

## 1. ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ

Βασική κατηγορία κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού είναι οι κυλινδρικές ή σφαιρικές δεξαμενές, δοχεία αποθήκευσης εύφλεκτων και τοξικών ουσιών ( $\text{NH}_3$ , 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). Το παρόν κείμενο αναφέρεται κυρίως στον προσδιορισμό των σεισμικών δυνάμεων στα τοιχώματα της δεξαμενής λόγω υδροδυναμικών φαινομένων. Οι οδηγίες μελέτης αναφέρονται σε δοχεία πίεσης και δεξαμενές της μορφής:

- Κατακόρυφου κυλίνδρου (εικόνα 1.1)
- Ορθογωνίου
- Οριζοντίου κυλίνδρου (εικόνα 1.2)
- Σφαίρας (εικόνα 1.2)

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.



**Εικόνα 1.1:** Δεξαμενή σχήματος κατακόρυφου κυλίνδρου.



**Εικόνα 1.2:** Δοχείο πίεσης σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου και σφαιρικού σχήματος.

## ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΟΔΗΓΙΕΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

### 1. 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.

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

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. Σε μεγάλο βαθμό βασίζονται στις Νέο-Ζηλανδικές οδηγίες μελέτης.

### 3. Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (API 650 – 1998 και API 620 – 1996)

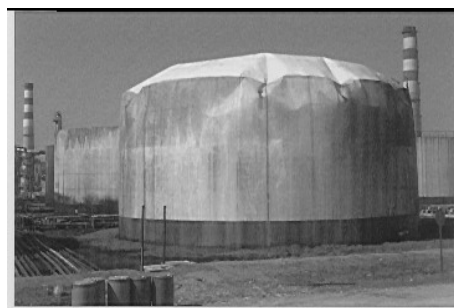
Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου έχει αναπτύξει μία συστηματική προσέγγιση (API 650) για τον αντισεισμικό σχεδιασμό, η οποία βασίζεται στην δημοσίευση των Wozniak και Mitchell (1978). Σημειώνεται όμως πως αφορά τις δεξαμενές σήματος κατακορύφου κυλίνδρου και όχι δεξαμενές άλλης γεωμετρίας.

## 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. Οι βασικές πιθανές μορφές αστοχίας που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν στα πλαίσια ενός αντισεισμικού σχεδιασμού μίας δεξαμενής είναι

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

Οι μορφές αυτές αναλύονται εκτενώς στην Τεχνική Έκθεση. Η πρώτη μορφή αστοχίας εξαρτάται από την αντοχή του τοιχώματος σε ήβωση υπό αξονική θλίψη και πίεση, η οποία εξετάζεται σε αντίστοιχους κανονισμούς μεταλλικών κατασκευών (π.χ. Eurocode 3 ENV 1993, part 1-6, Stability of Steel Shell Structures). Η δεύτερη μορφή αστοχίας εξετάζεται στο Κεφάλαιο 6 των οδηγιών. Οι επόμενες μορφές εξαρτώνται άμεσα από τον ακριβή υπολογισμό των σεισμικών δυνάμεων, και θα πρέπει να περιλαμβάνουν το φαινόμενο του κυματισμού του περιεχομένου της δεξαμενής.



**Εικόνα 1.3:** Αστοχία στην βάση μίας δεξαμενής λόγω τοπικού λυγισμού (elephant's foot). Κύρτωση στην κορυφή της δεξαμενής λόγω κυματισμού (σεισμός Νικομήδειας, Τουρκία 1999)

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο 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. Σε αυτές τις γεωμετρίες, οι παρούσες οδηγίες αντιμετωπίζουν το φαινόμενο με έναν τρόπο «ενοποιημένο», ώστε να συμπληρώνουν υπάρχουσες διατάξεις για δεξαμενές κατακόρυφου κυλίνδρου.

### Γενική μεθοδολογία προσδιορισμού των σεισμικών δυνάμεων

Το βασικό στοιχείο στο οποίο βασίζεται ο προσδιορισμός των σεισμικών δυνάμεων είναι το φαινόμενο του κυματισμού (sloshing). Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται στους κυματισμούς της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού της δεξαμενής ή του δοχείου πίεσης λόγω της εξωτερικής διέγερσης.

Το φαινόμενο του κυματισμού είναι σημαντικό και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την συνολική συμπεριφορά του συστήματος ρευστού – κατασκευής λόγω της πολύ μεγάλης τιμής ιδιοπεριόδου του ρευστού σε σχέση με την ιδιοπερίοδο του δομικού συστήματος της δεξαμενής ή του δοχείου πίεσης. Γενικά, η επίλυση του προβλήματος 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). 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. Η παραμόρφωση της δεξαμενής και η ενδοτικότητα του εδάφους πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, επειδή επηρεάζουν την συνολική συμπεριφορά του συστήματος, αλλά η επίδρασή τους στην λύση του κυματισμού μπορεί να αμεληθεί.

Γενικά, το πρόβλημα της απόκρισης (κίνησης) του ρευστού στην απαραμόρφωτη δεξαμενή, όταν η τελευταία κινείται με σεισμική επιτάχυνση  $\ddot{X}(t)$  κατά την οριζόντια διεύθυνση  $x$ , μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο εξισώσεων απλών ταλαντωτών

$$\ddot{a}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{a}_n + \omega_n^2 a_n = -\ddot{X} \quad n=1,2,3,\dots \quad (1.1)$$

ενώ θεωρώντας

$$u_n = a_n + X \quad (1.2)$$

τότε

$$\ddot{u}_n + 2\xi_n \omega_n (\dot{u}_n - \dot{X}) + \omega_n^2 (u_n - X) = 0 \quad n=1,2,3,\dots \quad (1.3)$$

όπου  $\omega_n$  είναι οι ιδιοσυχνότητες κυματισμού της δεξαμενής, που εξαρτώνται από την γεωμετρία της δεξαμενής και της πυκνότητα του ρευστού, ενώ  $u_n(t)$  είναι οι γενικευμένες συντεταγμένες της κινούμενης ρευστο-μάζας.

Η πίεση στα τοιχώματα της δεξαμενής δίνεται από το δυναμικό της ροής με βάση της εξίσωση Bernoulli, ενώ η συνολική δύναμη στα τοιχώματα της δεξαμενής γράφεται ως εξής:

$$F_T = - \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} M_{nc} \ddot{u}_n - \left( M_L - \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} M_{nc} \right) \ddot{X} = - \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} M_{nc} \ddot{u}_n - M_I \ddot{X} \quad (1.4)$$

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

$$F_I = -M_I \ddot{X} = -\left(M_L - \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} M_{nc}\right) \ddot{X} \quad (1.5)$$

και μία δύναμη επαγωγής

$$F_C = - \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} M_{nc} \ddot{u}_n \quad (1.6)$$

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

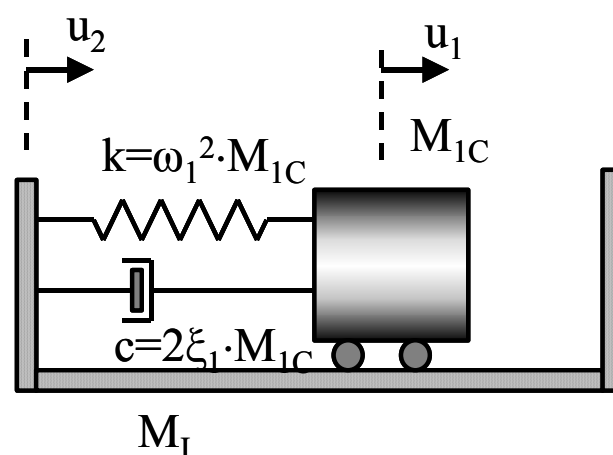
- την «μάζα επαγωγής»  $M_c$  (convective mass) η οποία αποτελείται από τις μάζες των επιμέρους ιδιομορφών  $M_{nc}$  και αναφέρεται στην σχετική κίνηση του ρευστού ως προς την δεξαμενή (κίνηση που συνδέεται με τον κυματισμό).
- την «ωστική μάζα»  $M_I$  (impulsive mass) η οποία ουσιαστικά αναφέρεται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

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

$$M_L = M_I + \sum_n M_{nc} \quad (1.7)$$

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

Για ευκολία των υπολογισμών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μηχανικό μοντέλο που περιγράφει την κίνηση του ρευστού μέσα στην κινούμενη από τον σεισμό δεξαμενή, που 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. 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 1.4 φαίνεται ένα απλοποιημένο μοντέλο που χρησιμοποιεί την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή κυματισμού (μόνο).



