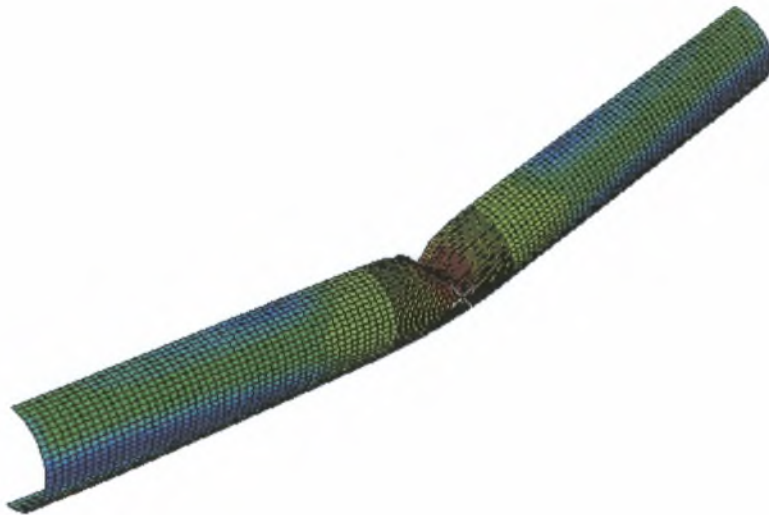


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ
ΣΩΛΗΝΩΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΜΕΛΩΝ ΥΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΤΟΠΙΚΗΣ
ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΥΡΤΩΣΗΣ ΤΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ

ΕΛΕΝΗ Χ. ΦΙΑΜΕΓΚΟΥ



Επιβλέπων : Σ. Α. Καραμάνος, Επίκουρος Καθηγητής

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας



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

Αριθ. Εισ.: 4521/1
Ημερ. Εισ.: 15-07-2005
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2005
ΦΙΑ

Εγκρίθηκε από τα μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής :

Πρώτος Εξεταστής

Δρ. Σπύρος Καραμάνο

Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Κωνσταντίνος Παπαδημητρίου

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Γεώργιος Πετρόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Παπαδημητρίου και Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Πετρόπουλο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους διδάσκοντες του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Βόλου για τις πολύτιμες και βασικές γνώσεις που μου παρείχαν στα πλαίσια των προπτυχιακών μαθημάτων.

Ευχαριστώ επίσης την μεταπτυχιακή φοιτήτρια του εργαστηρίου της Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών Σωτηρία Χουλιάρα για την σημαντική της βοήθεια στην έναρξη της διπλωματικής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η οριακή αντοχή χαλύβδινων σωληνωτών μελών που φέρουν τοπική αρχική ατέλεια με την μορφή “κοιλώματος” (τοπικής κύρτωσης λόγω επιβολής εγκάρσιου εξωτερικού φορτίου) στο τοίχωμά τους υπό την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου, καμπτικού φορτίου και συνδυασμού αυτών.

Αρχικά παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν από το Veritas Offshore Technology and Services στο Όσλο, όπως περιγράφονται στις εργασίες των Landet (1987) και Taby (1986). Στα πειράματα αυτά μελετάται η επίδραση του βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας στην οριακή αντοχή σωληνωτών μελών. Τα σωληνωτά αυτά μέλη χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο ως μέλη θαλάσσιων σωληνωτών εξεδρών εξώρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου και υποβάλλονται συχνά σε θλιπτικά αξονικά και καμπτικά φορτία καθώς και σε συνδυασμό τους. Οι πειραματικές αυτές διαδικασίες προσομοιάζονται αριθμητικά με την χρήση μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με την βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος ABAQUS. Κατά την προσομοίωση των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται στοιχεία κελύφους και λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμικότητα της γεωμετρίας και του υλικού καθώς επίσης και η αστάθεια του φαινομένου της αστοχίας του κελύφους. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την υπολογιστική και από την πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα και γίνεται η σύγκρισή τους, η οποία είναι γενικώς επιτυχής.

Στη συνέχεια της εργασίας γίνεται παραμετρική μελέτη στην οποία τα κυλινδρικά κελύφη υποβάλλονται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο, σε καμπτικό φορτίο και σε συνδυασμό τους. Στη μελέτη αυτή εξετάζεται κατά πόσον το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματος, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυλινδρικού κελύφους, το όριο διαρροής του υλικού, ο τύπος διείσδυσης κατά την δημιουργία της τοπικής αρχικής ατέλειας καθώς και η αλληλουχία της φόρτισης στην περίπτωση επιβολής και θλιπτικού αξονικού φορτίου και καμπτικού φορτίου επηρεάζουν την οριακή αντοχή και την συμπεριφορά του κελύφους. Η προσομοίωση του προβλήματος γίνεται αριθμητικά με την χρήση και πάλι του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

Τέλος παρουσιάζεται η αναλυτική μέθοδος κατά EPR (Exxon Production Research Co.) υπολογισμού της οριακής αντοχής χαλύβδινων κυλινδρικών κελυφών που φέρουν τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους και υποβάλλονται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο, σε καμπτικό φορτίο ή σε συνδυασμό τους. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε μια εξίσωση αλληλεπίδρασης αξονικής και καμπτικής έντασης και χρησιμοποιείται για τον αναλυτικό υπολογισμό της οριακής αντοχής των κυλινδρικών κελυφών που προσομοιώνονται αριθμητικά στην παραμετρική μελέτη. Τα αριθμητικά αποτελέσματα και οι αναλυτικοί υπολογισμοί αντοχής παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα και συγκρίνονται.

ΠΕΡΙΟΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Γενικά.....	1
1.2 Παλαιότερες έρευνες.....	1
1.3 Στόχος της εργασίας.....	2

Κεφάλαιο 2 : Περιγραφή πειραμάτων

2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	6
2.3 Αποτελέσματα των πειραμάτων.....	8

Κεφάλαιο 3 : Αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων

3.1.1 Εισαγωγή.....	17
3.1.2 Υλικό των σωληνωτών μελών και τύπος ανάλυσης.....	17
3.2 Αριθμητική επίλυση για τα πειράματα TestD1-32, TestD1-36 TestD1-35 και TestICDB.....	18
3.3 Αριθμητική επίλυση για τα πειράματα TestD2-37, TestD3-40.....	27

Κεφάλαιο 4 : Προσομοίωση κυλινδρικών γαλύβδινων κελυφών και παραμετρική μελέτη

4.1.1 Εισαγωγή.....	31
4.1.2 Υλικό και τύπος ανάλυσης.....	31
4.1.3 Κατηγορίες κυλινδρικών κελυφών και τύπων διείδυσης.....	32
4.2 Προσομοίωση για διείδυτη τύπου “σφήνας” ή “μαχαιριού”.....	33
4.3 Αποτελέσματα για $D/t=30$ και $L/D=10$	40
4.4 Αποτελέσματα για $D/t=30$ και $L/D=15$	50
4.5 Αποτελέσματα για $D/t=50$ και $L/D=10$	70
4.6 Αποτελέσματα για $D/t=50$ και $L/D=15$	74
4.7 Αποτελέσματα για $D/t=70$ και $L/D=10$	86
4.8 Αποτελέσματα για $D/t=70$ και $L/D=15$	98
4.9 Συμπεράσματα για την επιρροή γεωμετρικών χαρακτηριστικών στην οριακή αντοχή.....	110
4.10 Επιρροή ορίου διαρροής στην οριακή αντοχή.....	117
4.11 Αριθμητική προσομοίωση για διείδυτη τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου”.....	124

Κεφάλαιο 5 : Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με την αναλυτική μέθοδο κατά

EPR

5.1 Ανάπτυξη αναλυτικής μεθόδου.....	132
5.2 Αποτελέσματα αναλυτικής μεθόδου.....	137
Συμπεράσματα.....	142
Βιβλιογραφία.....	144

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή

1. Γενικά

Η παρουσία τοπικής αρχικής ατέλειας στα τοιχώματα σωληνωτών μελών επιφέρει την μείωση της αντοχής αυτών αλλά και ολοκλήρων των δομών των οποίων μπορεί να αποτελούν βασικά μέλη με κίνδυνο την αστοχίας τους. Σε πολλές περιπτώσεις τα μέλη αυτά υποβάλλονται σε θλιπτικά αξονικά φορτία, σε καμπτικά φορτία ή και σε συνδυασμό αυτών εξαιτίας λειτουργικών και περιβαλλοντικών συνθηκών και θα πρέπει να είναι ικανά να τα αντέξουν. Δυστυχώς όμως ο αρχικός σχεδιασμός των μελών αυτών δεν προβλέπει την συμπεριφορά τους κατά την δημιουργία τοπικής αρχικής ατέλειας. Για το λόγο αυτό σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητη η ανάπτυξη τεχνικών που θα υπολογίζουν γρήγορα, οικονομικά και αξιόπιστα την οριακή αντοχή των σωληνωτών μελών με τοπική ατέλεια στο τοίχωμά τους, καθώς η εφαρμογή τους σε μηχανολογικές εγκαταστάσεις είναι ευρεία. Πιο συγκεκριμένα τα σωληνωτά αυτά μέλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στηρίξεις των θαλασσιών εξεδρών εξώρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου, ως μέλη πλατφόρμων τύπου jack-up και χαλύβδινων κατασκευών βαρύτητας (steel gravity structures) σε διάφορες θαλάσσιες εγκαταστάσεις επίσης, μπορούν να αποτελέσουν μέλη του σκελετού γεφυρών καταστρωμάτων (deck trusses).

2. Παλαιότερες έρευνες

Η οριακή αντοχή των σωληνωτών μελών με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους έχει γίνει αντικείμενο έρευνας τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια καθώς ο μέσος όρος ηλικίας των θαλάσσιων εξεδρών μεγαλώνει. Στην δεκαετία του 1980 διεξήχθηκε ένας σημαντικός αριθμός πειραματικών και θεωρητικών ερευνών όσον αφορά στην επίδραση της τοπικής ατέλειας στην συμπεριφορά και στην οριακή αντοχή των σωληνωτών μελών. Η πρώτη πειραματική μελέτη έγινε από τους Smith et al (1979). Αργότερα ο Smith (1983) παρουσίασε μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για σωληνωτά μέλη που υποβάλλονται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο χρησιμοποιώντας στοιχεία δοκού (beam elements). Ο Ellinas (1984) ανέπτυξε μία από τις πιο διαδεδομένες προσεγγίσεις πρόβλεψης αντοχής σωληνωτών μελών με τοπική ατέλεια στο τοίχωμά τους την “ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ” (“the yield average-stress”). Η μέθοδος αυτή στηρίχτηκε στον υπολογισμό της μέσης διαμήκης

τάσης του τομέα του κελύφους με την τοπική ατέλεια γνωρίζοντας τις δυνάμεις που εφαρμόζονται σε ολόκληρο το μέλος. Η αστοχία του μέλους επέρχεται όταν η τάση αυτή γίνει ίση με την τάση διαρροής του. Η προσέγγιση μπορεί να είναι ή να μην είναι συντηρητική ανάλογα με το βάθος της τοπικής ατέλειας του τοιχώματος, τη λυγηρότητα του μέλους καθώς και το βαθμό της αρχικής καμπυλότητας ολόκληρου του μέλους. Οι Ueda and Rashed (1985) παρουσίασαν ένα αναλυτικό μοντέλο για σωληνωτά μέλη με τοπική αρχική ατέλεια βασιζόμενοι στην εξίσωση αλληλεπίδρασης της οριακής αντοχής μιας διατομής των μελών που φέρει ατέλεια. Οι ίδιοι πραγματοποίησαν 21 πειράματα στα οποία τα σωληνωτά μέλη με τοπική ατέλεια υποβλήθηκαν σε αξονική θλίψη. Επίσης οι Richards and Andronicou (1985) ανέπτυξαν μια διαδικασία για την παραγωγή μιας σχέσης μεταξύ της ενέργειας σύγκρουσης και της δημιουργουμένης ατέλειας. Οι Yao et al. (1986) παρουσίασαν ένα ιδανικό δομημένο μοναδιαίο μοντέλο για την μελέτη της προ- και της μετά-αστοχίας συμπεριφοράς ενός σωληνωτού τμήματος με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του βασιζόμενοι στην μειωμένη πλαστική αντοχή του τομέα με την τοπική ατέλεια και η οριακή αντοχή προσδιορίστηκε αναλυτικά σε συνθήκες ισορροπίας. Οι Yao et al.(1985) συνέχισαν την μελέτη τους πειραματικά υποβάλλοντας 13 σωληνωτά μέλη με τοπική ατέλεια σε έκκεντρη αξονική θλίψη. Οι J.Taby and T.Moan (1987) στο πανεπιστήμιο του Trondheim της Νορβηγίας πρότειναν μια ελαστοπλαστική ανάλυση για την εκτίμηση της οριακής αντοχής σωληνωτών μελών με τοπική ατέλεια στο τοίχωμά τους από την οποία αναπτύχθηκε ένα από τα πιο γνωστά προγράμματα H/Y το DENTA. Πιο πρόσφατα οι Walid A. Salman and Peter C. Birkemo (1989) στο πανεπιστήμιο του Τορόντο χρησιμοποίησαν μια μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων το ABAQUS για να εξετάσουν την δημιουργία “κοιλώματος” σε σωληνωτά μέλη και την αντοχή αυτών σε αξονική θλίψη και κάμψη. Η αριθμητική αυτή μέθοδος αποτελεί μια ακριβή υπολογιστική διαδικασία, ωστόσο, απαιτεί μεγάλη υπολογιστική προσπάθεια και κόστος. Ένα ακόμα πρόγραμμα H/Y για τον υπολογισμό της οριακής αντοχής σωληνωτών μελών με τοπική ατέλεια που υποβάλλονται σε φορτία διαφορετικών κατευθύνσεων αποτελεί το BCDENT που αναπτύχθηκε από τους Duan, Chen and Loh (1992) και η ανάπτυξη του βασίστηκε στις M-P-Φ (moment-thrust-curvature) σχέσεις που διεξήχθησαν από τον Loh (1993) στην Exxon Production Research Co. Επίσης ο Loh (1993) βασιζόμενος στα αποτελέσματα του BCDENT για μια σειρά πειραμάτων ανέπτυξε μία πλήρης αναλυτική μέθοδο που αποτελείται από ένα σετ εξισώσεων

αλληλεπίδρασης οι οποίες καλύπτουν όλες τις πιθανές αλληλουχίες φόρτισης για τις συνθήκες των πειραμάτων. Τέλος στην διάρκεια των τελευταίων ετών πειραματική έρευνα για την εκτίμηση της οριακής αντοχής σωληνωτών μελών με τοπική ατέλεια στο τοίχωμά τους έγινε στο Veritas Offshore and Service A.S. στο Όσλο από τους Landet et al. (1987).

3. Στόχος της εργασίας

Στην παρούσα εργασία μελετάται η οριακή αντοχή χαλύβδινων κυλινδρικών κελυφών που φέρουν τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους υπό την μορφή “κοιλώματος” (τοπικής κύρτωσης λόγω επιβολής εγκάρσιου εξωτερικού φορτίου), κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου, καμπτικού φορτίου ή συνδυασμού τους. Αρχικά σκοπός της εργασίας είναι να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα πειραμάτων τα οποία πραγματοποιήθηκαν από τους Landet (1987) και Taby (1986) για την μελέτη της οριακής αντοχής χαλύβδινων σωληνωτών μελών με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους και να συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά την προσομοίωση των πειραματικών διαδικασιών με το ABAQUS. Κύριος στόχος της μελέτης είναι να εξεταστεί κατά πόσον το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματος, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυλινδρικού κελύφους, το όριο διαρροής του υλικού, ο τύπος διεύθυνσης κατά την δημιουργία της τοπικής αρχικής ατέλειας καθώς και η αλληλουχία της φόρτισης στην περίπτωση επιβολής θλιπτικού αξονικού φορτίου και καμπτικού φορτίου επηρεάζουν την οριακή αντοχή και την συμπεριφορά του κελύφους. Η αριθμητική επίλυση γίνεται με την βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS και τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της αναλυτικής μεθόδου που αναπτύχθηκε από τον Loh (1993) στην EPR (Exxon Production Research Co.) και παρουσιάζεται στα πλαίσια της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Περιγραφή πειραμάτων

2.1 Εισαγωγή

Στόχος των πειραμάτων του Landet (1987) και Taby (1986) ήταν να υπολογιστεί η οριακή αντοχή κυλινδρικών χαλύβδινων σωληνωτών μελών, που φέρουν αρχική τοπική ατέλεια στο τοίχωμά τους υπό τη μορφή “κοιλώματος”, σε θλιπτικό αξονικό φορτίο, σε καμπτικό φορτίο και σε συνδυασμό αυτών. Τα κυλινδρικά σωληνωτά αυτά μέλη αποτελούν βασικά τμήματα στηρίξεων των θαλάσσιων εξεδρών που χρησιμοποιούνται για την εξώρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου σε θαλάσσιες περιοχές. Επίσης τα μέλη αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή και άλλων θαλάσσιων δομών όπως είναι οι πλατφόρμες τύπου jack-up και οι χαλύβδινες κατασκευές βαρύτητας (steel gravity structures) καθώς επίσης μπορούν να αποτελέσουν μέλη του σκελετού για την κατασκευή γεφυρών καταστρωμάτων των εξεδρών (deck trusses). Τα κυλινδρικά σωληνωτά μέλη των θαλάσσιων εξεδρών συνήθως υποβάλλονται σε φορτία λόγω βαρύτητας, άνεμου, κυμάτων και σε **παροοικων** φορτίων. Τα μέλη που βρίσκονται στην ζώνη των κυμάτων συχνά υπόκεινται σε τοπικές παραμορφώσεις της μορφής που αναφέρθηκε παραπάνω οι οποίες είναι αποτελέσματα συγκρούσεων μεταξύ των μελών αυτών με τροφοδοτικά πλοία, παγόβουνα ή ακόμα και βαριά αντικείμενα που προσκρούουν τυχαία κατά την διάρκεια της κατασκευής της δομής και της γεώτρησης. Από έρευνες που έγιναν στο παρελθόν τα σωληνωτά μέλη με τοπική παραμόρφωση υποβάλλονται κατά κύριο λόγο σε αξονική θλίψη συνδυασμένη με κάμψη που προκαλεί συνήθως θλίψη στην τοπική ατέλεια. Στην πραγματικότητα η τοπική παραμόρφωση μπορεί να συμβεί σε οποιαδήποτε διεύθυνση σε σχέση με το εφαρμοζόμενο καμπτικό φορτίο στα άκρα του τμήματος. Η τοποθεσία της τοπικής ατέλειας ποικίλει κατά μήκος του τμήματος και εγκάρσια φορτία μπορούν να συνοδεύουν τα θλιπτικά αξονικά φορτία.

Η μειωμένη αντοχή ενός μέλους που φέρει τοπική ατέλεια στο τοίχωμά του μπορεί να επηρεάσει την συμπεριφορά και την ασφάλεια ολόκληρης της κατασκευής, έτσι ώστε να μην μπορεί να ανταπεξέλθει στα λειτουργικά και στα περιβαλλοντικά φορτία για τα οποία έχει αρχικά σχεδιαστεί. Οι συνέπιες μπορούν να είναι λιγότερο καταστροφικές με την ανάπτυξη αξιόπιστων τεχνικών για γρήγορη εκτίμηση της αντοχής των παραμορφωμένων τμημάτων και ολόκληρης της δομής, έτσι ώστε οι επιδιορθώσεις να μπορούν να γίνουν αποτελεσματικά και οικονομικά. Στο κεφάλαιο

αυτό παρουσιάζονται τα πειράματα που διεξήχθησαν από το Veritas Offshore Technology and Services A.S. στο Όσλο για το σκοπό αυτό, και περιγράφονται από τον Landet (1987) και τον Taby (1986). Οι κατηγορίες των κυλινδρικών κελυφών που χρησιμοποιήθηκαν είναι :

- $D_o=140mm$ και $t=4.51mm$
- $D_o=140mm$ και $t=3.03mm$
- $D_o=140mm$ και $t=3.02mm$
- $D_o=140mm$ και $t=3.01mm$
- $D_o=140mm$ και $t=3.03mm$
- $D_o=133.8mm$ και $t=1.42mm$

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με όλες τις παραμέτρους των πειραμάτων που διεξήχθησαν.

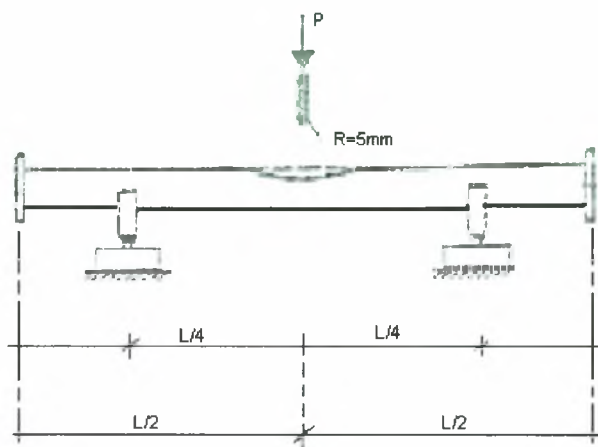
Test	D_o (mm)	t (mm)	L_o (mm)	K	σ_y (MPa)	d_o (mm)	P (kN)	b (mm)
D1-32	140	4.51	2677	0.944	350	14		215
D1-35	140	3.03	2677	0.946	368	14		220
D1-36	140	3.02	2677	0.964	400	28	-188.4	220
D2-37	140	3.01	2677	0.982	388	13.9	-107.7	220
D3-40	140	3.03	2677	0.986	391	28		220
1CDB	133.8	1.42	2500	1.00	295	15.6		210

όπου, D_o η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα, t το πάχος, L_o το μήκος του σωλήνα, K ο εκτιμώμενος συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού (λόγω συνοριακών συνθηκών), σ_y η τάση διαρροής, d_o το βάθος της αρχικής τοπικής ατέλειας του τοιχώματος, P το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο και b το μήκος του διεισδυτή στην εγκάρσια διεύθυνση του σωλήνα.

2.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Για την δημιουργία της αρχικής ατέλειας χρησιμοποιήθηκε διεισδητής τύπου “σφήνας” U (wedge-shape) με ακτίνα καμπυλότητας $r_0=5\text{mm}$, ο οποίος, τοποθετήθηκε στο μέσο του σωλήνα με την άκρη του εγκάρσια στο διαμήκη άξονα του σωλήνα.

Στη φάση αυτή του πειράματος το κέλυφος τοποθετήθηκε πάνω σε μια διάταξη όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.1 ενώ, για την στήριξή του χρησιμοποιήθηκε άρθρωση και κύλιση σε απόσταση $L/4$ από τα δύο άκρα του σωλήνα. Για να επιτευχθεί το καθορισμένο βάθος της αρχικής ατέλειας η διείσδυση έγινε σε ένα κύκλο φορτίσεων-αποφορτίσεων έτσι ώστε να μπορεί να ξεχωρίσει η ελαστική και η πλαστική παραμόρφωση.



Σχήμα 2.2.1 Πειραματική διάταξη για την δημιουργία της αρχική τοπικής ατέλειας

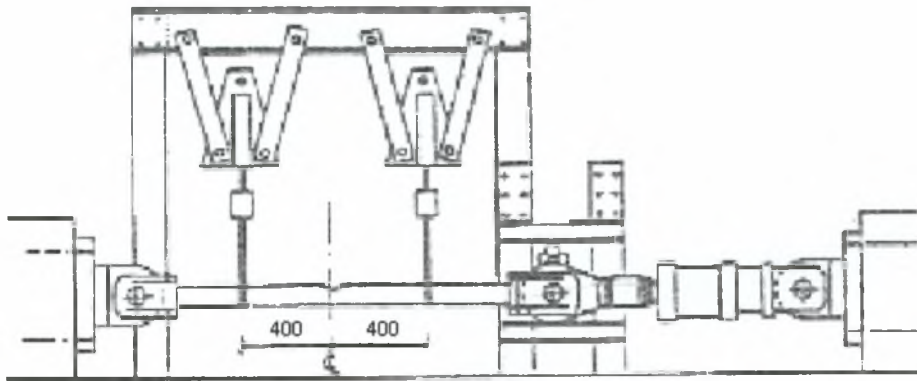


Σχήμα 2.2.2 Πειραματική διάταξη για τον υπολογισμό της καμπυλότητας και της γεωμετρίας των κελυφών πριν και μετά την διείσδυση

Για τον υπολογισμό της καμπυλότητας και της γεωμετρίας των κελυφών πριν και μετά την διείδυση κατασκευάστηκε μια ειδική διάταξη όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.2 Ο σωλήνας είναι ελεύθερος να στραφεί ως προς τον άξονα z ενώ, η μέτρηση της εξωτερικής ακτίνας του κελύφους γίνεται με δεκαεπτά αισθητήρες μετατόπισης (LVDT) οι οποίοι τοποθετήθηκαν συμμετρικά ως προς το κέντρο της ατέλειας. Οι μετρήσεις γίνονται ανά 5° κατά την περιφέρεια του κελύφους.

Τέλος για την εκτίμηση της οριακής αντοχής του κελύφους μετά την δημιουργία της τοπικής ατέλειας στο τοίχωμά του χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη του σχήματος 2.2.3 Τα αξονικά φορτία εφαρμόστηκαν στα κελύφη μέσω ενός σέρβο-υδραυλικού (servo-hydraulic) κυλίνδρου στον οποίο επιβλήθηκε ελεγχόμενη μετατόπιση (displacement control). Τα καμπτικά φορτία εφαρμόστηκαν μέσω δύο γρύλλων (jacks) τοποθετημένων κατακόρυφα ως προς τον διαμήκη άξονα του κελύφους ενώ, εφαρμόστηκε και σε αυτούς ελεγχόμενη μετατόπιση. Το τμήμα του κελύφους μεταξύ των εφαρμοζόμενων εγκάρσιων φορτίων έχει μήκος 800mm και θεωρήθηκε ως το “τμήμα υπό δοκιμή” (“test specimen”) ενώ, στο το κέντρο του δημιουργήθηκε η τοπική ατέλεια. Για την αποφυγή αστοχίας εκτός του τμήματος αυτού, τα κελύφη στηρίχτηκαν κάθετα στα εγκάρσια φορτία. Τέλος πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας υπολογίζεται η αρχική καμπυλότητα στα σημεία εφαρμογής των εγκάρσιων φορτίων σε σχέση με τις στηρίξεις στα άκρα του. Επίσης μετρήσεις γίνονται και κατά την διάρκεια του πειράματος για τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές στις στηρίξεις και στα σημεία εφαρμογής των εγκάρσιων φορτίων.

Στα πειράματα που αναλύονται στην παρούσα εργασία τα κυλινδρικά κελύφη υποβάλλονται ή μόνο σε θλιπτικό αξονικό φορτίο ή σε συνδυασμό αξονικού και καμπτικού φορτίου το οποίο εφαρμόζεται με τέτοια φορά ώστε να θλίβεται η περιοχή του κελύφους με την τοπική αρχική ατέλεια.



Σχήμα 2.2.2 Πειραματική διάταξη για τον υπολογισμό της οριακής αντοχής του κελύφους και το ιδανικό διάγραμμα των ροπών

2.3 Αποτελέσματα των πειραμάτων

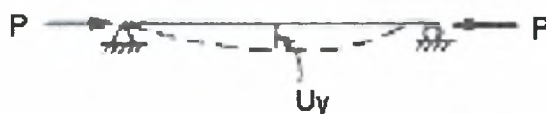
TestD1-32

Στο κυλινδρικό κέλυφος του συγκεκριμένου πειράματος μετά την δημιουργία της αρχικής τοπικής ατέλειας, εφαρμόζεται αξονικό θλιπτικό φορτίο για την εκτίμηση της αντοχής του, όπως περιγράφεται παραπάνω. Τα χαρακτηριστικά του σωλήνα είναι τα εξής :

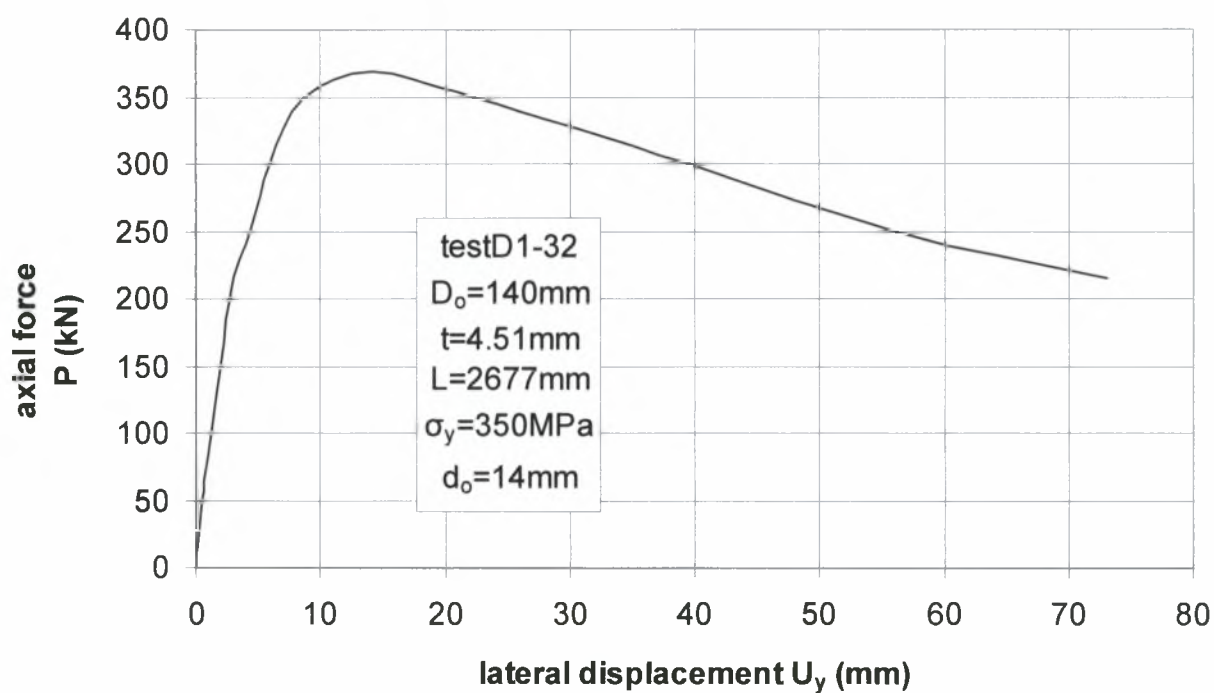
- Εξωτερική διάμετρος : $D_o=140mm$
- Πάχος : $t=4.51mm$
- Μήκος : $L=2677mm$
- Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού : $K=0.944$
- Όριο διαρροής : $\sigma_y=350MPa$
- Βάθος αρχικής τοπικής ατέλειας : $d_o=14mm$

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή του μεγέθους του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου P σε σχέση με την εγκάρσια μετατόπιση της διατομής του κελύφους στο κέντρο της περιοχής διείσδυσης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.31. Παρατηρείται ότι η ακαμψία του κελύφους (κλίση της καμπύλης) μειώνεται παίρνοντας θετικές τιμές μέχρι μιας ορισμένης τιμής του $P(=P_{max})$. Αυτό σημαίνει πως μέχρι αυτό το σημείο το κέλυφος μπορεί να “αναλάβει” περαιτέρω φορτίο παραμορφούμενο περισσότερο. Όμως στο σημείο όπου το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο παίρνει την μέγιστη τιμή του η ακαμψία του σωλήνα μηδενίζεται και η επιβολή φορτίου πέρα από το σημείο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία του

σωλήνα, αφού η ακαμψία του έχει πάρει πλέον αρνητικές τιμές (αρνητική κλίση της καμπύλης).



Σχήμα 2.3.1 Σημεία εφαρμογής του επιβαλλόμενου φορτίου και σημεία μέτρησης της μετατόπισης για το πείραμα testD1-32



Σχήμα 2.3.2 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου (P) σε σχέση με την εγκάρσια μετατόπιση (U_y) της μεσαίας διατομής του κελύφους

TestD1-35

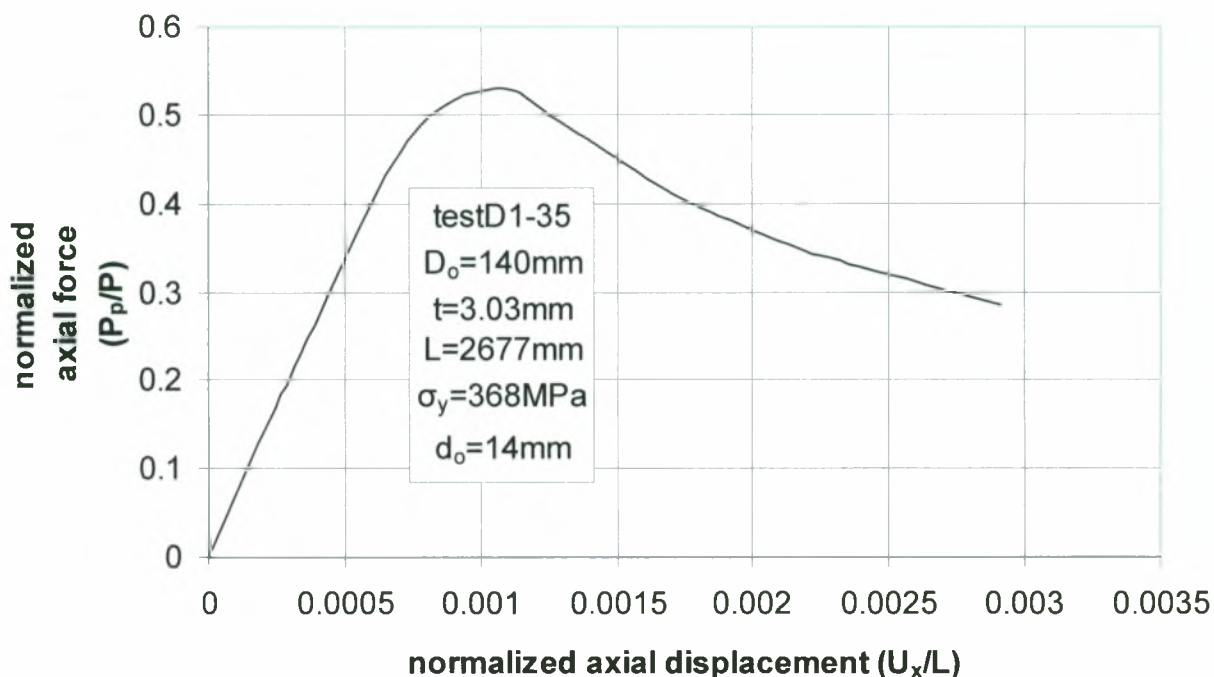
Στο πείραμα testD1-35 όπως και προηγουμένως εξετάζεται η αντοχή του κελύφους κατά την επιβολή σε αυτό θλιπτικού αξονικού φορτίου μετά την δημιουργία τοπικής ατέλειας στο τοίχωμά του. Τα χαρακτηριστικά του κελύφους είναι τα εξής :

- Εξωτερική διάμετρος : $D_o=140mm$
- Πάχος : $t=3.03mm$
- Μήκος : $L=2677mm$
- Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού : $K=0.946$
- Όριο διαρροής : $\sigma_y=368MPa$
- Βάθος αρχικής τοπικής ατέλειας : $d_o=14mm$

Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή του λόγου του επιβαλλόμενου φορτίου P προς το αξονικό φορτίο της πρώτης πλαστικής παραμόρφωσης P_p σε σχέση με την μεταβολή του λόγου της αξονικής μετατόπισης του σωλήνα U_x προς το μήκος του κελύφους L . Παρατηρείται πως η συμπεριφορά του υπό μελέτη κελύφους είναι όμοια με το κέλυφος του προηγούμενου πειράματος. Αρχικά η ακαμψία του σωλήνα (κλίση της καμπύλης) μειώνεται παραμένοντας θετική, πράγμα το οποίο σημαίνει πως είναι δυνατή η επιβολή μεγαλύτερων φορτίων στο κέλυφος παραμορφώνοντας το επιπλέον. Αυτό συμβαίνει μέχρι ο λόγος P/P_p πάρει τη μέγιστη τιμή του οπότε η ακαμψία του σωλήνα μηδενίζεται ενώ, η περαιτέρω επιβολή φορτίου έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση του κελύφους και τελικά την αστοχία του.



Σχήμα 2.3.3 Σημεία εφαρμογής του επιβαλλόμενου φορτίου και σημεία μέτρησης της μετατόπισης για το πείραμα testD1-35



Σχήμα 2.3.4 Διάγραμμα κανονικοποιημένου θλιπτικού αξονικού φορτίου (P/P_p) σε σχέση με την κανονικοποιημένη αξονική μετατόπιση (U_x/L) της ακραίας διατομής του κελύφους

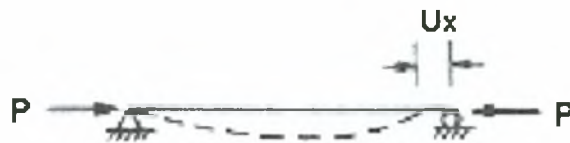
TestD1-36

Στο πείραμα testD1-36 το υπό εξέταση κέλυφος υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο αφού προηγηθεί η δημιουργία τοπικής ατέλειας στο τοίχωμά του. Τα χαρακτηριστικά του κελύφους είναι τα εξής :

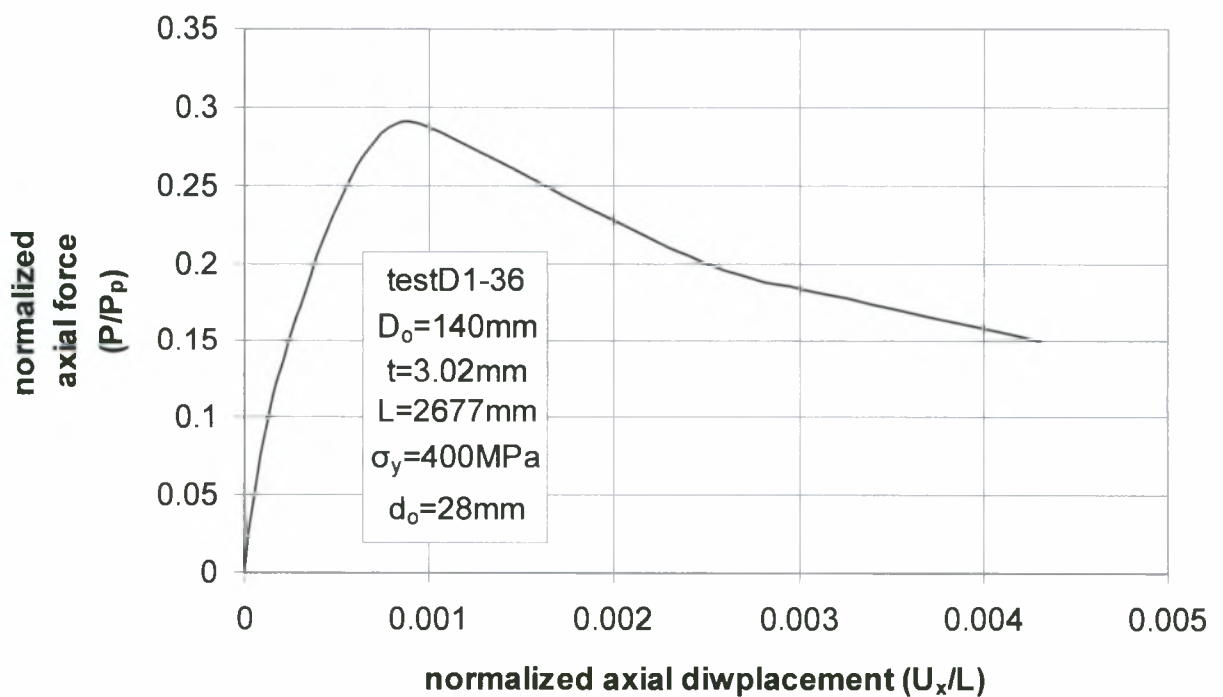
- Εξωτερική διάμετρος : $D_o=140\text{mm}$
- Πάχος : $t=3.02\text{mm}$
- Μήκος : $L=2677\text{mm}$
- Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού : $K=0.964$
- Όριο διαρροής : $\sigma_y=400\text{MPa}$
- Βάθος αρχικής τοπικής ατέλειας : $d_o=28\text{mm}$

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται και πάλι η μεταβολή του λόγου του επιβαλλόμενου φορτίου P προς το αξονικό φορτίο της πρώτης πλαστικής παραμόρφωσης P_p σε σχέση με την μεταβολή του λόγου της αξονικής μετατόπισης του σωλήνα U_x προς το μήκος του κελύφους L . Από το διάγραμμα παρατηρείται πως η τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου αυξάνει μέχρις μιας ορισμένης τιμής P_{max} , πέρα

από την οποία αρχίζει να μειώνεται ενώ, η αξονική μετατόπιση του κελύφους αυξάνει σε όλη την διάρκεια της φόρτισης. Στο διάστημα προτού ο λόγος P/P_p πάρει τη μέγιστη τιμή του η ακαμψία του σωλήνα (κλίση της καμπύλης) μειώνεται παραμένοντας θετική, πράγμα το οποίο σημαίνει πως ο σωλήνας μπορεί να αναλάβει περαιτέρω φορτίο παραμορφούμενος περισσότερο. Στο σημείο όπου $P=P_{max}$ (οριακό φορτίο αστοχίας) η ακαμψία του σωλήνα μηδενίζεται με αποτέλεσμα την αστοχία του.



Σχήμα 2.3.5 Σημεία εφαρμογής του επιβαλλόμενου φορτίου και σημεία μέτρησης της μετατόπισης για το πείραμα testD1-36



Σχήμα 2.3.6 Διάγραμμα κανονικοποιημένου θλιπτικού αξονικού φορτίου (P/P_p) σε σχέση με την κανονικοποιημένη αξονική μετατόπιση (U_x/L) της ακραίας διατομής του κελύφους

TestD2-37 και TestD3-40

Στο πείραμα που παρουσιάζεται στην παράγραφο αυτή τα κυλινδρικά κελύφη υποβάλλονται αρχικά σε θλιπτικό αξονικό φορτίο το οποίο παραμένει σταθερό ενώ, στην συνέχεια υποβάλλονται σε κάμψη με την εφαρμογή σε αυτά δύο εγκάρσιων φορτίων ως προς το διαμήκη άξονά τους όπως ακριβώς περιγράφεται στην παράγραφο 2.2. Της φόρτισης αυτής προηγείται η δημιουργία της τοπικής ατέλειας των κελυφών. Τα χαρακτηριστικά των δύο κελυφών είναι τα εξής :

testD2-37

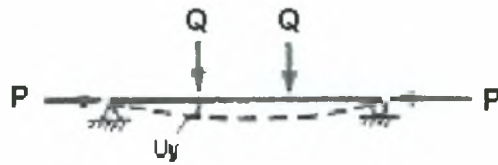
- Εξωτερική διάμετρος : $D_o=140mm$
- Πάχος : $t=3.01mm$
- Μήκος : $L=2677mm$
- Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού : $K=0.982$
- Όριο διαρροής : $\sigma_y=388MPa$
- Βάθος αρχικής τοπικής ατέλειας : $d_o=13.9mm$
- Θλιπτικό αξονικό φορτίο : $P=-188.4kN$

testD3-40

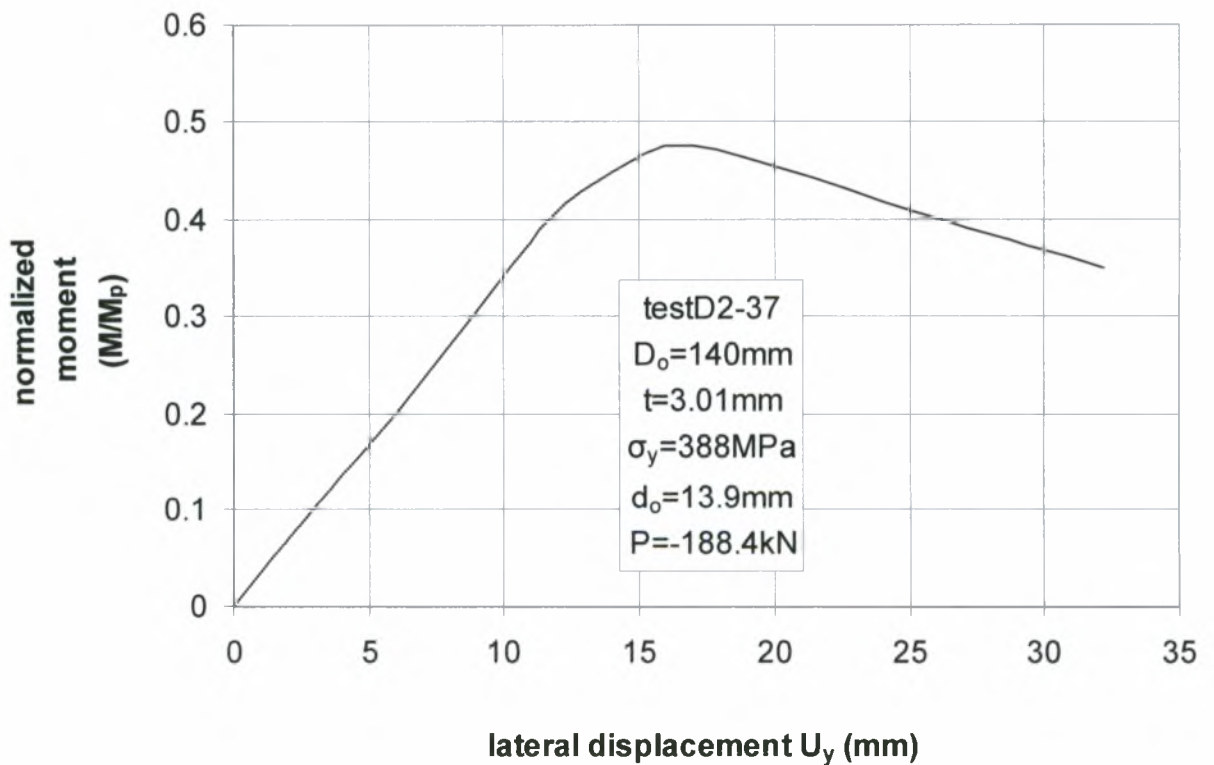
- Εξωτερική διάμετρος : $D_o=140mm$
- Πάχος : $t=3.03mm$
- Μήκος : $L=2677mm$
- Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού : $K=0.986$
- Όριο διαρροής : $\sigma_y=391MPa$
- Βάθος αρχικής τοπικής ατέλειας : $d_o=28mm$
- Θλιπτικό αξονικό φορτίο : $P=-107.7kN$

Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται πως μεταβάλλεται ο λόγος του καμπτικού φορτίου M (λόγω του επιβαλλόμενου εγκάρσιου φορτίου) προς το καμπτικό φορτίο της πρώτης πλαστικής παραμόρφωσης M_p του κελύφους χωρίς αρχική ατέλεια σε σχέση με την εγκάρσια μετατόπιση του κελύφους στο σημείο εφαρμογής του εγκάρσιου φορτίου και για τις δύο περιπτώσεις κελυφών. Από τα διαγράμματα φαίνεται πως αρχικά η ακαμψία των κελυφών (κλίση της καμπύλης) μειώνεται ενώ παραμένει θετική. Στο διάστημα αυτό είναι δυνατή η επιβολή μεγαλύτερων φορτίων στα κελύφη χωρίς να απέλθει η αστοχία τους. Στο σημείο όπου

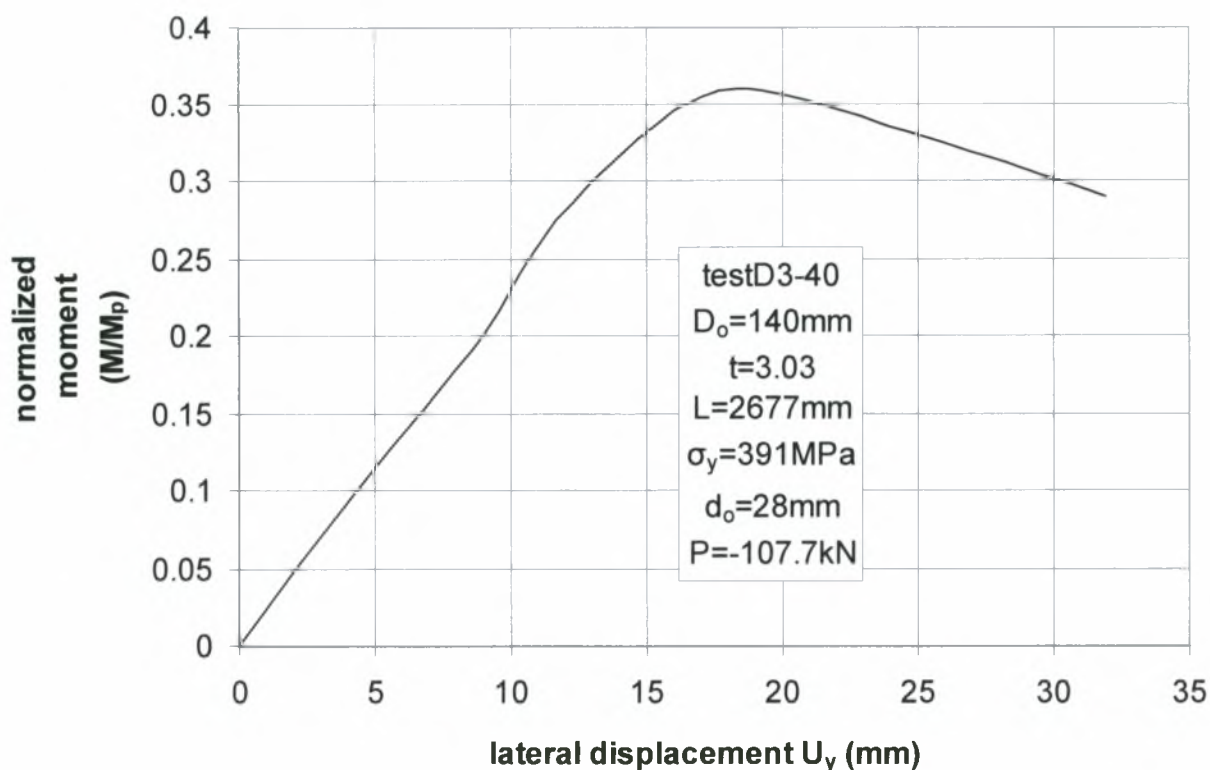
ο λόγος M/M_p παίρνει την μέγιστη τιμή του η ακαμψία της κατασκευής και στις δύο περιπτώσεις μηδενίζεται με αποτέλεσμα την αστοχία των κελυφών.



Σχήμα 2.3.7 Σημεία εφαρμογής των επιβαλλόμενων φορτίων και σημεία μέτρησης της μετατόπισης για το πειράματα testD2-37 και testD3-40



Σχήμα 2.3.8 Διάγραμμα κανονικοποιημένου καμπτικού φορτίου (M/M_p) σε σχέση με την εγκάρσια μετατόπιση (U_y) της διατομής του κελύφους στην οποία επιβάλλεται το εγκάρσιο φορτίο.



Σχήμα 2.3.9 Διάγραμμα κανονικοποιημένου καμπτικού φορτίου (M/M_p) σε σχέση με την εγκάρσια μετατόπιση (U_y) της διατομής του κελύφους στην οποία επιβάλλεται το εγκάρσιο φορτίο.

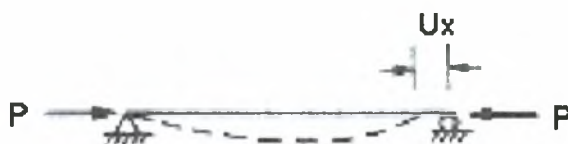
Test1CDB

Στο πείραμα test1CDB το υπό εξέταση κέλυφος υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο αφού προηγηθεί η δημιουργία τοπικής ατέλειας στο τοίχωμά του. Τα χαρακτηριστικά του κελύφους είναι τα εξής :

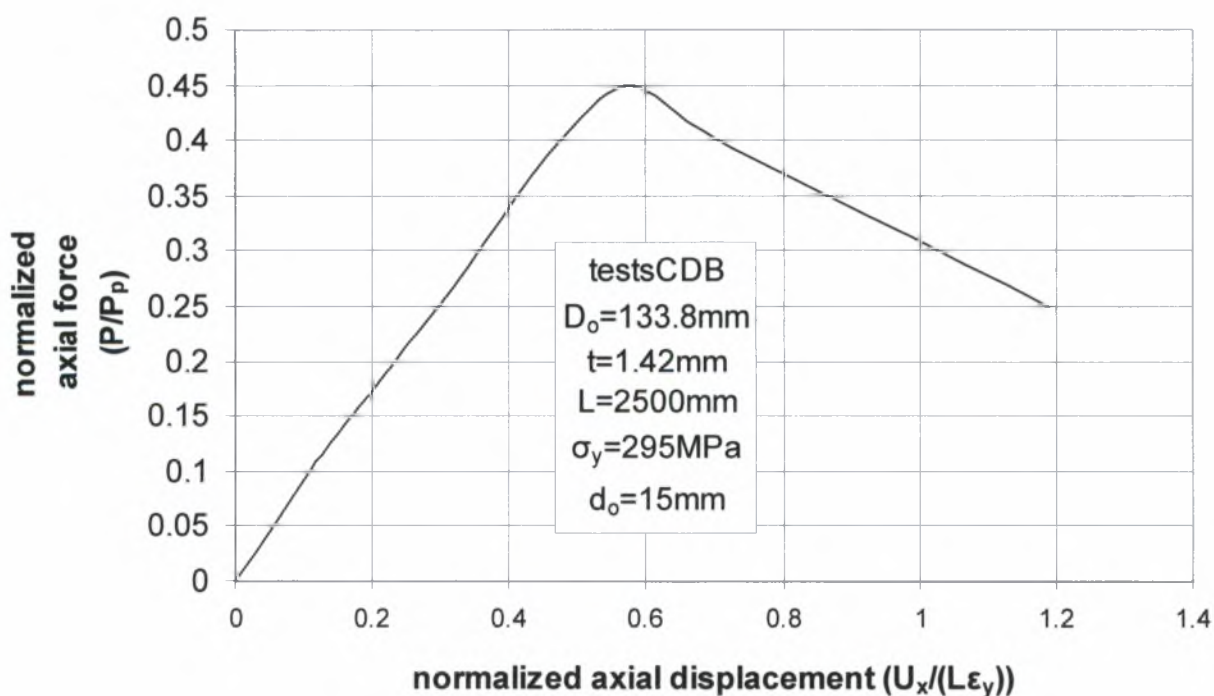
- Εξωτερική διάμετρος : $D_o=133.8mm$
- Πάχος : $t=1.42mm$
- Μήκος : $L=2500mm$
- Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού : $K=1$
- Όριο διαρροής : $\sigma_y=295MPa$
- Βάθος αρχικής τοπικής ατέλειας : $d_o=15.6mm$

Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή του λόγου του επιβαλλόμενου φορτίου P προς το αξονικό φορτίο της πρώτης πλαστικής παραμόρφωσης P_p σε σχέση με την μεταβολή του λόγου της αξονικής μετατόπισης του σωλήνα U_x προς το

γινόμενο του μήκους του κελύφους L επί την παραμόρφωση ϵ_y που αντιστοιχεί στην τάση διαρροής. Όπως παρατηρείται η ακαμψία του κελύφους (κλίση της καμπύλης) μειώνεται παίρνοντας θετικές τιμές μέχρι μιας ορισμένης τιμής του $P(=P_{max})$. Αυτό σημαίνει πως μέχρι αυτό το σημείο το κέλυφος μπορεί να “αναλάβει” περαιτέρω φορτίο παραμορφούμενο περισσότερο. Όμως στο σημείο όπου το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο παίρνει την μέγιστη τιμή του η ακαμψία του σωλήνα μηδενίζεται και η επιβολή φορτίου πέρα από το σημείο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία του σωλήνα, αφού η ακαμψία του έχει πάρει πλέον αρνητικές τιμές (αρνητική κλίση της καμπύλης).



Σχήμα 2.3.10 Σημεία εφαρμογής του επιβαλλόμενου φορτίου και σημεία μέτρησης της μετατόπισης για το πείραμα testCDB



Σχήμα 2.3.11 Διάγραμμα κανονικοποιημένου θλιπτικού αξονικού φορτίου (P/P_p) σε σχέση με την κανονικοποιημένη αξονική μετατόπιση $(U_x/(L\epsilon_y))$ της ακραίας διατομής του κελύφους

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Αριθμητική προσομοίωση πειραμάτων

3.1.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφαλαίο προσομοιώνονται αριθμητικά τα πειράματα που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2. Η αριθμητική επίλυση έγινε με την βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Οι σωλήνες προσομοιώθηκαν με τετρακομβικά στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης (S4R) ενώ, θεωρήθηκε μη γραμμική γεωμετρία με ελαστοπλαστικό υλικό και μοντέλο ισοεντροπικής κράτυνσης με κριτήριο διαρροής “Von Mises”.

3.1.2 Υλικό των σωληνωτών μελών και τύπος ανάλυσης

Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν θεωρήθηκε ελαστοπλαστικό γραμμικά κρατυνόμενο υλικό και μοντέλο ισοεντροπικής κράτυνσης με κριτήριο διαρροής “Von Mises”. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας στην ελαστική περιοχή $E=210000\text{MPa}$. Θα πρέπει να σημειωθεί πως στις αναφορές των πειραμάτων δεν υπήρχαν πλήρη δεδομένα για την συμπεριφορά του υλικού στην ανελαστική περιοχή για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε χάλυβας με $E'=0\text{MPa}$. Τα ζεύγη τιμών τάσης-παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν στο ABAQUS αφού πρώτα τροποποιήθηκαν σε πραγματικές τιμές τάσης και λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους :

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom})$$

$$\varepsilon_{ln}^p = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) - \frac{\sigma_{true}}{E}$$

όπου οι όροι σ_{nom} και ε_{nom} είναι η ονομαστική τάση και παραμόρφωση αντίστοιχα , ενώ το σ_{true} η πραγματική τάση, ο όρος $\ln(1 + \varepsilon_{nom})$ είναι η συνολική πραγματική παραμόρφωση και τέλος το ε_{ln}^p είναι η λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση.

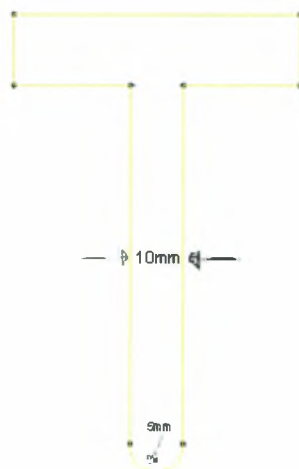
Όσον αφορά στην γεωμετρική συμπεριφορά των κελυφών κατά την παραμόρφωσή τους παρουσιάζουν γεωμετρικές μη-γραμμικότητες που οφείλονται στις μεγάλες μετατοπίσεις και περιστροφές που υφίστανται στην διάρκεια της ανάλυσης. Στο ABAQUS για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η εντολή “nlgeom” μια υποεντολή

της εντολής “step”. Αρχικά για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος “Static General” που λαμβάνει υπόψη του τις παραπάνω μη γραμμικότητες. Ενώ στο τελευταίο βήμα λόγω της αστάθειας του φαινομένου του λυγισμού και της μεταλυγισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής έγινε χρήση του αλγορίθμου “Static, riks”.

3.2.1 Αριθμητική επίλυση για τα πειράματα TestD1-32, TestD1-36 TestD1-35 και Test1CDB

Στην ανάλυση που ακολουθεί προσομοιάζονται τα κελύφη των πειραμάτων TestD1-32, TestD1-36, TestD1-35 και Test1CDB και εξετάζεται η οριακή αντοχή τους κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου μετά την δημιουργία τοπικής ατέλειας στο τοίχωμά τους με την μορφή “κοιλώματος”. Το φαινόμενο είναι τρισδιάστατο αλλά λόγω συμμετρίας εξετάζεται το $\frac{1}{2}$ του κελύφους. Για την δημιουργία της τοπικής ατέλειας χρησιμοποιείται διεισδυτής τύπου “σφήνας” ή “μαχαιριού” ο οποίος τοποθετήθηκε στο μέσο του κελύφους όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.2. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του διεισδυτή (σχήμα 3.2.1) είναι τα εξής :

- Λόγος μήκους διεισδυτή στην εγκάρσια διεύθυνση προς την μέση διάμετρο του κελύφους : $b/D=1.6$
- Πάχος του διεισδυτή : $d=10mm$
- Ακτίνα καμπυλότητας στην περιοχή της επαφής του διεισδυτή με το κέλυφος : $r_o=5mm$



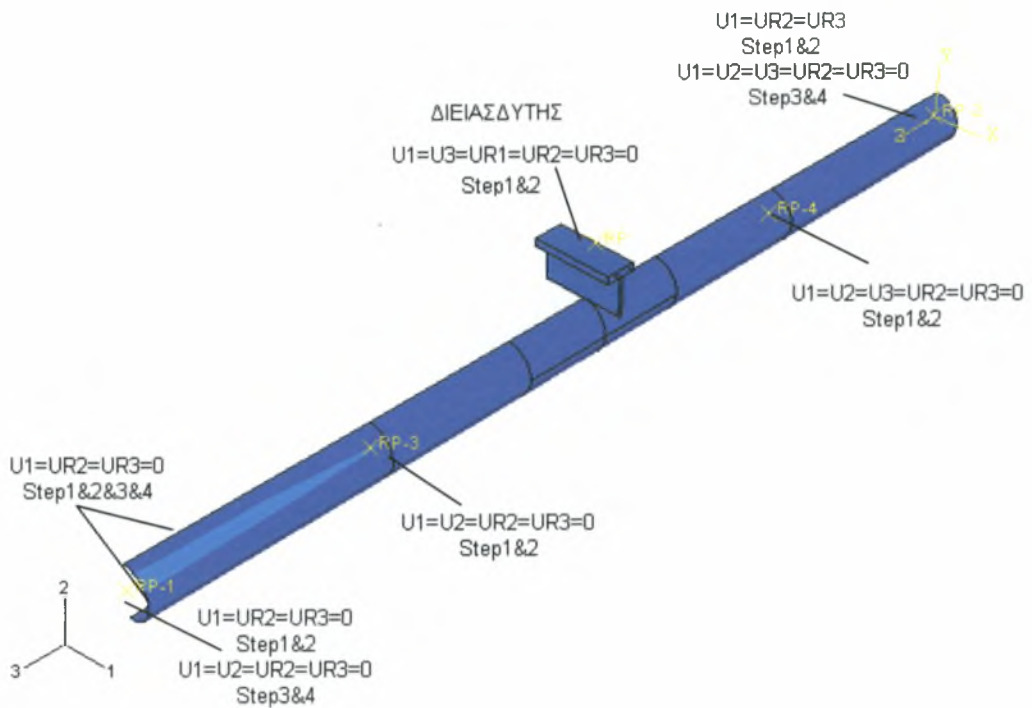
Σχήμα 3.2.1 Δεισδυτής τύπου “σφήνας” ή “μαχαιριού”

Βήματα της ανάλυσης

Στην περίπτωση των πειραμάτων που μελετώνται στην παράγραφο αυτή, όπου τα κελύφη υποβάλλονται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο η ανάλυση προχωράει σε τρία βήματα. Στο πρώτο βήμα “step1” επιτυγχάνεται η δημιουργία της τοπικής ατέλειας με την μετατόπιση του διεισδυτή. Στο δεύτερο βήμα “step2” γίνεται η αποδέσμευση του σωλήνα από τον διεισδυτή και τέλος στο τρίτο βήμα “step3” εφαρμόζεται το αξονικό φορτίο.

