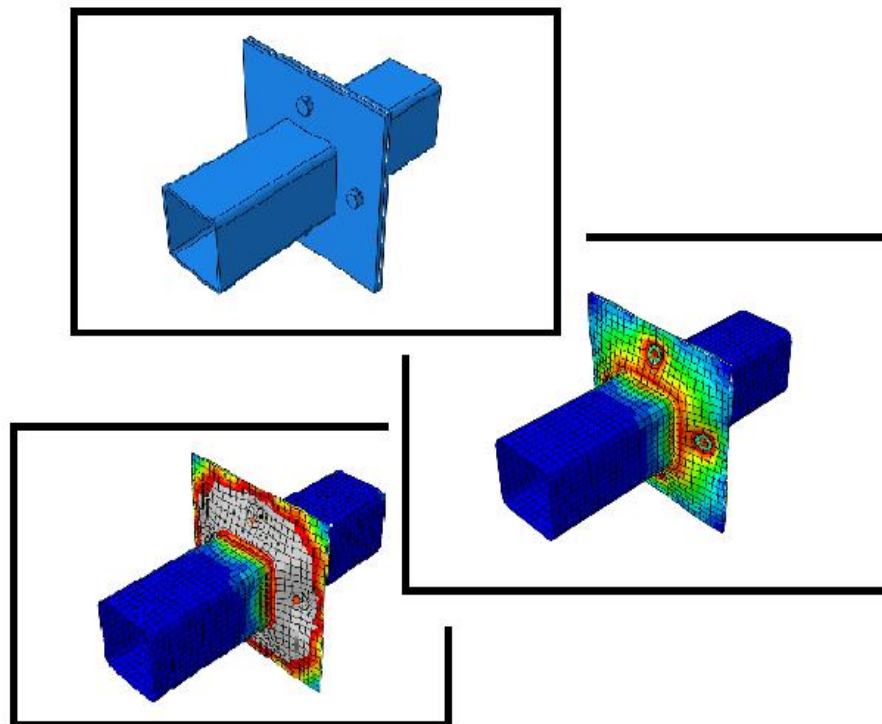




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

**Διπλωματική εργασία**

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ  
ΚΟΙΛΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΜΕΣΩ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ ΠΛΑΚΩΝ»**



**Παρασκευή Κεφαλά**

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

**Αθήνα, Νοέμβριος 2011**

*Στη μητέρα μου,*

*Άννα Νετκίδη*

# Ευχαριστίες

---

Θα ήθελα, στο σημείο αυτό, να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους, οι οποίοι συνετέλεσαν, ο καθένας με το δικό του τρόπο, στο να φέρω εις πέρας την παρούσα διπλωματική εργασία.

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον κύριο Ιωαννίδη Γεώργιο, καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την εμπιστοσύνη που μου υπέδειξε, αναθέτοντας μου την εκπόνηση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τον κύριο Σπηλιόπουλο Ανδρέα, υποψήφιο διδάκτορα και συνεπιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, για την πολύτιμη του καθοδήγηση και το χρόνο που διέθεσε για την παρακολούθηση της πορείας της εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Δασίου Μαρία-Ελένη για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχε ως προς την εκμάθηση και την εξοικείωσή μου με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

Ευχαριστώ τον κύριο Βάγια Ιωάννη, καθηγητή, και τον κύριο Γαντέ Χάρη, αναπληρωτή καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τους γονείς μου για την ανεκτίμητη υλική, αλλά κυρίως ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν γενναιόδωρα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, όπως και τις αδερφές μου Μίνα και Κατερίνα, τους παππούδες μου και όλους του ανθρώπους που με στήριξαν.

Παρασκευή Κεφαλά

# Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

## Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

### Τομέας Δομοστατικής

#### Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**Διπλωματική εργασία:** «Διερεύνηση της συμπεριφοράς κοχλιωτών συνδέσεων κοίλων διατομών μέσω μετωπικών πλακών»

**Εκπόνηση:** Παρασκευή Κεφαλά

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

## Περίληψη

---

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς κοχλιωτών συνδέσεων κοίλων διατομών, που υποβάλλονται σε εφελκυσμό, μέσω μετωπικών πλακών. Πιο συγκεκριμένα, μας ενδιαφέρουν οι συνδέσεις κοίλων διατομών τετραγωνικού σχήματος (SHS).

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μία εισαγωγή στις κοχλιωτές συνδέσεις των μεταλλικών κατασκευών. Αρχικά, παρουσιάζονται γενικά οι συνδέσεις μιας σιδηράς 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 μία περιγραφή της δύναμης επαφής που εμφανίζεται στις εν λόγω συνδέσεις. Τέλος, γίνεται μία σύντομη αναφορά στην αποκατάσταση συνέχειας των μελών των μεταλλικών κατασκευών καθώς και στις κοίλες διατομές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, επιχειρείται μία 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 μία κατηγοριοποίηση της συμπεριφοράς της σύνδεσης που μας ενδιαφέρει, ανάλογα με το σχηματισμό ή όχι γραμμών διαρροής στις μετωπικές πλάκες. Στη συνέχεια, γίνεται μία προσπάθεια απλοποίησης των μοντέλων της βιβλιογραφίας, ώστε να προσαρμοστούν στο θέμα της σύνδεσης εφελκυσμού, κάτι το απλούστερο και πιο ξεκάθαρο από αυτό της καμπτόμενης σύνδεσης. Εξάγουμε, λοιπόν, εξισώσεις που δίνουν την τιμή της αντοχής της σύνδεσης σε κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες συμπεριφοράς της σύνδεσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται αρχικά 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 εξαιδρικά στοιχεία (solid) και στα στοιχεία κελύφους (shell) και ακολουθεί επίλυση σύνδεσης εφελκυσμού δύο γωνιακών με έναν κοχλία με τους δύο τύπους στοιχείων τους οποίους και συγκρίνουμε. Εφόσον διαπιστώσουμε ότι η επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους επαρκεί, τα χρησιμοποιούμε για την επίλυση της σύνδεσης εφελκυσμού κοίλης διατομής μέσω μετωπικών πλακών, συνδεδεμένων με τέσσερις κοχλίες, για διάφορες τιμές του λόγου πάχους πλακών προς διάμετρο κοχλιών και για διάφορα μεγέθη κοχλιών. Τέλος, γίνεται μία σύγκριση των

αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης με τιμές αντοχής που προέκυψαν από τις αναλυτικές σχέσεις του δευτέρου κεφαλαίου και παρουσιάζονται οι τιμές της δύναμης επαφής για κάθε σύνδεση που αναλύθηκε.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας καθώς και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

**National Technical University of Athens**

**School of Civil Engineering**

**Department of Structural Engineering**

**Laboratory of Metal Structures**

**Diploma thesis: “Study of the behavior of bolted end plate connections joining hollow sections”**

**Submitted by: Paraskevi Kefala**

**Supervised by: Dr. Ioannidis Georgios, Professor N.T.U.A.**

## Abstract

---

The subject of the present diploma thesis is the study of the behavior of bolted tension end plate connections joining hollow sections. More precisely, we are interested in connections joining square hollow sections (SHS).

The first chapter presents an introduction to bolted connections in steel structures. Firstly, we present the connections in a steel structure in general and the classification of bolted connections. Furthermore, we present basic features of bolts and their fittings. After this, we focus on tension connections, where we refer to bolt resistances and the classification of tension connections and the definition of prying force takes place, a force which appears in such connections. Finally, a brief reference on beam connections and hollow sections takes place.

The second chapter attempts to theoretically approach the behavior of bolted tension end plate connections joining square hollow sections using four bolts. Firstly, we present some researches we found about the connection we are interested in. One of these researches classifies the behavior of our connection according to the formation or not of yield lines on the end plates. Moreover, we try to simplify the models we found, in order to adjust them to the case of tension connections, something simpler and clearer than this of moment connections. As a result, we established equations to calculate the connection resistance in each one of the connection behavior categories.

The third chapter presents, first of all, general characteristics of the finite element method and ABAQUS, the finite element software used in the analyses. Furthermore, we refer to solid and shell elements and we run finite element analysis for double angle tension connection using one bolt with the two different element types, which we compare. When we make sure that the finite element analysis with shell elements is sufficient, we use them to analyze the bolted tension end plate connection joining hollow section using four bolts, for different values of the ratio of plate thickness to bolt diameter and different bolt diameters. Finally, a comparison between numerical analysis and analytical solution, from the second chapter, as well as a presentation of connections' prying force take place.

The fourth chapter presents the conclusions of the diploma thesis and proposal for further research.

# Περιεχόμενα

---

Ευχαριστίες.....	III
------------------	-----

Περίληψη .....	IV
----------------	----

Abstract .....	VI
----------------	----

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΚΟΧΛΙΩΤΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

1.1 Γενικά περί συνδέσεων .....	1
1.2 Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων.....	3
1.2.1 Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων με βάση τον τύπο της δύναμης που καταπονεί τους κοχλίες.....	3
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 Ακαμπτοι, ημιάκαμπτοι και αρθρωτοί κόμβοι.....	7
1.3 Κοχλίες και εξαρτήματα κοχλιών .....	7
1.3.1 Ποιότητες κοχλιών, ανοχές σπών και γεωμετρικά στοιχεία.....	7
1.3.2 Διάταξη κοχλιών .....	10
1.4 Συνδέσεις εφελκυσμού.....	10
1.4.1 Αντοχές κοχλιών .....	10
1.4.2 Κατηγορίες συνδέσεων εφελκυσμού και απαιτούμενοι έλεγχοι.....	11
1.4.3 Δύναμη επαφής σε συνδέσεις εφελκυσμού (prying force).....	12
1.5 Αποκατάσταση συνέχειας μελών .....	14
1.6 Κοίλες διατομές.....	15
1.6.1 Ορισμός και ιστορικά στοιχεία .....	15
1.6.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κοίλων διατομών .....	16

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΚΟΙΛΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

2.1 Γενικά.....	17
-----------------	----

2.2 Μοντέλο κοχλιωτής σύνδεσης των Kato και Mukai.....	18
2.3 Μοντέλο κοχλιωτής σύνδεσης των Wheeler, Clarke, Hancock και Murray.....	19
2.3.1 Γενικά.....	19
2.3.2 Σύνδεση με πλάκα μεγάλου πάχους.....	21
2.3.3 Σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους.....	22
2.3.4 Σύνδεση με λεπτή πλάκα.....	23
2.4 Τροποποιημένη Μέθοδος Βραχέος Ταυ (Modified Stub-Tee Method) – Εφαρμογή σε κοχλιωτή σύνδεση, μέσω μετωπικών πλακών, κοίλων τετραγωνικών διατομών καταπονούμενων σε εφελκυσμό.....	24
2.4.1 Γενικά.....	24
2.4.2 Τροποποιημένη Μέθοδος Βραχέος Ταυ στην περίπτωση τεσσάρων κοχλιών.....	24
2.4.2.1 Σύνδεση με πλάκα μεγάλου πάχους.....	26
2.4.2.2 Σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους.....	27
2.4.2.3 Σύνδεση με λεπτή πλάκα.....	28

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ

3.1 Ανάλυση φορέων με πεπερασμένα στοιχεία - Γενικά.....	30
3.2 Σύνδεση εφελκυσμού δύο γωνιακών με έναν κοχλία.....	31
3.2.1 Τρισδιάστατα εξαεδρικά στοιχεία και στοιχεία κελύφους.....	31
3.2.2 Περιγραφή προσομοιώματος τρισδιάστατων εξαεδρικών πεπερασμένων στοιχείων (solid).....	34
3.2.3 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (shell).....	39
3.2.4 Κάμψη κοχλία.....	41
3.2.5 Αποτελέσματα και σύγκριση των δύο προσομοιωμάτων.....	42
3.3 Σύνδεση κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών, με τέσσερις κοχλίες... 45	
3.3.1 Γενικά.....	45
3.3.2 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.....	45
3.3.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.....	48
3.3.3.1 Αστοχία λόγω διαρροής των κοχλιών.....	48
3.3.3.2 Αστοχία λόγω ταυτόχρονης παραμόρφωσης της πλάκας και διαρροής των κοχλιών.....	51
3.3.3.3 Αστοχία λόγω μεγάλης παραμόρφωσης της πλάκας.....	54
3.3.3.4 Συνολικά αποτελέσματα αναλύσεων.....	59
3.3.4 Σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών λύσεων.....	75



3.3.5 Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης ως προς τη δύναμη επαφής .....	78
--	----

## **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

4.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων .....	79
4.2 Συμπεράσματα .....	80
4.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	81

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## 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, με στόχο να πάρει τη μορφή του ο τελικός συνολικός φορέας. Το κάθε μεγάλο τμήμα της κατασκευής, όμως, συντίθεται από επιμέρους μέλη, συνδεόμενα επίσης μεταξύ τους. Συμπεραίνουμε, επομένως, ότι οι συνδέσεις μιας μεταλλικής κατασκευής είναι ένα από τα πιο σημαντικά κομμάτια του έργου και γι' αυτό το λόγο δίνεται έμφαση στο σχεδιασμό τους και διατηρείται ένα πιο συντηρητικό πνεύμα απ' ό, τι στο σχεδιασμό ενός οποιουδήποτε άλλου μέρους της κατασκευής. Και αυτό διότι η ανάλυση μιας σύνδεσης είναι πολύπλοκότερη σε σχέση με την ανάλυση ενός απλού μέλους. Επίσης, σε περίπτωση ανάπτυξης μεγάλων φορτίων, προτιμούμε την αστοχία ενός μεμονωμένου μέλους από την αστοχία μιας σύνδεσης, που ίσως επηρεάσει και άλλα μέλη της κατασκευής.

Οι συνδέσεις σε μία μεταλλική κατασκευή έχουν ως σκοπό:

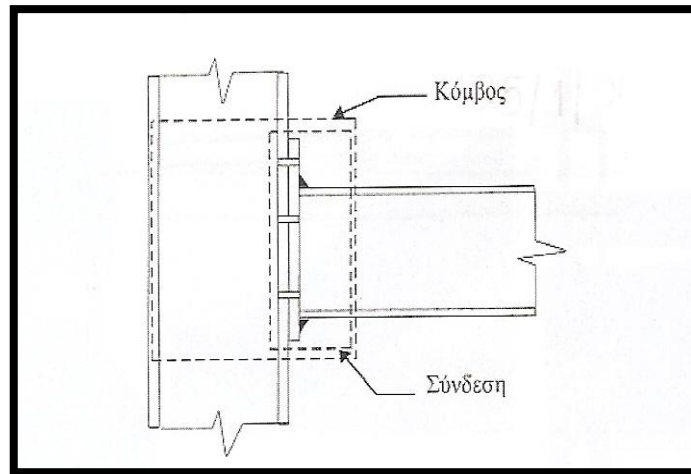
- τη σύνδεση μεταξύ μελών (π.χ. υποστρωμάτων με δοκούς) και με την επικάλυψη,
- την αποκατάσταση συνέχειας σε μέλη και επιμέρους τμήματα και
- τη διαμόρφωση των μελών (σύνθετες διατομές κλπ.).



Σχ. 1.1. Σύνδεση μεταξύ μελών με κοχλίες

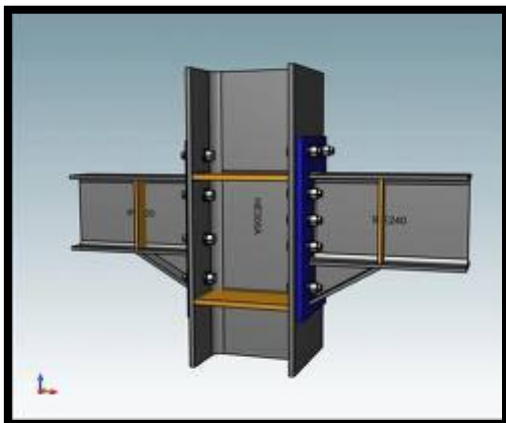
Ως *σύνδεση* ορίζουμε το σύνολο των φυσικών επιμέρους τμημάτων που συνδέουν μηχανικά τα συνδεόμενα μέλη. Υπάρχει ένας διαχωρισμός από την ευρεία έννοια του

κόμβου, που θεωρείται η θέση αποκατάστασης της συνέχειας. Δηλαδή, η σύνδεση επικεντρώνεται στη θέση της δράσης, ενώ ο κόμβος συμπεριλαμβάνει τη σύνδεση μαζί με τη ζώνη αλληλεπίδρασης μεταξύ των συνδεδεμένων μερών, όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 1.2:

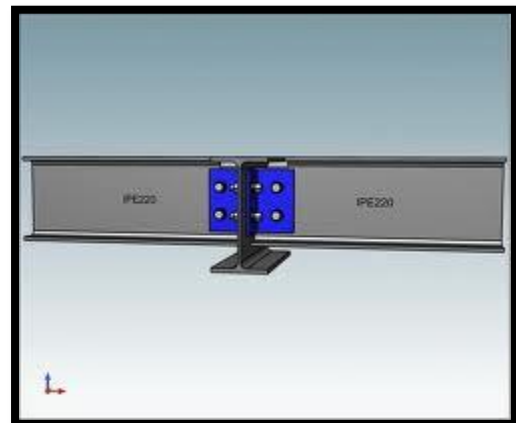


Σχ. 1.2. Επεξήγηση των όρων «κόμβος» και «σύνδεση»

Χαρακτηριστικά παραδείγματα κόμβων αποτελούν οι αποκαταστάσεις συνέχειας των διατομών δοκών ή υποστυλωμάτων, οι κόμβοι δοκών-υποστυλωμάτων, οι συνδέσεις δοκών με άλλες δοκούς, καθώς και οι κόμβοι έδρασης των υποστυλωμάτων.



(α) Κόμβος δοκού-υποστυλώματος



(β) Σύνδεση δοκού με άλλη δοκό

Σχ. 1.3. Παραδείγματα κόμβων

Η σύνδεση μεταξύ των στοιχείων του σκελετού μιας κατασκευής από χάλυβα γίνεται χρησιμοποιώντας είτε μηχανικά μέσα (κοχλίες, ήλους, πείρους κλπ.) είτε συγκολλήσεις. Οι ηλώσεις, ενώ στο παρελθόν ήταν το συνηθέστερο μέσο σύνδεσης, τείνουν πλέον να εξαλειφθούν στα κτιριακά έργα. Οι κοχλιώσεις εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά τον 19<sup>ο</sup> αιώνα και από τη δεκαετία του 1950 και μετά χρησιμοποιούνται ευρέως. Σήμερα στην Ελλάδα για τον σχεδιασμό συνδέσεων στις μεταλλικές κατασκευές ακολουθείται ως

κανονισμός ο Ευρωκώδικας 3 και πιο συγκεκριμένα το μέρος 1.8 που αναφέρεται στον σχεδιασμό κόμβων.

Οι συνδέσεις με κοχλίες συνηθίζεται να μορφώνονται στο εργοτάξιο, σε αντίθεση με τις συγκολλήσεις που προτιμάται να γίνονται στο εργοστάσιο, διότι απαιτούν την ύπαρξη κατάλληλων συνθηκών για την εφαρμογή τους. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα των κοχλιωτών συνδέσεων ως προς τις συγκολλητές. Άλλα πλεονεκτήματα είναι:

- ότι επιτρέπουν εύκολη συναρμολόγηση αλλά και αποσυναρμολόγηση, σε περίπτωση που απαιτείται αλλαγή χρήσης ή καθαίρεση μιας κατασκευής,
- ότι είναι πολλές φορές η καλύτερη επιλογή από άποψη κόστους και χρόνου κατασκευής και
- ότι έχουν μικρότερη ευαισθησία, σε σχέση με τις συγκολλητές συνδέσεις, σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, όπως στην περίπτωση διέλευσης τρένων πάνω από μία γέφυρα ή στην περίπτωση του σεισμού.

Υπάρχουν, φυσικά, και μειονεκτήματα στις κοχλιωτές συνδέσεις όπως είναι:

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

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθούμε στις κοχλιωτές συνδέσεις.

## 1.2 Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων

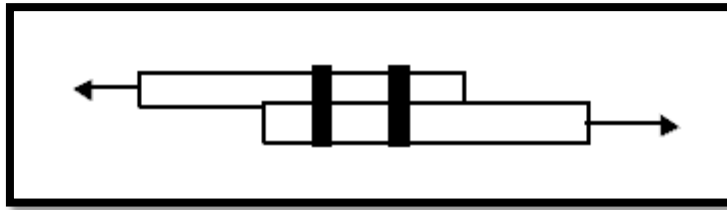
Οι κοχλιωτές συνδέσεις μίας χαλύβδινης κατασκευής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- με βάση τον τύπο της δύναμης που καταπονεί τους κοχλίες,
- με βάση τον μηχανισμό μεταφοράς της δύναμης από τους κοχλίες και
- 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

Σε αυτή την περίπτωση, οι κοχλιωτές συνδέσεις χωρίζονται σε κατηγορίες με βάση τη διεύθυνση της δύναμης που μεταφέρει η σύνδεση. Επομένως, έχουμε (α) τις συνδέσεις διάτμησης (σχ. 1.4), (β) τις συνδέσεις εφελκυσμού (σχ. 1.5) και (γ) τις συνδέσεις όπου υπάρχει συνδυασμός διάτμησης και εφελκυσμού (σχ. 1.6).

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



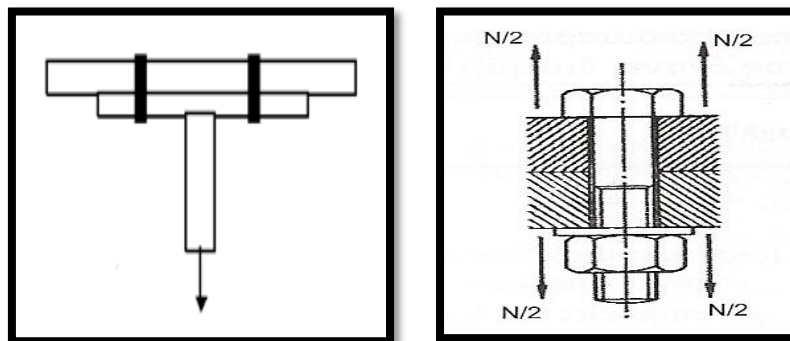
Σχ. 1.4. Σύνδεση διάτμησης

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

- στις συνδέσεις άντυγας (Κατηγορία Α),
- στις συνδέσεις τις ανθεκτικές σε ολίσθηση στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (Κατηγορία Β) και
- στις συνδέσεις τις ανθεκτικές σε ολίσθηση στην οριακή κατάσταση αστοχίας (Κατηγορία C).

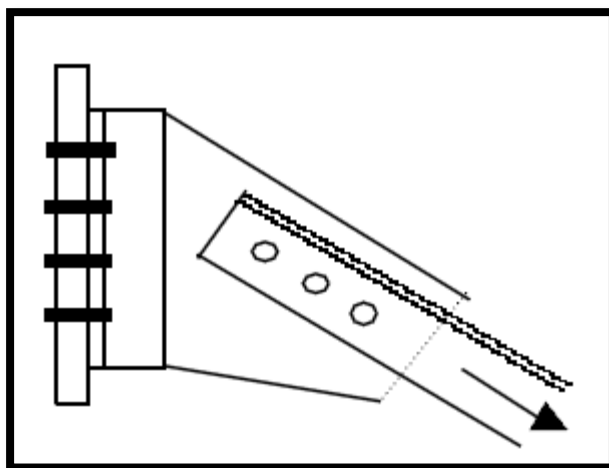
Στις παραπάνω κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων δεν θα αναφερθούμε περαιτέρω στο παρόν κείμενο.

Στις συνδέσεις εφελκυσμού, οι οποίες θα μας απασχολήσουν σε αυτή την εργασία, η δύναμη εφαρμόζεται παράλληλα προς τον άξονα του κοχλία, όπως βλέπουμε στο σχήμα 1.5:



Σχ. 1.5. Συνδέσεις εφελκυσμού

Οι κατηγορίες των συνδέσεων εφελκυσμού (Κατηγορίες D και E) θα αναφερθούν διεξοδικά παρακάτω, στο υποκεφάλαιο 1.4.



Σχ. 1.6. Σύνδεση ταυτόχρονης διάτμησης και εφελκυσμού

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

Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις κοχλιωτές συνδέσεις ως προς τον μηχανισμό που χρησιμοποιούν για να μεταφέρουν την 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. Συν τοις άλλοις, δεν απαιτείται ειδική επεξεργασία των επιφανειών επαφής.

Στις κοχλιώσεις τριβής ή, αλλιώς, προεντεταμένες κοχλιώσεις η μεταφορά της 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 πλέον ως σύνδεση άντυγας. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιούνται κοχλίες υψηλής αντοχής, δηλαδή κατηγορίας 8.8 ή 10.9.

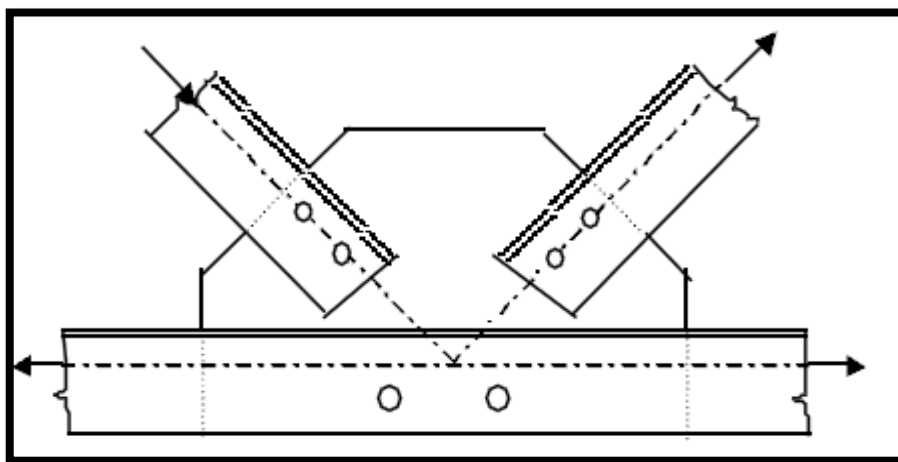
Στις συνδέσεις εφελκυσμού χωρίς προένταση χρησιμοποιούνται κοχλίες ποιότητας 4.6 έως 10.9, ενώ στην περίπτωση που έχουμε προένταση οι κοχλίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι 8.8 ή 10.9. Η κατηγορία των κοχλιώσεων εφελκυσμού στην οποία δεν εφαρμόζεται προένταση αποφεύγεται σε συνδέσεις που υπόκεινται σε συχνές μεταβολές του εφελκυστικού φορτίου. [2], [13]

### 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) τις συνδέσεις τέμνουσας, οι οποίες διακρίνονται περαιτέρω στις κεντρικές και τις 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 του κόμβου, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7:

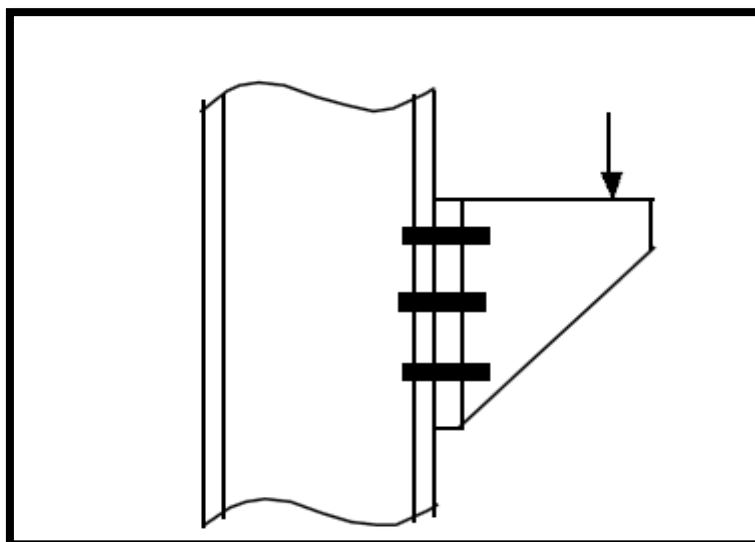


Σχ. 1.7. Κεντρική κοχλιωτή σύνδεση

Εφόσον οι συνδέσεις αυτές συναντώνται σε κόμβους δικτυωμάτων, οι δυνάμεις που μεταφέρονται είναι οι εφελκυστικές ή θλιπτικές αξονικές δυνάμεις των ράβδων του δικτυώματος.

Τις συνδέσεις ροπής τις συναντάμε σε πλαισιακές συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων, όπου μεταφέρονται η τέμνουσα και η ροπή της δοκού στο υποστύλωμα μέσω πλαισιακής λειτουργίας, σε αποκαταστάσεις συνέχειας διατομών των μελών καθώς και στην πάκτωση των υποστυλωμάτων στην βάση τους. Οι συνδέσεις αυτές παραλαμβάνουν δυνάμεις και ροπές.

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. Σύνδεση ροπής

#### 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.

Ένας άκαμπτος κόμβος ουσιαστικά πρόκειται για μία πάκτωση και, επομένως, δεν υπάρχει μεταβολή στην αρχική γωνία μεταξύ των μελών που συνδέονται.

Ένας ημιάκαμπτος κόμβος λειτουργεί ως ελαστική πάκτωση και για την προσομοίωσή του χρησιμοποιούνται στροφικά ελατήρια. Η γωνία μεταξύ του μέλους και του κόμβου είναι συνάρτηση της επιβαλλόμενης ροπής στο μέλος.

Τέλος, ένας αρθρωτός κόμβος προσομοιώνεται με μία 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 οπών και γεωμετρικά στοιχεία

Τα μέρη ενός κοχλία είναι η κεφαλή, ο κορμός και το σπείρωμα (σχ. 1.9). Η κεφαλή του κοχλία είναι συνήθως εξαγωνική. Το σπείρωμα ακολουθεί το μετρικό σύστημα ISO, σύμφωνα με το DIN ISO 898, 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 ο κίνδυνος ξεσφιζίματος.

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





(α) Μέρη κοχλία



(β) Εξαρτήματα κοχλία

Σχ. 1.9. Κοχλίες

Η επιλογή των κοχλιών στις κατασκευές γίνεται με βάση την ποιότητα του υλικού από το οποίο κατασκευάστηκαν και την διάμετρό 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:

- στους κοινούς κοχλίες και
- στους 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 μία τελεία μεταξύ τους. Οι δύο αυτοί 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 και της εφελκυστικής αντοχής. Στον Πίνακα 1.1, παρακάτω, βλέπουμε τις τιμές του ορίου διαρροής  $f_{yb}$  και της εφελκυστικής αντοχής  $f_{ub}$  για κάθε ποιότητα κοχλία. Για να χαρακτηρίσουμε έναν κοχλία, χρησιμοποιούμε τη διάμετρο του κοχλία και την σχετική προδιαγραφή, για παράδειγμα κοχλίας M 16, 10.9, DIN 6914.

Οι κοινοί κοχλίες χρησιμοποιούνται σε κατασκευές με χαμηλή καταπόνηση, όπως σε υπόστεγα αποθηκών και σε απλά κτίρια. Οι 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. Οι κοχλίες υψηλής αντοχής και μόνο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προεντεταμένοι κοχλίες σε συνδέσεις τριβής.

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

Πίν. 1.1. Ποιότητες και αντοχές κοχλιών

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

- τους κοινούς κοχλίες και
- τους εφαρμοσμένους κοχλίες.

Στους κοινούς κοχλίες οι διάμετροι του σπειρώματος και του κορμού του κοχλία είναι ίσες. Σε αυτή την περίπτωση προβλέπεται μία 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 επιμήκειες 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 1.2 δίνονται οι ανοχές των διαφόρων τύπων οπών που χρησιμοποιούνται:

Τύπος οπών	Κανονικές	Υπερμεγέθεις	Βραχείες σχισμές		Επιμήκειες οπές	
Εφαρμογή	Γενική	Προεντεταμένες κοχλιώσεις				
Άξονας	x και y	x και y	x	y	x	y
<b>M 12</b>	1	3	4	1	$d_0 =$ $2,5 \cdot d$	1
<b>M 16</b>	2	4	6	2		2
<b>M20-M22</b>	2	4	6	2		2
<b>M 24</b>	2	6	8	2		2
<b>≥ M 27</b>	3	8	10	3		3
Για εφαρμοσμένους κοχλίες: $a = 0,3 \text{ mm}$						

Πίν. 1.2. Ανοχή οπών  $a$  σε mm

Στους εφαρμοσμένους κοχλίες το σπείρωμα είναι κατά 1 mm μικρότερο του κορμού. Αυτό επιτρέπει να υπάρχει πολύ μικρή ανοχή μεταξύ οπής και κοχλία. [1], [2], [5], [12], [13]

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 μία 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
<b>d</b> <b>σπειρώματος</b>	12	16	20	22	24	27	30	36
<b>d</b> κορμού, <b>κοινοί</b> <b>κοχλίες</b>	12	16	20	22	24	27	30	36
<b>d</b> κορμού, <b>εφαρμοσμένοι</b> <b>κοχλίες</b>	13	17	21	23	25	28	31	37
<b>Εμβαδόν</b> <b>σπειρώματος</b> <b>A<sub>S</sub> (cm<sup>2</sup>)</b>	0,843	1,57	2,45	3,03	3,53	4,59	5,61	8,17

Πίν. 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 σύσφιξη των κοχλιών. Μέγιστες αποστάσεις χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να υπάρχει επαρκής επαφή των ελασμάτων, για να παρεμποδίζεται η διάβρωσή 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]

## 1.4 Συνδέσεις εφελκυσμού

### 1.4.1 Αντοχές κοχλιών

Στις συνδέσεις εφελκυσμού η δύναμη μεταφέρεται δια μέσου του κορμού του κοχλία. Επομένως, η αστοχία λαμβάνει χώρα στη διατομή του σπειρώματος, καθώς αυτή είναι ασθενέστερη από την πλήρη διατομή του κορμού. Άλλη μία μορφή αστοχίας που μπορεί να συμβεί στις συγκεκριμένες συνδέσεις είναι διάτρηση του ελάσματος. Διάτρηση του ελάσματος παρατηρείται όταν το έλασμα είναι πολύ λεπτό και δεν έχουμε τοποθετήσει δακτυλίους, οι οποίοι όταν τοποθετηθούν διευρύνουν την επιφάνεια διάτμησης.

Η αντοχή σε εφελκυσμό του κοχλία δίνεται από τη σχέση:

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

όπου  $k_2 = 0,9$  γενικώς

= 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 του ελάσματος

$f_u$ : όριο θραύσης χάλυβα ελάσματος

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

#### 1.4.2 Κατηγορίες συνδέσεων εφελκυσμού και απαιτούμενοι έλεγχοι

Οι συνδέσεις εφελκυσμού κατηγοριοποιούνται από τον Ευρωκώδικα 3 ως εξής:

- **Κατηγορία D:** Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται οι συνδέσεις με κοινούς κοχλίες, δηλαδή κοχλίες χωρίς προένταση. Εδώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε ποιότητα κοχλία, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.2.2. Οι εν λόγω συνδέσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε σχεδιασμό για συνήθη φορτία ανέμου. Στην περίπτωση όπου η σύνδεση δέχεται δυναμική καταπόνηση χρησιμοποιούνται δύο περικόχλια το ένα δίπλα στο άλλο, έτσι ώστε να μη συμβεί αποκοχλίωση.

Οι έλεγχοι που απαιτούνται να γίνουν, όταν χρησιμοποιούνται συνδέσεις αυτής της κατηγορίας, είναι οι ακόλουθοι:

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

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

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

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

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

- **Κατηγορία E:** Στην Κατηγορία E χρησιμοποιούνται προεντεταμένοι κοχλίες με ελεγχόμενη σύσφιξη. Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 1.2.2, οι προεντεταμένοι κοχλίες μπορούν να είναι μόνο ποιότητας 8.8 ή 10.9.

Σε αυτή την περίπτωση οι απαραίτητοι έλεγχοι, ομοίως με πριν, είναι:

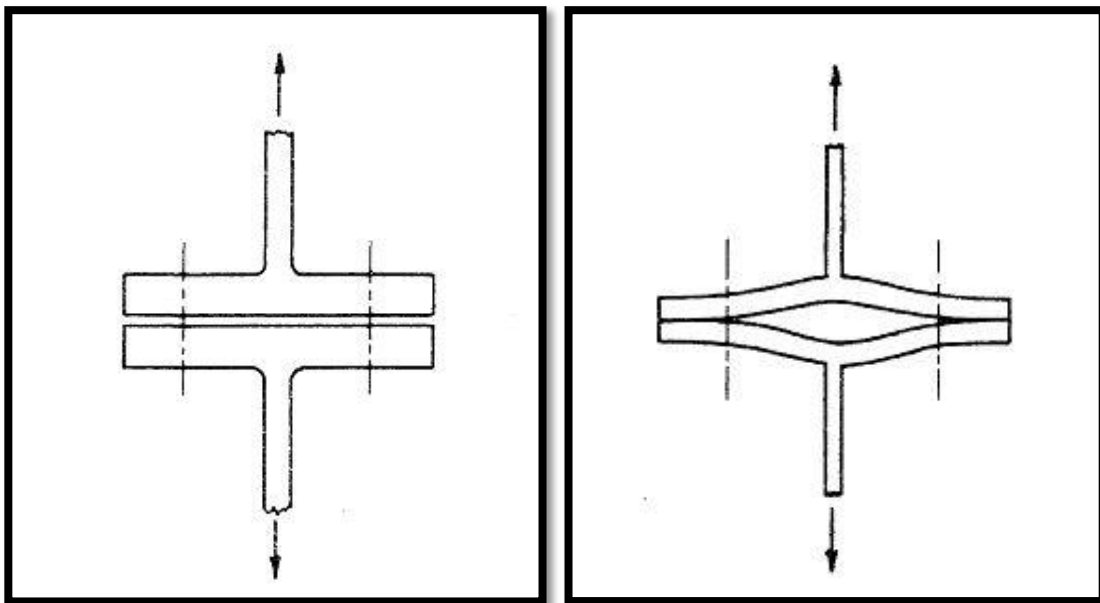
$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} \quad (1.6)$$

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

### 1.4.3 Δύναμη επαφής σε συνδέσεις εφελκυσμού (prying force)

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

Για να κατανοήσουμε την έννοια της δύναμης επαφής θα συγκρίνουμε μία σύνδεση ταυ με πολύ δύσκαμπτα συνδεόμενα ελάσματα και μία με σχετικά εύκαμπτα ελάσματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.10:



(α) Σύνδεση με δύσκαμπτα ελάσματα

(β) Σύνδεση με εύκαμπτα ελάσματα

Σχ. 1.10. Δημιουργία της δύναμης επαφής σε συνδέσεις ταυ

Όταν εφαρμόζεται εφελκυστικό φορτίο στις συνδέσεις ταυ, τα πολύ δύσκαμπτα ελάσματα (σχήμα 1.10α) παραμένουν παράλληλα το ένα στο άλλο, χωρίς να παραμορφώνονται αισθητά και, συνεπώς, δεν δημιουργούνται δυνάμεις επαφής. Αντιθέτως, τα εύκαμπτα ελάσματα (σχήμα 1.10β) παραμορφώνονται, λόγω κάμψης, κατά τέτοιον τρόπο ώστε να δημιουργούνται οι εν λόγω δυνάμεις επαφής, οι οποίες είναι θλιπτικές και παρατηρούνται στη περιοχή μεταξύ του κοχλίου και του άκρου του ελάσματος.

