



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

---

**Γεώργιος Αναγνώστου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΤΩΝ  
ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ  
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ***

Επιβλέπων:

**Σ.Α. Καραμάνος**

Εξεταστική Επιτροπή:

**Γρ. Χαϊδεμενόπουλος**

**Α. Γιαννακόπουλος**

**Βόλος, Ιούλιος 2003**



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 2490/1

Ημερ. Εισ.: 27-02-2004

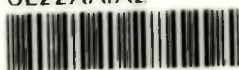
Δωρεά:

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ ΜΜΒ

2003

ΑΝΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000070531

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες .....	2
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή .....	3
1.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	4
1.2. Στόχος της διπλωματικής εργασίας .....	5
Κεφάλαιο 2. Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων .....	6
2.1. Περιγραφή Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων. ....	6
2.2. Επιβεβαίωση Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων .....	8
2-2-1. Σύνδεσμος μορφής X σε αξονική φόρτιση (πείραμα X 1).....	10
2-2-2. Σύνδεσμος μορφής X σε συνεπίπεδη κάμψη (πείραμα X 5).....	12
2-2-3. Σύνδεσμος μορφής X σε εκτός επιπέδου κάμψη (πείραμα X 9).....	15
Κεφάλαιο 3. Αντοχή Κόμβων μορφής X υπό πίεση και δομικά φορτία .....	18
3.1. Σύνδεσμοι μορφής X υπό αξονικά θλιπτικά φορτία και πίεση.....	20
3.2. Σύνδεσμος μορφής X υπό αξονικά εφελκυστικά φορτία και πίεση. ....	24
3.3. Σύνδεσμος μορφής X με λεπτό τοίχωμα βραχίονα υπό αξονικά θλιπτικά φορτία και πίεση. ....	26
3.4. Σύνδεσμος μορφής X σε συνεπίπεδη κάμψη και πίεση.....	28
3.5. Σύνδεσμος μορφής X σε εκτός επιπέδου κάμψη και πίεση.....	30
Κεφάλαιο 4. Αντοχή Κόμβων μορφής T και K υπό πίεση και δομικά φορτία.....	33
4.1. Σύνδεσμος μορφής T υπό αξονικό θλιπτικό φορτία και πίεση.....	33
4.2. Σύνδεσμος μορφής T υπό αξονικά εφελκυστικά φορτία και πίεση.....	35
4.3. Σύνδεσμος μορφής T σε εκτός επιπέδου κάμψη και πίεση. ....	37
4.4. Σύνδεσμος μορφής K σε αξονικά θλιπτικά φορτία και πίεση. ....	39
Κεφάλαιο 5. Απλοποιητικό Μοντέλο .....	42
Συμπεράσματα .....	49
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	50

## *Ευχαριστίες*

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Καραμάνο για την υπομονή που έδειξε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας και για την άμεση ενασχόληση με κάθε πρόβλημα που προέκυψε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Γιαννακόπουλο και Χαϊδεμενόπουλο για τις ουσιαστικές τους παρατηρήσεις κατά την εξέταση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους στο εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών, προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς, για το πολύ καλό κλίμα συνεργασίας που επικρατεί.

## Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Τα σωληνωτά μεταλλικά μέλη χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές ως δομικά στοιχεία σε μεταλλικές κατασκευές. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι έχουν μεγάλο λόγο αντοχής προς βάρος. Εκτός από τις πολύ καλές μηχανικές τους ιδιότητες, προσφέρουν και την δυνατότητα μιας αρχιτεκτονικά ελκυστικής κατασκευής. Επίσης, λόγω του σχήματος τους, έχουν σχετικά μικρό συντελεστή οπισθέλκουσας και αποδεικνύονται τα ιδανικότερα για κατασκευές που υπόκεινται σε φορτίσεις από τον άνεμο και την θάλασσα. Επιπλέον, η επιφάνεια των κατασκευών με σωληνωτά μέλη είναι σημαντικά μικρότερη από άλλων κατασκευών, γεγονός που μειώνει σημαντικά το κόστος της προστασίας τους από την διάβρωση. Ειδικότερα για τις θαλάσσιες κατασκευές, η κλειστή τους μορφή παρέχει την απαιτούμενη πλευστότητα για την εγκατάσταση των υπόψη κατασκευών στην θάλασσα.



**Σχήμα 1-1. Σχηματική παράσταση της εξέδρας αερίου στο Goldeneye στην Μ.Βρετανία και το δικτύωμα έτοιμο προς τοποθέτηση για την εξέδρα πετρελαίου στο Oseberg Sør στην Νορβηγία.**

## 1.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Για να εξασφαλιστεί η δομική επάρκεια των σωληνωτών κατασκευών είναι σημαντικός ο υπολογισμός της μέγιστης αντοχής των συγκολλητών σωληνωτών κόμβων. Το γεγονός αυτό οδήγησε τα τελευταία χρόνια πολλούς ερευνητές στη διεξαγωγή σχετικών πειραμάτων και αριθμητικών αναλύσεων. Τα πρώτα πειραματικά δεδομένα δημοσιεύτηκαν από τους Yura et al. (1981), τον Wardenier (1982) και τον Kurobane (1984). Μια σύνοψη των αποτελεσμάτων αυτών περιγράφεται στο σύγγραμμα του Marshall (1991). Τα δεδομένα αυτά αποτέλεσαν την βάση για την δημιουργία των αντίστοιχων κανονιστικών διατάξεων του American Petroleum Institute (API) και Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire (CIDECT). Πιο πρόσφατα πειράματα για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής μονοεπίπεδων συνδέσμων μορφής X πραγματοποιήθηκαν από τους van der Vegte et al.(1991,1995), τους Kang et al.(1998) και τους Rasmussen & Hasham (2001). Για τους συνδέσμους μορφής T δημοσιεύτηκαν πειραματικά αποτελέσματα από τους Scola et al. (1990) και για τους συνδέσμους μορφής K από τους Kurobane et al. (1986). Τέλος, έχουν πραγματοποιηθεί πειράματα για πολυεπίπεδους συνδέσμους μορφής XX, DT και KK (Scola et al. 1990, van der Vegte 1991, Paul et al. 1993, Makino & Kurobane 1994).

Εκτός από τα ανωτέρω πειραματικά δεδομένα, πολλές αριθμητικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής των συνδέσμων, με την χρήση μη-γραμμικών ελαστοπλαστικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Αναφέρονται οι δημοσιεύσεις των van der Vegte et al.(1991), των Lee & Wilmshurst (1996) και των Kang et al (1998). Τα μοντέλα βαθμονομήθηκαν με βάση τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα και χρησιμοποιήθηκαν είτε στοιχεία κελύφους είτε τρισδιάστατα στοιχεία. Οι δυνατότητες αυτών των μοντέλων βοήθησαν την έρευνα για τον προσδιορισμό της μέγιστης αντοχής των συνδέσμων δίνοντας μια πιο κατανοητή εικόνα της συμπεριφοράς των συνδέσμων υπό ποικίλλες φορτίσεις και συνοριακές συνθήκες.

Η αυξανόμενη ανάγκη για θαλάσσιες κατασκευές σε μεγαλύτερα βάθη για την εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου καθιστά επιβεβλημένη την εξέταση της επιρροής της εξωτερικής πίεσης κατά τον δομικό σχεδιασμό των κατασκευών αυτών. Η επιρροή της πίεσης στα σωληνωτά μέλη θαλάσσιων κατασκευών έχει επισημανθεί στο παρελθόν σε σχετικές δημοσιεύσεις (Loh 1990, Karamanos & Tassoulas 1994).

Αποδείχθηκε ότι η εξωτερική πίεση αυξάνει την παραμόρφωση της διατομής (ovalization) και οδηγεί σε πρόωρη αστοχία του σωληνωτού μέλους.

Παρόλα αυτά, η επιρροή της πίεσης στην δομική επάρκεια σωληνωτών συγκολλητών κόμβων δεν έχει εξεταστεί. Από όσο είναι γνωστό, μέχρι σήμερα υπάρχει μόνο μία δημοσίευση πιλοτικής μορφής όσον αφορά την επιρροή της εξωτερικής πίεσης στην αντοχή των σωληνωτών συγκολλητών συνδέσμων από τους Connolly & Zettlemyer (1991). Στην εργασία αυτή προσομοιώθηκαν σύνδεσμοι της μορφής X με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους και έγιναν αναλύσεις υπό αξονικά θλιπτικά φορτία και συνεπίπεδη (in plane) ροπή κάμψης. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια μείωση της μέγιστης αντοχής, αξονικού και καμπτικού φορτίου, για αυξανόμενη τιμή της εξωτερικής πίεσης.

## 1.2. Στόχος της διπλωματικής εργασίας

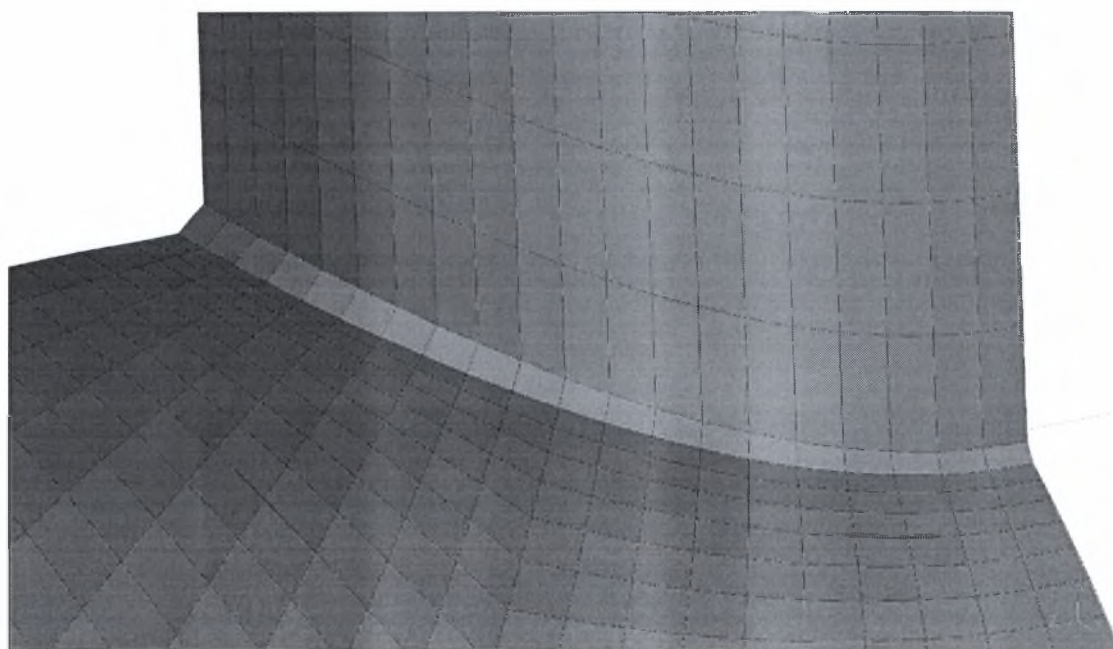
Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η επιρροή της εξωτερικής πίεσης στη αντοχή των μονοεπίπεδων συγκολλητών σωληνωτών συνδέσμων και οι μορφές αστοχίας υπό την επίδραση της εξωτερικής πίεσης και των δομικών φορτίων. Δίνεται έμφαση στα αποτελέσματα της εξωτερικής πίεσης στην οριακή αντοχή και στην δυνατότητα παραμόρφωσης των συνδέσμων που χρησιμοποιούνται σε θαλάσσιες σωληνωτές κατασκευές όπως οι εξέδρες πετρελαίου. Εξετάζονται μονοεπίπεδοι σύνδεσμοι της μορφής X, T και K υπό αξονικά φορτία, θλιπτικά και εφελκυστικά, και καμπτικά σε συνδυασμό με την εξωτερική πίεση. Τέλος αναπτύχθηκε ένα απλοποιητικό μοντέλο δυο διαστάσεων για τους συνδέσμους μορφής X υπό αντιδιαμετρικά θλιπτικά φορτία και εξωτερική πίεση. Το μοντέλο αυτό καταλήγει σε αναλυτικές εκφράσεις κλειστής μορφής και δίνει μια ποιοτική απεικόνιση της επιρροής της εξωτερικής πίεσης στην οριακή αντοχή και στην δυνατότητα παραμόρφωσης (“ολκιμότητα”) των συνδέσμων.

## Κεφάλαιο 2. Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων

### 2.1. Περιγραφή Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων.

Για την κατασκευή των μοντέλων και για τις αναλύσεις έχει χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην κατασκευή της γεωμετρίας της συγκόλλησης. Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται τα στοιχεία C3D20R, τα οποία είναι στοιχεία συνεχούς μέσου, τριών διαστάσεων με 20 κόμβους μειωμένης ολοκλήρωσης. Το πλέγμα είναι πυκνό στην περιοχή της συγκόλλησης λόγω της συγκέντρωσης τάσεων και της αντίστοιχης πλαστικοποίησης που παρατηρείται, ενώ γίνεται αραιό μακριά από την συγκόλληση.

Η μοντελοποίηση της συγκόλλησης έγινε με βάση τις διατάξεις του κανονισμού του American Welding Society (AWS 2000) για σωληνωτές συγκολλητές κατασκευές (κεφάλαιο 10). Με βάση τις διατάξεις του κανονισμού το πέλμα της συγκόλλησης έχει πλάτος ίσο με 1.5 του πάχους του βραχίονα (σχήμα 2-1). Το υλικό της συγκόλλησης θεωρήθηκε ότι είναι το ίδιο με των σωληνωτών μελών και δεν ελήφθησαν υπόψη οι παραμένουσες τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης. Δύο χαρακτηριστικά σημεία της συγκόλλησης είναι το σημείο “σέλλας” (saddle point) και το σημείο “στέψης” (crown point) που φαίνονται στο σχήμα (2-2).

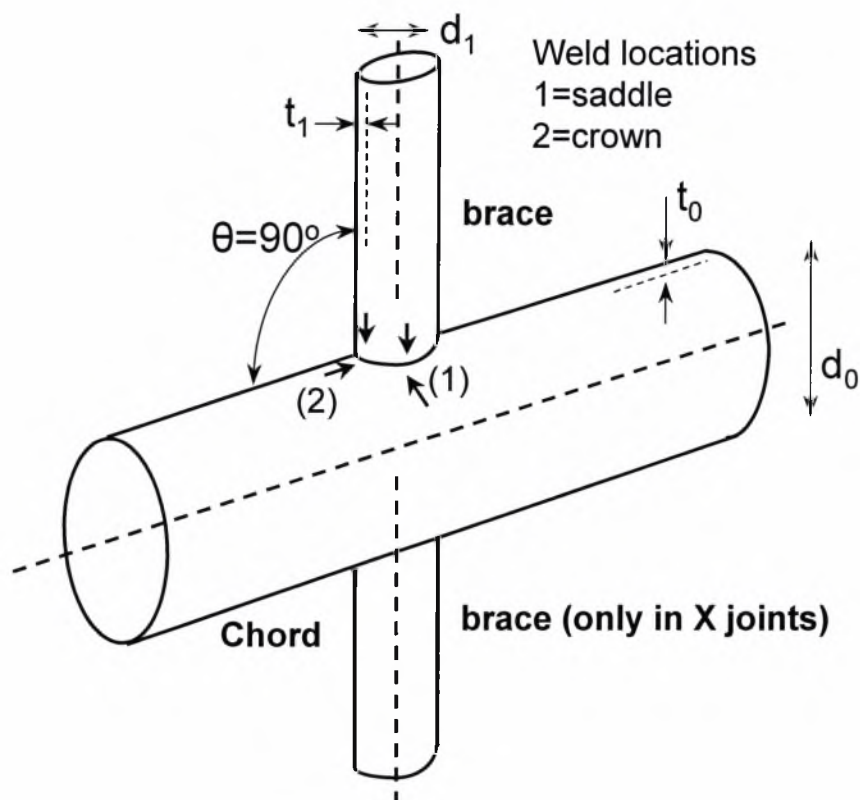


Σχήμα 2-1. Μοντελοποίηση της περιοχής της συγκόλλησης.



Κατά το πάχος των σωληνωτών μελών χρησιμοποιούνται δύο στοιχεία ώστε να προσομοιώνονται με ακρίβεια φαινόμενα κάμψης του τοιχώματος.

Το μήκος του κύριου μέλους (πολλές φορές ονομάζεται και “χορδή”- chord) είναι ίσο με 10 διαμέτρους του κύριου μέλους και το μήκος του κάθε βραχίονα (brace) από την επιφάνεια του κύριου μέλους είναι ίσο με 2.8 διαμέτρους του κύριου μέλους.



**Σχήμα 2-2. Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κόμβων μορφής X και T.**

Κατά την ανάλυση ο σύνδεσμος υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις και δημιουργούνται γεωμετρικές μη-γραμμικότητες. Οι γεωμετρικές μη-γραμμικότητες ελήφθησαν υπόψη χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη εντολή του Abaqus (nlgeom) στο βήμα της ανάλυσης όπου εφαρμόζονται τα δομικά φορτία.

Για ανάλυση με μεγάλες παραμορφώσεις χρησιμοποιήθηκαν τιμές πραγματικής τάσης – λογαριθμικής παραμόρφωσης σύμφωνα με τους τύπους :

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon)$$

$$\varepsilon^p = \ln(1 + \varepsilon) - \frac{\sigma_T}{E}$$

όπου  $\sigma$  είναι η ονομαστική τάση και  $\varepsilon$  η ανηγμένη παραμόρφωση και τα  $\sigma$ - $\varepsilon$  συνήθως δίνονται από πειραματικά αποτελέσματα.

Για την αριθμητική επίλυση ακολουθείται η διαδικασία της βήμα προς βήμα ανάλυσης με έλεγχο μετατόπισης (step-by-step displacement control). Στο μοντέλο εφαρμόζεται μετατόπιση σε κάποιους κόμβους ως συνοριακή συνθήκη. Για κάθε αύξηση (increment) της μετατόπισης, το μοντέλο ισορροπεί (implicit algorithm) και το αποτέλεσμα είναι μια δύναμη αντίδρασης στους κόμβους όπου εφαρμόζεται η μετατόπιση.

Στις περιπτώσεις που εφαρμόζεται πίεση στον κόμβο, τα άκρα του κύριου μέλους και των βραχιόνων θεωρείται ότι είναι συγκολλημένα σε απαραμόρφωτες πλάκες (capped-ends) απαραίτητες για να εφαρμοζονται η πίεση. Για να προσομοιωθούν αυτές οι πλάκες, οι κόμβοι των άκρων είναι “δεμένοι” σε έναν κόμβο αναφοράς (reference node). Οι κινηματικά εξαρτημένοι κόμβοι ακολουθούν την μετατόπιση και την στροφή του κόμβου αναφοράς ώστε να προσομοιωθεί η παρουσία της άκαμπτης πλάκας. Αυτό γίνεται με την χρήση της υποεντολής “kinematic coupling” του Abaqus.

Οι δυνάμεις από τις πιέσεις στις πλάκες στα άκρα του κύριου μέλους και των βραχιόνων λαμβάνονται επίσης υπόψη (capped-end forces). Οι δυνάμεις αυτές ακολουθούν την κίνηση των μελών, στην περίπτωση που αυτά στρέφονται, και είναι πάντα κάθετες στην επιφάνεια των άκαμπτων πλακών των άκρων χρησιμοποιώντας την υποεντολή “follower” του Abaqus στον ορισμό τους.

## 2.2. Επιβεβαίωση Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων

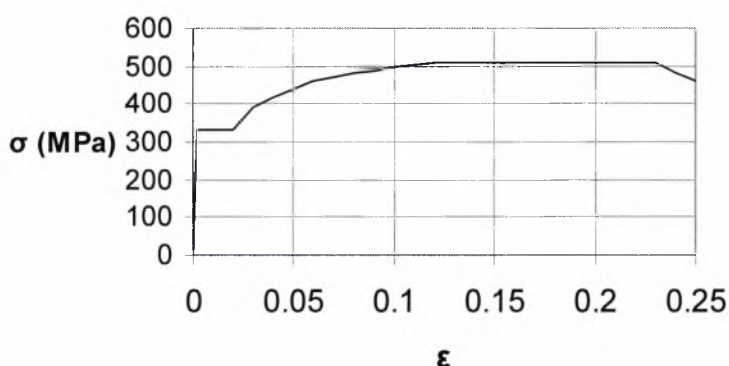
Θεωρήθηκε σκόπιμη η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων που αναπτύχθηκαν με πειραματικά και άλλα αριθμητικά δεδομένα για συγκολλητούς κόμβους χωρίς πίεση. Σημειώνεται ότι δεν υφίστανται πειραματικά δεδομένα για την αντοχή των κόμβων υπό την παρουσία τη πίεσης. Η σύγκριση αυτή γίνεται για να πιστοποιηθεί η ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα πειραματικά και αριθμητικά δεδομένα αλλά και για την επιβεβαίωση της επιλογής των στοιχείων και του αντίστοιχου πλέγματος που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω.

Τα δεδομένα των πειραματικών διατάξεων και τα αποτελέσματα των πειραμάτων προέρχονται από τρία πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο TU Delft όπου έγινε και η αριθμητική προσομοίωση (van der Vegte 1995). Η αριθμητική προσομοίωση της σύγκρισης χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των πειραματικών διατάξεων και η μοντελοποίηση έγινε με στοιχεία κελύφους. Η σύγκριση έγινε σε

έναν τύπο μονοεπίπεδου συνδέσμου με τρεις διαφορετικούς τύπους φόρτισης σε τρία διαφορετικά δοκίμια. Το πρώτο δοκίμιο υποβλήθηκε σε αξονική θλίψη (X1), το δεύτερο σε συνεπίπεδη κάμψη (in plane bending)(X5) και το τρίτο σε εκτός επιπέδου κάμψη (out of plane bending)(X9). Για κάθε σύγκριση κατασκευάστηκε ένα μοντέλο με βάση τα πραγματικά δεδομένα κάθε πειράματος.

Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι ελαστοπλαστικό (χάλυβας) με μέτρο ελαστικότητας  $E=29000$  ksi (200 GPa) και λόγο του Poisson  $\nu=0.29$ . Η τάση διαρροής είναι  $\sigma_y=331$  MPa για την περίπτωση της αξονικής φόρτισης (X1) και της εκτός επιπέδου κάμψης (X9) και  $\sigma_y=318$  MPa για την περίπτωση της συνεπίπεδης κάμψης (X5). Το μέτρο σκλήρυνσης είναι ίσο με μηδέν για παραμόρφωση μέχρι 2% και μέγιστη τάση 510 MPa για παραμόρφωση 12-23%. Στο σχήμα (2-3) φαίνεται το διάγραμμα  $\sigma$ - $\epsilon$  για το υλικό των δοκιμών X1 και X9.

Η μοντελοποίηση του συνδέσμου έγινε χρησιμοποιώντας στοιχεία τριών διαστάσεων 20 κόμβων από την βιβλιοθήκη στοιχείων του Abaqus. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα C3D20 και C3D20R, τα πρώτα με 27 σημεία ολοκλήρωσης (“πλήρης” ολοκλήρωση) και τα δεύτερα με 8 σημεία ολοκλήρωσης (“μειωμένη” ολοκλήρωση).



**Σχήμα 2-3. Διάγραμμα ονομαστικής τάσης-παραμόρφωσης γάλυβα συνδέσμων X1 και X9**

Οι τιμές του αξονικού φορτίου  $F$  και της ροπής κάμψης  $M$  αδιαστατοποιήθηκαν διαιρώντας με  $F_N$  και  $M_N$  αντίστοιχα:

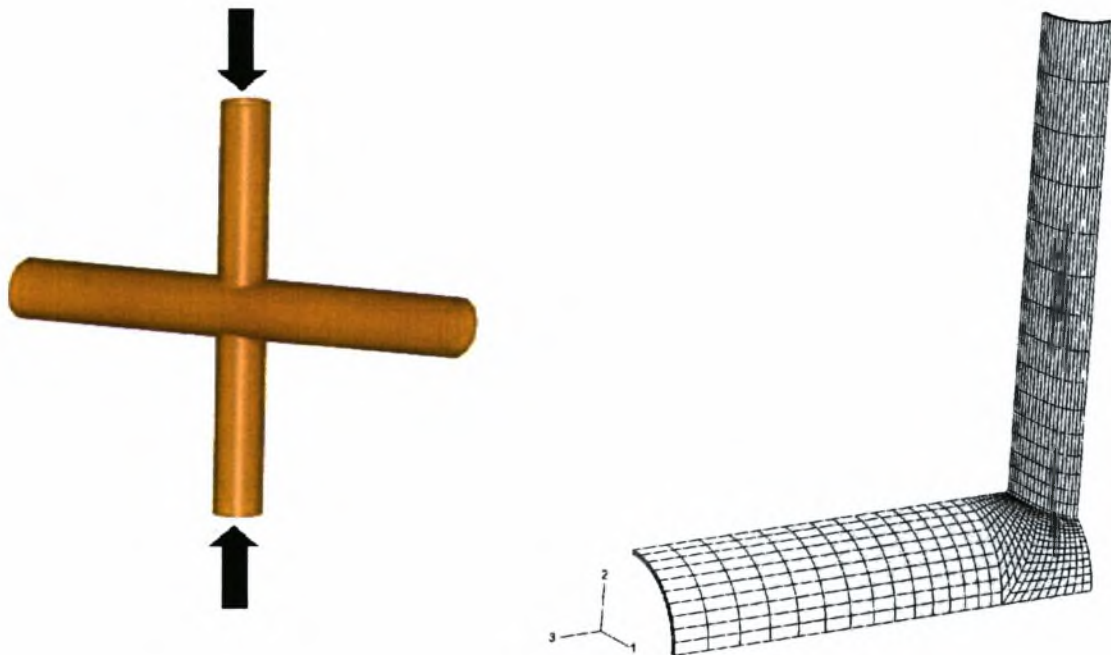
$$F_N = \sigma_y t_0^2$$

$$M_N = \sigma_y t_0^2 d_1$$

έτσι ώστε  $f = F/F_N$  και  $m = M/M_N$ .

### 2-2-1. Σύνδεσμος μορφής X σε αξονική φόρτιση (πείραμα X 1)

Η πειραματική διάταξη που περιγράφεται από τον van der Vegte (1995) εφαρμόζει θλιπτικά φορτία στα δύο άκρα των βραχιόνων του συνδέσμου αφήνοντας τα άκρα του κύριου μέλους ελεύθερα.



**Σχήμα 2-4. Γενική διάταξη πειράματος αξονικής φόρτισης και το μοντέλο που κατασκευάστηκε.**

Τα δεδομένα για την γεωμετρία των μελών του συνδέσμου είναι τα εξής :

$$d_0=408 \text{ mm}$$

$$t_0=10.2 \text{ mm}$$

$$\beta=0.6$$

$$2\gamma=d_0/t_0=40$$

$$\tau=1$$

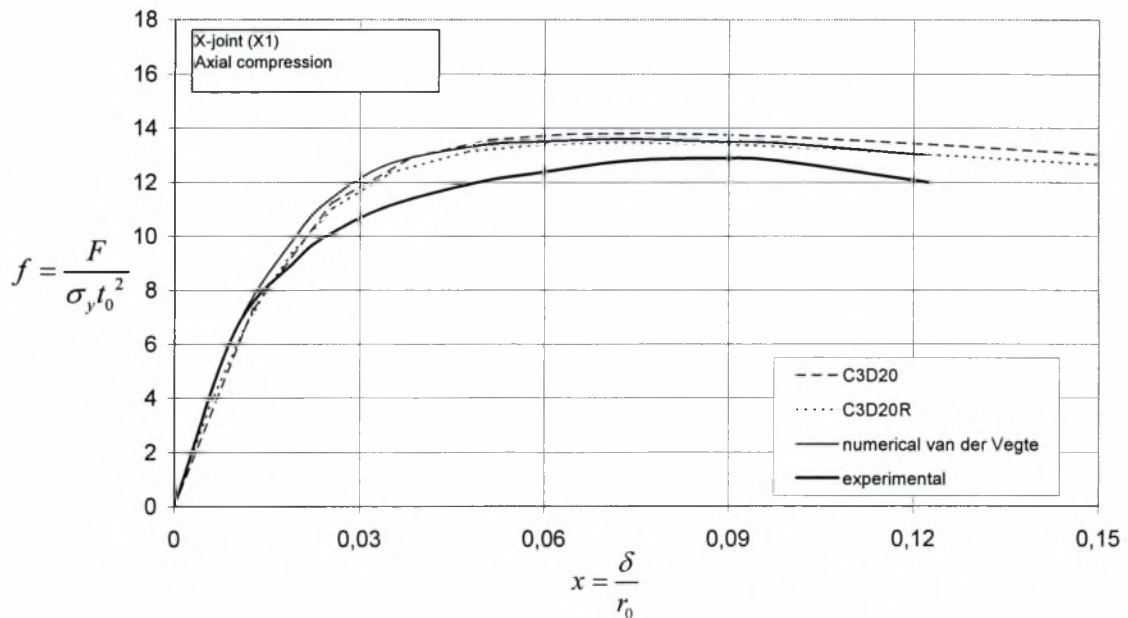
$$L=2440 \text{ mm}$$

$$l=1225 \text{ mm}$$

όπου  $d_0$  και  $t_0$  η εξωτερική διάμετρος και το πάχος του κύριου μέλους,  $\beta=d_1/d_0$  η αναλογία των διαμέτρων βραχίονα - κυρίου μέλους,  $\tau=t_1/t_0$  η αναλογία παχών των τοιχωμάτων,  $L$  το μήκος του κύριου μέλους και  $l$  το μήκος των βραχιόνων.

Από τη συνολική γεωμετρία προσομοιώθηκε το 1/8 καθώς υπάρχουν τρία επίπεδα συμμετρίας στα οποία επιβλήθηκαν οι ανάλογες συνοριακές συνθήκες.

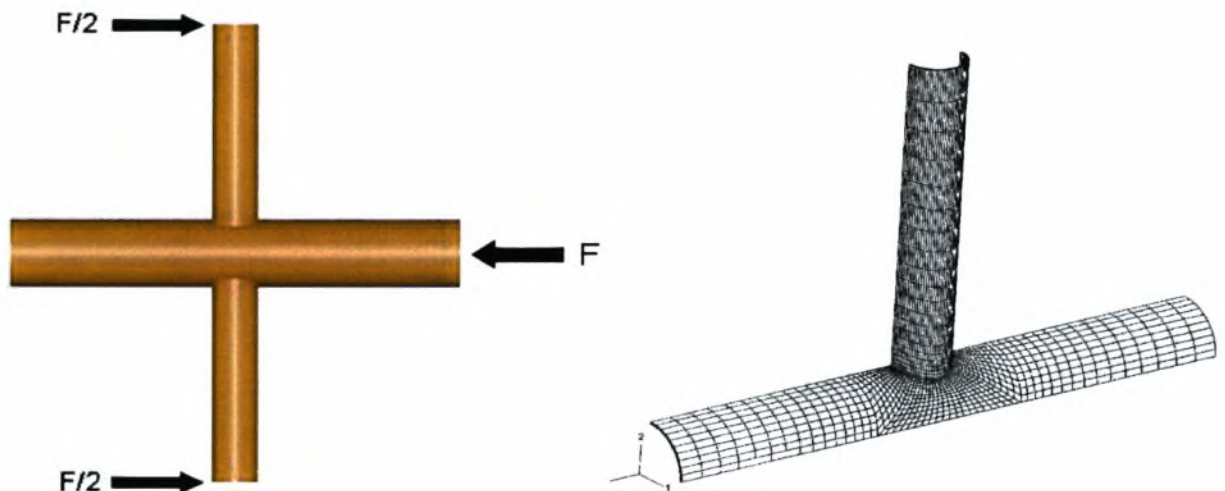
Κατά την ανάλυση εφαρμόστηκε μετατόπιση στον κόμβο αναφοράς στο άκρο του βραχίονα. Οι κόμβοι του άκρου του βραχίονα είναι “δεμένοι” με τον κόμβο αναφοράς με μόνο ελεύθερο βαθμό ελευθερίας αυτόν της μετατόπισης κατά την διεύθυνση του άξονα του βραχίονα. Στο άκρο του κύριου μέλους όλοι οι βαθμοί ελευθερίας αφέθησαν ελεύθεροι.



**Σχήμα 2-5. Συγκριτικά αποτελέσματα για το μοντέλο X1 (παρόντα αποτελέσματα και van der Vegte 1995).**

### 2-2-2. Σύνδεσμος μορφής X σε συνεπίπεδη κάμψη (πείραμα X 5)

Στην πειραματική διάταξη, ο σύνδεσμος στηρίζεται στα άκρα των δύο βραχιόνων και το φορτίο  $F$  εφαρμόζεται στο άκρο του κύριου μέλους. Τα άκρα των δύο βραχιόνων είναι συγκολλημένα το καθένα σε μια πλάκα ώστε να αποφευχθεί τοπική παραμόρφωση.



Σχήμα 2-6. Γενική διάταξη πειράματος συνεπίπεδης κάμψης και το μοντέλο που κατασκευάστηκε.

Τα δεδομένα για την γεωμετρία των μελών του συνδέσμου είναι τα εξής :

$$d_0=408.5 \text{ mm}$$

$$t_0=10 \text{ mm}$$

$$\beta=0.6$$

$$2\gamma=d_0/t_0=40.9$$

$$\tau=1$$

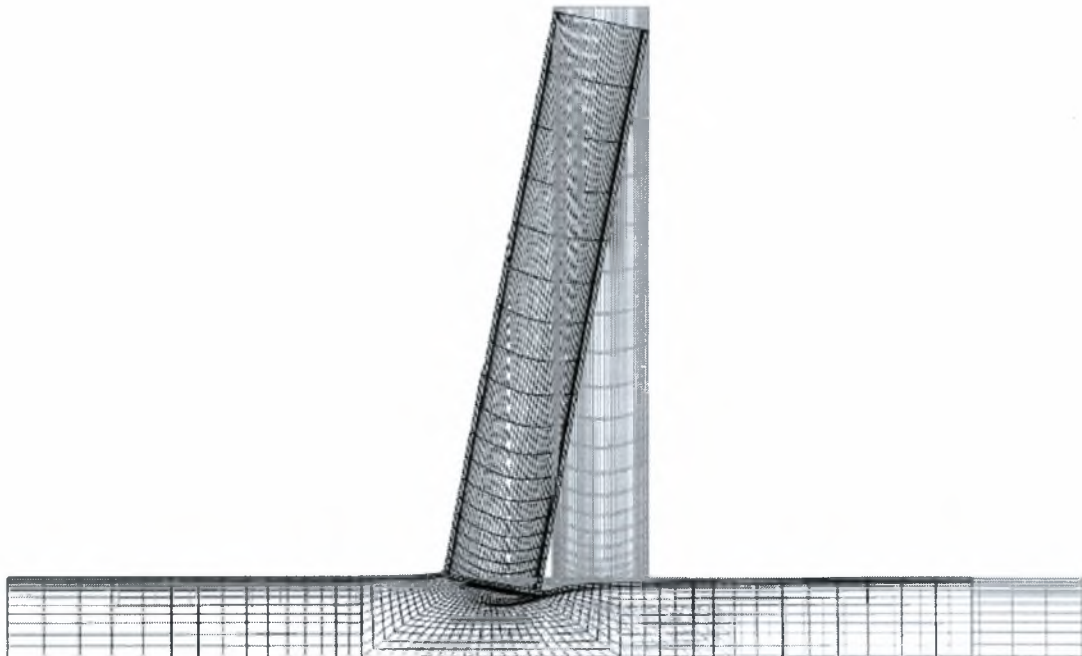
$$L=2440 \text{ mm}$$

$$l=1225 \text{ mm}$$

όπου  $d_0$  και  $t_0$  η εξωτερική διάμετρος και το πάχος του κύριου μέλους,  $\beta$  η αναλογία των διαμέτρων βραχίονα και κύριου μέλος,  $\tau$  η αναλογία παχών των τοιχωμάτων,  $L$  το μήκος του κύριου μέλους και  $l$  το μήκος των βραχιόνων.

Προσομοιώθηκε το  $\frac{1}{4}$  της συνολικής γεωμετρίας του συνδέσμου καθώς υπάρχουν δύο επίπεδα συμμετρίας και επιβλήθηκαν οι ανάλογες συνοριακές συνθήκες.

Κατά την ανάλυση εφαρμόστηκε μετατόπιση στο άκρο του κύριου μέλους. Οι κόμβοι του άκρου του κύριου μέλους είναι “δεμένοι” στον κόμβο αναφοράς στον οποίο εφαρμόστηκε η μετατόπιση. Στους παραπάνω κόμβους ο μόνος βαθμός ελευθερίας που είναι ελεύθερος είναι αυτός της μετατόπισης πάνω στον άξονα του κύριου μέλους. Οι κόμβοι στην επιφάνεια του άκρου του βραχίονα είναι επίσης “δεμένοι” με έναν κόμβο αναφοράς όπου εφαρμόστηκαν οι συνοριακές συνθήκες ώστε να προσομοιωθεί η πλάκα στην οποία είναι συγκολλημένο το άκρο. Στον κόμβο αναφοράς του βραχίονα ελεύθεροι είναι δυο βαθμοί ελευθερίας: (α) η μετατόπιση κατά τον άξονα του βραχίονα και (β) η στροφή ως προς το διάνυσμα που είναι κάθετο στο επίπεδο που ορίζουν οι άξονες του κύριου μέλους και του βραχίονα.

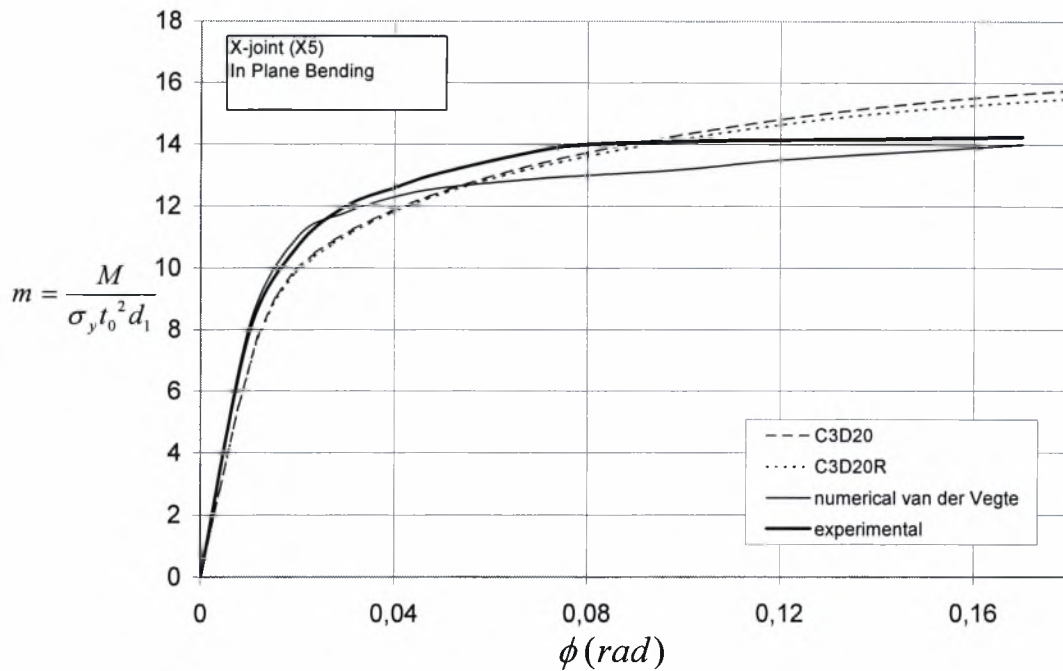


**Σχήμα 2-7. Σύγκριση απαραμόρφωτου - παραμορφωμένου πλέγματος X5.**

Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων (post-processing) ελήφθησαν τιμές για την αντίδραση στο άκρο του βραχίονα κατά τον άξονα στον οποίο εφαρμόστηκε η μετατόπιση. Υπολογίστηκε η ροπή με βάση την απόσταση του άκρου του βραχίονα από την επιφάνεια του κύριου μέλους. Για τον υπολογισμό της στροφής του βραχίονα ως προς την αρχική του θέση ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία : Ελήφθησαν οι τιμές της μετατόπισης κατά τον άξονα του κύριου μέλους για τον

κόμβο αναφοράς στο άκρο του βραχίονα (U) και του κόμβου που βρίσκεται στην τομή της επιφάνειας του κύριου μέλους και του άξονα του βραχίονα (u). Η διαφορά τους είναι η μετατόπιση του άκρου του βραχίονα ως προς το κύριο μέλος. Θεωρώντας ότι το μήκος του βραχίονα παραμένει πρακτικά αμετάβλητο και ίσο με L:

$$\frac{U-u}{L} = \sin \theta \Rightarrow \theta = \arcsin \frac{U-u}{L}$$

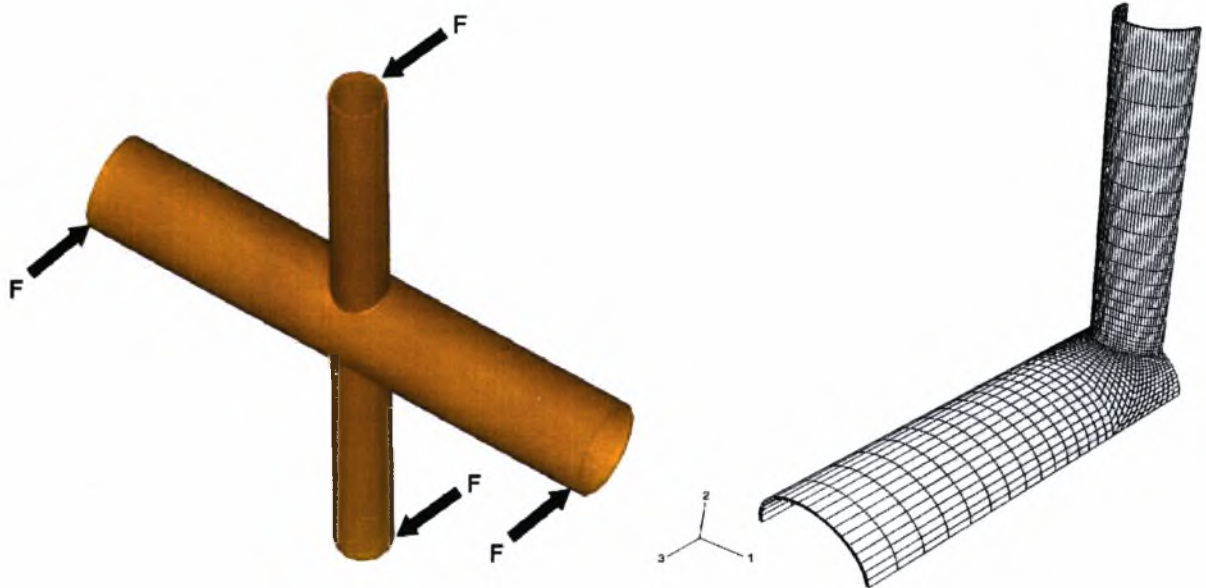


**Σχήμα 2-8. Συγκριτικά αποτελέσματα για το μοντέλο X5 (παρόντα αποτελέσματα και van der Vegte 1995).**



### 2-2-3. Σύνδεσμος μορφής Χ σε εκτός επιπέδου κάμψη (πείραμα Χ 9)

Στην πειραματική διάταξη ο σύνδεσμος στηρίζεται στα δυο άκρα του κύριου μέλους και εφαρμόζεται μετατόπιση στο άκρο του βραχίονα κάθετα προς το επίπεδο που ορίζουν οι άξονες του κύριου μέλους και του βραχίονα. Τα άκρα του κύριου μέλους και των βραχιόνων είναι συγκολλημένα σε μια άκαμπτη πλάκα ώστε να αποφευχθούν τοπικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 2-9. Γενική διάταξη πειράματος εκτός επιπέδου κάμψης και το μοντέλο που κατασκευάστηκε.

