



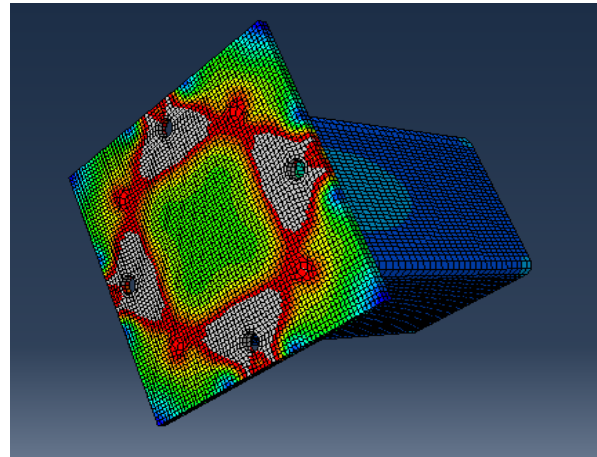
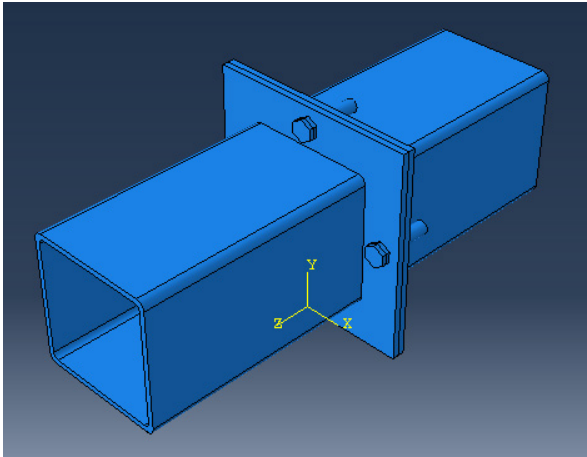
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Δομοστατικής

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Κοχλιωτές μετωπικές συνδέσεις μεταξύ κοιλοδοκών



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βακανά Ευγενία

Λοϊζιάς Παναγιώτης

Επιβλέπων: Ιωαννίδης Γεώργιος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

ΕΜΚ ΔΕ 2013/58

Βακανά Ε.

Λοϊζιάς Π.

Κοχλιωτές μετωπικές συνδέσεις μεταξύ κοιλοδοκών

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2013/58

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Vakana E.

Loizias P.

Bolted frontal connections between hollow sections

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2013/58

Laboratory of Metal Structures, National Technical University of Athens, Greece

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iii
Abstract.....	v
Ευχαριστίες.....	vi

Κεφάλαιο 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ: Κοχλιωτές Συνδέσεις

1.1 Γενικά περί συνδέσεων.....	1
1.2 Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων.....	4
1.2.1 Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων με βάση τον τύπο της δύναμης που καταπονεί τους κοχλίες.....	4
1.2.2 Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων με βάση τον μηχανισμό μεταφοράς της δύναμης από τους κοχλίες.....	5
1.2.3 Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων με βάση την εντατική κατάσταση που επιθυμούμε να παραλάβουμε.....	6
1.2.4 Άκαμπτοι, ημιάκαμπτοι και αρθρωτοί κόμβοι.....	7
1.3 Κοχλίες και εξαρτήματα κοχλιών.....	7
1.3.1 Ποιότητες κοχλιών, ανοχές οπών και γεωμετρικά στοιχεία.....	7
1.3.2 Διάταξη κοχλιών.....	10
1.4 Συνδέσεις εφελκυσμού.....	12
1.4.1 Αντοχές κοχλιών.....	12
1.4.2 Κατηγορίες συνδέσεων εφελκυσμού και απαιτούμενοι έλεγχοι.....	13
1.4.3 Δύναμη επαφής σε συνδέσεις εφελκυσμού (prying force).....	14
1.5 Αποκατάσταση συνέχειας μελών.....	18
1.6 Κοίλες διατομές.....	19
1.6.1 Ορισμός και ιστορικά στοιχεία.....	19
1.6.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κοίλων διατομών.....	20

Κεφάλαιο 2^ο

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΚΟΙΛΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

2.1 Γενικά.....	22
2.2 Μοντέλο κοχλιωτής σύνδεσης των Kato και Mukai.....	23
2.3 Μοντέλο κοχλιωτής σύνδεσης των Wheeler, Clarke, Hancock και Murray.....	25
2.3.1 Γενικά.....	25
2.3.2 Σύνδεση με πλάκα μεγάλου πάχους.....	27
2.3.3 Σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους.....	28
2.3.4 Σύνδεση με πλάκα λεπτού πάχους.....	29
2.4 Τροποποιημένη Μέθοδος Βραχέος Ταυ (Modified Stub-Tee Method)- Εφαρμογή σε κοχλιωτή σύνδεση, μέσω μετωπικών πλακών, κοίλων τετραγωνικών διατομών καταπονούμενων σε εφελκυσμό.....	31
2.4.1 Γενικά.....	31
2.4.2 Τροποποιημένη Μέθοδος Βραχέος ταυ στην περίπτωση τεσσάρων κοχλιών.....	31
2.4.2.1 Σύνδεση με πλάκα μεγάλου πάχους.....	33
2.4.2.2 Σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους.....	34

2.4.2.3 Σύνδεση με λεπτή πλάκα.....	36
-------------------------------------	----

Κεφάλαιο 3^ο

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

3.1 Γενικά.....	38
3.1.1 Ανάλυση φορέων με πεπερασμένα στοιχεία.....	38
3.2 Κοχλιωτή σύνδεση εφελκυσμού κοίλων διατομών μέσω μετωπικών πλακών.....	39
3.2.1 Τρισδιάστατα εξαεδρικά στοιχεία και στοιχεία κελύφους.....	39
3.2.2 Περιγραφή προσομοιώματος τρισδιάστατων εξαεδρικών πεπερασμένων στοιχείων (solid).....	42

Κεφάλαιο 4^ο

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ

4.1 Σύνδεση κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών, με τέσσερις κοχλίες.....	50
4.1.1 Γενικά.....	50
4.1.2 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.....	50
4.1.3 Αποτελέσματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.....	53
4.1.3.1 Αστοχία λόγω διαρροής των κοχλιών.....	54
4.1.3.2 Αστοχία λόγω ταυτόχρονης παραμόρφωσης της πλάκας και διαρροής των κοχλιών.....	57
4.1.3.3 Αστοχία λόγω μεγάλης παραμόρφωσης της πλάκας.....	59
4.1.4 Αποτελέσματα και σύγκριση δοκιμών.....	61
4.2 Σύνδεση κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών με οκτώ κοχλίες.....	67
4.2.1 Γενικά.....	67
4.2.2 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.....	68
4.2.3 Αποτελέσματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.....	71
4.2.3.1 Σύνδεση κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών με οκτώ κοχλίες σε τετραγωνική διάταξη.....	72
4.2.3.2 Σύνδεση κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη.....	74
4.2.3.3 Σύνδεση κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη με ενισχύσεις.....	76
4.2.4 Σύγκριση σύνδεσης με οκτώ κοχλίες σε τετραγωνική διάταξη με σύνδεση με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη.....	78
4.2.5 Σύγκριση σύνδεσης με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη με και χωρίς ενίσχυση.....	80
4.2.6 Αποτελέσματα και σύγκριση δοκιμών.....	82
4.2.7 Σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών λύσεων.....	83

Κεφάλαιο 5^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	85
-----------------------------------	----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Δομοστατικής
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών
Διπλωματική Εργασία: «Κοχλιωτές μετωπικές συνδέσεις μεταξύ
κοιλοδοκών»
Εκπόνηση: Βακανά Ευγενία, Λοϊζιάς Παναγιώτης
Επιβλέπων: Ιωαννίδης Γεώργιος, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση μετωπικών κοχλιωτών συνδέσεων μεταξύ κοίλων διατομών που υποβάλλονται σε εφελκυσμό, με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, μελετήσαμε τις συνδέσεις κοίλων διατομών τετραγωνικού σχήματος(SHS).

Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στις κοχλιωτές συνδέσεις των μεταλλικών κατασκευών. Παρουσιάζονται γενικά οι συνδέσεις μιας μεταλλικής κατασκευής και οι κατηγορίες των κοχλιωτών συνδέσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται βασικά στοιχεία περί κοχλιών και εξαρτημάτων αυτών. Μετά από αυτό επικεντρωνόμαστε στις συνδέσεις εφελκυσμού, όπου αναφερόμαστε στις αντοχές των κοχλιών και στις κατηγορίες των συνδέσεων εφελκυσμού και γίνεται μια περιγραφή της δύναμης επαφής που εμφανίζεται στις εν λόγω συνδέσεις. Τέλος γίνεται μια σύντομη αναφορά στην αποκατάσταση συνέχειας των μελών των μεταλλικών κατασκευών καθώς και στις κοίλες διατομές.

Στη συνέχεια επιχειρείται μια θεωρητική προσέγγιση της συμπεριφοράς σύνδεσης εφελκυσμού κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών συνδεδεμένων με τέσσερις κοχλίες. Αρχικά αναφερόμαστε σε κάποια βιβλιογραφικά ευρήματα σχετικά με το προαναφερόμενο θέμα. Σε ένα από αυτά γίνεται μια κατηγοριοποίηση της συμπεριφοράς της σύνδεσης που μας ενδιαφέρει, ανάλογα με το σχηματισμό ή όχι γραμμών διαρροής στις μετωπικές πλάκες. Έπειτα γίνεται μια προσπάθεια απλοποίησης των μοντέλων της βιβλιογραφίας ώστε να προσαρμοστούν στο θέμα της σύνδεσης εφελκυσμού, κάτι το απλούστερο από αυτό της καμπτόμενης σύνδεσης. Εξάγουμε λοιπόν εξισώσεις που δίνουν την τιμή της αντοχής της σύνδεσης σε κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες συμπεριφοράς της σύνδεσης.

Προχωρώντας παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και για το ABAQUS, το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας. Επιπλέον γίνεται αναφορά στα τρισδιάστατα εξαεδρικά στοιχεία (solid) και στα στοιχεία κελύφους (shell). Ακολούθως γίνεται η προσομοίωση πέντε διαφορετικών πειραμάτων με διαφορετικά κάθε φορά δεδομένα χρησιμοποιώντας τρισδιάστατα εξαεδρικά στοιχεία. Διαπιστώσαμε ότι η επίλυση με πεπερασμένα τρισδιάστατα εξαεδρικά στοιχεία προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια τις πειραματικές τιμές.

Έτσι επιλέξαμε την διακριτικοποίηση που μας οδηγούσε στα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Ακολούθως έγινε επίλυση σύνδεσης εφελκυσμού κοίλης διατομής μέσω μετωπικών πλακών, συνδεδεμένων με τέσσερις κοχλίες, για διάφορες τιμές του λόγου πάχους πλακών προς τη διάμετρο κοχλιών και για διάφορα μεγέθη κοχλιών. Στη συνέχεια γίνεται η προσομοίωση σύνδεσης οχτώ κοχλιών τόσο τετραγωνικής όσο και κυκλικής διάταξης για δεδομένο μέγεθος κοχλιών και για διάφορες τιμές του λόγου πάχους πλακών προς τη διάμετρο κοχλιών και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Έπειτα στη κυκλική διάταξη των οχτώ κοχλιών προσθέτουμε ενισχυτικά ελάσματα για να βελτιστοποιήσουμε ακόμη περισσότερο τη συμπεριφορά της σύνδεσης

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

National Technical University of Athens
School of Civil Engineering
Department of Structural Engineering
Laboratory of Metal Structures
Diploma Thesis: “Bolted frontal connections between hollow sections”
Submitted by: Vakana Evgenia, Loizias Panayiotis
Supervised by: Dr. Ioannidis Georgios, Professor N.T.U.A

Abstract

The purpose of this thesis is to study the behavior of frontal connections between hollow sections using FEM analysis. More precisely, we have focused on connections joining square hollow sections (SHS).

The first chapter is a brief introduction to bolted connections in steel structures. Specifically, there is a presentation of the connections in a steel structure and their classifications. Furthermore the basic features of bolts and their fittings are presented. Then tension connections are examined and more precisely: bolt resistance, classification of tension connections and definition of prying force. Finally, a brief report on beam connections and hollow sections is introduced.

In the second chapter we attempt a theoretical approach to the behavior of frontal connections between hollow sections using four bolts. Hence research regarding this subject is displayed. The main part of this research classifies the behavior of this connection according to the formation or not of yield lines on the end plates. Moreover we try to simplify the models in order to adjust them to the case of tension connections. The outcome is equations that give the connection resistance in each one of the connection behavior categories.

In the beginning of the third chapter we present general characteristics of the finite element analysis and ABAQUS (the software used in our thesis). Furthermore we refer to solid and shell elements. After this we run finite element analysis for five different experiments with different data each time using solid elements. Since the results of this analysis with solid elements are sufficient, we choose the mesh that optimizes the outcome.

Thereafter we elaborate on frontal connections between hollow sections using four bolts, for different values of the ratio of the plate thickness to bolt diameter and different bolt diameters. Then we simulate on ABAQUS connections of eight bolts in rectangular and circular pattern for specified bolt diameter and different values of the ratio of the plate thickness to bolt diameter. Moreover at the circular bolt pattern we add stiffeners in order to optimize the behavior of the connection.

Finally, the fourth chapter presents the conclusions of the thesis.

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε από τους φοιτητές Βακανά Ευγενία και Λοϊζιά Παναγιώτη υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Ιωαννίδη Γεώργιου.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κύριο Ιωαννίδη Γεώργιο, καθηγητή στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε αναθέτοντάς μας την εκπόνηση του θέματος.

Επιπλέον, ευχαριστούμε θερμά την υποψήφια διδάκτορα Μαρία-Ελένη Δασίου για την πολύτιμη της καθοδήγηση, την βοήθεια που μας παρείχε ως προς την εκμάθηση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων και για το χρόνο που διέθεσε για την παρακολούθηση της πορείας της εργασίας.

Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για τη στήριξή τους.

Κεφάλαιο 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΚΟΧΛΙΩΤΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

1.1 Γενικά περί συνδέσεων

Οι μεταλλικές κατασκευές αποτελούνται από τμήματα μεγάλου μεγέθους, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους στο χώρο του έργου. Το κάθε μεγάλο τμήμα της κατασκευής απαρτίζεται από επιμέρους μέλη συνδεόμενα μεταξύ τους. Στις μεταλλικές κατασκευές τόσο η μελέτη των συνδέσεων όσο και η κατασκευή τους απαιτούν χρόνο, και προσπάθεια. Έτσι οι συνδέσεις μιας μεταλλικής κατασκευής είναι από τα σπουδαιότερα σημεία του έργου και γι αυτό δίνεται μεγάλη έμφαση και προσοχή στο σχεδιασμό τους εν σύγκριση με το σχεδιασμό οποιουδήποτε άλλου μέρους της κατασκευής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη πολυπλοκότητα της σύνδεσης σε σχέση με την ανάλυση ενός απλού μέλους. Καλό είναι να αναφέρουμε ότι στην περίπτωση ανάπτυξης μεγάλων τάσεων προτιμούμε να αστοχήσει ένα μεμονωμένο μέλος παρά την αστοχία της σύνδεσης που είναι πολυπλοκότερη, χρονοβόρα στην αντικατάσταση αλλά ίσως επηρεάσει και άλλα μέλη της κατασκευής. Τέλος, στόχος μιας σύνδεσης είναι να μεταφέρει με ασφάλεια τα εντατικά μεγέθη από μέλος σε μέλος.

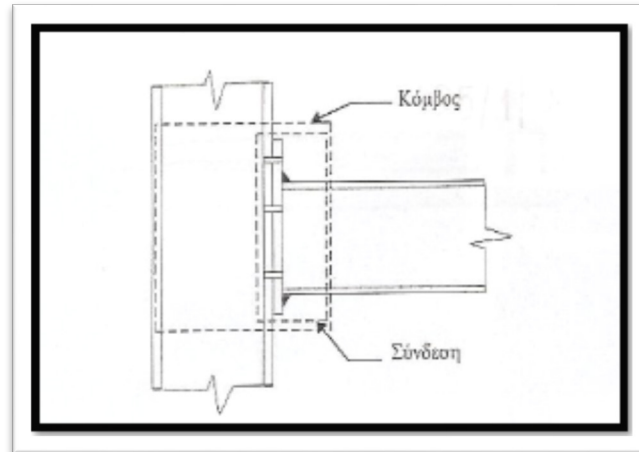
Σκοπός των συνδέσεων σε μια μεταλλική κατασκευή είναι:

- Η σύνδεση μεταξύ των μελών (π.χ. υποσύλωμα με δοκό)
- Η αποκατάσταση συνέχειας σε μέλη
- Η διαμόρφωση των μελών (σύνθετες διατομές κλπ)



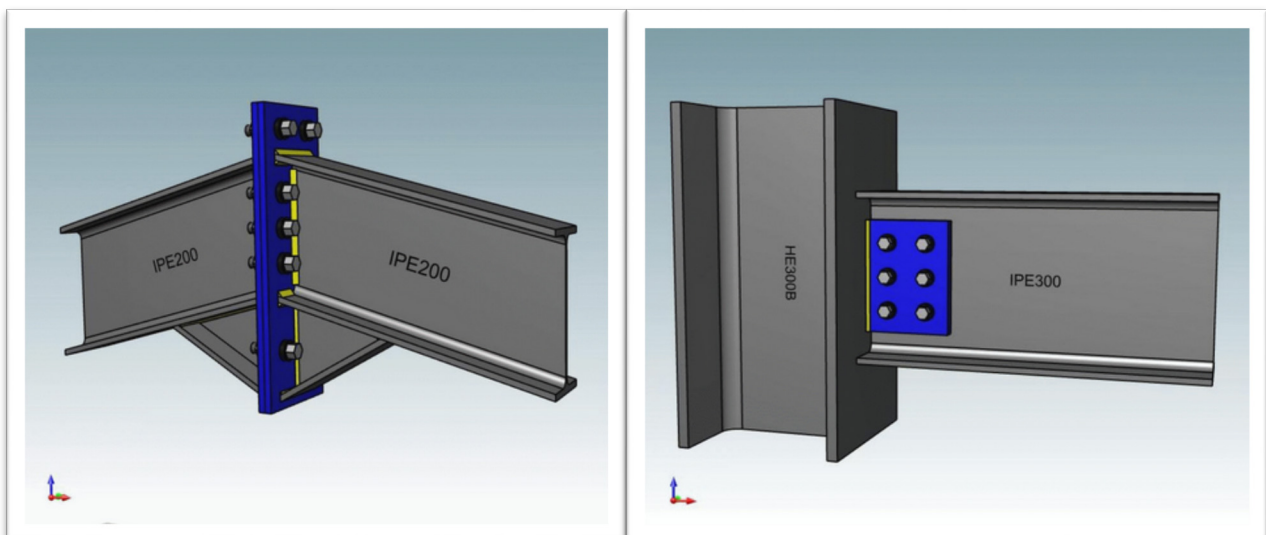
Σχ. 1.1. Αποκατάσταση συνέχειας

Σύνδεση ορίζεται ως το σύνολο των φυσικών επιμέρους τμημάτων που συνδέουν μηχανικά τα συνδεόμενα μέλη. Υπάρχει διαφορά ανάμεσα στους όρους κόμβος και σύνδεση. Ενώ η σύνδεση επικεντρώνεται στη θέση της δράσης, ο κόμβος συμπεριλαμβάνει τη σύνδεση μαζί με τη ζώνη αλληλεπίδρασης μεταξύ των συνδεόμενων μερών, όπως μπορούμε να δούμε στο πιο κάτω σχήμα 1.2:



Σχ. 1.2 Επεξήγηση των όρων κόμβος και σύνδεση

Παραδείγματα κόμβων αποτελούν οι αποκαταστάσεις συνέχειας διατομών δοκών και υποστυλωμάτων, οι κόμβοι δοκών υποστυλωμάτων, οι συνδέσεις δοκών με άλλες δοκούς καθώς και οι κόμβοι έδρασης των υποστυλωμάτων.



(α) Σύνδεση δοκών

(β) Κόμβος δοκού υποστυλώματος

Σχ. 1.3 Παραδείγματα κόμβων

Επιτυγχάνουμε τη σύνδεση των στοιχείων μιας κατασκευής από χάλυβα χρησιμοποιώντας είτε μηχανικά μέσα (κοχλίες, ήλους, πείρους) είτε συγκολλήσεις. Οι ηλώσεις ενώ ήταν το συνηθέστερο μέσο σύνδεσης, τείνουν πλέον να εξαλείφουν στα κτηριακά έργα. Σήμερα για τον σχεδιασμό συνδέσεων στις μεταλλικές κατασκευές ακολουθείται ως κανονισμός ο Ευροκώδικας 3 και πιο συγκεκριμένα το μέρος 1.8 που αναφέρεται στον σχεδιασμό κόμβων.

Η μόρφωση των κοχλιωτών συνδέσεων γίνεται στο εργοτάξιο ενώ των συγκολλητών στο εργοστάσιο, διότι απαιτούν την ύπαρξη κατάλληλων συνθηκών για την εφαρμογή τους. Παράλληλα αλλά πλεονεκτήματα των κοχλιωτών έναντι των συγκολλητών συνδέσεων είναι τα εξής:

- Επιτρέπουν εύκολη συναρμολόγηση αλλά και αποσυναρμολόγηση, σε περίπτωση που απαιτείται αλλαγή χρήσης ή καθαίρεση μιας κατασκευής.
- Καλύτερη επιλογή από άποψη κόστους και χρόνου κατασκευής.
- Έχουν μικρότερη ευαισθησία σε σχέση με τις συγκολλητές συνδέσεις σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, όπως στην περίπτωση διέλευσης τρένων πάνω από μια γέφυρα ή στην περίπτωση σεισμού.

Υπάρχουν φυσικά και κάποια μειονεκτήματα:

- Απαραίτητη η δημιουργία οπών με ακριβείς διαστάσεις στα συνδεόμενα μέλη, κάτι το οποίο απαιτεί υπευθυνότητα, προσοχή και χρόνο.
- Δύσκολη η εξασφάλιση μονολιθικότητας μεταξύ μελών συνδεδεμένων με κοχλίες, κάτι που επιτυγχάνεται με ιδιαίτερη ευκολία στην περίπτωση των συγκολλητών συνδέσεων. [1],[2],[5]



Σχ. 1.4 Εργοταξιακή σύνδεση κοχλιών

Στην παρούσα διπλωματική θα επικεντρωθούμε στις κοχλιωτές συνδέσεις.

1.2 Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων

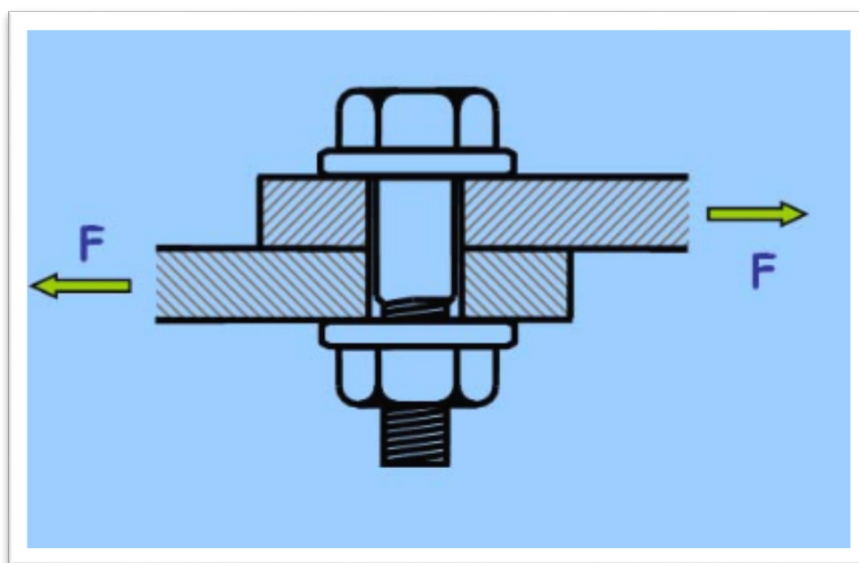
Οι κοχλιωτές συνδέσεις μιας χαλύβδινης διατομής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Με βάση τον τύπο δύναμης που καταπονεί τους κοχλίες
- Με βάση τον μηχανισμό μεταφοράς της δύναμης από τους κοχλίες.
- Με βάση την εντατική κατάσταση που επιθυμούμε να παραλάβουμε

1.2.1 Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων με βάση τον τύπο της δύναμης που καταπονεί τους κοχλίες

Με βάση τη διεύθυνση της δύναμης που μεταφέρει η κοχλιωτή σύνδεση χωρίζεται σε κατηγορίες: (α) τις συνδέσεις διάτμησης (σχ. 1.5), (β) τις συνδέσεις εφελκυσμού (σχ. 1.6) και (γ) τις συνδέσεις όπου υπάρχει συνδυασμός διάτμησης και εφελκυσμού.

Στις συνδέσεις διάτμησης η δύναμη είναι κάθετη στον άξονα του κοχλία, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

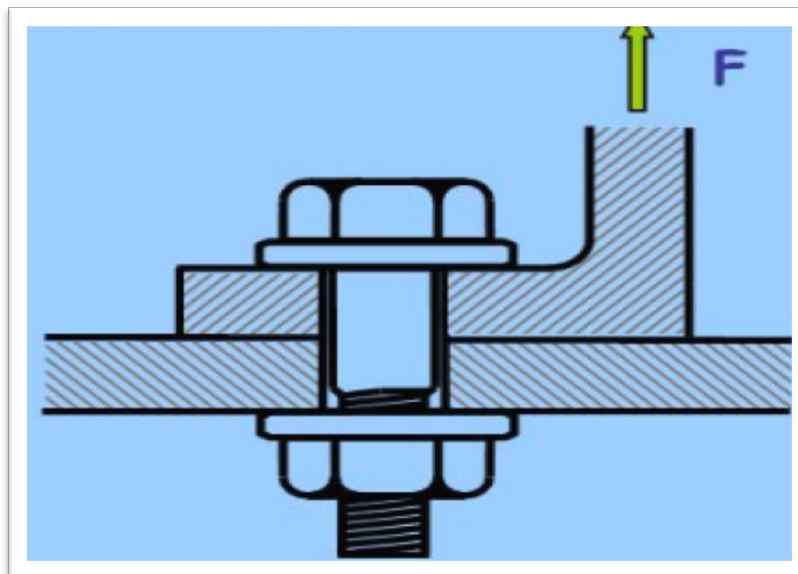


Σχ. 1.5 Σύνδεση διάτμησης

Οι συνδέσεις διάτμησης, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 εντάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Συνδέσεις άντυνας (Κατηγορία A)
- Συνδέσεις ανθεκτικές σε ολίσθηση στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (κατηγορία B)
- Συνδέσεις ανθεκτικές σε ολίσθηση στην οριακή κατάσταση αστοχίας (κατηγορία C)

Στις συνδέσεις εφελκυσμού (κατηγορία D και E), οι οποίες θα μας απασχολήσουν σε αυτήν την εργασία, η δύναμη εφαρμόζεται παράλληλα προς τον άξονα του κοχλία, όπως φαίνεται στο σχήμα:



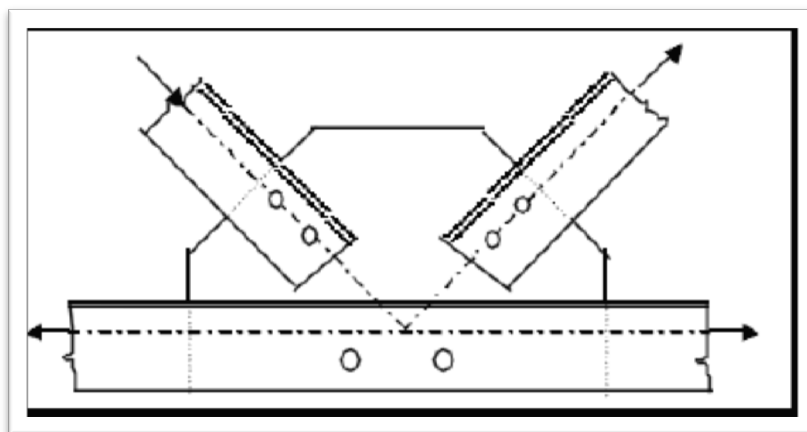
Σχ. 1.6 Σύνδεση εφελκυσμού

1.2.2 Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων με βάση τον μηχανισμό μεταφοράς της δύναμης από τους κοχλίες

Η κατηγοριοποίηση των κοχλιωτών συνδέσεων γίνεται ως προς τον μηχανισμό που χρησιμοποιούν για να μεταφέρουν τη δύναμη. Έτσι για τις κοχλιώσεις διάτμησης υπάρχουν οι συνδέσεις άντυγας και οι συνδέσεις τριβής και για τις κοχλιώσεις εφελκυσμού υπάρχουν οι συνδέσεις με και χωρίς προένταση. Στις συνδέσεις άντυγας η μεταφορά της δύναμης γίνεται μέσω επαφής της άντυγας του ελάσματος με τον κορμό του κοχλία. Σε αυτή την περίπτωση οι ποιότητες κοχλιών που χρησιμοποιούνται είναι 4.6 έως 10.9. Επιπλέον δεν απαιτείται ειδική επεξεργασία των επιφανειών επαφής. Στις κοχλιώσεις τριβής ή προεντεταμένες κοχλιώσεις η μεταφορά διατμητικής δύναμης γίνεται μέσω της αναπτυσσόμενης τριβής των συνδεόμενων ελασμάτων, λόγω της δύναμης προέντασης. Κατά την αύξηση της δύναμης διάτμησης από ένα σημείο και μετά η τριβή υπερνικάται και έτσι συμβαίνει ολίσθηση μεταξύ των ελασμάτων. Επομένως, μόλις υπερνικηθεί η τριβή, η σύνδεση συμπεριφέρεται ως σύνδεση άντυγας. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται κοχλίες υψηλής αντοχής, δηλαδή κατηγορίας 8.8 ή 10.9. Στις συνδέσεις εφελκυσμού χωρίς προένταση χρησιμοποιούνται κοχλίες ποιότητας 4.6 έως 10.9, ενώ στην περίπτωση που έχουμε προένταση οι κοχλίες που μπορεί να χρησιμοποιηθούν είναι 8.8 ή 10.9. Η κατηγορία των κοχλιώσεων εφελκυσμού στην οποία δεν εφαρμόζεται προένταση αποφεύγεται σε συνδέσεις που υπόκεινται σε συχνές μεταβολές του εφελκυστικού φορτίου.[2]

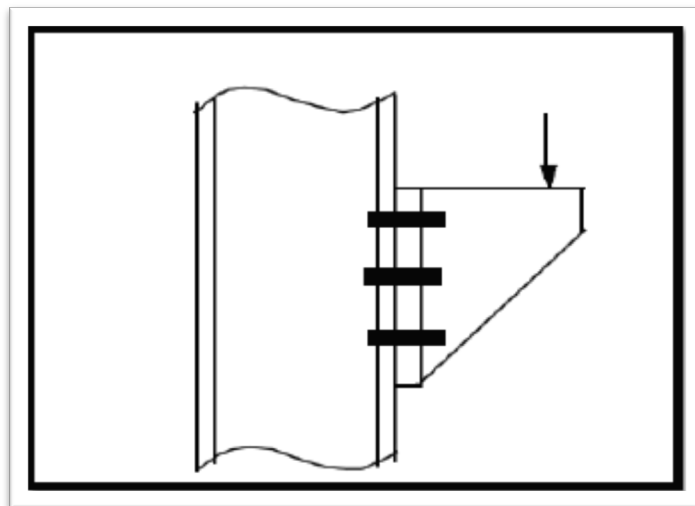
1.2.3 Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων με βάση την εντατική κατάσταση που επιθυμούμε να παραλάβουμε

Ανάλογα με το είδος της εντατικής κατάστασης που επιθυμούμε να παραλάβει η σύνδεση διακρίνουμε: (α) συνδέσεις τέμνουσας, οι οποίες διακρίνονται περαιτέρω στις έκκεντρες συνδέσεις και (β) τις συνδέσεις ροπής. Στις συνδέσεις τέμνουσας οι κοχλίες φορτίζονται στο επίπεδο της σύνδεσης, δεχόμενοι διατμητικές δυνάμεις. Οι κεντρικές συνδέσεις τέμνουσας εμφανίζονται σε κόμβους δικτυωμάτων, όπου οι ράβδοι διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε οι κεντροβαρικοί τους άξονες να συντρέχουν στο θεωρητικό σημείο κόμβου, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7 :



Σχ. 1.7 Κεντρική κοχλιωτή σύνδεση

Εφόσον οι συνδέσεις αυτές συναντώνται σε κόμβους δικτυωμάτων, οι δυνάμεις που μεταφέρονται είναι εφελκυστικές ή θλιπτικές αξονικές των ράβδων του δικτυώματος. Οι συνδέσεις ροπής συναντώνται σε πλαστικές συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων, όπου μεταφέρονται η τέμνουσα και η ροπή της δοκού στο υποσύλωμα μέσω πλαστικής λειτουργίας, σε αποκαταστάσεις συνέχειας διατομών των μελών καθώς και στην πάκτωση των υποστυλωμάτων στην βάση τους. Οι συνδέσεις ροπής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω ανάλογα με την αντοχή της σύνδεσης έναντι ροπής σε σχέση με την αντίστοιχη αντοχή των συνδεόμενων μελών. Έτσι έχουμε τις συνδέσεις πλήρους και μερικής αντοχής. Στις συνδέσεις πλήρους αντοχής, η ροπή αντοχής της σύνδεσης είναι μεγαλύτερη από αυτή των μελών που συνδέονται, ενώ στις συνδέσεις ροπής μερικής αντοχής η ροπή αντοχής της σύνδεσης είναι μικρότερη από την αντοχή των μελών.



Σχ. 1.8 Κεντρική κοχλιωτή σύνδεση

1.2.4 Άκαμπτοι, ημιάκαμπτοι και αρθρωτοί κόμβοι

Οι διάφοροι κόμβοι ανάλογα με τη δυσκαμψία που διαθέτουν μπορούν να διακριθούν σε (α) άκαμπτους, (β) ημιάκαμπτους και (γ) αρθρωτούς. Ο άκαμπτος κόμβος ουσιαστικά δημιουργεί συνθήκες πάκτωσης και επομένως δεν υπάρχει μεταβολή στην αρχική γωνία μεταξύ των μελών που συνδέονται. Ο ημιάκαμπτος κόμβος λειτουργεί ως ελαστική πάκτωση και για την προσομοίωση του χρησιμοποιούνται ελατήρια. Η γωνία μεταξύ του μέλους και του κόμβου είναι συνάρτηση της επιβαλλόμενης ροπής στο μέλος. Τέλος, ο αρθρωτός κόμβος προσομοιώνεται με μια άρθρωση και όπως είναι αναμενόμενο τα συνδεόμενα μέλη στρέφονται ελεύθερα το ένα σε σχέση με το άλλο.[2]

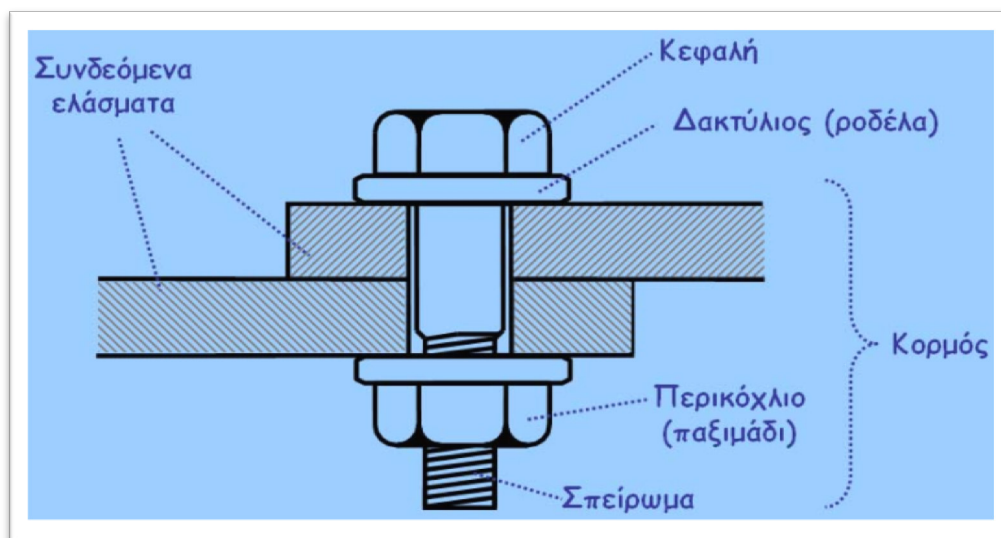
1.3 Κοχλίες και εξαρτήματα κοχλιών

1.3.1 Ποιότητες κοχλιών, ανοχές σπών και γεωμετρικά στοιχεία

Η κεφαλή, ο κορμός και το σπείρωμα είναι τα μέρη ενός κοχλία. Η κεφαλή του κοχλία είναι συνήθως εξαγωνική. Το σπείρωμα ακολουθεί το μετρικό σύστημα ISO, σύμφωνα με το DIN ISO 868, Μέρος 1. Οι κοχλίες συμβολίζονται με το γράμμα M και το μέγεθος της διαμέτρου τους σε mm, για παράδειγμα ο κοχλίας M 20 είναι διαμέτρου 20 mm. Το σπείρωμα του κοχλία είναι συνήθως δεξιόστροφο και όταν σπανίως είναι αριστερόστροφο πρέπει να μαρκάρεται για να μην υπάρχει κίνδυνος ξεσφιζίματος.