**Σχήμα 1.4:** Μηχανικό μοντέλο που περιγράφει την κίνηση του συστήματος ρευστού – δεξαμενής.

Σε επίπεδο αντισεισμικού φασματικού σχεδιασμού με περισσότερες της μίας ιδιομορφές, η συνολική δύναμη μπορεί να δοθεί από την εξίσωση (1.4), με την κατάλληλη επαλληλία. Μία μέθοδος που μπορεί να

χρησιμοποιηθεί έγκειται στην επαλληλία τύπου SRSS για τις επαγωγικές δυνάμεις, αλλά χρησιμοποιεί απλή αθροιστική επαλληλία με την ωστική δύναμη:

$$F_{T,max} = F_{I,max} + F_{C,max} = \left[ \sum_{n=1,2,3,\dots}^N (M_{nc} S_{An})^2 \right]^{1/2} + M_I A_g \quad (1.8)$$

όπου

$$F_{C,max} = \left[ \sum_{n=1,2,3,\dots}^N (M_{nc} S_{An})^2 \right]^{1/2} \quad (1.9)$$

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.

#### Επιρροή της παραμόρφωσης 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 την βασική παραδοχή πως η λύση του κυματισμού είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την κίνηση του τοιχώματος. 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).

#### Επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού

Η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού θεωρείται ότι δεν επηρεάζει την «επαγωγική» κίνηση, παρά μόνον την «ωστική» κίνηση. Περισσότερα για την κατακόρυφη συνιστώσα αναφέρονται στην ενότητα που αφορά κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές. Για τις άλλες γεωμετρίες δεξαμενών (ορθογωνική, οριζόντιος κύλινδρος, σφαίρα) δεν υπάρχουν δημοσιευμένες λύσεις στην διεθνή βιβλιογραφία, οπότε αντίστοιχες οδηγίες δεν συμπεριλαμβάνονται στις παρούσες οδηγίες μελέτης.

#### Αλληλεπίδραση δεξαμενής - εδάφους

Η αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής αποτελεί μία επίσης σημαντική παράμετρο στην απόκριση των δεξαμενών. Με την θεώρηση της παραμόρφωσης του εδάφους, η λύση κυματισμού – όπως αυτή περιγράφηκε ανωτέρω – θεωρείται πως 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 μεθοδολογίας που ακολουθείται η τροποποίηση των ιδιοπεριοδών των ωστικών μαζών ώστε να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση με το έδαφος. Για δεξαμενές σχήματος κατακόρυφου κυλίνδρου, η μεθοδολογία αυτή παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο των οδηγιών μελέτης.

#### **Κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές**

##### Απαραμόρφωτες κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές σε άκαμπτη θεμελίωση

Οι ιδιοσυχνότητες  $\omega_n$  της κίνησης του ρευστού λόγω κυματισμού δίνονται από την παρακάτω σχέση και εξαρτώνται από τον λόγο  $(H/R)$  του ύψους  $H$  του ρευστού προς την ακτίνα  $R$  της δεξαμενής.

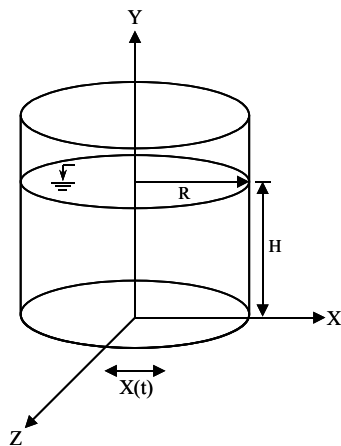
$$\omega_n = g k_n \tanh(k_n H) \quad (1.10)$$

και

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (1.11)$$

ενώ οι τιμές του  $k_n$  παρατίθενται στον κάτωθι πίνακα

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



**Σχήμα 1.5:** Γεωμετρία δεξαμενής κατακόρυφου κυλίνδρου.

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

$$M_{nc} = \left[ \frac{2}{k_n R [(k_n R)^2 - 1] (H/R)} \tanh(k_n H) \right] M_L \quad (1.12)$$

Οι μάζες επαγωγής  $M_{nc}$  ( $n=1,2$ ) και η ωστική μάζα  $M_L$  δίνονται στο κάτωθι σχήμα 1.6.

Για τον υπολογισμό της ροπής ανατροπής οι αποστάσεις των δυνάμεων  $h_{nc}$  από την βάση της δεξαμενής δίνονται από το διάγραμμα 1.7, με βάση την γεωμετρία της δεξαμενής (λόγος  $H/R$ ). Οι αναλυτικές εξισώσεις των  $h_{nc}$  είναι

$$h_{nc} = \left[ 1 - \frac{1}{k_n H} \tanh\left(\frac{k_n H}{2}\right) \right] H \quad (1.13)$$

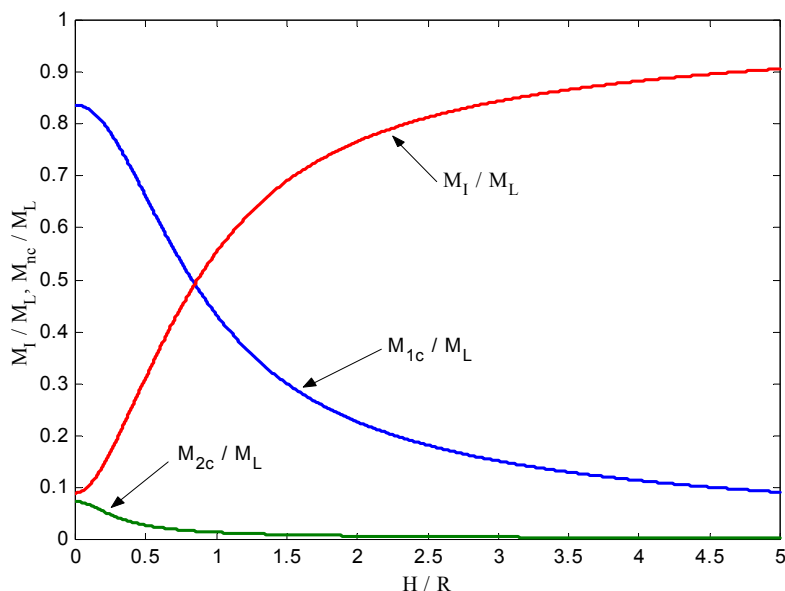
Οι υδροδυναμικές πιέσεις που αναπτύσσονται το τοίχωμα της δεξαμενής, τόσο για την ωστική όσο και την επαγωγική κίνηση, υπολογίζονται από την εξίσωση Bernoulli, χρησιμοποιώντας το δυναμικό της ροής του ρευστού. Συγκεκριμένα,

$$p_I(z, \theta) = c_I (\rho R \cos \theta) A_g \quad (1.14)$$

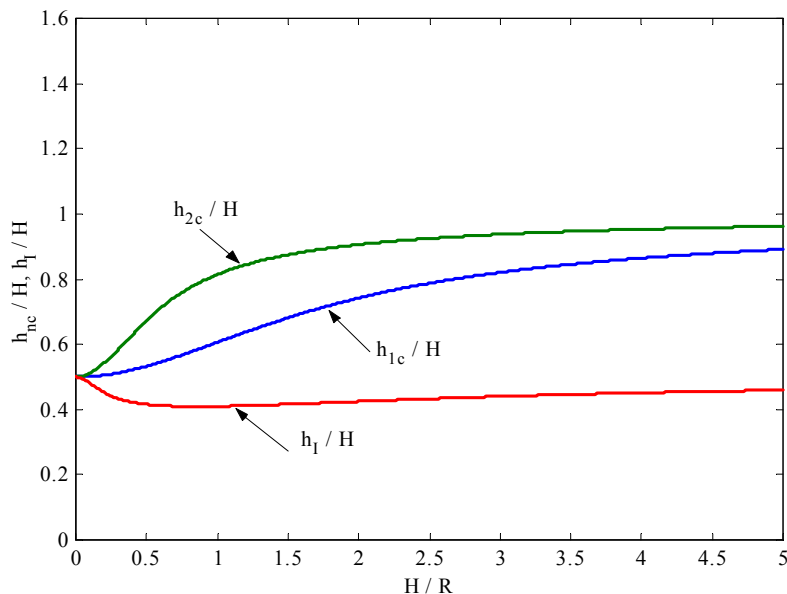
και

$$p_{nc}(z, \theta) = c_{nc}(\rho R \cos \theta) \cdot S_A(T_{nc}) \quad (1.15)$$

