
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ευχαριστίες – Εισαγωγή, πρόλογος και Ιστορική αναδρομή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αναφορά στο θεωρητική διερεύνηση τοπικής κατανομής έντασης σε χαλύβδινα ελάσματα λόγω ανηρτημένων φορτίων – μεταλλικές συνδέσεις

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εισαγωγή στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων

Γενικά, κατηγορίες, στάδια προσομοίωσης, έλεγχος αποτελεσμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιγραφή προγράμματος Abaqus 6.8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Περιγραφή προσομοιωμάτων και ανάλυση αποτελεσμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Υπολογισμοί και αποτελέσματα θεωρητικού τμήματος – Συγκρίσεις αποτελεσμάτων / αποκλίσεις / συμπεράσματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Βιβλιογραφία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ευχαριστίες

Πριν αρχίσει η εισαγωγή στο θέμα και ο πρόλογος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν να φέρω σε πέρας τη διπλωματική αυτή εργασία, στον Τομέα των Σιδηρών Κατασκευών, για την άμεση συνεργασία τους και για την πανταχού παρουσία τους.

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου, κύριο Γιώργο Μιχάλτσο, καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της παρούσης διπλωματικής εργασίας, για την πολύτιμή του καθοδήγηση.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες επίσης στον Δρ. Ξενοφώντα Λιγνό, για το χρόνο που αφιέρωσε στην παρακολούθηση της πορείας της διπλωματικής εργασίας, πολλές φορές επί καθημερινής βάσης, την καθοδήγηση που προσέφερε κατά την εκμάθηση και εξοικείωσή μου με το πρόγραμμα Abaqus.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους διδακτορικούς φοιτητές, που κατά διαστήματα με βοήθησαν με απορίες σχετικά με το λογισμικό του Abaqus σε κρίσιμα σημεία που δεν προχωρούσε η διπλωματική. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή που έδειξε κυρίως, αλλά και για τη στήριξη και συμπαράσταση στο τελευταίο αυτό στάδιο της πορείας μου ως φοιτητής του Ε.Μ.Π.

Εισαγωγή:

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, με τίτλο «Μελέτη Εξόλκευσης κοχλίας με F.E.M.», διερευνάται η παραμόρφωση που αναπτύσσεται σε μία κυκλική μεταλλική πλάκα μικρού πάχους με οπή στο κέντρο της διαμέτρου 12 χιλιοστών, η οποία εδράζεται πάνω σε ακλόνητη και άκαμπτη στήριξη μέσω διάταξης περιμετρικών κοχλιών. Στην κεντρική οπή των 12mm προσαρτάται κοχλίας, ο οποίος εφελκύεται έως την εξόλκευσή του, μέσω της διάτρησης της πλάκας.

Το φαινόμενο αυτό, προσομοιώνεται μέσω πεπερασμένων στοιχείων με την βοήθεια του προγράμματος Abaqus έκδοση 6.8 και επαληθεύεται θεωρητικά και υπολογιστικά.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν παραδοχές που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Σύμφωνα με την εξέταση των αποτελεσμάτων, το σύστημα αστοχούσε από εξόλκευση και ειδικά στο κέντρο της πλάκας, άρα και κοντά στο σημείο στο οποίο ασκήθηκε η εφελκυστική δύναμη, όπου τα φαινόμενα ήταν πολύ πιο έντονα.

Ιδιαίτερες δυσκολίες συναντήθηκαν αρχικώς κατά την προσπάθεια εξοικείωσης με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, Abaqus 6.8. Επίσης στον προσδιορισμό των παραδοχών, που έπρεπε να γίνουν ώστε τα αποτελέσματα να είναι μεν ακριβή και η προσομοίωση των μοντέλων λιγότερο επίπονη και περίπλοκη. Μετά από μία σειρά προσπαθειών αναλύσεων και δοκιμών με διάφορες παραδοχές, το προσομοίωμα πήρε την τελική του μορφή.

Στο 1^ο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται στον πρόλογο μια εισαγωγή στο αντικείμενο της εργασίας. Στη συνέχεια γίνεται μια ιστορική αναδρομή, και αναφορά σε εργασίες που έγιναν στο παρελθόν γύρω από το φαινόμενο της

εξόλκευσης και της αστοχίας λεπτών πλακών, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης, γίνεται αναφορά με λεπτομέρειες στο θεωρητικό κομμάτι, στον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζουμε το αντικείμενο της εργασίας θεωρητικά και υπολογιστικά, με λεπτομέρειες.

Στο 2^ο κεφάλαιο, αναλύεται η θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος και γίνεται αναφορά στην υπολογιστική μέθοδο.

Στο 3^ο κεφάλαιο, γίνεται εισαγωγή στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων και περιγράφονται τα στάδια προσομοίωσης, καθώς και ο τρόπος ελέγχου των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Γίνεται επίσης αναφορά στο Abaqus, καθώς και στις μεταλλικές συνδέσεις, στα είδη των συνδέσεων μεταξύ κοχλιών και μεταλλικού κυκλικού φορέα και την κατάταξή τους σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3.

Στο 4^ο κεφάλαιο, περιγράφεται το πρόγραμμα Abaqus 6.8 και αναφέρονται εφαρμογές του στην τεχνολογία και σε διάφορους κλάδους.

Στο 5^ο κεφάλαιο, περιγράφονται γενικά τα μοντέλα που χρησιμοποιήσαμε και δίδονται τα απαραίτητα χαρακτηριστικά των επιμέρους μελών τους, και ως προς την γεωμετρία τους αλλά και ως προς την αντοχή τους και την ελαστική και πλαστική συμπεριφορά τους. Γίνονται οι απαραίτητες παραδοχές προσομοίωσης, καθορίζονται οι συνοριακές συνθήκες, ο τρόπος φόρτισης καθώς και μια εκτενέστερη αναφορά στα στάδια προσομοίωσης των μοντέλων με ένα ειδικό πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στο 6ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα θεωρητικά αποτελέσματα αναλυτικά. Για αυτή τη διαδικασία, που προϋποθέτει τη χρήση πολύπλοκων τύπων και πολλές πράξεις όπου το λάθος μπορεί να γίνει εύκολα αλλά και το κυριότερο είναι χρονοβόρες, χρησιμοποιήθηκε ειδικά διαμορφωμένος πίνακας στο Excel, που απλοποίησε πολύ τη διαδικασία.

Στο 7ο κεφάλαιο συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα προσομοιώματα του Abaqus, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη θεωρία. Εντέλει βγαίνουν τα όποια συμπεράσματα από αυτές τις συγκρίσεις. Η απόκλιση εκτιμάται ότι θα είναι της τάξεως του 15-25%, εφόσον η θεωρία

υποστηρίζει πολύ λεπτά ελάσματα και το πάχος που επιλέχθηκε στα προσομοιώματα δεν είναι τέτοιο που να επιτρέπει ικανοποιητική προσέγγιση.

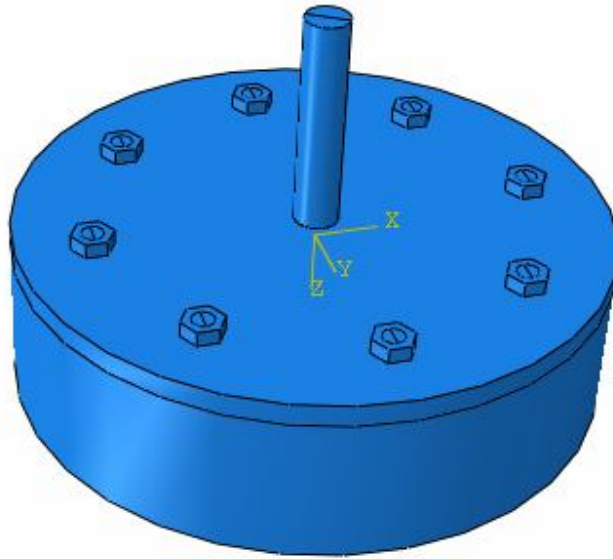
Στο 8^ο Κεφάλαιο εκτίθεται η Βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

Πρόλογος

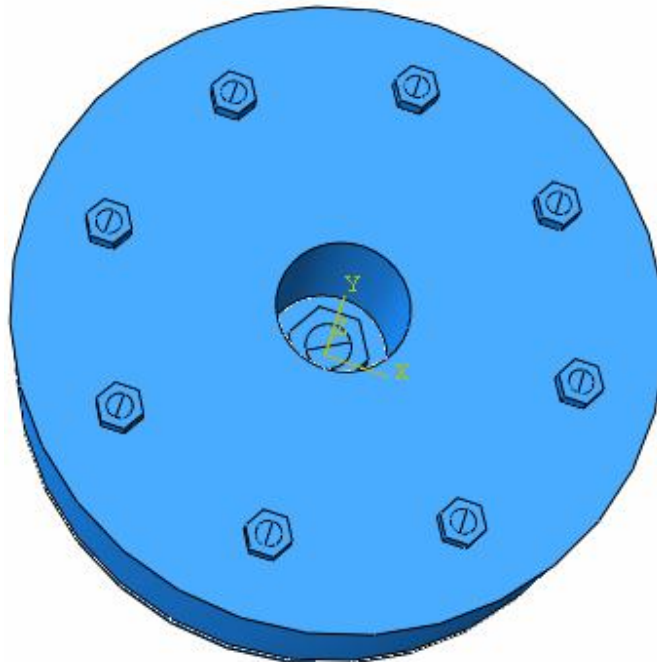
Το πρόβλημα της εξόλκευσης κοχλιών από χαλύβδινα ελάσματα αποτελεί ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον και πολύπλοκο φαινόμενο συμπεριφοράς στις χαλύβδινες συνδέσεις που παρατηρείται αρκετά συχνά και οδηγεί σε αστοχία των αντίστοιχων κατασκευών, όπως για παράδειγμα η αποκόλληση μεταλλικών πινακίδων λόγω ανεμοπτίσεως.

Ο τρόπος υπολογισμού των εφελκόμενων κοχλιών βασίζεται στην αναλυτική σχέση του Ευρωκώδικα 3 που συναρτά τη δύναμη αστοχίας με τη μέση διάμετρο της κεφαλής του κοχλία, το πάχος του ελάσματος, την τάση θραύσεως του υλικού του ελάσματος (ανάλογα με την ποιότητα του διαθέσιμου χάλυβα) και τον συντελεστή ασφαλείας. Σε όλα τα προσομοιώματα, ο κοχλίας που χρησιμοποιήθηκε για την εξόλκευση ήταν σε άμεση επαφή με τη χαλύβδινη πλάκα, χωρίς δακτυλίους (ροδέλες), για απλούστευση του μοντέλου.

Από τους κοχλίες που κυκλοφορούν στο εμπόριο, επελέγησαν ο M12/8.8 για την εξόλκευση, ενώ περιμετρικά για την ένωση με την άκαμπτη πλάκα M6/8.8. Σε όλα τα δοκίμια λοιπόν, χρησιμοποιήθηκαν περιμετρικά 8 κοχλίες M6/8.8, προκειμένου το χαλύβδινο κυκλικό έλασμα να στερεωθεί στην ειδικά διαμορφωμένη σταθερή άκαμπτη βάση. (βλέπε εικόνα 1.1 και εικόνα 1.2)



Εικόνα 1.1. Άνω όψη του προσομοιώματος



Εικόνα 1.2. Κάτω όψη του προσομοιώματος

Το δυσχερέστερο τμήμα της διπλωματικής εργασίας, βρίσκεται στην ανάλυση μέσω του προγράμματος Abaqus (v. 6.8), στην προσπάθεια κατασκευής του μοντέλου και τέλος στην προσπάθεια να προσεγγιστεί με επιτυχία το μοντέλο ώστε να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτά θα

αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Πριν προχωρήσει κάποιος στο βήμα των παραδοχών που θα χρειαστούν ώστε να απλοποιηθεί όσο γίνεται το προσομοίωμα του προγράμματος, ιδιαίτερα επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία επίσης, ήταν και η εξοικείωση με το πρόγραμμα Abaqus 6.8, τις δυνατότητές του, τις επιλογές του και τις ρυθμίσεις. Η διαδικασία στο θεωρητικό κομμάτι της εργασίας ήταν αρκετά πιο απλή, καθώς οι υπολογισμοί υλοποιήθηκαν με τη χρήση πίνακα Excel.

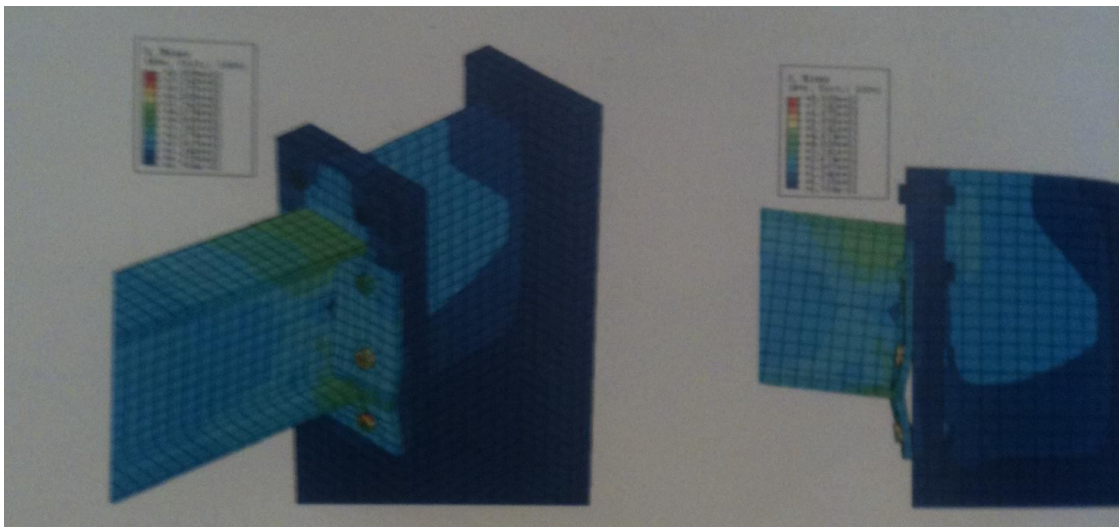
Ιστορική Αναδρομή

Παρά τη μεγάλη σημασία του μηχανισμού αστοχίας κοχλιών από χαλύβδινες πλάκες λόγω εξόλκευσης, η διεθνής βιβλιογραφία σε αυτό το φαινόμενο είναι σχετικά περιορισμένη. Προηγούμενες πειραματικές και αναλυτικές εργασίες σχετικές με αυτό το φαινόμενο πάντως, έχουν δείξει ότι οι μηχανισμοί αστοχίας εξαρτώνται κυρίως από το πάχος των πλακών. Λόγω της μεγάλης σημασίας της ανάλυσης του φαινομένου της εξόλκευσης των κοχλιών, εντούτοις έχουν γίνει κυρίως αριθμητικές αναλύσεις σε πλάκες με κοχλιωτές συνδέσεις, όπου το φαινόμενο της αστοχίας των κοχλιών από εξόλκευση είναι ο κύριος μηχανισμός αστοχίας. Πειραματικά όμως, το φαινόμενο της εξόλκευσης κοχλιών δεν έχει αναλυθεί σε ικανοποιητικό βαθμό.

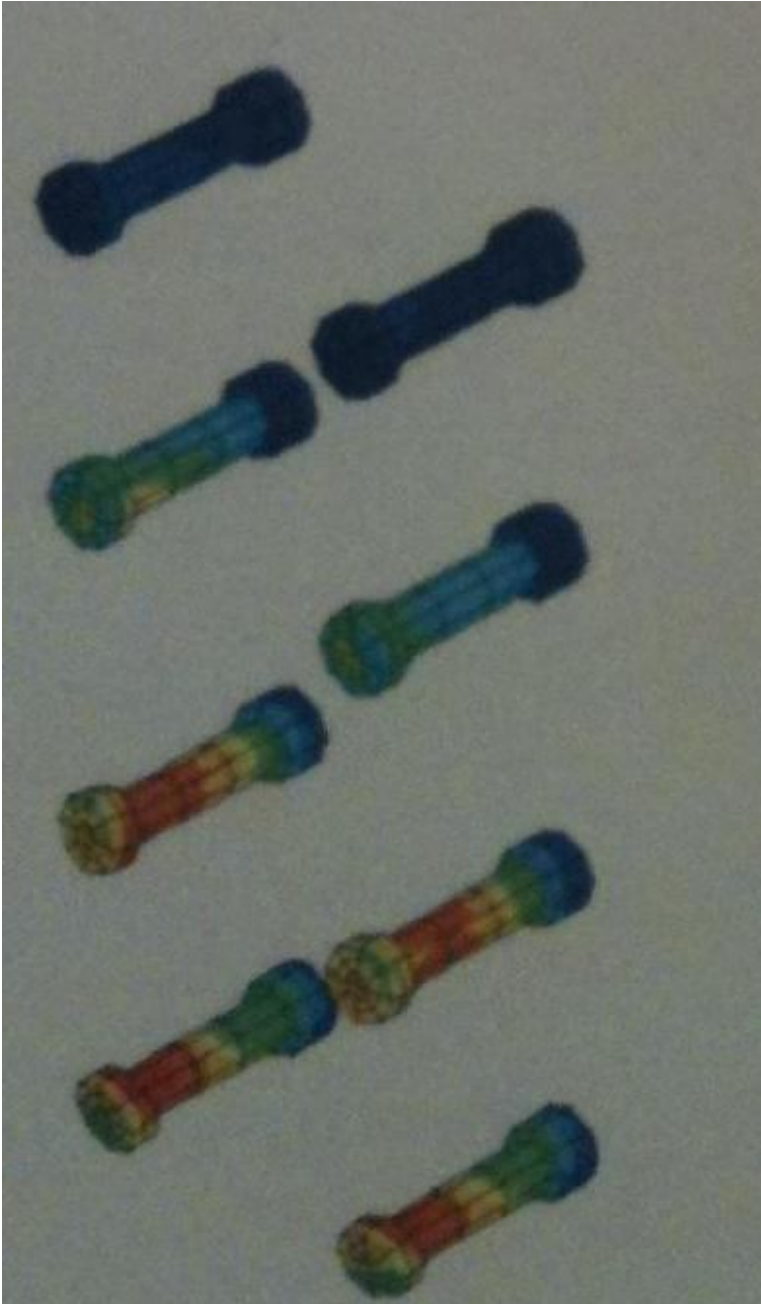
Μία πολύ πρόσφατη εργασία που πραγματοποιήθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, στο Εργαστήριο των Μεταλλικών Κατασκευών, είναι η εργασία με τίτλο «Πειραματική και θεωρητική Διερεύνηση Μεταλλικών Κόμβων Δοκού – Στύλου», η οποία πραγματοποιήθηκε από τους φοιτητές Εμμανουήλ Γραμματικάκη και Ιωάννη Κουτσούκο. Το αντικείμενο που πραγματεύτηκε η διπλωματική αυτή εργασία, είναι όπως μαρτυρά και ο τίτλος της, η διερεύνηση της συμπεριφοράς μεταλλικών κόμβων σύνδεσης δοκού και υποστηλώματος, που χρησιμοποιούνται σε μεταλλικά πλαίσια. Το βασικό μοντέλο αυτής της έρευνας, είναι ένας μονόπλευρος κοχλιωτός κόμβος σύνδεσης, ο οποίος

αποτελείται από ένα υποστήλωμα συγκολλητής διατομής τύπου Η και μια χαλύβδινη δοκό ίδιου μήκους, τύπου ΙΡΕ, η οποία βρίσκεται συγκολλημένη στο ένα της άκρο με μετωπική πλάκα.

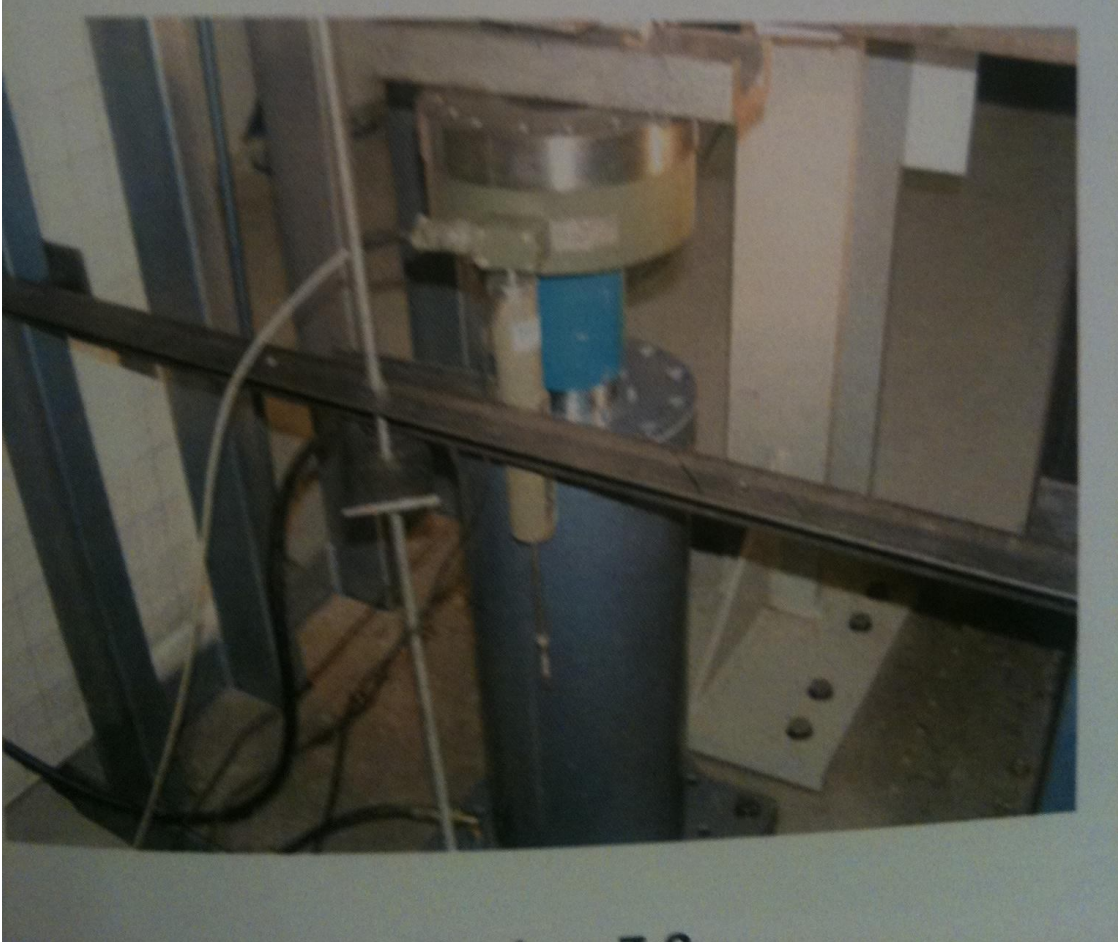
Η σύνδεση σε αυτή την διπλωματική πραγματοποιήθηκε με οχτώ κοχλίες συμμετρικά τοποθετημένους, σε τέσσερις σειρές ανά δύο. Ο κάθε κόμβος υποβλήθηκε σε κατακόρυφη στατική φόρτιση στο ελεύθερο άκρο της δοκού, μέχρι την αστοχία του πιο αδύναμου μέλους. Οι παράμετροι που ερευνήθηκαν, είναι το πάχος καθώς και η ποιότητα του χάλυβα της μετωπικής πλάκας, καθώς και η διάμετρος των κοχλιών σύνδεσης για τρία διαφορετικά μεγέθη διατομής ΙΡΕ. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μία διεξοδική σύγκριση των αποτελεσμάτων, τα οποία έδειξαν ότι η αύξηση του πάχους της μετωπικής πλάκας είχε ως αποτέλεσμα και την αύξηση της καμπτικής αντοχής και της αρχικής δυσκαμψίας του κόμβου(ανεμενόμενο), και παράλληλα μείωση της στρωφικής δυσκαμψίας. Χρησιμοποιήθηκαν πειραματικές διατάξεις, υπολογισμοί σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 αλλά και προσομοιώματα στο πρόγραμμα Abaqus. Παρακάτω, εικόνες και από προσομοιώματα του Abaqus, αλλά και από πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο των Μεταλλικών Κατασκευών.



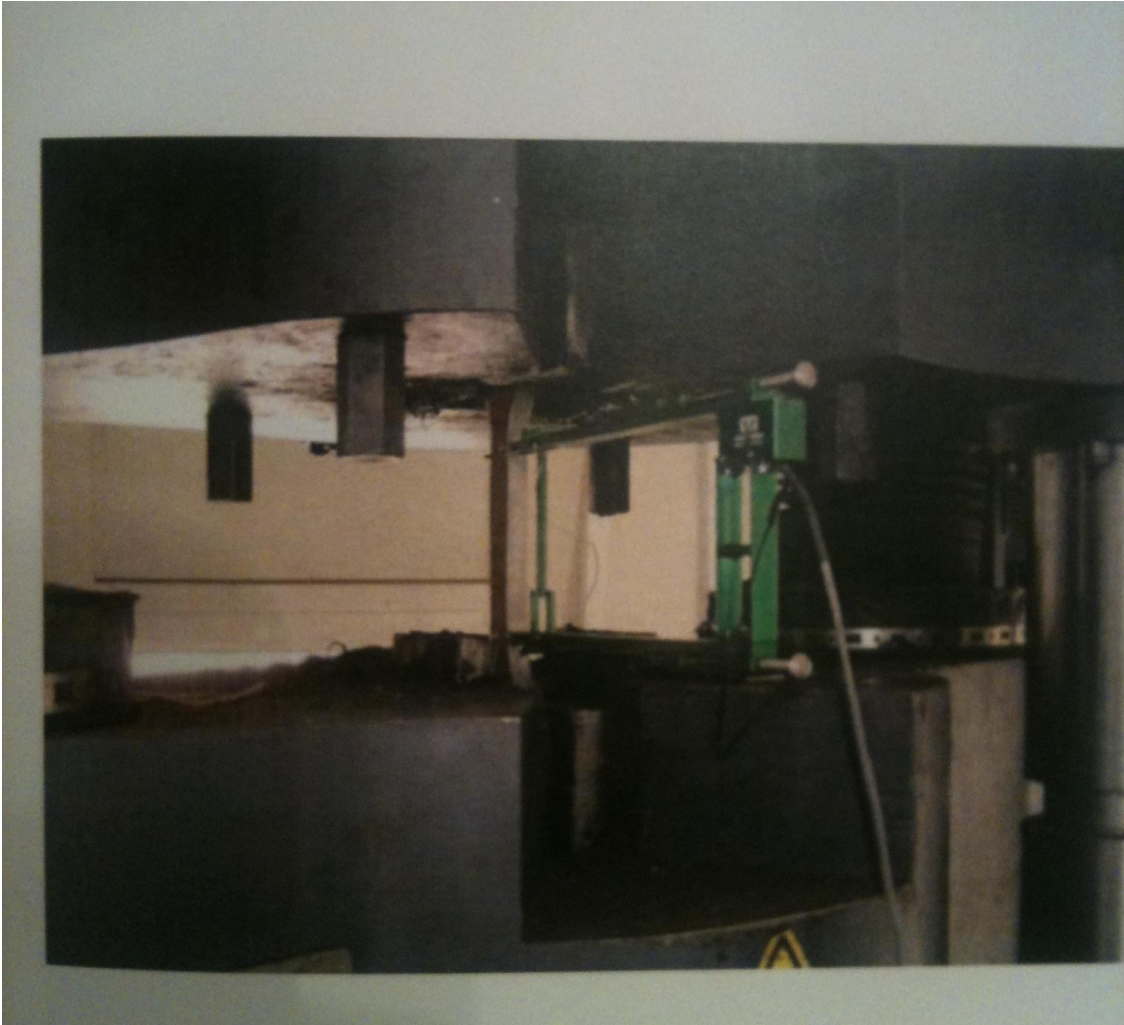
Εικόνα 1.1. Κόμβος δοκού και υποστηλώματος



Εικόνα 1.2. Παραμόρφωση κοχλιών ενός προσομοιώματος



Εικόνα 1.3. Μεταλλικό πλαίσιο συσκευής που παρέχει τις αναγκαίες συνθήκες στήριξης για την ομαλή διεξαγωγή πειραμάτων



Εικόνα 1.4. Δοκίμιο, με τον άξονά του να συμπίπτει με τον άξονα φορτίσεως της μηχανής



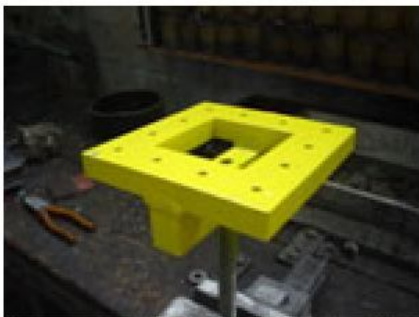
Εικόνα 1.5. Αρχή φόρτισης και πειράματος



Εικόνα 1.6. Θραύση και ολοκλήρωση του πειράματος.

Μία ακόμα πολύ πρόσφατη αλλά και με πολλές ομοιότητες με την εργασία αυτή ερευνητική μελέτη, η οποία συμπεριλάμβανε και πειράματα εξόλκευσης, εκτός των αναλυτικών αριθμητικών μελετών, είναι η εργασία που αναφέρεται και στο Πέμπτο Εθνικό συνέδριο των Μεταλλικών Κατασκευών. Στη συγκεκριμένη εργασία, στο Εργαστήριο των Μεταλλικών Κατασκευών πραγματοποιήθηκαν πειράματα στα πλαίσια ενός προγράμματος πειραματικών δοκιμών και αντίστοιχων αριθμητικών υπολογισμών στα πλαίσια της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν στη μηχανή εφελκυσμού των 100 kN, στο Εργαστήριο των Μεταλλικών Κατασκευών, όπως προαναφέρθηκε.

Προκειμένου να υπάρξει κοινή βάση για σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφορετικών συνδυασμών και ελασμάτων, σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια για όλα τα πειράματα με τις ίδιες διαστάσεις. Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες από μέρος των πειραμάτων που έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο των Μεταλλικών Κατασκευών.



Εικόνα 1.7. Βάση στήριξης χαλύβδινων πλακών



Εικόνα 1.8. Έναρξη εξόλκευσης



Εικόνα 1.9. Πείραμα σε εξέλιξη



Εικόνα 1.10. Έναρξη της εξόλκευσης

Όπως φαίνεται στις εικόνες, η χαλύβδινη πλάκα τοποθετήθηκε πάνω στην ειδικά διαμορφωμένη και στέρεη κίτρινη επιφάνεια, όπου και περιμετρικά δεσμεύτηκε με 12 κοχλίες. Το πείραμα βρίσκεται σε εξέλιξη όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.9, ενώ στην εικόνα 1.10 παρατηρείται η έναρξη της εξόλκευσης όπου μετά το πέρας της, το πείραμα τερματίζεται.

Για την ποιότητα του υλικού κάθε μιας πλάκας, καταγράφηκε με ακρίβεια η τιμή της θραύσης του υλικού f_u , η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου. Στους πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζονται το πάχος της κάθε πλάκας και η αντίστοιχη δύναμη που προκάλεσε την εξόλκευση του κοχλία. Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τα πειράματα έχουν προσομοιωθεί με το πρόγραμμα Abaqus 6.8, ενώ συγκρίνονται με τα αποτελέσματα πρόσφατης θεωρητικής ανάλυσης και βγαίνουν συμπεράσματα και επισημαίνονται οι αποκλίσεις.