Τα περικόχλια, οι δακτύλιοι και τα τυχόν μέσα εξασφάλισης (π.χ. δεύτερο περικόχλιο) είναι τα εξαρτήματα των κοχλιών. Οι δακτύλιοι παρεμβάλλονται μεταξύ του περικοχλίου και των ελασμάτων ή και μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και των

ελασμάτων.



Σχ. 1.9 Μέρη κοχλία

Η επιλογή των κοχλιών στις κατασκευές γίνεται με βάση την ποιότητα του υλικού από το οποίο κατασκευάστηκαν και τη διάμετρο τους. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η επιθυμητή αντοχή του κοχλία στις διάφορες καταπονήσεις που καλείται να αναλάβει.

Με βάση την αντοχή τους οι κοχλίες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Κοινούς κοχλίες
- Κοχλίες υψηλής αντοχής

Ο ευρωκώδικας 3 προβλέπει πέντε κατηγορίες υλικών για κοχλίες: τις κατηγορίες 4.6, 5.6, 6.8, 8.8 και 10.9. Ως κοινοί κοχλίες θεωρούνται αυτοί που έχουν ποιότητα 4.6, 5.6 και 6.8 ενώ ως κοχλίες υψηλής αντοχής θεωρούνται αυτοί με ποιότητα 8.8 και 10.9. Ο χαρακτηρισμός της ποιότητας ενός κοχλία προκύπτει με δύο αριθμούς με μια τελεία μεταξύ τους. Οι δύο αριθμοί μας πληροφορούν σχετικά με το όριο διαρροής f_{yb} και την εφελκυστική αντοχή f_{ub} του κοχλία. Ο πρώτος αριθμός εκφράζει το 1/100 της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία σε MPa και ο δεύτερος το δεκαπλάσιο του λόγου μεταξύ του ορίου διαρροής f_{yb} και της εφελκυστικής αντοχής f_{ub} για κάθε ποιότητα κοχλία. Για να χαρακτηρίσουμε ένα κοχλία, χρησιμοποιούμε την διάμετρο του κοχλία και την σχετική προδιαγραφή, για παράδειγμα κοχλίας M 16, 10.9, DIN 6914.

Για κατασκευές με χαμηλή καταπόνηση, όπως σε υπόστεγα αποθηκών και σε απλά κτίρια χρησιμοποιούνται οι κοινοί κοχλίες. Κοχλίες υψηλής αντοχής εφαρμόζονται σε συνδέσεις της γεφυροποιίας και γενικά σε έργα όπου παρατηρούνται υψηλές καταπονήσεις από στατικά φορτία, αλλά και σε περιπτώσεις δυναμικών φορτίων.

Τύπος κοχλιών	Ποιότητα	f_{yb} (MPa)	f_{ub} (MPa)
Κοινοί	4.6	240	400
	5.6	300	500
	6.8	480	600
Υψηλής αντοχής	8.8	640	800
	10.9	900	1000

Πιν. 1.1 Ποιότητες και αντοχές κοχλιών

Μόνο οι κοχλίες υψηλής αντοχής μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προεντεταμένοι κοχλίες σε συνδέσεις τριβής.

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των κοχλιών γίνεται με βάση τη σχέση μεταξύ διαμέτρου σπειρώματος και διαμέτρου κορμού. Έτσι έχουμε:

- Κοινούς κοχλίες
- Εφαρμοσμένους κοχλίες

Οι κοινοί κοχλίες έχουν ίσες διαμέτρους σπειρώματος και κορμού κοχλία. Έτσι προβλέπεται μια ανοχή κατά τη διάνοιξη των οπών στα ελάσματα ώστε να διευκολύνεται η διέλευση των κοχλιών και να αποφεύγεται ο τραυματισμός του σπειρώματος. Υπάρχουν τέσσερα είδη οπών με διαφορετικές ανοχές. Οι κανονικές και οι υπερμεγέθεις οπές έχουν σχήμα κύκλου και οι επιμήκεις οπές έχουν σχήμα ορθογωνικό με ημικυκλικά άκρα.

Για τη διάμετρο της οπής ισχύει η σχέση:

$$d_0 = d + a \quad (1.1)$$

Όπου:

- d_0 η διάμετρος της οπής
- d η διάμετρος του κορμού του κοχλία
- a η ανοχή

Στον πίνακα δίνονται οι ανοχές των διαφόρων τύπων που χρησιμοποιούνται:

Τύπος οπών	Κανονικές	Υπερμεγέθεις	Βραχείες σχισμές		Επιμήκεις οπές	
Εφαρμογή	Γενική	Προεντεταμένες κοχλιώσεις				
Άξονας	x και y	x και y	x	y	x	y
M 12	1	3	4	1	$d_0 =$ $2,5 \cdot d$	1
M 16	2	4	6	2		2
M 20-M 22	2	4	6	2		2
M 24	2	6	8	2		2
\geq M 27	3	8	10	3		3
Για εφαρμοσμένους κοχλίες: $a = 0,3 \text{ mm}$						

Πιν. 1.2 Ανοχή οπών σε mm

Το σπείρωμα στους εφαρμοσμένους κοχλίες είναι κατά 1mm μικρότερο του κορμού, επιτρέπεται έτσι μια πολύ μικρή ανοχή μεταξύ οπής και κοχλία. [1],[2],[5],[12]

Το μήκος του κοχλία εξαρτάται από το πάχος των συνδεόμενων ελασμάτων, από το μήκος του σπειρώματος του κοχλία, από τα πάχη των δακτυλίων και του περικοχλίου και από μια ανοχή προβλεπόμενη από τις προδιαγραφές. Οι διαστάσεις των κοχλιών και των εξαρτημάτων τους καθορίζονται από διάφορες προδιαγραφές (ISO, CEN, DIN κλπ.). Οι κυριότερες διαστάσεις των κοχλιών δίνονται στον Πίνακα 1.3:

Κοχλίες	M 12	M 16	M 20	M 22	M 24	M 27	M 30	M 36
d σπειρώματος	12	16	20	22	24	27	30	36
d κορμού, κοινοί κοχλίες	12	16	20	22	24	27	30	36
d κορμού, εφαρμοσμένοι κοχλίες	13	17	21	23	25	28	31	37
Εμβαδόν σπειρώματος A_s (cm ²)	0,843	1,57	2,45	3,03	3,53	4,59	5,61	8,17

Πιν. 1.3 Διαστάσεις κοχλιών

1.3.2 Διάταξη κοχλιών

Όταν σχεδιάζεται η διάταξη των κοχλιών στις συνδέσεις διάτμησης λαμβάνονται υπόψη ελάχιστες και μέγιστες αποστάσεις μεταξύ των κοχλιών αλλά και από τα άκρα των ελασμάτων. Ελάχιστες αποστάσεις λαμβάνονται υπόψη με σκοπό να μην έχουμε μεγάλη μείωση της αντοχής του ελάσματος σε σύνθλιψη άντυγας, καθώς και να μην υπάρχει δυσκολία κατά την σύσφιγξη των κοχλιών. Μέγιστες αποστάσεις χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να υπάρχει επαρκής επαφή των ελασμάτων για να εμποδίζεται η διάβρωση τους και να αποφεύγεται ο τοπικός λυγισμός μεταξύ οπών στα ελάσματα στην περίπτωση των θλιπτικών δυνάμεων. Έτσι λοιπόν ο Ευρωκώδικας 3 παρέχει σε πίνακες τις μέγιστες και τις ελάχιστες αποστάσεις που πρέπει να τηρούνται στις κοχλιώσεις διάτμησης. Αυτό δεν ισχύει όμως και στην περίπτωση των κοχλιώσεων εφελκυσμού, οι οποίες κυρίως μας απασχολούν σε αυτή τη διπλωματική εργασία. [1],[2]

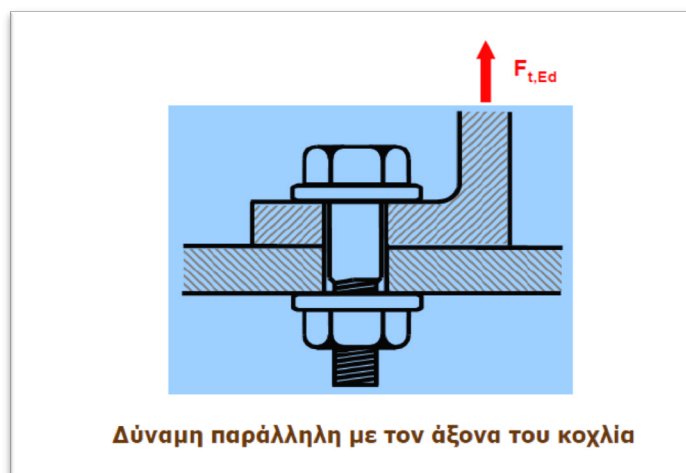
	Ελάχιστη	Μέγιστη		
		Κατασκευές από χάλυβες που συμφωνούν με το EN 10025 εκτός εκείνων που συμφωνούν με το EN 10025-5		Κατασκευές από χάλυβες που συμφωνούν με το EN 10025-5
		Χάλυβας εκτεθειμένος σε καυτικές συνθήκες ή άλλα διαβρωτικά περιβάλλοντα	Χάλυβας μη εκτεθειμένος	Χάλυβας χωρίς προστασία
Απόσταση από άκρο e_1	$1,2d_0$	$4t + 40 \text{ mm}$		Η μεγαλύτερη από $8t$ ή 125 mm
Απόσταση από άκρο e_2	$1,2d_0$	$4t + 40 \text{ mm}$		Η μεγαλύτερη από $8t$ ή 125 mm
Απόσταση e_3 σε επιμήκεις οπές	$1,5d_0$			
Απόσταση e_4 σε επιμήκεις οπές	$1,5d_0$			
Βήμα p_1	$2,2d_0$	Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm	Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm	Η μικρότερη από $14t_{min}$ ή 175 mm
Βήμα $p_{1,0}$		Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm		
Βήμα $p_{1,1}$		Η μικρότερη από $28t$ ή 400 mm		
Βήμα p_2	$2,4d_0$	Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm	Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm	Η μικρότερη από $14t_{min}$ ή 175 mm

Πιν. 1.4 Ελάχιστες και μέγιστες αποστάσεις μεταξύ κοχλιών

1.4 Συνδέσεις εφελκυσμού

1.4.1 Αντοχές κοχλιών

Στις συνδέσεις εφελκυσμού η δύναμη είναι παράλληλη με τον άξονα του κοχλία και μεταφέρεται δια μέσου του κορμού του.



Σχ. 1.10 Δύναμη παράλληλη με τον άξονα του κοχλία

Η αστοχία λαμβάνει χώρα στη διατομή του σπειρώματος επειδή αυτή είναι ασθενέστερη από την πλήρη διατομή του κορμού. Άλλη μορφή αστοχίας που εμφανίζεται στις συγκεκριμένες συνδέσεις είναι η διάτρηση του ελάσματος. Διάτρηση παρατηρείται όταν το έλασμα είναι πολύ λεπτό και δεν έχουμε τοποθετήσει δακτυλίους, οι οποίοι διευρύνουν την επιφάνεια διάτρησης.



α) αστοχία λόγω διάτρησης του ελάσματος



β) αστοχία λόγω διάτμησης του κορμού

Σχήμα 1.11 Μορφές αστοχίας κοχλιών

Η αντοχή του κοχλία σε εφελκυσμό δίνεται από τη σχέση:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (1.2)$$

όπου $k_2 = 0,9$ γενικά

=0,63 για κοχλίες βυθισμένης κεφαλής

f_{ub} : όριο θραύσης χάλυβα κοχλία

A_s : ενεργός διατομή του κορμού του κοχλία

$\gamma_{M2} = 1,25$

Η αντοχή σε διάτρηση του ελάσματος είναι:

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (1.3)$$

όπου d_m : μέση διάμετρος της κεφαλής του κοχλία

t_p : πάχος ελάσματος

f_u : όριο θραύσης χάλυβα ελάσματος

$\gamma_{M2} = 1,25$ [1],[2]

1.4.2 Κατηγορίες συνδέσεων εφελκυσμού και απαιτούμενοι έλεγχοι

Με βάση τον Ευρωκώδικα 3 οι συνδέσεις εφελκυσμού διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Κατηγορία D** : Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι συνδέσεις με κοινούς κοχλίες, δηλαδή κοχλίες χωρίς προένταση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε ποιότητα κοχλία. Οι συγκεκριμένες συνδέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σχεδιασμό για συνήθη φορτία ανέμου. Στην περίπτωση όπου η σύνδεση καταπονείται από δυναμική φόρτιση χρησιμοποιούνται δύο περικόχλια, το ένα δίπλα στο άλλο, για να αποφευχθεί η αποκοχλίωση.

Οι έλεγχοι που απαιτούνται όταν πραγματοποιείται σύνδεση αυτής της κατηγορίας είναι:

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} \quad (1.4)$$

$$F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd} \quad (1.5)$$

όπου $F_{t,Ed}$: εφελκυστική δύναμη σχεδιασμού

$F_{t,Rd}$: αντοχή σε εφελκυσμό του κοχλίου, δίνεται από την εξ.(1.2)

$B_{p,Rd}$: αντοχή σε διάτρηση του ελάσματος, δίνεται από την εξ.(1.3)

- **Κατηγορία E** : Στην κατηγορία E χρησιμοποιούνται προεντεταμένοι κοχλίες με ελεγχόμενη σύσφιξη. Οι προεντεταμένοι κοχλίες μπορούν να είναι μόνο ποιότητας 8.8 ή 10.9.

Οι απαιτούμενοι έλεγχοι, ομοίως με πριν:

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} \quad (1.6)$$

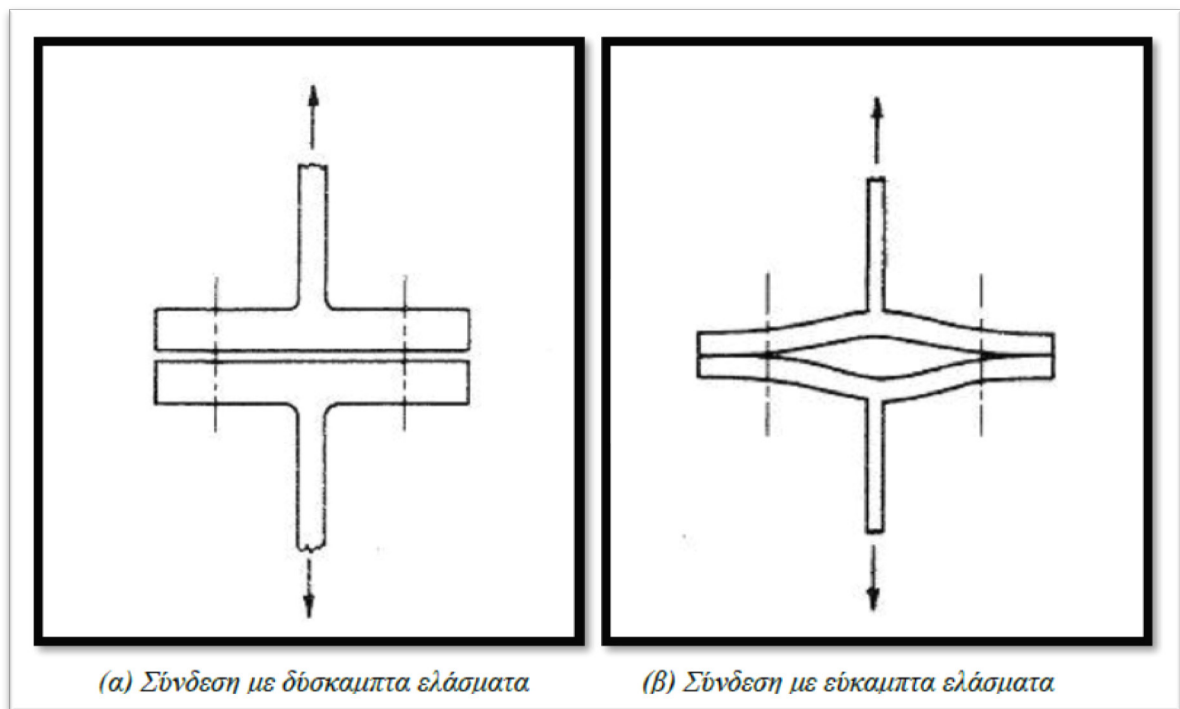
$$F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd} \quad (1.7)$$

1.4.3 Δύναμη επαφής σε συνδέσεις εφελκυσμού (prying force)

Η αύξηση της εφελκυστικής δύναμης που καταπονεί τους κοχλίες σε εφελκυσόμενες κοχλιωτές συνδέσεις ταυ, όταν συμβαίνει παραμόρφωση των ελασμάτων, ονομάζεται δράση επαφής (prying action). Οι δυνάμεις που δημιουργούνται λόγω της παραπάνω παραμόρφωσης λέγονται δυνάμεις επαφής (prying forces).

Για καλύτερη κατανόηση της έννοιας της δύναμης επαφής θα γίνει σύγκριση μιας σύνδεσης ταυ με πολύ δύσκαμπτα συνδεόμενα ελάσματα με μια με σχετικά

εύκαμπτα ελάσματα όπως φαίνεται στο σχήμα:



Σχ. 1.12 Δημιουργία της δύναμης επαφής σε συνδέσεις ταυ

Όταν εφαρμόζεται εφελκυστικό φορτίο στις συνδέσεις ταυ, τα πολύ δύσκαμπτα ελάσματα παραμένουν παράλληλα μεταξύ τους χωρίς να παραμορφώνονται αισθητά και, άρα, να μη δημιουργούνται δυνάμεις επαφής. Αντίθετα, τα εύκαμπτα ελάσματα, λόγω κάμψης, παραμορφώνονται έτσι ώστε να δημιουργούνται οι συγκεκριμένες δυνάμεις επαφής, οι οποίες είναι θλιπτικές και εμφανίζονται στην περιοχή μεταξύ του κοχλία και του άκρου του ελάσματος.

Από την ισορροπία των δύο προαναφερόμενων συνδέσεων όπως φαίνεται στο σχήμα 1.13 προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

Για την περίπτωση της σύνδεσης με δύσκαμπτα ελάσματα:

$$2B = 2F \quad (1.8)$$

$$B = F \quad (1.9)$$

όπου B: εφελκυστική δύναμη κοχλία

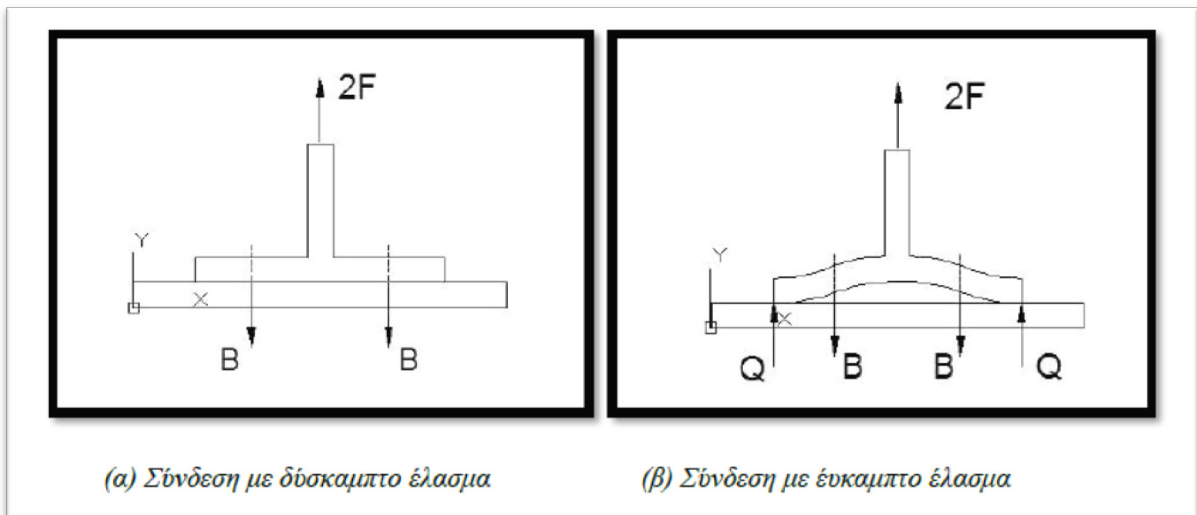
F: δύναμη που εφελκύει τη σύνδεση

Για την περίπτωση της σύνδεσης με εύκαμπτα ελάσματα:

$$2B = 2F + 2Q$$

$$B = F + Q \quad (1.10)$$

όπου Q: δύναμη επαφής



Σχ. 1.13 Δυνάμεις που ασκούνται σε συνδέσεις ταυ

Στις συνδέσεις στις οποίες η αστοχία προέρχεται από διαρροή των κοχλιών και όχι του ελάσματος, η δύναμη επαφής συνήθως μειώνεται όσο το εξωτερικά ασκούμενο φορτίο στη σύνδεση πλησιάζει την αντοχή της σύνδεσης. Κοντά στην αστοχία, η διαρροή των κοχλιών επιτρέπει την απομάκρυνση των δύο ταυ, με αποτέλεσμα τη μείωση των δυνάμεων επαφής. Αντίθετα, όταν η αστοχία οφείλεται στην δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στο έλασμα και, επομένως, στη δημιουργία μηχανισμού, δεν παρατηρείται μείωση στο μέγεθος της δύναμης επαφής.

Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται προεντεταμένοι κοχλίες στη σύνδεση με δύσκαμπτα ελάσματα, όταν το ασκούμενο εφελκυστικό φορτίο είναι μικρότερο του αθροίσματος των δυνάμεων προεντάσεως των κοχλιών δεν υπάρχει διαχωρισμός των δύο ταυ. Όταν το φορτίο εφελκυσμού υπερβεί το άθροισμα των δυνάμεων προεντάσεως, τα δύο ταυ διαχωρίζονται πλήρως μεταξύ τους. Από αυτή τη στιγμή μέχρι και τη στιγμή της αστοχίας, το άθροισμα των δυνάμεων των κοχλιών ισούται με το φορτίο που ασκείται στη σύνδεση.

Συμπερασματικά, η ανάλυση της δύναμης επαφής, δηλαδή ο υπολογισμός του μεγέθους της σε μια σύνδεση και η εύρεση της ακριβούς θέσης στην οποία ασκείται, είναι μια αρκετά δύσκολη διαδικασία. Τα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε σε μια τέτοια ανάλυση είναι τα εξής:

- η ανάγκη για χρήση ελαστοπλαστικής ανάλυσης
- η σημασία των ατελειών και η εφαρμογή τους στην κατανομή των δυνάμεων επαφής
- η αβεβαιότητα σχετικά με το σημείο εφαρμογής της δύναμης επαφής, λόγω καμπύλωσης της μετωπικής πλάκας
- η αβεβαιότητα στην κατανομή των τάσεων μεταξύ της κεφαλής του κοχλίου και της πλάκας
- τοπικά φαινόμενα στην περιοχή γύρω από τις οπές των κοχλιών

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν το μέγεθος της δύναμης επαφής σε μια σύνδεση ταυ είναι η γεωμετρία της σύνδεσης, καθώς και το μέγεθος και η ποιότητα των κοχλιών. Ακόμα σε συνδέσεις με λεπτά ελάσματα και μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των κοχλιών και των άκρων των ελασμάτων, παρατηρείται αύξηση των δυνάμεων επαφής. Επίσης μεγάλη δύναμη επαφής έχουμε και στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται κοχλίες μεγάλης διαμέτρου και υψηλής ποιότητας. Οι πιο πάνω παράγοντες δεν λαμβάνονται υπόψη μεμονωμένα, αλλά εξετάζονται οι σχέσεις μεταξύ αυτών.[6],[7]

1.5 Αποκατάσταση συνέχειας μελών

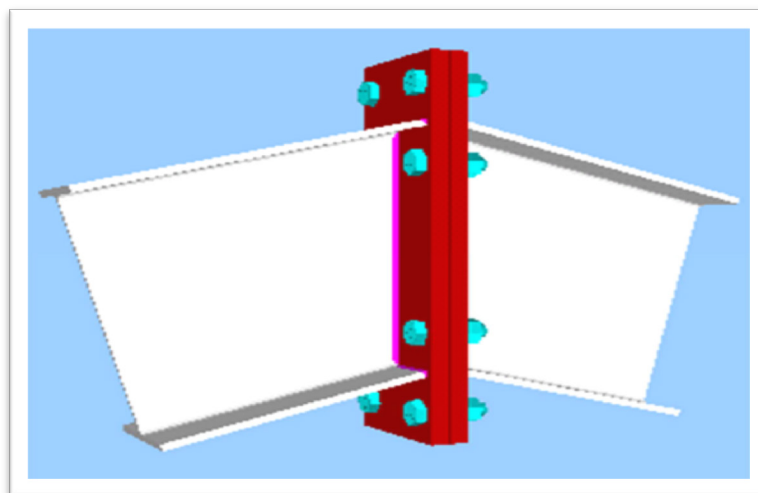
Η αποκατάσταση συνέχειας των μελών μιας κατασκευής είναι απαραίτητη γιατί κατά την μεταφορά τους στη θέση του έργου υπάρχει περιορισμός στο μήκος τους. Οι συνηθέστεροι τρόποι αποκατάστασης είναι :

- με λεπίδες



Σχ. 1.14 Αποκατάσταση συνέχειας μελών με λεπίδες

- με μετωπικές πλάκες



Σχ. 1.15 Αποκατάσταση συνέχειας μελών με μετωπικές πλάκες

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας μέσω μετωπικών πλακών. Σε αυτή την περίπτωση οι μετωπικές πλάκες συγκολλούνται στις άκρες των δύο δοκών ή υποστυλωμάτων τις οποίες σκοπεύουμε την αποκατάσταση συνέχειας και ακολούθως, συνδέονται μεταξύ τους με τη βοήθεια κοχλιών.

Οι αποκαταστάσεις συνέχειας διακρίνονται σε πλήρεις και μερικές. Πλήρης αποκατάσταση συνέχειας θεωρείται αυτή στην οποία η αντοχή της σύνδεσης είναι ίση ή μεγαλύτερη από την αντοχή της διατομής, ενώ μερική αποκατάσταση αυτή στην οποία η αντοχή της σύνδεσης είναι μικρότερη από την αντοχή της διατομής. Η μερική αποκατάσταση συνήθως επιλέγεται για λόγους οικονομίας.[2]

1.6 Κοίλες διατομές

1.6.1 Ορισμός και ιστορικά στοιχεία

Κοίλες διατομές ορίζονται οι μεταλλικές σωληνωτές ράβδοι των οποίων η κάθετη διατομή στον κατά μήκος άξονα της ράβδου έχει κλειστή γεωμετρική μορφή (κυκλική, τετραγωνική, ορθογωνική, εξαγωνική).



Σχ. 1.16 Διάφορες μορφές κοίλων διατομών

Ο μηχανικός ξεκίνησε να χρησιμοποιεί τις διατομές αυτές εδώ και αρκετά χρόνια για τη μεταφορά ρευστών και στη συνέχεια για την κατασκευή τεχνικών έργων. Όταν ξεκίνησε η χρήση τους για κατασκευή τεχνικών έργων ήταν οικονομικά ασύμφωρες για δύο κυρίως λόγους . Πρώτον, το κόστος παραγωγής τους ήταν αρκετά υψηλό και δεύτερον παρουσιάζονταν αρκετές δυσκολίες στα σημεία σύνδεσης των μελών.



Σχ.1.17 Γέφυρα Firth of Forth

Η χρήση των κοίλων διατομών διευρύνθηκε με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτροσυγκολλήσεων, της τεχνολογίας κοπής των κοίλων διατομών, καθώς και της εξέλιξης της μεταλλουργίας με την αύξηση της αντοχής του χάλυβα. Από το 1975 και μετά οι κοίλες διατομές εφαρμόζονται σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες έργων.

Η κατασκευή των κοίλων διατομών γίνεται εν θερμώ από ανθρακούχο χάλυβα κατάλληλο για συγκόλληση. Επιπλέον οι διατομές αυτές περιέχουν μαγγάνιο, φώσφορο, χρώμιο, βανάδιο κλπ. Ο χάλυβας είναι κοινός ή υψηλής αντοχής.

Ενδεικτικές κατηγορίες έργων που συναντούμε κοίλες διατομές:

- γέφυρες
- πολυώροφα κτίρια (βιομηχανικά κτίρια, κατοικίες)
- υπόστεγα και στέγες
- εξοπλισμός εργοταξίων
- ικριώματα, κιγκλιδώματα, κουφώματα

1.6.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κοίλων διατομών

Οι κοίλες διατομές παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Μεγαλύτερη αντοχή σε λυγισμό και στρέψη σε σύγκριση με τις ανοιχτές διατομές ίδιου βάρους
- Αποφυγή χρήσης κομβοελασμάτων με αποτέλεσμα πιο ελαφρές και απλούστερες κατασκευές
- Καλύτερη συμπεριφορά στην ανεμοπίεση λόγω αεροδυναμικών χαρακτηριστικών
- Οικονομία στην επένδυση λόγω μικρότερου βάρους σε σχέση με τις ανοιχτές
- Πιο εύκολη επίβλεψη και συντήρηση επειδή μειώνεται η επιφάνεια που απαιτεί συντήρηση, δεν υπάρχουν εστίες οξείδωσης και προστατεύονται οι εσωτερικές επιφάνειες λόγω στεγάνωσης των ράβδων

- Εκμετάλλευση εσωτερικού κενού ράβδων για πέρασμα καλωδίων ή άλλου εξοπλισμού
- Καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα
- Ικανότητα εύκολης καμπύλωσης
- Δυνατότητα τοποθέτησης σκυροδέματος στο κενό για αύξηση της αντοχής , πυροπροστασία

Παρουσιάζουν όμως και μειονεκτήματα όπως:

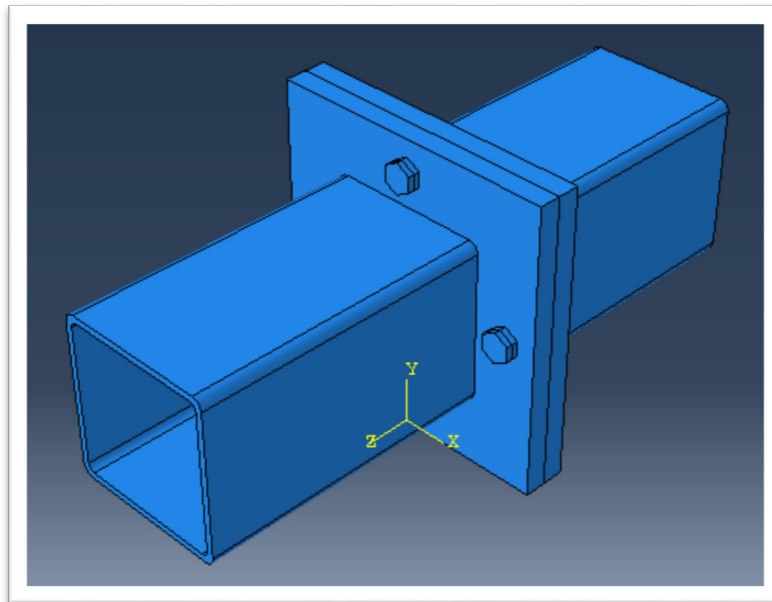
- Μεγάλο κόστος πρώτης ύλης ανά μονάδα βάρους
- Απαίτηση για υψηλή ποιότητα κατασκευής κυρίως στις περιοχές των συνδέσεων.[3]

Κεφάλαιο 2^ο

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΚΟΙΛΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

2.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με κοχλιωτές συνδέσεις κοίλων διατομών μέσω μετωπικών πλακών και στη συνέχεια θα απλοποιήσουμε τα βιβλιογραφικά ευρήματα και θα τα προσαρμόσουμε στην περίπτωση κοχλιωτής σύνδεσης κοίλης τετραγωνικής διατομής μέσω μετωπικών πλακών η οποία υποβάλλεται σε εφελκυσμό.



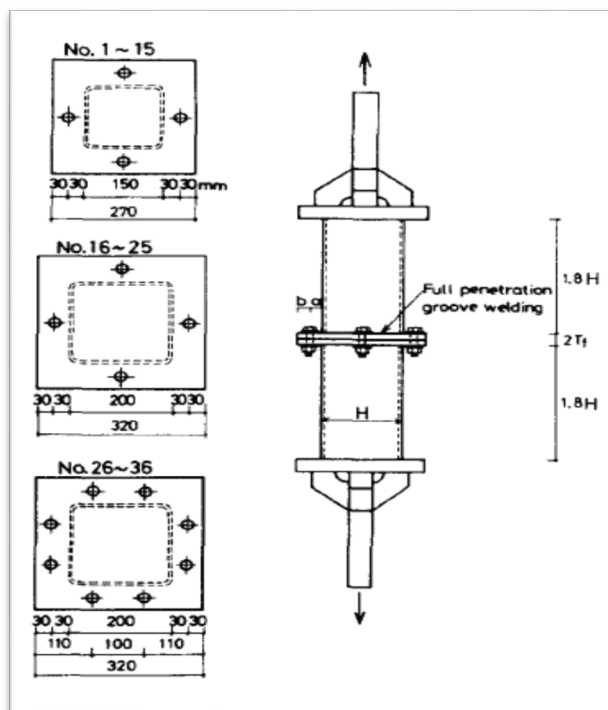
Σχ. 2.1 Αποκατάσταση συνέχειας κοιλοδοκού μέσω μετωπικών πλακών με τέσσερις κοχλίες

Ενδιαφέρουσες ερευνητικές εκθέσεις, με περιεχόμενο ανάλογο της παρούσας εργασίας είναι η εργασία “Bolted Tension Flanges Joining Square Hollow Section Members” (Kato & Mukai, 1985) από το πανεπιστήμιο του Τόκιο, καθώς και οι εργασίες “Design Model for Bolted Moment End Plate Connections using Rectangular Hollow Sections” (A. Wheeler et al., 1997) και “Design Model for Bolted Moment End Plate Connections using Rectangular Hollow Sections Using Eight Bolts” (A. Wheeler et al., 2003) και οι δύο

από το πανεπιστήμιο του Σύδνεϋ οι οποίες στηρίχθηκαν πάνω στην εργασία των Kato και Mukai. Επίσης η διπλωματική εργασία “Bolted Connections for Rectangular Hollow Sections under Tensile Loading” (Silke Willibald, 2003) του πανεπιστημίου της Καρλσρούη στηριζόμενη και αυτή στους Kato και Mukai, μελετά και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν τα πειραματικά αποτελέσματα π.χ τη συγκόλληση.