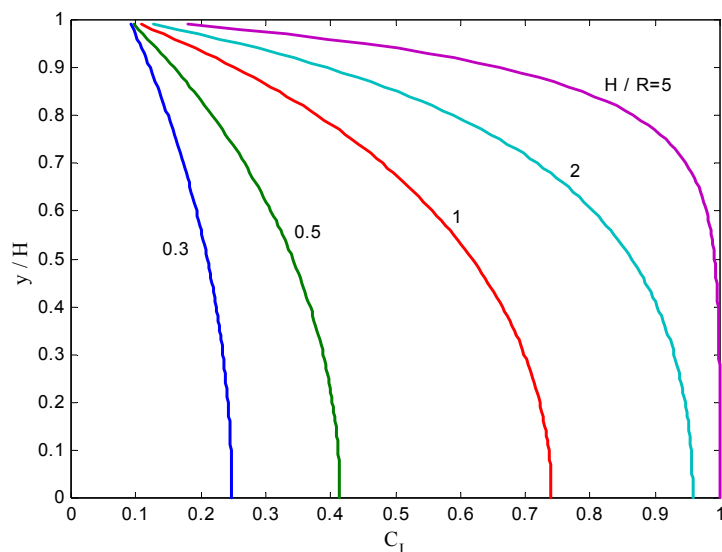
όπου οι συντελεστές  $c_I$  και  $c_{nc}$  είναι συναρτήσεις της θέσης – κατ’ ύψος – της δεξαμενής, και εξαρτώνται από τον λόγο  $H/R$ . Στα σχήματα 1.8 και 1.9 δίνονται τιμές των συντελεστών  $c_I$  και  $c_{nc}$  ( $n=1,2$ ) για διάφορες τιμές του λόγου  $H/R$ .



**Σχήμα 1.6:** Ωστική μάζα και μάζες επαγωγής για κυλινδρική δεξαμενή με απαραμόρφωτα τοιχώματα, σε σχέση με το λόγο  $H/R$ .



**Σχήμα 1.7:** Απόσταση της ωστικής δύναμης και των δυνάμεων επαγωγής από την βάση για κυλινδρική δεξαμενή με απαραμόρφωτα τοιχώματα, σε σχέση με το λόγο  $H/R$ .



**Σχήμα 1.8:** Συντελεστές υπολογισμού των ωστικών πιέσεων στο τοίχωμα συνάρτησι του ύψους του υγρού για δεξαμενή κατακόρυφου κυλίνδρου με απαραμόρφωτα τοιχώματα.

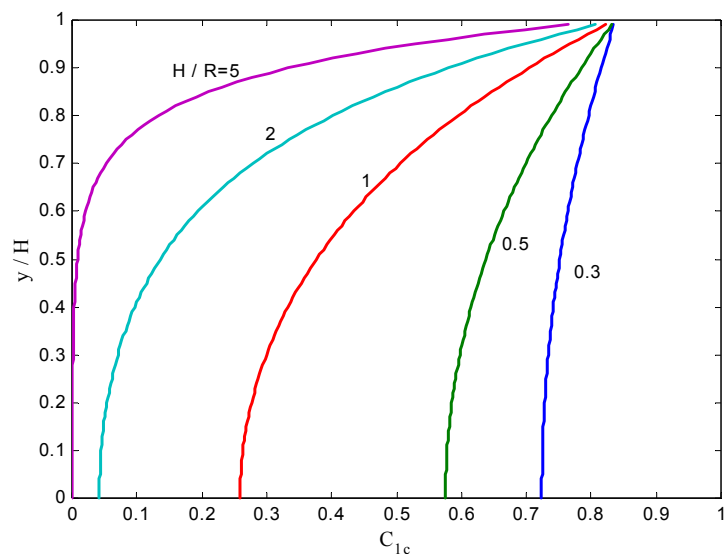
Η μέγιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της δεξαμενής δίνεται από τον εξής τύπο

$$\eta_{\max} = 0.837 R \left( \frac{S_{A1}}{g} \right) \quad (1.16)$$

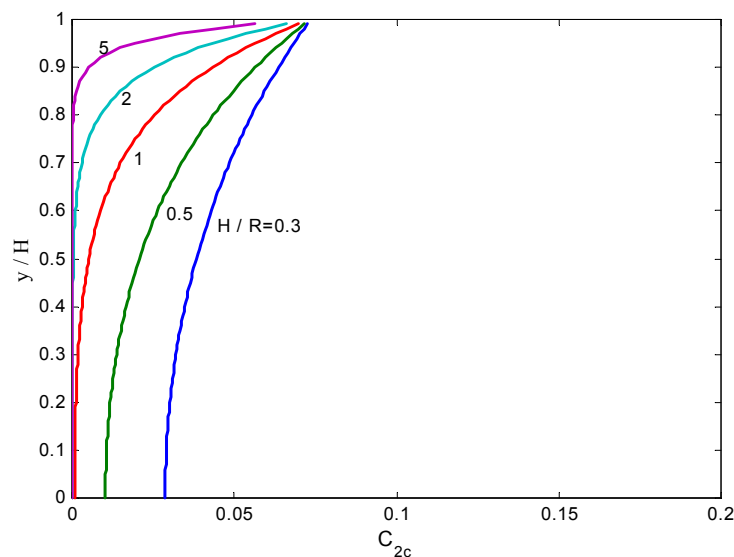
ο οποίος θεωρεί μόνον την πρώτη ιδιομορφή ( $n=1$ ). Για μεγαλύτερη ακρίβεια (συνυπολογισμός και ανωτέρων ιδιομορφών) μπορούμε να χρησιμοποιούμε τον κάτωθι τύπο

$$\eta_{\max} = \frac{R}{g} \left[ (0.837 \cdot S_{A1})^2 + (0.073 \cdot S_{A2})^2 + (0.028 \cdot S_{A3})^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (1.17)$$

με βάση την μέθοδο επαλληλίας τύπου SRSS.



(a)



(b)

**Σχήμα 1.9:** Συντελεστές υπολογισμού των πιέσεων επαγωγής (2 πρώτες ιδιομορφές) στο τοίχωμα συναρτήσει του ύψους του υγρού για δεξαμενή κατακόρυφου κυλίνδρου με απαραμόρφωτα τοιχώματα.

#### Επιρροή της παραμόρφωσης των τοιχωμάτων κατακόρυφης κυλινδρικής δεξαμενής (άκαμπτη θεμελίωση)

Θεωρώντας πως οι ιδιοσυχνότητες της παραμορφώσιμης δεξαμενής είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες του ρευστού, τότε η συνολική δύναμη είναι το άθροισμα μίας ωστικής δύναμης  $F_I$  και μίας δύναμης επαγωγής  $F_C$ , όπου η δύναμη επαγωγής είναι ακριβώς η ίδια με προηγουμένως [απαμόρφωτη δεξαμενή εξίσωση (1.6)], όπως και οι μάζες κυματισμού.

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

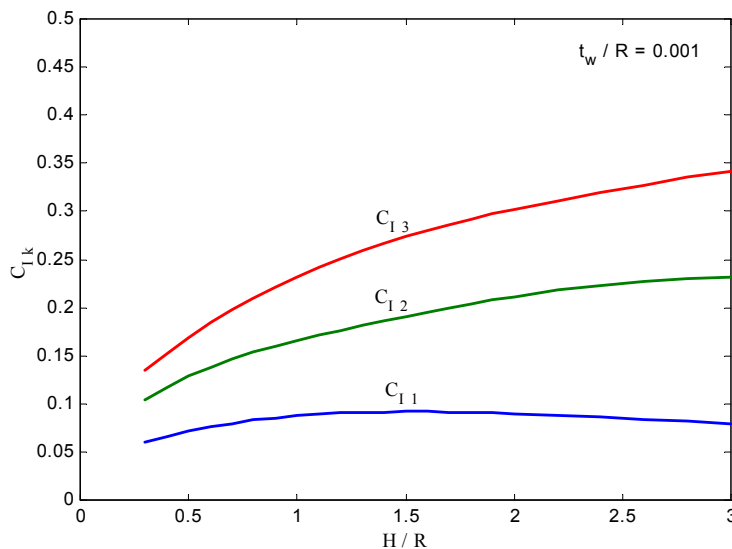
$$\omega_{I-k} = \frac{C_{I-k}}{H} \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s}} \quad k=1,2,3,\dots \quad (1.18)$$

και

$$T_{I-k} = \frac{2\pi}{\omega_{I-k}} \quad k=1,2,3,\dots \quad (1.19)$$

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 ( $\rho/\rho_s$ )



**Σχήμα 1.10:** 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 των κάτωθι ιδιομορφικών πιέσεων

$$p_{I-k}(z, \theta) = c_{I-k} (\rho R \cos \theta) \cdot S_A(T_{I-k}) \quad k=1,2,3,\dots \quad (1.20)$$

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 1.10, ως συναρτήσεις του ύψους της δεξαμενής, και διαφέρουν από τις αντίστοιχες τιμές του  $c_I$  για απαράμορφωτες 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):

$$F_{I,max} = \left[ \sum_k (M_{I-k} \cdot S_A(T_{I-k}))^2 \right]^{1/2} \quad (1.21)$$

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 είναι

$$F_{C,max} = \left[ \sum_n (M_{nc} S_A(T_n))^2 \right]^{1/2} \quad (1.22)$$

όπως και στην περίπτωση της απαραμόρφωτης δεξαμενής.