Μοντέλο επίλυσης του προβλήματος

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα ανάλυση αποτελείται από ένα παραμορφώσιμο σώμα τον σωλήνα και ένα άκαμπτο σώμα τον διεισδυτή. Αφού αρχικά σχεδιάστηκαν και τα δύο σώματα στο “ABAQUS CAE”, ορίστηκε η επιφάνεια αλληλεπίδρασης του διεισδυτή με το κέλυφος η οποία θεωρήθηκε χωρίς τριβή, ενώ στη συνέχεια για την αλληλεπίδρασή τους χρησιμοποιήθηκε η εντολή “contact pair”. Έπειτα ο διεισδυτής θεωρήθηκε άκαμπτο σώμα μέσω της εντολής “rigid body” και της υποεντολής “analytical surface”. Ορίστηκε ένας κόμβος αναφοράς στον διεισδυτή έτσι ώστε να επιβληθούν οι συνοριακές συνθήκες σε αυτόν. Στο σχήμα 3.2.2 φαίνεται η προσομοίωση που έγινε στο ABAQUS για τον σωλήνα και το διεισδυτή. Στη συνέχεια στο “step2” με την χρήση της εντολής “model change” αποδεσμεύτηκε το κέλυφος από το άκαμπτο σώμα. Τέλος στο “step3” επιβλήθηκε το αξονικό φορτίο μέσω της εντολής “Cload” και “kinematic coupling”. Οι στηρίξεις σε όλη την διάρκεια της ανάλυσης προσομοιώθηκαν με κατάλληλες συνοριακές συνθήκες που περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 3.2.2 Μοντέλο προσομοίωσης του πειράματος με τις συνοριακές συνθήκες κατά την διάρκεια της ανάλυσης

Συνοριακές συνθήκες

Στο μοντέλο της παρούσας ανάλυσης όπως προαναφέρθηκε σχεδιάστηκε το $\frac{1}{2}$ του κελύφους λόγω των συμμετριών που υπάρχουν στο συγκεκριμένο πρόβλημα οπότε, το μοντέλο είναι συμμετρικό μόνο ως προς τον άξονα 1. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.2 στην πάνω και κάτω γενέτειρα του σωλήνα δεσμεύτηκε η μετατόπιση στην διεύθυνση 1 και η στροφή στις διευθύνσεις 2 και 3 δηλαδή, $U1=UR2=UR3=0$. Στην αριστερή και δεξιά διατομή του σωλήνα στα δύο άκρα του δεσμεύτηκαν οι βαθμοί ελευθερίας 1,5 και 6 ($U1=UR2=UR3=0$), θεωρώντας απαραμόρφωτες πλάκες (“καπάκια”). Για την προσομοίωση των “καπακιών” στο ABAQUS χρησιμοποιήθηκε η εντολή “kinematic coupling” με την οποία μέσω ενός κόμβου αναφοράς περιορίστηκαν όλοι οι κόμβοι στα άκρα του κελύφους να κινούνται σύμφωνα με αυτό τον κόμβο στον οποίο επιβάλλαμε τις ανωτέρω συνοριακές συνθήκες. Επίσης στις διατομές του κελύφους σε απόσταση $L/4$ από τα δύο άκρα του προσομοιάστηκε μια άρθρωση και μια κύλιση θεωρώντας με την χρήση και πάλι απαραμόρφωτων πλακών όπως ακριβώς προηγουμένως οπότε, η μία διατομή περιορίστηκε να μετατοπίζεται

μόνο κατά τον άξονα 3 και να περιστρέφεται μόνο ως προς τον άξονα 1 ($U1=U2=UR2=UR3=0$) ενώ, η άλλη είναι ελεύθερη να κινηθεί μόνο στην διεύθυνση 3 ($U1=U2=U3=UR2=UR3=0$). Στον διεισδυτή επιτράπηκε η μετατόπιση μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση 2. Στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης “step3” η φύση του προβλήματος καθιστά αναγκαίο τον επαναπροσδιορισμό των συνοριακών συνθηκών, το οποίο έγινε μέσω της εντολής “boundary, op=new” οπότε, παύουν να ισχύουν οι συνοριακές συνθήκες που οριστήκαν στα προηγούμενα βήματα. Το ένα άκρο του κελύφους είναι ελεύθερο να κινηθεί κατά τον άξονα 3 και να περιστραφεί κατά τον άξονα 1 ($U1=UR2=UR3=0$ και το $U2$ τίθεται ίσο με την μετατόπιση που έχει ο κόμβος αναφοράς στο βήμα δύο) ενώ, το άλλο είναι ελεύθερο μόνο να περιστραφεί κατά την διεύθυνση 1 ($U1=UR2=UR3=0$ ενώ τα $U2$ και $U3$ τίθενται ίσα με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις που έχουν στο αμέσως προηγούμενο βήμα) προσομοιάζοντας έτσι μια κύλιση και μια άρθρωση αντίστοιχα στις δύο διατομές του σωλήνα στα άκρα του. Η προσομοίωση και εδώ έγινε με την χρήση της εντολής “kinematic coupling” και του κόμβου αναφοράς. Τέλος για την πάνω και την κάτω γενέτειρα του κελύφους επαναπροσδιορίζονται οι συνθήκες που ισχύουν στα δύο προηγούμενα βήματα της ανάλυσης.

Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Για την διακριτοποίηση των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν τετρακομβικά στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης (SR4) οπότε, προέκυψαν τέσσερα δομημένα πλέγματα με 3478, 3150, 3478 και 5472 στοιχεία για τα κελύφη των πειραμάτων TestD1-36, TestD1-32, TestD1-35 και Test1CDB αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται ότι στο κέντρο του σωλήνα υπάρχει πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή αλληλεπίδρασης του διεισδυτή με το κέλυφος (σχήμα 3.2.3).



Σχήμα 3.2.3 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τα κελύφη των πειραμάτων TestD1-32, TestD1-36, TestD1-35 και Test1CDB

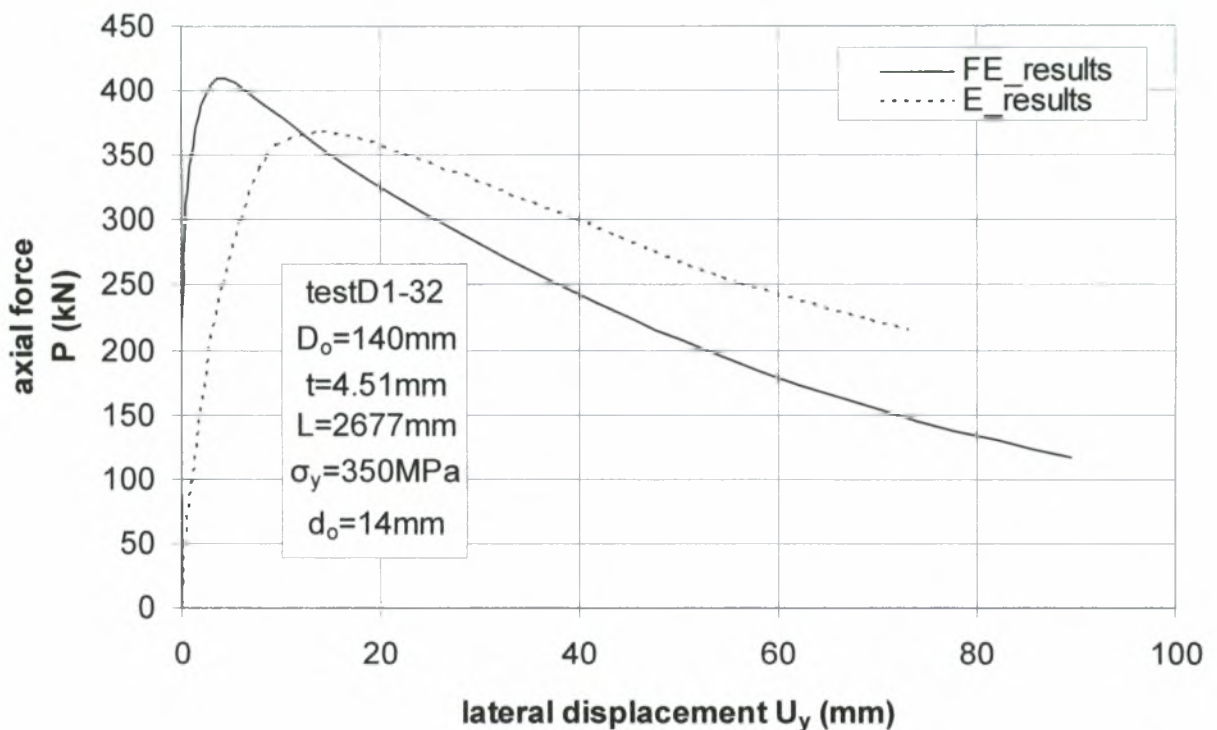
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αριθμητική επίλυση (συνεχή γραμμή) σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας (διακεκομμένη γραμμή). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στους υπολογισμούς που ακολουθούν δεν έχει ληφθεί υπόψη η μετατόπιση των διατομών του κελύφους κατά την δημιουργία της τοπικής αρχικής ατέλειας και για το λόγο αυτό οι μετατοπίσεις ξεκινάνε όλες από μηδέν. Επίσης τυχόν αποκλίσεις των δύο λύσεων μπορεί να οφείλονται στο ότι οι ιδιότητες του υλικού δεν είναι πλήρως προσδιορισμένες καθώς και στην ασάφια μερικών δεδομένων του προβλήματος στις αναφορές των πειραμάτων

TestD1-32

Στο πείραμα αυτό προσομοιάζεται κυλινδρικό κέλυφος με τα εξής χαρακτηριστικά :

- Εξωτερική διάμετρος : $D_o=140mm$
- Πάχος : $t=4.51mm$
- Μήκος : $L=2677mm$
- Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού : $K=0.944$
- Όριο διαρροής : $\sigma_y=350MPa$
- Βάθος αρχικής τοπικής ατέλειας : $d_o=14mm$

Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται φανερό ότι η αριθμητική μέθοδος υπερεκτιμά την οριακή αντοχή του κελύφους κατά 9.9% σε σχέση με την πειραματική διαδικασία.



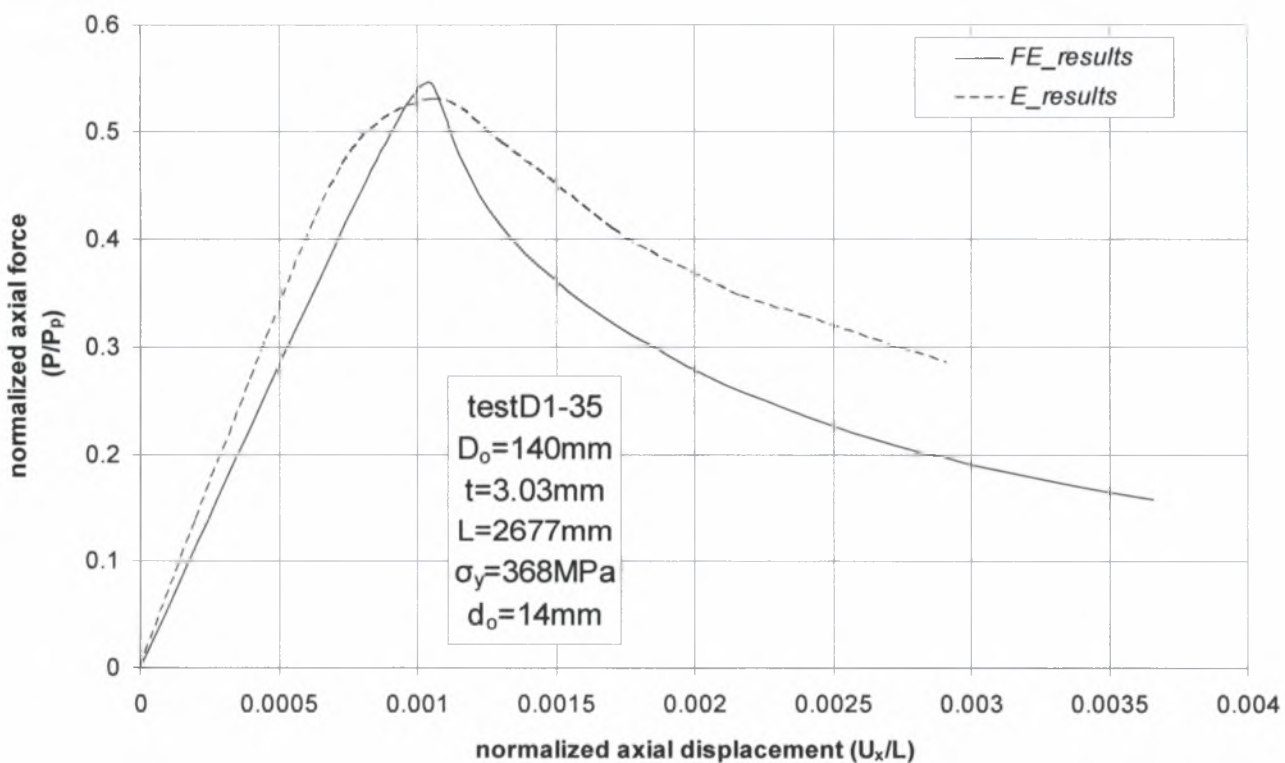
Σχήμα 3.2.4 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου (P) σε σχέση με την εγκάρσια μετατόπιση (U_y) της μεσαίας διατομής του κελύφους

TestD1-35

Στο πείραμα αυτό προσομοιάζεται κυλινδρικό κέλυφος με τα εξής χαρακτηριστικά :

- Εξωτερική διάμετρος : $D_o=140mm$
- Πάχος : $t=3.03mm$
- Μήκος : $L=2677mm$
- Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού : $K=0.946$
- Όριο διαρροής : $\sigma_y=368MPa$
- Βάθος αρχικής τοπικής ατέλειας : $d_o=14mm$

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα που ακολουθεί η αριθμητική μέθοδος υπερεκτιμά το φορτίο αστοχίας του κελύφους. Η διαφορά των δύο αποτελεσμάτων στην περίπτωση αυτή είναι πολλή μικρή και εκτιμάται περίπου στο 1.8%.



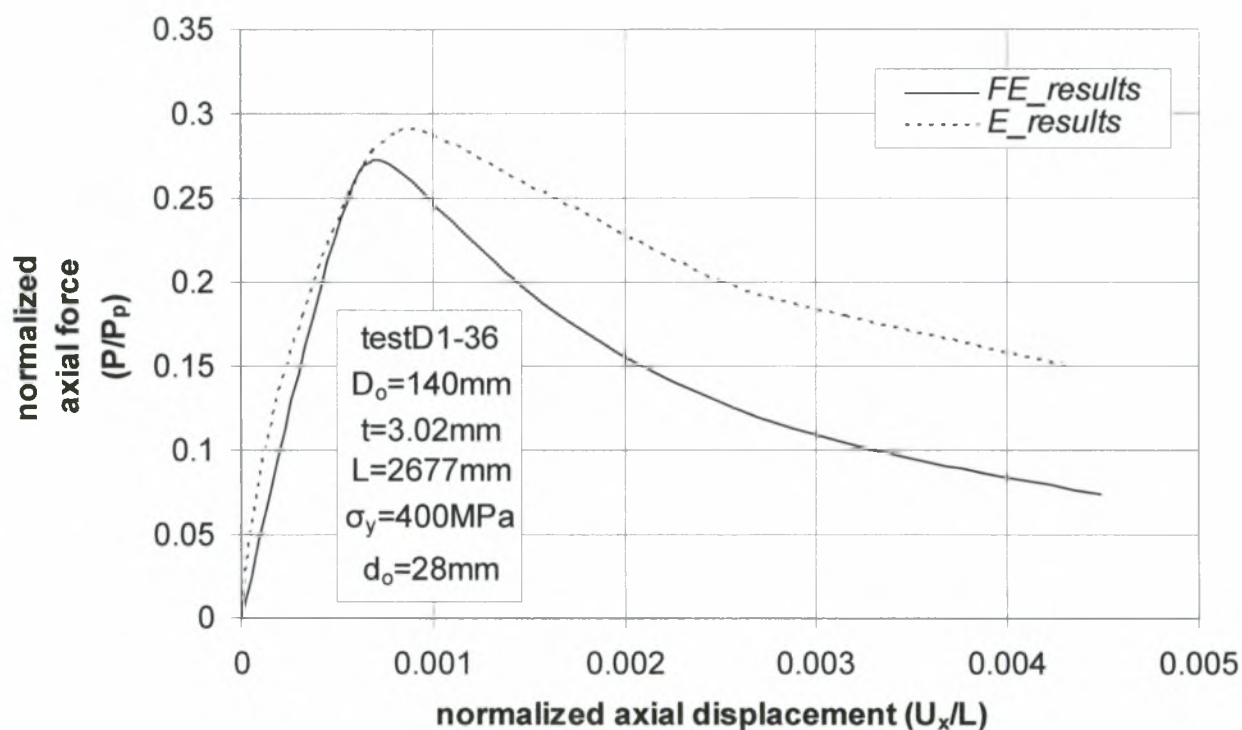
Σχήμα 3.2.5 Διάγραμμα κανονικοποιημένου θλιπτικού αξονικού φορτίου (P/P_p) σε σχέση με την κανονικοποιημένη αξονική μετατόπιση (U_x/L) της ακραίας διατομής του κελύφους

TestD1-36

Στο πείραμα αυτό προσομοιάζεται κυλινδρικό κέλυφος με τα εξής χαρακτηριστικά :

- Εξωτερική διάμετρος : $D_o=140mm$
- Πάχος : $t=3.02mm$
- Μήκος : $L=2677mm$
- Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού : $K=0.964$
- Όριο διαρροής : $\sigma_y=400MPa$
- Βάθος αρχικής τοπικής ατέλειας : $d_o=28mm$

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρείται πως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υποεκτιμά την οριακή αντοχή του κελύφους. Η απόκλιση των δύο εκτιμήσεων υπολογίζεται στο 5.8%.



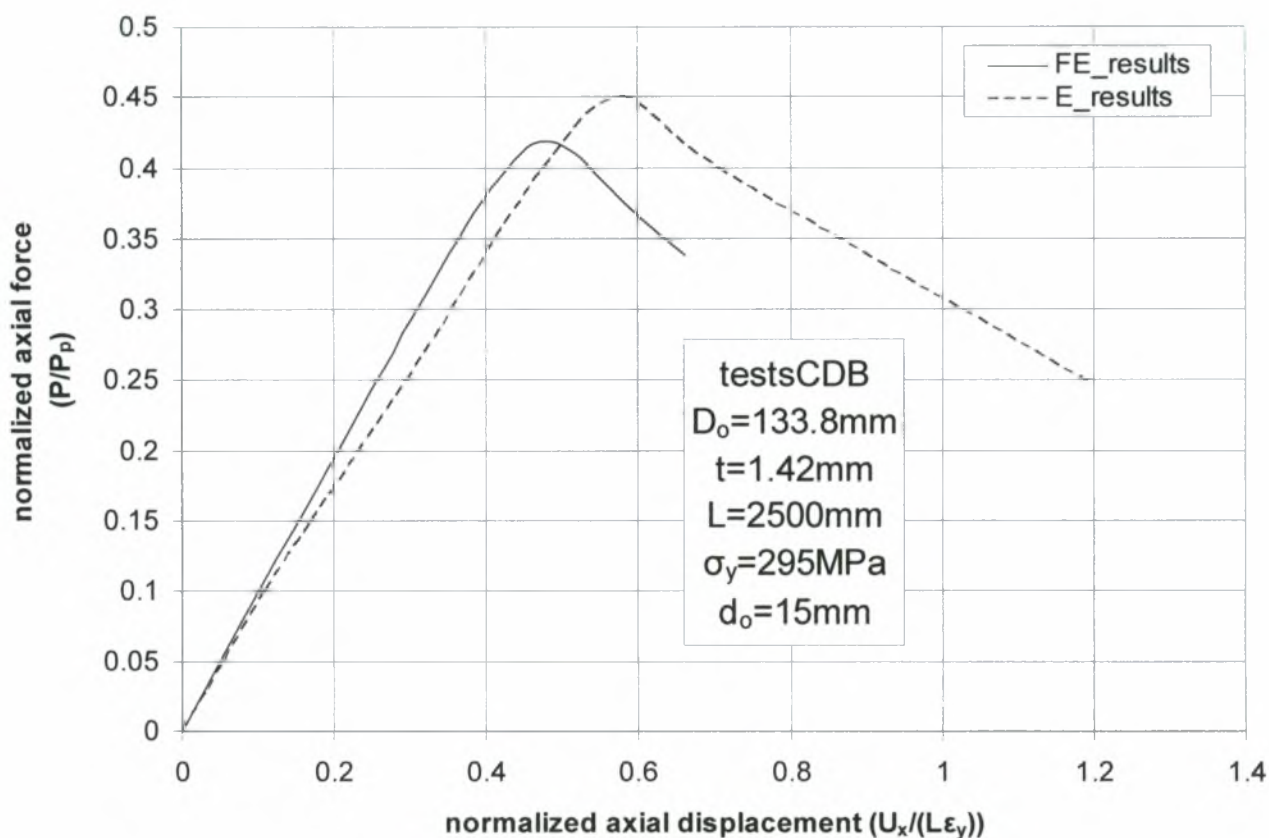
Σχήμα 3.2.6 Διάγραμμα κανονικοποιημένου θλιπτικού αξονικού φορτίου (P/P_p) σε σχέση με την κανονικοποιημένη αξονική μετατόπιση (U_x/L) της ακραίας διατομής του κελύφους

Test1CDB

Στο πείραμα test1CDB προσομοιάζεται κυλινδρικό κέλυφος με τα εξής χαρακτηριστικά :

- Εξωτερική διάμετρος : $D_o=133.8mm$
- Πάχος : $t=1.42mm$
- Μήκος : $L=2500mm$
- Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού : $K=1$
- Όριο διαρροής : $\sigma_y=295MPa$
- Βάθος αρχικής τοπικής ατέλειας : $d_o=15.6mm$

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων του παρακάτω διαγράμματος φαίνεται πως η αριθμητική μέθοδος υποεκτιμά την οριακή αντοχή του κελύφους κατά 6.9%.



Σχήμα 3.2.7 Διάγραμμα κανονικοποιημένου θλιπτικού αξονικού φορτίου (P/P_p) σε σχέση με την κανονικοποιημένη αξονική μετατόπιση (U_x/(Lε_y)) της ακραίας διατομής του κελύφους

3.3.1 Αριθμητική επίλυση για τα πειράματα TestD2-37, TestD3-40

Στην ανάλυση που ακολουθεί προσομοιάζονται τα κελύφη των πειραμάτων TestD2-37 και TestD3-40. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις εξετάζεται η οριακή αντοχή του σωλήνα κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου και δύο εγκάρσιων φορτίων ως προς το διαμήκη άξονά του μετά την δημιουργία τοπικής ατέλειας στο τοίχωμά του με την μορφή “κοιλώματος”. Τα εγκάρσια φορτία εφαρμόζονται σε δύο διατομές του κελύφους συμμετρικά ως προς την μεσαία διατομή του, σε απόσταση 400mm από αυτήν και έχουν τέτοια φορά έτσι ώστε θα θλίβεται η περιοχή του κελύφους με την τοπική αρχική ατέλεια. Το φαινόμενο είναι τριδιάστατο αλλά λόγω συμμετρίας εξετάζεται το $\frac{1}{2}$ του κελύφους. Για την δημιουργία της τοπικής ατέλειας χρησιμοποιείται διεισδυτής τύπου σφήνας ίδιος με αυτόν της παραγράφου 3.2.1(σχήμα 3.2.1) και τοποθετείται στο μέσο του κελύφους όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.2.

Βήματα της ανάλυσης

Στην περίπτωση των πειραμάτων που μελετώνται στην παράγραφο αυτή, όπου τα κελύφη υποβάλλονται σε θλιπτική αξονική φόρτιση και σε εγκάρσια φόρτιση η ανάλυση προχωράει σε τέσσερα βήματα. Στο πρώτο βήμα “step1” επιτυγχάνεται η δημιουργία της τοπικής ατέλειας με την μετατόπιση του διεισδυτή. Στη συνέχεια στο δεύτερο βήμα “step2” γίνεται η αποδέσμευση του σωλήνα από τον διεισδυτή. Τέλος στα βήματα “step3” και “step4” το κέλυφος υποβάλλεται σε αξονική και εγκάρσια φόρτιση (κάμψη) αντίστοιχα.

Μοντέλο επίλυσης του προβλήματος

Στη παρούσα ανάλυση χρησιμοποιείται το ίδιο μοντέλο επίλυσης του προβλήματος με αυτό της παραγράφου 3.2.1 με την διαφορά ότι το τρίτο βήμα της ανάλυσης ακολουθεί ένα επιπλέον βήμα στο οποίο το κέλυφος υποβάλλεται σε εγκάρσια φόρτιση μέσω της εντολής “Cload” και “kinematic coupling”. Οι στηρίξεις σε όλη την διάρκεια της ανάλυσης και εδώ προσομοιώθηκαν με κατάλληλες συνοριακές συνθήκες που περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο.

Συνοριακές συνθήκες

Για τις συνοριακές συνθήκες όσον αφορά τα τρία πρώτα βήματα της ανάλυσης είναι ακριβώς οι ίδιες με τις παραγράφου 3.2.1 ενώ, στο τελευταίο βήμα “step4” εξακολουθούν να ισχύουν οι συνοριακές συνθήκες που ορίστηκαν στο “step3”

Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Για την διακριτοποίηση των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν τετρακομβικά στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης (SR4) οπότε, προέκυψαν δύο δομημένα πλέγματα με 3666 στοιχεία το καθένα για τα κελύφη των πειραμάτων TestD2-37 και TestD3-40. Και στις δύο περιπτώσεις πύκνωση του πλέγματος υπάρχει στο κέντρο του σωλήνα στην περιοχή αλληλεπίδρασης του διεισδυτή με το κέλυφος καθώς και στις περιοχές εφαρμογής των εγκάρσιων φορτίων εκατέρωθεν του διεισδυτή όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.1.



Σχήμα 3.3.1 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τα κελύφη των πειραμάτων TestD2-37 και TestD3-40

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αριθμητική επίλυση (συνεχή γραμμή) σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας (διακεκομμένη γραμμή). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στους υπολογισμούς που ακολουθούν δεν έχει ληφθεί υπόψη η μετατόπιση των διατομών του κελύφους κατά την δημιουργία της τοπικής αρχικής ατέλειας και για το λόγο αυτό οι μετατόπισεις ξεκινάνε όλες από μηδέν. Επίσης τυχόν αποκλίσεις των δύο λύσεων μπορεί να οφείλονται στο ότι οι ιδιότητες του υλικού δεν είναι πλήρως

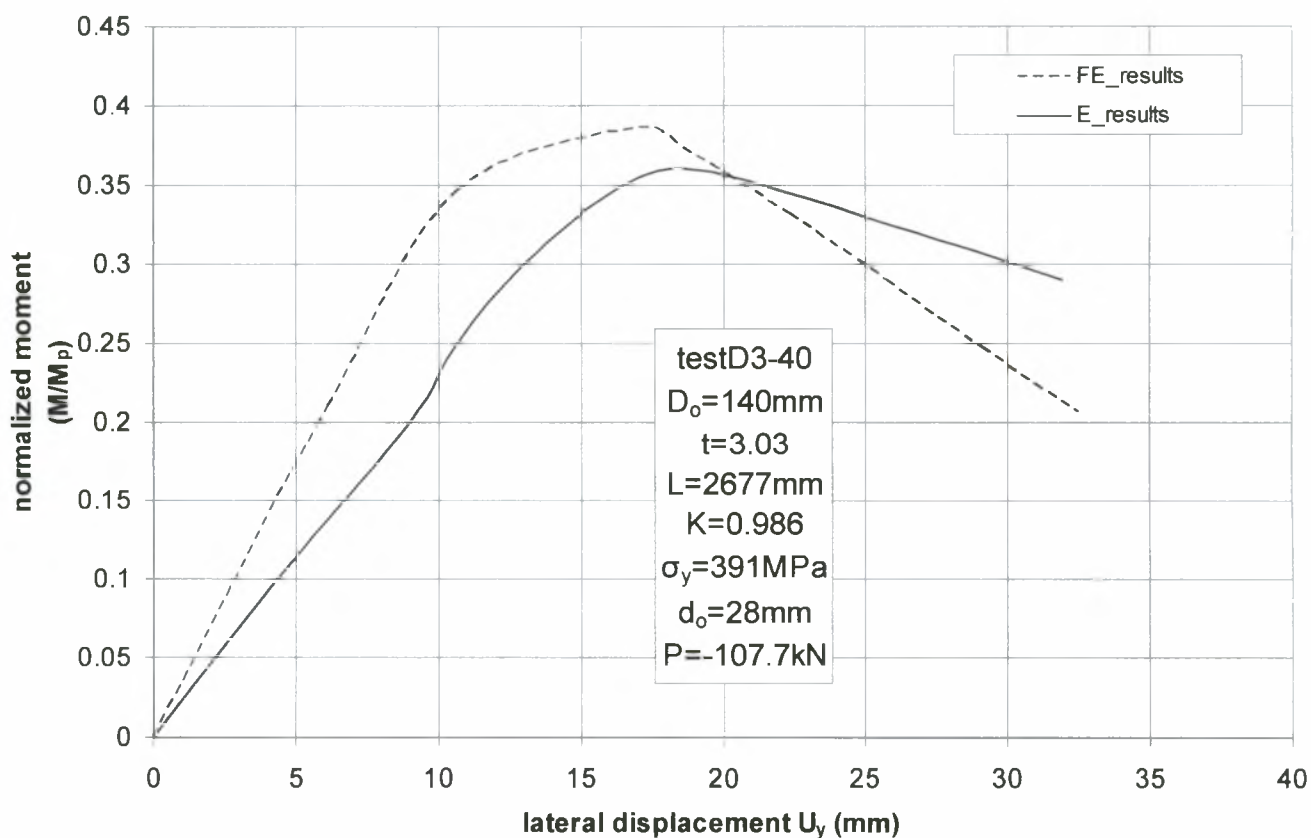
προσδιορισμένες καθώς και στην ασάφια μερικών δεδομένων του προβλήματος στις αναφορές των πειραμάτων

TestD3-40

Στο πείραμα TestD3-40 προσομοιάζεται κυλινδρικό κέλυφος με τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- Εξωτερική διάμετρος : $D_o=140mm$
- Πάχος : $t=3.03mm$
- Μήκος : $L=2677mm$
- Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού : $K=0.986$
- Όριο διαρροής : $\sigma_y=391MPa$
- Βάθος αρχικής τοπικής ατέλειας : $d_o=28mm$
- Θλιπτικό αξονικό φορτίο : $P=-107.7kN$

Στο παρακάτω διαγραμμα φαίνεται πως η αριθμητική λύση υπερεκτιμά την οριακή αντοχή του κελύφους. Η απόκλιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων εκτιμάται στο 7.8%.



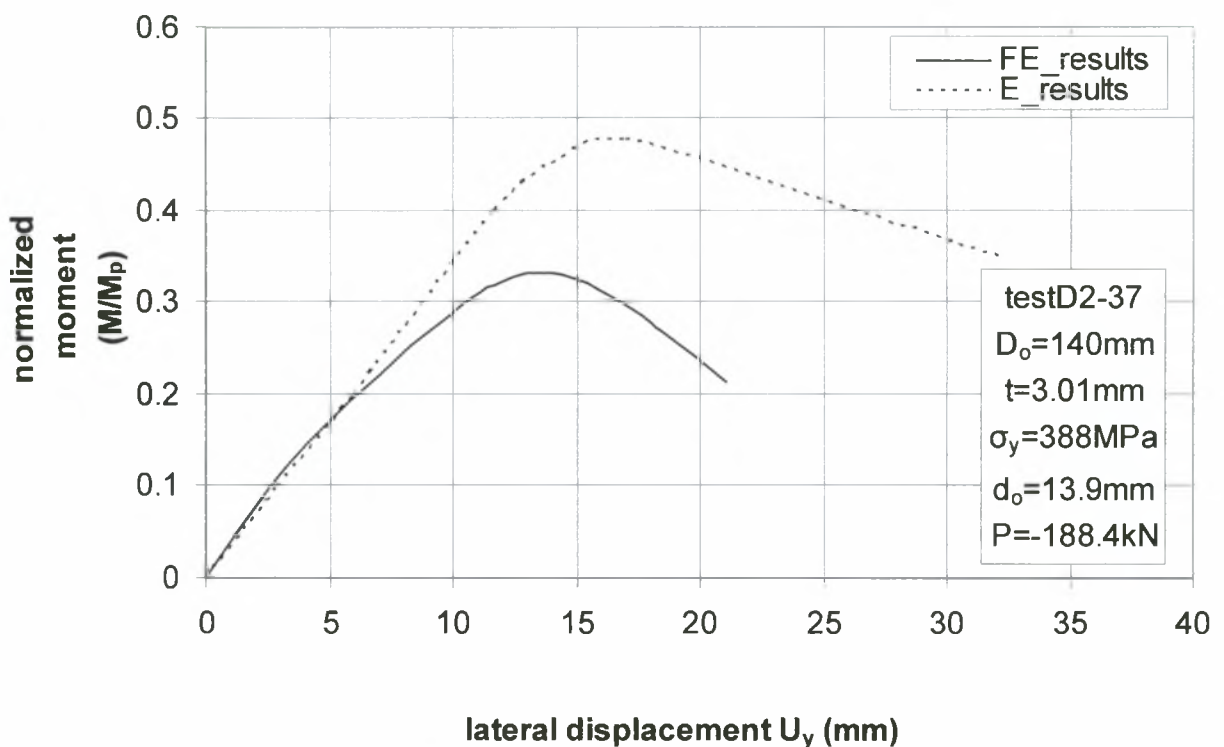
Σχήμα 3.3.2 Διάγραμμα κανονικοποιημένου καμπτικού φορτίου (M/M_p) σε σχέση με την εγκάρσια μετατόπιση (U_y) της διατομής του κελύφους στην οποία επιβάλλεται το εγκάρσιο φορτίο

TestD2-37

Στο πείραμα TestD2-37 προσομοιάζεται κυλινδρικό κέλυφος με τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- Εξωτερική διάμετρος : $D_o=140mm$
- Πάχος : $t=3.01mm$
- Μήκος : $L=2677mm$
- Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού : $K=0.982$
- Όριο διαρροής : $\sigma_y=388MPa$
- Βάθος αρχικής τοπικής ατέλειας : $d_o=13.9mm$
- Θλιπτικό αξονικό φορτίο : $P=-188.4kN$

Στην περίπτωση αυτή η αριθμητική λύση υποεκτιμά την οριακή αντοχή του κελύφους ενώ, η απόκλιση των δύο αποτελεσμάτων είναι πολύ μεγάλη και εκτιμάται στο 29.7% περίπου.



Σχήμα 3.3.3 Διάγραμμα κανονικοποιημένου καμπτικού φορτίου (M/M_p) σε σχέση με την εγκάρσια μετατόπιση (U_y) της διατομής του κελύφους στην οποία επιβάλλεται το εγκάρσιο φορτίο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Προσομοίωση κυλινδρικών χαλύβδινων κελυφών και παραμετρική μελέτη

4.1.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η οριακή αντοχή των χαλύβδινων κυλινδρικών κελυφών κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου, καμπτικού φορτίου ή συνδυασμού τους, υπό την παρουσία αρχικής τοπικής ατέλειας (κύρτωσης) στο τοίχωμα του κελύφους. Γίνεται μια ανάλυση για τον τρόπο με τον οποίο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σωλήνων, το βάθος της αρχικής τοπικής ατέλειας καθώς και το όριο διαρροής του υλικού επηρεάζουν την αντοχή του κελύφους σε λυγισμό (οριακή αντοχή). Επίσης για δύο τιμές του βάθους της αρχικής ατέλειας μελετάται κατά πόσον ο συνδυασμός θλιπτικού αξονικού φορτίου και καμπτικού φορτίου επηρεάζει το φορτίο λυγισμού της κατασκευής. Τέλος εξετάζεται η επίδραση του τύπου διείδυσης για την δημιουργία αρχικής ατέλειας. Η αριθμητική επίλυση έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Οι σωλήνες προσομοιώθηκαν με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης (S4R), ενώ θεωρήθηκε μη γραμμική γεωμετρία με ελαστοπλαστικό υλικό και μοντέλο ισοεντροπικής κράτυνσης με κριτήριο διαρροής "Von Mises". Σε όλες τις περιπτώσεις κατασκευάστηκε πλέγμα πυκνότερο στην περιοχή διείδυσης, ενώ στο υπόλοιπο του κελύφους το πλέγμα ήταν αραιότερο.

4.1.2 Υλικό και τύπος ανάλυσης

Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν θεωρήθηκε ελαστοπλαστικό γραμμικά κρατυνόμενο υλικό και μοντέλο ισοεντροπικής κράτυνσης με κριτήριο διαρροής "Von Mises". Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας στην ελαστική περιοχή $E=210000\text{MPa}$ και εφαπτομενικό μέτρο στην ανελαστική περιοχή $E'=1050\text{MPa}$. Τα ζεύγη τιμών τάσης-παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν στο

ABAQUS αφού πρώτα τροποποιήθηκαν σε πραγματικές τιμές τάσης και λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους :

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom})$$

$$\varepsilon_{ln}^p = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) - \frac{\sigma_{true}}{E}$$

όπου οι όροι σ_{nom} και ε_{nom} είναι η ονομαστική τάση και παραμόρφωση αντίστοιχα , ενώ το σ_{true} η πραγματική τάση, ο όρος $\ln(1 + \varepsilon_{nom})$ είναι η συνολική πραγματική παραμόρφωση και τέλος το ε_{ln}^p είναι η λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση.

Όσον αφορά στην γεωμετρική συμπεριφορά του κελύφους κατά την παραμόρφωσή του παρουσιάζει γεωμετρικές μη-γραμμικότητες που οφείλονται στις μεγάλες μετατοπίσεις και περιστροφές που υφίσταται στην διάρκεια της ανάλυσης. Στο ABAQUS για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η εντολή “nlgeom” μια υποεντολή της εντολής “step”. Αρχικά για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος “Static General” που λαμβάνει υπόψη του τις παραπάνω μη γραμμικότητες. Ενώ στο τελευταίο βήμα λόγω της αστάθειας του φαινομένου του λυγισμού και της μεταλυγισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής έγινε χρήση του αλγορίθμου “Static, riks”.

4.1.3 Κατηγορίες κυλινδρικών κελυφών και τύπων διείδυσης

Οι κατηγορίες των κυλινδρικών κελυφών που μελετώνται σε αδιαστατοποιημένη μορφή είναι :

- D/t=30 και L/D=10
- D/t=30 και L/D=15
- D/t=50 και L/D=10
- D/t=50 και L/D=15
- D/t=70 και L/D=10
- D/t=70 και L/D=15

Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις κελυφών εξετάζεται η οριακή αντοχή τους κατά την επιβολή θλιπτικού αξονικού φορτίου, καμπτικού φορτίου και συνδυασμού

τους, μετά από την δημιουργία αρχικής τοπικής κύρτωσης του τοιχώματός τους. Το καμπτικό φορτίο και στις δύο περιπτώσεις έχει τέτοια φορά ώστε να θλίβεται η περιοχή με την αρχική ατέλεια όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.1. Το φαινόμενο είναι τρισδιάστατο αλλά λόγω συμμετρίας εξετάζουμε το 1/2 του κελύφους.

Για την δημιουργία της τοπικής αρχικής ατέλειας στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι διεϊσδυσης τύπου “συγκεντρωμένης δύναμης” και τύπου “σφήνας” ή “μαχαιριού”(wedged-shaped denting tool). Οι δύο από τις παραπάνω περιπτώσεις προσομοιώθηκαν και για τους δύο τύπους διεϊσδυσης, ενώ οι υπόλοιπες μόνο για τη μία.



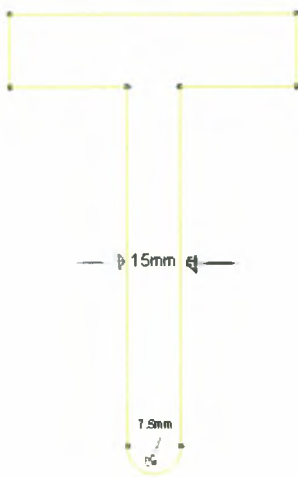
Σχήμα 4.1.1 Περιοχή κυλινδρικού κελύφους με τοπική αρχική ατέλεια και φορά εφαρμοζόμενου καμπτικού φορτίου

4.2 Προσομοίωση για διεϊσδυτή τύπου “σφήνας” ή “ μαχαιριού”

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση που η ανάλυση στο πρώτο στάδιο γίνεται με την θεώρηση διεϊσδυτή τύπου “σφήνας” ή “μαχαιριού”. Ο διεϊσδυτής σε όλες τις περιπτώσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.2 είναι τοποθετημένος στο μέσο του σωλήνα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του (σχήμα 4.2.1) είναι τα εξής:

- Λόγος μήκους διεϊσδυτή στην εγκάρσια διεύθυνση προς την μέση διάμετρο του κελύφους : $b / D = 1.6$

- Πάχος του διεισδυτή : $d = 15mm$
- Ακτίνα καμπυλότητας στην περιοχή της επαφής του διεισδυτή με το κέλυφος : $r_o = 7.5mm$



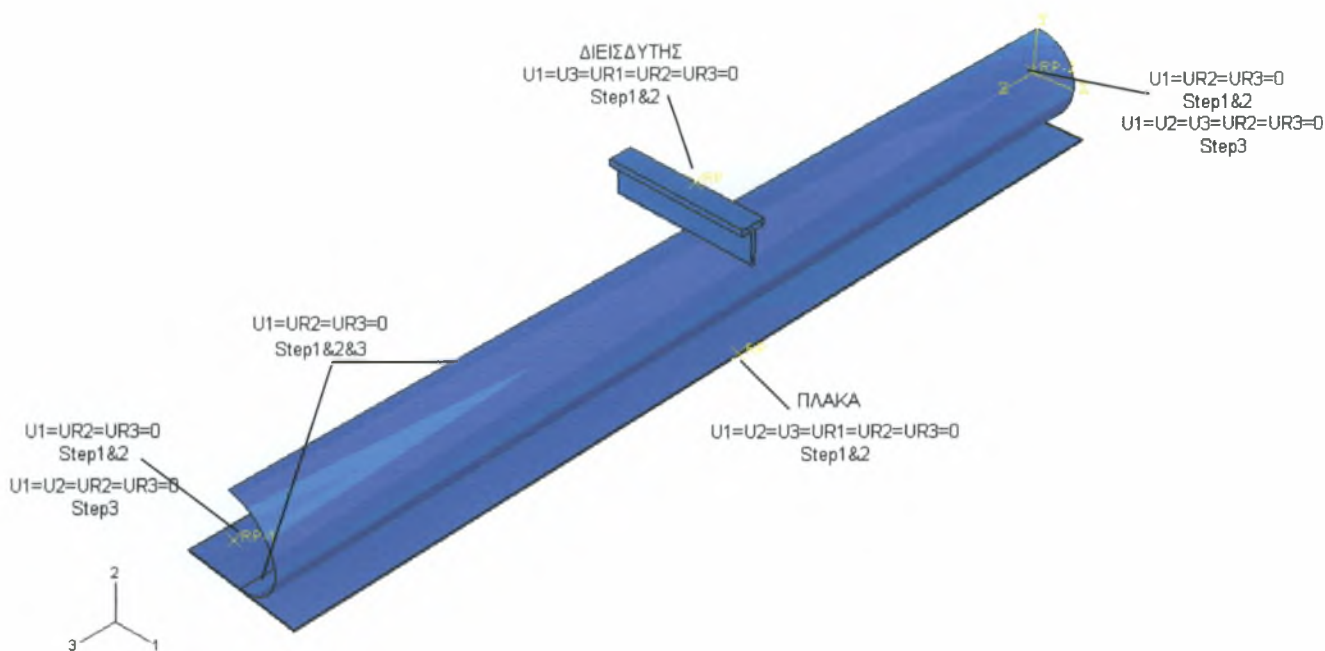
Σχήμα 4.2.1 Διεισδυτής τύπου “σφήνας” ή “μαχαιριού”

Βήματα της ανάλυσης

Στις περιπτώσεις κελύφους οπου επιβάλλεται μόνο αξονικό φορτίο ή μόνο καμπτικό φορτίο η ανάλυση αποτελείται από τρία βήματα. Στο πρώτο βήμα “step1” επιτυγχάνεται η δημιουργία της αρχικής ατέλειας με την μετατόπιση του διεισδυτή και την στήριξη του σωλήνα στην πλάκα. Στο δεύτερο βήμα “step2” γίνεται αποδέσμευση του σωλήνα από τον διεισδυτή και την πλάκα και τέλος στο τρίτο “step3” σε απλά εδραζόμενο πλέον σωλήνα επιβάλλεται το αξονικό/ καμπτικό φορτίο. Στις περιπτώσεις όμως που στο κέλυφος εφαρμόζεται και θλιπτικό αξονικό φορτίο και καμπτικό φορτίο, το τρίτο βήμα της ανάλυσης ακολουθείται από ένα επιπλέον βήμα “step4”, όπου τελικά εφαρμόζεται θλιπτικό αξονικό ή καμπτικό φορτίο ανάλογα με την αλληλουχία φόρτισης κάθε φορά. Τέλος για κελύφη χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους και στις δύο περιπτώσεις φόρτισης παραλείπονται τα δύο πρώτα στάδια της ανάλυσης “step1” και “step2”.

Μοντέλο επίλυσης του προβλήματος

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ανάλυση αποτελείται από ένα παραμορφώσιμο σώμα τον σωλήνα και δύο άκαμπτα τον διεισδυτή και την πλάκα που αλληλεπιδρούν με το πρώτο για την δημιουργία τοπικής αρχικής ατέλειας. Αφού αρχικά σχεδιάστηκαν και τα τρία σώματα στο “ABAQUS CAE”, οριστήκαν οι επιφάνειες αλληλεπίδρασης ανάμεσα στον διεισδυτή και την πλάκα με το κέλυφος οι οποίες θεωρήθηκαν χωρίς τριβή, ενώ στη συνέχεια για την αλληλεπίδρασή τους χρησιμοποιήθηκε η εντολή “contact pair”. Έπειτα ο διεισδυτής και η πλάκα θεωρήθηκαν άκαμπτα σώματα μέσω της εντολής “rigid body” και της υποεντολής “analytical surface”. Ορίστηκε ένας κόμβος αναφοράς και στα δύο σώματα έτσι ώστε να επιβληθούν οι συνοριακές συνθήκες σε αυτά. Στο σχήμα 4.2.2 φαίνεται η προσομοίωση που έγινε στο ABAQUS για το συγκεκριμένο σωλήνα, το διεισδυτή και την πλάκα. Στη συνέχεια στο “step2” με την χρήση της εντολής “model change” αποδεδεσμεύτηκε το κέλυφος και από τα δύο άκαμπτα σώματα. Στο “step3” επιβλήθηκε το αξονικό/καμπτικό φορτίο μέσω της εντολής “Cload” και “kinematic coupling” σε απλά εδραζόμενο κέλυφος. Οι στηρίξεις σε αυτό το βήμα προσομοιώθηκαν με κατάλληλες συνοριακές συνθήκες που περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο. Τέλος στην περίπτωση που η ανάλυση προχωράει σε τέσσερα βήματα για το μοντέλο επίλυσης του προβλήματος ισχύουν όσα και παραπάνω με την διαφορά ότι τώρα υπάρχει ένα τέταρτο βήμα στο οποίο με την χρήση και πάλι των εντολών “Cload” και “kinematic coupling” εφαρμόζεται αξονικό ή καμπτικό φορτίο ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος κάθε φορά.



Σχήμα 4.2.2 Το μοντέλο προσομοίωσης με τις συνοριακές συνθήκες στην διάρκεια της ανάλυσης

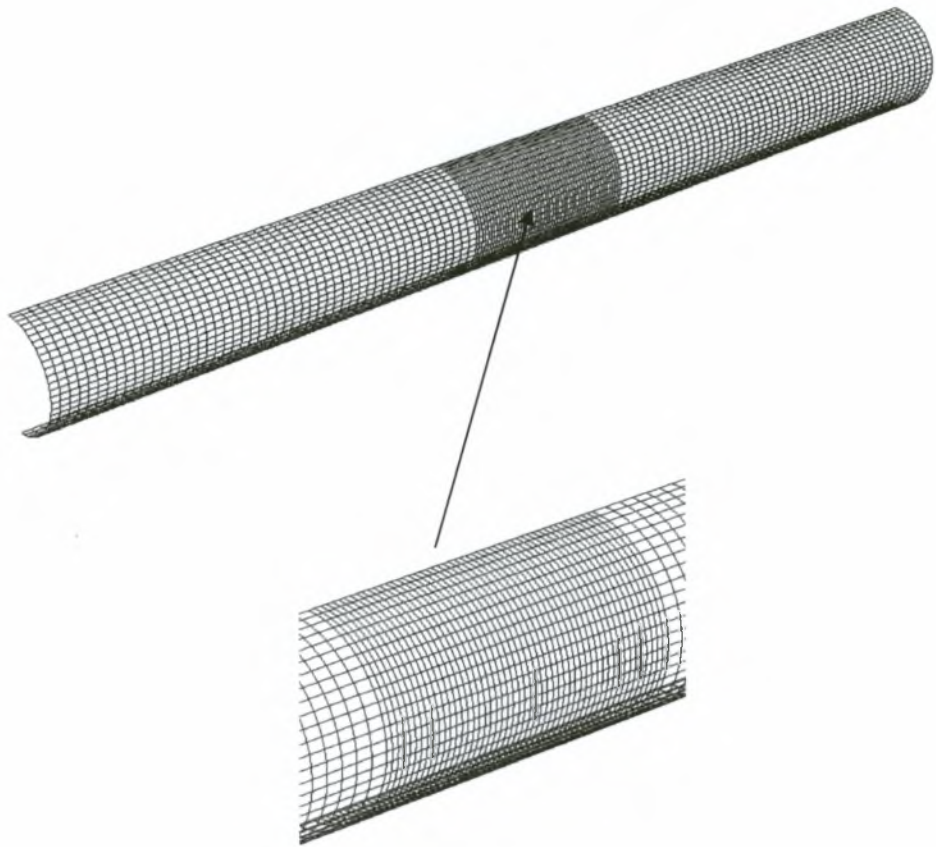
Συνοριακές συνθήκες

Στο μοντέλο της παρούσας ανάλυσης όπως προαναφέρθηκε σχεδιάστηκε το $\frac{1}{2}$ του κελύφους λόγω των συμμετριών που υπάρχουν στο συγκεκριμένο πρόβλημα οπότε, το μοντέλο είναι συμμετρικό μόνο ως προς τον άξονα 1. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.2 στην πάνω και κάτω γενέτειρα του σωλήνα δεσμεύτηκε η μετατόπιση στην διεύθυνση 1 και η στροφή στις διευθύνσεις 2 και 3 δηλαδή, $U1=UR2=UR3=0$. Στην αριστερή και δεξιά διατομή του σωλήνα στα δύο άκρα του δεσμεύτηκαν οι βαθμοί ελευθερίας 1, 5 και 6 ($U1=UR2=UR3=0$), θεωρώντας απαραμόρφωτες πλάκες (“καπάκια”). Για την προσομοίωση των “καπακιών” στο ABAQUS χρησιμοποιήθηκε η εντολή “kinematic coupling” με την οποία μέσω ενός κόμβου αναφοράς περιορίστηκαν όλοι οι κόμβοι στα άκρα του κελύφους να κινούνται σύμφωνα με αυτό τον κόμβο. Σε αυτόν επιβάλλαμε τις ανωτέρω συνοριακές συνθήκες. Στον διεισδυτή επιτράπηκε η μετατόπιση μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση 2, ενώ στην πλάκα δεσμεύτηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας. Στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης “step3” η φύση του προβλήματος καθιστά αναγκαίο τον επαναπροσδιορισμό των συνοριακών συνθηκών, το οποίο έγινε μέσω της εντολής “boundary, op=new” οπότε, παύουν να ισχύουν οι συνοριακές συνθήκες που

οριστήκαν στα προηγούμενα βήματα. Το ένα άκρο του κελύφους είναι ελεύθερο να κινηθεί κατά τον άξονα 3 και να περιστραφεί κατά τον άξονα 1 ($U_1=UR_2=UR_3=0$ και το U_2 τίθεται ίσο με την μετατόπιση που έχει ο κόμβος αναφοράς στο βήμα δύο) ενώ, το άλλο είναι ελεύθερο μόνο να περιστραφεί κατά την διεύθυνση 1 ($U_1=UR_2=UR_3=0$ ενώ τα U_2 και U_3 τίθενται ίσα με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις που έχουν στο αμέσως προηγούμενο βήμα) προσομοιάζοντας έτσι μια κύλιση και μια άρθρωση αντίστοιχα στις δύο διατομές του σωλήνα στα άκρα του. Η προσομοίωση και εδώ έγινε με την χρήση της εντολής “kinematic coupling” και του κόμβου αναφοράς. Τέλος για την πάνω και την κάτω γενέτειρα του κελύφους επαναπροσδιορίζονται οι συνθήκες που ισχύουν στα δύο προηγούμενα βήματα της ανάλυσης. Στην περίπτωση που η ανάλυση αποτελείται από τέσσερα στάδια ισχύουν όσα και παραπάνω με την διαφορά ότι οι συνθήκες που ορίστηκαν στο τρίτο βήμα εξακολουθούν να ισχύουν και στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης.

Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Για την διακριτοποίηση του μοντέλου σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν τετρακομβικά στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης (SR4). Παρακάτω (σχήμα 4.2.3) φαίνεται ενδεικτικά το δομημένο πλέγμα 4200 στοιχείων που προέκυψε κατά την προσομοίωση κελύφους με $D/t=30$ και $L/D=10$. Παρατηρείται ότι στο κέντρο του σωλήνα υπάρχει πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή αλληλεπίδρασης του διεισδυτή με το κέλυφος. Αυτή η μορφή διακριτοποίησης χρησιμοποιήθηκε για όλες τις περιπτώσεις κελυφών της παρούσας ενότητας με μόνη διαφοροποίηση από κέλυφος σε κέλυφος των αριθμό των στοιχείων.



Σχήμα 4.2.3 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και η πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή διείδυσης

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις κελυφών και για όλες τις συνθήκες φόρτισης που αναφέρθηκαν παραπάνω. Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν ο όρος q ίσος με P/P_p είναι ο λόγος του θλιπτικού αξονικού φορτίου (P) που επιβάλλεται στο άκρο του κελύφους προς το αξονικό φορτίο της πρώτης πλαστικής παραμόρφωσης ($P_p = \sigma_y 2\pi R t$) για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αρχικά απαραμόρφωτου σωλήνα. Με δ_x συμβολίζεται η αξονική μετατόπιση του κόμβου στον οποίο εφαρμόζεται το φορτίο αδιαστατοποιημένη ως προς την μέση ακτίνα του κελύφους R . Ο όρος m ίσος με M/M_p είναι ο λόγος του καμπτικού φορτίου (M) που επιβάλλεται στην ακραία διατομή του κελύφους προς την ροπή της πρώτης πλαστικής παραμόρφωσης ($M_p = \sigma_y D^2 t$) για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αρχικά απαραμόρφωτου σωλήνα. Με κ ίσο με k/k_t συμβολίζεται ο λόγος της καμπυλότητας ($k = \phi/L$) του κελύφους στην παραμορφωμένη κατάσταση

προς τον λόγο ($k_t=t/D^2$) του πάχους του σωλήνα προς το τετράγωνο της μέσης διαμέτρου του. Τέλος g είναι το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας του κελύφους (d_o) αδιαστατοποιημένο ως προς την μέση διάμετρό του (D). Οι παραπάνω όροι συγκεντρώνονται στον πίνακα 1.

D	Μέση διάμετρος του κελύφους
R	Μέση ακτίνα του κελύφους
t	Πάχος του κελύφους
L	Μήκος του κελύφους
d_o	Βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματος του κελύφους
σ_y	Όριο διαρροής του χρησιμοποιούμενου υλικού
φ	Στροφή του κελύφους σε rad στην παραμορφωμένη κατάσταση
P	Επιβαλλόμενο θλιπτικό αξονικό φορτίο
P_p	Θλιπτικό αξονικό φορτίο πρώτης πλαστικής παραμόρφωσης του κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του ($P_p = \sigma_y 2\pi R$)
q	Κανονικοποιημένο θλιπτικό αξονικό φορτίο ($q = P / P_p$)
M	Επιβαλλόμενο καμπτικό φορτίο
M_p	Καμπτικό φορτίο πρώτης πλαστικής παραμόρφωσης του κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του ($M_p = \sigma_y D^2 t$)
m	Κανονικοποιημένο καμπτικό φορτίο ($m = M / M_p$)
κ	Κανονικοποιημένη καμπυλότητα στην παραμορφωμένη κατάσταση ($\kappa = k / k_t$)
k	Καμπυλότητα του κελύφους στην παραμορφωμένη κατάσταση ($k = L / \varphi$)
k_t	Ο λόγος του πάχους του κελύφους προς το τετράγωνο της μέσης διαμέτρου του ($k_t = t / D^2$)
g	Κανονικοποιημένο βάθος αρχικής ατέλειας του τοιχώματος του κελύφους ($g = d_o / D$)

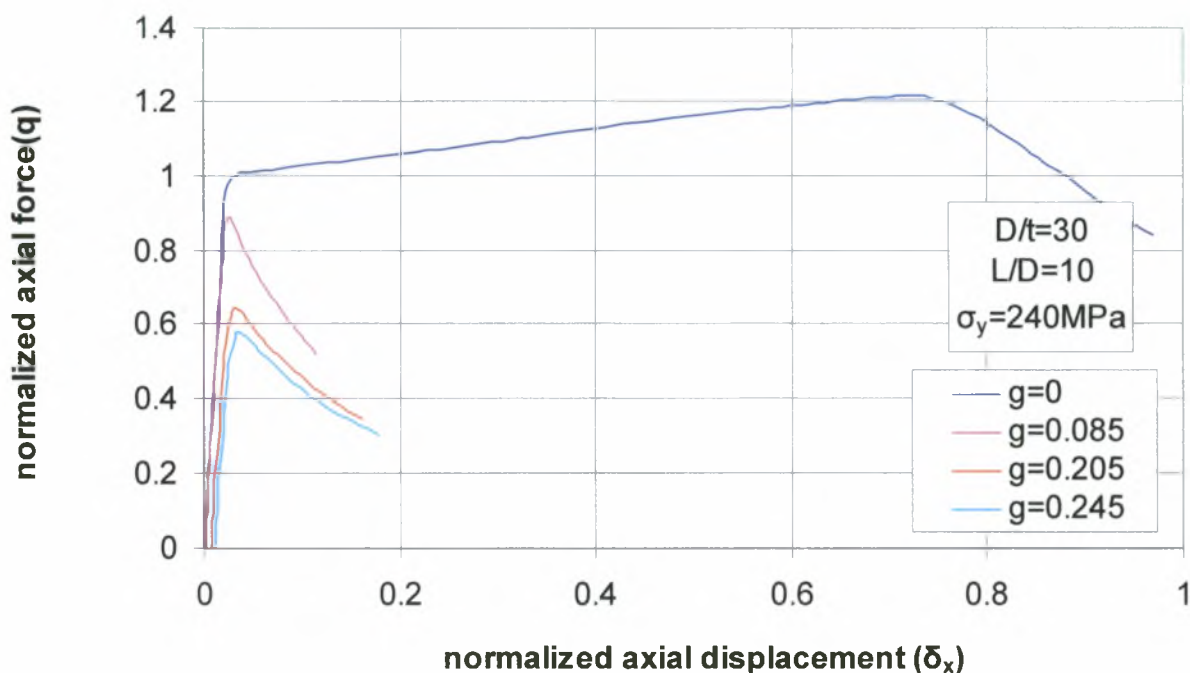
Πίνακας 1. Επεξήγηση των όρων των διαγραμμάτων του κεφαλαίου

4.3 Αποτελέσματα για $D/t=30$ και $L/D=10$

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυλινδρικού κελύφους του οποίου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρούσα παράγραφο είναι τα εξής

- Μέση διάμετρος του σωλήνα : $D = 300mm$
- Πάχος του σωλήνα : $t = 10mm$
- Μήκος του σωλήνα : $L = 3000mm$
- Μέση ακτίνα σωλήνα : $R = 150mm$
- Τάση διαρροής : $\sigma_y = 240mm$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0.3$

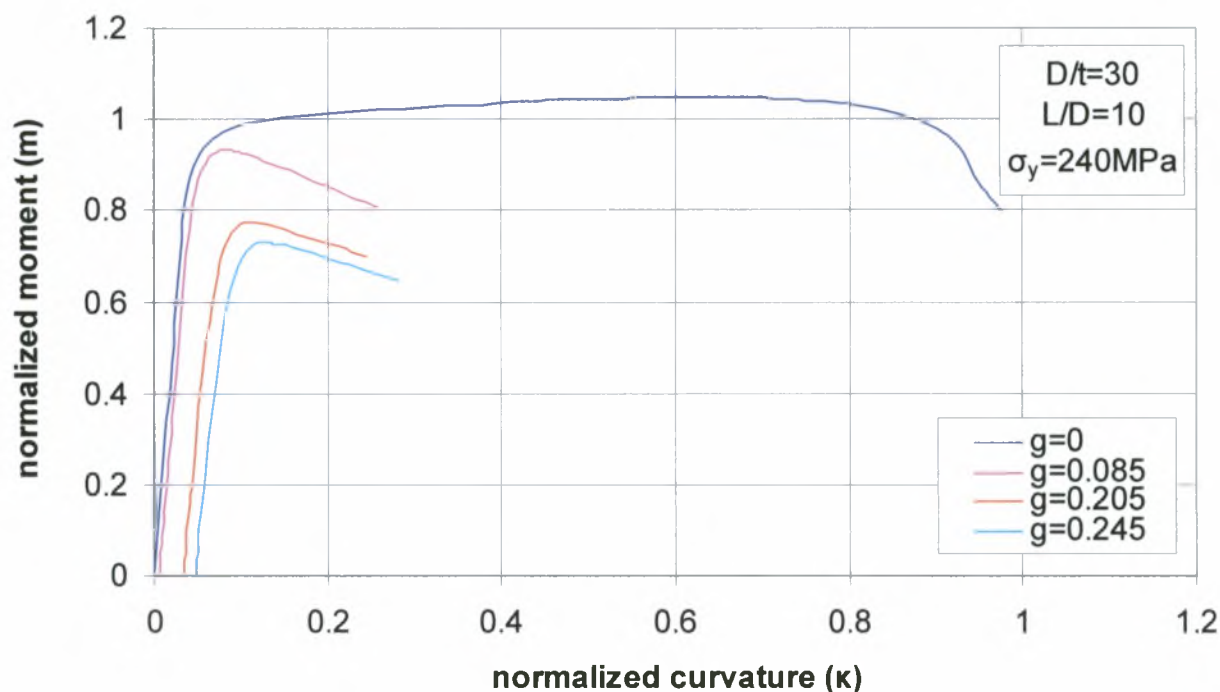
Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου, σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματός του. Αρχικά θα πρέπει να σημειωθεί πως για όλες τις τιμές βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας η ακαμψία του κελύφους (κλίση της καμπύλης) μειώνεται παραμένοντας θετική μέχρι μια τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου P (P_{max} ή q_{max}). Σε αυτό το διάστημα ο σωλήνας μπορεί να “αναλάβει” περαιτέρω φορτίο παραμορφούμενος περισσότερο. Στο σημείο όπου το $q=q_{max}$ (οριακό φορτίο αστοχίας) η ακαμψία της κατασκευής μηδενίζεται και η περαιτέρω φόρτιση του κελύφους έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία του. Όσον αφορά στην παρουσία τοπικής αρχικής ατέλειας όπως φαίνεται στο διάγραμμα η αύξηση του βάθους της επιφέρει μείωση της ακαμψίας του κελύφους με συνέπεια την ελάττωση της οριακής αντοχής (q_{max}). Στην περίπτωση του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους μπορεί να θεωρηθεί πως αστοχία επέρχεται σε εκείνο το σημείο στο οποίο η ακαμψία του κελύφους παρουσιάζει πρώτη φορά απότομη μεταβολή. Παρόλα αυτά όπως φαίνεται στο διάγραμμα η ακαμψία του κελύφους εξακολουθεί να είναι θετική μέχρι ο λόγος q να είναι περίπου ίσος με 1.2, πράγμα το οποίο σημαίνει πως το κέλυφος είναι δυνατόν να παραλάβει περίπου κατά 20% επιπλέον φορτίο από το θεωρούμενο φορτίο αστοχίας, προτού η ακαμψία του πάρει αρνητικές τιμές. Τέλος το φορτίο αστοχίας q_{max} (P_{max}/P_p) του εν λόγω κελύφους έχει τιμή μεγαλύτερη της μονάδος πράγμα το οποίο σημαίνει ότι ο σωλήνας ξεπερνάει το οριακό φορτίο αστοχίας αφού πρώτα πλαστικοποιηθεί η διατομή στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο.



