

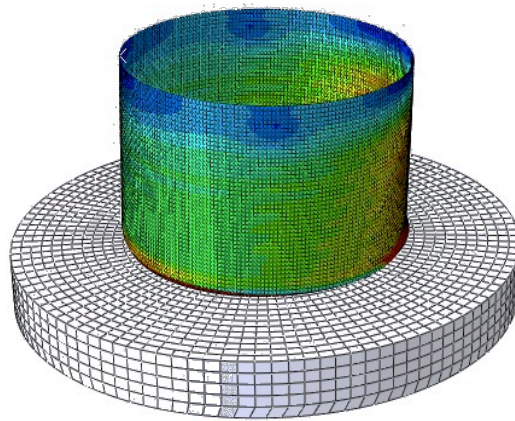


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Προσομοίωση και Εκτίμηση Σεισμικής Συμπεριφοράς Δεξαμενών με Πλωτή Οροφή



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ι. Καράογλου

Επιβλέπων: Δημήτριος Βαμβάτσικος

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

ΕΜΚ ΔΕ 2016/33

Καράογλου Δ. Ι. (2016).
Προσομοίωση και εκτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς δεξαμενών με πλωτή οροφή
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2016/33
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Karaoglou D. I. (2016).
Simulation and assessment of the seismic behavior of tanks with floating roof
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2016/33
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	2
Abstract	3
Ευχαριστίες	4
1 Εισαγωγή	5
1.1 Γενικά.....	5
1.2 Περιγραφή προβλημάτων δεξαμενών	6
1.3 Ανάγκη προσομοίωσης των δεξαμενών	8
1.4 Σπουδαιότητα αποτίμησης των δεξαμενών.....	10
1.5 Στόχοι διπλωματικής εργασίας.....	12
2 Προσομοίωση δεξαμενών με στοιχεία κελύφους.....	14
2.1 Εισαγωγή.....	14
2.2 Δομικά μέλη	14
2.3 Υλικό	17
2.4 Ορισμός διατομών	19
2.5 Συνδεσμολογία	20
2.6 Αλληλεπίδραση δεξαμενής-θεμελίωσης	21
2.7 Συνοριακές συνθήκες	22
2.8 Επίπεδα φόρτισης.....	23
2.9 Διάφραγμα.....	29
2.10 Διακριτοποίηση	30
2.11 Εξαγωγή αποτελεσμάτων	32
3 Αριθμητική ανάλυση δεξαμενών με στοιχεία κελύφους	35
3.1 Εισαγωγή.....	35
3.2 Διερεύνηση ανύψωσης.....	35
3.2.1 Πρόβλημα μήκους αποχωρισμού	35
3.2.2 Πρόβλημα πλαστικής στροφής	42
3.2.3 Πρόβλημα θεώρησης ευθείας	44
3.3 Ανάλυση τάσεων	45
3.4 Σχέση τέμνουσας-ανύψωσης βάσης.....	47
4 Προσομοίωση δεξαμενών με στοιχεία δοκού	49
4.1 Εισαγωγή.....	49
4.2 Περιγραφή του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος.....	49
4.3 Προσομοίωση του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος.....	52
4.4 Βαθμονόμηση του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος.....	56
5 Εξαγωγή καμπυλών σεισμικής τρωτότητας	61
5.1 Εισαγωγή.....	61
5.2 Στάθμες επιτελεστικότητας	61
5.3 Κριτήρια αστοχίας.....	62
5.4 Αριθμητικός υπολογισμός καμπυλών σεισμικής τρωτότητας	64
6 Συμπεράσματα.....	79
7 Βιβλιογραφία	81

Προσομοίωση και εκτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς δεξαμενών με πλωτή οροφή

Καράογλου Δ. Ι. (Επιβλέπων: Βαμβάτσικος Δ.)

Περίληψη

Προτείνεται προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς δεξαμενών με πλωτή οροφή. Το προσομοίωμα υιοθετεί μια ισοδύναμη προσαυξητική φόρτιση η οποία αντιπροσωπεύει τα φορτία αλληλεπίδρασης ρευστού-κατασκευής κατά την διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης. Με την βοήθεια των αποτελεσμάτων του βαθμονομείται ένα νέο απλοποιημένο μονοβάθμιο προσομοίωμα ικανό να πραγματοποιήσει αποδοτικά πολλαπλές δυναμικές αναλύσεις. Σύμφωνα με τις αρχές της σεισμικής μηχανικής βάσει επιτελεστικότητας (Performance-Based-Earthquake-Engineering), μέσω του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος επιτυγχάνεται η αποτίμηση δεξαμενών μέσα σε ένα πιθανοτικό πλαίσιο με την εξαγωγή των καμπυλών σεισμικής τρωτότητας.

Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε τέσσερις, ελεύθερα εδραζόμενες, μεταλλικές δεξαμενές με διαφορετικό λόγο ύψους προς ακτίνα βάσης. Διερευνούνται οι συνέπειες της ανύψωσης της βάσης των δεξαμενών λόγω λυκνισμού και προτείνεται τρόπος για την αξιόπιστη αποτίμησή τους μέσω των επιθυμητών επιπέδων επιτελεστικότητας. Με την εξαγωγή των καμπυλών σεισμικής τρωτότητας είναι δυνατή η εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης των διάφορων μορφών αστοχίας των δεξαμενών για κάθε επίπεδο σεισμικής έντασης.

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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔE 2016/33

Simulation and assessment of the seismic behavior of tanks with floating roof

Karaoglou D. I. (Supervised by Vamvatsikos D.)

Abstract

A finite element model is proposed for the assessment of the seismic behavior of tanks with floating roof. The model adopts an equivalent incremental load to represent the fluid-structure interaction loads during a seismic event. Based on these results a new simplified single-degree-of-freedom model is calibrated that can be used efficiently for multiple dynamic analyses. According to the principles of the Performance-Based-Earthquake-Engineering, the assessment of tanks can be achieved efficiently via the simplified model within a probabilistic framework by calculating the fragility curves.