#### Απλοποιημένη μεθοδολογία

Σε επίπεδο προμελέτης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία απλοποιημένη μεθοδολογία αντιμετώπισης των κατακόρυφων δεξαμενών με παραμορφώσιμα τοιχώματα, που χρησιμοποιεί την πρώτη «ωστική» ιδιομορφή και την πρώτη ιδιομορφή κυματισμού. Συγκεκριμένα, η συνολική σεισμική δύναμη δίνεται από τον τύπο

$$F_T = (M_{I-1} + M_S) \cdot S_A(T_{I-1}) + M_{IC} \cdot S_A(T_I) \quad (1.23)$$

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

H/R	$C_i$	$C_c$ [s/ $\sqrt{m}$ ]	$M_I / M_L$	$M_C / M_L$	$h_I / H$	$h_c / H$
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

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

$$T_{I-1} = C_I \frac{H\sqrt{\rho}}{\sqrt{t/R}\sqrt{E_s}} \quad (1.24)$$

και

$$T_I = C_C \sqrt{R} \quad (1.25)$$

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

$$\mathfrak{M} = (M_{I-1} + M_S) h_I \cdot S_A(T_{I-1}) + M_{IC} h_C \cdot S_A(T_I) \quad (1.26)$$

#### Επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού

Η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού οφείλει να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό της δεξαμενής. Για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κατακόρυφης συνιστώσας, υπολογίζεται η πρώτη ιδιοπερίοδος του συστήματος για κατακόρυφη διέγερση, ως ακολούθως:

$$\omega_1^v = \frac{C_v}{H} \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s}} \quad (1.27)$$

και

$$T_1^v = \frac{2\pi}{\omega_1^v} \quad (1.28)$$

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

$$p(y) = \rho H \cdot \left[ 0.8 \cos\left(\frac{\pi y}{2H}\right) \right] \cdot S_A(T_1^v) \quad (1.29)$$

Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος:

$$p(y) = \rho H \cdot \left[ 1 - \frac{y}{H} \right] \cdot S_A(T_1^v) \quad (1.30)$$

όπου  $S_A(T_1^v)$  είναι η φασματική επιτάχυνση για έναν απλό ταλαντωτή με ιδιοπερίοδο  $T_1^v = 2\pi/\omega_1^v$ .

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

Η παραμόρφωση του εδάφους ενδέχεται να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα στην απόκριση της δεξαμενής και οφείλει να λαμβάνεται υπόψη εάν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για την θεμελίωση.

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

Με δεδομένες τις σταθερές του εδάφους:

$K_x$  = οριζόντια ακαμψία (δύναμη-προς-μετατόπιση)

$K_y$  = κατακόρυφη συνιστώσα (δύναμη-προς-μετατόπιση)

$K_\theta$  = 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

$$T_1^* = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{M_I + M_f}{K_x \alpha_x} + \frac{M_I h_I^2}{K_\theta \alpha_\theta} \right)^{1/2} \quad (1.31)$$

όπου  $M_f$  είναι η μάζα της θεμελίωσης.

2. Για παραμορφώσιμη δεξαμενή σε οριζόντια διέγερση

$$T_{I-k}^* = T_{I-k} \left( \left[ 1 + \frac{K_I}{K_x \alpha_x} \right] + \left[ 1 + \frac{K_x h_{I-k}^2}{K_\theta \alpha_\theta} \right] \right) \quad (1.32)$$

όπου  $T_{I-k}$  είναι η ιδιοπερίοδος της ωστικής ιδιομορφής  $k$  από την εξίσωση (1.19), και

$$K_I = 4\pi^2 \left( \frac{M_I}{T_I^2} \right) \quad (1.33)$$

3. Για μη-παραμορφώσιμη δεξαμενή σε κατακόρυφη διέγερση

$$T_I^{v*} = 2\pi \left( \frac{M_L + M_S + M_f}{K_y \alpha_y} \right) \quad (1.34)$$

4. Για παραμορφώσιμη δεξαμενή σε κατακόρυφη διέγερση

$$T_{I-k}^{v*} = T_{I-k}^v \left( 1 + \frac{K_L}{K_y \alpha_y} \right)^{1/2} \quad (1.35)$$

όπου

$$K_L = 4\pi^2 \left( \frac{M_L}{T_{I-k}^2} \right) \quad (1.36)$$

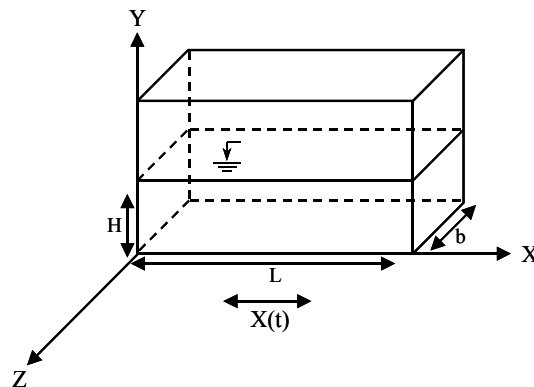
Σημείωση: οι συντελεστές  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$ ,  $\alpha_\theta$ , είναι διορθωτικοί συντελεστές ώστε να μετατραπούν οι στατικές ακαμψίες σε δυναμικές, όπως περιγράφεται στον Ευρωκώδικα 8.

Ανάλογες διορθώσεις γίνονται και στις τιμές της απόσβεσης, με αντίστοιχους τύπους για τους οποίους ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Παράρτημα Α του Ευρωκώδικα 8, μέρος 4.

#### 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 παρόμοια μεθοδολογία αναφέρεται στο παράρτημα Ε των προδιαγραφών του API 650 και του API 620.

#### **Ορθογωνικές δεξαμενές**



**Σχήμα 1.11:** Γεωμετρία ορθογωνικής δεξαμενής.

Οι ιδιοσυχνότητες  $\omega_n$ , κίνησης του ρευστού ως προς την δεξαμενή με διαστάσεις  $b \times L$  και ύψος ρευστού  $h$ , θεωρώντας διέγερση κατά  $x$ , δίνονται από τον τύπο

$$\omega_n^2 = \frac{n\pi g}{L} \tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right) \quad n=1,3,5,7,\dots \quad (1.37)$$

Σημειώστε πως οι συμμετρικές ως προς  $x$  ιδιομορφές δεν συμμετέχουν στην απόκριση, ενώ λόγω της μορφής της δεξαμενής και της διεύθυνσης της διέγερσης, μόνον οι ιδιομορφές  $n=1,3,5,7,\dots$  (αντισυμμετρικές) συμμετέχουν. Η συνολική μάζα του ρευστού μοιράζεται σε μία «ωστική μάζα»  $M_L$ , ενώ το υπόλοιπο τμήμα της μάζας αποτελεί τις μάζες  $M_{nc}$  των αντίστοιχων ιδιομορφών:

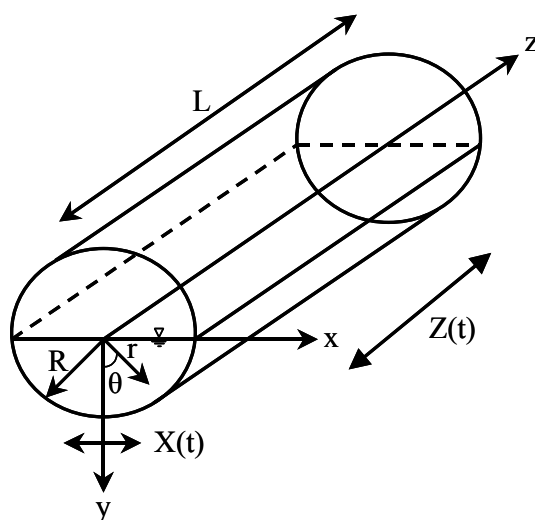
$$\frac{M_{nc}}{M_L} = \frac{4 \tanh\left(\frac{n\pi H}{L}\right)}{\left(\frac{H}{L}\right) (n\pi)^3} \quad n=1,3,5,7,\dots \quad (1.38)$$

$$M_I = M_L - \sum_{n=1,3,5,\dots} M_{nc} \quad (1.39)$$

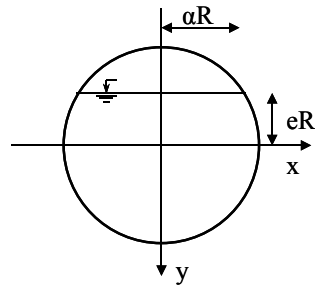
Η παραμορφωσιμότητα των τοιχωμάτων της ορθογωνικής δεξαμενής μπορεί να είναι σημαντική όπως και αυτή της κατακόρυφης κυλινδρικής δεξαμενής. Εντούτοις, επειδή δεν υπάρχουν δημοσιευμένα αποτελέσματα για την συμπεριφορά της δεξαμενής αυτής της γεωμετρίας υπό την υπόθεση της παραμόρφωσης του τοιχώματός της, αυτή μπορεί να αγνοηθεί.

