

Μελέτη Σεισμικής Μόνωσης Δεξαμενής Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου

Design of Seismic Isolation for Liquefied Natural Gas Tank

Χρήστος ΚΑΤΣΑΡΑΣ¹, Τηλέμαχος ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΚΟΣ²

Λέξεις κλειδιά: Δεξαμενή Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, Σεισμική Μόνωση
Keywords: LNG Tank, Seismic Isolation

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Ο σχεδιασμός έναντι σεισμού δεξαμενών Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (ΥΦΑ) σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα αποτελεί πρόκληση για κάθε μελετητή. Η πιο δόκιμη λύση στις περιπτώσεις αυτές είναι η επιλογή σεισμικής μόνωσης όχι μόνο ως οικονομικότερη αλλά και ως η ασφαλέστερη. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά η εφαρμογή των Ευρωκωδίκων (EN1998-1 και EN1998-4) στην μελέτη της σεισμικής μόνωσης για την 3η και μεγαλύτερη δεξαμενή αποθήκευσης Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου χωρητικότητας 95000m³ στον τερματικό σταθμό της νήσου Ρεβιθούσας. Με τη χρήση μη γραμμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας σε κατάλληλα προσομοιώματα που περιγράφονται στο EN1998-4 τα οποία περιλαμβάνουν και τη σεισμική απόκριση του υγρού γίνεται η διαστασιολόγηση μονωτήρων εκκρεμούς τριβής τριπλής καμπυλότητας και προκύπτουν οι απαιτήσεις έναντι σεισμού τόσο για το κέλυφος από προεντεταμένο σκυρόδεμα της δεξαμενής όσο και της θεμελίωσης αυτής.

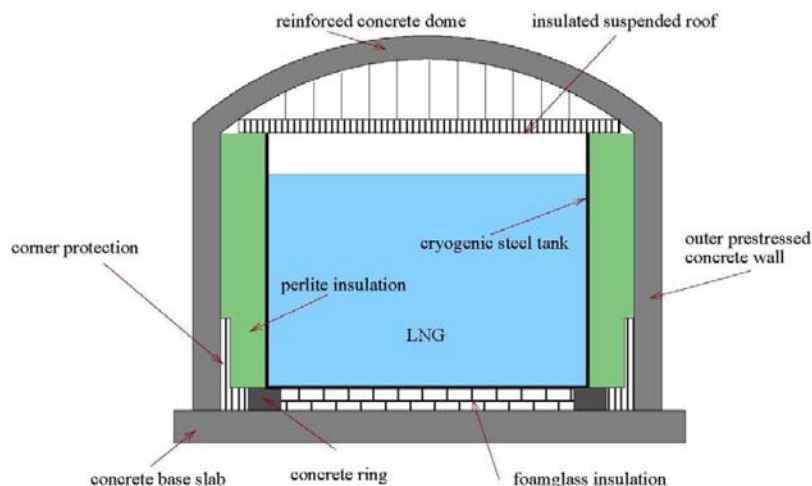
ABSTRACT : The seismic design of Liquefied Natural Gas (LNG) tanks in high seismicity areas is a challenge for the designers. The appropriate solution for these cases is the provision of seismic isolation not only because of the smaller cost but also because it is a safer solution. In this paper the application of Eurocodes (EN1998-1 and EN1998-4) is presented in detail for the design of the seismic isolation of the 3rd and largest LNG storage tank with capacity 95000m³ in the terminal station of Revithoussa island. By using non-linear time-history analysis and the suitable models described in EN1998-4, that also include the seismic response of the contained liquid, the design of the triple friction pendulum isolators is performed and the seismic demands are derived for the prestressed concrete shell of the tank and its foundation.

¹ Πολιτικός Μηχανικός, DENCO Στατικές Μελέτες ΙΚΕ, Αθήνα, email: ckatsaras@dencopc.com

² Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, DENCO Στατικές Μελέτες ΙΚΕ, Αθήνα, email: tpanagiotakos@dencopc.com

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο πιο εκτεταμένος τύπος δεξαμενής αποθήκευσης Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (ΥΦΑ) είναι η υπέργεια δεξαμενή πλήρους συγκράτησης, η οποία παρέχει συγκράτηση του υγρού με ελεύθερη επιφάνεια και των ατμών του σε θερμοκρασίες λειτουργίας της τάξης των -167°C . Τυπική σχηματική τομή της δεξαμενής πλήρους συγκράτησης εικονίζεται στο **Σχήμα 1**. Η κατασκευή αποτελείται κυλινδρική εσωτερική δεξαμενή από κρυογενικό χάλυβα η οποία είναι ανοικτή στην κορυφή της και είναι ικανή να συγκρατεί το υγρό. Η εξωτερική δεξαμενή κατασκευάζεται από σκυρόδεμα. Το κυλινδρικό πλευρικό τοίχωμα της είναι προεντεταμένο στην κατακόρυφη και στην περιφερειακή διεύθυνση. Ο θόλος σφαιρικής μορφής και η πλάκα βάσης αποτελούνται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Μεταξύ των δύο δεξαμενών τοποθετείται θερμομόνωση. Οι διαστάσεις της εξεταζόμενης δεξαμενής στην νήσο Ρεβυθούσα είναι τυπικές για το είδος της: συνολικό ύψος 35.78m, εσωτερική ακτίνα σφαιρικού θόλου 96.0m, εσωτερική ακτίνα κυλινδρικού τοιχώματος 40.0m, πάχος σφαιρικού θόλου 0.45m, πάχος πλευρικού τοιχώματος 0.65m με τοπική πάχυνση σε 1.0m σε ύψος 7.0m από την βάση, πάχος πλάκας βάσης 1.0m, σκυρόδεμα C40/50.



