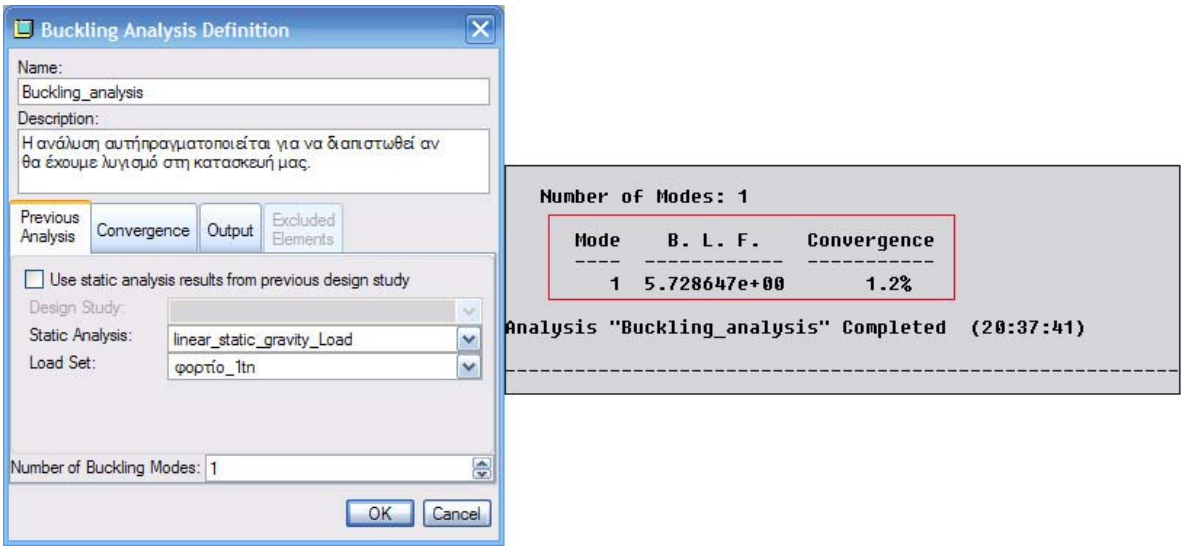
Στην συνέχεια, (δεν είναι απαραίτητο) μπορεί να δημιουργηθούν παράθυρα αποτελεσμάτων που απεικονίζουν τη συνολική παραμόρφωση ξεχωριστά για το φορτίο βαρύτητας αλλά και σε συνδυασμό με το πραγματικό φορτίο (1_τονος).

3.14 Ανάλυση λυγισμού.

Για να διαπιστωθεί, αν η κατασκευή θα υποφέρει από λυγισμό θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η ανάλυση του λυγισμού, που παρέχεται από το pro/mechanica. Από το κεντρικό παράθυρο για τις αναλύσεις, σχήμα 3.20 (σελ.46), επιλέγεται ***File > New buckling.*** Η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται για να διαπιστωθεί, αν θα υπάρχει

[9] Ασφαλώς η βαρύτητα δρα σε όλα τα στοιχεία της κατασκευής και όχι μόνο στην γωνία που εμφανίζεται το σύμβολο.

λυγισμός στην κατασκευή μας. Στην οθόνη εμφανίζεται στο παράθυρο διαλόγου για την ανάλυση λυγισμού (σχήμα 3.26).



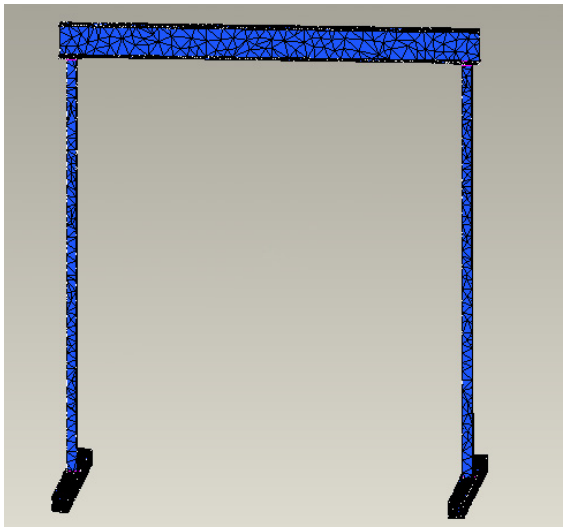
Σχήμα 3.26. α. Παράθυρο διαλόγου για την ανάλυση λυγισμού.- β. Συντελεστής λυγισμού.

Στο πρώτο πεδίο δίνεται ένα όνομα π.χ. Buckling_analysis, ενώ στο δεύτερο γράφεται μια σύντομη περιγραφή. Τέλος, στο κάτω μέρος του παραθύρου πρέπει να επιλεχθεί ο τρόπος στήριξης της κοιλοδοκού (κεφ. 2 σελ.33) από τους οποίους επιλέγεται ο πρώτος (1) τρόπος, που αναπαριστά την στήριξη της κατασκευής. Πατώντας το ***OK*** κλείνει το παράθυρο, ενώ παράλληλα παρατηρείται ότι στις αναλύσεις έχει προστεθεί και αυτή του λυγισμού, η οποία επιλέγεται και εκτελείται πατώντας ***run.*** Η ανάλυση ξεκινά.