Τα δεδομένα για την γεωμετρία των μελών του συνδέσμου είναι τα εξής :

$$d_0=408 \text{ mm}$$

$$t_0=10.2 \text{ mm}$$

$$\beta=0.6$$

$$2\gamma=d_0/t_0=40$$

$$\tau=1$$

$$L=2440 \text{ mm}$$

$$l=1225 \text{ mm}$$

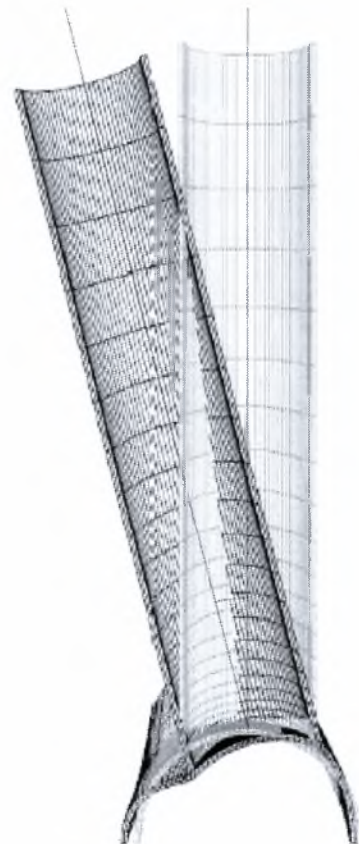
όπου  $d_0$  και  $t_0$  η εξωτερική διάμετρος και το πάχος του κύριου μέλους,  $\beta$  η αναλογία των διαμέτρων βραχίονα - κύριου μέλος,  $\tau$  η αναλογία παχών των τοιχωμάτων,  $L$  το μήκος του κύριου μέλους και  $l$  το μήκος των βραχιόνων.

Προσομοιώθηκε το  $\frac{1}{4}$  του συνδέσμου καθώς υπάρχουν 2 επίπεδα συμμετρίας όπου επιβλήθηκαν οι ανάλογες συνοριακές συνθήκες.

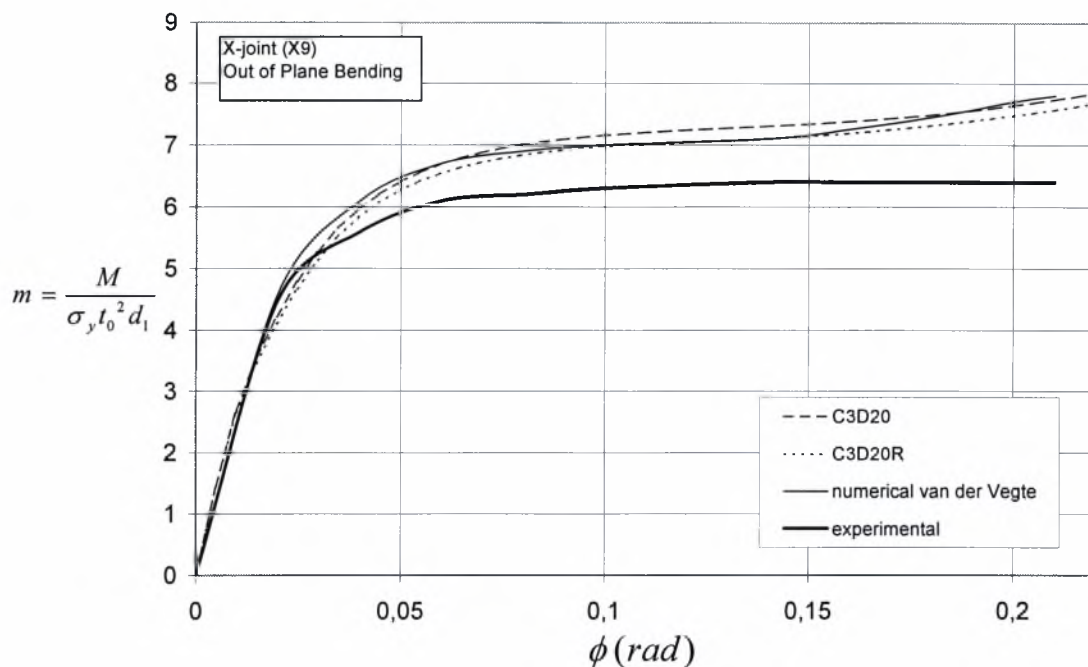
Οι κόμβοι στο άκρο του κύριου μέλους και στο άκρο του βραχίονα είναι “δεμένοι” σε κεντρικούς κόμβους (kinematic coupling). Στο άκρο του κύριου μέλους ο μόνος ελεύθερος βαθμός ελευθερίας είναι αυτός της μετατόπισης κατά τον άξονα του. Το άκρο του βραχίονα έχει τρεις ελεύθερους βαθμούς ελευθερίας. Ο πρώτος είναι αυτός της εφαρμοζόμενης μετατόπισης που είναι κάθετος στο επίπεδο που ορίζεται από τους άξονες του κύριου μέλους και του βραχίονα. Ο δεύτερος είναι η μετατόπιση κατά τον άξονα του βραχίονα και ο τρίτος είναι η στροφή ως προς τον άξονα του κύριου μέλους.

Κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων ελήφθησαν τιμές για την αντίδραση κατά τον άξονα στον οποίο εφαρμόστηκε η μετατόπιση και υπολογίστηκε η ροπή με βάση την απόσταση του άκρου του βραχίονα από την επιφάνεια του κύριου μέλους. Για τον υπολογισμό της στροφής του βραχίονα ως προς την αρχική του θέση ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία : Ελήφθησαν οι τιμές της μετατόπισης κατά τον άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο που ορίζουν οι άξονες του κύριου μέλους και του βραχίονα για τον κόμβο αναφοράς στο άκρο του βραχίονα ( $U$ ) και του κόμβου που βρίσκεται στην τομή της επιφάνειας του κύριου μέλους και του άξονα του βραχίονα ( $u$ ). Η διαφορά τους είναι η μετατόπιση του άκρου του βραχίονα ως προς το κύριο μέλος. Θεωρώντας ότι το μήκος του βραχίονα παραμένει πρακτικά αμεταβλητό και ίσο με  $L$ :

$$\frac{U-u}{L} = \sin \theta \Rightarrow \theta = \arcsin \frac{U-u}{L}$$



**Σχήμα 2-10. Σύγκριση απαραμόρφωτου - παραμορφωμένου μοντέλου X9.**



**Σχήμα 2-11. Συγκριτικά αποτελέσματα για το μοντέλο X9 (παρόντα αποτελέσματα και van der Vegte 1995).**

Στα διαγράμματα (2-5),(2-8) και (2-11) φαίνονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των μοντέλων που κατασκευάστηκαν με αυτά των πειραμάτων και των αριθμητικών αποτελεσμάτων του van der Vegte (1995). Βλέπουμε και στις τρεις περιπτώσεις ότι οι καμπύλες έχουν την ίδια μορφή με μικρές διαφορές στην προβλεπόμενη οριακή αντοχή. Τα αποτελέσματα βρίσκονται κατά κανόνα υψηλότερα από αυτά των πειραμάτων. Επίσης, η σύγκριση με τα αποτελέσματα που είχαμε στη διάθεση μας δείχνει πως οι διαφορές είναι γενικά μικρές. Το γεγονός αυτό μας δίνει μια πρώτη ένδειξη ότι τα μοντέλα δίνουν καλά αποτελέσματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης. Ακόμα, τα αποτελέσματα για τα στοιχεία C3D20R είναι πιο κοντά στα πειραματικά δεδομένα από ότι τα C3D20. Δεδομένης της καλύτερης συμπεριφοράς τους και συνυπολογίζοντας το υπολογιστικό κόστος, που είναι μικρότερο γι' αυτά τα στοιχεία, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερο για τα επόμενα μοντέλα να χρησιμοποιήσουμε τα στοιχεία C3D20R.

### Κεφάλαιο 3. Αντοχή Κόμβων μορφής X υπό πίεση και δομικά φορτία

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε την επίδραση της εξωτερικής πίεσης στην οριακή αντοχή των συνδέσμων μορφής X. Σε κάθε περίπτωση η εξωτερική πίεση εφαρμόζεται σε ένα πρώτο βήμα και στο δεύτερο βήμα, κρατώντας σταθερή την πίεση, εφαρμόζονται τα δομικά φορτία, κάτι που συμφωνεί με την διαδικασία πραγματικής φόρτισης.

Χρησιμοποιήθηκε ένας τύπος υλικού σε όλες τις αναλύσεις του παρόντος αλλά και του επόμενου κεφαλαίου. Το υλικό είναι ελαστοπλαστικό (χάλυβας) με μέτρο ελαστικότητας  $E=29000$  ksi (200 GPa), τάση διαρροής  $\sigma_y=55$  ksi (380 MPa) και λόγο του Poisson  $\nu=0.29$ . Θεωρήθηκε ότι το υλικό είναι γραμμικά κρατυνόμενο με μέτρο σκλήρυνσης  $E' = E/400$  και μοντέλο ισοτροπικής κράτυνσης με κριτήριο διαρροής “von Mises”

Τα αποτελέσματα για το αξονικό φορτίο (F), την ροπή κάμψης (M) και την πίεση αδιαστατοποιήθηκαν κατά  $F_N$ ,  $M_N$  και  $p_e$  :

$$F_N = \sigma_y t_0^2$$

$$M_N = \sigma_y t_0^2 d_1$$

$$p_e = \frac{2E}{1-\nu^2} \left( \frac{t_0}{d_0} \right)^3$$

ώστε  $f=F/F_N$ ,  $m=M/M_N$  και  $q=p/p_e$ . Η πίεση  $p_e$  είναι η ελαστική κρίσιμη πίεση λυγισμού για απειρομήκες λεπτότοιχο σωλήνα χωρίς νευρώσεις [Timoshenko & Gere (1961)]. Ακόμα, η μετατόπιση του άκρου του βραχίονα  $\delta$  ως προς το κέντρο της διατομής του κύριου μέλους αδιαστατοποιήθηκε με την ακτίνα του κύριου μέλους  $r_0=d_0/2$  για τους συνδέσμους μορφής X.

Για τον ορισμό της γεωμετρίας των συνδέσμων χρησιμοποιούνται οι παρακάτω αδιάστατες παράμετροι:

- Αναλογία διαμέτρων βραχίονα - κύριου μέλους  $\beta=d_1/d_0$
- Αναλογία ακτίνας – πάχους κύριου μέλους  $\gamma=d_0/2t_0$
- Αναλογία παχών βραχίονα – κύριου μέλους  $\tau=t_1/t_0$
- Η γωνία του άξονα του βραχίονα σε σχέση με τον άξονα του κύριου μέλους  $\theta$

Στις περιπτώσεις των συνδέσμων μορφής X η γωνία  $\theta$  είναι ίση με  $90^\circ$ . Η μελέτη έγινε χρησιμοποιώντας σταθερό λόγο παχών  $\tau=1$  εκτός από μια περίπτωση όπου ο λόγος ήταν  $\tau=0.5$  για μια εκτίμηση της επίδρασης του πάχους του βραχίονα.

Για κάθε περίπτωση που αναλύθηκε υπολογίζεται η οριακή αντοχή των συνδέσμων σύμφωνα με τον κανονισμό του American Petroleum Institute (API) με συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1 και για την μέγιστη πίεση που εφαρμόστηκε σε κάθε μοντέλο. Οι τύποι για το αξονικό και καμπτικό φορτίο είναι:

$$F_{uj} = \frac{\sigma_y t_0^2}{\sin \theta} Q_u Q_f$$

$$M_{uj} = \frac{\sigma_y t_0^2}{\sin \theta} (0.8d_1) Q_u Q_f$$

όπου  $\sigma_y$  το όριο διαρροής,  $t_0$  το πάχος του κύριου μέλους,  $d_1$  η διάμετρος του βραχίονα,  $Q_f$  είναι συνάρτηση της φόρτισης στο κύριο μέλος και του λόγου ακτίνας-πάχους  $\gamma$  και  $Q_u$  είναι συνάρτηση του τύπου του κόμβου και του τύπου της φόρτισης στους βραχίονες και της αναλογίας των διαμέτρων βραχίονα-κύριου μέλους  $\beta$ .

Η πίεσεις που εφαρμόζονται είναι συνάρτηση της ελαστικής κρίσιμης πίεσης για το κύριο μέλος. Η ελαστική κρίσιμη πίεση είναι συνάρτηση της παραμέτρου  $\gamma$  αφού για όλους τους συνδέσμους το υλικό είναι το ίδιο. Χρησιμοποιήθηκαν δυο τιμές της παραμέτρου  $\gamma$ . Συγκεκριμένα:

$$\gamma = 20 \Rightarrow p_e = 989 \text{ psi} (6.82 \text{ MPa})$$

$$\gamma = 30 \Rightarrow p_e = 293 \text{ psi} (2.02 \text{ MPa})$$

Πολλές φορές, για συνδέσμους υπό αξονική ή καμπτική φόρτιση δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί μια τιμή για την μέγιστη αντοχή του συνδέσμου από την καμπύλη φορτίου μετατόπισης διότι το διάγραμμα φορτίου μετατόπισης είναι μονοτονικά αυξανόμενο. Για τις περιπτώσεις αυτές θεωρείται ότι η μέγιστη αντοχή έχει επιτευχθεί αν αντίστοιχα η μετατόπιση ή η στροφή φτάσει ένα συγκεκριμένο όριο παραμόρφωσης. Για τον τύπο συνδέσμων τύπου X που μελετάμε συνήθως χρησιμοποιούνται τα όρια παραμόρφωσης που προτάθηκαν από τους Yura et al.(1981) τα οποία για αξονική φόρτιση και για κάμψη υπολογίζονται αντίστοιχα από τους παρακάτω τύπους:

$$\delta_{lim} = \frac{60\sigma_y d_1}{E}$$

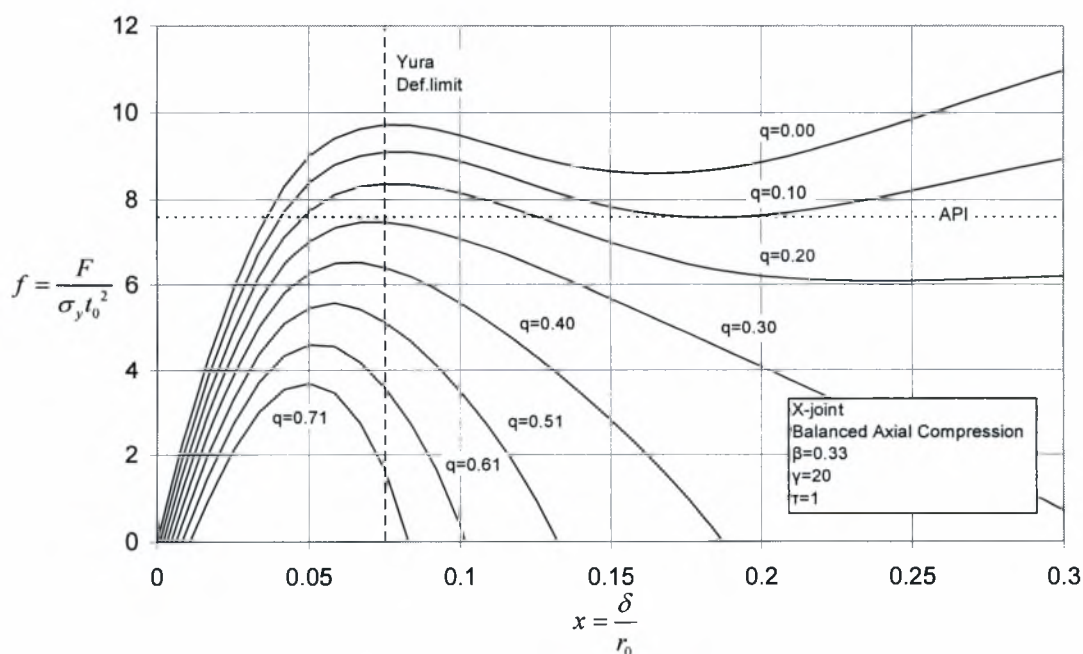
$$\phi_{lim} = \frac{80\sigma_y}{E}$$

όπου  $\delta$  η μετατόπιση του φορτίου σε σχέση με το κέντρο της διατομής και  $\phi$  η “μέση στροφή” του βραχίονα.

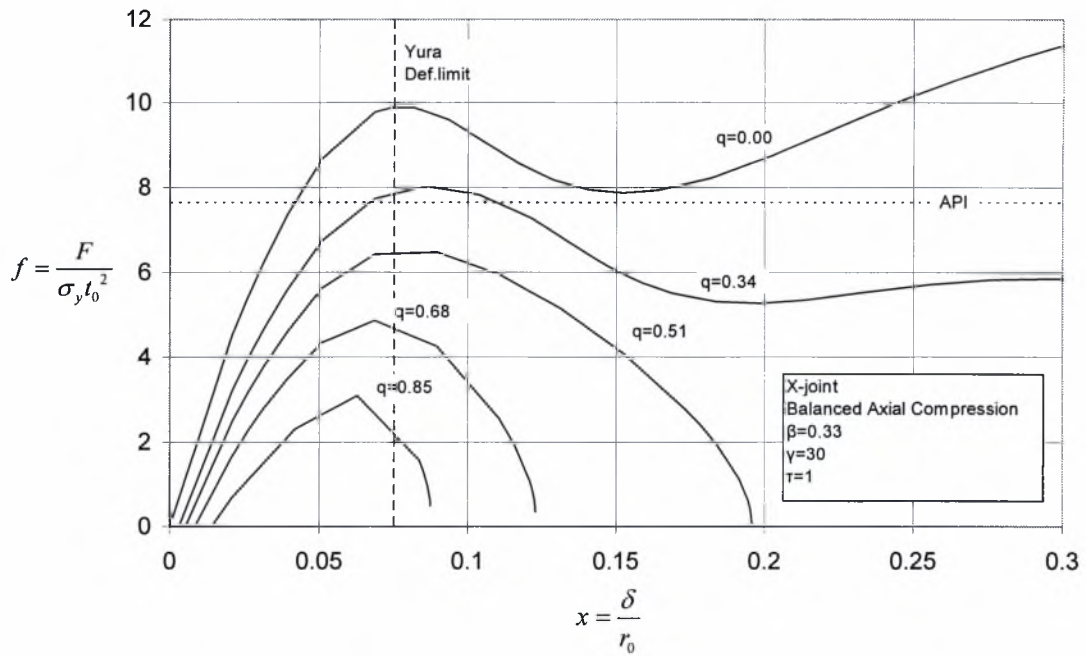
### 3.1. Σύνδεσμοι μορφής X υπό αξονικά θλιπτικά φορτία και πίεση.

Για τους συνδέσμους μορφής X σε αξονικά θλιπτικά φορτία και πίεση κατασκευάστηκαν τέσσερα μοντέλα για λόγο διαμέτρων βραχίονα – κύριου μέλους  $\beta=0.33$  και  $\beta=0.66$  και για λόγο ακτίνας – πάχους του κύριου μέλους  $\gamma=20$  και  $\gamma=30$ .

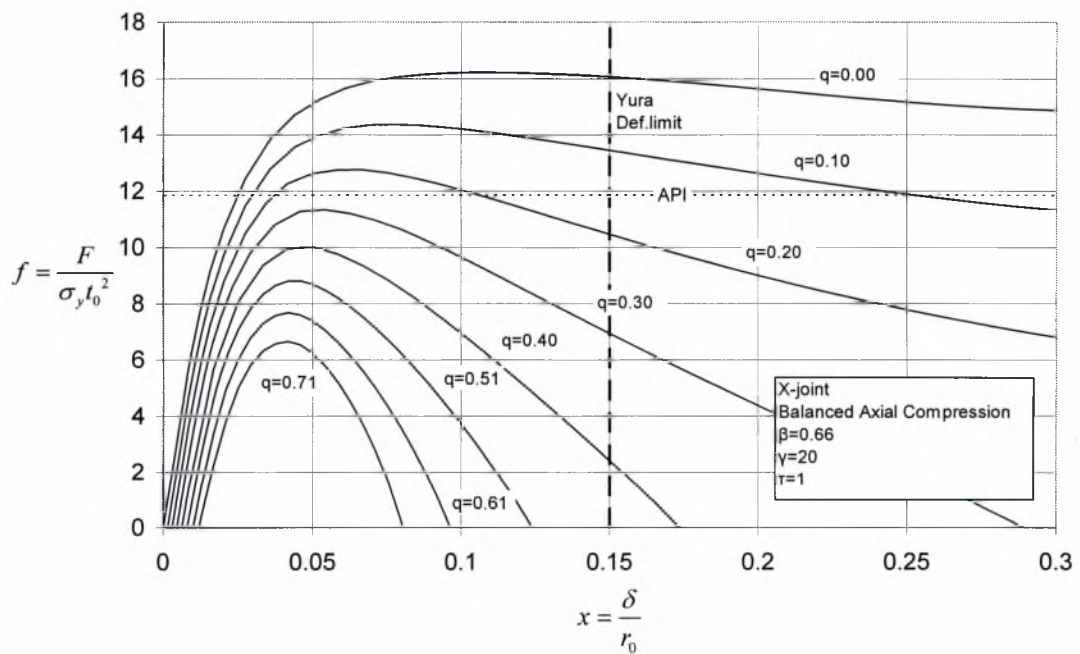
Η αριθμητική επίλυση γίνεται σε δυο βήματα. Στο πρώτο βήμα επιβάλλεται η εξωτερική πίεση σε όλες τις επιφάνειες του μοντέλου και στον κόμβο αναφοράς στο άκρο του κύριου μέλους ως συγκεντρωμένη δύναμη. Η κίνηση των κόμβων του άκρου του κύριου μέλους είναι περιορισμένη μόνο κατά τον άξονα του κύριου μέλους. Η πίεση στο άκρο του βραχίονα δεν εφαρμόζεται σε αυτό το βήμα λόγω της διαδικασίας επιβολής μετατόπισης που ακολουθεί στο επόμενο βήμα. Στο δεύτερο βήμα, κρατώντας την πίεση σταθερή, επιβάλουμε μετατόπιση στο άκρο του βραχίονα κατά τον άξονα του. Η εφαρμογή της μετατόπισης γίνεται στον κόμβο αναφοράς στο άκρο του βραχίονα. Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα σχήματα (3-1), (3-2), (3-3), (3-4) έχει αφαιρεθεί από την τιμή του φορτίου η δύναμη λόγω της πίεσης στο “καπάκι” του άκρου του βραχίονα, ώστε η δύναμη που αναφέρεται στα σχήματα να περιλαμβάνει μόνο το δομικό φορτίο και όχι την δύναμη “capped-end”.