ΚΟΧΛΙΑΣ Μ12		
A/A	ΠΑΧΟΣ (mm)	ΔΥΝΑΜΗ (kN)
1	5,95	61,4
2	5,9	62,1
3	5,85	62,3
4	5	49,6
5	5	53,5
6	4,95	54,7
7	4,3	45,8
8	4,3	46,1
9	4,1	45,2
10	3,1	28,4
11	3,1	28
12	3,05	29,3
13	2	13,8
14	2	15,4
15	2	14,2
16	1,05	6,4
17	1	6,2
18	1	6,4

Πίνακας 1.1. Πάχος πλακών και δύναμη εξόλκευσης για διάμετρο κοχλίας Μ12

ΚΟΧΛΙΑΣ Μ14		
A/A	ΠΑΧΟΣ (mm)	ΔΥΝΑΜΗ (kN)
19	5,9	70,4
20	5,9	72
21	5,9	72,2
22	5	64
23	5	57,8
24	5,05	62,2
25	4,3	56,4
26	4,3	56
27	4,15	52,9
28	3,1	35,3
29	3,1	35
30	3,05	34
31	2	18,3
32	2,15	17,2
33	2	18
34	1,1	8,4
35	1	8,5
36	1	8,6

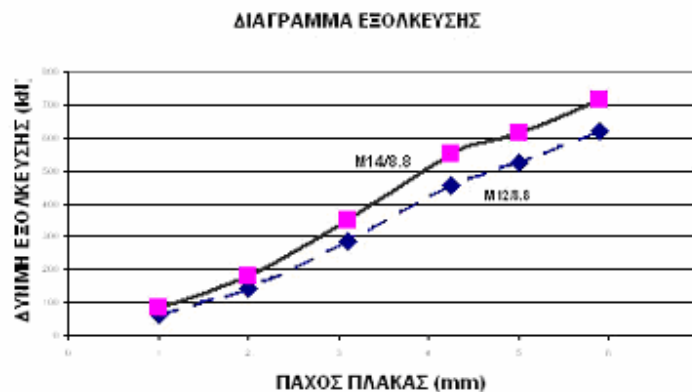
Πίνακας 1.2. Πάχος πλακών και δύναμη εξόλκευσης για κοχλίας Μ14

ΚΟΧΛΙΑΣ Μ12	
ΠΑΧΟΣ (mm)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΔΥΝΑΜΗΣ (kN)
5,9	61,93
5	52,6
4,25	45,7
3,1	28,57
2	14,47
1	6,33

Πίνακας 1.3. Μέση δύναμη εξόλκευσης για κοχλίας Μ12

ΚΟΧΛΙΑΣ Μ14	
ΠΑΧΟΣ (mm)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΔΥΝΑΜΗΣ (kN)
5,9	71,53
5	61,33
4,25	55,1
3,1	34,77
2	17,83
1	8,5

Πίνακας 1.4. Μέση δύναμη εξόλκευσης για κοχλίας Μ14

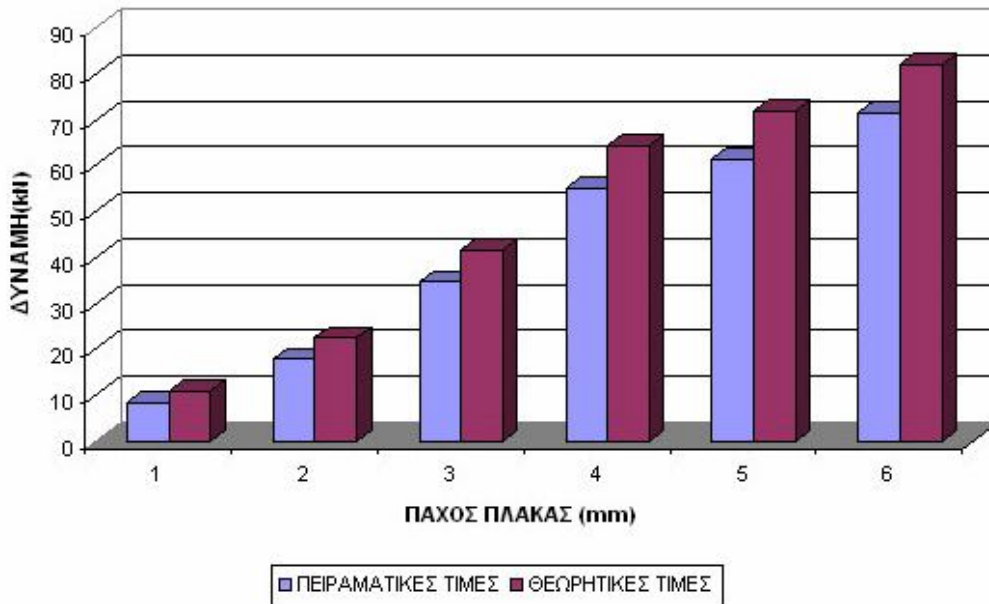


Σχήμα 1.1. Διαγράμματα σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων της εξόλκευσης για τους δύο τύπους κοχλιών M12/8.8 και M14/8.8

Για όλα τα δοκίμια η τάση θραύσης είναι ελαφρά μεγαλύτερη από $360\text{N}/\text{mm}^2$ για όλα τα πάχη πλάκων που χρησιμοποιήθηκαν, εκτός των δοκιμίων με πάχος 1 και 2 mm όπου η τάση θραύσης είναι ελάχιστα μικρότερη από $360\text{N}/\text{mm}^2$. Αυτό βέβαια δεν επηρεάζει τα συμπεράσματα από τη σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων με εφαρμογή του τύπου $B_r, R_d = 0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_r \cdot f_u / \gamma M_b$ διότι κάθε δοκίμιο υπολογίζεται χωριστά βάσει της τιμής της τάσης θραύσης που έχει ήδη υπολογισθεί.

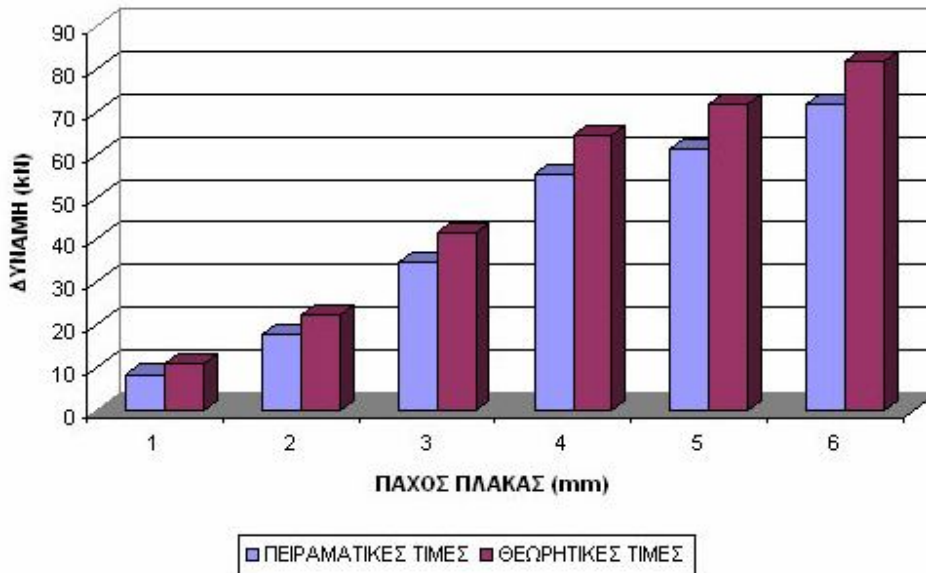
Παρατηρήθηκε ότι το φαινόμενο της εξόλκευσης επηρεάζεται σημαντικά από το πάχος της πλάκας. Συγκεκριμένα, για μικρά πάχη παρατηρείται ρηγμάτωση στα χείλη της οπής, για τα μέσα πλάτη μόνο πλαστική παραμόρφωση, ενώ για τα μεγάλα πάχη αποκοπή δακτυλίου από την μάζα του υλικού της πλάκας. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η τιμή της δύναμης που προκαλεί την εξόλκευση, για πάχος πλάκας 4-6 mm είναι από 60 – 70 KN περίπου έχοντας μία φθίνουσα πορεία, όμως μετά η τιμή της δύναμης ελαττώνεται σημαντικά καθώς το πάχος της πλάκας ελαττώνεται περισσότερο. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο τελευταίοι πίνακες, οι οποίοι δείχνουν τις αποκλίσεις μεταξύ των θεωρητικών και των πειραματικών τιμών, για κοχλίες M12 και M14.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΣΟΥ ΘΡΟΥ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ



Σχήμα 1.2. Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών τιμών της δύναμης εξόλκευσης για κοχλία M12/8.8

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΣΟΥ ΘΡΟΥ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ



Σχήμα 1.3. Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών τιμών της δύναμης εξόλκευσης για κοχλία M14/8.8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Το κεφάλαιο αυτό, αναφέρεται στη θεωρητική διερεύνηση τοπικής κατανομής έντασης σε χαλύβδινα ελάσματα λόγω ανηρημένων φορτίων

Ένας πολύ κρίσιμος και επικίνδυνος μηχανισμός αστοχίας στις συνδέσεις χαλύβδινων μελών, είναι αυτός που ήδη αναφέρθηκε και μελετάται σε αυτή τη διπλωματική εργασία, δηλαδή η αστοχία κοχλιών από χαλύβδινες πλάκες, λόγω εξόλκευσης. Το πρόβλημα, αν και φαίνεται αρκετά απλό, δεν είναι ένα κλασσικό πρόβλημα ανάλυσης όπως θα περίμενε κανείς. Οι κατασκευές ή τα μέλη των κατασκευών σχεδιάζονται συνήθως με βάση την ελαστική ή την ελαστοπλαστική θεώρηση. Ακόμα πάντως και στην περίπτωση της πλαστικής θεώρησης, εξετάζεται μόνο η περιορισμένη πλαστική ικανότητα. Στο θεωρητικό κομμάτι, πραγματοποιείται αναλυτική προσομοίωση για τον εντοπισμό της πλήρους αστοχίας του υλικού.

Ελαστική Περιοχή

Όσο η παραμόρφωση λαμβάνει χώρα στην ελαστική περιοχή, συνήθως δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της εξόλκευσης, αλλά μία πιθανή μικρή ή μεσαία παραμόρφωση της πλάκας.

Θεωρείται ότι ο κάθε κοχλίας που περιμετρικά στηρίζει την κυκλική χαλύβδινη πλάκα, επηρεάζει εντατικά μία ζώνη 2πα, η οποία ζώνη και παραμορφώνεται (ζώνη επιρροής). Δηλαδή, α είναι η απόσταση από το σημείο στο οποίο ασκείται η δύναμη στο κέντρο της πλάκας μέχρι τον οποιονδήποτε περιμετρικό κοχλία (ισαπέχουν από το κέντρο, και στην περίπτωση των μοντέλων που κατασκευάστηκαν στο Abaqus για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, είναι 6 εκατοστά). Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί το πρόβλημα και να μελετηθεί ως κάμψη, μιας κυκλικής πλάκας πάχους t , η οποία πλάκα είναι πακτωμένη στις παρειές της, ενώ στο κέντρο της έχει μία οπή ακτίνας b . Στην περίπτωση της πτυχιακής, η ακτίνα b είναι 12 χιλιοστά.

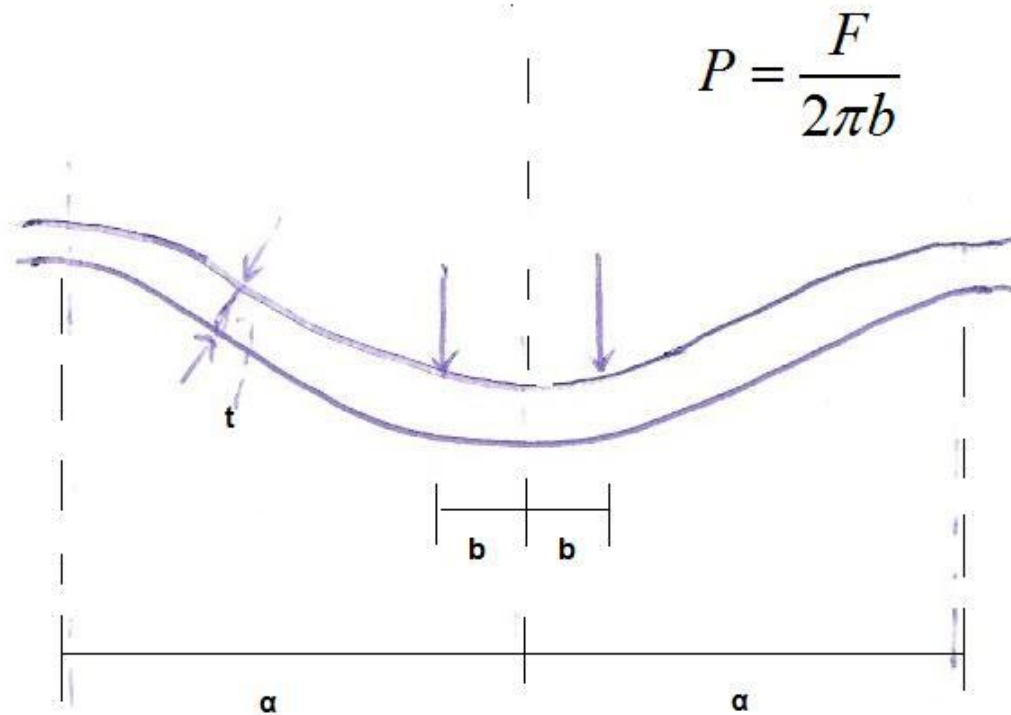
Η εξίσωση που διέπει το πρόβλημα κάμψης της πλάκας, είναι η εξής:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{Q(r)}{D} \quad (2.1)$$

Η μεταβλητή $w(r,\theta)$ συμβολίζει το βέλος της πλάκας, το $Q(r)$ συμβολίζει την τέμνουσα δύναμη στην πλάκα σε απόσταση r από το κέντρο της πλάκας (η οποία εκφράζεται σε δύναμη ανά μονάδα μήκους). D , τέλος, είναι η καμπτική δυσκαμψία της πλάκας που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.2)$$

E είναι το μέτρο ελαστικότητας, ενώ ν είναι ο λόγος Poisson. Τέλος, t είναι το πάχος της λεπτής κυκλικής χαλύβδινης πλάκας που θα αστοχήσει.



Σχ. 2.1. Τομή κυκλικού τμήματος πλάκας με οπή και εγκάρσια φόρτιση λόγω κοχλία

Για μία κυκλική πλάκα που φορτίζεται συμμετρικά, η τέμνουσα δύναμη σε μία τυχαία θέση r , όπου r η απόσταση του τυχαίου σημείου όπου ασκείται η δύναμη από το κέντρο, προσδιορίζεται αν το κατανομημένο φορτίο P του κοχλία που δρα στην περιφέρεια της οπής $2\pi b$ διαιρεθεί με την περιφέρεια $2\pi r$ στη θέση r . Επομένως, λαμβάνεται η εξής σχέση:

$$Q(r) = \frac{2\pi b P}{2\pi r} = P \frac{b}{r} \quad (2.3)$$

Αντικαθιστώντας την τέμνουσα $Q(r)$ από την σχέση 2.3 στην σχέση 2.1, θα

έχουμε:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{Pb}{Dr} \quad (2.4)$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση (3.4) δύο φορές, θα λάβουμε:

$$\frac{dw}{dr} = \frac{Pb}{D} \left(\frac{r}{2} \ln r - \frac{r}{4} \right) + c_1 \frac{r}{2} + \frac{c_2}{2} \quad (2.5)$$

ή

$$w = \frac{Pb}{D} \left(\frac{r^2}{4} \ln r - \frac{r^2}{4} \right) + c_1 \frac{r^2}{4} + c_2 \ln r + c_3 \quad (2.6)$$

Τελικά, η παραμόρφωση w , γίνεται:

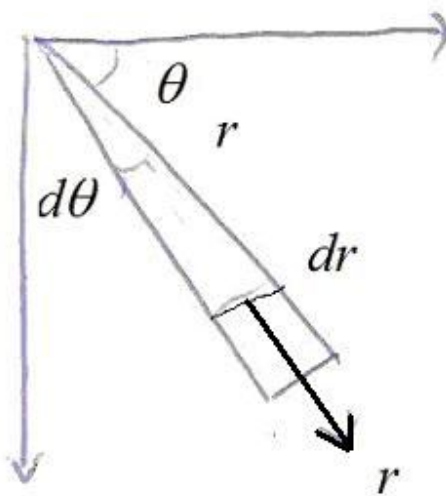
$$w = \frac{Pb}{D} \frac{r^2}{4} (\ln r - 1) + c_1 \frac{r^2}{4} + c_2 \ln r + c_3 \quad (2.7)$$

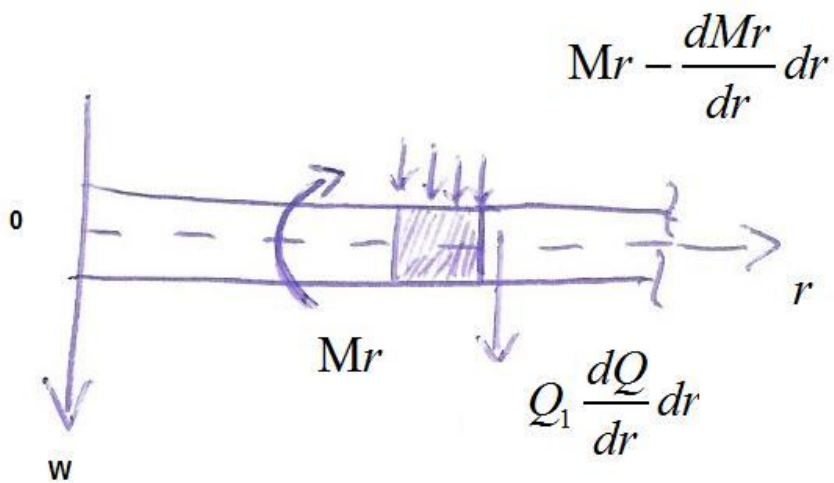
Για την ροπή κάμψεως M_r , θα ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$M_r = -D \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right) \quad (2.8)$$

Αντικαθιστώντας στην (2.8) την (2.7), προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$M_r = -D \left[\frac{Pb}{D} \left(\frac{1+\nu}{2} \ln r + \frac{1-\nu}{2} \right) + \frac{1+\nu}{2} c_1 - \frac{1-\nu}{2} c_2 \right] \quad (2.9)$$





Σχ. 2.2. (a) Στοιχειώδες τμήμα πλάκας με σπή και (b) εντατικά μεγέθη.

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, είναι οι εξής:

$$w(a)=0$$

$$w'(a)=0 \quad (2.9a)$$

$$M_r(b)=0$$

Από τις (2.9.a), (2.9) και (2.7), λαμβάνουμε το εξής σύστημα:

$$\frac{\alpha^2}{4} c_1 + \ln \alpha c_2 + c_3 = -\frac{Pb}{D} \frac{\alpha^2}{4} (\ln \alpha - 1) \quad (2.10)$$

$$\frac{\alpha}{2}c_1 + \frac{1}{\alpha}c_2 = -\frac{Pb}{D} \frac{\alpha}{2} \left(\ln \alpha - \frac{1}{2} \right) \quad (2.11)$$

$$\frac{1+\nu}{2}c_1 - \frac{1-\nu}{b^2}c_2 = \frac{Pb}{D} \left(\frac{1+\nu}{2} \ln b + \frac{1-\nu}{4} \right) \quad (2.12)$$

Με την επίλυση του παραπάνω συστήματος των τριών εξισώσεων, προσδιορίζονται και οι μεταβλητές της ολοκλήρωσης c_1 , c_2 και c_3 , ως εξής:

$$c_1 = -\frac{1}{2} \frac{Pb \left(b^2 - b^2 \mu + 2b^2 \ln(b) + 2b^2 \ln(b) \mu + \alpha^2 + 2\mu \alpha^2 \ln(\alpha) - 2\alpha^2 (\ln(a) - m\alpha^2) \right)}{D(-b^2 - b^2 \mu - \alpha^2 + \mu \alpha^2)}$$

$$c_2 = -\frac{1}{2} \frac{Pb^3 a^2 \left(-\mu + \ln(b) + \ln(b) \mu + \ln(\alpha) + \mu \ln(\alpha) \right)}{D(-b^2 - b^2 \mu - \alpha^2 + \mu \alpha^2)}$$

$$c_3 = -\frac{1}{8} a^2 Pb \frac{\left(\begin{array}{l} -\mu a^2 - 6 \ln(\alpha) b^2 \mu + 4 \ln(a) b^2 \ln(b) + 4 \ln(\alpha)^2 b^2 \mu - 2 \ln(\alpha) b^2 + 4 \ln(\alpha)^2 b^2 \\ + 3b^2 \mu - 2b^2 \ln(b) \mu + 4 \ln(a) b^2 \ln(b) \mu - 2b^2 (\ln(b) + \alpha^2 + b^2) \end{array} \right)}{D(-b^2 - b^2 \mu - \alpha^2 + \mu \alpha^2)}$$

Υπολογίζοντας λοιπόν από τις παραπάνω 3 εξισώσεις τα c_1 , c_2 και c_3 , και αντικαθιστώντας τις τιμές τους στην εξίσωση (2.7), θα υπολογιστεί το ζητούμενο βέλος w , το οποίο στη συνέχεια θα υπολογιστεί και στα προσομοιώματα του προγράμματος Abaqus 6.8 και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

Σε όλες τις παραπάνω σχέσεις, οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι dN για τη δύναμη (Newton * 10) και για μονάδα μήκους εκατοστά (cm) .

Ελαστοπλαστική Περιοχή

Στην περίπτωση που βρισκόμαστε στην ελαστοπλαστική περιοχή, γνωρίζουμε ότι το υλικό μας είναι κρατυνόμενος χάλυβας και η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων του συγκεκριμένου υλικού δύναται να περιγραφεί από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\sigma = E\varepsilon \quad , \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_e \quad (2.13)$$

$$\sigma = A - \frac{B}{\varepsilon} \quad , \quad \varepsilon_e \leq \varepsilon$$

A και B είναι σταθερές, οι οποίες εξαρτώνται από την ποιότητα του υλικού, και συγκεκριμένα από την ποιότητα του χάλυβα. Για παράδειγμα, αν ο χάλυβας είναι ποιότητας S355, τότε:

$$A = 5040 \quad , \quad B = 3,024$$

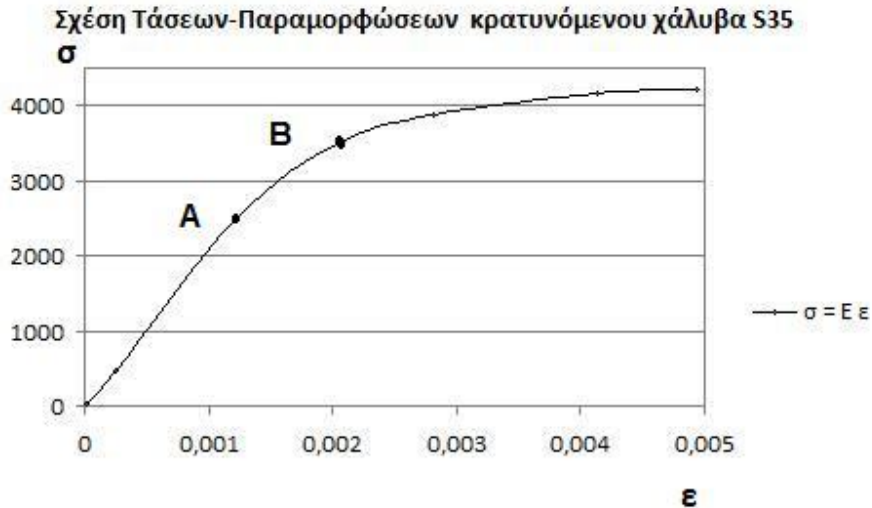
Επομένως, η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων για ποιότητα χάλυβα S355 θα είναι η παρακάτω:

$$\sigma = E\varepsilon \quad , \quad 0 \leq \varepsilon \leq 0,0012 \quad (2.14)$$

$$\sigma = 5.040 - \frac{3,024}{\varepsilon} \quad , \quad 0,0012 \leq \varepsilon$$

Από αυτές τις δύο σχέσεις, εύκολα προκύπτει και το διάγραμμα τάσεων –

παραμορφώσεων για τη συγκεκριμένη ποιότητα χάλυβα.

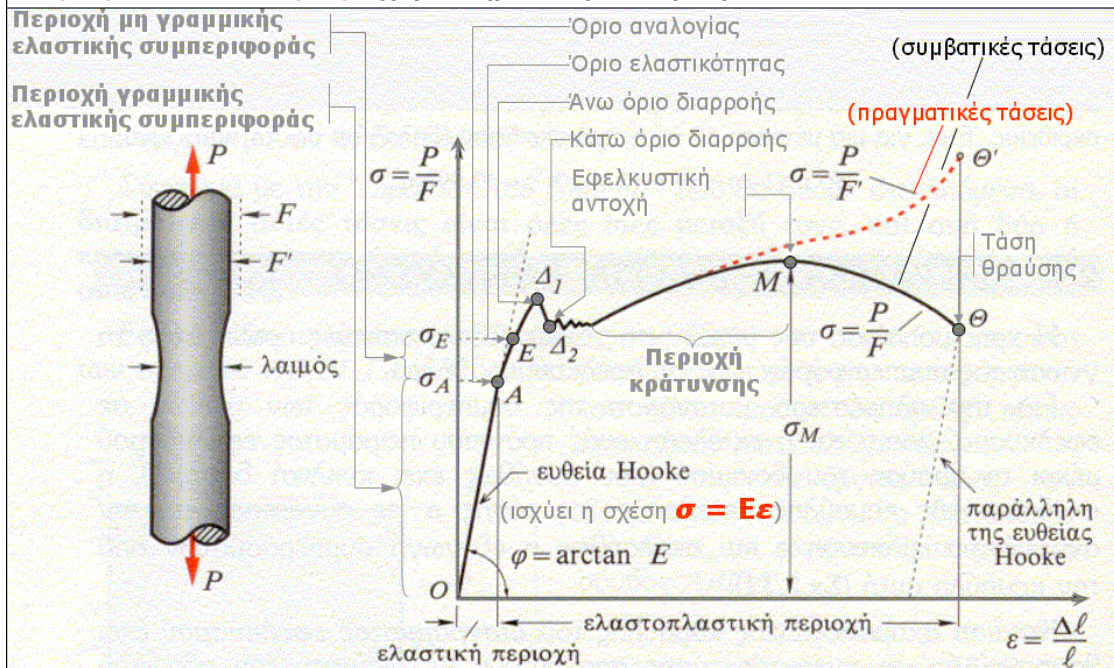


Σχ. 2.3. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το πειραματικό ή πραγματικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων για το χάλυβα σε εφελκυσμό. Στο διάγραμμα αυτό που ακολουθεί, φαίνεται κατά τον εφελκυσμό η περιοχή γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς του χάλυβα, καθώς και η περιοχή της μη γραμμικής ελαστικής (πλαστικής) συμπεριφοράς, καθώς και το σημείο στο οποίο ο χάλυβας αστοχεί και εμφανίζεται το φαινόμενο της εξόλκευσης, όταν δηλαδή φτάσει ο χάλυβας την τιμή της τάσης θραύσης.

Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων σε εφελκυσμό για το χάλυβα

E: μέτρο ελαστικότητας - χαρακτηριστική ιδιότητα για κάθε υλικό



Σχ. 2.4 Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων χάλυβα υπό εφελκυσμό

Ως κρίσιμο φορτίο, ορίζεται το F_{cr} . Το F_{cr} δηλαδή, είναι το φορτίο, το οποίο απαιτείται για να προκαλέσει πλήρη πλαστικοποίηση της παρειάς της οπής και το οποίο φορτίο έχει ως αποτέλεσμα την εξόλκευση του κοιλία διαμέσου της οπής αυτής.

Χρησιμοποιώντας την υπόθεση Bleich $[\sigma]$ για ανισότροπη συμπεριφορά πλακών στην ελαστοπλαστική περιοχή, ορίζεται ο λόγος ψ ως εξής:

$$\psi = \frac{E_t}{E} \quad (2.15)$$

Το ψ , είναι ο λόγος του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας E_t προς το μέτρο E του Young. Επομένως, η εξίσωση (3.8), δηλαδή $M_r = -D \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right)$, μετατρέπεται ως εξής: (όπου ο Bleich υπέθεσε αυθαίρετα και στη συνέχεια επαληθεύτηκε από πειράματα, ότι ο όρος της επιρροής των συνολικών τάσεων πολλαπλασιάζεται με $\sqrt{\psi}$)

$$M_{rp} = -D \left(\psi \frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu \sqrt{\psi}}{r} \frac{dw}{dr} \right) \quad (2.16)$$

Μετά την πλήρη πλαστικοποίηση της παρειάς της οπής, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η τιμή της E_t στο σημείο B του σχήματος 2.3 του διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων του κρατυνόμενου χάλυβα S35, η οποία αντιστοιχεί στο $\varepsilon = \varepsilon_f$.

Για παράδειγμα, ο χάλυβας ποιότητας S355 έχει :

$$\varepsilon_f = 0,002$$

$$E_t = 0,765 \times 10^6 \text{ dN} / \text{cm}^2$$

Θέτω:

$$M_{rp}(b) = M_p$$

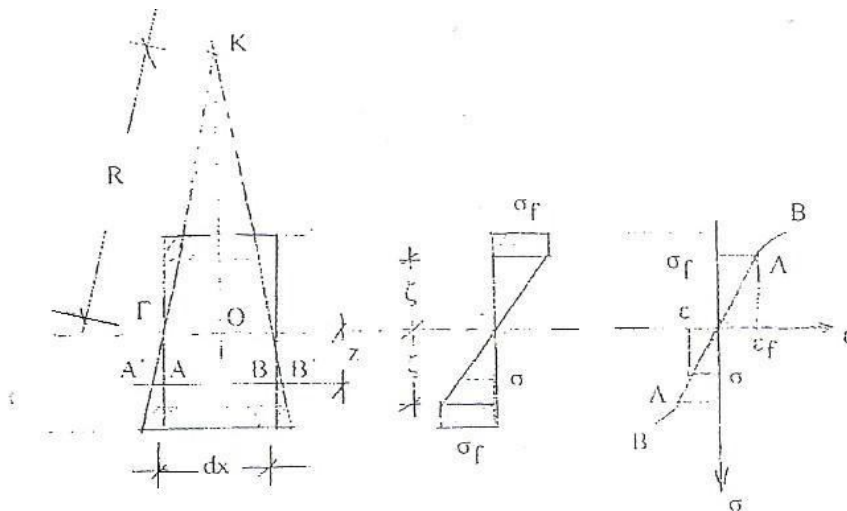
από όπου και προκύπτει το w_p .

Τώρα μπορεί να προσδιοριστεί η κρίσιμη τιμή του φορτίου F_{cr} . Η ροπή M_p , είναι και η ροπή της πλήρους πλαστικοποίησης της παρειάς της οπής, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M_p = \sigma_f \frac{t^2}{4} \quad (2.17)$$

σ_f είναι το όριο διαρροής του υλικού.

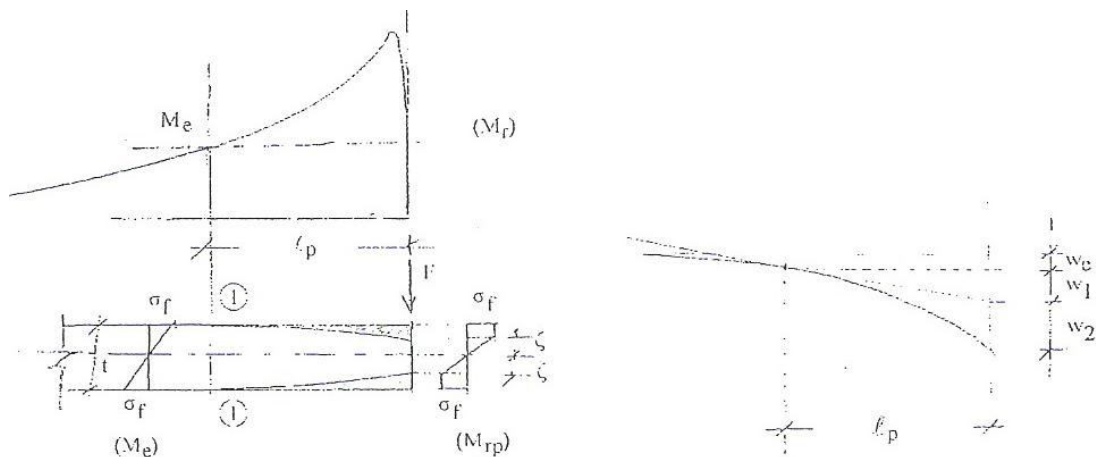
Ο προσδιορισμός της ακριβούς έκφρασης της παραμορφωμένης κατάστασης για το φορτίο $F < F_{cr}$, είναι εξαιρετικά δύσχερής. Επομένως είναι θεμιτός ο προσδιορισμός της παραμορφωμένης κατάστασης κατά προσέγγιση. Μία ικανοποιητική προσέγγιση, επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης της μέσης τιμής του λόγου ψ (2.15) μεταξύ των σημείων A και B, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4 παρακάτω:



Εικόνα 2.4 Τάσεις και παραμορφώσεις σε μερικώς πλαστικοποιημένη διατομή

Έτσι, με βάση την εικόνα 2.5 που ακολουθεί, έχω:

$$\varepsilon = \frac{\Delta dx}{dx} = \frac{AA' + BB'}{AB} = \frac{AA'}{AB/2} = \frac{AA'}{GO} \cong \frac{z}{R}$$



Εικόνα 2.5 Ροπή κάμψεως και βέλος στην μερικώς πλαστικοποιημένη ζώνη l_p της πλάκας.