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης που φαίνεται στο σχήμα 3.26 β, για τον τρόπο (mode) που έχει οριστεί δηλαδή, τον 1, είναι BLF= 5.7 το ποίο είναι μεγαλύτερο της μονάδας. Αρά η κατασκευή δεν θα εμφανιστεί λυγισμός.

3.15 Δημιουργία και επεξεργασία πλέγματος.

Το πλέγμα δημιουργείται αυτόματα από το Pro/mechanica μέσω της λειτουργίας AutoGEM (Automatic generator mesh). Το πρόγραμμα, ανάλογα με τη γεωμετρία του μοντέλου στους περιορισμούς και στα αναπτυσσόμενα φορτία, επιλέγει τον αριθμό των απαιτούμενων πεπερασμένων στοιχείων, ώστε η λύση που θα προκύψει να είναι περισσότερο ακριβής. Στη εν λόγω περίπτωση η αυτόματη λειτουργία δημιουργεί 10420 στοιχεία.



Η εικόνα της γερανογέφυρας με το πλέγμα των στοιχείων απεικονίζεται στο σχήμα 3.27. Για να δημιουργηθεί αυτή η εικόνα θα πρέπει να επιλεχθεί από την κεντρική βιβλιοθήκη η επιλογή: **Create (δημιουργία πλέγματος).**

Σχήμα 3.27 Πλέγμα στοιχείων.

Επιλέγεται η πρώτη ανάλυση που υλοποιήθηκε, καθώς και οι παράμετροι που παρουσιάζουν ενδιαφέρουν, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

Αριθμός στοιχείων: ***10420***

Τάση Von Mises stress (Στη δυσμενέστερη θέση): ***62.4*** MPa

Μέγιστη συνολική παραμόρφωση: ***1.197*** mm

Χρόνος CPU: ***663.56*** sec

Χρόνος υλοποίησης: ***951.37*** sec

Επιχειρείται αύξηση του προεπιλεγμένου αριθμού των στοιχείων και εν συνεχεία γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων. Αυτό θα επιτευχθεί μειώνοντας τα όρια των πεπερασμένων στοιχείων.

Από την κεντρική εργαλειοθήκη επιλέγεται:

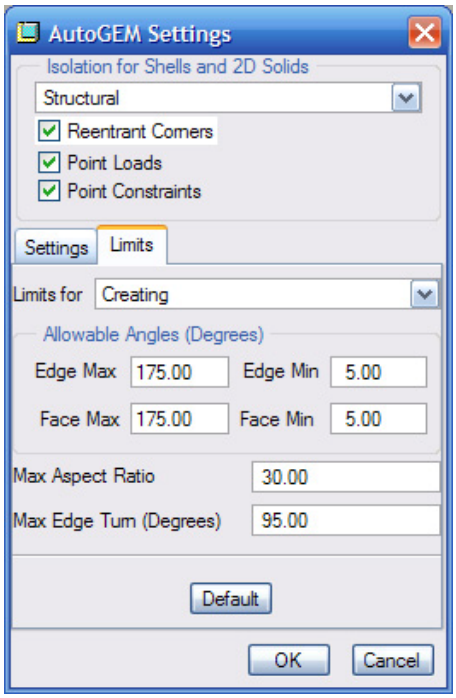
AutoGEM > Settings

Στην οθόνη εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου που απεικονίζεται στο σχήμα 3.28, όπου και επιλέγεται ο φάκελος ***limits*** (όρια). Ο φάκελος αυτός αναφέρει τα προεπιλεγμένα όρια των στοιχείων, τα οποία ορίζουν και το μέγεθος τους και ορίζονται με τρείς παραμέτρους.

Οι (**Allowable Angles**) επιτρεπτές γωνίες είναι οι γωνίες μεταξύ των ακμών και των πλευρών ενός στοιχείου.

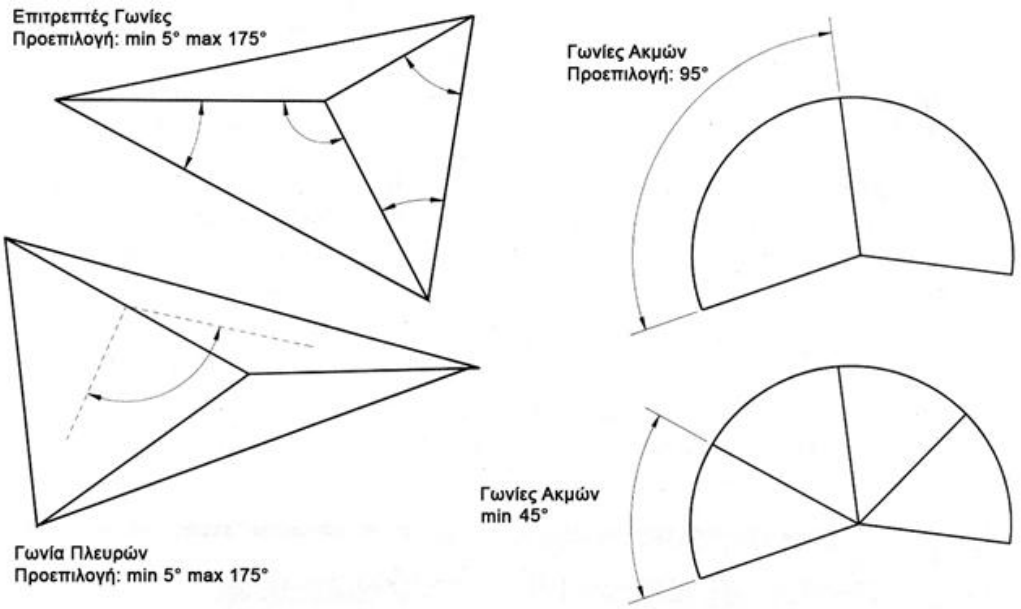
Ο (**Aspect Ratio**) λόγος των διαστάσεων είναι περίπου η αναλογία του μήκους και του πλάτους ενός στοιχείου.