2.2 Μοντέλο κοχλιωτής σύνδεσης των Kato και Mukai

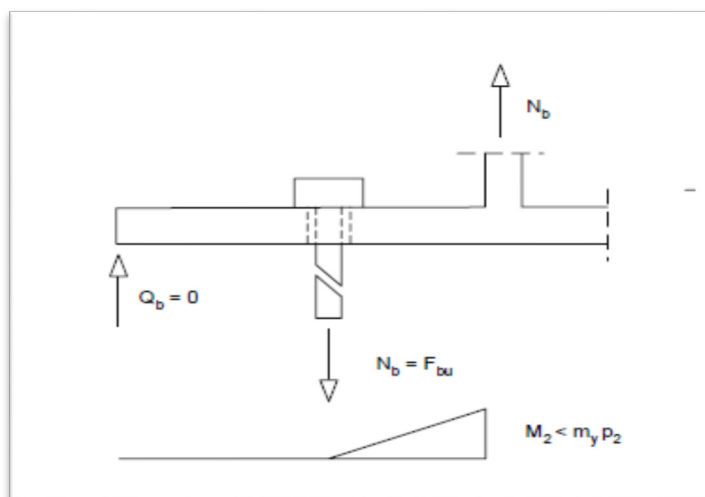
Οι Kato και Mukai (1985) εξέτασαν θεωρητικά και πειραματικά τη συμπεριφορά κοχλιωτών συνδέσεων κοίλων τετραγωνικών διατομών μέσω μετωπικών πλακών οι οποίες υποβάλλονται σε αξονικό εφελκυσμό με τέσσερις και οκτώ κοχλίες. Οι γεωμετρικές μεταβλητές επιλέχθηκαν να είναι η διάμετρος των κοχλιών, ο αριθμός των κοχλιών, το πάχος των μετωπικών πλακών και το μέγεθος των κοίλων τετραγωνικών διατομών. Οι λεπτομέρειες των συνδέσεων αλλά και η πειραματική διάταξη φαίνονται στο πιο κάτω σχήμα:



Σχ. 2.2 Λεπτομέρειες συνδέσεων

Οι Kato και Mukai αναγνώρισαν στο μοντέλο τρεις πιθανές μορφές αστοχίας : την αστοχία λόγω διαρροής των εφελκυσμένων κοχλιών, την αστοχία λόγω μεγάλων παραμορφώσεων των πλακών και την αστοχία λόγω συνδυασμού παραμορφώσεως

των πλακών και διαρροής των κοχλιών. Η καμπτική αντοχή των πλακών εκτιμήθηκε με τη χρήση της θεωρίας των γραμμών διαρροής, όπου η πλαστική ροπή αντοχής των πλακών προκύπτει από την εξίσωση του εσωτερικού με το εξωτερικό έργο για κάθε πιθανό πλαστικό μηχανισμό κατάρρευσης που εξετάζεται. Η εφελκυστική δύναμη των κοχλιών υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τη δύναμη επαφής την οποία περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



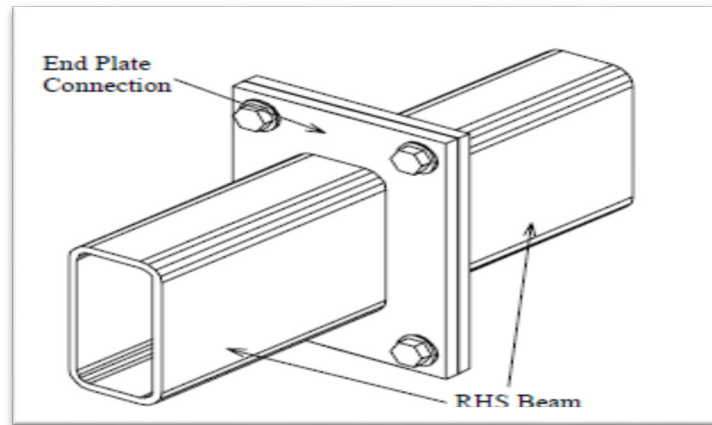
Σχ. 2.3 Αστοχία λόγω διαρροής των εφελκυσόμενων κοχλιών

Ανάλογα με το αν η αστοχία συμβαίνει πριν ή μετά τη στιγμή του διαχωρισμού των δύο πλακών, δηλαδή τη στιγμή που η εξωτερική δύναμη που δρα στη σύνδεση εξισώνεται με τη δύναμη στην οποία έχουν προενταθεί οι κοχλίες, προκύπτουν διαφορετικές σχέσεις για τον υπολογισμό της καμπτικής αντοχής των πλακών και της δύναμης των κοχλιών. Στη συγκεκριμένη εργασία υπολογίστηκε η δύναμη των κοχλιών κατά το διαχωρισμό των πλακών, η καμπτική αντοχή των πλακών όταν ο μηχανισμός δημιουργείται μετά το διαχωρισμό τους και η καμπτική αντοχή των πλακών όταν η δημιουργία μηχανισμού συμβαίνει πριν το διαχωρισμό τους. [4]

2.3 Μοντέλο κοχλιωτής σύνδεσης των Wheeler, Clarke, Hancock και Murray

2.3.1 Γενικά

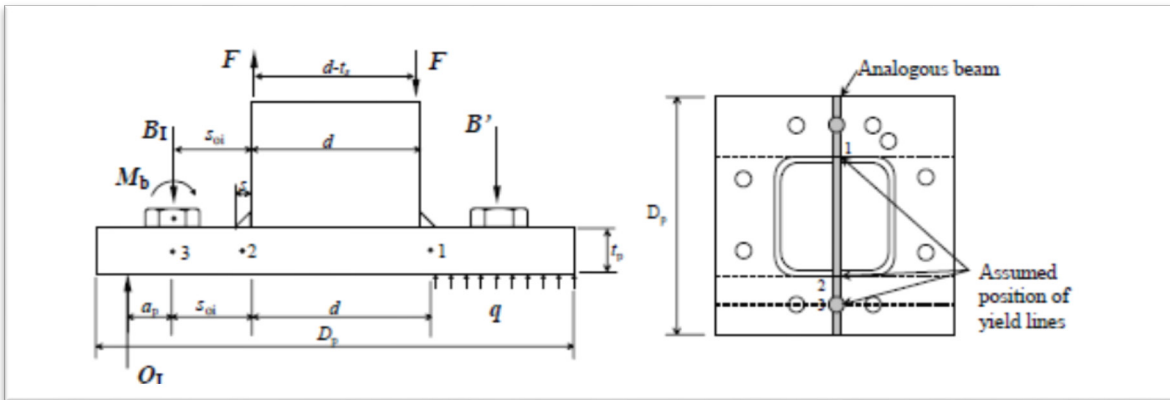
Οι Wheeler και συνεργάτες (1997, 2003) ασχολήθηκαν με το μοντέλο των Kato και Mukai με τη διαφορά ότι ανέλυσαν τη συμπεριφορά τετραγωνικών αλλά και ορθογωνικών κοίλων διατομών. Επίσης οι διατομές αυτές καταπονούνται σε κάμψη και όχι σε καθαρό εφελκυσμό.



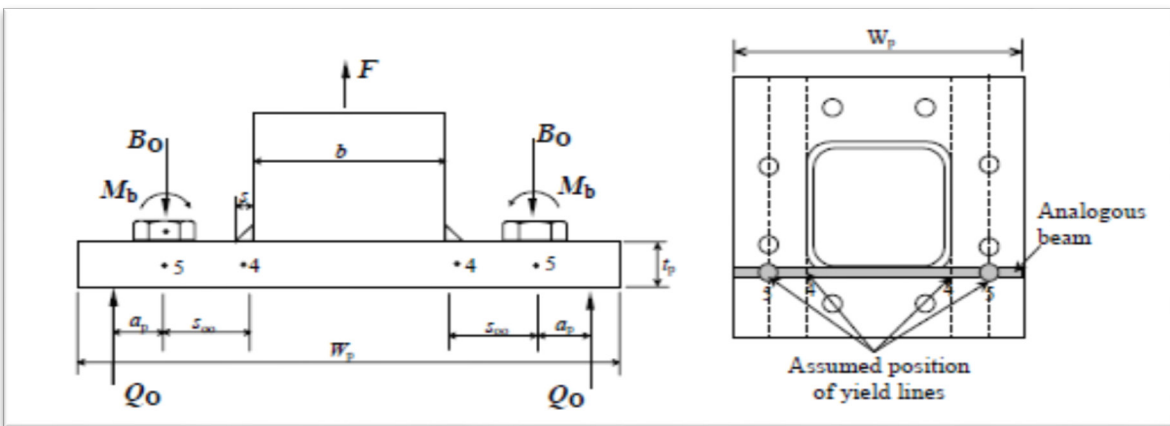
Σχ. 2.4 Σύνδεση κοίλης ορθογωνικής διατομής

Το θεωρητικό μοντέλο της συγκεκριμένης σύνδεσης εφαρμόστηκε στις περιπτώσεις τεσσάρων και οκτώ κοχλιών, εφαρμόζοντας τη θεωρία των γραμμών διαρροής για τον υπολογισμό της ροπής διαρροής και μία τροποποιημένη ανάλυση βραχέως ταυ για την εύρεση της αντοχής της σύνδεσης. Επιπλέον, στη σύνδεση με οκτώ κοχλίες παρατηρήθηκαν οι εξής μορφές αστοχίας: διαρροή των πλακών, διαρροή των κοχλιών, ταυτόχρονη διαρροή πλακών και κοχλιών, την πλαστικοποίηση της ορθογωνικής διατομής, διάτρηση των πλακών. Οι γεωμετρικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το μέγεθος των μετωπικών πλακών, δηλαδή το μήκος και το πλάτος τους, το πάχος των πλακών, το σχήμα της διατομής (τετραγωνική ή ορθογωνική) και οι θέσεις των κοχλιών.

Στη σύνδεση με οκτώ κοχλίες η τροποποιημένη ανάλυση βραχέως ταυ που εφαρμόστηκε, βασίστηκε στη θεώρηση δύο ανάλογων δοκών (analogous beams), μία σε κάθε διεύθυνση. Άρα έχουμε την «κατακόρυφη» δοκό στην περιοχή κάμψης της σύνδεσης και την «οριζόντια» δοκό στην περιοχή καθαρού εφελκυσμού όπως φαίνονται στο πιο κάτω σχήμα, στο οποίο βλέπουμε και τις πιθανές γραμμές διαρροής σε κάθε διεύθυνση.

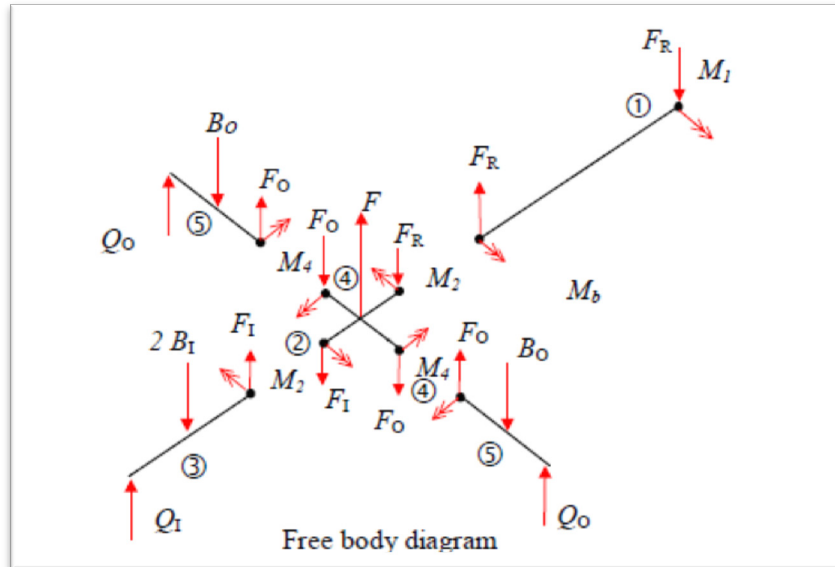


Σχ. 2.5(α) Κατακόρυφη ανάλογη δοκός



Σχ. 2.5(β) Οριζόντια ανάλογη δοκός

Τα σημεία 1,2 και 3 στην «κατακόρυφη» δοκό και 4,5 στην «οριζόντια» δοκό είναι πιθανά σημεία δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων. Στο σχήμα φαίνονται και οι δυνάμεις που ασκούνται στη σύνδεση και συμμετέχουν στις εξισώσεις ισορροπίας. Οι δυνάμεις είναι το ζεύγος F οι οποίες προκαλούν εξωτερική ροπή που καταπονεί τη διατομή, οι δυνάμεις των κοχλιών B_1, B_1', B_2, B_2' , οι δυνάμεις επαφής Q_1, q και Q_0 και οι ροπές που δημιουργούνται από την κάμψη του κορμού των κοχλιών ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης των μετωπικών πλακών M_b . Στο διάγραμμα ελευθέρου σώματος του πιο κάτω σχήματος καθορίζονται οι δυνάμεις που δρουν στη σύνδεση.



Σχ. 2.6 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος με τις δυνάμεις που δρουν στη σύνδεση

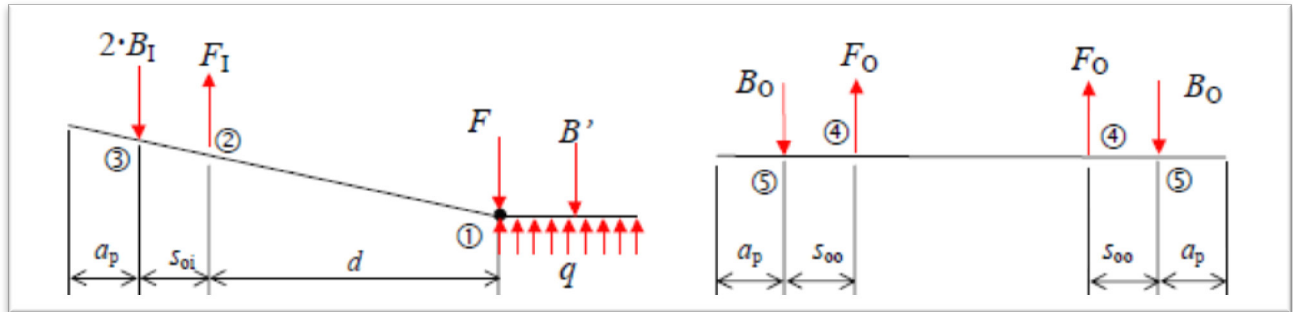
Ανάλογα με τον αριθμό και τη θέση των γραμμών διαρροής στις μετωπικές πλάκες, η σύνδεση συμπεριφέρεται με διαφορετικό τρόπο. Έτσι μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως σύνδεση:

- με πλάκα μεγάλου πάχους
- με πλάκα ενδιάμεσου πάχους
- με λεπτή πλάκα

Η κατάταξη συνδέεται άμεσα με το πάχος της πλάκας αλλά και με το μέγεθος του εφαρμοζόμενου φορτίου. Με τη χρήση της «οριζόντιας» και της «κατακόρυφης» δοκού θα περιγράψουμε, στα επόμενα υποκεφάλαια, τη συμπεριφορά της σύνδεσης με τέσσερις κοχλίες για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις που αναφέραμε.

2.3.2 Σύνδεση με πλάκα μεγάλου πάχους

Η συμπεριφορά της σύνδεσης εντάσσεται σε αυτή την κατηγορία όταν υπάρχει μηδενικό ή μικρό ποσοστό διαρροής στην μετωπική πλάκα. Η αστοχία καθορίζεται από τη διαρροή των κοχλιών, επομένως από την εφελκυστική τους αντοχή. Επομένως δεν θα σχηματιστεί πλαστικός μηχανισμός στην πλάκα, αλλά αυτή θα κινηθεί ως στερεό σώμα. Σε αυτή την περίπτωση οι δυνάμεις επαφής είναι μηδενικές. Ακόμα, δεδομένου ότι οι πλάκες υπόκεινται σε μικρή κάμψη, οι ροπές M_b των κοχλιών αμελούνται. Οι δυνάμεις που ασκούνται στις ανάλογες δοκούς φαίνονται στο σχήμα.



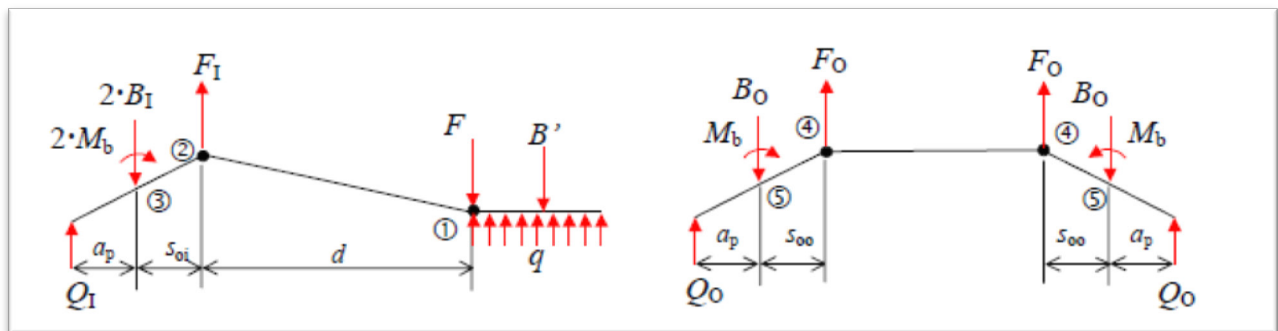
(α) «Κατακόρυφη» ανάλογη δοκός

(β) «Οριζόντια» ανάλογη δοκός

Σχ. 2.7 Συμπεριφορά της σύνδεσης με πλάκα μεγάλου πάχους

2.3.3 Σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους

Σε αυτή την κατηγορία ο μηχανισμός αστοχίας είναι συνδυασμός διαρροής πλακών και κοχλιών με δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα σημεία 1 και 2 της «κατακόρυφης» δοκού και στο σημείο 4 της «οριζόντιας» όπως δείχνει το σχήμα.



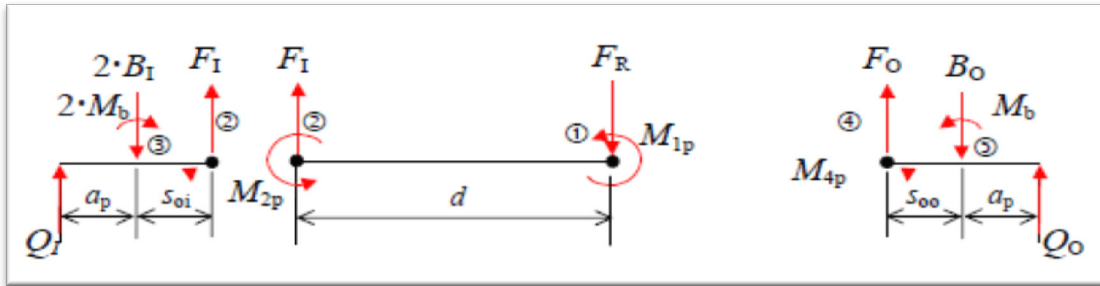
(α) «Κατακόρυφη» ανάλογη δοκός

(β) «Οριζόντια» ανάλογη δοκός

Σχ. 2.8 Συμπεριφορά της σύνδεσης με πλάκα ενδιάμεσου πάχους

Κατά τη μετάβαση από τη συμπεριφορά της σύνδεσης με πλάκα μεγάλου πάχους σε αυτή με πλάκα ενδιάμεσου πάχους θεωρείται ότι οι δυνάμεις επαφής Q_1 και Q_0 (prying forces) είναι ίσες με μηδέν. Ακόμα οι δυνάμεις αυτές παίρνουν μια μέγιστη τιμή κατά τη μετάβαση από τη συμπεριφορά της σύνδεσης με πλάκα ενδιάμεσου πάχους σε σύνδεση με λεπτή πλάκα. Με βάση αυτό το στοιχείο εξετάζονται ξεχωριστά δύο επιμέρους περιπτώσεις : μία για δυνάμεις επαφής ίσες με μηδέν ($Q_1 = Q_0 = 0$) και μία για θετικές δυνάμεις επαφής ($Q_1 > 0, Q_0 > 0$). Τα διαγράμματα ελευθέρου σώματος για

την «κατακόρυφη» και την «οριζόντια» δοκό της συγκεκριμένης περίπτωσης φαίνονται στο σχήμα.



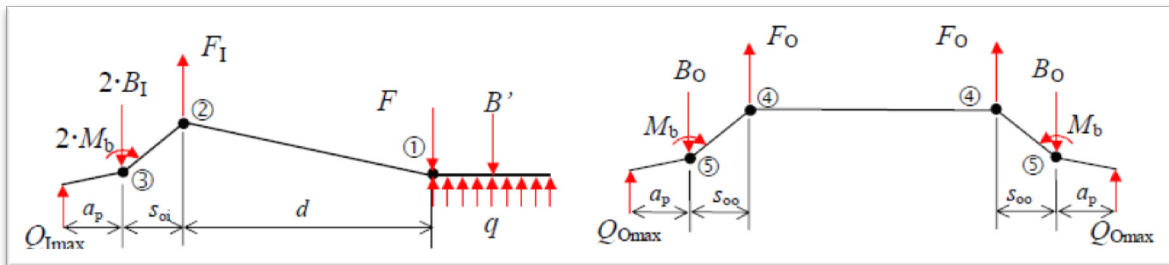
(α) «Κατακόρυφη» ανάλογη δοκός

(β) «Οριζόντια» ανάλογη δοκός

Σχ. 2.9 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος – Σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους

2.3.4 Σύνδεση με πλάκα λεπτού πάχους

Χαρακτηριστικό της κατηγορίας αυτής είναι η υπερβολική παραμόρφωση της πλάκας με τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα σημεία 1,2 και 3 της «κατακόρυφης» δοκού και στα σημεία 4 και 5 της «οριζόντιας» δοκού.

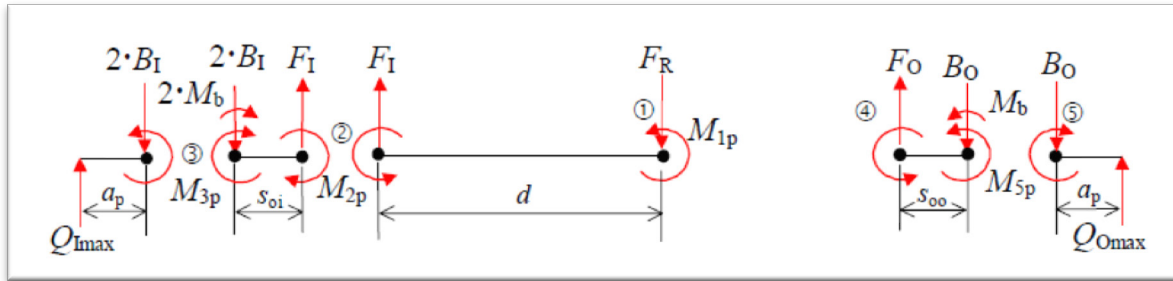


(α) «Κατακόρυφη» ανάλογη δοκός

(β) «Οριζόντια» ανάλογη δοκός

Σχ. 2.10 Συμπεριφορά σύνδεσης με λεπτή πλάκα

Στη σύνδεση με λεπτή πλάκα οι δυνάμεις επαφής Q_1 και Q_0 λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους, δηλαδή $Q_1 = Q_{1max}$ και $Q_0 = Q_{0max}$ όπως φαίνεται και στο διάγραμμα ελευθέρου σώματος της σύνδεσης με λεπτή πλάκα.



(α) «Κατακόρυφη» ανάλογη δοκός

(β) «Οριζόντια» ανάλογη δοκός

Σχ. 2.10 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος – Σύνδεση με λεπτή πλάκα

Μέσω αυτής της μελέτης, οι Wheeler, Clarke και Hancock συμπέραναν ότι αλλαγές στο πλάτος και στο πάχος των πλακών είχαν ως αποτέλεσμα σημαντικές μεταβολές στην αντοχή της σύνδεσης. Για παράδειγμα, αύξηση του πάχους των πλακών επέφερε αύξηση στην αντοχή. Επιπλέον, η θέση των κοχλιών και πιο συγκεκριμένα η απόστασή τους από την κοίλη διατομή έπαιξε σημαντικό ρόλο στην αντοχή και στην δυσκαμψία της σύνδεσης. Διαπιστώθηκε ότι όσο οι κοχλίες πλησίαζαν τη διατομή, τόσο αυξανόταν η αντοχή και η δυσκαμψία. [10],[11]

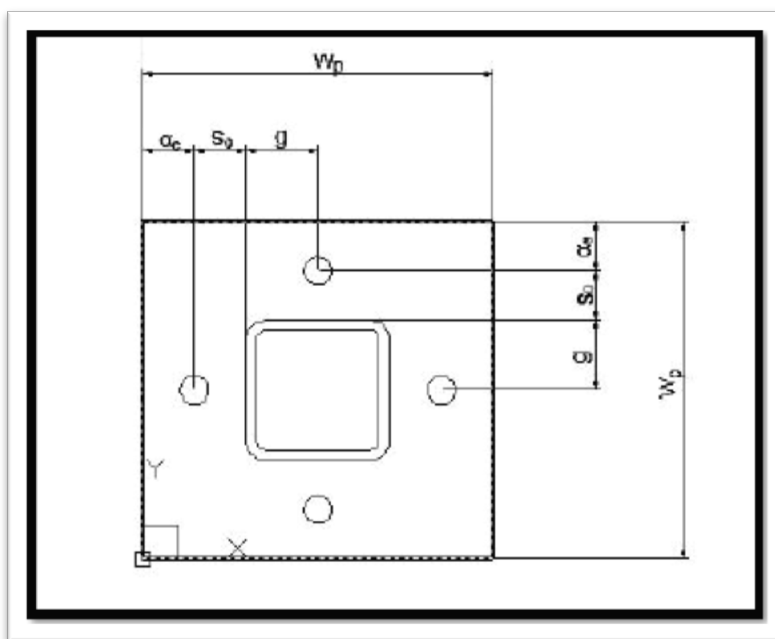
2.4 Τροποποιημένη Μέθοδος Βραχέος Ταυ (Modified Stub-Tee Method)- Εφαρμογή σε κοχλιωτή σύνδεση, μέσω μετωπικών πλακών, κοίλων τετραγωνικών διατομών καταπονούμενων σε εφελκυσμό

2.4.1 Γενικά

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα επιχειρηθεί η προσαρμογή του μοντέλου των Wheeler, Clarke και Hancock στην περίπτωση κοχλιωτής σύνδεσης μέσω μετωπικών πλακών κοίλων τετραγωνικών διατομών, οι οποίες υποβάλλονται σε εφελκυσμό. Η ανάλυση του συγκεκριμένου μοντέλου θα γίνει με τη χρήση τεσσάρων κοχλιών. Λόγω του ότι οι διατομές καταπονούνται σε αξονικό εφελκυσμό και επομένως παρατηρούμε την ίδια συμπεριφορά και στις δυο κάθετες διευθύνσεις θα γίνει χρήση μίας «αναλόγου δοκού» και θα υιοθετηθούν μόνο οι συμμετρικές μορφές αστοχίας, δηλαδή οι τρόποι αστοχίας της «οριζόντιας» δοκού του υποκεφαλαίου 2.3.

2.4.2 Τροποποιημένη Μέθοδος Βραχέος ταυ στην περίπτωση τεσσάρων κοχλιών

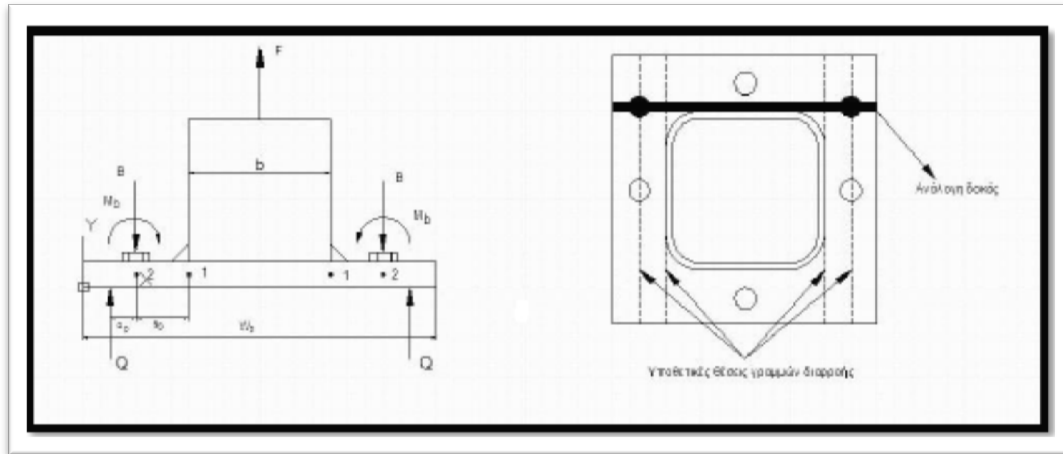
Η μορφή και οι διαστάσεις της συγκεκριμένης σύνδεσης φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :



Σχ. 2.11 Η μορφή και οι διαστάσεις της σύνδεσης

Επίσης, στο σχήμα 2.12 απεικονίζονται οι δυνάμεις που ασκούνται στη σύνδεση μας: η εξωτερική εφελκυστική F , οι δυνάμεις κοχλιών B , οι ροπές που δημιουργούνται από την κάμψη του κορμού των κοχλιών ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης των μετωπικών

πλακών M_b οι δυνάμεις επαφής Q . Στο διπλανό σχήμα βλέπουμε την διατομή της δοκού και τις γραμμές διαρροής που αναμένεται να δημιουργηθούν στην σύνδεση, οι οποίες λόγω της ανάπτυξης καθαρού εφελκυσμού, υποθέτουμε να εμφανιστούν στα σημεία 1 και 2.



Σχ. 2.12 Ανάλογη δοκός

Η πλήρως πλαστική ροπή των σημείων στα οποία υποθέτουμε ότι θα δημιουργηθούν πλαστικές αρθρώσεις δίνεται από τη σχέση:

$$M_{i,pl} = \frac{1}{4} * t_p^2 * l * f_y \quad (2.1)$$

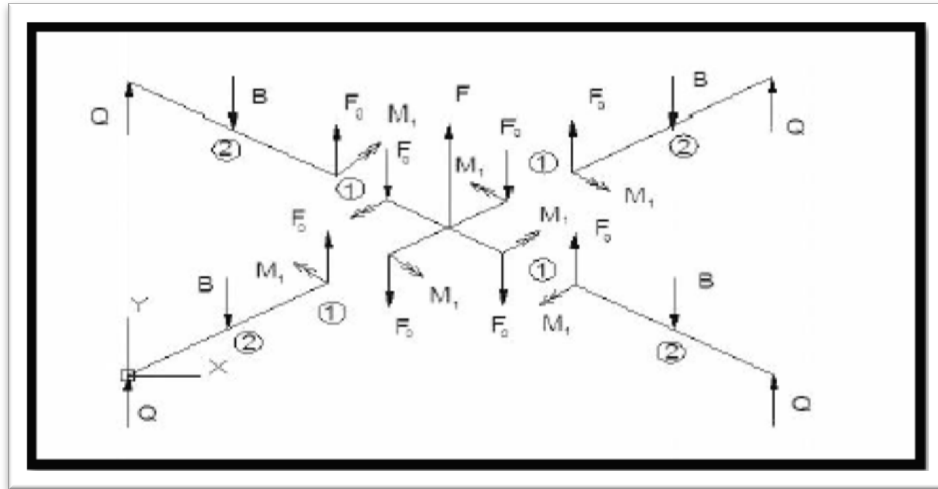
Όπου t_p το πάχος της πλάκας, l το πλάτος της γραμμής διαρροής και f_y το όριο διαρροής της πλάκας.

Η δύναμη F , όπως προκύπτει από το διάγραμμα ελευθέρου σώματος του Σχήματος 2.13 δίνεται από τη σχέση:

$$F^{\delta\sigma\kappa} = 2F_0, \text{ για κάθε ανάλογο δοκό και}$$

$$F = 4F_0, \text{ συνολικά από επαλληλία των δοκών των δύο κάθετων διευθύνσεων όπου}$$

$$F_0 = B - Q \quad (2.2)$$

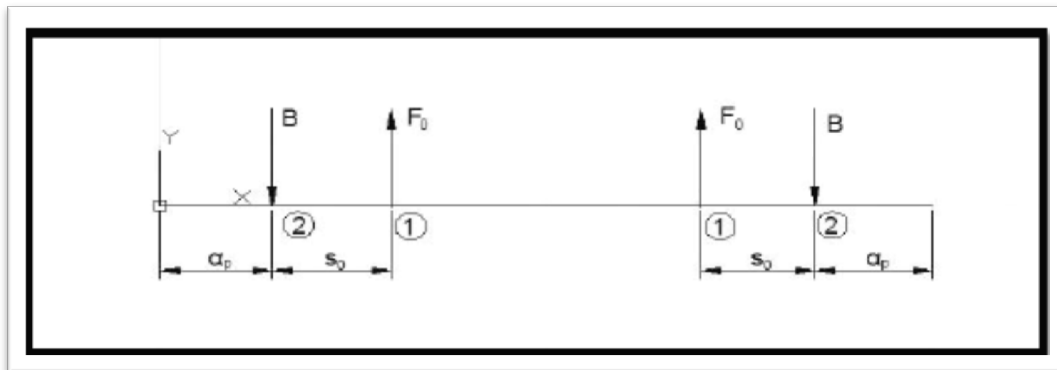


Σχ. 2.13 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος σύνδεσης

Παρακάτω θα εξετάσουμε κάθε μια από τις κατηγορίες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3.1, δηλαδή την συμπεριφορά της σύνδεσης με πλάκα μεγάλου πάχους, ενδιάμεσου και με λεπτή πλάκα και θα εξετάσουμε τις σχέσεις από τις οποίες προκύπτει η αντοχή της σύνδεσης κάθε φορά.

2.4.2.1 Σύνδεση με πλάκα μεγάλου πάχους

Στη σύνδεση αυτή η διαρροή στη πλάκα είναι πολύ μικρή έως και αμελητέα. Επομένως η μορφή αστοχίας είναι η διαρροή των κοχλιών. Στις συνδέσεις αυτής της κατηγορίας οι δυνάμεις επαφής είναι μηδέν ($Q=0$). Επιπλέον οι ροπές αντίστασης που δημιουργούνται στους κοχλίες δεν λαμβάνονται υπόψη λόγω της αμελητέας παραμόρφωσης της πλάκας. Η αντοχή της σύνδεσης είναι ίση με το άθροισμα της εφελκυστικής αντοχής του συνολικού αριθμού των κοχλιών. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στη τομή:



Σχ.2.14 Σύνδεση με πλάκα μεγάλου πάχους

Από την ισορροπία δοκού προκύπτει:

$$F_{thick}^{\delta\kappa} = 2F_0 = 2B_{U1} \quad (2.3)$$

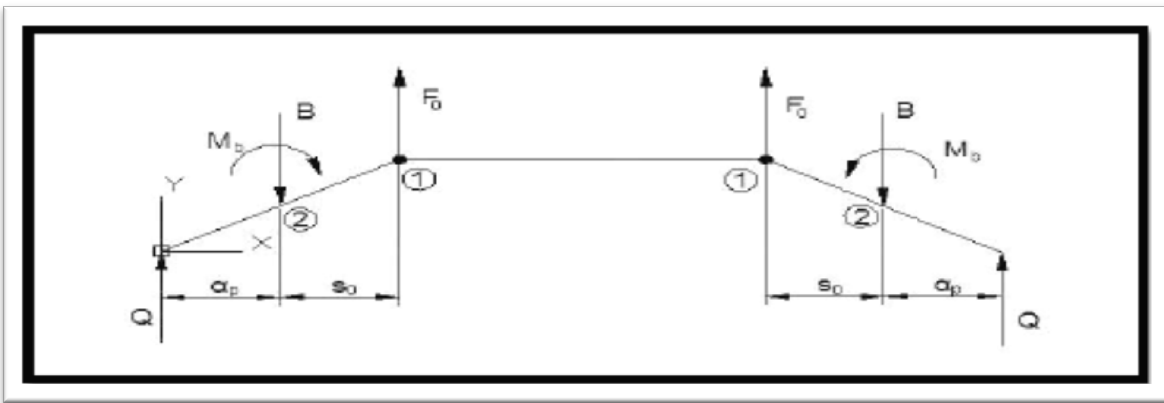
Όπου $B_{U1} = 0.9 * f_{ub} * A_s$ η εφελκυστική αντοχή ενός κοχλία.

