



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Σχεδιασμός Μεταλλικής Δεξαμενής Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καλαμαράς Κωνσταντίνος

Επιβλέπων: Ραυτογιάννης Ιωάννης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

ΕΜΚ ΔΕ 2013/64

Καλαμαράς Ν. Κωνσταντίνος
Σχεδιασμός Μεταλλικής Δεξαμενής Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2013/64
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Kalamaras N. Constantinos
Design of Liquefied Natural Gas (LNG) Steel Storage Tank
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2013/64
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Η διπλωματική αυτή ολοκληρώνει επίσημα τον κύκλο των προπτυχιακών μου σπουδών. Ως εκ τούτου θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη αγάπη και υπομονή τους σε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον αναπληρωτή καθηγητή του Ε.Μ.Π., κύριο Ιωάννη Ραυτογιάννη για την συνεχή υποστήριξη και καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Vice President της εταιρείας KOGAS κύριο Ik-Hyum για την αμέριστη βοήθειά του παρέχοντας μου τις προδιαγραφές της μεταλλικής δεξαμενής.

Τέλος, ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου, τόσο για την βοήθεια τους όσο και για την αρμονική και ευχάριστη συνεργασία μας.

Καλαμαράς Κωνσταντίνος
Αθήνα
Ιούλιος 2013

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2013/64

**Σχεδιασμός Μεταλλικής Δεξαμενής
Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου**

Καλαμαράς Ν. Κωνσταντίνος
Επιβλέπων: Ραυτογιάννης Ιωάννης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τον σχεδιασμό της εσωτερικής κυλινδρικής μεταλλικής δεξαμενής Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (ΥΦΑ). Εξετάζεται η διαδικασία σχεδιασμού της με βάση τους αντίστοιχους Ευρωκώδικες για τις δεξαμενές, EN 14620-2:2006, API 650 και μέσω αναλύσεων με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά γενικά περί φυσικού αερίου και ΥΦΑ και παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι δεξαμενών ΥΦΑ. Εκτενέστερη αναφορά γίνεται για τα στάδια ανέγερσης, θεμελίωσης αλλά και το σχεδιασμό της εσωτερικής δεξαμενής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των φορτίων που λαμβάνονται υπ' όψιν στο σχεδιασμό των μεταλλικών δεξαμενών σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι μέθοδοι ελέγχου με βάση τον Ευρωκώδικα 1993-1-6 που αφορά την αντοχή και την ευστάθεια κατασκευών από κελύφη αλλά και οι έλεγχοι για χαλύβδινες δεξαμενές από την παράγραφο A10 του Ευρωκώδικα 1998-4.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή των όσων περιγράφηκαν προηγουμένως σε πραγματική δεξαμενή μεταβλητού πάχους κελύφους, διαμέτρου 84m και ύψους 37,61m. Αρχικά παρουσιάζονται οι προδιαγραφές και οι περιορισμοί της δεξαμενής. Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός των δράσεων που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν, όπως περιγράφηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Τέλος γίνεται ο υπολογισμός της τέμνουσας βάσης, της ροπής ανατροπής και οι έλεγχοι για μη αγκυρωμένες δεξαμενές σε έδαφος από τον Ευρωκώδικα 1998-4.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται οι αναλύσεις που έγιναν με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Αρχικά περιγράφονται οι γραμμικές αναλύσεις για τους συνδυασμούς δράσεων στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας και στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Στη συνέχεια πραγματοποιείται γραμμική ανάλυση για το σεισμικό συνδυασμό δράσεων. Για όλες τις πιο πάνω περιπτώσεις επαναλαμβάνονται οι αναλύσεις χωρίς όμως την παρουσία των ενισχυτικών δακτυλιδιών της δεξαμενής αλλά μόνο του δακτυλιδιού κορυφής.

Στο έκτο κεφάλαιο επαναλαμβάνονται οι έλεγχοι σε οριακή κατάσταση αστοχίας σύμφωνα με τον κανονισμό, όπως περιγράφηκαν στο τρίτο κεφάλαιο και γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
DIVISION OF STRUCTURAL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2013/64

Design of Liquefied Natural Gas (LNG) Steel Storage Tank

Kalamaras N. Constantinos

Supervisor: Raftoyiannis Ioannis, Associate Professor N.T.U.A.

Abstract

This diploma thesis deals with the design of Liquefied Natural Gas (LNG) inner cylindrical steel storage tank. The design of this structure is investigated by using Eurocode 1993-1-6, EN 14620-2:2006, API 650 and a finite element software.

The first chapter gives general reference on natural gas and LNG and presents the various types of LNG tanks. Extensive reference is made to the stages of construction, foundation and design of the inner tank.

In the second chapter the actions considered during the design of steel tanks according to the Eurocodes are reviewed.

The third chapter first describes the testing methods based on Eurocode 1993-1-6 regarding the strength and stability of shell structures and then the inspections for steel tanks from paragraph A10 of Eurocode 1998-4.

In the fourth chapter there is an application of those which are described previously, in real tank of variable thickness shell, diameter of 84m and a height of 37,61m. Originally are presented the specifications and the limitations of the tank. Then the calculation of the actions that must be taken into account, as described in the second chapter. Finally the calculation of base shear, the overturning moment and the checks on unanchored tanks in the ground by the Eurocode 1998-4.

The fifth chapter describes the analyzes which performed with the finite element software-ADINA. Firstly described linear analyzes for combinations of actions to service ability and the ultimate limit state. Then, analysis is performed for the seismic combination actions. For all the above cases the analyzes are repeated without the presence of the stiffeners rigs rings of the tank, but only the top ring.

In the sixth chapter are repeated tests in the ultimate limit state in accordance with the regulation, as described in the third chapter and compared with the results which obtained by the analysis on finite element software.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Γενικά περί φυσικού αερίου.....	1
1.1.1	Ορισμός.....	1
1.1.2	Χημική σύσταση.....	2
1.1.3	Φυσικές Ιδιότητες.....	2
1.1.4	Χρήσεις.....	3
1.1.5	Εξόρυξη και μεταφορά.....	3
1.2	Γενικά περί υγροποιημένου φυσικού αερίου.....	4
1.2.1	Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο.....	4
1.2.2	Κίνδυνοι από το υγροποιημένο φυσικό αέριο.....	5
1.2.3	Συστήματα Ασφαλείας ΥΦΑ.....	5
1.2.4	Εγκαταστάσεις - Κύκλος του ΥΦΑ.....	6
1.2.5	Αποθήκευση του ΥΦΑ.....	6
1.2.6	Γενική περιγραφή του σταθμού υποδοχής/αποθήκευσης/αεριοποίησης ΥΦΑ.....	7
1.3	Γενικά περί δεξαμενών Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου.....	9
1.3.1	Ορισμός των διαφόρων τύπων των δεξαμενών ΥΦΑ.....	9
1.3.2	Παράδειγμα σταδίων κατασκευής-ανέγερσης δεξαμενής ΥΦΑ.....	16
1.3.3	Συγκόλληση.....	17
1.3.4	Θεμελίωση.....	18
1.3.4.1	Επιφανειακές θεμελιώσεις.....	18
1.3.4.2	Θεμελιώσεις με πασσάλους.....	19
1.3.5	Σχεδιασμός εσωτερικής δεξαμενής.....	20
1.3.6	Σχεδιασμός εξωτερικής δεξαμενής.....	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΦΟΡΤΙΑ

2.1	Ίδιο βάρος.....	25
2.2	Υδροστατικές πιέσεις.....	25
2.3	Σεισμική διέγερση.....	25
2.3.1	Αδρανειακή δύναμη στο κέλυφος της δεξαμενής.....	25
2.3.2	Υδροδυναμικές πιέσεις.....	26
2.3.2.1	Κατακόρυφες άκαμπτες κυκλικές δεξαμενές.....	26
2.3.2.2	Κατακόρυφες εύκαμπτες κυκλικές δεξαμενές.....	30
2.3.2.2.1	Απλοποιημένη διαδικασία για δεξαμενές με πακτωμένη βάση.....	32
2.4	Ίδιο βάρος αναρτώμενου καταστρώματος.....	34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ

3.1	Γενικά.....	35
3.2	Οριακές καταστάσεις αστοχίας.....	36
3.2.1	Πλαστική οριακή κατάσταση (LS1).....	36
3.2.2	Κυκλική οριακή κατάσταση (LS2).....	40
3.2.3	Λυγισμός (LS3).....	42
3.2.3.1	Μη ενισχυμένα κυλινδρικά κελύφη συνεχούς πάχους τοιχώματος.....	46
3.2.3.2	Μη ενισχυμένα κυλινδρικά κελύφη με βαθμιδωτό μεταβλητό πάχος τοιχώματος.....	50
3.3	Έλεγχοι για χαλύβδινές δεξαμενές από A10 του EN 1998-4:2006.....	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ

4.1	Προδιαγραφές και περιορισμοί της δεξαμενής.....	55
4.2	Υπολογισμός φορτίων.....	58
4.2.1	Ίδιο βάρος.....	58
4.2.2	Υδροστατικές πιέσεις.....	59
4.2.3	Ίδιο βάρος αναρτώμενου καταστρώματος.....	59
4.2.4	Σεισμική διέγερση.....	59
4.2.4.1	Ωστική (impulsive) πίεση, p_i	59
4.2.4.2	Μεταγωγική (convective) πίεση, p_c	61
4.2.4.3	Υδροδυναμική πίεση λόγω κατακόρυφης διέγερσης.....	63
4.2.4.4	Συνολική υδροδυναμική πίεση.....	63
4.2.5	Υπολογισμός της τέμνουσας βάσης και της ροπής ανατροπής με την απλοποιημένη μέθοδο.....	64
4.3	Έλεγχος για μη αγκυρωμένες δεξαμενές σε έδαφος (EN 1998-4).....	65
4.3.1	Ανύψωση κελύφους και μήκος ανύψωσης του ελάσματος βάσης.....	65
4.3.2	Επίμηκες τάση μεμβράνης στο έλασμα βάσης.....	66
4.3.3	Πλαστική περιστροφή του ελάσματος βάσης.....	66
4.3.4	Αντίσταση ολισθήσεως (API 650-2009).....	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ADINA

5.1	Περιγραφή του προσομοιώματος.....	69
5.2	Στατικές φορτίσεις.....	69
5.2.1	Γραμμική ανάλυση.....	69
5.2.1.1	Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας.....	69
5.2.1.2	Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας χωρίς τα ενισχυτικά δακτυλίδια 1 έως 5.....	71
5.2.1.3	Οριακή κατάσταση αστοχίας.....	72
5.2.1.4	Οριακή κατάσταση αστοχίας χωρίς τα ενισχυτικά δακτυλίδια 1 έως 5.....	73
5.2.2	Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας – Πλήρης μέθοδος Newton (F.N.M) στην οριακή κατάσταση αστοχίας.....	74
5.2.2.1	Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας – Πλήρης μέθοδος Newton (F.N.M) στην οριακή κατάσταση αστοχίας χωρίς τα ενισχυτικά δακτυλίδια 1 έως 5.....	75
5.3	Σεισμικές φορτίσεις.....	76
5.3.1	Γραμμική ανάλυση.....	76
5.3.2	Γραμμική ανάλυση χωρίς τα ενισχυτικά δακτυλίδια 1 έως 5.....	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥΣ

6.1	Πλαστική οριακή κατάσταση.....	81
6.2	Κυκλική οριακή κατάσταση.....	81
6.3	Λυγισμός.....	82
6.3.1	Αξονική θλίψη.....	82
6.3.2	Αξονική θλίψη με συνυπάρχουσα εσωτερική πίεση.....	83
6.3.3	Έλεγχος σε ελαστικό λυγισμό από EN 1998-4 2006.....	84
6.3.4	Ελαστική-πλαστική κατάρρευση από EN 1998-4 2006.....	84

ΣΧΟΛΙΑ

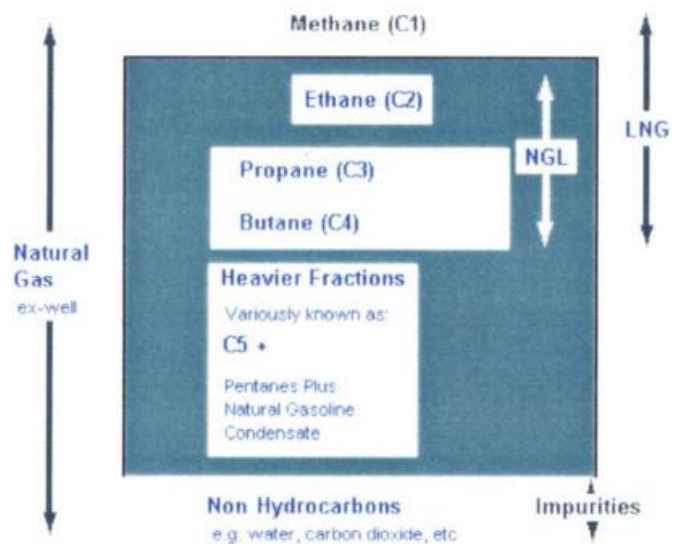
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά περί φυσικού αερίου

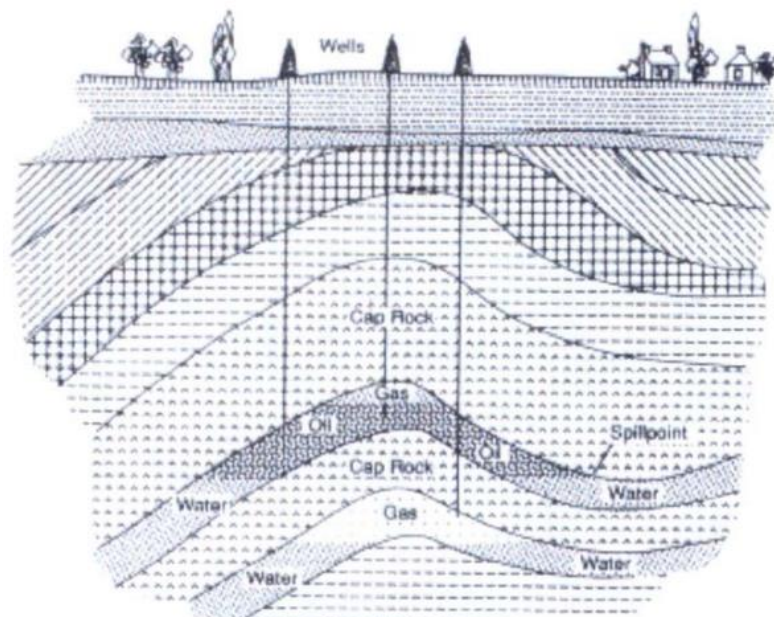
1.1.1 Ορισμός

Το Φυσικό Αέριο είναι ένα αέριο μείγμα υδρογονανθράκων που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4). Εκτός από το μεθάνιο περιέχει επίσης και άλλους υδρογονάνθρακες σε μικρότερες ποσότητες, καθώς και ορισμένες ουσίες σε πολύ μικρά ποσοστά όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το άζωτο (N_2), το υδρόθειο (H_2S), το νερό (H_2O), τα στερεά σωματίδια κ.α.. Η σύσταση του φυσικού αερίου διαφέρει ανάλογα με την πηγή. Στο διπλανό σχήμα (1.1) διακρίνονται τα διάφορα συστατικά (μαζί με την ονομασία τους) που μπορεί να συνυπάρχουν με το μεθάνιο σε μια τυπική σύσταση του φυσικού αερίου.



Σχήμα 1.1: Τυπική σύσταση του φυσικού αερίου.

Το φυσικό αέριο δημιουργήθηκε από την βραδεία (αναερόβια) αποσύνθεση φυτικής και ζωικής ύλης που υπήρχε παγιδευμένη κάτω από στερεά πετρώματα (υπό μεγάλη πίεση) για πολλά εκατομμύρια έτη, και είναι παγιδευμένο σε πετρώματα σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς (κοιλότητες) όπως φαίνεται στο σχήμα (1.2). Το φυσικό αέριο συνήθως συνυπάρχει με νερό (δύο φάσεις) ή είναι συνδεδεμένο με αργό πετρέλαιο και νερό (τρεις φάσεις)



Σχήμα 1.2: Προέλευση του Φυσικού Αερίου.

1.1.2 Χημική σύσταση

Βασικό συστατικό του φυσικού αερίου είναι το μεθάνιο, συνυπάρχουν όμως σε αυτό και μικρότερες ποσότητες αιθανίου, προπανίου και βουτανίου, καθώς και διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο, ήλιο και υδρόθειο. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται μια τυπική κατ' όγκο σύσταση φυσικού αερίου. Η σύσταση του φυσικού αερίου διαφέρει από περιοχή σε περιοχή.

Συστατικά	% κατά όγκο σύσταση
Μεθάνιο (CH ₄)	70-90
Αιθάνιο (C ₂ H ₆)	5-15
Προπάνιο (C ₃ H ₈) και Βουτάνιο (C ₄ H ₁₀)	< 5
CO ₂ , N ₂ , H ₂ S, κ.τ.λ	μικρότερες ποσότητες

Πίνακας 1.1: Χημική σύσταση του Φυσικού Αερίου.

Το φυσικό αέριο που είναι απαλλαγμένο από τους υδρογονάνθρακες πέραν του μεθανίου, δηλαδή το καθαρό μεθάνιο, συχνά αποκαλείται και ξηρό φυσικό αέριο. Αντίστοιχα, το φυσικό αέριο που συμπεριλαμβάνει και άλλους υδρογονάνθρακες εκτός από το μεθάνιο, αποκαλείται και υγρό φυσικό αέριο.

1.1.3 Φυσικές Ιδιότητες

Το φυσικό αέριο είναι άχρωμο και άοσμο. Η χαρακτηριστική του οσμή δίνεται τεχνικά για σκοπούς ασφαλείας, ώστε να γίνεται αντιληπτό σε περιπτώσεις διαρροής. Ανήκει στη δεύτερη οικογένεια των αέριων καυσίμων, το ειδικό του βάρος είναι ίσο με 0,55 N/m³ και είναι ελαφρύτερο από τον αέρα. Η καύση του σε σχέση με αυτή άλλων καυσίμων έχει λιγότερο επιβλαβείς συνέπειες για το περιβάλλον αφού παράγει μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα για κάθε μονάδα παραγόμενης ενέργειας (Πίνακας 1.2). Αποτελεί την καθαρότερη πηγή πρωτογενούς ενέργειας μετά τις ανανεώσιμες μορφές. Τα μεγέθη των εκπεμπόμενων ρύπων είναι μικρότερα σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα, ενώ η βελτίωση του βαθμού απόδοσης μειώνει τη συνολική κατανάλωση καυσίμου περιορίζοντας την ατμοσφαιρική ρύπανση.

Τύπος καυσίμου	Σωματίδια	Οξείδια του Αζώτου (NO _x)	Διοξείδιο του Θείου (SO ₂)	Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)	Υδρογονάνθρακες
Κάρβουνο	1.092	387	2.450	13	2
Μαζούτ	96	170	1.400	14	3
Ντίζελ	6	100	220	16	3
Φ.Α.	4	100	0,3	17	1

Πίνακας 1.2: Εκπεμπόμενοι ρύποι σε σχέση με άλλα καύσιμα κατά την καύση σε μονάδα ατμοπαραγωγής σε mg/MJ.

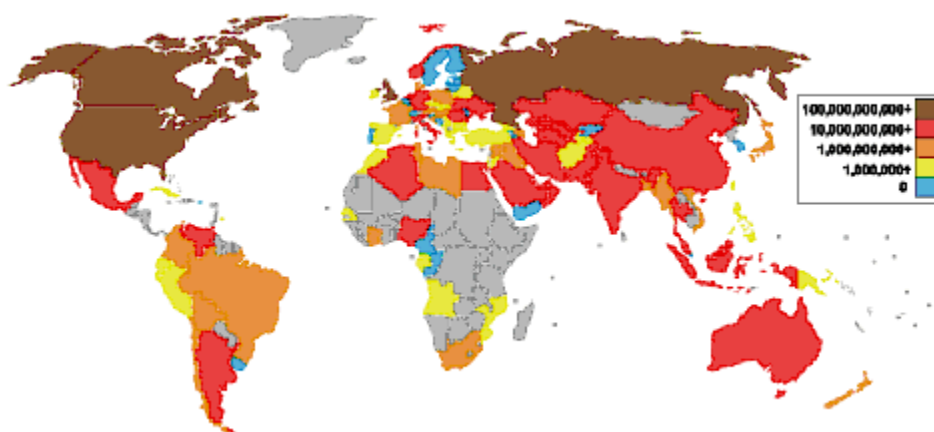
Επίσης συμβάλλει στη εξοικονόμηση ενέργειας αφού η χρησιμοποίηση φυσικού αερίου σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου θα έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση του βαθμού απόδοσης παραγωγής ηλεκτρισμού σε 52 -55% έναντι 35-40% των συμβατικών ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών. Λόγω της "καθαρότητας" των προϊόντων καύσης του φυσικού αερίου, αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές χωρίς την παρεμβολή εναλλακτικών που έχουν ως συνέπεια ενεργειακές απώλειες. Τέλος με την υποκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο στην τελική κατανάλωση, κυρίως στις οικιακές και εμπορικές χρήσεις, θα αποφευχθούν οι απώλειες μετατροπής της πρωτογενούς πηγής ενέργειας σε ηλεκτρισμό καθώς και οι απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

1.1.4 Χρήσεις:

- Βασική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας,
- Χρήση στην παραγωγή υδρογόνου,
- Χρήση ως καύσιμο οχημάτων (οικολογικά οχήματα) ενώ γίνονται προσπάθειες για χρήση του και στην αεροπορία,
- Οικιακή χρήση (μαγειρική, θέρμανση κ.α.),
- Άλλες χρήσεις (παραγωγή γυαλιού, υφασμάτων, ατσαλιού, πλαστικών, και άλλων προϊόντων),
- Βιομηχανία: Κάλυψη θερμικών αναγκών για όλες τις παραγωγικές διαδικασίες (παραγωγή ατμού, ξήρανση) , κλιματισμό , συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.

1.1.5 Εξόρυξη και μεταφορά

Το φυσικό αέριο αποτελεί συμβατικό καύσιμο καθώς και πρώτη ύλη στην χημική βιομηχανία. Εξάγεται από υπόγειες κοιλάτητες στις οποίες βρίσκεται υπό υψηλή πίεση. Σε αυτές τις κοιλάτητες το φυσικό αέριο σχηματίστηκε με τρόπο παρόμοιο με τον τρόπο σχηματισμού του πετρελαίου. Τα κοιτάσματα φυσικού αερίου βρίσκονται συνήθως μακριά από τα κύρια κέντρα καταναλώσεως, συνεπώς το αέριο θα πρέπει να μεταφερθεί σε κάποια απόσταση μέχρι να καταναλωθεί, αν και οι βιομηχανίες χημικής επεξεργασίας είναι συχνά εγκατεστημένες στην περιοχή της παραγωγής. Η μεταφορά του φυσικού αερίου εξαρτάται από την κατάστασή του. Σε αέρια κατάσταση μεταφέρεται με αγωγούς υπό υψηλή πίεση, ενώ σε υγρή κατάσταση μεταφέρεται με δεξαμενόπλοια. Οι μεγάλοι αγωγοί υψηλής πίεσης καθιστούν δυνατή τη μεταφορά του αερίου σε απόσταση χιλιάδων χιλιομέτρων. Παραδείγματα τέτοιων αγωγών είναι οι αγωγοί της Βόρειας Αμερικής, που εκτείνονται από το Τέξας και τη Λουιζιάνα μέχρι τη βορειοανατολική ακτή και από την Αλμπέρτα ως τον Ατλαντικό. Αγωγοί επίσης εκτείνονται από τη Σιβηρία μέχρι την Κεντρική και Δυτική Ευρώπη. Οι έρευνες για πετρέλαιο έχουν αποκαλύψει την ύπαρξη μεγάλων κοιτασμάτων αερίου στην Αφρική, Μέση Ανατολή, Αλάσκα και αλλού.



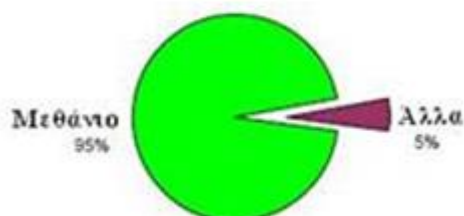
Σχήμα 1.3: Χάρτης που απεικονίζει την παραγωγή ανά χώρα ανά το παγκόσμιο (με καφέ χρώμα διακρίνονται οι χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή, ακολουθούν αυτές που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα).

1.2 Γενικά περί υγροποιημένου φυσικού αερίου

1.2.1 Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (ΥΦΑ) είναι φυσικό αέριο που έχει μετατραπεί προσωρινά σε υγρή μορφή για τη διευκόλυνση της αποθήκευσης και της μεταφοράς του. Είναι άοσμο, άχρωμο, μη τοξικό και μη διαβρωτικό. Το φυσικό αέριο υγροποιείται με πίεση κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση και ψύχεται στους $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$ περίπου. Κατά την διαδικασία υγροποίησης απαιτείται προ-επεξεργασία για την αφαίρεση των προσμειξεων όπως νερό, άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο και άλλες ενώσεις του θείου. Απομακρύνοντας αυτές τις προσμίξεις δεν μπορεί να δημιουργηθούν στερεές ουσίες με την ψύξη του φυσικού αερίου. Ως αποτέλεσμα, το ΥΦΑ περιέχει κυρίως μεθάνιο. Επειδή το ΥΦΑ είναι ένα εξαιρετικά ψυχρό υγρό που σχηματίζεται με ψυχτικά μέσα, δεν αποθηκεύεται υπό πίεση. Είναι λανθασμένη η πεποίθηση ότι το ΥΦΑ είναι ένα συμπιεσμένο αέριο. Η πυκνότητα του υγροποιημένου φυσικού αερίου είναι περίπου 467 γραμμάρια ανά λίτρο, μικρότερη σε σύγκριση με την πυκνότητα του νερού, (η οποία είναι περίπου 994 γραμμάρια ανά λίτρο). Έτσι, αν το ΥΦΑ χυθεί στο νερό, επιπλέει και εξατμίζεται γιατί είναι ελαφρύτερο από το νερό.

Σύνθεση Τυπικού ΥΦΑ



Σχήμα 1.4

1.2.2 Κίνδυνοι από το υγροποιημένο φυσικό αέριο

Ο συχνότερα αναμενόμενος κίνδυνος είναι η ανάφλεξη από φλόγες ή σπινθήρες. Η θερμοκρασία αυτανάφλεξης είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία ένα εύφλεκτο αέριο ατμός αναφλέγεται αυτόματα, χωρίς μια πηγή ανάφλεξης (π.χ. σπινθήρα), μετά από μερικά λεπτά έκθεσης στη θερμότητα. Για τους ατμούς μεθανίου που προέρχονται από την εξάτμιση ΥΦΑ με αναλογία μεθανίου – αέρα περίπου στο 10% (περίπου στο μέσο του 5 -15% εύρους αναφλεξιμότητας) και σε ατμοσφαιρική πίεση, η θερμοκρασία αυτό-ανάφλεξης είναι πάνω από 540°C. Γενικά οι κίνδυνοι περιλαμβάνουν αναφλεξιμότητα, κατάψυξη και ασφυξία. Το φυσικό αέριο είναι εύφλεκτο, και η ανεξέλεγκτη απελευθέρωση υγροποιημένου φυσικού αερίου δημιουργεί κινδύνους "πυρκαγιάς λίμνης" και σε περιορισμένους χώρους κινδύνους έκρηξης.

- Μια «πυρκαγιά λίμνης» είναι μια φωτιά στροβιλώδους διάδοσης που καίει πάνω από μια οριζόντια «λίμνη» εξατμιζόμενου καυσίμου, όπου το καύσιμο έχει μηδενική ή χαμηλή αρχική ορμή. Η «πυρκαγιά λίμνης» μπορεί να είναι στατική (π.χ. όταν η «λίμνη» καυσίμου είναι περιορισμένη) ή μια "ταχέως εξαπλωμένη" πυρκαγιά αν το σύννεφο αναφλεχθεί σε σημαντική απόσταση από την διαρροή.
- Έκρηξη ατμών ΥΦΑ. Σε περίπτωση διαρροής η ταχύτητα αεριοποίησης αυξάνεται δημιουργώντας ένα νέφος ψυχρών ατμών φυσικού αερίου. Ο όγκος του αυξάνει 600 φορές και αναμειγνύομενο με τον αέρα, ψύχει τον αέρα και σχηματίζει ένα κρύο λευκό σύννεφο ατμών που επειδή είναι μεγαλύτερο σε πυκνότητα από τον αέρα δεν διαλύεται. Το σύννεφο αυτό μπορεί να ταξιδέψει με τον άνεμο σε σημαντικές αποστάσεις, μέχρι να συναντήσει μία πηγή ανάφλεξης ή να διαλυθεί όταν αυξηθεί αρκετά η θερμοκρασία των ατμών. Το φυσικό αέριο όταν είναι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι ελαφρύτερο από τον αέρα και ανεβαίνει στην ατμόσφαιρα όπου και διαλύεται γρήγορα σε περίπτωση διαρροής. Ωστόσο, το ΥΦΑ λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του ψύχει τον αέρα καθώς αεριοποιείται και αναμειγνύεται με αυτόν. Το κρύο νέφος ατμών ΥΦΑ που δημιουργείται παραμένει πυκνότερο από τον αέρα δεν διαλύεται και μετακινείται προς την κατεύθυνση του άνεμου. Εάν το κρύο νέφος του αεριοποιημένου ΥΦΑ εισέλθει σε ένα κλειστό χώρο (π.χ. ένα δωμάτιο ή κτήριο) θα αναφλεχθεί και θα εκραγεί. Η θερμική ακτινοβολία που προέρχεται από την ανάφλεξη ενός σύννεφου ατμών ΥΦΑ μπορεί να είναι πολύ υψηλή, μέσα στο αναφλεγόμενο σύννεφο, και κατά συνέπεια ιδιαίτερα επικίνδυνη για τους ανθρώπους.

Οι ανησυχίες για την ασφάλεια των εγκαταστάσεων αποθήκευσης και τερματικών λιμενικών σταθμών έχουν προκαλέσει ξεσηκωμό των τοπικών κοινωνιών σε περιοχές όπου σχεδιάζεται η κατασκευή τέτοιων εγκαταστάσεων. Ένας τερματικός σταθμός υγροποιημένου φυσικού αερίου ορίζεται από τη ΕΕ νομοθεσία (οδηγία 96/82/ΕΚ) ως μια από τις τα πιο επικίνδυνες εγκαταστάσεις, μια εγκατάσταση Seveso II. Η οδηγία 96/82/ΕΚ ονομάζεται οδηγία Σεβέζο II, (και η οδηγία 82/501/ΕΟΚ οδηγία Σεβέζο I) και αφορά την πρόληψη και καταστολή βιομηχανικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης. Πήρε το όνομα της από το ατύχημα διαρροής χημικών (διοξίνης) στο Σεβέζο της Ιταλίας το 1976.

1.2.3 Συστήματα Ασφαλείας ΥΦΑ

Σε ολόκληρο τον κύκλο του ΥΦΑ από την παραγωγή, την υγροποίηση και τη μεταφορά, την αποθήκευση και την εκ νέου αεριοποίηση εφαρμόζονται τέσσερις απαιτήσεις ασφαλείας: το πρωτεύων «προστατευτικό περίβλημα», το δευτερεύων «προστατευτικό περίβλημα», τα συστήματα διασφάλισης και η απόσταση ασφαλείας (ζώνη ασφαλείας).

α) Πρωτεύων «προστατευτικό περίβλημα»: Η πρώτη και πιο σημαντική προϋπόθεση ασφάλειας είναι η αποθήκευση του ΥΦΑ. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων υλικών για τις δεξαμενές και τον υπόλοιπο εξοπλισμό, καθώς και κατάλληλο σχεδιασμό τεχνικών σε όλο το κύκλο του ΥΦΑ.

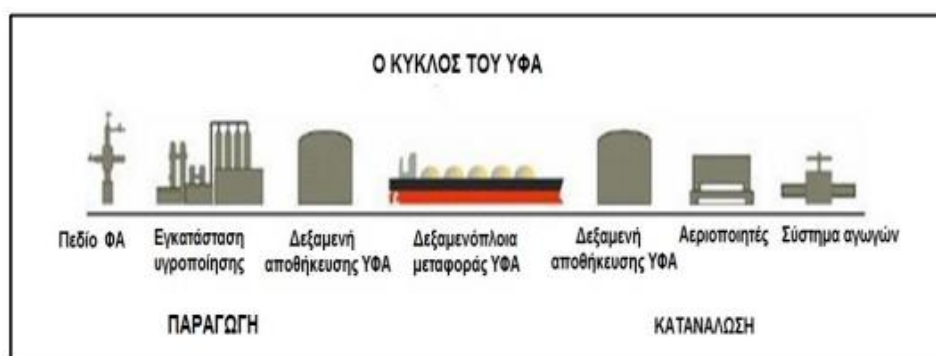
β) Δευτερεύων «προστατευτικό περίβλημα»: Το δεύτερο αυτό επίπεδο προστασίας διασφαλίζει ότι αν συμβούν διαρροές ΥΦΑ στις δεξαμενές αυτό μπορεί να συγκρατηθεί και να απομονωθεί. Για τις χερσαίες εγκαταστάσεις, αναφέρεται σε αναχώματα από προχώματα γύρω από τις δεξαμενές αποθήκευσης για να συλλέξουν το ΥΦΑ σε περίπτωση διαρροής. Σε ορισμένες εγκαταστάσεις ενισχυμένο σκυρόδεμα περιβάλλει το εσωτερικό της δεξαμενής που συνήθως κρατά το ΥΦΑ. Το δευτερεύων προστατευτικό περίβλημα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να υπερβαίνει τον όγκο της δεξαμενής αποθήκευσης. Διπλά και πλήρη προστατευτικά περιβλήματα για τις χερσαίες δεξαμενές αποθήκευσης μπορεί να εξαλείψουν την ανάγκη για αναχώματα και προχώματα.

γ) Συστήματα διασφάλισης: Στο τρίτο επίπεδο προστασίας, ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της απελευθέρωση του υγροποιημένου φυσικού αερίου και η μείωση των συνεπειών της απελευθέρωσης του. Για αυτό το επίπεδο ασφαλείας οι επιχειρήσεις ΥΦΑ χρησιμοποιούν συστήματα ανίχνευσης υγρού, αερίου και φωτιάς για να εντοπίσουν γρήγορα οποιαδήποτε παράβαση στην συγκράτηση και τηλεχειριζόμενα αυτόματα συστήματα διακοπής της παροχής για την ελαχιστοποίηση των διαρροών σε περίπτωση βλάβης.

δ) Απόσταση ασφαλείας/αποκλεισμού: Οι κανονισμοί απαιτούν ότι οι εγκαταστάσεις ΥΦΑ θα πρέπει να τοποθετούνται σε ασφαλή απόσταση από τις γειτονικές αστικές, βιομηχανικές και άλλες δημόσιες περιοχές. Επίσης υπάρχουν ζώνες ασφαλείας για δεξαμενόπλοια ΥΦΑ ενώ βρίσκονται εν πλώ και ενώ είναι αγκυροβολημένα.

1.2.4 Εγκαταστάσεις - Κύκλος του ΥΦΑ

Οι εγκαταστάσεις ή ο κύκλος του υγροποιημένου φυσικού αερίου αποτελείται από τέσσερα αλληλεξαρτώμενα στάδια: α) την εξόρυξη και παραγωγή, β) την υγροποίηση στις εγκαταστάσεις υγροποίησης, γ) τη μεταφορά από το σημείο της υγροποίησης προς τον τελικό προορισμό και δ) την παραλαβή, αποθήκευση και αεριοποίηση στον τελικό προορισμό (Σχήμα 1.5).

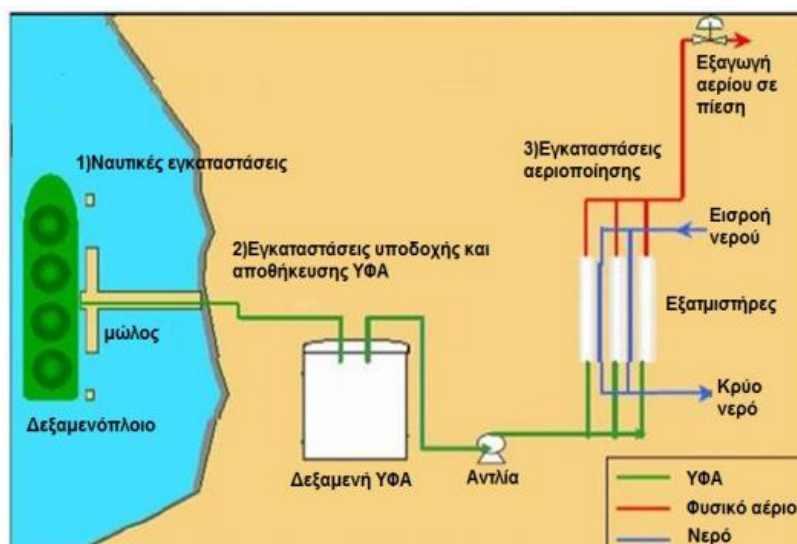


Σχήμα 1.5: Ο κύκλος του ΥΦΑ.

1.2.5 Αποθήκευση του ΥΦΑ

ΤΟ ΥΦΑ όταν φτάσει στους τερματικούς σταθμούς, μεταφέρεται σε ειδικές μονωμένες δεξαμενές αποθήκευσης οι οποίες μπορεί να είναι πάνω ή κάτω από το έδαφος και διατηρούν το υγρό σε χαμηλή θερμοκρασία για να ελαχιστοποιηθεί το ύψος της εξάτμισης. Αν δεν απελευθερωθούν ατμοί ΥΦΑ η πίεση και η θερμοκρασία στο εσωτερικό της δεξαμενής αυξάνονται. Το ΥΦΑ χαρακτηρίζεται ως κρυογονικό και διατηρείται στην υγρή του κατάσταση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Η

θερμοκρασία στο εσωτερικό της δεξαμενής θα παραμείνει σταθερή, αν η πίεση παραμένει σταθερή, επιτρέποντας το εξατμισμένο φυσικό αέριο να απελευθερώνεται από τη δεξαμενή. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως αυτοκατάψυξη. Οι απώλειες εξάτμισης συλλέγονται και χρησιμοποιούνται ως πηγή καυσίμων στην εγκατάσταση ή για το δεξαμενόπλοιο μεταφοράς. Το ΥΦΑ θερμαίνεται σε σημείο που μπορεί να μετατραπεί στην αέρια κατάσταση για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

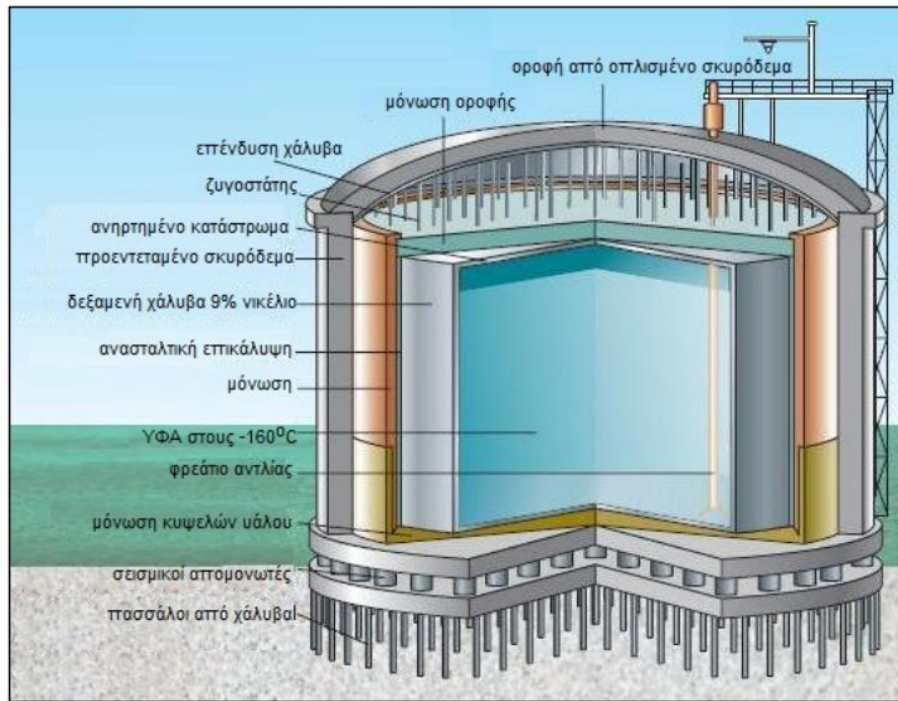


Σχήμα 1.6: Τυπικός σταθμός υποδοχής/αποθήκευσης/αεριοποίησης ΥΦΑ.

1.2.6 Γενική περιγραφή του σταθμού υποδοχής/αποθήκευσης/αεριοποίησης ΥΦΑ

Γίνεται περιγραφή των εγκαταστάσεων που πρόκειται να τοποθετηθούν καθώς και των υλικών που απαιτούνται. Το έργο που πρόκειται να χωροθετηθεί θα χρησιμοποιηθεί για υγροποίηση του ΦΑ, αποθήκευση του ΥΦΑ, αεριοποίηση και αποστολή στο δίκτυο μεταφοράς. Για τους σκοπούς αυτούς απαιτούνται οι ακόλουθες εγκαταστάσεις:

- Εγκαταστάσεις υγροποίησης για τις οποίες απαιτούνται ειδικά κράματα που να αντέχουν τις υψηλές τάσεις που αναπτύσσονται από τις έντονες μεταβολές της θερμοκρασίας. Τέτοια κράματα είναι ο χάλυβας, χάλυβας με 9%, 18% και 36% νικέλιο, κράμα Al-Mg (αργίλιο - μαγνήσιο), κράμα Al-Mn (αργίλιο - μαγγάνιο), κράμα Al-Si (αργίλιο - πυρίτιο).
- Υπέργειες ή υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης ΥΦΑ (συνήθως χρησιμοποιούνται υπέργειες λόγω του ότι έχουν μικρότερο κόστος) οι οποίες προσφέρουν ισχυρή θερμική μόνωση και ισχυρή προστασία από διαρροές λόγω σεισμών, ρωγμών κλπ. Έχουν κυλινδρικό σχήμα, η χωρητικότητά τους κυμαίνεται από 50m³ έως 250m³ με συνηθέστερες τιμές σήμερα περίπου στα 150m³. Ο λόγος ύψους προς ακτίνα (H/R) ισούται περίπου 0,5-1,5. Είναι κατασκευασμένες από υλικά όπως σκυρόδεμα, χάλυβα, γυαλί ενώ ένα μέρος τους τοποθετείται με πασσάλους από χάλυβα μέσα στο έδαφος (Σχήμα 1.7). Εντός των δεξαμενών αποθήκευσης δημιουργούνται αέρια αζώτου και μεθανίου λόγω της φυσικής εξάτμισης του ΥΦΑ. Για τη βελτίωση της απόδοσης του σταθμού και την προστασία της ρύπανσης του περιβάλλοντος δημιουργείται το σύστημα επανάκτησης αερίων που αποτελείται από συμπιεστές ανάκτησης αερίου, τον επανασυμπυκνωτή αερίου και το κατάλληλο δίκτυο σωληνώσεων. Οι δεξαμενές περιέχουν αντλίες χαμηλής πίεσης που οδηγούν το ΥΦΑ στον επανασυμπυκνωτή ή στις αντλίες υψηλής πίεσης. Οι αντλίες υψηλής πίεσης ανεβάζουν την πίεση του ΥΦΑ και το στέλλουν στους αεριοποιητές για αεριοποίηση.



