



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΧΕΙΟΥ ΥΠΟ  
ΠΙΕΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SOLIDWORKS**

**3D MODELING AND STATIC ANALYSIS OF A PRESSURE VESSEL USING  
SOLIDWORKS**

Δεστούνη Χριστίνα

A.M.:14021

Επιβλέπουσα: Δημητρέλλου Σωτηρία, Αναπλ. Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Αιγάλεω, 2021





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### **Διπλωματική εργασία**

Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση και Στατική Ανάλυση Δοχείου υπό Πίεση με Χρήση του Λογισμικού SolidWorks

### **Συγγραφέας**

Δεστούνη Χριστίνα (ΑΜ: 14021)

### **Επιβλέπουσα**

Δημητρέλλου Σωτηρία,  
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

### **Ημερομηνία εξέτασης**

07/10/2021

### **Εξεταστική Επιτροπή**

Δημητρέλλου Σωτηρία,  
Αναπλ. Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Λιβανός Γεώργιος,  
Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Παγώνης Δημήτριος-Νικόλαος,  
Αναπλ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.



## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Δεστούνη Χριστίνα του Δεστούνη Παναγιώτη, με αριθμό μητρώου 14021 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Η Δηλούσα



Δεστούνη Χριστίνα



## **Ευχαριστίες**

Η παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα «Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση και Στατική Ανάλυση Δοχείου υπό Πίεση με Χρήση του Λογισμικού SolidWorks» πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της φοίτησής μου στο Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Θέλω να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας. Πρώτα απ' όλα την επιβλέπουσα καθηγήτρια κυρία Σωτηρία Δημητρέλλου για τη συνεχή καθοδήγηση, τις ουσιώδεις συμβουλές, καθώς επίσης και την ενθάρρυνση και το σεβασμό που μου παρείχε όλο αυτό το χρονικό διάστημα. Ένα ακόμη σημαντικό ευχαριστώ στην οικογένειά μου για τη στήριξη, την κατανόηση και τη θετική τους στάση σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα.





## Περίληψη

Τα δοχεία υπό πίεση (pressure vessels) έχουν ως σκοπό να διατηρούν το αποθηκευμένο ρευστό (υγρό ή αέριο) σε πίεση λειτουργίας υψηλότερη από την πίεση του περιβάλλοντος. Στο πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας γίνεται αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά των δοχείων πίεσης, στους διεθνείς κανονισμούς και στις μεθόδους μη καταστρεπτικού ελέγχου. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι σχεδιαστικές αρχές που διέπουν τα δοχεία πίεσης λεπτού τοιχώματος όπως η επιλογή υλικού και οι υπολογισμοί τάσεων και ελάχιστου επιτρεπόμενου πάχους. Για τη θερμική και στατική ανάλυση μελετήθηκε ως ρευστό στο δοχείο πίεσης η υγρή άνυδρη αμμωνία  $\text{NH}_3$ . Οι βασικές ιδιότητες της αμμωνίας και οι κανονισμοί που εφαρμόζονται για την αποθήκευσή της σε δοχεία πίεσης παρουσιάζονται στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς η τρισδιάστατη σχεδίαση δύο μοντέλων κυλινδρικού οριζόντιου δοχείου πίεσης, με τη διαφορά τους να έγκειται στο τύπο των κεφαλών, κυρτές (torispherical) και ημισφαιρικές (hemispherical) κεφαλές αντίστοιχα. Ο σχεδιασμός έγινε λαμβάνοντας υπόψιν τις προδιαγραφές του κώδικα ASME BPVC Section VIII – Division 1. Η θερμική και στατική ανάλυση των δύο μοντέλων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό SolidWorks εφαρμόζοντας τα κατάλληλα θερμικά και στατικά φορτία και παρουσιάζεται στο πέμπτο κεφάλαιο. Στο ίδιο κεφάλαιο αξιολογούνται τα αποτελέσματα και προκύπτουν τα συμπεράσματα.



## **Abstract**

Pressure vessels are intended to keep the stored fluid (liquid or gas) at an operating pressure higher than the ambient pressure. The first chapter of the thesis refers to the basic characteristics of pressure vessels, international regulations, and non-destructive control methods. The second chapter presents in detail the design principles that govern thin-walled pressure vessels such as material selection and calculations of stress and thickness. Liquid anhydrous ammonia  $\text{NH}_3$  was used as the fluid for thermal and static analysis. The basic properties of ammonia and the regulations applicable to its storage in pressure vessels are presented in the third chapter of the thesis. The fourth chapter describes in detail the three-dimensional design of two cylindrical horizontal pressure vessel models, with difference in the type of heads, torispherical and hemispherical respectively. The design was based on the specifications of the ASME BPVC code Section VIII - Division 1. The thermal and static analysis of the two models in SolidWorks, applying the appropriate thermal and static loads, is presented in the fifth chapter. In the same chapter the results are evaluated, and the conclusions are drawn.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ .....	14
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.2 ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ – ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....	20
1.3 ΕΙΔΗ ΚΕΦΑΛΩΝ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ .....	23
1.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΥΣΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....	28
1.5 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ .....	29
1.5.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ (Ultrasonic) .....	29
1.5.2 ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΑ (Radiography).....	30
1.5.3 ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ (Hydrostatic tests) .....	32
1.5.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ & ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	33
1.6 ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΔΟΧΕΙΑ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ .....	35
1.6.1 ASME BPVC SECTION VIII .....	36
2. ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΟΧΕΙΩΝ ΠΙΕΣΗΣ ΛΕΠΤΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ.....	37
2.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ .....	37
2.2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ .....	37
2.2.1 CARBON STEEL SA516 GR70 .....	39
2.2.2 NIMONIC 80A.....	40
2.2.3 AISI 304 και 304L.....	41
2.3. ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΑΣΗΣ.....	42
2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΔΟΧΕΙΟΥ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ.....	43
2.5 ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ (Weld joint efficiency).....	47
2.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (Corrosion Allowance).....	48
3. Η ΑΝΥΔΡΗ ΑΜΜΩΝΙΑ .....	51
3.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΝΥΔΡΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ .....	51
3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ .....	53
3.3 ΑΝΥΔΡΗ ΑΜΜΩΝΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	55
3.4 ΚΩΔΙΚΑΣ INTERNATIONAL GAS CARRIER CODE ΓΙΑ ΑΜΜΩΝΙΑ .....	55
3.5 ΚΩΔΙΚΑΣ ASME BPVC ΓΙΑ ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ ΑΝΥΔΡΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ .....	57
4. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ.....	59
4.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ .....	59
4.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΧΟΥΣ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ .....	60

4.3.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ TORISPHERICAL ΚΕΦΑΛΗΣ.....	62
4.4.	ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΣΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	63
4.5.	ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΗΜΙΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΚΕΦΑΛΕΣ.....	69
5.	ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ .....	70
5.1.	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	70
5.2.	ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	77
5.2.1.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ .....	77
5.2.2.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ (Von Mises Stresses).....	78
5.2.3.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ (Displacements) .....	84
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	92
6.1.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ .....	92
6.2.	ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ.....	93
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	97

# 1. ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα δοχείο πίεσης (pressure vessel) είναι μία δεξαμενή η οποία έχει ως σκοπό τη διατήρηση αερίων ή υγρών σε πίεση διαφορετική από την πίεση του περιβάλλοντος.

Τα δοχεία πίεσης είναι απαραίτητος εξοπλισμός στις βιομηχανικές μονάδες και στις μονάδες πετροχημικές επεξεργασίας, αλλά χρησιμοποιούνται και στον ιδιωτικό οικιακό τομέα. Με την ευρεία έννοια, ο όρος δοχείο πίεσης περιλαμβάνει τα δοχεία αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα στη βιομηχανία, τις δεξαμενές αποθήκευσης ζεστού οικιακού νερού στον οικιακό τομέα, τις φιάλες κατάδυσης, τους θαλάμους συμπίεσης, τους πύργους απόσταξης-διύλισης και τους κλίβανους αποστείρωσης. Δοχεία υπό πίεση χρησιμοποιούνται σε όλους τους τομείς της βιομηχανίας όπως σε διυλιστήρια πετρελαίου, πετροχημικά εργοστάσια, πυρηνικούς αντιδραστήρες, στη βιομηχανία σιδηροδρομικών και οδικών οχημάτων ως ως υδραυλικοί / πνευματικοί κύλινδροι μηχανημάτων (πρέσας, ανελκυστήρα, κ.λπ.) και ως δοχεία αποθήκευσης για υγραποποιημένα αέρια όπως αμμωνία, χλώριο, προπάνιο, βουτάνιο και υγραέριο, [1].

Υπό το πρίσμα του σχεδιασμού και της κατασκευής, το δοχείο πίεσης ορίζεται γενικά ως μια κατασκευή που περιλαμβάνει συγκολλημένα εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένων των φλαντζών των ακροφυσίων, των διαφόρων συνδέσμων βιδωμένων ή συγκολλημένων, καθώς και των περιοχών (ακμών) που πρόκειται να συγκολληθούν στη σύνδεση των σωληνώσεων.

Λόγω των κινδύνων που θα συνδέονταν με τυχαία απελευθέρωση του περιεχομένου του δοχείου, σε πολλές χώρες η κατασκευή και η λειτουργία των δοχείων υπό πίεση συμμορφώνονται με κανονισμούς. Η εθνική νομοθεσία ή/και τα πρότυπα καθορίζουν γενικά πότε ένα δοχείο πρέπει να αντιμετωπίζεται ως δοχείο υπό πίεση. Ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις διάφοροι τύποι δοχείων ρευστών ορίζονται ως δοχεία υπό πίεση

για να διασφαλιστεί ότι ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η εγκατάσταση θα εξασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία.

Παρακάτω παρουσιάζονται διάφορες κατηγορίες δοχείων υπό πίεση και δοχείων διαχείρισης ρευστών.

**Δοχείο Παραγωγής (*Process Vessel*):** Τα δοχεία παραγωγής έχουν σχεδιαστεί για να διαχειρίζονται και να αποθηκεύουν ρευστά (υγρά ή αέρια) και χρησιμοποιούνται σε φαρμακευτικές βιομηχανίες, πετροχημικές εγκαταστάσεις, διυλιστήρια, εγκαταστάσεις υγραερίου-φωταερίου, εγκαταστάσεις παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου.



Εικόνα 1 Δοχείο αποθήκευσης [2]

**Κλίβανος Αποστείρωσης (*Autoclaves*):** Οι κλίβανοι αποστείρωσης είναι μεγάλα δοχεία υπό πίεση και λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Συνήθως είναι κυλινδρικοί, καθώς το στρογγυλεμένο σχήμα είναι σε θέση να αντέχει με ασφάλεια σε υψηλές πιέσεις. Έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να συγκρατούν αντικείμενα που είναι τοποθετημένα στο εσωτερικό τους.





Εικόνα 2 Κλίβανος Αποστείρωσης [3]

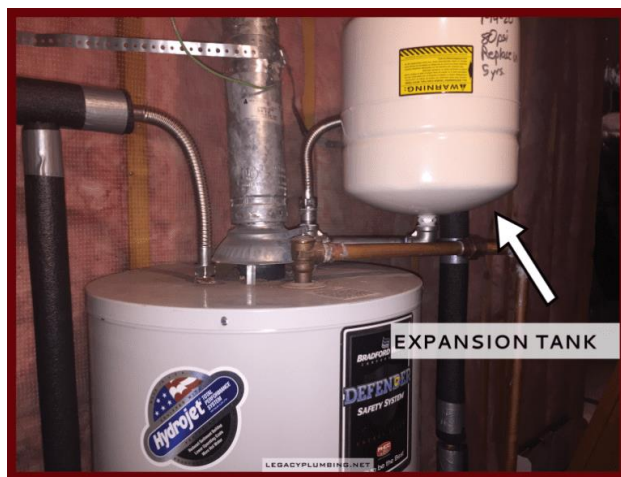
**Δοχεία υψηλής πίεσης (*High pressure vessels*):** Είναι τα πιο ανθεκτικά δοχεία στην αγορά, αναγνωρίσιμα για την ικανότητά τους να λειτουργούν κάτω από τα μεγαλύτερα φορτία και παρέχουν την καλύτερη αντοχή σε διάβρωση, θερμοκρασία και πίεση. Τα δοχεία υψηλής πίεσης είναι συνήθως κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα.



Εικόνα 3 Δοχείο υψηλής πίεσης από ανοξείδωτο χάλυβα [4]

**Δοχεία πίεσης λεπτού τοιχώματος (*Thin-walled pressure vessels*):** Ένα δοχείο πίεσης λεπτού τοιχώματος είναι ένα δοχείο στο οποίο η διάμετρός του έχει πάχος πολύ μικρότερο από το συνολικό μέγεθος του δοχείου και το δοχείο υπόκειται σε εσωτερική πίεση που είναι μεγαλύτερη από την εξωτερική πίεση του αέρα.

**Δεξαμενή διαστολής (*Expansion Tanks*):** Οι δεξαμενές διαστολής έχουν σχεδιαστεί για να προσαρμόζονται στις αλλαγές των ποσοτήτων ζεστού νερού στα συστήματα θέρμανσης και στις μεταβολές στο ρυθμό ροής νερού. Διατηρούν τη στατική πίεση που παράγεται από την αντλία στα συστήματα ζεστού νερού χρήσης.



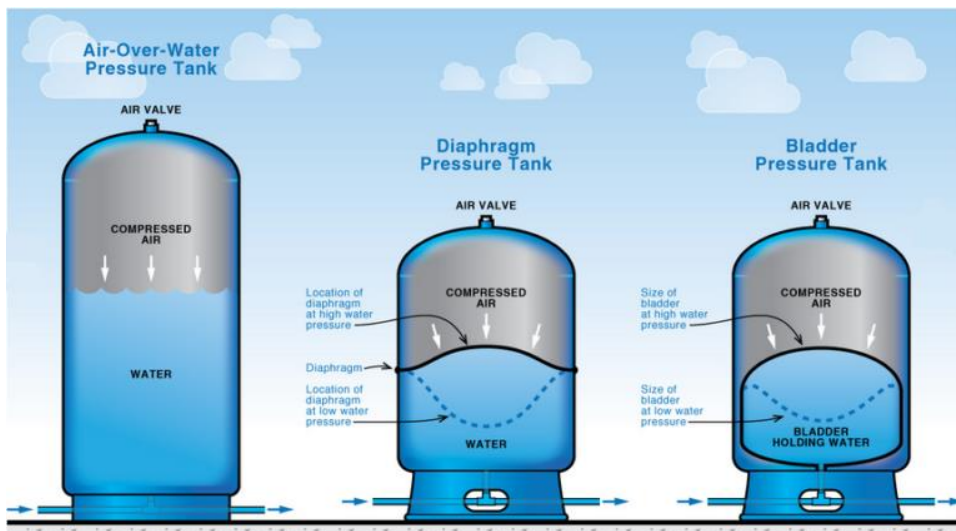
Εικόνα 4 Expansion tank [5]

**Εναλλάκτες θερμότητας (*Heat Exchangers*):** Ένας εναλλάκτης θερμότητας είναι μια συσκευή που μεταφέρει θερμότητα από το ένα μέσο στο άλλο. Χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις τροφίμων και φαρμακευτικών προϊόντων, σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας, σε πλοία και ναυτιλιακές βιομηχανίες. Ο *environmental heat exchanger*, όπως ορίζεται από τον κώδικα ASME, είναι ένα δοχείο πίεσης μονού θαλάμου που ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον.



Εικόνα 5 Εναλλάκτης θερμότητας στη βιομηχανία τροφίμων [6]

**Δεξαμενή πίεσης νερού (Water pressure tanks):** Σε μια υδραυλική εγκατάσταση η δεξαμενή πίεσης νερού αυξάνει την πίεση του νερού χρησιμοποιώντας πεπιεσμένο αέρα. Λόγω της αύξησης της πίεσης, το νερό εκτοξεύεται έξω από τη δεξαμενή μέσω των σωλήνων όταν ανοίγει μια βαλβίδα.



Εικόνα 6 Δεξαμενές πίεσης νερού [7]

**Δεξαμενές κενού (*Vacuum tanks*):** Η δεξαμενή κενού είναι μέρος ενός συστήματος που φιλτράρει αέρα ή υγρά μέσω αναρρόφησης, άντλησης ή συνδυασμού τεχνικών. Τυπικές εφαρμογές είναι ο καθαρισμός υγρών και ιλύος σε σηπτικά συστήματα, και η αναρρόφηση νερού και αποβλήτων από εργασίες γεώτρησης σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Είναι σχεδιασμένη να αντέχει την εξωτερική πίεση, και όταν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας η κατασκευή ως δοχείο πίεσης είναι προαιρετική.



Εικόνα 7 Δεξαμενή κενού [8]

**Λέβητες (*Boilers*):** Είναι κλειστά δοχεία πίεσης που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση υγρών, κυρίως νερού, [9].



Εικόνα 8 Σύστημα λέβητα [10]

## 1.2 ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ – ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Τα δοχεία πίεσης έχουν σχεδιαστεί με σκοπό το αποθηκευμένο ρευστό να φτάνει στο επίπεδο πίεσης που απαιτείται για τη λειτουργία μιας εφαρμογής. Η πίεση δημιουργείται είτε απευθείας μέσω βαλβίδων και διατάξεων απελευθέρωσης, είτε έμμεσα μέσω μεταφοράς θερμότητας. Τα επίπεδα πίεσης κυμαίνονται από 1 bar έως περίπου 10.000 bar, ενώ οι θερμοκρασίες είναι συχνά πάνω από 400 °C (750 °F). Η χωρητικότητά του κυμαίνεται από 75 λίτρα έως χιλιάδες λίτρα, [9].

Γενικότερα, υπάρχουν τρία είδη δοχείων υπό πίεση:

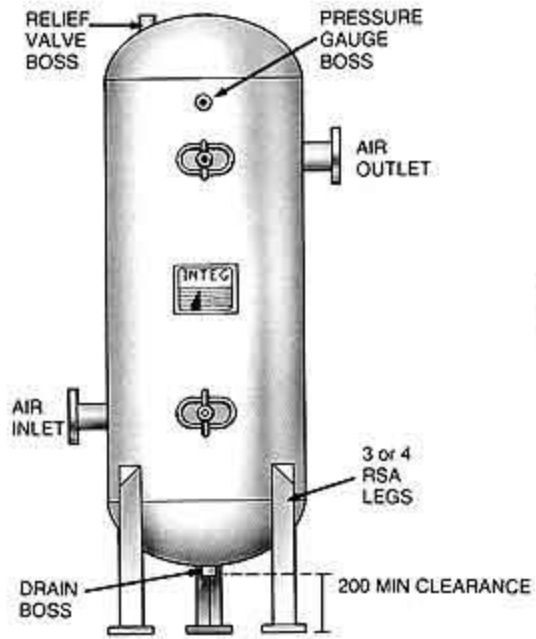
- Σφαιρικά δοχεία
- Κάθετα δοχεία
- Οριζόντια δοχεία

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζονται σχηματικά το κάθετο και το οριζόντιο δοχείο υπό πίεση, τα οποία είναι και τα πιο συνηθισμένα για ένα μεγάλο εύρος βιομηχανικών εφαρμογών.

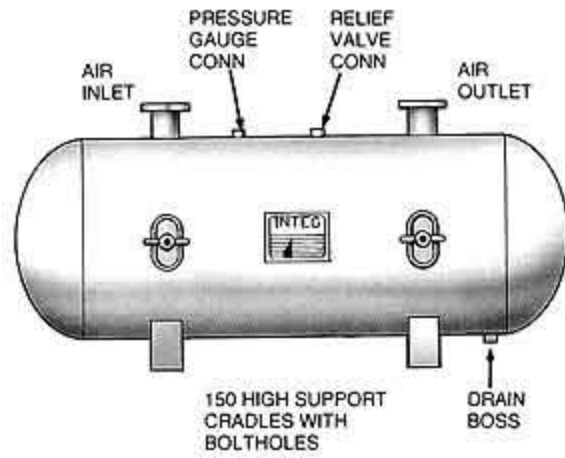
Τα σφαιρικά δοχεία, Εικόνα 10, προτιμώνται για αποθήκευση υγρών υψηλής πίεσης. Μια σφαίρα έχει πολύ ισχυρή δομή. Η ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στις επιφάνειες της σφαίρας, τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά, γενικά σημαίνει ότι δεν υπάρχουν περιοχές χαμηλής αντοχής, [11]. Ωστόσο, οι σφαίρες είναι πολύ πιο δαπανηρές στην κατασκευή από τα κυλινδρικά δοχεία.

Ένα πλεονέκτημα των σφαιρικών δοχείων αποθήκευσης είναι ότι έχουν μικρότερη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου από οποιοδήποτε άλλο σχήμα δοχείου. Αυτό σημαίνει, ότι η ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται από θερμότερο περιβάλλον στο υγρό της σφαίρας, θα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη για κυλινδρικά δοχεία αποθήκευσης.

### VERTICAL MODEL



### HORIZONTAL MODEL

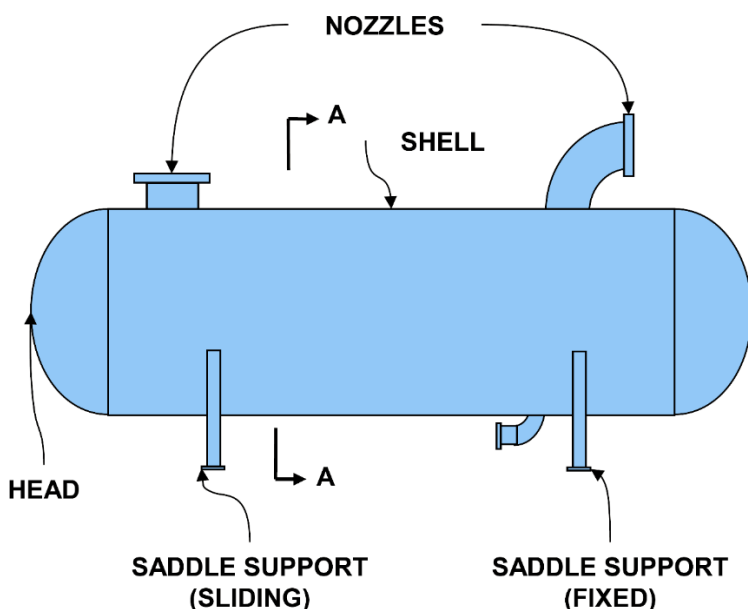


Εικόνα 9 Κάθετο και οριζόντιο δοχείο υπό πίεση [12]



Εικόνα 10 Σφαιρικά δοχεία [13]

Τα κύρια μέρη ενός κυλινδρικού δοχείου πίεσης, Εικόνα 11, είναι το κέλυφος (*shell*), η κεφαλή (*head*), τα ακροφύσια (*nozzles*), και οι στηρίξεις (*supports*).



Εικόνα 11 Κύρια μέρη ενός δοχείου υπό πίεση [14]

Το **κέλυφος (*shell*)** είναι το κυλινδρικό τοίχωμα του δοχείου. Μπορεί να κατασκευαστεί εξ αρχής ως ενιαίο κομμάτι ή να προέλθει από συγκόλληση διαφορετικών ελασμάτων, πάντα τηρώντας τους κανονισμούς παραγωγής. Συνήθως, διαφορετικές πλάκες συγκολλούνται μεταξύ τους και δημιουργούν μία κατασκευή η οποία έχει έναν κοινό άξονα περιστροφής.

Η **κεφαλή (*head*)** χρησιμοποιείται για να κλείσει τις άκρες του δοχείου. Κατασκευάζεται συνήθως σε καμπυλωτό σχήμα διότι λόγω του σχήματος αυτού έχει μεγαλύτερη αντοχή, λιγότερο βάρος και κόστος.

Τα **ακροφύσια (nozzles)** χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν το δοχείο πίεσης με το δίκτυο σωληνώσεων. Επίσης σε αυτά τοποθετούνται όργανα μέτρησης όπως μετρητές στάθμης και πίεσης.

Οι **στηρίξεις (saddles)** κατασκευάζονται για να υποστηρίξουν όλο το βάρος του δοχείου. Υπάρχουν διάφορα στηρίγματα με τη σχετική ονοματολογία όπως *lug*, *ring*, *skirt* και *leg support*, [14].

### 1.3 ΕΙΔΗ ΚΕΦΑΛΩΝ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ

**Επίπεδες κεφαλές (Flat Heads):** Οι επίπεδες κεφαλές είναι ο απλούστερος τύπος σφραγίσματος που χρησιμοποιείται μόνο για μικρές δεξαμενές. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως καλύμματα θύρας (*manhole covers*) σε δοχεία χαμηλής πίεσης. Δοχεία με επίπεδες κεφαλές και *manhole cover* απεικονίζονται στις Εικόνες 12 και 13.



Εικόνα 12 Flat head pressure vessel [15]





Εικόνα 13 Manhole cover [16]

**Ελλειψοειδείς κεφαλές (Ellipsoidal Heads):** Οι ελλειψοειδείς κεφαλές χρησιμοποιούνται συχνά για πιέσεις άνω των 10 bar. Στη διατομή, η κεφαλή είναι σαν μια έλλειψη με την ακτίνα της να κυμαίνεται συνεχώς μεταξύ του κυρίου και του δευτερεύοντος άξονα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια ομαλή μετάβαση μεταξύ της κεφαλής και του κυλινδρικού τμήματος του δοχείου. Η τυπική διάταξη είναι 2:1 που σημαίνει ότι το ύψος τους είναι 4 φορές μικρότερο από τη διάμετρό τους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14. Λόγω μικρότερης ακτίνας άρα και μικρότερου σχήματος, το κόστος κατασκευής μειώνεται.



Εικόνα 14 Ελλειψοειδής κεφαλή 2:1 [17]

**Κυρτές κεφαλές (Torispherical Heads):** Αυτή η κεφαλή χρησιμοποιείται ευρέως για μια μεγάλη ποικιλία κυλινδρικών δοχείων πίεσης. Το σχήμα της πλησιάζει το σχήμα της ελλειψοειδούς κεφαλής αλλά είναι ευκολότερη και φθηνότερη στην κατασκευή, Εικόνα 15. Αυτές οι κεφαλές έχουν μια κυρτή κεφαλή με σταθερή ακτίνα, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από το είδος της κεφαλής και την κυρτότητά της. Η ένωση της κυρτής κεφαλής απευθείας με το κυλινδρικό τμήμα του δοχείου οδηγεί σε γρήγορη αλλαγή στη γεωμετρία, με αποτέλεσμα μεγαλύτερες τοπικές καταπονήσεις. Για να αποφευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται ένα τμήμα μετάβασης (άρθρωση) μεταξύ της κεφαλής και του κυλινδρικού τμήματος το οποίο έχει τοροειδές (toroidal) σχήμα. Χρησιμοποιούνται γενικά σε δοχεία που η πίεση δεν υπερβαίνει τα 10 bar.



Εικόνα 15 Κυρτή κεφαλή [18]

**Ημισφαιρικές κεφαλές (*Hemispherical Heads*):** Μια ημισφαιρική κεφαλή έχει τη μεγαλύτερη αντοχή. Επίσης έχει την ικανότητα να αντέχει σε σχεδόν διπλάσια πίεση από την πίεση μιας σφαιρικής κεφαλής του ίδιου πάχους. Το κόστος κατασκευής της είναι υψηλότερο από αυτό για μια κυρτή (*torispherical*) κεφαλή. Δεδομένου ότι είναι η ακριβή η παραγωγή τους, προορίζονται για εφαρμογές υψηλής πίεσης (άνω των 10 bar). Διάφορες κατασκευές ημισφαιρικών κεφαλών παρουσιάζονται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 16 Ημισφαιρικές κεφαλές [19]

**Κωνικές κεφαλές (Conical Heads):** Οι κωνικές κεφαλές, Εικόνα 17, χρησιμοποιούνται ευρέως ως κεφαλές για το κάτω μέρος του δοχείου υπό πίεση για τη διευκόλυνση της απομάκρυνσης ή αποστράγγισης υγρού. Η ημι-κωνική γωνία λαμβάνεται συνήθως έως 30 μοίρες, [20].



Εικόνα 17 Κωνική κεφαλή [21]

## 1.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΥΣΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Αν και οι περισσότερες εταιρείες συμμορφώνονται με τους κανονισμούς και χρησιμοποιούν σύγχρονη τεχνολογία κατασκευής, εξακολουθούν να συμβαίνουν τραγικά ατυχήματα που αφορούν δοχεία πίεσης και σωληνώσεις. Η μη κατάλληλη αποθήκευση ενός υγρού ή αερίου υπό πίεση μπορεί να προκαλέσει σοβαρό κίνδυνο, όχι μόνο για τους εργαζόμενους, αλλά και για τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, τον πληθυσμό στην γύρω περιοχή και το περιβάλλον.

Διάφορα ατυχήματα έχουν συμβεί όπως στο ατμόπλοιο Sultana Unites States (1865) και στο εργοστάσιο παπουτσιών Grover Shoe Factory (1904). Ακόμη και τον 21ο αιώνα, η καταστροφική αποτυχία ενός ατμολέβητα στο κρουαζιερόπλοιο SS Norway στο λιμάνι του Μαϊάμι το 2003, το οποίο σκότωσε οκτώ άτομα του πληρώματος, ήταν μια υπενθύμιση ότι τα δοχεία πίεσης παραμένουν επικίνδυνα, εκτός εάν σχεδιασθούν, λειτουργούν και επιθεωρηθούν σύμφωνα με τους κανονισμούς.

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι αποτυχίας των δοχείων υπό πίεση. Αρχικά είναι η ακατάλληλη επιλογή υλικού. Έπειτα τα λανθασμένα δεδομένα σχεδιασμού, η ανακριβής διαδικασία σχεδιασμού, και η ανεπαρκής δοκιμή ή προσομοίωση του δοχείου για έλεγχο λειτουργίας. Στη συνέχεια μπορεί να υπάρξει ακατάλληλη τεχνική κατασκευής, έλεγχος κακής ποιότητας, ανεπαρκής διαδικασία παραγωγής, συμπεριλαμβανομένων της συγκόλλησης και της θερμικής επεξεργασίας.

Η ολοένα αυξανόμενη χρήση των δοχείων πίεσης έδωσε ιδιαίτερη έμφαση σε αναλυτικούς και πειραματικούς τρόπους προσδιορισμού της δομικής αντοχής τους. Προκειμένου να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του σχετικού υλικού, απαιτείται ο υπολογισμός και η αξιολόγηση των τιμών των τάσεων και καταπονήσεων. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού απαιτείται όχι μόνο για την αποφυγή αστοχιών, αλλά και για να επιτραπεί η μέγιστη οικονομία βάσει της ποσότητας υλικού που χρησιμοποιείται, [22].