Και η (**Edge Turn**) γωνία των ακμών είναι το ποσό του τόξου που μπορεί να επιτραπεί σε μια ακμή.



Σχήμα 3.28 Όρια στοιχείων.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι παράμετροι που ορίζουν το σχήμα και το μέγεθος των στοιχείων.



Σχήμα 3.29 Παράμετροι μεγέθους στοιχείων.

Εάν ελαττωθούν οι επιτρεπόμενες τιμές των ορίων των στοιχείων, λογικό είναι να αναμένονται περισσότερα στοιχεία στο μοντέλο. Έτσι θα αλλαχθούν αυθαίρετα οι επιτρεπτές γωνίες από 175 μοίρες σε 150 μοίρες. Με αυτόν τον τρόπο θα μειωθεί το μέγεθος του κάθε στοιχείου και έτσι για να καλυφθεί η γεωμετρία θα αυξηθεί ο αριθμός τους. Έπειτα κλείνει το παράθυρο αφού πατηθεί το ***OK.***

Έπειτα, επιλέγεται η προηγούμενη ανάλυση, γίνεται αντιγραφή, η νέα ανάλυση ονομάζεται «copy of nonlinear static analysis» και επιλέγεται το ***start.*** Δηλαδή, θα πραγματοποιηθεί η ίδια ακριβώς ανάλυση[10] με μόνη διαφορά τα στοιχεία. Ανοίγει και το παράθυρο πληροφοριών για να παρατηρηθεί η διαδικασία της ανάλυσης. Με το που τελειώσει η ανάλυση παρατηρούνται οι παράμετροι που παρουσιάζουν ενδιαφέρον:

Αριθμός στοιχείων: ***24311***

Τάση Von Mises stress (Στη δυσμενέστερη θέση): ***70.8*** MPa

Μέγιστη συνολική παραμόρφωση: ***1.203*** mm

Χρόνος CPU: ***2946.25*** sec

Χρόνος υλοποίησης: ***4650.86*** sec

3.15.1 Συμπέρασμα.

Η τάση Von Mises stress και η συνολική παραμόρφωση δεν αλλάζουν σημαντικά σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση, ειδικά αν αναλογιστεί κανείς, ότι στη νέα ανάλυση που πραγματοποιήθηκε τα στοιχεία υπερδιπλασιάστηκαν από 10420 σε 24311. Συγκεκριμένα, η συνολική παραμόρφωση διαφέρει κατά 0.5% και η τάση Von Mises κατά 13%. Γενικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι τα αποτελέσματα των δύο αναλύσεων είναι περίπου ίδια. Πάνω από είναι σημαντικό να θυμάται κανείς, ότι τα αποτελέσματα των προγραμμάτων FEA είναι μία προσέγγιση των πραγματικών αποτελεσμάτων. Επίσης, θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι από ένα σημείο κι έπειτα η πυκνότητα του πλέγματος δεν έχει πολύ μεγάλη επίπτωση στα αποτελέσματα της τελικής λύσης, αλλά έχει σημαντική επίπτωση στον χρόνο επίλυσης.

[10]Πριν υλοποιηθεί η ανάλυση θα πρέπει να είναι σίγουρο ότι η επιλογή ***use elements from a existing study*** είναι ανενεργή, διαφορετικά το πρόγραμμα θα αγνοήσει τις ρυθμίσεις και θα χρησιμοποιήσει τα στοιχεία τις προηγούμενης ανάλυσης.

Επίλογος.

Παρόλο που στην παρούσα εργασία δεν εξετάστηκαν αρκετές από τις εντολές και τις λειτουργίες που παρέχει το pro/mechanica επετεύχθη η ανάλυσης της γερανογέφυρας και η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τον τρόπο που λειτουργεί το πρόγραμμα και τον τρόπο που χειρίζεται τα φυσικά προβλήματα. Έγινε επίσης αναφορά στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μεταφορά ενός φυσικού προβλήματος στον κόσμο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία και το πώς δημιουργείται ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