Σχήμα 4.3.1 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g)

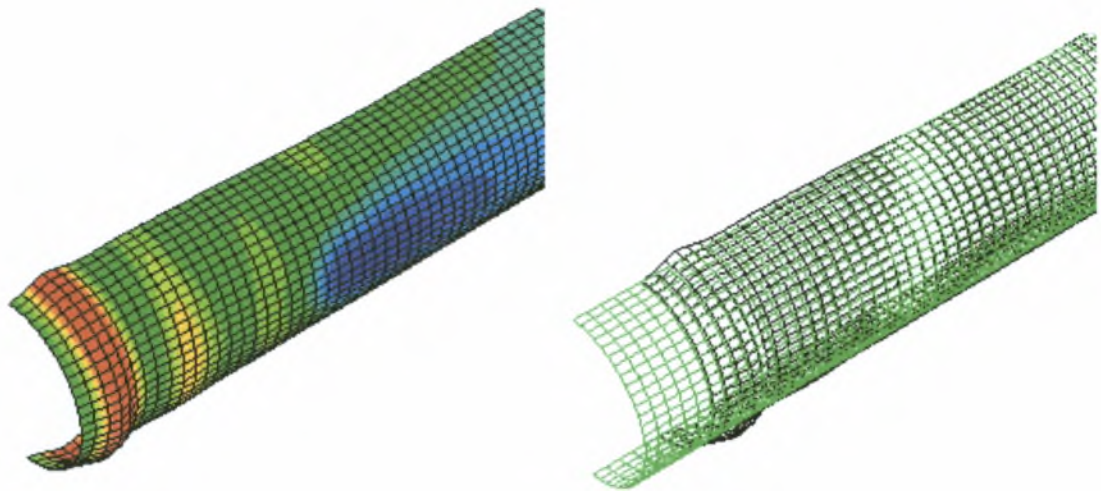
Στο παρακάτω διάγραμμα σχήμα 4.2.3 παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την εφαρμογή σε αυτό καμπτικού φορτίου σε σχέση με την μεταβολή του βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματος του. Από μια γενική παρατήρηση των καμπύλων φαίνεται πως ανεξάρτητα από το βάθος της αρχικής τοπικής ατέλειας σε κάθε περίπτωση η ακαμψία (κλίση της καμπύλης) του κελύφους μειώνεται παραμένοντας θετική μέχρι μια ορισμένη τιμή του κανονικοποιημένου καμπτικού φορτίου m (m_{max}). Στο διάστημα αυτό είναι δυνατή η επιβολή στο κέλυφος μεγαλύτερων φορτίων παραμορφώνοντας το επιπλέον. Στο σημείο όπου το m παίρνει τη μέγιστη τιμή του m_{max} (οριακό φορτίο αστοχίας) η ακαμψία της κατασκευής μηδενίζεται ενώ, για περαιτέρω φόρτιση του κελύφους παίρνει αρνητικές τιμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση του σωλήνα και τελικά την αστοχία του. Επίσης όσον αφορά στην ύπαρξη τοπικής αρχικής ατέλειας παρατηρείται πως η αύξηση του βάθους της επιφέρει μείωση του οριακού καμπτικού φορτίου αστοχίας του κελύφους (m_{max}). Τα κελύφη με αρχική τοπική ατέλεια παρουσιάζουν απότομη μετάβαση από την προλυγισμική στη μεταλυγισμική κατάσταση σε αντίθεση με τον αρχικά απαραμόρφωτο σωλήνα του οποίου η ακαμψία του μειώνεται σταδιακά πριν πάρει αρνητικές τιμές. Τέλος και στην περίπτωση

επιβολής καμπτικού φορτίου το αρχικά απαραμόρφωτο κέλυφος αστοχεί για τιμή του M μεγαλύτερη από M_p δηλαδή, ο σωλήνας ξεπερνά την οριακή αντοχή του αφού πρώτα πλαστικοποιηθεί η διατομή του στην οποία επιβάλλεται το φορτίο.

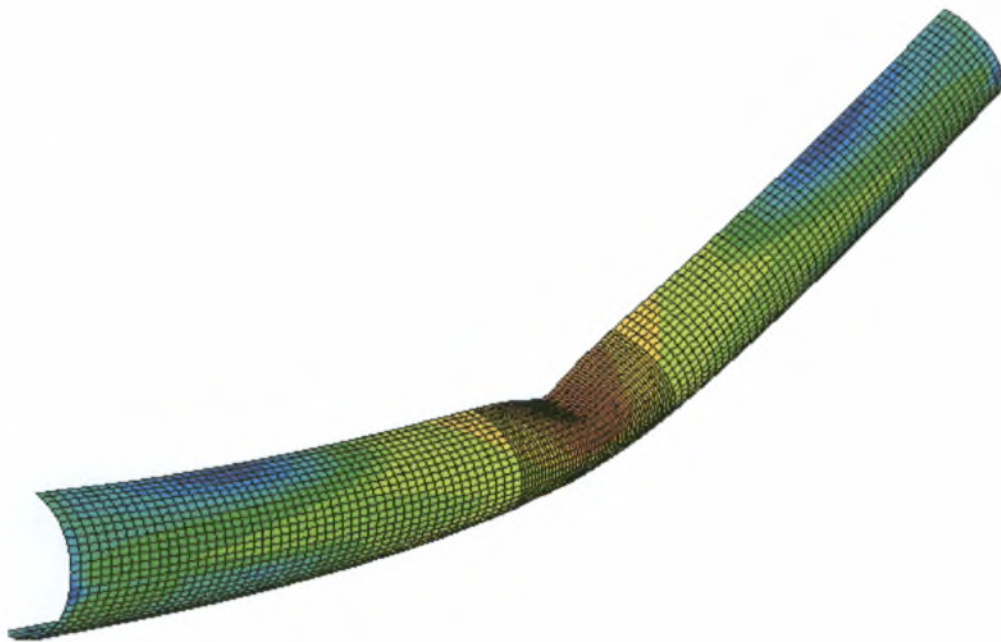


Σχήμα 4.3.2 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g)

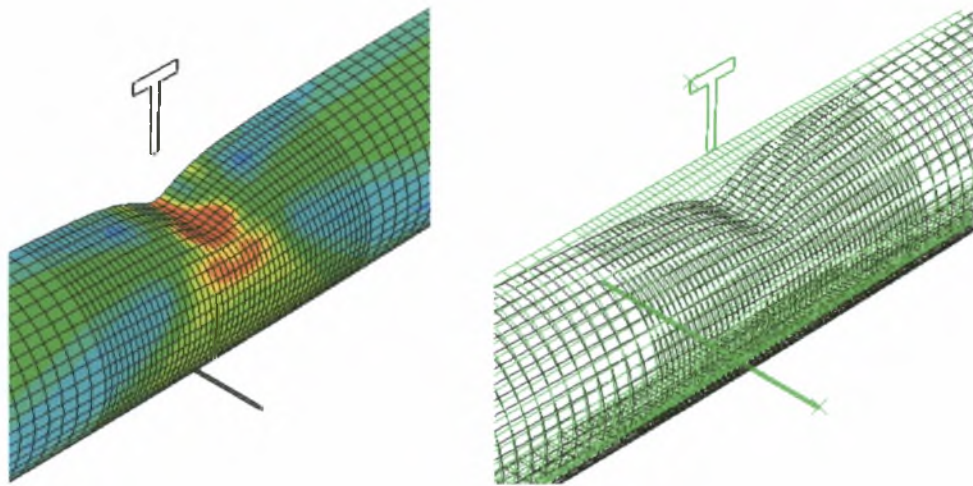
Στα σχήματα 4.3.3-4.3.3.α-γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατανομή των τάσεων κατά Von Mises και η παραμορφωμένη κατάσταση για κέλυφη με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους πριν και μετά την αστοχία. Ενδιαφέρον έχει η μορφή αστοχίας στην περίπτωση όπου επιβάλλεται θλιπτικό αξονικό φορτίο στο σωλήνα χωρίς τοπική αρχική ατέλεια του οποίου η αστοχία επέρχεται στις διατομές κοντά στα άκρα του σχήμα 4.3.3. Στην περίπτωση που το κέλυφος δεν έχει τοπική αρχική ατέλεια υποβάλλεται σε κάμψη η αστοχία του επέρχεται ολικά και η περαιτέρω επιβολή φορτίου μικρότερου από το οριακό φορτίο αστοχίας έχει ως αποτέλεσμα και την τοπική αστοχία του όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.4.



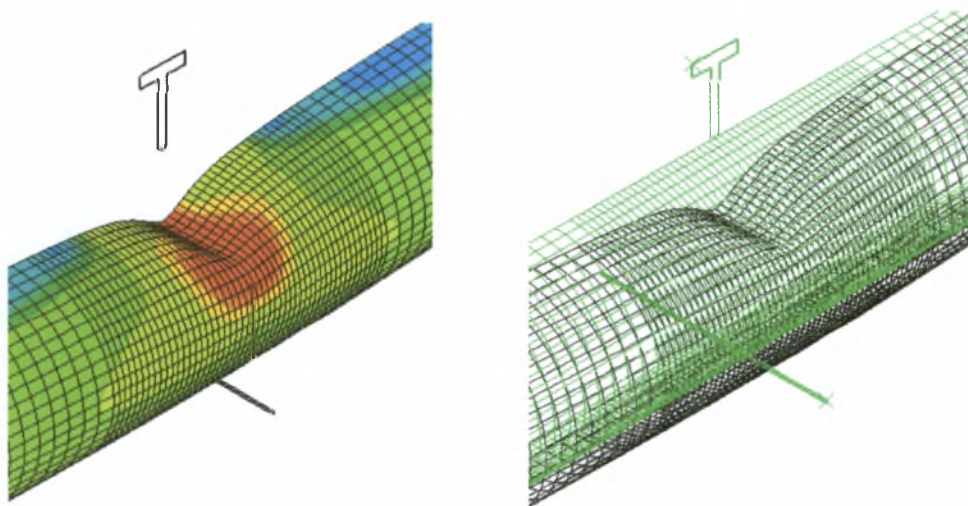
Σχήμα 4.3.3 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του που υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο



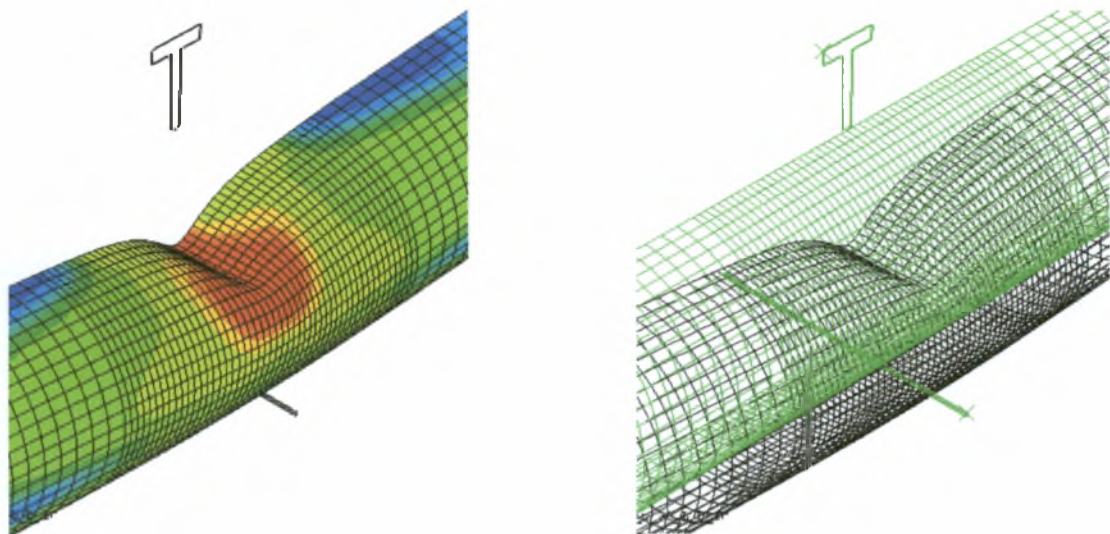
Σχήμα 4.3.4 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του που υποβάλλεται σε καμπτικό φορτίο



Σχήμα 4.3.5.α Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.245$ πριν την επιβολή θλιπτικού /καμπτικού φορτίου

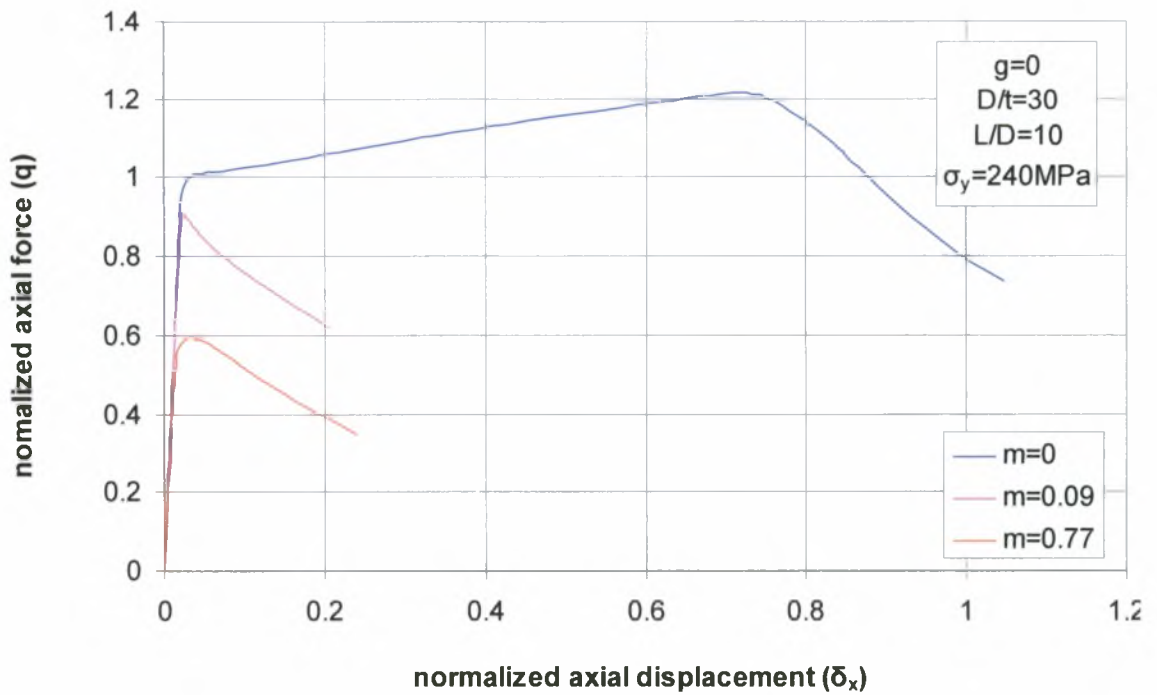


Σχήμα 4.3.5.β Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.245$ που υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο μετά την αστοχία του

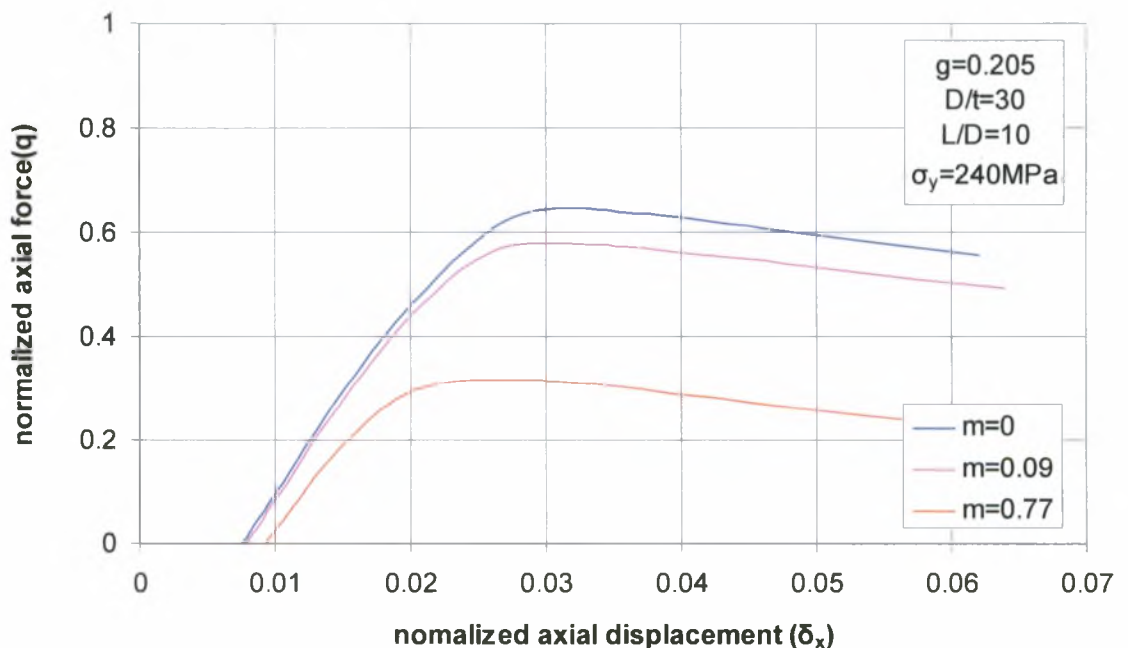


Σχήμα 4.3.5.γ Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.245$ που υποβάλλεται σε καμπτικό φορτίο μετά την αστοχία του

Στα διαγράμματα που ακολουθούν σχήματα 4.3.6-4.3.7 φαίνεται πως μεταβάλλεται η οριακή αντοχή του κελύφους κατά την επιβολή θλιπτικού αξονικού φορτίου στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης σε σχέση με την μεταβολή του μεγέθους του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης για κέλυφος με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του (M→P). Από την σύγκριση των καμπύλων φαίνεται πως η ακαμψία (κλίση των καμπύλων) του κελύφους με ή χωρίς αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του μειώνεται με την αύξηση της τιμής του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου, με αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής του κατά την εφαρμογή του αξονικού φορτίου και την αστοχία του σε μικρότερα οριακά αξονικά φορτία αστοχίας (q_{max}).

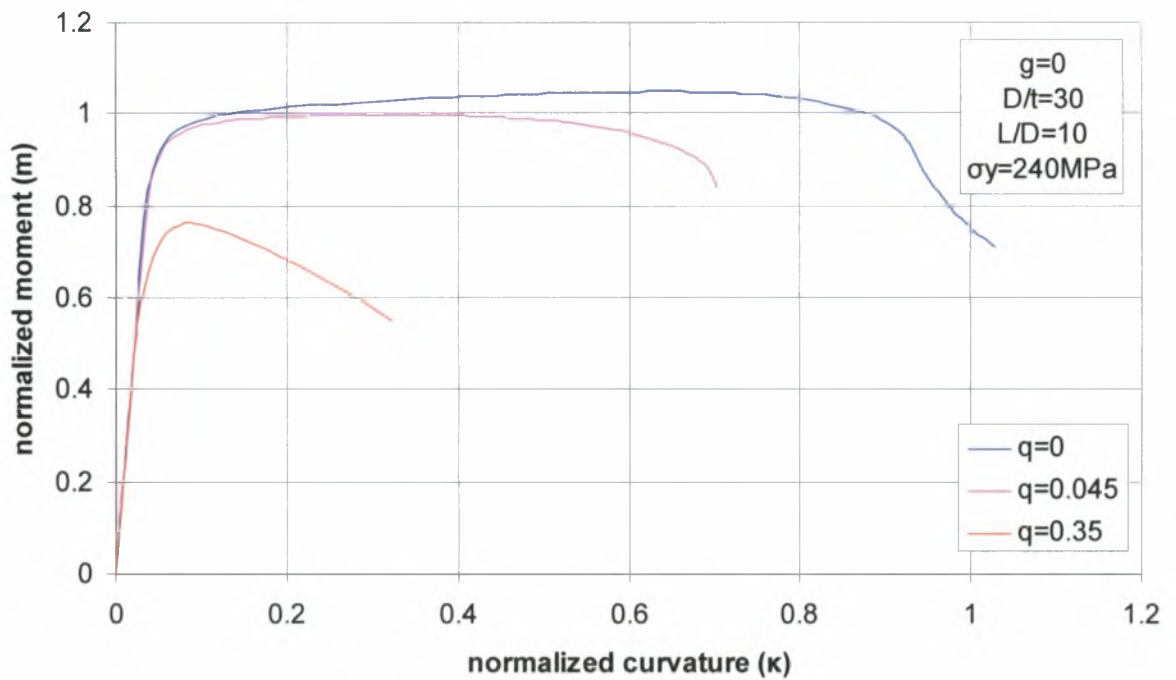


Σχήμα 4.3.6 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) για κυλινδρικό κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια

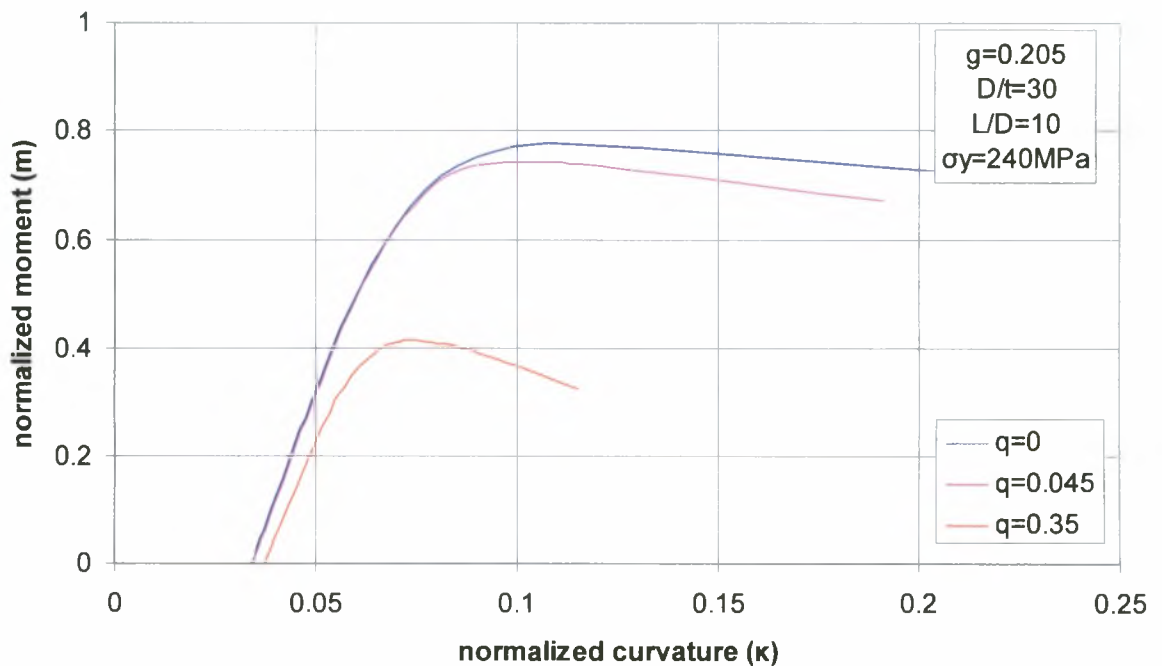


Σχήμα 4.3.7 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) για κυλινδρικό κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0.205$)

Στα παρακάτω διαγράμματα σχήματα 4.3.8-4.3.9 φαίνεται πως μεταβάλλεται η οριακή αντοχή του κελύφους κατά την επιβολή καμπτικού φορτίου στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης σε σχέση με την μεταβολή του μεγέθους του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης για κέλυφος με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του ($P \rightarrow M$). Παρατηρείται πως ανεξάρτητα από την ύπαρξη τοπικής ατέλειας του τοιχώματος η οριακή αντοχή του κελύφους σε καμπτικό φορτίο M_{max} μειώνεται καθώς αυξάνει το μέγεθος του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου P . Αυτό οφείλεται στο ότι με την αύξηση του μεγέθους του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου μειώνεται η ακαμψία της κατασκευής (κλίση της καμπύλης). Επίσης παρατηρείται πως για την περίπτωση του κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια η μετάβαση του από την προλυγισμική στην μεταλιγισμική κατάσταση είναι πιο ομαλή σε σχέση την περίπτωση του κελύφους με τοπική αρχική ατέλεια. Το φαινόμενο είναι πιο έντονο για την περίπτωση που στο αρχικά απαραμόρφωτο κέλυφος εφαρμόζεται μόνο καμπτικό φορτίο.

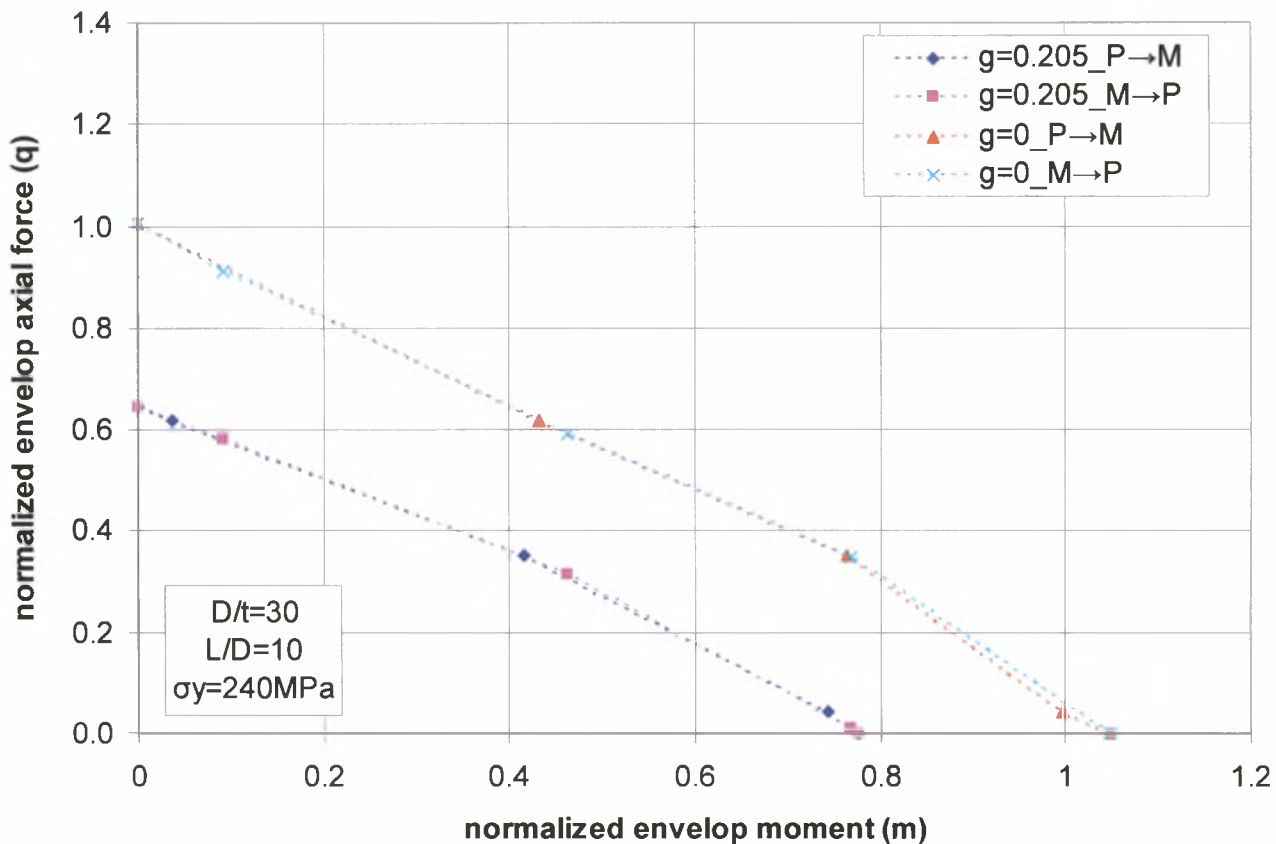


Σχήμα 4.3.8 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τέσσερα βάρη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q), για κυλινδρικό κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια



Σχήμα 4.3.9 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q), για κυλινδρικό κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0.205$)

Στο παρακάτω σχήμα 4.3.10 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για τις δύο παραπάνω αλληλουχίες φόρτισης ($M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$) για κέλυφος με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα τα οριακά φορτία αστοχίας του κελύφους με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του σχεδόν συμπίπτουν πράγμα το οποίο σημαίνει πως η αλληλουχία της φόρτισης δεν επηρεάζει σημαντικά την οριακή αντοχή του κελύφους. Θα πρέπει να σημειωθεί πως για την περίπτωση που επιβάλλεται μόνο θλιπτικό αξονικό φορτίο, ως φορτίο αστοχίας του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους έχει θεωρηθεί εκείνο το φορτίο που αντιστοιχεί στο σημείο που η κλίση της καμπύλης (ακαμψία του κελύφους) αλλάζει απότομα για πρώτη φορά.



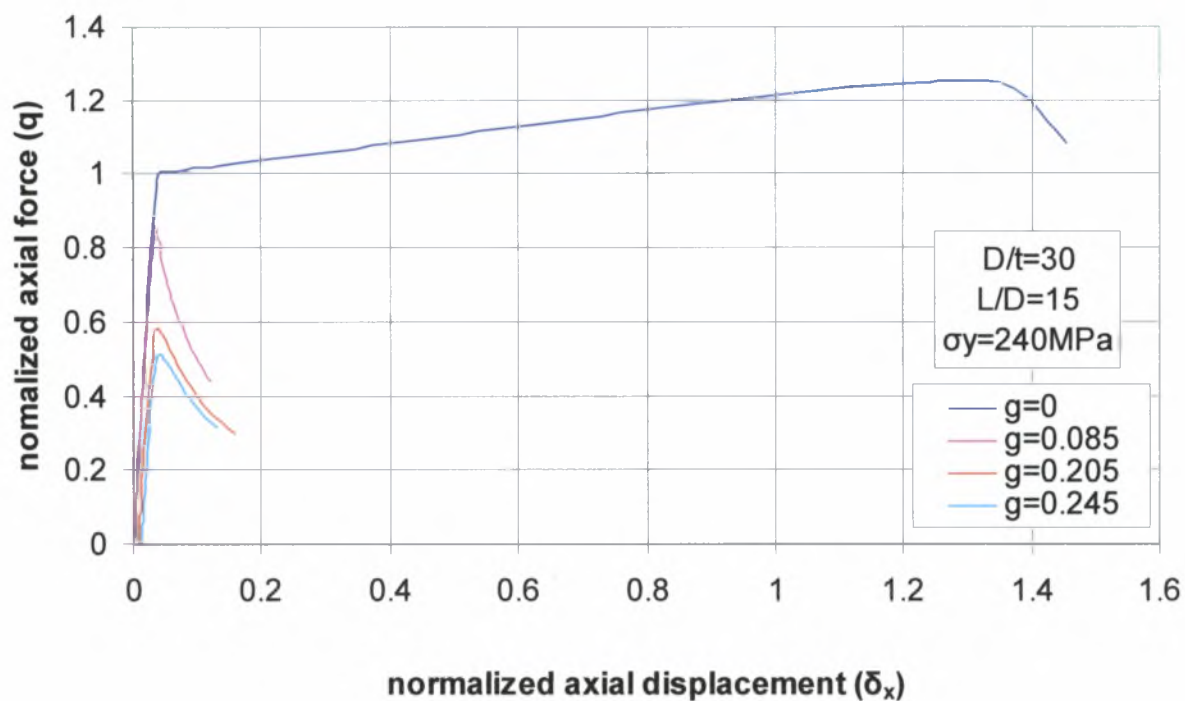
Σχήμα 4.3.10 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης $M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$ για κυλινδρικά κέλυφος χωρίς και με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0$ και $g=0.205$)

4.4 Αποτελέσματα για $D/t=30$ και $L/D=15$

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυλινδρικού κελύφους του οποίου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρούσα παράγραφο είναι τα εξής :

- Μέση διάμετρος του σωλήνα : $D = 300mm$
- Πάχος του σωλήνα : $t = 10mm$
- Μήκος του σωλήνα : $L = 4500mm$
- Μέση ακτίνα σωλήνα : $R = 150mm$
- Τάση διαρροής : $\sigma_y = 240mm$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0.3$

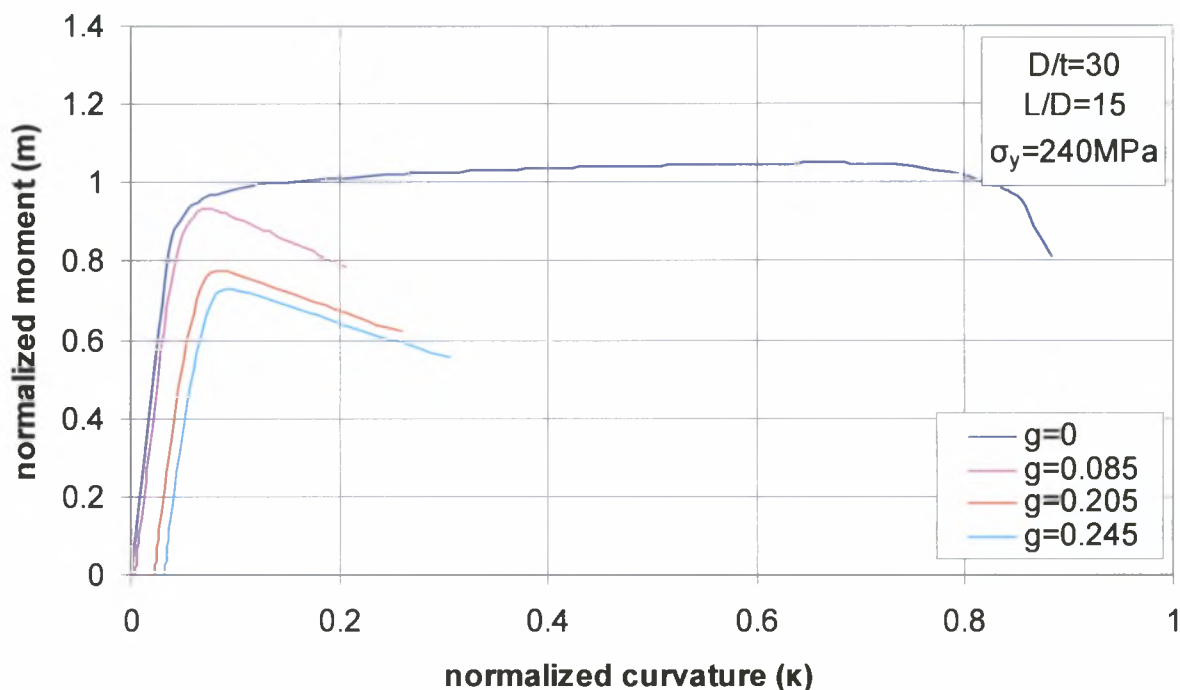
Στο διάγραμμα που ακολουθεί σχήμα 4.4.1 φαίνεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου, σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματός του. Παρατηρώντας την γενική συμπεριφορά του κελύφους κατά την εφαρμογή του αξονικού φορτίου είναι φανερό πως ανεξάρτητα από το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας η ακαμψία του (κλίση της καμπύλης) μειώνεται παραμένοντας θετική μέχρι μιας ορισμένης τιμής του επιβαλλόμενου φορτίου P (P_{max} ή q_{max}). Αυτό σημαίνει πως μέχρι αυτό το σημείο το κέλυφος μπορεί να “αναλάβει” περαιτέρω φορτίο παραμορφούμενο περισσότερο. Στο σημείο με $q=q_{max}$ (οριακό φορτίο αστοχίας) η ακαμψία του σωλήνα μηδενίζεται και η επιβολή φορτίου πέρα από την τιμή αυτή οδηγεί σε αστοχία του κελύφους. Όσον αφορά στην παρουσία τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμα του κελύφους παρατηρείται πως η αύξηση του βάθους της επιφέρει μείωση του λόγου q_{max} δηλαδή, του οριακού φορτίου αστοχίας του σωλήνα. Το οριακό φορτίο αστοχίας του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους μπορεί να θεωρηθεί ως η τιμή του λόγου q που αντιστοιχεί στο σημείο εκείνο που ακαμψία του κελύφους παρουσιάζει πρώτη φορά απότομη μεταβολή. Παρόλα αυτά όπως φαίνεται στο διάγραμμα η ακαμψία του κελύφους εξακολουθεί να είναι θετική μέχρι ο λόγος q να γίνει λίγο μεγαλύτερος από 1.2, πράγμα το οποίο σημαίνει πως το κέλυφος είναι δυνατόν να παραλάβει περίπου κατά 20% επιπλέον φορτίο από το θεωρούμενο φορτίο αστοχίας, προτού η ακαμψία του πάρει αρνητικές τιμές. Επίσης παρατηρείται ότι το φορτίο αστοχίας q_{max} του εν λόγω κελύφους είναι μεγαλύτερο της μονάδας, πράγμα το οποίο σημαίνει ο σωλήνας αστοχεί αφού πρώτα πλαστικοποιηθεί η διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο.



Σχήμα 4.4.1 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g)

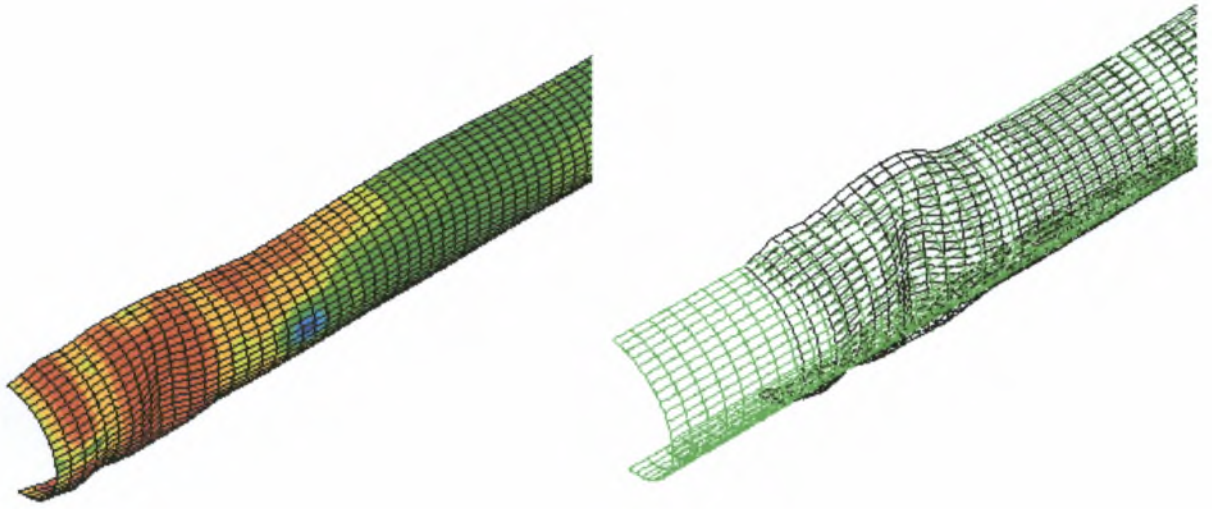
Στο διάγραμμα του σχήματος 4.4.3 παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την εφαρμογή σε αυτό καμπτικού φορτίου σε σχέση με την μεταβολή του βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματος του. Αρχικά θα πρέπει να σημειωθεί πως για οποιαδήποτε τιμή του βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας η ακαμψία της κατασκευής (κλίση της καμπύλης) μειώνεται παίρνοντας θετικές τιμές μέχρι μιας μέγιστης τιμής του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου M_{max} (m_{max}). Το κέλυφος σε αυτό το διάστημα είναι δυνατόν να “αναλάβει” μεγαλύτερα φορτία και να παραμορφωθεί επιπλέον. Στο σημείο όμως με $M = M_{max}$ (οριακό / κρίσιμο καμπτικό φορτίο αστοχίας) η ακαμψία της κατασκευής μηδενίζεται και η περαιτέρω φόρτιση του κελύφους οδηγεί στην αστοχία του ενώ, η ακαμψία του παίρνει πλέον αρνητικές τιμές. Επίσης όσον αφορά στην ύπαρξη τοπικής αρχικής ατέλειας παρατηρείται πως η αύξηση του βάθους της επιφέρει μείωση του καμπτικού φορτίου αστοχίας της κατασκευής (m_{max}). Επιπλέον από το διάγραμμα φαίνεται πως τα κελύφη με αρχική τοπική κύρτωση στο τοίχωμά τους μεταβαίνουν απότομα από την κατάσταση πριν την αστοχία στην κατάσταση μετά την αστοχία. Στην περίπτωση όμως του αρχικά απαραμόρφωτου σωλήνα ο ρυθμός μείωσης της ακαμψίας μειώνεται

σταδιακά προτού πάρει αρνητικές τιμές με αποτέλεσμα την πιο ομαλή μετάβαση του κελύφους από την μια κατάσταση στην άλλη. Όμοια με παραπάνω και στην περίπτωση επιβολής καμπτικού φορτίου το αρχικά απαραμόρφωτο κέλυφος αστοχεί για τιμή του M μεγαλύτερη από M_p δηλαδή, ο σωλήνας ξεπερνά την οριακή αντοχή αφού πρώτα πλαστικοποιηθεί η διατομή του στην οποία επιβάλλεται το φορτίο.

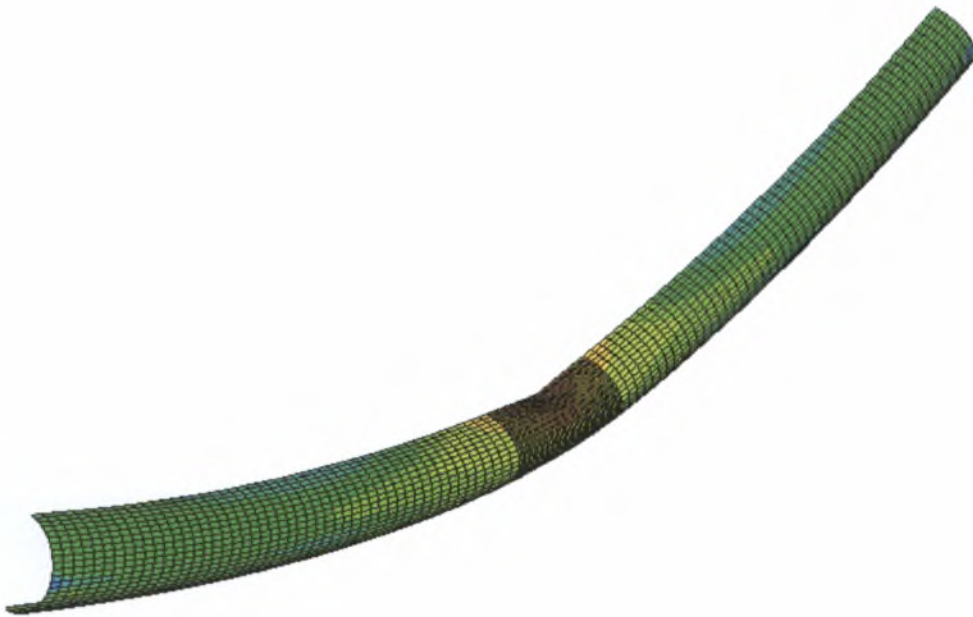


Σχήμα 4.4.2 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g)

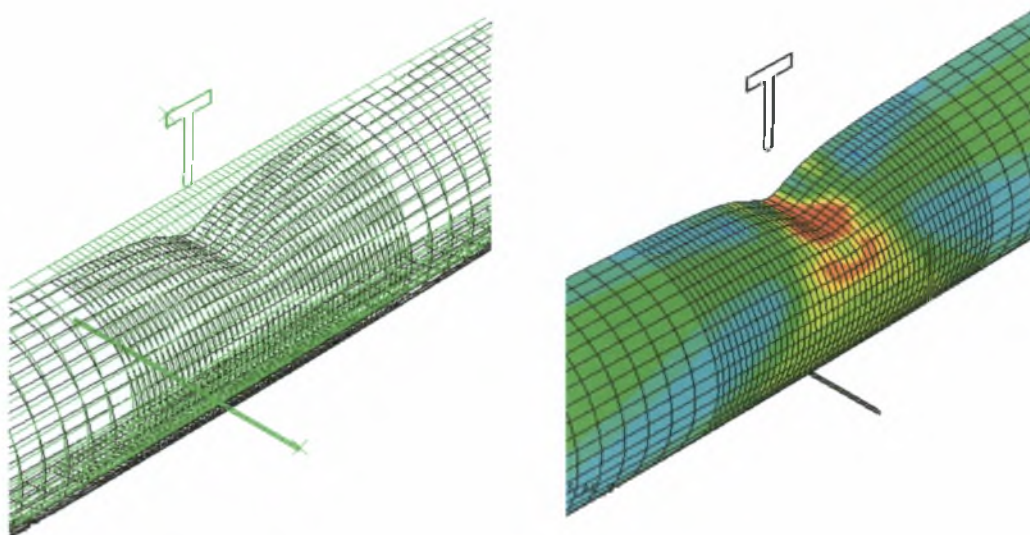
Στα σχήματα 4.4.3-4.4.α-γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατανομή των τάσεων κατά Von Mises και η παραμορφωμένη κατάσταση για κέλυφη με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους πριν και μετά την αστοχία. Ενδιαφέρον έχει η μορφή αστοχίας στην περίπτωση όπου επιβάλλεται θλιπτικό αξονικό φορτίο στο σωλήνα χωρίς τοπική αρχική ατέλεια του οποίου η αστοχία επέρχεται στις διατομές κοντά στα άκρα του σχήμα 4.4.3. Στην περίπτωση που το κέλυφος δεν έχει τοπική αρχική ατέλεια υποβάλλεται σε κάμψη η αστοχία του επέρχεται ολικά και η περαιτέρω επιβολή μικρότερου φορτίου από το οριακό φορτίο αστοχίας έχει ως αποτέλεσμα και την τοπική αστοχία του όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4.4.



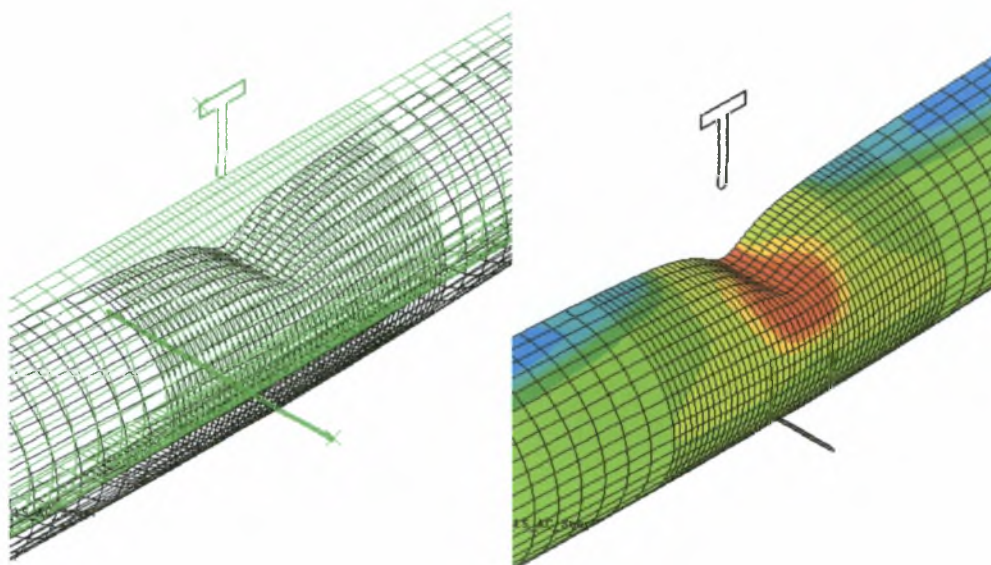
Σχήμα 4.4.3 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του που υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο



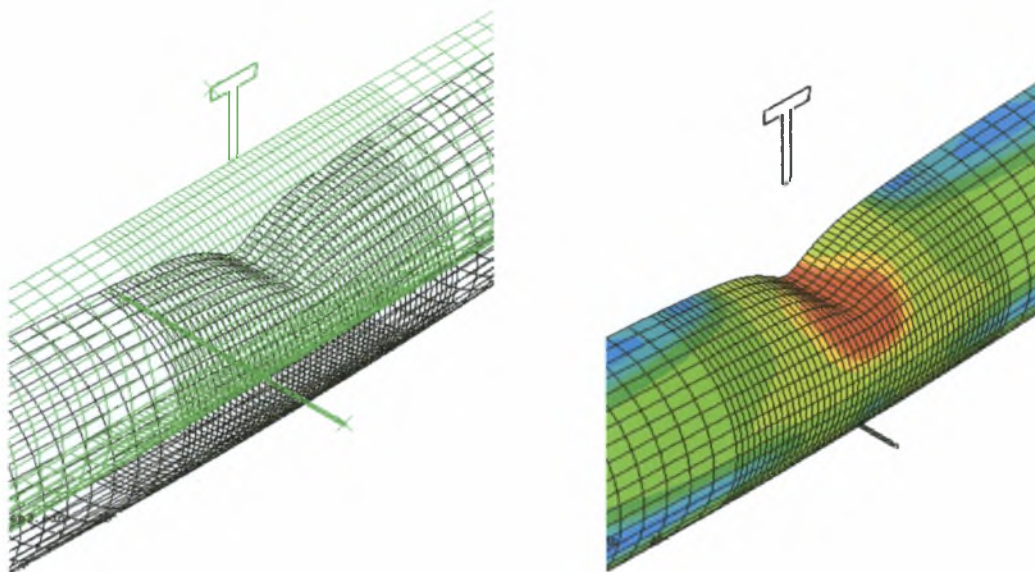
Σχήμα 4.4.4 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του που υποβάλλεται σε καμπτικό φορτίο



Σχήμα 4.4.5.α Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.245$ πριν την επιβολή θλιπτικού αξονικού /καμπτικού φορτίου

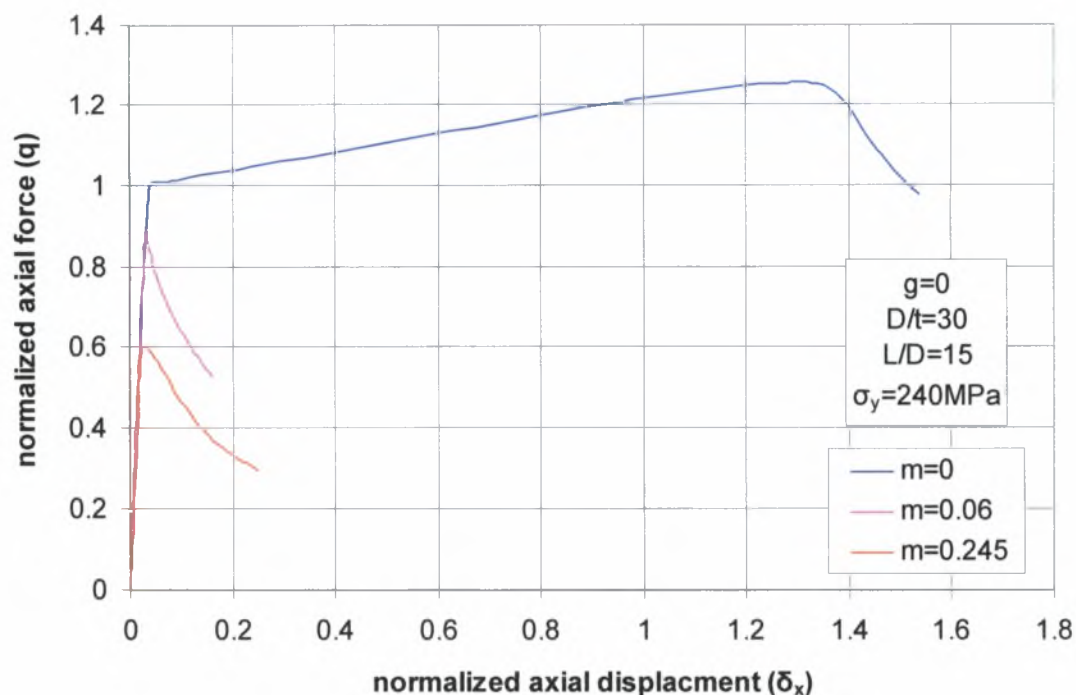


Σχήμα 4.4.5.β Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.245$ που υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο μετά την αστοχία του

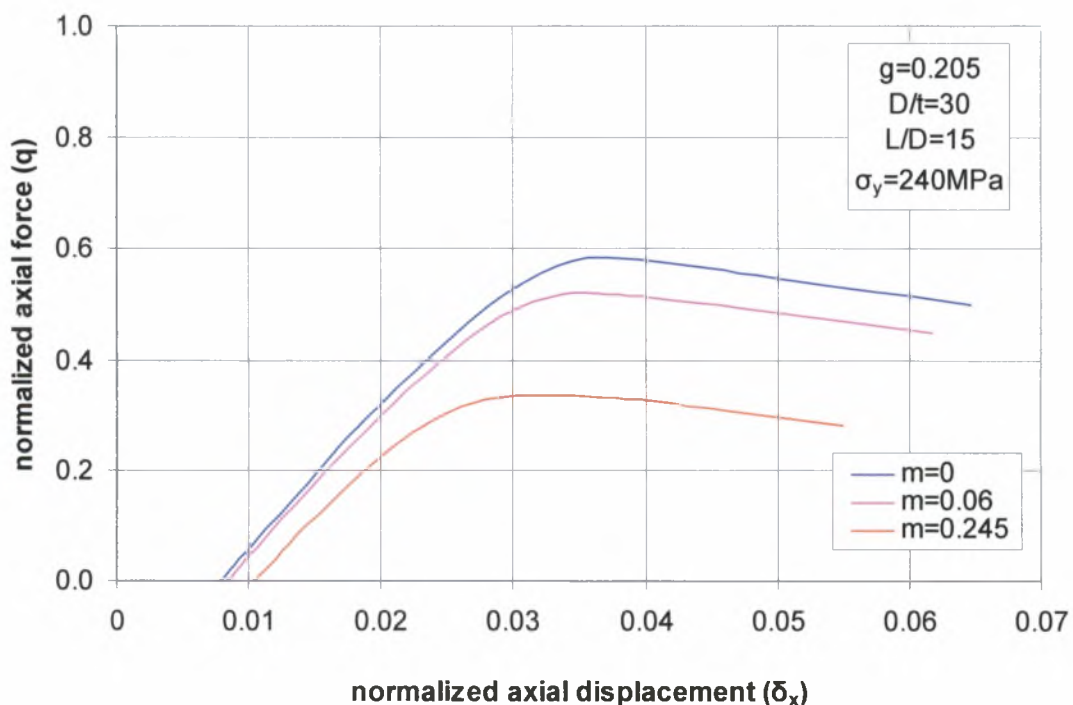


Σχήμα 4.4.5.γ Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.245$ που υποβάλλεται σε καμπτικό φορτίο μετά την αστοχία του

Στα διαγράμματα που ακολουθούν (σχήματα 4.4.6-7) παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την επιβολή θλιπτικού αξονικού φορτίου στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης σε σχέση με την μεταβολή του μεγέθους του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης για κέλυφος με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του (M→P). Από το διάγραμμα γίνεται φανερό πως ανεξάρτητα από το βάθος της αρχικής ατέλειας του κελύφους η αύξηση του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου επιφέρει μείωση της ακαμψίας της κατασκευής (κλίση των καμπύλων). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της οριακής αντοχής του σωλήνα με την αύξηση του λόγου m και τελικά την αστοχία του σε μικρότερα αξονικά φορτία (q_{max}).

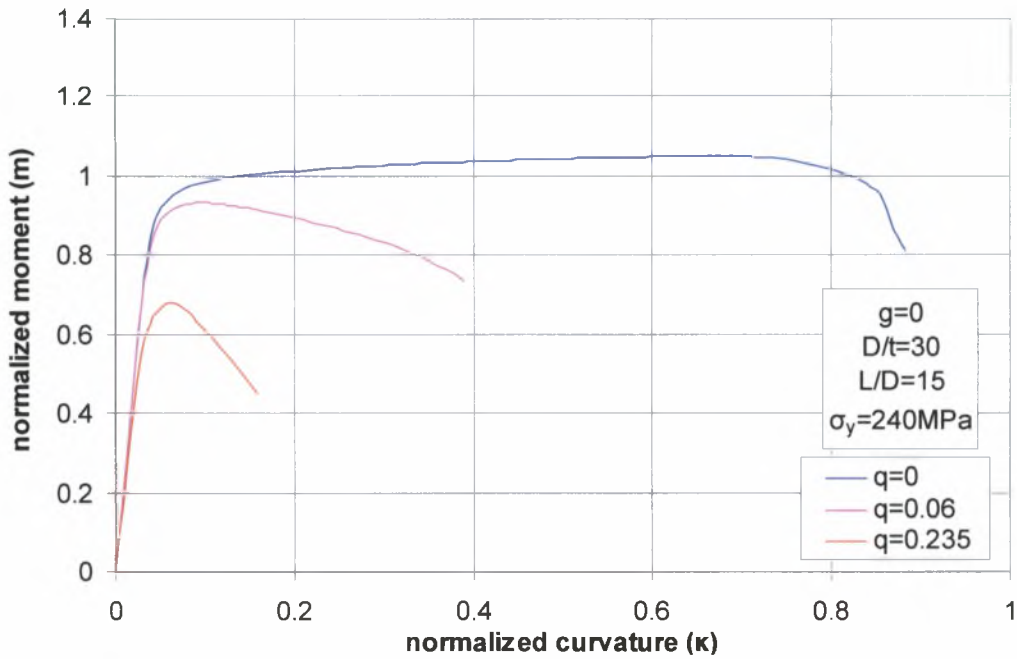


Σχήμα 4.4.6 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) για κυλινδρικό κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια

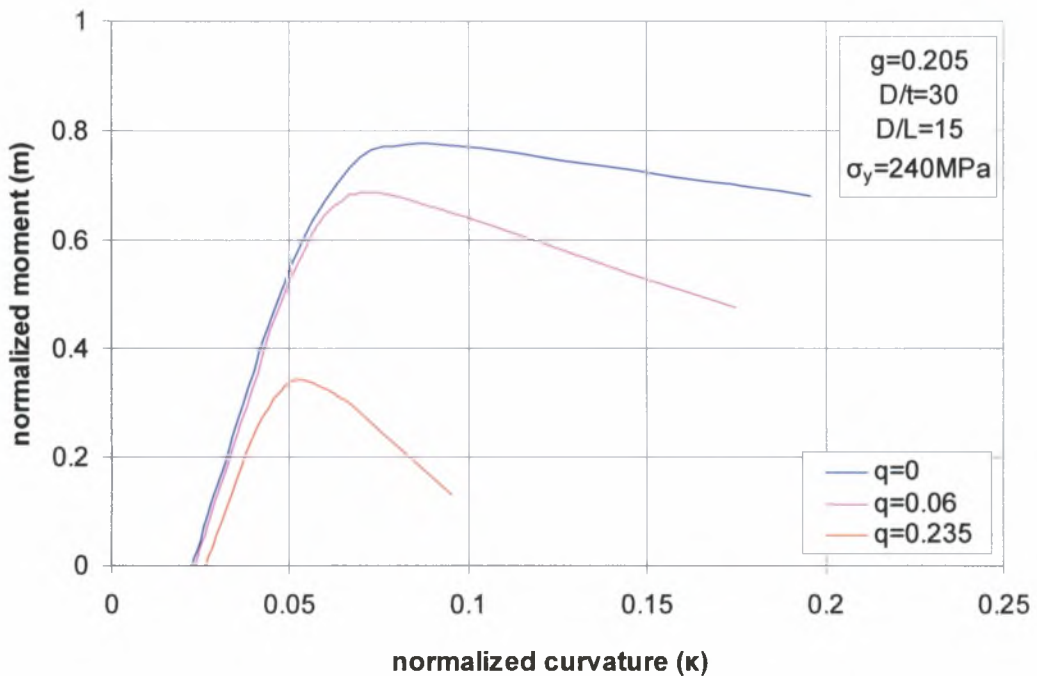


Σχήμα 4.4.7 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) για κυλινδρικό κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0.205$)

Στα διαγράμματα των σχημάτων 4.4.8-9 παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την επιβολή καμπτικού φορτίου στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης σε σχέση με την μεταβολή του μεγέθους του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης για κέλυφος με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του (P→M). Από τα διαγράμματα παρατηρείται πως ανεξάρτητα από την ύπαρξη αρχικής ατέλειας του τοιχώματος η αύξηση του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης επιφέρει μείωση της ακαμψίας της κατασκευής (κλίση των καμπύλων). Αυτό δικαιολογεί το γεγονός ότι όσο αυξάνει ο λόγος q τόσο μειώνεται το οριακό καμπτικό φορτίο αστοχίας του κελύφους m_{max} . Επίσης όσον αφορά στην παρουσία αρχικής ατέλειας στο τοίχωμα του κελύφους έχει ως αποτέλεσμα την επιπλέον μείωση της αντοχής του και τελικά την αστοχία του σε ακόμα μικρότερο καμπτικό φορτίο από ότι στην περίπτωση του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους για τις ίδιες συνθήκες φόρτισης κάθε φορά. Τέλος επισημαίνεται πως για την περίπτωση κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του η μείωση της ακαμψίας ελαττώνεται σταδιακά προτού πάρει αρνητικές τιμές με αποτέλεσμα την πιο ομαλή μετάβαση του κελύφους από κατάσταση προ αστοχίας στην κατάσταση μετά αστοχίας. Το φαινόμενο είναι πιο έντονο για την περίπτωση που στο κέλυφος ασκείται μόνο καμπτικό φορτίο.