## 1.5 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ

Για τον έλεγχο της καλής λειτουργίας των δοχείων υπό πίεση χρησιμοποιούνται μη καταστρεπτικοί έλεγχοι με τη χρήση υπερήχων, ραδιογραφίας, υδροστατικών τεστ, δεισδυτικών υγρών ή μαγνητικών σωματιδίων.

### 1.5.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ (Ultrasonic)

Η μέθοδος των υπερήχων, [23], ανήκει στην οικογένεια των μη καταστρεπτικών ελέγχων. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής αυτής, πραγματοποιείται αναπαραγωγή υπερηχητικών κυμάτων πάνω στο αντικείμενο με σκοπό την ανίχνευση εσωτερικών ελαττωμάτων του υλικού. Οι πιο στοιχειώδεις κεντρικές συχνότητες των κυμάτων αυτών κυμαίνονται από 0.1-15 MHz, και πιο σπάνια έως 50 MHz.

Η λειτουργία της μεθόδου βασίζεται στην εκπομπή ενός παλμού υπερήχων μέσα στο υλικό και την καταγραφή των ανακλάσεων που επιστρέφουν. Στη μέθοδο αυτή εκπέμπεται ένας παλμός υπερήχων εφαρμόζοντας ένα παλμό υψηλής τάσης σε ένα πιεζοηλεκτρικό δίσκο. Οι ανακλάσεις δονούν τον πιεζοηλεκτρικό δίσκο ο οποίος τις μετατρέπει πάλι σε τάσεις. Κάθε ατέλεια που υπάρχει μέσα στο υλικό ανακλά μια ηχώ του παλμού, η οποία έχει εύρος που εξαρτάται από το μέγεθος κάθε ατέλειας. Οι ρωγμές, τα κενά και άλλες υλικές ασυνέχειες απεικονίζονται σε διαγράμματα κυμάτων ήχων υψηλής συχνότητας. Από τις πιο συχνές εφαρμογές της μεθόδου είναι η μέτρηση του πάχους του αντικειμένου (*ultrasonic thickness measurement*), με σκοπό την παρακολούθηση της διάβρωσής του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18 Ultrasonic test [24]

### 1.5.2 ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΑ (Radiography)

Η ραδιογραφία, [25], είναι μία άλλη μέθοδος μη καταστρεπτικού ελέγχου. Χρησιμοποιεί ιονίζουσα ακτινοβολία με σκοπό να εντοπίσει αλλαγές στο πάχος και ελαττώματα (εσωτερικά και εξωτερικά) στο υλικό, τα οποία θα οδηγούσαν σε αποτυχία. Έχει αποκτήσει αξιοσημείωτη σημασία καθώς διασφαλίζει τη βέλτιστη ποιότητα και αξιοπιστία στη λειτουργία των προϊόντων.

Η βιομηχανική ακτινογραφία χρησιμοποιεί τα παρακάτω δύο είδη ακτινοβολίας:

- ακτίνες-X (X-rays)
- ακτίνες-Γάμα (gamma rays)

Οι ακτίνες-X έχουν τέτοιο μήκος κύματος που τους επιτρέπει να διαπερνούν όλα τα υλικά με κάποιο ποσοστό απορρόφησης που εξαρτάται από το υλικό. Το μήκος

κύματος ποικίλει από τα 10nm (Grenz ή «απαλές» ακτίνες-Χ) έως τα 10 $\mu$ m («σκληρές» ακτίνες-Χ) που μπορούν να διαπεράσουν ακόμη και ασάλι πάχους μισού μέτρου.

Οι ακτίνες-Γάμα εκπέμπονται από ραδιενεργές πηγές σε παρόμοια μήκη κύματος, είναι και αυτές ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, έχουν τις ίδιες ιδιότητες με τις ακτίνες-Χ και χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανική ραδιογραφία.

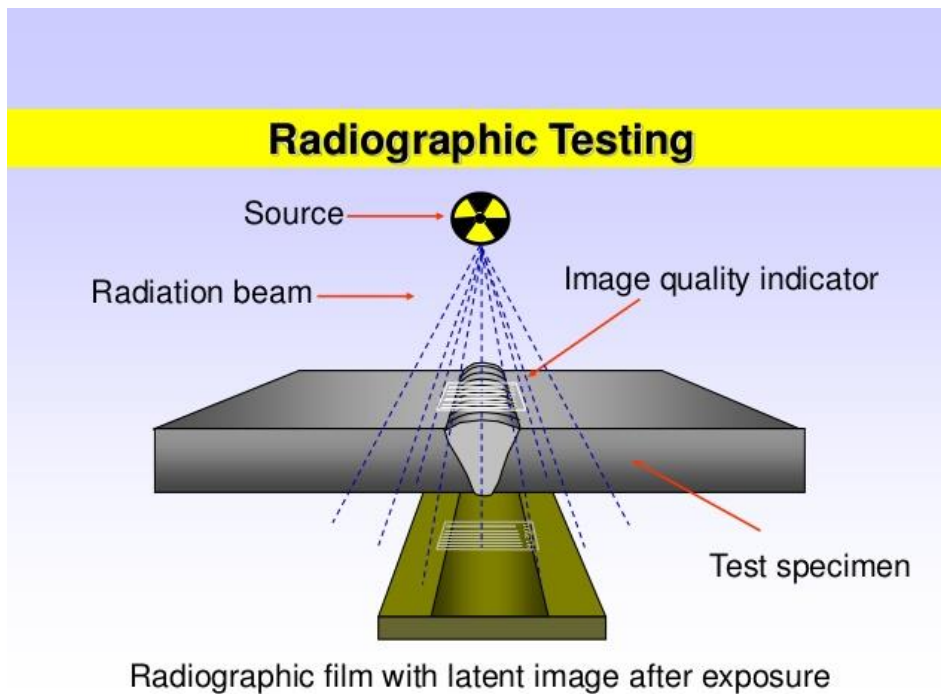
Ο πιο συχνός τρόπος χρήσης της ραδιογραφίας είναι ο έλεγχος και η ταξινόμηση των συγκολλήσεων σε σωληνώσεις υπό πίεση, δοχεία πίεσης, δοχεία αποθήκευσης υψηλής χωρητικότητας, αγωγούς και ορισμένες δομικές συγκολλήσεις.

Ως πρώτο βήμα της διαδικασίας συνίσταται να προηγηθεί η οπτική εξέταση με σκοπό τον αποκλεισμό κάποιων εξωτερικών ελαττωμάτων. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται μία συσκευή ανίχνευσης κατά τη διάρκεια της εξέτασης προκειμένου να γίνει διεύθυνση της ακτινοβολίας με αποτέλεσμα την επαρκή καταγραφή της, Εικόνα 19. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας η δέσμη ακτινοβολίας θα πρέπει να βρίσκεται στο μέσον της τομής του δείγματος, Εικόνα 20. Σε ιδιαίτερες περιπτώσεις μία διαφορετική κατεύθυνση της δέσμης μπορεί να δείχνει καλύτερα τα ελαττώματα του δείγματος. Το αποτέλεσμα είναι ένα φιλμ ραδιογραφίας το οποίο παρουσιάζει τα ελαττώματα του υλικού. Ωστόσο ελαττώματα όπως θραύση σε στρώματα (*delamination*) ή επίπεδες ρωγμές (*planar cracks*) είναι δύσκολο να ανιχνευθούν με ραδιογραφία.



Εικόνα 19 Ραδιογραφία σε κυλινδρικό αγωγό [26]





Εικόνα 20 Γενική περιγραφή της ραδιογραφίας [27]

### 1.5.3 ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ (Hydrostatic tests)

Ένας υδροστατικός έλεγχος, [28], είναι ένας τρόπος με τον οποίο ελέγχονται για αντοχή και διαρροές τα δοχεία πίεσης, οι αγωγοί, οι υδραυλικές εγκαταστάσεις, οι κύλινδροι αποθήκευσης αερίου, οι λέβητες και οι δεξαμενές καυσίμου.

Διεξάγεται υπό τους περιορισμούς είτε των προδιαγραφών των κανονισμών-προτύπων είτε του πελάτη. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, το δοχείο γεμίζεται με ένα σχεδόν ασυμπίεστο υγρό (σταθερή πυκνότητα), συνήθως νερό ή λάδι, εφαρμόζεται υδροστατική πίεση και εξετάζεται για διαρροές ή μόνιμες αλλαγές στο σχήμα, Εικόνα 21. Μπορούν να προστεθούν κόκκινες ή φθορίζουσες χρωστικές στο νερό για να διευκολυνθεί η οπτική εύρεση των διαρροών.



Εικόνα 21 Hydrostatic test [29]

Ο συντελεστής ασφάλειας είναι συνήθως 166,66%, 143% ή 150% της πίεσης λειτουργίας (*working pressure*), δηλαδή είναι πολύ μεγαλύτερος προκειμένου να υπάρχει ασφαλής και ελεγχόμενη λειτουργία.

Το πιο διαδεδομένο υγρό χρήσης είναι το νερό επειδή είναι οικονομικό, εύκολα διαθέσιμο και συνήθως είναι ακίνδυνο για το σύστημα που πρόκειται να δοκιμαστεί. Σε περιπτώσεις που το νερό προκαλεί προβλήματα, μπορεί να γίνει χρήση κάποιων υδραυλικών λιπαντικών ή λαδιών. Αυτά τα λιπαντικά είναι σχεδόν ασυμπίεστα, συνεπώς φτάνουν σε υψηλή πίεση σχετικά εύκολα. Επίσης έχουν την ικανότητα να απελευθερώσουν μια μικρή ποσότητα ενέργειας σε περίπτωση βλάβης – μία μικρή ποσότητα του λιπαντικού θα διαφύγει υπό υψηλή πίεση εάν το δοχείο αποτύχει.

#### 1.5.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ & ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

##### 1.5.4.1 Μέθοδος διεισδυτικών υγρών για εύρεση επιφανειακών ρωγμών (*Penetrant Testing*)

Η μέθοδος διεισδυτικών υγρών, [30], αποτελεί τον πλέον διαδεδομένο μη καταστροφικό έλεγχο για την ανίχνευση ασυνεχειών στις επιφάνειες των δοκιμίων. Εφαρμόζεται τόσο,

σε αγώγιμα όσο και σε μη αγώγιμα, σιδηρομαγνητικά (Fe) είτε μη σιδηρομαγνητικά (NFe) υλικά, για έλεγχο επιφανειακών ρωγμών και πόρων.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια σχετικά απλή διαδικασία χωρίς να απαιτείται πολύπλοκος και πολυδάπανος εξοπλισμός. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι το καθαριστικό, ο δεισδυτής και ο εμφανιστής. Η διαδικασία της μεθόδου είναι η εξής:

- Καθαρισμός της επιφάνειας με ειδικό καθαριστικό. Απομάκρυνση των γράσων, λαδιών και άλλων μορφών βρωμιάς διότι οι ρωγμές πρέπει να είναι ανοιχτές για να εφαρμοστεί η μέθοδος.
- Στέγνωση της επιφάνειας ώστε να μην υπάρχει υγρασία.
- Εφαρμογή του κόκκινου δεισδυτικού υγρού στην καθαρή και στεγνή επιφάνεια για 5 με 10 λεπτά.
- Απομάκρυνση του περίσσιου υγρού από την επιφάνεια είτε με νερό είτε με ένα καθαρό πανί χωρίς χνούδια, το οποίο να είναι εμποτισμένο με το καθαριστικό.
- Εφαρμογή του υγρού εμφάνισης λευκού χρώματος στη στεγνή επιφάνεια από μια απόσταση 20 εκ. με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματιστεί ένα λευκό φόντο.
- Εμφάνιση των ρωγμών ως κόκκινων γραμμών, ενώ η ακριβής τοποθεσία της ρωγμής γίνεται ορατή μέσα σε λίγα λεπτά. Όλη διαδικασία διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα όπου ολοκληρώνεται με το τελικό καθαρισμό και την καταγραφή των ενδείξεων.

Η παραπάνω διαδικασία επιτυγχάνει τις ορατές ασυνέχειες στο φυσικό φως. Επιπλέον, σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια υπάρχει και η δυνατότητα εφαρμογής φθοριζόντων δεισδυτικών υγρών.

#### 1.5.4.2 Μέθοδος Μαγνητικών Σωματιδίων (*Magnetic Particle Testing – MT*)

Τα μαγνητικά σωματίδια είναι μια διαδεδομένη μέθοδος, [30], για τον εντοπισμό επιφανειακών αλλά και υποεπιφανειακών ασυνεχειών έως 2-3 mm κάτω από την επιφάνεια σε μεταλλικά σιδηρομαγνητικά υλικά. Δεν απαιτείται επιμελής προκαθαρισμός και εντοπίζονται ακόμη και ασυνέχειες γεμάτες από ξένες ύλες (σκουριά, σκόνη, άλατα

κλπ.). Αποτελεί μια γρήγορη και απλή μέθοδο στην εφαρμογή της. Τα βήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- Προαιρετική προετοιμασία της επιφάνειας ελέγχου (π.χ. τρόχισμα συγκόλλησης).
- Μαγνήτιση του δοκιμίου που θα ελεγχθεί μέσω ειδικού ηλεκτρομαγνήτη ή άλλης ισοδύναμης διάταξης.
- Χρωματισμός επιφάνειας με λευκό υγρό και εφαρμογή μαγνητικών σωματιδίων (ρηνισμάτων) μαύρου χρώματος.
- Σχηματισμός της ένδειξης στη θέση διαρροής του μαγνητικού πεδίου. Οι ασυνέχειες στην περιοχή της δοκιμής που τέμνουν κάθετα το μαγνητικό πεδίο δημιουργούν πεδίο διαρροής και η πολικότητα που δημιουργείται έλκει τα σωματίδια και τις αποκαλύπτει.

## 1.6 ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΔΟΧΕΙΑ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ

Τα δοχεία υπό πίεση μπορεί να αποτελέσουν μεγάλο κίνδυνο καθώς έχουν συμβεί θανατηφόρα ατυχήματα κατά τη λειτουργία τους. Συνεπώς, ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η λειτουργία των δοχείων υπό πίεση πρέπει να ακολουθούν διαφόρους κανονισμούς και ελέγχους οι οποίοι εξαρτώνται από τη νομοθεσία. Οι κανονισμοί οι οποίοι διέπουν τα δοχεία υπό πίεση είναι οι ASME VIII (Αμερική), EN 13445 (Ευρώπη), PD5500 (Αγγλία), 97/23/EK / ΦΕΚ 987/B/1999 (Ελλάδα). Ωστόσο, ο διεθνώς αποδεκτός κώδικας για το σχεδιασμό των δοχείων υπό πίεση είναι ο *ASME (American Society of Mechanical Engineering) Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)*, [31].

Ο κώδικας αυτός παρέχει κανόνες για το σχεδιασμό, την κατασκευή, την εγκατάσταση, την επιθεώρηση, τη συντήρηση και τη χρήση λεβήτων ισχύος (power boilers), λεβήτων θέρμανσης (heating boilers), δοχείων πίεσης (pressure vessels) και εξαρτημάτων πυρηνικών εγκαταστάσεων (nuclear power plant components). Περιλαμβάνει επίσης πρότυπα για υλικά, διαδικασίες συγκόλλησης, μη καταστροφικούς ελέγχους και επιθεώρηση εν λειτουργία. Η πρώτη έκδοση του *ASME BPVC* σχετική με κανόνες για

την κατασκευή λεβήτων και για τις επιτρεπόμενες πιέσεις λειτουργίας, εκδόθηκε το 1914 και δημοσιεύθηκε το 1915.

### 1.6.1 ASME BPVC SECTION VIII

Τα κριτήρια σχεδιασμού του κώδικα *ASME BPVC* αποτελούνται από βασικούς κανόνες που καθορίζουν τη μέθοδο σχεδιασμού, τα φορτία σχεδιασμού, τις επιτρεπόμενες τάσεις, τα αποδεκτά υλικά, την κατασκευή, τη δοκιμή, τις πιστοποιήσεις και τις απαιτήσεις επιθεώρησης.

Η μέθοδος σχεδιασμού για τα δοχεία υπό πίεση ορίζεται στο τμήμα *Section VIII (Pressure Vessels)* του κώδικα *ASME BPVC* και χρησιμοποιεί την πίεση σχεδιασμού, την ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση, και υπολογισμούς συμβατούς με τη γεωμετρία, για τον υπολογισμό του ελάχιστου απαιτούμενου πάχους δεξαμενών, δοχείων και σωλήνων υπό πίεση.

Το τμήμα VIII χωρίζεται στις παρακάτω τρεις υποκατηγορίες:

**Division 1:** περιλαμβάνει κανόνες για το σχεδιασμό, την κατασκευή, την επιθεώρηση, τη δοκιμή και την πιστοποίηση δοχείων πίεσης που λειτουργούν σε εσωτερικές ή εξωτερικές πιέσεις από 15 psi έως 3000 psi.

**Division 2:** περιλαμβάνει εναλλακτικούς κανόνες για το σχεδιασμό, την κατασκευή, την επιθεώρηση, τη δοκιμή και την πιστοποίηση των δοχείων πίεσης που λειτουργούν είτε σε εσωτερικές ή εξωτερικές πιέσεις από 15 psi έως 3000 psi. Είναι πιο αυστηρός από το Division 1, έχει διαφορετικές προδιαγραφές για το σχεδιασμό, τον υπολογισμό των τάσεων, τον έλεγχο ποιότητας, την επιθεώρηση και κατασκευή, ωστόσο επιτρέπει υψηλότερες τάσεις σχεδιασμού.

**Division 3:** περιλαμβάνει κανόνες για το σχεδιασμό, την κατασκευή, την επιθεώρηση, τη δοκιμή και την πιστοποίηση δοχείων υψηλής πίεσης που λειτουργούν σε εσωτερικές ή εξωτερικές πιέσεις άνω των 10000 psi.

## 2. ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΟΧΕΙΩΝ ΠΙΕΣΗΣ ΛΕΠΤΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ

Στο βιομηχανικό τομέα, τα δοχεία πίεσης έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν με ασφάλεια σε μια συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία που τεχνικά αναφέρονται ως «πίεση σχεδιασμού» και «θερμοκρασία σχεδιασμού».

### 2.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ

Το πρώτο βήμα στο σχεδιασμό είναι η επιλογή του καταλληλότερου τύπου δοχείου πίεσης για τη συγκεκριμένη λειτουργία. Οι πρωταρχικοί παράγοντες που επηρεάζουν αυτήν την επιλογή είναι η θερμοκρασία και πίεση λειτουργίας, η θέση του δοχείου, η φύση του υγρού που αποθηκεύεται μέσα στο δοχείο υπό πίεση, ο απαραίτητος όγκος για αποθήκευση ή χρήση, [1].

Ενδείκνυνται διάφοροι τύποι δοχείων υπό πίεση τα οποία έχουν συγκεκριμένες χρήσεις. Για παράδειγμα, για την αποθήκευση υγρών σε ατμοσφαιρική πίεση, χρησιμοποιούνται συνήθως οριζόντια κυλινδρικά δοχεία. Σφαιρικά δοχεία χρησιμοποιούνται όταν ο απαιτούμενος όγκος είναι μεγάλος. Η κατανομή των τάσεων στις επιφάνειες της σφαίρας, τόσο εσωτερικά και εξωτερικά είναι ίσες. Ωστόσο, οι σφαίρες είναι πολύ πιο δαπανηρές στην κατασκευή από τα κυλινδρικά δοχεία. Για μικρότερο όγκο υπό πίεση, τα κυλινδρικά δοχεία με διαμορφωμένες κεφαλές είναι πιο οικονομικά, [32].

### 2.2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ

Στην πλειονότητα τα δοχεία πίεσης κατασκευάζονται από χάλυβα. Ορισμένες μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα βελτιώνονται με σφυρηλάτηση, αλλά η συγκόλληση μπορεί μερικές φορές να μειώσει αυτές τις επιθυμητές ιδιότητες. Σε περίπτωση συγκόλλησης, είναι ωφέλιμο να επιλέγεται κράμα χάλυβα με υψηλή αντοχή σε κρούση και ανθεκτικό στη διάβρωση, προκειμένου το δοχείο πίεσης να πληροί τα διεθνή πρότυπα ασφαλείας.

Η επιλογή του υλικού γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την αντοχή σε εφελκυσμό και σε θραύση, την αντοχή σε διάβρωση, και την αντίσταση στο σχηματισμό υδρογόνου σε υψηλές θερμοκρασίες, που προκαλεί ρήξη του υλικού (*hydrogen effect*).

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα συνηθέστερα υλικά (*carbon steel* και *low alloy steel*) για δοχεία πίεσης σύμφωνα με τον κώδικα *ASME BPVC Section VIII* παράγραφος 7-*Materials*. Η καμπύλη (*curve*) αναφέρεται στις ιδιότητες σκληρότητας (*toughness*) του υλικού, με τα υλικά της καμπύλης D να έχουν τις καλύτερες ιδιότητες σκληρότητας.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα συνηθέστερα υλικά για δοχεία και σωλήνες με βάση τα επιτρεπόμενα όρια θερμοκρασία λειτουργίας.

**Πίνακας 1** Κατηγορίες υλικών δοχείων πίεσης με βάση τις ιδιότητες σκληρότητάς τους [31]

<b>Curve A:</b> SA-216 Gr. WCB & WCC, normalized and tempered; SA-217 Gr. WC6, normalized and tempered.	<b>Curve B:</b> SA-216 Gr. WCA, normalized and tempered or water-quenched and tempered; SA-216 Gr. WCB & WCC for maximum thickness of 2 in. (water-quenched and tempered); SA-285 Gr. A & B; SA-414 Gr. A; SA-515 Gr. 60; SA-516 Gr. 65 & 70, not normalized.
<b>Curve C:</b> SA-182 Gr. 21 & 22, normalized and tempered SA-302 Gr. C & D SA-336 Gr. F21 & F22, normalized and tempered SA-387 Gr. 21 & 22, normalized and tempered SA-516 Gr. 55 & 60, not normalized SA-533 Gr. B & C SA-662 Gr. A	<b>Curve D:</b> SA-203 SA-537 Cl. 1, 2 & 3 SA-508 Cl. 1 SA-612, normalized SA-516, normalized SA 662, normalized SA-524 Cl. 1 & 2 SA-738 Gr. A

Πίνακας 2 Όρια θερμοκρασίας για διαδεδομένα υλικά δοχείων πίεσης [31]

Temperature Use Limit ( <sup>°</sup> F)	Plate Material	Pipe Material	Forging Material
Down to -50	SA-516 <sup>a</sup> All grades	SA 333 Gr. 1	SA 350 Gr. LF1, LF2
+33 to +775	SA-285 Gr. C SA-515 Gr. 55, 60, 65 SA-516 All grades	SA-53 SA-106	SA-181 Gr. I, II
+776 to +1000	SA-204 Gr. B, C SA-387 Gr. 11, 12 Class 1	SA-335 Gr. P1, P11, P12	SA-182 Gr. F1, F11, F12

<sup>a</sup> Impact testing required.  
 Note: SA is a classification of steel used in the ASME Boiler and Pressure Vessel Code.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τρία βασικά υλικά κατασκευής δοχείων πίεσης που έχουν επίσης μελετηθεί σε σχετικές επιστημονικές δημοσιεύσεις στη διεθνή βιβλιογραφία.

### 2.2.1 CARBON STEEL SA516 GR70

Ο ανθρακοχάλυβας ASME SA 516 70 είναι ένας από τους πιο δημοφιλείς χάλυβες στην αγορά. Προορίζεται κυρίως για χρήση σε συγκολλημένα δοχεία πίεσης όπου είναι σημαντική η αντοχή στα πιο δύσκολα σημεία.

Χρησιμοποιείται για την κατασκευή λεβήτων και δοχείων πίεσης, ως υψηλής ποιότητας υλικό που συμμορφώνεται ιδανικά με τις υψηλές προδιαγραφές που καθορίζονται από τη βιομηχανία πετρελαίου, φυσικού αερίου και πετροχημικών. Η ονομασία του καθορίζεται στα διεθνή πρότυπα ASTM (*American Society for Testing and Materials*) A516 Grade 70 και ASME SA516 Grade 70.

Ο ASME SA516 Grade 70 περιέχει κυρίως άνθρακα C και πυρίτιο Si και σε μικρότερες ποσότητες μαγγάνιο Mn, φώσφορο P, θείο S, αλουμίνιο Al, και χρώμιο Cr. Οι ιδιότητές



του περιλαμβάνουν την καλή συγκολλησιμότητα, αντίσταση σε κόπωση, αντοχή σε θραύση, αντίσταση στην κρούση, μικρή παραμόρφωση σε υψηλές θερμοκρασίες, αντίσταση σε διάβρωση λόγω θείου και υδρογόνου, καλή ποιότητα επιφάνειας και καλή διαστασιολογική ακρίβεια.

Για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων μπορεί να γίνει θερμική επεξεργασία του SA516 Gr. 70 επιτυγχάνοντας καλύτερη ολκιμότητα, σκληρότητα, αντοχή θραύσης και αντίσταση στην κρούση. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι σε αυτή την περίπτωση η ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα μεταβάλλονται σε μικρό βαθμό, [20].

### 2.2.2 NIMONIC 80A

Τα κράματα *nimonic* αποτελούνται κυρίως από νικέλιο και χρώμιο. Αυτά τα κράματα είναι γνωστά γιατί έχουν υψηλή απόδοση και σε υψηλές θερμοκρασίες παραμορφώνονται δύσκολα.

Τα κράματα *nimonic* που διατίθενται στο εμπόριο είναι το NIMONIC 75 και το NIMONIC 80A. Το κράμα NIMONIC 80A είναι ένα σφυρήλατο, σκληρυμένο κράμα που ενισχύεται με πρόσθετα όπως τιτάνιο, αλουμίνιο και άνθρακα. Κατασκευάζεται με τήξη υψηλής συχνότητας και χύτευση. Είναι παρόμοιο με το κράμα NIMONIC 75. Έχει καλή αντοχή στη διάβρωση και την οξειδωση. Η ρήξη λόγω ερπυσμού και η αντοχή σε εφελκυσμό παρουσιάζονται σε υψηλές θερμοκρασίες στους 815 °C (1500 °F). Χρησιμοποιείται ευρέως σε λέβητες, πτερύγια στροβίλου, θαλάμους καύσης, έμβολα και εργαλεία μηχανημάτων, [20].

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται συγκριτικά οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών NIMONIC 80A και SA516 Gr. 70.

Πίνακας 3 Μηχανικές Ιδιότητες των υλικών *Nimonic 80A* και *Carbon Steel SA516 GR70* [20]

<b>Μηχανικές Ιδιότητες</b>		
	<b>Nimonic 80A</b>	<b>CARBON STEEL SA516 GR70</b>
<b>Density (g/cm<sup>3</sup>)</b>	8.19	7.80
<b>Ultimate Tensile Strength (MPa)</b>	890	550
<b>Yield Strength (Mpa)</b>	620	260
<b>Modulus of Elasticity (Gpa)</b>	185	200
<b>Poisson's Ratio</b>	0.30	0.29
<b>Thermal Conductivity (W/mk)</b>	55	46
<b>Specific Heat Capacity (J/gC)</b>	0.448	0.460

### 2.2.3 AISI 304 και 304L

Ο χάλυβας AISI 304 είναι ο πιο κοινός ανοξειδωτος χάλυβας. Περιέχει υψηλή περιεκτικότητα σε χρώμιο και χαμηλή σε άνθρακα. Περιέχει χρώμιο (18-20%) και νικέλιο (8-10.5%). Είναι ωστενιτικός ανοξειδωτος χάλυβας. Δεν είναι τόσο αγωγίμος θερμικά και ηλεκτρικά όσο ο ανθρακοχάλυβας. Έχει καλύτερη αντοχή στη διάβρωση από τον κανονικό χάλυβα και η χρήση του είναι διαδεδομένη λόγω της ευκολίας του στη διαμόρφωσή του σε διάφορα σχήματα, [33].

Ο τύπος AISI 304L διαθέτει 0.03% μέγιστη περιεκτικότητα άνθρακα η οποία εξαλείφει τα καρβίδια του χρωμίου κατά τη συγκόλληση. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα περιορίζει το σχηματισμό καρβιδίων του χρωμίου σε υψηλές θερμοκρασίες (480 – 820 °C) και την επιρρέπεια σε κοκκώδη διάβρωση (*intergranular corrosion*). Οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαβρωτικές εφαρμογές που απαιτούν συγκόλληση όπως σε δοχεία πίεσης και σωλήνες. Ο τύπος AISI 304 εφαρμόζεται μόνο σε κατεργασίες χωρίς απαίτηση συγκόλλησης, [34].

Πίνακας 4 Μηχανικές Ιδιότητες των υλικών AISI 304 και 304L [35]

<b>Μηχανικές Ιδιότητες</b>	<b>AISI 304</b>
<b>Yield Strength</b>	210 Min MPa
<b>Tensile Strength</b>	520 - 720 MPa
<b>Elongation at Break</b>	45 Min%
<b>Φυσικές Ιδιότητες</b>	<b>AISI 304 κ' 304L</b>
<b>Πυκνότητα</b>	8.00 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Σημείο Τήξης</b>	1450 °C
<b>Θερμική Διαστολή</b>	17.2 x 10 <sup>-6</sup> /K
<b>Μέτρο Ελαστικότητας</b>	193 GPa
<b>Θερμική αγωγιμότητα</b>	16.2W/m.K
<b>Ηλεκτρική αντίσταση</b>	0.072 x 10 <sup>-6</sup> Ω .m
<b>Μηχανικές Ιδιότητες</b>	<b>AISI 304L</b>
<b>Yield Strength</b>	200 Min MPa
<b>Tensile Strength</b>	500 - 700 MPa
<b>Elongation at Break</b>	45 Min%

### 2.3. ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΑΣΗΣ

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές τάσης που λαμβάνονται υπόψιν για τον υπολογισμό του πάχους του τοιχώματος ενός δοχείου πίεσης δίνονται στον κώδικα *ASME BPVC* και εξαρτώνται κυρίως από το υλικό κατασκευής, Πίνακας 5.

Η υποκατηγορία *Division 1* ενσωματώνει υψηλότερο συντελεστή ασφαλείας με τιμή 4. Για παράδειγμα, εάν χρησιμοποιείται υλικό με αντοχή εφελκυσμού 60.000 psi, η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση είναι 15.000 psi. Η υποκατηγορία *Division 2* ενσωματώνει χαμηλότερο συντελεστή ασφαλείας με τιμή 3. Έτσι, η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή τάσης για ένα υλικό αντοχής εφελκυσμού 60.000 psi, θα γίνει 20.000 psi.

