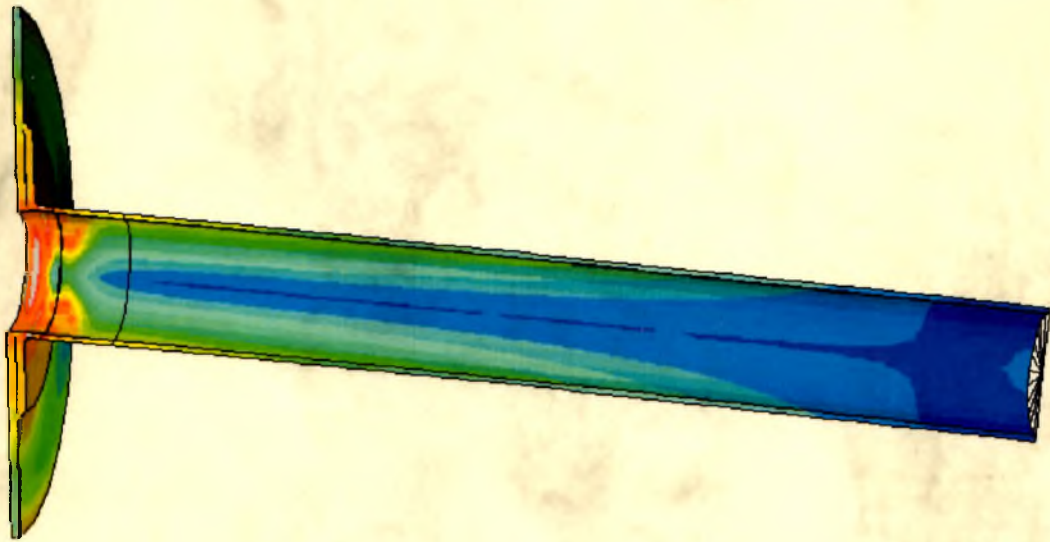


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΠΕΡΓΕΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ
ΑΜΜΩΝΙΑΣ



Επιβλέποντες : Ν. Αράβας
Σπ. Καραμάνος
Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος

Επιμέλεια : Πελτέκης Βασίλης

Βόλος, Σεπτέμβριος 2000



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 998/1
Ημερ. Εισ.: 06-10-2000
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2000
ΠΕΛ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	2
1.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ	3
1.1.1 Σκοπός της μελέτης	3
1.1.2 Η μοντελοποίηση των σωληνώσεων	3
1.1.3 Η μοντελοποίηση των στηρίξεων	6
1.1.4 Δεδομένα για το υλικό	7
1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	8
1.2.1 Μεθοδολογία του προβλήματος	8
1.2.2 Φυσική ερμηνεία του προβλήματος	8
1.2.3 Αποτελέσματα της υπολογιστικής ανάλυσης	9
2.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ	14
2.1.1 Εισαγωγή	14
2.1.2 Περιγραφή κατασκευής καννάβου της σύνδεσης αναρρόφησης (κάθετη σύνδεση). Σημείο Aspiration.	14
2.1.3 Περιγραφή κατασκευής καννάβου σύνδεσης υπό γωνία στην κορυφή της δεξαμενής. Σύνδεση 1.	26
2.1.4 Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση των συνδέσεων.	30
2.1.5 Δεδομένα για το υλικό.	31
2.1.6 Κινηματικοί περιορισμοί των μοντέλων των συνδέσεων.	31
2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	33
2.2.1 Μεθοδολογία του προβλήματος.	33
2.2.2 Αποτελέσματα της υπολογιστικής ανάλυσης.	34
2.2.3 Εφαρμογή φορτίων στο σημείο ASPIRATION όπως προέκυψαν από την ανάλυση του δικτύου σωληνώσεων.	98
3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ	100
3.1.1 Έλεγχος των τιμών της δύναμης αντίδρασης RF2 για τη σύνδεση στο σημείο ASPIRATION	100
3.1.2 Ελαστοπλαστική ανάλυση για το σημείο αναρρόφησης (ASPIRATION)	101
4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	105

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική έχει ως στόχο την μελέτη ανάπτυξης τάσεων σε τμήμα δικτύου σωληνώσεων, που συνδέεται σε δεξαμενή υγρής αμμωνίας, καθώς επίσης και τη μελέτη ανάπτυξης τάσεων στα σημεία ενώσεων των σωληνώσεων με την δεξαμενή. Η δεξαμενή βρίσκεται στο Καλοχώρι Θεσσαλονίκης και ανήκει στις Χημικές Βιομηχανίες Βορείου Ελλάδος. Η ανάπτυξη των τάσεων οφείλεται στο γεγονός, ότι ενώ η δεξαμενή έχει θεμελιωθεί σε στέρεο έδαφος οι υπόλοιπες εγκαταστάσεις του δικτύου που συνδέονται με αυτήν, στηρίζονται σε έδαφος που καθιζάνει.

Η εργασία ανατέθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών και ζητήθηκαν απαντήσεις για το σημείο που αρχίζει η κατασκευή του δικτύου να αστοχεί, σε σχέση με την καθίζηση του εδάφους. Επιπλέον, στα σημεία σύνδεσης των σωληνώσεων με τη δεξαμενή έχουν παρατηρηθεί γωνίες κλίσης. Για αυτόν το λόγο ζητήθηκε να βρεθούν εκείνες οι γωνίες, στις οποίες αστοχεί το υλικό.

Τα κεφάλαια από τα οποία αποτελείται η εργασία είναι τρία. Στο πρώτο κεφάλαιο μελετούνται οι τάσεις που αναπτύσσονται στο δίκτυο των σωληνώσεων λόγω της καθίζησης. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση των συνδέσεων με τη δεξαμενή. Τέλος στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια σύγκριση με αναλυτικές λύσεις, καθώς μελετάται επίσης και η ακαμψία των μοντέλων μας .

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η ανάλυση τμήματος δικτύου σωληνώσεων και των συνδέσεων σωλήνων με δεξαμενή υγρής Αμμωνίας. Η ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προέκυψε ως ανάγκη αντιμετώπισης ενός υπαρκτού προβλήματος της βιομηχανίας, που η λύση του με τις κλασσικές μεθόδους της αντοχής των υλικών είναι πολύ δύσκολη, αν όχι αδύνατη. Η δεξαμενή βρίσκεται στο Καλοχώρι Θεσσαλονίκης και ανήκει στις Χημικές Βιομηχανίες Βορείου Ελλάδος (Χ.Β.Β.Ε). Έχει διάμετρο 31.70 μέτρων και ύψος περίπου 25 μέτρα.

Το έδαφος στο οποίο κτίστηκε η όλη κατασκευή έχει προέλθει από πρόσχωση και για αυτόν το λόγο καθιζάνει. Για την πρόληψη τυχών προβλημάτων η δεξαμενή στηρίχθηκε επάνω σε πασσάλους, οι οποίοι φθάνουν βαθιά σε στέρεο έδαφος. Με αυτόν τον τρόπο η δεξαμενή δεν καθιζάνει. Αντιθέτως, οι στηρίξεις του δικτύου των σωληνώσεων που ενώνονται με αυτήν, βρίσκονται πάνω σε έδαφος που καθιζάνει. Για τους παραπάνω λόγους παρατηρήθηκε μετατόπιση του όλου δικτύου σε σχέση με τη δεξαμενή. Επίσης έχουν παρατηρηθεί κλίσεις των σωληνώσεων στα σημεία σύνδεσης με την δεξαμενή.

Η παραπάνω κατάσταση προκαλεί ανάπτυξη τάσεων και παραμορφώσεων στις σωληνώσεις, και με την πάροδο του χρόνου μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία σημαντικό μέρος της κατασκευής. Μια τέτοια αστοχία είναι πιθανόν να οδηγήσει σε διαρροή υγρής ή αέριας αμμωνίας με καταστροφικά για το περιβάλλον επακόλουθα. Στα πλαίσια, λοιπόν, αυτής της λογικής, ανατέθηκε η ανάλυση του δικτύου των σωληνώσεων και των συνδέσεων των σωληνώσεων με την δεξαμενή στο εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του δικτύου και η προσομοίωση της καθίζησης με την βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS και η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των συνδέσεων με την βοήθεια του προγράμματος ABAQUS-PRE και η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται σύγκριση μεταξύ της αριθμητικής και της αναλυτικής λύσης για το σημείο ASPIRATION.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές της διπλωματικής εργασίας Ν. Αράβα και Σπ. Καραμάνο, καθώς και την υπ. διδάκτορα Ελ. Αμανατίδου για τη βοήθεια τους και το χρόνο που μου αφιέρωσαν.

1.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ

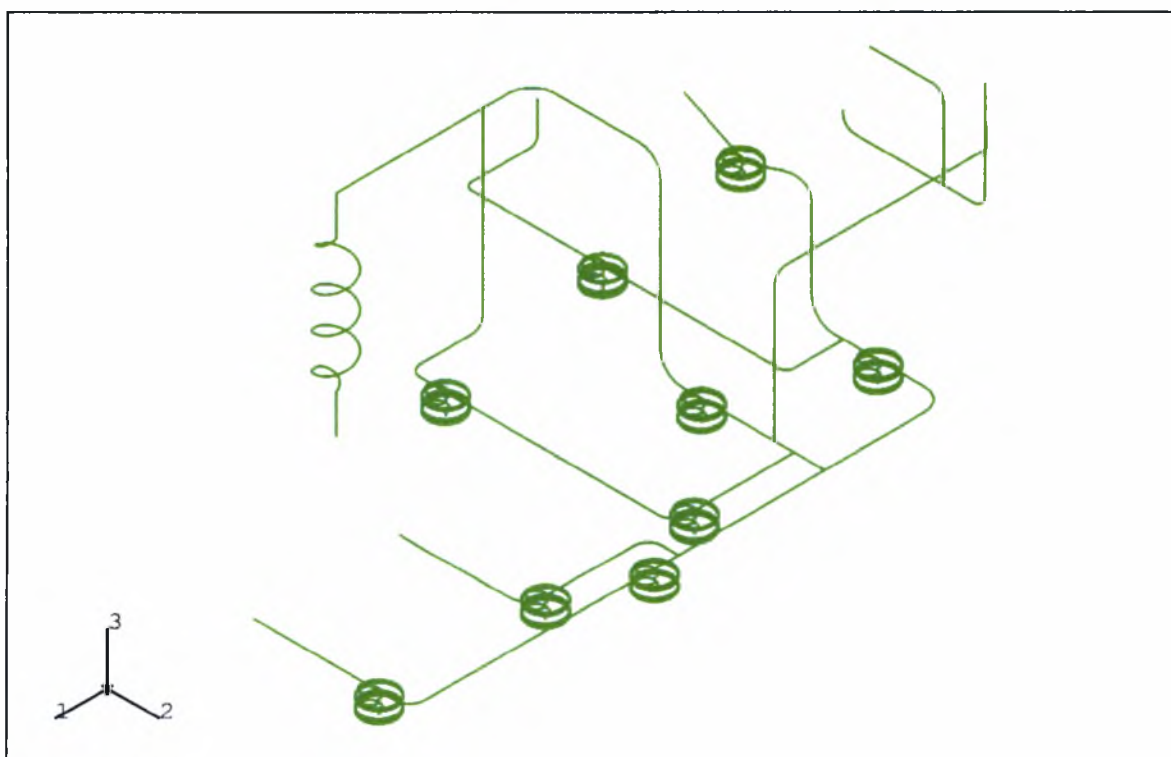
1.1.1 Σκοπός της μελέτης

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι:

1. να εντοπισθούν τα κρίσιμα σημεία στα οποία αναπτύσσονται οι μέγιστες τάσεις,
2. να βρεθεί η τιμή της καθίζησης για την οποία, η μέγιστη τάση στο κρίσιμο σημείο υπερβαίνει το όριο διαρροής
3. να προσδιορισθεί η μεταβολή των τάσεων συναρτήσει της καθίζησης.

1.1.2 Η μοντελοποίηση των σωληνώσεων

Το πρώτο στάδιο της μελέτης αποτελεί η εισαγωγή της γεωμετρίας βάσει σχεδίου, όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.1.



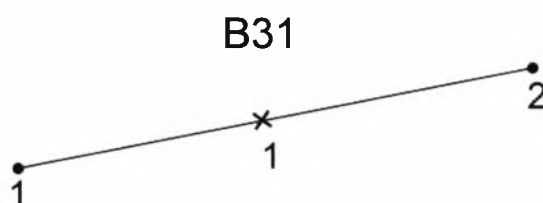
Σχήμα 1.1 Σχέδιο δικτύου σωληνώσεων

Οι σωλήνες του δικτύου είναι διαμέτρου τεσσάρων, έξι, οκτώ και δώδεκα ιντσών, με γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αποτυπώνονται στον πίνακα 1.1.

DN (in.)	ΕΞΩΤ. ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ D (mm)	ΠΑΧΟΣ ΣΩΛΗΝΑ t (mm)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΔΙΑΤΟΜΗΣ A (m ²)
4"	114,3	6,02	2.04×10^{-3}
6"	168,3	7,11	3.60×10^{-3}
8"	219,1	6,35	4.24×10^{-3}
12"	323,9	6,35	6.33×10^{-3}
12"	323,9	9,52	9.40×10^{-3}

ΠΙΝΑΚΑΣ1.1

Για την μοντελοποίηση του δικτύου έχουν χρησιμοποιηθεί 263 στοιχεία και 263 κόμβοι. Ο κάνναβος του μοντέλου είναι πυκνότερος στα καμπύλα τμήματα, έτσι ώστε να προσεγγίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η καμπυλότητα των συγκεκριμένων τμημάτων.



Σχήμα 1.2 Beam Element τύπου B31.

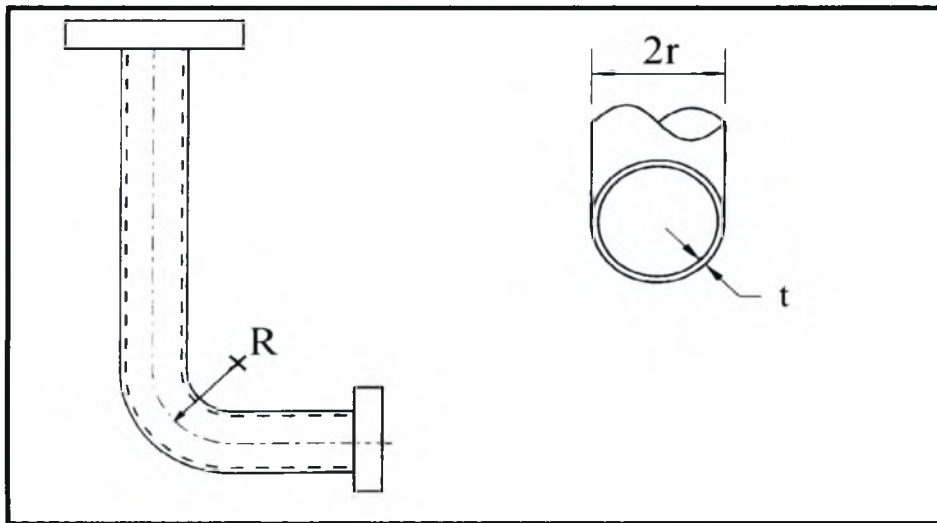
Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τους σωλήνες των ευθύγραμμων τμημάτων, είναι Beam Elements τύπου B31. Τα συγκεκριμένα στοιχεία είναι γραμμικά, τριδιάστατα με δύο κόμβους και ένα σημείο ολοκλήρωσης (Σχήμα1.2). Επιπλέον, έχουν έξι ενεργούς βαθμούς ελευθερίας στους κόμβους με τρεις μετατοπίσεις και τρεις στροφές ως προς τους x, y και z άξονες ($u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$).

Σε τυπικά δίκτυα σωληνώσεων τα καμπύλα τμήματα έχουν κυρίαρχο ρόλο, λόγω της ευκαμψίας τους, στην ανταπόκριση του δικτύου στις διάφορες φορτίσεις. Αυτή τους η συμπεριφορά μπορεί να ενσωματωθεί στο μοντέλο μας χρησιμοποιώντας στοιχεία τύπου Elbow Elements. Παρ' όλα αυτά, τα Elbow Elements προορίζονται για εφαρμογές ανάλυσης με πρόβλεψη των τοπικών φαινομένων και η επιλογή τους για την παρούσα ανάλυση είναι μη συμφέρουσα, λόγω αυξημένου υπολογιστικού κόστους. Στη συγκεκριμένη εργασία θεωρείται, πως η ελαστική ανάλυση του προβλήματος είναι αρκετή σε πρώτη προσέγγιση. Για τους παραπάνω λόγους, αντί των Elbow Elements χρησιμοποιούνται Beam Elements τύπου B31 των οποίων οι γεωμετρικές ιδιότητες μετατρέπονται, ώστε να μοντελοποιηθεί η κατάλληλη ευκαμψία. Αυτό γίνεται υπολογίζοντας τον παράγοντα της ευκαμψίας, k, για κάθε καμπύλο

τμήμα και μετατρέποντας τις ροπές αδρανείας στις συγκεκριμένες περιοχές. Ο παράγοντας k για ένα καμπύλο τμήμα σωληνώσεων είναι συνάρτηση δύο μεταβλητών. Της γεωμετρικής μεταβλητής, λ , οριζόμενη ως

$$\lambda = \frac{tR}{r^2\sqrt{1-\nu^2}},$$

όπου t είναι το πάχος του καμπύλου σωλήνα, R είναι η ακτίνα καμπυλότητας από τον άξονα συμμετρίας, r η μέση ακτίνα του σωλήνα και ν ο λόγος του Poisson. Τα γεωμετρικά μεγέθη του λ φαίνονται γραφικά στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3 Γεωμετρικά μεγέθη για τον προσδιορισμό του λ

Η άλλη μεταβλητή, ψ , είναι ανάλογη της εσωτερικής πίεσης των σωληνώσεων, λόγω του ρευστού που μπορεί να περιέχουν αυτές. Στην παρούσα μελέτη εξετάζουμε την περίπτωση, όπου στις σωληνώσεις δεν υπάρχει εσωτερική πίεση. Συνεπώς στην περίπτωση αυτή ο παράγοντας k εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρική μεταβλητή λ . Τα k και λ που χρησιμοποιούνται για κάθε τμήμα φαίνονται στον πίνακα 1.2.

DN in.	4"	6"	8"	12"	12"
t (mm)	6,02	7,11	6,35	6,35	9,52
r (mm)	54,14	80,595	106,375	158,775	157,19
R (mm)	171,45	252,45	328,65	485,85	485,85
λ	0,37	0,28	0,193	0,128	0,196
k	4,66	6,31	9	14,08	8,905

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2

1.1.3 Η μοντελοποίηση των στηρίξεων

Οι στηρίξεις του δικτύου με το έδαφος μοντελοποιήθηκαν ως ελατήρια και χρησιμοποιήθηκαν Spring Elements. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους προσδιορίστηκαν από το μηχανολογικό σχέδιο. Ο τύπος των στοιχείων είναι Spring A Elements, Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4 Spring Element τύπου SPRINGA

Τα συγκεκριμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται, για να μοντελοποιήσουν πραγματικά φυσικά ελατήρια, καθώς και για την μοντελοποίηση κινηματικών περιορισμών μιας κατασκευής. Αποτελούνται από δύο κόμβους και έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας. Μετατοπίσεις στους άξονες x , y και z (u_x , u_y , u_z). Είναι δυνατόν να επιλεγεί γραμμική ή μη γραμμική συμπεριφορά των στοιχείων. Οι σωληνώσεις περιβάλλονται από πολυουρεθάνη ως μονωτικό υλικό. Για αυτό το λόγο διαχωρίζεται ο τρόπος που αντιδρά το μονωτικό υλικό, που υπάρχει μεταξύ της σωλήνωσης και της κύριας στήριξης (ελατήριο SD), από τον τρόπο που αντιδρά η στήριξη καθεαυτή (ελατήριο SM). Στη συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκε γραμμική συμπεριφορά των στοιχείων. Η γραμμική συμπεριφορά των Spring Elements ορίζεται μαθηματικά από τον τύπο

$$F = k\Delta l,$$

όπου F η δύναμη του ελατηρίου [MN], k η σταθερά του ελατηρίου [MN/m] και Δl η παραμόρφωση του ελατηρίου [m]. Οι σταθερές των ελατηρίων υπολογίζονται από τον τύπο

$$k = \frac{EA}{l},$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, A η διατομή και l το μήκος της στήριξης.

Ορίζονται τέσσερα σημεία στα οποία υπάρχει σύνδεση με τη δεξαμενή. Στα σημεία αυτά το είδος της στήριξης είναι πάκτωση. Οι κόμβοι που αντιστοιχούν σε αυτά είναι οι 1, 186, 179 και 266. Σε αυτούς τους κόμβους δεσμεύονται και οι έξι βαθμοί ελευθερίας. Οι στηρίξεις του δικτύου με το έδαφος αντιστοιχούν στους κόμβους 6, 31, 50, 64, 80, 98, 115, 209, 225, 249, 69, 91 και 109. Η καθίζηση του εδάφους προσομοιώνεται με μια μετατόπιση ως προς τον άξονα z

στα σημεία στήριξης του δικτύου με το έδαφος. Αρχικά η ανάλυση γίνεται με μηδενική καθίζηση, όπου φαίνεται η επίδραση του ίδιου βάρους των σωληνώσεων.

1.1.4 Δεδομένα για το υλικό

Το υλικό από το οποίο αποτελούνται οι σωληνώσεις είναι ο κραματοποιημένος χάλυβας SA-333 με κραμάτωση C-Mn-Si. Ο συγκεκριμένος χάλυβας έχει μέτρο ελαστικότητας E 200GPa, όριο διαρροής σ_y 214 MPa και όριο θραύσης 414 MPa. Οι μεταλλικές στηρίξεις έχουν το ίδιο μέτρο ελαστικότητας E και το ίδιο όριο διαρροής σ_y . Η πολυουρεθάνη έχει μέτρο ελαστικότητας E ίσο με 15×10^{-3} GPa.

1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

1.2.1 Μεθοδολογία του προβλήματος

Η συνολική μετατόπιση του δικτύου u οφείλεται στη μετατόπιση λόγω του ιδίου βάρους των σωληνώσεων u^f και στη μετατόπιση λόγω της καθίζησης u^0 . Η παρατήρηση αυτή εκφράζεται μαθηματικά από την εξίσωση (1.2.1).

$$u = u^f + u^0 \quad 1.2.1$$

Το πρόβλημα περιγράφεται στο χώρο της κατασκευής Ω από τις εξισώσεις:

$$\sigma_{ji,j} + \rho f_i = 0 \quad 1.2.2$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{όπου } C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{jilk} \quad 1.2.3$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad 1.2.4$$

και στο σύνορο S από τις συνθήκες:

$$\sigma_{ij} n_j = \hat{t}_i = 0 \quad \text{στην } S_t \quad 1.2.5$$

$$u_i = \hat{u}_i \quad \text{στην } S_u \quad 1.2.6$$

όπου $S_t \cup S_u = S$.

1.2.2 Φυσική ερμηνεία του προβλήματος

Για μηδενική καθίζηση οι τάσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή οφείλονται αποκλειστικά στο ίδιο βάρος του δικτύου. Εάν προστεθεί μετατόπιση λόγω καθίζησης τότε οι συνολικές τάσεις του δικτύου είναι συνάρτηση της πρόσθετης μετατόπισης και του ιδίου βάρους της κατασκευής. Το ίδιο βάρος του δικτύου είναι ένα σταθερό μέγεθος, το οποίο δε μεταβάλλεται με την αύξηση της καθίζησης. Πολλαπλασιάζοντας με έναν συντελεστή α τη μετατόπιση λόγω καθίζησης στη σχέση 1.2.6 είναι σε θέση να παρατηρήσει κανείς, πως μεταβάλλεται κατά τον ίδιο συντελεστή η παραμόρφωση, σχέση 1.2.4, και τελικά η τάση, σχέση 1.2.3.

Οι συνολικές τάσεις, που αναπτύσσονται στο δίκτυο, είναι το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων λόγω ιδίου βάρους, σ_f , και των τάσεων λόγω καθίζησης σ_0 . Η παραπάνω διαπίστωση μπορεί να

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ IELEM	σ_{\max} [MPa] u=0 [cm]	σ_{\max} [MPa] u=1 [cm]
4	210,4	231,7
7	212,5	230,4
258	193,8	234,8
259	183,8	232,6

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3

Για τις τιμές του πίνακα 1.3 οι καθαρές τάσεις λόγω καθίζησης 1 cm προκύπτουν εάν από τις τιμές της δεύτερης στήλης αφαιρεθούν οι τιμές της πρώτης. Επειδή οι τάσεις λόγω καθίζησης μεταβάλλονται γραμμικά είναι εύκολο να προσδιορισθεί για μια τιμή της καθίζησης οι τάσεις θα φθάσουν το όριο διαρροής από τις σχέσεις:

$$\sigma_y = \sigma_0 + a(\sigma_1 - \sigma_0)$$

$$a = \frac{\sigma_y - \sigma_0}{(\sigma_1 - \sigma_0)}$$

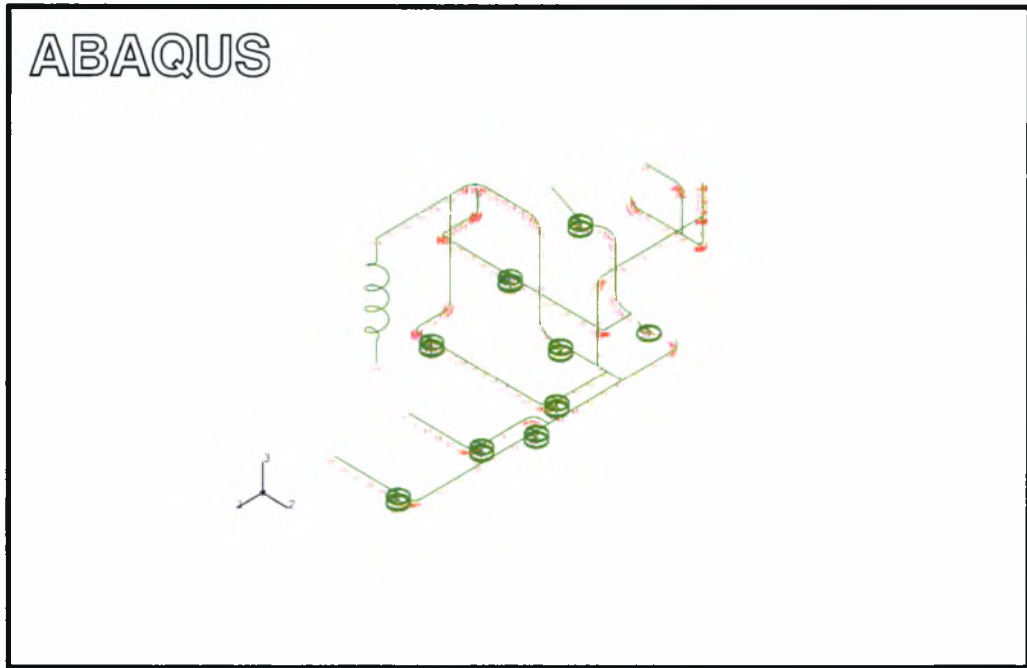
$$u_y = a u_1$$

Όπου σ_0 και σ_1 οι τάσεις για καθίζηση 0 και 1 cm αντίστοιχα, a αδιάστατος συντελεστής και u_1 καθίζηση 1 cm. Αντικαθιστώντας τις τιμές του πίνακα 1.3 στις παραπάνω σχέσεις προκύπτει πως το πρώτο στοιχείο για το οποίο η σ_{\max} φτάνει το όριο διαρροής, σ_y , είναι το 258 με $a = 1,15122$. Επομένως η τιμή της καθίζησης, για την οποία το πρώτο στοιχείο του δικτύου αρχίζει να πλαστικοποιείται, είναι $u_y = 1,15122$ cm. Οι τάσεις για $u = 1,15122$ cm παρουσιάζονται στον πίνακα 1.4.

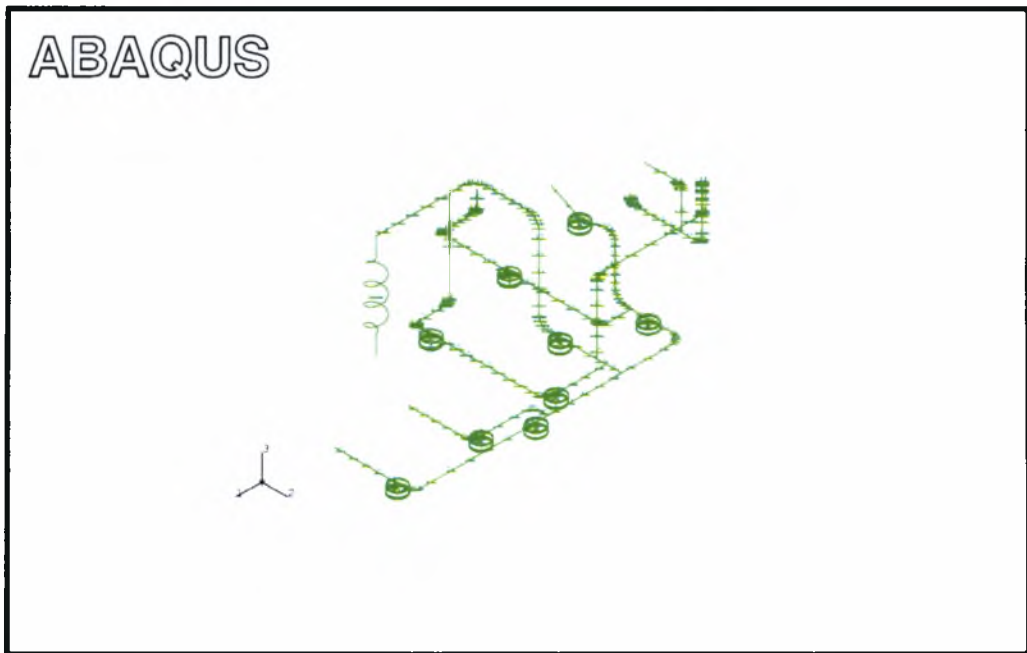
ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ IELEM	σ_{\max} [MPa] u=0 [cm]	σ_{\max} [MPa] u=1 [cm]	σ_{\max} [MPa] u=1,15122 [cm]
4	210,4	231,7	234,92
7	212,5	230,4	233,11
258	193,8	234,8	241
259	183,8	232,6	239,98

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.4

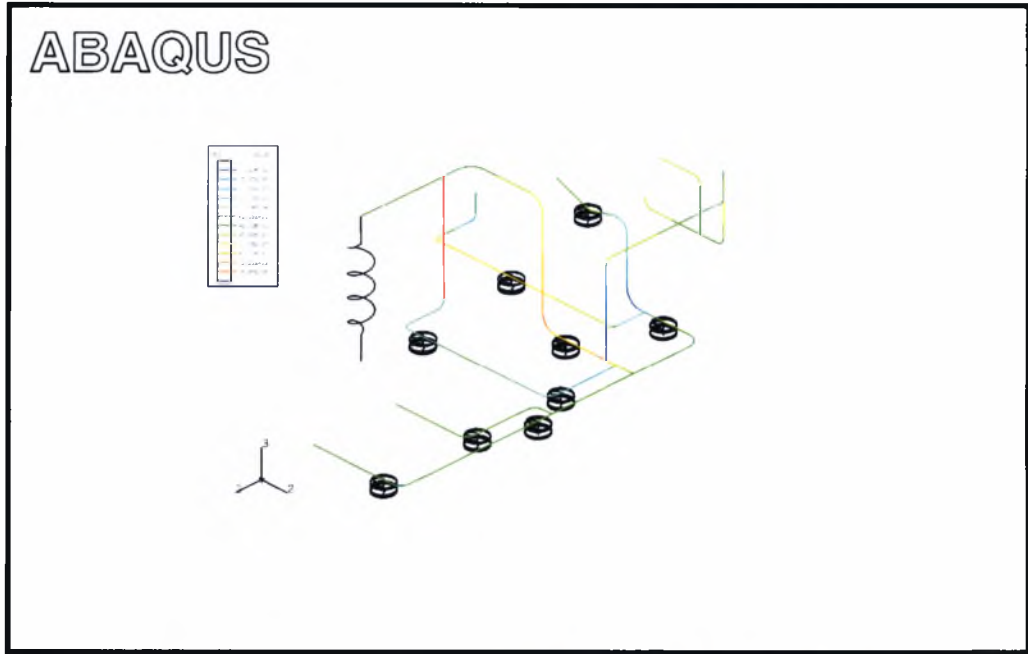
Στα Σχήματα 1.6 και 1.7 παρουσιάζεται η γεωμετρία του σχήματος των σωληνώσεων και η αρίθμηση των κόμβων και των στοιχείων αντίστοιχα. Οι αριθμοί των κόμβων (INODE) και των στοιχείων (IELEM) αντιστοιχούν στον ορισμό τους στο ABAQUS. Στα Σχήματα 1.8 και 1.9 φαίνονται οι ισοϋψείς των ροπών M_1 και M_2 για μηδενική καθίζηση. Στα Σχήματα 1.10 και 1.11 φαίνονται οι ισοϋψείς των ροπών M_1 και M_2 για καθίζηση ίση με 1 cm.



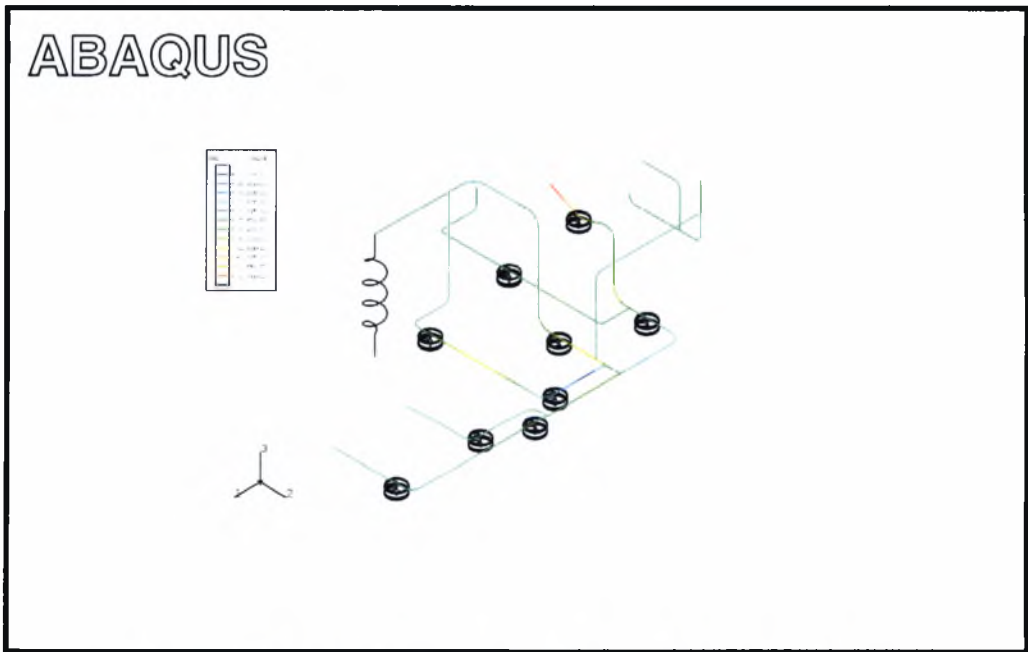
Σχήμα 1.6 Αρίθμηση των κόμβων του δικτύου



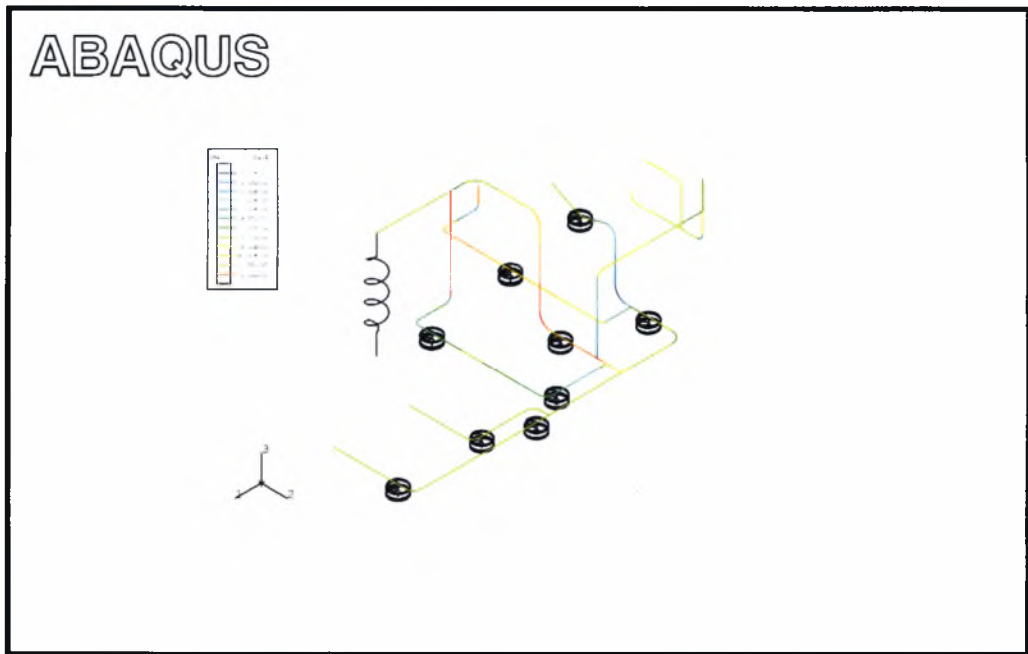
Σχήμα 1.7 Αρίθμηση των στοιχείων του δικτύου



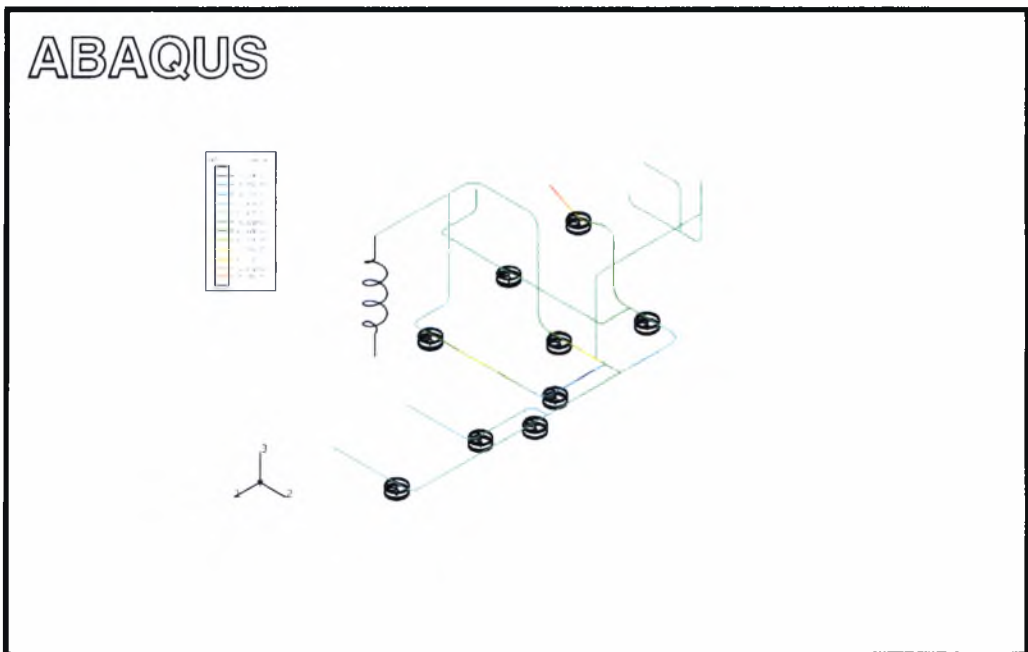
Σχήμα 1.7 Ισοϋψείς των ροπών M1 για μηδενική καθίζηση



Σχήμα 1.8 Ισοϋψείς των ροπών M2 για μηδενική καθίζηση



Σχήμα 1.9 Ισοϋψείς των ροπών M1 για καθίζηση 1 cm



Σχήμα 1.10 Ισοϋψείς των ροπών M2 για καθίζηση 1 cm

2.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ

2.1.1 Εισαγωγή

Για τη μοντελοποίηση των συνδέσεων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ABAQUS – PRE. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι υπολογιστικό πακέτο προ-επεξεργασίας, γραφικού περιβάλλοντος του ABAQUS. Η εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος γίνεται με τη βοήθεια του mouse και τη χρήση εντολών που εμφανίζονται σε μορφή παραθύρων. Επειδή δεν υπήρχε προηγούμενη εμπειρία στη χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος, κρίθηκε σκόπιμο να περιγραφεί η διαδικασία κατασκευής των μοντέλων των συνδέσεων. Συνολικά μελετήθηκαν επτά συνδέσεις. Δύο από αυτές ενώνονται κάθετα με τη δεξαμενή. Οι υπόλοιπες πέντε, οι οποίες βρίσκονται στη κορυφή, ενώνονται υπό γωνία. Όλες οι συνδέσεις είναι συγκολλητές. Η συγκόλληση έχει γίνει μεταξύ του σωλήνα και της δεξαμενής, μεταξύ του σωλήνα και του ενισχυτικού μεταλλικού δακτυλίου, καθώς επίσης και μεταξύ του δακτυλίου και της δεξαμενής. Η διαδικασία μοντελοποίησης των κάθετων συνδέσεων είναι πανομοιότυπη. Το ίδιο ισχύει και για τη μοντελοποίηση των υπό γωνία συνδέσεων. Για τους παραπάνω λόγους στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι διαδικασίες μοντελοποίησης μιας κάθετης σύνδεσης και μιας κεκλιμένης.

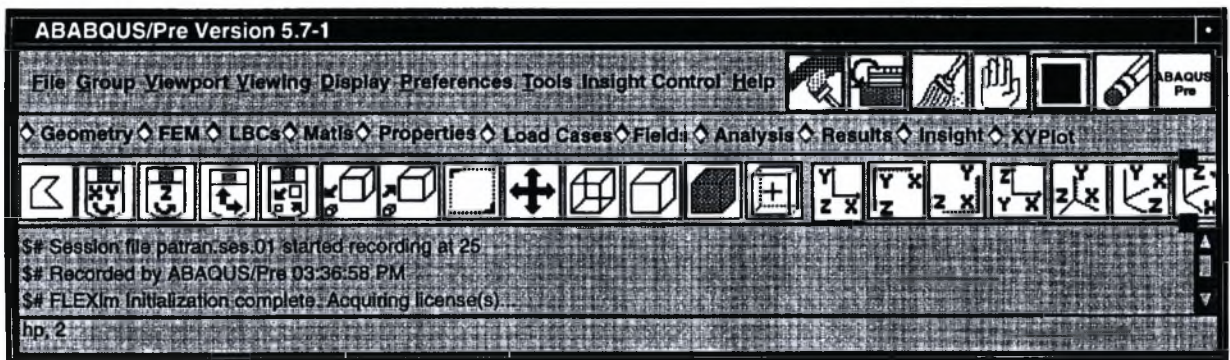
2.1.2 Περιγραφή κατασκευής καννάβου της σύνδεσης αναρρόφησης (κάθετη σύνδεση). Σημείο Aspiration.

Η γενική διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

1. Ορίζεται η γεωμετρία της υπό ανάλυσης κατασκευής.
2. Κατασκευάζεται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων.

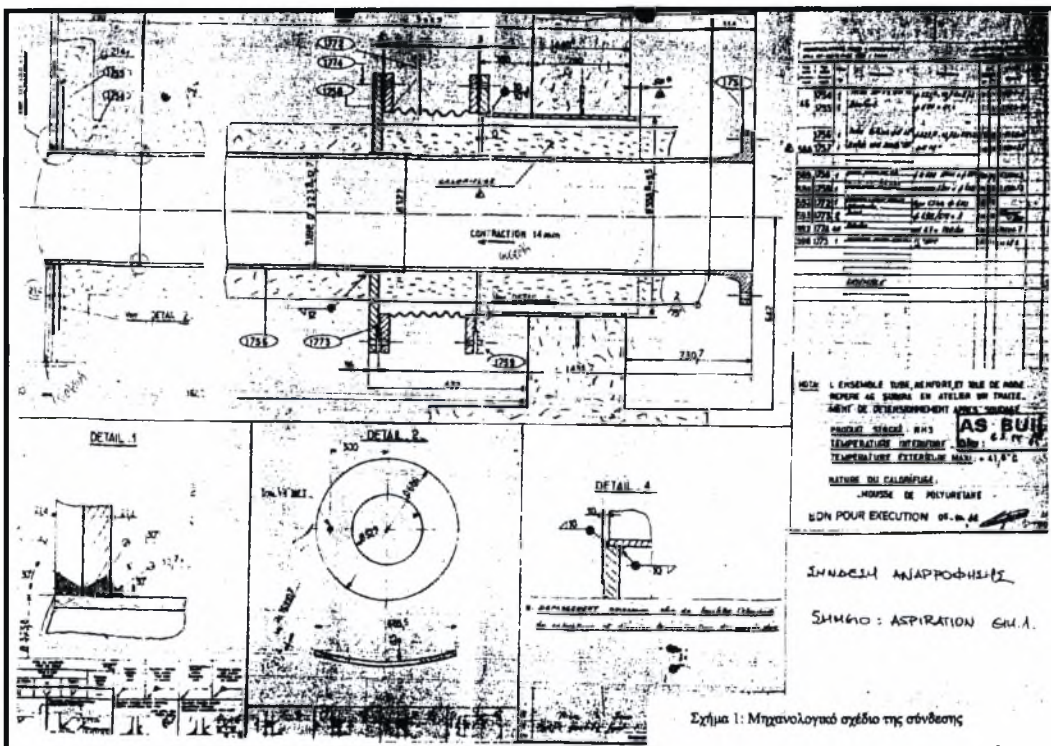
Η γεωμετρία του μοντέλου κατασκευάστηκε γύρω από ένα κεντρικό σύστημα συντεταγμένων, το οποίο τοποθετήθηκε, έτσι ώστε η αρχή του να βρίσκεται στο κέντρο της διατομής του σωλήνα στο σημείο που ενώνεται η δεξαμενή με το σωλήνα. Το μοντέλο μας είναι αξονοσυμμετρικό. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε πρώτα η γεωμετρία και το πλέγμα των στοιχείων στις δύο διαστάσεις και έπειτα το τριδιάστατο μοντέλο με περιστροφή γύρω από τον άξονα συμμετρίας x .

Ανοίγοντας κανείς ένα καινούργιο file με το όνομα της επιλογής του, βρίσκεται στην κεντρική οθόνη εντολών του προγράμματος. Το menu εντολών βρίσκεται στην κορυφή της οθόνης και ενεργοποιείται με το αριστερό κουμπί του ποντικιού(Σχήμα2.1).



Σχήμα 2.1 Το menu εντολών του προγράμματος ABAQUS-PRE

Ακριβώς από κάτω υπάρχει το σχεδιαστικό πλαίσιο σε μαύρο φόντο, όπου φαίνεται η εκτέλεση των εντολών που έχει επιλεγεί. Για να εισαχθούν τα δεδομένα της γεωμετρίας πρέπει να ενεργοποιηθεί η εντολή Geometry. Αυτό γίνεται κλικάροντας στο ρόμβο που βρίσκεται δίπλα από την εντολή. Στο δεξί μέρος της οθόνης και δίπλα από το σχεδιαστικό πλαίσιο ανοίγει το παράθυρο Geometry. Τα δεδομένα της γεωμετρίας του μοντέλου Aspiratation εισήχθησαν από το μηχανολογικό σχέδιο του Σχήματος 2.2.



Σχήμα 2.2 Μηχανολογικό σχέδιο της σύνδεσης αναρρόφησης(σημείο Aspiration)

Σε πρώτη φάση δημιουργήθηκαν τα σημεία στις κορυφές των ακμών του διδιάστατου μοντέλου. Στο παράθυρο Geometry επιλέχθηκαν τα παρακάτω:

- Action: Create
- Object: Point
- Method: XYZ

Στο ίδιο παράθυρο στην επιλογή Ref.Coordinate Frame εισήχθηκε η έκφραση Coord 0 που αντιπροσωπεύει το αρχικό σύστημα συντεταγμένων. Με αυτόν τον τρόπο ορίζεται το σύστημα στο οποίο αναφέρονται οι συντεταγμένες, που εισάγει ο χρήστης στη συνέχεια, για να δημιουργήσει τα γεωμετρικά σημεία που επιθυμεί. Στην επιλογή Point Coordinates List εισάγονται οι συντεταγμένες των σημείων. Κάθε γεωμετρική οντότητα από τη στιγμή που θα δημιουργηθεί συνδέεται με έναν αριθμό, ο οποίος φαίνεται στη γραμμή κάτω από την έκφραση ID List. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται το παράθυρο Geometry όπως εμφανίζεται στην οθόνη του προγράμματος. Όλες οι εντολές του προγράμματος έχουν τη μορφή του Σχήματος 2.3.

The image shows a dialog box titled 'Geometry' with the following fields and controls:

- Action:** Create
- Object:** Point
- Method:** XYZ

- Point ID List**
6
- Refer. Coordinate Frame**
Coord 0
- Auto Execute**
- Point Coordinates List**
[10 5 3.125]
- Apply-**

Σχήμα 2.3 Το παράθυρο Geometry για τη δημιουργία σημείου με τη μέθοδο XYZ

Εισάγοντας τις συντεταγμένες $[0,155.55,0]$, $[0,168.25,0]$, $[2061.4,155.55,0]$, $[2061.4,155.55,0]$ δημιουργήθηκαν τα τέσσερα σημεία, που ενώνοντας τα κατασκευάζεται ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με μήκος όσο του σωλήνα και πλάτος όσο το πάχος του. Για να μορφοποιηθεί το συγκεκριμένο παραλληλόγραμμο επιλέχθηκε στο παράθυρο Geometry:

- Action: Create
- Object: Curve
- Method: Point

Στην επιλογή Option εισάγεται η έκφραση 2 Point και στις επιλογές Starting Point List και Ending Point List τα σημεία Point1 και Point2 αντίστοιχα. Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία και για τα υπόλοιπα σημεία κατασκευάζεται το ζητούμενο παραλληλόγραμμο που αντιπροσωπεύει το πάχος του σωλήνα στο επίπεδο x-y. Ακολουθώντας πανομοιότυπο τρόπο εργασίας δημιουργήθηκαν, τα τραπέζια των εσωτερικών συγκολλήσεων μεταξύ δεξαμενής και σωλήνα, ενισχυτικού δακτυλίου και σωλήνα. Επίσης δημιουργήθηκαν τα τρίγωνα των εξωτερικών συγκολλήσεων μεταξύ σωλήνα και δακτυλίου, δακτυλίου και δεξαμενής. Το μήκος του τραπεζίου της δεξαμενής επιλέχθηκε ίσο με τέσσερις φορές τη διάμετρο του σωλήνα, έτσι ώστε να διαγνωσθεί επικείμενη αστοχία στο τμήμα της. Στην εσωτερική επιφάνεια επαφής του δακτυλίου με την δεξαμενή, στα σημεία όπου δεν υπάρχει συγκόλληση, οι κόμβοι του πλέγματος της δεξαμενής και του πλέγματος του δακτυλίου έχουν ανεξάρτητους βαθμούς ελευθερίας. Για την ικανοποίηση της παραπάνω συνθήκης δημιουργήθηκαν δύο γραμμές σχεδόν παράλληλες η μία πολύ κοντά στην άλλη. Μέχρι αυτό το σημείο έχει δημιουργηθεί το διδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο αποτελούμενο από σημεία και πλευρές. Για να κατασκευασθεί το τριδιάστατο μοντέλο της συνδέσεως, πρέπει πρώτα να δημιουργηθούν οι επιφάνειες που ορίζουν οι πλευρές και τα σημεία. Για να επιτευχθεί αυτή η εργασία επιλέγεται στο παράθυρο Geometry :

- Action: Create
- Object: Surface
- Method: Curve

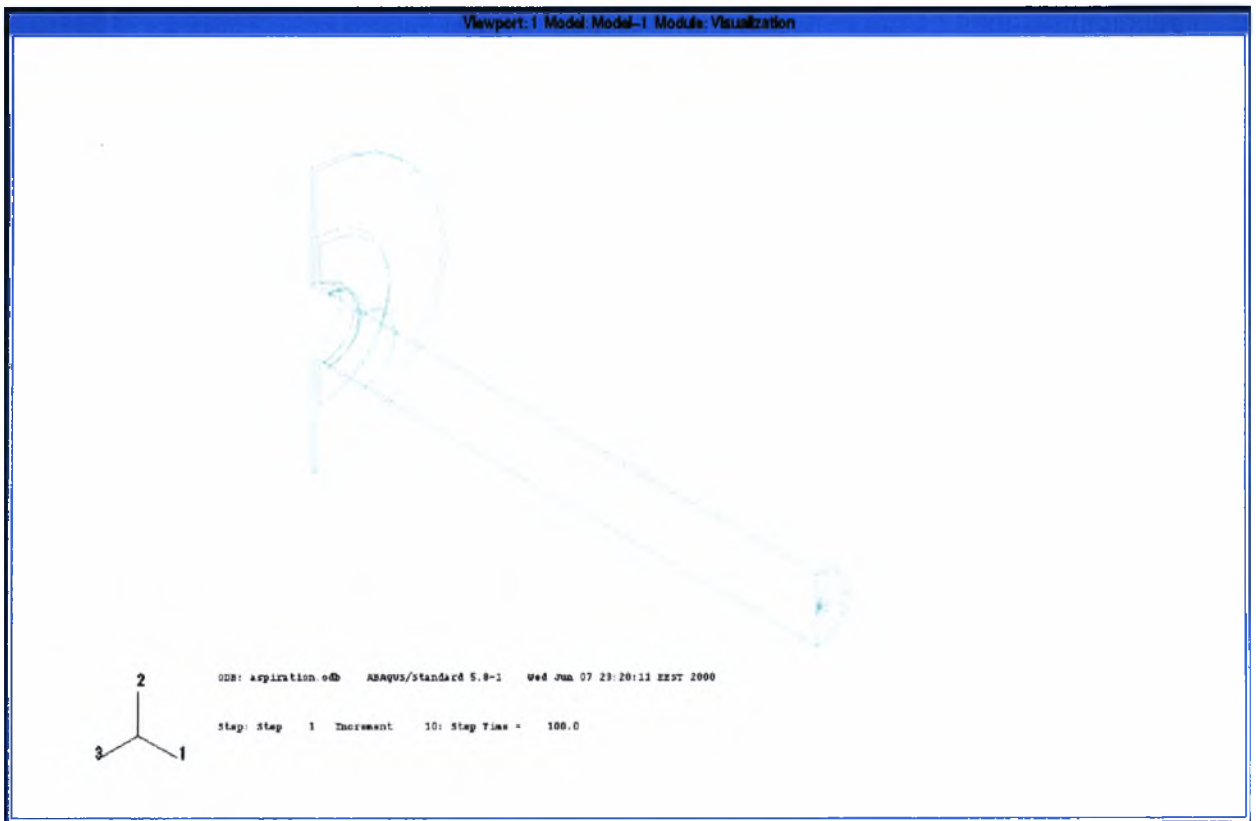
Στην επιλογή Option εισάγεται η έκφραση 2 Curve και στις επιλογές Starting Curve List και Ending Curve List οι πλευρές Curve 1 και Curve 2 αντίστοιχα. Με αυτή τη διαδικασία δημιουργείται η επιφάνεια του σωλήνα. Ακολουθώντας τα παραπάνω βήματα δημιουργούνται και οι επιφάνειες των συγκολλήσεων, της δεξαμενής και του δακτυλίου (επτά συνολικά). Η κάθε μία επιφάνεια έχει το δικό της αριθμό. Επειδή το πρόβλημα είναι συμμετρικό ως προς τον z άξονα, για οικονομία στη μνήμη και στον υπολογιστικό χρόνο κατασκευάστηκε το μισό συμμετρικό μοντέλο. Πριν δημιουργηθεί το τριδιάστατο μοντέλο στο κυρίως μενού επιλέχθηκε Group, Create. Με αυτή την επιλογή ενεργοποιείται το παράθυρο της εντολής Group. Στο παράθυρο αυτό επιλέχθηκε Create –Group και εισήχθη στην επιλογή Group name το όνομα solid 1. Ακολουθώντας την διαδικασία αυτή η νέα γεωμετρική οντότητα που θα δημιουργηθεί,

αποτελεί ένα ανεξάρτητο Group εργασίας. Δημιουργώντας ανεξάρτητα Group μπορεί ο χρήστης να εμφανίζει στην οθόνη του συγκεκριμένα Group κάθε φορά και να επεμβαίνει σε αυτά ευκολότερα. Η εμφάνιση αυτή γίνεται επιλέγοντας Group-Post και έπειτα το όνομα του Group το οποίο επιθυμεί κάποιος να επεξεργαστεί.

Για την κατασκευή του τριδιάστατου μοντέλου επιλέχθηκε στο παράθυρο Geometry :

- Action: Create
- Object: Solid
- Method: Revolve

Στην επιλογή Axis εισάγεται ο άξονας περιστροφής, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο άξονας 1. Στη συνέχεια επιλέγονται 180 μοίρες για την περιστροφή της επιφάνειας, ώστε να δημιουργηθεί το στερεό. Τέλος στη Surface List εισάγεται η έκφραση Surface 1:7. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται το τριδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο.



Σχήμα 2.4 Τριδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο του σημείου Aspiration

Για τη δημιουργία του διδιάστατου πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων εμφανίζεται ξανά το διδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο με την εντολή Post Group επιλέγοντας το Group Default. Ενεργοποιώντας στη συνέχεια την εντολή Finite Elements είναι σε θέση ο χρήστης πλέον να αρχίσει τη δημιουργία του πλέγματος. Τη θέση του παραθύρου Geometry έχει πάρει τώρα το παράθυρο Finite Elements. Επειδή στη συνέχεια θα εφαρμοστεί μια βύθιση στο άκρο του μοντέλου, περιμένει κανείς πως οι τάσεις που θα αναπτυχθούν κοντά στη σύνδεση με τη δεξαμενή θα είναι μεγαλύτερες και συνεπώς η αστοχία του υλικού θα επέλθει πρώτα σε αυτή την περιοχή. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων να είναι πυκνότερο στην περιοχή όπου γίνεται η σύνδεση του σωλήνα με τη δεξαμενή και τον ενισχυτικό δακτύλιο. Ο κάνναβος του διδιάστατου μοντέλου κατασκευάστηκε τμηματικά. Αρχικά κατασκευάστηκε τμήμα πλέγματος του σωλήνα με πλάτος όσο το πάχος του σωλήνα και μήκος όσο το άθροισμα των πλατών της δεξαμενής και του δακτυλίου. Κατά το πάχος του σωλήνα κατασκευάστηκαν τέσσερα στοιχεία και κατά το μήκος του συγκεκριμένου τμήματος οκτώ. Το κάθε στοιχείο έχει πλάτος 3,175 mm και μήκος 5,35 mm. Για την κατασκευή του πλέγματος δημιουργήθηκε μια ευθεία ίση και παράλληλη με το πάχος του σωλήνα σε απόσταση 42,8 mm από την αρχή του. Έπειτα δημιουργείται μία επιφάνεια ανάμεσα στις δύο αυτές πλευρές. Στο παράθυρο Finite Elements επιλέγεται :

- Action: Create
- Object: Mesh Seed
- Method: Uniform

Επιλέγεται η εντολή Numbers of Elements και εισάγεται ο αριθμός των στοιχείων που επιθυμεί ο χρήστης για την συγκεκριμένη πλευρά που έχει επιλέξει. Στην επιλογή Curve List εισάγεται η πλευρά στη οποία γίνεται η διακριτοποίηση. Αφού διακριτοποιηθούν όλες οι πλευρές της νέας επιφάνειας στο παράθυρο Finite Elements εισάγεται :

- Action: Create
- Object: Mesh
- Method: Surface

Στην επιλογή Surface List εισάγεται η επιφάνεια που έχει διακριτοποιηθεί στο προηγούμενο βήμα με την εντολή Mesh Seed. Ολοκληρώνοντας την παραπάνω διαδικασία έχει δημιουργηθεί το πλέγμα του πρώτου τμήματος της κατασκευής. Με παρόμοιο τρόπο δημιουργούνται και τα πλέγματα των επιφανειών της δεξαμενής, του δακτυλίου και των συγκολλήσεων. Στη συνέχεια

πρέπει να δημιουργηθεί το υπόλοιπο πλέγμα του σωλήνα. Για απόσταση 85,6 mm κατά τον άξονα x το πλέγμα των στοιχείων παραμένει ίδιο. Το υπόλοιπο τμήμα του σωλήνα χωρίζεται σε δύο ίσες επιφάνειες. Στην πρώτη επιφάνεια και για το πλάτος του σωλήνα τα στοιχεία του πλέγματος μειώνονται σε δύο. Κατά το μήκος της επιφάνειας αυξήθηκε το μήκος των στοιχείων στο διπλάσιο. Στη δεύτερη επιφάνεια ως το τέλος της περιοχής του σωλήνα το πλέγμα αποτελείται από ένα στοιχείο, το οποίο έχει πλάτος όσο το πλάτος του σωλήνα και διπλάσιο μήκος από το μήκος των στοιχείων της προηγούμενης περιοχής. Η δημιουργία των στοιχείων του υπόλοιπου πλέγματος επιτεύχθηκε ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα. Αρχικά επιλέχθηκε:

- Action: Create
- Object: Node
- Method: Translate

Στην επιλογή Translation Vector εισήχθηκε η έκφραση [10.7, 0, 0] και κάτω από την επιλογή Nodes List εισήχθησαν οι κόμβοι από τους οποίους θα αποτελούνται και τα νέα στοιχεία του λιγότερου πυκνού τμήματος του πλέγματος. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν τρεις νέοι κόμβοι σε απόσταση όσο το μήκος των στοιχείων, που έχει επιλεγεί για το νέο τμήμα του καννάβου.

