

5. ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ

Μία πρώτη κατηγορία κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού είναι οι κυλινδρικές ή σφαιρικές δεξαμενές, δοχεία αποθήκευσης εύφλεκτων και τοξικών ουσιών (NH_3 , LNG, LPG, προπυλένιο κτλ.) το περιεχόμενο των οποίων βρίσκεται υπό ατμοσφαιρική πίεση ή υπό σημαντική εσωτερική πίεση (δοχεία πίεσης) και τα silos αποθήκευσης στερεών προϊόντων (PVC, PP). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η στατική επάρκεια του κελύφους της δεξαμενής σε συνδυασμό με την στήριξή τους και τον αναπτυσσόμενο κυματισμό του περιεχομένου.

Οι ισχύοντες κανονισμοί ή διατάξεις προβλέπουν τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών αυτών για την περίπτωση των δεξαμενών κατακόρυφου κυλίνδρου, ενώ ελάχιστα αναφέρονται για άλλες γεωμετρίες όπως του οριζοντίου κυλίνδρου και της σφαίρας, οι οποίες είναι πολύ διαδεδομένες στην χημική και πετροχημική βιομηχανία.

Η παρούσα ενότητα, αρχικά περιγράφει τις υπόψη κατασκευές σε σχέση με τις βιομηχανικές εφαρμογές τους. Στην συνέχεια παραθέτει ορισμένους ισχύοντες κανονισμούς γενικού σχεδιασμού και τις δημοσιευμένες οδηγίες για αντισεισμικό σχεδιασμό. Στο κεφάλαιο 5.3 περιγράφονται οι μορφές αστοχία μίας δεξαμενής ή δοχείου πίεσης, και τέλος στο κεφάλαιο 5.4 περιγράφεται μία γενική μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των σεισμικών δυνάμεων στις υπόψη κατασκευές.

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δεξαμενές και δοχεία πίεσης διαφορετικών γεωμετριών (κυλινδρικές, σφαιρικές, τετραγωνικές) χρησιμοποιούνται ευρέως στην χημική βιομηχανία για την αποθήκευση διαφόρων υγρών όπως νερό, πετρέλαιο, χημικά και υγροποιημένο φυσικό αέριο. Η συμπεριφορά των δεξαμενών αυτών κατά την διάρκεια σεισμικής διέγερσης αποτελεί σημαντικό στοιχείο του αντισεισμικού σχεδιασμού.

Σε σχέση με την πίεση στο εσωτερικό της δεξαμενής, οι δεξαμενές διακρίνονται σε

- Σε ατμοσφαιρικές δεξαμενές που συνήθως είναι κυλινδρικές αποθηκεύονται υγρά καύσιμα (π.χ. αργό, μαζούτ, πετρέλαιο) και χημικά προϊόντα (π.χ. αμμωνία, αιθυλένιο). Το πάχος των τοιχωμάτων είναι σχετικά λεπτό (μερικά mm) αφού σχεδιάζεται για να αντέχει μόνο την υδροστατική πίεση του αποθηκευμένου υγρού.
- Σε μεγάλα δοχεία πίεσης που συνήθως είναι κυλινδρικά και σφαιρικά αποθηκεύονται υγροποιημένοι υδρογονάνθρακες (π.χ. προπυλένιο, φυσικό αέριο) και χημικά προϊόντα (π.χ. VCM). Η εσωτερική πίεση είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής ώστε να βρίσκονται σε υγρή κατάσταση. Μικρά δοχεία πίεσης είναι πολύ συνηθισμένα σε γραμμές παραγωγής και χρησιμοποιούνται σαν συσκευές φυσικών και χημικών διεργασιών (π.χ. φίλτρα, αντιδραστήρες, εναλλάκτες θερμότητας). Τα πάχη των τοιχωμάτων ποικίλουν ανάλογα με την εσωτερική πίεση του δοχείου που συνήθως κυμαίνεται από 10-500psig.

Η επίδραση ενός σεισμού σε δεξαμενές μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ζημιές τόσο στην ίδια την κατασκευή όσο και στα υπόλοιπα στοιχεία που περιβάλλουν την δεξαμενή όπως σωληνώσεις. Αντίστοιχα στο σχεδιασμό των δοχείων πίεσης όπου το περιεχόμενο υγρό βρίσκεται υπό πίεση θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι οδηγίες αντισεισμικού σχεδιασμού.

Αναλυτικότερα, η εμφάνιση μεγάλων αξονικών (διαμηκών) τάσεων λόγω αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών σε συνδυασμό με την εσωτερική πίεση μπορεί να προκαλέσει τοπικό λυγισμό των τοιχωμάτων της δεξαμενής τύπου “diamond shape” καθ’ ύψος της δεξαμενής ή και τύπου “elephant foot” στην βάση.

Ο κυματισμός “sloshing” στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού λόγω εξαναγκασμένης ταλάντωσης και σε συνδυασμό με πιθανό φαινόμενο συντονισμού μπορούν να δημιουργήσουν πρόβλημα στην ευστάθεια της κατασκευής ή να προκαλέσουν ζημίες στην οροφή.

Σε δεξαμενές ή δοχεία πίεσης η συνολική διατμητική δύναμη στην βάση της δεξαμενής (τέμνουσα βάση) ή η συνολική ροπή (ροπή ανατροπής) μπορεί να προκαλέσει αστοχία της θεμελίωσης, με αποτέλεσμα την ολίσθηση, ανατροπή ή άλλης μορφής συνεπαγόμενη αστοχία. Σε δεξαμενές μη αγκυρούμενες, η τέμνουσα βάση μπορεί να ξεπεράσει την τάση τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ της βάσης και της θεμελίωσης προκαλώντας ολίσθηση της δεξαμενής, ή και ανατροπή αν η συνολική ροπή ανατροπής δεν ισοσταθμιστεί από το βάρος της δεξαμενής. Επίσης, η ανύψωση της βάσης (uplifting) σε δεξαμενές χωρίς στηρίξεις μπορεί να προκαλέσει ζημία στις συνδέσεις της δεξαμενής με τις σωληνώσεις (ακροφύσια).

Η παρούσα ερευνητική εργασία αναφέρεται σε δοχεία πίεσης και δεξαμενές της μορφής

- Κατακόρυφου κυλίνδρου (εικόνα 5.1)
- Σφαίρας (εικόνα 5.2)
- Οριζοντίου κυλίνδρου (εικόνα 5.3)
- Ορθογωνίου

Η προτεινόμενη μεθοδολογία υπολογισμού των συνολικών σεισμικών δυνάμεων στα πλαίσια του αντισεισμικού σχεδιασμού των δεξαμενών και των δοχείων πίεσης συμβάλει στον πλέον αξιόπιστο σχεδιασμό των κατασκευών αυτών, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την λειτουργικότητα των βιομηχανικών συστημάτων, την καλύτερη αντοχή των κατασκευών και τέλος την ασφάλεια του εργατικού δυναμικού.



Εικόνα 5.1: Δεξαμενή σχήματος κατακόρυφου κυλίνδρου.



Εικόνα 5.2: Δοχείο πίεσης σφαιρικού σχήματος.



Εικόνα 5.3: Δοχείο πίεσης σχήματος οριζόντιου κυλίνδρου.

5.2 ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ

Οδηγίες αντισεισμικού σχεδιασμού έχουν διατυπωθεί σε διάφορους κανονισμούς και προδιαγραφές οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω, σε μία πολύ συνοπτική περιγραφή. Ο αναγνώστης για μία πληρέστερη περιγραφή των κανονισμών στις δεξαμενές παραπέμπεται στο κεφάλαιο 4.

5.2.1 Ευρωπαϊκός Κώδικας Αντισεισμικού Σχεδιασμού (Eurocode EC8, part 4 – Jan. 1998)

Ο Ευρωπαϊκός Αντισεισμικός Κανονισμός Eurocode 8, part 4 αναφέρεται σε silos, δεξαμενές και αγωγούς (pipelines). Το κεφάλαιο 4.1 περιλαμβάνει γενικές διατάξεις σχεδιασμού, ενώ το 4.3 αναφέρεται σε δεξαμενές. Το παράρτημα Α αναφέρεται σε ειδικά θέματα, κυρίως στο υπολογισμό των υδροδυναμικών δυνάμεων, αλλά και στην αντοχή του τοιχώματος της δεξαμενής.

Στον κείμενο του κανονισμού αυτού έχει στηριχθεί σε μεγάλο βαθμό η παρούσα ερευνητική εργασία για την σύνταξη οδηγιών αντισεισμικού σχεδιασμού κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού, υπό την έννοια ότι οι προτεινόμενες μεθοδολογίες υπολογισμού των σεισμικών δυνάμεων μπορούν να ενσωματωθούν στις διατάξεις του με κατάλληλη προσαρμογή.

5.2.2 Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (API 650 – 1998 και API 620 – 1996)

Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου έχει αναπτύξει μία συστηματική προσέγγιση (API 650) για τον αντισεισμικό σχεδιασμό, η οποία βασίζεται στην δημοσίευση των Wozniak και Mitchell (1978). Σημειώνεται όμως πως αφορά τις δεξαμενές σήματος κατακορύφου κυλίνδρου και όχι δεξαμενές άλλης γεωμετρίας.

5.2.3 Αμερικανική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών (ASCE – 1984)

Οι οδηγίες αυτές περιλαμβάνουν την τεχνογνωσία μέχρι την εποχή που δημοσιεύτηκαν. Το κεφάλαιο των δεξαμενών έχει γραφεί από τον Veletsos, αναφέρεται όμως μόνον στην περίπτωση των δεξαμενών κατακορύφου κυλίνδρου.

5.2.4 Οδηγίες μελέτης της National Society for Earthquake Engineering της Νέας Ζηλανδίας (1986)

Οι Νέο-Ζηλανδικές συστάσεις μελέτης αποτελούν ένα πλήρες κείμενο για τον αντισεισμικό σχεδιασμό δεξαμενών. Οι οδηγίες αναφέρονται σε κατακόρυφες δεξαμενές κυρίως, αλλά δίνονται μερικές απλές οδηγίες υπολογισμού των σεισμικών δυνάμεων σε δεξαμενές και δοχεία άλλης γεωμετρίας.

5.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΛΟΓΩ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Η πολύπλοκη κατανομή των τάσεων και παραμορφώσεων στο κέλυφος της δεξαμενής λόγω σεισμικής φόρτισης και η αλληλοεπίδραση μεταξύ του ρευστού και της κατασκευής έχουν ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση ποικίλων μηχανισμών αστοχίας της κατασκευής.

Γενικά, το σημαντικότερο θέμα στην διαδικασία υπολογισμού των σεισμικών δυνάμεων αποτελεί το φαινόμενο του κυματισμού (sloshing). Το στοιχείο αυτό οφείλει να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών λόγω σεισμού. Το φαινόμενο του κυματισμού είναι υδροδυναμικό σχετίζεται με την ανύψωση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας του περιεχόμενου υγρού λόγω εξαναγκασμένης ταλάντωσης της δεξαμενής. Η ανάλυση του φαινομένου είναι πολύ σημαντική για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των δεξαμενών, διότι οι επιπλέον πιέσεις στο τοίχωμα της δεξαμενής λόγω του κυματισμού θα πρέπει να συνυπολογιστούν στις συνολικές δυνάμεις, ώστε να υπολογιστεί με αξιοπιστία η συνολική δύναμη διάτμησης βάσης και η αντίστοιχη ροπή ανατροπής. Επίσης, ο σχεδιασμός του τοιχώματος οφείλει να συνυπολογίσει τις υδροδυναμικές πιέσεις και τις υδροστατικές πιέσεις. Η μη θεώρηση του φαινομένου του κυματισμού και σε συνδυασμό με πιθανή εμφάνιση του φαινομένου του συντονισμού μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα ευστάθειας της κατασκευής, είτε εν συνόλω είτε στο τοίχωμα της δεξαμενής. Επιπλέον εάν ο ελεύθερος χώρος μεταξύ κυματισμού και οροφής δεν είναι αρκετός τότε μπορεί να προκύψει ζημία στην οροφή ή σε στοιχεία που περιβάλλουν την δεξαμενή (σωληνώσεις). Το φαινόμενο του κυματισμού περιγράφεται από φυσικής πλευράς (συνοδεύόμενη από μία απλή μαθηματική διατύπωση) στο κεφάλαιο 9.1 (ειδικά θέματα).

Οι βασικές μορφές αστοχίας μίας δεξαμενής είναι

- Τοπικός λυγισμός (κύρτωση ή ήβωση) της δεξαμενής
- Αστοχία λόγω ολίσθησης ή ανατροπής
- Αύξηση των εσωτερικών πιέσεων λόγω υδροδυναμικών φαινομένων
- Κύρτωση στην κορυφή της δεξαμενής λόγω κυματισμού
- Ανεπιθύμητη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας
- Αστοχία συγκολλητών συνδέσεων με ακροφύσια - σωληνώσεις

και αναλύονται κάτωθι.

5.3.1 Τοπικός λυγισμός (κύρτωση ή ήβωση) της δεξαμενής

Ο λυγισμός (αστάθεια) του τοιχώματος της δεξαμενής είναι μία καταστροφική αστοχία λόγω του ότι συμβαίνει συνήθως ξαφνικά και συνοδεύεται από άμεση κατάρρευση. Η μορφή αυτή της αστοχίας αναφέρεται σε δεξαμενές σχήματος κατακόρυφου κυλίνδρου. Οφείλεται στην μεγάλη τιμή της θλιπτικής τάσης του τοιχώματος η οποία ενδέχεται να υπερβεί την θλιπτική αντοχή του συνήθως λεπτού τοιχώματος της δεξαμενής. Η αστοχία αυτή μπορεί να προκληθεί είτε στον πόδα της δεξαμενής (elephant's foot) είτε καθ' ύψος της δεξαμενής, και ειδικότερα στο σημείο αλλαγής του πάχους (diamond shape buckling). Από την θεωρία των κελυφών, είναι γνωστό πως η μορφή της αστοχίας αυτής είναι πράγματι καταστροφική, συνοδεύεται από ασταθέστατο μεταλυσμικό δρόμο ισορροπίας και τέλος είναι πολύ ευαίσθητη σε αρχικές γεωμετρικές ατέλειες. Προφανώς, η αστοχία αυτή δεν επιτρέπει καμία απορρόφηση ανελαστικής ενέργειας και επομένως ο σχεδιασμός της κατασκευής οφείλει να γίνει στην γενική περίπτωση με ελαστικό φάσμα συμπεριφοράς, δηλαδή με συντελεστή συμπεριφοράς ίσον με την μονάδα ($q=1$).

Σημειώνεται πως στις δεξαμενές είναι σημαντική η παρουσία της εσωτερικής πίεσης (υδροστατικής) η οποία δρα άλλοτε ευεργετικά και άλλοτε δυσμενώς και επομένως θα πρέπει να λαμβάνεται στους υπολογισμούς.

Για την αποφυγή των ανωτέρω αστοχιών, θα πρέπει να ελέγχονται οι κάτωθι δύο καταστάσεις αστοχίας λόγω κύρτωσης (τοπικού λυγισμού). Οι δύο μορφές αυτές λυγισμού περιγράφονται στον Ευρωκώδικα 8 (μέρος 4 – παράρτημα Α).

Έλεγχος λόγω κύρτωσης 1

Ο λυγισμός αυτός συνεπάγεται μία “μορφή διαμαντιού (diamond shape)”, αναφέρεται ως «ελαστικός» και προκαλείται από τις υψηλές αξονικές θλιπτικές τάσεις. Εμφανίζεται κυρίως στα μέρη του κελύφους της δεξαμενής όπου το πάχος μειώνεται σε σχέση με το πάχος της βάσης της δεξαμενής και η εσωτερική πίεση μειώνεται σε σχέση με την μέγιστη τιμή της στην βάση. Στον σχεδιασμό έναντι αυτής της μορφής αστοχίας υποθέτουμε την μη συμμετοχή της κάθετης συνιστώσας της διέγερσης.