Οι εξισώσεις που λαμβάνουμε από την ισορροπία των δύο προαναφερόμενων συνδέσεων και που προκύπτουν από το σχήμα 1.11, όπου φαίνονται οι δυνάμεις που ακούονται σε κάθε σύνδεση, είναι οι ακόλουθες:

Για την περίπτωση της σύνδεσης με δύσκαμπτα ελάσματα:

$$2B = 2F$$

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

όπου  $B$ : εφελκυστική δύναμη κοχλία

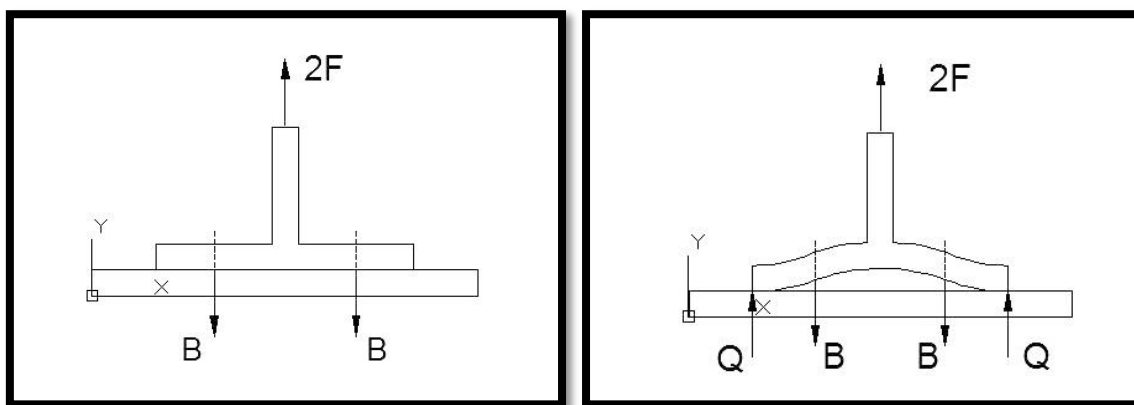
$F$ : δύναμη που εφελκύει τη σύνδεση.

Ενώ για την περίπτωση της σύνδεσης με σχετικώς εύκαμπτα ελάσματα:

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

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

όπου  $Q$ : δύναμη επαφής.



(α) Σύνδεση με δύσκαμπτο έλασμα

(β) Σύνδεση με εύκαμπτο έλασμα

Σχ. 1.11. Δυνάμεις που ασκούνται σε συνδέσεις ταν

Στις συνδέσεις στις οποίες η αστοχία προέρχεται από διαρροή των κοχλιών, και όχι του ελάσματος, το μέγεθος της δύναμης επαφής συνήθως μειώνεται όσο το εξωτερικώς ασκούμενο στη σύνδεση φορτίο πλησιάζει την αντοχή της σύνδεσης. Κοντά στην αστοχία, η διαρροή των κοχλιών επιτρέπει την απομάκρυνση των δύο ταυ, με αποτέλεσμα την μείωση της δύναμης επαφής. Αντιθέτως, αν η αστοχία της σύνδεσης οφείλεται στη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στο έλασμα και, συνεπώς, στη δημιουργία μηχανισμού, τότε δεν παρατηρείται μείωση στην τιμή της δύναμης επαφής όσο πλησιάζουμε το φορτίο αστοχίας.

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

Γενικώς, η ανάλυση της δύναμης επαφής, δηλαδή η εξεύρεση του μεγέθους της σε μία σύνδεση αλλά και της ακριβούς θέσης στην οποία ασκείται, είναι μία επίπονη διαδικασία

και τα προβλήματα τα οποία καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε σε μία τέτοια ανάλυση είναι τα ακόλουθα:

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

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν το μέγεθος της δύναμης επαφής σε μία σύνδεση ταυ είναι η γεωμετρία της σύνδεσης, καθώς και το μέγεθος και η ποιότητα των κοχλιών. Αύξηση της δύναμης επαφής παρατηρείται σε συνδέσεις με λεπτά ελάσματα και μεγάλες αποστάσεις μεταξύ κοχλιών και άκρων των ελασμάτων. Επίσης, μεγάλη δύναμη επαφής έχουμε στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται κοχλίες μεγάλης διαμέτρου και υψηλής ποιότητας. Φυσικά, όλοι αυτοί οι παράγοντες δεν λαμβάνονται υπόψη μεμονωμένα, αλλά εξετάζουμε τις σχέσεις μεταξύ αυτών. [6], [7], [13]

### **1.5 Αποκατάσταση συνέχειας μελών**

Η αποκατάσταση συνέχειας στα μέλη μιας κατασκευής είναι απαραίτητη, διότι κατά τη μεταφορά των μελών στη θέση του έργου υπάρχει περιορισμός στο μήκος τους. Δύο είναι οι συνηθέστεροι τρόποι αποκατάστασης συνέχειας:

- με λεπίδες,
- με μετωπικές πλάκες.

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε στα επόμενα κεφάλαια με σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας μέσω μετωπικών πλακών. Σε αυτή την περίπτωση, οι μετωπικές πλάκες συγκολλούνται στις άκρες των δύο δοκών ή υποστυλωμάτων των οποίων επιθυμούμε την αποκατάσταση συνέχειας και, στη συνέχεια, 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. Μερική αποκατάσταση επιλέγουμε να κάνουμε κυρίως για λόγους οικονομίας. [2]

## 1.6 Κοίλες διατομές

### 1.6.1 Ορισμός και ιστορικά στοιχεία

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

Από πολύ παλιά ο άνθρωπος χρησιμοποίησε κοίλες διατομές διαφόρων υλικών. Αρχικά, και για πολλά χρόνια, για να μεταφέρει ρευστά και στη συνέχεια στην κατασκευή τεχνικών έργων. Παρόλο που είχε ξεκινήσει η κατασκευή σιδηρών κατασκευών με χρήση κοίλων διατομών από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα [ένα παράδειγμα είναι η γέφυρα Firth of Forth στη Σκωτία (1890), που φαίνεται στο σχήμα 1.12] , στην πραγματικότητα οι κοίλες διατομές αποτελούσαν τότε μία οικονομικά ασύμφορη λύση. Και αυτό λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής και των δυσχεριών κατά την κατασκευή των σημείων σύνδεσης των μελών.



Σχ. 1.12. Γέφυρα Firth of Forth

Λίγα χρόνια μετά, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτροσυγκολλήσεων, καθώς και της τεχνολογίας κοπής των κοίλων διατομών και της εξέλιξης της μεταλλουργίας (αύξηση αντοχής του χάλυβα), οι κοίλες διατομές ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο, με αποτέλεσμα, από το 1975 περίπου και μετά, να βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες έργων.

Η κατασκευή των κοίλων διατομών γίνεται εν θερμώ από κατάλληλο για συγκόλληση ανθρακούχο χάλυβα. Εκτός από τον άνθρακα, οι διατομές αυτές περιέχουν ως επιπλέον πρόσμικτα και μαγγάνιο, φώσφορο, χρώμιο, βανάδιο κλπ. Ο χάλυβας κατασκευής είναι είτε κοινός, είτε υψηλής αντοχής.

Ενδεικτικά θα αναφέρουμε μερικές μόνο από τις κατηγορίες των έργων όπου συναντάμε κοίλες διατομές:

- πολυόροφα κτίρια (βιομηχανικά κτίρια και κατοικίες),
- στέγες και υπόστεγα (αποθήκες κ.α.),
- γέφυρες,
- ικριώματα, κιγκλιδώματα, κουφώματα,
- εξοπλισμός εργοταξίων.



### 1.6.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κοίλων διατομών

Τα πλεονεκτήματα των κοίλων διατομών είναι τα ακόλουθα:

- Μεγαλύτερη αντοχή σε λυγισμό και στρέψη, σε σχέση με τις ανοικτές διατομές ίσου βάρους.
- Καλύτερη συμπεριφορά στην ανεμοπίεση, λόγω αεροδυναμικών χαρακτηριστικών.
- Αποφυγή χρήσεως κομβοελασμάτων, με αποτέλεσμα πιο ελαφριές και πιο απλές κατασκευές.
- Οικονομία στην επένδυση, λόγω μικρότερου βάρους αναλογικά με τις ανοικτές.
- Ευκολότερη επιθεώρηση και συντήρηση, διότι 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 κλπ.
- Τοποθέτηση σκυροδέματος στο κενό, με αποτέλεσμα αύξηση της αντοχής, πυροπροστασία κλπ.
- Ελκυστικό αισθητικό αποτέλεσμα.
- Ικανότητα εύκολης καμπύλωσης, όταν είναι απαραίτητο.

Οι κοίλες διατομές, όμως, έχουν και μειονεκτήματα που είναι τα εξής:

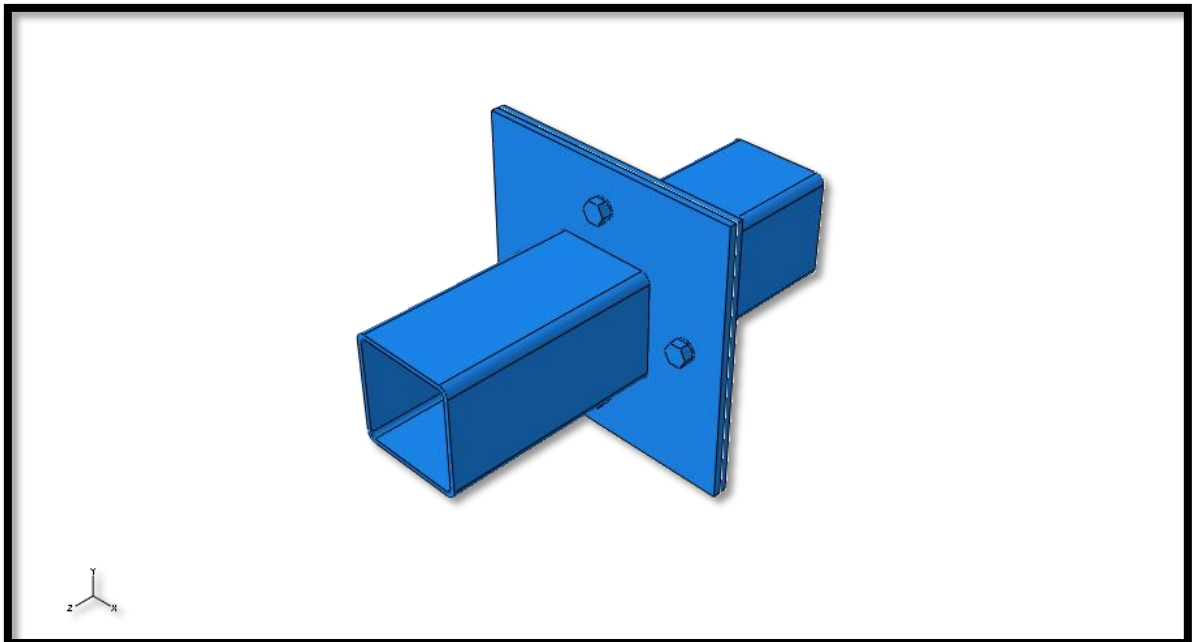
- Μεγάλο κόστος πρώτης ύλης ανά μονάδα βάρους.
- Απαιτηση για υψηλή ποιότητα κατασκευής, με έμφαση στην περιοχή των συνδέσεων. [3]

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΚΟΙΛΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

#### 2.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό της διπλωματικής εργασίας θα αναφερθεί η υπάρχουσα βιβλιογραφία σχετικά με κοχλιωτές συνδέσεις κοίλων διατομών μέσω μετωπικών πλακών και στη συνέχεια θα γίνει μία απλοποίηση των βιβλιογραφικών ευρημάτων και προσαρμογή στην περίπτωση κοχλιωτής σύνδεσης κοίλης τετραγωνικής διατομής μέσω μετωπικών πλακών, η οποία υποβάλλεται σε εφελκυσμό (βλ. σχήμα 2.1).

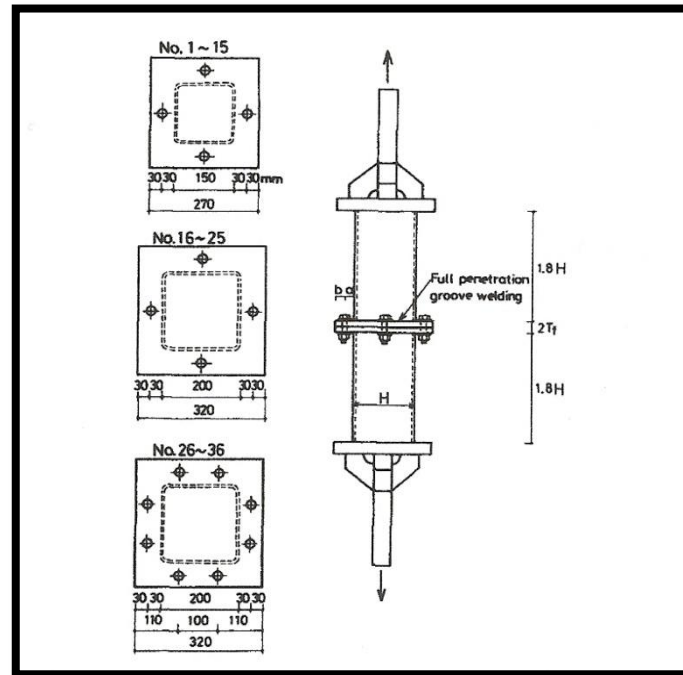


Σχ. 2.1. Αποκατάσταση συνέχειας κοιλοδοκού μέσω μετωπικών πλακών με τέσσερις κοχλίες

Ενδιαφέρουσες ερευνητικές εκθέσεις, με περιεχόμενο ανάλογο της παρούσας εργασίας και με την περιγραφή των οποίων θα ξεκινήσουμε, 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 Joining Rectangular Hollow Sections Using Eight Bolts” (A. Wheeler et al., 2003), και οι δύο από το Πανεπιστήμιο του Σύδνεϋ και οι οποίες στηρίχθηκαν πάνω στην εργασία των Kato και Mukai.

## 2.2 Μοντέλο κοχλιωτής σύνδεσης των Kato και Mukai

Οι Kato και Mukai (1985) εξέτασαν θεωρητικά και πειραματικά την συμπεριφορά κοχλιωτών συνδέσεων μέσω μετωπικών πλακών κοίλων τετραγωνικών διατομών, οι οποίες υποβάλλονται σε αξονικό εφελκυσμό, με τέσσερις και οκτώ κοχλίες. Οι γεωμετρικές μεταβλητές που επιλέχθηκαν ήταν η διάμετρος των κοχλιών, ο αριθμός των κοχλιών, το πάχος των μετωπικών πλακών και το μέγεθος των κοίλων τετραγωνικών διατομών. Οι λεπτομέρειες των συνδέσεων που εξετάστηκαν φαίνονται στο επόμενο σχήμα:



Σχ. 2.2. Λεπτομέρειες συνδέσεων

Οι Kato και Mukai αναγνώρισαν στο μοντέλο τρεις πιθανές μορφές αστοχίας: την αστοχία λόγω διαρροής των εφελκυσόμενων 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 θεωρώντας τη λεγόμενη δύναμη επαφής, την οποία περιγράψαμε και στην παράγραφο 1.4.3 του προηγούμενου κεφαλαίου.

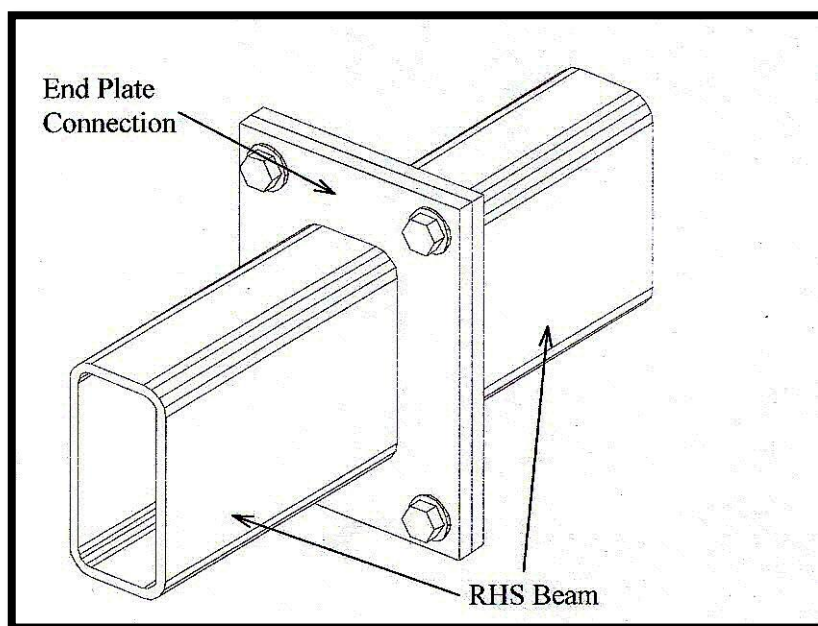
Ανάλογα με το αν η αστοχία συμβαίνει πριν ή μετά τη στιγμή του διαχωρισμού των δύο πλακών, δηλαδή τη στιγμή που η εξωτερική δύναμη που δρα στη σύνδεση εξισώνεται με την δύναμη στην οποία έχουν προενταθεί οι κοχλίες, προκύπτουν διαφορετικές σχέσεις για τον υπολογισμό της καμπτικής αντοχής των πλακών και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

γίνεται μετά το διαχωρισμό τους και η καμπτική αντοχή των πλακών όταν έχουμε τη δημιουργία μηχανισμού πριν το διαχωρισμό τους. [4]

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

### 2.3.1 Γενικά

Ο Wheeler και συν. (1997, 2003) ασχολήθηκαν με το μοντέλο των Kato και Mukai, με τη διαφορά ότι ανέλυσαν τη συμπεριφορά όχι μόνο τετραγωνικών, αλλά και ορθογωνικών κοίλων διατομών, όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.3, και επίσης οι διατομές αυτές καταπονούνται σε κάμψη και όχι σε καθαρό εφελκυσμό, όπως πριν.

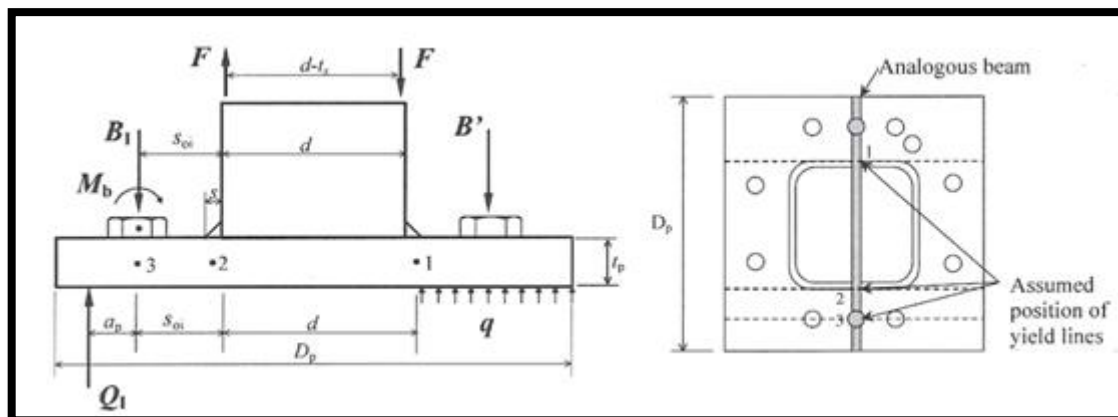


Σχ. 2.3. Σύνδεση κοίλης ορθογωνικής διατομής

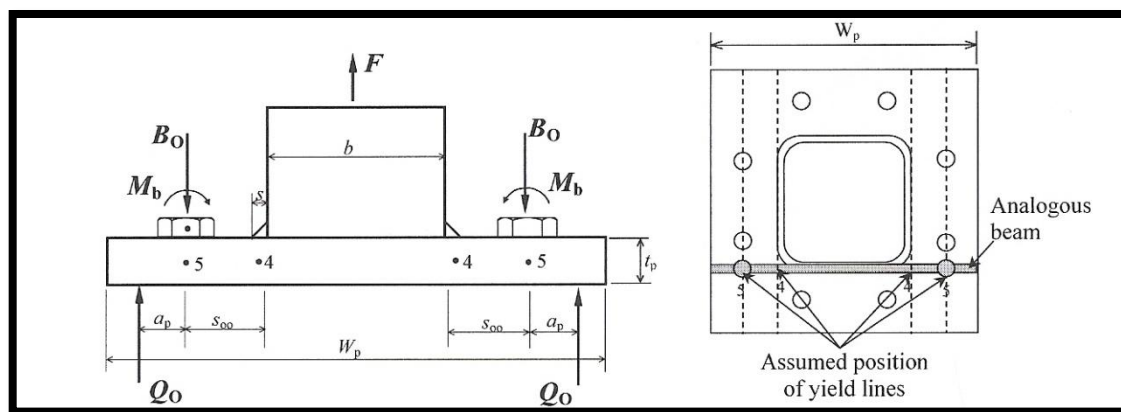
Το θεωρητικό μοντέλο της εν λόγω σύνδεσης εφαρμόστηκε στις περιπτώσεις τεσσάρων και οκτώ κοχλιών, χρησιμοποιώντας την θεωρία των γραμμών διαρροής για τον υπολογισμό της ροπής διαρροής και μία τροποποιημένη ανάλυση βραχέος ταν για την εξεύρεση της αντοχής της σύνδεσης. Επιπρόσθετα, στην σύνδεση με οκτώ κοχλίες, παρατηρήθηκε αστοχία η οποία περιλάμβανε είτε διαρροή των πλακών, είτε διαρροή των κοχλιών, είτε ταυτόχρονη διαρροή πλακών και κοχλιών, είτε την πλαστικοποίηση της ορθογωνικής διατομής, είτε τη διάτρηση των πλακών. Εδώ 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. Θα περιγράψουμε στη συνέχεια το θεωρητικό μοντέλο των Wheeler, Clarke, Hancock και Murray με χρήση οκτώ κοχλιών.

Στη σύνδεση με οκτώ κοχλίες, η τροποποιημένη ανάλυση βραχέος ταν που εφαρμόστηκε βασίστηκε στην θεώρηση δύο ανάλογων δοκών (analogous beams), μίας σε κάθε

διεύθυνση. Έτσι έχουμε την «κατακόρυφη» δοκό, στην περιοχή κάμψης της σύνδεσης, και την «οριζόντια» δοκό, στην περιοχή καθαρού εφελκυσμού, όπως παρατηρούμε στο σχήμα 2.4, στο οποίο βλέπουμε και τις πιθανώς δημιουργούμενες γραμμές διαρροής σε κάθε διεύθυνση:

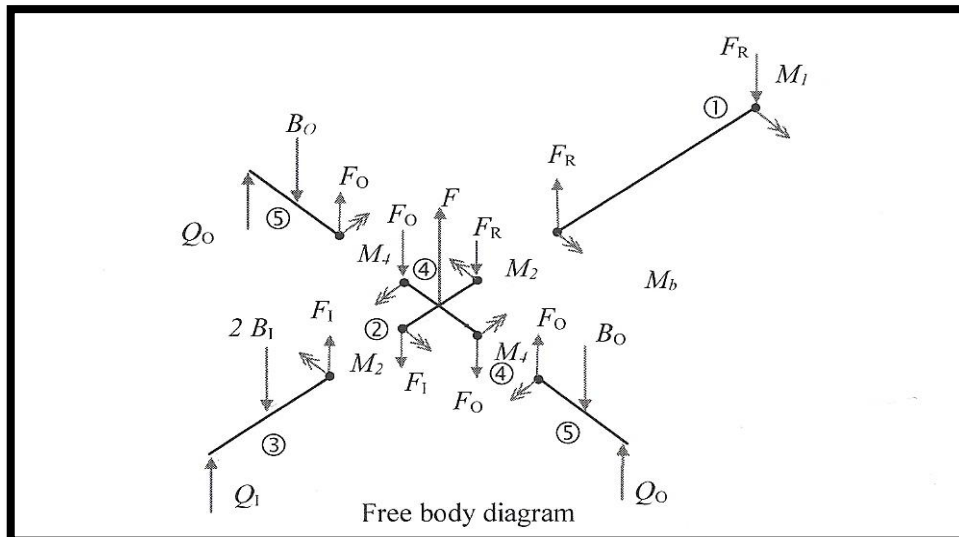


Σχ. 2.4(α). Κατακόρυφη ανάλογη δοκός



Σχ. 2.4(β). Οριζόντια ανάλογη δοκός

Τα σημεία 1,2 και 3 στην «κατακόρυφη» δοκό και 4,5 στην «οριζόντια» δοκό παριστάνουν πιθανά σημεία δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων. Στο σχήμα 2.4 φαίνονται, επίσης, οι δυνάμεις που ασκούνται στη σύνδεση και συμμετέχουν στις εξισώσεις ισορροπίας της. Αυτές είναι το ζεύγος δυνάμεων  $F$ , οι οποίες δημιουργούν την εξωτερική ροπή που καταπονεί τη διατομή, οι δυνάμεις των κοχλιών  $B_1$ ,  $B'$ ,  $B_0$ , 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 σχήματος 2.5 καθορίζονται οι δυνάμεις που δρουν στη σύνδεση:



Σχ. 2.5. Διάγραμμα ελευθέρου σώματος με τις δυνάμεις που ασκούνται στη σύνδεση

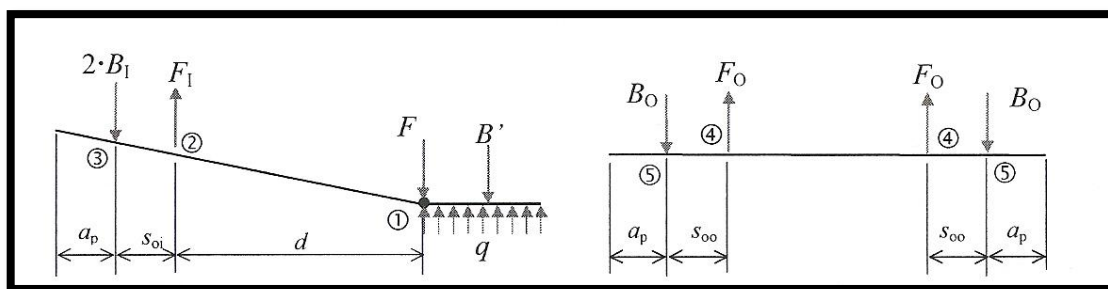
Ανάλογα με τη θέση και τον αριθμό των γραμμών διαρροής στις μετωπικές πλάκες, η σύνδεση συμπεριφέρεται με διαφορετικό τρόπο και μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως σύνδεση:

- με πλάκα μεγάλου πάχους,
- με πλάκα ενδιάμεσου πάχους και
- με λεπτή πλάκα.

Η κατάταξη σε αυτές τις κατηγορίες συνδέεται άμεσα με το πάχος της πλάκας, όπως και με το μέγεθος του εφαρμοζόμενου φορτίου. Θα δούμε στα επόμενα υποκεφάλαια, με τη βοήθεια της «κατακόρυφης» και της «οριζόντιας» δοκού, πώς συμπεριφέρεται η σύνδεση των τεσσάρων κοχλιών σε κάθε μία από τις περιπτώσεις που αναφέραμε.

### 2.3.2 Σύνδεση με πλάκα μεγάλου πάχους

Η συμπεριφορά της σύνδεσης εντάσσεται σε αυτή την κατηγορία όταν υπάρχει καθόλου ή μικρό ποσοστό διαρροής στην μετωπική πλάκα. Η αστοχία καθορίζεται από την διαρροή των κοχλιών, επομένως από την εφελκυστική τους αντοχή. Αυτό σημαίνει ότι στην πλάκα δεν θα σχηματιστεί πλαστικός μηχανισμός, αλλά αυτή θα κινηθεί σαν στερεό σώμα. Σε αυτή την περίπτωση, οι δυνάμεις επαφής είναι ίσες με μηδέν. Τέλος, δεδομένου ότι οι πλάκες δέχονται μικρή κάμψη, οι ροπές των κοχλιών  $M_b$  αμελούνται. Οι δυνάμεις που ασκούνται στις ανάλογες δοκούς φαίνονται στο σχήμα 2.6:



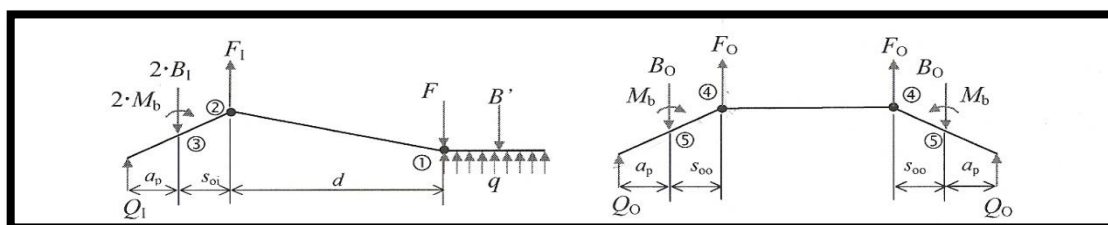
(α) «Κατακόρυφη» δοκός

(β) «Οριζόντια» δοκός

Σχ. 2.6. Συμπεριφορά σύνδεσης με πλάκα μεγάλου πάχους

### 2.3.3 Σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους

Ο μηχανισμός αστοχίας σε αυτή την κατηγορία είναι συνδυασμός διαρροής πλακών και κοχλιών, με τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα σημεία 1 και 2 της «κατακόρυφης» δοκού και στο σημείο 4 της «οριζόντιας» δοκού, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 2.7:



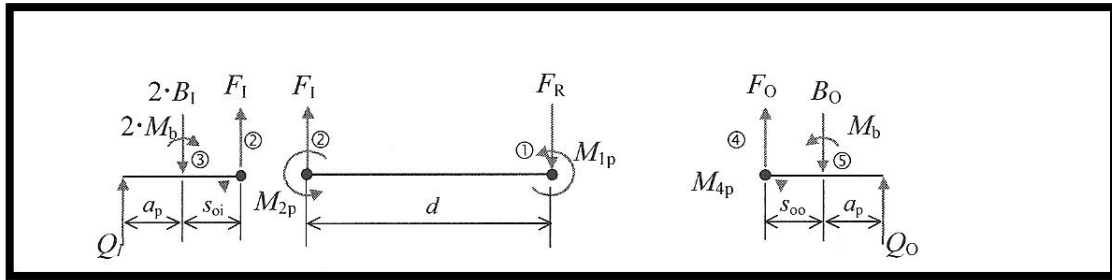
(α) «Κατακόρυφη» δοκός

(β) «Οριζόντια» δοκός

Σχ. 2.7. Συμπεριφορά σύνδεσης με πλάκα ενδιάμεσου πάχους

Θεωρείται ότι κατά την μετάβαση από την συμπεριφορά της σύνδεσης με πλάκα μεγάλου πάχους σε αυτήν με πλάκα ενδιάμεσου πάχους οι δυνάμεις επαφής  $Q_1$  και  $Q_0$  (prying forces) είναι μηδέν. Επιπλέον, οι δυνάμεις αυτές λαμβάνουν μία μέγιστη τιμή κατά τη μετάβαση από την συμπεριφορά της σύνδεσης με πλάκα ενδιάμεσου πάχους σε αυτήν με λεπτή πλάκα. Με βάση αυτή την παρατήρηση, εξετάζονται ξεχωριστά δύο επιμέρους περιπτώσεις, μία για δυνάμεις επαφής ίσες με μηδέν ( $Q_1 = Q_0 = 0$ ) και μία για θετικές δυνάμεις επαφής ( $Q_1 > 0, Q_0 > 0$ ). Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται τα διαγράμματα ελευθέρου σώματος για την «κατακόρυφη» και την «οριζόντια» ανάλογη δοκό της συγκεκριμένης περίπτωσης :





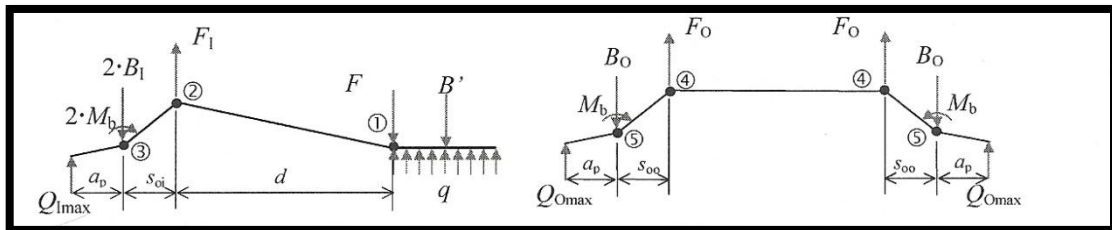
(α) «Κατακόρυφη» δοκός

(β) «Οριζόντια» δοκός

Σχ. 2.8. Διαγράμματα ελευθέρου σώματος – σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους

### 2.3.4 Σύνδεση με λεπτή πλάκα

Αυτή η περίπτωση χαρακτηρίζεται από την αστοχία λόγω υπερβολικής παραμόρφωσης 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, όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.9:

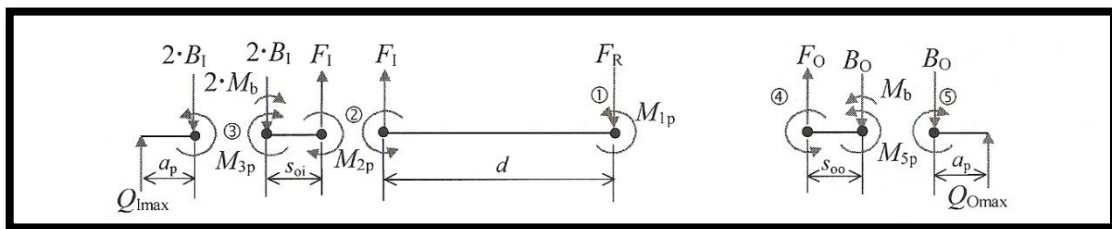


(α) «Κατακόρυφη» δοκός

(β) «Οριζόντια» δοκός

Σχ. 2.9. Συμπεριφορά σύνδεσης με λεπτή πλάκα

Στη σύνδεση με λεπτή πλάκα οι δυνάμεις επαφής  $Q_I$  και  $Q_O$  λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους, δηλαδή  $Q_I = Q_{I\max}$  και  $Q_O = Q_{O\max}$ , όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.10.



(α) «Κατακόρυφη» δοκός

(β) «Οριζόντια» δοκός

Σχ. 2.10 Διαγράμματα ελευθέρου σώματος-σύνδεση με λεπτή πλάκα

Από την παραπάνω εργασία, οι Wheeler, Clarke και Hancock συμπέραναν ότι αλλαγές στο πλάτος και στο πάχος των πλακών είχαν ως αποτέλεσμα σημαντικές μεταβολές στην αντοχή της σύνδεσης. Αύξηση, για παράδειγμα, του πάχους των πλακών επέφερε αύξηση στην αντοχή. Επιπρόσθετα, σημαντικό ρόλο στην αντοχή αλλά και στην δυσκαμψία της σύνδεσης έπαιξε η θέση των κοχλιών, και συγκεκριμένα η απόστασή τους από την κοίλη



διατομή. Όσο οι κοχλίες πλησίαζαν την διατομή, τόσο αυξάνονταν η αντοχή και η δυσκαμψία. [10], [11]

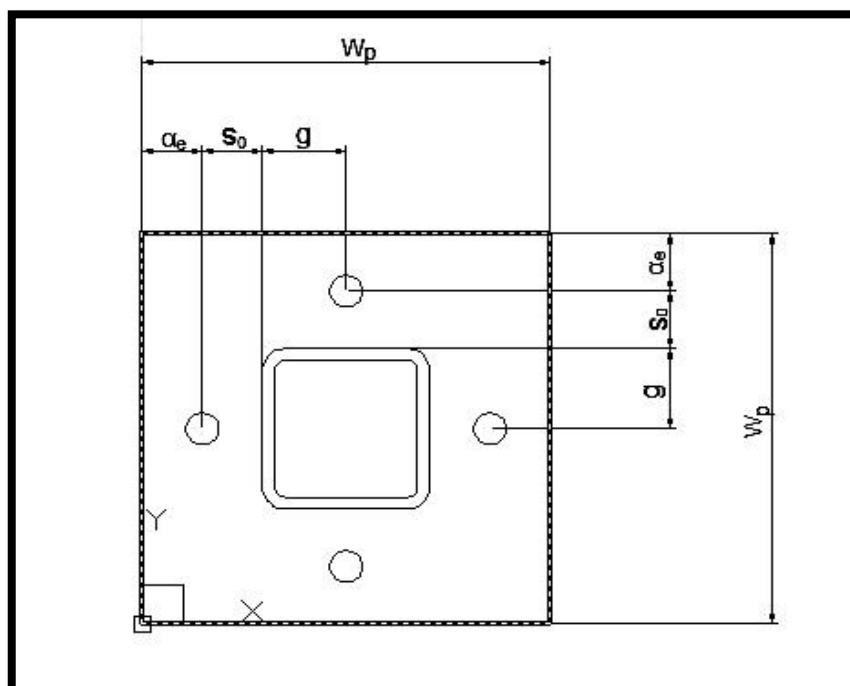
## 2.4 Τροποποιημένη Μέθοδος Βραχέος Ταυ (Modified Stub-Tee Method) – Εφαρμογή σε κοχλιωτή σύνδεση, μέσω μετωπικών πλακών, κοίλων τετραγωνικών διατομών καταπονούμενων σε εφελκυσμό

### 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. Θα αναλυθεί το συγκεκριμένο μοντέλο στις αντίστοιχες συνδέσεις με χρήση τεσσάρων κοχλιών. Σε αυτή την περίπτωση, λόγω του ότι οι διατομές καταπονούνται σε αξονικό εφελκυσμό και επομένως παρατηρούμε την ίδια συμπεριφορά και κατά τις δύο 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

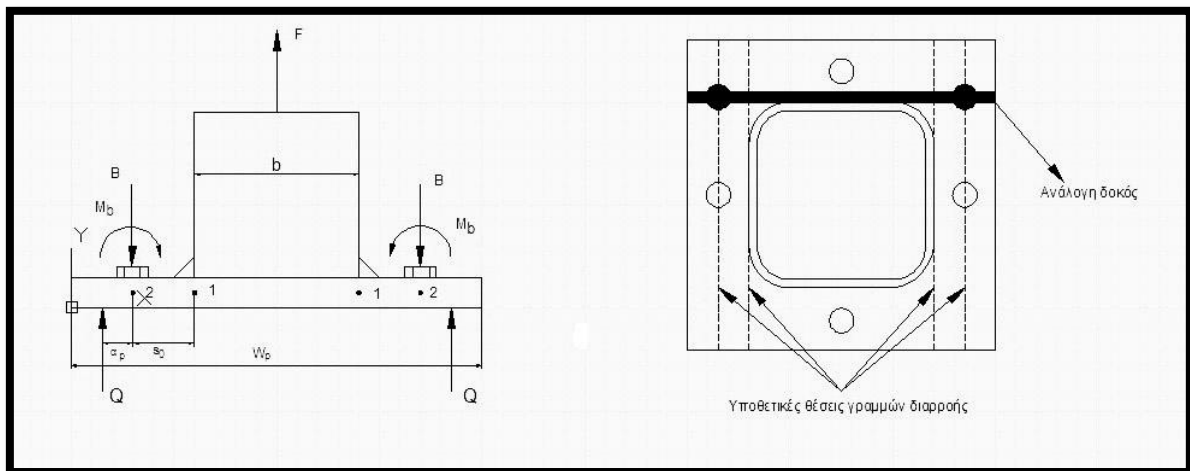
Η μορφή και οι διαστάσεις της συγκεκριμένης σύνδεσης φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 2.11. Μορφή και διαστάσεις σύνδεσης

Επίσης, στο σχήμα 2.12 απεικονίζονται οι δυνάμεις που ασκούνται στη σύνδεσή μας, που είναι η εξωτερική εφελκυστική δύναμη  $F$ , οι δυνάμεις των κοχλιών  $B$ , οι ροπές που δημιουργούνται από την κάμψη του κορμού των κοχλιών ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης των μετωπικών πλακών  $M_b$ , καθώς και οι δυνάμεις επαφής  $Q$ . Στο ίδιο

σχήμα βλέπουμε την ανάλογη δοκό που θα βοηθήσει στην ανάλυση και τις γραμμές διαρροής που αναμένεται να δημιουργηθούν στη σύνδεση, οι οποίες, λόγω της ανάπτυξης καθαρού εφελκυσμού, υποθέτουμε ότι είναι πιθανόν 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:

$$M_{ipl} = \frac{1}{4} \cdot t_p^2 \cdot l \cdot f_y \quad (2.1)$$

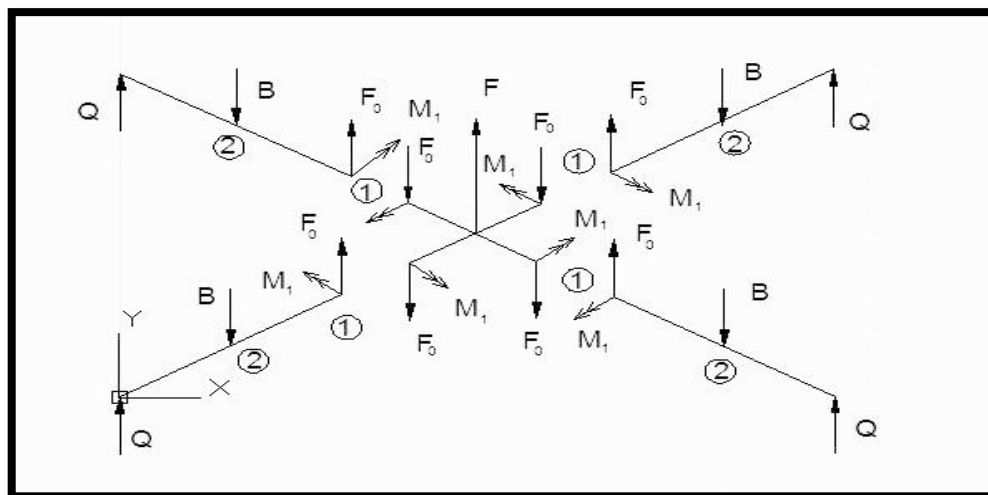
όπου  $t_p$  το πάχος της πλάκας,  $l$  το πλάτος της γραμμής διαρροής και  $f_y$  το όριο διαρροής της πλάκας.