The proposed method is applied on four unanchored steel tanks with different height-to-radius ratios. The effect of the tanks' base uplift due to rocking is studied and a reliable approach is offered assessing their performance levels. By extracting the fragility curves the probability of occurrence of the tanks' failure modes can be evaluated for any given intensity measure level.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Δημήτρη Βαμβάτσικο, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την άψογη συνεργασία, την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε και τις πολλές ώρες που αφιέρωσε στο πρόσωπό μου. Οι συμβουλές του ήταν άκρως καθοδηγητικές για την αποπεράτωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Μπακάλη για τις χρήσιμες οδηγίες και παρεμβάσεις του, ήταν πάντα πρόθυμος να βοηθήσει να αντιμετωπίσω οποιοδήποτε πρόβλημα παρουσιαζόταν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη ψυχολογική και οικονομική συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Θα ήθελα λοιπόν να τους αφιερώσω την παρούσα διπλωματική εργασία σαν ένα μικρό δείγμα ευγνωμοσύνης.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Σε ολόκληρο τον κόσμο κατασκευάζονται δεξαμενές οι οποίες έχουν αποκλειστικό στόχο την αποθήκευση διάφορων υγρών όπως νερό, αργό πετρέλαιο, υγροποιημένο φυσικό αέριο κ.τ.λ. Αυτό που μου κίνησε την περιέργεια σε αυτές τις θηριώδεις συνήθως κατασκευές είναι ότι ο τρόπος σχεδιασμού και αποτίμησής τους διαφέρει σε μεγάλο βαθμό με τον αντίστοιχο τρόπο των συμβατικών κατασκευών στις οποίες εντρυφούμε στον πενταετή κύκλο σπουδών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Συνεπώς, όταν πληροφορήθηκα ότι για την μελέτη μιας τέτοιας ιδιαίτερα περίπλοκης κατασκευής είναι απαραίτητη η προσομοίωσή της με κάποιο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, ήμουν πεπεισμένος ότι ήθελα να διερευνήσω διεξοδικά την συμπεριφορά των δεξαμενών κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Τέτοιες κατασκευές αν και δεν είναι ιδιαίτερα οικείες στον απλό πολίτη καθώς βρίσκονται ως επί το πλείστον σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις εκτός αστικού ιστού, είναι άκρως απαραίτητες για την εύρυθμη λειτουργία της κοινωνίας επειδή μπορούν να αποθηκεύσουν τα παραπάνω αναγκαία αγαθά κοντά στις πόλεις. Οι δεξαμενές αποθήκευσης διακρίνονται σε υπόγειες, επίγειες και υπερυψωμένες δεξαμενές και ποικίλουν ως προς το σχήμα και το υλικό κατασκευής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μελέτη αποκλειστικά των κατακόρυφων, κυλινδρικών, επίγειων, μεταλλικών δεξαμενών οι οποίες αξιοποιούνται κατά κόρον για την αποθήκευση αργού πετρελαίου.

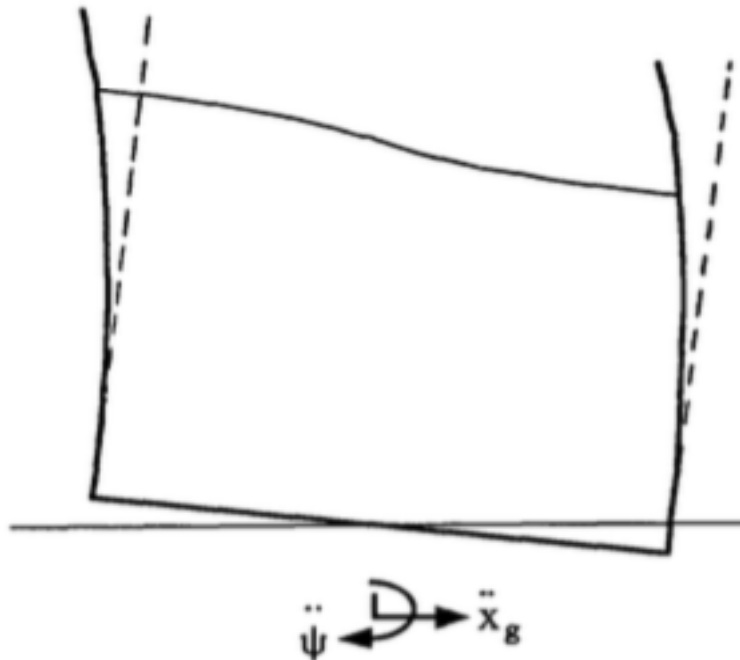


Σχήμα 1.1: Κυλινδρική, επίγεια, μεταλλική δεξαμενή αργού πετρελαίου στο Καλοχώρι Θεσσαλονίκης, Λαβασάς κ.α. (2005)

1.2 Περιγραφή προβλημάτων δεξαμενών

Οι επίγειες, κατακόρυφες, κυλινδρικές, μεταλλικές δεξαμενές είναι συνήθως μεγάλης χωρητικότητας και σχεδιάζονται ως πλήρως ή μερικώς ή μη αγκυρωμένες στη βάση τους. Οι πλήρως ή μερικώς αγκυρωμένες δεξαμενές όταν υποβληθούν σε ισχυρή σεισμική διέγερση αναπτύσσουν ροπή ανατροπής και μεγάλη τέμνουσα βάση λόγω της υδροδυναμικής δράσης, με αποτέλεσμα να υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις όσον αφορά το σύστημα αγκύρωσης και τη θεμελίωσή τους. Είναι ιδιαίτερα συχνό φαινόμενο να παρατηρούνται υψηλές τάσεις στην περιοχή των αγκυρώσεων οι οποίες είναι ανεπαρκώς σχεδιασμένες με αποτέλεσμα να ωθούνται τα τοιχώματα της δεξαμενής. Μπορεί να προκληθεί ακόμα και ολίσθηση της δεξαμενής αν η μεγάλη διατμητική δύναμη στη βάση των αγκυρωμένων δεξαμενών υπερβεί τη δύναμη της τριβής.