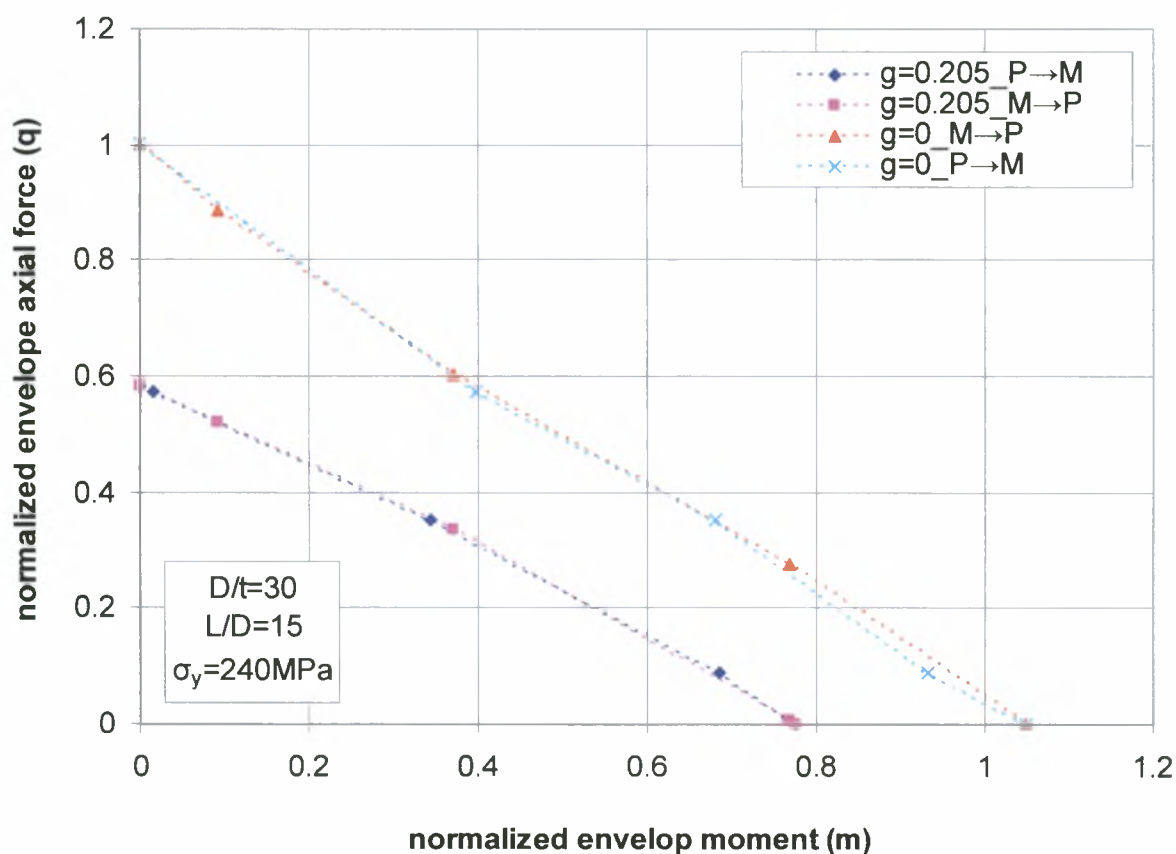


Σχήμα 4.4.8 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικο φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q), για κυλινδρικό κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια



Σχήμα 4.4.9 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικο φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q), για κυλινδρικό κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια (g=0.205)

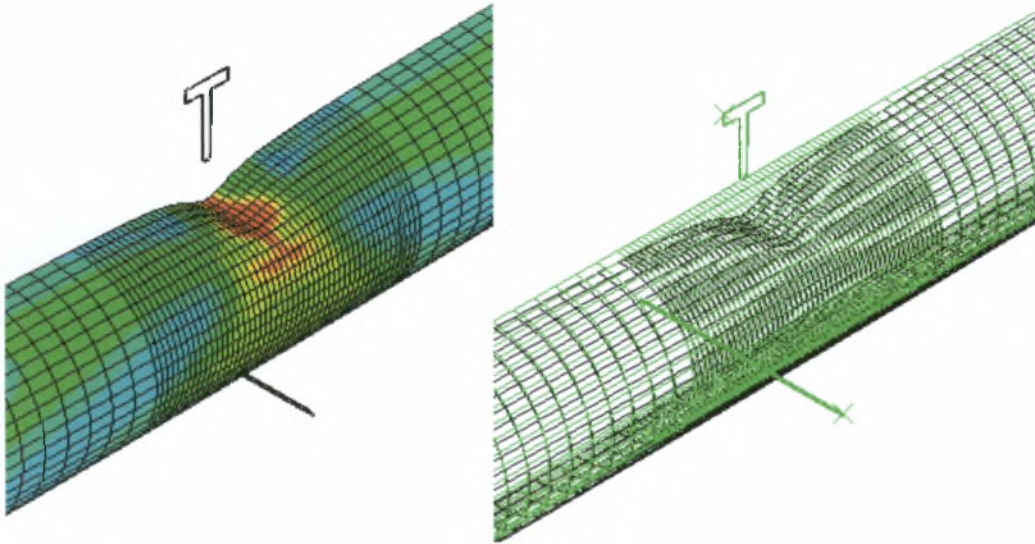
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για τις δύο παραπάνω αλληλουχίες φόρτισης ($M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$) για κέλυφος με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα τα οριακά φορτία αστοχίας του κελύφους με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του σχεδόν συμπίπτουν πράγμα το οποίο σημαίνει πως η αλληλουχία της φόρτισης δεν επηρεάζει σημαντικά την οριακή αντοχή του κελύφους. Θα πρέπει να σημειωθεί πως για την περίπτωση που επιβάλλεται μόνο θλιπτικό αξονικό φορτίο, ως φορτίο αστοχίας του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους έχει θεωρηθεί εκείνο το φορτίο που αντιστοιχεί στο σημείο που η κλίση της καμπύλης (ακαμψία του κελύφους) αλλάζει απότομα για πρώτη φορά.



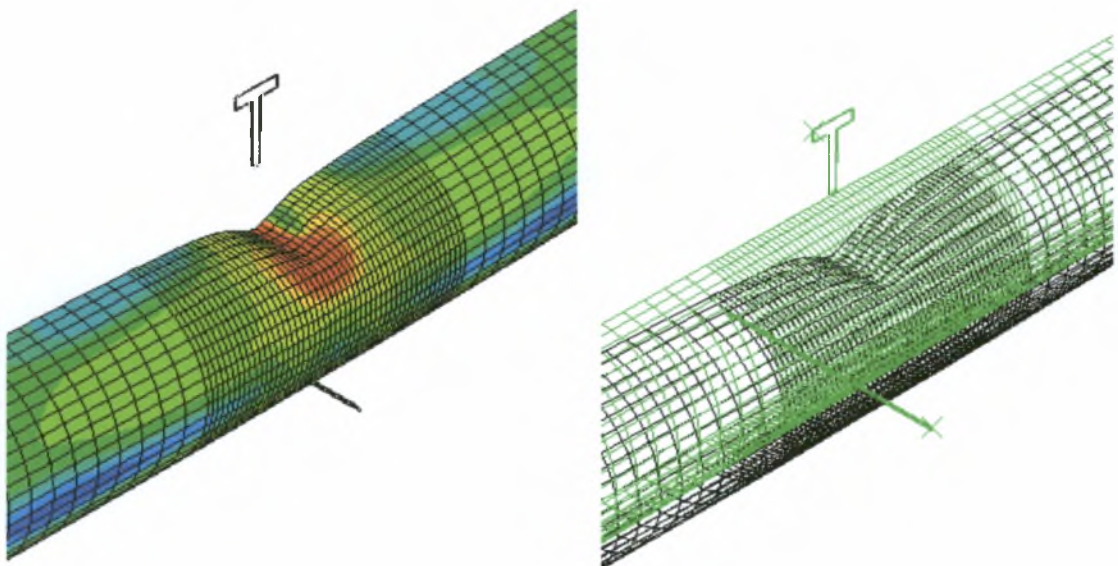
Σχήμα 4.4.10 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης $M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$ για κυλινδρικά κέλυφος χωρίς και με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0$ και $g=0.205$)

Στα σχήματα 4.4.11.α-γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατανομή των τάσεων κατά Von Mises και την παραμορφωμένη κατάσταση για κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του για όλα τα βήματα της ανάλυσης (Step1, Step2,

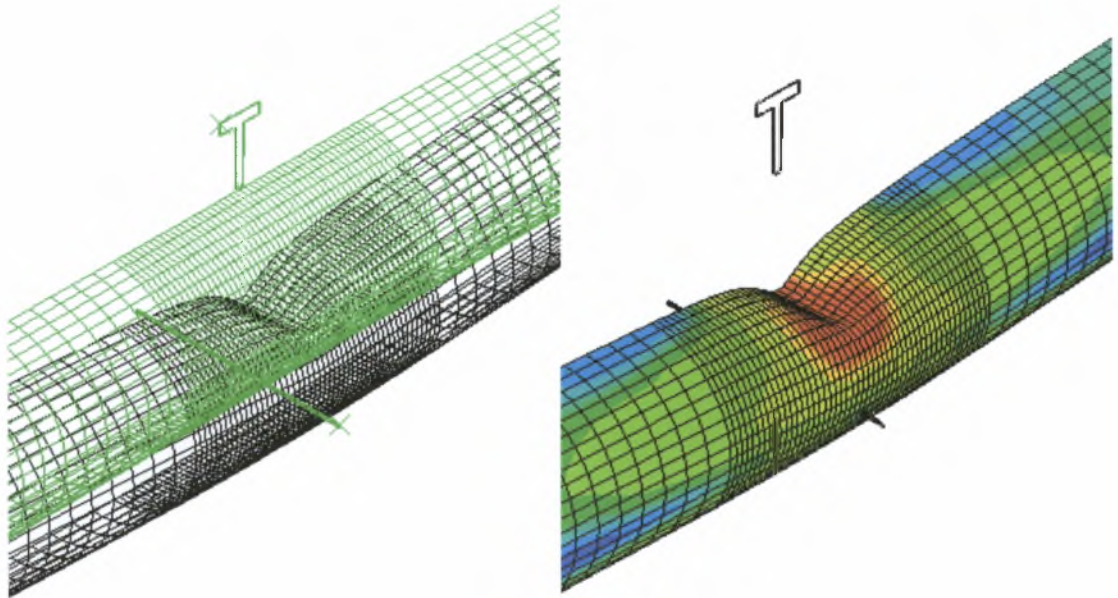
Step3, Step4) διαδοχικά, για την περίπτωση που ο σωλήνας στο τρίτο βήμα υποβάλλεται σε κάμψη και στο τέταρτο σε αξονική θλίψη.



Σχήμα 4.4.11.α Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους αμέσως μετά την δημιουργία τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.205$ (Step1-2) και πριν την επιβολή καμπτικού (Step3)



Σχήμα 4.4.11.β Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους κατά την εφαρμογή του καμπτικού φορτίου (Step3)



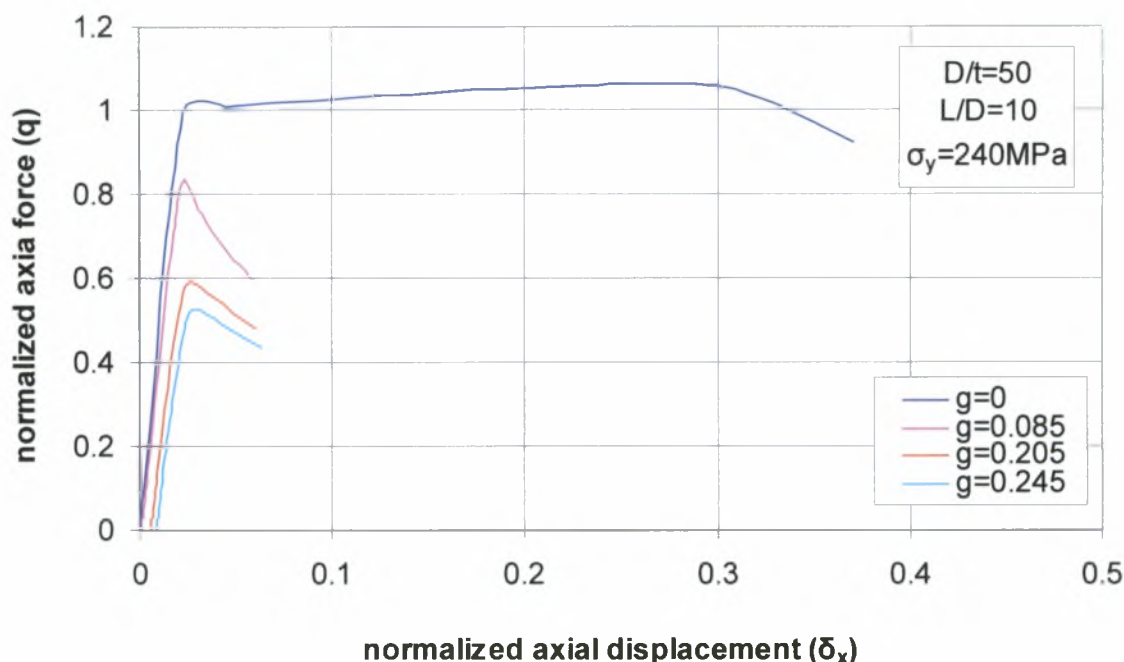
Σχήμα 4.4.11.γ Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους λίγο μετά την αστοχία του κατά την επιβολή θλιπτικού αξονικού φορτίου (Step4)

4.5 Αποτελέσματα για $D/t=50$ και $L/D=10$

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυλινδρικού κελύφους του οποίου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρούσα παράγραφο είναι τα εξής :

- Μέση διάμετρος του σωλήνα : $D=500mm$
- Πάχος του σωλήνα : $t = 10mm$
- Μήκος του σωλήνα : $L=5000mm$
- Μέση ακτίνα σωλήνα : $R=250mm$
- Τάση διαρροής : $\sigma_y=240mm$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0.3$

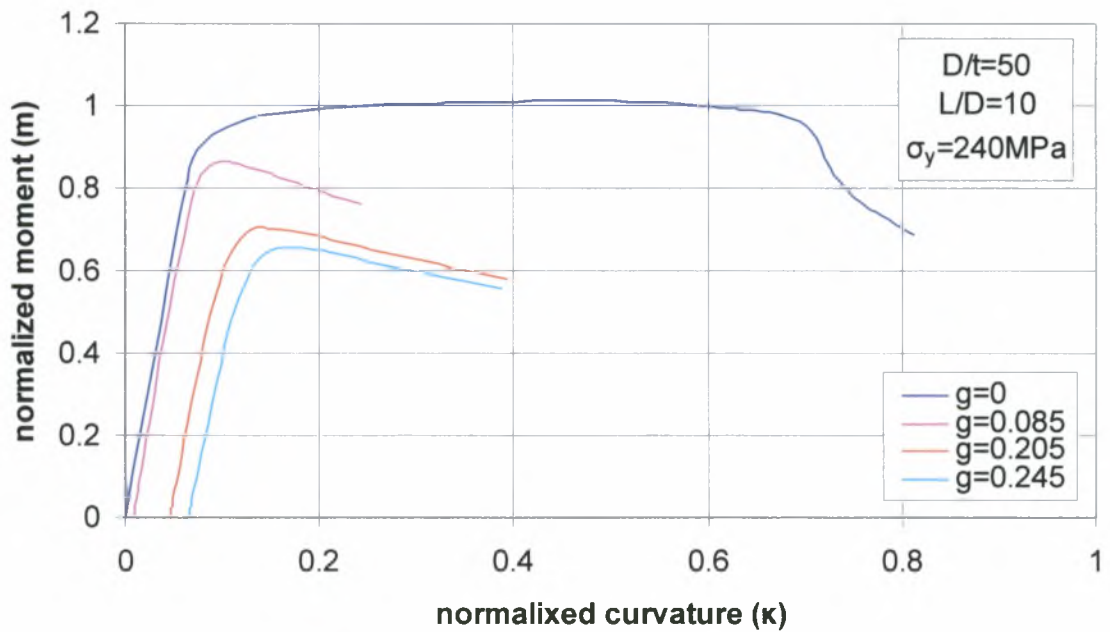
Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου, σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματος του. Αρχικά θα πρέπει να σημειωθεί πως για όλες τις τιμές του βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας ακαμψία του κελύφους (κλίση της καμπύλης) μειώνεται παραμένοντας θετική μέχρι μια τιμή του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου P (P_{max} ή q_{max}). Σε αυτό το διάστημα ο σωλήνας μπορεί να αναλάβει περεταίρω φορτίο παραμορφούμενος περισσότερο. Στο σημείο όπου το $q=q_{max}$ (οριακό φορτίο αστοχίας) η ακαμψία της κελύφους μηδενίζεται και η περαιτέρω φόρτιση του κελύφους έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία του. Όσον αφορά στην παρουσία αρχικής τοπικής ατέλειας όπως φαίνεται στο διάγραμμα η αύξηση του βάθους της επιφέρει μείωση της ακαμψίας του κελύφους με συνέπεια την ελάττωση της οριακής αντοχής του. Στην περίπτωση του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους μπορεί να θεωρηθεί πως αστοχία επέρχεται σε εκείνο το σημείο στο οποίο η ακαμψία του κελύφους παρουσιάζει πρώτη φορά απότομη μεταβολή. Παρόλα αυτά όπως φαίνεται στο διάγραμμα η ακαμψία του κελύφους εξακολουθεί να είναι θετική μέχρι ο λόγος q να είναι περίπου ίσος με 1.2, πράγμα το οποίο σημαίνει πως το κέλυφος είναι δυνατόν να παραλάβει περίπου κατά 20% επιπλέον φορτίο από το θεωρούμενο φορτίο αστοχίας, προτού η ακαμψία του πάρει αρνητικές τιμές. Τέλος το φορτίο αστοχίας q_{max} (P_{max}/P_p) του εν λόγω κελύφους έχει τιμή μεγαλύτερη της μονάδος πράγμα το οποίο σημαίνει ότι ο σωλήνας ξεπερνάει το οριακό φορτίο αστοχίας αφού πρώτα πλαστικοποιηθεί η διατομή στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο.



Σχήμα 4.5.1 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g)

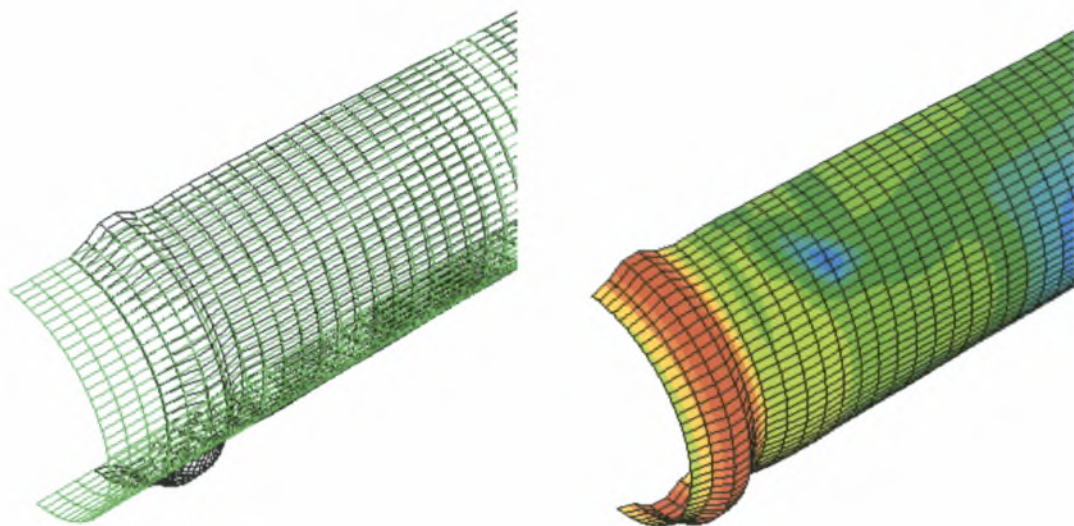
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την εφαρμογή σε αυτό καμπτικού φορτίου σε σχέση με την μεταβολή του βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματος του. Από μια γενική παρατήρηση των καμπύλων φαίνεται πως ανεξάρτητα από το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας σε κάθε περίπτωση η ακαμψία (κλίση της καμπύλης) του κελύφους μειώνεται παραμένοντας θετική μέχρι μια ορισμένη τιμή του λόγου m (m_{max}). Στο διάστημα αυτό είναι δυνατή η επιβολή στο κέλυφος μεγαλύτερων φορτίων παραμορφώνοντας το επιπλέον. Στο σημείο όπου ο λόγος m παίρνει τη μέγιστη τιμή του m_{max} (οριακό φορτίο αστοχίας) η ακαμψία της κατασκευής μηδενίζεται ενώ, για περαιτέρω φόρτιση του κελύφους παίρνει αρνητικές τιμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση του σωλήνα και τελικά την αστοχία του. Επίσης όσον αφορά στην ύπαρξη αρχικής τοπικής ατέλειας παρατηρείται πως η αύξηση του βάθους της επιφέρει μείωση του οριακού καμπτικού φορτίου αστοχίας της κελύφους. Τα κελύφη με αρχική τοπική ατέλεια παρουσιάζουν απότομη μετάβαση από την προλυγισμική στη μεταλυγισμική κατάσταση σε αντίθεση με τον αρχικά απαραμόρφωτο σωλήνα του οποίου η μείωση της ακαμψία του ελαττώνεται σταδιακά πριν πάρει αρνητικές τιμές. Τέλος το κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια έχει λόγο m (M_{max}/M_p)

μεγαλύτερο της μονάδος πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η αστοχία επέρχεται άφου πρώτα πλαστικοποιηθεί η διατόμη του στην οποία εφαρμόζεται το καμπτικό φορτίο.

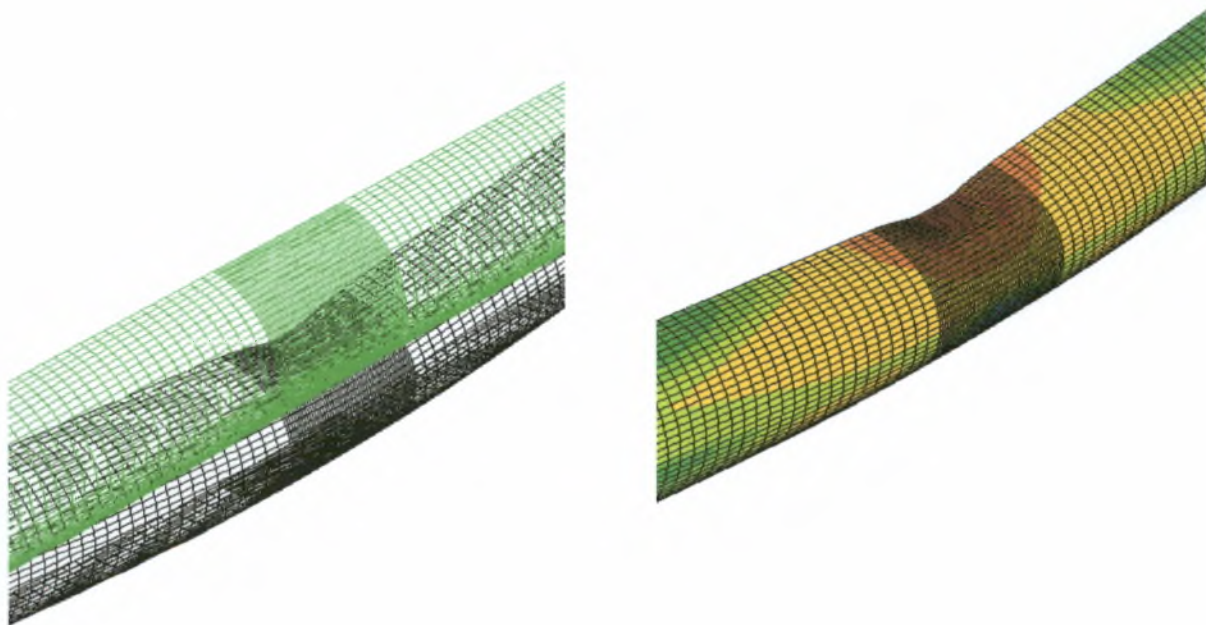


Σχήμα 4.5.2 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g)

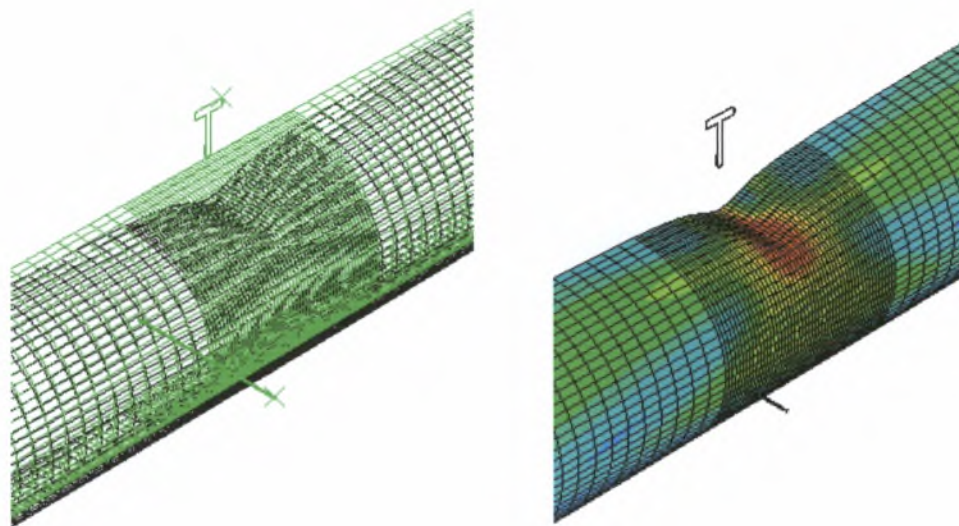
Στα σχήματα 4.2.31-3.2.33.α-γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατανομή των τάσεων κατά Von Mises και την παραμορφωμένη κατάσταση για κελύφη με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους πριν και μετά την αστοχία. Ενδιαφέρον έχει η μορφή αστοχίας στην περίπτωση όπου επιβάλλεται θλιπτικό αξονικό φορτίο στο σωλήνα χωρίς τοπική αρχική ατέλεια του οποίου η αστοχία επέρχεται στις διατομές κοντά στα άκρα του σχήμα 4.2.31.



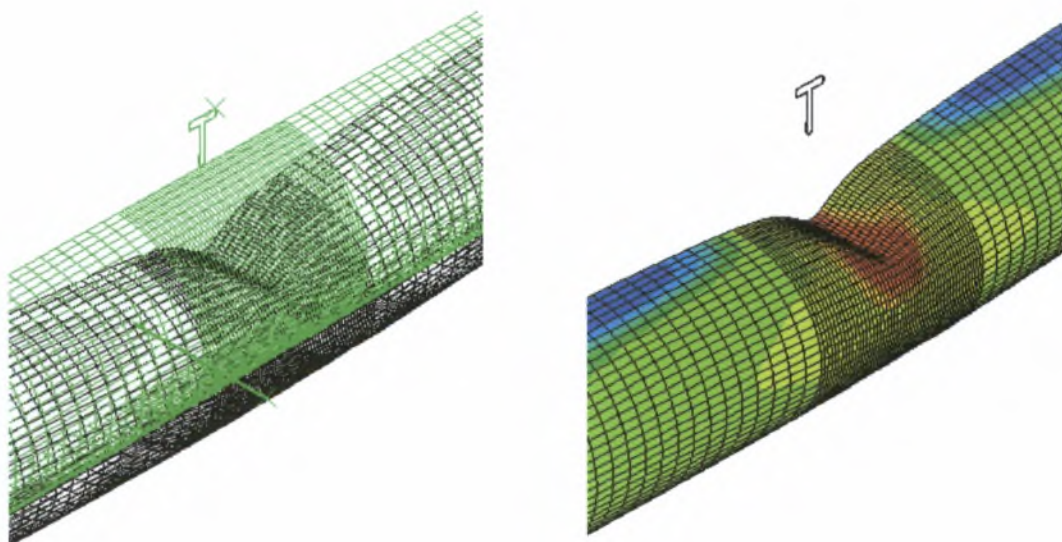
Σχήμα 4.5.3 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του που υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο



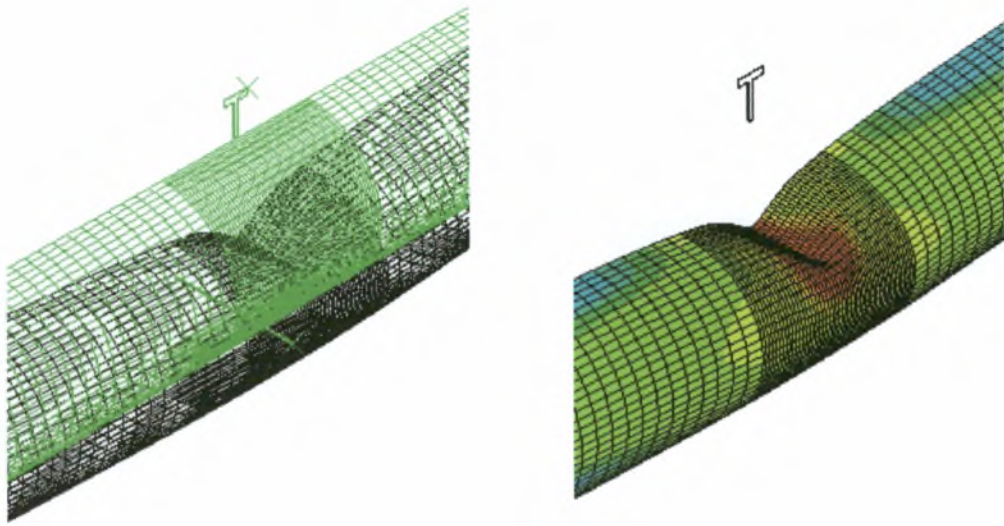
Σχήμα 4.5.4 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του που υποβάλλεται σε καμπτικό φορτίο



Σχήμα 4.5.5.α Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.205$ πριν την επιβολή θλιπτικού αξονικού/καμπτικού φορτίου

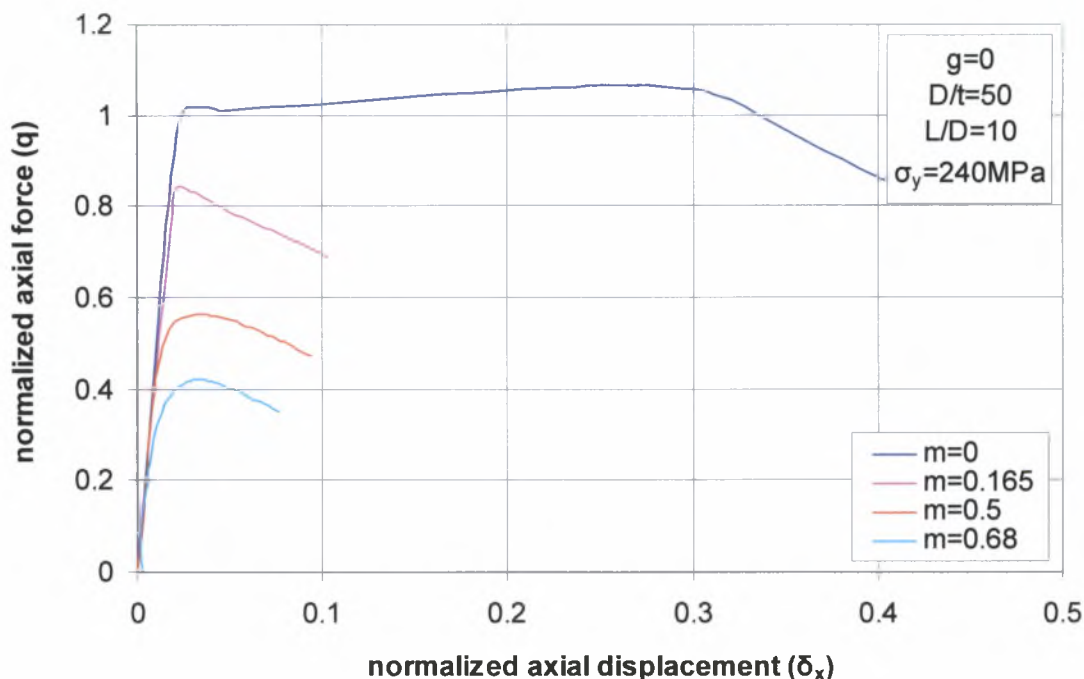


Σχήμα 4.5.5.β Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.205$ που υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο μετά την αστοχία του

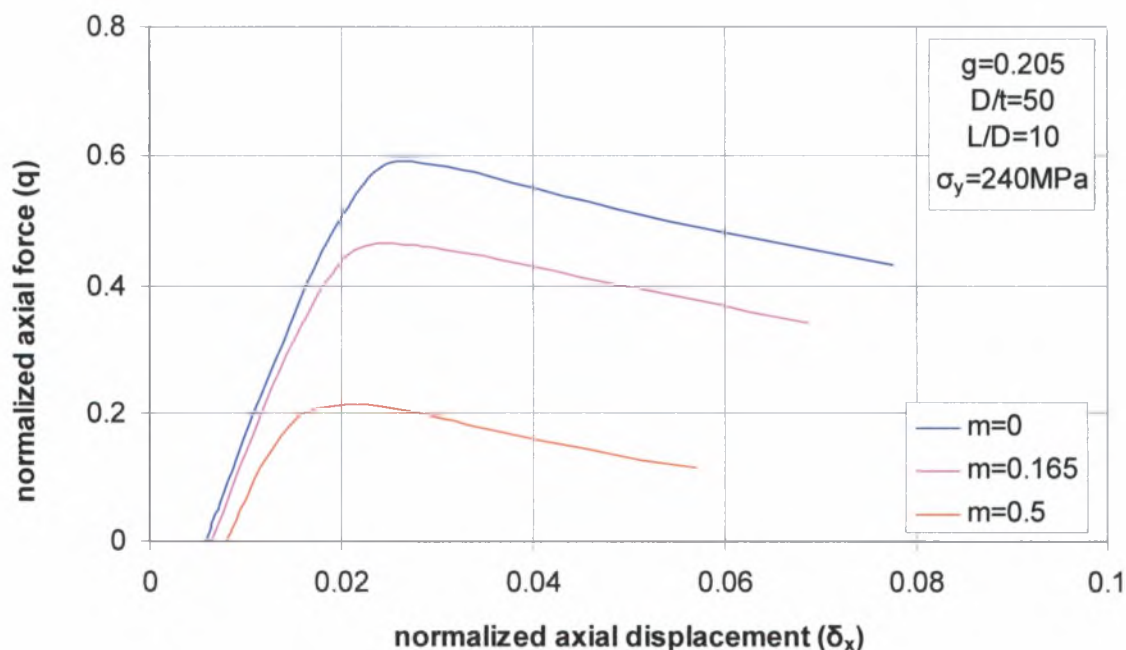


Σχήμα 4.5.5.γ Παραμορφωμένη κατάσταση και Κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.205$ που υποβάλλεται σε καμπτικό φορτίο μετά την αστοχία του

Στα διαγράμματα των σχημάτων 4.5.6-7 φαίνεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την επιβολή θλιπτικού αξονικού φορτίου στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης σε σχέση με την μεταβολή του μεγέθους του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης για κέλυφος με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του ($M \rightarrow P$). Παρατηρείται ότι ανεξάρτητα από την ύπαρξη τοπικής αρχικής ατέλειας ο λόγος q_{max} μειώνεται με την αύξηση του καμπτικού φορτίου M που επιβάλλεται στο τρίτο βήμα της ανάλυσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου μειώνεται η ακαμψία του κελύφους (κλίση των καμπύλων).

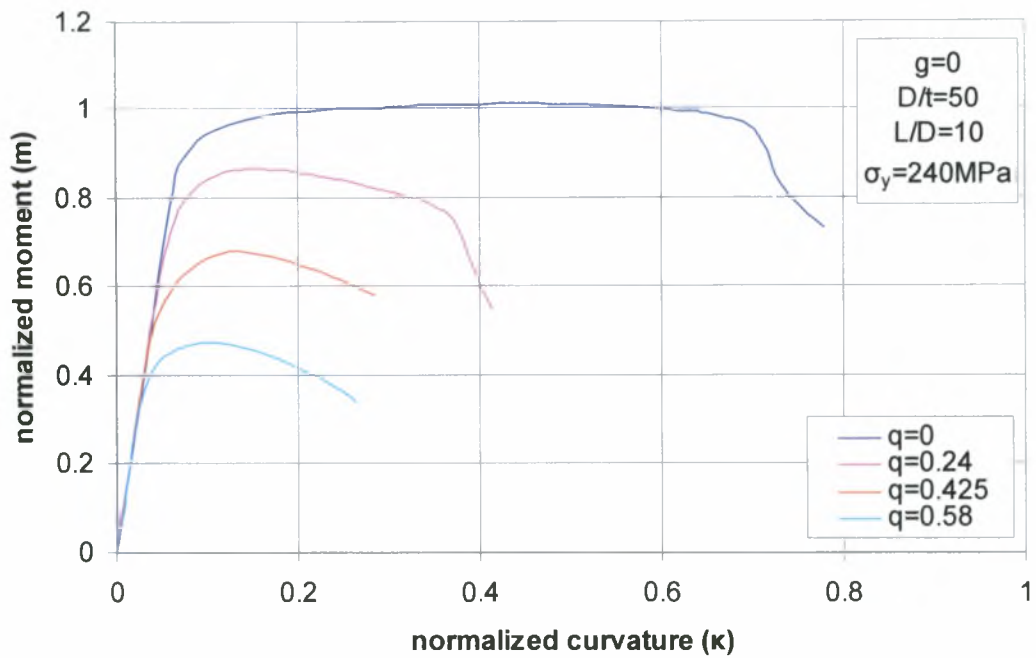


Σχήμα 4.5.6 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) για κυλινδρικό κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια

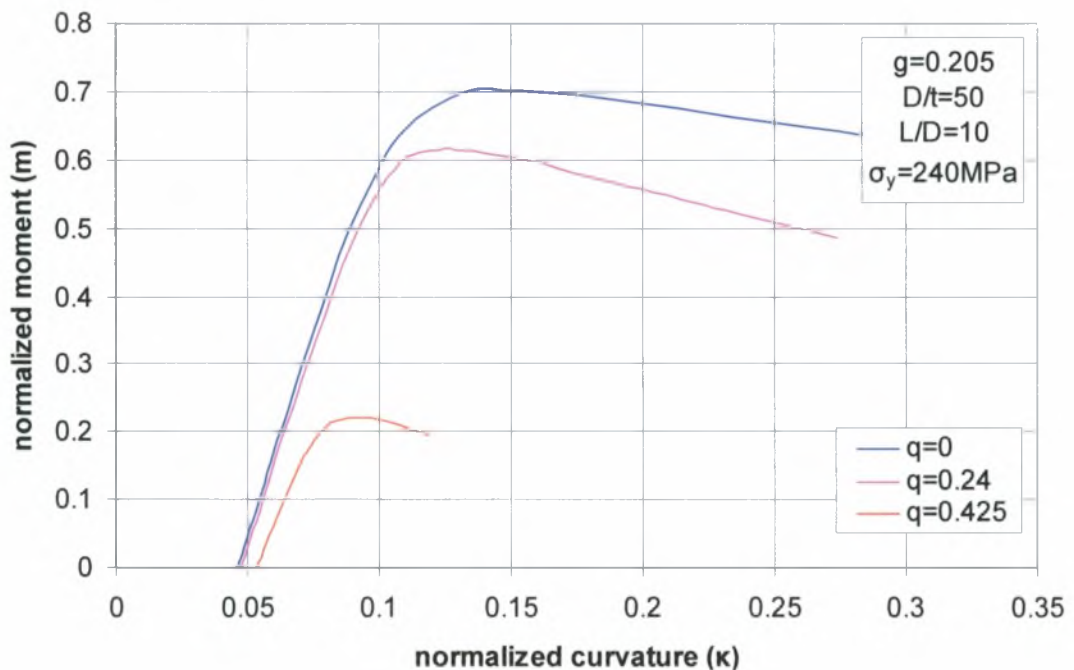


Σχήμα 4.5.7 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) για κυλινδρικό κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0.205$)

Στα διαγράμματα που ακολουθούν (σχήματα 4.5.8-7) παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την επιβολή καμπτικού φορτίου στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης σε σχέση με την μεταβολή του μεγέθους του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης για κέλυφος με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του (P→M). Παρατηρείται πως η οριακή αντοχή του κελύφους σε καμπτικό φορτίο M_{max} (m_{max}) ανεξάρτητα από την ύπαρξη τοπικής αρχικής ατέλειας μειώνεται καθώς αυξάνει ο λόγος q . Αυτό οφείλεται στην μείωση της ακαμψίας του κελύφους (κλίση των καμπύλων) με την αύξηση του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης. Επίσης παρατηρείται ότι για την περίπτωση που το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας είναι μηδέν ο σωλήνας περνά ομαλά από την προλυγισμική στην μεταλυγισμική κατάσταση με το φαινόμενο να είναι πιο έντονο στην περίπτωση που στο κέλυφος εφαρμόζεται μόνο καμπτικό φορτίο. Αντίθετα για βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας διάφορο του μηδενός η μετάβαση είναι πιο απότομη.

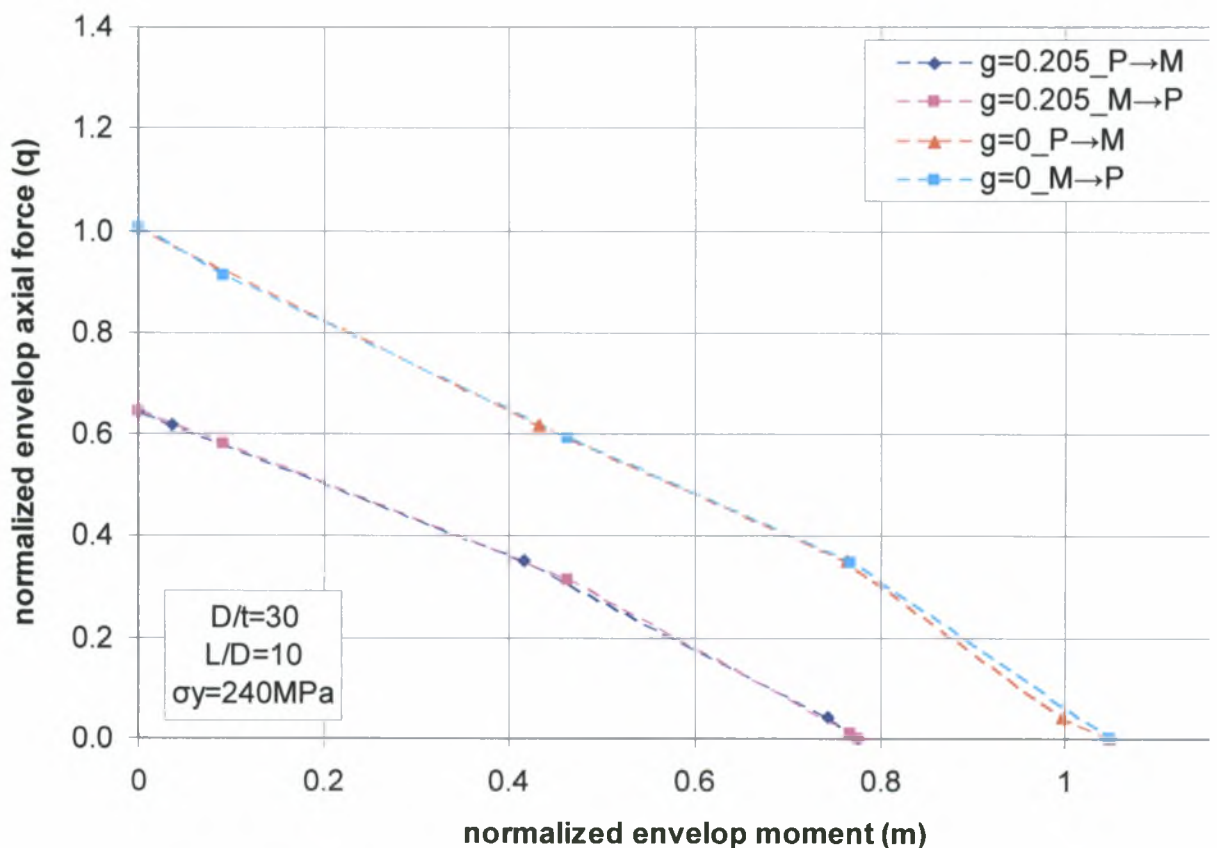


Σχήμα 4.5.8 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q), για κυλινδρικό κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια



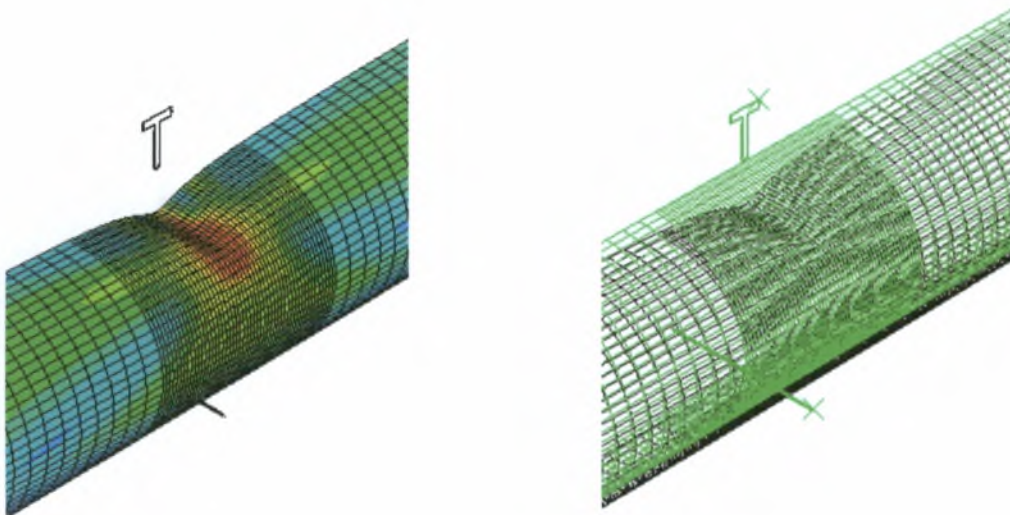
Σχήμα 4.5.9 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q), για κυλινδρικό κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0.205$)

Στο παρακάτω σχήμα 4.5.11 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για τις δύο παραπάνω αλληλουχίες φόρτισης ($M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$) για κέλυφος με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα τα οριακά φορτία αστοχίας του κελύφους με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του σχεδόν συμπίπτουν πράγμα το οποίο σημαίνει πως η αλληλουχία της φόρτισης δεν επηρεάζει σημαντικά την οριακή αντοχή του κελύφους. Θα πρέπει να σημειωθεί πως για την περίπτωση που επιβάλλεται μόνο θλιπτικό αξονικό φορτίο, ως φορτίο αστοχίας του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους έχει θεωρηθεί εκείνο το φορτίο που αντιστοιχεί στο σημείο που η κλίση της καμπύλης (ακαμψία του κελύφους) αλλάζει απότομα για πρώτη φορά.

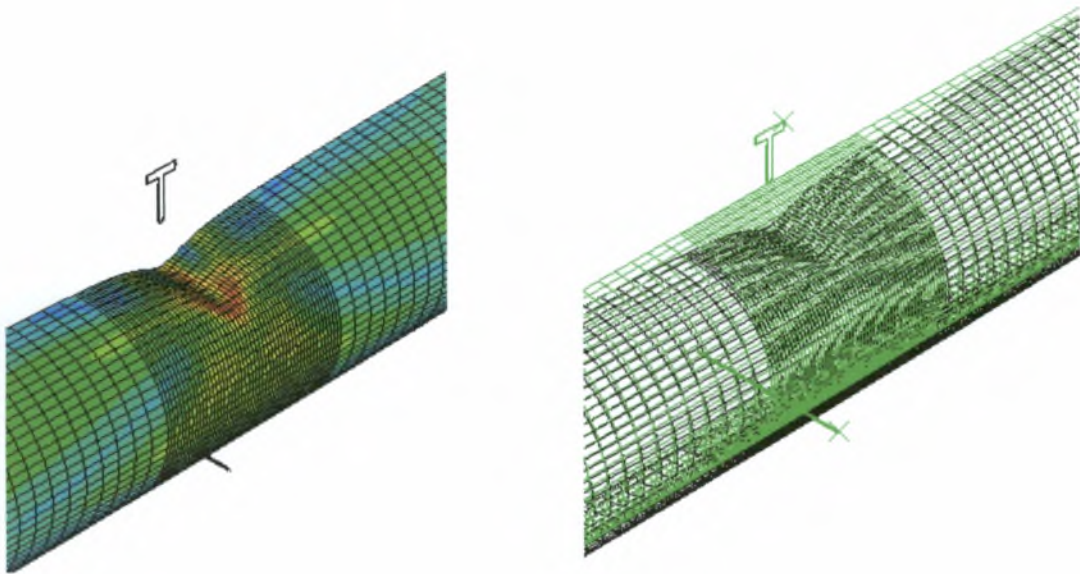


Σχήμα 4.5.10 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης $M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$ για κυλινδρικά κέλυφος χωρίς και με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0$ και $g=0.205$)

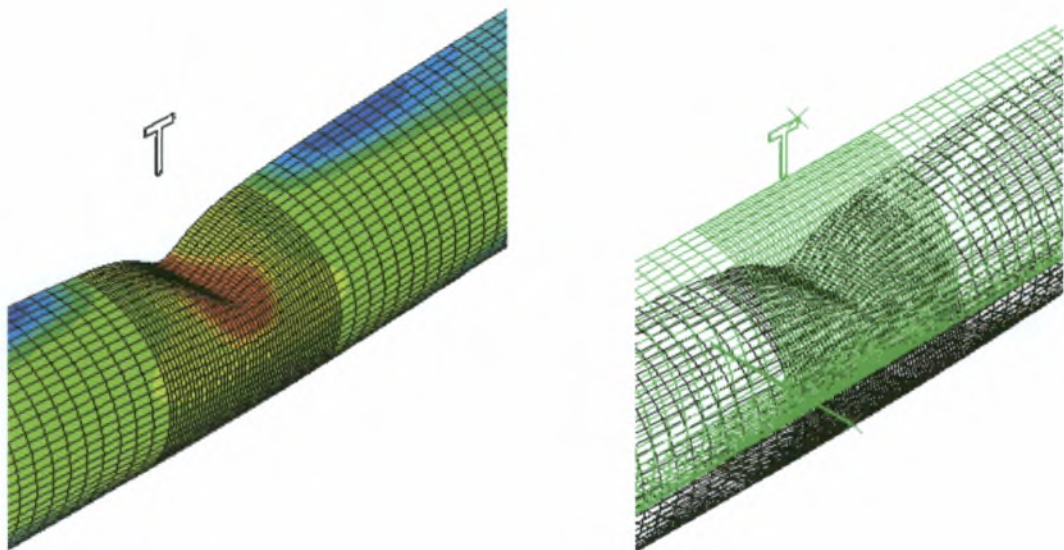
Στα σχήματα 4.5.11.α-γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατανομή των τάσεων κατά Von Mises και η παραμορφωμένη κατάσταση σε όλα τα βήματα (Step1-2, Step3 και Step4) της ανάλυσης για κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του $g=0.205$ στο οποίο αρχικά εφαρμόζεται θλιπτικό αξονικό φορτίο και στην συνέχεια καμπτικό φορτίο.



Σχήμα 4.5.11.α Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους αμέσως μετά την δημιουργία τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.205$ (Step1-2) και πριν την επιβολή θλιπτικού αξονικού (Step3)



Σχήμα 4.5.11.β Παραμορφωμένη κατάσταση και Κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.205$ κατά την εφαρμογή του θλιπτικού αξονικού φορτίου (Step3)



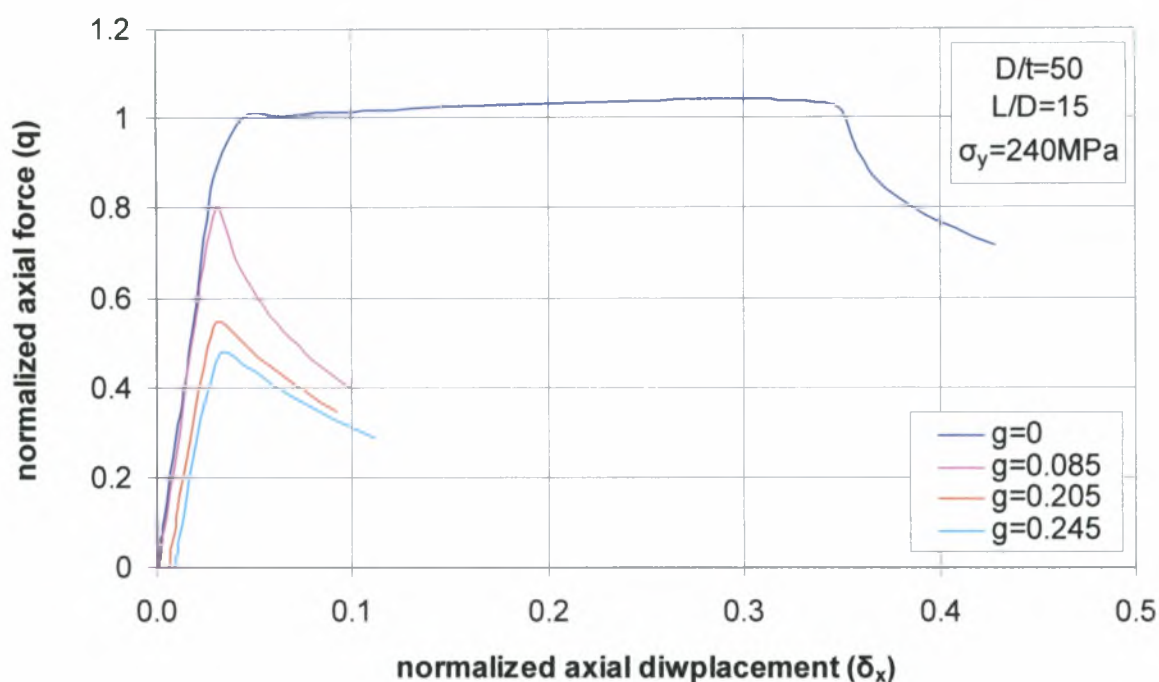
Σχήμα 4.5.11.γ Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.205$ λίγο μετά την αστοχία του κατά την επιβολή καμπτικού φορτίου (Step4)

4.6 Αποτελέσματα για $D/t=50$ και $L/D=15$

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυλινδρικού κελύφους του οποίου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρούσα παράγραφο είναι τα εξής :

- Μέση διάμετρος του σωλήνα : $D=500mm$
- Πάχος του σωλήνα : $t=10mm$
- Μήκος του σωλήνα : $L=7500mm$
- Μέση ακτίνα σωλήνα : $R=250mm$
- Τάση διαρροής : $\sigma_y=240mm$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0.3$

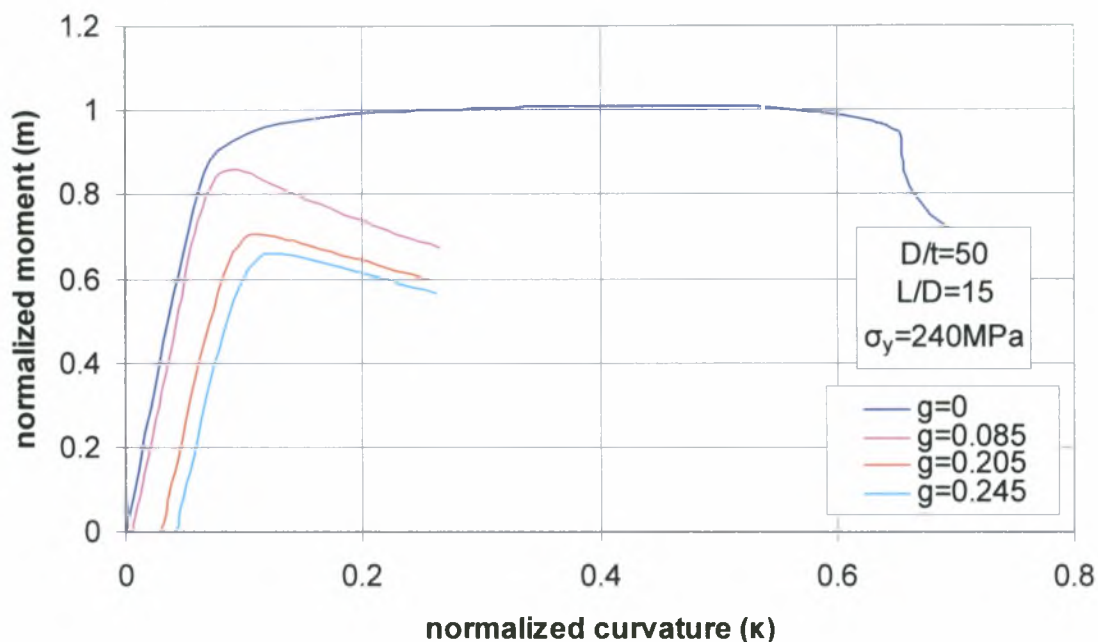
Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου, σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματος του. Αρχικά θα πρέπει να σημειωθεί πως για όλες τις τιμές βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας η ακαμψία του κελύφους (κλίση της καμπύλης) μειώνεται παραμένοντας θετική μέχρι μια τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου P (P_{max} ή q_{max}). Σε αυτό το διάστημα ο σωλήνας μπορεί να “αναλάβει” περαιτέρω φορτίο παραμορφούμενος περισσότερο. Στο σημείο όπου το $P=P_{max}$ (οριακό/κρίσιμο φορτίο αστοχίας) η ακαμψία της κατασκευής μηδενίζεται και η περαιτέρω φόρτιση του κελύφους έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία του. Όσον αφορά στην παρουσία τοπικής αρχικής ατέλειας η αντοχή του κελύφους μειώνεται καθώς το βάθος της αυξάνεται, με συνέπεια την αστοχία του κελύφους σε μικρότερα αξονικά οριακά φορτία. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την αύξηση του βάθους της αρχικής τοπικής ατέλειας μειώνεται η ακαμψία του σωλήνα (κλίση των καμπύλων). Το οριακό φορτίο αστοχίας του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους μπορεί να θεωρηθεί ως η τιμή του λόγου q που αντιστοιχεί στο σημείο εκείνο που ακαμψία του κελύφους παρουσιάζει πρώτη φορά απότομη μεταβολή. Παρόλα αυτά όπως φαίνεται στο διάγραμμα η ακαμψία του κελύφους εξακολουθεί να είναι θετική μέχρι ο λόγος q να γίνει λίγο μεγαλύτερος από 1.2, πράγμα το οποίο σημαίνει πως το κέλυφος είναι δυνατόν να παραλάβει περίπου κατά 20% επιπλέον φορτίο από το θεωρούμενο φορτίο αστοχίας, προτού η ακαμψία του πάρει αρνητικές τιμές. Επίσης παρατηρείται ότι το φορτίο αστοχίας q_{max} του εν λόγω κελύφους είναι μεγαλύτερο της μονάδος, πράγμα το οποίο σημαίνει ο σωλήνας αστοχεί αφού πρώτα πλαστικοποιηθεί η διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο.



Σχήμα 4.6.1 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g)

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την εφαρμογή σε αυτό καμπτικού φορτίου σε σχέση με την μεταβολή του βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματος του. Από μια γενική παρατήρηση των καμπύλων φαίνεται πως ανεξάρτητα από το βάθος της αρχικής τοπικής ατέλειας σε κάθε περίπτωση η ακαμψία (κλίση της καμπύλης) του κελύφους μειώνεται παραμένοντας θετική μέχρι μια ορισμένη τιμή του λόγου m (m_{max}). Στο διάστημα αυτό είναι δυνατή η επιβολή στο κέλυφος μεγαλύτερων φορτίων παραμορφώνοντας το επιπλέον. Στο σημείο όπου ο λόγος m παίρνει τη μέγιστη τιμή του m_{max} (οριακό φορτίο αστοχίας) η ακαμψία της κατασκευής μηδενίζεται ενώ, για περαιτέρω φόρτιση του κελύφους παίρνει αρνητικές τιμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση του σωλήνα και τελικά την αστοχία του. Όσον αφορά την ύπαρξη τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμα του κελύφους από την σύγκριση των καμπύλων φαίνεται πως η ακαμψία του σωλήνα μειώνεται καθώς αυξάνεται το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας, με αποτέλεσμα την μείωση του οριακού καμπτικού φορτίου αστοχίας (m_{max}). Τα κελύφη με αρχική τοπική ατέλεια παρουσιάζουν απότομη μετάβαση από την προ-αστοχίας στην μετά-αστοχίας

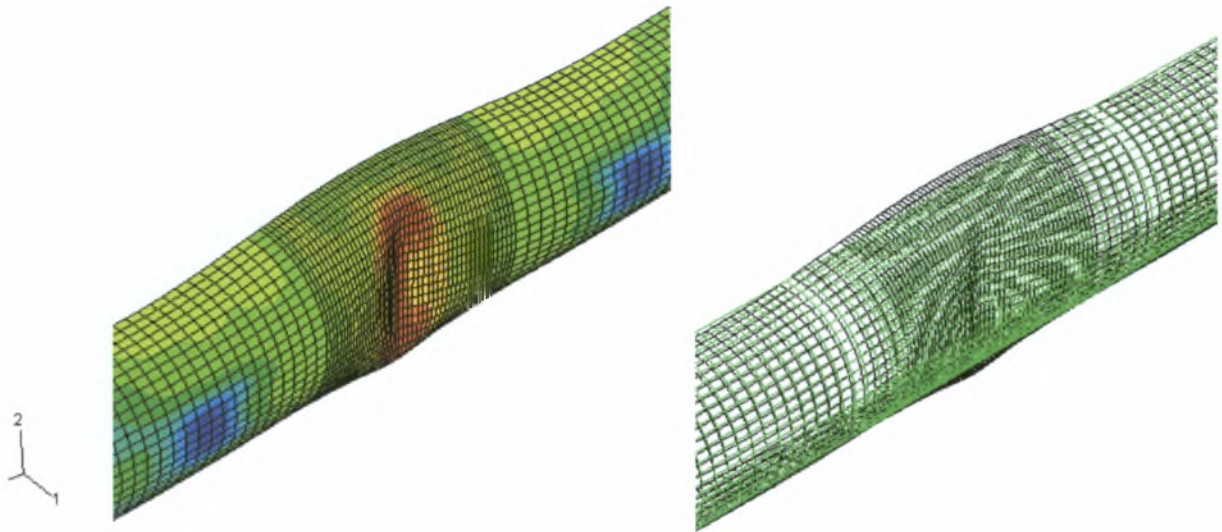
κατάσταση σε αντίθεση με τον αρχικά απαραμόρφωτο σωλήνα του οποίου η ακαμψία μειώνεται σταδιακά πριν πάρει αρνητικές τιμές. Τέλος και στην περίπτωση επιβολής καμπτικού φορτίου το αρχικά απαραμόρφωτο κέλυφος αστοχεί για τιμή του M μεγαλύτερη από M_p , δηλαδή, ο σωλήνας ξεπερνά την οριακή αντοχή του αφού πρώτα πλαστικοποιηθεί η διατομή του στην οποία επιβάλλεται το καμπτικό φορτίο.