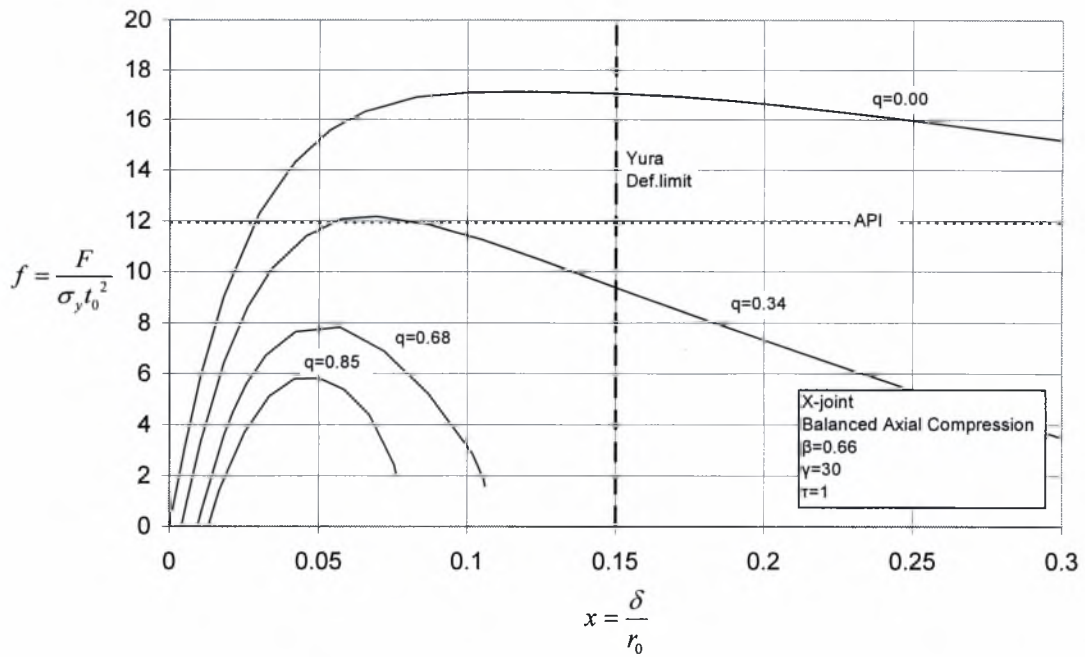
**Σχήμα 3-1. Επίδραση της πίεσης στην αντοχή συνδέσμου μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=20$  σε αξονικά θλιπτικά φορτία.**



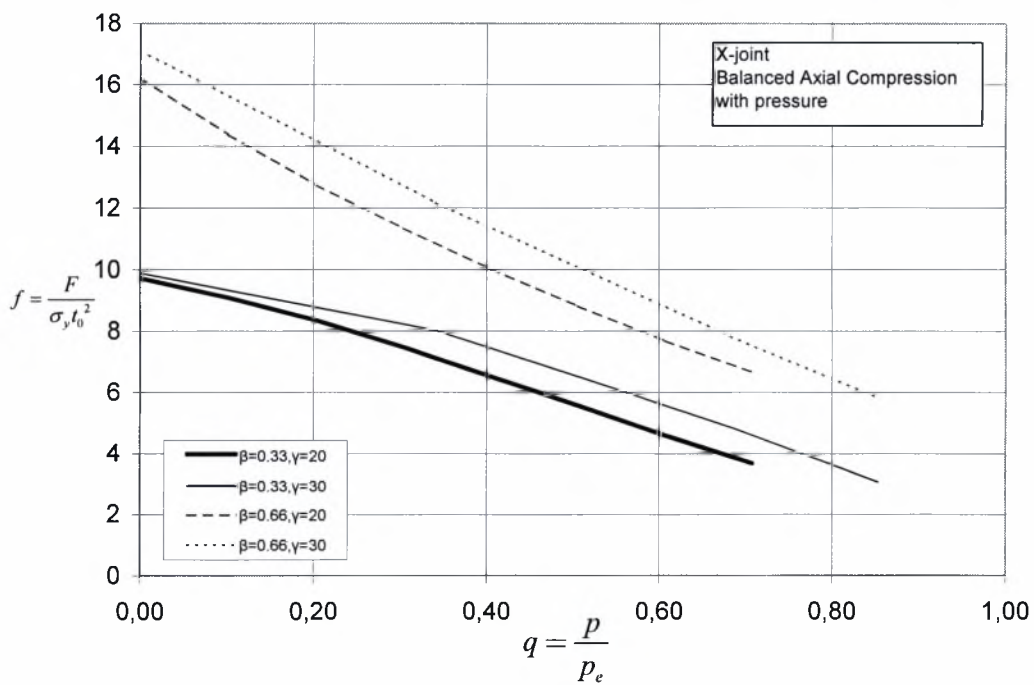
**Σχήμα 3-2. Επίδραση της πίεσης στην αντοχή συνδέσμου μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  σε αξονικά θλιπτικά φορτία.**



**Σχήμα 3-3. Επίδραση της πίεσης στην αντοχή συνδέσμου μορφής X με  $\beta=0.66$  και  $\gamma=20$  σε αξονικά θλιπτικά φορτία.**



**Σχήμα 3-4. Επίδραση της πίεσης στην αντοχή συνδέσμου μορφής X με  $\beta=0.66$  και  $\gamma=30$  σε αξονικά θλιπτικά φορτία.**



**Σχήμα 3-5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα επίδρασης της πίεσης στην αντοχή του συνδέσμου μορφής X σε αξονικά θλιπτικά φορτία.**

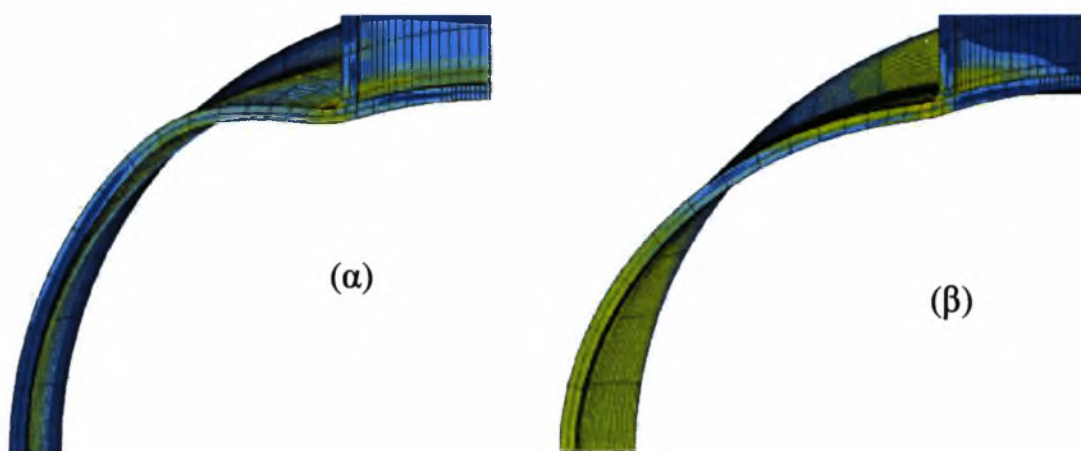
Στα σχήματα (3-1),(3-2),(3-3) και (3-4) φαίνονται οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για τους τέσσερις τύπους συνδέσμων μορφής X που εξετάστηκαν υπό αξονικά θλιπτικά φορτία. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια σημαντική μείωση της



μέγιστης αντοχής του συνδέσμου για αυξανόμενη πίεση, αλλά και μια “δραματική” μείωση της δυνατότητας παραμόρφωσης του συνδέσμου ως την οριακή αντοχή. Στο σχήμα (3-5) φαίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της μεταβολής της μέγιστης αντοχής των τεσσάρων συνδέσμων συναρτήσει της πίεσης, στην μορφή διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης πίεσης – αξονικού φορτίου.

Σε κάθε διάγραμμα εμφανίζεται και η τιμή που προβλέπει ο κανονισμός του API καθώς και το όριο παραμόρφωσης κατά τους Yura et al (1981).

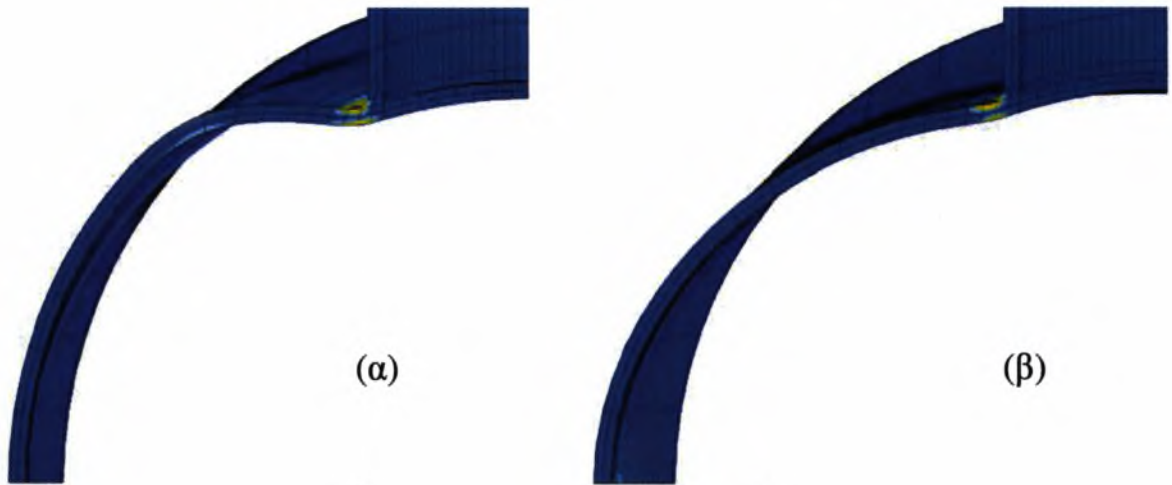
Παρατηρείται ότι σε πολλές περιπτώσεις η προβλεπόμενη τιμή του API είναι υψηλότερη από την υπολογισμένη μέγιστη τιμή από μια τιμή της πίεσης και πάνω. Συγκεκριμένα, για όλους τους συνδέσμους βλέπουμε ότι για πίεση μεγαλύτερη από περίπου  $q=0.35$  ο κανονισμός του API προβλέπει μέγιστη αντοχή υψηλότερη από αυτήν που υπολογίστηκε. Επομένως είναι μη-συντηρητικός και ίσως θα πρέπει να αναθεωρηθεί για να λάβει υπόψη του αυτό το φαινόμενο. Ακόμα, για μέτριες σχετικά πιέσεις, η μέγιστη αντοχή παρατηρείται σε παραμόρφωση σημαντικά μικρότερη από το όριο παραμόρφωσης κατά τους Yura et al. (1981)



**Σχήμα 3-6. Σύνδεσμος μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  υπό αξονικά θλιπτικά φορτία στη παραμορφωμένη κατάσταση (α) για πίεση  $q=0.00$  και (β) για πίεση  $q=0.51$  για μετατόπιση ίση με  $x=0.18$  στην περιογή του σημείου “σέλλας” της συγκόλλησης.**

Στο σχήμα (3-6) βλέπουμε την σύγκριση της μορφής των παραμορφωμένων συνδέσμων με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  για την ίδια τιμή αδιάστατης μετατόπισης  $x=0.18$  για πίεση ίση με 0 και για πίεση ίση με το 51% της ελαστικής κρίσιμης πίεσης  $p_e$ . Η παραμόρφωση στο σχήμα αναφέρεται στην περιοχή του σημείου “σέλλας” της συγκόλλησης. Είναι εμφανές ότι στην περίπτωση παρουσίας εξωτερικής πίεσης

αλλάζει ο τρόπος με τον οποίο παραμορφώνεται ο σύνδεσμος. Η πίεση προκαλεί αύξηση του ovalization της διατομής γεγονός στο οποίο οφείλεται η σημαντική μείωση της μέγιστης αντοχής του συνδέσμου.



**Σχήμα 3-7. Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση σε σύνδεσμο μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  (α) για πίεση  $q=0.00$  και (β) για πίεση  $q=0.51$  και μετατόπιση ίση με  $x=0.18$  στην περιοχή του σημείου “σέλλας” της συγκόλλησης.**

Στο σχήμα (3-7) φαίνεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση του συνδέσμου μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  για  $q=0.00$  και  $q=0.51$  για αδιάστατη μετατόπιση  $x=0.18$ . Είναι εμφανής η συγκέντρωση πλαστικής παραμόρφωσης στα σημεία “σέλλας” και στις δύο περιπτώσεις.

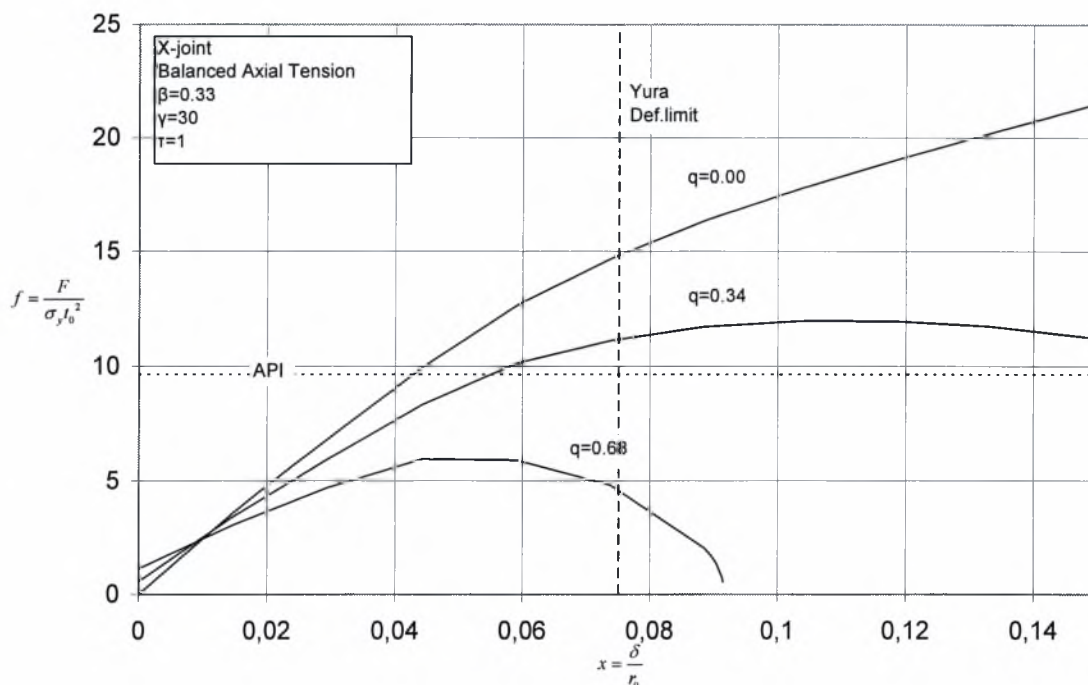
### 3.2. Σύνδεσμος μορφής X υπό αξονικά εφελκυστικά φορτία και πίεση.

Για την περίπτωση του συνδέσμου μορφής X υπό αξονικά εφελκυστικά φορτία και πίεση χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$ . Έγιναν τρεις αναλύσεις, μια χωρίς εξωτερική πίεση και δυο με εξωτερική πίεση  $q=0.34$  και  $q=0.68$ .

Η αριθμητική επίλυση έγινε σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα εφαρμόζεται η εξωτερική πίεση σε όλες τις επιφάνειες και στο άκρο του κύριου μέλους και στο άκρο του βραχίονα. Στο δεύτερο βήμα, κρατώντας την πίεση σταθερή, επιβάλλουμε μετατόπιση στο άκρο του βραχίονα.

Στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, ελήφθη υπόψη η δύναμη “capped-end” που προκύπτει από την πίεση στο “καπάκι” στο άκρο του βραχίονα (η οποία

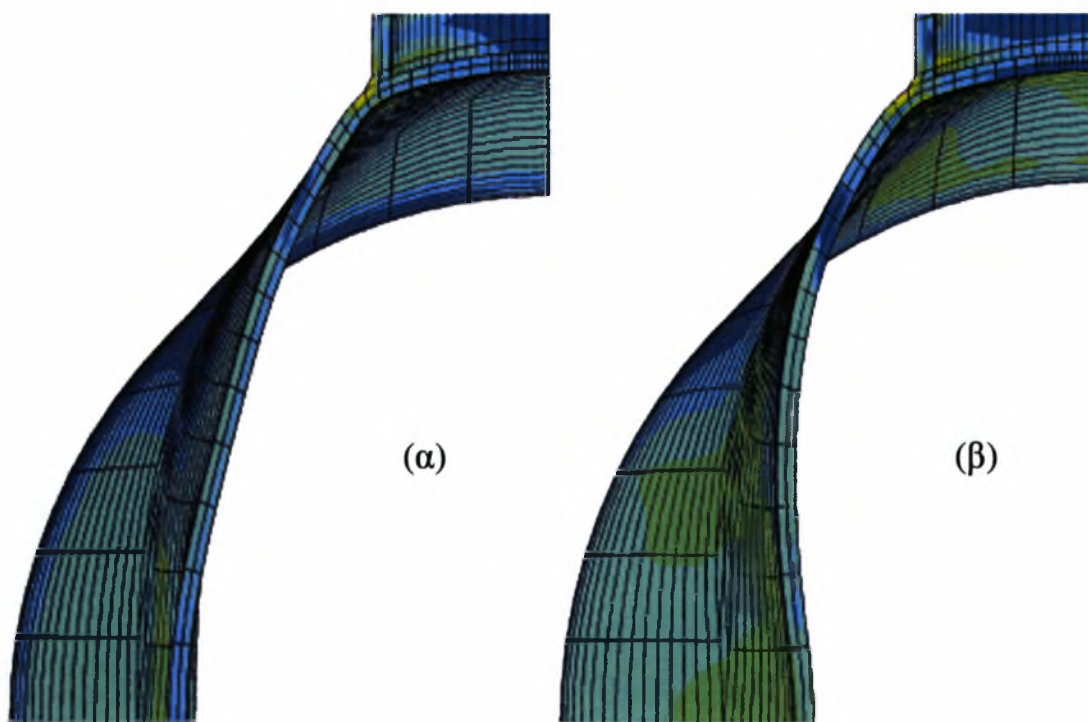
προστέθηκε στην συνισταμένη), ώστε τα αποτελέσματα να αναφέρονται στην καθαρή δύναμη λόγω δομικής φόρτισης και μόνο.



**Σχήμα 3-8. Επίδραση της πίεσης στην αντοχή του συνδέσμου μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  σε αξονικό εφελκυσμό.**

Στο σχήμα (3-8) εμφανίζονται οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για τον σύνδεσμο μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  υπό εφελκυστικά φορτία και πίεση. Η μείωση της μέγιστης αντοχής του συνδέσμου είναι εμφανής για αυξανόμενη εξωτερική πίεση. Βλέπουμε ότι για επίπεδο πίεσης  $q=0.68$  η πρόβλεψη του κανονισμού του API είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την οριακή αντοχή που προβλέπεται από τα αριθμητικά αποτελέσματα, άρα υποσυντηριτική (underconservative) και “επικίνδυνη” από πλευράς δομικού σχεδιασμού.

Στο σχήμα (3-9) φαίνεται η μορφή του παραμορφωμένου συνδέσμου για εξωτερική πίεση (α)  $q=0.00$  και (β)  $q=0.34$  και για μετατόπιση του φορτίου ίση με  $x=0.22$ . Στην περίπτωση της ύπαρξης εξωτερικής πίεσης το φαινόμενο του “ανάστροφου ovalization”, δηλαδή αύξηση του μήκους της διαμέτρου παράλληλης με την διεύθυνση της φόρτισης, επιδεινώνεται. Το φαινόμενο αυτό είναι υπεύθυνο για την μείωση της μέγιστης αντοχής του συνδέσμου.