Σχήμα 1.7: Δεξαμενή αποθήκευσης ΥΦΑ

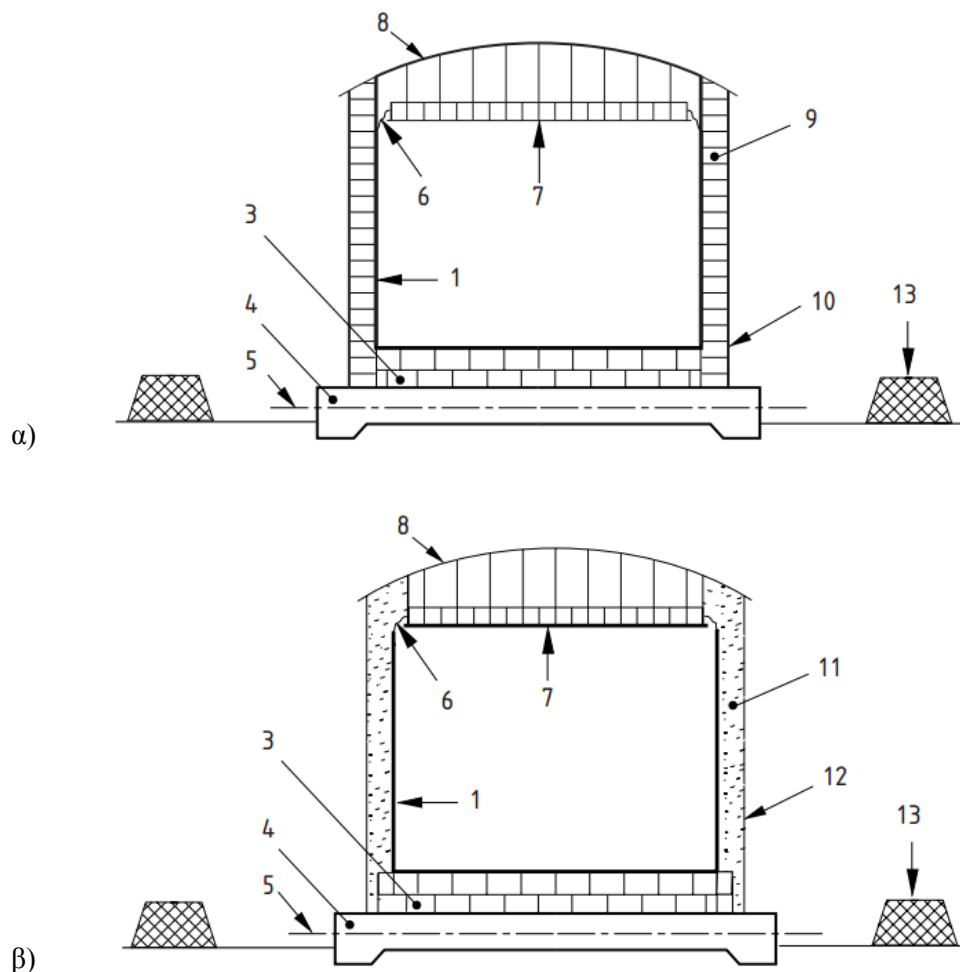
- Εγκαταστάσεις αεριοποίησης τις οποίες αποτελούν οι αεριοποιητές ή εξαεριστήρες κατασκευασμένοι από ελαφρά κράματα όπως αλουμίνιο και δίνουν στο ΥΦΑ την απαιτούμενη θερμότητα ώστε να αεριοποιηθεί.
- Προβλήματα εκφόρτωσης και μεταφοράς του ΥΦΑ από τα δεξαμενόπλοια για σκοπούς εξαγωγής και βραχίονες (από χάλυβα) με σύστημα ανάκτησης αερίου για εκφόρτωση του ΥΦΑ στα δεξαμενόπλοια. Οι συγκεκριμένοι βραχίονες επιτρέπουν στο ΦΑ που εξατμίζεται να ανακτηθεί με αποτέλεσμα από τη μία η βελτίωση της απόδοσης του σταθμού και από την άλλη η προστασία της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Το βάθος της θάλασσας στην περιοχή χωροθέτησης είναι 10m μέχρι απόσταση περίπου 1km από την ακτογραμμή ενώ τα δεξαμενόπλοια μεταφοράς ΥΦΑ απαιτούν ένα ελάχιστο βάθος υδάτων 12m όταν είναι πλήρως φορτωμένα, επομένως απαιτείται εκσκαφή τουλάχιστον 2m εντός του θαλάσσιου τμήματος της περιοχής. Οι παρεμβάσεις αυτές στο θαλάσσιο τμήμα έχουν ιδιαίτερες τεχνικές δυσκολίες ενώ αναμένεται να επιβαρύνουν σημαντικά το θαλάσσιο περιβάλλον.
- Βοηθητικές εγκαταστάσεις (Κτηριακές εγκαταστάσεις, βοηθητικοί δρόμοι κλπ).
- Θαλάσσιος αγωγός για μεταφορά του ΦΑ από το σημείο εξόρυξης στο σημείο κατασκευής.

1.3 Γενικά περί δεξαμενών Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου

1.3.1 Ορισμός των διαφόρων τύπων των δεξαμενών ΥΦΑ

Μονής συγκράτησης

Μια δεξαμενή μονής συγκράτησης θα πρέπει να αποτελείται μόνο από ένα περίβλημα ώστε να αποθηκεύεται το υγρό προϊόν. Το κύριο περίβλημα του υγρού θα πρέπει να είναι μια αυτό-υποστηριζόμενη, χαλύβδινη κυλινδρική δεξαμενή.

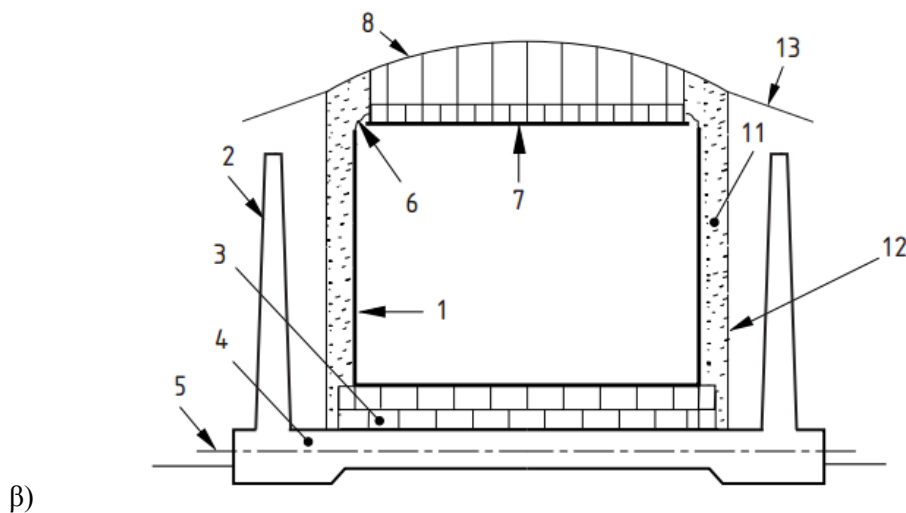
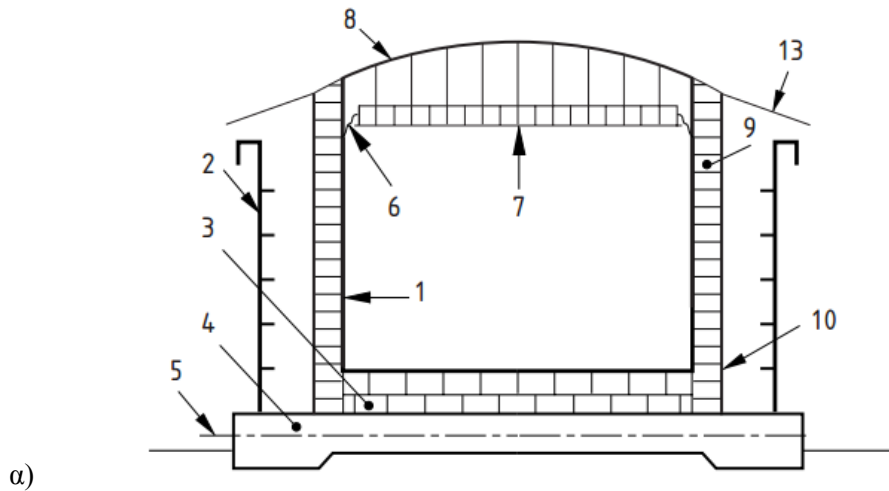


- | | |
|---------------------------------|---|
| 1. κύριο χαλύβδινο περίβλημα | 9. εξωτερική μόνωση κελύφους |
| 3. μόνωση πυθμένα | 10. εξωτερικό φράγμα υδρατμών |
| 4. θεμέλιο | 11. χαλαρή πλήρωση μόνωσης |
| 5. σύστημα θέρμανσης θεμελίου | 12. εξωτερικό χαλύβδινο κέλυφος (δεν μπορεί να περιέχει υγρό) |
| 6. εύκαμπτη μονωτική σφράγιση | 13. bund τοίχος |
| 7. αναρτώμενη οροφή (με μόνωση) | |
| 8. χαλύβδινη οροφή | |

Σχήμα 1.8: Παραδείγματα δεξαμενής μονής συγκράτησης.

Διπλής συγκράτησις

Μια δεξαμενή διπλής συγκράτησις θα πρέπει να αποτελείται από ένα κύριο περίβλημα υγρού και ατμών, το οποίο το ίδιο θα αποτελεί δεξαμενή μονής συγκράτησις, χτισμένο μέσα σε ένα δευτερεύον περίβλημα. Το δευτερεύον περίβλημα πρέπει να είναι σχεδιασμένο για να κρατήσει όλα τα υγρά περιεχόμενα του κύριου περιβλήματος σε περίπτωση διαρροών. Ο δακτυλιοειδής χώρος μεταξύ του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος περιβλήματος, δεν πρέπει να είναι περισσότερο από 6 m.



- | | |
|---|---|
| 1. κύριο χαλύβδινο περίβλημα | 8. χαλύβδινη οροφή |
| 2. δευτερεύον περίβλημα (χάλυβας ή σκυρόδεμα) | 9. εξωτερική μόνωση κελύφους |
| 3. μόνωση πυθμένα | 10. εξωτερικό φράγμα υδρατμών |
| 4. θεμέλιο | 11. χαλαρή πλήρωση μόνωσης |
| 5. σύστημα θέρμανσης θεμελίου | 12. εξωτερικό χαλύβδινο κέλυφος (δεν μπορεί να περιέχει υγρό) |
| 6. εύκαμπτη μονωτική σφράγιση | 13. κάλυμμα (ασπίδα βροχής) |
| 7. αναρτώμενη οροφή (με μόνωση) | |

Σχήμα 1.9: Παραδείγματα δεξαμενής διπλής συγκράτησις.

Πλήρης συγκράτησις

Μια δεξαμενή πλήρης συγκράτησις θα πρέπει να αποτελείται από ένα κύριο και ένα δευτερεύον περίβλημα, τα οποία μαζί να σχηματίζουν μια δεξαμενή αποθήκευσης. Το κύριο περίβλημα θα πρέπει να είναι μια αυτοτελής χαλύβδινη ενιαία δεξαμενή, κρατώντας το υγρό προϊόν.

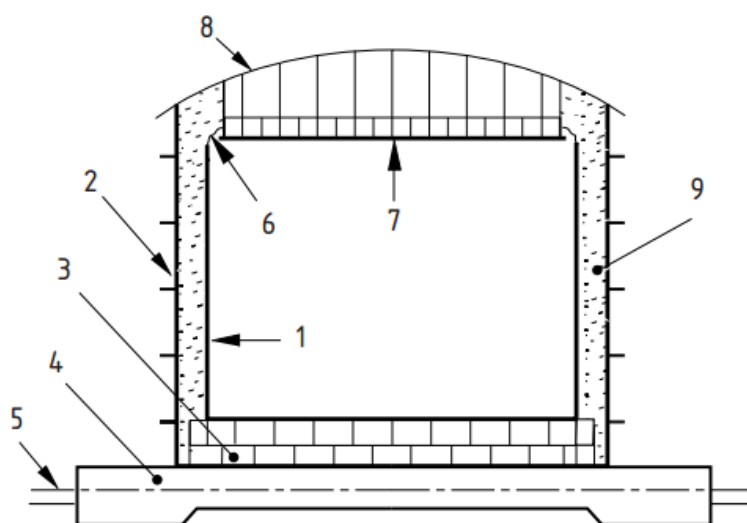
Το κύριο περίβλημα θα πρέπει:

- είτε να είναι ανοικτό στην κορυφή, στην οποία περίπτωση δεν περιέχει τους ατμούς του προϊόντος
- ή εξοπλισμένο με τρούλο για στέγη έτσι ώστε να περιέχονται οι ατμοί του προϊόντος.

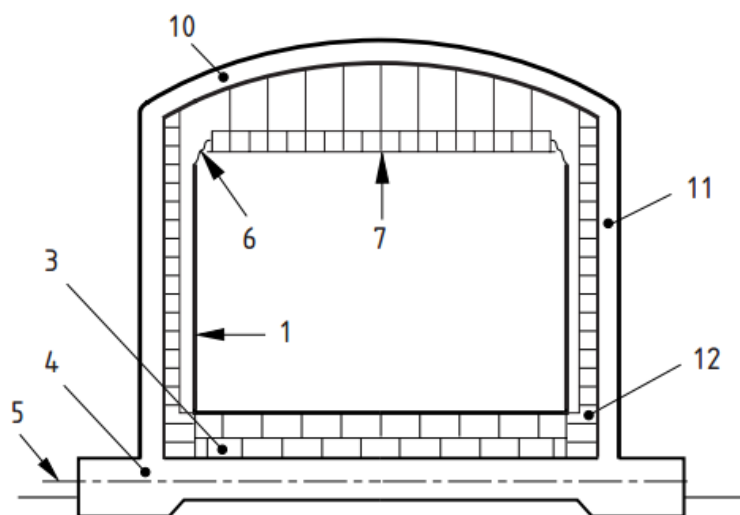
Το δευτερεύον περίβλημα θα πρέπει να είναι μια αυτό-υποστηριζόμενη χαλύβδινη ή από σκυρόδεμα δεξαμενή εξοπλισμένη με τρούλο για στέγη και να έχει σχεδιαστεί για να συνδυάσει τις ακόλουθες λειτουργίες:

- σε κανονική υπηρεσία δεξαμενής: να παρέχει την βασική συγκράτηση των ατμών της δεξαμενής (αυτό σε περίπτωση που ανοίξει η οροφή του πρωτεύοντος περιβλήματος) και να συγκρατεί την θερμική μόνωση του πρωτεύοντος περιβλήματος
- σε περίπτωση διαρροής του πρωτεύοντος περιβλήματος: να συγκρατήσει το υγρό. Είναι αποδεκτή η εξαέρωση, αλλά θα πρέπει να ελέγχεται (πίεση του συστήματος ανακούφισης).

Το δακτυλοειδές διάστημα μεταξύ του κύριου και δευτερεύοντος περιβλήματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2 m.



α)



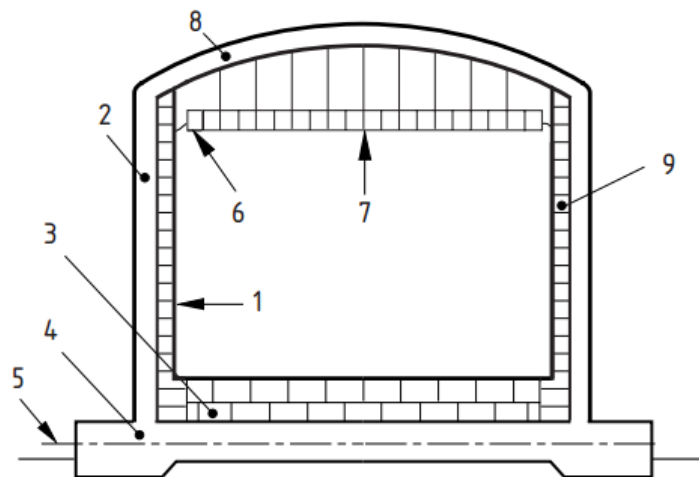
β)

- | | |
|---|--|
| 1. κύριο χαλύβδινο περίβλημα | 9. χαλαρή πλήρωση μόνωσης |
| 2. δευτερεύον περίβλημα (χάλυβας ή σκυρόδεμα) | 10. οροφή από σκυρόδεμα |
| 3. μόνωση πυθμένα | 11. εξωτερική δεξαμενή από προεντεταμένο σκυρόδεμα (δευτερεύον περίβλημα) |
| 4. θεμέλιο | 12. μόνωση στο εσωτερικό της προεντεταμένης από σκυρόδεμα εξωτερικής δεξαμενής |
| 5. σύστημα θέρμανσης θεμελίου | |
| 6. εύκαμπτη μονωτική σφράγιση | |
| 7. αναρτώμενη οροφή(με μόνωση) | |
| 8. χαλύβδινη οροφή | |

Σχήμα 1.10: Παραδείγματα δεξαμενής πλήρης συγκράτησης.

Μεμβράνης

Μια δεξαμενή μεμβράνης αποτελείται από ένα λεπτό κύριο χαλύβδινο περίβλημα (μεμβράνη) σε συνδυασμό με θερμική μόνωση και μια τσιμεντένια δεξαμενή, έτσι αποτελούν από κοινού μια ολοκληρωμένη σύνθετη κατασκευή. Αυτή η σύνθετη κατασκευή θα πρέπει να παρέχει τη συγκράτηση των υγρών. Όλα τα υδροστατικά φορτία και άλλες φορτίσεις επί της μεμβράνης θα πρέπει να μεταφέρονται μέσω της μόνωσης πάνω στην τσιμεντένια δεξαμενή. Η οροφή της δεξαμενής θα πρέπει να περιορίζει τους ατμούς, η οποία μπορεί να είναι είτε μια παρόμοια ή σύνθετη κατασκευή με μια αεροστεγή οροφή μορφής θόλου και με μόνωση σε αναρτώμενη οροφή. Σε περίπτωση διαρροής της μεμβράνης, η δεξαμενή από σκυρόδεμα, σε συνδυασμό με το σύστημα μόνωσης, θα πρέπει να είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να μπορεί να συγκρατήσει το υγρό.

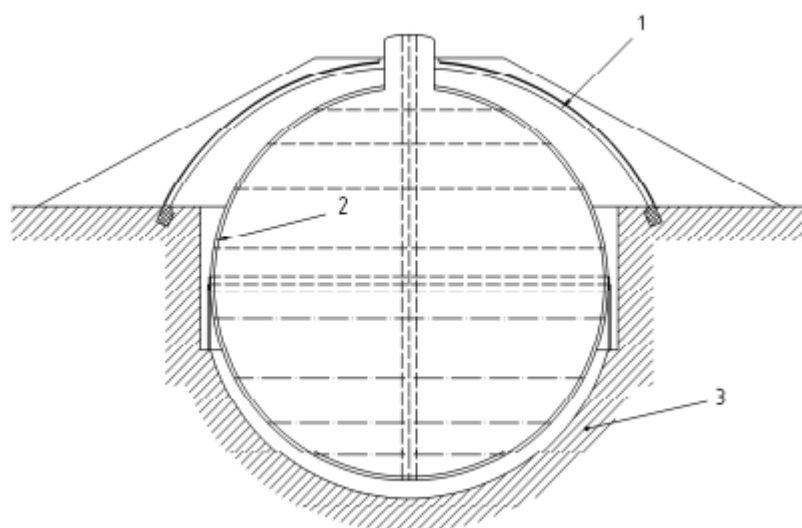
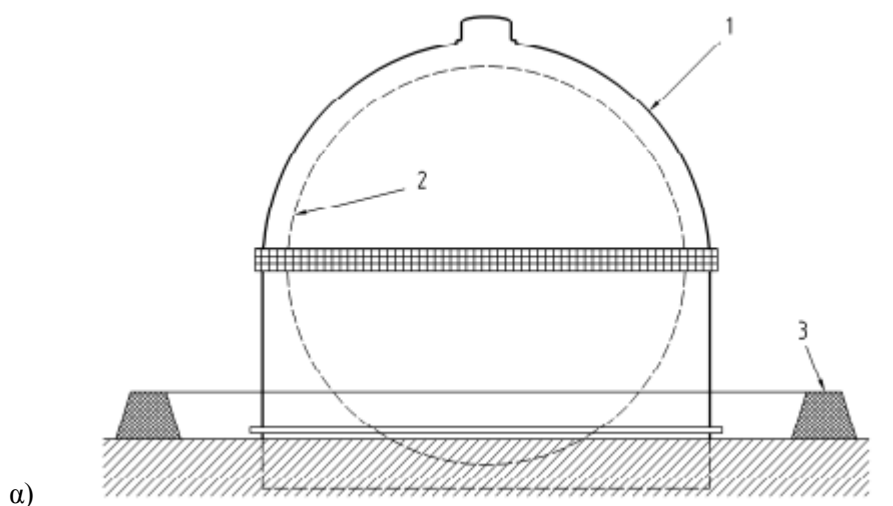


- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. πρωτεύον περίβλημα (μεμβράνη) | 7. αναρτώμενη οροφή (με μόνωση) |
| 2. δευτερεύον περίβλημα (σκυρόδεμα) | 8. οροφή από σκυρόδεμα |
| 3. μόνωση πυθμένα | 9. μόνωση στο εσωτερικό της προεντεταμένης από σκυρόδεμα εξωτερικής δεξαμενής |
| 4. θεμέλιο | |
| 5. σύστημα θέρμανσης θεμελίου | |
| 6. εύκαμπτη μονωτική σφράγιση | |

Σχήμα 1.11: Παράδειγμα δεξαμενής τύπου μεμβράνης.

Σφαιρική δεξαμενή αποθήκευσης

Το σφαιρικό, κύριο σύστημα συγκράτησης της δεξαμενής αποτελείται από μία μη-ενισχυμένη σφαίρα που υποστηρίζεται στον ισημερινό από ένα κατακόρυφο κύλινδρο. Η δεξαμενή έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σύμφωνα με τον κώδικα αεριοφόρων του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (ΙΜΟ τύπου Β δεξαμενή). Η σφαιρική γεωμετρία της δεξαμενής επιτρέπει την ακριβή πρόβλεψη της δομικής ακεραιότητας. Μπορεί να σχεδιασθεί για υψηλές επιταχύνσεις του σεισμού. Μια υπέργεια σφαιρική δεξαμενή θα πρέπει να περιβάλλεται από ένα τείχος bund ώστε να περικλείει οποιαδήποτε διαρροή.

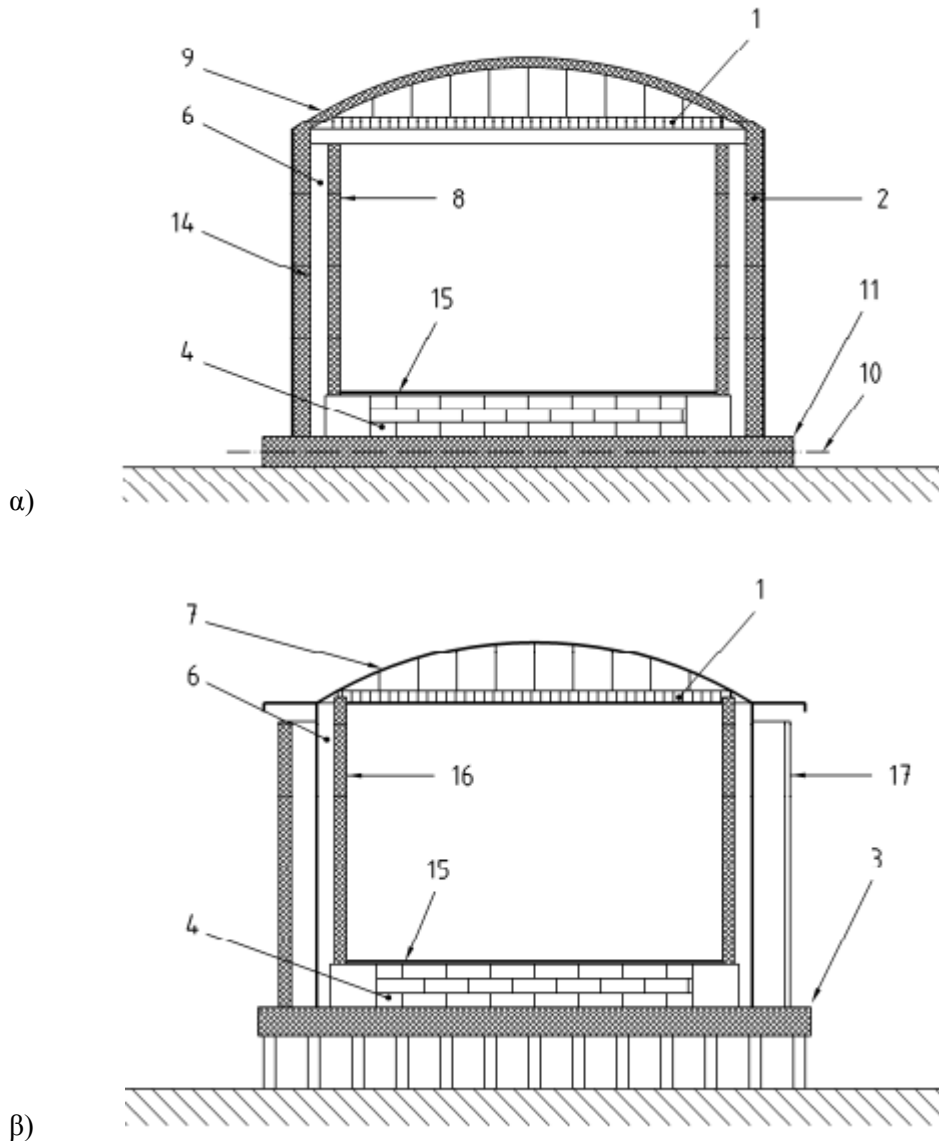


1. εξωτερικό κέλυφος
2. πρωτεύων περίβλημα
3. δευτερεύων περίβλημα

Σχήμα 1.12: Παραδείγματα σφαιρικής δεξαμενής.

Κρυογονική (cryogenic) δεξαμενή από σκυρόδεμα

Μια κρυογονική δεξαμενή σκυροδέματος είναι είτε μια διπλή δεξαμενή συγκράτησις ή μια πλήρη δεξαμενή συγκράτησις. Για αυτόν τον τύπο των δεξαμενών, τα τοιχώματα του πρωτεύων και του δευτερεύων περιβλήματος αποτελούνται από προεντεταμένο σκυρόδεμα.



- | | |
|---|--|
| 1. αναρτώμενο κατάστρωμα από αλουμίνιο | 9 οροφή από σκυρόδεμα |
| 2. δευτερεύων περίβλημα από προεντεταμένο σκυρόδεμα | 10 θέρμανση πυθμένα |
| 3. ανυψωμένη πλάκα | 11 εξωτερική πλάκα από σκυρόδεμα |
| 4. μόνωση βάσης | 14 επένδυση χάλυβα από άνθρακα |
| 6 χαλαρή πλήρωση μόνωσης | 15 χαλύβδινη βάση 9% νικέλιο |
| 7 εξωτερική χαλύβδινη οροφή | 16 κρυογονικό πρωτεύων περίβλημα από προεντεταμένο σκυρόδεμα |
| 8 πρωτεύων περίβλημα | 17 κρυογονικό δευτερεύων περίβλημα από προεντεταμένο σκυρόδεμα |

Σχήμα 1.13: Παραδείγματα κρυογονικής (cryogenic) δεξαμενής από σκυρόδεμα.

Μεταξύ αυτών των διαφόρων τύπων δεξαμενών ΥΦΑ, ο τύπος πλήρης συγκράτησις θεωρείται ως ο πιο προηγμένος τύπος. Οι δεξαμενές ταξινομούνται επίσης από τις αυξήσεις από το επίπεδο του εδάφους: τύπου πάνω από το έδαφος, τύπου σε έδαφος και τύπου κάτω από το έδαφος.



Σχήμα 1.14: Δεξαμενή τύπου κάτω από το έδαφος



Σχήμα 1.15: Υπέργεια δεξαμενή πλήρης συγκράτησις



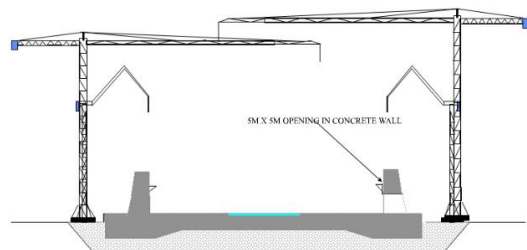
Σχήμα 1.16: Υπέργεια σφαιρική δεξαμενή αποθήκευσις, όχι ΥΦΑ

1.3.2 Παράδειγμα σταδίων κατασκευής-ανέγερσης δεξαμενής ΥΦΑ

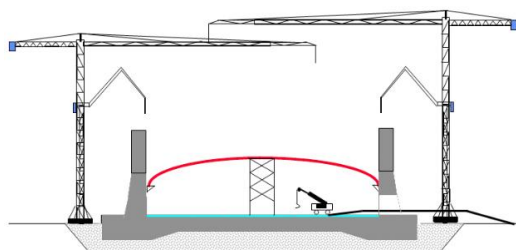
Βήμα 1: Ανασκαφή και προετοιμασία βάσης

Βήμα 2: Τοποθέτηση μανδύα σκυροδέματος και βάση πλάκας

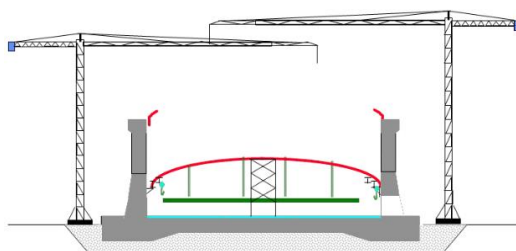
Βήμα 3: Κατασκευή τοίχου, τοποθέτηση εξωτερικών γερανών.



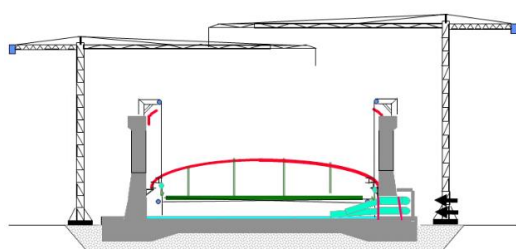
Βήμα 4: Κατασκευή τοίχου, ανέγερση οροφής, τοποθέτηση του βασικού φράγματος υδρατμών



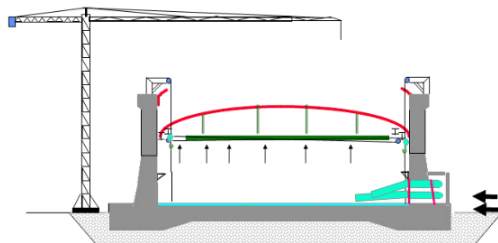
Βήμα 5: Κατασκευή τοίχου, ανέγερση οροφής αναρτώμενου καταστρώματος, συμπίεση εγκατάστασης πλάκας.



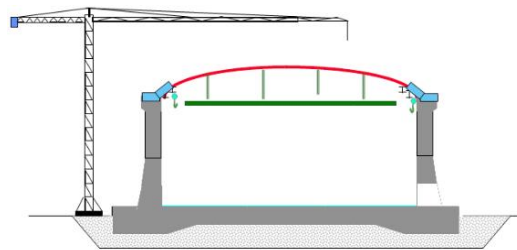
Βήμα 6: Εγκατάσταση εξοπλισμού κλιματιστικού ανέγερσης, διεκπεραίωση προετοιμασίας κλιματιστικού ανέγερσης, κλείσιμο του ανοίγματος πρόσβασης.



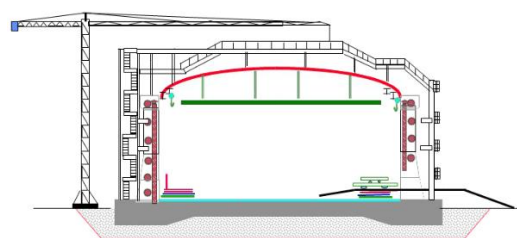
Βήμα 7: Ανύψωση οροφής



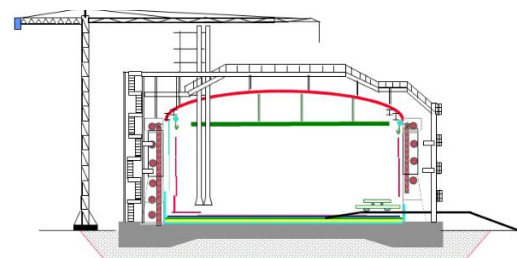
Βήμα 8: Ολοκλήρωση ανύψωσης οροφής, συγκόλλησης στέγη σε πλάκα συμπίεσης.



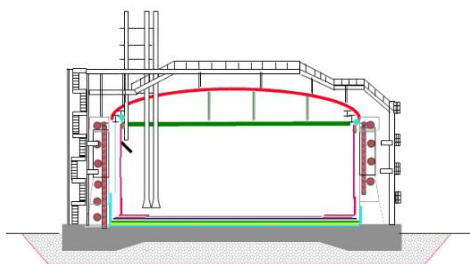
Βήμα 9: Τοποθέτηση στο δακτυλιοειδές διάστημα μεταξύ του κύριου και δευτερεύον περιβλήματος τα κατάλληλα μονωτικά υλικά. Εγκατάσταση στην οροφή και στους εξωτερικούς τοίχους της δεξαμενής σκάλες.



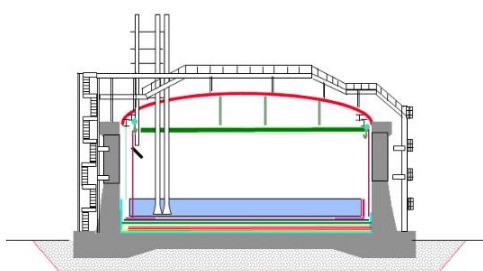
Βήμα 10: Ανύψωση κελύφους εσωτερικής δεξαμενής και φράγματος υδρατμών. Ολοκλήρωση μόνωσης πυθμένα και εσωτερικής δεξαμενής. Εγκατάσταση εξαρτημάτων οροφής και εσωτερικής δεξαμενής. Ανύψωση πλατφόρμας οροφής.



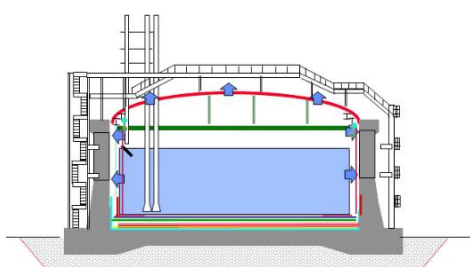
Βήμα 11: Εγκατάσταση αφρώδους γυαλιού σε τοίχους και 9% νικέλιο.



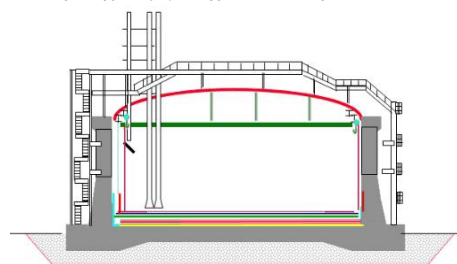
Βήμα 12: Εγκατάσταση σωληνώσεων, οργάνων και των ηλεκτρονικών. Υδραυλικοί έλεγχοι.



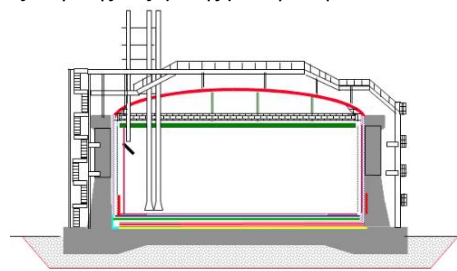
Βήμα 13: Εγκατάσταση σωληνώσεων, οργάνων και των ηλεκτρονικών. Εκτέλεση υδροστατικών ελέγχων.



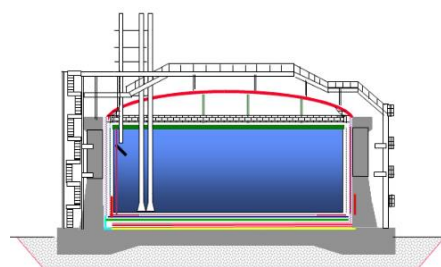
Βήμα 14: Άδειασμα και καθάρισμα του πυθμένα της εσωτερικής δεξαμενής από το νερό.



Βήμα 15: Μόνωση του κελύφους της εσωτερικής δεξαμενής και του αναρτώμενου καταστρώματος. Συμπλήρωση του κενού χώρου μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής δεξαμενής με περλίτη.



Βήμα 16: Γέμισμα της δεξαμενής με ΥΦΑ



1.3.3 Συγκόλληση

Σχεδόν για όλες τις συγκολλητές δεξαμενές, τα διάφορα τμήματα κατασκευάζονται στο εργοστάσιο και μεταφέρονται στο εργοτάξιο όπου συναρμολογούνται και συγκολλούνται. Ζητούμενο είναι να περιοριστούν οι συγκολλήσεις που θα χρειαστεί να πραγματοποιηθούν στο ύπαιθρο λόγω της ευαισθησίας της διαδικασίας της συγκόλλησης στις καιρικές συνθήκες. Οι κύριες μέθοδοι συγκόλλησης είναι οι ακόλουθες:

- Συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου με επενδυμένα ηλεκτρόδια: Το ηλεκτρόδιο αποτελείται από τον πυρήνα και την επένδυση. Κατά τη συγκόλληση ο πυρήνας λιώνει δημιουργώντας τη ραφή, ενώ η επένδυση εξαερώνεται προστατεύοντας το τόξο και το υλικό απόθεσης πάνω στη ραφή.
- Συγκόλληση με αδρανές / ενεργό αέριο: Αντί ηλεκτροδίου που χρησιμοποιείται στην προηγούμενη μέθοδο, σ' αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται σύρμα το οποίο προωθείται μέσω μηχανής συγκόλλησης. Η διαφορά μεταξύ συγκολλήσεως με αδρανές ή ενεργό αέριο είναι ότι στην πρώτη το προστατευτικό αέριο είναι αργό ή ήλιο ενώ στην τελευταία είναι διοξείδιο του άνθρακα.

- Συγκόλληση βυθιζόμενου τόξου: Όπως και στην συγκόλληση με αέρια το τόξο δημιουργείται μεταξύ ενός σύρματος και του συγκολλούμενου μετάλλου, αλλά αντί αερίου, χρησιμοποιείται κονία για την προστασία από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Οι συγκολλήσεις μπορούν να γίνονται χειροκίνητα (από το συγκολλητή που τοποθετεί το ηλεκτρόδιο στη σωστή θέση και το αντικαθιστά μόλις τελειώσει), ημι-αυτόματα (με τη χρήση πιστολιού που τροφοδοτεί το ηλεκτρόδιο) ή αυτόματα (χωρίς κάποιο χειριστή).

Η κοπή των μεταλλικών πλακών γίνεται με διάφορες μεθόδους, όπως η θερμική κοπή με φλόγα οξυγόνου ή με τόξο πλάσματος. Σε οποιαδήποτε από τις δύο μεθόδους χρησιμοποιηθεί, το μέταλλο κόβεται στο επιθυμητό μέγεθος και διαμορφώνονται οι άκρες του (εξομαλύνονται και καθαρίζονται από τη σκωρία) ώστε να είναι δυνατή η συγκόλληση του στη συνέχεια. Άλλες μέθοδοι για την κοπή μετάλλων είναι η χρήση μηχανημάτων laser και η υδροκοπή (κοπή μέσω μιας δέσμης νερού μικρής διαμέτρου που εκτοξεύεται με πολύ μεγάλη πίεση στο μέταλλο). Τα ελάσματα (μονής ή διπλής καμπυλότητας) που χρησιμοποιούνται σε συγκολλητές δεξαμενές μορφώνονται με ψυχρή έλαση.

1.3.4 Θεμελίωση

Για τη θεμελίωση είναι σημαντικό να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος εδάφους που θα είναι ικανός να παραλάβει όλα τα φορτία της κατασκευής, χωρίς να υφίσταται μεγάλες καθιζήσεις και να αντιστέκεται στην ολίσθηση και την ανατροπή. Τα ιδανικά εδάφη για τη θεμελίωση δεξαμενών είναι τα αμμώδη με μεσαία προς υψηλή σχετική πυκνότητα και στιφρές άργιλοι. Ο τύπος της θεμελίωσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τα φορτία, την τοπογραφία και την παρουσία άλλων κατασκευών κοντά στο σημείο κατασκευής της δεξαμενής. Οι καθιζήσεις (ολικές και σχετικές), όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, θα πρέπει να είναι περιορισμένες λόγω της ευαισθησίας των δεξαμενών σε αυτές. Η μέγιστη προτεινόμενη τιμή για την ολική και τη σχετική καθίζηση είναι 5 cm και 2,5 cm αντίστοιχα. Για οικονομικούς λόγους οι επιφανειακές θεμελιώσεις προτιμούνται όταν αυτό είναι δυνατό. Οι βαθιές θεμελιώσεις είναι κατάλληλες στην περίπτωση χαλαρών άμμων και μαλακών αργίλων ή όταν έχουν εντοπιστεί κοιλώματα, αμμώδη ρευστοποιήσιμα εδάφη ή υλεις με μεγάλη υγρασία που είναι πιθανόν να στερεοποιηθούν υπό την επίδραση των φορτίων.

1.3.4.1 Επιφανειακές θεμελιώσεις

Οι επιφανειακές θεμελιώσεις είναι οι πιο αποδοτικές όσον αφορά το κόστος. Συνήθως αποτελούνται από μεμονωμένα πέδιλα ή πλάκα γενικής κοιτόστρωσης. Για τις επίγειες δεξαμενές που μελετούνται η θεμελίωση μπορεί να αποτελείται και από δακτυλιοειδή πλάκα. Τα πέδιλα τοποθετούνται σε τέτοιο βάθος ώστε οι τάσεις επαφής να είναι στα επιτρεπόμενα όρια και οι καθιζήσεις να είναι ανεκτές. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι επιφανειακές θεμελιώσεις είναι προτιμότερες εκτός αν το έδαφος έχει μειωμένη φέρουσα ικανότητα γεγονός που θα απαιτούσε πέδιλα μεγάλων διαστάσεων. Η ύπαρξη μεγάλων πεδίων μπορεί να οδηγήσει σε επικάλυψη των βολβών των τάσεων των μεμονωμένων πεδίων και κατ' επέκταση σε μεγάλες καθιζήσεις. Ο υπολογισμός των διαστάσεων των πεδίων είναι μια επαναληπτική διαδικασία. Η επιφάνειά τους προσδιορίζεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τις φορτίσεις, χωρίς συντελεστές ασφαλείας, ώστε να υπολογιστούν οι πιέσεις επαφής κάτω από το θεμέλιο. Το πάχος του πεδίου, το βάθος τοποθέτησής του και οι διαστάσεις του επιλέγονται ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια ισορροπίας και σταθερότητας.