Πολλές εταιρείες απαιτούν να κατασκευάζονται όλα τα δοχεία πίεσης σύμφωνα με το *Division 2* λόγω των πιο απαιτητικών προδιαγραφών σχεδίασης. Άλλες εταιρείες στοχεύοντας σε μείωση του κόστους επιτρέπουν στους κατασκευαστές να επιλέξουν

είτε το *Division 1* είτε το *Division 2*. Γενικά οι κατασκευαστές επιλέγουν το *Division 1* για δοχεία χαμηλότερων πιέσεων και το *Division 2* για δοχεία υψηλής πίεσης.

Πίνακας 5 Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές τάσεων για δοχεία υπό πίεση [31]

Maximum Allowable Stress Value for Common Steels				
Material	Spec. Nbr	Grade	DIVISION 1	DIVISION 2
			-20°F to 650°F	-20°F to 650°F
Carbon Steel Plates and Sheets	SA - 516	Grade 55	13,800	18,300
		Grade 60	15,000	20,000
		Grade 65	16,300	21,700
		Grade 70	17,500	23,300
	SA - 285	Grade A	11,300	15,000
		Grade B	12,500	16,700
		Grade C	13,800	18,300
	SA - 36		12,700	16,900
	SA - 203	Grade A	16,300	21,700
		Grade B	17,500	23,300
		Grade D	16,300	21,700
		Grade E	17,500	23,300
	High Alloy Steel Plates	SA - 240	Grade 304	11,200
Grade 304L			-	16,700
Grade 316			12,300	20,000
Grade 316L			10,200	16,700

## 2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΔΟΧΕΙΟΥ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ

Τα δοχεία πίεσης υπόκεινται σε εφελκυστικές δυνάμεις που παρουσιάζονται στα τοιχώματα του κελύφους. Δύο τύποι μεθοδολογίας εφαρμόζονται συνήθως στα δοχεία πίεσης. Κατά γενικό κανόνα, η πρώτη εφαρμόζεται σε δοχεία πίεσης με λεπτά τοιχώματα, δηλαδή όταν ο λόγος της ακτίνας  $r$  προς το πάχος τοιχώματος  $t$  είναι μεγαλύτερος από 10. Η δεύτερη μέθοδος είναι πάντα εφαρμόσιμη ανεξάρτητα από την αναλογία  $r / t$  και μπορεί να αναφέρεται ως λύση για δοχεία πίεσης με μεγαλύτερα πάχη τοιχώματος, [1].

Η κανονική τάση στα τοιχώματα του δοχείου είναι ανάλογη με την πίεση που ασκείται εσωτερικά στις επιφάνειες του δοχείου και τη διάμετρο του δοχείου και αντιστρόφως

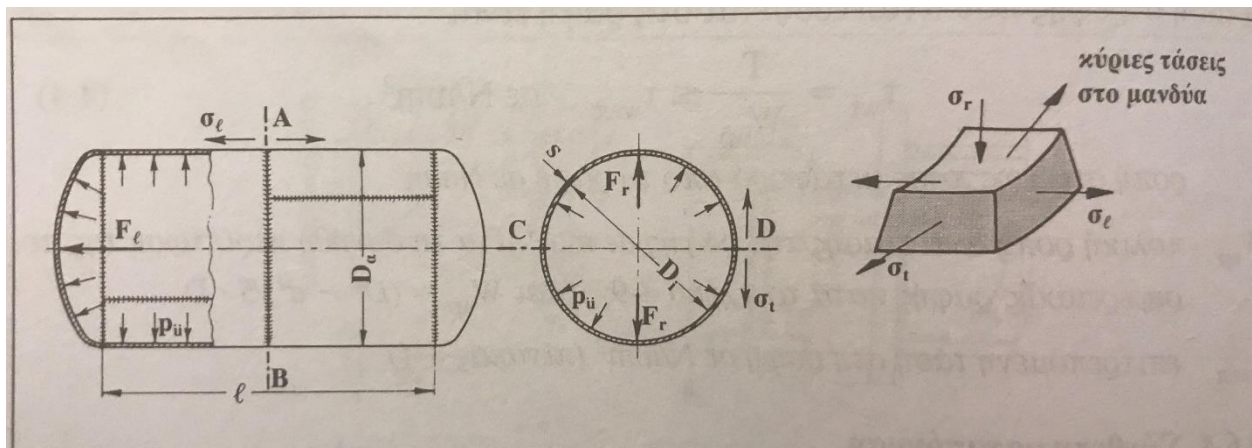
ανάλογη με το πάχος των τοιχωμάτων. Βέβαια, τα δοχεία πίεσης αποτυγχάνουν όταν η κατάσταση πίεσης υπερβαίνει κάποιο κριτήριο αστοχίας.

Σύμφωνα με το «Στοιχεία Μηχανών Ι, Ι.Κ. Στεργίου και Κ.Ι. Στεργίου, 2003», [36], για τον υπολογισμό του πάχους σε κυλινδρικό δοχείο πίεσης λεπτού τοιχώματος της Εικόνας 22, η αξονική δύναμη  $F_l$  και η ακτινική δύναμη  $F_r$  που ασκεί το περιεχόμενο του δοχείου στα τοιχώματα υπολογίζεται ως εξής:

$$F_l = \frac{\pi \times D^2 \times p}{4} [N]$$

$$F_r = D \times l \times p [N]$$

Όπου  $D$  η εσωτερική διάμετρος του κελύφους σε  $mm$  και  $p$  η πίεση σε  $\frac{N}{mm^2}$  ή  $MPa$ .



Εικόνα 22 Καταπόνηση του μανδύα ενός συγκολλητικού δοχείου πίεσης [36]

Στην τομή A-B η αξονική δύναμη  $F_l$  προκαλεί στην περιφερειακή ραφή με πάχος  $s$  (πάχος ελάσματος δοχείου) την αξονική τάση εφελκυσμού (*longitudinal stress*):

$$\text{Αξονική τάση εφελκυσμού: } \sigma_l = \frac{F_l}{D \times \pi \times s} = \frac{\pi \times D^2 \times p}{4 \times D \times \pi \times s} = \frac{D \times p}{4 \times s} \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

Στην τομή C-D η ακτινική δύναμη  $F_r$  προκαλεί στην κατά μήκος ραφή με πάχος  $s$  την εφαπτομενική ή περιφερειακή τάση εφελκυσμού (*hoop stress ή circumferential stress*):

$$\text{Εφαπτομενική τάση εφελκυσμού: } \sigma_r = \frac{F_r}{2 \times l \times s} = \frac{D \times l \times p}{2 \times l \times s} = \frac{D \times p}{2 \times s} \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

Από τη σύγκριση των δύο τάσεων προκύπτει ότι η τάση  $\sigma_r$  που προκαλεί η  $F_r$  στην κατά μήκος ραφή είναι διπλάσια της τάσης  $\sigma_l$  που προκαλεί η  $F_l$  στην περιφερειακή ραφή.

$$\text{Επομένως: } \sigma_r = 2 \sigma_l$$

Δηλαδή είναι πιο πιθανό οι ρωγμές στο δοχείο να προκύψουν στην κατεύθυνση κατά μήκος του κυλινδρικού δοχείου παρά περιφερειακά.

Ο υπολογισμός λοιπόν του ελάχιστου επιτρεπόμενου πάχους  $s$  του δοχείου θα γίνει βάσει της δυσμενέστερης τιμής  $\sigma_r$ . Θα έχουμε τότε,

$$s = \frac{D \times p}{2 \times \sigma_{\varepsilon\pi}}$$

όπου  $\sigma_{\varepsilon\pi} = \sigma_r = 2 \sigma_l$  είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη εφαπτομενική τάση εφελκυσμού.

Οι παραπάνω εξισώσεις χρησιμοποιούνται ευρέως στη σχετική βιβλιογραφία για τον υπολογισμό του ελάχιστου πάχους σε δοχεία πίεσης λεπτού τοιχώματος.

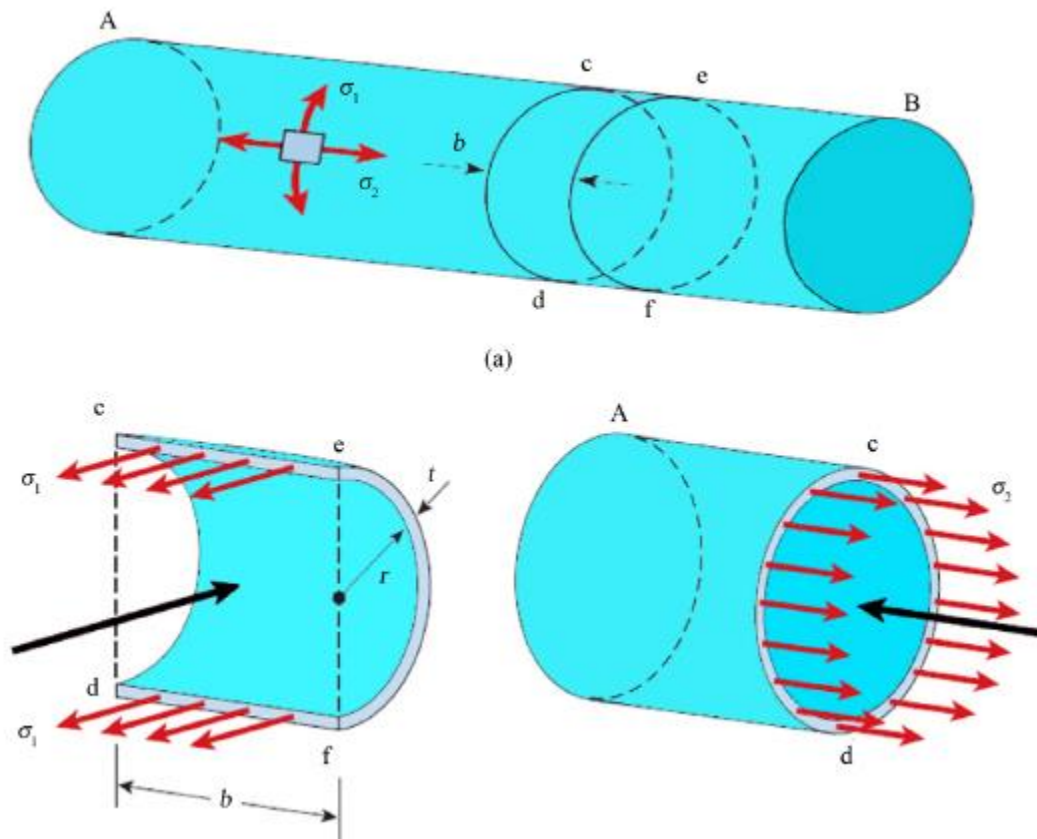
Στη δημοσίευση «Static, Linear and Finite Element Analysis of Pressure Vessel» (2014), [1], υπολογίζεται το ελάχιστο πάχος τοιχώματος για ένα κυλινδρικό δοχείο πίεσης με ημισφαιρικές κεφαλές από υλικό SA 516 70, με διάμετρο 1500 mm και πίεση λειτουργίας 5 bar. Για τους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψιν ότι :  $\sigma_{\varepsilon\pi} = 2 \times \sigma_l = 2 \times 260 \text{ MPa}$ , όπου 260 MPa είναι η τάση διαρροής (*yield stress*) του υλικού.

Στη δημοσίευση «Stress Analysis of Thin-Walled Pressure Vessels» (2015), [32], υπολογίζεται το ελάχιστο πάχος τοιχώματος για ένα δοχείο υπό πίεση (*soda can*) με ημισφαιρικές κεφαλές από υλικό SA 516 70, με διάμετρο 0.004 in (10.16 cm) και πίεση λειτουργίας από 42 psi έως 45.6 psi (3 bar). Καθώς υπάρχει διαφορά μεταξύ της

εξωτερικής πίεσης  $p_{ext}$  και της εσωτερικής πίεσης  $p_{int}$  οι παραπάνω εξισώσεις τροποποιούνται ως :

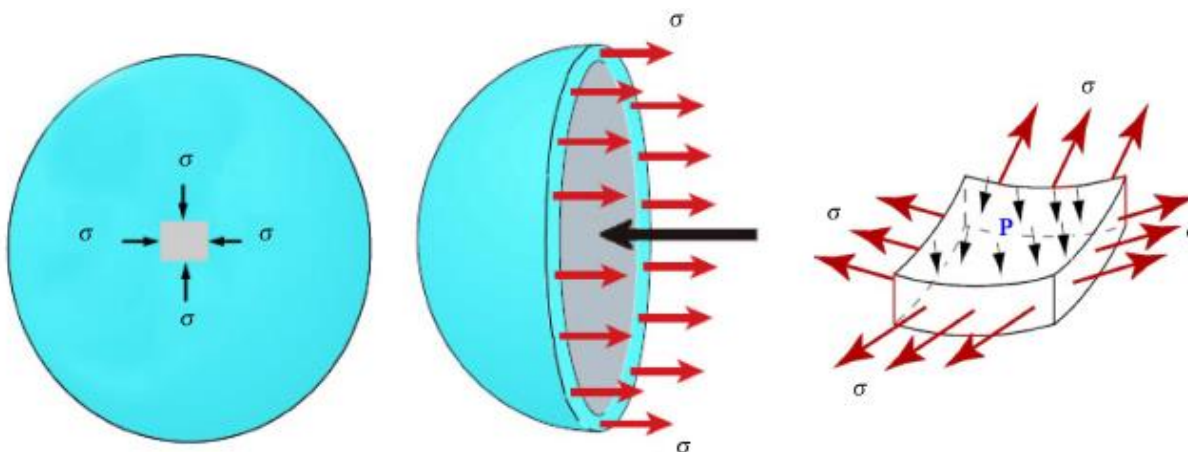
$$s = \frac{D \times (p_{int} - p_{ext})}{2 \times \sigma_{\epsilon\pi}}$$

Στις παρακάτω εικόνες περιγράφονται σχηματικά τα είδη τάσεων που αναπτύσσονται σε κυλινδρικό δοχείο λεπτού τοιχώματος και σε σφαιρικό δοχείο λεπτού τοιχώματος. Στην Εικόνα 23,  $\sigma_1$  είναι η περιφερειακή τάση εφελκυσμού (*circumferential stress*), και  $\sigma_2$  είναι η αξονική τάση εφελκυσμού (*longitudinal stress*).



Εικόνα 23 Τάσεις σε κυλινδρικό δοχείο πίεσης [32]

Στην Εικόνα 24,  $\sigma$  είναι η περιφερειακή τάση εφελκυσμού (*hoop stress*), ενώ δεν υφίσταται αξονική τάση εφελκυσμού. Σε κάθε τομή που διέρχεται από το κέντρο της σφαίρας ισχύει η ίδια τάση. Συγκρίνοντας τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να πούμε ότι για ίδιες τιμές πίεσης, ακτίνας και πάχους τοιχώματος, η σφαιρική γεωμετρία είναι δύο φορές πιο αποδοτική σε αντοχή του τοιχώματος καθώς αναπτύσσονται μικρότερες τάσεις από την κυλινδρική γεωμετρία.



Εικόνα 24 Τάσεις σε σφαιρικό δοχείο πίεσης [32]

## 2.5 ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ (Weld joint efficiency)

Αναφορικά με τον έλεγχο ποιότητας ο κώδικας *ASME BPVC Section VIII* απαιτεί την εξέταση των διαμήκων και περιφερειακών ενώσεων στα δοχεία πίεσης με τη μέθοδο της ραδιογραφίας.

Σύμφωνα με τον κώδικα, όταν ο σχεδιασμός του δοχείου πίεσης απαιτεί πλήρη ραδιογραφημένη διαμήκη συγκολλημένη ένωση, το κυλινδρικό κέλυφος θα έχει απόδοση συγκόλλησης (*welded joint efficiency*)  $E = 1.0$ . Όταν ο σχεδιασμός του δοχείου δεν απαιτεί πλήρη ραδιογραφημένη διαμήκη συγκολλημένη ένωση, η κατασκευή θα έχει απόδοση συγκόλλησης  $E = 0.7$ . Η απόδοση συγκόλλησης εκφράζει



βασικά το λόγο της αντοχής της συγκόλλησης ως προς την αντοχή του βασικού υλικού. Η τιμή αυτή εισάγεται στον τύπο υπολογισμού του ελάχιστου επιτρεπόμενου πάχους του κελύφους σύμφωνα με τον κώδικα *ASME BPVC Section VIII*, (βλ. υποκεφάλαιο 4.2).

## 2.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (Corrosion Allowance)

Είναι προφανές ότι στην πετροχημική βιομηχανία τα δοχεία πίεσης πρέπει να αντέχουν στην πίεση αλλά και στη διαβρωτική χημική δράση. Η διάβρωση είναι μια ηλεκτροχημική αντίδραση μεταξύ ενός μετάλλου και του περιβάλλοντός του. Περιλαμβάνει μεταφορά ηλεκτρονίων και επίσης απαιτεί μία άνοδο, μία κάθοδο και έναν ηλεκτρολύτη. Η διάβρωση προκαλεί απώλεια μάζας του υλικού και μείωση της αντοχής του.

Η προστασία έναντι της διάβρωσης επιτυγχάνεται μέσω της επιμετάλλωσης των εσωτερικών επιφανειών του κελύφους με ένα μη διαβρωτικό κράμα το οποίο ψεκάζεται πάνω από τα χαλύβδινα ελάσματα. Η διάβρωση ελέγχεται από το λεπτό στρώμα του κράματος, το οποίο θα αποτρέψει οποιαδήποτε χημική αντίδραση του μεταλλικού κελύφους κατά τη λειτουργία του προϊόντος. Ωστόσο, μία ακόμα αποδεδειγμένη τεχνική είναι η μεταλλική επένδυση με μία συμπιεσμένη επίστρωση από ανοξειδωτο ασάλι συγκολλημένη σε ολόκληρη την εσωτερική επιφάνεια.

Βασικό σημείο ελέγχου της διάβρωσης είναι η ακριβής εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης που υπολογίζεται σύμφωνα με τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του υλικού. Για να προσδιοριστεί ο ρυθμός διάβρωσης, δοκιμάζεται ένα παρόμοιο κομμάτι μετάλλου όπως αυτό που πρόκειται να υποβληθεί σε λειτουργία. Με αυτά τα δεδομένα είναι απλό να κατασκευαστεί το δοχείο σε ένα πάχος κατάλληλο, προκειμένου να έχουμε ένα καλό μη διαβρωτικό αποτέλεσμα, [37].

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση της διάβρωσης στα δοχεία πίεσης είναι ο καθορισμός του επιτρεπόμενου ορίου διάβρωσης (*corrosion allowance*). Αυτό το όριο είναι ένα συμπληρωματικό πάχος μετάλλου που προστίθεται

στο ελάχιστο πάχος που απαιτείται για την επίτευξη αντοχής στα εφαρμοζόμενα φορτία. Αυτό το πρόσθετο πάχος αντισταθμίζει τη διάβρωση που θα πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια της ζωής του σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας ή περιβάλλοντος.

Με σκοπό την εύρεση του ορίου διάβρωσης είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του ρυθμού διάβρωσης (*corrosion rate*). Ο ρυθμός διάβρωσης είναι η ταχύτητα με την οποία οποιοδήποτε δεδομένο μέταλλο φθείρεται σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον και εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και από τον τύπο και την κατάσταση του μετάλλου.

Ο υπολογισμός του ρυθμού διάβρωσης γίνεται ως εξής:

$$\text{Corrosion Rate} = \frac{t_{\text{initial}} - t_{\text{actual}}}{\text{time between } (t_{\text{initial}}, t_{\text{actual}})}$$

$t_{\text{initial}}$ : το αρχικό πάχος του δοχείου (mm)

$t_{\text{actual}}$ : το πραγματικό πάχος (mm)

*time between* ( $t_{\text{initial}}, t_{\text{actual}}$ ): ο χρόνος που έχει περάσει μεταξύ αυτών των δύο σε χρόνια

Οπότε ο υπολογισμός του ορίου διάβρωσης, εάν ο ρυθμός διάβρωσης είναι π.χ. 0.4 mm/yr, είναι:

$$\text{Corrosion allowance} = 0.4 \frac{\text{mm}}{\text{yr}} \times \text{προσδοκώμενη ζωή του δοχείου}$$

Για σωληνώσεις από ανθρακούχο χάλυβα, χρησιμοποιείται όριο διάβρωσης 1.5 mm, εκτός εάν απαιτούνται υψηλότερα όρια. Για ανοξείδωτους χάλυβες συνήθως δεν προσδιορίζεται το όριο διάβρωσης διότι έχουν αρκετά μεγάλη αντοχή σε διάβρωση, [38].

Στη σχετική βιβλιογραφία για τον υπολογισμό του ελάχιστου πάχους σε δοχεία πίεσης λεπτού τοιχώματος, λαμβάνονται υπόψιν διαφορετικές τιμές για το όριο διάβρωσης:

Στη δημοσίευση «Static, Linear and Finite Element Analysis of Pressure Vessel» (2014), [1], για δοχείο πίεσης διαμέτρου 1500 mm, πίεση λειτουργίας 5 bar, από υλικό SA 516 70, λαμβάνεται όριο διάβρωσης ίσο με 1.5 mm και απόδοση συγκόλλησης ίση με 0.95.

Στη δημοσίευση «Stress Analysis on Pressure Vessel» (2018), [22], για δοχείο πίεσης διαμέτρου 915 mm, πίεση λειτουργίας από 2.5 bar έως 15.5 bar, θερμοκρασία λειτουργίας από 0 έως 60 °C, από υλικό SA 516 70, λαμβάνεται όριο διάβρωσης ίσο με 1 mm και απόδοση συγκόλλησης ίση με 1.

Στη δημοσίευση «Design and Static Analysis of Different Pressure Vessels and Materials Using FEM Method» (2020), [20], για δοχείο πίεσης διαμέτρου 880 mm, πίεση λειτουργίας 8.24 bar, θερμοκρασία λειτουργίας 200 °C, λαμβάνεται όριο διάβρωσης ίσο με 1.28 mm και εξετάζεται η περίπτωση υλικού από SA 516 70 και από Nimonic 80A.

### 3. Η ΑΝΥΔΡΗ ΑΜΜΩΝΙΑ

#### 3.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΝΥΔΡΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ

Η άνυδρη αμμωνία είναι ανόργανη χημική ένωση η οποία αποτελείται από άζωτο και υδρογόνο με χημικό τύπο  $\text{NH}_3$ . Σε τυπικές συνθήκες η αμμωνία είναι αέριο. Δηλαδή, σε θερμοκρασία  $25^\circ\text{C}$  και σε ατμοσφαιρική πίεση 1 atm είναι άχρωμο αέριο αλλά με δυνατή ενοχλητική οσμή. Ωστόσο, σε χαμηλή θερμοκρασία το αέριο γίνεται υγρό και σε πιο ακραίες συνθήκες, μετατρέπεται σε στερεό.

Η (χημικά καθαρή) αμμωνία συχνά αποκαλείται «άνυδρη αμμωνία» καθώς απουσιάζει εξ ολοκλήρου το νερό από αυτήν. Η άνυδρη αμμωνία (*anhydrous ammonia*) δημιουργείται αρχικά συνδυάζοντας υδρογόνο και άζωτο σε αναλογία 3-1, και στη συνέχεια συμπιέζοντας το προκύπτον αέριο και ψύχοντας το στους  $-33^\circ\text{C}$ . Το άζωτο λαμβάνεται από τον αέρα και το υδρογόνο παράγεται συνήθως από καταλυτική ατμοαναμόρφωση μεθανίου (φυσικού αερίου). Η άνυδρη αμμωνία δεν πρέπει να συγχέεται με το υδατικό διάλυμα αμμωνίας που παριστάνεται με τον χημικό τύπο  $\text{NH}_4\text{OH}$  ή τον  $\text{NH}_3(\text{aq})$ , και αποκαλείται «οικιακή αμμωνία».

Η αμμωνία συνήθως αποθηκεύεται ως ψυχρό υγρό στους  $-33^\circ\text{C}$  ( $28^\circ\text{F}$ ) σε ατμοσφαιρική πίεση 1 bar σε ειδικά δοχεία καθώς είναι ασφαλέστερα (λόγω της χαμηλής πίεσης). Ωστόσο, κατά την κανονική λειτουργία, η αποθηκευμένη αμμωνία ή οι ατμοί της πιθανόν να βρίσκονται σε πίεση πάνω από την ατμοσφαιρική. Εάν για κάποιο λόγο αυξηθεί η θερμοκρασία στο δοχείο, τότε για να παραμείνει στην υγρή φάση θα πρέπει να αυξηθεί και η πίεση, π.χ.  $25^\circ\text{C}$  σε 10 bar ή  $56.9^\circ\text{C}$  σε 24.2 bar. Περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας στους  $-77.65^\circ\text{C}$  προκαλεί πήξη και μετατροπή από υγρή αμμωνία σε άσπρο κρυσταλλικό στερεό, [39].

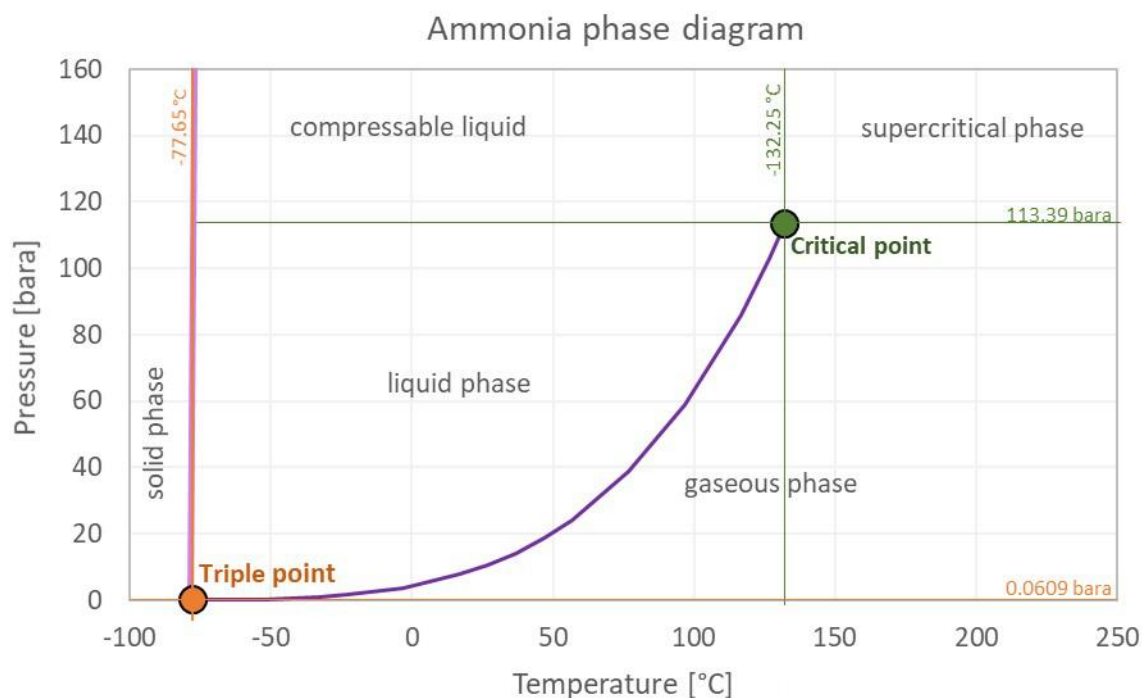
Το διάγραμμα φάσης της αμμωνίας, Εικόνα 25, δείχνει τη συμπεριφορά φάσης με αλλαγές στη θερμοκρασία και την πίεση. Η καμπύλη πίεσης – θερμοκρασίας μεταξύ του τριπλού σημείου και του κρίσιμου σημείου δείχνει το σημείο βρασμού της αμμωνίας (μετάβαση από αέριο σε υγρό), [40].

**Κρίσιμο σημείο:** Το τελικό σημείο της καμπύλης πίεσης-θερμοκρασίας που καθορίζει συνθήκες υπό τις οποίες ένα υγρό και οι ατμοί του μπορούν να συνυπάρχουν.

- θερμοκρασία αμμωνίας:  $T_c = 405.4 \text{ K} = 132.25 \text{ }^\circ\text{C}$
- πίεση αμμωνίας:  $P_c = 113.4 \text{ bar} = 11.34 \text{ MPa}$

**Τριπλό σημείο:** Το τελικό σημείο της καμπύλης πίεσης-θερμοκρασίας όπου συνυπάρχουν οι τρεις φάσεις (αέριο, υγρό και στερεό) σε θερμοδυναμική ισορροπία.

- θερμοκρασία αμμωνίας:  $195.5 \text{ K} = -77.65 \text{ }^\circ\text{C}$
- πίεση αμμωνίας:  $0.0609 \text{ bar} = 6090 \text{ Pa}$



Εικόνα 25 Διάγραμμα φάσης αμμωνίας [40]

Στον Πίνακα 6 απεικονίζονται οι ιδιότητες της υγρής αμμωνίας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας.

Πίνακας 6 Ιδιότητες της υγρής αμμωνίας σε μονάδες SI [40]

Temperature		Pressure		Density	Specific weight	Cv	Cp	Thermal conductivity		Dynamic Viscosity	Kinematic viscosity
[K]	[°C]	[MPa]	[bara]	[g/l], [kg/m <sup>3</sup> ]	[N/m <sup>3</sup> ]	[kJ/kg K]	[kJ/kg K]	[mW/m K]	[kcal(IT)/(h m K)]	[μPa s]	[cSt], [m <sup>2</sup> /s*10 <sup>-6</sup> ]
Liquid											
195.5	-77.7	0.006091	0.06091	732.9	7188	2.9342	4.2020	818.99	0.70420	559.57	0.76347
210	-63.2	0.0177	0.1774	717.2	7033	2.9077	4.2846	768.02	0.66038	414.98	0.57862
220	-53.2	0.0338	0.3379	705.8	6922	2.8893	4.3421	733.17	0.63041	346.68	0.49119
230	-43.2	0.0604	0.6041	694.0	6806	2.8716	4.3969	698.80	0.60086	294.94	0.42500
240	-33.2	0.1022	1.022	681.8	6686	2.8544	4.4486	665.09	0.57187	254.85	0.37380
250	-23.2	0.1649	1.649	669.2	6563	2.8376	4.4982	632.16	0.54356	223.08	0.33336
270	-3.2	0.3811	3.811	642.9	6305	2.8051	4.5991	568.85	0.48912	176.06	0.27386
290	16.9	0.7774	7.774	614.8	6029	2.7753	4.7215	508.99	0.43765	142.74	0.23216
300	26.9	1.062	10.62	600.0	5884	2.7620	4.8000	480.30	0.41298	129.30	0.21550
310	36.9	1.424	14.24	584.5	5732	2.7512	4.8964	452.23	0.38885	117.49	0.20101
320	46.9	1.873	18.73	568.2	5572	2.7430	5.0180	424.80	0.36526	106.90	0.18814
330	56.9	2.421	24.21	551.0	5403	2.7383	5.1756	397.96	0.34218	97.33	0.17665
350	76.9	3.866	38.66	512.4	5025	2.7460	5.6706	345.32	0.29692	80.43	0.15696
370	96.9	5.878	58.78	465.3	4563	2.7960	6.7142	293.07	0.25199	65.49	0.14075
390	116.9	8.605	86.05	399.6	3919	2.9546	10.3047	239.65	0.20606	50.88	0.12731
400	126.9	10.31	103.1	344.6	3379	3.1771	22.7274	216.00	0.18573	41.80	0.12132
405.4	132.3	11.34	113.4	225.0	2207						

### 3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

Η αμμωνία αποτελεί ένα χημικό προϊόν που παράγεται παγκοσμίως σε εξαιρετικά μεγάλες ποσότητες. Ο λόγος είναι ότι η αμμωνία έχει ποικίλες εφαρμογές σε διάφορες βιομηχανίες όπως παραγωγής λιπασμάτων, παραγωγής φαρμάκων (σύνθεση πολλών φαρμακευτικών προϊόντων), επεξεργασίας τροφίμων, παραγωγής χημικών προϊόντων (π.χ. νιτρικού οξέος HNO<sub>3</sub>), ως ψυκτικό υγρό και στην παραγωγή πάγου, [39].