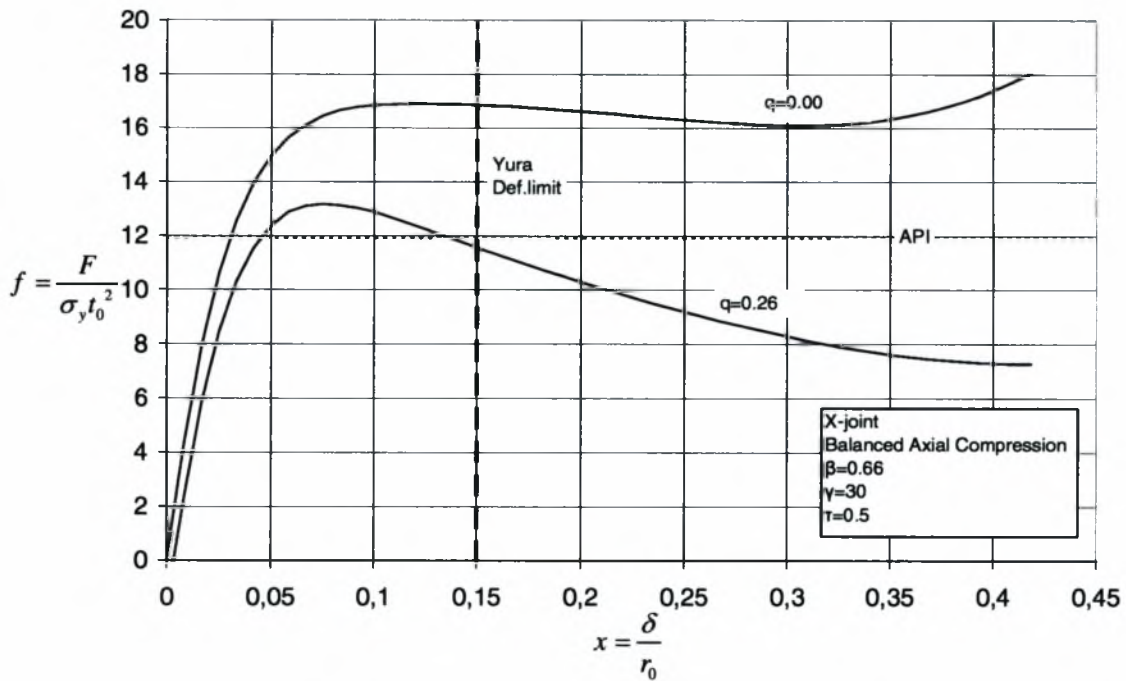
**Σχήμα 3-9. Σύνδεσμος μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  υπό αξονικά εφελκυστικά φορτία στη παραμορφωμένη κατάσταση (α) για πίεση  $q=0.00$  και (β) για πίεση  $q=0.34$  για μετατόπιση ίση με  $x=0.22$ .**

### **3.3. Σύνδεσμος μορφής X με λεπτό τοίχωμα βραχίονα υπό αξονικά θλιπτικά φορτία και πίεση.**

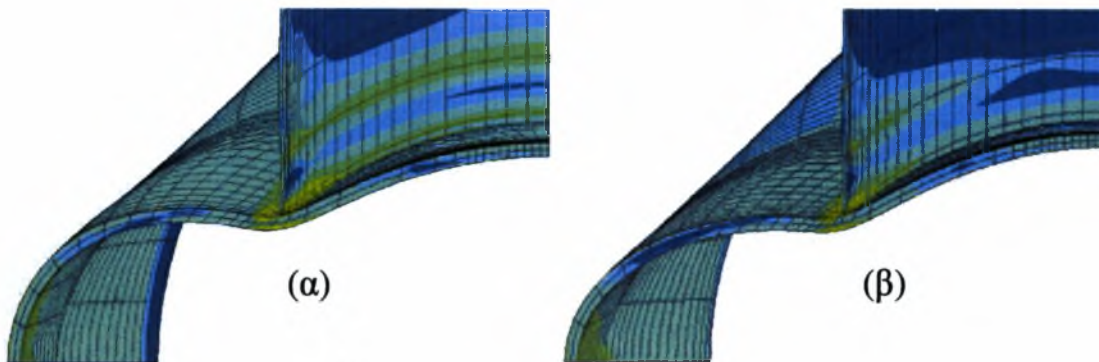
Για τον σύνδεσμο μορφής X με λεπτό σχετικά τοίχωμα βραχίονα υπό αξονικά θλιπτικά φορτία και πίεση κατασκευάστηκε ένα μοντέλο με  $\beta=0.66$ ,  $\gamma=30$  και  $\tau=0.5$ . Από την συνολική γεωμετρία προσομοιώθηκε το 1/8 καθώς υπάρχουν 3 επίπεδα συμμετρίας όπου επιβλήθηκαν οι ανάλογες συνοριακές συνθήκες.

Λόγω του λεπτού τοιχώματος του βραχίονα, παρατηρήθηκε αστοχία του βραχίονα και η εξωτερική πίεση που εφαρμόστηκε ήταν σημαντικά μικρότερη από τις περιπτώσεις με λόγο παχών  $\tau=1$ .

Στο σχήμα (3-10) φαίνονται οι καμπύλες φορτίου μετατόπισης για μηδενική εξωτερική πίεση και για πίεση ίση με το 26% της ελαστικής κρίσιμης πίεσης του κύριου μέλους. Η οριακή αντοχή του κόμβου μειώνεται υπό την παρουσία εξωτερικής πίεσης, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.



**Σχήμα 3-10. Επίδραση της πίεσης στην αντοχή του συνδέσμου μορφής X με  $\beta=0.66$ ,  $\gamma=30$  και  $\tau=0.5$  σε αξονικά θλιπτικά φορτία.**



**Σχήμα 3-11. Σύνδεσμος μορφής X με  $\beta=0.66$ ,  $\gamma=30$  και  $\tau=0.5$  υπό αξονικά θλιπτικά φορτία στη παραμορφωμένη κατάσταση (α) για πίεση  $q=0.00$  και (β) για πίεση  $q=0.26$  για μετατόπιση ίση με  $x=0.42$  στην περιοχή του σημείου “σέλλας” της συγκόλλησης.**

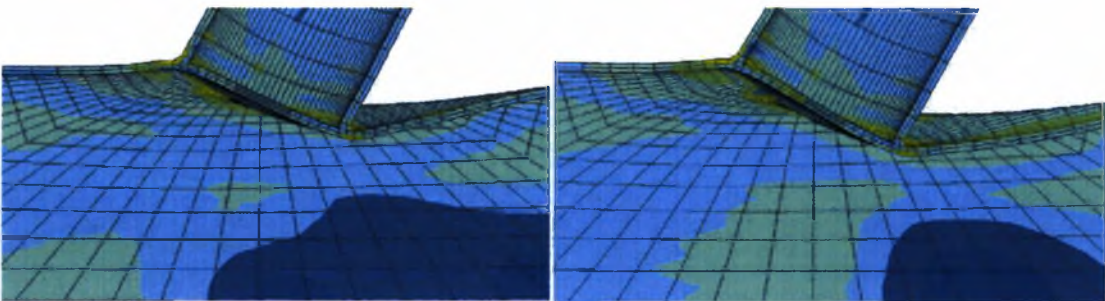
Στο σχήμα (3-11) φαίνεται η παραμορφωμένη μορφή του συνδέσμου χωρίς και υπό την παρουσία εξωτερικής πίεσης. Κοντά στην περιοχή της συγκόλλησης φαίνεται η αστοχία λόγω κύρτωσης του τοιχώματος του βραχίονα και στις δύο περιπτώσεις. Αυτή είναι η μορφή αστοχίας που εμφανίζεται παρατηρείται για λεπτό τοίχωμα του βραχίονα ενώ είναι εμφανής και πάλι η αλλαγή στον τρόπο που παραμορφώνεται το κύριο μέλος υπό την παρουσία εξωτερικής πίεσης.

### 3.4. Σύνδεσμος μορφής X σε συνεπίπεδη κάμψη και πίεση.

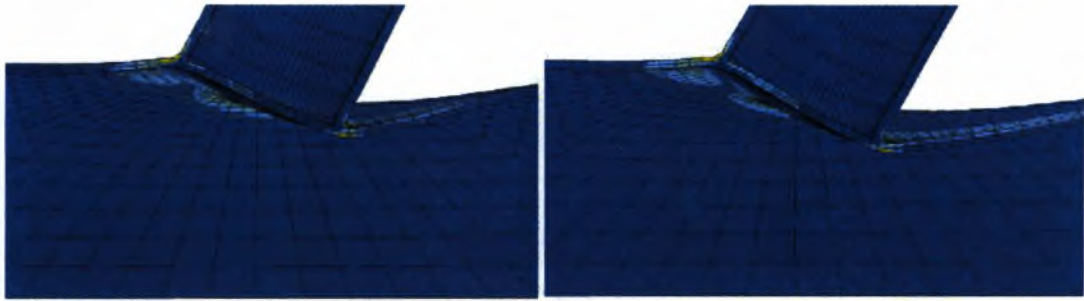
Για τον σύνδεσμο μορφής X σε συνεπίπεδη κάμψη και πίεση κατασκευάστηκε ένα μοντέλο με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$ . Από την γεωμετρία μοντελοποιήθηκε του  $\frac{1}{4}$  του κόμβου καθώς υπάρχουν δυο επίπεδα συμμετρίας όπου επιβλήθηκαν οι ανάλογες συνοριακές συνθήκες.

Η μορφή του μοντέλου είναι παρόμοια με αυτό που κατασκευάστηκε για την προσομοίωση του πειράματος X5 στο κεφάλαιο (2-2-2). Υπάρχουν διαφορές στην γεωμετρία του συνδέσμου αλλά και στον τρόπο επιβολής των δομικών φορτίων.

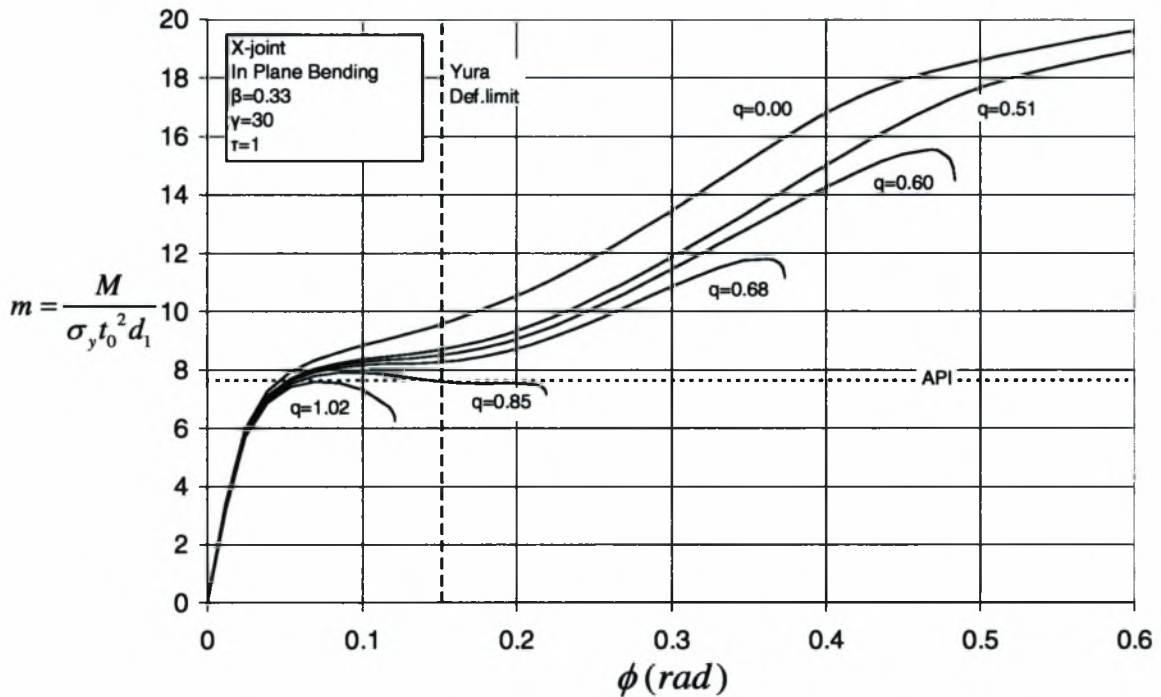
Η αριθμητική επίλυση γίνεται σε δυο βήματα. Στο πρώτο βήμα, επιβάλλεται η εξωτερική πίεση στις επιφάνειες του μοντέλου, στο άκρο του κύριου μέλους και στο άκρο του βραχίονα. Η πίεση στο άκρο του κύριου μέλους εφαρμόζεται ως συγκεντρωμένη δύναμη στον κόμβο αναφοράς στον οποίο είναι “δεμένοι” οι κόμβοι του άκρου (kinematic coupling). Μόνος ελεύθερος βαθμός ελευθερίας είναι αυτός της μετατόπισης κατά τον άξονα του κύριου μέλους. Το άλλο άκρο του κύριου μέλους είναι πακτωμένο για να αποφευχθεί η μεταφορική κίνηση του μοντέλου. Αντίστοιχα και η πίεση στην ακραία διατομή του βραχίονα εφαρμόζεται στον κόμβο αναφοράς με την μορφή συγκεντρωμένης δύναμης και ακολουθεί την στροφή του βραχίονα. Στο δεύτερο βήμα, στον κόμβο αναφοράς στο άκρο του βραχίονα επιβάλλεται μια στροφή ως προς τον άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο που ορίζουν οι άξονες του κύριου μέλους και του βραχίονα. Οι εξαρτημένοι κόμβοι στρέφονται ακολουθώντας τον κόμβο αναφοράς και το μοντέλο περνάει από διαδοχικές καταστάσεις ισορροπίας κατά τα οποία η στροφή αυξάνεται μέχρι την μέγιστη τιμή η οποία έχει οριστεί. Εφαρμόζοντας στροφή στο άκρο του βραχίονα προκύπτει μια σταθερή ροπή κατά μήκος του βραχίονα.



**Σχήμα 3-12. Σύνδεσμος μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  σε συνεπίπεδη κάμψη στη παραμορφωμένη κατάσταση για πίεση  $\alpha=0.00$  και  $\alpha=0.51$  και στροφή του βραχίονα ίση με  $\phi=0.37$  rad.**



**Σχήμα 3-13. Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση σε σύνδεσμο μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  σε συνεπίπεδη κάμψη για πίεση  $q=0.00$  και  $q=0.51$  για στροφή βραχίονα ίση με  $\phi=0.37$  rad.**



**Σχήμα 3-14. Επίδραση της πίεσης στην αντοχή του συνδέσμου μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  σε συνεπίπεδη κάμψη.**

Στο σχήμα (3-14) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την συνεπίπεδη κάμψη με πίεση στην μορφή αδιάστατης ροπής - στροφής. Η στροφή του βραχίονα υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που συνδέει το άκρο με την βάση του βραχίονα όπως για το μοντέλο X5 που φαίνεται στο σχήμα (2-6). Πρέπει να σημειωθεί πως η στροφή αυτή είναι διαφορετική από την στροφή που επιβάλλουμε στο άνω άκρο του βραχίονα λόγω της καμπτικής παραμόρφωσης του βραχίονα.

Από τα αποτελέσματα είναι εμφανές ότι η τιμή της ροπής κάμψης επηρεάζεται από την παρουσία εξωτερικής πίεσης και για τιμή της πίεσης μεγαλύτερη από περίπου 60% της ελαστικής κρίσιμης πίεσης  $p_e$ , αλλάζουν σημαντικά οι μορφές των καμπυλών ροπής-στροφής.

### 3.5. Σύνδεσμος μορφής X σε εκτός επιπέδου κάμψη και πίεση.

Για τον σύνδεσμο μορφής X σε εκτός επιπέδου κάμψη και πίεση κατασκευάστηκε ένα μοντέλο με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$ . Από την γεωμετρία μοντελοποιήθηκε του  $\frac{1}{4}$  καθώς υπάρχουν δυο επίπεδα συμμετρίας όπου επιβλήθηκαν οι ανάλογες συνοριακές συνθήκες.

Η μορφή του μοντέλου είναι παρόμοια με αυτό που κατασκευάστηκε για την προσομοίωση του πειράματος X9 στο κεφάλαιο (2-2-3). Υπάρχουν διαφορές στην γεωμετρία του συνδέσμου αλλά και στον τρόπο επιβολής των δομικών φορτίων.

Η αριθμητική επίλυση γίνεται σε δυο βήματα. Στο πρώτο βήμα, επιβάλλεται η εξωτερική πίεση στις επιφάνειες του μοντέλου, στα άκρα του κύριου μέλους και στο άκρο του βραχίονα. Η πίεση στα άκρα του κύριου μέλους και του βραχίονα εφαρμόζεται ως συγκεντρωμένη δύναμη στους κεντρικούς κόμβους όπως ακριβώς και στην περίπτωση του μοντέλου για συνεπίπεδη κάμψη. Στο δεύτερο βήμα, στον κόμβο αναφοράς στο άκρο του βραχίονα επιβάλλεται μια στροφή ως προς τον άξονα του κύριου μέλους. Όπως και στο μοντέλο για την συνεπίπεδη κάμψη επιβάλουμε στροφή στο άκρο για να έχουμε μια σταθερή ροπή κατά μήκος του βραχίονα.

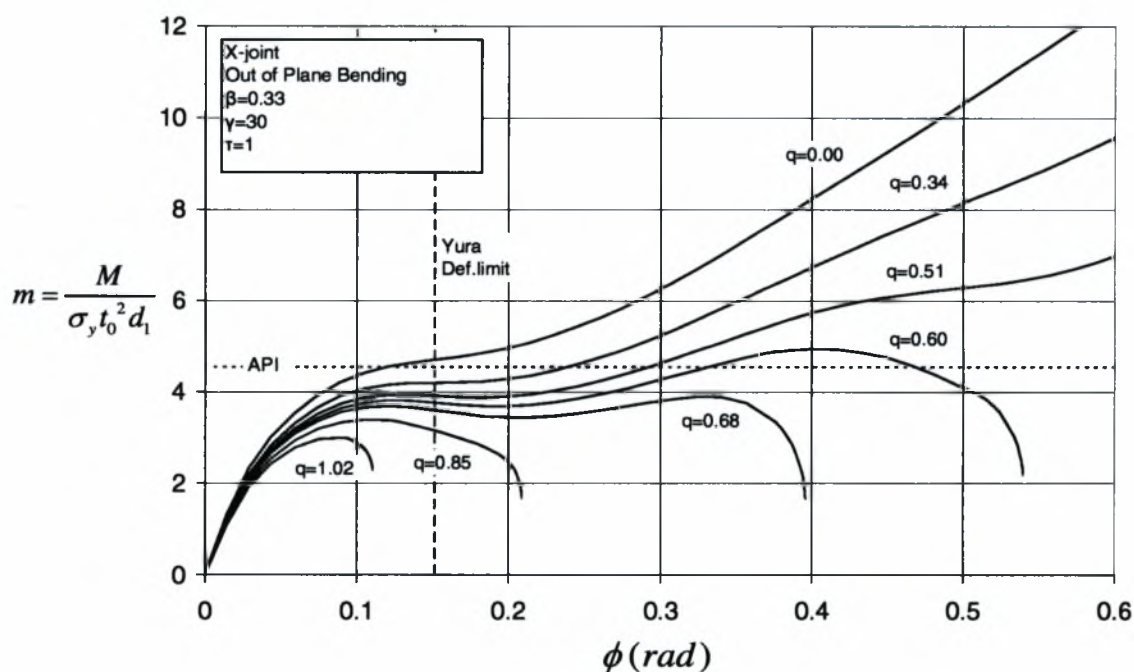


**Σχήμα 3-15. Σύνδεσμος μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  σε εκτός επιπέδου κάμψη στην παραμορφωμένη κατάσταση για πίεση  $q=0.00$  και  $q=0.51$  και στροφή του βραχίονα ίση με  $\phi=0.76$  rad.**





**Σχήμα 3-16. Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση σε σύνδεσμο μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  σε εκτός επιπέδου κάμψη για πίεση  $q=0.00$  και  $q=0.51$  για στροφή του βραχίονα ίση με  $\phi=0.76$  rad.**



**Σχήμα 3-17. Επίδραση της πίεσης στην αντοχή του συνδέσμου μορφής X με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  σε εκτός επιπέδου κάμψη.**

Στο σχήμα (3-17) φαίνονται τα αποτελέσματα για την εκτός επιπέδου κάμψη με πίεση στην μορφή αδιάστατης ροπής - στροφής. Η στροφή του βραχίονα υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που συνδέει το άκρο με την βάση του βραχίονα όπως για το μοντέλο X9 που φαίνεται στο σχήμα (2-9).

Από τα αποτελέσματα είναι εμφανές ότι και στη περίπτωση της εκτός επιπέδου κάμψης μεταβάλλεται η αντοχή ροπής κάμψης όσο αυξάνεται η εξωτερική πίεση. Για τιμές της πίεσης μεγαλύτερες από το 60% της ελαστικής κρίσιμης πίεσης  $p_e$  έχουμε σημαντική αλλαγή στην μορφή των καμπυλών ροπής κάμψης - στροφής.

Εκτός από την μέγιστη αντοχή του συνδέσμου, μειώνεται και η δυνατότητα παραμόρφωσης του όσο αυξάνεται η εξωτερική πίεση.

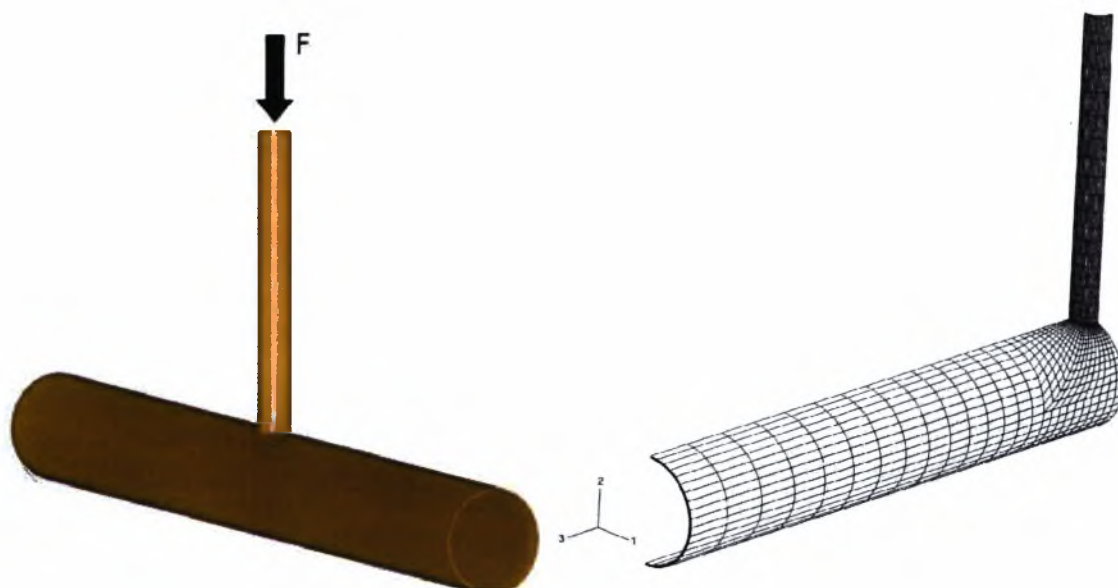
Χαρακτηριστικό είναι επίσης ότι για τιμές της πίεσης πάνω από περίπου το 70% της ελαστικής κρίσιμης πίεσης  $p_e$ , η πρόβλεψη του κανονισμού του API δίνει σημαντικά μεγαλύτερη τιμή από ότι η υπολογιζόμενη μέγιστη αντοχή, γεγονός “επικίνδυνο” από πλευράς σχεδιασμού.