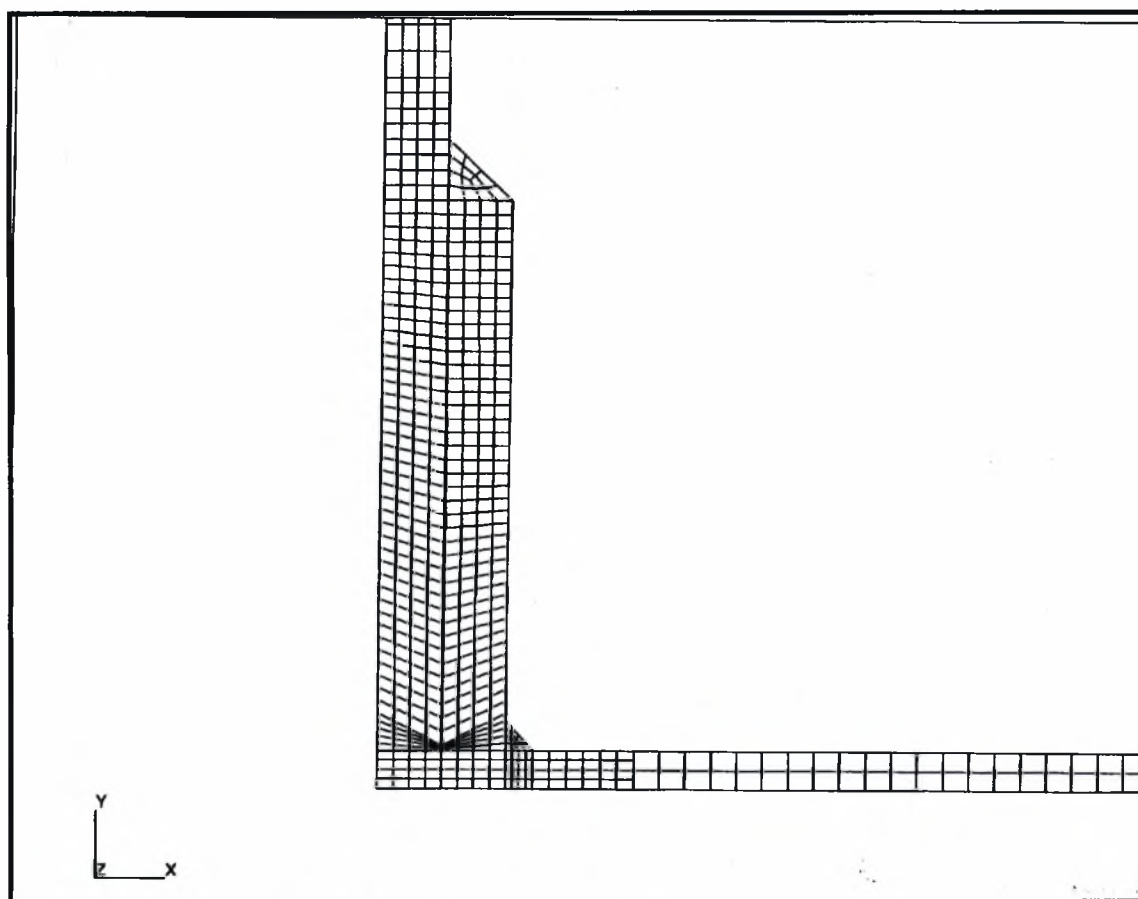
Ακολούθως επιλέχθηκε :

- Action: Create
- Object: Element
- Method: Edit

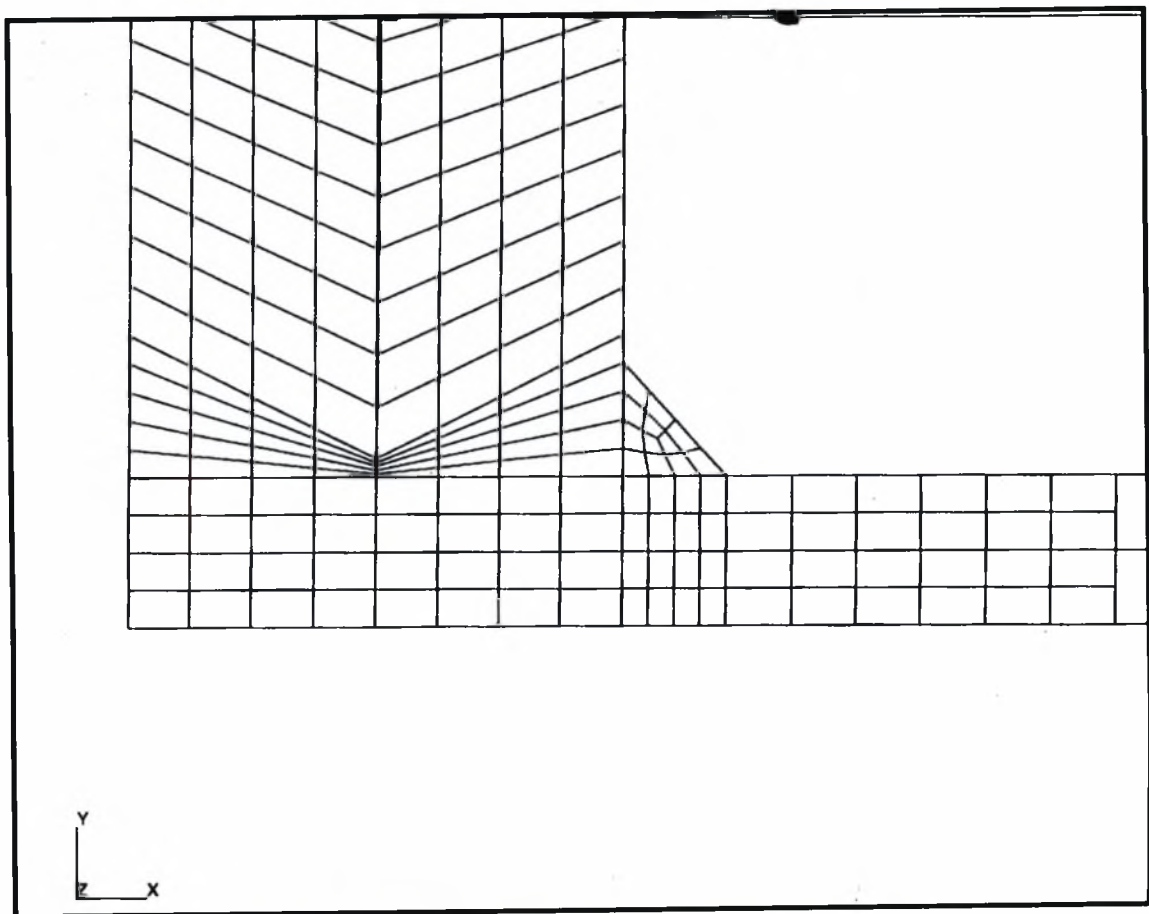
Στην επιλογές Shape, Topology και Pattern εισήχθησαν αντίστοιχα οι εκφράσεις Quad, Quad4 και Standard. Στις επιλογές Node 1, Node 2, Node 3 Node 4 εισήχθησαν αντίστοιχα οι αριθμοί των κόμβων που αποτελούν το νέο στοιχείο. Με τη χρήση των παραπάνω επιλογών δημιουργήθηκαν όλα τα υπόλοιπα στοιχεία. Για την ολοκλήρωση του διδιάστατου καννάβου πρέπει να τοποθετηθούν Explicit MPC, στα σημεία που μειώνονται τα στοιχεία του πλέγματος από τέσσερα σε δύο και από δύο σε ένα για το πάχος του σωλήνα. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζουμε την εξάρτιση των βαθμών ελευθερίας των «τυφλών» κόμβων από τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων, από τους οποίους αποτελούνται τα στοιχεία του λιγότερου πυκνού καννάβου. Για τη δημιουργία των MPC στο παράθυρο Finite Elements εισάγεται:

- Action: Create
- Object: MPC
- Method: Explicit

Ενεργοποιώντας την επιλογή Define Terms εισάγεται στο πρόγραμμα, ποιοι είναι οι ανεξάρτητοι κόμβοι και ποιος ο εξαρτημένος. Εάν η διαδικασία ορισμού των MPC έχει γίνει σωστά στην οθόνη του υπολογιστή εμφανίζεται ένας νέος κόμβος χρώματος μοβ. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται το ολοκληρωμένο διδιάστατο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων, που θα αποτελέσει τη βάση για τη δημιουργία του τριδιάστατου πλέγματος. Στα Σχήματα 2.5 και 2.6 παρουσιάζονται λεπτομέρειες του διδιάστατου πλέγματος.



Σχήμα 2.5 Λεπτομέρεια 1^η του διδιάστατου πλέγματος



Σχήμα 2.6 Λεπτομέρεια 2^η του διδιάστατου πλέγματος

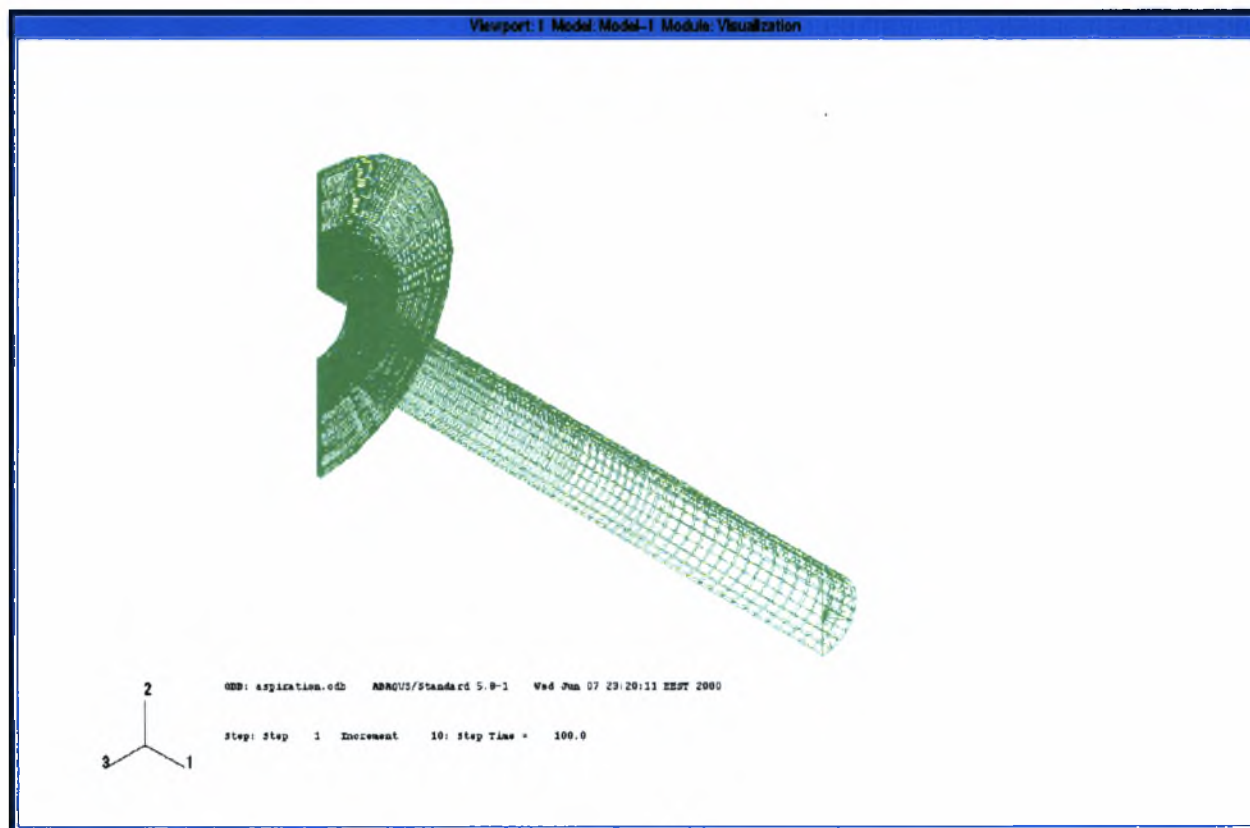
Για τη δημιουργία του τριδιάστατου καννάβου επιλέχθηκε:

- Action: Sweep
- Object: Element
- Method: Arc

Ως άξονας περιστροφής ορίστηκε ο άξονας 1. Ως γωνία περιστροφής ορίστηκαν οι 15 μοίρες, ούτως ώστε στην περιφέρεια του μοντέλου να δημιουργηθούν δώδεκα στοιχεία. Στην επιλογή Base Entity List εισήχθησαν όλα τα διδιάστατα στοιχεία. Η παραπάνω εντολή εκτελέστηκε συνολικά δώδεκα φορές. Με τη χρήση της εντολής Sweep κάθε φορά που δημιουργείται ένα στοιχείο, δημιουργούνται ταυτόχρονα και διπλοί κόμβοι. Για την αποφυγή της παραπάνω ανεπιθύμητης ενέργειας χρησιμοποιείται η εντολή Equivalence ως εξής:

- Action: Equivalence
- Object: All
- Method: Tolerance Cube

Στην επιλογή Nodes to Equivalence εισάγονται όλοι οι κόμβοι του μοντέλου. Για να ολοκληρωθεί το τριδιάστατο πλέγμα πρέπει να ορισθούν προηγουμένως όλα τα MPC. Αυτό γίνεται με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε πιο πριν. Το τελικό τριδιάστατο πλέγμα φαίνεται στο Σχήμα 2.7.

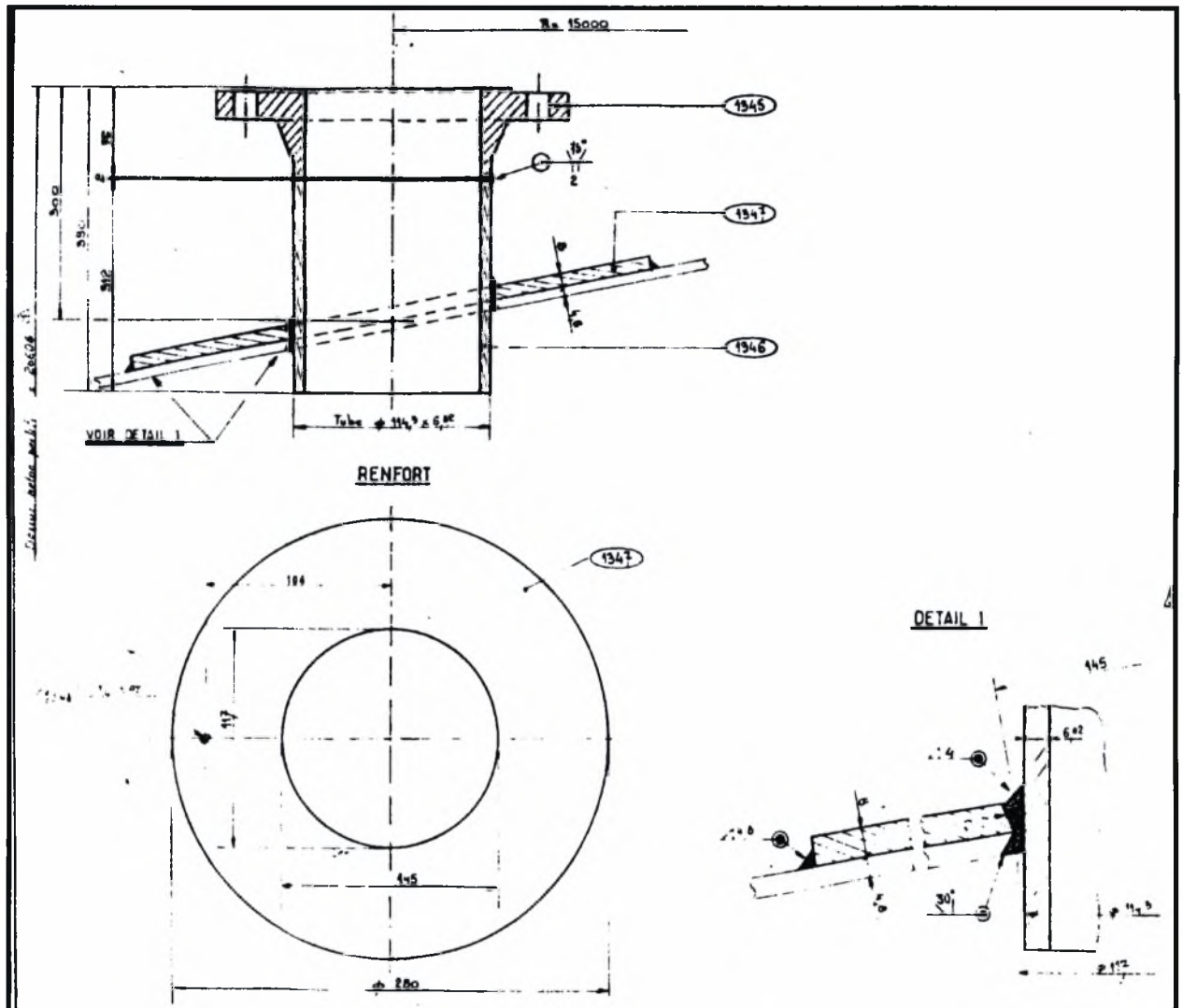


Σχήμα 2.7 Τριδιάστατο πλέγμα του σημείου Aspiration

2.1.3 Περιγραφή κατασκευής καννάβου σύνδεσης υπό γωνία στην κορυφή της δεξαμενής.

Σύνδεση 1.

Επειδή τα μοντέλα των συνδέσεων της συγκεκριμένης γεωμετρίας δεν είναι αξονοσυμμετρικά, ακολούθηθηκε διαφορετική διαδικασία μορφοποίησης τους. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σύνδεσης φαίνονται στο μηχανολογικό σχέδιο του Σχήματος 2.9.



Σχήμα 2.9 Μηχανολογικό σχέδιο σύνδεσης στην κορυφή της δεξαμενής

Το αρχικό σύστημα συντεταγμένων τοποθετήθηκε στο κέντρο της διατομής του σωλήνα που βρίσκεται μέσα στη δεξαμενή. Στη συνέχεια ενεργοποιώντας το παράθυρο Geometry δημιουργήθηκαν οκτώ σημεία με την εντολή:

- Action: Create
- Object: Point
- Method: XYZ

Οι συντεταγμένες που εισήχθησαν κάτω από την επιλογή Point List είναι: [26.24, 0, 0], [30.15, 0, 0], [26.24, 304.5, 0], [30.15, 304.5, 0], [-26.24, 0, 0], [-30.15, 0, 0], [-26.24, 304.5, 0] και [-30.15, 304.5, 0]. Από αυτά τα σημεία κατασκευάστηκαν δύο παράλληλα ορθογώνια παραλληλόγραμμα δημιουργώντας ευθείες μεταξύ των σημείων. Τα ορθογώνια αυτά αντιπροσωπεύουν την τομή του σωλήνα. Έχουν πλάτος όσο το πάχος του σωλήνα και μήκος όσο το μήκος του σωλήνα. Επίσης ισαπέχουν από την αρχή των αξόνων. Για τη δημιουργία της δεξαμενής και του ενισχυτικού δακτυλίου, χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές:

- Action: Create
- Object: Coord
- Method: Translate

Στην επιλογή System to translate εισήχθηκε το σύστημα συντεταγμένων Coord 0 και στην επιλογή Translate Vector εισήχθηκε η έκφραση [0, 70, 0]. Έτσι δημιουργήθηκε ένα δεύτερο σύστημα συντεταγμένων (Coord 1) σε απόσταση 70 mm κατά τον άξονα y του αρχικού συστήματος (Coord 0) με τους άξονες του παράλληλους ως προς το αρχικό σύστημα. Το σύστημα συντεταγμένων Coord 1 περιστρέφεται, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα νέο σύστημα του οποίου οι άξονες x και y να σχηματίζουν γωνία με τους αντίστοιχους άξονες του Coord 1 ίση με 41 μοίρες, ενώ ο άξονας z είναι κοινός και για τα δύο. Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται το διδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο.



Σχήμα 2.10 Διδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο σύνδεσης στην οροφή της δεξαμενής

Για να δημιουργηθεί το σύστημα Coord 2 ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Action: Transform
- Object: Coord
- Method: Euler

Στην επιλογή Ref.Coord εισάγεται το Coord 1. Οι γωνίες των νέων αξόνων σε σχέση με το Coord 1 ορίζονται στην επιλογή Data Input. Μετά την εκτέλεση των παραπάνω ενεργειών στην οθόνη του υπολογιστή εμφανίζεται το νέο σύστημα συντεταγμένων Coord 2. Έπειτα ενεργοποιείται ξανά το παράθυρο δημιουργίας γεωμετρικών σημείων. Προτού δημιουργηθεί οποιαδήποτε γεωμετρία, δημιουργείται ένα νέο Group με το όνομα Dexameni/Dactilios και όλες οι ενέργειες που ακολουθούν ομαδοποιούνται μέσα σε αυτό. Στο παράθυρο Geometry επιλέγεται:

- Action: Create
- Object: Point
- Method: XYZ

Πρέπει να δοθεί αρκετή προσοχή σε αυτό το τμήμα κατασκευής της γεωμετρίας, ώστε σαν σύστημα αναφοράς να επιλέγεται πάντα το Coord 2. Στην επιλογή Point Coordinates List

εισάγονται οι συντεταγμένες: [115, 0, 0], [115, 8,0], [115, -4, 0], [241.2, 0, 0], [241.2, -4, 0], [-115, 0, 0], [-115, 8,0], [-115, -4, 0], [-241.2, 0, 0], [-241.2, -4, 0]. Έπειτα δημιουργούνται οι ευθείες που περνούν από αυτά τα σημεία. Με αυτόν τον τρόπο στην οθόνη του υπολογιστή έχουν μορφοποιηθεί δύο νέα ορθογώνια παραλληλόγραμμα που τέμνουν τα ήδη υπάρχοντα υπό γωνία 41 μοιρών σε οκτώ σημεία. Τέσσερα βρίσκονται στην δεξιά επιφάνεια του σωλήνα και τέσσερα στην αριστερή. Για να δημιουργηθούν τα συγκεκριμένα σημεία επιλέγεται:

- Action: Create
- Object: Point
- Method: Intersect

Στην επιλογή Option εισάγεται η έκφραση 2Curves και στις επιλογές First Curve και Second Curve οι ευθείες που τέμνονται κάθε φορά. Στην συνέχεια σβήνονται όλες οι ευθείες που συνέθεταν τα ορθογώνια παραλληλόγραμμα. Δημιουργούνται τα σημεία με συντεταγμένες [0, 0,-26.24], [0, 8,-26.24], [0, -4,-26.24], [0, 0,-30.15], [0, 8,-30.15], [0, -4,-30.15]. Τα παραπάνω σημεία, όπως και τα σημεία που δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο Intersect, αποτελούν σημεία του σωλήνα. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο XYZ δημιουργούνται και τα σημεία [0, 0,-115], [0, 8, -115], [0, -4, -115], [0, 0, -241.2], [0, -4, -241.2]. Για να κατασκευαστεί το στερεό από τα σημεία που βρίσκονται στην οθόνη στο παράθυρο Geometry επιλέγεται:

- Action: Create
- Object: Curve
- Method: Arc3Point

Με αυτήν την επιλογή σχηματίζεται τόξο από τις συντεταγμένες τριών σημείων αναφοράς. Το πρόγραμμα υπολογίζει τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων αναφοράς. Με την εκτέλεση της εντολής δημιουργείται τόξο οποιασδήποτε κωνικής τομής ανάλογα με τις συντεταγμένες των σημείων αναφοράς. Στις επιλογές Starting Point List, Middle Point List και Ending Point List εισάγονται τα σημεία των τόξων των ελλείψεων για τα σημεία του σωλήνα και των τόξων των κύκλων για τα σημεία του δακτυλίου και τις δεξαμενής. Με βάση τα ομόκεντρα ελλειπτικά και κυκλικά τόξα δημιουργούνται επιφάνειες, χρησιμοποιώντας την εντολή Create-Surface-Curve. Από τις οκτώ καινούργιες επιφάνειες δημιουργούνται 5 στερεά με χρήση της εντολής Create-Solid-Surface. Μέχρι αυτό το σημείο έχει κατασκευαστεί το τριδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο του ενισχυτικού δακτυλίου, της δεξαμενής και τμήματος του σωλήνα. Προτού κατασκευαστεί η υπόλοιπη γεωμετρία του σωλήνα και των συγκολλήσεων, δημιουργούνται τα ανάλογα Group για κάθε στερεό ξεχωριστά, ώστε να είναι πιο εύχρηστη η επεξεργασία τους. Για το κάτω τμήμα του

σωλήνα δημιουργήθηκε μια ευθεία που αρχίζει από σημείο με συντεταγμένες [26.24, 0, 0] και τελειώνει στο σημείο [30.15, 0, 0]. Με βάση αυτήν την ευθεία δημιουργείται επιφάνεια χρησιμοποιώντας την εντολή :

- Action: Create
- Object: Surface
- Method: Revolve

Στην επιλογή Ref.Coord εισάγεται το Coord 0. Ως άξονας περιστροφής ορίζεται ο άξονας 2 και η περιστροφή γίνεται για 180 μοίρες. Ως ευθεία που περιστρέφεται, ορίζεται η ευθεία που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα. Στη συνέχεια επιλέχτηκε στο παράθυρο Geometry :

- Action: Create
- Object: Solid
- Method: Surface

Στην επιλογή Starting Surface List εισάγεται η κάτω επιφάνεια του στερεού, που αντιπροσωπεύει το σωλήνα και στην Ending Surface List η επιφάνεια που δημιουργήθηκε με την εντολή Revolve. Αντίστοιχα κατασκευάστηκε και το άνω τμήμα του σωλήνα.

Για τη δημιουργία του πλέγματος ενεργοποιείται το παράθυρο Finite Elements και αφού εισαχθεί στην οθόνη σχεδιασμού το Group Dexameni/Dactilios, ενεργοποιείται η επιλογή:

- Action: Create
- Object: Mesh Seed
- Method: Uniform

Διακριτοποιούνται όλες οι πλευρές των στερεών, που ανήκουν στο συγκεκριμένο Group, ανάλογα με τον επιθυμητό αριθμό στοιχείων που έχει επιλεγεί. Στη συνέχεια επιλέγεται:

- Action: Create
- Object: Mesh
- Method: Solid

Με τη χρήση των παραπάνω εντολών δημιουργείται το πλέγμα όλων των στερεών στο Group αυτό. Η κατασκευή του πλέγματος των υπόλοιπων τμημάτων του σωλήνα γίνεται με τις εντολές:

- Action: Create
- Object: Mesh Seed
- Method: One Way Bias

και

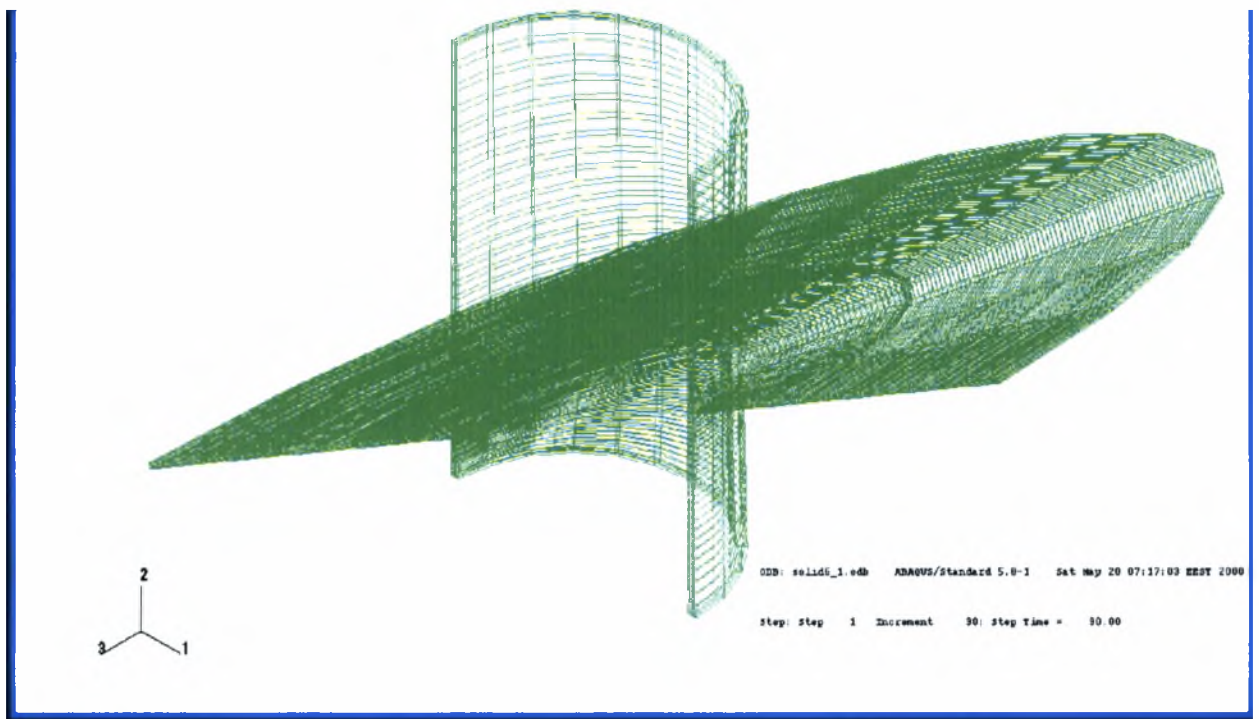
- Action: Create
- Object: Mesh
- Method: Solid

Η μέθοδος One Way Bias χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί πυκνότερη «σπορά» κόμβων στην περιοχή ένωσης του σωλήνα με τον ενισχυτικό δακτύλιο και τη δεξαμενή, γιατί σε αυτήν την περιοχή αναμένονται μεγαλύτερες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων. Στη συνέχεια δημιουργούνται οι εξωτερικές συγκολλήσεις με τις μεθόδους που έχουν προαναφερθεί.

Για να ολοκληρωθεί το μοντέλο της σύνδεσης πρέπει πρώτα να εξαλειφθούν οι διπλοί κόμβοι που έχουν δημιουργηθεί. Η εξάλειψη όμως όλων των διπλών κόμβων θα ήταν λάθος. Όπως και στην περίπτωση της σύνδεσης Aspiration στην επιφάνεια επαφής του ενισχυτικού δακτυλίου και της δεξαμενής, εκεί που δεν υπάρχει συγκόλληση, το υλικό χαρακτηρίζεται από μια ασυνέχεια. Η ασυνέχεια προσομοιάζεται στο μοντέλο μας με την ύπαρξη διπλών κόμβων σε αυτή την περιοχή. Η εξασφάλιση της παραπάνω απαίτησης γίνεται με την εντολή:

- Action: Equivalence
- Object: All
- Method: Tolerance Cube

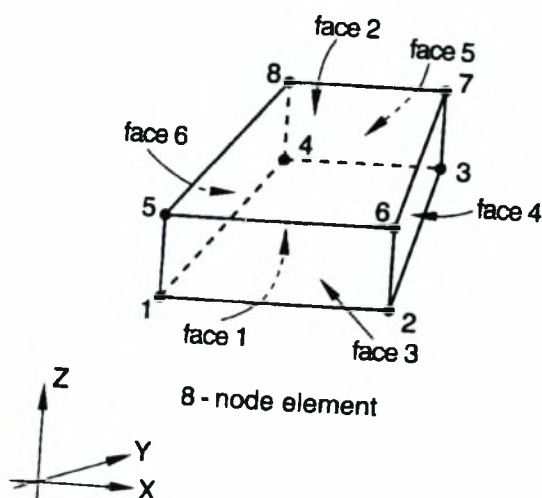
Στην επιλογή Nodes to be Excluded εισάγονται όλοι εκείνοι οι κόμβοι που επιθυμεί ο χρήστης να παραμείνουν διπλοί. Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται το τριδιάστατο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων για τη σύνδεση στην κορυφή της δεξαμενής.



Σχήμα 2.11 Το τριδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για τη σύνδεση στην κορυφή της δεξαμενής

2.1.4 Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση των συνδέσεων.

Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι τριδιάστατα ισοπαραμετρικά με οκτώ κόμβους και οκτώ σημεία ολοκλήρωσης. Τα συγκεκριμένα στοιχεία κωδικοποιούνται στη βιβλιοθήκη του υπολογιστικού προγράμματος ABAQUS ως C3D8. Κάθε κόμβος έχει τρεις ενεργούς βαθμούς ελευθερίας με τρεις μετατοπίσεις ως προς τους x , y και z άξονες (u_x , u_y , u_z). Στο Σχήμα 2.12 φαίνεται ο τύπος των στοιχείων C3D8.



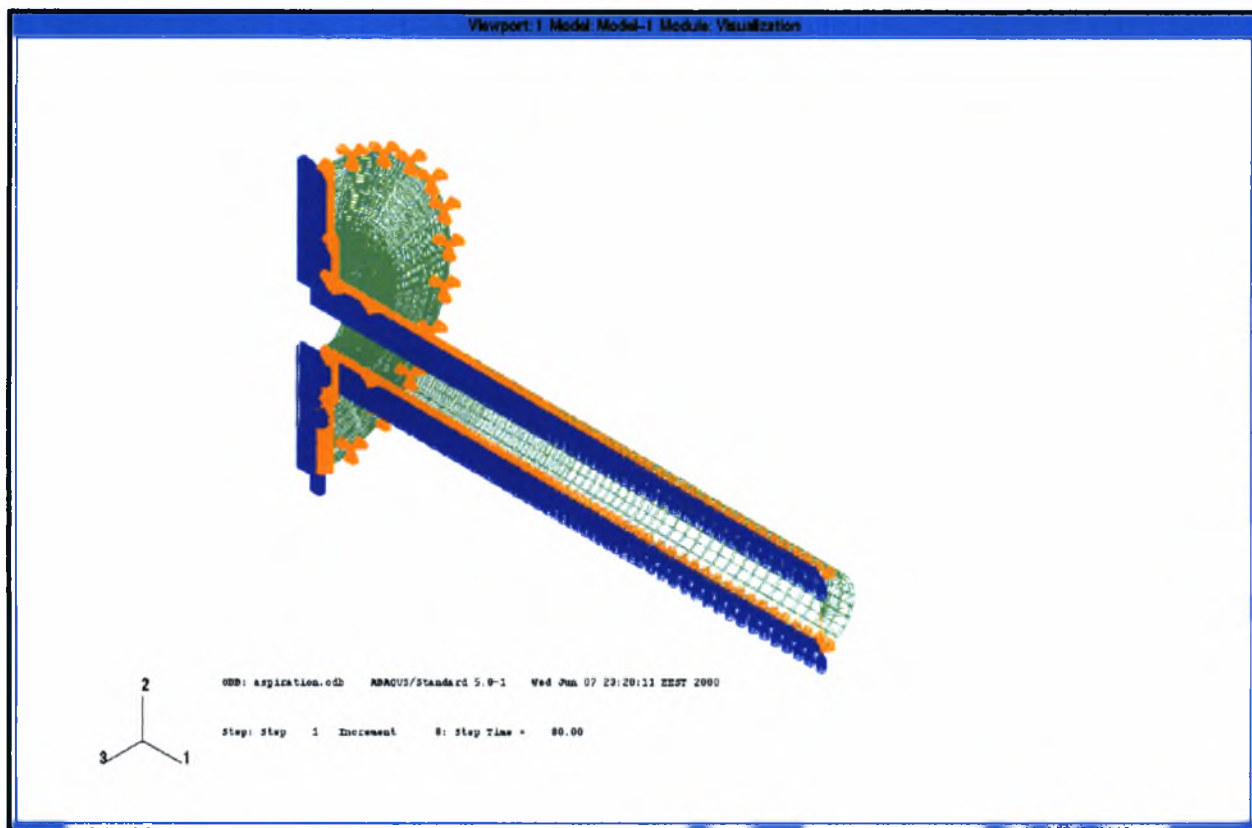
Σχήμα 2.12 Στοιχείο τύπου C3D8

2.1.5 Δεδομένα για το υλικό

Το υλικό από το οποίο αποτελούνται οι σωληνώσεις των συνδέσεων είναι ο κραματοποιημένος χάλυβας SA-333 με κραμάτωση C-Mn-Si. Ο συγκεκριμένος χάλυβας έχει μέτρο ελαστικότητας E 200GPa, λόγο Poisson ν 0.3, όριο διαρροής σ_y 214 MPa και όριο θραύσης 414 MPa. Τα υλικά από τα οποία αποτελούνται η δεξαμενή και ο ενισχυτικός δακτύλιος, θεωρήθηκε ότι έχουν τις ίδιες τιμές για τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη.

2.1.6 Κινηματικοί περιορισμοί των μοντέλων των συνδέσεων.

Στην περιφέρεια της δεξαμενής θεωρήθηκε ότι υπάρχει πάκτωση. Για αυτόν το λόγο δεσμεύτηκαν και οι έξι βαθμοί ελευθερίας των κόμβων που βρίσκονται στην περιοχή αυτήν. Λόγω συμμετρίας του προβλήματος δεσμεύτηκε ο τρίτος, ο τέταρτος και ο πέμπτος βαθμός ελευθερίας, δηλαδή η μετατόπιση ως προς το z άξονα και οι περιστροφές ως προς τους x και y άξονες αντίστοιχα, σε όλους τους κόμβους που βρίσκονται στο σύνορο της τομής του μοντέλου μας. Στο Σχήμα 2.13 φαίνονται οι κινηματικοί περιορισμοί του μοντέλου στο σημείο ASPIRATION, όπως αυτοί οπτικοποιούνται στη σχεδιαστική οθόνη του προγράμματος ABAQUS-PRE.*



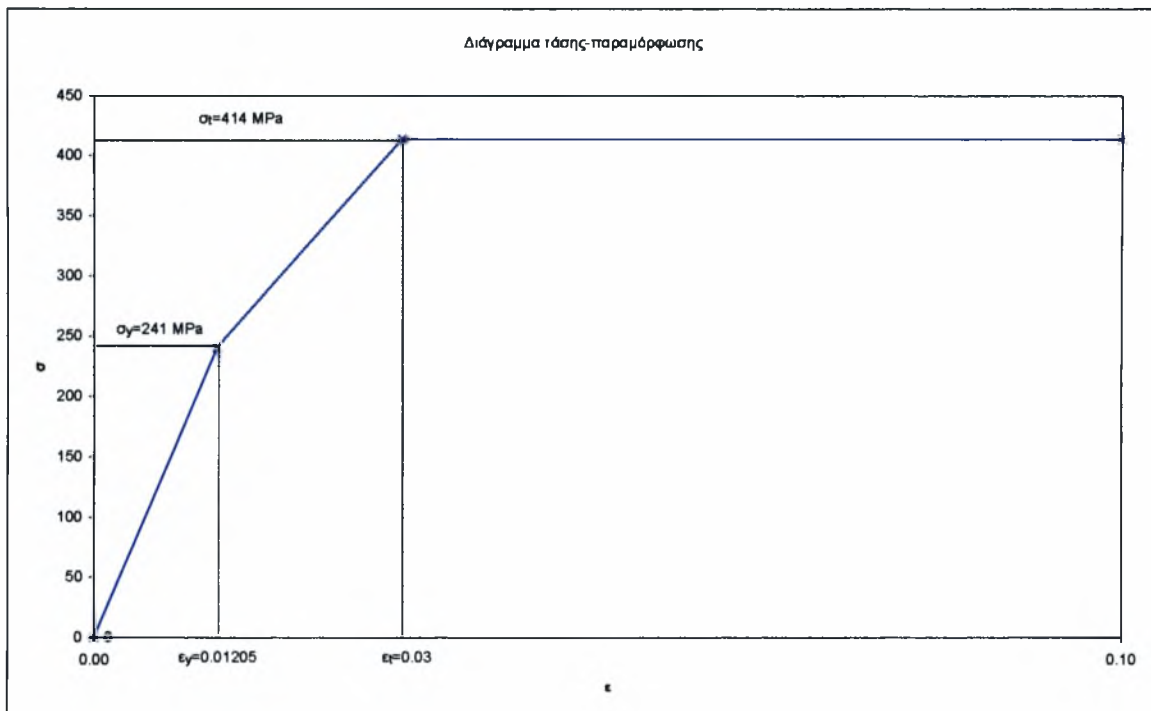
Σχήμα 2.13 Οι κινηματικοί περιορισμοί όπως φαίνονται στην οθόνη του υπολογιστή

*Σ.Σ. Κατά τη διάρκεια συγγραφής του παρόντος κεφαλαίου το πρόγραμμα ABAQUS-PRE αντικαταστάθηκε από το ABAQUS/CAE. Λόγω της αντικατάστασης αυτής δεν ήταν δυνατή η εξολοκλήρου παρουσίαση της κατασκευής των μοντέλων με εικόνες της σχεδιαστικής οθόνης του ABAQUS-PRE. Η αδυναμία αυτή υπερκεράστηκε με τη χρησιμοποίηση σχημάτων από τη σχεδιαστική οθόνη του ABAQUS/CAE, όπου αυτή ήταν δυνατή. Τα δύο προγράμματα μοιράζονται πολλές ομοιότητες στον τρόπο κατασκευής της γεωμετρίας και του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Η περιγραφή της κατασκευής των μοντέλων των συνδέσεων είναι δυνατόν, για αυτόν το λόγο, να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση κατασκευών με την χρήση του νέου σχεδιαστικού προγράμματος.

2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

2.2.1 Μεθοδολογία του προβλήματος.

Στο παρόν τμήμα της ανάλυσης, που εξετάζεται η συμπεριφορά των συνδέσεων του δικτύου με τη δεξαμενή, λαμβάνεται υπόψη η πιθανή πλαστική παραμόρφωση της κατασκευής. Αυτό συμβαίνει χρησιμοποιώντας το κριτήριο διαρροής του von Mises. Η περιγραφή της εργοσκήρυνσης βασίζεται στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης σε μονοαξονικό εφελκυσμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14 Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης

Το φορτίο που επιβάλλεται είναι μια μετατόπιση u στο ελεύθερο άκρο της σύνδεσης. Για κάθε μετατόπιση που επιβάλλεται υπολογίζεται η γωνία κλίσης της σωλήνας και η κατανομή της ισοδύναμης τάσης κατά von Mises. Η γωνία κλίσης υπολογίζεται από τη σχέση $\phi = \arctan\left(\frac{u}{L}\right)$, όπου L είναι η απόσταση του ελεύθερου άκρου της σωλήνας από τη δεξαμενή. Η

ανάλυση βασίζεται στο μηχανολογικό σχέδιο της κάθε σύνδεσης και γίνεται με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

2.2.2 Αποτελέσματα της υπολογιστικής ανάλυσης.

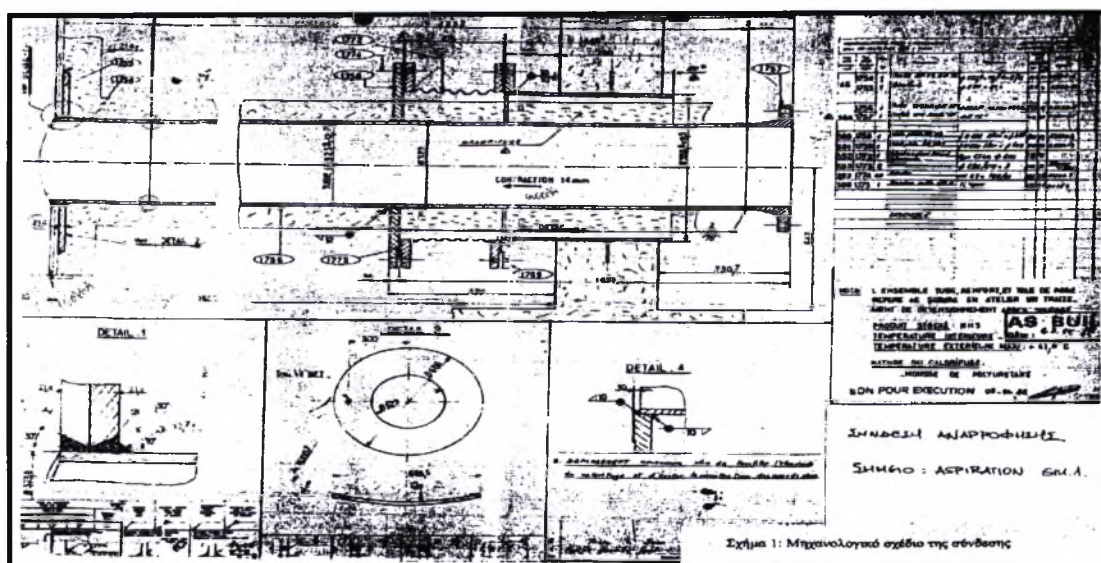
1 Σύνδεση αναρρόφησης (aspiration)

Το φορτίο που επιβάλλεται στην κατασκευή είναι μία κατακόρυφη βύθιση u στο δεξί άκρο, $L=2502.8$ mm. Το πάχος της σωλήνωσης είναι 12.7 mm. Για τη μοντελοποίηση της σύνδεσης αναρρόφησης χρησιμοποιήθηκαν 12495 κόμβοι και 8701 στοιχεία. Το πρόβλημα είναι μη-γραμμικό, λόγω των πλαστικών παραμορφώσεων, και η ανάλυση εκτελείται αυξάνοντας σταδιακά το u με βήμα $\Delta u = 1$ mm μέχρι την τελική του τιμή. Στον Πίνακα 2.1 δίνεται ο υπολογισμός της «μέσης κλίσης» της σωλήνωσης, όπως υπολογίζεται από τη σχέση

$$\phi = \arctan\left(\frac{u}{L}\right).$$

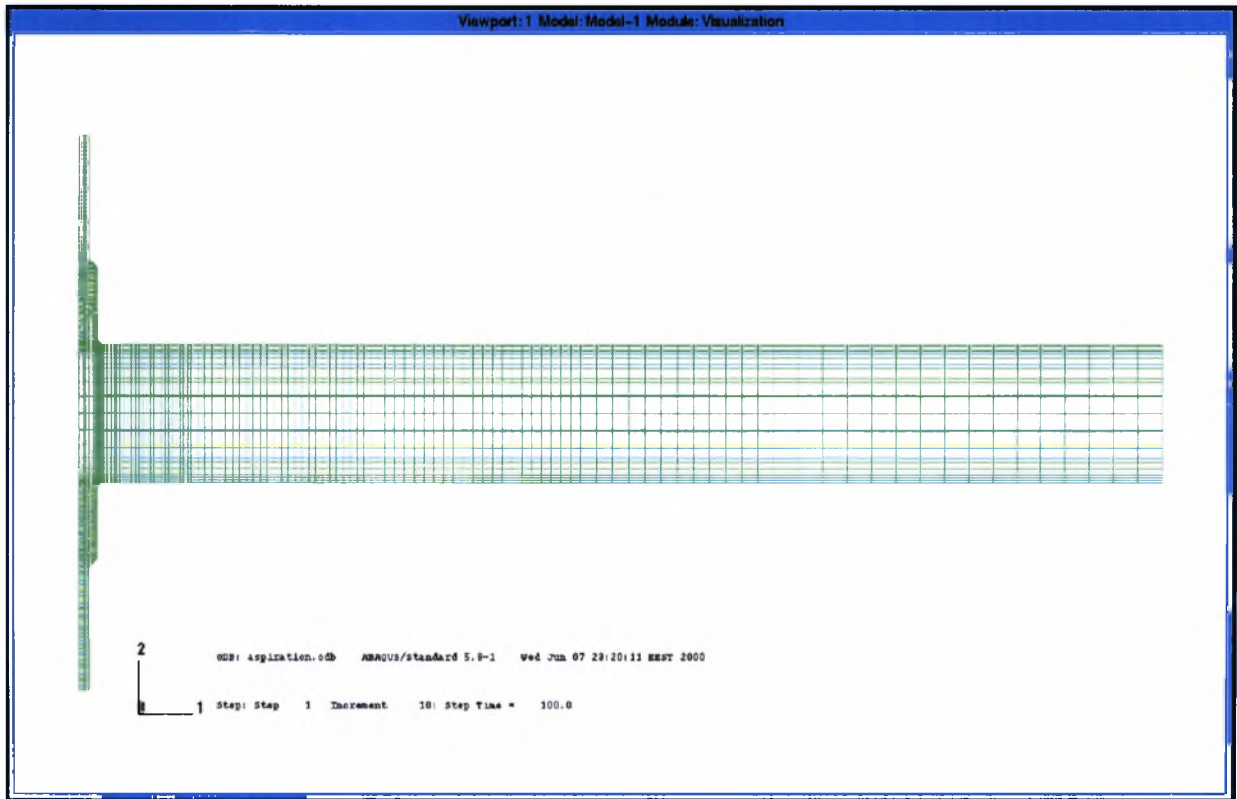
Βύθιση u (mm)	Γωνία ϕ (μοίρες)
10	0.228
20	0.457
30	0.686
40	0.915
50	1.144
60	1.373
70	1.602
80	1.830
90	2.059
100	2.288

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1

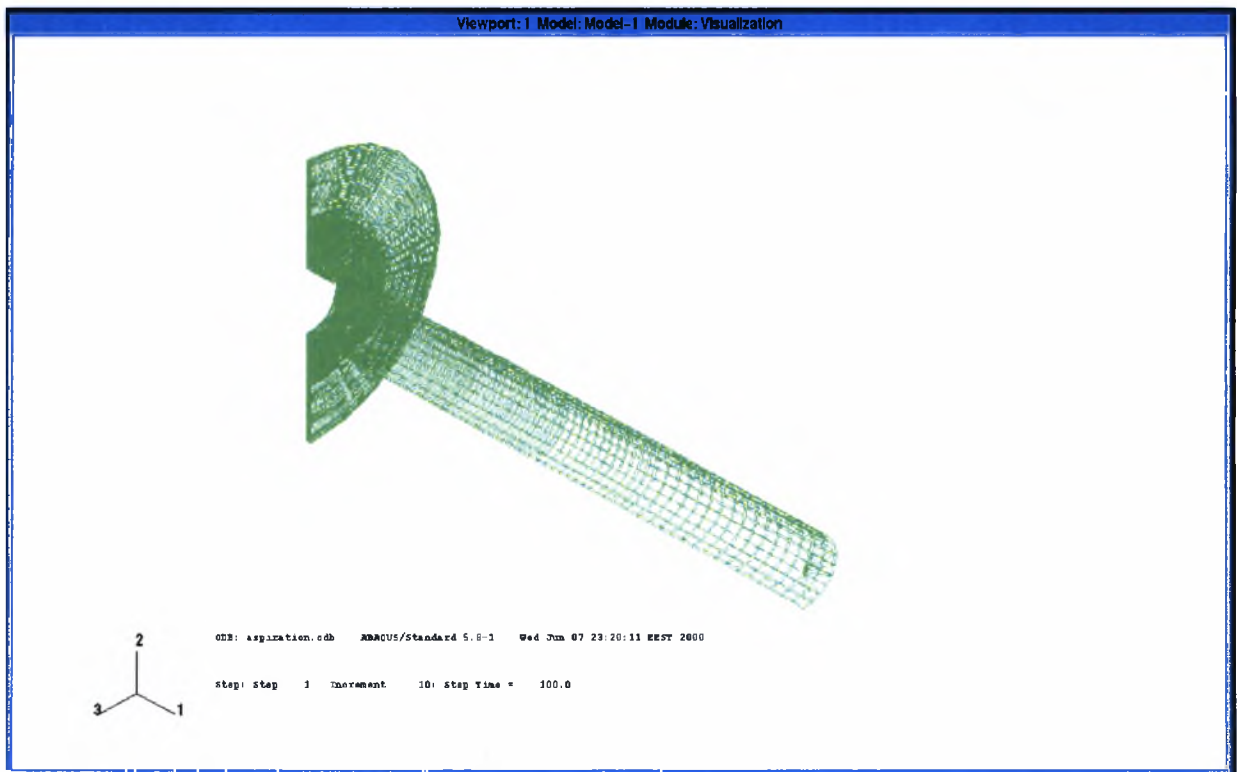


Σχήμα 2.15 Μηχανολογικό σχέδιο της σύνδεσης αναρρόφησης

Στο Σχήμα 2.15 δίνεται το μηχανολογικό σχέδιο της σύνδεσης. Ο κάνναβος που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στα σχήματα 2.16 και 2.17. Κοντά στο σημείο σύνδεσης χρησιμοποιείται πυκνότερος κάνναβος, όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.16 και 2.17.

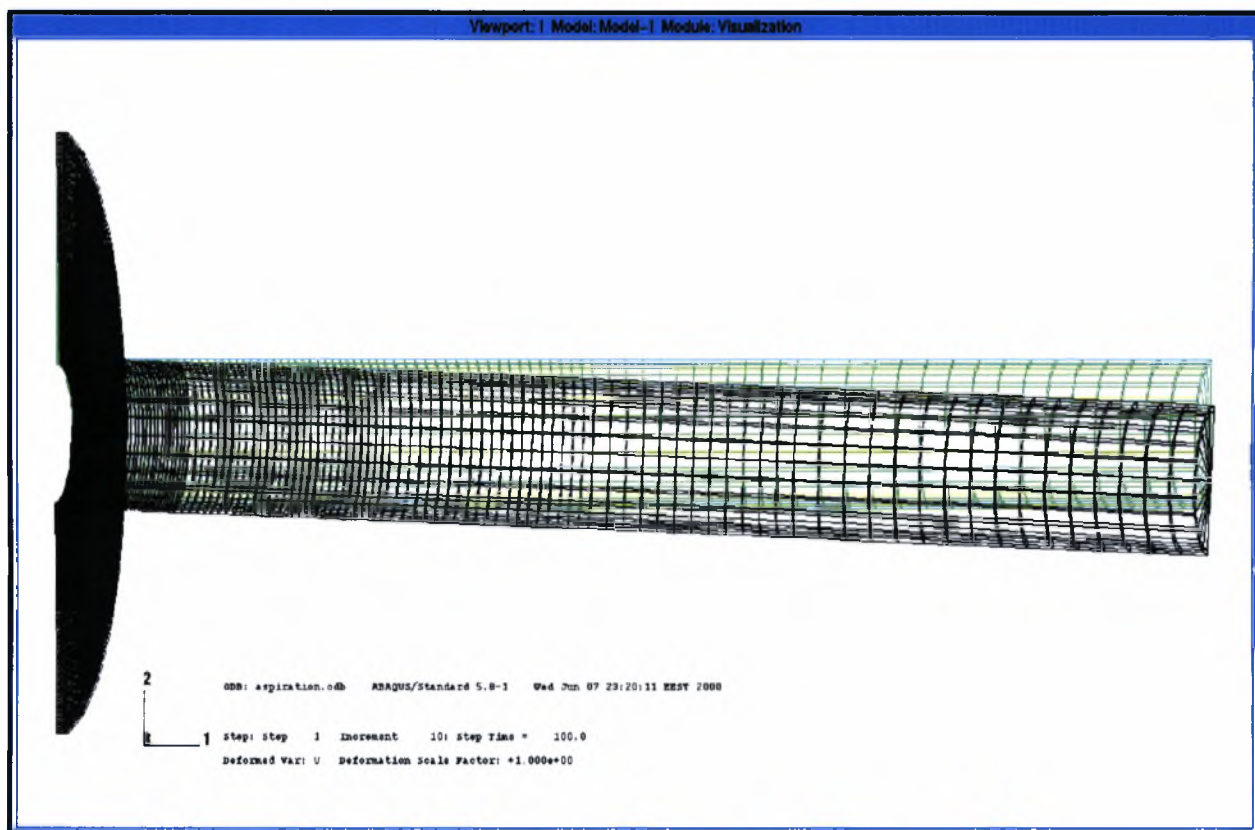


Σχήμα 2.16 Ο κάνναβος της σύνδεσης στο x-y επίπεδο

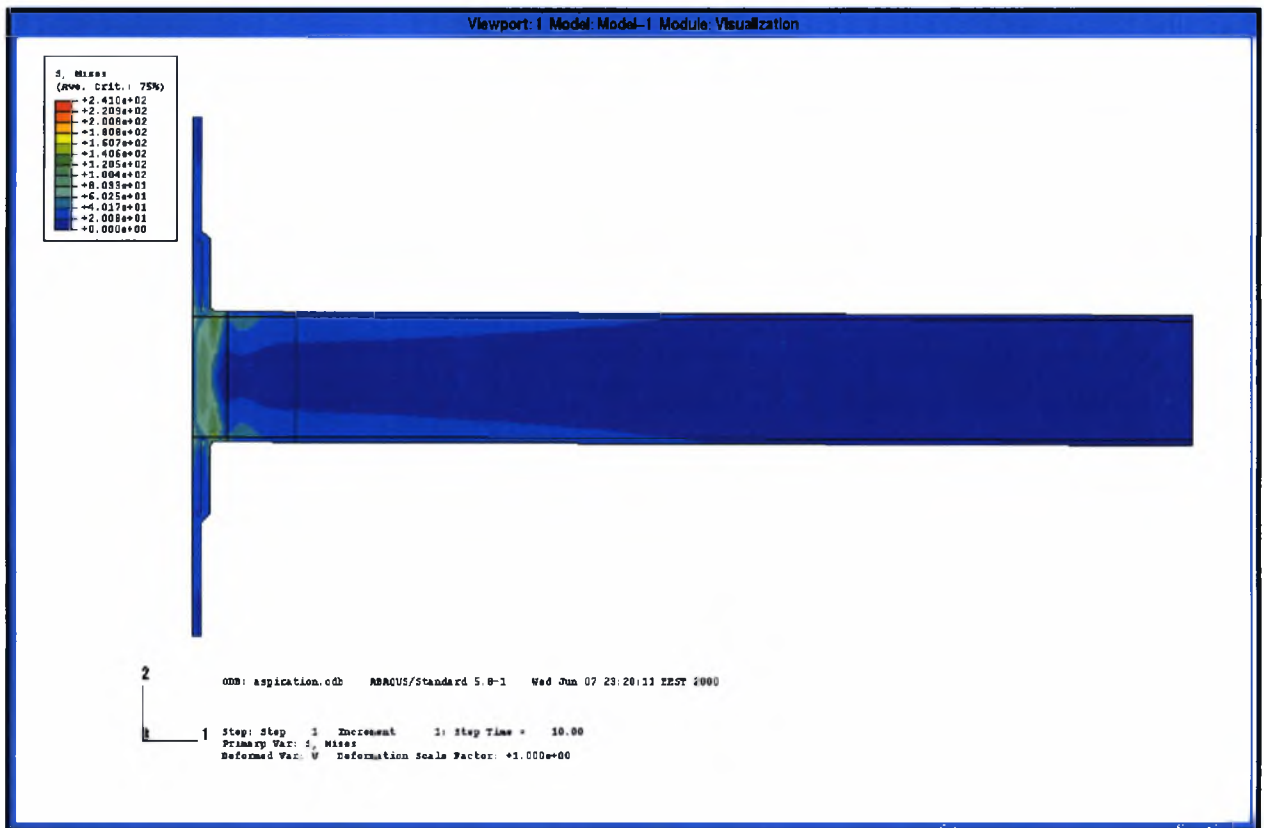


Σχήμα 2.17 Ισομετρικό σχέδιο του καννάβου της σύνδεσης

Στο Σχήμα 2.18 φαίνεται η αρχική και η παραμορφωμένη γεωμετρία της κατασκευής για μία συνολική βύθιση $u = 10\text{ cm}$. Στο Σχήμα 2.19 δίνονται γραφικά οι ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσης του von Mises σ_e για $u = 1\text{ cm}$. Η σ_e παίρνει μέγιστες τιμές στα σημεία της σύνδεσης, όπου όμως παραμένει μικρότερη από το όριο διαρροής $\sigma_0 = 241\text{ MPa}$ του υλικού. Για βύθιση $u = 1\text{ cm}$, η μέγιστη τάση που εμφανίζεται στη σύνδεση είναι 213 MPa . Καθώς το πρόβλημα είναι γραμμικό στην ελαστική περιοχή, η τάση τοπικά θα ξεπεράσει την τάση διαρροής για μία βύθιση $u = 1.13\text{ cm}$.