Ακολουθως, από την επαλληλία των δύο ομοίων δοκών στις δύο κάθετες διευθύνσεις:

$$F_{thick} = 4B_{U1} \quad (2.4)$$

2.4.2.2 Σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους

Η αστοχία σε αυτή την κατηγορία είναι ένας συνδυασμός διαρροής κοχλιών και πλάκας. Έτσι δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις στα σημεία που αντιστοιχούν στον αριθμό 1 όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15:

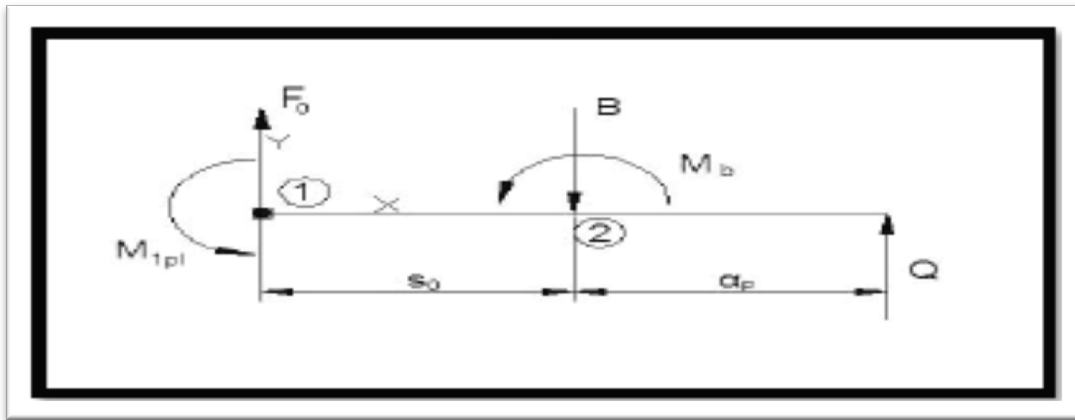


Σχ. 2.15 Σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους

Οι κοχλίες θεωρούμε ότι έχουν φτάσει στην πλήρως πλαστική αντοχή τους και επομένως η ροπή που προκύπτει από την κάμψη ενός κοχλία δίνεται από τη σχέση:

$$M_b = \frac{\pi * d_b^3 * f_{yb}}{32} \quad (2.5)$$

Όπου d_b η διάμετρος του κοχλία και f_{yb} το όριο διαρροής του κοχλία.



Σχ. 2.16 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος- Σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους

Από το πιο πάνω διάγραμμα προκύπτουν οι ακόλουθες περιπτώσεις και οι αντίστοιχες σχέσεις:

- Η περίπτωση μηδενικής δύναμης επαφής ($Q=0$), συμβαίνει ουσιαστικά στη μετάβαση από μετωπική πλάκα μεγάλου πάχους σε ενδιάμεσο. Από ισορροπία ροπών ως προς το σημείο 1 προκύπτουν:

$$B = \frac{M_{1pl} + M_b}{s_0} \quad (2.6)$$

Όπου M_{1pl} από τη σχέση 2.1 και M_b από τη σχέση 2.5

Από ισορροπία δυνάμεων του σχήματος παίρνουμε:

$$F_{dock}^{thick} = 2B \quad (2.7)$$

Συνεπώς, από την επαλληλία των δύο κάθετων ανάλογων δοκών και τη σχέση 2.6 προκύπτει:

$$F_{Cint} = 4 * \frac{M_{1pl} + M_b}{s_0} \quad (2.8)$$

- Στην περίπτωση θετικής δύναμης επαφής θεωρούμε ότι οι δυνάμεις επαφής Q γίνονται ταυτόχρονα θετικές, έτσι μπορούμε να τις υπολογίσουμε χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$Q = \frac{M_2}{a_p} = \frac{F_0 * s_0 - M_{1pl} - M_b}{a_p} \quad (2.9)$$

Από τις σχέσεις 2.2 και 2.9 παίρνουμε:

$$F_0 = \frac{B \cdot a_p + M_{1pl} + M_b}{a_p + s_0} \quad (2.10)$$

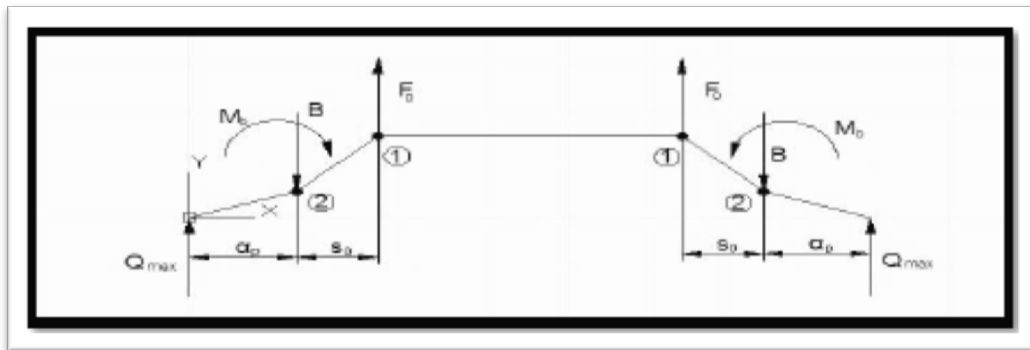
Επομένως από την επαλληλία των δοκών στις δύο κάθετες διευθύνσεις προκύπτει η αντοχή της σύνδεσης σε αυτή την περίπτωση:

$$F_{cint} = 4 * \frac{B \cdot a_p + M_{1pl} + M_b}{a_p + s_0} \quad (2.11)$$

Όπου $B=BU_1$.

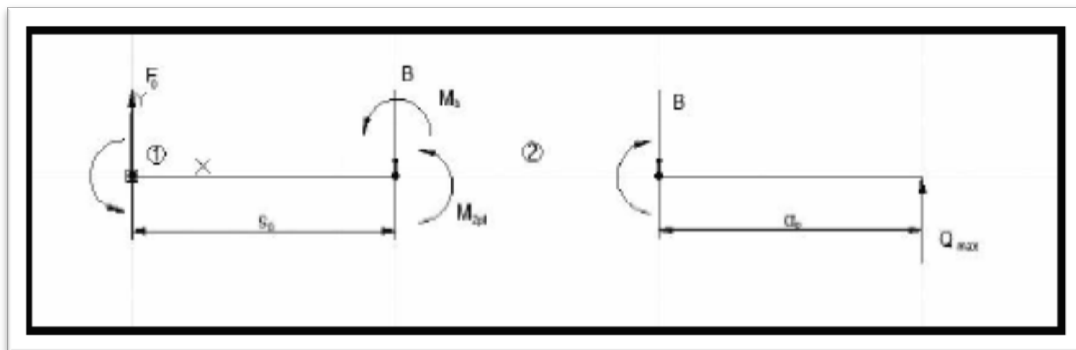
2.4.2.3 Σύνδεση με λεπτή πλάκα

Στη σύνδεση με λεπτή πλάκα η αστοχία παρατηρείται λόγω πολύ μεγάλης παραμόρφωσης της πλάκας. Έχουμε λοιπόν τη δημιουργία πλαστικού μηχανισμού με πλαστικές αρθρώσεις στα σημεία 1 και 2, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17:



Σχ. 2.17 Σύνδεση με λεπτή πλάκα

Επιπλέον στο πιο κάτω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα ελεύθερου σώματος για την συγκεκριμένη κατηγορία συμπεριφοράς:



Σχ. 2.18 Διαγράμματα ελεύθερου σώματος- Σύνδεση με λεπτή πλάκα

Σε σύγκριση με την περίπτωση ενδιάμεσου πάχους μετωπικής πλάκας εδώ έχουμε επιπρόσθετες γραμμές διαρροής. Από τη στιγμή που αυτές σχηματίζονται, οι δυνάμεις επαφής φτάνουν τη μέγιστη τιμή τους, που δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{\max} = \frac{M_{2pl}}{\alpha_p} \quad (2.12)$$

που προέρχεται από ισορροπία ροπών ως προς το σημείο 2, ενώ η ροπή M_{2pl} προκύπτει από τη σχέση 2.1.

Έτσι από τις σχέσεις 2.9 και 2.12 για $Q=Q_{\max}$ έχουμε :

$$F_0 = \frac{M_{1pl} + M_{2pl} + M_b}{s_o} \quad (2.13)$$

Τελικώς από επαλληλία των δύο ανάλογων δοκών, η αντοχή της σύνδεσης όταν συμπεριφέρεται ως περίπτωση λεπτής πλάκας είναι:

$$F_{Cmin} = 4 * \frac{M_{1pl} + M_{2pl} + M_b}{s_o} \quad (2.14)$$

Κεφάλαιο 3^ο

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

3.1 Γενικά

3.1.1 Ανάλυση φορέων με πεπερασμένα στοιχεία

Κατά τη μελέτη ενός φαινομένου με σύγχρονα υπολογιστικά μέσα δύο είναι τα στάδια που ακολουθούνται: 1) η μαθηματική διατύπωση του φαινομένου όπου βασιζόμαστε σε χαρακτηριστικές παραδοχές και 2) η αριθμητική ανάλυση του μαθηματικού προσομοιώματος κατά την οποία μέσω υπολογιστή γίνεται προσπάθεια να λυθεί το πρόβλημα. Όταν η ακριβής εξεύρεση της λύσης είναι δυσχερής, τότε ως εναλλακτικός τρόπος λύσης προσφέρονται οι προσεγγιστικές μέθοδοι. Γνωστές προσεγγιστικές μέθοδοι για προβλήματα μηχανικής αποτελούν οι μέθοδοι των μεταβολών όπως η μέθοδος Rayleigh-Ritz αλλά και οι μέθοδοι σταθμικών υπολοίπων όπως η μέθοδος Galerkin.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θεωρείται ειδική διατύπωση των μεθόδων Rayleigh-Ritz και σταθμικών υπολοίπων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιλύει ευκολότερα πολύπλοκες γεωμετρίες και προγραμματίζεται με ευχέρεια στον υπολογιστή. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι απλά υποπεδία τα οποία αντικαθιστούν το σύνθετο γεωμετρικά πεδίο του προβλήματος. Εφάπτονται μεταξύ τους χωρίς να αφήνουν κενά και συνδέονται με κόμβους στα σύνορα των στοιχείων. Δίκτυο ή πλέγμα ορίζεται το σύνολο των πεπερασμένων στοιχείων και διακριτοποίηση του φορέα ονομάζεται η προσομοίωσή του με δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων.

Από το 1941 γίνονταν προσπάθειες για διατύπωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Το 1944 ο Ιωάννης Αργύρης ήταν αυτός που διατύπωσε ουσιαστικά τη μέθοδο, ο οποίος σκόπευε να προσομοιάσει τη γεωμετρία των πτερυγίων των τότε μαχητικών αεροσκαφών. Η μέθοδος αυτή καταλήγει σε τόσες αλγεβρικές λύσεις όσοι είναι και οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος. Αν και η μέθοδος επινοήθηκε με σκοπό τη στατική ανάλυση φορέων, χρησιμοποιείται ευρέως για επίλυση μεγάλου φάσματος προβλημάτων μηχανικού όπως στη ρευστομηχανική και τον ηλεκτρομαγνητισμό. [8]

Στην εργασία μας θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα ABAQUS. Το ABAQUS είναι ένα εξελιγμένο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων το οποίο εφαρμόζεται σε ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων μηχανικού. Πρωταρχικά σχεδιάστηκε για την προσομοίωση στερεών σχημάτων

και κατασκευών οι οποίες βρίσκονται υπό την επίδραση εξωτερικώς ασκούμενων φορτίων. Η λέξη ABAQUS προέρχεται από την ελληνική λέξη άβαξ που ήταν η πινακίδα όπου χρησιμοποιούσαν οι αρχαίοι Έλληνες για μαθηματικές πράξεις και πρόχειρους υπολογισμούς.

Το πρόγραμμα ABAQUS παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- Έχει την ικανότητα να προσομοιάσει πολύπλοκες γεωμετρίες στερεών σωμάτων
- Αντιμετωπίζει στατικά και δυναμικά προβλήματα
- Παρουσιάζει τη δυνατότητα προσομοίωσης των προβλημάτων με μια μεγάλη ποικιλία πεπερασμένων στοιχείων όπως συνεχή στοιχεία, στοιχεία δοκού, στοιχεία πλάκας και κελύφους κλπ.
- Διαθέτει εξελιγμένη «βιβλιοθήκη» υλικών στην οποία περιλαμβάνονται, εκτός των συνήθων ελαστικών και ελαστοπλαστικών υλικών, υλικά σκυροδέματος, εδάφους αλλά και αφρώδη
- Υπάρχει η επιλογή προσομοίωσης του τρόπου αλληλεπίδρασης μεταξύ των διάφορων στερεών σχημάτων από τα οποία αποτελείται ο φορέας

Το ABAQUS δημιουργήθηκε το 1978 από τους Hibbit, Karlsson και Sorensen. Σήμερα χρησιμοποιείται από αρκετές βιομηχανίες όπως βιομηχανίες αεροσκαφών και αυτοκινήτων, πετρελαϊκές εταιρείες. Επίσης χρησιμοποιείται για πανεπιστημιακές έρευνες αλλά και σε εθνικά εργαστήρια. [13]

3.2 Κοχλιωτή σύνδεση εφελκυσμού κοίλων διατομών μέσω μετωπικών πλακών

3.2.1 Τρισδιάστατα εξαεδρικά στοιχεία και στοιχεία κελύφους

Η σύνδεση της οποίας η αριθμητική ανάλυση θα γίνει στο επόμενο υποκεφάλαιο αποτελεί σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας σε εφελκυσόμενη ράβδο κοίλης διατομής (τετραγωνικής και ορθογωνικής) μέσω μετωπικών πλακών συνδεόμενων με τέσσερις ή οκτώ κοχλίες. Υπάρχουν δύο πιθανές λύσεις για την κατασκευή του προσομοιώματος. Η πρώτη είναι η προσομοίωση της σύνδεσης με τη βοήθεια εξαεδρικών ορθογωνικών πεπερασμένων στοιχείων οκτώ κόμβων (χωρικά στοιχεία-solid) ενώ η εναλλακτική λύση είναι η χρήση πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (επιφανειακά στοιχεία-shell). Στη συνέχεια θα αναφέρουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθεμιάς από τις δύο επιλογές προσομοίωσης με τους δύο διαφορετικούς τύπους πεπερασμένων στοιχείων.

Η προσομοίωση της σύνδεσης με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία προσεγγίζει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά της πραγματικής σύνδεσης. Αυτό συμβαίνει γιατί το μοντέλο προσομοίωσης έχει ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις με το πραγματικό μοντέλο. Επιπλέον, η προσομοίωση του φορέα με χωρικά στοιχεία έχει τη δυνατότητα να ληφθούν υπόψη τοπικά λεπτομέρειες της

σύνδεσης όπως για παράδειγμα το πάχος της συγκόλλησης στην περιοχή ένωσης της πλάκας με την δοκό αλλά και την αλληλεπίδραση μεταξύ των επιφανειών των διαφόρων αντικειμένων του μοντέλου (έλασμα με κοχλίες και εξαρτήματα κοχλιών) με τη μορφή επαφής. Ακόμα, με τη χρήση αυτού του τύπου πεπερασμένων στοιχείων, δημιουργούμε τους κοχλίες και τα εξαρτήματά τους (δακτυλίους και περικόχλια) ως μέρη του μοντέλου με ικανοποιητική ακρίβεια χρησιμοποιώντας ως διαστάσεις τις προδιαγραφόμενες από το σχετικό κανονισμό.

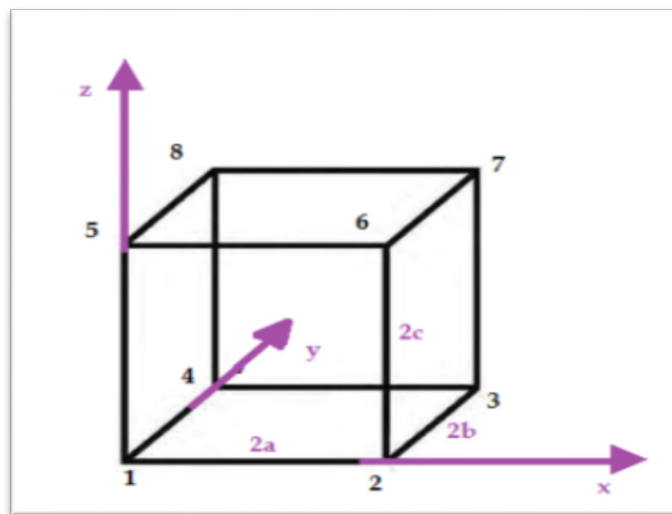
Κατά τη προσομοίωση της σύνδεσης με χωρικά στοιχεία προκύπτουν και κάποια μειονεκτήματα. Το βασικότερο μειονέκτημα των στοιχείων αυτών είναι ο χρόνος που απαιτείται για την ανάλυση, ο οποίος είναι από διπλάσιος μέχρι και δεκάδες φορές μεγαλύτερος από αυτόν που απαιτείται για την ανάλυση της προσομοίωσης του μοντέλου με επιφανειακά στοιχεία. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο φορέας τόσο περισσότερα είναι τα στοιχεία στα οποία διακριτοποιείται και τόσο περισσότεροι οι βαθμοί ελευθερίας. Συγκεκριμένα ένα εξαεδρικό ορθογωνικό στοιχείο οκτώ κόμβων διαθέτει τριάντα δύο βαθμούς ελευθερίας (σε κάθε κόμβο αντιστοιχούν τρεις βαθμοί ελευθερίας). Επομένως, το πρόγραμμα καλείται να επιλύσει μεγάλο πλήθος εξισώσεων, το οποίο συνεπάγεται κόστος σε χρόνο. Ακόμα ως σημαντικό μειονέκτημα μπορεί να χαρακτηριστεί το ότι για τη σωστή προσομοίωση της κάμψης την οποία υφίσταται η μετωπική πλάκα είναι αναγκαίο να διακριτοποιηθεί το πάχος της με μεγάλο αριθμό στοιχείων. Αυτό σχετίζεται με την θεώρηση «κατανεμημένης πλαστικότητας» σύμφωνα με την οποία η πλαστικοποίηση της διατομής πραγματοποιείται σταδιακά ανάλογα με την ικανοποίηση του κριτηρίου διαρροής σε χαρακτηριστικά σημεία καθ' ύψος της διατομής. Με αυτό τον τρόπο, αν και επιτυγχάνουμε την κατανομή της πλαστικοποίησης καθ' ύψος, αναγκαζόμαστε να χρησιμοποιήσουμε μεγάλο αριθμό στοιχείων κατά τη διεύθυνση του πάχους του ελάσματος και να χρησιμοποιήσουμε μη γραμμικοποιημένες μεθόδους υπολογισμού της καμπύλης ικανότητας. Έτσι οδηγούμαστε στο πρώτο μειονέκτημα, την απαίτηση χρόνου. [9]

Τα κελύφη είναι επιφανειακοί φορείς των οποίων η μέση επιφάνεια είναι καμπύλη και τις περισσότερες φορές το πάχος τους είναι μικρό σε σχέση με το άνοιγμά τους. Η γεωμετρία του κελύφους παριστάνεται από τη μέση επιφάνεια και το πάχος σε κάθε σημείο της μέσης επιφάνειας. Στο κέλυφος συνδυάζεται η καμπτική λειτουργία της πλάκας και η μεμβρανική λειτουργία του δίσκου. Στη θεωρία λεπτών κελυφών η εγκάρσια διατμητική παραμόρφωση αμελείται. [8]

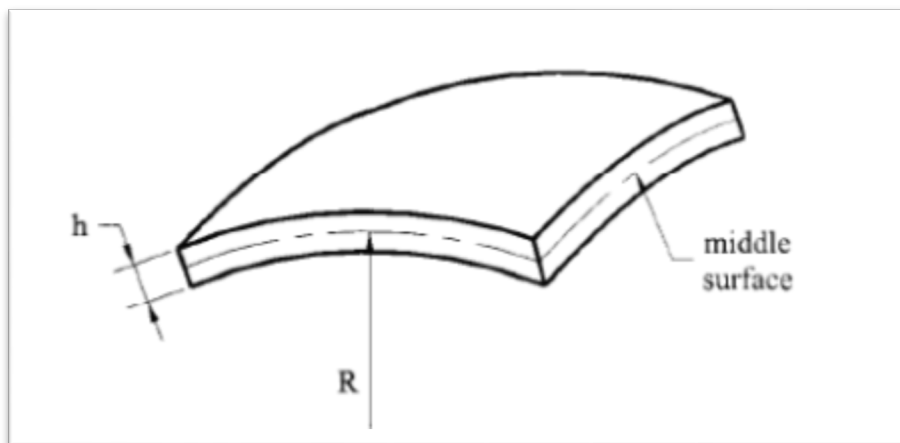
Το κύριο πλεονέκτημα του πεπερασμένου στοιχείου κελύφους είναι ότι λόγω της καμπύλης γεωμετρίας του, προσομοιώνεται επιτυχώς η καμπύλωση της μετωπικής πλάκας λόγω κάμψης. Επιπρόσθετα, η χρήση του επιφανειακού στοιχείου οδηγεί σε μαθηματικό προσομοίωμα με αρκετά μικρότερο αριθμό αλγεβρικών εξισώσεων προς επίλυση και επομένως ο χρόνος που απαιτείται για την ανάλυση ενός τέτοιου μοντέλου είναι πολύ

λιγότερος σε σύγκριση με το χρόνο που απαιτείται για την ανάλυση ενός φορέα στον οποίο χρησιμοποιήθηκαν χωρικά στοιχεία.

Η χρήση στοιχείων κελύφους παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα: η προσομοίωση με αυτά τα στοιχεία αποτελεί ακόμα μεγαλύτερη απλοποίηση του φυσικού προβλήματος. Επομένως υπάρχει κίνδυνος παρείσφρησης σφαλμάτων τα οποία είναι ικανά να επηρεάσουν την αξιοπιστία της ανάλυσης. Σημαντική απλοποίηση μπορεί να θεωρηθεί η προσομοίωση των κοχλιών και των εξαρτημάτων του, έτσι δε λαμβάνονται υπόψη σημαντικές λεπτομέρειες, όπως η αλληλεπίδραση μεταξύ τους αλλά και με την πλάκα, οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στη σύνδεσή μας.



Σχ. 3.1 Εξαεδρικό ορθογώνιο στοιχείο οκτώ κόμβων



Σχ. 3.2 Κέλυφος τυχαίου σχήματος

Από την παράθεση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των δύο περιπτώσεων προσομοίωσης της σύνδεσης επιλέξαμε να εφαρμόσουμε χωρικά πεπερασμένα στοιχεία αφού στην παρούσα εργασία, εκτός από την αντοχή της σύνδεσης σε εξωτερικά επιβαλλόμενο εφελκυστικό φορτίο, θα μελετήσουμε την κάμψη των κοχλιών αλλά και τον τρόπο που επηρεάζει η συγκόλληση την σύνδεση. Τα χωρικά πεπερασμένα στοιχεία μας επιτρέπουν την προσομοίωση τέτοιων λεπτομερειών με αρκετή ακρίβεια.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία του μοντέλου προσομοίωσής μας. Συγκεκριμένα θα προσομοιώσουμε υπάρχοντα πειράματα στο πρόγραμμα ABAQUS και θα συγκρίνουμε τα υπολογιστικά αποτελέσματα με τα πραγματικά. Με αυτό τον τρόπο θα ελέγξουμε τις συνθήκες στήριξης αλλά και αλληλεπίδρασης των διάφορων μερών της σύνδεσης που χρησιμοποιήσαμε στον υπολογιστή. Επιπρόσθετα θα διακριτοποιήσουμε τα μέρη με διάφορες διαστάσεις και θα επιλέξουμε την πιο αποδεκτή από άποψης σύγκλισης αλλά και απαίτησης χρόνου.

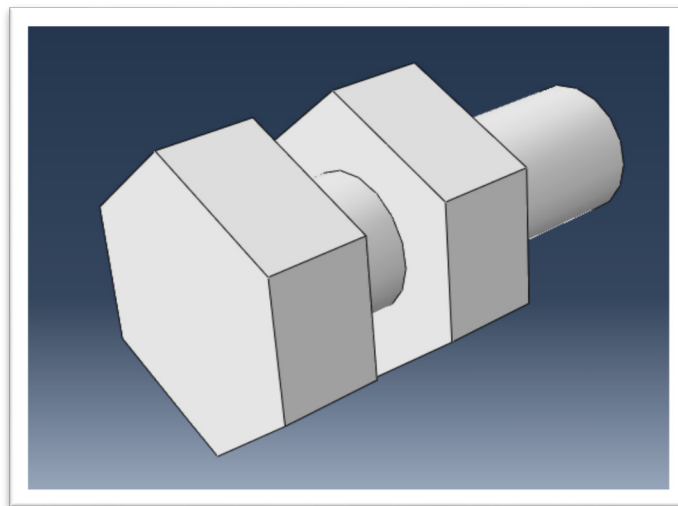
3.2.2 Περιγραφή προσομοιώματος τρισδιάστατων εξαεδρικών πεπερασμένων στοιχείων (solid)

Το προσομοίωμα που θα αναλυθεί είναι σύνδεση κοίλων διατομών μέσω μετωπικών πλακών με τέσσερεις και οχτώ κοχλίες που υποβάλλεται σε εφελκυσμό. Στο προσομοίωμα αυτό δημιουργήθηκαν στο Abaqus τα αντικείμενα από τα οποία αποτελείται η σύνδεση, τα οποία είναι: οι μετωπικές πλάκες, οι κοίλες διατομές και ο κοχλίας ο οποίος αποτελείται από την κεφαλή, το περικόχλιο και τον κορμό. Απλοποιητικά στον κορμό του κοχλία αμελήσαμε το σπείρωμα για να μειώσουμε την πολυπλοκότητα υποθέτοντας ότι ο ρόλος του σπειρώματος στα τελικά αποτελέσματα θα ήταν μηδαμινός. Η διάμετρος της οπής στην μετωπική πλάκα ακολούθησε τη σχέση που αναφέραμε στο πρώτο κεφάλαιο. Για τη δημιουργία των εξαρτημάτων του κοχλία χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές τους διαστάσεις οι οποίες περιγράφονται από πίνακες. Επιπλέον, με σκοπό να επιτευχθεί η επιθυμητή σύσφιξη του κοχλία με το περικόχλιο, δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα ένα αντικείμενο το οποίο αποτελείται από την κεφαλή του κοχλία και τον κορμό, ο οποίος στη συνέχεια συνδέθηκε με το περικόχλιο.

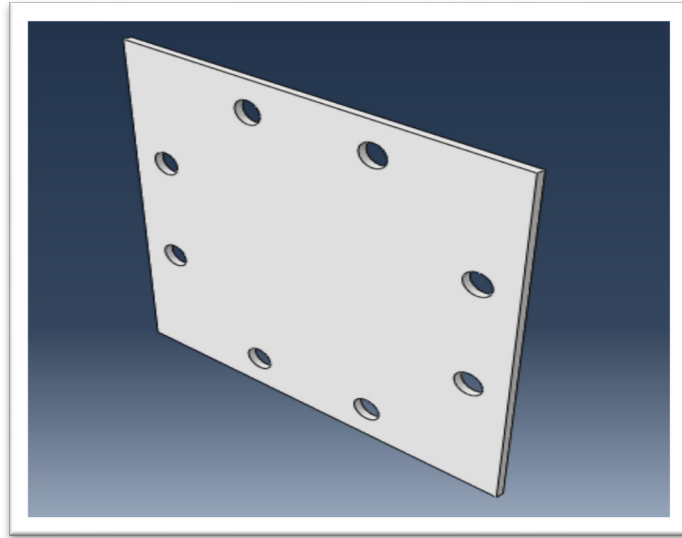
Πραγματοποιήθηκαν πέντε αναλύσεις με διαφορετικές διατομές μετωπικών πλακών, κοίλων διατομών καθώς και κοχλίες. Τα δεδομένα καθώς και οι διαστάσεις τους στα πέντε πειράματα τα οποία προσομοιώσαμε είναι τα εξής:

- Πείραμα 1^ο : Μετωπική πλάκα διαστάσεων 320x320 και πάχους 15.3mm
 $f_y = 284 \text{ N/mm}^2, f_u = 465 \text{ N/mm}^2$, shs 200x200x8 και οκτώ κοχλίες M16
- Πείραμα 2^ο : Μετωπική πλάκα διαστάσεων 270x270 και πάχους 9.01mm
 $f_y = 310 \text{ N/mm}^2, f_u = 407 \text{ N/mm}^2$, shs 150x150x6 και τέσσερις κοχλίες M16
- Πείραμα 3^ο : Μετωπική πλάκα διαστάσεων 270x270mm και πάχους 18.5mm
 $f_y = 290 \text{ N/mm}^2, f_u = 457 \text{ N/mm}^2$, shs 150x150x6 και τέσσερις κοχλίες M16
- Πείραμα 4^ο : Μετωπική πλάκα διαστάσεων 320x320mm και πάχους 6.25mm
 $f_y = 352 \text{ N/mm}^2, f_u = 484 \text{ N/mm}^2$, shs 200x200x8 και οκτώ κοχλίες M20
- Πείραμα 5^ο : Μετωπική πλάκα διαστάσεων 311.7x311.7mm και πάχους 12.6mm
 $f_y = 410.7 \text{ N/mm}^2, f_u = 512.7 \text{ N/mm}^2$, shs 152.8x152.8x9.4 και τέσσερις κοχλίες M20

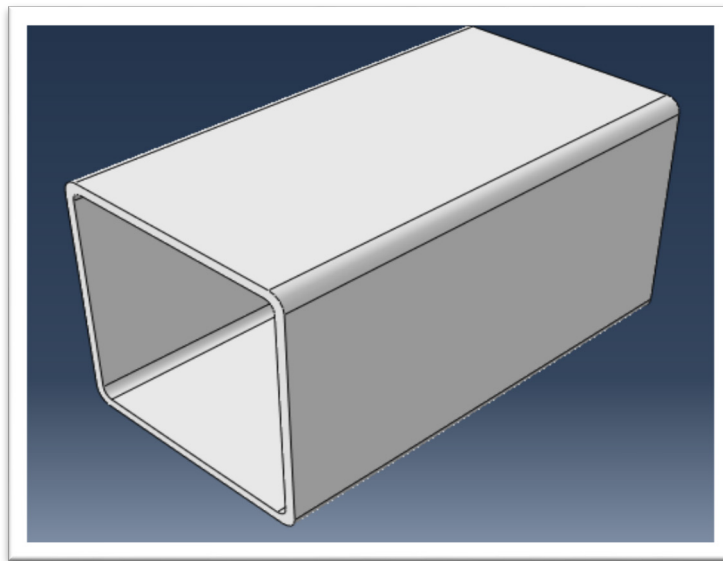
Οι προσομοιώσεις έγιναν με διαφορετικά κάθε φορά δεδομένα με στόχο να συγκρίνουμε κάθε φορά τη συμπεριφορά των περιπτώσεων αλλά και το είδος της αστοχίας. Το μήκος των κοίλων διατομών ήταν περίπου το διπλάσιο του ύψους της πλάκας. Μέσα σε αυτό το μήκος θεωρείται ότι ομαλοποιούνται οι τάσεις. Παρακάτω φαίνονται εικόνες των αντικειμένων που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα:



Σχ. 3.3 Κοχλίας

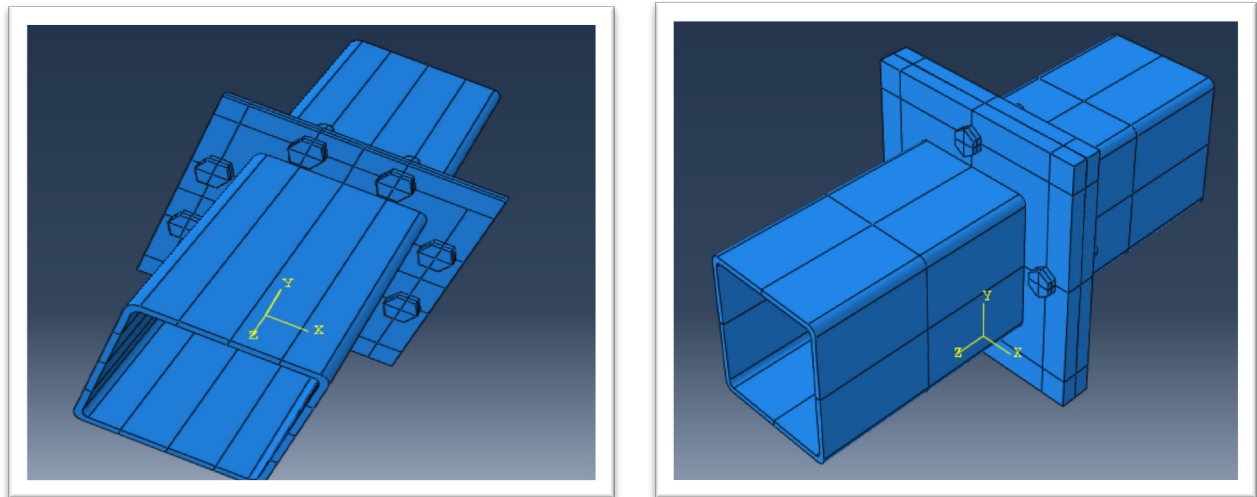


Σχ. 3.4 Μετωπική Πλάκα



Σχ.3.5 Κοίλη τετραγωνική διατομή

Η σύνδεση κοίλων διατομών μέσω μετωπικών πλακών φαίνεται στα πιο κάτω σχήματα:



Σχ. 3.6 Σύνδεση κοίλων διατομών μέσω μετωπικών πλακών

Θεωρήσαμε ελαστικό υλικό στις κοίλες διατομές ώστε η διαρροή των κοιλοδοκών να μην επηρεάσει στη μελέτη της σύνδεσης και άρα να μην είναι αίτιο αστοχίας.

Οι τιμές των συντελεστών του υλικού που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

Μέτρο ελαστικότητας: $E=210000 \text{ N} / \text{mm}^2$

Λόγος Poisson: $\nu=0.3$

Πυκνότητα: $\rho=7850 \text{ kg} / \text{m}^3$

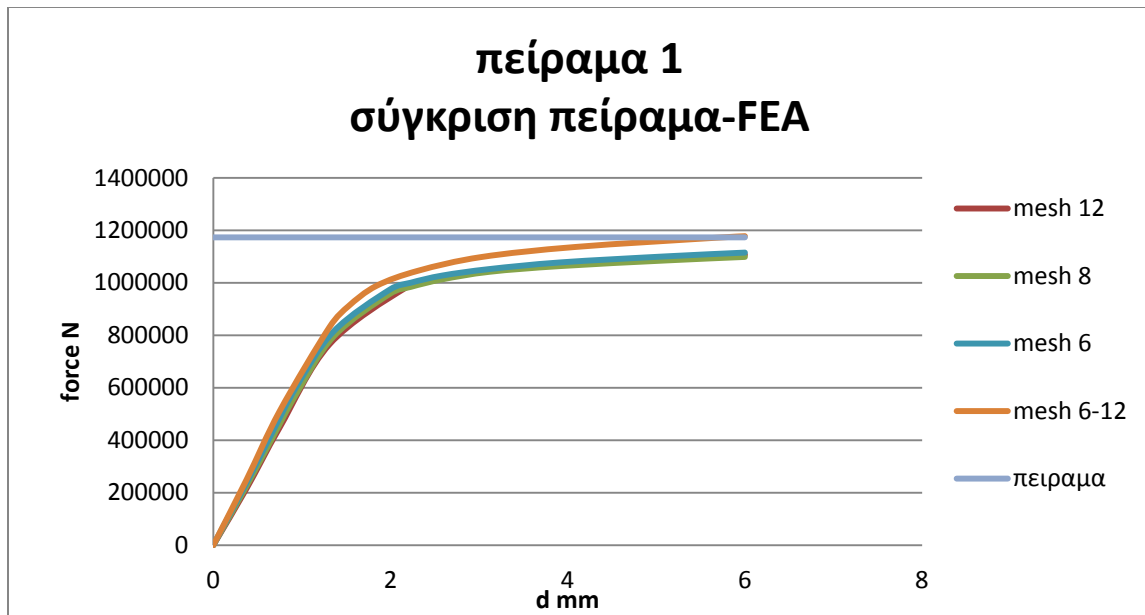
Ορίσαμε στο Abaqus ως μέγιστο αριθμό επαναλήψεων κατά την ανάλυση τις 100 επαναλήψεις, αρχικό μέγεθος προσαύξησης 1E-005 ανά επανάληψη και μέγιστο μέγεθος προσαύξησης 1. Στη συνέχεια το Abaqus μας δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε τον τύπο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιφανειών των μερών της σύνδεσης. Αλληλεπίδραση στο μοντέλο μας διακρίνουμε ότι υπάρχει μεταξύ των δύο μετωπικών πλακών, μεταξύ των μετωπικών πλακών και του κορμού του κοχλίου και μεταξύ των μετωπικών πλακών και των περικοχλίων. Ως τύπος αλληλεπίδρασης επιλέχθηκε η επαφή μεταξύ των επιφανειών αλληλεπίδρασης και ως συντελεστής τριβής μεταξύ των χαλύβδινων επιφανειών του μοντέλου ορίστηκε η τιμή 0.5.