Παρατηρείται ότι στην συνεπίπεδη κάμψη η πίεση επηρεάζει λιγότερο την αντοχή του κόμβου από ότι στην εκτός επιπέδου κάμψη. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η αντοχή του συνδέσμου έχει άμεση σχέση με την παραμόρφωση της διατομής του κύριου μέλους (chord ovalization). Στην περίπτωση της εκτός επιπέδου κάμψης εμφανίζονται μεγάλες παραμορφώσεις της διατομής στο σημείο “σέλλας” (saddle). Αυτό συνδέεται με το ovalization και ενισχύεται υπό την παρουσία εξωτερικής πίεσης. Αντίθετα, στη περίπτωση της συνεπίπεδης κάμψης οι παραμορφώσεις εμφανίζονται τοπικά στην περιοχή γύρω από την συγκόλληση στο σημείο “στέψης” (crown) το οποίο δεν συνδέεται άμεσα με το ovalization, επομένως η συμπεριφορά δεν επηρεάζεται τόσο πολύ από την παρουσία της εξωτερικής πίεσης.

## Κεφάλαιο 4. Αντογή Κόμβων μορφής T και K υπό πίεση και δομικά φορτία

### 4.1. Σύνδεσμος μορφής T υπό αξονικό θλιπτικό φορτία και πίεση.

Για τον σύνδεσμο μορφής T υπό αξονικά θλιπτικά φορτία και πίεση κατασκευάστηκε ένα μοντέλο με αναλογία διαμέτρων βραχίονα – κύριου μέλους  $\beta=0.33$  και αναλογία ακτίνας – πάχους του κύριου μέλους  $\gamma=30$ . Από την γεωμετρία μοντελοποιήθηκε το  $\frac{1}{4}$  καθώς υπάρχουν δυο επίπεδα συμμετρίας όπου επιβλήθηκαν οι ανάλογες συνοριακές συνθήκες.

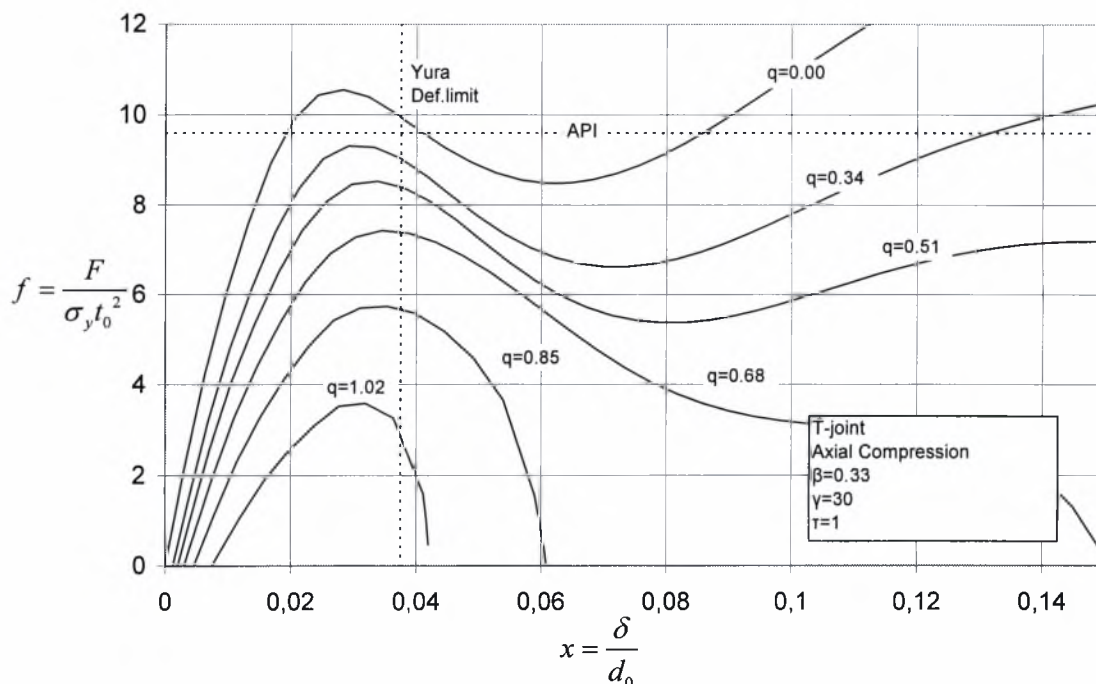


Σχήμα 4-1. Γενική διάταξη του συνδέσμου μορφής T υπό αξονική φορτίση και το μοντέλο που κατασκευάστηκε.

Η αριθμητική επίλυση του προβλήματος γίνεται σε δυο βήματα. Στο πρώτο βήμα επιβάλλεται η εξωτερική πίεση σε όλες τις επιφάνειες του μοντέλου και στο άκρο του κύριου μέλους ως συγκεντρωμένη δύναμη. Η δύναμη αυτή εφαρμόζεται στον κόμβο αναφοράς στο άκρο του κύριου μέλους. Η κίνηση των κόμβων στο άκρο του κύριου μέλους είναι περιορισμένη μόνο κατά τον άξονα του κύριου μέλους. Η πίεση στο άκρο του βραχίονα δεν εφαρμόζεται σε αυτό το βήμα λόγω της διαδικασίας επιβολής μετατόπισης που ακολουθεί στο επόμενο βήμα. Στο δεύτερο βήμα, κρατώντας την πίεση σταθερή, επιβάλλουμε μετατόπιση στο άκρο του βραχίονα κατά τον άξονα του. Η εφαρμογή της μετατόπισης γίνεται στον κόμβο αναφοράς στο άκρο

του βραχίονα. Μετά την επίλυση αφαιρούμε από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης την δύναμη από την πίεση στο “καπάκι” του άκρου του βραχίονα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των συνδέσμων μορφής T η αδιαστατοποίηση της μετατόπισης γίνεται με την διάμετρο του κύριου μέλους  $d_0$  και όχι με την ακτίνα όπως στους συνδέσμους μορφής X. Επίσης, η μετατόπιση  $\delta$  που εμφανίζεται στα διαγράμματα είναι η μετατόπιση του βραχίονα ως προς τον άξονα του κύριου μέλους, απαλείφοντας έτσι την μετατόπιση λόγω της ελαστικότητας του κύριου μέλους.



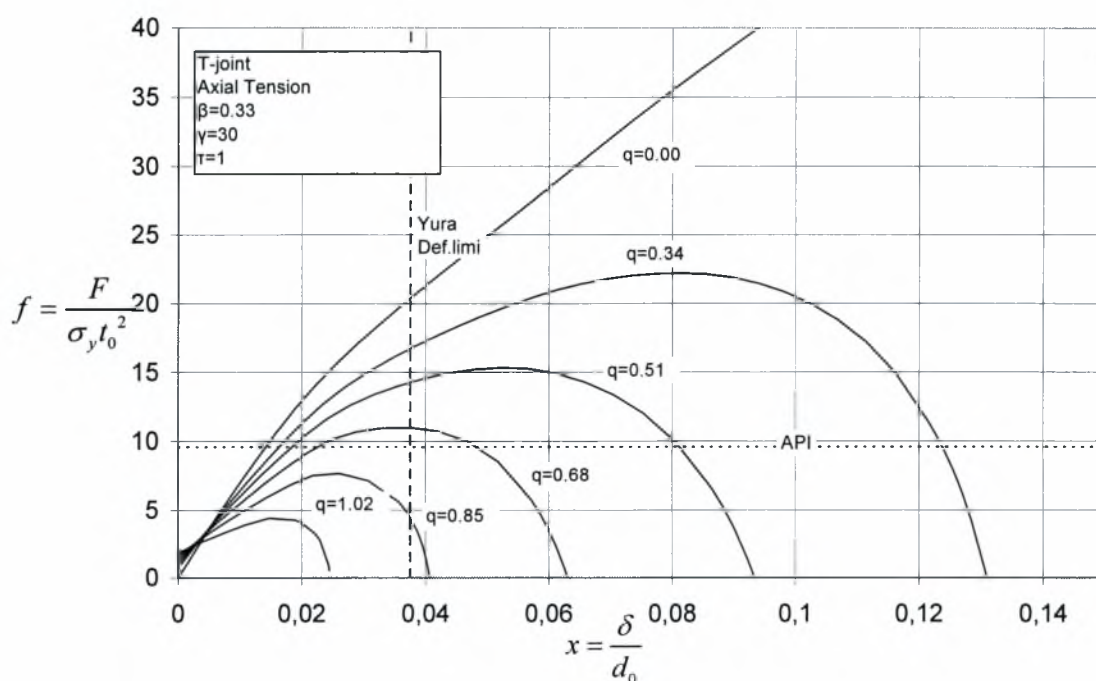
**Σχήμα 4-2. Επίδραση της πίεσης στην αντοχή του συνδέσμου μορφής T με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  σε αξονικά θλιπτικά φορτία.**

Στο σχήμα (4-2) φαίνονται οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για τον τύπο συνδέσμου μορφής T που εξετάστηκε. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια σημαντική μείωση της μέγιστης αντοχής του συνδέσμου για αυξανόμενη πίεση, αλλά και την δραματική μείωση της δυνατότητας παραμόρφωσης του συνδέσμου. Στο διάγραμμα εμφανίζεται και η τιμή που προβλέπει ο κανονισμός του API καθώς και το όριο παραμόρφωσης όπως προτάθηκε από τους Yura et al. (1981) και αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3. Παρατηρείται ότι σε πολλές περιπτώσεις η προβλεπόμενη τιμή του API είναι σημαντικά υψηλότερη από την υπολογισμένη μέγιστη τιμή. Επίσης, παρατηρείται πως για σχετικά μέτριες πιέσεις, η μέγιστη αντοχή του συνδέσμου

εμφανίζεται για παραμορφώσεις μικρότερες από το όριο παραμόρφωσης κατά τους Yura et al. (1981).

#### 4.2. Σύνδεσμος μορφής T υπό αξονικά εφελκυστικά φορτία και πίεση.

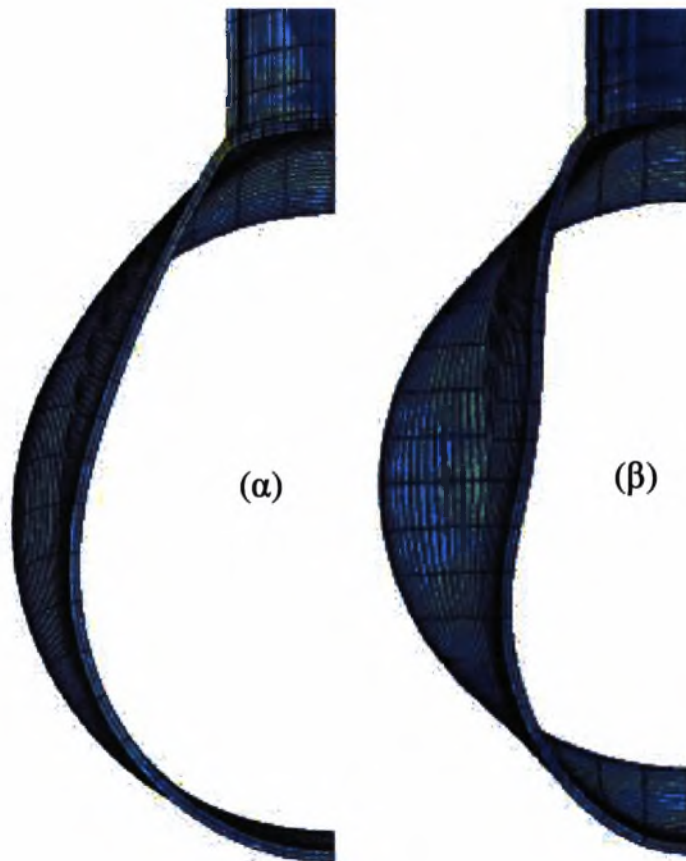
Για τον σύνδεσμο μορφής T υπό αξονικά εφελκυστικά φορτία και πίεση χρησιμοποιήθηκε το ίδιο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τα αξονικά θλιπτικά φορτία. Ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία με την προηγούμενη ανάλυση και η μοναδική διαφορά είναι η φορά της μετατόπισης που επιβλήθηκε στο άκρο του βραχίονα. Μετά την επίλυση προσθέτουμε στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης την δύναμη από την πίεση στο “καπάκι” του άκρου του βραχίονα, ώστε η δύναμη που αναφέρουμε ν’ αφορά την καθαρά “δομική” φόρτιση και μόνο.



**Σχήμα 4-3. Επίδραση της πίεσης στην αντοχή του συνδέσμου μορφής T με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  σε αξονικά εφελκυστικά φορτία.**

Στο σχήμα (4-3) εμφανίζονται οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για τον σύνδεσμο μορφής T υπό αξονικά εφελκυστικά φορτία και πίεση. Για μηδενική πίεση η αντοχή του συνδέσμου αυξάνει μονοτονικά με την μετατόπιση. Υπό την επίδραση της εξωτερικής πίεσης οι καμπύλες αλλάζουν μορφή και εμφανίζονται μέγιστες τιμές στις καμπύλες. Η μέγιστη αντοχή και η δυνατότητα παραμόρφωσης μειώνονται για αυξανόμενη πίεση. Για τιμές της πίεσης μεγαλύτερες από το 70% της ελαστικής κρίσιμης πίεσης, η μέγιστη τιμή που υπολογίζεται είναι μικρότερη από την πρόβλεψη

του κανονισμού του API, ενώ για τις ίδιες πιέσεις, η μέγιστη αντοχή του συνδέσμου εμφανίζεται για παραμόρφωση μικρότερη από το όριο παραμόρφωσης κατά τους Yura et al.(1981), άρα από πλευράς σχεδιασμού η επιρροή της πίεσης ενδέχεται να έχει δυσμενή αποτελέσματα.

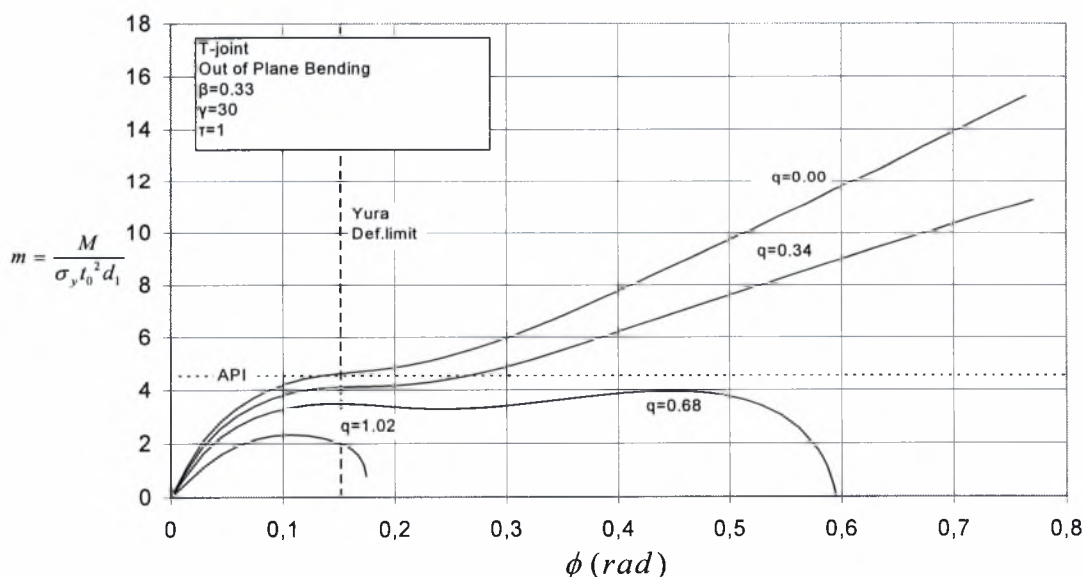


**Σχήμα 4-4. Σύνδεσμος μορφής T με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  υπό αξονικά εφελκυστικά φορτία στη παραμορφωμένη κατάσταση (α) για πίεση  $q=0.00$  και (β) για πίεση  $q=0.34$  για μετατόπιση ίση με  $x=0.13$ .**

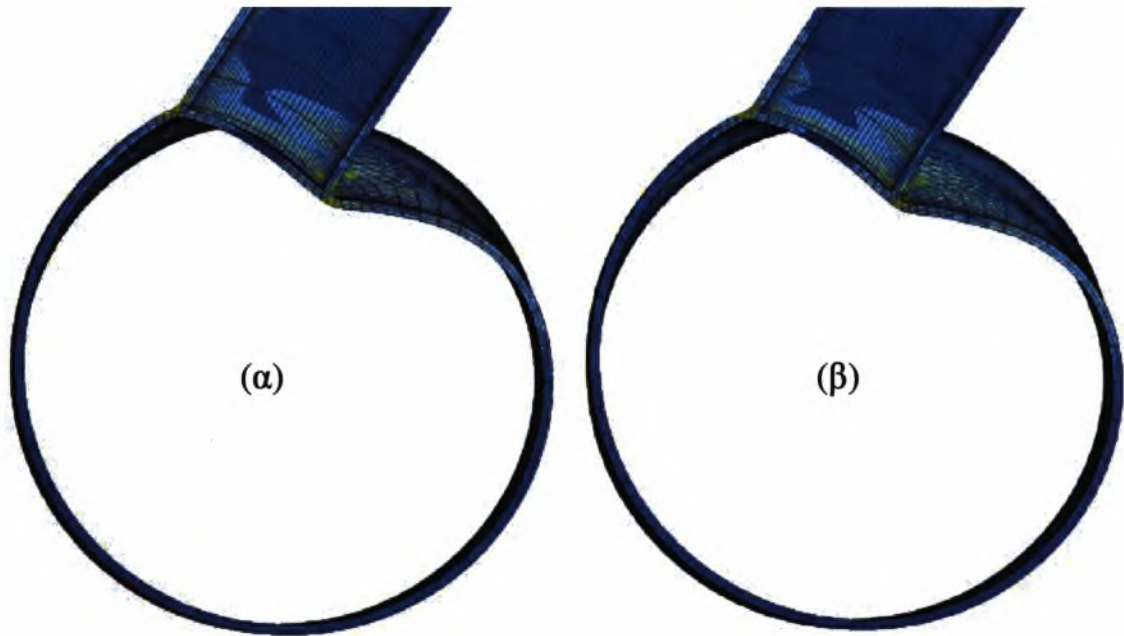
#### 4.3. Σύνδεσμος μορφής T σε εκτός επιπέδου κάμψη και πίεση.

Για τον σύνδεσμο μορφής Tα σε εκτός επιπέδου κάμψη και πίεση κατασκευάστηκε ένα μοντέλο με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$ . Από την γεωμετρία μοντελοποιήθηκε το  $\frac{1}{2}$  καθώς υπάρχει ένα επίπεδο συμμετρίας όπου επιβλήθηκαν οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες.

Η αριθμητική επίλυση γίνεται σε δυο βήματα. Στο πρώτο βήμα επιβάλλεται η εξωτερική πίεση σε όλες τις επιφάνειες του μοντέλου και στο ένα άκρο του κύριου μέλους ως συγκεντρωμένη δύναμη. Η δύναμη αυτή εφαρμόζεται στον κόμβο αναφοράς στο άκρο του κύριου μέλους στον οποίο είναι “δεμένοι” όλοι οι κόμβοι του άκρου (kinematic coupling). Η κίνηση των παραπάνω κόμβων είναι περιορισμένη μόνο κατά τον άξονα του κύριου μέλους. Η πίεση στο άκρο του βραχίονα εφαρμόζεται ως συγκεντρωμένη δύναμη σε έναν κόμβο αναφοράς. Η δύναμη ακολουθεί την στροφή του βραχίονα και είναι πάντα κάθετη στο άκρο του με την χρήση της υποεντολής “follower” στον ορισμό της δύναμης. Στο δεύτερο βήμα, κρατώντας την πίεση σταθερή, εφαρμόζουμε στροφή στον κόμβο αναφοράς του άκρου του βραχίονα ως προς τον άξονα του κύριου μέλους. Οι εξαρτημένοι κόμβοι στο άκρο του βραχίονα ακολουθούν την στροφή αυτή και το μοντέλο περνάει από διαδοχικά βήματα ισορροπίας μέχρι η στροφή να φτάσει την τιμή που έχει οριστεί. Εφαρμόζοντας στροφή στο άκρο, προκύπτει μια σταθερή ροπή κατά μήκος του βραχίονα.