Ορίζοντας με σ_{cx} την μέγιστη κατακόρυφη τάση θα πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη ανισότητα ώστε να αποφευχθεί αυτή η μορφή λυγισμού [Rotter (1985a)]:

$$\frac{\sigma_{cx}}{\sigma_{c0}} \leq 0.19 + 0.81 \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{c0}} \right) \quad (5.1)$$

όπου

$$\sigma_{c0} = 0.6 E \left(\frac{t}{R} \right)$$

είναι η θεωρητική τάση αστοχίας λυγισμού κυλινδρικού ελαστικού μεταλλικού κελύφους υπό ομοιόμορφη αξονική θλίψη, χωρίς αρχικές ατέλειες, ενώ

$$\sigma_p = \sigma_{c0} \left[1 - \left(1 - \frac{\bar{p}}{5} \right)^2 \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{c0}} \right)^2 \right]^{1/2} \leq \sigma_{c0} \quad (5.2)$$

είναι μία τάση που εξαρτάται από την πίεση της δεξαμενής, το όριο διαρροής του υλικού, τον γεωμετρικό λόγο t/R και τον εκτιμώμενο μέγεθος των αρχικών ατελειών. Συγκεκριμένα,

$$\bar{p} = \frac{p}{\sigma_{c0}} \left(\frac{R}{t} \right) < 5$$

και

$$\sigma_0 = f_y \left(1 - \frac{\lambda^2}{4} \right) \quad \text{εάν} \quad \lambda^2 = \frac{f_y}{\sigma \sigma_{c1}} \leq 2$$

$$\sigma_0 = \bar{\sigma} \sigma_{cl} \quad \text{εάν} \quad \lambda^2 = \frac{f_y}{\bar{\sigma} \sigma_{cl}} \geq 2$$

όπου

$$\bar{\sigma} = 1 - 1.24(\delta/t) \left[\left(1 + \frac{2}{1.24(\delta/t)} \right)^{1/2} - 1 \right]$$

είναι μία αδιάστατη ποσότητα που εξαρτάται από την μέγιστη εκτιμώμενη ατέλεια, διαιρούμενη με το πάχος του τοιχώματος t , και το λ παίζει τον ρόλο της «λυγηρότητας». Ελλείψει άλλων στοιχείων, ο λόγος αυτός εκτιμάται ως εξής:

$$\left(\frac{\delta}{t} \right) = \frac{0.06}{\alpha} \sqrt{\frac{R}{t}}$$

όπου ο “συντελεστής ποιότητας της κατασκευής” (quality factor) α ορίζεται ως ακολούθως
 $\alpha=1$ για κανονική κατασκευή
 $\alpha=1.5$ για κατασκευή ποιοτικά άνω του μέσου όρου
 $\alpha=2.5$ για κατασκευή πολύ καλής ποιότητας

Στην εξίσωση (5.2), ο δεύτερος όρος λαμβάνει υπόψιν του το ευεργετικό αποτέλεσμα της εσωτερικής πίεσης, ενώ ο τρίτος όρος μας δίνει την μείωση της κρίσιμης τάσης λόγω των ατελειών.

Έλεγχος κύρτωσης 2

Σε μία ζώνη κοντά στην βάση της δεξαμενής αναπτύσσεται υψηλή εφελκυστική περιμετρική τάση σε συνδυασμό με μία σημαντική αξονική θλιπτική τάση που προκαλείται από τη ροπή ανατροπής. Εάν η προκύπτουσα, λόγω συνδυασμού τάση αποκτήσει τιμή κοντά στο όριο διαρροής του υλικού της δεξαμενής, η τοπική πλαστικοποίηση μπορεί να μειώσει την ακαμψία του τοιχώματος της δεξαμενής. Ο λυγισμός αυτός λέγεται και «ελαστοπλαστικός λυγισμός» δεξαμενών.

Το αποτέλεσμα της αστοχίας αυτής είναι η παραμόρφωση του τοιχώματος της δεξαμενής θα παραμορφωθεί προς την εξωτερική πλευρά της δεξαμενής, δημιουργώντας το γνωστό “elephant’s foot” (Εικόνα 5.4). Η τάση αστοχίας βασίζεται στην θεωρία ελαστοπλαστικού λυγισμού και υπολογίζεται από την σχέση, που προτάθηκε από τον Rotter (1985b). Συγκεκριμένα, η αξονική τάση πρέπει να ικανοποιεί την ανισότητα:

$$\sigma_{xc} \leq \sigma_{c0} \left[1 - \left(\frac{pR}{t f_y} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{1}{1.12 + r^{1.5}} \right) \left[\frac{r + f_y/250}{r + 1} \right] \quad (5.3)$$

όπου

$$r = \frac{R/t}{400}$$

f_y είναι η τάση διαρροής σε MPa, p είναι η εσωτερική πίεση σε MPa, και σ_{c0} είναι η τάση λυγισμού για ελαστικούς λεπτότοιχους κυλίνδρους υπό ομοιόμορφη αξονική θλιπτική ένταση χωρίς ατέλειες

$$\sigma_{c0} = 0.6 E \left(\frac{t}{R} \right) \quad (5.4)$$

Από την εξίσωση προκύπτει το συμπέρασμα ότι υψηλή εσωτερική πίεση συνεπάγεται χαμηλή τιμή της τάσης σ_{xc} . Η τάση σ_{xc} υπολογίζεται ως συνάρτηση του ύψους z της δεξαμενής και συγκρίνεται με την αξονική θλιπτική τάση σε κάθε θέση της δεξαμενής.



Εικόνα 5.4: Αστοχία στην βάση μίας δεξαμενής λόγω τοπικού λυγισμού (elephant's foot).

5.3.2 Αστοχία λόγω έλλειψης ευστάθειας, ολίσθησης ή ανατροπής

Τόσο οι δεξαμενές που έχουν ειδική θεμελίωση όσο και οι δεξαμενές χωρίς στήριξη (απλή έδραση στο έδαφος) είναι δυνατόν να υποστούν ολίσθηση ή ανατροπή όταν το μέγεθος της διάτμησης βάσης ή της ροπής ανατροπής ξεπεράσει μία οριακή τιμή. Σημαντικότερη είναι η περίπτωση των δεξαμενών σχήματος κατακόρυφου κυλίνδρου που απλά εδράζονται στο έδαφος. Σε κάθε περίπτωση, η δεξαμενή θα πρέπει να εξετάζεται σε σχέση με τον τύπο στήριξης ή θεμελίωσής της.

1. Σε περιπτώσεις κατακόρυφων κυλινδρικών δεξαμενών (Εικόνα 5.1) έχουμε είτε την απλή έδρασή τους με το έδαφος, άρα και την πιθανότητα ένα τμήμα της βάσης να ανυψώνεται σε σχέση με την θεμελίωση (αποκόλληση – uplifting), είτε και την σύνδεσή τους με την θεμελίωσης μέσω κατάλληλης διάταξης κοχλιών. Στην πρώτη περίπτωση, η δυνατότητα αποκόλλησης δεν οδηγεί απαραίτητα στην κατάρρευση της δεξαμενής αλλά οι συνέπειες της ενδέχεται να είναι σοβαρές ζημιές στις συνδέσεις των σωληνώσεων με την δεξαμενή και αύξηση της αξονικής τάσης που ασκείται στο τοίχωμα της δεξαμενής που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος. Στην δεύτερη περίπτωση, η σωστή διαστασιολόγηση των κοχλιών είναι απαραίτητη για την ευστάθεια της δεξαμενής.

2. Σε δεξαμενές ή δοχεία πίεσης σφαιρικού σχήματος, η στήριξη γίνεται μέσω στύλων κυλινδρικής διατομής συνδεδεμένων (συνήθως) με συνδέσμους μορφής Χ όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2. Οι στύλοι και οι σύνδεσμοι απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής ενέργειας και θα πρέπει να διαστασιολογηθούν κατάλληλα.
3. Σε κυλινδρικές δεξαμενές ή δοχεία πίεσης οριζόντιας διάταξης, η στήριξη γίνεται μέσω άκαμπτων στηρίξεων όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3. Η περίπτωση ανατροπής είναι μάλλον μικρή, θα πρέπει όμως να εξασφαλιστεί.

Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να υπολογιστούν με αξιόπιστο τρόπο οι οριζόντιες δυνάμεις λόγω του σεισμού, ώστε να εξασφαλιστεί η ευστάθεια της δεξαμενής. Οι δυνάμεις αυτές εξαρτώνται κυρίως από τις πιέσεις του αποθηκευμένου ρευστού στο τοίχωμα της δεξαμενής και ο αξιόπιστος προσδιορισμός τους θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη το φαινόμενο του κυματισμού.

5.3.3 Αύξηση των εσωτερικών πιέσεων λόγω κυματισμού

Το φαινόμενο του κυματισμού που περιγράφηκε ανωτέρω συνοδεύεται από μία σημαντική αύξηση των πιέσεων λόγω υδροδυναμικών φαινομένων και επομένως αυτό μπορεί να συντελέσει στην υπέρβαση της πίεσης σχεδιασμού του τοιχώματος, και την πιθανή αστοχία της δεξαμενής. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο σε δεξαμενές σχήματος κατακόρυφου κυλίνδρου. Σε σφαιρικά δοχεία και δοχεία σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου, όπου υπάρχει μεγάλη εσωτερική πίεση, η αύξηση των πιέσεων λόγω υδροδυναμικών φαινομένων δεν θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμη. Σε κάθε περίπτωση, είναι επιθυμητό να υπολογίζεται η αύξηση των πιέσεων και να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό.

5.3.4 Κύρτωση στην κορυφή της δεξαμενής λόγω κυματισμού

Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται σε δεξαμενές σχήματος κατακόρυφου κυλίνδρου. Η κίνηση του ρευστού σχετικά με την δεξαμενή συνοδεύεται, όπως προαναφέρθηκε, με την παρουσία υδροδυναμικών πιέσεων. Η κατανομή των πιέσεων αυτών είναι διαφορετική από την υδροστατική, οι μέγιστες πιέσεις είναι κοντά στην επιφάνεια του ρευστού και μάλιστα λόγω της «ταλαντωτικής» συμπεριφοράς του ρευστού, ορισμένες πιέσεις μπορεί να είναι αρνητικές.

Δεδομένου ότι η συνολική πίεση στα τοιχώματα της δεξαμενής είναι μία επαλληλία των υδροδυναμικών πιέσεων και των υδροστατικών πιέσεων, όταν οι αρνητικές υδροδυναμικές πιέσεις αντισταθμίσουν τις αντίστοιχες υδροστατικές (οι οποίες σημαντικά μικρές στην κορυφή της δεξαμενής) τότε το τοίχωμα βρίσκεται υπό την επίδραση μίας εξωτερικής ατμοσφαιρικής πίεσης, μικρής μεν, αλλά σημαντικής ώστε να προκληθεί αστοχία, και επομένως άμεση αστοχία λόγω κύρτωσης. Σημειώστε πως οι δεξαμενές κατακόρυφου κυλίνδρου έχουν $R/t \approx 1000$, οπότε έχουν πρακτικά μηδενική αντοχή σε εξωτερική πίεση.

Σημειώνεται πως για πρώτη φορά το φαινόμενο αυτό εξετάστηκε πειραματικά και αναλυτικά από τους Natsiavas & Babcock (1988), χωρίς όμως να δοθεί κάποια πληροφορία χρήσιμη για την αντιμετώπισή του σε επίπεδο σχεδιασμού. Στην διεθνή βιβλιογραφία και ειδικότερα στις αντίστοιχες οδηγίες σχεδιασμού το φαινόμενο αυτό δεν έχει αντιμετωπιστεί, παρότι έχουν αναφερθεί σημαντικές καταστροφές σε δεξαμενές ατμοσφαιρικής πίεσης (βλ. σεισμός Νικομήδειας, Τουρκία, 1999, εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.5: Κύρτωση στην κορυφή της δεξαμενής λόγω κυματισμού (σεισμός Νικομήδειας, Τουρκία 1999)

5.3.5 Ανεπιθύμητη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας

Μία μορφή «αστοχία» σε μία δεξαμενή (ορθογωνική ή κατακόρυφη κυλινδρική) μπορεί να θεωρηθεί η σημαντική και ανεπιθύμητη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (sloshing wave height). Η αστοχία αυτή σημαίνει πως μπορεί να καταστραφεί εξοπλισμός στην κορυφή της δεξαμενής, να καταστραφεί (πιθανώς) η οροφή της δεξαμενής, ή να γίνει υπερχειλίση του ρευστού. Για την αποφυγή της ανεπιθύμητης ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας και γενικά την μείωση του φαινομένου του κυματισμού σε σχέση με την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, χρησιμοποιούνται ειδικοί αποσβεστήρες όπως περιγράφονται από τους Warnitchai & Pinkaew (1998). Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εκτιμάται η μέγιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Για δεξαμενές συγκεκριμένης γεωμετρίας ο υπολογισμός αυτός είναι εφικτός και σχετικοί τύποι δίνονται στο επόμενο κεφάλαιο 5.4

5.3.6 Αστοχία συγκολλητών συνδέσεων με ακροφύσια - σωληνώσεις

Σημαντικότερες λεπτομέρειες σχεδιασμού αποτελούν οι συγκολλητές συνδέσεις των ακροφυσίων (nozzles) με το κύριο σήμα της δεξαμενής (εικόνα 5.6). Η αστοχία ενός ακροφυσίου είναι μεν τοπική, αλλά μπορεί να είναι πολύ καταστροφική, διότι μπορεί να δημιουργήσει είτε θραύση, είτε μία ιδιαίτερα πλαστικοποιημένη περιοχή στην δεξαμενή, η οποία μπορεί να προκαλέσει καθολική κατάρρευση. Στο θέμα των ακροφυσίων ενδιαφέρουν δύο βασικά θέματα

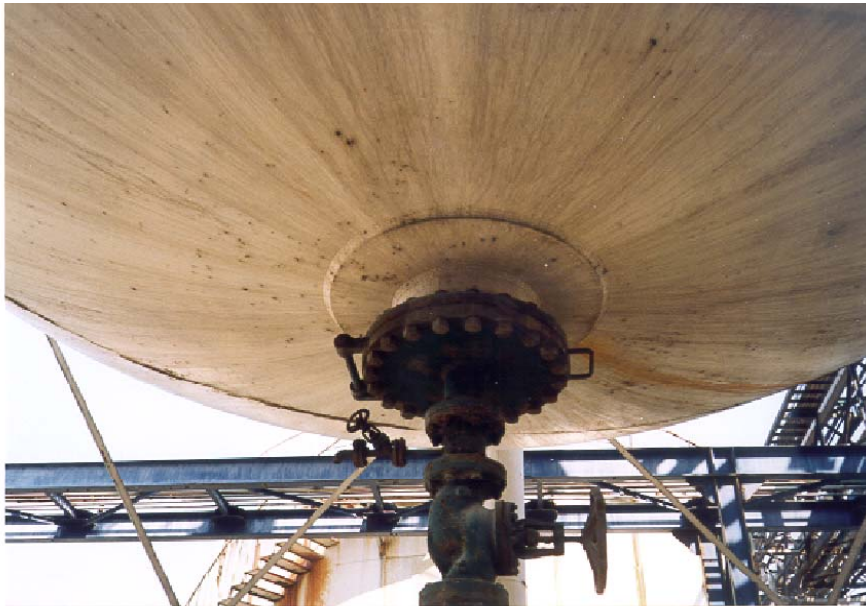
- Η ακαμψία της σύνδεσης για τον καθορισμό κατάλληλων συνοριακών συνθηκών για την ανάλυση τάσεων γειτονικών σωληνώσεων.
- Η οριακή τους αντοχή και η πλαστιμότητά τους ώστε να εξασφαλιστεί η παραμορφωσιμότητά τους σε ισχυρό σεισμό.

Όσον αφορά την ακαμψία μίας τέτοιας κατασκευαστικής λεπτομέρειας, τα στοιχεία στην διεθνή βιβλιογραφία είναι σχετικά περιορισμένα. Αυτό από μία άποψη είναι φυσιολογικό, δεδομένου πως υπάρχουν αρκετές κατασκευαστικές λεπτομέρειες για το θέμα αυτό, η κάθε μία από τις οποίες έχει διαφορετική συμπεριφορά. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στην σχετικά πρόσφατη εργασία των Weiss & Joost (1997) για την συμπεριφορά των ακροφυσίων και την εκτίμηση των ελαστικών σταθερών τους.

Τέλος, η οριακή αντοχή ενός ακροφυσίου επίσης εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την συγκεκριμένη κατασκευαστική λεπτομέρεια. Ο γενικός σχεδιασμός των ακροφυσίων βασίζεται στις αντίστοιχες διατάξεις του ASME Boiler & Pressure Vessel Code και του API 620. Στην ειδική περίπτωση του αντισεισμικού σχεδιασμού ενός ακροφυσίου, πρέπει να εκτιμηθεί η μέγιστη παραμόρφωση του ακροφυσίου (αξονικά ή καμπτικά). Ο Ευρωκώδικας 8 – μέρος 4, κεφάλαιο 3.4.1.2 δίνει (χωρίς βιβλιογραφική αναφορά) έναν τύπο για την μέγιστη επιτρεπόμενη σχετική μετατόπιση Δ_{\max} γειτονικότερης στήριξης (που απέχει απόσταση x από το ακροφύσιο) ώστε να γίνει ο σχεδιασμός του ακροφυσίου. Συγκεκριμένα, αν δίνεται η μέγιστη εδαφική μετατόπιση d_g (π.χ. από την δεδομένη εδαφική κίνηση του σεισμού) τότε

$$\Delta_{\max} = \gamma_1 \frac{x d_g}{500} \quad (5.5)$$

όπου τα x , d_g , Δ_{\max} σε μέτρα (m) και γ_1 είναι ο συντελεστής σπουδαιότητας.