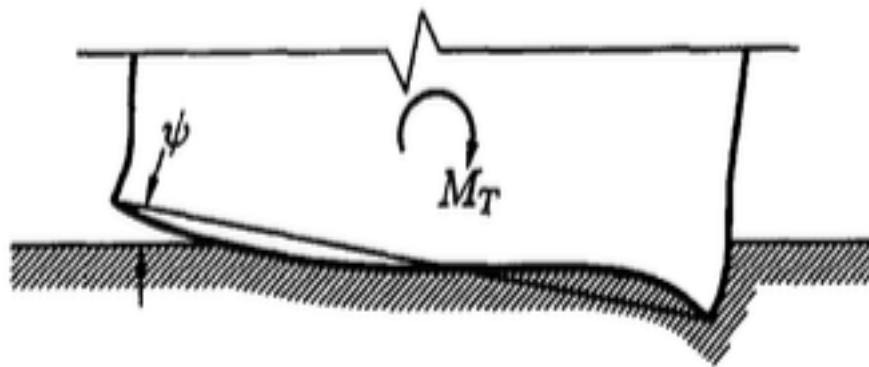
Γίνεται κατανοητό ότι σε περιοχές με πιθανότητα υψηλής σεισμικής διέγερσης οι δεξαμενές είναι πρακτικά αδύνατο να σχεδιαστούν να αντέχουν τις παραπάνω πολύ ισχυρές δράσεις μέσω ελαστικής ανάλυσης. Όταν λοιπόν οι μη ελεύθερα εδραζόμενες δεξαμενές υποβληθούν σε δράσεις μεγαλύτερες από τις δράσεις σχεδιασμού, οι κοιλίες αγκύρωσης τείνουν να αποκολληθούν ή παρουσιάζουν ανελαστική επιμήκυνση. Η απώλεια ενέργειας λόγω ανελαστικής δράσης των κοιλιών αγκύρωσης είναι όμως αρκετά μικρή καθώς οι κοιλίες δρουν σε εφελκυσμό μόνο. Οι αγκυρώσεις οι οποίες δεν σχεδιάζονται σωστά είναι δυνατόν να σπάσουν ψαθυρά ή να ολισθήσουν με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται μια απότομη αύξηση στην ανύψωση της βάσης η οποία σχετίζεται με την πλαστική στρόφη της βάσης της δεξαμενής, την ακτινική απομάκρυνση μεταξύ βάσης και θεμελίωσης και τις περιφερειακές θλιπτικές τάσεις στα τοιχώματά της.



Σχήμα 1.2: Πλήρως ή μερικώς αγκυρωμένη δεξαμενή που υποβάλλεται σε μετακίνηση βάσης και στρόφη, Malhotra & Veletsos (1994c)

Πρακτικά όμως η πλήρης αγκύρωση στις δεξαμενές είναι πολύ συχνά αντιοικονομική και δεν μπορεί να εγγυηθεί η απόδοσή της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλές δεξαμενές αποθήκευσης υγρών να σχεδιάζονται ως μη αγκυρωμένες και να εδράζονται απευθείας σε μαλακές εδαφικές στρώσεις. Όταν αυτές οι δεξαμενές υποβληθούν σε ισχυρή σεισμική διέγερση, η μία πλευρά τους ανυψώνεται και η άλλη πλευρά τους διεισδύει στον εύκαμπτο εδαφικό σχηματισμό. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν ότι η συμπεριφορά και των μη αγκυρωμένων δεξαμενών χαρακτηρίζεται ως έντονα μη γραμμική. Η ενδοσιμότητα των μη αγκυρωμένων δεξαμενών, η οποία σχετίζεται με την ανύψωση της βάσης, μειώνει τις υδροδυναμικές πιέσεις και συνεπώς και την τέμνουσα βάση και την ροπή ανατροπής. Ωστόσο, λόγω της μειωμένης επαφής της δεξαμενής με τη θεμελίωση, οι αξονικές θλιπτικές τάσεις αυξάνονται όπως και οι πλαστικές στροφές στην συναρμογή τοιχώματος και βάσης της δεξαμενής με αποτέλεσμα τον λυγισμό του τοιχώματος. Επίσης μειώνεται η αντίσταση έναντι ανύψωσης και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Οι μη αγκυρωμένες δεξαμενές οι οποίες στηρίζονται απευθείας σε μαλακές εδαφικές στρώσεις υποβάλλονται σε μικρότερες αξονικές θλιπτικές τάσεις σε σχέση με τις μη αγκυρωμένες δεξαμενές που στηρίζονται σε άκαμπτη πλάκα σκυροδέματος. Έχει παρατηρηθεί ότι οι λεπτές και υψηλές μη αγκυρωμένες δεξαμενές είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στα παραπάνω φαινόμενα.

Επομένως στις μη αγκυρωμένες δεξαμενές μπορεί να παρατηρηθεί αυξημένη ανύψωση της βάσης, διείσδυση θεμελίωσης, πλαστική στροφή της βάσης της δεξαμενής, περιφερειακές θλιπτικές τάσεις στα τοιχώματα και ακτινική απομάκρυνση μεταξύ βάσης και θεμελίωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συμπεριφορά της μη αγκυρωμένης δεξαμενής είναι παρόμοια με τη συμπεριφορά της αγκυρωμένης δεξαμενής μόνο κάτω από μικρές εδαφικές παραμορφώσεις. Μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της αντίστασης έναντι ανύψωσης με αύξηση του πάχους της βάσης και των τοιχωμάτων της δεξαμενής ή αύξηση της δυσκαμψίας της θεμελίωσης. Αντίθετα, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μειώνεται με την αύξηση της δυσκαμψίας της θεμελίωσης ή του πάχους των τοιχωμάτων και αυξάνεται με την αύξηση του πάχους της βάσης της δεξαμενής ή του ορίου διαρροής του υλικού.