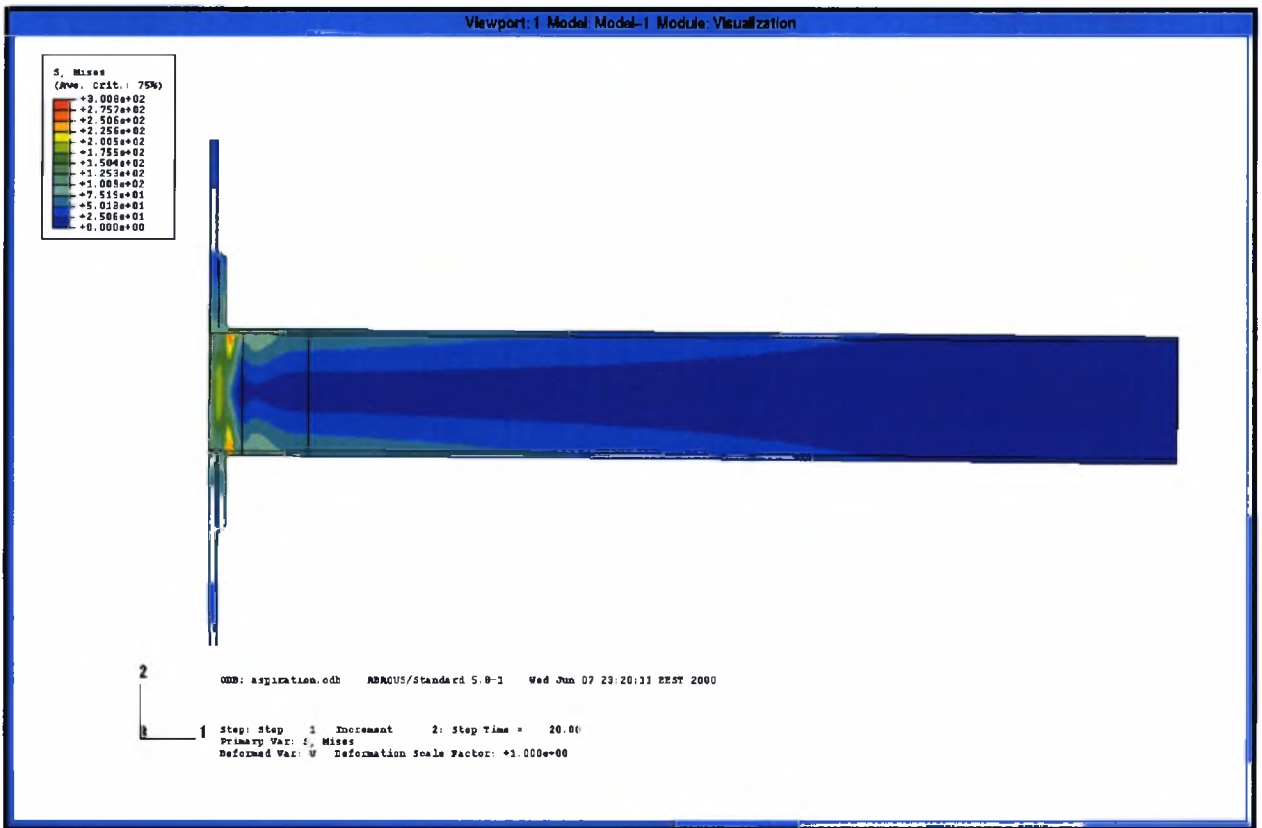


Σχήμα 2.18 Η αρχική και η παραμορφωμένη γεωμετρία της κατασκευής για μία συνολική βύθιση $u = 10\text{ cm}$

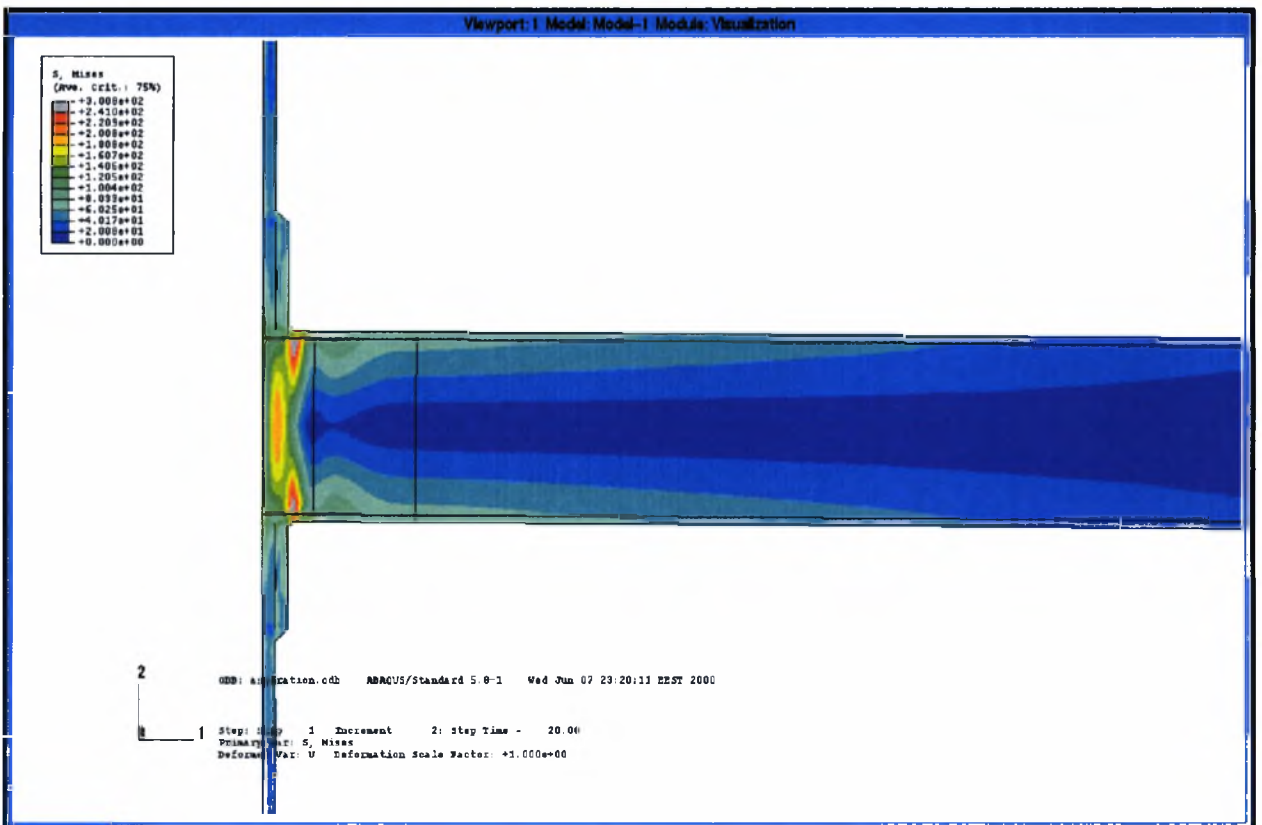


Σχήμα 2.19 Ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσης του von Mises σ_e για $u = 1 \text{ cm}$

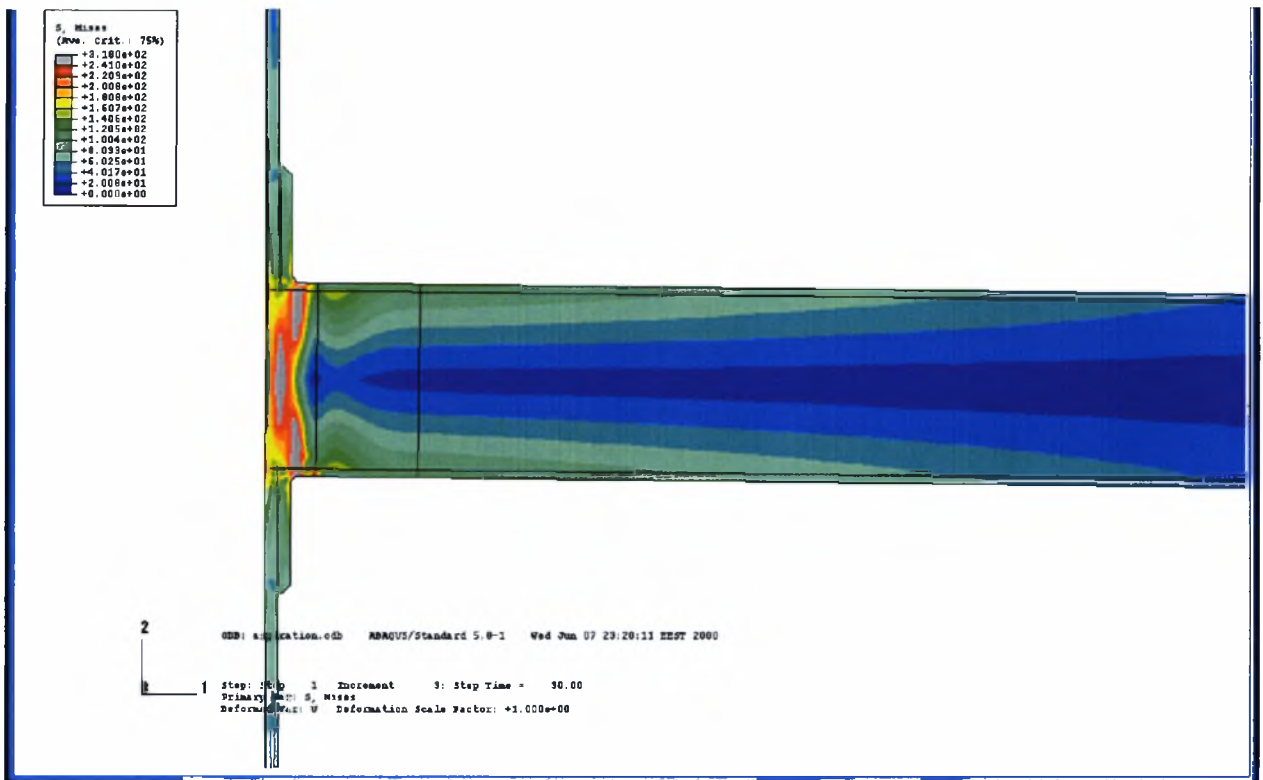
Στα σχήματα 2.20 και 2.21 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς της σ_e για $u = 2 \text{ cm}$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20, υπάρχουν σημεία της κατασκευής στα οποία η σ_e υπερβαίνει το όριο διαρροής και μέρος της σύνδεσης παραμορφώνεται πλαστικά. Η πλαστική ζώνη, που αντιστοιχεί στο γκρι χρώμα, εμφανίζεται στο πάνω και κάτω μέρος της σύνδεσης και περιορίζεται μόνον σε μέρος του πάχους της σωλήνας (Σχήμα 2.21). Αντίστοιχα αποτελέσματα για $u = 3 \text{ cm}$ φαίνονται στα Σχήματα 2.22 και 2.23. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 2.22 και 2.23 έχουμε ισοϋψείς της σ_e . Η πλαστική ζώνη για $u = 3 \text{ cm}$ έχει τώρα εξαπλωθεί σε όλη τη σύνδεση.



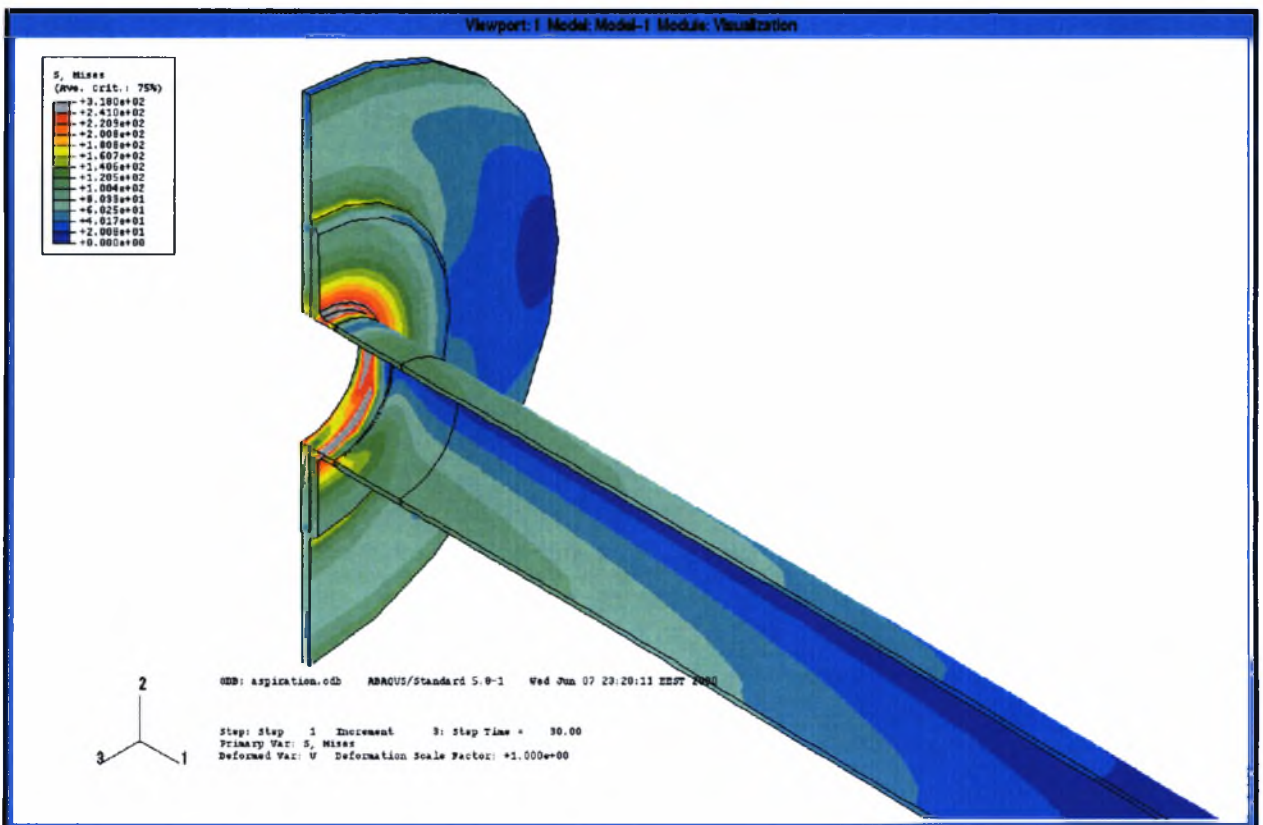
Σχήμα 2.20 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 2 \text{ cm}$



Σχήμα 2.21 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 2 \text{ cm}$

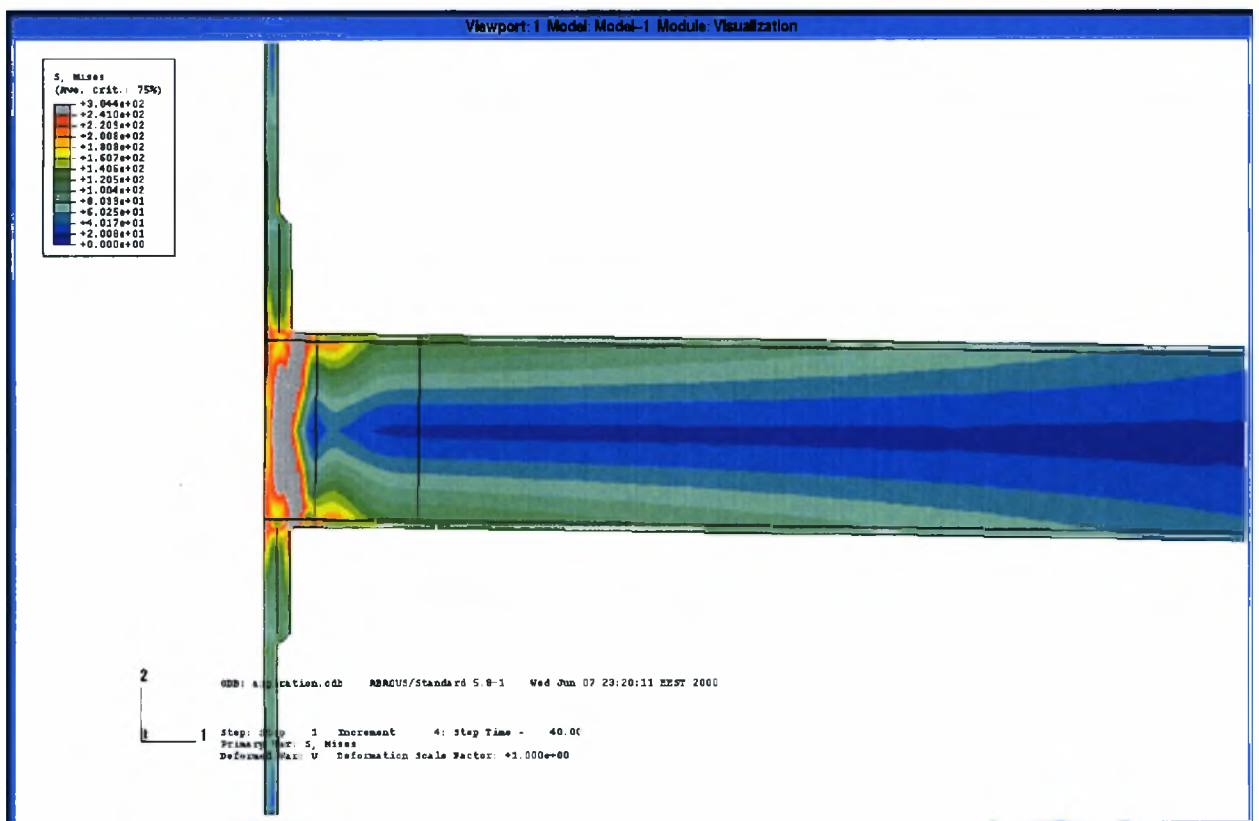


Σχήμα 2.22 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 3\text{cm}$

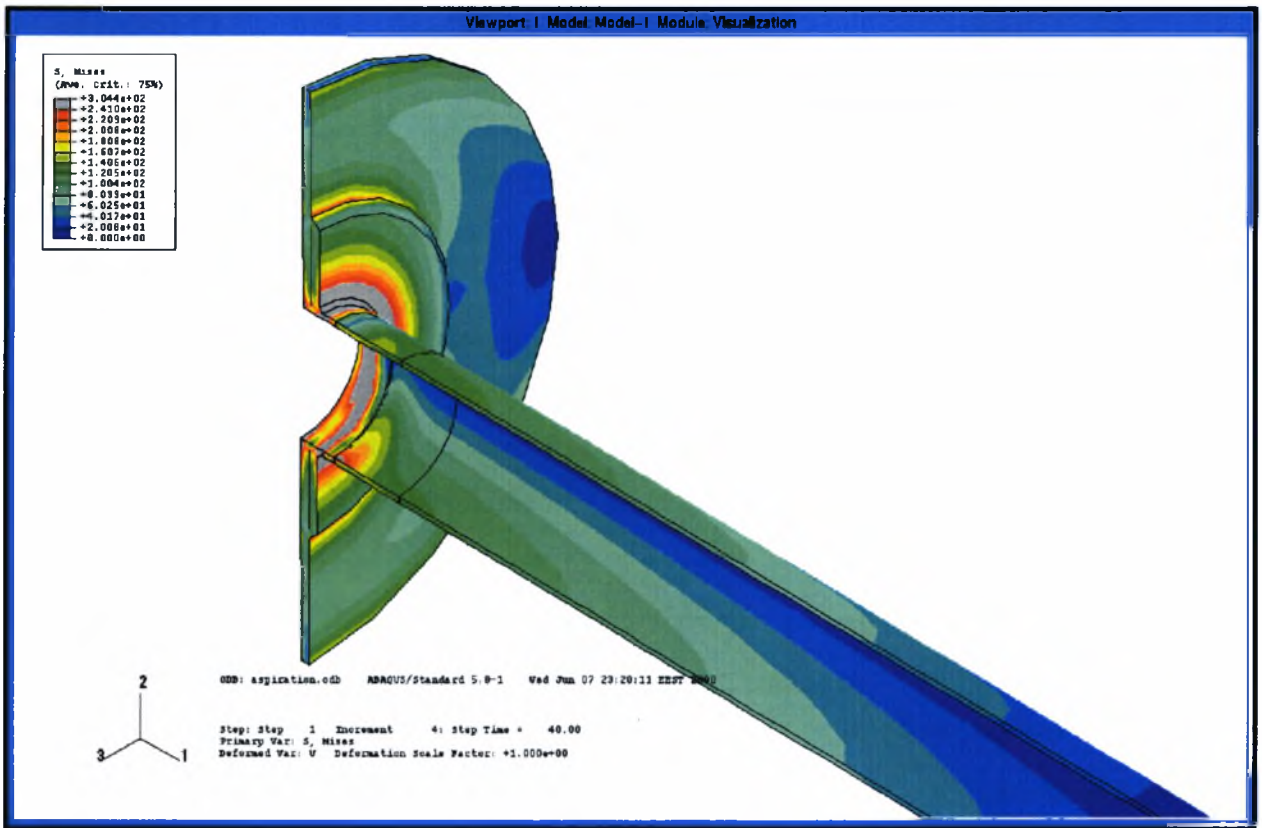


Σχήμα 2.23 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 3\text{cm}$

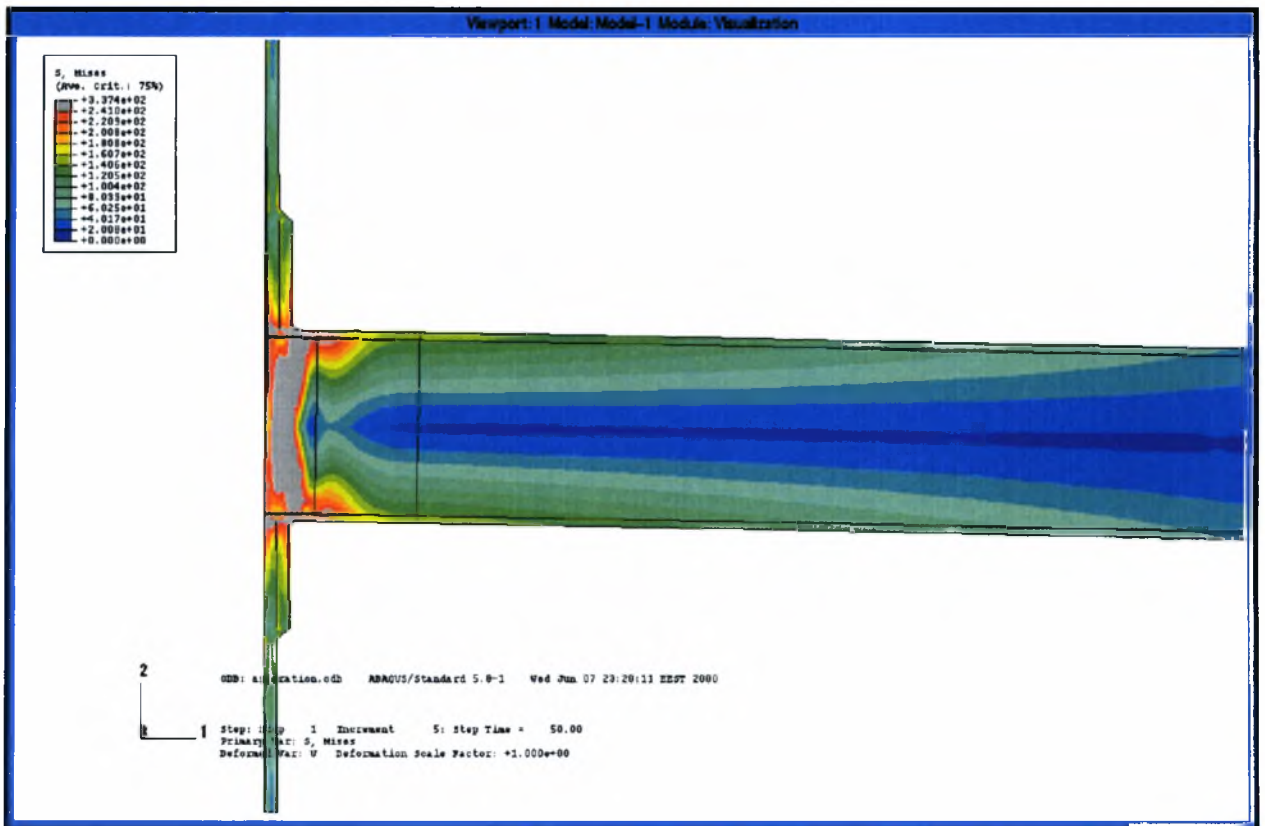
Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται: για $u = 4$ cm στα Σχήματα 2.24 και 2.25, για $u = 5$ cm στα Σχήματα 2.26 έως 2.27 και για $u = 6$ cm στα Σχήματα 2.28 και 2.29. Επίσης μία μετατόπιση $u = 7$ cm δίνει την εικόνα που περιγράφεται στα Σχήματα 2.30 έως 2.31, ενώ για $u = 8$ cm και $u = 9$ cm λαμβάνουμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στα Σχήματα 2.32 έως 2.34, αντίστοιχα. Τέλος, για $u = 10$ cm οι τάσεις που αναπτύσσονται ξεπερνούν το όριο θραύσης, Σχήμα 2.35.



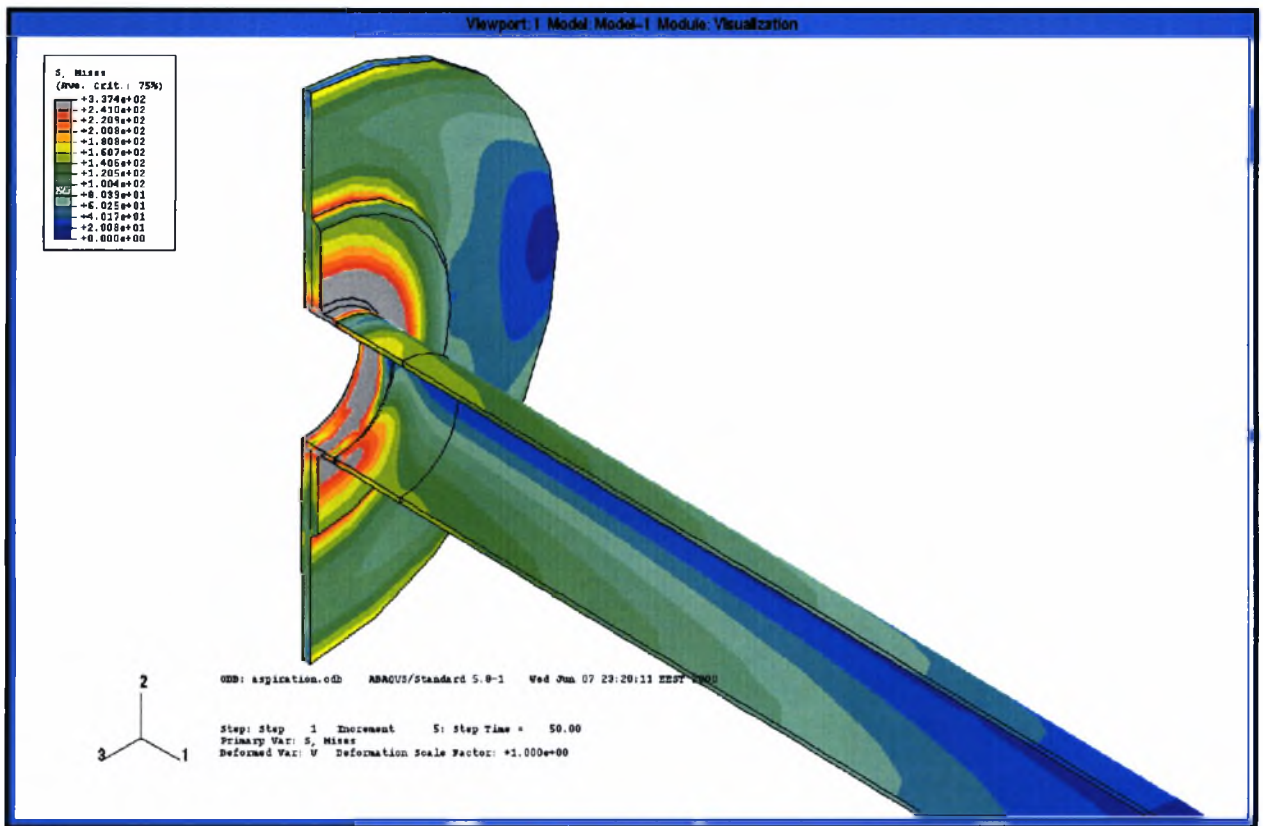
Σχήμα 2.24 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 4$ cm



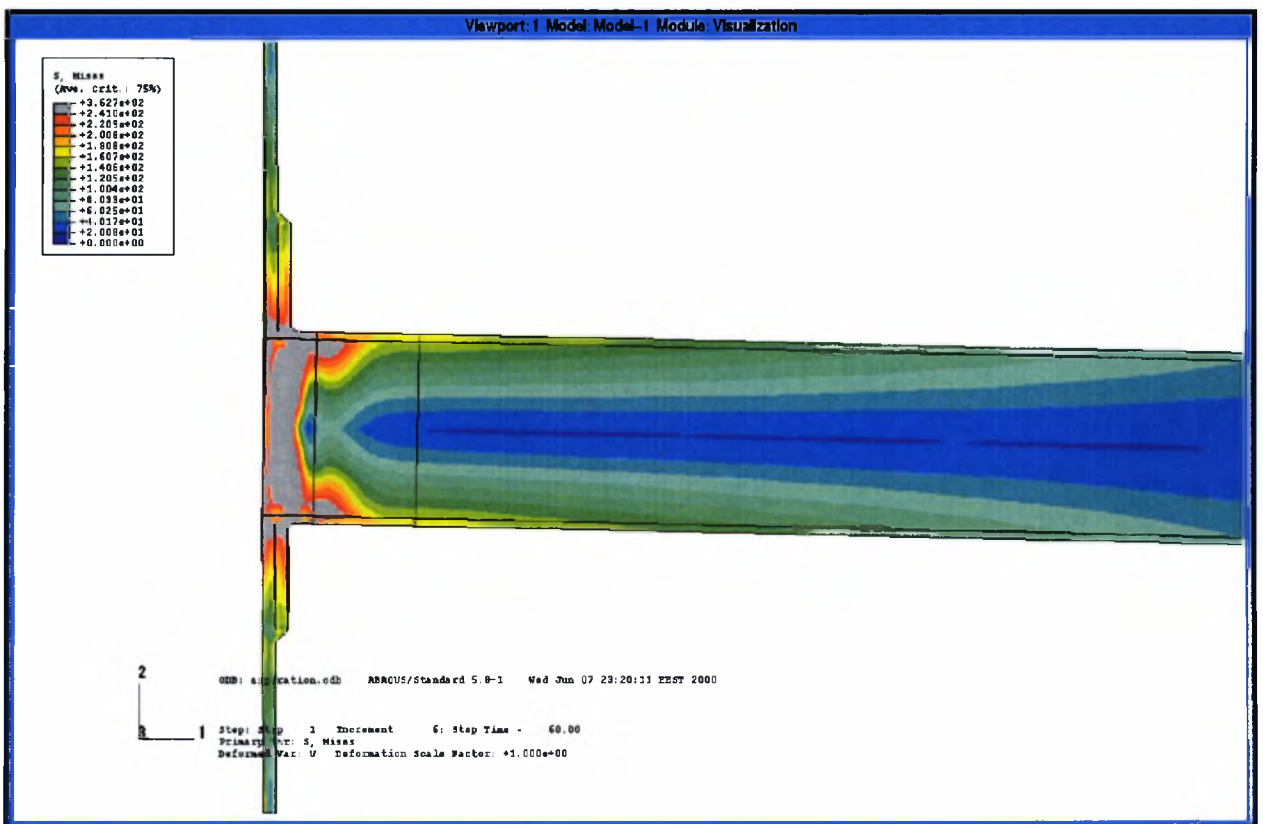
Σχήμα 2.25 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 4$ cm



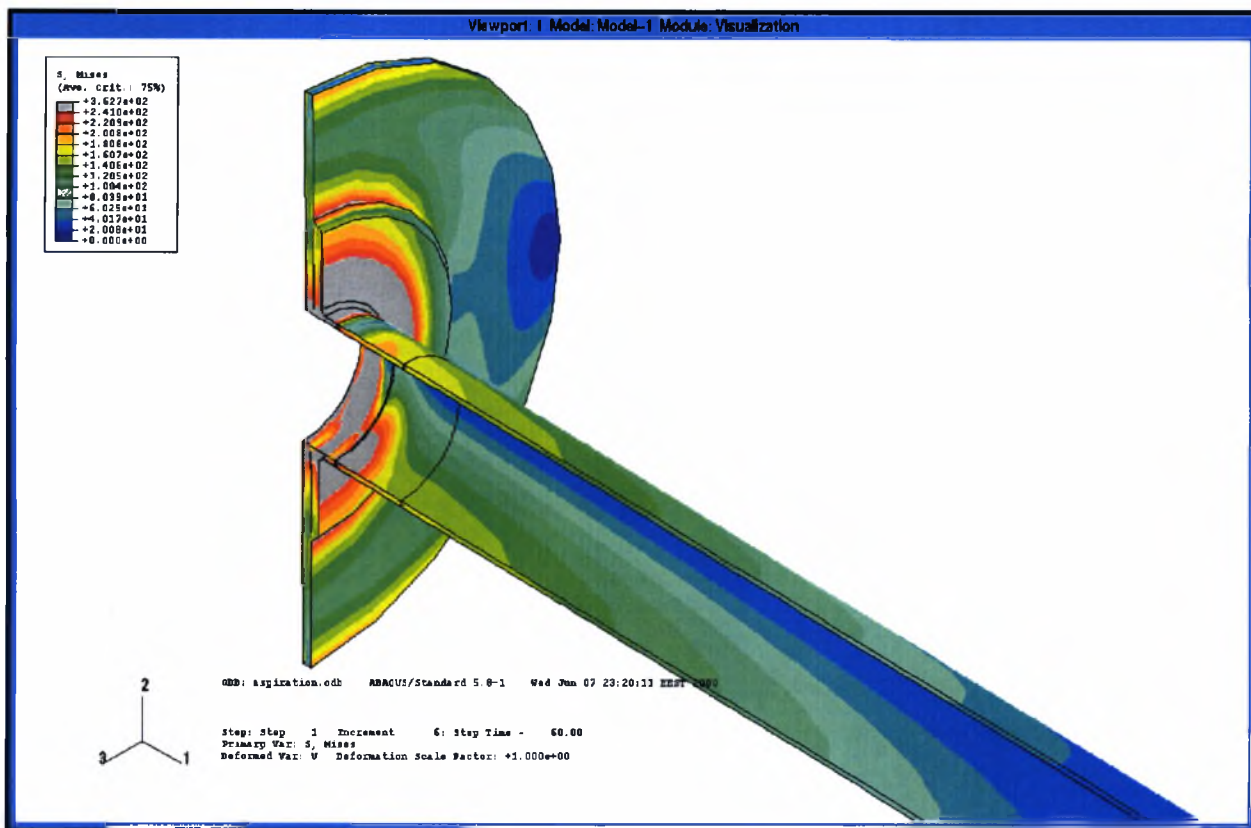
Σχήμα 2.26 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 5$ cm



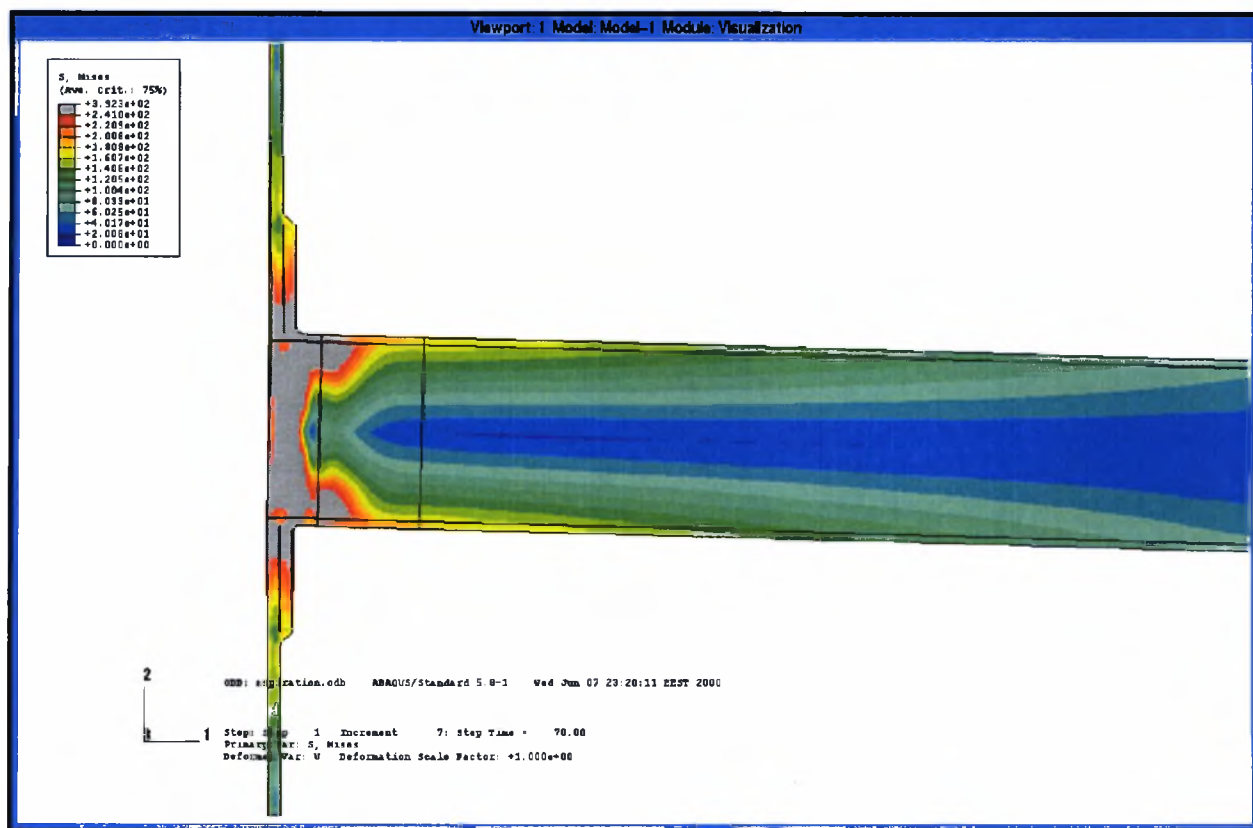
Σχήμα 2.27 Ισοΰψεις της σ_e για $u = 5$ cm



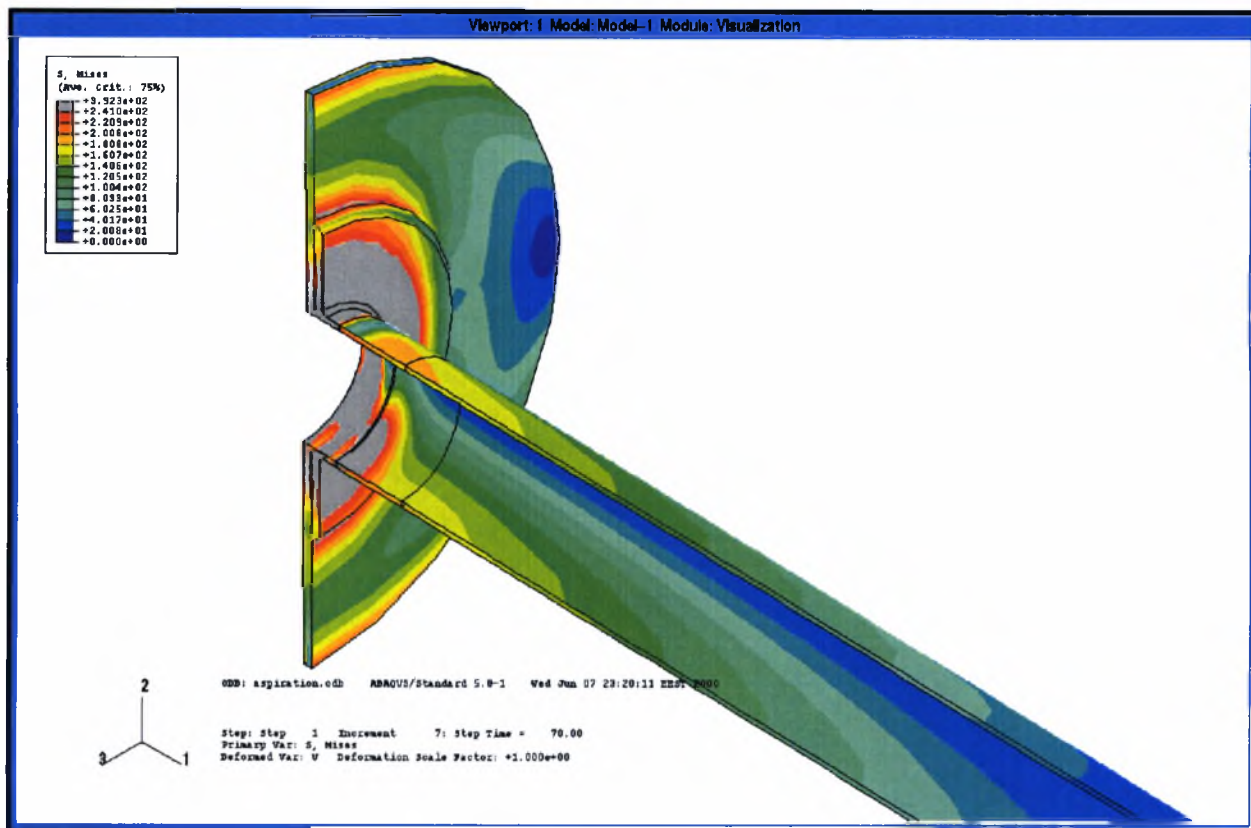
Σχήμα 2.28 Ισοΰψεις της σ_e για $u = 6$ cm



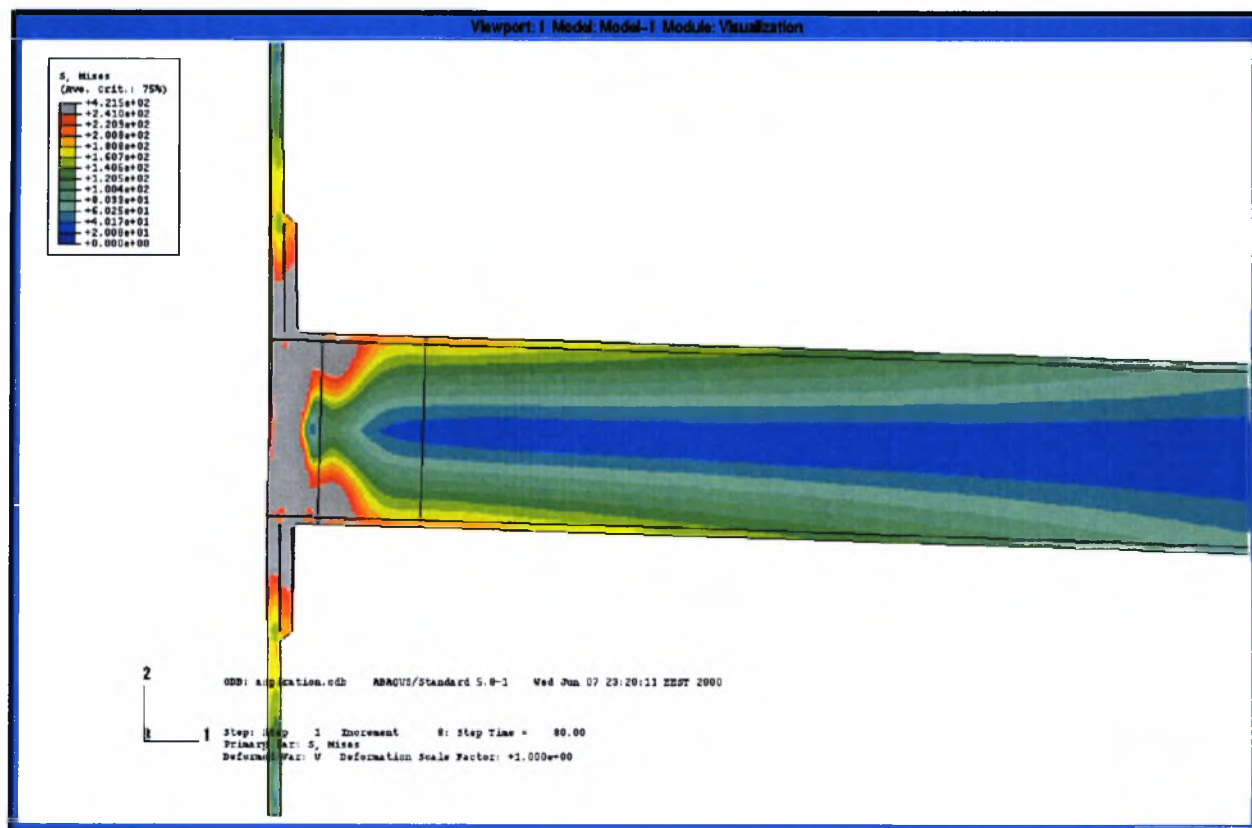
Σχήμα 2.29 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 6$ cm



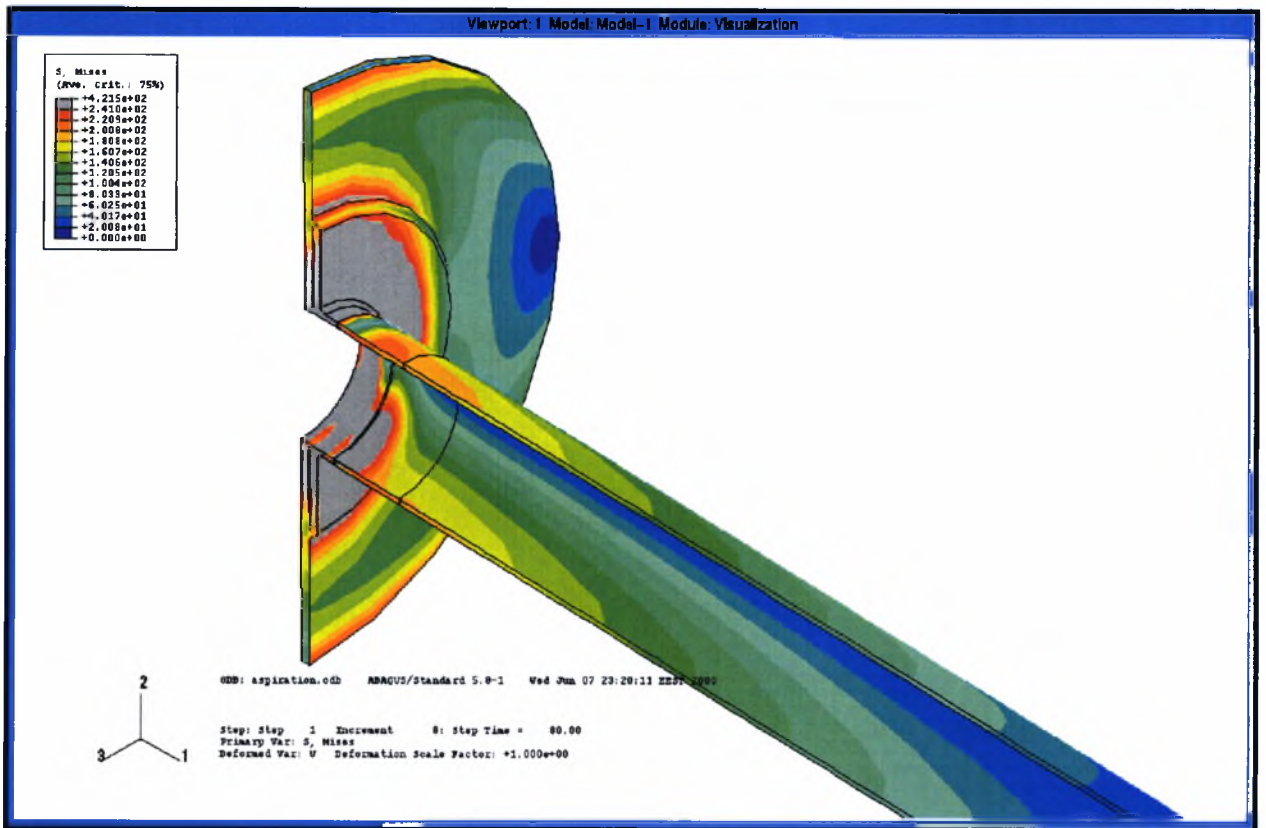
Σχήμα 2.30 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 7$ cm



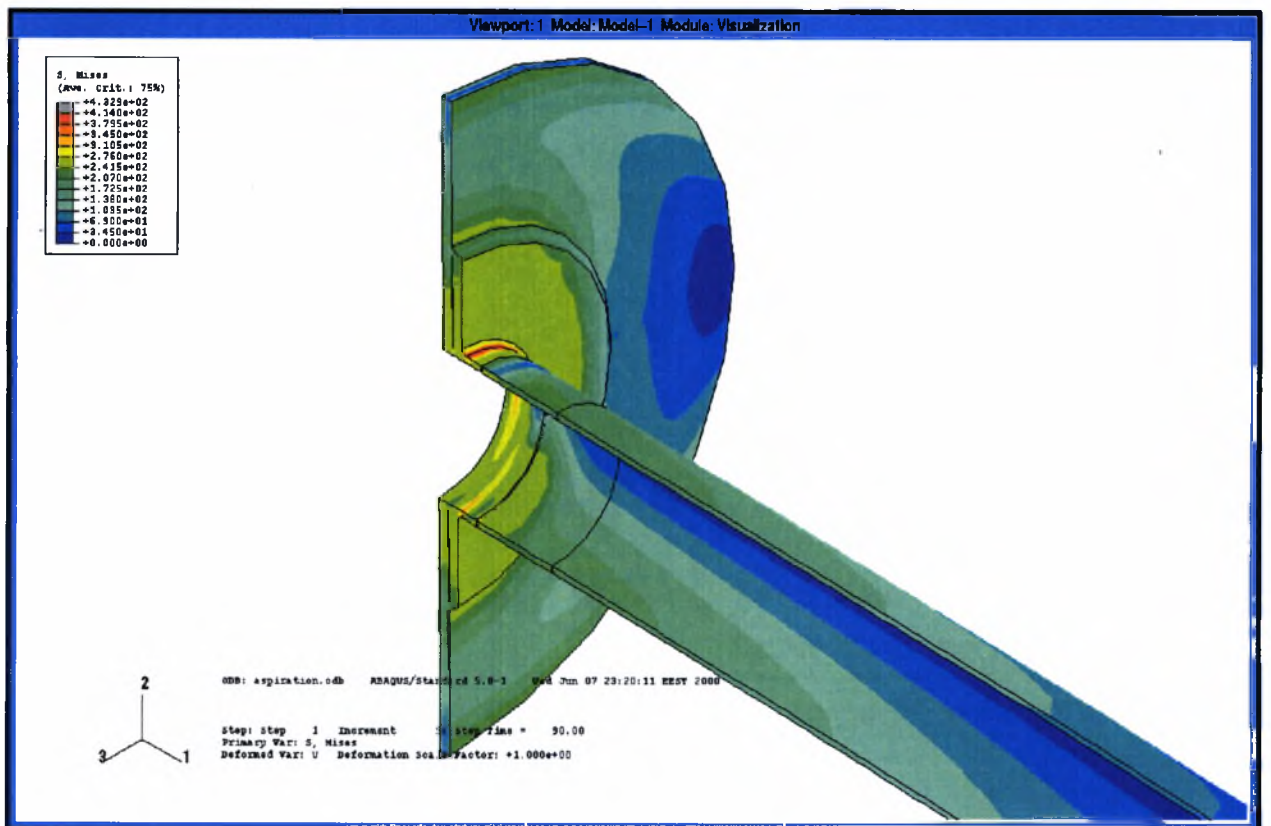
Σχήμα 2.31 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 7$ cm



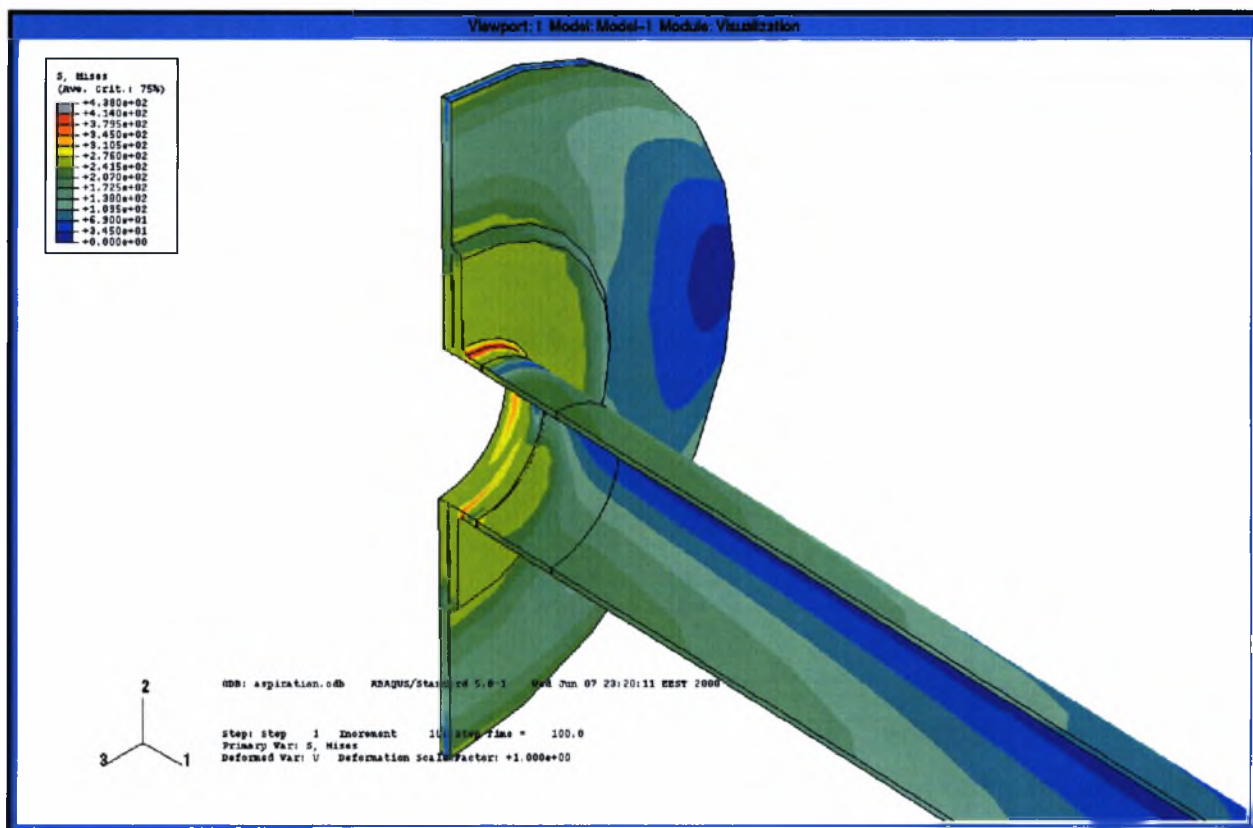
Σχήμα 2.32 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 8$ cm



Σχήμα 2.33 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 8 \text{ cm}$

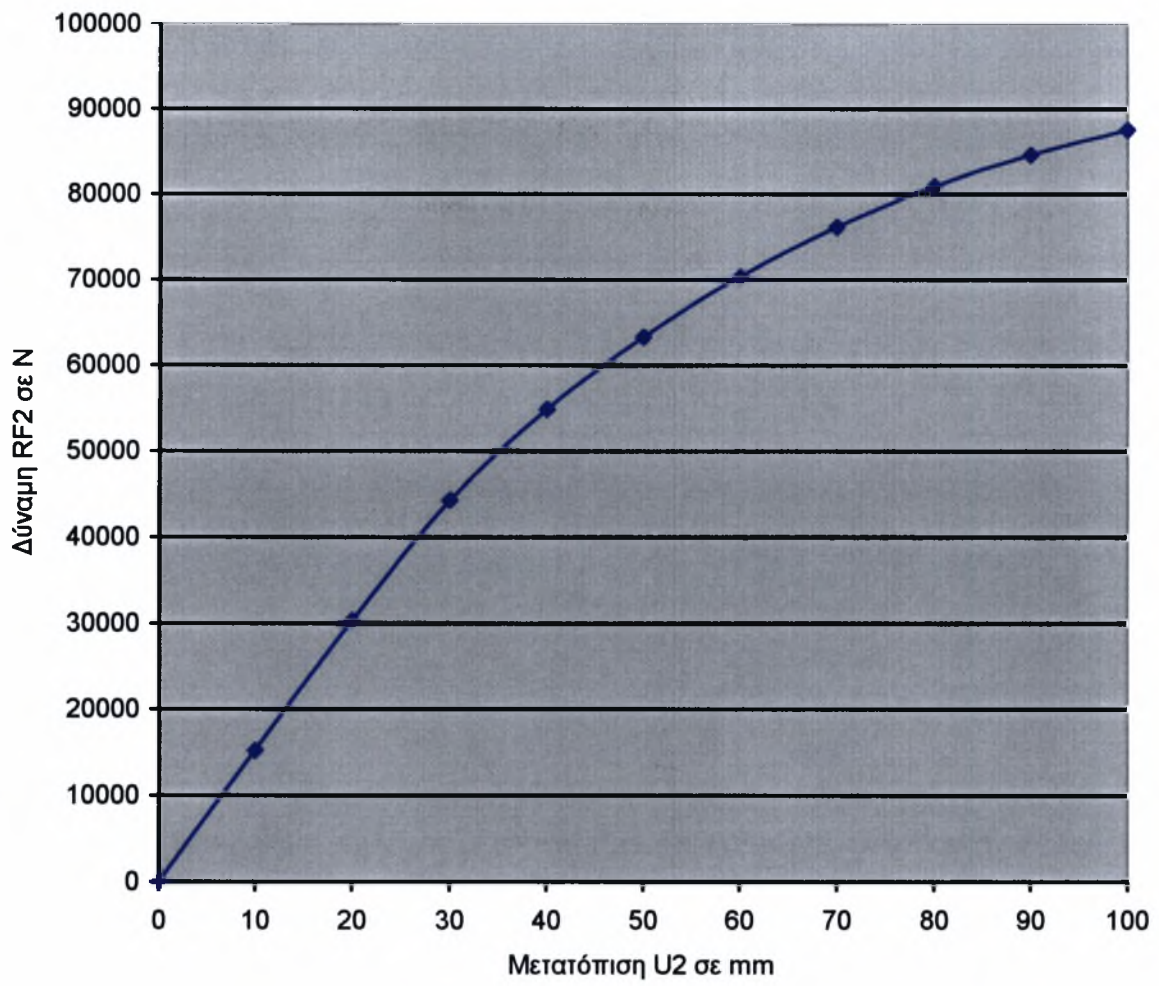


Σχήμα 2.34 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 9 \text{ cm}$



Σχήμα 2.35 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 10 \text{ cm}$

Στο Σχήμα 2.36 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης αντίδρασης RF2 σε σχέση με τη μετατόπιση U2. Η ακαμψία της κατασκευής, k_b , ορίζεται ως η κλίση του διαγράμματος RF2-U2. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα φαίνεται η μείωση της ακαμψίας της κατασκευής, αφού με την αύξηση της μετατόπισης μειώνεται η δύναμη αντίδρασης και συνεπώς και η κλίση της καμπύλης. Η αρχική ακαμψία της σύνδεσης είναι ίση με $k_b = \frac{P_{10} - P_0}{\delta_{10} - \delta_0} = 1522,8 \text{ [KN/m]}$, όπου P η δύναμη αντίδρασης και δ η μετατόπιση που εφαρμόζεται στο ελεύθερο άκρο. Ο δείκτης στον παραπάνω τύπο δηλώνει το βήμα της μετατόπισης σε mm. Θεωρώντας ότι μία κατασκευή αστοχεί όταν η ακαμψία της φτάσει το ένα δέκατο της αρχικής της τιμής, θα μπορούσε κανείς να υποστηρίξει πως η συγκεκριμένη σύνδεση δεν αστοχεί για μια συνολική μετατόπιση 100 mm. Η τιμή της ακαμψίας για μετατόπιση 100 mm στο ελεύθερο άκρο της σωλήνωσης είναι ίση με $k_b = 293,6 \text{ [KN/m]}$. Δηλαδή είναι ίση με δύο δέκατα της αρχικής τιμής. Παρά όλα τα παραπάνω για μία μετατόπιση 100 mm τοπικά ανιχνεύονται τάσεις μεγαλύτερες από το όριο θραύσης του υλικού, οπότε η κατασκευή αστοχεί λόγω θραύσης.