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

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

$F = 4F_0$ , συνολικά, από επαλληλία των δοκών των δύο κάθετων διευθύνσεων, όπου

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

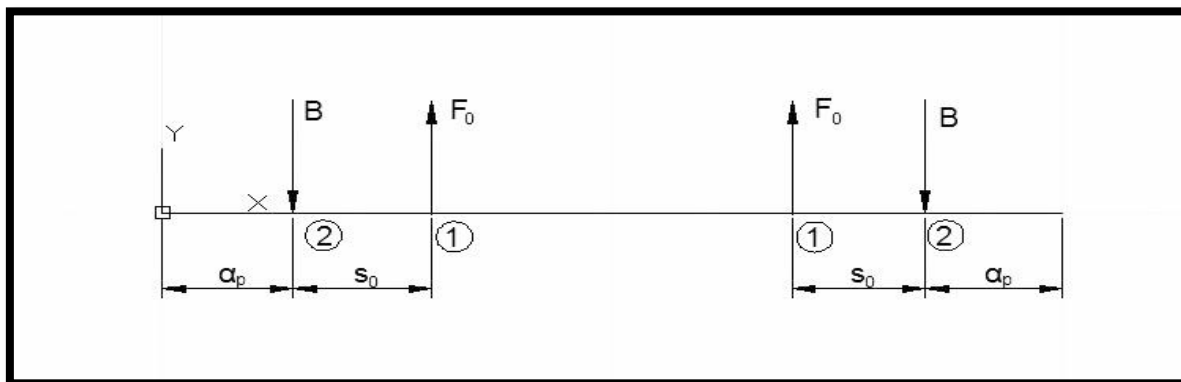


Σχ. 2.13. Διάγραμμα ελευθέρου σώματος της σύνδεσης

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

#### 2.4.2.1 Σύνδεση με πλάκα μεγάλου πάχους

Στις συνδέσεις αυτής της κατηγορίας, όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 2.3.2, οι δυνάμεις επαφής είναι μηδέν ( $Q = 0$ ) και οι ροπές  $M_b$  που δημιουργούνται στους κοχλίες αμελούνται. Στο σχήμα 2.14 παρατηρούμε την ανάλογο δοκό αυτής της περίπτωσης και τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτήν:



Σχ. 2.14. Σύνδεση με πλάκα μεγάλου πάχους

Από την ισοροπία της δοκού προκύπτει:

$$F_{Cthick}^{\delta ok} = 2F_0 = 2B_{UI} \quad (2.3)$$

όπου  $B_{UI} = 0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s$  η εφελκυστική αντοχή του ενός κοχλίου.

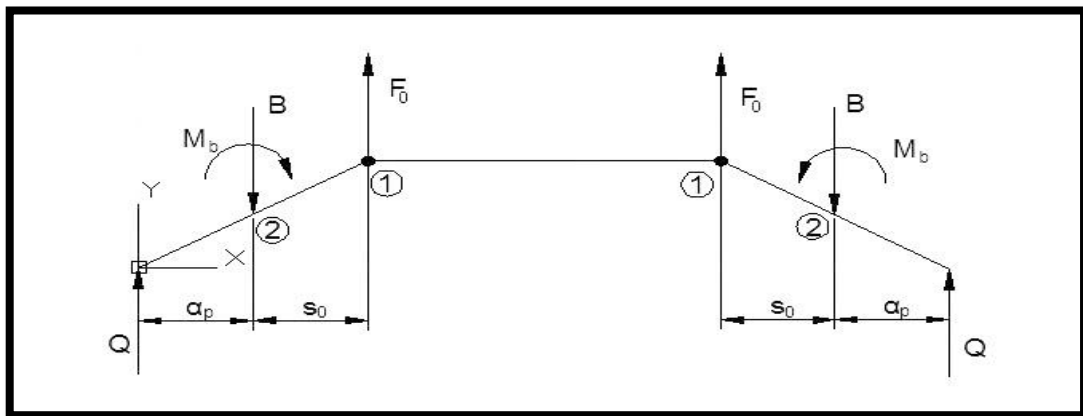
Ακολούθως, από την επαλληλία των δύο όμοιων δοκών στις δύο κάθετες διευθύνσεις:

$$F_{Cthick} = 4B_{UI} \quad (2.4)$$

Η σχέση (2.4) μας βοηθάει να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι όταν η πλάκα που χρησιμοποιούμε στη σύνδεση έχει μεγάλο πάχος και, επομένως, η επικείμενη μορφή αστοχίας είναι η διαρροή των κοχλιών, η αντοχή της σύνδεσης είναι ίση με το άθροισμα της εφελκυστικής αντοχής του συνολικού αριθμού των κοχλιών.

#### 2.4.2.2 Σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους

Η αστοχία σε αυτή την κατηγορία επέρχεται από την ταυτόχρονη διαρροή των κοχλιών και την παραμόρφωση της πλάκας, σύμφωνα με την παράγραφο 2.3.3 του παρόντος κεφαλαίου. Έτσι, έχουμε την δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα σημεία που αντιστοιχούν στον αριθμό 1, όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.15:

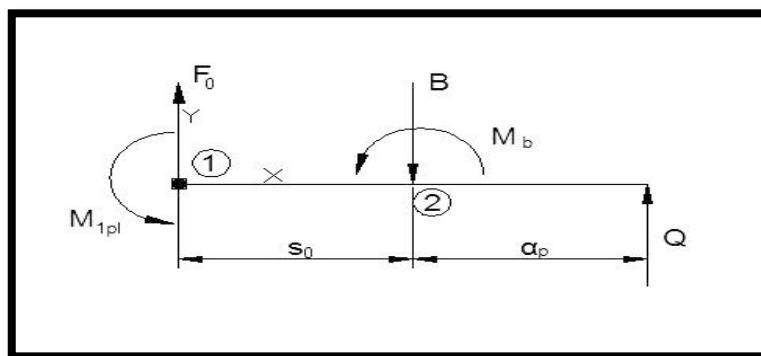


Σχ. 2.15. Σύνδεση με πλάκα ενδιάμεσου πάχους

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

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

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 διάγραμμα ελευθέρου σώματος του σχήματος 2.16 προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

- για την περίπτωση μηδενικής δύναμης επαφής ( $Q = 0$ ) από ισορροπία ροπών ως προς το σημείο 1:

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

όπου  $M_{1pl}$  από τη σχέση 2.1 και  $M_b$  από τη σχέση 2.5.

Από ισορροπία δυνάμεων του σχήματος 2.16 παίρνουμε:

$$F_{Cint}^{\delta ok} = 2B \quad (2.7)$$

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

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

- για την περίπτωση θετικής δύναμης επαφής ( $Q > 0$ ) έχουμε:

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

Από τις σχέσεις 2.2 και 2.9 παίρνουμε:

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

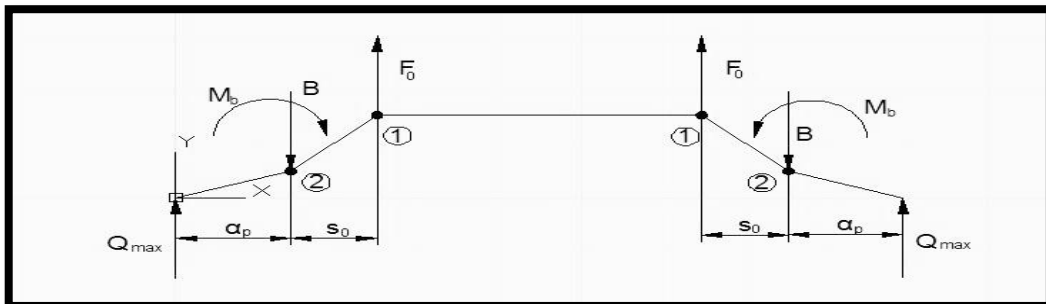
Επομένως, από την επαλληλία των δοκών στις δύο κάθετες διευθύνσεις προκύπτει η αντοχή της σύνδεσης σε αυτή την περίπτωση:

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

όπου  $B = B_{II}$ .

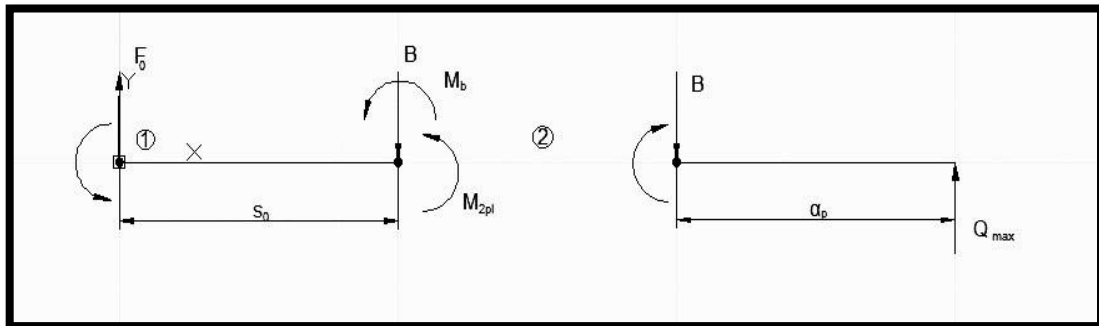
#### 2.4.2.3 Σύνδεση με λεπτή πλάκα

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 απεικονίζεται στο σχήμα 2.17:



Σχ. 2.17. Σύνδεση με λεπτή πλάκα

Επιπροσθέτως, στο σχήμα 2.18 φαίνεται το διάγραμμα ελευθέρου σώματος για την συγκεκριμένη κατηγορία συμπεριφοράς της σύνδεσης:



Σχ. 2.18. Διαγράμματα ελευθέρου σώματος – σύνδεση με λεπτή πλάκα

Σε αυτή την περίπτωση, όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 2.3.4, έχουμε μία μέγιστη τιμή για τη δύναμη επαφής, η οποία δίνεται από τη σχέση:

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

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:

$$F_0 = \frac{M_{1pl} + M_{2pl} + M_b}{s_0} \quad (2.13)$$

Τελικώς, από επαλληλία των δύο ανάλογων δοκών, η αντοχή της σύνδεσης όταν συμπεριφέρεται σαν σύνδεση με λεπτή πλάκα είναι:

$$F_{Cthin} = 4 \cdot \frac{M_{1pl} + M_{2pl} + M_b}{s_0} \quad (2.14)$$

# Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

## ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ

### 3.1 Ανάλυση φορέων με πεπερασμένα στοιχεία - Γενικά

Κατά τη μελέτη ενός φαινομένου στη φύση με σύγχρονα υπολογιστικά μέσα ακολουθούμε δύο στάδια: (α) τη μαθηματική διατύπωση του φαινομένου, κατά την οποία βασιζόμαστε σε παραδοχές χαρακτηριστικές του φαινομένου που εξετάζεται και (β) την αριθμητική ανάλυση του μαθηματικού προσομοιώματος, όπου μέσω του υπολογιστή επιχειρείται να δοθεί λύση στο πρόβλημα. Στην περίπτωση όπου η ακριβής εξεύρεση της λύσης είναι δυσχερής, οι προσεγγιστικές μέθοδοι προσφέρονται ως ένας εναλλακτικός τρόπος επίλυσης του προβλήματος. Γνωστές προσεγγιστικές μέθοδοι για την αντιμετώπιση προβλημάτων της Μηχανικής αποτελούν οι μέθοδοι των μεταβολών, όπως η μέθοδος Rayleigh-Ritz, καθώς και οι μέθοδοι των σταθμικών υπολοίπων, όπως η μέθοδος Galerkin.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θεωρείται μία ειδική διατύπωση των μεθόδων Rayleigh-Ritz και σταθμικών υπολοίπων. Παρόλα αυτά όμως, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιλύει ευκολότερα πολύπλοκες γεωμετρίες και προγραμματίζεται ευχερέστερα στον υπολογιστή. Τα *πεπερασμένα στοιχεία* είναι απλά υποπεδία που αντικαθιστούν το γεωμετρικά σύνθετο πεδίο του προβλήματος του οποίου επιθυμούμε την επίλυση. Τα πεπερασμένα στοιχεία εφάπτονται μεταξύ τους, χωρίς να αφήνουν κενά και συνδέονται με κόμβους στα σύνορα των στοιχείων. *Δίκτυο* ή *πλέγμα* ονομάζεται το σύνολο των πεπερασμένων στοιχείων και *διακριτοποίηση* του φορέα λέγεται η προσομοίωση του φορέα με δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων διατυπώθηκε ουσιαστικά το 1944 από τον Ιωάννη Αργύρη, αν και είχαν γίνει ήδη από το 1941 αντίστοιχες απόπειρες. Ο Ιωάννης Αργύρης επινόησε τη μέθοδο, με σκοπό να προσομοιώσει τη γεωμετρία των περυγίων των τότε μαχητικών αεροσκαφών. Με τη μέθοδο αυτή καταλήγουμε σε τόσες αλγεβρικές εξισώσεις, όσοι και οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος, το οποίο επιλύεται με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Παρόλο που η μέθοδος επινοήθηκε με σκοπό την στατική ανάλυση φορέων, χρησιμοποιείται ευρέως για την αντιμετώπιση μεγάλου φάσματος προβλημάτων του μηχανικού, για παράδειγμα στη ρευστομηχανική, στον ηλεκτρομαγνητισμό, στην εμβιομηχανική κλπ. [8]

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα ABAQUS. Το ABAQUS είναι ένα εξελιγμένο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, που μπορεί να εφαρμοσθεί σε μεγάλο εύρος προβλημάτων μηχανικού, σχεδιάστηκε όμως πρωταρχικώς 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 που χρησιμοποιούσαν οι αρχαίοι Έλληνες για να κάνουν μαθηματικές πράξεις και πρόχειρους υπολογισμούς.

Το πρόγραμμα ABAQUS διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Έχει την ικανότητα αντιμετώπισης και στατικών, αλλά και δυναμικών προβλημάτων.
- Είναι ικανό να προσομοιώσει επιτυχώς απότομες αλλαγές στο σχήμα των στερεών σχημάτων, τόσο στις δύο όσο και στις τρεις διαστάσεις.
- Δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης των προβλημάτων με μια μεγάλη ποικιλία πεπερασμένων στοιχείων, όπως συνεχή στοιχεία, στοιχεία δοκού, στοιχεία κελύφους και πλάκας κλπ.
- Διαθέτει την επιλογή προσομοίωσης του τρόπου αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων στερεών σχημάτων, από τα οποία αποτελείται ο φορέας.
- Χρησιμοποιεί μία εξελιγμένη «βιβλιοθήκη» υλικών, η οποία συμπεριλαμβάνει, εκτός των συνήθων ελαστικών και ελαστοπλαστικών υλικών, υλικά αφρώδη, σκυροδέματος, εδάφους κλπ.
- Έχει δυνατότητες προσομοίωσης ενός σημαντικού αριθμού ενδιαφερόντων φαινομένων, όπως αλληλεπίδραση ρευστών με στερεά στοιχεία, ακουστική, προβλήματα λυγισμού κλπ.

Το ABAQUS δημιουργήθηκε από τους Hibbitt, Karlsson και Sorensen το 1978. Σήμερα χρησιμοποιείται από αρκετές βιομηχανίες, όπως βιομηχανίες αεροσκαφών και αυτοκινήτων, εταιρείες πετρελαίου, καθώς και σε εθνικά εργαστήρια και έρευνες πανεπιστημίων σε ολόκληρο τον κόσμο. [14]

## 3.2 Σύνδεση εφελκυσμού δύο γωνιακών με έναν κοχλία

### 3.2.1 Τρισδιάστατα εξαεδρικά στοιχεία και στοιχεία κελύφους

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 2.1, η σύνδεση, της οποίας η αριθμητική ανάλυση θα γίνει στο υποκεφάλαιο 3.3, αποτελεί σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας σε εφελκυσμένη ράβδο κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών συνδεδεμένων με τέσσερις κοχλίες (βλ. σχήμα 2.1). Για την κατασκευή του προσομοιώματος της σύνδεσης ξεχωρίσαμε δύο πιθανές λύσεις. Η πρώτη λύση είναι η προσομοίωση της σύνδεσης με τη βοήθεια εξαεδρικών ορθογωνικών πεπερασμένων στοιχείων οκτώ κόμβων (χωρικά στοιχεία - solid), ενώ μία εναλλακτική λύση αποτελεί η χρήση πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (επιφανειακά στοιχεία - shell). Θα διακρίνουμε στη συνέχεια τα πλεονεκτήματα καθώς και τα μειονεκτήματα καθεμιάς από τις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης με τους δύο διαφορετικούς τύπους πεπερασμένων στοιχείων.

Η προσομοίωση της σύνδεσης με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία είναι λογικό ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά της πραγματικής σύνδεσης. Και αυτό διότι το μοντέλο του υπολογιστή διαθέτει ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις με το πραγματικό μοντέλο. Συν τοις άλλοις, η προσομοίωση του φορέα με χωρικά στοιχεία δίνει τη δυνατότητα να ληφθούν υπόψη λεπτομέρειες της σύνδεσης τοπικά, για παράδειγμα το πάχος της συγκόλλησης στην περιοχή ένωσης της πλάκας με την κοιλοδοκό, όπως και η



αλληλεπίδραση μεταξύ των επιφανειών των διαφόρων αντικειμένων του μοντέλου (ελάσματα με κοχλίες και εξαρτήματα κοχλιών), με τη μορφή επαφής. Επίσης, σε αυτή την περίπτωση, δημιουργούμε ως μέρη του μοντέλου τους κοχλίες και τα εξαρτήματά τους (δακτυλίους και περικόχλια) με ικανοποιητική ακρίβεια, χρησιμοποιώντας ως διαστάσεις αυτών τις προδιαγραφόμενες διαστάσεις από σχετικούς πίνακες.

Πέρα από τα προαναφερόμενα πλεονεκτήματα που ανακύπτουν κατά την προσομοίωση της σύνδεσης με χωρικά στοιχεία, είναι επόμενο να υπάρχουν και μειονεκτήματα. Το βασικότερο μειονέκτημα των στοιχείων αυτών είναι ο χρόνος που απαιτείται για την ανάλυση, ο οποίος είναι από διπλάσιος μέχρι δεκάδες φορές μεγαλύτερος από αυτόν που απαιτείται για την ανάλυση της σύνδεσης προσομοιωμένης με επιφανειακά στοιχεία. Και αυτό γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο φορέας τόσο περισσότερα τα στοιχεία στα οποία διακριτοποιείται και τόσο περισσότεροι οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας. Μάλιστα ένα εξαεδρικό ορθογωνικό στοιχείο οκτώ κόμβων διαθέτει τριάντα δύο βαθμούς ελευθερίας (σε κάθε κόμβο αντιστοιχούν τρεις βαθμοί ελευθερίας). Συνεπώς, ο υπολογιστής καλείται να επιλύσει μεγάλο πλήθος εξισώσεων και αυτό συνεπάγεται κόστος από άποψη χρόνου. Ακολουθώντας, ως ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα μπορεί να αναφερθεί το ότι για να προσομοιωθεί με σωστό τρόπο η κάμψη την οποία υφίσταται η μετωπική πλάκα είναι απαραίτητη η διακριτοποίηση του πάχους της με μεγάλο αριθμό στοιχείων. Αυτό έχει να κάνει 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, παρόλο που προσομοιώνεται η κατανομή της πλαστικοποίησης καθ' ύψος, αναγκάζομαστε να χρησιμοποιήσουμε μεγάλο αριθμό στοιχείων κατά τη διεύθυνση του πάχους του ελάσματος, αλλά και να εφαρμόσουμε μη γραμμικοποιημένες μεθόδους υπολογισμού της καμπύλης ικανότητας. Έτσι οδηγούμαστε στο πρώτο μειονέκτημα που αναφέρθηκε, την απαίτηση χρόνου. [9]

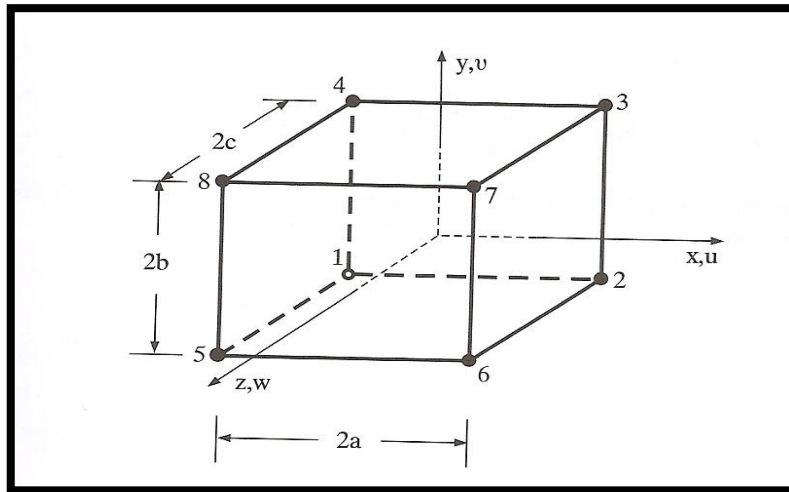
Τα κελύφη είναι επιφανειακοί φορείς των οποίων η μέση επιφάνεια είναι καμπύλη και συνήθως το πάχος τους είναι μικρό σε σχέση με το άνοιγμά τους. Η γεωμετρία του κελύφους παριστάνεται από τη μέση επιφάνεια και το πάχος σε κάθε σημείο της μέσης επιφάνειας. Στο κέλυφος συνδυάζεται η καμπτική λειτουργία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

Το μείζον πλεονέκτημα του πεπερασμένου στοιχείου κελύφους είναι ότι λόγω της καμπύλης γεωμετρίας του, προσομοιώνεται με επιτυχία η καμπύλωση, λόγω κάμψης, της μετωπικής πλάκας. Εκτός αυτού, όμως, η χρήση του επιφανειακού στοιχείου οδηγεί σε μαθηματικό προσομοίωμα με πολύ μικρότερο αριθμό αλγεβρικών εξισώσεων προς επίλυση και, συνεπώς, ο χρόνος που πρέπει να αφιερωθεί για την ανάλυση ενός τέτοιου φορέα είναι πολύ λιγότερος από αυτόν που χρειάζεται για την ανάλυση ενός φορέα στον οποίο έχουν χρησιμοποιηθεί χωρικά στοιχεία.

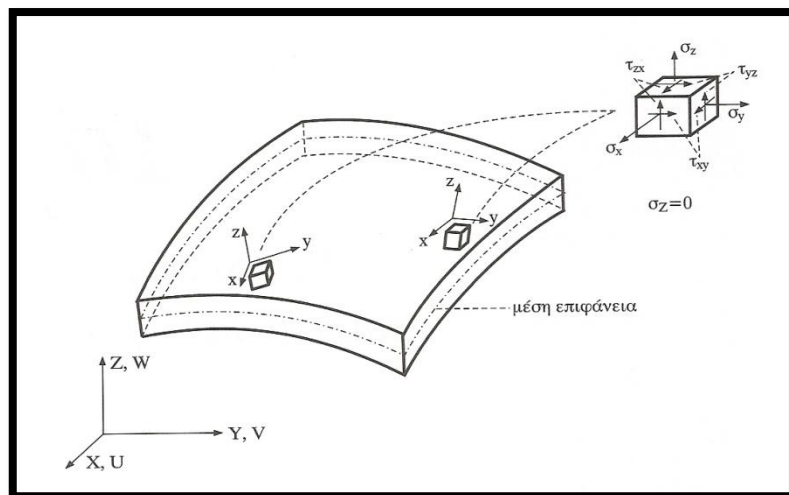
Το μειονέκτημα της χρησιμοποίησης στοιχείων κελύφους είναι ότι η προσομοίωση με αυτά τα στοιχεία αποτελεί ακόμα μεγαλύτερη απλοποίηση του φυσικού προβλήματος,

πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει κίνδυνος παρείσφρησης σφαλμάτων, ικανών να επηρεάσουν την αξιοπιστία της ανάλυσης. Ως σημαντική απλοποίηση μπορεί να θεωρηθεί η προσομοίωση του κοχλία και των εξαρτημάτων του (στο συγκεκριμένο θέμα θα αναφερθούμε διεξοδικότερα σε επόμενη παράγραφο). Με αυτό τον τρόπο, λοιπόν, δεν λαμβάνονται υπόψη λεπτομέρειες που ίσως να παίζουν σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση της συμπεριφορά της σύνδεσής μας.

Στα σχήματα 3.1 και 3.2 παρακάτω απεικονίζονται ένα εξαεδρικό ορθογωνικό στοιχείο οκτώ κόμβων και ένα στοιχείο κελύφους.



Σχ. 3.1. Εξαεδρικό ορθογωνικό στοιχείο οκτώ κόμβων



Σχ. 3.2. Κέλυφος τυχαίου σχήματος με το στοιχειώδες στερεό των τάσεων

Από την παράθεση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των δύο περιπτώσεων προσομοίωσης της σύνδεσης, κατανοούμε ότι όταν επιθυμούμε την ανάλυση μεγάλου αριθμού διαφορετικών φορέων, είναι σημαντικό να εξοικονομήσουμε χρόνο, ακόμη και αν αποδειχθεί ότι με το χρησιμοποιούμενο προσομοίωμα οδηγούμαστε σε μία απόκλιση ως προς τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Αν η εν λόγω απόκλιση είναι ασήμαντη ή έστω

μικρή, τότε είναι αποδεκτή. Έτσι ως προσφορότερη λύση θεωρείται η απλοποίηση του προσομοιώματος, αν αυτή είναι ικανή να μειώσει το χρόνο ανάλυσης.

Με βάση την παραπάνω παρατήρηση, θα εξετάσουμε στη συνέχεια την αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία των στοιχείων κελύφους στην προσομοίωση της συμπεριφοράς της σύνδεσης, με τη δοκιμαστική ανάλυση ενός απλούστερου προβλήματος από αυτό της σύνδεσης μέσω μετωπικών πλακών με τέσσερις κοχλίες. Συγκεκριμένα, θα αναλύσουμε μία απλούστερη σύνδεση, της οποίας η συμπεριφορά προσεγγίζει τη συμπεριφορά της σύνδεσης με τέσσερις κοχλίες, διαθέτει όμως πολύ μικρότερες διαστάσεις και άρα μικρότερο αριθμό βαθμών ελευθερίας.

Η σύνδεση που θα αναλυθεί είναι σύνδεση δύο γωνιακών με έναν κοχλία που υποβάλλεται σε εφελκυσμό και θα προσομοιωθεί με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία όπως και με επιφανειακά. Στη συνέχεια, θα γίνει σύγκριση της συμπεριφοράς των δύο προσομοιωμάτων, προκειμένου να κριθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του προσομοιώματος με επιφανειακά στοιχεία.

### 3.2.2 Περιγραφή προσομοιώματος τρισδιάστατων εξαεδρικών πεπερασμένων στοιχείων (solid)

Στο προσομοίωμα της σύνδεσης των δύο γωνιακών με τρισδιάστατα εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία δημιουργήθηκαν στο ABAQUS τα έξι αντικείμενα από τα οποία αποτελείται η σύνδεση. Αυτά τα αντικείμενα είναι τα δύο γωνιακά, ο κοχλίας, καθώς και το περικόχλιο και οι δύο δακτύλιοι του κοχλίας. Η διάμετρος της οπής του γωνιακού ακολούθησε τη σχέση 1.1 που αναφέραμε στο πρώτο κεφάλαιο. Για τη δημιουργία των εξαρτημάτων του κοχλίας χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές τους διαστάσεις, οι οποίες προδιαγράφονται από πίνακες. Προκειμένου να λάβουμε υπόψη την διατομή του σπειρώματος του κοχλίας  $A_s$ , διότι αυτή η διατομή είναι κρίσιμη στην περίπτωση εφελκυσμού, δόθηκε στον κορμό του κοχλίας τιμή απομειωμένης διαμέτρου  $d_s$ , που αντιστοιχεί στην απομειωμένη διατομή. Και αυτό διότι υπάρχει δυσκολία στην προσομοίωση της γεωμετρίας της διατομής του σπειρώματος, και συν τοις άλλοις είναι άσκοπη η επιβάρυνση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων σε μία τέτοια περίπτωση. Επιπλέον, με σκοπό να επιτευχθεί η επιθυμητή σύσφιξη του κοχλίας με το περικόχλιο, δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα ένα αντικείμενο, το οποίο αποτελείτο από την κεφαλή του κοχλίας και τον κορμό, ο οποίος στη συνέχεια συνδέθηκε με το περικόχλιο.

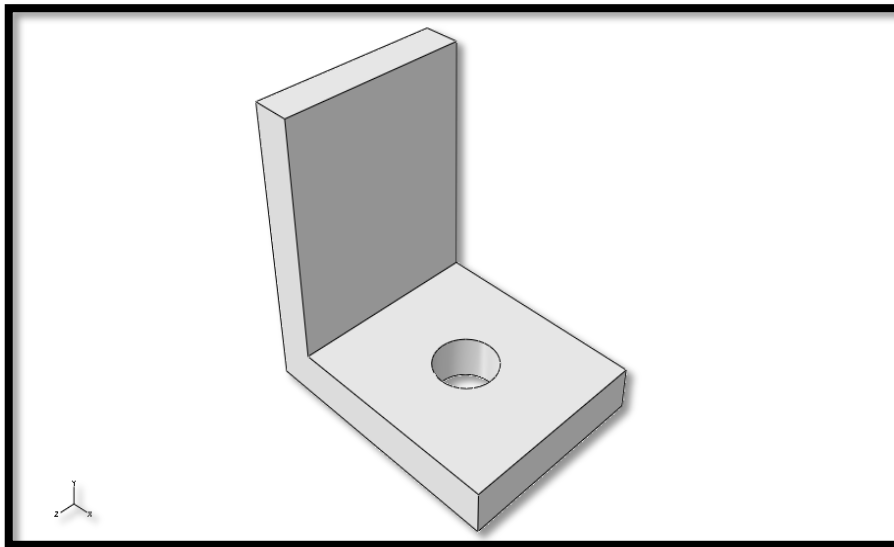
Έγιναν αναλύσεις με τρεις διαφορετικές διατομές ισοσκελών γωνιακών, οι οποίες ήταν οι εξής:

- L 53 x 53 x 8
- L 54 x 54 x 9
- L 57 x 57 x 12.

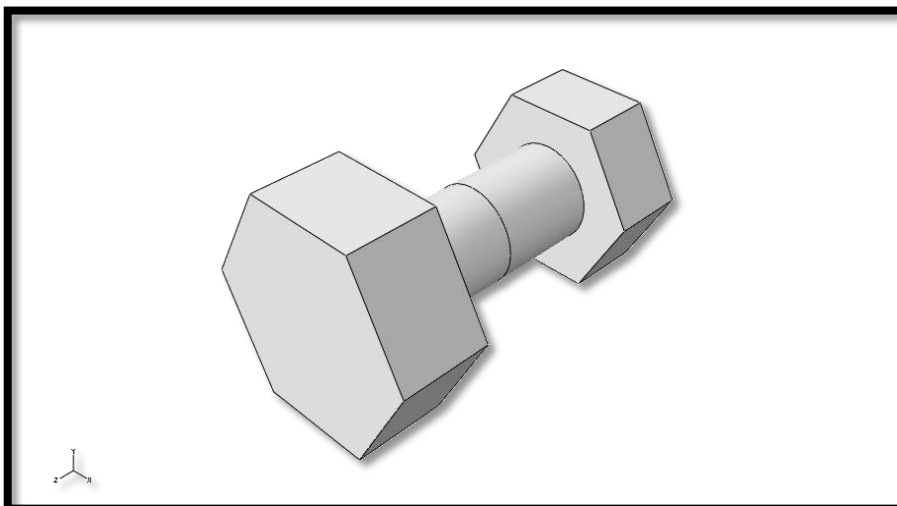
Εξετάστηκαν συνδέσεις με τις παραπάνω διατομές, με στόχο να συγκρίνουμε τη συμπεριφορά των δύο προσομοιωμάτων σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις παχών των γωνιακών ελασμάτων ( $t = 8 \text{ mm}$ ,  $t = 9 \text{ mm}$  και  $t = 12 \text{ mm}$ ) και, συνεπώς, σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις δυσκαμψίας των ελασμάτων.

Ο κοχλίας ήταν σε κάθε ανάλυση κοχλίας M 12. Οι αποστάσεις του κοχλία από τα όλα τα άκρα των οριζοντίων σκελών των γωνιακών καθώς και από την εσωτερική γωνία των γωνιακών ήταν σταθερές και ίσες με 20 mm και 25 mm αντίστοιχα σε όλες τις αναλύσεις.

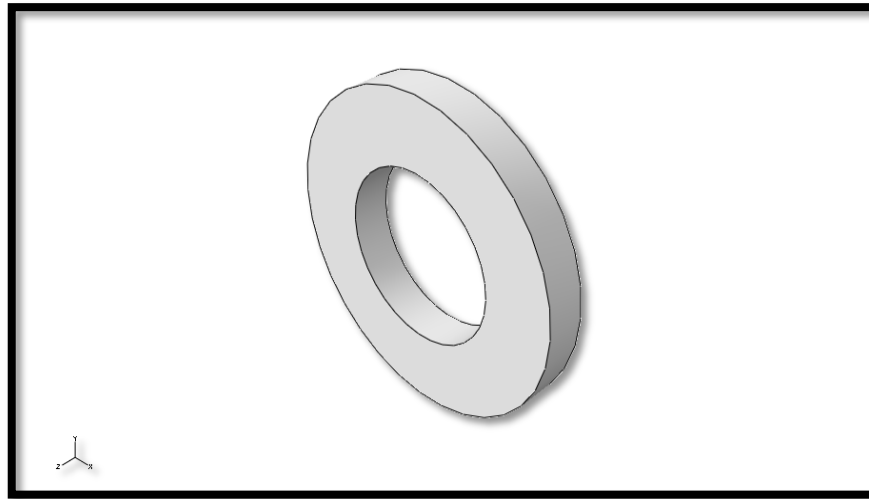
Οι εικόνες των αντικειμένων που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα 3.3, 3.4 και 3.5.



Σχ. 3.3. Γωνιακό – χωρικά στοιχεία

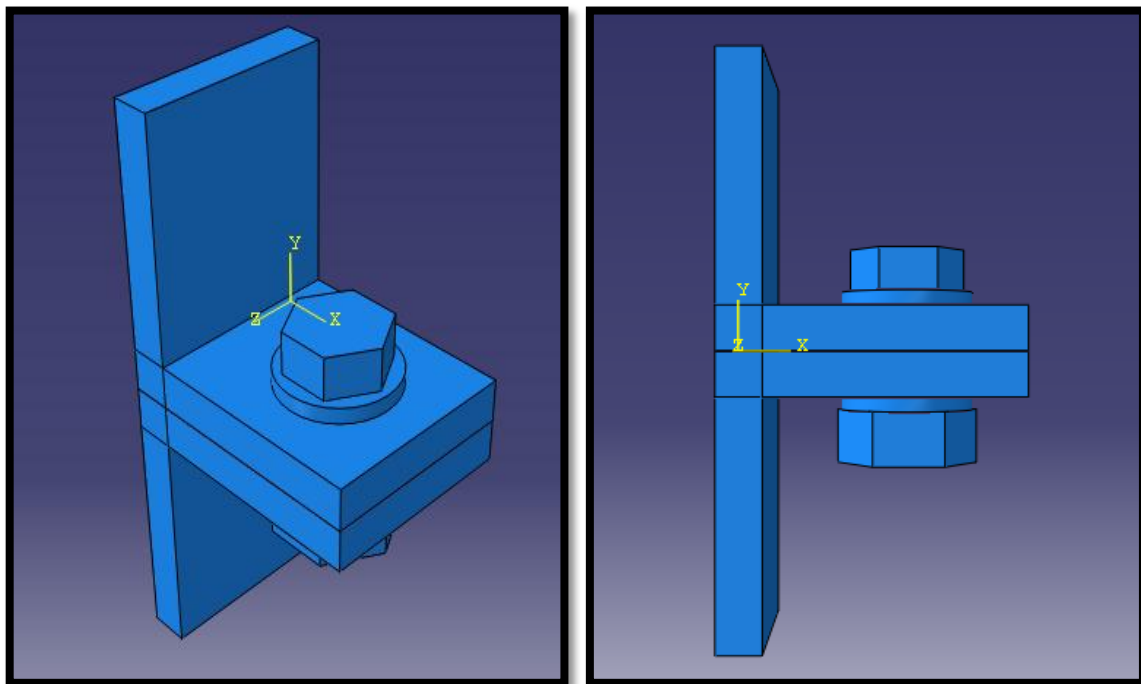


Σχ. 3.4. Κοχλίας και περικόχλιο



Σχ. 3.5. Δακτύλιος

Η σύνδεση των δύο γωνιακών απεικονίζεται στο σχήμα 3.6.