Σχήμα 1.3: Μη αγκυρωμένη δεξαμενή που υποβάλλεται σε μετακίνηση βάσης και στροφή, Malhotra (1997)

Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε ότι οι δεξαμενές αποθήκευσης υγρού (αγκυρωμένες και μη) είναι αδύνατο να παραμείνουν να συμπεριφέρονται ελαστικά σε περίπτωση έντονης σεισμικής διέγερσης και ως εκ τούτου ενδέχεται να παρατηρηθούν βλάβες καθ' όλη τη διάρκειας ζωής τους. Οι δυνάμεις σχεδιασμού των δεξαμενών που περιγράφονται πρωτίστως στα αμερικάνικα πρότυπα API 650 και στον Ευρωκώδικα EN 1998-4:2006 είναι απλά ένα ποσοστό των αντίστοιχων δυνάμεων που προκύπτουν από την ελαστική γραμμική ανάλυση χωρίς καμία ζημιά. Οι μειώσεις των δυνάμεων σχετίζονται με την αναμενόμενη υπεραντοχή και την πλαστιμότητα του συστήματος, καθώς η μη ικανοποιητική απόδοση των αγκυρωμένων και μη αγκυρωμένων δεξαμενών σχετίζεται άμεσα με την περιορισμένη ικανότητα να απορροφήσουν την σεισμική ενέργεια με πλαστικό τρόπο. Ωστόσο, δεν υπάρχουν πρακτικές μέθοδοι για να ποσοτικοποιηθεί το ποσοστό των παραπάνω μειώσεων για πιθανή βλάβη των δεξαμενών. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η μη γραμμική ανάλυση για την αποτίμηση των δεξαμενών λόγω της μεγάλης πιθανότητας εμφάνισης βλαβών.

Δεδομένου ότι η συμπεριφορά των αγκυρωμένων δεξαμενών έχει διερευνηθεί εκτενέστατα στο παρελθόν, το κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς των μη αγκυρωμένων δεξαμενών που επιδέχονται ανύψωση βάσης, αντικείμενο το οποίο δεν έχει κατανοηθεί πλήρως μέχρι και σήμερα.

1.3 Ανάγκη προσομοίωσης των δεξαμενών

Η πολυπλοκότητα των δεξαμενών αποθήκευσης υγρών καθιστά την προσομοίωσή τους αναγκαία καθώς δεν μπορούν να μελετηθούν όπως οι συμβατικές κατασκευές. Η προαναφερθείσα ανύψωση της βάσης μπορεί να προκαλέσει ιδιαίτερα σημαντικές συνέπειες στην δυναμική συμπεριφορά και στην δομική ακεραιότητα της δεξαμενής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η σεισμική συμπεριφορά των μη αγκυρωμένων δεξαμενών εξετάζεται μέσω δύο προσομοιωμάτων:

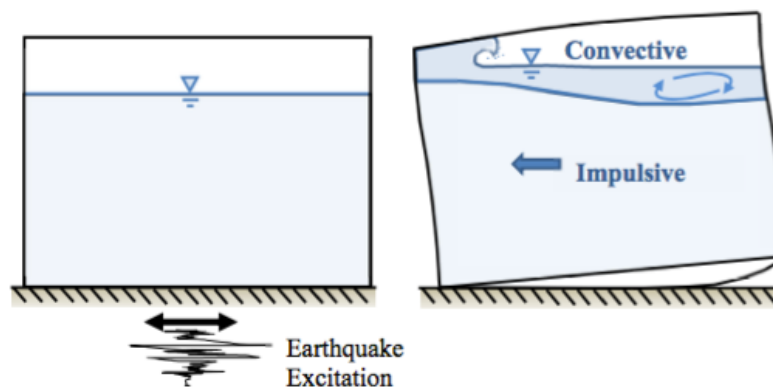
- a. Ενός λεπτομερούς προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με στοιχεία κελύφους ικανό να περιγράψει μέσω μη γραμμικής προσαυξητικής στατικής ανάλυσης (non-linear pushover analysis) τις τάσεις και τις παραμορφώσεις σε διάφορα επίπεδα φόρτισης.
- b. Ενός απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος μάζας-ελατηρίων με στοιχεία δοκού ικανό να πραγματοποιήσει πολλαπλές δυναμικές αναλύσεις με σκοπό την εξαγωγή των καμπυλών τρωτότητας.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) μπορεί να προσφέρει μεγάλη ακρίβεια στην μελέτη αλλά αυτή αντισταθμίζεται από το μεγάλο υπολογιστικό φόρτο που απαιτείται. Ο αριθμός των βημάτων ολοκλήρωσης σε ένα προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων υπό δυναμική ανάλυση μπορεί να είναι τόσο μεγάλος που να καθιστά την επίλυση του προβλήματος αδύνατη. Είναι απαραίτητο, λοιπόν, τέτοια μεγάλης κλίμακας προβλήματα όπως οι δεξαμενές να προσομοιώνονται με στόχο την ισορροπία σφάλματος και πολυπλοκότητας. Η χρήση ενός ορθού απλοποιημένου προσομοιώματος είναι άκρως θεμιτή επειδή αν και μπορεί να υστερεί σε ακρίβεια είναι ικανό να μας δώσει μια πολύ καλή πρώτη εκτίμηση του προβλήματος που προσπαθούμε να ερμηνεύσουμε.

Η μοντελοποίηση των δεξαμενών είναι ιδιαίτερα σύνθετη καθώς υπάρχουν διάφορα περίπλοκα φαινόμενα τα οποία οφείλουμε να προσομοιώσουμε (π.χ. θεμελίωση