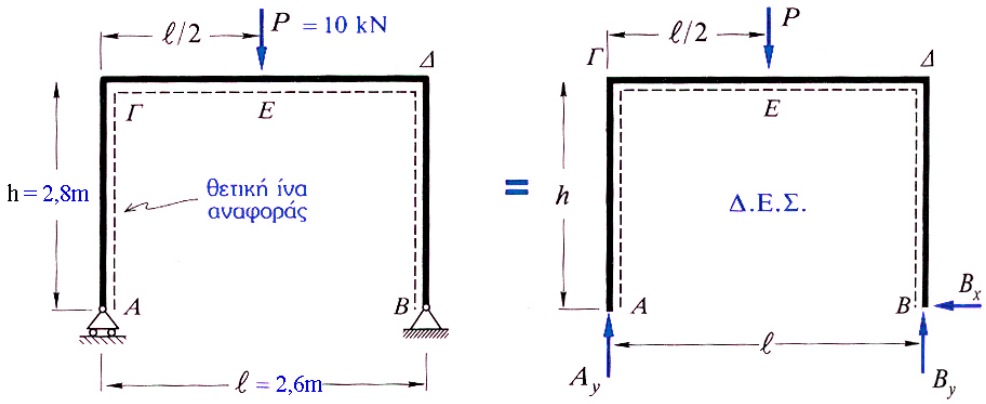
Το Mechanica είναι αναμφίβολα ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο ανάλυσης, αλλά δεν μπορεί από μόνο του να λύσει προβλήματα και να εξάγει συμπεράσματα. Θα πρέπει να γίνει κατανοητό, ότι μέσω της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία επιτυγχάνεται μία προσεγγιστική λύση σε ένα εξιδανικευμένο μαθηματικό μοντέλο, που προσεγγίζει ένα φυσικό πρόβλημα. Δεν θα πρέπει να πιστεύει κανείς, ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν ταιριάζουν απόλυτα με αυτά που θα συμβούν στην πραγματικότητα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι όμως ικανά να οδηγήσουν στην εξαγωγή κάποιων χρήσιμων συμπερασμάτων. Τέλος, το pro/Mechanica είναι ένα αρκετά απαιτητικό πρόγραμμα, καθώς ο χειρισμός και η κατανόηση του είναι πράγματα αρκετά δυσνόητα, τα οποία απαιτούν γνώση και εμπειρία για να μπορέσει κανείς να βρει σωστά αποτελέσματα.

Παράρτημα: υπολογισμός αντοχής.

Για τους παρακάτω υπολογισμούς που χρειάσθηκαν για την ενδεικτική επίλυση της στοιχειώδους αντοχής της γερανογέφυρας πρέπει να ληφθούν υπόψη οι απλοποιήσεις που αναφέρονται παρακάτω.

- Στα διαγράμματα ελευθέρου σώματος η στήριξη των δοκών θα μπορούσε να είναι άρθρωση-άρθρωση, που ανταποκρίνεται καλύτερα στη πραγματικότητα, για την απλοποίηση όμως των πράξεων έγινε άρθρωση-κύλιση.

- Γίνεται η υπόθεση ότι όλα τα σώματα είναι ισότροπα, ομογενή και συνεχή.



Σχ. α Σχ. β

Αρχικά θα υπολογιστούν οι αντιδράσεις στα σημεία στήριξης A και B. Αντικαθιστάται η κύλιση στο σημείο A με την αντίδραση A_y καθώς και την άρθρωση στο B με τις αντιδράσεις B_X, B_yόπως φαίνεται στο σχήμα β.

Υπολογισμός αντιδράσεων :

Εφαρμόζοντας τις τρείς (3) εξισώσεις ισορροπίας στο Δ.Ε.Σ του πλαισίου υπολογίζεται:

$$\sum F_x = 0: \qquad B_X = 0 \qquad (1)$$

$$\sum F_y = 0: \qquad A_y - P + B_y = 0 \quad => \quad A_Y + B_y = 10\ kN \qquad (2)$$

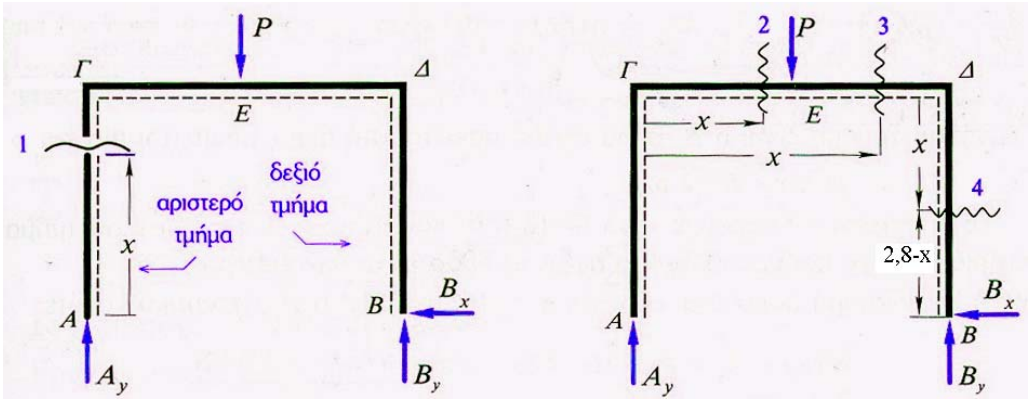
$$\sum M_B = 0: \quad A_y l - P(l/2) = 0 \quad => \quad 2.6\,A_y - 10(2.6/2) = 0 \qquad (3)$$

Από τη λύση του συστήματος των εξισώσεων (1),(2), (3) βρίσκεται:

$$\boldsymbol{A_y = 5\ kN,\quad B_X = 0,\quad B_y = 5\ kN}$$

Υπολογισμός συναρτήσεων N(x), Q(x), M(x)

Το πλαίσιο αποτελείται από τρία τμήματα, τα ΑΓ,ΓΔ, ΔΒ. Φέρει δε, τόσο την εξωτερική δύναμη P όσο και τις γνωστές πλέον αντιδράσεις A_y, B_X, B_y. Για το σχεδιασμό των [N], [Q], [M], εξετάζονται χωριστά τα τμήματα ΑΓ,ΓΔ και ΔΒ, υπολογίζοντας τις αντίστοιχες συναρτήσεις N(x), Q(x), M(x).