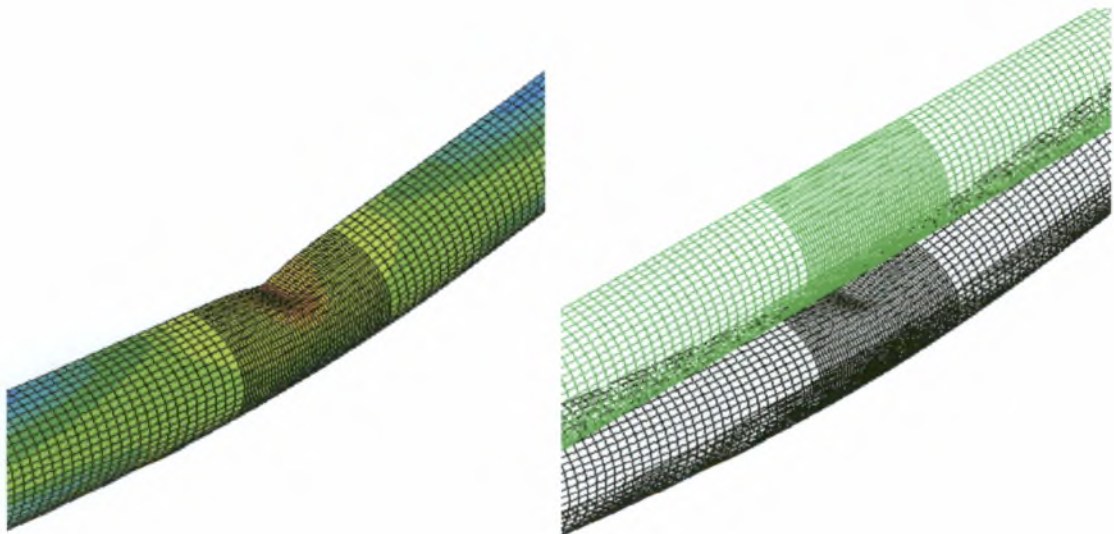
Σχήμα 4.6.2 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g)



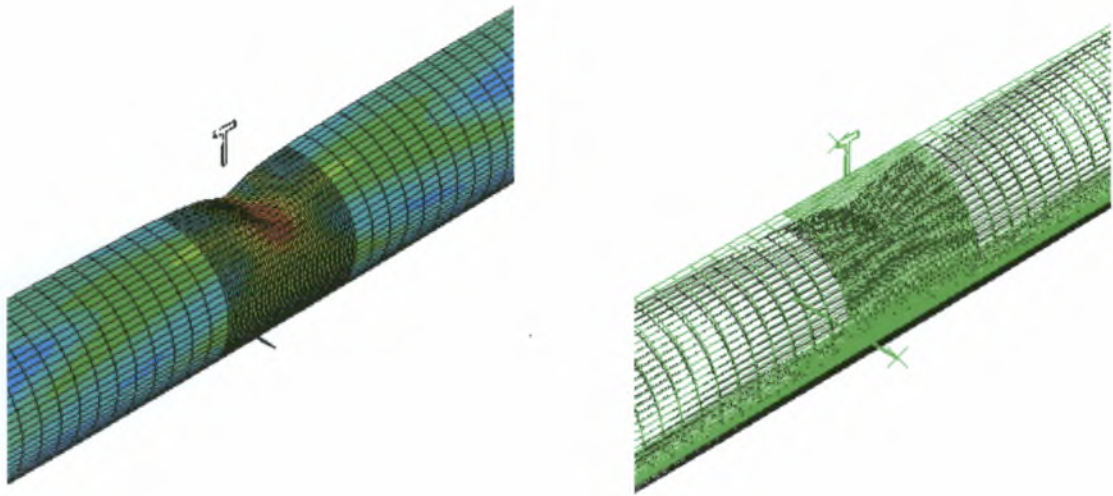
Στα σχήματα 4.6.3-4.6.5.α-γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατανομή των τάσεων κατά Von Mises και την παραμορφωμένη κατάσταση για κέλυφος με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους πριν και μετά την αστοχία. Ενδιαφέρον έχει η μορφή αστοχίας στην περίπτωση όπου επιβάλλεται θλιπτικό αξονικό φορτίο στο σωλήνα χωρίς τοπική αρχική ατέλεια του οποίου η αστοχία επέρχεται στη μεσαία διατομή αλλά ως προς το επίπεδο των αξόνων 2-3 και όχι ως το 1-3 όπως συμβαίνει για όλους τα άλλα κέλυφη.



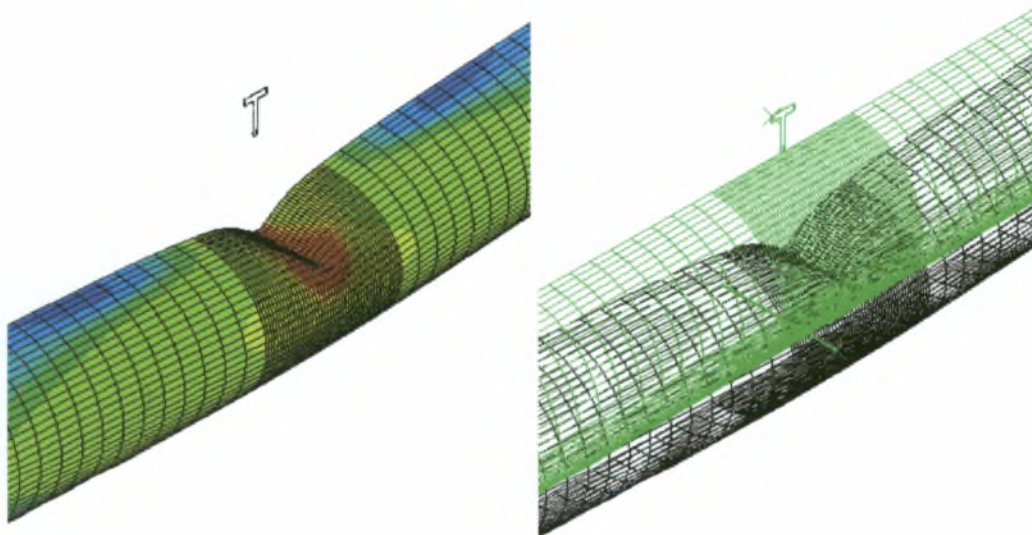
Σχήμα 4.6.3 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του που υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο



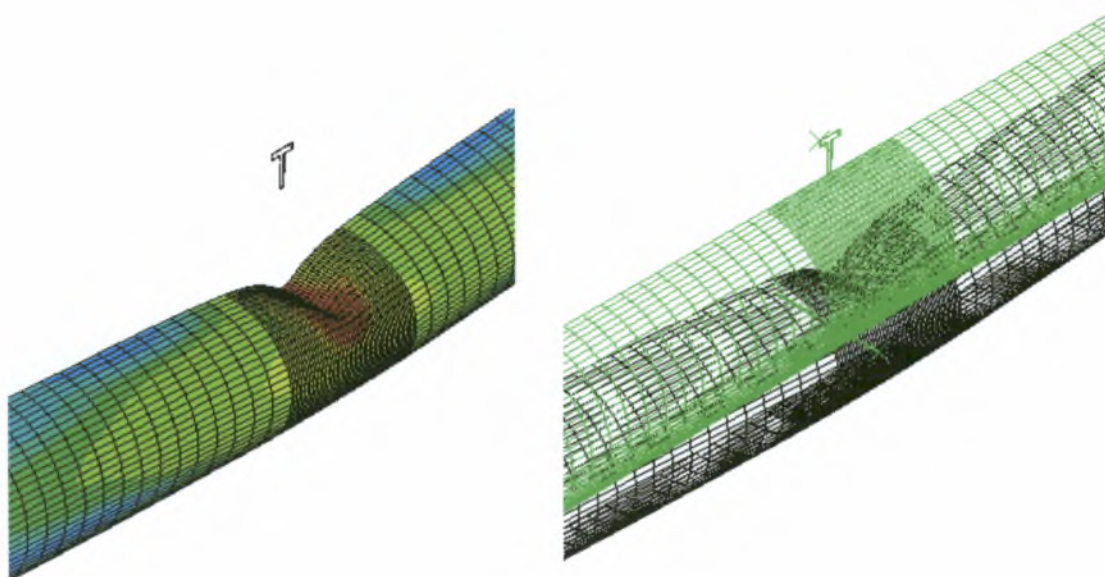
Σχήμα 4.6.4 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του που υποβάλλεται σε καμπτικό φορτίο



Σχήμα 4.6.5.α Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.205$ πριν την επιβολή θλιπτικού αξονικού /καμπτικού φορτίου

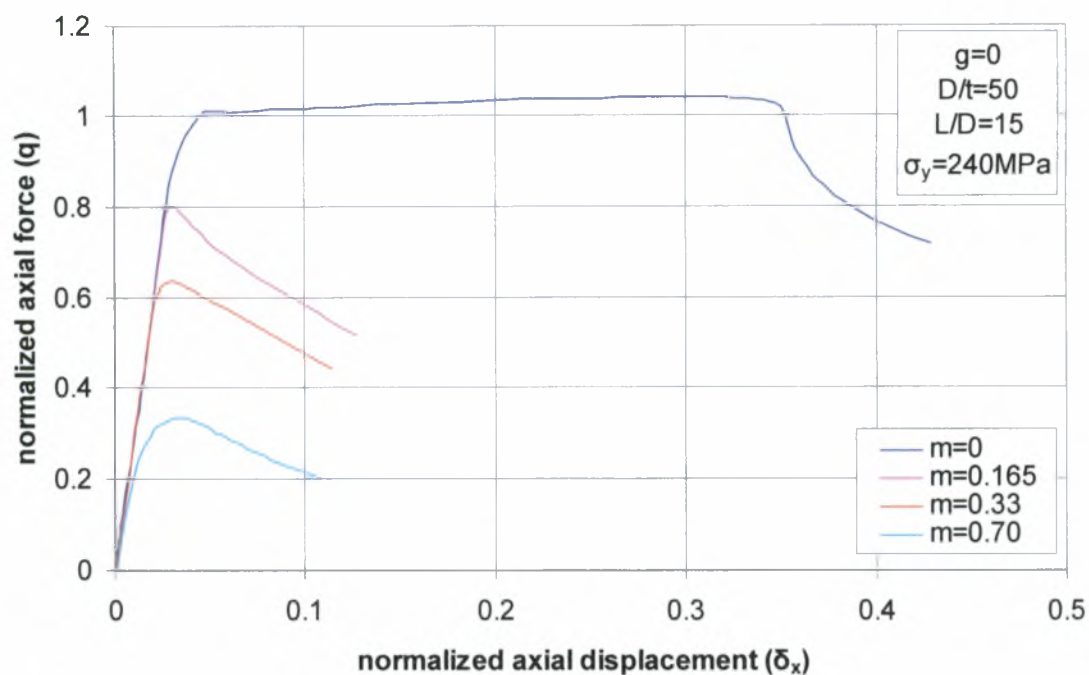


Σχήμα 4.6.5.β Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.205$ που υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο μετά την αστοχία του

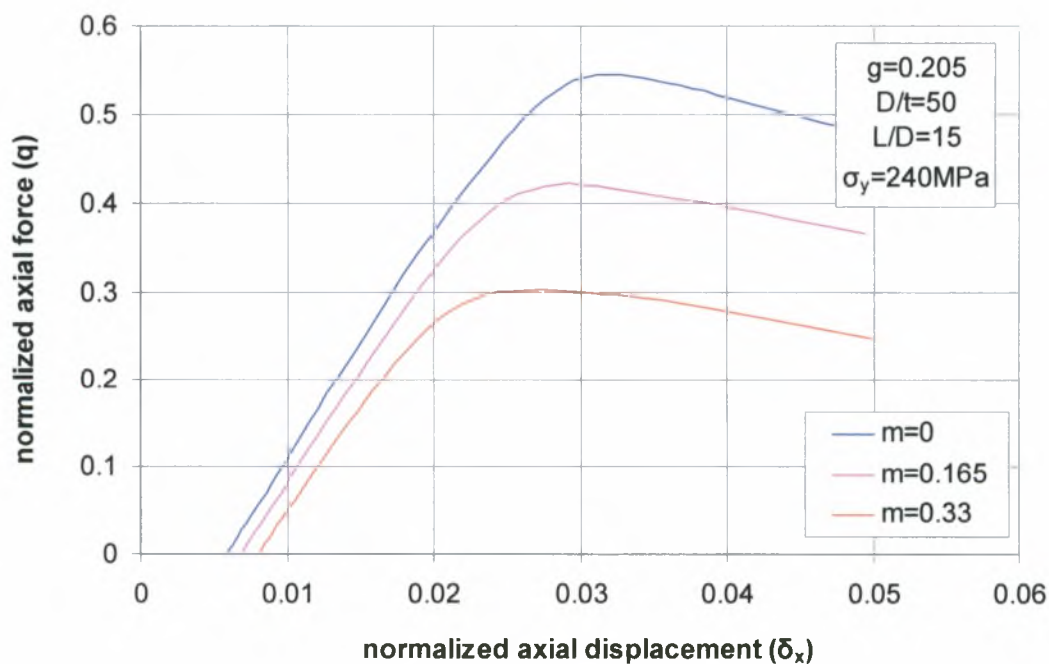


Σχήμα 4.6.5.γ Κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.205$ που υποβάλλεται σε καμπτικό φορτίο μετά την αστοχία του

Στα παρακάτω διαγράμματα (σχήματα 4.6.6-7) παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την επιβολή θλιπτικού αξονικού φορτίου στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης σε σχέση με την μεταβολή του μεγέθους του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης για κέλυφος με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του ($M \rightarrow P$). Από τα διαγράμματα γίνεται φανερό ότι με την αύξηση του λόγου m μειώνεται το μέγιστο θλιπτικό αξονικό φορτίο στο οποίο επέρχεται η αστοχία του κελύφους με ή χωρίς αρχική τοπική ατέλεια. Αυτό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι η ακαμψία της κατασκευής (κλίση των καμπυλών) μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου M . Για την περίπτωση κελύφους με αρχική τοπική ατέλεια παραλείπονται τα αποτελέσματα για m ίσο με 70% διότι η τιμή του λόγου q_{max} είναι πάρα πολύ μικρή σε αυτές τις συνθήκες φόρτισης.

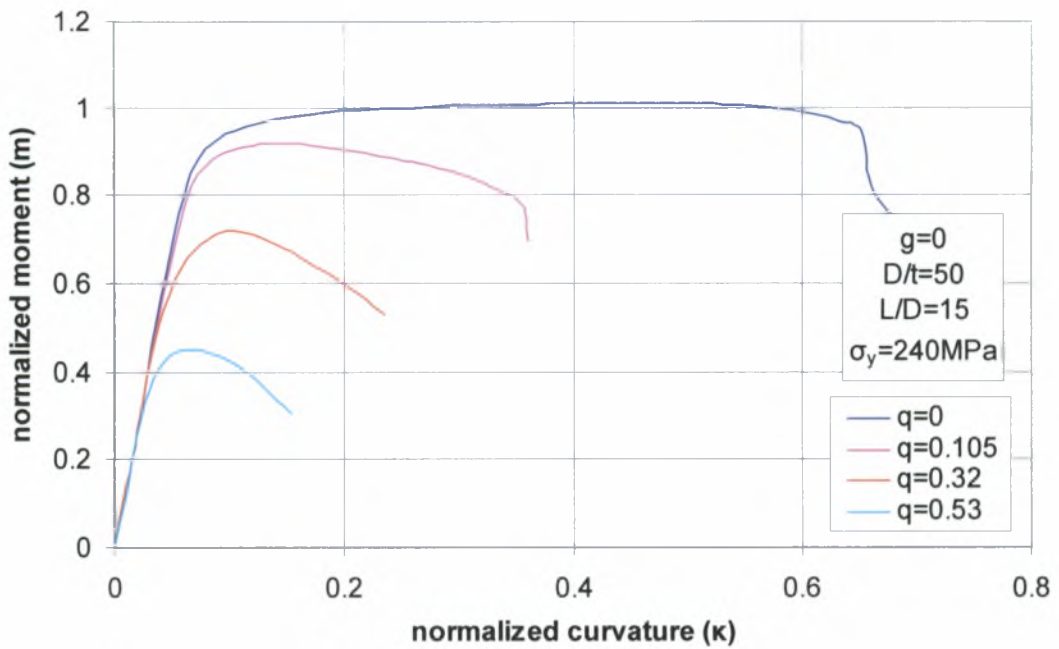


Σχήμα 4.6.6 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) για κυλινδρικό κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια

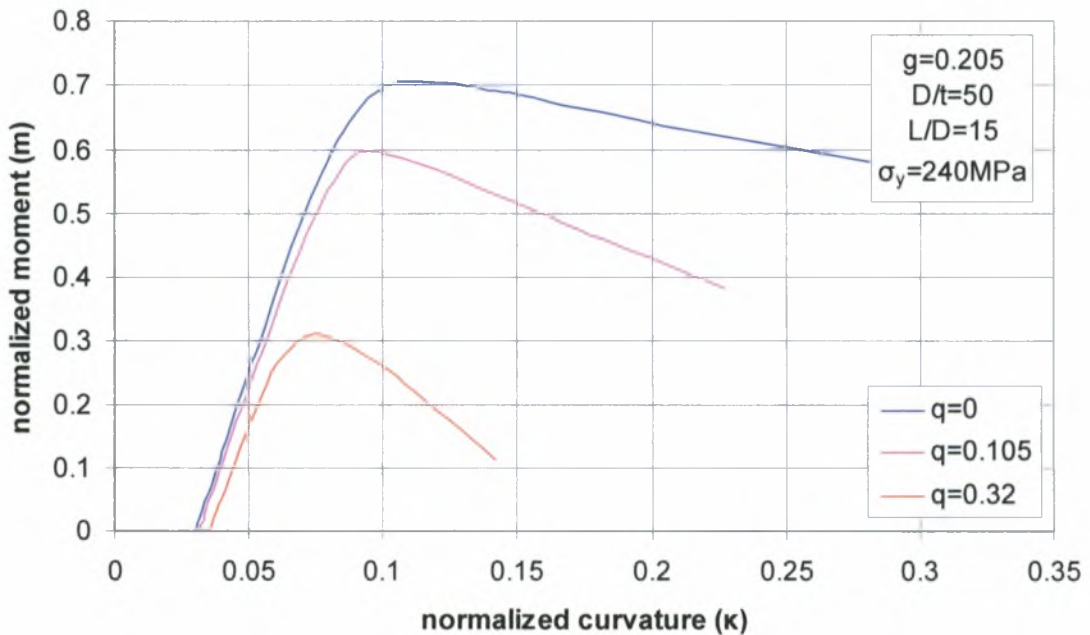


Σχήμα 4.6.7 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) για κυλινδρικό κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0.205$)

Στα διαγράμματα των σχημάτων 4.6.8-9 παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την επιβολή καμπτικού φορτίου στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης σε σχέση με την μεταβολή του μεγέθους του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης για κέλυφος με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του (P→M). Παρατηρείται πως η οριακή αντοχή του κελύφους σε καμπτικό φορτίο m_{max} μειώνεται καθώς αυξάνει ο λόγος g , ανεξάρτητα από την παρουσία τοπικής αρχικής ατέλειας. Αυτό οφείλεται στο ότι με την αύξηση του μεγέθους του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου μειώνεται η ακαμψία της κατασκευής. Επίσης παρατηρείται για την περίπτωση του απαραμόρφωτου αρχικά κελύφους η μετάβαση από την κατάσταση προ-αστοχίας στην κατάσταση μετά-αστοχίας είναι πιο ομαλή σε σχέση με την περίπτωση κελύφους με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του. Το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο όταν στο αρχικά απαραμόρφωτο κέλυφος εφαρμόζεται μόνο καμπτικό φορτίο. Τα αποτελέσματα για g ίσο με 0.205 και g ίσο με 0.53 παραλείπονται διότι m παίρνει πολύ μικρές τιμές για αυτές τις συνθήκες φόρτισης.

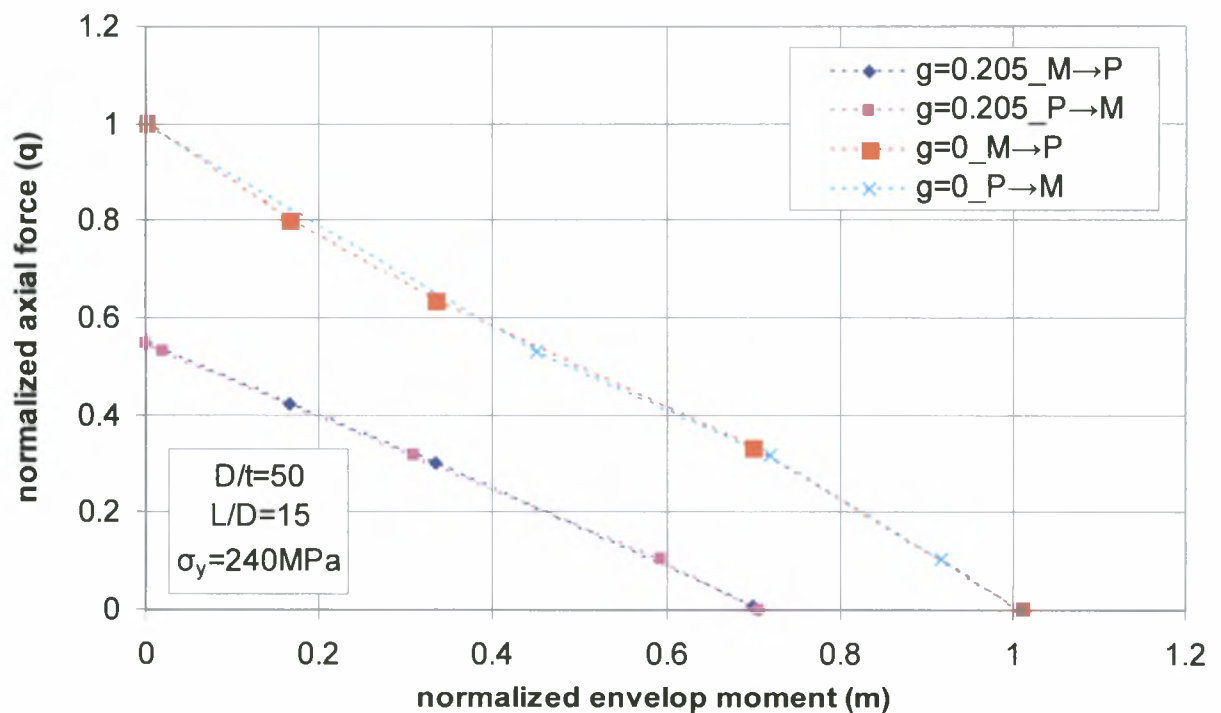


Σχήμα 4.6.8 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q), για κυλινδρικό κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια



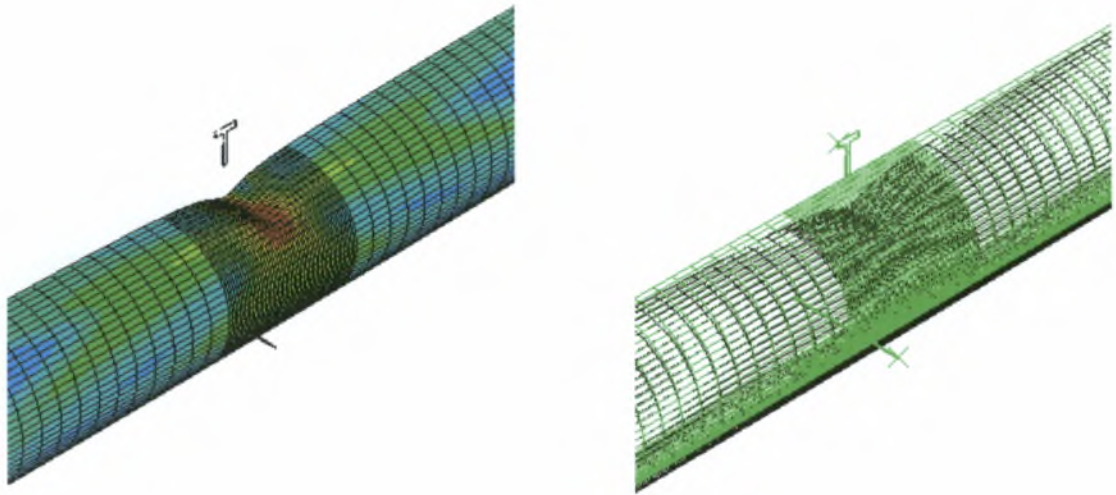
Σχήμα 4.6.9 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q), για κυλινδρικό κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0.205$)

Στο παρακάτω σχήμα 4.6.10 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για τις δύο παραπάνω αλληλουχίες φόρτισης ($M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$) για κέλυφος με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα τα οριακά φορτία αστοχίας του κελύφους με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του σχεδόν συμπίπτουν πράγμα το οποίο σημαίνει πως η αλληλουχία της φόρτισης δεν επηρεάζει σημαντικά την οριακή αντοχή του κελύφους. Θα πρέπει να σημειωθεί πως για την περίπτωση που επιβάλλεται μόνο θλιπτικό αξονικό φορτίο, ως φορτίο αστοχίας του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους έχει θεωρηθεί εκείνο το φορτίο που αντιστοιχεί στο σημείο που η κλίση της καμπύλης (ακαμψία του κελύφους) αλλάζει απότομα για πρώτη φορά.

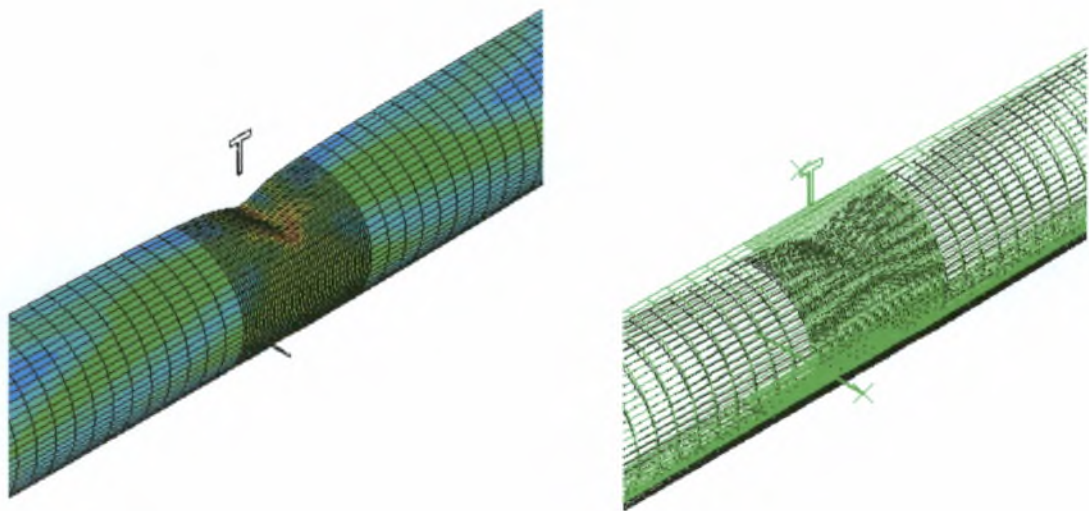


Σχήμα 4.6.10 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης $M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$ για κυλινδρικά κελύφη χωρίς και με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0$ και $g=0.205$)

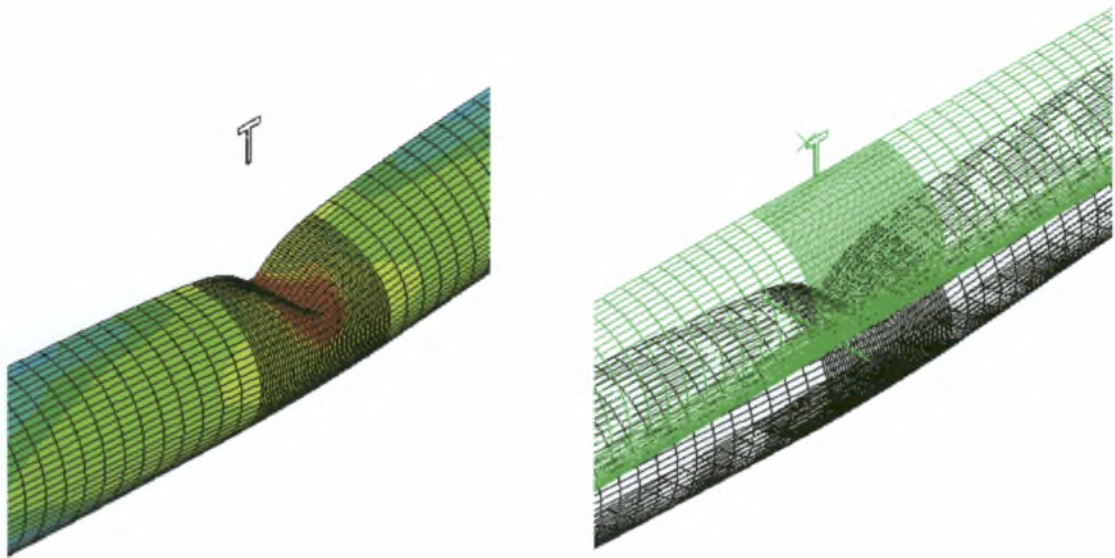
Στα σχήματα 4.6.11.α-γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατανομή των τάσεων κατά Von Mises και την παραμορφωμένη κατάσταση σε όλα τα βήματα (Step1-2, Step3 και Step4) της ανάλυσης για κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του $g=0.205$ στο οποίο αρχικά εφαρμόζεται θλιπτικό αξονικό φορτίο και στην συνέχεια καμπτικό φορτίο.



Σχήμα 4.6.11.α Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους αμέσως μετά την δημιουργία τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.205$ (Step1-2) και πριν την επιβολή θλιπτικού αξονικού φορτίου (Step3)



Σχήμα 4.6.11.β Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής ατέλειας $g=0.205$ κατά την εφαρμογή του θλιπτικού αξονικού φορτίου (Step3)



Σχήμα 4.6.11.γ Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής ατέλειας $g=0.205$ λίγο μετά την αστοχία του κατά την επιβολή καμπτικού φορτίου (Step4)

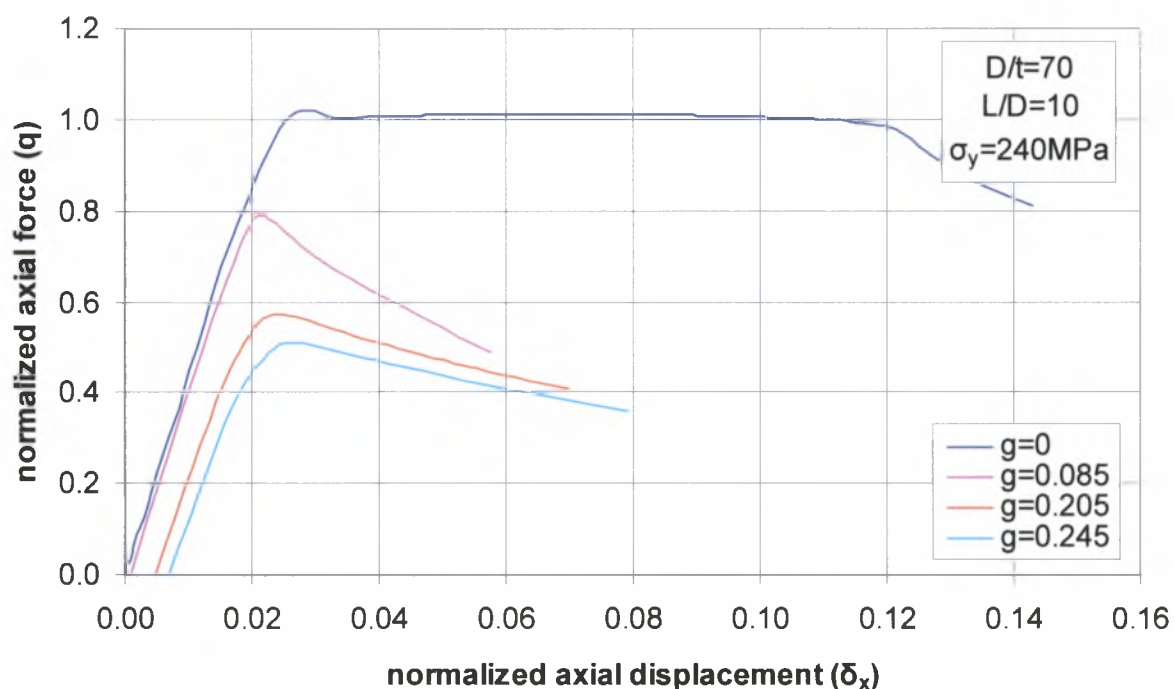
4.7 Αποτελέσματα για $D/t=70$ και $L/D=10$

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυλινδρικού κελύφους του οποίου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρούσα παράγραφο είναι τα εξής :

- Μέση διάμετρος του σωλήνα : $D=700mm$
- Πάχος του σωλήνα : $t=10mm$
- Μήκος του σωλήνα : $L=7000mm$
- Μέση ακτίνα σωλήνα : $R=350mm$
- Τάση διαρροής : $\sigma_y=240mm$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0.3$

Στο διάγραμμα του σχήματος 4.7.1 φαίνεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου, σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματος του. Παρατηρώντας την γενική συμπεριφορά του κελύφους κατά την εφαρμογή του αξονικού φορτίου είναι φανερό πως ανεξάρτητα από το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας η ακαμψία της κατασκευής (κλίση της καμπύλης) μειώνεται παραμένοντας θετική μέχρι μιας ορισμένης τιμής του επιβαλλόμενου φορτίου P (P_{max} ή q_{max}). Αυτό σημαίνει πως μέχρι αυτό το σημείο το κέλυφος μπορεί να “αναλάβει” περαιτέρω φορτίο παραμορφούμενο περισσότερο. Στο σημείο με $P = P_{max}$ (οριακό/κρίσιμο φορτίο αστοχίας) η ακαμψία της κατασκευής μηδενίζεται και η επιβολή φορτίου πέρα από την τιμή αυτή οδηγεί σε αστοχία του κελύφους. Επίσης παρατηρείται πως η οριακή αντοχή του κελύφους κατά την επιβολή σε αυτό θλιπτικού αξονικού φορτίου μειώνεται καθώς αυξάνει το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματός του. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την αύξηση του βάθους της αρχικής τοπικής ατέλειας μειώνεται η ακαμψία του σωλήνα. Το αρχικά απαρμόρφωτο κέλυφος των αναλογιών που εξετάζεται στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από τα κελύφη που εξετάστηκαν πιο πριν για τις παραπάνω συνθήκες φόρτισης. Παρατηρείται πως το κέλυφος αστοχεί και πάλι στο σημείο που η ακαμψία παρουσιάζει πρώτη φορά απότομη μεταβολή, αλλά με την διαφορά ότι από το σημείο αυτό και έπειτα δεν είναι δυνατή σε αυτό η επιβολή μεγαλύτερων φορτίων από το φορτίο της αστοχίας. Παρόλα αυτά η ακαμψία του εν λόγω κελύφους μετά την αστοχία του μειώνεται σταδιακά σε αντίθεση με ότι συμβαίνει για τα κελύφη των ίδιων αναλογιών με τοπική αρχική ατέλεια. Τέλος το φορτίο αστοχίας q_{max} (P_{max}/P_p) του αρχικά απαρμόρφωτου κελύφους έχει τιμή μεγαλύτερη της μονάδος πράγμα το

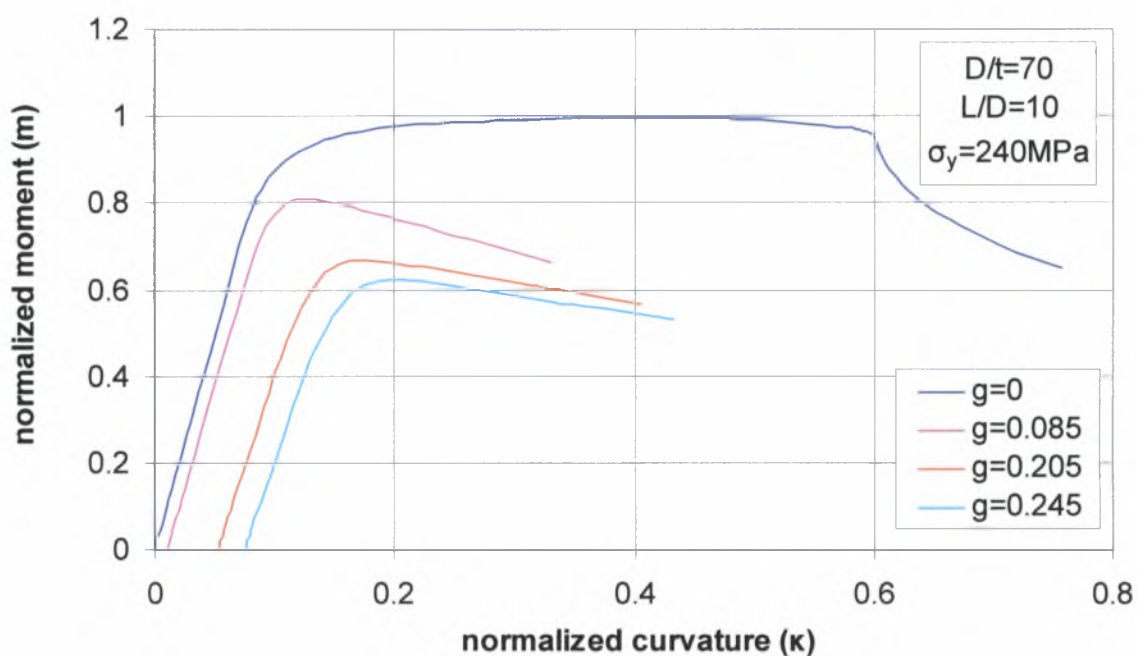
οποίο σημαίνει ότι ο σωλήνας ξεπερνάει το οριακό φορτίο αστοχίας αφού πρώτα πλαστικοποιηθεί η διατομή στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο.



Σχήμα 4.7.1 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g)

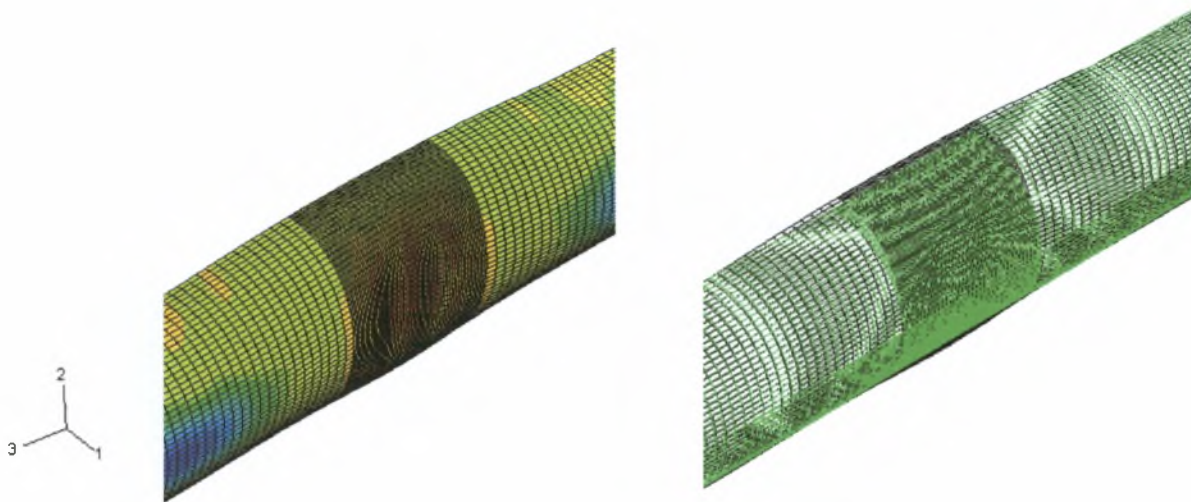
Στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 4.7.2) παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την εφαρμογή σε αυτό καμπτικού φορτίου σε σχέση με την μεταβολή του βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματος του. Αρχικά θα πρέπει να σημειωθεί πως για όλες τις τιμές του βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας η ακαμψία της κελύφους (κλίση της καμπύλης) μειώνεται παίρνοντας θετικές τιμές μέχρι μιας μέγιστης τιμής του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου m_{max} . Το κέλυφος σε αυτό το διάστημα είναι δυνατόν να υποβληθεί σε μεγαλύτερα φορτία και να παραμορφωθεί επιπλέον. Στο σημείο όμως με $m=m_{max}$ (οριακό φορτίο αστοχίας) η ακαμψία του σωλήνα μηδενίζεται και η περαιτέρω φόρτιση του κελύφους οδηγεί στην αστοχία του ενώ, η ακαμψία του παίρνει πλέον αρνητικές τιμές. Επίσης από την σύγκριση των καμπύλων φαίνεται πως η ακαμψία του σωλήνα μειώνεται καθώς αυξάνεται το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας, με αποτέλεσμα την μείωση του οριακού καμπτικού φορτίου αστοχίας. Τα κελύφη με τοπική αρχική ατέλεια παρουσιάζουν απότομη μετάβαση από την προλυγισμική στην μεταλυγισμική

κατάσταση σε αντίθεση με τον αρχικά απαραμόρφωτο σωλήνα του οποίου η ακαμψία μειώνεται σταδιακά πριν πάρει αρνητικές τιμές. Τέλος για πρώτη φορά παρατηρείται ότι στην περίπτωση επιβολής καμπτικού φορτίου το αρχικά απαραμόρφωτο κέλυφος αστοχεί για τιμή του λόγου m μικρότερη της μονάδος δηλαδή, ο σωλήνας αστοχεί χωρίς να απέλθει πλαστικοποίηση της διατομής του στην οποία επιβάλλεται το φορτίο.

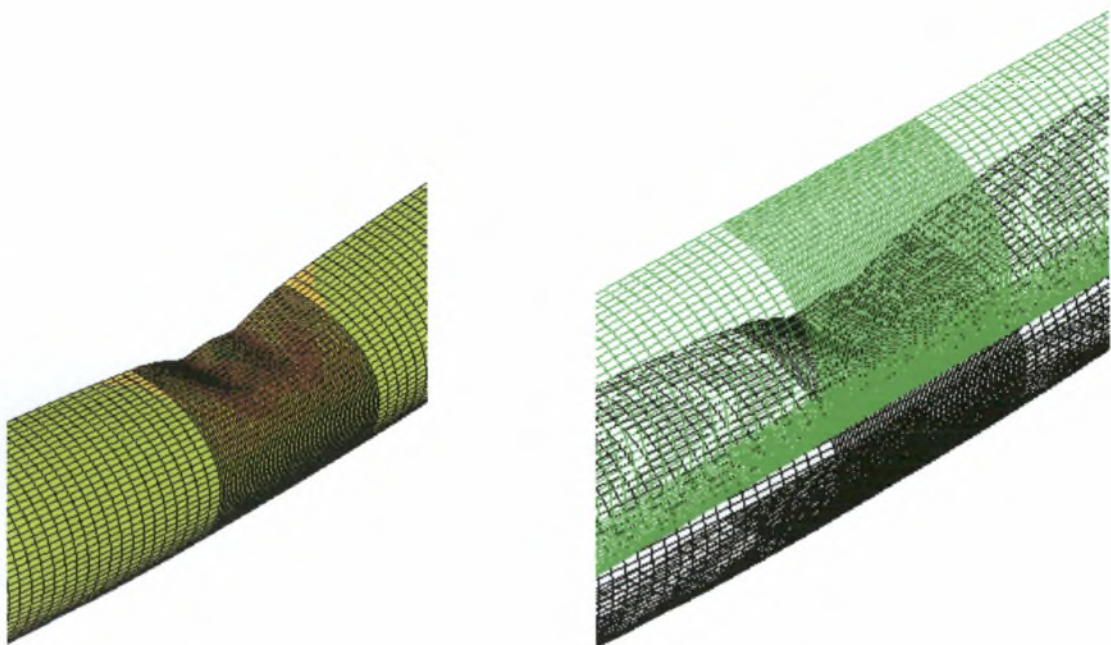


Σχήμα 4.7.2 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τέσσερα βάρη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g)

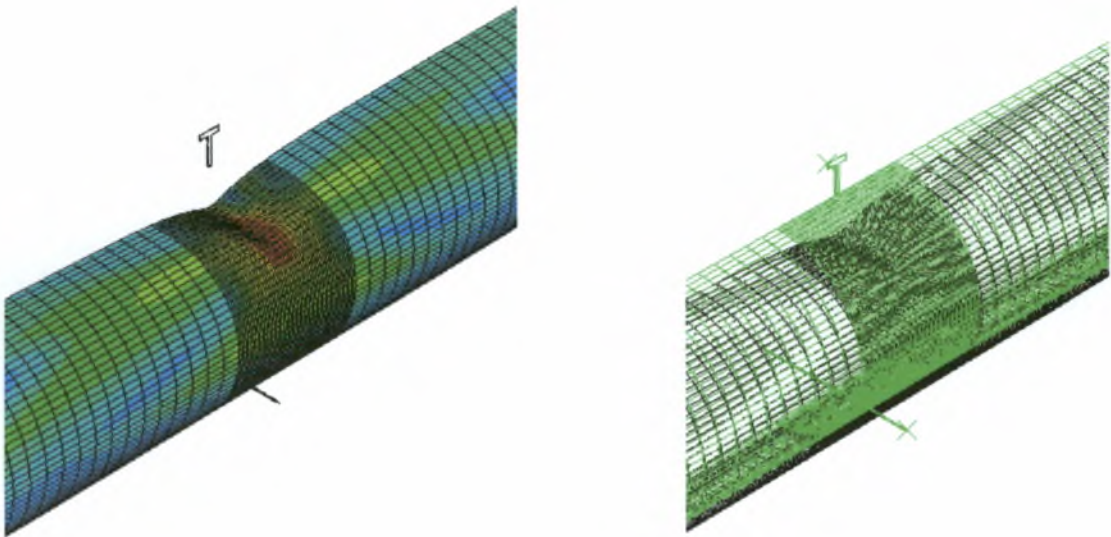
Στα σχήματα 4.7.3-4.7.5.α-γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατανομή των τάσεων κατά Von Mises και την παραμορφωμένη κατάσταση για κελύφη με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους πριν και μετά την αστοχία. Ενδιαφέρον έχει η μορφή αστοχίας στην περίπτωση όπου επιβάλλεται θλιπτικό αξονικό φορτίο στο σωλήνα χωρίς τοπική αρχική ατέλεια του οποίου η αστοχία επέρχεται στη μεσαία διατομή αλλά ως προς το επίπεδο των αξόνων 2-3 και όχι ως το 1-3 όπως συμβαίνει για όλους τα άλλα κελύφη.



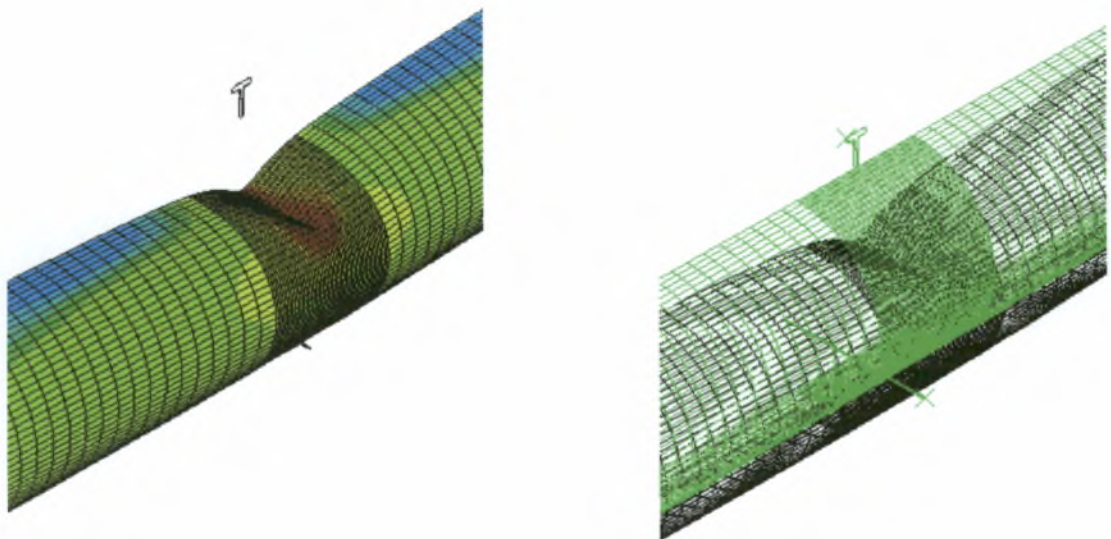
Σχήμα 4.7.3 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του που υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο



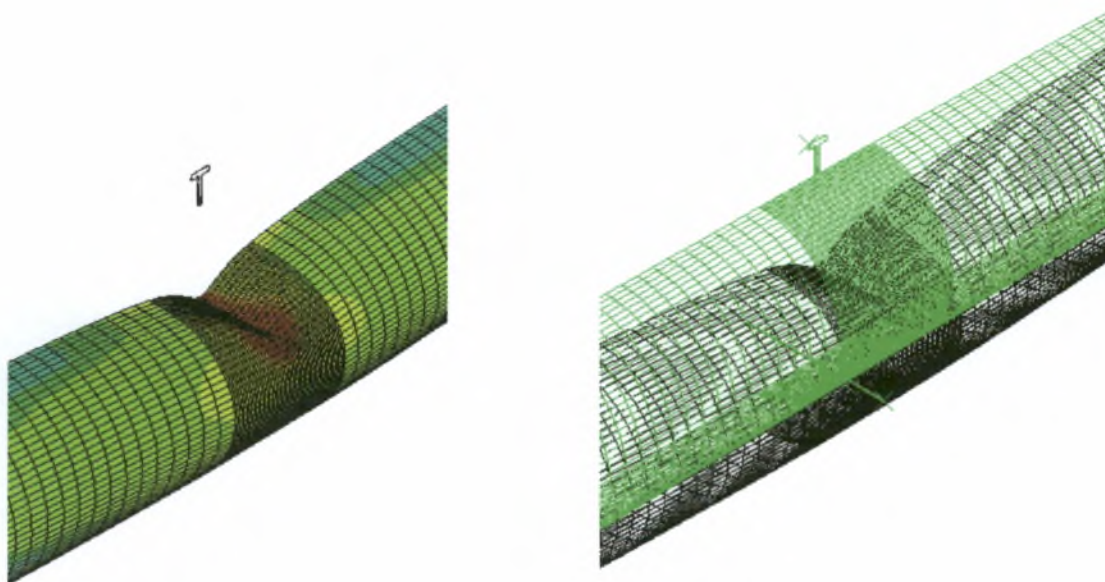
Σχήμα 4.7.4 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του που υποβάλλεται σε καμπτικό φορτίο



Σχήμα 4.7.5.α Παραμορφωμένη κατάσταση και Κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.205$ πριν την επιβολή θλιπτικού αξονικού /καμπτικού φορτίου

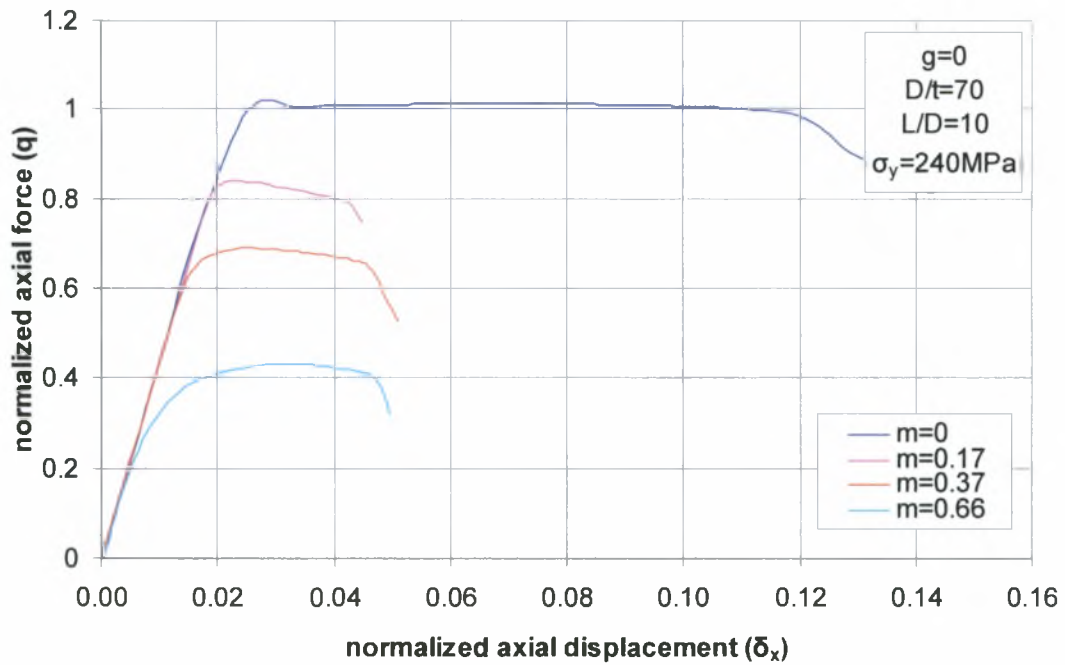


Σχήμα 4.7.5.β Παραμορφωμένη κατάσταση και Κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.205$ που υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο μετά την αστοχία του

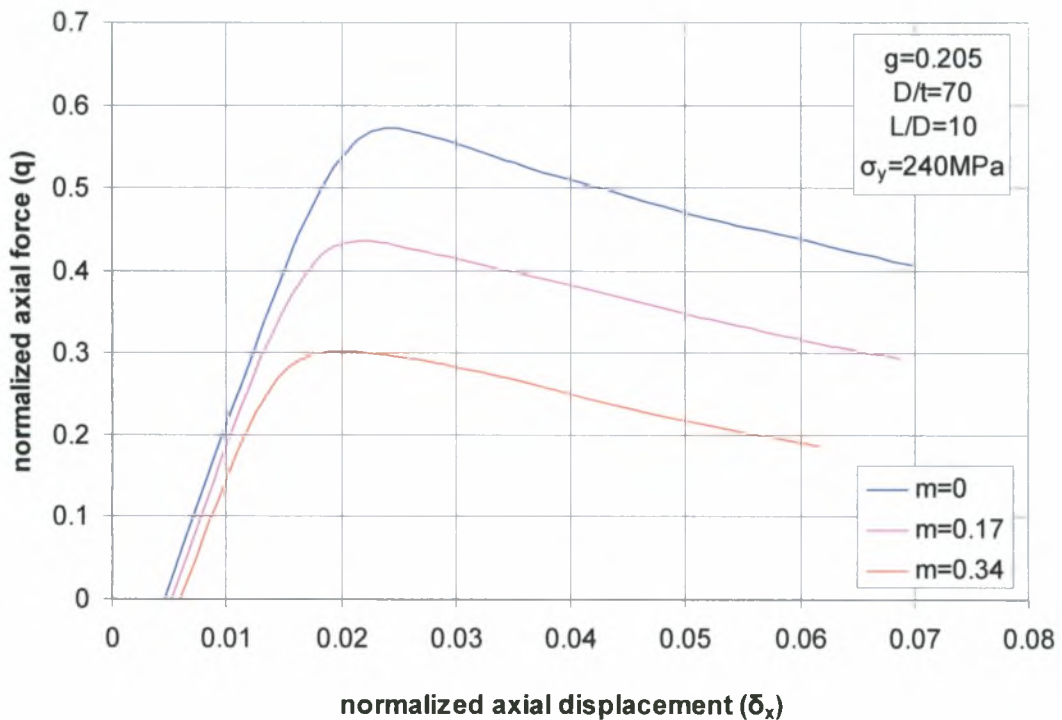


Σχήμα 4.7.5.γ Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.205$ που υποβάλλεται σε καμπτικό φορτίο μετά την αστοχία του

Στα διαγράμματα που ακολουθούν (σχήματα 4.7.6-7) παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την επιβολή θλιπτικού αξονικού φορτίου στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης σε σχέση με την μεταβολή του μεγέθους του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης για κέλυφος με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του ($M \rightarrow P$). Από τις καμπύλες των διαγραμμάτων φαίνεται πως και στην παρούσα ανάλυση η οριακή αντοχή σε θλιπτικό αξονικό φορτίο του κελύφους με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια μειώνεται με την αύξηση της τιμής του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιβολή καμπτικού φορτίου πριν την εφαρμογή του αξονικού φορτίου μειώνει την ακαμψία του σωλήνα (κλίση των καμπύλων). Επίσης παρατηρείται πως για την περίπτωση του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους όταν σε αυτό επιβάλλεται και καμπτικό φορτίο και αξονικό φορτίο η μετάβασή του από την κατάσταση προ-αστοχίας στην κατάσταση μετά-αστοχίας είναι πιο ομαλή σε σχέση την περίπτωση κελύφους με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του. Τα αποτελέσματα για g ίσο με 0.205 και για m 0.66 παραλείπονται διότι ο λόγος q παίρνει πολύ μικρές τιμές για αυτές τις συνθήκες φόρτισης.

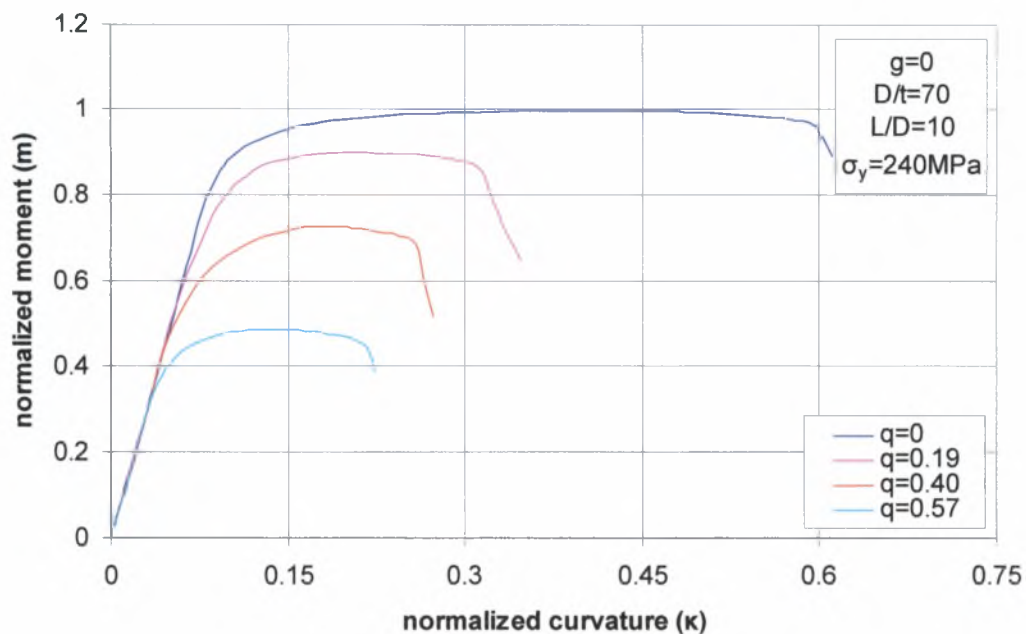


Σχήμα 4.5.6 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) για κυλινδρικό κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια

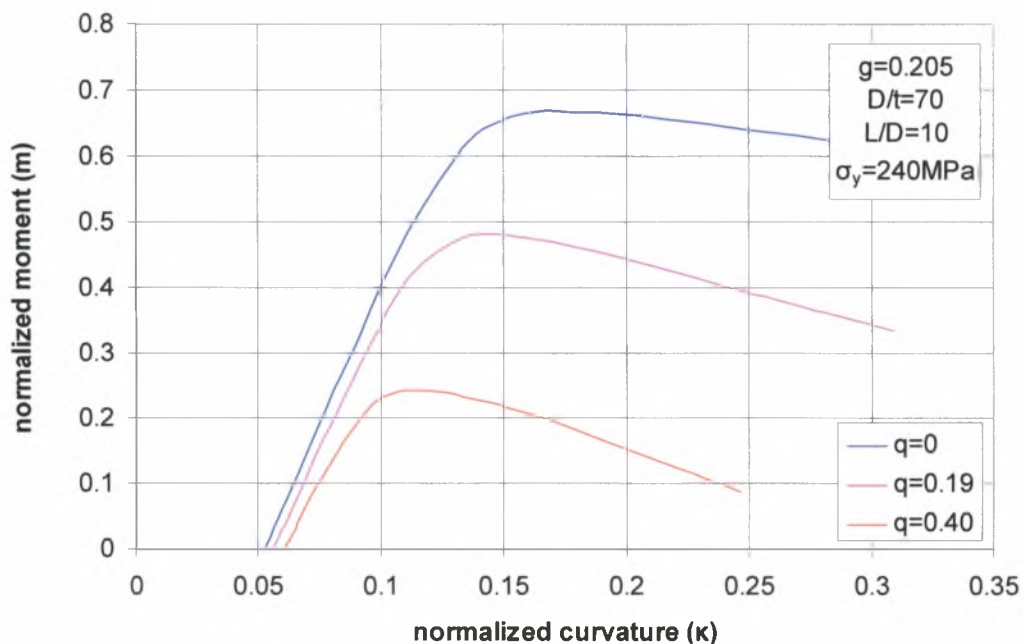


Σχήμα 4.7.7 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) για κυλινδρικό κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0.205$)

Στα διαγράμματα των σχημάτων 4.7.8-9 παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την επιβολή καμπτικού φορτίου στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης σε σχέση με την μεταβολή του μεγέθους του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης για κέλυφος με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του ($P \rightarrow M$). Από τα διαγράμματα γίνεται φανερό ότι με την αύξηση του λόγου q μειώνεται το μέγιστο καμπτικό φορτίο m_{max} στο οποίο επέρχεται η αστοχία του κελύφους με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια. Αυτό οφείλεται στο ότι με την αύξηση του μεγέθους του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου μειώνεται η ακαμψία του σωλήνα (κλίση των καμπύλων). Επίσης παρατηρείται πως για την περίπτωση του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους η μετάβαση από κατάσταση πριν την αστοχία στην κατάσταση μετά την αστοχία είναι πιο ομαλή σε σχέση την περίπτωση του κελύφους με τοπική αρχική ατέλεια. Το φαινόμενο είναι πιο έντονο όταν στο κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια εφαρμόζεται μόνο καμπτικό φορτίο. Τα αποτελέσματα για $g=0.205$ και $q=0.57$ παραλείπονται διότι το m_{max} παίρνει πολύ μικρές τιμές για αυτές τις συνθήκες φόρτισης.