Με βάση λοιπόν την ελαστική ανάλυση, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό, υπολογίζεται το βέλος κάμψης της πλάκας w , καθώς και το διάγραμμα της κατανεμημένης ροπής $M_r(r)$. Μετά εφαρμόζεται η πλαστική ανάλυση, όπως αναλύθηκε σε αυτό το κεφάλαιο, στο κομμάτι της ελαστοπλαστικής περιοχής.

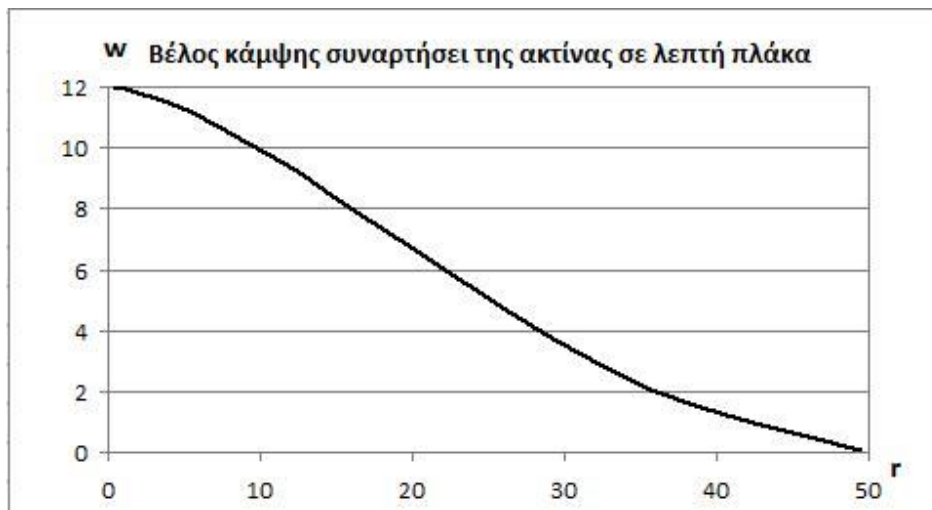
Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα του βέλους κάμψης w συναρτήσει της ακτίνας r , καθώς και της ροπής κάμψης της πλάκας M_r συναρτήσει της ακτίνας r πρώτα (α) και κατόπιν μεγεθύνοντας στη θέση της οπής (β) επιτυγχάνεται το διάγραμμα με λεπτομέρεια στη θέση αυτή.

Έτσι, με αυτό τον τρόπο, επιχειρείται μία αναλυτική προσομοίωση του φαινομένου της διάτρησης των πλακών, καθώς και της εξόλκευσης των κοχλιών, με καθαρά θεωρητική και υπολογιστική προσέγγιση.

Αν και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνονται αρκετά ενδιαφέροντα

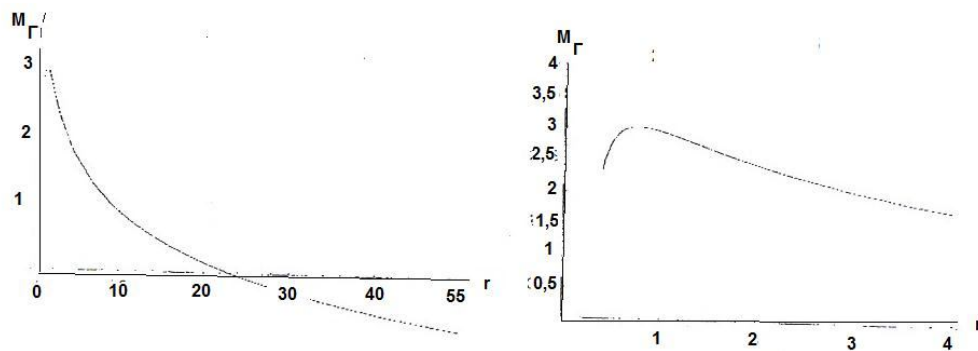
αποτελέσματα, όπως η αρκετά ακριβής προσομοίωση του μηχανισμού αστοχίας, οι τιμές φορτίου – μετατόπισης παρουσιάζουν κάποιες μικρές αποκλίσεις από τις αντίστοιχες τιμές που προσδιορίστηκαν με μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, όπως με τη χρήση και τη βοήθεια του προγράμματος Abaqus 6.8.

Ακολουθούν τα διαγράμματα του βέλους κάμψης w συναρτήσει της ακτίνας r , καθώς και της ροπής κάμψης της πλάκας M_r συναρτήσει της ακτίνας r .



Εικόνα 2.6 Βέλος κάμψης w συναρτήσει της ακτίνας r

Στην εικόνα 2.7 παρατηρείται ότι η ροπή κάμψεως, αλλάζει πρόσημο για ακτίνα $r = 220$ mm, ενώ κοντά στην οπή, η καμπυλότητα επίσης αλλάζει πρόσημο, λόγω της προόδου της πλαστικής ζώνης. Το φαινόμενο πλήρους πλαστικοποίησης της περιμέτρου της οπής, λαμβάνει χώρα για φορτίο $P = 240,72$ KN, ενώ η περιοχή πλαστικοποίησης έχει ακτίνα $l_p = 9.87$ cm, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7 (α) Ροπή κάμψης της πλάκας M_r συναρτήσει της ακτίνας r και (β) μεγέθυνση στη θέση οπής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Εισαγωγή στη Θεωρία των Πεπερασμένων Στοιχείων

Γενικά

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος (δηλ. μέθοδος υπολογισμού με χρήση Η/Υ) για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά.

Επομένως, υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι. Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα.

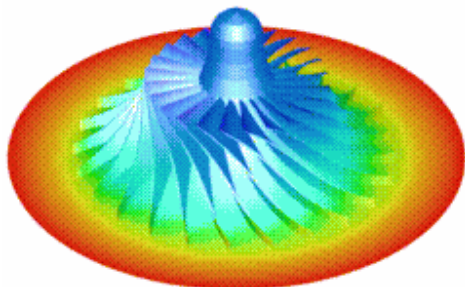
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ξεκίνησε από τους Hrennikoff, Courant, Αργύρη και Clough, το 1941, 1943, 1944 και 1960 αντίστοιχα. Αναλυτικά, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων προήλθε από τις ανάγκες για την επίλυση σύνθετης ελαστικότητας και δομικής ανάλυσης, προβλημάτων πολιτικού μηχανικού, έργων και αεροναυτικής εφαρμοσμένης μηχανικής.

Η ανάπτυξη της μπορεί να επισημανθεί πίσω στην εργασία κοντά Αλέξανδρος Hrennikoff (1941) και Richard Courant (1942). Ενώ οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται από αυτούς τους πρωτοπόρους είναι εντυπωσιακά διαφορετικές, έχουν ένα ουσιαστικό χαρακτηριστικό: πλέγμα discretization μιας

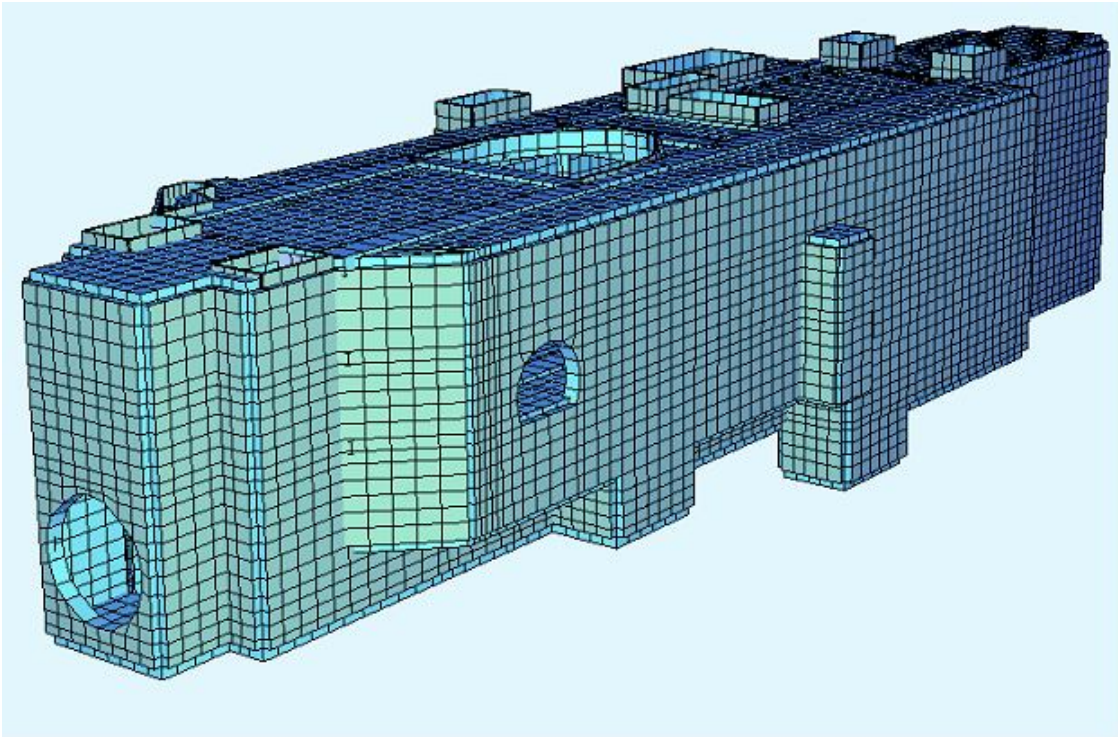
συνεχούς περιοχής σε ένα σύνολο ιδιαίτερων υπο--περιοχών. Η εργασία του Hrennikoff «discretizes», ερευνά την περιοχή με τη χρήση μιας αναλογίας δικτυωτού πλέγματος ενώ η προσέγγιση Courant διαιρεί την περιοχή σε πεπερασμένες τριγωνικές υποπεριφέρειες για τη λύση των ελλειπτικών μερικών διαφορικών εξισώσεων δεύτερης διαταγής (PDEs) που προκύπτουν από το πρόβλημα torsion από έναν κύλινδρο.

Η συμβολή του Courant ήταν εξελικτική, επισύροντας την προσοχή σε ένα μεγάλο σώμα των προηγούμενων αποτελεσμάτων για PDEs που αναπτύχθηκαν κοντά Rayleigh, Ritz, και Galerkin. Η ανάπτυξη της πεπερασμένης μεθόδου στοιχείων άρχισε σοβαρά μετά τα μέσα της δεκαετίας του '50 για πλαίσιο αέρος και δομική ανάλυση και μαζευμένη ορμή, στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης μέσω της εργασίας John Argyris και Μπέρκλεϋ και μέσω της εργασίας Ray W. «Χαράδρα», ώστε τη δεκαετία του 60 να επεκταθεί η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και σε δομικά έργα των πολιτικών μηχανικών.

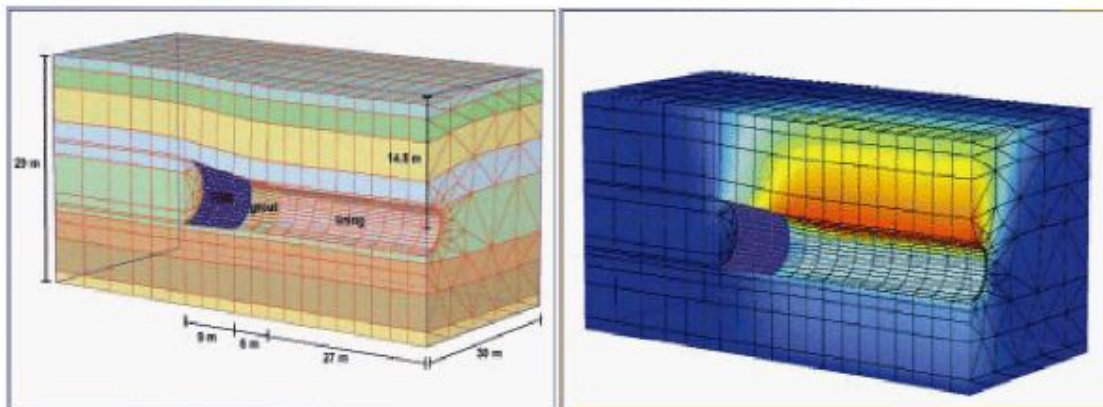
Σήμερα βρίσκει πολλές εφαρμογές και μπορεί να την εφαρμόσει ένας μηχανικός σε θέματα θερμότητας, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στον ηλεκτρομαγνητισμό, στην ακουστική των χώρων, στη ρευστομηχανική, στη μεταφορά θερμότητας, στον ηλεκτρομαγνητισμό, στην αεροδυναμική (βιομηχανία των αεροπλάνων), σε γεωτεχνικές εφαρμογές, σε πισίνες, σε δεξαμενές, σε μεταλλικές κατασκευές και άλλα πολλά, αν και η αρχική της εφαρμογή περιοριζόταν σε στατική ανάλυση και επίλυση φορέων. Παραδείγματα φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 3.1. Θερμοδυναμική



Σχήμα 3.2. Γεωμετρικό προσομοίωμα ενός τυπικού σταθμού του Μετρό στην Αθήνα. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βρίσκει εφαρμογή σε κάθε είδος κατασκευής



Σχήμα 3.3. Προσομοίωση ευρέος φάσματος συμπεριφορών εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, η θεώρηση ότι ο φορέας αποτελείται από άπειρα διακριτά υποσύνολα, τα οποία και εφάπτονται μεταξύ τους χωρίς κενά και συνδέονται με τους κόμβους που βρίσκονται στα σύνορα των στοιχείων. Ξεκινώντας από ένα πολύπλοκο γεωμετρικά πεδίο λοιπόν, το χωρίζουμε σε πολλά επιμέρους κομμάτια, ώστε να δημιουργήσουμε ένα πλήθος απλών γεωμετρικά υποπεδίων, τα οποία και ονομάζουμε πεπερασμένα στοιχεία.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βρίσκει πολλές εφαρμογές στη σύγχρονη επιστήμη. Η ευκολία που έχει επιφέρει είναι ότι πολλά δύσκολα προβλήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες, πλήθος δυνάμεων και ίσως διαφορετικά υλικά στην ίδια κατασκευή, πια εύκολα αντιμετωπίζονται με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών, με προγράμματα όπως το Abaqus στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία που λειτουργεί με τη μέθοδο αυτή. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι πρόκειται για μια ειδική περίπτωση των μεθόδων Rayleigh – Ritz.

Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καταλήγουμε σε σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, όπου το πλήθος των εξισώσεων ισούται με το πλήθος των μεταβλητών. Το μόνο που μένει λοιπόν είναι να λυθεί το σύστημα με τις μεταβλητές. Σε αυτό το στάδιο είναι που κρίνεται απαραίτητη η χρήση προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή που θα λύσει αυτό το σύστημα μεταβλητών πολύ γρήγορα.

Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ λοιπόν, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι δημοφιλής, δυνατή και χρησιμοποιείται στις κατασκευές και μελέτες αεροσκαφών, πλοίων, αυτοκινήτων, παντός είδους μηχανημάτων, γεφυρών, σηράγγων, πολυκατοικιών, θεμελιώσεων, οδοστρωμάτων και άλλων εφαρμογών.

Τα πεπερασμένα στοιχεία εισάγουν την νέα τεχνολογία και την επανάσταση στην

επιστήμη και στην βιομηχανία, και για αυτό τον λόγο διδάσκονται ως βασικό μάθημα σε όλα τα Ανώτατα ιδρύματα, των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, της Ευρώπης και της Ελλάδας.

Επίσης όλα τα Ανώτατα ιδρύματα, τα ερευνητικά κέντρα, οι βιομηχανίες, οι τεχνικές εταιρείες και οι μελετητές μηχανικοί, χρησιμοποιούν εμπορικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων για την λύση των προβλημάτων, όπως και για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το ευρέως διαδεδομένο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το Abaqus v. 6.8.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία εξέλιξη των μητρωικών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων λοιπόν, απαιτούνται τα εξής στάδια:

1. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.

2. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται pre processor.

3. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται solver και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.

4. Όταν τελειώσει η επίλυση, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται post processor, για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

Κατηγορίες Πεπερασμένων Στοιχείων

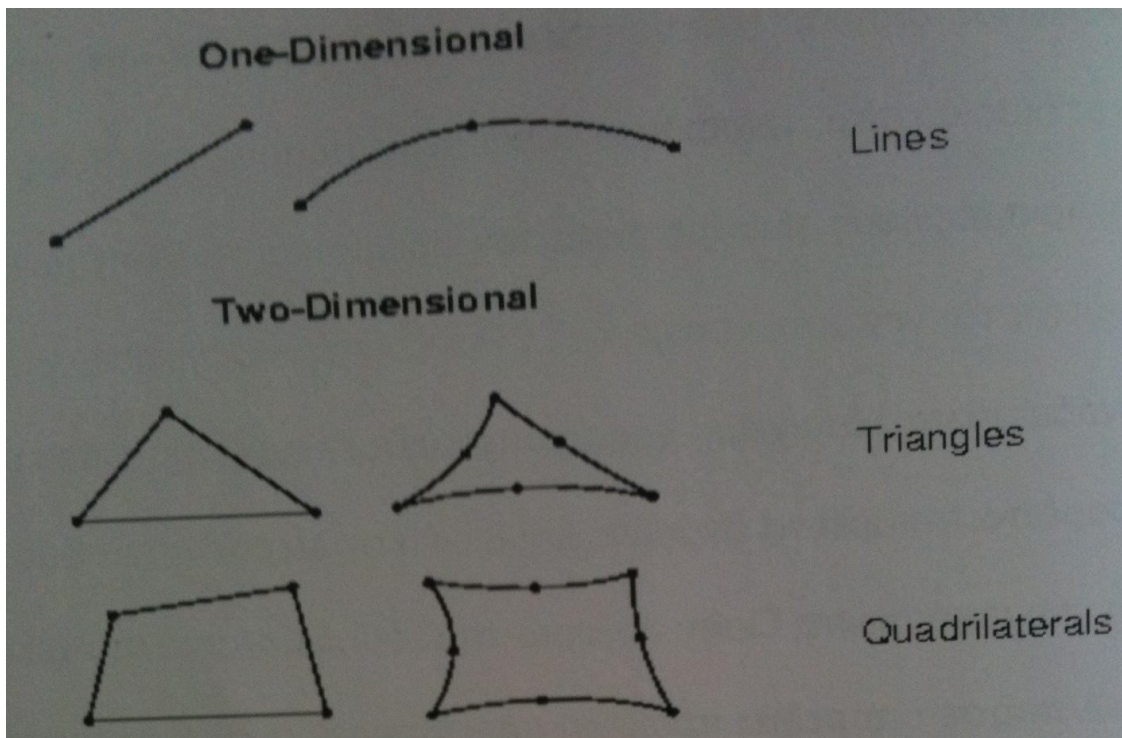
Το πιο σημαντικό ίσως βήμα όταν χρησιμοποιούμε τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι η υποδιαίρεση σε τμήματα του φορέα που προσομοιώνεται. Είναι και το πιο κρίσιμο βήμα σίγουρα, καθώς ο αριθμός των υποφορέων, τα σημεία στα οποία γίνονται οι διαιρέσεις του φορέα, όλα γίνονται με σκοπό η προσομοίωση να προσεγγίζει την πραγματικότητα όσο το δυνατό σε μεγαλύτερο βαθμό. Για μια επιτυχή προσομοίωση λοιπόν, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον αριθμό και στα σχήματα των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν.

Τα πεπερασμένα στοιχεία κατατάσσονται με δύο τρόπους: Ο ένας στηρίζεται στη θέση και στον αριθμό των κόμβων των πεπερασμένων στοιχείων. Ο δεύτερος τα κατατάσσει ανάλογα με τον αριθμό των διαστάσεών του και τα διαχωρίζει σε αξονοσυμμετρικά, μονοδιάστατα, δισδιάστατα και τρισδιάστατα.

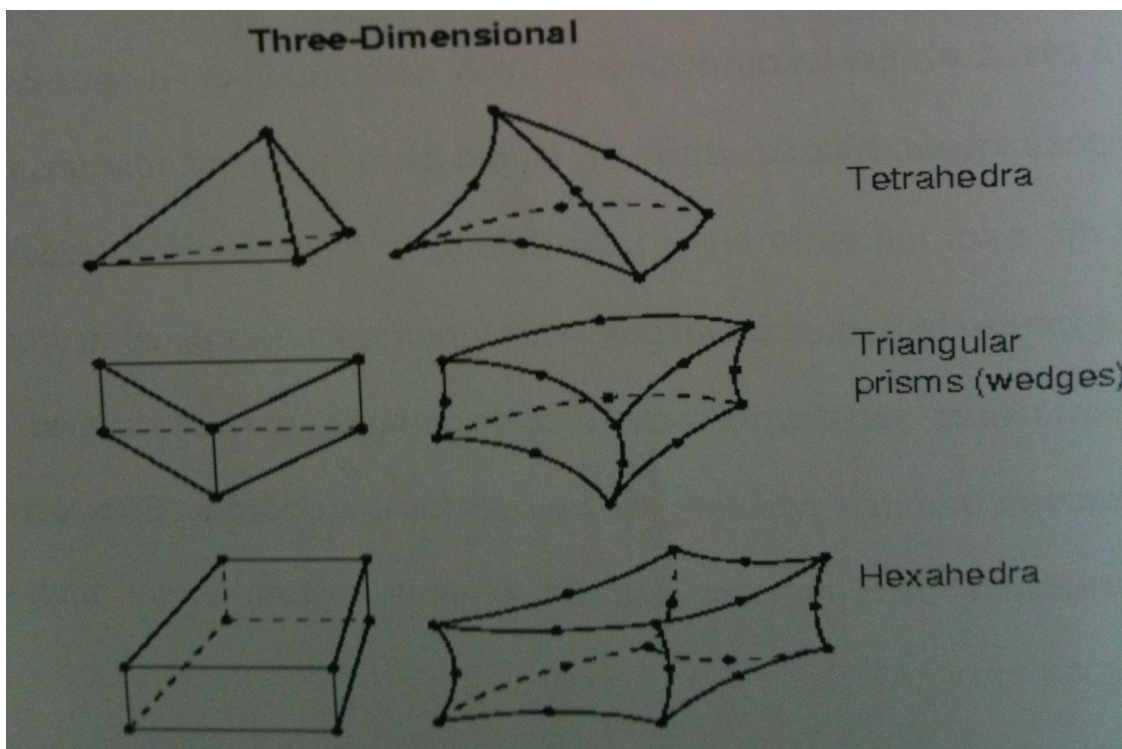
Τα μονοδιάστατα στοιχεία, (μια διάσταση) βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην ανάλυση ραβδωτών φορέων. Όταν έχουμε να αντιμετωπίσουμε επίπεδα προβλήματα, τότε έχουμε να κάνουμε με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Μπορεί να είναι ορθογωνικά ή και τριγωνικά. Από τα δισδιάστατα στοιχεία προκύπτουν εύκολα και τα τρισδιάστατα, προσθέτοντας τη συντεταγμένη z. Τελειώνοντας με τα αξονοσυμμετρικά, πρόκειται για στοιχεία που τα εφαρμόζουμε όταν έχουμε να αναλύσουμε αξονοσυμμετρικούς φορείς. Στερεοί δακτύλιοι σταθερής διατομής, με κόμβους – περιφέρειες κύκλου.

Μία ακόμα διάκριση των πεπερασμένων στοιχείων που δεν αναφέρθηκε, είναι αυτή των ισοπαραμετρικών στοιχείων. Βρίσκουν εφαρμογή σε μη ορθογωνικά στοιχεία, με καμπυλόγραμμες πλευρές.

Τύποι – κατηγορίες πεπερασμένων στοιχείων στις εικόνες που ακολουθούν:



Εικόνα 3.4. Μονοδιάστατα και δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία



Εικόνα 3.5. Τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία

Στάδια Προσομοίωσης

Όταν αναλύεται μία κατασκευή χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, υπάρχει μια συγκεκριμένη διαδικασία όπως και προκαθορισμένα στάδια – βήματα που ακολουθείται. Το πρώτο στάδιο είναι η μετάβαση από το αρχικό πρόβλημα, δηλαδή τον υπό μελέτη φορέα/κατασκευή, στο μαθηματικό προσομοίωμα που θα χρησιμοποιηθεί στον υπολογιστή (στη συγκεκριμένη περίπτωση στο πρόγραμμα Abaqus 6.8).

Σε αυτό το στάδιο, το οποίο και χαρακτηρίζεται πολύ κρίσιμο καθώς η προσέγγιση του προβλήματος πρέπει να είναι πολύ προσεκτική ούτως ώστε να δώσει στον χρήστη σωστά αποτελέσματα, παίρνει μορφή η κατασκευή, γεωμετρικά και δομικά.

«Βαφτίζονται» τα υλικά της κατασκευής, ορίζουμε τις ιδιότητές των υλικών των μελών της κατασκευής, επισημαίνοντας και την ελαστική και πλαστική συμπεριφορά που θα έχουν αυτά κατά τη φόρτιση της κατασκευής. Τέλος, δίνονται οι συνοριακές συνθήκες, καθορίζονται οι στηρίξεις της κατασκευής και τοποθετούνται τα φορτία που την επιβαρύνουν.

Δύο είναι οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μαθηματικό προσομοίωμα. Η συνθήκη ισορροπίας σε κάθε στοιχειώδες στερεό του φορέα, καθώς και η συνθήκη του συμβιβαστού μετατοπίσεων. Η συνθήκη ισορροπίας σε κάθε στοιχειώδες στερεό του φορέα είναι κάτι που εξασφαλίζεται και στην κατασκευή.

Η συνέχεια των μετατοπίσεων όμως στη διεπιφάνεια των στοιχείων υποδηλώνει πως δεν πρέπει να υπάρχουν κενά μεταξύ των παραμορφωμένων στοιχείων, εφόσον ο φορέας έχει φορτιστεί, κατά τη διάρκεια της συρραφής των στοιχείων στους κόμβους.

Ενώ στο μαθηματικό προσομοίωμα δεχόμαστε τη συνέχεια των μετατοπίσεων, στις κατασκευές αυτό δε συμβαίνει πάντα. Έτσι τα στοιχεία

χωρίζονται σε σύμμορφα και σε μη σύμμορφα, όταν αυτά ικανοποιούν τις απαιτήσεις του συμβιβαστού των μετατοπίσεων και όταν δεν τις καλύπτουν αντίστοιχα. Τα σύμμορφα στοιχεία, για να είμαστε σε θέση να τα χρησιμοποιήσουμε χωρίς να κινδυνεύουμε να καταλήξουμε σε επισφαλή αποτελέσματα, πρέπει να έχουν την ικανότητα, οι ασυνέχειες των μετατοπίσεών τους στις διεπιφάνειες των στοιχείων αυτών να τείνουν να απαλυνθούν με την πύκνωση του δικτύου.

Η συνθήκη του συμβιβαστού των μετατοπίσεων πάντως, δε δύναται να ικανοποιείται πάντα. Παρ' όλα αυτά, δεν είναι απαραίτητο αυτό να οδηγήσει τον χρήστη σε μη ικανοποιητικά αποτελέσματα. Δεν συνίσταται λοιπόν να μη χρησιμοποιούνται τα μη σύμμορφα στοιχεία, και ας μην ικανοποιούν πάντα τη συνθήκη του συμβιβαστού των μετατοπίσεων. Κρίνεται όμως απαραίτητος ο έλεγχος συρραφής, ούτως ώστε να είμαστε σίγουροι για την αξιοπιστία του μη σύμμορφου στοιχείου. Εφόσον ικανοποιείται το κριτήριο της συρραφής, το μη σύμμορφο στοιχείο θα ικανοποιεί και τις απαιτήσεις σύγκλισης.

Από το μαθηματικό προσομοίωμα θα πρέπει ο χρήστης να περάσει στο προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο είναι και το επόμενο στάδιο. Είναι ίσως το πιο σημαντικό στάδιο, αφού κατά το στάδιο αυτό επιλέγουμε τα πεπερασμένα στοιχεία που θα μας αποδώσουν την καλύτερη δυνατή προσομοίωση των μελών του φορέα. Αυτό πρέπει φυσικά να γίνει για όλα τα μέλη του φορέα. Στη συνέχεια υπολογίζονται μητρώα στιβαρότητας. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι στο προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων, δεν ικανοποιούνται οι δύο συνθήκες: της ισορροπίας σε κάθε στοιχειώδες στερεό στοιχείο του φορέα και του συμβιβαστού των μετατοπίσεων.

Το τρίτο στάδιο, είναι και το τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης. Σε αυτό το τελικό στάδιο, λαμβάνει χώρα η μετάβαση από το προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων στο υπολογιστικό προσομοίωμα. Σε αυτό το τελικό στάδιο λοιπόν, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής αναλαμβάνει να επεξεργαστεί αριθμητικά το προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων που του έχουμε δώσει. Στη συνέχεια, υπολογίζονται και το καθολικό διάνυσμα των ισοδύναμων δράσεων καθώς και το καθολικό μητρώο στιβαρότητας, που προέκυψε από το

προηγούμενο στάδιο της προσομοίωσης. Τελειώνοντας, υπολογίζονται οι τάσεις, τα εντατικά μεγέθη και επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας.

Ο κίνδυνος ο χρήστης να πέσει σε σφάλμα παραμονεύει σε κάθε στάδιο της προσομοίωσης. Το μέγεθος της επιρροής ενός σφάλματος ως προς τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης, εξαρτάται από το πόσο σοβαρό είναι το συγκεκριμένο σφάλμα. Έτσι λοιπόν, τα σφάλματα διακρίνονται σε:

- 1) Αριθμητικά σφάλματα, τα οποία έχουν να κάνουν με το πόσο ακριβείς είναι οι υπολογισμοί που κάνει ο ηλεκτρονικός υπολογιστής στο προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και στην επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας.
- 2) Σφάλματα προσομοίωσης, τα οποία εξαρτώνται από το βαθμό πιστότητας του φορέα προς την κατασκευή
- 3) Σφάλματα διακριτοποίησης, τα οποία σχετίζονται με την πυκνότητα του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων αλλά και με τον τύπο του δικτύου.

Έλεγχος αποτελεσμάτων

Το πλέον κρίσιμο βήμα στην προσομοίωση μιας κατασκευής από πεπερασμένα στοιχεία, είναι να επιλεγθεί σωστά το πλήθος των στοιχείων, καθώς και ο κατάλληλος τύπος των στοιχείων. Για να γίνει αυτό σωστά, πρέπει να κατανοηθεί εις βάθος η δομή της συμπεριφοράς και η στατική της εικόνα. Στοιχεία με μεγάλο μέγεθος (από μόνα τους τα πεπερασμένα στοιχεία, στη θεωρία, θεωρούνται στοιχεία πολύ μικρά σε μέγεθος) ή με κακή γεωμετρία είναι δύο σοβαρά λάθη που πρέπει να αποφύγει ο χρήστης.

Ο λόγος είναι ότι στοιχεία με μεγάλο μέγεθος ή κακή γεωμετρία, δεν μπορούν να καταγράψουν απότομες μεταβολές των εντατικών μεγεθών στη κατασκευή. Επίσης, και η άσκοπη πύκνωση του δικτύου θα πρέπει να αποφεύγεται. Ούτε το μεγάλο μέγεθος λοιπόν είναι προτιμητέο, καθώς οδηγεί σε λάθος αποτελέσματα, αλλά και το αντίθετο, ο διαχωρισμός πολύ μικρών σε μέγεθος στοιχείων, έχει ως

αποτέλεσμα να καθυστερεί ο ηλεκτρονικός υπολογιστής πολύ περισσότερο να επεξεργαστεί τα δεδομένα, χωρίς όμως παράλληλα η πύκνωση του δικτύου να προσφέρει στον χρήστη πιο ακριβή αποτελέσματα.

