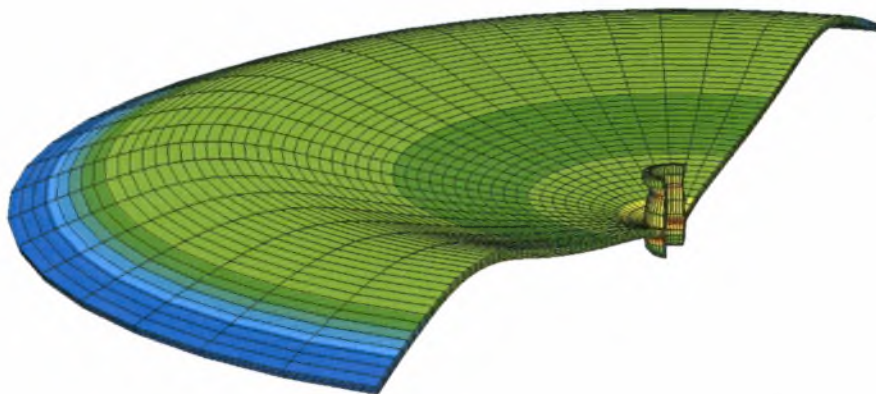




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ :

Υπολογισμός οριακής αντοχής και αντοχής σε κόπωση σε δοχεία πίεσης, με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Γιώργος Ράλλης

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Πτυχίου Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

ΒΟΛΟΣ 2006



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

Αριθ. Εισ.: 5082/1
Ημερ. Εισ.: 06-11-2006
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ
2006
ΡΑΛ

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Σπύρος Καραμάνος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Κωνσταντίνος Παπαδημητρίου
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Πετρόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, κ. Σπύρο Καραμάνο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου.

Ευχαριστώ επίσης τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Κωνσταντίνο Παπαδημητρίου και κ. Γιώργο Πετρόπουλο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ευχαριστώ επίσης τους προπτυχιακούς, μεταπτυχιακούς και διδακτορικούς φοιτητές του εργαστηρίου της Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών για την υποστήριξη και τη βοήθεια τους τον τελευταίο χρόνο.

Θερμές ευχαριστίες στους φίλους και στους συμφοιτητές μου για την επικοινωνιακή συνεργασία και την δημιουργία ενός ιδιαίτερα ευχάριστου κλίματος κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στην οικογένεια μου, για την υποστήριξή τους, ηθική και οικονομική, όλα αυτά τα χρόνια καθώς και την πίστη που μου έδειξαν στο ότι μπορώ να τα καταφέρω. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένεια μου.

Γιώργος Ράλλης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενική περιγραφή των δοχείων πίεσης.....	1
1.2 Σχεδιασμών των δοχείων πίεσης.....	5
1.2.1 Σχεδιασμός με βάση συγκεκριμένη ανάλυση.....	7
1.3 Ακροφύσια σε δοχεία πίεσης.....	7
1.4 Αντικείμενο της μελέτης.....	8

Κεφάλαιο 2: Οριακή αντοχή σφαιρικού δοχείου πίεσης

2.1 Εισαγωγή.....	9
2.2 Περιγραφή της γεωμετρίας των δοχείων πίεσης με ακροφύσια P1 και P2 αντίστοιχα	9
2.3 Μη γραμμική ανάλυση σε δισδιάστατη μορφή του μισού δοχείου πίεσης με αξονική συμμετρία.....	13
2.3.1 Ανάλυση ακροφυσίου P1.....	16
2.3.2 Ανάλυση ακροφυσίου P2.....	17
2.4 Οριακή ανάλυση σε τρισδιάστατη μορφή του δοχείου πίεσης με ακροφύσιο P1..	19
2.4.1 Οριακή ανάλυση του σφαιρικού δοχείου πίεσης υπό την επίδραση αξονικής δύναμης στο ακροφύσιο P1.....	20
2.4.2 Οριακή ανάλυση του σφαιρικού δοχείου πίεσης με αρχική ατέλεια υπό την επίδραση αξονικής δύναμης στο ακροφύσιο P1.....	24
2.4.3 Οριακή ανάλυση του σφαιρικού δοχείου πίεσης υπό την επίδραση συγκεντρωμένης ροπής στο ακροφύσιο P1	25
2.4.4 Οριακή ανάλυση του σφαιρικού δοχείου πίεσης υπό την επίδραση συγκεντρωμένης ροπής και μετά αξονικής δύναμης στο ακροφύσιο P1.....	27
2.4.5 Οριακή ανάλυση του σφαιρικού δοχείου πίεσης υπό την επίδραση αξονικής δύναμης και μετά συγκεντρωμένης ροπής στο ακροφύσιο P1	28

Κεφάλαιο 3: Εκτίμηση της αντοχής σε κόπωση συγκολλητών δοχείων πίεσης

3.1 Εισαγωγή.....	30
3.2 Υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση κυλινδρικού δοχείου υπό εσωτερική πίεση	
3.2.1 Εισαγωγή.....	33
3.2.2 Μέθοδος Dong & Hong.....	35
3.2.3 Μέθοδος European Standard EN 13445.....	40

3.3 Υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση σφαιρικού δοχείου πίεσης.....	51
3.3.1 Εισαγωγή.....	51
3.3.2 Υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση σφαιρικού δοχείου πίεσης υπό την επίδραση αξονικής δύναμης.....	51
3.3.2.1 Εισαγωγή.....	51
3.3.2.2 Μέθοδος Dong & Hong.....	53
3.3.2.3 Μέθοδος European Standard EN 13445.....	58
3.3.3 Υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση σφαιρικού δοχείου πίεσης υπό την επίδραση εσωτερικής πίεσης.....	69
3.3.3.1 Εισαγωγή.....	69
3.3.3.2 Μέθοδος Dong & Hong.....	71
3.3.3.3 Μέθοδος European Standard EN 13445.....	75
<u>Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα.....</u>	<u>86</u>
<u>BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</u>	<u>89</u>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

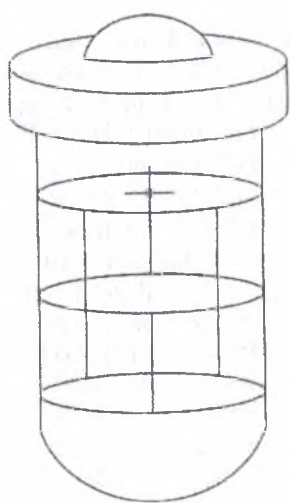
1.1 Γενική περιγραφή των δοχείων πίεσης

Ως δοχεία πίεσης ορίζονται τα δοχεία, οι δεξαμενές και οι σωλήνες που αποθηκεύουν ή παραλαμβάνουν ρευστά υπό πίεση. Σε ένα δοχείο πίεσης υπάρχει διαφορά πίεσης εσωτερικά και εξωτερικά. Η εσωτερική πίεση είναι συνήθως μεγαλύτερη από την εξωτερική εκτός από μερικές μεμονωμένες περιπτώσεις. Το ρευστό το οποίο βρίσκεται εσωτερικά του δοχείου μπορεί να υφίσταται μια μεταβολή στην κατάσταση του όπως συμβαίνει και στην περίπτωση του λέβητα ατμού ή μπορεί να συνδυαστεί με άλλα αντιδρώντα όπως την περίπτωση της χημικής αντίδρασης. Στα δοχεία πίεσης συνήθως υπάρχει ένας συνδυασμός υψηλών πιέσεων και υψηλών θερμοκρασιών και σε μερικές περιπτώσεις εύφλεκτων υγρών. Εξαιτίας αυτών των κινδύνων, είναι αναγκαίο να γίνει ο κατάλληλος σχεδιασμός έτσι ώστε να μην υπάρχει καθόλου διαρροή. Επιπρόσθετα, αυτά τα δοχεία πρέπει να σχεδιαστούν προσεκτικά έτσι ώστε να αντέχουν την υφιστάμενη πίεση και θερμοκρασία λειτουργίας. Θα πρέπει συνεχώς να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η πιθανότητα θραύσης ενός δοχείου πίεσης που ενδέχεται να προκαλέσει σοβαρούς τραυματισμούς και καταστροφή των γύρω εγκαταστάσεων. Για το λόγο αυτό, η ασφάλεια και η δομική επάρκεια της κατασκευής είναι οι θεμελιώδεις παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των δοχείων πίεσης και φυσικά αυτές εξαρτώνται από την ορθότητα των κανόνων σχεδιασμού.

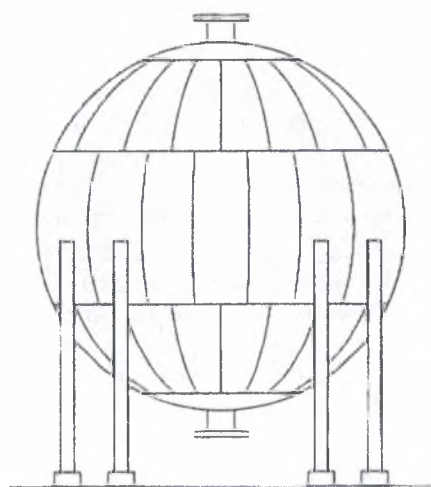
Τα δοχεία πίεσης και οι δεξαμενές χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο αριθμό βιομηχανιών, για παράδειγμα σε πετρελαιοχημικές βιομηχανίες για αποθήκευση και επεξεργασία ακατέργαστου πετρελαίου σε ειδικές δεξαμενές όπως επίσης και για την αποθήκευση βενζίνης σε σταθμούς εξυπηρέτησης. Η χρήση τους έχει επεκταθεί σε ολόκληρο τον κόσμο. Τα δοχεία πίεσης και οι δεξαμενές είναι απαραίτητα για τις χημικές και πετρελαιοχημικές βιομηχανίες. Είναι με αυτό το είδος εξοπλισμού που πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις, οι διαχωρισμοί και η αποθήκευση ακατέργαστων υλικών. Γενικά, αυτού του είδους εξοπλισμός είναι απαραίτητος για ένα μεγάλο εύρος βιομηχανιών για σκοπούς αποθήκευσης και παραγωγής.

Το μέγεθος και η γεωμετρία των δοχείων πίεσης, διαφέρει σημαντικά από τα μεγάλα κυλινδρικά δοχεία που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση αερίου υψηλής πίεσης. Μερικά είναι θαμμένα στο έδαφος αλλά τα περισσότερα τοποθετούνται στο έδαφος ή στηρίζονται σε πλατφόρμες. Τα δοχεία πίεσης είναι συνήθως σφαιρικά ή κυλινδρικά. Γενικότερα προτιμούνται τα κυλινδρικά δοχεία επειδή παρουσιάζουν λιγότερα κατασκευαστικά προβλήματα και σε αυτά μπορεί να αξιοποιηθεί καλύτερα ο διαθέσιμος χώρος. Λέβητες ατμού, εναλλάκτες θερμότητας και χημικοί αντιδραστήρες είναι μερικά παραδείγματα κυλινδρικών δοχείων πίεσης. Τα σφαιρικά δοχεία έχουν το πλεονέκτημα ότι απαιτούν λεπτότερο πάχος για δεδομένη πίεση και διάμετρο σε σχέση με τα κυλινδρικά. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για μεγάλα δοχεία αερίου ή υγρού. Δοχεία υγρών σε χαμηλές πιέσεις λειτουργίας έχουν πολλές φορές σφαιροειδή σχήμα ή μοιάζουν σαν μια σταγόνα. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι δημιουργείται η καλύτερη δυνατή κατανομή των τάσεων όταν η δεξαμενή είναι γεμάτη.

Η γεωμετρία ενός τυπικού δοχείου πίεσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. Επίσης στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται ένα δοχείο πίεσης το οποίο είναι μια αποθηκευτική σφαίρα.



Σχήμα 1.1: Τυπικό δοχείο πίεσης



Σχήμα 1.2: Αποθηκευτική σφαίρα

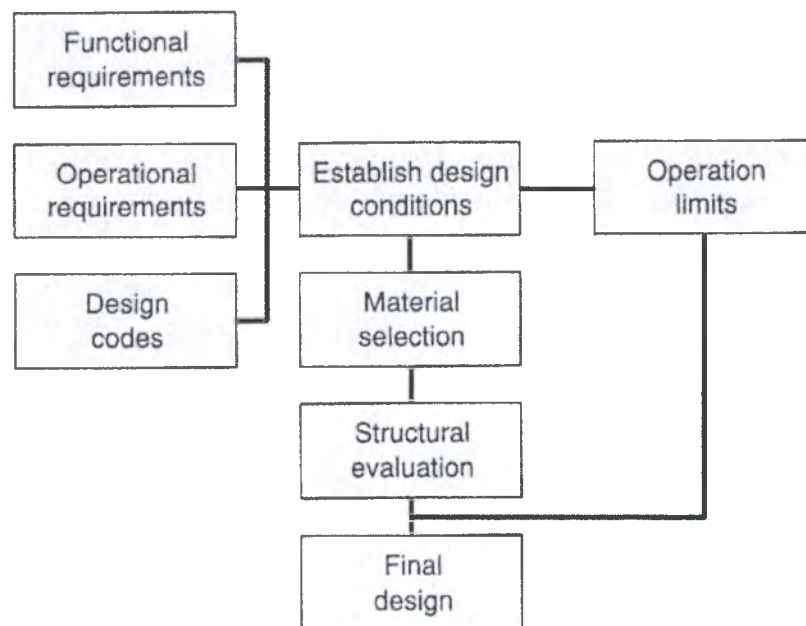
Λειτουργικά το δοχείο ενεργεί σαν μια δεξαμενή διότι ο σκοπός του είναι η αποθήκευση ρευστού. Παρόλα αυτά επειδή λειτουργεί σε πιέσεις μεγαλύτερες από την ατμοσφαιρική, μπορεί να ταξινομηθεί στην κατηγορία των δοχείων πίεσης.

Οι γεωμετρία των δοχείων χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη είναι δοχεία τύπου ελάσματος και η δεύτερη δοχεία τύπου κελύφους. Η κατασκευή των δοχείων τύπου ελάσματος χρησιμοποιείται σε επίπεδα καλύμματα (καπάκια για δοχεία πίεσης και εναλλάκτες θερμότητας) τα οποία παρουσιάζουν καλή αντοχή σε κάμψη ενώ τα δοχεία τύπου κελύφους λειτουργούν με τρόπο ανάλογο όπως ένα μπαλόνι υπό πίεση (μεμβρανική λειτουργία). Γενικά η κατασκευή των δοχείων τύπου κελύφους είναι προτιμότερη λόγω του γεγονότος ότι απαιτούν μικρότερο πάχος, συνεπώς λιγότερο υλικό.

Τα δοχεία πίεσης κατασκευάζονται σε όλα τα σχήματα και μεγέθη με διάμετρο που ξεκινά από μερικά εκατοστά και φτάνει έως και 50m ή μεγαλύτερη. Η πίεση μπορεί να κυμαίνεται από 0,25 kPa έως 200 MPa.

Η Αμερικάνικη Ένωση Μηχανολόγων Μηχανικών (ASME) καθορίζει μια διακύμανση της εσωτερικής πίεσης από 0,1 MPa έως 30 MPa.

Τα δοχεία πίεσης σχεδιάζονται με τρόπο τέτοιο έτσι ώστε να μπορούν να αντεπεξέλθουν στις διάφορες απαιτήσεις, όπως αυτές ορίζονται από τους σχεδιαστές. Το πρώτο βήμα της διαδικασίας σχεδιασμού είναι η συλλογή των απαραίτητων πληροφοριών, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό τον βασικό κορμό των απαιτήσεων σχεδιασμού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3: Βήματα της διαδικασίας σχεδιασμού

Όταν καθοριστούν οι απαιτήσεις σχεδιασμού, επιλέγονται τα κατάλληλα υλικά και ο κανόνας σχεδιασμού ανάλογα πάντα με την περίπτωση, θα δώσει ένα επιτρεπτό σχεδιασμό ή ονομαστική τάση η οποία χρησιμοποιείται για τον ορισμό του πάχους του δοχείου πίεσης. Επιπρόσθετα, κάποιιοι άλλοι κανόνες καλύπτουν το σχεδιασμό κάποιων επί μέρους τμημάτων του δοχείου όπως για παράδειγμα των ακροφυσίων. Ακολουθώντας αυτούς τους κανόνες γίνεται μια ανάλυση των επί μέρους τμημάτων όσο αφορά την αστοχία τους. Οι περισσότεροι τύποι αστοχίας σχετικά με το σχεδιασμό των δοχείων πίεσης εξαρτώνται από τις τάσεις και για αυτό είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί η επάρκεια της κατανομής των τάσεων και ο έλεγχος για πρόληψη των διαφόρων τύπων αστοχίας. Ο προτεινόμενος σχεδιασμός είναι τελικά επαναλαμβανόμενος μέχρι να δώσει μια βέλτιστη λύση τόσο από οικονομικής πλευράς, όσο και από πλευράς αξιοπιστίας. Οι λειτουργικές ανάγκες καλύπτουν τις παραμέτρους σχεδιασμού όπως για παράδειγμα το μέγεθος, το σχήμα και τις τοπικά συγκεντρωμένες τάσεις. Μερικές από αυτές τις παραμέτρους, ενδέχεται να χρειάζονται διόρθωση σε σχέση με τον ολικό σχεδιασμό, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις, ο σχεδιαστής ενός δοχείου πίεσης λειτουργεί ελεύθερα με βάση την εμπειρία του.

Κατά το σχεδιασμό των δοχείων πίεσης, το πρώτο που πρέπει να εξασφαλίζεται όσο καλύτερα γίνεται, είναι η ασφάλεια με τη μορφή της δομικής επάρκειας. Παρόλα αυτά ο σχεδιασμός των δοχείων γίνεται με στόχο να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ασφάλεια με το καλύτερο δυνατό κόστος. Φυσικά, οι δύο αυτοί στόχοι είναι αντικρουόμενοι έτσι θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να βρίσκει κανείς την «χρυσή τομή» για την επίτευξη και των δύο στόχων.

Η ασφάλεια δεν είναι δυνατό να εξασφαλιστεί απόλυτα για δύο λόγους. Πρώτο, η πραγματική μορφή του φορτίου κατά την λειτουργία μπορεί να διαφέρει από αυτή του σχεδιασμού. Για παράδειγμα μπορεί να εμφανιστούν ακανόνιστα φορτία ή φορτία τα οποία δεν μπορούσαν να προβλεφθούν από το στάδιο του σχεδιασμού. Δεύτερο, οι γνώσεις μας δεν επαρκούν συνήθως για να μας δώσουν μια ποσοτική απάντηση ως προς τη θραύση των υλικών και την κατάσταση των τάσεων κάτω υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

Είναι αλήθεια ότι αν και ο θεμελιώδης μηχανισμός αστοχίας δεν είναι πλήρως κατανοητός, είναι δυνατό να ληφθούν κάποια μέτρα τα οποία βασίζονται σε ημιεμπειρικές μεθόδους. Ακολουθώντας αυτή τη γραμμή σκέψης, τα δοχεία πίεσης θα

μπορούσαν να ταξινομηθούν ανάλογα με την κρισιμότητα λειτουργίας τους επειδή αυτό θα επηρεάσει και την πιθανότητα αστοχίας αλλά και τις συνέπειες της.

Το 1925, οι κανόνες για την κατασκευή λεβήτων γράφτηκαν χρησιμοποιώντας ένα συντελεστή ασφαλείας 5 που μετέπειτα μειώθηκε στη τιμή 4 το 1942, πιθανώς για να βοηθήσει στην συντήρηση του χάλυβα. Το 1955, αναπτύχθηκαν νέες διαδικασίες στην πετρελαιοχημική βιομηχανία για το σχεδιασμό δοχείων πίεσης, οι οποίες απαιτούσαν πάχος τοιχώματος στα δοχεία από 150 έως 200mm. Η Αμερικανική Ένωση Μηχανολόγων Μηχανικών (ASME) αποφάσισε να πραγματοποιήσει μια εργασία με επιτρεπόμενες τάσεις με παράγοντα σχεδιασμού 3. Ο σκοπός ήταν να μειωθεί το κόστος κατασκευής, με την υπόθεση ότι αυτό θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε περιορισμένο αριθμό υλικών. Λήφθηκαν επίσης υπόψη οι κανόνες για την αντοχή σε θραύση, χρησιμοποιήθηκαν κανόνες σχεδιασμού για κυκλική φόρτιση και έγινε λεπτομερής ανάλυση των τάσεων για τις περισσότερες συνθήκες φόρτισης.

1.2 Σχεδιασμός των δοχείων πίεσης

Ο μηχανολογικός δομικός σχεδιασμός είναι μια εργασία που αποσκοπεί στη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας μιας κατασκευής. Το πρώτο μέλημα είναι να εξασφαλίζεται η δομική επάρκεια της κατασκευής. Ο «πλήρης σχεδιασμός» είναι ένα θέμα με πολλά παρακλάδια. Θα μπορούσε να περιλαμβάνει από σχεδιασμό συστήματος καυσίμων μέχρι σχεδιασμό αντιδραστήρων ή και θερμοδραυλικών συστημάτων. Για συγκεκριμένα δοχεία πίεσης και σχετικό εξοπλισμό, ο προκαταρκτικός σχεδιασμός γίνεται με βάση τις απαιτήσεις για μεταφορά θερμότητας και ροή των ρευστών.

Τα μέρη και τα υλικά των δοχείων, περιγράφονται με μαθηματικά μοντέλα τα οποία μπορούν να αναλυθούν σε κλειστή μορφή για ένα περιορισμένο αριθμό καταστάσεων όμως στις περισσότερες των περιπτώσεων πρέπει να λυθούν αριθμητικά. Ακόμη και τα λεγόμενα απλά μοντέλα που μπορούν να λυθούν σε κλειστή μορφή, ενδέχεται να περιλαμβάνουν πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις. Σε ορισμένες μεμονωμένες περιπτώσεις, κάποιες «έξυπνες» εφαρμογές απλών σχέσεων έχουν οδηγήσει στην απλοποίηση των πολύπλοκων εννοιών. Παρόλα αυτά στην πλειοψηφία των περιπτώσεων επιβάλλεται να γίνει η βέλτιστη χρήση των απαραίτητων υλικών στην ανάλυση της κατασκευής. Όσο η πολυπλοκότητα της ανάλυσης αυξάνεται, η

ερμηνεία των αποτελεσμάτων γίνεται ολοένα και πιο διεξοδική. Επιπλέον, ένας μεγάλος αριθμός αυτών των μοντέλων προσεγγίζει την συμπεριφορά του υλικού μαζί με το σημείο διαρροής. Συνεπώς στη συμπεριφορά του υλικού, οι αβεβαιότητες και οι παραλειπόμενοι παράγοντες στο σχεδιασμό, γίνονται όλο και πιο φανεροί.

Υλικά υψηλής αντοχής τα οποία δημιουργούνται από κράματα, διαδικασίες παραγωγής ή διεργασίες θερμότητας, βελτιώνονται συνεχώς έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις οικονομικές και μηχανικές ανάγκες όπως το μειωμένο πάχος τοιχώματος του δοχείου. Ελέγχονται συνεχώς έτσι ώστε να καθοριστούν τα όρια σχεδιασμού με όσο το δυνατό μεγαλύτερη αντοχή. Δεν υπάρχει κανένα τέλειο υλικό για δοχεία πίεσης, κατάλληλο για όλες τις συνθήκες, όμως η επιλογή του υλικού πρέπει να ταιριάζει με την εφαρμογή και το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται.

Κάποιες βασικές πρόοδοι στην ανάλυση των τάσεων, επιτρέπουν να γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των υλικών με βεβαιότητα. Παλαιότερες εξισώσεις ελαστικότητας λύνονται τώρα αριθμητικά. Αυτές μαζί με πειραματικές τεχνικές χρησιμοποιούνται για να μελετηθούν οι κατασκευαστικές ασυνέχειες σε ανοίγματα ακροφυσίων κλπ. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό διότι το 80% των αστοχιών σε δοχεία πίεσης προκαλείται από τις μεγάλες τοπικές τάσεις που αναπτύσσονται. Επομένως είναι φανερό ότι οι συγκεντρώσεις τάσεων στα δοχεία πίεσης και σε συγκολλήσεις είναι πάρα πολύ σημαντικές και το «κλειδί» για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής αυτών των δοχείων είναι κάποιες μέθοδοι που θα ελαχιστοποιήσουν τις συγκεκριμένες τάσεις μέσω καλύτερων σχεδιασμών και αναλύσεων. Οι λεπτομέρειες του ελέγχου καταλληλότητας σε ένα δοχείο πίεσης οδηγούν σε ένα ισορροπημένο σχεδιασμό και στην μέγιστη δομική επάρκεια της κατασκευής.

Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω, γίνεται προσπάθεια να περιγραφούν τα δοχεία πίεσης με βάση μαθηματικά μοντέλα τα οποία δίνουν λύσεις κλειστής μορφής και με αριθμητικές λύσεις επίσης. Η ανάπτυξη των υπολογιστικών μεθόδων (πεπερασμένα στοιχεία) έχει μια σημαντική επίδραση στην ανάλυση των τάσεων στα επί μέρους κομμάτια των δοχείων πίεσης. Η χρήση των μεθόδων έχει αναπτυχθεί πάρα πολύ, σε βαθμό που μπορούμε να κάνουμε συνδυασμούς των λύσεων μας και να βλέπουμε παραστατικά τα αριθμητικά αποτελέσματα. Σε πολλές περιπτώσεις κάποια λογισμικά είναι φτιαγμένα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μπορούμε να δούμε την κατασκευή μας σε κίνηση, κάτι το οποίο φυσικά μας βοηθά να αξιολογήσουμε καλύτερα την ανάλυση και τα αποτελέσματα μας. Ένα από αυτά τα λογισμικά, το ABAQUS,

χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός κανόνων σχεδιασμού και ανάλυσης που απορρέουν από το θεμελιώδη σχεδιασμό και ανάλυση, μοντελοποιώντας μερικές φορές τη μη γραμμική γεωμετρία και τη συμπεριφορά του υλικού. Συνήθως τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι παραμορφώσεις και τάσεις. Σε πολλές περιπτώσεις οι αναλύσεις γίνονται πιο λεπτομερείς μελετώντας φαινόμενα όπως ο ερπυσμός, η κόπωση και οι μηχανισμοί θραύσης. Με την εμφάνιση τρισδιάστατων λογισμικών σχεδιασμού και των παραμέτρων τους, είναι εφικτό πλέον να είμαστε βέβαιοι για την δομική επάρκεια των κατασκευών κάνοντας τις κατάλληλες διορθωτικές κινήσεις οπουδήποτε χρειάζεται και εκσυγχρονίζοντας το μοντέλο μας αυτόματα.

1.2.1 Σχεδιασμός με βάση συγκεκριμένη ανάλυση

Η ανάλυση σχεδιασμού ολοκληρώνει αποτελεσματικά το σχεδιασμό και τις προσπάθειες για ανάλυση των τάσεων και αναγνωρίζει ότι διαφορετικές εντατικές καταστάσεις έχουν παράλληλα και διαφορετικό επίπεδο σημαντικότητας. Ακόμη με αυτή τη διαδικασία μπορούμε κάνουμε υπολογισμούς για τα περισσότερα είδη αστοχίας και να ξέρουμε τα όρια ασφαλείας γύρω από τα οποία πρέπει να κινηθούμε έτσι ώστε να αποφευχθεί η αστοχία. Η ανάλυση σχεδιασμού περιλαμβάνει λεπτομερή εκτίμηση των πραγματικών και θερμικών τάσεων όπως επίσης και της κόπωσης. Αυτή η προσέγγιση σχεδιασμού παρέχει ένα λογικό όριο ασφαλείας βασισμένο στο προφίλ των πραγματικών τάσεων και βελτιστοποιεί το σχεδιασμό ως προς την συντήρηση του υλικού οδηγώντας έτσι την κατασκευή σε ένα υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας και ασφάλειας. Αυτή η φιλοσοφία είναι κατάλληλη για δοχεία πίεσης που υπόκεινται σε κυκλικές φορτίσεις και απαιτούν ένα πάρα πολύ υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας και ασφάλειας.

1.3 Ακροφύσια σε δοχεία πίεσης

Ένα αξονικό ακροφύσιο ορίζεται από τέσσερις γεωμετρικές μεταβλητές, την ακτίνα του ακροφυσίου και της σφαίρας r και R και τα αντίστοιχα πάχη t και T . Συνήθως θεωρούμε ότι η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται από κάποια φόρτιση στη διατομή του ακροφυσίου, όταν εκφραστεί ως συντελεστής συγκέντρωσης των τάσεων K

διαιρώντας με την ονομαστική τάση, είναι ανεξάρτητη της απόλυτης τιμής των μεταβλητών και μπορεί να συνδέεται με αδιάστατες παραμέτρους που μπορεί να λαμβάνονται ως r/R , R/T και t/T . Επιπλέον συνήθως το K αυξάνεται όσο ο λόγος r/R αυξάνεται και μειώνεται όσο ο λόγος t/T αυξάνεται.

Ένα σημαντικό βήμα έγινε από τους Leckie and Penny οι οποίοι βρήκαν κάποιες λύσεις για ελαστική ανάλυση με μικρές μετατοπίσεις για λεπτότοιχα κυλινδρικά και σφαιρικά δοχεία. Γίνεται η υπόθεση ότι τα δύο κελύφη ενώνονται στο σημείο που συναντώνται οι κεντρικοί του άξονες και ότι τα αρχικά επίπεδα τμήματα παραμένουν επίπεδα και μετά την επιβολή του φορτίου. Ολοκληρωμένες λύσεις με διαφορικές εξισώσεις λαμβάνονται παίρνοντας υπόψη τις μεμβρανικές τάσεις .