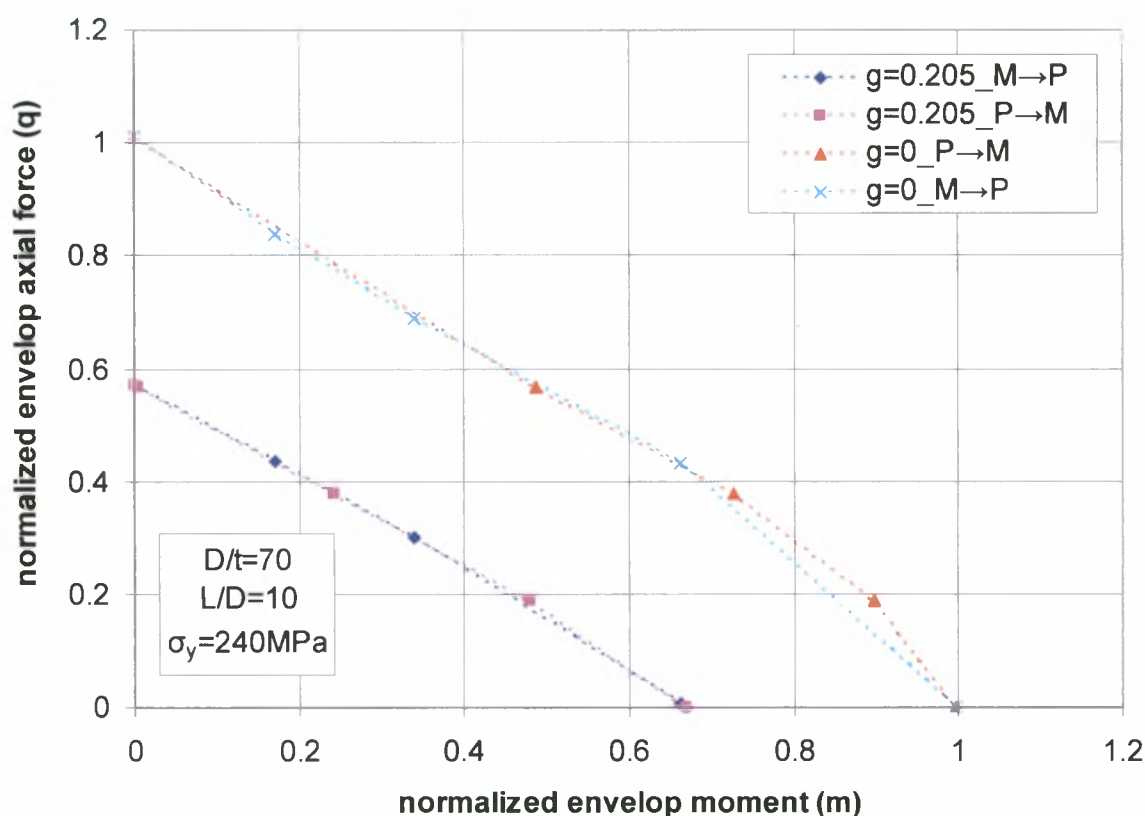


Σχήμα 4.7.8 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q), για κυλινδρικό κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια



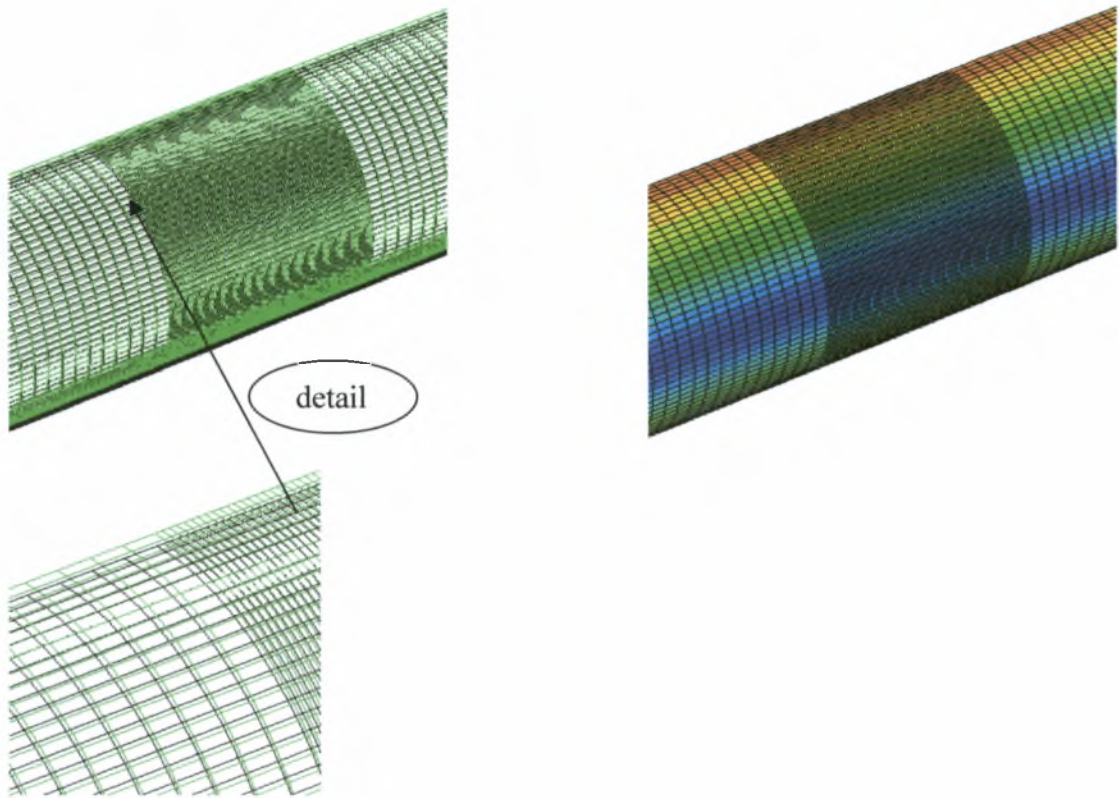
Σχήμα 4.7.9 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q), για κυλινδρικό κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια (g=0.205)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για τις δύο παραπάνω αλληλουχίες φόρτισης ($M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$) για κέλυφος με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα τα οριακά φορτία αστοχίας του κελύφους που φέρει τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του σχεδόν συμπίπτουν πράγμα το οποίο σημαίνει πως η αλληλουχία της φόρτισης δεν επηρεάζει σημαντικά την οριακή αντοχή του κελύφους. Για την περίπτωση όμως σωλήνα χωρίς τοπική αρχική ατέλεια υπάρχει ένα εύρος τιμών των λόγων P/P_p και M/M_p στο οποίο τα κρίσιμα φορτία αστοχίας του κελύφους παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη απόκλιση.

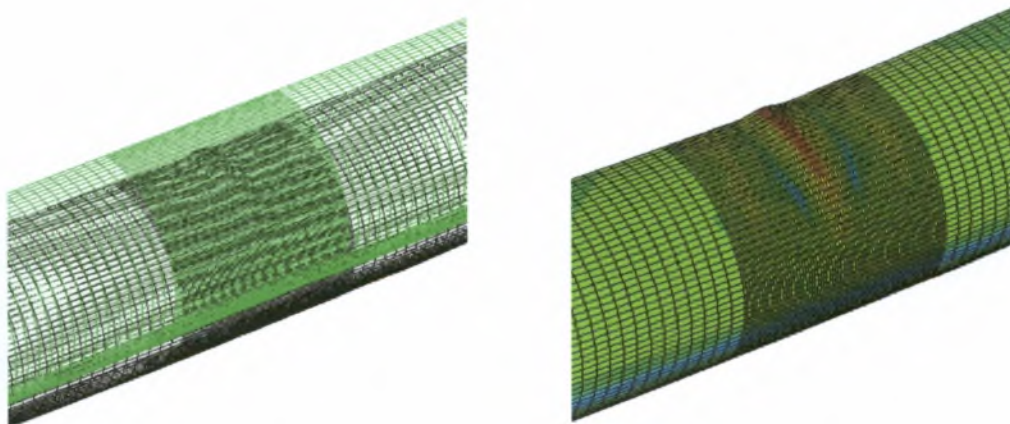


Σχήμα 4.7.10 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης $M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$ για κυλινδρικά κέλυφη χωρίς και με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0$ και $g=0.205$)

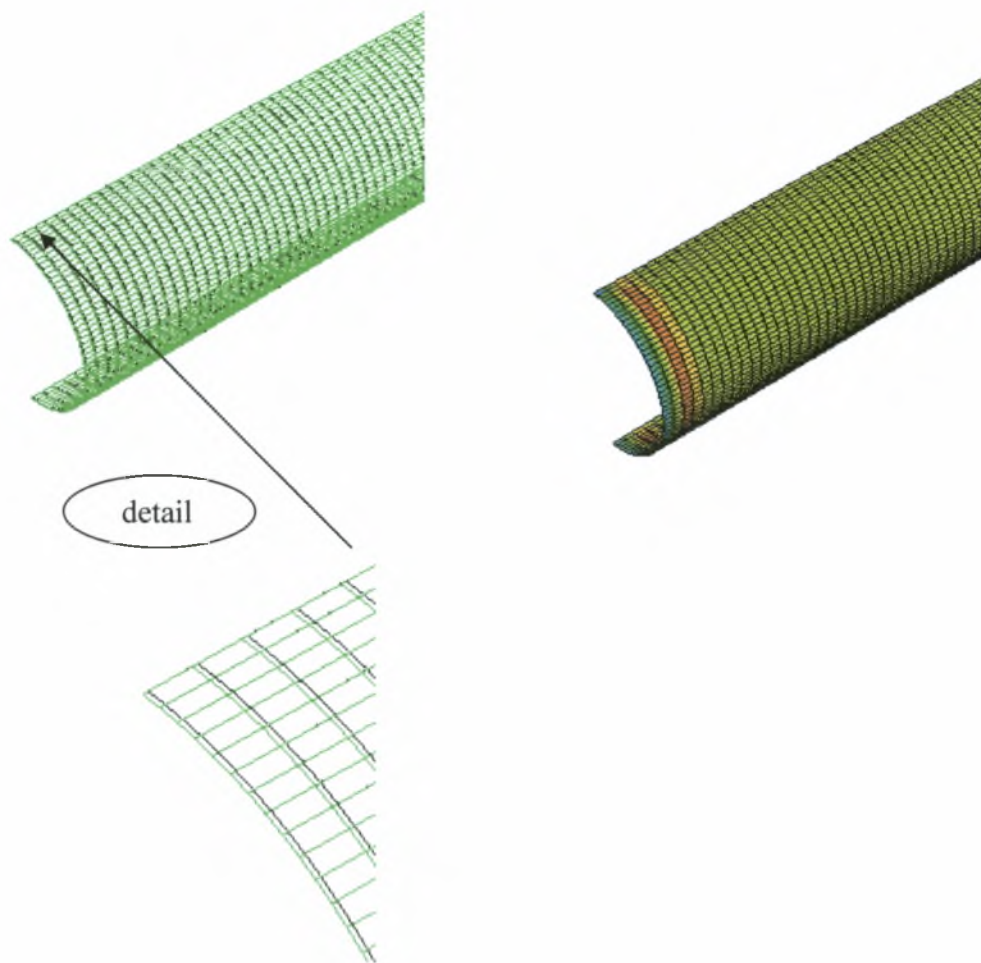
Στα σχήματα 4.7.11.α-β και 4.7.12.α-β παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατανομή των τάσεων κατά Von Mises την παραμορφωμένη κατάσταση σε όλα τα βήματα της ανάλυσης (Step1, Step2) για το κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του και για τις δύο αλληλουχίες φόρτισης $M \rightarrow P$, $P \rightarrow M$ όταν $m=0.66$ και $q=0.57$ αντίστοιχα.



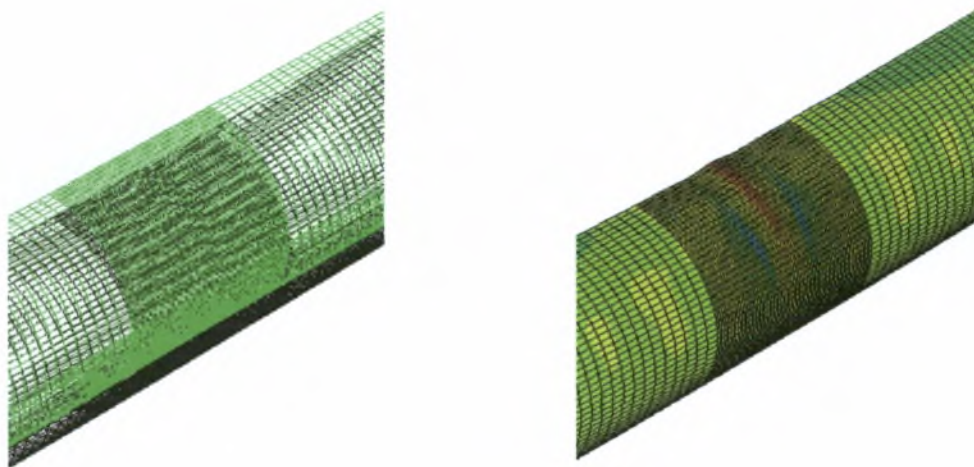
Σχήμα 4.7.11.α. Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια αμέσως μετά την εφαρμογή του καμπτικού φορτίου (Step1)



Σχήμα 4.7.11.β Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια μετά την αστοχία του κατά την εφαρμογή θλιπτικού αξονικού φορτίου (Step2)



Σχήμα 4.7.12.α Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια αμέσως μετά την εφαρμογή του θλιπτικού αξονικού φορτίου (Step1)



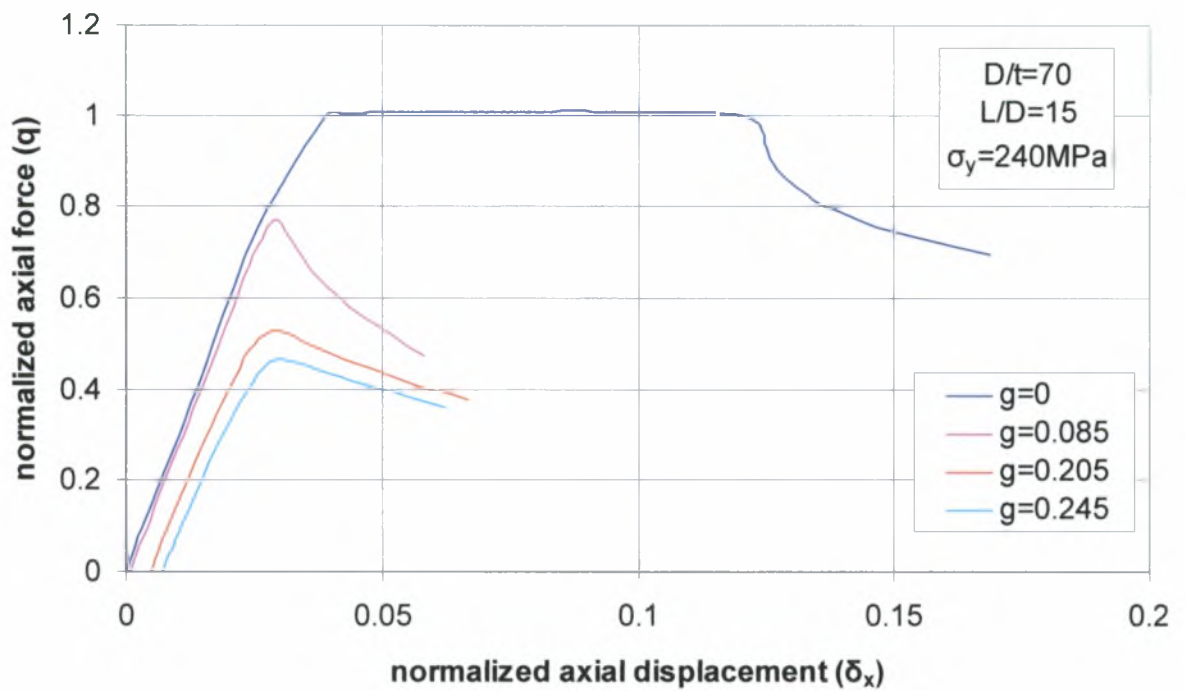
Σχήμα 4.7.12.β Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια μετά την αστοχία του κατά την εφαρμογή καμπτικού φορτίου (Step2)

4.8 Αποτελέσματα για $D/t=70$ και $L/D=15$

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυλινδρικού κελύφους του οποίου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρούσα παράγραφο είναι τα εξής :

- Μέση διάμετρος του σωλήνα : $D=700mm$
- Πάχος του σωλήνα : $t=10mm$
- Μήκος του σωλήνα : $L=10500mm$
- Μέση ακτίνα σωλήνα : $R=350mm$
- Τάση διαρροής : $\sigma_y=240mm$
- Λόγος Poisson : $\nu = 0.3$

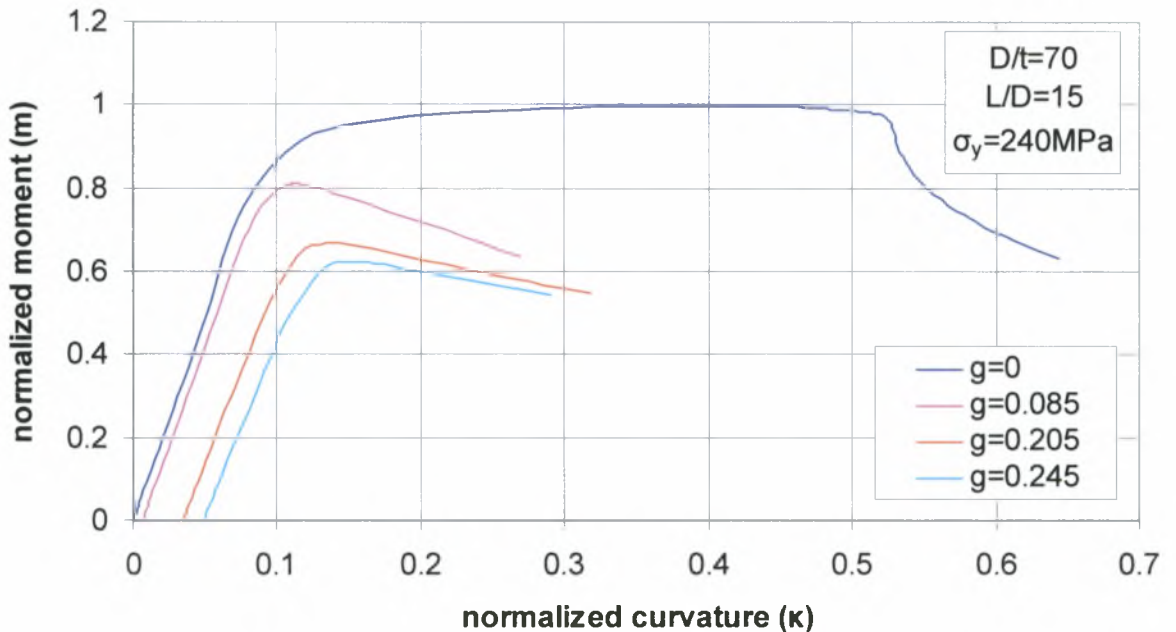
Στο διάγραμμα του σχήματος 4.8.1 φαίνεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου, σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματος του. Αρχικά θα πρέπει να σημειωθεί πως για όλες τις τιμές του βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας η ακαμψία του κελύφους (κλίση της καμπύλης) μειώνεται παραμένοντας θετική μέχρι μια τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου P (P_{max} ή q_{max}). Σε αυτό το διάστημα ο σωλήνας μπορεί να αναλάβει περαιτέρω φορτίο παραμορφούμενος περισσότερο. Στο σημείο όπου το $P=P_{max}$ (οριακό/κρίσιμο φορτίο αστοχίας) η ακαμψία του κελύφους μηδενίζεται και η περαιτέρω φόρτισή του έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία του. Όσον αφορά στην ύπαρξη τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμα του κελύφους παρατηρείται πως και σε αυτή την περίπτωση η αύξηση του βάθους της επιφέρει μείωση της οριακής αντοχής του κελύφους με αποτέλεσμα την αστοχία του σε μικρότερα κρίσιμα φορτία q_{max} . Το οριακό φορτίο αστοχίας του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους μπορεί να θεωρηθεί ως η τιμή του λόγου q που αντιστοιχεί στο σημείο εκείνο που ακαμψία του κελύφους παρουσιάζει πρώτη φορά απότομη μεταβολή. Παρόλα αυτά όπως φαίνεται στο διάγραμμα μετά την αστοχία η ακαμψία του κελύφους εξακολουθεί να είναι θετική ενώ ο λόγος q αυξάνει, πράγμα το οποίο σημαίνει πως το κέλυφος είναι δυνατόν να παραλάβει επιπλέον φορτίο μεγαλύτερο από το θεωρούμενο φορτίο αστοχίας, προτού η ακαμψία του πάρει αρνητικές τιμές. Επίσης παρατηρείται ότι το φορτίο αστοχίας q_{max} του εν λόγω κελύφους είναι μεγαλύτερο της μονάδος, πράγμα το οποίο σημαίνει ο σωλήνας αστοχεί αφού πρώτα πλαστικοποιηθεί η διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο.



Σχήμα 4.8.1 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g)

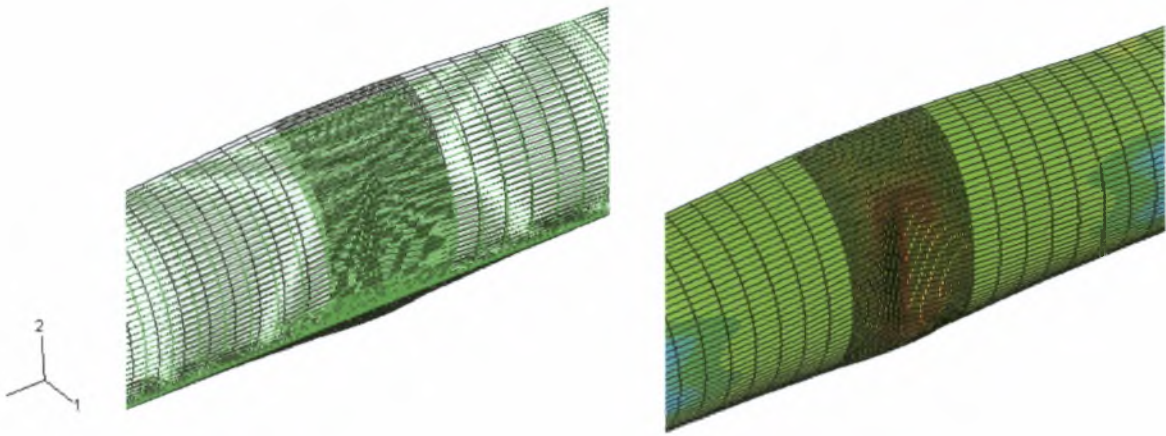
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την εφαρμογή σε αυτό καμπτικού φορτίου σε σχέση με την μεταβολή του βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας του τοιχώματός του. Από μια γενική παρατήρηση των καμπύλων φαίνεται πως ανεξάρτητα από το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας η ακαμψία του κελύφους (κλίση της καμπύλης) μειώνεται παραμένοντας θετική μέχρι μια ορισμένη τιμή του λόγου m (m_{max}). Στο διάστημα αυτό είναι δυνατή η επιβολή στο κέλυφος μεγαλύτερων φορτίων παραμορφώνοντας το επιπλέον. Στο σημείο όπου ο λόγος m παίρνει τη μέγιστη τιμή του m_{max} (οριακό φορτίο αστοχίας) η ακαμψία της κατασκευής μηδενίζεται ενώ, για περαιτέρω φόρτιση του κελύφους παίρνει αρνητικές τιμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση του σωλήνα και τελικά την αστοχία του. Όσον αφορά την ύπαρξη τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμα του κελύφους από την σύγκριση των καμπύλων φαίνεται πως η ακαμψία του σωλήνα μειώνεται καθώς αυξάνεται το βάθος της τοπικής ατέλειας, με αποτέλεσμα την μείωση του κρίσιμου καμπτικού φορτίου αστοχίας (m_{max}). Όμοια με προηγουμένως τα κελύφη με αρχική τοπική ατέλεια παρουσιάζουν απότομη μετάβαση από την προλυγισμική κατάσταση στην

μεταλυστική κατάσταση, σε αντίθεση με τον αρχικά απαραμόρφωτο σωλήνα του οποίου η ακαμψία μειώνεται σταδιακά πριν πάρει αρνητικές τιμές. Τέλος παρατηρείται πως το κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια αστοχεί για τιμή του λόγου m μικρότερη της μονάδας δηλαδή, η αστοχία επέρχεται χωρίς την πλαστικοποίηση της διατομής του στην οποία επιβάλλεται το φορτίο.

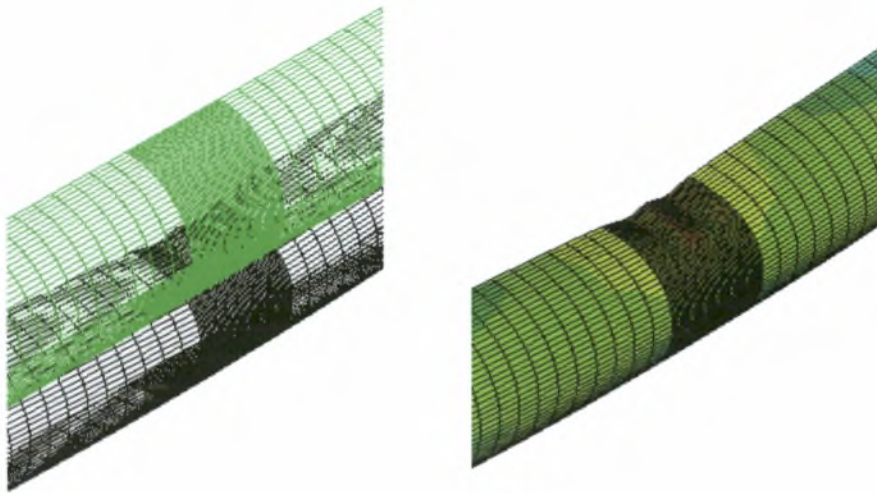


Σχήμα 4.8.2 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g)

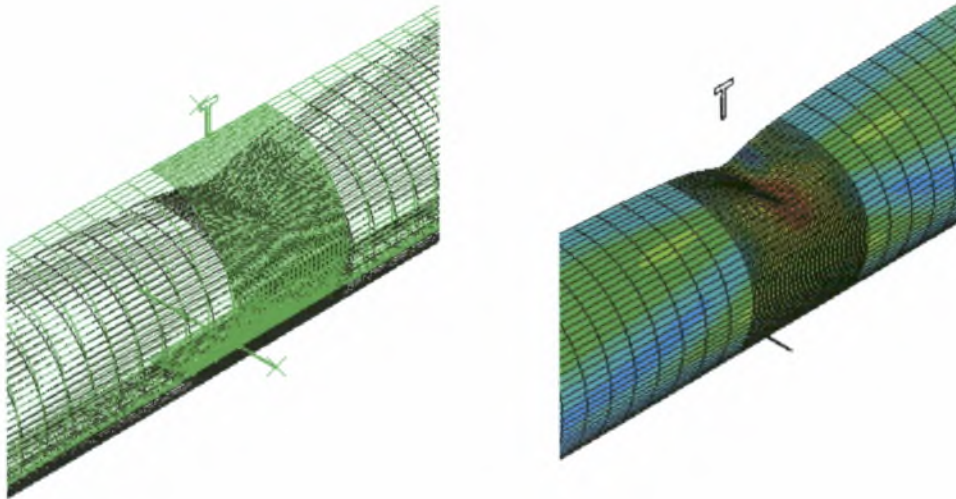
Στα σχήματα 4.8.3-4.8.5.α-γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατανομή των τάσεων κατά Von Mises και την παραμορφωμένη κατάσταση σε σχέση με την αρχική κατάσταση κελυφών με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους πριν και μετά την αστοχία. Ενδιαφέρον έχει η μορφή αστοχίας στην περίπτωση όπου επιβάλλεται θλιπτικό αξονικό φορτίο στο σωλήνα χωρίς τοπική αρχική ατέλεια του οποίου η αστοχία επέρχεται στη μεσαία διατομή αλλά ως προς το επίπεδο των αξόνων 2-3 και όχι ως το 1-3 όπως συμβαίνει για όλους τα άλλα κελύφη.



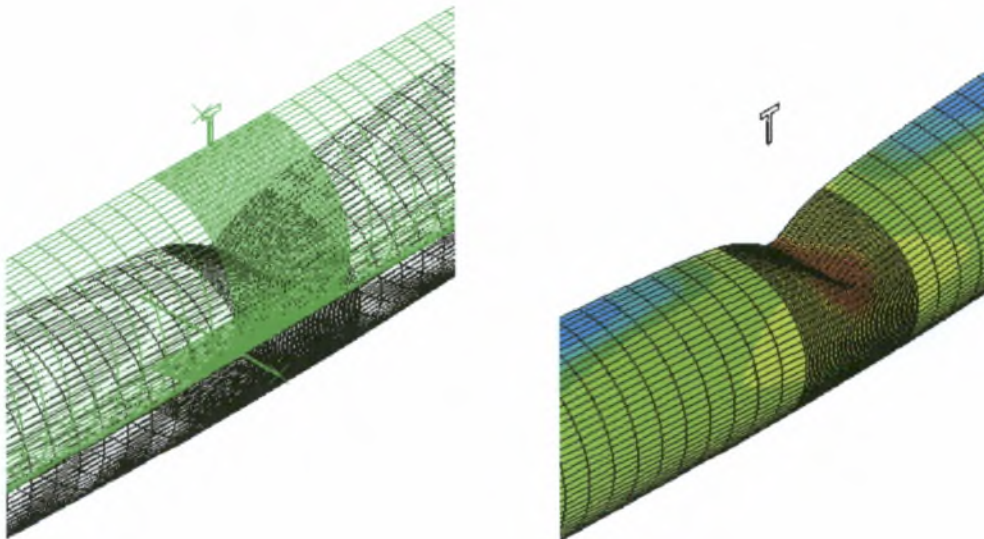
Σχήμα 4.8.3 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του που υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο



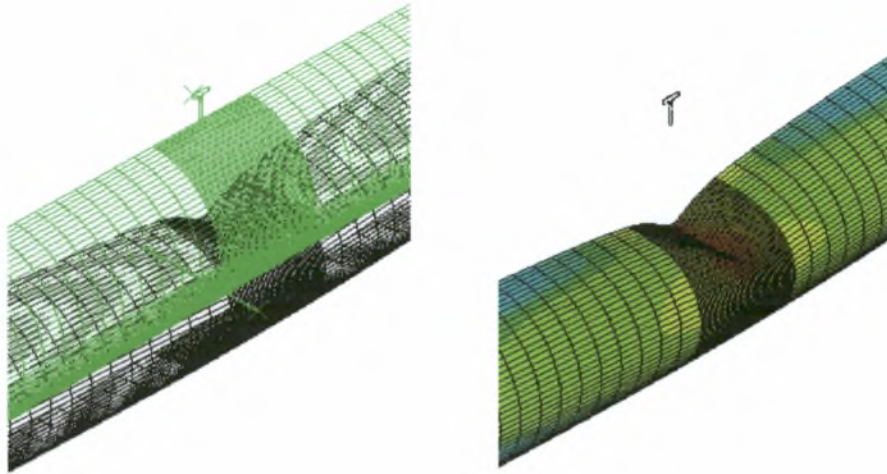
Σχήμα 4.8.4 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του που υποβάλλεται σε καμπτικό φορτίο



Σχήμα 4.8.5.α Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.205$ πριν την επιβολή θλιπτικού αξονικού /καμπτικού φορτίου

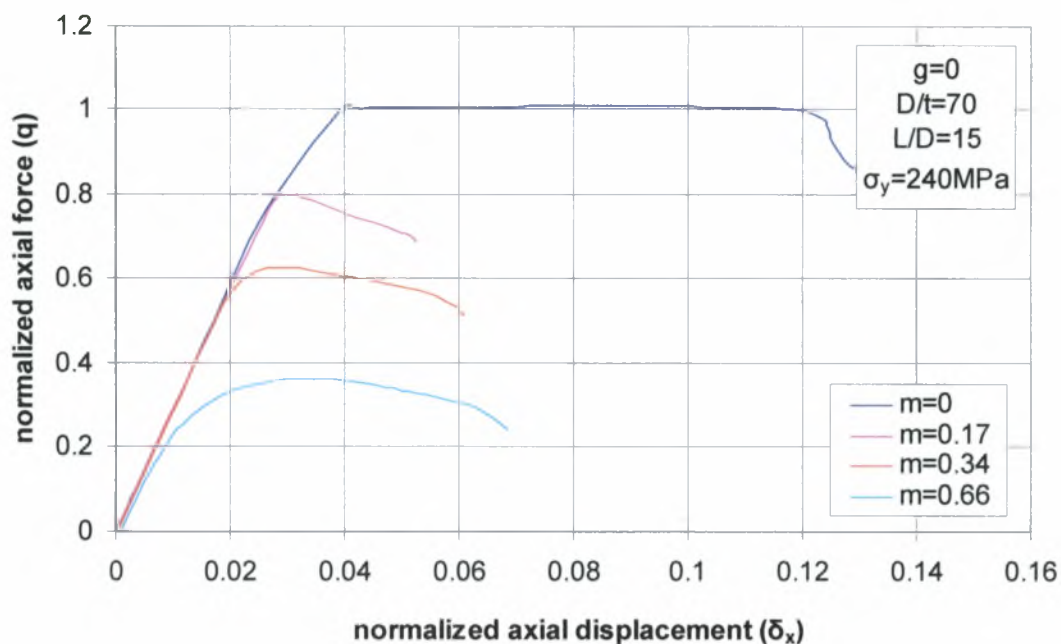


Σχήμα 4.8.5.β Παραμορφωμένη κατάσταση και Κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.205$ που υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο μετά την αστοχία του

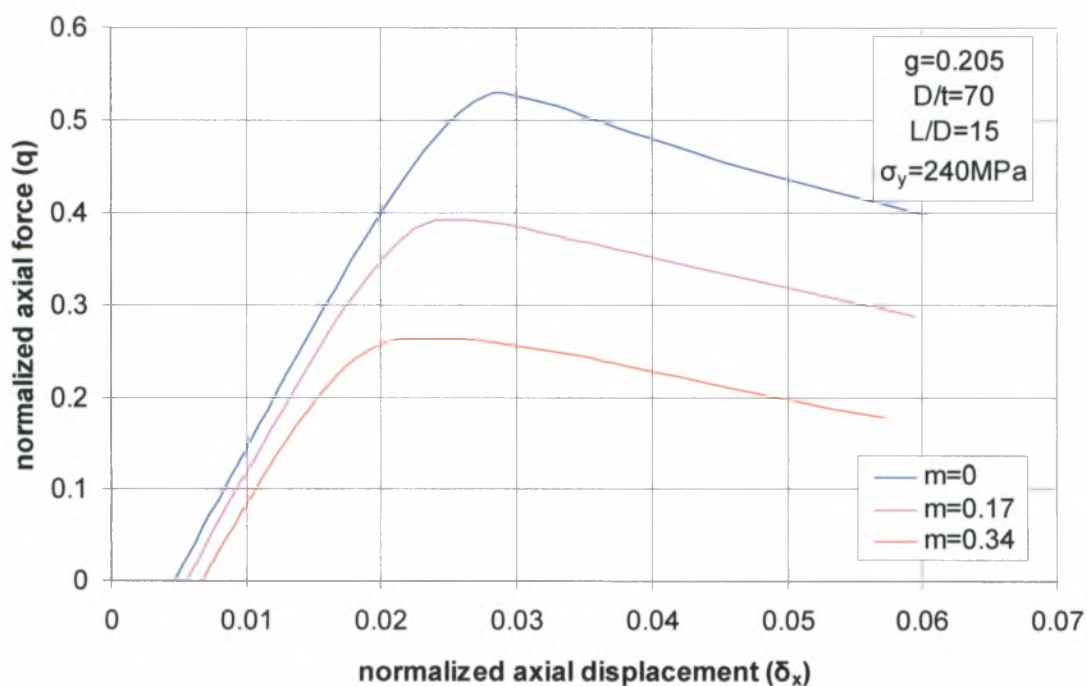


Σχήμα 4.8.5.γ Παραμορφωμένη κατάσταση και Κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας στο τοίχωμά του $g=0.205$ που υποβάλλεται σε καμπτικό φορτίο μετά την αστοχία του

Στα διαγράμματα που ακολουθούν σχήματα 4.8.6-7 παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την επιβολή θλιπτικού αξονικού φορτίου στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης σε σχέση με την μεταβολή του μεγέθους του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης για κέλυφος με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του ($M \rightarrow P$). Από την σύγκριση των καμπύλων φαίνεται πως η ακαμψία του κελύφους (κλίση των καμπύλων) με ή χωρίς αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του μειώνεται με την αύξηση της τιμής του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου, με αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής του και την αστοχία του σε μικρότερα αξονικά φορτία. Επίσης παρατηρείται πως για την περίπτωση κελύφους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια η μετάβαση από την κατάσταση πριν την αστοχία στην κατάσταση μετά την αστοχία είναι πιο ομαλή σε σχέση την περίπτωση του παραμορφωμένου αρχικά κελύφους. Το φαινόμενο είναι πιο έντονο όταν το αρχικά απαραμόρφωτο κέλυφος υποβάλλεται μόνο σε αξονικό φορτίο. Τα αποτελέσματα για $g=0.205$ και για $m=0.66$ παραλείπονται διότι ο λόγος q_{max} παίρνει πολύ μικρές τιμές για αυτές τις συνθήκες φόρτισης.

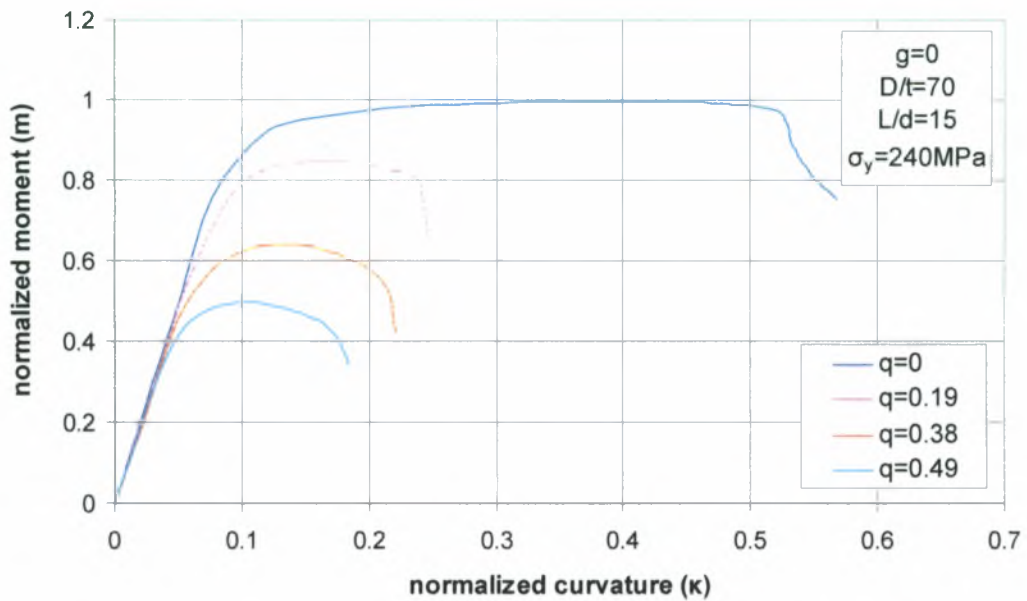


Σχήμα 4.8.6 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) για κυλινδρικό κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια

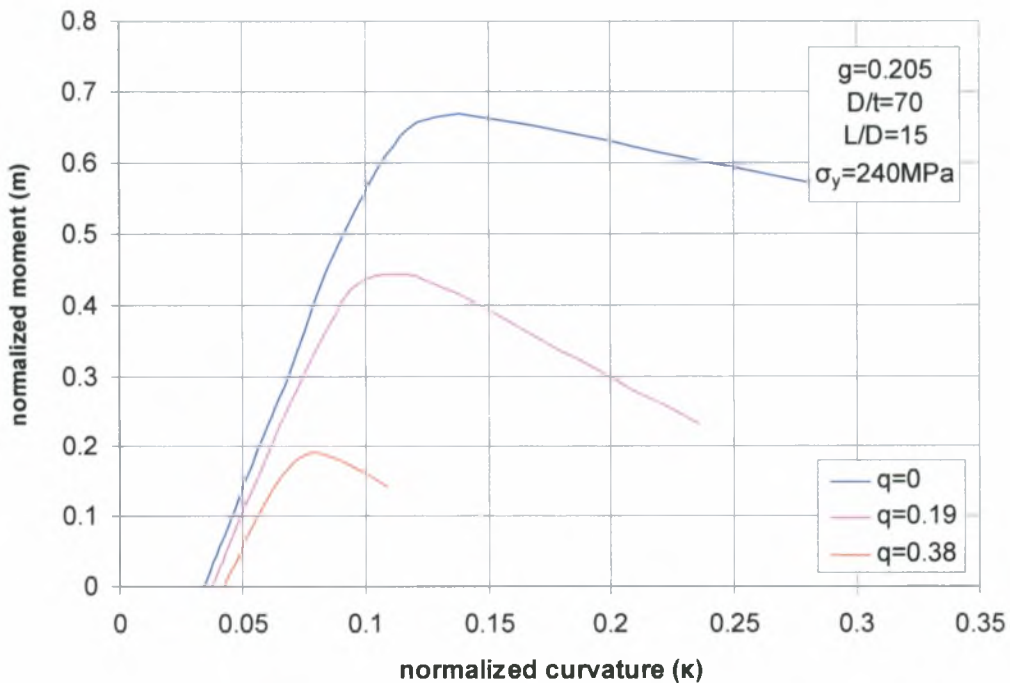


Σχήμα 4.8.7 Διάγραμμα θλιπτικού αξονικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση της ακραίας διατομής του κελύφους στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (δ_x) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) για κυλινδρικό κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0.205$)

Στα διαγράμματα των σχημάτων 4.8.8-9 παρουσιάζεται η μεταβολή της οριακής αντοχής του κελύφους κατά την επιβολή καμπτικού φορτίου στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης σε σχέση με την μεταβολή του μεγέθους του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου στο τρίτο βήμα της ανάλυσης για κέλυφος με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του ($P \rightarrow M$). Από τις καμπύλες των διαγραμμάτων φαίνεται πως και στην παρούσα ανάλυση η οριακή αντοχή σε καμπτικό φορτίο του κελύφους με ή χωρίς αρχική τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμα μειώνεται με την αύξηση της τιμής του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιβολή αξονικού φορτίου πριν την εφαρμογή του καμπτικού φορτίου μειώνει την ακαμψία του σωλήνα (κλίση των καμπύλων). Επίσης παρατηρείται πως για την περίπτωση του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους η μετάβαση από την κατάσταση πριν την αστοχία στην κατάσταση μετά την αστοχία είναι πιο ομαλή σε σχέση την περίπτωση κελύφους που φέρει τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του. Το φαινόμενο είναι πιο έντονο όταν στο αρχικά απαραμόρφωτο κέλυφος εφαρμόζεται μόνο καμπτικό φορτίο. Τα αποτελέσματα για $g=0.205$ και $q=0.49$ παραλείπονται διότι ο λόγος m_{max} παίρνει πολύ μικρές τιμές για αυτές τις συνθήκες φόρτισης.

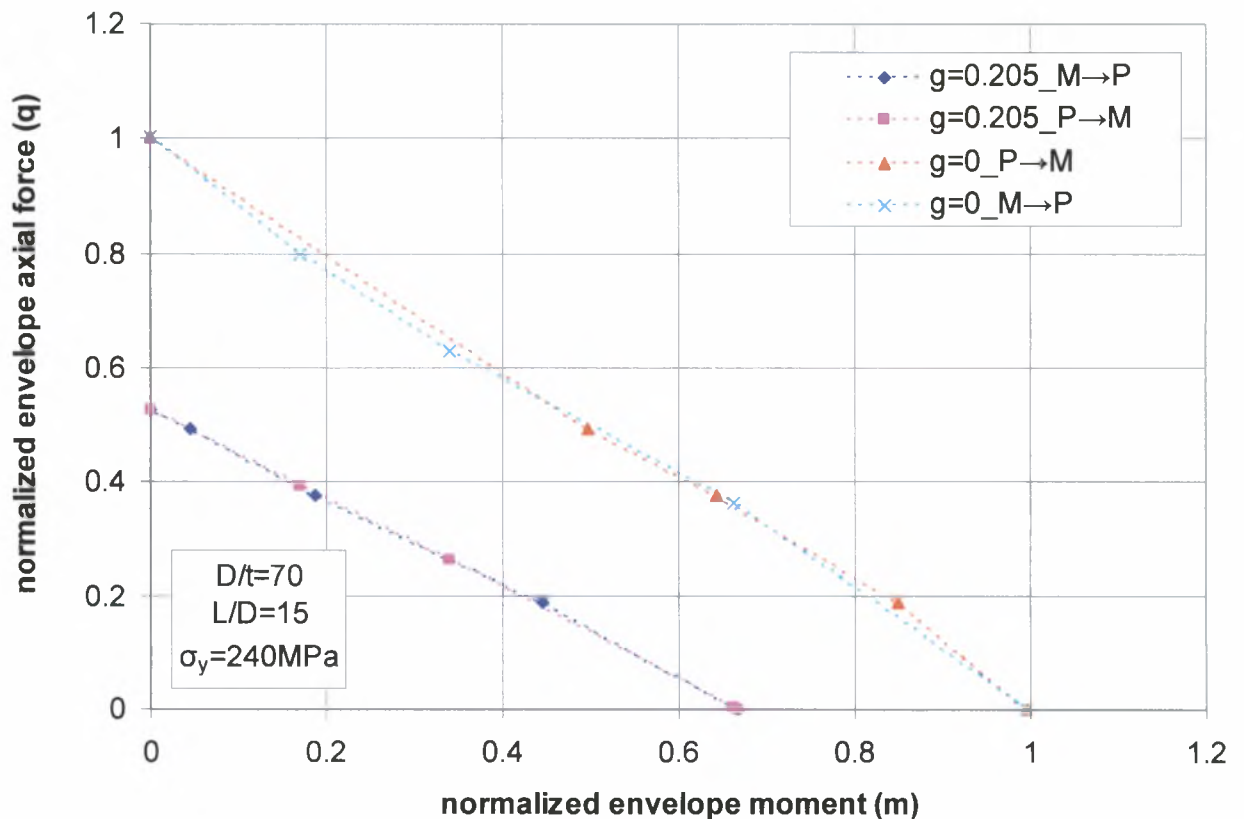


Σχήμα 4.8.8 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τέσσερα βάθη της τοπικής αρχικής ατέλειας (g) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικό φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q), για κυλινδρικό κέλυφος χωρίς τοπική αρχική ατέλεια



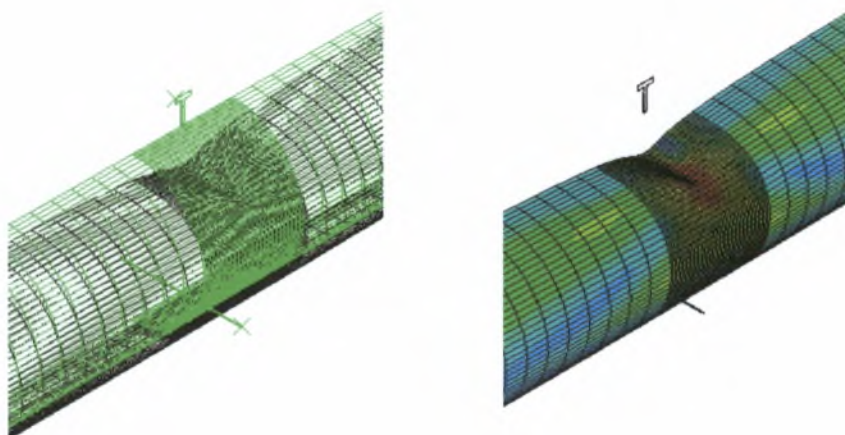
Σχήμα 4.8.9 Διάγραμμα καμπτικού φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (m) σε σχέση με την καμπυλότητα του κελύφους στην ακραία διατομή του στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο επίσης, σε κανονικοποιημένη μορφή (κ) για τρεις τιμές του επιβαλλόμενου θλιπτικού αξονικό φορτίου σε κανονικοποιημένη μορφή (q), για κυλινδρικό κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια (g=0.205)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για τις δύο παραπάνω αλληλουχίες φόρτισης ($M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$) για κελύφος με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα τα οριακά φορτία αστοχίας του κελύφους που φέρει τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του σχεδόν συμπίπτουν πράγμα το οποίο σημαίνει πως η αλληλουχία της φόρτισης δεν επηρεάζει σημαντικά την οριακή αντοχή του κελύφους. Για την περίπτωση όμως σωλήνα χωρίς τοπική αρχική ατέλεια υπάρχει ένα εύρος τιμών των λόγων P/P_p και M/M_p στο οποίο τα κρίσιμα φορτία αστοχίας του κελύφους παρουσιάζουν μια μικρή απόκλιση. Θα πρέπει να σημειωθεί πως για την περίπτωση που επιβάλλεται μόνο θλιπτικό αξονικό φορτίο, ως φορτίο αστοχίας του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους έχει θεωρηθεί εκείνο το φορτίο που αντιστοιχεί στο σημείο που η κλίση της καμπύλης (ακαμψία του κελύφους) αλλάζει απότομα για πρώτη φορά.

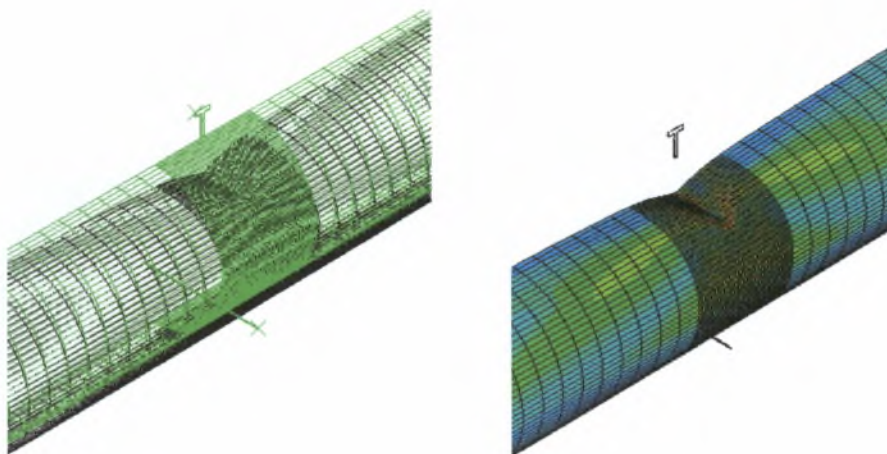


Σχήμα 4.8.10 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης $M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$ για κυλινδρικά κελύφη χωρίς και με τοπική αρχική ατέλεια ($g=0$ και $g=0.205$)

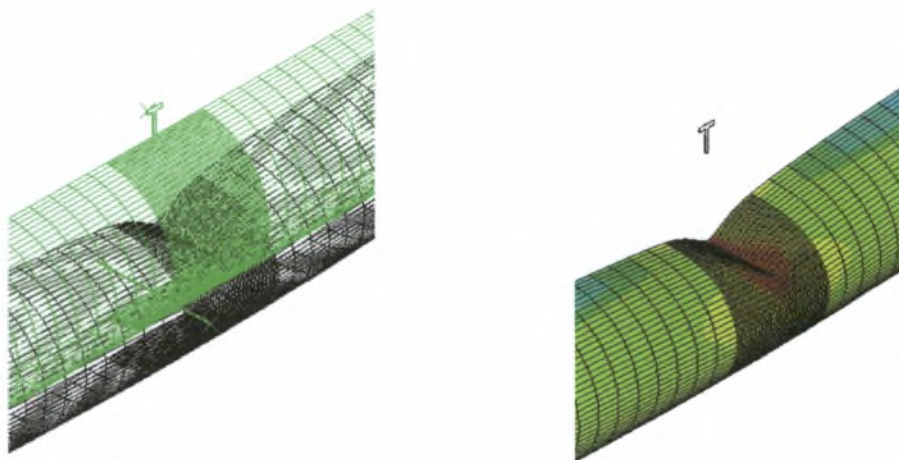
Στα σχήματα 4.8.11.α-γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατανομή των τάσεων κατά Von Mises και την παραμορφωμένη σε σχέση με την αρχική κατάσταση κατάσταση σε όλα τα βήματα (Step1-2, Step3 και Step4) της ανάλυσης για κέλυφος με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του $g=0.205$ στο οποίο αρχικά εφαρμόζεται καμπτικό φορτίο και στην συνέχεια θλιπτικό αξονικό φορτίο.



Σχήμα 4.8.11.α Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους αμέσως μετά την δημιουργία τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.205$ (Step1-2) και πριν την επιβολή καμπτικού φορτίου (Step3)



Σχήμα 4.8.11.β Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.205$ κατά την εφαρμογή του καμπτικού φορτίου (Step3)



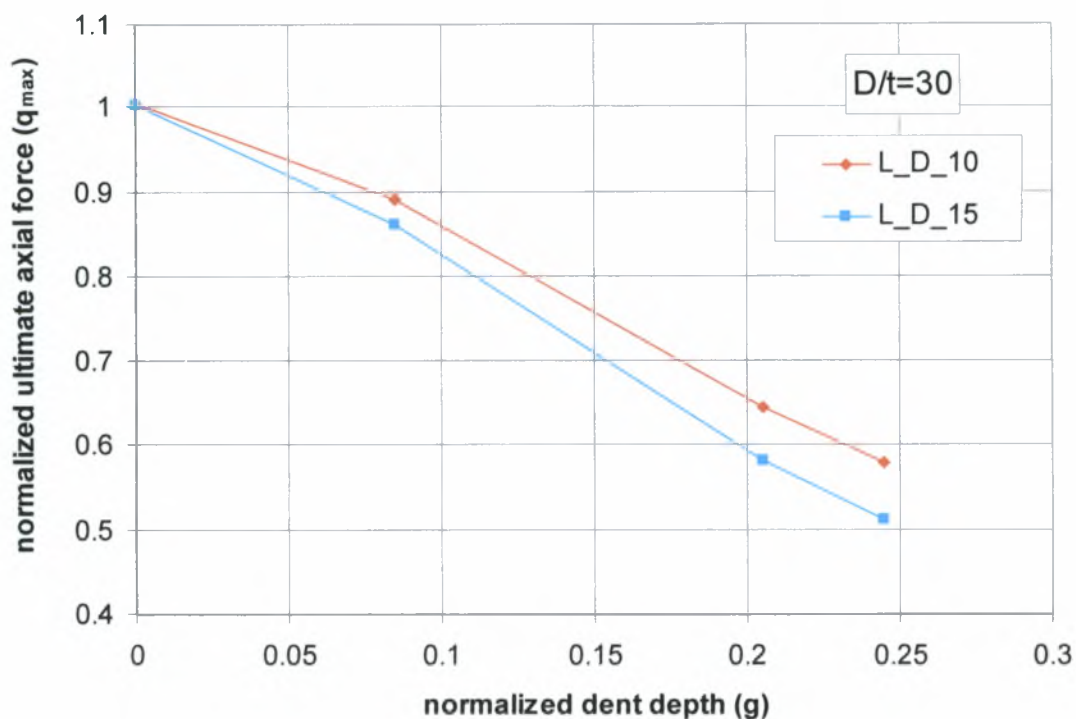
Σχήμα 4.8.11.γ Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων κατά Von Mises κυλινδρικού κελύφους με βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.205$ λίγο μετά την αστοχία του κατά την επιβολή θλιπτικού αξονικού φορτίου (Step4)

4.9 Συμπεράσματα για την επιρροή γεωμετρικών χαρακτηριστικών στην οριακή αντοχή

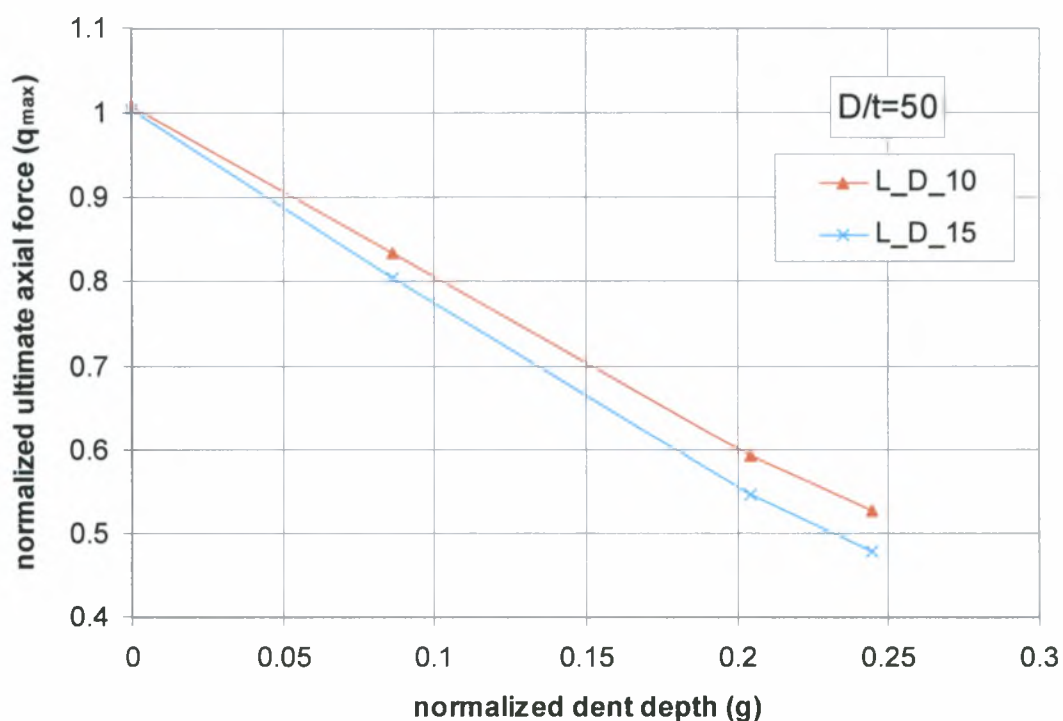
Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κυλινδρικού κελύφους με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του στην οριακή αντοχή του κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού ή καμπτικού φορτίου.

Στα παρακάτω σχήματα 4.9.1(.α-γ)-4.9.2(.α-β) φαίνεται η μεταβολή του λόγου q_{max} , σε σχέση με τον λόγο g , για όλες τις αναλογίες διαστάσεων κελύφους που μελετήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

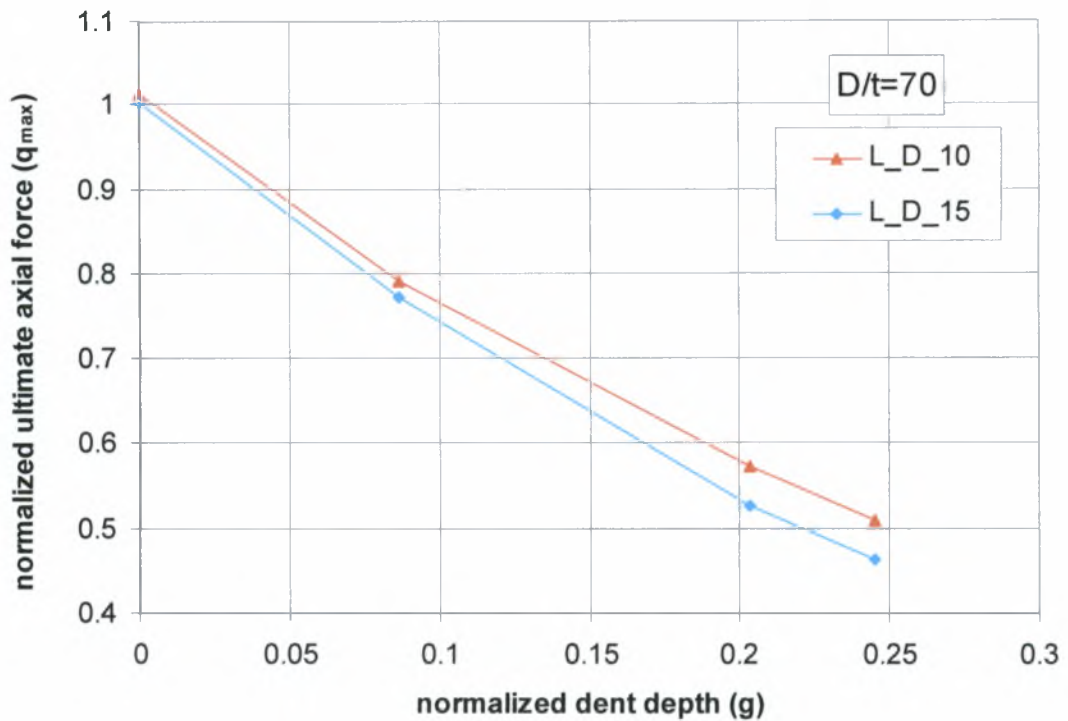
Αρχικά εξετάζεται η επίδραση του λόγου L/D για D/t σταθερό. Από τα διαγράμματα των σχημάτων 4.9.1.α-γ παρατηρείται πως και για τις τρεις τιμές του λόγου D/t ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου g τα κελύφη με L/D ίσο με 10 παρουσιάζουν μεγαλύτερα οριακά αξονικά φορτία αστοχίας σε σχέση με τα κελύφη με L/D ίσο με 15. Εξετάζοντας στην συνέχεια την επίδραση του λόγου D/t για L/D σταθερό (σχήματα 4.9.2.α-β), είναι φανερό πως για τα κελύφη που φέρουν τοπική αρχική ατέλεια, ανεξάρτητα από βάθος της η αύξηση της διαμέτρου του κελύφους (του λόγου D/t) έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής του κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου. Για την περίπτωση του αρχικά απαραμόρφωτου κελύφους, λόγω της παραδοχής που έχει γίνει στην παρούσα εργασία για το αξονικό φορτίο αστοχίας των κελυφών με αναλογίες διαστάσεων $L/D=10$ και $D/t=30$, $L/D=15$ και $D/t=30$, $L/D=10$ και $D/t=50$, $L/D=15$ και $D/t=50$ και $L/D=15$ και $D/t=70$, δεν απορρέει κάποιο γενικό συμπέρασμα για την επίδραση του λόγου D/t στην αντοχή του. Στην περίπτωση που η παραπάνω παραδοχή δεν ισχύει τότε το εν λόγω κέλυφος ακολουθεί την συμπεριφορά των κελυφών με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους.