Σχήμα 2.36 Διάγραμμα δύναμης αντίδρασης RF2 και μετατόπισης U2 (δρόμος ισορροπίας) για το σημείο aspiration

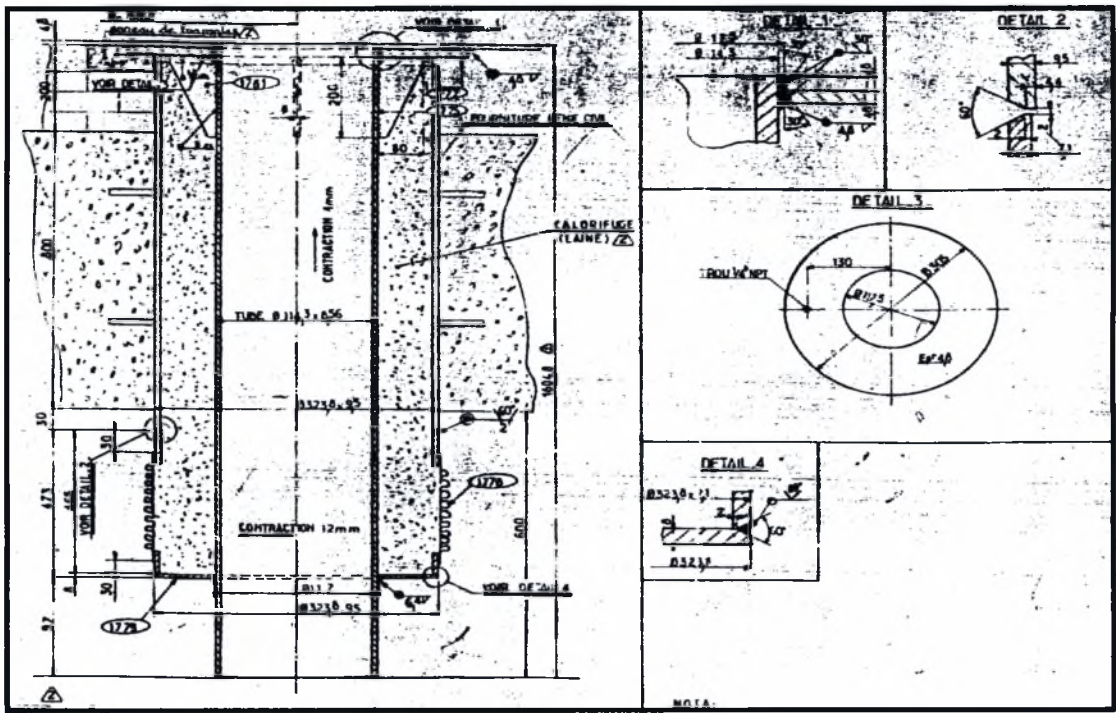
2 Σύνδεση εξυδάτωσης (drain)

Το φορτίο που επιβάλλεται στην κατασκευή είναι μία οριζόντια μετατόπιση u στο κάτω άκρο, $L=1604.8$ mm. Το πάχος της σωλήνωσης είναι 8,56 mm. Για τη μοντελοποίηση της συγκεκριμένης συνδέσεως χρησιμοποιήθηκαν 27469 κόμβοι και 19248 στοιχεία. Η ανάλυση εκτελείται αυξάνοντας σταδιακά το u με βήμα $\Delta u = 1$ mm μέχρι την τελική του τιμή. Στον Πίνακα 2.2 δίνεται ο υπολογισμός της «μέσης κλίσης» της σωλήνωσης.

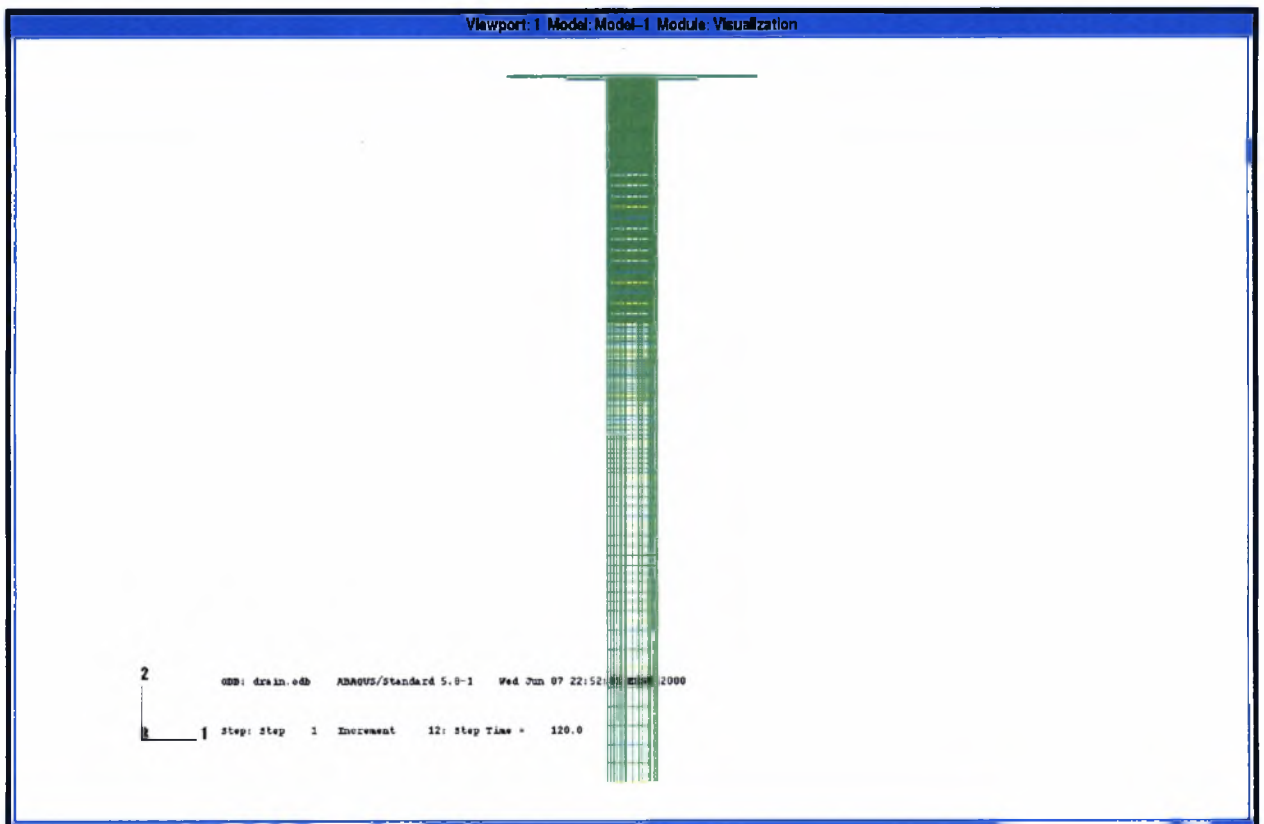
Μετατόπιση u (mm)	Γωνία φ (μοίρες)
10	0.357
20	0.714
30	1.070
40	1.427
50	1.784
60	2.141
70	2.497
80	2.853
90	3.209
100	3.565

Πίνακας 2.2

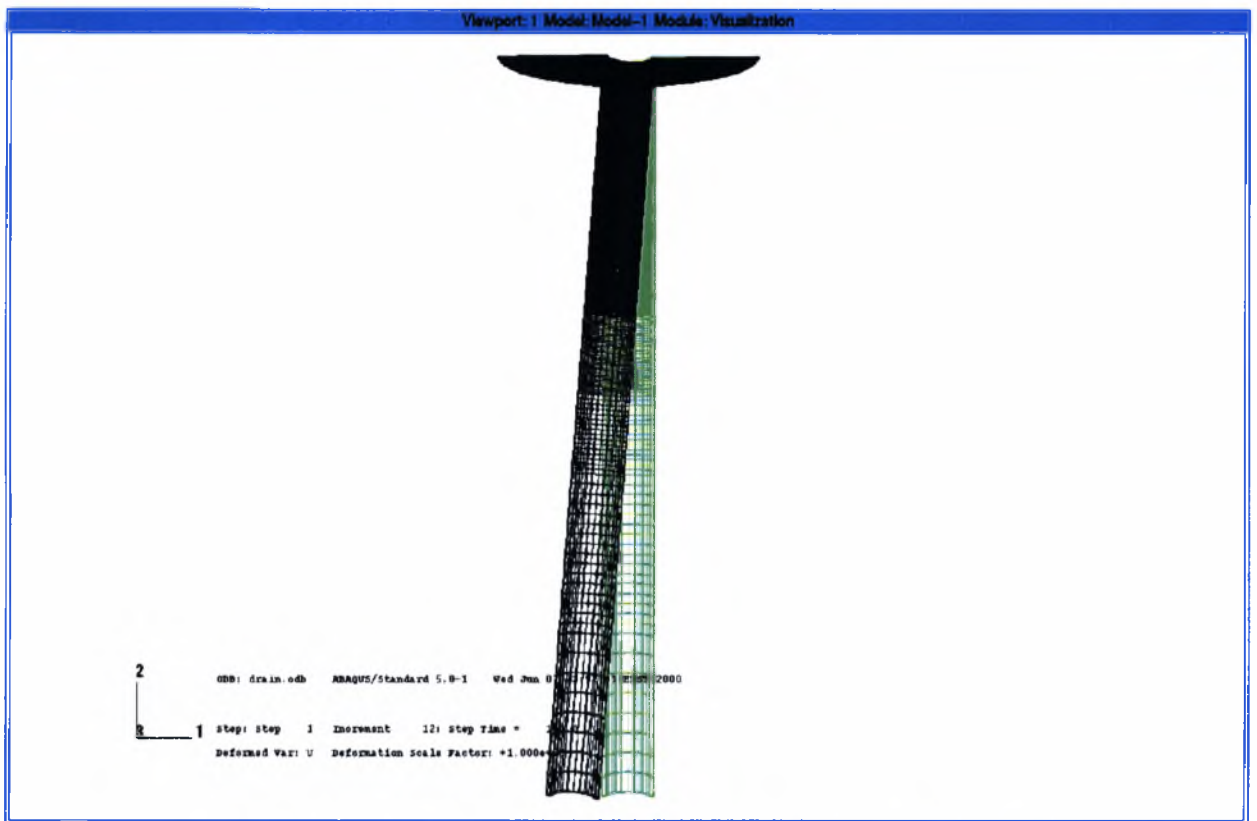
Η ανάλυση βασίζεται στο μηχανολογικό σχέδιο του Σχήματος 2.37. Ο κάνναβος που χρησιμοποιείται φαίνεται στο Σχήμα 2.38. Στο Σχήμα 2.39 φαίνεται η αρχική και η παραμορφωμένη γεωμετρία της κατασκευής για μία συνολική μετατόπιση $u = 10$ cm.



Σχήμα 2.37 Μηχανολογικό σχέδιο του σημείου Drain

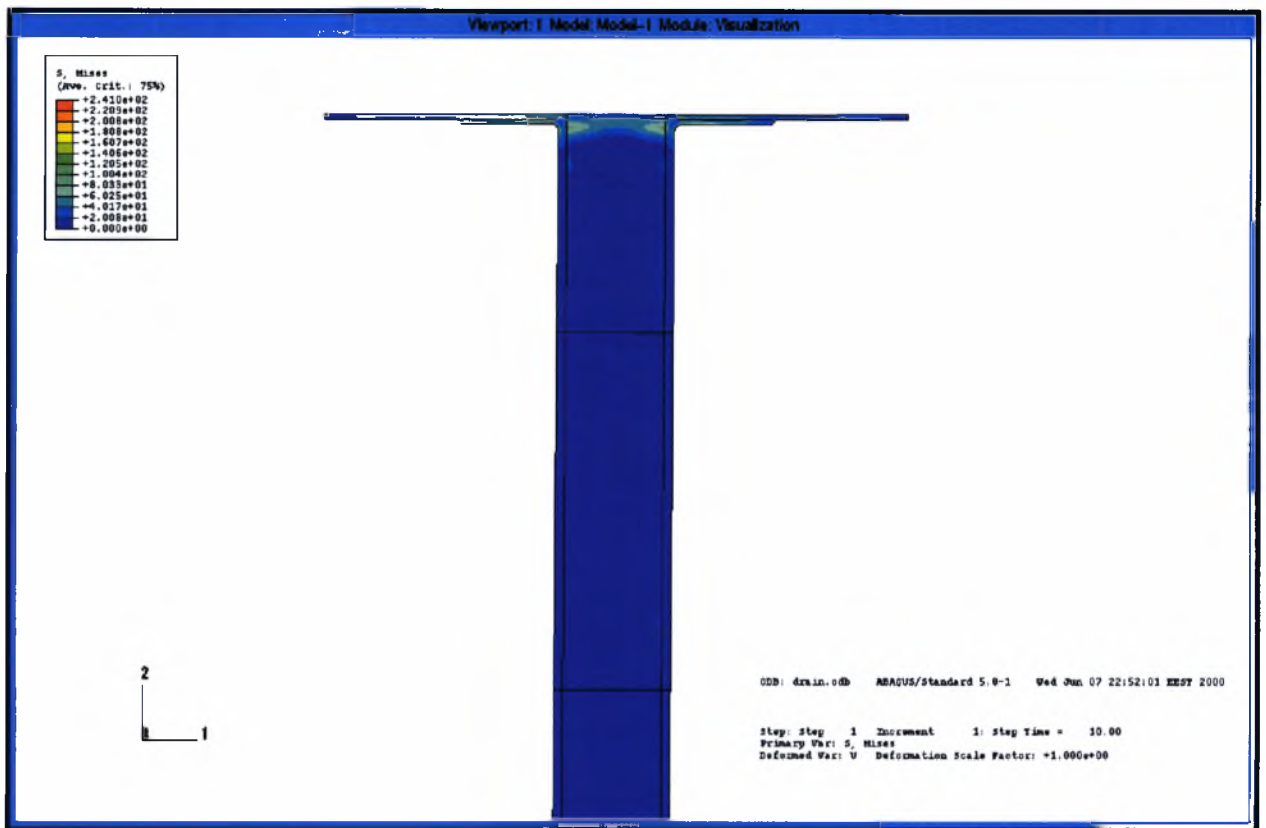


Σχήμα 2.38 Τριδιάστατος κάναβος του σημείου Drain



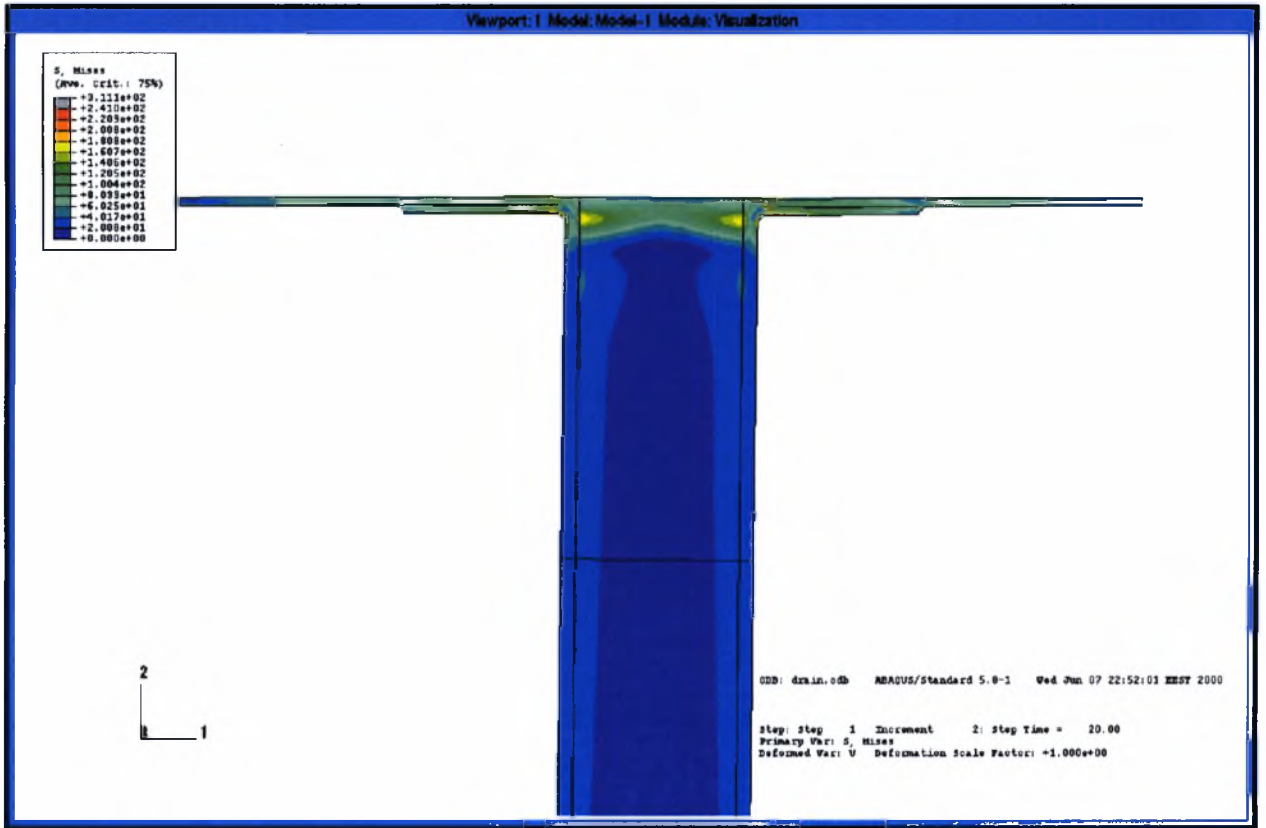
Σχήμα 2.39 Αρχική και παραμορφωμένη γεωμετρία της κατασκευής

Στο Σχήμα 2.40 δίνονται γραφικά οι ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσης του von Mises σ_e για $u=1\text{cm}$. Η σ_e παίρνει μέγιστες τιμές στα σημεία της σύνδεσης, όπου όμως παραμένει μικρότερη από το όριο διαρροής $\sigma_0 = 241\text{MPa}$ του υλικού. Για μετατόπιση $u = 1\text{ cm}$, η μέγιστη τάση που εμφανίζεται στη σύνδεση είναι 163.2 MPa . Καθώς το πρόβλημα είναι γραμμικό στην ελαστική περιοχή, η τάση τοπικά θα ξεπεράσει την τάση διαρροής για μία μετατόπιση $u = 1.47\text{ cm}$.

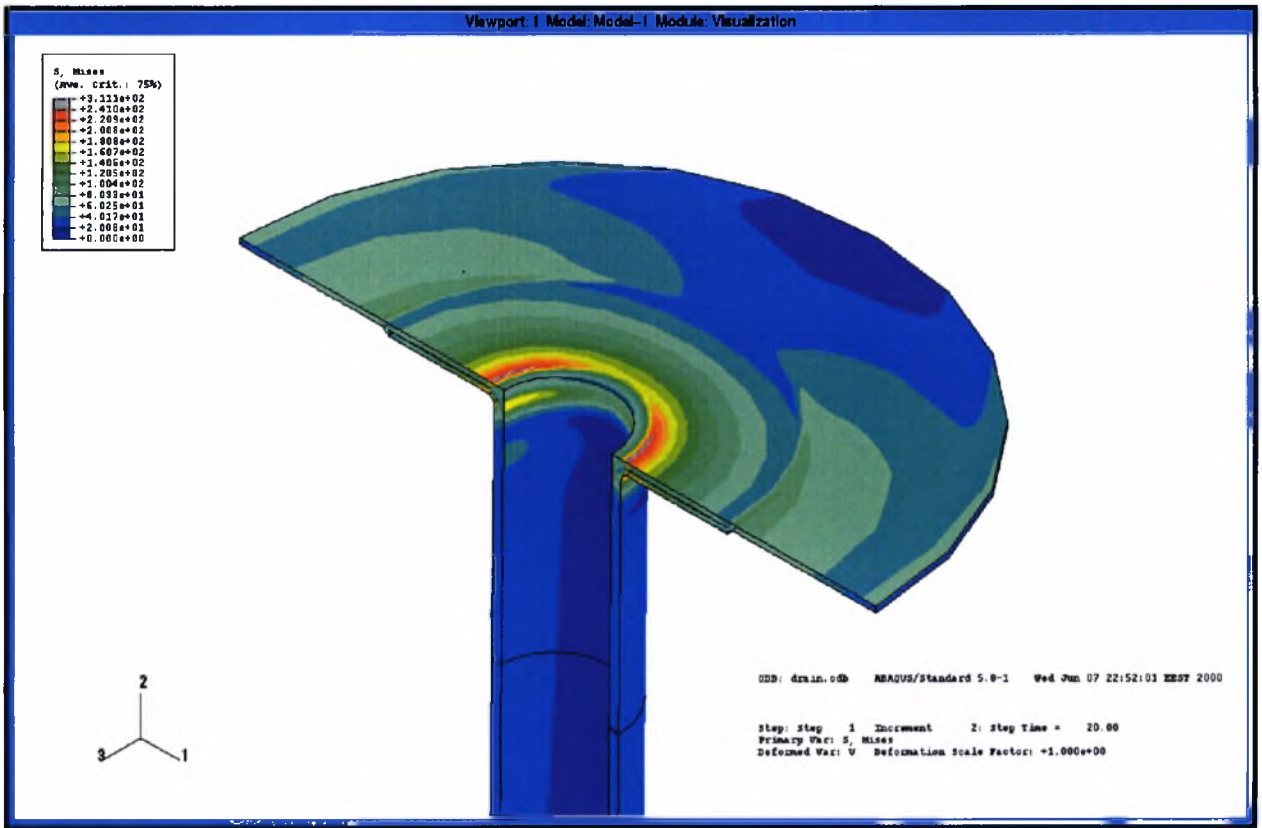


Σχήμα 2.40 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 1 \text{ cm}$

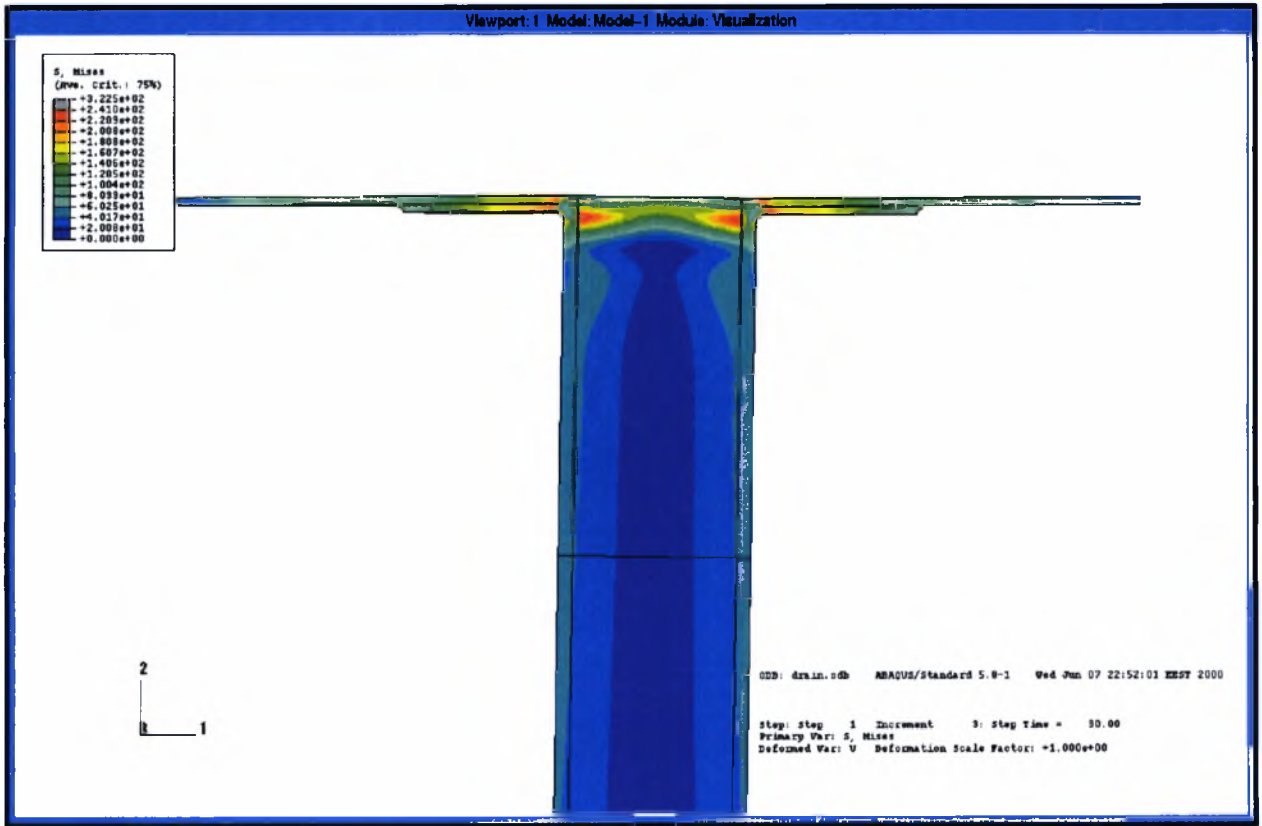
Στα Σχήματα 2.41 και 2.42 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς της σ_e για $u = 2 \text{ cm}$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.41, υπάρχουν σημεία της κατασκευής στα οποία η σ_e υπερβαίνει το όριο διαρροής και μέρος της σύνδεσης παραμορφώνεται πλαστικά. Η πλαστική ζώνη, που αντιστοιχεί στο γκρι χρώμα, εμφανίζεται στο δεξί και αριστερό μέρος της σύνδεσης και περιορίζεται μόνον σε μέρος του πάχους της δεξαμενής και του μεταλλικού ενισχυτικού δακτυλίου (Σχήμα 2.42). Αντίστοιχα αποτελέσματα για $u = 3 \text{ cm}$ φαίνονται στα Σχήματα 2.43 έως 2.44. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 2.43 και 2.44 έχουμε ισοϋψείς της σ_e . Η πλαστική ζώνη έχει τώρα εξαπλωθεί στο μεγαλύτερο τμήμα του πάχους της δεξαμενής, ενώ έχει εμφανιστεί και στη σωλήνα στην περιοχή της σύνδεσης.



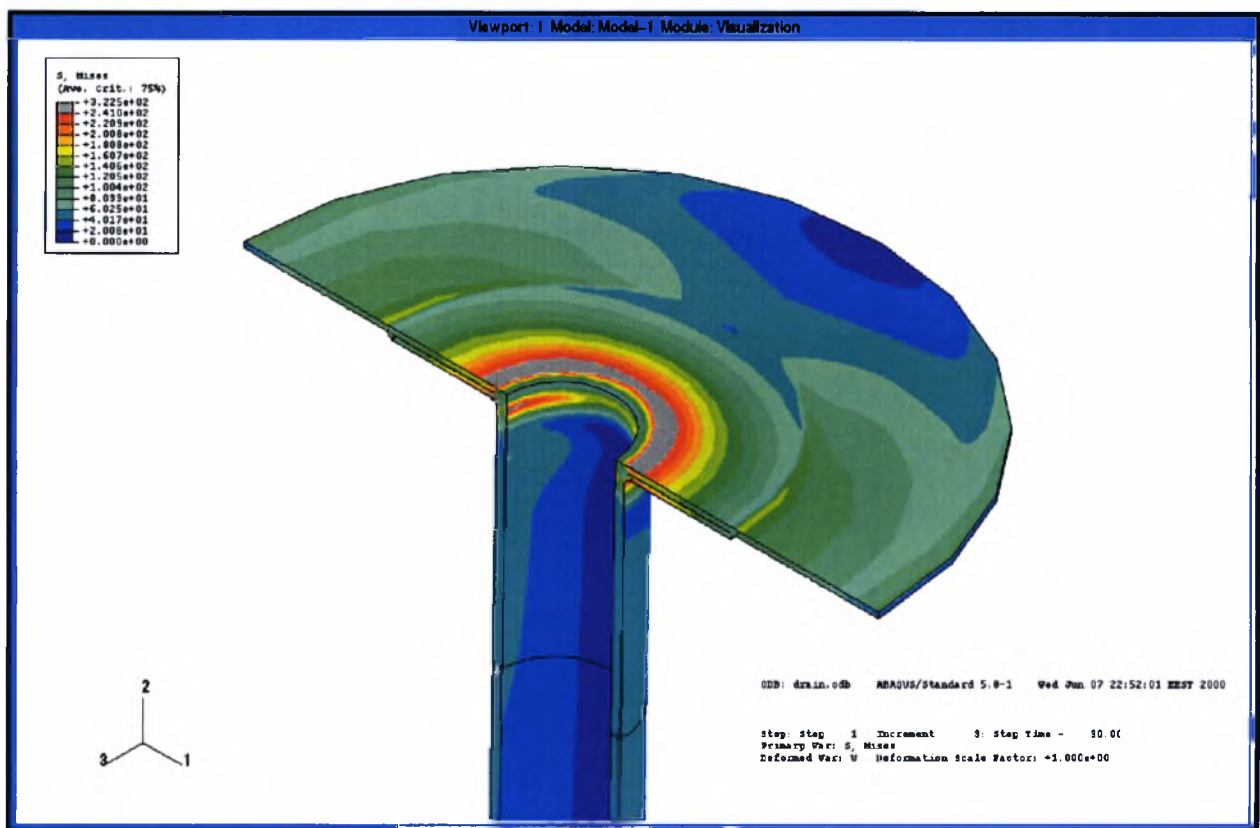
Σχήμα 2.41 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 2 \text{ cm}$



Σχήμα 2.42 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 2$ cm

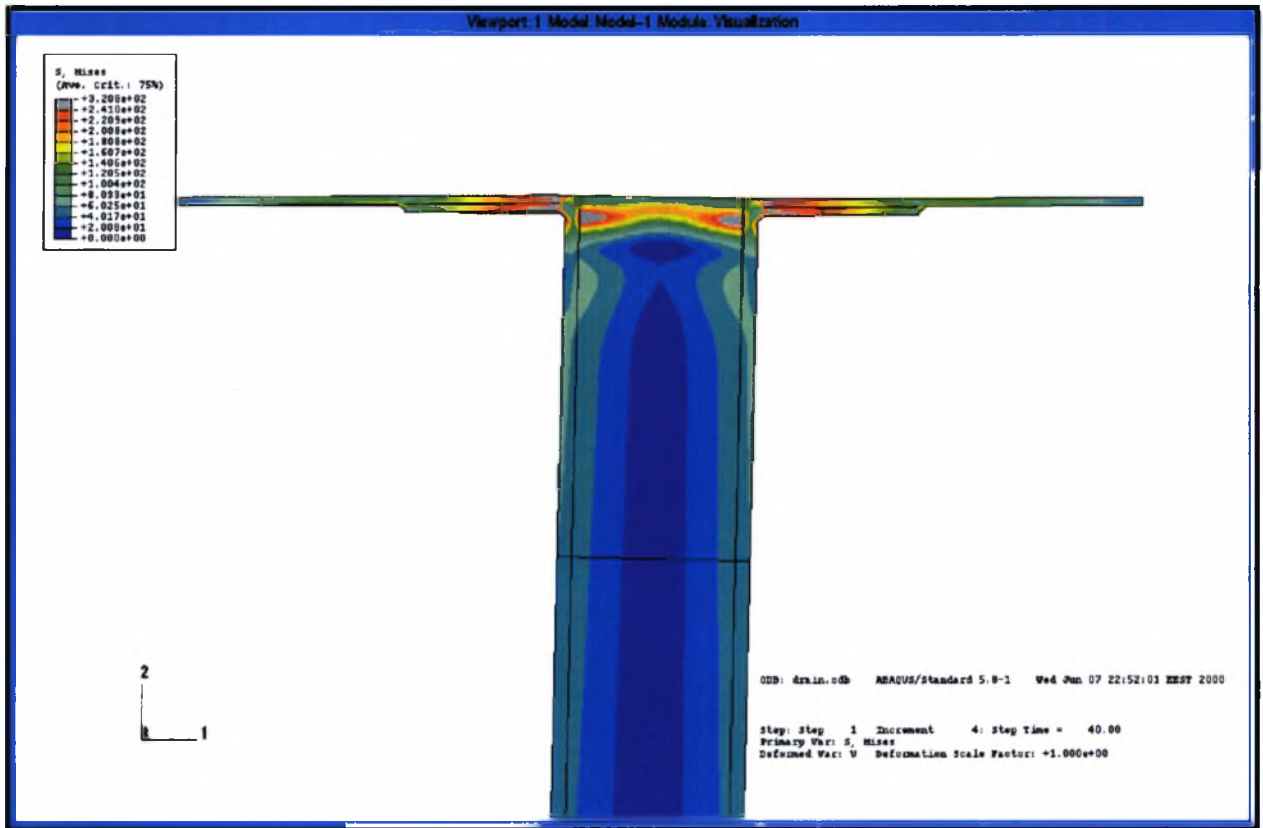


Σχήμα 2.43 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 3$ cm

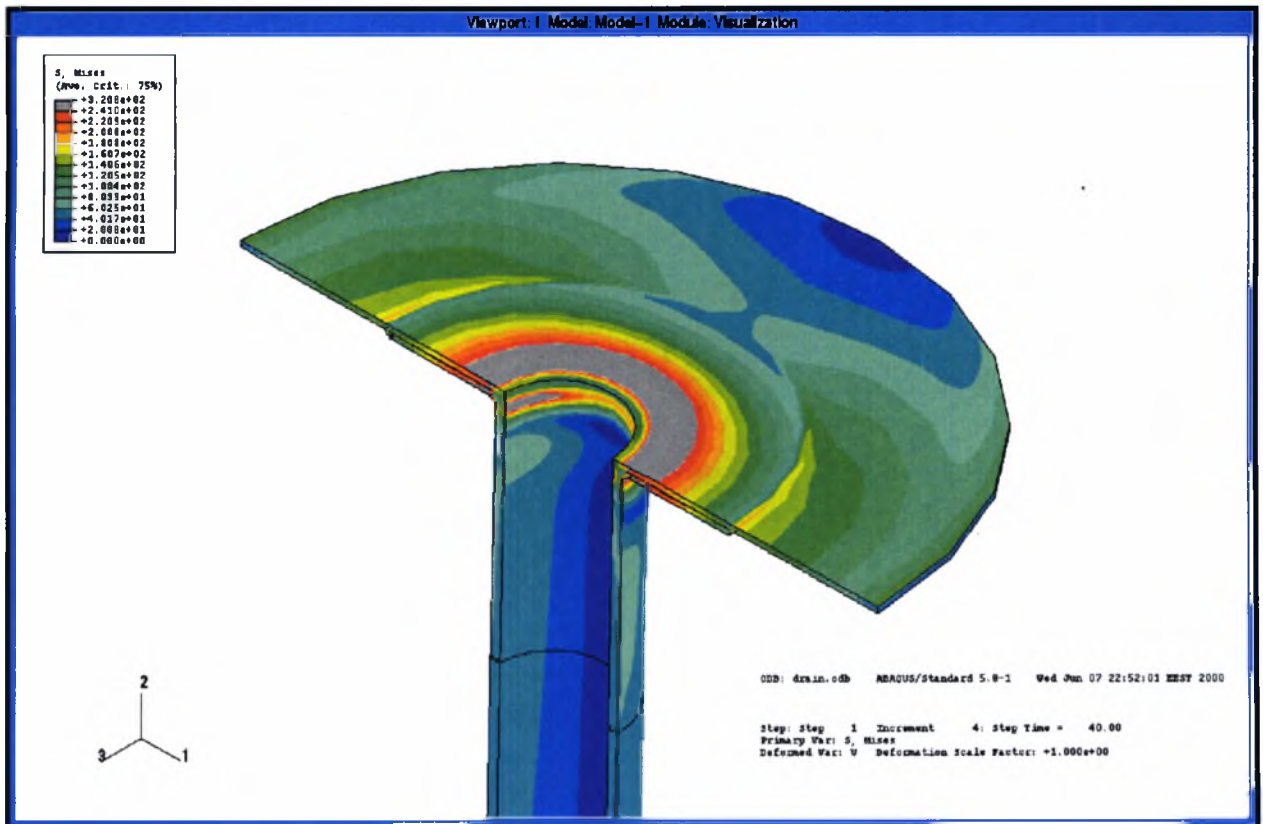


Σχήμα 2.44 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 3\text{ cm}$

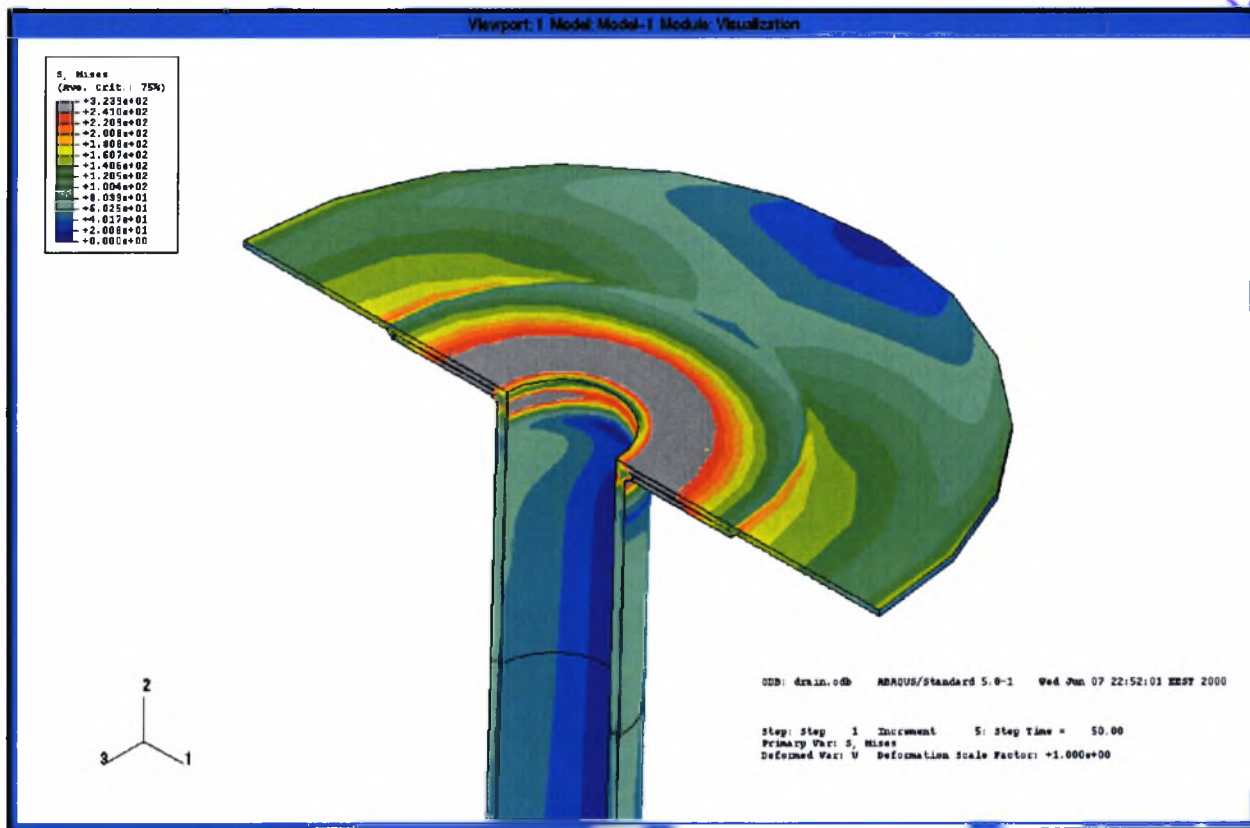
Αυξάνοντας τη μετατόπιση σε $u = 4\text{ cm}$ λαμβάνουμε τις ισοϋψείς που παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.45 έως 2.46, με την πλαστική ζώνη να εξαπλώνεται σε όλο και μεγαλύτερο μέρος της σύνδεσης. Αντίστοιχα και για $u = 5\text{ cm}$, προκύπτουν τα αποτελέσματα που αποτυπώνονται γραφικά στα Σχήματα 2.47 έως 2.48. Η πλαστική ζώνη καλύπτει τόσο το πάχος της δεξαμενής, όσο και το πάχος του ενισχυτικού δακτυλίου. Για $u = 6\text{ cm}$ οι τάσεις που ξεπερνούν το όριο διαρροής αναπτύσσονται σε όλο και μεγαλύτερη περιοχή, Σχήματα 2.49 έως 2.50. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται για $u = 7\text{ cm}$, Σχήματα 2.51 έως 2.52, για $u = 8\text{ cm}$, Σχήματα 2.53 και 2.54, και για $u = 9\text{ cm}$, Σχήματα 2.55 και 2.56. Τέλος, για $u = 10\text{ cm}$ η πλαστική ζώνη έχει εξαπλωθεί σε όλη την περιοχή της σύνδεσης, Σχήματα 2.57 έως 2.58.



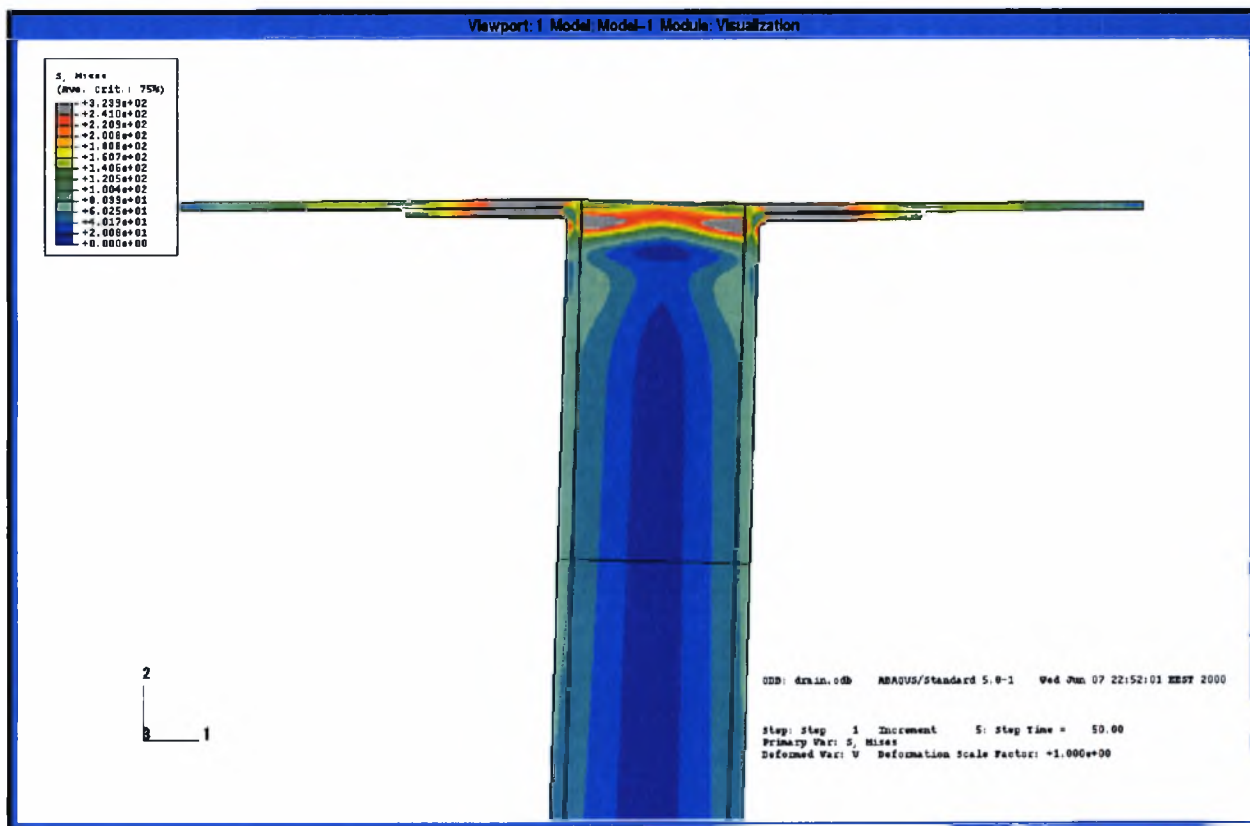
Σχήμα 2.45 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 4$ cm



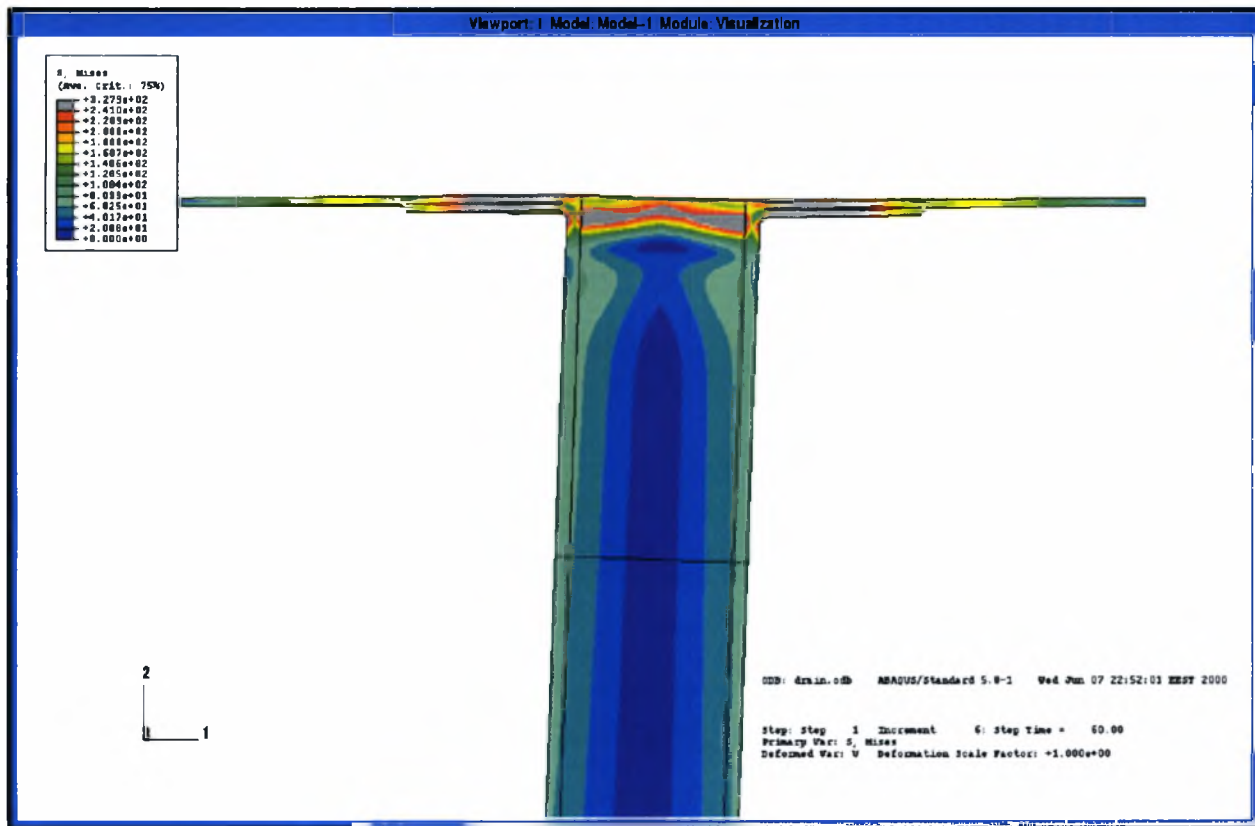
Σχήμα 2.46 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 4$ cm



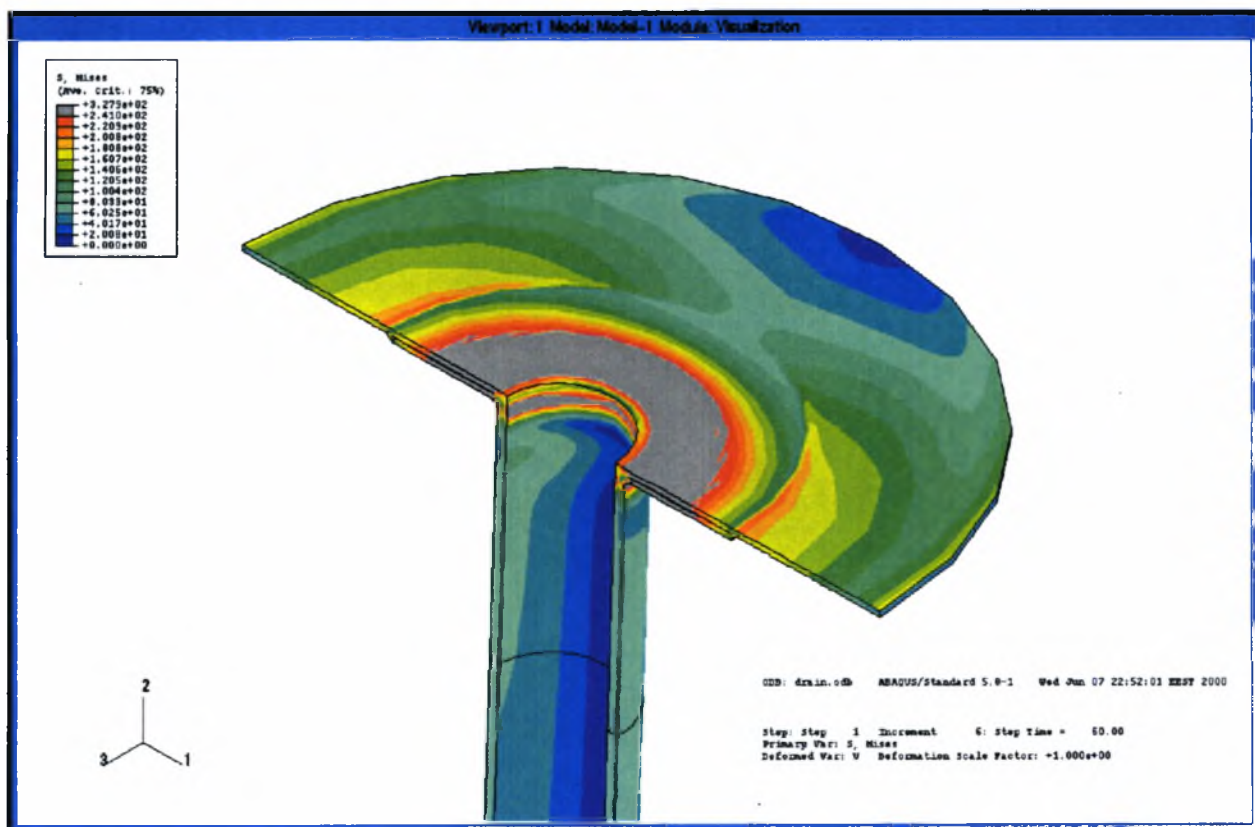
Σχήμα 2.47 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 5 \text{ cm}$



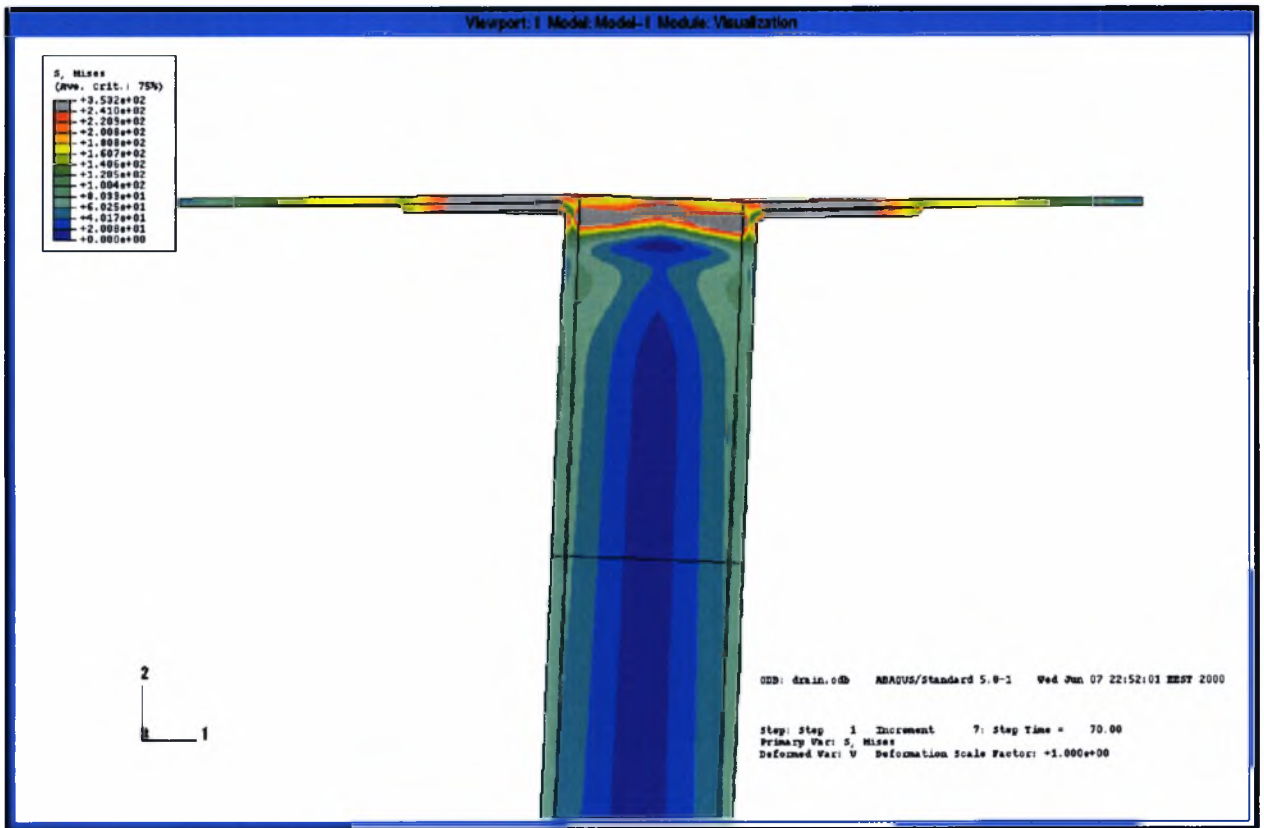
Σχήμα 2.48 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 5 \text{ cm}$



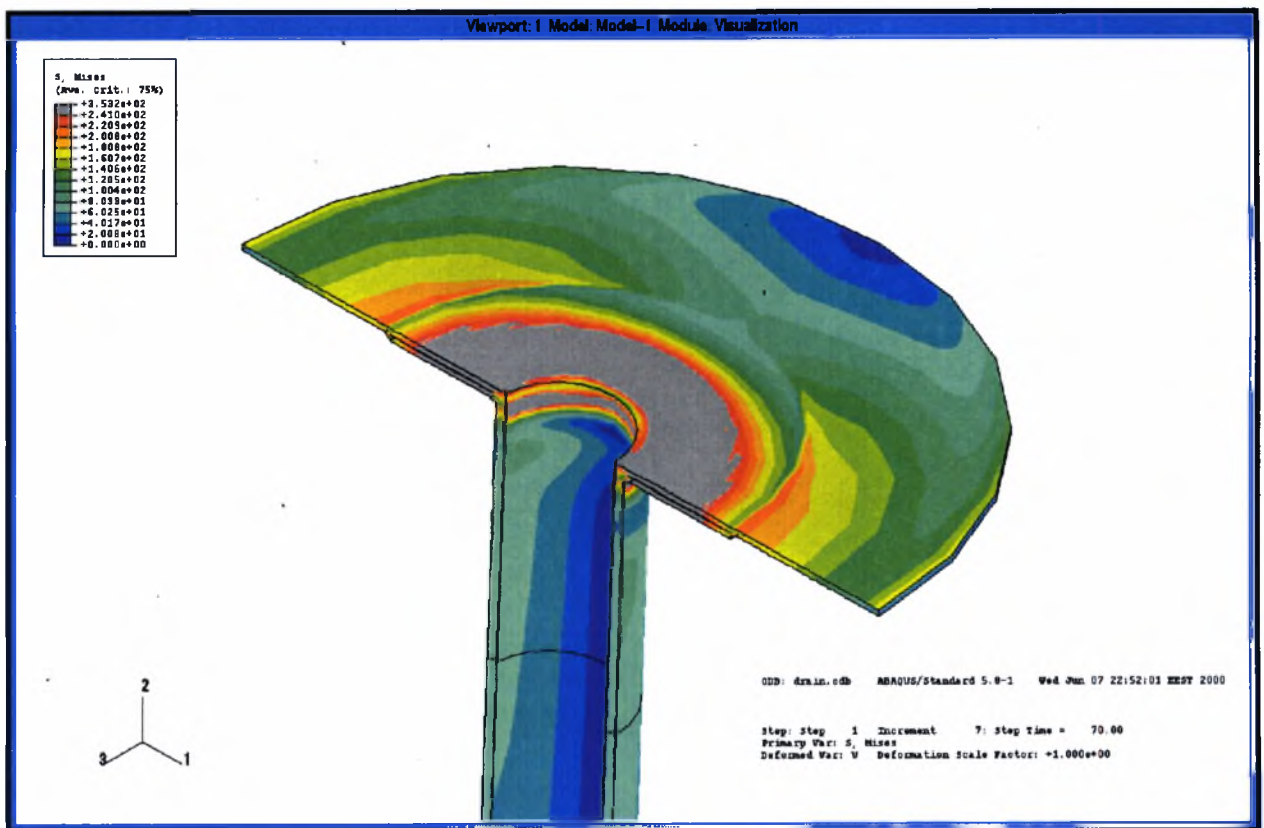
Σχήμα 2.49 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 6$ cm



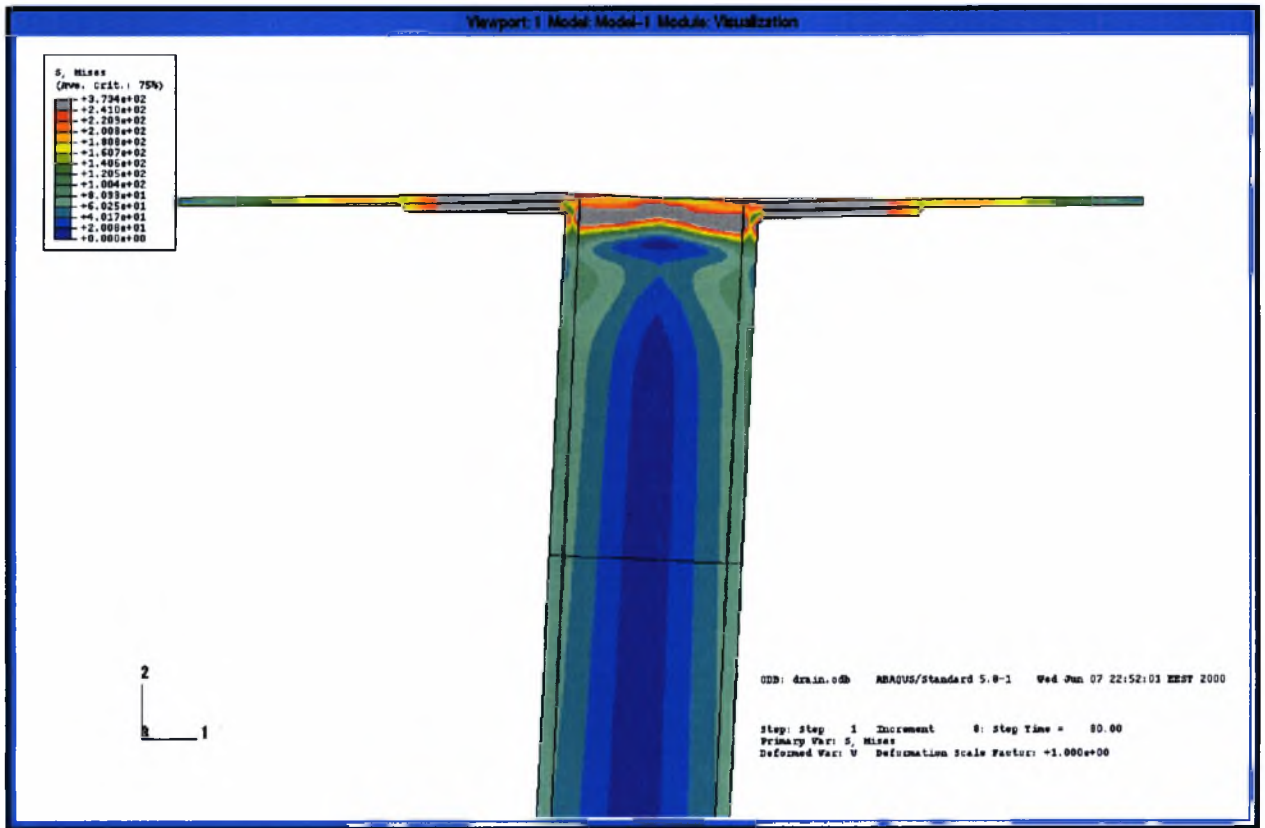
Σχήμα 2.50 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 6$ cm