1.4 Αντικείμενο της μελέτης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η οριακή αντοχή και η αντοχή σε κόπωση σε δοχεία πίεσης, με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Πραγματοποιούνται αναλύσεις σε κυλινδρικά και σφαιρικά δοχεία πίεσης υπό την επίδραση διαφόρων μορφών φόρτισης. Οι κυριότερες μορφές φόρτισης που επιβάλλονται είναι αξονική δύναμη, εσωτερική πίεση, συγκεντρωμένη ροπή και συνδυασμός αυτών. Πραγματοποιείται επίσης ανάλυση της συμπεριφοράς του σφαιρικού δοχείου υπό την επίδραση αρχικών ατελειών. Γίνεται αριθμητική διερεύνηση με τη χρήση μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Κατά την προσομοίωση των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται αξισυμμετρικά συνεχόμενα στοιχεία, λαμβάνοντας υπόψη την συμμετρία της γεωμετρίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

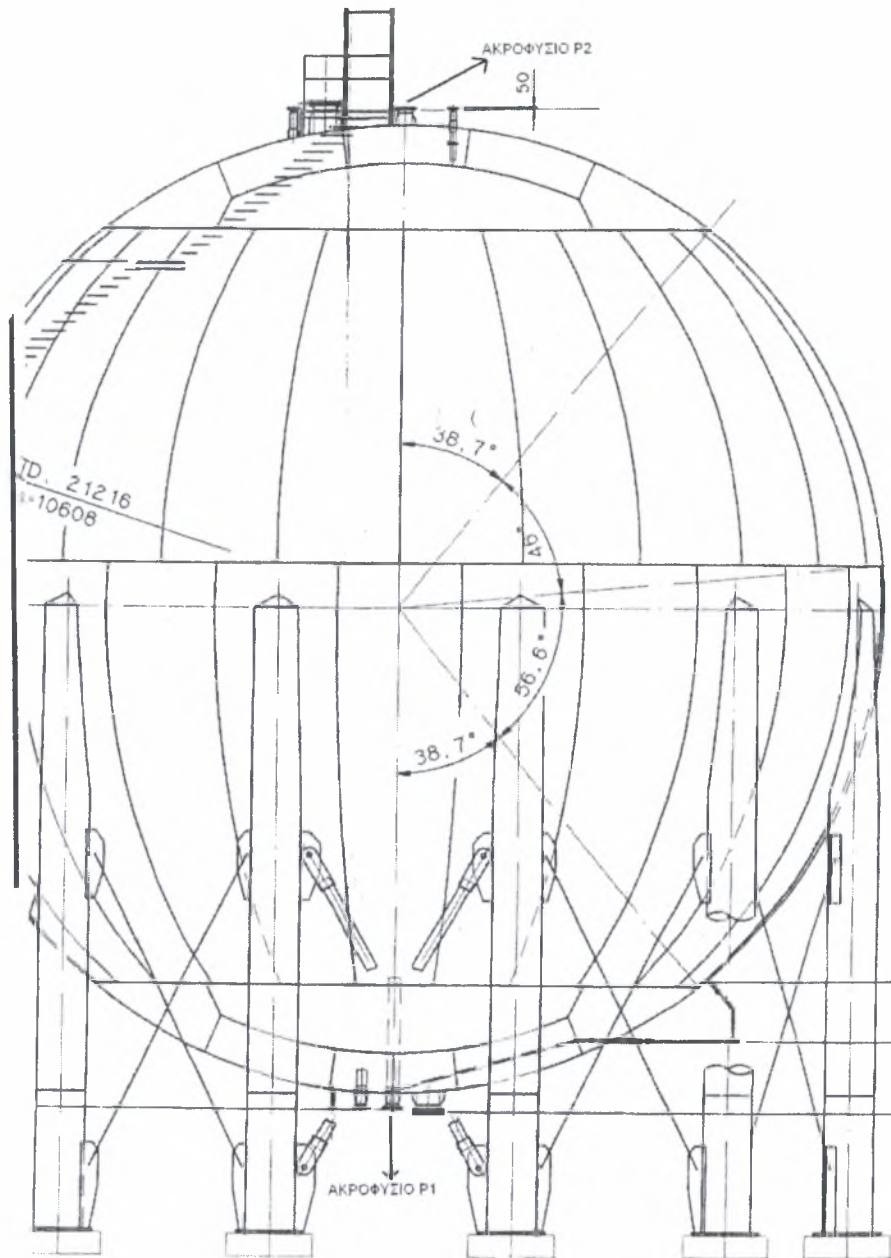
ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΧΕΙΩΝ ΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΟΡΦΗ

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η οριακή αντοχή σφαιρικών δοχείων πίεσης για διάφορες εντατικές καταστάσεις. Συγκεκριμένα το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην περιοχή των συγκολλημένων ακροφυσίων P1 και P2. Η μελέτη αυτή γίνεται τόσο σε δισδιάστατο όσο και τρισδιάστατο επίπεδο και ακολούθως γίνεται σύγκριση των δύο. Αρχικά, στην δισδιάστατη περίπτωση σχεδιάζεται το μισό σφαιρικό δοχείο πίεσης (υπάρχει αξονική συμμετρία) με βάση το κατασκευαστικό σχέδιο που μας παραχωρήθηκε από τη Βιομηχανία Φωσφορικών Λιπασμάτων, και στη συνέχεια στην τρισδιάστατη περίπτωση σχεδιάζεται ένα μέρος του δοχείου για απλοποίηση της ανάλυσης χωρίς αυτό να παρουσιάζει απόκλιση των αποτελεσμάτων.

2.2 Περιγραφή της γεωμετρίας των δοχείων πίεσης με ακροφύσια P1 και P2 αντίστοιχα

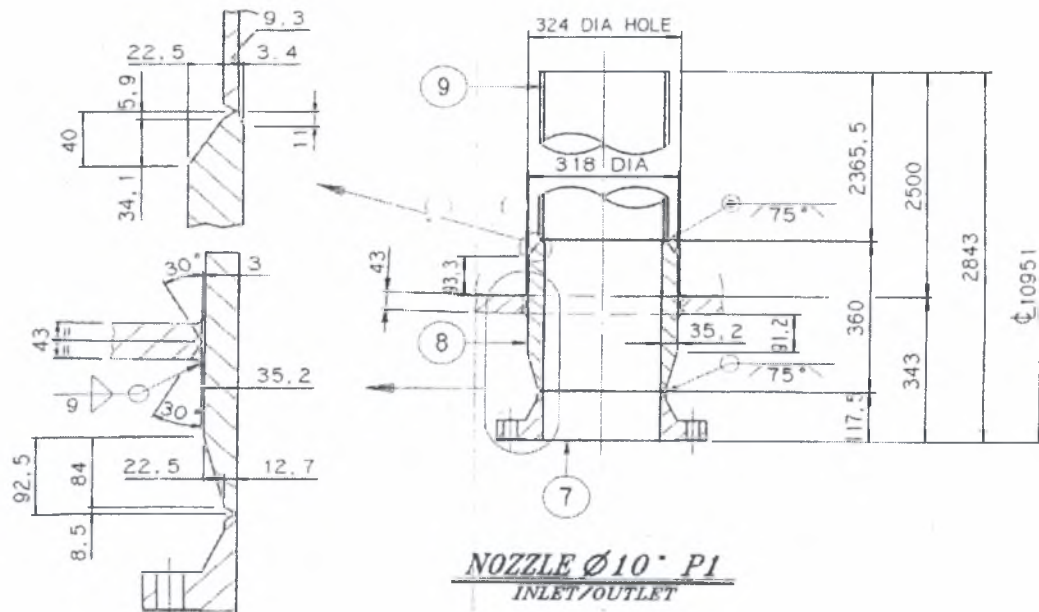
Στα σχήματα 2.1 - 2.3 φαίνονται οι διαστάσεις του σφαιρικού δοχείου πίεσης και των ακροφυσίων P1 και P2 που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις περιπτώσεις που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.



Σχήμα 2.1: Διαστάσεις του σφαιρικού δοχείου πίεσης

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σφαιρικού δοχείου με ακροφύσιο P1

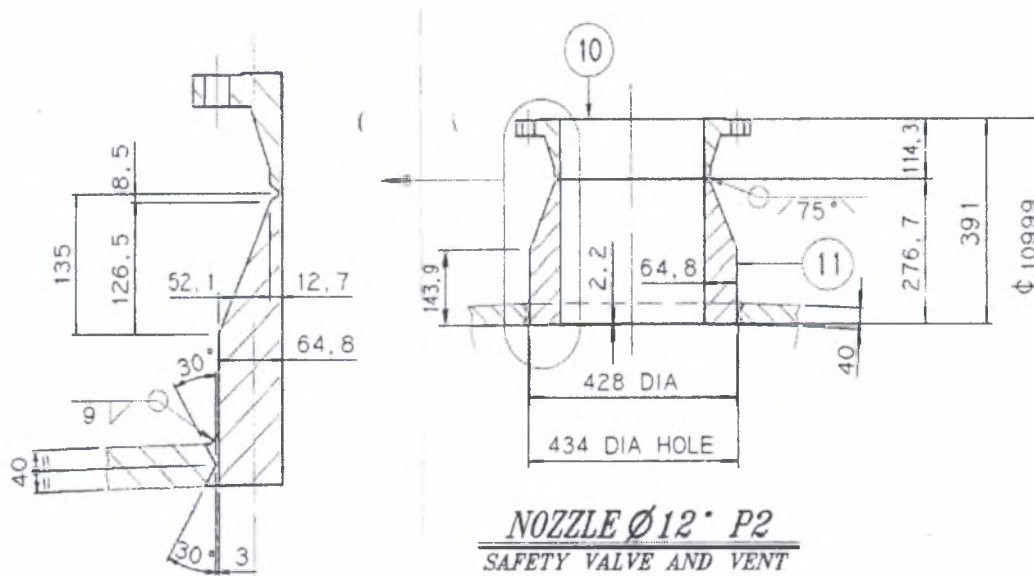
- Εσωτερική ακτίνα σφαίρας, $R = 10608 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος της σφαίρας στην περιοχή του ακροφυσίου P1, $t = 43 \text{ mm}$
- Εσωτερική ακτίνα του ακροφυσίου, $r = 123.8 \text{ mm}$
- Εξωτερική ακτίνα του ακροφυσίου, $r' = 159 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος του ακροφυσίου, $t' = 35.2 \text{ mm}$



Σχήμα 2.2: Διαστάσεις στην περιοχή του ακροφυσίου P1

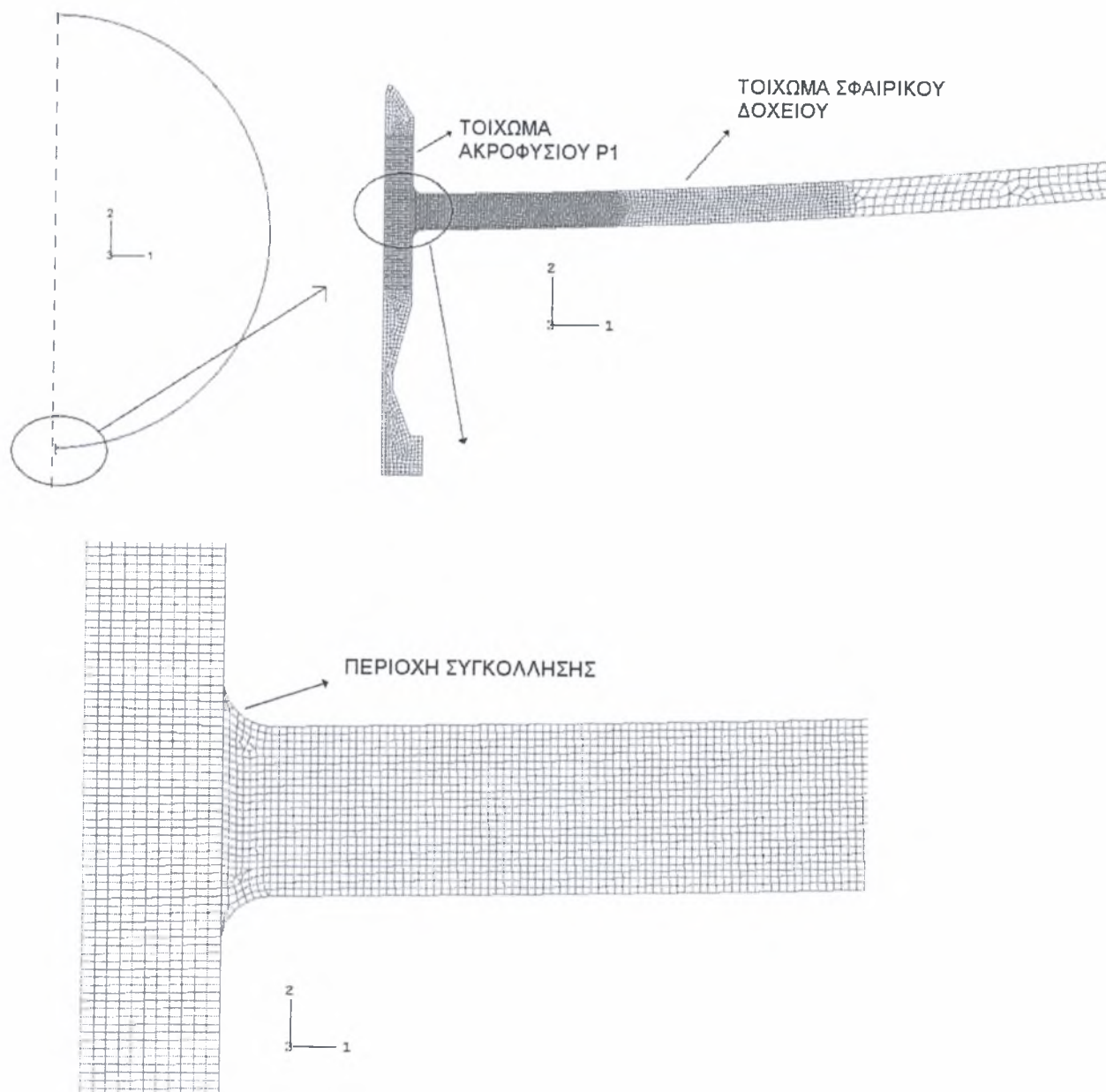
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σφαιρικού δοχείου με ακροφύσιο P2

- Εσωτερική ακτίνα σφαίρας, $R = 10608 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος της σφαίρας στην περιοχή του ακροφυσίου P2, $t = 40 \text{ mm}$
- Εσωτερική ακτίνα του ακροφυσίου, $r = 149.2 \text{ mm}$
- Εξωτερική ακτίνα του ακροφυσίου, $r' = 214 \text{ mm}$
- Πάχος τοιχώματος του ακροφυσίου, $t' = 64.8 \text{ mm}$

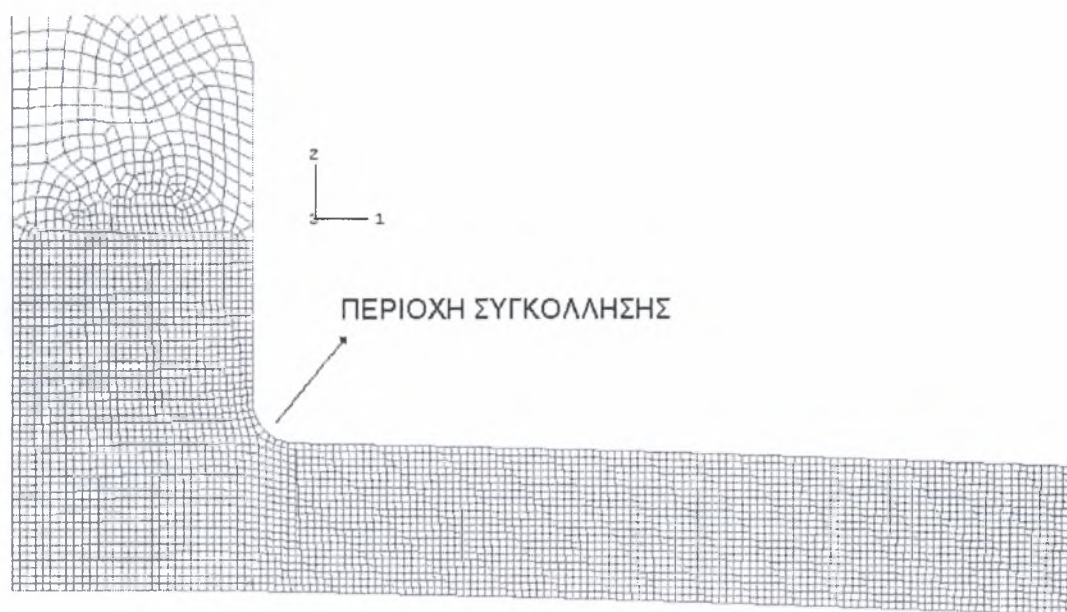
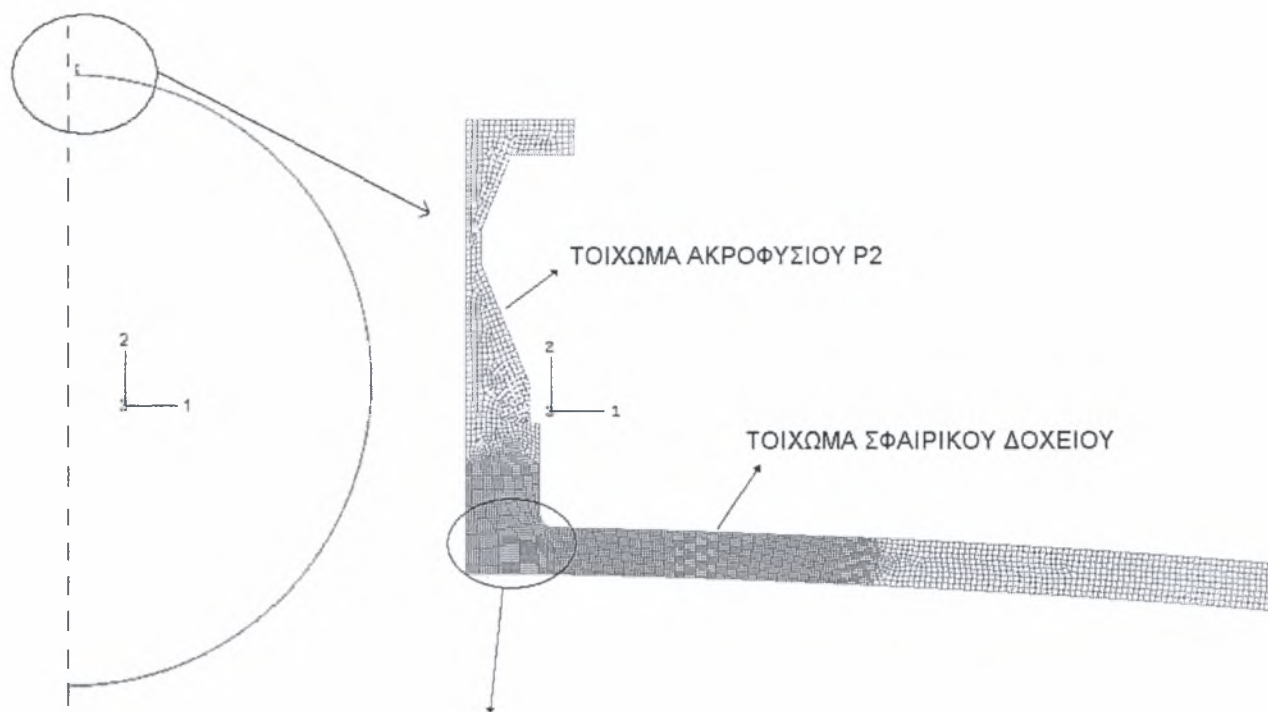


Σχήμα 2.3: Διαστάσεις στην περιοχή του ακροφυσίου P2

Οι υπόλοιπες παράμετροι κατά το σχεδιασμό όπως για παράδειγμα το πλέγμα, τα βήματα ανάλυσης και οι συνοριακές συνθήκες θα παρουσιαστούν αργότερα ανάλογα με την περίπτωση φόρτισης που εξετάζεται. Κάτι που θα μπορούσε να λεχθεί στο παρόν στάδιο είναι ότι το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson είναι τα ίδια σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης το πλέγμα είναι πολύ πιο πυκνό στην περιοχή των ακροφυσίων εφόσον είναι και η κρίσιμη περιοχή που μας ενδιαφέρει.



Σχήμα 2.4: Η γεωμετρία του δοχείου πίεσης με αξονοσυμμετρική προσομοίωση καθώς και του ακροφυσίου P1



Σχήμα 2.5: Η γεωμετρία του δοχείου πίεσης με αξονοσυμμετρική προσομοίωση καθώς και του ακροφυσίου P2

2.3 Μη γραμμική ανάλυση σε δισδιάστατη μορφή του μισού δοχείου πίεσης (αξονοσυμμετρικά)

Πραγματοποιείται ανάλυση στο κάτω μισό δοχείο πίεσης που περιέχει το ακροφύσιο P1. Οι μεγαλύτερες τάσεις αναπτύσσονται στην περιοχή κοντά στο ακροφύσιο έτσι σχεδιάζεται το μισό δοχείο για απλούστευση της ανάλυσης, χωρίς να επηρεάζονται τα αποτελέσματα σε σχέση με το σχεδιασμό ολόκληρου του δοχείου πίεσης.

Ιδιότητες του υλικού

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση αυτή είναι χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας $E = 210000 \text{ MPa}$, λόγο Poisson $\nu = 0.3$ και τάση διαρροής $\sigma_y = 300 \text{ MPa}$. Η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης δίνεται στο σχήμα 2.6α.

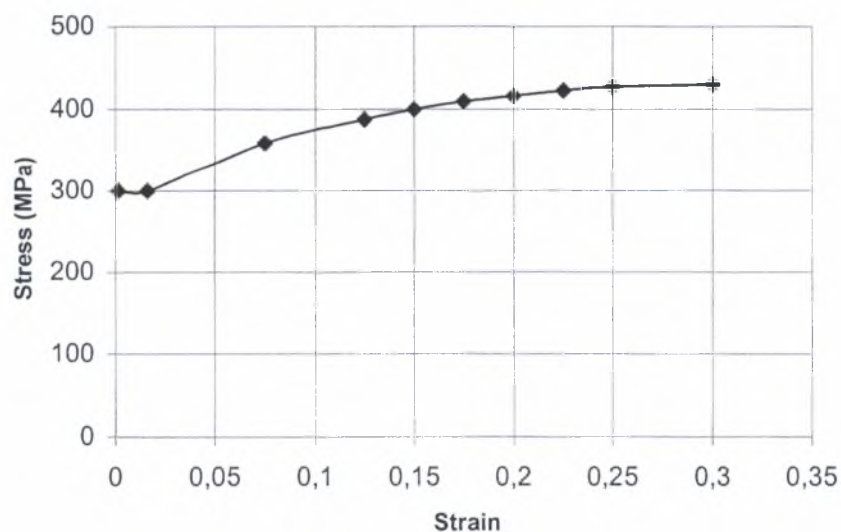
Για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του υλικού στο ABAQUS έγινε μετατροπή της τάσης σε πραγματική τάση και της μετατόπισης σε ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (Σχήμα 2.6β) με βάση τους πιο κάτω τύπους:

$$\sigma_T = (1 + \varepsilon)\sigma \quad (2.1)$$

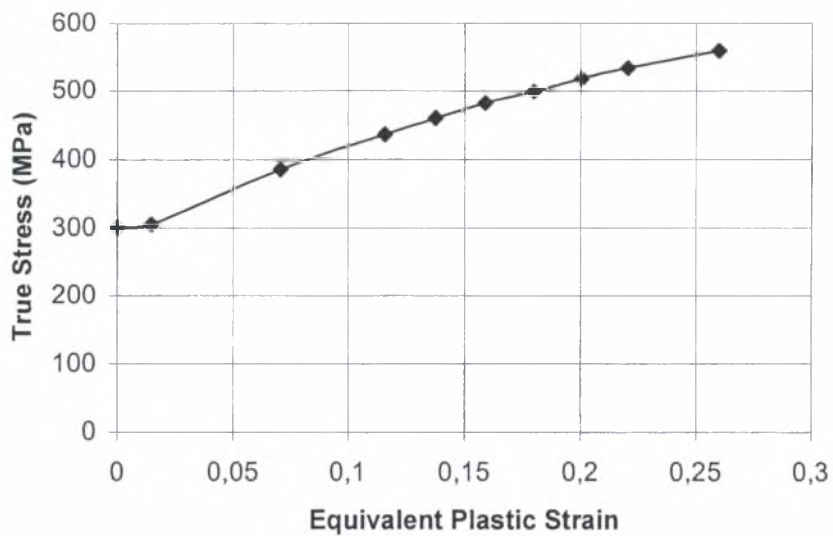
όπου, σ_T : πραγματική τάση, ε : παραμόρφωση και σ : τάση

$$\varepsilon_{ln}^P = \ln(1 + \varepsilon) - \frac{\sigma_T}{E} \quad (2.2)$$

όπου, ε_{ln}^P : ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση και E : μέτρο ελαστικότητας



Σχήμα 2.6α: Καμπύλη τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ε) του υλικού



Σχήμα 2.6β: Καμπύλη πραγματικής τάσης(σ_T) – ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης(ϵ_{ln}^P) του υλικού του δείγματος για την προσομοίωση της ανάλυσης

Πλέγμα

Το πλέγμα συγκροτείται από αξονοσυμμετρικά τετραγωνικά στοιχεία (CAX4R, μειωμένης ολοκλήρωσης) και είναι αραιό στο μεγαλύτερο μέρος του σφαιρικού δοχείου με δυο μόνο στοιχεία κατά πάχος. Φυσικά γίνεται όλο και πιο πυκνό όσο πλησιάζει στην περιοχή του ακροφυσίου που είναι και η περιοχή που μας ενδιαφέρει.

Βήματα ανάλυσης

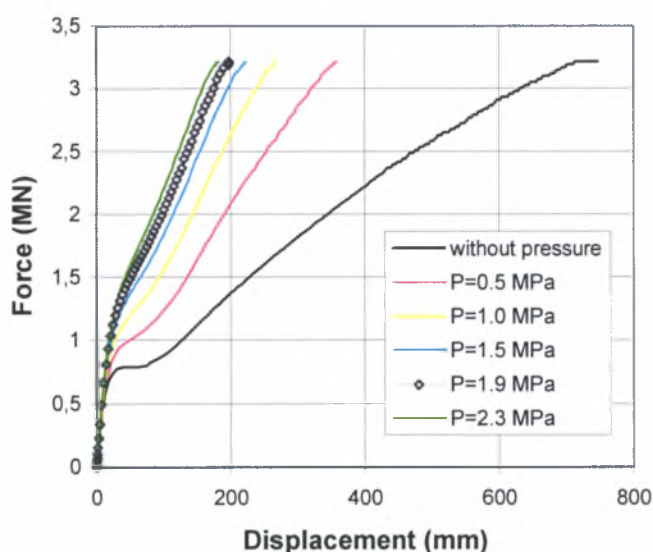
Τα βήματα διαφέρουν ανάλογα με την ανάλυση, έτσι θα γίνει εκτενής αναφορά για κάθε μια ξεχωριστά. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλες τις πιο κάτω αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε η εντολή «static riks».

Συνοριακές συνθήκες και επιβαλλόμενα φορτία

Οι συνοριακές συνθήκες είναι σε όλες τις περιπτώσεις οι ίδιες:
 $U2 = UR6 = 0$ στο δεξί άκρο της σφαίρας. Δηλαδή μπορεί να μετατοπιστεί μόνο ως προς τον άξονα 1.

2.3.1 Ανάλυση ακροφυσίου P1

Διεξάγονται διάφορες αναλύσεις για να διαπιστώσουμε το πως μεταβάλλεται η συμπεριφορά της σφαίρας έχοντας στο πρώτο βήμα μια σταθερή ποσότητα εσωτερικής πίεσης και ακολούθως στο δεύτερο βήμα ασκούμε μια διαρκώς αυξανόμενη αξονική δύναμη. Η πρώτη ανάλυση ξεκινάει με ένα μόνο ένα βήμα κατά το οποίο εφαρμόζεται μόνο αξονική κατακόρυφη δύναμη. Στις υπόλοιπες αναλύσεις, το πρώτο βήμα περιλαμβάνει σταθερή εσωτερική πίεση και ακολούθως στο δεύτερο βήμα ασκούμε μια διαρκώς αυξανόμενη αξονική δύναμη διατηρώντας σταθερή την εσωτερική πίεση. Πιο κάτω (Σχήμα 2.7) φαίνεται η καμπύλη δύναμης (F) – μετατόπισης (U2) για τις διάφορες αναλύσεις.



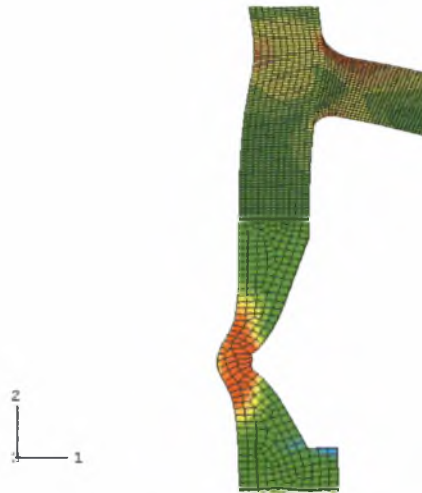
Σχήμα 2.7: Διάγραμμα δύναμης (F) – Μετατόπισης (U2) για διάφορες τιμές σταθερής εσωτερικής πίεσης και ακολούθως αξονικής δύναμης στο ακροφύσιο P1, διατηρώντας την πίεση σταθερή.

Πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι η μέγιστη εσωτερική πίεση που ασκείται στο δοχείο είναι $P = 2.3 \text{ MPa}$ έτσι ώστε να μην είναι μεγαλύτερη από την πίεση διαρροής $P_y = 2.427 \text{ MPa}$. Η τιμή της επιτρεπόμενης εσωτερικής πίεσης που μπορεί να ασκηθεί στο δοχείο υπολογίζεται με βάση την πιο κάτω βασική σχέση:

$$P_y = \frac{2t\sigma_y}{R_m} \Rightarrow P_y = \frac{2 \times 43 \times 300}{10629.5} = 2.427 \text{ MPa} \quad (2.3)$$

Σε όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις η καμπύλη δύναμης – μετατόπισης διέρχεται διαδοχικά από τρία στάδια, την ελαστική, την ελαστοπλαστική και την μεμβρανική περιοχή. Με αύξηση της εσωτερικής πίεσης μειώνεται η ελαστοπλαστική περιοχή.

Επίσης όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης που γίνεται στο ABAQUS, το σημείο στο οποίο αστοχεί πλήρως η κατασκευή σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης, είναι το λεπτό τμήμα του ακροφυσίου όπως φαίνεται και στο πιο κάτω σχήμα:



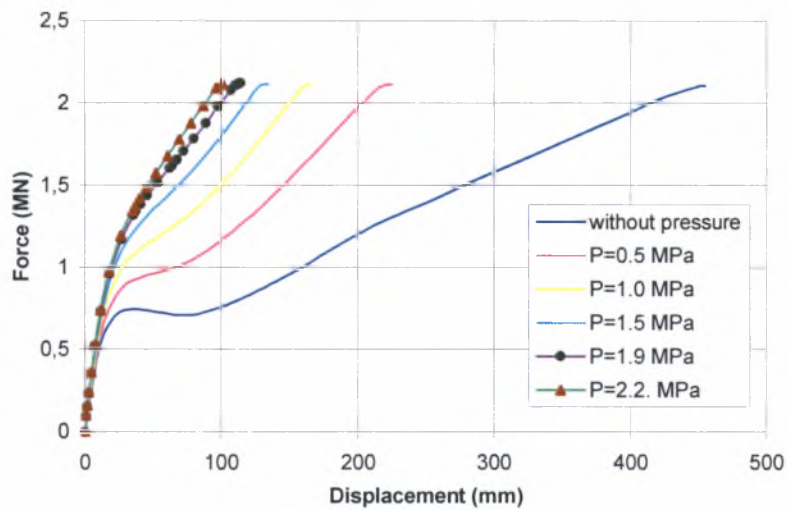
Σχήμα 2.8: Παραμορφωμένη κατάσταση στην περιοχή του ακροφυσίου P1 για την περίπτωση $P = 1.5$ MPa.