### Οριζόντια κυλινδρικά δοχεία πίεσης

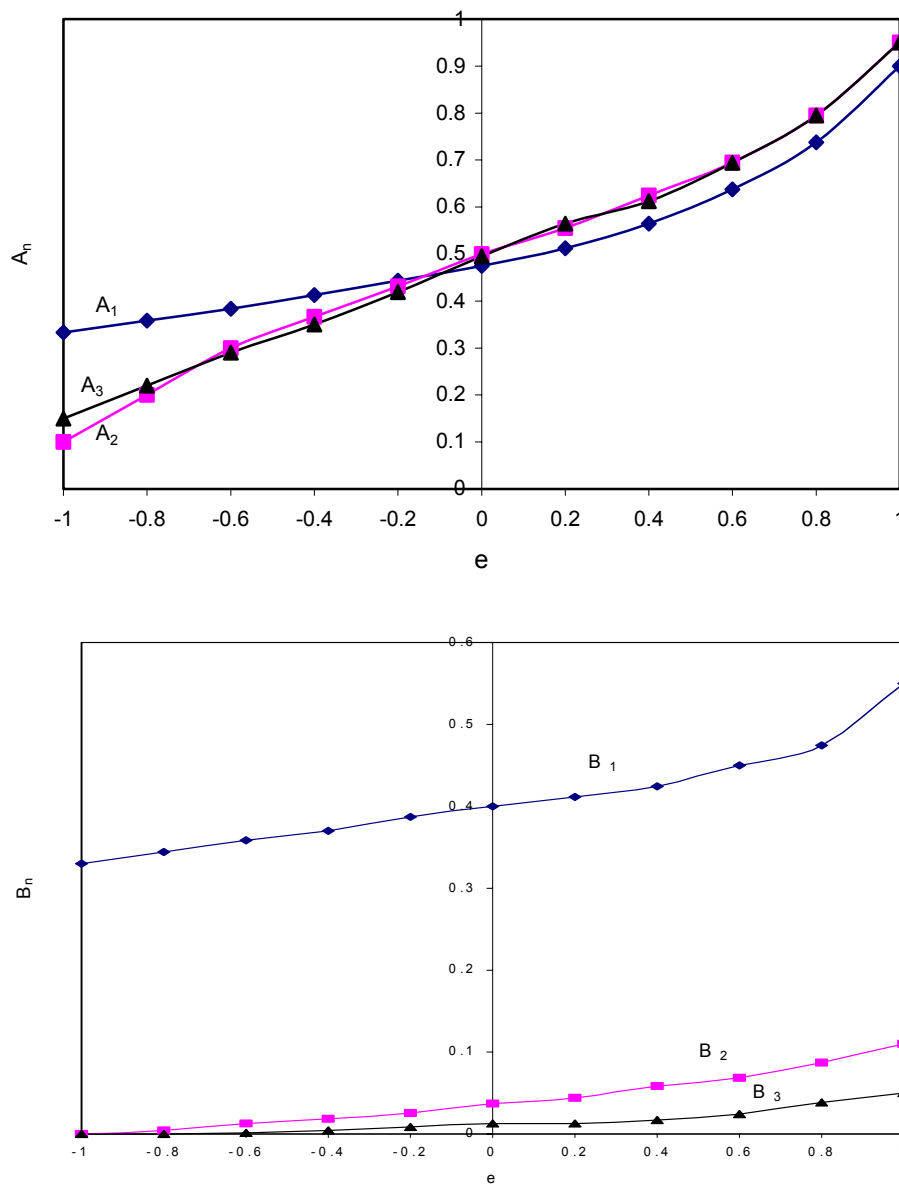
Στα δοχεία μορφής οριζοντίου κυλίνδρου έχουμε 2 διακριτές διευθύνσεις σεισμού (σχήμα 1.12): την εγκάρσια διεύθυνση  $x$  και την διαμήκη διεύθυνση  $z$ . Και στις δύο διευθύνσεις, η απόκριση μπορεί θεωρητικά να περιγραφεί μέσω της γενικής μορφής εξίσωσης (1.1)



**Σχήμα 1.12:** Γεωμετρία δεξαμενής – δοχείου πίεσης σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου.



**Σχήμα 1.13:** Γεωμετρικές παράμετροι διατομής οριζώντιου κυλίνδρου σε σχέση με το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού.



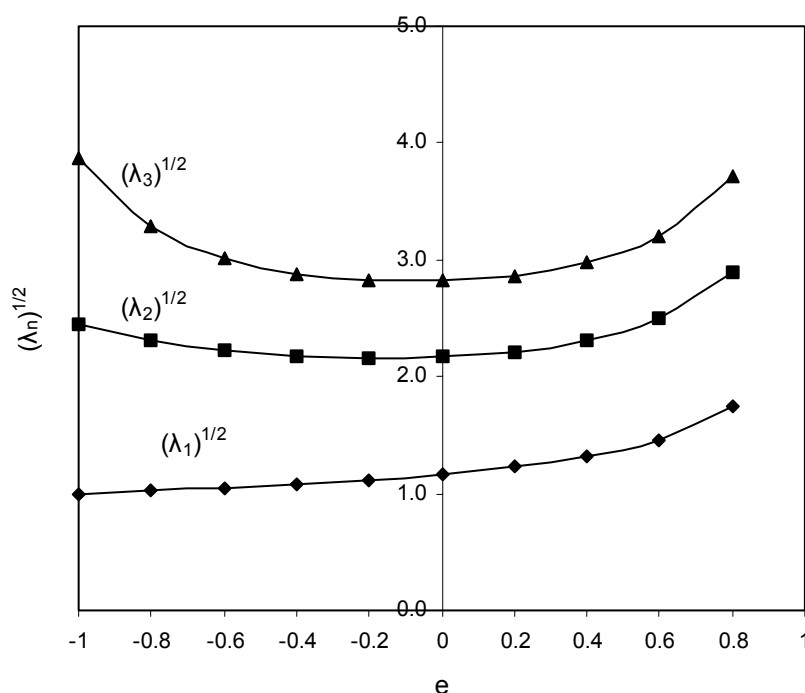
**Σχήμα 1.14:** Συντελεστές  $A_n$ ,  $B_n$  δοχείου πίεσης σχήματος οριζώντιου κυλίνδρου, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.

### Απόκριση στην εγκάρσια διεύθυνση

Η κίνηση του ρευστού, μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση (1.1) όπου  $\omega_n$  είναι η ιδιοσυχνότητα της n-ιδιομορφής, ενώ η παράμετρος  $\alpha$  σχετίζεται με την θέση της ελεύθερης επιφάνειας, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.13. Βασικά ρόλο στην απόκριση παίζουν οι παράμετροι  $A_n$ ,  $B_n$  που δίνονται στα σχήματα 1.14. Οι ιδιοσυχνότητες  $\omega_n$  δίνονται σε αδιάστατη μορφή

$$\sqrt{\lambda_n} = \omega_n \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1.40)$$

στο σχήμα 1.15, σε σχέση με το  $e$ , το οποίο ορίζεται στο σχήμα 1.13.