Σχήμα 1. Σχηματική εγκάρσια τομή δεξαμενής ΥΦΑ πλήρους συγκράτησης (αναπαραγωγή σχήματος από αναφορά Marti, Crespo & Martinez, 2010)

Οι δεξαμενές φυσικού αερίου θεωρούνται κατασκευές υψηλής επικινδυνότητας λόγω της τεράστιας χημικής ενέργειας την οποία αποθηκεύουν και των καταστροφικών συνεπειών που συνεπάγεται ενδεχόμενη αστοχία τους. Τα σύγχρονα πρότυπα και κανονισμοί θέτουν πολύ αυστηρές απαιτήσεις στον σχεδιασμό τους. Ειδικότερα για τον αντισεισμικό σχεδιασμό ορίζονται δύο επίπεδα σεισμικής διέγερσης, α) Ο σεισμός λειτουργίας (Operating Basis Earthquake – OBE) με περίοδο επαναφοράς 475 έτη για τον οποίο απαιτείται

αδιάκοπη λειτουργία της εγκατάστασης, και β) ο σεισμός ασφαλούς διακοπής λειτουργίας (Safe Shutdown Earthquake – SSE) με περίοδο επαναφοράς 2500 έτη ή μεγαλύτερη. Για την εξεταζόμενη δεξαμενή η σεισμική δράση αντιστοιχεί σε εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού ίση με 0.24g για τον OBE και 0.48g για τον SSE.

Σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας είναι σκόπιμη η πρόβλεψη συστήματος σεισμικής μόνωσης για τον περιορισμό της σεισμικής καταπόνησης της δεξαμενής ΥΦΑ (Wang et al, 2001), (Kim et al, 2002), (Shrimalo & Jangid, 2002), (Christovasilis & Whittaker, 2008). Η σεισμική μόνωση επιτυγχάνει την μείωση της σεισμικής καταπόνησης από τις οριζόντιες σεισμικές δράσεις μέσω αύξησης της θεμελιώδους περιόδου του συστήματος και αύξησης της απόσβεσης ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται:

- Περιορισμός της καταπόνησης τόσο στο κέλυφος της εξωτερικής δεξαμενής αλλά κυρίως στις μηχανολογικές εγκαταστάσεις που βρίσκονται αναρτημένες στην οροφή και τα πλευρικά τοιχώματα της εξωτερικής δεξαμενής.
- Περιορισμός της καταπόνησης του τοιχώματος της εσωτερικής δεξαμενής με στόχο το πάχος των ελασμάτων του κρυογενικού χάλυβα να μην ξεπερνάει τα 50 mm, κάτι το οποίο είναι απαραίτητο για την αξιόπιστη συγκόλληση τους.
- Περιορισμός της τάσης για ανασήκωμα στις κάτω γωνίες της εσωτερικής δεξαμενής με στόχο την αποφυγή της αγκύρωσης η οποία καταργεί την ανεξάρτητη δράση της εσωτερικής και εξωτερικής δεξαμενής.
- Αποφυγή ολίσθησης της εσωτερικής δεξαμενής.

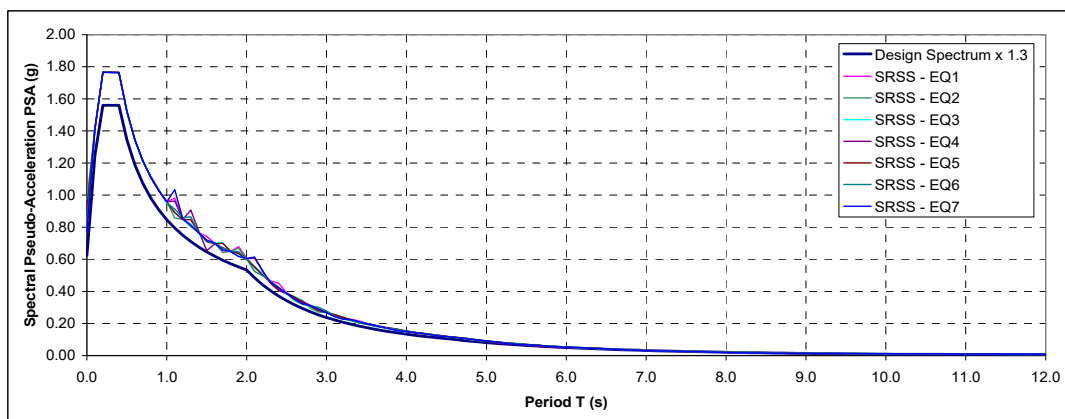
Για τις περιπτώσεις δεξαμενών ΥΦΑ στις οποίες έχει εφαρμοστεί σεισμική μόνωση η έδραση της εξωτερικής δεξαμενής στην πλάκα θεμελίωσης γίνεται μέσω εφεδράνων σεισμικής μόνωσης. Το σύστημα σεισμικής μόνωσης αποτελείται συνήθως από εφέδρανα εκκρεμούς τριβής (Friction Pendulum Bearings – FPS) ή από ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης, με ή χωρίς πυρήνα μολύβδου. Η εξεταζόμενη δεξαμενή στηρίζεται σε 308 εφέδρανα τύπου Τριπλού Εκκρεμούς Τριβής (Triple Friction Pendulum System).

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ

Η σεισμική δράση σχεδιασμού για την μη-γραμμική δυναμική ανάλυση χρονιοιστορίας του συστήματος σεισμικής μόνωσης ορίζεται μέσω 7 σεισμικών κινήσεων εδάφους η οποίες προκύπτουν από 7 πραγματικές σεισμικές καταγραφές, κατάλληλα τροποποιημένες έτσι ώστε να είναι συμβατές με το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του EN1998-1. Οι καταγραφές επιλέχθηκαν από ελληνικούς και διεθνείς σεισμούς οι οποίοι έχουν παρόμοιες γεωλογικές και σεισμοτεκτονικές συνθήκες σε σχέση με το έργο. Η τροποποίηση των

πραγματικών καταγραφών έτσι ώστε να είναι συμβατές με το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του EN1998-1 πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα H/Y RSPMatch09 (Al Atik & Abrahamson, 2010). Η τροποποίηση της χρονιστορίας εδαφικής επιτάχυνσης πραγματοποιείται επαναληπτικά όπου σε κάθε βήμα προστίθεται στην χρονιστορία κυματίδια (wavelets) τα οποία μειώνουν την απόκλιση από το φάσμα στόχο. Η τροποποιημένη χρονιστορία εδαφικής επιτάχυνσης διατηρεί τα μη-στάσιμα χαρακτηριστικά της αρχικής χρονιστορίας χωρίς να προκαλείται αυξανόμενη απόκλιση στις προκύπτουσες ταχύτητες και μετακινήσεις.