**Σχήμα 4-5. Επίδραση της πίεσης στην αντοχή του συνδέσμου μορφής T με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  σε εκτός επιπέδου κάμψη.**



**Σχήμα 4-6 Σύνδεσμος μορφής T με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  σε εκτός επιπέδου κάμψη στη παραμορφωμένη κατάσταση (α) για πίεση  $q=0.00$  και (β) για πίεση  $q=0.34$  για στροφή ίση με  $\varphi=0.56$  rad.**

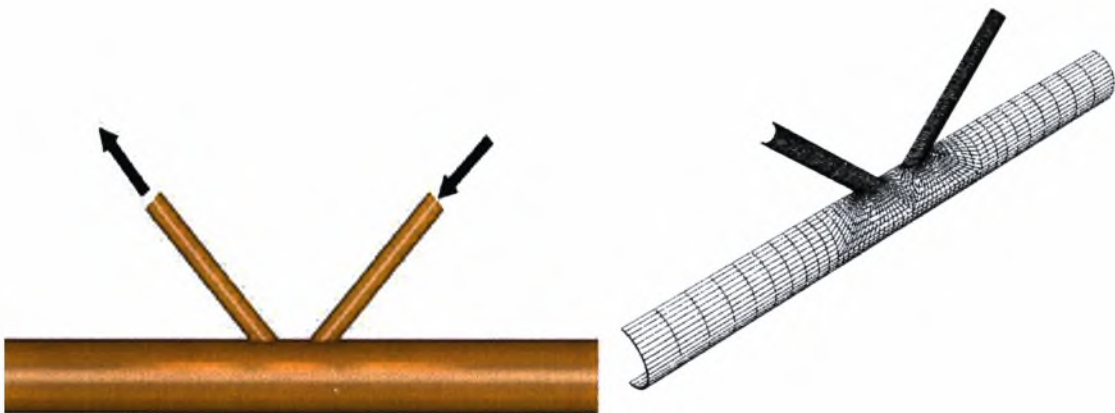
Στο σχήμα (4-5) φαίνονται τα αποτελέσματα για την εκτός επιπέδου κάμψη με πίεση σε σύνδεσμο μορφής T. Η στροφή του βραχίονα υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που συνδέει το άκρο με την βάση του βραχίονα, όπως για το μοντέλο για τον ίδιο τύπο φόρτισης σε σύνδεσμο μορφής X στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα έχουν την ίδια μορφή με αυτά για τον σύνδεσμο μορφής X. Για τιμή πίεσης ίση με 68% της ελαστικής κρίσιμης πίεσης η καμπύλη έχει αλλάξει εντελώς μορφή όπως και στην περίπτωση του συνδέσμου μορφής X. Επίσης, για τα ίδια επίπεδα πίεσης άνω του 68% του  $p_e$  ο κανονισμός του API προβλέπει τιμές μεγαλύτερες από την υπολογιζόμενη μέγιστη αντοχή του συνδέσμου. Πρέπει ακόμα να σημειωθεί πως, η μέγιστη αντοχή εμφανίζεται για παραμορφώσεις μικρότερες από το όριο παραμόρφωσης κατά τους Yura et al.(1981).



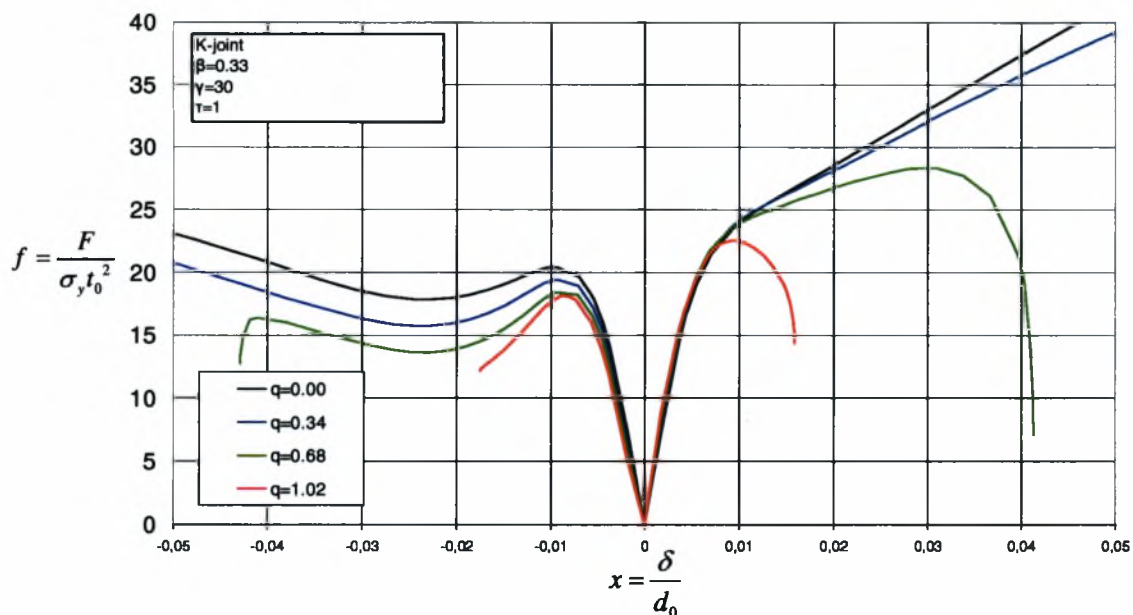
#### 4.4. Σύνδεσμος μορφής K σε αξονικά θλιπτικά φορτία και πίεση.

Για τον σύνδεσμο μορφής K υπό αξονικά φορτία και πίεση κατασκευάστηκε ένα μοντέλο με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$ . Η γωνίες που σχηματίζουν οι άξονες των δυο βραχιόνων με τον άξονα του κύριου μέλους είναι  $45^\circ$ . Οι άξονες των δυο βραχιόνων και του κύριου μέλους τέμνονται στο ίδιο σημείο. Από την συνολική γεωμετρία του κόμβου προσομοιώθηκε το  $\frac{1}{2}$  του κόμβου καθώς υπάρχει ένα επίπεδο συμμετρίας όπου επιβλήθηκαν οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες.



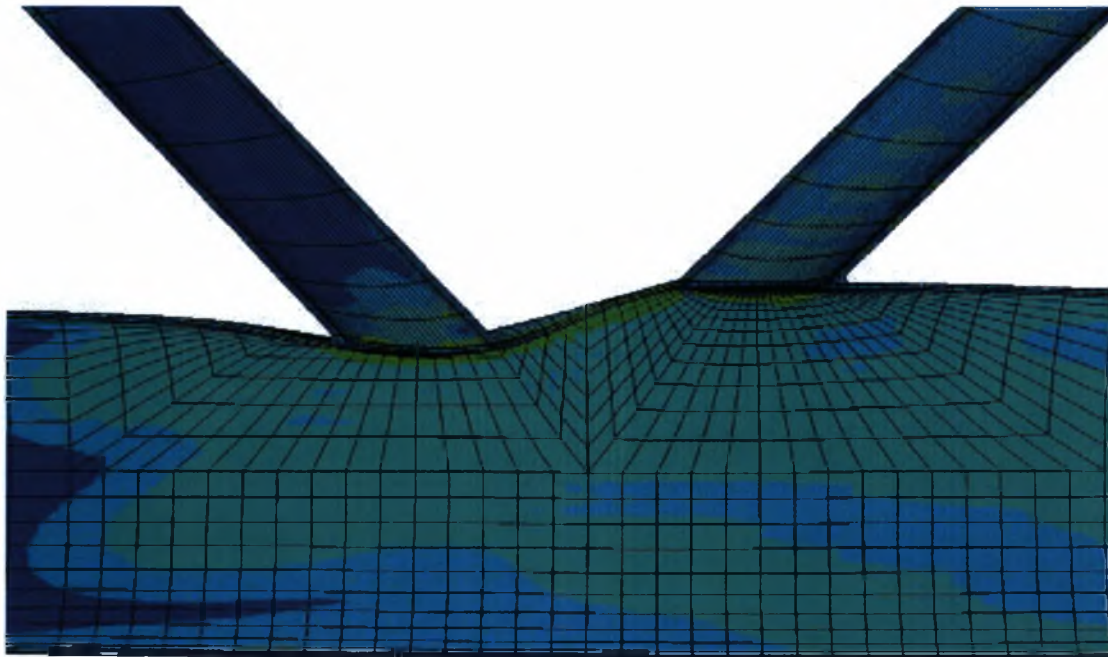
Σχήμα 4-7. Γενική διάταξη φόρτισης του συνδέσμου μορφής K και το μοντέλο που κατασκευάστηκε.

Η αριθμητική επίλυση γίνεται σε δυο βήματα. Αρχικά εφαρμόζεται η εξωτερική πίεση σε όλες τις επιφάνειες του συνδέσμου. Η πίεση στο ένα άκρο του κύριου μέλους εφαρμόζεται σε έναν κόμβο αναφοράς με την μορφή συγκεντρωμένης δύναμης. Όλοι οι κόμβοι του άκρου είναι “δεμένοι” στον κόμβο αναφοράς (kinematic coupling) και η κίνηση τους περιορίζεται μόνο κατά τον άξονα του κύριου μέλους. Στο άλλο άκρο του κύριου μέλους όλοι οι κόμβοι είναι και πάλι “δεμένοι” με έναν κόμβο αναφοράς. Ο κόμβος αυτός είναι πακτωμένος για να αποφευχθεί η μεταφορική κίνηση του συστήματος. Στο δεύτερο βήμα εφαρμόζονται μετατοπίσεις στα άκρα των δύο βραχιόνων. Οι κόμβοι και στα δυο άκρα των βραχιόνων είναι “δεμένοι” σε δυο κεντρικούς κόμβους, έναν στο άκρο κάθε βραχίονα. Και στους δύο βραχίονες εφαρμόζονται μετατοπίσεις με διεύθυνση κατά τον άξονα τους. Στον έναν βραχίονα η μετατόπιση είναι προς την κατεύθυνση του κύριου μέλους ενώ στον άλλον η επιβαλλόμενη μετατόπιση έχει αντίθετη κατεύθυνση.

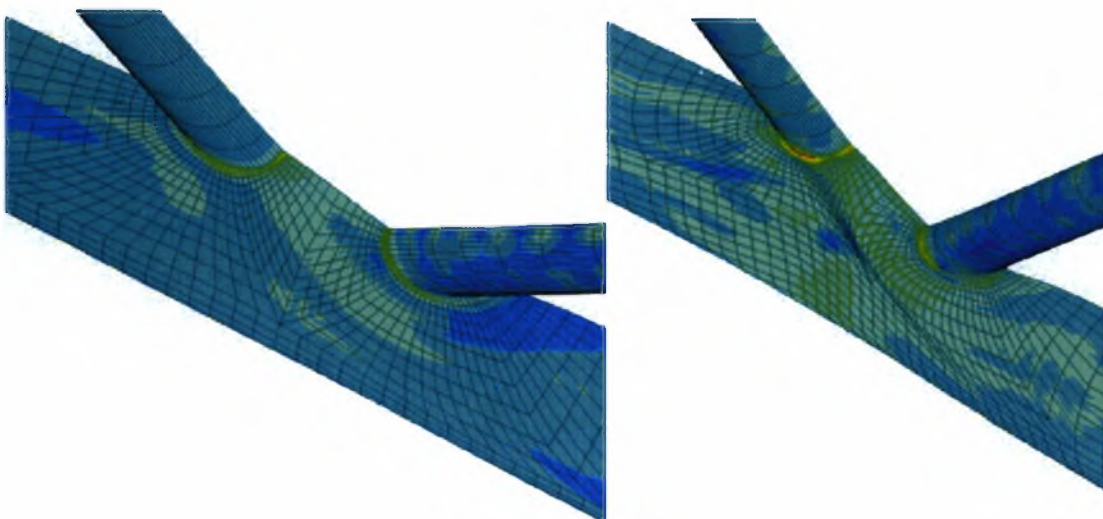


**Σχήμα 4-8. Επίδραση της εξωτερικής πίεσης στην αντοχή του συνδέσμου μορφής K με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  υπό αξονικά φορτία.**

Στο σχήμα (4-8) φαίνονται τα αποτελέσματα για τον σύνδεσμο μορφής K υπό αξονικά φορτία στην μορφή αδιάστατου φορτίου – αδιάστατης μετατόπισης. Το φορτίο αδιαστατοποιήθηκε διαιρώντας με  $\sigma_y t_0^2$ . Η μετατόπιση που εμφανίζεται είναι η μετατόπιση των κεντρικών κόμβων μόνο από τα δομικά φορτία (χωρίς να περιλαμβάνονται οι αρχικές μετατοπίσεις λόγω των δυνάμεων capped-end) κατά τον άξονα που είναι κάθετος στον άξονα του κύριου μέλους. Η μετατόπιση αδιαστατοποιήθηκε διαιρώντας με την διάμετρο του κύριου μέλους  $d_0$ . Στις καμπύλες έχει υπολογιστεί η δύναμη από την εξωτερική πίεση στα καπάκια στα άκρα των βραχιόνων. Για αρνητικές μετατοπίσεις έχουμε τις καμπύλες για τον βραχίονα που θλίβεται ενώ για θετικές γι' αυτόν που εφελκύεται. Παρατηρείται ότι για πιέσεις μέχρι  $q=0.35$  το εφελκυστικό φορτίο αυξάνει μονοτονικά με την μετατόπιση. Για μεγαλύτερες πιέσεις οι καμπύλες αλλάζουν μορφή παρουσιάζοντας οριακό σημείο, ενώ η μέγιστη αντοχή του συνδέσμου μειώνεται.



**Σχήμα 4-9. Σύνδεσμος μορφής Κ με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  υπό αξονικά φορτία στην παραμορφωμένη κατάσταση για πίεση  $q=0.34$  και μετατοπίσεις  $\chi=0.07$ .**

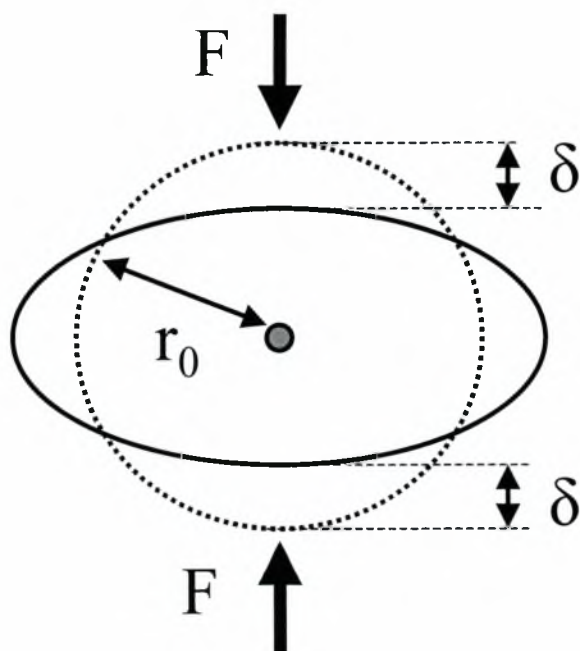


**Σχήμα 4-10. Κάτωψη συνδέσμου μορφής Κ με  $\beta=0.33$  και  $\gamma=30$  υπό αξονικά φορτία στην παραμορφωμένη κατάσταση για πίεση  $q=0.00$  και  $q=0.34$  και μετατοπίσεις  $\chi=0.13$ .**

## Κεφάλαιο 5. Απλοποιητικό Μοντέλο

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας αναπτύχθηκε ένα απλοποιητικό δι-διάστατο μοντέλο για να εξεταστούν ποιοτικά τα αποτελέσματα της εξωτερικής πίεσης σε συνδέσμους μορφής X υπό αξονικά θλιπτικά φορτία. Το αποτέλεσμα αυτού του μοντέλου είναι ο συνδυασμός ενός ελαστικού μοντέλου και ενός τέλει πλαστικού μοντέλου με έξι πλαστικές αρθρώσεις. Το μοντέλο περιορίζεται μόνο στην τομή του κύριου μέλους με τον άξονα του βραχίονα, και παρουσιάζει το τρισδιάστατο πρόβλημα ως ένα ισοδύναμο δι-διάστατο. Αυτή η απλοποιητική προσέγγιση δικαιολογείται από το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος της παραμόρφωσης του συνδέσμου συμβαίνει σε αυτή την διατομή.

Πρέπει να σημειωθεί ότι χάριν ευκολίας θεωρείται ακαριαία μετάβαση από την ελαστική λύση στην πλήρως πλαστική και δεν λαμβάνονται υπόψη ενδιάμεσες καταστάσεις.



Σχήμα 5-1. Ελαστική παραμόρφωση δακτυλίου υπό αξονικά αντιδιαμετρικά φορτία.

Για το ελαστικό μέρος της ανάλυσης, χρησιμοποιούμε την λύση ελαστικού δακτυλίου με δυο αντιδιαμετρικά εγκάρσια φορτία όπως δόθηκε από τους Timoshenko & Gere (1961).

$$F_{el}(\delta) = 1.12 \frac{E}{1-\nu^2} \left( \frac{t_0}{r_0} \right)^3 b \delta$$

όπου  $E$ ,  $\nu$ ,  $t$ ,  $r_0$  και  $\delta$  είναι αντίστοιχα το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος του Poisson, το πάχος του κύριου μέλους, η ονομαστική ακτίνα,  $b$  είναι το “ισοδύναμο μήκος” και  $\delta$  η βύθιση.

Η παρουσία εξωτερικής πίεσης προκαλεί μείωση της ακαμψίας του μοντέλου, και για ίδια φορτία εμφανίζονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Για να συμπεριληφθεί η επίδραση της εξωτερικής πίεσης χρησιμοποιείται ένας συντελεστής μεγέθυνσης, της ευκαμψίας όπως δόθηκε από τους Timoshenko & Gere (1961).

$$\frac{1}{1 - \frac{p}{p_e}}$$

όπου  $p$  και  $p_e$  είναι αντίστοιχα η εξωτερική πίεση και η ελαστική κρίσιμη πίεση.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει για το ελαστικό μέρος της λύσης:

$$F_{el}(\delta, p) = 1.12 \frac{E}{1-\nu^2} \left( 1 - \frac{p}{p_e} \right) \left( \frac{t_0}{r_0} \right)^3 b \delta$$

Διαιρώντας με  $\sigma_y t_0^2$  και αντικαθιστώντας  $\lambda = \frac{E}{(1-\nu^2)\sigma_y}$ ,  $b = L_b d_0$ ,  $q = \frac{p}{p_e}$  και

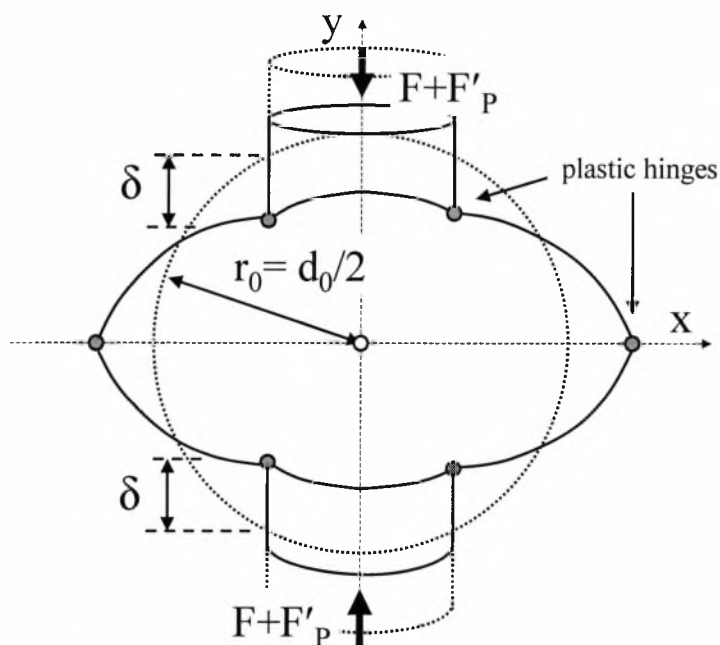
$x = \frac{\delta}{d_0}$  προκύπτει η αδιάστατη μορφή :

$$f_{el}(x, q) = 4.48 L_b \lambda \frac{t_0}{d_0} (1-q) x$$

όπου  $L_b$  είναι ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους ( $b = L_b d_0$ )

$$f_{el} = f_{el} \left( x, q, \lambda, L_b, \frac{t_0}{d_0} \right)$$

Όσον αφορά το πλαστικό μέρος της λύσης θεωρείται ότι δημιουργείται ένας μηχανισμός κατάρρευσης με έξι πλαστικές αρθρώσεις (σχήμα 5-2).



**Σχήμα 5-2. Μηχανισμός κατάρρευσης με έξι πλαστικές αρθρώσεις, γεωμετρία μηχανισμού και ισορροπία στην παραμορφωμένη κατάσταση.**

Θεωρείται επίσης ότι σε κάθε πλαστική άρθρωση το υλικό είναι τέλεια πλαστικό  
 Η πλαστική ροπή είναι:

$$M_{pl} = \sigma_y b \frac{t_0^2}{4}$$

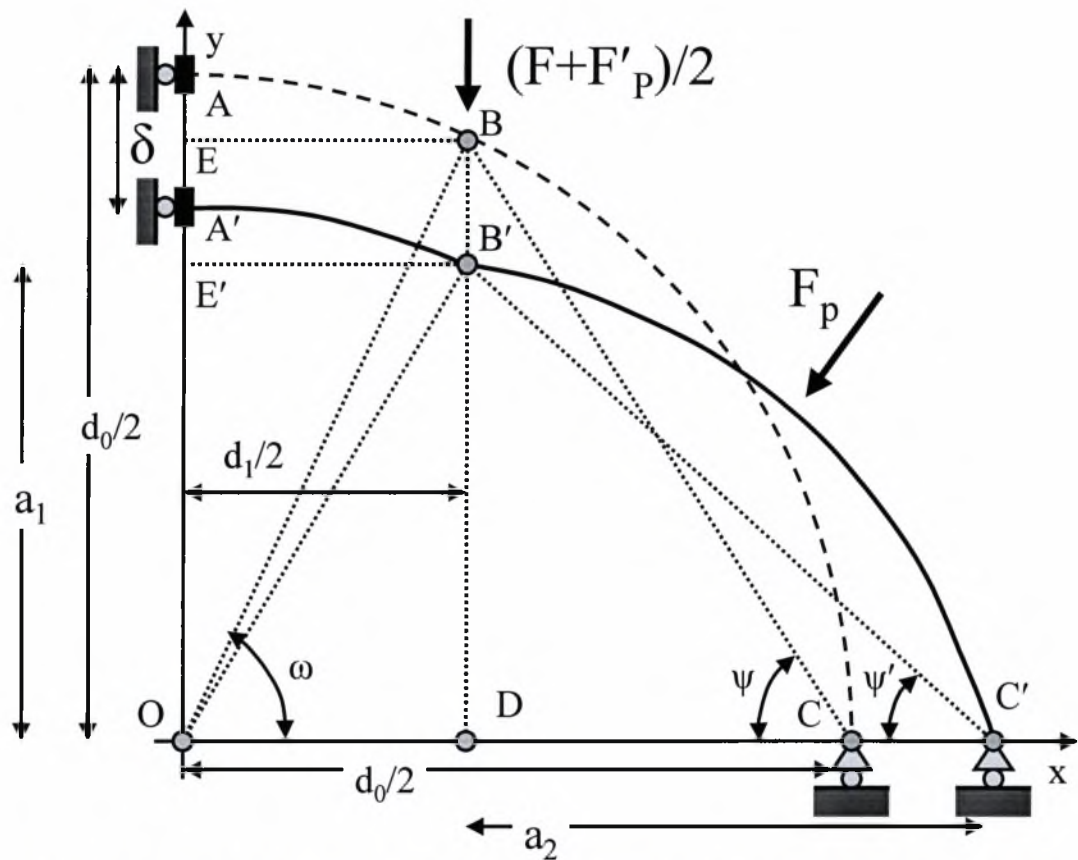
όπου  $\sigma_y$  είναι η τάση διαρροής,  $b$  το “ισοδύναμο μήκος” ( $b = L_b d_0$ ) και  $t_0$  το πάχος του κύριου μέλους.