Προκειμένου να διευκολυνθεί η μεταφορά της αμμωνίας, συνήθως μετατρέπεται σε ψυχρή υγρή αμμωνία και μεταφέρεται σε κατάλληλα σχεδιασμένες δεξαμενές και δοχεία. Για να διατηρηθεί η χαμηλή θερμοκρασία της αμμωνίας εντός του δοχείου απαιτείται ένα σύστημα ψύξης (*refrigeration system*). Σε κανονική λειτουργία οι ατμοί που

δημιουργούνται λόγω μικρής αύξησης της θερμοκρασίας στο δοχείο ή μικρής αύξησης στην πίεση, οδηγούνται στον συμπιεστή (*compressor*), ψύχονται, υγροποιούνται και οδηγούνται πίσω στο δοχείο. Σε περίπτωση πολύ μεγάλης αύξησης της πίεσης λόγω βλάβης του συστήματος ψύξης ή εισαγωγής μεγάλης ποσότητας από το δίκτυο τότε οι ατμοί οδηγούνται μέσω των βαλβίδων ελέγχου (*vent control valves*) σε καύση (*flare burning*) ώστε να επανέλθει η κανονική πίεση στο δοχείο και να μην διαφύγουν στην ατμόσφαιρα.

Η αμμωνία τα τελευταία χρόνια είναι ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές στη ναυτιλία. Μεταφέρεται ως υγροποιημένο καύσιμο σε ατμοσφαιρική πίεση στους -33 °C σε ειδικές δεξαμενές και η υψηλή ενεργειακή της απόδοση την αναδεικνύει ιδανική ως καύσιμο για πλοία μεγάλων αποστάσεων. Στα πλεονεκτήματα της συμπεριλαμβάνεται το ήδη εκτεταμένο δίκτυο διανομής και οι διαθέσιμες υποδομές. Η αμμωνία μεταφέρεται επίσης και αποθηκεύεται πιο εύκολα σε σύγκριση με το υδρογόνο. Είναι ένα καύσιμο που προσαρμόζεται εύκολα, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες τεχνολογίες (π.χ. σε μηχανές εσωτερικής καύσης ή σε κυψέλες καυσίμου). Συγκεκριμένα για τις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, οι οποίες είναι ηλεκτροχημικές συσκευές μετατροπής ενέργειας που παράγουν ηλεκτρισμό και θερμότητα, η αμμωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως πηγή υδρογόνου, [41].

Εντούτοις, υπάρχουν κάποιες ιδιαιτερότητές της αμμωνίας τις οποίες οφείλουμε να προσέχουμε για την ασφαλή χρήση της ως καύσιμο. Η αμμωνία είναι τοξική, όμως η ισχυρή οσμή της βοηθά στον εύκολο εντοπισμό πιθανών διαρροών. Η ένυδρη αμμωνία έχει ισχυρές διαβρωτικές ιδιότητες, οι οποίες θα πρέπει να μελετηθούν και να επισημανθούν στο σχεδιασμό του συστήματος καυσίμου. Έχει την ικανότητα να διαλύεται στο νερό και η χαμηλή πυκνότητα που διαθέτει της επιτρέπει να διασκορπίζεται στον αέρα, περιορίζοντας έτσι τον κίνδυνο ανάφλεξης και έκρηξης. Γενικά πάντως, θεωρείται πιο ασφαλής καύσιμο από το υδρογόνο, [41].

### 3.3 ΑΝΥΔΡΗ ΑΜΜΩΝΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η άνυδρη αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) και το υδροξείδιο του αμμωνίου (διάλυμα αμμωνίας σε νερό) δεν προκαλούν διάβρωση από μόνα τους αλλά χρειάζεται η επαφή τους με συγκεκριμένα στοιχεία για να δημιουργηθεί αυτή η κατάσταση, ειδικά όταν υπάρχουν διάφορα ανεπιθύμητα αέρια στο περιβάλλον. Η ένωση με διοξείδιο του άνθρακα οδηγεί στη δημιουργία οξειδωτικού καρβαμιδικού αμμωνίου (το καρβαμικό – *carbamate* είναι μία κατηγορία οργανικών ενώσεων που προέρχεται από καρβαμικό οξύ), [42].

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές όσον αφορά την αμμωνία, ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες, για να αποφευχθεί η διάβρωση του υλικού. Όσον αφορά τους ωστενιτικούς ανοξειδωτους χάλυβες, όπως ο AISI 304L, αυτοί έχουν τη δυνατότητα να αντιστέκονται στη διάβρωση και στο SCC (*stress corrosion cracking*), [43].

Αντίθετα η αμμωνία μπορεί να δημιουργήσει SCC σε ανθρακοχάλυβες (*carbon steels*) υπό τάση και σε χάλυβες υψηλής αντοχής - χαμηλής κραμάτωσης (*high strength low-alloy steels*), [44].

### 3.4 ΚΩΔΙΚΑΣ INTERNATIONAL GAS CARRIER CODE ΓΙΑ ΑΜΜΩΝΙΑ

Ο κώδικας IGC (*International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk*), [45], έχει δημιουργηθεί για την κατασκευή και τον εξοπλισμό των πλοίων εκείνων που μεταφέρουν χύδην υγροποιημένα αέρια. Το Κεφάλαιο 17.13 του κώδικα IGC αναφέρεται στη χρήση της υγρής αμμωνίας σε δεξαμενές πλοίων.

Σύμφωνα με τον κώδικα, η υγρή άνυδρη αμμωνία δεν πρέπει ποτέ να ψεκάζεται σε δεξαμενή που περιέχει αέρα, καθώς υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας στατικού ηλεκτρικού φορτίου που θα μπορούσε να προκαλέσει ανάφλεξη. Για να ελαχιστοποιηθεί η δημιουργία SCC (*stress corrosion cracking*) όταν η αμμωνία μεταφέρεται σε



θερμοκρασία πάνω από  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (αντιστοιχεί σε πίεση 1,9 bar), η περιεκτικότητα σε οξυγόνο στο χώρο (*vapour space*) σε δοχεία πίεσης και σε αγωγούς από χάλυβα άνθρακα-μαγγανίου, πρέπει να μειωθεί στο ελάχιστο δυνατό πριν από την εισαγωγή υγρής αμμωνίας.

Όταν το υλικό κατασκευής είναι χάλυβας άνθρακα-μαγγανίου, τα δοχεία πίεσης και οι σωληνώσεις πρέπει να κατασκευάζονται από λεπτόκοκκο χάλυβα με καθορισμένη ελάχιστη αντοχή διαρροής (*yield strength*) που δεν υπερβαίνει τα  $355\text{ N/mm}^2$  και με πραγματική αντοχή διαρροής που δεν υπερβαίνει τα  $440\text{ N/mm}^2$ .

Γενικά πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν τα ακόλουθα:

- Να χρησιμοποιείται υλικό αντοχής με καθορισμένη ελάχιστη αντοχή εφελκυσμού (*tensile strength*) που δεν υπερβαίνει τα  $410\text{ N/mm}^2$ , ή
- Οι δεξαμενές φορτίου πρέπει να υποβάλλονται σε θερμική επεξεργασία μετά τη συγκόλληση, ή
- Η θερμοκρασία μεταφοράς πρέπει να διατηρείται κατά προτίμηση σε θερμοκρασία κοντά στο σημείο βρασμού του προϊόντος  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$  (1 bar) αλλά σε καμία περίπτωση σε θερμοκρασία πάνω από  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ή
- Η αμμωνία δεν πρέπει να περιέχει λιγότερο από 0,1% κ.β. νερό.

Εάν χρησιμοποιούνται χάλυβες άνθρακα-μαγγανίου με ιδιότητες υψηλότερης απόδοσης από εκείνες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί θερμική επεξεργασία μετά την συγκόλληση των δεξαμενών φορτίου, σωληνώσεων, κ.λπ.

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος του SCC, συνίσταται να διατηρείται η περιεκτικότητα σε οξυγόνο στις δεξαμενές κάτω από 2,5 ppm κ.β. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να μειωθεί η μέση περιεκτικότητα σε οξυγόνο στις δεξαμενές πριν από την εισαγωγή της αμμωνίας ανάλογα με τη θερμοκρασία της αμμωνίας. Ακολουθεί πίνακας με τα επιτρεπόμενα ποσοστά οξυγόνου για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες της αμμωνίας.

Πίνακας 7 Τιμές οξυγόνου (% κ.β.) για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες αμμωνίας [45]

T (°C)	O <sub>2</sub> (% κ.β.)
-30 και κάτω	0.90
-20	0.50
-10	0.28
0	0.16
10	0.10
20	0.05
30	0.03

### 3.5 ΚΩΔΙΚΑΣ ASME BPVC ΓΙΑ ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ ΑΝΥΔΡΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια τα δοχεία υπό πίεση σχεδιάζονται, κατασκευάζονται, ελέγχονται και επιθεωρούνται σύμφωνα με την τελευταία έκδοση του κώδικα *ASME BPVC Section VIII*, ο οποίος θεωρείται στην πραγματικότητα ο ισχυρότερος διεθνής κώδικας προτύπων.

Αναφορικά με τα δοχεία πίεσης αμμωνίας, αυτά θα πρέπει να είναι κατάλληλα για λειτουργία με αμμωνία εντός της πίεσης και της θερμοκρασίας λειτουργίας που υποδεικνύονται στα σχέδια. Η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση λειτουργίας (*maximum allowable working pressure*) θα πρέπει να συμβαδίζει με την πίεση σχεδιασμού.

Σύμφωνα με τα περισσότερα εθνικά πρότυπα κυρίως των Η.Π.Α., [46], ισχύουν οι παρακάτω απαιτήσεις:

A) τα δοχεία πίεσης που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση, μεταφορά ή χρήση αμμωνίας χωρίς ψύξη, σε θερμοκρασίες αμμωνίας από -20F έως +300F (-29°C έως και 149°C ) πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται σύμφωνα με τον κώδικα *ASME BPVC Section VIII* για μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση λειτουργίας 265 psig.

B) Τα δοχεία πίεσης που χρησιμοποιούνται για την υπό συνθήκες ψύξης αποθήκευση ή μεταφορά αμμωνίας, πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται για μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση λειτουργίας που λαμβάνει υπόψιν την αναμενόμενη θερμοκρασία στο δοχείο και άλλα κατάλληλα δεδομένα σχεδιασμού.

Ωστόσο ορισμένα εθνικά πρότυπα, [47], ορίζουν ότι τα δοχεία πίεσης αμμωνίας υπό συνθήκες ψύξης πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται σύμφωνα με τον κώδικα *ASME BPVC Section VIII* για μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση λειτουργίας 60 psig (4.1 bar).

## 4. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ

### 4.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

Στη διπλωματική εργασία επιλέχθηκε να μελετηθεί ένα κυλινδρικό οριζόντιο δοχείο υπό πίεση με κυρτές (torispherical) κεφαλές από υλικό SA 516 GR 70. Αυτός ο τύπος κεφαλής επιλέχθηκε λόγω της ευρείας χρήσης της, της σταθερής ακτίνας που διαθέτει και της οικονομικής κατασκευής, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1.

Ο σχεδιασμός του δοχείου έγινε λαμβάνοντας υπόψιν τις προδιαγραφές του κώδικα *ASME BPVC Section VIII – Division 1*. Η απόδοση συγκόλλησης επιλέχθηκε  $E=1$  και το όριο διάβρωσης επιλέχθηκε ως 0.0625 in (1.58 mm), σύμφωνα και με τα κριτήρια του *ASME BPVC Section VIII – Division 1*.

Τα δεδομένα του δοχείου είναι τα εξής:

- Μήκος δοχείου:  $L = 2 \text{ m}$
- Διάμετρος (εσωτερική):  $D = 800 \text{ mm}$
- Εξωτερική πίεση:  $p = 1 \text{ bar} = 0.1 \text{ N/mm}^2$
- Εσωτερική πίεση:  $p = 1 \text{ bar} = 14.5 \text{ psi} = 0.1 \text{ N/mm}^2$
- Εξωτερική θερμοκρασία:  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$
- Εσωτερική θερμοκρασία:  $T = -35 \text{ }^\circ\text{C} = 238.15 \text{ K}$

Παρατήρηση 1: Η εσωτερική θερμοκρασία επιλέχθηκε  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$  διότι σύμφωνα με τον κώδικα IGC, η θερμοκρασία μεταφοράς της υγρής άνυδρης αμμωνίας πρέπει να διατηρείται κατά προτίμηση σε θερμοκρασία κοντά στους  $-33 \text{ }^\circ\text{C}$  (1 bar).

Παρατήρηση 2: Επειδή η θερμοκρασία  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$  αντιστοιχεί σε πίεση 1 bar θα μπορούσαμε να σχεδιάσουμε το δοχείο ως απλό δοχείο αποθήκευσης χωρίς να εφαρμόσουμε τις ειδικές σχεδιαστικές απαιτήσεις του κώδικα *ASME BPVC Section VIII - Division 1* ο οποίος εφαρμόζεται για δοχεία πίεσης άνω των 15 psi (1.03 bar). Ωστόσο επιλέξαμε να αντιμετωπίσουμε το δοχείο της μελέτης ως δοχείο υπό πίεση για να

διασφαλίσουμε ότι οποιαδήποτε αύξηση της θερμοκρασίας και συνάμα της εσωτερικής πίεσης πάνω από 15 psi δεν θα δημιουργήσει πρόβλημα στη λειτουργία και την ασφάλεια της κατασκευής.

Παρατήρηση 3: Για να ελέγξουμε την αντοχή του δοχείου πίεσης σε πιθανή αύξηση της εσωτερικής πίεσης εκπονήσαμε δύο ακόμα στατικές μελέτες. Στην πρώτη εφαρμόσαμε εσωτερική πίεση σχεδιασμού ίση με 3.8 bar (55 psi) που αντιστοιχεί σε μια σημαντική αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας σε -3 °C, και στη δεύτερη εφαρμόσαμε εσωτερική πίεση σχεδιασμού ίση με 4.1 bar (60 psi) όπως απαιτείται από ορισμένα εθνικά πρότυπα (βλ. υποκεφάλαιο 3.5). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Κεφαλαίο 6.

#### 4.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΧΟΥΣ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ

Σύμφωνα με τον κώδικα *ASME BPVC Section VIII*, [31], το ελάχιστο επιτρεπόμενο πάχος του κελύφους (minimum required shell thickness) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$t = \frac{P \times R}{S \times E - 0.6 \times P}$$

όπου

- $P$  = εσωτερική πίεση [psi] = 14.5 psi
- $R$  = εσωτερική ακτίνα [in] = 15.748 in = 400 mm
- $S$  = επιτρεπόμενη τάση [psi] = 17500 για SA 516 GR70 (Πίνακας 5)
- $E$  = απόδοση συγκόλλησης = 1.00

Άρα το ελάχιστο επιτρεπόμενο πάχος είναι:

$$t = \frac{14.5 \times 15.748}{17500 \times 1 - 0.1 \times 14.5} = 0.012 \text{ in}$$

Σε αυτή τη τιμή προσθέτουμε το όριο διάβρωσης 0.0625 in:  $t = 0.012 \text{ in} + 0.0625 = 0.0745 \text{ in} = 1.89 \text{ mm}$

Συνεπώς, το ελάχιστο πάχος του κελύφους είναι 1.89 mm. Για το σχεδιασμό και τη μελέτη της αντοχής του δοχείου επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε πάχους κελύφους ίσο με 3 mm.

Επίσης με βάση τον ίδιο κώδικα *ASME BPVC Section VIII*, [31], το ελάχιστο επιτρεπόμενο πάχος της torispherical κεφαλής (minimum required head thickness) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$t = \frac{0.885 \times P \times L}{S \times E - 0.1 \times P}$$

Όπου

- $P$  = εσωτερική πίεση [psi] = 14.5 psi
- $L$  = εσωτερική σφαιρική ακτίνα [in] = 15.748 in = 400 mm
- $S$  = επιτρεπόμενη τάση [psi] = 17500 για SA 516 GR70 (Πίνακας 5)
- $E$  = απόδοση συγκόλλησης = 1.00

Άρα το ελάχιστο επιτρεπόμενο πάχος είναι:

$$t = \frac{0.885 \times 14.5 \times 15.748}{17500 \times 1 - 0.1 \times 14.5} = 0.0115 \text{ in}$$

Σε αυτή τη τιμή προσθέτουμε το όριο διάβρωσης 0.0625 in:  $t = 0.0115 \text{ in} + 0.0625 = 0.074 \text{ in} = 1.88 \text{ mm}$

Συνεπώς, το ελάχιστο πάχος κεφαλής είναι 1.88 mm. Για το σχεδιασμό και τη μελέτη της αντοχής του δοχείου επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε πάχους κεφαλής ίσο με 3 mm.

#### 4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ TORISPHERICAL ΚΕΦΑΛΗΣ

Για τον υπολογισμό των διαστάσεων της torispherical κεφαλής χρησιμοποιήθηκε το γερμανικό πρότυπο DIN 28011. Οι εξισώσεις που αναφέρονται στο πρότυπο είναι οι παρακάτω και αντιστοιχούν στην Εικόνα 26, [48].

$$C_R = D_0$$

$$KR = 0,1x D_0$$

$$SF = 3,5 x t \text{ or per request}$$

$$DH = 0,1935 x D_0 - 0,455 x t$$

$$TH_i = SF + DH$$

όπου:

$D_0$  = εξωτερική διάμετρος κεφαλής (*external head diameter*)

$CR$  = ακτίνα στεφάνης (*crown radius*)

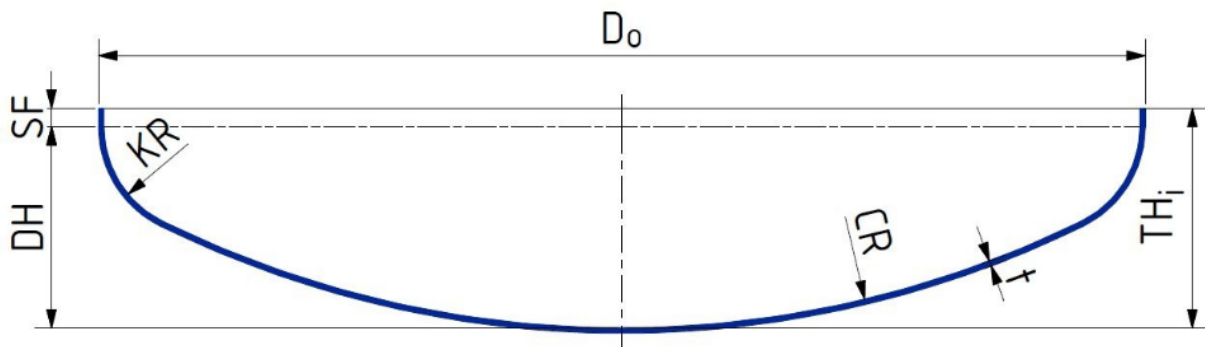
$KR$  = ακτίνα άρθρωσης (*knuckle radius*)

$SF$  = ύψος ίσιας φλάντζας (*straight flange height*)

$DH$  = βάθος εκτόνωσης (*depth of dishing*)

$TH_i$  = συνολικό εσωτερικό ύψος κεφαλής (*total internal head height*)

$t$  = πάχος τοιχώματος (*wall thickness*)



Εικόνα 26 Διαστάσεις torispherical κεφαλής [48]

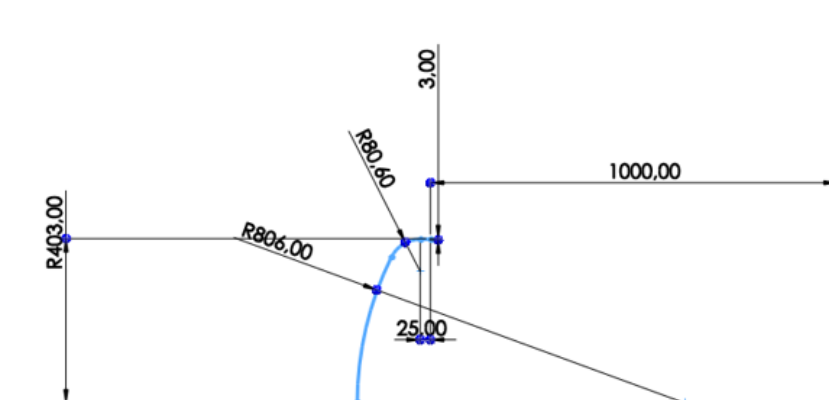
Εισάγοντας στις παραπάνω εξισώσεις τις βασικές διαστάσεις του δοχείου πίεσης προκύπτουν οι διαστάσεις της torispherical κεφαλής σύμφωνα με τις οποίες θα γίνει η τρισδιάστατη σχεδίαση:

- $t = 3\text{mm}$
- $CR = D_0 = 806\text{mm}$
- $KR = 0,1 \times D_0 = 80.6\text{ mm} \rightarrow R80.6$
- $SF \geq 3.5 \times t \geq 3.5 \times 3 \geq 10.5\text{ mm} \rightarrow$  Επιλογή του  $SF = 25\text{mm}$
- $DH = 0.1935 \times D_0 - 0.455 \times t = 154.596\text{ mm}$
- $TH_1 = SF + DH = 25 + 154.596 = 179.596\text{ mm}$

#### 4.4. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΣΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

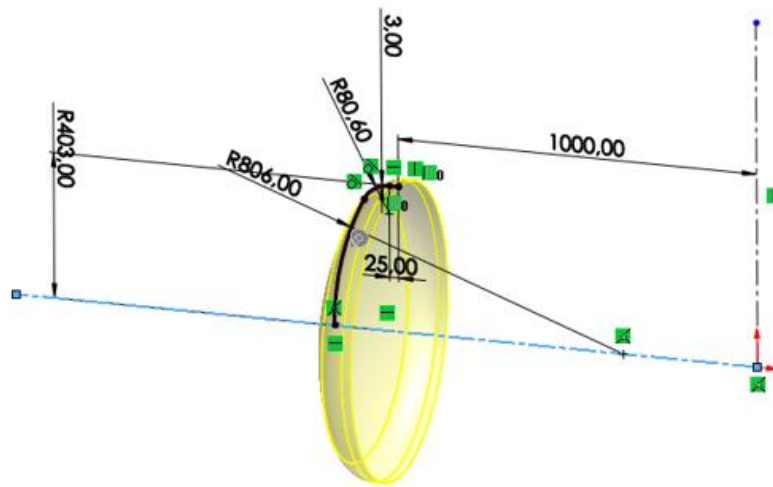
Η σχεδίαση του 3D μοντέλου έγινε στο λογισμικό SolidWorks 2020 το οποίο χρησιμοποιείται με ερευνητική άδεια από το Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών ΠΑ.Δ.Α. Τα σχεδιαστικά βήματα για τη μοντελοποίηση του δοχείου πίεσης είναι τα εξής:

##### 1. Σχεδίαση της κεφαλής σε 2D profile σύμφωνα με τους υπολογισμούς

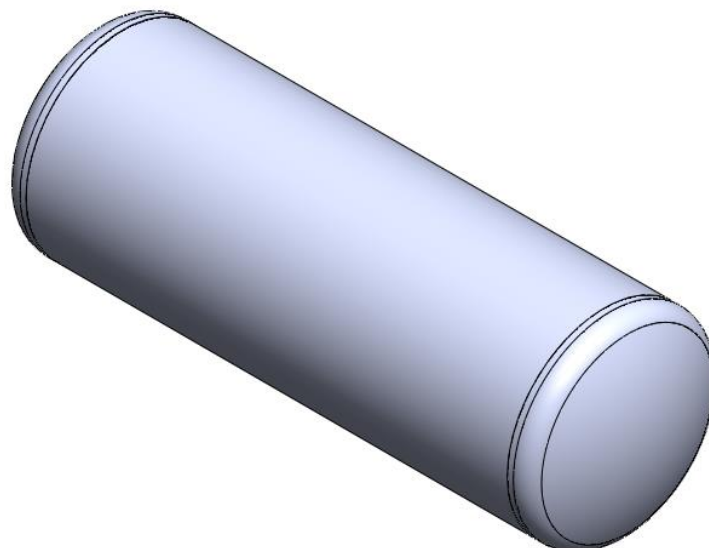




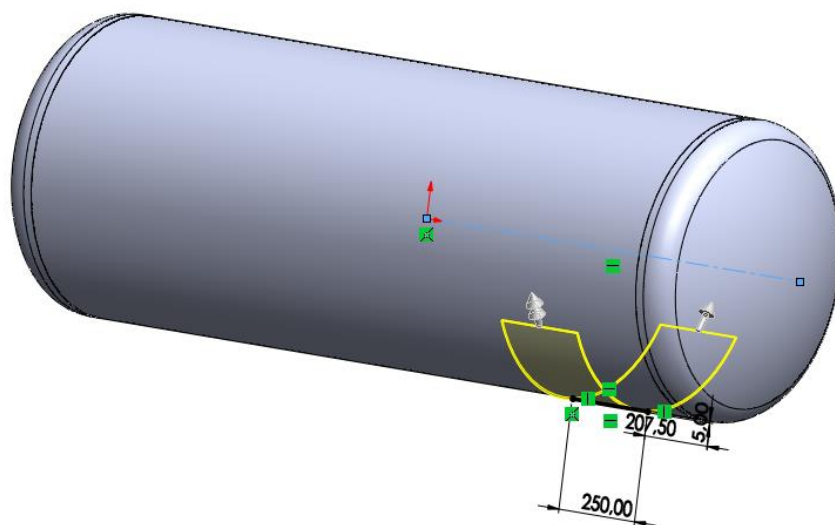
2. Δημιουργία της 3D κεφαλής



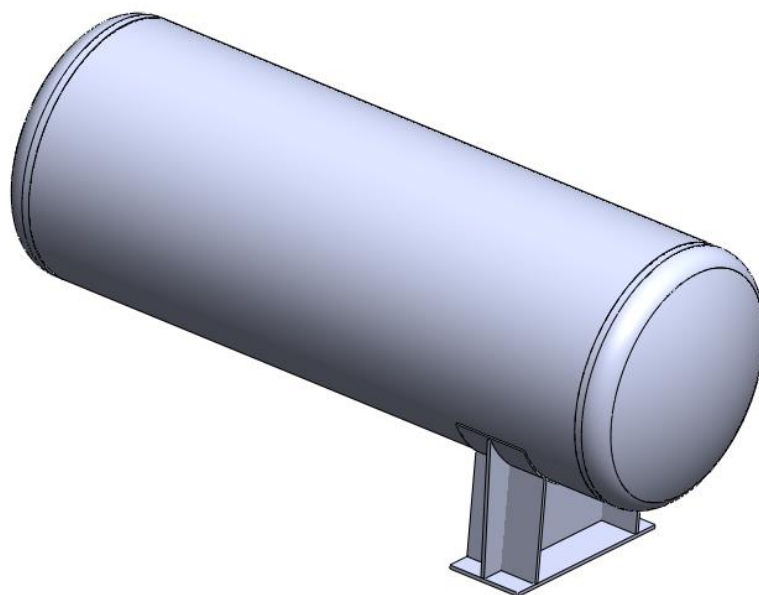
3. Δημιουργία του κυλινδρικού τοιχώματος (κέλυφος) και ένωση με τις κεφαλές



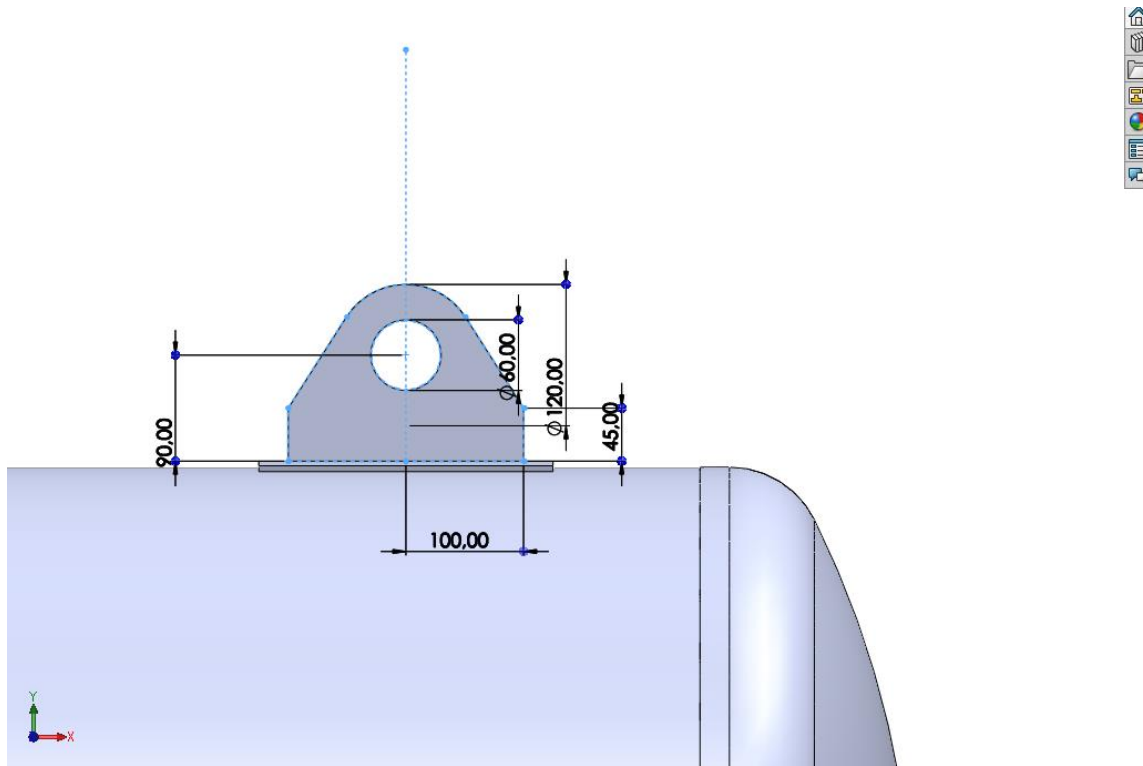
4. Δημιουργία των επιφανειών στήριξης με ελάσματα πάχους 5mm



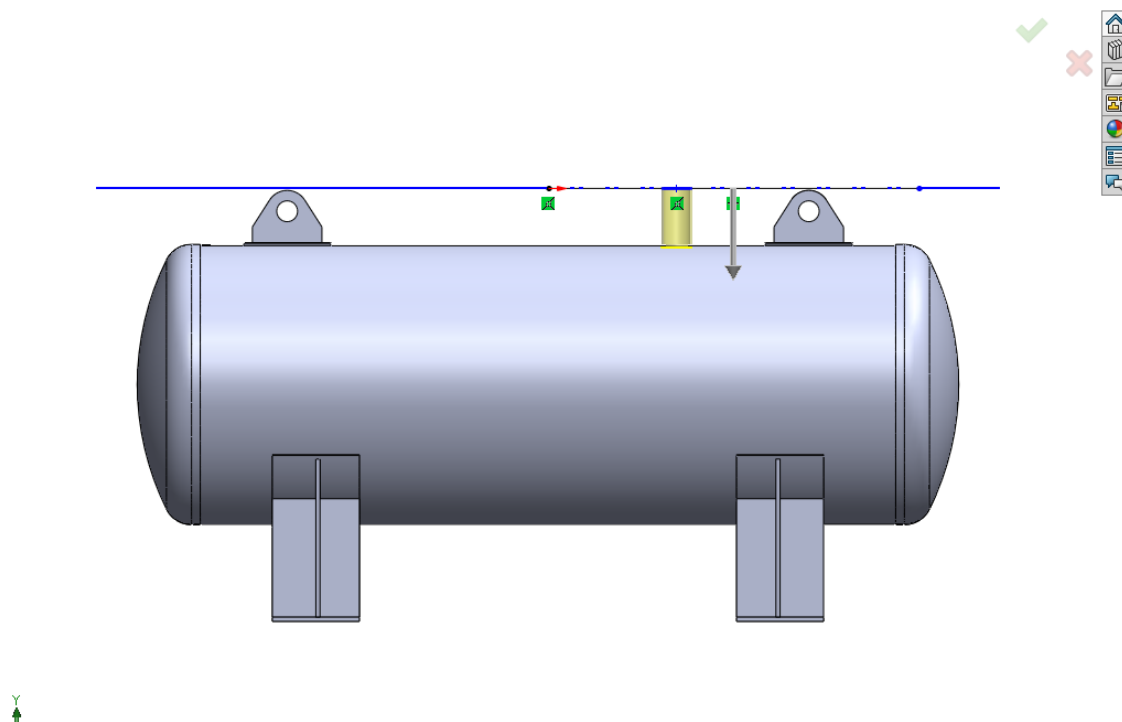
5. Δημιουργία των στηρίξεων από συγκολλητά ελάσματα πάχους 12mm



6. Σχεδίαση του γάντζου ανύψωσης (*lifting hook*) με πάχη ελασμάτων βάσης 5mm και γάντζου 8mm



7. Δημιουργία του ακροφυσίου (nozzle)



Για δοχείο πίεσης με εσωτερική διάμετρο κελύφους 800mm επιλέγουμε εσωτερική διάμετρο ακροφυσίου 100mm (4 in). Ως υλικό για το ακροφύσιο επιλέγουμε το ίδιο υλικό SA 516 GR 70, με μέγιστη επιτρεπόμενη τάση 17500 psi, απόδοση συγκόλλησης E=1 και όριο διάβρωσης 0.0625 in σύμφωνα με τα κριτήρια του κώδικα *ASME BPVC Section VIII – Shell Nozzles*, [31].