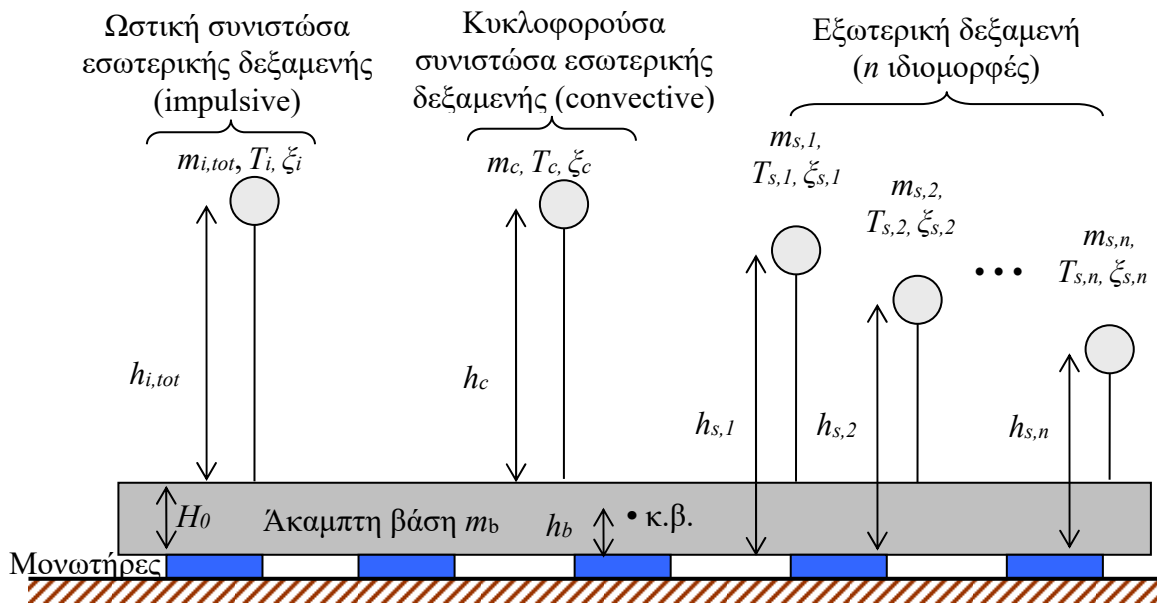
Ο έλεγχος συμβατότητας των φασμάτων των τροποποιημένων εδαφικών κινήσεων σε σχέση με το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού πραγματοποιείται όπως περιγράφεται στο EN1998-2 παρ. 3.2.3. Συγκεκριμένα για κάθε σεισμική κίνηση υπολογίζεται το SRSS φάσμα ως η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των φασμάτων των δύο οριζόντιων συνιστωσών. Ο μέσος όρος των SRSS φασμάτων του συνόλου των εδαφικών κινήσεων δεν θα πρέπει να είναι λιγότερο από 1.3 φορές το φάσμα σχεδιασμού στο διάστημα περιόδων από $0.2T_{eff}$ έως $1.5T_{eff}$ όπου T_{eff} η ενεργός περίοδος του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Στο **Σχήμα 2** παρουσιάζεται ο έλεγχος συμβατότητας για κάθε μεμονωμένη εδαφική κίνηση. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται για την κατακόρυφη συνιστώσα.



Σχήμα 2. Σύγκριση φάσματος SRSS των δύο οριζόντιων συνιστωσών για τις 7 σεισμικές κινήσεις (EQ1 έως EQ7) με το φάσμα σχεδιασμού του EN1998-1 πολλαπλασιασμένο επί 1.3.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΜΑΖΩΝ

Η λεπτομερής ανάλυση του συστήματος σεισμικής μόνωσης της δεξαμενής ΥΦΑ πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο προσομοίωμα διακριτών μαζών (stick model) που προσεγγίζει επαρκώς την δυναμική απόκριση της δεξαμενής. Το προσομοίωμα διακριτών μαζών εικονίζεται στο **Σχήμα 3**.



Σχήμα 3. Προσομοίωμα διακριτών μαζών της δεξαμενής.

Προσομοίωση Υγρού και Εσωτερικής Δεξαμενής

Το σύστημα υγρού - εσωτερικής δεξαμενής αναλύεται σύμφωνα με το απλοποιημένο προσομοίωμα για κυλινδρικές δεξαμενές σταθερής βάσης σύμφωνα με το EN1998-4 §A3.2.2 (CEN, 2006a). Σύμφωνα με αυτή την απλοποιημένη προσέγγιση το σύστημα δεξαμενής-υγρού προσομοιώνεται με δύο μονοβάθμια συστήματα, α) ένα σύστημα το οποίο αντιστοιχεί στην ωστική συνιστώσα (impulsive) του υγρού η οποία αλληλεπιδρά με το τοίχωμα της εσωτερικής δεξαμενής και προκαλεί σημαντικές διαφοροποιήσεις στις δυναμικές πιέσεις στα τοιχώματα, και β) ένα σύστημα το οποίο αντιστοιχεί στην κυκλοφορούσα συνιστώσα του υγρού (convective) και προσομοιώνει την διαταραχή της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού και τον σχηματισμό κυματισμών (sloshing) κατά την σεισμική διέγερση.