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλαμε ήταν οι ακόλουθες:

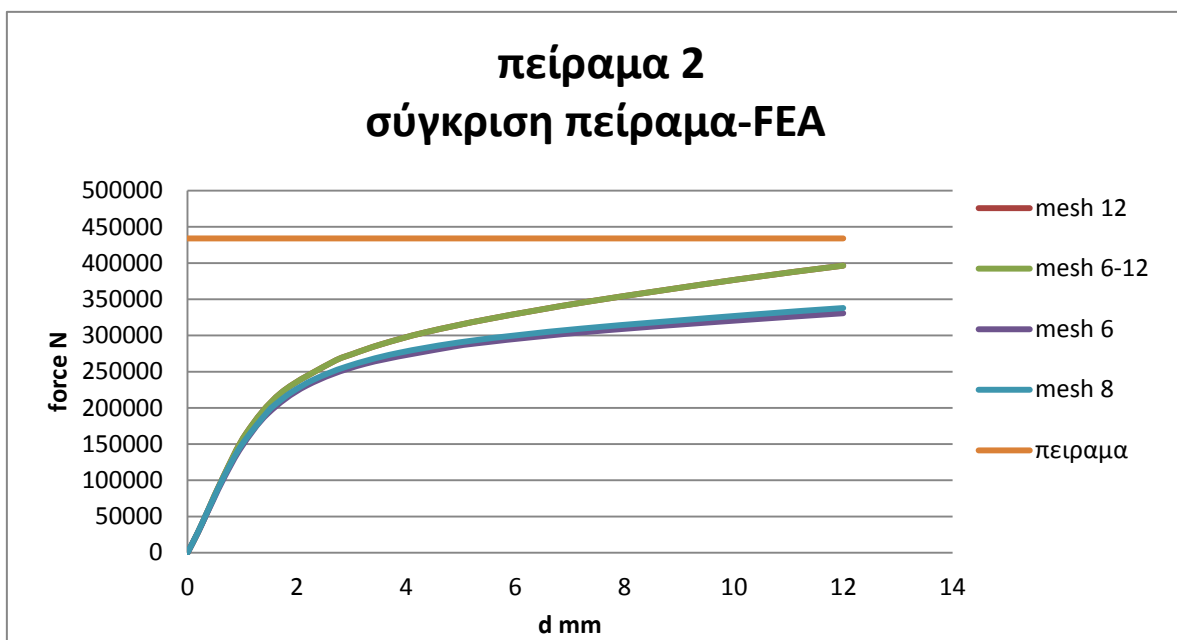
- Πάκτωση στις ελεύθερες επιφάνειες των κοίλων διατομών αριστερά και δεξιά από τη σύνδεση.
- Ελεύθερη μεταφορική κίνηση κατά τη διεύθυνση z , ελεύθερη περιστροφική κίνηση γύρω από τους άξονες x και y και πλήρης δέσμευση κατά τους υπόλοιπους βαθμούς ελευθερίας στην κεφαλή του κοχλία.

Επιπλέον επιβάλαμε μετατόπιση κατά την διεύθυνση z στην αριστερά κοίλη διατομή του shs. Η μετατόπιση αυτή διέφερε κάθε φορά και κυμάνθηκε από 6-15mm μέχρι να διακρίνουμε αστοχία είτε των κοχλιών, είτε γραμμή διαρροής στην πλάκα.

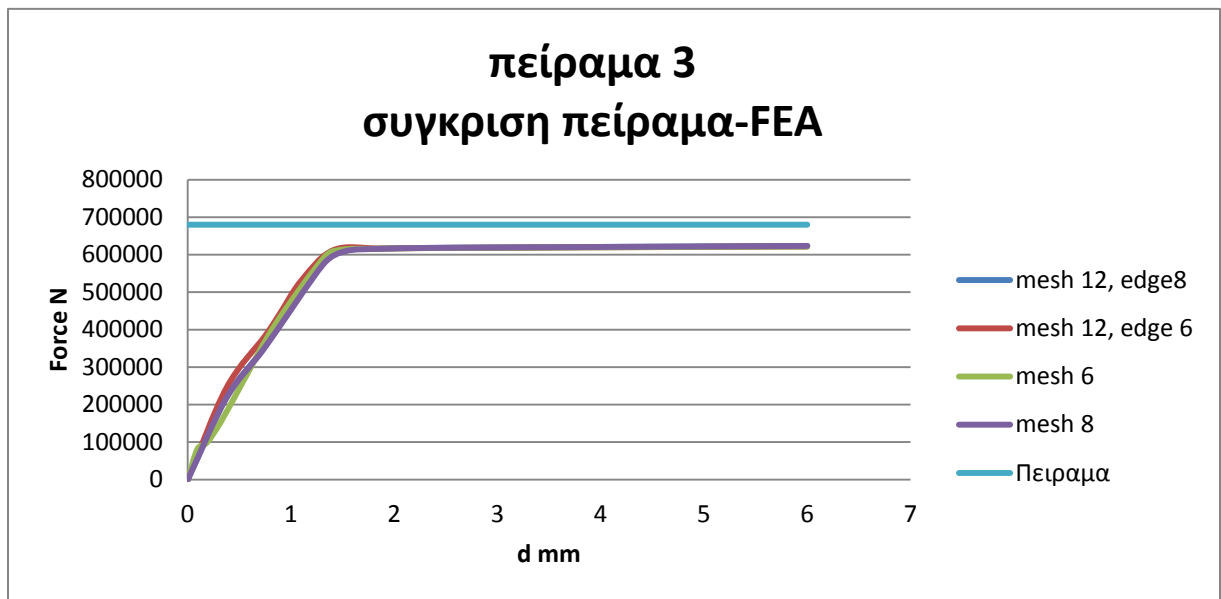
Τέλος, για τη διακριτοποίηση των μελών ορίστηκαν διάφορα μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων ώστε να πετύχουμε σύγκλιση του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων ως προς την προσομοίωση της συμπεριφοράς της σύνδεσης σε σχέση με την πειραματική. Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής διακριτοποιήσεις μελών: α) 12 mm σε όλα τα μέλη, β) 8 mm σε όλα τα μέλη, γ) 6 mm σε όλα τα μέλη και δ) 6 mm στο πάχος της μετωπικής πλάκας και κατά μήκος του κοχλία και 12 mm στα υπόλοιπα. Παρατηρήσαμε ότι στην περίπτωση δ έχουμε την καλύτερη δυνατή σύγκλιση μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Άλλο ένα θετικό χαρακτηριστικό αυτής της διακριτοποίησης είναι ότι, επειδή η περίπτωση αστοχίας της κοίλης διατομής δε μας ενδιαφέρει, δίνουμε μεγαλύτερο μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων σε αυτό το μέλος και εξοικονομούμε σημαντικό χρόνο για την ανάλυση με υπολογιστή.



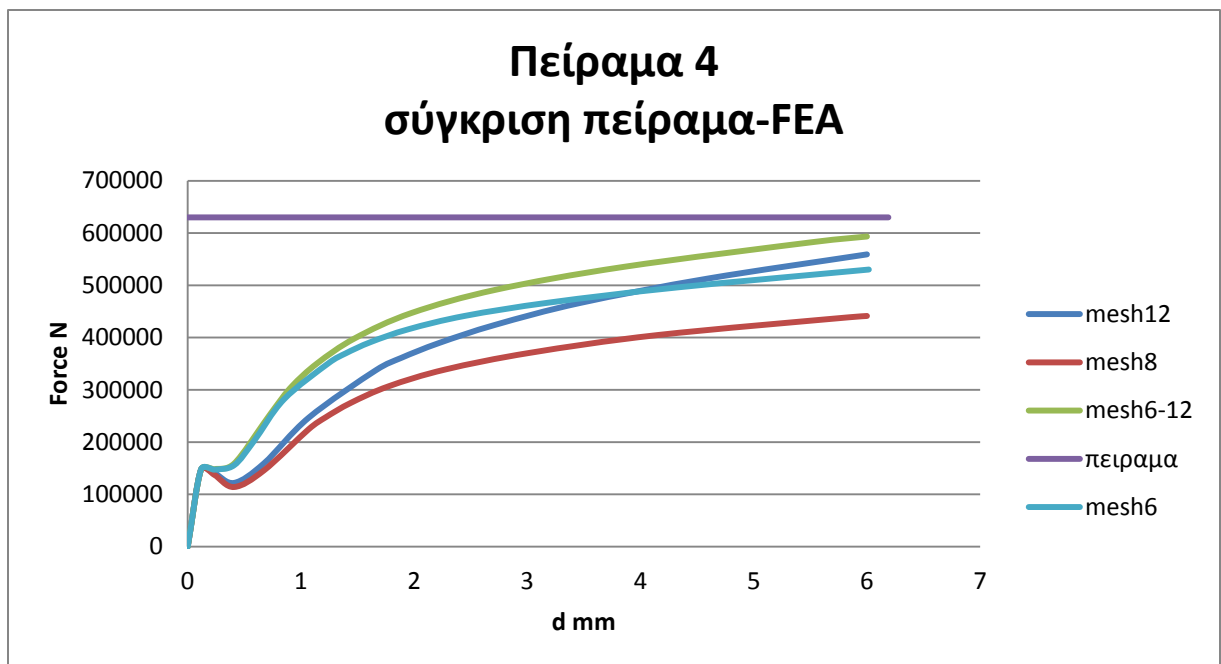
Σχ. 3.7 Πείραμα 1: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με διάφορες διακριτοποιήσεις με το πειραματικό αποτέλεσμα



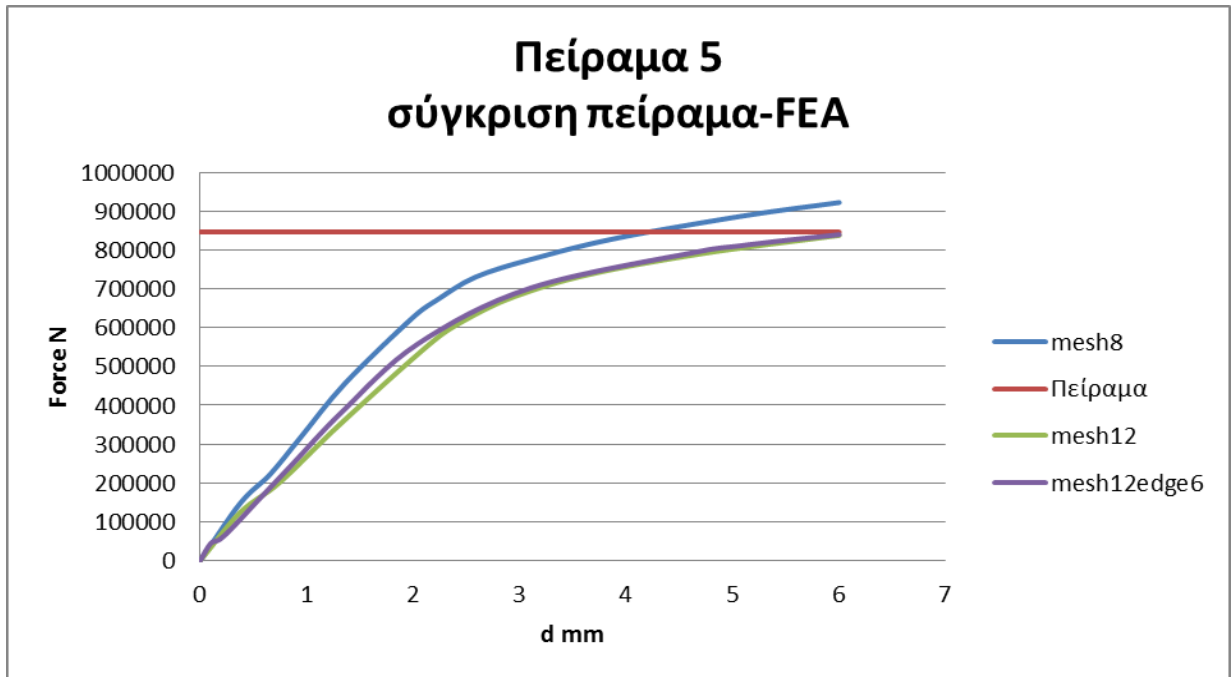
Σχ. 3.8 Πείραμα 2: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με διάφορες διακριτοποιήσεις με το πειραματικό αποτέλεσμα



Σχ. 3.9 Πείραμα 3: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με διάφορες διακριτοποιήσεις με το πειραματικό αποτέλεσμα



Σχ. 3.10 Πείραμα 4: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με διάφορες διακριτοποιήσεις με το πειραματικό αποτέλεσμα



Σχ. 3.11 Πείραμα 5: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με διάφορες διακριτοποιήσεις με το πειραματικό αποτέλεσμα

Κεφάλαιο 4^ο

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ

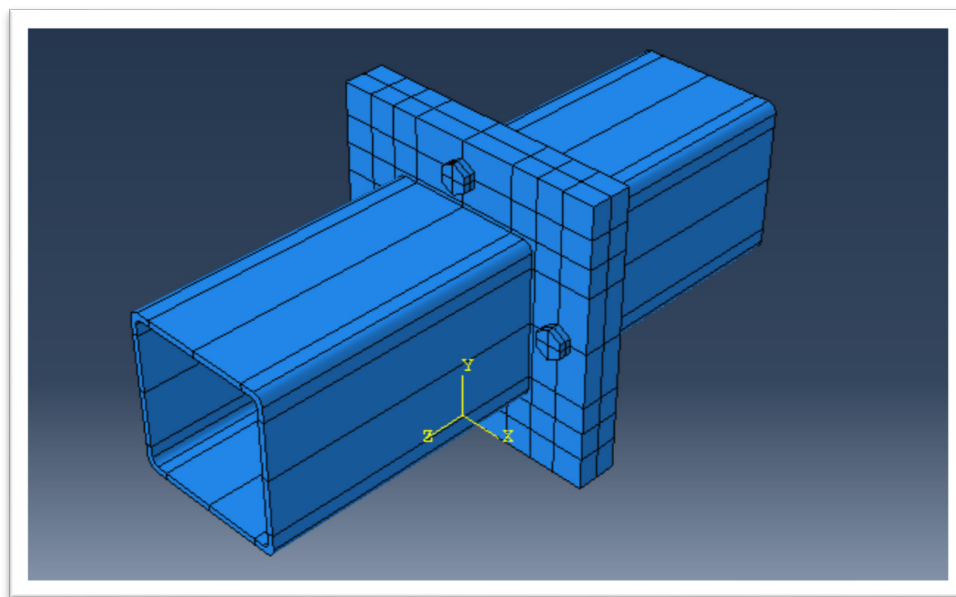
4.1 Σύνδεση κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών, με τέσσερις κοχλίες

4.1.1 Γενικά

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα περιγραφεί το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων της σύνδεσης κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών, με τέσσερις κοχλίες και στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την αριθμητική ανάλυση.

4.1.2 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων

Η προσομοίωση της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας κοίλης τετραγωνικής διατομής μέσω μετωπικών πλακών με τέσσερις κοχλίες έγινε με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία.



Σχ. 4.1 Προσομοίωση σύνδεσης με χωρικά στοιχεία

Ο συνολικός αριθμός των συνδέσεων που αναλύθηκαν ήταν δώδεκα (12). Οι παράμετροι που μεταβάλλονταν μεταξύ των αναλύσεων ήταν το μέγεθος των κοχλιών, οι διαστάσεις των μετωπικών πλακών και της κοίλης διατομής. Χρησιμοποιήθηκαν κοχλίες M16, M20 και M24 και τρία μεγέθη κοίλων τετραγωνικών διατομών SHS 150 x 6, SHS 200 x 8 και SHS 250 x 10. Για κάθε μέγεθος κοχλία, οι λόγοι πάχους πλάκας προς διάμετρο κοχλία (t/d) που χρησιμοποιήθηκαν ήταν t/d= 0.50, 0.75, 1.00 και 1.25. Οι μετωπικές πλάκες ήταν τετραγωνικού σχήματος και είχαν πλάτος 270mm, 320mm και 370mm. Επιπλέον, διατηρήθηκε σταθερή η απόσταση των κοχλιών από τα άκρα των μετωπικών πλακών καθώς και από τη διατομή της κοιλοδοκού. Η απόσταση αυτή ήταν 30mm. Το μήκος της κοιλοδοκού που υιοθετήθηκε ήταν 1.80 φορές το πλάτος της, διότι, βάσει εμπειρίας, από αυτό το μήκος και μετά υπάρχει ομαλοποίηση των τάσεων.

Το υλικό των μετωπικών πλακών ήταν χάλυβας S355, δηλαδή:

Όριο διαρροής: $f_y = 355 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση μηδενική)

Εφελκυστική αντοχή: $f_u = 510 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση 0.15 για λόγους ολκιμότητας)

Το υλικό της κοιλοδοκού ήταν χάλυβας S235, δηλαδή:

Όριο διαρροής: $f_y = 235 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση μηδενική)

Εφελκυστική αντοχή: $f_u = 360 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση 0.15 για λόγους ολκιμότητας)

Η ποιότητα των κοχλιών ήταν 10.9, επομένως:

Όριο διαρροής κοχλιών: $f_{yb} = 900 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση μηδενική)

Εφελκυστική αντοχή κοχλιών: $f_{ub} = 1000 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση 0.15 για λόγους ολκιμότητας)

Οι τιμές των συντελεστών του υλικού που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

Μέτρο ελαστικότητας: $E=210000 \text{ N} / \text{mm}^2$

Λόγος Poisson: $\nu=0.3$

Πυκνότητα: $\rho=7850 \text{ kg} / \text{m}^3$

Έγινε η υπόθεση ότι η κοιλοδοκός είναι υπερδιαστασιολογημένη και η εφελκυστική δύναμη που καλείται να παραλάβει δεν θα ξεπερνά το 70% της πλαστικής της αντοχής. Για την επιλογή των κοχλιών ακολουθήθηκε η εξής απλοποιητική διαδικασία:

Κοιλοδοκός SHS 250x10, S235

$$A_s = 94.9 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl} = 2230.15 \text{ KN}$$

Η σύνδεση θα πραγματοποιηθεί με τέσσερις κοχλίες, άρα

$$N_{pl} * 0.70 / 4 = 390.28 \text{ KN}$$

Η τάση διαρροής των κοχλιών για όλες τις συνδέσεις θα είναι σταθερή και ίση με 90 KN/cm^2 , επομένως το ελάχιστο εμβαδόν που πρέπει να έχει ο κάθε κοχλίας είναι:

$$390.28 \text{ KN} / 90 \text{ KN/cm}^2 = 4.34 \text{ cm}^2$$

Επιλέγουμε M24 με εμβαδόν 4.52 cm^2

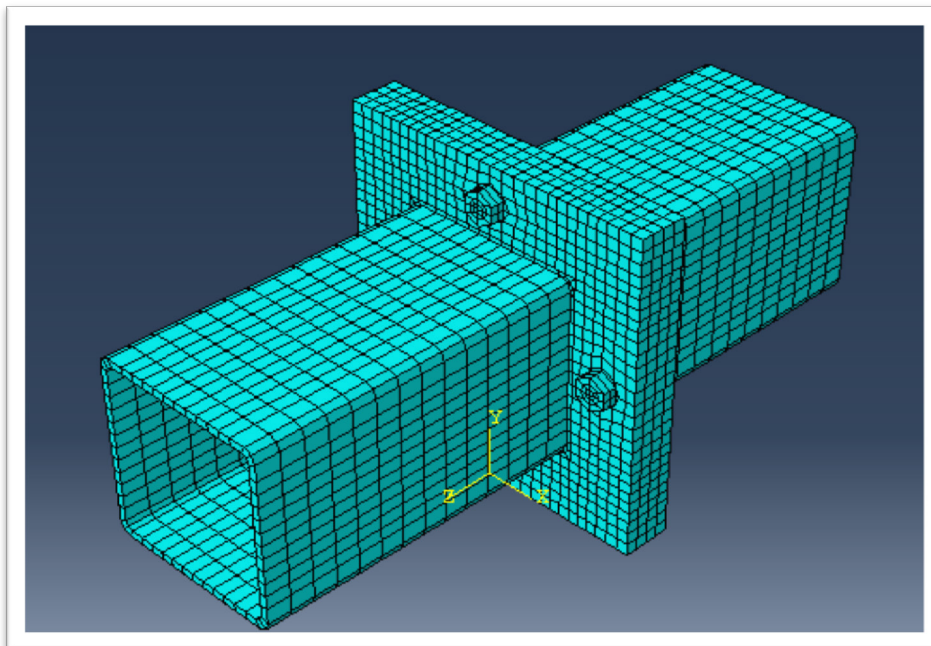
Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο πλακών και μεταξύ των πλακών και των κοχλιών. Ο τύπος αλληλεπίδρασης είναι η επαφή μεταξύ των επιφανειών αλληλεπίδρασης και η τιμή του συντελεστή τριβής μεταξύ των χαλύβδινων επιφανειών είναι 0.5.

Η φόρτιση που ορίστηκε στο πρόγραμμα ήταν εφελκυστικό φορτίο κατά τη θετική φορά του άξονα z, εφαρμοζόμενο στην περίμετρο της κοιλοδοκού.

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλαμε στη σύνδεση ήταν οι ακόλουθες:

- Πάκτωση στις ελεύθερες επιφάνειες των κοίλων διατομών αριστερά και δεξιά από τη σύνδεση.
- Ελεύθερη μεταφορική κίνηση κατά τη διεύθυνση z, ελεύθερη περιστροφική κίνηση γύρω από τους άξονες x και y και πλήρης δέσμευση κατά τους υπόλοιπους βαθμούς ελευθερίας στην κεφαλή του κοχλίου.

Το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων με το οποίο έγινε η διακριτοποίηση της σύνδεσης διαμορφώθηκε ώστε να υποδιαιρεθεί το πάχος των μετωπικών πλακών σε δύο πεπερασμένα στοιχεία καθ' ύψος.



Σχ. 4.2 Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων της σύνδεσης

4.1.3 Αποτελέσματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία

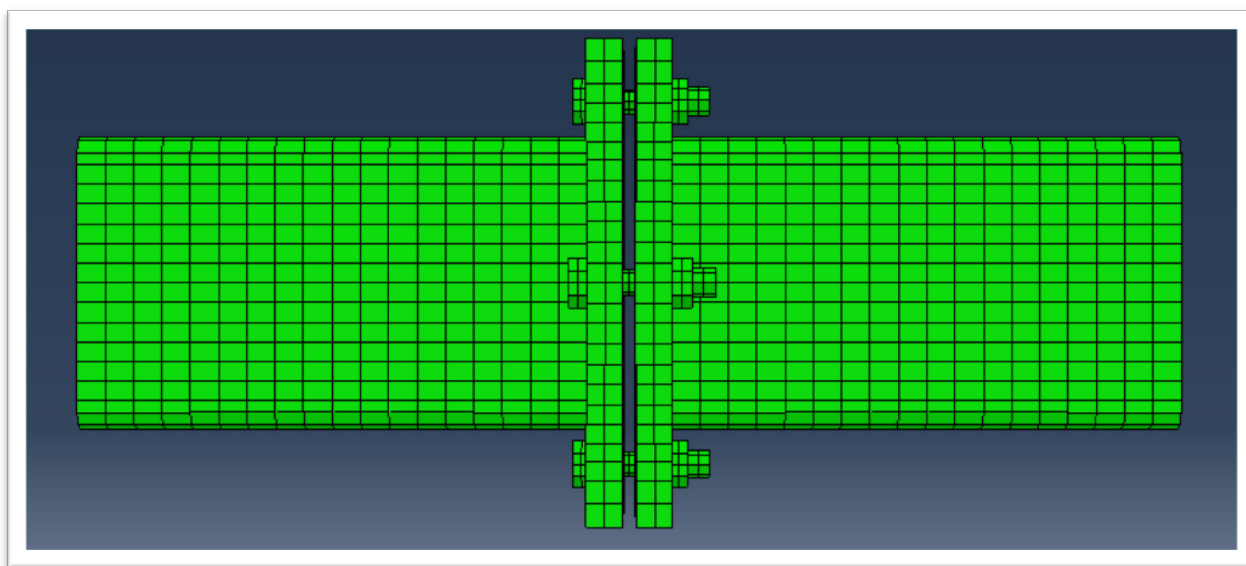
Στην περίπτωση της κοχλιωτής σύνδεσης κοίλης διατομής μέσω μετωπικών πλακών διακρίνουμε τρεις κατηγορίες συμπεριφοράς της σύνδεσης ανάλογα με τη δυσκαμψία της, τη συμπεριφορά με πλάκα μεγάλου, ενδιάμεσου και μικρού πάχους. Σε αυτές τις τρεις κατηγορίες συμπεριφοράς της σύνδεσης αντιστοιχούν τρεις πιθανές μορφές αστοχίας :

- αστοχία λόγω διαρροής των κοχλιών
- αστοχία λόγω ταυτόχρονης παραμόρφωσης της πλάκας και διαρροής των κοχλιών
- αστοχία λόγω μεγάλης παραμόρφωσης της πλάκας

Στις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκαν και οι τρεις μορφές αστοχίας. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα τριών περιπτώσεων ώστε να διακρίνουμε καλύτερα τη συμπεριφορά της σύνδεσης σε κάθε μια από τις τρεις κατηγορίες που αναφέρθηκαν.

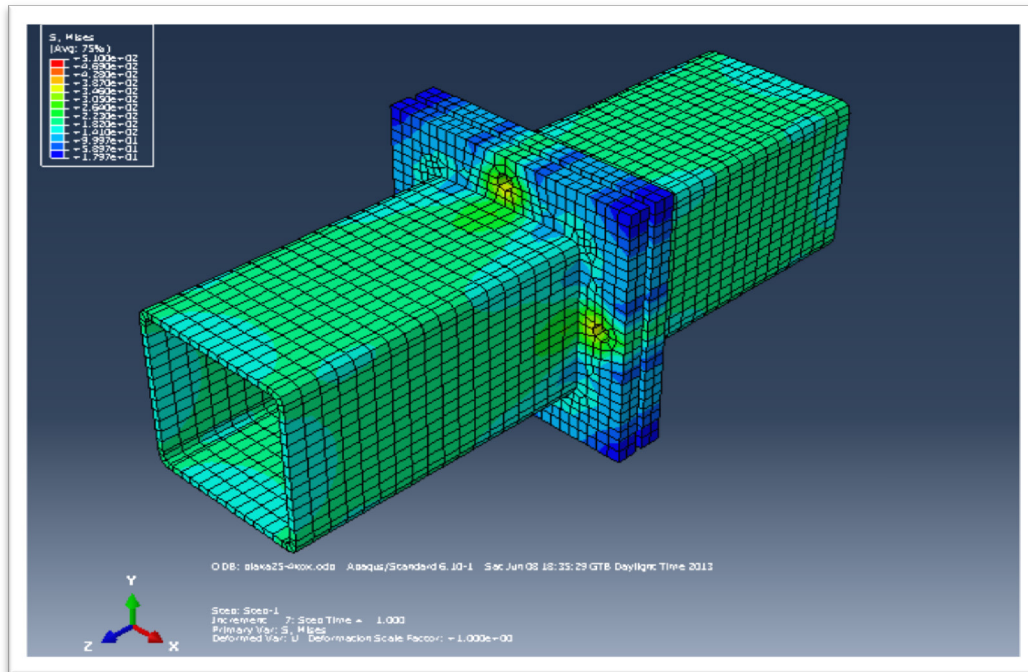
4.1.3.1 Αστοχία λόγω διαρροής των κοχλιών

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν όλες οι δοκιμές που έγιναν με πάχος πλακών $t/d=1.00$ και $t/d=1.25$ για κοχλίες M16, M20 και M24. Στο πιο κάτω σχήμα φαίνεται η εικόνα παραμόρφωσης για shs 200x8, κοχλίες M20, μετωπική πλάκα 320x320mm και πάχος πλάκας $t=25\text{mm}$ δηλαδή $t/d=1.25$.

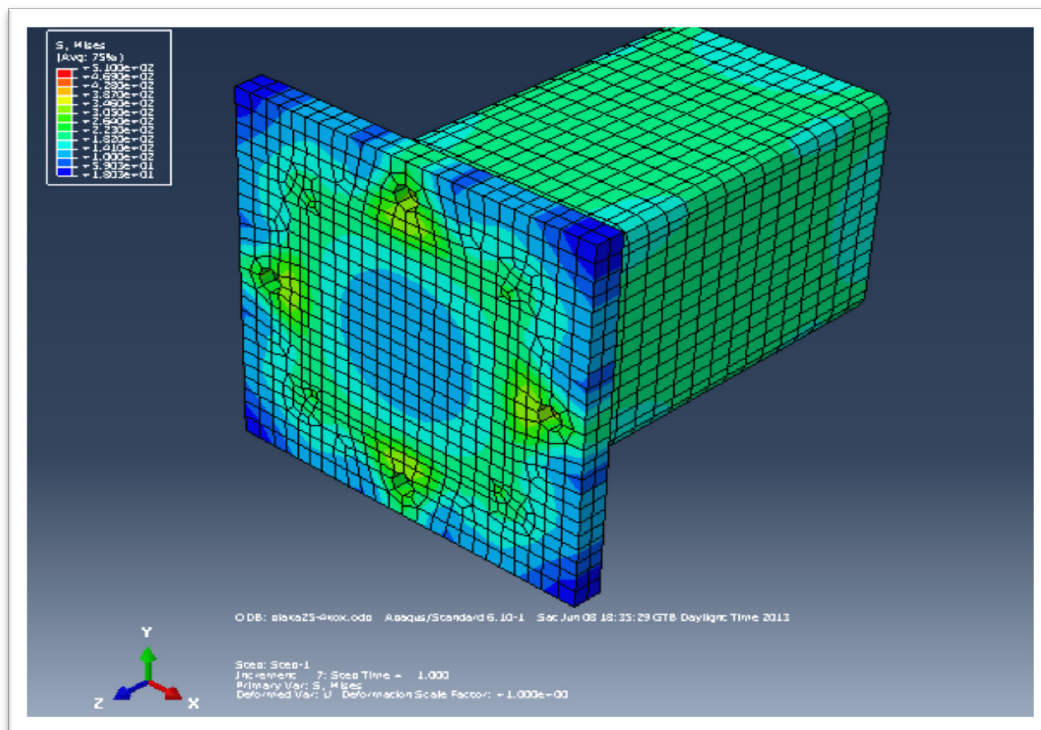


Σχ. 4.3 Εικόνα παραμορφώσεων σύνδεσης –Πλάγια όψη

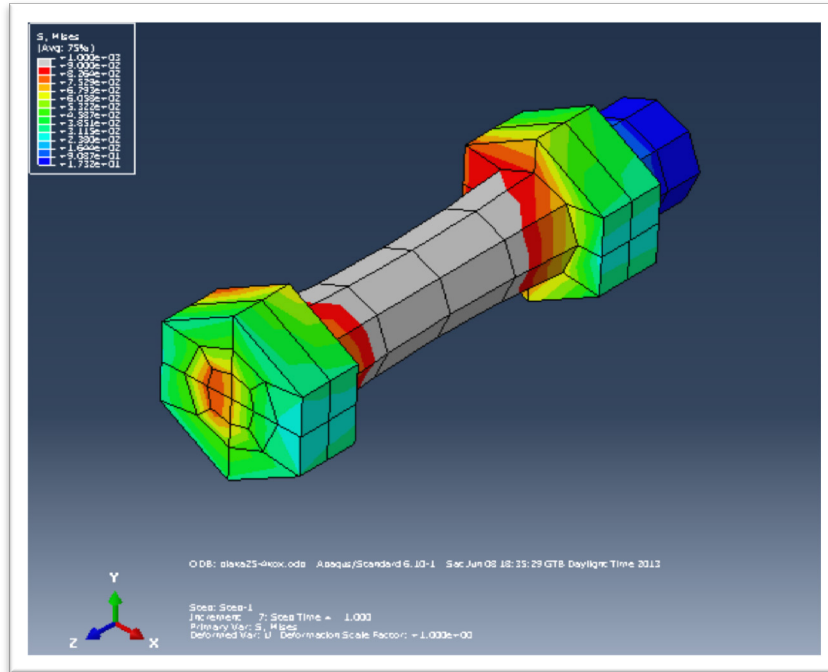
Από την εικόνα του σχήματος παρατηρούμε ότι οι μετωπικές πλάκες ανήκουν στην κατηγορία των πλακών μεγάλου πάχους. Αυτό σημαίνει ότι παραμορφώνονται ελάχιστα και δεν σχηματίζεται πλαστικός μηχανισμός, αλλά κινούνται ως στερεό σώμα. Το γεγονός αυτό διαπιστώνεται και από την εικόνα των τάσεων von Mises όπου φαίνεται ότι οι πλάκες δεν έχουν πλαστικοποιηθεί.