1.3.4.2 Θεμελιώσεις με πασσάλους

Όταν το έδαφος θεμελίωσης έχει μικρή φέρουσα ικανότητα ή υφίσταται μεγάλες καθιζήσεις όταν φορτίζεται είναι απαραίτητο η θεμελίωση να γίνει με πασσάλους σε μεγαλύτερο βάθος μέχρι το υποκείμενο ανθεκτικότερο στρώμα εδάφους ή το βραχώδες υπόβαθρο. Οι πάσσαλοι οφείλουν την αντοχή τους στην πλευρική τριβή ή και στην αντοχή του εδάφους στην αιχμή τους ανάλογα με το είδος του εδάφους και το μήκος έμπηξης του στο έδαφος. Μπορεί να είναι προκατασκευασμένοι (από ξύλο, προεντεταμένο σκυρόδεμα ή χάλυβα) ή να σκυροδετούνται επί τόπου όταν η μεταφορά τους μπορεί να προκαλέσει προβλήματα λόγω των δονήσεων.

Η φέρουσα ικανότητα των πασσάλων προκύπτει από το άθροισμα της αντοχής λόγω πλευρικής τριβής και της αντοχής αιχμής. Ο προσδιορισμός των επιμέρους αντοχών είναι διαφορετικός για άμμους και αργίλους. Η αντοχή της πασσαλοομάδας επηρεάζεται από την απόσταση μεταξύ των πασσάλων. Η μεγάλη απόσταση έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση μεγαλύτερου αριθμού πασσάλων ενώ η μικρή απόσταση μεταξύ των πασσάλων μπορεί να μειώσει την απόδοση της ομάδας σε σχέση με την απόδοση των μεμονωμένων πασσάλων. Σύμφωνα με τους κανονισμούς της Αμερικανικής Εταιρείας Ύδρευσης (American Water Works Association) η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των κέντρων των πασσάλων αιχμής είναι ίση με τρεις φορές τη διάμετρο τους ενώ για τους πασσάλους τριβής η απόσταση αυτή είναι μεγαλύτερη.



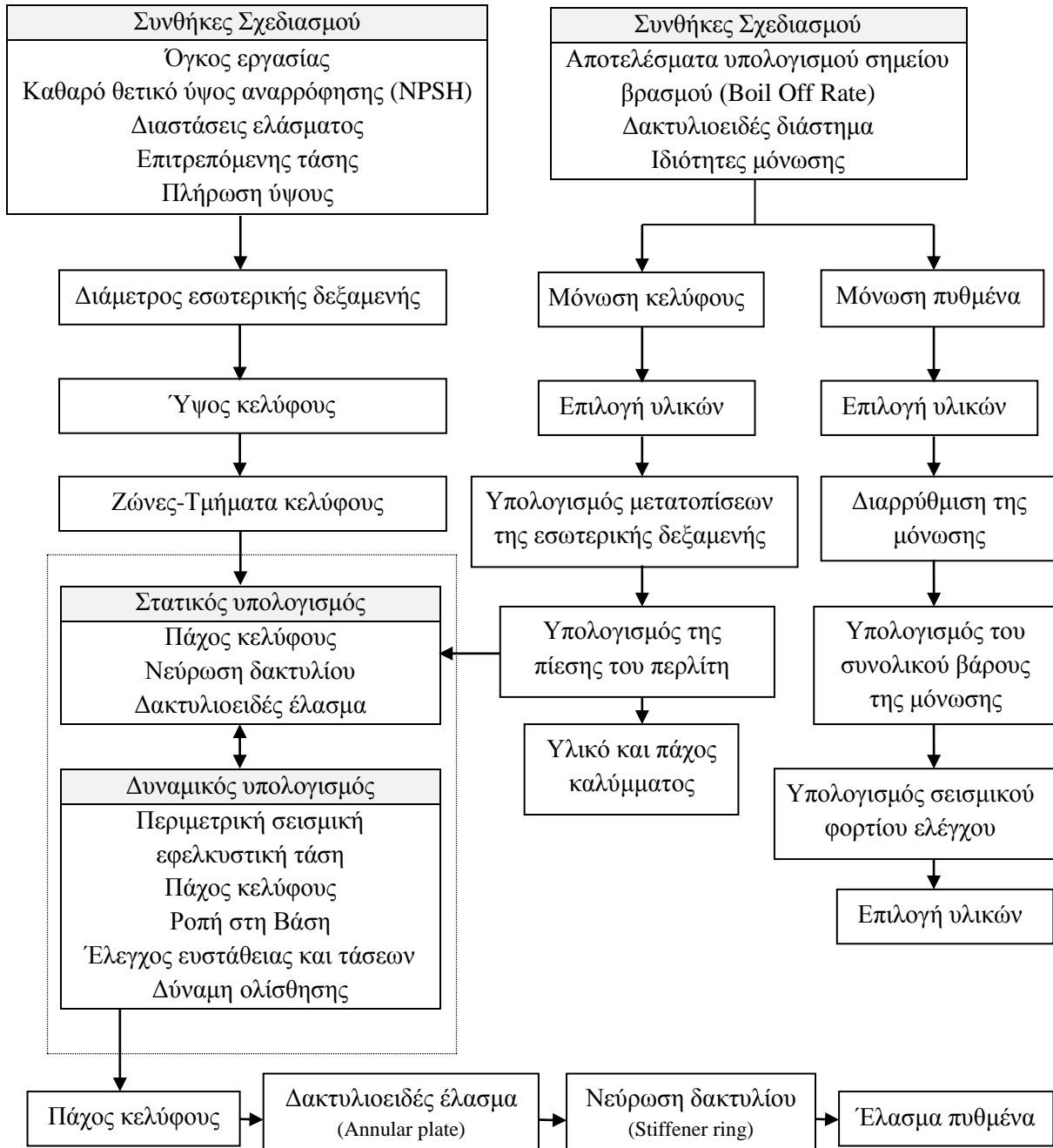
Σχήμα 1.17α: Δεξαμενή θεμελιωμένη με πασσάλους.



Σχήμα 1.17β: Δεξαμενή θεμελιωμένη σε πλάκα με εφόδρανα.

1.3.5 Σχεδιασμός εσωτερικής δεξαμενής

Οι κύριοι κώδικες σχεδιασμού που εφαρμόζονται για το σχεδιασμό της εσωτερικής δεξαμενής είναι API 620 και NFPA 59A. Το σχήμα 1.18, μας δείχνει μια γενική διαδικασία για τον σχεδιασμό της εσωτερικής δεξαμενής χάλυβα 9% νικέλιο.



Σχήμα 1.18: Γενική διαδικασία για τον σχεδιασμό της εσωτερικής δεξαμενής χάλυβα 9% νικέλιο.

➤ Στατικός υπολογισμός

Ένας πρόσθετος νεκρός χώρος 2m για την εσωτερική αντλία NPSH έχει δοθεί στον πυθμένα της εσωτερικής δεξαμενής και η επιτρεπόμενη τιμή ύψους για το σεισμικό κύμα καθώς και ένας ελεύθερος κενός χώρος πάνω από τη στάθμη σχεδιασμού του υγρού προσδιορίζουν το τελικό ύψος της εσωτερικής δεξαμενής. Το πάχος του χαλύβδινου 9% νικέλιο ελάσματος του κελύφους της εσωτερικής δεξαμενής έχει σχεδιαστεί:

- για το πλήρες ύψος του ΥΦΑ που αντιστοιχεί στο επίπεδο σχεδιασμού του υγρού,
- για μερικό έλεγχο υδροστατικών φορτίων (γέμισμα της δεξαμενής με νερό) που αντιστοιχεί σε 1,25 φορές το πλήρες ύψος του ΥΦΑ.

Η πίεση λειτουργικότητας του ατμού εξισώνεται και στις δύο πλευρές του τοιχώματος της εσωτερικής δεξαμενής δεδομένου ότι η εσωτερική δεξαμενή έχει μια ανοικτή κορυφή.

➤ Αντισεισμικός Σχεδιασμός

Η εσωτερική δεξαμενή σχεδιάζεται ως μη αγκυρωμένη (unanchored) και μη εντεινόμενη (unstrained) για να αντισταθεί στον OBE (Operating Basis Earthquake, μικρή συχνότητα εμφάνισης σεισμικής δράσης με περίοδο επαναφοράς 475 χρόνια) και στον SSE (Safe Shutdown Earthquake, πολύ σπάνιοι σεισμοί με περίοδο επαναφοράς 4975 χρόνια) σε επιτάχυνση σχεδιασμού που δίνεται στα βασικά στοιχεία του σχεδιασμού.

➤ Φορτία κατά την περίμετρο

Οι περιμετρικές δυνάμεις στο κέλυφος της εσωτερικής δεξαμενής είναι ένας συνδυασμός της στατικής πίεσης λόγω του υγρού, η ωστική (impulsive) πίεση λόγω της δράσης του ωστικού συστατικού του υγρού, μεταγωγικής (convective) πίεση λόγω της δράσης του μεταγωγικού συστατικού του υγρού, και η κατακόρυφη πίεση που προκαλείται από την κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής φόρτισης.

➤ Αντίσταση στην ανατροπή

Ο υπολογισμός της αντίστασης για την ανατροπή προκαλείται από την δράση του περιεχόμενου υγρού στο δακτυλιοειδές έλασμα όπου το πλάτος και το πάχος του δακτυλιοειδούς ελάσματος βασίζονται στις απαιτήσεις του API 620 (American Petroleum Institute) προσάρτημα L παράγραφος L4.1 και L4.2.

➤ Συμπίεση κελύφους

Η συμπίεση κελύφους υπολογίζεται με τη διαδικασία του API 620 προσάρτημα L παράγραφος L.5.1 για μη αγκυρωμένες δεξαμενές. Η μέγιστη επιτρεπόμενη συμπίεση κελύφους είναι σύμφωνα με το API 620 L.5.3.

➤ Κυματισμός λόγω σεισμού

Το ύψος κύματος λόγω σεισμού υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον τύπο από το API 620 L.8. Μια προσθήκη για το κέλυφος ακολουθείται σύμφωνα με την απαίτηση του API 620 παράγραφος L.8.1.

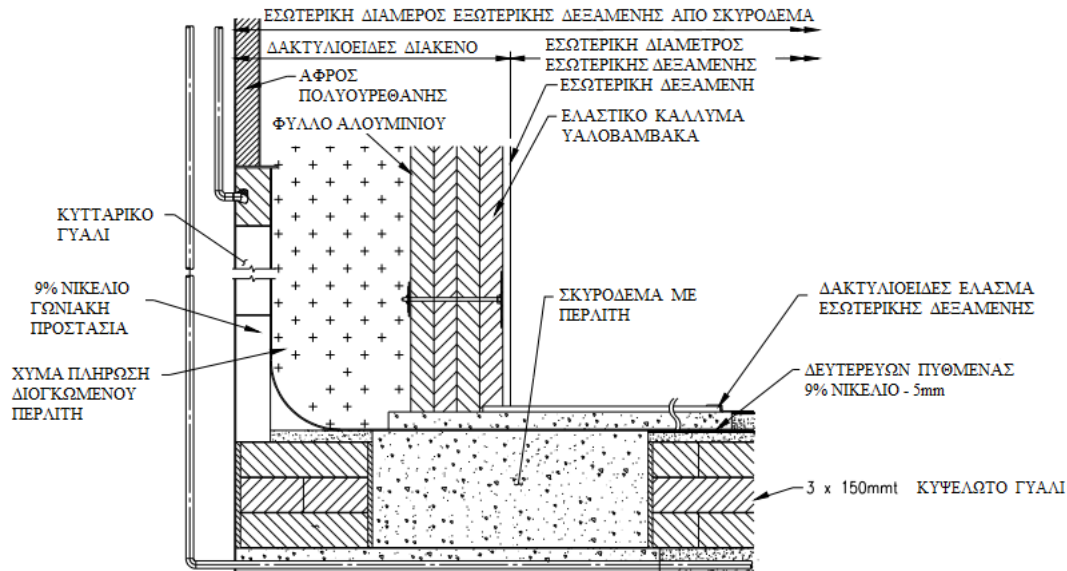
➤ Δευτερέων πυθμένας

Εάν ο δευτερέων πυθμένας βρίσκεται στην κορυφή της μόνωσης βάσης, θα είναι σχεδόν στην ίδια θερμοκρασία με τον πυθμένα της εσωτερικής δεξαμενής εν λειτουργία. Στην περίπτωση διαρροής κάτω από τον εσωτερικό πυθμένα, δεν θα παρουσιαστεί θερμικό σοκ στον δευτερέων πυθμένα. Εάν ο δευτερέων πυθμένας βρίσκεται στη μέση της μόνωσης βάσης, θα είναι σε υψηλότερη θερμοκρασία από τον πυθμένα της εσωτερικής δεξαμενής εν λειτουργία. Διαρροή από τον πυθμένα της εσωτερικής δεξαμενής θα δώσει ένα τοπικό θερμικό σοκ στον δευτερέων πυθμένα. Σε αυτή την περίπτωση πιο σοβαρές εκτιμήσεις και συντελεστές πρέπει να ληφθούν, από τις απαιτήσεις του κώδικα για την επιτρεπόμενη τάση.

➤ Γωνιακό σύστημα προστασίας

Σε περίπτωση διαρροής από την εσωτερική δεξαμενή, ΥΦΑ μπορεί να συσσωρεύεται στο δακτυλιοειδή χώρο μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής δεξαμενής με αποτέλεσμα να ψύξει το γωνιακό τοίχο του πυθμένα. Προκειμένου να αποφευχθεί ράγισμα από το ΥΦΑ, του κάτω τμήματος

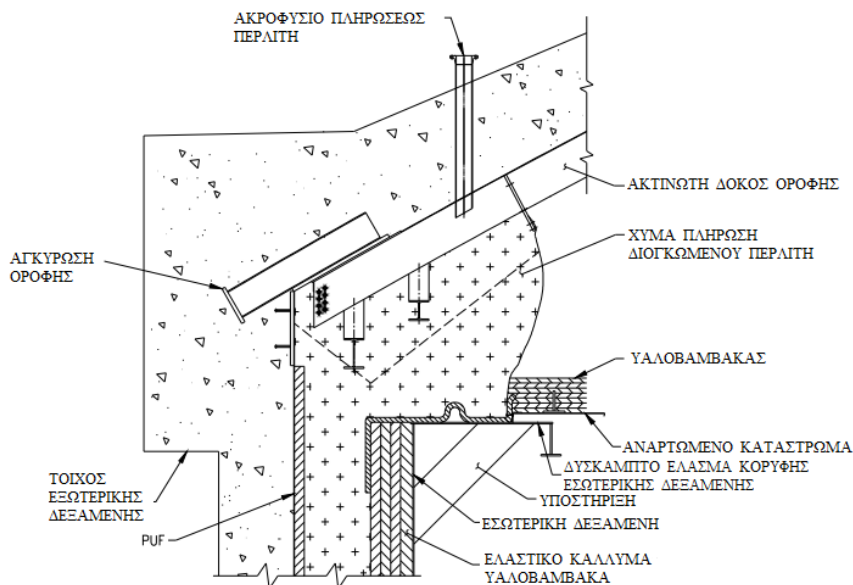
του τοίχου από σκυρόδεμα, θα τοποθετείται ένα στεγανό σύστημα προστασίας θερμικά απομονωμένο, με κυψελωτό μονωτικό γυαλί και θωρακισμένο με χαλύβδινα 9% νικέλιο ελάσματα όπως φαίνεται στο σχήμα 1.19. Ο σχεδιασμός θα πρέπει να διεξάγεται με τη χρήση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, λαμβάνοντας υπόψη τα φορτία λόγω πίεσης και τις θερμικές τάσεις / μετατοπίσεις. Η εξωτερική δεξαμενή πρέπει να είναι σε θέση να περιέχει το πλήρες περιεχόμενο της εσωτερικής δεξαμενής. Μικρές και μεγάλες περιπτώσεις διαρροής πρέπει να ελέγχονται με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και συνδυασμένες με τη μέγιστη πίεση στην ανάλυση.



Σχήμα 1.19: Μόνωση και γωνιακό σύστημα προστασίας.

➤ Αναρτώμενο κατάστρωμα

Το αναρτημένο κατάστρωμα είναι σχεδιασμένο να αντέχει τα φορτία του ίδιου βάρους του, το βάρος της μόνωσης, της διαφορικής πίεσης ατμών, την κυκλοφορία των κατασκευών και τη σεισμική φόρτιση. Ο σχεδιασμός γίνεται με βάση το British Standard Code Practice CP 118. Χρησιμοποιείται ένα αναρτώμενο κατάστρωμα από αλουμίνιο με ομόκεντρα δύσκαμπτα δακτυλιοειδές ελάσματα και το πάχος του ελάσματος καταστρώματος είναι 5mm. Το έλασμα καταστρώματος απομονώνεται θερμικά με 6 στρώσεις από υαλοβάμβακα (fiberglass blanket).



Σχήμα 1.20: Διάταξη της γωνίας στην κορυφή της δεξαμενής.

➤ Εξαρτήματα συναρμογής οροφής

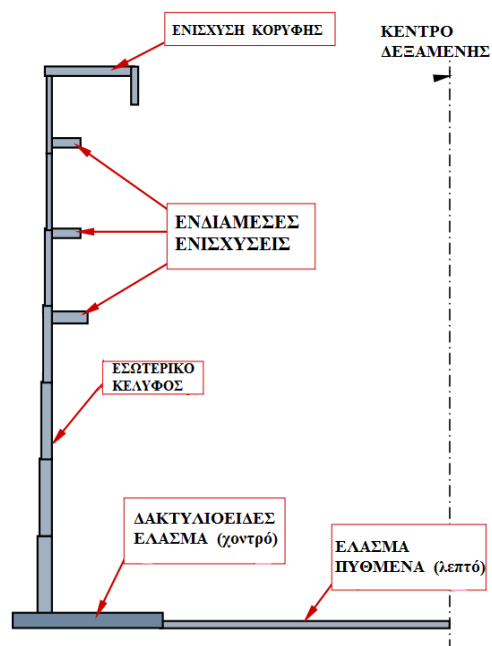
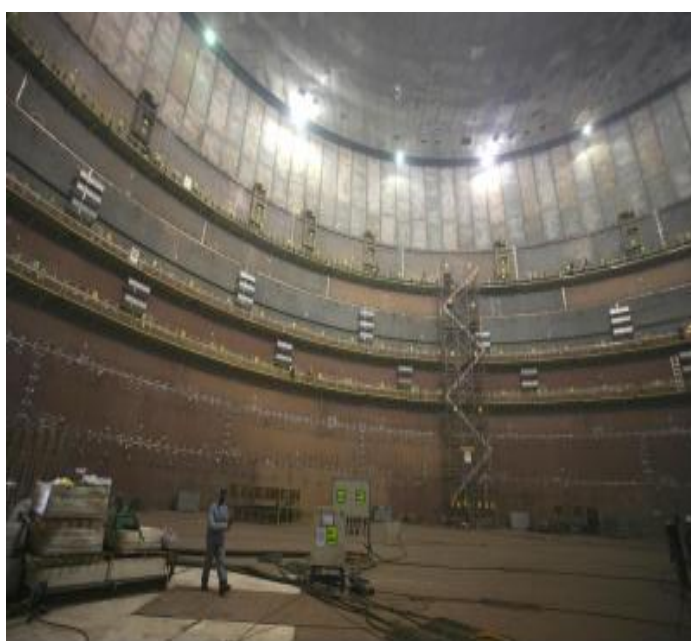
Η ενίσχυση των ελασμάτων οροφής για τα εξαρτήματα συνάρμοσης οροφής είναι σχεδιασμένα σύμφωνα με τους κανόνες του API 620. Οι φορτίσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη περιλαμβάνουν το ίδιο βάρος, το βάρος του προϊόντος, σεισμικά φορτία, φορτία που προκύπτουν από τις κινήσεις του υγρού λόγω του σεισμού και φορτία ανέμου επί των συναφών εξωτερικών και εσωτερικών σωληνώσεων.

➤ Επικάλυψη οροφής

Ο σχεδιασμός της επικάλυψης της οροφής γίνεται σύμφωνα με τους κανόνες του API 620. Η πίεση σχεδιασμού για την επικάλυψη οροφής θα είναι η μέγιστη πίεση αέρα είναι της ανέγερσης (air-lift) ή κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης της στέγης.

➤ Θερμικός σχεδιασμός

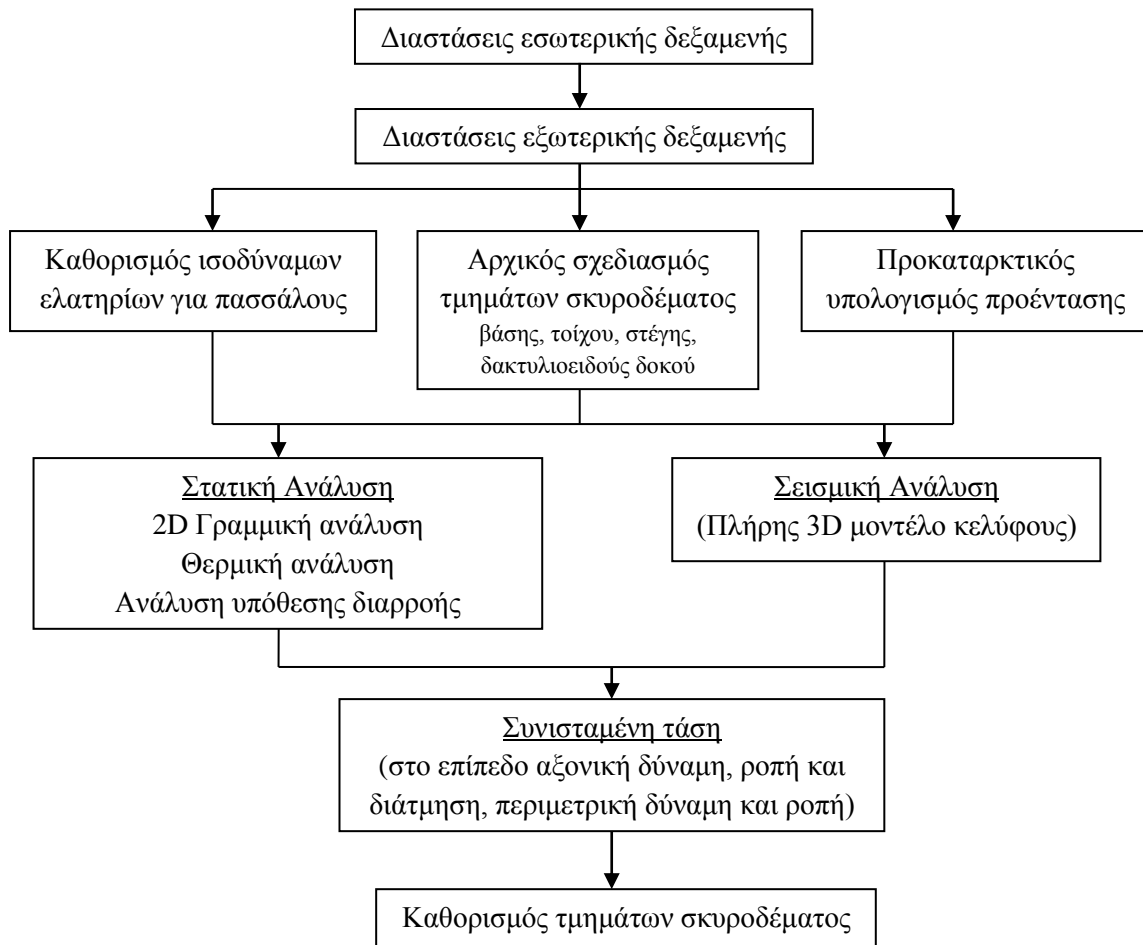
Το σύστημα θερμικής μόνωσης της δεξαμενής έχει σχεδιαστεί για να έχει ένα ποσοστό εξατμίσεων λιγότερο από το 0,05% του πλήρους περιεχομένου δεξαμενής ανά ημέρα οφειλόμενο στην διαρροή ατμοσφαιρικής θερμότητας. Ο υπολογισμός διαρροής θερμότητας βασίζεται σε μια μέγιστη θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα και τη θερμοκρασία σχεδιασμού του προϊόντος μετάλλου δηλαδή στους -170°C . Η θερμοκρασία της πλάκα σκυροδέματος στη βάση υποτίθεται ότι είναι 10°C λόγω της θέρμανσης πυθμένα και επίσης η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνεται υπόψη.



Σχήμα 1.21: Κατασκευή της εσωτερικής δεξαμενής.

1.3.6 Σχεδιασμός εξωτερικής δεξαμενής

Το εξωτερικό περίβλημα αποτελείται από μία εντελώς κλειστή μονολιθική κατασκευή από σκυρόδεμα- μια πλάκα για βάση, ένα κυλινδρικό τοίχο και την οροφή. Η εξωτερική δεξαμενή από σκυρόδεμα είναι σχεδιασμένη για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς φορτίσεων, κανονικές και έκτακτης ανάγκης, φορτίσεις οι οποίες ενδέχεται να προκύψουν κατά την κατασκευή, κατά τις δοκιμές, κατά τη διάρκεια σε λειτουργία και κατά τη συντήρηση της δεξαμενής. Οι συνδυασμοί φορτίων σχεδιασμού περιλαμβάνουν τους πιο σοβαρούς συνδυασμούς φορτίων. Η γενική διαδικασία για τον σχεδιασμό της εξωτερικής δεξαμενής παρουσιάζεται στο σχήμα 1.22 .



Σχήμα 1.22: Γενική διαδικασία για τον σχεδιασμό της εξωτερικής δεξαμενής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΦΟΡΤΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα φορτία που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στους υπολογισμούς κατά τον σχεδιασμό κυκλικών κατακόρυφων μεταλλικών δεξαμενών.

Λόγω του τρόπου κατασκευής της δεξαμενής και συγκεκριμένα του μονωτικού υλικού (σύστημα μόνωσης δεξ σχήμα 1.19 και αποτελείται από 95% από αέρα) που παρεμβάλλεται μεταξύ του σκυροδέματος (εξωτερική δεξαμενή) και της μεταλλικής δεξαμενής, θεωρείται ότι δεν υπάρχει μεταφορά οριζόντιων στατικών δυνάμεων από το εξωτερικό περίβλημα προς το εσωτερικό. Ως εκ τούτου σε στατικές συνθήκες δεν θα ληφθούν υπόψη οριζόντιες δυνάμεις, που θα δρουν επί της μεταλλικής δεξαμενής στην εξωτερική της επιφάνεια.

2.1 Ίδιο βάρος

Στους υπολογισμούς θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο βάρος των διαφόρων στοιχείων της δεξαμενής και το ίδιο βάρος του περιεχόμενου σε αυτήν υγρού.

2.2 Υδροστατικές πιέσεις

Η πίεση p που ασκεί το υγρό στα τοιχώματα της δεξαμενής μεταβάλλεται γραμμικά με το βάθος και προκύπτει από τη σχέση (2.1) όπου γ είναι το ειδικό βάρος του υγρού και z το βάθος από την επιφάνεια. Η πυκνότητα ρ (από την οποία προκύπτει και το ειδικό βάρος γ) των διαφόρων υγρών που μπορεί να περιέχονται στις δεξαμενές δίνεται στο παράρτημα Α το EN 1991-1-1.

$$p(z) = \gamma \cdot z \quad (2.1)$$

2.3 Σεισμική διέγερση

Οι δεξαμενές αποθήκευσης είναι κατασκευές που πρέπει να παραμένουν λειτουργικές μετά από κάποιο σεισμό και έτσι είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η επίδραση του σεισμού τόσο στην ίδια την κατασκευή όσο και στο υγρό που περιέχει. Η επίδραση του σεισμού έχει διάφορες μορφές. Στις μεταλλικές δεξαμενές οι πιο συνήθεις μορφές αστοχίας είναι ο λυγισμός των τοιχωμάτων λόγω των μεγάλων θλιπτικών τάσεων και η ανατροπή της δεξαμενής. Επιπλέον ο κυματισμός που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια του σεισμού μπορεί να έχει τέτοιο ύψος που να φτάσει στην οροφή της δεξαμενής προκαλώντας του ζημιά. Επιπρόσθετα είναι δυνατόν να συμβεί ολίσθηση εάν η τέμνουσα βάσης ξεπεράσει την τριβή.

2.3.1 Αδρανειακή δύναμη στο κέλυφος της δεξαμενής

Για τις μεταλλικές δεξαμενές οι αδρανειακές δυνάμεις που δρουν στο κέλυφος λόγω του ίδιου του βάρους είναι μικρές σε σχέση με τις υδροδυναμικές πιέσεις και μπορούν να αμεληθούν, σύμφωνα με τον κανονισμό.

2.3.2 Υδροδυναμικές πιέσεις

Για τον υπολογισμό των επιπρόσθετων πιέσεων που δημιουργούνται λόγω της σεισμικής διέγερσης χρησιμοποιείται το μέρος 4 του EN 1998. Η διαδικασία για τη σεισμική ανάλυση δεξαμενών περιγράφεται στο παράρτημα Α, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δεξαμενές με κυλινδρικό σχήμα, κατακόρυφο άξονα και κυκλική ή ορθογωνική διατομή, με άκαμπτη ή εύκαμπτη θεμελίωση, στην οποία η δεξαμενή είναι μερικώς ή πλήρως αγκυρωμένη. Λεπτομερής περιγραφή της διαδικασίας δίνεται από τον κανονισμό μόνο για την απλή περίπτωση των άκαμπτων δεξαμενών, αγκυρωμένων σε άκαμπτη βάση. Για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις που καθιστούν το πρόβλημα πιο περίπλοκο, όπως η περίπτωση της εύκαμπτης δεξαμενής ή όταν λαμβάνονται υπ' όψιν τα χαρακτηριστικά του εδάφους θεμελίωσης, δίνονται προσεγγιστικές λύσεις.

2.3.2.1 Κατακόρυφες άκαμπτες κυκλικές δεξαμενές

Οριζόντια διέγερση

Η πλήρης λύση της εξίσωσης Laplace που διέπει την κίνηση του υγρού σε μια άκαμπτη κυλινδρική δεξαμενή εκφράζεται ως το άθροισμα δύο ξεχωριστών συνιστωσών, της ωστικής (impulsive) και της μεταγωγικής (convective). Η ωστική συνιστώσα ικανοποιεί τις συνοριακές συνθήκες (στα τοιχώματα και στον πυθμένα της δεξαμενής οι ταχύτητες της δεξαμενής και του υγρού είναι συμβατές). Η ωστική συνιστώσα δεν αρκεί για την περιγραφή της κίνησης διότι δίνει μηδενική πίεση στην αρχική θέση της ελεύθερης -υπό στατικές συνθήκες- επιφάνειας, κάτι το οποίο δεν ισχύει υπό τις δυναμικές συνθήκες που εξετάζονται. Για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου της δεξαμενής ορίζεται ένα κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων r, z, θ , όπου z είναι ο κατακόρυφος άξονας, με αρχή των συντεταγμένων στο κέντρο του πυθμένα.

Η ωστική πίεση, p_i σε κάθε θέση του υγρού υπολογίζεται από τη σχέση (2.2).

$$p_i(\xi, \zeta, \theta, t) = C_i(\xi, \zeta) \cdot \rho \cdot H \cdot \cos \theta \cdot \alpha_g(t) \quad (2.2)$$

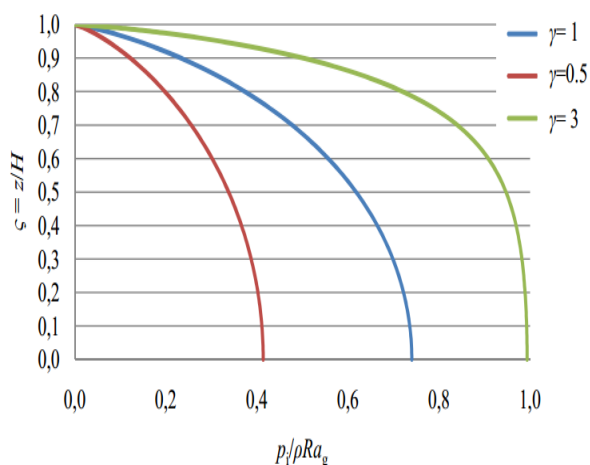
όπου $\xi=r/R$ και $\zeta=z/H$ είναι οι αδιάστατες συντεταγμένες (R η ακτίνα της δεξαμενής και H το ύψος από τη βάση μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού), t είναι ο χρόνος, ρ η πυκνότητα του υγρού, $\gamma=H/R$ και $\alpha_g(t)$ είναι η επιτάχυνση του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο. Οι συντελεστές C_i και v_n δίνονται από τις σχέσεις (2.3) και (2.4).

$$C_i(\xi, \zeta) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{I_1'(v_n/\gamma) v_n^2} \cos(v_n \zeta) I_1\left(\frac{v_n}{\gamma} \xi\right) \quad (2.3)$$

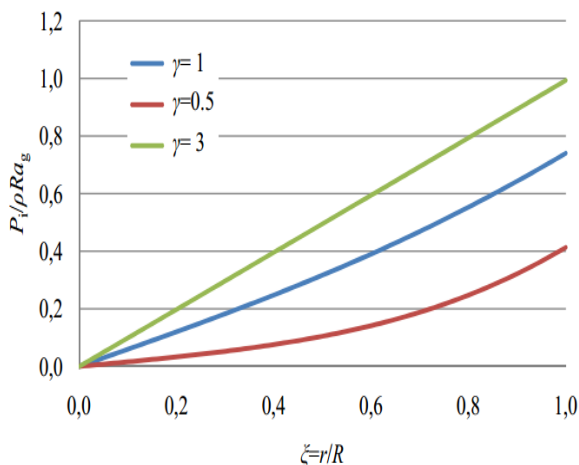
$$v_n = \frac{2n+1}{2} \pi \quad (2.4)$$

I_1 και I_1' είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel και η παράγωγός της, αντίστοιχα.

Η ωστική πίεση (κανονικοποιημένη ως προς $\rho R \alpha_g$) στα τοιχώματα της δεξαμενής ($\xi=1$) και $\cos \theta = 1$ (δηλ. στο επίπεδο της οριζόντιας σεισμική δράση) σε συνάρτηση με την κατακόρυφη απόσταση από τον πυθμένα, φαίνεται στο σχήμα (2.1) για διάφορες τιμές της λυγηρότητας γ . Στο σχήμα (2.2) φαίνεται και η κατανομή της ωστικής πίεσης στον πυθμένα της δεξαμενής. Για μεγάλες τιμές του γ η κατανομή πίεσης στον πυθμένα γίνεται γραμμική.



Σχήμα 2.1: Καθ' ύψος μεταβολή της ωστικής πίεσης για τρεις τιμές της λυγηρότητας $\gamma = H/R$



Σχήμα 2.2: Ακτινική μεταβολή ωστικής πίεσης στον πυθμένα της δεξαμενής.

Η ωστική τέμνουσα βάσης δίνεται από τη σχέση:

$$Q_i(t) = m_i A_g(t) \quad (2.5)$$

Όπου m_i είναι η μάζα του περιεχόμενου υγρού που κινείται μαζί με τα τοιχώματα (ωστική μάζα) και προκύπτει από τη σχέση:

$$m_i = m 2\gamma \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_1(v_n/\gamma)}{v_n^3 I_1'(v_n/\gamma)} \quad (2.6)$$

και $m = \rho \pi R^2 H$ είναι η συνολική μάζα του υγρού.

Η ωστική ροπή αμέσως κάτω από τη βάση της δεξαμενής δίνεται από τη σχέση:

$$M_i'(t) = m_i h_i' A_g(t) \quad (2.7)$$

η M_i' περιλαμβάνει τις συνεισφορές των πιέσεων επί των τοιχωμάτων από την έκφραση (2.2) και εκείνων επί του πυθμένα της δεξαμενής.

$$\text{όπου} \quad h_i' = H \frac{\frac{1}{2} + 2\gamma \sum_{n=0}^{\infty} \frac{v_n + 2(-1)^{n+1} I_1(v_n/\gamma)}{v_n^4 I_1'(v_n/\gamma)}}{2\gamma \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_1(v_n/\gamma)}{v_n^3 I_1'(v_n/\gamma)}} \quad (2.8)$$

Στον ευρωκώδικα EN 1998-4 (A.2.1.2) στο σχήμα A.2 μας δίνει τους λόγους m_i/m , h_i'/H και h_i/H ως συνάρτηση της λυγηρότητας της δεξαμενής.

Η μεταγωγική συνιστώσα της πίεσης είναι ίση με:

$$p_c(\xi, \zeta, \theta, t) = \rho \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \cosh(\lambda_n \gamma \zeta) J_1(\lambda_n \xi) \cos \theta A_{cn}(t) \quad (2.9)$$

$$\text{όπου} \quad \psi_n = \frac{2R}{(\lambda_n^2 - 1) J_1(\lambda_n) \cosh(\lambda_n \gamma)} \quad (2.10)$$

επίσης $\lambda_1 = 1,841$, $\lambda_2 = 5,331$, $\lambda_3 = 8,536$

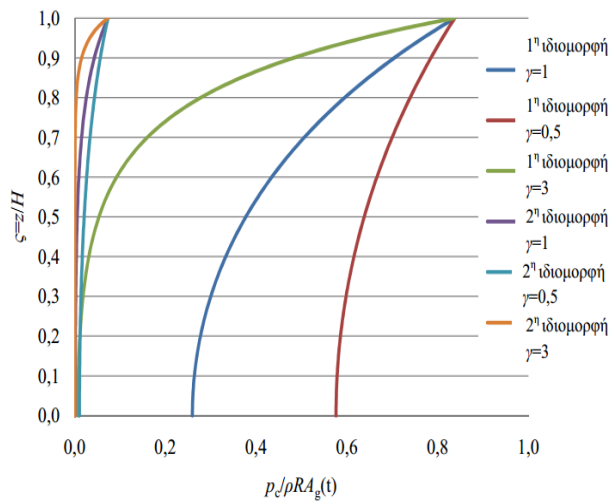
J_1 είναι η συνάρτηση Bessel πρώτης τάξης

και $A_{cn}(t)$ είναι η επιτάχυνση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή που έχει κυκλική συχνότητα ω_{cn} ίση με:

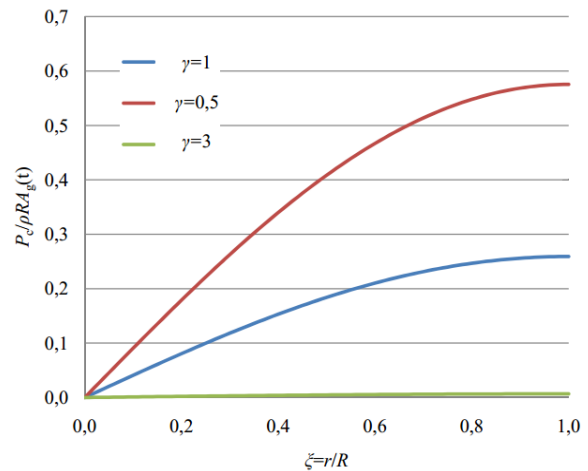
$$\omega_{cn} = \sqrt{g \frac{\lambda_n}{R} \tanh(\lambda_n \gamma)} \quad (2.11)$$

και συντελεστή απόσβεσης κατάλληλο για τη κυματική απόκριση του υγρού.

Η συνολική πίεση λόγω του κυματισμού (μεταγωγική συνιστώσα) είναι το άθροισμα άπειρων ιδιομορφικών όρων, ο καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε μια κυματομορφή του ταλαντούμενου υγρού. Συνήθως αρκεί μόνο η πρώτη ιδιομορφή και συχνότητα για τους υπολογισμούς. Η κατανομή των κυματικών πιέσεων σε συνάρτηση με το βάθος για τις δύο πρώτες ιδιομορφές φαίνεται στο σχήμα (2.3). Στο σχήμα αυτό φαίνεται η αμελητέα συνεισφορά της 2^{ης} ιδιομορφής. Στο σχήμα (2.4) απεικονίζεται η ακτινική μεταβολή της κυκλοφορούσας πίεσης για την πρώτη ιδιομορφή.



Σχήμα 2.3: Μεταβολή των δύο πρώτων ιδιομορφών της κυματικής πίεσης καθ' ύψος για διάφορες τιμές της λυγηρότητας γ .



Σχήμα 2.4: Ακτινική μεταβολή μεταγωγικής πίεσης στον πυθμένα της δεξαμενής για την 1^η ιδιομορφή.

Από το σχήμα (2.3) φαίνεται επίσης ότι η μεταγωγική πίεση έχει σημαντική τιμή στον πυθμένα σε δεξαμενές με μικρό λόγο γ ενώ για λυγηρές δεξαμενές η επίδραση του κυματισμού είναι αμελητέα. Ακόμη η μεταγωγική πίεση αυξάνεται από τον πυθμένα στην επιφάνεια σε αντίθεση με την ωστική πίεση. Από το σχήμα A.3b του EN 1998-4 φαίνεται πως οι ιδιοσυχνότητες του κυματισμού είναι σχεδόν ανεξάρτητες της παραμέτρου γ όταν αυτή είναι μεγαλύτερη από 1. Σε αυτήν την περίπτωση η 1^η ιδιοσυχνότητα είναι περίπου ίση με

$$\omega_{c1} = 4,2/\sqrt{R} \quad (R \text{ σε m}) \quad (2.12)$$

Η τέμνουσα βάσης λόγω του κυματισμού προκύπτει από τη σχέση:

$$Q_c(t) = \sum_{n=1}^{\infty} m_{cn} A_{cn}(t) \quad (2.13)$$

δηλαδή είναι το άθροισμα των δυνάμεων που συνεισφέρουν οι άπειροι ταλαντωτές με μάζα m_{cn} που είναι συνδεδεμένοι στην άκαμπτη δεξαμενή με ελατήρια ακαμψίας $K_n = \omega_n^2 m_{cn}$ όταν το έδαφος υπόκειται σε οριζόντια διέγερση $A_g(t)$ και οι μάζες αποκρίνονται με επιτάχυνση $A_n(t)$.

Η n-οστή κυκλοφορούσα μάζα είναι ίση με

$$m_{cn} = m \frac{2 \tanh(\lambda_n \gamma)}{\gamma \lambda_n (\lambda_n^2 - 1)} \quad (2.14)$$

Η ροπή λόγω της κυκλοφορούσας μάζας, αμέσως κάτω από τη βάση της δεξαμενής προκύπτει από τη σχέση:

$$M'_c(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (m_{cn} A_{cn}(t)) h'_{cn} = \sum_{n=1}^{\infty} Q_{cn}(t) h'_{cn} \quad (2.15)$$

όπου h'_{cn} είναι το ύψος που πρέπει να εφαρμοστεί ο ταλαντωτής για να προκύψει η τιμή της ροπής M'_{cn} .

$$h'_{cn} = H \left(1 + \frac{2 - \cosh(\lambda_n \gamma)}{\lambda_n \gamma \sinh(\lambda_n \gamma)} \right) \quad (2.16)$$

Η ροπή λόγω της κυκλοφορούσας μάζας αμέσως πάνω από τη βάση της δεξαμενής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M_c(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (m_{cn} A_{cn}(t)) h_{cn} = \sum_{n=1}^{\infty} Q_{cn}(t) h_{cn} \quad (2.17)$$

και

$$h_{cn} = H \left(1 + \frac{2 - \cosh(\lambda_n \gamma)}{\lambda_n \gamma \sinh(\lambda_n \gamma)} \right) \quad (2.18)$$

Στα σχήματα A.4a και A.4b του EN 1988-4 απεικονίζεται η μεταβολή της μεταγωγικής μάζας και του ύψους h_c αντίστοιχα, των δύο πρώτων ιδιομορφών σε συνάρτηση με τη λυγηρότητα γ .