Οι ιδιότητες των παραπάνω μονοβάθμιων συστημάτων (μάζα, θέση κέντρου βάρους, περίοδος, απόσβεση) καθορίζονται στο EN1998-4 §A3.2.2, ως εξής:

$$m_i = m2\gamma \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_1(v_n/\gamma)}{v_n^3 I_1'(v_n/\gamma)} \quad (1)$$

$$m_{cn} = m \frac{2 \tanh(\lambda_n \gamma)}{\gamma \lambda_n (\lambda_n^2 - 1)}, \quad \omega_{cn} = \sqrt{g \frac{\lambda_n}{R} \tanh(\lambda_n \gamma)} \quad (2)$$

όπου m_i η μάζα της ωστικής συνιστώσας, m_{cn} και ω_{cn} η μάζα και η κυκλική συχνότητα της n ιδιομορφής της κυκλοφορούσας συνιστώσας, $m = \rho \pi R^2 H$ είναι η συνολική μάζα του υγρού με πυκνότητα $\rho = 0.5 \text{ t/m}^3$, ακτίνα $R = 38.925 \text{ m}$, ύψος $H = 21.288 \text{ m}$ για την εξεταζόμενη δεξαμενή, $I_1()$ και $I_1'()$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel 1^{ης} τάξεως και η παράγωγος της, $\nu_n = (2n+1)\pi/2$, $\gamma = H/R$ ο λόγος ύψους/ακτίνας, $\lambda_1 = 1.841$, $\lambda_2 = 5.331$, $\lambda_3 = 8.536$. Η περίοδος της ωστικής συνιστώσας εξαρτάται από την ευκαμψία του μεταλλικού τοιχώματος της εσωτερικής δεξαμενής. Για την εξεταζόμενη δεξαμενή προκύπτει ότι η συνολική μάζα του υγρού αναλύεται κατά 67.3% στην κυκλοφορούσα συνιστώσα με περίοδο 10.65s και απόσβεση 0.5%, και κατά 32.7% στην ωστική συνιστώσα με περίοδο 0.415s και απόσβεση 5%.

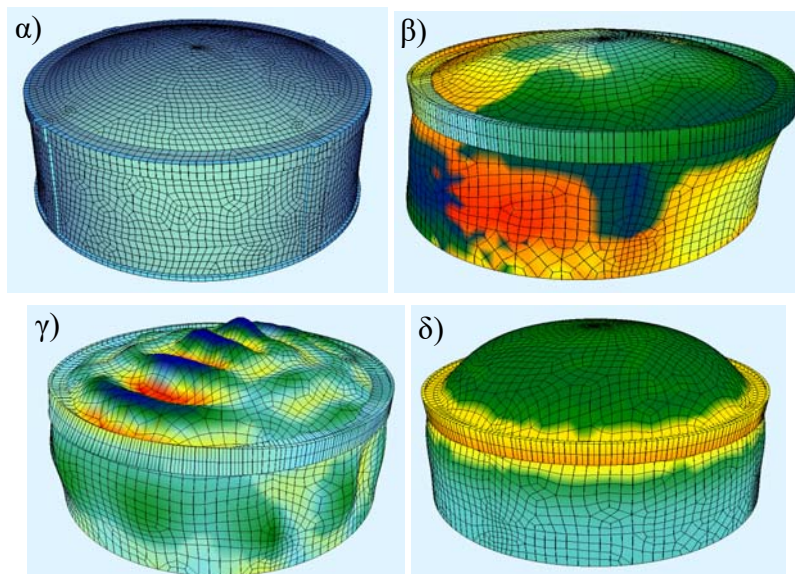
Η ωστική συνιστώσα προκαλεί σημαντική καταπόνηση στα τοιχώματα της δεξαμενής λόγω της διαφοροποίησης της δυναμικής πίεσης. Η ωστική συνιστώσα έχει περίοδο ($T_i = 0.415 \text{ s}$) η οποία είναι σημαντικά μικρότερη από την ενεργό περίοδο της σεισμικής μόνωσης ($T_{eff} = 1.97 \text{ s} \sim 2.36 \text{ s}$). Συνεπώς η σεισμική μόνωση είναι αποδοτική στην μείωση της καταπόνησης της εσωτερικής δεξαμενής όσον αφορά την ωστική συνιστώσα.

Η κυκλοφορούσα συνιστώσα προκαλεί διαταραχή της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού και δημιουργία κυματισμών (sloshing). Η εσωτερική δεξαμενή πρέπει να έχει ικανοποιητικό ελεύθερο ύψος πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια ώστε να μπορεί να αναλάβει το πρόσθετο ύψος κύματος. Το ύψος κύματος επηρεάζεται κυρίως από την πρώτη ιδιομορφή της κυκλοφορούσας συνιστώσας με περίοδο $T_{c1} = 10.65 \text{ s}$ η οποία είναι πολύ πιο εύκαμπτη από την ενεργό περίοδο της σεισμικής μόνωσης ($T_{eff} = 1.97 \text{ s} \sim 2.36 \text{ s}$). Συνεπώς η σεισμική μόνωση δεν είναι αποδοτική στην μείωση του κύματος. Επιπλέον επειδή η περίοδος της κυκλοφορούσας συνιστώσας είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες συνιστώσες της σεισμικής κίνησης η μέγιστη καταπόνηση λόγω κυκλοφορούσας συνιστώσας είναι πιθανό να συμπίπτει χρονικά με την μέγιστη καταπόνηση κάποιας από τις υπόλοιπες συνιστώσες. Το φαινόμενο αυτό αναγνωρίζεται στο EN1998-4 όπου προδιαγράφεται ότι ο συνδυασμός των δύο συνιστωσών (ωστική και κυκλοφορούσα) γίνεται με άθροισμα των απόλυτων τιμών των μεγίστων αντί για τον συνήθη συνδυασμό με τον κανόνα SRSS ή CQC. Στην ανάλυση χρονιοστορίας η διαφορετική δυναμική συμπεριφορά των δύο συνιστωσών λαμβάνεται υπόψη με το προσομοίωμα διακριτών μαζών όπου η κάθε συνιστώσα αντιπροσωπεύεται από διαφορετικό βαθμό ελευθερίας και έχει διαφορετική χρονιοστορία απόκρισης.