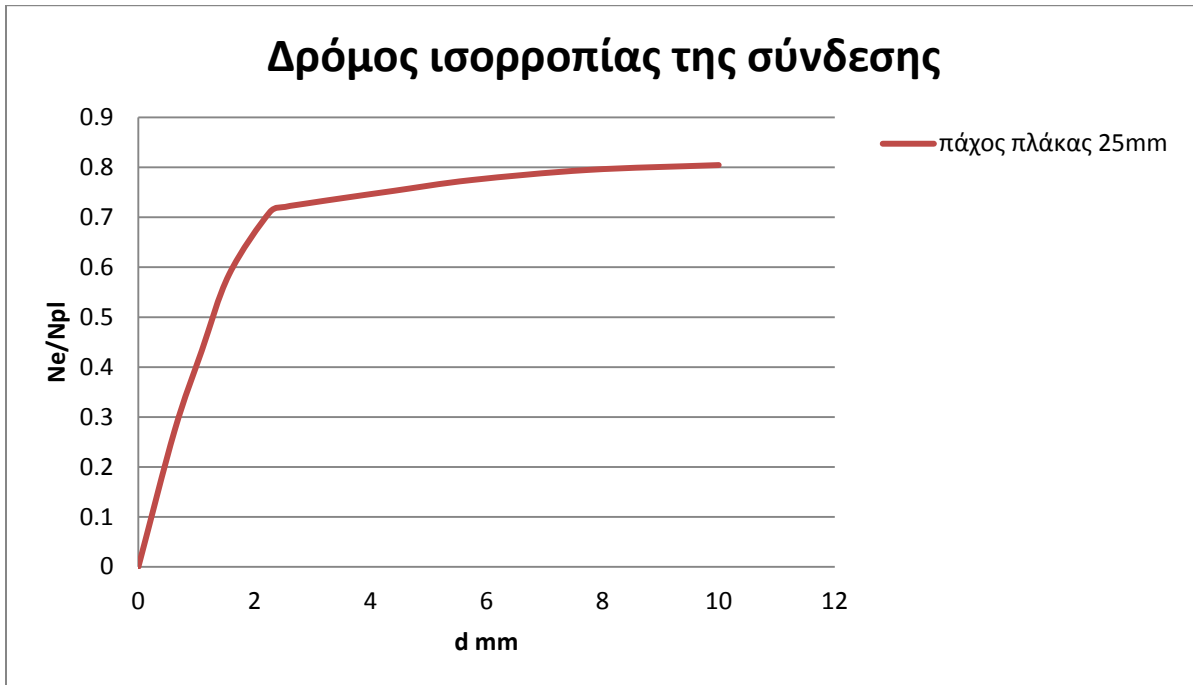
Σχ. 4.4 Τάσεις von Mises σύνδεσης με μέγιστη τάση f_y κατά την αστοχία



Σχ. 4.5 Τάσεις von Mises πλάκας με μέγιστη τάση f_y κατά την αστοχία

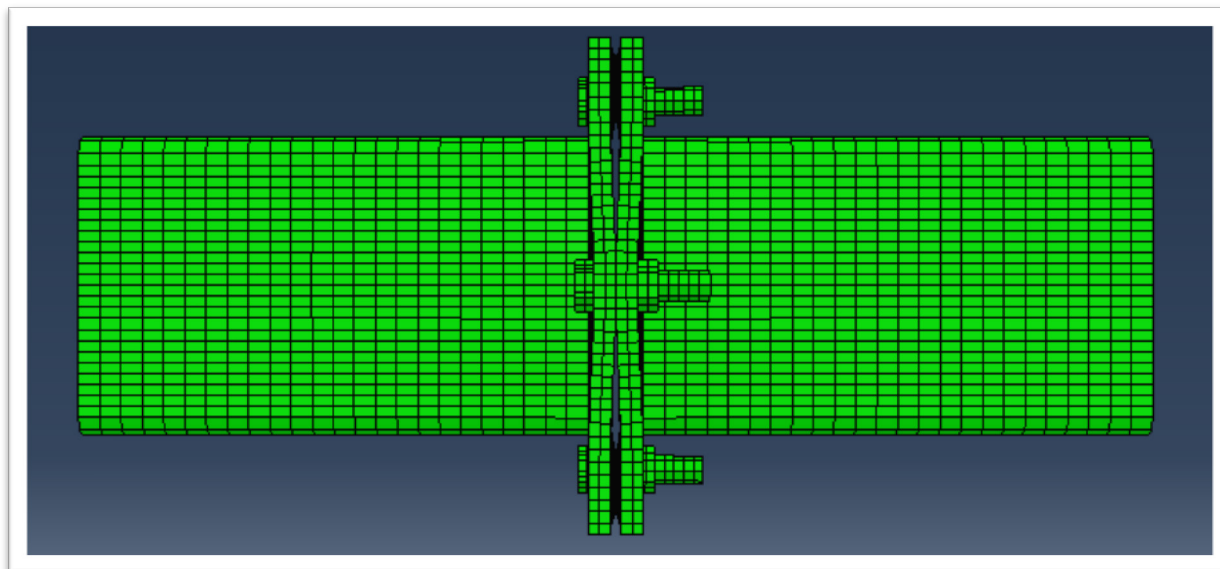


Σχ. 4.6 Τάσεις von Mises κοχλία με μέγιστη τάση f_y κατά την αστοχία



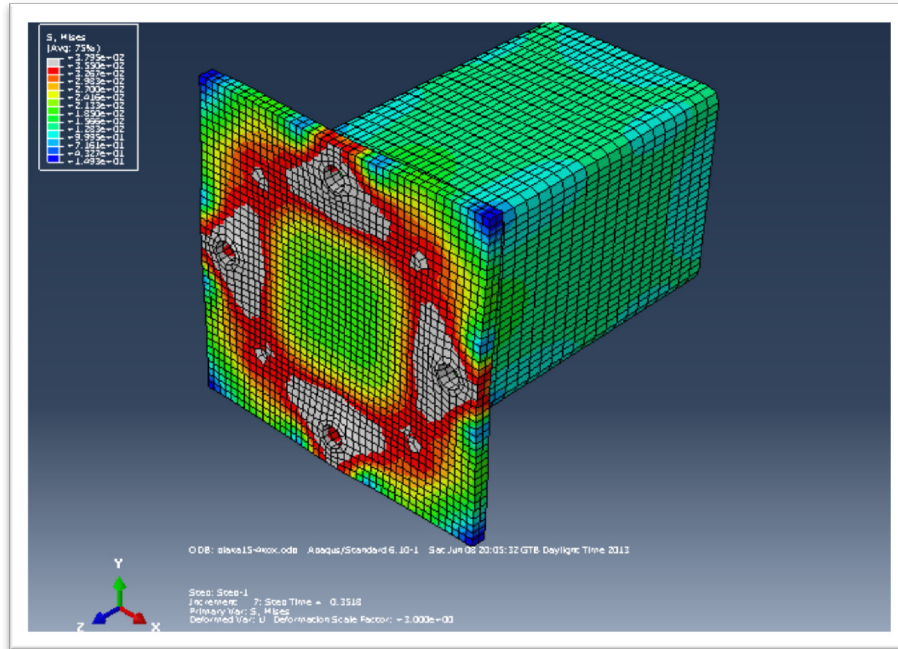
Σχ. 4.7 Διάγραμμα δύναμης -μετατόπισης στη σύνδεση

4.1.3.2 Αστοχία λόγω ταυτόχρονης παραμόρφωσης της πλάκας και διαρροής των κοχλιών
Από όλες τις δοκιμές που έγιναν βλέπουμε ότι για πάχος πλάκας $t/d=0.75$ παρατηρείται ταυτόχρονη παραμόρφωση πλάκας και διαρροή κοχλιών. Παρακάτω απεικονίζεται η δοκιμή για $s_hs200x8$, κοχλίες M20, μετωπική πλάκα $320x320mm$ και πάχος πλάκας $t=15mm$ δηλαδή $t/d=0.75$.

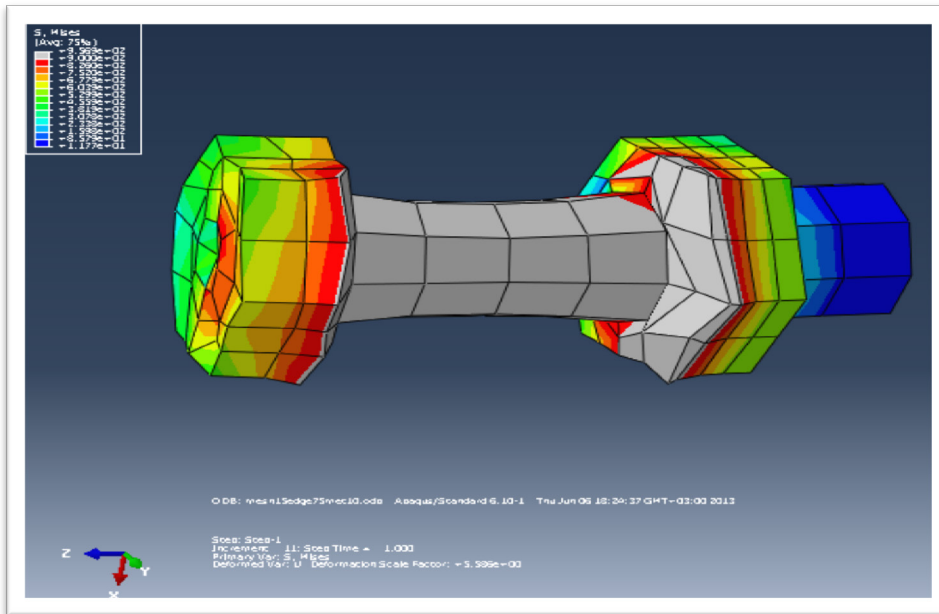


Σχ.4.8 Εικόνα παραμορφώσεων σύνδεσης –Πλάγια όψη

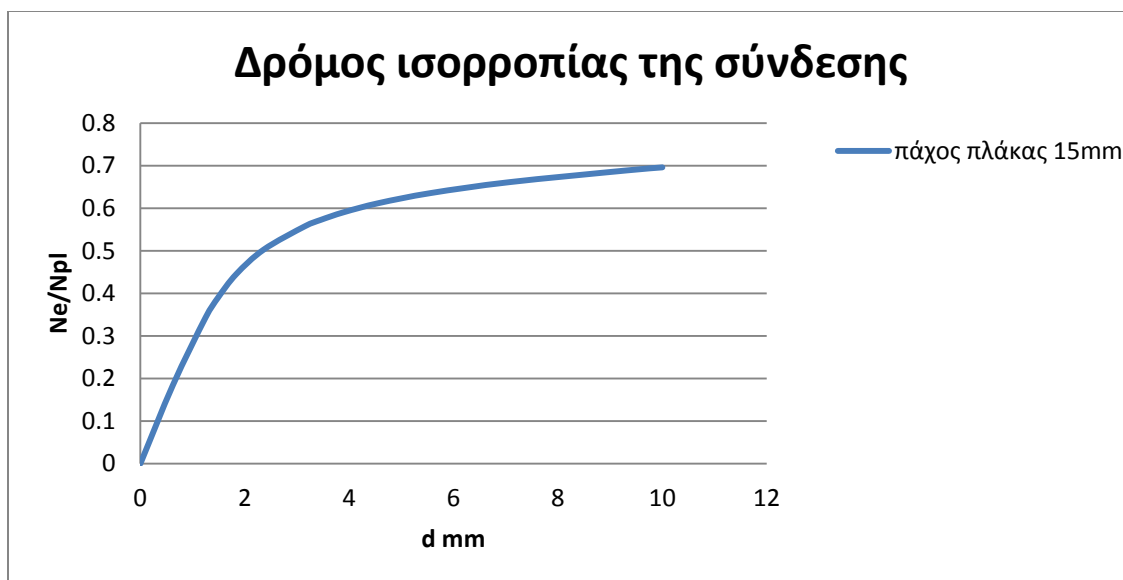
Παρατηρούμε ότι οι παραμορφώσεις της πλάκας ακολουθούν τη μορφή μιας πλάκας ενδιάμεσου πάχους στην οποία δημιουργείται μηχανισμός με δύο πλαστικές αρθρώσεις.



Σχ. 4.9 Τάσεις von Mises πλάκας με μέγιστη τάση f_y κατά την αστοχία



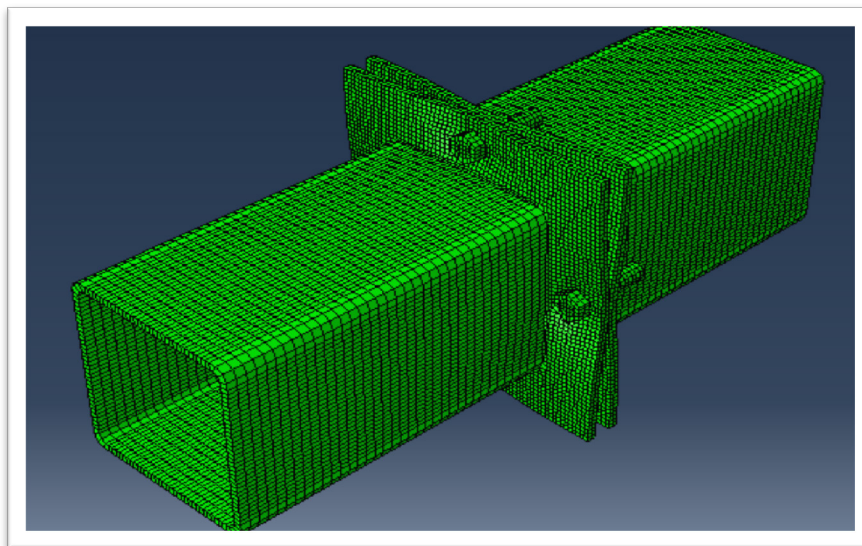
Σχ. 4.10 Τάσεις von Mises κοχλία με μέγιστη τάση f_y κατά την αστοχία



Σχ. 4.11 Διάγραμμα δύναμης -μετατόπισης στη σύνδεση

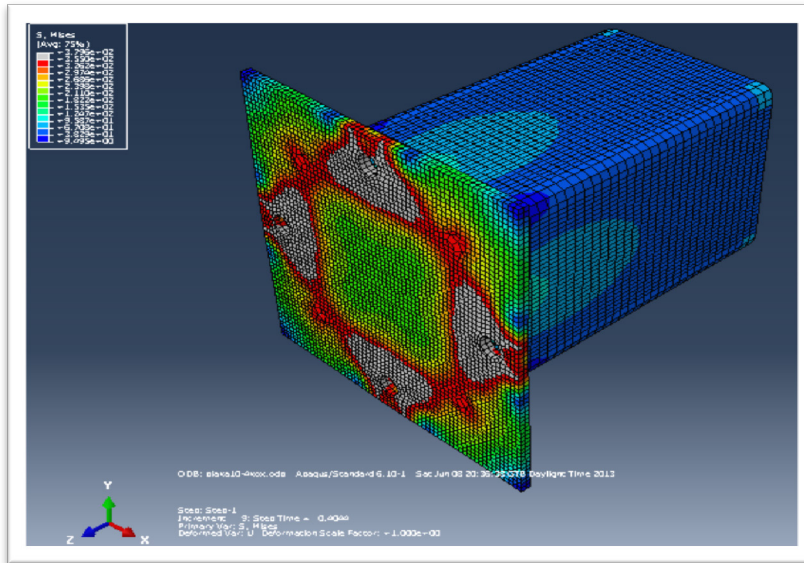
4.1.3.3 Αστοχία λόγω μεγάλης παραμόρφωσης της πλάκας

Η συμπεριφορά αυτή παρατηρήθηκε για πάχη μετωπικής πλάκας $t/d=0.50$ σε όλες τις δοκιμές. Παρακάτω απεικονίζεται η δοκιμή για $shs200 \times 8$, κοχλίες M20, μετωπική πλάκα $320 \times 320 \text{mm}$ και πάχος πλάκας 10mm δηλαδή $t/d=0.50$.

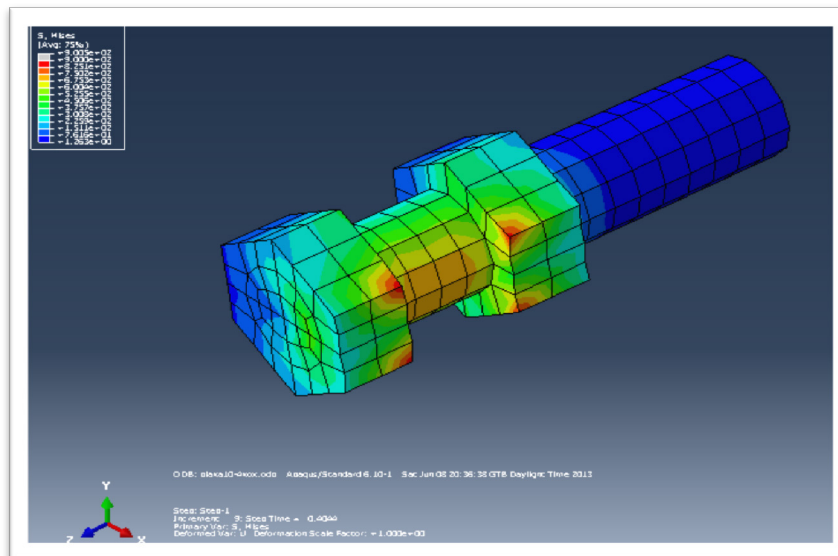


Σχ. 4.12 Εικόνα παραμορφώσεων σύνδεσης –Πλάγια όψη

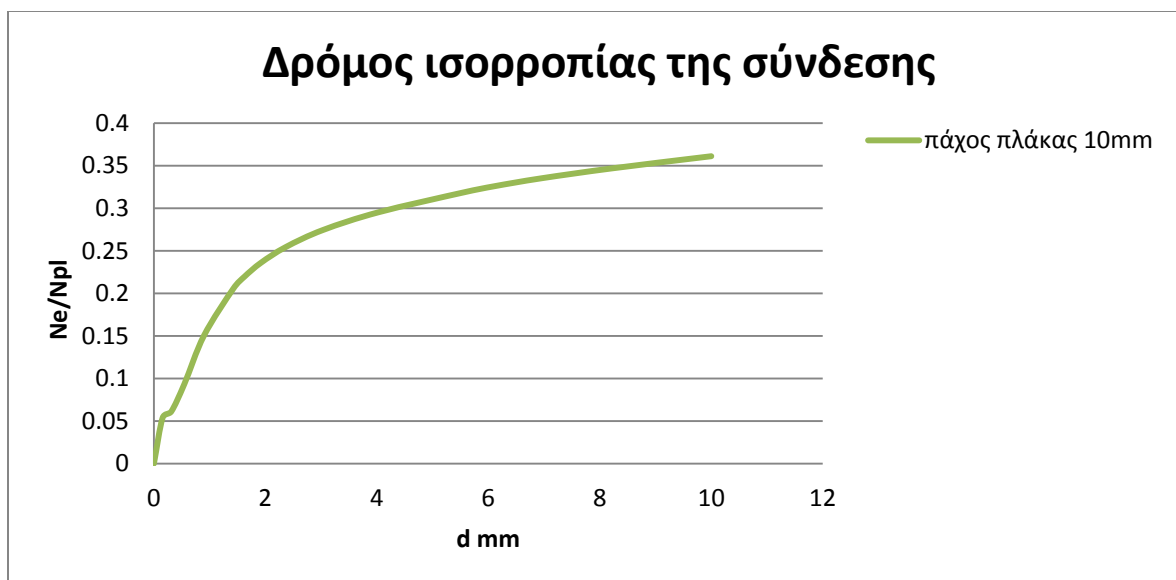
Παρατηρούμε ότι οι παραμορφώσεις της πλάκας ακολουθούν τη μορφή παραμόρφωσης μιας λεπτής πλάκας στην οποία δημιουργείται μηχανισμός με τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις.



Σχ. 4.13 Τάσεις von Mises πλάκας με μέγιστη τάση f_y κατά την αστοχία



Σχ. 4.14 Τάσεις von Mises κοχλία με μέγιστη τάση f_y κατά την αστοχία



Σχ. 4.15 Διάγραμμα δύναμης -μετατόπισης στη σύνδεση

4.1.4 Αποτελέσματα και σύγκριση δοκιμών

Από τις αναλύσεις που έγιναν παρατηρούμε ότι η μορφή αστοχίας για συνδέσεις με λόγο πάχους προς τη διάμετρο κοχλιών $t/d=0.50$ είναι αστοχία λόγω μεγάλης παραμόρφωσης των μετωπικών πλακών σε όλες τις συνδέσεις. Επίσης όταν έχουμε λόγο $t/d=0.75$ προκύπτει από την αριθμητική ανάλυση ότι η μορφή αστοχίας σε κάθε σύνδεση με αυτούς τους λόγους είναι η ταυτόχρονη παραμόρφωση των πλακών και διαρροή κοχλιών. Τέλος βλέπουμε ότι για t/d μεγαλύτερο ή ίσο του 1,00 η μορφή αστοχίας των συνδέσεων είναι αποκλειστικά η διαρροή των κοχλιών. Παράλληλα παρατηρούμε ότι ο βέλτιστος λόγος πάχους πλάκας είναι το $t/d=1$ αφού πέραν αυτού η αντοχή δεν αυξάνει και άρα ο σχεδιασμός είναι αντιοικονομικός. Παρακάτω απεικονίζονται οι δρόμοι ισορροπίας καθώς και οι αναλύσεις κάθε δοκιμής.

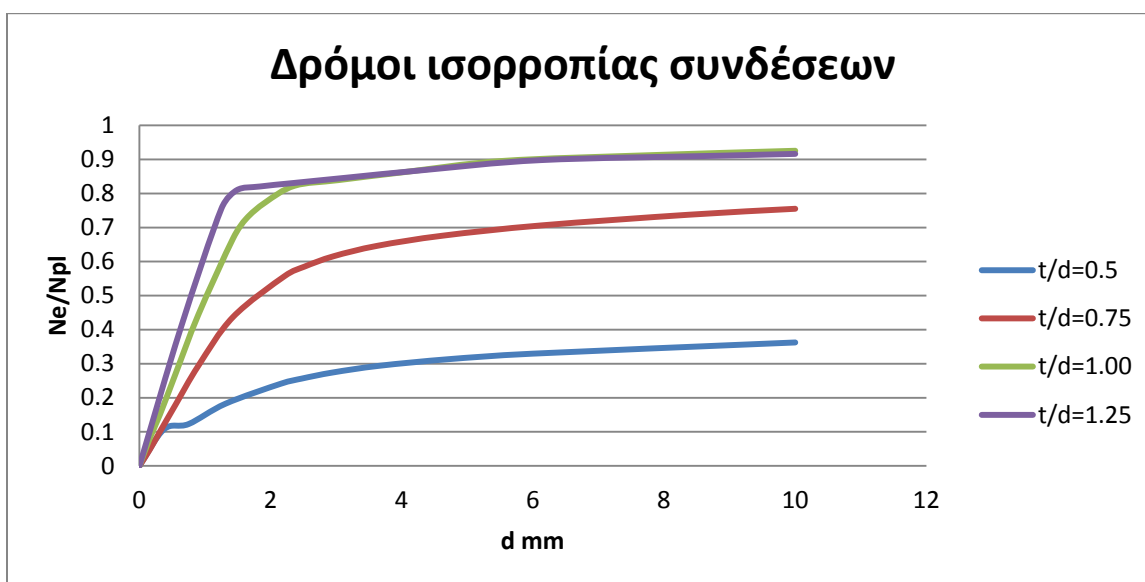
Αριθμός ανάλυσης	Διάμετρος κοχλιών d(mm)	Λόγος t/d	Αντοχή (KN) Ne/Npl	Μορφή αστοχίας*
1	16	0.50	0.12	πλάκα
2	16	0.75	0.56	Πλ. & κοχ.
3	16	1.00	0.77	Κοχλίες
4	16	1.25	0.81	Κοχλίες

*πλάκα= Αστοχία λόγω μεγάλης παραμόρφωσης των μετωπικών πλακών

Πλ. & κοχ.= Αστοχία λόγω ταυτόχρονης παραμόρφωσης των πλακών και διαρροής των κοχλιών

Κοχλίες = Αστοχία λόγω διαρροής των κοχλιών

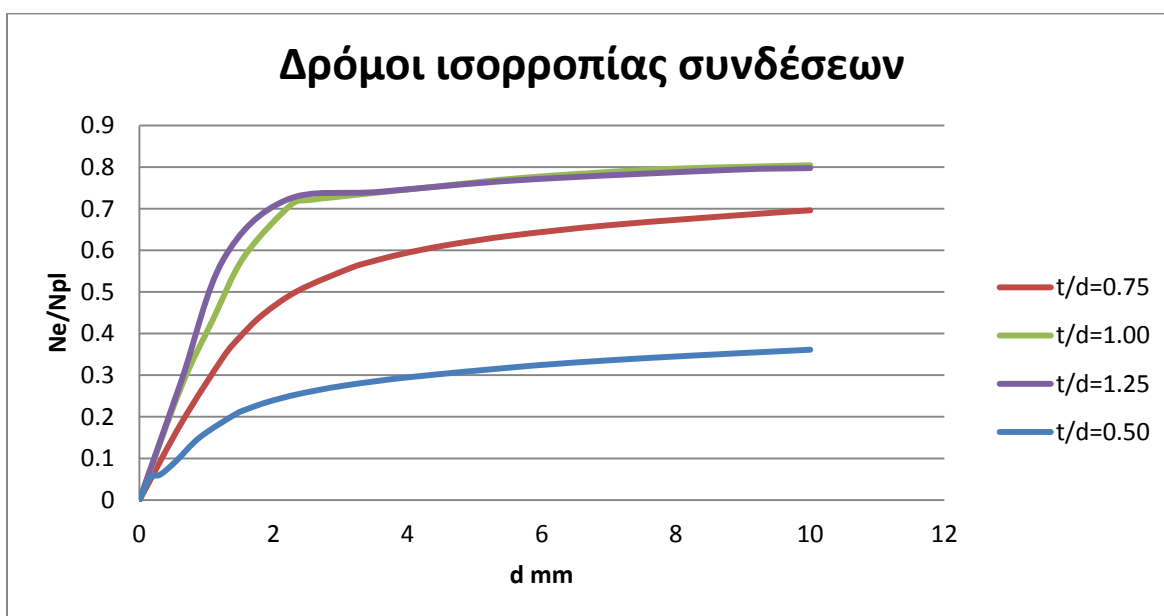
Πιν. 4.1 Αποτελέσματα ανάλυσης για συνδέσεις της διατομής SHS 150x6 με τέσσερις κοχλίες M16



Σχ. 4.16 Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα t/d σε σύνδεση με SHS 150x6 και τέσσερις κοχλίες M16

Αριθμός ανάλυσης	Διάμετρος κοχλιών d(mm)	Λόγος t/d	Αντοχή (KN) Ne/Npl	Μορφή αστοχίας*
5	20	0.50	0.10	πλάκα
6	20	0.75	0.45	Πλ. & κοχ.
7	20	1.00	0.71	Κοχλίες
8	20	1.25	0.72	Κοχλίες

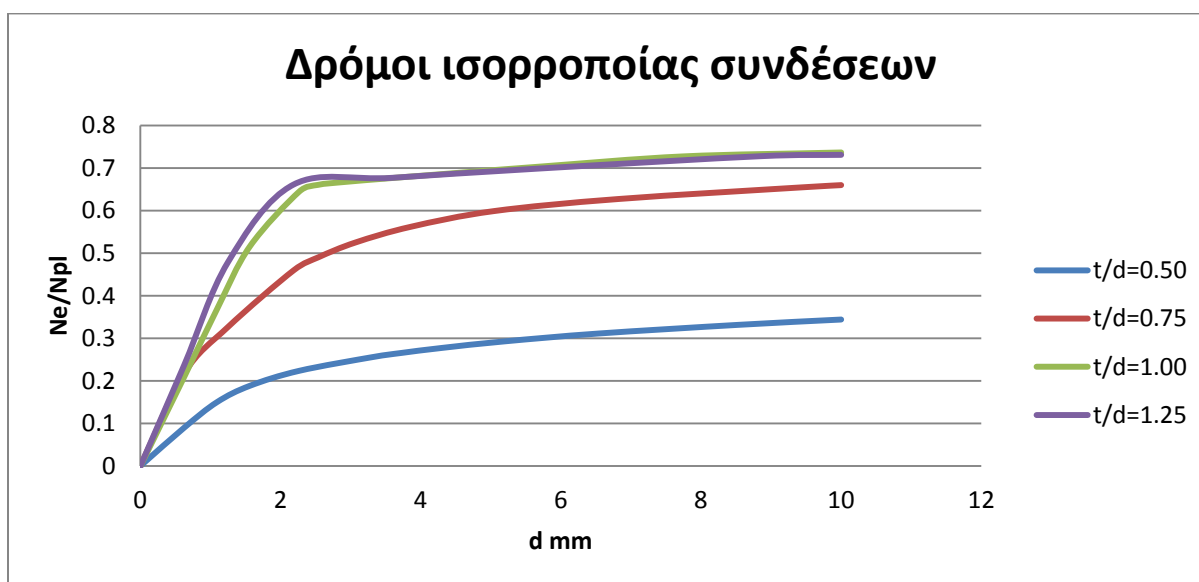
Πιν. 4.2 Αποτελέσματα ανάλυσης για συνδέσεις της διατομής SHS 200x8 με τέσσερις κοχλίες M20



Σχ. 4.17 Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα t/d σε σύνδεση με SHS 200x8 και τέσσερις κοχλίες M20

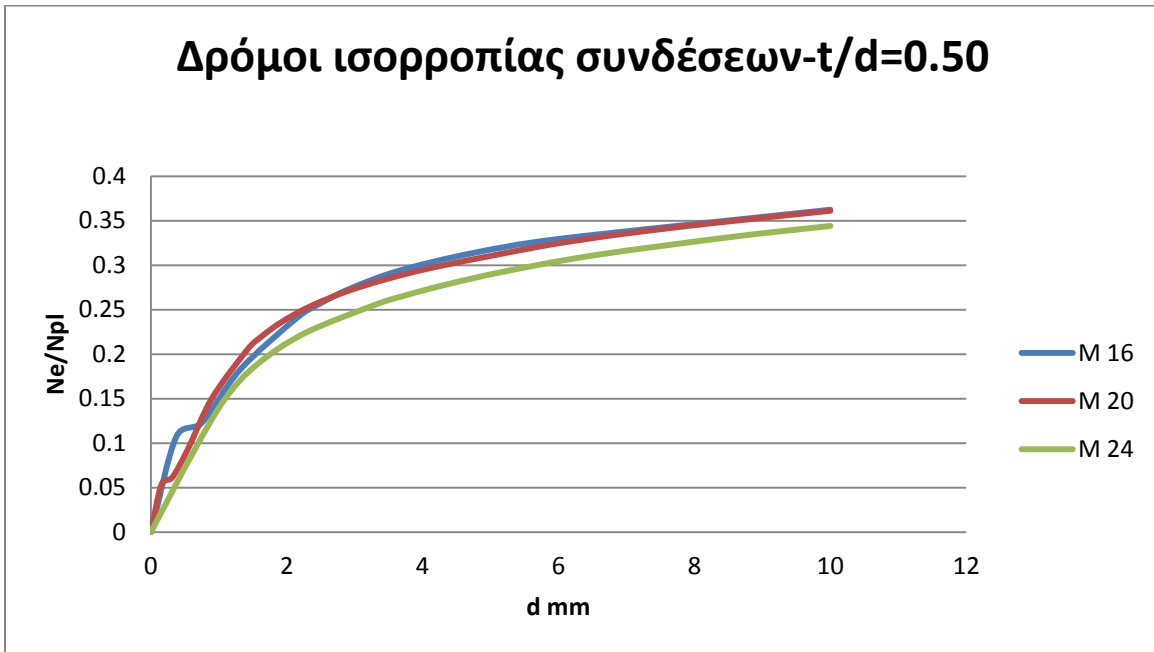
Αριθμός ανάλυσης	Διάμετρος κοχλιών d(mm)	Λόγος t/d	Αντοχή (KN) Ne/Npl	Μορφή αστοχίας*
9	24	0.50	0.22	πλάκα
10	24	0.75	0.53	Πλ. & κοχ.
11	24	1.00	0.66	Κοχλίες
12	24	1.25	0.68	Κοχλίες

Πιν. 4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης για συνδέσεις της διατομής SHS 250x10 με τέσσερις κοχλίες M24

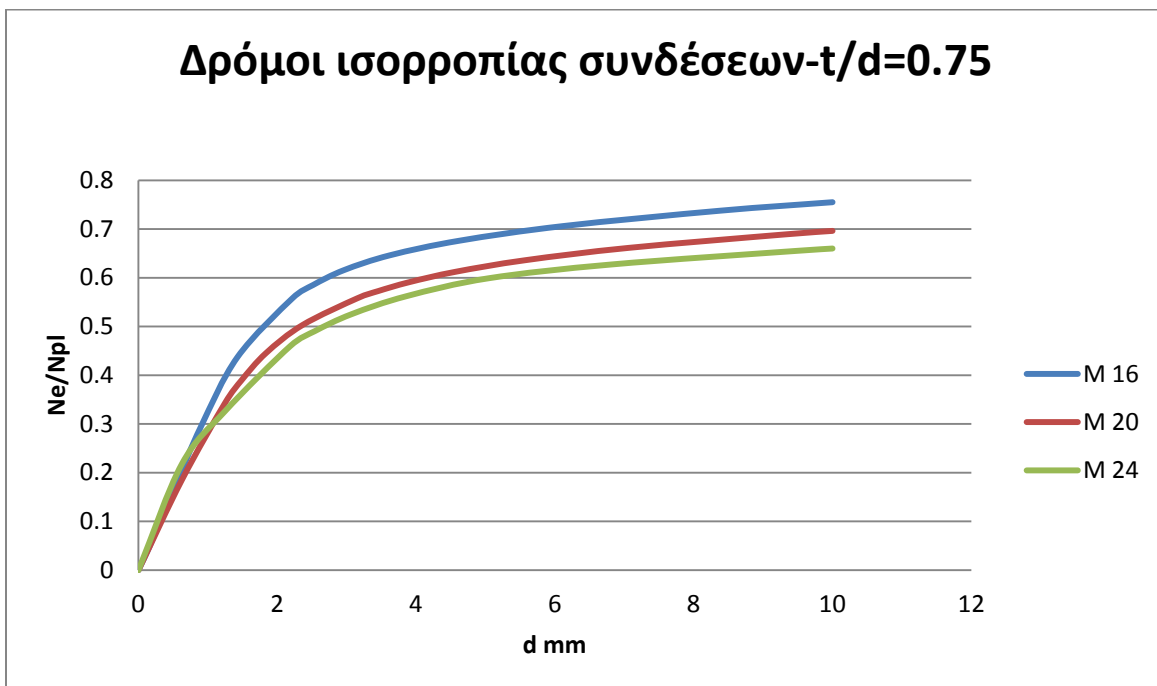


Σχ. 4.18 Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα t/d σε σύνδεση με SHS 250x10 και τέσσερις κοχλίες M24

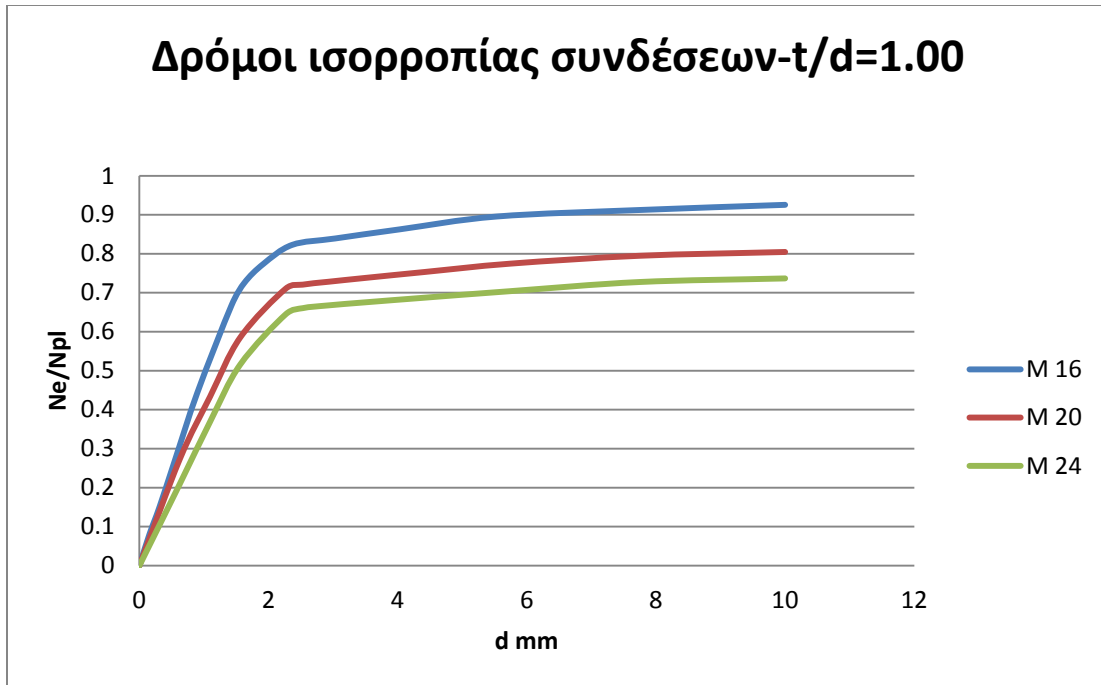
Στη συνέχεια ακολουθούν οι δρόμοι ισορροπίας των συνδέσεων ανά μέγεθος του λόγου πάχους πλάκας προς διάμετρο κοχλία t/d και για μεγέθη κοχλιών M16, M20 και M24.