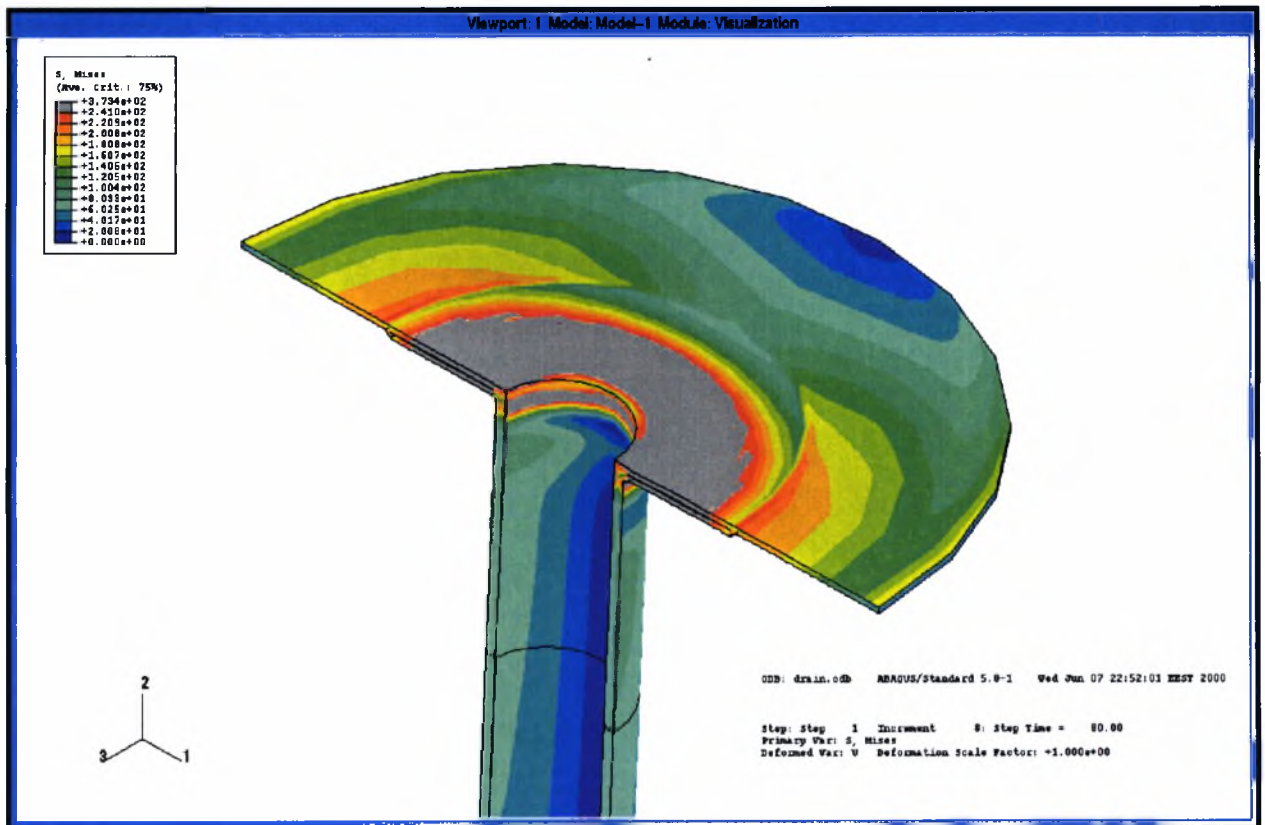
Σχήμα 2.51 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 7$ cm



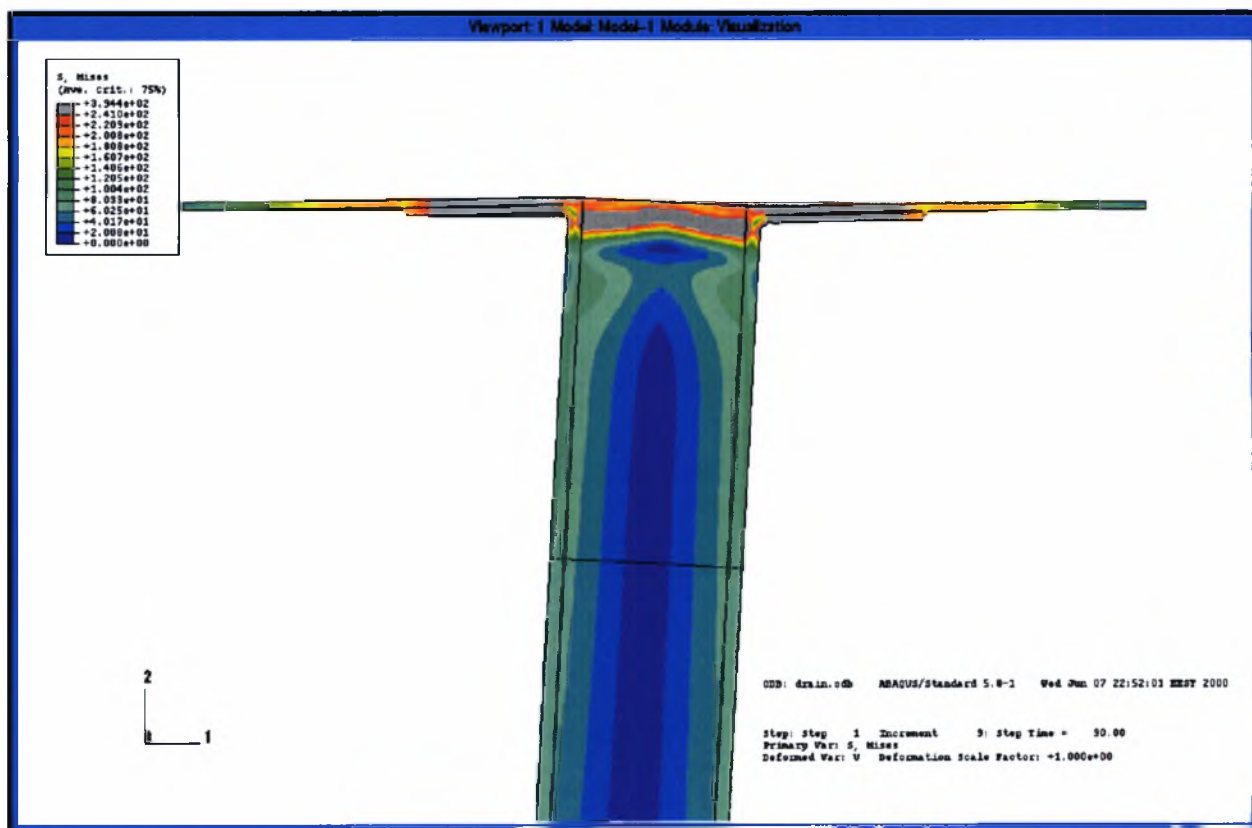
Σχήμα 2.52 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 7$ cm



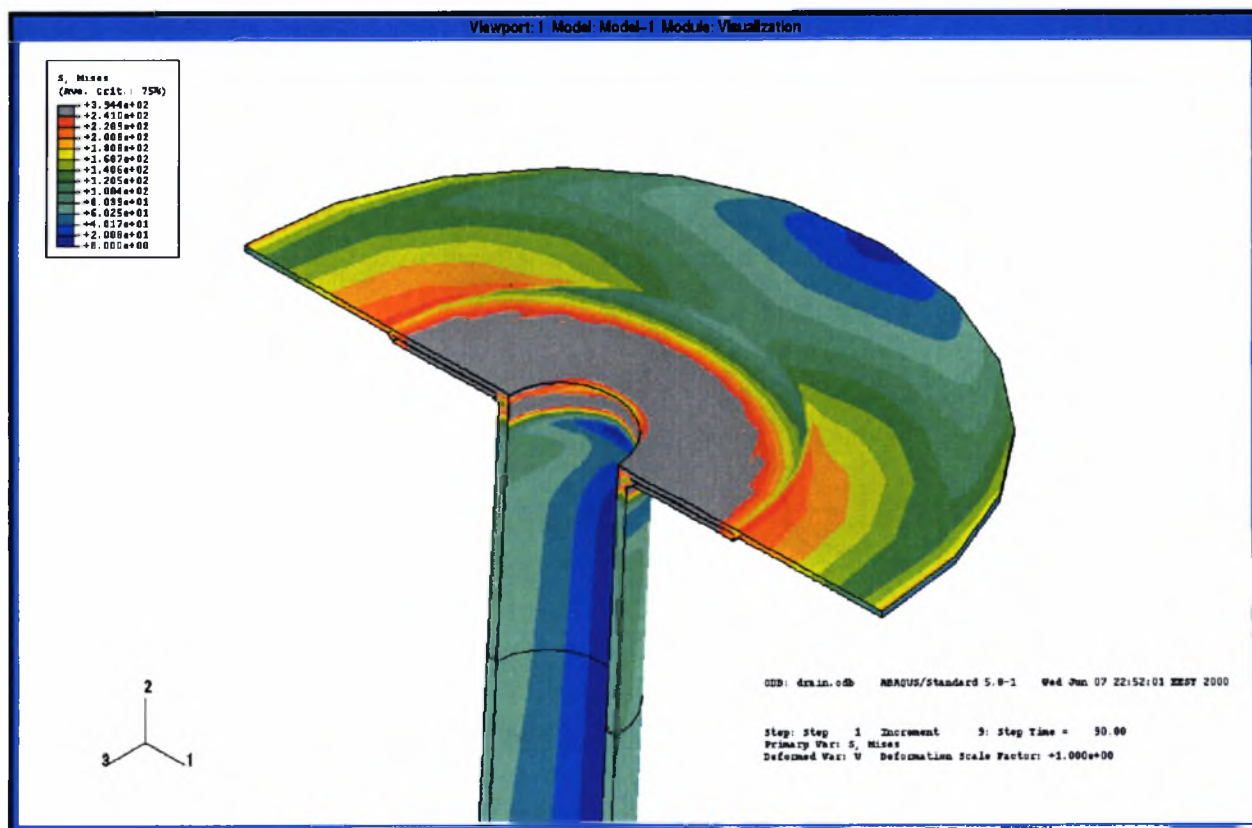
Σχήμα 2.53 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 8 \text{ cm}$



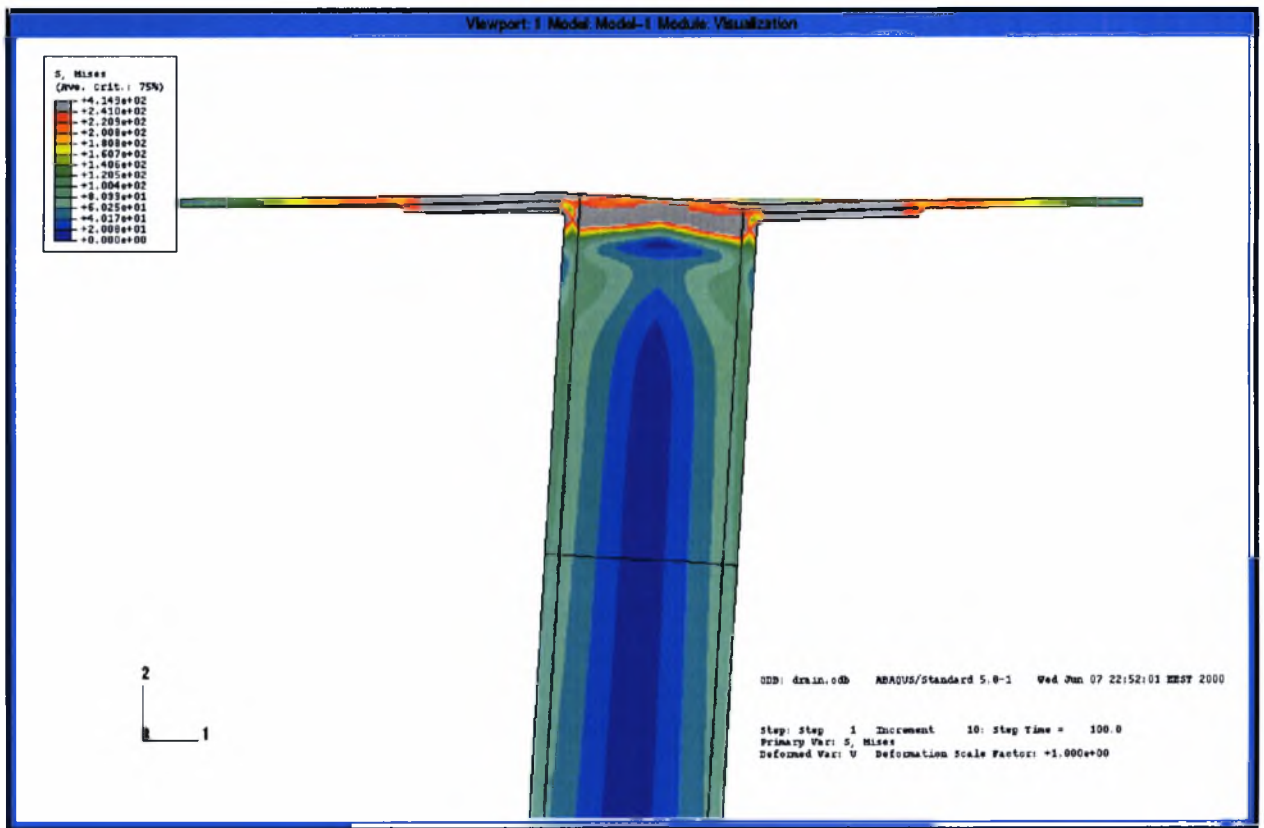
Σχήμα 2.54 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 8 \text{ cm}$



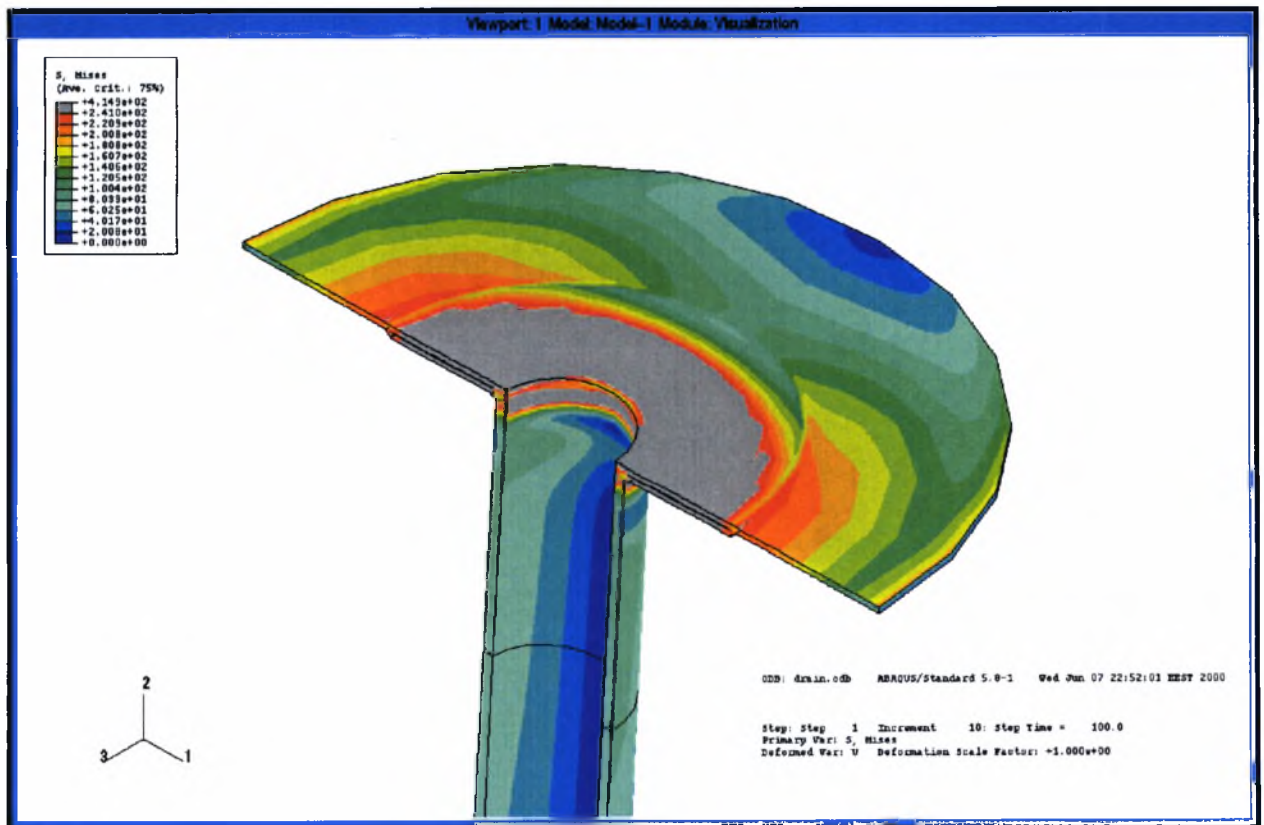
Σχήμα 2.55 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 9$ cm



Σχήμα 2.56 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 9$ cm

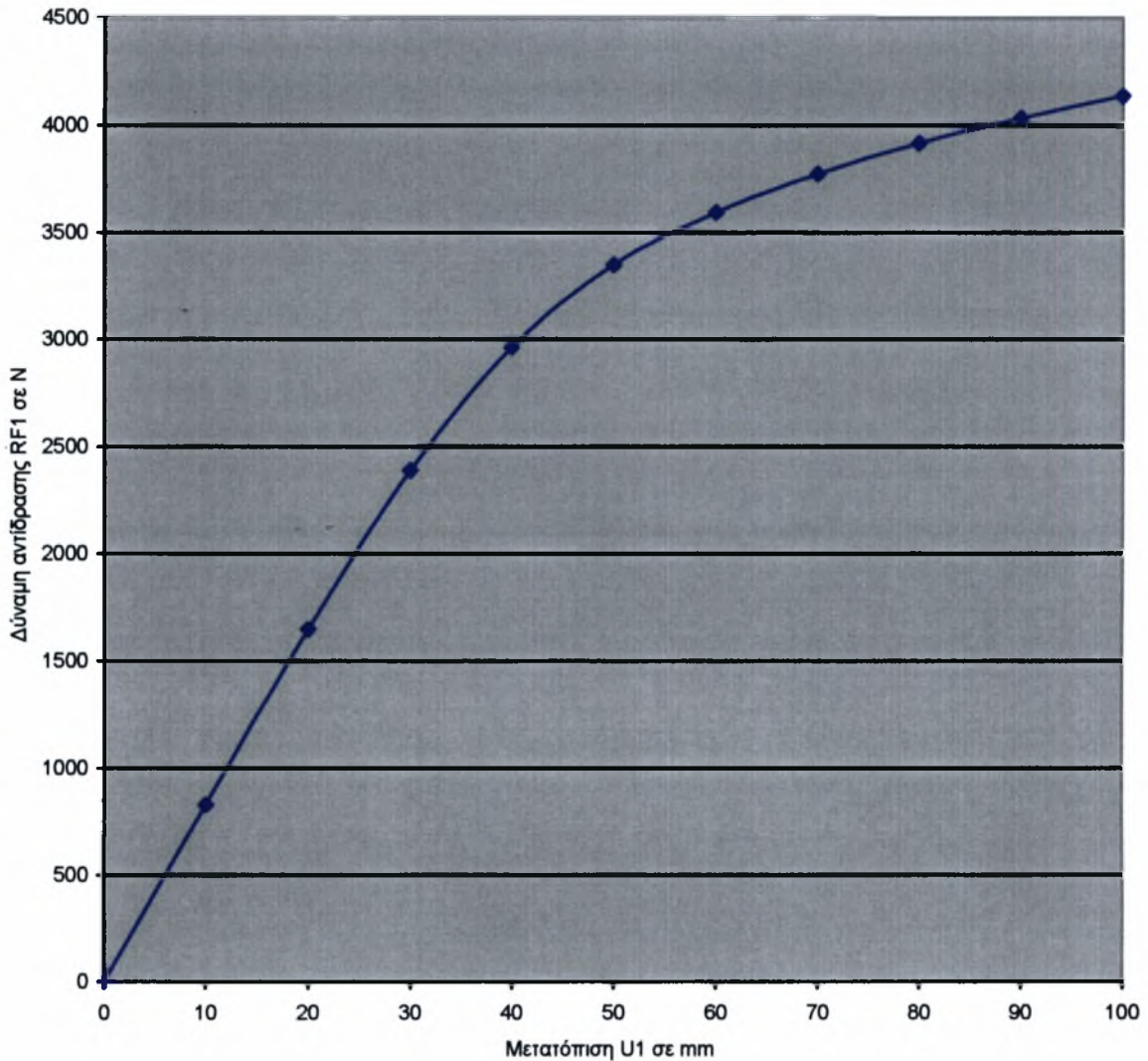


Σχήμα 2.57 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 10\text{ cm}$



Σχήμα 2.58 Ισοϋψείς της σ_e για $u = 10\text{ cm}$

Στο Σχήμα 2.59 παρουσιάζεται το διάγραμμα της δύναμης αντίδρασης RF1 και της μετατόπισης U1.



Σχήμα 2.59 Διάγραμμα δύναμης αντίδρασης RF1 και μετατόπισης U1 για το σημείο Drain

Η αρχική τιμή της ακαμψίας είναι $k_b = 82,5548$ [KN/m] και της τελικής $k_b = 10,248$ [KN/m]. Η τελική τιμή της ακαμψίας είναι λίγο μεγαλύτερη από το ένα δέκατο της αρχικής της τιμής. Και σε αυτή την περίπτωση η κατασκευή αστοχεί λόγω τάσεων, που τοπικά ξεπερνούν το όριο θραύσης του υλικού για μία μετατόπιση 80 mm.

3 Σύνδεση Νο 1 στην οροφή της δεξαμενής

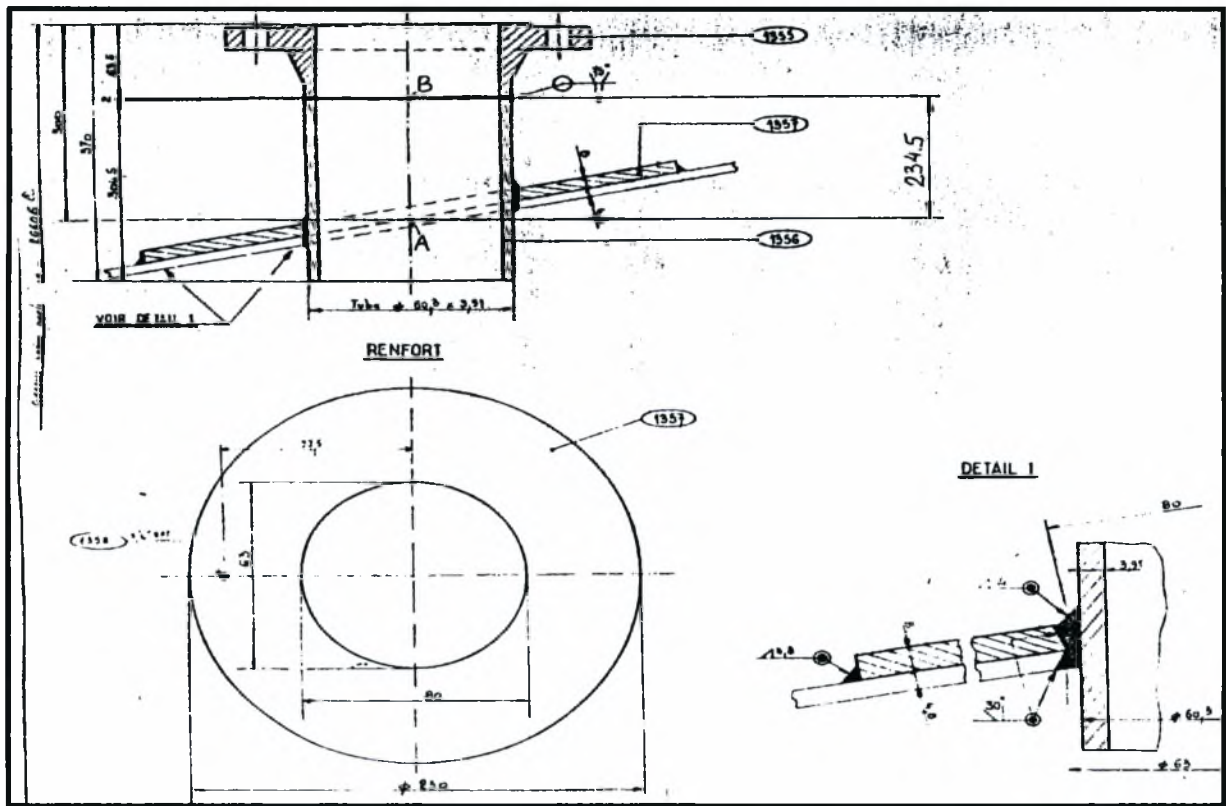
Το «φορτίο» που επιβάλλεται στην κατασκευή είναι μία οριζόντια μετατόπιση u στο σημείο Β ως προς το σημείο Α Σχήμα 2.60, $L=234.5$ mm. Για τη μοντελοποίηση της συνδέσεως χρησιμοποιήθηκαν 11927 κόμβοι και 8664 στοιχεία. Το πάχος της σωλήνωσης είναι 3.91 mm. Η ανάλυση εκτελείται αυξάνοντας σταδιακά το u με βήμα $\Delta u = 1$ mm μέχρι τα 10 mm. Στον Πίνακα 2.3 δίνεται ο υπολογισμός της «μέσης κλίσης» της σωλήνωσης.

Μετατόπιση u (mm)	Γωνία φ (μοίρες)
1	0.25
2	0.50
3	0.73
4	1.00
5	1.22
6	1.46
7	1.70
8	1.95
9	2.20
10	2.44

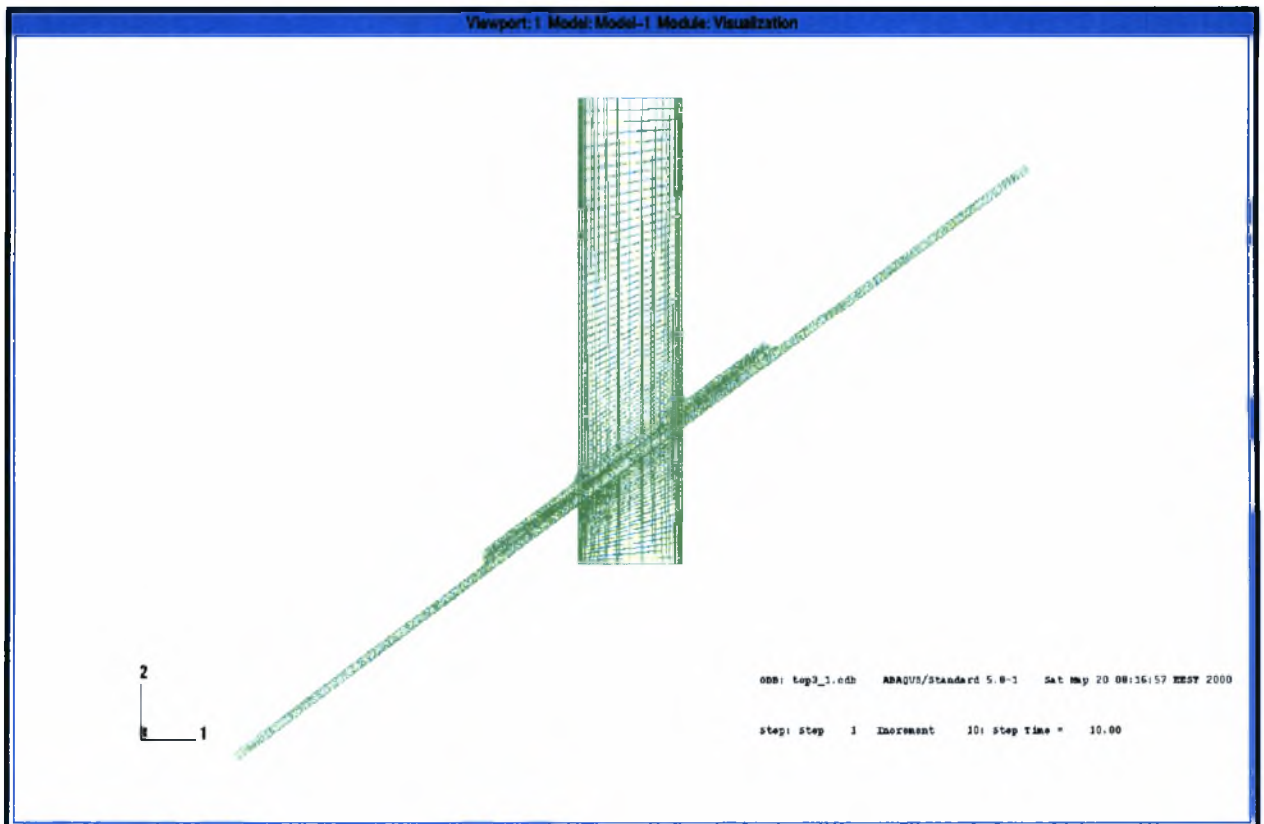
Πίνακας 2.3

Στο Σχήμα 2.60 δίνεται το μηχανολογικό σχέδιο της σύνδεσης, στο οποίο βασίζεται η ανάλυση. Στο Σχήμα 2.61 φαίνεται ο κάρναβος που χρησιμοποιείται. Στο Σχήμα 2.62 παρουσιάζεται η αρχική και η παραμορφωμένη γεωμετρία της κατασκευής για την τελική μετατόπιση της σύνδεσης. Για μετατόπιση 1 mm η μέγιστη τάση του von Mises που εμφανίζεται είναι ίση με 210 MPa. Λόγω της γραμμικότητας του προβλήματος η ισοδύναμη τάση θα ξεπεράσει το όριο διαρροής για $u = 1.14$ mm. Στο Σχήμα 2.63 δίνονται οι ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσης του von Mises για $u = 1$ mm. Στο Σχήμα 2.64 εμφανίζεται η κατανομή των τάσεων για $u = 2$ mm. Με γκρι παρουσιάζεται η περιοχή όπου η σ_e ξεπερνά το όριο διαρροής. Όπως φαίνεται οι τάσεις

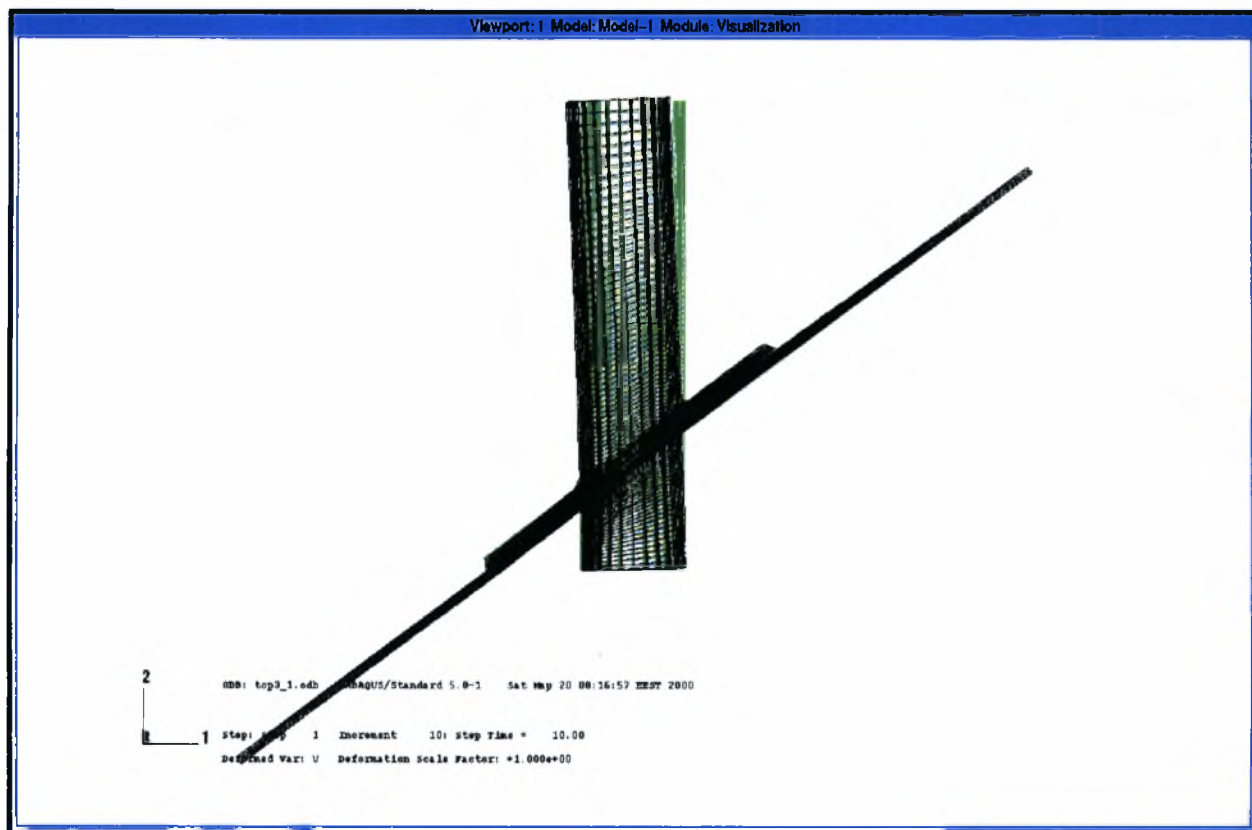
ξεπερνούν το όριο διαρροής στη συγκόλληση της σωλήνας με τη δεξαμενή και τον ενισχυτικό δακτύλιο για $u = 2 \text{ mm}$.



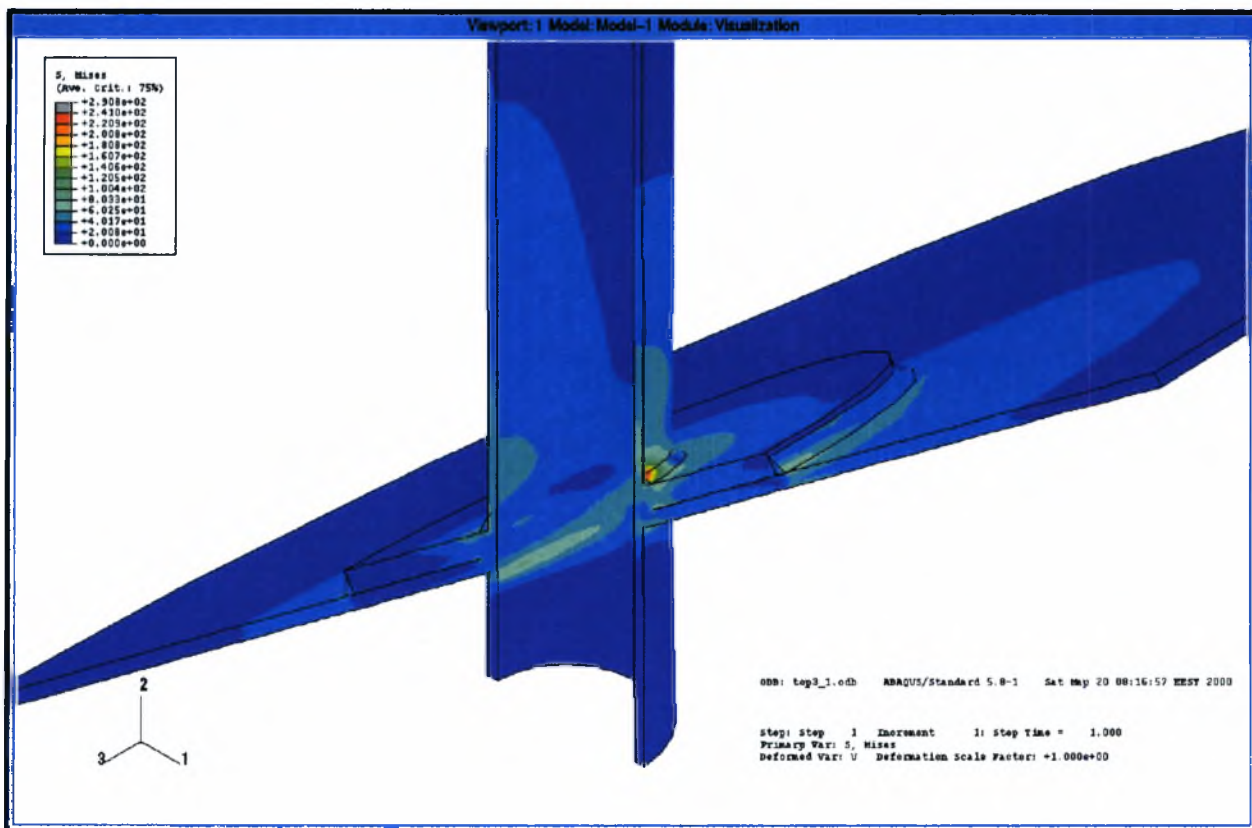
Σχήμα 2.60 Μηχανολογικό σχέδιο της σύνδεσης Νο 1 στην κορυφή της δεξαμενής



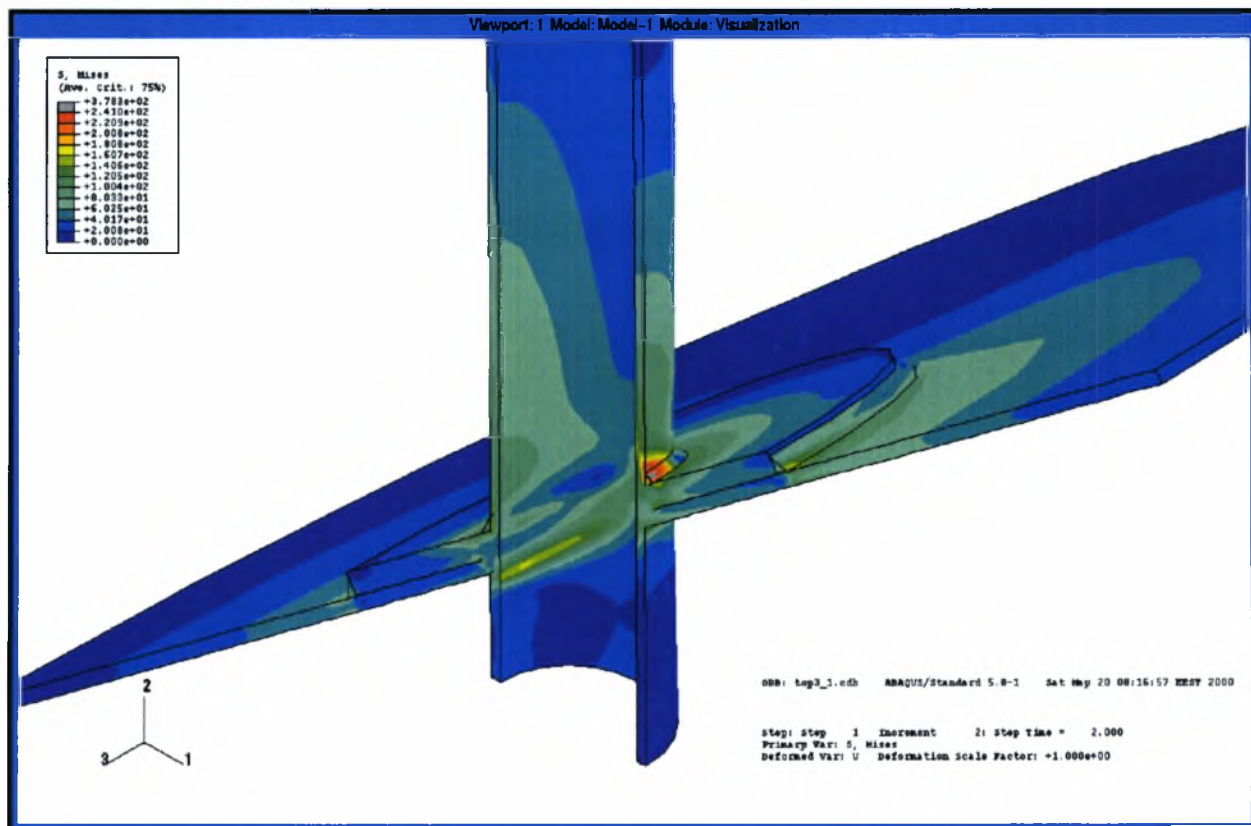
Σχήμα 2.61 Τριδιάστατος κάρναβος που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση Νο 1 στην κορυφή της δεξαμενής



Σχήμα 2.62 Αρχική και παραμορφωμένη γεωμετρία της σύνδεσης

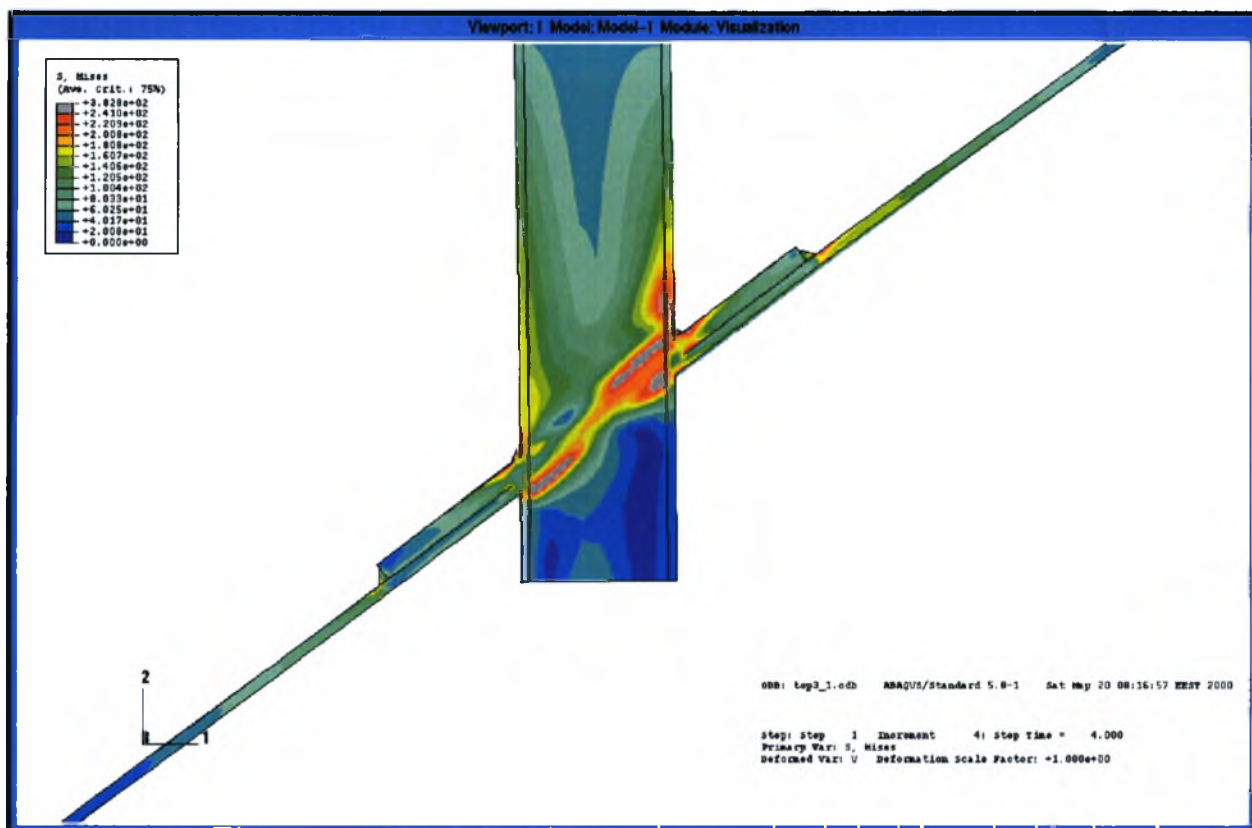


Σχήμα 2.63 Ισοϋψείς της σ_e για $u=1\text{mm}$

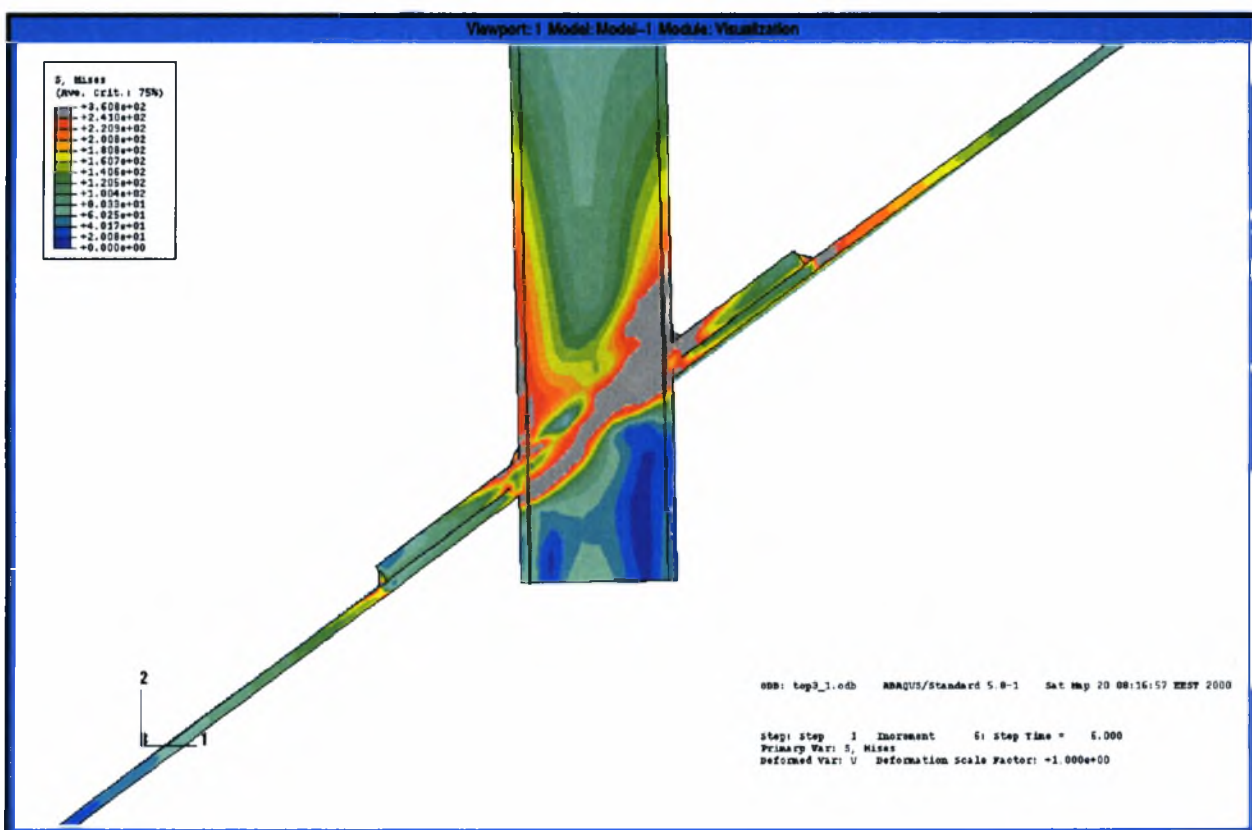


Σχήμα 2.64 Ισοϋψείς της σ_e για $u=2\text{ mm}$

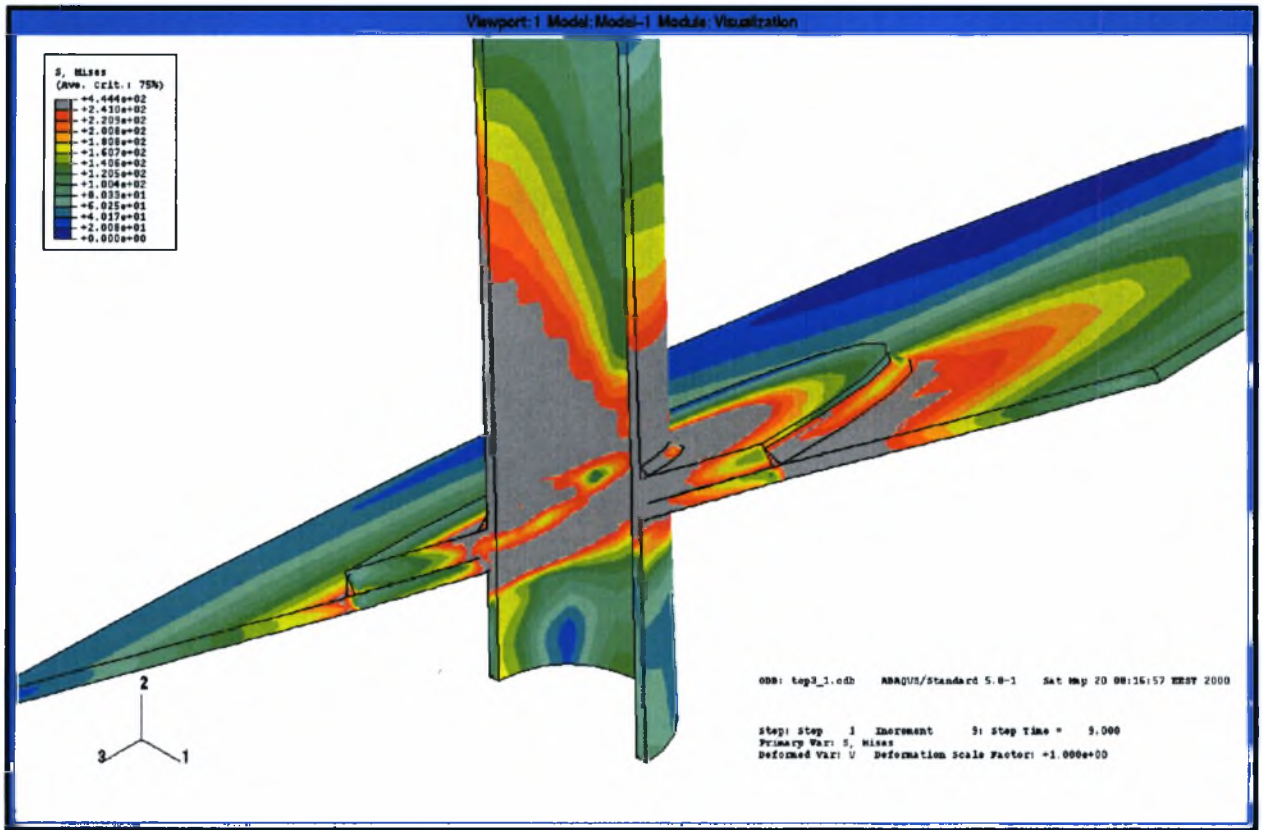
Για $u = 4\text{ mm}$, Σχήμα 2.65, η πλαστική ζώνη εξαπλώνεται σε όλο το πάχος της σωλήνας. Καθώς αυξάνεται η μετατόπιση στο άκρο, όλο και μεγαλύτερο μέρος της σύνδεσης περνάει στην πλαστική περιοχή, Στο Σχήμα 2.66 για $u = 6\text{ mm}$, η πλαστική ζώνη έχει καλύψει όλη τη σύνδεση της σωλήνας με τη δεξαμενή και συνεχίζει να εξαπλώνεται. Για $u=9\text{ mm}$ οι τάσεις που αναπτύσσονται ξεπερνούν τοπικά στη σωλήνα την τάση θραύσης του υλικού 414 MPa, Σχήμα 2.67, γεγονός που φαίνεται πιο έντονα στο Σχήμα 2.68 για $u=10\text{ mm}$. Στο Σχήμα 2.69 δίνεται το διάγραμμα της δύναμης αντίστασης RF1 σε σχέση με τη μετατόπιση U1.



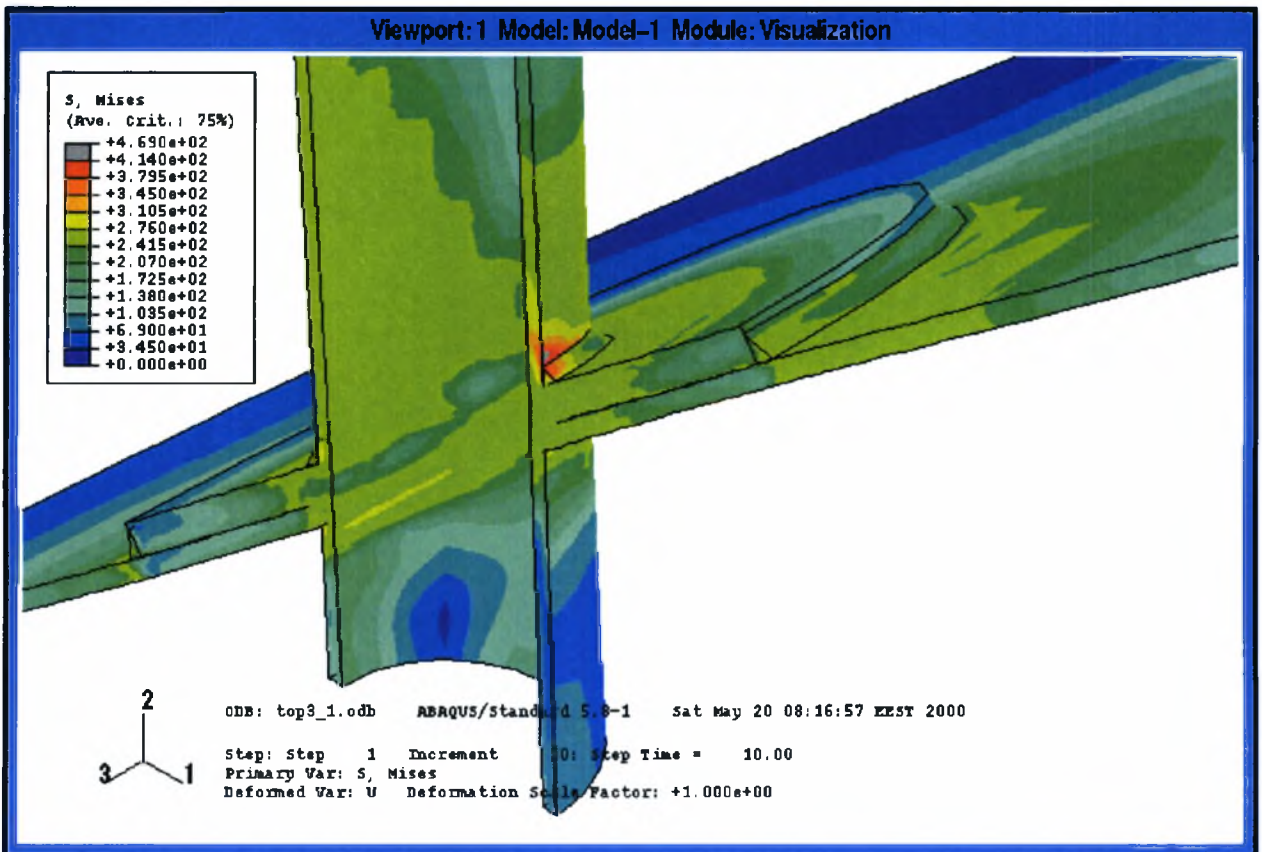
Σχήμα 2.65 Ισοϋψείς της σ_e για $u=4$ mm



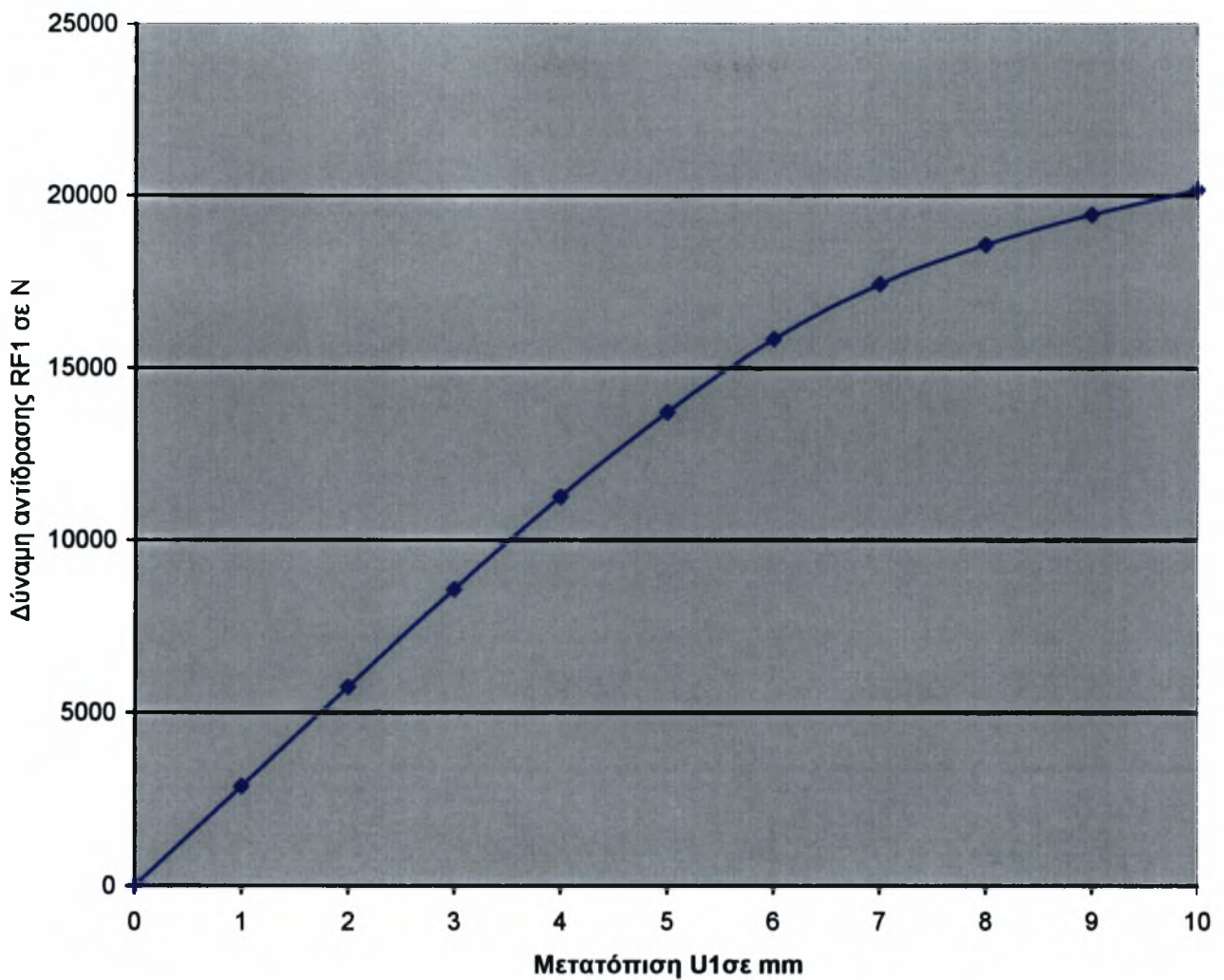
Σχήμα 2.66 Ισοϋψείς της σ_e για $u=6$ mm



Σχήμα 2.67 Ισοϋψείς της σ_e για $u=9$ mm



Σχήμα 2.68 Ισοϋψείς της σ_e για $u=10$ mm



Σχήμα 2.69 Διάγραμμα δύναμης αντίδρασης RF1 και μετατόπισης U1 για την σύνδεση No 1 στην κορυφή της δεξαμενής

Στη No 1 σύνδεση στη κορυφή της δεξαμενής η τελική ακαμψία, $k_b = 287,438$ [KN/m], ισούται με δύο δέκατα της αρχικής της τιμής, $k_b = 70,696$ [KN/m]. Η σύνδεση και σε αυτή την περίπτωση αστοχεί λόγω ανάπτυξης τάσεων μεγαλύτερων του ορίου θραύσης του υλικού.