Σχ. 3.6. Σύνδεση δύο γωνιακών με έναν κοχλία – χωρικά στοιχεία

Το υλικό των γωνιακών ήταν χάλυβας S355, δηλαδή:

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

Εφελκυστική αντοχή:  $f_u = 510 \text{ N/mm}^2$  (πλαστική παραμόρφωση 0,15, για λόγους ολκιμότητας)

Η ποιότητα του κοχλία και των εξαρτημάτων του ήταν 10.9, και επομένως:

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

Εφελκυστική αντοχή κοχλιών:  $f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$  (πλαστική παραμόρφωση 0,15, για λόγους ολκιμότητας)

Οι τιμές των συντελεστών του υλικού που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

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

Λόγος Poisson:  $\nu = 0,3$

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

Επιπλέον, ορίσαμε στο ABAQUS ως μέγιστο αριθμό επαναλήψεων κατά την ανάλυση τις 100 επαναλήψεις, αρχικό μέγεθος προσάυξης ανά επανάληψη 0,01 και μέγιστο μέγεθος προσάυξης 0,01.

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 διακρίναμε ότι υπάρχει μεταξύ των δύο γωνιακών, μεταξύ των γωνιακών και του κορμού του κοχλία, μεταξύ γωνιακών και δακτυλίων, μεταξύ κοχλία και δακτυλίων και μεταξύ του περικοχλίου και του ενός δακτυλίου. Ως τύπος αλληλεπίδρασης επιλέχθηκε η επαφή μεταξύ των επιφανειών αλληλεπίδρασης και ως συντελεστής τριβής μεταξύ των χαλύβδινων επιφανειών του μοντέλου ορίστηκε η τιμή 0,7.

Η φόρτιση της σύνδεσης έγινε στη διατομή του κάτω άκρου του κάτω γωνιακού με εφελκυστικό φορτίο, κατά τον άξονα y με φορά προς τα κάτω, ίσο με την εφελκυστική αντοχή της διατομής αυτής. Η τιμή του φορτίου ορίστηκε από τη σχέση:

$$N_{pl} = A \cdot f_y \quad (3.1)$$

όπου  $A$ : εμβαδόν διατομής

$f_y$ : όριο διαρροής του χάλυβα του γωνιακού.

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλαμε στη σύνδεση ήταν οι ακόλουθες:

- πάκτωση στην επιφάνεια του άνω άκρου του άνω γωνιακού
- ελεύθερη μεταφορική κίνηση του κάτω άκρου του κάτω γωνιακού κατά τη διεύθυνση y και πλήρης δέσμευση κατά τους άλλους βαθμούς ελευθερίας, μεταφορικούς και περιστροφικούς
- στην κεφαλή του κοχλία, ελεύθερη μεταφορική κίνηση κατά τη διεύθυνση y, ελεύθερη περιστροφική κίνηση γύρω από τους άξονες x και z και πλήρης δέσμευση κατά τους υπόλοιπους βαθμούς ελευθερίας
- στους δύο δακτυλίους, συνοριακές συνθήκες όμοιες με αυτές της κεφαλής του κοχλία.

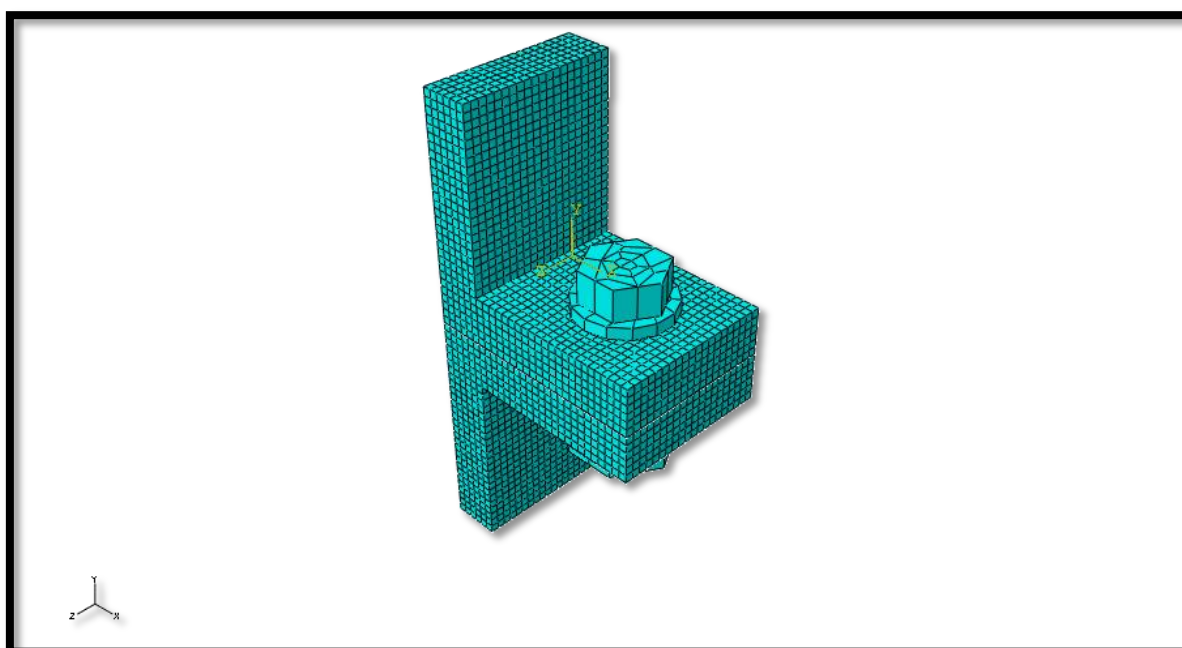
Τέλος, σε κάθε μία από τις τρεις διατομές γωνιακών που χρησιμοποιήθηκαν ορίστηκαν τέτοια μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να είναι δυνατή η υποδιαίρεση του πάχους των γωνιακών σε δύο, τέσσερα, έξι και οκτώ πεπερασμένα στοιχεία καθ' ύψος. Αυτό έγινε ώστε να επιτύχουμε σύγκλιση του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων ως προς την προσομοίωση της συμπεριφοράς του γωνιακού ελάσματος. Τα μεγέθη των στοιχείων που ορίστηκαν για τα γωνιακά ήταν τα εξής:

Αριθμός στοιχείων κατά τη διεύθυνση του πάχους του γωνιακού	L 53 x 53 x 8	L 54 x 54 x 9	L 57 x 57 x 12
2	4,00	4,50	6,00
4	2,00	2,25	3,00
6	1,33	1,50	2,00
8	1,00	1,125	1,50

Πίν. 3.1. Μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων σε mm για τα γωνιακά

Το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για τον κοχλία ήταν 4 mm για την περίπτωση του L 53 x 53 x 8 γωνιακού, 4,5 mm για την περίπτωση του L 54 x 54 x 9 γωνιακού και 6 mm για την περίπτωση του L 57 x 57 x 12 γωνιακού. Επιλέχθηκε, δηλαδή, το μεγαλύτερο μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων διακριτοποίησης των γωνιακών, έτσι ώστε να γίνει η ανάλυση σε σύντομο χρόνο και να διατηρήσουμε σταθερή τη συμπεριφορά του κοχλία σε κάθε περίπτωση, με σκοπό να επικεντρωθούμε στη συμπεριφορά των γωνιακών ως προς την κάμψη, ανάλογα με το μέγεθος του στοιχείου.

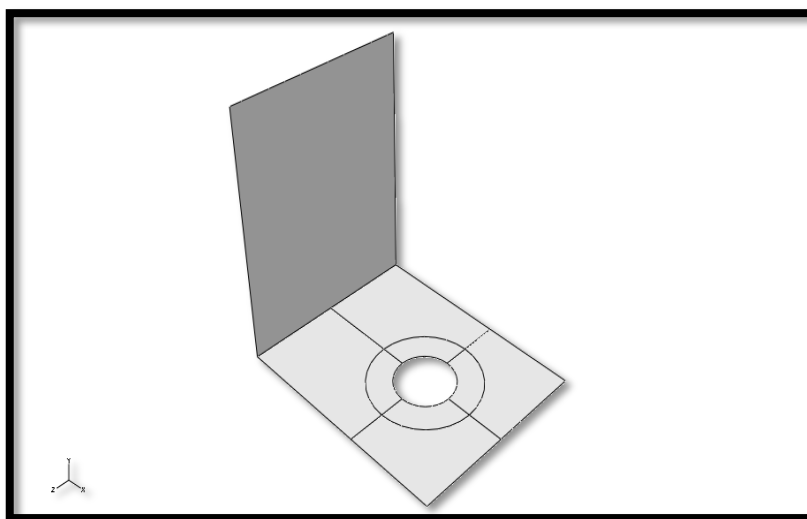
Η εικόνα διακριτοποίησης της σύνδεσης στην περίπτωση της ανάλυσης με γωνιακό L 57 x 57 x 12 και μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων 2,00 mm φαίνεται στο σχήμα 3.7.



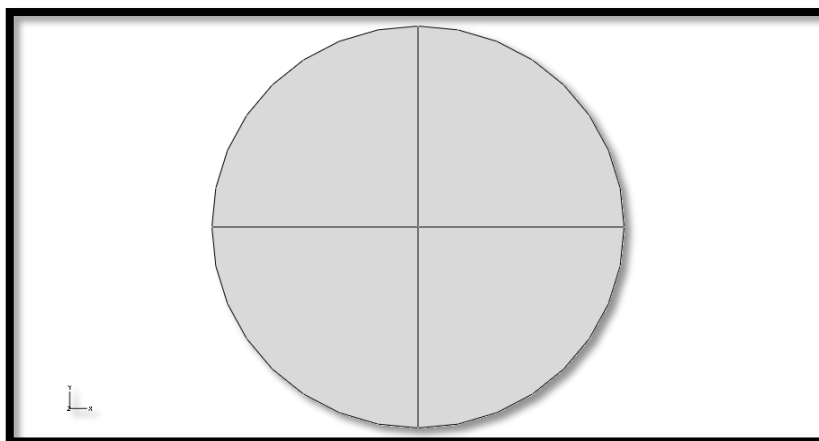
Σχ. 3.7. Διακριτοποίηση σύνδεσης με χωρικά στοιχεία

### 3.2.3 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (shell)

Η προσομοίωση του κοχλία και των εξαρτημάτων του, δηλαδή των δύο δακτυλίων και του περικοχλίου, έγινε σε αυτή την περίπτωση με ένα στοιχείο, το οποίο στο ABAQUS ονομάζεται «wire» και μέσω του οποίου συνδέθηκαν δύο κυκλικοί δίσκοι. Το στοιχείο «wire» παίζει το ρόλο μετακινησιακού ελατηρίου και προσομοιώνει τον κορμό του κοχλία. Οι δύο κυκλικοί δίσκοι προσομοιώνουν την κεφαλή του κοχλία, τους δύο δακτυλίους και το περικόχλιο. Η τιμή της διαμέτρου των κυκλικών δίσκων ήταν ίση με την εξωτερική διάμετρο των δακτυλίων που αντιστοιχούν στον κοχλία M 12, ενώ το πάχος τους ήταν ίσο με αυτό του αντίστοιχου περικοχλίου. Παρακάτω βλέπουμε το ένα γωνιακό της περίπτωσης προσομοίωσης με επιφανειακά στοιχεία και τον ένα κυκλικό δίσκο.



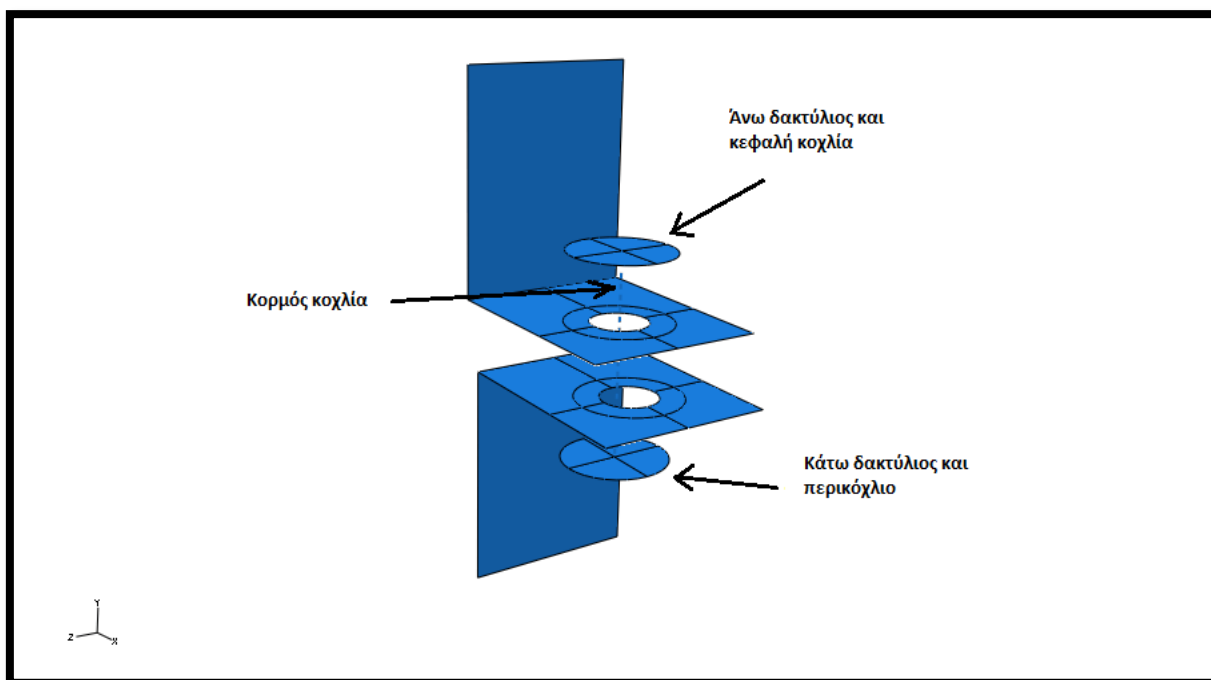
Σχ. 3.8. Γωνιακό – επιφανειακά στοιχεία



Σχ. 3.9. Κυκλικός δίσκος προσομοίωσης κοχλία και εξαρτημάτων του

Η προσομοίωση της σύνδεσης με στοιχεία κελύφους φαίνεται ολοκληρωμένη στο σχήμα 3.10.





Σχ. 3.10. Σύνδεση δύο γωνιακών με έναν κοχλία – επιφανειακά στοιχεία

Η απόσταση του άνω κυκλικού δίσκου από το άνω γωνιακό, όπως και του κάτω κυκλικού δίσκου από το κάτω γωνιακό ορίστηκε σε 0,001 mm, δηλαδή πολύ μικρή αλλά μη μηδενική, έτσι ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία του στοιχείου wire μεταξύ των δύο κυκλικών δίσκων.

Οι κυκλικοί δίσκοι και το ελατήριο διέθεταν τις ιδιότητες του υλικού του κοχλία. Συγκεκριμένα, το υλικό των κυκλικών δίσκων ήταν το υλικό του κοχλία που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2.2, δηλαδή ποιότητας 10.9, και διέθετε τους συντελεστές που αναφέραμε σε αυτή την παράγραφο. Το υλικό του ελατηρίου ήταν ελαστικό – απολύτως πλαστικό και στο πρόγραμμα δόθηκε η τιμή του μέτρου ελαστικότητας,  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$  και η εφελκυστική αντοχή του κοχλία  $F_T$ , η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$F_T = 0,9 f_{ub} \cdot A_s \quad (3.2)$$

όπου  $A_s$ : ενεργός διατομή του κορμού του κοχλία.

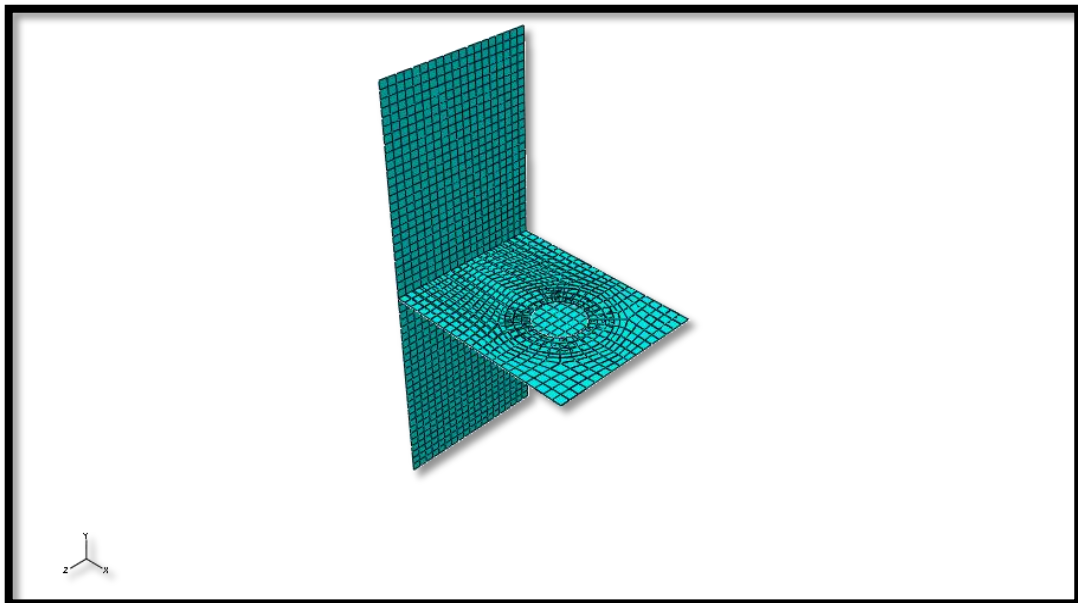
Στην περίπτωση της προσομοίωσης με επιφανειακά στοιχεία, αλληλεπίδραση υπάρχει μεταξύ των επιφανειών των δύο γωνιακών και μεταξύ του κάθε γωνιακού με τον αντίστοιχο κυκλικό δίσκο του. Ορίστηκε, λοιπόν, και εδώ ως τύπος αλληλεπίδρασης η επαφή μεταξύ των επιφανειών αλληλεπίδρασης και ως συντελεστής τριβής μεταξύ των χαλύβδινων επιφανειών επιλέχθηκε η τιμή 0,7.

Η φόρτιση της σύνδεσης είναι και εδώ εφελκυστική, εφαρμοζόμενη στο κάτω άκρο του κάτω γωνιακού, με διεύθυνση κατά τον άξονα y και φορά προς τα κάτω. Η τιμή του φορτίου είναι η εφελκυστική αντοχή της διατομής στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο.

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλαμε στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν οι ακόλουθες:

- πάκτωση στο άνω άκρο του άνω γωνιακού
- ελεύθερη μεταφορική κίνηση του κάτω άκρου του κάτω γωνιακού κατά τη διεύθυνση  $y$  και πλήρης δέσμευση κατά τους άλλους βαθμούς ελευθερίας, μεταφορικούς και περιστροφικούς
- ελεύθερη μεταφορική κίνηση κατά τη διεύθυνση  $y$ , ελεύθερη περιστροφική κίνηση γύρω από τους άξονες  $x$  και  $z$  και πλήρης δέσμευση κατά τους υπόλοιπους βαθμούς ελευθερίας στους δύο κυκλικούς δίσκους.

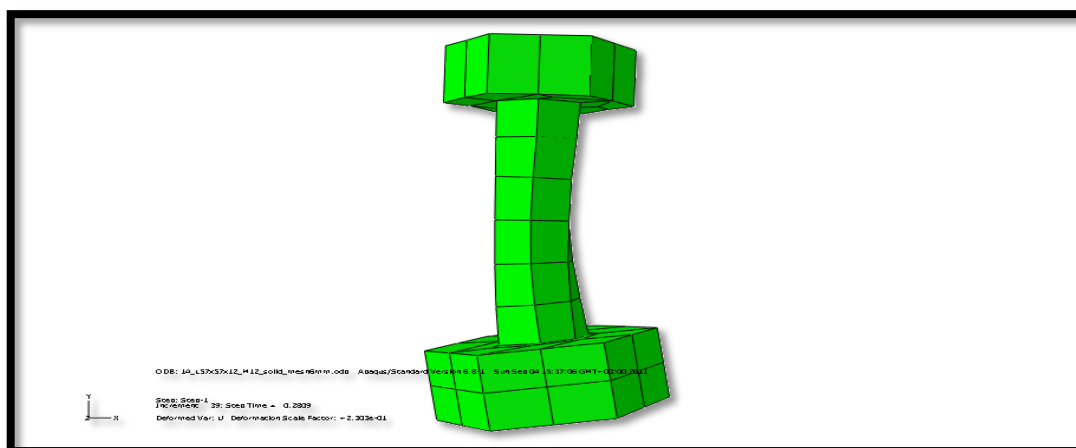
Το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων που επιλέχθηκε ήταν επιφανειακά στοιχεία μεγέθους 2 mm. Στην περίπτωση των επιφανειακών στοιχείων, αποδείχθηκε ότι η συμπεριφορά της σύνδεσης δεν επηρεάζεται από το μέγεθος των στοιχείων που χρησιμοποιούνται, συνεπώς έγινε χρήση μόνο του συγκεκριμένου μεγέθους στοιχείων. Η διακριτοποίηση της σύνδεσης με επιφανειακά στοιχεία απεικονίζεται στο σχήμα 3.11.



Σχ. 3.11. Διακριτοποίηση σύνδεσης με επιφανειακά στοιχεία

### 3.2.4 Κάμψη κοχλία

Ο κοχλίας, λόγω της παραμόρφωσης των ελασμάτων, εκτός από εφελκυσμό δέχεται και κάμψη. Η κάμψη του κοχλία στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούμε χωρικά στοιχεία προσομοιώνεται επιτυχώς, όπως βλέπουμε στο σχήμα 3.12.

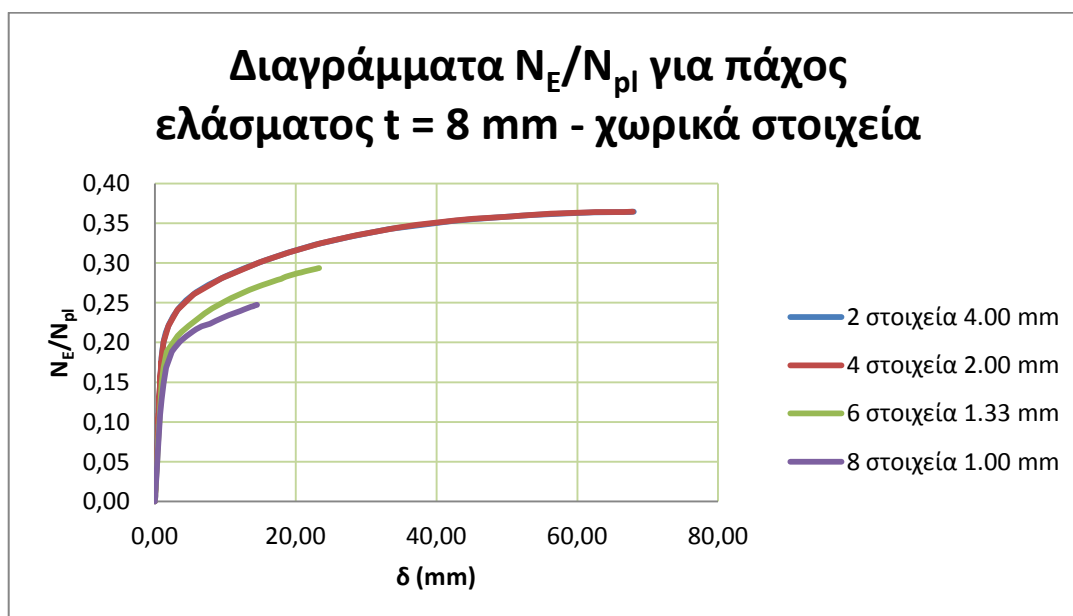


Σχ. 3.12. Κάμψη κοχλία

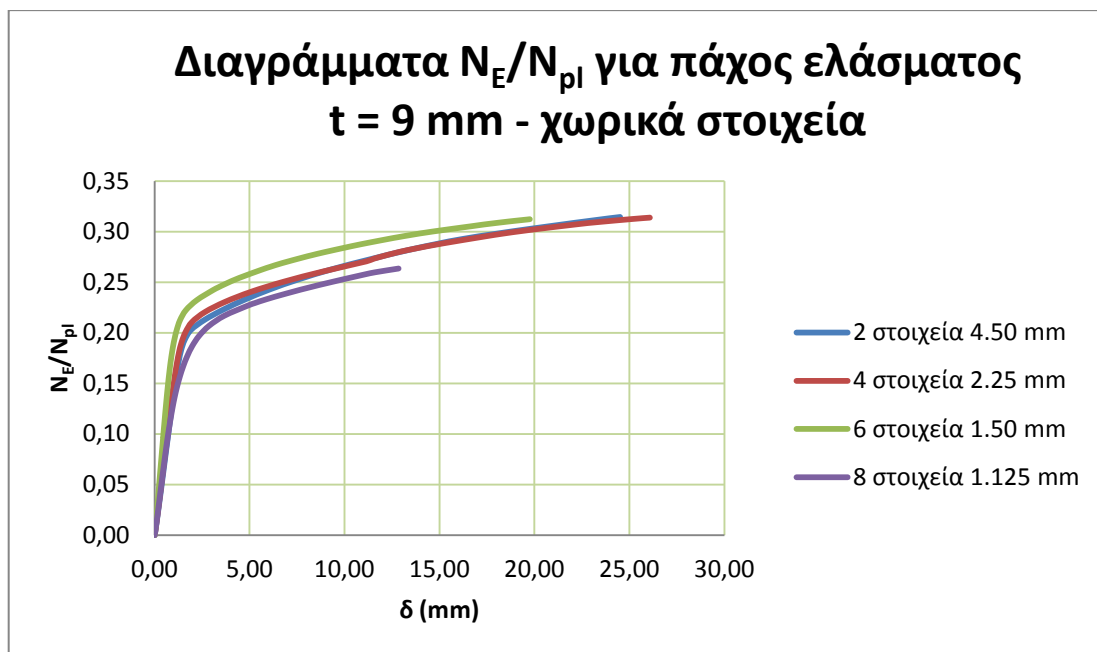
Αντιθέτως, στο προσομοίωμα της σύνδεσης με επιφανειακά στοιχεία, όπου ο κοχλίας προσομοιώνεται με μετακινησιακό ελατήριο, η καμπτική καταπόνηση του κοχλία παραλείπεται και θεωρούμε ότι ο κοχλίας δέχεται καθαρό εφελκυσμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία.

### 3.2.5 Αποτελέσματα και σύγκριση των δύο προσομοιωμάτων

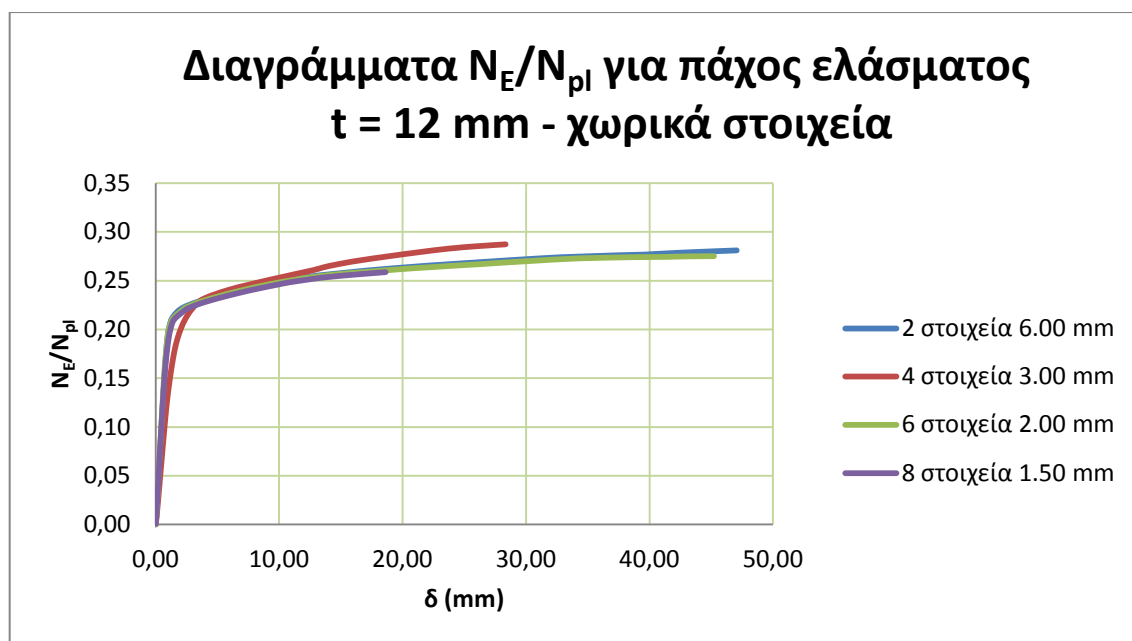
Θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης με τη μορφή δρόμων ισορροπίας, δηλαδή διαγραμμάτων του φορτίου  $N_E$  που ασκείται στη σύνδεση διαιρεμένου με την εφελκυστική αντοχή  $N_{pl}$  της διατομής στην οποία ασκείται το φορτίο συναρτήσει της μετατόπισης  $\delta$  του κάτω άκρου του κάτω γωνιακού κατά τη διεύθυνση  $y$  και με φορά προς τα κάτω. Ακολουθούν, λοιπόν, οι δρόμοι ισορροπίας για κάθε μία περίπτωση των γωνιακών που χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή για πάχη ελασμάτων  $t = 8 \text{ mm}$ ,  $t = 9 \text{ mm}$  και  $t = 12 \text{ mm}$ . Στο κάθε διάγραμμα φαίνεται η συμπεριφορά της σύνδεσης για τα διάφορα μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων που αναφέραμε στην παράγραφο 3.2.2.



Σχ. 3.13. Δρόμοι ισορροπίας για πάχος ελάσματος 8 mm και διάφορα μεγέθη χωρικών στοιχείων

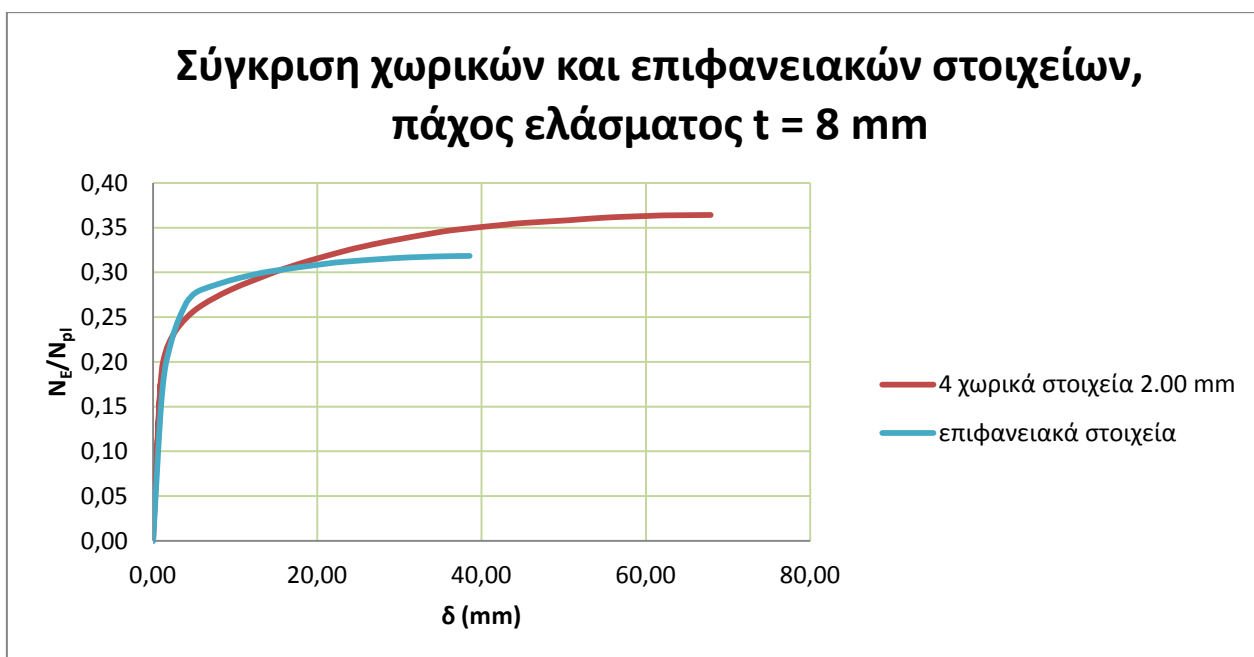


Σχ. 3.14. Δρόμοι ισορροπίας για πάχος ελάσματος 9 mm και διάφορα μεγέθη χωρικών στοιχείων

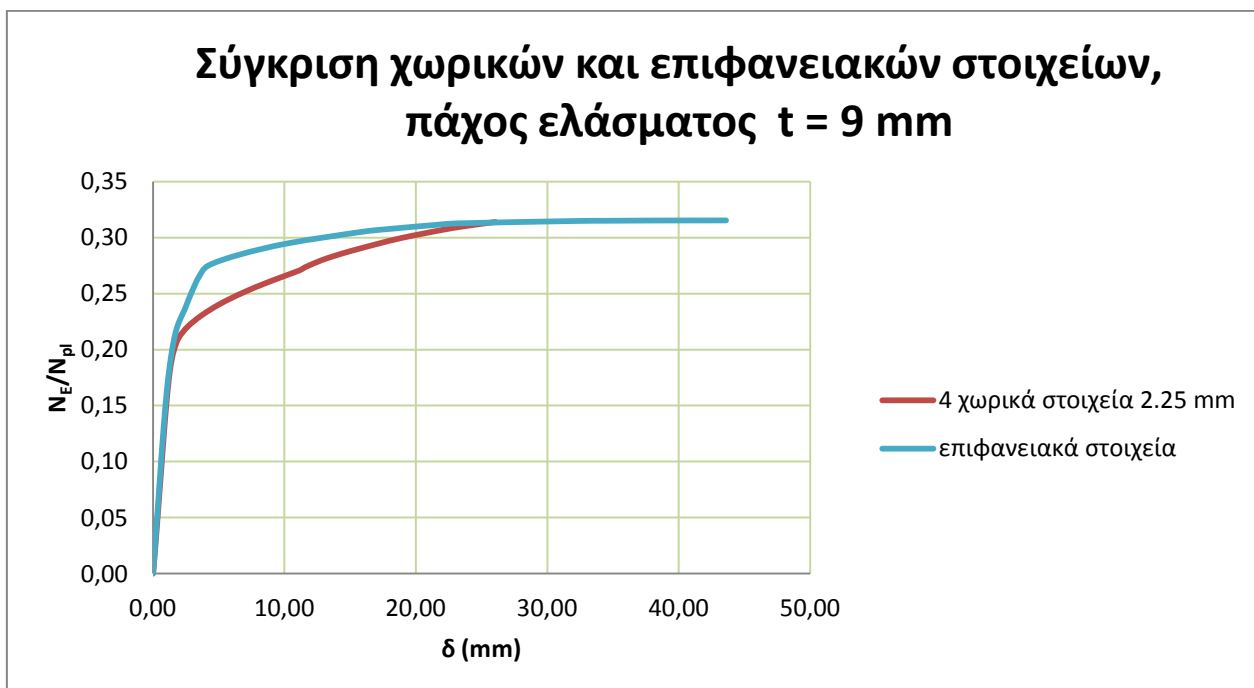


Σχ. 3.15. Δρόμοι ισορροπίας για πάχος ελάσματος 12 mm και διάφορα μεγέθη χωρικών στοιχείων

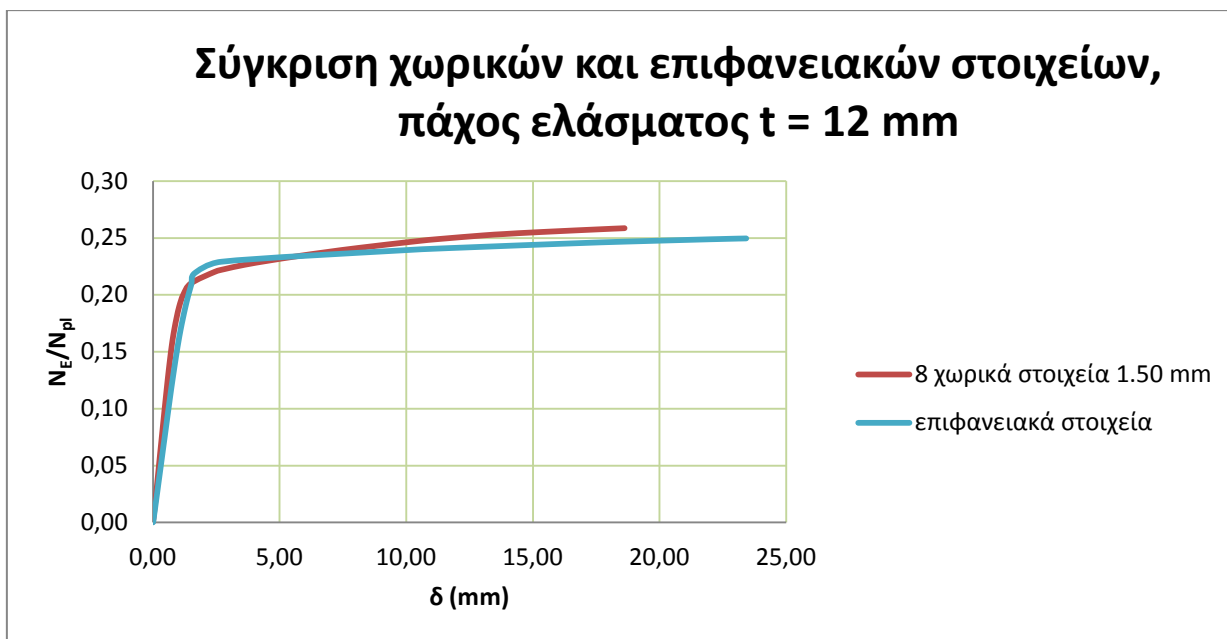
Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιήσουμε από τα παραπάνω διαγράμματα την καμπύλη εκείνη, στην οποία έχει επιτευχθεί μεγαλύτερη σύγκλιση, ώστε να συγκρίνουμε τη συμπεριφορά του προσομοιώματος της σύνδεσης με χωρικά στοιχεία με εκείνη του προσομοιώματος με επιφανειακά στοιχεία.