Εικόνα 5.6: Λεπτομέρεια σύνδεσης σωλήνωσης με σφαιρική δεξαμενή.

5.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο 5.4 περιγράφεται μία απλή μεθοδολογία υπολογισμού των δυνάμεων και πιέσεων λόγω κυματισμού για διάφορες γεωμετρίες δοχείων και δεξαμενών, με βάση τις ισχύουσες διατάξεις σε αντίστοιχους κανονισμούς, καθώς και σε γεωμετρίες που δεν εξετάζονται από τους ισχύοντες κανονισμούς. Το κείμενο αυτό, αποτελεί μία σημαντική συμβολή της παρούσας ερευνητικής εργασίας, διότι θέτει το πρόβλημα του υπολογισμού των σεισμικών δυνάμεων σε μία «ενοποιημένη» βάση, δεδομένου πως για δεξαμενές και δοχεία πίεσης γεωμετρίες του οριζόντιου κυλίνδρου και της σφαίρας δεν υπάρχουν τα απαραίτητα σχεδιαστικά βοηθήματα. Επομένως πιστεύεται πως θα μπορέσει να αποτελέσει ένα συνοδευτικό κείμενο παράρτημα σε μελλοντικές κανονιστικές διατάξεις. Η προτεινόμενη απλή μεθοδολογία εκτίμησης της συνολικής δύναμης σε αυτές τις γεωμετρίες δεξαμενών και δοχείων πίεσης, λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο του κυματισμού βασίζεται σε δημοσιευμένες εργασίες, καθώς και σε επιλύσεις του κυματισμού που έγιναν στο πανεπιστήμιο Θεσσαλίας στα πλαίσια αυτής της ερευνητικής προσπάθειας. Σημειώνεται πως στα πλαίσια των εκπαιδευτικών και ερευνητικών δραστηριοτήτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας διεξάγεται εκτενής έρευνα στο πρόβλημα του κυματισμού με αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους, η μέχρι τώρα πρόοδος της οποίας περιγράφεται συνοπτικά στο Παράρτημα Α.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, βασικό σημείο της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας, είναι η παρουσίαση – για πρώτη φορά – μίας ενοποιημένης διαδικασίας υπολογισμού των σεισμικών δυνάμεων στις δεξαμενές, οι οποίες θα πρέπει να συμπεριληφθούν στους επιμέρους ελέγχους, διότι η σωστή αντιμετώπιση των ανωτέρω μορφών αστοχίας (κεφάλαιο 5.3) απαιτεί το προσδιορισμό των σεισμικών δυνάμεων στην κατασκευή. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα υπολογισμού των σεισμικών δυνάμεων σε χαρακτηριστικές δεξαμενές – δοχεία με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία αναφέρονται στο Παράρτημα Β.

Ο προσδιορισμός των δυνάμεων αυτών βασίζεται σε ορισμένες βασικές αρχές που διέπουν το φαινόμενο του κυματισμού και την αλληλεπίδρασή του με την κατασκευή, οι οποίες περιγράφονται στην συνέχεια. Σημειώνουμε πως οι μεθοδολογίες αυτές είχαν αναπτυχθεί σε παλιότερες εργασίες που αναφέρονταν είτε στην αντισεισμική ανάλυση δεξαμενών, είτε στην δυναμική συμπεριφορά διαστημικών οχημάτων (για οριζόντιους κυλίνδρους και σφαίρες). Εντούτοις, η παρουσίαση των μεθοδολογιών αυτών σε μια ενοποιημένη μορφή γίνεται για πρώτη φορά, αποτελεί μία σημαντική συμβολή της παρούσας εργασίας.

5.4.1 Γενική μεθοδολογία

5.4.1.1 Βασικές αρχές

Η βασική αρχή στην οποία βασίζεται ο προσδιορισμός των σεισμικών δυνάμεων είναι η θεώρηση του φαινομένου του κυματισμού (sloshing). Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται στα ειδικά θέματα (κεφάλαιο 9 – παράγραφος 9.1) και αναφέρεται στους κυματισμούς της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού της δεξαμενής ή του δοχείου πίεσης λόγω της εξωτερικής διέγερσης.

Το φαινόμενο του κυματισμού είναι σημαντικό για την συνολική συμπεριφορά του συστήματος ρευστού – κατασκευής λόγω της πολύ σημαντικής ιδιοπεριόδου του ρευστού σε σχέση με την ιδιοπερίοδο του δομικού συστήματος της κατασκευής. Γενικά, η επίλυση του προβλήματος του

κυματισμού είναι μη-γραμμική, και στην γενική περίπτωση θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την πιθανή παραμόρφωση του τοιχώματος του δοχείου αλλά και την αλληλεπίδραση της θεμελίωσης με το έδαφος (τριπλή αλληλεπίδραση ρευστού – κατασκευής – εδάφους), που συνεπάγεται ένα πολύπλοκο πρόβλημα, το οποίο επιλύεται μόνον με αριθμητικές μεθόδους, και σίγουρα όχι στα πλαίσια μίας διαδικασίας σχεδιασμού.

Εντούτοις, συγκεκριμένες απλοποιήσεις του προβλήματος, βασισμένες σε ρεαλιστικές παραδοχές, επιτρέπουν αφενός την γραμμικοποίηση του προβλήματος και αφετέρου την παρουσίαση μίας απλής γενικής μεθοδολογίας υπολογισμού των συνολικών σεισμικών δυνάμεων για τον σχεδιασμό. Για μία απλή, καίτοι μαθηματική, παρουσίαση του προβλήματος του κυματισμού, συνοδευόμενη από μία απλή μαθηματική διατύπωση, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο κεφάλαιο 9 (ειδικά θέματα).

Όπως αναφέρθηκε, σημαντική πρόοδος στην μελέτη του φαινομένου του κυματισμού έγινε την περίοδο που αναπτύχθηκε η διαστημική τεχνολογία (1960 – 1970), λόγω της ανάγκης για την δυναμική απόκριση δεξαμενών καυσίμων διαστημικών οχημάτων (space vehicle fuel containers), ενώ σημαντικές εργασίες παρουσιάστηκαν σε μεταγενέστερη εποχή για την ανάλυση και σχεδιασμό σε σεισμό δεξαμενών κατακόρυφου κυλίνδρου.

Η μεθοδολογία που θα περιγραφεί στις επόμενες παραγράφους βασίζεται

- στην γραμμικοποίηση του προβλήματος του κυματισμού
- στην αρχική θεώρηση του απαραμόρφωτου τοιχώματος της δεξαμενής

και αποσκοπεί στον προσδιορισμό της συνολικής σεισμικής δύναμης. Όπως θα δούμε εν συνεχεία, η παραμόρφωση της δεξαμενής και η ενδοτικότητα του εδάφους επηρεάζουν την συνολική συμπεριφορά του συστήματος, αλλά όχι την λύση του κυματισμού.

5.4.1.2 Γενική λύση της απόκρισης με κυματισμό

Γενικά, το γραμμικό πρόβλημα της απόκρισης του ρευστού στην απαραμόρφωτη δεξαμενή όταν η τελευταία κινείται με επιτάχυνση $\ddot{X}(t)$ κατά την οριζόντια διεύθυνση x περιγράφεται από μία συνάρτηση δυναμικού

$$\varphi(x,y,z,t) = \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} \dot{q}_n(t) \psi_n(x,y,z) + \dot{X}(t) x \quad (5.6)$$

Αν οι συναρτήσεις $\psi_n(x,y,z)$ είναι ορθογωνικές μεταξύ τους, τότε τα $q_n(t)$ δίδονται από μία σειρά από ασύζευκτες εξισώσεις απλού ταλαντωτή της μορφής

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = -\gamma_n \ddot{X} \quad (5.7)$$

όπου ω_n είναι η ιδιοσυχνότητα που αντιστοιχεί στην ιδιομορφή $\psi_n(x,y,z)$, ξ_n είναι ο συντελεστής απόσβεσης της αντίστοιχης ιδιομορφής, ενώ γ_n είναι το ποσοστό συμμετοχής της εξωτερικής διέγερσης του σεισμού στην συγκεκριμένη ιδιομορφή $\psi_n(x,y,z)$.

Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\eta(x,z,t)$ δίνεται από την σχέση

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \left[\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right]_{f.s.} \quad (5.8)$$

όπου $[.]_{f.s.}$ σημαίνει πως η συνάρτηση $[.]$ υπολογίζεται στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού, y είναι ο κατακόρυφος άξονας (κάθετος στην ελεύθερη επιφάνεια) και επομένως, από την γενική λύση του δυναμικού έχουμε

$$\eta(x,z,t) = \sum_n q_n \left[\frac{\partial \psi_n}{\partial y} \right]_{f.s.} \quad (5.9)$$

5.4.1.3 Υδροδυναμικές πιέσεις και δυνάμεις

Το φαινόμενο της κίνησης του ρευστού συνοδεύεται από υδροδυναμικές πιέσεις οι οποίες υπολογίζονται από το δυναμικό με βάση την εξίσωση Bernoulli

$$p(x,y,z,t) = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (5.10)$$

Η συνολική δύναμη του ρευστού στα τοιχώματα της δεξαμενής προκύπτει με κατάλληλη ολοκλήρωση των ως άνω πιέσεων στην «υγρή επιφάνεια» δεξαμενής κατά την διεύθυνση του σεισμού x . Το τελικό αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης είναι

$$F_T = - \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} L_{nc} \ddot{q}_n - M_L \ddot{X} \quad (5.11)$$

όπου οι συντελεστές L_{nc} εξαρτώνται από την γεωμετρία της δεξαμενής, άρα από τις χωρικές συναρτήσεις $\psi_n(x,y,z)$. Χρησιμοποιώντας τις κάτωθι αλλαγές μεταβλητών,

$$a_n = \frac{q_n}{\gamma_n} \quad \text{και} \quad (5.12)$$

$$u_n = a_n + X$$

οι εξισώσεις κίνησης του ρευστού ως προς την δεξαμενή γίνονται

$$\ddot{a}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{a}_n + \omega_n^2 a_n = -\ddot{X} \quad (5.13)$$

ή ισοδύναμα

$$\ddot{u}_n + 2\xi_n \omega_n (\dot{u}_n - \dot{X}) + \omega_n^2 (u_n - X) = 0$$

Η συνολική δύναμη γράφεται ως εξής:

$$F_T = - \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} M_{nc} \ddot{u}_n - \left(M_L - \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} M_{nc} \right) \ddot{X} = - \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} M_{nc} \ddot{u}_n - M_L \ddot{X} \quad (5.14)$$

Δηλαδή, η συνολική δύναμη αναλύεται σε δύο συνιστώσες, μία ωστική δύναμη

$$F_I = -M_I \ddot{X} = -\left(M_L - \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} M_{nc}\right) \ddot{X} \quad (5.15)$$

και μία δύναμη επαγωγής

$$F_C = - \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} M_{nc} \ddot{u}_n \quad (5.16)$$

Με βάση τα παραπάνω, και η συνολική μάζα χωρίζεται σε 2 τμήματα,

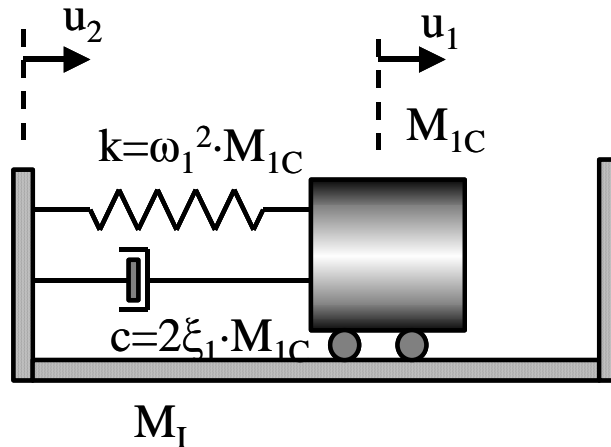
- την «μάζα επαγωγής» M_c (convective mass) η οποία αποτελείται από τις μάζες των επιμέρους ιδιομορφών M_{nc} και αναφέρεται στην σχετική κίνηση του ρευστού ως προς την δεξαμενή (κίνηση που συνδέεται με τον κυματισμό).
- την «ωστική μάζα» M_I (impulsive mass) η οποία ουσιαστικά αναφέρεται στην μάζα του ρευστού που παρακολουθεί την κίνηση της δεξαμενής $X(t)$

Προφανώς το άθροισμα της ωστικής μάζας του ρευστού και των επιμέρους μαζών των ιδιομορφών θα είναι ίσο με την συνολική μάζα του ρευστού, ή αλλιώς

$$M_L = M_I + \sum_n M_{nc} \quad (5.17)$$

Με την μεθοδολογία αυτή ο προσδιορισμός της μέγιστης συνολικής σεισμικής δύναμης ανάγεται στον υπολογισμό των επιμέρους μαζών και την εκτίμηση της μέγιστης τιμής $q_{n-\max}$ της μεταβλητής $q_n(t)$.

Για ευκολία των υπολογισμών, παρατηρείται πως η μορφή των ανωτέρω εξισώσεων μας παρέχει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε ένα μηχανικό μοντέλο που περιγράφει την κίνηση του ρευστού μέσα στην κινούμενη από τον σεισμό δεξαμενή. Το μοντέλο αποτελείται από μία μάζα ίση με την ωστική μάζα που κινείται ακριβώς όπως και ο σεισμός με μετατόπιση $X(t)$, ενώ πάνω σε αυτήν «στηρίζονται» απλοί ταλαντωτές με μάζα και ιδιοσυχνότητα ίσες με αυτές της κάθε ιδιομορφής (βλ. Priestley NZ-1986, Abramson 1966). Επομένως, θεωρώντας N το πλήθος ιδιομορφές, το πρόβλημα ανάγεται στην απόκριση ενός συστήματος με N ασύζευκτους βαθμούς ελευθερίας, η απόκριση των οποίων μπορεί να ληφθεί από ένα φάσμα απόκρισης ή ένα φάσμα σχεδιασμού. Στο σχήμα 5.7 φαίνεται ένα απλοποιημένο μοντέλο που χρησιμοποιεί την 1^η ιδιομορφή κυματισμού.



Σχήμα 5.7: Μηχανικό μοντέλο που περιγράφει την κίνηση του συστήματος ρευστού – δεξαμενής.

Σε επίπεδο σχεδιασμού, η συνολική δύναμη μπορεί να δοθεί από την εξίσωση (5.15), με την κατάλληλη επαλληλία. Μία μέθοδος που έχει προταθεί (Veletsos and Shrivakumar, 1997) έγκειται στην επαλληλία τύπου SRSS για τις επαγωγικές δυνάμεις, αλλά χρησιμοποιεί απλή αθροιστική επαλληλία με την ωστική δύναμη:

$$F_T = F_{I,\max} + F_{C,\max} = \left[\sum_{n=1,2,3,\dots}^N (M_{nc} S_{An})^2 \right]^{1/2} + M_I A_g \quad (5.18)$$

όπου

$$F_{C,\max} = \left[\sum_{n=1,2,3,\dots}^N (M_{nc} S_{An})^2 \right]^{1/2} \quad (5.19)$$

και S_{An} είναι η μέγιστη φασματική επιτάχυνση της μάζας της ιδιομορφής n που υπολογίζεται με βάση την αντίστοιχη ιδιοπερίοδο T_n , ενώ A_g είναι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση.

Εντούτοις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η επαλληλία SRSS για όλες τις δυνάμεις:

$$F_T = \sqrt{F_{I,\max}^2 + F_{C,\max}^2} = \left[(M_I A_g)^2 + \sum_{n=1,2,3,\dots}^N (M_{nc} S_{An})^2 \right]^{1/2} \quad (5.20)$$

Η βασική αυτή θεωρία, παρουσιάζεται στην βιβλιογραφία σε πολλές μορφές, ανάλογα με την μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος που ακολουθεί κάθε ερευνητής. Η άποψη της ερευνητικής ομάδας είναι πως η πρώτη φορά που παρουσιάστηκε η διάκριση της μάζας του ρευστού σε «ωστική μάζα» και «μάζα επαγωγής» ήταν στην εργασία του Housner (1957), για ορθογωνικές και κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές, παρότι γενικές λύσεις του προβλήματος είχαν προταθεί παλαιότερα. Στην συνέχεια, αρκετά μεταγενέστερες εργασίες καθιέρωσαν την διάκριση αυτή, η οποία αποτελεί την βασική αρχή πάνω στην οποία βασίζεται ο προσδιορισμός των υδροδυναμικών πιέσεων και δυνάμεων σε δεξαμενές και δοχεία πίεσης, σε επίπεδο απλοποιητικής σεισμικής ανάλυσης και σχεδιασμού.