Το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος του ακροφυσίου (*required nozzle minimum thickness*) υπολογίζεται ως εξής:

$$t = \frac{P \times R}{S \times E - 0.6 \times P} = \frac{14.5 \times 2}{17500 \times 1 - 0.6 \times 14.5} = 0.0017 \text{ in}$$

όπου *R*: η εσωτερική ακτίνα του ακροφυσίου σε *in*.

Στη συνέχεια προσθέτουμε το όριο διάβρωσης:  $t = 0.0017 + 0.0625 = 0.0642 \text{ in} = 1.63\text{mm}$  και επιλέγουμε πάχος ακροφυσίου ίσο με 3 mm (0.12 in).

## 8. Σχεδίαση και δημιουργία της φλάντζας

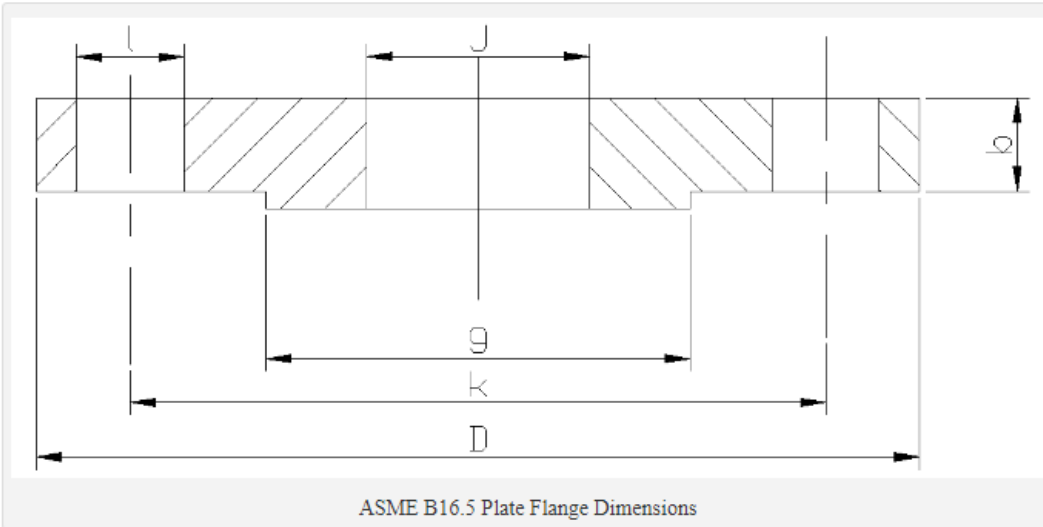
Σύμφωνα με το κώδικα *ASME BPVC Section VIII – Shell Nozzles*, το ελάχιστο άνοιγμα της φλάντζας (*circular opening*) υπολογίζεται ως εξής:

$$d = \text{Diameter of nozzle} - 2(t + \text{corrosion allowance})$$

$$d = 4 - 2 \times (0.12 + 0.0625) = 3.635 \text{ in} = 92.33 \text{ mm}$$

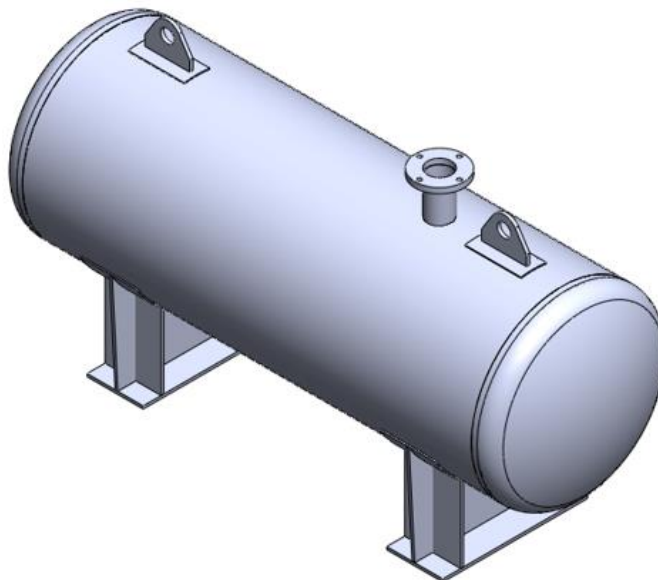
Συνεπώς, για άνοιγμα της φλάντζας  $d = 100 \text{ mm}$  μπορώ να υπολογίσω τις υπόλοιπες διαστάσεις από Πίνακες σύμφωνα με το κώδικα *ASME B16.5 Plate Flange*, [49]. Οι προκύπτουσες διαστάσεις όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 27, είναι:

$$D = 215.9 \text{ mm} \quad k = 177.8 \text{ mm} \quad l = 19 \text{ mm} \quad b = 23.8 \text{ mm}$$



Εικόνα 27 Υπολογισμός διαστάσεων φλάντζας [49]

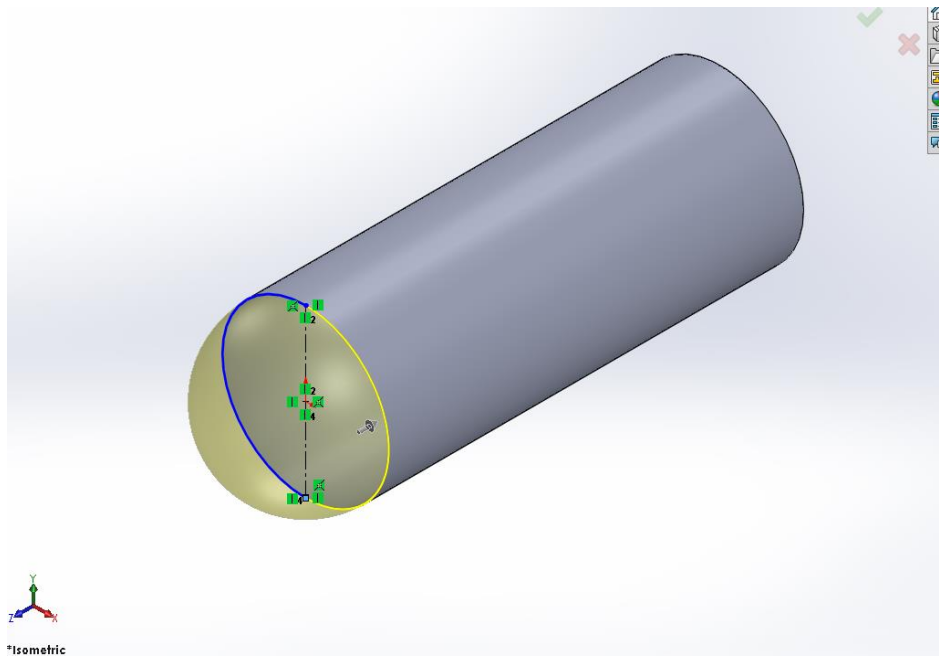
Το ολοκληρωμένο 3D μοντέλο του δοχείου πίεσης με τις torispherical κεφαλές, δύο στηρίξεις, ακροφύσιο, φλάντζα και γάντζο ανύψωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 28. Ωστόσο, για τη θερμική και στατική ανάλυση του μοντέλου με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, το μοντέλο απλοποιήθηκε στο βαθμό που αυτό είναι δυνατόν και αφαιρέθηκαν οι διάφορες λεπτομέρειες (*features*) που δεν επηρεάζουν τη λύση, όπως το ακροφύσιο, η φλάντζα και ο γάντζος ανύψωσης.



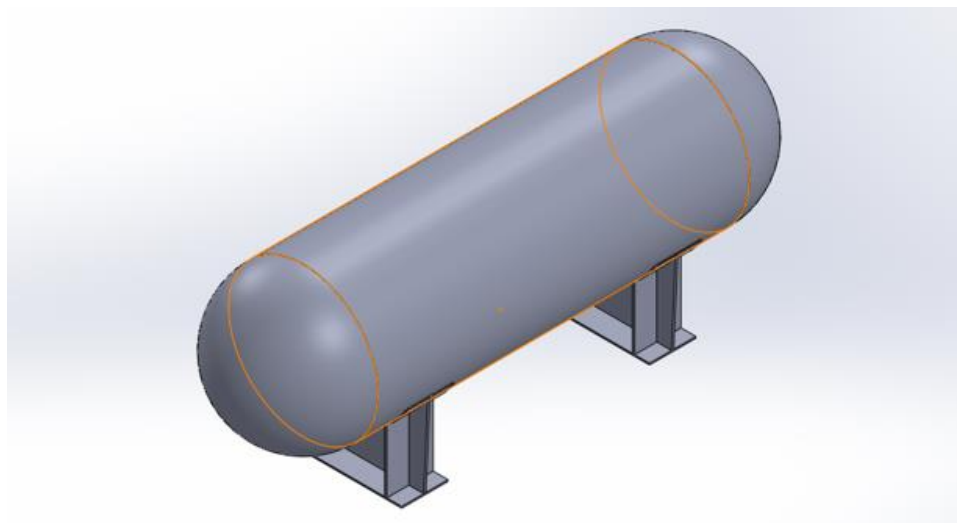
Εικόνα 28 Το 3D μοντέλο του δοχείου πίεσης με torispherical κεφαλές

#### 4.5. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΗΜΙΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΚΕΦΑΛΕΣ

Για τη συγκριτική αξιολόγηση της αντοχής ενός δοχείου πίεσης με torispherical κεφαλές και ενός δοχείου πίεσης με ημισφαιρικές κεφαλές, σχεδιάστηκε ένα ακόμα μοντέλο με ημισφαιρικές κεφαλές, ίδιων διαστάσεων κελύφους (Εικόνες 29 και 30). Τα ελάχιστα πάχη των ημισφαιρικών κεφαλών υπολογίστηκαν με βάση τον ίδιο κώδικα *ASME BPVC Section VIII*.



Εικόνα 29 Σχεδιασμός ημισφαιρικής κεφαλής



Εικόνα 30 Το μοντέλο του δοχείου πίεσης με ημισφαιρικές κεφαλές

## 5. ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ

### 5.1. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η θερμική ανάλυση υπολογίζει τις επιπτώσεις των θερμικών φορτίων σε ένα μοντέλο και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό θερμοκρασιών, ροής θερμότητας και ρυθμού ροής θερμότητας σε όλη την «ύλη» του μοντέλου.

Τα θερμικά φορτία τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν σε μία κατασκευή είναι η θερμοκρασία, η θερμική συναγωγή, η ροή θερμότητας, η θερμική ισχύς και η ακτινοβολία.

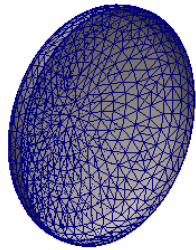
Πριν από την εισαγωγή των θερμικών φορτίων στη θερμική ανάλυση, πρέπει να δημιουργηθεί το πλέγμα (*mesh*). Ένας από τους σκοπούς της δημιουργίας πλέγματος είναι να επιλυθεί με ακρίβεια το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (*Finite Element Analysis*). Δημιουργώντας το πλέγμα, το μοντέλο χωρίζεται σε στοιχεία (*elements*) που βρίσκονται στις επιφάνειες αλλά και στο εσωτερικό του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο οι άγνωστες μεταβλητές υπολογίζονται σε κάθε σημείο του μοντέλου, παρέχοντας μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Στα δύο μοντέλα εφαρμόστηκε ξεχωριστό πλέγμα στην αριστερή και δεξιά κεφαλή, στον κυλινδρικό τμήμα και στα δύο στηρίγματα.

Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος *curvature-base mesh*, με υψηλή ποιότητα πλέγματος τετράεδρων στοιχείων, με 83954 κόμβους και 41465 στοιχεία στο μοντέλο με τις *torispherical* κεφαλές και με 93220 κόμβους και 46062 στοιχεία στο μοντέλο με τις ημισφαιρικές κεφαλές.

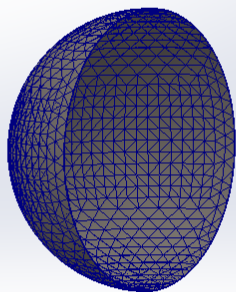
Στις Εικόνες 31-34 παρουσιάζεται το πλέγμα στα διάφορα τμήματα του μοντέλου.

Mesh type: Solid Mesh



Εικόνα 31 Πλέγμα κυρτής (*torispherical*) κεφαλής

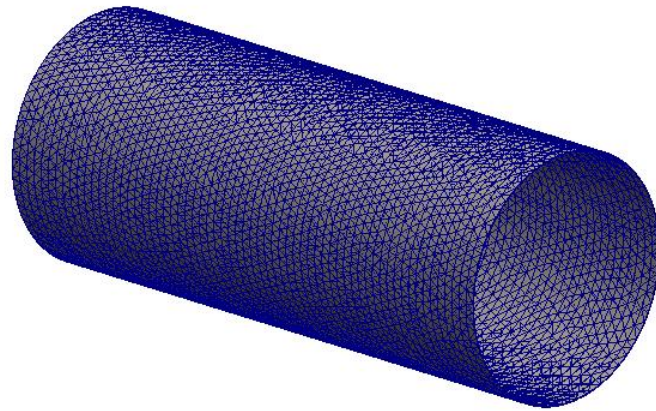
Model name: vessel hemi mesh carbon steel  
Study name: Thermal 1(-Default-)  
Mesh type: Solid Mesh



Εικόνα 32 Πλέγμα ημισφαιρικής κεφαλής

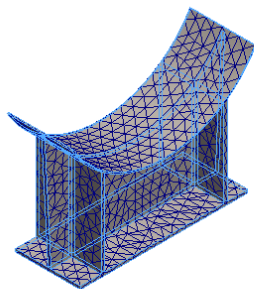


Mesh type: Solid Mesh



Εικόνα 33 Πλέγμα κυλινδρικού τμήματος

Mesh type: Solid Mesh



Εικόνα 34 Πλέγμα στηρίγματος

Η θερμική ανάλυση του συγκεκριμένου προβλήματος πραγματοποιείται σε σταθερή κατάσταση (*Steady-state analysis*) καθώς τα θερμικά φορτία δεν μεταβάλλονται σε σχέση με το χρόνο.

Τα θερμικά φορτία τα οποία εφαρμόζονται στο μοντέλο είναι τα εξής.

1. Στην εξωτερική επιφάνεια του δοχείου δεχόμαστε:

- Θερμοκρασία επιφάνειας ίση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου  $\rightarrow T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Συναγωγή (*convection of air*) με συντελεστή  $\rightarrow h = 32 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  [50] και θερμοκρασία του ρευστού-αέρα μακριά από την επιφάνεια συναγωγής  $\rightarrow T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Ακτινοβολία (*radiation*)  $\rightarrow$  συντελεστής εκπομπής (*emissivity*) = 0.7 και θερμοκρασία του χώρου και γύρω επιφανειών  $\rightarrow T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

2. Στην κάτω επιφάνεια των στηριγμάτων (*saddles*) δεχόμαστε:

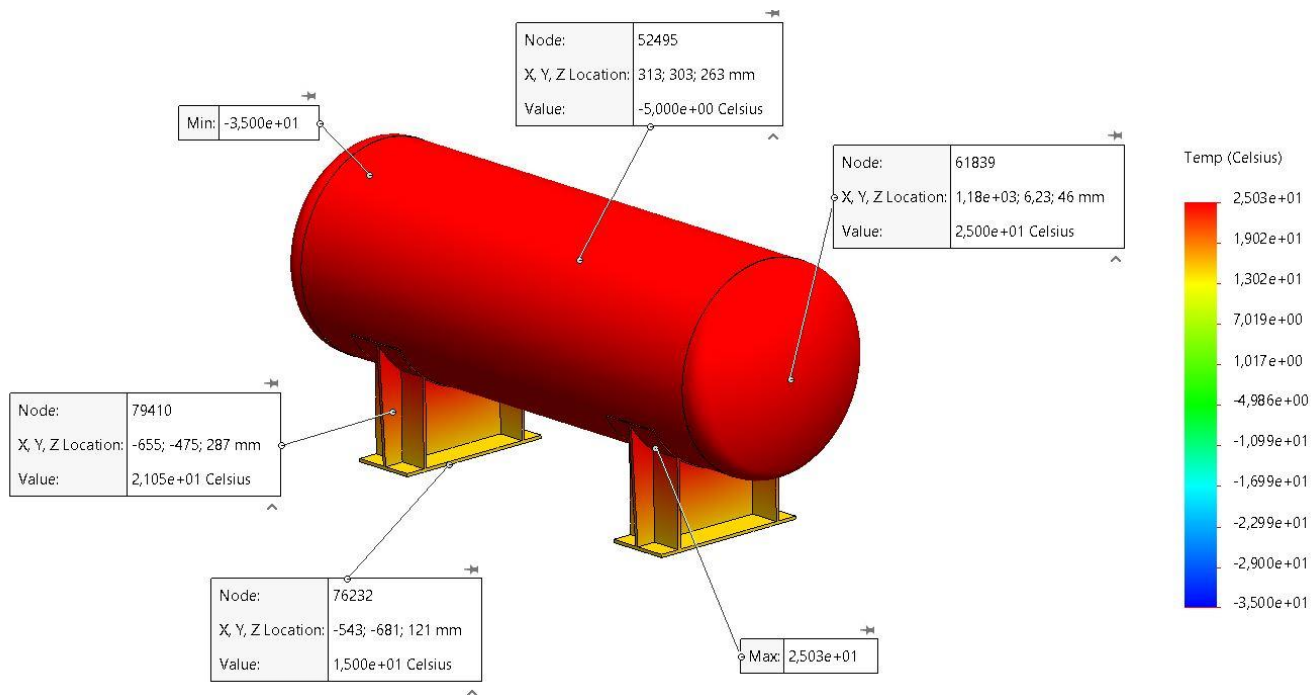
- Θερμοκρασία  $\rightarrow T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$

3. Στην εσωτερική επιφάνεια του δοχείου δεχόμαστε:

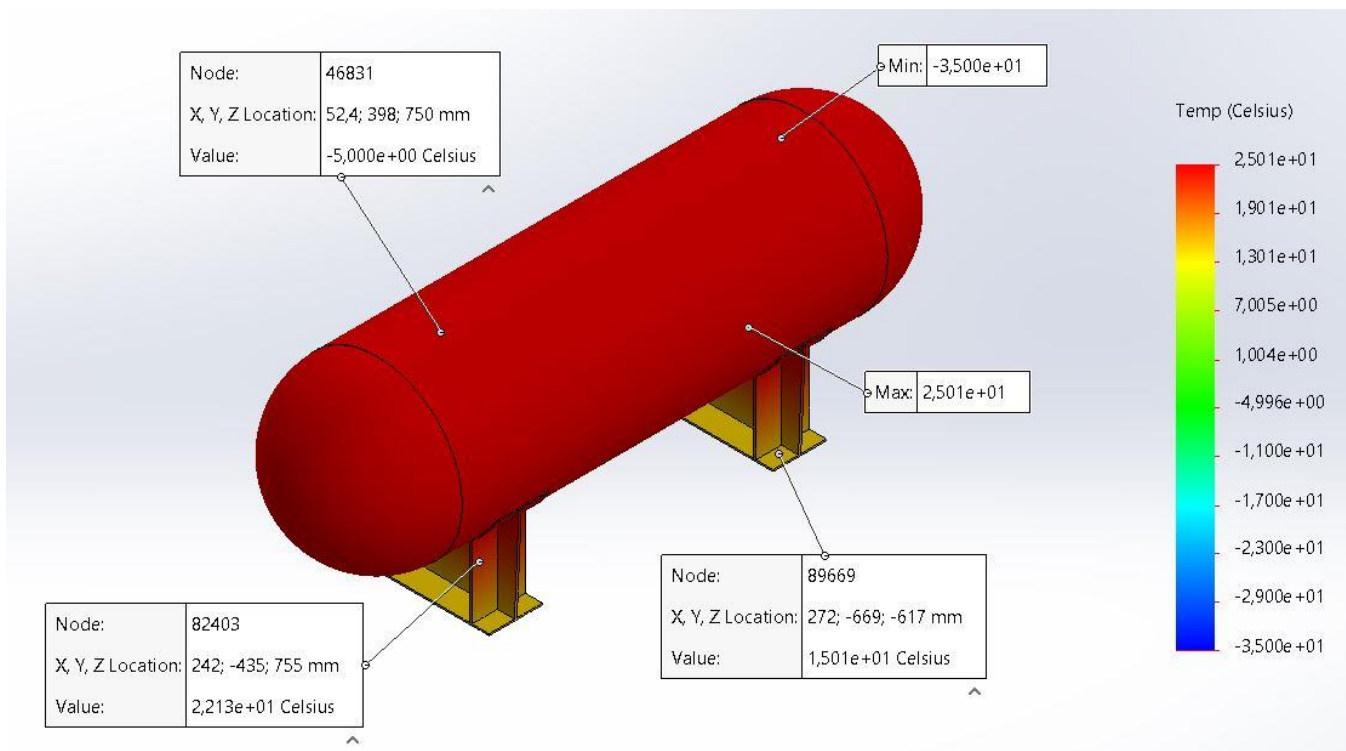
- Θερμοκρασία επιφάνειας ίση με τη θερμοκρασία της αμμωνίας  $\rightarrow T = -35 \text{ }^\circ\text{C}$
- Συναγωγή (*convection of ammonia*) με συντελεστή  $\rightarrow h = 3000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  [51] και θερμοκρασία του ρευστού  $\rightarrow T = -35 \text{ }^\circ\text{C}$

Τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης παρουσιάζονται στις Εικόνες 35-38.

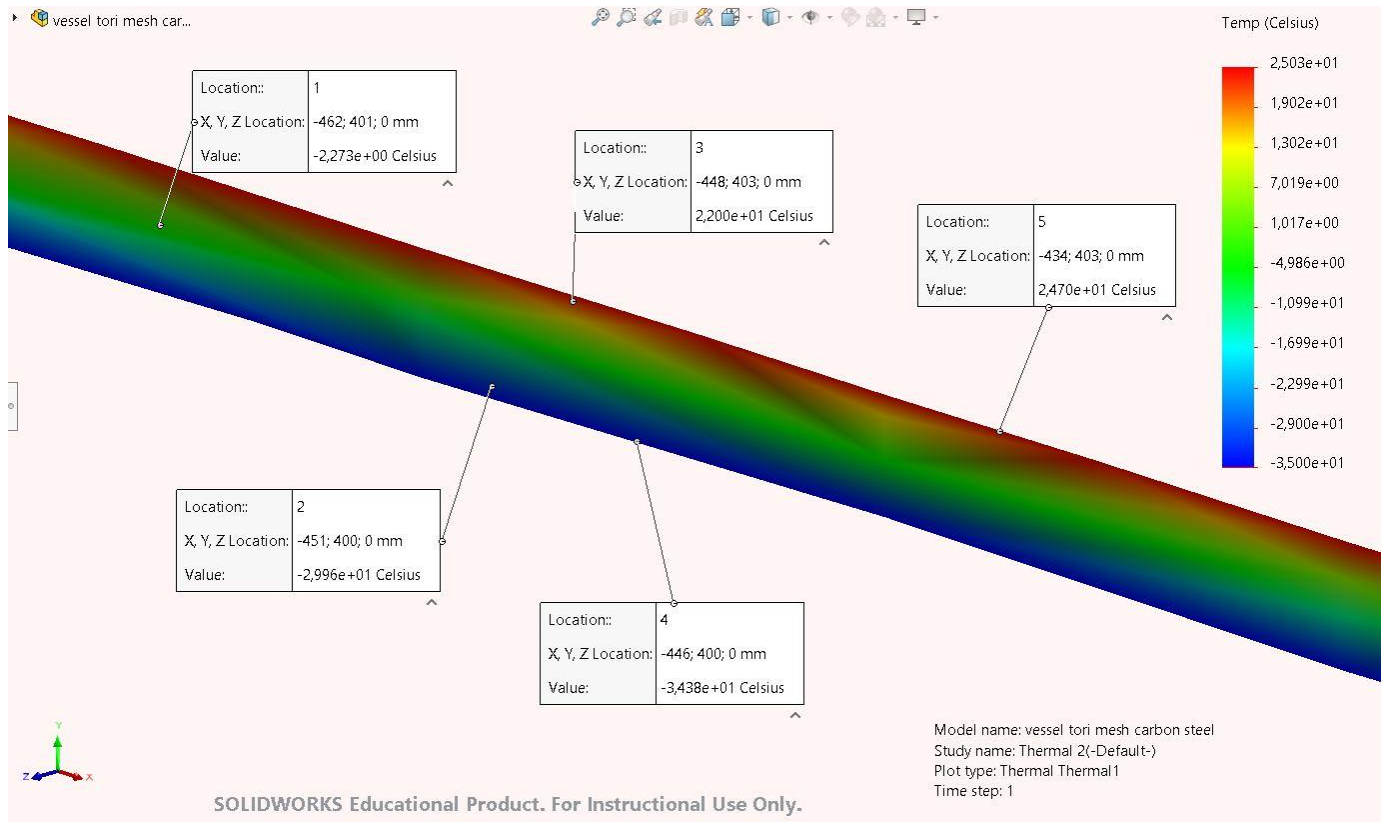
Η συμπεριφορά των δύο μοντέλων σχετικά με τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στα διάφορα τμήματα δεν έχει διαφορές. Παρατηρούμε ότι οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μεταβάλλονται ομαλά από τη θερμότερη στην ψυχρότερη επιφάνεια και σε αναλογία με το πάχος του τοιχώματος.