**Σχήμα 1.15:** Ιδιοσυχνότητες δοχείου πίεσης σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.

Η συνολική δύναμη δίνεται από τον ακόλουθο τύπο, αντίστοιχο του τύπου (1.8):

$$F_{T,max} = F_{I,max} + F_{C,max} = \left[ \sum_{n=1,2,3,\dots}^N (M_{nc} S_{An})^2 \right]^{1/2} + M_I A_g \quad (1.41)$$

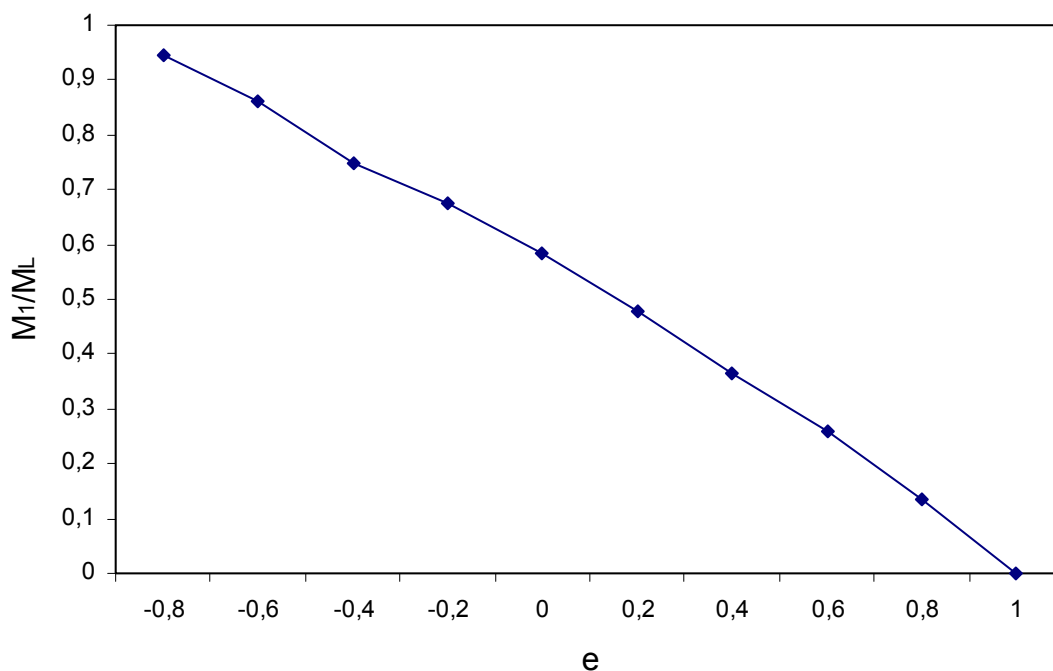
όπου η ωστική μάζα είναι

$$M_I = M_L + M_S - \sum_n M_{nc} \quad (1.42)$$

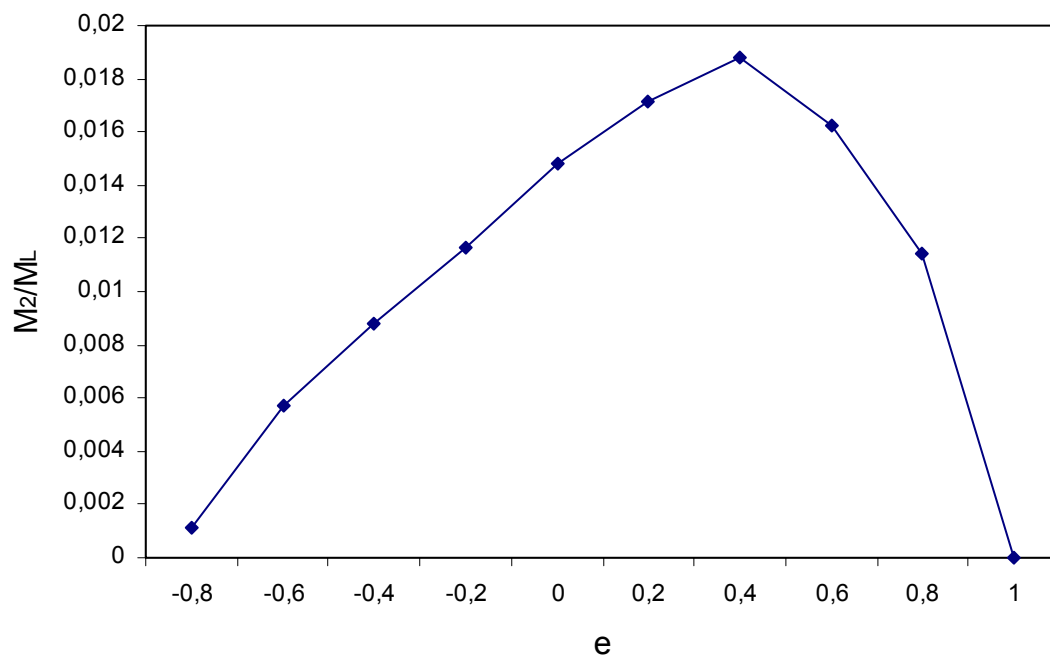
και η μάζα «κυματισμού» της ιδιομορφής n είναι

$$M_{nc} = 2\rho R^2 \left( \frac{A_n}{\lambda_n} \right) \alpha \quad (1.43)$$

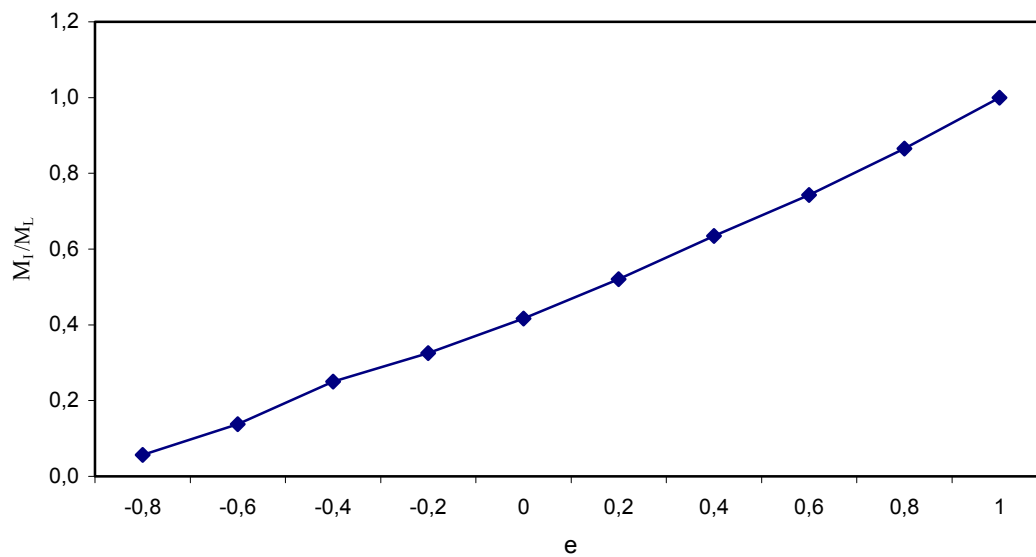
Οι δύο πρώτες μάζες επαγωγής  $M_{1C}$ ,  $M_{2C}$  και η ωστική μάζα  $M_I$  δίνονται στα σχήματα 1.16, 1.17, 1.18, ως συνάρτηση της παραμέτρου πληρότητας του δοχείου  $e$ .



**Σχήμα 1.16:** Πρώτη μάζα επαγωγής  $M_{1C}$  δοχείου πίεσης σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.



**Σχήμα 1.17:** Δεύτερη μάζα επαγωγής  $M_{2C}$  δοχείου πίεσης σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.



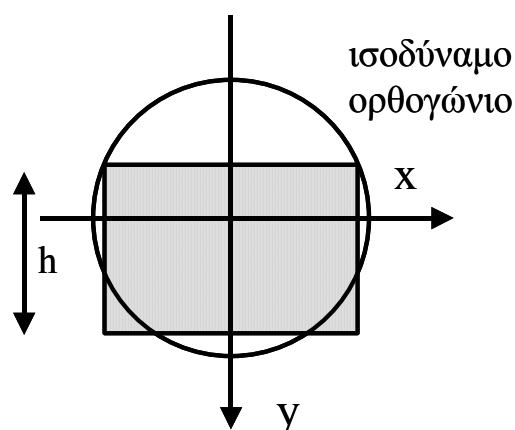
**Σχήμα 1.18:** Ωστική μάζα δοχείου  $M_I$  πίεσης σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.