2.3.2 Ανάλυση ακροφυσίου P2

Διεξάγονται και πάλι οι αναλύσεις με τον ίδιο ακριβώς τρόπο και τα ίδια δεδομένα (πλην των γεωμετρικών χαρακτηριστικών) όπως και στο ακροφύσιο P1 με την μόνη διαφορά ότι τώρα η μεγαλύτερη επιτρεπτή εσωτερική πίεση που ασκείται είναι $P = 2.2$ MPa διότι η πίεση διαρροής είναι τώρα $P_y = 2.26$ MPa όπως προκύπτει από τον κατωτέρω απλό υπολογισμό:

$$P_y = \frac{2t\sigma_y}{R_m} \Rightarrow P_y = \frac{2 \times 40 \times 300}{10629.5} = 2.26 \text{ MPa} \quad (2.4)$$

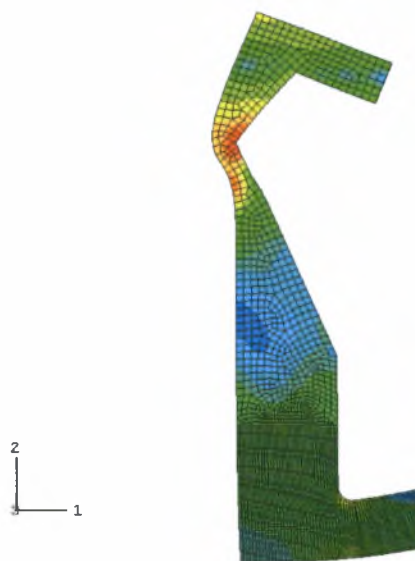
Στο σχήμα 2.9 φαίνεται η καμπύλη δύναμης (F) – μετατόπισης (U2) για τις διάφορες αναλύσεις στο ακροφύσιο P2.



Σχήμα 2.9: Διάγραμμα δύναμης (F) – Μετατόπισης (U_2) για διάφορες τιμές σταθερής εσωτερικής πίεσης και ακολούθως αξονικής δύναμης στο ακροφύσιο P2, διατηρώντας την πίεση σταθερή.

Σε όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις παρατηρείται πλαστική συμπεριφορά σε αρκετά χαμηλότερη τιμή της αξονικής δύναμης σε σχέση με την περίπτωση του ακροφυσίου P1 ενώ και οι μέγιστες μετατοπίσεις που επιδέχεται το ακροφύσιο P2 είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες της προηγούμενης ανάλυσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στα δύο δοχεία με την αύξηση της εσωτερικής πίεσης μειώνεται πολύ η πλαστική περιοχή στην καμπύλη δύναμης - μετατόπισης .

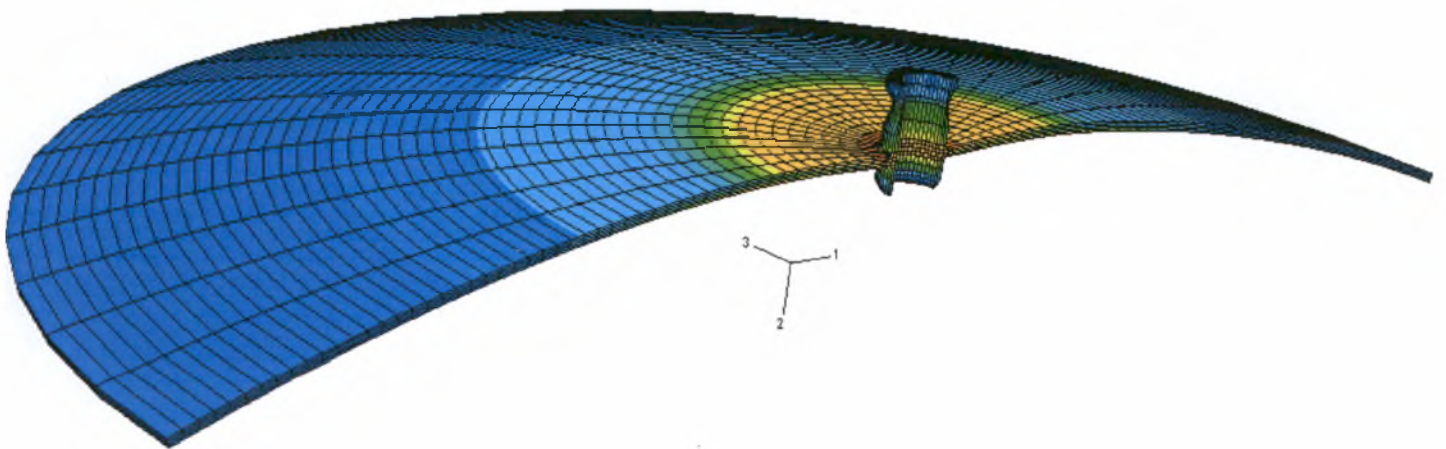
Πάλι φαίνεται από την ανάλυση που γίνεται στο ABAQUS ότι το σημείο στο οποίο αστοχεί η κατασκευή σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης, είναι το λεπτό τμήμα του ακροφυσίου όπως φαίνεται και στο πιο κάτω σχήμα:



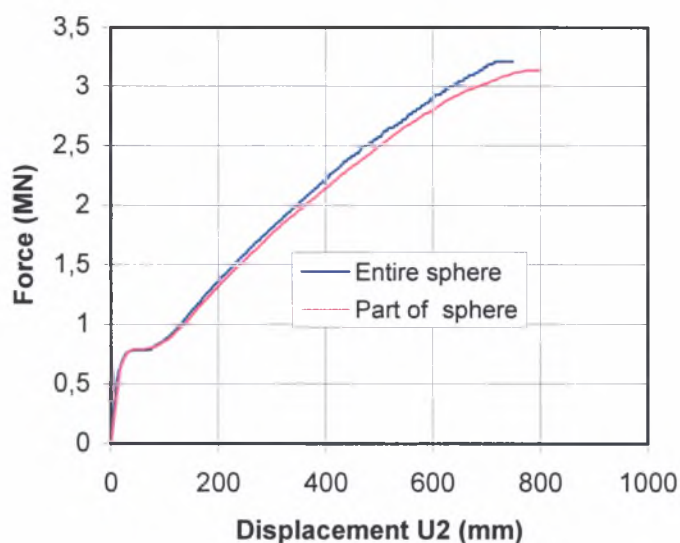
Σχήμα 2.10: Παραμορφωμένη κατάσταση στην περιοχή του ακροφυσίου P2 για την περίπτωση $P = 1.5$ MPa.

2.4 Οριακή ανάλυση σε τρισδιάστατη μορφή του δοχείου πίεσης με ακροφύσιο P1

Για τις ανάγκες της ανάλυσης και για λόγους απλούστευσης θεωρήθηκε ένα μέρος του δοχείου πίεσης σε τρισδιάστατη μορφή (Σχήμα 2.11) διότι σε αντίθετη περίπτωση ο αριθμός των στοιχείων που θα προέκυπταν θα ήταν πολύ μεγάλος που θα καθιστούσε την ανάλυση εξαιρετικά δαπανηρή υπολογιστικά. Βέβαια, πριν γίνει αυτή η απλούστευση ελέγχθηκε η απόκλιση των αποτελεσμάτων συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη ανάλυση μοντέλου που προσομοιάζει συνολικά την σφαίρα με ακροφύσιο P1 και ενός μοντέλου που προσομοιάζει το μέρος της σφαίρας το οποίο βρίσκεται αρκετά κοντά στο ακροφύσιο P1 σε δισδιάστατη μορφή (Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.11: Το μέρος του σφαιρικού δοχείου που θεωρείται για απλούστευση της ανάλυσης.



Σχήμα 2.12: Διάγραμμα δύναμης (F) – Μετατόπισης (U_2) των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη ανάλυση σφαίρας και ενός μέρους της σφαίρας με ακροφύσιο P1 σε δισδιάστατη μορφή.

Όπως φαίνεται από την πιο πάνω γραφική παράσταση, η απόκλιση που υπάρχει μεταξύ των δύο περιπτώσεων δεν είναι σημαντική, και αυτό αποδεικνύει ότι το μοντέλο που προσομοιάζει μέρος της σφαίρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα ανάλυση.

2.4.1 Οριακή ανάλυση του σφαιρικού δοχείου πίεσης υπό την επίδραση αξονικής δύναμης στο ακροφύσιο

- Α' ΤΡΟΠΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Γεωμετρία

Σχεδιάζεται σε τρισδιάστατη μορφή το μέρος του δοχείου για το οποίο έγινε αναφορά πιο πάνω με το ακροφύσιο P1 για να είναι εφικτή η ανάλυση. Οι διαστάσεις παραμένουν οι ίδιες όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις.

Ιδιότητες του υλικού

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση είναι χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας $E = 210000 \text{ MPa}$, λόγο Poisson $\nu = 0.3$ και τάση διαρροής $\sigma_y = 300 \text{ MPa}$. Η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης δίνεται στο σχήμα 2.6α.

Για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του υλικού στο ABAQUS έγινε μετατροπή της τάσης σε πραγματική τάση και της μετατόπισης σε ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (Σχήμα 2.6β, σχέσεις 2.1 - 2.2)

Πλέγμα

Το πλέγμα συγκροτείται από οκτακομβικά τρισδιάστατα στοιχεία (C3D8R, Three-dimensional continuum elements with reduced- integration) και είναι σχετικά πυκνό στο μεγαλύτερο μέρος του δοχείου με τέσσερα στοιχεία κατά πάχος και γίνεται ακόμη πιο πυκνό στην κρίσιμη περιοχή κοντά στο συγκολλημένο ακροφύσιο.

Βήματα ανάλυσης

Η ανάλυση αποτελείται από ένα μόνο βήμα στο οποίο επιβάλλεται αξονική και διαρκώς αυξανόμενη δύναμη. Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης είναι ενεργοποιημένη η εντολή NLGEOM (non linear geometry) αφού η ανάλυση είναι μη γραμμική.

Συνοριακές συνθήκες και επιβαλλόμενα φορτία

α) Συμμετρία ως προς τον άξονα z της επιφάνειας η οποία είναι στην ουσία η επιφάνεια τομής των δύο τμημάτων της σφαίρας.

β) $U_1 = U_2 = U_3 = UR_4 = UR_5 = UR_6 = 0$ στην επιφάνεια που βρίσκεται περιμετρικά της σφαίρας. Το φορτίο που επιβάλλεται είναι αξονική και διαρκώς αυξανόμενη δύναμη η οποία ασκείται υπό τη μορφή πίεσης στην επιφάνεια της φλάντζας. Την μετατρέπουμε σε δύναμη με βάση την απλή σχέση:

$$F = p \cdot A \quad (2.5)$$

όπου A η επιφάνεια της φλάντζας.

- Β' ΤΡΟΠΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (kinematic coupling)

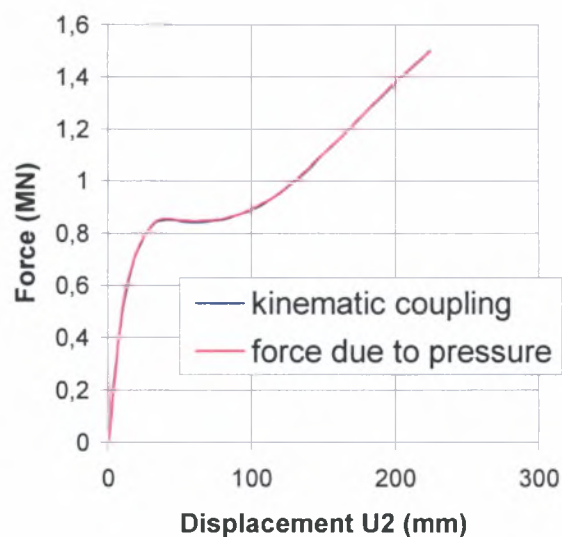
Αυτός ο τρόπος είναι πιο εύχρηστος και πιο εύρωστος όπως θα φανεί στη συνέχεια διότι μπορούμε να ασκήσουμε στην κατασκευή διάφορες μορφές φορτίσεως.

Η ανάλυση είναι η ίδια όπως και πιο πάνω με την μόνη διαφορά ότι εδώ η αξονική δύναμη εφαρμόζεται με διαφορετικό τρόπο και συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας την εντολή “kinematic coupling”. Ορίζεται ένας κόμβος αναφοράς πάνω στον άξονα συμμετρίας στο ίδιο ύψος με την άκρη του ακροφυσίου στον οποίο εφαρμόζουμε το υπόψη φορτίο. Επίσης ορίζουμε τους κόμβους οι οποίοι μετατοπίζονται σε συνάρτηση με τον κόμβο αναφοράς, ώστε να αποτελούν ένα στερεό απαραμόρφωτο

σώμα. Πρέπει ακόμα να σημειωθεί ότι επιβάλλουμε μια επιπλέον συνοριακή συνθήκη η οποία επιτρέπει στο ακροφύσιο να μετατοπίζεται κατά μήκος κατακόρυφου άξονα 2.

Σύγκριση των δύο τρόπων φόρτισης

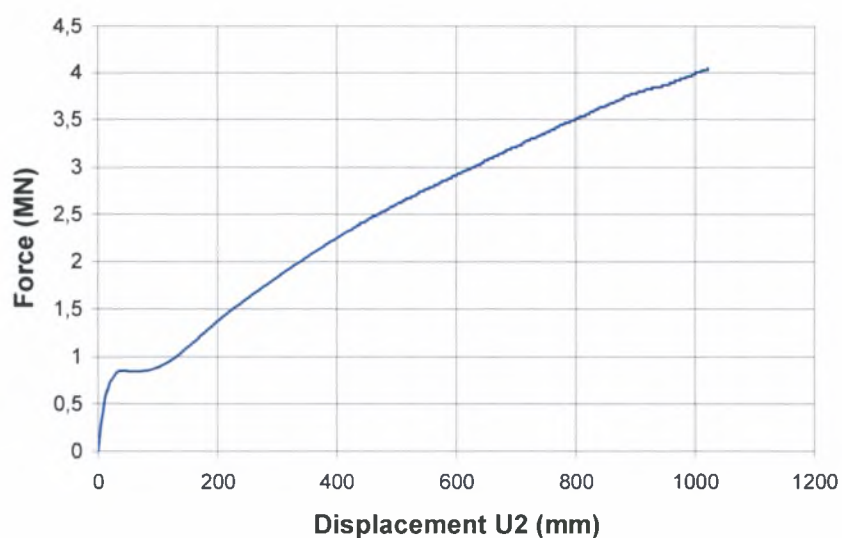
Οι δύο τρόποι συγκρίνονται με βάση το διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Για την παρούσα ανάλυση χρησιμοποιήθηκε περιορισμένος αριθμός “increments” διότι ο σκοπός ήταν η επαλήθευση των δυο διαφορετικών μεθόδων φόρτισης.



Σχήμα 2.13: Διάγραμμα δύναμης (F) – Μετατόπισης (U_2) των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τους δύο διαφορετικούς τρόπους φόρτισης της σφαίρας

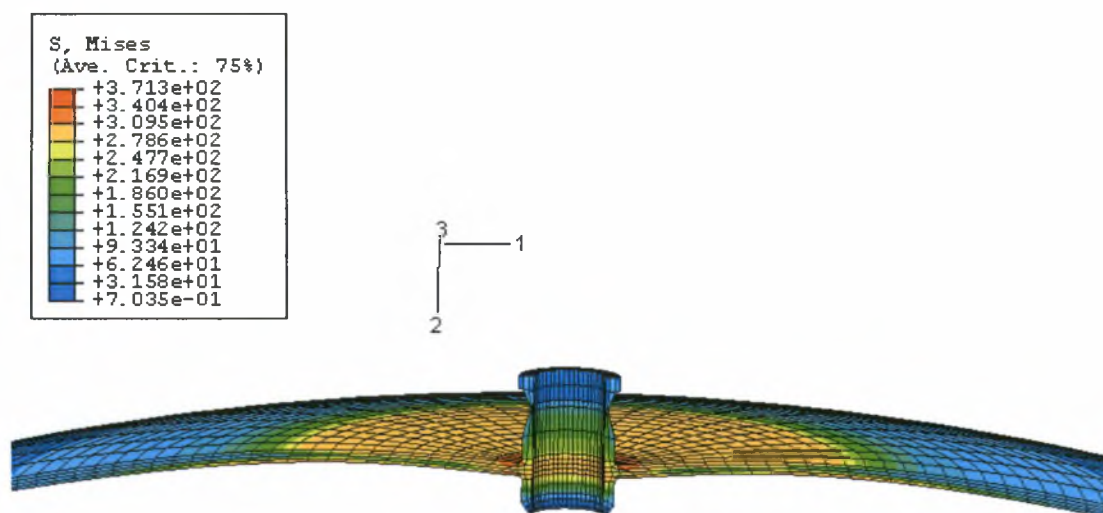
Από το πιο πάνω διάγραμμα φαίνεται ότι τα αποτελέσματα ταυτίζονται, έτσι στο εξής θα χρησιμοποιείται ο β' τρόπος (kinematic coupling) που είναι άλλωστε και πιο εύρηστος, ειδικά στην περίπτωση που θα έχουμε και εγκάρσια φόρτιση.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ολοκληρωμένη ανάλυση με την χρήση της εντολής “kinematic coupling” δηλαδή με τον β' τρόπο που φαίνεται ανωτέρω. Έτσι προκύπτει διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης που φαίνεται στο Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14: Διάγραμμα δύναμης (F) – Μετατόπισης (U_2) για αξονική φόρτιση της σφαίρας χρησιμοποιώντας την εντολή *kinematic coupling*.

Από το πιο πάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή της δύναμης (F) στην ελαστοπλαστική περιοχή είναι $F_{\max} = 856.68 \text{ KN}$. Πιο κάτω φαίνεται η κρίσιμη περιοχή της σφαίρας για την πιο πάνω περίπτωση, δηλαδή την χρονική στιγμή που η δύναμη παίρνει την τιμή $F_{\max} = 856.68 \text{ KN}$ (Σχήμα 2.15)



Σχήμα 2.15: Η κρίσιμη περιοχή της σφαίρας για την περίπτωση αξονικής δύναμης στο ακροφύσιο P1 (*increment 172*)

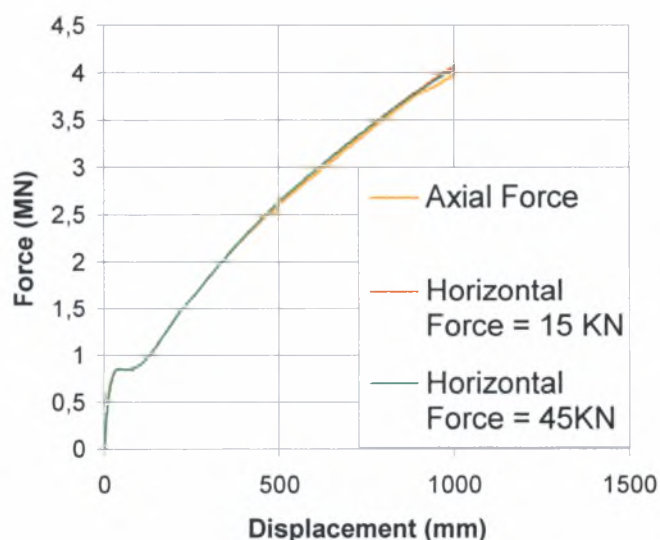
2.4.2 Οριακή ανάλυση του σφαιρικού δοχείου πίεσης με αρχική ατέλεια υπό την επίδραση αξονικής δύναμης στο ακροφύσιο P1

Και σε αυτή την περίπτωση ένα μέρος της ανάλυσης είναι το ίδιο με τις προηγούμενες περιπτώσεις (γεωμετρία, ιδιότητες του υλικού, πλέγμα) και διαφέρουν τα βήματα ανάλυσης, οι συνοριακές συνθήκες και ο τρόπος φόρτισης του δοχείου.

Συγκεκριμένα η ανάλυση γίνεται τώρα σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα θεωρείται μια αρχική ατέλεια με τη μορφή μιας σταθερής οριζόντιας δύναμης. Η δύναμη αυτή είναι περίπου 50 φορές μικρότερη από την F_{max} (πλαστική περιοχή) της προηγούμενης περίπτωσης, δηλαδή για $F = 15 \text{ KN}$. Στο δεύτερο βήμα εφαρμόζεται η κατακόρυφη και διαρκώς αυξανόμενη δύναμη F , ενώ η οριζόντια δύναμη παραμένει σταθερή. Η διαφορά στις συνοριακές συνθήκες είναι ότι τώρα το ακροφύσιο μπορεί να μετατοπιστεί και οριζόντια (άξονας 1) αλλά και κατακόρυφα (άξονας 2).

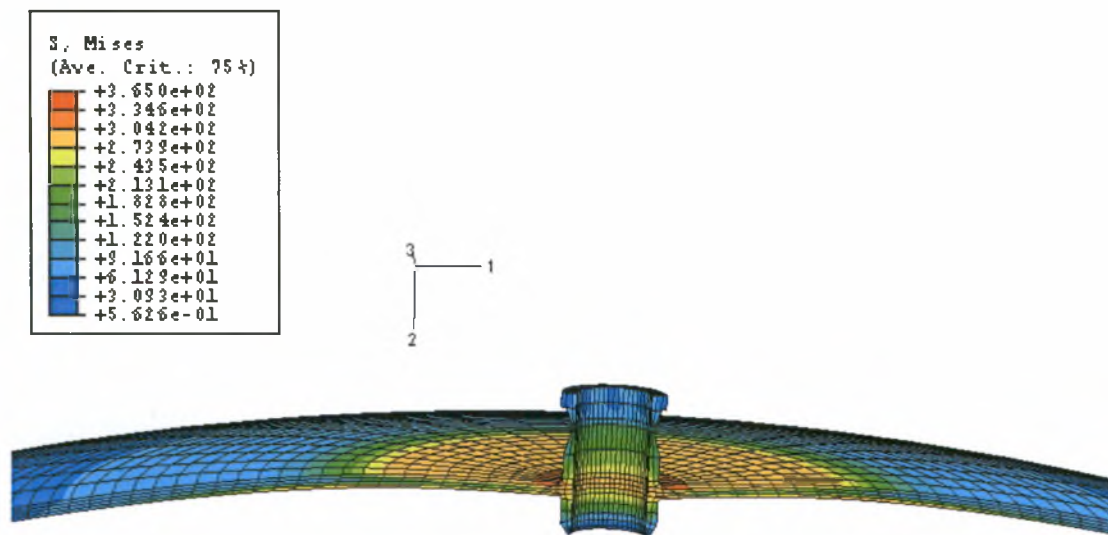
Η ανάλυση διεξάγεται και για οριζόντια δύναμη $F = 45 \text{ KN}$ (20 φορές μικρότερη από την F_{max}). Έτσι προκύπτει το διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης των τριών διαφορετικών τρόπων φόρτισης του σφαιρικού δοχείου που φαίνεται στο σχήμα 2.16.

Στο σχήμα 2.17 φαίνεται η κρίσιμη περιοχή της σφαίρας για την πιο πάνω περίπτωση την χρονική στιγμή που η δύναμη παίρνει την τιμή $F_{max} = 856.68 \text{ KN}$



Σχήμα 2.16: Διάγραμμα Δύναμης (F) – Μετατόπισης (U_2) των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τους τρεις διαφορετικούς τρόπους φόρτισης της σφαίρας.

Συγκρίνοντας την καμπύλη δύναμης - μετατόπισης της ανάλυσης ενός βήματος με διαρκώς αυξανόμενη αξονική δύναμη και της πιο πάνω περίπτωσης με αρχική ατέλεια, παρατηρούμε ότι ταυτίζονται, συνεπώς η αρχική ατέλεια δεν προκαλεί μεταβολή στην συμπεριφορά του ακροφυσίου P1.



Σχήμα 2.17: Η κρίσιμη περιοχή της σφαίρας για την περίπτωση της αρχικής ατέλειας και ακολούθως επιβολή αξονικής δύναμης στο ακροφύσιο P1 (increment 10)

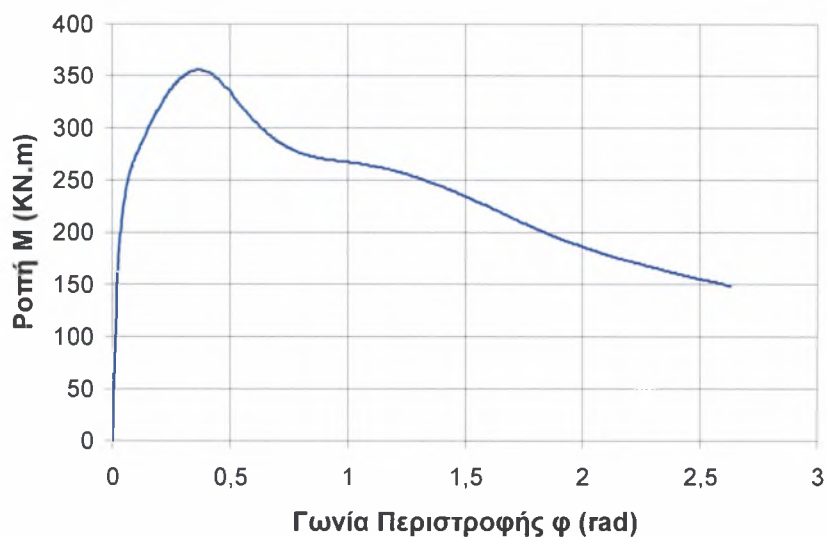
2.4.3 Οριακή ανάλυση του σφαιρικού δοχείου πίεσης υπό την επίδραση συγκεντρωμένης ροπής στο ακροφύσιο P1

Σε αυτή την περίπτωση διαφέρουν τα βήματα ανάλυσης, οι συνοριακές συνθήκες και ο τρόπος φόρτισης του δοχείου.

Η ανάλυση γίνεται τώρα σε ένα μόνο βήμα. Στο βήμα αυτό ασκείται η διαρκώς αυξανόμενη συγκεντρωμένη ροπή στο ακροφύσιο P1.

Η διαφορά στις συνοριακές συνθήκες είναι ότι τώρα το ακροφύσιο μπορεί να μετατοπιστεί ως προς τους άξονες 1 και 2 και να περιστραφεί ως προς τον άξονα 3 δηλαδή $U3 = UR4 = UR5 = 0$.

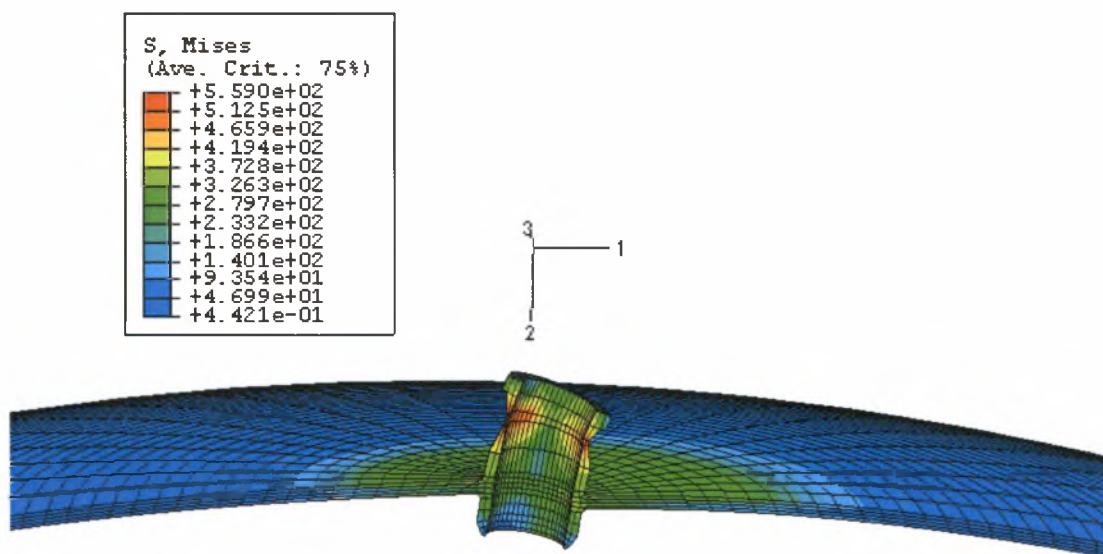
Από την πιο πάνω ανάλυση παίρνουμε το εξής διάγραμμα ροπής (M) – γωνίας περιστροφής (φ) που φαίνεται στο σχήμα 2.18.



Σχήμα 2.18: Διάγραμμα ροπής (M) – γωνίας περιστροφής (φ) του ακροφυσίου P1

Από το πιο πάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή της ροπής (M) είναι $M_{\max} = 357 \text{ KN.m}$

Πιο κάτω φαίνεται η κρίσιμη περιοχή της σφαίρας για την πιο πάνω περίπτωση την χρονική στιγμή που η ροπή παίρνει την μέγιστη τιμή της $M = 357 \text{ MN.mm}$ (Σχήμα 2.19)



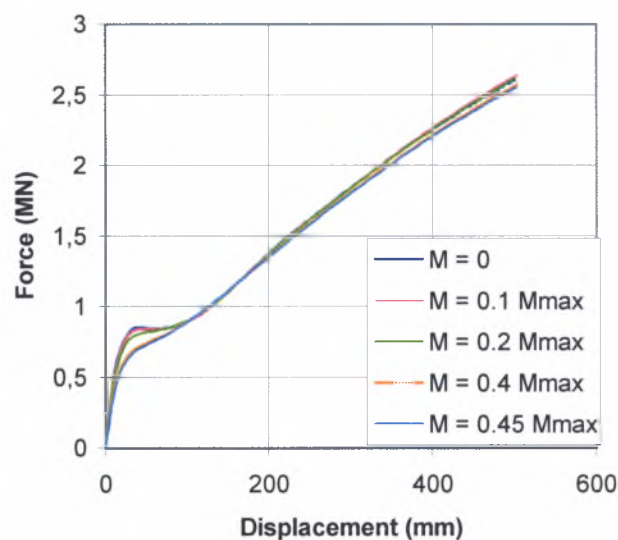
Σχήμα 2.19: Η κρίσιμη περιοχή της σφαίρας για την περίπτωση της συγκεντρωμένης ροπής στο ακροφύσιο P1 (increment 108).

2.4.4 Οριακή ανάλυση του σφαιρικού δοχείου πίεσης υπό την επίδραση συγκεντρωμένης ροπής και αξονικής δύναμης στο ακροφύσιο P1

Και σε αυτή την περίπτωση ένα μέρος της ανάλυσης είναι το ίδιο με τις προηγούμενες περιπτώσεις (γεωμετρία, ιδιότητες του υλικού, πλέγμα) και διαφέρουν τα βήματα ανάλυσης και ο τρόπος φόρτισης του δοχείου.

Η ανάλυση γίνεται τώρα σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα ασκείται η σταθερή συγκεντρωμένη ροπή που παίρνει τιμές υποπολλαπλάσιες της M_{max} . Στο δεύτερο βήμα εφαρμόζεται η κατακόρυφη και διαρκώς αυξανόμενη δύναμη, διατηρώντας τη ροπή σταθερή.