δεξαμενής, μη γραμμικότητες υλικού και γεωμετρίας, φορτίσεις δεξαμενής κ.τ.λ). Όπως περιγράφουν οι Jacobsen (1949) και Housner (1963) κατά τη μελέτη της υδροδυναμικής ρευστών σε άκαμπτες δεξαμενές με άκαμπτη θεμελίωση, παρατηρείται ένα μέρος του ρευστού που κινείται με μεγάλη περιοδικά κίνηση θραύσης και το υπόλοιπο κινείται άκαμπτα μαζί με τα τοιχώματα της δεξαμενής. Η πρώτη συνιστώσα και πιο σημαντική για τη συμπεριφορά της δεξαμενής, γνωστή και ως «ωστική» ή «impulsive», επιδέχεται την ίδια επιτάχυνση με το έδαφος και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την τέμνουσα βάση και τη ροπή ανατροπής που θα αναπτυχθούν στην δεξαμενή. Η θεμελιώδης ωστική ιδιομορφή προσεγγίζει μια ιδιομορφή τύπου δοκού-προβόλου για οριζόντια κίνηση βάσης. Η δεύτερη συνιστώσα, γνωστή και ως «επαγωγική» ή «convective», είναι καθοριστική για το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας της δεξαμενής, καθώς σχετίζεται με το ύψος του κύματος θραύσης και είναι υπεύθυνη για τις ζημιές στα ανώτερα τοιχώματα και την οροφή της δεξαμενής. Λόγω της μεγάλης διαφοράς στις ιδιοπεριόδους μεταξύ ωστικής (0.1 s με 0.3 s) και επαγωγικής (2 s με 6 s) κίνησης, μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητες μεταξύ τους. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι η συνεισφορά της επαγωγικής μάζας στη συνολική συμπεριφορά της δεξαμενής μπορεί να αμεληθεί, καθώς η ωστική μάζα είναι κυρίως υπεύθυνη για την πλειονότητα των βλαβών κατά την διάρκεια μιας ισχυρής σεισμικής δόνησης.

Η ορθή προσομοίωση του υδροδυναμικού φαινομένου είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς ο υπολογισμός της τέμνουσας βάσης και της ροπής ανατροπής δεν μπορεί να γίνει με απλή θεώρηση της δεξαμενής ως άκαμπτο στερεό υλικό. Η προσομοίωση των υδροδυναμικών δράσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί επίσης μέσω χρήσης πεπερασμένων στοιχείων ρευστού που αντικατοπτρίζουν την αλληλεπίδραση ρευστού-δεξαμενής, η οποία όμως είναι άκρως χρονοβόρα λόγω ιδιαίτερα αυξημένου υπολογιστικού φόρτου. Για την προσομοίωση, λοιπόν, του υδροδυναμικού προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις του Housner (1963) και του Ευρωκώδικα EN 1998-4:2006 οι οποίες παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια κατά την περιγραφή των δύο προσομοιωμάτων. Έγινε η παραδοχή ότι η ωστική πίεση λαμβάνει χώρα μόνο στα τοιχώματα της δεξαμενής.



Σχήμα 1.4: Δεξαμενή σε ηρεμία (αριστερά), ανυψωμένη δεξαμενή με την ωστική (impulsive) και την επαγωγική (convective) μάζα (δεξιά), Cortes et al (2012)

1.4 Σπουδαιότητα αποτίμησης των δεξαμενών

Οι κίνδυνοι που επιφυλάσσονται λόγω ενδεχόμενης αστοχίας της δεξαμενής είναι πολλαπλοί και γι' αυτό ο σχεδιασμός και η αποτίμηση των δεξαμενών χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Η σεισμική επικινδυνότητα τέτοιων βιομηχανικών εγκαταστάσεων είναι συνήθως υψηλή, καθώς η βλάβη που μπορεί να προκληθεί από ισχυρή σεισμική δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει ανυπολόγιστες ζημιές όχι μόνο στην ίδια την εγκατάσταση αλλά και στο περιβάλλον. Ο περιβαλλοντικός κίνδυνος, η απώλεια πολύτιμου περιεχομένου, η εκδήλωση φωτιάς είναι μερικά από τα πιο σοβαρά προβλήματα που μπορούν να προκύψουν λόγω αστοχίας της δεξαμενής.

Έχουν παρατηρηθεί διάφορες μορφές αστοχίας δεξαμενών λόγω ισχυρής σεισμικής δραστηριότητας. Μία συχνή μορφή αστοχίας είναι η εμφάνιση σημαντικών βλαβών στην οροφή της δεξαμενής και στα άνω τοιχώματά της λόγω της επαγωγικής κίνησης του υγρού. Η ανύψωση της βάσης της δεξαμενής μπορεί να προκαλέσει επίσης ζημιές στην σύνδεση των αγωγών λόγω των κατακόρυφων διαφορικών μετακινήσεων με αποτέλεσμα η λειτουργία των αγωγών να καταστεί αδύνατη. Δύο άλλες μορφές αστοχίας που έχουν παρατηρηθεί στο παρελθόν είναι η θραύση του μανδύα της βάσης της δεξαμενής λόγω πολύ υψηλών τάσεων ή λίγων κύκλων μεγάλων πλαστικών στροφών και η υπερβολική καθίζηση της θεμελίωσης.

Ο λυγισμός, επίσης, παίζει θεμελιώδη ρόλο στις δεξαμενές λόγω του μικρού πάχους των τοιχωμάτων. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μορφές λυγισμού, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε καταστρεπτικά αποτελέσματα λόγω θραύσης των τοιχωμάτων. Ωστόσο, διακρίνονται κυρίως δύο μορφές λυγισμού: ο ελαστοπλαστικός λυγισμός και ο ελαστικός λυγισμός. Η πιο χαρακτηριστική μορφή λυγισμού είναι ο ελαστοπλαστικός λυγισμός, ο λεγόμενος «elephant's foot buckling», ο οποίος χαρακτηρίζεται με ένα «φούσκωμα» κοντά στην βάση της δεξαμενής το οποίο έχει τη μορφή ποδιού ελέφαντα. Ο ελαστοπλαστικός λυγισμός οφείλεται κυρίως στις υψηλές αξονικές θλιπτικές τάσεις λόγω της κάμψης των τοιχωμάτων σε συνδυασμό με τις επίσης υψηλές περιφερειακές εφελκυστικές τάσεις λόγω των εσωτερικών πιέσεων (υδροστατικών και υδροδυναμικών) κατά την κατακόρυφη διέγερση. Ο ελαστικός λυγισμός εκδηλώνεται επίσης στη βάση της δεξαμενής και διακρίνεται για τη μορφή διαμαντιού που λαμβάνει τοίχωμα (diamond shape buckling). Αυτή η μορφή λυγισμού οφείλεται κυρίως στις αξονικές θλιπτικές δυνάμεις στον μεσημβρινό λόγω του ίδιου βάρους των τοιχωμάτων και της οροφής της δεξαμενής, οι οποίες αυξάνονται σημαντικά κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης. Ο ελαστικός λυγισμός είναι πιο σπάνιος σε σχέση με τον ελαστοπλαστικό λυγισμό, καθώς λαμβάνει χώρα κάτω από μόνο μικρές περιφερειακές τάσεις. Τέλος, υπάρχει και ο δευτερεύων λυγισμός ο οποίος συμβαίνει ως επί το πλείστον στα ανώτερα τμήματα της δεξαμενής.