Είναι λοιπόν προφανές, ότι είναι πολύ πιθανό να προκύψουν λάθη κατά την προσομοίωση της κατασκευής. Επομένως, ο έλεγχος των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση του ηλεκτρονικού υπολογιστή κρίνεται αναγκαίος.

Πρώτα γίνεται ο έλεγχος στις μετατοπίσεις, δηλαδή η σύγκριση της παραμόρφωσης του φορέα σε σχέση με την μετατόπιση που αναμένεται να εμφανιστεί με τη φόρτιση αυτή. Αν αυτή η σύγκριση οδηγήσει σε δύο αποτελέσματα που διαφέρουν πολύ μεταξύ τους, αυτομάτως αυτό σημαίνει ότι έχει γίνει σημαντικό λάθος στην προσομοίωση (σφάλμα).

Ο επόμενος έλεγχος είναι στην κατανομή των τάσεων του φορέα. Ως πρώτη εκτίμηση, που γίνεται αμέσως αντιληπτή, είναι μία τυχούσα σημαντική ασυνέχεια στην κατανομή των τάσεων μεταξύ των στοιχείων. Αυτό δείχνει πρόβλημα στο δίκτυο.

Θα έπρεπε να τονιστεί ότι η σκέψη ότι έχει οδηγηθεί το μοντέλο σε σφάλμα, προκύπτει από την σημαντική ασυνέχεια στην κατανομή των τάσεων και όχι λόγω μικρών ασυνεχειών, οι οποίες είναι αναμενόμενες και απολύτως φυσιολογικές κατά μήκος των διεπιφανειών των στοιχείων, όπως είναι και η έλλειψη ισορροπίας των τάσεων στους κοινούς κόμβους είναι επίσης κάτι αναμενόμενο και θεμιτό. Αυτές οι ασυνέχειες όμως είναι μικρές, όταν το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων είναι σωστά δομημένο και με κατάλληλο τύπο.

Κάτι που επίσης αναμένεται να συναντήσει ο χρήστης, είναι η έλλειψη ισορροπίας στο εσωτερικό των στοιχείων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας μεταξύ των στοιχείων ικανοποιούνται προσεγγιστικά, και όχι με απόλυτη ακρίβεια. Το ζητούμενο λοιπόν, για να προσεγγίσει ο χρήστης με μεγάλη ακρίβεια τη λύση του προσομοιώματος, είναι να ικανοποιείται οριακά η συνθήκη ισορροπίας των τάσεων εντός των στοιχείων.

Γενική παρατήρηση λοιπόν, ότι με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, εφόσον αυτή εφαρμοστεί ιδανικά, προσεγγίζει με τα αποτελέσματά της τα

πραγματικά αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια που κρίνεται ικανοποιητική για να χρησιμοποιηθεί ακόμα και για θεωρητική χρήση. Η λέξη κλειδί όμως, πάντα, είναι η προσέγγιση.

Μέθοδοι επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Γενικά, το FEM είναι η μέθοδος επιλογής σε όλους τους τύπους αναλύσεων στους δομικούς μηχανικούς για πεπερασμένα στοιχεία, (δηλαδή επίλυση για την παραμόρφωση και τις πιέσεις στους στερεούς οργανισμούς ή δυναμική των δομών) ενώ η υπολογιστική ρευστή δυναμική (CFD) τείνει να χρησιμοποιήσει FDM ή άλλες μεθόδους (π.χ., πεπερασμένη μέθοδος όγκου).

Τα προβλήματα CFD απαιτούν συνήθως discretization του προβλήματος σε έναν μεγάλο αριθμό κυττάρων / gridpoints (εκατομμύρια και περισσότεροι), επομένως κόστος της απλούστερης, χαμηλότερης προσέγγισης διαταγής ευνοιών λύσης μέσα σε κάθε κύτταρο. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα προβλήματα «εξωτερικής ροής», όπως τη ροή αέρα γύρω από το αυτοκίνητο ή το αεροπλάνο, ή την καιρική προσομοίωση σε μια μεγάλη περιοχή.

Υπάρχουν πολλά πεπερασμένα πακέτα λογισμικού στοιχείων, άλλα παρέχονται δωρεάν, ενώ άλλα πιο χρήσιμα και πολύπλοκα, με πολλές εφαρμογές και πραγματικά πολύτιμα, διατίθενται στην αγορά σε αρκετά υψηλές τιμές. Μερικά παραδείγματα του λογισμικού FEM διαθέσιμα στην αγορά είναι τα εξής:

- * ANSA: Ελληνικό λογισμικό
- * ABAQUS: Αμερικανικό λογισμικό
- * CosmosWorks: Franco-αμερικανικό λογισμικό από SolidWorks, τα οποία ανήκουν σε Ντασώ CosmosWorks
- * NISA: Ινδικό λογισμικό NISA
- * ANSYS: Αμερικανικό λογισμικό

- * CAST3M: Γαλλικό λογισμικό CASTEM
- * SYSTUS: Γαλλικό λογισμικό
- * SYSWELD: Γαλλικό λογισμικό
- * Αστέρας κώδικα: Γαλλικό λογισμικό Αστέρας
- * Nastran: Αμερικανικό λογισμικό
- * PERMAS: Γερμανικό λογισμικό PERMAS
- * SAMCEF: Βελγικό λογισμικό SAMCEF
- * Morfeo: Βελγικό λογισμικό Morfeo
- * JMAG: Ιαπωνικό λογισμικό
- * freeFEM: ένα gPL-χορηγημένο άδεια λογισμικό freefem.org
- * CalculiX: Το ανοικτός-πηγή-FEM, χρησιμοποιεί μερικώς έναν συμβατό ABAQUS σχήμα αρχείων
- * Actran: Βελγικό λογισμικό (ακουστικό)

Μερικά παραδείγματα του ρητού λογισμικού:

- * ABAQUS: Αμερικανικό λογισμικό
- * EuroPlexus: Γαλλικό λογισμικό EuroPlexus
- * LS DYNA: Αμερικανικό λογισμικό
- * PAM: Γαλλικό λογισμικό PAM
- * Radioss: Γαλλικό λογισμικό

Επίσης χρήσιμα μπορούν να φανούν και τα ακόλουθα:

- * Μέθοδος στοιχείων ορίου
- * Ιδιαίτερη μέθοδος στοιχείων
- * Ηλεκτρομαγνητική διαμόρφωση
- * Πεπερασμένη ανάλυση στοιχείων
- * Πεπερασμένη μηχανή στοιχείων
- * Πεπερασμένη μέθοδος στοιχείων στους δομικούς μηχανικούς
- * Galerkin μέθοδος

- * Μέθοδοι Meshfree
- * Multiphysics
- * Δοκιμή μπαλωμάτων
- * Μέθοδος rayleigh-Ritz
- * Φασματική μέθοδος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Περιγραφή προγράμματος Abaqus v.6.8

Το Abaqus (η έκδοση του προγράμματος αυτού που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία είναι η 6.8), είναι ένα γενικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των τάσεων σε κατασκευές, αλλά και των θερμοκρασιακών πεδίων. Η ονομασία του προέρχεται από την ελληνική λέξη «abacus», δηλαδή άβαξ. Είναι μία ακολουθία από ισχυρά προγράμματα προσομοίωσης εφαρμοσμένης μηχανικής, η οποία μπορεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων να επιλύσει προβλήματα που κυμαίνονται από τις σχετικά πολύ απλές γραμμικές αναλύσεις, ως τις πιο απαιτητικές μη γραμμικές προσομοιώσεις.

Το Abaqus χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για την ολοκλήρωση και τον υπολογισμό ποσοτήτων (τάσεις, παραμορφώσεις, μετακινήσεις, κ.λ.π.) σε οποιοδήποτε σημείο του όγκου κάθε στοιχείου. Το πρόγραμμα εκτιμά την αντίδραση του υλικού σε κάθε σημείο της ολοκλήρωσης κάθε στοιχείου. Όταν χρησιμοποιούνται solid elements, υπάρχει η επιλογή πλήρους ή μειωμένης ολοκλήρωσης. Αυτή η δυνατότητα ενδέχεται να είναι μία απόφαση που θα πάρει ο χρήστης, η οποία μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ακρίβεια του στοιχείου για ένα συγκεκριμένο μοντέλο και πρόβλημα.

Το Abaqus περιέχει μία εκτενή βιβλιοθήκη στοιχείων, τα οποία μπορούν να διαμορφώσουν ουσιαστικά οποιαδήποτε γεωμετρία. Ακόμα όμως και για χρήστες οι οποίοι δεν είναι εξοικειωμένοι με τον σχεδιασμό μέσω του προγράμματος αυτού, υπάρχει η δυνατότητα σχεδιασμού των μοντέλων εκτός Abaqus (π.χ. με τη βοήθεια του Autocad) και η εισαγωγή τους στο πρόγραμμα κατόπιν σχεδιασμού.

Το Abaqus έχει έναν εξίσου εκτενή κατάλογο πρότυπων υλικών, τα οποία μπορούν να υποδυθούν τη συμπεριφορά των περισσότερων χαρακτηριστικών υλικών της εφαρμοσμένης μηχανικής, συμπεριλαμβανομένων των μετάλλων, – τα οποία και ενδιαφέρουν τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία – ελαστικών, πολυμερών, σύνθετων υλικών, οπλισμένου σκυροδέματος, συνθλίψιμους αφρούς, καθώς και γεωτεχνικών υλικών, όπως το έδαφος και ο βράχος.

Σχεδιασμένο ως εργαλείο προσομοίωσης γενικής χρήσης λοιπόν, το Abaqus μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μελετήσει προβλήματα σε πολλές διαφορετικές περιοχές, όπως η μεταφορά θερμότητας, η διάχυση μάζας, η θερμική διαχείριση των ηλεκτρικών τμημάτων, (ζεύγη θερμο – ηλεκτρικών αναλύσεων), η ακουστική, η εδαφομηχανική (ζεύγη αναλύσεων ρευστού – πίεσης πόρων) καθώς και πιεζομετρική ανάλυση.

Πεπερασμένα στοιχεία και άκαμπτα σώματα είναι αυτά που αποτελούν τα θεμελιώδη συστατικά ενός μοντέλου του Abaqus. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι παραμορφώσιμα, ενώ τα άκαμπτα σώματα μετακινούνται στον χώρο χωρίς να αλλάζει το σχήμα τους. Ακόμα κι αν οι χρήστες των προγραμμάτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (όχι απαραίτητα του Abaqus) έχουν μια γνώση γύρω από το αντικείμενο των πεπερασμένων στοιχείων, η γενική αρχή των άκαμπτων σωμάτων μέσα σε ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων πιθανόν να είναι κάτι καινούριο για αυτούς.

Οι βαθμοί ελευθερίας είναι οι θεμελιώδεις μεταβλητές, οι οποίες υπολογίζονται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Για μία προσομοίωση τάσης ή μετατόπισης, οι βαθμοί ελευθερίας είναι οι μετακινήσεις σε κάθε κόμβο. Μερικές οικογένειες στοιχείων, όπως οι οικογένειες διατομής δοκού και οι οικογένειες κελυφών, έχουν επιπλέον περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας. Για μία προσομοίωση μεταφοράς

θερμότητας, οι βαθμοί ελευθερίας είναι οι θερμοκρασίες σε κάθε κόμβο. Μία ανάλυση μεταφοράς θερμότητας, επομένως, απαιτεί τη χρήση διαφορετικών στοιχείων από μία ανάλυση τάσης, δεδομένου ότι οι βαθμοί ελευθερίας δεν είναι οι ίδιοι.

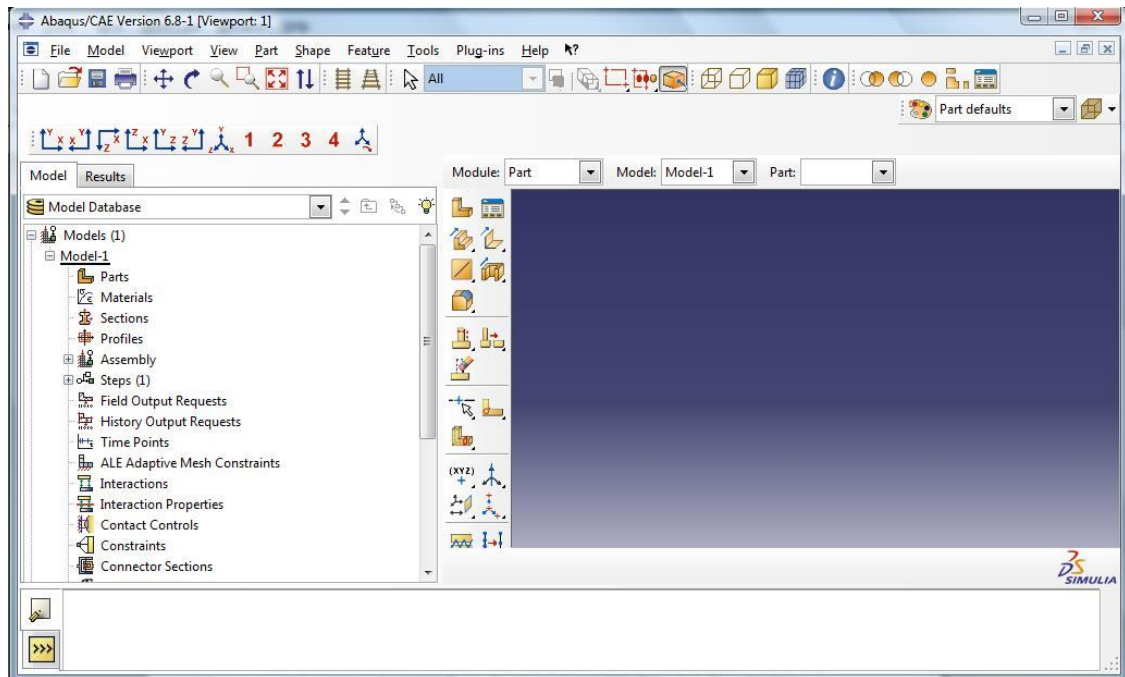
Στο Abaqus, ο χρήστης κλιμακώνει την «ιστορία» του μοντέλου, σε μία αλληλουχία βημάτων, τα οποία ονομάζονται steps. Κάθε τέτοιο βήμα (step), είναι μία περίοδος απόκρισης συγκεκριμένου τύπου, μίας στατικής φόρτισης, μίας δυναμικής απόκρισης κ.τ.λ. Ο προσδιορισμός του step, περιλαμβάνει τον τύπο της διαδικασίας (στατική ανάλυση τάσεων, ανάλυση μεταφοράς θερμότητας, κ.τ.λ.), παραμέτρους ελέγχου για χρονική ολοκλήρωση ή για μη – γραμμικά προβλήματα, φορτίσεις και ζητούμενα.

Ο χρήστης επιλέγει τι θα περιλαμβάνει το κάθε βήμα (step). Για παράδειγμα, ένα στατικό φορτίο είναι δυνατόν να εφαρμοστεί σε ένα βήμα, ή αν απαιτείται μεγαλύτερη λεπτομέρεια στα επίπεδα υψηλής φόρτισης, τότε η ίδια η ανάλυση είναι δυνατόν να διασπαστεί σε δύο βήματα (steps), ούτως ώστε να δίδεται βαρύτητα στις μεταβλητές που ενδιαφέρουν περισσότερο σε κάθε ένα από τα βήματα (steps).

Για υπολογιστική αποδοτικότητα, το Abaqus έχει μια γενική άκαμπτη ικανότητα σωμάτων. Οποιοδήποτε σώμα ή μέρος σώματος, μπορεί να οριστεί ως άκαμπτο σώμα. Οι περισσότεροι τύποι στοιχείων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε έναν ορισμό άκαμπτων σωμάτων. Το πλεονέκτημα των άκαμπτων σωμάτων, πέρα από τα παραμορφώσιμα σώματα, είναι ότι η κίνηση ενός άκαμπτου σώματος περιγράφεται πλήρως από λιγότερους από έξι βαθμούς ελευθερίας σε έναν κόμβο αναφοράς.

Αντίθετα, τα παραμορφώσιμα στοιχεία έχουν πολλούς βαθμούς ελευθερίας και απαιτούν πολύ ακριβείς υπολογισμούς στοιχείων για να προσδιορίσουν τις παραμορφώσεις. Όταν τέτοιες παραμορφώσεις είναι αμελητέες ή δεν ενδιαφέρουν τον μελετητή/χρήστη, η μοντελοποίηση ενός συστατικού ως άκαμπτο σώμα παράγει σημαντικό υπολογιστικό κέρδος, χωρίς να επηρεάζονται τα γενικά αποτελέσματα.

Το πρόγραμμα Abaqus CAE (6.8), το οποίο λειτουργεί σε περιβάλλον IRIX και πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο λογισμικό, παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα να είναι πιο πρακτικό και εύχρηστο το πρόγραμμα από ότι αν ο χρήστης προσπαθήσει να συντάξει ένα input file.



Σχήμα 4.1. Αρχική σελίδα του Abaqus/CAE.

Η ακόλουθη λίστα των modules που είναι διαθέσιμη μέσα στο ABAQUS/CAE, περιγράφει με συντομία τις πράξεις μοντελοποίησης που μπορούμε να εκτελέσουμε σε κάθε module. Η διάταξη των modules στη λίστα αντιστοιχεί στη σειρά με την οποία εμφανίζονται στην Module list της γραμμής περιεχομένων.

Part: Το Part module επιτρέπει στον χρήστη τη δημιουργία μεμονωμένων parts, σχεδιάζοντας τη γεωμετρία τους απευθείας στο ABAQUS /CAE ή εισάγοντας τη γεωμετρία τους από άλλα προγράμματα γεωμετρικής μοντελοποίησης. (όπως το Autocad)

Property: Ο ορισμός ενός section περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες ενός part ή μιας περιοχής ενός part, όπως ο καθορισμός του υλικού που συνδέεται με μια περιοχή και η γεωμετρία της διατομής. Στο Property

module, ο χρήστης δημιουργεί ορισμούς section και ορισμούς υλικών, τους οποίους αναθέτει σε περιοχές των parts .

Assembly: Όταν δημιουργείται ένα part , αυτό υφίσταται στο δικό του σύστημα συντεταγμένων, που είναι ανεξάρτητο από τα άλλα parts του μοντέλου. Το Assembly module χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των instances (ομοιώματα) των parts και για την τοποθέτηση των instances εξαρτημένων μεταξύ τους σε ένα γενικό σύστημα συντεταγμένων, δημιουργώντας επομένως ένα. Ένα μοντέλο του ABAQUS περιέχει μόνο ένα assembly.

Step: Ο χρήστης χρησιμοποιεί το Step module για τη δημιουργία και τον σχηματισμό των βημάτων ανάλυσης (analysis steps) και για τη σύνδεσή τους με ζητήματα/αποτελέσματα εξόδου (output requests). Η διαδοχή των steps εξασφαλίζει έναν εύκολο τρόπο για να ληφθούν οι αλλαγές σε ένα μοντέλο (όπως οι αλλαγές των φορτίσεων ή των συνοριακών συνθηκών). Τα ζητήματα εξόδου (output requests) μπορούν να ποικίλλουν ως κρίνεται απαραίτητο μεταξύ των steps.

Interaction: Στο Interaction module καθορίζονται οι μηχανικές και θερμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των περιοχών ενός μοντέλου και του περιβάλλοντός του. Ένα παράδειγμα μιας αλληλεπίδρασης είναι η επαφή μεταξύ δύο επιφανειών. Άλλες αλληλεπιδράσεις που μπορούν να οριστούν περιλαμβάνουν περιορισμούς, όπως περιορισμούς δεσμών, εξίσωσης και άκαμπτων σωμάτων. Το ABAQUS CAE δεν αναγνωρίζει μηχανικές επαφές ανάμεσα σε part instances ή σε περιοχές ενός assembly , εκτός αν η επαφή έχει προσδιοριστεί στο Interaction module. Η απόλυτη φυσική εγγύτητα δύο επιφανειών σε ένα assembly δεν είναι επαρκής για να δείξει οποιοδήποτε είδος αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιφανειών. Οι αλληλεπιδράσεις (Interactions) είναι αντικείμενα εξαρτώμενα από τα βήματα (step-dependent objects), το οποίο σημαίνει ότι πρέπει να καθορίζουμε τα βήματα της ανάλυσης στα οποία είναι ενεργά.

Load: Το Load module επιτρέπει στον χρήστη να προσδιορίζει φορτία, συνοριακές συνθήκες και πεδία (loads, boundary conditions, fields). Τα φορτία και οι συνοριακές συνθήκες είναι αντικείμενα εξαρτώμενα από τα βήματα (step-dependent objects), το οποίο σημαίνει ότι πρέπει να προσδιοριστούν τα βήματα

της ανάλυσης στα οποία είναι ενεργά. Κάποια πεδία είναι εξαρτώμενα από τα βήματα, ενώ άλλα εφαρμόζονται μόνο στο ξεκίνημα της ανάλυσης.

Mesh: Το Mesh module περιέχει εργαλεία που επιτρέπουν στον χρήστη να παράγει ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων σε ένα assembly που δημιουργήθηκε μέσα στο ABAQUS/CAE. Διάφορα επίπεδα αυτοματισμού και ελέγχου είναι διαθέσιμα, ώστε να μπορεί ο χρήστης να δημιουργήσει ένα πλέγμα που ικανοποιεί τις ανάγκες της επιθυμητής ανάλυσης.

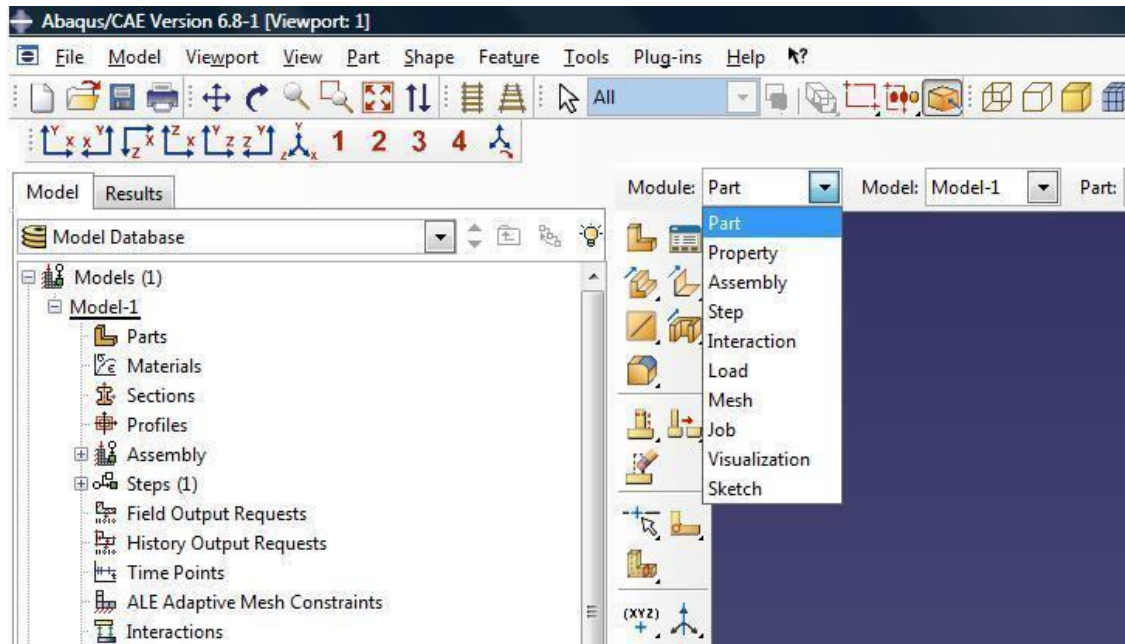
Job: Από τη στιγμή που έχουν ολοκληρωθεί όλα τα καθήκοντα που συνδέονται με τον ορισμό ενός μοντέλου, χρησιμοποιείται το Job module για την ανάλυση του μοντέλου. Το Job module επιτρέπει στον χρήστη να υποβάλλει μια εργασία για ανάλυση και να παρακολουθήσει την πρόοδό της. Πολλαπλά μοντέλα και «τρεξίματα» μπορούν να υποβληθούν και να παρακολουθηθούν ταυτόχρονα.

Visualization: Το Visualization module εξασφαλίζει γραφική απεικόνιση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και των αποτελεσμάτων. Παρέχει πληροφορίες του μοντέλου και των αποτελεσμάτων από την βάση δεδομένων εξόδου (output database). Μπορούν να ελεγχθούν ποιες πληροφορίες θα γράφονται στη βάση δεδομένων εξόδου, τροποποιώντας τα ζητήματα εξόδου (output requests) στο Step module.

Sketch: Τα σκαριφήματα (Sketches) είναι δισδιάστατα προφίλ που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση της γεωμετρίας, καθώς ο χρήστης ορίζει ένα native part στο ABAQUS/CAE. Χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί ένα σκαρίφημα (sketch) το οποίο ορίζει ένα επίπεδο part, μια δοκό, ή ένα partition ή για να δημιουργήσουμε ένα σκαρίφημα, το οποίο μπορεί να προεκταθεί (extrude) , να κινηθεί κυκλικά (sweep) ή να περιστραφεί (revolve) για να διαμορφωθεί ένα τρισδιάστατο part.

Τα περιεχόμενα του κύριου παραθύρου αλλάζουν καθώς κινούμαστε μεταξύ των modules. Επιλέγοντας ένα module από τη λίστα Module list της γραμμής περιεχομένων, η γραμμή περιεχομένων, η εργαλειοθήκη του module, και η γραμμή μενού αλλάζουν, ώστε να απεικονίζουν τις λειτουργίες του τρέχοντος module.

Παρακάτω παρατίθεται εικόνα με τα modules, όπως φαίνονται αυτά όταν ανοιχτεί το πρόγραμμα Abaqus/CAE, v. 6.8.



Σχήμα 4.2. Τα modules στο Abaqus 6.8.

Μπορεί επίσης να δημιουργηθούν γραμμικοί - πολλαπλών σημείων περιορισμοί εξίσωσης, μεταξύ σημείων, στο Interaction module. Ο χρήστης πρώτα θα δημιουργήσει έναν απλό περιορισμό εξίσωσης πάνω στις μετακινήσεις των άκρων του συνδέσμου, στην 3 - διάσταση. Η εξίσωση του περιορισμού έχει τη μορφή $A+B=0$, όπου A είναι η μετακίνηση της άνω αριστερής γωνίας του συνδέσμου και όπου B είναι η μετακίνηση της κάτω δεξιά γωνίας του συνδέσμου. Για να δημιουργηθεί αυτός ο περιορισμός από τον χρήστη, θα πρέπει να δημιουργήσει ένα γεωμετρικό σύνολο για κάθε σημείο που πρόκειται να περιστραφεί.

Προσδιορισμός του path

Ένα path είναι μια γραμμή που ορίζει ο χρήστης, προσδιορίζοντας μια σειρά σημείων μέσα στο μοντέλο. Τα σημεία αυτά μπορεί να είναι κόμβοι ή θέσεις

συντεταγμένων. Τα Paths μπορούν να διασχίσουν περισσότερα από ένα part instances. Το ABAQUS/CAE προσφέρει δύο ευδιάκριτους τύπους path:

1)Λίστα κόμβων (Node list)

Τα σημεία που αποτελούν το path, αποτελούνται μόνο από κομβικές θέσεις. Ο χρήστης προσδιορίζει τα σημεία χρησιμοποιώντας τις επιγραφές των κόμβων και το εύρος των επιγραφών των κόμβων. Η επιγραφή ενός κόμβου είναι ένας μόνιμος τρόπος αναφοράς σε έναν δεδομένο κόμβο. Αυτό σημαίνει ότι οι επιγραφές των κόμβων δεν αλλάζουν καθώς το μοντέλο παραμορφώνεται. Λόγω αυτού, οι επιγραφές των κόμβων που περιέχονται σε ένα path από κόμβους εφαρμόζονται εξίσου στο μη παραμορφωμένο ή στο παραμορφωμένο σχήμα. Ωστόσο, οι επιγραφές των κόμβων είναι συγκεκριμένες στα part instances. Με άλλα λόγια, ο χρήστης μπορεί να έχει την ίδια επιγραφή κόμβων για πολλαπλά part instances. Επομένως, ο χρήστης πρέπει να καθορίσει σε ποιο part instance αναφέρεται όταν χρησιμοποιεί επιγραφές κόμβων.

2)Λίστα σημείων (Point list)

Τα σημεία που αποτελούν το path, αποτελούνται από θέσεις συντεταγμένων μέσα στο μοντέλο. Αυτές οι θέσεις είτε συμπίπτουν είτε όχι με τις κομβικές θέσεις. Οι συντεταγμένες της λίστας σημείων παραμένουν σταθερές στον χώρο και είναι ανεξάρτητες από το μοντέλο. Παραδείγματος χάριν, οι συντεταγμένες που συμπίπτουν με μια κομβική θέση στο απαμορφωμένο σχήμα, μπορεί να μην συμπίπτουν με οποιαδήποτε θέση στο παραμορφωμένο σχήμα. Σύμφωνα με την ίδια λογική, οι συντεταγμένες της λίστας σημείων είναι ανεξάρτητες από συγκεκριμένα part instances. Το ABAQUS/CAE διαμορφώνει το path συνδέοντας τους κόμβους ή τα σημεία που καθορίζει ο χρήστης, στη σειρά με την οποία έχει δώσει.

Αφού ο χρήστης δημιουργήσει ένα path, μπορεί να επιλέξει Tools Path από το κύριο μενού, για να το τροποποιήσει, να το αντιγράψει, να το μετονομάσει, να το διαγράψει, ή να το σχεδιάσει. Η χάραξη του ίδιου του path είναι ένας τρόπος να ελεγχθεί οπτικά ότι ο χρήστης έχει την προοριζόμενη γραμμή. Για να φανούν τα αποτελέσματα κατά μήκος του path, πρέπει ο χρήστης να διαμορφώσει ζευγάρια X- Y δεδομένων (X-Y d a t a) και να παράγει ένα σχέδιο X-Y.

Η παρακάτω αριθμητική σύμβαση χρησιμοποιείται για τους βαθμούς ελευθερίας στο ABAQUS :

- 1) Μετακίνηση στη διεύθυνση 1 (Translation in direction 1)
- 2) Μετακίνηση στη διεύθυνση 2 (Translation in direction 2)
- 3) Μετακίνηση στη διεύθυνση 3 (Translation in direction 3)
- 4) Περιστροφή γύρω από τον άξονα-1 (Rotation about the 1-axis)
- 5) Περιστροφή γύρω από τον άξονα-2 (Rotation about the 2-axis)
- 6) Περιστροφή γύρω από τον άξονα-3 (Rotation about the 3-axis)
- 7) Στρέβλωση σε στοιχεία ανοικτής διατομής δοκού (Warping in open-section beam elements)
- 8) Ακουστική πίεση (acoustic pressure), πίεση πόρων (pore pressure), ή υδροστατική πίεση ρευστών (hydrostatic fluid pressure)
- 9) Ηλεκτρικό δυναμικό (Electric potential)
- 10) Θερμοκρασία (Temperature) - ή ομαλοποιημένη συγκέντρωση στην ανάλυση διάχυσης μάζας (or normalized concentration in mass diffusion analysis) για ομογενή στοιχεία ή θερμοκρασία στο πρώτο σημείο κατά το πάχος στοιχείων διατομής δοκού ή κελυφών (temperature at the first point through the thickness of beams and shells)
- 11) Θερμοκρασία σε άλλα σημεία κατά το πάχος στοιχείων διατομής δοκού ή κελυφών (Temperature at other points through the thickness of beams and shells).

Οι διευθύνσεις 1, 2, και 3 αντιστοιχούν στις διευθύνσεις 1-, 2-, και 3 - του γενικού συστήματος, αντίστοιχα, εκτός αν έχει οριστεί ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων στους κόμβους.

Τα αξονοσυμμετρικά στοιχεία είναι η εξαίρεση, με τους βαθμούς ελευθερίας μετατοπίσεων και περιστροφών να αναφέρονται ως εξής:

- 1) Μετακίνηση στη διεύθυνση r (Translation in the direction)
- 2) Μετακίνηση στη διεύθυνση z (Translation in the $-z$ direction)
- 3) Περιστροφή στο επίπεδο r - z (Rotation in the r - z plane)

Οι διευθύνσεις, ακτινική και αξονική, αντιστοιχούν στις διευθύνσεις 1- και 2- του γενικού συστήματος, αντίστοιχα, εκτός αν έχει οριστεί ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων στους κόμβους.