Σχ. 3.16. Δρόμοι ισορροπίας για πάχος ελάσματος 8 mm – Σύγκριση χωρικών και επιφανειακών στοιχείων



Σχ. 3.17. Δρόμοι ισορροπίας για πάχος ελάσματος 9 mm – Σύγκριση χωρικών και επιφανειακών στοιχείων



Σχ. 3.18. Δρόμοι ισορροπίας για πάχος ελάσματος 12 mm – Σύγκριση χωρικών και επιφανειακών στοιχείων

Από τους δρόμους ισορροπίας των σχημάτων 3.16, 3.17 και 3.18, συμπεραίνουμε ότι η συμπεριφορά της σύνδεσης στην περίπτωση προσομοίωσης με χωρικά στοιχεία και στην περίπτωση προσομοίωσης με επιφανειακά στοιχεία είναι παρόμοια, διότι επιτυγχάνεται επαρκής σύγκλιση των διαγραμμάτων τόσο ως προς την αντοχή της σύνδεσης, όσο και ως προς τη δυσκαμψία, με απόκλιση όχι μεγαλύτερη από 5%. Συνεπώς, η προσομοίωση με επιφανειακά στοιχεία θεωρείται αρκετά ικανοποιητική, ώστε να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση της σύνδεσης κοιλοδοκού, μέσω μετωπικών πλακών, με τέσσερις κοχλίες.

### 3.3 Σύνδεση κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών, με τέσσερις κοχλίες

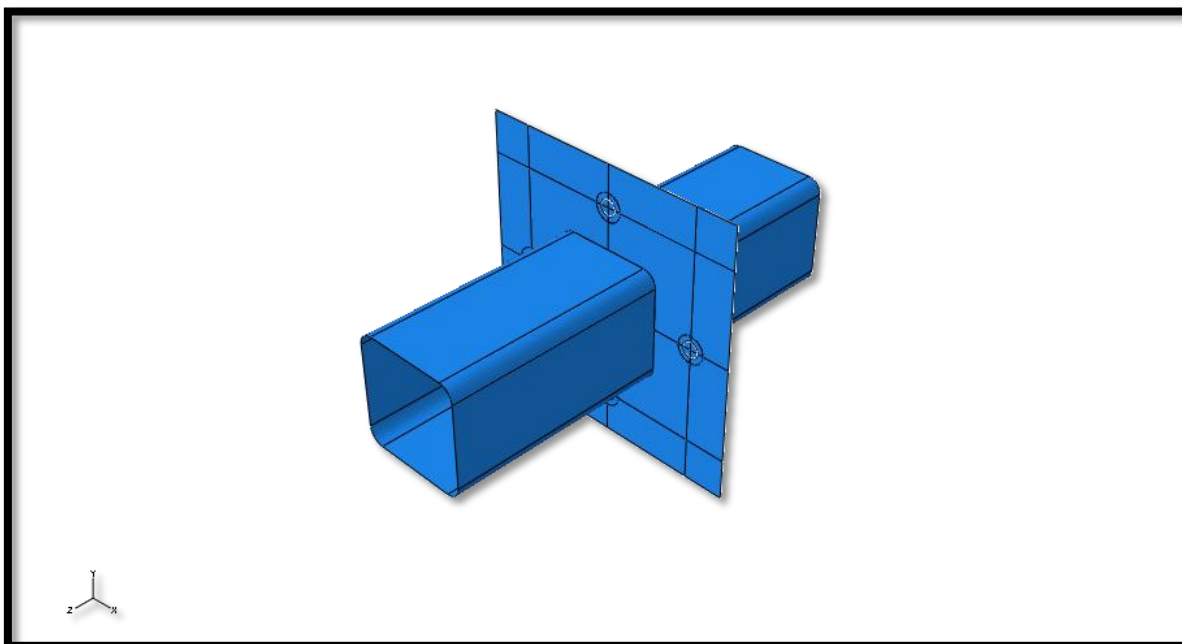
#### 3.3.1 Γενικά

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. Επίσης, θα γίνει σύγκριση των αριθμητικών και των αναλυτικών λύσεων, οι οποίες θα προκύψουν βάσει των σχέσεων που εξηγάγαμε στο κεφάλαιο 2, και τέλος, θα παρουσιαστεί το ποσοστό της δύναμης επαφής ως προς τη συνολική εφελκυστική αντοχή των τεσσάρων κοχλιών.

#### 3.3.2 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων

Η προσομοίωση της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας κοίλης τετραγωνικής διατομής, μέσω μετωπικών πλακών, με τέσσερις κοχλίες, έγινε με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (βλ. σχήμα 3.19). Η προσομοίωση των τεσσάρων κοχλιών έγινε με τον τρόπο που

περιγράψαμε στην παράγραφο 3.2.3, δηλαδή με χρήση του στοιχείου wire, ως μετακινησιακού ελατηρίου, συνδεδεμένου με δύο κυκλικούς δίσκους, για κάθε κοχλία.



Σχ. 3.19. Προσομοίωση σύνδεσης με επιφανειακά στοιχεία

Ο συνολικός αριθμός των συνδέσεων που αναλύθηκαν ήταν εξήντα (60). Οι παράμετροι που μεταβάλλονταν μεταξύ των αναλύσεων ήταν το μέγεθος των κοχλιών, το πάχος των μετωπικών πλακών και το πάχος της κοίλης διατομής. Χρησιμοποιήθηκαν κοχλίες M 12, M 16, M 20, M 22 και M 24 και δύο μεγέθη κοίλων τετραγωνικών διατομών SHS 120 x 5 και SHS 120 x 10. Για κάθε μέγεθος κοχλίας, οι λόγοι πάχους πλάκας προς διάμετρο κοχλίας ( $t/d$ ) που χρησιμοποιήθηκαν ήταν  $t/d = 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50,$  και  $1,75$ . Οι μετωπικές πλάκες ήταν τετραγωνικού σχήματος και είχαν σε κάθε ανάλυση πλάτος 300 mm. Επιπλέον, σταθερή διατηρήθηκε η απόσταση των κοχλιών από τα άκρα των μετωπικών πλακών καθώς και από τη διατομή της κοιλοδοκού. Η απόσταση αυτή ήταν 90 mm. Το μήκος της κοιλοδοκού που υιοθετήθηκε ήταν το διπλάσιο του πλάτους της, δηλαδή  $l = 2 \cdot 120 = 240$  mm, διότι, βάσει εμπειρίας, από αυτό το μήκος και μετά υπάρχει ομαλοποίηση των τάσεων.

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

Όριο διαρροής:  $f_y = 355$  N/mm<sup>2</sup> (πλαστική παραμόρφωση μηδενική)

Εφελκυστική αντοχή:  $f_u = 510$  N/mm<sup>2</sup> (πλαστική παραμόρφωση 0,15, για λόγους ολκιμότητας)

Η ποιότητα του κοχλίας ήταν 10.9, και επομένως:

Όριο διαρροής κοχλιών:  $f_{yb} = 900$  N/mm<sup>2</sup> (πλαστική παραμόρφωση μηδενική)

Εφελκυστική αντοχή κοχλιών:  $f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$  (πλαστική παραμόρφωση 0,15, για λόγους ολκιμότητας)

Οι τιμές των συντελεστών του υλικού που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

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

Λόγος Poisson:  $\nu = 0,3$

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

Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία που δόθηκε στο πρόγραμμα δίνεται από τη σχέση 3.2.

Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο πλακών και μεταξύ των πλακών και των κυκλικών δίσκων. Ο τύπος αλληλεπίδρασης και εδώ, όπως και στο προσομοίωμα της παραγράφου 3.2.3, είναι η επαφή μεταξύ των επιφανειών αλληλεπίδρασης και η τιμή του συντελεστή τριβής μεταξύ των χαλύβδινων επιφανειών είναι 0,7.

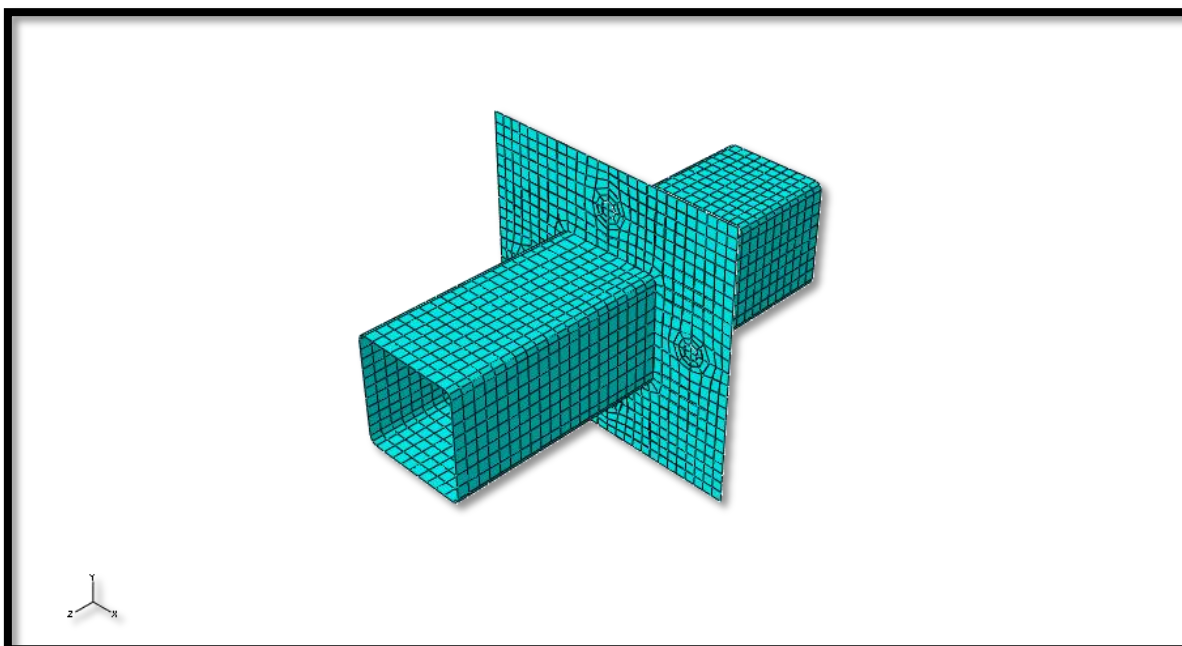
Η φόρτιση που ορίστηκε στο πρόγραμμα ήταν εφελκυστικό φορτίο, κατά τη θετική φορά του άξονα z (βλ. σχήμα 3.19), εφαρμοζόμενο στην περίμετρο της κοιλοδοκού και με τιμή ίση με την εφελκυστική αντοχή της διατομής της κοιλοδοκού που προκύπτει από τη σχέση 3.1.

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στη σύνδεση έχουν ως εξής:

- πάκτωση στο άκρο της κοιλοδοκού που βρίσκεται κατά την αρνητική φορά του άξονα z
- ελεύθερη μεταφορική κίνηση του άκρου της κοιλοδοκού, στο οποίο εφαρμόζεται το φορτίο, κατά τη διεύθυνση z και πλήρης δέσμευση κατά τους άλλους βαθμούς ελευθερίας, μεταφορικούς και περιστροφικούς
- στους κυκλικούς δίσκους 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

Το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων με το οποίο έγινε η διακριτοποίηση της σύνδεσης ήταν επιφανειακά στοιχεία μεγέθους 12 mm. Η διακριτοποίηση φαίνεται στο σχήμα 3.20:





Σχ. 3.20. Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων σύνδεσης

### 3.3.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία

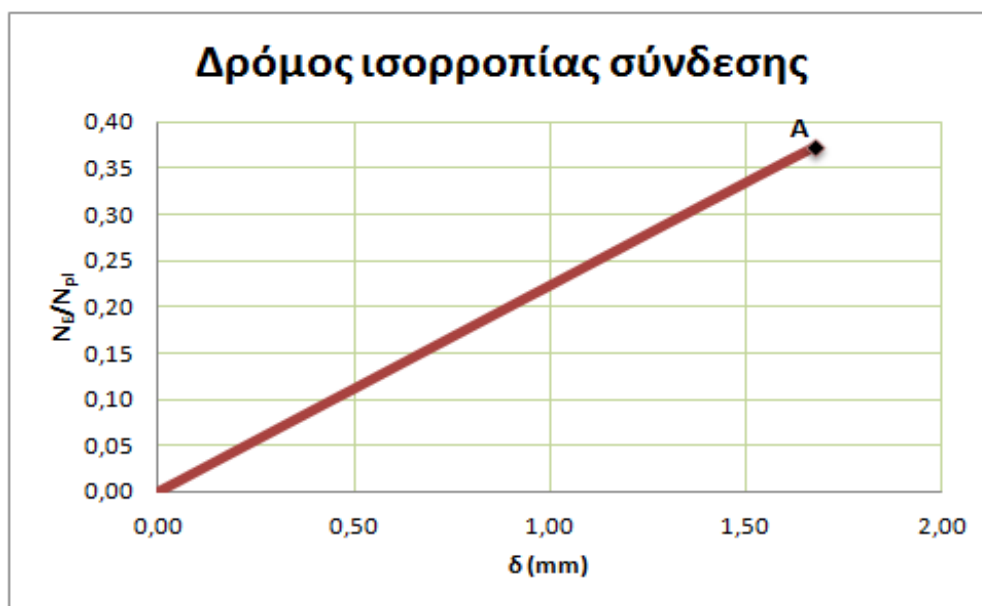
Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2, στην περίπτωση της κοχλιωτής σύνδεσης κοίλης τετραγωνικής διατομής μέσω μετωπικών πλακών διακρίνουμε τρεις κατηγορίες συμπεριφοράς της σύνδεσης ανάλογα με τη δυσκαμψία της, τη συμπεριφορά με πλάκα μεγάλου, ενδιάμεσου και μικρού πάχους. Σε αυτές τις τρεις κατηγορίες συμπεριφοράς της σύνδεσης αντιστοιχούν τρεις πιθανές μορφές αστοχίας:

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

Στις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκαν και οι τρεις μορφές αστοχίας. Παρακάτω, θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τα αποτελέσματα τριών περιπτώσεων που ξεχωρίσαμε από το σύνολο των εξεταζόμενων συνδέσεων, ώστε να διακρίνουμε ακόμα καλύτερα την συμπεριφορά της σύνδεσης σε κάθε μία από τις τρεις κατηγορίες που αναφέρθηκαν. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί το σύνολο των αποτελεσμάτων πιο επιγραμματικά, με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων.

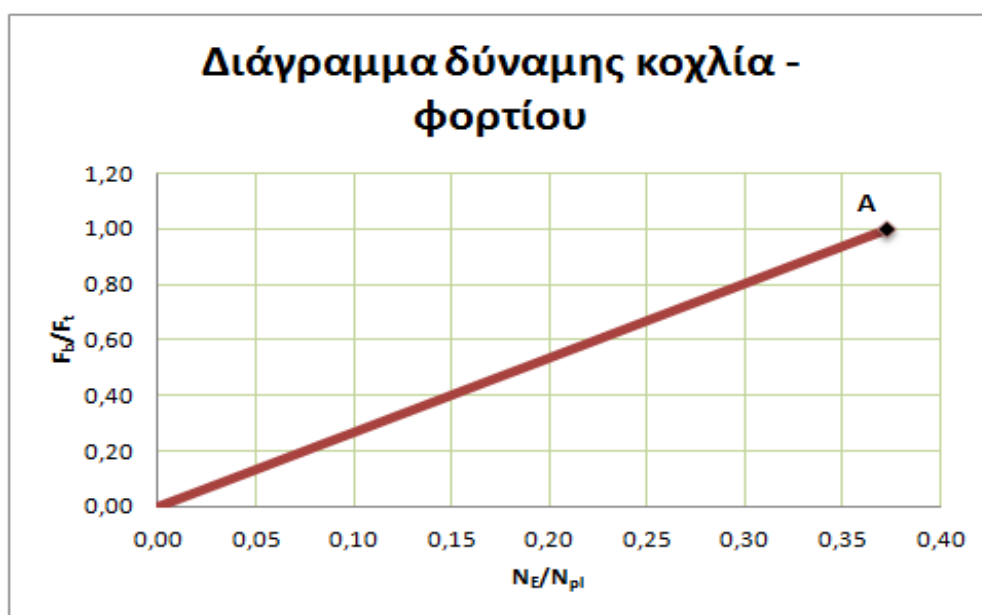
#### 3.3.3.1 Αστοχία λόγω διαρροής των κοχλιών

Σε αυτή την κατηγορία θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της σύνδεσης με διατομή κοιλοδοκού SHS 120 x 10, κοχλίες M 16 και πάχος πλακών  $t = 24 \text{ mm}$ , δηλαδή  $t/d = 1,50$ . Στο σχήμα 3.21 φαίνεται ο δρόμος ισορροπίας αυτής της σύνδεσης, δηλαδή το διάγραμμα του λόγου του φορτίου  $N_E$  προς την εφελκυστική αντοχή  $N_{pl}$  της διατομής της κοιλοδοκού συναρτήσει της μετατόπισης  $\delta$  ενός σημείου του άκρου της κοιλοδοκού, όπου εφαρμόστηκε το φορτίο, κατά τον άξονα  $z$ .

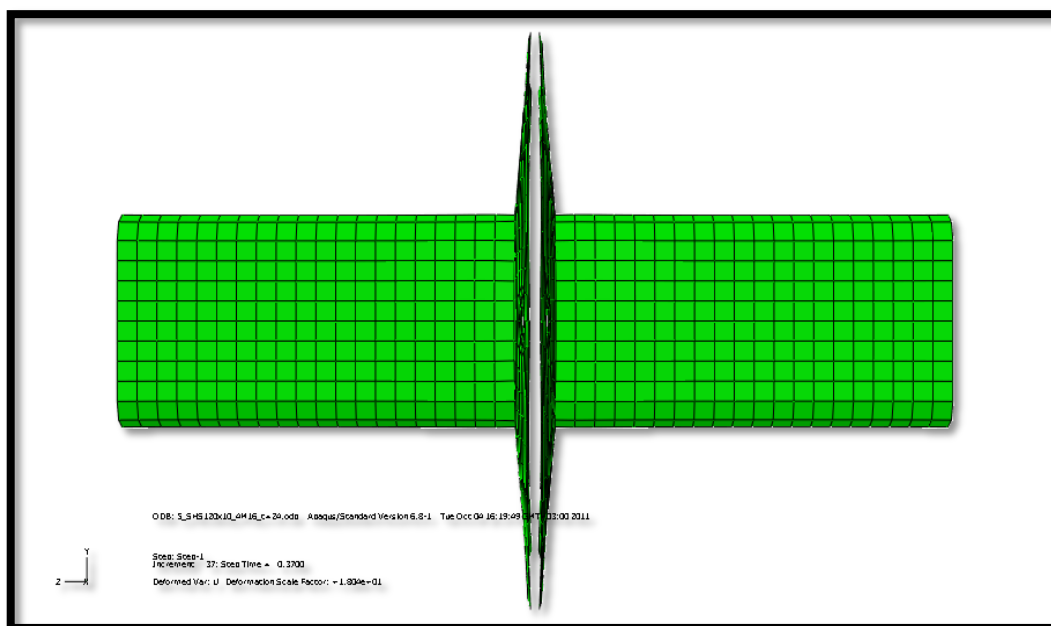


Σχ. 3.21. Δρόμος ισορροπίας σύνδεσης κοιλοδοκού SHS 120x10, με κοχλίες M16 και πάχος πλακών 24 mm

Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι η σύνδεση συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την αστοχία, όπου το εφελκυστικό φορτίο  $N_E$  είναι ίσο με  $0,37N_{pl}$  (σημείο A). Η σύνδεση παρουσιάζει, λοιπόν, μικρές παραμορφώσεις και έτσι διαπιστώνουμε ότι η αστοχία οφείλεται στη διαρροή των κοχλιών και όχι στην παραμόρφωση των μετωπικών πλακών. Βλέπουμε παρακάτω, στο σχήμα 3.22, το διάγραμμα του λόγου της εφελκυστικής δύναμης  $F_b$  που δέχονται οι κοχλίες προς την εφελκυστική αντοχή  $F_t$  των κοχλιών συναρτήσεως του λόγου του φορτίου  $N_E$  προς την εφελκυστική αντοχή  $N_{pl}$  της διατομής της κοιλοδοκού, καθώς και την εικόνα παραμορφώσεων της σύνδεσης στο σχήμα 3.23.

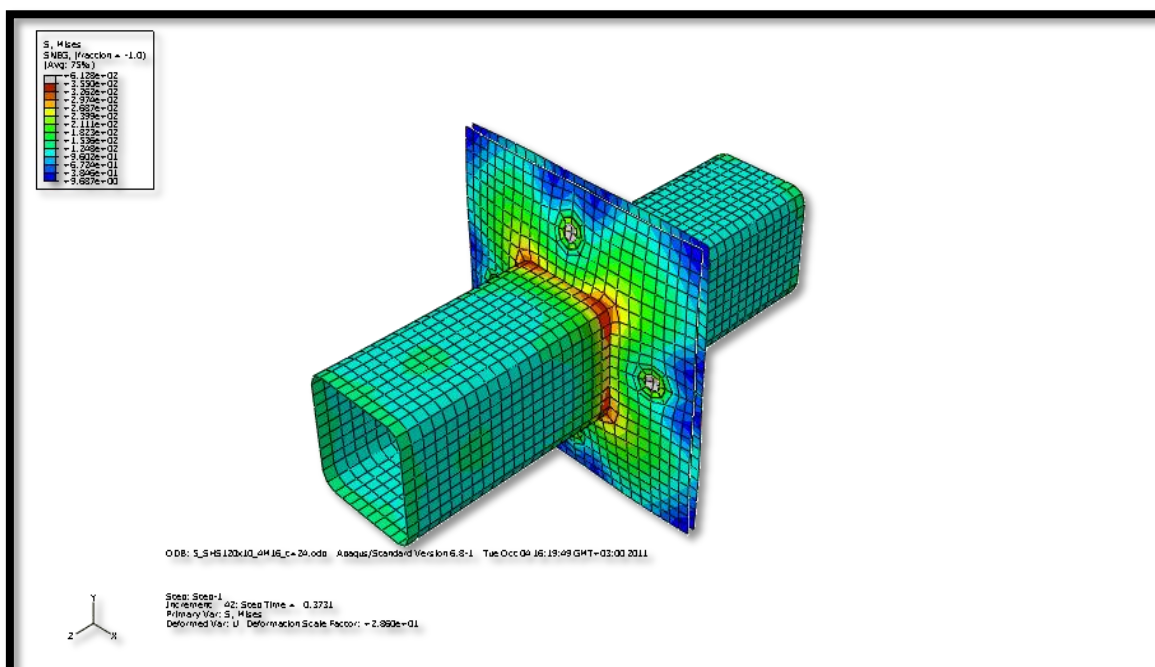


Σχ. 3.22. Διάγραμμα δύναμης κοχλία – φορτίου σε σύνδεση κοιλοδοκού SHS 120x10, με κοχλίες M16 και πάχος πλακών 24 mm

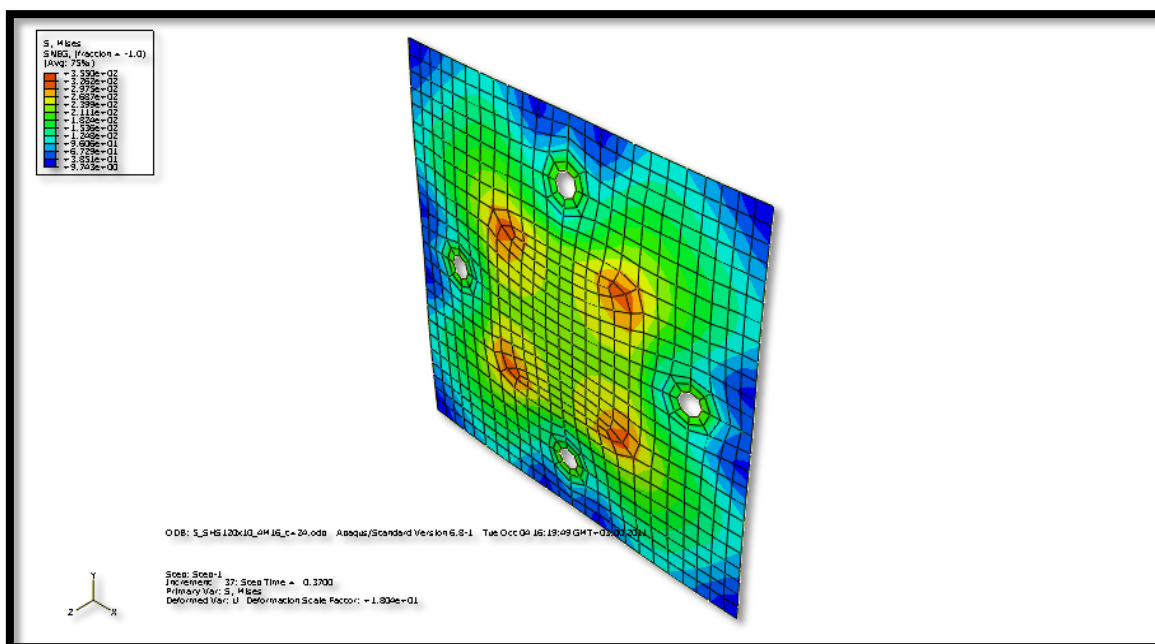


Σχ. 3.23. Εικόνα παραμορφώσεων σύνδεσης – πλάγια όψη

Από την εικόνα του σχήματος 3.23 παρατηρούμε ότι οι μετωπικές πλάκες ανήκουν στην κατηγορία των πλακών μεγάλου πάχους που αναφέραμε στο κεφάλαιο 2. Αυτό σημαίνει ότι παραμορφώνονται ελάχιστα και δεν σχηματίζεται σε αυτές πλαστικός μηχανισμός, αλλά κινούνται σαν στερεό σώμα. Αυτό το διαπιστώνουμε και από την εικόνα των τάσεων von Mises των σχημάτων 3.24 και 3.25, όπου διαπιστώνουμε ότι οι πλάκες δεν έχουν πλαστικοποιηθεί.



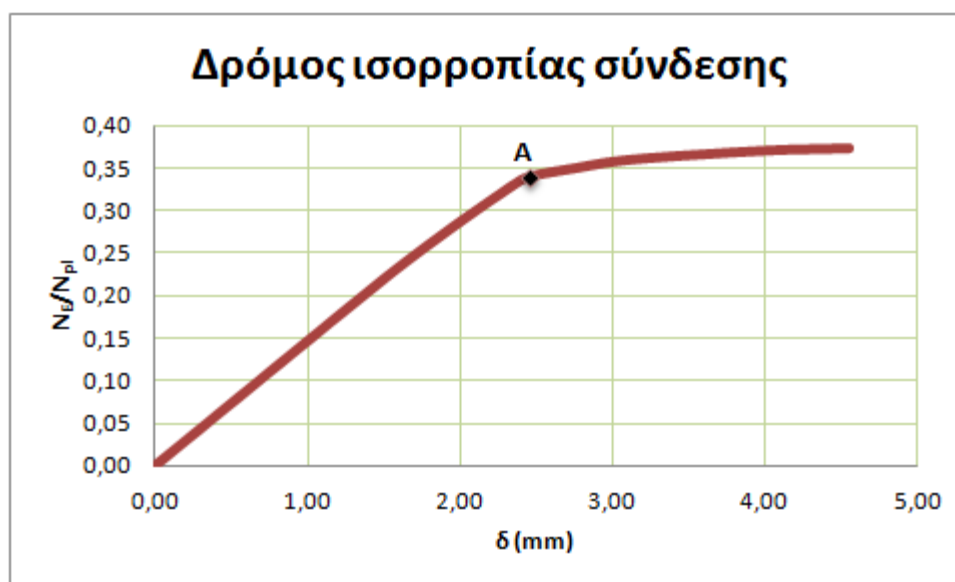
Σχ. 3.24. Τάσεις von Mises σύνδεσης με μέγιστη τάση  $f_y$  κατά την αστοχία (σημείο A –  $0,37 N_{pl}$ )



Σχ. 3.25. Τάσεις von Mises πλάκας με μέγιστη τάση  $f_y$  κατά την αστοχία (σημείο A –  $0,37 N_{pl}$ )

### 3.3.3.2 Αστοχία λόγω ταυτόχρονης παραμόρφωσης της πλάκας και διαρροής των κοχλιών

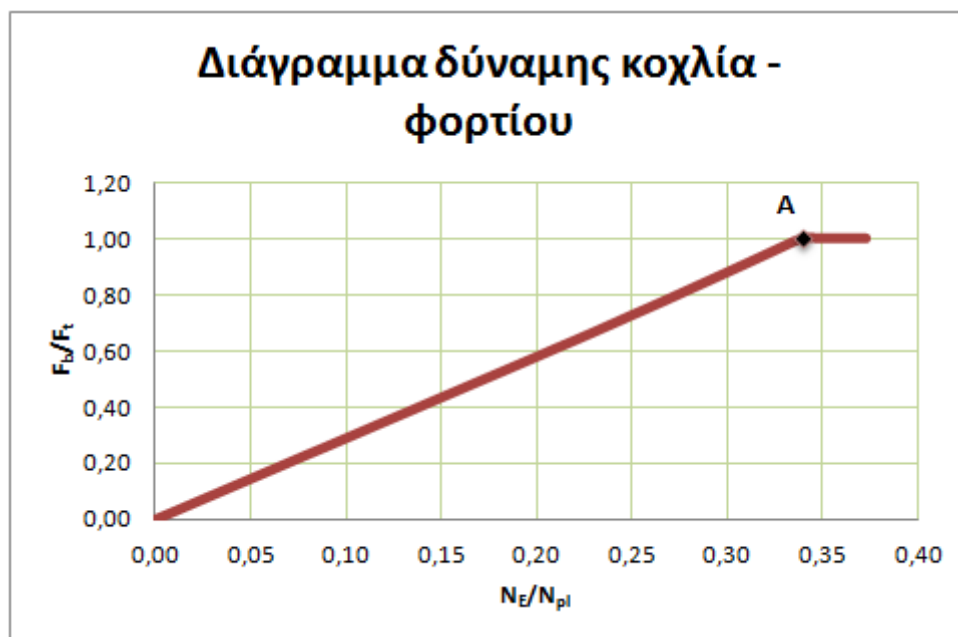
Μία σύνδεση αυτής της κατηγορίας που εξετάσαμε είναι αυτή με διατομή κοιλοδοκού SHS 120 x 10, κοχλίες M 16 και πάχος πλακών  $t = 16 \text{ mm}$ , δηλαδή  $t/d = 1,00$ . Ο δρόμος ισορροπίας για τη συγκεκριμένη σύνδεση φαίνεται στο σχήμα 3.26.



Σχ. 3.26. Δρόμος ισορροπίας σύνδεσης κοιλοδοκού SHS 120x10, με κοχλίες M16 και πάχος πλακών 16 mm

Από το δρόμο ισορροπίας του σχήματος 3.26 διαπιστώνουμε ότι η δυσκαμψία της σύνδεσης μειώνεται για εφελκυστικό φορτίο  $N_E$  ίσο με  $0,34N_{pl}$  (σημείο A). Βλέπουμε παρακάτω, στο σχήμα 3.27, το διάγραμμα του λόγου της εφελκυστικής δύναμης  $F_b$  που

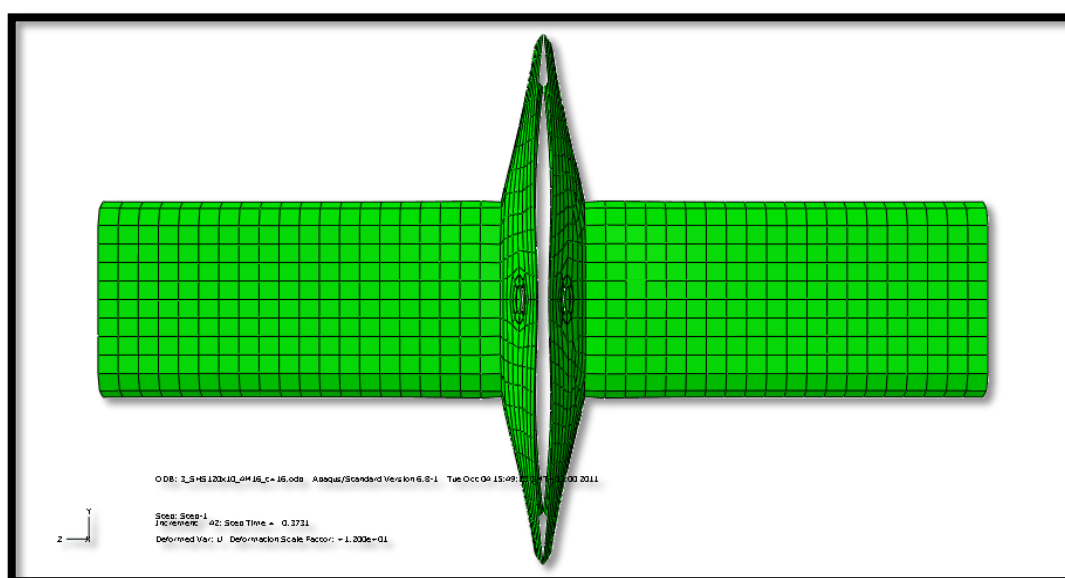
δέχονται οι κοχλίες προς την εφελκυστική αντοχή  $F_t$  των κοχλιών συναρτήσει του λόγου του φορτίου  $N_E$  προς την εφελκυστική αντοχή  $N_{pl}$  της διατομής της κοιλοδοκού.



Σχ. 3.27. Διάγραμμα δύναμης κοχλία – φορτίου σε σύνδεση κοιλοδοκού SHS 120x10, με κοχλίες M16 και πάχος πλακών 16 mm

Από τα διαγράμματα των σχημάτων 3.26 και 3.27 παρατηρούμε ότι όταν βλέπουμε έντονη πτώση στο δρόμο ισορροπίας της σύνδεσης (σημείο A) ταυτόχρονα, εκείνη τη χρονική στιγμή, διαρρέουν και οι κοχλίες (για  $N_E = 0,34N_{pl}$ ). Έτσι διαπιστώνουμε ότι η μορφή αστοχίας της εν λόγω σύνδεσης είναι η ταυτόχρονη παραμόρφωση των πλακών και διαρροή των κοχλιών.

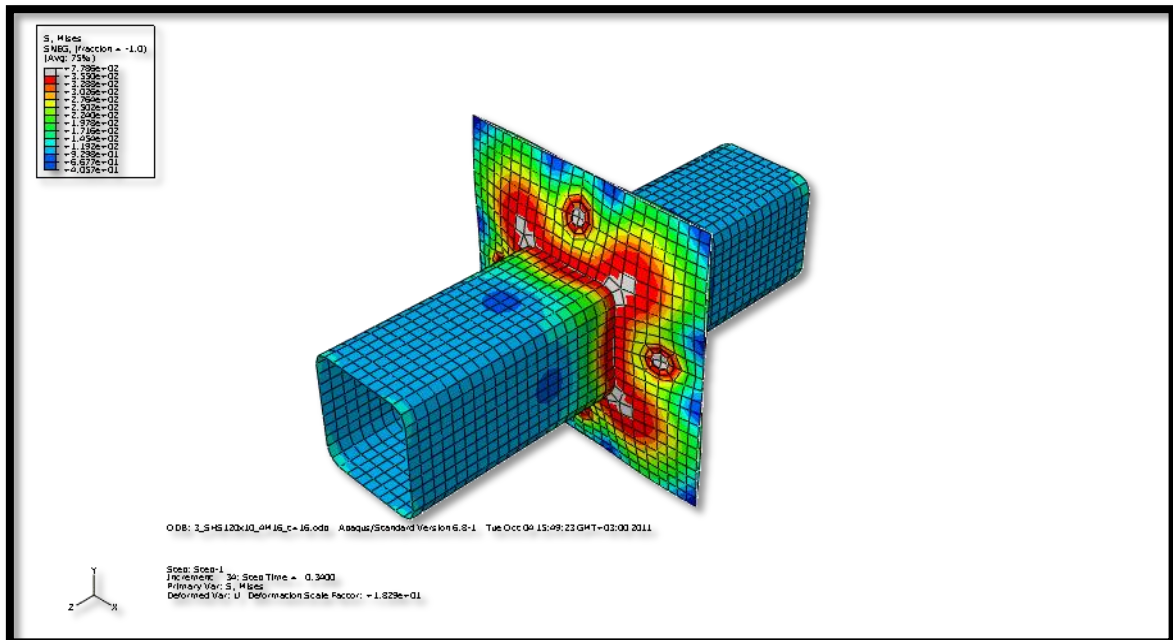
Στη συνέχεια, φαίνεται στο σχήμα 3.28 η εικόνα των παραμορφώσεων της σύνδεσης:



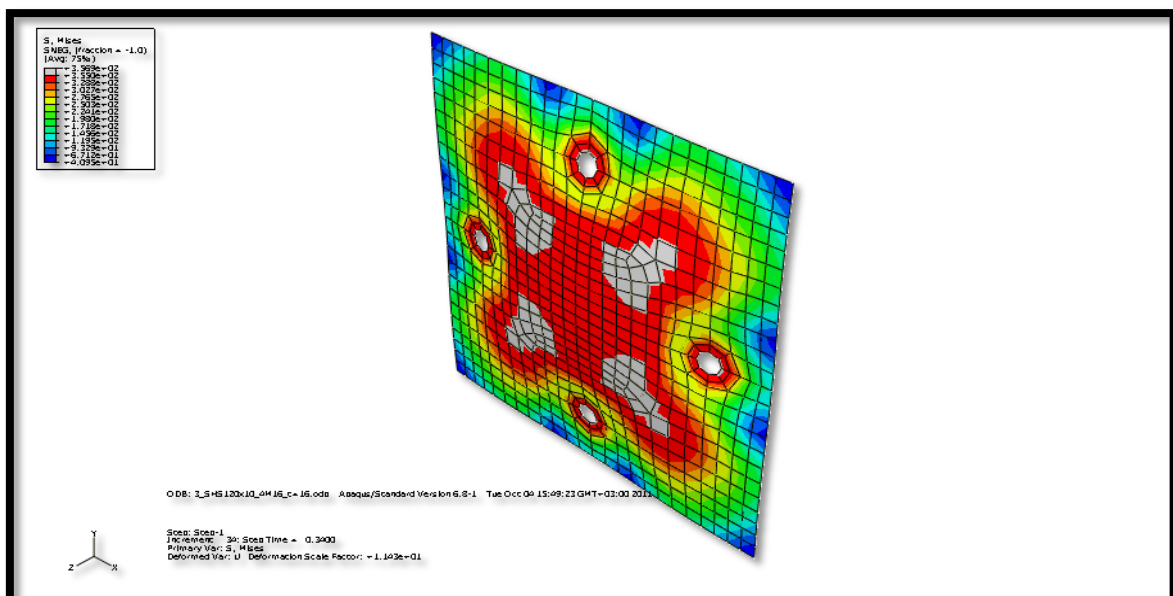
Σχ. 3.28. Εικόνα παραμορφώσεων σύνδεσης – Πλάγια όψη

Παρατηρούμε, από το σχήμα 3.28, ότι οι παραμορφώσεις της πλάκας ακολουθούν τη μορφή παραμόρφωσης μιας πλάκας ενδιάμεσου πάχους, στην οποία δημιουργείται μηχανισμός με δύο πλαστικές αρθρώσεις (βλ. σχήμα 2.15).