Προσομοίωση Εξωτερικής Δεξαμενής

Η δομική συνιστώσα της εξωτερικής δεξαμενής προσομοιώνεται από ένα σύνολο μονοβάθμιων συστημάτων που αντιστοιχούν σε έναν αριθμό ιδιομορφών που περιγράφουν επαρκώς την απόκριση της κατασκευής. Οι δεσπόζουσες ιδιομορφές υπολογίζονται μέσω τριασδιάστατου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζονται στο παρακάτω **Σχήμα 4**. Η γεωμετρία κελύφους τόσο για τα

κυλινδρικά τοιχώματα όσο και για τον σφαιρικό θόλο οδηγεί σε απόκριση μέσω πολλών υψίσυχων ιδιομορφών με μικρή συμμετοχή μάζας για την κάθε μια. Η συμπεριφορά αυτή λαμβάνεται υπόψη μέσω ομαδοποίησης των λοιπών ιδιομορφών σε μία άκαμπτη ιδιομορφή με την μάζα της τοποθετημένη στο κέντρο βάρους του κελύφους. Ομοίως η άκαμπτη συμπεριφορά της πλάκας βάσης της δεξαμενής προσομοιώνεται με την αντίστοιχη μάζα τοποθετημένη στο κέντρο βάρους της.



Σχήμα 4. α) Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για το εξωτερικό κέλυφος της δεξαμενής, β) πρώτη ιδιομορφή με σημαντική συμμετοχή στις οριζόντιες συνιστώσες (ιδιομορφή Νο. 24, περίοδος 0.164s), γ) δεύτερη ιδιομορφή με σημαντική συμμετοχή στις οριζόντιες διευθύνσεις (ιδιομορφή Νο. 113, περίοδος 0.076s), δ) πρώτη ιδιομορφή με σημαντική συμμετοχή στην κατακόρυφη διεύθυνση (ιδιομορφή Νο. 1, περίοδος 0.258s).

Προσομοίωση Συστήματος Σεισμικής Μόνωσης

Οι σεισμικοί μονωτήρες προσομοιώνονται με διγραμμικό υστερετικό μοντέλο που αντιστοιχεί στη συμπεριφορά τριβής, το οποίο χαρακτηρίζεται από τον ενεργό συντελεστή τριβής μ και την ενεργό ακτίνα καμπυλότητας R . Το διγραμμικό προσομοίωμα τριβής περιγράφεται στο EN1998-2 §7.5.2.3. 5. Το προσομοίωμα αυτό είναι κατάλληλο για την ανάλυση των σφαιρικών εφεδράνων τριβής με μονή ή διπλή καμπύλη επιφάνεια ολίσθησης. Το ίδιο προσομοίωμα μπορεί επίσης να προσεγγίσει τη συμπεριφορά των σφαιρικών εφεδράνων τριβής με τριπλή καμπύλη επιφάνεια ολίσθησης εισάγοντας μια ενεργό μετατόπιση διαρροής της τάξης των μερικών cm η οποία οδηγεί σε απομείωση της αποσβενόμενης ενέργειας ανά κύκλο. Για την δυναμική ανάλυση χρονιοιστορίας η μη-γραμμική σχέση δύναμης-μετακίνησης των σεισμικών μονωτήρων

προσομοιώνεται μέσω του υστερητικού προσομοιώματος Bouc-Wen. Το σύνολο των μονωτήρων προσομοιώνεται με ένα υστερητικό στοιχείο που αντιστοιχεί στη συνολική κατακόρυφη δύναμη. Η παραδοχή αυτή είναι εύλογη καθώς α) η οριζόντια μετατόπιση είναι σχεδόν ίση για όλους τους μονωτήρες, β) η οριζόντια δύναμη για κάθε μονωτήρα είναι ανάλογη της κατακόρυφης δύναμής του και γ) η επίδραση των ροπών ανατροπής στην αύξηση και μείωση των φορτίων των μονωτήρων αυτοαναιρείται λόγω της συμμετρικής διάταξης.

Για την εξεταζόμενη δεξαμενή το σύστημα σεισμικής μόνωσης αποτελείται από 308 σεισμικούς μονωτήρες τύπου τριπλού εκκρεμούς τριβής. Η διαμόρφωση των σεισμικών μονωτήρων περιλαμβάνει: α) περιμετρικό δακτύλιο με σε ακτίνα $R=39.9\text{m}$ κάτω από το τοίχωμα της εξωτερικής δεξαμενής με 96 μονωτήρες σε απόσταση 2.61m, β) δεύτερο περιμετρικό δακτύλιος σε ακτίνα $R=33.3\text{m}$ με 48 μονωτήρες σε απόσταση 4.36m, γ) 164 εσωτερικούς μονωτήρες σε ορθογωνικό κάναβο 4.4m x 4.4m.

Κάθε εφέδρανο σεισμικής μόνωσης εδράζεται σε πλίνθο σκυροδέματος C40/50 κάτοψης 1.5m x 1.5m και ύψους 1.45m. Το σχηματιζόμενη διάκενο ύψους 1.825m μεταξύ της κάτω πλάκας της δεξαμενής και της κυκλικής πλάκας θεμελίωσης επαρκεί για την επισκεψιμότητα και των αερισμό του χώρου. οι ιδιότητες των εφεδράνων Τριπλού εκκρεμούς τριβής είναι: ενεργές ακτίνες $R_1=482\text{mm}$, $R_2=4267\text{mm}$, κάτω όριο δυναμικού συντελεστή τριβής $f_1=0.5\%$, $f_2=f_3=4.5\%$, άνω όριο δυναμικού συντελεστή τριβής $f_1=2\%$, $f_2=f_3=7\%$, μέγιστη μετακίνηση σεισμική μετακίνηση 337mm, μέγιστη τέμνουσα βάσης 0.125W. Η μεταβλητότητα της τιμής του δυναμικού συντελεστή τριβής λόγω της διαδικασίας παραγωγής καθώς και λόγω μακροχρόνιων φαινομένων όπως η θερμοκρασία, η γήρανση, η φθορά κτλ. λαμβάνεται υπόψη μέσω δύο ξεχωριστών αναλύσεων α) της ανάλυσης κάτω ορίου και β) της ανάλυσης άνω ορίου. Τα μεγέθη σχεδιασμού λαμβάνονται από την δυσμενέστερη ανάλυση.