Number of nodes (Αριθμός των κόμβων) - order of interpolation (τάξη παρεμβολής)

Μετακινήσεις, στροφές, θερμοκρασίες και άλλοι βαθμοί ελευθερίας που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, υπολογίζονται μόνο στους κόμβους των στοιχείων. Σε οποιοδήποτε άλλο σημείο του στοιχείου, οι μετακινήσεις λαμβάνονται με παρεμβολή από τις κομβικές μετακινήσεις. Συνήθως, η τάξη της παρεμβολής ορίζεται με βάση τον αριθμό των κόμβων που υπάρχουν σε ένα στοιχείο.

Στοιχεία που έχουν κόμβους μόνο στις γωνίες τους, χρησιμοποιούν γραμμική παρεμβολή σε κάθε διεύθυνση και συχνά ονομάζονται γραμμικά στοιχεία (linear elements) ή στοιχεία πρώτης τάξης (first-order elements).

Τυπικά, ο αριθμός των κόμβων σε ένα στοιχείο είναι σαφώς προσδιορισμένος από το όνομά του στοιχείου. Η οικογένεια στοιχείων διατομής δοκού χρησιμοποιεί μια ελαφρώς διαφορετική σύμβαση: η τάξη της παρεμβολής

προσδιορίζεται στο όνομα. Συνεπώς, ένα πρώτης τάξης, τρισδιάστατο στοιχείο διατομής δοκού ονομάζεται B31, ενώ ένα δεύτερας τάξης, τρισδιάστατο στοιχείο διατομής δοκού ονομάζεται B32. Μια παρεμφερής σύμβαση χρησιμοποιείται για αξονοσυμμετρικά στοιχεία κελυφών και μεμβρανών.

Formulation (Τυποποίηση)

Η τυποποίηση ενός στοιχείου αναφέρεται στην μαθηματική θεωρία που χρησιμοποιήθηκε για να οριστεί η συμπεριφορά του στοιχείου. Ελλείψει ενός προσαρμόσιμου πλέγματος (adaptive meshing), όλα τα στοιχεία τάσης και μετατόπισης στο ABAQUS είναι βασισμένα στην κατά Lagrange ή υλική περιγραφή της συμπεριφοράς: το υλικό που συνδέεται με ένα στοιχείο παραμένει συνδεδεμένο με το στοιχείο σε όλη την ανάλυση, και επιπροσθέτως το υλικό δεν μπορεί να διαρεύσει πέρα από τα όρια των στοιχείων.

Στην εναλλακτική κατά Euler περιγραφή ή χωρική περιγραφή, τα στοιχεία καθορίζονται στον χώρο όπως το υλικό ρέει μέσω αυτών. Οι μέθοδοι κατά Euler χρησιμοποιούνται συνήθως στις προσομοιώσεις της ρευστομηχανικής. Το ABAQUS/Standard χρησιμοποιεί στοιχεία κατά Euler για να διαμορφώσει τη μεταφορά θερμότητας εκμεταγωγής. Ένα προσαρμόσιμο πλέγμα (adaptive meshing) στο ABAQUS/Explicit, συνδυάζει τα χαρακτηριστικά θεωρητικών αναλύσεων κατά Lagrange και κατά Euler και επιτρέπει την κίνηση του στοιχείου, ώστε να είναι ανεξάρτητη από το υλικό.

Για να προσαρμόσουμε διαφορετικούς τύπους συμπεριφοράς, μερικές οικογένειες στοιχείων στο ABAQUS περιλαμβάνουν στοιχεία με αρκετές διαφορετικές τυποποιήσεις. Παραδείγματος χάριν, η οικογένεια στοιχείων κελύφους έχει τρεις κατηγορίες: μια κατάλληλη για ανάλυση κελυφών γενικής χρήσης, άλλη για λεπτά κελύφη, και άλλη μια για κελύφη με μεγάλο πάχος.

Μερικές οικογένειες στοιχείων του ABAQUS / Standard έχουν μια πρότυπη τυποποίηση όπως κάποιες εναλλακτικές τυποποιήσεις. Στοιχεία με εναλλακτικές

τυποποιήσεις, αναγνωρίζονται από έναν επιπλέον χαρακτήρα στο τέλος του ονόματος των στοιχείων. Για παράδειγμα, οικογένειες στοιχείων ομογενών, διατομής δοκού και δικτυωτών στοιχείων, περιλαμβάνουν μέλη με μια υβριδική τυποποίηση, στην οποία η πίεση (ομογενή στοιχεία) ή αξονική δύναμη (στοιχεία διατομής δοκού και δικτυωμάτων) αντιμετωπίζεται ως πρόσθετη άγνωστη. Αυτά τα στοιχεία αναγνωρίζονται από το γράμμα "H" στο τέλος του ονόματος.

Μερικές τυποποιήσεις στοιχείων επιτρέπουν να επιλυθούν προβλήματα ζεύγους πεδίων. Παραδείγματος χάριν, στοιχεία των οποίων τα ονόματα αρχίζουν με το γράμμα C και τελειώνουν με το γράμμα T (και έχουν και μηχανικούς και θερμικούς βαθμούς ελευθερίας και προορίζονται για ζεύγη θερμικών και μηχανικών προσομοιώσεων).

Integration (Ολοκλήρωση)

Το ABAQUS χρησιμοποιεί αριθμητικές τεχνικές για να ολοκληρώσει διάφορες ποσότητες στον όγκο κάθε στοιχείου. Χρησιμοποιώντας τον τετραγωνισμό κατά Gauss (Gaussian quadrature) για τα περισσότερα στοιχεία, το ABAQUS αξιολογεί την υλική απόκριση σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης κάθε στοιχείου. Μερικά ομογενή στοιχεία (continuum elements) στο ABAQUS, μπορούν να χρησιμοποιήσουν ολική ή μειωμένη ολοκλήρωση (full or reduced-integration), μια επιλογή που μπορεί να έχει μια σημαντική επίδραση στην ακρίβεια του στοιχείου για ένα δεδομένο πρόβλημα.

Το ABAQUS χρησιμοποιεί το γράμμα "R" στο τέλος του ονόματος του στοιχείου για να διακρίνει τα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης (εκτός αν είναι επίσης υβριδικά στοιχεία, οπότε σε αυτή την περίπτωση το όνομα των στοιχείων τελειώνει με τα γράμματα " R H "). Το ABAQUS / Standard προσφέρει ταυτόχρονα στοιχεία πλήρους και μειωμένης ολοκλήρωσης. Το ABAQUS / Explicit παρέχει μόνο στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης με εξαίρεση τα

τροποποιημένα τετραεδρικά και τριγωνικά στοιχεία (the modified tetrahedron and triangle elements)

Σύγκλιση πλέγματος (Mesh convergence)

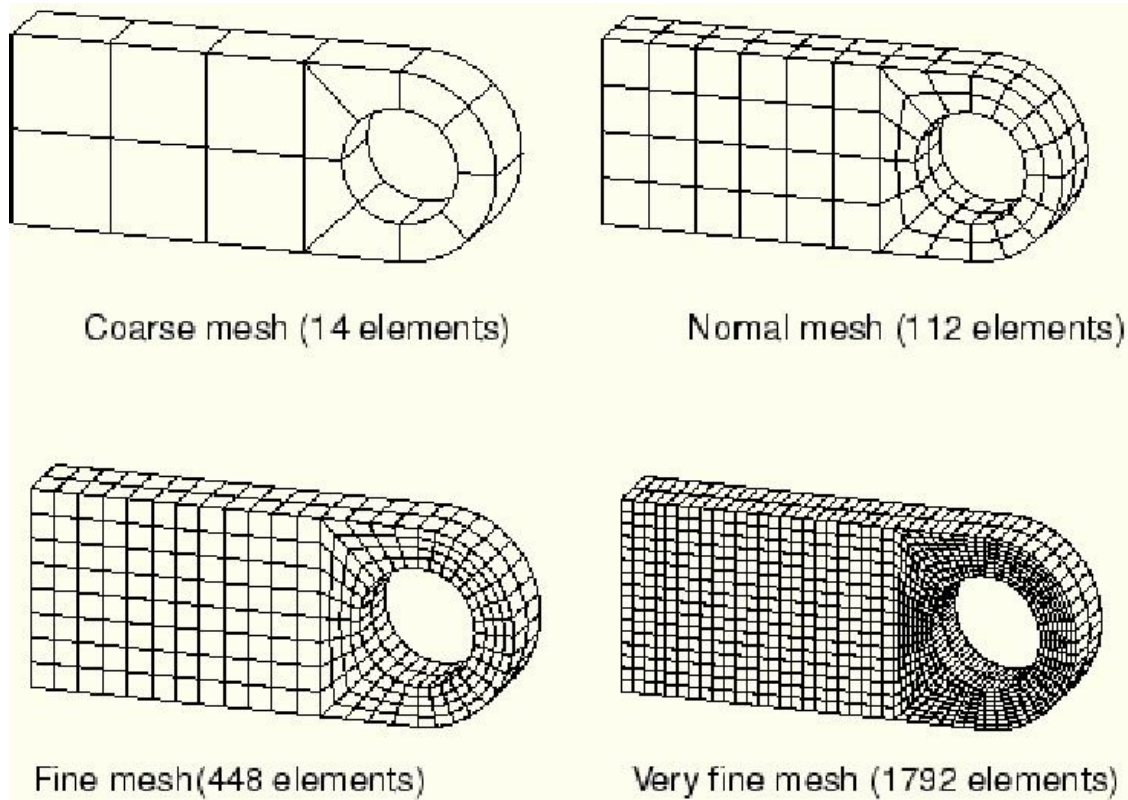
Είναι σημαντικό για τον χρήστη να χρησιμοποιεί ένα αρκετά πυκνό πλέγμα για να εξασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα από την προσομοίωση στο ABAQUS θα είναι ικανοποιητικά. Τα χονδροειδή πλέγματα μπορούν να παραγάγουν ανακριβή αποτελέσματα στις αναλύσεις χρησιμοποιώντας implicit ή explicit μεθόδους. Η αριθμητική λύση που παρέχεται από το εν λόγω μοντέλο, θα τείνει προς μια μοναδική τιμή καθώς αυξάνεται η πυκνότητα του πλέγματος.

Οι πόροι του συστήματος που απαιτούνται για να τρέξουν την προσομοίωση του χρήστη, αυξάνονται επίσης καθώς το πλέγμα πυκνώνεται. Έχει παρατηρηθεί πως, για να μπορέσει κάποιος να πει ότι το πλέγμα είναι ικανοποιητικά συγκλινόν, πρέπει κάποια ενδεχόμενη περαιτέρω πύκνωσή του να παράγει μια αμελητέα αλλαγή στη λύση.

Καθώς ο χρήστης αποκτά εμπειρία, μαθαίνει να κρίνει ποιο επίπεδο πύκνωσης παράγει ένα κατάλληλο πλέγμα για να δώσει τα αποδεκτά αποτελέσματα για τις περισσότερες προσομοιώσεις. Ωστόσο, θεωρείται ορθή πρακτική να διεξάγεται μια μελέτη σύγκλισης πλέγματος, κατά την οποία προσομοιώνεται το ίδιο πρόβλημα με ένα λεπτότερο πλέγμα και να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Ο χρήστης μπορεί να έχει την σιγουριά ότι το μοντέλο του παράγει μια ακριβή λύση από μαθηματική άποψη, εάν τα δύο πλέγματα δίνουν ουσιαστικά το ίδιο αποτέλεσμα (με ελάχιστη δηλαδή απόκλιση μεταξύ τους).

Η σύγκλιση πλέγματος είναι μια σημαντική θεώρηση τόσο στο Abaqus / Standard όσο και στο Abaqus / Explicit. Η συνδετήρια υποδοχή θα χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα μιας μελέτης πύκνωσης πλέγματος, με περαιτέρω ανάλυση της υποδοχής στο ABAQUS / Standard, χρησιμοποιώντας

τέσσερις διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος. Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε κάθε πλέγμα φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:

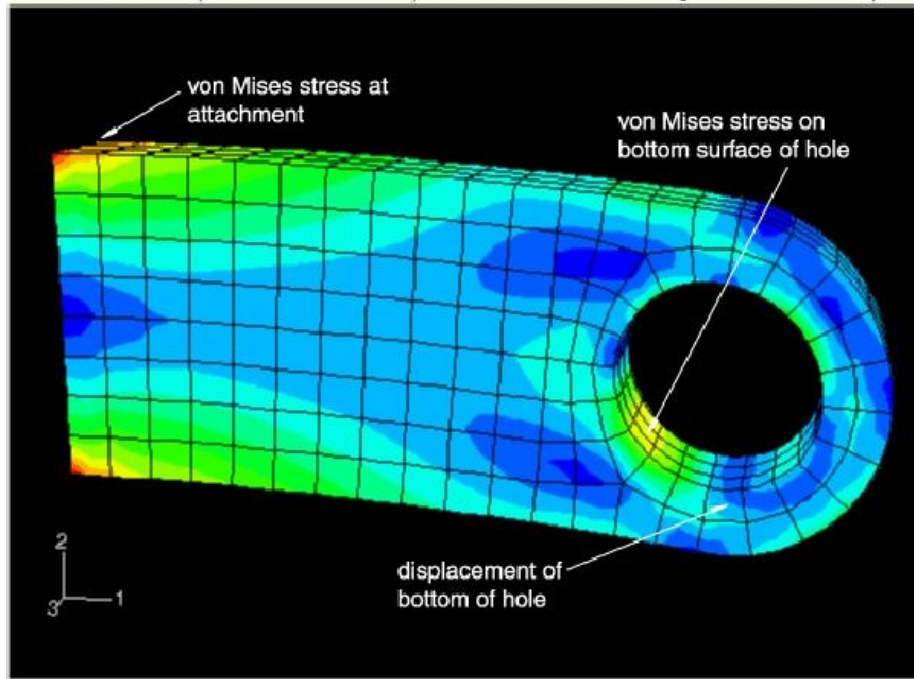


Σχήμα 4.3. Διαφορετικά πλέγματα για το πρόβλημα της υποδοχής του βλήτρου.

Ο χρήστης εξετάζει την επιρροή της πυκνότητας πλέγματος σε τρία συγκεκριμένα αποτελέσματα από αυτό το μοντέλο:

- 1) Στην μετατόπιση του κατώτατου σημείου της οπής.
- 2) Στην μέγιστη τάση Mises στην περιοχή συγκέντρωσης τάσεων στην κατώτατη επιφάνεια της τρύπας.
- 3) Στην μέγιστη τάση Mises όπου η υποδοχή συνδέεται με τη υπόλοιπη κατασκευή.

Οι θέσεις όπου συγκρίνονται τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



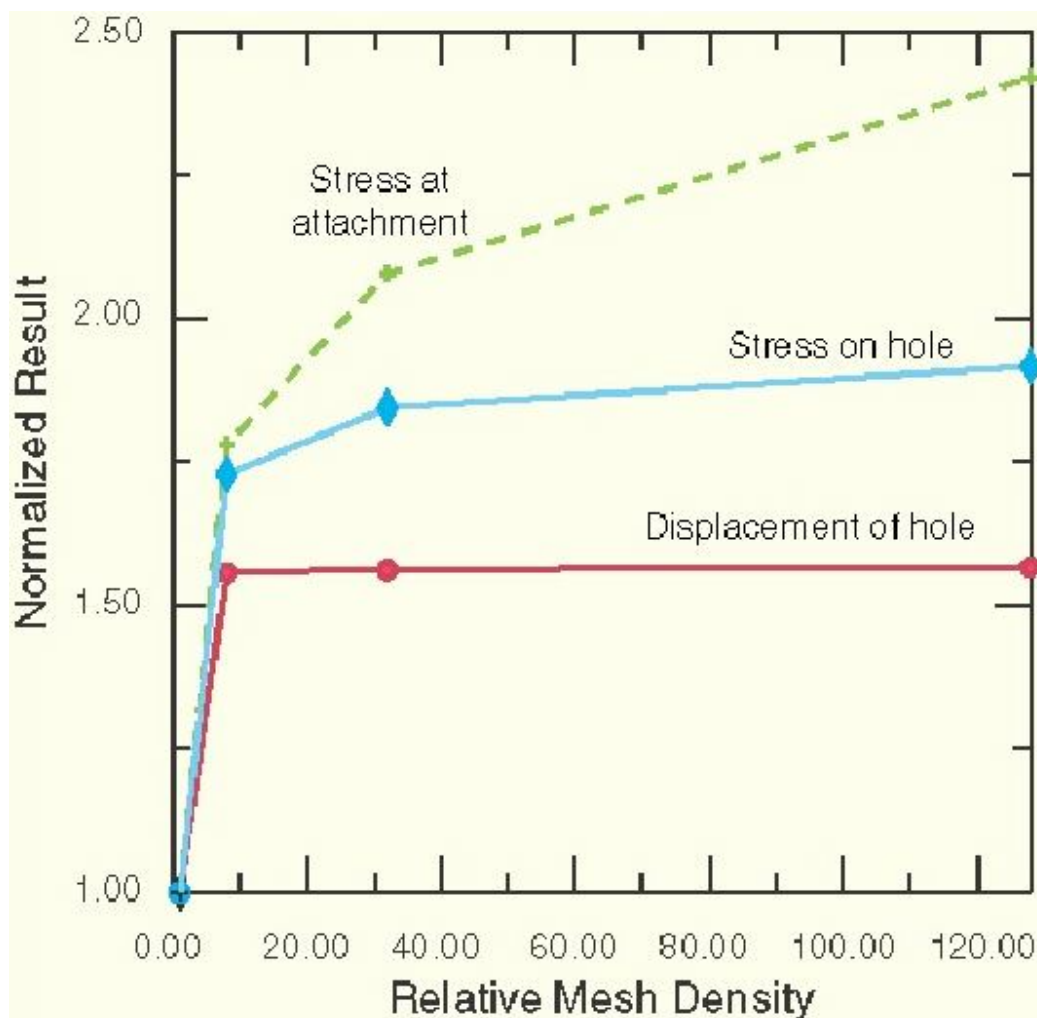
Σχήμα 4.4. Αποτελέσματα του «τρέξιματος» στο Abaqus.

Τα αποτελέσματα για κάθε μια από τις τέσσερις πυκνότητες πλέγματος, συγκρίνονται στον πίνακα παρακάτω, σε σχέση με τον χρόνο που απαιτείται από τον επεξεργαστή (CPU) για να τρέξει κάθε προσομοίωση.

Πλέγμα (Mesh)	Μετατόπιση του κατώτατου σημείου της οπής	Τάση στο κατώτατο σημείο της οπής	Τάση στο σημείο σύνδεσης	Σχετικός χρόνος επεξεργασίας
Χονδρό (Coarse)	2.01E-4	180.E6	205.E6	0.26
Κανονικό (Normal)	3.13E-4	311.E6	365.E6	1.0
Λεπτό (Fine)	3.14E-4	332.E6	426.E6	2.7
Πολύ λεπτό (Very fine)	3.15E-4	345.E6	496.E6	22.5

Πίνακας 4.1. Αποτελέσματα της μελέτης πύκνωσης του πλέγματος

Το χονδροειδές πλέγμα προβλέπει ανακριβείς μετατοπίσεις στο κατώτατο σημείο της οπής, αλλά το κανονικό, το λεπτό και το πολύ λεπτό πλέγμα, και τα τρία προβλέπουν παρόμοια αποτελέσματα. Το κανονικό πλέγμα επομένως, συνέκλινε όσον αφορά τις μετατοπίσεις και είναι το προτιμότερο για το συγκεκριμένο μοντέλο, καθώς απαιτεί και λιγότερο χρόνο για την υλοποίηση του «τρέξιματος» της job. Η σύγκλιση αποτυπώνεται στο παρακάτω σχήμα:

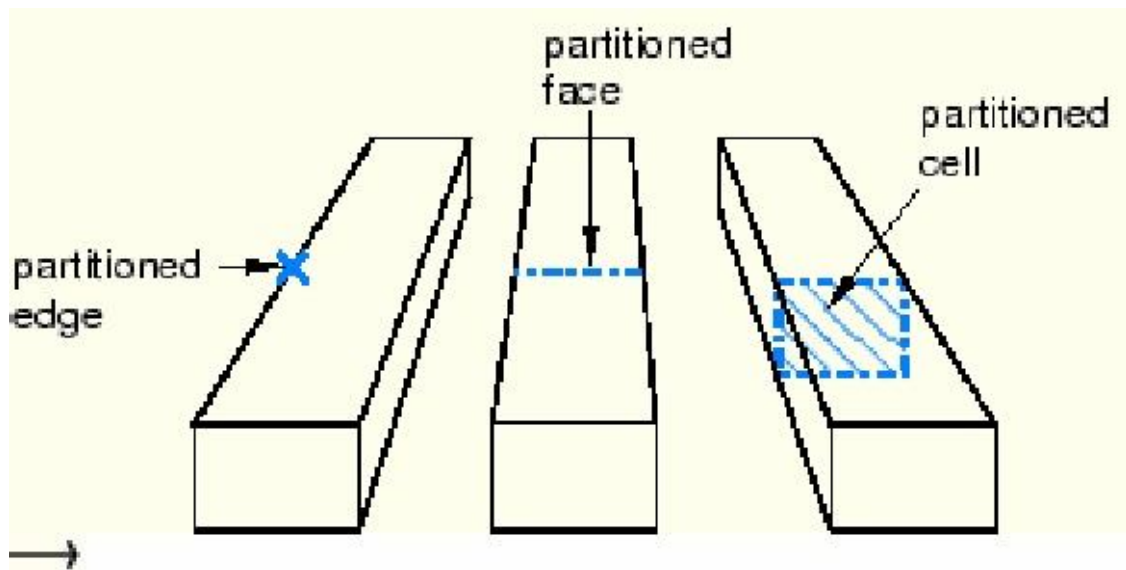


Σχήμα 4.5. Σύγκλιση των αποτελεσμάτων στη μελέτη πύκνωσης του πλέγματος

Κατανόηση του ρόλου των partitions

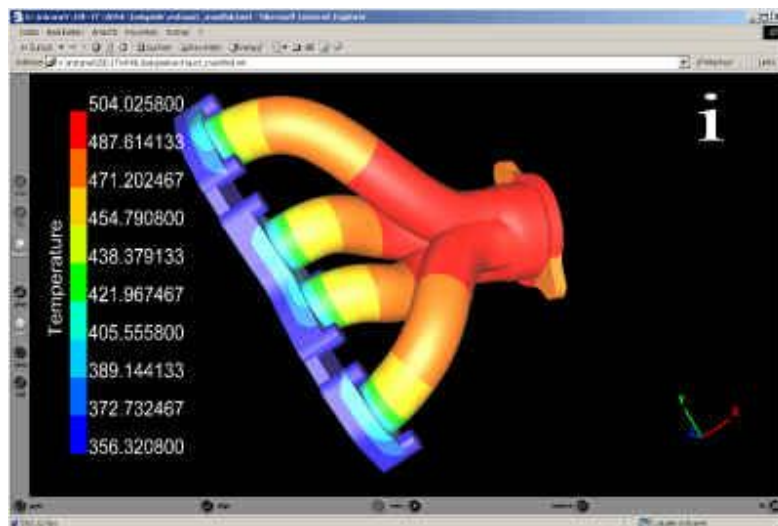
Καθώς προχωράμε τη διαδικασία μοντελοποίησης, ίσως διαπιστώσουμε ότι πρέπει να επιλέξουμε μια συγκεκριμένη περιοχή που δεν υπάρχει στο μοντέλο. Τέτοιες περιοχές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν τα όρια υλικών, να υποδείξουν τη θέση των φορτίων και των περιορισμών και τελευταίο και σημαντικότερο, το οποίο προέκυψε στα μοντέλα ανάλυσης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, να βοηθήσουν στη βελτίωση του πλέγματος (στο meshing). Χρησιμοποιούμε τα εργαλεία Partition για να χωρίσουμε το μοντέλο σε περιοχές.

Τα Partitions μπορούν να δημιουργηθούν σε άκρα (edges) , σε πλευρές (faces) και σε κελιά (cells) . Ένα partition κατά μήκος ενός edge δημιουργεί μια νέα κορυφή (vertex), ενώ partitions σε faces και cells δημιουργούν νέα άκρα (edges) και νέες πλευρές (faces), αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις, το partitioning χρησιμεύει για να υποδιαιρέσει τη γεωμετρία που πρόκειται να διαχωριστεί. Το παρακάτω σχήμα επεξηγεί το χωρισμό ενός edge, ενός face και ενός cell.

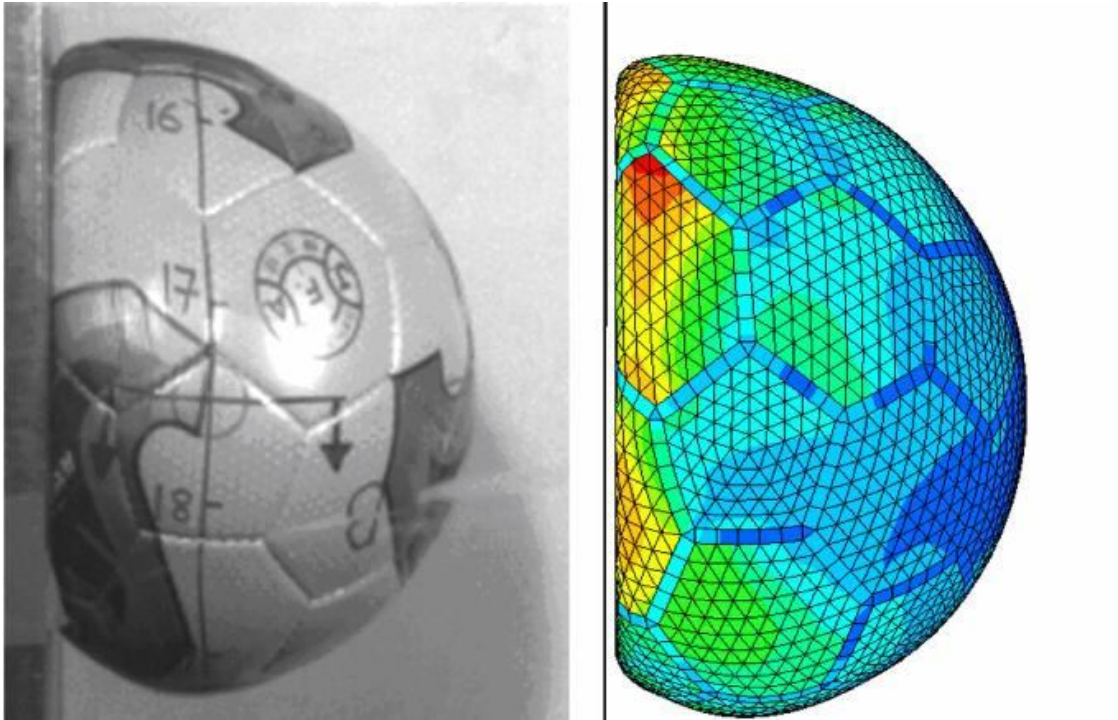


Σχήμα 4.6. Διαχωρισμός των τριών κατηγοριών partitions

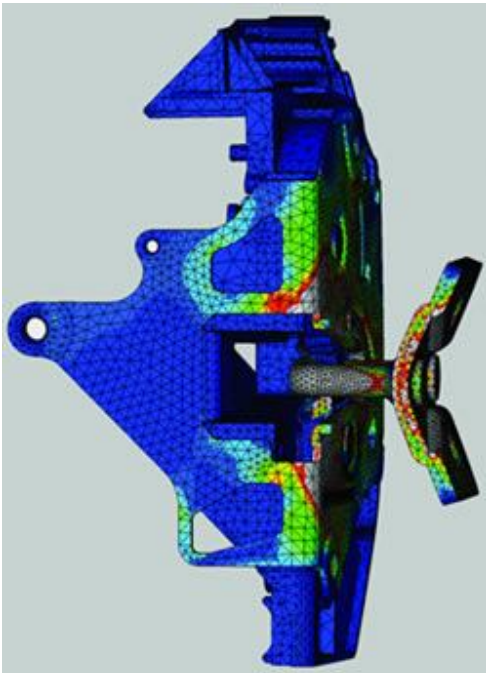
Οι δυνατότητες, οι εφαρμογές και οι λεπτομέρειες του Abaqus είναι πραγματικά απεριόριστες, οπότε επιλεκτικά αναφέρθηκαν τα πιο σημαντικά και κύρια χαρακτηριστικά του. Οι εφαρμογές του πολύ δυνατού αυτού προγράμματος είναι όπως φαίνεται πολυδιάστατες. Παρατίθενται παρακάτω ενδεικτικά μερικές εικόνες από εφαρμογές σε διάφορους βιομηχανικούς/κατασκευαστικούς κτλ τομείς της τεχνολογίας.



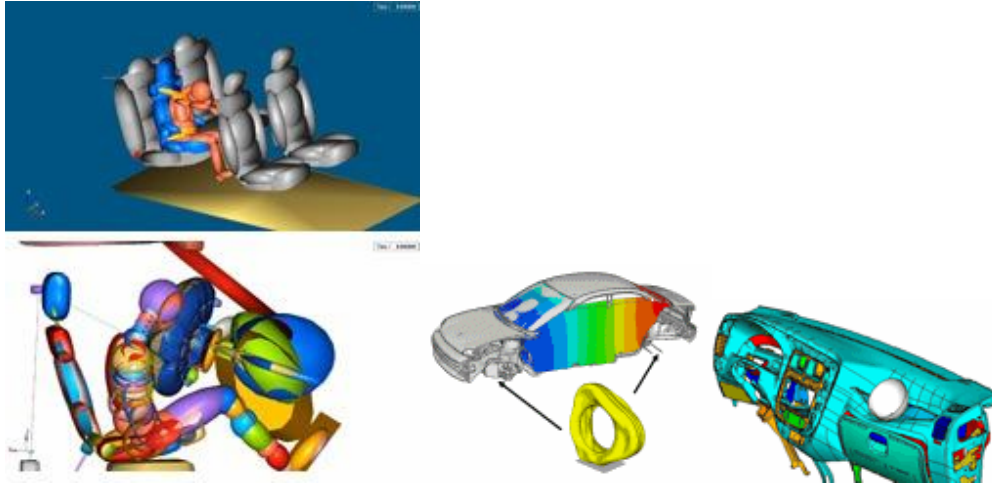
Σχήμα 4.7. Τμήμα εξάτμισης, εφαρμογή του προγράμματος Abaqus σε αυτοκινητοβιομηχανία, θερμοκρασιακά αποτελέσματα



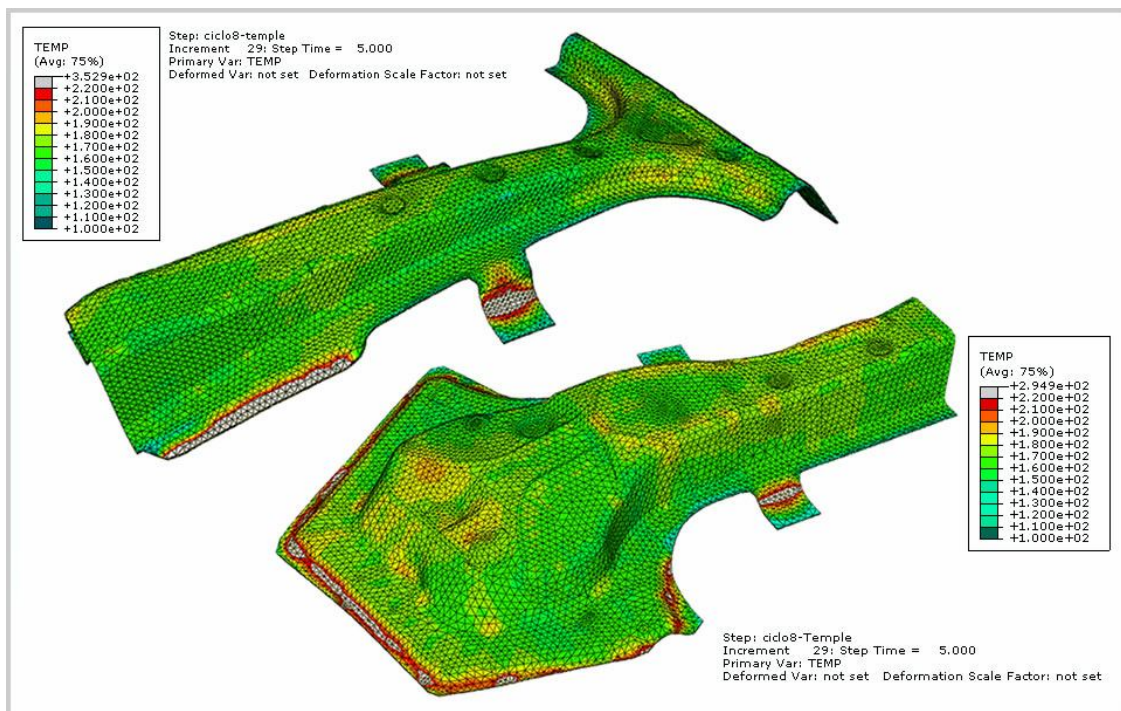
Σχήμα 4.8. Εφαρμογή και σε ποδοσφαιρική μπάλα, δημιουργία μοντέλου FEA για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της και για να δοκιμαστεί η απόδοση και η αντοχή της ώστε να καταλήξουν με κατάλληλες προσαρμογές σε τελειότερο design για μέγιστη απόδοση.