4 Σύνδεση Νο 2 στην οροφή της δεξαμενής

Το «φορτίο» που επιβάλλεται στην κατασκευή είναι μία οριζόντια μετατόπιση u στο σημείο Β ως προς το σημείο Α, Σχήμα 2.70. Το μήκος της κατασκευής είναι 222 mm. Για την μοντελοποίηση της σύνδεσης χρησιμοποιήθηκαν 12406 κόμβοι 8664 στοιχεία. Η ανάλυση εκτελείται αυξάνοντας σταδιακά το u με βήμα $\Delta u = 1$ mm μέχρι τα 20 mm. Στον Πίνακα 2.4 δίνεται ο υπολογισμός της «μέσης κλίσης» της σωλήνωσης.

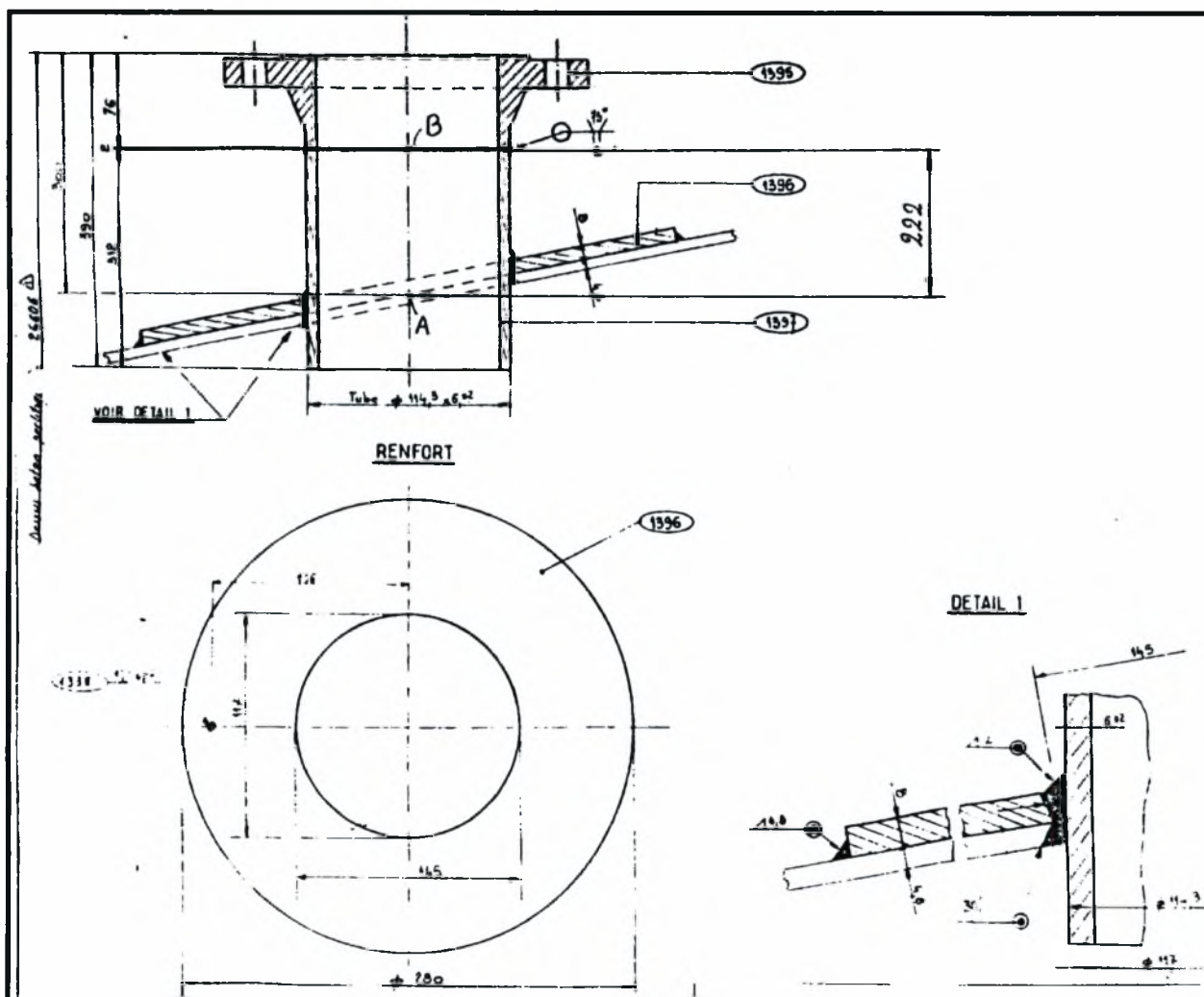
Μετατόπιση u (mm)	Γωνία φ (μοίρες)
1	0.25
2	0.50
3	0.77
4	1.00
5	1.30
6	1.54
7	1.80
8	2.00
9	2.32
10	2.57
11	2.83
12	3.10
20	5.14

Πίνακας 2.4

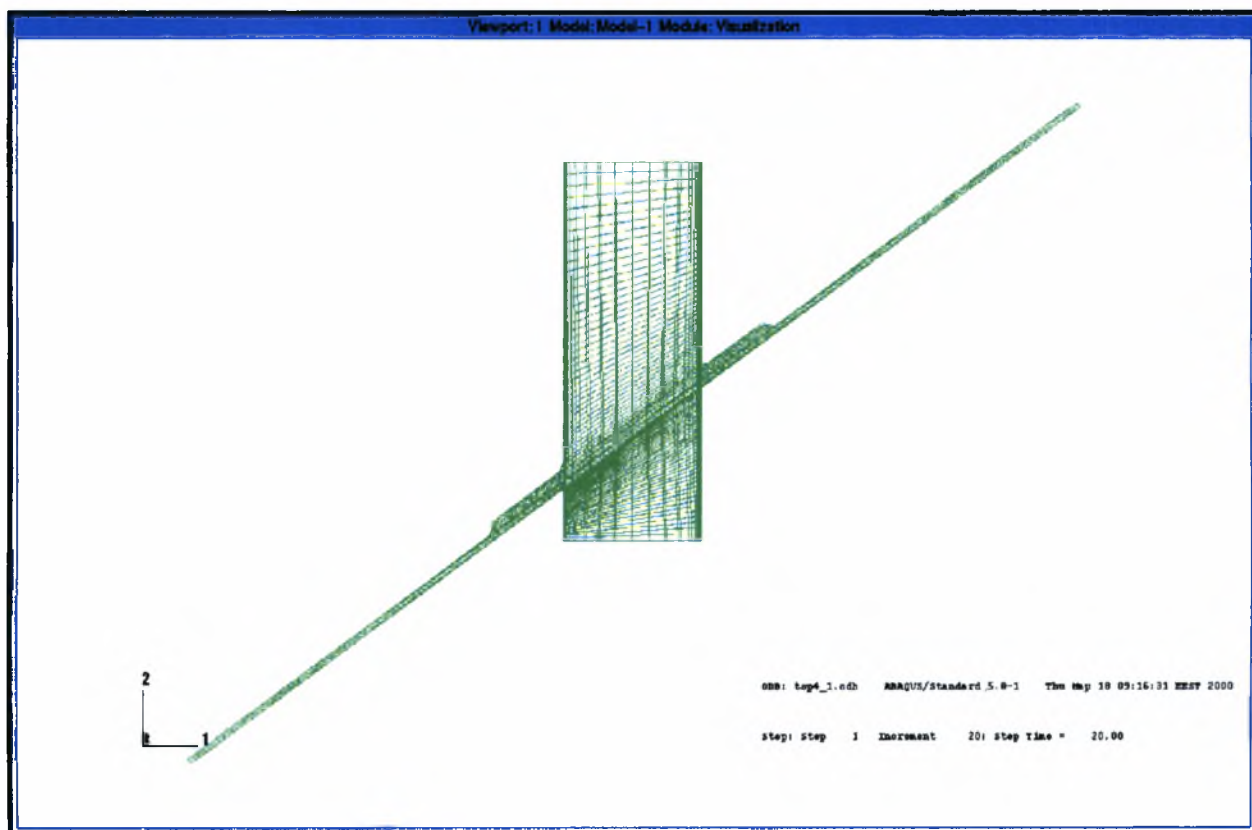
Η ανάλυση βασίζεται στο μηχανολογικό σχέδιο του σχήματος 2.70. Στο Σχήμα 2.71 φαίνεται ο κάρναβος που χρησιμοποιείται. Στο Σχήμα 2.72 δίνεται η αρχική και η παραμορφωμένη γεωμετρία της σύνδεσης. Για μετατόπιση 1 mm η μέγιστη τάση του von Mises που εμφανίζεται είναι ίση με 164.5 MPa. Λόγω της γραμμικότητας του προβλήματος η ισοδύναμη τάση θα ξεπεράσει το όριο διαρροής για $u = 1.465$ mm.

Στο Σχήμα 2.73 δίνονται οι ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσης του von Mises για $u = 1$ mm. Η τάση δεν έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής. Στο Σχήμα 2.74 εμφανίζεται η κατανομή των τάσεων για $u = 2$ mm. Με γκρι παρουσιάζεται η περιοχή όπου η σ_e ξεπερνά το όριο διαρροής. Όπως φαίνεται οι τάσεις ξεπερνούν το όριο διαρροής πάνω στη συγκόλληση της σωλήνας με τον ενισχυτικό δακτύλιο για $u = 2$ mm. Για $u = 3$ mm η πλαστική ζώνη εξαπλώνεται χωρίς να καλύπτει το πάχος του σωλήνα. Η εξάπλωση της πλαστικής ζώνης σε όλο το πάχος του σωλήνα εμφανίζεται για $u = 4$ mm, Σχήμα 2.75. Για $u = 5$ mm η πλαστική ζώνη καλύπτει και το πάχος του ενισχυτικού δακτυλίου και της δεξαμενής στη συγκόλληση τους με τη σωλήνα, όπως

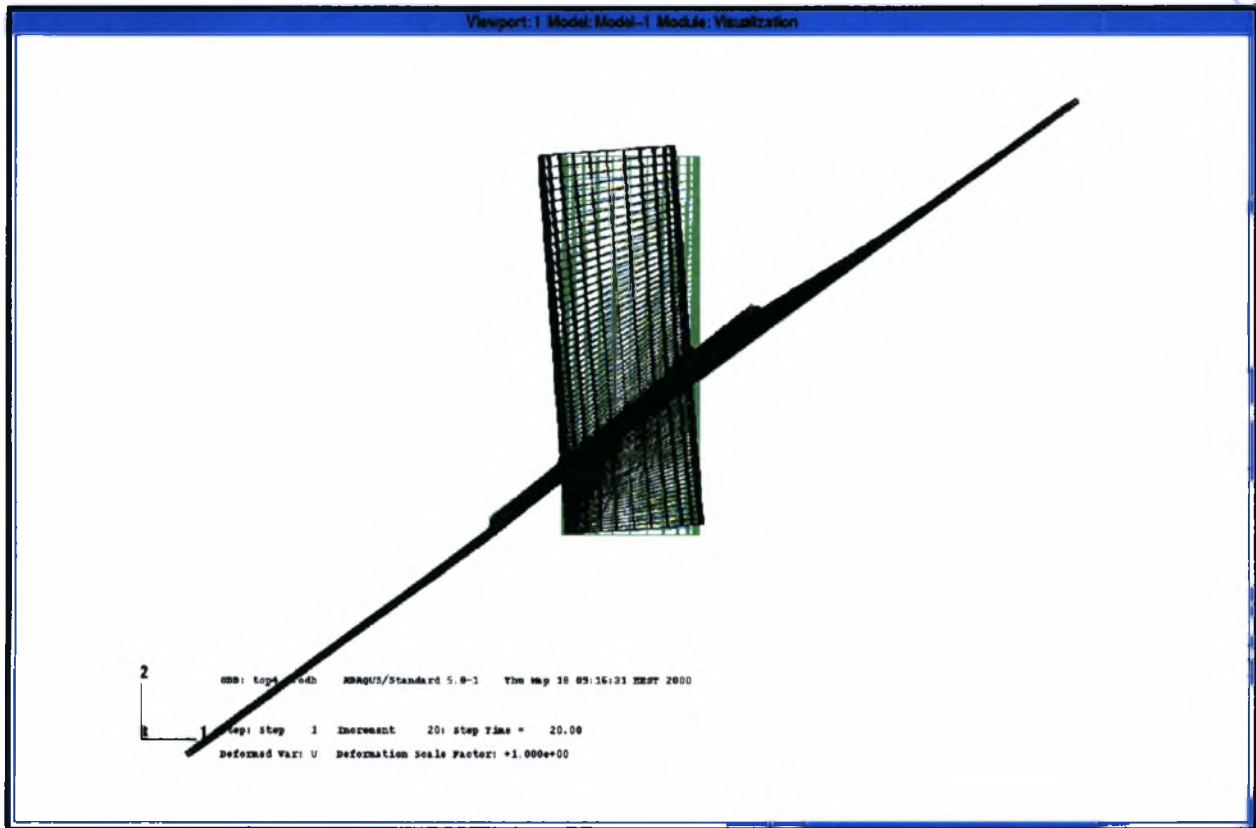
φαίνεται στο Σχήμα 2.76. Για μεγαλύτερες μετατοπίσεις η πλαστική ζώνη καλύπτει όλο και μεγαλύτερη περιοχή της σύνδεσης. Για $u=8$ mm, Σχήμα 2.77, όλη η περίμετρος της σύνδεσης έχει εισέλθει στην πλαστική περιοχή. Ανάλογη είναι και η εικόνα για $u=9-11$ mm. Για $u=12$ mm οι τιμές των τάσεων ξεπερνούν τοπικά και το όριο θραύσης του υλικού 414 MPa, Σχήμα 2.78, κάτι που φαίνεται πιο καθαρά στο Σχήμα 2.79 για $u=20$ mm. Στο Σχήμα 2.80 παρουσιάζεται το διάγραμμα της δύναμης αντίδρασης RF1 και της μετατόπισης U1.



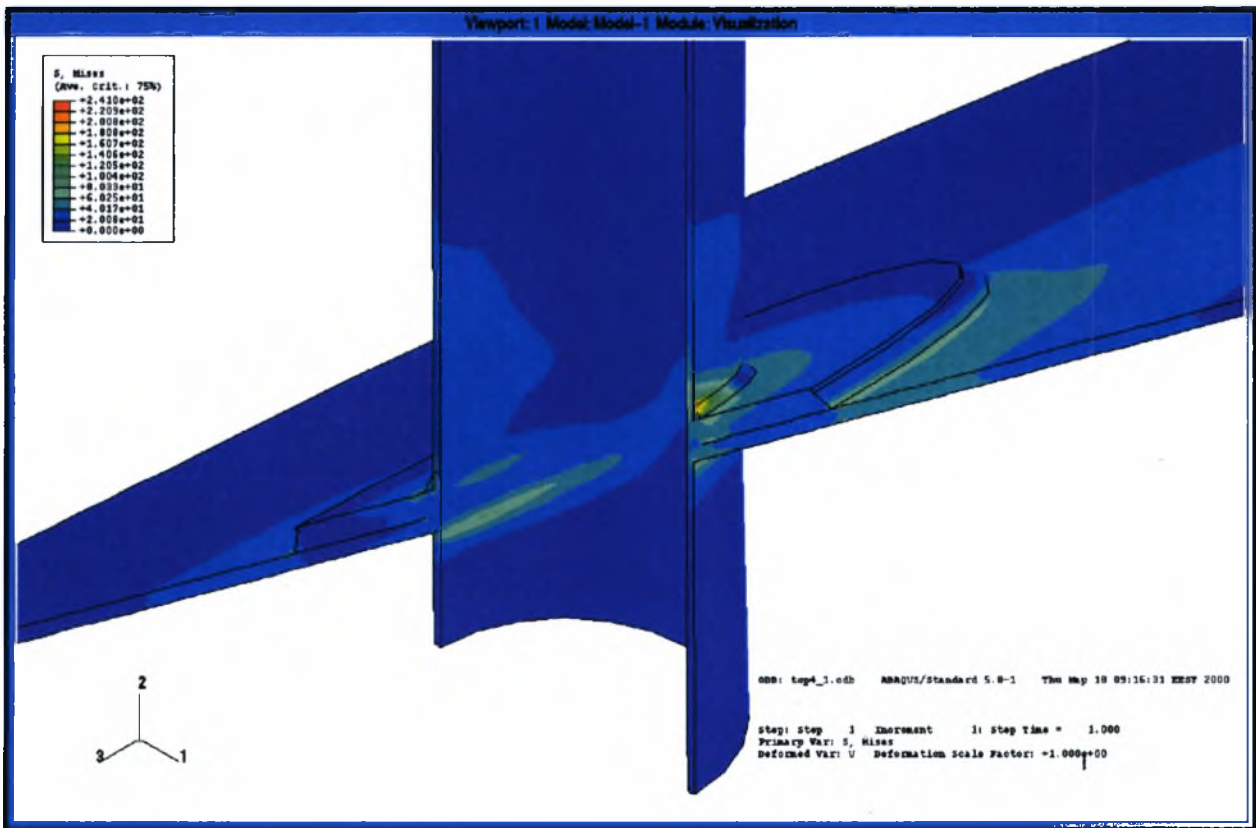
Σχήμα 2.70 Μηχανολογικό σχέδιο της σύνδεσης No 2 στην κορυφή της δεξαμενής



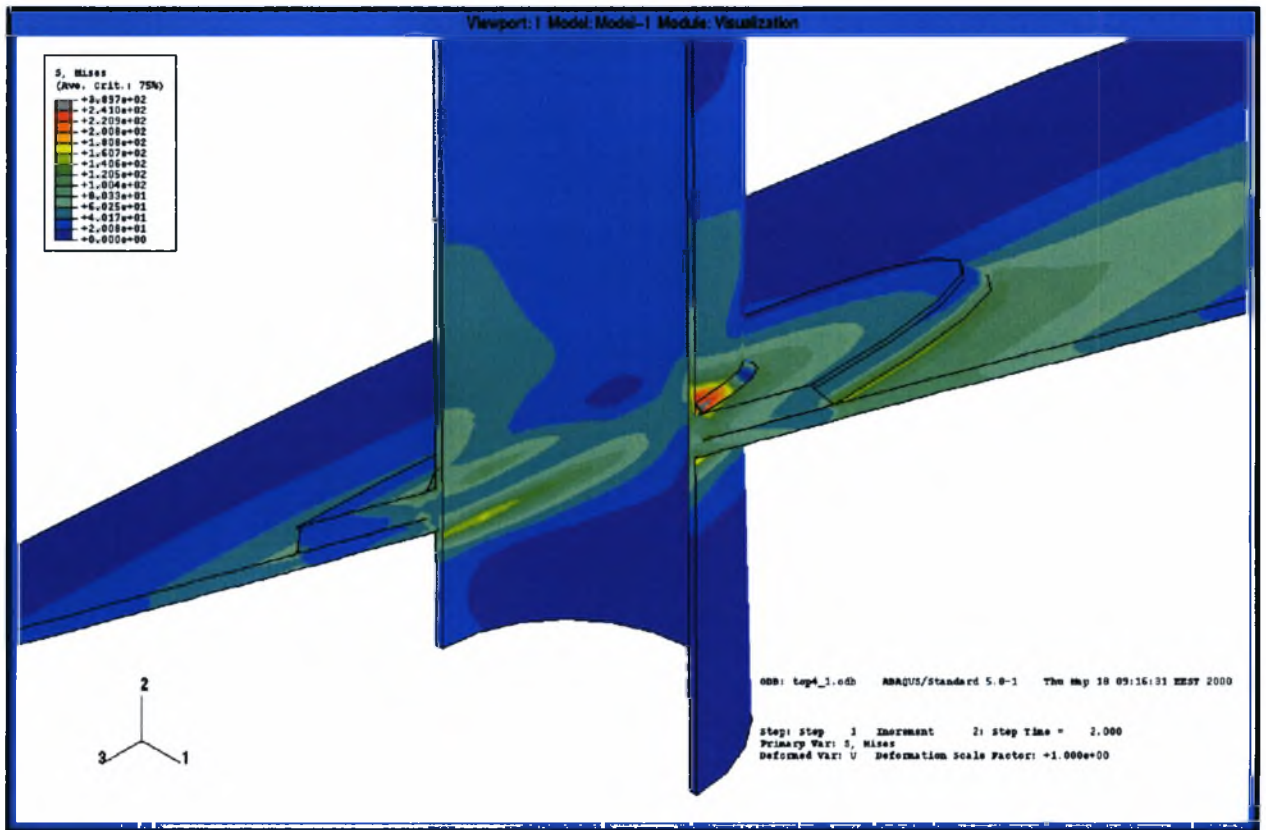
Σχήμα 2.71 Ο κάναβος της σύνδεσης Νο 2 στην κορυφή της δεξαμενής



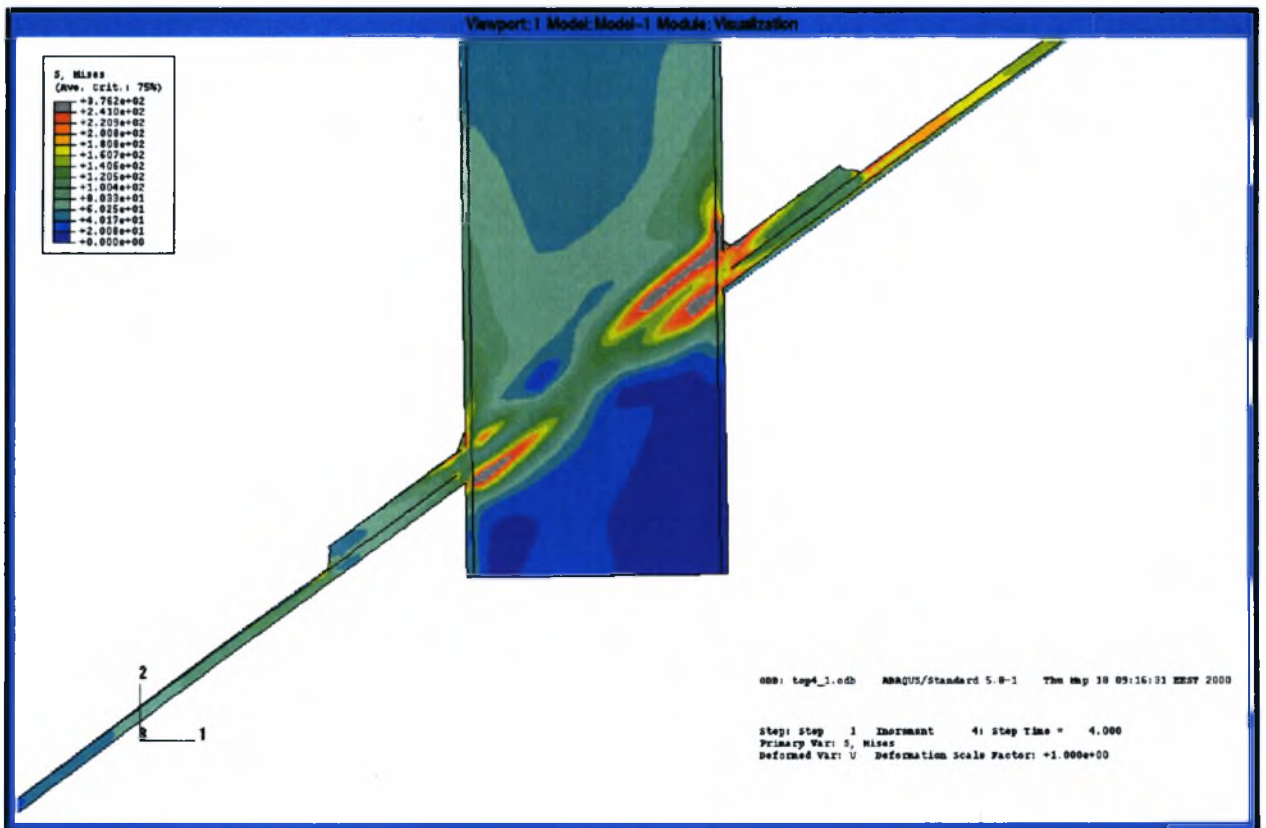
Σχήμα 2.72 Η αρχική και η παραμορφωμένη γεωμετρία της σύνδεσης



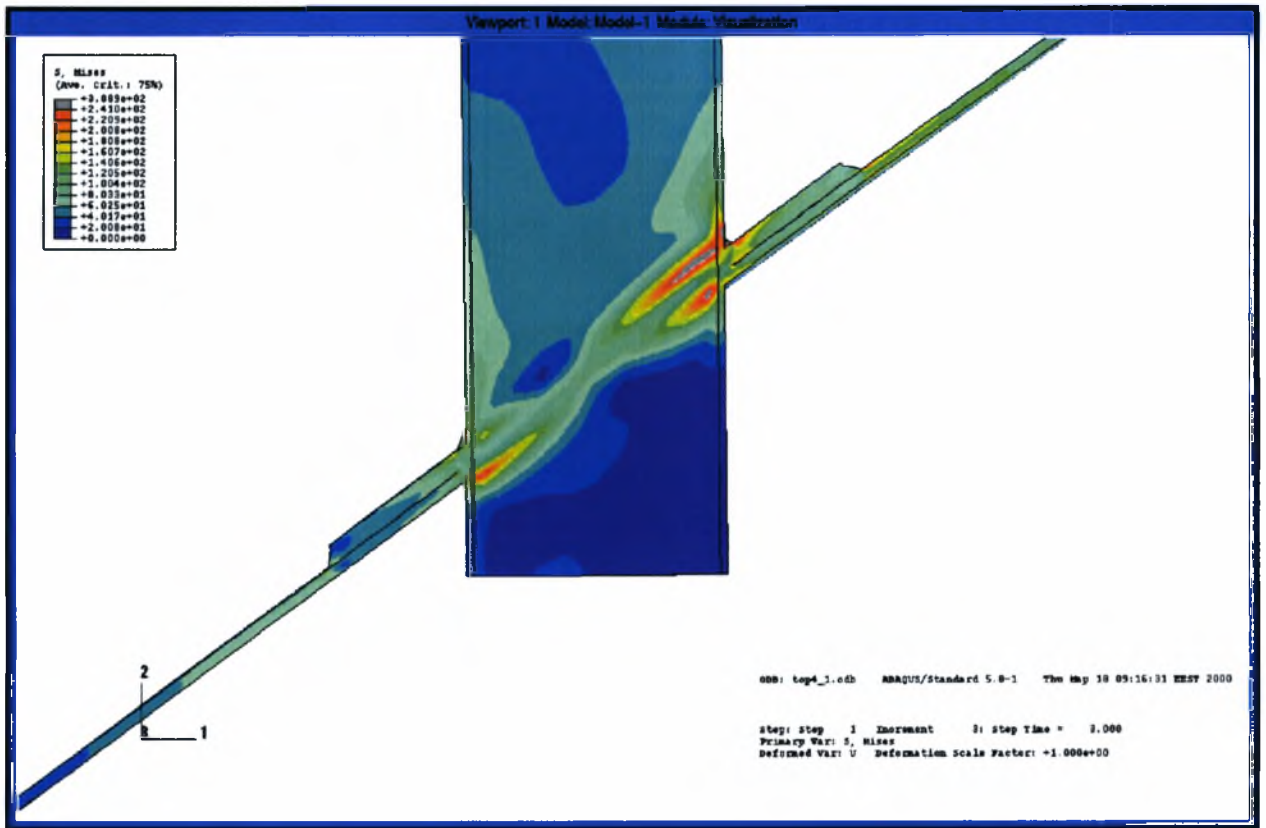
Σχήμα 2.73 Ισοϋψείς της σ_e για $u=1\text{mm}$



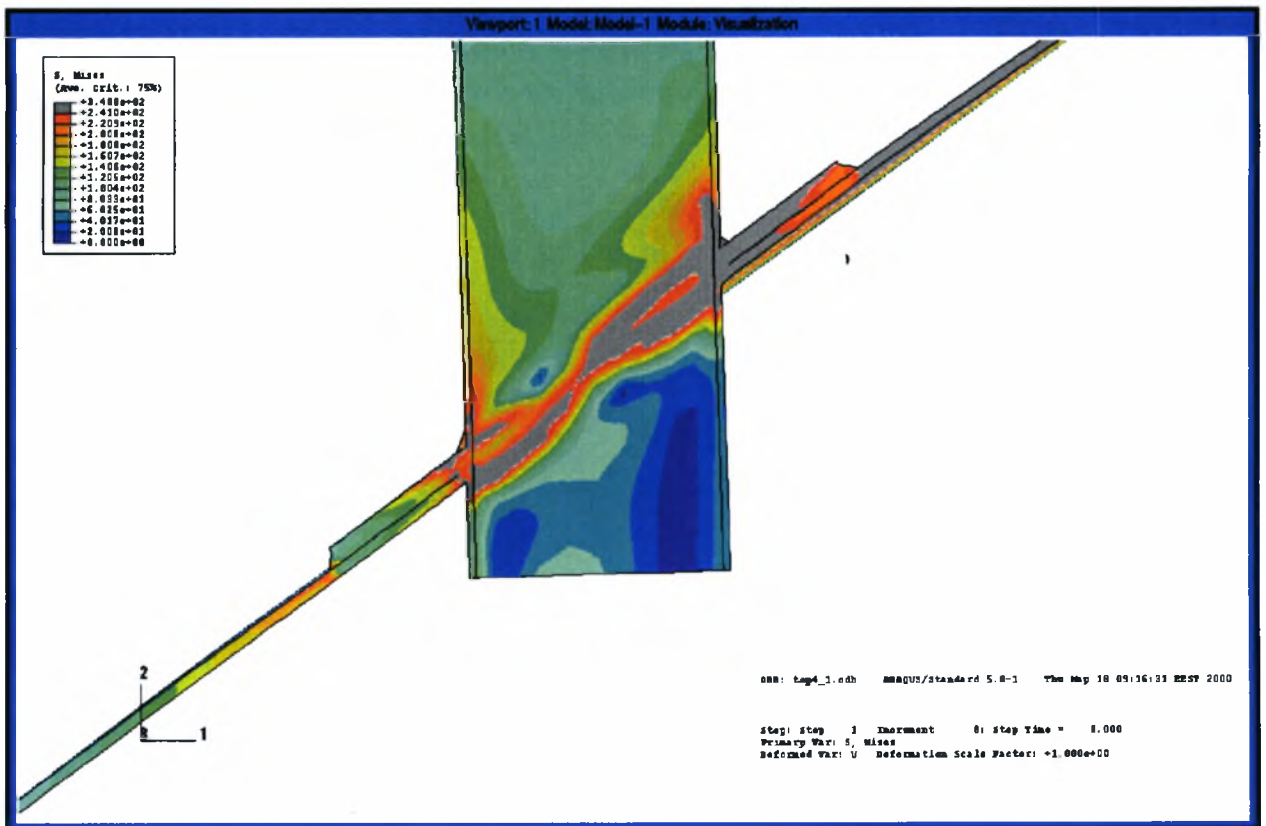
Σχήμα 2.74 Ισοϋψείς της σ_e για $u=2$ mm



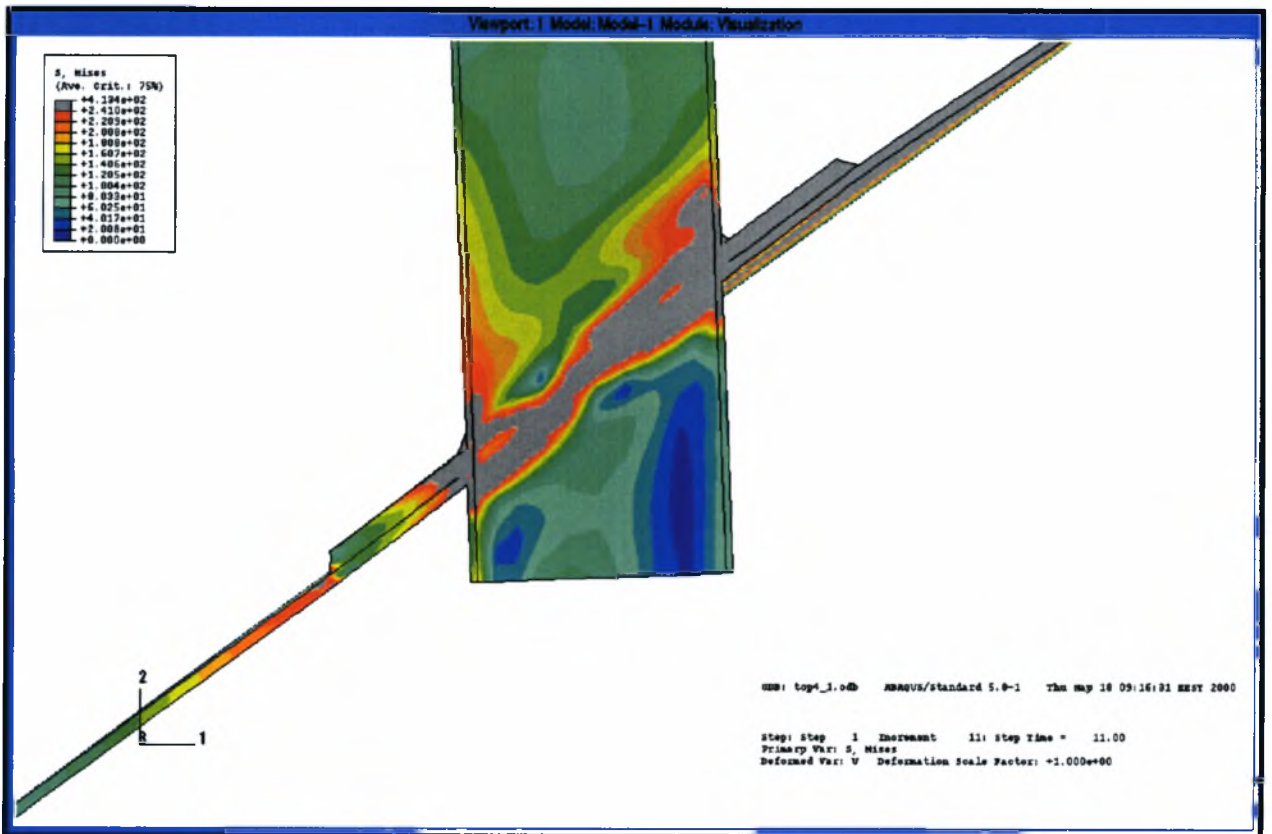
Σχήμα 2.75 Ισοϋψείς της σ_e για $u=4$ mm



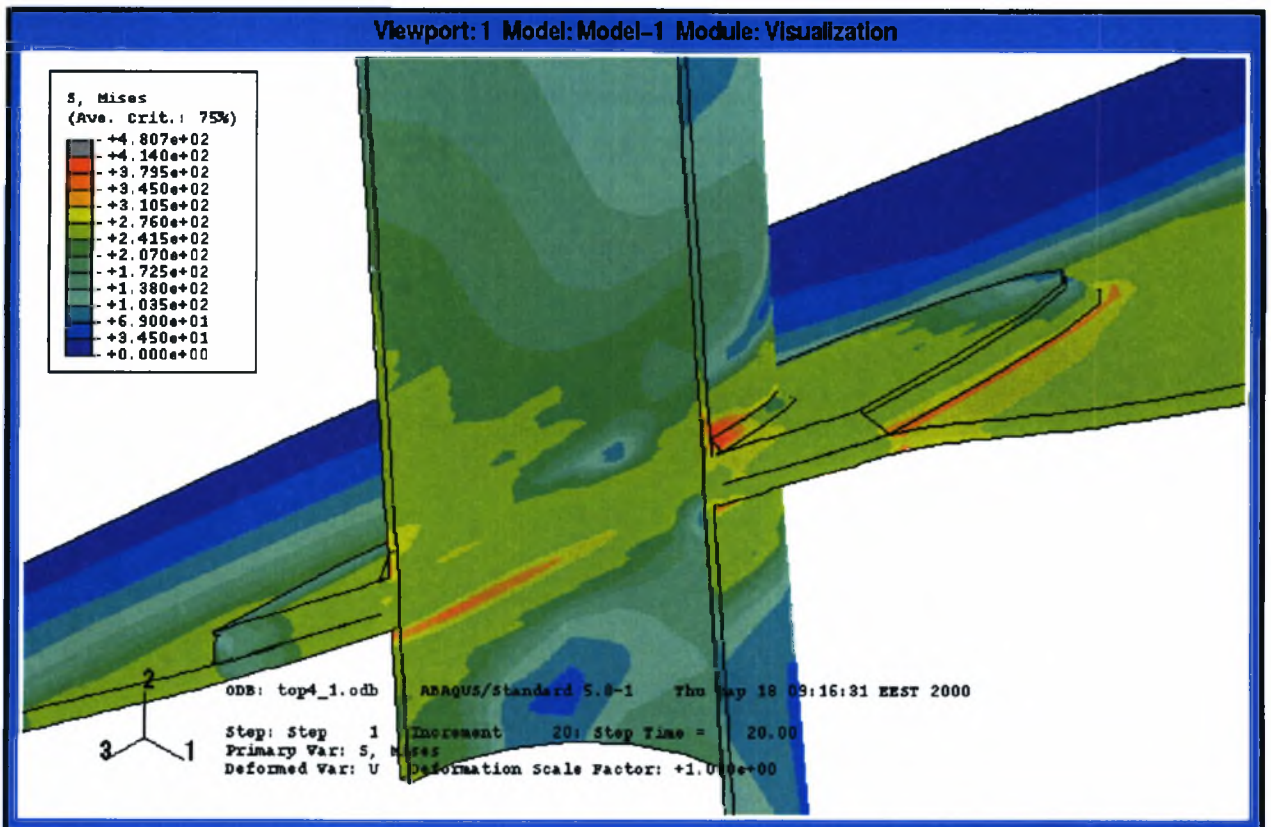
Σχήμα 2.76 Ισοϋψείς της σ_e για $u=5$ mm



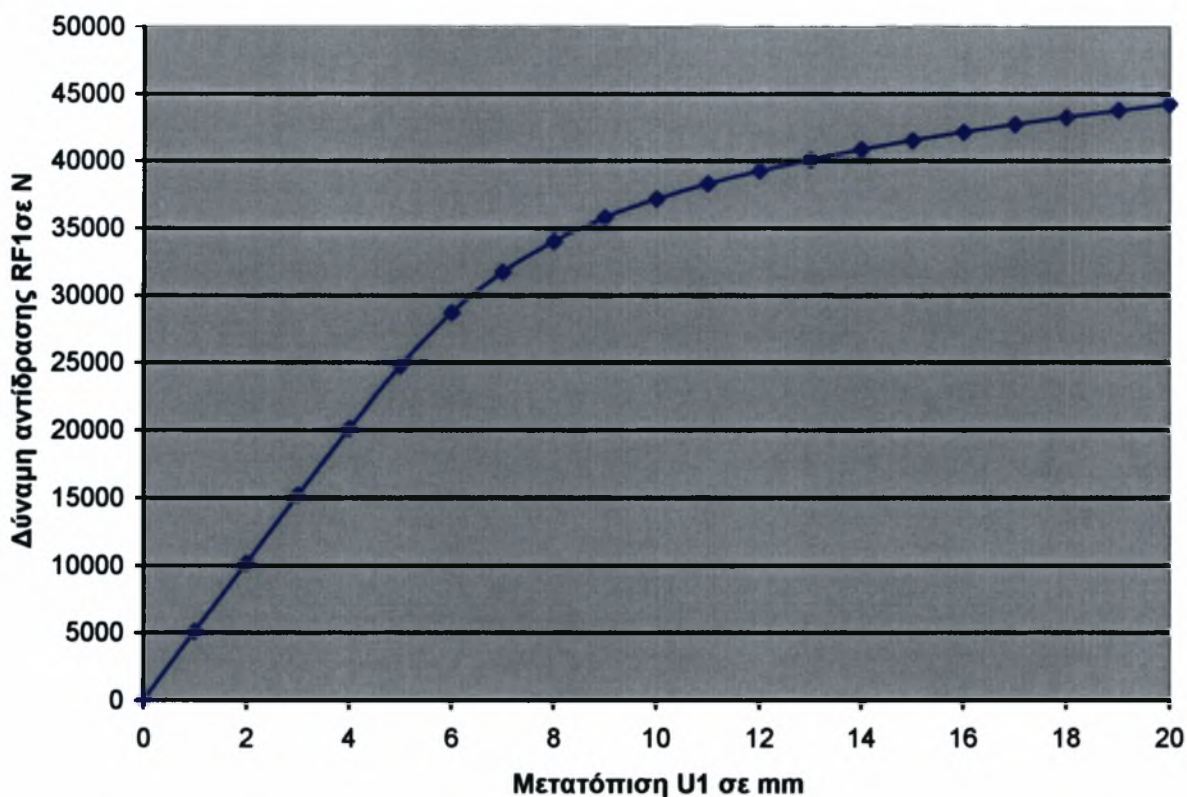
Σχήμα 2.77 Ισοϋψείς της σ_e για $u=8$ mm



Σχήμα 2.78 Ισοϋψείς της σ_e για $u=12\text{mm}$



Σχήμα 2.79 Ισοϋψείς της σ_e για $u=20\text{mm}$



Σχήμα 2.80 Διάγραμμα δύναμης αντίδρασης RF1 και μετατόπισης U1

Στην συγκεκριμένη σύνδεση η τελική τιμή της ακαμψίας, $k_b = 45,8 \text{ [KN/m]}$, γίνεται μικρότερη από το ένα δέκατο της αρχικής, $k_b = 508,46 \text{ [KN/m]}$, για μετατόπιση ίση με 19 mm. Επομένως η κατασκευή είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι αστοχεί, πριν το όριο της ακαμψίας που έχει τεθεί ως απαγορευτικό λόγω τάσεων μεγαλύτερων από το όριο θραύσης. $[U=12\text{mm}]$

5 Σύνδεση Νο 3 στην οροφή της δεξαμενής

Το «φορτίο» που επιβάλλεται στην κατασκευή είναι μία οριζόντια μετατόπιση u στο σημείο B ως προς το σημείο A, Σχήμα 2.81. Η απόσταση A-B είναι ίση με 209mm. Για τη μοντελοποίηση της σύνδεσης χρησιμοποιήθηκαν 12926 κόμβοι και 9384 στοιχεία. Το πάχος της σωλήνωσης είναι 7.11 mm. Η ανάλυση εκτελείται αυξάνοντας σταδιακά το u με βήμα $\Delta u = 1$ mm μέχρι τα 25 mm. Στον Πίνακα 2.5 δίνεται ο υπολογισμός της «μέσης κλίσης» της σωλήνωσης.

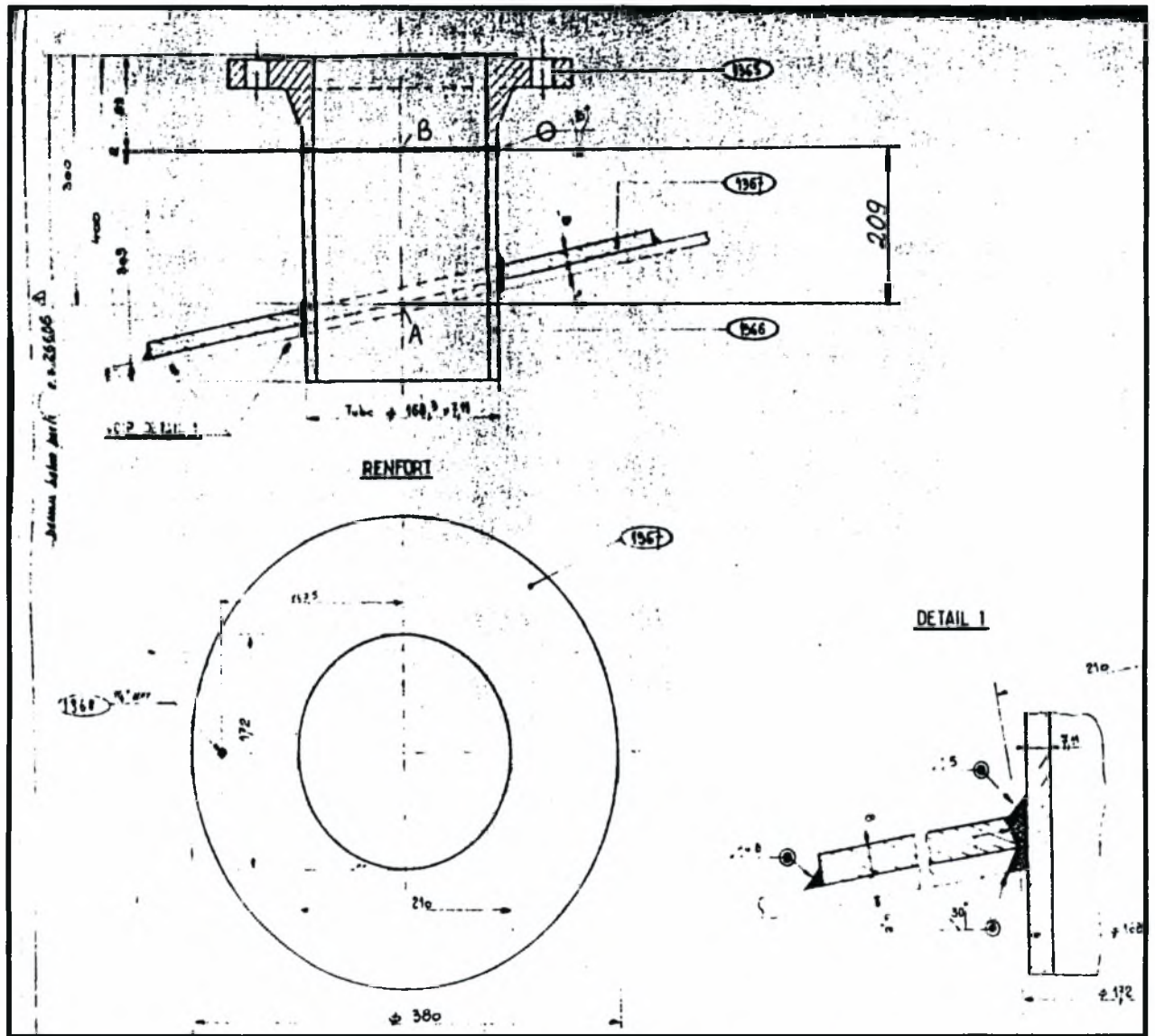
Μετατόπιση u (mm)	Γωνία φ (μοίρες)
1	0.27
2	0.55
3	0.82
4	1.10
5	1.37
6	1.65
7	1.90
8	2.20
9	2.50
10	2.74
22	6.00
25	6.82

Πίνακας 2.5

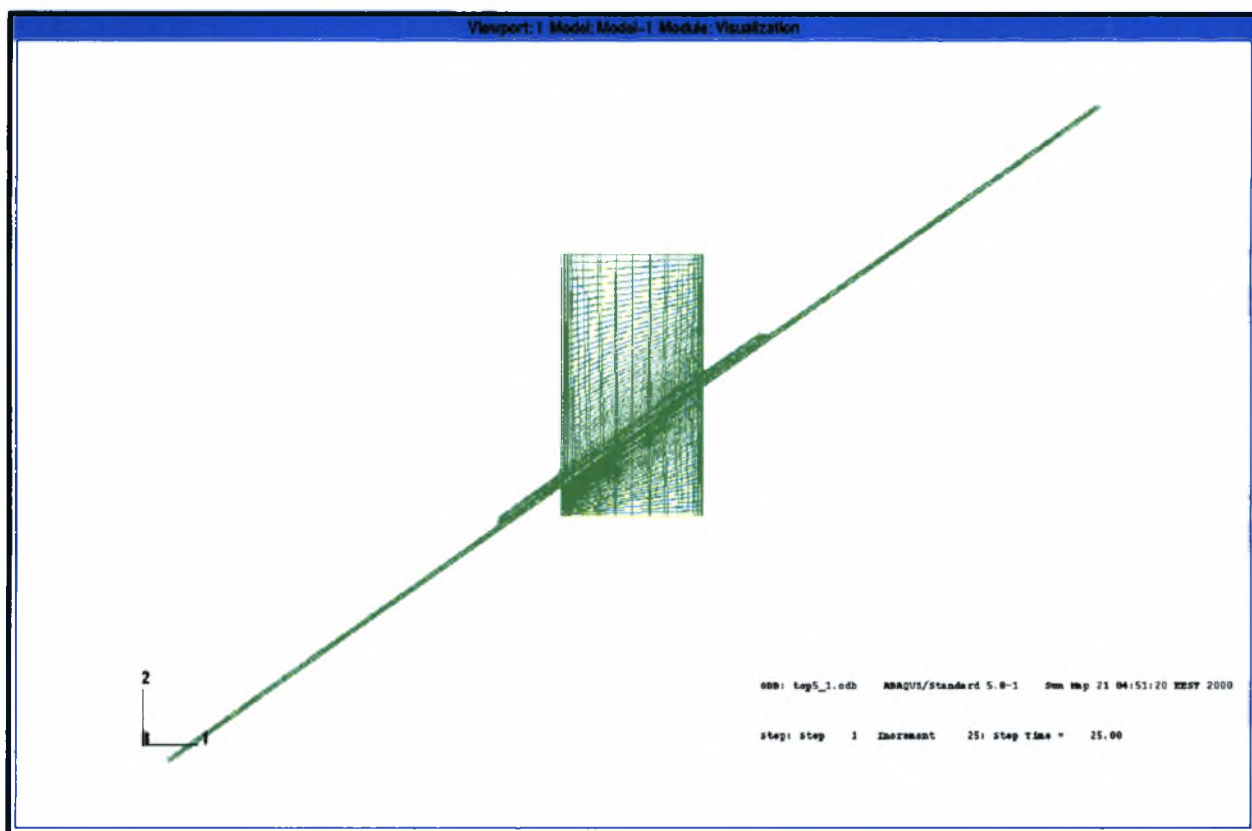
Η ανάλυση βασίζεται στο μηχανολογικό σχέδιο του σχήματος 2.81. Στο Σχήμα 2.82 φαίνεται ο κάρναβος που χρησιμοποιείται. Για μετατόπιση 1 mm η μέγιστη τάση του von Mises που εμφανίζεται είναι ίση με 145.6 MPa. Λόγω της γραμμικότητας του προβλήματος η ισοδύναμη τάση θα ξεπεράσει το όριο διαρροής για $u = 1.65$ mm.

Στο Σχήμα 2.83 δίνονται οι ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσης του von Mises για $u = 1$ mm. Η τάση δεν έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής. Στο Σχήμα 2.84 εμφανίζεται η κατανομή των τάσεων για $u = 2$ mm. Με γκρι παρουσιάζεται η περιοχή όπου η σ_e ξεπερνά το όριο διαρροής. Όπως φαίνεται οι τάσεις ξεπερνούν το όριο διαρροής πάνω στη συγκόλληση της σωλήνας με τον ενισχυτικό δακτύλιο $u = 2$ mm. Παρόμοια εικόνα λαμβάνεται και για $u = 3$ mm και $u = 4$ mm. Για $u = 5$ mm η πλαστική ζώνη καλύπτει όλο το πάχος της δεξαμενής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.85, ενώ στη διατομή της σωλήνας δεν έχουν ενωθεί ακόμη οι πλαστικές περιοχές. Για $u = 6$ mm, εισέρχεται στην πλαστική περιοχή το σύνολο του πάχους του ενισχυτικού δακτυλίου και της δεξαμενής, στη συγκόλλησή τους με τη σωλήνα. Η ίδια εικόνα εμφανίζεται και για $u = 7$ mm. Η πλαστική ζώνη εξαπλώνεται σε όλο το πάχος της σωλήνας για $u = 8$ mm, Σχήμα 2.86. Για μεγαλύτερες μετατοπίσεις η πλαστική ζώνη καλύπτει όλο και μεγαλύτερη περιοχή της

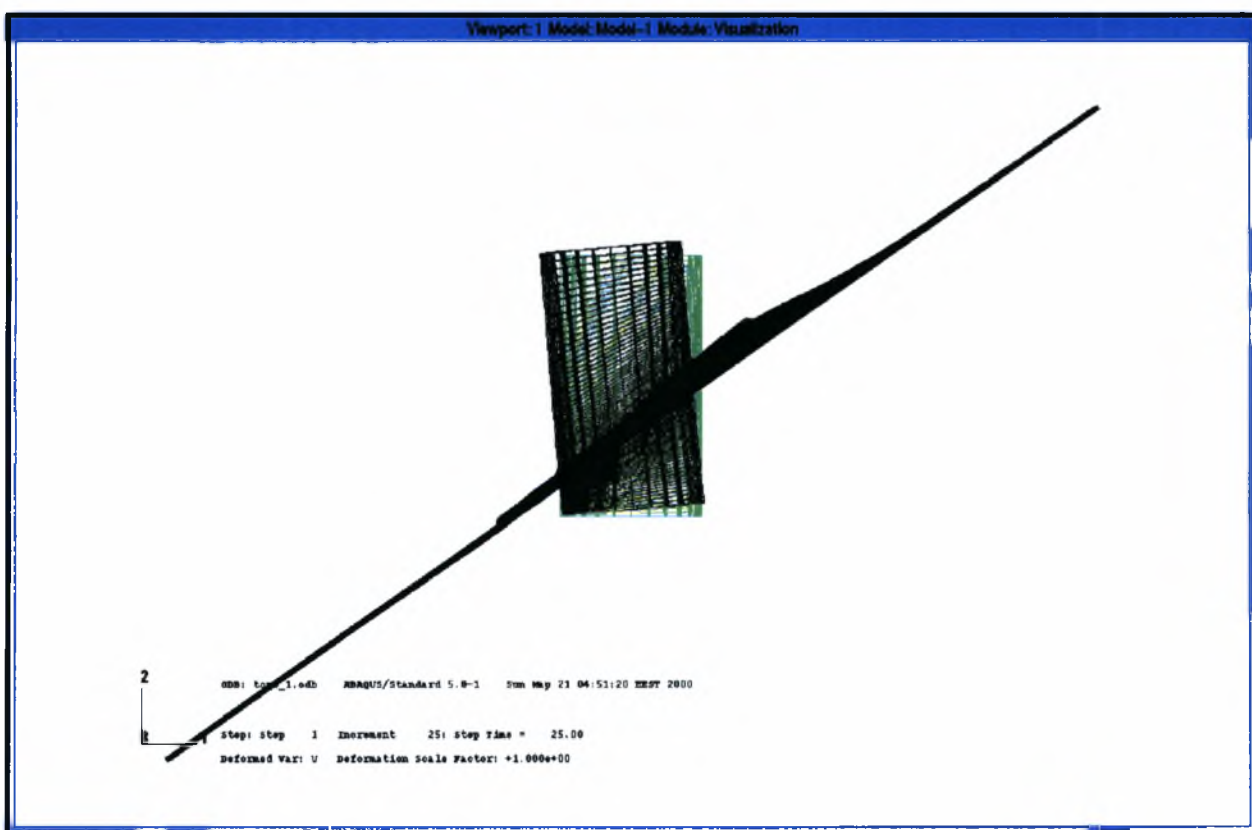
σύνδεσης. Για $u=18$ mm, Σχήμα 2.87, η πλαστική περιοχή εξαπλώνεται σε όλη την περίμετρο της σύνδεσης. Τέλος, για $u=25$ mm οι τάσεις ξεπερνούν τοπικά στη δεξαμενή το όριο θραύσης του υλικού, 414 MPa, Σχήμα 2.88. Στο Σχήμα 2.90 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης αντίδρασης και μετατόπισης .