Σχ. γ Σχ. δ

Τμήμα ΑΓ

Επειδή αυτό δεν φέρει δυνάμεις, απαιτείται μία μόνο τομή.

Τομή 1, $0 < x < 2.6$ m

Σε απόσταση x θεωρείται νοητή τομή (Σχ. γ) και εξετάζουμε το αριστερό τμήμα του *A*, μήκους x.

N(x): σε αυτό ασκείται αξονικά η A_y που είναι αρνητική (ως θλιπτική), οπότε:

$N(x) = -A_y$, N(x) = -5 kN

Στο τμήμα *A* δεν ασκείται καμία τέμνουσα δύναμη, ούτε ροπή κάμψης οπότε:

Q(x): Q(x) = 0

M(x): M(x) = 0

Τμήμα ΓΔ

Επειδή ενδιάμεσα ασκείται η P απαιτούνται δύο τομές η 2 και η 3.

Τομή 2 , $0 < x < 1.3$ m

Θεωρούμε νοητή τομή 2 και εξετάζεται το αριστερό τμήμα του ΑΓ.

N(x): => N (x) = 0

Q(x): Τέμνουσα δύναμη (δηλ. κάθετη στο ΓΔ) είναι η A_y (θετική) οπότε:

Q(x) = A_y => Q(x) = 5 kN

M(x): Ως προς το σημείο τομής 2, η A_y δίνει δεξιόστροφη ροπή $A_y x$, οπότε

$M(x) = A_y x$ => $M(x) = 5x$ [kNm], $0 < x < 1.3$

M (0) = 0 M (1.3) = 6.5 kNm

Τομή 3, $1.3 < x < 2.6$ m

Σε απόσταση x, θεωρείται τομή 3 και εξετάζεται το αριστερό τμήμα Σχ. δ

N(x): => N (x) = 0

Q(x): Τέμνουσες δυνάμεις είναι η A_y (θετική) και η P (αρνητική), άρα:

Q(x) = $A_y - P$ => Q(x) = −5 kN

M(x): Η A_y δίνει δεξιόστροφή ροπή $A_y x$, η P αριστερόστροφή $P(x - l/2)$, άρα:

$M(x) = A_y x - P(x - l/2)$ => $M(x) = 5x - 10(x - 1.3)$ $1.3 < x < 2.6$ m

M (1.3) = 6.5kN M (2.6) = 0

Τμήμα ΔΒ

Τέμνουσα δύναμη είναι η B_X αλλά επειδή ασκείται στο άκρο, απαιτείται μία τομή.

Τομή 4 , $0 < x < 2.6$ m

Σε απόσταση x θεωρείται τομή 4 και εξετάζεται το αριστερό τμήμα.

N(x): Στη διατομή ασκούνται αξονικά η A_y (θετική) και η P (αρνητική), οπότε:

$N(x) = A_y - P = 5 - 10$ => N(x) = -5 kN

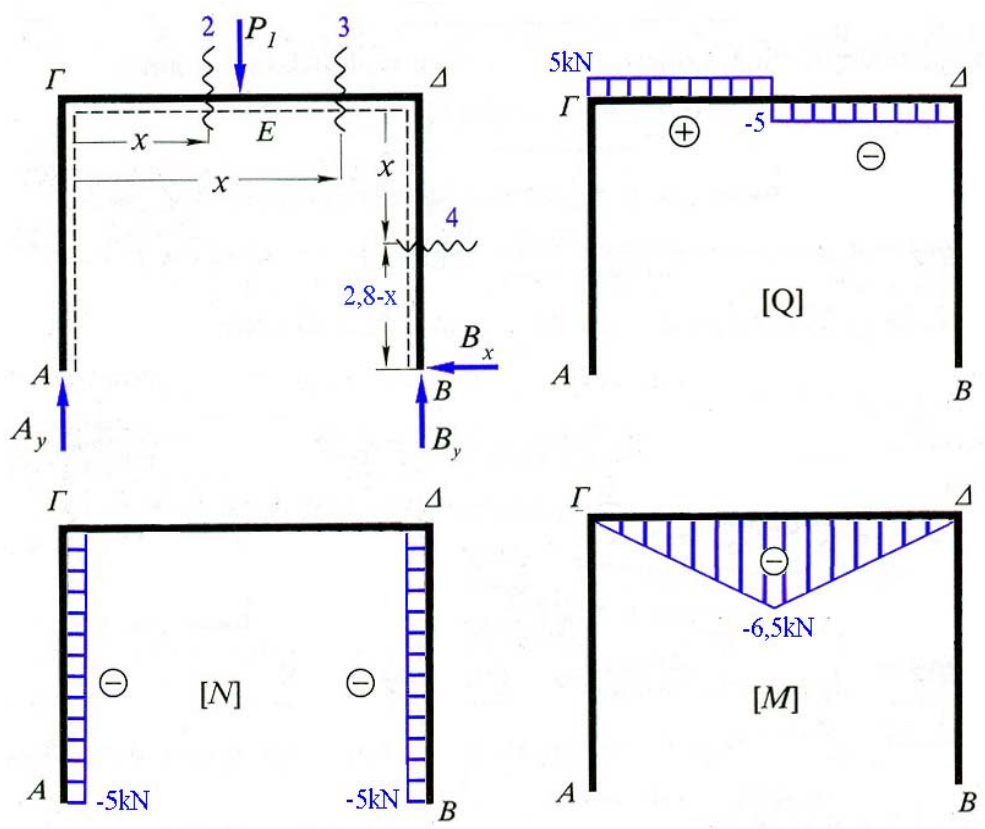
Q(x): => Q(x) =0

M(x): Η A_y δίνει δεξιόστροφη ροπή με μέτρο $A_y l$, ενώ η P δίνει αριστερόστροφη με μέτρο $P(l/2)$ άρα:

$M(x) = A_y x - P(l/2) = 0$ => <u>M(x) = 0</u>

Σχεδίαση διαγραμμάτων N(x), Q(x), M(x) :

Με γνωστές τις N(x), Q(x), M(x) σχεδιάζονται τα [N], [Q], [M],



Υπολογισμός αντοχής

Η μέγιστη τάση (M_{max}) παρατηρείται στο κέντρο της οριζόντιας διατομής, για να διαπιστωθεί αν αντέχει το φορτίο του ενός (1) τόνου θα πρέπει να συγκριθεί το σ_{max} με το $\sigma_{\varepsilon\pi}$, θα πρέπει δηλαδή, $\sigma_{max} < \sigma_{\varepsilon\pi}$.

Υπολογίζεται λοιπόν,

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{w} = \frac{6.5\ kNm}{109\ cm^3} => \sigma_{max} = \frac{650\ kN}{109\ cm^2} = 5.96\ {}^{kN}/_{cm^2}$$

Από πίνακες (σελ. 63,64),

$$\sigma_{\varepsilon\pi} = 0.55 \cdot R_m => \ \sigma_{\varepsilon\pi} = 0.55 \cdot 235 \, {}^{N}/_{mm^2} = 129 \ {}^{N}/_{mm^2} \quad \text{ή}$$

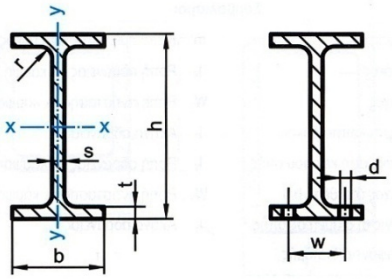
$$\sigma_{\varepsilon\pi} = 12.9 \ {}^{kN}/_{cm^2}$$

$$\sigma_{max} = 5.96 \ {}^{kN}/_{cm^2} \ < \ \sigma_{\varepsilon\pi} = 12.9 \ {}^{kN}/_{cm^2}$$

Άρα η διατομή αντέχει, καθώς ικανοποιείται η σχέση $\sigma_{max} < \sigma_{\varepsilon\pi}$.

Πίνακες.

Πίνακας 1 Τυποποιημένα μεγέθη δοκών χάλυβα διατομής I-PE κατά DIN 1025-5

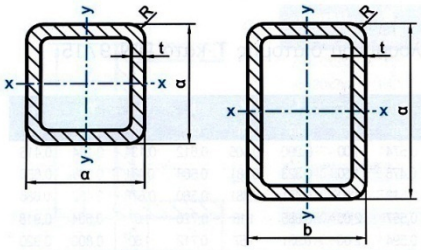


Συμβολισμοί:

h	Ύψος	m'	Κατανομή μάζας ανά μήκος
b	Πλάτος	I_x	Ροπή αδράνειας σε κάμψη
s	Πάχος	W_x	Ροπή αντίστασης σε κάμψη
t	Πάχος	i_x	Ακτίνα αδράνειας
r	Καμπυλότητα δοκού	I_y	Ροπή αδράνειας σε κάμψη
w	Απόσταση κέντρων οπών	W_y	Ροπή αντίστασης σε κάμψη
d	Μέγιστη διάμετρος οπής	i_y	Ακτίνα αδράνειας
S	Επιφάνεια διατομής		

Διαστάσεις IPE [mm]	h	b	s	t	r	w	d	S	m'	I_x	W_x	i_x	I_y	W_y	i_y
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm^2	kg/m	cm^4	cm^3	cm	cm^4	cm^3	cm
80	80	46	3,8	5,2	5	25	6,4	7,64	6,0	80,1	20,0	3,24	8,49	3,69	1,05
100	100	55	4,1	5,7	7	30	8,4	10,3	8,1	171	34,2	4,07	15,9	5,79	1,24
120	120	64	4,4	6,3	7	35	8,4	13,2	10,4	318	53,0	4,90	27,7	8,65	1,45
160	160	82	5,0	7,4	9	44	13	20,1	15,8	869	109	6,58	68,3	16,7	1,84
200	200	100	5,6	8,5	12	52	13	28,5	22,4	1940	194	8,26	142	28,5	2,24
240	240	120	6,2	9,8	15	65	17	39,1	30,7	3890	324	9,97	284	47,3	2,69
300	300	150	7,1	10,7	15	80	23	53,8	42,2	8360	557	12,5	604	80,5	3,35
400	400	180	8,6	13,5	21	95	28	84,5	66,3	23130	1160	16,5	1320	146	3,95
500	500	200	10,2	16,0	21	110	28	116	90,7	48200	1930	20,4	2140	214	4,31

Πίνακας 2 Τυποποιημένα μεγέθη κοιλοδοκών χάλυβα κατά DIN EN 10210 & 10219



Συμβολισμοί:

α	Ύψος	I_x	Ροπή αδράνειας σε κάμψη
b	Πλάτος	W_x	Ροπή αντίστασης σε κάμψη
t	Πάχος	i_x	Ακτίνα αδράνειας
R	Καμπυλότητα δοκού	I_y	Ροπή αδράνειας σε κάμψη
S	Επιφάνεια διατομής	W_y	Ροπή αντίστασης σε κάμψη
m'	Κατανομή μάζας ανά μήκος	i_y	Ακτίνα αδράνειας

α	t	S	m'	I	W	i	αxb	t	S	m'	I_x	W_x	i_x	I_y	W_y	i_y
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm^2	kg/m	cm	mm	cm^4	cm^3	cm	cm^4	cm^3	cm
40	3,0	4,34	3,41	9,78	4,89	1,50	50x30	3,0	4,34	3,41	13,6	5,43	1,77	5,94	3,96	1,17
	4,0	5,59	4,39	11,8	5,91	1,45		4,0	5,59	4,39	16,5	6,60	1,72	7,08	4,72	1,13
50	3,0	5,54	4,35	20,2	8,08	1,91	60x40	3,0	5,54	4,35	26,5	8,82	2,18	13,9	6,95	1,58
	4,0	7,19	5,64	25	9,99	1,86		4,0	7,19	5,64	32,8	10,9	2,14	17,0	8,52	1,54
60	3,0	6,74	5,29	36,2	12,1	2,32	80x40	3,0	6,74	5,29	54,2	13,6	2,84	18,0	9,00	1,63
	4,0	8,79	6,90	45,4	15,1	2,27		4,0	8,79	6,9	68,2	17,1	2,79	22,2	11,1	1,59
	5,0	10,7	8,42	53,3	17,8	2,23	90x50	4,0	10,4	8,15	107	23,8	3,21	41,9	16,8	2,01
20	2,0	1,34	1,05	0,69	0,69	0,72	40x20	2,0	2,14	1,68	4,05	2,02	1,38	1,34	1,34	0,79
25	2,0	1,74	1,36	1,48	1,19	0,92		2,5	2,59	2,03	4,69	2,35	1,35	1,54	1,54	0,77
25	2,5	2,09	1,64	1,69	1,35	0,90		3,0	3,01	2,36	5,21	2,60	1,32	1,68	1,68	0,75
30	2,0	2,14	1,68	2,72	1,81	1,13	50x30	2,0	2,94	2,31	9,54	3,81	1,80	4,29	2,86	1,21
30	2,5	2,59	2,03	3,16	2,10	1,10		2,5	3,59	2,82	11,3	4,52	1,77	5,05	3,37	1,19
30	3,0	3,01	2,36	3,50	2,34	1,08		3,0	4,21	3,30	12,8	5,13	1,75	5,70	3,80	1,16
								4,0	5,35	4,20	15,3	6,10	1,69	6,69	4,46	1,12
40	2,0	2,94	2,31	6,94	3,47	1,54	60x40	2,0	3,74	2,93	18,4	6,14	2,22	9,83	4,92	1,62
40	2,5	3,59	2,82	8,22	4,11	1,51		2,5	4,59	3,60	22,1	7,36	2,19	11,7	5,87	1,60
40	3,0	4,21	3,30	9,32	4,66	1,49		3,0	5,41	4,25	25,4	8,46	2,17	13,4	6,72	1,58
40	4,0	5,35	4,20	11,1	5,54	1.44		4,0	6,95	5,45	31,0	10,3	2,11	16,3	8,14	1,53

Υλικό		R_m N/mm²	R_e ($R_{p0,2}$) N/mm²
Φαιός χυτοσίδηρος DIN 1691	GG-15	150...250	–
	GG-20	200...300	–
	GG-25	250...350	–
	GG-30	300...400	–
	GG-35	350...450	–
Λευκός χυτοσίδηρος DIN 1692	GTS-35-10	350	200
	GTS-45-06	450	270
	GTS-55-04	550	340
	GTS-65-02	650	430
	GTS-70-02	700	530
	GTW-40-05	360...420	200...230
	GTW-45-07	400...480	230...280
Χυτοσίδηρος DIN 1693	GGG-40	370...400	240...250
	GGG-50	420...500	290...320
	GGG-60	550...600	340...380
	GGG-70	650...700	380...440
Χυτοχάλυβας DIN 1681	GS-38	380	200
	GS-45	450	230
	GS-52	520	260
	GS-60	600	300
Χάλυβας κατασκευών DIN 17100	St 37-2	340...470	195...235
	St 44-2	410...540	235...275
	St 50-2	470...610	255...295
	St 60-2	570...710	295...335
	St 70-2	670...830	325...365
Βελτιωμένος χάλυβας DIN 17200	C 35, Ck 35	550...780	320...430
	C 45, Ck 45	630...850	370...500
	C 60, Ck 60	750...1000	450...580
	34 Cr 4	700...1100	460...700
	34 CrMo 4	700...1200	450...800
	42 CrMo 4	750...1300	500...900
	50 CrV 4	800...1300	600...900
	30 CrNiMo 8	900...1450	700...1050

Πίνακας 3 *Τιμές αντοχής σε εφελκυσμό R_m και όριο διαρροής R_e (ή όριο μόνιμης παραμόρφωσης $R_{p0,2}$) για μερικά συνηθισμένα υλικά. (Οι μεγαλύτερες τιμές για μικρότερα πάχη).*