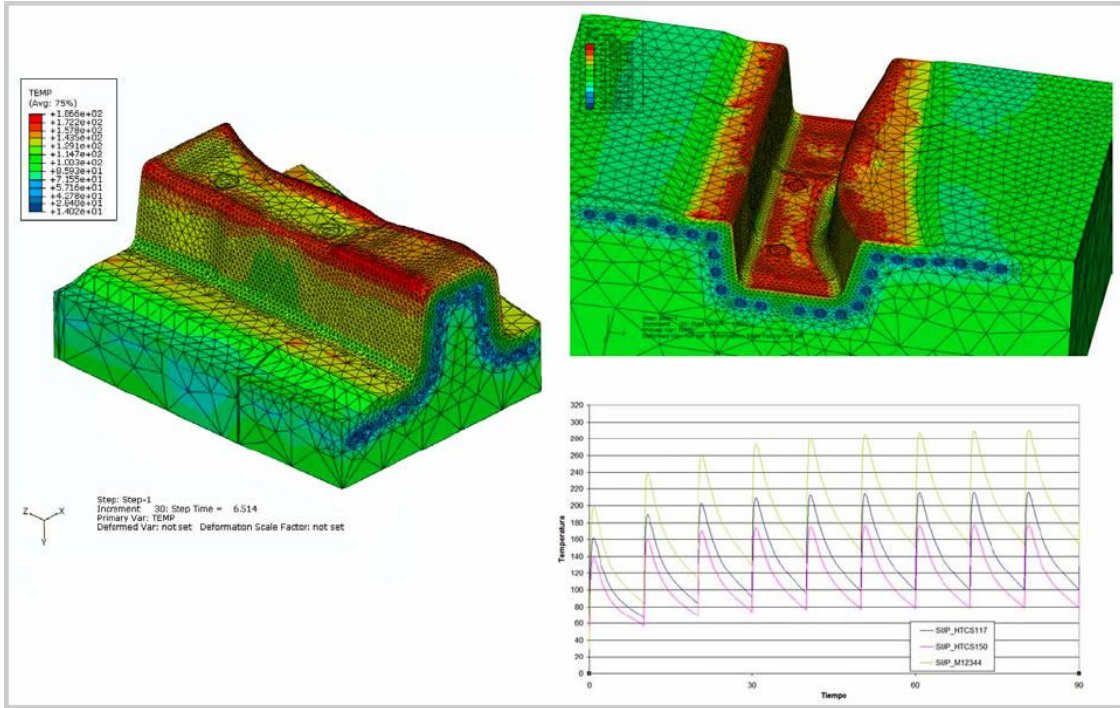


Σχήμα 4.9. Εφαρμογή και πάλι στην αυτοκινητοβιομηχανία, κλείσιμο της πόρτας με μέγιστη δύναμη

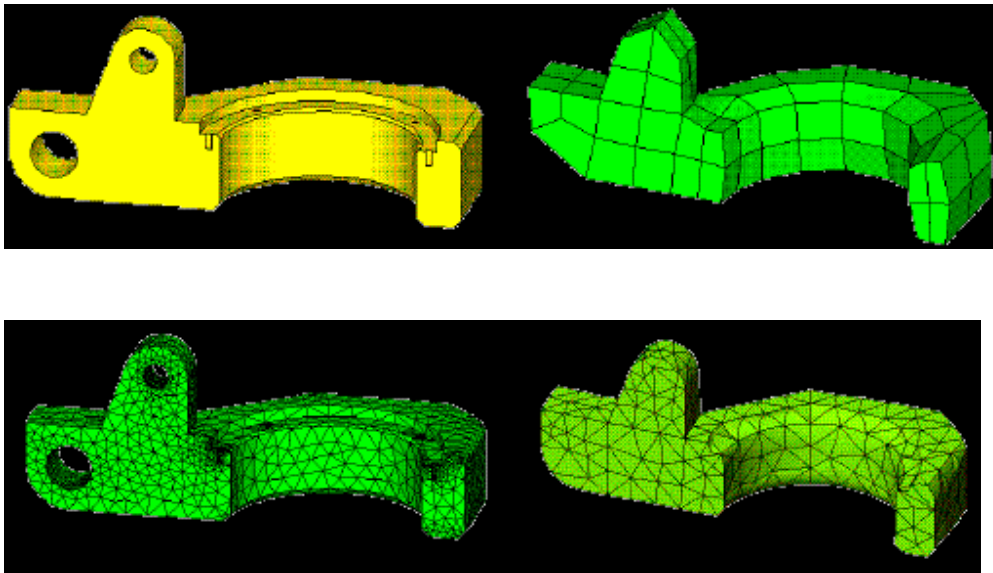


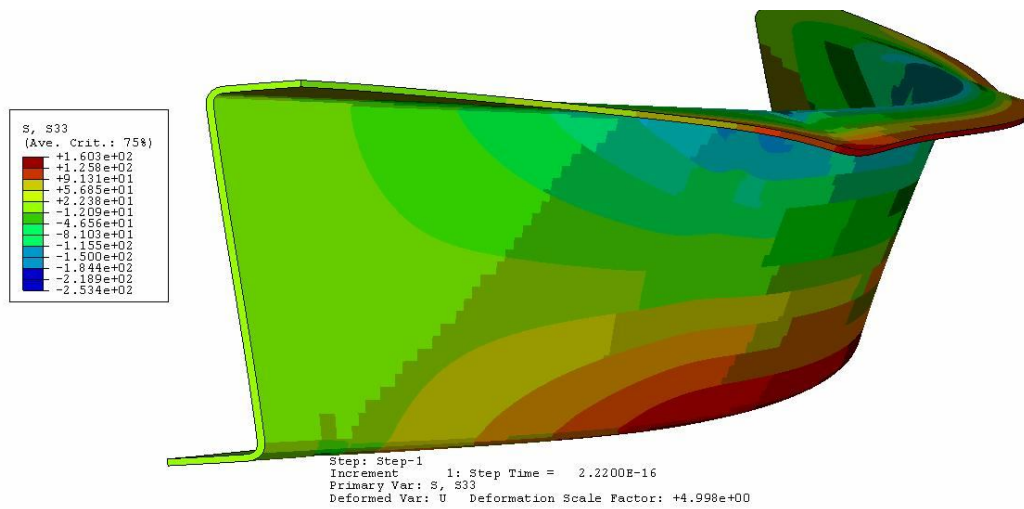
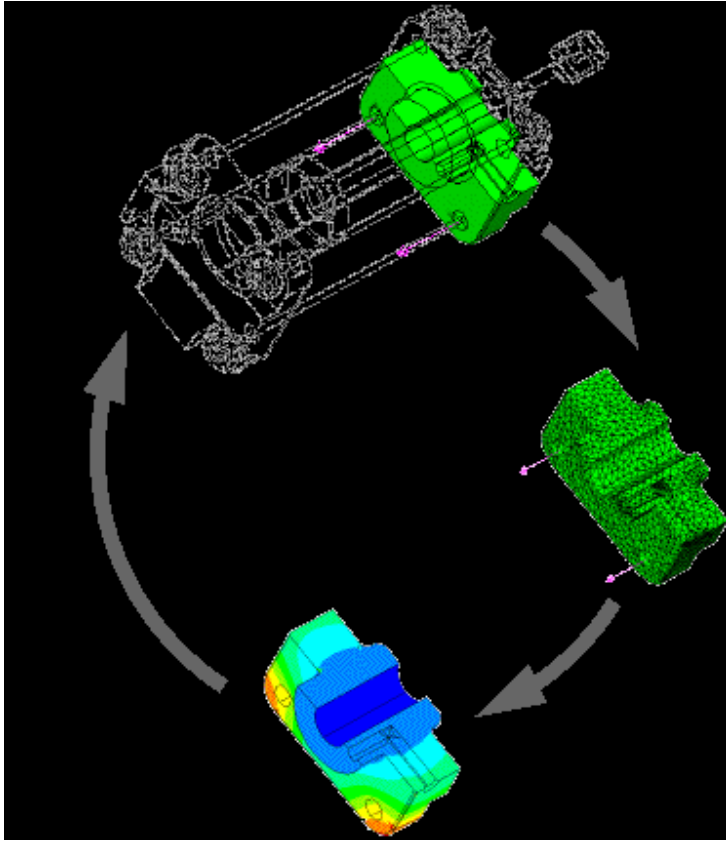
Σχήμα 4.10. Εικόνες από Crash test αυτοκινήτου





Σχήματα 4.11 – 4.12. Θερμικές προσομοιώσεις





Σχήματα 4.13-4.16. Χρήση του Abaqus στην βιομηχανία των αεροπλάνων.

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο, εν κατακλείδι, να σημειωθεί ότι η ευκολία στη χρήση του προγράμματος Abaqus, βασίζεται στο μεγαλύτερο βαθμό, στη σωστή χρήση των βοηθητικών εγχειριδίων(manuals), τα οποία είναι ιδιαίτερα αναλυτικά και εύχρηστα. Όλες οι εντολές που αναφέρθηκαν, όπως και ολόκληρη η βιβλιοθήκη με τα εγχειρίδια του Abaqus, είναι προσβάσιμα σε ηλεκτρονική μορφή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Περιγραφή προσομοιωμάτων και ανάλυση αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφούν τα προσομοιώματα του Abaqus 6.8 που αναλύθηκαν και θα γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων τους, ούτως ώστε μετά την ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων στο επόμενο Κεφάλαιο του θεωρητικού και υπολογιστικού μέρους, να γίνει η σύγκριση και να εκτιμηθεί η απόκλιση των αποτελεσμάτων.

Μελετήθηκαν 3 προσομοιώματα σε αυτή τη διπλωματική εργασία. Το ζητούμενο, όπως προαναφέρθηκε, είναι η μεταβολή του λόγου του πάχους της μεταλλικής κυκλικής πλάκας προς την ακτίνα της. Χρησιμοποιήθηκαν για αυτό το σκοπό τρία διαφορετικά πάχη της εν λόγω πλάκας: των 6 χιλιοστών, των 5 χιλιοστών και των 4 χιλιοστών.

Εφόσον το θεωρητικό κομμάτι που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2, αναφέρεται σε πολύ λεπτά ελάσματα, είναι αναμενόμενο και θεμιτό, όσο ελαττώνεται το πάχος της πλάκας, τα αποτελέσματα του προγράμματος Abaqus και των υπολογισμών μέσω της θεωρητικής διερεύνησης σε λεπτά χαλύβδινα ελάσματα να συγκλίνουν περισσότερο, δεδομένου ότι στα παχέα ελάσματα, πρέπει να εφαρμοστεί η θεωρία των παχέων πλακών, που περιέχει επιπλέον όρους από τη θεωρία των λεπτών πλακών.

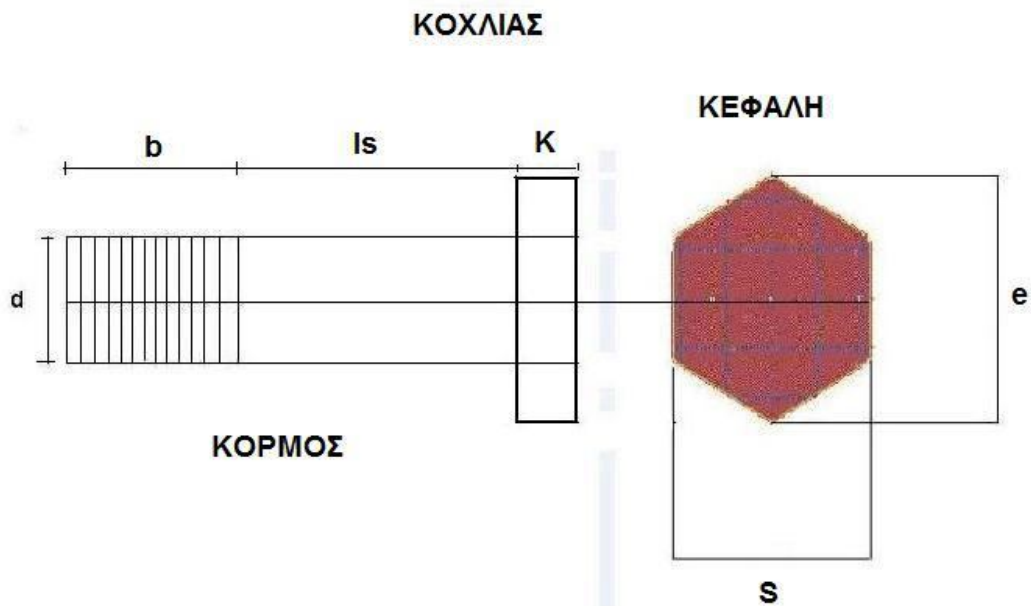
Κοχλίες

Οι ποιότητες και οι διάμετροι των κοχλιών που είναι διαθέσιμοι στην αγορά, παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΚΟΧΛΙΩΝ	Mj,Rd (kNm)						
	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΟΧΛΙΩΝ						
	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
M8	-13,0	-13,0	-16,3	-16,3	-19,6	-26,1	-31,9
M10	-20,7	-20,7	-25,8	-25,8	-31,0	-48,4	-54,1
M12	-30,0	-30,0	-45,5	-45,5	-50,5	-58,6	-63,5
M16	-56,3	-56,3	-62,0	-62,0	-66,0	-67,1	-67,1
M20	-66,9	-66,9	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1
M22	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1
M24	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1
M27	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1
M30	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1
M36	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1	-67,1

Πίνακας 5.1. Ποιότητες και διάμετροι διαθέσιμων κοχλιών στην αγορά.

Οι κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν, M12 και M6, είναι όλοι ποιότητας 8.8. Τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά είναι τα εξής:



Στον χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε, μελετήθηκε στην ελαστική αλλά και στην πλαστική περιοχή. Για την ελαστική περιοχή, δόθηκαν οι τιμές:

$$E = 210.000 \text{ N/m}^2 \text{ και } \text{λόγο Poisson } \nu = 0,3.$$

Για την πλαστική περιοχή του χάλυβα S355, η τάση διαρροής είναι ίση με 355 N/mm^2 , και η τάση θραύσης είναι ίση με 510 N/mm^2 για τις δύο κυκλικές μεταλλικές πλάκες, ενώ για τους κοχλίες η τάση διαρροής είναι ίση με 640 N/mm^2 , και η τάση θραύσης είναι ίση με 800 N/mm^2 .

Προσομοίωση μοντέλων

Παραδοχές προσομοίωσης

Η απόπειρα να προσομοιώσει ο χρήστης με απόλυτη ακρίβεια μία μεταλλική σύνδεση μεταξύ των δύο κυκλικών πλακών, καθώς και τη σύνδεσή τους με τους κοχλίες, είναι πολύ χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία. Εντούτοις, έγιναν μερικές παραδοχές στο πρόγραμμα Abaqus 6.8, οι οποίες παράλληλα δε μείωσαν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Είχαν μόνο ως αποτέλεσμα να απλοποιηθεί η διαδικασία προς όφελός μας φυσικά και να γίνει πιο ανώδυνη και γρήγορη. Το κάτω μέρος της άκαμπτης πλάκας, θεωρήθηκε πακτωμένο, για να περιγραφεί η σταθερή ακλόνητη βάση.

Στο σημείο επαφής των κοχλιών με τις πλάκες, δε χρησιμοποιήθηκαν ροδέλες. Επίσης, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, ενώ στο πείραμα οι οπές της μετωπικής πλάκας είναι ένα χιλιοστό μεγαλύτερες από τη διάμετρο των κοχλιών ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή των κοχλιών μέσα στις οπές, στο προσομοίωμα στο Abaqus 6.8 οι διάμετροι των οπών είναι ίσες με τις διαμέτρους των κοχλιών, ούτως ώστε να μην υπάρχει κενό ανάμεσα στις οπές και στους κοχλίες. Τέλος, το περικόχλιο και ο κοχλίας θεωρήθηκαν ενιαίο σώμα. Η απόπειρα να προσομοιωθεί με απόλυτη ακρίβεια μία μεταλλική σύνδεση μεταξύ των δύο κυκλικών πλακών, καθώς και τη σχέση τους με τους κοχλίες, είναι πολύ χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία.

Στο Interaction Module, όπου έπρεπε να τεθούν οι ρυθμίσεις για τις ιδιότητες των επαφών των μελών των μοντέλων, τέθηκε:

Contact Property Options: Tangential Behavior and Normal Behavior

Constraint enforcement Method: Default

Pressure – Overclosure: “Hard Contact”

Οι ρυθμίσεις αυτές, έγιναν μετά από αρκετές δοκιμές ώστε τα αποτελέσματα του Abaqus 6.8 να είναι αποδεκτά και να συγκλίνουν με αυτά του θεωρητικού τμήματος. Οι δοκιμές ήταν επίσης αρκετά χρονοβόρα διαδικασία, καθώς ήταν συνδυασμός των ρυθμίσεων στο Interaction Module με την επίτευξη του κατάλληλου πλέγματος, κατά τη διαδικασία του meshing, δηλαδή του διαχωρισμού των τμημάτων των υπό μελέτη μοντέλων σε πεπερασμένα στοιχεία.

Η εξόλκευση υλοποιείται υπό κεντρικό ελκυσμό. Ο κεντρικός κοχλίας, ο οποίος θα υποστεί την εφελκυστική καταπόνηση, θα δεχτεί στα τρία μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν πίεση 600 N/mm^2 . Ο λόγος της μεγάλης αυτής πίεσης ήταν να προκαλέσει σίγουρα την αστοχία του μοντέλου.

Στο πρώτο μοντέλο, με την μεταλλική κυκλική λεπτή πλάκα να έχει διάμετρο 6 χιλιοστά, χρησιμοποιήθηκε διαφορετικός διαχωρισμός πεπερασμένων στοιχείων και στους κοχλίες και στις πλάκες σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα των 5 και 4 χιλιοστών, στην προσπάθεια η σύγκλιση των αποτελεσμάτων να είναι η καλύτερη δυνατή.

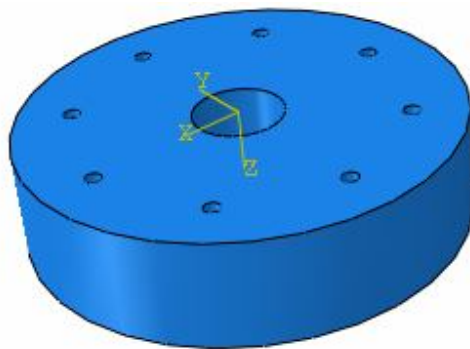
Προσομοίωμα με πάχος μεταλλικής πλάκας 6 mm (μοντέλο 1)

Το πρώτο προσομοίωμα που δημιουργήθηκε και αναλύθηκε, είχε πάχος πλάκας 6 χιλιοστά. Η άκαμπτη σταθερή βάση έχει πάχος 40 χιλιοστά. Η διάμετρος των δύο κυκλικών μεταλλικών πλακών είναι 160 χιλιοστά. Οι οχτώ περιμετρικοί κοχλίες που στερεώνουν την κυκλική μεταλλική λεπτή πλάκα στην ειδικά διαμορφωμένη μεταλλική βάση είναι διαμέτρου M6 και ποιότητας 8.8. Οι

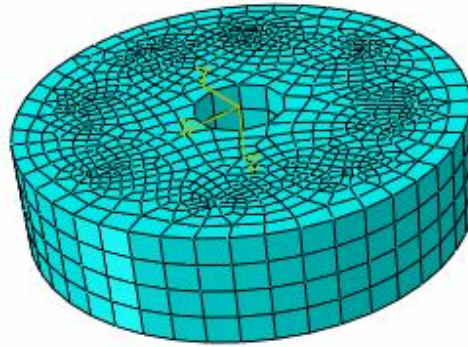
οπές περιμετρικά των δύο πλακών είναι διαμέτρου 6 χιλιοστών (για λόγους πρακτικούς του προγράμματος στο θέμα επαφής οπής και κοχλίας, δεν αφήνεται κενό μεταξύ οπών και κοχλιών).

Η οπή στο κέντρο της κυκλικής μεταλλικής πλάκας που θα παραμορφωθεί, έχει διάμετρο 12 χιλιοστά ενώ η οπή στο κέντρο της κυκλικής μεταλλικής άκαμπτης πλάκας έχει διάμετρο 34 χιλιοστά (για να τοποθετηθεί ο κεντρικός κοχλίας που θα προκαλέσει την εξόλκευση, πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την κεφαλή του). Ο κεντρικός κοχλίας είναι M12 και ποιότητας 8.8.

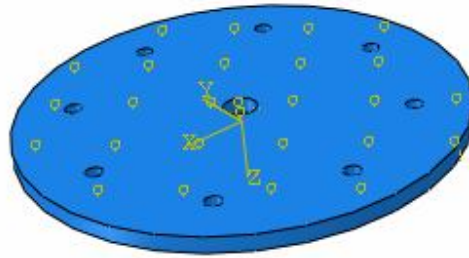
Παρακάτω παρατίθενται σχήματα των parts χωριστά πριν και μετά την δημιουργία πλέγματος, καθώς και σχήμα του Assembly (το μοντέλο στην τελική του μορφή πριν την ανάλυση).



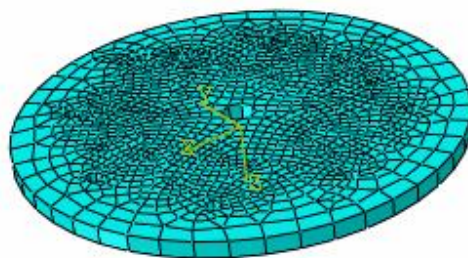
Σχήμα 5.1. Άκαμπτη πλάκα



Σχήμα 5.2. Άκαμπτη πλάκα, 3.228 πεπερασμένα στοιχεία



Σχήμα 5.3. Παραμορφώσιμη πλάκα.



Σχήμα 5.4. Παραμορφώσιμη πλάκα, 1475 στοιχεία



Σχήμα 5.5. Περιμετρικός κοχλίας M6/8.8



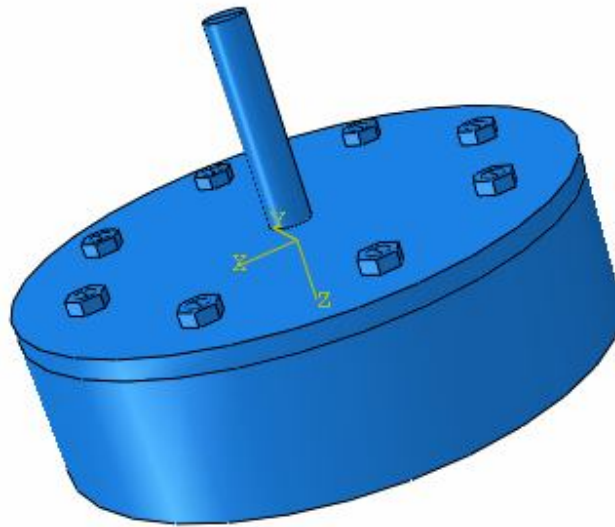
Σχήμα 5.6. Περιμετρικός κοχλίας M6/8.8, 950 πεπερασμένα στοιχεία



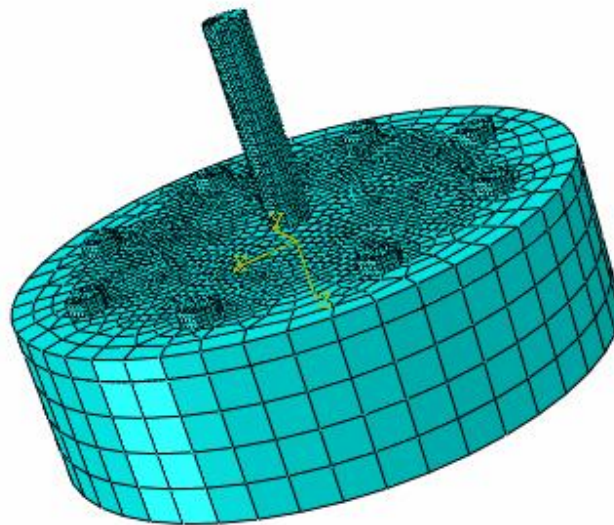
Σχήμα 5.7. Κεντρικός κοχλίας M12/8.8



Σχήμα 5.8. Κεντρικός κοχλίας M12/8.8, 9.358 πεπερασμένα στοιχεία

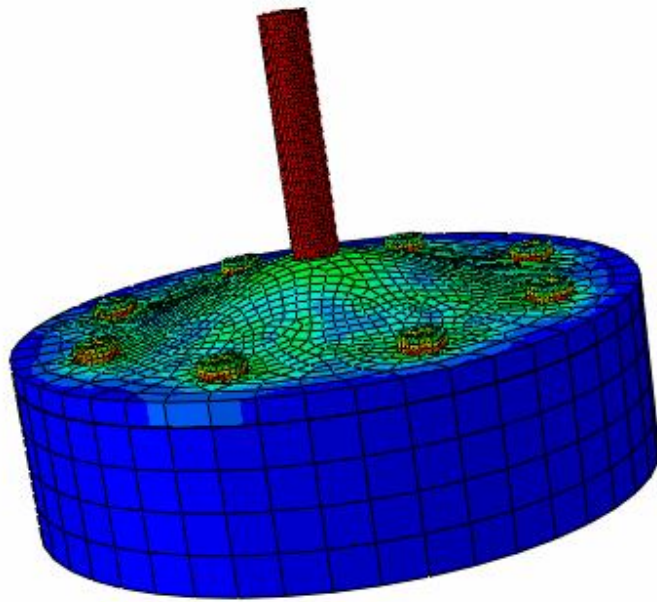


Σχήμα 5.9. Το μοντέλο στην τελική του μορφή

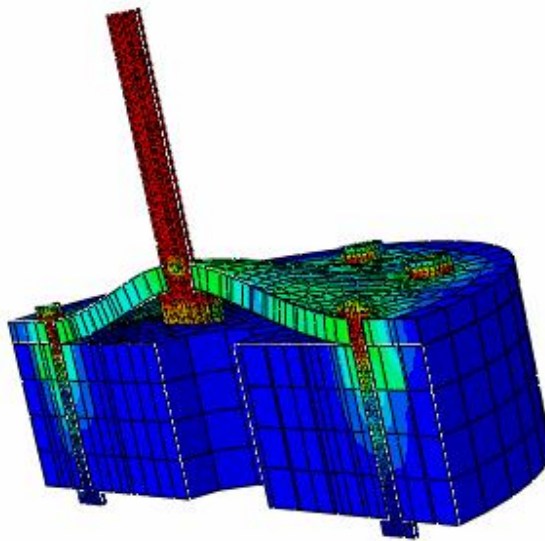


Σχήμα 5.10. Το μοντέλο στην τελική του μορφή, με σύνολο 21.841 πεπερασμένα στοιχεία

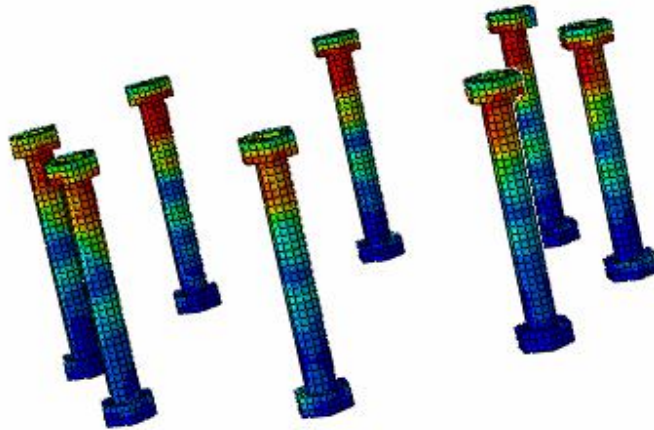
Το μοντέλο, εφόσον έχει πάρει την τελική του μορφή με όλες τις απαραίτητες παραδοχές στο πρόγραμμα, επιλύεται. Το αποτέλεσμα στο Visualization παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 5.11. Απεικόνιση της παραμόρφωσης μέσω του Visualization για πάχος παραμορφώσιμης πλάκας 6mm



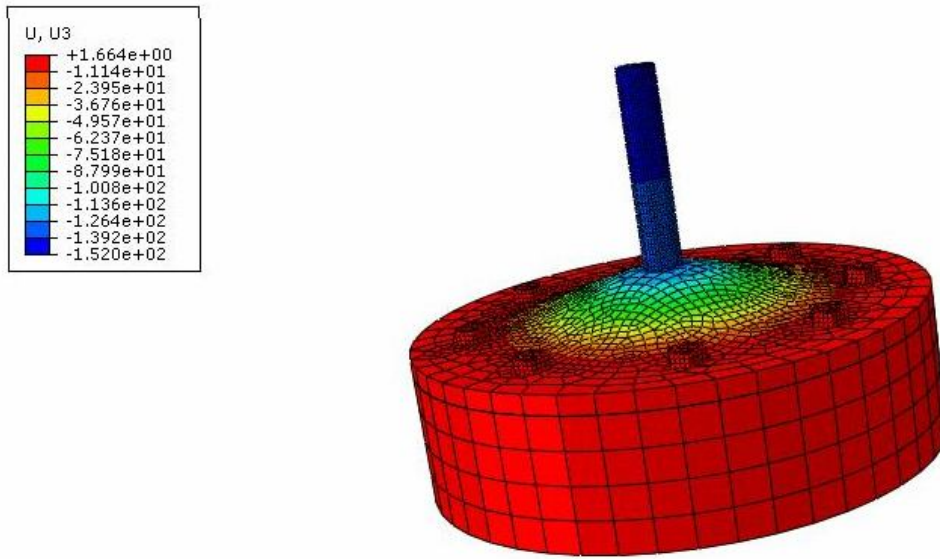
Σχήμα 5.12. Τομή του σχήματος 5.11



Σχήμα 5.13. Απεικόνιση παραμόρφωσης των 8 περιμετρικών κοχλιών για πάχος παραμορφώσιμης πλάκας 6mm

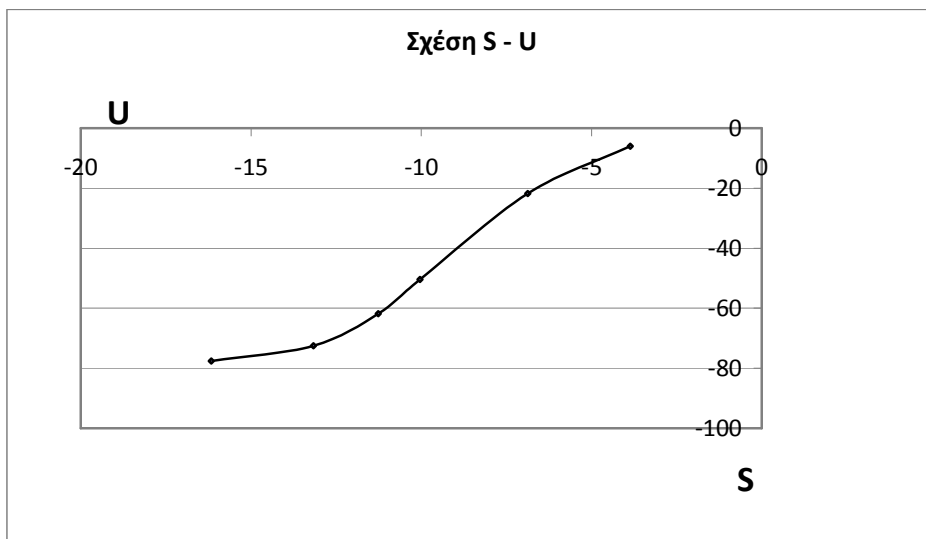
Προκειμένου η μελέτη της απόκλισης να μπορεί να δώσει ασφαλή συμπεράσματα, θα θεωρηθούν παραπάνω από ένα σημεία πάνω στις παραμορφώσιμες μεταλλικές πλάκες, στα οποία και θα μετρηθεί μέσω του προγράμματος Abaqus 6.8 το μέγεθος του βέλους κάμψης (w) και θα συγκριθεί με την τιμή του βέλους κάμψης w στη συνέχεια που θα υπολογιστεί με τη βοήθεια της θεωρητικής μεθόδου όπως αναλύθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Τα σημεία που θα οριστούν, θα είναι τέσσερα σημεία ακριβώς πάνω στην οπή της παραμορφώσιμης πλάκας και άλλα δύο σημεία σε αποστάσεις 20mm και 30mm από το κέντρο της πλάκας. Τα σημεία αυτά δείχνονται παρακάτω.