5.4.1.4 Επιρροή της παραμόρφωσης της δεξαμενής

Τα ανωτέρω βασίζονται στην λύση για το φαινόμενο του κυματισμού με απαραμόρφωτα τοιχώματα της δεξαμενής. Στην γενική περίπτωση που τα τοιχώματα της δεξαμενής παραμορφώνονται, η ανωτέρω λύση οφείλει να τροποποιηθεί, ενώ η συνολική δύναμη πρέπει να περιλαμβάνει την αδράνεια του παλλόμενου τοιχώματος. Χρησιμοποιώντας όμως την βασική παραδοχή πως η λύση του κυματισμού είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την κίνηση του τοιχώματος, το πρόβλημα απλοποιείται σημαντικά.

Η παραμόρφωση του τοιχώματος της δεξαμενής είναι σημαντική στην περίπτωση της κατακόρυφης ορθογωνικής δεξαμενής (λόγω του σημαντικού λόγου διαμέτρου προς πάχος), ενώ στην περίπτωση των δοχείων πίεσης λόγω του σχετικά μεγάλου πάχους, η παραμόρφωση του τοιχώματος μπορεί γενικά να αγνοηθεί (σε σφαιρικά δοχεία και σε οριζόντια κυλινδρικά δοχεία).

5.4.1.5 Επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού

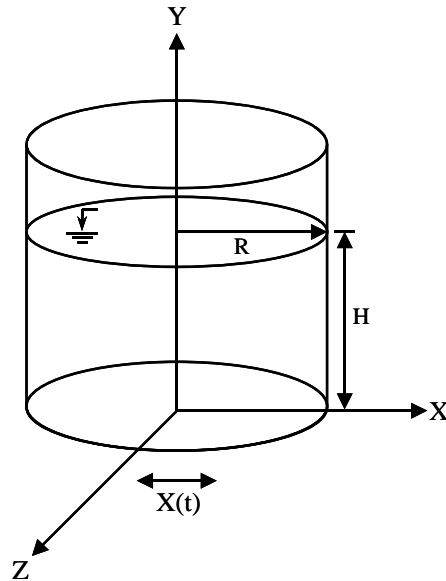
Η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού αποτελεί έναν ξεχωριστό παράγοντα ο οποίος δεν έχει ερευνηθεί παρά μόνον σε κατακόρυφες δεξαμενές, και μάλιστα με απλοποιητικό τρόπο, δεδομένου ότι οι αντίστοιχες προτεινόμενες λύσεις αγνοούν την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού. Περισσότερα για την κατακόρυφη συνιστώσα αναφέρονται στην ενότητα 5.4.2.4 για κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές. Για τις άλλες γεωμετρικές δεξαμενών (ορθογωνική, οριζόντιος κύλινδρος, σφαίρα) δεν υπάρχουν δημοσιευμένες λύσεις στην διεθνή βιβλιογραφία, οπότε αντίστοιχες οδηγίες δεν συμπεριλαμβάνονται στην παρούσα έκθεση.

5.4.1.6 Αλληλεπίδραση δεξαμενής - εδάφους

Η αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής αποτελεί μία επίσης σημαντική παράμετρο στην απόκριση των δεξαμενών. Με την θεώρηση της παραμόρφωσης του εδάφους το σύστημα γίνεται πολύπλοκο και η τριπλή αλληλεπίδραση ρευστού – κατασκευής – εδάφους πρέπει να αντιμετωπιστεί. Η αντιμετώπιση αυτή γίνεται με αριθμητικές μεθόδους, αλλά υπάρχει η δυνατότητα θεώρησης των φαινομένων αυτών με κάποιες βασικές απλοποιητικές παραδοχές. Πιο συγκεκριμένα, η λύση κυματισμού – όπως αυτή περιγράφηκε ανωτέρω – παραμένει ανεπηρέαστη, δηλαδή ίδια με αυτήν της απαραμόρφωτης δεξαμενής σε άκαμπτη θεμελίωση. Δηλαδή, το έδαφος επηρεάζει μόνον το ωστικό τμήμα της απόκρισης. Η βασική ιδέα της μεθοδολογία που ακολουθείται η τροποποίηση των ιδιοπεριόδων των ωστικών μαζών ώστε να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση με το έδαφος. Για δεξαμενές σχήματος κατακόρυφου κυλίνδρου, η μεθοδολογία αυτή παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

5.4.2 Κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές

Οι κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές παρουσιάζουν σημαντικές εφαρμογές σε βιομηχανικές κατασκευές και έχουν αναλυθεί σε μεγάλη έκταση, ιδιαίτερα την περίοδο 1975 – 1990. Παρουσιάζουν επίσης σημαντικές εφαρμογές σε διαστημικά οχήματα, και είχαν ήδη να εξετάζονται από τα τέλη της δεκαετίας του '50. Η παρούσα παράγραφος επιχειρεί μία συνοπτική και απλοποιητική περιγραφή των βασικών αρχών προσδιορισμού των σεισμικών δυνάμεων σε κατακόρυφους κυλίνδρους λαμβανομένων υπόψη και των υδροδυναμικών φαινομένων.



Σχήμα 5.8: Γεωμετρία δεξαμενής κατακόρυφου κυλίνδρου.

5.4.2.1 Απαραμόρφωτες κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές σε άκαμπτη θεμελίωση

Αποδεικνύεται πως αναλυτική λύση της μορφής (5.6) με ορθογωνικές χωρικές συναρτήσεις $\psi_n(x,y,z)$ είναι εφικτή, και μάλιστα, εφαρμόζοντας την μέθοδο χωρισμού των μεταβολών,

$$\psi_n(r,\theta,z) = J_1(k_n r) \cosh(k_n z) \cos\theta \quad (5.21)$$

όπου $J_1(\cdot)$ είναι η συνάρτηση Bessel πρώτης τάξης, και τα k_n είναι οι ρίζες της εξίσωσης

$$J'_1(k_n R) = 0$$

και παρατίθενται στον κάτωθι πίνακα

Ιδιομορφή (n)	$k_n R$
1	1.841
2	5.331
3	8.536
4	11.706
5	14.864

Οι ιδιοσυχνότητες ω_n της κίνησης του ρευστού δίνονται από την παρακάτω σχέση και εξαρτώνται κυρίως από τον λόγο (H/R) του ύψους H του ρευστού προς την ακτίνα R της δεξαμενής.

$$\omega_n = g k_n \tanh(k_n H)$$

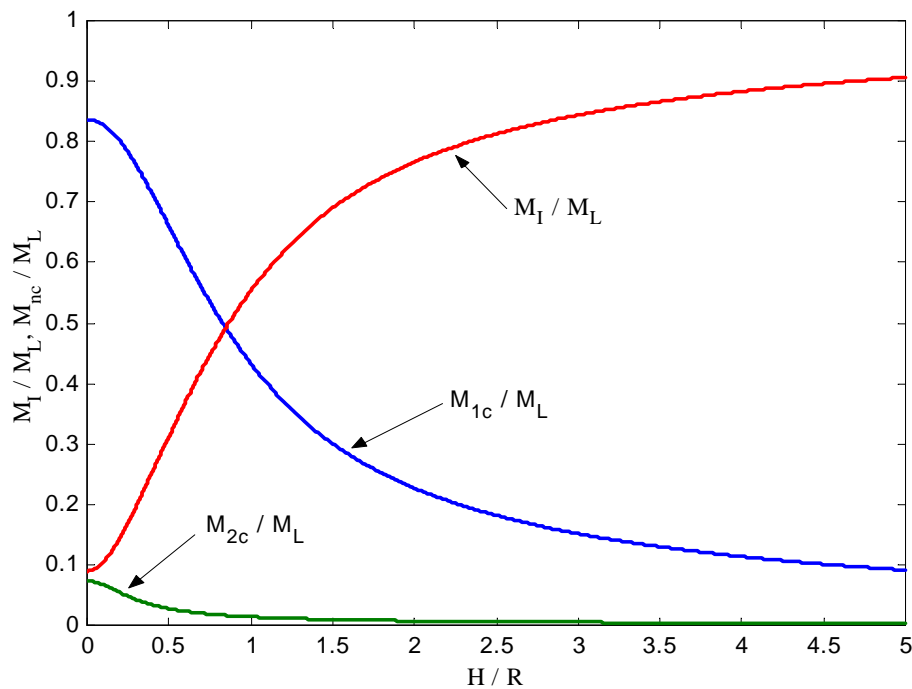
και

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n}$$

Η ωστική μάζα και οι μάζες των ιδιομορφών δίνονται από τις κάτωθι εκφράσεις, οι οποίες εξαρτώνται επίσης από τον λόγο του ύψους H προς την ακτίνα R της δεξαμενής. Οι ιδιομορφικές μάζες κυματισμού (μάζες επαγωγής) δίνονται από τον τύπο

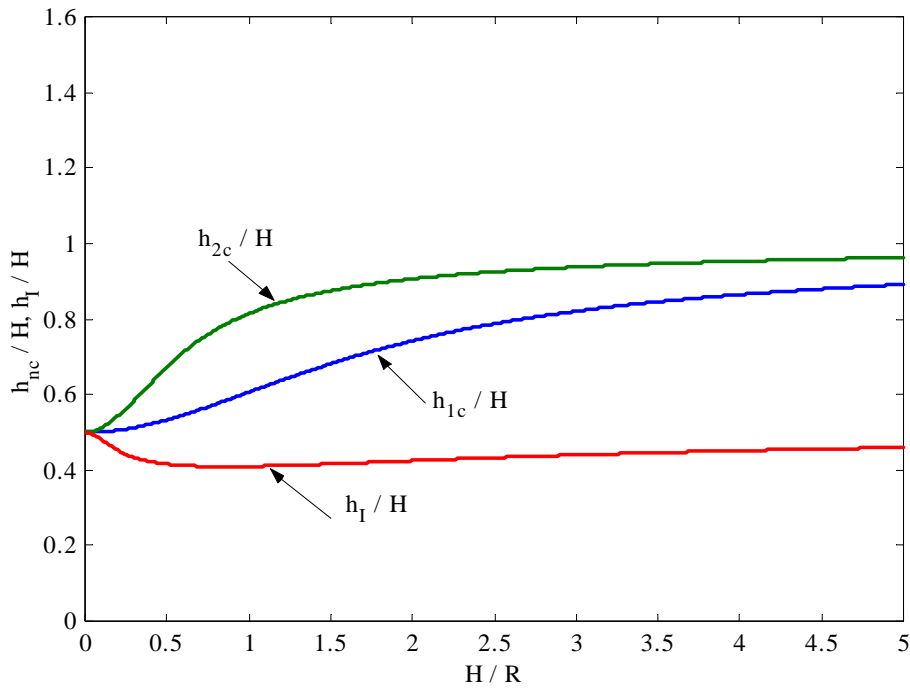
$$M_{nc} = \left[\frac{2}{k_n R [(k_n R)^2 - 1]} \tanh(k_n H) \right] M_L \quad (5.22)$$

Οι μάζες επαγωγής M_{nc} και η ωστική μάζα M_I δίνονται στο κάτωθι σχήμα 5.9



Σχήμα 5.9: Ωστική μάζα και μάζες επαγωγής για κυλινδρική δεξαμενή με απαραμόρφωτα τοιχώματα, σε σχέση με το λόγο H/R .

Εκτός από το μέγεθος της δύναμης της κάθε ιδιομορφής, απαιτείται και ο προσδιορισμός του σημείου εφαρμογής τους. Οι αποστάσεις των δυνάμεων h_{nc} από την βάση της δεξαμενής δίνονται από το διάγραμμα 5.10, με βάση την γεωμετρία της δεξαμενής (λόγος H/R).



Σχήμα 5.10: Απόσταση της ωστικής δύναμης και των δυνάμεων επαγωγής από την βάση για κυλινδρική δεξαμενή με απαραμόρφωτα τοιχώματα, σε σχέση με το λόγο H/R .

Οι αναλυτικές εξισώσεις των h_{nc} είναι

$$h_{nc} = \left[1 - \frac{1}{k_n H} \tanh\left(\frac{k_n H}{2}\right) \right] H \quad (5.22)$$

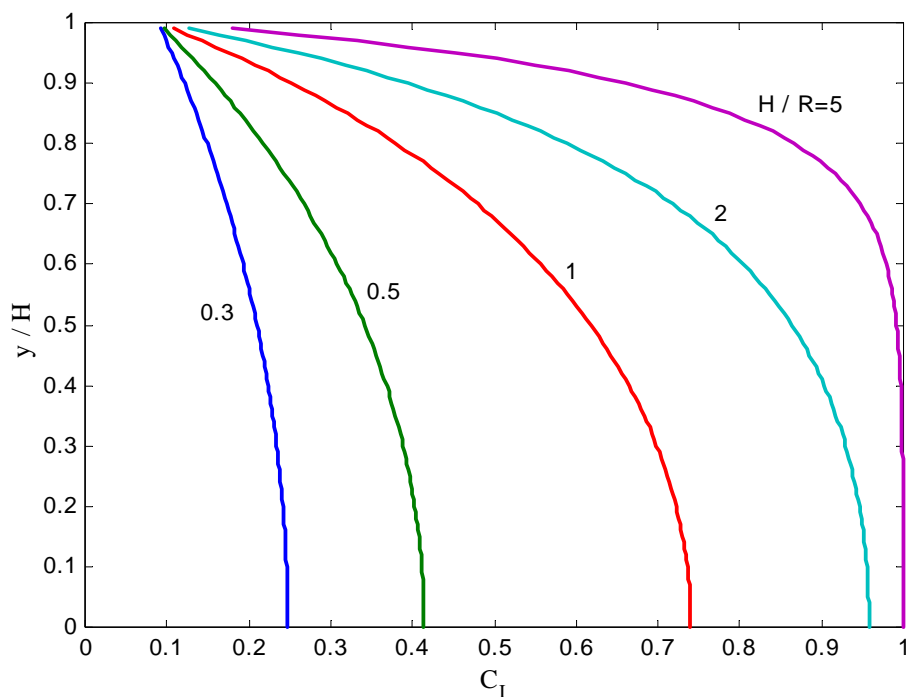
Με βάση την εξίσωση του κυματισμού είναι εύκολο να έχουμε μία έκφραση για τις υδροδυναμικές πιέσεις που αναπτύσσονται το τοίχωμα της δεξαμενής, τόσο για την ωστική όσο και την επαγωγική κίνηση. Συγκεκριμένα,

$$p_l(z, \theta) = c_l (\rho R \cos \theta) A_g$$

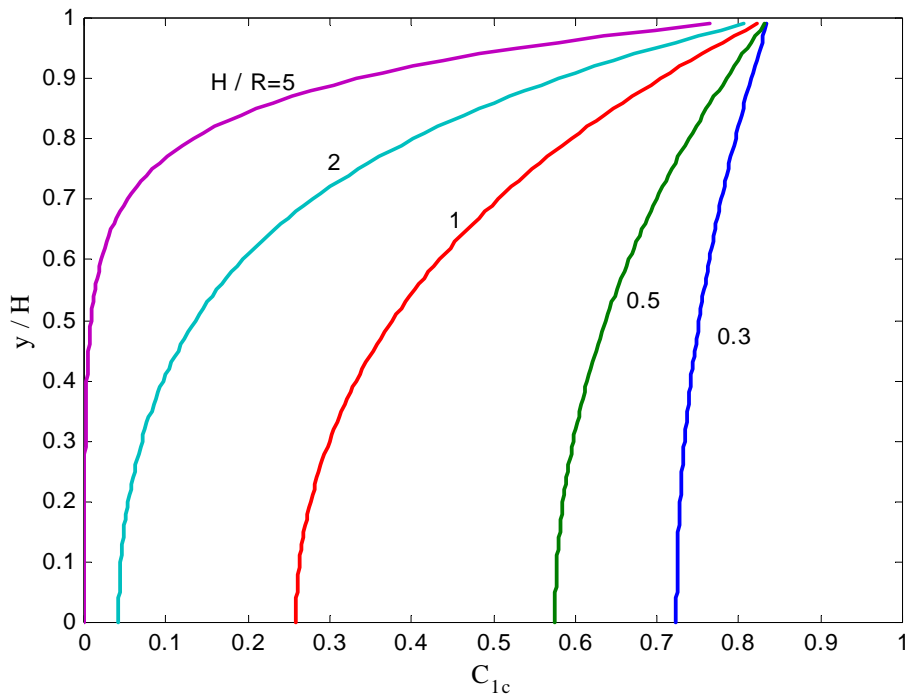
και

$$p_{nc}(z, \theta) = c_{nc} (\rho R \cos \theta) \cdot S_A(T_{nc})$$

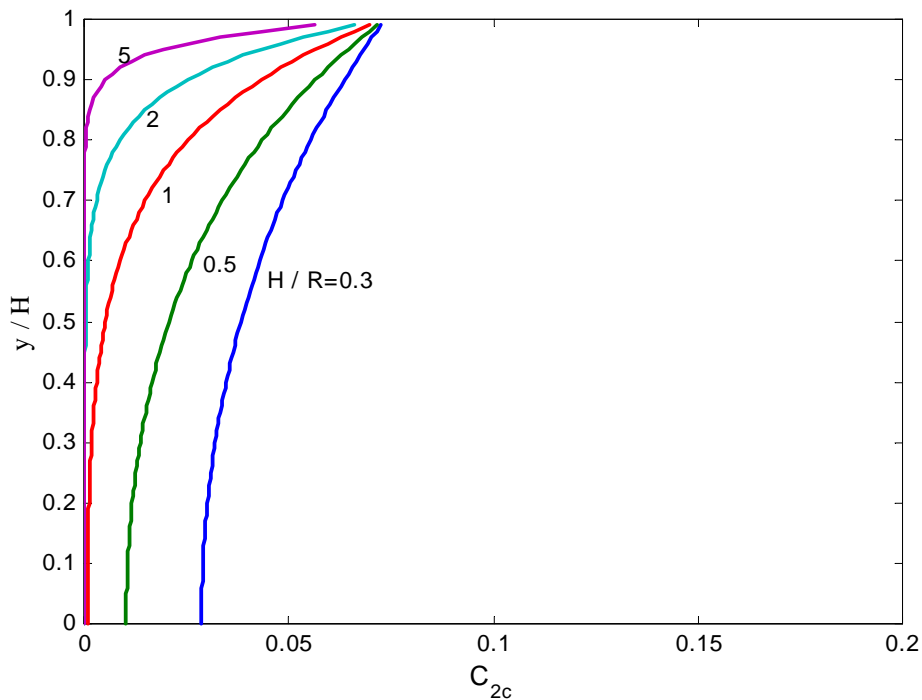
όπου οι συντελεστές c_l και c_{nc} είναι συναρτήσεις της θέσης – κατ' ύψος – της δεξαμενής, και εξαρτώνται από τον λόγο H/R . Στα σχήματα 5.11, 5.12a και 5.12b δίνονται τιμές των συντελεστών c_l και c_{nc} ($n=1,2$) για διάφορες τιμές του λόγου H/R . Παρατηρήστε πως η ωστική πίεση είναι μηδενική στην ελεύθερη επιφάνεια και μέγιστη στην βάση της δεξαμενής, ενώ η επαγωγική πίεση είναι μέγιστη στην ελεύθερη επιφάνεια και μειώνεται ταχύτατα κατά το βάθος της δεξαμενής.