Το ύψος του κύματος λαμβάνοντας υπ' όψιν την 1^η ιδιομορφή είναι

$$d_{\max} = 0,84 \cdot R \cdot S_e(T_{c1})/g \quad (2.19)$$

όπου S_e είναι η ελαστική φασματική επιτάχυνση του υγρού που προκύπτει για κατάλληλη τιμή του συντελεστή απόσβεσης.

Η χρονιοιστορία της ολικής πίεσης είναι άθροισμα των χρονιοιστοριών της ωστικής πίεσης (που εξαρτάται από την επιτάχυνση $A_g(t)$) και της μεταγωγικής πίεσης (που εξαρτάται από την επιτάχυνση $A_{c1}(t)$, αν αγνοηθούν οι όροι ανώτερης τάξης). Για κάθε συνιστώσα όμως της πίεσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός συντελεστής συμπεριφοράς q λόγω της διαφοράς στην απορρόφηση ενέργειας. Συγκεκριμένα, δεν συμβαίνει απορρόφηση ενέργειας που να σχετίζεται με την μεταγωγική απόκριση (οπότε $q=1$), σε αντίθεση με την ωστική απόκριση (που μπορεί να συνοδεύεται από υστερητική απορρόφηση ενέργειας οπότε μπορεί να ληφθεί $q=1,5$ ή \star). Για την επαλληλία των μεγίστων των δύο συνιστωσών χρησιμοποιείται το άθροισμα των απολύτων τιμών των μεγίστων καθώς η ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων (SRSS) δίνει αποτελέσματα που δεν είναι συντηρητικά.

$\star = 2$ για μη αγκυρωμένη δεξαμενή, υπό τον όρο ότι πληρούνται οι κανόνες σχεδίου του EN 1993-4 -2:2006, ιδίως εκείνων που αφορούν το πάχος της πλάκας πυθμένα, η οποία θα πρέπει να είναι μικρότερη από ό,τι το πάχος του κάτω μέρους του περιβλήματος (δες EN 1998-4:2006, παράγραφο 4.4).

Η τέμνουσα δύναμη και η ροπή αμέσως πάνω από τη βάση της δεξαμενής χρησιμοποιούνται για των υπολογισμών των τάσεων στα τοιχώματα και στην ένωση τους με τη βάση. Λόγω της μεγάλης συχνότητας της ωστικής συνιστώσας και της αδράνειας των τοιχωμάτων για τον υπολογισμό της ροπής ανατροπής ως προς τη βάση της δεξαμενής μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο η μεταγωγική συνιστώσα.

Κατακόρυφη διέγερση

Η υδροδυναμική πίεση στα τοιχώματα λόγω κατακόρυφης επιτάχυνσης του εδάφους $A_v(t)$ δίνεται από τη σχέση

$$p_{vr}(\zeta,t)=\rho H(1-\zeta)A_v(t) \quad (2.20)$$

και δεν προκαλεί τέμνουσα δύναμη ή ροπή σε κανένα οριζόντιο επίπεδο της δεξαμενής λόγω της συμμετρίας περί τον άξονα z.

Για τον συνδυασμό της οριζόντιας και της κατακόρυφης διέγερσης υπολογίζονται οι δράσεις $(E_x+0,3E_z)$ και $(0,3E_x+E_z)$ ώστε να προκύψει ο δυσμενέστερη τιμή. Στην περίπτωση όμως που θα γίνει μη γραμμική στατική ανάλυση η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού μπορεί να αμεληθεί (EN1998-1, 4.3.3.5.2 (5)). Η υδροδυναμική πίεση που θα προκύψει από το συνδυασμό των δύο συνιστωσών θα προστεθεί στην υδροστατική πίεση στη μια πλευρά της δεξαμενής και θα αφαιρεθεί στην άλλη.

2.3.2.2 Κατακόρυφες εύκαμπτες κυκλικές δεξαμενές

Οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής δράσης

Στην πραγματικότητα οι μεταλλικές δεξαμενές δεν μπορούν να θεωρηθούν άκαμπτες. Στην περίπτωση των εύκαμπτων δεξαμενών η λύση της εξίσωσης Laplace προκύπτει ως άθροισμα τριών συνιστωσών: της ωστικής (impulsive), της κυματικής (sloshing) ή μεταγωγικής (convective) –όπως στις άκαμπτες δεξαμενές και της εύκαμπτης (flexible). Η τελευταία ικανοποιεί τη συνθήκη η ακτινική ταχύτητα του υγρού κατά μήκος των τοιχωμάτων να εξισορροπεί την ταχύτητα παραμόρφωσης του τοιχώματος καθώς και τις συνθήκες μηδενικής κατακόρυφης ταχύτητας στη βάση και μηδενικής πίεσης στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού. Η παραμόρφωση των τοιχωμάτων οφείλεται επιπλέον και στις κυματικές πιέσεις και άρα η «κυματική» και η «εύκαμπτη» συνιστώσα συνδέονται μεταξύ τους. Η σύνδεση αυτή είναι μικρή λόγω της διαφοράς στις συχνότητες των δύο κινήσεων και έτσι η «εύκαμπτη» συνιστώσα μπορεί να λαμβάνεται υπ' όψιν ανεξάρτητα από τις άλλες δύο, που υπολογίζονται όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην περίπτωση των άκαμπτων δεξαμενών.

Δεν υπάρχει έκφραση κλειστής μορφής για τον υπολογισμό της «εύκαμπτης» συνιστώσας της πίεσης, αφού η τελευταία εξαρτάται από τις ιδιομορφές του συστήματος υγρό-δεξαμενής οι οποίες όμως δεν είναι γνωστές εκ των προτέρων καθώς δεν είναι γνωστή η μάζα του υγρού που συμμετέχει στην κίνηση αυτή. Έτσι, για τον υπολογισμό της κατανομής της πίεσης λόγω της ευκαμψίας των τοιχωμάτων χρησιμοποιείται επαναληπτική διαδικασία η οποία περιγράφεται στη συνέχεια.

Αρχικά επιλέγεται μια δοκιμαστική μορφή της πρώτης ιδιομορφής, $f(\zeta)$ και υπολογίζονται οι ακόλουθοι συντελεστές.

$$b'_n = 2 \frac{(-1)^n I_1(v_n/\gamma)}{v_n^2 I_1'(v_n/\gamma)} \quad (2.21)$$

$$d_n = 2 \frac{\int_0^1 f(\zeta) \cos(v_n \zeta) d\zeta I_1(v_n/\gamma)}{v_n I_1'(v_n/\gamma)} \quad (2.22)$$

$$\psi = \frac{\int_0^1 f(\zeta) \left[\frac{\rho_s s(\zeta)}{\rho H} + \sum_{n=0}^{\infty} b'_n \cos(v_n \zeta) \right] d\zeta}{\int_0^1 f(\zeta) \left[\frac{\rho_s s(\zeta)}{\rho H} f(\zeta) + \sum_{n=0}^{\infty} d_n \cos(v_n \zeta) \right] d\zeta} \quad (2.23)$$

Η πίεση λόγω της ευκαμψίας υπολογίζεται από τη σχέση

$$p_f(\zeta, \theta, t) = \rho H \psi \cos \theta \sum_{n=0}^{\infty} d_n \cos(v_n \zeta) A_{fn}(t) \quad (2.24)$$

όπου $s(\zeta)$ είναι το πάχος, ρ_s η πυκνότητα του κελύφους και $A_{fn}(t)$ η επιτάχυνση απόκρισης ενός ταλαντωτή με περίοδο και συντελεστή απόσβεσης της ιδιομορφής n (η θεμελιώδης λειτουργία για $n=1$ είναι συνήθως επαρκής).

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ενεργή πυκνότητα του κελύφους από τη σχέση

$$\rho^i(\zeta) = \frac{\rho_f^i(\zeta)}{2gs(\zeta)f^i(\zeta)} + \rho_s \quad (2.25)$$

Η ενεργή πυκνότητα χρησιμοποιείται ώστε να υπολογιστεί ξανά η πίεση p_f και από την ανάλυση να προκύψει η νέα ιδιομορφή i . Τα πιο πάνω επαναλαμβάνονται μέχρι να υπάρξει σύγκλιση ($i+1$).

Η θεμελιώδης κυκλική συχνότητα του συστήματος δεξαμενών-υγρού μπορεί να εκτιμηθεί με τη βοήθεια της ακόλουθης έκφρασης, κατά προσέγγιση για χαλύβδινες δεξαμενές:

$$\omega_f = 2\pi \frac{\sqrt{Es(\zeta)/\rho H}}{R(0,157\gamma^2 + \gamma + 1,49)} \quad \text{για } (\zeta=1/3) \quad (2.26)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young του υλικού του τοιχώματος της δεξαμενής.

Η τέμνουσα βάσης είναι:

$$Q_f(t) = m_f A_f(t) \quad (2.27)$$

όπου

$$m_f = m\psi\gamma \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{v_n} d_n \quad (2.28)$$

Η ροπή αμέσως πάνω από την βάση της δεξαμενής μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$M_f(t) = m_f h_f A_f(t) \quad (2.29)$$

$$\text{όπου } h_f = H \frac{\left[\gamma \sum_{n=0}^{\infty} d_n \frac{(-1)^n v_n - 2}{v_n^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{d_n I_1'(v_n/\gamma)}{v_n} \right]}{\gamma \sum_{n=0}^{\infty} d_n \frac{(-1)^n}{v_n}} \quad (2.30)$$

2.3.2.2.1 Απλοποιημένη διαδικασία για δεξαμενές με πακτωμένη βάση

Η επίδραση των υδροδυναμικών πιέσεων προκύπτει από την υπέρθεση των δύο συνιστωσών (ωστικής και μεταγωγικής) όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην περίπτωση των άκαμπτων δεξαμενών. Το σύστημα δεξαμενής και υγρού προσομοιώνεται από ένα σύστημα δύο βαθμών ελευθερίας (που αντιστοιχούν στις δύο συνιστώσες της δράσης). Ο συνδυασμός των δύο συνιστωσών προκύπτει ως το αριθμητικό άθροισμά τους.

Οι ιδιοπερίοδοι που αντιστοιχούν στις δύο συνιστώσες προκύπτουν από τις σχέσεις

$$T_{imp} = C_i \frac{\sqrt{\rho H}}{\sqrt{s/R\sqrt{E}}} \quad (2.31)$$

$$T_{con} = C_c \sqrt{R} \quad (2.32)$$

όπου H είναι το ύψος της στάθμης σχεδιασμού του υγρού, R είναι η ακτίνα της δεξαμενής, s το ισοδύναμο ομοιόμορφο πάχος των τοιχωμάτων (στην περίπτωση που το πάχος αλλάζει σε συνάρτηση με το ύψος), ρ η πυκνότητα του υγρού και E το μέτρο ελαστικότητας του Young του υλικού του τοιχώματος της δεξαμενής. Οι συντελεστές C_i και C_c (με μονάδα μέτρησης $s/m^{1/2}$) προκύπτουν από τον πίνακα (2.1). Στον ίδιο πίνακα δίνονται και οι τιμές των μαζών m_i και m_c καθώς και οι τιμές των h_i και h_c που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ροπών ανατροπής όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

H/R	C_i	C_c ($s/m^{1/2}$)	m_i/m	m_c/m	h_i/H	h_c/H	h'_i/H	h'_c/H
0,3	9,28	2,09	0,176	0,824	0,400	0,521	2,640	3,414
0,5	7,74	1,74	0,300	0,700	0,400	0,543	1,460	1,517
0,7	6,97	1,60	0,414	0,586	0,401	0,571	1,009	1,011
1,0	6,36	1,52	0,548	0,452	0,419	0,616	0,721	0,785
1,5	6,06	1,48	0,686	0,314	0,439	0,690	0,555	0,734
2,0	6,21	1,48	0,763	0,237	0,448	0,751	0,500	0,764
2,5	6,56	1,48	0,810	0,190	0,452	0,794	0,480	0,796
3,0	7,03	1,48	0,842	0,158	0,453	0,825	0,472	0,825

Πίνακας 2.1

Η συνολική τέμνουσα βάσης προκύπτει από τη σχέση

$$Q = (m_i + m_w + m_r) S_e(T_{imp}) + m_c S_e(T_{con}) \quad (2.33)$$

όπου m_w και m_r είναι οι μάζες των τοιχωμάτων και της οροφής αντίστοιχα. $S_e(T_{imp})$ είναι η ωστική φασματική επιτάχυνση που προκύπτει από το ελαστικό φάσμα απόκρισης με κατάλληλο συντελεστή απόσβεσης που εξαρτάται από την κατάσταση σχεδιασμού που εξετάζεται (οριακή κατάσταση σχηματισμού βλαβών $\zeta=2\%$ ή οριακή κατάσταση αστοχίας $\zeta=5\%$) όπως προκύπτει από την παράγραφο 2.3.2.1 του EN1998-4. Η μεταγωγική φασματική επιτάχυνση, $S_e(T_{con})$ προκύπτει από το ελαστικό φάσμα για απόσβεση 0,5 %.

Η ροπή ανατροπής ακριβώς πάνω από τη βάση είναι

$$M = (m_i h_i + m_w h_w + m_r h_r) S_e(T_{imp}) + m_c h_c S_e(T_{con}) \quad (2.34)$$

όπου h_i και h_c είναι τα ύψη των κεντροειδών της ωστικής και της μεταγωγικής υδροδυναμικής πίεσης αντίστοιχα, και h_w , h_r είναι τα κέντρα βάρους των τοιχωμάτων και της οροφής αντίστοιχα.

Η ροπή ανατροπής ακριβώς κάτω από τη βάση είναι

$$M' = (m_i h'_i + m_w h'_w + m_r h'_r) S_e(T_{imp}) + m_c h'_c S_e(T_{con}) \quad (2.35)$$

Τα ύψη h'_i και h'_c προκύπτουν από τον πίνακα 2.1 .

Αν η δεξαμενή στηρίζεται σε δακτυλιοειδή θεμελίωση τότε, η τιμή της M ροπής χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό των τοιχωμάτων της δεξαμενής, των αγκυρίων της βάσης και της θεμελίωσης. Στην περίπτωση που η δεξαμενή εδράζεται σε θεμελίωση με γενική κοιτόστρωση, η τιμή της M ροπής χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό των τοιχωμάτων της δεξαμενής και των αγκυρίων της βάσης μόνο, ενώ η M' χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό της θεμελίωσης.

Κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής δράσης

Στην περίπτωση των εύκαμπτων δεξαμενών, στην πίεση που προκαλείται λόγω της κατακόρυφης συνιστώσας της διέγερσης θα πρέπει να προστεθεί ακόμα ένας όρος λόγω της παραμόρφωσης των τοιχωμάτων. Ο όρος αυτός δίνεται από τη σχέση

$$p_{vf}(\zeta, t) = 0,815 f(\gamma) \rho H \cos\left(\frac{\pi}{2} \zeta\right) A_{vf}(t) \quad (2.36)$$

$$\text{όπου} \quad f(\gamma) = 1,078 + 0,274 \ln \gamma \quad \text{για } 0,8 \leq \gamma < 4 \quad (2.37)$$

$$f(\gamma) = 1 \quad \text{για } 0,8 \quad (2.38)$$

και $A_{vf}(t)$ είναι η επιτάχυνση με την οποία αποκρίνεται ένας ταλαντωτής με συχνότητα ίση με τη θεμελιώδη συχνότητα της αξονοσυμμετρικής δόνησης της δεξαμενής και του υγρού. Η θεμελιώδης αυτή συχνότητα υπολογίζεται από τη σχέση

$$f_{vd} = \frac{1}{4R} \left[\frac{2EI_1(\gamma_1) s(\zeta)}{\pi \rho H (1 - \nu^2) I_o(\gamma_1)} \right]^{1/2} \quad (\text{για } \zeta = 1/3) \quad (2.39)$$

όπου $\gamma_1 = \pi/(2\gamma)$, I_o και I_1 είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικής και πρώτης τάξης αντίστοιχα, E είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young και ν ο λόγος του Poisson του υλικού της δεξαμενής.

Η τιμή της κατακόρυφης επιτάχυνσης προκύπτει από το αντίστοιχο φάσμα για την κατάλληλη τιμή του συντελεστή απόσβεσης. Αν αγνοείται η παραμορφωσιμότητα του εδάφους τότε ο συντελεστής απόσβεσης λαμβάνεται ίσος με το συντελεστή απόσβεσης του υλικού. Ως συντελεστής συμπεριφοράς, q , μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό της ωστικής συνιστώσας και της αδράνειας των τοιχωμάτων. Ο δύο συνιστώσες της πίεσης που προκύπτουν από την κατακόρυφη διέγερση (άκαμπτη και εύκαμπτη) μπορούν να συνδυαστούν με τη μέθοδο SRSS ώστε να προκύψει η μέγιστη τιμή της πίεσης.

2.4 Ίδιο βάρος αναρτώμενου καταστρώματος

Το αναρτώμενο κατάστρωμα αποτελείται από έλασμα αλουμινίου 5mm και απομονώνεται θερμικά με 6 στρώσεις από υαλοβάμβακα (δες σχήμα 1.20).

Παραδοχή: Το κέλυφος της δεξαμενής παραλαμβάνει το 20% του ίδιου βάρους του αναρτώμενου καταστρώματος (δηλ του αλουμινίου και των 6 στρώσεων υαλοβάμβακα). Η πίεση που ασκείται περιμετρικά στο κέλυφος της δεξαμενής είναι

$$P_{\text{αναρτ.καταστρώματος}} = 0,2 \left[(\gamma \cdot t)_{\text{aluminium}} + (\gamma \cdot 6t)_{\text{fiberglass}} \right] \quad (2.40)$$

όπου γ (kN/m³) είναι το ειδικό βάρος και t (m) το πάχος του υλικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ

3.1 Γενικά

Για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων ελέγχων χρησιμοποιούνται τα μέρη 1-6 (Αντοχή και ευστάθεια κελυφών) και 4-2 (Δεξαμενές) του Ευρωκώδικα 3 που αφορά τις μεταλλικές κατασκευές. Οι οριακές καταστάσεις αστοχίας στις οποίες πρέπει να ελεγχθεί η δεξαμενή είναι οι ακόλουθες:

α) LS1 - Πλαστικό όριο:

Η οριακή κατάσταση του πλαστικού ορίου θα πρέπει να λαμβάνεται ως η κατάσταση κατά την οποία η ικανότητα της κατασκευής να αντισταθεί στις υπάρχουσες δράσεις έχει εξαντληθεί λόγω της διαρροής του υλικού. Η αντίσταση που προσφέρεται από την κατασκευή στην πλαστική κατάσταση ορίου μπορεί να προέρχεται ως το πλαστικό φορτίο κατάρρευση ενός μηχανισμού που βασίζεται στη θεωρία των μικρών μετατοπίσεων. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της οριακής κατάστασης είναι ότι το φορτίο ή οι δράσεις δεν μπορούν να αυξηθούν χωρίς να υπάρξει μία σημαντική αλλαγή στην γεωμετρία της κατασκευής ή στελέχους-σκλήρυνση του υλικού. Όλοι οι σχετικοί συνδυασμοί φορτίων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον έλεγχο LS1. Οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση αυτή είναι:

- θεωρία μεμβράνης
- εκφράσεις από τα παραρτήματα A και B του EN 1993-1-6 (αναφέρονται σε επόμενη παράγραφο)
- γραμμική ελαστική ανάλυση (LA)
- μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA)
- μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας (GMNA)

β) LS2 - Ανακυκλική φόρτιση

Είναι η κατάσταση στην οποία επαναλαμβανόμενοι κύκλοι φόρτισης και αποφόρτισης προκαλούν διαρροή σε εφελκυσμό και θλίψη στο ίδιο σημείο και εξάντληση της ικανότητας της κατασκευής σε απορρόφηση ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή ελέγχονται όλες οι δράσεις που μπορεί να έχουν περισσότερους από τρεις κύκλους στη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Τέτοια δράση είναι η υδροστατική πίεση που μεταβάλλεται με το γέμισμα και το άδειασμα της δεξαμενής και πιθανώς σε κάθε κύκλο να προκαλεί διαρροή του υλικού όταν η δεξαμενή είναι εντελώς γεμάτη. Ακόμη τέτοια φόρτιση είναι και η δράση του σεισμού αλλά ακόμα και η μεταβολή της θερμοκρασίας. Για την ανάλυση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πιο κάτω μέθοδοι:

- εκφράσεις από το παράρτημα C του EN 1993-1-6 (αναφέρονται σε επόμενη παράγραφο)
- γραμμική ελαστική ανάλυση (LA) ή ελαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας (GNA)
- μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA) ή μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού (GMNA)

γ) LS3 – Λυγισμός

Στην οριακή κατάσταση λυγισμού ολόκληρη η κατασκευή ή μέρος αυτής εμφανίζει απότομα μεγάλες μετατοπίσεις κάθετες στην επιφάνεια του κελύφους, που προκαλούνται από την απώλεια ευστάθειας υπό τις θλιπτικές ή διατμητικές μεμβρανικές τάσεις. Σε τέτοια περίπτωση είναι πιθανό η κατασκευή να μην έχει την ικανότητα να δεχτεί οποιαδήποτε αύξηση των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτή με αποτέλεσμα να προκληθεί συνολική κατάρρευση της κατασκευής. Όλοι οι σχετικοί συνδυασμοί φορτίων που προκαλούν θλιπτικές ή διατμητικές μεμβρανικές τάσεις στο κέλυφος θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον έλεγχο LS3. Οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση αυτή είναι:

- θεωρία μεμβράνης για αξονοσυμμετρικές συνθήκες (και για τις περιπτώσεις που αναφέρονται στο μέρος που αφορά τις δεξαμενές)
- εκφράσεις του παραρτήματος Α
- γραμμική ελαστική ανάλυση (LA)
- γραμμική ελαστική ανάλυση διακλάδωσης (LBA)
- μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA)
- μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA)

Οι απαιτούμενες μέθοδοι ανάλυσης καθορίζονται με βάση την κατηγορία σπουδαιότητας της κατασκευής.

- Για δεξαμενές κατηγορίας σπουδαιότητας 2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θεωρία μεμβράνης για τον καθορισμό των κύριων τάσεων ή αριθμητική ανάλυση (για παράδειγμα, ανάλυση κελύφους με πεπερασμένα στοιχεία), ανάλογα με τις δράσεις. Για αξονοσυμμετρικές δράσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο προαναφερθείσες μέθοδοι, ενώ σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθούν μόνο αριθμητικές μέθοδοι. Στην περίπτωση που το φορτίο μεταβάλλεται ελαφρώς περιμετρικά του κελύφους προκαλώντας μόνο καθολική κάμψη μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θεωρία μεμβράνης για τον καθορισμό των κύριων τάσεων.
- Για δεξαμενές κατηγορίας σπουδαιότητας 3, οι εσωτερικές δυνάμεις και οι ροπές θα πρέπει να καθορίζονται με χρήση επικυρωμένης ανάλυσης (για παράδειγμα, ανάλυση κελύφους με πεπερασμένα στοιχεία), όπως ορίζεται στον EN 1993-1-6. Η πλαστική οριακή κατάσταση (LS1) μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας δυνάμεις πλαστικής κατάρρευσης, υπό την μορφή κύριων τάσεων, όπως ορίζεται στον EN 1993-1-6.

3.2 Οριακές καταστάσεις αστοχίας

3.2.1 Πλαστική οριακή κατάσταση (LS1)

Οι τιμές σχεδιασμού των δράσεων πρέπει να προκαλούν τον δυσμενέστερο συνδυασμό φορτίων (περιλαμβάνοντας τους σχετικούς συντελεστές γ_F και ψ).

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η θεωρία μεμβράνης για τον έλεγχο της κατασκευής οι συνισταμένες της πίεσης $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$ και $n_{x\theta,Ed}$ (δυνάμεις ανά μέτρο μήκους) αντιπροσωπεύονται από την ισοδύναμη τάση σχεδιασμού $\sigma_{eq,Ed}$.

$$\sigma_{eq,Ed} = \frac{1}{t} \sqrt{n_{x,Ed}^2 + n_{\theta,Ed}^2 - n_{x,Ed} \cdot n_{\theta,Ed} + 3n_{x\theta,Ed}^2} \quad (3.1)$$

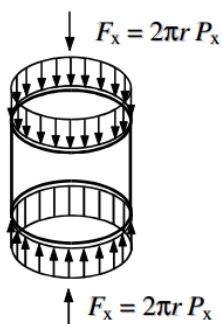
Οι τάσεις σχεδιασμού πρέπει να ικανοποιούν τη συνθήκη:

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd} \quad (3.2)$$

όπου

$$f_{eq,Rd} = f_{yk} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (3.3)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας γ_{M0} προκύπτει από την παράγραφο 2.9.2.2 του EN 1993-4-2 και είναι ίσος με 1,00. Οι τιμές των τάσεων που αναπτύσσονται στη δεξαμενή προκύπτουν από το παράρτημα Α του EN 1993-1-6 με βάση το σχήμα (3.1).

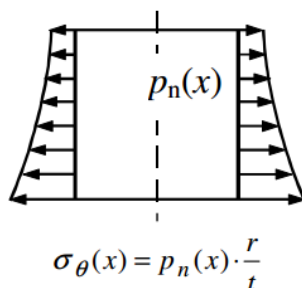


Σχήμα 3.1: Προσδιορισμός αξονικής τάσης σε κυλινδρικά κελύφη.

Για τον υπολογισμό της αξονικής τάσης σ_x λόγω του ίδιου βάρους θα χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$\sigma_x = -\frac{F_x}{2\pi r t} \quad (3.4)$$

Για τον υπολογισμό της τάσης λόγω της υδροστατικής πίεσης που ασκεί το υγρό (μεταβλητή καθ' ύψος) χρησιμοποιείται η σχέση που δίνονται στο σχήμα (3.2).

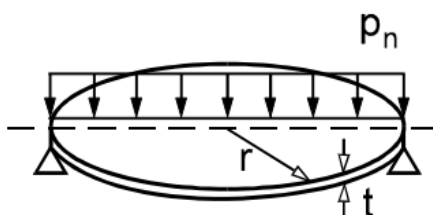


$$\sigma_{\theta}(x) = p_n(x) \cdot \frac{r}{t}$$

Σχήμα 3.2: Προσδιορισμός περιμετρικής τάσης. (3.5)

Για τον προσδιορισμό της αντοχής της οροφής σε ομοιόμορφη πίεση, $p_{n,R}$, χρησιμοποιείται η σχέση και το πιο κάτω σχήμα

$$p_{n,R} = 1,625 \left(\frac{t}{r} \right)^2 f_y \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.3: Ομοιόμορφο φορτίο, απλά υποστηριζόμενο όριο.

Για τις συνισταμένες τάσεις $n_{x,Ed}$ και $n_{\theta,Ed}$ που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της ισοδύναμης τάσης ισχύουν οι σχέσεις

$$n_{x,Ed} = \sigma_{x,Ed} \cdot t \quad (3.7)$$

$$n_{\theta,Ed} = \sigma_{\theta,Ed} \cdot t \quad (3.8)$$

όπου t είναι το πάχος του κελύφους.

Για κάθε κέλυφος ή τμήματος του ελάσματος στην κατασκευή αντιπροσωπεύεται από μια βασική περίπτωση φορτίου όπως παρουσιάζεται στο παράρτημα Β, η τιμή σχεδιασμού των δράσεων F_{Ed} δεν πρέπει να υπερβαίνει την δύναμη αντοχής F_{Rd} με βάση τη δύναμη διαρροής σχεδιασμού F_{yd} .

Στο παράρτημα Β παρουσιάζονται επιπλέον εκφράσεις για τις πλαστική αντοχή κατάρρευσης τμήματος του ελάσματος στο κέλυφος της κατασκευής. Οι εκφράσεις αναφέρονται για δύο περιπτώσεις, α) για μη ενισχυμένα κυλινδρικά κελύφη και β) για ενισχυμένα κυλινδρικά κελύφη με δακτυλιοειδές ελάσματα.

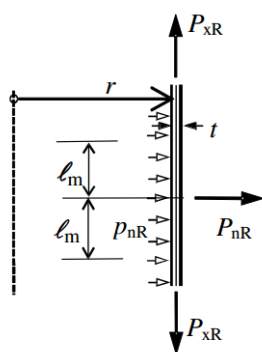
Και οι δύο περιπτώσεις αναλύονται σε τρεις υποπεριπτώσεις:

- i. Γραμμικό επίμηκες (καθ' ύψος) φορτίο-(Radial line load)
- ii. Γραμμικό επίμηκες (καθ' ύψος) φορτίο και αξονικό φορτίο
- iii. Γραμμικό επίμηκες (καθ' ύψος) φορτίο, σταθερή εσωτερική πίεση και αξονικό φορτίο.

(Πιο κάτω θα παρουσιασθεί η υποπερίπτωση iii για τις περιπτώσεις α και β)

α) Για μη ενισχυμένα κυλινδρικά κελύφη

Γραμμικό επίμηκες (καθ' ύψος) φορτίο, σταθερή εσωτερική πίεση και αξονικό φορτίο



Σχήμα 3.4

t = πάχος ελάσματος

r = ακτίνα δεξαμενής

l_m = ενεργό πλάτος δύναμης

s_x = αδιάστατη παράμετρος αξονικής τάσης

s_θ = αδιάστατη παράμετρος περιφερειακής τάσης

s_m = αδιάστατη παράμετρος συνδυασμένης τάσης

s_e = αδιάστατη von Mises παράμετρος ισοδύναμης τάσης

ποσότητες αναφοράς:

$$s_x = \frac{P_x}{f_y t}, \quad s_\theta = \frac{P_n}{f_y} \cdot \frac{r}{t}, \quad s_e = \sqrt{s_\theta^2 + s_x^2 - s_x s_\theta} \quad (3.9)$$

$$l_o = 0,975\sqrt{rt} \quad (3.10)$$

εύρος εφαρμογής:

$$-1 \leq s_x \leq +1$$

$$-1 \leq s_\theta \leq +1$$

Περιμετρικό φορτίο με κατεύθυνση προς τα έξω $P_n > 0$		Περιμετρικό φορτίο με κατεύθυνση προς τα μέσα $P_n < 0$	
Συνθήκες	Εκφράσεις	Συνθήκες	Εκφράσεις
$s_e < 1,00$ και $s_\theta \leq 0,975$	$A = +s_x - 2s_\theta - 1,50$ $s_m = A + \sqrt{A^2 + 4(1 - s_e^2)}$ $l_m = l_o \left(\frac{s_m}{1 - s_\theta} \right)$	$s_e < 1,00$ και $s_\theta \geq -0,975$	$A = -s_x + 2s_\theta - 1,50$ $s_m = A + \sqrt{A^2 + 4(1 - s_e^2)}$ $l_m = l_o \left(\frac{s_m}{1 + s_\theta} \right)$
$s_e = 1,00$ ή $s_\theta > 0,975$	$l_m = 0,0$	$s_e = 1,00$ ή $s_\theta < -0,975$	$l_m = 0,0$

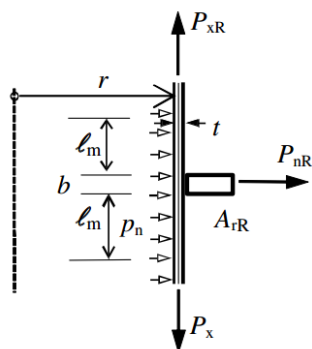
Πίνακας 3.1

Η πλαστική αντοχή δίνεται από τη σχέση (P_n και p_n , πάντα θετικά προς τα έξω)

$$\frac{P_{nR}}{2\ell_m} + p_n = f_y \frac{t}{r} \quad (3.11)$$

β) Για ενισχυμένα κυλινδρικά κελύφη

Γραμμικό επίμηκες (καθ' ύψος) φορτίο, σταθερή εσωτερική πίεση και αξονικό φορτίο



Σχήμα 3.5

b = πάχος δακτυλιοειδούς ελάσματος

A_r = εμβαδόν διατομής δακτυλιοειδούς ελάσματος

ποσότητες αναφοράς:

$$s_x = \frac{P_x}{f_y t} s_x = \frac{P_x}{f_y t} \quad , \quad s_\theta = \frac{p_n \cdot r}{f_y \cdot t} \quad , \quad s_e = \sqrt{s_\theta^2 + s_x^2} - s_x s_\theta \quad (3.12)$$

$$\ell_o = 0,975\sqrt{rt} \quad (3.13)$$

εύρος εφαρμογής:

$$-1 \leq s_x \leq +1$$

$$-1 \leq s_\theta \leq +1$$

Περιμετρικό φορτίο με κατεύθυνση προς τα έξω $P_n > 0$		Περιμετρικό φορτίο με κατεύθυνση προς τα μέσα $P_n < 0$	
Συνθήκες	Εκφράσεις	Συνθήκες	Εκφράσεις
$s_e < 1,00$ και $s_\theta \leq 0,975$	$A = +s_x - 2s_\theta - 1,50$ $s_m = A + \sqrt{A^2 + 4(1 - s_e^2)}$ $\ell_m = \ell_o \left(\frac{s_m}{1 - s_\theta} \right)$	$s_e < 1,00$ και $s_\theta \geq -0,975$	$A = -s_x + 2s_\theta - 1,50$ $s_m = A + \sqrt{A^2 + 4(1 - s_e^2)}$ $\ell_m = \ell_o \left(\frac{s_m}{1 + s_\theta} \right)$
$s_e = 1,00$ ή $s_\theta > 0,975$	$\ell_m = 0,0$	$s_e = 1,00$ ή $s_\theta < -0,975$	$\ell_m = 0,0$

Πίνακας 3.2

Η πλαστική αντοχή δίνεται από τη σχέση (P_n και p_n , πάντα θετικά προς τα έξω)

$$P_{nR} + p_n(b + 2\ell_m) = f_y \left(\frac{A_r + (b + 2\ell_m)t}{r} \right) \quad (3.14)$$

3.2.2 Κυκλική οριακή κατάσταση (LS2)

Η ανάλυση του κελύφους γίνεται με γραμμική ελαστική ανάλυση (LA) ή μη γραμμική ελαστική ανάλυση γεωμετρίας (GNA) της δεξαμενής που υπόκειται στις δύο ακραίες τιμές των δράσεων F_{Ed} . Για δύο διαδοχικές ακραίες τιμές του κύκλου υπολογίζονται οι τιμές σχεδιασμού της διαφοράς των δράσεων $\Delta\sigma_{x,Ed}$, $\Delta\sigma_{\theta,Ed}$, $\Delta\tau_{x\theta,Ed}$, στην εσωτερική (που συμβολίζεται με 1) και στην εξωτερική (που συμβολίζεται με 2) επιφάνεια του κελύφους και σε κάθε σημείο της κατασκευής. Η τιμή σχεδιασμού της ισοδύναμης τάσης von Mises υπολογίζεται από τη σχέση (3.15).

$$\Delta\sigma_{eq,Ed,i} = \sqrt{\Delta\sigma_{x,Ed,i}^2 - \Delta\sigma_{x,Ed,i} \cdot \Delta\sigma_{\theta,Ed,i} + \Delta\sigma_{\theta,Ed,i}^2 + 3\Delta\tau_{x\theta,Ed,i}^2} \quad (3.15)$$

Η μεταβολή της ισοδύναμης τάσης von Mises θα πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} \leq \Delta f_{eq,Rd} \quad (3.16)$$

$$\text{όπου} \quad \Delta f_{eq,Rd} = 2f_{yd} \quad (3.17)$$

Αν για την ανάλυση σε κυκλική φόρτιση χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι μη γραμμικής ανάλυσης υλικού (MNA) ή μη γραμμικής ανάλυσης υλικού και γεωμετρίας (GMNA) τότε η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της δράσης πρέπει να θεωρηθεί ότι δρουν ταυτόχρονα με τις σταθερές τιμές της φόρτισης. Ακόμη θα πρέπει να υπολογιστεί η συσσωρευμένη πλαστική παραμόρφωση $\varepsilon_{p,eq,Ed}$ στο τέλος της διάρκειας ζωής του έργου. Αν δεν υπολογιστεί διαφορετικά τότε η συσσωρευμένη πλαστική παραμόρφωση μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (3.18).

$$\varepsilon_{p,eq,Ed} = n\Delta\varepsilon_{p,eq,Ed} \quad (3.18)$$

όπου n είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης στη διάρκεια ζωής του έργου και $\Delta\varepsilon_{p,eq,Ed}$ είναι η μεγαλύτερη προσαύξηση στην ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση von Mises κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου φόρτισης σε οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής, που συμβαίνει μετά τον τρίτο κύκλο φόρτισης. Θα πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη

$$\varepsilon_{p,eq,Ed} \leq n_{p,eq} \left(\frac{f_{yd}}{E} \right) \quad (3.19)$$

Για το συντελεστή $n_{p,eq}$ προτείνεται η τιμή 25.

Για κάθε τμήμα κελύφους της κατασκευής εκπροσωπούμενη από μια βασική περίπτωση φόρτισης, όπως καθορίζεται στο παράρτημα C, το υψηλότερο von Mises εύρος ισοδύναμης τάσης $\Delta\sigma_{eq,Ed}$ λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο επιφάνειες του κελύφους σύμφωνα με τις τιμές σχεδιασμού των δράσεων F_{Ed} θα πρέπει να προσδιορίζονται με βάση τις σχετικές εκφράσεις στο παράρτημα C. Η περαιτέρω διαδικασία αξιολόγησης θα πρέπει να είναι όπως περιγράφεται πιο πάνω.

Από το παράρτημα C του EN 1993-1-6 παίρνουμε τα πιο κάτω.

t = πάχος ελάσματος

r = εξωτερική ακτίνα κελύφους δεξαμενής

$\sigma_{eq,m}$ = ισοδύναμη τάση von Mises που σχετίζεται με στοιχεία μεμβρανικής τάσης

$\sigma_{eq,s}$ = ισοδύναμη τάση von Mises που προέρχεται από επιφανειακές τάσεις

σ_{MT} = τάση αναφοράς που προέρχεται από τη θεωρία μεμβράνης

σ_{bx} = μεσημβρινή τάση λόγω κάμψης

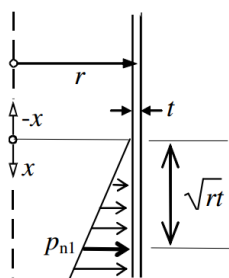
$\sigma_{b\theta}$ = περιμετρική τάση λόγω κάμψης

σ_{sx} = μεσημβρινή τάση στην επιφάνεια

$\sigma_{s\theta}$ = περιμετρική τάση στην επιφάνεια

τ_{xn} = εγκάρσια διατμητική τάση που σχετίζεται με την μεσημβρινή κάμψη

Εσωτερική υδροστατική πίεση



p_{n1} είναι η πίεση σε βάθος \sqrt{rt} κάτω από την επιφάνεια

$$\sigma_{MT\theta} = p_{n1} \frac{r}{t} \tag{3.20}$$

Σχήμα 3.6

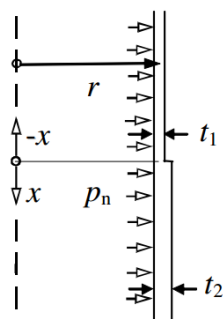
Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$k_x \sigma_{MT\theta}$	$k_\theta \sigma_{MT\theta}$	$k_\tau \sqrt{l/r} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,s} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,m} \sigma_{MT\theta}$

Πίνακας 3.3

k_x	k_θ	k_τ	$k_{eq,s}$	$k_{eq,m}$
-1,060	0,510	0,160	1,005	0,275

Πίνακας 3.4

Αλλαγή πάχους του κελύφους της δεξαμενής



$$\sigma_{MT\theta} = p_n \frac{r}{t_1} \tag{3.21}$$

Σχήμα 3.7

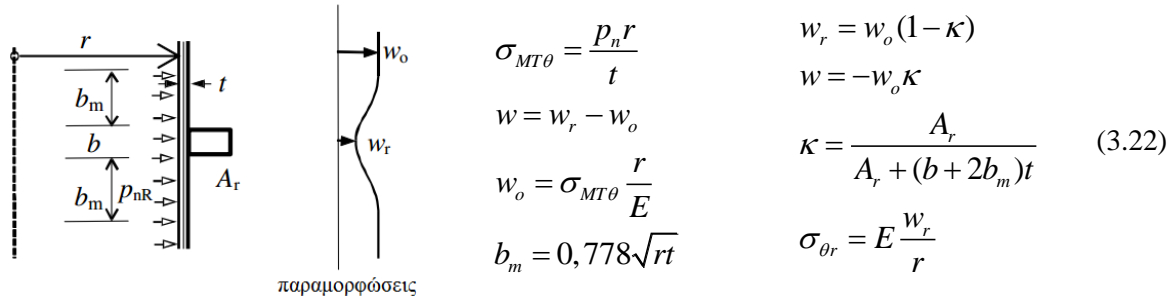
Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$k_x \sigma_{MT\theta}$	$k_\theta \sigma_{MT\theta}$	$k_\tau \sqrt{l/r} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,s} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,m} \sigma_{MT\theta}$

Πίνακας 3.5

$\left(\frac{t_1}{t_2}\right)$	k_x	k_θ	k_τ	$k_{eq,s}$	$k_{eq,m}$
1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0
0,8	0,0256	1,010	0,179	1,009	0,895
0,667	0,0862	1,019	0,349	1,015	0,815
0,571	0,168	1,023	0,514	1,019	0,750
0,5	0,260	1,027	0,673	1,023	0,694

Πίνακας 3.6

Ομοιόμορφη εσωτερική πίεση σε κέλυφος δεξαμενής με δακτυλιοειδές έλασμα



Σχήμα 3.8

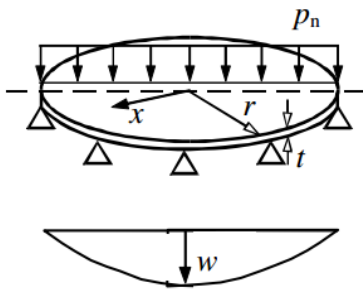
Maximum σ_{sx}	Maximum $\sigma_{s\theta}$	Maximum τ_{xn}	Maximum $\sigma_{eq,s}$	Maximum $\sigma_{eq,m}$
$k_x \sigma_{MT\theta}$	$k_\theta \sigma_{MT\theta}$	$k_\tau \sqrt{l/r} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,s} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,m} \sigma_{MT\theta}$

Πίνακας 3.7

κ	k_x	k_θ	k_τ	$k_{eq,s}$	$k_{eq,m}$
1,0	1,816	1,080	1,169	1,614	1,043
0,75	1,312	1,060	0,877	1,290	1,032
0,50	0,908	1,040	0,585	1,014	1,021
0,0	0,0	1,000	0,0	1,000	1,000

Πίνακας 3.8

Οροφή απλά υποστηριζόμενη: ομοιόμορφο φορτίο



Σχήμα 3.9

$$w = 0,696 \frac{p_n r^4}{Et^3}$$

$$\max \sigma_{bx} = 1,238 p_n \left(\frac{r}{t}\right)^2$$

$$\max \sigma_{b\theta} = 1,238 p_n \left(\frac{r}{t}\right)^2$$

$$p_{n,y} = 0,808 \left(\frac{r}{t}\right)^2 f_y$$

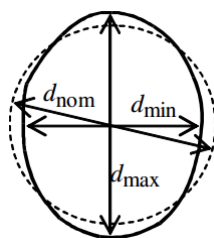
(3.23)

3.2.3 Λυγισμός (LS3)

Στον έλεγχο σε λυγισμό λαμβάνονται υπ' όψιν όλες οι δράσεις που προκαλούν θλιπτικές ή διατμητικές μεμβρανικές τάσεις. Τα ακόλουθα όρια που αφορούν τις γεωμετρικές ατέλειες θα πρέπει να ικανοποιούνται. Η απόκλιση από το κυκλικό σχήμα αντιπροσωπεύεται από την παράμετρο U_r που υπολογίζεται από τη σχέση

$$U_r = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{nom}} \quad (3.24)$$

όπου d_{\max} και d_{\min} είναι η μεγαλύτερη και η μικρότερη, αντίστοιχα, εσωτερική διάμετρος και d_{nom} είναι η ονομαστική εσωτερική διάμετρος. Θα πρέπει να ληφθούν αρκετές μετρήσεις διαμέτρων ώστε να προσδιοριστεί η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή. Στο σχήμα (3.10) φαίνονται οι διάμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απόκλισης από το κυκλικό σχήμα.