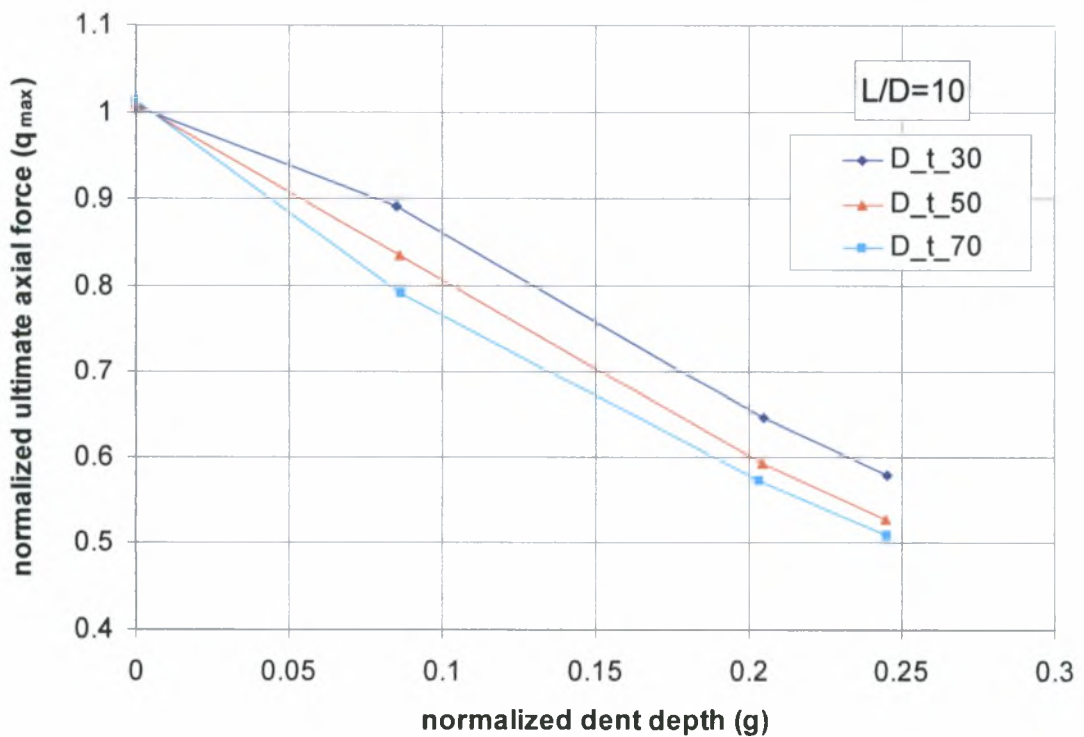
Σχήμα 4.9.1.α Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του λόγου L/D στην οριακή αντοχή κελύφους (q_{\max}) με λόγο $D/t=30$ κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).



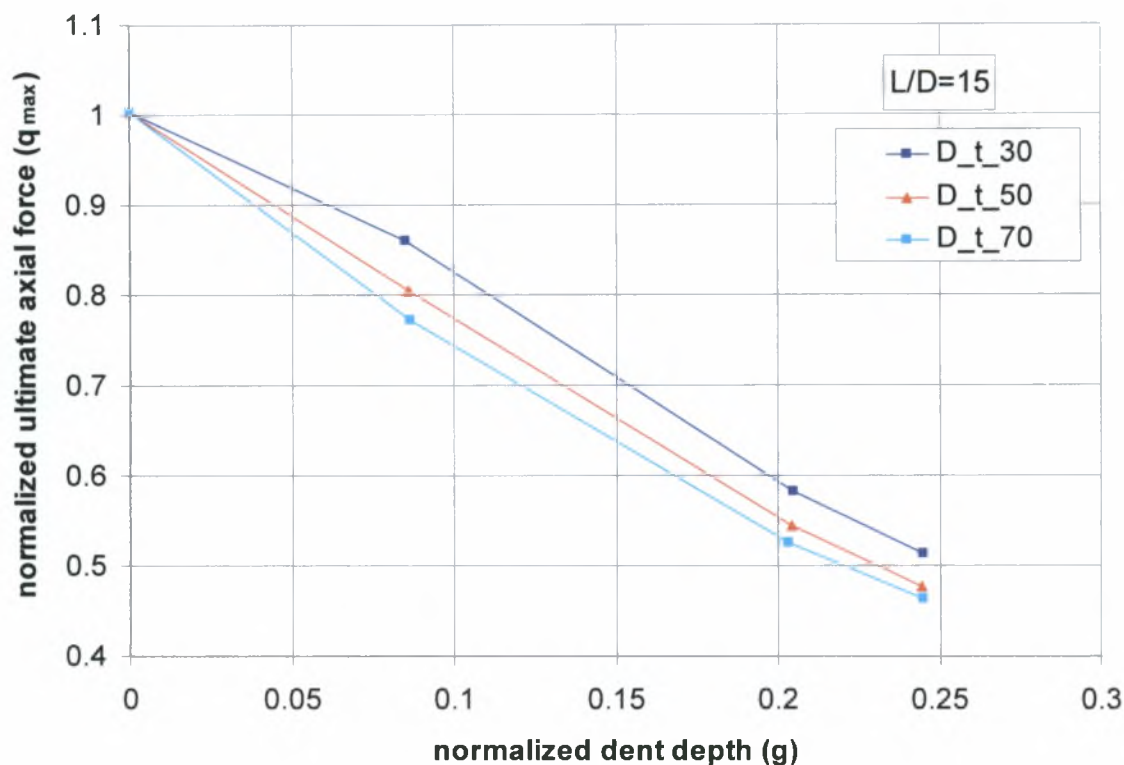
Σχήμα 4.9.2.α Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του λόγου L/D στην οριακή αντοχή κελύφους (q_{\max}) με λόγο $D/t=50$ κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).



Σχήμα 4.9.1.α Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του λόγου L/D στην οριακή αντοχή κελύφους (q_{\max}) με λόγο $D/t=70$ κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).



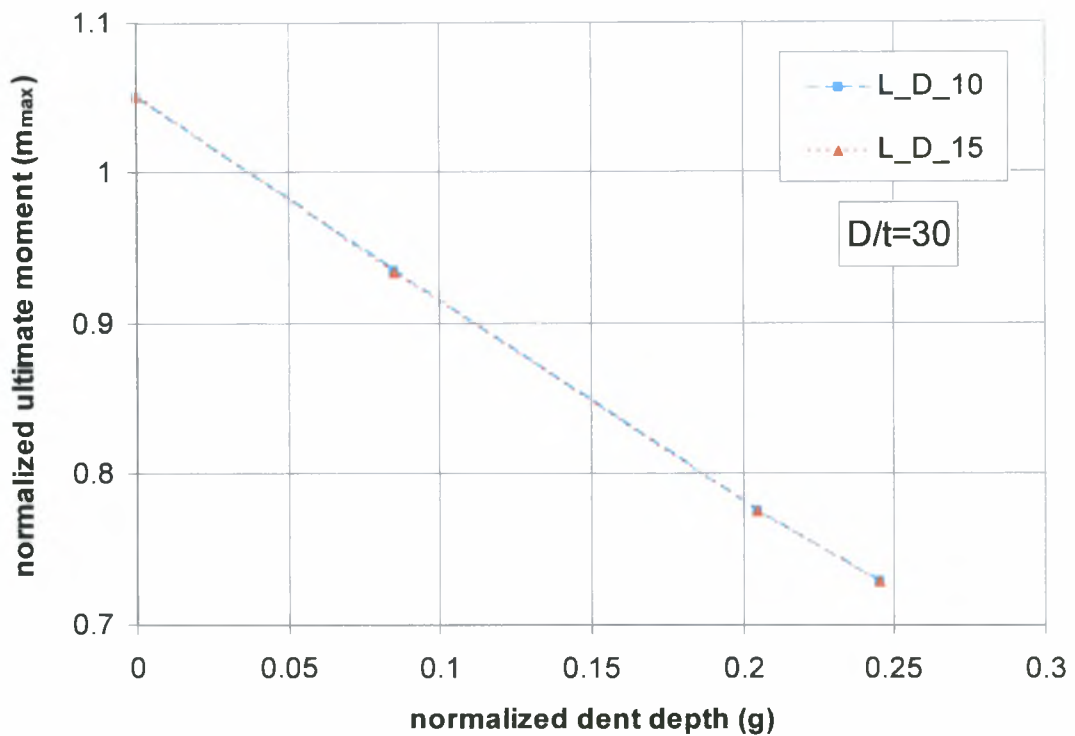
Σχήμα 4.9.2.α Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του λόγου D/t στην οριακή αντοχή κελύφους (q_{\max}) με λόγο $L/D=10$ κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).



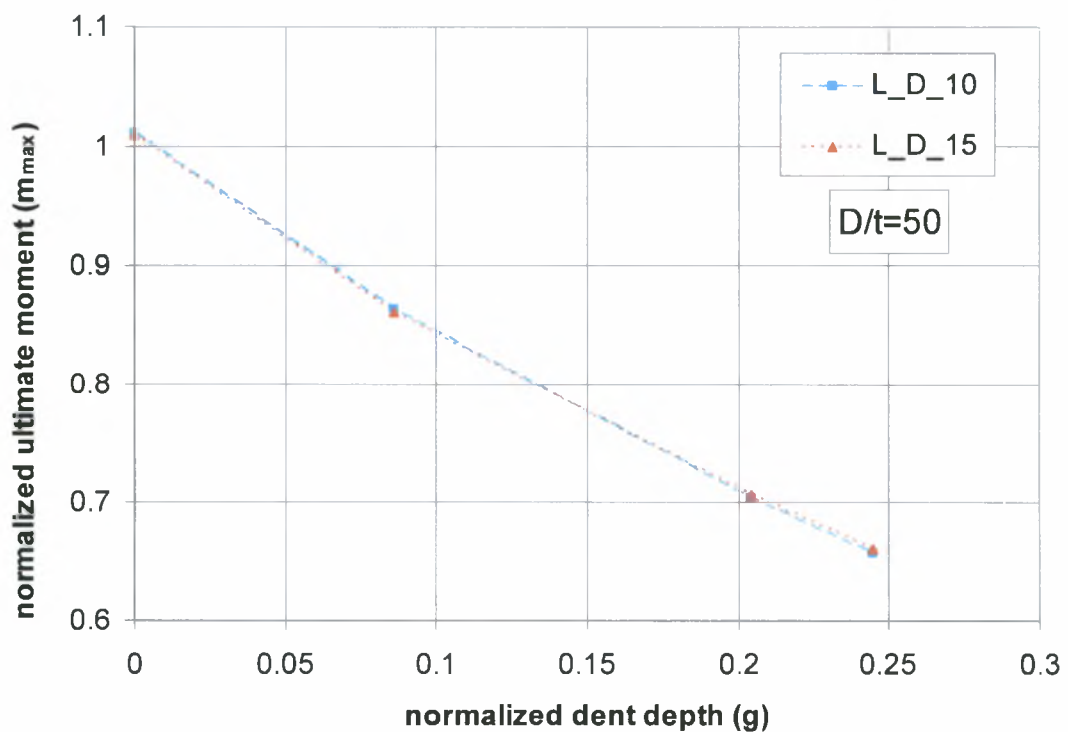
Σχήμα 4.9.2.β Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του λόγου D/t στην οριακή αντοχή κελύφους (q_{max}) με λόγο $L/D=15$ κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).

Στα παρακάτω σχήματα 4.9.3.(α-γ)-4.9.4.(α-β) φαίνεται η μεταβολή του λόγου m_{ma} , σε σχέση με τον λόγο g , για τις όλες τις αναλογίες διαστάσεων κελύφους που μελετήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

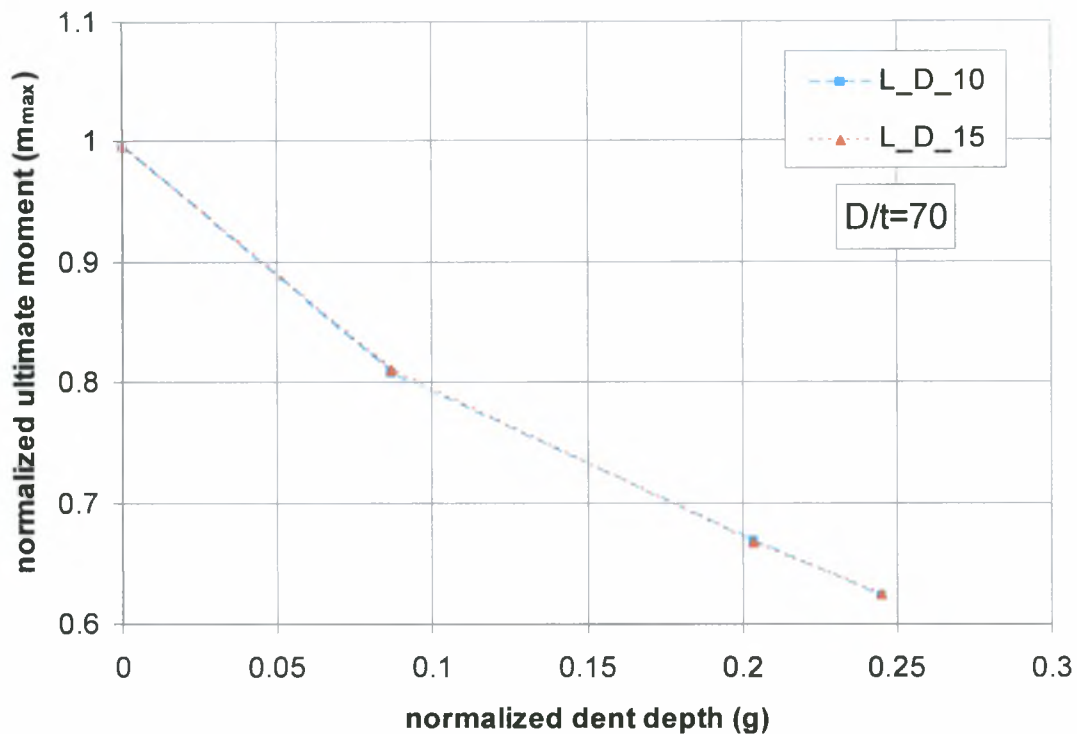
Αρχικά εξετάζεται η επίδραση του λόγου L/D για D/t σταθερό. Όπως γίνεται φανερό από το διάγραμμα των σχημάτων 4.9.3.α-γ η μεταβολή του μήκους του σωλήνα δεν έχει καμία επίδραση στην αντοχή του κατά την επιβολή σε αυτόν καμπτικού φορτίου για οποιοδήποτε βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας. Εξετάζοντας στη συνέχεια την επιρροή του λόγου D/t για L/D σταθερό στην αντοχή του κελύφους κάτω από την επίδραση καμπτικού φορτίου παρατηρείται (σχήματα 4.9.4.α-β) πως η αύξηση του λόγου D/t έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής του κελύφους για οποιαδήποτε τιμή του λόγου g .



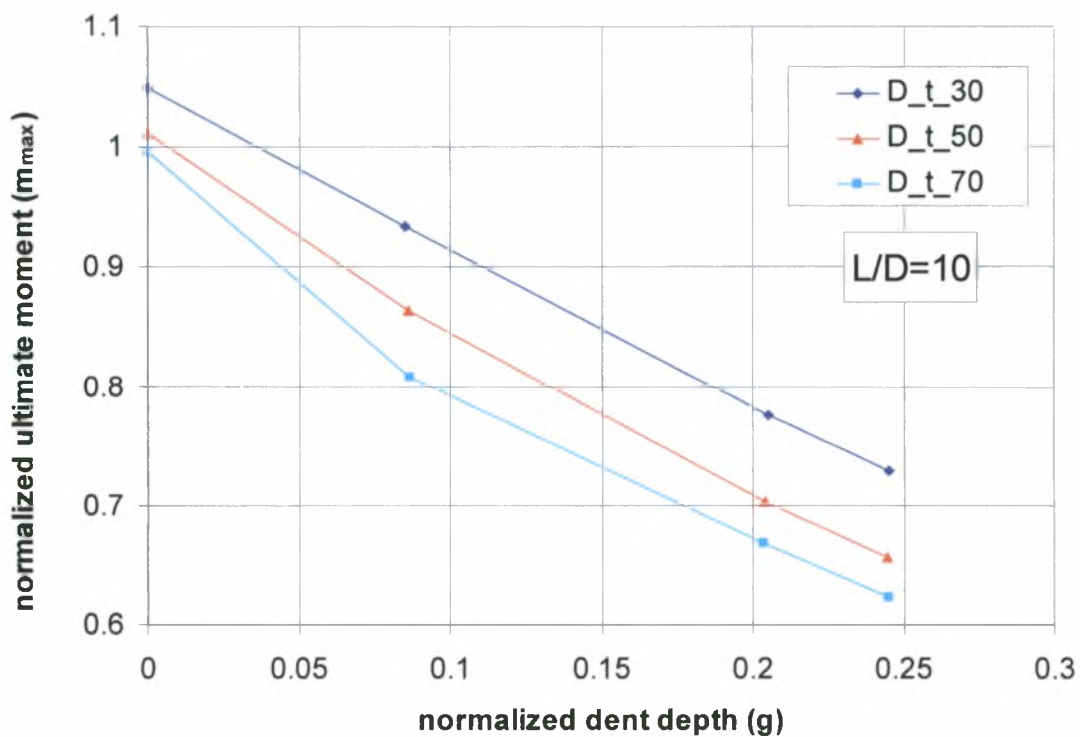
Σχήμα 4.9.3.α Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του λόγου L/D στην οριακή αντοχή κελύφους (m_{max}) με λόγο $D/t=30$ κάτω από την επίδραση καμπτικού φορτίου σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).



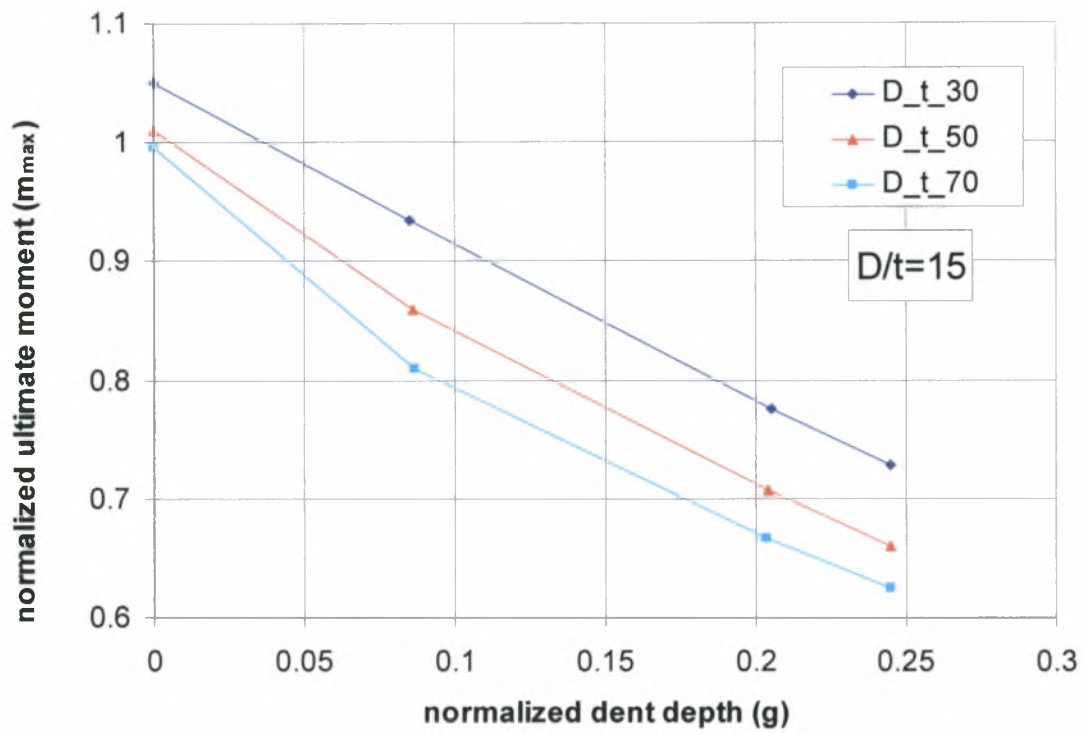
Σχήμα 4.9.3.β Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του λόγου L/D στην οριακή αντοχή κελύφους (m_{max}) με λόγο $D/t=50$ κάτω από την επίδραση καμπτικού φορτίου σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).



Σχήμα 4.9.3.γ Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του λόγου L/D στην οριακή αντοχή κελύφους (m_{max}) με λόγο $D/t=70$ κάτω από την επίδραση καμπτικού φορτίου σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).



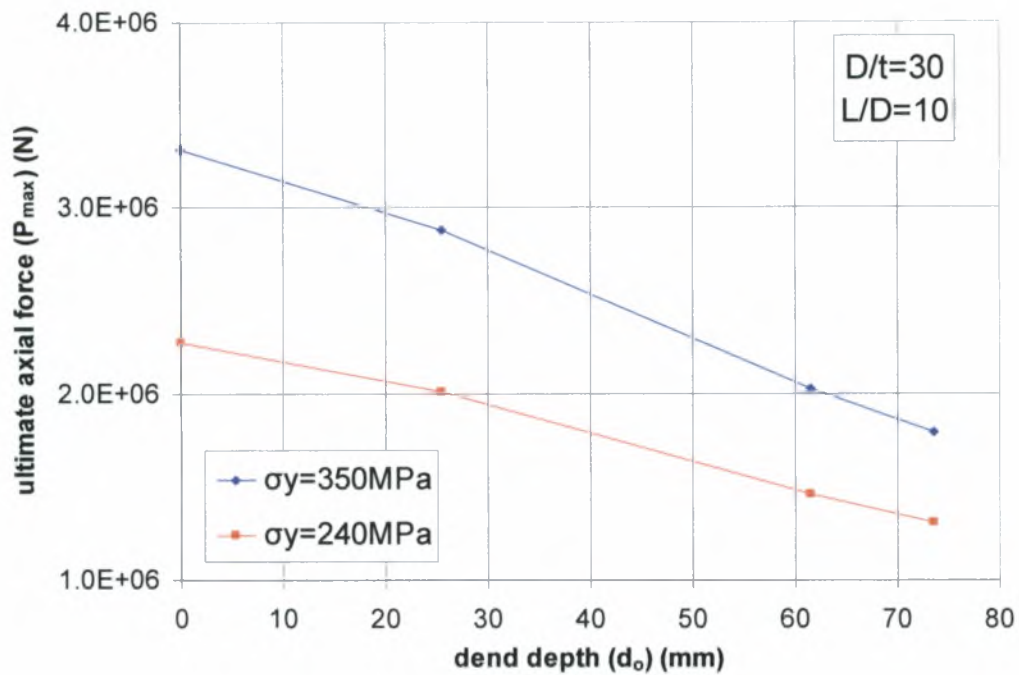
Σχήμα 4.9.4.α Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του λόγου D/t στην οριακή αντοχή κελύφους (m_{max}) με λόγο $L/D=10$ κάτω από την επίδραση καμπτικού φορτίου σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).



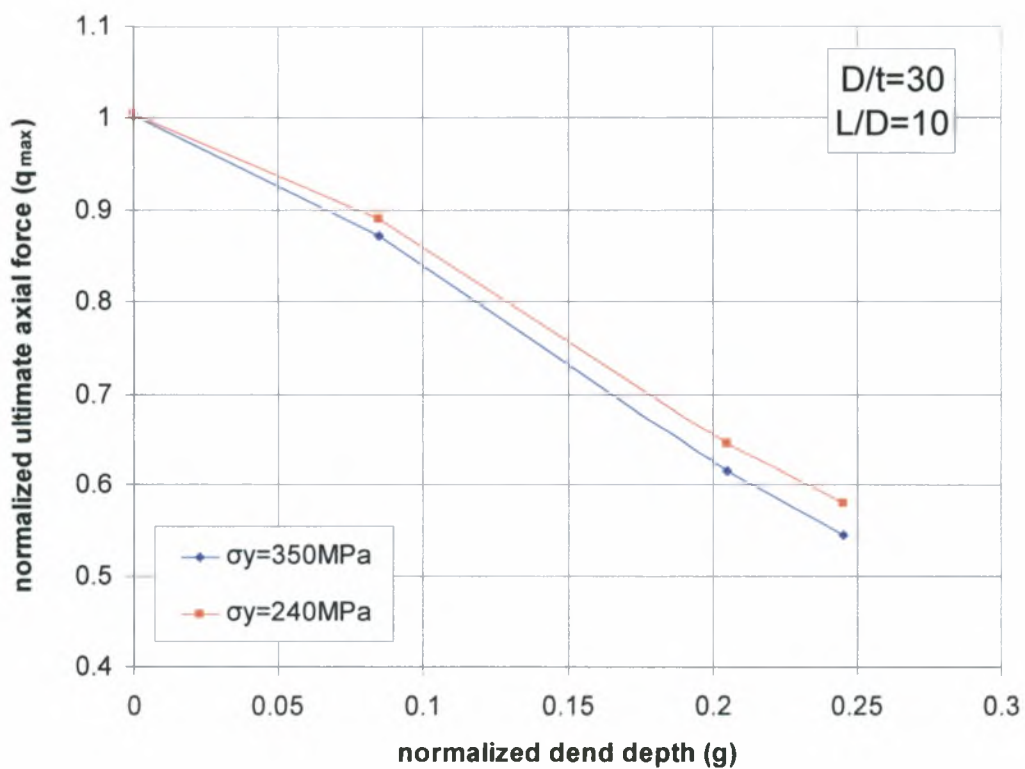
Σχήμα 4.9.4.β Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του λόγου D/t στην οριακή αντοχή κελύφους (m_{max}) με λόγο $L/D=15$ κάτω από την επίδραση καμπτικού φορτίου σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).

4.10 Επιρροή ορίου διαρροής στην οριακή αντοχή

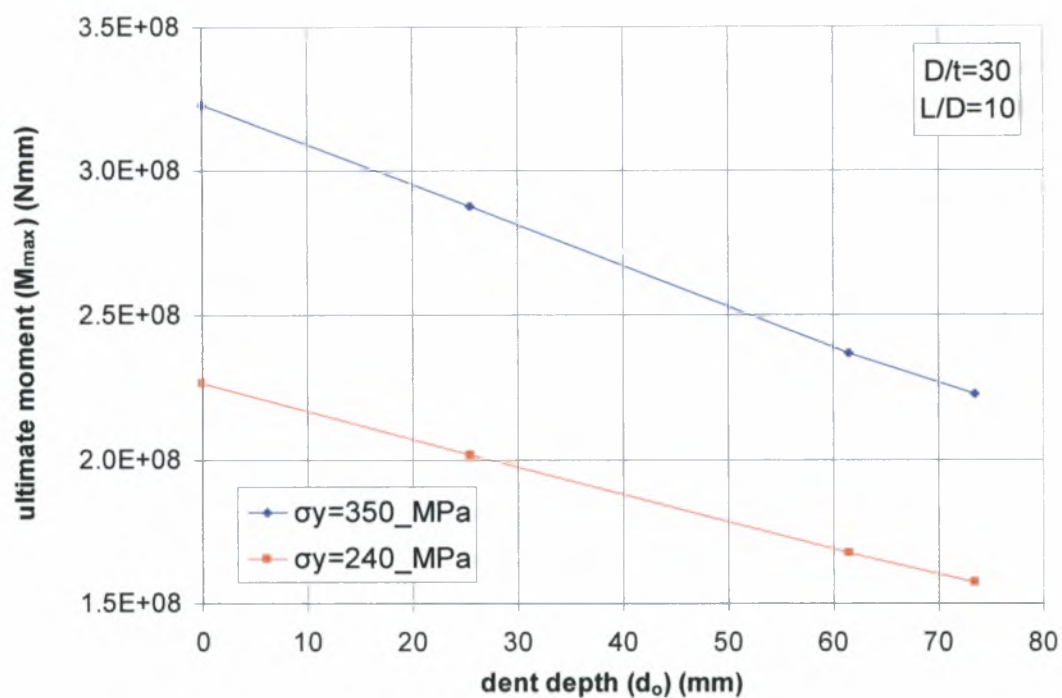
Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επιρροή του ορίου διαρροής του χρησιμοποιούμενου υλικού στην οριακή αντοχή του κελύφους με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση κελυφών με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=10$ και με $D/t=70$, $L/D=10$ για όριο διαρροής $\sigma_y=350MPa$ σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για $\sigma_y=240MPa$. Η γενική συμπεριφορά των κελυφών και στις δύο περιπτώσεις είναι ίδια για το λόγο αυτό παραλείπονται τα αναλυτικά διαγράμματα. Στα διαγράμματα των σχημάτων 4.10.1.β,4.10.2.β,4.10.3-4,4.10.5.β,4.10.6.β,4.10.7-8 φαίνεται η μεταβολή του φορτίου αστοχίας q_{max} ή m_{max} σε κανονικοποιημένη μορφή σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας g επίσης σε κανονικοποιημένη μορφή. Από την σύγκριση των καμπύλων των διαγραμμάτων αυτών παρατηρείται ότι το κέλυφος με όριο διαρροής $\sigma_y=350MPa$ παρουσιάζει μικρότερα οριακά φορτία αστοχίας (q_{max} και m_{max}) για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης και για τις δύο αναλογίες διαστάσεων των κελυφών. Αυτό συμβαίνει γιατί παρόλο που τα οριακά φορτία αστοχίας του κελύφους με όριο διαρροής $\sigma_y=350MPa$ κατά απόλυτη τιμή (P_{max} και M_{max}) είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα για $\sigma_y=240MPa$, κατά την αδιαστατοποίησή τους απαιτείται η διαίρεσή αυτών με ένα πολύ μεγαλύτερο μέγεθος (P_p και M_p) από το αντίστοιχο του κελύφους με όριο διαρροής $\sigma_y=240MPa$. Στα σχήματα 4.10.1.α,4.10.2.α,4.10.5.α και 4.10.6.α παρατίθενται η μεταβολή του οριακού φορτίου αστοχίας κατά απόλυτη τιμή σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας και για τα δύο όρια διαρροής. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα αυτά το κέλυφος με το μεγαλύτερο όριο διαρροής παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή κάτι που ήταν αναμενόμενο.



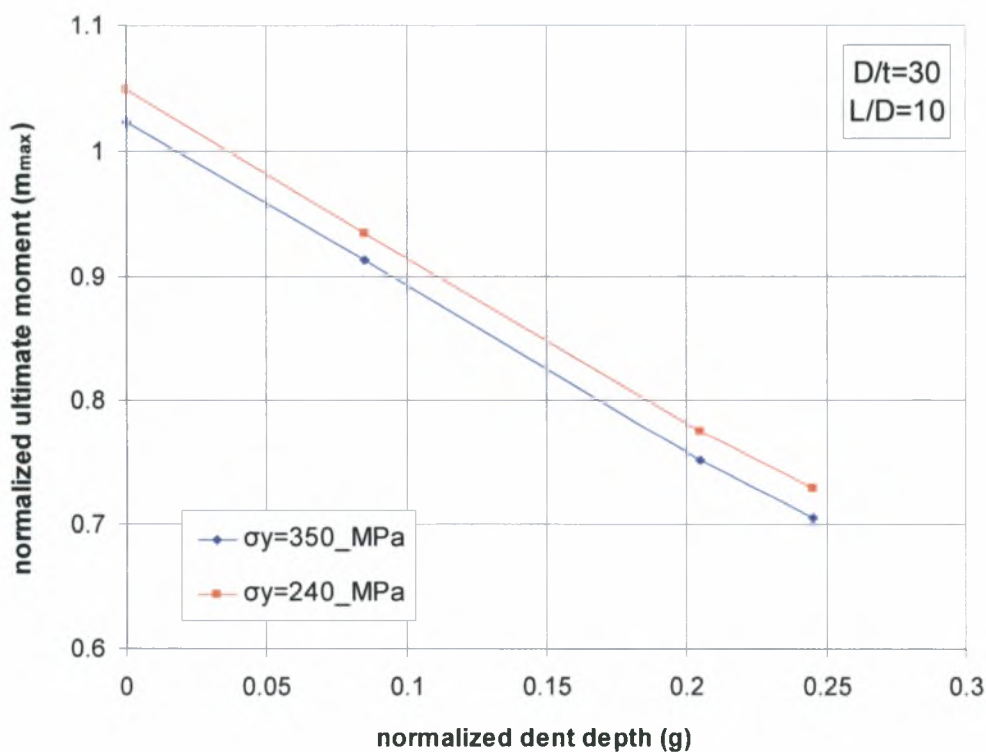
Σχήμα 4.10.1.α Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του ορίου διαρροής του υλικού στο θλιπτικό αξονικό φορτίο αστοχίας (P_{max}) κελύφους με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=10$ σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (d_0).



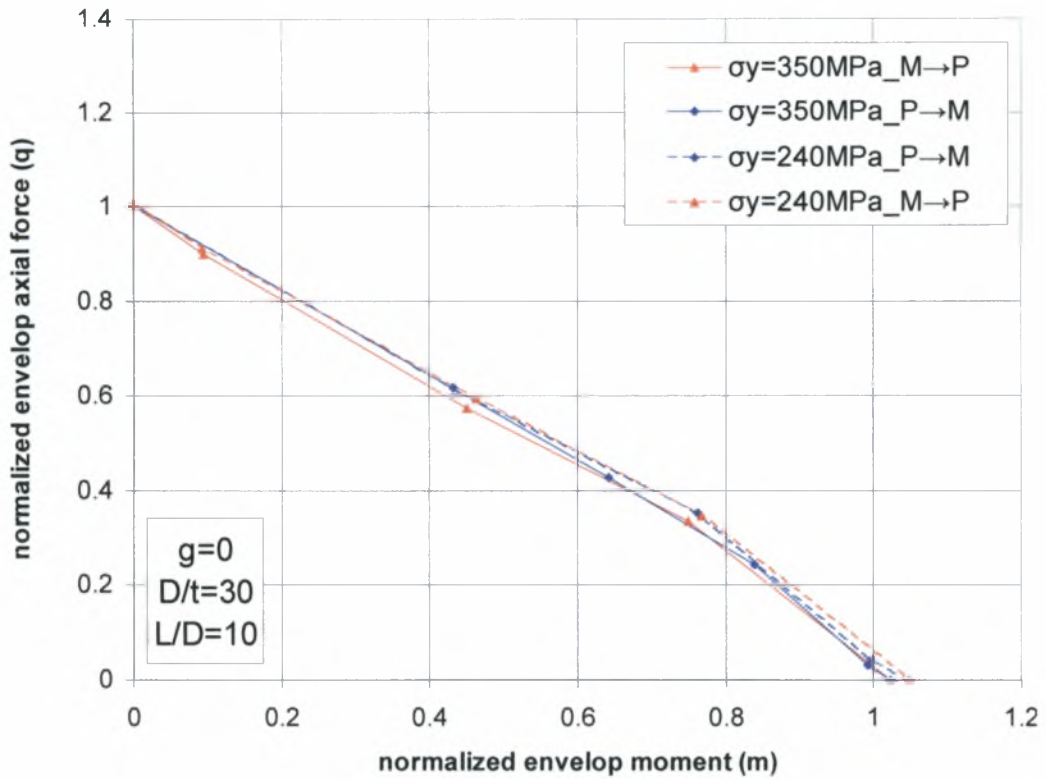
Σχήμα 4.10.1.β Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του ορίου διαρροής του υλικού στο θλιπτικό αξονικό φορτίο αστοχίας (q_{max}) κελύφους με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=10$ σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).



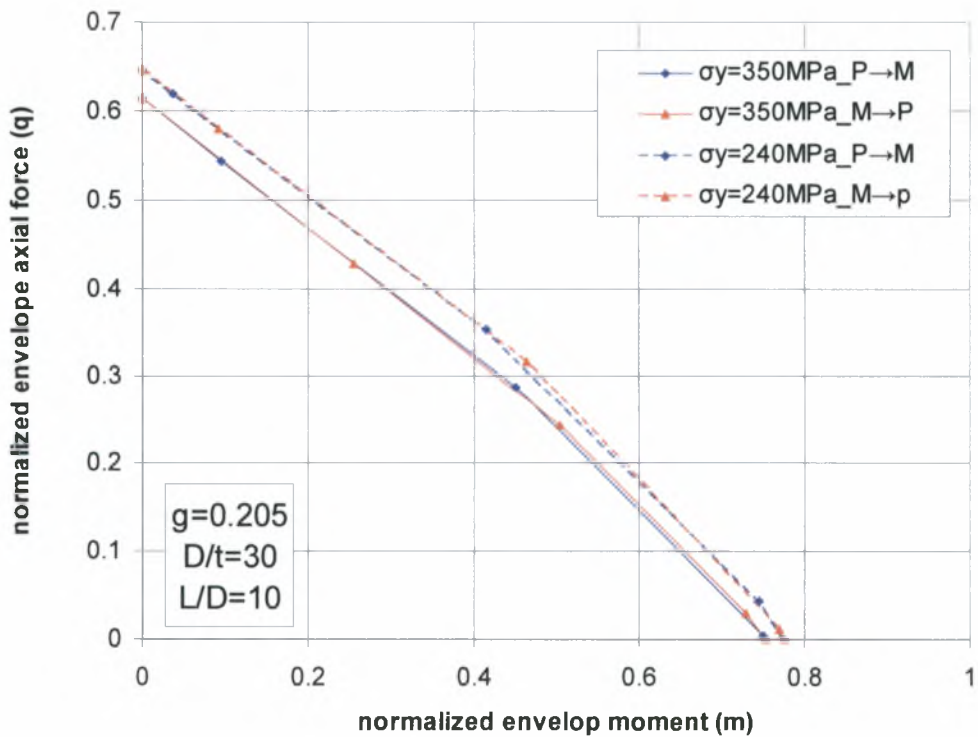
Σχήμα 4.10.2.α Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του ορίου διαρροής του υλικού στο καμπτικό φορτίο αστοχίας (M_{max}) κελύφους με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=10$ σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (d_0).



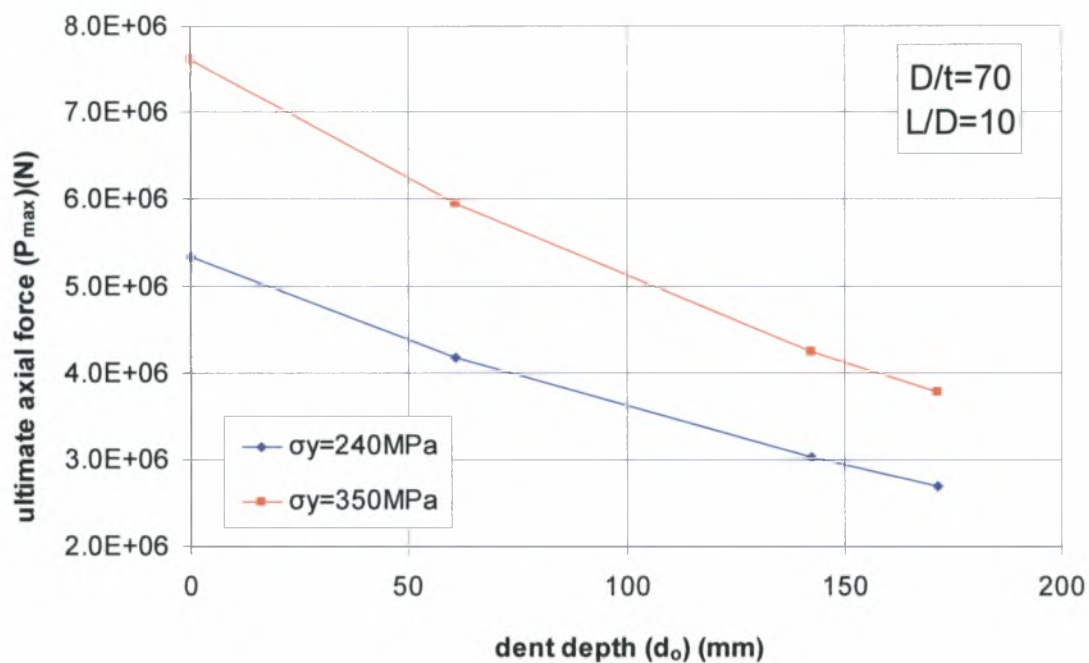
Σχήμα 4.10.2.β Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του ορίου διαρροής του υλικού στο καμπτικό φορτίο αστοχίας (m_{max}) κελύφους με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=10$ σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).



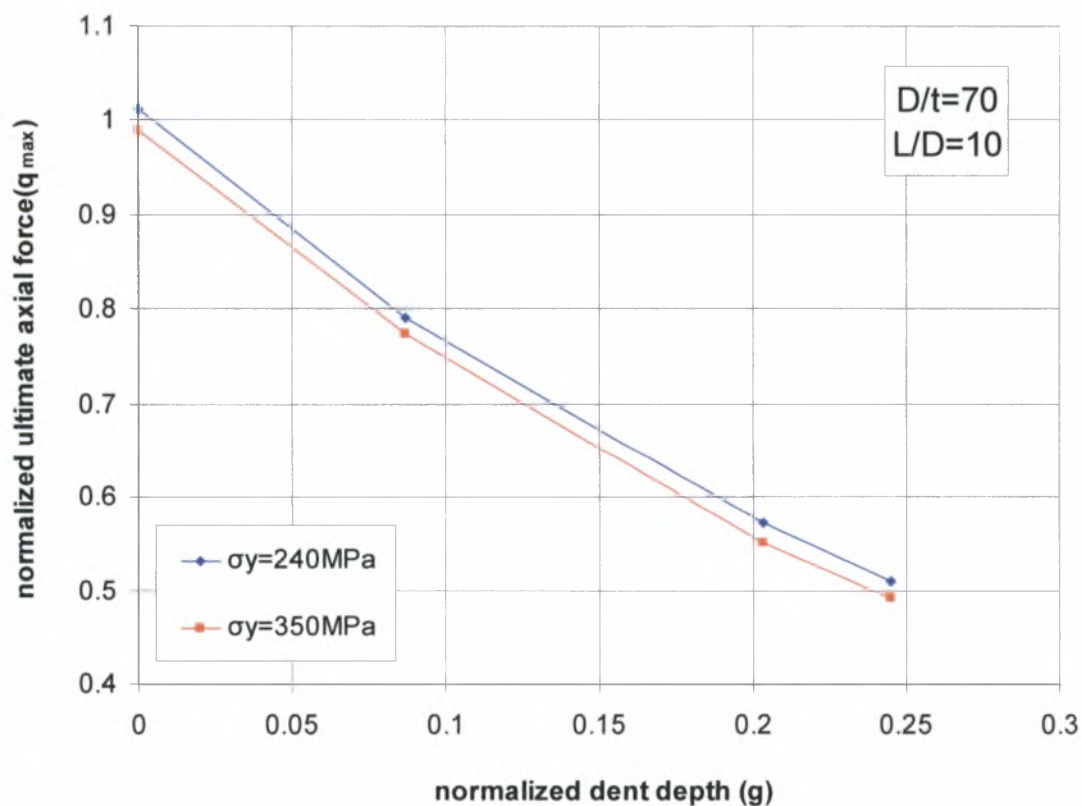
Σχήμα 4.10.3 Συγκριτικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης M→P και P→M επιρροής του ορίου διαρροής του υλικού κελύφους με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=10$ για βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0$.



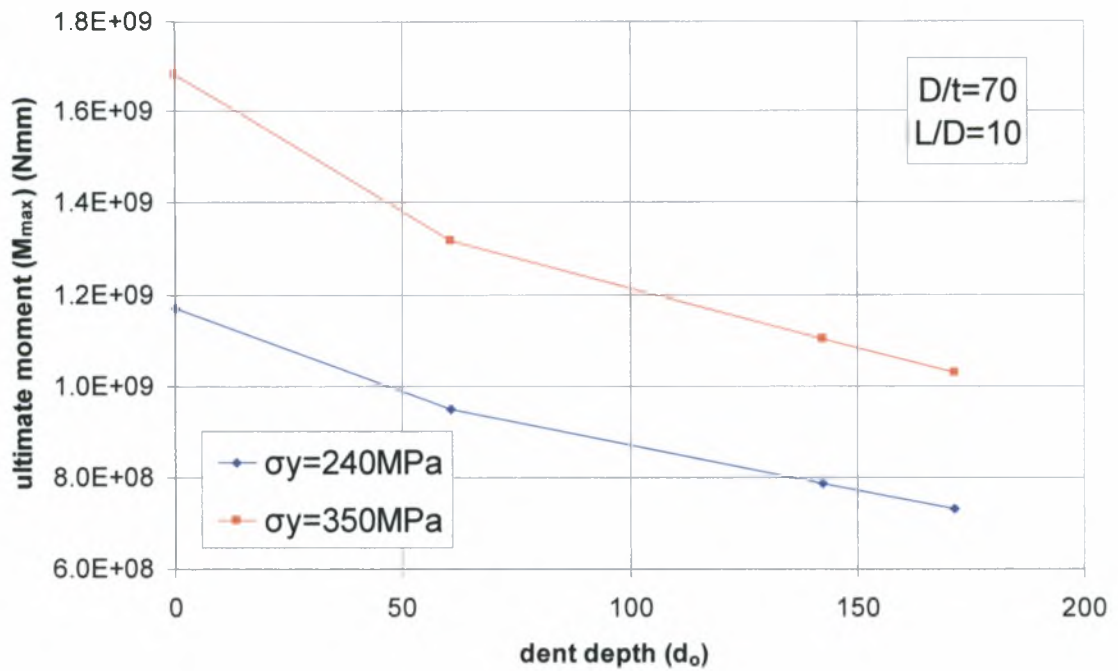
Σχήμα 4.10.4 Συγκριτικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης M→P και P→M επιρροής του ορίου διαρροής του υλικού κελύφους με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=10$ για βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.205$.



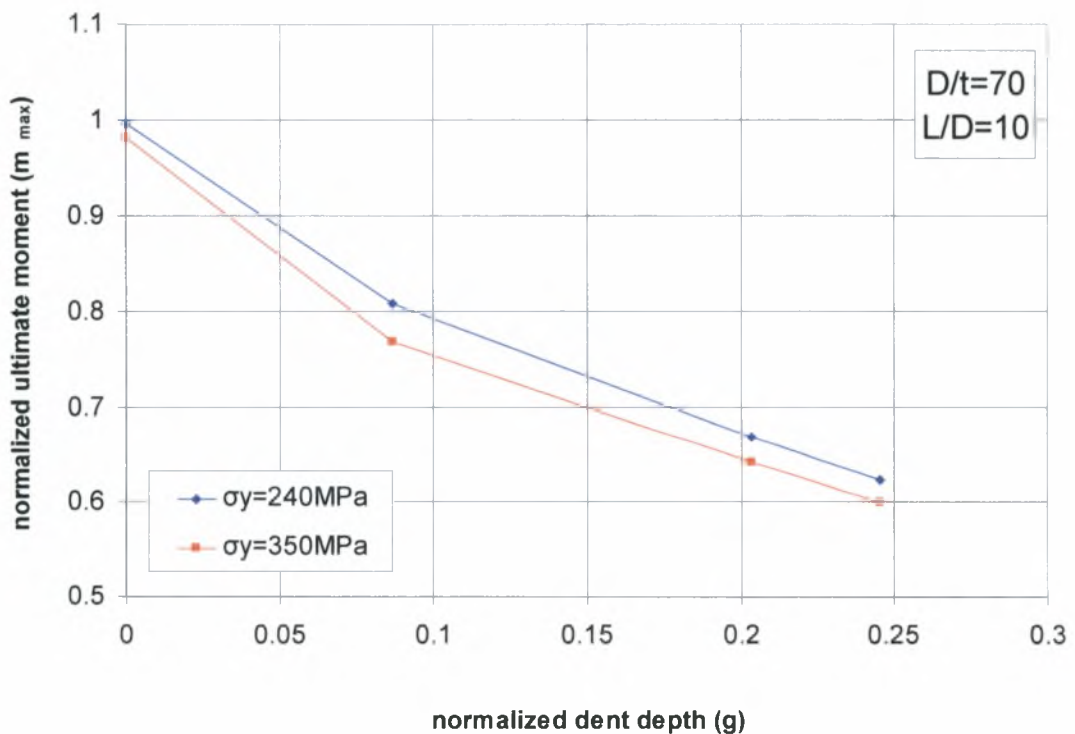
Σχήμα 4.10.5.α Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του ορίου διαρροής του υλικού στο θλιπτικό αξονικό φορτίο αστοχίας (P_{max}) κελύφους με αναλογίες διαστάσεων $D/t=70$, $L/D=10$ σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (d_o).



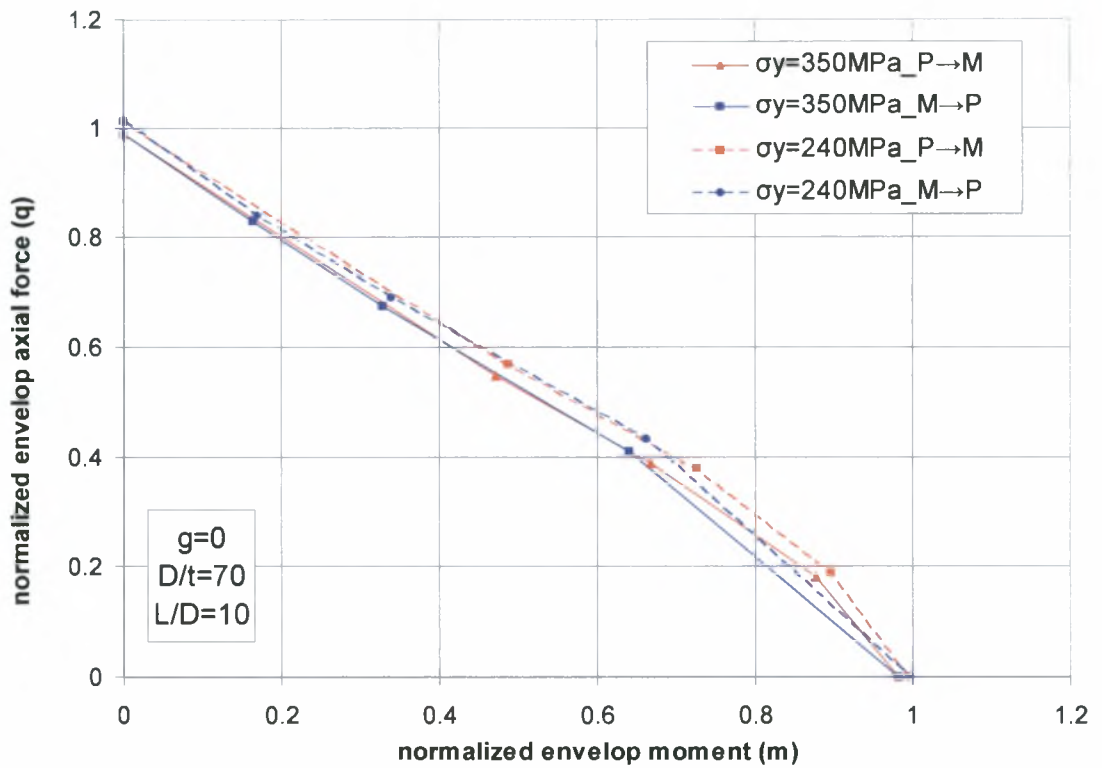
Σχήμα 4.10.5.β Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του ορίου διαρροής του υλικού στο θλιπτικό αξονικό φορτίο αστοχίας (q_{max}) κελύφους με αναλογίες διαστάσεων $D/t=70$, $L/D=10$ σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).



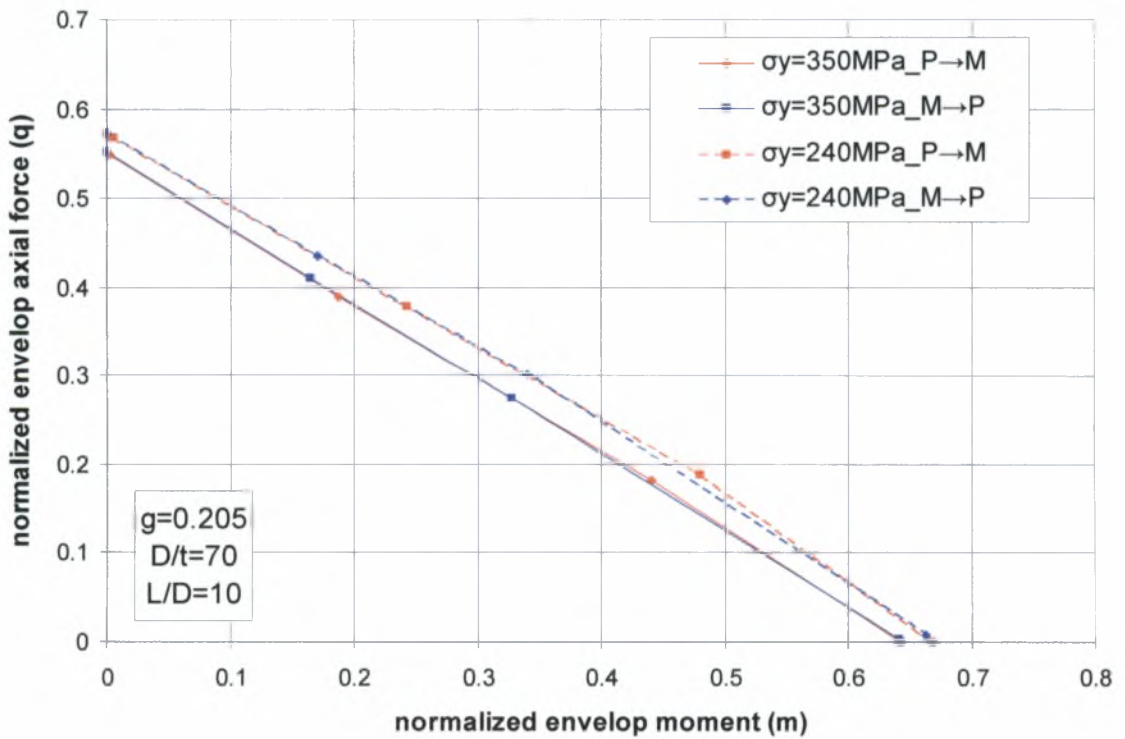
Σχήμα 4.10.6.α Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του ορίου διαρροής του υλικού στο καμπτικό φορτίο αστοχίας (M_{max}) κελύφους με αναλογίες διαστάσεων $D/t=70$, $L/D=10$ σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (d_0).



Σχήμα 4.10.6.β Συγκριτικό διάγραμμα επιρροής του ορίου διαρροής του υλικού στο καμπτικό φορτίο αστοχίας (m_{max}) κελύφους με αναλογίες διαστάσεων $D/t=70$, $L/D=10$ σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g).



Σχήμα 4.10.7 Συγκριτικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης M→P και P→M επιρροής του ορίου διαρροής του υλικού κελύφους με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=10$ για βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0$.



Σχήμα 4.10.8 Συγκριτικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης M→P και P→M επιρροής του ορίου διαρροής του υλικού κελύφους με αναλογίες διαστάσεων $D/t=70$, $L/D=10$ για βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.205$.

4.11 Αριθμητική προσομοίωση για διεισδυτή τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου”

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση που η ανάλυση στο πρώτο στάδιο (δημιουργία της τοπικής αρχικής ατέλειας) γίνεται με την θεώρηση διεισδυτή τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου”. Το φαινόμενο είναι τρισδιάστατο αλλά λόγω συμμετρίας προσομοιάζεται το $\frac{1}{2}$ του κελύφους ενώ, το συγκεντρωμένο εγκάρσιο φορτίο εφαρμόζεται στο μέσο του σωλήνα.

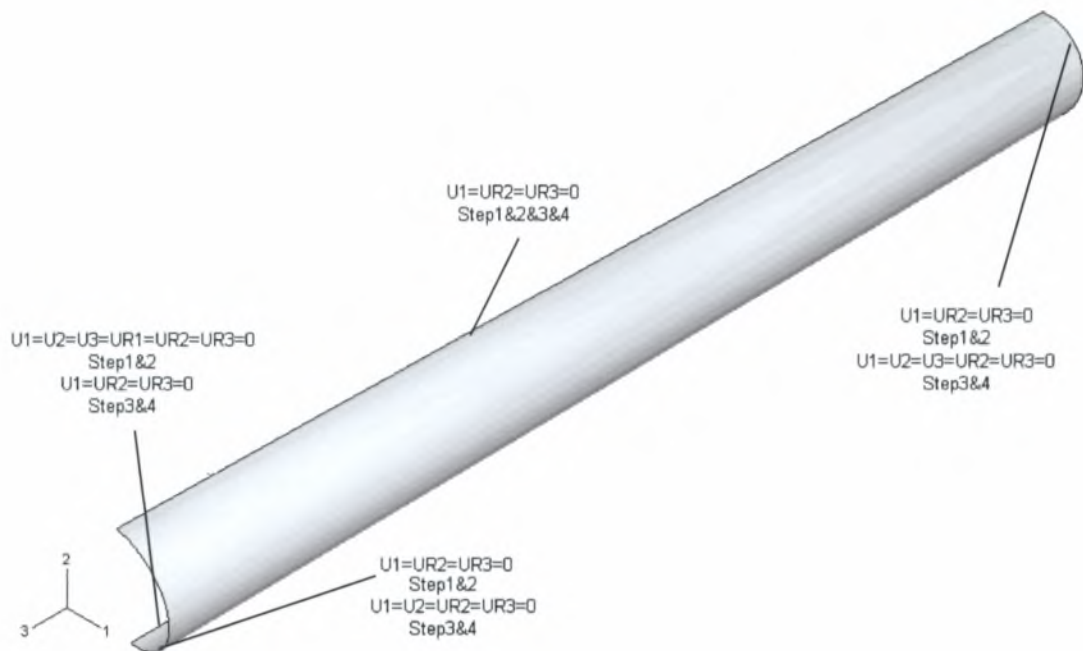
Βήματα της ανάλυσης

Στις περιπτώσεις κελύφους οπού επιβάλλεται μόνο αξονικό φορτίο ή μόνο καμπτικό φορτίο η ανάλυση προχωράει σε τρία βήματα. Στο πρώτο βήμα “step1” επιτυγχάνεται η δημιουργία της τοπικής αρχικής ατέλειας με την εφαρμογή συγκεντρωμένου εγκάρσιου φορτίου. Στο δεύτερο βήμα “step2” αφαιρείται το φορτίο και τέλος στο τρίτο βήμα “step3” σε απλά εδραζόμενο πλέον σωλήνα επιβάλλεται το αξονικό/καμπτικό φορτίο. Για την περίπτωση που το κέλυφος υποβάλλεται και σε θλιπτικό αξονικό φορτίο και σε καμπτικό φορτίο η ανάλυση αποτελείται από ένα επιπλέον βήμα “step4” στο οποίο το κέλυφος υποβάλλεται σε θλιπτικό αξονικό ή καμπτικό φορτίο ανάλογα με την αλληλουχία φόρτισης κάθε φορά. Τέλος για κελύφη χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους και στις δύο περιπτώσεις φόρτισης παραλείπονται τα δύο πρώτα στάδια της ανάλυσης “step1” και “step2”.

Μοντέλο επίλυσης του προβλήματος

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ανάλυση αποτελείται από ένα και μόνο παραμορφώσιμο σώμα τον σωλήνα. Αφού πρώτα σχεδιάστηκε στο “ABAQUS CAE” εφαρμόστηκε σε αυτό εγκάρσιο συγκεντρωμένο φορτίο μέσω της εντολής “Cload” για την δημιουργία της αρχικής τοπικής κύρτωσης του τοιχώματος. Η στήριξη του κελύφους στα δύο πρώτα βήματα της ανάλυσης έγινε με την ακινητοποίηση της κάτω γενέτειράς του με την χρήση κατάλληλων συνοριακών συνθηκών. Τέλος στο “step3” επιβλήθηκε το αξονικό/καμπτικό φορτίο μέσω της εντολής “Cload” και “kinematic coupling” σε απλά εδραζόμενο κέλυφος. Οι στηρίξεις και σε αυτό το βήμα προσομοιώθηκαν με κατάλληλες συνοριακές συνθήκες που περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο. Στην περίπτωση που η ανάλυση

προχωράει σε τέσσερα βήματα ισχύουν τα παραπάνω με την διαφορά ότι τώρα υπάρχει ένα τέταρτο βήμα στο οποίο με την χρήση και πάλι των εντολών “Cload” και “kinematic coupling” εφαρμόζεται αξονικό ή καμπτικό φορτίο ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος κάθε φορά.