Σχήμα 5.11: Συντελεστές υπολογισμού των ωστικών πιέσεων στο τοίχωμα συναρτήσει του ύψους του υγρού για δεξαμενή κατακόρυφου κυλίνδρου με απαραμόρφωτα τοιχώματα.



(a)



(b)

Σχήμα 5.12a, b: Συντελεστές υπολογισμού των πιέσεων επαγωγής (2 πρώτες ιδιομορφές) στο τοίχωμα συναρτήσει του ύψους του υγρού για δεξαμενή κατακόρυφου κυλίνδρου με απαραμόρφωτα τοιχώματα.

Επίσης, με βάση την αναλυτική λύση του κυματισμού, η μέγιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της δεξαμενής δίνεται από τον εξής τύπο

$$\eta_{\max} = 0.837 R \left(\frac{S_{A1}}{g} \right)$$

Ο οποίος θεωρεί μόνον την πρώτη ιδιομορφή. Για μεγαλύτερη ακρίβεια (συνυπολογισμός και ανωτέρων ιδιομορφών) μπορούμε να χρησιμοποιούμε τον κάτωθι τύπο

$$\eta_{\max} = \frac{R}{g} \left[(0.837 \cdot S_{A1})^2 + (0.073 \cdot S_{A2})^2 + (0.028 \cdot S_{A3})^2 + \dots \right]^{1/2}$$

με βάση την μέθοδο επαλληλίας SRSS.

5.4.2.2 Επιρροή της παραμόρφωσης των τοιχωμάτων της δεξαμενής (άκαμπτη θεμελίωση)

Η παραμόρφωση των τοιχωμάτων αλλάζει το πρόβλημα της συνολικής απόκρισης. Ειδικότερα, λόγω της αλλαγής της κινηματικής συννοριακής συνθήκης στο τοίχωμα της δεξαμενής, η λύση του κυματισμού που αναφέρεται στην εξίσωση (5.21). Εντούτοις, θεωρώντας (όπως πράγματι ισχύει) πως οι ιδιοσυχνότητες της παραμορφώσιμης δεξαμενής είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες του ρευστού, τότε η λύση του κυματισμού μπορεί να θεωρηθεί ασύζευκτη με την ταλάντωση της δεξαμενής. Με την παραδοχή αυτή, η συνολική δύναμη μπορεί και πάλι να θεωρηθεί ως άθροισμα μίας ωστικής δύναμης F_I και μίας δύναμης επαγωγής F_C , όπου η δύναμη επαγωγής θα είναι ακριβώς η ίδια με προηγούμενως (απαμόρφωτη δεξαμενή), καθώς και οι μάξες κυματισμού.

Για το ωστικό τμήμα της δύναμης, οι ιδιοσυχνότητες του ωστικού συστήματος ρευστού – δεξαμενής δίνονται από τον τύπο

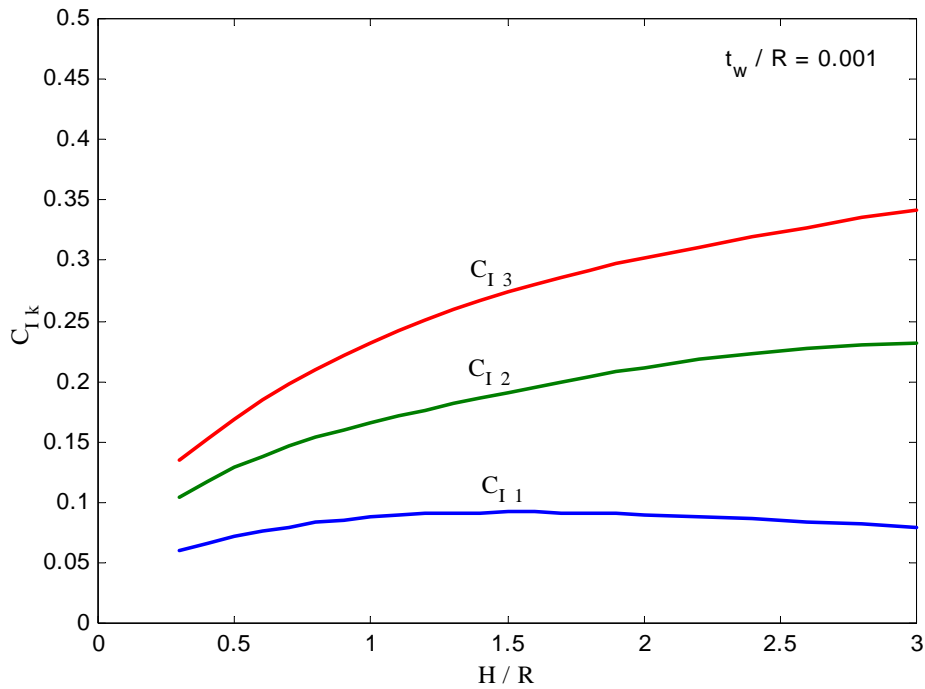
$$\omega_{I-k} = \frac{C_{I-k}}{H} \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s}} \quad (5.23)$$

και

$$T_{I-k} = \frac{2\pi}{\omega_{I-k}}$$

Όπου C_{I-k} είναι συντελεστές που εξαρτώνται για κάθε ιδιομορφή k της ωστικής λύσης από

- το λόγο του ύψους του ρευστού προς την ακτίνα της δεξαμενής (H/R)
- το λόγο ακτίνα-προς-πάχος της δεξαμενής (R/t)
- το λόγο των πυκνοτήτων ρευστού και δεξαμενής (ρ/ρ_s)



Σχήμα 5.13: Συντελεστές υπολογισμού των ωστικών πιέσεων (3 πρώτες ιδιομορφές) στο τοίχωμα συναρτήσει του ύψους του υγρού για δεξαμενή κατακόρυφου κυλίνδρου με παραμορφώσιμα τοιχώματα.

Με βάση τα παραπάνω οι υδροδυναμικές πιέσεις που αναπτύσσονται το τοίχωμα της δεξαμενής, τόσο για την ωστική κίνηση του ρευστού θα υπολογιστούν ως επαλληλία

$$p_{I-k}(z, \theta) = c_{I-k}(\rho R \cos \theta) \cdot S_A(T_{I-k})$$

όπου M_{I-k} είναι η μάζα της ωστικής ιδιομορφής k και $S_A(T_{I-k})$ η φασματική τιμή της ιδιομορφής k , με βάση την ιδιοπερίοδο της T_{I-k} , και οι συντελεστές c_{I-k} εξαρτώνται από το υλικό και τον λόγο ακτίνα-προς-πάχος (R/t) της δεξαμενής. Για μεταλλικές δεξαμενές με $R/t=1000$ (συνήθης τιμή) οι τιμές των συντελεστών c_{I-k} για τις 3 πρώτες ιδιομορφές δίνονται στο σχήμα 5.13, ως συναρτήσεις του ύψους της δεξαμενής. Σημειώστε πως διαφέρουν από τις τιμές του c_I για απαμόρφωτες δεξαμενές. Οι πιέσεις που αναφέρονται στην επαγωγική κίνηση παραμένουν οι ίδιες με αυτές της απαμόρφωτης δεξαμενής.

Για τον σχεδιασμό, η συνολική ωστική δύναμη θα δίνεται από τον τύπο (επαλληλία SRSS):

$$F_{I,max} = \left[\sum_k (M_{I-k} \cdot S_A(T_{I-k}))^2 \right]^{1/2} \quad (5.24)$$

όπου M_{I-k} είναι η μάζα της ωστικής ιδιομορφής k και $S_A(T_{I-k})$ η φασματική τιμή της ιδιομορφής k , με βάση την ιδιοπερίοδο της T_{I-k} . Αντίστοιχα η δύναμη επαγωγής θα συνεχίσει να είναι

$$F_{C,max} = \left[\sum_n (M_{nc} S_A(T_n))^2 \right]^{1/2}$$

όπως και στην περίπτωση της απαραμόρφωτης δεξαμενής.

5.4.2.3 Απλοποιημένη μεθοδολογία

Μία απλοποιημένη μεθοδολογία αντιμετώπισης των κατακόρυφων δεξαμενών με παραμορφώσιμα τοιχώματα παρουσιάζεται κάτωθι. Η μεθοδολογία παρουσιάστηκε από τους Malhotra, Wenk & Wieland (2000) και χρησιμοποιεί την πρώτη «ωστική» ιδιομορφή και την πρώτη ιδιομορφή κυματισμού. Συγκεκριμένα, η συνολική σεισμική δύναμη δίνεται από τον τύπο

$$F_T = (M_{I-1} + M_S) \cdot S_A(T_{I-1}) + M_{IC} \cdot S_A(T_1) \quad (5.25)$$

όπου οι M_{I-1} και M_{IC} είναι η ωστική μάζα και μάζα επαγωγής αντίστοιχα που δίνονται από τον κατωτέρω Πίνακα

H/R	C_i	C_c [s/√m]	M_I / M_L	M_C / M_L	h_I / H	h_c / H
0.3	9.28	2.09	0.176	0.842	0.400	0.521
0.5	7.74	1.74	0.300	0.700	0.400	0.543
0.7	6.97	1.60	0.414	0.586	0.401	0.571
1.0	6.36	1.52	0.548	0.452	0.419	0.616
1.5	6.06	1.48	0.686	0.314	0.439	0.690
2.0	6.21	1.48	0.763	0.237	0.448	0.751
2.5	6.56	1.48	0.810	0.190	0.452	0.794
3.0	7.03	1.48	0.842	0.158	0.453	0.825

T_{I-1} και T_1 είναι ιδιοπερίοδοι της ωστικής μάζας και της μάζας επαγωγής αντίστοιχα, που δίνονται από τις εξισώσεις

$$T_{I-1} = C_I \frac{H\sqrt{\rho}}{\sqrt{t/R} \sqrt{E_s}}$$

και

$$T_1 = C_C \sqrt{R}$$

ενώ οι συντελεστές C_I και C_C δίνονται στον ανωτέρω Πίνακα. Οι ροπές των δύο δυνάμεων ως προς την θεμελίωση υπολογίζονται με βάση τις αποστάσεις τους από την βάση της δεξαμενής h_I και h_C που δίνονται από τον ανωτέρω Πίνακα, και η συνολική ροπή ανατροπής \mathfrak{M} είναι

$$\mathfrak{M} = (M_{I-1} + M_S) h_I \cdot S_A(T_{I-1}) + M_{IC} h_C \cdot S_A(T_1) \quad (5.26)$$

5.4.2.4 Επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού

Η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα οδυνηρή σε πολλές κατασκευές που υπέστησαν σεισμικές δονήσεις. Στην περίπτωση των δεξαμενών δεν έχουν αναφερθεί ιδιαίτερες επιπτώσεις λόγω της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού, αλλά με βάση

τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8, ο μελετητής είναι υποχρεωμένος να την συμπεριλάβει στον σχεδιασμό της δεξαμενής.

Η πλέον απλή και αποτελεσματική μεθοδολογία για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κατακόρυφης συνιστώσας είναι αυτή που περιγράφεται από τους Veletsos & Tang (1986). Σύμφωνα με την μεθοδολογία αυτή, χρησιμοποιώντας κάποιες απλοποιητικές παραδοχές, υπολογίζεται η πρώτη ιδιοπερίοδος του συστήματος για κατακόρυφη κίνηση, ως ακολούθως:

$$\omega_1^v = \frac{C_v}{H} \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s}}$$

και

$$T_1^v = \frac{2\pi}{\omega_1^v}$$

όπου ο συντελεστής C_v εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες που εξαρτώνται και τα C_{I-k} , ενώ η μέγιστη κατανομή πιέσεων στο τοίχωμα δίνεται από τον τύπο

$$p(y) = \rho H \cdot \left[0.8 \cos\left(\frac{\pi y}{2H}\right) \right] \cdot S_A(T_1^v)$$

Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος του Luft (1984):

$$p(y) = \rho H \cdot \left[1 - \frac{y}{H} \right] \cdot S_A(T_1^v)$$

όπου $S_A(T_1^v)$ είναι η φασματική επιτάχυνση για έναν απλό ταλαντωτή με ιδιοπερίοδο $T_1^v = 2\pi/\omega_1^v$. Προφανώς, δεν τίθεται θέμα συνισταμένης δύναμης στην δεξαμενή, διότι η λύση για κατακόρυφη διέγερση είναι αξονο-συμμετρική, επομένως οι προκύπτουσες πιέσεις αν ολοκληρωθούν κατάλληλα ως προς μία συγκεκριμένη διεύθυνση έχουν συνιστώσα μηδέν.

5.4.2.5 Επιρροή της ευκαμψίας της θεμελίωσης και η αλληλεπίδραση με την δεξαμενή

Η παραμόρφωση του εδάφους ενδέχεται να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα στην απόκριση της δεξαμενής. Η αλληλεπίδραση του εδάφους με την κατασκευή αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται με προσεγγιστικές μεθόδους.

Μία βασική παραδοχή της μεθοδολογίας που παρουσιάζεται κάτωθι είναι πως αλληλεπίδραση εδάφους – δεξαμενής δεν επηρεάζει την λύση κυματισμού, μία απλή αλλά ρεαλιστική παραδοχή, λόγω του ότι οι ιδιοπερίοδοι της κίνησης του ρευστού είναι πολύ μεγαλύτερες αυτών που χαρακτηρίζουν την ταλάντωση του συστήματος έδαφος – δεξαμενή.

Δύο βασικοί μηχανισμοί επηρεάζουν την απόκριση του εδάφους:

1. Το έδαφος έχει την δυνατότητα (θεωρητικά) της κίνησης και κατά την μεταφορική έννοια στις 3 διευθύνσεις (2 οριζόντιες και 1 κατακόρυφη) αλλά και σε στροφή (rocking). Η ακαμψία του εδάφους έναντι των ανωτέρω κινήσεων χαρακτηρίζεται από

τις «ελαστικές σταθερές» του εδάφους, οι οποίες υπολογίζονται μετά από κατάλληλη εδαφοτεχνική μελέτη.

2. Σημαντικό μέρος της ενέργειας ταλάντωσης του συστήματος απορροφάται από έδαφος με την μορφή κυμάτων (radiation waves) ακτινοβολίας αλλά και με την μορφή υστερητικής απόσβεσης (hysteretic damping) του εδαφικού υλικού που συμπεριφέρεται σαφώς ανελαστικά σε ισχυρές σεισμικές δονήσεις.