#### Απόκριση στην διαμήκη διεύθυνση

Η απόκριση ενός οριζοντίου κυλίνδρου στην διαμήκη διεύθυνση  $z$  λόγω εξωτερικής διέγερσης  $\ddot{Z}(t)$  είναι σημαντικά πιο πολύπλοκη από την ανωτέρω εγκάρσια απόκριση. 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 1.19. Αυτό σημαίνει πως έχουμε την λύση της ίδιας μορφής με την ορθογωνική δεξαμενή, όπου το ύψος της ισοδύναμης ορθογωνικής δεξαμενής δίνεται από τον τύπο

$$h = \frac{1}{2} \left( H - \frac{D}{2} \right) + \frac{D^2}{8} \cdot \frac{\sin^{-1} \left( \frac{2H-D}{D} \right) + \frac{\pi}{2}}{\sqrt{H(D-H)}} \quad (1.44)$$

όπου  $H$  είναι το ύψος ρευστού της κυλινδρικής δεξαμενής, και  $D$  η διάμετρός της. Η συνολική δύναμη δίνεται από την αντίστοιχη σχέση, με το ύψος  $h$  της ορθογωνικής δεξαμενής να δίνεται από την ανωτέρω σχέση.



**Σχήμα 1.19:** Ισοδύναμο ορθογώνιο για την διατομή οριζοντίου κυλίνδρου.

### Σφαιρικά δοχεία πίεσης

Στα σφαιρικά δοχεία πίεσης (σχήμα 1.20), η κίνηση του ρευστού, μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση (1.1) όπου  $\omega_n$  είναι η ιδιοσυχνότητα της n-ιδιομορφής, ενώ η παράμετρος  $\alpha$  σχετίζεται με την θέση της ελεύθερης επιφάνειας, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.13. Βασικό ρόλο στην απόκριση παίζουν οι παράμετροι  $C_n$ ,  $D_n$  που δίνονται στα σχήματα 1.21.

Οι ιδιοσυχνότητες  $\omega_n$  δίνονται σε αδιάστατη μορφή

$$\sqrt{\lambda_n} = \omega_n \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1.45)$$

στο σχήμα 1.22, σε σχέση με το  $e$ , το οποίο ορίζεται στο σχήμα 1.13. Η συνολική δύναμη δίνεται από τον ακόλουθο τύπο, αντίστοιχο του τύπου (1.8):

$$F_{T,max} = F_{I,max} + F_{C,max} = \left[ \sum_{n=1,2,3,\dots}^N (M_{nc} S_{An})^2 \right]^{1/2} + M_I A_g \quad (1.46)$$

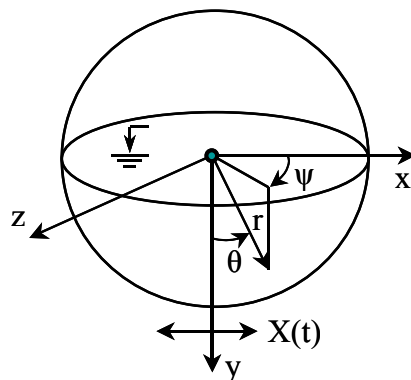
όπου η ωστική μάζα είναι

$$M_I = M_L + M_S - \sum_n M_{nc} \quad (1.47)$$

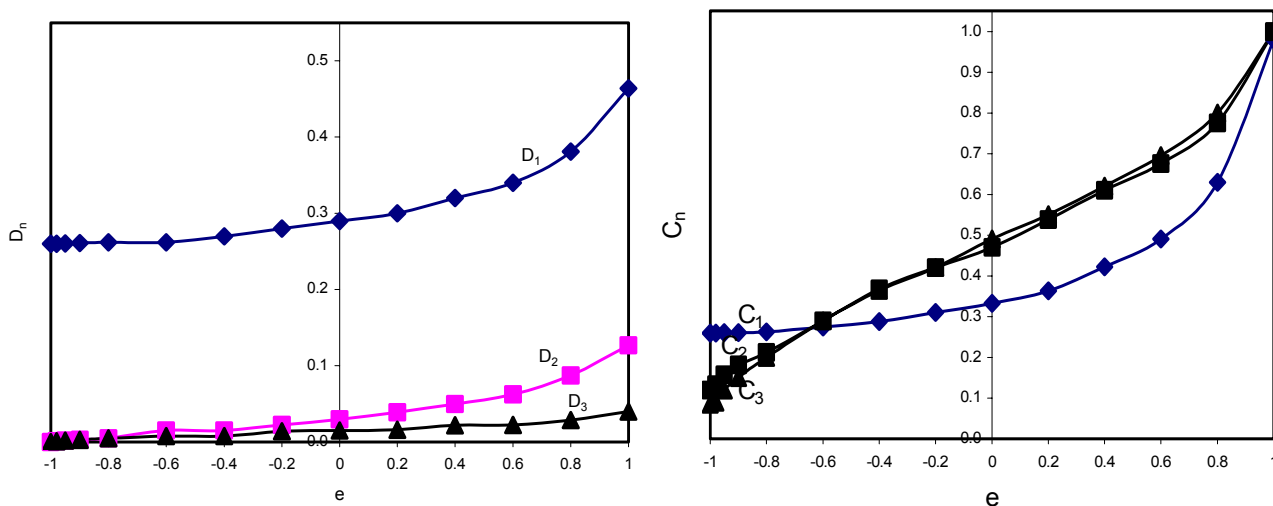
και η μάζα «κυματισμού» της ιδιομορφής  $n$  είναι

$$M_{nc} = 2\rho R^2 \left( \frac{A_n}{\lambda_n} \right) \alpha \quad (1.48)$$

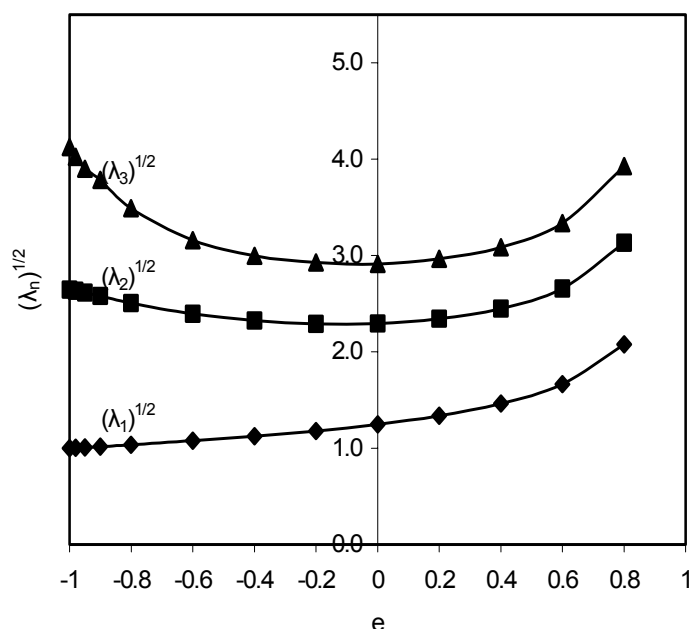
Οι δύο πρώτες μάζες επαγωγής  $M_{1C}$ ,  $M_{2C}$  και η ωστική μάζα  $M_I$  δίνονται στα σχήματα 1.23, 1.24, 1.25, ως συνάρτηση του  $e$ .



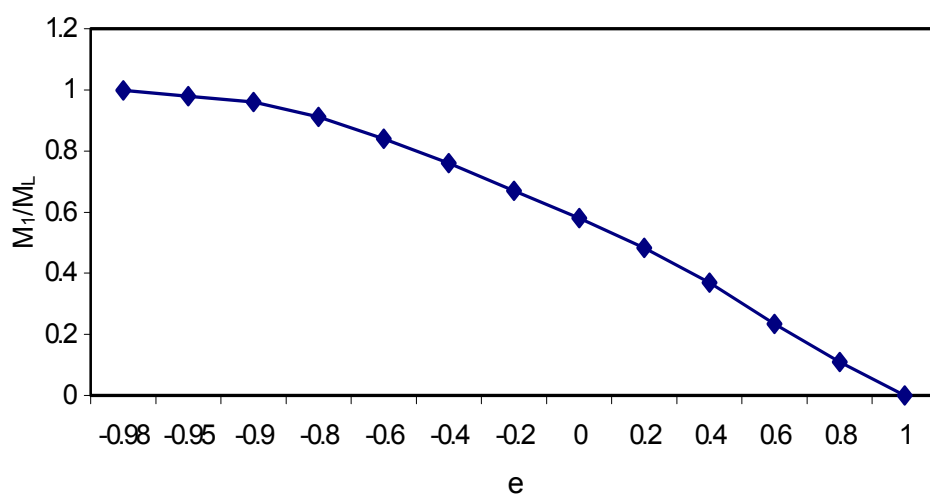
**Σχήμα 1.20:** Γεωμετρία σφαιρικής δεξαμενής – δοχείου πίεσης