Ιδιότητες προσομοιώματος διακριτών μαζών

Οι ιδιότητες του προσομοιώματος διακριτών μαζών της εξεταζόμενης δεξαμενής παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**. Τα ποσοστά μάζας αναφέρονται επί της συνολικής μάζας της δεξαμενής.

Πίνακας 1. Ιδιότητες προσομοιώματος διακριτών μαζών.

α/α	Περιγραφή	Συχνότητα (Hz)	Μάζα (t)	Μάζα (%)	Θέση Κέντρου Βάρους (m)	Απόσβεση (%)
1	Άκαμπτη βάση	άκαμπτη	17183	17.6	0.67	-
2	Κυκλοφορούσα συνιστώσα	0.094	34111	35.0	31.62	0.5
3	Ωστική συνιστώσα	2.41	17140	17.6	30.09	5.0
4	Εξωτ. δεξαμενή – 1η ιδιομορφή	6.10	22601	23.2	29.54	5.54
5	Εξωτ. δεξαμενή – 2η ιδιομορφή	13.23	2138	2.2	9.88	5.79
6	Εξωτ. δεξαμενή – 3η ιδιομορφή	22.02	1170	1.2	30.69	6.15
7	Εξωτ. δεξαμενή – 4η ιδιομορφή	άκαμπτη	3104	3.2	13.90	-

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Μη-γραμμική Δυναμική Ανάλυση χρονιστορίας

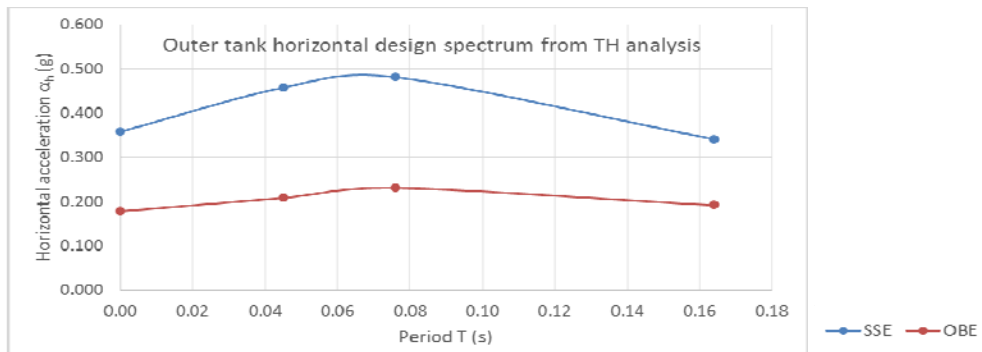
Η χρονικά εξαρτώμενη απόκριση της κατασκευής υπολογίζεται μέσω της άμεσης ολοκλήρωσης των διαφορικών εξισώσεων της κίνησης, όπου η σεισμική κίνηση του εδάφους ορίζεται μέσω επιταχυνσιογραφημάτων. Οι τρεις χωρικές συνιστώσες του σεισμού συνδυάζονται άμεσα με ταυτόχρονη δράση των τριών επιταχυνσιογραφημάτων της εδαφικής κίνησης. Η σεισμική απόκριση υπολογίζεται εφαρμόζοντας τη μέθοδο της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης χρονιστορίας για το προσομοίωμα διακριτών μαζών που παρουσιάζεται στις προηγούμενες ενότητες.

Εφαρμόζεται η μη-γραμμική μέθοδος άμεσης χρονικής ολοκλήρωσης των Hilber-Hughes-Taylor με τις παραμέτρους $\alpha = 0$, $\beta = 0.25$, $\gamma = 0.5$. Αυτές οι παράμετροι αντιστοιχούν στη μέθοδο σταθερής επιτάχυνσης Newmark η οποία είναι άνευ όρων σταθερή. Το βήμα της χρονικής ολοκλήρωσης επιλέγεται ως 0.005s, το οποίο παρέχει πολύ ακριβή αποτελέσματα για τις ιδιοπεριόδους της κατασκευής. Για την μη-γραμμική δυναμική ανάλυση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα υπολογιστή SAP2000.

Από τα αποτελέσματα της μη-γραμμικής δυναμικής ανάλυσης χρονιστορίας προκύπτουν οι μέγιστες απαιτήσεις μετακινήσεων και κατακόρυφων φορτίων για τις οποίες διαστασιολογούνται τα εφεδράνα σεισμικής μόνωσης. Η ικανότητα μετακίνησης των τοποθετούμενων εφεδράνων είναι 432mm. Η ικανότητα ανάληψης κατακόρυφου φορτίου των εφεδράνων είναι 6700 kN.