Παρατηρούμε, λοιπόν, την αναγκαιότητα του ορθού σχεδιασμού και της αξιόπιστης αποτίμησης των δεξαμενών αποθήκευσης. Ιδιαίτερα στις μη αγκυρωμένες δεξαμενές, οι οποίες επιλέγονται όλο και συχνότερα στις μέρες μας για λόγους οικονομίας, λόγω της μερικής ανύψωσης της βάσης, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης κάποιας από τις παραπάνω μορφές αστοχίας. Γι' αυτό κρίνεται αναγκαία η εκτενέστατη διερεύνηση των ελεύθερα εδραζόμενων δεξαμενών, καθώς ελλοχεύουν πολλοί κίνδυνοι που είναι δυνατόν να προκαλέσουν σοβαρά κοινωνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά προβλήματα.



Σχήμα 1.5: Δευτερεύων λυγισμός στα ανώτερα τοιχώματα της δεξαμενής (αριστερά), ελαστικός λυγισμός (diamond shape buckling) στη βάση της δεξαμενής (δεξιά), Burrati & Tavano (2013)



Σχήμα 1.6: Ελαστοπλαστικός λυγισμός (elephant's foot buckling) στη βάση της δεξαμενής, Burrati & Tavano (2013)

1.5 Στόχοι διπλωματικής εργασίας

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση και εκτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς δεξαμενών με πλωτή οροφή. Όπως προαναφέρθηκε δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις μη αγκυρωμένες δεξαμενές λόγω της μη πλήρους κατανόησης του φαινομένου της ανύψωσης της βάσης και της επικινδυνότητας που παρουσιάζουν.

Προσομοιώθηκαν τέσσερις δεξαμενές με διαφορετικό λόγο ύψους προς ακτίνα και διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης ελεύθερα εδραζόμενων δεξαμενών. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων δεξαμενών παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 1.1. Εκτενέστερη αναφορά για τις δεξαμενές, το υλικό κατασκευής τους και τα φορτία που ελήφθησαν υπόψη περιγράφονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

Πίνακας 1.1: Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων δεξαμενών

Δεξαμενή	Ύψος (m)	Ακτίνα (m)	Ύψος υγρού (m)	Πάχος τοιχώματος ανά δαχτυλίδι (mm)	Πάχος πλάκας βάσης (mm)	Πάχος περιμετρικού δαχτυλιδιού (mm)
1	16.51	13.885	15.70	17.7/15.7/13.7/11.7/9.7/7.8/6.4/6.4/6.4	6.4	8.0
2	19.95	23.467	18.95	22.23/18.93/16.24/13.57/10.9/8.22/8.0/8.0/8.0	6.4	10.0
3	11.30	6.100	11.30	9.6/8.0/6.4/4.8	4.8	4.8
4	8.54	6.100	8.54	9.6/8.0/6.4	4.8	4.8

Η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς των μη αγκυρωμένων δεξαμενών, όπως έχει προαναφερθεί, πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια δύο διαφορετικών προσομοιωμάτων. Αρχικά, σχεδιάστηκε στο λογισμικό Abaqus ένα αναλυτικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με στοιχεία κελύφους το οποίο υιοθετεί μια ισοδύναμη προσαυξητική φόρτιση η οποία αντιπροσωπεύει τα φορτία αλληλεπίδρασης ρευστού-κατασκευής κατά την διάρκεια μιας έντονης σεισμικής διέγερσης. Για τη μελέτη και την κατανόηση της απόκρισης των δεξαμενών έγινε η εξαγωγή διαγραμμάτων για την συσχέτιση διάφορων μεγεθών. Συγκεκριμένα το διάγραμμα τέμνουσας-ανύψωσης βάσης είναι θεμελιώδους σημασίας καθώς με αυτόν τον τρόπο κατανοούμε διάφορες μη γραμμικότητες όπως η συνεχώς μεταβαλλόμενη επιφάνεια επαφής της βάσης με τη θεμελίωση, η πλαστική διαρροή της βάσης και η επιρροή των μεμβρανικών δυνάμεων λόγω μεγάλων παραμορφώσεων της βάσης της δεξαμενής. Έτσι, λοιπόν, οι στόχοι του πρώτου προσομοιώματος ορίζονται ως οι εξής:

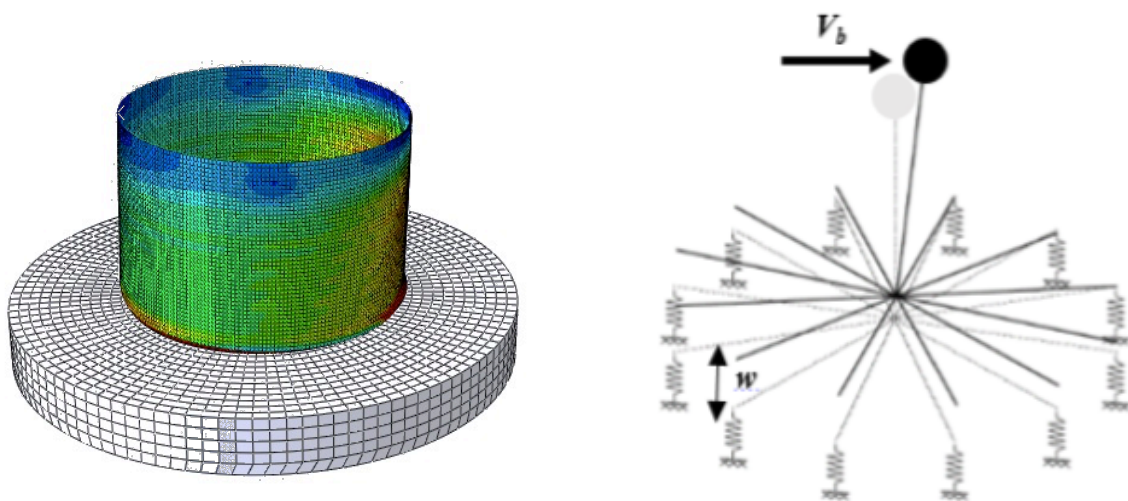
- Κατανόηση του μηχανισμού ανύψωσης των μη αγκυρωμένων δεξαμενών
- Εκτίμηση βασικών μεγεθών όπως παραμορφώσεις, τάσεις κ.τ.λ.
- Συσχέτιση μερικών βασικών μεγεθών και εξαγωγή αντίστοιχων διαγραμμάτων