Παρακάτω απεικονίζονται οι τάσεις της σύνδεσης και, στη συνέχεια, μόνο της πλάκας, τη στιγμή της αστοχίας (σημείο A):



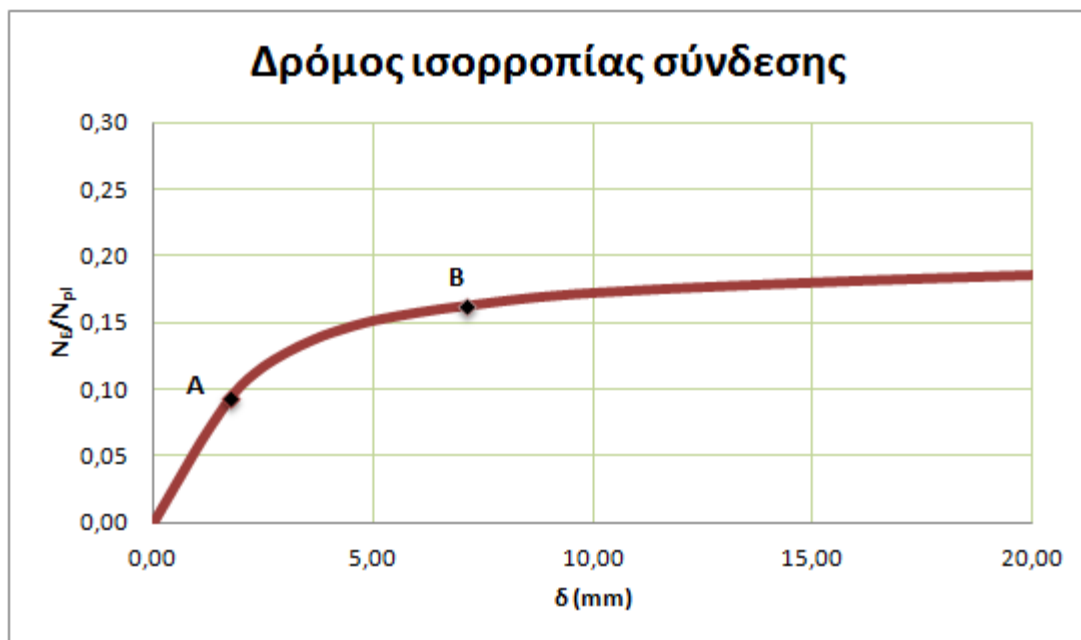
Σχ. 3.29. Τάσεις von Mises σύνδεσης με μέγιστη τάση  $f_y$  κατά την αστοχία (σημείο A –  $0,34N_{pl}$ )



Σχ. 3.30. Τάσεις von Mises πλάκας με μέγιστη τάση  $f_y$  κατά την αστοχία (σημείο A –  $0,34N_{pl}$ )

### 3.3.3.3 Αστοχία λόγω μεγάλης παραμόρφωσης της πλάκας

Από τις συνδέσεις που αναλύθηκαν και ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, θα αναφερθούμε στη σύνδεση με διατομή κοιλοδοκού SHS 120 x 10, κοχλίες M 16 και πάχος πλακών  $t = 8 \text{ mm}$ , δηλαδή  $t/d = 0,50$ . Ο δρόμος ισορροπίας αυτής της σύνδεσης είναι ο παρακάτω:

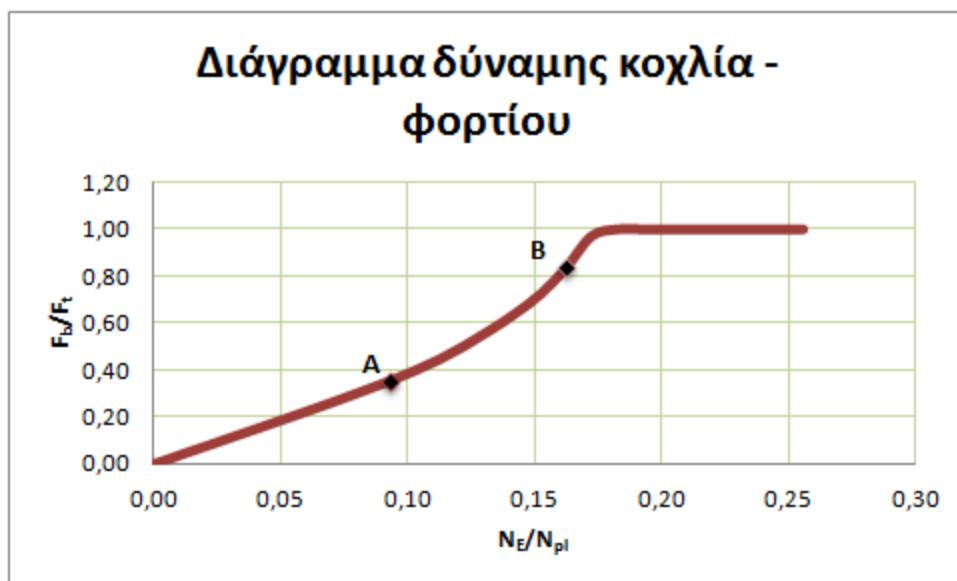


Σχ. 3.31. Δρόμος ισορροπίας σύνδεσης κοιλοδοκού SHS 120x10, με κοχλίες M16 και πάχος πλακών 8 mm

Από τον παραπάνω δρόμο ισορροπίας παρατηρούμε ότι η δυσκαμψία της σύνδεσης αρχίζει να μειώνεται για εφελκυστικό φορτίο  $N_E$  περίπου ίσο με  $0,10N_{pl}$  και, τελικώς, μεγάλη πτώση της δυσκαμψίας έχουμε περίπου για  $N_E = 0,16N_{pl}$ . Για αυτή την τιμή του φορτίου θεωρούμε ότι συμβαίνει και η αστοχία της σύνδεσης αυτής.

Στη συνέχεια, βλέπουμε στο σχήμα 3.32 το διάγραμμα του λόγου της εφελκυστικής δύναμης  $F_b$  που δέχονται οι κοχλίες προς την εφελκυστική αντοχή των κοχλιών  $F_t$  συναρτήσει του λόγου του φορτίου  $N_E$  προς την εφελκυστική αντοχή  $N_{pl}$  της διατομής της κοιλοδοκού:



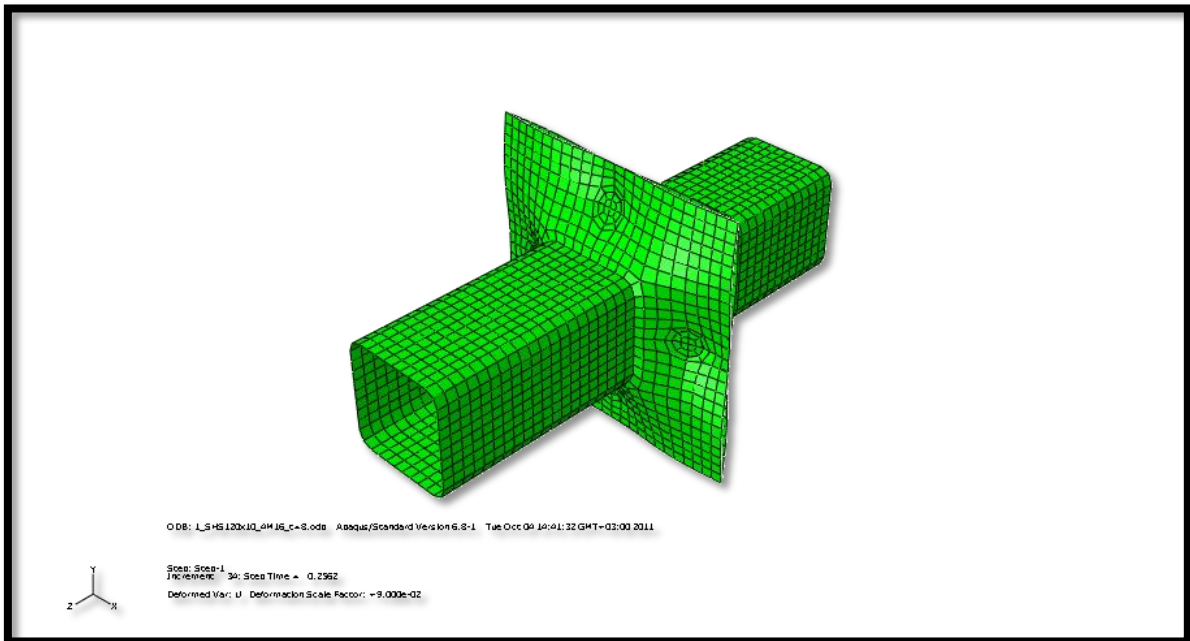


Σχ. 3.32. Διάγραμμα δύναμης κοχλία – φορτίου σε σύνδεση κοιλοδοκού SHS 120x10, με κοχλίες M16 και πάχος πλακών 8 mm

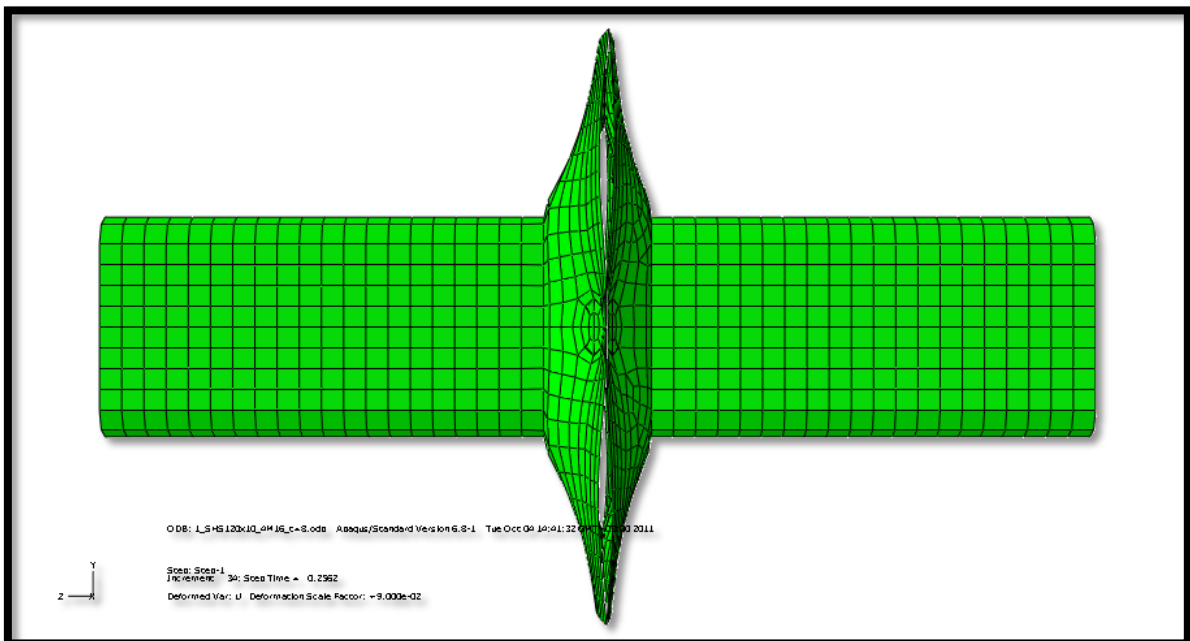
Από το παραπάνω διάγραμμα, που αφορά στη συμπεριφορά των κοχλιών M 16 στη συγκεκριμένη σύνδεση, συμπεραίνουμε ότι η δύναμη των κοχλιών φτάνει την εφελκυστική της αντοχή για ασκούμενο φορτίο στη σύνδεση  $N_E = 0,18N_{pl}$ . Η δυσκαμψία της σύνδεσης όμως έχει μειωθεί αισθητά για φορτίο  $N_E = 0,16N_{pl}$ , όπως αναφέραμε παραπάνω. Συνεπώς, οι κοχλίες δεν συμμετέχουν στην αστοχία της σύνδεσης και από  $0,16N_{pl}$  και μετά το παραπάνω διάγραμμα είναι πλασματικό. Η μορφή αστοχίας αυτής της σύνδεσης, λοιπόν, είναι η μεγάλη παραμόρφωση των μετωπικών πλακών.



Στα σχήματα 3.33 και 3.34 παρακάτω βλέπουμε τις εικόνες των παραμορφώσεων της σύνδεσης:

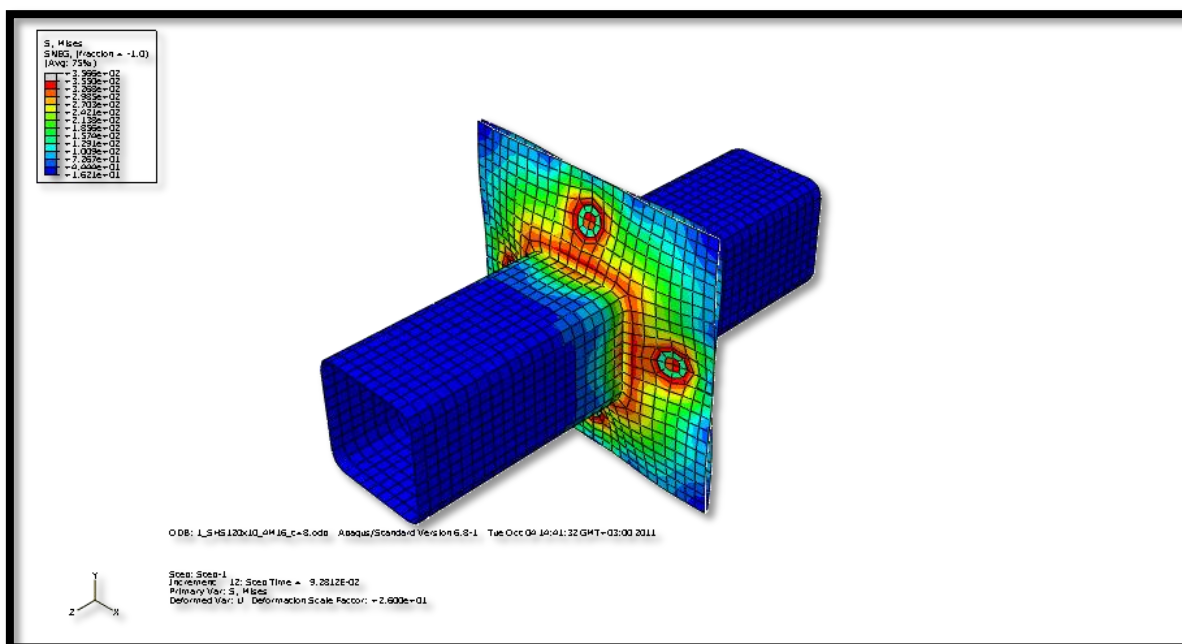


Σχ. 3.33. Εικόνα παραμορφώσεων σύνδεσης

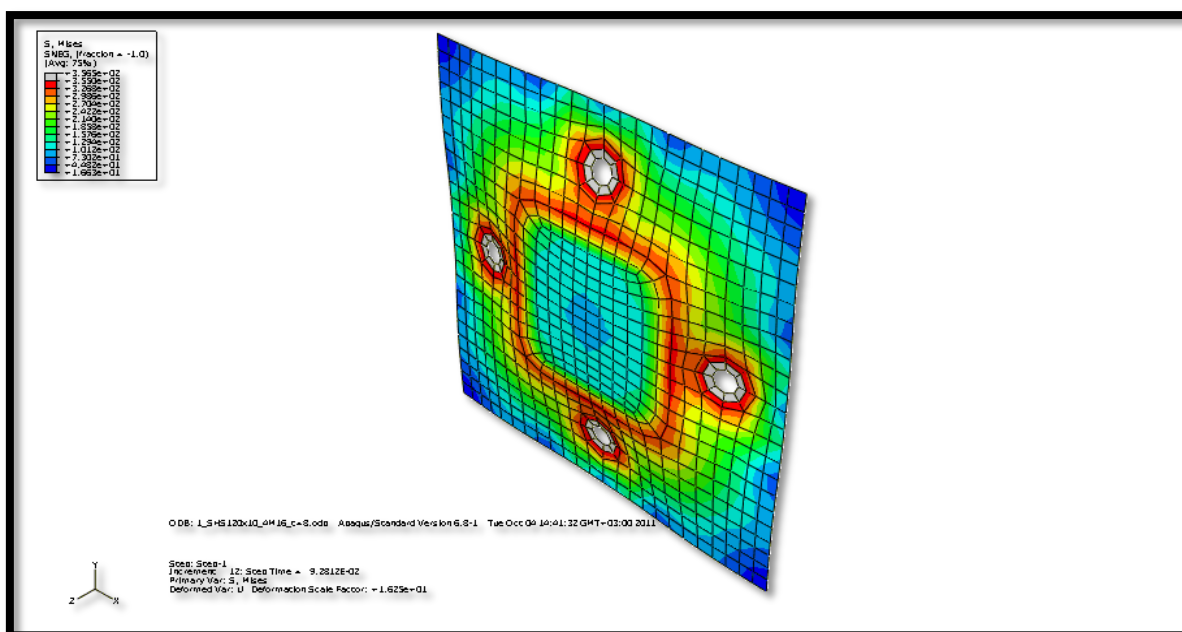


Σχ. 3.34. Εικόνα παραμορφώσεων σύνδεσης – Πλάγια όψη

Παρατηρούμε από το σχήμα 3.34 ότι οι παραμορφώσεις της πλάκας ακολουθούν τη μορφή παραμόρφωσης μιας λεπτής πλάκας, στην οποία δημιουργείται μηχανισμός με τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις (βλ. σχήμα 2.17). Παρακάτω βλέπουμε τις τάσεις της σύνδεσης και στη συνέχεια μόνο της πλάκας για ένα σημείο πριν (σημείο A) την πτώση της δυσκαμψίας του δρόμου ισοροπίας.

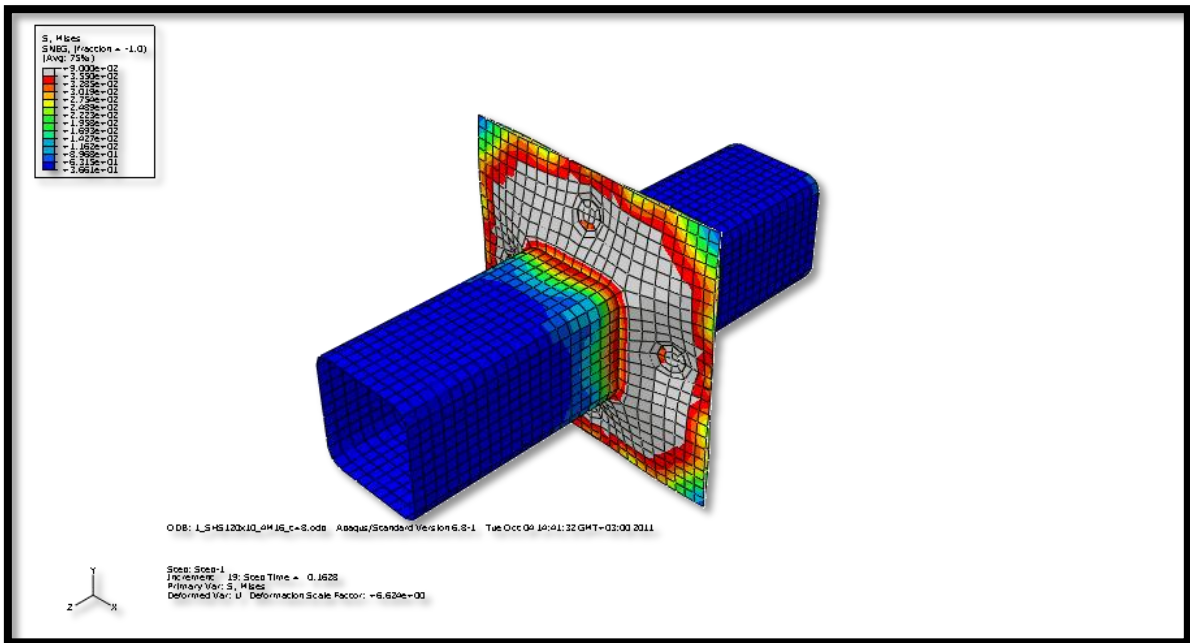


Σχ. 3.35. Τάσεις von Mises σύνδεσης με μέγιστη τάση  $f_y$  (σημείο A –  $0,09N_{pl}$ )

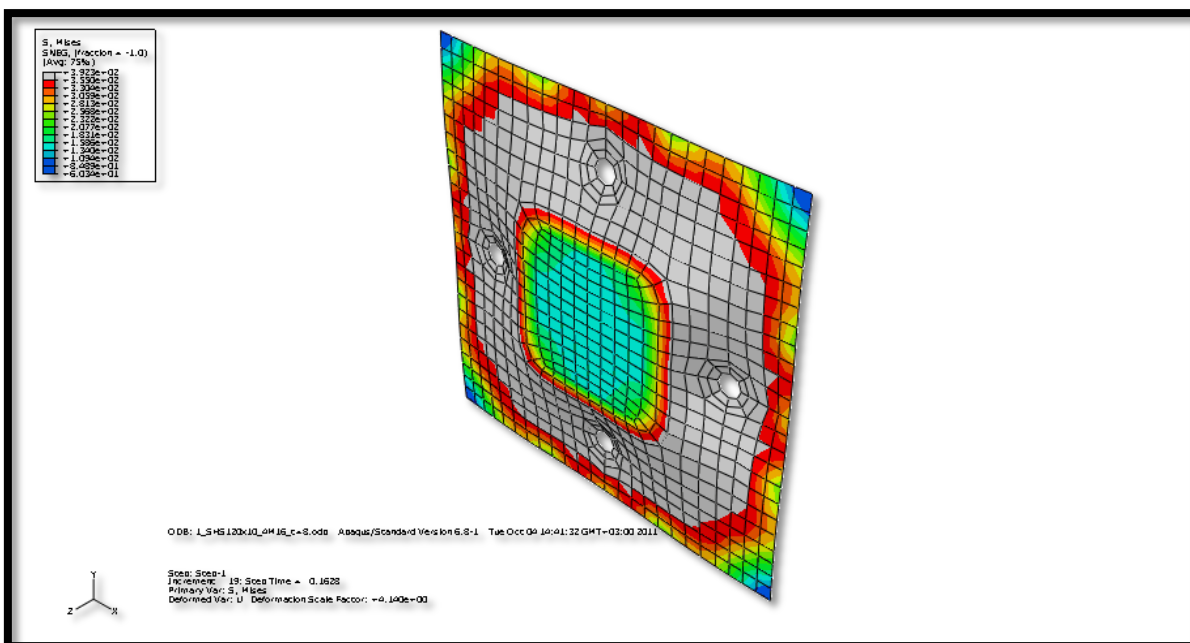


Σχ. 3.36. Τάσεις von Mises πλάκας με μέγιστη τάση  $f_y$  (σημείο A –  $0,09N_{pl}$ )

Στα σχήματα 3.37 και 3.38 απεικονίζονται οι τάσεις von Mises στην περιοχή της πλάκας για ένα σημείο μετά (σημείο αστοχίας B) την πτώση της δυσκαμψίας του δρόμου ισοροπίας του σχήματος 3.31.



Σχ. 3.37. Τάσεις von Mises σύνδεσης με μέγιστη τάση  $f_y$  κατά την αστοχία (σημείο B –  $0,16N_{pl}$ )



Σχ. 3.38. Τάσεις von Mises πλάκας με μέγιστη τάση  $f_y$  κατά την αστοχία (σημείο B –  $0,16N_{pl}$ )

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων των υπόλοιπων συνδέσεων προέκυψαν ομοίως με αυτά των υποπαράγραφων 3.3.3.1, 3.3.3.2 και 3.3.3.3 που μόλις αναφέρθηκαν.

### 3.3.3.4 Συνολικά αποτελέσματα αναλύσεων

Σε αυτή την υποπαράγραφο θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα όλων των αναλύσεων. Στους πίνακες 3.2 και 3.3 παρακάτω φαίνονται οι τιμές των αντοχών των συνδέσεων βάσει της αριθμητικής ανάλυσης, με τη μορφή λόγου του εφελκυστικού φορτίου αστοχίας προς την εφελκυστική αντοχή της κοιλοδοκού  $N_E/N_{pl}$ , καθώς και η μορφή αστοχίας κάθε σύνδεσης.

Αριθμός ανάλυσης	Διάμετρος κοχλιών $d$ (mm)	Λόγος $t/d$	Αντοχή βάσει αριθμητικής ανάλυσης $N_E/N_{pl}$	Μορφή αστοχίας*
1	12	0,50	0,17	Πλ & Κοχ
2	12	0,75	0,31	Πλ & Κοχ
3	12	1,00	0,31	Πλ & Κοχ
4	12	1,25	0,34	Κοχλίες
5	12	1,50	0,38	Κοχλίες
6	12	1,75	0,38	Κοχλίες
7	16	0,50	0,28	Πλάκες
8	16	0,75	0,54	Πλ & Κοχ
9	16	1,00	0,64	Πλ & Κοχ
10	16	1,25	0,71	Κοχλίες
11	16	1,50	0,71	Κοχλίες
12	16	1,75	0,71	Κοχλίες
13	20	0,50	0,35	Πλάκες
14	20	0,75	0,67	Πλ & Κοχ
15	20	1,00	0,81	Πλ & Κοχ
16	20	1,25	0,86	Κοχλίες
17	20	1,50	0,86	Κοχλίες
18	20	1,75	0,86	Κοχλίες
19	22	0,50	0,20	Πλάκες
20	22	0,75	0,39	Πλ & Κοχ
21	22	1,00	0,48	Πλ & Κοχ
22	22	1,25	0,49	Κοχλίες
23	22	1,50	0,49	Κοχλίες
24	22	1,75	0,49	Κοχλίες
25	24	0,50	0,29	Πλάκες
26	24	0,75	0,46	Πλ & Κοχ
27	24	1,00	0,56	Πλ & Κοχ
28	24	1,25	0,57	Κοχλίες
29	24	1,50	0,57	Κοχλίες
30	24	1,75	0,57	Κοχλίες

\* Πλάκες = 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

Πίν. 3.2. Αποτελέσματα ανάλυσης για συνδέσεις της διατομής SHS 120x5

Αριθμός ανάλυσης	Διάμετρος κοχλιών (mm)	Λόγος $t/d$	Αντοχή βάσει αριθμητικής ανάλυσης $N_E/N_{pl}$	Μορφή αστοχίας
31	12	0,50	0,08	Πλάκες
32	12	0,75	0,16	Πλ & Κοχ
33	12	1,00	0,17	Πλ & Κοχ
34	12	1,25	0,19	Κοχλίες
35	12	1,50	0,20	Κοχλίες
36	12	1,75	0,20	Κοχλίες
37	16	0,50	0,16	Πλάκες
38	16	0,75	0,30	Πλ & Κοχ
39	16	1,00	0,34	Πλ & Κοχ
40	16	1,25	0,37	Κοχλίες
41	16	1,50	0,37	Κοχλίες
42	16	1,75	0,37	Κοχλίες
43	20	0,50	0,26	Πλάκες
44	20	0,75	0,47	Πλ & Κοχ
45	20	1,00	0,57	Πλ & Κοχ
46	20	1,25	0,58	Κοχλίες
47	20	1,50	0,58	Κοχλίες
48	20	1,75	0,58	Κοχλίες
49	22	0,50	0,32	Πλάκες
50	22	0,75	0,58	Πλ & Κοχ
51	22	1,00	0,70	Πλ & Κοχ
52	22	1,25	0,72	Κοχλίες
53	22	1,50	0,72	Κοχλίες
54	22	1,75	0,72	Κοχλίες
55	24	0,50	0,43	Πλάκες
56	24	0,75	0,68	Πλ & Κοχ
57	24	1,00	0,82	Πλ & Κοχ
58	24	1,25	0,84	Κοχλίες
59	24	1,50	0,84	Κοχλίες
60	24	1,75	0,84	Κοχλίες

\* Πλάκες = 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

Πίν. 3.3. Αποτελέσματα ανάλυσης για συνδέσεις της διατομής SHS 120x10

Πρέπει να αναφερθεί ότι κατά την αριθμητική ανάλυση των συνδέσεων 13 έως 30 προέκυψε ως μορφή αστοχίας η πλαστικοποίηση της κοίλης διατομής SHS 120 x 5. Σε αυτή την περίπτωση δεν έχουμε τη δυνατότητα να πληροφορηθούμε για τη συμπεριφορά της σύνδεσης. Επομένως, για να αποφύγουμε αυτό το πρόβλημα και να επικεντρωθούμε στη σύνδεση, θεωρήσαμε ότι στις συνδέσεις αυτές η κοιλοδοκός έχει υπεραντοχή έναντι της σύνδεσης. Συγκεκριμένα, αυξήσαμε την ποιότητα του υλικού της κοιλοδοκού, ώστε σε καμία περίπτωση να μην θεωρηθεί ως κρίσιμη η κοιλοδοκός.

Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής της κοιλοδοκού SHS 120 x 5 ήταν:

για τις συνδέσεις 1 έως 12:  $N_{pl} = 795,20 \text{ kN}$

για τις συνδέσεις 13 έως 18:  $N_{pl} = 1030,40 \text{ kN}$

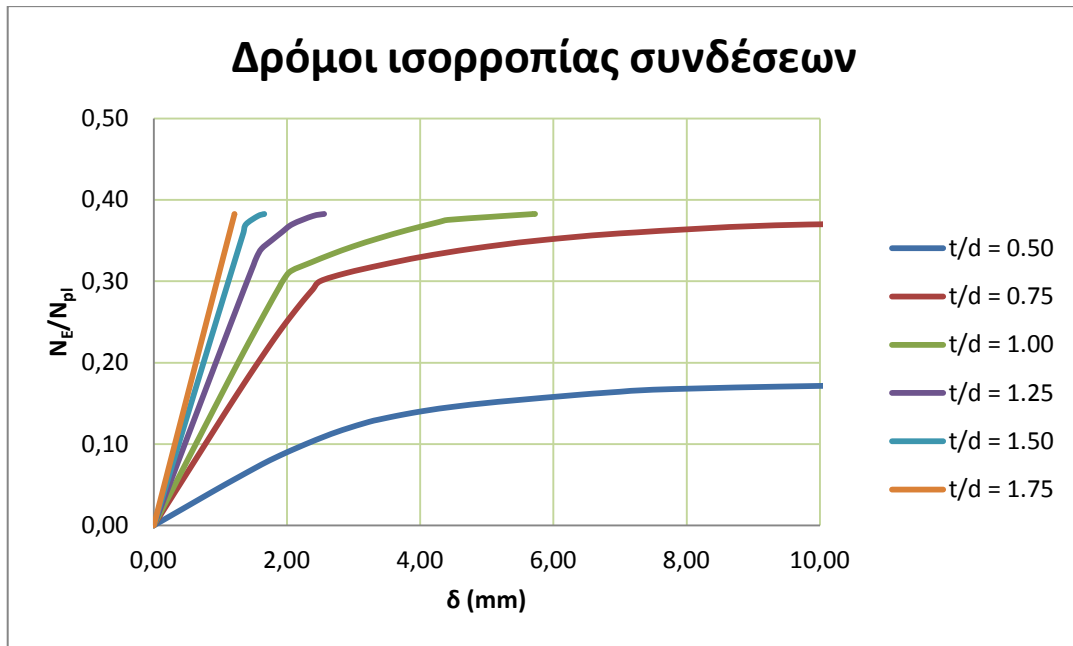
για τις συνδέσεις 19 έως 30:  $N_{pl} = 1030,40 \text{ kN}$ .

Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής της κοιλοδοκού SHS 120 x 10 ήταν:

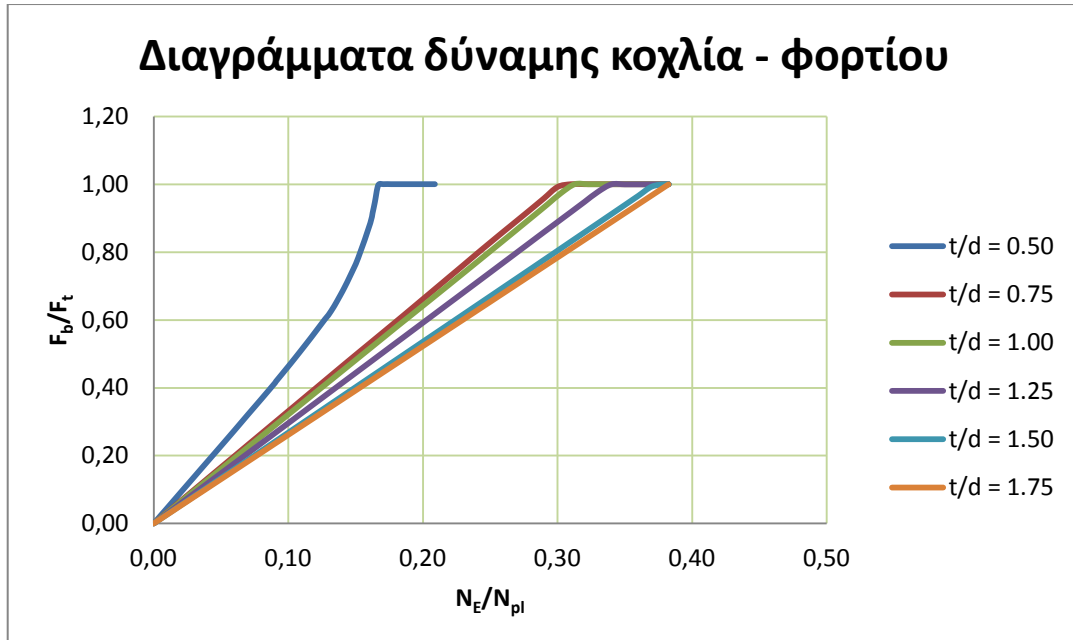
για τις συνδέσεις 31 έως 60:  $N_{pl} = 1522,95 \text{ kN}$ .

Παρατηρούμε, από τους πίνακες 3.2 και 3.3, ότι η μορφή αστοχίας για συνδέσεις με λόγο πάχους πλάκας προς διάμετρο κοχλιών  $t/d = 0,50$  είναι αστοχία λόγω μεγάλης παραμόρφωσης των μετωπικών πλακών σε όλες τις συνδέσεις εκτός από την σύνδεση 1 με κοχλίες M 12 και κοιλοδοκό SHS 120 x 5, όπου η μορφή αστοχίας είναι η ταυτόχρονη παραμόρφωση των πλακών και διαρροή των κοχλιών. Επίσης, όταν έχουμε λόγο  $t/d = 0,75$  και 1,00, προκύπτει, από την αριθμητική ανάλυση, ότι η μορφή αστοχίας σε κάθε σύνδεση με αυτούς τους λόγους είναι η ταυτόχρονη παραμόρφωση των πλακών και διαρροή των κοχλιών. Τέλος, βλέπουμε ότι για λόγο  $t/d$  μεγαλύτερο του 1,00 η μορφή αστοχίας των συνδέσεων είναι αποκλειστικά η διαρροή των κοχλιών.

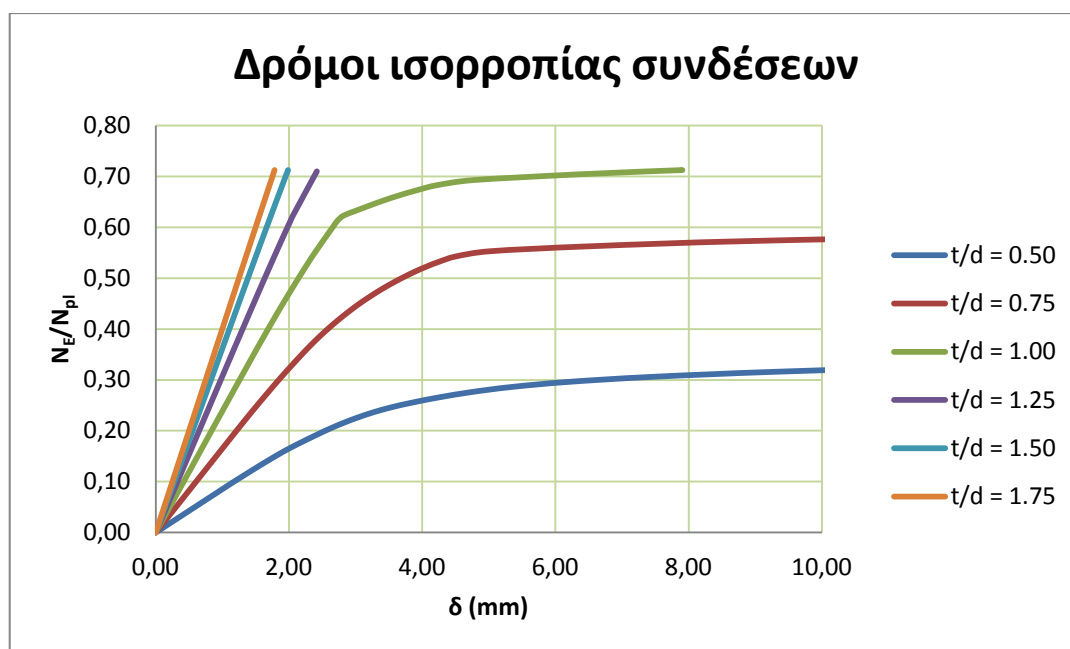
Παρακάτω, στα σχήματα 3.39 έως 3.58 απεικονίζονται οι δρόμοι ισορροπίας, καθώς και τα διαγράμματα του λόγου της εφελκυστικής δύναμης  $F_b$  που δέχονται οι κοχλίες προς την εφελκυστική αντοχή  $F_t$  των κοχλιών συναρτήσει του λόγου του φορτίου  $N_E$  προς την εφελκυστική αντοχή  $N_{pl}$  της διατομής της κοιλοδοκού, για κάθε μέγεθος κοχλίας και για τις περιπτώσεις λόγο πάχους πλάκας προς διάμετρο κοχλίας  $t/d = 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50$  και 1,75.