Στο σχήμα (5-4) το φορτίο ( $F_T$ ) στο σημείο  $B'$  είναι το άθροισμα της δύναμης από την πίεση στο καπάκι του βραχίονα ( $F_p'$ ) και του δομικού φορτίου ( $F$ ). Η δύναμη  $F_p$  είναι η συνισταμένη της πίεσης στην παράπλευρη επιφάνεια  $B'C'$  και είναι πάντα κάθετη στο ευθύγραμμο τμήμα  $B'C'$ .

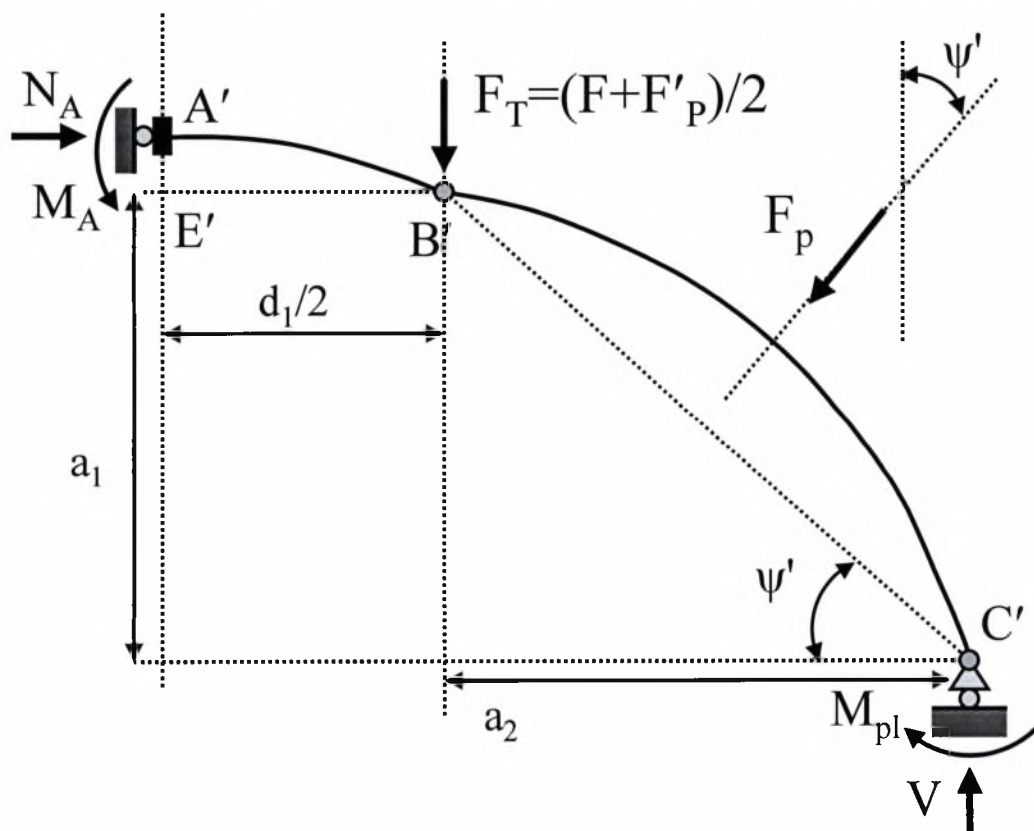
Από την ισορροπία του συστήματος  $A'B'C'$  στην παραμορφωμένη κατάσταση ισχύει:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow N_A - F_p \sin \psi' = 0 \Rightarrow N_A = F_p \sin \psi'$$

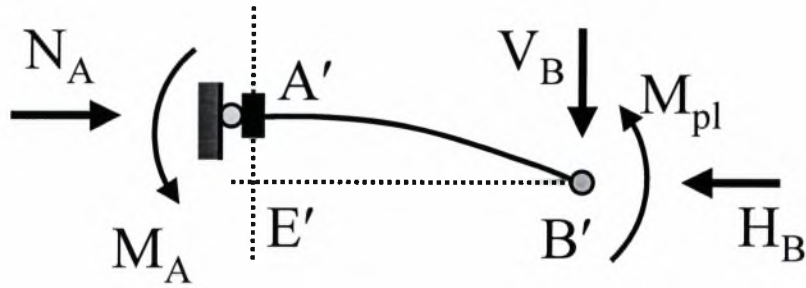
$$\sum M_C = 0 \Rightarrow M_A - M_{pl} + \frac{(F + F_p) a_2}{2} + F_p \frac{(B'\Gamma')}{2} - N_A [a_1 + (A'E')] ]$$



**Σχήμα 5-3. Γεωμετρία πλαστικού μηχανισμού και ισορροπία στην παραμορφωμένη κατάσταση.**



**Σχήμα 5-4. Ισορροπία στην παραμορφωμένη κατάσταση για το A'B'C'.**



**Σχήμα 5-5. Ισοροπία στο τμήμα (A'B').**

Από ισοροπία για το τμήμα (A'B') ισχύει:

$$\sum M_{B'} = 0 \Rightarrow -N_A(A'E') + M_A + M_{pl} = 0 \Rightarrow M_A = F_p \sin \psi'(A'E') - M_{pl}$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις και απαλοίφοντας  $N_A, M_A$  προκύπτει:

$$F_{pl} = \frac{4M_{pl}}{a_2} - 2pb \frac{(B'\Gamma')^2}{2a_2} + 2pb(B'\Gamma') \frac{a_1 \sin \psi'}{a_2} - pb\beta d_0$$

Διαιρώντας με  $\sigma_y t_0^2$  και αντικαθιστώντας  $p = q \frac{2E}{(1-\nu^2)} \left( \frac{t_0}{d_0} \right)^3$  και  $\lambda = \frac{E}{(1-\nu^2)\sigma_y}$

προκύπτει η αδιάστατη μορφή:

$$f_{pl} = \frac{L_b d_0}{a_2} - 2q\lambda L_b \frac{t_0}{d_0} \left[ \frac{(B\Gamma)^2}{a_2} - 2 \frac{(B\Gamma)a_1 \sin \psi'}{a_2} + \beta d_0 \right]$$

Από την γεωμετρία προκύπτει:

$$a_1 = \frac{d_0}{2} (\sqrt{1-\beta^2} - x)$$

$$a_2 = \frac{d_0}{2} \sqrt{(1-\beta)^2 - x^2 + 2x\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$(B'\Gamma') = (B\Gamma) = \frac{d_0}{2} \sqrt{2-2\beta}$$

$$\sin \psi' = \frac{a_1}{(B\Gamma)}$$

$$\cos \psi' = \frac{a_2}{(B\Gamma)}$$

$$\beta = \frac{d_1}{d_0}$$

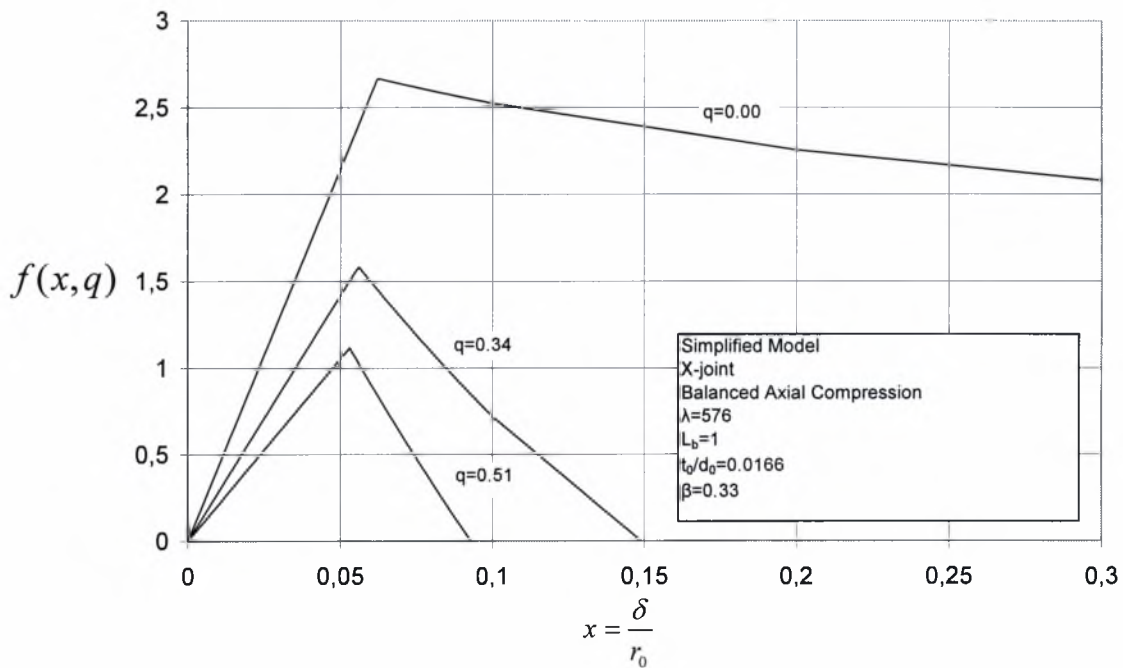


Αντικαθιστώντας και τις τιμές για τα  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , ( $B\Gamma$ ), και  $\sin \psi'$  προκύπτει η τελική μορφή της σχέσης φορτίου μετατόπισης σε κλειστή μορφή.

$$f_{pl}(x, q, \lambda, L_b, \frac{t_0}{d_0}, \beta) = \frac{2L_b}{\sqrt{(1-\beta)^2 - x^2 + 2x\sqrt{1-\beta^2}}} - 2q\lambda L_b \frac{t_0}{d_0} \left[ \frac{(1-\beta) - (\sqrt{1-\beta^2} - x)^2}{\sqrt{(1-\beta)^2 - x^2 + 2x\sqrt{1-\beta^2}}} + \beta \right]$$

Η τελική σχέση φορτίου – μετατόπισης προκύπτει από την ελάχιστη τιμή μεταξύ των σχέσεων για την ελαστική και την πλαστική απόκριση:

$$f = \min(f_{el}, f_{pl})$$



**Σχήμα 5-4. Αποτελέσματα αναλυτικού μοντέλου για αντιδιαμετρικά θλιπτικά φορτία και τρία διαφορετικά επίπεδα πίεσης.**

Για την περίπτωση των αντιδιαμετρικών εφελκυστικών φορτίων η ελαστική λύση παραμένει αμετάβλητη:

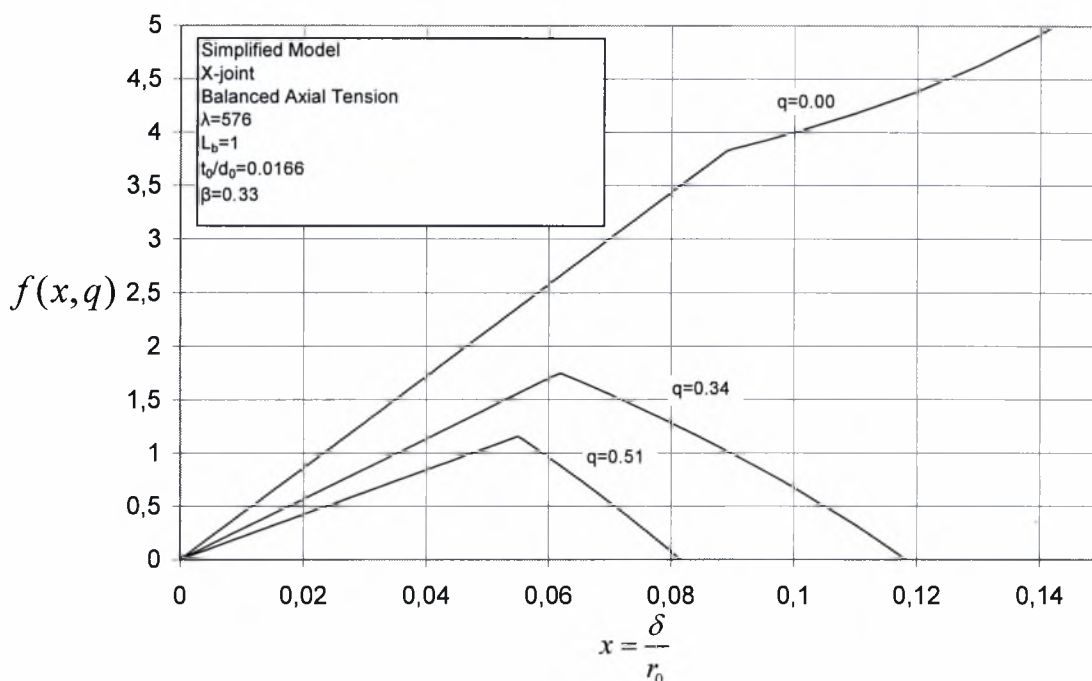
$$f_{el}(x, q) = 4.48L_b\lambda \frac{t_0}{d_0} (1-q)x$$

Για το πλαστικό μέρος ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, όπως περιγράφηκε για την περίπτωση θλιπτικών φορτίων, προκύπτει:

$$f_{pl}(x, q, m, L_b, \frac{t_0}{d_0}, \beta) = \frac{2L_b}{\sqrt{(1-\beta)^2 - x^2 - 2x\sqrt{1-\beta^2}}} - 2qmL_b \frac{t_0}{d_0} \left[ \frac{(\sqrt{1-\beta^2} + x)^2 - (1-\beta)}{\sqrt{(1-\beta)^2 - x^2 - 2x\sqrt{1-\beta^2}}} - \beta \right]$$

Η τελική σχέση φορτίου – μετατόπισης προκύπτει από την ελάχιστη τιμή μεταξύ των σχέσεων για την ελαστική και την πλαστική απόκριση:

$$f = \min(f_{el}, f_{pl})$$



**Σχήμα 5-5. Αποτελέσματα αναλυτικού μοντέλου για αντιδιαμετρικά εφελκυστικά φορτία και τρία διαφορετικά επίπεδα πίεσης.**

Στα σχήματα (5-4), (5-5) φαίνονται οι καμπύλες φορτίου μετατόπισης που προκύπτουν από το απλοποιητικό μοντέλο για αντιδιαμετρικά θλιπτικά και εφελκυστικά φορτία για τρία επίπεδα εξωτερικής πίεσης. Από την μορφή των καμπυλών είναι εμφανής η μείωση της μέγιστης αντοχής αλλά και της δυνατότητας παραμόρφωσης του συνδέσμου για αυξανόμενη πίεση και στις δύο περιπτώσεις. Τα σχήματα (3-2) και (3-8) είναι τα αντίστοιχα σχήματα για σύγκριση από τις αριθμητικές αναλύσεις. Τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου δίνουν μια ποιοτική εικόνα για την αστάθεια που προκαλεί η εξωτερική πίεση στον κόμβο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την επίδραση της εξωτερικής πίεσης στην οριακή αντοχή μονοεπίπεδων σωληνωτών συγκολλητών κόμβων υπό διάφορα δομικά φορτία (αξονικά και καμπτικά) χρησιμοποιώντας μια μη-γραμμική ελαστοπλαστική προσομοίωση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Όλα τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εξωτερική πίεση αυξάνει την παραμόρφωση της διατομής (ovalization) και δημιουργεί αστάθεια στο κύριο μέλος του συνδέσμου, μειώνοντας την μέγιστη αντοχή των συνδέσμων και προκαλώντας σημαντική μείωση της δυνατότητας παραμόρφωσης τους.

Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων φανερώνουν πως η εξωτερική πίεση έχει σημαντική επιρροή στην συμπεριφορά των συνδέσμων μορφής X, T και K υπό αξονικά θλιπτικά αλλά και εφελκυστικά φορτία. Επίσης, η εξωτερική πίεση επηρεάζει και την συμπεριφορά των παραπάνω συνδέσμων υπό καμπτικά φορτία. Μεγαλύτερη επιρροή παρατηρείται για την περίπτωση της εκτός επιπέδου κάμψης συγκριτικά με την συνεπίπεδη κάμψη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση της εκτός επιπέδου κάμψης η αστοχία συνδέεται με την πλαστική παραμόρφωση στο σημείο “σέλλας” της συγκόλλησης, ενώ στην περίπτωση της συνεπίπεδης κάμψης συνδέεται με την πλαστική παραμόρφωση στο σημείο “στέψης” που είναι λιγότερο έντονη.

Τέλος, παρουσιάζεται ένα απλοποιητικό αναλυτικό μοντέλο που προσεγγίζει την ελαστοπλαστική συμπεριφορά του συνδέσμου μορφής X υπό αξονικά θλιπτικά φορτία παρουσία εξωτερικής πίεσης. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην παραδοχή ότι δημιουργείται ένας μηχανισμός με έξι πλαστικές αρθρώσεις και καταλήγει σε μια αναλυτική σχέση “κλειστής μορφής” δομικού φορτίου – μετατόπισης. Με την χρήση του μοντέλου αυτού δίνεται μια ποιοτική εικόνα της αστάθειας που προκαλεί η εξωτερική πίεση, με έναν απλό και αποτελεσματικό τρόπο.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Yura, J. A., Edwards, I. F. and Zettlemyer, N. (1981), “Ultimate Capacity of Circular Tubular Joints.”, *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 107, No. 10., pp. 1965-1984.
- [2] Wardenier, J. (1982), *Hollow Section Joints*, Delft University Press, 1<sup>st</sup> Edition, Delft, The Netherlands.
- [3] Kurobane, Y., Makino, Y. and Ochi, K. (1984), “Ultimate Resistance of Unstiffened Tubular Joints.”, *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 2., pp. 385-400.
- [4] Marshall, P. W. (1991), “Design of Welded Tubular Connections – Basis and Use of AWS Code Provisions”, Elsevier Science Publisher’s Ltd., Madison Square, New York, USA.
- [5] American Petroleum Institute (1993), “Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms.” API RP2A - LRFD, 1<sup>st</sup> Edition.
- [6] Wardenier, J., Kurobane, Y., Parker, J. A., Dutta, D., Yeomans, N., (1991) “Design Guide for Circular Hollow Section (CHS) Joints under Predominantly Static Loading.” Ed. CIDECT, Verlag TÜV Rheinland, Köln, Germany.
- [7] American Welding Society (2000), *Structural Welding Code-Steel*, ANSI/AWS, 15<sup>th</sup> ed., Miami, USA
- [8] van der Vegte, G. J., de Koning, C. H. M., Puthli, R. S., Wardenier, J., (1991) “The Static Strength and Stiffness of Multiplanar Tubular Steel X-Joints.”, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 1, No 1.
- [9] van der Vegte, G. J. (1995), “The Static Strength of Uniplanar and Multiplanar Tubular T- and X-Joints”, Delft University Press, Delft, The Netherlands.
- [10] Kang, C. T., Moffat, D. G. and Mistry, J. (1998), “Strength of DT Tubular Joints with Brace and Chord Compression”, *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 7., pp. 775-783.
- [11] Rassmussen, K. J. R and Hasham, A. S. (2001), “Tests of X- and K-Joints in CHS Stainless Steel Tubes”, *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 10., pp. 1183-1189.

- [12] Scola, S., Redwood, R. G. and Mitri, H. S. (1990), "Behaviour of Axially Loaded Tubular V-Joints", *J. Construction Steel Research*, Vol. 16, pp. 89-109.
- [13] Paul, J. C., Makino, Y. and Kurobane, Y. (1993), "Ultimate Capacity of Tubular Double T-Joints Under Axial Brace Loading.", *J. Construction Steel Research*, Vol. 24, pp. 205-228.
- [14] Makino, Y., and Kurobane, Y. (1994), "Tests on CHS KK-Joints under Anti-symmetrical Loads." Proc., 5<sup>th</sup> Int. Symp. on Tubular Struct., AA Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- [15] Lee, M. M. K. and Wilmshurst, S.R.(1996), "Parametric Study of Strength of Tubular Multiplanar KK-Joints", *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 8., pp. 893-904.
- [16] Loh, J. L. (1990), "A Unified Design Procedure for Tubular Members.", *Offshore Technology Conference*, OTC 6310, Houston, Texas.
- [17] Karamanos, S. A. and Tassoulas, J. L. (1994), "Hydrostatic Effects in Tubular Member Design.", *J. Offshore Mechanics & Arctic Engineering (OMAE)*, ASME, Vol. 116, pp. 246-251.
- [18] Connelly, L. M. and Zettlemoyer, N. (1991) "Hydrostatic Effects on the Capacity of DT Tubular Joints.", *Offshore Technology Conference*, OTC 6574, Houston, Texas, pp. 119-130.
- [19] Karamanos, S. A. (1996), "Stability of Pressurized Long Inelastic Cylinders Under Radial Transverse Loads", *Computational Mechanics*, Vol.117, No.2, pp.150-155
- [20] Timoshenko, S. and Gere, J. M. (1961), *Theory of Elastic Stability*, Second Edition, McGraw-Hill, New York, USA.
- [21] Hibbit, H. D., Karlsson, B. I., and Sorensen (2001), "Theory Manual", ABAQUS, version 6.2, USA.
- [22] Hibbit, H. D., Karlsson, B. I., and Sorensen (2001), "Standard User's Manual", ABAQUS, version 6.2, USA.