Το επιθυμητό είναι να φανούν οι τιμές των βελών κάμψης σε αυτές τις αποστάσεις, στον άξονα x . Η επιθυμητή απεικόνιση των βελών κάμψης, φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5.14. Απεικόνιση τιμών των βελών κάμψης κατά τον άξονα x, για την παραμορφώσιμη πλάκα πάχους 6mm

Καθώς αρχίζει η επιβολή του φορτίου στο μοντέλο, αρχίζει να παραμορφώνεται ελαστικά μέχρι να αστοχήσει, οπότε περνάει στην πλαστική παραμόρφωση. Το διάγραμμα που δίνει το σημείο αστοχίας του μοντέλου, καθώς και τη σχέση μεταξύ S – U, παρατίθεται παρακάτω: (λίγο πριν το σημείο που η γραφική παράσταση αλλάζει κλίση σημαντικά, θεωρείται ότι το μοντέλο αστόχησε)



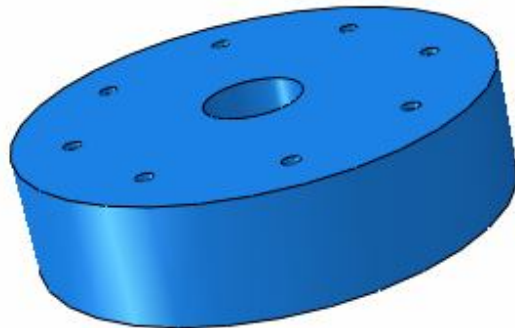
Επιλέχθηκαν και για τα τρία μοντέλα, σημεία πάνω στο τέλος της οπής στο κέντρο της παραμορφώσιμης κυκλικής πλάκας, καθώς και άλλα σημεία ενδεικτικά, αποστάσεις μεταξύ 20 και 40mm περίπου ενδεικτικά καθώς κοντά στο κέντρο της επιφάνειας οι παραμορφώσεις και τα φαινόμενα είναι πιο έντονα (εφόσον οι κόμβοι συνολικά είναι πάνω από 3.000, θα έπαιρνε άπειρο χρόνο να καταγραφούν και με τις δύο μεθόδους τόσα αποτελέσματα για 3 μοντέλα). Οι τιμές του βέλους κάμψης για το πρώτο μοντέλο, με την παραμορφώσιμη πλάκα πάχους 6 χιλιοστών, εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα: (τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με αύξουσα σειρά, συγκριτικά με την απόσταση των επιλεγμένων κόμβων από το κέντρο της παραμορφώσιμης κυκλικής πλάκας)

Αριθμός κόμβου (node)	Απόσταση από κέντρο παραμορφώσιμης κυκλικής πλάκας (mm)	Τιμή βέλους κάμψεως w στον επιλεγμένο κόμβο (node) σε mm
54	6	-16,1762
52	6	-16,1762
53	6	-16,1762
650	22,29	-12,1894
719	23,65	-11,679
778	24,7	-11,2769
1070	30,23	-8,33
1042	30,50	-8,34
1179	32,1	-7,051
880	41,8	-3,36

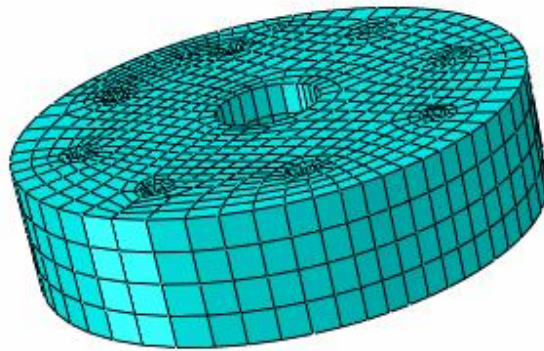
Πίνακας 5.1. Ενδεικτικές τιμές του βέλους κάμψεως του μοντέλου 1, με αριθμημένους τους επιλεγμένους κόμβους και δεδομένες τις αποστάσεις τους από το κέντρο της πλάκας

Προσομοίωμα με πάχος μεταλλικής πλάκας 4 mm και 5 mm (μοντέλα 2 και 3 αντίστοιχα)

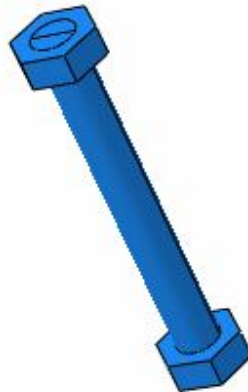
Επειδή όπως αναφέρθηκε νωρίτερα σε αυτό το Κεφάλαιο, στα δύο αυτά μοντέλα χρησιμοποιήθηκε το ίδιο πλέγμα για όλα τα επιμέρους parts, θα παρουσιαστούν μαζί τα σχήματα και χωριστά τα αποτελέσματα, καθώς τα μόνα διαφορετικά σχήματα μεταξύ αυτών των δύο μοντέλων είναι αυτά των παραμορφώσιμων πλακών και των Assembly, τα οποία παρουσιάζουν τα δύο καθολικά μοντέλα. Στη συνέχεια λοιπόν, παρατίθενται τα εν λόγω σχήματα, ξεκινώντας από τα όμοια μεταξύ των δύο μοντέλων.



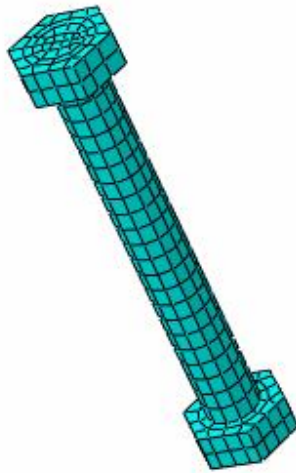
Σχήμα 5.15. άκαμπτη πλάκα



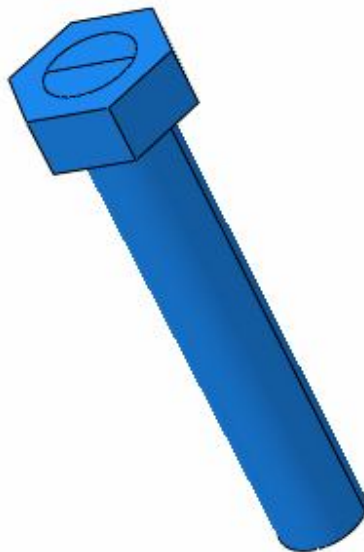
Σχήμα 5.16. Άκαμπτη πλάκα, 2.808 πεπερασμένα στοιχεία



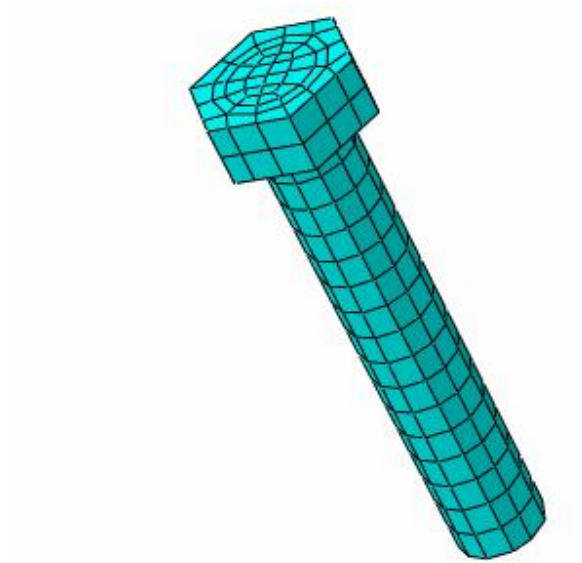
Σχήμα 5.17. Περιμετρικός κοχλίας M6/8.8



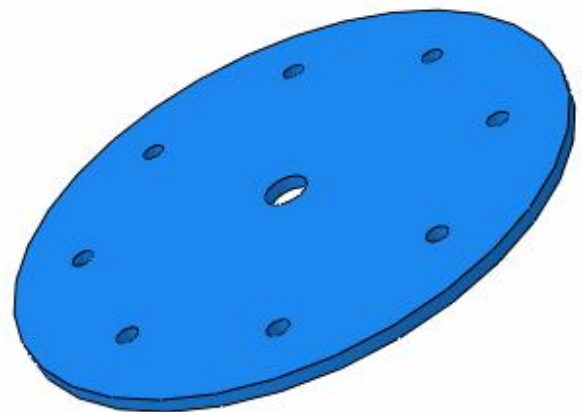
Σχήμα 5.18. Περιμετρικός κοχλίας M6/8.8, 634 πεπερασμένα στοιχεία



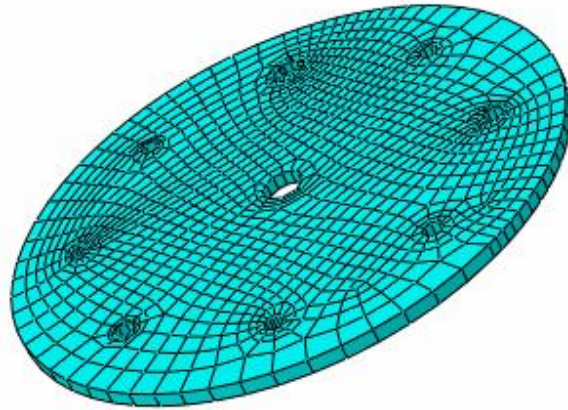
Σχήμα 5.19. Κεντρικός Κοχλίας M12/8.8



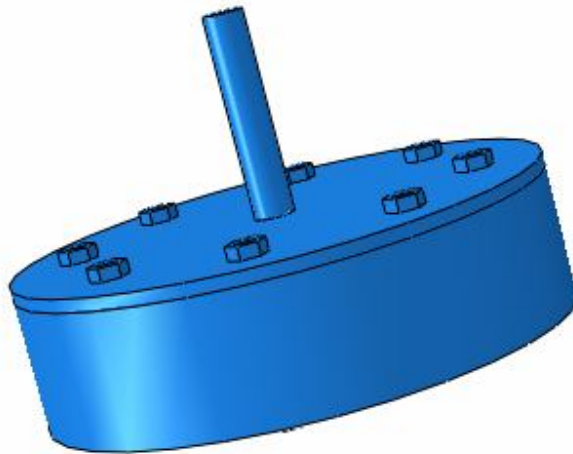
Σχήμα 5.20. Κεντρικός Κοχλίας M12/8.8, 414 πεπερασμένα στοιχεία



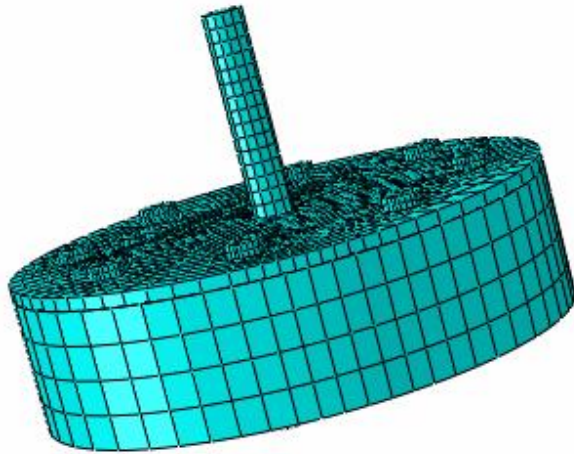
Σχήμα 5.21. Παραμορφώσιμη πλάκα 4mm



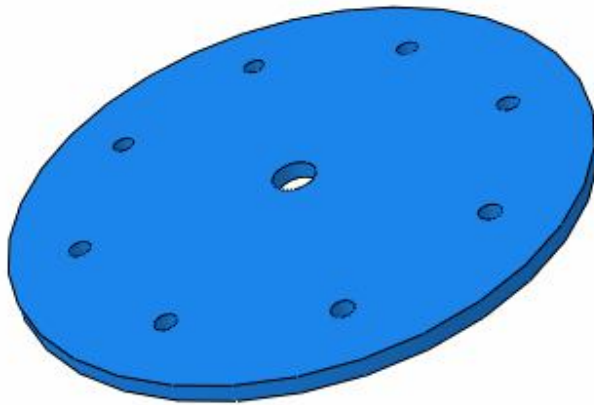
Σχήμα 5.22. Παραμορφώσιμη πλάκα 4mm, 1.176 πεπερασμένα στοιχεία



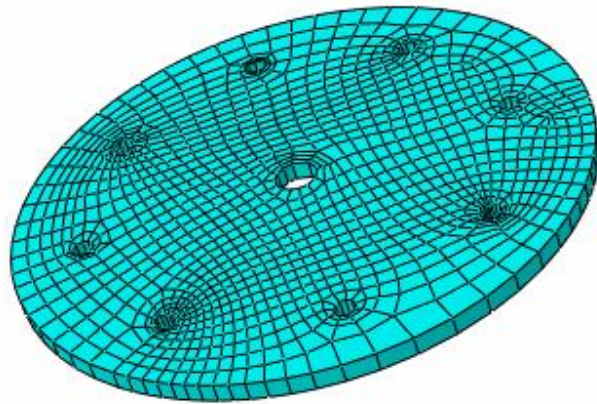
Σχήμα 5.23. Καθολικό μοντέλο για πάχος παραμορφώσιμης πλάκας 4mm.



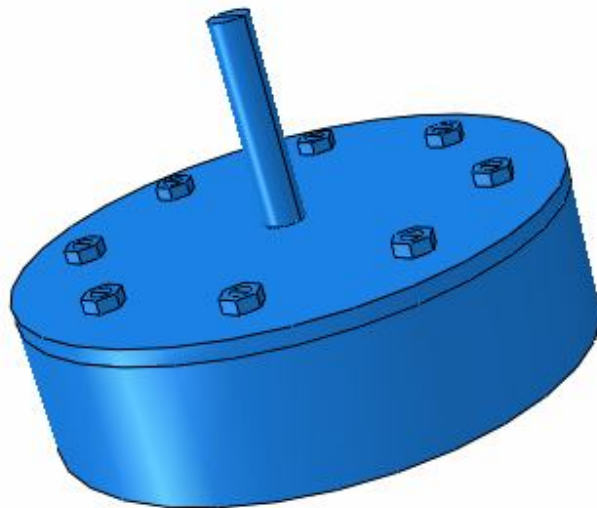
Σχήμα 5.24. Καθολικό μοντέλο για πάχος παραμορφώσιμης πλάκας 4mm, 9.470 πεπερασμένα στοιχεία.



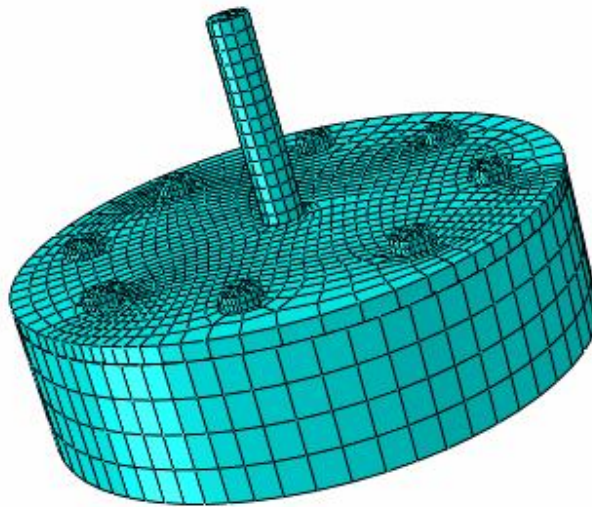
Σχήμα 5.25. Παραμορφώσιμη πλάκα 5mm



Σχήμα 5.26. Παραμορφώσιμη πλάκα 5mm, 1.176 πεπερασμένα στοιχεία

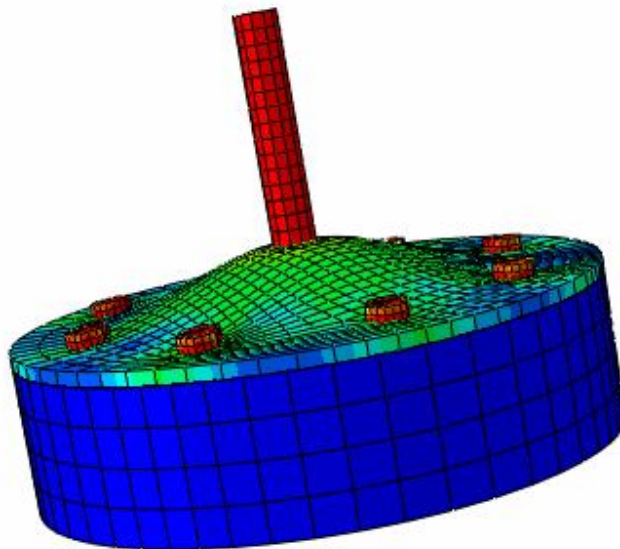


Σχήμα 5.27. Καθολικό μοντέλο για πάχος παραμορφώσιμης πλάκας 5mm.

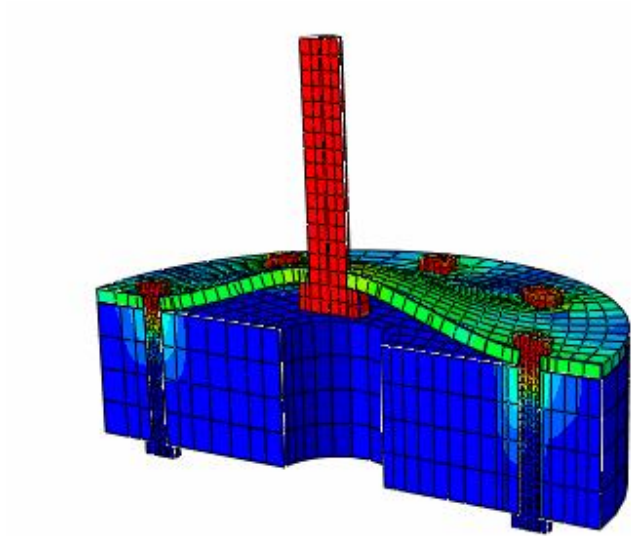


Σχήμα 5.28. Καθολικό μοντέλο για πάχος παραμορφώσιμης πλάκας 5mm, 9470 πεπερασμένα στοιχεία.

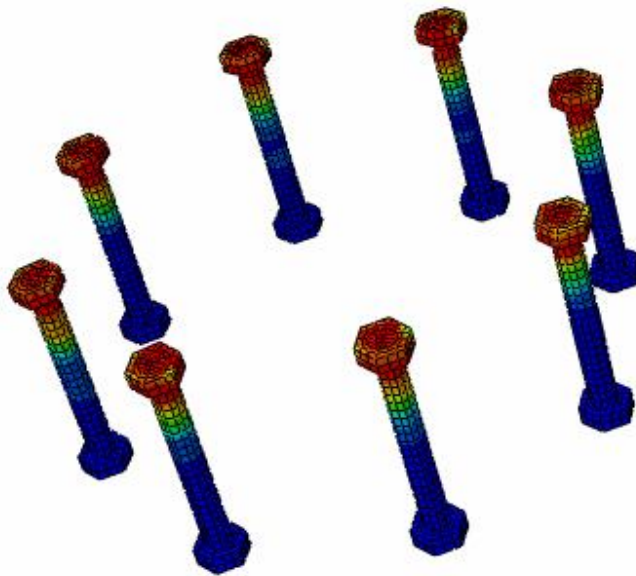
Κατόπιν παρουσιάζονται οι απεικονίσεις των δύο μοντέλων στο Visualization, όπως και στο πρώτο μοντέλο, πρώτα το καθολικό και στη συνέχεια τομή στη μέση του μοντέλου, καθώς και των κοχλιών χωριστά.



Σχήμα 5.29. Απεικόνιση της παραμόρφωσης μέσω του Visualization για πάχος παραμορφώσιμης πλάκας 4mm

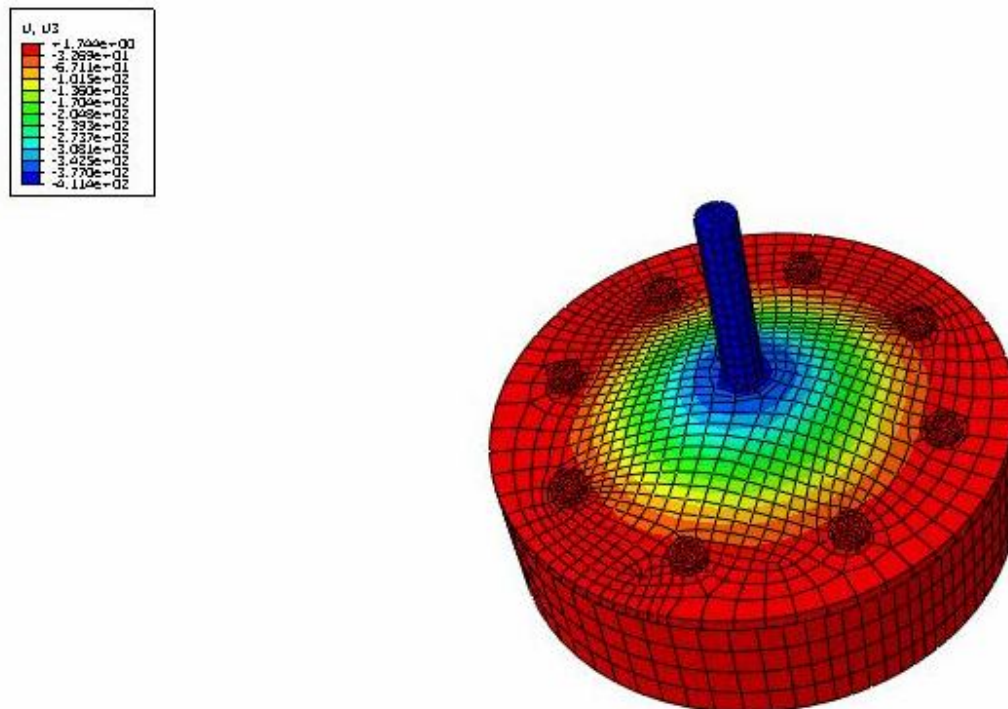


Σχήμα 5.30. Τομή του σχήματος 5.28



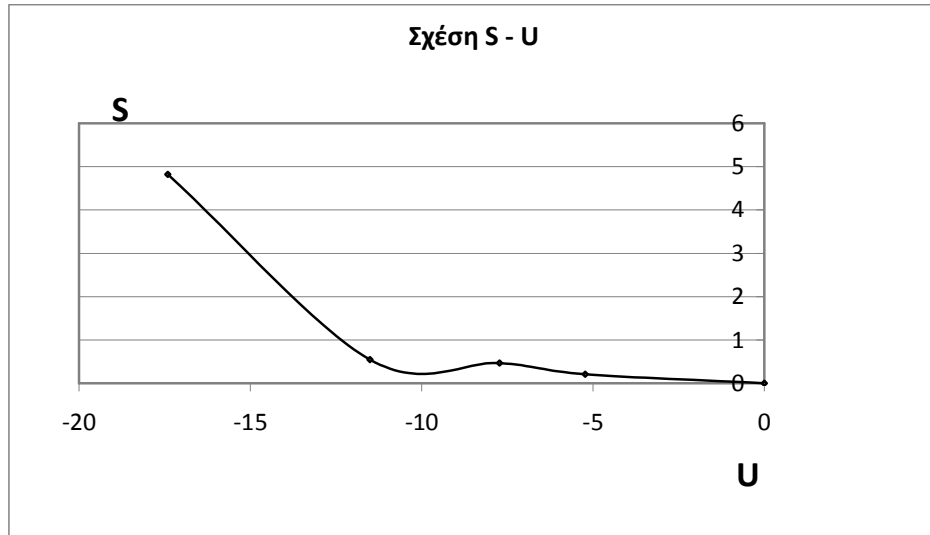
Σχήμα 5.31. Απεικόνιση παραμόρφωσης των 8 περιμετρικών κοχλιών για πάχος παραμορφώσιμης πλάκας 4mm

Και πάλι το ζητούμενο είναι η απεικόνιση των τιμών του βέλους κάμψης στον άξονα x. Για το μοντέλο 2 λοιπόν, με την παραμορφώσιμη πλάκα να έχει πάχος 4mm, το πρόγραμμα Abaqus 6.8 δίνει την εξής απεικόνιση:



Σχήμα 5.32. Απεικόνιση τιμών των βελών κάμψης κατά τον άξονα x, για την παραμορφώσιμη πλάκα πάχους 4mm

Το διάγραμμα S – U, θα δείξει πάλι το σημείο στο οποίο το μοντέλο 2 θα αστοχήσει, όπως φαίνεται παρακάτω:

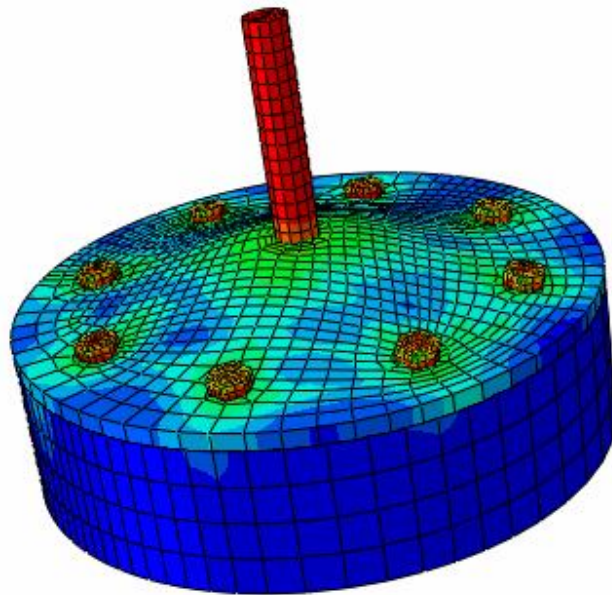


Οι τιμές του βέλους κάμψης για το δεύτερο μοντέλο, με την παραμορφώσιμη πλάκα πάχους 4 χιλιοστών, εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα: (τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και πάλι με αύξουσα σειρά, συγκριτικά με την απόσταση των επιλεγμένων κόμβων από το κέντρο της παραμορφώσιμης κυκλικής πλάκας)

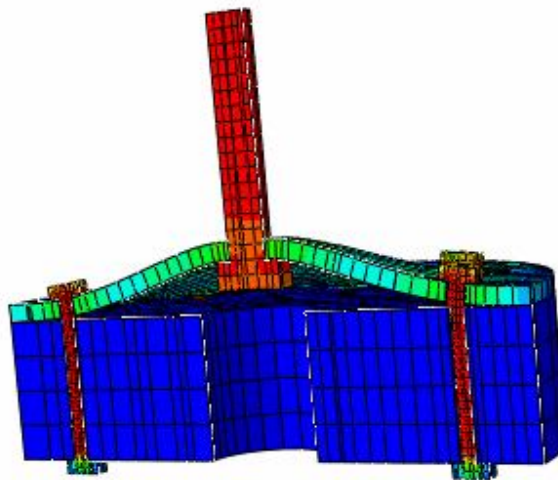
Αριθμός κόμβου (node)	Απόσταση από κέντρο παραμορφώσιμης κυκλικής πλάκας (mm)	Τιμή βέλους κάμψεως w στον επιλεγμένο κόμβο (node) σε mm
80	6	-17,4076
86	6	-17,3359
51	6	-17,3383
1309	6	-17,2702
1310	14,7	-16,5382
1288	19,12	-14,92
441	26,7	-10,85
440	30	-9,055
439	33,55	-7,11
1366	44,9	-2,06

Πίνακας 5.2. Ενδεικτικές τιμές του βέλους κάμψεως του μοντέλου 2, με αριθμημένους τους επιλεγμένους κόμβους και δεδομένες τις αποστάσεις τους από το κέντρο της πλάκας

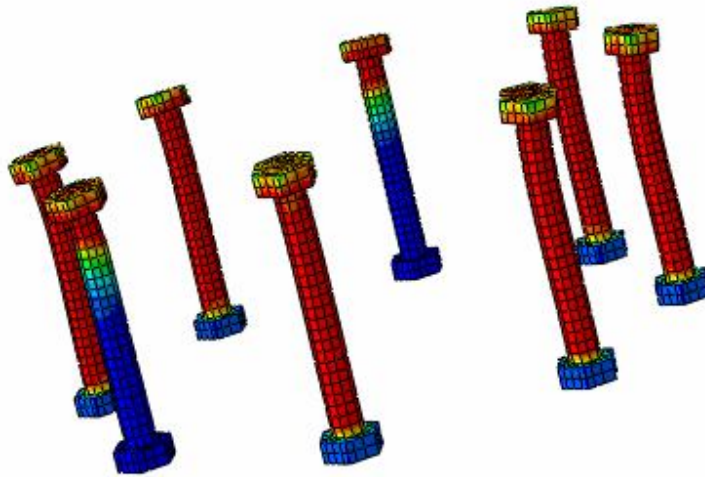
Τελειώνοντας, το μοντέλο 3, με πάχος παραμορφώσιμης πλάκας 5mm.



Σχήμα 5.33. Απεικόνιση της παραμόρφωσης μέσω του Visualization για πάχος παραμορφώσιμης πλάκας 5mm

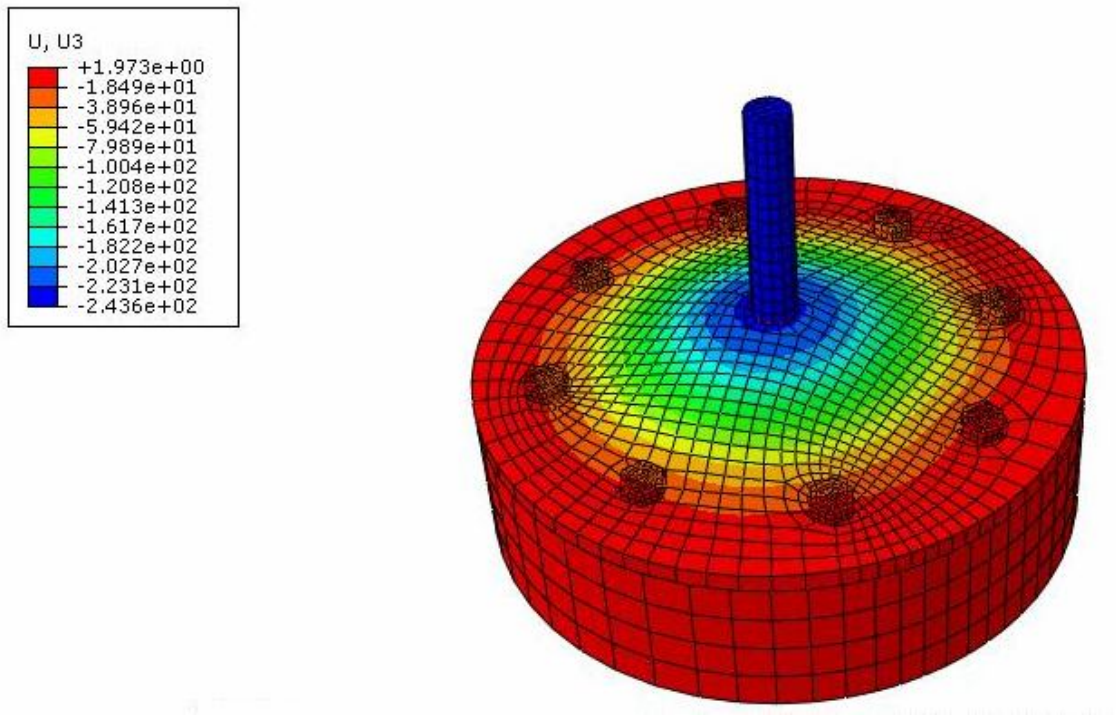


Σχήμα 5.34. Τομή του σχήματος 5.30.