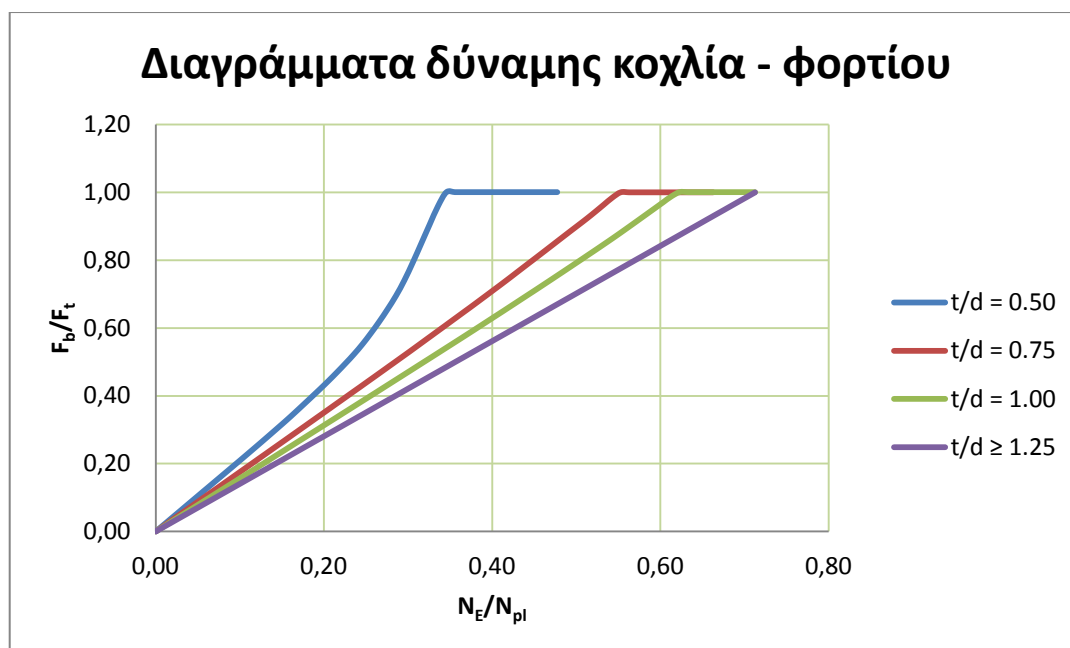
Σχ. 3.39. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M12 και διατομή SHS 120x5



Σχ. 3.40. Διαγράμματα δύναμης κοχλία - φορτίου για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M12 και διατομή SHS 120x5

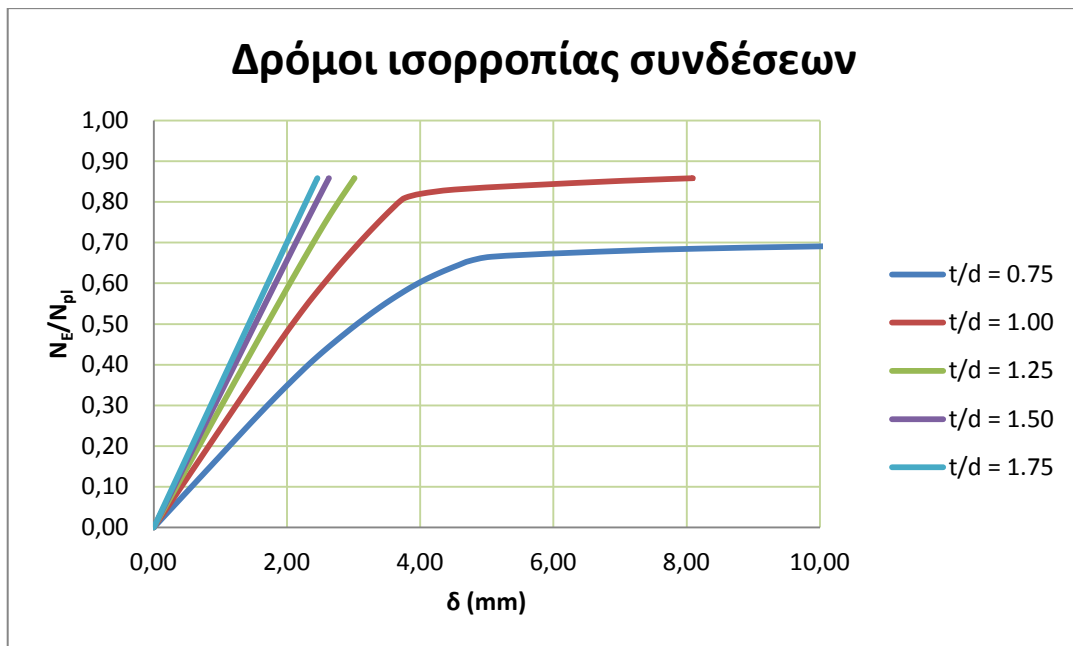


Σχ. 3.41. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M16 και διατομή SHS 120x5

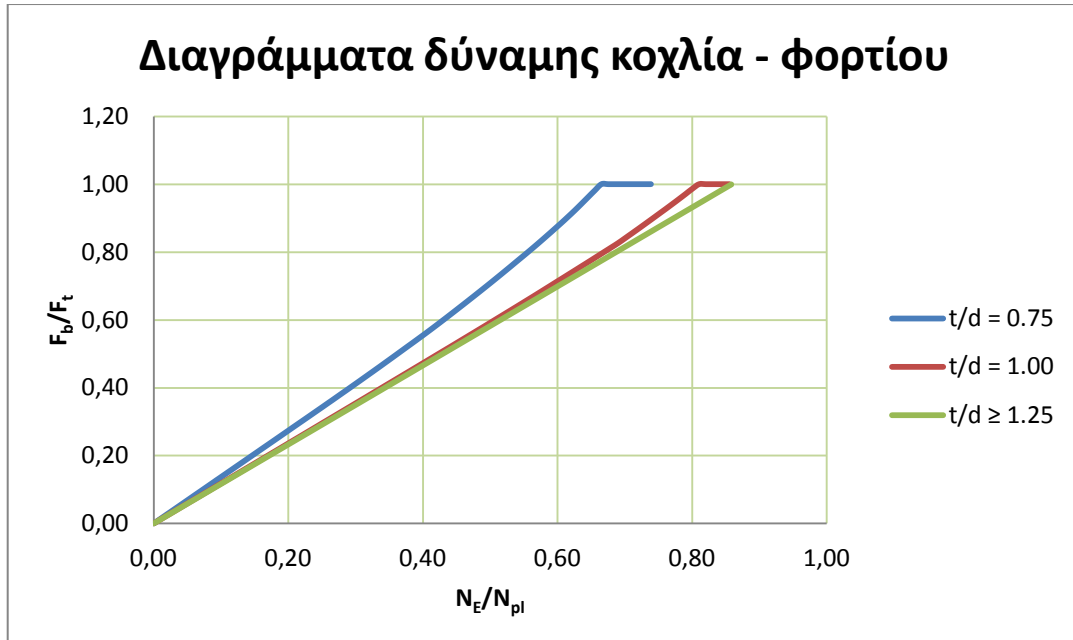


Σχ. 3.42. Διαγράμματα δύναμης κοχλία - φορτίου για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M16 και διατομή SHS 120x5

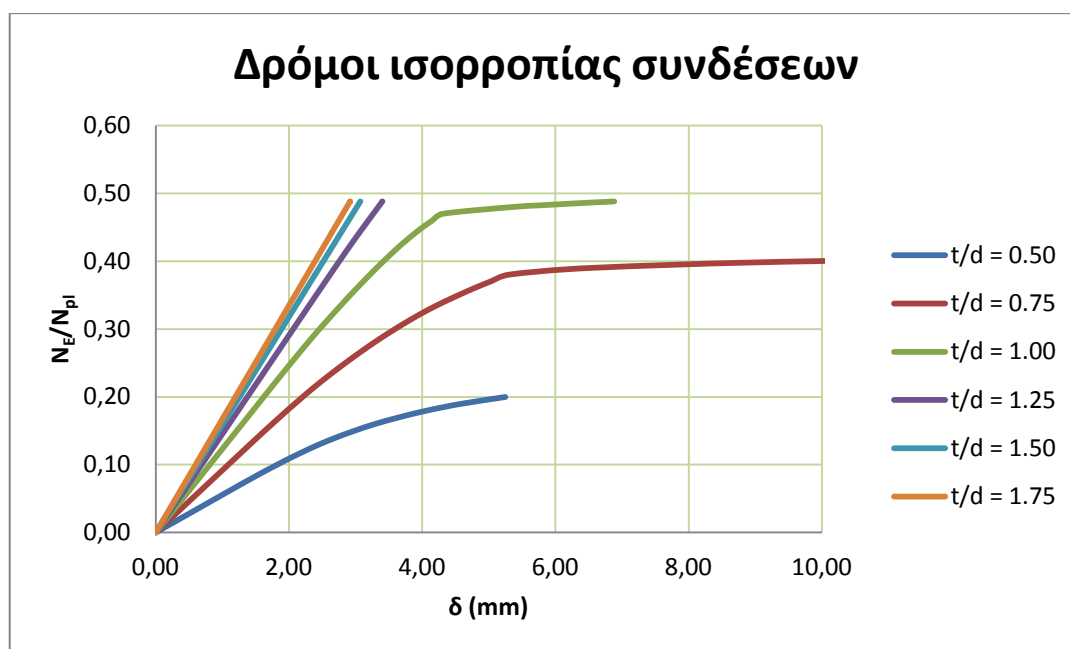




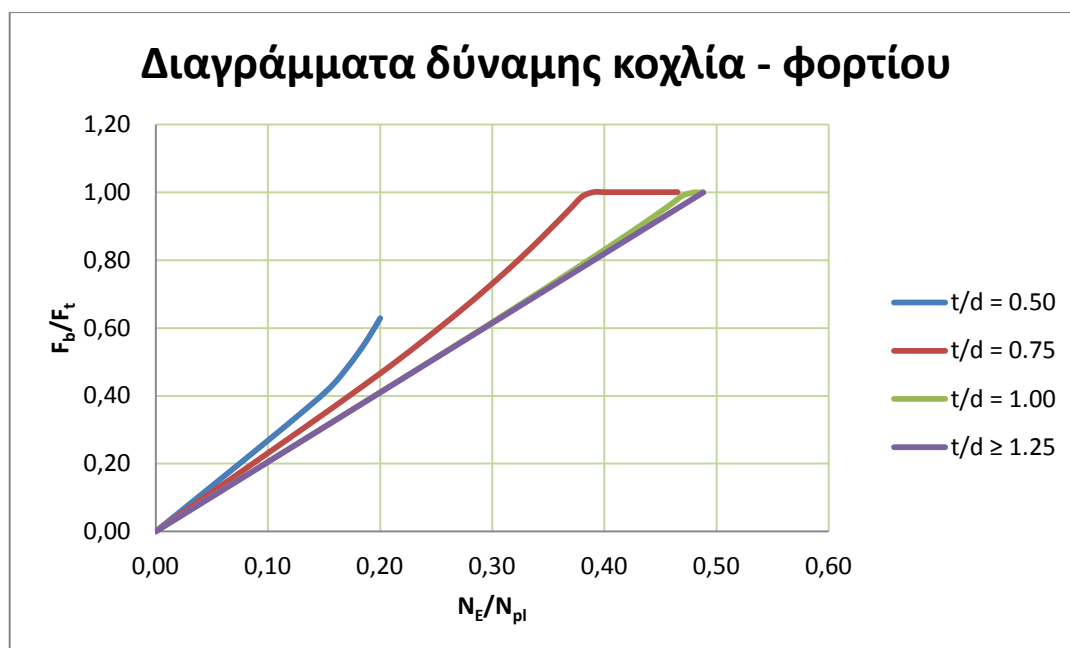
Σχ. 3.43. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M20 και διατομή SHS 120x5



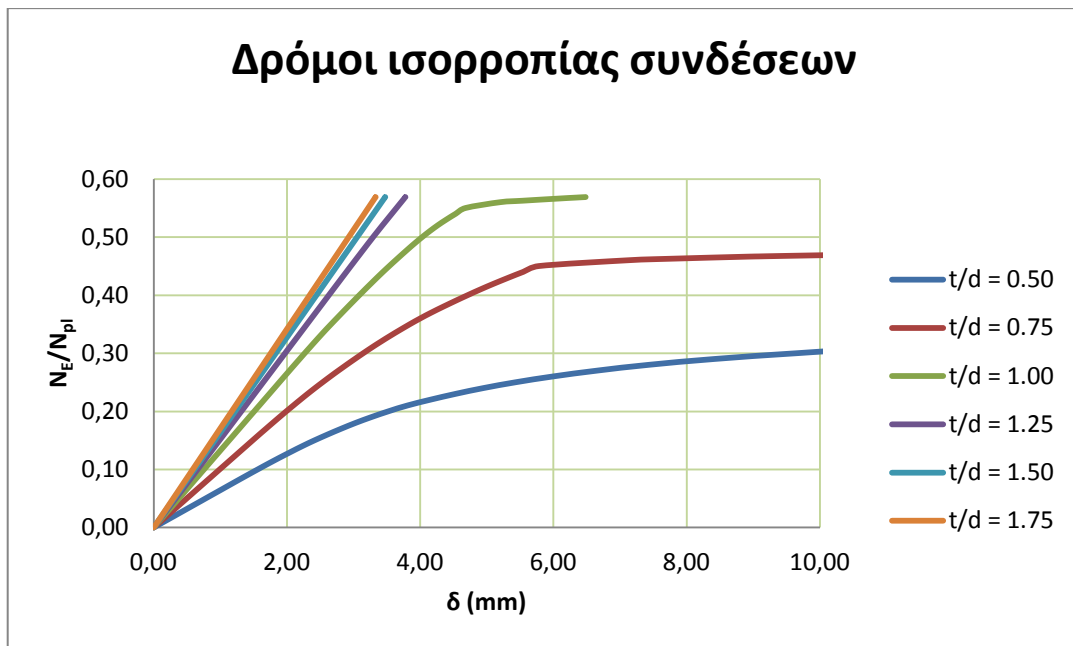
Σχ. 3.44. Διαγράμματα δύναμης κοχλία - φορτίου για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M20 και διατομή SHS 120x5



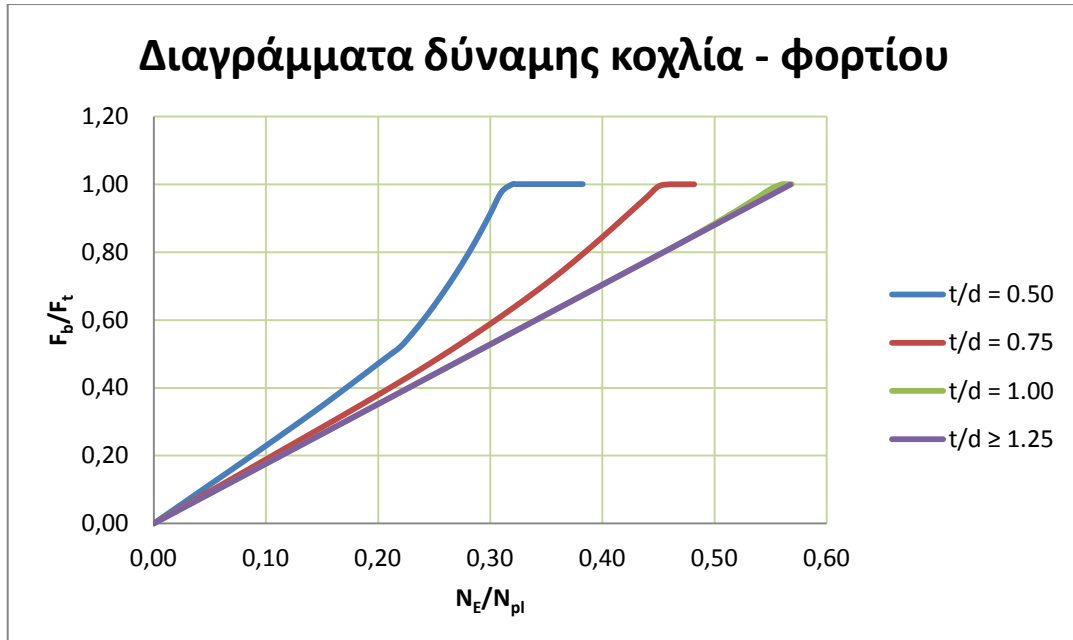
Σχ. 3.45. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M22 και διατομή SHS 120x5



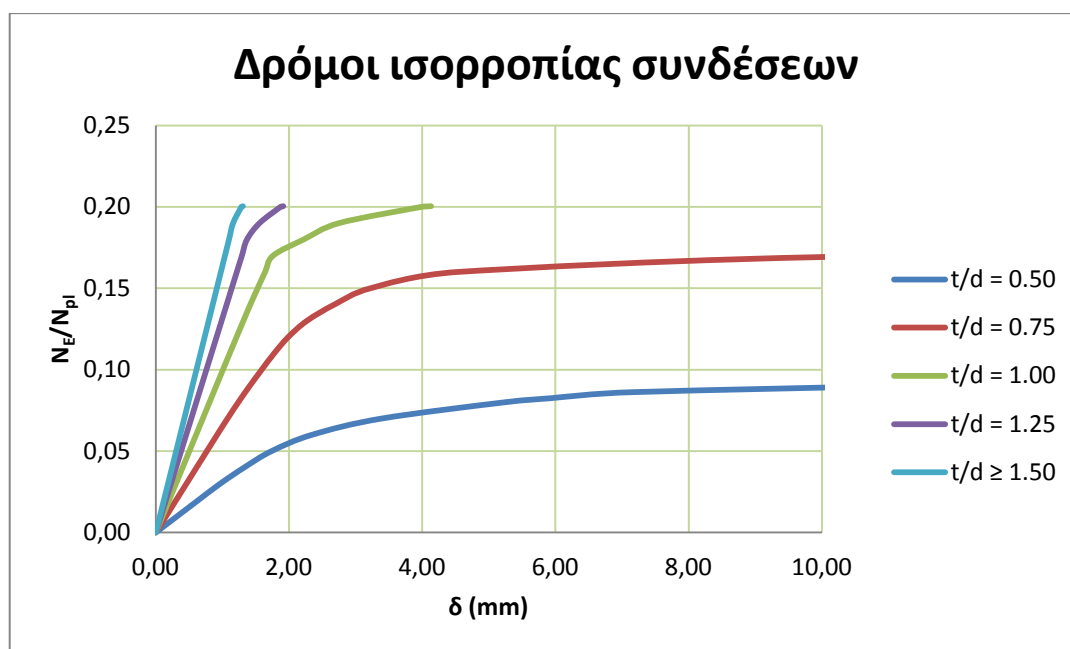
Σχ. 3.46. Διαγράμματα δύναμης κοχλία - φορτίου για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M22 και διατομή SHS 120x5



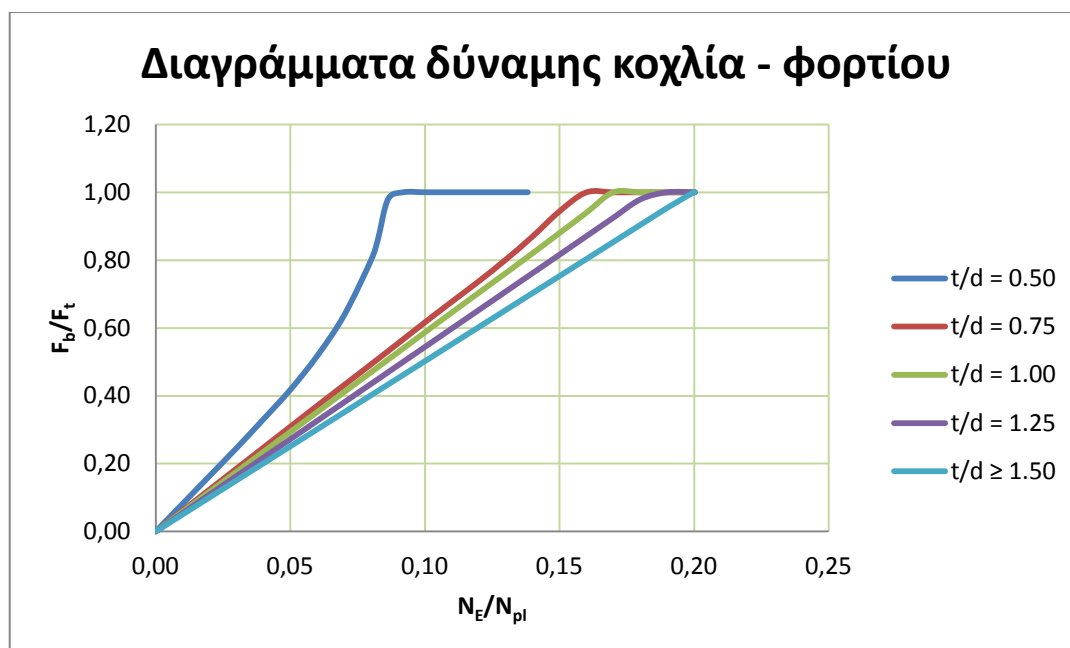
Σχ. 3.47. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M24 και διατομή SHS 120x5



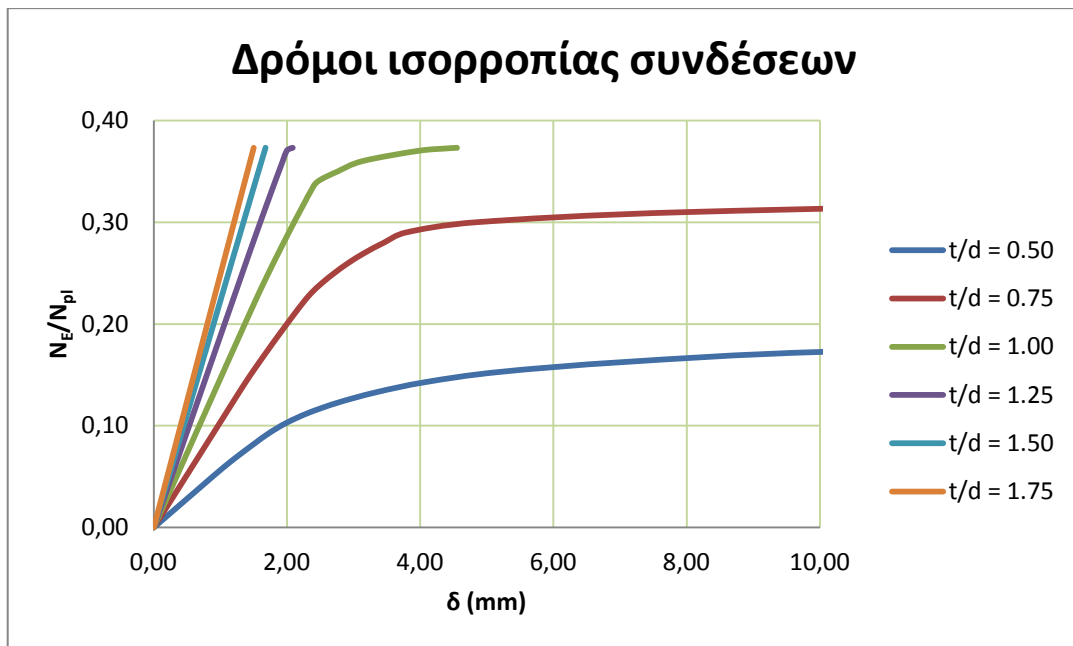
Σχ. 3.48. Διαγράμματα δύναμης κοχλία - φορτίου για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M24 και διατομή SHS 120x5



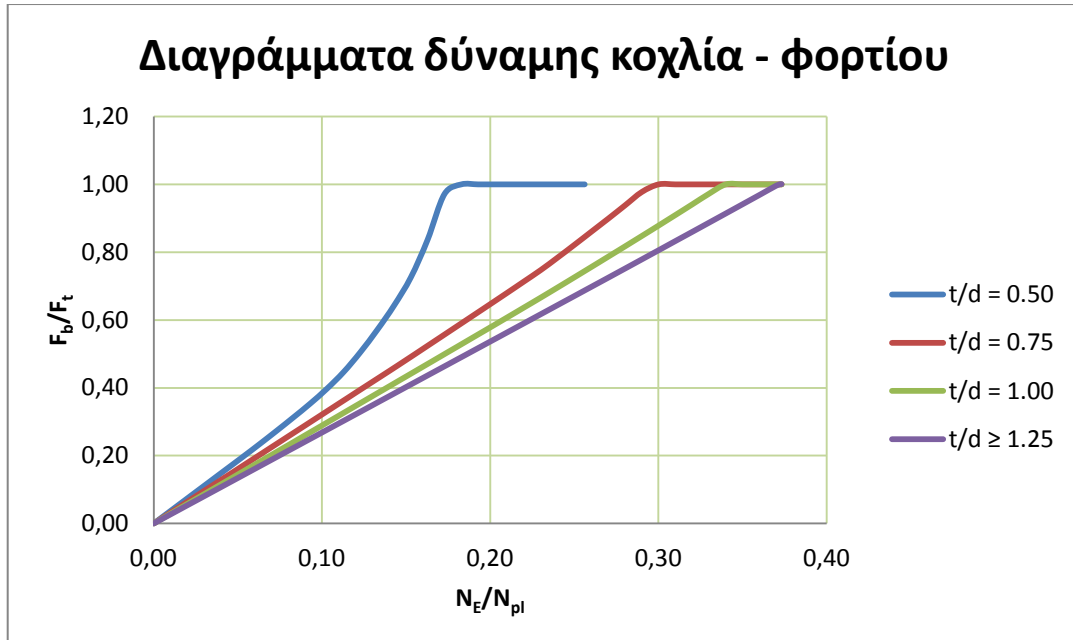
Σχ. 3.49. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M12 και διατομή SHS 120x10



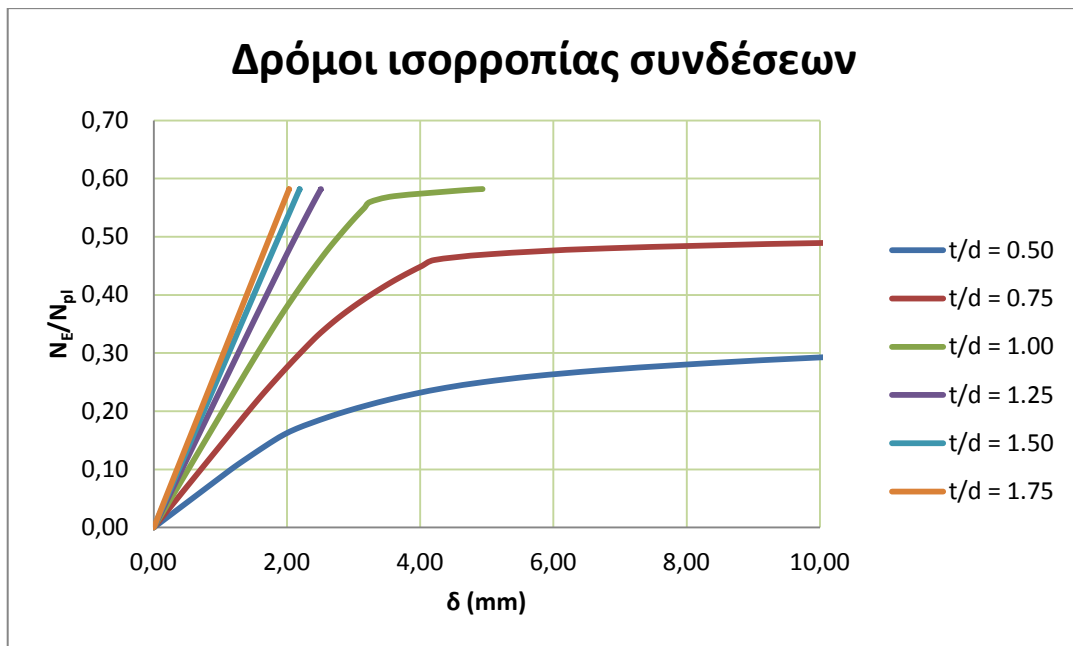
Σχ. 3.50. Διαγράμματα δύναμης κοχλία - φορτίου για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M12 και διατομή SHS 120x10



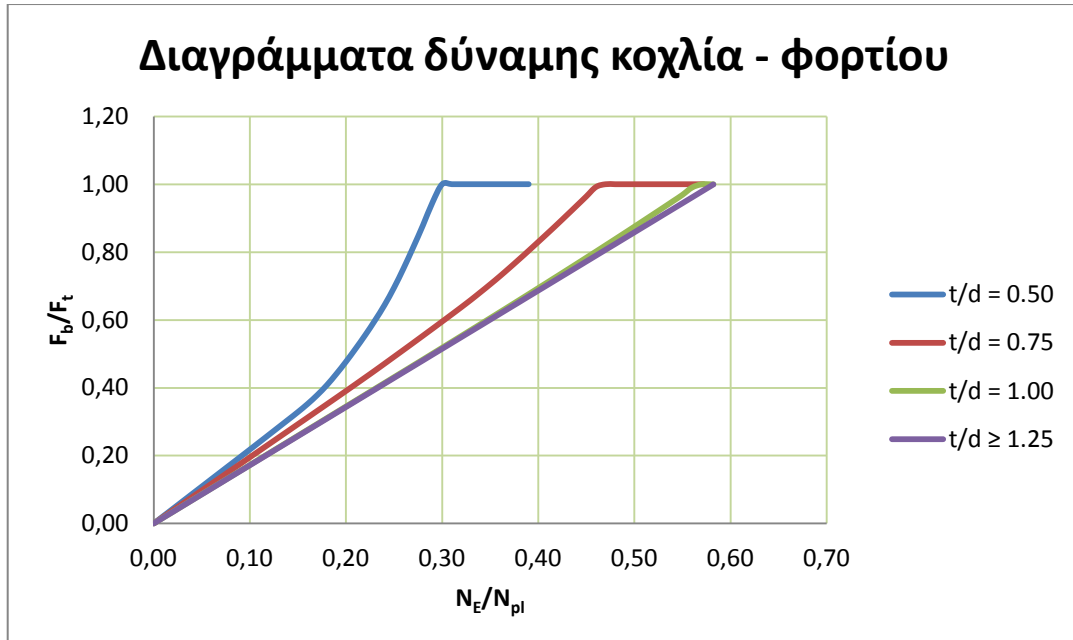
Σχ. 3.51. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M16 και διατομή SHS 120x10



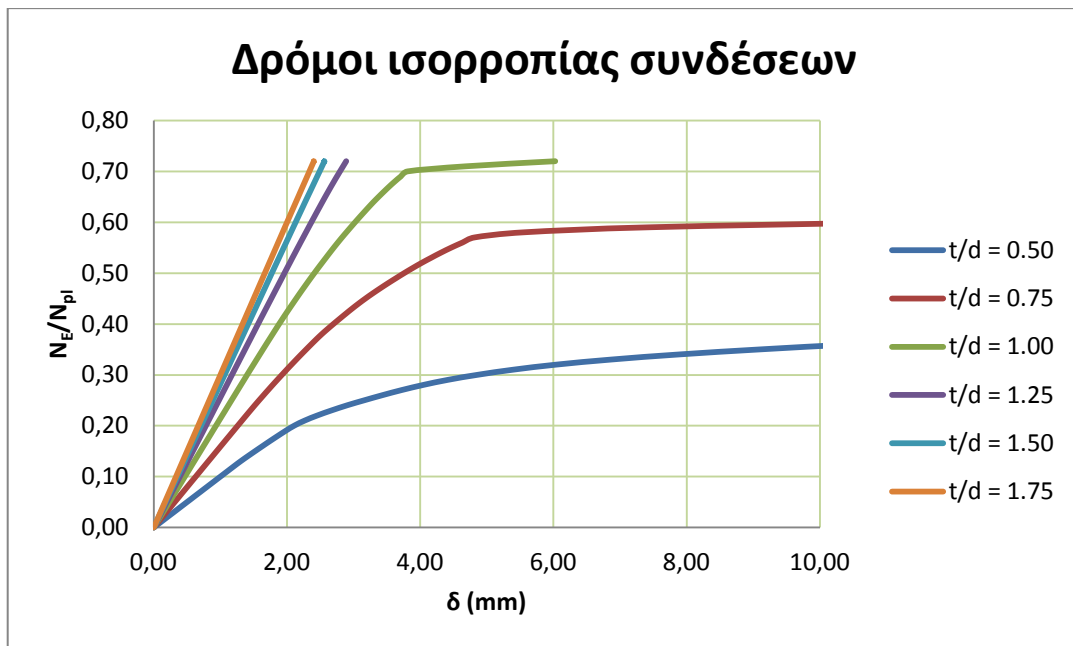
Σχ. 3.52. Διαγράμματα δύναμης κοχλία - φορτίου για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M16 και διατομή SHS 120x10



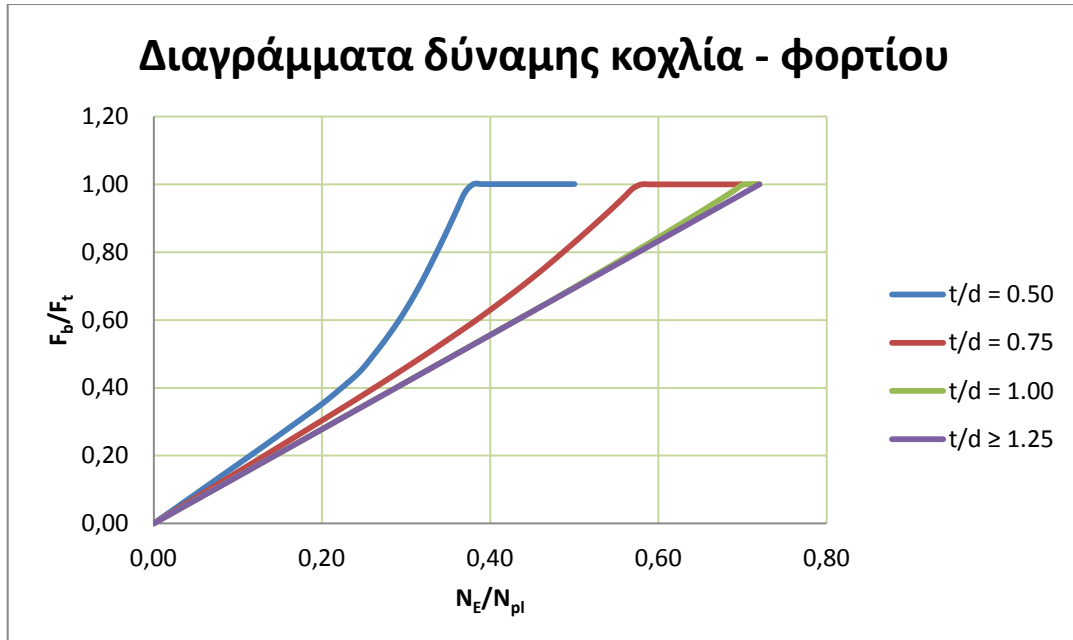
Σχ. 3.53. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M20 και διατομή SHS 120x10



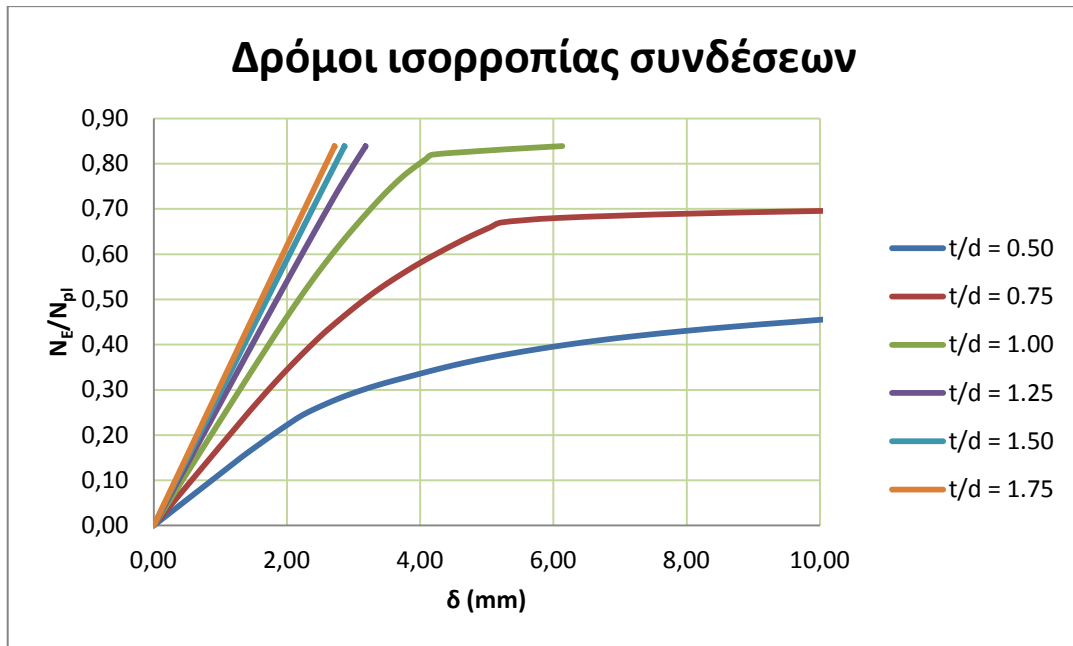
Σχ. 3.54. Διαγράμματα δύναμης κοχλία - φορτίου για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M20 και διατομή SHS 120x10



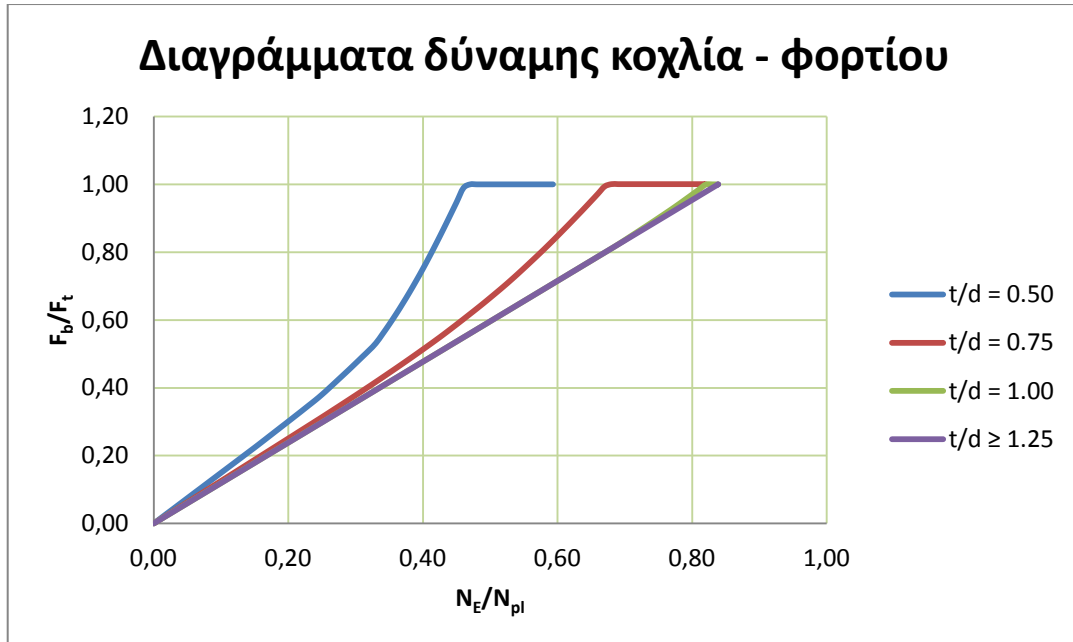
Σχ. 3.55. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M22 και διατομή SHS 120x10



Σχ. 3.56. Διαγράμματα δύναμης κοχλία - φορτίου για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M22 και διατομή SHS 120x10



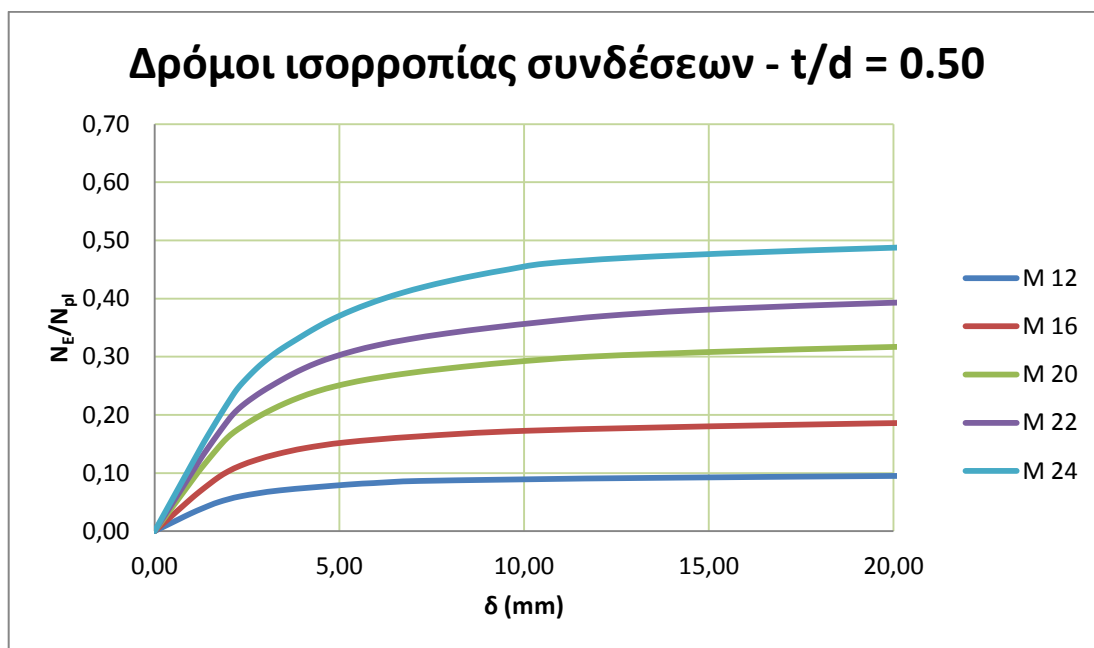
Σχ. 3.57. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M24 και διατομή SHS 120x10



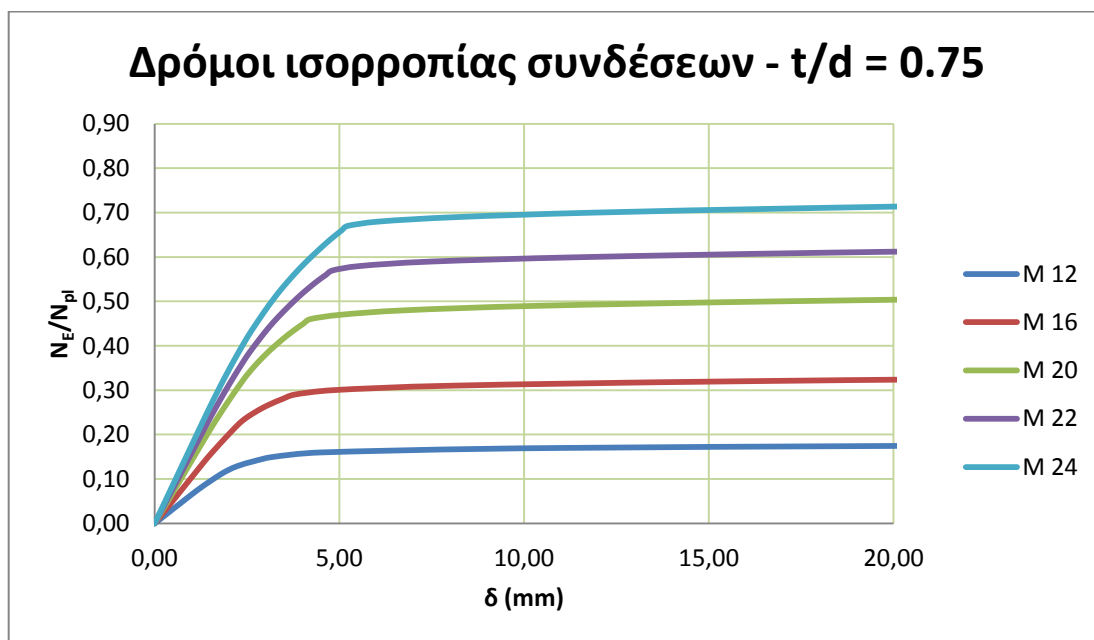
Σχ. 3.58. Διαγράμματα δύναμης κοχλία - φορτίου για διάφορα  $t/d$  σε σύνδεση με κοχλίες M24 και διατομή SHS 120x10



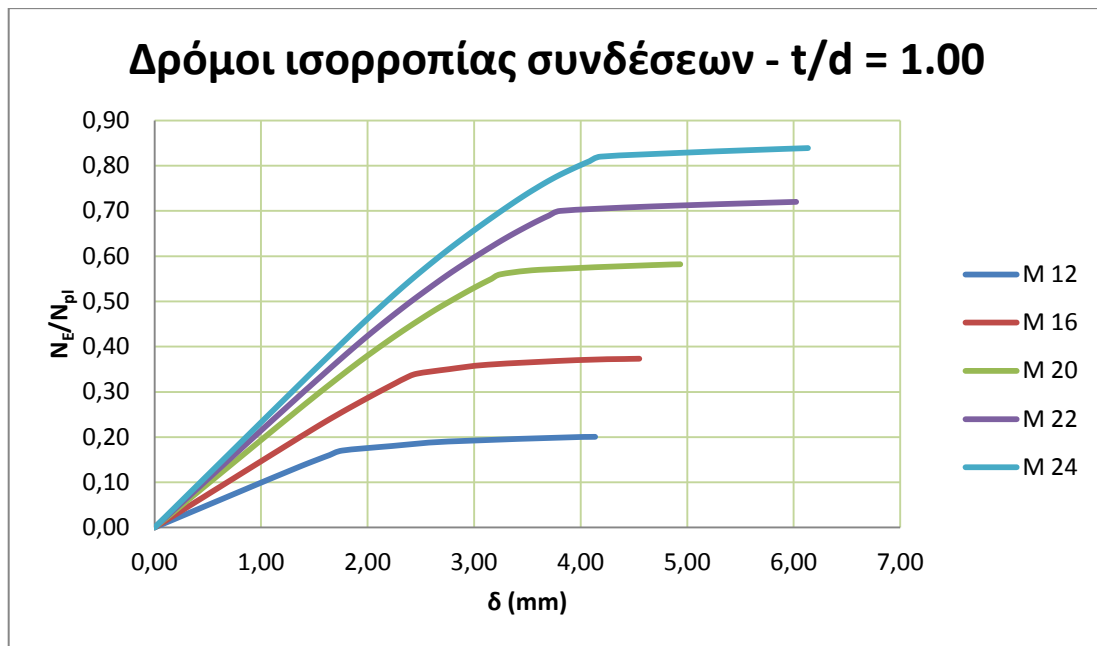
Στη συνέχεια, στα σχήματα 3.59 έως 3.64 ακολουθούν οι δρόμοι ισορροπίας των συνδέσεων της κοιλοδοκού SHS 120 x 10 ανά μέγεθος του λόγου πάχους πλάκας προς διάμετρο κοχλία  $t/d$  και για μεγέθη κοχλιών M 12, M 16, M 20, M 22 και M 24.