Σχήμα 3.10: Διάμετροι για τον προσδιορισμό της απόκλισης από το κυκλικό σχήμα.

Η παράμετρος U_r θα πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση

$$U_r \leq U_{r,\max} \quad (3.25)$$

όπου $U_{r,\max}$ είναι η ανεκτή οριακή παράμετρος απόκλισης από τον κύκλο που εξαρτάται από την τάξη της ποιότητας της κατασκευής (fabrication tolerance quality class), οι τιμές της οποίας δίνονται στον πίνακα (3.9).

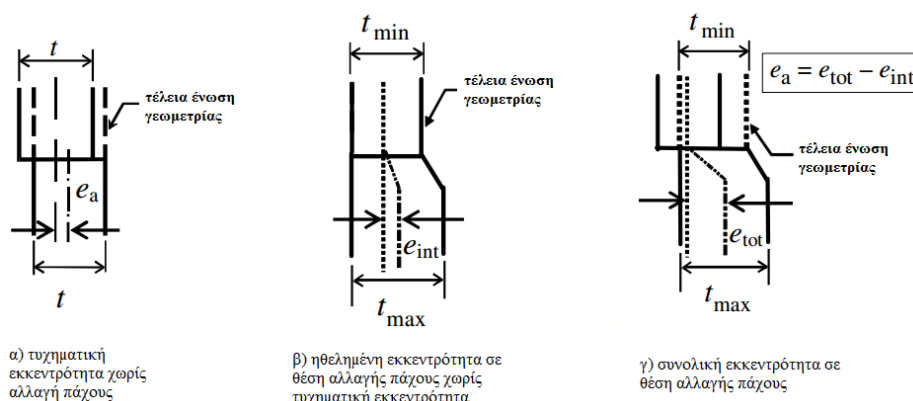
Ποιότητα κατασκευής	Διάμετρος Περιγραφή	$d [m] \leq 0,50m$	$0,50m < d [m] < 1,25m$	$1,25m \leq d [m]$
		Προτεινόμενη τιμή του $U_{r,\max}$		
Τάξη Α	Εξαιρετική	0,014	$0,007+0,0093(1,25-d)$	0,007
Τάξη Β	Υψηλή	0,020	$0,010+0,0133(1,25-d)$	0,010
Τάξη Γ	Κανονική	0,030	$0,015+0,0200(1,25-d)$	0,015

Πίνακας 3.9: Προτεινόμενες τιμές της παραμέτρου $U_{r,\max}$

Στις ενώσεις των τοιχωμάτων που είναι κάθετα στις μεμβρανικές θλιπτικές δυνάμεις η τυχηματική εκκεντρότητα θα πρέπει να υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_a = e_{\text{tot}} - e_{\text{int}} \quad (3.26)$$

όπου e_{tot} , e_{int} και e_a είναι η εκκεντρότητα, η ηθελημένη εκκεντρότητα και η τυχηματική εκκεντρότητα, αντίστοιχα, ανάμεσα στις μέσες επιφάνειες των τμημάτων που συνδέονται. Τα μεγέθη αυτά φαίνονται στο σχήμα (3.11). Η τυχηματική εκκεντρότητα δεν πρέπει να ξεπερνά τη μέγιστη επιτρεπόμενη τυχηματική εκκεντρότητα που προκύπτει από τον πίνακα (3.10).



Σχήμα 3.11: Τυχηματική και ηθελημένη εκκεντρότητα σε ένωση.

Ποιότητα κατασκευής	Περιγραφή	Προτεινόμενη τιμή της μέγιστης επιτρεπόμενης τυχηματικής εκκεντρότητας $e_{a,max}$
Τάξη Α	Εξαιρετική	2 mm
Τάξη Β	Υψηλή	3 mm
Τάξη Γ	Κανονική	4 mm

Πίνακας 3.10: Προτεινόμενες τιμές της μέγιστης επιτρεπόμενης τυχηματικής εκκεντρότητας.

Θα πρέπει ακόμη να ισχύει η σχέση (3.27) που αφορά στην παράμετρο τυχηματικής εκκεντρότητας U_e .

$$U_e \leq U_{e,max} \quad (3.27)$$

όπου

$$U_e = \frac{e_a}{t_{av}} \quad (3.28)$$

t_{av} είναι το μέσο πάχος του λεπτότερου και του παχύτερου τμήματος της σύνδεσης. Η τιμή της παραμέτρου $U_{e,max}$ δίνεται στον πίνακα (3.11).

Ποιότητα κατασκευής	Περιγραφή	Προτεινόμενη τιμή της παραμέτρου $U_{e,max}$
Τάξη Α	Εξαιρετική	0,14
Τάξη Β	Υψηλή	0,20
Τάξη Γ	Κανονική	0,30

Πίνακας 3.11: Προτεινόμενες τιμές για την ανοχή σε τυχηματική εκκεντρότητα.

Η αντοχή σε λυγισμό προσδιορίζεται από τις σχέσεις:

$$\sigma_{x,Rd} = \frac{\sigma_{x,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad , \quad \sigma_{\theta,Rd} = \frac{\sigma_{\theta,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad , \quad \tau_{x\theta,Rd} = \frac{\tau_{x\theta,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (3.29)$$

Προτείνεται ο συντελεστής γ_{M1} να είναι τουλάχιστον 1,1 εκτός αν ορίζεται διαφορετικά στο εθνικό προσάρτημα. Οι χαρακτηριστικές τάσεις λυγισμού υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας τη χαρακτηριστική τάση διαρροής με το μειωτικό συντελεστή λυγισμού χ όπως φαίνεται στις σχέσεις:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x \cdot f_{yk} \quad , \quad \sigma_{\theta,Rk} = \chi_{\theta} \cdot f_{yk} \quad , \quad \tau_{x\theta,Rk} = \frac{\chi_{\tau} \cdot f_{yk}}{\sqrt{3}} \quad (3.30)$$

Οι μειωτικοί συντελεστές χ_x , χ_{θ} και χ_{τ} είναι συναρτήσεις της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}$ του κελύφους και προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$\chi = 1 \quad \text{όταν} \quad \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad (3.31)$$

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^n \quad \text{όταν} \quad \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda} < \bar{\lambda}_p \quad (3.32)$$

$$\chi = \frac{a}{\bar{\lambda}^2} \quad \text{όταν} \quad \bar{\lambda}_p < \bar{\lambda} \quad (3.33)$$

όπου a είναι ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατέλειας, β είναι ο πλαστικός συντελεστής, n είναι ο δείκτης αλληλεπίδρασης και $\bar{\lambda}_0$ είναι η ανηγμένη λυγηρότητα θλίψης. Οι τιμές των συντελεστών αυτών πρέπει να λαμβάνονται από το παράρτημα D του EN 1993-1-6. Όταν το παράρτημα D δεν καθορίζει τις τιμές αυτών των συντελεστών, μπορούν να οριστούν από το εθνικό προσάρτημα.

Το πλαστικό όριο της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}_p$ υπολογίζεται από τη σχέση:

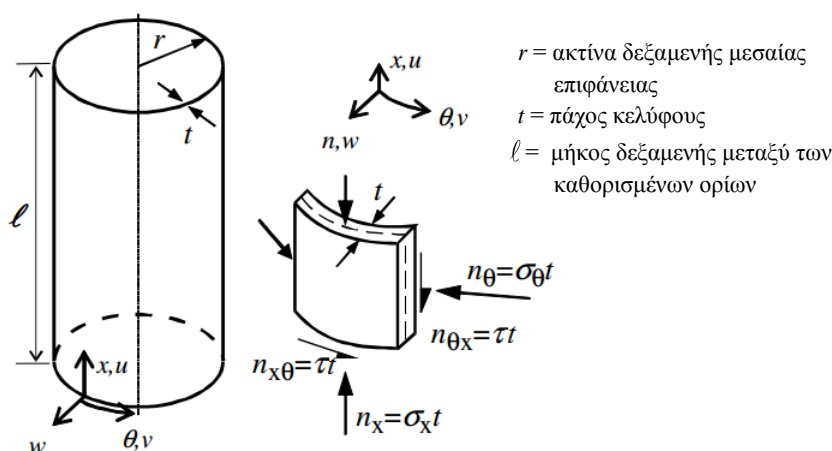
$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} \quad (3.34)$$

Οι παράμετροι της ανηγμένη λυγηρότητας του κελύφους προκύπτουν από τις σχέσεις

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}} , \quad \bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta,Rcr}}} , \quad \bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\frac{(f_{yk} / \sqrt{3})}{\tau_{x\theta,Rcr}}} \quad (3.35)$$

όπου οι ελαστικές κρίσιμες τάσεις λυγισμού $\sigma_{x,Rcr}$, $\sigma_{\theta,Rcr}$ και $\tau_{x\theta,Rcr}$ θα πρέπει να λαμβάνονται με τη βοήθεια των σχετικών εκφράσεων από το παράρτημα D.

Στο πιο κάτω σχήμα φαίνονται οι συνιστώσες των τάσεων που ελέγχονται.



Σχήμα3.12: Γεωμετρία του κυλίνδρου, μεμβρανικές τάσεις και συνισταμένες αυτών.

Ανάλογα με την περίπτωση της φόρτισης και των τάσεων μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες σχέσεις θα πρέπει να πραγματοποιείται για τον έλεγχο σε λυγισμό στην περίπτωση απλής μεμβρανικής τάσης.

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} , \quad \sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd} , \quad \tau_{x\theta,Ed} \leq \tau_{x\theta,Rd} \quad (3.36)$$

Στην περίπτωση που συνυπάρχουν δύο ή τρεις από τις συνιστώσες των τάσεων στο πλαίσιο των δράσεων υπό εξέταση, θα πρέπει να ικανοποιείται η σχέση για την συνδυασμένη κατάσταση.

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} \right)^{k_\tau} \leq 1 \quad (3.37)$$

Εάν οι τάσεις $\sigma_{x,Ed}$ ή $\sigma_{\theta,Ed}$ είναι εφελκυστικές τότε στην έκφραση (3.37) λαμβάνονται ίσες με μηδέν. Οι συντελεστές k_x , k_θ , k_τ και k_i λαμβάνονται από το παράρτημα D του EN 1993-1-6.

$$k_x = 1,25 + 0,75\chi_x \quad (3.38)$$

$$k_\theta = 1,25 + 0,75\chi_\theta \quad (3.39)$$

$$k_\tau = 1,75 + 0,25\chi_\tau \quad (3.40)$$

$$k_i = (\chi_x \chi_\theta)^2 \quad (3.41)$$

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού των τάσεων λυγισμού από το παράρτημα D.

3.2.3.1 Μη ενισχυμένα κυλινδρικά κελύφη συνεχούς πάχους τοιχώματος

➤ Αξονική θλίψη

Το μήκος του τμήματος κελύφους χαρακτηρίζεται από την αδιάστατη παράμετρο μήκους ω :

$$\omega = \frac{\ell}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{\ell}{\sqrt{rt}} \quad (3.42)$$

Η ελαστική κρίσιμη αξονική τάση λυγισμού $\sigma_{x,Rcr}$ προκύπτει από τη σχέση:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 E C_x \frac{t}{r} \quad (3.43)$$

όπου ο συντελεστής C_x υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$C_x = 1 \quad \text{για} \quad 1,7 \leq \omega \leq 0,5 \frac{r}{t} \quad (\text{κύλινδρος μεσαίου μήκους}) \quad (3.44)$$

$$C_x = 1,36 - \frac{1,83}{\omega} + \frac{2,07}{\omega^2} \quad \text{για} \quad \omega \leq 1,7 \quad (\text{κοντός κύλινδρος}) \quad (3.45)$$

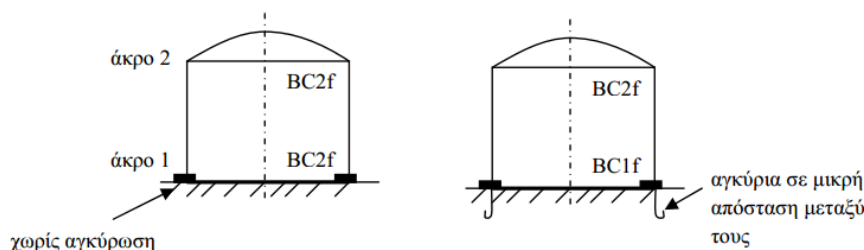
$$C_x = C_{x,N} \quad \text{για} \quad \omega \geq 0,5 \frac{r}{t} \quad (\text{μακρύς κύλινδρος}) \quad (3.46)$$

Ο παράγοντας $C_{x,N}$ λαμβάνεται ως η μεγαλύτερη τιμή από τις σχέσεις

$$C_{x,N} = 1 + \frac{0,2}{C_{xb}} \left[1 - 2\omega \frac{t}{r} \right] \quad (3.47)$$

$$C_{x,N} = 0,6 \quad (3.48)$$

όπου C_{xb} είναι μια παράμετρος, ανάλογα με τις συνοριακές συνθήκες και λαμβάνεται από τον πίνακα (3.12). Επίσης οι συνοριακές συνθήκες φαίνονται στο σχήμα (3.13).



Σχήμα 3.13: Συνοριακές συνθήκες.

Περίπτωση	Άκρο κυλίνδρου	Συνοριακές συνθήκες	C_{xb}
1	άκρο 1	BC 1	6
	άκρο 2	BC 1	
2	άκρο 1	BC 1	3
	άκρο 2	BC 2	
3	άκρο 1	BC 2	1
	άκρο 2	BC 2	

Πίνακας 3.12: Παράμετρος C_{xb} για την επίδραση των συνοριακών συνθηκών στον ελαστικό αξονικό λυγισμό μακρών κυλίνδρων.

Ο μη υπό πίεση ελαστικός μειωτικός συντελεστής α_x λόγω ατέλειας, υπολογίζεται από τη σχέση

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91(\Delta w_k / t)^{1,44}} \quad (3.49)$$

Δw_k είναι το χαρακτηριστικό μέγεθος της ατέλειας και υπολογίζεται από τη σχέση

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot t \quad (3.50)$$

όπου Q είναι η παράμετρος της ποιότητας της κατασκευής και προκύπτει από τον πίνακα (3.13).

Ποιότητα κατασκευής	Περιγραφή	Q
Τάξη Α	Εξαιρετική	40
Τάξη Β	Υψηλή	25
Τάξη Γ	Κανονική	16

Πίνακας 3.13: Τιμές της παραμέτρου ποιότητας της κατασκευής.

Για τον υπολογισμό του μειωτικού συντελεστή χ_x η οριακή λυγηρότητα θλίψης $\bar{\lambda}_{x0}$, ο πλαστικός συντελεστής β και ο δείκτης αλληλεπίδρασης n μπορούν να ληφθούν ίσοι με:

$$\bar{\lambda}_{x0} = 0,20 \quad \beta = 0,60 \quad \eta = 1,0 \quad (3.51)$$

Οι κύλινδροι δεν χρειάζεται να ελεγχθούν σε αξονικό λυγισμό εάν ισχύει η σχέση

$$\frac{r}{t} \leq 0,03 \frac{E}{f_{yk}} \quad (3.52)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young.

➤ Περιμετρική θλίψη

Ο υπολογισμός της ελαστικής περιμετρικής κρίσιμης τάσης λυγισμού γίνεται σύμφωνα με τις σχέσεις

$$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92E \left(\frac{C_\theta}{\omega} \right) \left(\frac{t}{r} \right) \quad \text{για} \quad 20 \leq \frac{\omega}{C_\theta} \leq 1,63 \frac{r}{t} \quad (\text{κύλινδρος μεσαίου μήκους}) \quad (3.53)$$

$$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92E \left(\frac{C_{\theta s}}{\omega} \right) \left(\frac{t}{r} \right) \quad \text{για} \quad \frac{\omega}{C_\theta} < 20 \quad (\text{κοντός κύλινδρος}) \quad (3.54)$$

$$\sigma_{\theta,Rcr} = E \left(\frac{t}{r} \right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{C_\theta \cdot r}{\omega \cdot t} \right)^4 \right] \quad \text{για} \quad \frac{\omega}{C_\theta} > 1,63 \frac{r}{t} \quad (\text{μακρύς κύλινδρος}) \quad (3.55)$$

Οι συντελεστές C_θ και $C_{\theta s}$ προκύπτουν από τους πίνακες (3.14) και (3.15) αντίστοιχα.

Περίπτωση	Άκρο κυλίνδρου	Συνοριακές συνθήκες	C_θ
1	άκρο 1 άκρο 2	BC 1 BC 1	1,50
2	άκρο 1 άκρο 2	BC 1 BC 2	1,25
3	άκρο 1 άκρο 2	BC 2 BC 2	1,00
4	άκρο 1 άκρο 2	BC 1 BC 3	0,60
5	άκρο 1 άκρο 2	BC 2 BC 3	0,00
6	άκρο 1 άκρο 2	BC 3 BC 3	0,00

Πίνακας 3.14: Συντελεστές λυγισμού για κυλίνδρους μεσαίου μήκους, C_θ .

Περίπτωση	Άκρο κυλίνδρου	Συνοριακές συνθήκες	$C_{\theta s}$
1	άκρο 1 άκρο 2	BC 1 BC 1	$1,5 + \frac{10}{\omega^2} - \frac{5}{\omega^3}$
2	άκρο 1 άκρο 2	BC 1 BC 2	$1,25 + \frac{8}{\omega^2} - \frac{4}{\omega^3}$
3	άκρο 1 άκρο 2	BC 2 BC 2	$1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}}$
4	άκρο 1 άκρο 2	BC 1 BC 3	$0,6 + \frac{1}{\omega^2} - \frac{0,3}{\omega^3}$
όπου $\omega = \frac{\ell}{\sqrt{rt}}$			

Πίνακας 3.15: Συντελεστές λυγισμού για κοντούς κυλίνδρους, $C_{\theta s}$.

Ο περιμετρικός συντελεστής ατελειών a_{θ} προκύπτει από τον πίνακα (3.16).

Ποιότητα κατασκευής	Περιγραφή	a_{θ}
Τάξη Α	Εξαιρετική	0,75
Τάξη Β	Υψηλή	0,65
Τάξη Γ	Κανονική	0,50

Πίνακας 3.16: Τιμές του συντελεστή a_{θ} με βάση την ποιότητα κατασκευής.

Για τον υπολογισμό του μειωτικού συντελεστή χ_{θ} η οριακή λυγηρότητα θλίψης $\bar{\lambda}_{\theta 0}$, ο πλαστικός συντελεστής β και ο δείκτης αλληλεπίδρασης n μπορούν να ληφθούν ίσοι με:

$$\bar{\lambda}_{\theta 0} = 0,40 \quad \beta = 0,60 \quad \eta = 1,0 \quad (3.56)$$

Οι κύλινδροι δεν χρειάζεται να ελεγχθούν σε περιμετρικό λυγισμό εάν ισχύει η σχέση

$$\frac{r}{t} \leq 0,21 \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}} \quad (3.57)$$

➤ Διάτμηση

Η ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού είναι ίση με:

$$\tau_{x\theta, Rcr} = 0,75 E C_{\tau} \sqrt{\frac{1}{\omega} \left(\frac{t}{r} \right)} \quad (3.58)$$

Ο συντελεστής C_{τ} προκύπτει από τις σχέσεις

$$C_{\tau} = 1 \quad \text{για} \quad 10 \leq \omega \leq 8 \frac{r}{t} \quad (\text{κύλινδρος μεσαίου μήκους}) \quad (3.59)$$

$$C_{\tau} = \sqrt{1 + \frac{42}{\omega^3}} \quad \text{για} \quad \omega < 10 \quad (\text{κοντός κύλινδρος}) \quad (3.60)$$

$$C_{\tau} = \frac{1}{3} \sqrt{\omega \frac{t}{r}} \quad \text{για} \quad \omega > 8,7 \frac{r}{t} \quad (\text{μακρής κύλινδρος}) \quad (3.61)$$

Ο διατμητικός ελαστικός μειωτικός συντελεστής α_{τ} λόγω ατέλειας, προκύπτει από τον πίνακα (3.17).

Ποιότητα κατασκευής	Περιγραφή	α_τ
Τάξη Α	Εξαιρετική	0,75
Τάξη Β	Υψηλή	0,65
Τάξη Γ	Κανονική	0,50

Πίνακας 3.17: Τιμές της παραμέτρου α_τ με βάση την ποιότητα της κατασκευής.

Για τον υπολογισμό του μειωτικού συντελεστή χ_τ η οριακή λυγηρότητα θλίψης $\bar{\lambda}_{\tau 0}$, ο πλαστικός συντελεστής β και ο δείκτης αλληλεπίδρασης n μπορούν να ληφθούν ίσοι με:

$$\bar{\lambda}_{\tau 0} = 0,40 \quad \beta = 0,60 \quad \eta = 1,0 \quad (3.62)$$

Οι κύλινδροι δεν χρειάζεται να ελεγχθούν σε διατμητικό λυγισμό εάν ισχύει η σχέση

$$\frac{r}{t} \leq 0,16 \left[\frac{E}{f_{yk}} \right]^{0,67} \quad (3.63)$$

➤ Αξονική θλίψη με συνυπάρχουσα εσωτερική πίεση

Η ελαστική κρίσιμη αξονική τάση λυγισμού $\sigma_{x,Rcr}$ μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ανεπηρέαστη από την παρουσία της εσωτερικής πίεσης και μπορεί να ληφθεί όπως ορίζεται στην αξονική θλίψη (σχέση 3.43). Ωστόσο, ο μη υπό πίεση ελαστικός μειωτικός συντελεστής α_x (σχέση 3.49) λόγω ατέλειας, θα πρέπει να αντικατασταθεί από τον υπό πίεση ελαστικό μειωτικό συντελεστή α_{xpe} λόγω ατέλειας. Ο α_{xpe} πρέπει να ληφθεί ως η μικρότερη από τις δύο ακόλουθες τιμές: α_{xpe} (παράγοντας που καλύπτει την πίεση που προκαλείται από ελαστική σταθεροποίηση) ή α_{xpp} (παράγοντας που καλύπτει την πίεση που προκαλείται από πλαστική σταθεροποίηση).

Ο α_{xpe} υπολογίζεται από την σχέση:

$$\alpha_{xpe} = \alpha_x + (1 - \alpha_x) \left[\frac{\bar{p}_s}{p_s + 0,3 / \alpha_x^{0,5}} \right] \quad (3.64)$$

όπου

$$\bar{p}_s = \left(\frac{p_s}{\sigma_{x,Rcr}} \right) \left(\frac{r}{t} \right) \quad (3.65)$$

p_s είναι η μικρότερη τιμή σχεδιασμού των τοπικών εσωτερικών πιέσεων στη θέση του σημείου που εκτιμάται με την εγγύηση να συνυπάρχουν με την μεσημβρινή θλίψη.

Ο συντελεστής α_{xpe} δεν πρέπει να εφαρμόζεται σε μακρύς κυλίνδρους. Επιπλέον, δεν θα πρέπει να εφαρμόζεται, εκτός εάν μία από τις δύο ακόλουθες προϋποθέσεις ισχύει: i) ο κύλινδρος είναι μεσαίου μήκους, σύμφωνα με την σχέση (3.44) και ii) ο κύλινδρος είναι κοντός, σύμφωνα με την σχέση (3.45) και $C_x = 1$ έχει τοποθετηθεί στη σχέση (3.43).

Ο α_{xpp} υπολογίζεται από την σχέση:

$$\alpha_{xpp} = \left\{ 1 - \left(\frac{\bar{p}_g}{\lambda_x^2} \right)^2 \right\} \left[1 - \frac{1}{1,12 + s^{3/2}} \right] \left[\frac{s^2 + 1,21 \bar{\lambda}_x^2}{s(s+1)} \right] \quad (3.66)$$

$$\bar{p}_g = \left(\frac{p_g}{\sigma_{x,Rcr}} \right) \left(\frac{r}{t} \right) \quad (3.67)$$

$$s = \frac{1}{400} \cdot \frac{r}{t} \quad (3.68)$$

p_g είναι η μεγαλύτερη τιμή σχεδιασμού των τοπικών εσωτερικών πιέσεων στη θέση του σημείου που εκτιμάται ότι μπορούν να συνυπάρχουν με την μεσημβρινή θλίψη.

$\bar{\lambda}_x$ από την σχέση (3.35)

3.2.3.2 Μη ενισχυμένα κυλινδρικά κελύφη με βαθμιδωτό μεταβλητό πάχος τοιχώματος

Οι παρακάτω εκφράσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν μόνο για περιβλήματα με οριακές συνθήκες BC 1 ή BC 2 και στα δύο άκρα (βλ. σχήμα 3.13), χωρίς να γίνεται διάκριση μεταξύ τους.

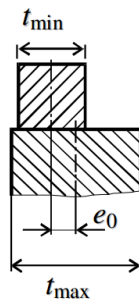
Υπό την προϋπόθεση ότι το πάχος του τοιχώματος του κυλίνδρου αυξάνεται προοδευτικά βαθμιδωτά από πάνω προς τα κάτω (βλέπε σχήμα 3.15), οι διαδικασίες που δίνονται σε αυτήν την παράγραφο 3.2.3.2, μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Προβλεπόμενη αντιστάθμιση $e_{0,p}$ μεταξύ των ελασμάτων των γειτονικών τμημάτων (βλέπε σχήμα 3.14), μπορεί να αντιμετωπιστεί από τις ακόλουθες εκφράσεις υπό την προϋπόθεση ότι η επιθυμητή τιμή e_0 είναι μικρότερη από την επιτρεπτή τιμή $e_{0,p}$ η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται ως η μικρότερη από τις πιο κάτω σχέσεις:

$$e_{0,p} = 0,5(t_{\max} - t_{\min}) \quad (3.69)$$

$$\text{ή} \quad e_{0,p} = 0,5t_{\min} \quad (3.70)$$

όπου t_{\max} και t_{\min} είναι το πάχος του παχύτερου και λεπτότερου ελάσματος στην ένωση αντίστοιχα.



Σχήμα 3.14: Επιθυμητή αντιστάθμιση $e_{0,p}$ σε μια άκρη-ένωση κελύφους.

➤ Αξονική θλίψη

Κάθε κυλινδρικό τμήμα j μήκους ℓ_j , πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ισοδύναμος κύλινδρος συνολικού μήκους $\ell = L$ και ομοιόμορφου πάχους τοιχώματος $t = t_j$, σύμφωνα με την αξονική θλίψη της παραγράφου 3.2.3.1.

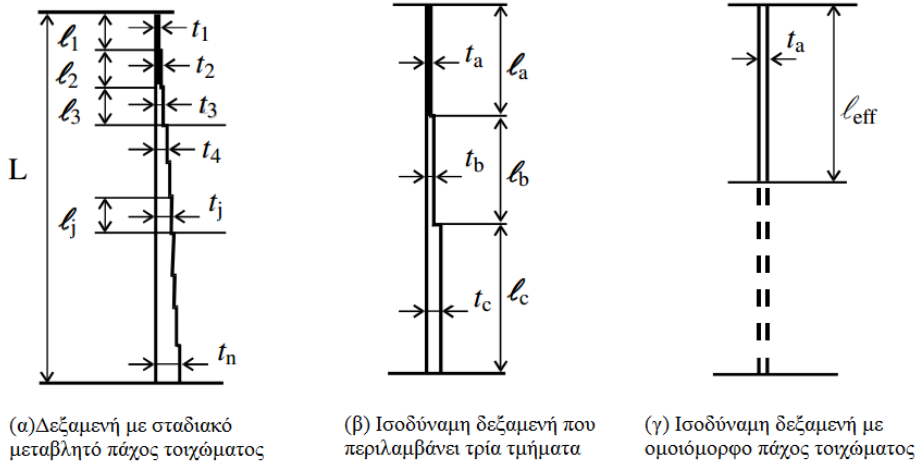
➤ Περιμετρική θλίψη

Εάν η δεξαμενή αποτελείται από περισσότερα από τρία τμήματα με διαφορετικά πάχη τοιχώματος (βλ. σχήμα 3.15α), θα πρέπει πρώτα να αντικατασταθεί από μία ισοδύναμη που περιλαμβάνει τρία τμήματα α , β και γ (βλ. σχήμα 3.15β). Το μήκος του άνω τμήματος της δεξαμενής, ℓ_a , πρέπει να επεκταθεί στο άνω άκρο του πρώτου τμήματος που έχει ένα πάχος τοιχώματος μεγαλύτερο από 1,5

φορές το μικρότερο πάχος τοιχώματος t_1 , αλλά δεν πρέπει να περιλαμβάνει περισσότερο από το μισό του συνολικού μήκους L της δεξαμενής. Το μήκος των άλλων δύο τμημάτων l_b και l_c θα πρέπει να λαμβάνονται ως εξής:

$$l_b = l_a \quad \text{και} \quad l_c = L - 2l_a \quad \text{εάν} \quad l_a \leq L/3 \quad (3.71)$$

$$l_b = l_c = 0,5(L - l_a) \quad \text{εάν} \quad L/3 \leq l_a \leq L/2 \quad (3.72)$$



Σχήμα 3.15: Μετατροπή κλιμακωτής δεξαμενής σε ισοδύναμη δεξαμενή.

Το πλασματικό πάχος τοιχώματος t_a, t_b, t_c των τριών τμημάτων θα πρέπει να καθορίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος του πάχους των τοιχωμάτων σε κάθε ένα από τα τρία πλασματικά τμήματα:

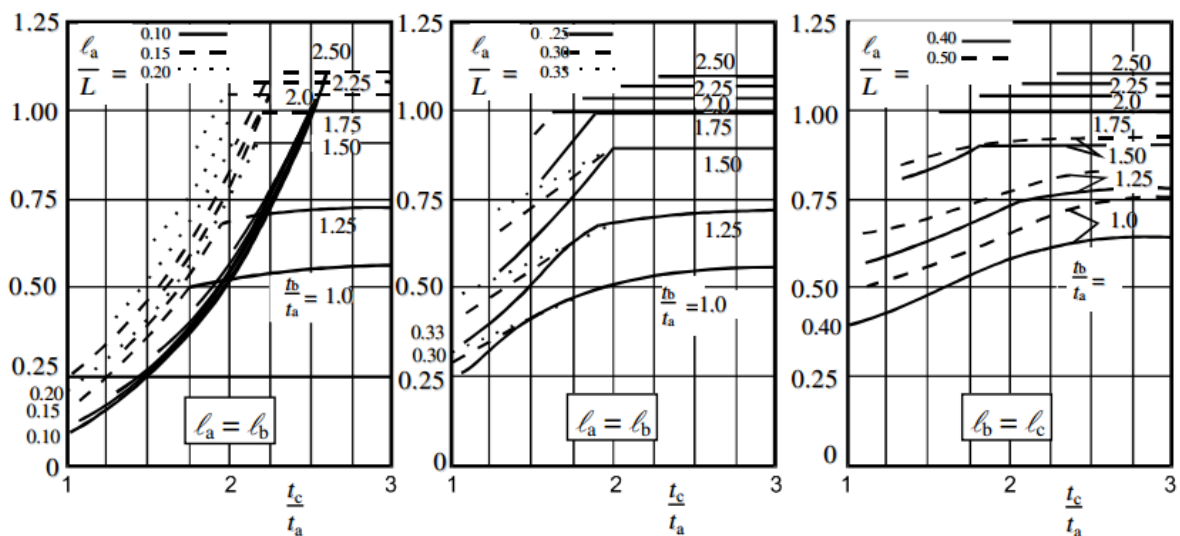
$$t_a = \frac{1}{l_a} \sum_a l_j t_j, \quad t_b = \frac{1}{l_b} \sum_b l_j t_j, \quad t_c = \frac{1}{l_c} \sum_c l_j t_j \quad (3.73)$$

Η ισοδύναμη δεξαμενή των τριών τμημάτων θα πρέπει να αντικατασταθεί από μια ισοδύναμη δεξαμενή ισοδύναμου μήκους l_{eff} και ομοιόμορφου πάχους τοιχώματος $t = t_a$, βλέπε σχήμα 3.15γ.

Το ισοδύναμο μήκος θα πρέπει να προσδιορισθεί από:

$$l_{eff} = l_a / \kappa \quad (3.74)$$

όπου κ είναι ένας αδιάστατος συντελεστής που λαμβάνεται από το σχήμα 3.16.



Σχήμα 3.16: Συντελεστής κ για τον προσδιορισμό του ισοδύναμου μήκους l_{eff}

Για δεξαμενή με τμήματα μέτριου ή μικρού μήκους, η ελαστική κρίσιμη περιμετρικής τάση λυγισμού κάθε τμήματος j της αρχικής δεξαμενής με βαθμιδωτό μεταβλητό πάχος τοιχώματος θα πρέπει να προσδιορίζεται από:

$$\sigma_{\theta,Rcr,j} = \left(\frac{t_a}{t_j} \right) \sigma_{\theta,Rcr,eff} \quad (3.75)$$

όπου $\sigma_{\theta,Rcr,eff}$ είναι η ελαστική κρίσιμη περιμετρική τάση λυγισμού που προέρχεται από τις σχέσεις 3.53, 3.54, 3.55 ανάλογα με την περίπτωση (ο συντελεστής C_θ σε αυτές τις σχέσεις πρέπει να είναι ίσος με 1,0), της ισοδύναμης δεξαμενής με μήκος ℓ_{eff} σύμφωνα με τα πιο πάνω.

Το μήκος του τμήματος κελύφους χαρακτηρίζεται από την αδιάστατη παράμετρο μήκους ω_j :

$$\omega_j = \frac{\ell_j}{r} \sqrt{\frac{r}{t_j}} = \frac{\ell_j}{\sqrt{rt_j}} \quad (3.76)$$

Στην περίπτωση που κάποιο τμήμα j του κελύφους της δεξαμενής είναι μακρύ, τότε πρέπει να γίνει μια δεύτερη συμπληρωματική αξιολόγηση της τάσης λυγισμού (σχέσεις 3.77 και 3.78). Η μικρότερη από τις δύο τιμές που προκύπτουν από τις σχέσεις 3.75 και 3.78 θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό του τμήματος j του κελύφους της δεξαμενής έναντι σε λυγισμό.

Το τμήμα j του κελύφους της δεξαμενής θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως μακρύ εάν:

$$\omega_j > 1,63 \frac{r}{t_j} \quad (3.77)$$

στην οποία περίπτωση η ελαστική κρίσιμη περιμετρική τάση λυγισμού θα πρέπει να προσδιορίζεται από την σχέση:

$$\sigma_{\theta,Rcr,j} = E \left(\frac{t_j}{r} \right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{1}{\omega_j} \cdot \frac{r}{t_j} \right)^4 \right] \quad (3.78)$$

Για κάθε τμήμα j της δεξαμενής θα πρέπει να πληρούνται οι σχέσεις από την 3.29 μέχρι την 3.41 και επίσης θα πρέπει να ισχύει η ακόλουθη σχέση:

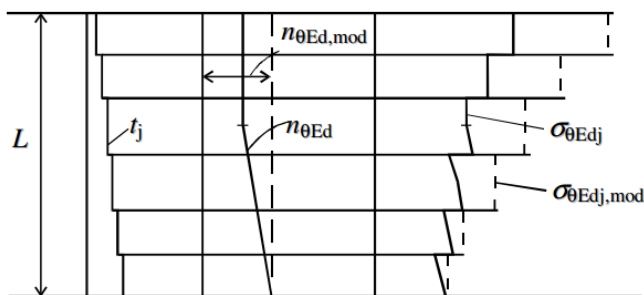
$$\sigma_{\theta,Ed,j} \leq \sigma_{\theta,Rcr,j} \quad (3.79)$$

Εφόσον η τιμή σχεδιασμού της προκύπτουσας περιμετρικής τάσης $n_{\theta,Ed}$ είναι σταθερή σε όλο το μήκος L , η τιμή της περιμετρικής θλιπτικής τάσης μεμβράνης στο τμήμα j , θα πρέπει να ληφθεί ως εξής:

$$\sigma_{\theta,Ed,j} = n_{\theta,Ed} / t_j \quad (3.80)$$

Εάν η τιμή σχεδιασμού της προκύπτουσας περιμετρικής τάσης $n_{\theta,Ed}$ ποικίλλει εντός του μήκους L , η τιμή της περιμετρικής θλιπτικής τάσης μεμβράνης θα πρέπει να ληφθεί ως μια πλασματικά τιμή $\sigma_{\theta,Ed,j,mod}$ και προσδιορίζεται από τη μέγιστη τιμή της προκύπτουσας περιμετρικής τάσης $n_{\theta,Ed}$ οπουδήποτε εντός του μήκους L , δια του τοπικού πάχους t_j (βλ. σχήμα 3.17), και καθορίζεται ως εξής:

$$\sigma_{\theta,Ed,j,mod} = \max(n_{\theta,Ed}) / t_j \quad (3.81)$$



Σχήμα 3.17: Διάγραμμα της περιμετρικής θλιπτικής τάσης μεμβράνης στις περιπτώσεις όπου το $n_{\theta Ed}$ ποικίλλει εντός του μήκους L .

➤ Διάτμηση

Ο περαιτέρω προσδιορισμός της ελαστικής κρίσιμης διατμητικής τάσης λυγισμού μπορεί κατ'αρχήν να πραγματοποιηθεί από τις σχέσεις 3.75 έως 3.78, αλλά αντικαθιστώντας την περιμετρική έκφραση τάσης (σχέσεις 3.53 έως 3.55) από τις σχετικές εκφράσεις διάτμησης 3.59 έως 3.61.

Για επαλήθευση αντοχής σε λυγισμού λόγω διάτμησης μπορούν να εφαρμοστούν οι σχέσεις 3.77 έως 3.79, αλλά αντικαθιστώντας τις εκφράσεις της περιμετρικής τάσης από τις σχετικές εκφράσεις διατμήσεως.

3.3 Έλεγχοι για χαλύβδινές δεξαμενές από A10 του EN 1998-4:2006

Η ακεραιότητα της περιοχής της γωνίας μεταξύ του ελάσματος βάσης και του τοιχώματος μιας αγκυρωμένης ή μη αγκυρωμένης δεξαμενής θα πρέπει να ελέγχεται υπό τις τάσεις και τις καταπονήσεις που προβλέπει η θεωρία από την ανάλυση για τη σεισμική κατάσταση σχεδιασμού. Επιπλέον, η σταθερότητα του τοιχώματος της δεξαμενής κοντά αλλά και πάνω από τη βάση πρέπει να επαληθεύονται για δύο πιθανούς τρόπους αστοχίας.

➤ Έλεγχος σε ελαστικό λυγισμό

Αυτή η μορφή λυγισμού έχει παρατηρηθεί σε εκείνα τα μέρη του κελύφους, όπου το πάχος μειώνεται σε σχέση με το πάχος της βάσεως και / ή η εσωτερική πίεση (η οποία έχει μια σταθεροποιητική επίδραση) μειώνεται επίσης σε σχέση με την μέγιστη τιμή καθώς φτάνει στη βάση. Για δεξαμενές με συνεχή ή διαφορετικό πάχος τοιχώματος, ο έλεγχος για ελαστικό λυγισμό πρέπει να πραγματοποιηθεί στη βάση, καθώς και στο τοίχωμα πάνω από τη βάση. Λόγω της σταθεροποιητικής επίδρασης της εσωτερικής πίεσης, ο έλεγχος θα πρέπει να βασίζεται στην ελάχιστη δυνατή τιμή της εσωτερικής πίεσης στη σεισμική κατάσταση σχεδιασμού.

Ως εναλλακτική λύση από το πρότυπο EN 1993-1-6, η ακόλουθη ανισότητα μπορεί να ελεγχθεί:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_{c1}} \leq 0,19 + 0,81 \frac{\sigma_p}{\sigma_{c1}} \quad (3.82)$$

$$\sigma_{c1} = 0,6 \cdot E \frac{s}{R} \quad (3.83)$$

όπου σ_m είναι η μέγιστη κατακόρυφη τάση μεμβράνης και σ_{c1} είναι η ιδανική κρίσιμη τάση λυγισμού για δεξαμενές φορτισμένες με αξονική θλίψη.

$$\sigma_p = \sigma_{c1} \left[1 - \left(1 - \frac{\bar{p}}{5} \right)^2 \left(1 - \frac{\sigma_o}{\sigma_{c1}} \right)^2 \right]^{1/2} \leq \sigma_{c1} \quad (3.84)$$

$$\text{όπου} \quad \bar{p} = \frac{pR}{s\sigma_{c1}} < 5 \quad (3.85)$$

το p δηλώνει την ελάχιστη δυνατή πίεση στο εσωτερικό στη σεισμική κατάσταση σχεδιασμού και s είναι το πάχος του ελάσματος του τοιχώματος βάσης ή της βάσης.

$$\sigma_o = f_y \left(1 - \frac{\lambda^2}{4} \right) \quad \text{εάν} \quad \lambda^2 = \frac{f_y}{\sigma_{c1}} \leq 2 \quad (3.86)$$

$$\sigma_o = \bar{\sigma}\sigma_{c1} \quad \text{εάν} \quad \lambda^2 \geq 2 \quad (3.87)$$

$$\text{και} \quad \bar{\sigma} = 1 - 1,24 \left(\frac{\delta}{s} \right) \left[\left(1 + \frac{2}{1,24 \left(\frac{\delta}{s} \right)} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (3.88)$$

το δ / s δηλώνει την αναλογία του μεγίστου πλάτους ατέλειας στο πάχος του τοιχώματος, το οποίο μπορεί να ληφθεί ως:

$$\left(\frac{\delta}{s} \right) = \frac{0,06}{\alpha} \sqrt{\frac{R}{s}} \quad (3.89)$$

όπου $\alpha = 1$ για κανονική κατασκευή

$\alpha = 1,5$ για κατασκευή ποιότητας

$\alpha = 2,5$ για πολύ υψηλή ποιότητα κατασκευής

➤ Ελαστική-πλαστική κατάρρευση

Αυτή η μορφή λυγισμού ('elephant's foot') συμβαίνει συνήθως κοντά στη βάση της δεξαμενής, λόγω ενός συνδυασμού των κάθετων τάσεων θλίψης και των εφελκυστικών περιμετρικών τάσεων προκαλώντας μια ανελαστική διαξονική κατάσταση τάσεων. Σε δεξαμενές με μεταβλητό πάχος τοιχώματος, για έλεγχο αυτού του τρόπου λυγισμού δεν πρέπει να περιορίζεται μόνο κοντά στο τμήμα της βάσης της δεξαμενής, αλλά πρέπει να επεκταθεί στο κάτω τμήμα όλων των τμημάτων του τοιχώματος που έχουν σταθερό πάχος.