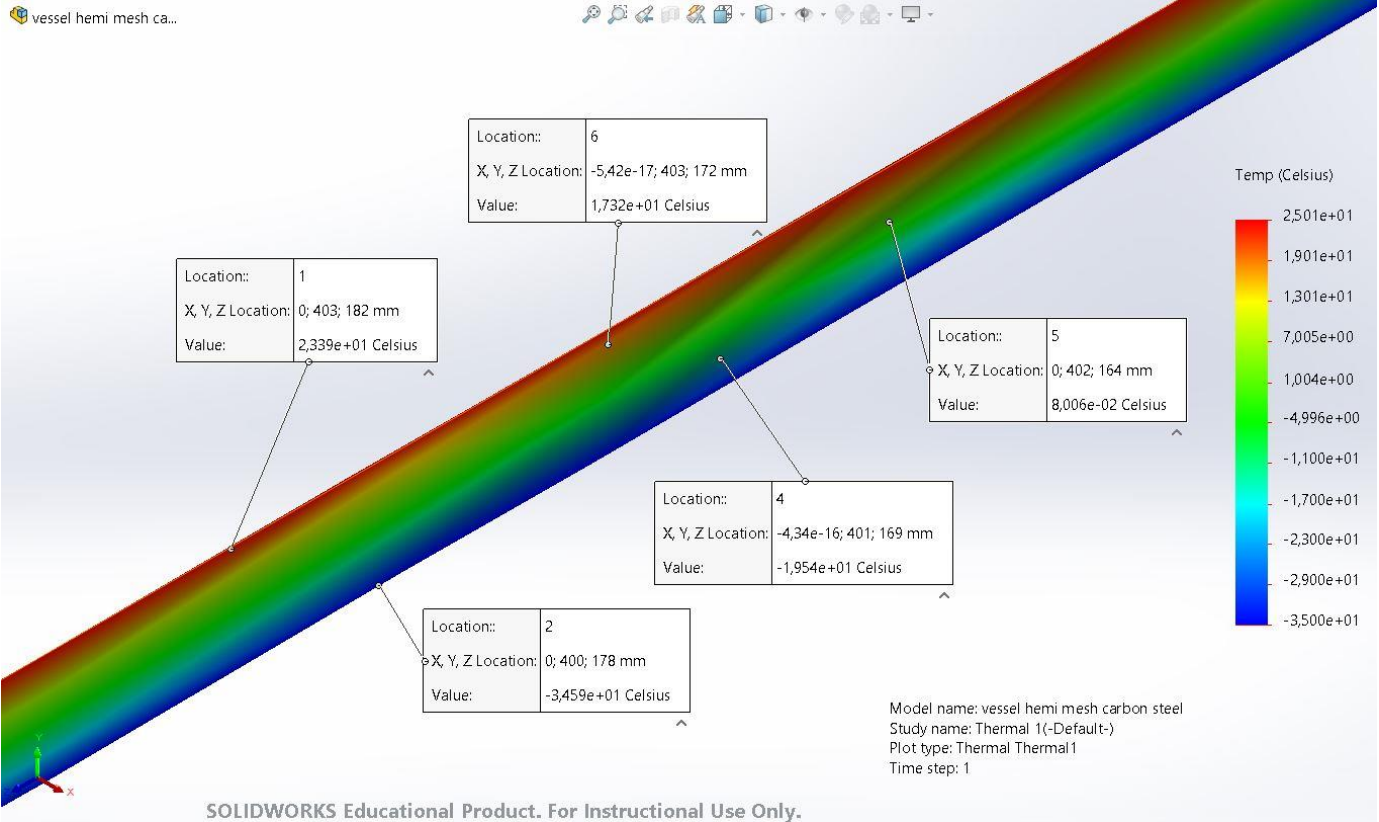
Εικόνα 35 Κατανομή θερμοκρασίας του μοντέλου με κυρτές (*torispherical*) κεφαλές



Εικόνα 36 Κατανομή θερμοκρασίας του μοντέλου με ημισφαιρικές κεφαλές



Εικόνα 37 Κατανομή θερμοκρασίας στο τοίχωμα του κελύφους (*torispherical model*)



Εικόνα 38 Κατανομή θερμοκρασίας στο τοίχωμα του κελύφους (*hemispherical mode*)

## 5.2. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 5.2.1. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Η στατική ανάλυση του συγκεκριμένου προβλήματος πραγματοποιείται σε σταθερή κατάσταση (*Steady-state analysis*) καθώς τα στατικά φορτία δεν μεταβάλλονται σε σχέση με το χρόνο.

Τα φορτία τα οποία εφαρμόζονται στο μοντέλο είναι τα εξής:

1. Βαρύτητα (*gravity*)  $\rightarrow g = 9.81 \text{ m/s}^2$
2. Πίεση (*pressure*) στην εξωτερική επιφάνεια της δεξαμενής  $\rightarrow p = 0.1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
3. Πίεση (*pressure*) στην εσωτερική επιφάνεια της δεξαμενής  $\rightarrow p = 0.1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
4. Δύναμη (*force*) στα στηρίγματα του δοχείου, η κάθε μία  $\rightarrow F = 4494.4 \text{ N}$
5. Θερμικά αποτελέσματα (*thermal effects*)  $\rightarrow$  εισαγωγή θερμοκρασίας από τη θερμική ανάλυση για υπολογισμό των θερμικών τάσεων.

Η δύναμη υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό βάρος (βάρος δοχείου και αμμωνίας).

➤ Βάρος δοχείου:  $W_{\text{vessel}} = \text{density}_{\text{carbonsteel}} \times \text{volume} = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.03 \text{ m}^3 \rightarrow W_{\text{vessel}} = 234 \text{ kg}$  (Ο όγκος του δοχείου  $0.03 \text{ m}^3$  υπολογίζεται από το σχεδιαστικό πρόγραμμα και για τα δύο μοντέλα).

➤ Βάρος αμμωνίας:  $\text{density}_{\text{ammonia}} \times \text{volume}_{\text{ammonia}} = 682.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1 \text{ m}^3 = 682.6 \text{ kg}$ .

Η πυκνότητα της υγρής αμμωνίας είναι  $682.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  [52].

Ο όγκος του κυλινδρικού τμήματος είναι:

$$\text{volume}_{\text{cylinder}} = \pi \times r^2 \times h = \pi \times 0.4^2 \times 2 = 1 \text{ m}^3.$$

Ο όγκος της torispherical κεφαλής είναι:

$$\text{volume}_{\text{tori}} = 0.0506 \text{ m}^3 \rightarrow \times 2 \rightarrow 0.1012 \text{ m}^3 \text{ [53].}$$

Ο όγκος της ημισφαιρικής κεφαλής είναι:

$$\text{volume}_{\text{hemi}} = \frac{2}{3} \times \pi \times r^3 = \frac{2}{3} \times \pi \times 0.4^3 = 0.134 \text{ m}^3 \rightarrow \times 2 \rightarrow 0.268 \text{ m}^3.$$

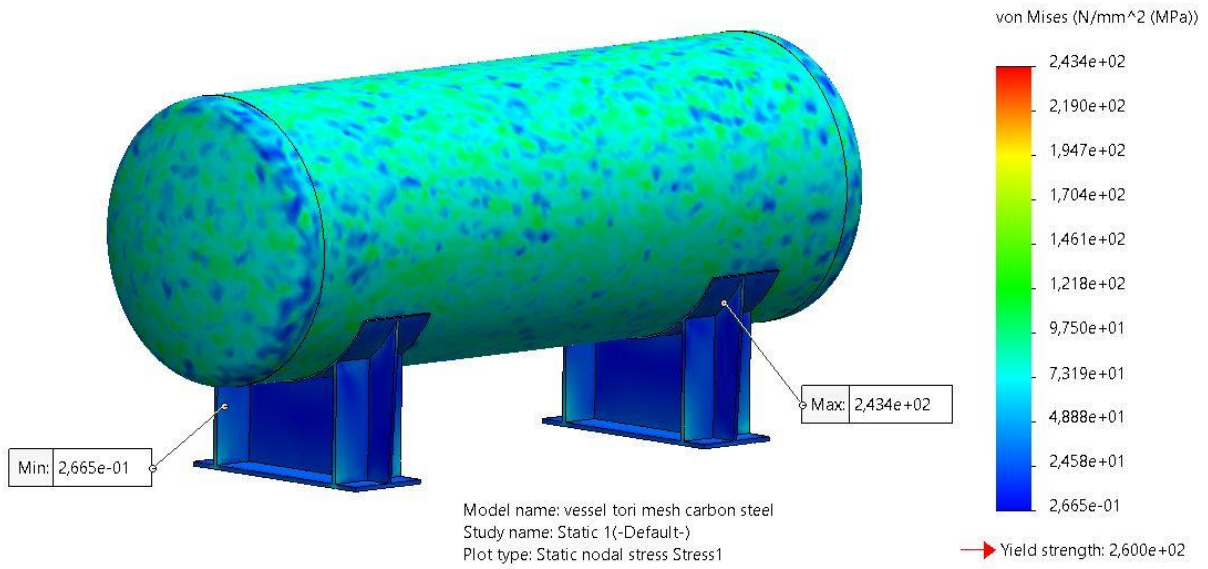
Καθώς το δοχείο πίεσης θα πρέπει να είναι περίπου 85% γεμάτο με αμμωνία (ο κενός χώρος επιτρέπει ένα μέρος της υγρής αμμωνίας να αεριοποιείται και εξασφαλίζει ασφάλεια στην αποθήκευση και τη λειτουργία) Since the gas expands, vapor space of 15% is maintained to ensure safe storage and operations, ώστε να επιτρέπει, θα θεωρήσουμε ότι ο όγκος της υγρής αμμωνίας είναι 1 m<sup>3</sup>.

Συνεπώς το συνολικό βάρος είναι:  $W_{\text{total}} = 234 + 682.6 = 916.6 \text{ Kg} = 8988.8 \text{ N}$ .

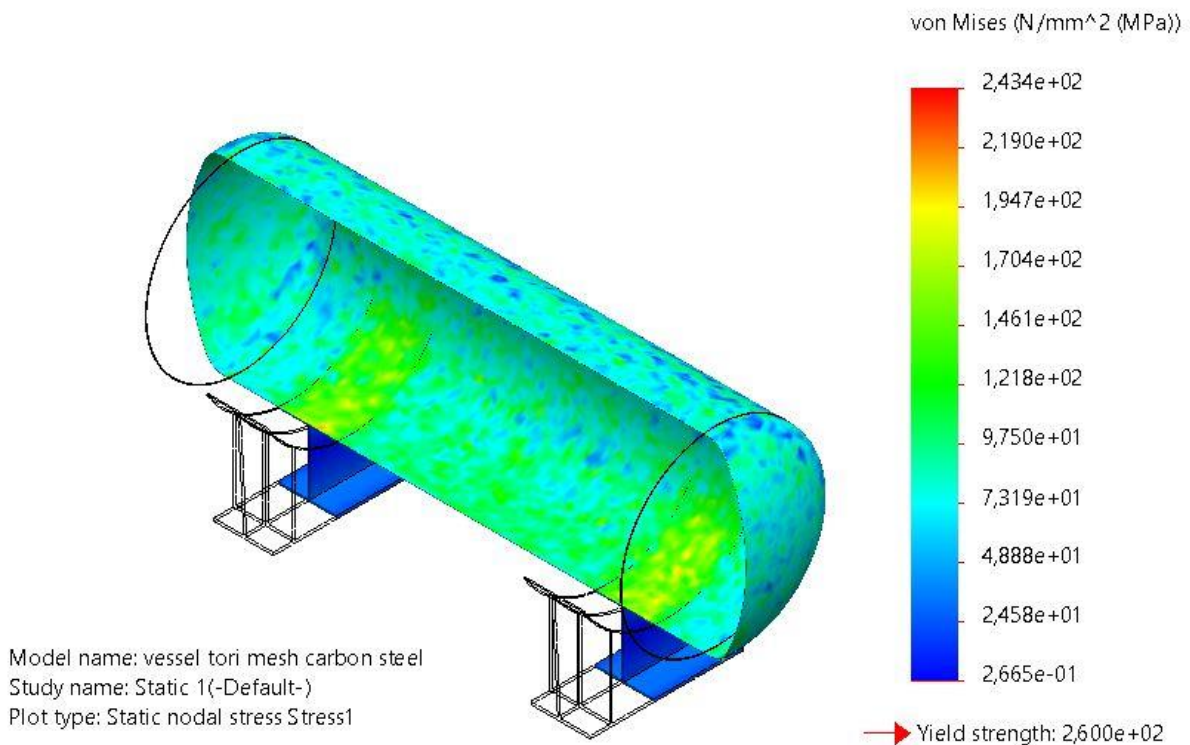
## 5.2.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ (Von Mises Stresses)

### Δοχείο με torispherical κεφαλή

- Η ελάχιστη και η μέγιστη τάση Von Mises (Εικόνα 39) είναι 0.27 MPa και 243.4 MPa αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι δεν ξεπερνάει το όριο διαρροής του υλικού που είναι 260 MPa. Συνεπώς το αποτέλεσμα της σχεδίασης είναι ικανοποιητικό.
- Η μέγιστη τάση 243 MPa εμφανίζεται εσωτερικά του κελύφους στα σημεία πάνω από τις επιφάνειες επαφής με τα στηρίγματα (Εικόνες 40,41).
- Η μέγιστη τάση στις κεφαλές εμφανίζεται στις εσωτερικές επιφάνειες των κεφαλών και είναι 157 MPa (Εικόνα 42).
- Στα στηρίγματα η μέγιστη τάση 113.7 MPa εμφανίζεται στην πάνω επιφάνεια, δηλαδή την επιφάνεια επαφής με το κέλυφος (Εικόνα 43).

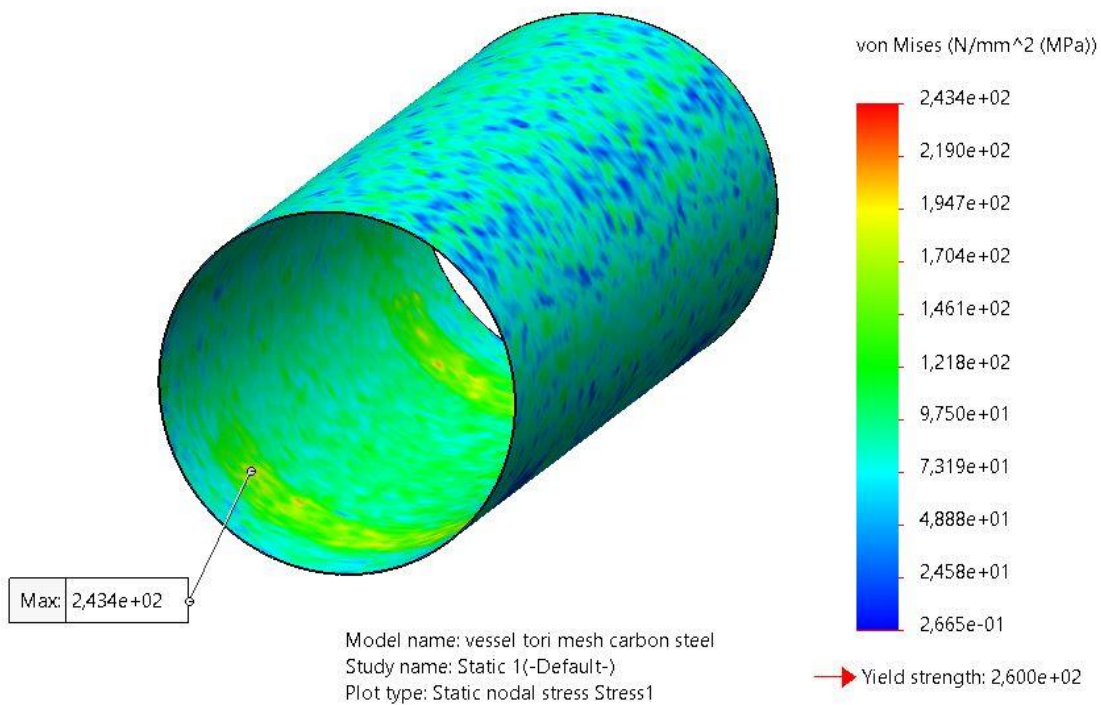


Εικόνα 39 Κατανομή τάσεων Von Mises στο μοντέλο με torispherical κεφαλές

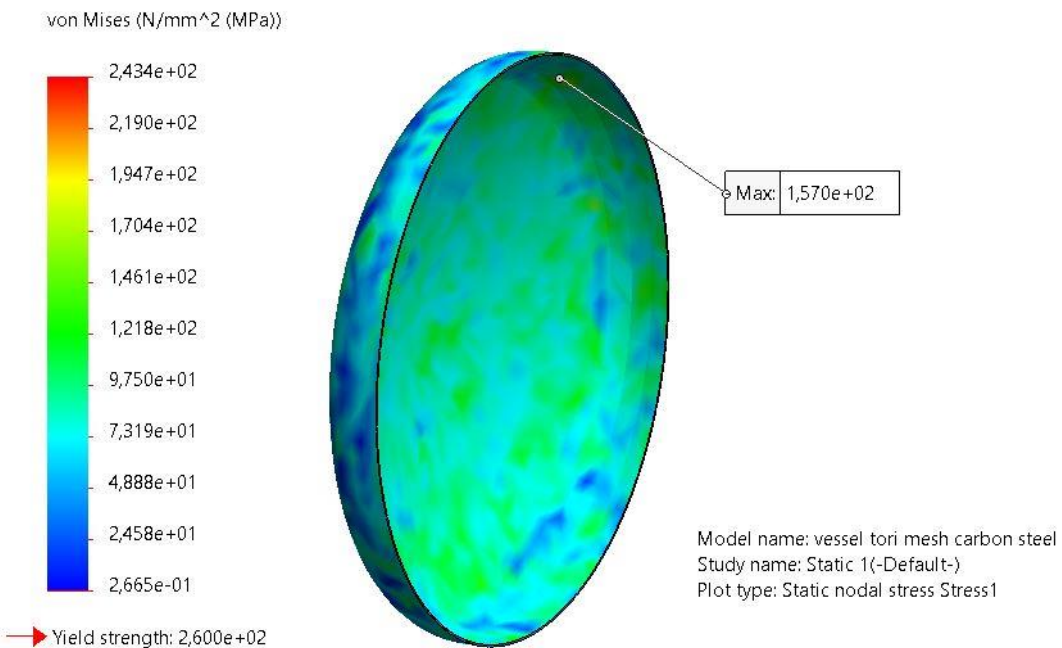


Εικόνα 40 Κατανομή τάσεων Von Mises στο εσωτερικό του μοντέλου

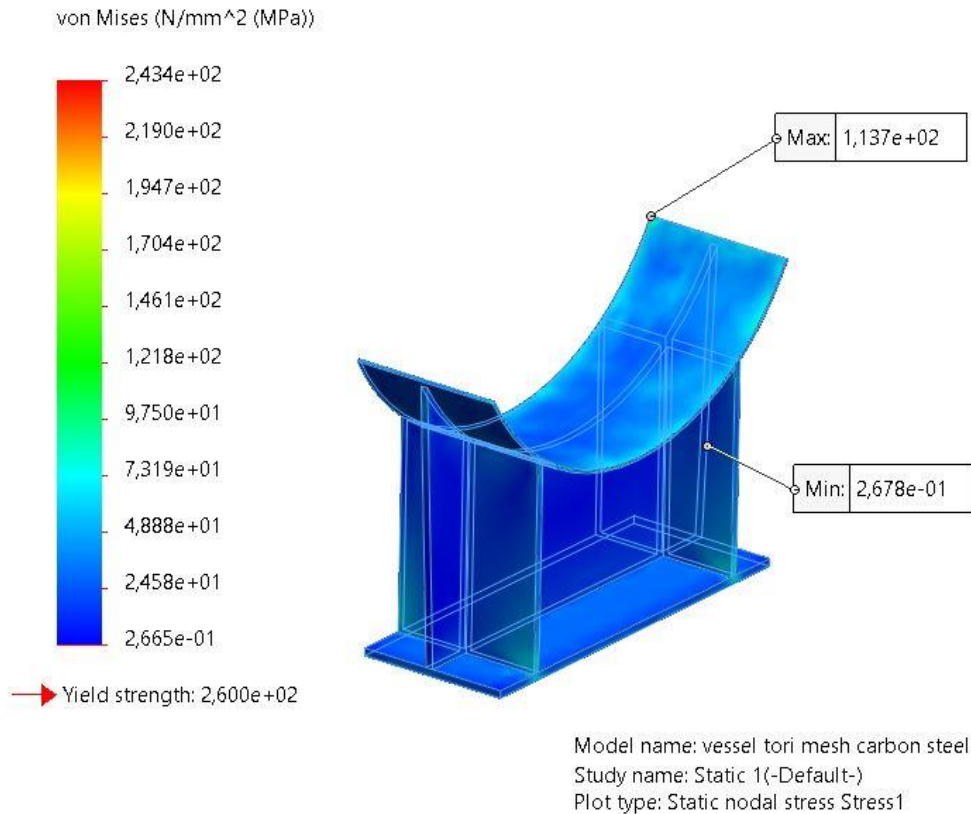




Εικόνα 41 Κατανομή τάσεων Von Mises στο κυλινδρικό τμήμα



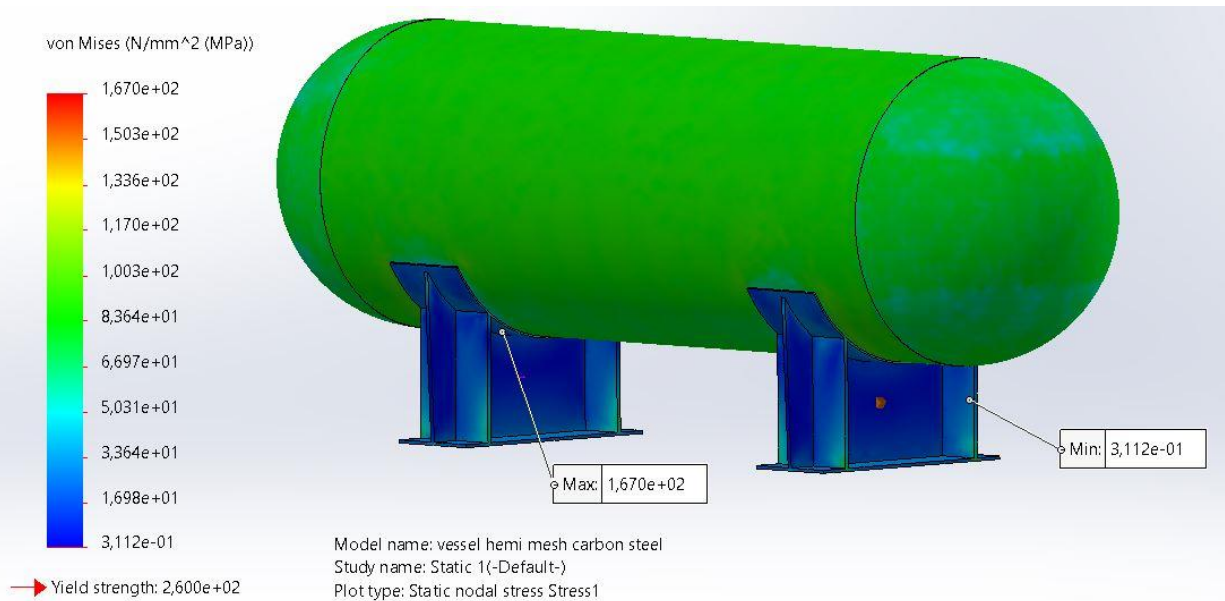
Εικόνα 42 Κατανομή τάσεων Von Mises στην κεφαλή



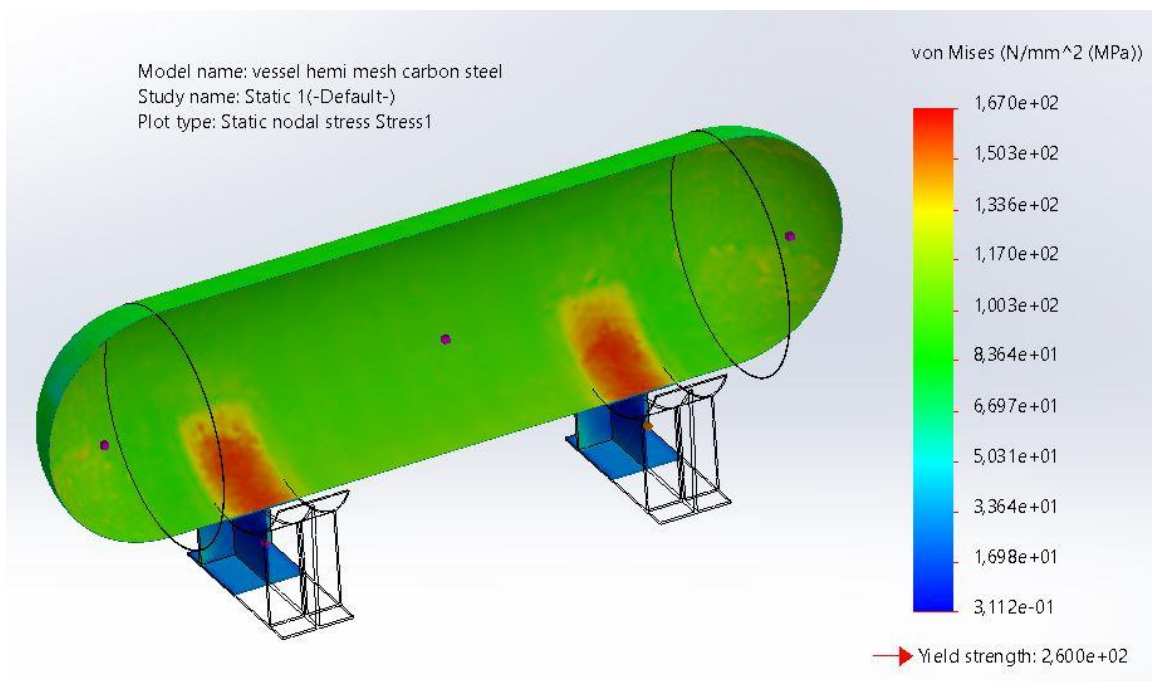
Εικόνα 43 Κατανομή τάσεων Von Mises στα στηρίγματα

### Δοχείο με ημισφαιρική κεφαλή

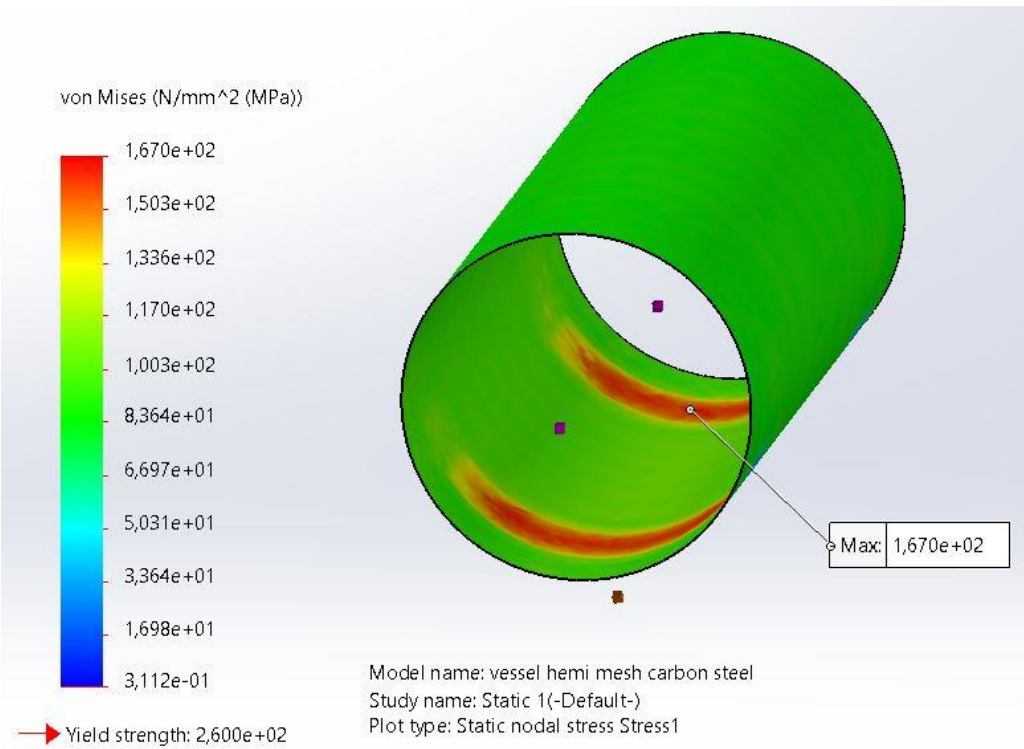
- Η ελάχιστη και η μέγιστη τάση Von Mises (Εικόνα 44) είναι 0.31 MPa και 166.96 MPa αντίστοιχα. Και σε αυτή τη περίπτωση δεν ξεπερνάει το όριο διαρροής του υλικού που είναι 260 MPa.
- Η μέγιστη τάση 167 MPa εμφανίζεται εσωτερικά του κελύφους στα σημεία πάνω από τις επιφάνειες επαφής με τα στηρίγματα (Εικόνες 45,46). Η τιμή της είναι αρκετά μικρότερη από το άλλο μοντέλο.
- Η μέγιστη τάση στις κεφαλές εμφανίζεται στις εσωτερικές επιφάνειες τους και είναι 147 MPa (Εικόνα 47). Η τιμή της είναι λίγο μικρότερη από το άλλο μοντέλο.
- Στα στηρίγματα η μέγιστη τάση 76 MPa εμφανίζεται στην πάνω επιφάνεια, δηλαδή την επιφάνεια επαφής με το κέλυφος, (Εικόνα 48).