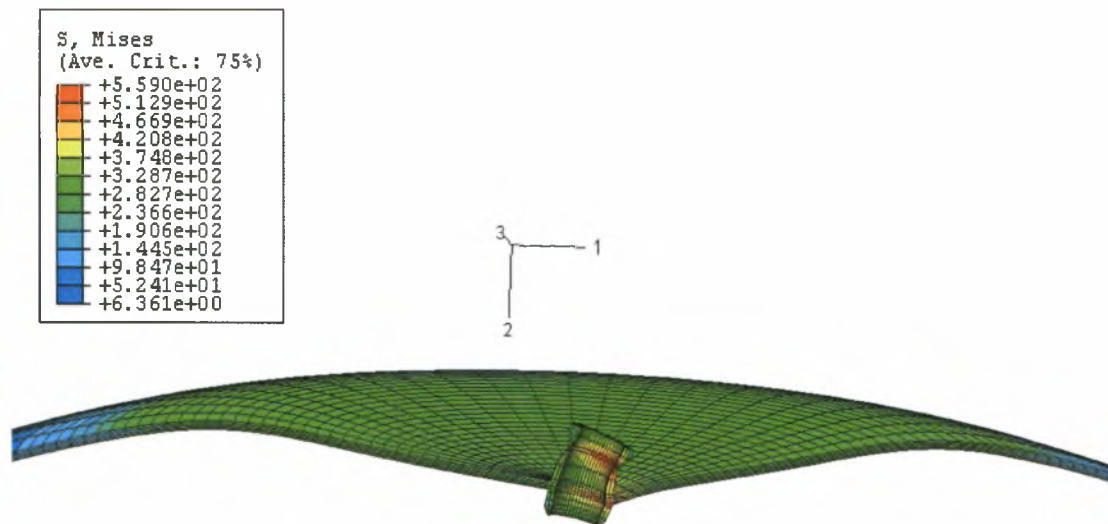
Η ανάλυση γίνεται για τιμές της ροπής M που κυμαίνονται από $M = 0 - 0.45 M_{max}$. Πιο κάτω δίνεται το διάγραμμα δύναμης (F) – μετατόπισης (U_2) για όλες περιπτώσεις (Σχήμα 2.20).



Σχήμα 2.20: Διάγραμμα Δύναμης (F) – Μετατόπισης (U_2) για διάφορες τιμές σταθερής ροπής

Συγκρίνοντας τις καμπύλες δύναμης-μετατόπισης του ακροφυσίου για διάφορες τιμές συγκεντρωμένης ροπής, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η τιμή της ροπής η πλαστικοποίηση λαμβάνει χώρα σε μικρότερες τιμές αξονικής δύναμης.

Πιο κάτω φαίνεται η κρίσιμη περιοχή της σφαίρας για την περίπτωση που $M = 0.45 M_{max}$ την χρονική στιγμή που η δύναμη παίρνει την μέγιστη τιμή της $F = 2.67$ MN (Σχήμα 2.21)



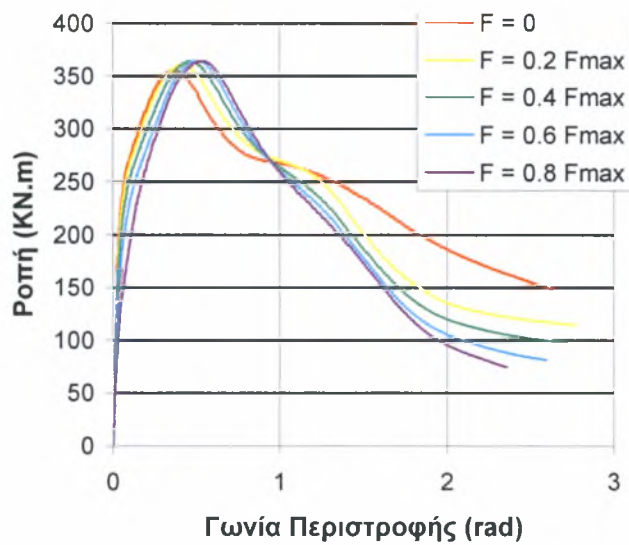
Σχήμα 2.21: Η κρίσιμη περιοχή της σφαίρας για την περίπτωση που ασκείται σταθερή ροπή $M = 0.45M_{max}$ και ακολούθως αξονική δύναμη στο ακροφύσιο P1 (increment 81)

2.4.5 Οριακή ανάλυση του σφαιρικού δοχείου πίεσης υπό την επίδραση αξονικής δύναμης και συγκεντρωμένης ροπής στο ακροφύσιο P1

Και σε αυτή την περίπτωση ένα μέρος της ανάλυσης είναι το ίδιο με τις προηγούμενες περιπτώσεις (γεωμετρία, ιδιότητες του υλικού, πλέγμα) και διαφέρουν τα βήματα ανάλυσης και ο τρόπος φόρτισης του δοχείου.

Συγκεκριμένα η ανάλυση γίνεται τώρα σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα ασκείται η σταθερή αξονική δύναμη που παίρνει τιμές υποπολλαπλάσιες της F_{max} . Στο δεύτερο βήμα εφαρμόζεται η διαρκώς αυξανόμενη ροπή διατηρώντας σταθερή την αξονική δύναμη.

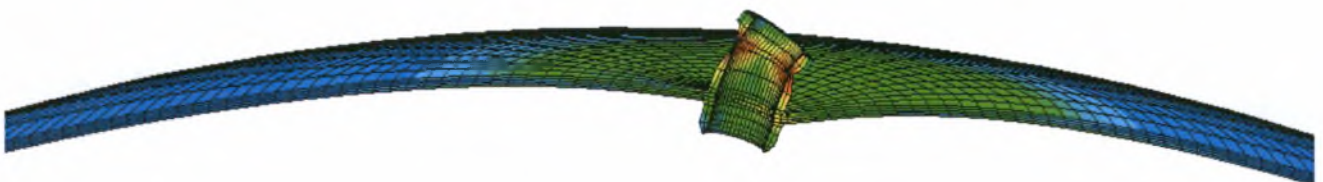
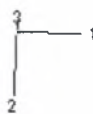
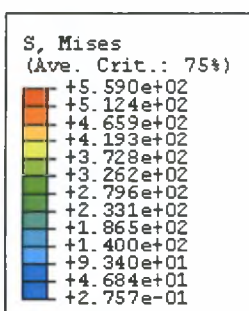
Η ανάλυση γίνεται για τιμές της δύναμης F που κυμαίνονται από $F = 0 - 0.8 F_{max}$. Πιο κάτω δίνονται τα διαγράμματα ροπής (M) – γωνίας περιστροφής (φ) για όλες περιπτώσεις (Σχήμα 2.22).



Σχήμα 2.22: Διάγραμμα ροπής (M) – γωνίας περιστροφής (φ) του ακροφυσίου P1 για διάφορες τιμές της αξονικής δύναμης

Συγκρίνοντας τις καμπύλες ροπής – γωνίας περιστροφής του ακροφυσίου για διάφορες τιμές αξονικής δύναμης, παρατηρούμε μέχρι ένα σημείο ότι, όσο αυξάνεται η τιμή της δύναμης παρουσιάζεται μεγαλύτερη γωνία περιστροφής στο ακροφύσιο ενώ μετά το συγκεκριμένο σημείο παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τιμή της δύναμης, το ακροφύσιο επιδέχεται μικρότερη γωνία περιστροφής.

Πιο κάτω φαίνεται η κρίσιμη περιοχή της σφαίρας για την περίπτωση που $F=0.8 M_{\max}$ την χρονική στιγμή που η ροπή παίρνει την μέγιστη τιμή της $M = 357$ MN.mm (Σχήμα 2.23)



Σχήμα 2.23: Η κρίσιμη περιοχή της σφαίρας για την περίπτωση που ασκείται σταθερή δύναμη $F = 0.8F_{\max}$ και ακολούθως ροπή στο ακροφύσιο P1 (increment 278)

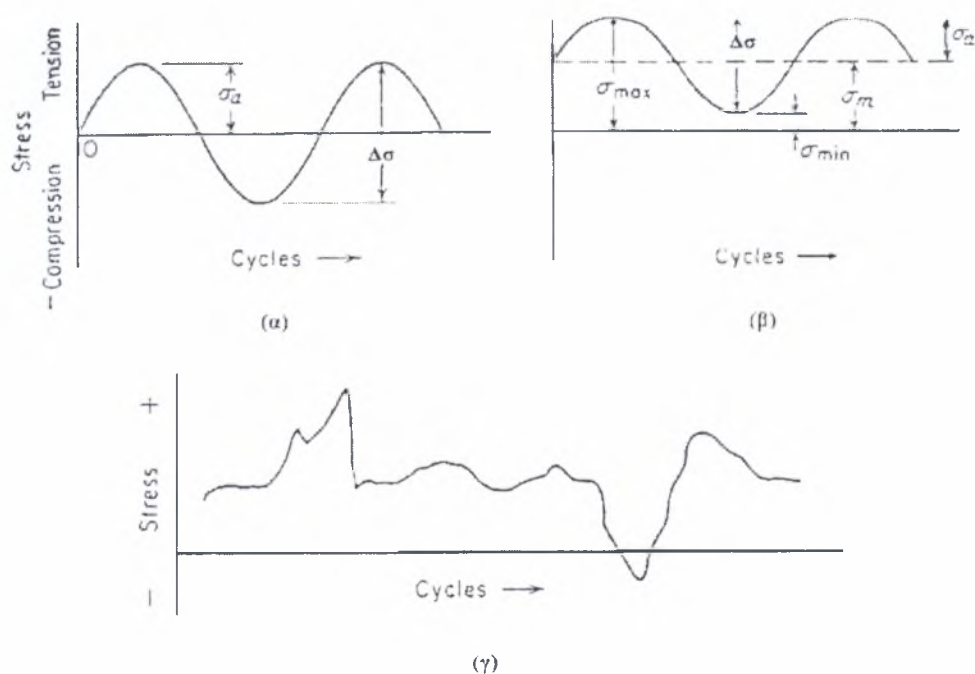
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΔΟΧΕΙΩΝ ΠΙΕΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Ήδη από το 1830 έχει διαπιστωθεί ότι τα μεταλλικά υλικά, όταν καταπονούνται από επαναλαμβανόμενες ή χρονικά μεταβαλλόμενες (δυναμικές) τάσεις, μπορούν να αστοχήσουν σε θραύση, ακόμη και όταν οι τιμές των τάσεων αυτών βρίσκονται αρκετά χαμηλότερα από την αντοχή του υλικού σε θραύση. Η αστοχία που εμφανίζεται στα μεταλλικά υλικά λόγω της επίδρασης δυναμικών καταπονήσεων ονομάζεται **κόπωση**. Το βασικό της χαρακτηριστικό είναι ότι απαιτεί μια σημαντική χρονική περίοδο λειτουργίας του δομικού στοιχείου ή εξαρτήματος μιας κατασκευής για να εμφανιστεί. Σήμερα εκτιμάται ότι το 90% των αστοχιών, που προέρχονται από μηχανική αιτία, οφείλεται σε κόπωση.

Υπάρχουν τρεις βασικοί παράγοντες που απαιτούνται για να εμφανιστεί αστοχία από κόπωση: α) μία αρκετά υψηλή μέγιστη εφελκυστική τάση, β) μια αρκετά μεγάλη και επαναλαμβανόμενη διακύμανση της τάσης κατά τη λειτουργία και γ) ένας αρκετά μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης, δηλαδή επαναλήψεων της δυναμικής καταπόνησης (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Τρεις περιπτώσεις δυναμικής καταπόνησης

Εκτός από τους τρεις αυτούς βασικούς παράγοντες, η συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών σε κόπωση επηρεάζεται και από μια σειρά άλλων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος, η μικροδομή του υλικού, η ύπαρξη παραμενουσών εσωτερικών τάσεων στο υλικό κ.ά.

Όπως ήταν αναμενόμενο η κόπωση έχει αναγνωριστεί ως η κυριότερη αιτία αστοχίας και για τα δοχεία πίεσης. Έτσι έχουν αναπτυχθεί κάποιοι κώδικες σχεδιασμού για την αντιμετώπιση του φαινομένου της κόπωσης. Σε πολλές περιπτώσεις σχεδιασμού, ο αναμενόμενος αριθμός κύκλων φόρτισης είναι μερικά εκατομμύρια κύκλοι και για όλους τους πρακτικούς σκοπούς μπορεί να θεωρηθεί ως άπειρος. Αντίστοιχα, έχει καθοριστεί η έννοια του ορίου αντοχής με βάση συγκεκριμένους κανονισμούς. Το όριο αντοχής είναι η τάση που μπορεί να εφαρμοστεί για άπειρο αριθμό κύκλων φόρτισης χωρίς να προκαλέσει αστοχία σε κόπωση. Παρόλα αυτά, ο τυπικός αριθμός των κύκλων φόρτισης σπάνια ξεπερνά τις 100,000 και συχνά μόνο μερικές χιλιάδες. Συνεπώς, η ανάλυση της κόπωσης προϋποθέτει κατά κάποιο τρόπο μελέτη και άλλων παραμέτρων που ενδέχεται να παίζουν καθοριστικό ρόλο εκτός από το όριο αντοχής.

Η κόπωση αναφέρεται στην συμπεριφορά των υλικών που υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση, η οποία διαφέρει σημαντικά από την συμπεριφορά των υλικών υπό μονοτονικά εφαρμοσμένα φορτία. Υπάρχει μια προοδευτική τοπική παραμόρφωση που δέχεται την επίδραση αυξομειωμένων φορτίων τα οποία προκαλούν τα ρήγματα και έτσι επέρχεται η θραύση μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό κύκλων φόρτισης. Η κόπωση προκαλείται μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Παρόλα αυτά, μπορεί να προκληθεί ξαφνικά χωρίς προηγούμενες ενδείξεις, και οι «μηχανισμοί» θραύσης ενδέχεται να ξεκίνησαν να επενεργούν στο υλικό από την αρχική επιβολή του φορτίου. Αυτή η χρονική περίοδος αναφέρεται συχνά ως “usage period”. Η κόπωση θεωρείται ότι ξεκινά από τοπικές περιοχές στις οποίες ασκούνται μεγάλες τάσεις. Αυτές οι περιοχές υψηλών τάσεων οφείλονται στις απότομες αλλαγές στη γεωμετρία και οδηγούν σε υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων εξαιτίας των θερμοκρασιακών μεταβολών, των ατελειών ή λόγω των παραμενουσών τάσεων. Η αστοχία λαμβάνει χώρα όταν το ρήγμα μεγαλώνει λόγω της επαναλαμβανόμενης φόρτισης έως ένα σημείο στο οποίο το υλικό δεν μπορεί πια να αντέξει τα επιβαλλόμενα φορτία έτσι επέρχεται η θραύση. Μεταλλουργικά ελαττώματα όπως για παράδειγμα τα ρήγματα δίνουν το έναυσμα για την δημιουργία του φαινομένου της

κόπωσης. Η διαδικασία της κόπωσης ξεκινά με το σχηματισμό των ρηγμάτων, συνεχίζει με την ανάπτυξη τους έως ότου επέλθει η οριστική θραύση του υλικού.

Ένας άλλος τρόπος κατανόησης αυτού του φαινομένου είναι η υπόθεση ότι υπάρχουν ρήγματα εν γένει σε μικροκλίμακα τα οποία μεγαλώνουν σταδιακά λόγω της φόρτισης έως ότου τελικά επέλθει η θραύση.

Η κόπωση διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες, στην πολυκυκλική και ολιγοκυκλική κόπωση. Στην πολυκυκλική κόπωση, οι τάσεις σε μακροσκοπικό επίπεδο είναι ελαστικές, με αποτέλεσμα μακροσκοπικά να μην προκαλείται πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Όταν οι εφαρμοζόμενες τάσεις ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού, με αποτέλεσμα αυτό σε κάθε κύκλο φόρτισης να υφίσταται ένα ποσοστό ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, τότε η διάρκεια ζωής σε κόπωση μειώνεται σημαντικά ($N_f < 10^4$ κύκλους). Επειδή στις περιπτώσεις αυτές είναι δύσκολο να εκφραστεί η εντατική καταπόνηση σε όρους τάσης, οι δοκιμές κόπωσης διεξάγονται έτσι, ώστε σε κάθε κύκλο φόρτισης να προσδίδεται στο υλικό ένα προκαθορισμένο ποσοστό ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, παρά μια προκαθορισμένη μεταβολή της τάσης. Αυτό το είδος κόπωσης ονομάζεται ολιγοκυκλική κόπωση.

Τα βασικά στοιχεία για την εκτίμηση της κόπωσης σε δοχεία πίεσης βασίζονται στη μέγιστη διατμητική τάση με βάση το κριτήριο του Tresca, θεωρώντας γραμμική ελαστική συμπεριφορά και χρησιμοποιώντας τον κανόνα του Miner για να υπολογίσουμε τους κύκλους φόρτισης για διάφορες τιμές διακύμανσης της τάσης.

Η κόπωση συνήθως συμβαίνει σε περιοχές όπου υπάρχουν κατασκευαστικές ασυνέχειες οι οποίες αυξάνουν την συγκέντρωση των τάσεων. Οι παράγοντες συγκέντρωσης της τάσης βασίζονται σε θεωρητική ανάλυση που περιλαμβάνει στατικά εφαρμοζόμενα φορτία. Αυτά είναι απευθείας εφαρμοζόμενα στην ανάλυση της κόπωσης μόνο όταν η ονομαστική τάση, η οποία πολλαπλασιάζεται λόγω της συγκέντρωσης των τάσεων, είναι μικρότερη του ορίου διαρροής του υλικού. Όταν είναι μεγαλύτερη από το όριο διαρροής, υπάρχει μια ανακατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων. Για «απότομες» γεωμετρίες, χρησιμοποιώντας τις τιμές των συγκεντρωμένων τάσεων οι οποίες προκύπτουν από την θεωρία ελαστικότητας, λαμβάνουμε λανθασμένα αποτελέσματα για την ζωή του υλικού σε κόπωση αφού αυτά τα αποτελέσματα απέχουν αρκετά από τα πειραματικά και πραγματικά.

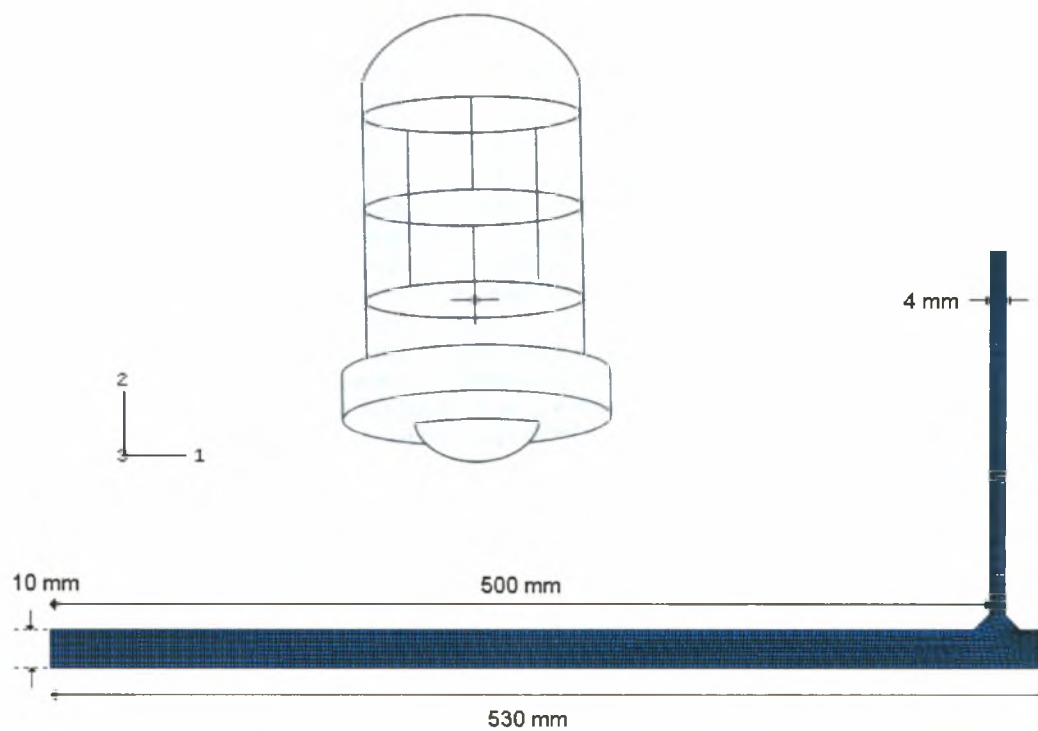
3.2 Υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση κυλινδρικού δοχείου υπό εσωτερική πίεση

3.2.1 Εισαγωγή

Διεξάγεται ανάλυση για την αντοχή σε κόπωση μιας συγκόλλησης μεταξύ ενός κελύφους και μιας επίπεδης επιφάνειας. Για την μελέτη αυτή χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι οι οποίες βασίζονται στις κύριες τάσεις. Σε κάθε μέθοδο υπολογίζονται οι επιτρεπόμενοι κύκλοι φόρτισης. Θεωρούμε μια συγκόλληση μεταξύ ενός κελύφους και μιας επίπεδης επιφάνειας. Εφαρμόζουμε σταθερή πίεση στο εσωτερικό του δοχείου. Οι επιτρεπόμενοι κύκλοι φόρτισης υπολογίζονται από δύο μεθόδους κυρίων τάσεων και από δυο μεθόδους notch τάσεων. Η μία από τις δύο μεθόδους κυρίων τάσεων δίνεται από τους Dong & Hong και η άλλη από το European Standard EN 13445.

Πρόβλημα

Η γεωμετρία του κυλινδρικού δοχείου φαίνεται στο σχήμα 3.2. Η εσωτερική διάμετρος του είναι 500mm και το πάχος του τοιχώματος του 4mm. Η διάμετρος του ελάσματος είναι 530mm και το πάχος του 10mm. Το δοχείο σχεδιάστηκε για πίεση 0,28 MPa σε θερμοκρασία δωματίου. Η πίεση κυμαίνεται από 0-0,28 MPa. Το υλικό είναι είτε άνθρακας είτε ανοξείδωτος χάλυβας.



Σχήμα 3.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυλινδρικού δοχείου

Ιδιότητες του υλικού

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας $E = 210000$ MPa και λόγο Poisson $\nu = 0.3$.

Πλέγμα

Το πλέγμα συγκροτείται από αξονοσυμμετρικά τετραγωνικά στοιχεία με τέσσερα σημεία ολοκλήρωσης (CAX4, Σχήμα 3.4) και είναι αρκετά πυκνό σε όλη την περιοχή του κυλινδρικού δοχείου πίεσης.

Βήματα ανάλυσης

Η ανάλυση αποτελείται από ένα μόνο βήμα στο οποίο επιβάλλεται εσωτερική πίεση $\Delta P = 0.28$ MPa στο δοχείο. Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης είναι απενεργοποιημένη η εντολή NLGEOM (non linear geometry) αφού η ανάλυση είναι γραμμική.

Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες είναι :

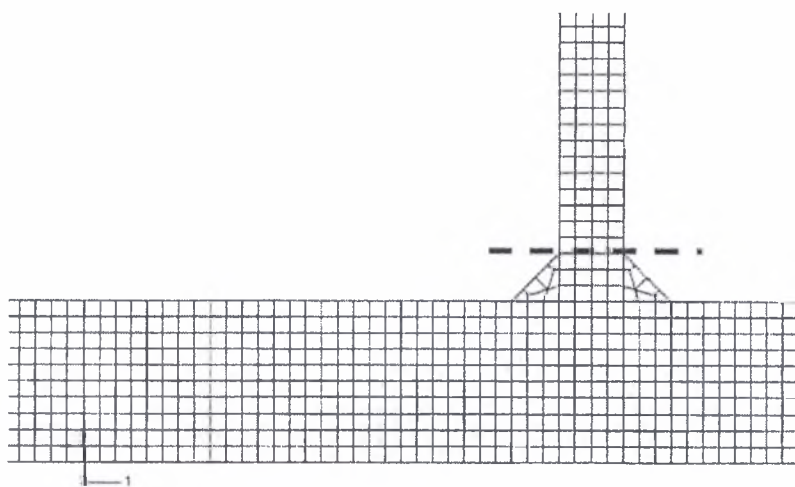
$U1 = UR6 = 0$ στην επιφάνεια που βρίσκεται κάτω αριστερά του κυλινδρικού δοχείου.

$U2 = UR6 = 0$ στην πάνω δεξιά επιφάνεια του δοχείου.

Οι συνοριακές συνθήκες φαίνονται στο σχήμα 3.5

3.2.2 Μέθοδος Dong & Hong

Η συνιστώσα S22 υπολογίζεται από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS στο οριζόντιο επίπεδο που φαίνεται από τη διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 3.3 και αναλυτικότερα στο Σχήμα 3.5. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται 15 σημεία (5 κόμβοι και 10 σημεία ολοκλήρωσης) τα οποία έχουν γνωστή τάση S22 και γνωστή απόσταση από το weld toe. Γίνεται γραμμική παρεμβολή στα σημεία της τάσης και έτσι ορίζεται η membrane stress ($\Delta\sigma_m$) και η καμπτική τάση ($\Delta\sigma_b$).

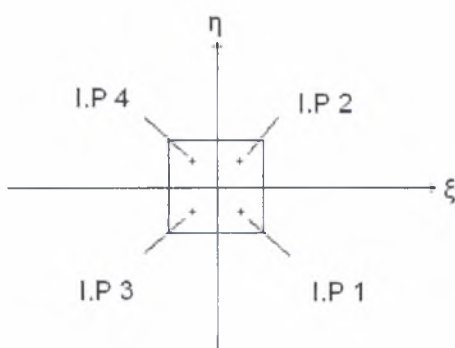


Σχήμα 3.3: Το οριζόντιο επίπεδο του weld toe στο οποίο υπολογίζεται η τάση S22

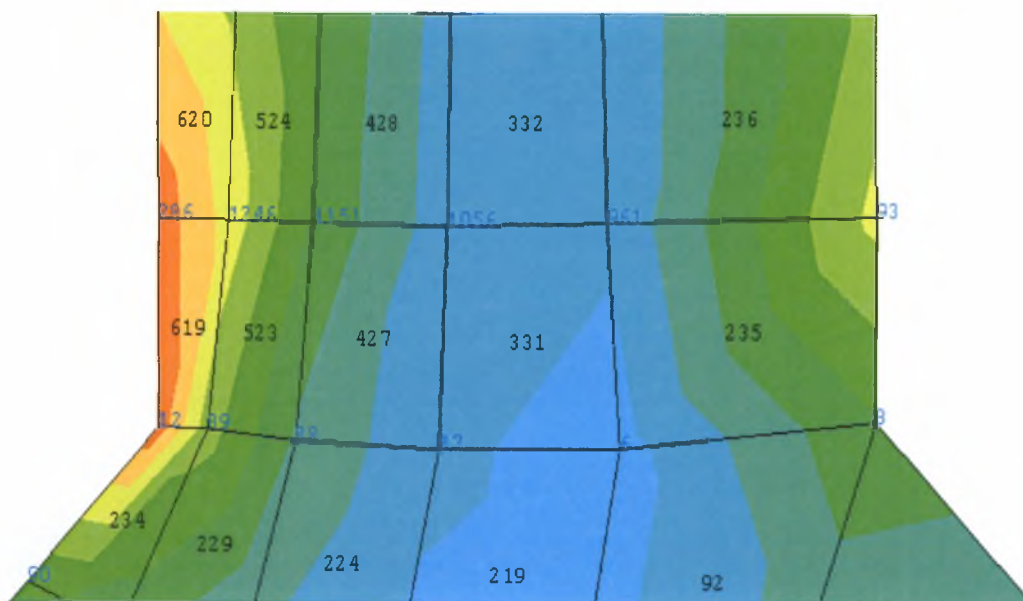
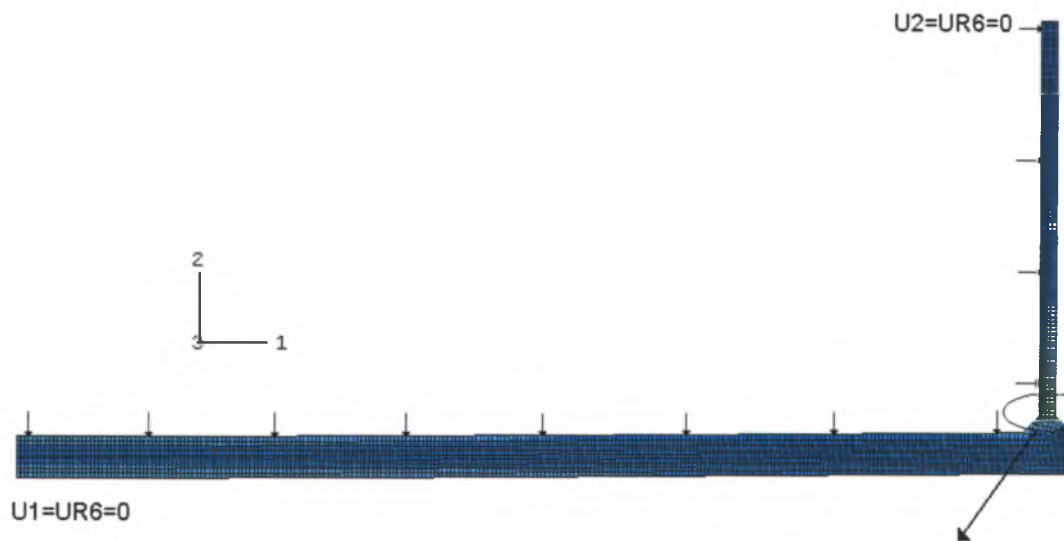
ΟΙ ΤΑΣΕΙΣ S22 ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΥ WELD TOE (Σχήμα 3.3)

Σημείο μέτρησης της τάσης S22	Απόσταση από το weld toe (mm)	S22 (MPa)
*IP 3 (*el 619)	0,0685195	364,892
IP 1 (el 619)	0,2055585	333,453
NODE 89	0,274078	252,676
IP 3 (el 523)	0,39800225	238,208
IP 1 (el 523)	0,64585078	216,721
NODE 88	0,769775	161,187
IP 3 (el 427)	0,96927275	126,803
IP 1 (el 427)	1,36826825	103,653
NODE 87	1,567766	61,1425
IP 3 (el 331)	1,819541	21,7238
IP 1 (el 331)	2,323091	7,76405
NODE 6	2,574866	-58,6588
IP 3 (el 235)	2,92357	-162,199
IP 1 (el 235)	3,64119	-235,664
NODE 8	4	-177,055

*IP: Integration Point, *el: element

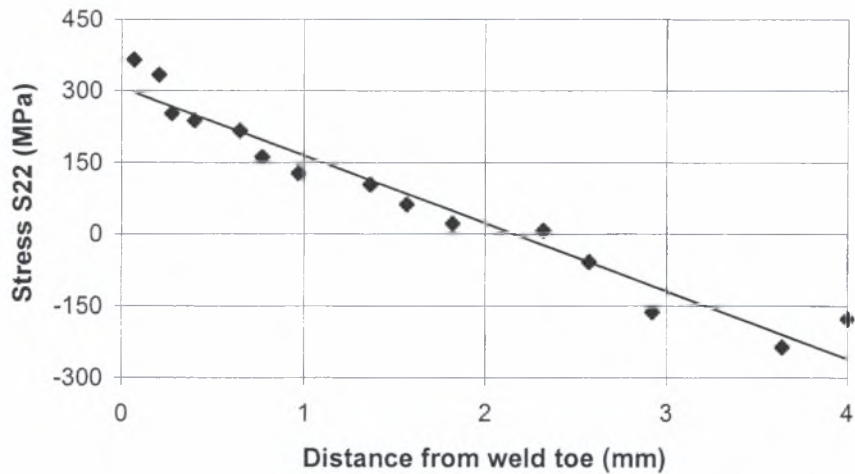


Σχήμα 3.4: Ο τρόπος αρίθμησης των σημείων ολοκλήρωσης ενός πεπερασμένου τετρακομβικού στοιχείου



Σχήμα 3.5: Τα στοιχεία των σημείων ολοκλήρωσης και οι κόμβοι στα οποία υπολογίζεται η τάση S_{22}