Διαστασιολόγηση Εξωτερικής Δεξαμενής

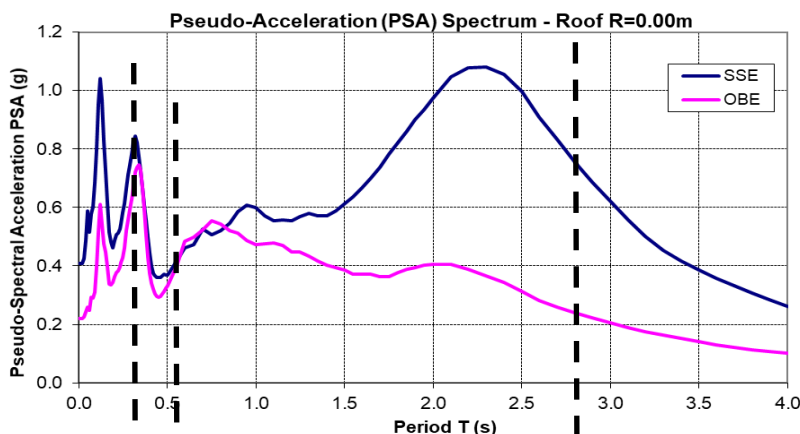
Η διέγερση της εξωτερικής δεξαμενής για τις οριζόντιες συνιστώσες του σεισμού υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο του φάσματος απόκρισης χρησιμοποιώντας της ιδιομορφές σταθερής βάσης της εξωτερικής δεξαμενής. Η διέγερση κάθε ιδιομορφής υπολογίζεται με την εφαρμογή ενός ενεργού φάσματος απόκρισης επιτάχυνσης που λαμβάνει υπόψη την δράση του συστήματος σεισμικής απομόνωσης. Αυτό το φάσμα υπολογίζεται διαιρώντας την μέγιστη τέμνουσα βάσης αντίστοιχη μάζα για καθεμία από τις τέσσερις συγκεντρωμένες μάζες που προσομοιώνουν την εξωτερική δεξαμενή στη μη γραμμική ανάλυση χρονιστορίας του προσομοιώματος διακριτών μαζών. Το ενεργό φάσμα απόκρισης για τις οριζόντιες κατευθύνσεις παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5**.



Σχήμα 5. Ενεργό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων για την εξωτερική δεξαμενή.

Διαστασιολόγηση Ανηρτημένων Κατασκευών

Οι δευτερεύουσες κατασκευές καθώς και οι ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις οι οποίες βρίσκονται ανηρτημένες στα τοιχώματα και στην οροφή της δεξαμενής διαστασιολογούνται μέσω ελαστικών φασμάτων μετακίνησης και επιτάχυνσης τα οποία υπολογίζονται σε διάφορα σημεία στην επιφάνεια του κελύφους. Για τον υπολογισμό των παραπάνω φασμάτων απόκριση πραγματοποιείται γραμμική ανάλυση χρονιστορίας του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων του κελύφους το οποίο θεωρείται πακτωμένο στην βάση του όπου εισάγεται ως διέγερση στην βάση του η αντίστοιχη χρονιστορία επιτάχυνσης όπως αυτή προκύπτει από το προσομοίωμα διακριτών μαζών του συνόλου της κατασκευής. Η χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης γίνεται με τις ίδιες παραμέτρους όπως αναφέρθηκαν παραπάνω. Η χρονιστορία σεισμικής μετακίνησης σε διάφορα σημεία του κελύφους της δεξαμενής χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των φασμάτων απόκρισης μετακίνησης και επιτάχυνσης για την διαστασιολόγηση των ανηρτημένων κατασκευών. Στο **Σχήμα 6** εικονίζονται τα φάσματα απόκρισης των δευτερέων κατασκευών για το κέντρο του θόλου. Παρατηρείται μια περιοχή έντονης φασματικής ενίσχυσης σε περιόδους μεταξύ 2.0s και 2.5s που αντιστοιχούν στην ενεργό περίοδο της σεισμικής μόνωσης. Επιπλέον στις μικρές περιόδους παρατηρούνται περιοχές φασματικής ενίσχυσης για περιόδους 0.3s~0.4s που αντιστοιχούν στην ωστική συνιστώσα του υγρού, για περιόδους 0.10s~0.15s που αντιστοιχεί στην θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της εξωτερικής δεξαμενής, και για περιόδους 0.05~0.10s που αντιστοιχεί στις ανώτερες περιόδους της εξωτερικής δεξαμενής.



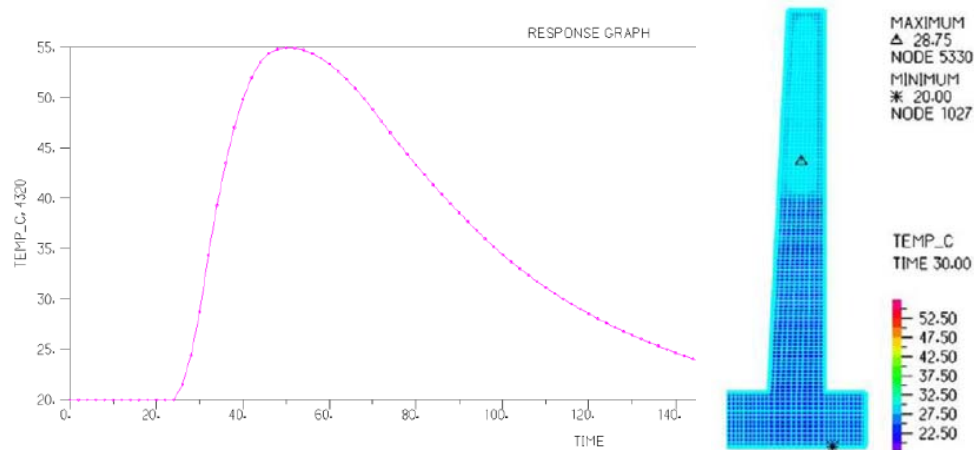
Σχήμα 6. Φάσματα απόκρισης επιταχύνσεων για τις ανηρητημένες κατασκευές στο κέντρο του θόλου της εξωτερικής δεξαμενής.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Κατά την φάση κατασκευής του τοιχώματος της δεξαμενής είναι πιθανή η εμφάνιση ρωγμών λόγω της έντονης αρχικής συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος σε συνδυασμό με την ένταση που οφείλεται σε θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ της εσωτερικής μάζας του σκυροδέματος του τοιχώματος και των παρειών, που με την σειρά τους προκαλούνται από την έκλυση θερμότητας ενυδάτωσης του τσιμέντου, η οποία λαμβάνει χώρα τα πρώτα εικοσιτετράωρα της πήξης του σκυροδέματος. Στην περίοδο αυτή η αντοχή του νεαρού σκυροδέματος είναι προφανώς ιδιαίτερα χαμηλή και οι παραπάνω εντάσεις καταναγκασμού προκαλούν ανάπτυξη επιφανειακών ρωγμών. Η ανάπτυξη αυτών των ρωγμών χαλαρώνει την γενεσιουργό ένταση χωρίς να προκαλεί αισθητή παραμένουσα επιπόνηση στο τοίχωμα. Για το λόγο αυτό οι ρωγμές είναι επιφανειακές και στατικά ακίνδυνες για τη λειτουργία του τοιχώματος.