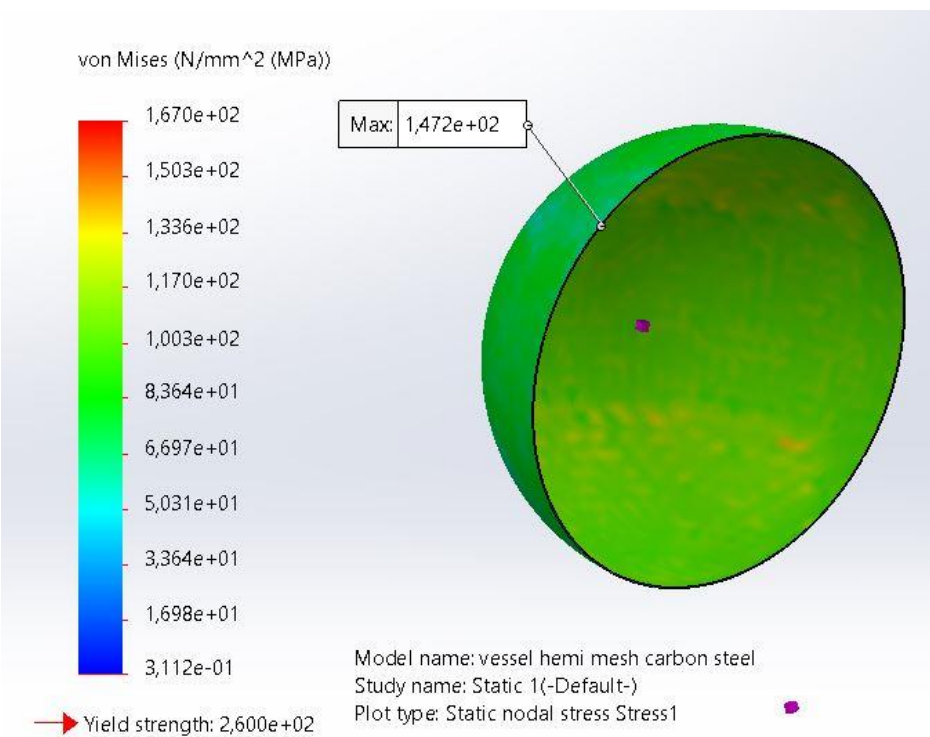
Εικόνα 44 Κατανομή τάσεων Von Mises στο μοντέλο με ημισφαιρικές κεφαλές



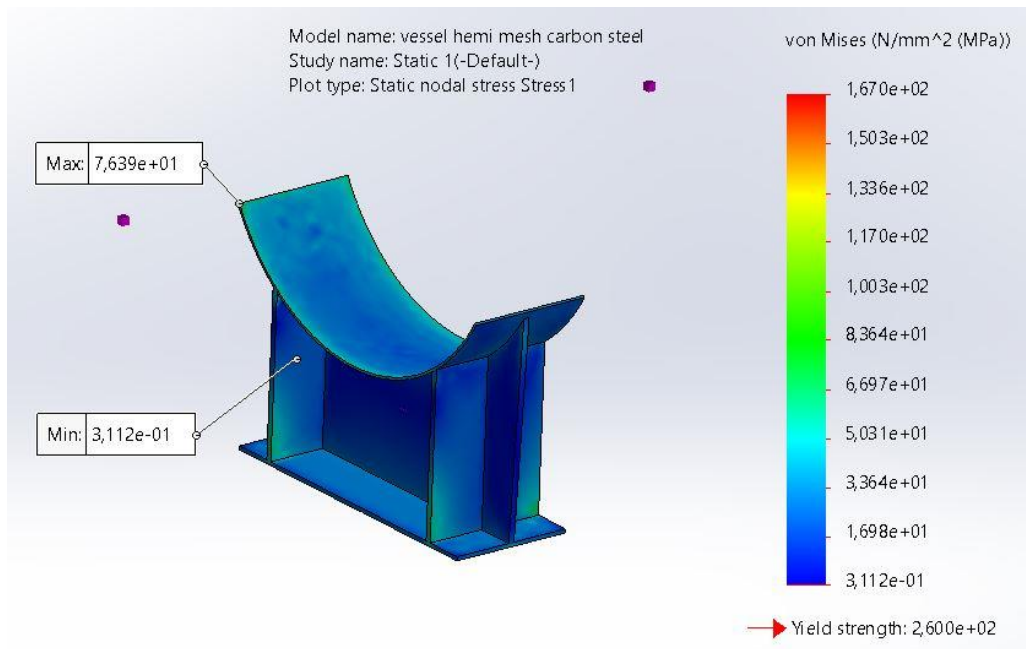
Εικόνα 45 Κατανομή τάσεων Von Mises στο εσωτερικό του μοντέλου



Εικόνα 46 Κατανομή τάσεων Von Mises στο κυλινδρικό τμήμα



Εικόνα 47 Κατανομή τάσεων Von Mises στην κεφαλή



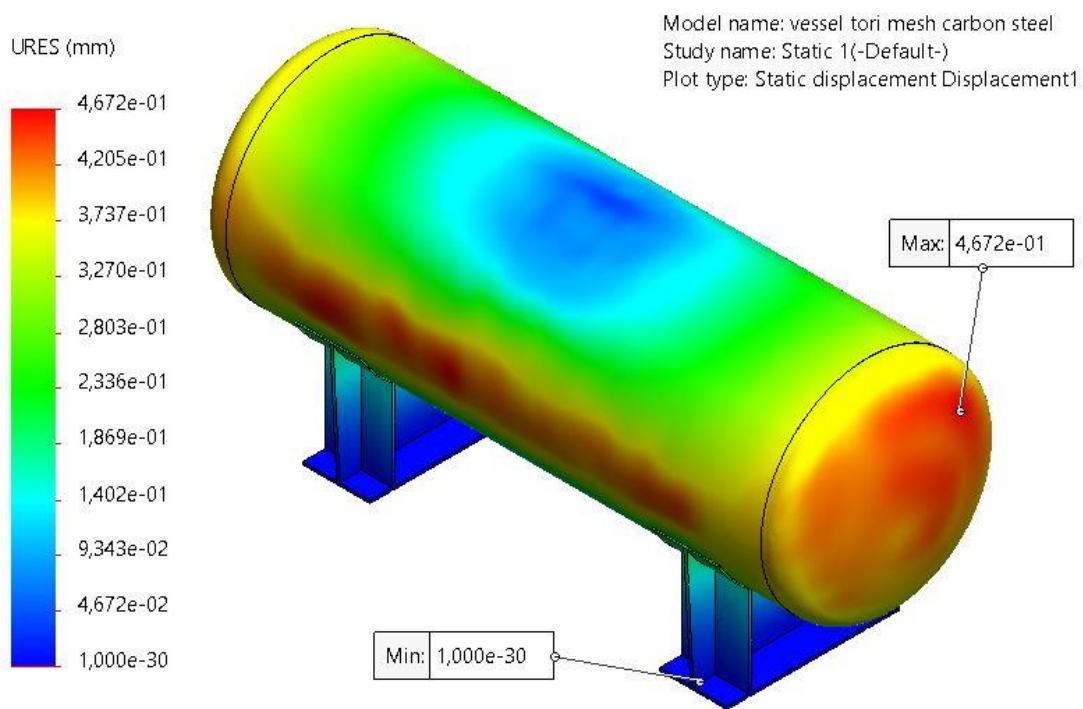
Εικόνα 48 Κατανομή τάσεων Von Mises στα στηρίγματα

### 5.2.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ (Displacements)

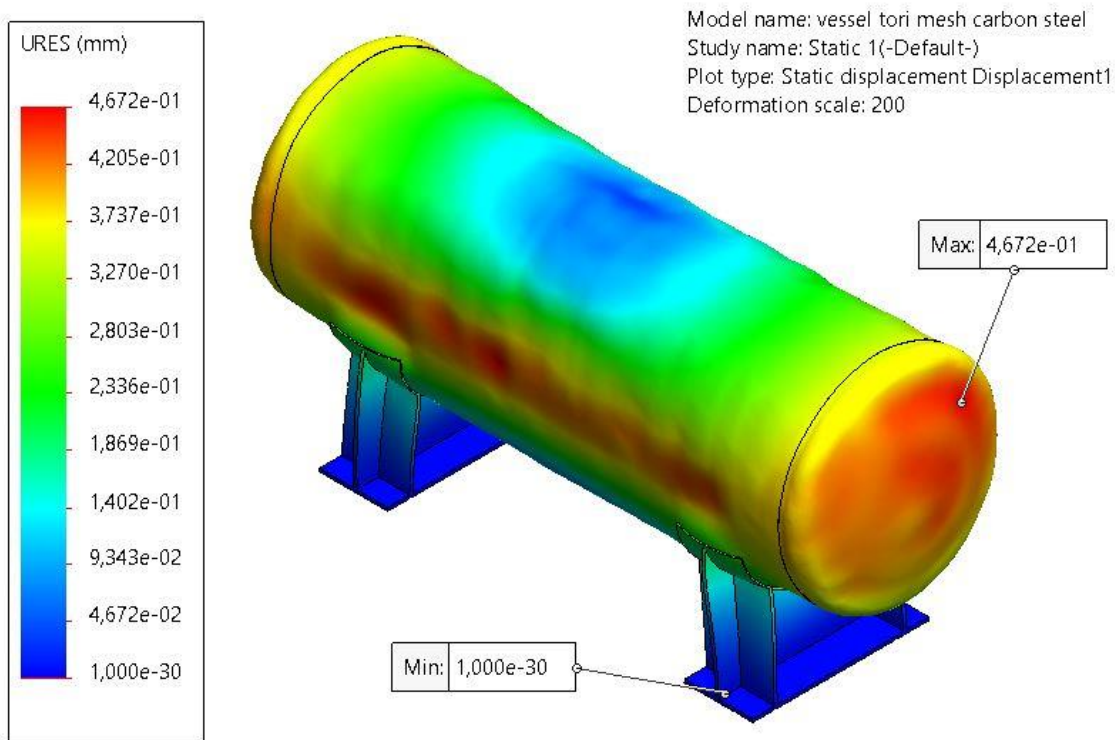
#### Δοχείο με torispherical κεφαλή

- Η κατανομή των μετατοπίσεων του δοχείου απεικονίζεται στις Εικόνες 49 και 50. Ξεκινάει από μία πολύ μικρή τιμή και φτάνει στη μέγιστη τιμή 0.4672 mm στις κεφαλές του δοχείου στα σημεία με τη μεγαλύτερη κυρτότητα. Η παραμόρφωση αυτή είναι πάρα πολύ μικρή σε σχέση με τις διαστάσεις και το μέγεθος του μοντέλου.
- Στο κέλυφος η μέγιστη μετατόπιση 0.4668 mm (Εικόνα 51) συμβαίνει στα πλευρικά τοιχώματα. Η τιμή είναι σχεδόν ίδια με αυτή στις κεφαλές. Αυτό συμβαίνει διότι τα στηρίγματα κρατούν κατά κάποιο τρόπο αμετακίνητη την κάτω επιφάνεια.

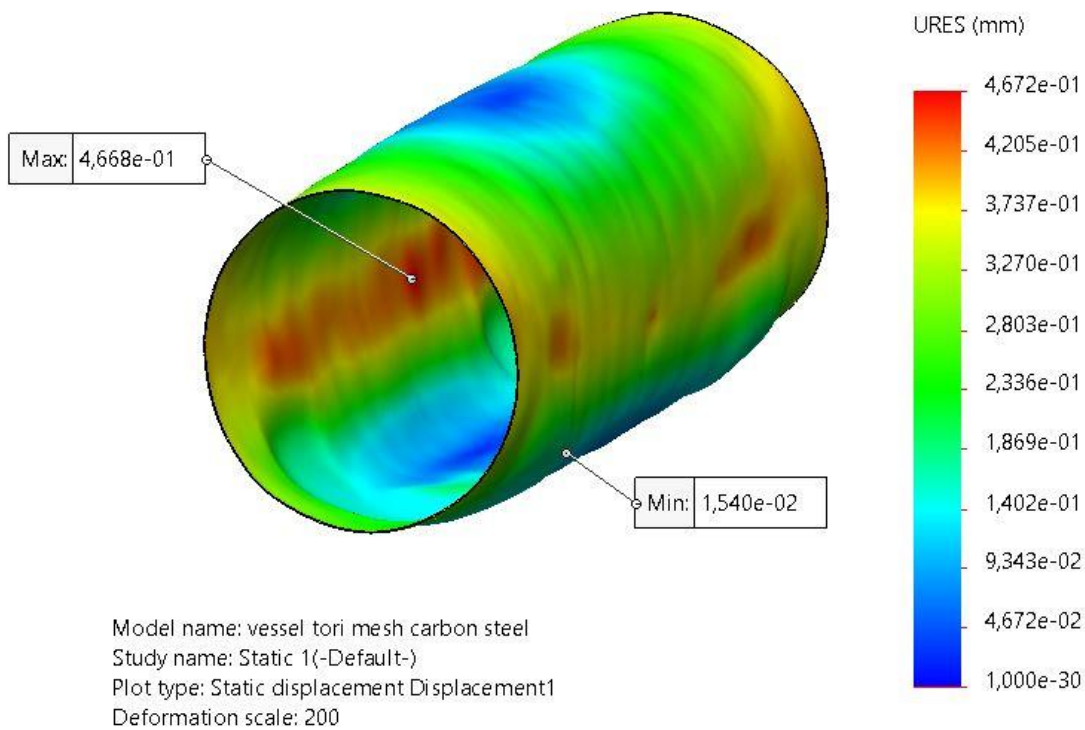
- Μπορούμε να δούμε καλύτερα την ανηγμένη παραμόρφωση (strain) των τοιχωμάτων στην Εικόνα 52 η οποία δείχνει πως τείνει να παραμορφωθεί το μοντέλο με κλίμακα παραμόρφωσης 350.
- Στις κεφαλές η μέγιστη μετατόπιση συμβαίνει στις κυρτές επιφάνειες και είναι 0.4672 mm (Εικόνα 53).
- Στα στηρίγματα η μέγιστη μετατόπιση 0.278 mm συμβαίνει στην πάνω επιφάνεια (Εικόνα 54).



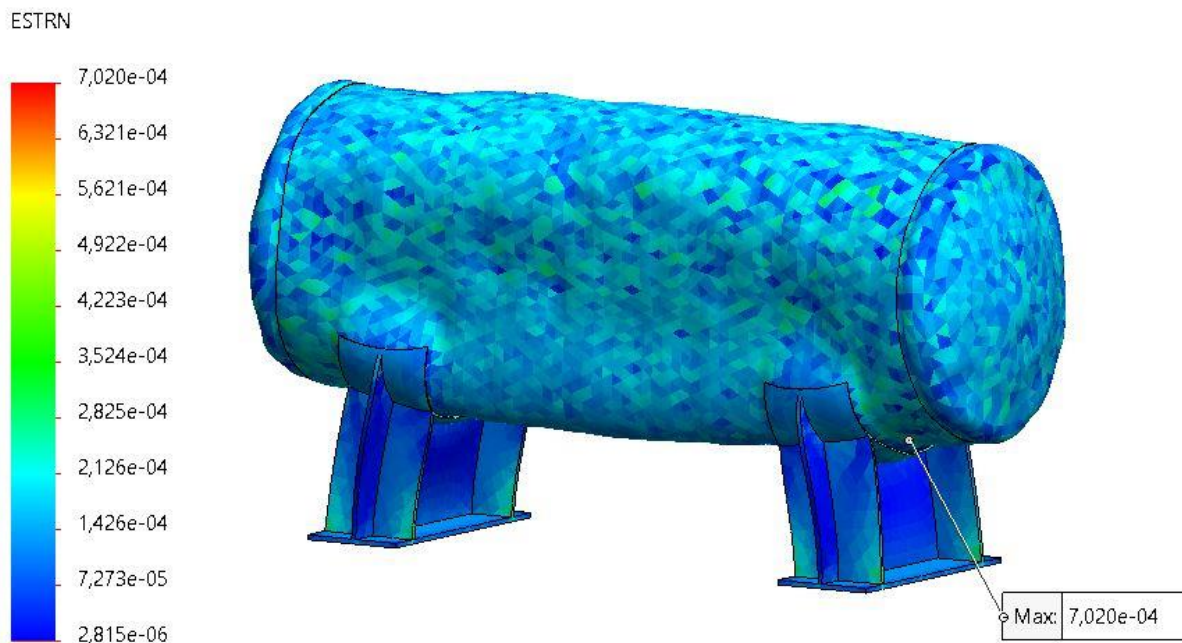
Εικόνα 49 Κατανομή μετατόπισης (*Displacement*) στο μοντέλο με torispherical κεφαλές



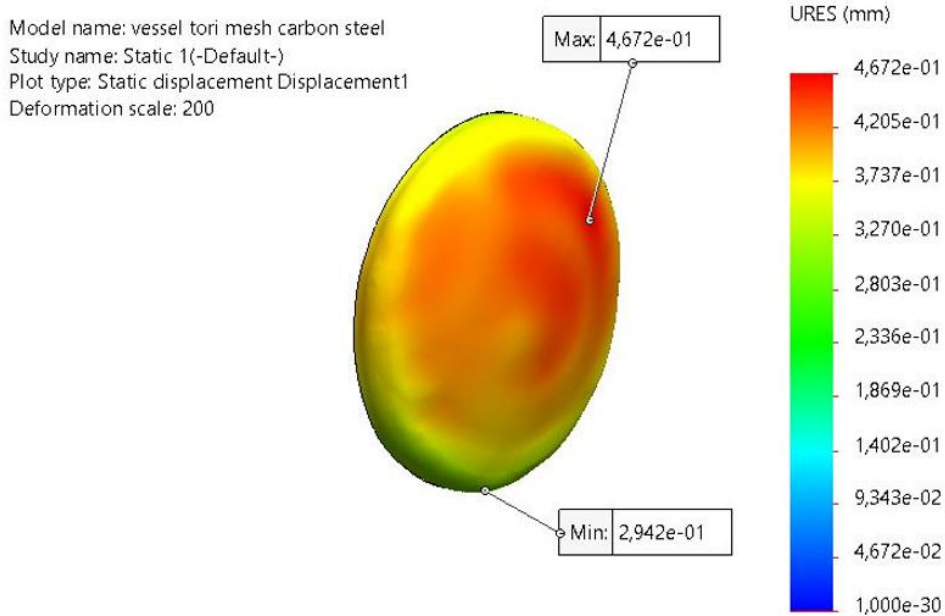
Εικόνα 50 Κατανομή μετατόπισης στο μοντέλο με *deformation scale* 200



Εικόνα 51 Κατανομή μετατόπισης στο κυλινδρικό τμήμα με *deformation scale* 200

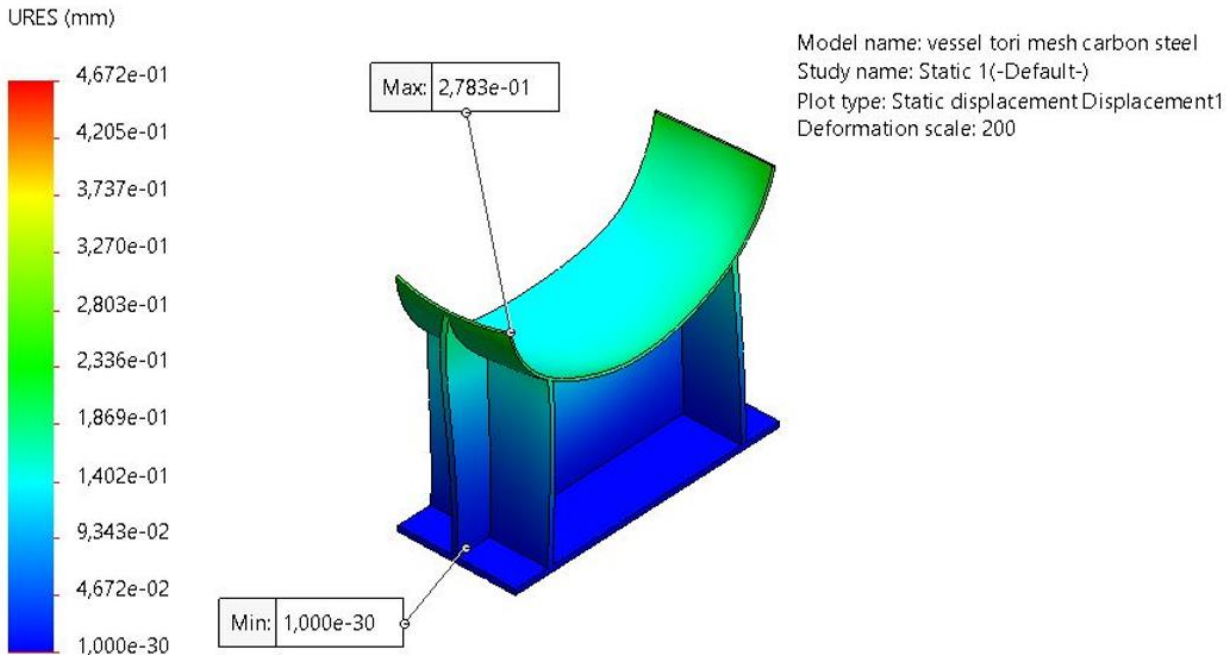


Εικόνα 52 Κατανομή ανηγμένης παραμόρφωσης (*strain*) στο μοντέλο με *deformation scale* 350



Εικόνα 53 Κατανομή μετατόπισης στην κεφαλή



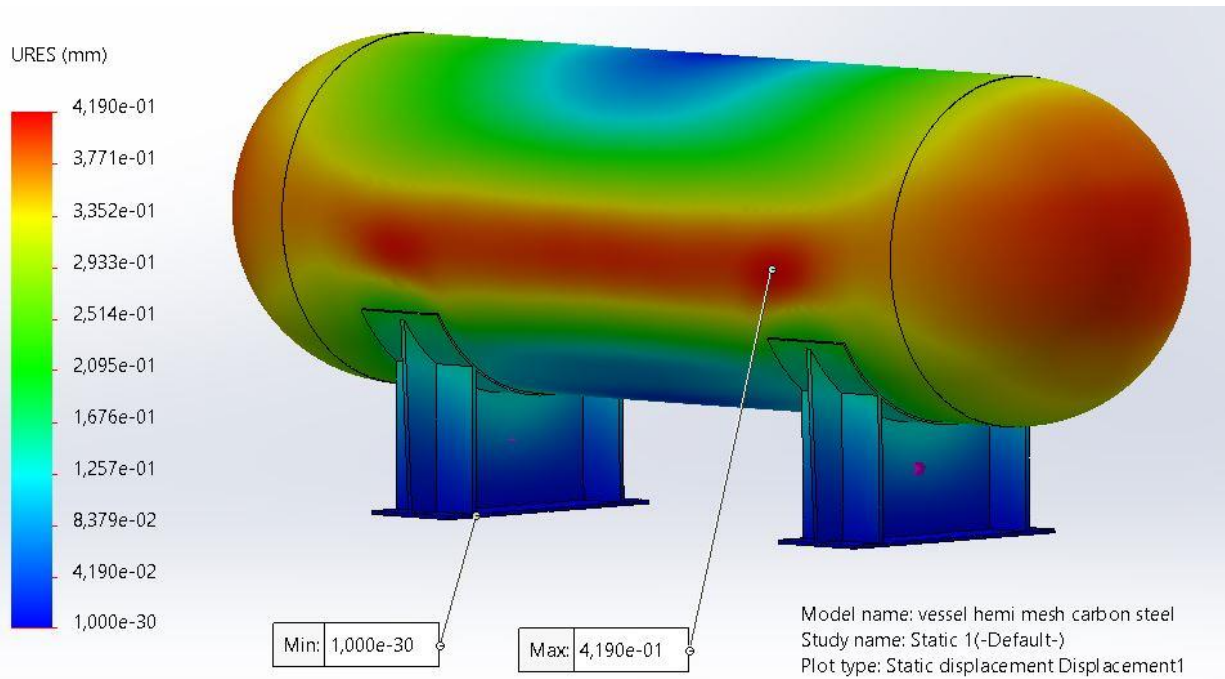


Εικόνα 54 Κατανομή μετατόπισης στα στηρίγματα

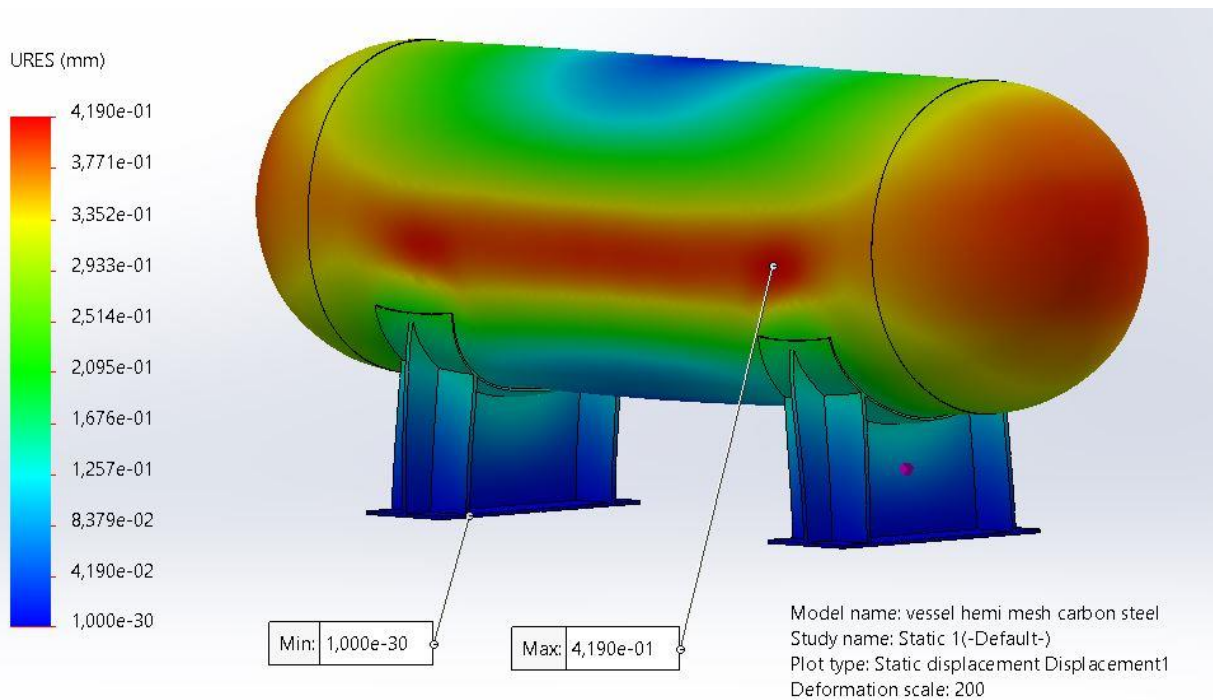
### Δοχείο με ημισφαιρική κεφαλή

- Η κατανομή των μετατοπίσεων του δοχείου απεικονίζεται στις Εικόνες 55-56. Ξεκινάει από μία πολύ μικρή τιμή και φτάνει στη μέγιστη τιμή 0.419 mm στα πλευρικά τοιχώματα του κελύφους. Στο μοντέλο με torispherical κεφαλές η αντίστοιχη μέγιστη μετατόπιση είναι 0.4668 mm.
- Στο κέλυφος η μέγιστη μετατόπιση 0.419 mm (Εικόνα 57) συμβαίνει στα πλευρικά τοιχώματα. Η συμπεριφορά είναι ίδια με το μοντέλο με torispherical κεφαλές και συμβαίνει διότι τα στηρίγματα κρατούν κατά κάποιο τρόπο αμετακίνητη την κάτω επιφάνεια.
- Μπορούμε να δούμε καλύτερα την παραμόρφωση των τοιχωμάτων στην Εικόνα 58 η οποία δείχνει πως τείνει να παραμορφωθεί το μοντέλο με κλίμακα παραμόρφωσης 350.
- Στις κεφαλές η μέγιστη μετατόπιση 0.41 mm συμβαίνει στα σημεία με την μεγαλύτερη κυρτότητα (Εικόνα 59). Στο μοντέλο με torispherical κεφαλές η αντίστοιχη μετατόπιση είναι 0.4672 mm.

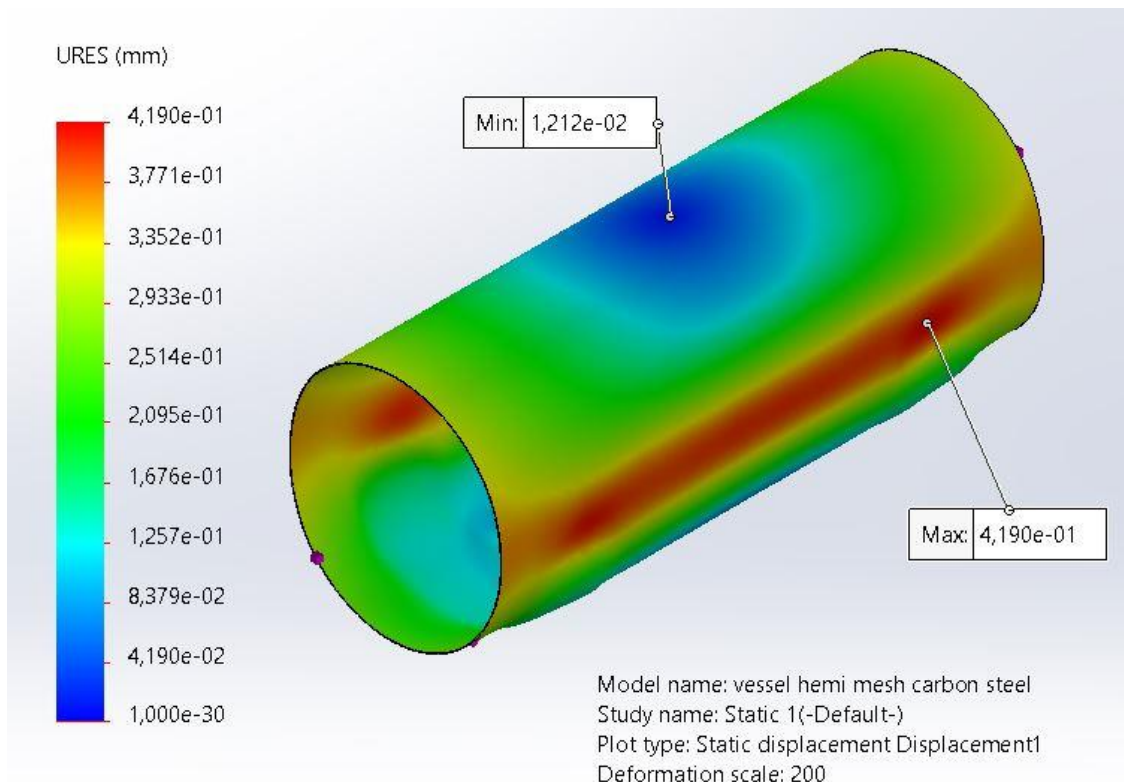
- Στα στηρίγματα η μέγιστη μετατόπιση συμβαίνει στην πάνω επιφάνεια και η τιμή της είναι 0.244 mm (Εικόνα 60).