Οι βασικές παράμετροι του εδάφους που επηρεάζουν την απόκριση είναι

1. Η ακαμψία του εδάφους της θεμελίωσης, χαρακτηριζόμενη κυρίως από την ταχύτητα διατμητικού κύματος
2. Ο λόγος Poisson του εδάφους και ο αντίστοιχος λόγος απόσβεσης
3. Η μάζα και οι διαστάσεις του θεμελίου

Θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη πως οι ακαμψίες της θεμελίωσης εξαρτώνται από την συχνότητα ταλάντωσης και αυτό περιπλέκει την ανάλυση. Εντούτοις, παρά το πολύπλοκο του προβλήματος, με δεδομένες τις σταθερές του εδάφους:

K_x = οριζόντια ακαμψία (δύναμη-προς-μετατόπιση)

K_y = κατακόρυφη συνιστώσα (δύναμη-προς-μετατόπιση)

K_θ = στροφική (rocking) ακαμψία (ροπή-προς-στροφή)

οι «ωστικές» ιδιοπερίοδοι τροποποιούνται κατάλληλα ώστε να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό της δεξαμενής. Συγκεκριμένα:

1. Για μη-παραμορφώσιμη δεξαμενή σε οριζόντια διέγερση

$$T_I^* = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{M_I + M_f}{K_x \alpha_x} + \frac{M_I h_I^2}{K_\theta \alpha_\theta} \right)^{1/2}$$

όπου M_f είναι η μάζα της θεμελίωσης.

2. Για παραμορφώσιμη δεξαμενή σε οριζόντια διέγερση

$$T_{I-k}^* = T_{I-k} \left(\left[1 + \frac{K_I}{K_x \alpha_x} \right] + \left[1 + \frac{K_x h_{I-k}^2}{K_\theta \alpha_\theta} \right] \right)$$

όπου T_{I-k} είναι η ιδιοπερίοδος της ωστική ιδιομορφής k , και

$$K_I = 4\pi^2 \left(\frac{M_I}{T_I^2} \right)$$

3. Για μη-παραμορφώσιμη δεξαμενή σε οριζόντια διέγερση

$$T_I^{v*} = 2\pi \left(\frac{M_L + M_S + M_f}{K_y \alpha_y} \right)$$

4. Για παραμορφώσιμη δεξαμενή σε οριζόντια διέγερση

$$T_{I-k}^{v*} = T_{I-k}^v \left(1 + \frac{K_L}{K_y \alpha_y} \right)^{1/2}$$

όπου

$$K_L = 4\pi^2 \left(\frac{M_L}{T_{I-k}^2} \right)$$

Σημείωση: οι συντελεστές α_x , α_y , α_θ , είναι διορθωτικοί συντελεστές ώστε να μετατραπούν οι στατικές ακαμψίες σε δυναμικές, όπως περιγράφεται από τον Gazetas (1983).

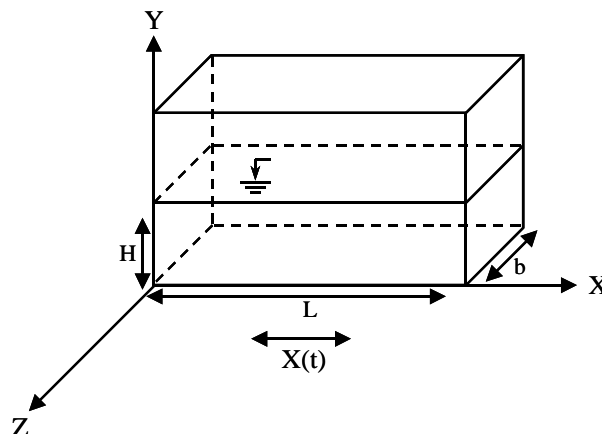
Ανάλογες διορθώσεις γίνονται και στις τιμές της απόσβεσης, με αντίστοιχους τύπους οι οποίοι δεν αναφέρονται στο παρόν κείμενο. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Παράρτημα Α του Ευρωκώδικα 3, μέρος 4.

5.4.2.6 Επιρροή του ανασηκώματος της δεξαμενής

Η περίπτωση του ανασηκώματος μίας δεξαμενής που είναι απλά εδραζόμενη στο έδαφος – δηλαδή μη αγκυρωμένης στο έδαφος – είναι πιθανή και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόκριση της δεξαμενής. Με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία, υπάρχουν απλοποιητικές μεθοδολογίες οι οποίες τροποποιούν την ιδιοπερίοδο του συστήματος για να λάβουν υπόψη τους το συγκεκριμένο φαινόμενο. Μία σχετική μεθοδολογία αντιμετώπισης για τέτοιες δεξαμενές αναφέρεται στο κεφάλαιο Α.8 του Παραρτήματος Α του Ευρωκώδικα 3 – Μέρος 4. Στην περίπτωση του ανασηκώματος, η βάση της δεξαμενής συμπεριφέρεται ως καμπτόμενη πλάκα και θα πρέπει να εξεταστεί κατάλληλα. Μία τέτοια μεθοδολογία αναφέρεται στο παράρτημα Ε των προδιαγραφών του API 650 που βασίζεται στην μεθοδολογία των Wozniak & Mitchell (1978).

5.4.3 Ορθογωνικές δεξαμενές

Θεωρούμε διέγερση κατά x στην δεξαμενή με διαστάσεις $b \times L$ και ύψος ρευστού h . Στην περίπτωση αυτή, οι χωρικές συναρτήσεις της λύσης (5.6) είναι της μορφής



Σχήμα 5.14: Γεωμετρία ορθογωνικής δεξαμενής.

$$\psi_n(x,y,t) = \frac{1}{\left(\frac{n\pi}{L}\right) \sinh \frac{n\pi h}{L}} \cosh \frac{n\pi(y+h)}{L} \cos \frac{n\pi x}{L}, \quad n=1,3,5,7,\dots \quad (5.27)$$

ενώ λόγω της μορφής της δεξαμενής και της διεύθυνσης της διέγερσης, μόνον οι ιδιομορφές $n=1,3,5,7,\dots$ αρκεί να θεωρηθούν (αντισυμμετρικές). Σημειώστε πως οι συμμετρικές ως προς x ιδιομορφές (που είναι της μορφής $\sin \frac{n\pi x}{L}$) δεν συμμετέχουν στην λύση. Επίσης, η λύση είναι ανεξάρτητη του z . Επίσης, οι εξισώσεις κίνησης του ρευστού ως προς την δεξαμενή μπορούν να γραφούν ως εξής

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = -\gamma_n \ddot{X} \quad n=1,3,5,7,\dots$$

όπου n είναι η διακριτή n -ιδιομορφή κυματισμού, ενώ η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα ω_n , και ο συντελεστής γ_n δίνονται από τους τύπους

$$\omega_n^2 = \frac{n\pi g}{L} \tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right) \quad n=1,3,5,7,\dots \quad (5.28)$$

$$\gamma_n = \frac{4}{n\pi} \tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right) \quad n=1,3,5,7,\dots$$

Η συνολική μάζα του ρευστού μοιράζεται σε μία «ωστική μάζα» M_I , ενώ το υπόλοιπο τμήμα της μάζας αποτελεί τις μάζες M_{nc} των αντίστοιχων ιδιομορφών:

$$\frac{M_{nc}}{M_L} = \frac{4 \tanh\left(\frac{n\pi H}{L}\right)}{\left(\frac{H}{L}\right) (n\pi)^3} \quad n=1,3,5,7,\dots \quad (5.29)$$

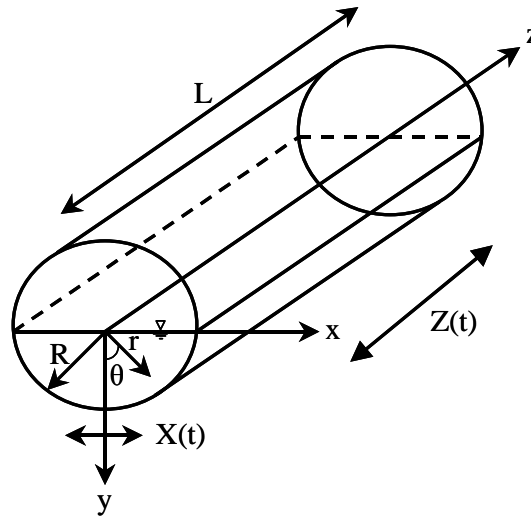
$$M_I = M_L - \sum_{n=1,3,5,\dots} M_{nc}$$

Η παραμορφωσιμότητα των τοιχωμάτων της ορθογωνικής δεξαμενής είναι εξίσου σημαντική με αυτή της κατακόρυφης κυλινδρικής δεξαμενής. Εντούτοις, δεν υπάρχουν δημοσιευμένα αποτελέσματα για την συμπεριφορά της δεξαμενής αυτής της γεωμετρίας υπό την υπόθεση της παραμόρφωσης του τοιχώματός της, όπως άλλωστε αναφέρεται και στις πρόσφατες διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 – μέρος 4.

5.4.4 Οριζόντια κυλινδρικά δοχεία πίεσης

Στα δοχεία μορφής οριζόντιου κυλίνδρου έχουμε 2 διακριτές διευθύνσεις σεισμού (σχήμα 5.15). Ην εγκάρσια διεύθυνση x και την διαμήκη διεύθυνση z . Και στις δύο διευθύνσεις, η απόκριση μπορεί θεωρητικά να περιγραφεί μέσω της γενικής μορφής (εξίσωση 5.6), αλλά δεν υπάρχουν

αναλυτικές εκφράσεις για τις συναρτήσεις ιδιομορφών $\psi_n(x,y,z)$, οι οποίες προσδιορίζονται αριθμητικά, όπως και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες ω_n .



Σχήμα 5.15: Γεωμετρία δεξαμενής – δοχείου πίεσης σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου.

5.4.4.1 Απόκριση στην εγκάρσια διεύθυνση

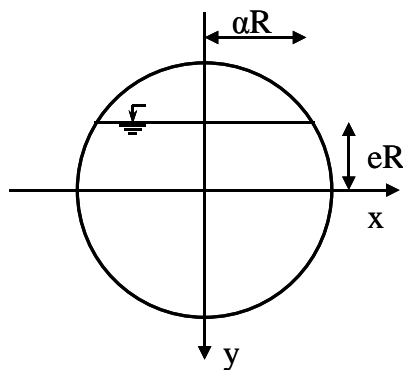
Η κίνηση του ρευστού (Budiansky, 1960), μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση (5.6), όπου

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = -\gamma_n \ddot{X} \quad (5.30)$$

όπου ω_n είναι η ιδιοσυχνότητα της n-ιδιομορφής, ενώ ο συντελεστής συμμετοχής γ_n δίνεται από την σχέση:

$$\gamma_n = \lambda_n \alpha \left(\frac{B_n}{A_n} \right)$$

όπου η παράμετρος α σχετίζεται με την θέση της ελεύθερης επιφάνειας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.16, ενώ οι παράμετροι A_n , B_n δίνονται στα σχήματα 5.17a, 5.17b.

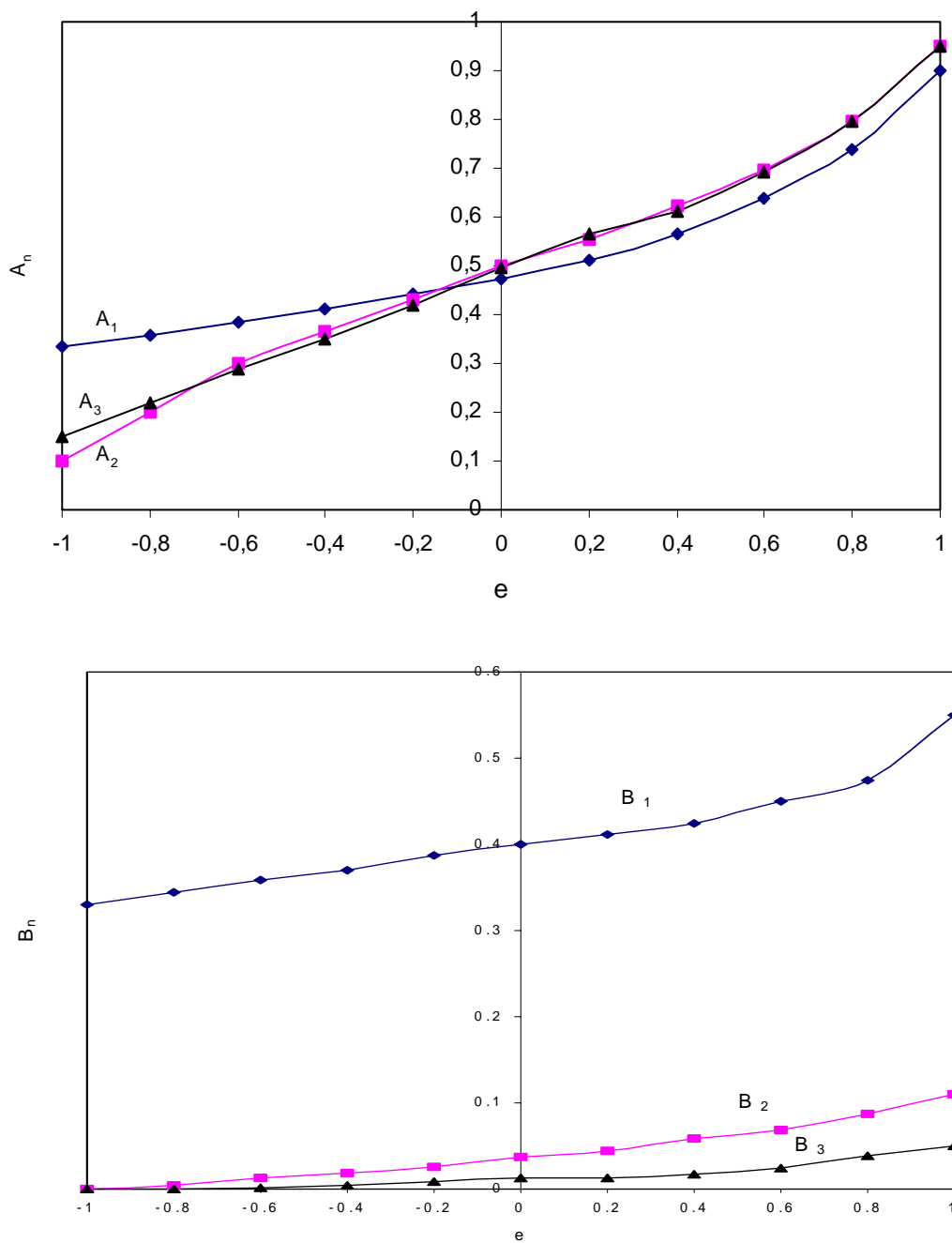


Σχήμα 5.16: Γεωμετρικές παράμετροι διατομής οριζόντιου κυλίνδρου σε σχέση με το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού.

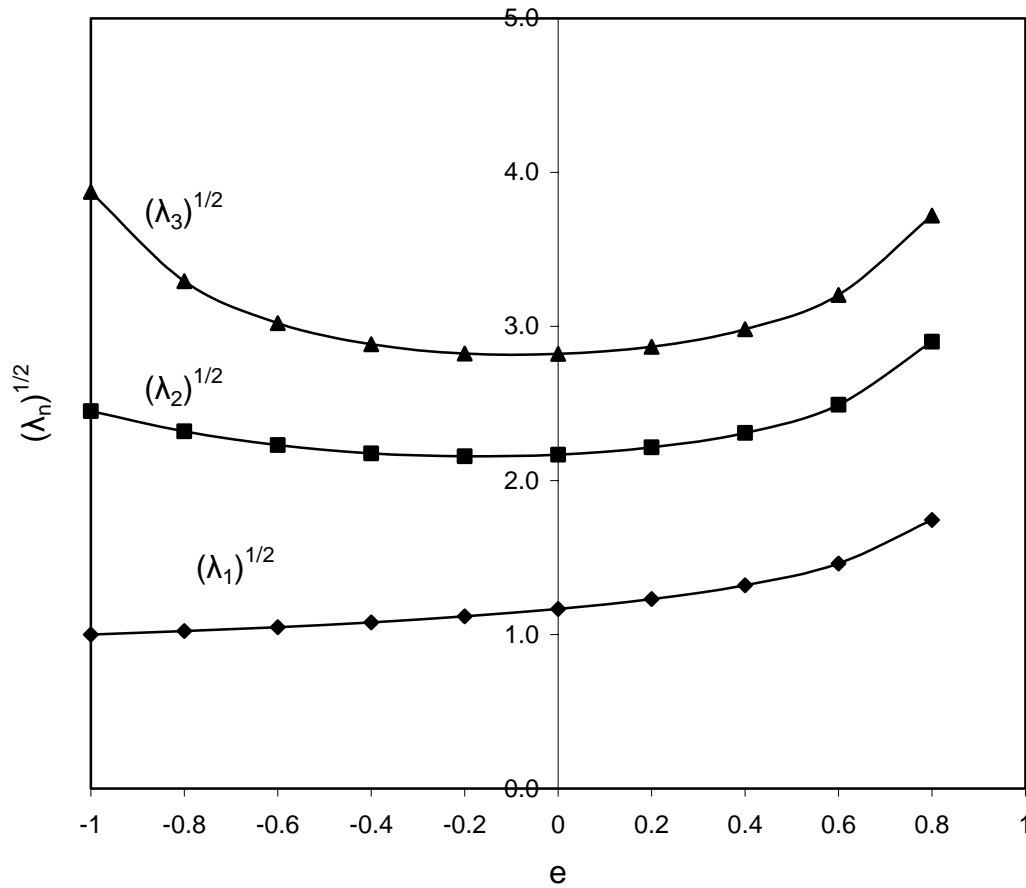
Οι ιδιοσυχνότητες ω_n δίνονται σε αδιάστατη μορφή

$$\sqrt{\lambda_n} = \omega_n \sqrt{\frac{R}{g}}$$

στο σχήμα 5.17c, σε σχέση με το e , το οποίο ορίζεται στο σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.17a,b: Συντελεστές A_n , B_n δοχείου πίεσης σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.