Γραμμική παρεμβολή της S22



Σχήμα 3.6: Τιμές της τάσης S22 στο οριζόντιο επίπεδο του weld toe

$\Delta\sigma_m = 22.7 \text{ MPa}$ (τιμή της τάσης S22 για $x=2\text{mm}$)

$\Delta\sigma_b = 306.14 \text{ MPa}$ (σημείο τομής με τον άξονα των y)

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b = 328.84 \text{ MPa} \quad (3.1)$$

$$r = \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b} \Rightarrow r = \frac{306.1392}{22.6967 + 306.1392} = 0.9309786 \quad (3.2)$$

$$\Gamma^{1/m} = C_6 r^6 + C_5 r^5 + C_4 r^4 + C_3 r^3 + C_2 r^2 + C_1 r^1 + C_0 \quad (3.3)$$

όπου $C_6 = 0.0011$, $C_5 = 0.0767$, $C_4 = -0.0988$, $C_3 = 0.0946$,

$C_2 = 0.0221$, $C_1 = 0.014$ και $C_0 = 1.2223$

$$\text{Άρα με βάση τις σχέσεις 3.2 – 3.3 : } \Gamma^{1/m} = 1.311 \quad (3.4)$$

Ορίζουμε επίσης τον συντελεστή $t^{\frac{2-m}{2m}}$ όπου για πάχος $t = 4 \text{ mm}$ και $m = 3.6$ παίρνει

$$\text{την τιμή } t^{\frac{2-m}{2m}} = 0.7349 \quad (3.5)$$

Χρησιμοποιώντας την ΔS από την σχέση 3.1 και τις τιμές από τις 3.4 και 3.5 έχουμε:

$$\Delta S = \frac{\Delta \sigma}{t^{2-m} I^{1/m}} = 341.32 \text{ MPa}$$

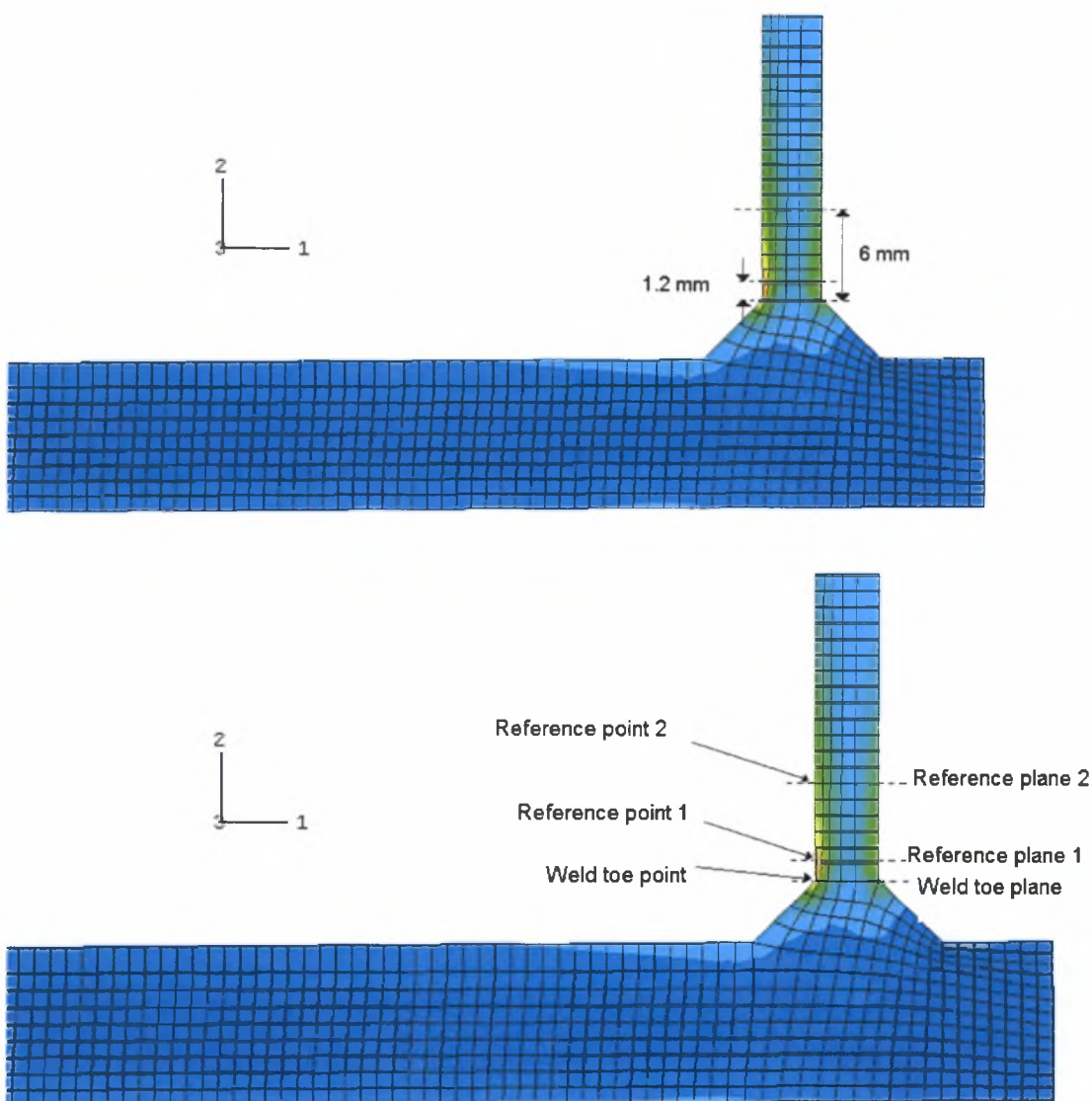
Έτσι ο αναμενόμενος αριθμός κύκλων φόρτισης είναι:

$$N = \left(\frac{C_1}{\Delta S} \right)^{\frac{1}{m_1}} \text{ όπου } C_1 = 12492.6 \text{ και } m_1 = 0.319$$

Άρα: $N = \underline{\underline{80337 \text{ κύκλοι φόρτισης}}}$

3.2.3 Μέθοδος European Standard EN 13445.

Οι συνιστώσες τάσεις στα κρίσιμα σημεία αξονικής καταπόνησης του κύκλου υπολογίζονται με τη βοήθεια δύο επιπέδων, του επιπέδου αναφοράς 1 και του επιπέδου αναφοράς 2, τα οποία απέχουν 1.2 mm και 6 mm αντίστοιχα, από το επίπεδο του weld toe όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Οι κόμβοι και τα επίπεδα αναφοράς στα οποία πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή για υπολογισμό των τάσεων

Γίνεται γραμμική παρεμβολή στις συνιστώσες τάσεις S11, S22, S33 και S12 στα επίπεδα αναφοράς 1 και 2 έτσι ώστε να υπολογιστούν οι τάσεις στα σημεία αναφοράς

1 και 2 αντίστοιχα στην εσωτερική επιφάνεια του κυλινδρικού δοχείου (Σχήμα 3.7). Ακολουθώς γίνεται γραμμική παρεμβολή στις τάσεις S11, S22, S33 και S12 των σημείων αναφοράς και υπολογίζονται οι αντίστοιχες τάσεις στο weld toe από τις οποίες προκύπτουν οι κύριες τάσεις.

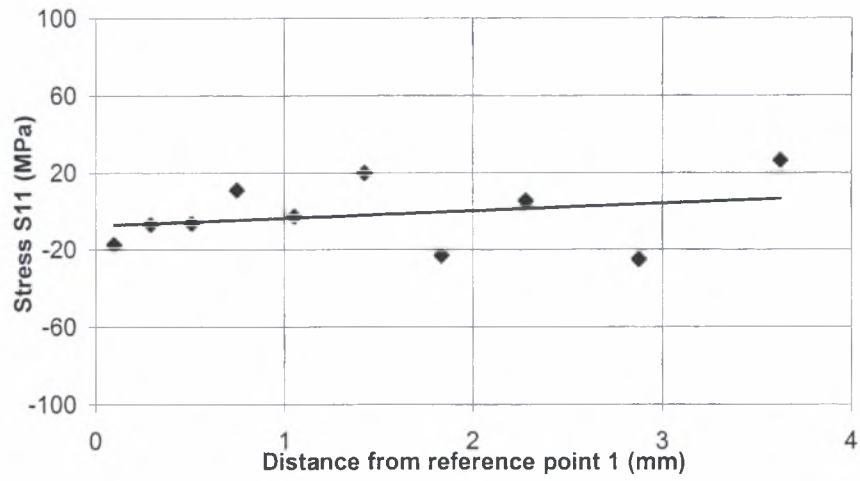
Από την γραμμική παρεμβολή στις τάσεις S11, S22, S33, και S12 στο επίπεδο αναφοράς 1 το οποίο απέχει 1.2 mm από το επίπεδο του weld toe, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

ΟΙ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ 1 (Σχήμα 3.7)

Σημείο	Απόσταση από το σημείο αναφοράς 1 (mm)	S11(MPa)	S22(MPa)	S33(MPa)	S12(MPa)
IP 3 (el 620*)	0,0980175	-17,4482	307,523	24,7822	8,96438
IP 1 (el 620)	0,2940525	-6,86615	296,941	24,7822	12,4426
IP 3 (el 524)	0,510483	-6,25276	240,038	7,91688	31,3359
IP 1 (el 524)	0,7473095	11,1083	222,676	7,91688	30,7574
IP 3 (el 428)	1,052521	-2,527	142,615	-20,101	31,3282
IP 1 (el 428)	1,426116	20,1095	119,979	-20,101	27,6368
IP 3 (el 332)	1,835206	-22,9789	17,1246	-63,6932	32,8145
IP 1 (el 332)	2,279789	5,56691	-11,4213	-63,6932	37,1622
IP 3 (el 236)	2,876781	-25,1457	-169,603	-119,851	30,165
IP 1 (el 236)	3,626181	26,3464	-221,095	-119,851	29,052

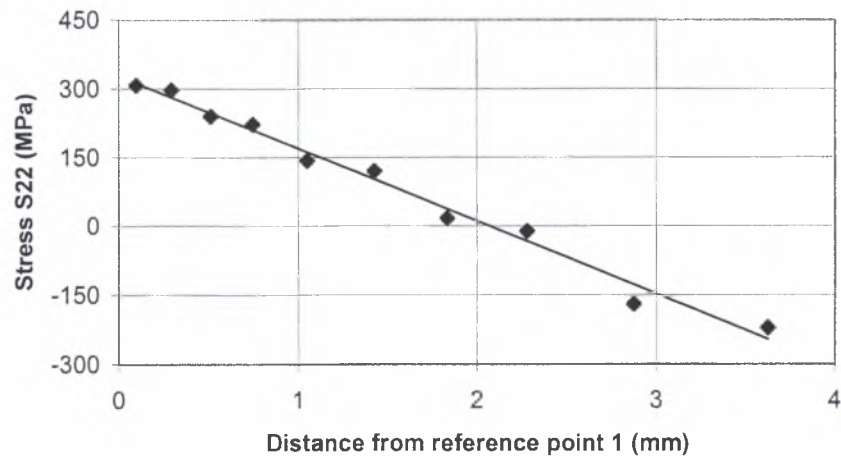
* στοιχείο στην εσωτερική επιφάνεια του κυλινδρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S11



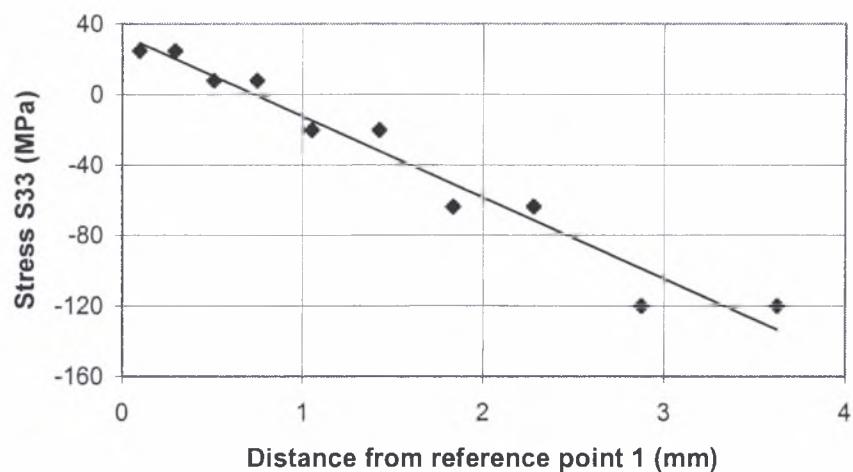
Σχήμα 3.8: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S11 στο επίπεδο αναφοράς 1

Γραμμική παρεμβολή στην S22



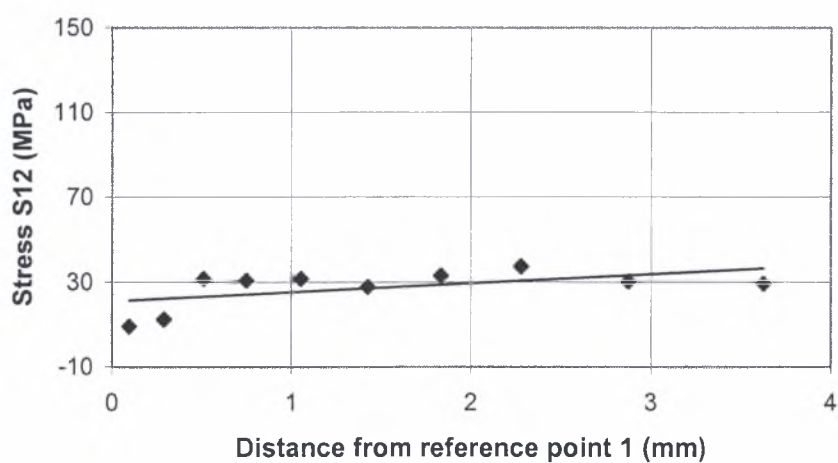
Σχήμα 3.9: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S22 στο επίπεδο αναφοράς 1

Γραμμική παρεμβολή στην S33



Σχήμα 3.10: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S33 στο επίπεδο αναφοράς 1

Γραμμική παρεμβολή στην S12



Σχήμα 3.11: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S12 στο επίπεδο αναφοράς 1

Έτσι οι τάσεις στο σημείο αναφοράς 1 είναι:

$$S11 = -7.54 \text{ MPa}$$

$$S22 = 328.18 \text{ MPa}$$

$$S33 = 33.84 \text{ MPa}$$

$$S12 = 20.89 \text{ MPa}$$

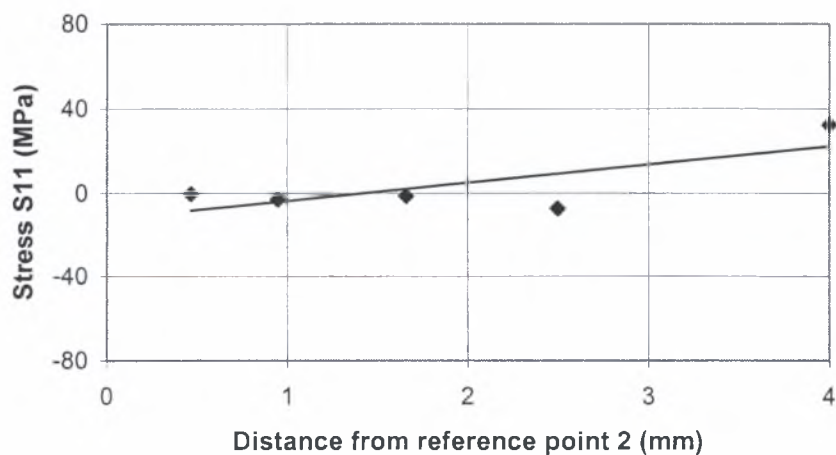
Από την γραμμική παρεμβολή στις τάσεις S11, S22, S33, και S12 στο επίπεδο αναφοράς 2 το οποίο απέχει 6 mm από το επίπεδο του weld toe, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

ΟΙ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ 2 (Σχήμα 3.7)

Κόμβος	Απόσταση από το σημείο αναφοράς 2 (mm)	S11 (MPa)	S22 (MPa)	S33 (MPa)	S12 (MPa)
1251*	0,468994	-0,395983	197,67	-16,0269	5,79486
1156	0,947006	-2,79294	134,26	-35,6913	11,2714
1061	1,658706	-1,29125	48,274	-60,8558	14,902
966	2,496597	-7,12388	-65,6601	-96,3555	12,4514
98	4	32,3913	-177,168	-117,645	7,14975

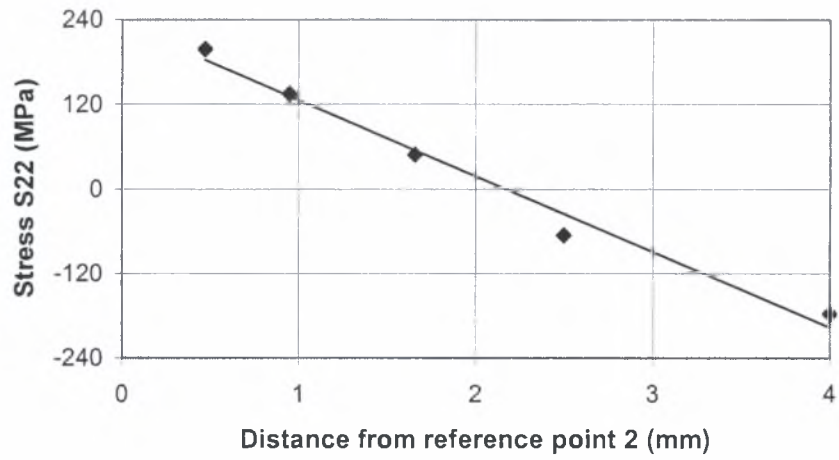
* κόμβος στην εσωτερική επιφάνεια του κυλινδρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S11



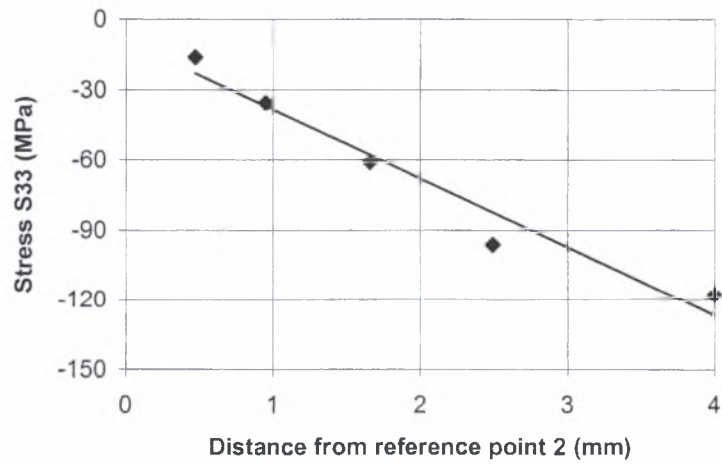
Σχήμα 3.12: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S11 στο επίπεδο αναφοράς 2

Γραμμική παρεμβολή στην S22



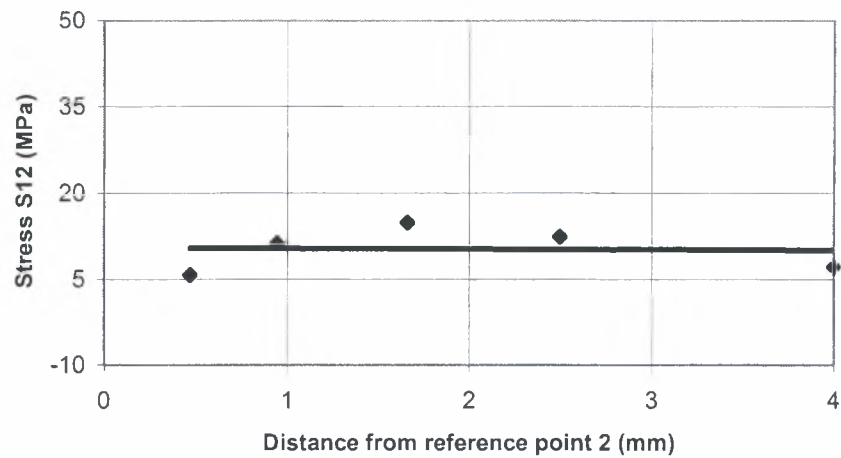
Σχήμα 3.13: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S22 στο επίπεδο αναφοράς 2

Γραμμική παρεμβολή στην S33



Σχήμα 3.14: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S33 στο επίπεδο αναφοράς 2

Γραμμική παρεμβολή στην S12



Σχήμα 3.15: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S12 στο επίπεδο αναφοράς 2

Έτσι οι τάσεις στο σημείο αναφοράς 2 είναι:

$$S11 = - 12.33 \text{ MPa}$$

$$S22 = 233.11 \text{ MPa}$$

$$S33 = - 9.15 \text{ MPa}$$

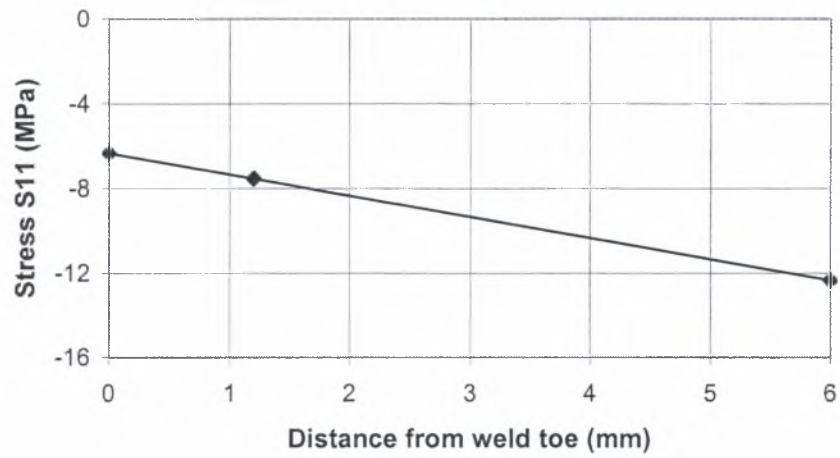
$$S12 = 10.54 \text{ MPa}$$

Ακολούθως, πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή στις τάσεις S11, S22, S33, και S12 των σημείων αναφοράς 1 και 2 για να βρούμε την τιμή των αντίστοιχων τάσεων στο weld toe (0mm) και προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

ΟΙ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ 1 ΚΑΙ 2 (Σχήμα 3.7)

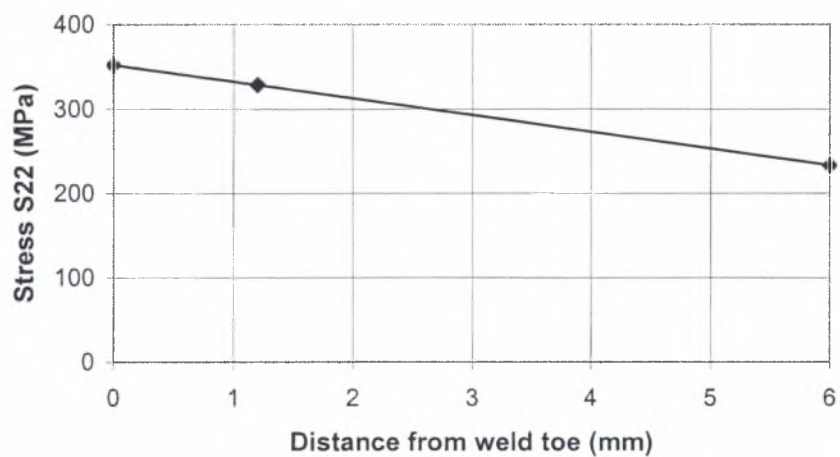
Κόμβος	Απόσταση από το weld toe (mm)	S11(MPa)	S22(MPa)	S33(MPa)	S12(MPa)
Σημείο αναφοράς 1	1,2	-7,54	328,18	33,84	20,89
Σημείο αναφοράς 2	6	-12,33	233,11	-9,15	10,54

Γραμμική παρεμβολή στην S11



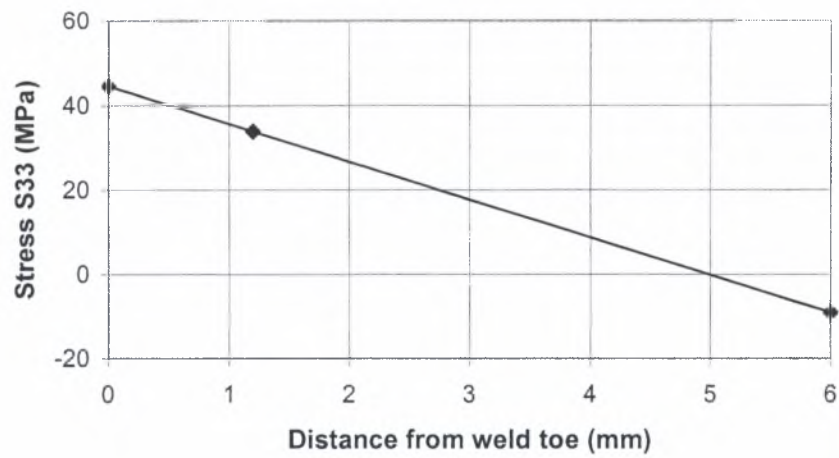
Σχήμα 3.16: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S11 στην εσωτερική επιφάνεια του κυλινδρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S22



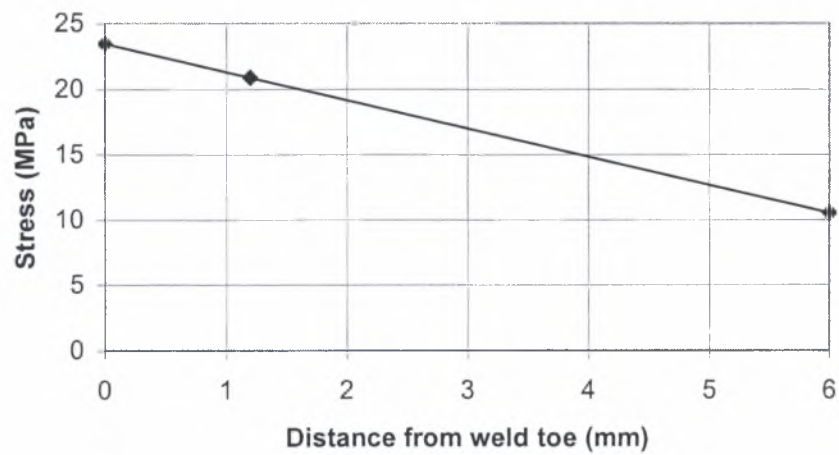
Σχήμα 3.17: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S22 στην εσωτερική επιφάνεια του κυλινδρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S33



Σχήμα 3.18: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S33 στην εσωτερική επιφάνεια του κυλινδρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S12



Σχήμα 3.19: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S12 στην εσωτερική επιφάνεια του κυλινδρικού δοχείου

Από τις πιο πάνω αναλύσεις προκύπτουν οι εξής τάσεις στο weld toe:

$$S11 = - 6.34 \text{ MPa}$$

$$S22 = 351.95 \text{ MPa}$$

$$S33 = 44.58 \text{ MPa}$$

$$S12 = 23.47 \text{ MPa}$$

Ακολουθως υπολογίζονται οι ισοδύναμες κύριες τάσεις ως εξής:

$$\bar{S}_{12} = \sigma_{\text{struct1}} - \sigma_{\text{struct2}} \quad (3.6)$$

$$\bar{S}_{23} = \sigma_{\text{struct2}} - \sigma_{\text{struct3}} \quad (3.7)$$

$$\bar{S}_{31} = \sigma_{\text{struct3}} - \sigma_{\text{struct1}} \quad (3.8)$$

Η ισοδύναμη κύρια τάση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των κύκλων φόρτισης είναι η μέγιστη των πιο πάνω, δηλαδή:

$$\Delta\sigma_{\text{eq}} = \max(|\bar{S}_{12}|, |\bar{S}_{23}|, |\bar{S}_{31}|) \quad (3.9)$$

Υπολογίζουμε τις κύριες τάσεις σ_{struct1} , σ_{struct2} και σ_{struct3}

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{struct1}} &= \frac{S11 + S22}{2} + \left[\left(\frac{S11 - S22}{2} \right)^2 + (S12)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \\ \sigma_{\text{struct1}} &= \frac{-6.34 + 351.95}{2} + \left[\left(\frac{-6.34 - 351.95}{2} \right)^2 + (23.47)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \\ \sigma_{\text{struct1}} &= \underline{\underline{350.309 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{struct2}} &= \frac{S11 + S22}{2} - \left[\left(\frac{S11 - S22}{2} \right)^2 + (S12)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \\ \sigma_{\text{struct2}} &= \frac{-6.34 + 351.95}{2} - \left[\left(\frac{-6.34 - 351.95}{2} \right)^2 + (23.47)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \\ \sigma_{\text{struct2}} &= \underline{\underline{-11.039 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\sigma_{\text{struct3}} = S33 \Rightarrow \sigma_{\text{struct3}} = \underline{\underline{44.58 \text{ MPa}}} \quad (3.12)$$

Από τις σχέσεις 3.6 – 3.8 και 3.10 – 3.12 προκύπτει ότι

$$\bar{S}_{12} = 350.309 + 11.039 \Rightarrow \bar{S}_{12} = 361.35 \text{ MPa} \quad (3.13)$$

$$\bar{S}_{23} = -11.039 - 44.58 \Rightarrow \bar{S}_{23} = -55.62 \text{ MPa} \quad (3.14)$$

$$\bar{S}_{31} = 44.58 - 350.309 \Rightarrow \bar{S}_{31} = -305.73 \quad (3.15)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 3.9 και 3.13 – 3.15 προκύπτει ότι

$$\Delta\sigma_{eq} = \bar{S}_{12} \Rightarrow \Delta\sigma_{eq} = \underline{\underline{361.35 \text{ MPa}}}$$

Άρα

$$N = \frac{C_1}{\left(\frac{\Delta\sigma_{eq}}{f_w} \right)^{m_1}} \text{ όπου } C_1 = 7.16 \times 10^{11}, m_1 = 3 \text{ και } f_w = 1$$

$$\Rightarrow N = \underline{\underline{15175 \text{ κύκλοι φόρτισης}}}$$

3.3 Υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση σφαιρικού δοχείου πίεσης

3.3.1 Εισαγωγή

Γίνεται ανάλυση για την αντοχή σε κόπωση του συγκολλημένου ακροφυσίου P1 στο σφαιρικό δοχείο πίεσης. Για την μελέτη αυτή επιβάλλονται ξεχωριστά δύο μορφές φόρτισης στο δοχείο (αξονική δύναμη και εσωτερική πίεση) και χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι για την κάθε ανάλυση, οι οποίες βασίζονται στις κύριες τάσεις. Η μία από τις δύο μεθόδους κυρίων τάσεων δίνεται από τους Dong & Hong και η άλλη από το European Standard EN 13445. Σε κάθε μέθοδο υπολογίζονται οι επιτρεπόμενοι κύκλοι φόρτισης.