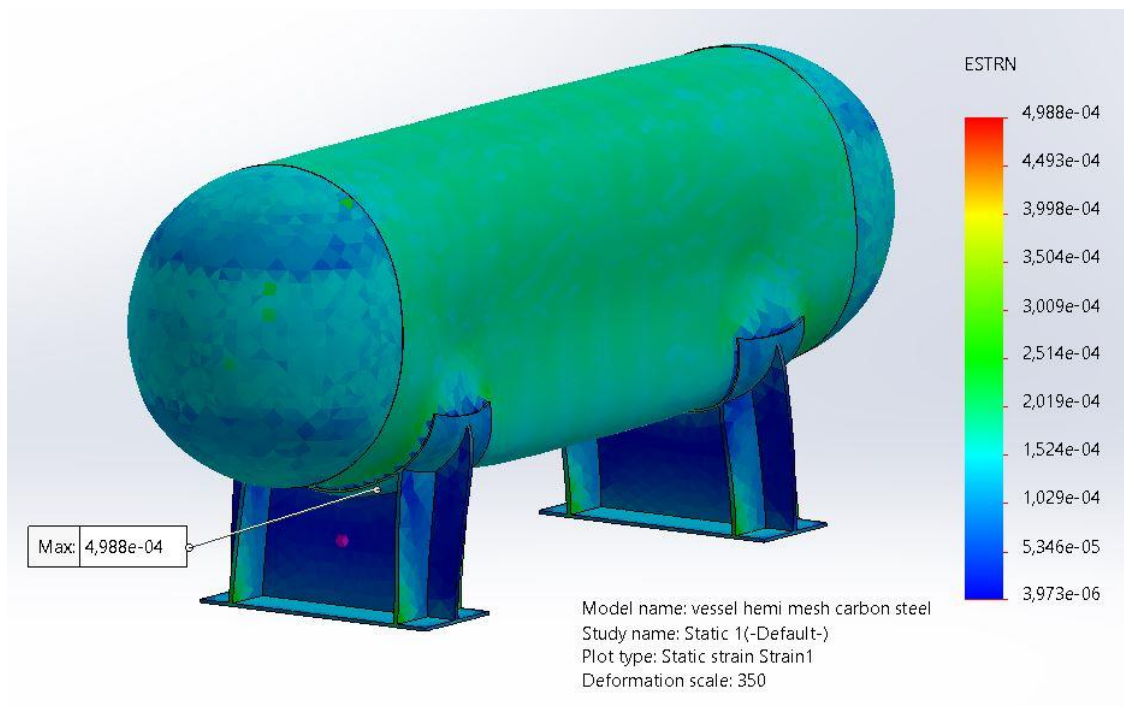
Εικόνα 55 Κατανομή μετατόπισης (*displacement*) στο μοντέλο με ημισφαιρικές κεφαλές



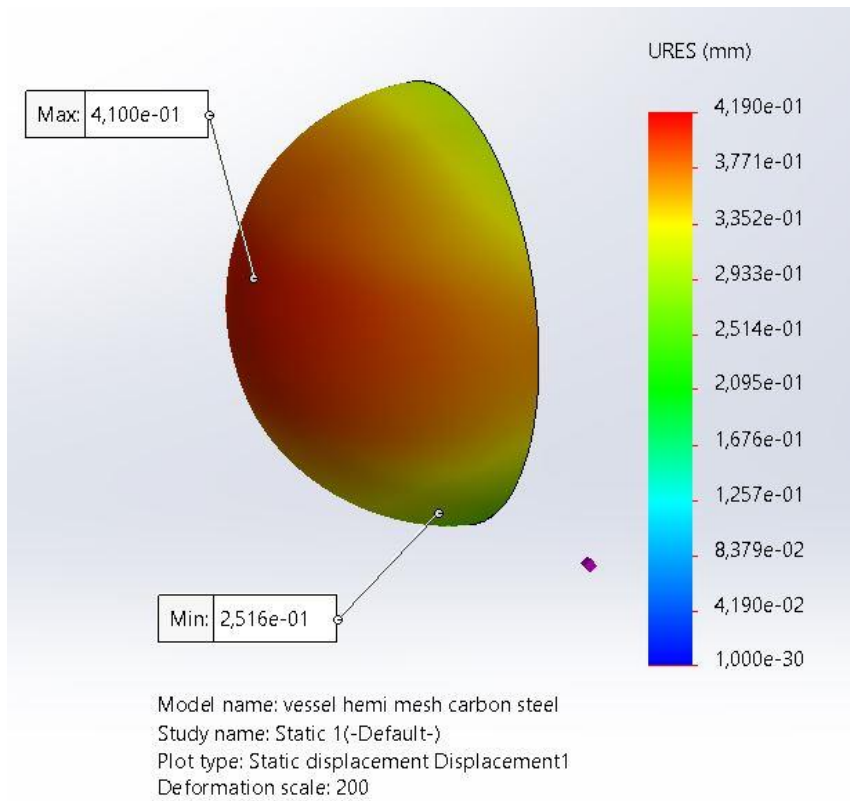
Εικόνα 56 Κατανομή μετατόπισης στο μοντέλο με *deformation scale* 200



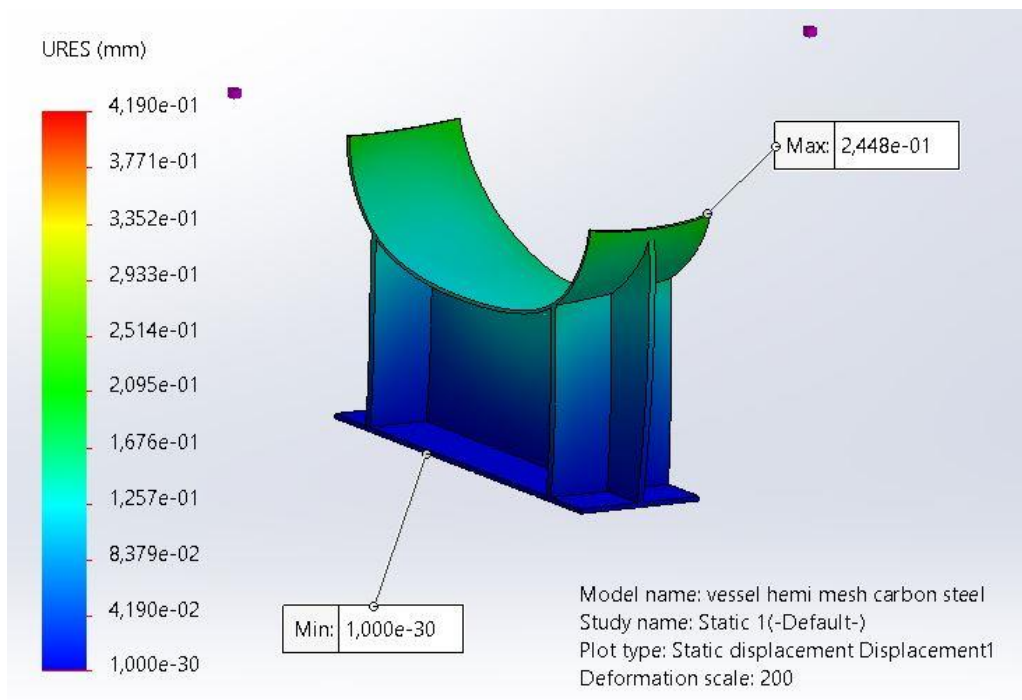
Εικόνα 57 Κατανομή μετατόπισης στο κυλινδρικό τμήμα με *deformation scale* 200



Εικόνα 58 Κατανομή ανηγμένης παραμόρφωσης (*strain*) στο μοντέλο με *deformation scale* 350



Εικόνα 59 Κατανομή μετατόπισης στην κεφαλή



Εικόνα 60 Κατανομή μετατόπισης στα στηρίγματα

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 6.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης, και τα δύο μοντέλα ακολουθούν τη ίδια συμπεριφορά ως προς τον τρόπο που παραμορφώνονται. Η μέγιστη παραμόρφωση και στα δύο μοντέλα συμβαίνει στα τοιχώματα του κυλινδρικού τμήματος και στις κυρτές επιφάνειες των κεφαλών, στα σημεία που τέμνουν ένα φανταστικό οριζόντιο επίπεδο που βρίσκεται περίπου στο μέσον του δοχείου πίεσης. Οι τιμές της μετατόπισης (*displacement*) για τα δύο μοντέλα δεν διαφέρουν ιδιαίτερα (διαφορά της τάξης των 60μm).

Μικρές διαφορές παρουσιάζονται κυρίως στις μέγιστες τιμές της τάσης Von Mises. Το μοντέλο με τις ημισφαιρικές (*hemispherical*) κεφαλές εμφανίζει μικρότερες τιμές τάσεων Von Mises και αυτό οφείλεται κυρίως στο σχήμα των κεφαλών. Αντιθέτως οι κυρτές (*torispherical*) κεφαλές έχουν μικρότερη εσωτερική επιφάνεια στην οποία ασκούνται τα διάφορα θερμικά και στατικά φορτία και έτσι οι τάσεις Von Mises που προκύπτουν είναι μεγαλύτερες. Επίσης, η ένωση της κυρτής κεφαλής με το κυλινδρικό τμήμα του δοχείου ακόμα και εάν μεσολαβεί η άρθρωση οδηγεί σε μια πιο γρήγορη αλλαγή στη γεωμετρία με αποτέλεσμα μεγαλύτερες τοπικές καταπονήσεις.

Γενικά, η τάση σε ένα στοιχειώδες τμήμα του στερεού σώματος με επίπεδα κάθετα στο σύστημα αξόνων x-y-z μπορεί να περιγραφεί από 9 τιμές: 3 ορθές τάσεις κάθετες στα επίπεδα (*normal stresses*) και 6 διατμητικές τάσεις (*shear stresses*). Το κριτήριο Von Mises εξαρτάται από τις τρεις κύριες τάσεις (*principal stresses*) και η συνισταμένη τάση υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma_{VonMises} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Μέσω του λογισμικού SolidWorks μπορούμε να υπολογίσουμε με ακρίβεια τις τρεις μέγιστες κύριες τάσεις σε κάθε τμήμα του μοντέλου, Πίνακας 8.

Θα παρατηρήσουμε ότι οι τιμές του δεύτερου μοντέλου (*hemispherical model*) είναι μικρότερες από αυτές του πρώτου μοντέλου (*torispherical model*). Άρα και η τιμή της συνισταμένης τάσης Von Mises είναι μικρότερη για το μοντέλο με τις ημισφαιρικές κεφαλές.

Πίνακας 8 Σύγκριση κύριων τάσεων σε κέλυφος και κεφαλές στα δύο μοντέλα

<b>Principal Stresses (Mpa)</b>					
<b>Torispherical Model</b>			<b>Hemispherical Model</b>		
	<b>Head</b>	<b>Cylinder</b>		<b>Head</b>	<b>Cylinder</b>
<b><math>\sigma_1</math></b>	181	266	<b><math>\sigma_1</math></b>	123	166
<b><math>\sigma_2</math></b>	156	251	<b><math>\sigma_2</math></b>	122	159
<b><math>\sigma_3</math></b>	732	825	<b><math>\sigma_3</math></b>	352	568

Συγκριτικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα της πραγματοποιηθείσας ανάλυσης συγκλίνουν με την πρακτική που εφαρμόζεται στη χρήση των δοχείων πίεσης στη βιομηχανία. Τα δοχεία πίεσης με ημισφαιρικές κεφαλές θεωρείται ότι έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε υψηλές πιέσεις σε σχέση με τα δοχεία πίεσης με κυρτές (*torispherical*) κεφαλές ίδιου πάχους. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής πίεσης (άνω των 10 bar) ενώ τα δεύτερα χρησιμοποιούνται γενικά σε εφαρμογές όπου η εσωτερική πίεση δεν υπερβαίνει τα 10 bar.

## 6.2. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Για να ελέγξουμε την αντοχή του δοχείου πίεσης σε πιθανή αύξηση της εσωτερικής πίεσης της αμμωνίας εκπονήσαμε τη στατική ανάλυση επιπλέον για τις παρακάτω τιμές εσωτερικής πίεσης σχεδιασμού:

- Εσωτερική πίεση ίση με 3.8 bar (55 psi) που αντιστοιχεί που αντιστοιχεί σε μια σημαντική αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας της αμμωνίας σε -3 °C.
- Εσωτερική πίεση ίση με 4.1 bar (60 psi) μια τιμή που απαιτείται από ορισμένα εθνικά πρότυπα όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 3.5.

Παρατήρηση 1: Οι αυξημένες εσωτερικές πιέσεις εφαρμόστηκαν στο μοντέλο με torispherical κεφαλές το οποίο αναπτύσσει υψηλότερες τιμές τάσεων σε σχέση με το μοντέλο με ημισφαιρικές κεφαλές.

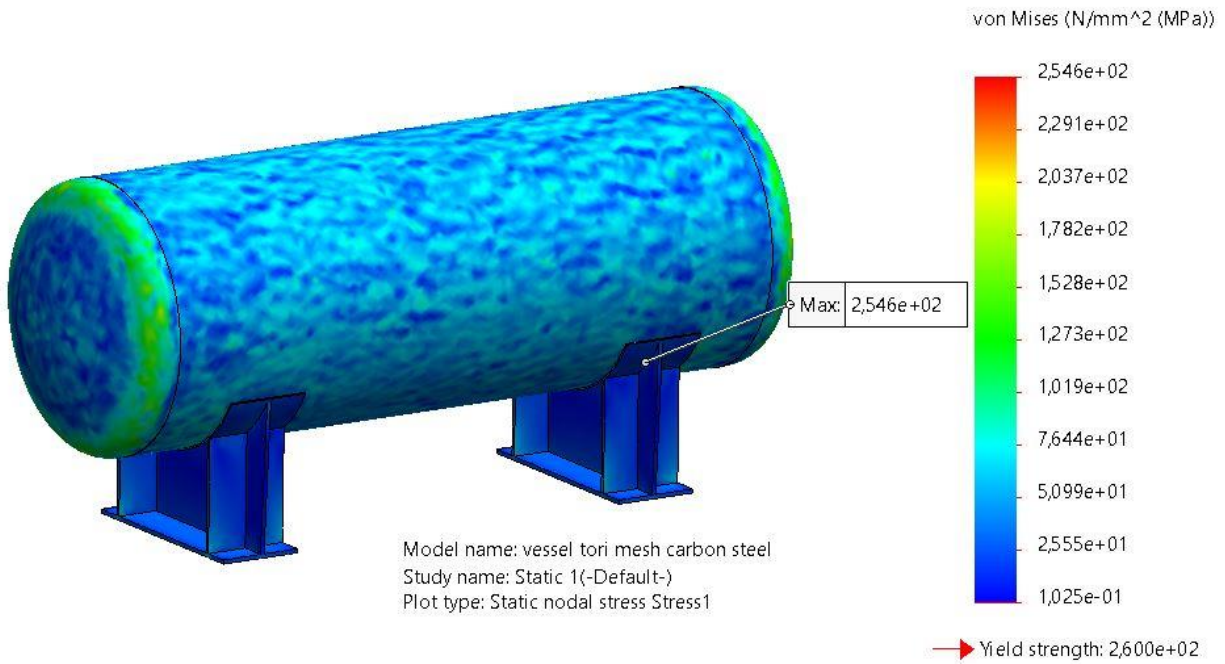
Παρατήρηση 2: Η εσωτερική θερμοκρασία στο εσωτερικό του δοχείου δεν μεταβλήθηκε αλλά παρέμεινε στη τιμή των  $-35^{\circ}\text{C}$  (ακραία περίπτωση).

Οι προκύπτουσες τιμές των μέγιστων τάσεων Von Mises που προέκυψαν για το κέλυφος, τις κεφαλές και τα στηρίγματα αναγράφονται στον Πίνακα 9. Η κατανομή των τάσεων (*stresses*) παρουσιάζεται στις Εικόνες 61 και 62. Παρατηρούμε ότι οι τιμές των τάσεων Von Mises έχουν μια μικρή αύξηση στο κέλυφος και στις κεφαλές, αλλά δεν ξεπερνάνε το όριο διαρροής του υλικού SA516 Grade 70 το οποίο είναι 260 MPa. Οι τιμές των μετατοπίσεων (*displacements*) επίσης είναι αρκετά χαμηλές, όπως παρουσιάζονται στις Εικόνες 63 και 64.

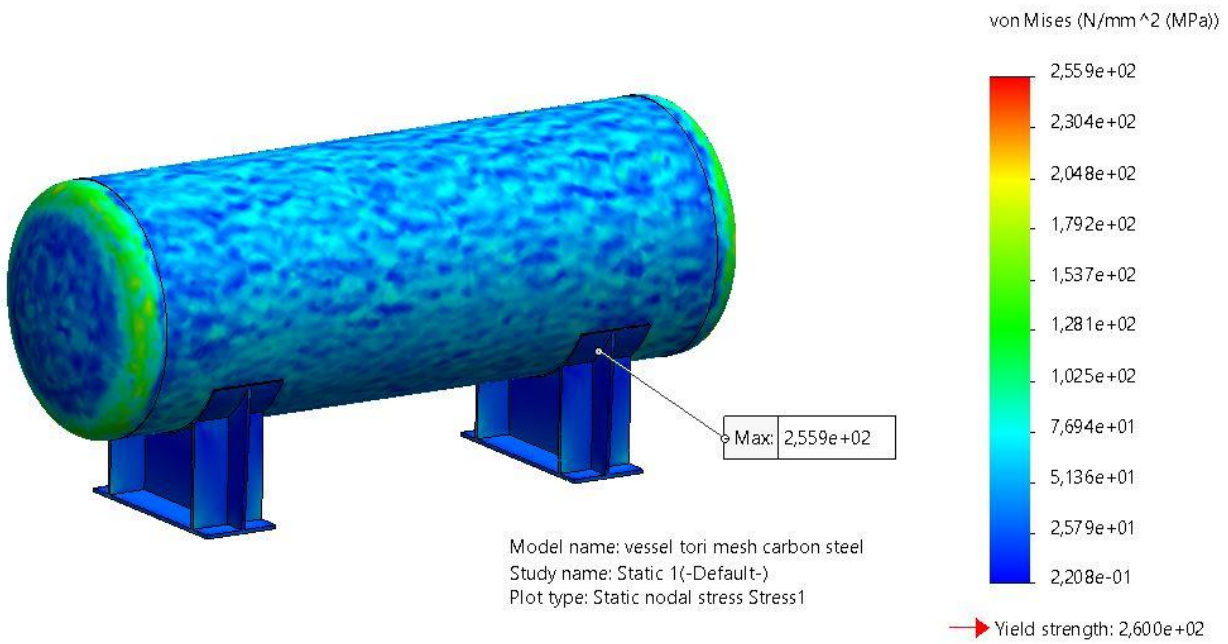
**Πίνακας 9** Σύγκριση τάσεων Von Mises για εσωτερική πίεση αμμωνίας 1 bar, 3.8 bar και 4.1 bar.

<b>Μέγιστες τιμές τάσης Von Mises</b>			
	<b>1 bar (14.5 psi)</b>	<b>3.8 bar (55 psi)</b>	<b>4.1 bar (60 psi)</b>
<b>Κέλυφος (shell)</b>	243.4	254.6	255.9
<b>Κεφαλή (head)</b>	157.0	215.8	226.6
<b>Στήριγμα (saddle)</b>	113.7	91.32	88.96

Συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο του δοχείου πίεσης όπως σχεδιάστηκε με βάση τις προδιαγραφές του κώδικα *ASME BPVC Section VIII – Division 1* και η κατάλληλη επιλογή του πάχους των 3mm, καθώς και η επιλογή του SA516 Grade 70 ως υλικό κατασκευής, εξασφαλίζει σε κάθε περίπτωση την ασφαλή λειτουργία του ως δοχείο πίεσης υγρής αμμωνίας.

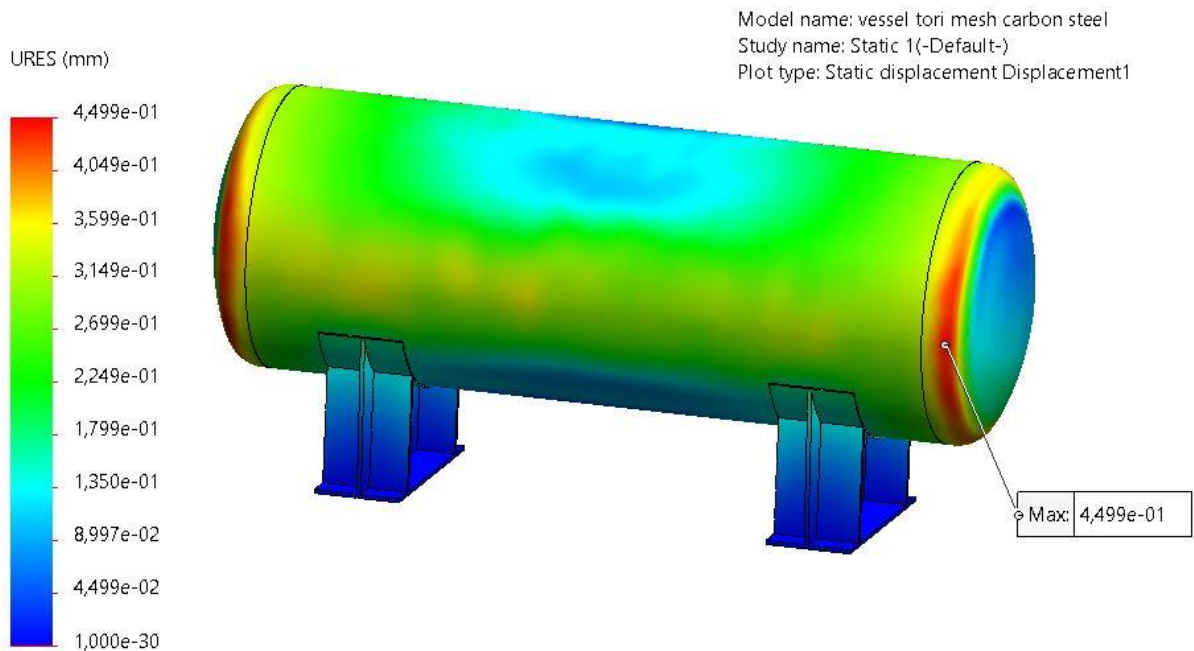


Εικόνα 60 Κατανομή τάσεων Von Mises στο μοντέλο με 3.8 bar (55 psi)

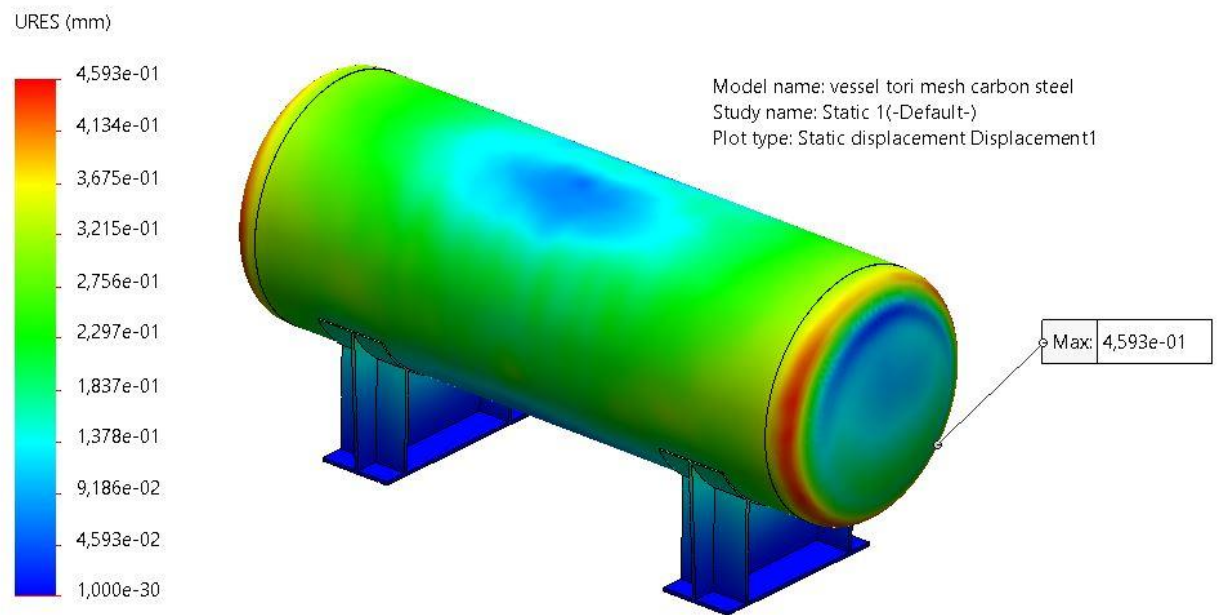


Εικόνα 61 Κατανομή τάσεων Von Mises στο μοντέλο με 4.1 bar (60 psi)





**Εικόνα 62** Κατανομή μετατόπισης (displacement) στο μοντέλο με 3.8 bar (55 psi)



**Εικόνα 63** Κατανομή μετατόπισης (displacement) στο μοντέλο με 4.1 bar (60 psi)

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]: Vishal V. Saidpatil και V.K. Kulloli, Static, Linear and Finite Element Analysis of Pressure Vessel, IJLTEMAS, Vol. III, Issue IV, pp 84-91, April 2014.
- [2]: Process Vessels, <https://samarthengineers.com/process-vessels.html>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)
- [3]: Autoclave, <https://www.compositesone.com/process/autoclave/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)
- [4]: Stainless-Steel High-Pressure Vessels, <https://www.indiamart.com/proddetail/high-pressure-vessels-4862031073.html>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)
- [5]: Water Heater Expansion Tanks, <https://pamperingplumber.com/water-heater-expansion-tanks/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)
- [6]: The hidden costs of plate heat exchangers in the food industry, <https://www.newfoodmagazine.com/article/126999/the-hidden-costs-of-plate-heat-exchangers-in-the-food-industry/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)
- [7]: Pressure Tank Styles, <http://www.hedmandrilling.com/blog/pressure-tank-styles/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)
- [8]: Customizable Vacuum Tanks Made For Nonhazardous Waste, <https://www.pumper.com/editorial/2014/07/customizable-vacuum-tanks-made-for-non-hazardous-waste>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)
- [9]: Pressure Vessels – Everything you need to know, <https://yenaengineering.nl/>. (Ημερομηνία Ανάκτησης: 7/01/20)
- [10]: Efficiency Benefits of a Boiler System Upgrade, <https://www.process-heating.com/articles/92509-efficiency-benefits-of-a-boiler-system-upgrade>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)

- [11]: Introduction to Spherical and Cylindrical Pressure Vessels, <http://www.wermac.org/>. (Ημερομηνία Ανάκτησης: 7/03/21)
- [12]: Air Receivers, <https://www.mc-integ.co.uk/product/pressure-vessels/horizontal-cylindrical-pressure-vessel/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 07/12/20)
- [13]: Pressure Vessel, <https://cnipvc.com/business-portfolio/pressure-vessel/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 07/12/20)
- [14]: Pressure Vessel Components, <https://atrinsanat.com/>. (Ημερομηνία Ανάκτησης: 7/01/20)
- [15]: UL-142 Tanks, <https://www.modweldco.com/products/aboveground-tanks/ul-142-tanks>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)
- [16]: Tank accessories, <https://www.southerntank.net/tank-accessories/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)
- [17]: Ellipsoidal Head, <https://www.petrolsteel.com/Ellipsoidal-Head-p.html>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)
- [18]: Torispherical Head for Vessel, <http://www.hiseamarine.com/torispherical-head-for-vessel-3918.html>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)
- [19]: Pressure Vessel Hemispherical Head, <http://www.hiseamarine.com/pressure-vessel-hemispherical-head-4519.html>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)
- [20]: P. R. Paul and Dr. V.L. Chowdary, Design and Static Analysis of Different Pressure Vessels and Materials Using FEM Method, IJASRET, Vol. 5, Issue 7, pp.93-99, July 2020.
- [21]: Conical Pressure Vessel, <https://www.air-receivers.co.uk/news/conical-pressure-vessel-to-pd5500/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)
- [22]: J. Jegatheesan, Z. Zakaria (2018, July). Stress Analysis on Pressure Vessel. EES [Online], 2(2), pp.53-57.

[23]: Ultrasonic Testing, <https://en.wikipedia.org/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 07/12/20)

[24]: Ultrasonic Pipeline Test, [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ultrasonic\\_pipeline\\_test.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ultrasonic_pipeline_test.jpg). (Ημερομηνία ανάκτησης: 07/12/20)

[25]: Industrial Radiography, <https://en.wikipedia.org/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 07/12/20)

[26]: PH Tool Standards for Radiographic Testing (RT), <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=21252&content=1>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 07/12/20)

[27]: Principle Of Radiographic Testing, <http://sitasndt.com/radiographic-testing/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 07/12/20)

[28]: Hydrostatic Test, <https://en.wikipedia.org/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 07/12/20)

[29]: NiGen Offers Hydrostatic Pressure Testing for Pipelines and Pressure Vessels, <https://nigen.com/hydrostatic-pressure-testing-companies/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 5/02/21)

[30]: Εύρεση Ρωγμών με τις Μεθόδους Διεισδυτικών Υγρών & Μαγνητικών Σωματιδίων, <https://qcontrol.gr/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 15/03/21)

[31]: ASME Boiler and Pressure Vessel Code, <https://www.slideshare.net/StaticEquipmentDesig/presentation-on-secviii>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 19/05/21)

[32]: Ibrahim, A., Ryu, Y. and Saidpour, M. (2015) Stress Analysis of Thin-Walled Pressure Vessels. Modern Mechanical Engineering, 5, 1-9.

[33]: SAE 304 Stainless Steel, <https://en.wikipedia.org/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 06/01/21)

- [34]: 304/304L Stainless Steel, <https://www.aksteel.com/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 06/01/21)
- [35]: Stainless Steel 304 & Stainless Steel 304L, <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 6/03/2021)
- [36]: Ι.Κ. Στεργίου και Κ.Ι. Στεργίου, Στοιχεία Μηχανών Ι, Αθήνα: Σύγχρονη Εκδοτική, 2003, σελ. 118-119.
- [37]: Allen, H. (1958), Corrosion Problems with Pressure Vessels, Anti-Corrosion Methods and Materials, Vol. 5, No. 12, pp. 390-397.
- [38]: Materials Selection, Norsok Standard, Design Principles, Rev. 1, pp.1-35, December 1994.
- [39]: Αμμωνία, <https://www.fbc.com.gr/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 08/12/20)
- [40]: Ammonia – Properties at Gas – Liquid Equilibrium Condition, <https://www.engineeringtoolbox.com/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 11/02/21)
- [41]: ShipFc: Η αμμωνία ως καύσιμο για τη Διεθνή και την Ελληνική Ναυτιλία, <https://www.in.gr/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 20/12/20)
- [42]: Carbamate, <https://en.wikipedia.org/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 20/12/20)
- [43]: M. Davies (2006). Corrosion by Ammonia. ASM Handbook, Volume 13C: Corrosion: Environments and Industries, pp. 727-735.
- [44]: Stainless Steels in Ammonia Production, <https://nickelinstitute.org/>. (Ημερομηνία ανάκτησης: 20/12/20)
- [45]: IGC-Code Int. Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk, [https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC\\_2389\\_14/5/#](https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_2389_14/5/#). (Ημερομηνία ανάκτησης: 11/02/21)

[46] Design and Construction of NH<sub>3</sub> Tanks, California Department of Industrial Relations, <https://www.dir.ca.gov/title8/458.html> . (Ημερομηνία ανάκτησης: 11/02/21)

[47] Anhydrous Ammonia Bulk Storage Regulations, C.R.C., c. 1146, [https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/C.R.C.,\\_c.\\_1146/FullText.html](https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/C.R.C.,_c._1146/FullText.html) (Ημερομηνία ανάκτησης: 11/02/21)

[48]: Torispherical head according to DIN 28011, <https://www.slawinski.co.uk/products/torispherical-heads/>, (Ημερομηνία ανάκτησης: 19/05/21)

[49] ASME B16.5 Plate Flange Dimensions, <https://www.haihaopiping.com/asme-b16-5-plate-flange-dimensions.html>, (Ημερομηνία ανάκτησης: 19/05/21)

[50]: Convective Heat Transfer, [https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d\\_430.html](https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html), (Ημερομηνία ανάκτησης: 19/05/21)

[51]: A. Ferrantelli, P. Melois & M. Viljanen, Sensitivity studies of heat transfer: forced convection across a cylindrical pipe and duct flow, August 14, 2003.

[52]: Density of liquid ammonia [NH<sub>3</sub>], <https://www.aqua-calc.com/>, (Ημερομηνία ανάκτησης: 24/05/21)

[53]: Torispherical Head – Volume, <https://www.vcalc.com/>, (Ημερομηνία ανάκτησης: 24/05/21)