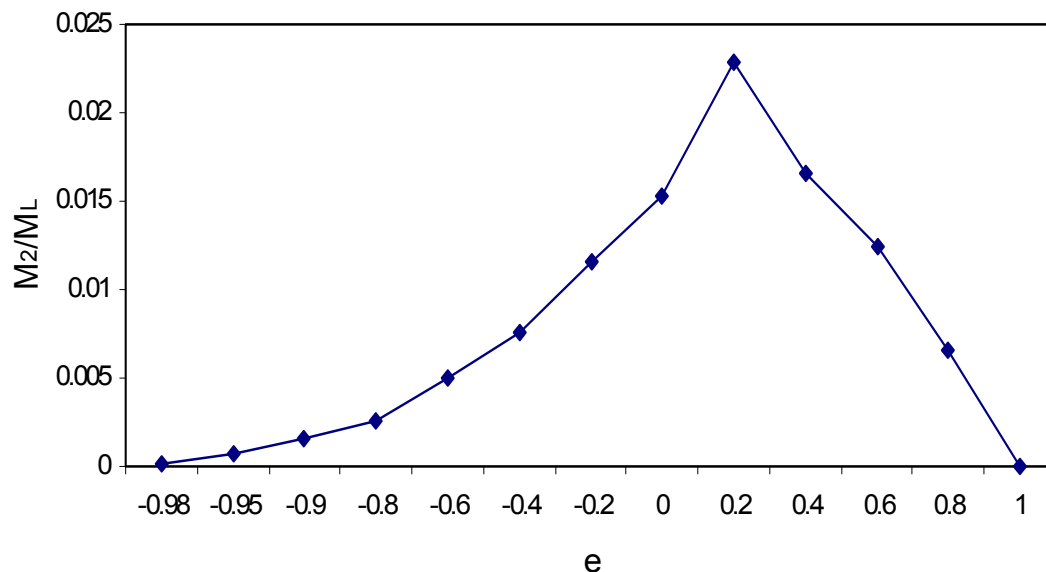
Σχήμα 1.21: Συντελεστές  $C_n$ ,  $D_n$  δοχείου πίεσης σχήματος σφαίρας, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.



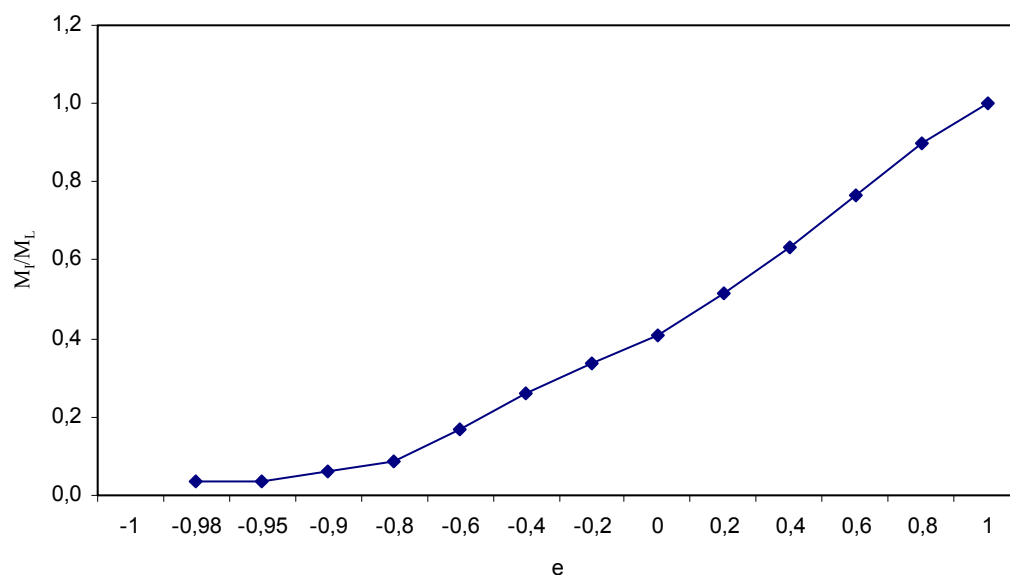
Σχήμα 1.22: Ιδιοσυχνότητες δοχείου πίεσης σχήματος σφαίρας, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.



Σχήμα 1.23: Πρώτη μάζα επαγωγής  $M_{1C}$  δοχείου πίεσης σχήματος σφαίρας, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.



**Σχήμα 1.24:** Δεύτερη μάζα επαγωγής  $M_{2C}$  δοχείου πίεσης σχήματος σφαίρας, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.



**Σχήμα 1.25:** Οστική μάζα  $M_1$  δοχείου πίεσης σχήματος σφαίρας, σε σχέση με το ύψος του ρευστού.

#### Παραμόρφωση στο σύστημα στήριξης σφαιρικής δεξαμενής

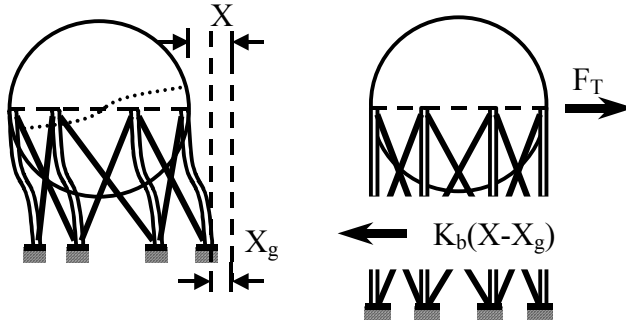
Η παραμορφωσιμότητα της κατασκευής στήριξης της δεξαμενής (σωληνωτά υποστυλώματα και σύνδεσμοι μορφής X) πρέπει να ληφθεί υπόψη. Θεωρώντας 1 επαγωγική ιδιομορφή, η κίνηση του ρευστού περιγράφεται από την εξίσωση (1.1) για  $n=1$ , και η συνολική δύναμη στην σφαίρα προκύπτει

$$F_T = F_I + F_C = - (M_L + M_S) \ddot{X} - M_{1C} \ddot{a}_1 \quad (1.49)$$

και θα πρέπει να εξισορροπείται από την ελαστική δύναμη της στήριξης, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.26. Αν  $K_b$  είναι η ελαστική ακαμψία της στήριξης, τότε λόγω ισορροπίας

$$F_T = K_b (X - X_g) \quad (1.50)$$

όπου  $X_g(t)$  είναι η κίνηση του εδάφους.



**Σχήμα 1.26:** Ισορροπία οριζόντιων δυνάμεων στην σφαιρική δεξαμενή

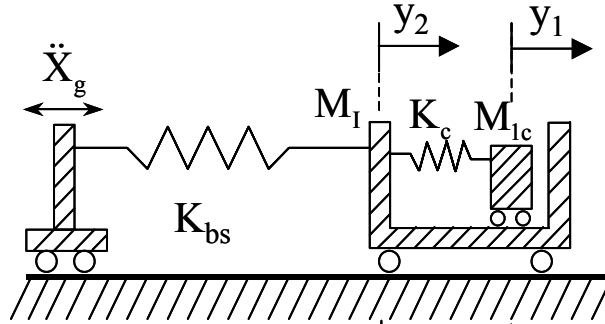
Με την παραδοχή αυτή, οι εξισώσεις (1.1) και (1.50) γράφονται

$$\begin{bmatrix} M_{1c} & 0 \\ 0 & M_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_C & -K_C \\ -K_C & K_C + K_{bs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_{1c} \\ M_I \end{bmatrix} \ddot{X}_g \quad (1.51)$$

όπου

$$K_C = \omega_1^2 M_{1c} \quad (1.52)$$

Το ανωτέρω σύστημα εξισώσεων παραπέμπει σε ένα ισοδύναμο μηχανικό μοντέλο, της μορφής που φαίνεται στο σχήμα 1.27.



**Σχήμα 1.27:** Ισοδύναμο μηχανικό μοντέλο για το σύστημα της σφαιρικής δεξαμενής με το σύστημα στήριξης.

Σημειώνεται πως η ακαμψία της κατασκευής στήριξης  $K_b$  θα πρέπει να περιλαμβάνει την ακαμψία των σωληνωτών υποστυλωμάτων καθώς και την ακαμψία των X-συνδέσμων. Έναν απλό τρόπο να ληφθούν υπόψη οι ανωτέρω ακαμψίες δίνει ο κάτωθι τύπος:

$$K_b = \sum_{j=1}^{N_{legs}} \frac{12EI_L}{h_L^3} + \sum_{k=1}^{N_{braces}} \frac{EA_b}{L_b} \cos^2 \alpha_k \cos^2 \beta \quad (1.53)$$

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,  $\alpha_k$  είναι η γωνία που σχηματίζει ο κάθε σύνδεσμος με την διεύθυνση του σεισμού, και  $\beta$  είναι η κατακόρυφη γωνία που καθορίζει την κλίση του συνδέσμου.