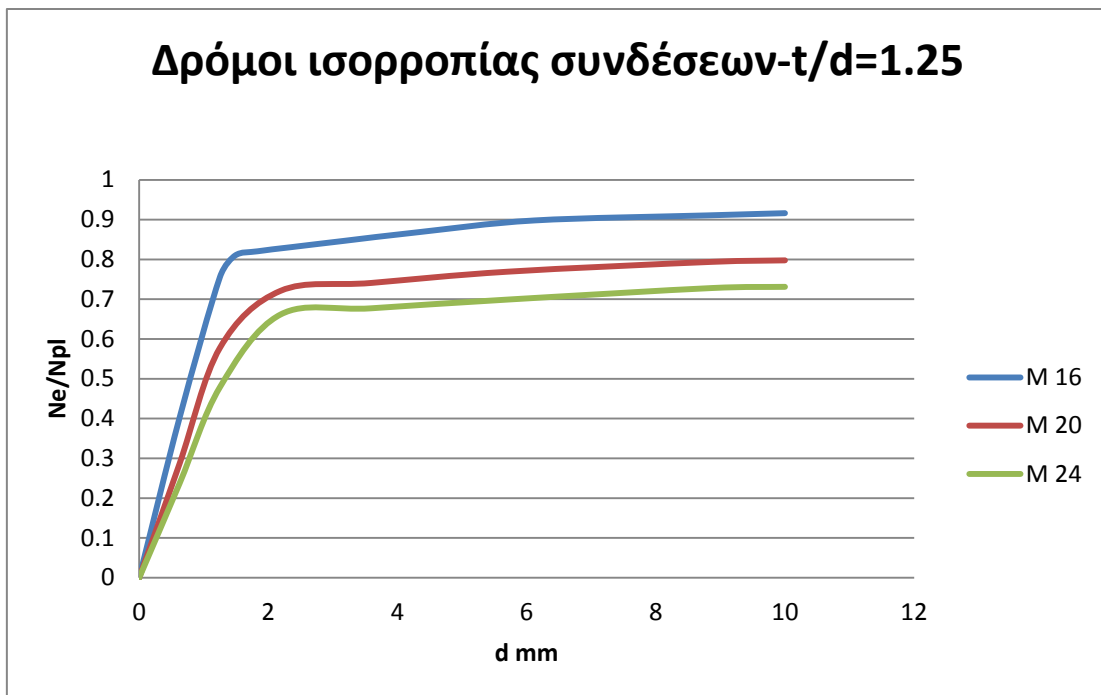
Σχ. 4.19 Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα μεγέθη κοχλιών σε σύνδεση με $t/d=0.50$



Σχ. 4.20 Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα μεγέθη κοχλιών σε σύνδεση με $t/d=0.75$



Σχ. 4.21 Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα μεγέθη κοχλιών σε σύνδεση με $t/d=1.00$

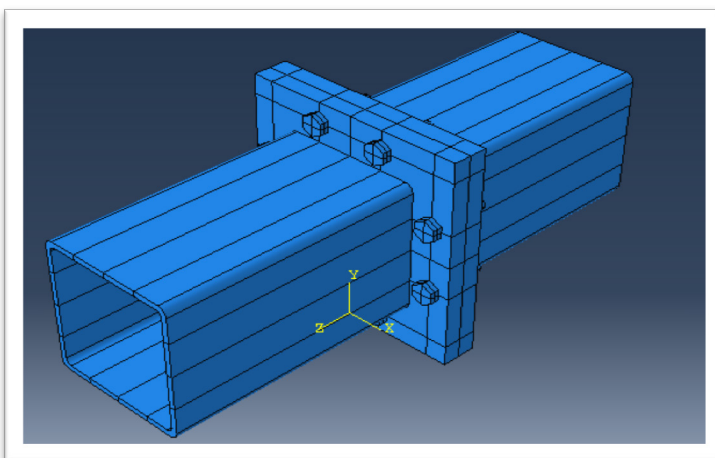


Σχ. 4.22 Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα μεγέθη κοχλιών σε σύνδεση με $t/d=1.25$

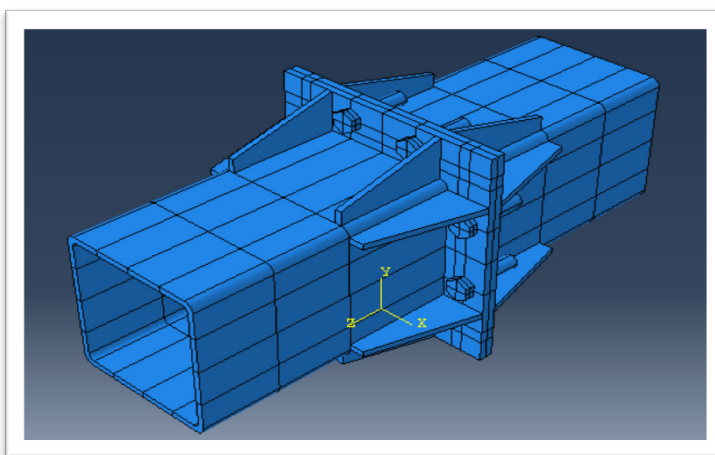
4.2 Σύνδεση κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών με οκτώ κοχλίες

4.2.1 Γενικά

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα περιγραφεί το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων της σύνδεσης κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών, με οκτώ κοχλίες σε τετραγωνική διάταξη, σε κυκλική διάταξη και σε κυκλική διάταξη με ενισχύσεις και στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την αριθμητική ανάλυση.



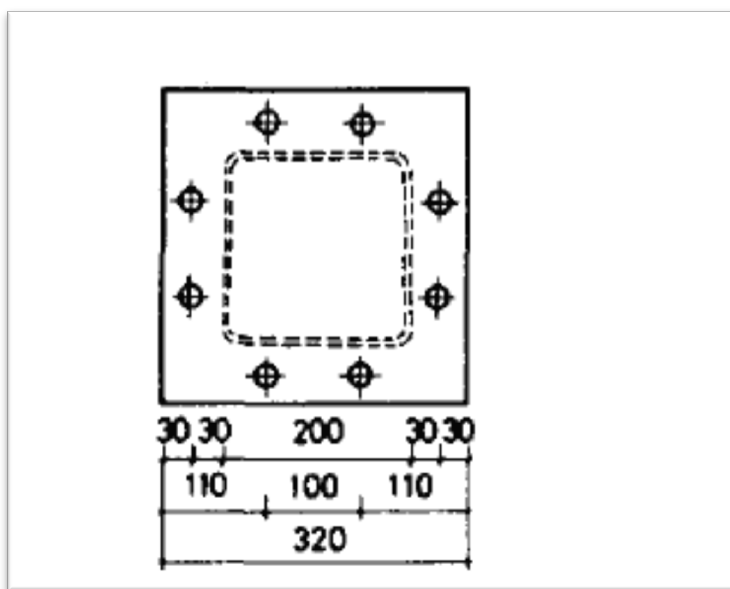
Σχ. 4.23 Προσομοίωση σύνδεσης με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη



Σχ. 4.24 Προσομοίωση σύνδεσης με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη με ενισχύσεις

4.2.2 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων

Η προσομοίωση της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας κοίλης τετραγωνικής διατομής μέσω μετωπικών πλακών με οκτώ κοχλίες έγινε με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία. Ο συνολικός αριθμός των συνδέσεων που αναλύθηκαν ήταν δώδεκα (12). Οι παράμετροι που μεταβάλλονταν μεταξύ των αναλύσεων ήταν το πάχος των μετωπικών πλακών. Χρησιμοποιήθηκαν κοχλίες M 20 και το μέγεθος των κοίλων τετραγωνικών διατομών ήταν SHS 200x8. Για κάθε ανάλυση, οι λόγοι πάχους πλάκας προς διάμετρο κοχλίου (t/d) που χρησιμοποιήθηκαν ήταν $t/d = 0.50, 0.75, 1.00$ και 1.25 . Οι μετωπικές πλάκες ήταν τετραγωνικού σχήματος και είχαν πλάτος 320mm. Επιπλέον, διατηρήθηκε σταθερή η απόσταση των κοχλιών από τα άκρα των μετωπικών πλακών καθώς και από τη διατομή της κοιλοδοκού. Η απόσταση αυτή ήταν 30mm. Η διάταξη των κοχλιών στις διάφορες αναλύσεις φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. Στην περίπτωση ανάλυσης της σύνδεσης με ενισχύσεις, τοποθετήθηκαν δεκαέξι (16) ελάσματα ενίσχυσης στο πέρασ της καμπυλότητας των κοιλοδοκών. Το μήκος της κοιλοδοκού που υιοθετήθηκε ήταν 1.80 φορές το πλάτος της, διότι, βάσει εμπειρίας, από αυτό το μήκος και μετά υπάρχει ομαλοποίηση των τάσεων.



Σχ. 4.25 Κυκλική διάταξη κοχλιών

Το υλικό των μετωπικών πλακών και των ενισχύσεων ήταν χάλυβας S355, δηλαδή:

Όριο διαρροής: $f_y = 355 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση μηδενική)

Εφελκυστική αντοχή: $f_u = 510 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση 0.15 για λόγους ολκιμότητας)

Το υλικό της κοιλοδοκού στις αναλύσεις χωρίς ενίσχυση ήταν χάλυβας S355, δηλαδή:

Όριο διαρροής: $f_y = 355 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση μηδενική)

Εφελκυστική αντοχή: $f_u = 510 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση 0.15 για λόγους ολκιμότητας)

Το υλικό της κοιλοδοκού στις αναλύσεις με ενίσχυση ήταν χάλυβας S420, δηλαδή:

Όριο διαρροής: $f_y = 420 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση μηδενική)

Εφελκυστική αντοχή: $f_u = 520 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση 0.15 για λόγους ολκιμότητας)

Η ποιότητα των κοχλιών ήταν 10.9, επομένως:

Όριο διαρροής κοχλιών: $f_{yb} = 900 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση μηδενική)

Εφελκυστική αντοχή κοχλιών: $f_{ub} = 1000 \text{ N} / \text{mm}^2$ (πλαστική παραμόρφωση 0.15 για λόγους ολκιμότητας)

Οι τιμές των συντελεστών του υλικού που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

Μέτρο ελαστικότητας: $E=210000 \text{ N} / \text{mm}^2$

Λόγος Poisson: $\nu=0.3$

Πυκνότητα: $\rho=7850 \text{ kg} / \text{m}^3$

Έγινε η υπόθεση ότι η εφελκυστική δύναμη που καλείται να παραλάβει η κοιλοδοκός πρέπει να ισούται με την πλαστική της αντοχής. Για την επιλογή των κοχλιών ακολουθήθηκε η εξής απλοποιητική διαδικασία:

Κοιλοδοκός SHS 250x8, S355

$A_s=60.8 \text{ cm}^2$

$N_{pl}=2158.4 \text{ KN}$

Η σύνδεση θα πραγματοποιηθεί με οκτώ κοχλίες, άρα

$$N_{pl}/8 = 269.8\text{KN}$$

Η τάση διαρροής των κοχλιών για όλες τις συνδέσεις θα είναι σταθερή και ίση με $90\text{KN}/\text{cm}^2$, επομένως το ελάχιστο εμβαδόν που πρέπει να έχει ο κάθε κοχλίας είναι:

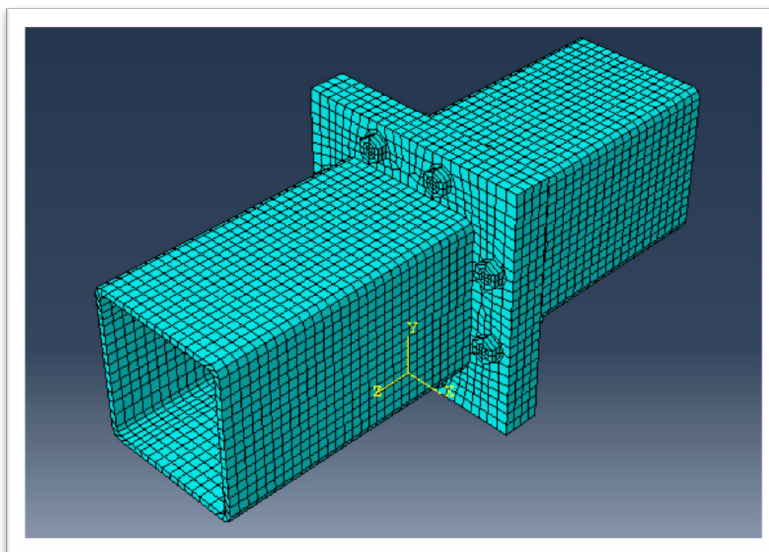
$$269.8\text{KN}/90\text{KN}/\text{cm}^2 = 3.00\text{cm}^2$$

Επιλέγουμε M20 με εμβαδόν $3,00\text{cm}^2$

Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο πλακών και μεταξύ των πλακών και των κοχλιών. Ο τύπος αλληλεπίδρασης είναι η επαφή μεταξύ των επιφανειών αλληλεπίδρασης και η τιμή του συντελεστή τριβής μεταξύ των χαλύβδινων επιφανειών είναι 0.5. Η φόρτιση που ορίστηκε στο πρόγραμμα ήταν εφελκυστικό φορτίο κατά τη θετική φορά του άξονα z, εφαρμοζόμενο στην περίμετρο της κοιλοδοκού. Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλαμε στη σύνδεση ήταν οι ακόλουθες:

- Πάκτωση στις ελεύθερες επιφάνειες των κοίλων διατομών αριστερά και δεξιά από τη σύνδεση.
- Ελεύθερη μεταφορική κίνηση κατά τη διεύθυνση z, ελεύθερη περιστροφική κίνηση γύρω από τους άξονες x και y και πλήρης δέσμευση κατά τους υπόλοιπους βαθμούς ελευθερίας στην κεφαλή του κοχλία.

Το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων με το οποίο έγινε η διακριτοποίηση της σύνδεσης διαμορφώθηκε ώστε να υποδιαιρεθεί το πάχος των μετωπικών πλακών σε δύο πεπερασμένα στοιχεία καθ' ύψος.



Σχ. 4.26 Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων της σύνδεσης

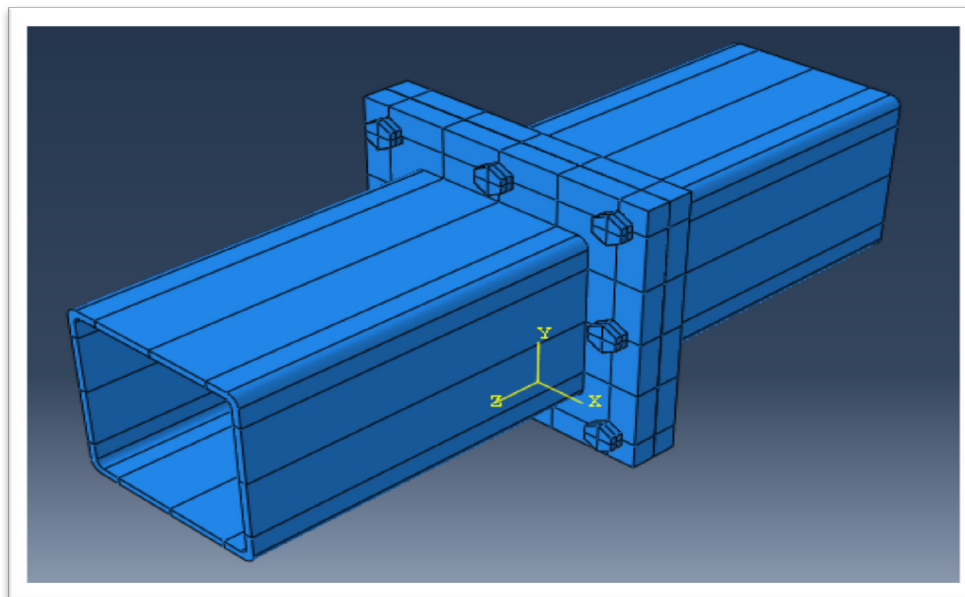
4.2.3 Αποτελέσματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία

Στην περίπτωση της κοχλιωτής σύνδεσης κούλης διατομής μέσω μετωπικών πλακών διακρίνουμε τρεις κατηγορίες συμπεριφοράς της σύνδεσης ανάλογα με τη δυσκαμψία της, τη συμπεριφορά με πλάκα μεγάλου, ενδιάμεσου και μικρού πάχους. Σε αυτές τις τρεις κατηγορίες συμπεριφοράς της σύνδεσης αντιστοιχούν τρεις πιθανές μορφές αστοχίας :

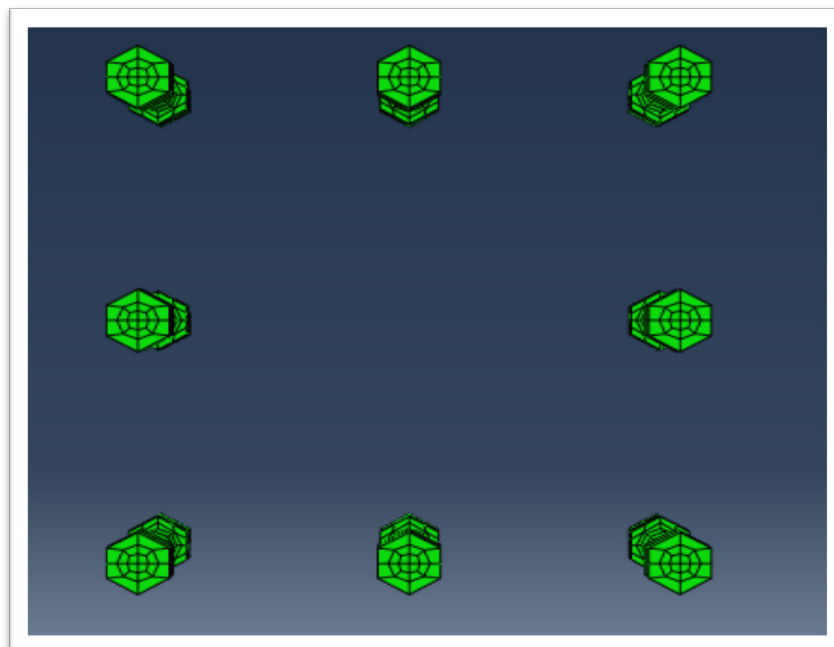
- αστοχία λόγω διαρροής των κοχλιών
- αστοχία λόγω ταυτόχρονης παραμόρφωσης της πλάκας και διαρροής των κοχλιών
- αστοχία λόγω μεγάλης παραμόρφωσης της πλάκας

Στις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκαν και οι τρεις μορφές αστοχίας. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα έτσι ώστε να συγκρίνουμε τη συμπεριφορά της σύνδεσης με τις δύο διαφορετικές διατάξεις κοχλιών καθώς και με τη σύνδεση με ενίσχυση.

4.2.3.1 Σύνδεση κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών με οκτώ κοχλίες σε τετραγωνική διάταξη



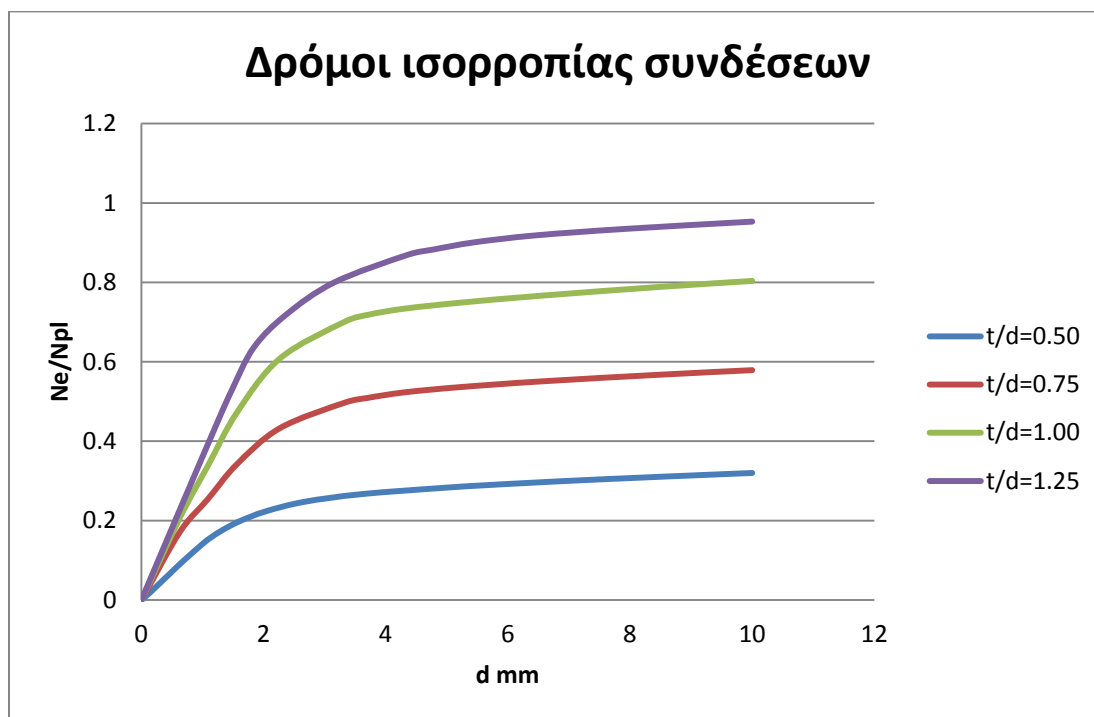
Σχ. 4.27 Προσομοίωση σύνδεσης με οκτώ κοχλίες σε τετραγωνική διάταξη



Σχ. 4.28 Κοχλίες M20 σε τετραγωνική διάταξη

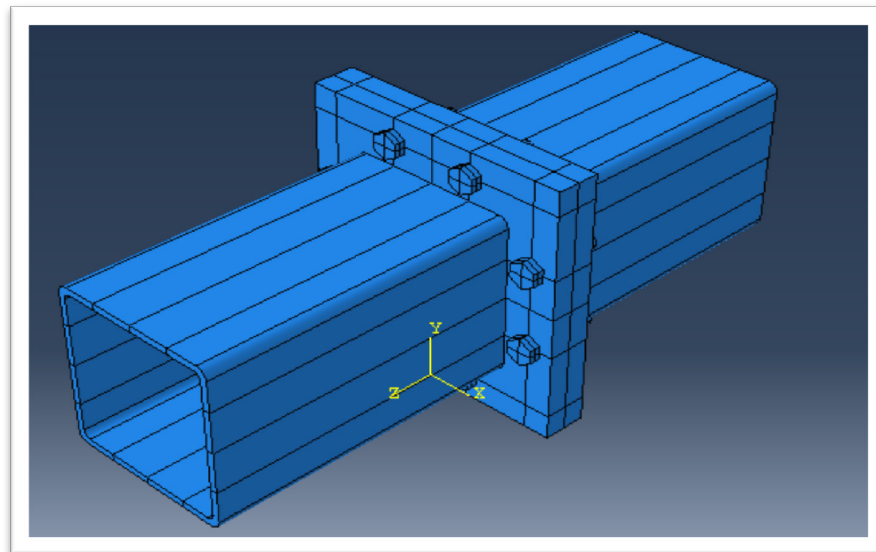
Αριθμός ανάλυσης	Διάμετρος κοχλιών d(mm)	Λόγος t/d	Αντοχή (KN) Ne/Npl	Μορφή αστοχίας*
1	20	0.50	0.23	πλάκα
2	20	0.75	0.50	Πλ. & κοχ.
3	20	1.00	0.71	Πλ. & κοχ.
4	20	1.25	0.80	Κοχλίες

Πιν. 4.4 Αποτελέσματα ανάλυσης για συνδέσεις της διατομής SHS 200x8 με οκτώ κοχλίες σε τετραγωνική διάταξη

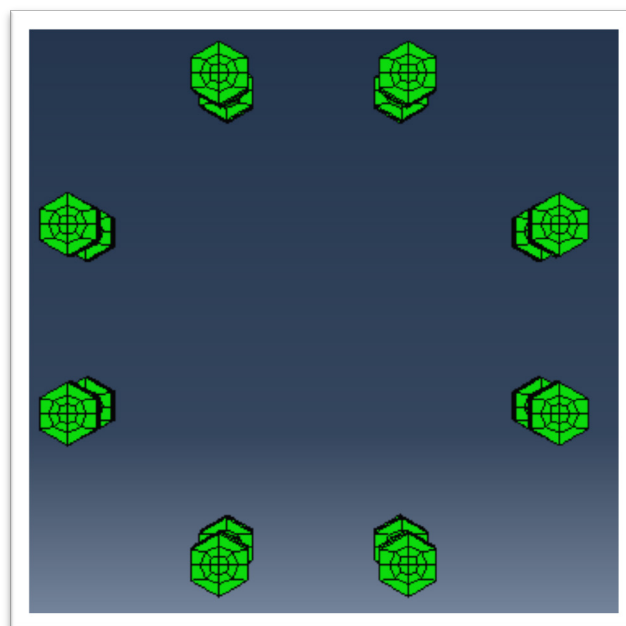


Σχ. 4.29 Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα t/d σε σύνδεση με SHS 200x8 και οκτώ κοχλίες M20 σε τετραγωνική διάταξη

4.2.3.2 Σύνδεση κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη



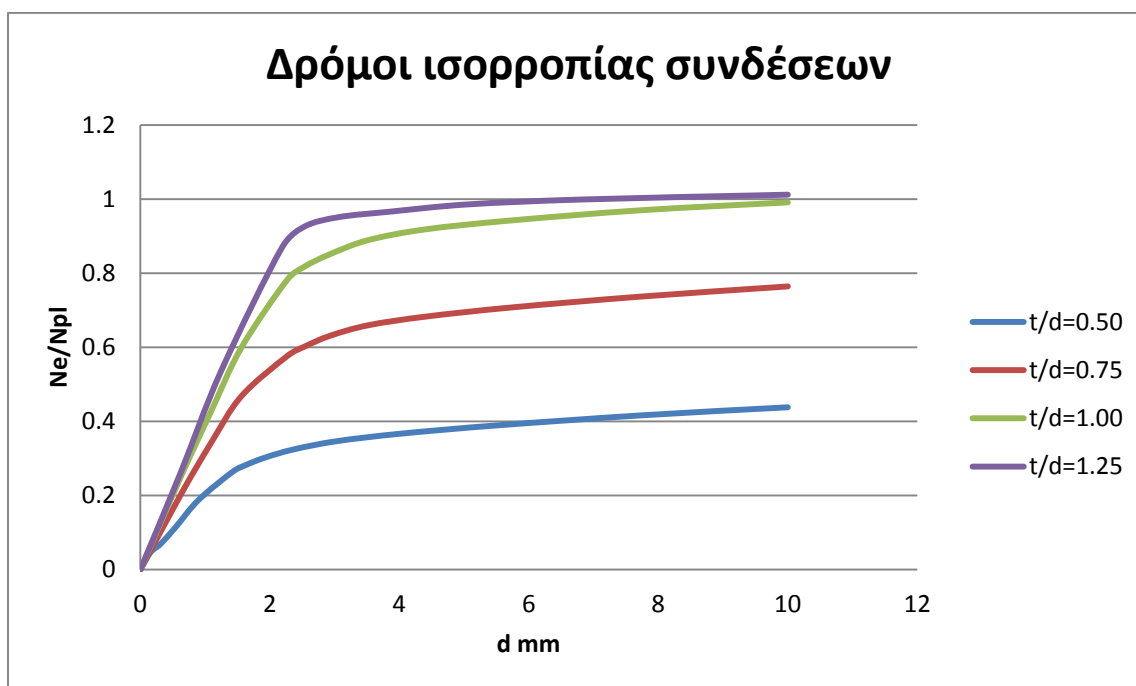
Σχ. 4.30 Προσομοίωση σύνδεσης με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη



Σχ. 4.31 Κοχλίες M20 σε κυκλική διάταξη

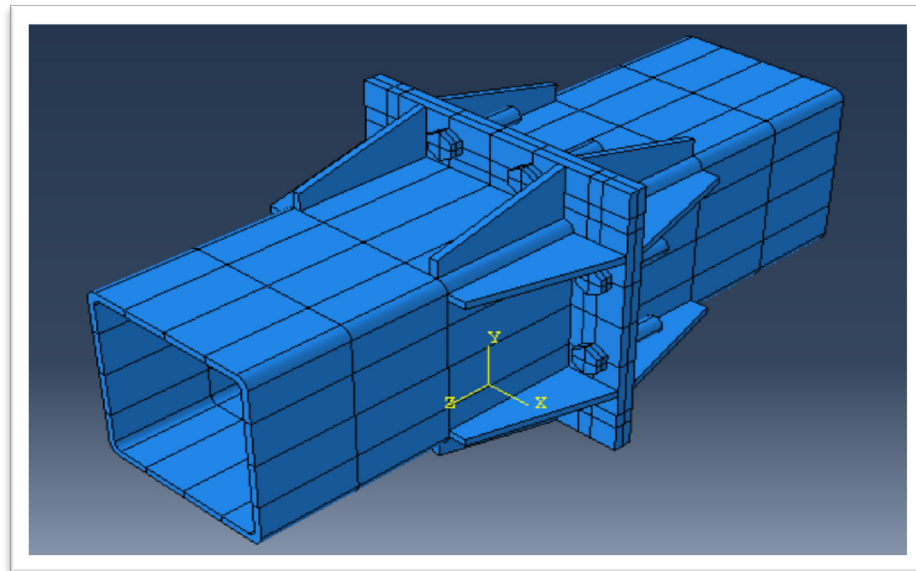
Αριθμός ανάλυσης	Διάμετρος κοχλιών d(mm)	Λόγος t/d	Αντοχή (KN) Ne/Npl	Μορφή αστοχίας*
5	20	0.50	0.26	πλάκα
6	20	0.75	0.63	Πλ. & κοχ.
7	20	1.00	0.81	Πλ. & κοχ.
8	20	1.25	0.92	Κοχλίες

Πιν. 4.5 Αποτελέσματα ανάλυσης για συνδέσεις της διατομής SHS 200x8 με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη

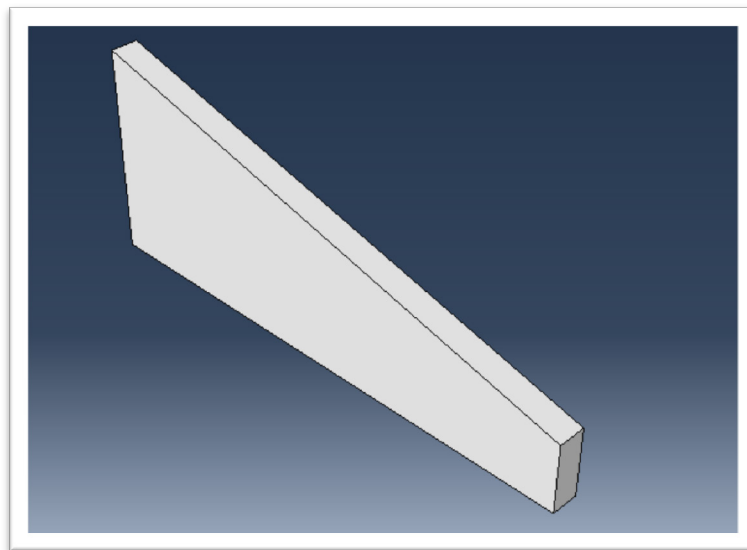


Σχ. 4.32 Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα t/d σε σύνδεση με SHS 200x8 και οκτώ κοχλίες M20 σε κυκλική διάταξη

4.2.3.3 Σύνδεση κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη με ενισχύσεις



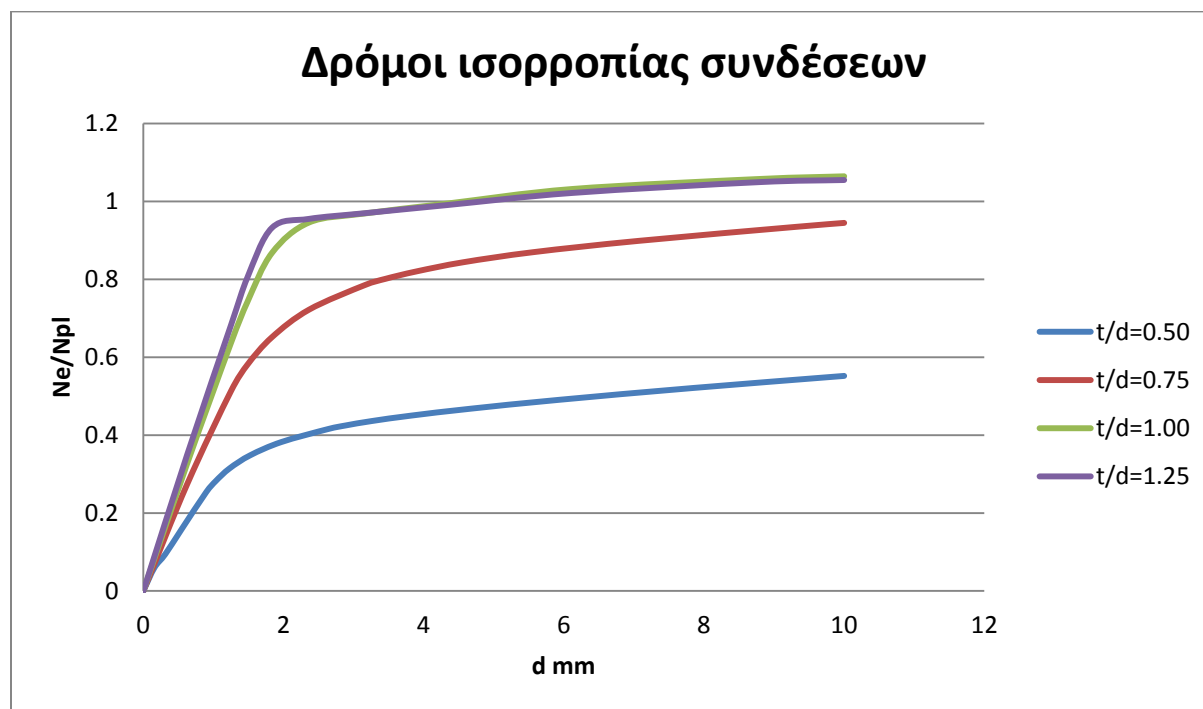
Σχ. 4.33 Προσομοίωση σύνδεσης με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη με ενισχύσεις



Σχ. 4.34 Έλασμα ενίσχυσης

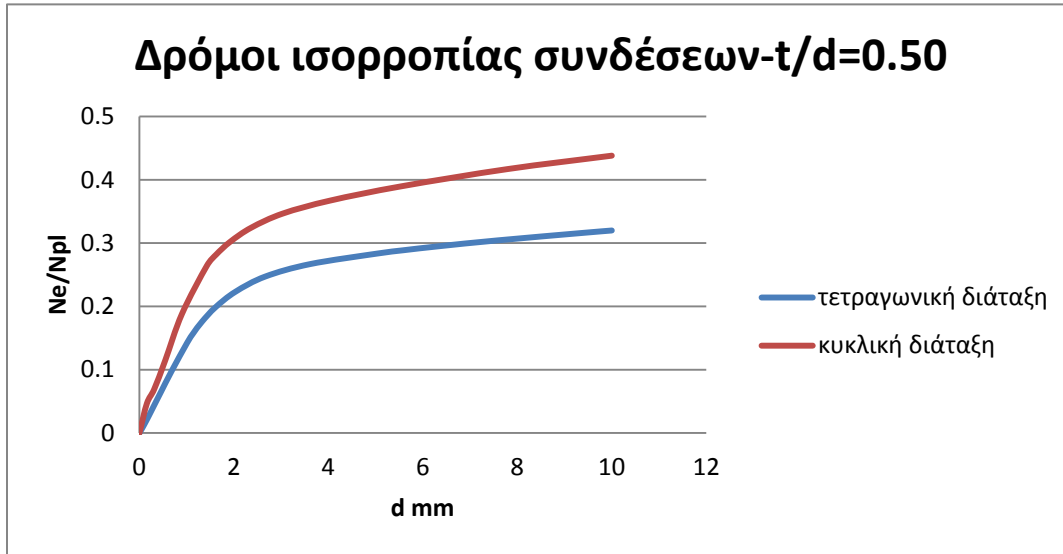
Αριθμός ανάλυσης	Διάμετρος κοχλιών d(mm)	Λόγος t/d	Αντοχή (KN) Ne/Npl	Μορφή αστοχίας*
9	20	0.50	0.35	πλάκα
10	20	0.75	0.72	Πλ. & κοχ.
11	20	1.00	0.94	Πλ. & κοχ.
12	20	1.25	0.95	Κοχλίες

Πιν. 4.6 Αποτελέσματα ανάλυσης για συνδέσεις της διατομής SHS 200x8 με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη με ενισχύσεις

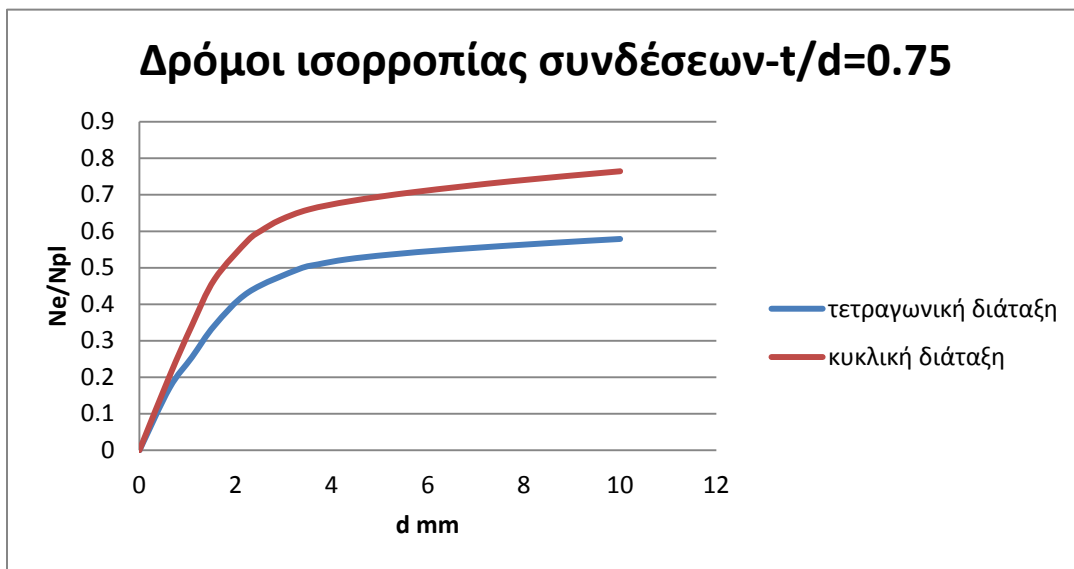


Σχ. 4.35 Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα t/d σε σύνδεση με SHS 200x8 και οκτώ κοχλίες M20 σε κυκλική διάταξη με ενισχύσεις