Στην πρώτη ανάλυση επιβάλλεται αξονική δύναμη στο ακροφύσιο $\Delta F = 285.5 \text{ KN}$,

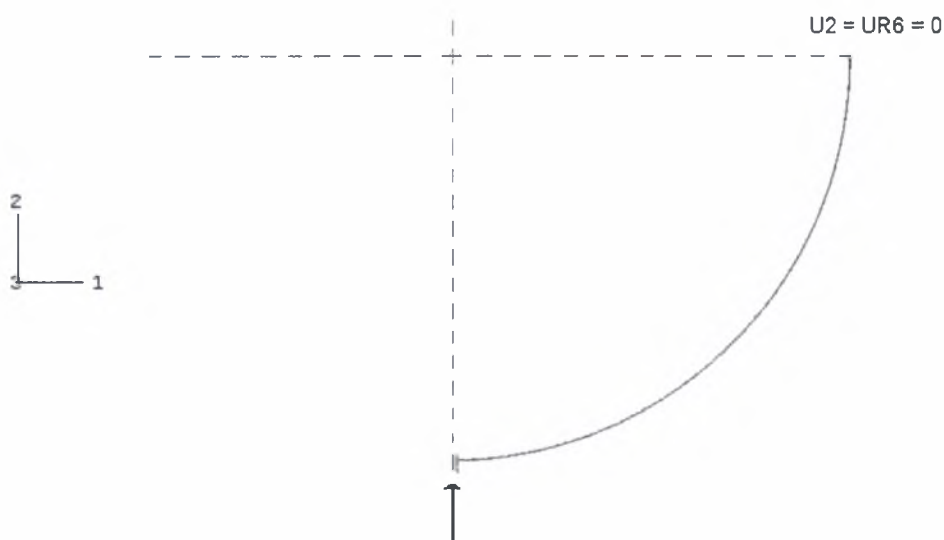
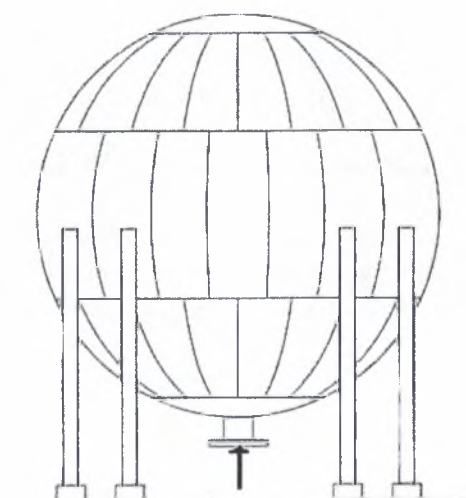
δηλαδή $\Delta F = \frac{F_{\max}}{3}$ ενώ στην δεύτερη ανάλυση επιβάλλεται εσωτερική πίεση στο

δοχείο $\Delta P = 1.21 \text{ MPa}$, δηλαδή $\Delta P = \frac{P_y}{2}$.

3.3.2 Υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση σφαιρικού δοχείου πίεσης υπό την επίδραση αξονικής δύναμης

3.3.2.1 Εισαγωγή

Η γεωμετρία του σφαιρικού δοχείου φαίνεται στο σχήμα 3.20. Η διακεκομμένες γραμμές είναι η ένδειξη ότι το δοχείο σχεδιάστηκε αξονοσυμμετρικά. Η εσωτερική ακτίνα του δοχείου είναι 10608 mm και το πάχος του τοιχώματος του 43 mm. Η εσωτερική ακτίνα του ακροφυσίου P1 είναι 123.8 mm και το πάχος του 35.2 mm.



Σχήμα 3.20: Η γεωμετρία του σφαιρικού δοχείου υπό την επίδραση αξονικής δύναμης

Ιδιότητες του υλικού

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας $E = 210000$ MPa και λόγο Poisson $\nu = 0.3$.

Πλέγμα

Το πλέγμα συγκροτείται από αξονοσυμμετρικά τετραγωνικά στοιχεία (CAX4) και είναι πολύ πυκνό στην περιοχή κοντά στο ακροφύσιο P1.

Βήματα ανάλυσης

Η ανάλυση αποτελείται από ένα μόνο βήμα στο οποίο επιβάλλεται αξονική δύναμη στο ακροφύσιο $\Delta F = 285.5 \text{ KN}$, δηλαδή $\Delta F = \frac{F_{\max}}{3}$. Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης είναι απενεργοποιημένη η εντολή NLGEOM (non linear geometry) αφού η ανάλυση είναι γραμμική.

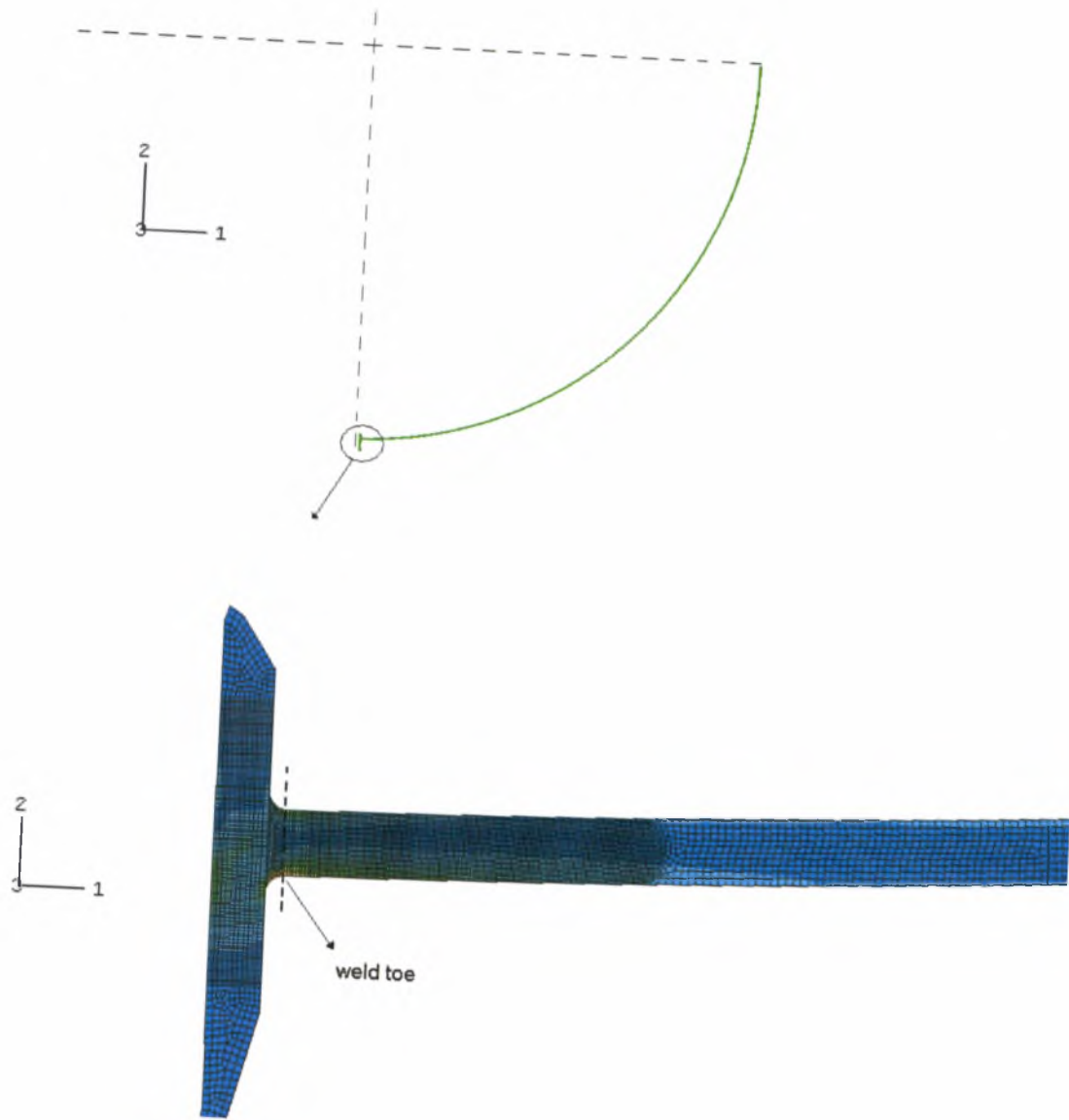
Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες είναι :

$U2 = UR6 = 0$ στο σημείο που φαίνεται στο σχήμα 3.20.

3.3.2.2 Μέθοδος Dong & Hong

Υπολογίζεται η συνιστώσα S11 από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS στο κατακόρυφο επίπεδο που φαίνεται από τη διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 3.21. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται 24 κόμβοι οι οποίοι έχουν γνωστή τάση S11 και γνωστή απόσταση από το weld toe . Γίνεται γραμμική παρεμβολή στα σημεία της τάσης και έτσι ορίζεται η membrane stress ($\Delta\sigma_m$) η οποία υπολογίζεται σε απόσταση 21.5 mm από το weld toe ($t/2$) και η καμπτική τάση($\Delta\sigma_b$) η οποία υπολογίζεται στο weld toe.



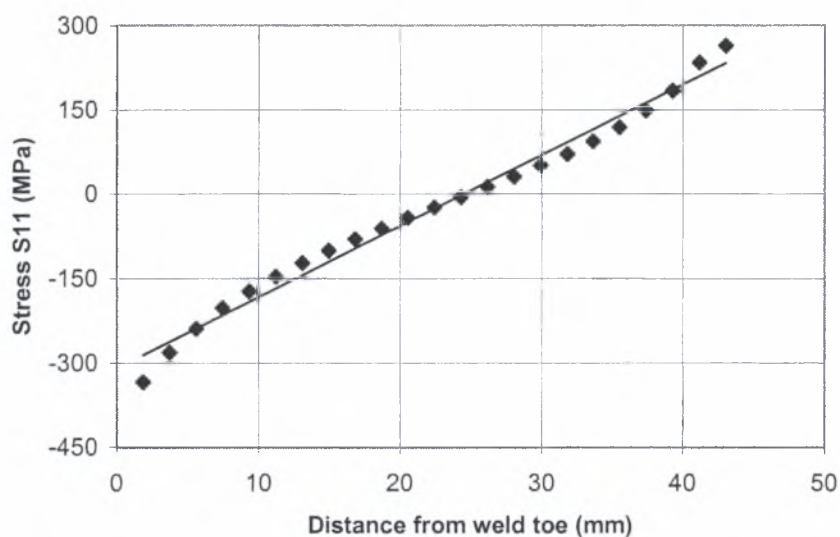
***Σχήμα 3.21:** Το επίπεδο του weld toe πάνω στο οποίο πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή της τάσης S11*

ΟΙ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΥ WELD TOE (Σχήμα 3.21)

Κόμβος	Απόσταση από το weld toe (mm)	S11 (MPa)
1939	1,87012	-333,702
1938	3,7402	-281,395
1937	5,6103	-238,275
1936	7,4805	-202,687
1935	9,3506	-172,655
1934	11,2197	-146,207
1933	13,0898	-122,486
1932	14,96	-100,723
1931	16,8301	-80,3735
1930	18,7002	-60,9782
1929	20,5703	-42,2494
1928	22,4404	-23,8999
1927	24,3105	-5,678
1926	26,1797	12,7058
1925	28,0498	31,4916
1924	29,9199	51,0345
1923	31,79	71,6695
1922	33,6602	94,1643
1921	35,5303	119,617
1920	37,4004	149,049
1919	39,2705	184,797
1918	41,1396	234,444
32*	43	264,206

* κόμβος στην εσωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S11



Σχήμα 3.22: Τιμές της τάσης S11 επίπεδο του weld toe

$$\Delta\sigma_m = -39.95 \text{ MPa (τιμή της τάσης S22 για } x = 21.5\text{mm)}$$

$$\Delta\sigma_b = -309.92 \text{ MPa (σημείο τομής με τον άξονα των } y)$$

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b = -349.87 \text{ MPa} \quad (3.16)$$

$$r = \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b} \Rightarrow r = \frac{-309.92}{-349.87} = 0.886 \quad (3.17)$$

$$I^{1/m} = C_6 r^6 + C_5 r^5 + C_4 r^4 + C_3 r^3 + C_2 r^2 + C_1 r^1 + C_0 \quad (3.18)$$

όπου $C_6 = 0.0011$, $C_5 = 0.0767$, $C_4 = -0.0988$, $C_3 = 0.0946$,
 $C_2 = 0.0221$, $C_1 = 0.014$ και $C_0 = 1.2223$

Άρα με βάση την σχέση 3.18 : $I^{1/m} = 1.3 \quad (3.19)$

Ορίζουμε επίσης τον συντελεστή $t^{\frac{2-m}{2m}}$ όπου για πάχος $t = 43 \text{ mm}$ και $m = 3.6$ παίρνει την τιμή $t^{\frac{2-m}{2m}} = 0.434$ (3.20)

Χρησιμοποιώντας την ΔS από την σχέση 3.16 και τις τιμές από τις 3.19 – 3.20 έχουμε:

$$\Delta S = \frac{\Delta \sigma}{t^{\frac{2-m}{2m}} I^{1/m}} = 620.8 \text{ MPa}$$

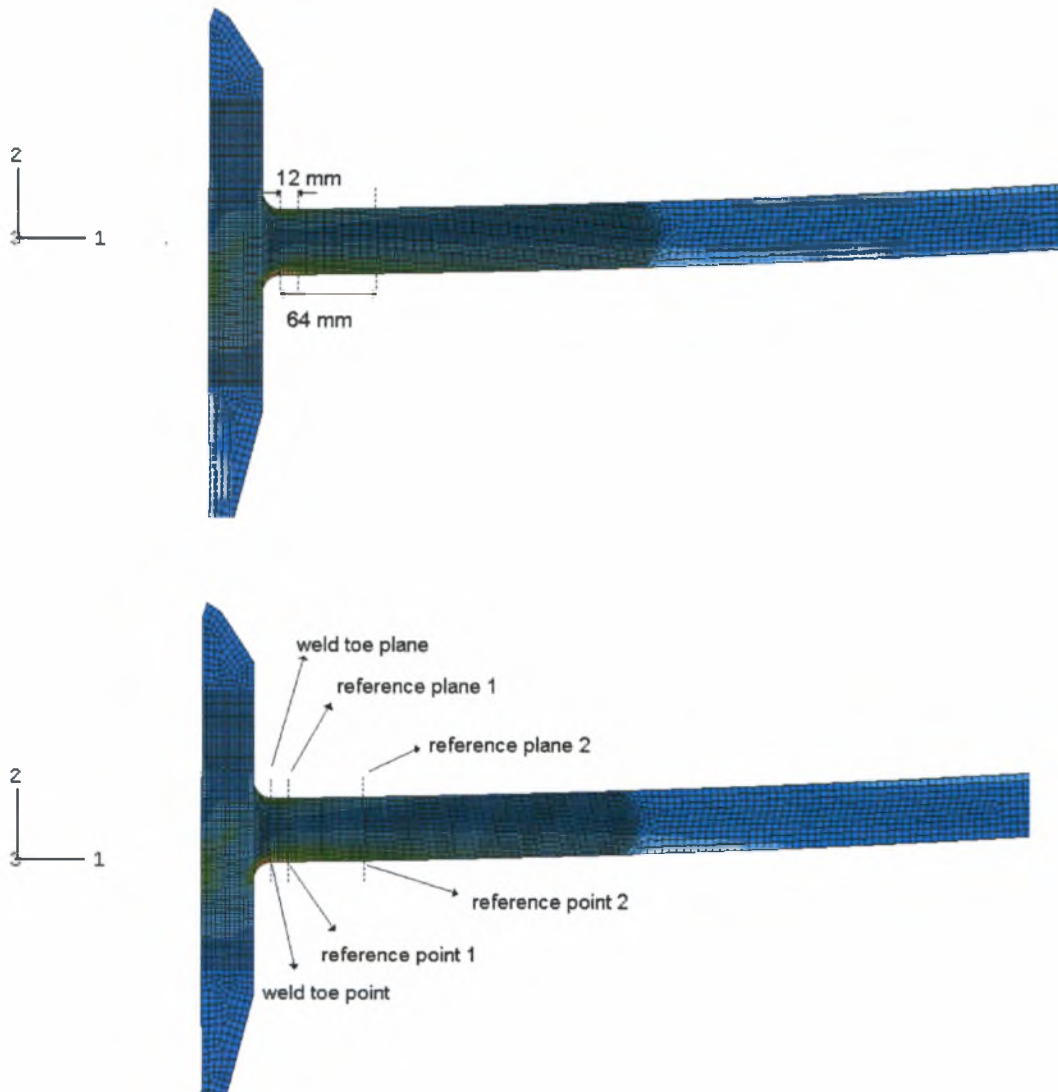
Έτσι ο αναμενόμενος αριθμός κύκλων φόρτισης είναι:

$$N = \left(\frac{C_1}{\Delta S} \right)^{\frac{1}{m_1}} \text{ όπου } C_1 = 12492.58 \text{ και } m_1 = 0.319$$

Άρα: $N = \underline{\underline{12300 \text{ κύκλοι φόρτισης}}}$

3.3.2.3 Μέθοδος European Standard EN 13445

Οι συνιστώσες τάσεις στα κρίσιμα σημεία αξονικής καταπόνησης του κύκλου υπολογίζονται με την βοήθεια δύο επιπέδων, του επιπέδου αναφοράς 1 και του επιπέδου αναφοράς 2, τα οποία απέχουν 12 mm και 64 mm αντίστοιχα, από το επίπεδο του weld toe όπως φαίνεται στο σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23: Οι κόμβοι και τα επίπεδα αναφοράς στα οποία πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή για εύρεση των τάσεων

Γίνεται γραμμική παρεμβολή στις συνιστώσες τάσεις S11, S22, S33 και S12 στα επίπεδα αναφοράς 1 και 2 έτσι ώστε να υπολογιστούν οι τάσεις στα σημεία αναφοράς 1 και 2 αντίστοιχα στην εξωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου (Σχήμα 3.23). Ακολούθως γίνεται γραμμική παρεμβολή στις τάσεις S11, S22, S33 και S12 των

σημείων αναφοράς και υπολογίζονται οι αντίστοιχες τάσεις στο weld toe από τις οποίες προκύπτουν οι κύριες τάσεις.

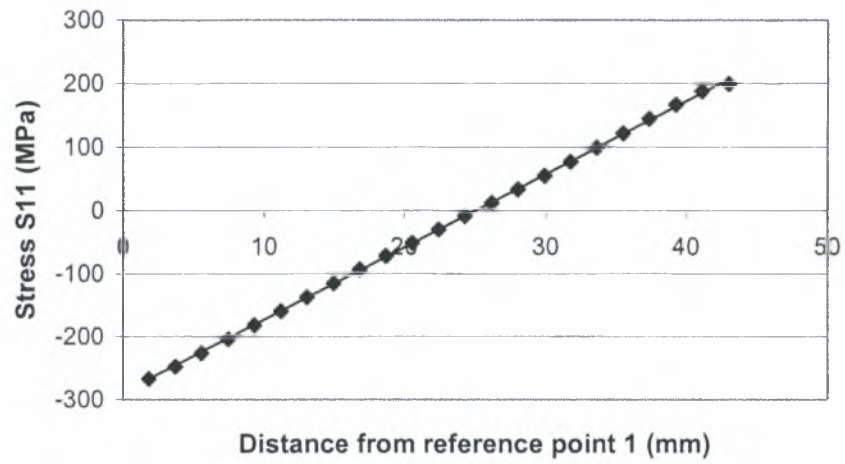
Από την γραμμική παρεμβολή στις τάσεις S11, S22, S33, και S12 στο επίπεδο αναφοράς 1 το οποίο απέχει 12 mm από το επίπεδο του weld toe, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

ΟΙ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ 1 (Σχήμα 3.23)

Κόμβος	Απόσταση από το σημείο αναφοράς 1 (mm)	S11 (MPa)	S22 (MPa)	S33 (MPa)	S12 (MPa)
8571	1,8702	-267,369	-5,29E-01	-182,397	-7,37909
8572	3,7403	-247,495	-1,37306	-170,836	-10,5213
8573	5,6104	-226,478	-2,64385	-159,138	-13,3521
8574	7,4796	-204,536	-4,11894	-147,289	-15,4779
8575	9,3497	-182,133	-5,46383	-135,314	-16,7841
8576	11,2198	-159,616	-6,50835	-123,256	-17,3508
8577	13,0899	-137,249	-7,10357	-111,135	-17,2942
8578	14,9601	-115,196	-7,21035	-98,9774	-16,8297
8579	16,8302	-93,4818	-6,86658	-86,7936	-16,12
8580	18,7003	-72,0918	-6,13586	-74,5926	-15,3124
8581	20,5704	-50,9426	-5,11992	-62,3755	-14,5079
8582	22,4396	-29,9396	-3,9141	-50,14	-13,7734
8583	24,3097	-8,95207	-2,64029	-37,8815	-13,1391
8584	26,1798	12,1076	-1,40367	-25,6072	-12,5952
8585	28,0402	33,3803	-3,15E-01	-13,302	-12,0951
8586	29,9201	55,0017	5,32E-01	-9,43E-01	-11,5496
8587	31,7902	76,9605	1,05313	11,4355	-10,845
8588	33,6506	99,197	1,22344	23,8114	-9,79752
8589	35,5197	121,674	1,09271	36,2093	-8,28081
8590	37,3898	144,183	7,50E-01	48,6045	-6,15697
8591	39,26	166,397	4,16E-01	60,972	-3,45837
8592	41,1301	188,295	2,04E-01	73,347	-3,45E-01
1912*	43	199,189	1,19E-01	79,5413	1,31151

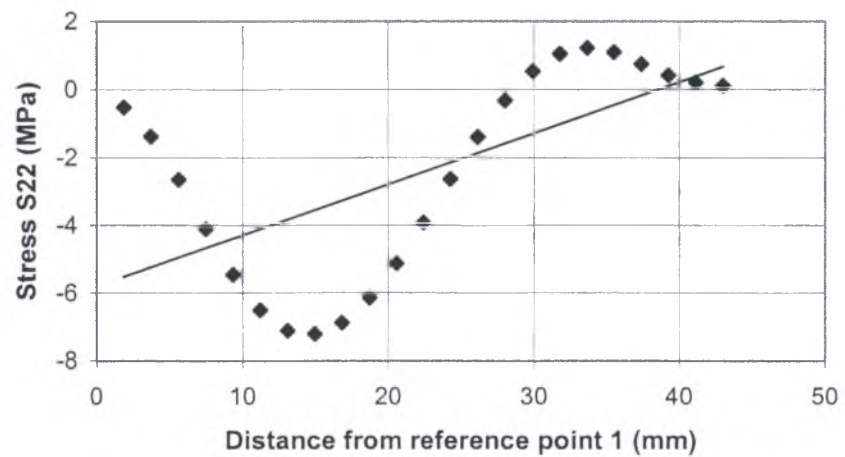
* κόμβος στην εσωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S11



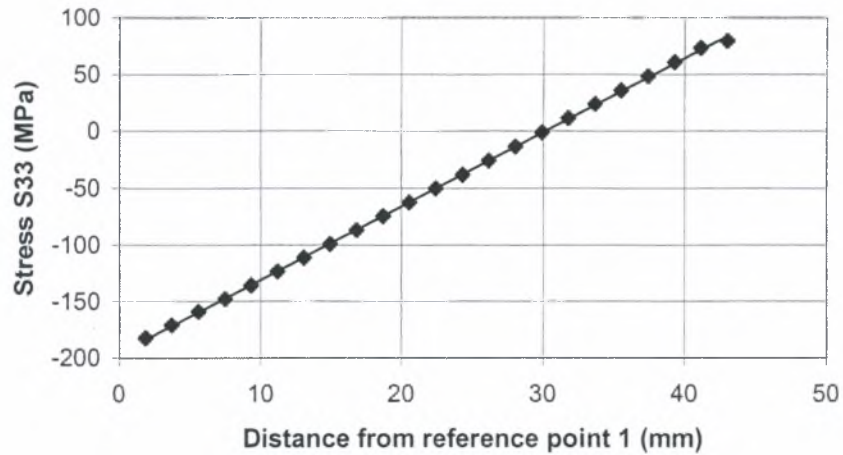
Σχήμα 3.24: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S11 στο επίπεδο αναφοράς 1

Γραμμική παρεμβολή στην S22



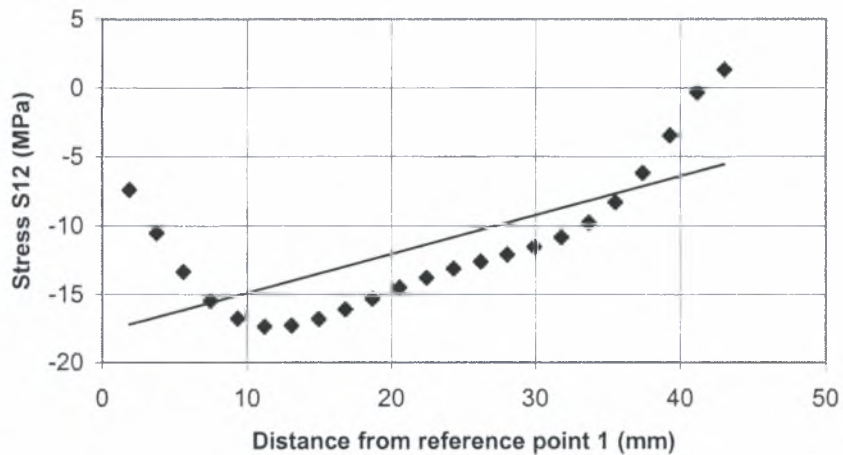
Σχήμα 3.25: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S22 στο επίπεδο αναφοράς 1

Γραμμική παρεμβολή στην S33



Σχήμα 3.26: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S33 στο επίπεδο αναφοράς 1

Γραμμική παρεμβολή στην S12



Σχήμα 3.27: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S12 στο επίπεδο αναφοράς 1

Έτσι οι τάσεις στο σημείο αναφοράς 1 είναι:

$$S11 = - 289.38 \text{ MPa}$$

$$S22 = - 5.7 \text{ MPa}$$

$$S33 = - 193.5 \text{ MPa}$$

$$S12 = -17.55 \text{ MPa}$$

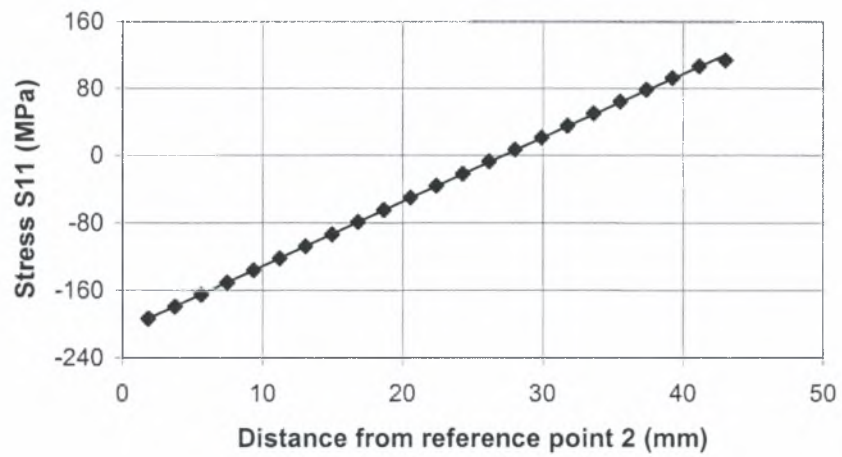
Από την γραμμική παρεμβολή στις τάσεις S11, S22, S33, και S12 στο επίπεδο αναφοράς 2 το οποίο απέχει 64 mm από το επίπεδο του weld toe, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

ΟΙ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ 2 (Σχήμα 3.23)

Κόμβος	Απόσταση από το σημείο αναφοράς 2 (mm)	S11 (MPa)	S22 (MPa)	S33 (MPa)	S12 (MPa)
7999	1,8704	-193,357	-8,18E-02	-172,72	-5,41376
8000	3,7407	-179,125	-8,07E-02	-160,889	-6,9961
8001	5,6111	-164,874	-1,05E-01	-149,092	-8,4354
8002	7,4716	-150,598	-1,23E-01	-137,315	-9,67499
8003	9,342	-136,304	-1,34E-01	-125,546	-10,7316
8004	11,2113	-121,978	-1,46E-01	-113,779	-11,6065
8005	13,0816	-107,646	-1,55E-01	-102,024	-12,2947
8006	14,952	-93,2996	-1,64E-01	-90,2759	-12,8
8007	16,8223	-78,9463	-1,72E-01	-78,5324	-13,1154
8008	18,6926	-64,5916	-1,78E-01	-66,7924	-13,2474
8009	20,5629	-50,2382	-1,82E-01	-55,0557	-13,1918
8010	22,4333	-35,8911	-1,84E-01	-43,3202	-12,9482
8011	24,3036	-21,5477	-1,84E-01	-31,5771	-12,5175
8012	26,1729	-7,21066	-1,81E-01	-19,8263	-11,8993
8013	28,0432	7,11006	-1,75E-01	-8,06942	-11,0935
8014	29,9136	21,42	-1,65E-01	3,70317	-10,0971
8015	31,7839	35,7183	-1,52E-01	15,4947	-8,91499
8016	33,6542	49,9934	-1,34E-01	27,3029	-7,54131
8017	35,5245	64,2447	-1,10E-01	39,1312	-5,97836
8018	37,3949	78,4618	-8,33E-02	50,9741	-4,21978
8019	39,2545	92,6119	-3,52E-02	62,8303	-2,27734
8020	41,1248	106,803	2,28E-02	74,7422	-1,50E-01
1886*	43	113,94	4,64E-02	80,7207	9,68E-01

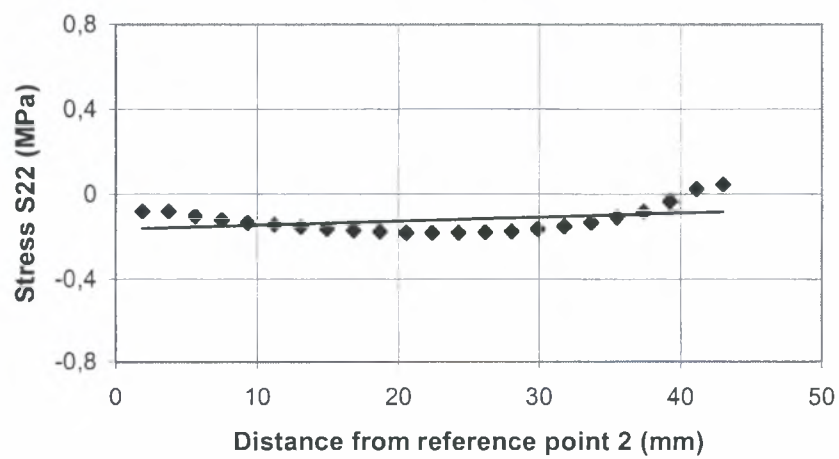
* κόμβος στην εσωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S11



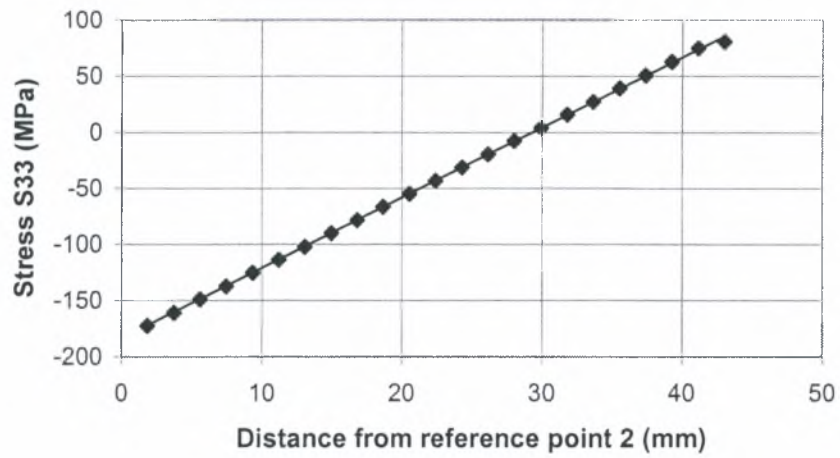
Σχήμα 3.28: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S11 στο επίπεδο αναφοράς 2