Σχήμα 4.11.1 Το μοντέλο προσομοίωσης με τις συνοριακές συνθήκες στην διάρκεια της ανάλυσης

Συνοριακές συνθήκες

Στο μοντέλο της παρούσας ανάλυσης όπως προαναφέρθηκε σχεδιάστηκε το $\frac{1}{2}$ του κελύφους λόγω των συμμετριών που υπάρχουν στο συγκεκριμένο πρόβλημα οπότε, το μοντέλο είναι συμμετρικό μόνο ως προς τον άξονα 1. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11.1 στην πάνω γενέτειρα του σωλήνα δεσμεύτηκε η μετατόπιση στην διεύθυνση 1 και η στροφή στις διευθύνσεις 2 και 3 ($U1=UR2=UR3=0$) ενώ, στην κάτω απαγορεύτηκε η κίνηση σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας. Στην αριστερή και δεξιά διατομή του σωλήνα στα δύο άκρα του δεσμεύτηκαν οι βαθμοί ελευθερίας 1,5 και 6 ($U1=UR2=UR3=0$), θεωρώντας απαραμόρφωτες πλάκες (“καπάκια”). Για την προσομοίωση των “καπακιών” στο ABAQUS χρησιμοποιήθηκε η εντολή “kinematic

coupling” με την οποία μέσω ενός κόμβου αναφοράς περιορίστηκαν όλοι οι κόμβοι στα άκρα του κελύφους να κινούνται σύμφωνα με αυτό τον κόμβο. Σε αυτόν επιβάλλαμε τις ανωτέρω συνοριακές συνθήκες. Στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης “step3” η φύση του προβλήματος καθιστά αναγκαίο τον επαναπροσδιορισμό των συνοριακών συνθηκών, ο οποίος έγινε μέσω της εντολής “boundary, op=new”. Το ένα άκρο του κελύφους είναι ελεύθερο να κινηθεί κατά τον άξονα 3 και να περιστραφεί κατά τον άξονα 1 ($U1=UR2=UR3=0$ και το $U2$ τίθεται ίσο με την μετατόπιση που έχει ο κόμβος αναφοράς στο βήμα δύο) ενώ, το άλλο είναι ελεύθερο μόνο να περιστραφεί κατά την διεύθυνση 1 ($U1=UR2=UR3=0$ ενώ τα $U2$ και $U3$ τίθενται ίσα με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις που έχουν στο αμέσως προηγούμενο βήμα) προσομοιάζοντας έτσι μια κύλιση και μια άρθρωση αντίστοιχα στα δύο άκρα του σωλήνα. Η προσομοίωση και εδώ έγινε μέσω της εντολής “kinematic coupling” και του κόμβου αναφοράς. Τέλος στην κάτω γενέτειρα του κελύφους δεσμεύονται οι βαθμοί ελευθερίας 1,5 και 6 ($U1=UR2=UR3=0$) ενώ, για την πάνω επαναπροσδιορίζονται οι συνθήκες που ισχύουν στα δύο προηγούμενα βήματα της ανάλυσης. Στην περίπτωση που η ανάλυση αποτελείται από τέσσερα βήματα ισχύουν όσα και παραπάνω με την διαφορά ότι οι συνθήκες που ορίστηκαν στο τρίτο βήμα εξακολουθούν να ισχύουν και στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης.

Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

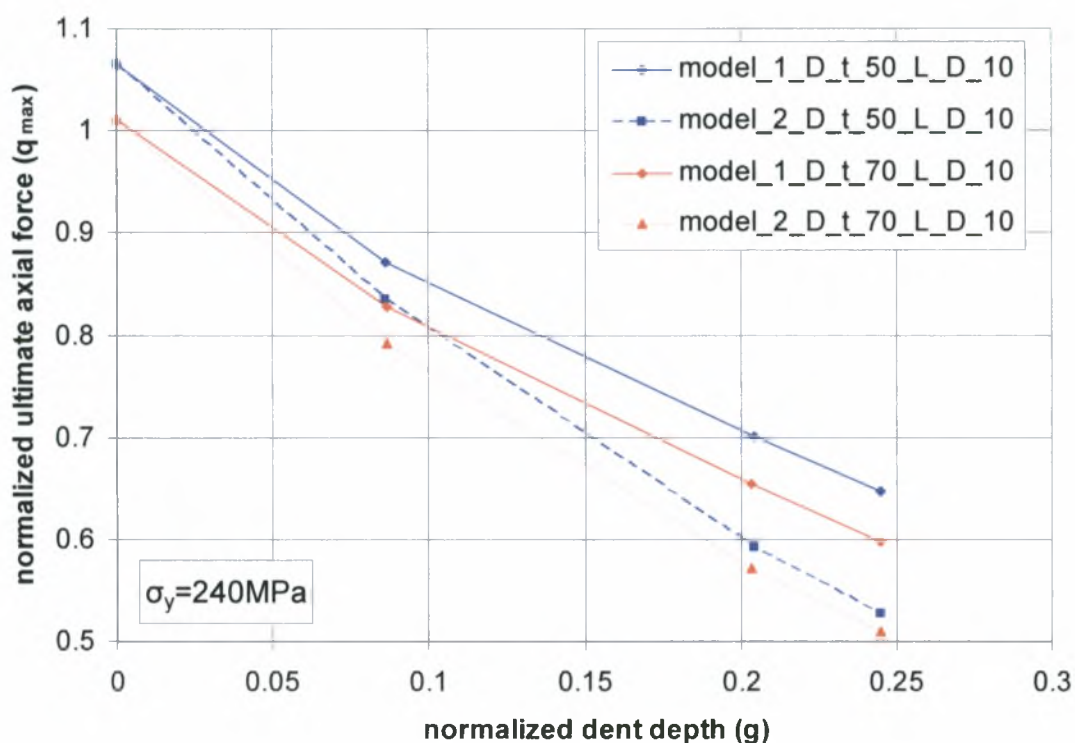
Όσον αφορά στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ισχύουν τα ίδια με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.2

Αποτελέσματα για $D/t=50$, $L/D=10$ και $D/t=70$, $L/D=10$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά προσομοίωση των κυλινδρικών κελυφών με αναλογίες διαστάσεων $D/t=50$, $L/D=10$ και με $D/t=70$, $L/D=10$ παρουσιάζονται σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του μοντέλου της παραγράφου 4.2. Παραλείπεται η αναλυτική παρουσίαση τους διότι η γενική συμπεριφορά των κελυφών είναι όμοια και στα δύο μοντέλα.

Στο σχήμα 4.11.2 που ακολουθεί παρατίθενται ένα συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων των κελυφών με $D/t=50$ και $L/D=10$ και με $D/t=70$ και $L/D=10$ για τους δύο τύπους διείδυσης. Ως *model_1* και με συνεχή γραμμή χαρακτηρίζεται το μοντέλο με διείδυτη τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου” και ως *model_2* και με

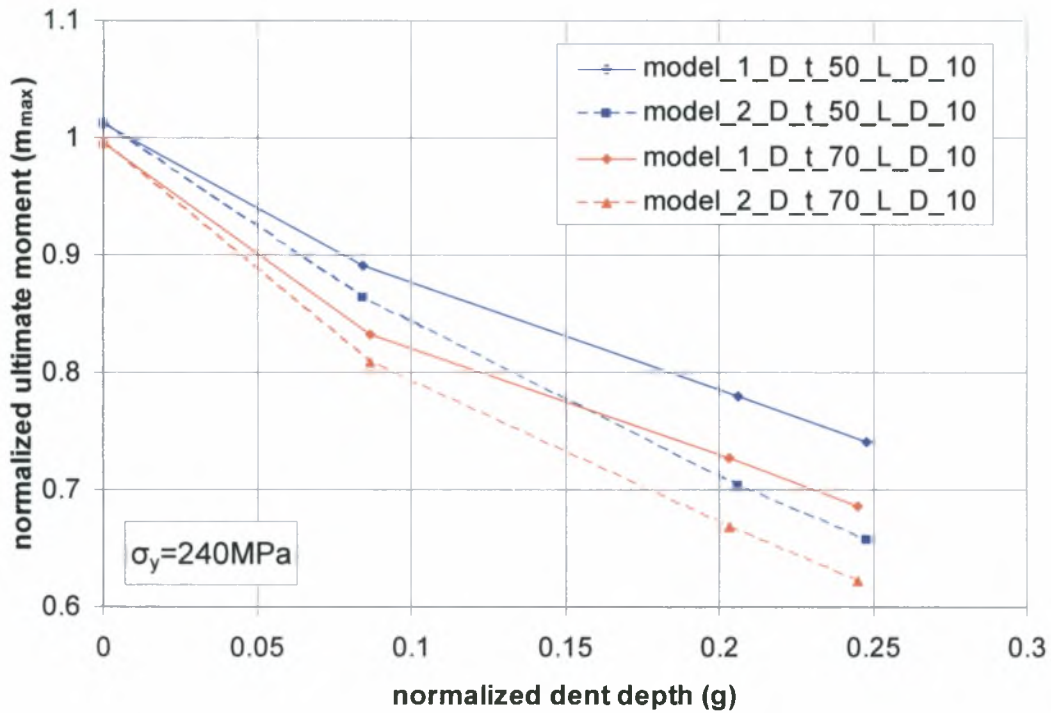
διακεκομμένη γραμμή το μοντέλο με διεισδυτή τύπου “σφήνας”. Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή του λόγου q_{max} σε σχέση με την μεταβολή του όρου g . Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων παρατηρείται πως στην περίπτωση διείσδυσης τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου” υπερεκτιμάται το φορτίο αστοχίας για τα κελύφη με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους. Σύμφωνα με το ABAQUS η διαφορά αυτή εκτιμάται για τους σωλήνες με $D/t=50$ και $L/D=10$ από 5% έως και 18% και για τους σωλήνες με $D/t=70$ και $L/D=10$ από 4% έως 14%. Η διαφορά αυτή οφείλεται διαφορετική μορφή της τοπικής αρχικής ατέλειας και στην διαφορετική κατανομή των τάσεων μετά την διείσδυση όπως φαίνεται στα σχήματα 4.11.6-8.



Σχήμα 4.11.2 Διάγραμμα οριακού θλιπτικού αξονικού φορτίου αστοχίας (q_{max}) σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g) για κελύφη με αναλογίες διαστάσεων $D/t=50$, $L/D=10$ και $D/t=70$, $L/D=10$ για το μοντέλο διεισδυτή τύπου “σφήνας” σε σύγκριση με το μοντέλο διεισδυτή τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου”

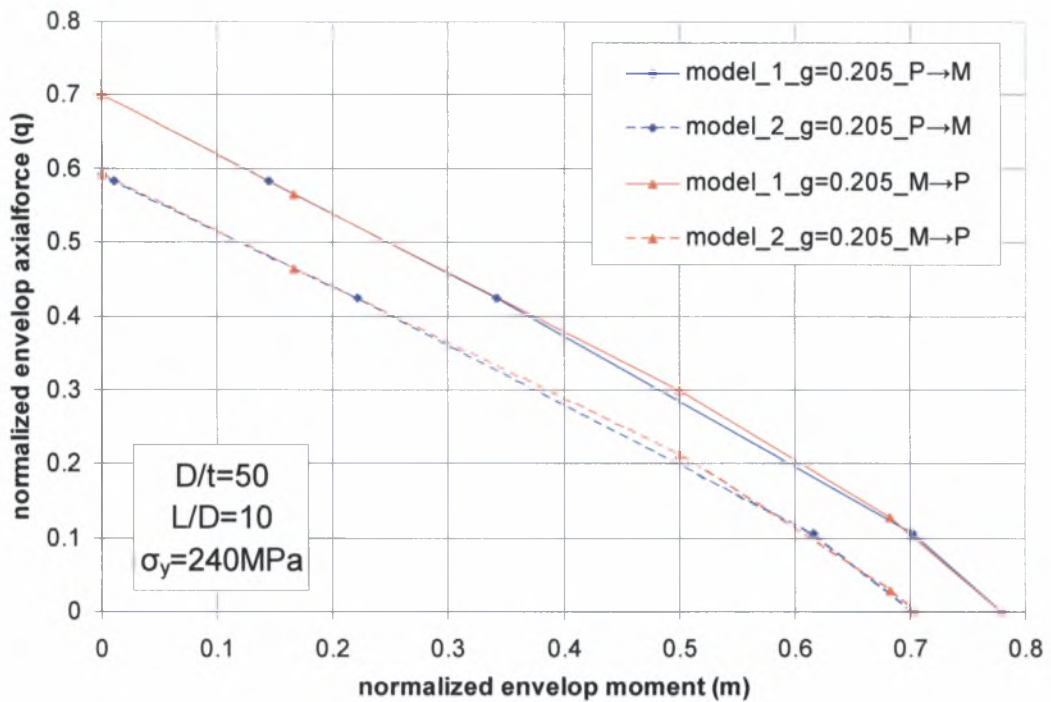
Στο επόμενο σχήμα 4.11.3 φαίνεται επίσης ένα συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων για την περίπτωση επιβολής καμπτικού φορτίου. Ο συμβολισμός που χρησιμοποιείται είναι αντίστοιχος του σχήματος 4.11.2. Από το διάγραμμα είναι φανερό πως το μοντέλο διείσδυσης τύπου “συγκεντρωμένου

φορτίου” υπερεκτιμά το καμπτικό φορτίο αστοχίας του κελύφους με τοπική αρχική ατέλεια. Σύμφωνα με το ABAQUS η διαφορά των αποτελέσματα εκτιμάται για τα κελύφη με $D/t=50$ και $L/D=10$ από 3% έως 11.4% και για τα κελύφη με $D/t=70$ και $L/D=10$ από 3% έως 9.2%. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στη διαφορετική μορφή της τοπικής αρχικής ατέλειας και στην διαφορετική κατανομή των τάσεων μετά την διείδυση όπως φαίνεται στα σχήματα 4.11.3.

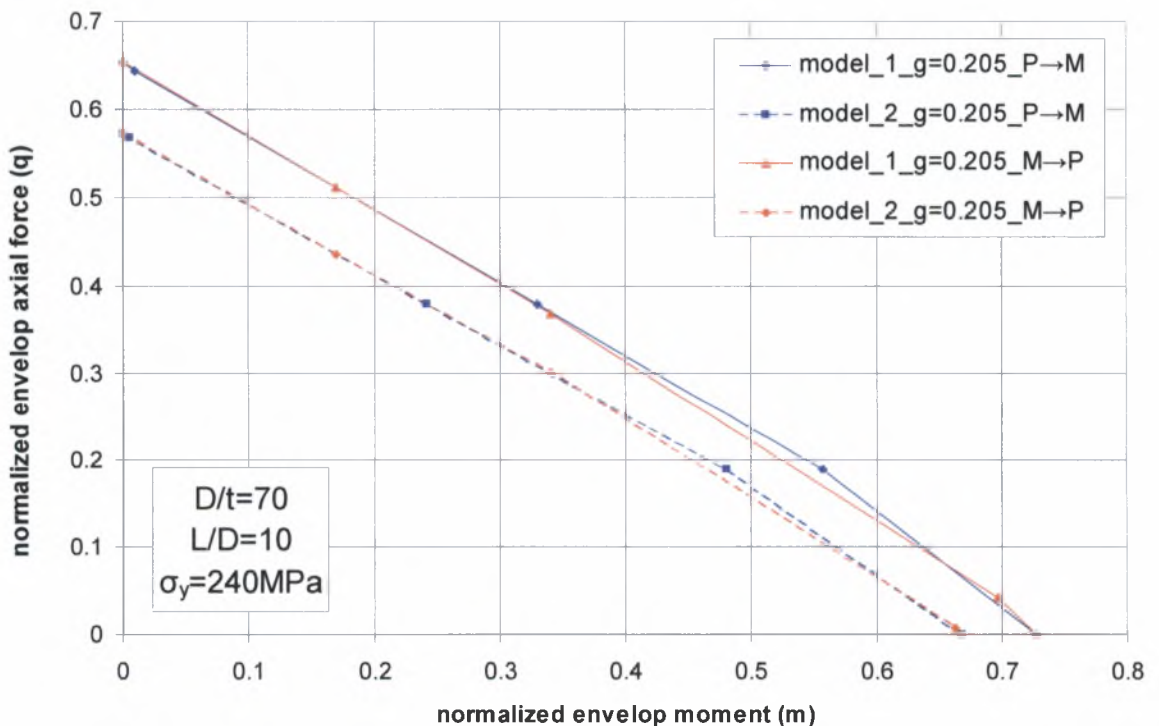


Σχήμα 4.11.3 Διάγραμμα οριακού καμπτικού φορτίου αστοχίας (m_{max}) σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g) για κελύφη με αναλογίες διαστάσεων $D/t=50$, $L/D=10$ και $D/t=70$, $L/D=10$ για το μοντέλο διεισδυτή τύπου “σφήνας” σε σύγκριση με το μοντέλο διεισδυτή τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου”

Στα παρακάτω σχήματα 4.11.4-5 παρουσιάζονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των δύο κελυφών ($D/t=50$, $L/D=10$ και με $D/t=70$, $L/D=10$) με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια για δύο αλληλουχίες φόρτισης $M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$ συγκριτικά και για τα δύο μοντέλα. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων παρατηρείται πως στην περίπτωση διείδυσης τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου” υπερεκτιμάται η οριακή αντοχή των κελυφών που φέρουν τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους. Τα αποτελέσματα για τα αρχικά απαραμόρφωτα κελύφη παραλείπονται καθώς είναι ανεξάρτητα του τύπου διείδυσης.

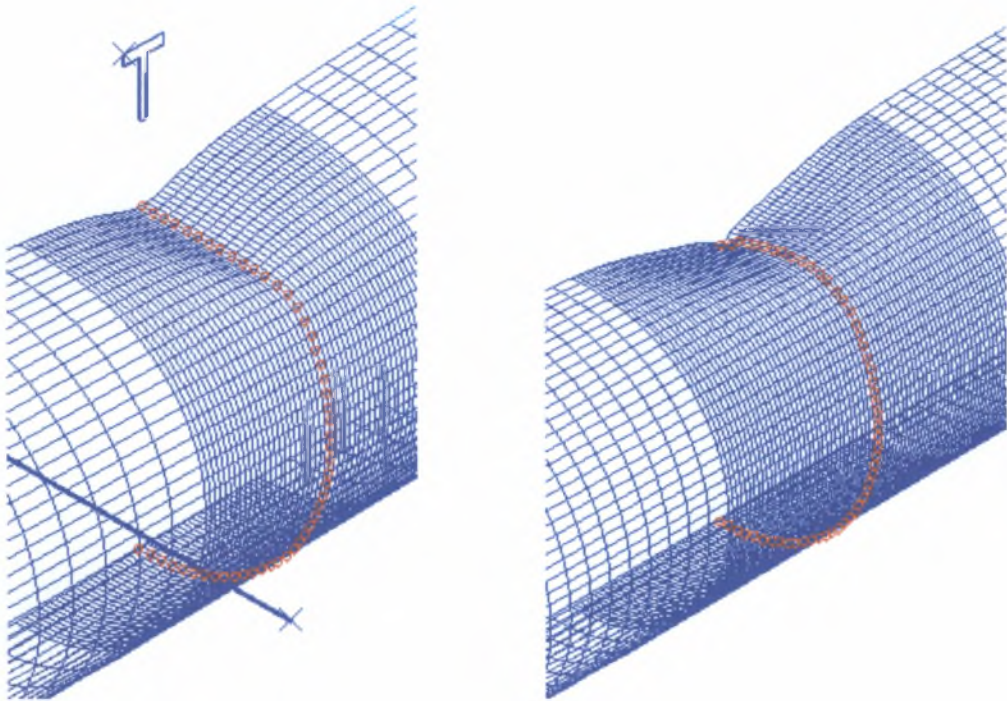


Σχήμα 4.11.4 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης $M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$ για κυλινδρικό κέλυφος με αναλογίες διαστάσεων $D/t=50$, $L/D=10$ με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια ($g=0$ και $g=0.205$) για το μοντέλο διεισδυτή τύπου “σφήνας” σε σύγκριση με το μοντέλο διεισδυτή τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου”.

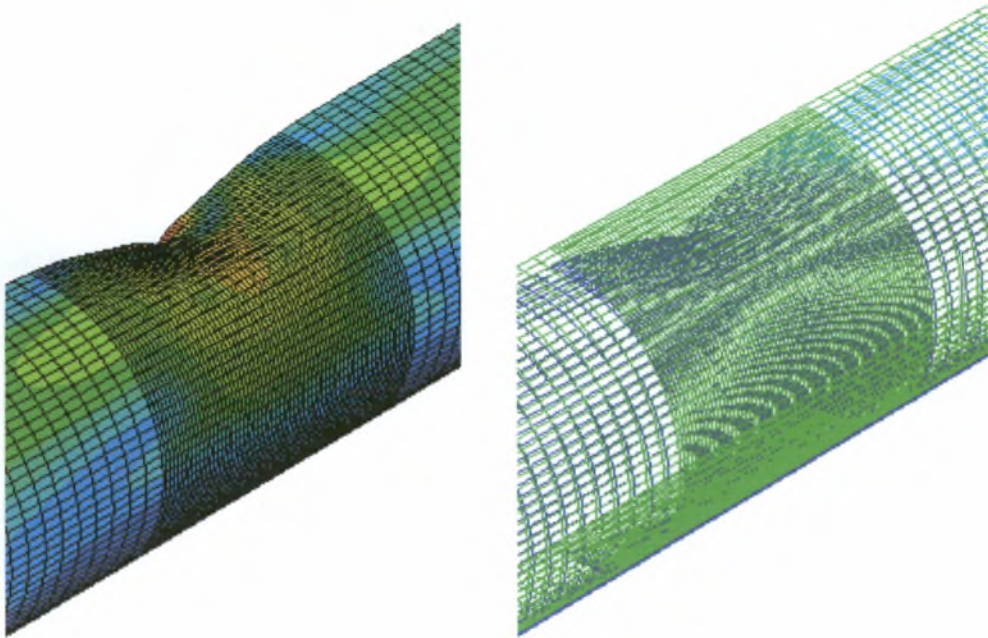


Σχήμα 4.11.5 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης $M \rightarrow P$ και $P \rightarrow M$ για κυλινδρικό κέλυφος με αναλογίες διαστάσεων $D/t=70$, $L/D=10$ με και χωρίς τοπική αρχική ατέλεια ($g=0$ και $g=0.205$) για το μοντέλο διεισδυτή τύπου “σφήνας” σε σύγκριση με το μοντέλο διεισδυτή τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου”.

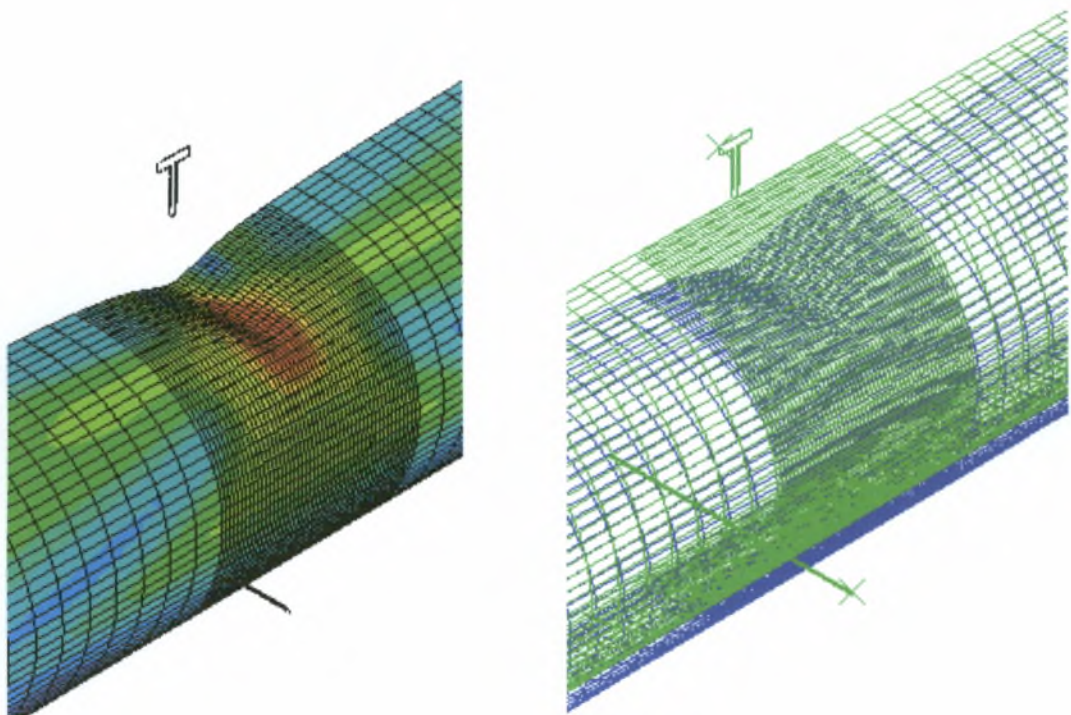
Στο σχήμα 4.11.6 που ακολουθεί φαίνεται η μεσαία διατομή του κελύφους στην παραμορφωμένη κατάσταση αμέσως μετά την διείσδυση και για τα δύο μοντέλα. Παρατηρείται πως για το μοντέλο με διεισδυτή τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου” η παραμόρφωση της διατομής είναι βαθμιαία και γίνεται πιο έντονη γύρω από το σημείο εφαρμογής του φορτίου. Αντίθετα στην περίπτωση διεισδυτή τύπου “σφήνας” η παραμόρφωση της διατομής εκτείνεται ομοιόμορφα από το κέντρο του κελύφους προς το εξωτερικό του. Στα σχήματα 4.11.7-8 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων κατά Von Mises στην περιοχή της τοπικής ατέλειας αμέσως μετά την διείσδυση.



Σχήμα 4.11.6 Μεσαία διατομή του κελύφους αμέσως μετά την διείσδυση, αριστερά για το μοντέλο με διεισδυτή τύπου “σφήνας” ή “μαχαιριού” και δεξιά για το μοντέλο με διεισδυτή τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου”, για κέλυφος με αναλογίες διαστάσεων $D/t=70$, $L/D=10$ και βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.205$.



Σχήμα 4.11.7 Παραμορφωμένη κατάσταση σε σχέση με την αρχική κατάσταση και κατανομή τάσεων κατά Von Mises στην περιοχή με την τοπική αρχική ατέλεια αμέσως μετά την διείσδυση για το μοντέλο με διεισδυτή τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου”, για κέλυφος με αναλογίες διαστάσεων $D/t=70$, $L/D=10$ και βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.205$.



Σχήμα 4.11.8 Παραμορφωμένη κατάσταση σε σχέση με την αρχική κατάσταση και κατανομή τάσεων κατά Von Mises στην περιοχή με την τοπική αρχική ατέλεια αμέσως μετά την διείσδυση για το μοντέλο με διεισδυτή τύπου “σφήνας” ή “μαχαιριού”, για κέλυφος με αναλογίες διαστάσεων $D/t=70$, $L/D=10$ και βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.205$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ : 5 Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με την αναλυτική μέθοδο κατά EPR

5.1 Ανάπτυξη αναλυτικής μεθόδου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια αναλυτική μέθοδος υπολογισμού της οριακής αντοχής σωληνωτών μελών με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους, υπό την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου, καμπτικού φορτίου ή συνδυασμού αυτών, σύμφωνα με μελέτη που προτάθηκε από την EPR και τον Loh (1985). Το καμπτικό φορτίο εφαρμόζεται έτσι ώστε να θλίβεται η τοπική ατέλεια του τοιχώματος. Στους αναλυτικούς υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (d_o), το ισοδύναμο μήκος λυγισμού (K) και θεωρείται ένα επιτρεπόμενο αρχικό ποσοστό καμπυλότητας (ΔY) της τάξεως του 0,1%L .

Στον παρακάτω πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στο παρόν κεφάλαιο και η επεξήγησή τους.

A_o	Εμβαδό διατομής σωληνωτού μέλους χωρίς αρχική ατέλεια
A_d	Εμβαδό διατομής σωληνωτού μέλους με αρχική ατέλεια
D_{out}	Εξωτερική διάμετρος διατομής σωληνωτού μέλους
d_o	Βάθος τοπικής αρχικής ατέλειας
E	Μέτρο Ελαστικότητας
I_o	Ροπή αδράνειας διατομής σωληνωτού μέλους χωρίς αρχική ατέλεια
I_d	Ροπή αδράνειας διατομής σωληνωτού μέλους με αρχική ατέλεια
K_d	Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού σωληνωτού μέλους με τοπική αρχική ατέλεια
K_o	Συντελεστής ισοδύναμο μήκους λυγισμού σωληνωτού μέλους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια
L	Μήκος σωληνωτού μέλους
M_u	Οριακή αντοχή σωληνωτού μέλους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια σε καμπτικό φορτίο
M_{ud}	Οριακή αντοχή σωληνωτού μέλους με αρχική ατέλεια σε καμπτικό φορτίο
M_p	Πλαστική αντοχή σωληνωτού μέλους χωρίς αρχική ατέλεια

M	Επιβαλλόμενο καμπτικό φορτίο
P	Επιβαλλόμενο θλιπτικό αξονικό φορτίο
P_{crd}	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού λαμβανομένου υπόψη αρχική απόκλιση από την ευθυγραμμία μεγαλύτερη από 0,1%L
P_{crd_s}	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού λαμβανομένου υπόψη την αρχική επιτρεπόμενη απόκλιση από την ευθυγραμμία μικρότερη από 0,1%L
P_E	Φορτίο Eule σωληνωτού μέλους χωρίς αρχική ατέλεια
P_{Ed}	Φορτίο Eule σωληνωτού μέλους με αρχική ατέλεια
P_u	Αντοχή σε θλιπτικό αξονικό φορτίο σωληνωτού μέλους χωρίς αρχική ατέλεια
P_{ud}	Αντοχή σε θλιπτικό αξονικό φορτίο σωληνωτού μέλους με αρχική ατέλεια
t	Πάχος τοιχώματος σωληνωτού μέλους
a	$2 - 3 \cdot (d_0 / D)$
λ_d	Λυγηρότητα σωληνωτού μέλους με αρχική ατέλεια
ΔY	Αρχική απόκλιση από την ευθυγραμμία σωληνωτού μέλους με τοπική αρχική ατέλεια

Πίνακας 5.1 Επεξήγηση των όρων των εξισώσεων της αναλυτικής μεθόδου κατά EPR

Για τις συνθήκες του προβλήματος που μελετάται στην παρούσα εργασία η εξίσωση αλληλεπίδρασης είναι:

$$1. \geq \frac{P}{P_{crd}} + \sqrt{\left[\frac{M}{\left[1 - \frac{P}{P_{Ed}} \right]} M_{ud} \right]^a} \quad (1)$$

Παρακάτω φαίνεται η διαδικασία υπολογισμού των μεγεθών της εξίσωσης (1) :

Υπολογισμός της οριακής αντοχής σε θλιπτικό αξονικό φορτίο P_u και καμπτικό φορτίο M_u της διατομής σωληνωτού μέλους χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του.

$$P_u = \sigma_y \cdot A_o \quad \text{για} \quad \frac{D}{t} \leq 60 \quad (2.a)$$

$$P_u = \sigma_u \cdot A_g \cdot \left[1.64 - 0.23 \cdot \left[\frac{D}{t} \right]^{0.25} \right] \quad \text{για} \quad \frac{D}{t} > 60 \quad (2.\beta)$$

$$\frac{M_u}{M_p} = 1.0 \quad \text{για} \quad 0 < \frac{\sigma_y \cdot D}{t} \leq 10343 \text{MPa} \quad (3.\alpha)$$

$$\frac{M_u}{M_p} = 1.13 - 2.58 \cdot \frac{\sigma_y \cdot D}{E \cdot t} \quad \text{για} \quad 10343 \text{MPa} < \frac{\sigma_y \cdot D}{t} \leq 20685 \text{MPa} \quad (3.\beta)$$

$$\frac{M_u}{M_p} = 0.94 - 0.76 \cdot \frac{\sigma_y \cdot D}{E \cdot t} \quad \text{για} \quad 20685 \text{MPa} < \frac{\sigma_y \cdot D}{t} \leq 300\sigma_y \text{MPa} \quad (3.\gamma)$$

όπου,

$$M_p = \sigma_y \cdot t \cdot (D - t)^2$$

Η οριακή αντοχή σε θλιπτικό αξονικό φορτίο P_u και καμπτικό φορτίο M_u διατομής σωληνωτού μέλους με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του είναι :

$$\frac{P_{ud}}{P_u} = \frac{A_d}{A_o} = \exp \left[-0.08 \cdot \frac{d_o}{t} \right] \geq 0.45 \quad (4)$$

$$\frac{M_{ud}}{M_u} = \frac{I_d}{I_o} = \exp \left[-0.06 \cdot \frac{d_o}{t} \right] \geq 0.55 \quad (5)$$

Το φορτίο λυγισμού Euler σωληνωτών μελών με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους είναι :

$$P_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_o}{(K_o \cdot L)^2} \quad (6)$$

$$P_{Ed} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_d}{(K_d \cdot L)^2} \quad (7)$$

όπου,

$$K_o = K_d$$

οπότε,

$$\frac{P_{Ed}}{P_E} = \frac{M_{ud}}{M_u} = \frac{I_d}{I_o} = \exp\left[-0.06 \cdot \frac{d_o}{t}\right] \geq 0.55 \quad (8)$$

Η λυγηρότητα σωληνωτών μελών με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους υπολογίζεται από την σχέση :

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{P_{ud}}{P_{Ed}}} \geq \sqrt{\frac{P_{ud}}{P_E}} \quad (9)$$

Το κρίσιμο αξονικό φορτίο αστοχίας σωληνωτών μελών με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους είναι :

$$P_{crd_o} = P_{ud} \cdot [1 - 0.25 \cdot \lambda_d] \quad \text{για} \quad \lambda_d < 1.41 \quad (10.\alpha)$$

$$P_{crd_o} = P_{ud} \cdot \frac{1}{\lambda_d^2} = P_{Ed} \quad \text{για} \quad \lambda_d \geq 1.41 \quad (10.\beta)$$

Παρατηρείται ότι για τιμές της λυγηρότητας μεγαλύτερες ή ίσες από 1.41 η αστοχία του σωληνωτού μέλους επέρχεται στην ελαστική περιοχή, όταν το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο πάρει την τιμή του Euler δηλαδή, $P_{crd_o} = P_{Ed} \ll P_{ud}$. Αντίθετα για τιμές της λυγηρότητας μικρότερες από 1.41 το σωληνωτό μέλος αστοχεί στην πλαστική περιοχή για τιμή του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου $P_{crd_o} = P_{ud} \ll P_{Ed}$.

Υπολογισμός του κρίσιμο αξονικό φορτίο αστοχίας σωληνωτών μελών με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους και με αρχικό ποσοστό απόκλισης από την ευθυγραμμία ΔY μεγαλύτερο από το επιτρεπόμενο ($>0,1\%L$).

$$\frac{P_{crd}}{P_{crd_o}} + \frac{P_{crd} \cdot \Delta Y}{\left[1 - \frac{P_{crd}}{P_{crd_o}}\right] M_{ud}} = 1, \quad (11.a)$$

ή

$$a \cdot P_{crd}^2 + b \cdot P_{crd} + c = 0 \quad (11.\beta)$$

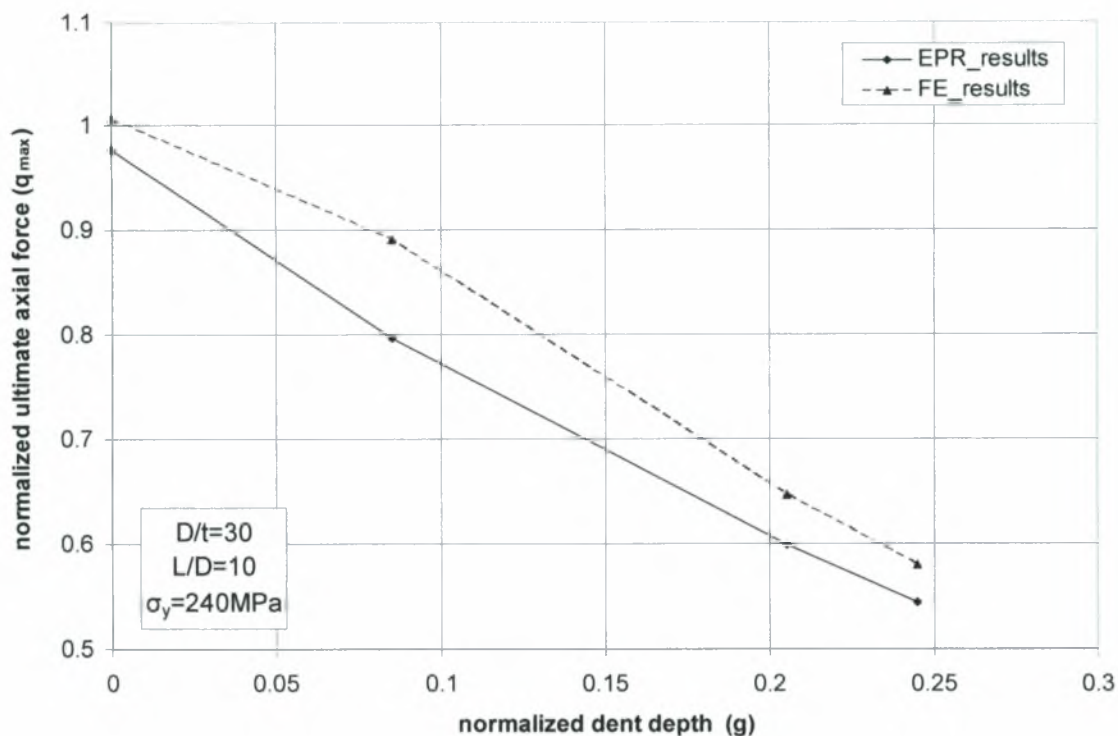
όπου

$$a = -\frac{M_{ud}}{P_{Ed}}, \quad b = M_{ud} + \frac{M_{ud}}{P_{Ed}} + \Delta Y \cdot P_{crd_o}, \quad c = P_{crd_o} \cdot M_{ud}$$

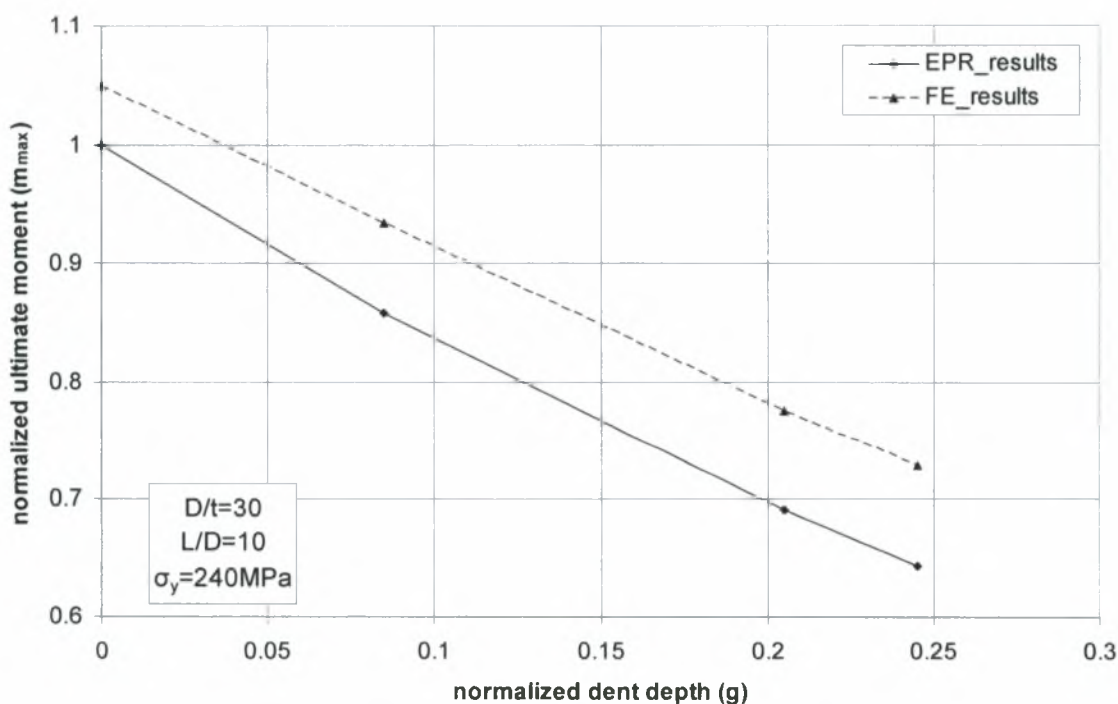
Η παραπάνω σχέση δίνει το κρίσιμο θλιπτικό αξονικό φορτίο που προκαλεί αστοχία σε σωληνωτό μέλος με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του και με αρχική καμπυλότητα λαμβάνοντας υπόψη την πλαστικότητα και την τοπική /ολική αστοχία, χωρίς βέβαια την επιβολή εξωτερικού καμπτικού φορτίου.

5.2 Αποτελέσματα αναλυτικής μεθόδου

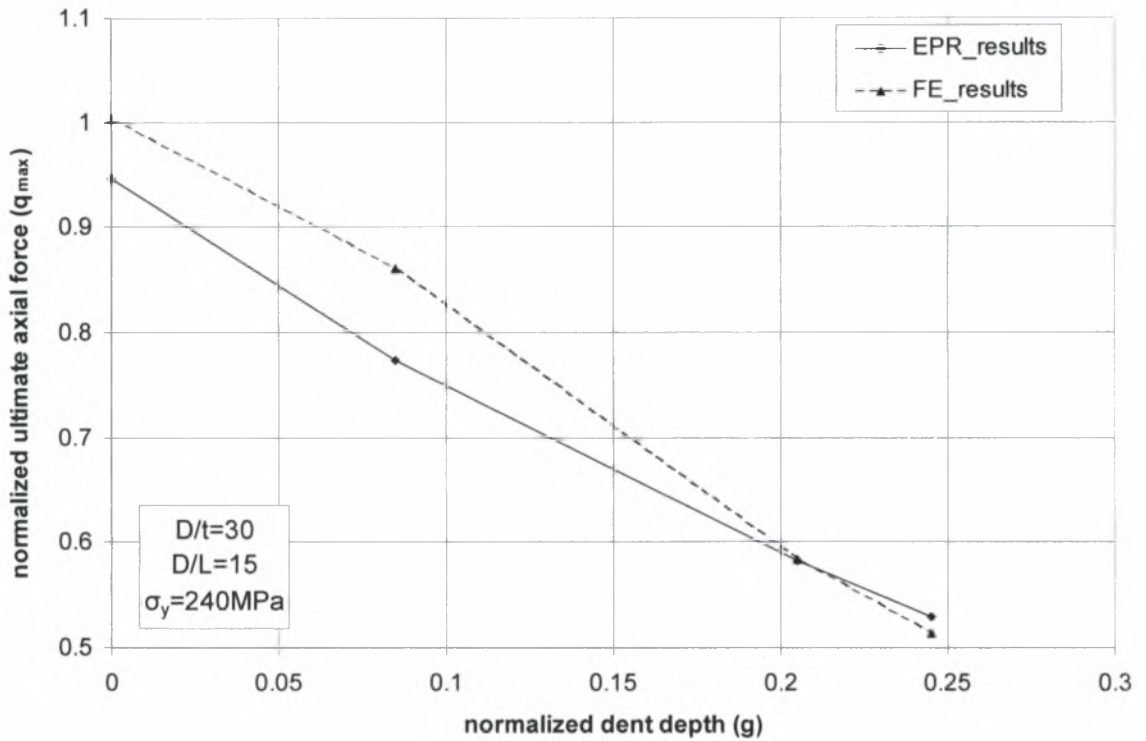
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατίθενται τα αποτελέσματα της αναλυτικής μεθόδου κατά EPR, τα οποία παρουσιάζονται με συνεχή γραμμή, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης, που παρουσιάζονται με διακεκομμένη γραμμή, ενδεικτικά για τα κελύφη με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=10$ και $D/t=30$, $L/D=15$. Τα αποτελέσματα για τα υπόλοιπα κελύφη παραλείπονται διότι παρουσιάζουν ακριβώς την ίδια συμπεριφορά.. Στα σχήματα 5.1-5.4 φαίνονται τα διαγράμματα για την περίπτωση που στο κυλινδρικό κέλυφος με ή χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά του εφαρμόζεται θλιπτικό αξονικό φορτίο ή καμπτικό φορτίο. Και για τις δύο περιπτώσεις φόρτισης παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου q_{max} ή m_{max} , σε σχέση με την μεταβολή λόγου g . Όπως παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υπερεκτιμά την οριακή αντοχή των σωληνωτών μελών. Η διαφορά των δύο λύσεων δικαιολογείται από το γεγονός ότι η εξίσωση αλληλεπίδρασης (1) της αναλυτικής μεθόδου είναι προσαρμοσμένη στα πειραματικά αποτελέσματα και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κυλινδρικών κελυφών πειραμάτων που συγκεντρώθηκαν από την EPR για την ανάπτυξή της. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή για κελύφη εκτός του εύρους των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κελυφών των πειραμάτων αυτών. Θα πρέπει να σημειωθεί πως καμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις κελυφών δεν πληρεί όλες τις προϋποθέσεις.



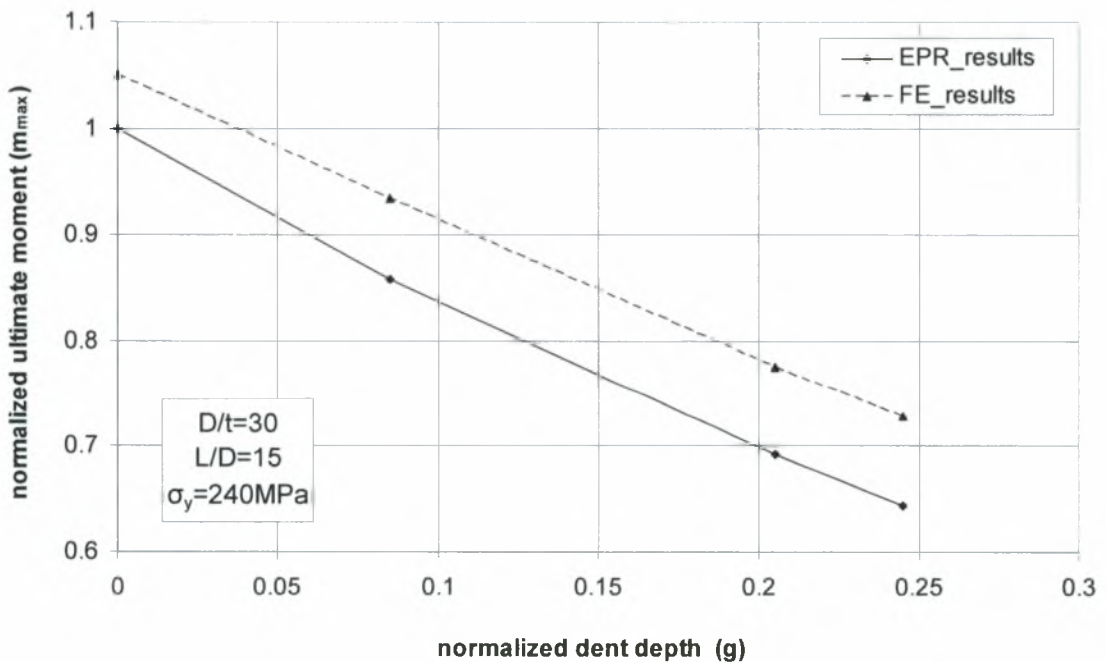
Σχήμα 5.1 Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων αριθμητικής και αναλυτικής μεθόδου του θλιπτικού αξονικού φορτίου αστοχίας (q_{max}) σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g) για κέλυφος με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=10$.



Σχήμα 5.2 Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων αριθμητικής και αναλυτικής μεθόδου του καμπτικού φορτίου αστοχίας (m_{max}) σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g) για κέλυφος με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=10$.

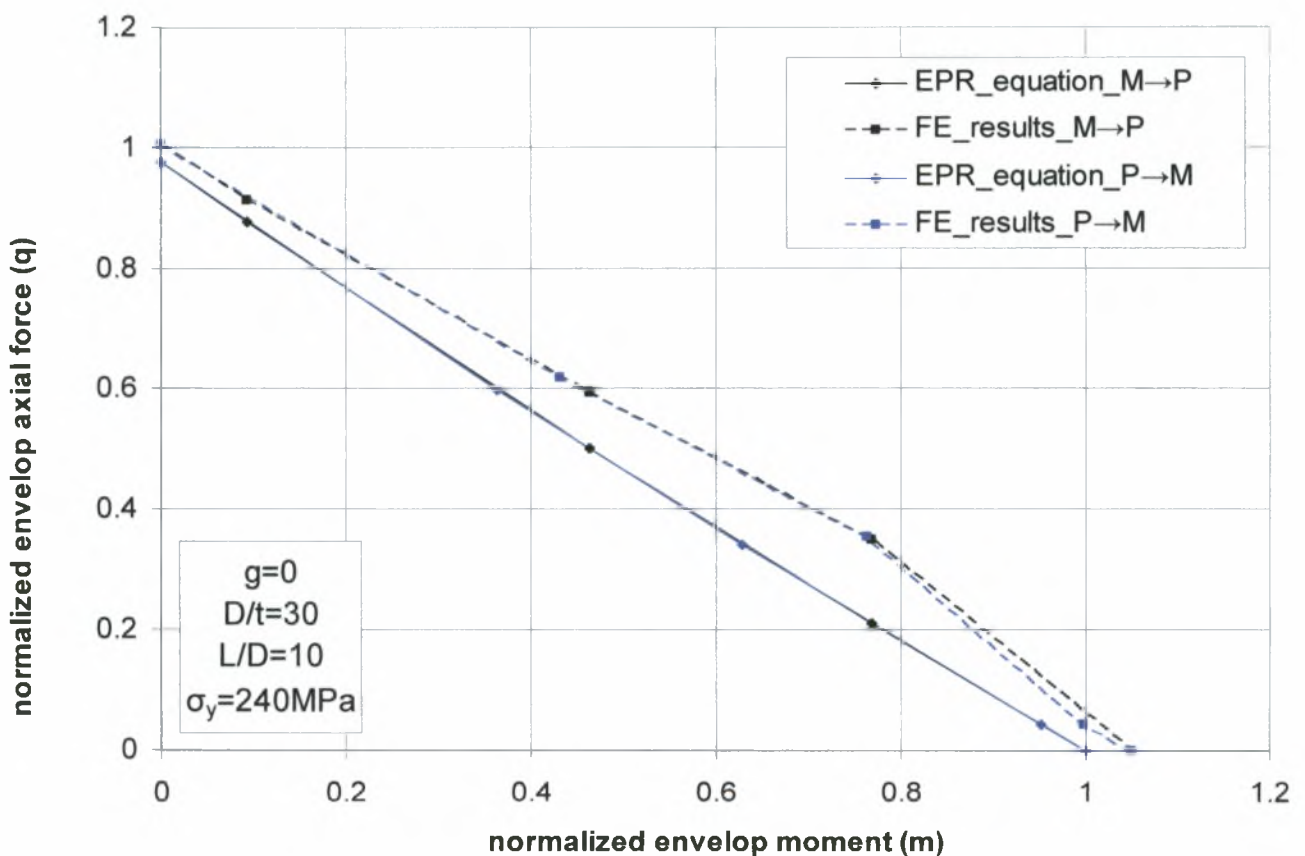


Σχήμα 5.3 Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων αριθμητικής και αναλυτικής μεθόδου του θλιπτικού αξονικού φορτίου αστοχίας (q_{max}) σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g) για κέλυφος με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=15$.

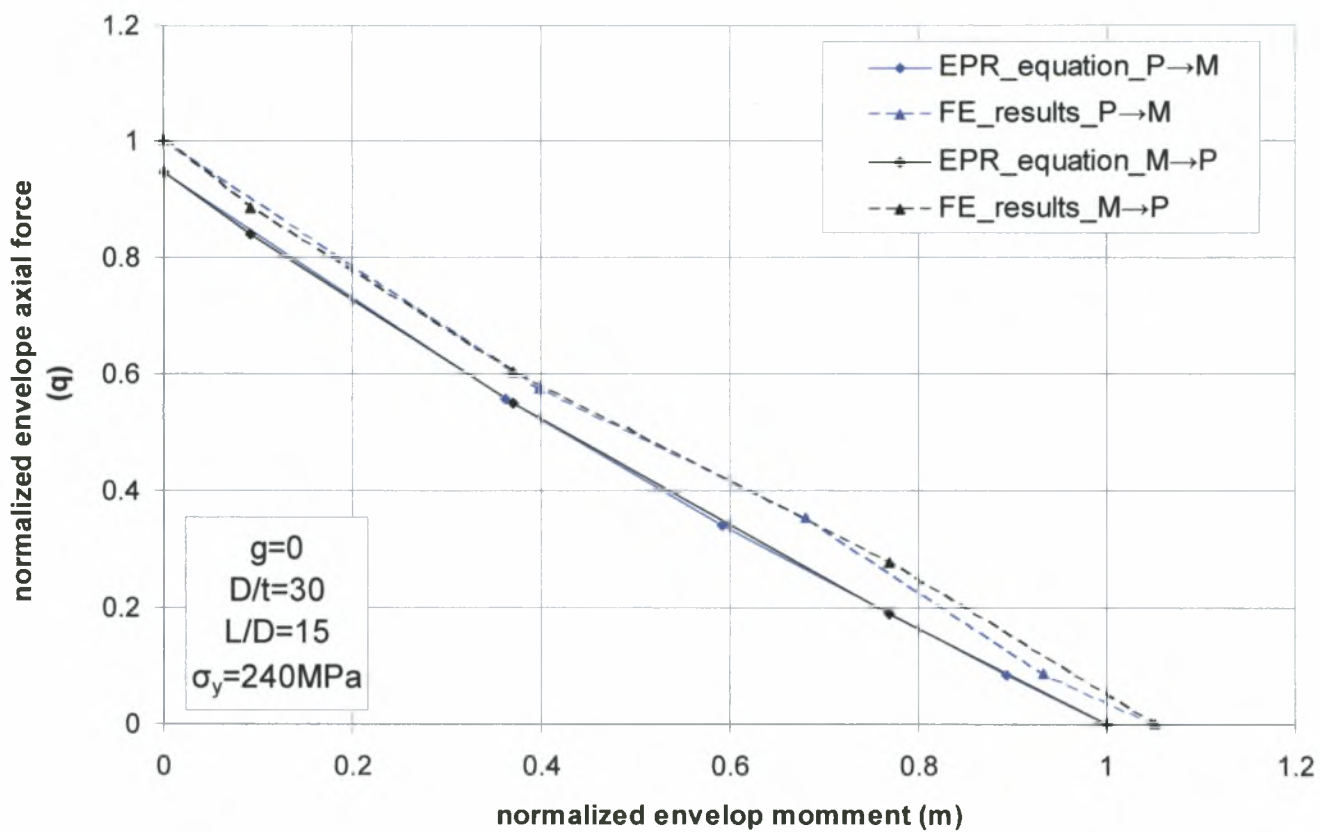


Σχήμα 5.4 Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων αριθμητικής και αναλυτικής μεθόδου του καμπτικού φορτίου αστοχίας (m_{max}) σε σχέση με το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας (g) για κέλυφος με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=15$.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν (σχήματα 5.5-5.6) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο λύσεων για την περίπτωση που στα σωληνωτά μέλη χωρίς τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους εφαρμόζεται καμπτικό και θλιπτικό αξονικό φορτίο με όποια αλληλουχία φόρτισης. Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται η μεταβολή του λόγου q_{max} και m_{max} σε σχέση με την μεταβολή του λόγου m και q αντίστοιχα. Παρατηρείται πως και σε αυτή την περίπτωση φόρτισης η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υπερεκτιμά την οριακή αντοχή των σωληνωτών μελών. Η διαφορά των δύο λύσεων οφείλεται στους ίδιους λόγους με παραπάνω.



Σχήμα 5.5 Συγκριτικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης M→P και P→M των αποτελεσμάτων αριθμητικής και αναλυτικής μεθόδου για κέλυφος με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=10$ και βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0$.



Σχήμα 5.6 Συγκριτικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης για δύο αλληλουχίες φόρτισης M→P και P→M των αποτελεσμάτων αριθμητικής και αναλυτικής μεθόδου για κέλυφος με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$, $L/D=15$ και βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0$.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται το πρόβλημα της οριακής αντοχής χαλύβδινων κυλινδρικών σωληνωτών μελών με ελαστοπλαστική συμπεριφορά που φέρουν τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους υπό τη μορφή “κοιλώματος” προερχόμενη από την επιβολή εγκάρσιου φορτίου στο τοίχωμα, κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου, καμπτικού φορτίου και συνδυασμού αυτών. Το καμπτικό φορτίο εφαρμόζεται έτσι ώστε να θλίβεται η περιοχή του κυλινδρικού κελύφους με την τοπική αρχική ατέλεια. Γίνεται αριθμητική διερεύνηση με χρήση μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Κατά τη προσομοίωση των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται στοιχεία κελύφους, λαμβάνοντας υπόψη την μη γραμμικότητα της γεωμετρίας και του υλικού καθώς και την αστάθεια του φαινομένου της αστοχίας.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται και προσομοιάζονται πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν από τους Landet (1987) και Taby (1986) για την μελέτη της οριακής αντοχής χαλύβδινων σωληνωτών μελών με τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική επίλυση συγκρίνονται με αυτά των πειραμάτων. Κατά την προσομοίωση των πειραμάτων αριθμητικά η αντοχή των κελυφών υπερεκτιμάται ή υποεκτιμάται. Η απόκλιση αυτή είναι πολύ μικρή έως και αρκετά μεγάλη για κάποιες περιπτώσεις και οφείλεται στην ελλιπή γνώση κάποιων δεδομένων του προβλήματος.

Κατά την παραμετρική ανάλυση εξετάζονται κελύφη με αναλογίες διαστάσεων $D/t=30$ και $L/D=10$, $D/t=30$ και $L/D=15$, $D/t=50$ και $L/D=10$, $D/t=50$ και $L/D=15$, $D/t=70$ και $L/D=10$ και τέλος $D/t=70$ και $L/D=15$ για βάθη τοπικής αρχικής ατέλειας $g=0.085$, $g=0.205$ και $g=0.245$. Παρατηρείται ότι η αύξηση του βάθους της τοπικής αρχικής ατέλειας επιφέρει μείωση της οριακής αντοχής του κελύφους σε οποιοδήποτε από τα παραπάνω είδη φόρτισης. Επίσης όσον αφορά στο αρχικά απαραμόρφωτο κέλυφος κατά την επιβολή σε αυτό θλιπτικού αξονικού φορτίου γίνεται παραδοχή πως η αστοχία του επέρχεται στο σημείο όπου η ακαμψία του παρουσιάζει πρώτη φορά απότομη μεταβολή ενώ, αυτό μπορεί να παραλάβει επιπλέον φορτίο από το θεωρούμενο φορτίο αστοχίας παραμορφούμενο περισσότερο. Η παραδοχή αυτή ισχύει εν μέρει για το αρχικά απαραμόρφωτο κέλυφος με

αναλογίες διαστάσεων $D/t=70$ και $L/D=10$, με την διαφορά ότι από το σημείο της αστοχίας του και έπειτα δεν είναι δυνατή η εφαρμογή σε αυτό μεγαλύτερων φορτίων του φορτίου αστοχίας.

Μελετάται επίσης η επίδραση της αλληλουχίας της φόρτισης κατά την εφαρμογή θλιπτικού αξονικού φορτίου και καμπτικού φορτίου και παρατηρείται ότι δεν επηρεάζει σημαντικά την οριακή αντοχή του κελύφους. Μικρές αποκλίσεις στα φορτία αστοχίας υπάρχουν κατά την αλλαγή της σειράς φόρτισης (αξονικής ή καμπτικής) για τα κελύφη χωρίς τοπική αρχική ατέλεια.

Επιπλέον εξετάζεται η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κελύφους στην οριακή αντοχή του. Η μείωση του λόγου L/D όταν ο λόγος D/t παραμένει σταθερός έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της οριακής αντοχής του κελύφους κάτω από την επίδραση θλιπτικού αξονικού φορτίου ανεξάρτητα από το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας ενώ, δεν επηρεάζει την οριακή αντοχή του κελύφους στην περίπτωση επιβολής καμπτικού φορτίου. Για την περίπτωση που ο λόγος D/t αυξάνει και ο λόγος L/D παραμένει σταθερός παρατηρείται πως η αύξησή του επιφέρει μείωση της αντοχής του κελύφους σε σχέση με την πλαστική αντοχή της απαραμόρφωτης διατομής για οποιοδήποτε είδος φόρτισης ανεξάρτητα από το βάθος της τοπικής αρχικής ατέλειας. Στην περίπτωση που ληφθεί υπόψη η παραπάνω παραδοχή για τα αρχικά απαραμόρφωτα κελύφη η επίδραση του λόγου D/t κατά την εφαρμογή θλιπτικού αξονικού φορτίου δεν ακολουθεί το πιο πάνω συμπέρασμα.

Όσον αφορά στο όριο διαρροής του κελύφους τα κελύφη με μεγαλύτερο όριο διαρροής παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές σε απόλυτα μεγέθη, αλλά μικρότερα κανονικοποιημένα φορτία αστοχίας (σε σχέση με το πλαστικό φορτίο) για όλα τα είδη φόρτισης.

Εξετάζεται η επίδραση του τύπου του διεσδυτή που χρησιμοποιείται για την δημιουργία της τοπικής αρχικής ατέλειας στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης. Παρατηρείται πως κατά την χρήση διεσδυτή τύπου “συγκεντρωμένου φορτίου” υπερεκτιμάται η οριακή αντοχή του κελύφους σε σχέση με την χρήση διεσδυτή τύπου “σφήνας” ή “μαχαιριού”.

Τέλος παρουσιάζεται μια αναλυτική μέθοδος υπολογισμού της οριακής αντοχής χαλύβδινων κυλινδρικών κελυφών που φέρουν τοπική αρχική ατέλεια στο τοίχωμά τους και υποβάλλονται σε θλιπτικό αξονικό φορτίο, καμπτικό φορτίο ή και συνδυασμό τους. Η μέθοδος αναπτύχθηκε στην Exxon Production Research Co. (EPR) από τον Loh (1993) και βασίζεται σε μια εξίσωση αλληλεπίδρασης

αξονικού/καμπτικού φορτίου. Η εξίσωση αλληλεπίδρασης της μεθόδου αυτής είναι προσαρμοσμένη στα αποτελέσματα και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά 151 πειραματικών διαδικασιών που συγκεντρώθηκαν μέσω της EPR από διάφορες αναφορές πειραμάτων. Επίσης μία δεύτερη πηγή πειραματικών δεδομένων αποτέλεσε ένα βιομηχανικό σχέδιο 128 πειραμάτων που αποσκοπούσε στην αποπεράτωση της ανάπτυξης της εξισώσεως αυτής. Και στις δύο περιπτώσεις το εύρος των γεωμετρικών χαρακτηριστικών είναι σύμφωνο με την τυπική γεωμετρία σωληνωτών μελών με τοπική ατέλεια στο τοίχωμά τους που αποτελούν τμήματα στηρίξεων θαλάσσιων εξεδρών. Κατά την σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής μεθόδου και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή της εξίσωσης αυτής στα σωληνωτά μέλη της παραμετρικής μελέτης παρατηρείται πως η αναλυτική μέθοδος είναι πιο συντηρητική.



BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] L. Duan, W.F. Chen, J.T. Loh, 1993, “Analysis of Dented Tubular Members Using Moment Curvature Approach”
- [2] Walid A. Salman and Peter C.Birkemoe, 1994, “An Analytical Investigation of the Change in Tubular Member Behaviour Resulting from Damage”, Department of Civil Engineering, University of Toronto
- [3] E.Landet, I.Lotsberg, and F.Axhg, 1987, “Ultimate Capacity of Dented Tubular Members”, Veritas Offshore Technology and Services Hovik, Norway
- [4] J.T. Loh, 1993, “Ultimate Strength of Dented Tubular Member Steel Members”, Exxon Production Research Co. Houston, Texas. USA

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



0040000745 12