Η εμπειρική εξίσωση που αναπτύχθηκε για να ελεγχθεί αυτή η μορφή της αστάθειας είναι:

$$\sigma_m = \sigma_{c1} \left[1 - \left(\frac{pR}{sf_y} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{1}{1,12 + r^{1,15}} \right) \left[\frac{r + f_y / 250}{r + 1} \right] \quad (3.90)$$

$$\text{όπου} \quad r = \frac{R/s}{400} \quad (3.91)$$

R είναι η ακτίνα της δεξαμενής

f_y είναι η αντοχή διαρροής του υλικού του τοιχώματος της δεξαμενής σε MPa, και

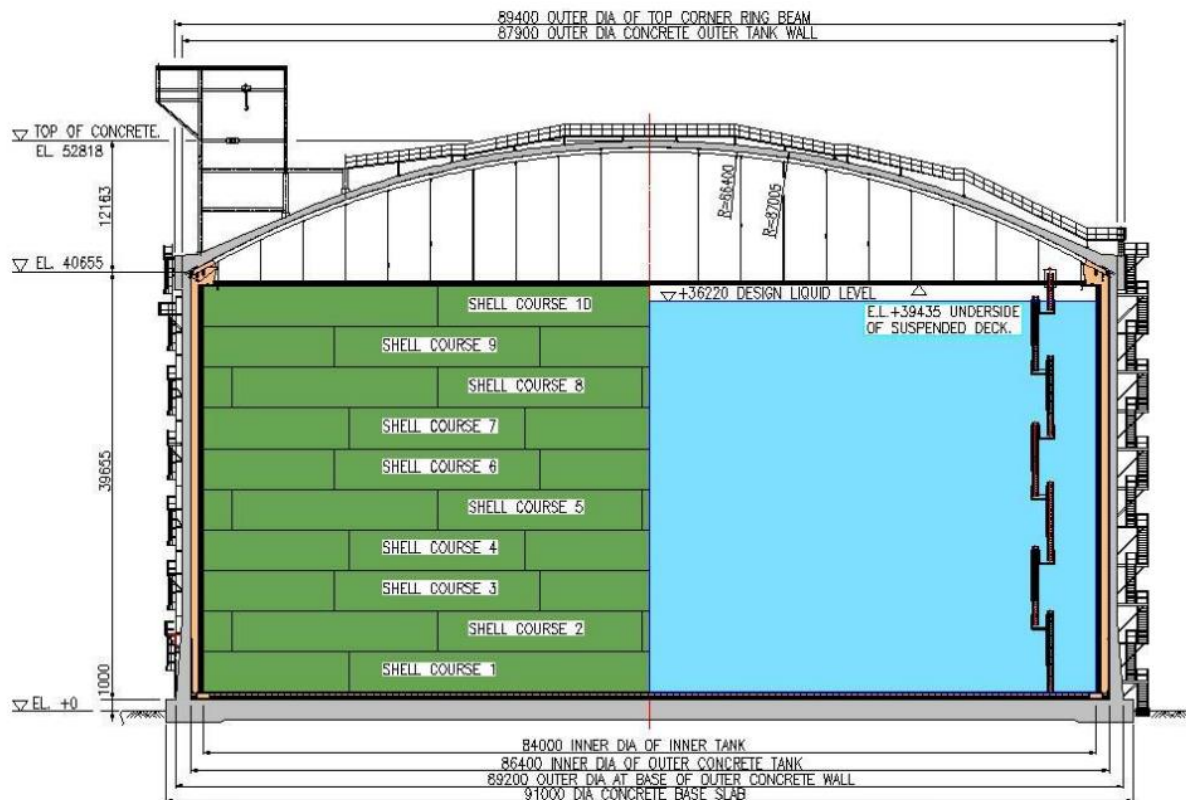
p δηλώνει την μέγιστη δυνατή πίεση στο εσωτερικό στη σεισμική κατάσταση σχεδιασμού σε MPa.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΓΚΡΕΚΡΙΜΕΝΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ

Σ' αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα διάφορα στοιχεία της δεξαμενής (κέλυφος, βάση και κατάστρωμα) και υπολογίζονται τα φορτία που θα ληφθούν υπ' όψιν στην ανάλυση. Η δεξαμενή χάλυβα 9% νικέλιο είναι τύπου πλήρης συγκράτησης και οι προδιαγραφές (από πραγματική δεξαμενή της εταιρείας KOGAS) της είναι οι ακόλουθες.

4.1 Προδιαγραφές και περιορισμοί της δεξαμενής

- Ολική χωρητικότητα (Gross capacity) : 200000 m³ (cold)
- Ειδικό βάρος ΥΦΑ : $\gamma = 480 \text{ kg/m}^3 = 4,8 \text{ kN/m}^3$ (0,48 για API 620 και API 650)
- Πίεση σχεδιασμού : 29 kPa
- Πίεση λειτουργικότητας : 5-25 kPa
- Υπό πίεση σχεδιασμού : -0,5 kPa
- Σχεδιασμός σημείου βρασμού (design Boil Off Rate) : 0,05vol%/day
- Σχεδιασμός στάθμης του υγρού : 36,22 m
- Μέγιστο επίπεδο λειτουργικότητας : 35,92 m
- Διάμετρος εσωτερικής μεταλλικής δεξαμενής : 84,0 m
- Ύψος εσωτερικής μεταλλικής δεξαμενής : 37,61 m
- Θερμοκρασία σχεδιασμού : -170 °C
- Ζώνες-Τμήματα κελύφους : 10
- Μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας υγρού : 11000 m³/hr
- Σεισμικά φορτία : οριζόντιος SSE = 0,48g
οριζόντιος OBE = 0,24g
κατακόρυφη σεισμική απόκριση = 2/3 των οριζόντιων τιμών



Σχήμα 4.1: Τομή δεξαμενής 200000 m³ πλήρης συγκράτησης ΥΦΑ.

$$e = \frac{D}{20S} [98W(H - 0,3) + P] + c \quad \text{για συνθήκες λειτουργίας} \quad (4.1)$$

$$e_t = \frac{D}{20S_t} [98W_t(H_t - 0,3) + P_t] \quad \text{για συνθήκες υδροστατικών δοκιμών} \quad (4.2)$$

όπου c είναι η ανοχή διάβρωσης σε (mm), D είναι η εσωτερική διάμετρος της δεξαμενή σε (m), e και e_t είναι το υπολογιζόμενο πάχος ελάσματος κελύφους σε (mm). S είναι η επιτρεπόμενη τάση σχεδιασμού και S_t είναι η επιτρεπόμενη τάση σε συνθήκες δοκιμών σε (N/mm²) αντίστοιχα. P είναι η πίεση σχεδιασμού και P_t είναι η πίεση δοκιμών σε (mbar) αντίστοιχα (μηδέν για ανοιχτή κορυφή εσωτερικής δεξαμενής). W είναι η μέγιστη πυκνότητα του υγρού υπό συνθήκες αποθήκευσης και W_t η μέγιστη πυκνότητα του νερού σε δοκιμές σε (kg/L) αντίστοιχα. H είναι το ύψος από τον πυθμένα του τμήματος του κελύφους υπό εξέταση στη μέγιστη σε σχεδιασμό στάθμη του υγρού και H_t είναι το ύψος από τον πυθμένα του τμήματος του κελύφους υπό εξέταση στη στάθμη δοκιμών του υγρού σε (m) αντίστοιχα.

Είδος χάλυβα	Επιτρεπόμενη τάση για συνθήκες λειτουργίας	Επιτρεπόμενη τάση για συνθήκες υδροστατικών δοκιμών
χάλυβας 9% νικέλιο	το μικρότερο από: 0,43 f_u ή 0,67 f_y	το μικρότερο από: 0,60 f_u ή 0,85 f_y ή 340 N/mm ²

Πίνακας 4.4: Προσδιορισμός της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης (S και S_t) σχεδιασμού.

★ Σε περίπτωση αντισεισμικού σχεδιασμού, η επιτρεπόμενη τάση για OBE θα πρέπει να είναι 1,33 φορές την επιτρεπόμενη τάση για συνθήκες λειτουργίας. Για SSE, η επιτρεπόμενη τάση θα πρέπει να είναι 1,00 f_y , σε εφελκυσμό και η κρίσιμη τάση λυγισμού σε θλίψη.

• Πυθμένας

Το ελάχιστο πάχος των ελασμάτων του πυθμένα, εξαιρουμένης ανοχής διάβρωσης, είναι $e_b = 5$ mm (σχήμα 4.2β).

Τα δακτυλιοειδείς ελάσματα πρέπει να έχουν ελάχιστο πάχος (εξαιρουμένης ανοχής διάβρωσης), e_a :

$$e_a = \left(3 + \frac{e_1}{3}\right) \quad , \quad \text{όχι όμως μικρότερο από } 8 \text{ mm} \quad (4.3)$$

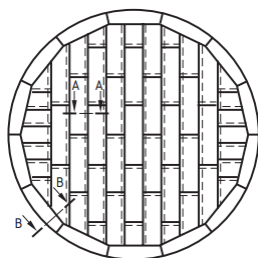
όπου e_1 είναι το πάχος του τμήματος του κελύφους στον πυθμένα, σε mm.

Το ελάχιστο πλάτος l_a , μεταξύ του άκρου του ελάσματος πυθμένα και της εσωτερικής πλευράς του κελύφους, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2γ είναι:

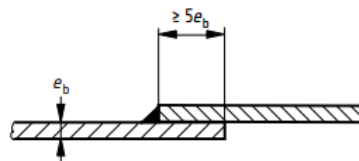
$$\text{η μεγαλύτερη τιμή από } \alpha) \quad l_a > \frac{240}{\sqrt{H}} e_a \quad \text{ή} \quad \beta) \quad 500 \text{ mm} \quad (4.4)$$

όπου e_a είναι το πάχος του δακτυλιοειδούς ελάσματος σε (mm) και H είναι μέγιστο ύψος σχεδιασμού του υγρού σε (m).

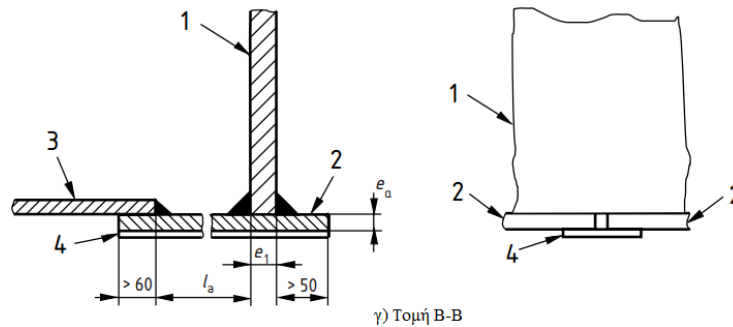
Η ελάχιστη απόσταση από την εξωτερική επιφάνεια του κελύφους προς την εξωτερική άκρη του δακτυλιοειδούς ελάσματος πρέπει να είναι 50 mm.



α) με δακτυλιοειδείς ελάσματα στην περίμετρο



β) Τμήμα A-A, αλληλοεπικάλυψη των ελασμάτων πυθμένα



- | | |
|------------------------|----------------------------------|
| 1 κέλυφος | 3 έλασμα πυθμένα (sketch plate) |
| 2 δακτυλιοειδές έλασμα | 4 έλασμα υπόθεμα (backing strip) |

Σχήμα 4.2: Τυπική διάταξη πυθμένα.

- **Ενδιάμεση απόσταση δακτυλιοειδών ενισχύσεων (stiffener ring).**

Η μετασχηματισμένη μέθοδος κελύφους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ενδιάμεσης απόστασης δακτυλιοειδών ενισχύσεων για κελύφη με μεταβαλλόμενο πάχος κελύφους. Το ισοδύναμο ύψος (απόσταση) μεταξύ των δακτυλιοειδών ενισχύσεων υπολογίζεται ως εξής:

$$H_e = h \sqrt{\left(\frac{e_{\min}}{e}\right)^5} \quad (4.5)$$

όπου e είναι το πάχος της κάθε ζώνης (course) με τη σειρά της σε (mm), e_{\min} είναι το πάχος της ανώτατης ζώνης σε (mm), H_e είναι το ισοδύναμο σταθερό ύψος της κάθε ζώνης στο e_{\min} σε (m) και h είναι το ύψος της κάθε ζώνης με τη σειρά σε (m).

Η δακτυλιοειδής ενίσχυση πρέπει να συνδέεται με το κέλυφος με συνεχή συγκόλληση και από τις δύο επιφάνειες της. Στην περίπτωση που η ενδιάμεση δακτυλιοειδής ενίσχυση διασχίζει μια κάθετη συγκόλληση πρέπει να χρησιμοποιείται μια οπή (mouse-hole). Η δακτυλιοειδής ενίσχυση πρέπει να βρίσκεται τουλάχιστον 150 mm από μια οριζόντια συγκόλληση.

4.2 Υπολογισμός φορτίων

4.2.1 Ίδιο βάρος

Το ειδικό βάρος του χάλυβα είναι ίσο με $\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$. Η δύναμη λόγω του ειδικού βάρους του χάλυβα από το κέλυφος αλλά και από την βάση ορίζεται με τις ακόλουθες πράξεις:

α) από το κέλυφος :

$$\begin{aligned} P_{\text{κέλυφος}} &= \gamma_{\text{χάλυβα}} \cdot t_{\text{course, μέσος όρος}} \\ &= 78,5 \cdot (3 \cdot 0,01 + 0,0131 + 0,0163 + 0,0192 + 0,0224 + 0,0252 + 0,028 + 0,0312) / 10 \\ &= 78,5 \cdot 0,01854 = 1,45539 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

β) από την βάση:

i) Δακτυλιοειδές έλασμα (annular plate): $p_{\text{annular plate}} = \gamma_{\text{χάλυβα}} \cdot t = 78,5 \cdot 0,0255 = 2,0018 \text{ kN/m}^2$

σε εύρος 3m από την περίμετρο προς το κέντρο της δεξαμενής.

ii) Έλασμα πυθμένα (bottom plate): $p_{\text{bottom plate}} = \gamma_{\text{χάλυβα}} \cdot t = 78,5 \cdot 0,005 = 0,3925 \text{ kN/m}^2$

Το ειδικό βάρος του ΥΦΑ είναι ίσο με $\gamma = 4,8 \text{ kN/m}^3$.

Η στάθμη σχεδιασμού του υγρού είναι 36,22 m.

η πίεση που ασκεί το ΥΦΑ στη βάση είναι $p_{\text{ΥΦΑ}} = \gamma H = 4,8 \cdot 36,22 = 173,856 \text{ kN/m}^2$

4.2.2 Υδροστατικές πιέσεις

Το ειδικό βάρος του ΥΦΑ είναι ίσο με $\gamma = 4,8 \text{ kN/m}^3$.

Η υδροστατική πίεση καθ' ύψος της δεξαμενής είναι $p(z) = \gamma \cdot z = 4,8 \cdot z \text{ kN/m}^2$

4.2.3 Ίδιο βάρος αναρτώμενου καταστρώματος

Το ειδικό βάρος του αλουμινίου είναι ίσο με $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ και το πάχος ίσο με 5 mm.

Το ειδικό βάρος του υαλοβάμβακα (fiberglass blanket) είναι ίσο με $\gamma = 12 \text{ kg/m}^3 = 0,12 \text{ kN/m}^3$ και το πάχος ίσον με 40 mm.

$$P_{\text{αναρτ.καταστρώματος}} = 0,2 \left[(27 \cdot 0,005)_{\text{aluminium}} + (0,12 \cdot 6 \cdot 0,04)_{\text{fiberglass}} \right] = 0,0328 \text{ kN/m}^2$$

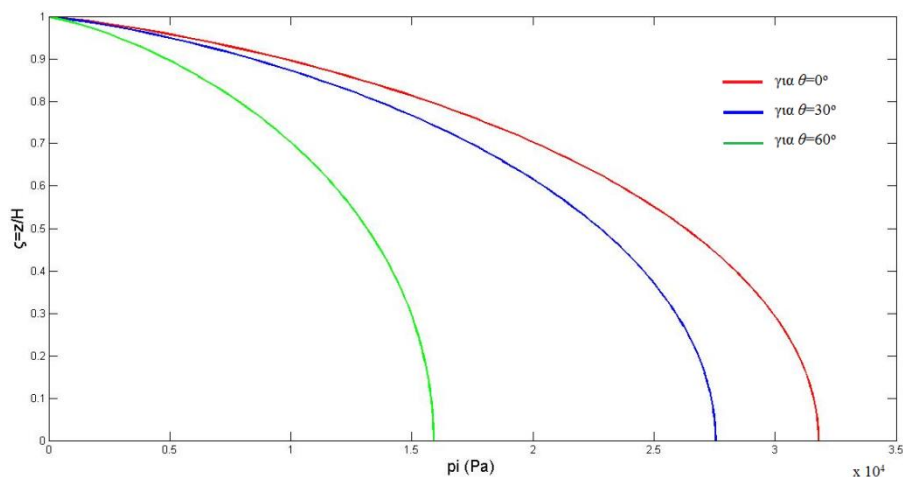
4.2.4 Σεισμική διέγερση

4.2.4.1 Ωστική (impulsive) πίεση, p_i

Η κατανομή της ωστικής πίεσης σε κάθε σημείο στη μάζα του υγρού και σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται από τη σχέση (2.2). Η τιμή της πίεσης στα τοιχώματα προκύπτει από τη σχέση αυτή για $\zeta=1$. Η κατανομή της πίεσης στη διεύθυνση του σεισμού προκύπτει από το σχήμα (2.1). Ως επιτάχυνση εδάφους χρησιμοποιούμε την OBE (Operating Basis Earthquake) ίσον με $a_g = 0,24g$. Ισχύει $\gamma = H/R = 36,22/42 = 0,8623809$ και $\rho R a_g = 480 \cdot 42 \cdot 0,24g = 47464,704 \text{ Pa}$.

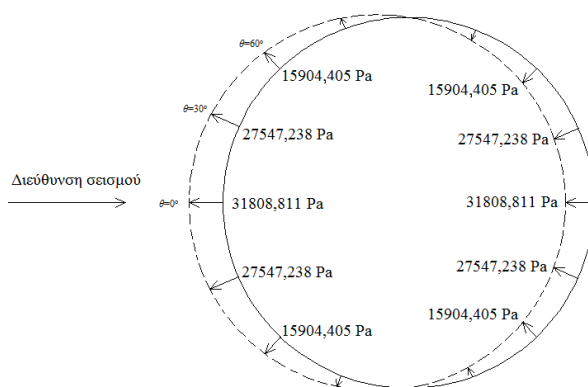
$\zeta = z/H$	z (m)	p_i (Pa) $\theta=0^\circ$	p_i (Pa) $\theta=30^\circ$	p_i (Pa) $\theta=60^\circ$	p_i (Pa) $\theta=90^\circ$
0	0	31808,811	27547,238	15904,405	0
0,05	1,811	31757,545	27502,84	15878,772	0
0,1	3,622	31603,576	27369,499	15801,788	0
0,15	5,433	31345,961	27146,398	15672,98	0
0,2	7,244	30982,375	26831,524	15491,188	0
0,25	9,055	30509,287	26421,817	15254,643	0
0,3	10,866	29922,551	25913,69	14961,276	0
0,35	12,677	29217,304	25302,928	14608,652	0
0,4	14,488	28387,085	24583,937	14193,543	0
0,45	16,299	27423,341	23749,31	13711,671	0
0,5	18,11	26315,785	22790,138	13157,893	0
0,55	19,921	25052,509	21696,109	12526,254	0
0,6	21,732	23618,794	20454,476	11809,397	0
0,65	23,543	21995,25	19048,445	10997,625	0
0,7	25,354	20156,479	17456,023	10078,24	0
0,75	27,165	18069,58	15648,715	9034,79	0
0,8	28,976	15689,555	13587,553	7844,773	0
0,85	30,787	12948,102	11213,385	6474,0509	0
0,9	32,598	9728,4475	8425,0827	4864,2238	0
0,95	34,409	5787,010	5011,6978	2893,505054	0
1	36,22	0	0	0	0

Πίνακας 4.5: Καθ' ύψος κατανομή της ωστικής υδροδυναμικής πίεσης.



Σχήμα 4.3: Καθ' ύψος κατανομή της ωστικής υδροδυναμικής πίεσης για OBE=0,24g .

Η ωστική πίεση μεταβάλλεται στο οριζόντιο επίπεδο από τη μέγιστη τιμή στη διεύθυνση της διέγερσης ($\theta=0^\circ$) σε μηδενική τιμή σε γωνία $\theta=90^\circ$. Για τιμές της γωνίας θ από 180° έως 360° η κατανομή της ωστικής πίεσης είναι συμμετρική της κατανομής που αντιστοιχεί στις γωνίες 0° - 180° . Η ωστική πίεση στη μία πλευρά είναι θετική και στην άλλη αρνητική (βέλη με κατεύθυνση προς το κέντρο της δεξαμενής).



Σχήμα 4.4: Κατανομή της ωστικής υδροδυναμικής πίεσης στα τοιχώματα για $z=0m$

Η ωστική πίεση στη βάση της δεξαμενής προκύπτει από την σχέση (2.2) για $\zeta=0$.

θ	$\zeta = r/R$	p_i (Pa)
0°	0,25	11831,71
	0,5	22076,01
	0,75	28517,27
	1	31808,811
30°	0,25	10246,56
	0,5	19118,38
	0,75	24696,68
	1	27547,238
60°	0,25	5915,855
	0,5	11038
	0,75	14258,63
	1	15904,405
90°	*	0

* = για όλες τις τιμές του ζ

Πίνακας 4.6: Πραγματικές τιμές της ωστικής υδροδυναμικής πίεσης στη βάση της δεξαμενής.

4.2.4.2 Μεταγωγική (convective) πίεση, p_c

Για τον υπολογισμό της μέγιστης κυκλοφορούσας πίεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο η 1^η ιδιομορφή. Η κατανομή της κυκλοφορούσας πίεσης στο κέλυφος προκύπτει από τη σχέση (2.9) για $\xi=1$. Η ιδιοσυχνότητα κάθε ιδιομορφής προκύπτει από τη σχέση (2.11). Για την 1^η ιδιομορφή ισχύει

$$\omega_{c1} = \sqrt{g \frac{\lambda_1}{R} \tanh(\lambda_1 \gamma)} = \sqrt{9,81 \frac{1,841}{42} \tanh(1,841 \cdot \frac{36,22}{42})} = 0,6289 \text{ rad/s}$$

$$T_{c1} = \frac{2\pi}{\omega_{c1}} = \frac{2\pi}{0,6289} = 9,99 \approx 10 \text{ sec}$$

Επιλογή κατηγορίας εδάφους B ($S=1,2$, $T_B=0,15$ s, $T_C=0,5$ s, $T_D=2,0$ s) και συντελεστή απόσβεσης 0,5 % όπως αναφέρεται στην παράγραφο 2.3.3.2 του EN1998-4. Λόγω του ότι το $T_{c1} > 4$ sec για να βρούμε την επιτάχυνση του μονοβάθμιου ταλαντωτή A_{c1} χρησιμοποιείται ο τύπος E.4.6.1-5 του API 650 (11^η έκδοση) όπου

$$A_{c1} = 2,5 K Q F_a S_0 \left(\frac{T_s T_L}{T_{c1}^2} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \quad \text{όπου} \quad K = \eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}} = \sqrt{\frac{7}{2+0,5}} = 1,673, \quad T_s = T_C,$$

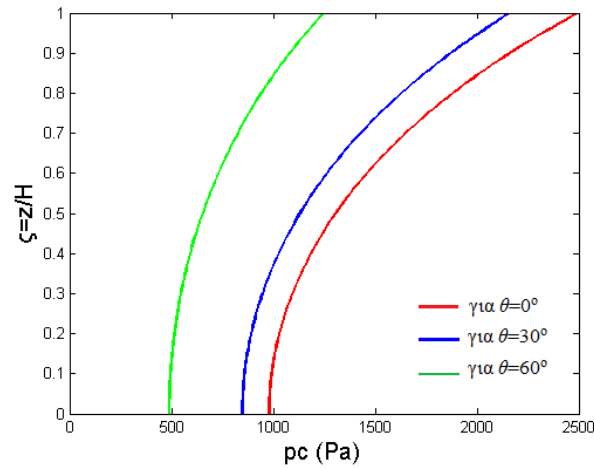
$$A_{c1} = 2,5 \cdot 1,673 \cdot 1 \cdot 0,24 g \cdot 1,2 \left(\frac{0,5 \cdot 4}{9,99^2} \right) \left(\frac{1,25}{2} \right) = 0,01509 g$$

$$\text{και } \rho R A_{c1}(t) = 480 \cdot 42 \cdot 0,01509 g = 2984,343 \text{ Pa}$$

$\zeta = z/H$	z (m)	p_c (Pa) $\theta=0^\circ$	p_c (Pa) $\theta=30^\circ$	p_c (Pa) $\theta=60^\circ$	p_c (Pa) $\theta=90^\circ$
0	0	980,302	848,967	490,151	0
0,05	1,811	983,392	851,643	491,696	0
0,1	3,622	992,683	859,689	496,341	0
0,15	5,433	1008,23	873,155	504,116	0
0,2	7,244	1030,14	892,126	515,069	0
0,25	9,055	1058,54	916,721	529,269	0
0,3	10,866	1093,61	947,097	546,807	0
0,35	12,677	1135,58	983,444	567,792	0
0,4	14,488	1184,71	1025,99	592,356	0
0,45	16,299	1241,31	1075,01	620,656	0
0,5	18,11	1305,74	1130,8	652,868	0
0,55	19,921	1378,39	1193,72	689,197	0
0,6	21,732	1459,74	1264,17	729,871	0
0,65	23,543	1550,29	1342,59	775,147	0
0,7	25,354	1650,62	1429,48	825,31	0
0,75	27,165	1761,35	1525,38	880,676	0
0,8	28,976	1883,19	1630,89	941,595	0
0,85	30,787	2016,9	1746,69	1008,45	0
0,9	32,598	2163,33	1873,5	1081,66	0
0,95	34,409	2323,39	2012,12	1161,7	0
1	36,22	2498,11	2163,43	1249,05	0

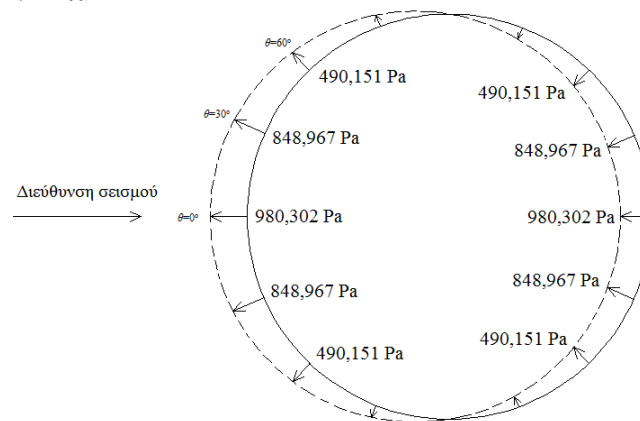
Πίνακας 4.7: Καθ' ύψος κατανομή της μεταγωγικής υδροδυναμικής πίεσης.

(★ Επίσης η ωστική και η μεταγωγική πίεση μπορούν να υπολογιστούν από τις σχέσεις E.6.1.4-1a και E.6.1.4-4a αντίστοιχα, του API 650 (11^η έκδοση))



Σχήμα 4.5: Καθ' ύψος κατανομή της μεταγωγικής υδροδυναμικής πίεσης για $OBE=0,24g$.

Η μεταγωγική πίεση μεταβάλλεται στο οριζόντιο επίπεδο από τη μέγιστη τιμή στη διεύθυνση της διέγερσης ($\theta=0^\circ$) σε μηδενική τιμή σε γωνία $\theta=90^\circ$. Για τιμές της γωνίας θ από 180° έως 360° η κατανομή της μεταγωγικής πίεσης είναι συμμετρική της κατανομής που αντιστοιχεί στις γωνίες 0° - 180° . Η μεταγωγική πίεση στη μία πλευρά είναι θετική και στην άλλη αρνητική (βέλη με κατεύθυνση προς το κέντρο της δεξαμενής).



Σχήμα 4.6: Κατανομή της μεταγωγικής υδροδυναμικής πίεσης στα τοιχώματα για $z=0m$

Η μεταγωγική πίεση στη βάση της δεξαμενής προκύπτει από την σχέση (2.9) για $\zeta=0$.

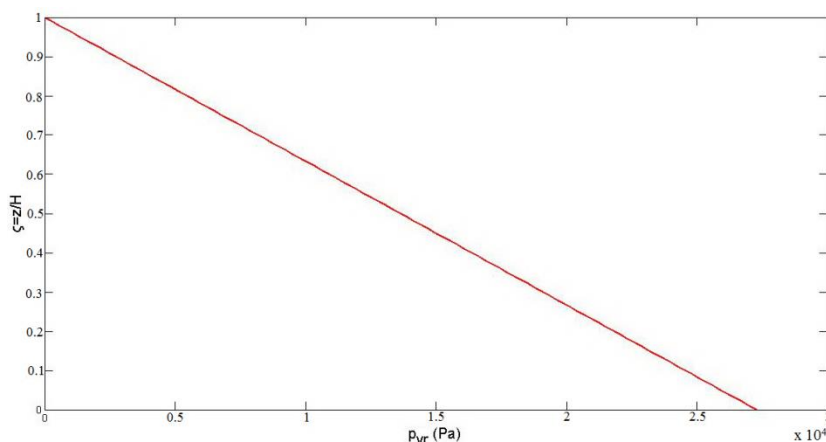
θ	$\zeta = r/R$	p_c (Pa)
0°	0,25	377,529
	0,5	696,131
	0,75	907,098
	1	980,302
30°	0,25	326,95
	0,5	602,867
	0,75	785,57
	1	848,967
60°	0,25	188,765
	0,5	348,066
	0,75	453,549
	1	490,151
90°	*	0

* = για όλες τις τιμές του ξ

Πίνακας 4.8: Πραγματικές τιμές της μεταγωγικής υδροδυναμικής πίεσης στη βάση της δεξαμενής.

4.2.4.3 Υδροδυναμική πίεση λόγω κατακόρυφης διέγερσης

Από την σχέση (2.20) και με κατακόρυφη επιτάχυνση του εδάφους $A_v = \frac{2}{3} \cdot 0,24g = 0,16g$ παίρνουμε την εξής γραφική παράσταση:



Σχήμα 4.7: Καθ' ύψος κατανομή της κατακόρυφης υδροδυναμικής πίεσης για OBE=0,24g .

4.2.4.4 Συνολική υδροδυναμική πίεση

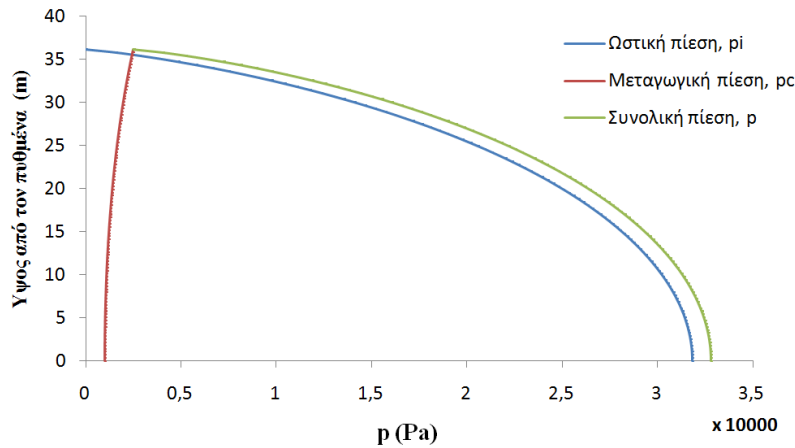
$\zeta = z/H$	z (m)	p (Pa) $\theta=0^\circ$	p (Pa) $\theta=30^\circ$	p (Pa) $\theta=60^\circ$	p (Pa) $\theta=90^\circ$
0	0	32789,113	28396,205	16394,556	0
0,05	1,811	32740,937	28354,483	16370,468	0
0,1	3,622	32596,259	28229,188	16298,129	0
0,15	5,433	32354,193	28019,553	16177,096	0
0,2	7,244	32012,513	27723,65	16006,257	0
0,25	9,055	31567,825	27338,539	15783,913	0
0,3	10,866	31016,165	26860,787	15508,082	0
0,35	12,677	30352,887	26286,372	15176,444	0
0,4	14,488	29571,798	25609,928	14785,899	0
0,45	16,299	28664,652	24824,317	14332,326	0
0,5	18,11	27621,521	23920,939	13810,761	0
0,55	19,921	26430,903	22889,833	13215,451	0
0,6	21,732	25078,536	21718,649	12539,268	0
0,65	23,543	23545,543	20391,038	11772,771	0
0,7	25,354	21807,099	18885,502	10903,549	0
0,75	27,165	19830,932	17174,091	9915,466	0
0,8	28,976	17572,744	15218,443	8786,3722	0
0,85	30,787	14965,003	12960,072	7482,5013	0
0,9	32,598	11891,776	10298,58	5945,8878	0
0,95	34,409	8110,4047	7023,8165	4055,2024	0
1	36,22	2498,1099	2163,4266	1249,055	0

Πίνακας 4.9: Καθ' ύψος κατανομή της συνολικής υδροδυναμικής πίεσης.

θ	$\zeta = r/R$	p (Pa)
0°	0,25	12209,24
	0,5	22772,14
	0,75	29424,37
	1	32789,11
30°	0,25	10573,51
	0,5	19721,25
	0,75	25482,25
	1	28396,21
60°	0,25	6104,62
	0,5	11386,07
	0,75	14712,18
	1	16394,56
90°	*	0

* = για όλες τις τιμές του ζ

Πίνακας 4.10: Πραγματικές τιμές συνολικής υδροδυναμικής πίεσης στη βάση της δεξαμενής.



Σχήμα 4.8: Κατανομή της ωστικής, μεταγωγικής και συνολικής υδροδυναμικής πίεσης στο κέλυφος για $\theta=0^\circ$.

4.2.5 Υπολογισμός της τέμνουσας βάσης και της ροπής ανατροπής με την απλοποιημένη μέθοδο

Από τον πίνακα (2.1) με γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στις τιμές που αντιστοιχούν σε λυγηρότητα 0,7 και 1 προκύπτουν οι πιο κάτω τιμές των συντελεστών για λυγηρότητα $\gamma=0,86238$.

$$C_i = 6,69 \quad , \quad m_i/m = 0,487 \quad , \quad h_i/H = 0,411 \quad , \quad h'_i/H = 0,877$$

$$C_c = 1,563 \quad , \quad m_c/m = 0,525 \quad , \quad h_c/H = 0,595 \quad , \quad h'_c/H = 0,907$$

Το μέγιστο ύψος του κύματος προκύπτει από τη σχέση (2.19) ίσο με:

$$d_{\max} = 0,84 \cdot R \cdot S_e(T_{c1})/g = 0,84 \cdot 42 \cdot 0,01509g / g = 0,53 \text{ m.}$$

Η μάζα του υγρού θα είναι $m = \pi R^2 H \rho = \pi \cdot 42^2 \cdot 36,22 \cdot 480 = 96346986,79 \text{ kg}$

$$m_i = 0,487 \cdot 96346986,79 = 46920982,57 \text{ kg}$$

$$m_c = 0,525 \cdot 96346986,79 = 50582168,07 \text{ kg}$$

$$h_i = 0,411 \cdot 36,22 = 14,886 \text{ m}$$

$$h_c = 0,595 \cdot 36,22 = 21,551 \text{ m}$$

$$h'_i = 0,877 \cdot 36,22 = 31,765 \text{ m}$$

$$h'_c = 0,907 \cdot 36,22 = 32,852 \text{ m}$$

Θεωρώντας ότι το πάχος του κελύφους είναι ο μέσος όρος των ζωνών του κελύφους:

$$t_{\text{course, μέσος όρος}} = (3 \cdot 0,01 + 0,0131 + 0,0163 + 0,0192 + 0,0224 + 0,0252 + 0,028 + 0,0312) / 10 = 0,01854 \text{ m}$$

$$\text{και η μάζα του } m_w = \pi(R^2 - r^2)H_{ol}\rho + m_{\text{stiffener rings}} = 7850 \cdot \pi \{ (42,01854^2 - 42^2) \cdot 37,61 + 2,34822 \} \\ = 1502710,6 \text{ kg}$$

(την μάζα των stiffener rings την βρήκα με τον τύπο $\rho t \pi (R^2 - r^2)$)

Η μάζα της οροφής είναι (θα λάβουμε υπόψη το 20%)

$$m_r = \pi R^2 \cdot 0,2 \left[(2700 \cdot 0,005)_{\text{aluminium}} + (12 \cdot 6 \cdot 0,04)_{\text{fiberglass}} \right] = \pi \cdot 42^2 \cdot 3,28 = 18177,004 \text{ kg}$$

Από τις σχέσεις (2.31) και (2.32) προκύπτουν οι ιδιοπερίοδοι κάθε συνιστώσας της κίνησης.

$$T_{\text{imp}} = C_i \frac{\sqrt{\rho H}}{\sqrt{s/R} \sqrt{E}} = 6,69 \frac{\sqrt{480 \cdot 36,22}}{\sqrt{0,01854/42} \sqrt{210 \cdot 10^9}} = 0,5514 \text{ sec}$$

$$T_{con} = C_c \sqrt{R} = 1,563 \sqrt{42} = 10,13 \text{ sec}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}} = \sqrt{\frac{7}{2+2}} \approx 1,323 \quad (\text{θεωρώντας } \xi=2\% \text{ στην οριακή κατάσταση σχηματισμού βλαβών})$$

$$\text{για } T_c \leq T_{imp} \leq T_D$$

$$S_e(T_{imp}) = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \frac{T_c}{T_D} = 0,24g \cdot 1,2 \cdot 1,323 \cdot 2,5 \cdot \frac{0,5}{2,5} = 0,1905g$$

$$S_e(T_{con}) = A_c = 2,5 KQF_d S_0 \left(\frac{T_s T_L}{T_{c1}^2} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) = 2,5 \cdot 1,673 \cdot 1 \cdot 0,24g \cdot 1,2 \left(\frac{0,5 \cdot 4}{10,13^2} \right) \left(\frac{1,25}{2} \right) = 0,01467g$$

$$Q = (m_i + m_w + m_r) S_e(T_{imp}) + m_c S_e(T_{con})$$

$$= (46920982,57 + 1502710,6 + 18177,004) \cdot 0,1905g + (50582168,07 \cdot 0,01467g)$$

$$= 90528409,19 + 7279416,379 = 97807825,57 \text{ kg} \frac{m}{s^2} = 97807825,57 \text{ N} = 97807,8256 \text{ kN}$$

$$M' = (m_i h_i' + m_w h_w' + m_r h_r') S_e(T_{imp}) + m_c h_c' S_e(T_{con})$$

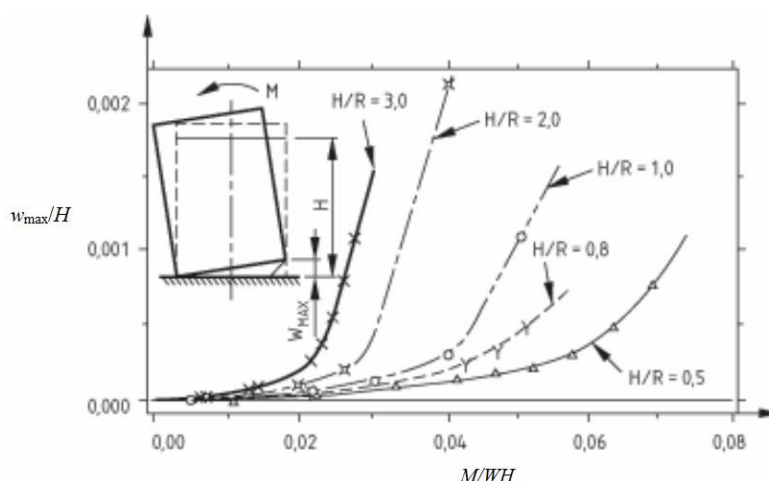
$$= (46920982,57 \cdot 31,765 + 1502710,6 \cdot 14,5 + 18177,004 \cdot 37,61) \cdot 0,1905g + (50582168,07 \cdot 32,852 \cdot 0,01467g)$$

$$= 2827348634 + 239143386,9 = 3066492020 \text{ kg} \frac{m}{s^2} = 3066492,020 \text{ kNm}$$

4.3 Έλεγχοι για μη αγκυρωμένες δεξαμενές σε έδαφος (EN 1998-4)

4.3.1 Ανύψωση κελύφους και μήκος ανύψωσης του ελάσματος βάσης

Η κατακόρυφη ανύψωση στην άκρη της βάσης, w , όπως προκύπτει από μια παραμετρική μελέτη με μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για μη αγκυρωμένες κυλινδρικές χαλύβδινες δεξαμενές σε έδαφος, που χρησιμοποιείται συνήθως για γεωμετρικές, σταθερές και βαριές οροφές. (W = ολικό βάρος του υγρού)



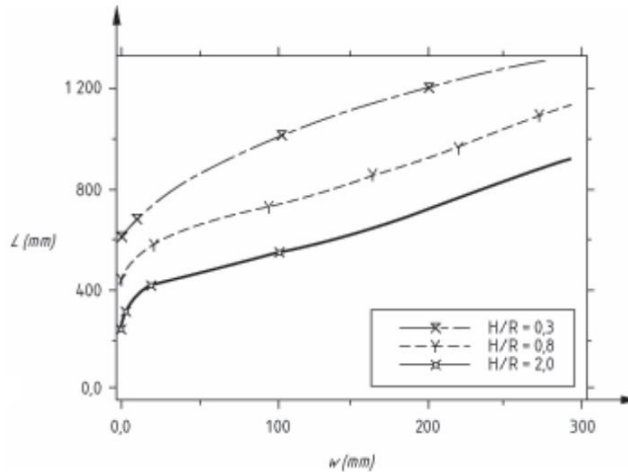
Σχήμα 4.9: Η μέγιστη κατακόρυφη ανύψωση για μη αγκυρωμένες κυλινδρικές χαλύβδινες δεξαμενές σε έδαφος με σταθερή οροφή σε σχέση με την ροπή ανατροπής M/WH .

$$WH = 96346986,79 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 36,22 \text{ m} = 3,4234 \cdot 10^{10} \text{ kg m/s}^2$$

$$M/WH = 3066492020 / 3,4234 \cdot 10^{10} = 0,08956$$

$$\text{Από σχήμα 4.8 } w_{max}/H = 0,003 \leftrightarrow w_{max} = 0,003 \cdot 36,22 = 0,10866 \text{ m} = 108,66 \text{ mm}$$

Για την εκτίμηση της ακτινικής τάσης μεμβράνης στο έλασμα είναι απαραίτητο το μήκος L του τμήματος του πυθμένα της δεξαμενής που ανυψώθηκε. Μόλις συμβεί ανύψωση, η εξάρτηση του μήκους L στην κάθετη ανύψωση w είναι σχεδόν γραμμική. (για τα δεδομένα της συγκεκριμένης δεξαμενής στη διπλωματική χρησιμοποιούμε το σχήμα A.13b του EN 1998-4)



Σχήμα 4.10: Μήκος του τμήματος της βάσης της δεξαμενής που ανυψώθηκε, ως συνάρτηση της κάθετης ανύψωσης στην άκρη.