Το συγκεκριμένο θέμα έχει διεξοδικά μελετηθεί και επιβεβαιωθεί και σε αντίστοιχα έργα (Zhai et al, 2016). Στο **Σχήμα 7** παρουσιάζεται ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για την διάχυση της θερμοκρασίας κατά την φάση της ενυδάτωσης του σκυροδέματος με χρήση του προγράμματος ADINA. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία ενυδάτωσης είναι 55°C σε χρόνο περίπου 30h μετά την διάστρωση. Η τιμή αυτή της θερμοκρασίας συμφωνεί με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας όπου οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας προκύπτουν από 50°C έως 60°C. Με την εφαρμογή της περιφερειακής προέντασης στην οποία υποβάλλεται το τοίχωμα αναμένεται σε μεγάλο βαθμό το κλείσιμο των εμφανιζόμενων ρωγμών. Για την αποφυγή/ελάφρυνση της παραπάνω ρηγμάτωσης είναι σκόπιμο να μειωθούν οι αναπτυσσόμενες διαφορές θερμοκρασίας κατά τα πρώτα εικοσιτετράωρα της πήξης του σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό θεωρείται σκόπιμο να διατηρηθεί ο ξυλότυπος τουλάχιστον επί τρία έως τέσσερα εικοσιτετράωρα μετά τη διάστρωση. Η συνεχής και επιμελής

επιφανειακή διαβροχή του σκυροδέματος (curing) αποτελεί επίσης προϋπόθεση. Αν η διάστρωση του σκυροδέματος προβλέπεται να γίνει σε εξαιρετικά χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι σκόπιμο να προβλεφθούν κατάλληλα μέτρα θερμικής μόνωσης των παρειών.



Σχήμα 7. Χρονοιστορία ανάπτυξης θερμοκρασίας κατά την ενυδάτωση του σκυροδέματος για την δεύτερη φάση σκυροδέτησης του εξωτερικού κελύφους

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η σεισμική ανάλυση της δεξαμενής Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στην νήσο Ρεβυθούσα πραγματοποιήθηκε μέσω σύνθετης ανάλυσης επιμέρους προσομοιωμάτων. Η μη-γραμμική συμπεριφορά του συστήματος σεισμικής μόνωσης, η συμπεριφορά της εξωτερικής δεξαμενής καθώς και η συμπεριφορά του υγρού σύμφωνα με το EN1998-4 εξετάζονται μέσω μη-γραμμικής δυναμικής ανάλυσης χρονοιστορίας ενός προσομοιώματος συγκεντρωμένων μαζών (stick model) όπου εισάγονται βαθμοί ελευθερίας για την αντίστοιχη ιδιομορφή. Η σεισμική διαστασιολόγηση του κελύφους της δεξαμενής πραγματοποιήθηκε μέσω γραμμικής δυναμικής φασματικής ανάλυσης όπου ως φάσμα σχεδιασμού εισάγεται το φάσμα που αντιστοιχεί στην μέγιστη σεισμική επιτάχυνση της κάθε ιδιομορφής όπως προκύπτει από την ανάλυση χρονοιστορίας. Η διαστασιολόγηση των δευτερευόντων κατασκευών και των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων που βρίσκονται ανηρτημένες στο κέλυφος της εξωτερικής δεξαμενής πραγματοποιήθηκε μέσω παραγωγής ελαστικών φασμάτων μετακίνησης και επιτάχυνσης που αντιστοιχούν στην χρονοιστορία μετακίνησης στην εξεταζόμενη θέση. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτει η σημαντική συνεισφορά της σεισμικής μόνωσης στην απομείωση των σεισμικών απαιτήσεων των δεξαμενών Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Al Atik, L. & Abrahamson, N.A., “An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching”. *Earthquake Spectra*, Vol. 26, No 3 (2010) 601-617
- CEN, Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 4: Silos, tanks and pipelines, European Committee for Standardization Standard EN 1998-4:2006 (2006a)
- Christovasilis, I.P. & Whittaker, A.S., “Seismic analysis of conventional and isolated LNG tanks using mechanical analogs”, *Earthquake Spectra*, Vol. 24, No. 3 (2008) 599-616
- Kim, M.K., Lim, Y.M., Cho, S.Y, Cho, K.H. & Lee K.W., “Seismic analysis of base-isolated liquid storage tanks using the BE-FE-BE coupling technique”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 9–12 (2002) 1151-1158
- Marti, J., Crespo, M. & Martinez, F., “Seismic isolation of liquefied natural gas tanks: a comparative assessment”. *Seismic Isolation and Protection Systems*, Vol. 1, No 1 (2010) 125-140
- Shrimali, M.K., & Jangid, R.S., “Seismic analysis of base-isolated liquid storage tanks”, *Journal of Sound Vibrations*, Vol. 275, No. 1-2 (2004) 59-75
- Wang, Y.P., Teng, M.C., & Chung, K.W., “Seismic isolation of rigid cylindrical tanks using friction pendulum bearings”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, No 7 (2001) 1083-1099
- Zhai, X., Wang, Y., Wang, H., “Thermal stress analysis of concrete wall of LNG tank during construction period”, *Materials and Structures* Vo.49 (2016) 2393–2406