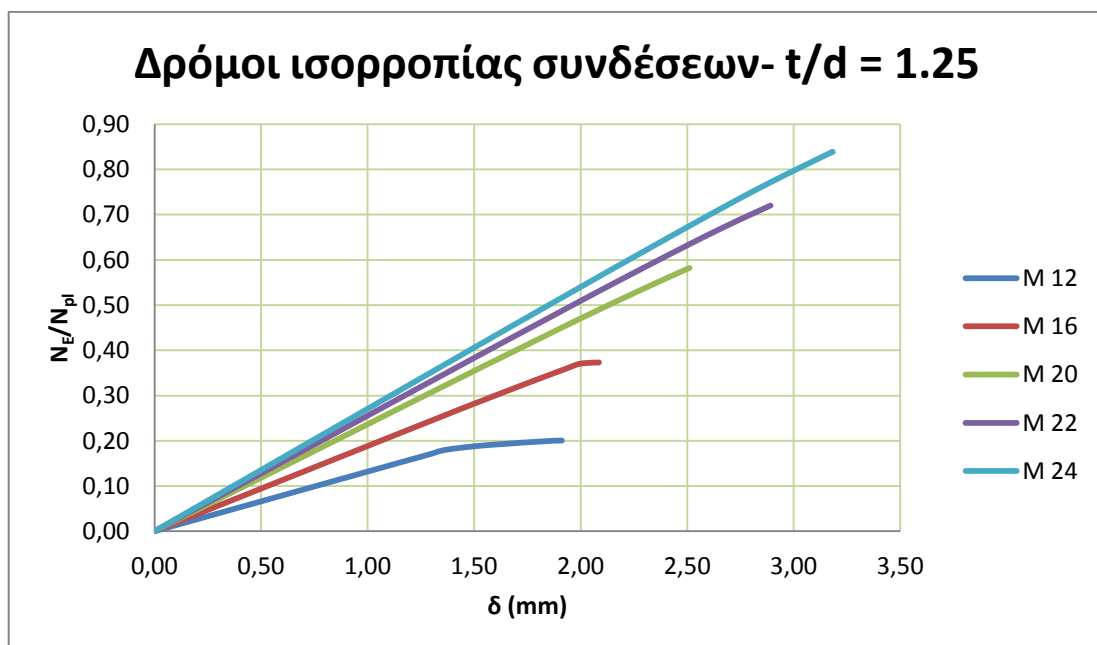
Σχ. 3.59. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα μεγέθη κοχλιών σε σύνδεση με  $t/d = 0,50$  και διατομή SHS 120x10



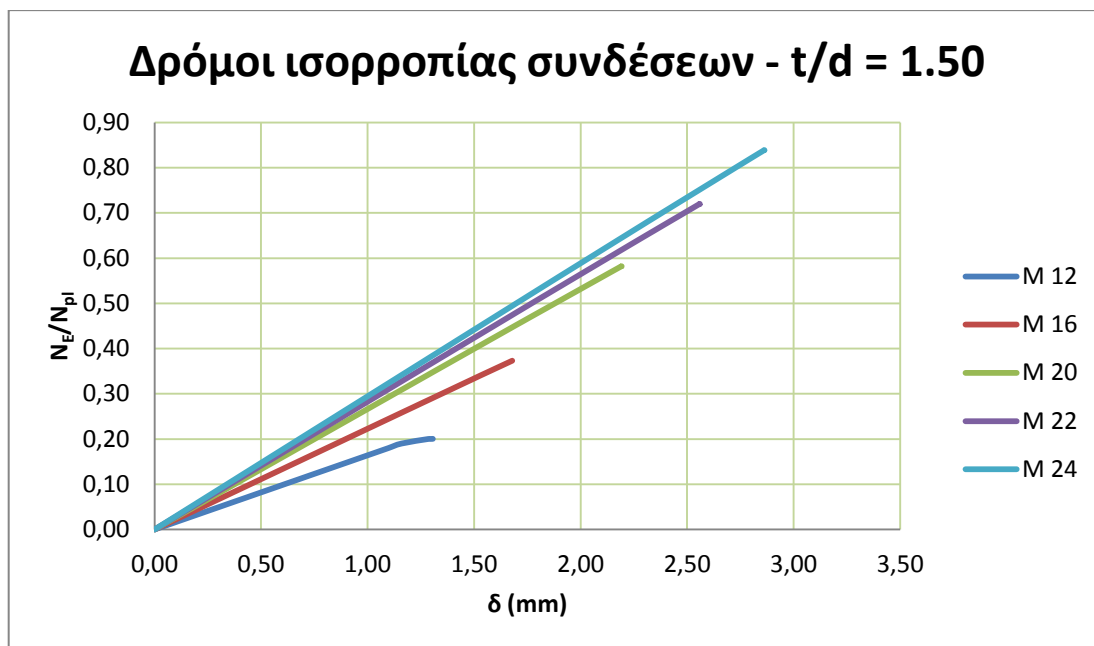
Σχ. 3.60. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα μεγέθη κοχλιών σε σύνδεση με  $t/d = 0,75$  και διατομή SHS 120x10



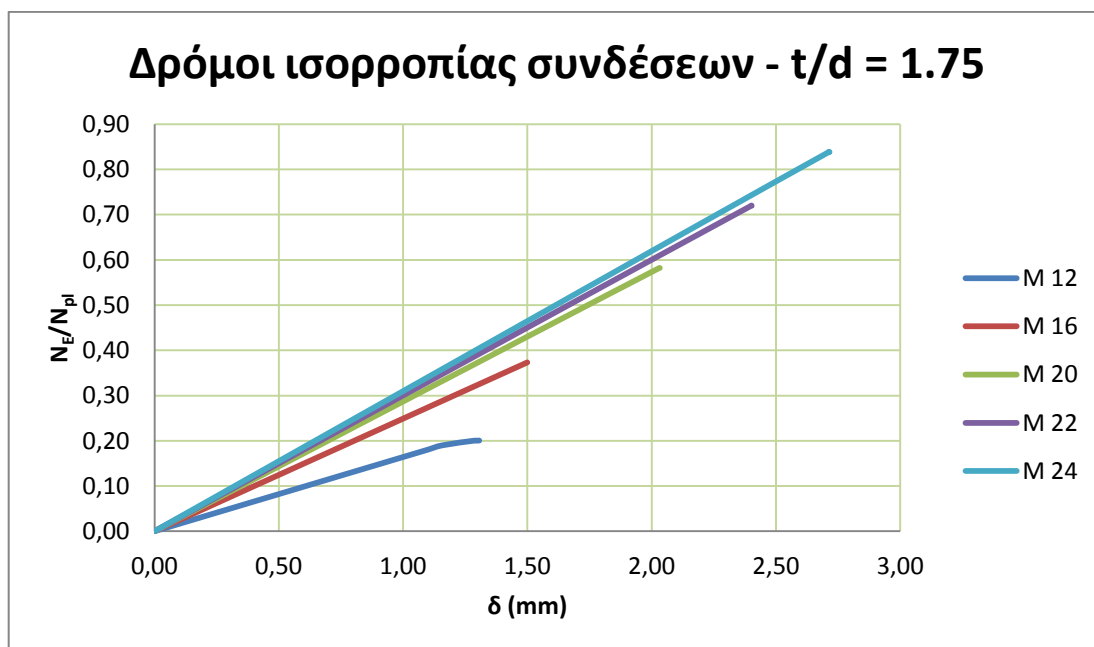
Σχ. 3.61. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα μεγέθη κοχλιών σε σύνδεση με  $t/d = 1,00$  και διατομή SHS 120x10



Σχ. 3.62. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα μεγέθη κοχλιών σε σύνδεση με  $t/d = 1,25$  και διατομή SHS 120x10



Σχ. 3.63. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα μεγέθη κοχλιών σε σύνδεση με  $t/d = 1,50$  και διατομή SHS 120x10



Σχ. 3.64. Δρόμοι ισορροπίας για διάφορα μεγέθη κοχλιών σε σύνδεση με  $t/d = 1,75$  και διατομή SHS 120x10

### 3.3.4 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, 2.11 και 2.14 της τροποποιημένης μεθόδου βραχέως ταυ για την περίπτωση συνδέσεων κοίλων τετραγωνικών εφελκόμενων διατομών, μέσω μετωπικών πλακών, με τέσσερις κοχλίες. Για την περίπτωση της συμπεριφοράς σύνδεσης με πλάκα ενδιάμεσου πάχους υιοθετήθηκε η εξίσωση 2.11, στην οποία η δύναμη επαφής είναι θετική ( $Q > 0$ ), και όχι η 2.8, όπου θεωρούμε ότι η δύναμη επαφής είναι μηδέν ( $Q = 0$ ). Οι τιμές αντοχής βάσει της αναλυτικής λύσης προέκυψαν, λοιπόν, από τη σχέση:

$$F_C = \min(F_{Cthick}, F_{Cimb}, F_{Cthin}) \quad (3.3)$$

$$F_C = \min(4B_{U1}, 4 \cdot \frac{B_{U1} \cdot \alpha_p + M_{1pl} + M_b}{\alpha_p + s_0}, 4 \cdot \frac{M_{1pl} + M_{2pl} + M_b}{s_0}) \quad (3.4)$$

Για κάθε σύνδεση, θεωρούμε ως μορφή αστοχίας αυτήν που αντιστοιχεί στην σχέση της εξίσωσης 3.4 που μας δίνει τη μικρότερη τιμή αντοχής. Οι τιμές των αντοχών βάσει της αναλυτικής λύσης θα συγκριθούν με τις τιμές που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση που περιγράψαμε παραπάνω. Στους πίνακες 3.4 και 3.5 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές αντοχής της σύνδεσης και οι μορφές αστοχίας για κάθε περίπτωση.

Αριθμός ανάλυσης	Διάμετρος κοχλιών $d$ (mm)	Λόγος $t/d$	Μορφή αστοχίας - αναλυτική λύση	Μορφή αστοχίας - αριθμητική ανάλυση	Αντοχή βάσει αναλυτικής λύσης $F_c$ (kN)	Αντοχή βάσει αριθμητικής ανάλυσης $F_{nu}$ (kN)	Λόγος $F_c/F_{nu}$
1	12	0,50	Πλάκες	Πλ & Κοχ	183,97	135,18	1,36
2	12	0,75	Πλ & Κοχ	Πλ & Κοχ	254,38	246,51	1,03
3	12	1,00	Κοχλίες	Πλ & Κοχ	303,48	246,51	1,23
4	12	1,25	Κοχλίες	Κοχλίες	303,48	270,37	1,12
5	12	1,50	Κοχλίες	Κοχλίες	303,48	302,18	1,00
6	12	1,75	Κοχλίες	Κοχλίες	303,48	302,18	1,00
7	16	0,50	Πλάκες	Πλάκες	335,10	222,66	1,51
8	16	0,75	Πλ & Κοχ	Πλ & Κοχ	469,08	429,41	1,09
9	16	1,00	Κοχλίες	Πλ & Κοχ	565,20	508,93	1,11
10	16	1,25	Κοχλίες	Κοχλίες	565,20	564,59	1,00
11	16	1,50	Κοχλίες	Κοχλίες	565,20	564,59	1,00
12	16	1,75	Κοχλίες	Κοχλίες	565,20	564,59	1,00
13	20	0,50	Πλάκες	Πλάκες	536,17	360,64	1,49
14	20	0,75	Πλ & Κοχ	Πλ & Κοχ	738,67	690,37	1,07
15	20	1,00	Κοχλίες	Πλ & Κοχ	882,00	834,62	1,06
16	20	1,25	Κοχλίες	Κοχλίες	882,00	886,14	1,00
17	20	1,50	Κοχλίες	Κοχλίες	882,00	886,14	1,00
18	20	1,75	Κοχλίες	Κοχλίες	882,00	886,14	1,00
19	22	0,50	Πλάκες	Πλάκες	656,36	448,00	1,47
20	22	0,75	Πλ & Κοχ	Πλ & Κοχ	909,38	873,60	1,04
21	22	1,00	Κοχλίες	Πλ & Κοχ	1090,80	1075,20	1,01
22	22	1,25	Κοχλίες	Κοχλίες	1090,80	1097,60	1,00
23	22	1,50	Κοχλίες	Κοχλίες	1090,80	1097,60	1,00
24	22	1,75	Κοχλίες	Κοχλίες	1090,80	1097,60	1,00
25	24	0,50	Πλάκες	Πλάκες	790,17	649,60	1,21
26	24	0,75	Πλ & Κοχ	Πλ & Κοχ	1073,09	1030,40	1,04
27	24	1,00	Κοχλίες	Πλ & Κοχ	1270,80	1254,40	1,01
28	24	1,25	Κοχλίες	Κοχλίες	1270,80	1276,80	1,00
29	24	1,50	Κοχλίες	Κοχλίες	1270,80	1276,80	1,00
30	24	1,75	Κοχλίες	Κοχλίες	1270,80	1276,80	1,00

\* Πλάκες = 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

Πίν. 3.4. Σύγκριση τιμών αντοχής και μορφών αστοχίας αναλυτικής και αριθμητικής λύσης – διατομή SHS 120x5

Αριθμός ανάλυσης	Διάμετρος κοχλιών $d$ (mm)	Λόγος $t/d$	Μορφή αστοχίας - αναλυτική λύση	Μορφή αστοχίας - αριθμητική ανάλυση	Αντοχή βάσει αναλυτικής λύσης $F_c$ (kN)	Αντοχή βάσει αριθμητικής ανάλυσης $F_{nu}$ (kN)	Λόγος $F_c/F_{nu}$
31	12	0,50	Πλάκες	Πλάκες	183,97	121,84	1,51
32	12	0,75	Πλ & Κοχ	Πλ & Κοχ	254,38	243,67	1,04
33	12	1,00	Κοχλίες	Πλ & Κοχ	303,48	258,90	1,17
34	12	1,25	Κοχλίες	Κοχλίες	303,48	289,36	1,05
35	12	1,50	Κοχλίες	Κοχλίες	303,48	304,59	1,00
36	12	1,75	Κοχλίες	Κοχλίες	303,48	304,59	1,00
37	16	0,50	Πλάκες	Πλάκες	335,10	243,67	1,38
38	16	0,75	Πλ & Κοχ	Πλ & Κοχ	469,08	456,89	1,03
39	16	1,00	Κοχλίες	Πλ & Κοχ	565,20	517,80	1,09
40	16	1,25	Κοχλίες	Κοχλίες	565,20	563,49	1,00
41	16	1,50	Κοχλίες	Κοχλίες	565,20	563,49	1,00
42	16	1,75	Κοχλίες	Κοχλίες	565,20	563,49	1,00
43	20	0,50	Πλάκες	Πλάκες	536,17	395,97	1,35
44	20	0,75	Πλ & Κοχ	Πλ & Κοχ	738,67	715,79	1,03
45	20	1,00	Κοχλίες	Πλ & Κοχ	882,00	868,08	1,02
46	20	1,25	Κοχλίες	Κοχλίες	882,00	883,31	1,00
47	20	1,50	Κοχλίες	Κοχλίες	882,00	883,31	1,00
48	20	1,75	Κοχλίες	Κοχλίες	882,00	883,31	1,00
49	22	0,50	Πλάκες	Πλάκες	656,36	487,34	1,35
50	22	0,75	Πλ & Κοχ	Πλ & Κοχ	909,38	883,31	1,03
51	22	1,00	Κοχλίες	Πλ & Κοχ	1090,80	1066,07	1,02
52	22	1,25	Κοχλίες	Κοχλίες	1090,80	1096,52	1,00
53	22	1,50	Κοχλίες	Κοχλίες	1090,80	1096,52	1,00
54	22	1,75	Κοχλίες	Κοχλίες	1090,80	1096,52	1,00
55	24	0,50	Πλάκες	Πλάκες	790,17	654,87	1,21
56	24	0,75	Πλ & Κοχ	Πλ & Κοχ	1073,09	1035,61	1,04
57	24	1,00	Κοχλίες	Πλ & Κοχ	1270,80	1248,82	1,02
58	24	1,25	Κοχλίες	Κοχλίες	1270,80	1279,28	1,00
59	24	1,50	Κοχλίες	Κοχλίες	1270,80	1279,28	1,00
60	24	1,75	Κοχλίες	Κοχλίες	1270,80	1279,28	1,00

\* Πλάκες = 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

Πίν. 3.5. Σύγκριση τιμών αντοχής και μορφών αστοχίας αναλυτικής και αριθμητικής λύσης – διατομή SHS 120x10

Από τους πίνακες 3.4 και 3.5 παρατηρούμε διαφορές ως προς τις μορφές αστοχίας των συνδέσεων που προκύπτουν από την αναλυτική λύση, σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση. Έτσι, με βάση την αναλυτική λύση, βλέπουμε ότι για λόγο  $t/d = 0,50$  η μορφή αστοχίας είναι πάντα η μεγάλη παραμόρφωση των πλακών, για λόγο  $t/d = 0,75$  η μορφή αστοχίας είναι η ταυτόχρονη παραμόρφωση των πλακών και διαρροή των κοχλιών και για λόγους  $t/d \geq 1,00$  αστοχία συμβαίνει λόγω διαρροής των κοχλιών. Οι

τιμές της αντοχής των συνδέσεων βάσει αναλυτικής λύσης είναι συγκρίσιμες με αυτές της αριθμητικής επίλυσης, με ένα μέσο όρο του λόγου θεωρητικής αντοχής προς την αντοχή βάσει αριθμητικής ανάλυσης ίσο με 1,09 και τυπική απόκλιση ίση με 0,15.

### 3.3.5 Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης ως προς τη δύναμη επαφής

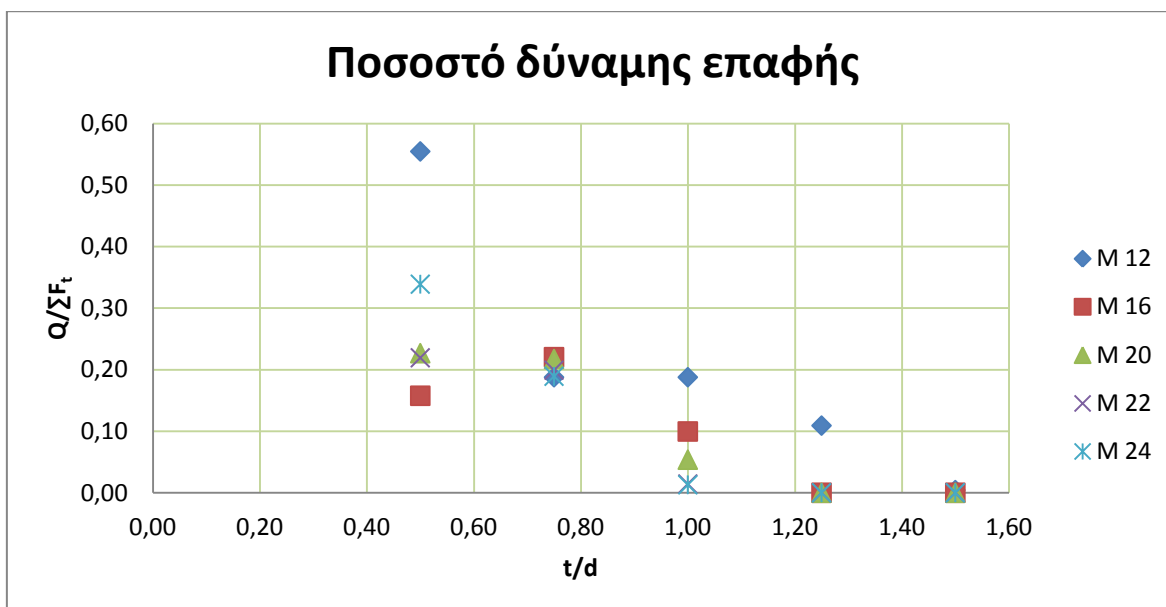
Παρακάτω θα παρουσιάσουμε το ποσοστό της δύναμης επαφής (prying force) στην αστοχία ως προς τη συνολική εφελκυστική αντοχή των τεσσάρων κοχλιών της σύνδεσης με τη μορφή διαγραμμάτων για κάθε λόγο  $t/d$  και μέγεθος κοχλιών (βλ. σχήματα 3.65 και 3.66). Το μέγεθος της δύναμης επαφής υπολογίστηκε από τη σχέση

$$Q = B - F$$

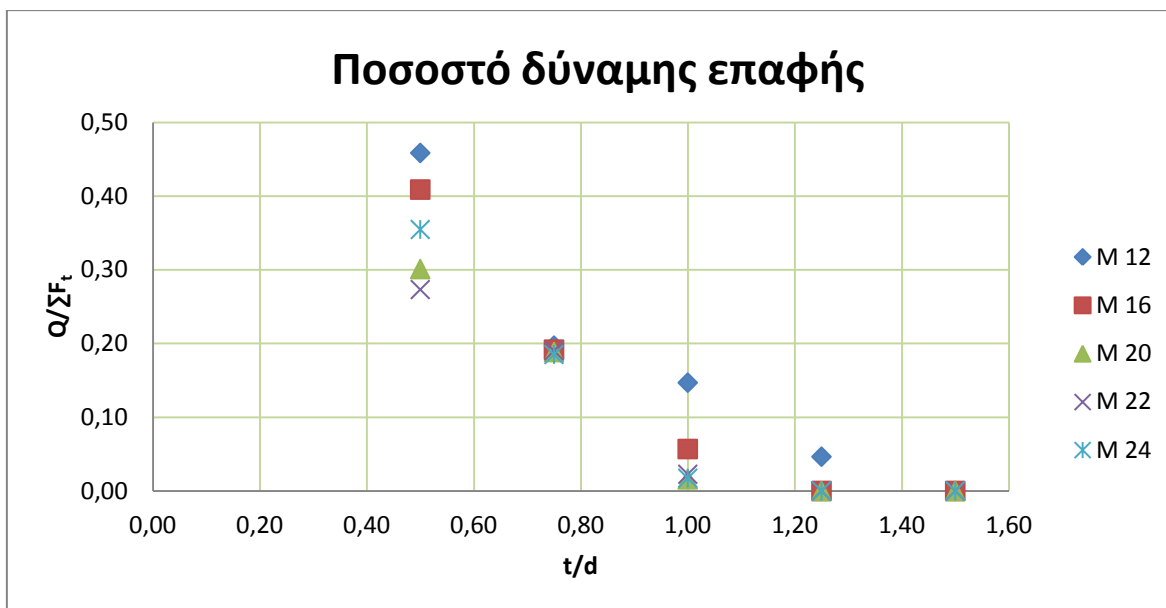
όπου  $Q$ : δύναμη επαφής κατά την αστοχία

$B$ : συνολική δύναμη τεσσάρων κοχλιών κατά την αστοχία

$F$ : αντοχή σύνδεσης.



Σχ. 3.65. Λόγος δύναμης επαφής στην αστοχία προς την συνολική εφελκυστική αντοχή των κοχλιών για διάφορους λόγους  $t/d$  και μεγέθη κοχλιών – συνδέσεις διατομής SHS 120x5



Σχ. 3.66. Λόγος δύναμης επαφής στην αστοχία προς την συνολική εφελκυστική αντοχή των κοχλιών για διάφορους λόγους  $t/d$  και μεγέθη κοχλιών – συνδέσεις διατομής SHS 120x10

Από τα διαγράμματα των σχημάτων 3.65 και 3.66 παρατηρούμε ότι:

- για λόγο πάχους πλάκας προς διάμετρο κοχλιών  $t/d = 0,50$ , το ποσοστό της δύναμης επαφής ως προς τη συνολική αντοχή των κοχλιών σε εφελκυσμό είναι από 16 έως 55 %,
- για  $t/d = 0,75$  το ποσοστό της δύναμης επαφής είναι από 19 έως 22 %,
- για  $t/d = 1,00$  το ποσοστό της δύναμης επαφής είναι από 1 έως 19 %,
- για  $t/d = 1,25$  το ποσοστό της δύναμης επαφής είναι από 0 έως 11 %
- για  $t/d \geq 1,50$  το αντίστοιχο ποσοστό είναι πάντα 0.



# Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 4.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως προέκυψε από την αναλυτική λύση του δευτέρου κεφαλαίου, αλλά και από την αριθμητική ανάλυση των κοχλιωτών συνδέσεων του τρίτου κεφαλαίου, για λόγο πάχους πλάκας προς διάμετρο κοχλιών  $t/d = 0,50$ , η μορφή αστοχίας της σύνδεσης είναι η δημιουργία μηχανισμού των πλακών. Σε αυτή την περίπτωση, ενώ η μορφή αστοχίας είναι ξεκάθαρη, δεν ισχύει το ίδιο και για τις τιμές της αντοχής των συνδέσεων. Προκύπτει, λοιπόν, μέσος όρος του λόγου της αντοχής βάσει αναλυτικής λύσης προς την αντοχή βάσει αριθμητικής ανάλυσης ίσος με 1,38 και τυπική απόκλιση 0,11.

Οι λόγοι για τους οποίους παρατηρείται μεγάλη απόκλιση των αποτελεσμάτων στην προκειμένη περίπτωση είναι οι εξής:

- Οι μεγάλες παραμορφώσεις των πλακών έχουν ως αποτέλεσμα την κάμψη των κοχλιών. Η εν λόγω κάμψη όμως, όπως έχει προαναφερθεί, δεν λαμβάνεται υπόψη από το μοντέλο με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Συν τοις άλλοις, η θεωρητική σχέση, βάση της οποίας υπολογίζεται η αντοχή της σύνδεσης στην περίπτωση αστοχίας λόγω παραμόρφωσης των πλακών, εμπεριέχει τον όρο  $M_b$ , που εκφράζει τη ροπή που προκύπτει από την κάμψη ενός κοχλία, και ο οποίος μάλιστα πολλαπλασιάζεται επί τέσσερα στην εξίσωση, αυξάνοντας το υπάρχον σφάλμα.
- Το γεγονός ότι στο προσομοίωμα αναπτύσσονται μεγάλες παραμορφώσεις, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε δεν είναι όσο αξιόπιστα θα επιθυμούσαμε.

Στην περίπτωση όπου ο λόγος  $t/d$  ισούται με 0,75, προκύπτει και στην αναλυτική αλλά και στην αριθμητική λύση ως μορφή αστοχίας η ταυτόχρονη παραμόρφωση των πλακών και διαρροή των κοχλιών. Εδώ ο μέσος όρος του λόγου της αντοχής βάσει αναλυτικής λύσης προς την αντοχή βάσει αριθμητικής ανάλυσης είναι ίσος με 1,04 και η τυπική απόκλιση 0,02. Σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα σχεδόν συμπίπτουν.

Για λόγο  $t/d = 1,00$ , παρατηρούμε διαφορά ως προς τη μορφή αστοχίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης. Συγκεκριμένα, στην αναλυτική λύση η μορφή αστοχίας είναι η διαρροή των κοχλιών, ενώ στην αριθμητική λύση έχουμε αστοχία λόγω ταυτόχρονης παραμόρφωσης των πλακών και διαρροής των κοχλιών. Η διαφορά αυτή συμβαίνει οριακά, επομένως δεν θεωρείται ουσιώδης. Πάντως, στην αριθμητική λύση δεν μπορούμε να αγνοήσουμε τη συμμετοχή της πλάκας στην αστοχία. Αυτό φαίνεται από τους δρόμους ισορροπίας των συνδέσεων που εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία, οι οποίοι

εμφανίζουν μία συμπεριφορά των συνδέσεων σχεδόν διγραμμική και όχι γραμμικώς ελαστική. Απορρέει, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι οι πλάκες συμμετέχουν στην αστοχία, χωρίς παρόλα αυτά σημαντική παραμόρφωση. Σε αυτή την περίπτωση, ο μέσος όρος του λόγου της αντοχής βάσει αναλυτικής λύσης προς την αντοχή βάσει αριθμητικής ανάλυσης είναι ίσος με 1,07 και η τυπική απόκλιση 0,08. Τα αποτελέσματα ως προς τις τιμές των αντοχών είναι ικανοποιητικά.

Άλλη μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση που μπορεί να γίνει ως προς τα αποτελέσματα είναι το ότι για το ίδιο μέγεθος κοχλιών και φορτίου, στην περίπτωση σύνδεσης με λεπτότερες πλάκες, οι κοχλίες διαρρέουν για μικρότερη τιμή του φορτίου απ' ό, τι στην περίπτωση των πιο ισχυρών πλακών. Αυτό συμβαίνει λόγω της πρόσθεσης των δυνάμεων επαφής στη δύναμη που δέχονται οι κοχλίες, έτσι οι κοχλίες οδηγούνται πιο γρήγορα στην διαρροή.

Επίσης, ως προς τη δύναμη επαφής συμπεραίνουμε ότι, για λόγο  $t/d = 0,50$ , η τιμή που υπολογίστηκε είναι αρκετά μεγάλη (ποσοστό 16 έως 55% ως προς τη συνολική εφελκυστική δύναμη των κοχλιών). Οι λόγοι που συντρέχουν για αυτό είναι αυτοί που αναφέραμε παραπάνω για τις συνδέσεις αυτής της κατηγορίας (κάμψη κοχλιών, μη αξιόπιστο προσομοίωμα).

Αντιθέτως, στις υπόλοιπες περιπτώσεις, τα ποσοστά της δύναμης επαφής είναι αναμενόμενα και μπορούμε να τα θεωρήσουμε πιο αξιόπιστα. Θα αναφερθούμε μόνο στις περιπτώσεις με λόγο  $t/d = 1,25$  και μέγεθος κοχλιών M 12, όπου ενώ η αστοχία της σύνδεσης οφείλεται στη διαρροή των κοχλιών, η δύναμη επαφής δεν είναι μηδενική αλλά σε ποσοστό 5 % και 11 % ως προς την εφελκυστική αντοχή των κοχλιών. Μπορούμε να θεωρήσουμε, παρόλα αυτά, ότι αυτό το ποσοστό είναι σχετικά χαμηλό.

Συμπερασματικά, για το σχεδιασμό συνδέσεων κοίλων τετραγωνικών διατομών μέσω μετωπικών πλακών με τέσσερις κοχλίες, είναι προτιμότερη η χρήση λόγου πάχους πλακών προς διάμετρο κοχλιών ίσου με 0,75 ή 1,00. Και αυτό διότι μέσω αυτών των διαστάσεων εξασφαλίζεται μια συμπεριφορά σύνδεσης με πλάκα ενδιάμεσου πάχους. Τα οφέλη αυτής της επιλογής είναι πολλά, διότι εκτός της υψηλής αντοχής και δυσκαμψίας της σύνδεσης, εξασφαλίζεται και ολκιμότητα.

Η χρήση  $t/d = 0,50$  δεν προτείνεται, αφού παρόλο που προσφέρει μεγάλη ολκιμότητα, μια σύνδεση αυτής της κατηγορίας δεν διαθέτει ούτε αντοχή, ούτε δυσκαμψία. Επιπλέον, μια λύση με πλάκα τόσο μικρού μεγέθους είναι πρακτικά μη εφαρμόσιμη.

Τέλος, η χρήση του λόγου  $t/d \geq 1,25$  δεν προτείνεται, λόγω ψαθυρής συμπεριφοράς της σύνδεσης.

## 4.2 Συμπεράσματα

- Για διάφορους λόγους  $t/d$  προσδιορίστηκαν οι μορφές αστοχίας της σύνδεσης.
- Οι δυνάμεις επαφής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της αντοχής των κοχλιών, καθώς για  $t/d \geq 0,75$  το ποσοστό των δυνάμεων επαφής φτάνει μέχρι και το 20% της αντοχής των κοχλιών.

- Για βέλτιστο σχεδιασμό προτείνεται λόγος πάχους πλακών προς διάμετρο κοχλιών μεταξύ 0,75 και 1,00.

### **4.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

Εξαιρετικά ενδιαφέροντα θα ήταν η ανάλυση παρόμοιων κοχλιωτών συνδέσεων κοίλων τετραγωνικών διατομών μέσω μετωπικών πλακών με αυτές της παρούσας εργασίας, με μεταβολή των αποστάσεων των κοχλιών από τα άκρα των ελασμάτων αλλά και από την κοιλοδοκό. Επίσης, θα μπορούσε να γίνει ανάλυση συνδέσεων με οκτώ κοχλίες, τέσσερις στις ίδιες θέσεις με της εργασίας αυτής και τέσσερις στις γωνίες των μετωπικών πλακών. Σε αυτή την περίπτωση η συμπεριφορά της σύνδεσης προβλέπεται αρκετά πιο πολύπλοκη.

# 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, Αθήνα, 2005.
- [3] Ερμόπουλος, Ι., *Στοιχεία σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών*, εκδόσεις Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, Αθήνα, 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*, Ανάκτηση 16/6/2011 από [http://eng.ccs.gr/LH2Uploads/ItemsContent/181/181\\_1.pdf](http://eng.ccs.gr/LH2Uploads/ItemsContent/181/181_1.pdf)
- [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, Αθήνα, 2001.
- [9] Παπαδρακάκης, Μ., *Μαθήματα Στατικής V – Πλαστική Ανάλυση Ραβδωτών Φορέων, Σύγχρονες Μέθοδοι*, εκδόσεις Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, Αθήνα, 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] Διάλεξη 3 (*Κοχλιωτές συνδέσεις*) του μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές II» του 8<sup>ου</sup> εξαμήνου της σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ανάκτηση 30/9/2011 από [http://mycourses.ntua.gr/courses/CIVIL1028/document/%C4%E9%E1%EB%DD%EE%E5%E9%F2/sidires\\_kataskeues2\\_lecture03.pdf](http://mycourses.ntua.gr/courses/CIVIL1028/document/%C4%E9%E1%EB%DD%EE%E5%E9%F2/sidires_kataskeues2_lecture03.pdf).
- [13] *Bolted Connections – I*, Ανάκτηση 11/8/2011 από <http://www.steel-insdag.org/new/pdfs/chapter33.pdf>.
- [14] *ABAQUS tutorial*, Ανάκτηση 7/10/2011 από <http://www.engin.brown.edu/courses/en175/abaqustut/abaqustut.htm>.