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε στο λογισμικό OpenSees ένα απλοποιημένο μονοβάθμιο προσομοίωμα με στοιχεία δοκού με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab. Μέσω μη γραμμικής προσαυξητικής στατικής ανάλυσης πραγματοποιήθηκε η συσχέτιση των δύο παραπάνω προσομοιωμάτων. Η συσχέτιση του προσομοιώματος στο OpenSees με το προσομοίωμα στο Abaqus επιτεύχθηκε μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων των δύο αυτών προσομοιωμάτων με τη βοήθεια κάποιων παραμέτρων ψευδοαγκυρίων. Μέσω του βαθμονομημένου απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος ήταν δυνατή η

πραγματοποίηση πολλαπλών δυναμικών αναλύσεων για την αποτίμηση δεξαμενών μέσα σε ένα πιθανοτικό πλαίσιο με την εξαγωγή των καμπυλών σεισμικής τρωτότητας. Συνεπώς, οι στόχοι του δεύτερου προσομοιώματος ορίζονται συνοπτικά ως εξής:

- Συσχέτιση του προσομοιώματος OpenSees με το προσομοίωμα Abaqus
- Εξαγωγή προσεγγιστικού διαγράμματος για την άμεση συσχέτιση των παραμέτρων των ψευδοαγκυρίων με τον λόγο ύψους προς ακτίνα μιας δεξαμενής, για δυνατότητα άμεσης χρήσης του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος
- Εξαγωγή των καμπυλών σεισμικής τρωτότητας

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο Ευρωκώδικας EN 1998-4:2006 δεν διαθέτει ένα πλαίσιο αποτίμησης δεξαμενών, καθώς απλά θέτει κάποιους περιορισμούς, όπως η επιτρεπόμενη στροφή της πλαστικής άρθρωσης που σχηματίζεται στη βάση της δεξαμενής, οι οποίοι έχουν αμφισβητηθεί κατά καιρούς από αρκετούς μελετητές. Για την ικανοποίηση διάφορων επιθυμητών επιπέδων επιτελεσματικότητας μπορούν να εφαρμοστούν οι αρχές της σεισμικής μηχανικής βάσει επιτελεσματικότητας (Performance-Based-Earthquake-Engineering) οι οποίες ωστόσο δεν έχουν υιοθετηθεί πλήρως από τους πρόσφατους κώδικες πρακτικής.



Σχήμα 1.7: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με στοιχεία κελύφους (αριστερά), απλοποιημένο μονοβάθμιο προσομοίωμα με στοιχεία δοκού (δεξιά)

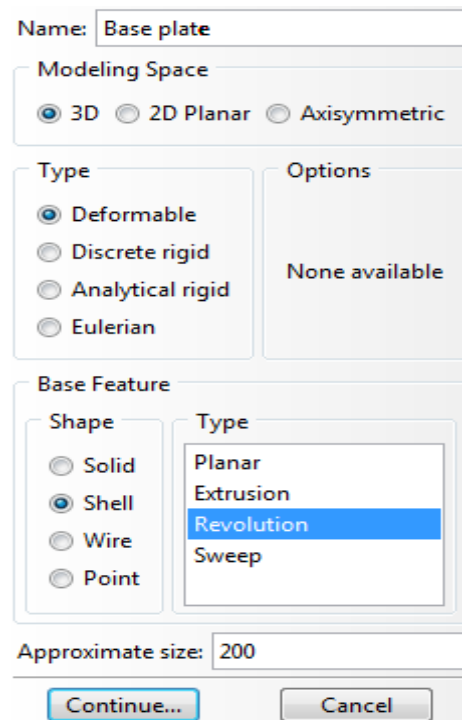
2 Προσομοίωση δεξαμενών με στοιχεία κελύφους