Γραμμική παρεμβολή στην S22



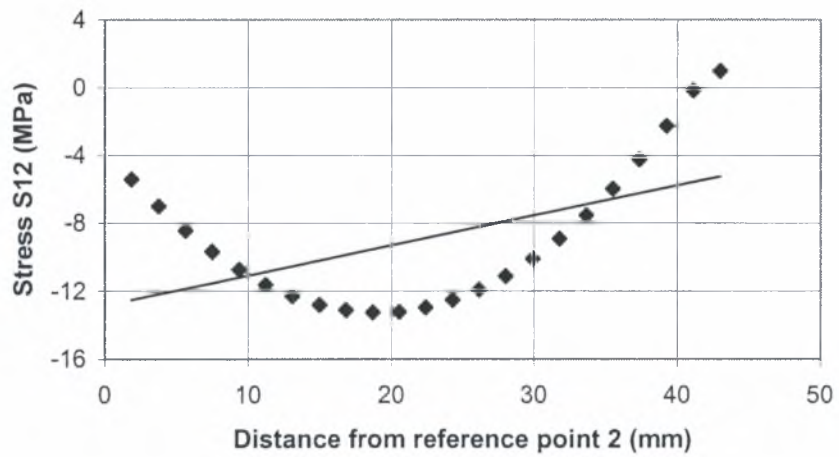
Σχήμα 3.29: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S22 στο επίπεδο αναφοράς 2

Γραμμική παρεμβολή στην S33



Σχήμα 3.30: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S33 στο επίπεδο αναφοράς 2

Γραμμική παρεμβολή στην S12



Σχήμα 3.31: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S12 στο επίπεδο αναφοράς 2

Έτσι οι τάσεις στο σημείο αναφοράς 2 είναι:

$$S_{11} = - 207.07 \text{ MPa}$$

$$S_{22} = - 0.17 \text{ MPa}$$

$$S_{33} = - 183.96 \text{ MPa}$$

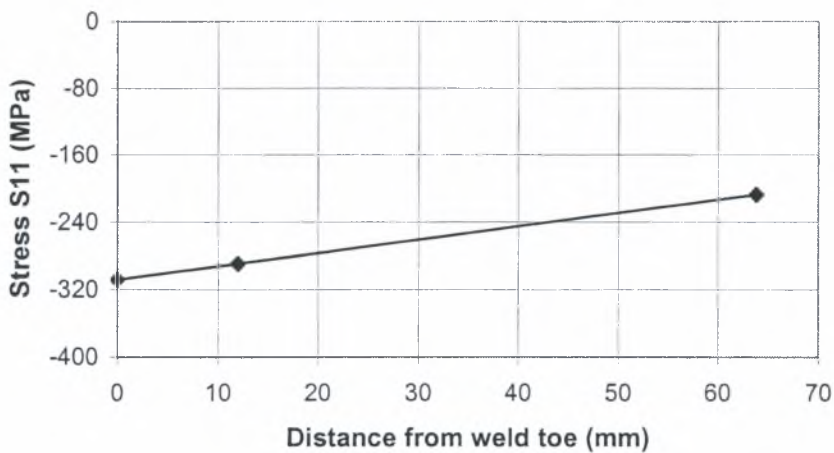
$$S_{12} = - 12.82 \text{ MPa}$$

Τώρα πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή στις τάσεις S11, S22, S33, και S12 των σημείων αναφοράς 1 και 2 για να βρούμε την τιμή των αντίστοιχων τάσεων στο weld toe (0mm) και προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

ΟΙ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ 1 ΚΑΙ 2 (Σχήμα 3.23)

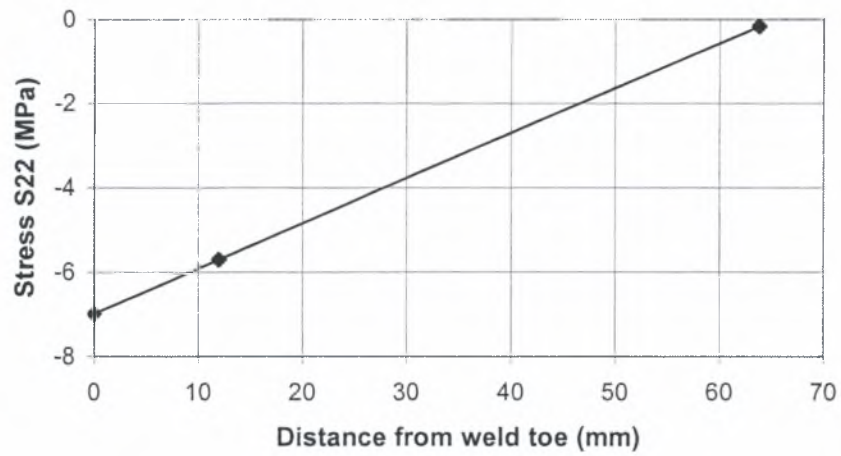
Κόμβος	Απόσταση από το weld toe (mm)	S11(MPa)	S22(MPa)	S33(MPa)	S12(MPa)
Σημείο αναφοράς 1	11.97	-289.38	-5.7	-193.5	-17.55
Σημείο αναφοράς 2	63.8	-207.08	-0.17	-183.96	-12.82

Γραμμική παρεμβολή στην S11



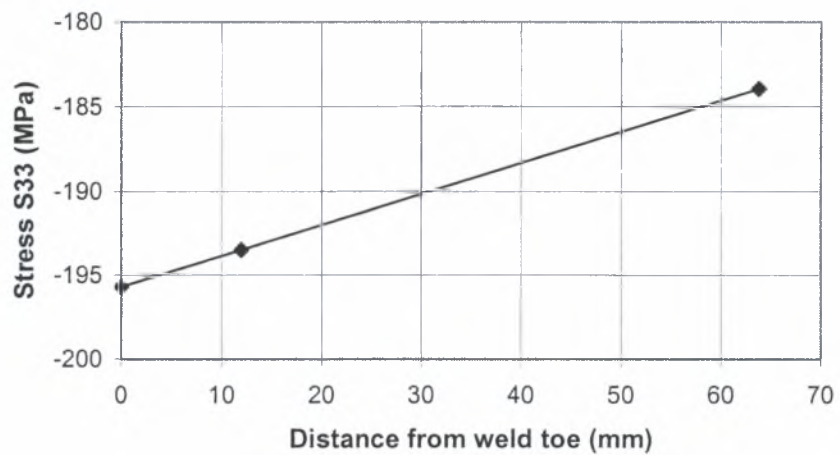
Σχήμα 3.32: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S11 στην εξωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S22



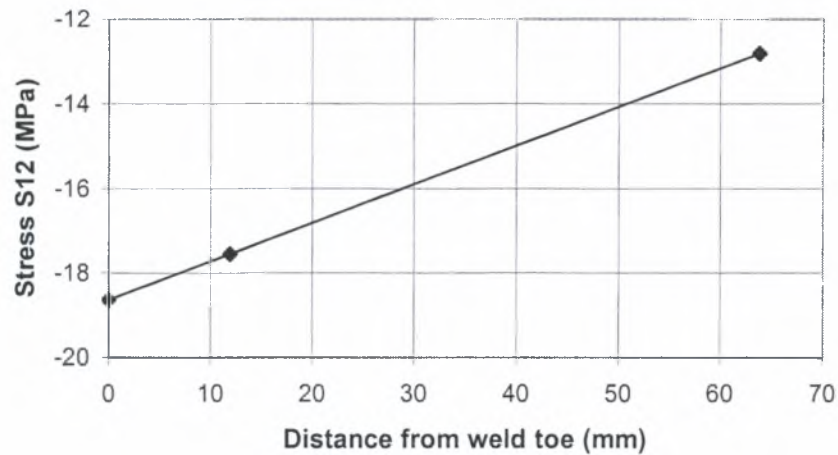
Σχήμα 3.33: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S22 στην εξωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S33



Σχήμα 3.34: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S33 στην εξωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S12



Σχήμα 3.35: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S12 στην εξωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Από τις πιο πάνω αναλύσεις προκύπτουν οι εξής τάσεις στο weld toe:

$$S_{11} = - 308.39 \text{ MPa}$$

$$S_{22} = - 6.98 \text{ MPa}$$

$$S_{33} = - 195.7 \text{ MPa}$$

$$S_{12} = - 18.64 \text{ MPa}$$

Ακολούθως υπολογίζονται οι ισοδύναμες κύριες τάσεις ως εξής:

$$\bar{S}_{12} = \sigma_{\text{struct1}} - \sigma_{\text{struct2}} \quad (3.21)$$

$$\bar{S}_{23} = \sigma_{\text{struct2}} - \sigma_{\text{struct3}} \quad (3.22)$$

$$\bar{S}_{31} = \sigma_{\text{struct3}} - \sigma_{\text{struct1}} \quad (3.23)$$

Η ισοδύναμη κύρια τάση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των κύκλων φόρτισης είναι η μέγιστη των πιο πάνω, δηλαδή:

$$\Delta\sigma_{\text{eq}} = \max(|\bar{S}_{12}|, |\bar{S}_{23}|, |\bar{S}_{31}|) \quad (3.24)$$

Υπολογίζουμε τις κύριες τάσεις σ_{struct1} , σ_{struct2} και σ_{struct3}

$$\sigma_{\text{struct1}} = \frac{S_{11} + S_{22}}{2} + \left[\left(\frac{S_{11} - S_{22}}{2} \right)^2 + (S_{12})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$\sigma_{\text{struct1}} = \frac{-308.39 - 6.98}{2} + \left[\left(\frac{-308.39 + 6.98}{2} \right)^2 + (18.64)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$\sigma_{\text{struct1}} = \underline{\underline{-5.835 \text{ MPa}}} \quad (3.25)$$

$$\sigma_{\text{struct2}} = \frac{S_{11} + S_{22}}{2} - \left[\left(\frac{S_{11} - S_{22}}{2} \right)^2 + (S_{12})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$\sigma_{\text{struct2}} = \frac{-308.39 - 6.98}{2} - \left[\left(\frac{-308.39 + 6.98}{2} \right)^2 + (18.64)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$\sigma_{\text{struct2}} = \underline{\underline{-309.535 \text{ MPa}}} \quad (3.26)$$

$$\sigma_{\text{struct3}} = S_{33} \Rightarrow \sigma_{\text{struct3}} = \underline{\underline{-195.7 \text{ MPa}}} \quad (3.27)$$

Από τις σχέσεις 3.21 – 3.23 και 3.25 – 3.27 προκύπτει ότι

$$\bar{S}_{12} = -5.835 + 309.535 \Rightarrow \bar{S}_{12} = 303.7 \text{ MPa} \quad (3.28)$$

$$\bar{S}_{23} = -309.535 + 195.7 \Rightarrow \bar{S}_{23} = -113.835 \text{ MPa} \quad (3.29)$$

$$\bar{S}_{31} = -195.7 + 5.838 \Rightarrow \bar{S}_{31} = -189.86 \text{ MPa} \quad (3.30)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 3.24 και 3.28 – 3.30 προκύπτει ότι

$$\Delta\sigma_{\text{eq}} = \bar{S}_{12} \Rightarrow \Delta\sigma_{\text{eq}} = \underline{\underline{303.7 \text{ MPa}}}$$

Άρα

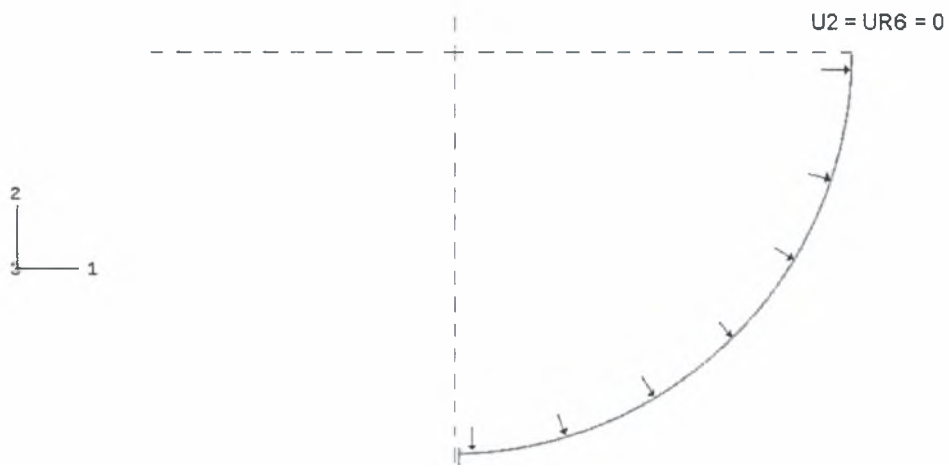
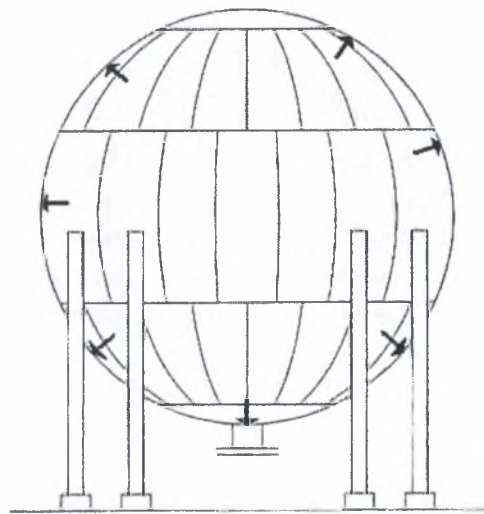
$$N = \frac{C_1}{\left(\frac{\Delta\sigma_{\text{eq}}}{f_w} \right)^{m_1}} \text{ όπου } C_1 = 7.16 \times 10^{11}, m_1 = 3 \text{ και } f_w = 1$$

$$\Rightarrow N = \underline{\underline{25561 \text{ κύκλοι φόρτισης}}}$$

3.3.3 Υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση σφαιρικού δοχείου πίεσης υπό την επίδραση εσωτερικής πίεσης

3.3.3.1 Εισαγωγή

Η γεωμετρία του σφαιρικού δοχείου φαίνεται στο σχήμα 3.36. Η διακεκομμένες γραμμές είναι η ένδειξη ότι το δοχείο σχεδιάστηκε αξονοσυμμετρικά. Η εσωτερική ακτίνα του δοχείου είναι 10608 mm και το πάχος του τοιχώματος του 43 mm. Η εσωτερική ακτίνα του ακροφυσίου P1 είναι 123.8 mm και το πάχος του 35.2 mm



Σχήμα 3.36: Η γεωμετρία του σφαιρικού δοχείου υπό την επίδραση εσωτερικής πίεσης

Ιδιότητες του υλικού

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας $E = 210000$ MPa και λόγο Poisson $\nu = 0.3$.

Πλέγμα

Το πλέγμα συγκροτείται από αξονοσυμμετρικά τετραγωνικά στοιχεία (CAX4) και είναι πολύ πυκνό στην περιοχή κοντά στο ακροφύσιο P1.

Βήματα ανάλυσης

Η ανάλυση αποτελείται από ένα μόνο βήμα στο οποίο επιβάλλεται εσωτερική πίεση στο δοχείο $P = 1.21$ MPa, δηλαδή $P = \frac{P_v}{2}$. Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης είναι απενεργοποιημένη η εντολή NLGEOM (non linear geometry) διότι η ανάλυση είναι γραμμική.

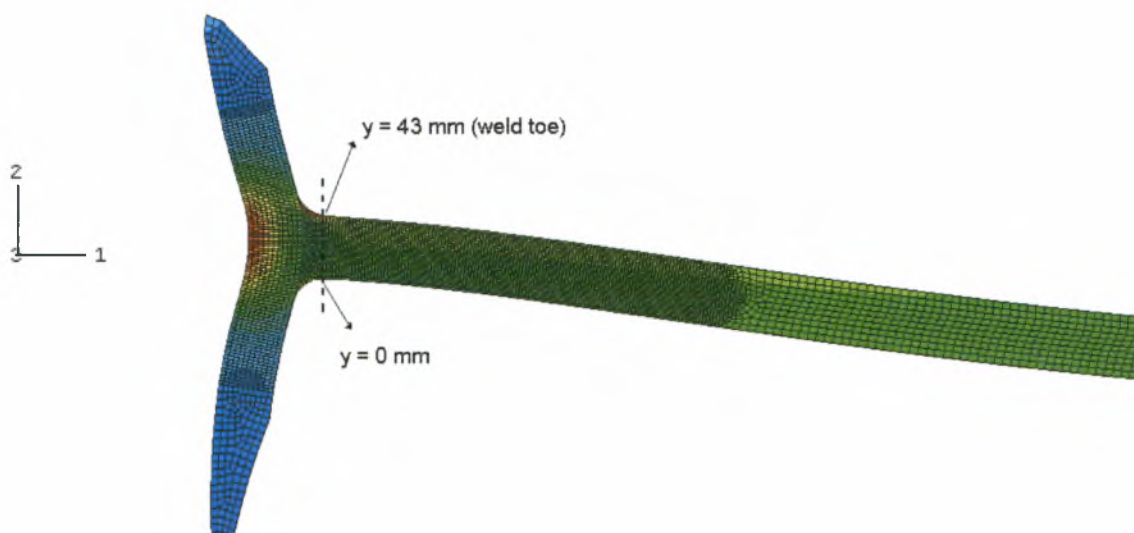
Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες είναι :

$U2 = UR6 = 0$ στο σημείο που φαίνεται στο σχήμα 3.36

3.3.3.2 Μέθοδος Dong & Hong

Υπολογίζεται η συνιστώσα S_{11} από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS στο κατακόρυφο επίπεδο που φαίνεται από τη διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 3.37. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούμε 24 κόμβους οι οποίοι έχουν γνωστή τάση S_{11} και γνωστή απόσταση από το weld toe . Γίνεται γραμμική παρεμβολή στα σημεία της τάσης και έτσι ορίζεται η membrane stress ($\Delta\sigma_m$) η οποία υπολογίζεται σε απόσταση 21.5 mm από το weld toe ($t/2$) και η καμπτική τάση($\Delta\sigma_b$) η οποία υπολογίζεται στο weld toe.



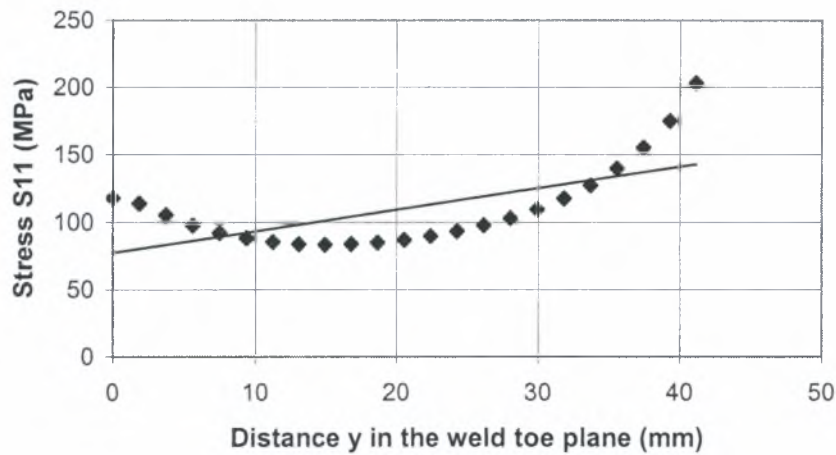
Σχήμα 3.37: Το επίπεδο του weld toe πάνω στο οποίο πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή της τάσης S_{11}

ΟΙ ΤΑΣΕΙΣ S11 ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΥ WELD ΤΟΕ (Σχήμα 3.37)

Κόμβος	Απόσταση γ από την εξωτερική επιφάνεια της σφαίρας (mm)	S11(MPa)
33*	0	117,845
1939	1,87012	113,786
1938	3,7402	105,634
1937	5,6103	98,0025
1936	7,4805	92,1128
1935	9,3506	88,0951
1934	11,2197	85,4537
1933	13,0898	84,0024
1932	14,96	83,5425
1931	16,8301	83,9555
1930	18,7002	85,1539
1929	20,5703	87,1126
1928	22,4404	89,8275
1927	24,3105	93,3376
1926	26,1797	97,7272
1925	28,0498	103,091
1924	29,9199	109,63
1923	31,79	117,535
1922	33,6602	127,327
1921	35,5303	139,68
1920	37,4004	155,26
1919	39,2705	175,152
1918	41,1396	202,871

* κόμβος στην εξωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S11



Σχήμα 3.38: Τιμές της τάσης S11 στο επίπεδο του weld toe

$\Delta\sigma_m = 111.75 \text{ MPa}$ (τιμή της τάσης S22 για $x = 21.5\text{mm}$)

$\Delta\sigma_b = 146 \text{ MPa}$ (τιμή της τάσης S22 για $x = 43\text{mm}$ στο σχήμα 3.38)

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b = 257.75 \text{ MPa} \quad (3.31)$$

$$r = \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b} \Rightarrow r = \frac{146}{257.75} = 0.89 \quad (3.32)$$

$$\Gamma^{1/m} = C_6 r^6 + C_5 r^5 + C_4 r^4 + C_3 r^3 + C_2 r^2 + C_1 r^1 + C_0 \quad (3.33)$$

όπου $C_6 = 0.0011$, $C_5 = 0.0767$, $C_4 = -0.0988$, $C_3 = 0.0946$,

$C_2 = 0.0221$, $C_1 = 0.014$ και $C_0 = 1.2223$

Άρα με βάση την σχέση 3.33: $\Gamma^{1/m} = 1.25$ (3.34)

Ορίζουμε επίσης τον συντελεστή $t^{\frac{2-m}{2m}}$ όπου για πάχος $t = 43 \text{ mm}$ και $m = 3.6$ παίρνει

την τιμή $t^{\frac{2-m}{2m}} = 0.43$ (3.35)

Χρησιμοποιώντας την $\Delta\sigma$ από την σχέση 3.31 και τις τιμές από τις 3.34 – 3.35 έχουμε:

$$\Delta S = \frac{\Delta\sigma}{t^{\frac{2-m}{2m}} I^{1/m}} = 476.1 \text{ MPa}$$

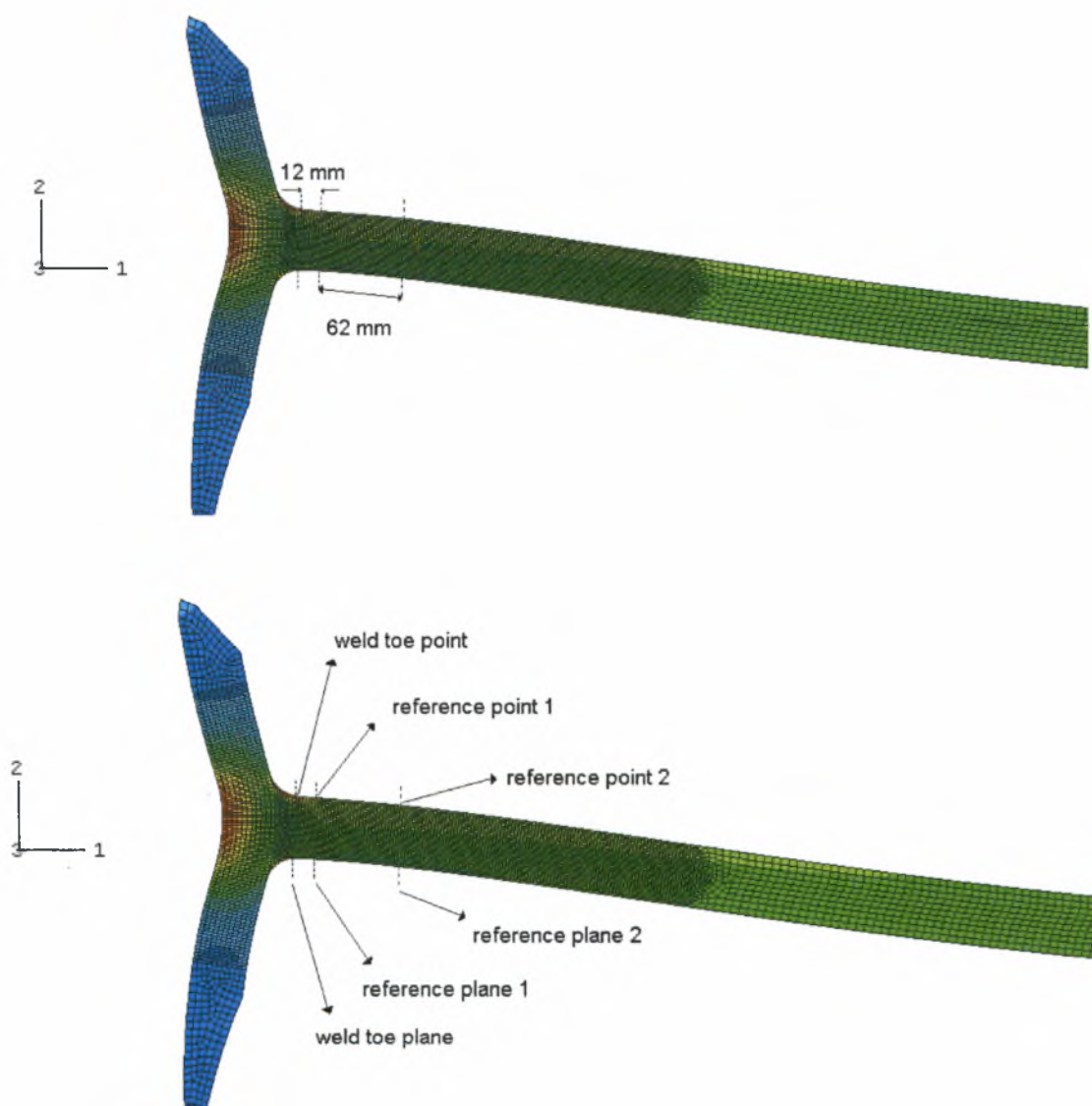
Έτσι ο αναμενόμενος αριθμός κύκλων φόρτισης είναι:

$$N = \left(\frac{C_1}{\Delta S} \right)^{\frac{1}{m_1}} \text{ όπου } C_1 = 12492.58 \text{ και } m_1 = 0.32$$

Άρα: $N = \underline{\underline{28280 \text{ κύκλοι φόρτισης}}}$

3.3.3.3 Μέθοδος European Standard EN 13445

Οι συνιστώσες τάσεις στα κρίσιμα σημεία αξονικής καταπόνησης του κύκλου υπολογίζονται με τη βοήθεια δύο επιπέδων, του επιπέδου αναφοράς 1 και του επιπέδου αναφοράς 2, τα οποία απέχουν 12 mm και 64 mm αντίστοιχα, από το επίπεδο του weld toe όπως φαίνεται στο σχήμα 3.39.



Σχήμα 3.39: Οι κόμβοι και τα επίπεδα αναφοράς στα οποία πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή για υπολογισμό των τάσεων

Γίνεται γραμμική παρεμβολή στις συνιστώσες τάσεις S_{11} , S_{22} , S_{33} και S_{12} στα επίπεδα αναφοράς 1 και 2 έτσι ώστε να υπολογιστούν οι τάσεις στα σημεία αναφοράς 1 και 2 αντίστοιχα στην εσωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου (Σχήμα 3.39). Ακολούθως γίνεται γραμμική παρεμβολή στις τάσεις S_{11} , S_{22} , S_{33} και S_{12} των

σημείων αναφοράς και υπολογίζονται οι αντίστοιχες τάσεις στο weld toe από τις οποίες προκύπτουν οι κύριες τάσεις.