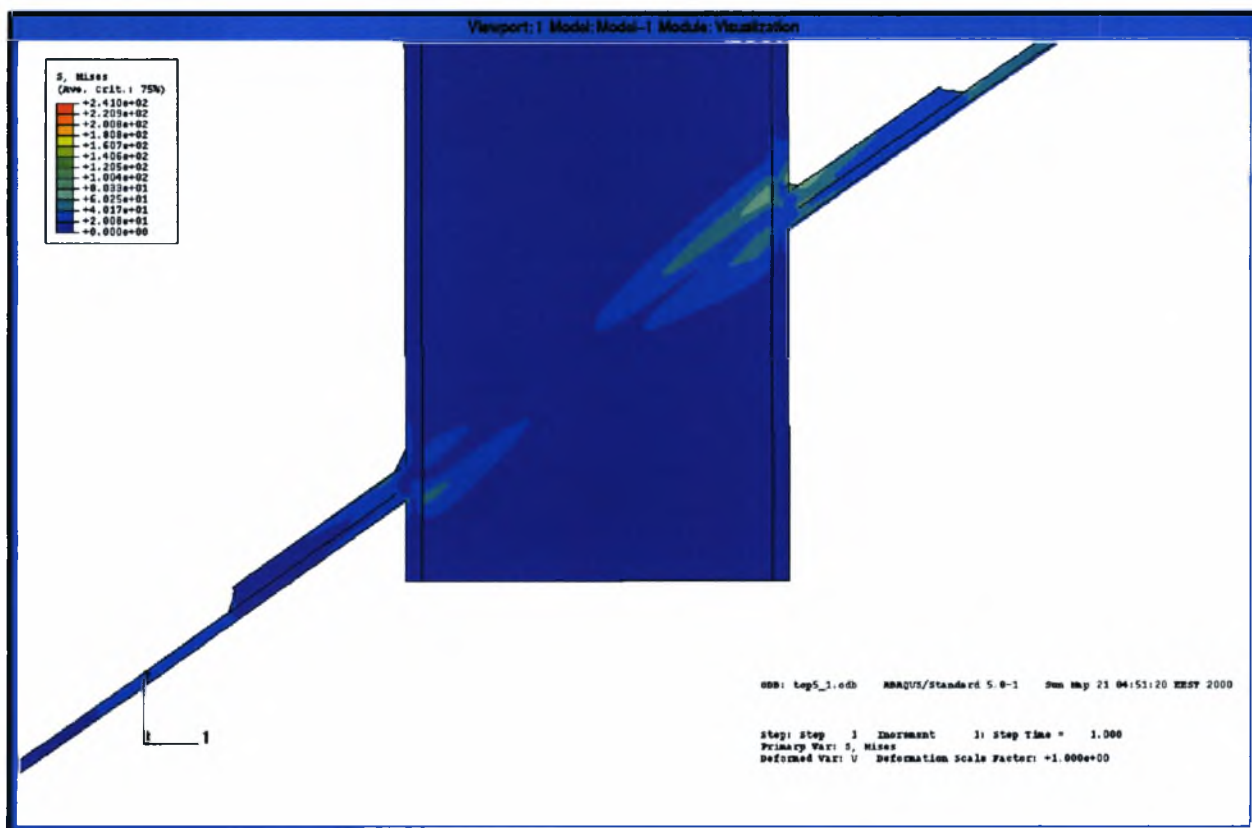
Σχήμα 2.81 Μηχανολογικό σχέδιο της Νο 3 σύνδεσης στην οροφή της δεξαμενής



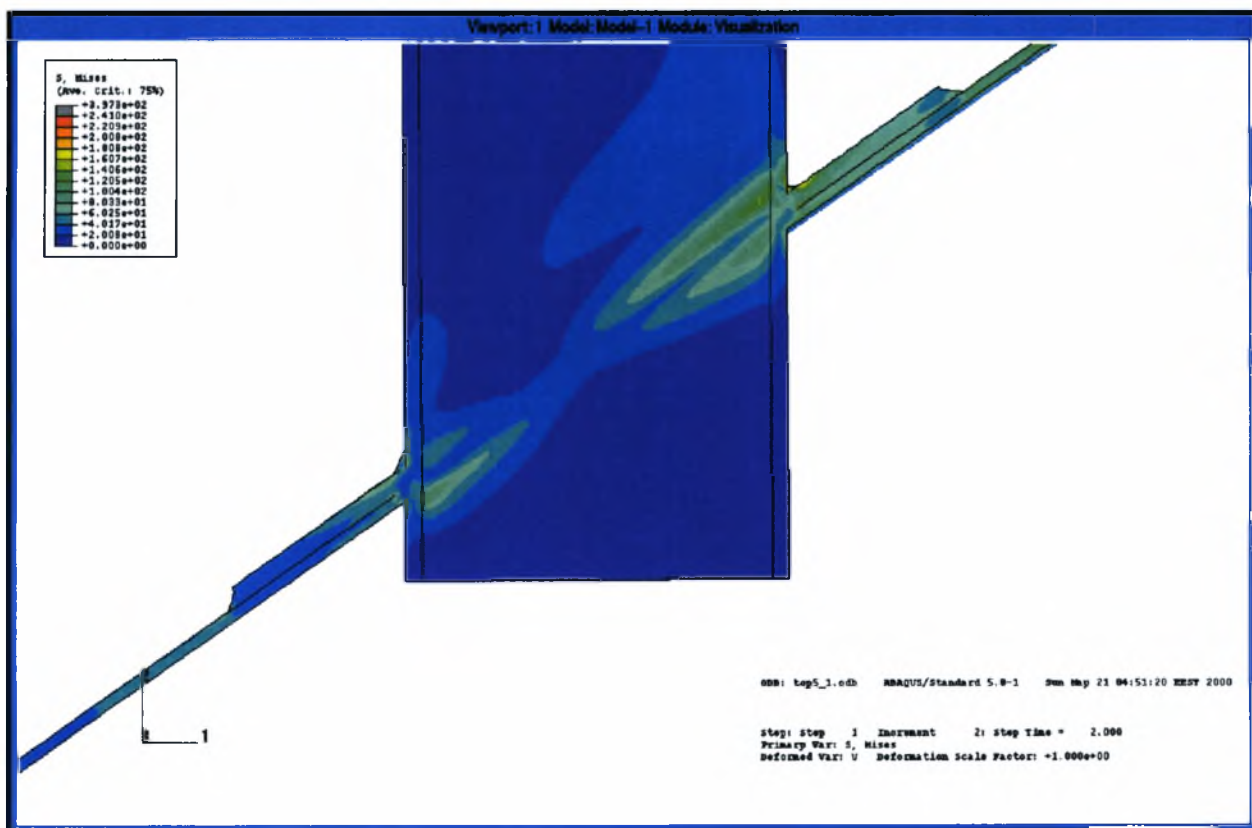
Σχήμα 2.81 Ο τριδιάστατος κάρναβος της σύνδεσης Νο 3



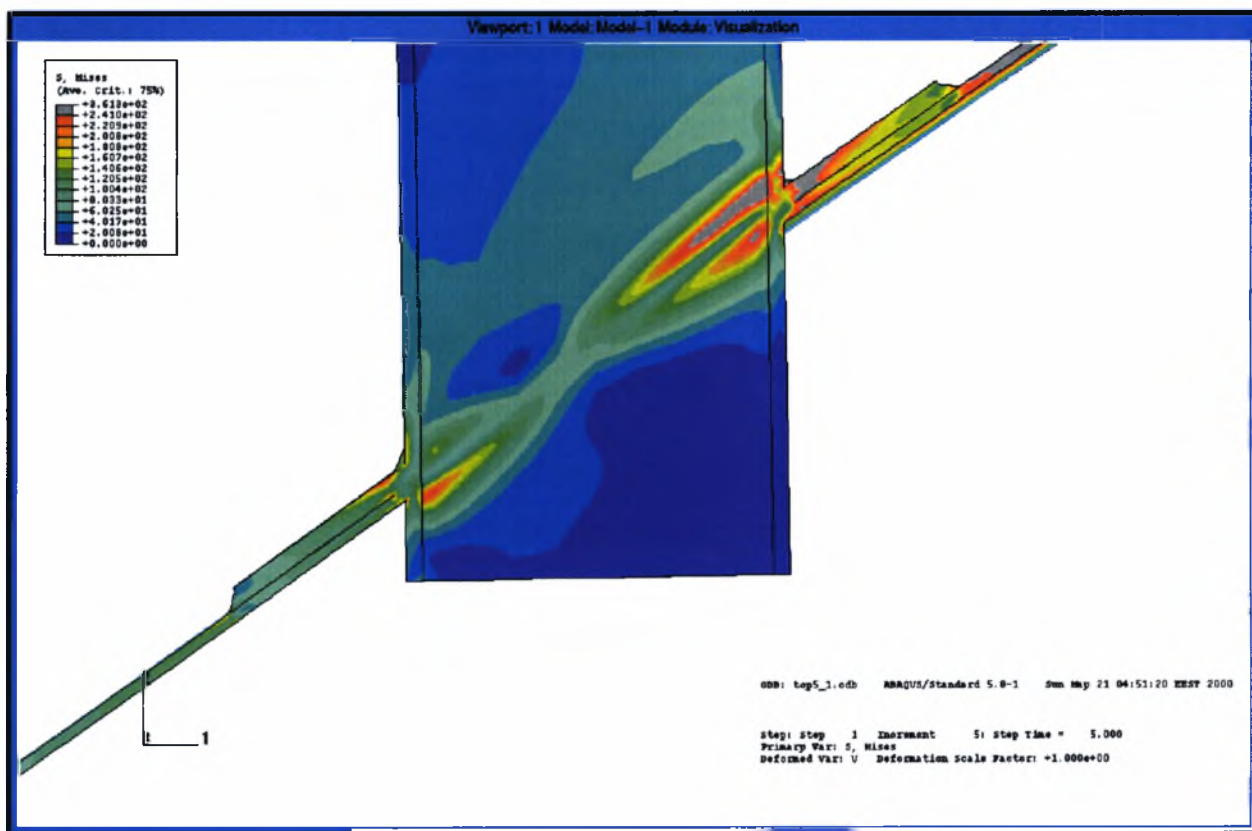
Σχήμα 2.82 Αρχική και παραμορφωμένη γεωμετρία της κατασκευής



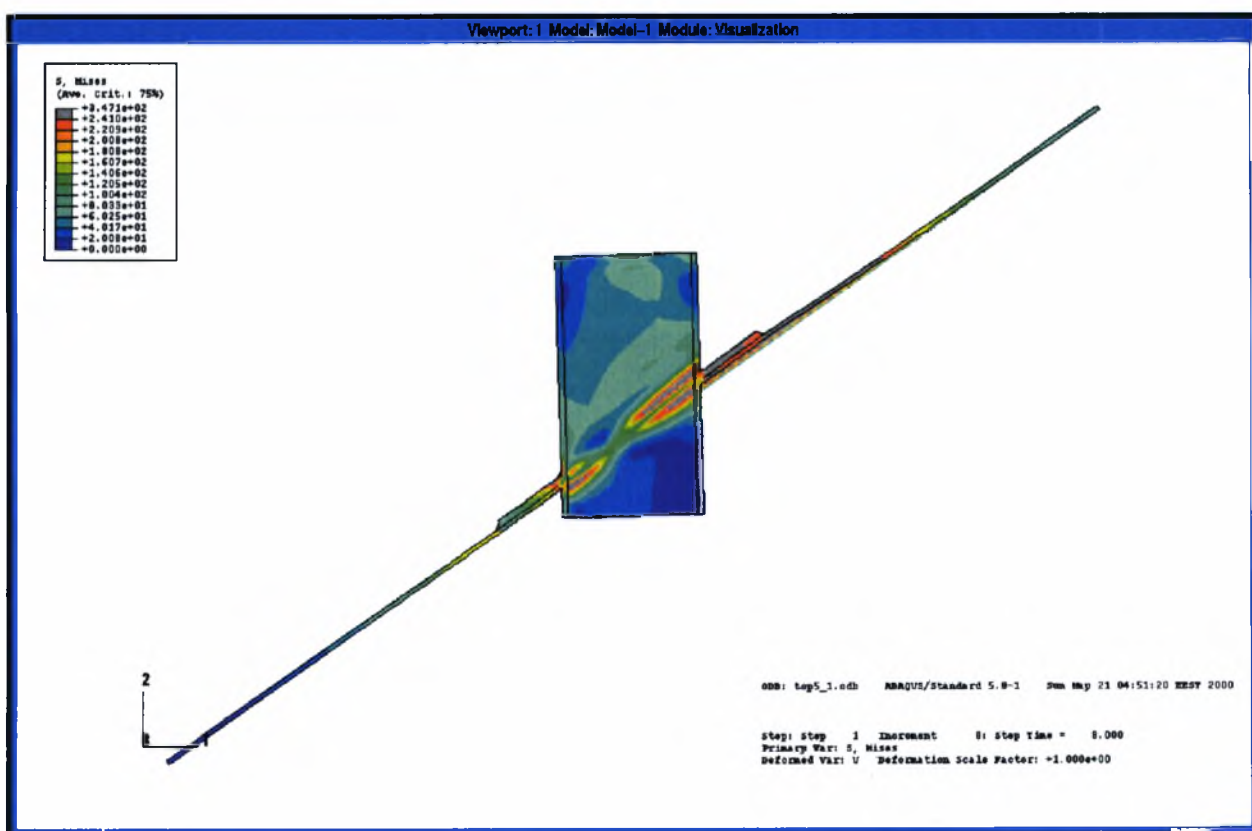
Σχήμα 2.83 Ισοϋψείς της σ_e για $u=1\text{mm}$



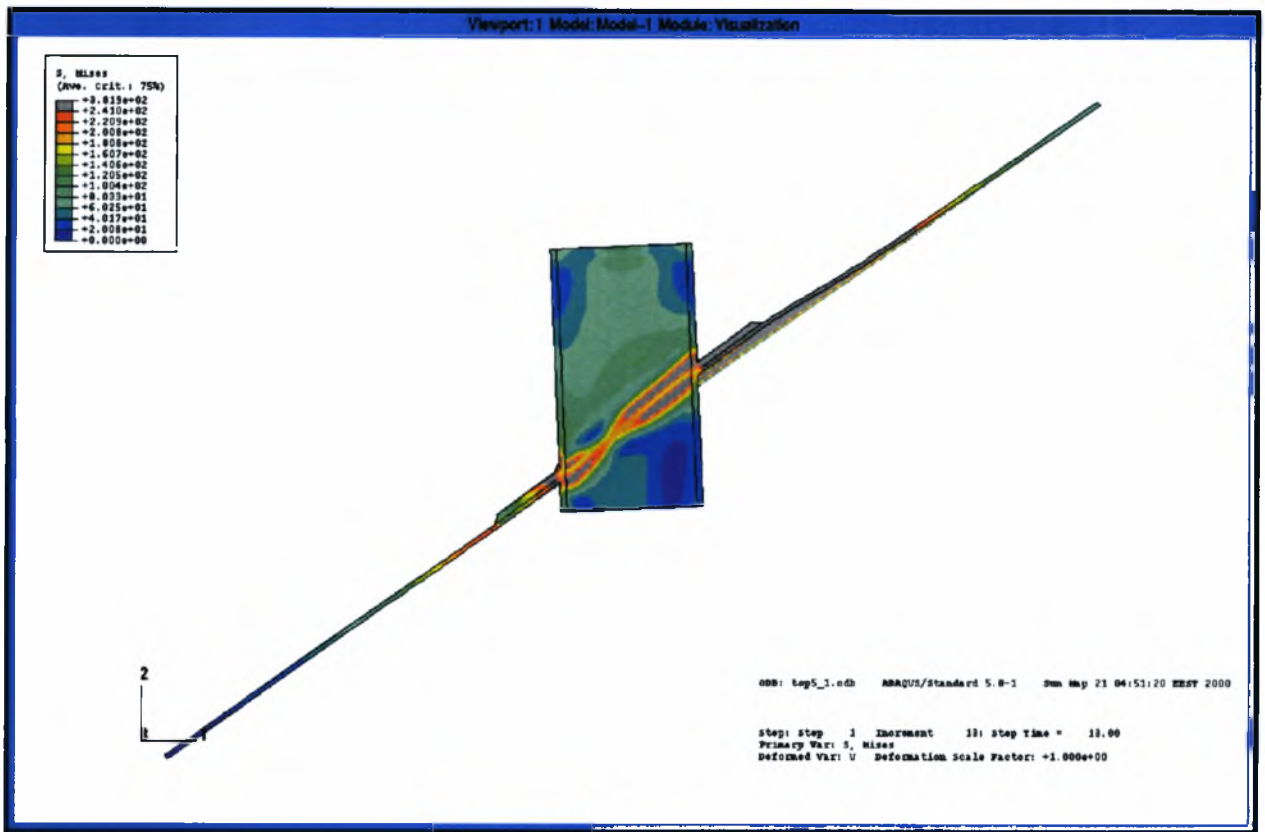
Σχήμα 2.84 Ισοϋψείς της σ_e για $u=2\text{mm}$



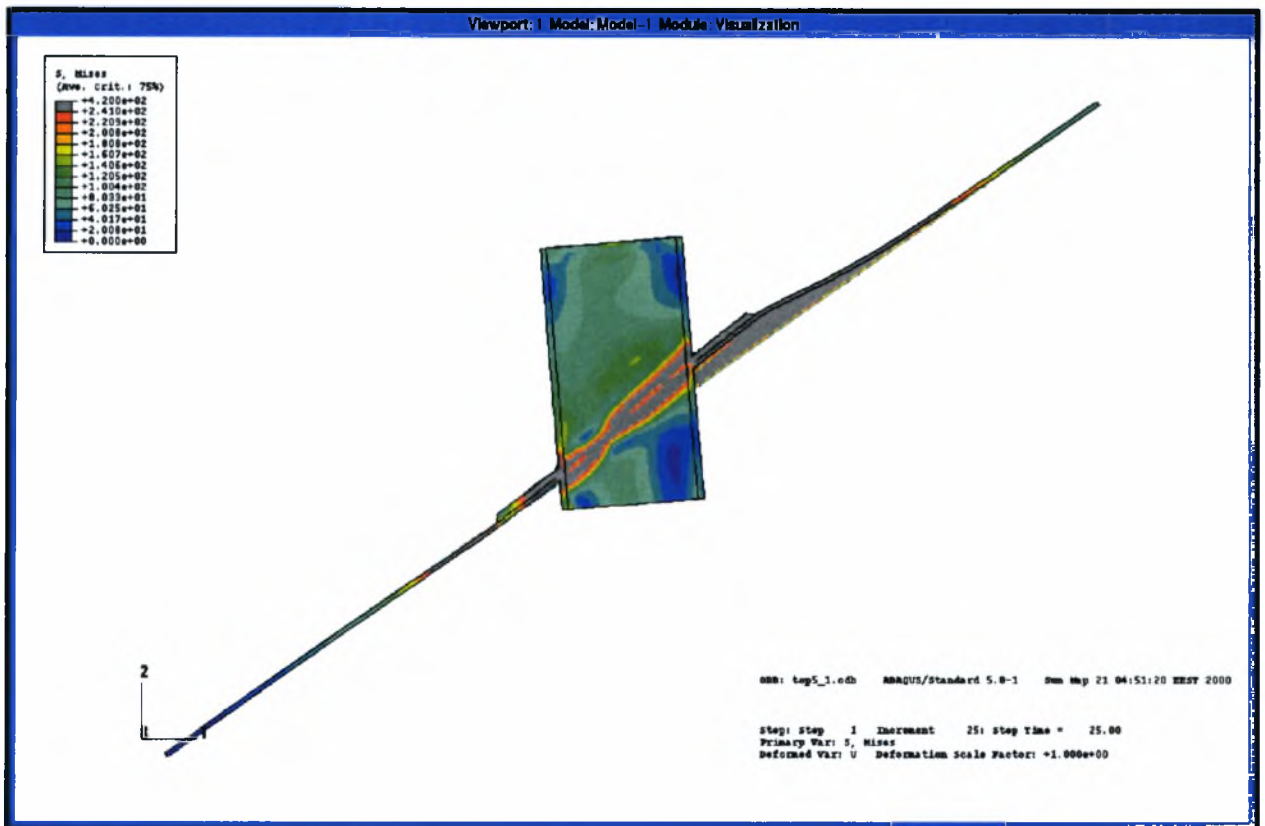
Σχήμα 2.85 Ισοϋψείς της σ_e για $u=5$ mm



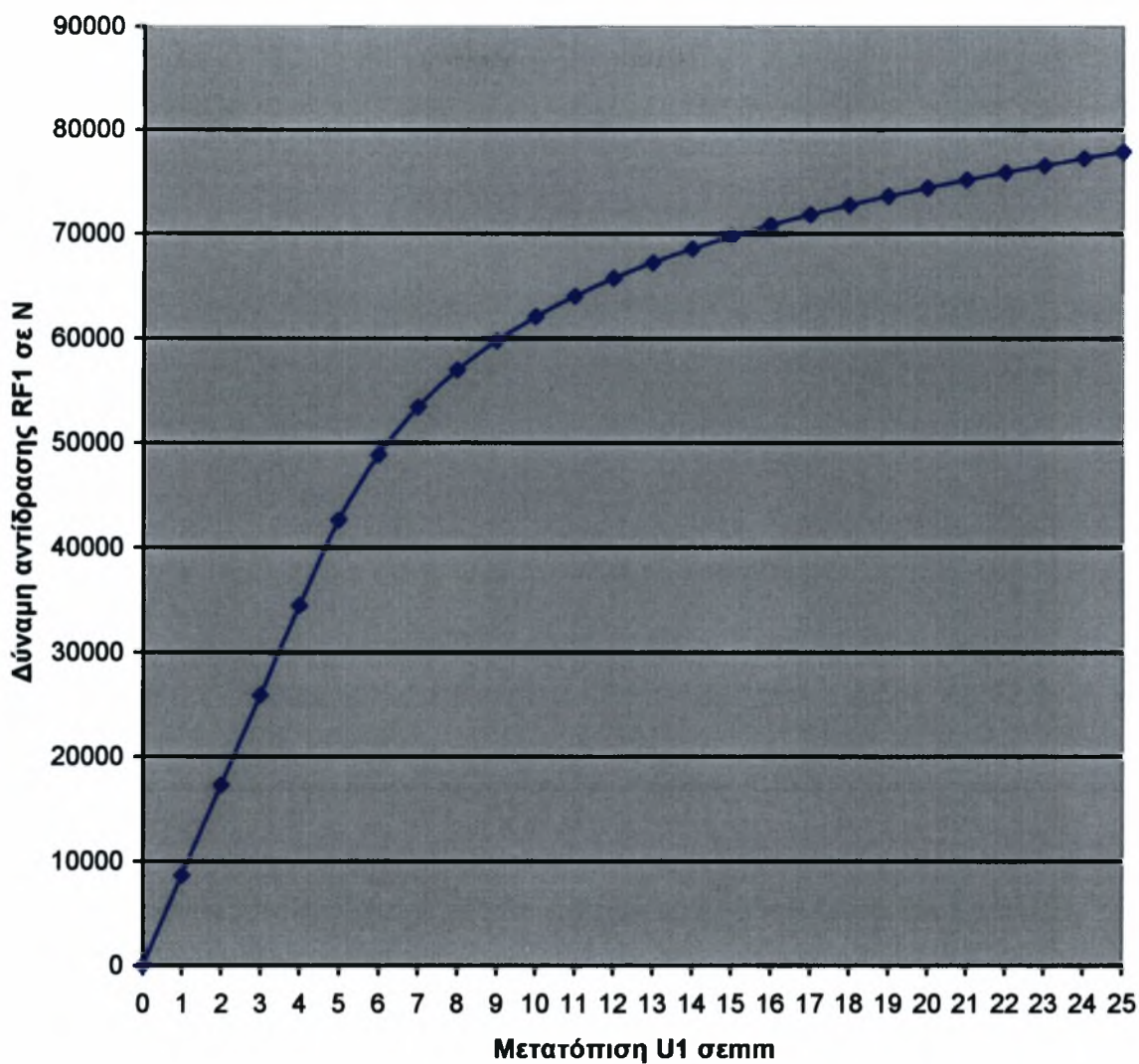
Σχήμα 2.86 Ισοϋψείς της σ_e για $u=8$ mm



Σχήμα 2.87 Ισοΰψεις της σ_e για $u=18$ mm



Σχήμα 2.88 Ισοΰψεις της σ_e για $u=25$ mm



Σχήμα 2.89 Διάγραμμα δύναμης αντίδρασης RF1 και μετατόπισης U1

Για τη συγκεκριμένη σύνδεση η ακαμψία της κατασκευής γίνεται μικρότερη από το ένα δέκατο της αρχικής της τιμής, $k_b = 8639,9$ [KN/m], για μία μετατόπιση 18 mm, $k_b = 848,22$ [KN/m]. Είναι δυνατό να θεωρηθεί, πως η κατασκευή έχει αστοχήσει για τη συγκεκριμένη μετατόπιση των 18 mm.

6 Σύνδεση Νο 4 στην οροφή της δεξαμενής

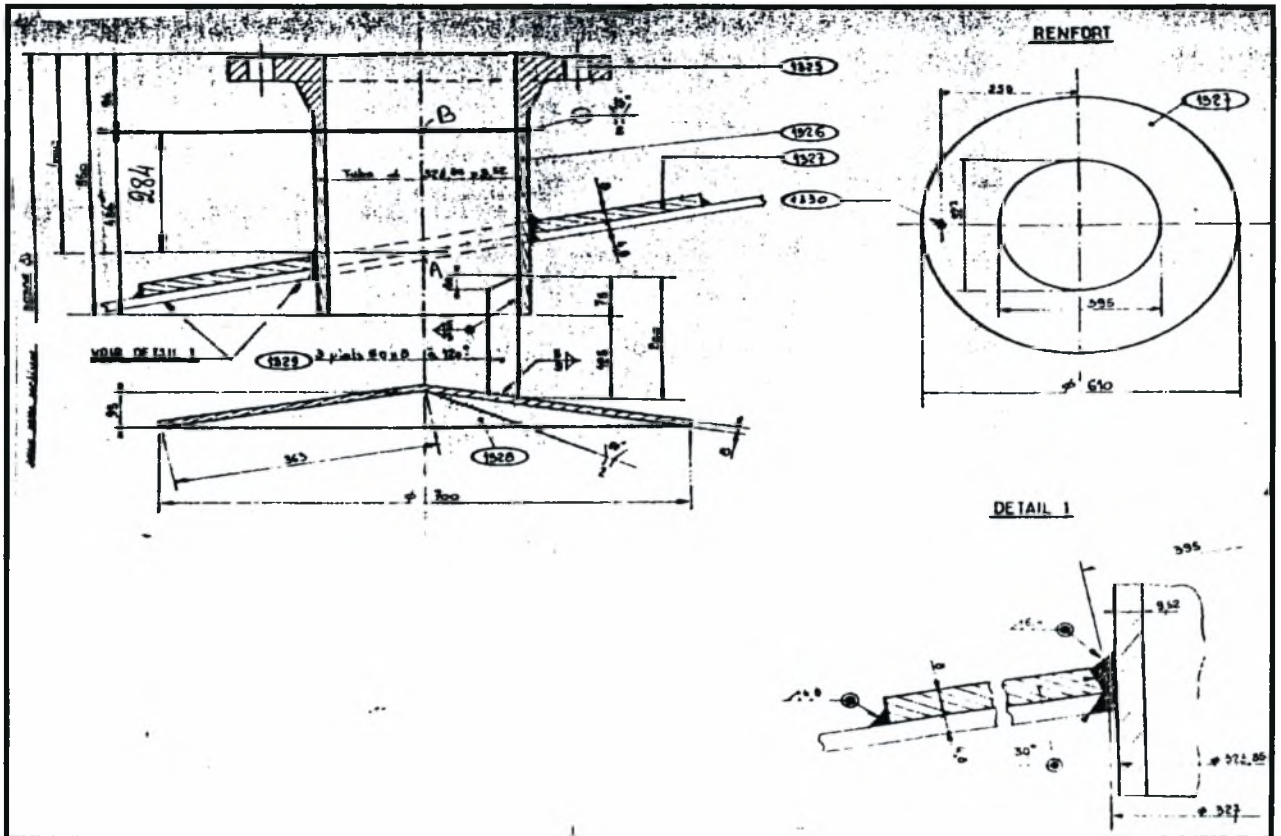
Το «φορτίο» που επιβάλλεται στην κατασκευή είναι μία οριζόντια μετατόπιση u στο σημείο Β ως προς το σημείο Α, Σχήμα 2.90. Το μήκος Α-Β είναι 284 mm. Το πάχος της σωλήνωσης είναι 9.52 mm. Για τη μοντελοποίηση της σύνδεσης χρησιμοποιήθηκαν 14224 κόμβοι και 10344 στοιχεία. Η ανάλυση εκτελείται αυξάνοντας σταδιακά το u με βήμα $\Delta u = 1$ mm μέχρι τα 8 mm. Στον Πίνακα 2.6 δίνεται ο υπολογισμός της «μέσης κλίσης» της σωλήνωσης.

Μετατόπιση u (mm)	Γωνία φ (μοίρες)
1	0.20
2	0.40
3	0.60
4	0.80
5	1.00
6	1.20
7	1.40
8	1.60

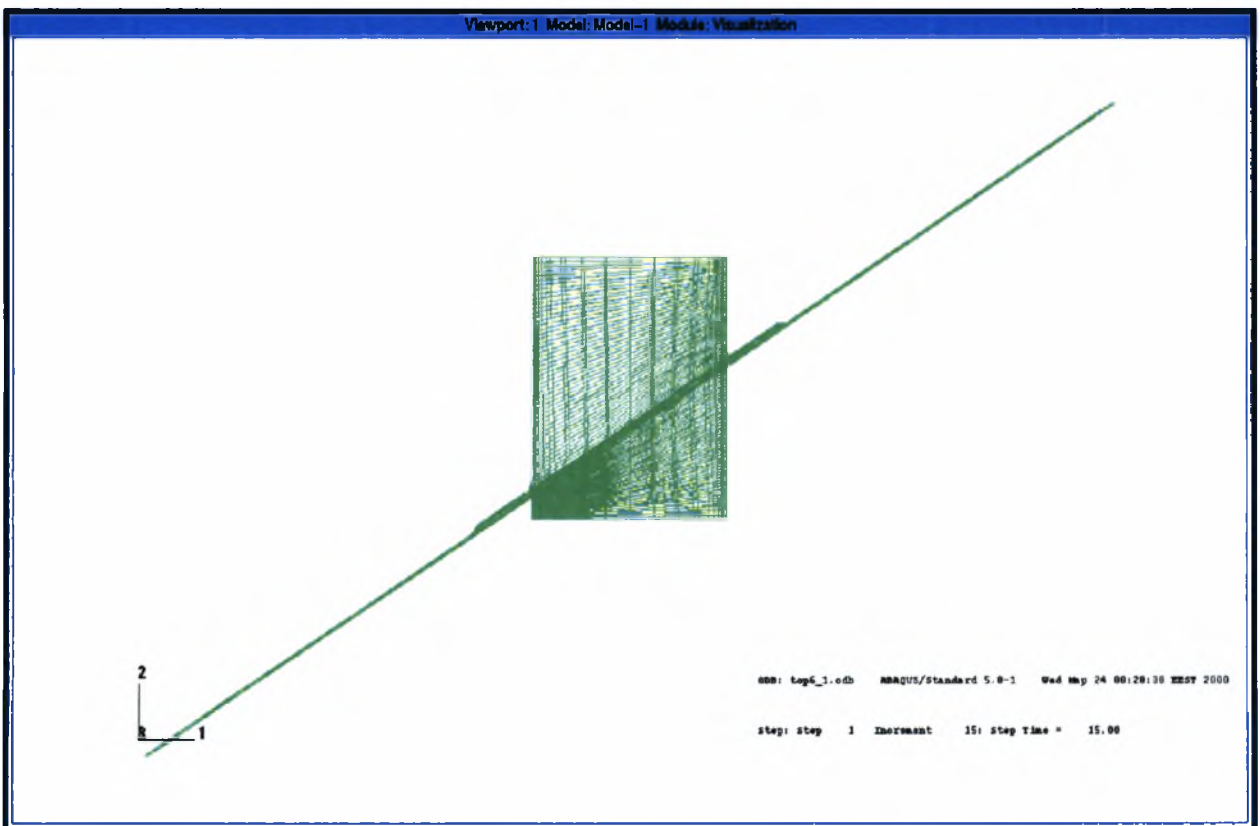
Πίνακας 2.6

Η ανάλυση βασίζεται στο μηχανολογικό σχέδιο του σχήματος 2.90. Στο Σχήμα 2.91 φαίνεται ο κάρναβος που χρησιμοποιείται. Στο Σχήμα 2.92 φαίνεται η αρχική και η παραμορφωμένη γεωμετρία της σύνδεσης. Για μετατόπιση 1 mm η μέγιστη τάση του von Mises που εμφανίζεται είναι ίση με 69.76 MPa. Λόγω της γραμμικότητας του προβλήματος η ισοδύναμη τάση θα ξεπεράσει το όριο διαρροής για $u = 3.45$ mm.

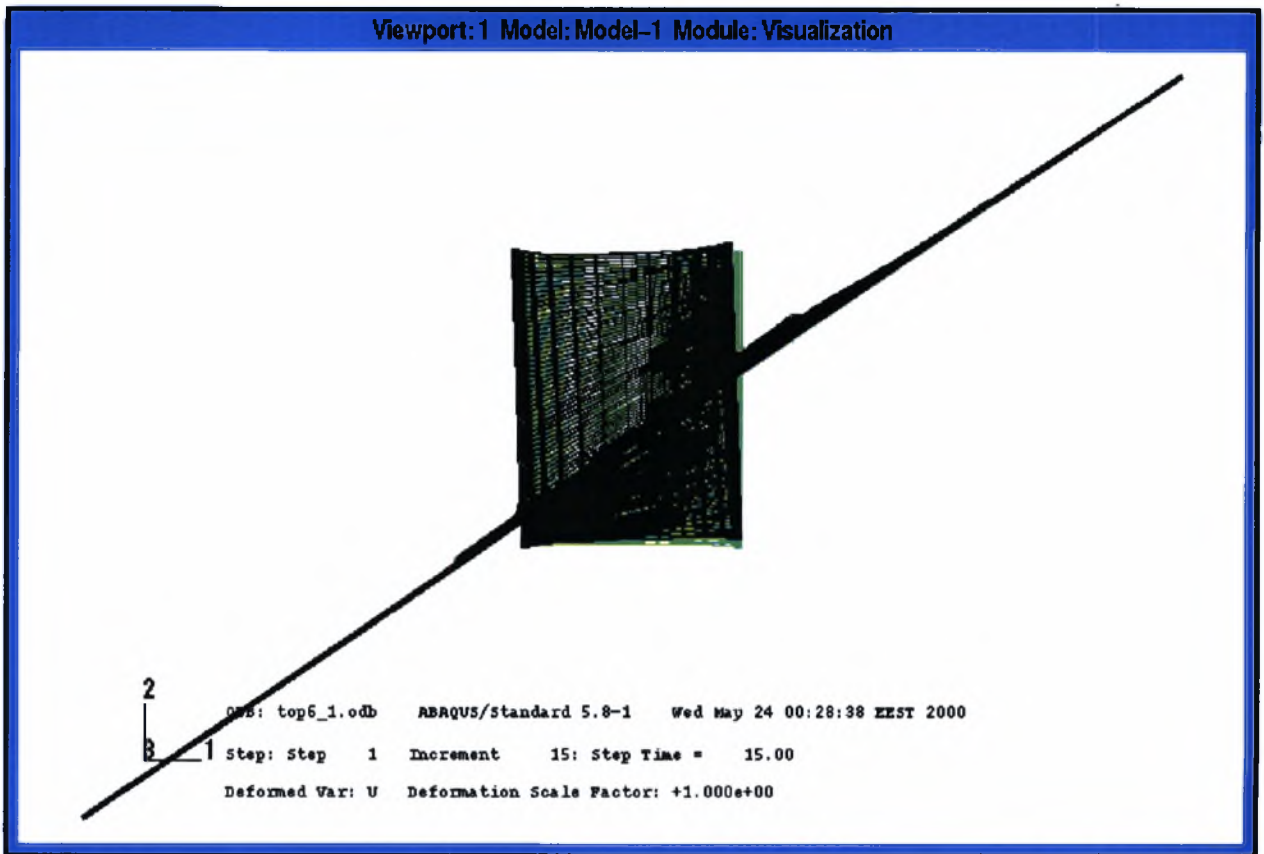
Στο Σχήμα 2.93 δίνονται οι ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσης του von Mises για $u = 1$ mm. Για $u = 2$ και $u = 3$ mm η τάση δεν έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής. Στο Σχήμα 2.94 εμφανίζεται η κατανομή των τάσεων για $u = 4$ mm. Με γκρι παρουσιάζεται η περιοχή όπου η σ_e ξεπερνά το όριο διαρροής. Όπως φαίνεται, για $u = 4$ mm οι τάσεις ξεπερνούν τοπικά το όριο διαρροής πάνω στη συγκόλληση της σωλήνας με τον ενισχυτικό δακτύλιο. Για $u = 5$ mm η πλαστική ζώνη εξαπλώνεται τοπικά στην περιοχή της συγκόλλησης της σωλήνας με τον ενισχυτικό δακτύλιο, αλλά και στη συγκόλληση του δακτυλίου με τη δεξαμενή. Για $u = 6$ mm η πλαστική ζώνη καλύπτει όλο το πάχος της δεξαμενής αλλά και του δακτυλίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.95, ενώ στη διατομή της σωλήνας δεν έχουν ενωθεί ακόμη οι πλαστικές περιοχές. Η ίδια εικόνα λαμβάνεται και για $u = 7$ mm και $u = 8$ mm. Ταυτόχρονα, για $u = 8$ mm οι τάσεις ξεπερνούν το όριο θραύσης του υλικού 414 MPa πάνω στη συγκόλληση της σωλήνας με τη δεξαμενή, Σχήμα 2.96. Στο Σχήμα 2.97 παρουσιάζεται το διάγραμμα RF1-U1.



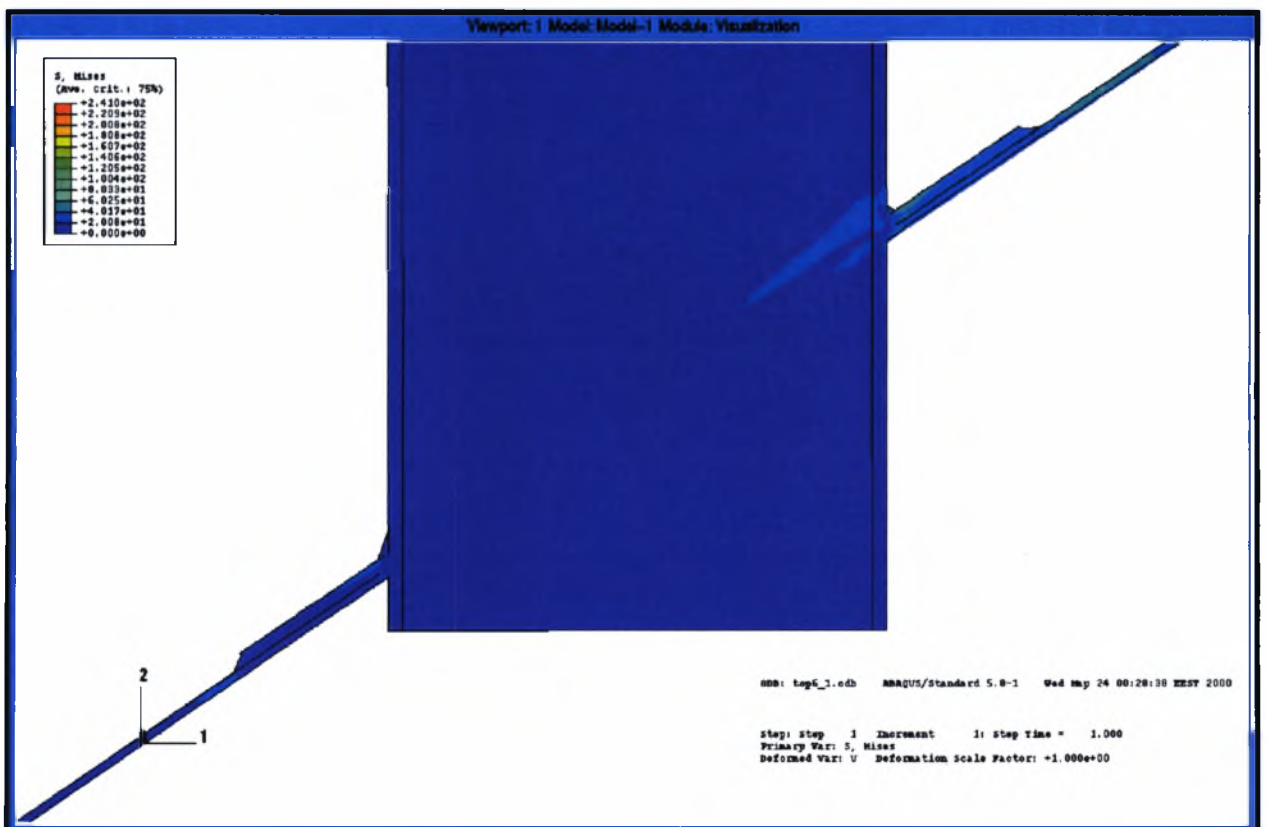
Σχήμα 2.90 Μηχανολογικό σχέδιο της Νο 4 σύνδεσης στην κορυφή της δεξαμενής



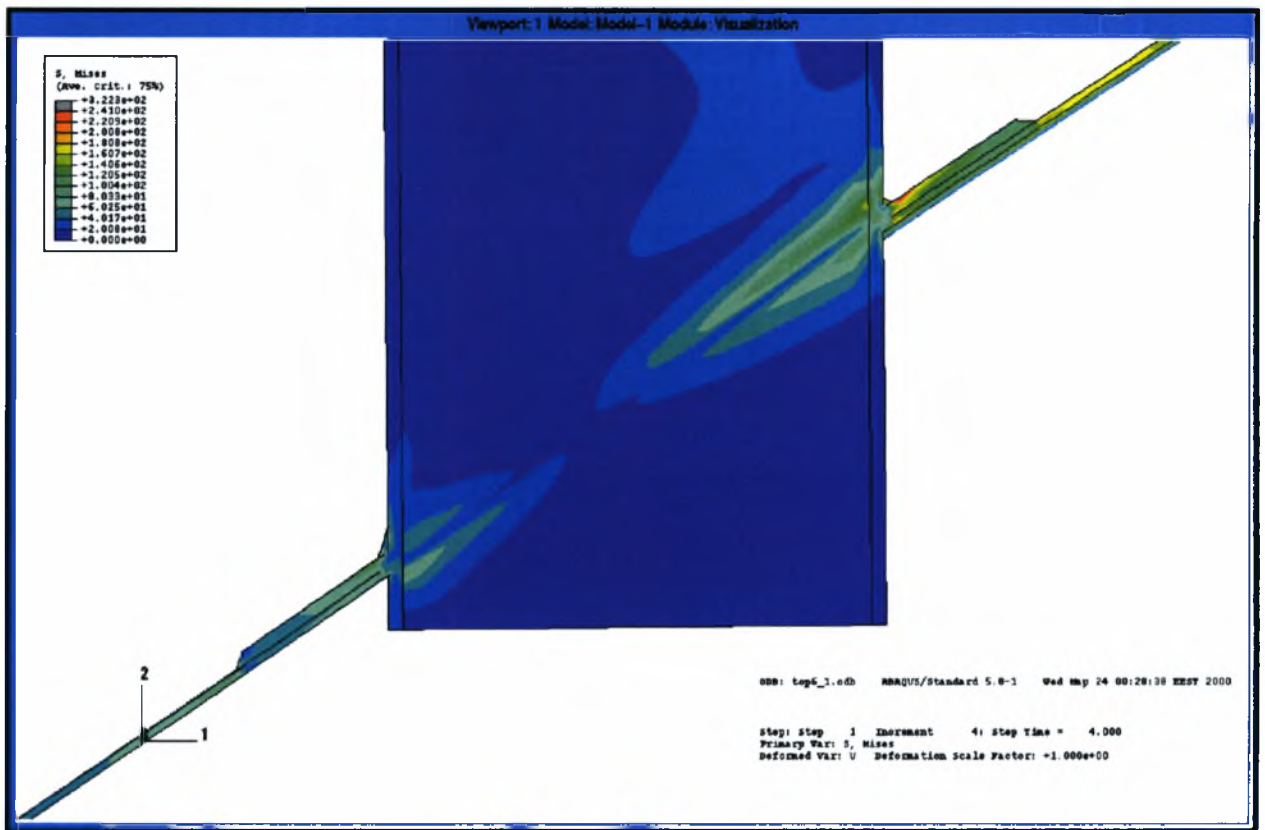
Σχήμα 2.91 Ο τριδιάστατος κάναβος της σύνδεσης



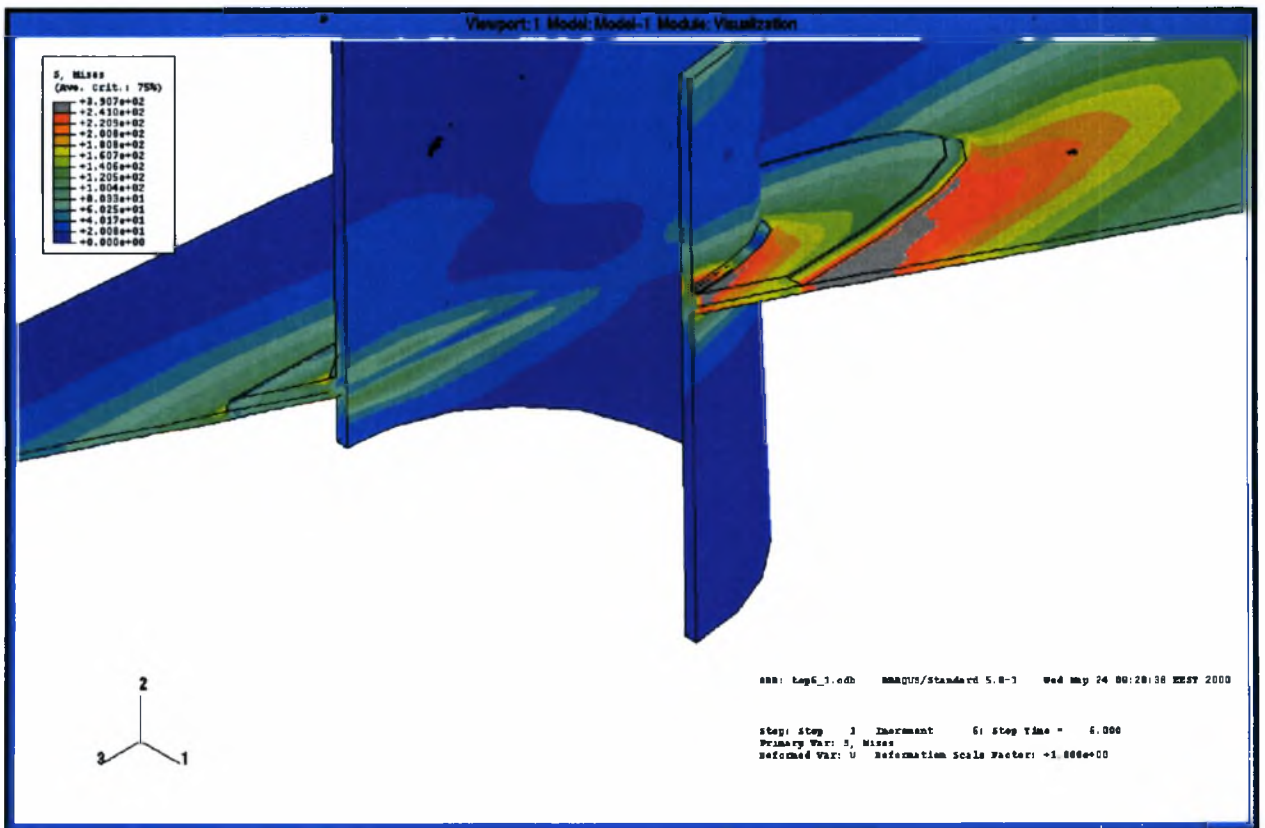
Σχήμα 2.92 Αρχική και παραμορφωμένη γεωμετρία της κατασκευής



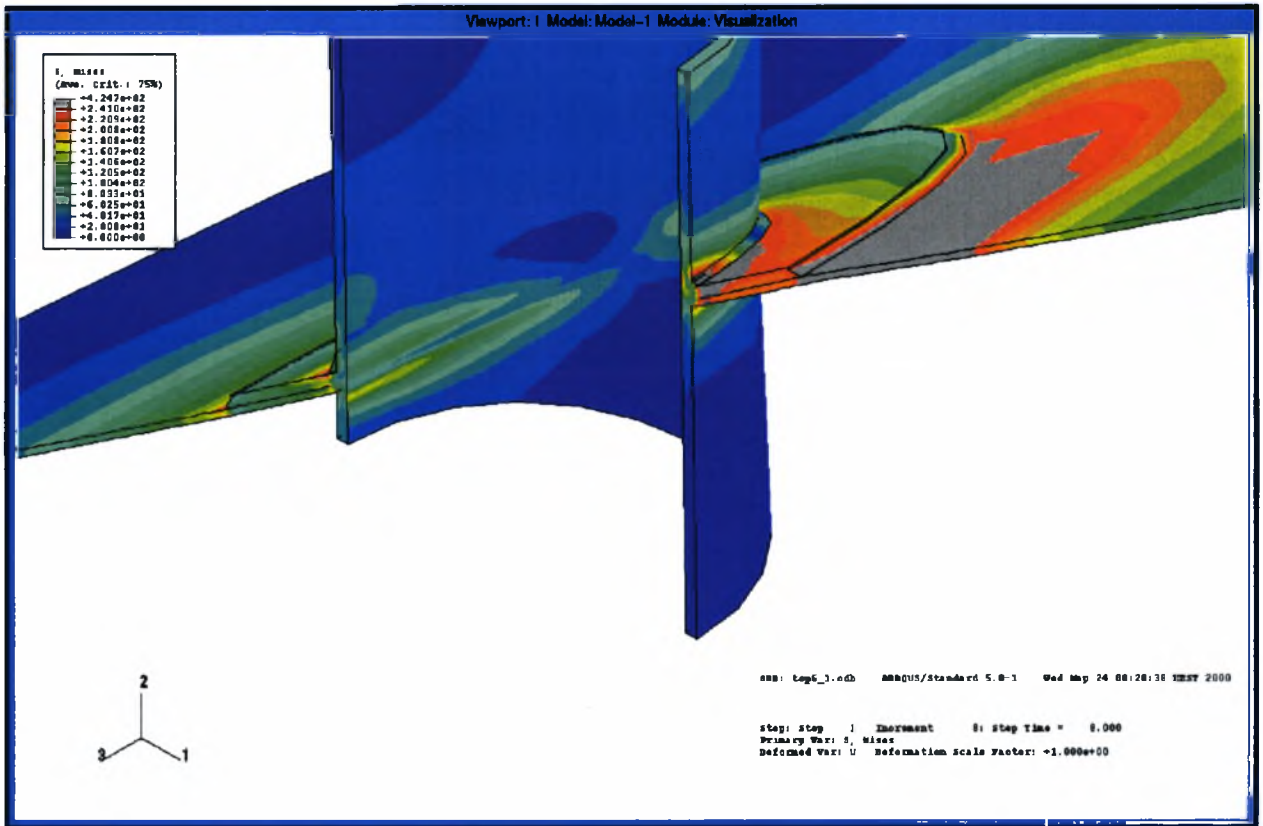
Σχήμα 2.93 ΙσοΨείς της σ_e για $u=1\text{ mm}$



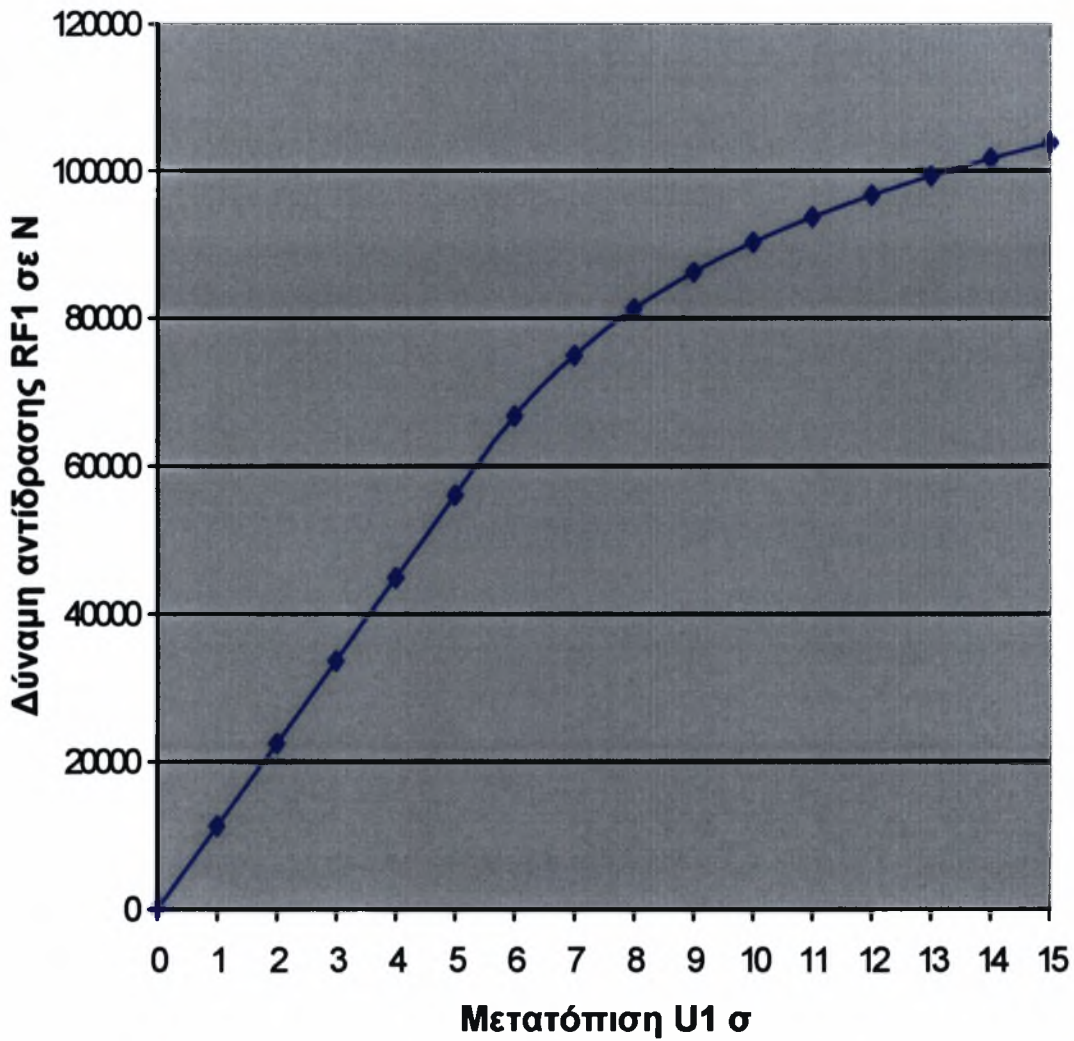
Σχήμα 2.94 Ισοϋψείς της σ_e για $u=4$ mm



Σχήμα 2.95 Ισοϋψείς της σ_e για $u=6$ mm



Σχήμα 2.96 ΙσοΨείς της σ_e για $u=8$ mm



Σχήμα 2.97 Διάγραμμα δύναμης αντίδρασης RF1 και μετατόπισης U1

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η αστοχία επέρχεται στα 8 mm λόγω τάσεων θραύσης. Η ακαμψία στα 8 mm μετατόπισης, $k_b = 821,328$ [KN/m], είναι αρκετά μεγαλύτερη από το ένα δέκατο της αρχικής της τιμής, $k_b = 1121$ [KN/m].

7 Σύνδεση Νο 5 στην οροφή της δεξαμενής

Το «φορτίο» που επιβάλλεται στην κατασκευή είναι μία οριζόντια μετατόπιση u στο σημείο Β ως προς το σημείο Α, Σχήμα 2.98. Η απόσταση Α-Β είναι ίση με 228 mm. Το πάχος της σωλήνωσης είναι 5.49 mm. Για τη μοντελοποίηση της σύνδεσης χρησιμοποιήθηκαν 11184 κόμβοι και 7792 στοιχεία. Η ανάλυση εκτελείται αυξάνοντας σταδιακά το u με βήμα $\Delta u = 1$ mm μέχρι τα 30 mm. Στον Πίνακα 2.7 δίνεται ο υπολογισμός της «μέσης κλίσης» της σωλήνωσης.

Μετατόπιση u (mm)	Γωνία φ (μοίρες)
1	0.25
2	0.50
3	0.75
4	1.00
5	1.25
6	1.50
7	1.75
8	2.00
15	3.75
30	7.50

Πίνακας 2.7

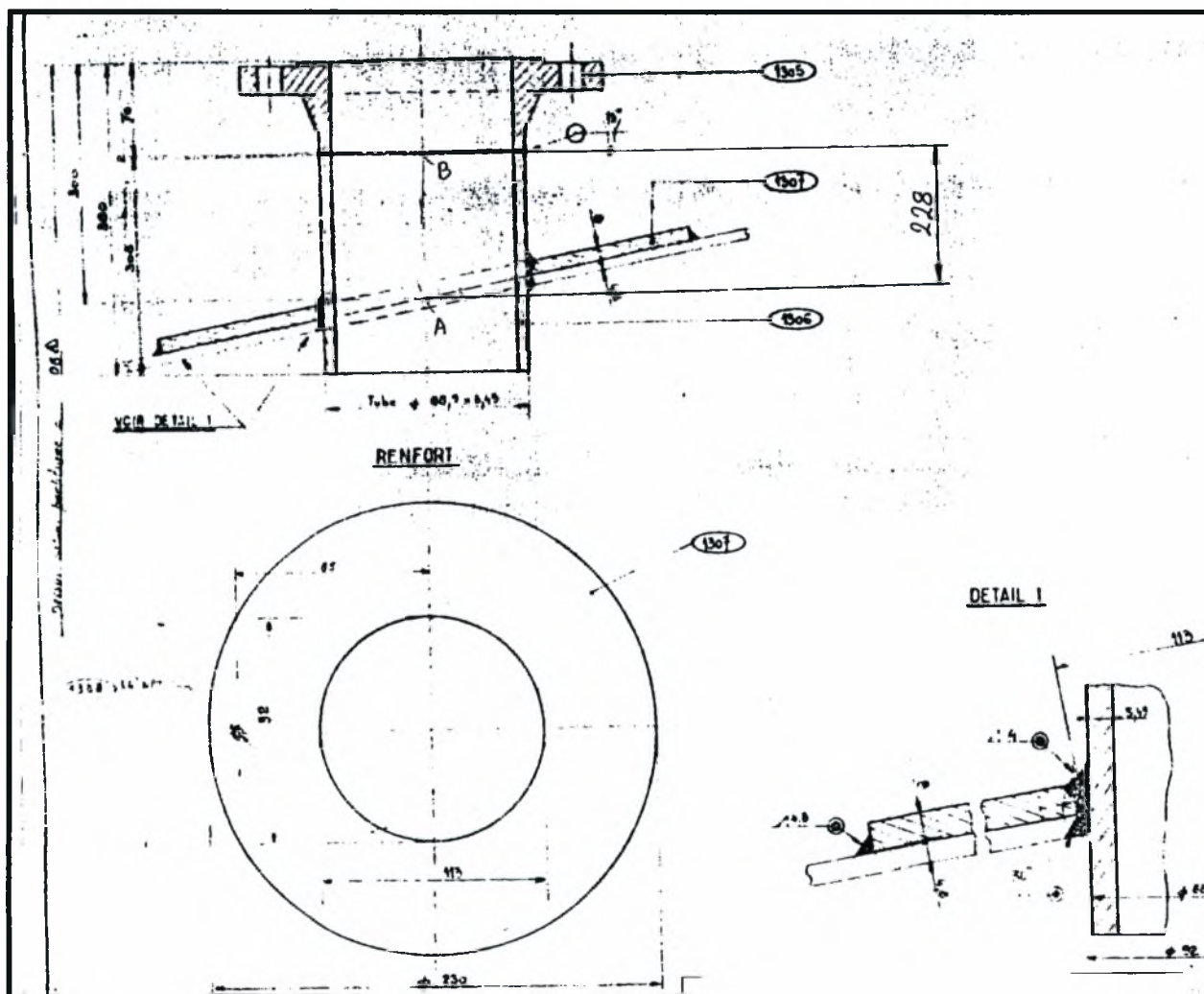
Η ανάλυση βασίζεται στο μηχανολογικό σχέδιο του σχήματος 2.98. Στο Σχήμα 2.99 φαίνεται ο κάρναβος που χρησιμοποιείται. Στο Σχήμα 2.100 παρουσιάζεται η αρχική και η παραμορφωμένη γεωμετρία. Για μετατόπιση 1 mm η μέγιστη τάση του von Mises που εμφανίζεται είναι ίση με 99.23 MPa. Λόγω της γραμμικότητας του προβλήματος η ισοδύναμη τάση θα ξεπεράσει το όριο διαρροής για $u = 2.43$ mm.

Στα Σχήματα 2.101-2.102 δίνονται οι ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσης του von Mises για $u = 1$ και $u = 2$ mm. Η τάση δεν έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής. Στο Σχήμα 2.103 εμφανίζεται η κατανομή των τάσεων για $u = 3$ mm. Με γκρι παρουσιάζεται η περιοχή όπου η σ_e ξεπερνά το όριο διαρροής. Όπως φαίνεται, για $u = 3$ mm οι τάσεις ξεπερνούν τοπικά το όριο διαρροής πάνω στη συγκόλληση της σωλήνας με το παρέμβυσμα.

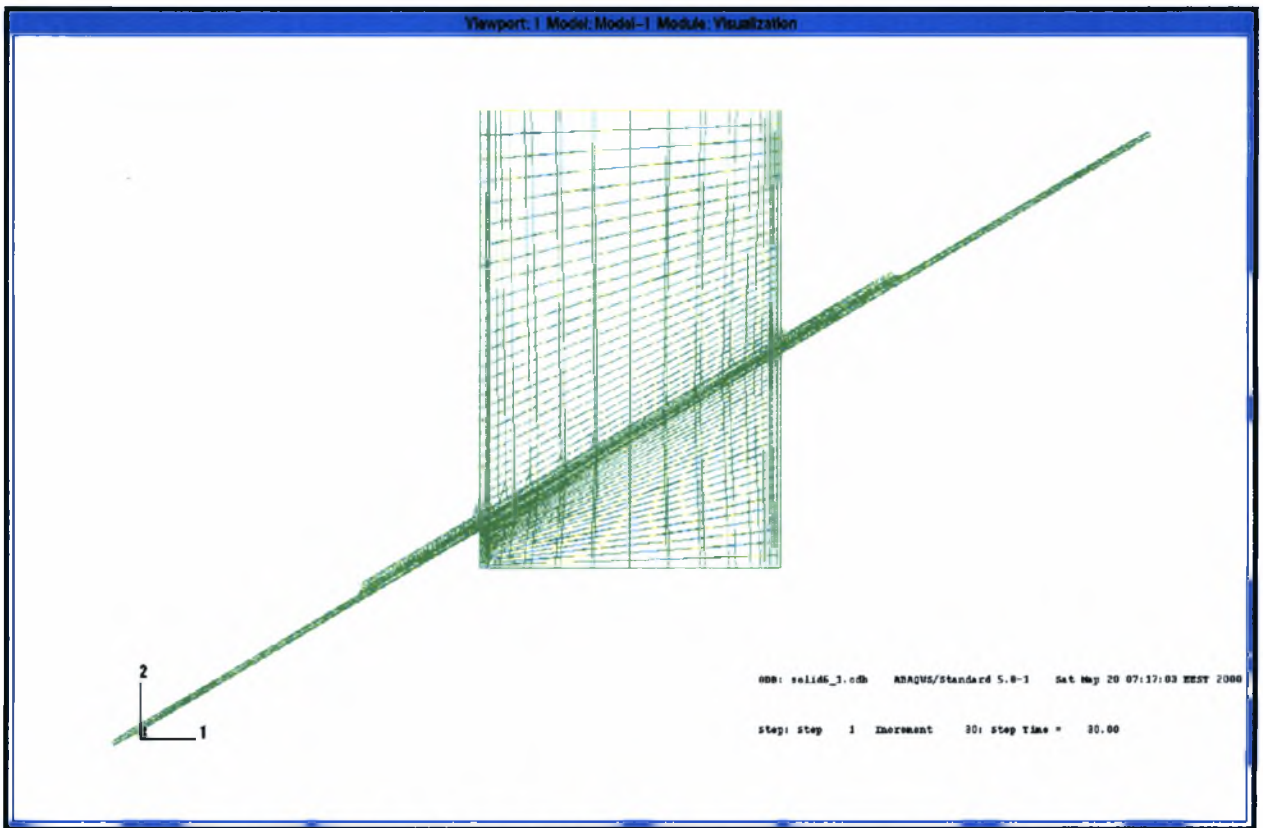
Για $u = 4$ mm η πλαστική ζώνη εξαπλώνεται τοπικά στην περιοχή της συγκόλλησης της σωλήνας με το δακτύλιο, αλλά και στη συγκόλληση του δακτυλίου με τη δεξαμενή.