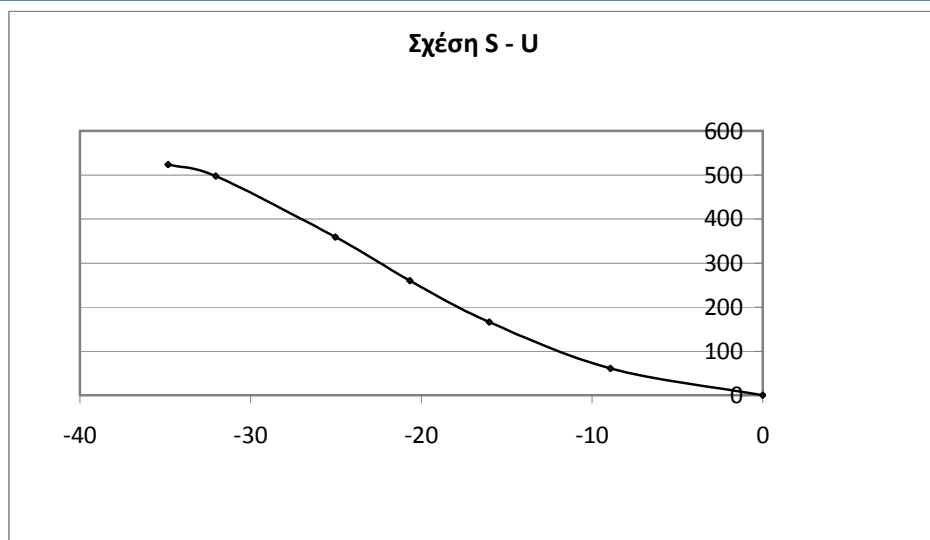
Σχήμα 5.35. Απεικόνιση παραμόρφωσης των 8 περιμετρικών κοχλιών για πάχος παραμορφώσιμης πλάκας 5mm

Και πάλι το επιθυμητό είναι η απεικόνιση των τιμών του βέλους κάμψης στον άξονα x. Για το μοντέλο 3 λοιπόν, με την παραμορφώσιμη πλάκα να έχει πάχος 5mm, το πρόγραμμα Abaqus 6.8 δίνει την εξής απεικόνιση:



Σχήμα 5.36. Απεικόνιση τιμών των βελών κάμψης κατά τον άξονα x, για την παραμορφώσιμη πλάκα πάχους 5mm

Το διάγραμμα S – U, θα δείξει πάλι το σημείο στο οποίο το μοντέλο 2 θα αστοχήσει, όπως φαίνεται παρακάτω:



Οι τιμές του βέλους κάμψης για το τρίτο και τελευταίο μοντέλο, με την παραμορφώσιμη πλάκα πάχους 5 χιλιοστών, εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα: (τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και πάλι με αύξουσα σειρά, συγκριτικά με την απόσταση των επιλεγμένων κόμβων από το κέντρο της παραμορφώσιμης κυκλικής πλάκας)

Αριθμός κόμβου (node)	Απόσταση από κέντρο παραμορφώσιμης κυκλικής πλάκας (mm)	Τιμή βέλους κάμψεως w στον επιλεγμένο κόμβο (node) σε mm
51	6	-31,92
52	6	-31,69
80	6	-32,048
324	9,25	-31,93
366	20,23	-26,61
274	23,42	-23,34
110	41	-7,32
109	44,9	-4,59
420	53,12	-0,6699
563	57,2	-0,27366

Πίνακας 5.3. Ενδεικτικές τιμές του βέλους κάμψεως του μοντέλου 3, με αριθμημένους τους επιλεγμένους κόμβους και δεδομένες τις αποστάσεις τους από το κέντρο της πλάκας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Υπολογισμοί και αποτελέσματα με τη βοήθεια της θεωρητικής διερεύνησης τοπικής κατανομής έντασης σε χαλύβδινα ελάσματα λόγω ανηρημένων φορτίων – σύγκριση αποτελεσμάτων – αποκλίσεις – συμπεράσματα

Όπως φάνηκε από την πολυπλοκότητα των τύπων υπολογισμού στο δεύτερο κεφάλαιο της θεωρητικής διερεύνησης του προβλήματος που μελετάται σε αυτή τη διπλωματική εργασία, η διαδικασία αυτή θα ήταν ιδιαίτερα επίπονη εάν γινόταν χωρίς τη βοήθεια ενός προγράμματος όπως το Excel, καθώς οι πολλές πράξεις εγκυμονούν όχι μόνο τον προφανή κίνδυνο η διαδικασία υπολογισμού να αποδειχτεί πολύ χρονοβόρα, αλλά επίσης να γίνουν και αρκετά υπολογιστικά λάθη, καθώς υπεισέρχεται πολύ συχνά ο ανθρώπινος παράγοντας.

Η χρήση λοιπόν του προγράμματος Excel κρίθηκε απαραίτητη σε αυτό το εγχείρημα. Στο πρόγραμμα Excel λοιπόν τοποθετήθηκαν οι τύποι υπολογισμού του βέλους κάμψεως, μέσω των τριών μεταβλητών C_1 , C_2 και C_3 . Δηλαδή:

$$w = \frac{Pb}{D} \frac{r^2}{4} (\ln r - 1) + c_1 \frac{r^2}{4} + c_2 \ln r + c_3, \text{ όπου:}$$

$$c_1 = -\frac{1}{2} \frac{Pb(b^2 - b^2\mu + 2b^2 \ln(b) + 2b^2 \ln(b)\mu + \alpha^2 + 2\mu\alpha^2 \ln(\alpha) - 2\alpha^2(\ln(a) - m\alpha^2))}{D(-b^2 - b^2\mu - \alpha^2 + \mu\alpha^2)}$$

$$c_2 = -\frac{1}{2} \frac{Pb^3 a^2 (-\mu + \ln(b) + \ln(b)\mu + \ln(\alpha) + \mu \ln(\alpha))}{D(-b^2 - b^2\mu - \alpha^2 + \mu\alpha^2)}$$

$$c_3 = -\frac{1}{8} a^2 Pb \frac{\left(\begin{array}{l} -\mu a^2 - 6 \ln(\alpha) b^2 \mu + 4 \ln(a) b^2 \ln(b) + 4 \ln(\alpha)^2 b^2 \mu - 2 \ln(\alpha) b^2 + 4 \ln(\alpha)^2 b^2 \\ + 3 b^2 \mu - 2 b^2 \ln(b) \mu + 4 \ln(a) b^2 \ln(b) \mu - 2 b^2 (\ln(b) + \alpha^2 + b^2) \end{array} \right)}{D(-b^2 - b^2\mu - \alpha^2 + \mu\alpha^2)}$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{και} \quad P = \frac{F}{2\pi b}$$

Επομένως κάθε φορά, η τιμή που μεταβάλλεται στο Excel είναι η τιμή t του πάχους της παραμορφώσιμης πλάκας (4, 5 και 6mm αλλά η μονάδα μέτρησης που θα χρησιμοποιηθεί είναι cm άρα θα είναι 0.4, 0.5 και 0.6 cm αντίστοιχα), καθώς και η τιμή r , η οποία είναι η απόσταση (cm) του σημείου της παραμορφώσιμης πλάκας του οποίου μελετάται η τιμή του βέλους κάμψης, από το κέντρο της. Θα υπολογιστούν λοιπόν οι τιμές του βέλους κάμψης για τα τρία μοντέλα, για τις θέσεις και τους κόμβους που υπάρχουν στους πίνακες 5.1, 5.2 και 5.3 για τα μοντέλα 1, 2 και 3 αντίστοιχα.

Η θεωρητική / υπολογιστική μέθοδος, υπολογίζει την τιμή του βέλους κάμψης w σε εκατοστά (cm). Στους πίνακες 6.1, 6.2 και 6.3 που θα ακολουθήσουν για τα 3 μοντέλα, οι τιμές έχουν μετατραπεί σε χιλιοστά (mm) για μεγαλύτερη ευκολία στη σύγκριση με τους πίνακες 5.1, 5.2 και 5.3.

Μοντέλο 1 – παραμορφώσιμη πλάκα με πάχος 6mm

Αριθμός κόμβου (node)	Απόσταση από κέντρο παραμορφώσιμης κυκλικής πλάκας (mm)	C_1	C_2	C_3	Τιμή βέλους κάμψεως w στον επιλεγμένο κόμβο (node)(mm)
54	6	0,0026547	0,013280511	1,135206563	-10,93
52	6	0,0026547	0,013280511	1,135206563	-10,93
53	6	0,0026547	0,013280511	1,135206563	-10,93
650	22,29	-0,046635	4,4352919	-2,42142283	-8,376
719	23,65	-0,068012	5,607497686	-3,89787137	-6,343284
778	24,7	-0,088282	6,667262683	-5,26280307	-4,748436
1070	30,23	-0,270183	15,22571359	-16,766227	-2,22072
1042	30,50	-0,283287	15,80708466	-17,564367	-2,4213
1179	32,1	-0,371642	19,65917958	-22,881627	-3,15264
880	41,8	-1,589132	68,3222628	-91,577187	-2,608083

Πίνακας 6.1. Αποτελέσματα για το μοντέλο 1 με την θεωρητική / υπολογιστική μέθοδο

Μοντέλο 2 – παραμορφώσιμη πλάκα με πάχος 4mm

Αριθμός κόμβου (node)	Απόσταση από κέντρο παραμορφώσιμης κυκλικής πλάκας (mm)	C_1	C_2	C_3	Τιμή βέλους κάμψης w στον επιλεγμένο κόμβο (node) (mm)
80	6	0,0089596	0,0448217	3,831322	-18,89236
86	6	0,0089596	0,0448217	3,831322	-18,89236
51	6	0,0089596	0,0448217	3,831322	-18,89236
1309	6	0,0089596	0,0448217	3,831322	-18,89236
1310	14,7	0,015752	2,9086149	4,9951742	-19,404731
1288	19,12	-0,046823	8,1916258	-0,1209155	-11,562970
441	26,7	-0,464819	30,785970	-28,67178	-10,077333
440	30	-0,87547	49,764045	-54,361721	-6,866503
439	33,55	-1,585764	80,442665	-96,8231	-6,093217
1366	44,9	-8,373101	345,04442	-472,29517	-2,031938

Πίνακας 6.2. Αποτελέσματα για το μοντέλο 2 με την θεωρητική / υπολογιστική μέθοδο

Μοντέλο 3 – παραμορφώσιμη πλάκα με πάχος 5mm

Αριθμός κόμβου (node)	Απόσταση από κέντρο παραμορφώσιμης κυκλικής πλάκας (mm)	C_1	C_2	C_3	Τιμή βέλους κάμψης w στον επιλεγμένο κόμβο (node) (mm)
51	6	0,0045873	0,022948745	1,961636864	-36,89914
52	6	0,0045873	0,022948745	1,961636864	-36,89914
80	6	0,0045873	0,022948745	1,961636864	-36,89914
324	9,25	0,0097462	0,216662222	2,7237508	-36,89914
366	20,23	-0,039749	5,233163296	-1,2481903	-24,1029
274	23,42	-0,110644	9,32095876	-6,2658767	-19,24648
110	41	-2,449935	106,6300255	-141,98672	-9,13656
109	44,9	-4,287028	176,6627467	-241,81513	-6,4856
420	53,12	-16,87277	639,0352444	-904,43713	-3,0546
563	57,2	-53,12241	1949,142349	-2785,3530	-1,03193

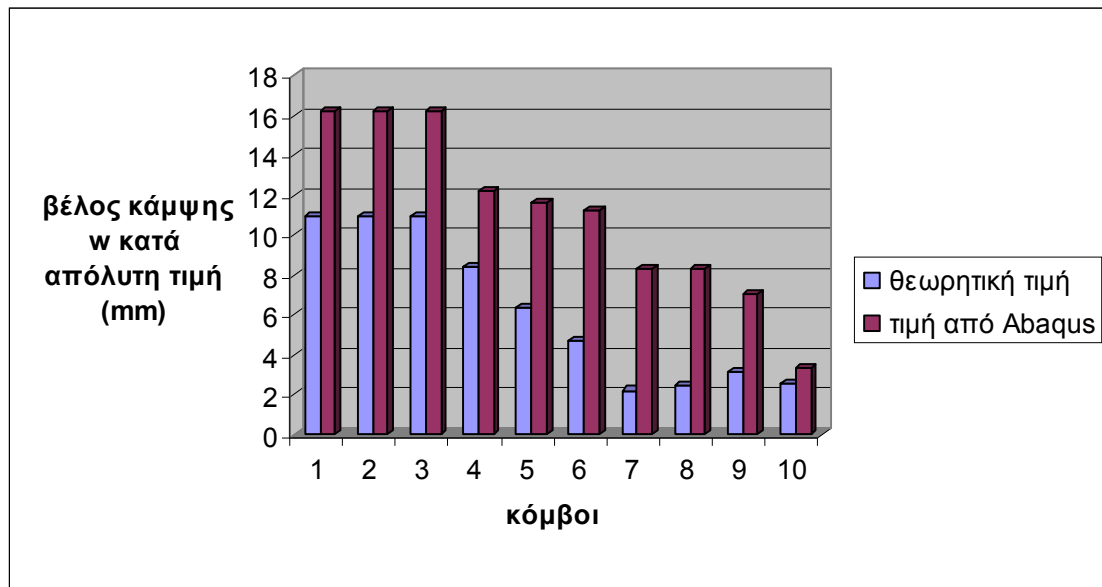
Πίνακας 6.3. Αποτελέσματα για το μοντέλο 3 με την θεωρητική / υπολογιστική μέθοδο

Για να γίνει άμεσα η σύγκριση των αποτελεσμάτων, δημιουργούνται τρεις νέοι πίνακες, οι οποίοι θα παραθέτουν τα αποτελέσματα και των δύο μεθόδων σε δύο διαφορετικές στήλες στο τέλος καθώς και δύο ακόμα στήλες, η μία με την απόκλιση σε mm των δύο τιμών και η άλλη με το ποσοστό της απόκλισης των δύο αυτών τιμών. Έτσι παρατίθενται οι πίνακες 6.4, 6.5 και 6.6 παρακάτω, παραλείποντας τις στήλες με τα C_1 , C_2 και C_3 και κάτω από κάθε πίνακα, γίνονται οι συγκρίσεις των τιμών και σχολιάζονται οι αποκλίσεις. Παρατίθενται επίσης τα διαγράμματα με τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων με τις δύο μεθόδους για τα μοντέλα 1, 2 και 3, στα σχήματα 6.1, 6.2 και 6.3 αντίστοιχα.

Σύγκριση τιμών μοντέλου 1 (πάχος πλάκας 6mm)

Αριθμός κόμβου (node)	Απόσταση από κέντρο παραμορφώσιμης κυκλικής πλάκας (mm)	Τιμή βέλους κάμψης w με την θεωρητική / υπολογιστική μέθοδο (mm)	Τιμή βέλους κάμψης w από Abaqus 6.8	Απόκλιση των δύο τιμών (mm)	Ποσοστό απόκλισης των τιμών των δύο μεθόδων(%)
54	6	-10,93	-16,1762	5,2462	47,99
52	6	-10,93	-16,1762	5,2462	47,99
53	6	-10,93	-16,1762	5,2462	47,99
650	22,29	-8,376	-12,1894	3,8134	45,53
719	23,65	-6,343284	-11,679	5,3357	84,12
778	24,7	-4,748436	-11,2769	6,5285	137
1070	30,23	-2,22072	-8,33	6,11	375,22
1042	30,50	-2,4213	-8,34	5,92	344,63
1179	32,1	-3,15264	-7,051	3,901	223,7
880	41,8	-2,608083	-3,36	0,752	128,83

Πίνακας 6.4. Σύγκριση τιμών μοντέλου 1



Σχήμα 6.1. Σύγκριση θεωρητικών τιμών και τιμών από το Abaqus για το μοντέλο 1

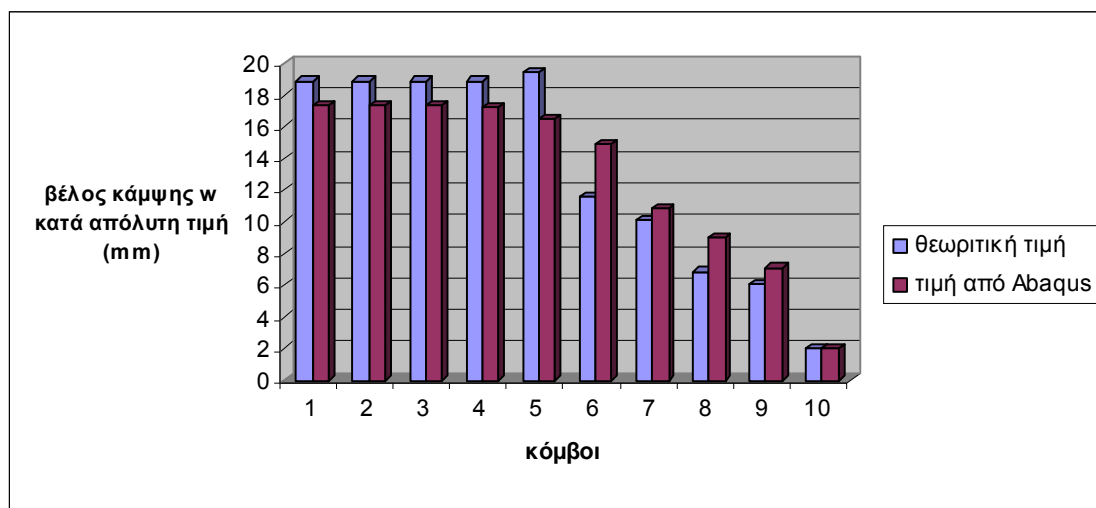
Όπως παρατηρείται, η μέγιστη απόκλιση των τιμών είναι της τάξεως των 6 χιλιοστών, με τιμή 6,5285mm. Σε αυτό το μοντέλο οι αποκλίσεις ήταν οι μεγαλύτερες από τα άλλα δύο, το οποίο ίσως και να ήταν πιο αναμενόμενο καθώς η θεωρητική / υπολογιστική μέθοδος προσεγγίζει πολύ λεπτά ελάσματα και συγκριτικά με τις διαστάσεις της παραμορφώσιμης πλάκας, τα 6mm «ξεφεύγουν» αρκετά από την παραδοχή / προϋπόθεση της θεωρητικής προσέγγισης. Πάντως, παρατηρείται πως αν και με αρκετά σημαντική απόκλιση, που καθώς τα στοιχεία απομακρύνονται από το κέντρο της παραμορφώσιμης πλάκας η απόκλιση αυτή μεγαλώνει σε ποσοστό, τα αποτελέσματα της θεωρητικής προσέγγισης δεν είναι εξωπραγματικά.

Όμως ακόμα και στα σημεία κοντά στο κέντρο της πλάκας, παρατηρείται ότι η διαφορά είναι αρκετά σημαντική (45% - 48%). Η διαφορά σε χιλιοστά πάντως και όχι σε ποσοστό, δείχνει μία αρμονία αποτελεσμάτων και μία σταθερή απόκλιση.

Σύγκριση μοντέλου 2 (πάχος πλάκας 4mm)

Αριθμός κόμβου (node)	Απόσταση από κέντρο παραμορφώσιμης κυκλικής πλάκας (mm)	Τιμή βέλους κάμψεως w με την θεωρητική / υπολογιστική μέθοδο (mm)	Τιμή βέλους κάμψεως w από Abaqus 6.8	Απόκλιση των δύο τιμών (mm)	Ποσοστό απόκλισης των τιμών των δύο μεθόδων(%)
80	6	-18,8923638	-17,4076	1,4824	8,5
86	6	-18,8923638	-17,3359	1,5564	8,98
51	6	-18,8923638	-17,3383	1,554	8,97
1309	6	-18,8923638	-17,2702	1,662	9,39
1310	14,7	-19,40473136	-16,5382	2,866	17,33
1288	19,12	-11,56297016	-14,92	3,357	29,1
441	26,7	-10,077333	-10,85	0,773	7,67
440	30	-6,866503	-9,055	2,189	132
439	33,55	-6,093217	-7,11	1,017	16,69
1366	44,9	-2,0319380	-2,06	0,03	1,38

Πίνακας 6.5. Σύγκριση τιμών μοντέλου 2



Σχήμα 6.2. Σύγκριση θεωρητικών τιμών και τιμών από το Abaqus για το μοντέλο 2

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων στο μοντέλο 2, παρατηρείται πολύ ικανοποιητική προσέγγιση, ειδικά κοντά στο κέντρο της παραμορφώσιμης πλάκας, με απόκλιση κάτω από 10%. Και πάλι, καθώς τα σημεία απομακρύνονται από το κέντρο της πλάκας, παρατηρείται μία αύξηση της απόκλισης της τάξεως του 10 – 20%. Θεωρείται, εντούτοις, τυχαίο το γεγονός ότι στον κόμβο 1366 η απόκλιση είναι μόνο 1,38%, 0,03mm, που πάντως είναι η πιο συγκλίνουσα απόκλιση του μοντέλου αυτού.

Το πάχος της πλάκας είναι 4mm, το μικρότερο πάχος που χρησιμοποιήθηκε από τα 3 μοντέλα. Καθώς ο λόγος του πάχους της παραμορφώσιμης πλάκας προς την ακτίνα της προσεγγίζει περισσότερο από τα άλλα δύο μοντέλα τη συνθήκη της θεωρητικής / υπολογιστικής μεθόδου (που αναφέρεται σε πολύ λεπτά ελάσματα), είναι λογικό και θεμιτό οι αποκλίσεις σε αυτό το μοντέλο να είναι οι μικρότερες συγκριτικά με τα άλλα δύο.

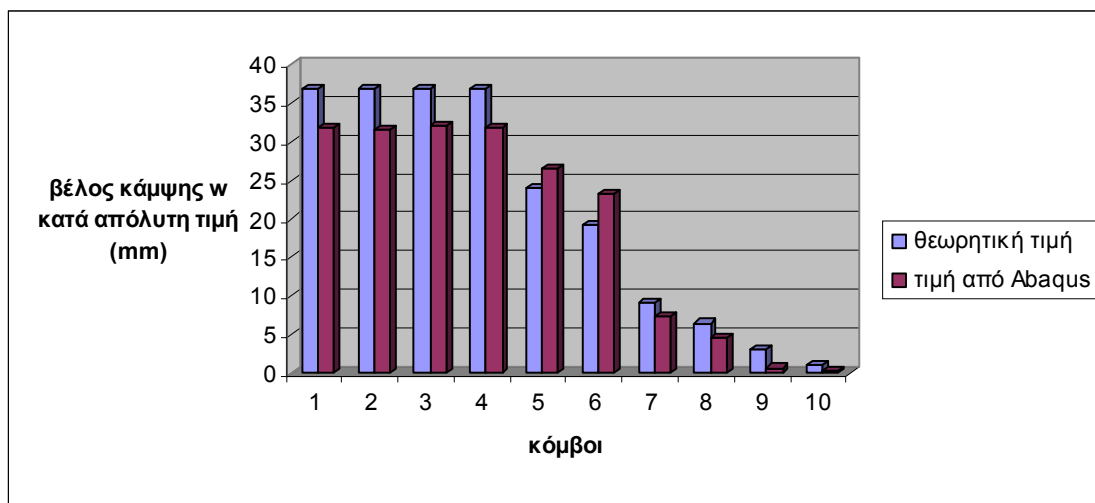
Το γεγονός ότι επιτεύχθηκε τόσο μικρή απόκλιση όμως, ίσως δείχνει ότι η θεωρία καλύπτει ικανοποιητικά και ελάσματα οριακά μεγαλύτερου μήκους από αυτό που «επιβάλεται» από αυτή τη μέθοδο ως προϋπόθεση. Ίσως όμως και να

έτυχε, καθώς από σημείο σε σημείο παρατηρείται ότι δεν υπάρχει η ίδια απόκλιση και όσο απομακρύνονται τα σημεία, η απόκλιση και πάλι ξεφεύγει σε μεγέθη 20-30%.

Σύγκριση μοντέλου 3 (πάχος πλάκας 5mm)

Αριθμός κόμβου (node)	Απόσταση από κέντρο παραμορφώσιμης κυκλικής πλάκας (mm)	Τιμή βέλους κάμψεως w με την θεωρητική / υπολογιστική μέθοδο (mm)	Τιμή βέλους κάμψεως w από Abaqus 6.8	Απόκλιση των δύο τιμών (mm)	Ποσοστό απόκλισης των τιμών των δύο μεθόδων(%)
51	6	-36,899148	-31,92	4,98	15,59
52	6	-36,899148	-31,69	5,21	16,44
80	6	-36,899148	-32,048	4,851	15,14
324	9,25	-36,899148	-31,93	4,97	15,56
366	20,23	-24,102976	-26,61	2,51	10,41
274	23,42	-19,2464895	-23,34	4,1	21,25
110	41	-9,13656	-7,32	1,816	24,73
109	44,9	-6,4856	-4,59	1,896	41,3
420	53,12	-3,0546	-0,6699	2,385	355
563	57,2	-1,03193	-0,27366	0,758	277,1

Πίνακας 6.6. Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου 3



Σχήμα 6.3. Σύγκριση θεωρητικών τιμών και τιμών από το Abaqus για το μοντέλο 3

Στο τρίτο και τελευταίο μοντέλο αυτής της διπλωματικής εργασίας, με την παραμορφώσιμη πλάκα των 5mm, παρατηρούνται μικρότερες αποκλίσεις από το μοντέλο 1 και μεγαλύτερες από το μοντέλο 2. Οι αποκλίσεις κρίνονται πολύ ικανοποιητικές κοντά στο κέντρο της πλάκας, της τάξεως του 15-16%, ενώ καθώς τα σημεία απομακρύνονται από το κέντρο, και πάλι παραμένουν στο 20-25%.

Οι τιμές στους κόμβους 420 και 563 που δίδονται από το Abaqus, είναι πολύ λογικά κοντά στο μηδέν, καθώς είναι τα σημεία στα οποία η πλάκα «δένεται» περιμετρικά με τους κοχλίες και η παραμόρφωση μεταφέρεται στους περιμετρικούς κοχλίες στα σημεία κοντά σε αυτές τις επιφάνειες.

Αυτό ίσως δεν μπόρεσε να το «μεταφέρει σωστά η υπολογιστική / θεωρητική μέθοδος, με αποτέλεσμα οι αποκλίσεις να είναι πιο μεγάλες σε αυτές τις θέσεις. Επίσης, αν κρίνει κανείς τις αποκλίσεις σε αυτές τις θέσεις σε χιλιοστά, παρατηρεί ότι οι αποκλίσεις είναι πολύ ικανοποιητικές μακριά από τους περιμετρικούς κοχλίες.

Οι τιμές του βέλους κάμψης που δίνει το Abaqus κοντά στις επιφάνειες των περιμετρικών κοχλίων, είναι οι αναμενόμενες γιατί όπως ειπώθηκε, σε αυτά τα

σημεία η παραμόρφωση απορροφήθηκε σχεδόν εξ ολοκλήρου από τους κοχλίες. Αυτό είναι και μια καλή απόδειξη, όπως και η μεγαλύτερη σύμπτωση των αποτελεσμάτων καθώς το πάχος της παραμορφώσιμης πλάκας στα μοντέλα ελαττώνεται, ότι η προσομοίωση στο πρόγραμμα Abaqus 6.8 έγινε ικανοποιητικά.

Ήταν επιθυμητό και αναμενόμενο από την αρχή να υπάρχει μία απόκλιση της τάξεως του 20%, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο στην διπλωματική αυτή εργασία. Τι ιδανικό θα ήταν να υπήρχε και μία προοδευτική μείωση της μέσης τιμής της απόκλισης, καθώς το πάχος της πλάκας των μοντέλων ελαττώνεται. Κρίνοντας εκ των αποτελεσμάτων λοιπόν, διαπιστώνεται ότι ο «στόχος» επετεύχθη, ικανοποιώντας πλήρως τις προσδοκίες της διπλωματικής εργασίας.

Γενικά σχόλια

Λαμβάνοντας υπόψιν και τις τρεις συγκρίσεις των μοντέλων, κρίνεται ότι η θεωρητική μέθοδος δεν μπορεί να περιγράψει τη συμπεριφορά μιας κυκλικής μεταλλικής πλάκας όσο το πάχος της αυξάνει, δεδομένου ότι οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν είναι για λεπτές πλάκες, όπου παραλείπεται η διατμητική επιρροή. Θα ήταν ίσως ενδιαφέρον να επεκταθεί η θεωρητική διερεύνηση και με τη χρήση των εξισώσεων των παχέων πλακών. Οι αποκλίσεις των τιμών αυξάνονται σημαντικά και με την προσθήκη πάχους ενός χιλιοστού. Κρίνοντας ότι η θεωρία αυτή καλύπτει ικανοποιητικά το εγχείρημα με το δεύτερο μοντέλο, πάχους πλάκας 4 χιλιοστών, η διαφορά είναι αισθητή στο επόμενο μοντέλο με πάχος πλάκας 5 χιλιοστών, ενώ οι αποκλίσεις κρίνονται απογοητευτικές και απαγορευτικές για το μοντέλο με πάχος 6 χιλιοστών.

Αν και σε αυτό το πρώτο μοντέλο υπάρχει μία αρμονία αποτελεσμάτων όπως αναφέρθηκε στην σύγκριση των τιμών νωρίτερα στο κεφάλαιο αυτό και η θεωρητική μέθοδος δεν βγάζει «παράλογα» αποτελέσματα, αν αποπειραθεί κανείς να μελετήσει την εξόλκευση της πλάκας και να υπολογίσει βέλη κάμψης με τη μέθοδο αυτή κινούμενος σε τέτοιους λόγους πάχους και διαμέτρου πλάκας, τα

αποτελέσματα που θα προκύψουν δε θα είναι καθόλου ικανοποιητικά.

Τελειώνοντας, κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι και οι 2 τρόποι είναι αρκετά ενδιαφέροντες. Και η θεωρία για τα λεπτά ελάσματα, και η χρήση του προγράμματος abaqus. Κάνοντας χρήση σωστών παχών στις πλάκες για την πρώτη μέθοδο και λαμβάνοντας σωστές παραδοχές για τη χρήση του Abaqus, προκύπτουν αποτελέσματα που προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια τα επιθυμητά.

Ωστόσο, και το Abaqus είναι ένα πρόγραμμα το οποίο είναι αρκετά επίπονο στη χρήση και η διαδικασία να το μάθει να το δουλεύει σωστά ο χρήστης, κρίνεται επίσης πολύ επίπονη και χρονοβόρα. Και στην υπολογιστική μέθοδο, χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και προγράμματος Excel για την απλοποίηση των τύπων και των πράξεων, η διαδικασία κρίνεται και πάλι χρονοβόρα, επίπονη και εγκυμονεί πάντα ο κίνδυνος του ανθρώπινου σφάλματος με τις πολλές πράξεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. ENV 1993-1-1 “Design of steel structures”, CEN, Brussels, 1993.**
- 2. IVANYI P., ZYGOMALAS M. & BANIOΤΟΠΟΥΛΟΣ C.C. “On the numerical modeling of the bolt pull-out phenomenon from a steel plate**

in a bolted steel connection”, Proc. 5th GRACM International Congress on Computational Mechanics, 2005, (in print).

3. IVANYI P., ZYGOMALAS M. & BANIOΤΟΠΟΥΛΟΣ C.C. “On the pull-out phenomenon of bolts from steel bolted plate connections: A laboratory testing and numerical approach”, Proc. XI International Conference on Metal Structures, Rzezow, 2006 (in print).

4. Παράρτημα, στοιχεία Documentation του Abaqus

5. American Fastener Technologies Corporation

6. Bleich F. “Buckling strength of metal structures” M’Graw – Hill book Company – N. York – 1952

7. Raftogiannis I. G. , Michaltsos G.T. “Local stress distribution and yielding in steel plates subjected to concentrated transverse loads” Eurosteel 2008, Gratz, Austria, 1873 - 1877

8. Παπαδρακάκης Μ (2001) – Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

**9. Abaqus: ABAQUS / CAE User’s Manual
Abaqus Version 6.8 Documentation, USA**

**10. Abaqus: Abaqus Analysis User’s Manual.
Abaqus Version 6.8 Documentation, USA**

11. Abaqus: Abaqus Theory Manual
Abaqys Version 6.8 Documentation, USA