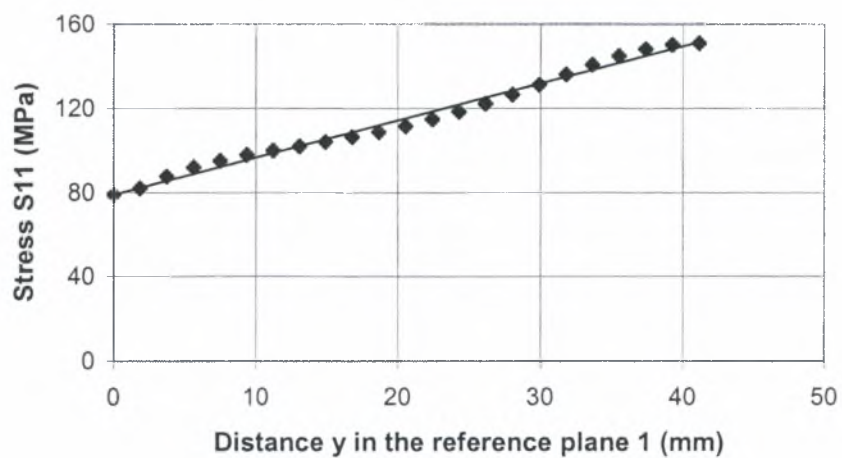
Από την γραμμική παρεμβολή στις τάσεις S11, S22, S33, και S12 στο επίπεδο αναφοράς 1 το οποίο απέχει 12 mm από το επίπεδο του weld toe, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

ΟΙ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ 1 (Σχήμα 3.39)

Κόμβος	Απόσταση κατά y από την εξωτερική επιφάνεια της σφαίρας (mm)	S11 (MPa)	S22 (MPa)	S33 (MPa)	S12 (MPa)
1945*	0	78,8861	1,75E-01	146,257	1,92576
8571	1,8702	81,9777	5,09E-01	147,634	2,59496
8572	3,7403	87,5125	1,44548	150,289	3,97067
8573	5,6104	91,8284	2,9016	152,768	5,2856
8574	7,4796	95,1337	4,72504	155,088	6,25607
8575	9,3497	97,741	6,6961	157,272	6,73783
8576	11,2198	99,9299	8,6602	159,35	6,70413
8577	13,0899	101,947	0,4697	161,344	6,17061
8578	14,9601	103,996	12,0293	163,281	5,22016
8579	16,8302	106,211	13,2801	165,175	3,93523
8580	18,7003	108,697	14,1787	167,041	2,40823
8581	20,5704	111,517	14,7006	168,888	7,31E-01
8582	22,4396	114,715	14,824	170,721	-1,0087
8583	24,3097	118,314	14,529	172,54	-2,71311
8584	26,1798	122,297	13,8058	174,34	-4,27918
8585	28,0402	126,638	12,6439	176,114	-5,59214
8586	29,9201	131,258	11,0565	177,849	-6,52256
8587	31,7902	136,008	9,08958	179,522	-6,93532
8588	33,6506	140,636	6,8512	181,098	-6,68187
8589	35,5197	144,834	4,52115	182,553	-5,71241
8590	37,3898	148,206	2,31894	183,845	-4,02719
8591	39,26	150,303	5,70E-01	184,944	-1,84603
8592	41,1301	150,967	-5,43E-01	185,86	4,38E-01

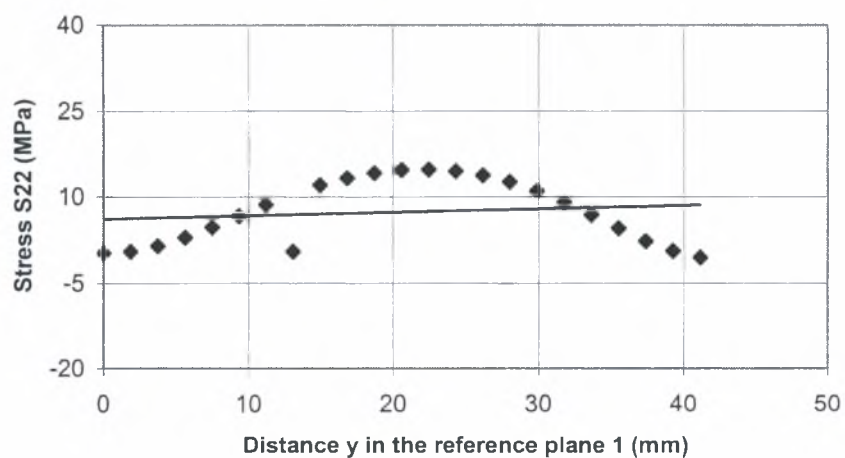
* κόμβος στην εξωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S11



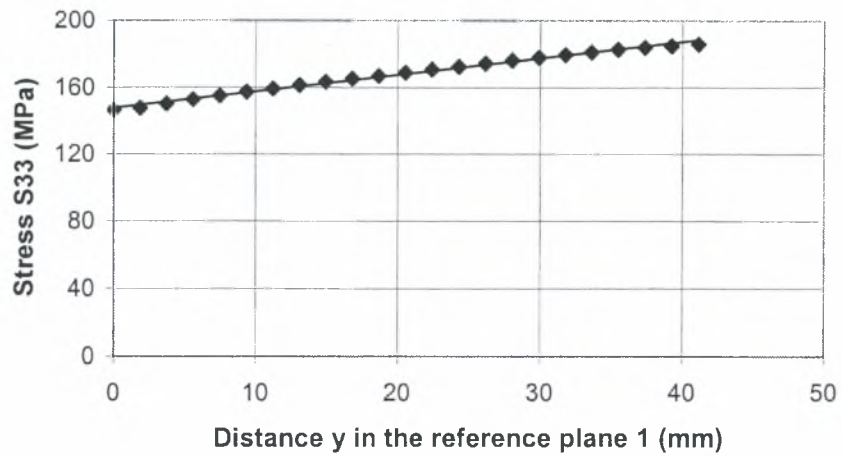
Σχήμα 3.40: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S_{11} στο επίπεδο αναφοράς 1

Γραμμική παρεμβολή στην S22



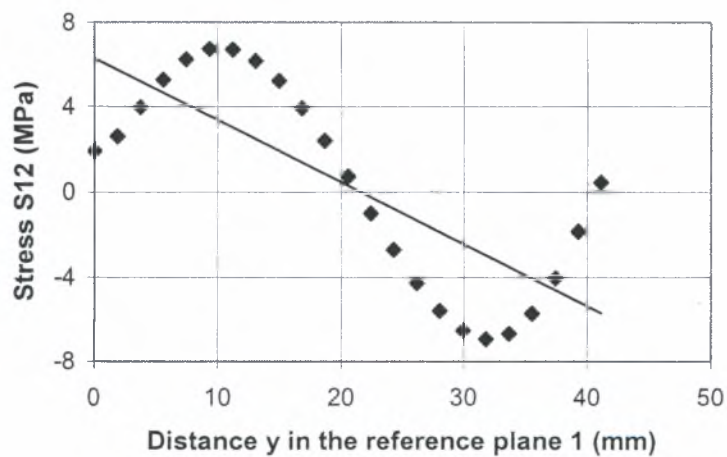
Σχήμα 3.41: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S_{22} στο επίπεδο αναφοράς 1

Γραμμική παρεμβολή στην S33



Σχήμα 3.42: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S33 στο επίπεδο αναφοράς 1

Γραμμική παρεμβολή στην S12



Σχήμα 3.43: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S12 στο επίπεδο αναφοράς 1

Έτσι οι τάσεις στο σημείο αναφοράς 1 είναι:

$$S11 = 154.75 \text{ MPa}$$

$$S22 = 8.69 \text{ MPa}$$

$$S33 = 190.12 \text{ MPa}$$

$$S12 = - 6.26 \text{ MPa}$$

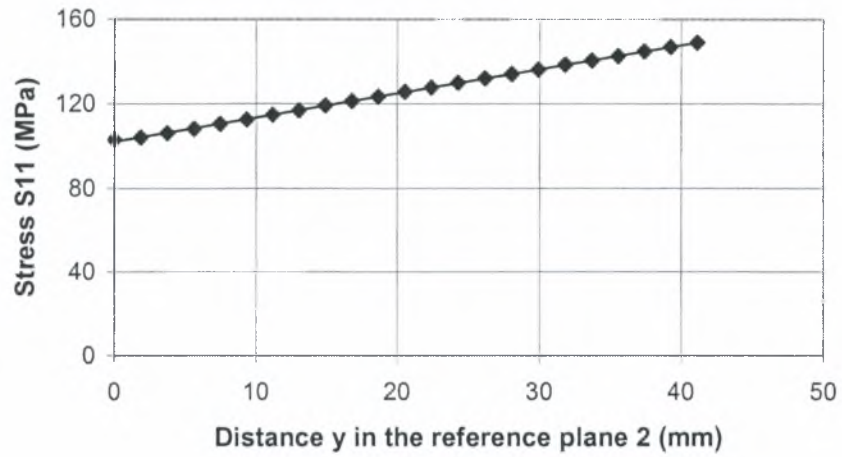
Από την γραμμική παρεμβολή στις τάσεις S11, S22, S33, και S12 στο επίπεδο αναφοράς 2 το οποίο απέχει 64 mm από το επίπεδο του weld toe, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

ΟΙ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ 2 (Σχήμα 3.39)

Κόμβος	Απόσταση κατά y από την εξωτερική επιφάνεια της σφαίρας (mm)	S11 (MPa)	S22 (MPa)	S33 (MPa)	S12 (MPa)
1971*	0	102,893	2,82E-02	137,707	2,13852
7999	1,8704	103,951	-9,71E-03	138,588	1,98519
8000	3,7407	106,094	-8,02E-02	140,357	1,71645
8001	5,6111	108,244	-1,41E-01	142,125	1,49901
8002	7,4716	110,39	-2,06E-01	143,887	1,30764
8003	9,342	112,55	-2,75E-01	145,649	1,14995
8004	11,2113	114,715	-3,43E-01	147,411	1,02686
8005	13,0816	116,881	-4,10E-01	149,171	9,36E-01
8006	14,952	119,047	-4,75E-01	150,93	8,78E-01
8007	16,8223	121,212	-5,37E-01	152,689	8,52E-01
8008	18,6926	123,372	-5,96E-01	154,447	8,56E-01
8009	20,5629	125,529	-6,51E-01	156,205	8,91E-01
8010	22,4333	127,68	-7,02E-01	157,962	9,54E-01
8011	24,3036	129,826	-7,49E-01	159,721	1,04487
8012	26,1729	131,967	-7,93E-01	161,48	1,16267
8013	28,0432	134,102	-8,33E-01	163,241	1,30553
8014	29,9136	136,233	-8,71E-01	165,004	1,47455
8015	31,7839	138,363	-9,07E-01	166,771	1,66665
8016	33,6542	140,49	-9,42E-01	168,54	1,88592
8017	35,5245	142,615	-9,76E-01	170,314	2,12843
8018	37,3949	144,743	-1,01328	172,09	2,40644
8019	39,2545	146,846	-1,03482	173,869	2,70877
8020	41,1248	149,03	-1,05338	175,678	3,03125

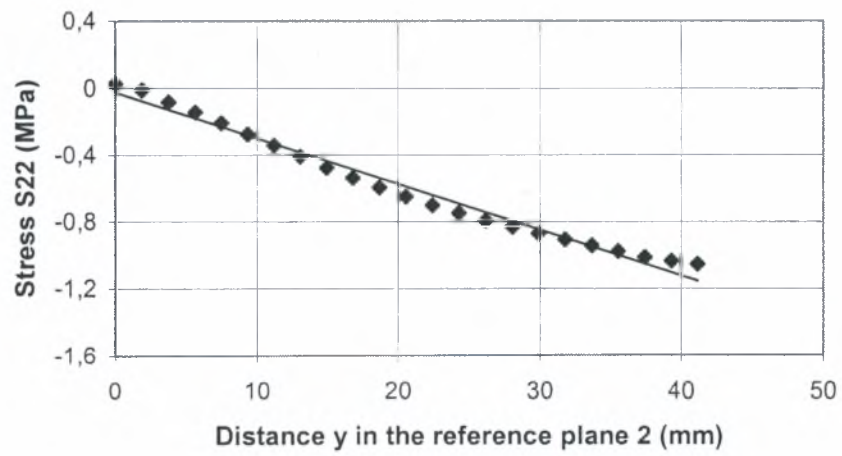
* κόμβος στην εξωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S11



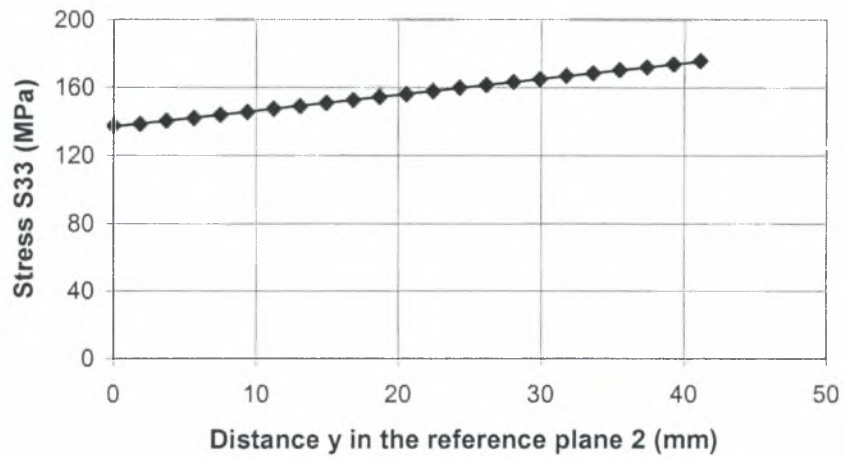
Σχήμα 3.44: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S11 στο επίπεδο αναφοράς 2

Γραμμική παρεμβολή στην S22



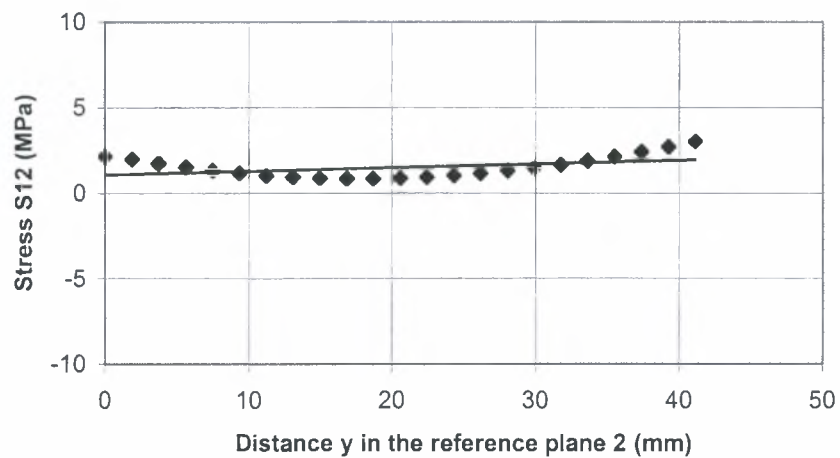
Σχήμα 3.45: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S22 στο επίπεδο αναφοράς 2

Γραμμική παρεμβολή στην S33



Σχήμα 3.46: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S33 στο επίπεδο αναφοράς 2

Γραμμική παρεμβολή στην S12



Σχήμα 3.47: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S12 στο επίπεδο αναφοράς 2

Έτσι οι τάσεις στο σημείο αναφοράς 2 είναι:

$$S11 = 151.13 \text{ MPa}$$

$$S22 = - 1.19 \text{ MPa}$$

$$S33 = 177.29 \text{ MPa}$$

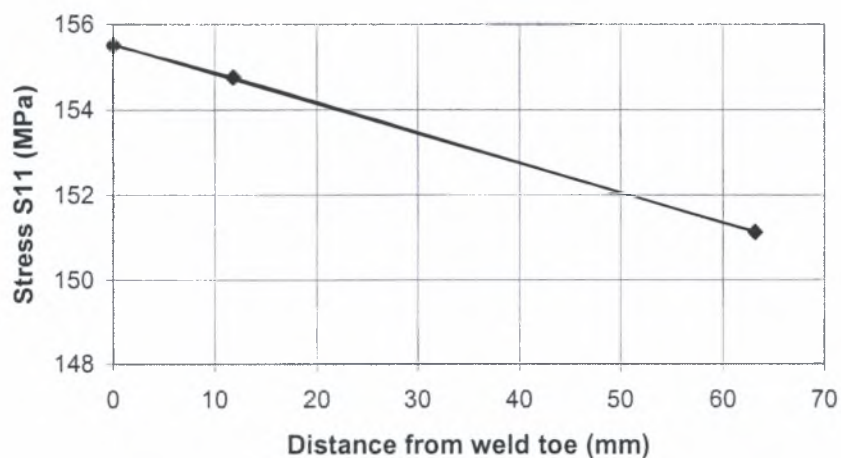
$$S12 = 1.98 \text{ MPa}$$

Τώρα πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή στις τάσεις S11, S22, S33, και S12 των σημείων αναφοράς 1 και 2 για να βρούμε την τιμή των αντίστοιχων τάσεων στο weld toe ($y = 43 \text{ mm}$, σχήμα 3.37) και προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

ΟΙ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΥ WELD TOE (Σχήμα 3.39)

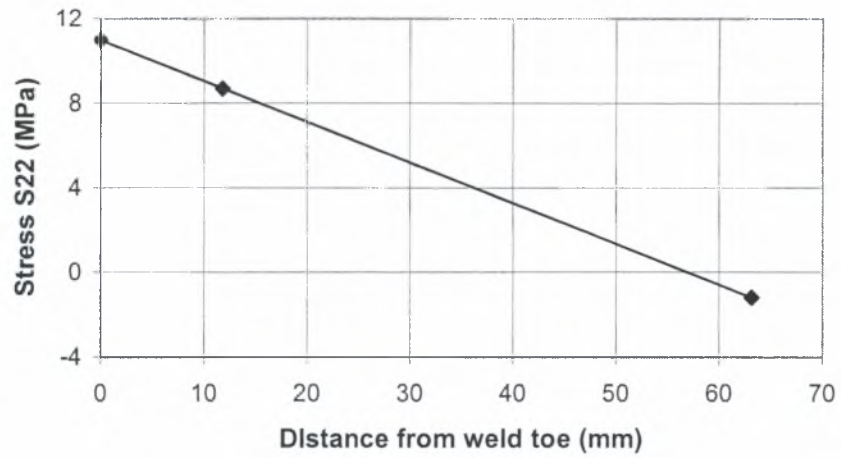
Κόμβος	Απόσταση y από το weld toe (mm)	S11 (MPa)	S22 (MPa)	S33 (MPa)	S12 (MPa)
Σημείο αναφοράς 1	11,97	154,75	8,69	190,12	-6,26
Σημείο αναφοράς 2	63,8	151,13	-1,19	177,29	1,98

Γραμμική παρεμβολή στην S11



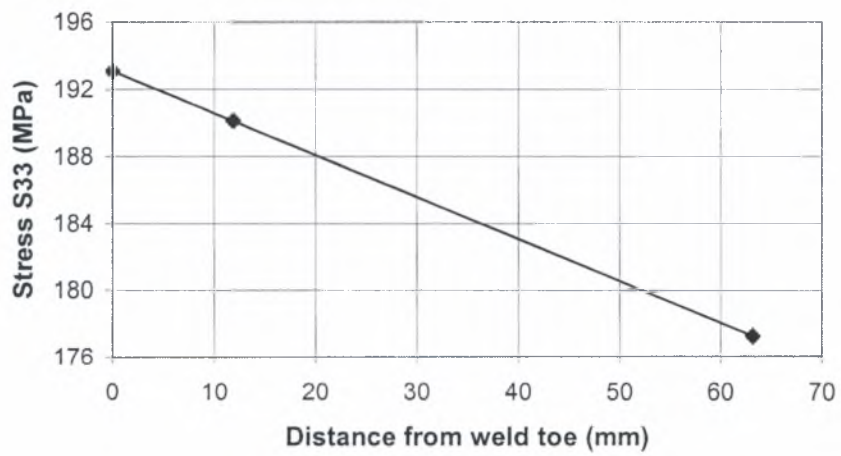
Σχήμα 3.48: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S11 στην εσωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S22



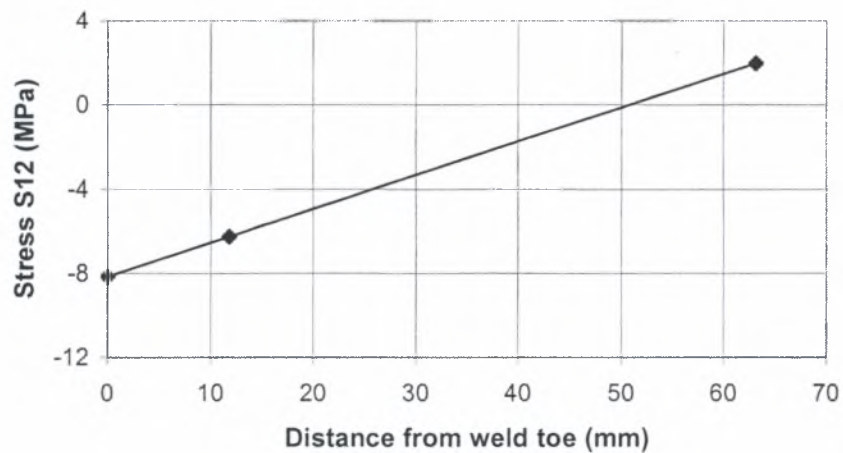
Σχήμα 3.49: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S22 στην εσωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S33



Σχήμα 3.50: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S33 στην εσωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Γραμμική παρεμβολή στην S12



Σχήμα 3.51: Γραμμική παρεμβολή των τάσεων S12 στην εσωτερική επιφάνεια του σφαιρικού δοχείου

Από τις πιο πάνω αναλύσεις προκύπτουν οι εξής τάσεις στο weld toe:

$$S_{11} = 155.5 \text{ MPa}$$

$$S_{22} = 10.97 \text{ MPa}$$

$$S_{33} = 193.08 \text{ MPa}$$

$$S_{12} = -8.16 \text{ MPa}$$

Ακολουθώς υπολογίζονται οι ισοδύναμες κύριες τάσεις ως εξής:

$$\bar{S}_{12} = \sigma_{\text{struct1}} - \sigma_{\text{struct2}} \quad (3.36)$$

$$\bar{S}_{23} = \sigma_{\text{struct2}} - \sigma_{\text{struct3}} \quad (3.37)$$

$$\bar{S}_{31} = \sigma_{\text{struct3}} - \sigma_{\text{struct1}} \quad (3.38)$$

Η ισοδύναμη κύρια τάση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των κύκλων φόρτισης είναι η μέγιστη των πιο πάνω, δηλαδή:

$$\Delta\sigma_{\text{eq}} = \max(|\bar{S}_{12}|, |\bar{S}_{23}|, |\bar{S}_{31}|) \quad (3.39)$$

Τώρα μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε τις κύριες τάσεις σ_{struct1} , σ_{struct2} και σ_{struct3}

Ως γνωστό,

$$\sigma_{\text{struct1}} = \frac{S_{11} + S_{22}}{2} + \left[\left(\frac{S_{11} - S_{22}}{2} \right)^2 + (S_{12})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$\sigma_{\text{struct1}} = \frac{155.5 + 10.97}{2} + \left[\left(\frac{155.5 - 10.97}{2} \right)^2 + (8.16)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$\sigma_{\text{struct1}} = \underline{\underline{155.96 \text{ MPa}}} \quad (3.40)$$

$$\sigma_{\text{struct2}} = \frac{S_{11} + S_{22}}{2} - \left[\left(\frac{S_{11} - S_{22}}{2} \right)^2 + (S_{12})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$\sigma_{\text{struct2}} = \frac{155.5 + 10.97}{2} - \left[\left(\frac{155.5 - 10.97}{2} \right)^2 + (8.16)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$\sigma_{\text{struct2}} = \underline{\underline{10.515 \text{ MPa}}} \quad (3.41)$$

$$\sigma_{\text{struct3}} = S_{33} \Rightarrow \sigma_{\text{struct3}} = \underline{\underline{193.08 \text{ MPa}}} \quad (3.42)$$

Από τις σχέσεις 3.36– 3.38 και 3.40 – 3.42 προκύπτει ότι

$$\bar{S}_{12} = 155.96 - 10.515 \Rightarrow \bar{S}_{12} = 145.45 \text{ MPa} \quad (3.43)$$

$$\bar{S}_{23} = 10.515 - 193.08 \Rightarrow \bar{S}_{23} = - 182.57 \text{ MPa} \quad (3.44)$$

$$\bar{S}_{31} = 193.08 - 155.96 \Rightarrow \bar{S}_{31} = 37.12 \text{ MPa} \quad (3.45)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 3.39 και 3.43 – 3.45 προκύπτει ότι

$$\Delta\sigma_{\text{eq}} = \bar{S}_{23} \Rightarrow \Delta\sigma_{\text{eq}} = \underline{\underline{182.57 \text{ MPa}}}$$

Άρα

$$N = \frac{C_1}{\left(\frac{\Delta\sigma_{\text{eq}}}{f_w} \right)^{m_1}} \text{ όπου } C_1 = 7.16 \times 10^{11}, m_1 = 3 \text{ και } f_w = 1$$

$$\Rightarrow N = \underline{\underline{117658 \text{ κύκλοι φόρτισης}}}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η οριακή αντοχή και η αντοχή σε κόπωση σε δοχεία πίεσης, με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Πραγματοποιούνται αναλύσεις σε κυλινδρικά και σφαιρικά δοχεία πίεσης υπό την επίδραση διαφόρων μορφών φόρτισης. Οι κυριότερες μορφές φόρτισης που επιβάλλονται είναι αξονική δύναμη, εσωτερική πίεση, συγκεντρωμένη ροπή και συνδυασμός αυτών. Πραγματοποιείται επίσης ανάλυση της συμπεριφοράς του σφαιρικού δοχείου υπό την επίδραση αρχικών ατελειών. Γίνεται αριθμητική διερεύνηση με τη χρήση μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Κατά την προσομοίωση των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται αξονοσυμμετρικά συνεχόμενα στοιχεία, λαμβάνοντας υπόψη την συμμετρία της γεωμετρίας.

Αρχικά πραγματοποιείται μη γραμμική ανάλυση σε δισδιάστατη μορφή της οριακής αντοχής δύο λεπτότοιχων σφαιρικών δοχείων πίεσης διαφορετικού πάχους με συγκολλημένα ακροφύσια P1 και P2 αντίστοιχα. Το πρώτο δοχείο έχει πάχος τοιχώματος 43 mm και πάχος ακροφυσίου 35.2 mm ενώ το δεύτερο δοχείο έχει πάχος τοιχώματος 40 mm και πάχος ακροφυσίου 64.8 mm. Αρχικά εξετάζεται η οριακή αντοχή των δοχείων χρησιμοποιώντας πρώτα ένα και στη συνέχεια δύο βήματα ανάλυσης. Στην περίπτωση ανάλυσης ενός βήματος επιβάλλεται αξονική δύναμη στα ακροφύσια των σφαιρικών δοχείων και σχεδιάζεται η αντίστοιχη καμπύλη δύναμης – μετατόπισης. Στην περίπτωση ανάλυσης δύο βημάτων, στο πρώτο βήμα επιβάλλεται σταθερή εσωτερική πίεση με τιμή υποπολλαπλάσια της πίεσης διαρροής του δοχείου και στο δεύτερο επιβάλλεται αξονική και διαρκώς αυξανόμενη δύναμη στο ακροφύσιο, διατηρώντας την πίεση σταθερή. Σε όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις η καμπύλη δύναμης – μετατόπισης διέρχεται διαδοχικά από τρία στάδια, την ελαστική, την ελαστοπλαστική και την μεμβρανική περιοχή. Στο δεύτερο δοχείο πίεσης παρατηρείται πλαστική συμπεριφορά σε αρκετά χαμηλότερη τιμή της αξονικής δύναμης σε σχέση με το πρώτο ενώ και οι μέγιστες μετατοπίσεις που επιδέχεται είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του πρώτου δοχείου πίεσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στα δύο δοχεία με την αύξηση της εσωτερικής πίεσης μειώνεται πολύ η πλαστική περιοχή στην καμπύλη δύναμης - μετατόπισης .

Ακολούθως πραγματοποιήθηκαν διάφορες μη γραμμικές αναλύσεις σε τρισδιάστατη μορφή στο δοχείο πίεσης με ακροφύσιο P1. Πρώτα εξετάστηκε η

οριακή αντοχή του δοχείου υπό την επίδραση αξονικής δύναμης. Σχεδιάζοντας την καμπύλη δύναμης - μετατόπισης της πιο πάνω ανάλυσης βλέπουμε ότι δεν διαφέρει σε τίποτα από την αντίστοιχη καμπύλη που λήφθηκε για την ίδια φόρτιση σε δισδιάστατη μορφή. Επίσης ορίζουμε ως F_{max} την μέγιστη τιμή της δύναμης στην ελαστοπλαστική περιοχή.

Ακολούθως εξετάστηκε η οριακή αντοχή του δοχείου χρησιμοποιώντας δύο βήματα ανάλυσης. Στο πρώτο βήμα επιβάλλεται σταθερή οριζόντια δύναμη δημιουργώντας έτσι αρχική ατέλεια στο ακροφύσιο και στο δεύτερο επιβάλλεται αξονική και διαρκώς αυξανόμενη δύναμη στο ακροφύσιο, διατηρώντας την οριζόντια δύναμη σταθερή. Συγκρίνοντας την καμπύλη δύναμης - μετατόπισης της ανάλυσης ενός βήματος με διαρκώς αυξανόμενη αξονική δύναμη και της πιο πάνω περίπτωσης με αρχική ατέλεια, παρατηρούμε ότι ταυτίζονται, συνεπώς η αρχική ατέλεια δεν προκαλεί μεταβολή στην συμπεριφορά του ακροφυσίου P1.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση ενός βήματος για την μελέτη της οριακής αντοχής του δοχείου υπό την επίδραση συγκεντρωμένης ροπής στο ακροφύσιο και σχεδιάστηκε η καμπύλη ροπής - γωνίας περιστροφής του ακροφυσίου. Επίσης, ορίσαμε ως M_{max} την μέγιστη τιμή της ροπής που παρατηρείται στην καμπύλη. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε ανάλυση δύο βημάτων όπου στο πρώτο βήμα επιβάλλεται σταθερή συγκεντρωμένη ροπή στο ακροφύσιο με τιμές υποπολλαπλάσιες της M_{max} και στο δεύτερο επιβάλλεται αξονική και διαρκώς αυξανόμενη δύναμη στο ακροφύσιο, διατηρώντας την συγκεντρωμένη ροπή σταθερή. Συγκρίνοντας τις καμπύλες δύναμης-μετατόπισης του ακροφυσίου για διάφορες τιμές συγκεντρωμένης ροπής, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η τιμή της ροπής η πλαστικοποίηση λαμβάνει χώρα σε μικρότερες τιμές αξονικής δύναμης.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση δύο βημάτων όπου στο πρώτο βήμα επιβάλλεται σταθερή αξονική δύναμη στο ακροφύσιο με τιμές υποπολλαπλάσιες της F_{max} και στο δεύτερο επιβάλλεται συγκεντρωμένη και διαρκώς αυξανόμενη ροπή στο ακροφύσιο, διατηρώντας την αξονική δύναμη σταθερή. Συγκρίνοντας τις καμπύλες ροπής - γωνίας περιστροφής του ακροφυσίου για διάφορες τιμές αξονικής δύναμης, παρατηρούμε μέχρι ένα σημείο ότι, όσο αυξάνεται η τιμή της δύναμης παρουσιάζεται μεγαλύτερη γωνία περιστροφής στο ακροφύσιο ενώ μετά το συγκεκριμένο σημείο παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τιμή της δύναμης, το ακροφύσιο επιδέχεται μικρότερη γωνία περιστροφής.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε μια σειρά γραμμικών αναλύσεων για εκτίμηση της αντοχής σε κόπωση συγκολλητών δοχείων πίεσης. Πρώτα έγινε ανάλυση σε λεπτότοιχο κυλινδρικό δοχείο πίεσης υπό την επίδραση εσωτερικής πίεσης. Οι επιτρεπόμενοι κύκλοι φόρτισης υπολογίζονται από δύο μεθόδους κυρίων τάσεων, την μέθοδο Dong & Hong και την μέθοδο European Standard EN 13445. Με τη μέθοδο Dong & Hong ο επιτρεπόμενος αριθμός κύκλων φόρτισης είναι 75827 κύκλοι και με τη μέθοδο European Standard EN 13445 προκύπτουν 14489 κύκλοι φόρτισης. Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας η απόκλιση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τις ανωτέρω τιμές είναι μικρή. Συγκεκριμένα, στη μέθοδο Dong & Hong υπάρχει απόκλιση 5.9 % και στη μέθοδο European Standard EN 13445 4.7 %.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση χρησιμοποιώντας τις ίδιες μεθόδους για υπολογισμό της αντοχής σε κόπωση του σφαιρικού δοχείου πίεσης με ακροφύσιο P1. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για δύο περιπτώσεις φόρτισης του δοχείου. Στην πρώτη περίπτωση επιβάλλεται στο δοχείο επαναλαμβανόμενη αξονική δύναμη με εύρος ίσο με $\Delta F = \frac{F_{\max}}{3}$ και στην δεύτερη περίπτωση επιβάλλεται επαναλαμβανόμενη εσωτερική πίεση με εύρος ίσο με $P = \frac{P_y}{2}$. Στην περίπτωση φόρτισης του δοχείου υπό την επίδραση αξονικής δύναμης, με τη μέθοδο Dong & Hong ο επιτρεπόμενος αριθμός κύκλων φόρτισης είναι 12300 κύκλοι και με τη μέθοδο European Standard EN 13445 προκύπτουν 25561 κύκλοι φόρτισης. Στην περίπτωση φόρτισης του δοχείου υπό την επίδραση εσωτερικής πίεσης, με τη μέθοδο Dong & Hong ο επιτρεπόμενος αριθμός κύκλων φόρτισης είναι 28280 κύκλοι και με τη μέθοδο European Standard EN 13445 προκύπτουν 117658 κύκλοι φόρτισης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Spence and A.S Tooth, “Pressure Vessel Design”, Concepts and Principles
- [2] Somnath Chattopadhy, “Pressure Vessels”, Design and Practice
- [3] A.B Potvin, J.G Kuang, R.D Leick, J.L Kahlich, “Stress Concentration in Tubular Joints”, Exxon Production Research Co., Houston, August 1977
- [4] S. Schindler, J.L Zeman, “Stress Concentration Factors of Nozzle – Sphere Connections”, Institute for Pressure Vessel and Plant Technology, Vienna University of Technology, Austria, February 2003
- [5] Arturs Kalnins, Vic Bergsten, Mahendra Rana, “Fatigue Assessment of a Weld Joint of a Pressure Vessel”, 2005 ASME Pressures Vessels and Piping Division Conference, Denver, Colorado USA, July 17 – 21



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000089093