Για $u = 5$ mm η πλαστική ζώνη καλύπτει όλο το πάχος της δεξαμενής και του δακτυλίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.104. Την ίδια εικόνα παρουσιάζουν και οι μετατοπίσεις $u = 6$ mm

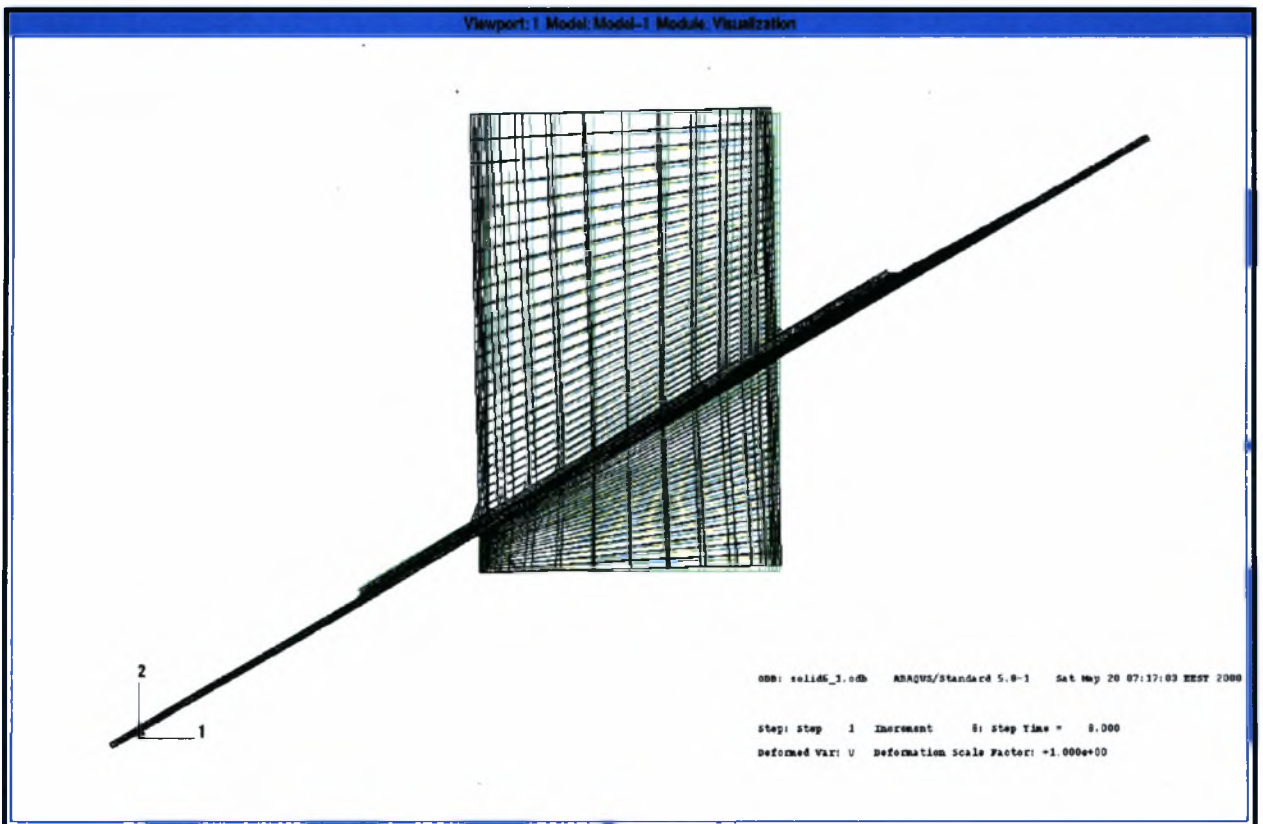
και $u = 7 \text{ mm}$. Για $u=8 \text{ mm}$ η πλαστική ζώνη καλύπτει την περιοχή της συγκόλλησης της σωλήνας με τη δεξαμενή και το δακτύλιο. Τέλος για $u=15 \text{ mm}$ οι τάσεις ξεπερνούν τοπικά το όριο θραύσης του υλικού, 414 MPa , κάτι που είναι πιο εμφανές στο Σχήμα 2.105 για $u = 30 \text{ mm}$. Στο σχήμα 2.106 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης αντίδρασης RF1 και μετατόπισης U1.



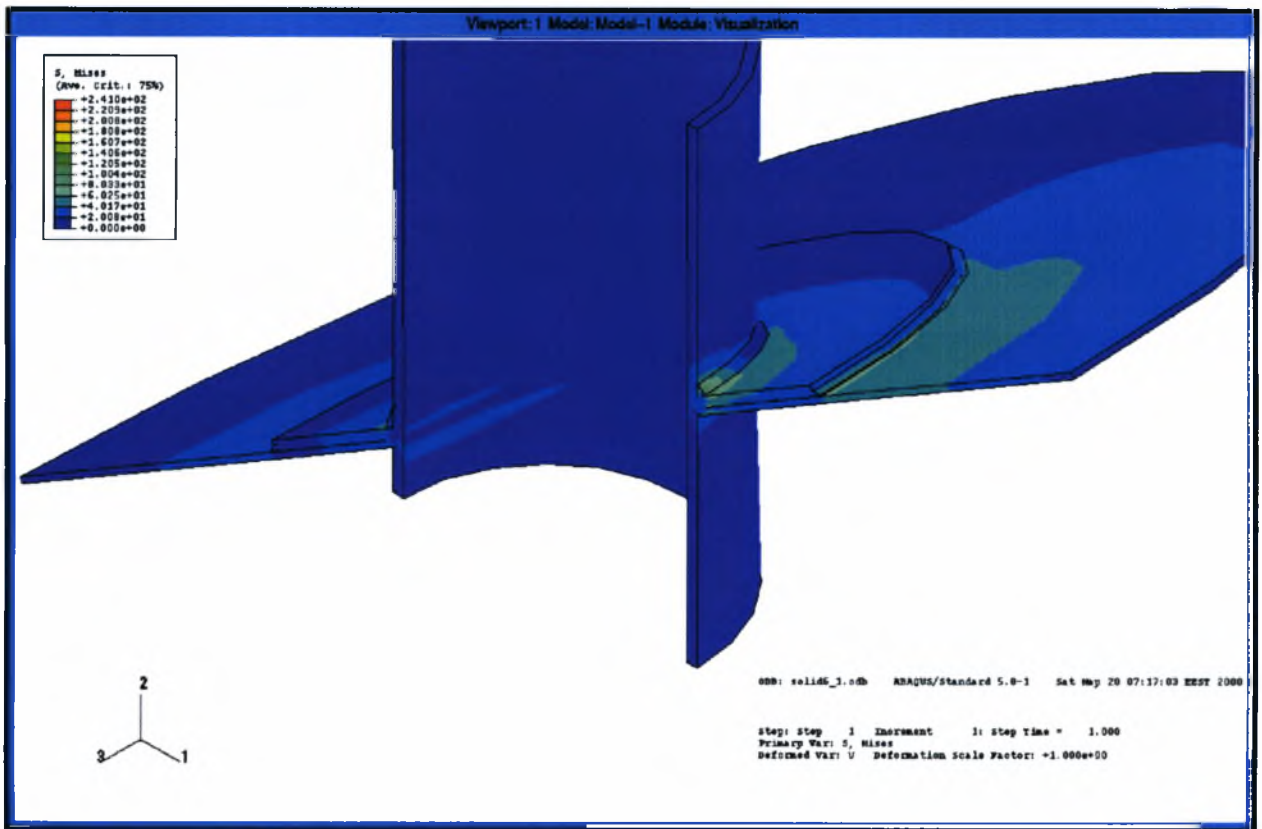
Σχήμα 2.98 Μηχανολογικό σχέδιο της Νο5 σύνδεσης στην κορυφή της δεξαμενής



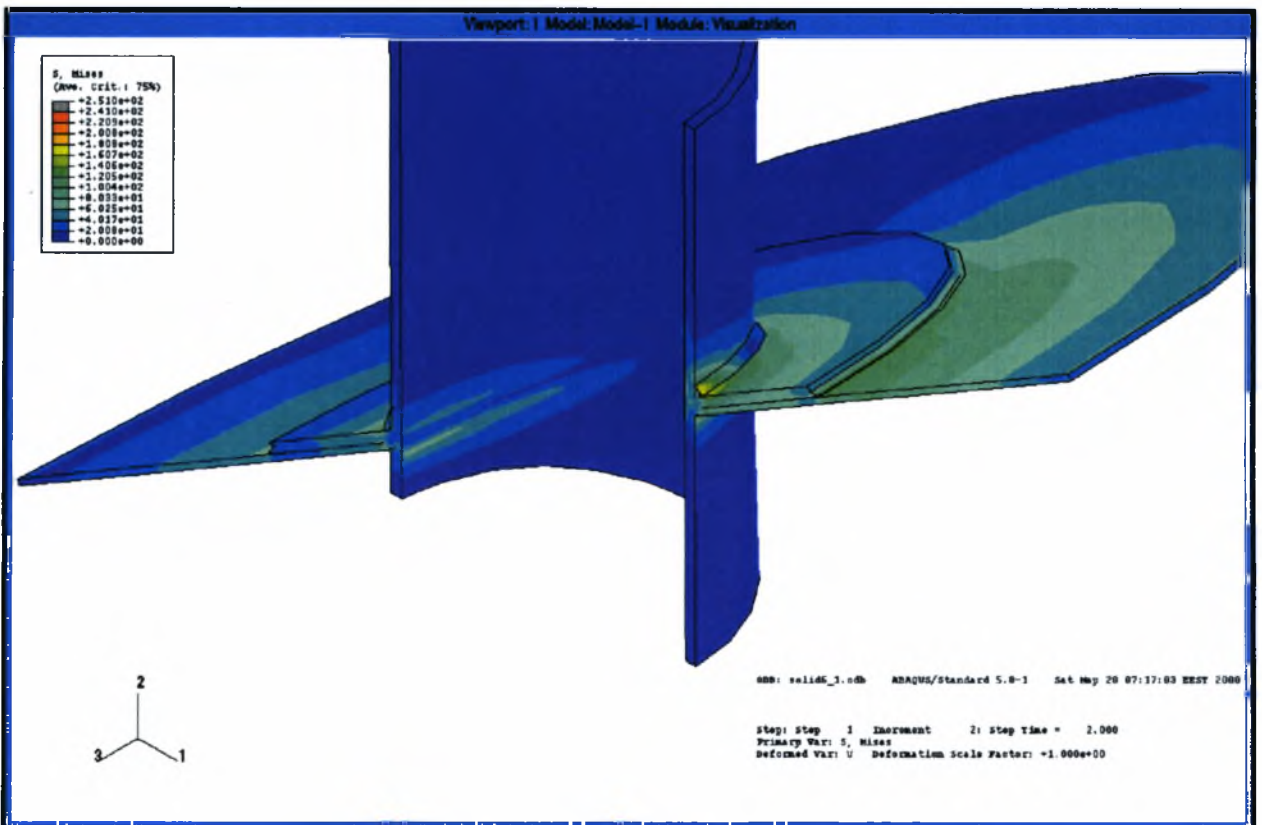
Σχήμα 2.99 Ο κάναβος της σύνδεσης Νο 5 στην κορυφή της δεξαμενής



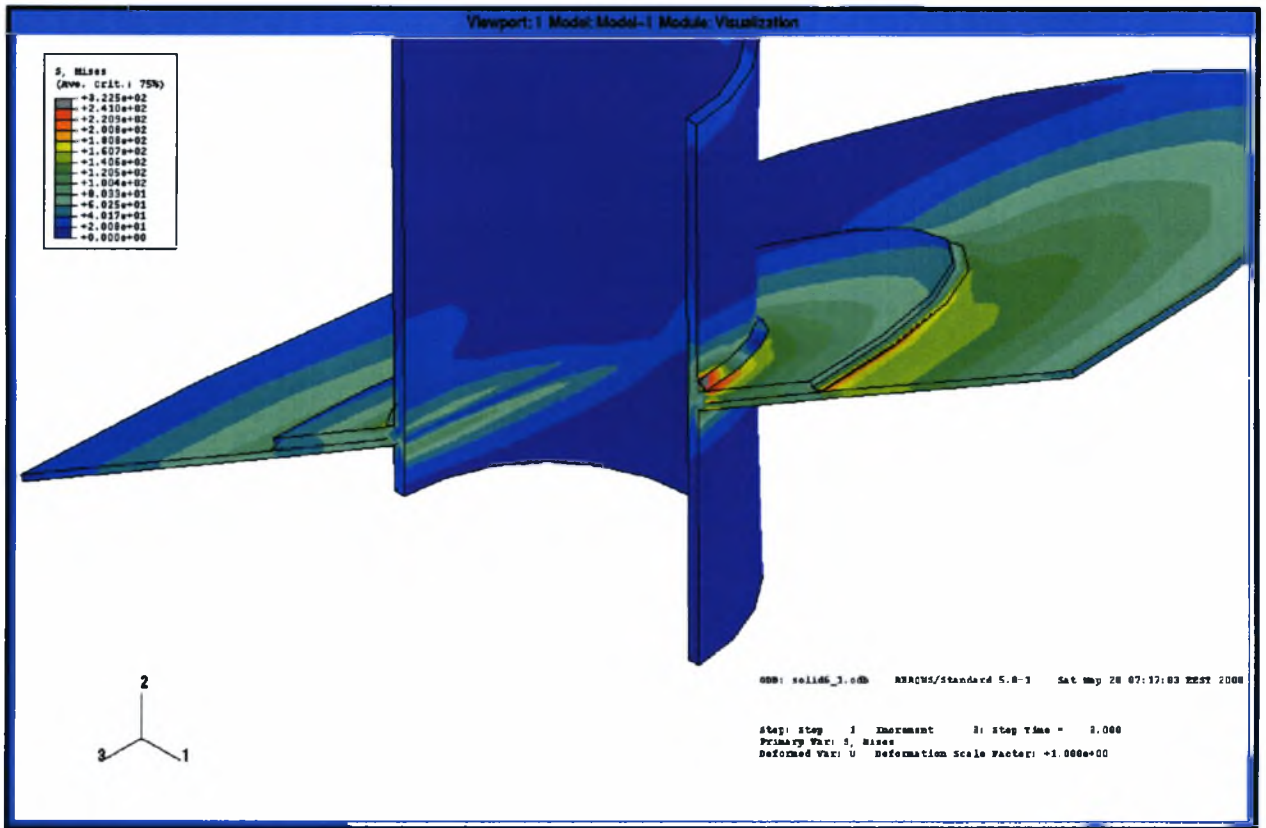
Σχήμα 2.100 Η αρχική και η παραμορφωμένη γεωμετρία της κατασκευής



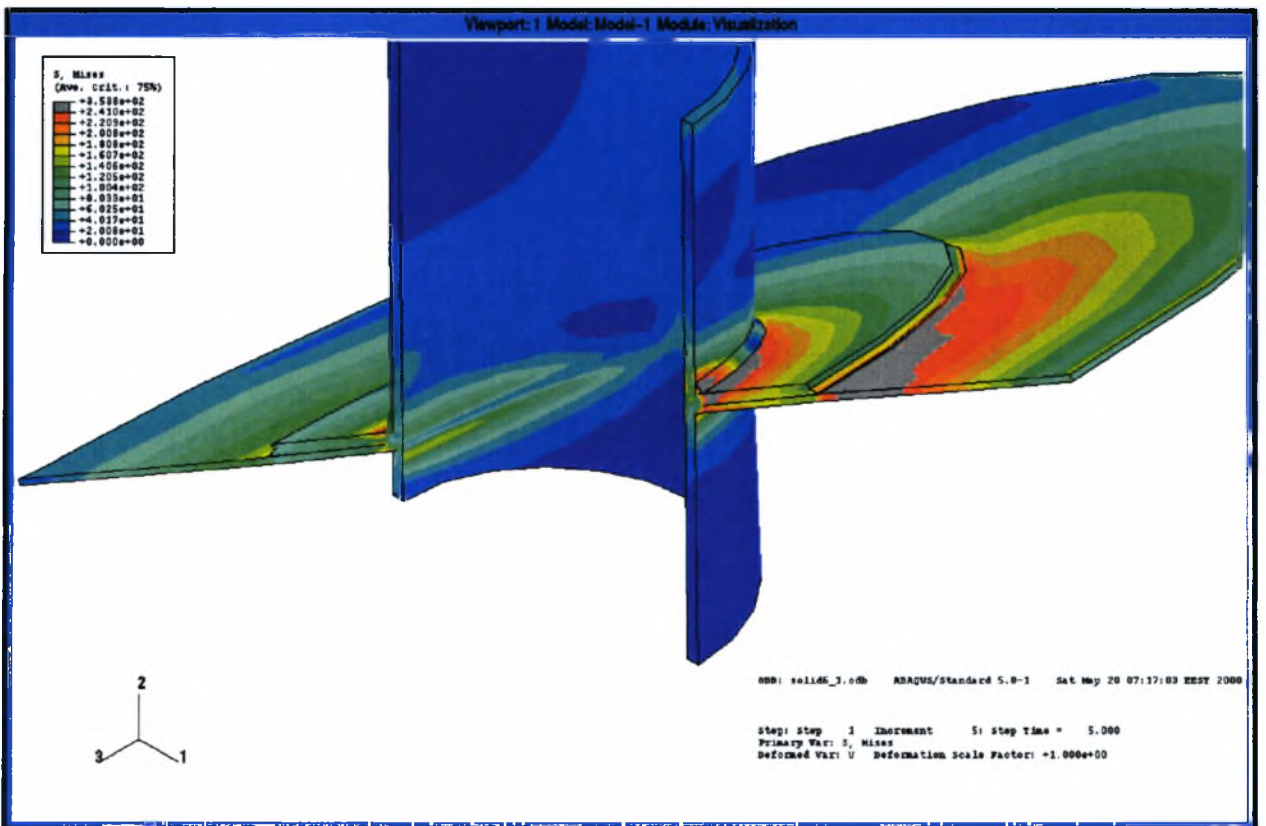
Σχήμα 2.101 Ισοϋψείς της σ_e για $u=1\text{ mm}$



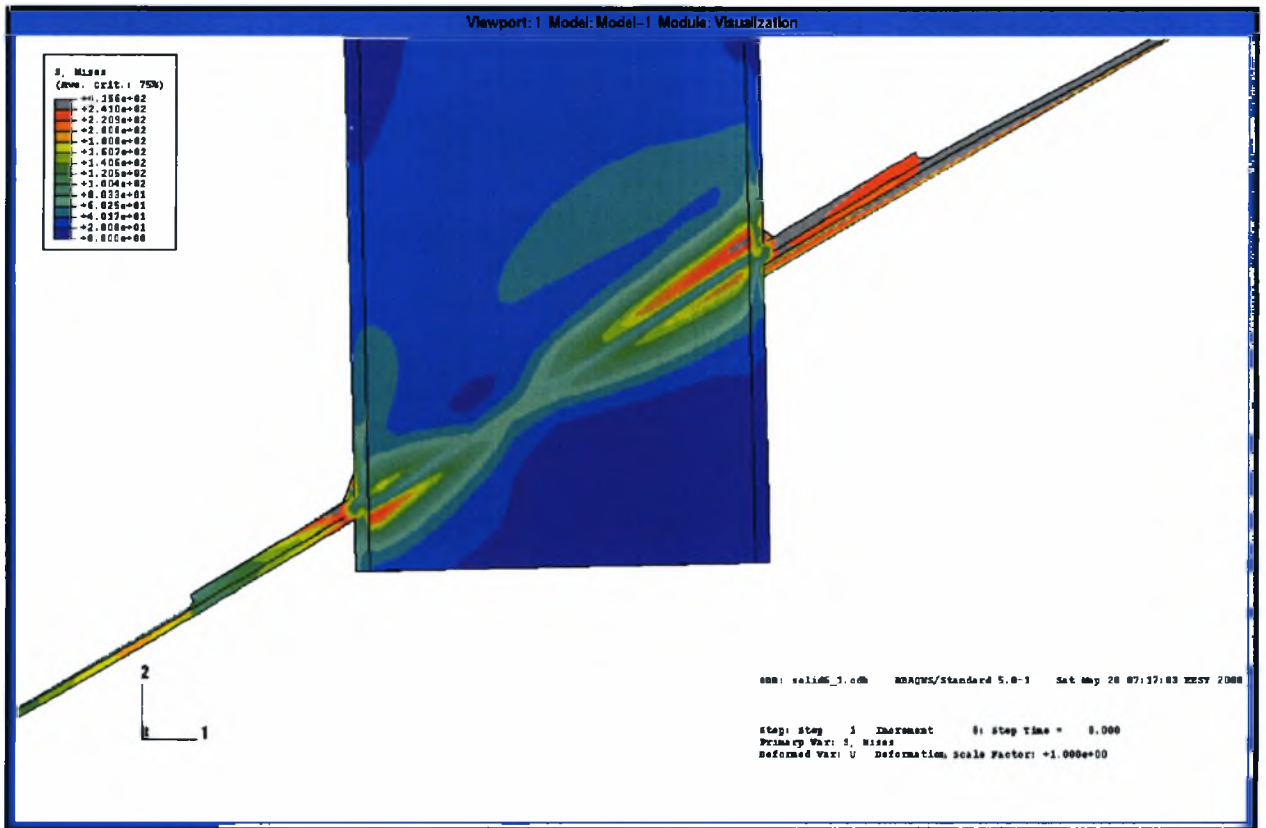
Σχήμα 2.102 Ισοϋψείς της σ_e για $u=2\text{ mm}$



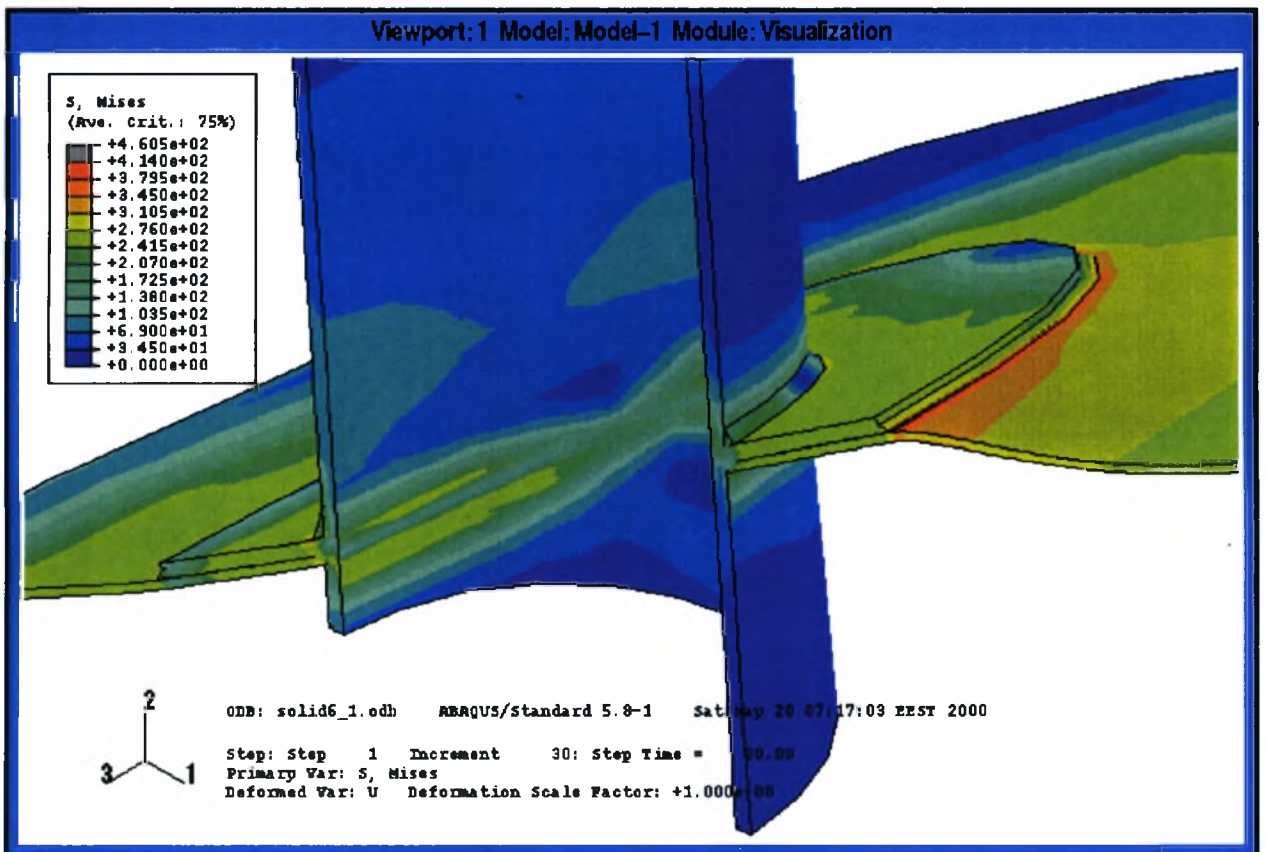
Σχήμα 2.103 Ισοϋψείς της σ_e για $u=3$ mm



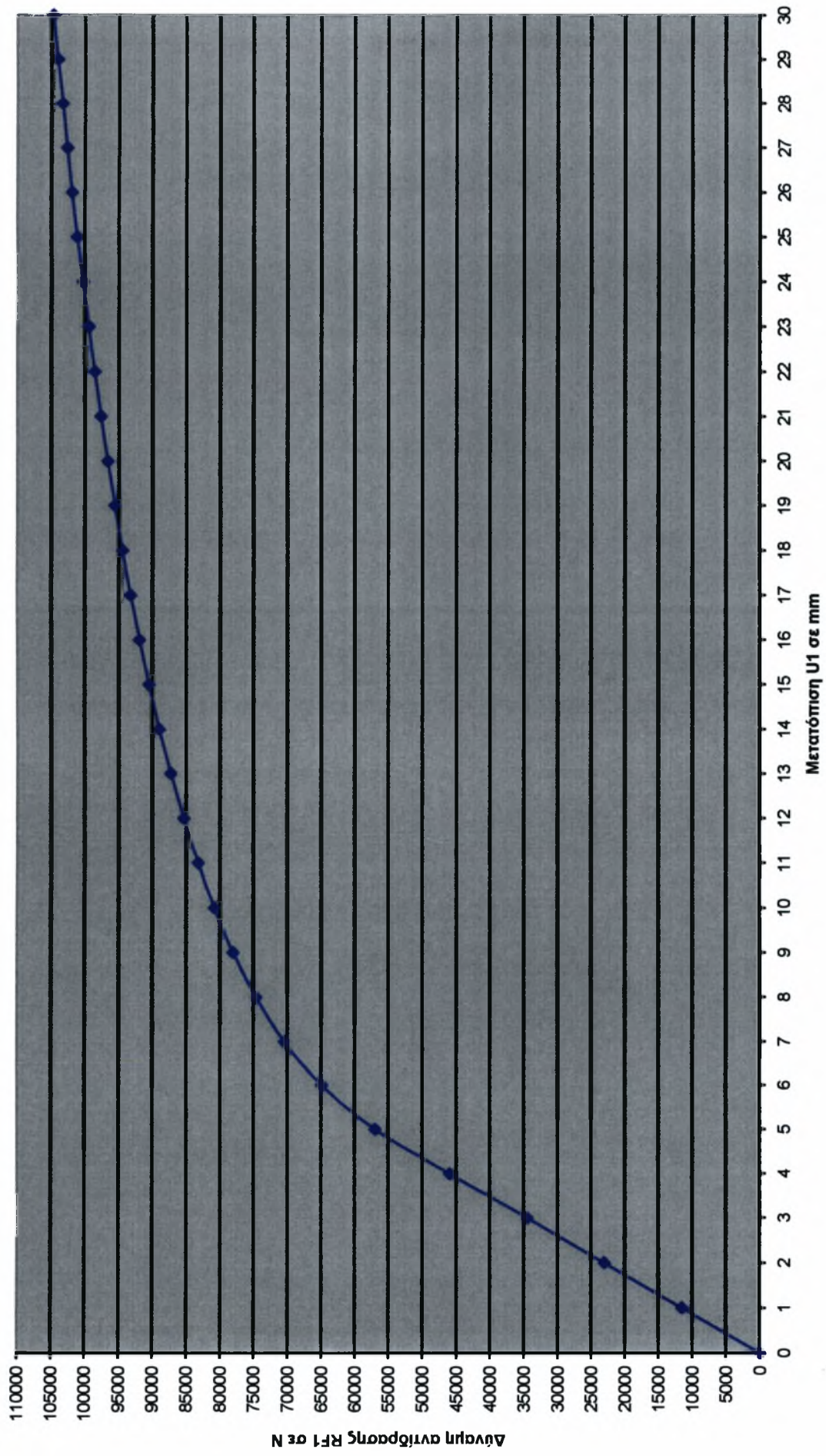
Σχήμα 2.104 Ισοϋψείς της σ_e για $u=5$ mm



Σχήμα 2.105 Ισοϋψείς της σ_e για $u=8$ mm



Σχήμα 2.106 Ισοϋψείς της σ_e για $u=30$ mm



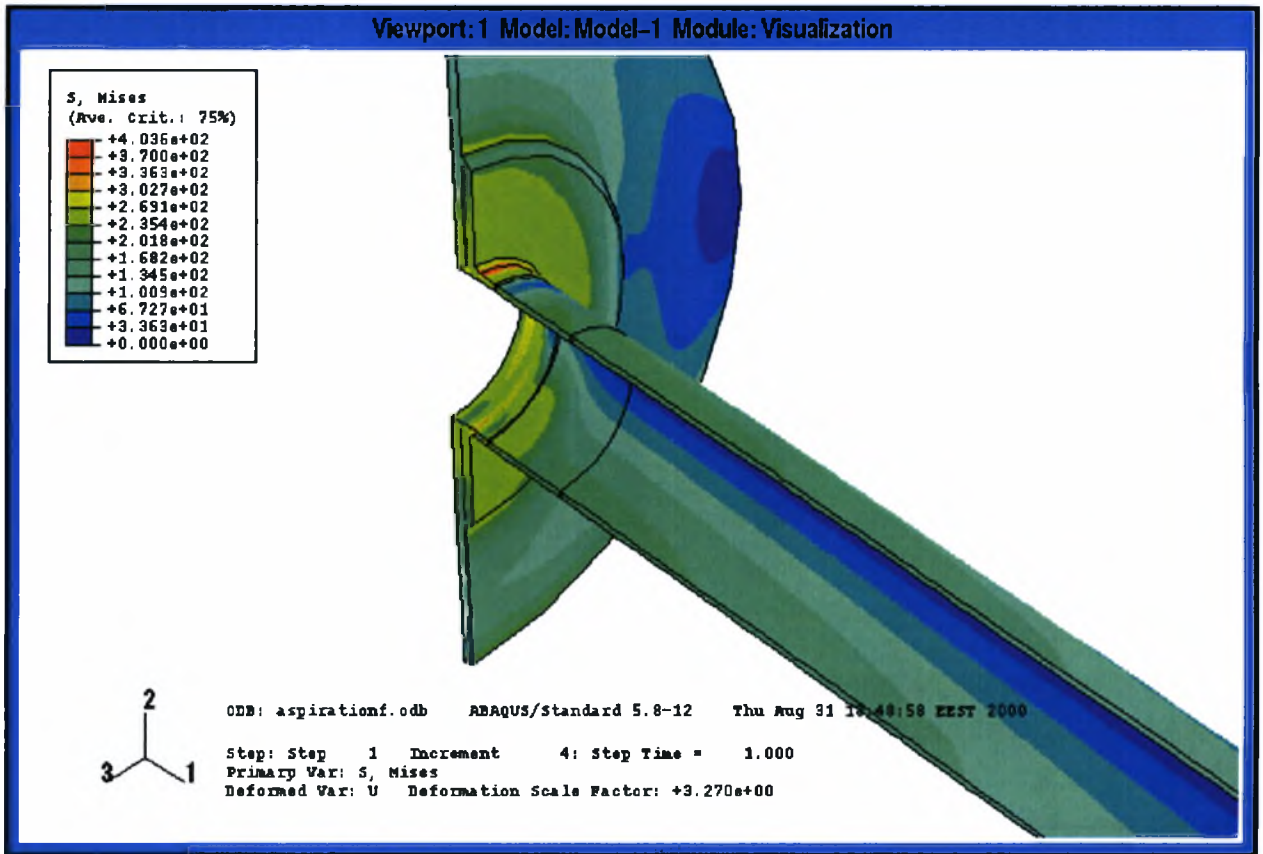
Σχήμα 2.107 Διάγραμμα δύναμης αντίδρασης RF1 και μετατόπισης U1

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η κατασκευή αστοχεί, λόγω τάσεων που ξεπερνούν το όριο θραύσης, για μία μετατόπιση 15 mm. Η αρχική τιμή της ακαμψίας είναι ίση με $k_b = 11509,82 \text{ [KN/m]}$. Για τη μετατόπιση των 15 mm η τιμή της ακαμψίας είναι αρκετά μεγαλύτερη του ενός δεκάτου της αρχικής της τιμής.

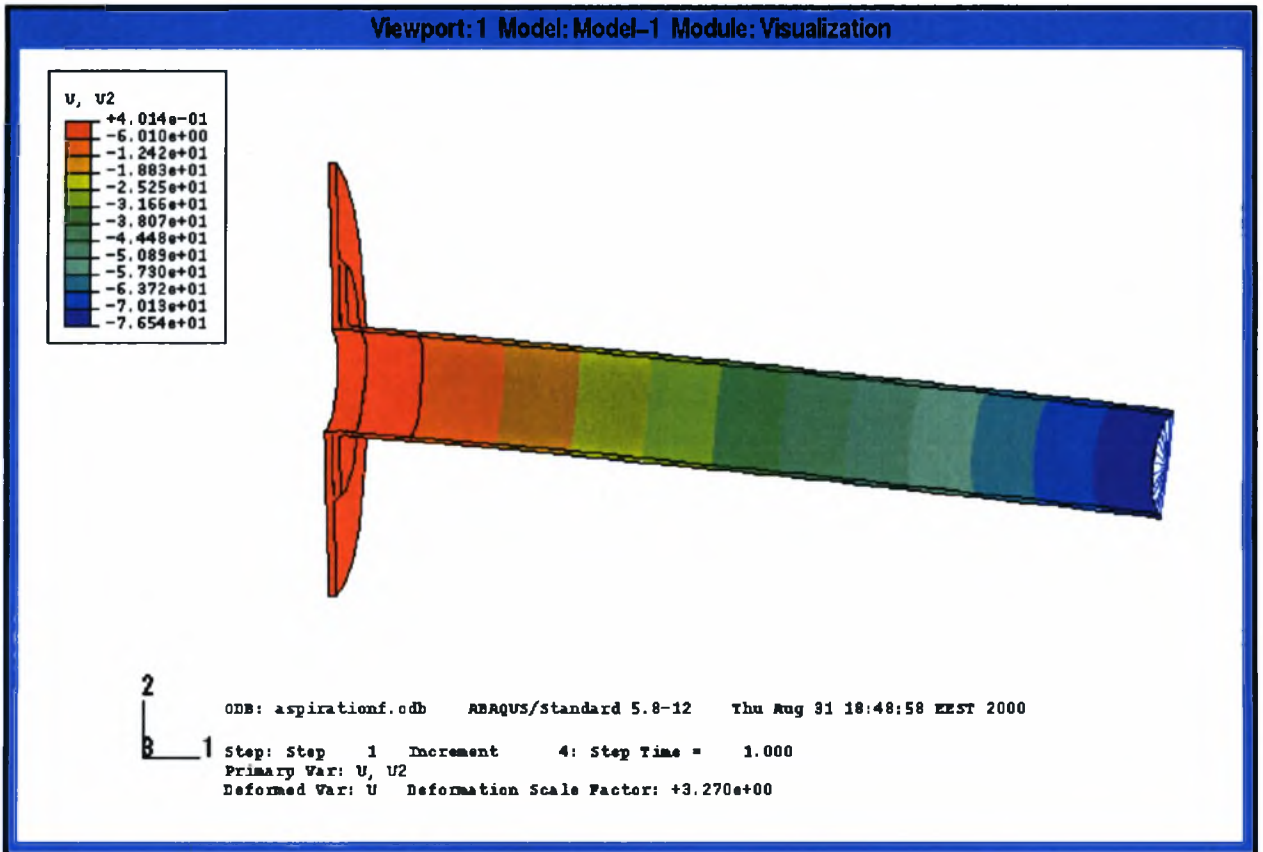
2.2.3 Εφαρμογή φορτίων στο σημείο ASPIRATION όπως προέκυψαν από την ανάλυση του δικτύου σωληνώσεων.

Σε αυτό το τμήμα της διπλωματικής εργασίας εφαρμόζονται τα φορτία του κόμβου «3» του στοιχείου «2» του πλέγματος του δικτύου των σωληνώσεων, που προέκυψαν από την ανάλυση του δικτύου για μία καθίζηση 50 cm, στον κεντρικό κόμβο 12494 του μοντέλου ASPIRATION. Με αυτόν τον τρόπο συνδέεται η ανάλυση του δικτύου με την ανάλυση της σύνδεσης. Από το συγκερασμό των δύο αναλύσεων είναι δυνατόν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα, όπως το αν πράγματι δικαιολογείται μία μετατόπιση κατά την διεύθυνση που έχει παρατηρηθεί στο δεξί άκρο του σημείου ASPIRATION και κατά πόσο τα συγκεκριμένα φορτία είναι ικανά να οδηγήσουν σε αστοχία της σύνδεσης. Στο Σχήμα 2.107 παρουσιάζονται οι ισούψεις της ισοδύναμης τάσης σ_e για τα φορτία που προέκυψαν από την ανάλυση του δικτύου για καθίζηση 50 cm. Στο Σχήμα 2.108 παρουσιάζονται οι ισούψεις της μετατόπισης U2 στο σημείο ASPIRATION. Από τα αποτελέσματα του προγράμματος παρατηρεί κανείς, πως οι τάσεις που αναπτύσσονται στη σύνδεση φτάνουν τα 403.6 MPa. Από τις ισούψεις των μετατοπίσεων φαίνεται πως για τα συγκεκριμένα φορτία υπάρχει μία μετατόπιση U2 76.54 mm. Οι μετατοπίσεις ως προς τους άλλους άξονες είναι αμελητέες.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι η σύνδεση δεν αστοχεί για καθίζηση 50 cm, καθώς η ισοδύναμη τάση δεν ξεπερνά το όριο θραύσης του υλικού. Για πολύ μικρότερες τιμές της καθίζησης αστοχούν τμήματα του δικτύου, όπως προκύπτει από την ανάλυση του. Επειδή στο μοντέλο της σύνδεσης επιβάλλεται συμμετρία ως προς τον άξονα z, στον κόμβο 12494 εφαρμόζονται τα φορτία F_1 , F_2 και M_3 υποδιπλασιασμένα. Αυτή η προσέγγιση είναι ακριβής διότι τα φορτία F_3 , M_1 και M_2 είναι πολύ μικρότερα από τα εφαρμοζόμενα.



Σχήμα 2.107 Ισοϋφείς της ισοδύναμης τάσης σ_e για καθίζηση 50 cm



Σχήμα 2.108 Ισοϋφείς της μετατόπισης U2 για καθίζηση 50 cm

3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

3.1.1 Έλεγχος των τιμών της δύναμης αντίδρασης RF2 για τη σύνδεση στο σημείο ASPIRATION

Σε απλές αναλυτικές λύσεις τέτοιων προβλημάτων το σημείο της σύνδεσης θεωρείται ως πάκτωση και δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η δυνατότητα παραμόρφωσης της δεξαμενής. Επομένως για να είναι δυνατή η ακριβής σύγκριση των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού προγράμματος και της αναλυτικής λύσης, δεσμεύτηκαν οι ενεργοί βαθμοί ελευθερίας περιφερειακά του σωλήνα στην αρχή της συγκόλλησης του με τον ενισχυτικό δακτύλιο. Με αυτό τον τρόπο ο σωλήνας εξετάζεται σε πλήρη πάκτωση. Η υπολογιστική ανάλυση έγινε για μία εφαρμοζόμενη μικρή μετατόπιση 1 mm. Από τα αποτελέσματα του προγράμματος προκύπτει ότι για τη συγκεκριμένη μετατόπιση η δύναμη αντίδρασης είναι ίση με 5830 N. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται οι ισούψεις της ισοδύναμης τάσης για την περίπτωση της πλήρους πάκτωσης. Φαίνεται καθαρά πως δεν περνάει ροή δύναμης πέραν του σημείου της πάκτωσης και δεν αναπτύσσονται τάσεις στο απομονωμένο τμήμα της κατασκευής.

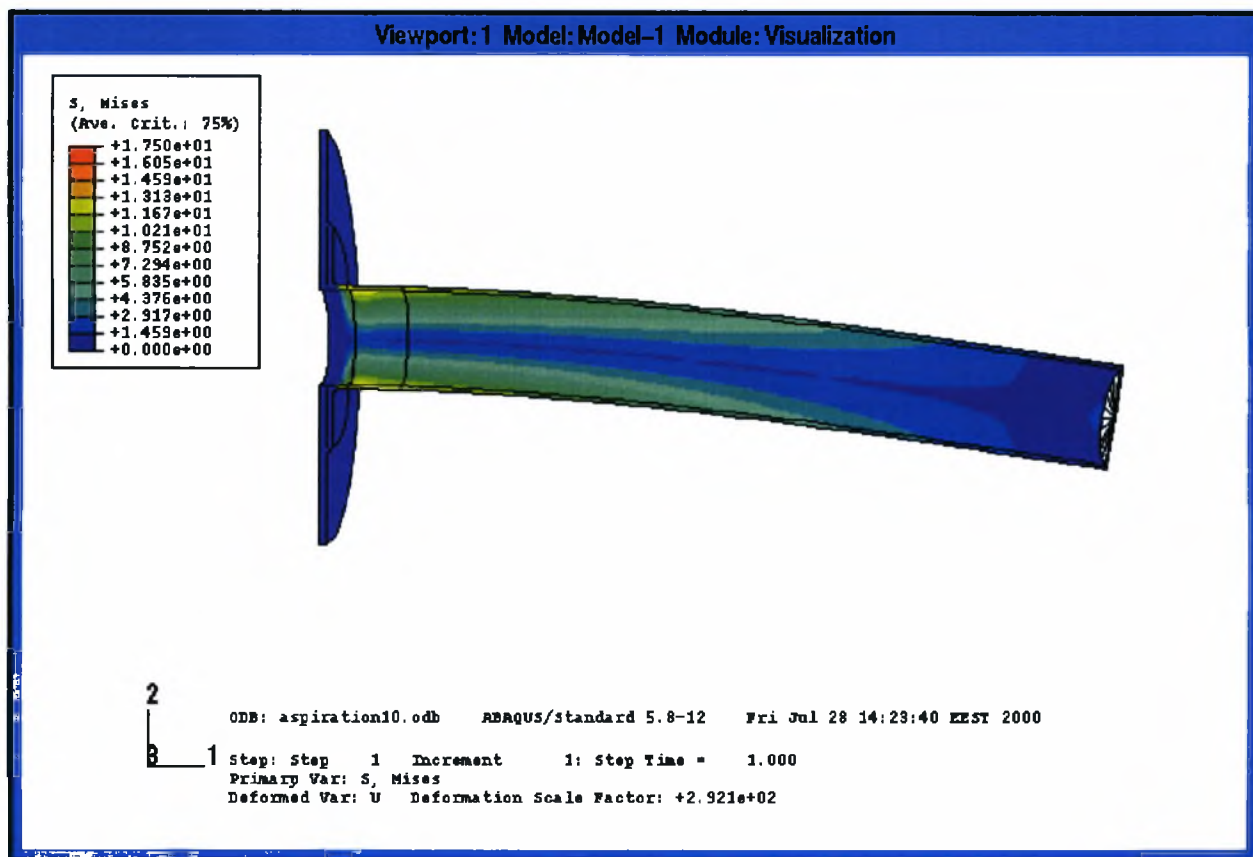
Από τα γεωμετρικά δεδομένα του σωλήνα , $D_{e_s} = 323,8\text{mm}$, $t=12,7\text{mm}$, προκύπτει $D_m = 311,1\text{mm}$ και $R_m = 155,55\text{mm}$. Η ροπή αδρανείας του σωλήνα δίνεται από τη σχέση :

$$I = \pi R_m^3 t \quad 3.1.1$$

με $I = \pi R_m^3 t = \pi 0,15555^3 \times 0,0127 = 1,50 \times 10^{-4} \text{m}^4$ και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού $E = 2 \times 10^8 \text{KN/m}$. Η δύναμη που αντιστοιχεί σε μετατόπιση 1 mm στο δεξί άκρο του σωλήνα δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{3EI}{L^3} \times \delta = \frac{3 \times 3 \times 10^4}{2,4653^3} \times 10^{-3} = 6,006 \text{KN} = 6006 \text{N} \quad 3.1.2$$

Η διαφορά των δύο λύσεων είναι της τάξεως του 3% γεγονός που καταδεικνύει την ορθότητα των τιμών της υπολογιστικής λύσης , επαληθεύοντας κατά αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις συνδέσεις.



Σχήμα 3.1 Ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσης σ_e για την περίπτωση της πλήρους πάκτωσης

3.1.2 Ελαστοπλαστική ανάλυση για το σημείο αναρρόφησης (ASPIRATION)

Ροπή διαρροής στη μηχανική των κατασκευών ονομάζεται η ροπή για την οποία εμφανίζεται σημειακά η τάση διαρροής στην υπό εξέταση κατασκευή. Για την σύνδεση ASPIRATION η ροπή διαρροής δίνεται από τον τύπο:

$$M_y = \sigma_y \frac{I}{R_m} = 0,2324 \text{ [MNm]} \quad 3.1.3$$

Η δύναμη που αντιστοιχεί στη ροπή διαρροής δίνεται από τον τύπο:

$$P_y = \frac{M_y}{L} = 92960 \text{ [N]} \quad 3.1.4$$

Η μετατόπιση στο ελεύθερο άκρο του σωλήνα που αντιστοιχεί στην P_y είναι ίση με:

$$\delta_y = \frac{P_y L^3}{3EI} = 16 \text{ [mm]} \quad 3.1.5$$

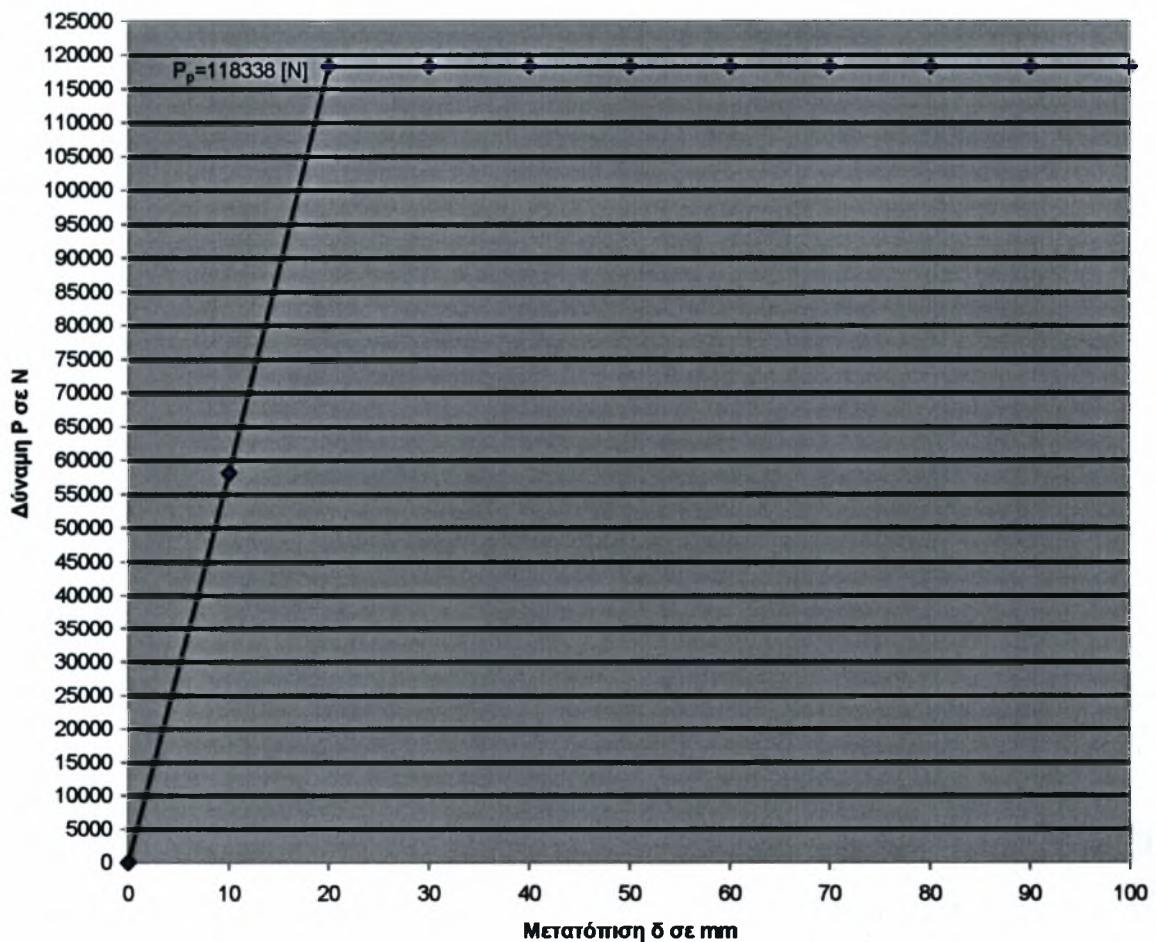
Η πλαστική ροπή (ροπή για την οποία έχει πλαστικοποιηθεί όλη η διατομή) δίνεται από την σχέση :

$$M_p = f M_y \quad 3.1.6$$

Αντίστοιχα η δύναμη δίνεται από τη σχέση :

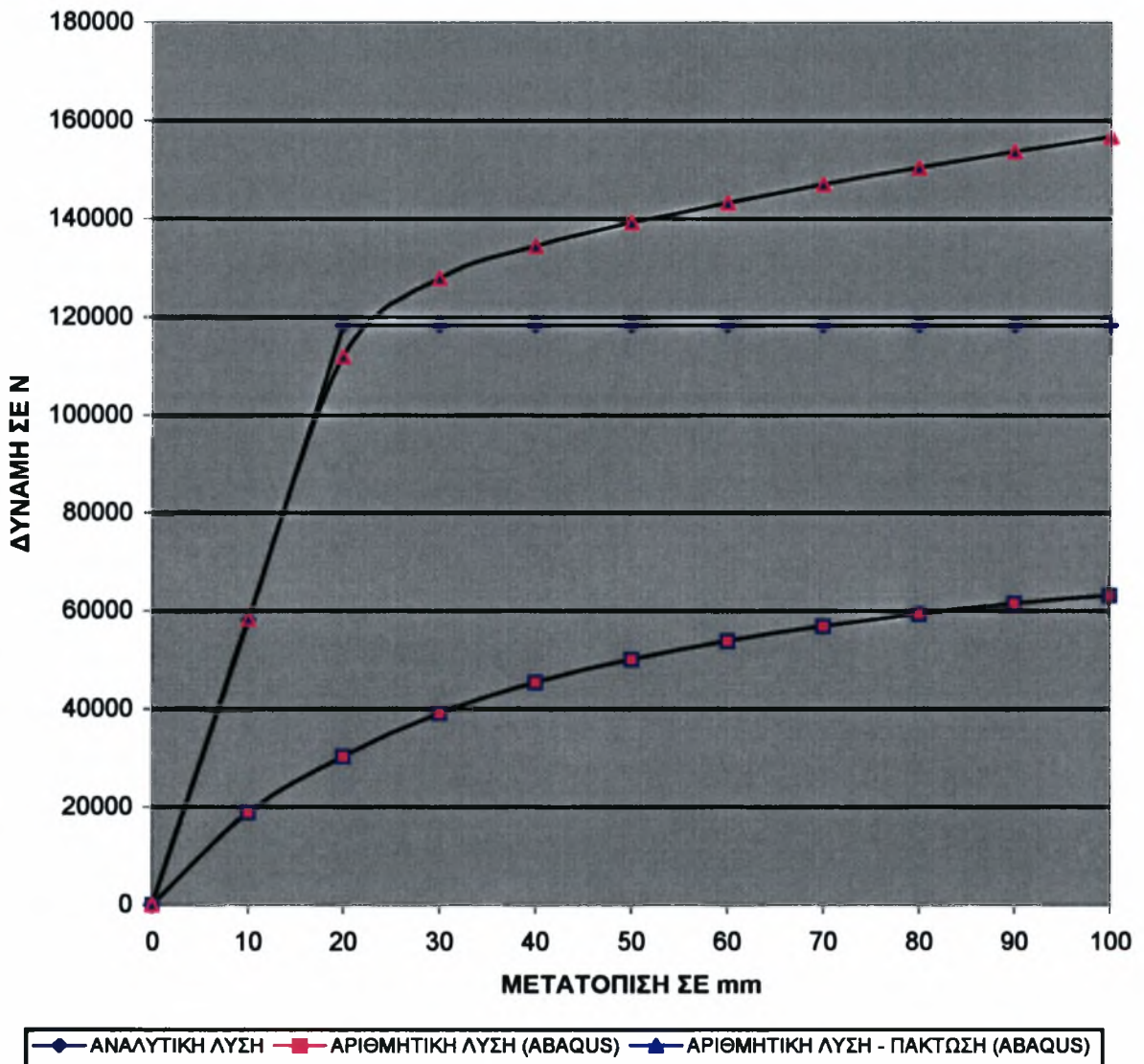
$$P_p = f P_y \quad 3.1.7$$

Όπου f είναι ο συντελεστής σχήματος και εξαρτάται από τη γεωμετρία της κατασκευής. Στην περίπτωση που μελετάται, ο συντελεστής σχήματος f ισούται με 1,273. Επομένως $P_p=118338$ [N] και $\delta_p = 20,368$ mm. Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εύκολο να χαραχτεί το διάγραμμα δύναμης μετατόπισης και να γίνει σύγκριση με τις αριθμητικές λύσεις. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα P-δ για τις τιμές της αναλυτικής λύσης. Στην αναλυτική λύση δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η κράτυνση του υλικού.



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης P-δ για τις τιμές της αναλυτικής λύσης

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται το συγκριτικό διάγραμμα ανάμεσα στην αναλυτική λύση, στην αριθμητική λύση με πακτωμένο το σημείο σύνδεσης και στην αριθμητική λύση που έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των συνδέσεων.



Σχήμα 3.3 Συγκριτικό διάγραμμα της αναλυτικής και της αριθμητικής λύσης (ASPIRATION)

Για την ελαστική περιοχή είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ακαμψία της δεξαμενής. Η συνολική μετατόπιση στο ελεύθερο άκρο της σύνδεσης δίνεται από τον τύπο :

$$\delta_{\text{total}} = \delta_b + \delta_T$$

Όπου δ_b η μετατόπιση του σωλήνα και δ_T η μετατόπιση λόγω στροφής της δεξαμενής. Εφαρμόζοντας μία δύναμη P στο ελεύθερο άκρο της σύνδεσης τέτοια ώστε να μην αναπτυχθούν τάσεις μεγαλύτερες του ορίου διαρροής, ο παραπάνω τύπος μετατρέπεται σε :

$$\frac{P}{k_{total}} = \frac{P}{k_b} + \varphi_T \times L$$

Επειδή όμως $\varphi_T = \frac{P \times L}{k_T}$, η παραπάνω μετατρέπεται σε :

$$\frac{1}{k_{total}} = \frac{1}{k_b} + \frac{L^2}{k_T}$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση τα γνωστά μεγέθη $k_b = 1522,8$ [KN/m] και $k_{total} = 5810$ [KN/m], προκύπτει ότι η ακαμψία της δεξαμενής είναι $k_T = 12898$ [KNm/rad].

Η απλή αναλυτική λύση υστερεί της αριθμητικής διότι δεν μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτή δεδομένα του ενισχυτικού δακτυλίου και της δεξαμενής. Η διαφορά της αναλυτικής και της αριθμητικής λύσης οφείλεται στη μη θεώρηση της παραμόρφωσης της δεξαμενής από την αναλυτική λύση. Εντούτοις, η σύγκριση των απλών αναλυτικών λύσεων και των αριθμητικών οδήγησε σε εκτίμηση της ακαμψίας της δεξαμενής.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η τιμή της καθίζησης για την οποία παρατηρείται ανάπτυξη τάσεων ίση του ορίου διαρροής είναι ίση με $U_y=1,15122$ cm. Για τη συγκεκριμένη τιμή της καθίζησης το τμήμα του δικτύου που αστοχεί αντιπροσωπεύεται στο μοντέλο από το Element με αριθμό 258.
- Από τα αποτελέσματα του προγράμματος τα κρίσιμα σημεία του δικτύου εντοπίζονται στα καμπύλα τμήματα των σωληνώσεων κοντά στα σημεία σύνδεσης με τη δεξαμενή (ASPIRATION-DRAIN).
- Για να αυξηθεί η αντοχή της κατασκευής, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο στήριξης των σωλήνων. Ίσως κάποια κατασκευή κοχλιοσύνδεσης να αποτελούσε λύση, αντισταθμίζοντας την καθίζηση. Σε περίπτωση υιοθέτησης μιας παρόμοιας λύσης θα πρέπει να είναι κανείς σίγουρος για την εκάστοτε τιμή της καθίζησης, διαφορετικά υπάρχει περίπτωση το πρόβλημα να οξυνθεί.
- Μεμονωμένα εξετάζοντας τις συνδέσεις, για το σημείο ASPIRATION προέκυψε πως αστοχεί λόγω τάσεων θραύσης για μία μετατόπιση στο ελεύθερο άκρο του ίση με 100 mm.
- Το σημείο DRAIN αντίστοιχα αστοχεί λόγω τάσεων θραύσης για μία μετατόπιση στο άκρο του, έτσι όπως εφαρμόστηκε στην ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, ίση με 80 mm.
- Η σύνδεση No 1 στην κορυφή της δεξαμενής αστοχεί λόγω τάσεων θραύσης στα 9 mm.
- Η σύνδεση No 2 στην κορυφή της δεξαμενής αστοχεί λόγω τάσεων θραύσης στα 12 mm.
- Η σύνδεση No 3 στην κορυφή της δεξαμενής αστοχεί λόγω μείωσης της ακαμψίας παραπάνω από το ένα δέκατο της αρχικής της τιμής, πριν ανιχνευθούν τάσεις ίσες με το όριο θραύσης στα 18 mm.
- Η σύνδεση No 4 στην κορυφή της δεξαμενής αστοχεί λόγω τάσεων θραύσης στα 8 mm.
- Η σύνδεση No 5 στην κορυφή της δεξαμενής αστοχεί λόγω τάσεων θραύσης στα 15 mm.
- Από την εφαρμογή των φορτίων του δικτύου στη σύνδεση ASPIRATION προκύπτει ότι δεν υπάρχει περίπτωση αστοχίας της σύνδεσης, ακόμα και για μεγάλες τιμές της καθίζησης. Ο έλεγχος όμως της κλίσης της σωλήνωσης στο σημείο αυτό, εξασφαλίζει την έγκαιρη διάγνωση αστοχίας. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η «πρόωρη» αστοχία λόγω απρόβλεπτων παραγόντων, όπως οι κακοτεχνίες ή η μη ομοιόμορφη καθίζηση του εδάφους.
- Η σύγκριση με τις απλές αναλυτικές λύσεις πιστοποιεί ότι για την ανάλυση αυτών των

λεπτομερειών απαιτείται μία προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων. Οι απλές αναλυτικές λύσεις δεν μπορούν να προσομοιώσουν την σημαντική παραμόρφωση της δεξαμενής. Εντούτοις, η σύγκριση των απλών αναλυτικών και των αριθμητικών λύσεων οδήγησε σε εκτίμηση της ακαμψίας της δεξαμενής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Dodge, W. G. and S. E. Moore, "Stress Indices and Flexibility Factors for Moment Loadings on Elbows and Curved Pipes," Weldings Research Council Bulletin, no. 179, 1972.