Για $w = 108,66$ mm από σχήμα 4.10 έχουμε $L = 750$ mm < 3000 mm (length of annular plate)

4.3.2 Επιμήκης τάση μεμβράνης στο έλασμα βάσης

$$\sigma_{rb} = \frac{1}{s} \left(\frac{2}{3} \frac{E}{1-\nu^2} s p^2 R^2 (1-\mu)^2 \right)^{1/3} \quad (4.6)$$

και

$$\mu = 1 - L / (2R) \quad (4.7)$$

όπου s είναι το πάχος του ελάσματος βάσης (annular plate) και p η πίεση στη βάση.

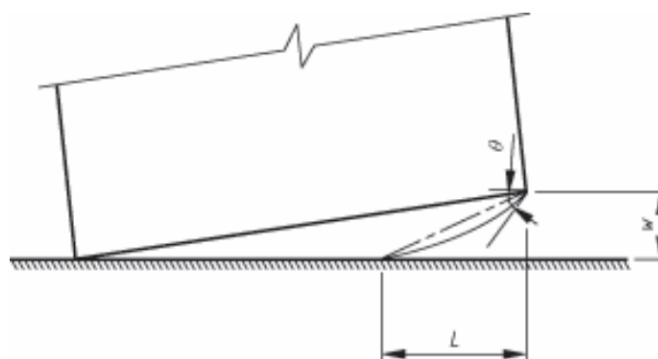
Έχουμε $\mu = 1 - 0,75 / (2 \cdot 42) = 0,9912$

$$\begin{aligned} \sigma_{rb} &= \frac{1}{0,0255m} \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{21 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2}{1-0,3^2} \cdot 0,0255m \cdot (173,856 \text{ kN/m}^2)^2 \cdot 42^2 m^2 \cdot (1-0,9912)^2 \right)^{1/3} \\ &= 99223,95 \text{ kN/m}^2 = 99223,95 \text{ kPa} = 99,224 \text{ MPa} < (\text{πίνακας 4.4}) 0,43f_u = 0,43 \cdot 690 = 296,7 \text{ MPa} \rightarrow \text{O.K} \end{aligned}$$

Όταν πραγματοποιείται σημαντική ανύψωση δεξαμενής μεγάλης διαμέτρου, επικρατεί κάμψη του ελάσματος λόγω των τάσεων στο ανυψωθέν τμήματος του ελάσματος βάσης στην οριακή κατάσταση (συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης της πίεσης που ενεργεί στην βάση των δεξαμενών) και όχι από τάσεις μεμβράνης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τάσεων.

4.3.3 Πλαστική περιστροφή του ελάσματος βάσης

Συνιστάται να σχεδιάζεται το δακτυλιοειδές έλασμα με ένα πάχος μικρότερο από το πάχος κελύφους της δεξαμενής, έτσι ώστε να αποφευχθεί η καμπτική διαρροή στη βάση του κελύφους. Η περιστροφή της πλαστικής άρθρωσης στη βάση της δεξαμενής πρέπει να είναι συμβατή με τη διαθέσιμη τιμή της καμπτικής παραμόρφωσης. Για μέγιστη επιτρεπόμενη τάση χάλυβα 0,05 και πιθανολογούμενο μήκος της πλαστικής άρθρωσης ίσο με $2s$ η μέγιστη επιτρεπόμενη περιστροφή είναι 0,20 rads.



Σχήμα 4.11: Πλαστική περιστροφή του ελάσματος βάσης σε ανυψωμένη δεξαμενή.

$$\theta = \left(\frac{2w}{L} - \frac{w}{2R} \right) < 0,2 \text{ rads} \quad (4.8)$$

και έχουμε $\theta = \left(\frac{0,10866}{0,75} - \frac{0,10866}{2 \cdot 42} \right) = 0,1436 \text{ rads}$

4.3.4 Αντίσταση ολισθήσεως (API 650-2009)

Για self-anchored χαλύβδινες δεξαμενές, η τριβή μεταξύ του πυθμένα της δεξαμενής και της θεμελίωσης πρέπει να αντισταθεί στη συνολική οριζόντια σεισμική δύναμη διάτμησης. Η υπολογισθείσα σεισμική διάτμηση βάσης, V , δεν πρέπει να υπερβαίνει την V_s . Ο συντελεστής τριβής, μ , δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,4. Κατώτερες τιμές του συντελεστή τριβής θα πρέπει να εφαρμοστούν προκειμένου, εάν η διασύνδεση του πυθμένα και της θεμελίωσης δεν μπορεί να δικαιολογήσει την παραπάνω τιμή τριβής.

$$V_s = \mu(W_s + W_r + W_f + W_p)(1 - 0,4A_v) \quad (4.9)$$

όπου W_s είναι το συνολικό βάρος του κελύφους της δεξαμενής και των παρελκόμενων σε N, W_r είναι το συνολικό βάρος της οροφής της δεξαμενής σε N, W_f είναι το βάρος του πυθμένα της δεξαμενής σε N, W_p είναι το συνολικό βάρος των περιεχομένων της δεξαμενής με βάση το ειδικό βάρος σχεδιασμού του προϊόντος σε N και A_v κατακόρυφη σεισμική επιτάχυνση εδάφους σε %g.

$$W_s = 1502710,6 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 14741591 \text{ N} = 14741,591 \text{ kN}$$

$$W_r = 18177,004 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 178316,41 \text{ N} = 178,31641 \text{ kN}$$

$$W_f = \pi \rho \left[(R^2 - r^2) t_{\text{annular plate}} + r^2 t_{\text{bottom plate}} \right] \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = \pi \cdot 7850 \left[(42^2 - 39^2) \cdot 0,0255 + 0,005 \cdot 39^2 \right] \cdot 9,81$$

$$= 3338987,757 \text{ N} = 3338,988 \text{ kN}$$

$$W_p = 96346986,79 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 945163940,4 \text{ N} = 945163,94 \text{ kN}$$

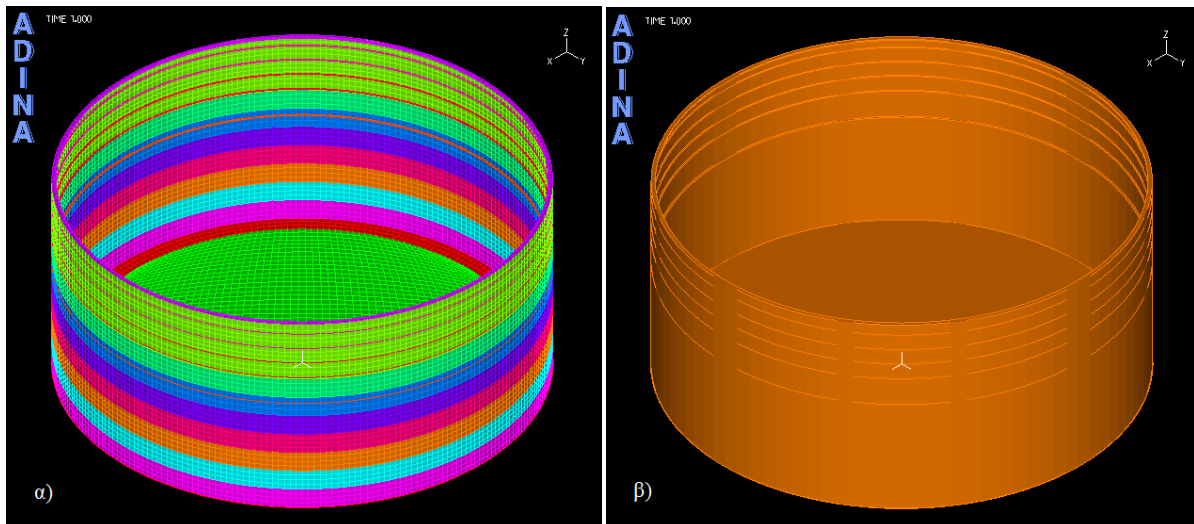
$$A_v = 0,24g \cdot 2/3 = 0,16g$$

άρα $V_s = 0,4(14741591 + 178316,41 + 3338987,757 + 945163940,4)(1 - 0,4 \cdot 0,16)$
 $= 360705509,6 \text{ N} = 360705,51 \text{ kN} > Q = 97807,8256 \text{ kN} \rightarrow \text{O.K}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ADINA

5.1 Περιγραφή του προσομοιώματος

Η δεξαμενή που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4 προσομοιώνεται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA ώστε να προσδιοριστεί η συμπεριφορά της στις διάφορες φορτίσεις που πιθανώς να δεχτεί. Οι φορτίσεις αυτές έχουν επίσης περιγραφεί στο κεφάλαιο 4. Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα δίκτυο τετρακομβικών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους διάστασης (mesh density) $1m \cdot 1m$ τόσο στα τοιχώματα, τη βάση αλλά και τα ενισχυτικά δακτυλίδια του κελύφους. Χρησιμοποιείται υλικό (γραμμικώς ελαστικό ή γραμμικώς ελαστικό-απολύτως πλαστικό ανάλογα με την ανάλυση) με όριο διαρροής $\min 585 \text{ MPa}$. Η βάση της δεξαμενής θεωρείται ότι στηρίζεται σε όλη της την επιφάνεια με αρθρώσεις (δέσμευση όλων των μετατοπίσεων και της στροφής κατά τον άξονα z). Η δεξαμενή στο σχήμα 5.1α αποτελείται από διαφορετικά είδη χρωμάτων λόγω των διαφορετικών ομάδων στοιχείων (element group) τα οποία ορίστηκαν με βάση το πάχος του τμήματος-course του κελύφους, της βάσης αλλά και το πάχος των ενισχυτικών δακτυλιδιών-stiffener rings της δεξαμενής.



Σχήμα 5.1: Προσομοίωμα της δεξαμενής με πεπερασμένα στοιχεία.

5.2 Στατικές φορτίσεις

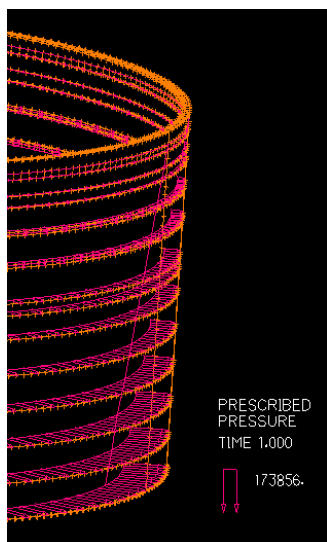
5.2.1 Γραμμική ανάλυση

5.2.1.1 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

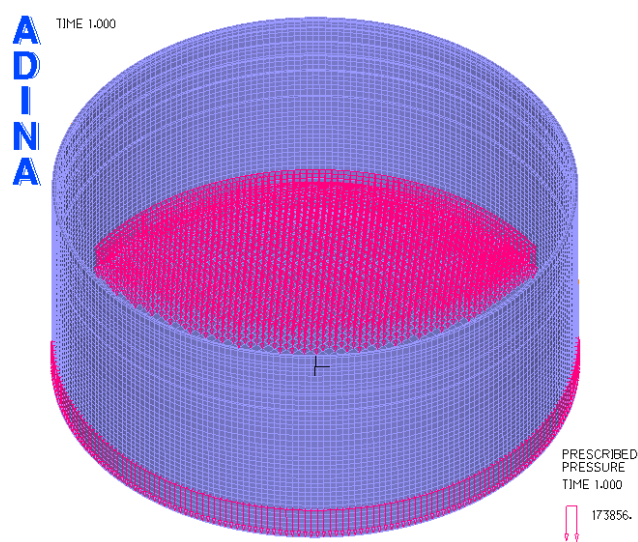
Οι φορτίσεις που ελέγχονται εκτός από το ίδιο βάρος της δεξαμενής είναι οι υδροστατικές πιέσεις στο κέλυφος αλλά και η πίεση της οροφής στο ενισχυτικό δακτυλίδι κορυφής.

Είδος φόρτισης	Συντελεστής Ασφαλείας	Μέγιστη τιμή (Pa)	
Υδροστατική πίεση	1	173856	Γραμμική κατανομή καθ' ύψος με μηδενική τιμή στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού και μέγιστη στον πυθμένα της δεξαμενής.
Ίδιο βάρος κελύφους, ενισχυτικών δακτυλιδιών και βάσης	1		Ορίζεται από το λογισμικό ADINA. Ορίσαμε πυκνότητα υλικού 7850 kg/m^3 . Στα φορτία (mass proportional) καθορίσαμε ως magnitude $9,81 \text{ m/s}^2$.
Ίδιο βάρος οροφής	1	32.8	Τοποθετείται στο ενισχυτικό δακτυλίδι κορυφής.

Πίνακας 5.1: Φορτία.

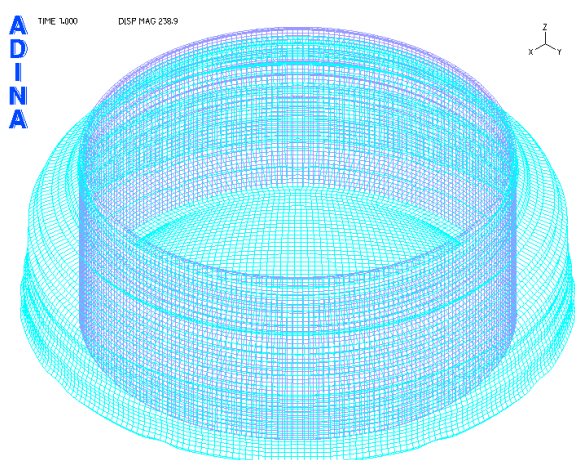


Σχήμα 5.2: Υδροστατικές πιέσεις στο κέλυφος.

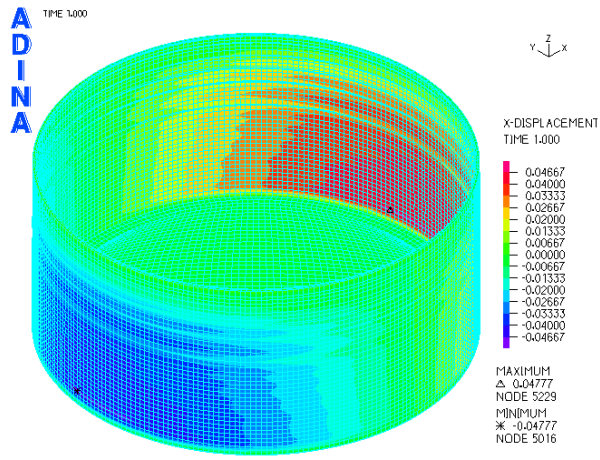


Σχήμα 5.3: Υδροστατικές πιέσεις στη βάση.

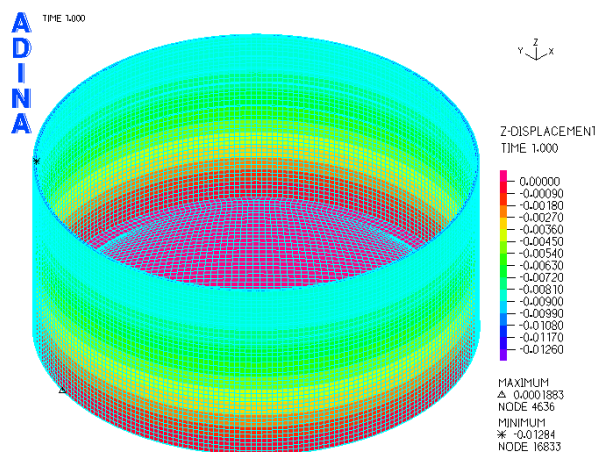
Αρχικά γίνεται γραμμική ανάλυση με φορτία αυτά που περιλαμβάνονται στον πίνακα (5.1). Η μέγιστη κατ' απόλυτη τιμή μετατόπιση στη διεύθυνση x αναπτύσσεται κοντά στη βάση της δεξαμενής, όπου αναπτύσσεται η μεγαλύτερη υδροστατική πίεση, σε δύο αντιδιαμετρικούς κόμβους. Το ίδιο ισχύει και για τη μέγιστη μετατόπιση παράλληλα στον άξονα y. Στα επόμενα θα παρουσιάζεται μόνο το διάγραμμα μετατοπίσεων στη διεύθυνση x καθώς το διάγραμμα μετατοπίσεων στη διεύθυνση y θα είναι όμοιο με αυτό.



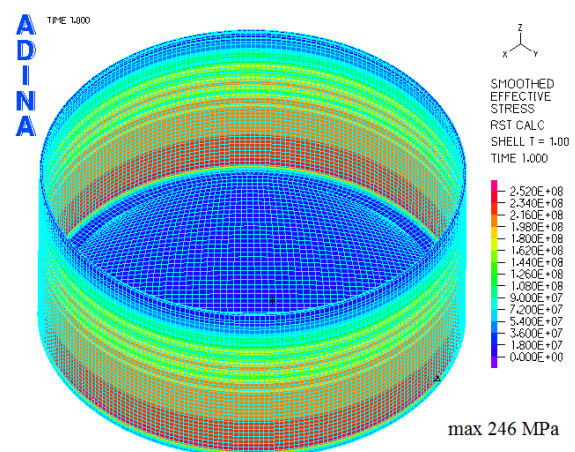
Σχήμα 5.4: Παραμορφωμένη κατάσταση σε μεγέθυνση.



Σχήμα 5.5: Μετατοπίσεις στη διεύθυνση x.



Σχήμα 5.6: Μετατοπίσεις στη διεύθυνση z.



Σχήμα 5.7: Ενεργός τάση.

Διεύθυνση μετατόπισης	Μετατόπιση (m)
x	0,048*
y	0,048
z	0,013**

Πίνακας 5.2: Μέγιστες μετατοπίσεις σε απόλυτη τιμή.

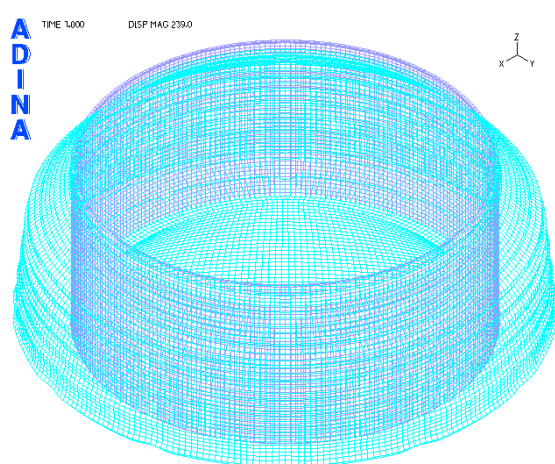
* το node 5016,5229 βρίσκονται περίπου στα 2,8m ύψος από τον πυθμένα.

** το node 16833 βρίσκεται στην άκρη του ενισχυτικού δακτυλιδιού κορυφής.

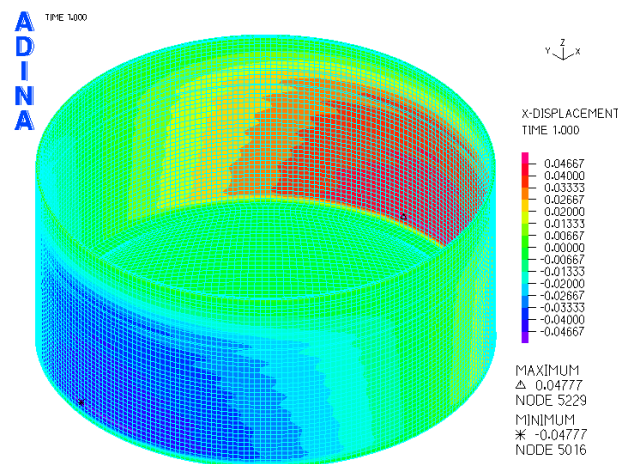
Στο σχήμα (5.7) παρουσιάζεται η κατανομή της ενεργού τάσης στο φορέα. Η κατανομή αυτή φαίνεται να μεταβάλλεται περίπου γραμμικά. Η μέγιστη τάση είναι ίση με 246 MPa περίπου και αναπτύσσεται κοντά στη βάση της δεξαμενής (οι πραγματικές τιμές της τάσης που προκύπτουν από ειδική εντολή στο λογισμικό για την εκτύπωσή τους σε αριθμητική μορφή σε λίστα είναι διαφορετικές από τις τιμές που δίνει το λογισμικό υπό μορφή διαγράμματος). Αυτή η τιμή είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού κατασκευής αν και αυτό δεν έχει σημασία στη συγκεκριμένη ανάλυση αφού έχει θεωρηθεί γραμμικό ελαστικό υλικό.

5.2.1.2 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας χωρίς τα ενισχυτικά δακτυλίδια 1 έως 5

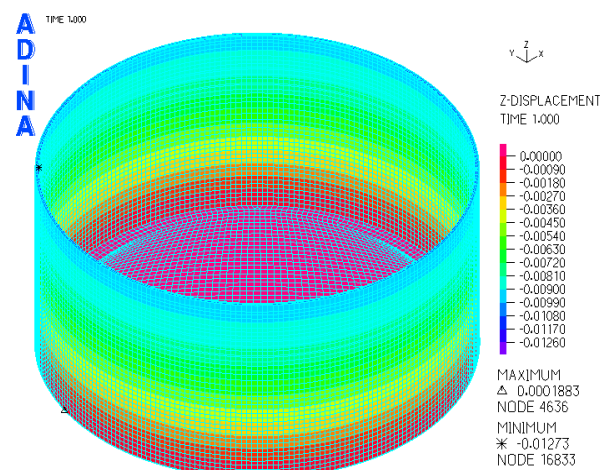
Τα φορτία είναι αυτά του πίνακα 5.1, το μόνο που αλλάζει είναι το ίδιο βάρος της δεξαμενής λόγω της αφαίρεσης των ενισχυτικών δακτυλιδιών 1 έως και 5.



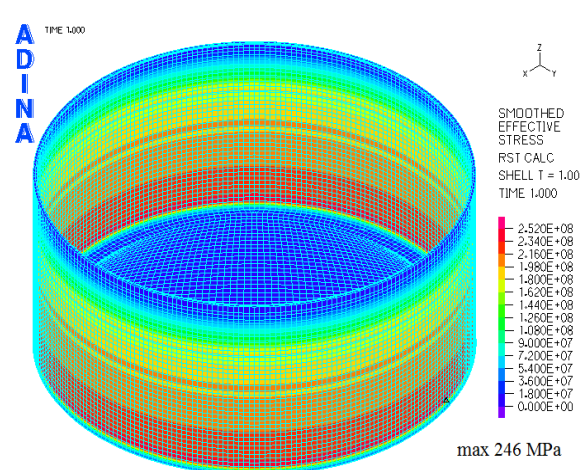
Σχήμα 5.8: Παραμορφωμένη κατάσταση σε μεγέθυνση.



Σχήμα 5.9: Μετατοπίσεις στη διεύθυνση x.



Σχήμα 5.10: Μετατοπίσεις στη διεύθυνση z.



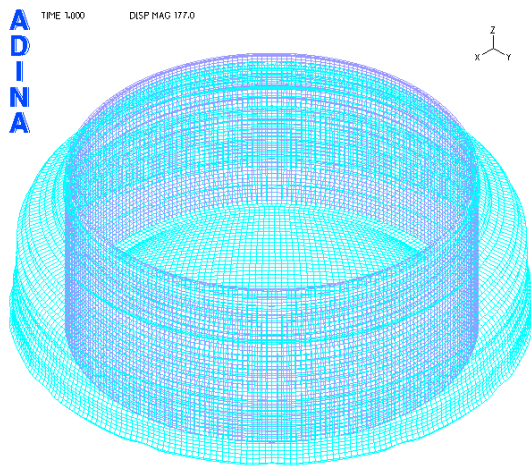
Σχήμα 5.11: Ενεργός τάση.

Οι μέγιστες μετατοπίσεις παραμένουν οι ίδιες σε μέγεθος και στο ίδιο σημείο. Αυτό που αλλάζει αν συγκρίνουμε το σχήμα 5.5 με το 5.9 και το σχήμα 5.7 με το 5.11 παρατηρούμε ότι έχουμε αύξηση των μετατοπίσεων και των τάσεων στα σημεία-περιοχή του κελύφους εκεί που βρίσκονταν τα ενισχυτικά δακτυλίδια.

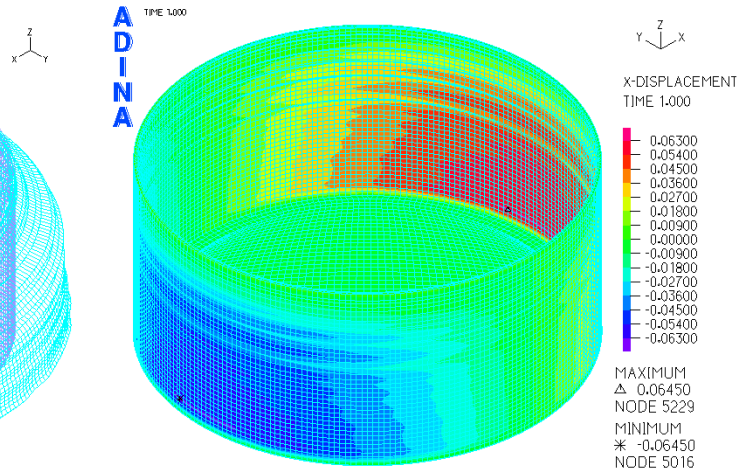
5.2.1.3 Οριακή κατάσταση αστοχίας

Είδος φόρτισης	Συντελεστής Ασφαλείας	Μέγιστη τιμή (Pa)	
Υδροστατική πίεση	1,35	234706	Γραμμική κατανομή καθ' ύψος με μηδενική τιμή στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού και μέγιστη στον πυθμένα της δεξαμενής.
Ίδιο βάρος κελύφους, ενισχυτικών δακτυλιδιών και βάσης	1,35		Ορίζεται από το λογισμικό ADINA. Ορίσαμε πυκνότητα υλικού 7850 kg/m^3 . Στα φορτία (mass proportional) καθορίσαμε ως magnitude $1,35 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$.
Ίδιο βάρος οροφής	1,35	44,3	Τοποθετείται στο ενισχυτικό δακτυλίδι κορυφής.

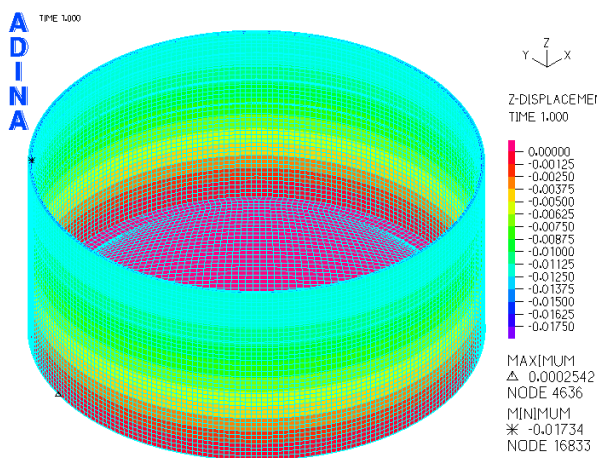
Πίνακας 5.3: Φορτία.



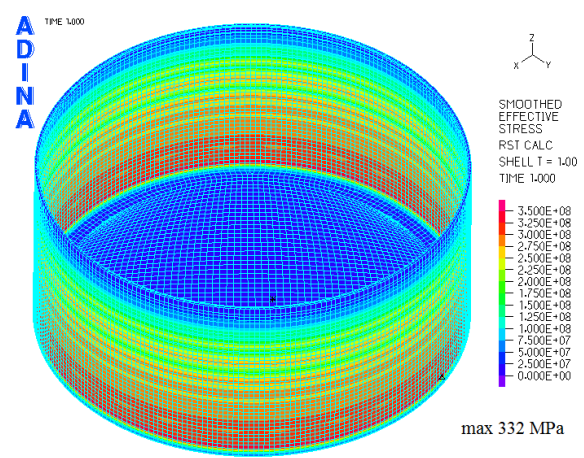
Σχήμα 5.12: Παραμορφωμένη κατάσταση σε μεγέθυνση.



Σχήμα 5.13: Μετατοπίσεις στη διεύθυνση x.



Σχήμα 5.14: Μετατοπίσεις στη διεύθυνση z.



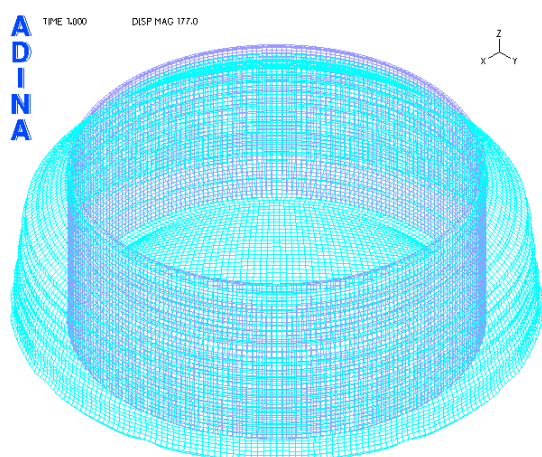
Σχήμα 5.15: Ενεργός τάση.

Διεύθυνση μετατόπισης	Μετατόπιση (m)
x	0,0645*
y	0,0645
z	0,0173**

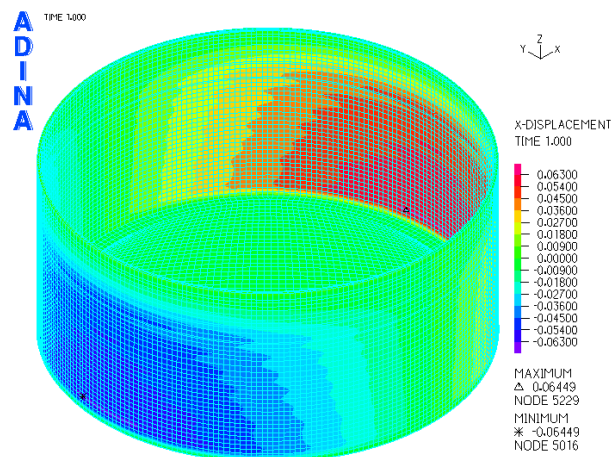
Πίνακας 5.4: Μέγιστες μετατοπίσεις σε απόλυτη τιμή.

Στο σχήμα (5.15) απεικονίζεται η κατανομή της τάσης στη δεξαμενή για τις συγκεκριμένες φορτίσεις. Η μέγιστη τάση αναπτύσσεται στη βάση, όπου η υδροστατική πίεση έχει τη μέγιστη τιμή και είναι ίση με 332 MPa περίπου, όμως μικρότερη από το όριο διαρροής.

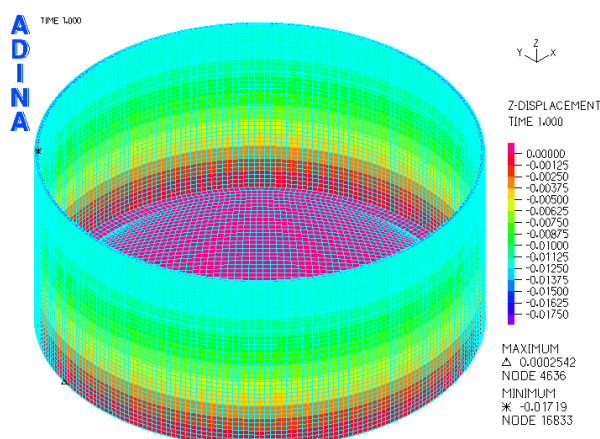
5.2.1.4 Οριακή κατάσταση αστοχίας χωρίς τα ενισχυτικά δακτυλίδια 1 έως 5



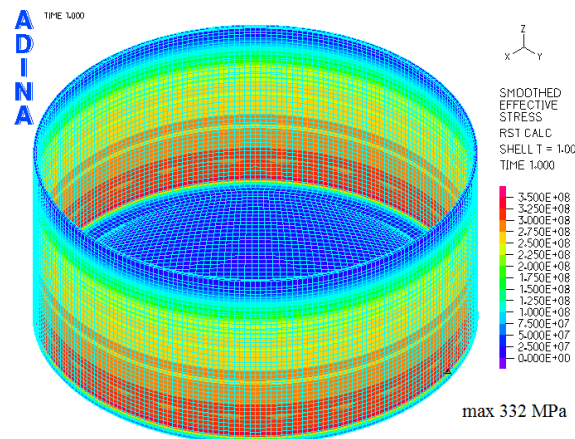
Σχήμα 5.16: Παραμορφωμένη κατάσταση σε μεγέθυνση.



Σχήμα 5.17: Μετατοπίσεις στη διεύθυνση x.



Σχήμα 5.18: Μετατοπίσεις στη διεύθυνση z.

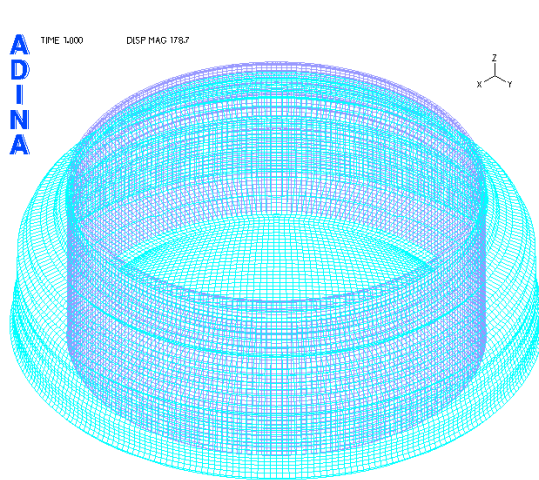


Σχήμα 5.19: Ενεργός τάση.

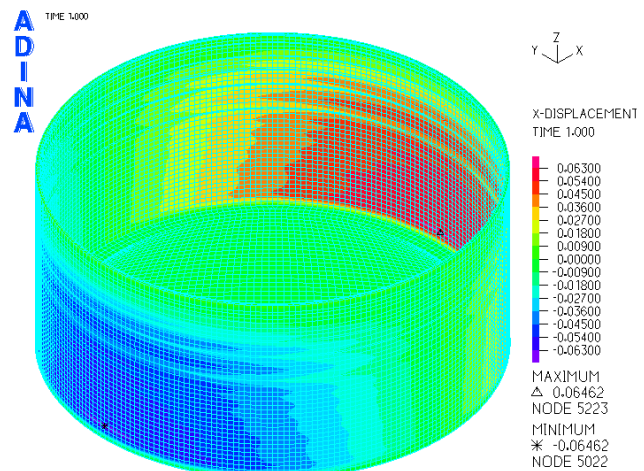
Οι μέγιστες μετατοπίσεις παραμένουν οι ίδιες σε μέγεθος και στο ίδιο σημείο. Αυτό που αλλάζει αν συγκρίνουμε το σχήμα 5.13 με το 5.17 και το σχήμα 5.15 με το 5.19 παρατηρούμε ότι έχουμε αύξηση των μετατοπίσεων και των τάσεων στα σημεία-περιοχή του κελύφους εκεί που βρίσκονταν τα ενισχυτικά δακτυλίδια.

5.2.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας – Πλήρης μέθοδος Newton (F.N.M) στην οριακή κατάσταση αστοχίας

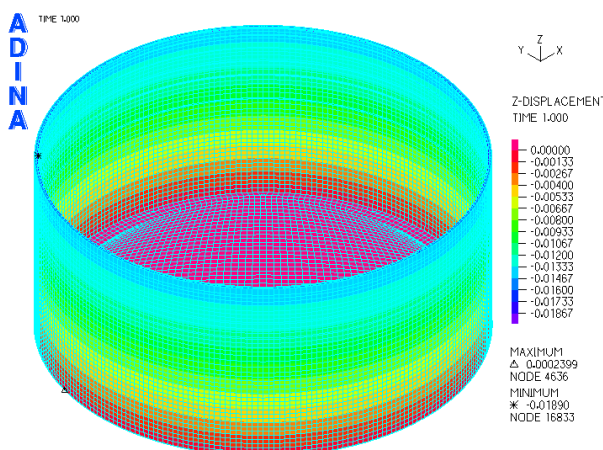
Σε αυτή την παράγραφο πραγματοποιείται μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας ώστε να προκύψει μια πιο ακριβής τιμή των τάσεων και των μετατοπίσεων. Αρχικά θεωρείται ότι το υλικό είναι γραμμικό και ελαστικό. Για την ανάλυση χρησιμοποιείται η πλήρης μέθοδος Newton – F.N.M (που υπολογίζει σε κάθε επανάληψη του ίδιου βήματος το μητρώο δυσκαμψίας) με μέγιστο αριθμό επαναλήψεων 15. Η μη γραμμική ανάλυση θα γίνει για τις φορτίσεις όπως παρουσιάζονται στον πίνακα (5.3). Από τη γραμμική ανάλυση που περιγράφηκε προηγουμένως, η φόρτιση αυτή δεν φαίνεται να είναι κρίσιμη καθώς η μέγιστη τάση που προσδιορίστηκε ήταν μικρότερη από το όριο διαρροής. Παρ' όλα αυτά η μη γραμμική ανάλυση πραγματοποιείται για να προσδιοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι αναπτυσσόμενες τάσεις.



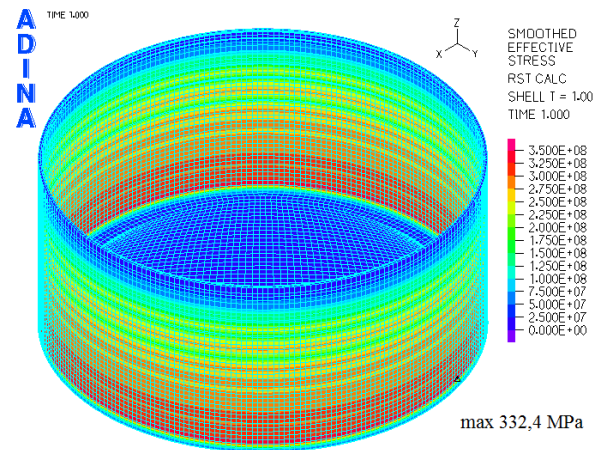
Σχήμα 5.20: Παραμορφωμένη κατάσταση σε μεγέθυνση. Πλήρης μέθοδος Newton.



Σχήμα 5.21: Μετατοπίσεις στη διεύθυνση x. Πλήρης μέθοδος Newton.



Σχήμα 5.22: Μετατοπίσεις στη διεύθυνση z. Πλήρης μέθοδος Newton.



Σχήμα 5.23: Ενεργός τάση - Πλήρης μέθοδος Newton.

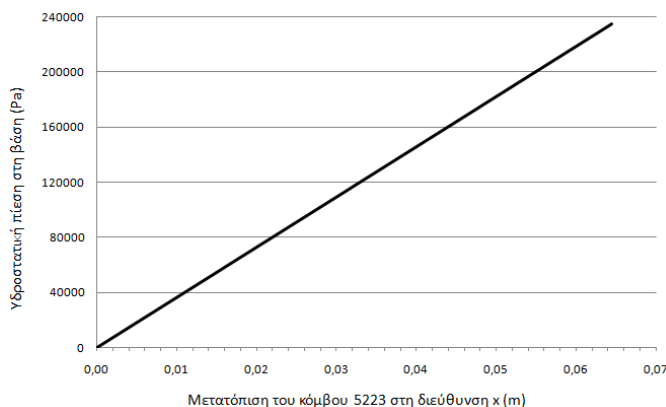
Διεύθυνση μετατόπισης	Μετατόπιση (m)
x	0,0646*
y	0,0646
z	0,0189**

Πίνακας 5.5: Μέγιστες μετατοπίσεις- Πλήρης μέθοδος Newton σε απόλυτη τιμή.

* το node 5022,5223 βρίσκονται περίπου στα 2,8m ύψος από τον πυθμένα.

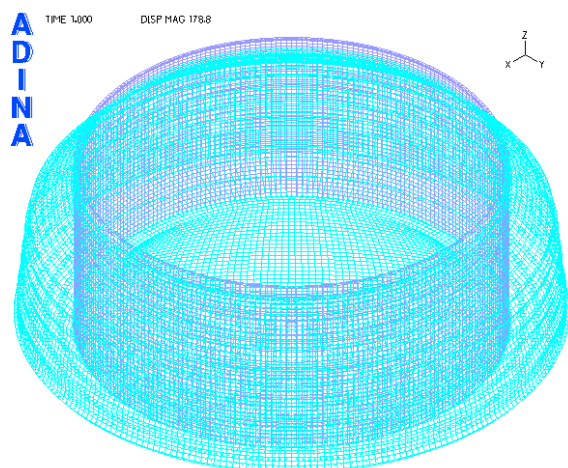
** το node 16833 βρίσκεται στην άκρη του ενισχυτικού δακτυλιδιού κορυφής.

Στη συνέχεια, στο σχήμα (5.24) απεικονίζεται ο δρόμος ισορροπίας δηλαδή η γραφική παράσταση του φορτίου που ασκείται σε συνάρτηση με μια χαρακτηριστική μετατόπιση του φορέα. Ως χαρακτηριστική μετατόπιση επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η μετατόπιση του κόμβου 5223 στη διεύθυνση x ο οποίος παρουσιάζει τη μέγιστη μετατόπιση στη διεύθυνση αυτή. Ως χαρακτηριστικό φορτίο χρησιμοποιείται η μέγιστη τιμή της υδροστατικής πίεσης που ασκείται στη βάση της δεξαμενής. Ο δρόμος ισορροπίας σε αυτή την περίπτωση είναι γραμμικός λόγω του ότι οι τιμές των φορτίων είναι τέτοιες που να προκαλούν σχετικά μικρές παραμορφώσεις.

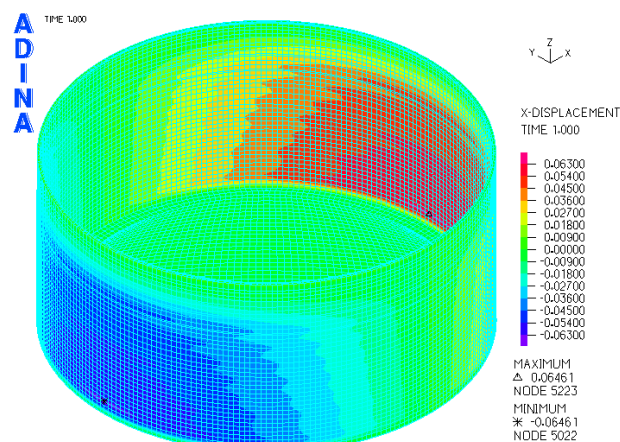


Σχήμα 5.24: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης- Πλήρης μέθοδος Newton.

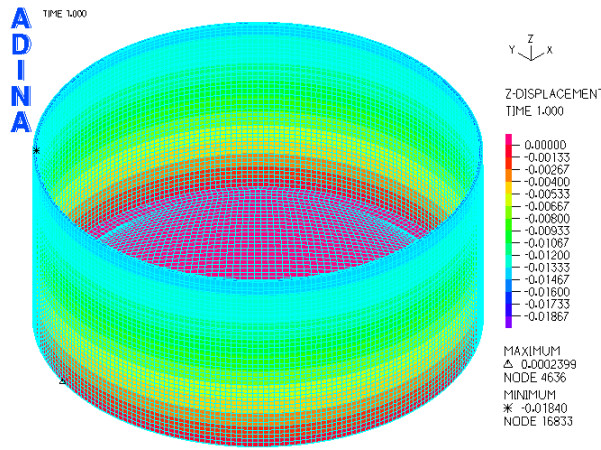
5.2.2.1 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας – Πλήρης μέθοδος Newton (F.N.M) στην οριακή κατάσταση αστοχίας χωρίς τα ενισχυτικά δακτυλίδια 1 έως 5



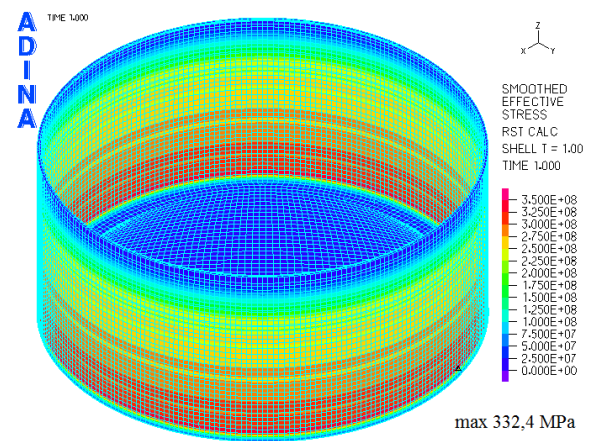
Σχήμα 5.25: Παραμορφωμένη κατάσταση σε μεγέθυνση. Πλήρης μέθοδος Newton.