Σχήμα 5.17c: Ιδιοσυχνότητες δοχείου πίεσης σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.

Η συνολική δύναμη δίνεται από τον τύπο

$$F_T = -(M_L + M_S) \ddot{X} - 2\rho R^2 \alpha^2 \sum_n B_n \ddot{q}_n \quad (5.31)$$

Χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό

$$a_n = \frac{q_n}{\gamma_n}$$

Η εξίσωση κίνησης γίνεται

$$\ddot{a}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{a}_n + \omega_n^2 a_n = -\ddot{X}(t) \quad (5.32)$$

και η συνολική δύναμη είναι

$$F_T = -(M_L + M_S) \ddot{X} - \sum_n M_{nc} \ddot{a}_n \quad (5.33)$$

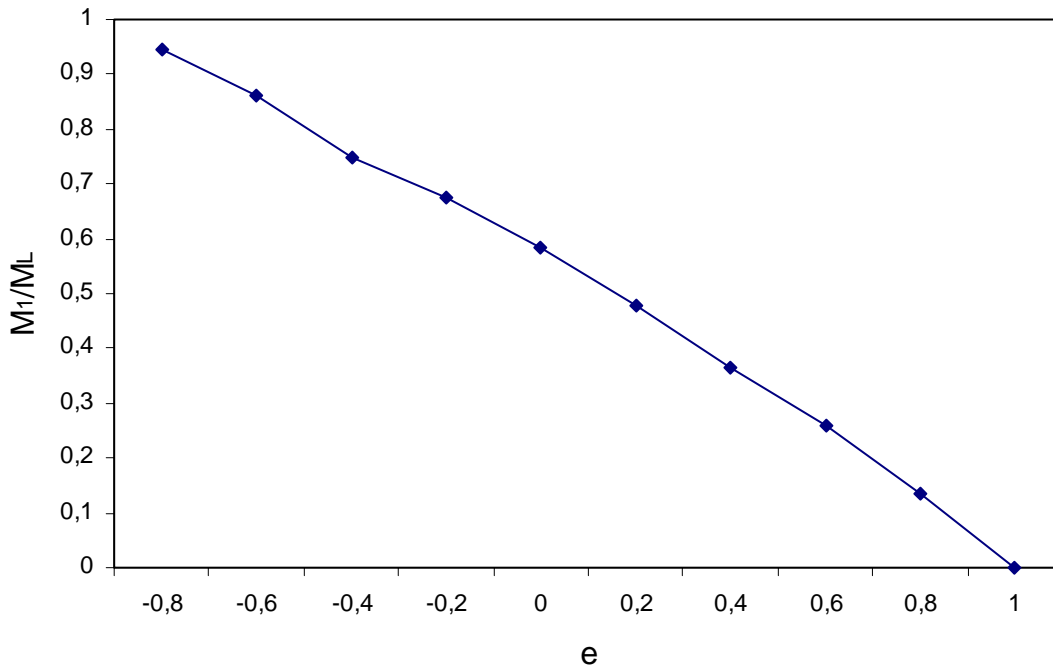
Επομένως, η ωστική μάζα είναι

$$M_I = M_L + M_S - \sum_n M_{nc}$$

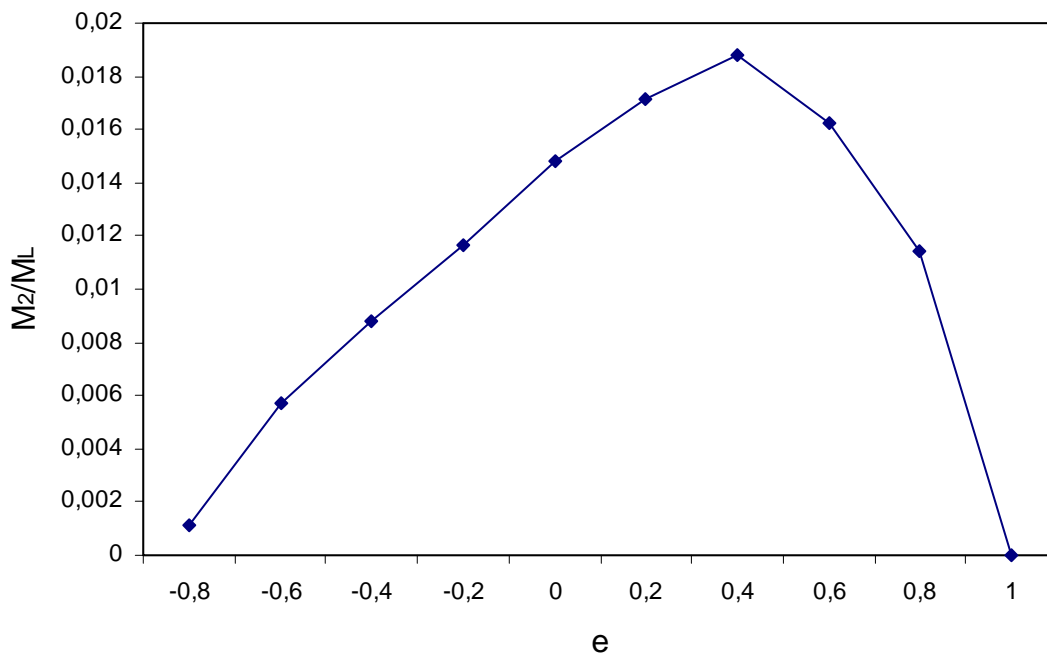
και η μάζα «κυματισμού» της ιδιομορφής n είναι

$$M_{nc} = 2\rho R^2 \left(\frac{A_n}{\lambda_n} \right) \alpha \quad (5.34)$$

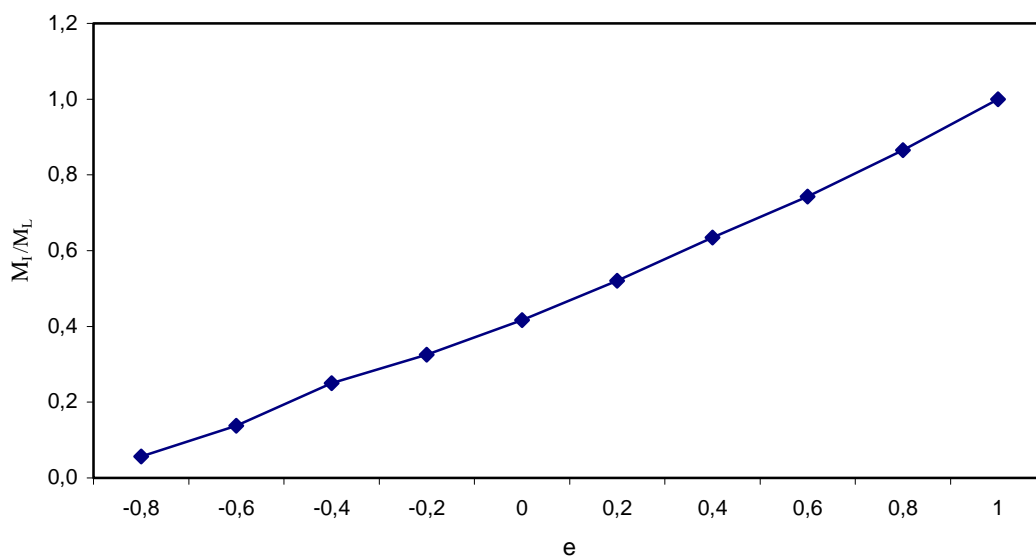
Οι δύο πρώτες μάζες επαγωγής M_{1C} , M_{2C} και η ωστική μάζα M_I δίνονται στα σχήματα 5.18a, 5.18b, 5.18c, ως συνάρτηση της παραμέτρου e .



Σχήμα 5.18a: Πρώτη μάζα επαγωγής δοχείου πίεσης σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.



Σχήμα 5.18b: Δεύτερη μάζα επαγωγής δοχείου πίεσης σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.



Σχήμα 5.18c: Ωστική μάζα δοχείου πίεσης σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.

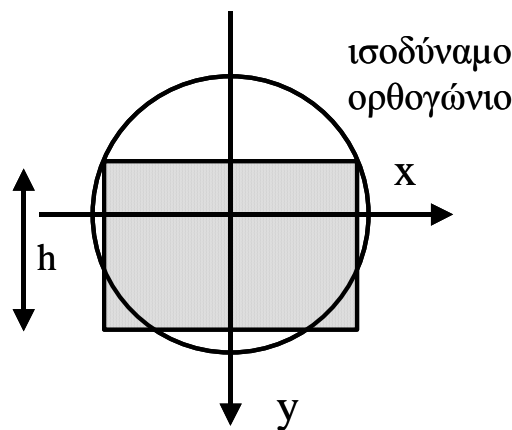
5.4.4.2 Απόκριση στην διαμήκη διεύθυνση

Η απόκριση ενός οριζόντιου κυλίνδρου στην διαμήκη διεύθυνση z λόγω εξωτερικής διέγερσης $Z(t)$ είναι σημαντικά πιο πολύπλοκη από την ανωτέρω εγκάρσια απόκριση, διότι είναι σαφώς τρισδιάστατη. Λύσεις δημοσιευμένες στην βιβλιογραφία για την περίπτωση της διαμήκους διέγερσης οριζόντιας κυλινδρικής διατομής δεν έχουν παρουσιαστεί. Παρόλα αυτά έχει

αποδειχθεί αναλυτικά και πειραματικά πως η απόκριση ενός απαραμόρφωτο οριζοντίου κυλίνδρου στην διαμήκη διεύθυνση μπορεί να προσεγγιστεί με καλή ακρίβεια με την απόκριση μίας ισοδύναμης ορθογωνικής δεξαμενής (δηλαδή μίας δεξαμενής με την ίδια ελεύθερη επιφάνεια και τον ίδιο όγκο ρευστού) όπως φαίνεται στο σχήμα 5.19. Αυτό σημαίνει πως έχουμε την λύση της ίδιας μορφής με την ορθογωνική δεξαμενή, όπου το ύψος της ισοδύναμης ορθογωνικής δεξαμενής δίνεται από τον τύπο

$$h = \frac{1}{2} \left(H - \frac{D}{2} \right) + \frac{D^2}{8} \cdot \frac{\sin^{-1} \left(\frac{2H-D}{D} \right) + \frac{\pi}{2}}{\sqrt{H(D-H)}} \quad (5.35)$$

όπου H είναι το ύψος ρευστού της κυλινδρικής δεξαμενής, και D η διάμετρός της. Οι ιδιομορφές της δεξαμενής δίνονται από τον αντίστοιχο τύπο, που δόθηκε και στην περίπτωση της ορθογωνικής διατομής, ενώ η συνολική δύναμη δίνεται από την αντίστοιχη σχέση, με το ύψος h της ορθογωνικής διατομής να δίνεται από την ανωτέρω σχέση.



Σχήμα 5.19: Ισοδύναμο ορθογώνιο για την διατομή οριζόντιου κυλίνδρου.

5.4.5 Σφαιρικά δοχεία πίεσης

Στα σφαιρικά δοχεία πίεσης (σχήμα 5.20), λόγω της συμμετρίας εξετάζουμε μία διεύθυνση της διέγερσης, έστω την διεύθυνση x . Στα δοχεία αυτά λόγω υψηλής πίεσης, το τοίχωμα είναι σημαντικά παχύ, επομένως, το δοχείο μπορεί να θεωρηθεί απαραμόρφωτο. Εντούτοις, οι σφαιρικές δεξαμενές στηρίζονται σε ένα σύστημα από κατακόρυφους στύλους, που συνήθως συνδέονται σε συνδέσμους ακαμψίας μορφής X (X -bracing system), για αύξηση της οριζόντιας ακαμψίας τους, το οποίο δέχεται σημαντική παραμόρφωση.

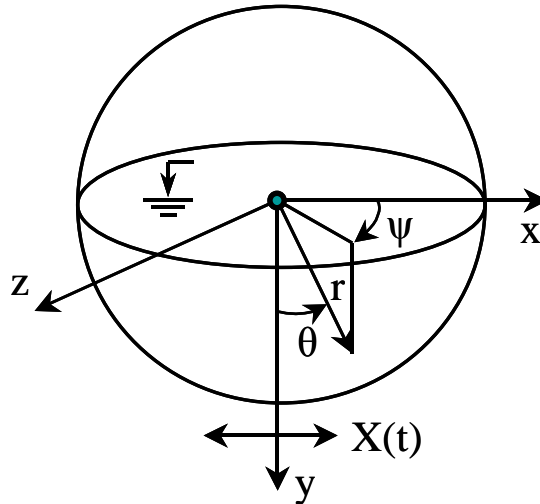
5.4.5.1 Βασική λύση της απόκρισης σφαιρικού δοχείου

Η απόκριση του ρευστού μέσα στο σφαιρικό δοχείο είναι επαλληλία ιδιομορφών. Λόγω της γεωμετρίας, οι συναρτήσεις των ιδιομορφών $\psi_n(x,y,z)$ δεν μπορούν να προσδιοριστούν αναλυτικά, παρά μόνον αριθμητικά. Παρόλα αυτά, μπορεί να αποδειχθεί πως η κίνηση του ρευστού (Budiansky 1960) μπορεί να περιγραφεί από την γενική εξίσωση δυναμικού (5.6), με

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = -\gamma_n \ddot{X} \quad (5.36)$$

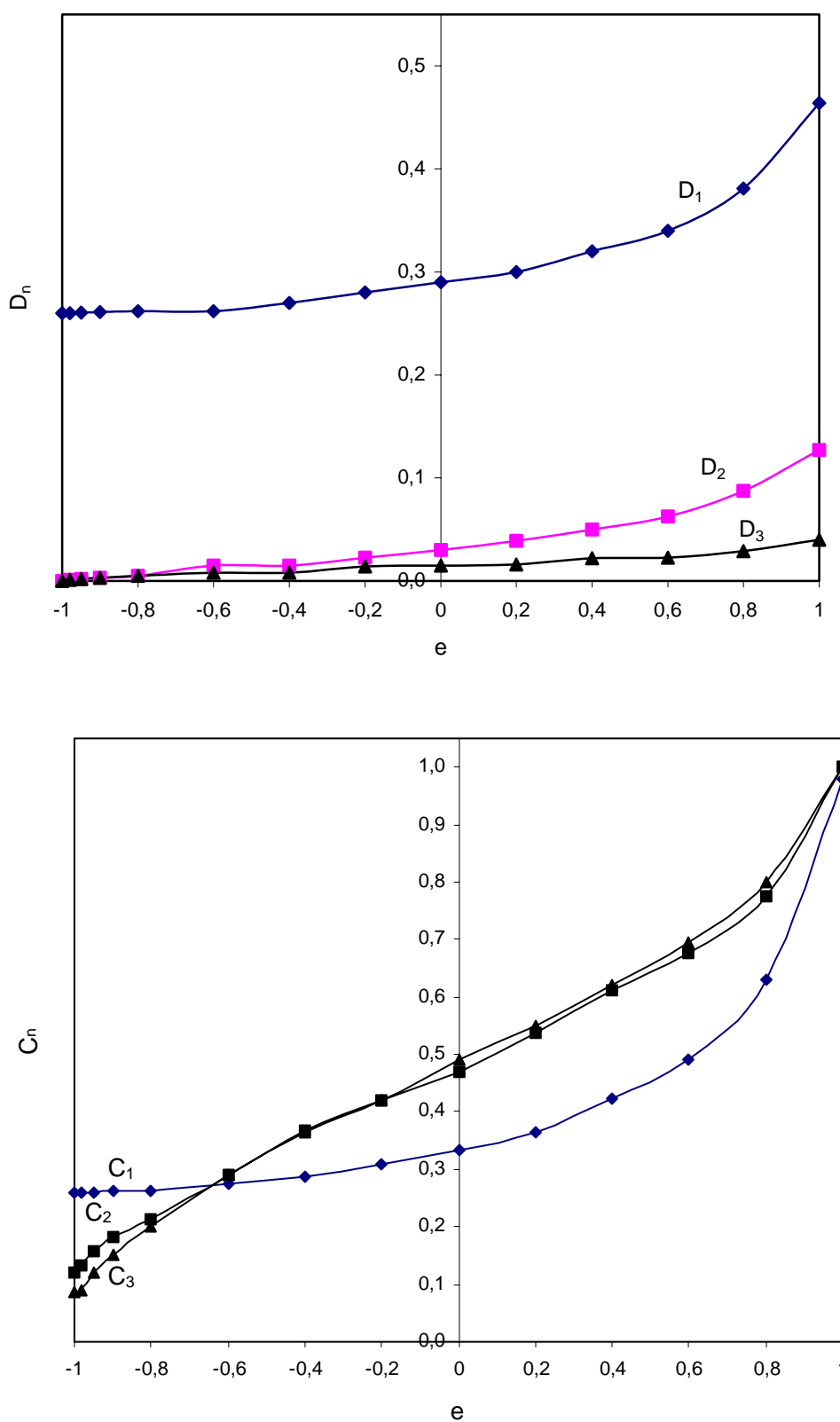
όπου ω_n είναι η ιδιοσυχνότητα της n-ιδιομορφής, ενώ ο συντελεστής συμμετοχής δίνεται από την σχέση:

$$\gamma_n = \lambda_n \alpha \left(\frac{D_n}{C_n} \right) \quad (5.37)$$

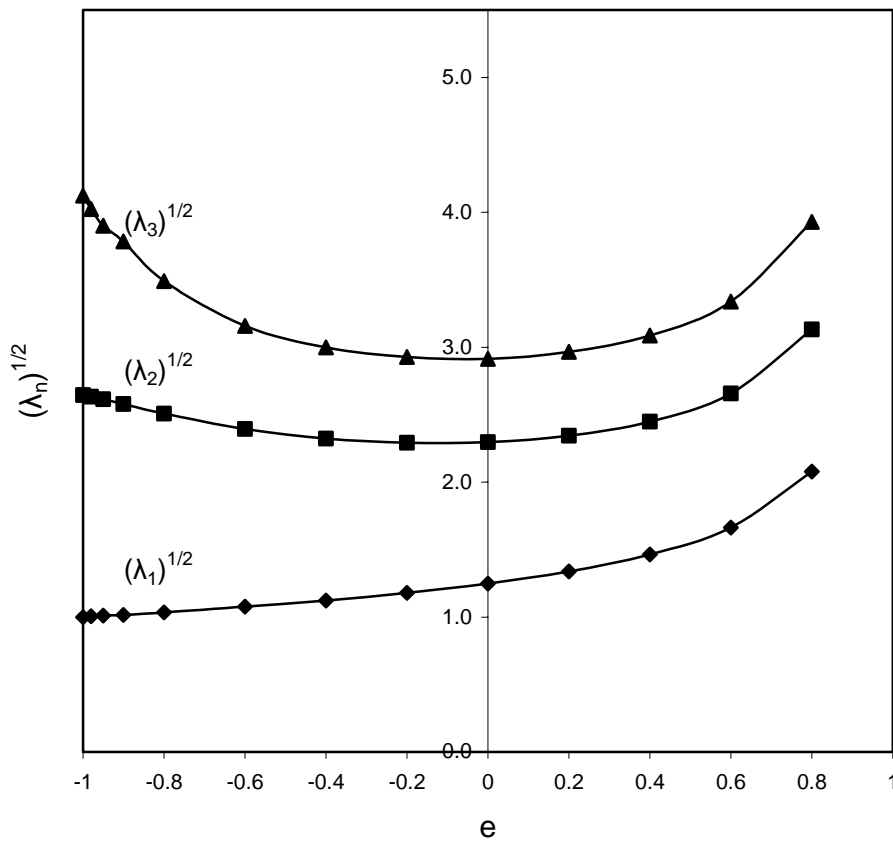


Σχήμα 5.20: Γεωμετρία σφαιρικής δεξαμενής – δοχείου πίεσης

Η παράμετρος α καθορίζει την θέση της ελεύθερης επιφάνειας όπως φαίνεται στο σχήμα 5.16, ενώ οι παράμετροι C_n , D_n δίνονται στα σχήματα 5.21a, 5.21b. Οι ιδιοσυχνότητες ω_n για το σφαιρικό δοχείο πίεσης δίνονται σε αδιάστατη μορφή στο σχήμα 5.21c, συναρτήσει της παραμέτρου e , του σχήματος 5.16.



Σχήμα 5.21a,b: Συντελεστές C_n , D_n δοχείου πίεσης σχήματος σφαίρας, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.



Σχήμα 5.21c: Ιδιοσυχνότητες δοχείου πίεσης σχήματος σφαίρας, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.

Η συνολική δύναμη δίνεται από τον τύπο

$$F_T = -(M_L + M_S) \ddot{X} - \pi r R^3 \alpha^3 \sum_n D_n \ddot{q}_n \quad (5.38)$$

Χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό

$$a_n = \frac{q_n}{\gamma_n}$$

Η εξίσωση κίνησης γίνεται

$$\ddot{a}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{a}_n + \omega_n^2 a_n = -\ddot{X}(t) \quad (5.39)$$

και η συνολική δύναμη είναι

$$F_T = -(M_L + M_S) \ddot{X} - \sum_n M_{nc} \ddot{a}_n \quad (5.40)$$

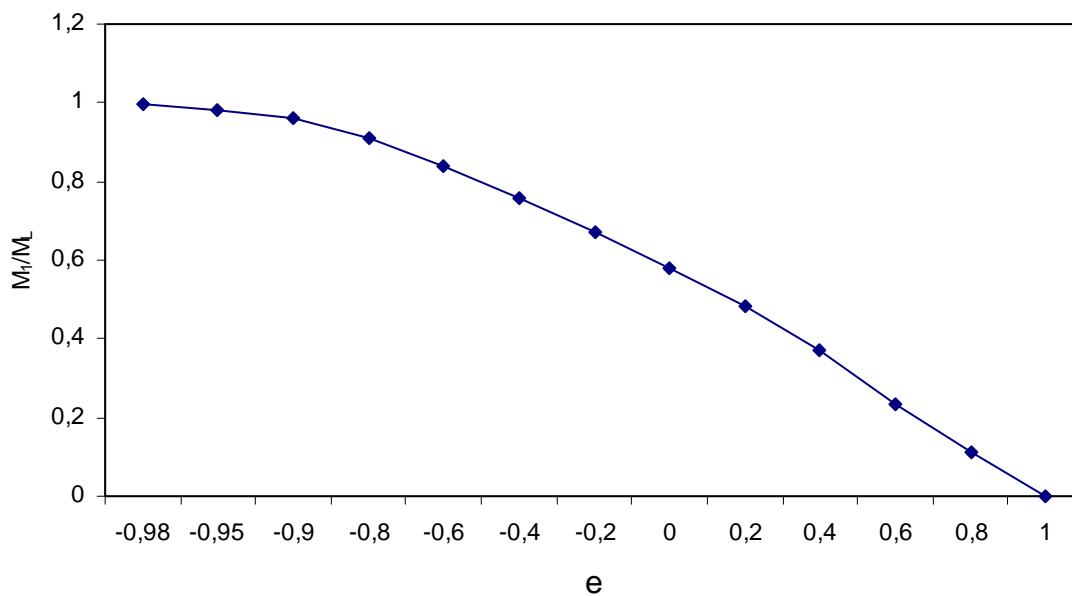
Επομένως, η ωστική μάζα είναι

$$M_I = M_L + M_S - \sum_n M_{nc}$$

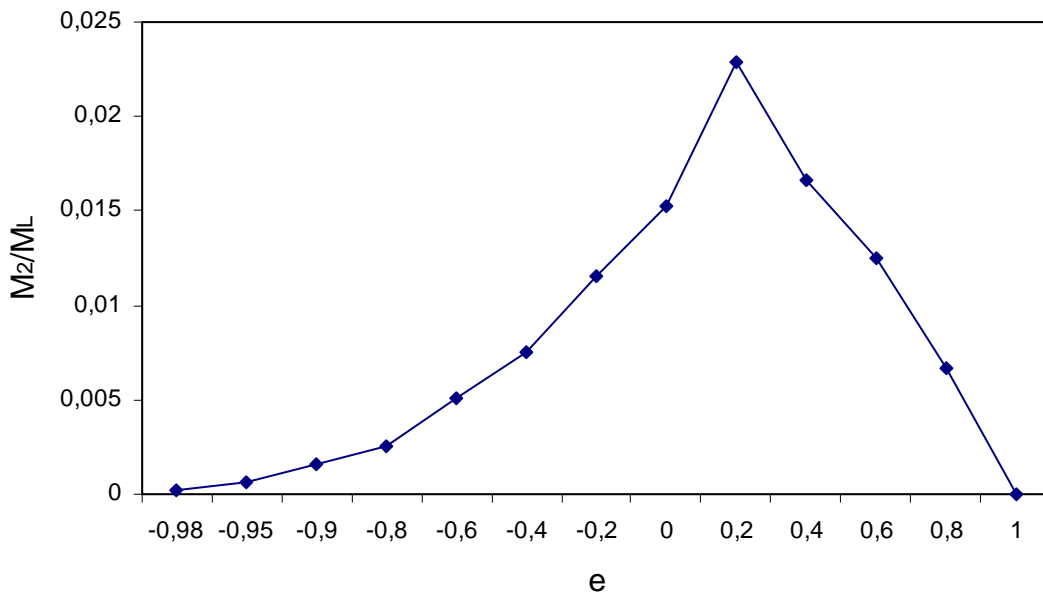
και η μάζα «κυματισμού» της ιδιομορφής n είναι

$$M_{nc} = \pi \rho R^3 \left(\frac{C_n}{\lambda_n} \right) \alpha^2$$

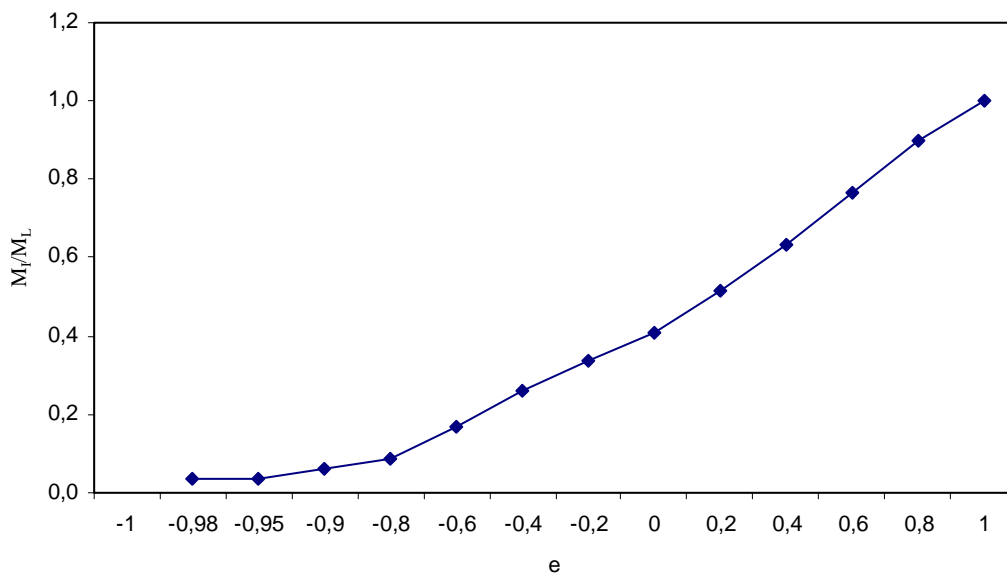
Οι δύο πρώτες μάζες επαγωγής M_{1C} , M_{2C} και η ωστική μάζα M_I δίνονται στα σχήματα 5.22a, 5.22b, 5.22c, ως συνάρτηση του e , που δίνεται στο σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.22a: Πρώτη μάζα επαγωγής δοχείου πίεσης σχήματος σφαίρας, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.



Σχήμα 5.22b: Δεύτερη μάζα επαγωγής δοχείου πίεσης σχήματος σφαίρας, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.



Σχήμα 5.22c: Ωστική μάζα δοχείου πίεσης σχήματος σφαίρας, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.

5.4.5.2 Σύστημα στήριξης σφαιρικής δεξαμενής

Τα παραπάνω ισχύουν για την περίπτωση που η κίνηση της σφαίρας $X(t)$ είναι γνωστή. Εντούτοις, η παραμορφωσιμότητα της κατασκευής στήριξης της δεξαμενής (σωληνωτά υποστυλώματα και σύνδεσμοι μορφής X) πρέπει να ληφθεί υπόψη. Για την οικονομία της

διατύπωσης του προβλήματος θεωρούμε 1 επαγωγική ιδιομορφή (η μεθοδολογία γενικεύεται για πολλές ιδιομορφές). Συγκεκριμένα, θεωρώντας λύση της μορφής,

$$\varphi(r, \theta, \psi, t) = \dot{q}_1 \psi_1(r, \theta, \psi)$$

η εξίσωση κίνησης είναι τελικά

$$\ddot{a}_1 + 2\xi_1 \omega_1 \dot{a}_1 + \omega_1^2 a_1 = -\ddot{X} \quad (5.41)$$

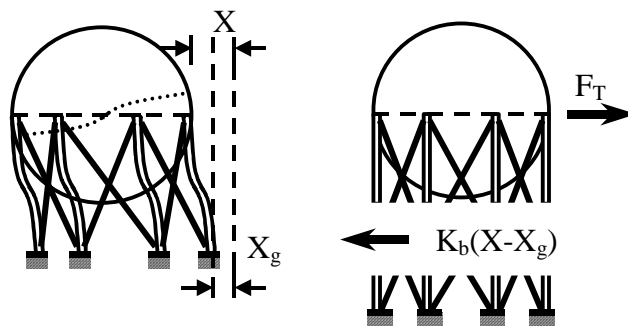
ενώ η συνολική δύναμη στην σφαίρα προκύπτει

$$F_T = F_I + F_C = - (M_L + M_S) \ddot{X} - M_{IC} \ddot{q}_1$$

και θα πρέπει να εξισορροπείται από την ελαστική δύναμη της στήριξης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.23. Αν K_{bs} είναι η ελαστική ακαμψία της στήριξης, τότε λόγω ισορροπίας

$$F_T = K_{bs} (X - X_g) \quad (5.42)$$

όπου $X_g(t)$ είναι η γνωστή μετακίνηση του εδάφους.



Σχήμα 5.23: Ισορροπία οριζόντιων δυνάμεων στην σφαιρική δεξαμενή

Στην συνέχεια, θέτοντας

$$y_1 + X_g = a_1 + X$$

$$y_2 + X_g = X$$

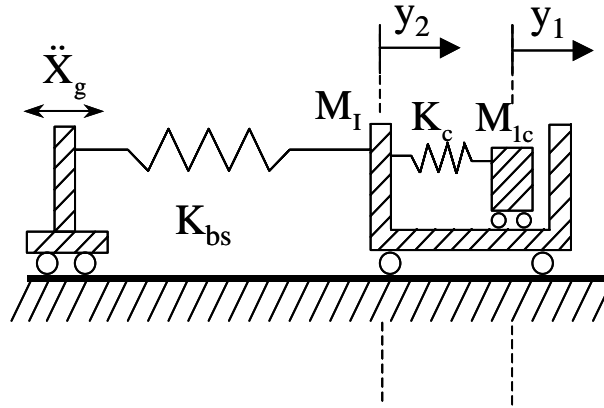
και αγνοώντας την απόσβεση για την οικονομία της περιγραφής, οι εξισώσεις (5.41) και (5.42) γράφονται

$$\begin{bmatrix} M_{IC} & 0 \\ 0 & M_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_C & -K_C \\ -K_C & K_C + K_{bs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_{IC} \\ M_I \end{bmatrix} \ddot{X}_g \quad (5.43)$$

όπου

$$K_C = \omega_1^2 M_{IC}$$

Το ανωτέρω σύστημα εξισώσεων παραπέμπει σε ένα ισοδύναμο μηχανικό μοντέλο, της μορφής που φαίνεται στο σχήμα 5.24.



Σχήμα 5.24: Ισοδύναμο μηχανικό μοντέλο για το σύστημα της σφαιρικής δεξαμενής με το σύστημα στήριξης.

Σημειώνεται πως η ακαμψία της κατασκευής στήριξης K_{bs} θα πρέπει να περιλαμβάνει την ακαμψία των σωληνωτών υποστυλωμάτων καθώς και την ακαμψία των Χιαστί συνδέσμων. Έναν απλό τρόπο να ληφθούν υπόψη οι ανωτέρω ακαμψίες δίνει ο κάτωθι τύπος:

$$K_b = \sum_{j=1}^{N_{legs}} \frac{12EI_L}{h_L^3} + \sum_{k=1}^{N_{braces}} \frac{EA_b}{L_b} \cos^2 \alpha_k \cos^2 \beta$$

όπου h_L και I_L είναι το ύψος και η ροπή αδράνειας των υποστυλωμάτων, A_b και L_b είναι η διατομή και το μήκος των συνδέσμων, α_k είναι η γωνία που σχηματίζει ο κάθε σύνδεσμος με την διεύθυνση του σεισμού, και β είναι η κατακόρυφη γωνία που καθορίζει την κλίση του συνδέσμου.