Περίπτωση φόρτισης	Συνεκτικά υλικά (χάλυβας)			Ψαθυρά υλικά (χυτοσίδηρος)		
	στατική	επαναλαμβανόμενη	αντιστρεφόμενη	στατική	επαναλαμβανόμενη	αντιστρεφόμενη
$\sigma_{z,\,\delta\epsilon\pi}$	$0,75\ R_e$	$0,45\ R_e$	$0,35\ R_e$	$0,3\ R_m$	$0,23\ R_m$	$0,18\ R_m$
$\sigma_{b\epsilon\pi}$	$0,85\ R_e$	$0,55\ R_e$	$0,4\ R_e$	$0,45\ R_m$	$0,3\ R_m$	$0,2\ R_m$
$\tau_{\tau\epsilon\pi}$	$0,5\ R_e$	$0,3\ R_e$	$0,2\ R_e$	$0,35\ R_m$	$0,25\ R_m$	$0,2\ R_m$
$\tau_{\alpha\epsilon\pi}$	$0,6\ R_e$	$0,4\ R_e$	$0,3\ R_e$	$0,35\ R_m$	$0,25\ R_m$	$0,2\ R_m$

Πίνακας 4 *Επιτρεπόμενες τάσεις για κατά προσέγγιση υπολογισμούς (R_e και R_m από πίνακα 3).*

Για χάλυβα:	$\sigma_W \approx 0{,}45\ R_m$	$\sigma_{Sch} \approx 0{,}8 \ldots 1{,}0\ R_e$
	$\sigma_{bW} \approx 0{,}5\ R_m$	$\sigma_{bSch} \approx 0{,}8 \ldots 1{,}0\ \sigma_{bF}$
	$\tau_{tW} \approx 0{,}27\ R_m$	$\tau_{tSch} \approx 0{,}6\ R_e$
Για χυτοσίδηρο:	$\sigma_W \approx 0{,}3\ R_m$	$\sigma_{Sch} \approx 0{,}45\ R_m$
	$\sigma_{bW} \approx 0{,}45\ R_m$	
	$\tau_{tW} \approx 0{,}35\ R_m$	$\tau_{tSch} \approx 0{,}3\ R_m$

με	R_m	αντοχή θραύσης		
	σ_W	αντιστρεφόμενη καταπόνηση		(θλίψη - εφελκυσμός)
	σ_{bW}	αντιστρεφόμενη	»	(κάμψη)
	τ_{tW}	αντιστρεφόμενη	»	(στρέψη)
	σ_{Sch}	επαναλαμβανόμενη	»	(θλίψη - εφελκυσμός)
	σ_{bSch}	επαναλαμβανόμενη	»	(κάμψη)
	τ_{tSch}	επαναλαμβανόμενη	»	(στρέψη)
	R_m, R_e	από πίνακα 3 .		

Πίνακας 5. *Τιμές αντοχής σε αντιστρεφόμενη και επαναλαμβανόμενη καταπόνηση.*

Βιβλιογραφία.

1. *Pro/Engineer wild fire 3 Mechanica Tutorial (Structure / Thermal) Integrated Mode,* Roger Toogood Edmonton, Alberta ISBN: 1-58503-305-7.

2. *Essentials of pro/Engineer,* Yousef Haik and Mohammed Kilani, Florida state university ISBN: 0-534-37864-1.

3. *Engineering Design Process*, Yousef Haik Florida state university

ISBN: 0-534-38014-X.

4. *Pro/Engineer Wild fire 3,* Louis Garg Lamit, University of California

ISBN: 0-534-40083-3.

5. *Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων,* Γ. Τσαμασφύρος – Ε.Ε Θεοτοκόγλου,

Αθήνα 1994.

6. *Μηχανική παραμόρφωση σωμάτων I* , Γ. Τσαμασφύρος, Αθήνα 1999.

7. *Στοιχεία μηχανών Ι,* Ιωάννης Κ. Στεργίου Κωνσταντίνος Ι. Στεργίου

ISBN: 978-960-8165-46-5.

8. *Μηχανολογικό σχέδιο,* Αριστομένης Θ. Αντωνιάδης, Αθήνα 2007

ISBN: 960-418-114-9.

9. *Μηχανική του απαραμόρφωτου στερεού - Στατική*, Δρ. Π.Α. Βουθούνης Αθήνα 2003 ISBN: 960-85431-3-4.

Τα ακόλουθα άρθρα είναι διαθέσιμα στην ιστοσελίδα: www.machinedesign.com

[1] *''Avoiding pitfalls in fea,''* Paul Kurowski, Machine Design, November 1994.

[2] *''When good engineer deliver bad FEA,''* Paul Kurowski, Machine Design, November 1995.

[3] *''More errors that mar FEA results,''* Paul Kurowski, Machine Design, March 2002.

Χρήσιμες πληροφορίες είναι διαθέσιμες στις παρακάτω ιστοσελίδες:

1. Portal Βιομηχανικού Σχεδιασμού

www.designcad.gr

2. University of Colorado at boulder

www.colorado.edu/engineering/cas/courses.d/IFEM.d/

3. Mechanical Engineering and Design information (MEAD info)

www.meadinfo.org/2009/07/buckling-load-factor-fea.html

4. Free 3D CAD Models of User-Contributed and Supplier-Certified Parts & Assemblies

www.3dcontentcentral.com/Default.aspx

5. Parametric technology (official site of pro/engineer)

www.ptc.com/products/proengineer/

6. Wikipedia

www.en.wikipedia.org/wiki/Yield_(engineering)