Σχήμα 5.26: Μετατοπίσεις στη διεύθυνση x. Πλήρης μέθοδος Newton.



Σχήμα 5.27: Μετατοπίσεις στη διεύθυνση z. Πλήρης μέθοδος Newton.



Σχήμα 5.28: Ενεργός τάση - Πλήρης μέθοδος Newton.

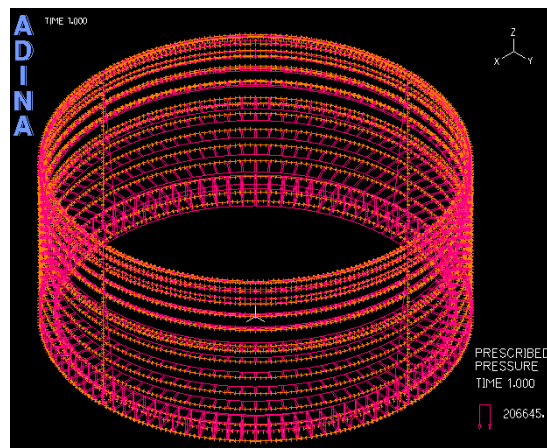
5.3 Σεισμικές φορτίσεις

Στη συνέχεια πραγματοποιούνται αναλύσεις στο προσομοίωμα λαμβάνοντας υπ' όψιν τη σεισμική φόρτιση θεωρώντας τη δεξαμενή γεμάτη. Στις σεισμικές φορτίσεις λαμβάνονται υπ' όψιν η δράση του σεισμού (υδροδυναμικές πιέσεις) και οι μόνιμες δράσεις (ίδιο βάρος και υδροστατική πίεση) με συντελεστή ασφαλείας 1. Λαμβάνεται υπ' όψιν η πραγματική συνολική κατανομή των υδροδυναμικών πιέσεων όπως φαίνεται στο σχήμα (4.8). Η ανάλυση γίνεται για σεισμό στη διεύθυνση x (για $\theta=0^\circ$).

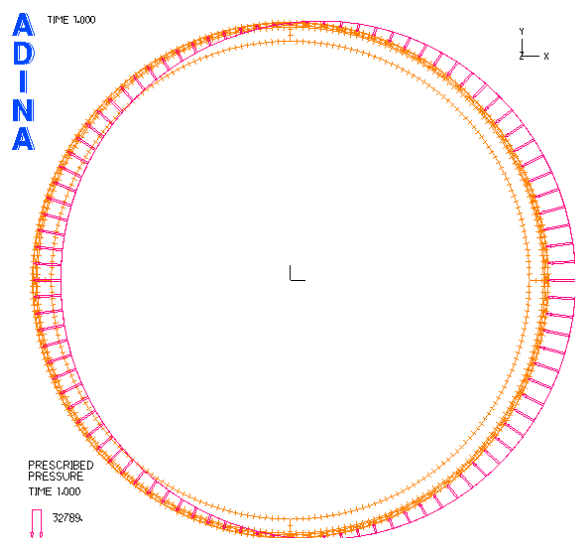
5.3.1 Γραμμική ανάλυση

Είδος φόρτισης	Συντελεστής Ασφαλείας	Μέγιστη τιμή (Pa)	
Υδροστατική πίεση	1	173856	Γραμμική κατανομή καθ' ύψος με μηδενική τιμή στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού και μέγιστη στον πυθμένα της δεξαμενής.
Ίδιο βάρος κελύφους, ενισχυτικών δακτυλιδιών και βάσης	1	Ορίζεται από το λογισμικό ADINA. Ορίσαμε πυκνότητα υλικού 7850 kg/m ³ . Στα φορτία (mass proportional) καθορίσαμε ως magnitude 9,81 m/s ² .	
Ίδιο βάρος οροφής	1	32.8	Τοποθετείται στο ενισχυτικό δακτυλίδι κορυφής.
Σεισμός (υδροδυναμικές πιέσεις)	1	32789	Σχήμα 4.4 , 4.6 , 4.8

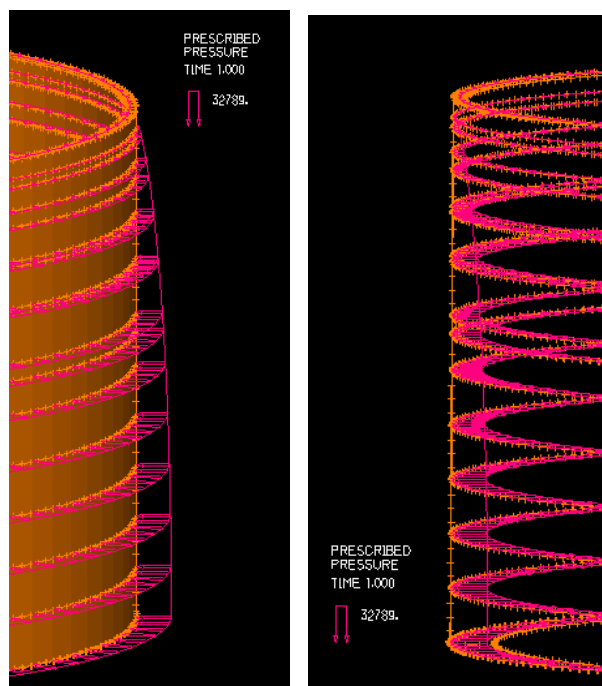
Πίνακας 5.6: Φορτία.



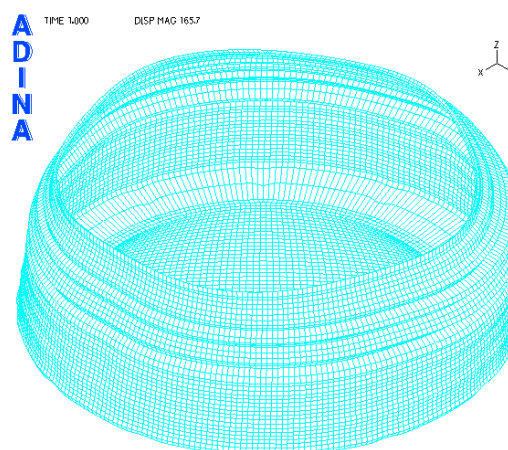
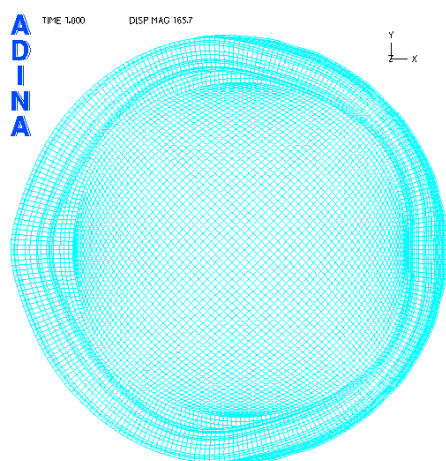
Σχήμα 5.29: Κατανομή φορτίων.



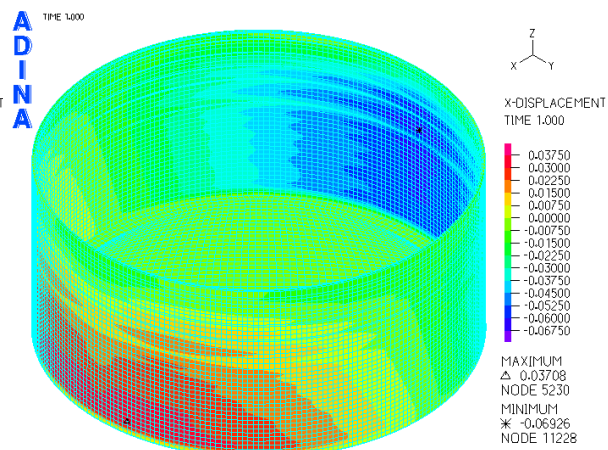
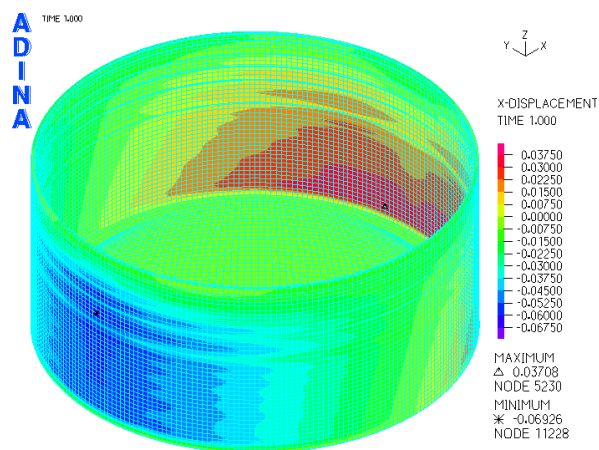
Σχήμα 5.30: Κατανομή της συνολικής υδροδυναμικής πίεσης στο επίπεδο του πυθμένα.



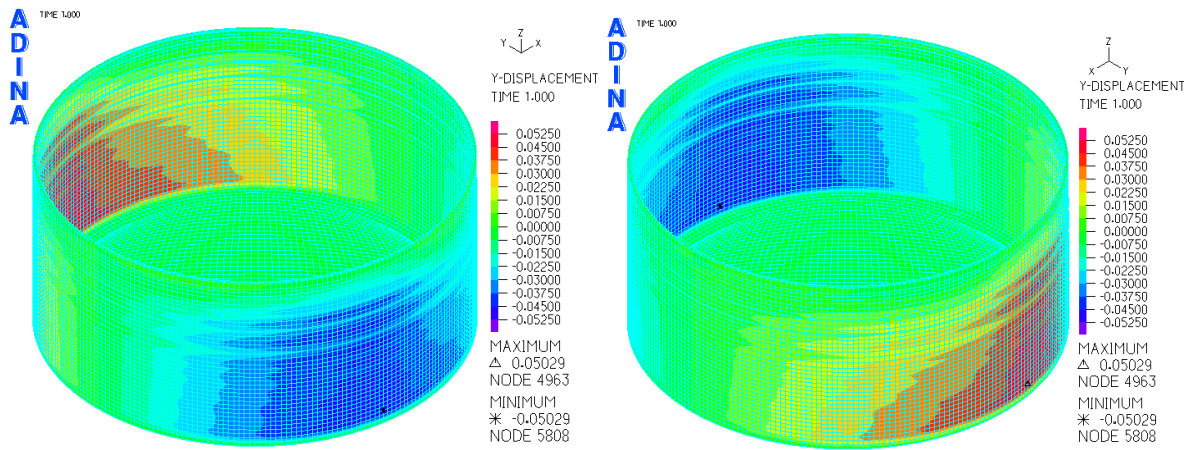
Σχήμα 5.31: Θετική και αρνητική συνολική υδροδυναμική πίεση στο κέλυφος της δεξαμενής.



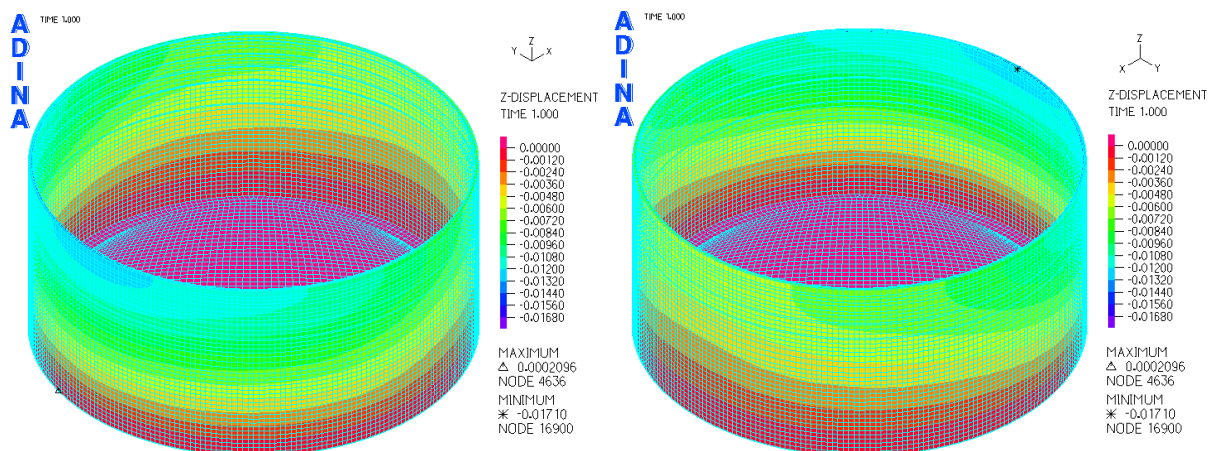
Σχήμα 5.32: Σεισμικός συνδυασμός - Παραμορφωμένη κατάσταση.



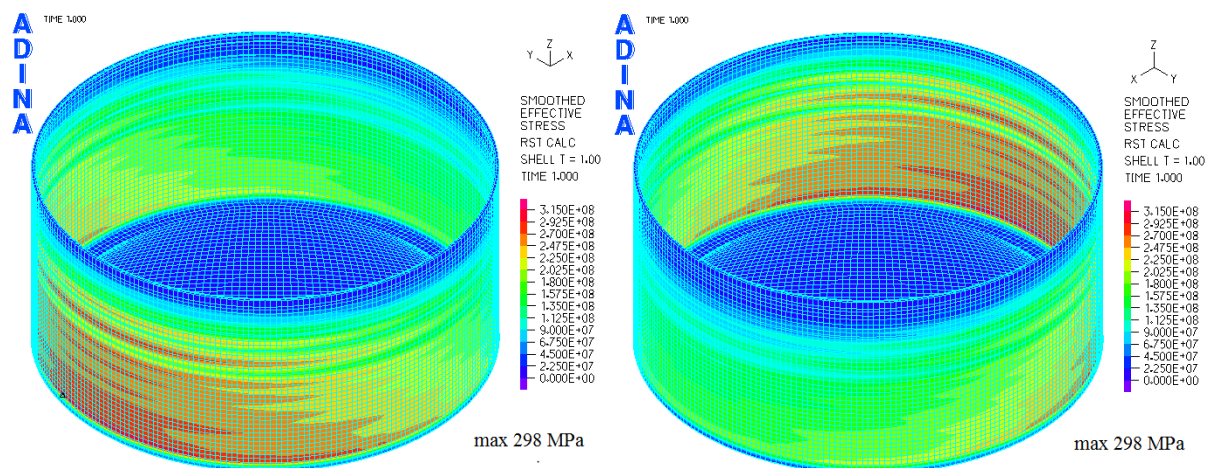
Σχήμα 5.33: Σεισμικός συνδυασμός - Μετατοπίσεις στη διεύθυνση x.



Σχήμα 5.34: Σεισμικός συνδυασμός - Μετατοπίσεις στη διεύθυνση y.



Σχήμα 5.35: Σεισμικός συνδυασμός - Μετατοπίσεις στη διεύθυνση z.



Σχήμα 5.36: Σεισμικός συνδυασμός - Αναπτυσσόμενες τάσεις.

Η μέγιστη τάση αναπτύσσεται κοντά στη βάση στη διεύθυνση του σεισμού στη μεριά που οι υδροστατικές και υδροδυναμικές πιέσεις είναι ομόφορες.

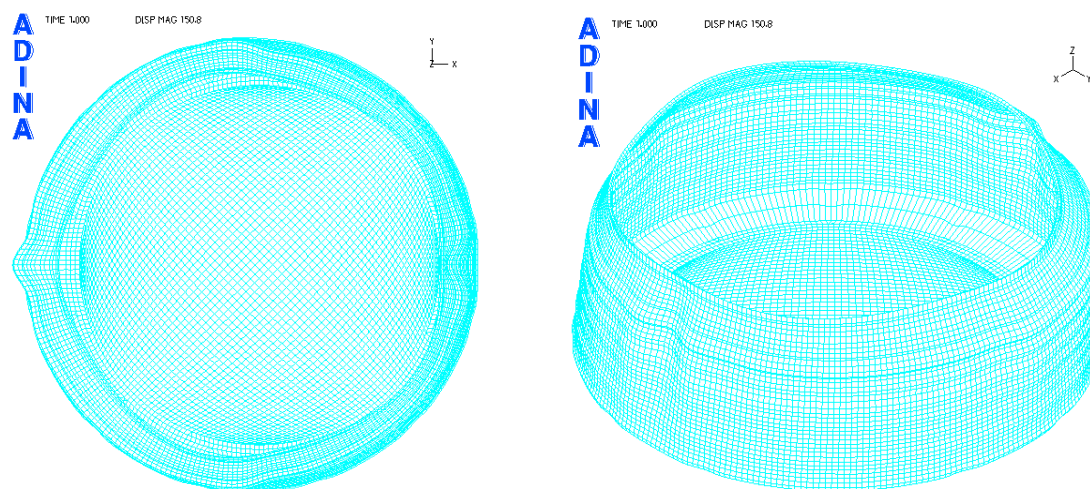
Διεύθυνση μετατόπισης	Μετατόπιση (m)
x	0,0693
y	0,053
z	0,0171

Πίνακας 5.7: Μέγιστες μετατοπίσεις σε απόλυτη τιμή στο σεισμικός συνδυασμός.

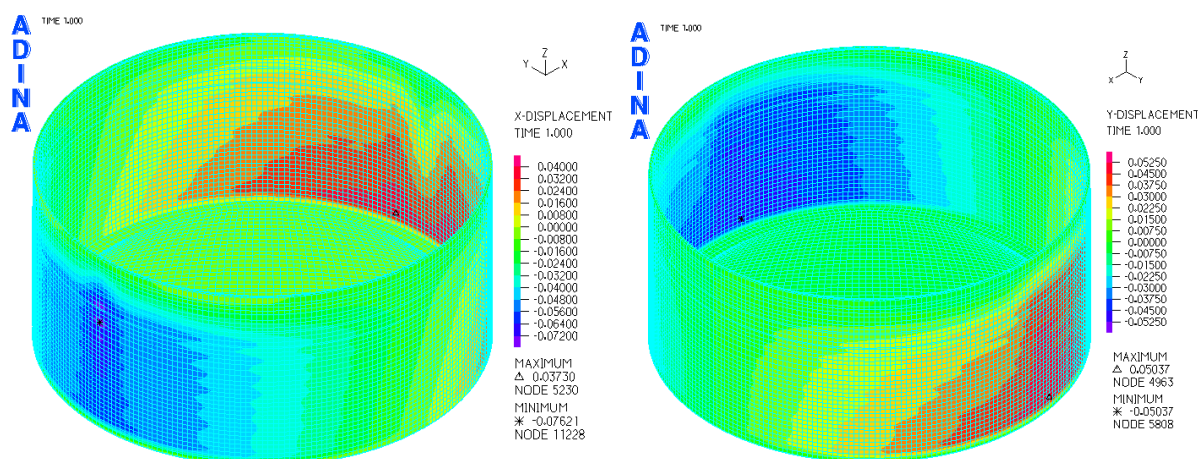
Όπως φαίνεται και στο σχήμα (5.34) οι μέγιστες θετικές και αρνητικές μετατοπίσεις στη διεύθυνση y είναι ίσες λόγω της συμμετρίας ως προς τον άξονα x και βρίσκονται κοντά στη βάση της δεξαμενής. Η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση βρίσκεται στην άκρη του ενισχυτικού δακτυλιδιού κορυφής. Αντίθετα δεν παρουσιάζεται συμμετρία στις μετατοπίσεις στη διεύθυνση x. Η μέγιστη αναπτύσσεται μεταξύ του πέμπτου και τέταρτου δακτυλιδιού ενίσχυσης στη μεριά που υδροστατική και υδροδυναμική πίεση είναι ομόφορες.

5.3.2 Γραμμική ανάλυση χωρίς τα ενισχυτικά δακτυλίδια 1 έως 5

Για τα φορτία ισχύει ο πίνακας 5.6 .

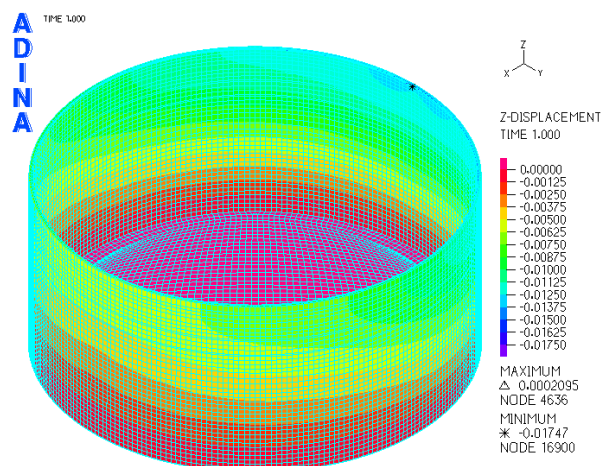


Σχήμα 5.37: Σεισμικός συνδυασμός - Παραμορφωμένη κατάσταση.

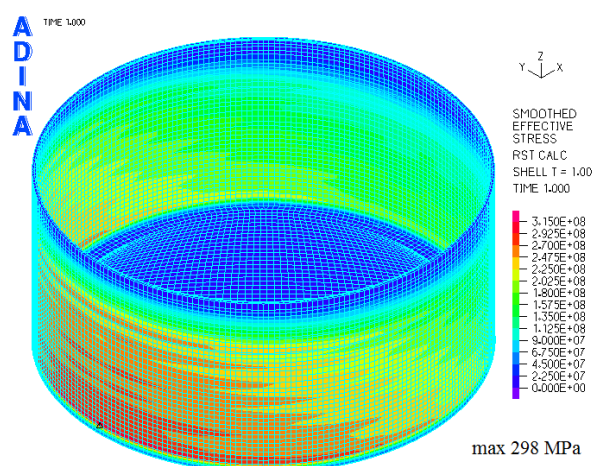


Σχήμα 5.38: Σεισμικός συνδυασμός
Μετατοπίσεις στη διεύθυνση x.

Σχήμα 5.39: Σεισμικός συνδυασμός
Μετατοπίσεις στη διεύθυνση y



Σχήμα 5.40: Σεισμικός συνδυασμός.
Μετατοπίσεις στη διεύθυνση z.



Σχήμα 5.41: Σεισμικός συνδυασμός.
Αναπτυσσόμενες τάσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥΣ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνονται ενδεικτικοί έλεγχοι των τάσεων που αναπτύσσονται στη δεξαμενή για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας που περιγράφηκαν στο 3^ο κεφάλαιο ώστε να γίνει σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου.

6.1 Πλαστική οριακή κατάσταση

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.2.1 σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται υπ' όψιν ο δυσμενέστερος συνδυασμός δράσεων με τους κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας και συνδυασμού. Θα γίνει έλεγχος σε ένα σημείο (οποιοδήποτε) στη βάση του κελύφους όπου ασκείται η μέγιστη τιμή της υδροστατικής πίεσης.

$$p_{\text{αναρτ. καταστρώματος}} = 1,35 \cdot 0,2 \left[(27 \cdot 0,005)_{\text{aluminium}} + (0,12 \cdot 6 \cdot 0,04)_{\text{fiberglass}} \right] = 0,443 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{\theta} = p_n \cdot \frac{r}{t} = 1,35 \cdot 4,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 36,22 \text{m} \cdot \frac{42 \text{m}}{0,0312 \text{m}} = 315949,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 315,95 \text{ MPa}$$

Φορτίο από ίδιο βάρος κελύφους:

$$p_x = 1,35 \cdot 78,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 3,761 \text{m} (3 \cdot 0,01 + 0,0131 + 0,0163 + 0,0192 + 0,0224 + 0,0252 + 0,028 + 0,0312) = 73,9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\sigma_x = \frac{p_x}{t} + p_{\text{αναρτ. καταστρώματος}} = \frac{73,9}{0,0312} \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0,443 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 2369 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 2,369 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{eq,Ed}} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{\theta,Ed}} = \sqrt{2,369^2 + 315,95^2 - 2,369 \cdot 315,95}$$

$$= 315,77 \text{ MPa} < f_{\text{eq,Ed}} = f_{\text{yd}} = \frac{585}{1,25} = 468 \text{ MPa} \rightarrow \text{O.K}$$

Οριακή Κατάσταση Αστοχίας		
γ _F	γ _M	
1,36	$\alpha \geq 1,57$ 1,10	$\alpha < 1,57$ 1,72/α
όπου $\alpha = f_u / f_y$		

Πίνακας 6.1: Συντελεστές φορτίων και υλικού από EN 14620-2:2006.

6.2 Κυκλική οριακή κατάσταση

Κυκλική φόρτιση θεωρείται η υδροστατική πίεση. Η ισοδύναμη τάση von Mises υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (3.15). Η μεταβολή των δράσεων $\Delta\sigma_x$ και $\Delta\sigma_{\theta}$ είναι ίση με τη μέγιστη τιμή τους (αφού δεν αλλάζουν φορά) οπότε δεν χρειάζεται ο έλεγχος της ισοδύναμης τάσης για τις δράσεις αυτές των οποίων η μέγιστη τιμή ελέγχθηκε στην παράγραφο 6.1. Αντίθετα θα πρέπει να ελεγχθεί η συσσωρευμένη πλαστική παραμόρφωση που υπολογίζεται από τη σχέση (3.19).

$$\varepsilon_{p,eq,Ed} \leq n_{p,eq} \left(\frac{f_{yd}}{E} \right) = 25 \cdot \frac{585 / 1,25}{210000} = 0,0557$$

Έλεγχος του κελύφους της δεξαμενής με δακτυλιοειδές ενίσχυση - Νο 5 σε ομοιόμορφη πίεση:

$$A_r = 0,36 \cdot 0,0224 = 8,064 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad b_m = 0,778 \sqrt{rt} = 0,788 \sqrt{42,0163 \cdot 0,0163} = 0,652 \text{ m}$$

Ως ομοιόμορφη εσωτερική πίεση χρησιμοποιούμε την πίεση που βρίσκεται στη μέση του 6^{ης} ζώνης κελύφους. $p_n = 15,5345 \cdot 4,8 \cdot 1,35 = 100,664 \text{ kPa}$

$$\sigma_{MT\theta} = \frac{p_n \cdot r}{t} = \frac{100,664 \cdot 42,0163}{0,163} = 259480,3 \text{ kPa} = 259,48 \text{ MPa} < f_{yd} = 468 \text{ MPa}$$

$$w_o = \sigma_{MT\theta} \frac{r}{E} = 259,48 \cdot \frac{42,0163}{210000} = 0,0519 \text{ m}$$

$$\kappa = \frac{A_r}{A_r + (b + 2b_m)t} = \frac{8,064 \cdot 10^{-3}}{8,064 \cdot 10^{-3} + (0,0224 + 2 \cdot 0,652)0,163} = 0,2717$$

$$w_r = w_o(1 - \kappa) = 0,0519 \cdot (1 - 0,2717) = 0,0378 \text{ m}$$

$$\sigma_{\theta r} = E \frac{w_r}{r} = 210000 \cdot \frac{0,0378}{42,0163} = 188,927 \text{ MPa} < f_{yd} = 468 \text{ MPa}$$

$$w = w_r - w_o = 0,0378 - 0,0519 = -0,0141 \text{ m}$$

για $\kappa = 0,2717$ από πίνακα 3.8 έχουμε:

$$\left. \begin{array}{l} k_x = 0,4934 \Rightarrow \max \sigma_{sx} = k_x \sigma_{MT\theta} = 0,4934 \cdot 259,48 = 128,03 \text{ MPa} \\ k_\theta = 1,022 \Rightarrow \max \sigma_{s\theta} = k_\theta \sigma_{MT\theta} = 1,022 \cdot 259,48 = 265,19 \text{ MPa} \\ k_{eq,s} = 1,0008 \Rightarrow \max \sigma_{eq,s} = k_{eq,s} \sigma_{MT\theta} = 1,0008 \cdot 259,48 = 259,69 \text{ MPa} \\ k_{eq,m} = 1,0114 \Rightarrow \max \sigma_{eq,m} = k_{eq,m} \sigma_{MT\theta} = 1,0114 \cdot 259,48 = 262,44 \text{ MPa} \end{array} \right\} < f_{yd} = 468 \text{ MPa}$$

6.3 Λυγισμός

Στην παράγραφο αυτή γίνεται έλεγχος του κελύφους της δεξαμενής με βάση την παράγραφο 3.2.3.2 που αφορά μη ενισχυμένα κυλινδρικά κελύφη με βαθμιδωτό μεταβλητό πάχος τοιχώματος. Λόγω του ότι η υδροστατική πίεση δεν προκαλεί θλίψη στο κέλυφος της δεξαμενής δεν γίνεται έλεγχος σε περιμετρική θλίψη.

6.3.1 Αξονική θλίψη

Θα γίνει ο έλεγχος για το χαμηλότερο τμήμα του κελύφους, το course 01 με $t = 0,0312 \text{ m}$.

$r =$ ακτίνα δεξαμενής μεσαίας επιφάνειας $= 42 + 0,5 \cdot 0,0312 = 42,0156 \text{ m}$

$$\frac{r}{t} = \frac{42,0156}{0,0312} = 1346,654 \geq 0,03 \frac{E}{f_{yk}} = 0,03 \frac{185000}{585} = 9,49 \text{ και επομένως δεν ισχύει η σχέση (3.52) και}$$

άρα απαιτείται ο έλεγχος σε αξονική θλίψη. ($E = 185 \text{ GPa}$ στους 21°C)

Υπολογίζεται το χαρακτηριστικό μέγεθος της ατέλειας:

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot t = \frac{1}{25} \sqrt{\frac{42,0156}{0,0312}} \cdot 0,0312 = 0,0458 \text{ m}$$

Ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατέλειας, α_x προκύπτει από τη σχέση:

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91(\Delta w_k / t)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91(0,0458 / 0,0312)^{1,44}} = 0,144$$

Η αδιάστατη παράμετρος του μήκους, ω προκύπτει από τη σχέση:

$$\omega = \frac{\ell}{\sqrt{rt}} = \frac{37,61}{\sqrt{42,0156 \cdot 0,312}} = 32,85$$

$$C_x = 1 \quad \text{για} \quad 1,7 \leq \omega \leq 0,5 \frac{r}{t} = 0,5 \frac{42,0156}{0,0312} = 673,327 \quad (\text{κύλινδρος μεσαίου μήκους})$$

Η ελαστική κρίσιμη αξονική τάση λυγισμού $\sigma_{x,Rcr}$ προκύπτει από τη σχέση:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 E C_x \frac{t}{r} = 0,605 \cdot 185000 \cdot 1 \cdot \frac{0,0312}{42,0156} = 83,113 \text{ MPa}$$

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}} = \sqrt{\frac{585}{83,113}} = 2,653$$

Για τον υπολογισμό του μειωτικού συντελεστή χ_x η οριακή λυγηρότητα θλίψης $\bar{\lambda}_{x0}$, ο πλαστικός συντελεστής β και ο δείκτης αλληλεπίδρασης n μπορούν να ληφθούν ίσοι με:

$$\bar{\lambda}_{x0} = 0,20 \quad \beta = 0,60 \quad \eta = 1,0$$

$$\bar{\lambda}_{px} = \sqrt{\frac{\alpha_x}{1-\beta_x}} = \sqrt{\frac{0,144}{1-0,6}} = 0,6 < \bar{\lambda}_x$$

επομένως ο μειωτικός συντελεστής χ_x είναι ίσος με $\chi_x = \frac{a_x}{\bar{\lambda}_x^2} = \frac{0,144}{2,653^2} = 0,0205$

Η χαρακτηριστική τάση λυγισμού είναι ίση με $\sigma_{x,Rk} = \chi_x \cdot f_{yk} = 0,0205 \cdot 585 = 12 \text{ MPa}$

και η αντοχή σε λυγισμό είναι $\sigma_{x,Rd} = \frac{\sigma_{x,Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{12}{1,25} = 9,6 \text{ MPa}$

Η αναπτυσσόμενη τάση όπως υπολογίστηκε στην παράγραφο 6.1 είναι $\sigma_{x,Ed} = 2,369 \text{ MPa}$ και είναι κατά πολύ μικρότερη από την αντοχή σε λυγισμό.

6.3.2 Αξονική θλίψη με συνυπάρχουσα εσωτερική πίεση

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 E C_x \frac{t}{r} = 0,605 \cdot 210000 \cdot 1 \cdot \frac{0,0312}{42,0156} = 94,345 \text{ MPa}$$

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}} = \sqrt{\frac{585}{94,345}} = 2,49$$

$$p_s = 36,22 \cdot 4,8 = 173,856 \text{ kPa} \rightarrow \bar{p}_s = \left(\frac{p_s}{\sigma_{x,Rcr}} \right) \left(\frac{r}{t} \right) = \left(\frac{0,173856}{94,345} \right) \left(\frac{42,0156}{0,0312} \right) = 2,4816$$

$$\alpha_{xpe} = \alpha_x + (1-\alpha_x) \left[\frac{\bar{p}_s}{\bar{p}_s + 0,3/\alpha_x^{0,5}} \right] = 0,144 + (1-0,144) \left[\frac{2,4816}{2,4816 + 0,3/0,144^{0,5}} \right] = 0,7932$$

$$p_g = 1,35 \cdot 36,22 \cdot 4,8 = 234,706 \text{ kPa} \rightarrow \bar{p}_g = \left(\frac{p_g}{\sigma_{x,Rcr}} \right) \left(\frac{r}{t} \right) = \left(\frac{0,234706}{94,345} \right) \left(\frac{42,0156}{0,0312} \right) = 3,35013$$

$$s = \frac{1}{400} \cdot \frac{r}{t} = \frac{1}{400} \cdot \frac{42,0156}{0,0312} = 3,367$$

$$\alpha_{xpp} = \left\{ 1 - \left(\frac{\bar{p}_g}{\bar{\lambda}_x} \right)^2 \right\} \left[1 - \frac{1}{1,12 + s^{3/2}} \right] \left[\frac{s^2 + 1,21\bar{\lambda}_x^2}{s(s+1)} \right] = \left\{ 1 - \left(\frac{3,35013}{2,49^2} \right)^2 \right\} \left[1 - \frac{1}{1,12 + 3,367^{3/2}} \right] \left[\frac{3,367^2 + 1,21 \cdot 2,49^2}{3,367(3,367+1)} \right]$$

$$= 0,70804 \cdot 0,86298064 \cdot 1,2812302 = 0,7829 < \alpha_{xpe}$$

$$\bar{\lambda}_{px} = \sqrt{\frac{\alpha_{xpp}}{1-\beta_x}} = \sqrt{\frac{0,7829}{1-0,6}} = 1,4 < \bar{\lambda}_x$$

επομένως ο μειωτικός συντελεστής χ_x είναι ίσος με $\chi_x = \frac{\alpha_{xpp}}{\bar{\lambda}_x^2} = \frac{0,7829}{2,49^2} = 0,1263$

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x \cdot f_{yk} = 0,1263 \cdot 585 = 73,89 \text{ MPa}$$

και η αντοχή σε λυγισμό είναι:

$$\sigma_{x,Rd} = \frac{\sigma_{x,Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{73,89}{1,25} = 59,112 \text{ MPa} < \sigma_{x,Rcr} = 94,345 \text{ MPa}$$

6.3.3 Έλεγχος σε ελαστικό λυγισμό από EN 1998-4 2006

$$s = 0,0312 \text{ m}$$

$$\sigma_{c1} = 0,6 \cdot E \frac{s}{R} = 0,6 \cdot 210000 \cdot \frac{0,0312}{42} = 93,6 \text{ MPa}$$

$$\left(\frac{\delta}{s}\right) = \frac{0,06}{\alpha} \sqrt{\frac{R}{s}} = \frac{0,06}{1,5} \sqrt{\frac{42}{0,0312}} = 1,468$$

$$\bar{\sigma} = 1 - 1,24 \left(\frac{\delta}{s}\right) \left[\left(1 + \frac{2}{1,24 \left(\frac{\delta}{s}\right)}\right)^{1/2} - 1 \right] = 1 - 1,24 \cdot 1,468 \cdot \left[\left(1 + \frac{2}{1,24 \cdot 1,468}\right)^{1/2} - 1 \right] = 0,183$$

$$\lambda^2 = \frac{f_y}{\sigma \sigma_{c1}} = \frac{585}{0,183 \cdot 93,6} = 34,153 > 2 \rightarrow \sigma_o = \bar{\sigma} \sigma_{c1} = 0,183 \cdot 93,6 = 17,13 \text{ MPa}$$

$p = 206,645 \text{ kPa}$ στη βάση για OBE= 0,24g

$$\bar{p} = \frac{pR}{s \sigma_{c1}} = \frac{0,206645 \cdot 42}{0,0312 \cdot 93,6} = 2,972 < 5$$

$$\sigma_p = \sigma_{c1} \left[1 - \left(1 - \frac{\bar{p}}{5}\right)^2 \left(1 - \frac{\sigma_o}{\sigma_{c1}}\right)^2 \right]^{1/2} = 93,6 \left[1 - \left(1 - \frac{2,972}{5}\right)^2 \left(1 - \frac{17,13}{93,6}\right)^2 \right]^{1/2} = 88,312 < \sigma_{c1}$$

$$\sigma_m \leq 0,19 \sigma_{c1} + 0,81 \sigma_p = 0,19 \cdot 93,6 + 0,81 \cdot 88,312 = 89,32 \text{ MPa}$$

6.3.4 Ελαστική-πλαστική κατάρρευση από EN 1998-4 2006

$$r = \frac{R/s}{400} = \frac{42}{400 \cdot 0,0312} = 3,3654$$

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \sigma_{c1} \left[1 - \left(\frac{pR}{s f_y}\right)^2 \right] \left(1 - \frac{1}{1,12 + r^{1,15}}\right) \left[\frac{r + f_y / 250}{r + 1}\right] \\ &= 93,6 \cdot \left[1 - \left(\frac{0,206645 \cdot 42}{585 \cdot 0,0312}\right)^2 \right] \left(1 - \frac{1}{1,12 + 3,3654^{1,15}}\right) \left[\frac{3,3654 + 585 / 250}{3,3654 + 1}\right] \\ &= 93,6 \cdot 0,7739 \cdot 0,8061 \cdot 1,307 = 76,32 \text{ MPa} \end{aligned}$$

ΣΧΟΛΙΑ

Με βάση τα στοιχεία τα οποία μου δόθηκαν από την εταιρεία KOGAS για την μεταλλική δεξαμενή και τα σεισμικά φορτία από τη Ρεβυθούσα-Ελλάδα, ακολουθώντας τους ελέγχους και τους κανονισμούς από τους Ευρωκώδικες, EN 14620-2:2006 και API 650 προσπάθησα όσον το δυνατό καλύτερα να γίνει ο σχεδιασμός της μεταλλικής δεξαμενής αλλά και να προσομοιώσω τη δεξαμενή στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA ώστε να εξάγω αποτελέσματα και συμπεράσματα.

Λόγω του ότι η μεταλλική δεξαμενή προστατεύεται από την εξωτερική δεξαμενή σκυροδέματος οι μόνες δυνάμεις που επιβάλλονται σ' αυτή είναι το ίδιο βάρος, οι υδροστατικές πιέσεις και οι υδροδυναμικές πιέσεις λόγω του σεισμού. Οι υδροστατικές πιέσεις που είναι και οι μεγαλύτερες, επειδή είναι εφελκυστικές δεν προκαλούν λυγισμό στο κέλυφος της δεξαμενής. Με δεδομένο αυτό δεν έγιναν στην δεξαμενή οι ακόλουθες αναλύσεις: α) γραμματικοποιημένη ανάλυση λυγισμού, β) μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με έλεγχο φορτίου τύπου Arc - length (Collapse), γ) μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας τύπου Arc - length (Collapse) με ατέλεια, δ) μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια τύπου Arc - length (Collapse).

Στο 5^ο κεφάλαιο έγιναν επιπλέον αναλύσεις στη δεξαμενή χωρίς τα ενισχυτικά δακτυλίδια 1 έως 5 ώστε να γίνει σύγκριση της κατανομής των τάσεων και των μετακινήσεων στη δεξαμενή στις περιπτώσεις με ή χωρίς ενισχυτικά δακτυλίδια. Το κύριο συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι έχουμε μείωση των τάσεων στο κέλυφος της δεξαμενής στο πλάτος που βρίσκονται τα ενισχυτικά δακτυλίδια. Επίσης στην περίπτωση του σεισμού η μέγιστη μετακίνηση κατά την διεύθυνση x στη περιοχή μεταξύ του 4^{ου} και 5^{ου} δακτυλιδιού στη μεριά που υδροστατική και υδροδυναμική πίεση είναι ομόφορες.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

- i. Για την μελέτη της σεισμικής δράσης θα μπορούσε να γίνει προσομοίωση του περιεχόμενου υγρού με πεπερασμένα στοιχεία
- ii. Σωστότερη προσομοίωση της δεξαμενής και συγκεκριμένα τοποθέτηση ελατηρίων στη βάση της δεξαμενής ή δημιουργία contact surface με τη βάση της δεξαμενής, ώστε στην περίπτωση του σεισμού να δούμε αν θα υπάρξει ανύψωση της βάσης
- iii. Θα μπορούσε να ληφθεί υπ' όψιν και η τρίτη συνιστώσα των υδροδυναμικών πιέσεων που οφείλεται στην ευκαμψία των λεπτών τοιχωμάτων των μεταλλικών δεξαμενών
- iv. Στην περίπτωση της σεισμικής δράσης θα μπορούσε να γίνει συνδυασμός της οριζόντιας και της κατακόρυφης ώστε να προκύψει η δυσμενέστερη τιμή

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures.
2. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 4-2: Tanks.
3. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 4: Silos, tanks and pipelines.
4. EN 1473:2007 Installation and equipment for liquefied natural gas — Design of onshore installations.
5. EN 14620:2006 Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0 °C and -165 °C — Part 1: General.
6. EN 14620:2006 Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0 °C and -165 °C — Part 2: Metallic components.
7. API STANDARD 650, 11th EDITION, JUNE 2007, Welded Tanks for Oil Storage.
8. Young-myung Yang, DEVELOPMENT OF THE WORLD'S LARGEST ABOVE-GROUND FULL CONTAINMENT LNG STORAGE TANK, Korea Gas Corporation, 23rd World Gas Conference, Amsterdam 2006.
9. Γιώργος Τσιουπής, Επιλογή θέσης χωροθέτησης τερματικού σταθμού υγροποίησης φυσικού αερίου στην Κύπρο και εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, 2012, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π
10. Γεωργία Χατζηιωσήφ, Μελέτη Μεταλλικών Κυλινδρικών Δεξαμενών, 2011, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π
11. ArcelorMittal USA — Plate 9% Nickel Steel: For use at cryogenic temperatures, www.arcelormittal.com
12. Υπουργείο Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού Κύπρου, www.mcit.gov.cy