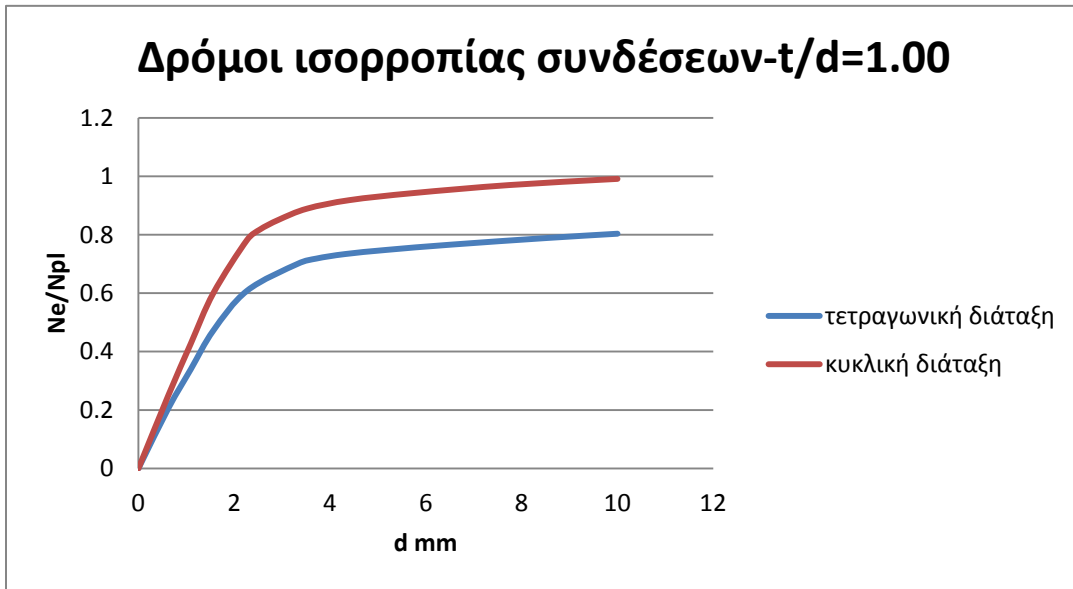
4.2.4 Σύγκριση σύνδεσης με οκτώ κοχλίες σε τετραγωνική διάταξη με σύνδεση με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη



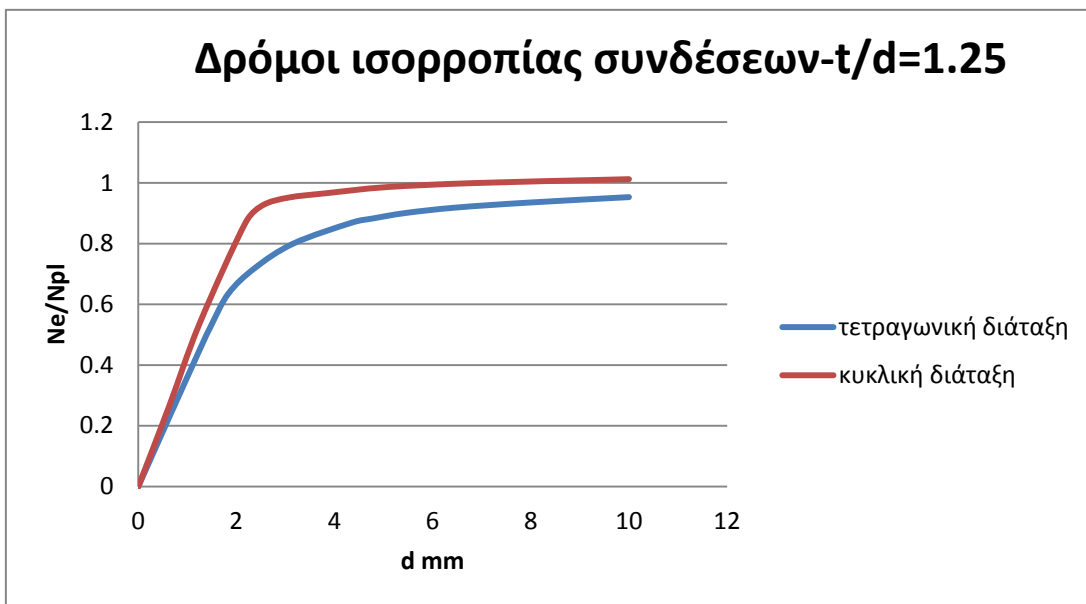
Σχ. 4.36 Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης με οκτώ κοχλίες σε τετραγωνική και κυκλική διάταξη για λόγο $t/d=0.50$



Σχ. 4.37 Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης με οκτώ κοχλίες σε τετραγωνική και κυκλική διάταξη για λόγο $t/d=0.75$

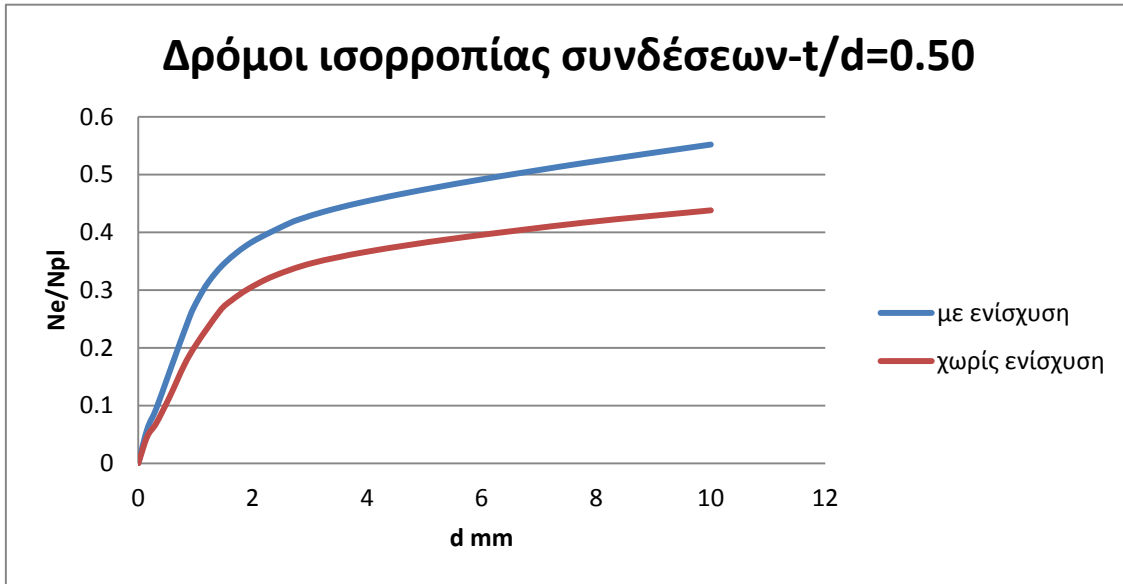


Σχ. 4.38 Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης με οκτώ κοχλίες σε τετραγωνική και κυκλική διάταξη για λόγο $t/d=1.00$

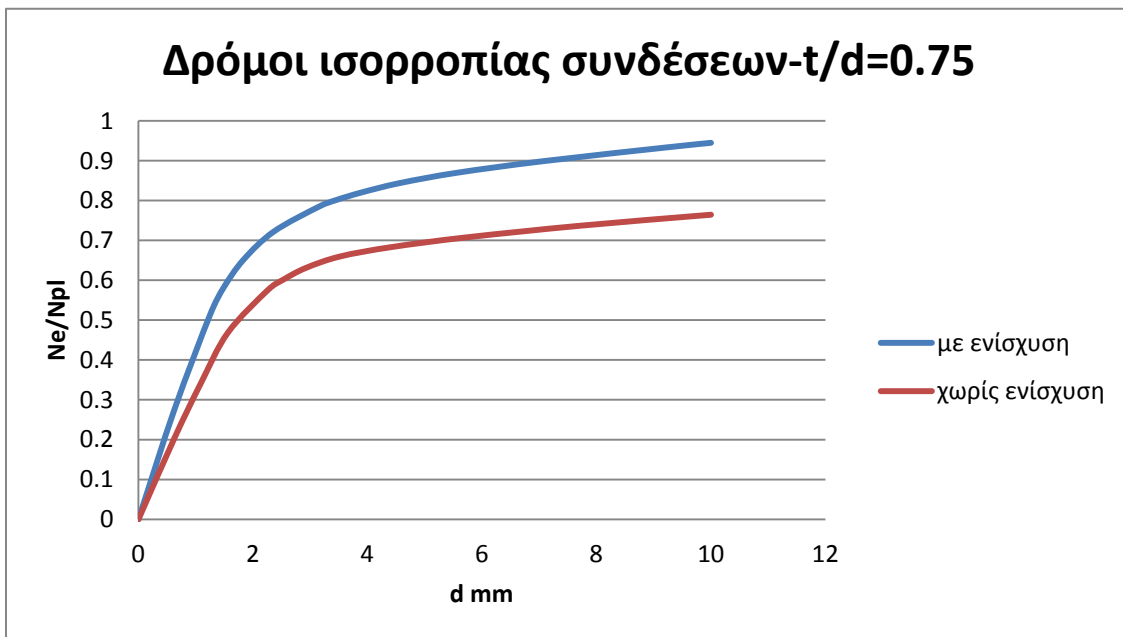


Σχ. 4.39 Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης με οκτώ κοχλίες σε τετραγωνική και κυκλική διάταξη για λόγο $t/d=1.25$

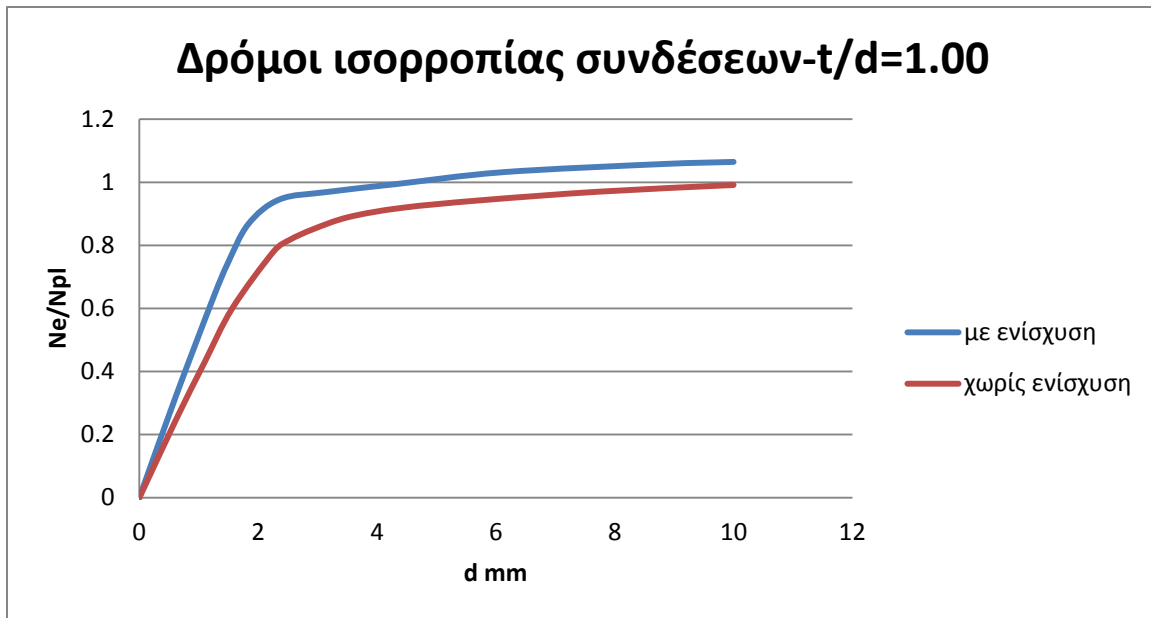
4.2.5 Σύγκριση σύνδεσης με οκτώ κοχλίες σε κυκλική διάταξη με και χωρίς ενίσχυση



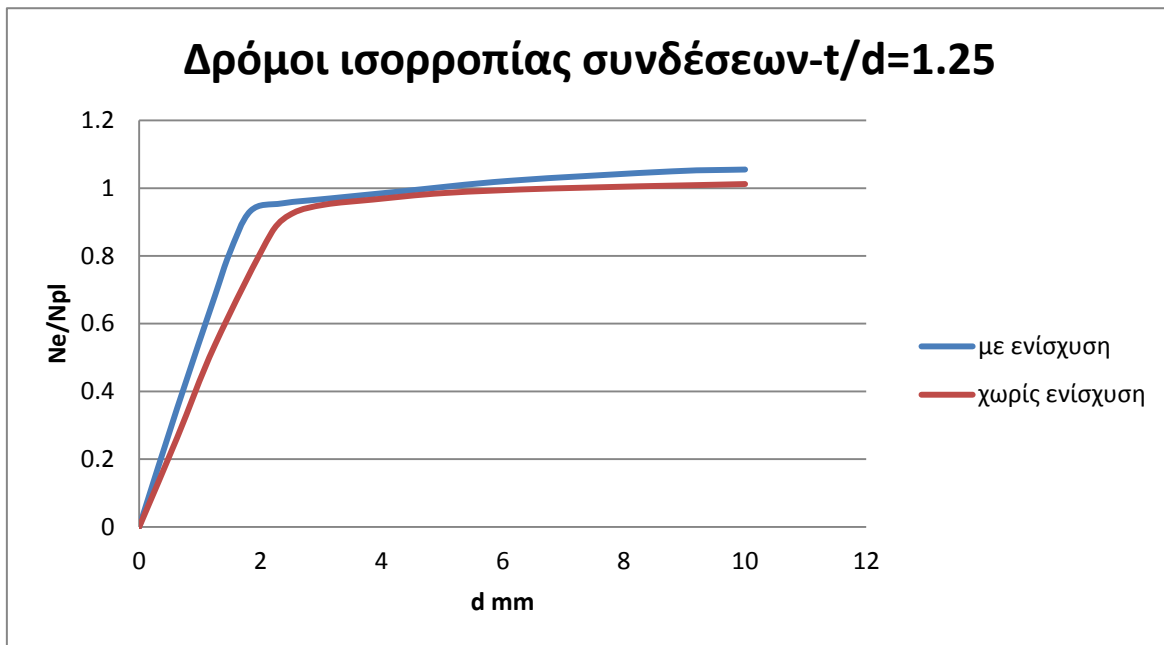
Σχ. 4.40 Δρόμοι ισορροπίας συνδέσεων με και χωρίς ενίσχυση για λόγο $t/d=0.50$



Σχ. 4.41 Δρόμοι ισορροπίας συνδέσεων με και χωρίς ενίσχυση για λόγο $t/d=0.75$



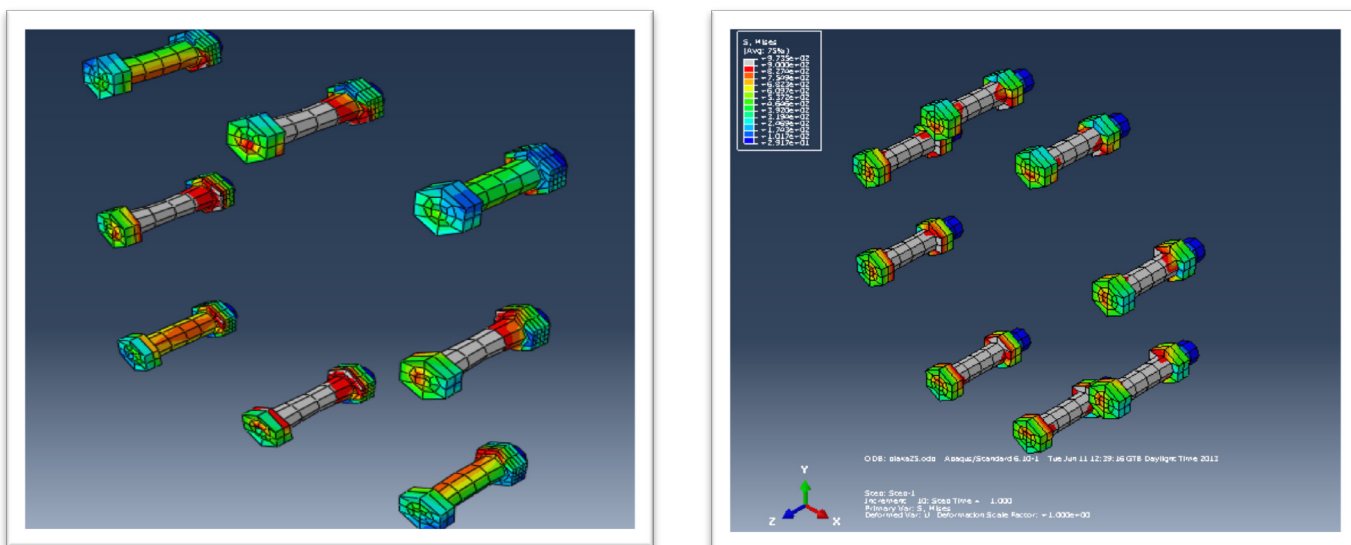
Σχ. 4.42 Δρόμοι ισορροπίας συνδέσεων με και χωρίς ενίσχυση για λόγο $t/d=1.00$



Σχ. 4.43 Δρόμοι ισορροπίας συνδέσεων με και χωρίς ενίσχυση για λόγο $t/d=1.25$

4.2.6 Αποτελέσματα και σύγκριση δοκιμών

Από τις αναλύσεις που έγιναν παρατηρούμε ότι στην τετραγωνική διάταξη κοχλιών οι ακραίοι κοχλίες παραλαμβάνουν σημαντικά μικρότερη δύναμη στην ελαστική περιοχή ενώ μόνο μετά την πλαστικοποίηση της πλάκας και την πλήρη φόρτιση των μεσαίων κοχλιών γίνεται ανακατανομή των δυνάμεων και παραλαμβάνουν σταδιακά το φορτίο που τους αντιστοιχεί. Επιπλέον η κυκλική διάταξη κοχλιών βελτιώνει τη συμπεριφορά της σύνδεσης και αυτό φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα για $t/d=0.5$, $t/d=0.75$ και $t/d=1.00$. Ενώ για $t/d=1.25$ όπου η μορφή αστοχίας είναι λόγω διαρροής κοχλιών αν και είναι σημαντικά μειωμένη η δύναμη διαρροής της σύνδεσης της τετραγωνικής διάταξης από αυτή της κυκλικής, εντούτοις η δύναμη αστοχίας είναι περίπου η ίδια όπως ήταν αναμενόμενο. Τέλος οι συνδέσεις με βελτιωμένη γεωμετρία και ενισχυτικά ελάσματα είχαν ως αποτέλεσμα ακόμη πιο βελτιωμένη συμπεριφορά σύνδεσης κυρίως στα μικρά πάχη, δηλαδή $t/d=0.5-0.75$, αφού βοήθησαν στην ομαλοποίηση των τάσεων καθώς και της ισοκατανομής τους.



Σχ. 4.44 Κατανομή τάσεων στους κοχλίες σε τετραγωνική και κυκλική διάταξη πριν από την αστοχία

4.2.7 Σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών λύσεων

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιάσουμε τις τιμές των αντοχών των συνδέσεων οι οποίες προήλθαν από τις εξισώσεις 2.4, 2.8, 2.11 και 2.14 της τροποποιημένης μεθόδου βραχέως ταυ για την περίπτωση συνδέσεων κοίλων τετραγωνικών εφελκόμενων διατομών μέσω μετωπικών πλακών με τέσσερις κοχλίες. Οι τιμές των αντοχών βάσει της αναλυτικής λύσης θα συγκριθούν με τις τιμές που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση.

	Σύνδεση με πλάκα μεγάλου πάχους			
	$t/d=1.00$ & $t/d=1.25$			
	$Bu1=0,9*fub*As$			
		M16	M20	M24
	fub	As	As	As
	1000	201.0619298	314.1592654	452.3893421
Bu1(N)		180955.7368	282743.3389	407150.4079
Bu1(KN)		180.9557368	282.7433389	407.1504079
Fcthiick=4Bu1		723.8229473	1130.973355	1628.601632
	Σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους			
	$t/d=0.75$	$f_y=355$		
	$M1pl=1/4*tp^2*I*f_y$	$Mb=(3.141592654*d^3*f_yb)/32$	$B=(M1pl+Mb)/so$	$Fo=(B*ap+M1pl+Mb)/(ap+so)$
		M16	M20	M24
	tp	12	15	18
	l	270	320	370
	db	16	20	24
	$M1pl$	3450600	6390000	10639350
	Mb	361911.4737	706858.3472	1221451.224
	so	30	30	30 σταθερή
Q=0	B	127083.7158	236561.9449	395360.0408
	$Fcint=4B(KN)$	508.3348632	946.2477796	1581.440163
Q>0	$ap=so$	30	30	30
	Fo	127083.7158	236561.9449	395360.0408
	$Fcint=4Fo(KN)$	508.3348632	946.2477796	1581.440163
	Σύνδεση με λεπτή πλάκα			
	$t/d=0.5$			
	$M2pl=(Fo*so-M1pl-Mb)$	$Fo=(M1pl+M2pl+Mb)/so$		
		M16	M20	M24
	tp	8	10	12
	l	270	320	370
	$M1pl$	1533600	2840000	4728600
	$M2pl$	0	0	0
	Fo	63183.71579	118228.6116	198335.0408
	$Fcthin$	252.7348632	472.9144463	793.3401632

Σχ. 4.45 Φύλλο EXCEL που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των αναλυτικών λύσεων

Αριθμός Ανάλυσης	Διάμετρος κοχλιών d (mm)	Λόγος t/d	Μορφή αστοχίας-Αναλυτική λύση	Μορφή αστοχίας-Αριθμητική λύση	Αντοχή βάσει αριθμητικής ανάλυσης F _{nu} (kN)	Αντοχή βάση αναλυτικής λύσης F _c (kN)	Λόγος F _c /F _{nu}
1	16	0.50	πλάκα	πλάκα	291.26	252.74	1.15
2	16	0.75	Πλ. & κοχ.	Πλ. & κοχ.	606.87	508.33	1.19
3	16	1.00	Πλ. & κοχ.	Πλ. & κοχ.	743.84	866.17	0.86
4	16	1.25	Κοχλίες	Κοχλίες	736.44	723.82	1.01
5	20	0.50	πλάκα	πλάκα	516.09	472.91	1.09
6	20	0.75	Πλ. & κοχ.	Πλ. & κοχ.	994.77	946.26	1.05
7	20	1.00	Πλ. & κοχ.	Πλ. & κοχ.	1149.62	1408.91	0.82
8	20	1.25	Κοχλίες	Κοχλίες	1139.77	1130.97	1.01
9	24	0.50	πλάκα	πλάκα	767.60	793.34	0.97
10	24	0.75	Πλ. & κοχ.	Πλ. & κοχ.	1472.01	1581.44	0.93
11	24	1.00	Πλ. & κοχ.	Πλ. & κοχ.	1643.09	2084.78	0.79
12	24	1.25	Κοχλίες	Κοχλίες	1630.57	1628.60	1.00

Πιν. 4.7 Σύγκριση τιμών αντοχής και μορφών αστοχίας αναλυτικής και αριθμητικής λύσης

Κεφάλαιο 5^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στην προσομοίωση των εργαστηριακών πειραμάτων παρατηρήσαμε ότι όσο μικραίνει το μέγεθος των χωρικών στοιχείων, δηλαδή όσο μεγαλώνει το πλήθος των στοιχείων στο πάχος της μετωπικής πλάκας, πετυχαίνουμε καλύτερη σύγκλιση του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων ως προς την προσομοίωση της συμπεριφοράς της σύνδεσης σε σχέση με την πειραματική.

Στην ανάλυση των συνδέσεων με τέσσερις και οκτώ κοχλίες η διακριτοποίηση των μελών ήταν τέτοια έτσι ώστε το πάχος της μετωπικής πλάκας να χωρίζεται σε δύο στοιχεία. Αυτό έγινε για να ισοροπηθεί η απαίτηση για καλύτερη προσομοίωση της πλάκας με όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία με την οικονομία χρόνου.

Από τις αναλύσεις των κοχλιωτών συνδέσεων που έγιναν διακρίνουμε τρεις κατηγορίες συμπεριφοράς της σύνδεσης ανάλογα με τη δυσκαμψία της, τη συμπεριφορά με πλάκα μεγάλου, ενδιάμεσου και μικρού πάχους. Σε αυτές τις τρεις κατηγορίες συμπεριφοράς της σύνδεσης αντιστοιχούν τρεις πιθανές μορφές αστοχίας :

- αστοχία λόγω διαρροής των κοχλιών
- αστοχία λόγω ταυτόχρονης παραμόρφωσης της πλάκας και διαρροής των κοχλιών
- αστοχία λόγω μεγάλης παραμόρφωσης της πλάκας

Όπως προέκυψε από την ανάλυση συνδέσεων τεσσάρων κοχλιών παρατηρούμε ότι η μορφή αστοχίας για συνδέσεις με λόγο πάχους προς τη διάμετρο κοχλιών $t/d=0.50$ είναι αστοχία λόγω μεγάλης παραμόρφωσης των μετωπικών πλακών σε όλες τις συνδέσεις. Επίσης όταν έχουμε λόγο $t/d=0.75$ προκύπτει από την αριθμητική ανάλυση ότι η μορφή αστοχίας σε κάθε σύνδεση με αυτούς τους λόγους είναι η ταυτόχρονη παραμόρφωση των πλακών και διαρροή κοχλιών. Τέλος βλέπουμε ότι για t/d μεγαλύτερο ή ίσο του 1,00 η μορφή αστοχίας των συνδέσεων είναι αποκλειστικά η διαρροή των κοχλιών.

Συνοψίζοντας λοιπόν για σύνδεση με λόγο $t/d=0.50$ παρατηρούμε χαμηλή αντοχή με λόγο εφελκυστικού φορτίου αστοχίας προς την εφελκυστική αντοχή της δοκού $NE/Np=0.25$, καθώς και χαμηλή δυσκαμψία. Η συνολική μάζα σιδήρου που

χρησιμοποιείται είναι $m=25.78\text{kg}$. Είναι επομένως μια λύση που δεν αξιοποιεί την σωστή εκμετάλλευση των υλικών και για αυτό δεν προτιμάται. Συνεχίζοντας για λόγο $t/d=0.75$ η συμπεριφορά των συνδέσεων είναι αρκετά βελτιωμένη με καλύτερη δυσκαμψία και μεγαλύτερη αντοχή κατά 100% αφού ο λόγος $NE/N_{pl}=0.50$. Επομένως γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση των υλικών. Η μάζα που χρησιμοποιήθηκε είναι μεγαλύτερη από πριν πράγμα που ανεβάζει το κόστος ενώ ο λόγος $NE/N_{pl}=0.50$ δεν ήταν ικανοποιητικός για την υπόθεση μας ($NE/N_{pl}=0.7$). Για $t/d=1.00$ βλέπουμε μεγάλη βελτίωση στην αντοχή της σύνδεσης. Ο λόγος εφελκυστικού φορτίου αστοχίας προς την εφελκυστική αντοχή είναι ίσος με 0.7 (δηλαδή το ζητούμενο) επομένως έχουμε την καλύτερη εκμετάλλευση των υλικών μας. Παρ' όλα αυτά η απαιτούμενη μάζα αυξάνει πολύ, $m=51.58\text{kg}$ (διπλάσια από την ανάλυση για $t/d=0.50$). Τέλος για $t/d=1.25$ και επομένως συνολικής μάζας σιδήρου που χρησιμοποιείται $m=63.48\text{kg}$ η δυσκαμψία και η τάση στην οποία η σύνδεση διαρρέει είναι ελάχιστα μεγαλύτερες από τη περίπτωση για $t/d=1.00$ ενώ η τάση στην οποία αστοχεί είναι η ίδια (αφού η μορφή αστοχίας είναι η διαρροή κοχλιών). Ως εκ τούτου η λύση $t/d=1.25$ είναι αντιοικονομική με αύξηση του υλικού κατά 25% από την περίπτωση $t/d=1.00$ χωρίς ιδιαίτερη βελτίωση στη δυσκαμψία και αντοχή της σύνδεσης. Άρα βέλτιστος λόγος πάχους πλάκας είναι $t/d=1.00$ αφού πέραν αυτού η αντοχή δεν αυξάνει και ο σχεδιασμός είναι αντιοικονομικός.

Στη συνέχεια έγινε επίλυση των αναλυτικών εξισώσεων του δεύτερου κεφαλαίου ανάλογα με το πάχος πλάκας και επομένως τη μορφή αστοχίας και σύγκριση τους με τις αριθμητικές αναλύσεις για σύνδεση τεσσάρων κοχλιών του τρίτου κεφαλαίου. Για λόγο πάχους πλάκας προς διάμετρο κοχλιών $t/d=0.5$, όπου η μορφή αστοχίας είναι η δημιουργία μηχανισμού των πλακών, προκύπτει μέσος όρος του λόγου αντοχής βάσει αριθμητικής ανάλυσης προς την αντοχή βάση αναλυτικής λύσης ίσος με 1,05 και τυπική απόκλιση 0,04 δηλαδή σχεδόν ταύτιση των αποτελεσμάτων.

Το ίδιο συμβαίνει και για λόγο $t/d=0.75$ όπου η μορφή αστοχίας είναι η ταυτόχρονη παραμόρφωση πλακών και διαρροή κοχλιών, ο μέσος όρος λοιπόν του λόγου της αντοχής βάση αριθμητικής ανάλυσης προς την αντοχή βάση αναλυτικής λύσης είναι ίσος με 1.05 και η τυπική απόκλιση 0,04 και σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα σχεδόν συμπίπτουν.

Για λόγους $t/d=1.00$ και $t/d=1.25$ όπου μορφή αστοχίας είναι η διαρροή κοχλιών. Ο μέσος όρος του λόγου είναι ίσος με περίπου 1.01 και για τις δυο περιπτώσεις και η τυπική απόκλιση 0,02. Οι λόγοι για τους οποίους τα αποτελέσματα μας έχουν πολύ μικρή απόκλιση είναι το ότι η προσομοίωση της σύνδεσης μας έγινε με τη βοήθεια εξαεδρικών ορθογωνικών πεπερασμένων στοιχείων οκτώ κόμβων (χωρικά στοιχεία-solid) που ήταν δυνατό έτσι να ληφθούν υπόψη τόσο οι μεγάλες παραμορφώσεις

των πλακών όσο και η κάμψη των κοχλιών που είναι πολύ σημαντική για να καταλήξουμε σε αξιόπιστα αποτελέσματα.

Ακολούθως έγινε προσομοίωση της σύνδεσης κοίλης τετραγωνικής διατομής μέσω μετωπικών πλακών με οκτώ κοχλίες σε τετραγωνική και κυκλική διάταξη. Και πάλι οι τρεις μορφές αστοχίας ήταν οι παρακάτω :

- αστοχία λόγω διαρροής των κοχλιών
- αστοχία λόγω ταυτόχρονης παραμόρφωσης της πλάκας και διαρροής των κοχλιών
- αστοχία λόγω μεγάλης παραμόρφωσης της πλάκας

Όπως προέκυψε και από την ανάλυση συνδέσεων τεσσάρων κοχλιών παρατηρούμε ότι η μορφή αστοχίας για συνδέσεις με λόγο πάχους προς τη διάμετρο κοχλιών $t/d=0.50$ είναι αστοχία λόγω μεγάλης παραμόρφωσης των μετωπικών πλακών σε όλες τις συνδέσεις. Ο λόγος $t/d=0.75$ αναλογεί σε ταυτόχρονη παραμόρφωση των πλακών και διαρροή κοχλιών και ο λόγος $t/d=1.25$ αντιστοιχεί σε αστοχία λόγω διαρροής κοχλιών. Αντίθετα ο λόγος $t/d=1.00$ στην περίπτωση σύνδεσης οκτώ κοχλιών τόσο τετραγωνικής όσο και κυκλικής διάταξης αντιστοιχεί σε μορφή αστοχίας λόγω ταυτόχρονης παραμόρφωσης των πλακών και διαρροής κοχλιών σε σύγκριση με την προηγούμενη ανάλυση που ήταν αποκλειστικά αστοχία λόγω διαρροής κοχλιών.

Από τις αναλύσεις που έγιναν για τις δύο διατάξεις καταλήξαμε ότι στην τετραγωνική διάταξη κοχλιών οι ακραίοι κοχλίες παραλαμβάνουν σημαντικά μικρότερη δύναμη στην ελαστική περιοχή ενώ μόνο μετά την πλαστικοποίηση της πλάκας και την πλήρη φόρτιση των μεσαίων κοχλιών γίνεται ανακατανομή των δυνάμεων και παραλαμβάνουν σταδιακά το φορτίο που τους αντιστοιχεί. Παράλληλα στην κυκλική διάταξη η συμπεριφορά της σύνδεσης είναι σαφώς βελτιωμένη με μεγαλύτερη δυσκαμψία και καλύτερη αντοχή. Έτσι ο σχεδιασμός της γεωμετρίας της σύνδεσης είναι σημαντικός για τη συμπεριφορά και την τελική αντοχή της σύνδεσης, διότι η ακτινική τοποθέτηση των κοχλιών βοηθά στην ισοκατανομή και την αποφυγή εξάρσεων των τάσεων καθώς και την αποφυγή ανακατανομής εντάσεων.

Στην συνέχεια έγιναν αναλύσεις με κυκλική διάταξη κοχλιών και ενισχυτικά ελάσματα. Είχαμε ως αποτέλεσμα ακόμη πιο βελτιωμένη συμπεριφορά σύνδεσης κυρίως στα μικρά πάχη μετωπικών πλακών $t/d=0.50-0.75$. Οι νευρώσεις βοήθησαν στην ομαλοποίηση των τάσεων από τον κοχλία προς την κοίλη διατομή δημιουργώντας πιο ομοιόμορφη διασπορά με αποτέλεσμα μεγαλύτερες γραμμές θραύσης, αυξημένη δυσκαμψία και αντοχή καθώς και πιο ισορροπημένη κατανομή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5⁰ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

της δρώσας δύναμης στους κοχλίες. Έτσι η προσθήκη ενισχύσεων στη σύνδεση μας προσφέρει ασφαλέστερη λειτουργία και αμβλύνει το φαινόμενο της ανισοκατανομής των δυνάμεων μεταξύ των κοχλιών. Παρ' όλα αυτά οι ενισχύσεις αυξάνουν τον παράγοντα πολυπλοκότητας της σύνδεσης αλλά και το κόστος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Βάγιας Ι., Σιδηρές Κατασκευές - Ανάλυση και Διαστασιολόγηση, Κλειδάριθμος 2003
- [2] Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι. και Ιωαννίδης Γ., Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, Κλειδάριθμος 2005
- [3] Ερμόπουλος Ι., Στοιχεία σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών, εκδόσεις Ε.Μ.Π, 2000
- [4] Kato B. and Mukai A., “Bolted Tension Flanges Joining Square Hollow Section Members”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE 1985
- [5] Λιόγανος Δ., «Κοχλίες – Επιλογή και Εφαρμογή σε έργα από χάλυβα», Μεταλλικές Κατασκευές
- [6] Nair R., Birkemoe P. and Munse W., Behavior of bolts in tee-connections subject to prying action, Urbana, Illinois 1969
- [7] Owens G. and Cheal D., *Structural steelwork connections*, Butterworths, London 1989
- [8] Παπαδρακάκης Μ., Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, εκδόσεις Παπασωτηρίου 2001
- [9] Παπαδρακάκης Μ., Μαθήματα Στατικής V – Πλαστική Ανάλυση Ραβδωτών Φορέων, Σύγχρονες Μέθοδοι, εκδόσεις Ε.Μ.Π 1996
- [10] Wheeler A., Clarke M. Hancock G. and Murray T. “Design Model for Bolted Moment End Plate Connections Using Rectangular Hollow Sections” , *Journal of Structural Engineering*, ASCE 1997
- [11] Wheeler A., Clarke M. and Hancock G. “Design Model for Bolted Moment End Plate Connections Joining Rectangular Hollow Sections Using Eight Bolts” , *Journal of Structural Engineering*, ASCE 2003
- [12] Διαλέξεις του Μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» του 8^{ου} εξαμήνου της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π
- [13] ABAQUS tutorial
- [14] Fredrik Torp Karlsen and Arne Aalberg, “Bolted RHS End-Plate Joints in Axial Tension”, Nordic Steel Construction Conference 2012

[15] Silke Willibald, "Bolted Connections for Rectangular Hollow Sections under Tensile Loading", Dissertation, Karlsruhe 2003