2.1 Εισαγωγή

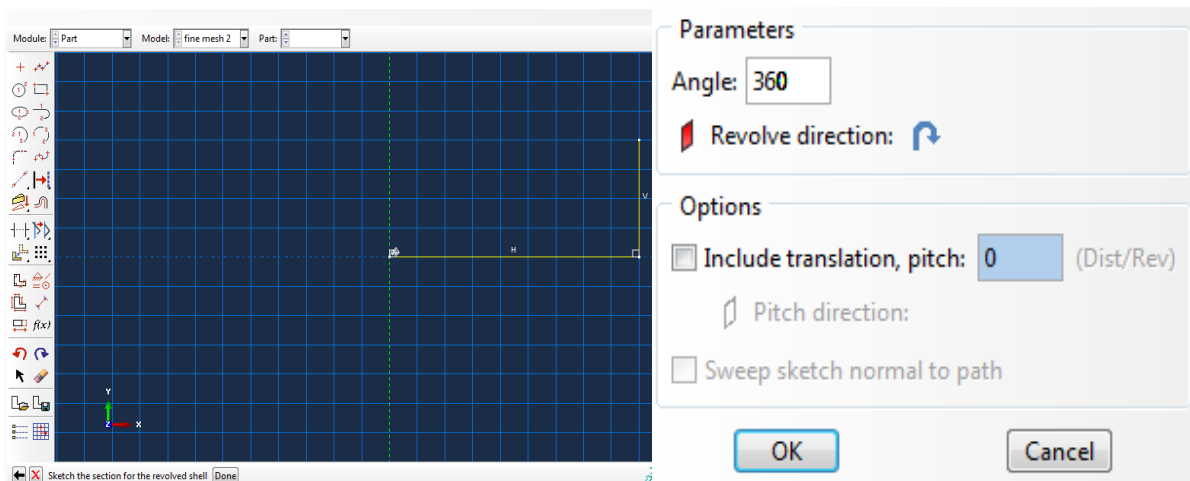
Για την προσομοίωση των δεξαμενών με στοιχεία κελύφους χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Σχεδιάστηκαν τέσσερις δεξαμενές διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών οι οποίες επιλύθηκαν για δύο διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης η κάθε μία. Ο ένας τρόπος προσομοίωσης αντιπροσωπεύει την δεξαμενή με κλειστή οροφή ενώ ο άλλος αντιπροσωπεύει την δεξαμενή με πλωτή οροφή. Όλες οι δεξαμενές σχεδιάστηκαν ως μη αγκυρωμένες με σκοπό την εκτενή μελέτη του προβλήματος της ανύψωσης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται βήμα προς βήμα η διαδικασία προσομοίωσης της δεξαμενής 1 (Πίνακας 1.1). Με όμοιο και αντίστοιχο τρόπο σχεδιάστηκαν και οι υπόλοιπες δεξαμενές. Για την εύκολη και άμεση κατανόηση της διαδικασίας οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στην αγγλική γλώσσα.

2.2 Δομικά μέλη

Σχεδιάστηκαν δύο δομικά μέλη (parts): η μεταλλική δεξαμενή και η άκαμπτη πλάκα θεμελίωσης της δεξαμενής. Επιλέγουμε στο module τη λέξη part. Δημιουργούμε το πρώτο part της μεταλλικής δεξαμενής επιλέγοντας part και στην συνέχεια create.

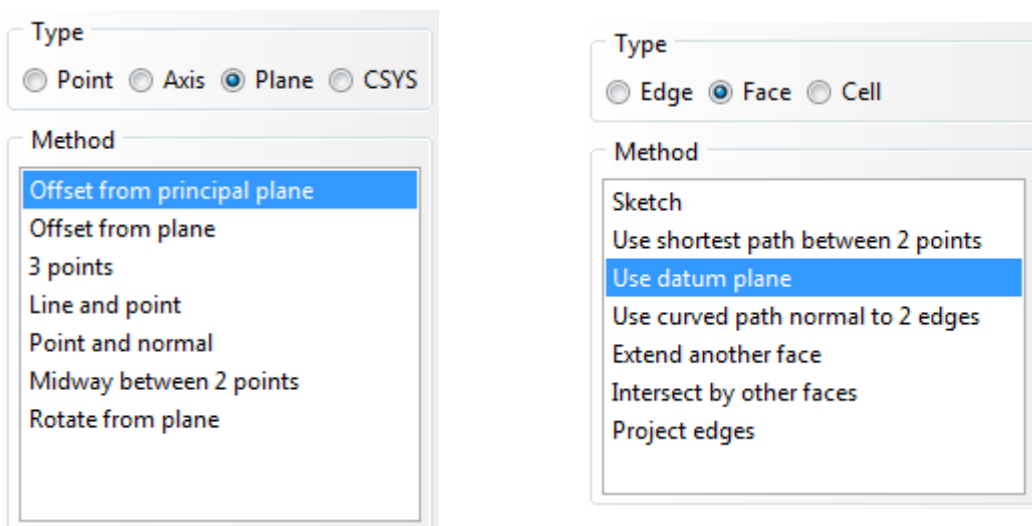


Σχήμα 2.1: Δημιουργία δομικού μέλους (part) της μεταλλικής δεξαμενής



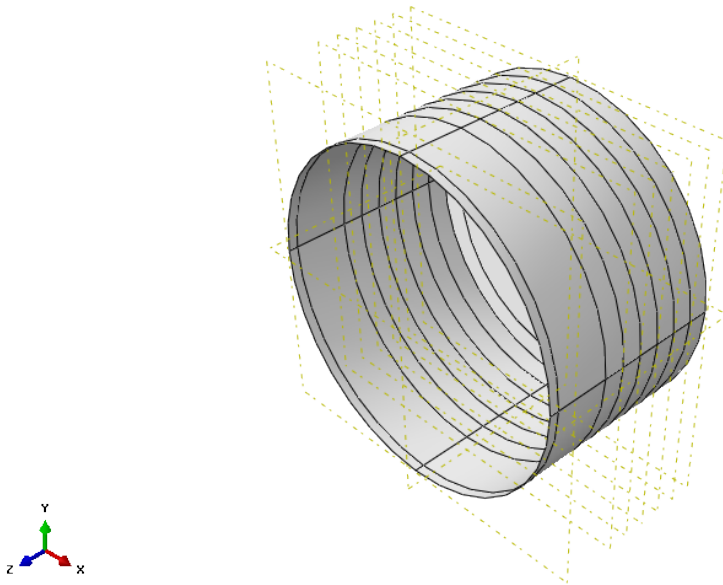
Σχήμα 2.2: Σχεδίαση ακτίνας και ύψους της μεταλλικής δεξαμενής (αριστερά), περιστροφή ευθειών κατά 360° (δεξιά)

Όπως παρουσιάστηκε και στον Πίνακα 1.1 τα τοιχώματα της δεξαμενής αποτελούνται από «δαχτυλίδια» με διαφορετικό πάχος (αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων από την οροφή προς τη βάση της δεξαμενής). Συνεπώς, το κέλυφος της δεξαμενής που δημιουργήθηκε πρέπει να χωριστεί ανάλογα με το πάχος του τοιχώματος στα αντίστοιχα δαχτυλίδια. Αυτή η ενέργεια πραγματοποιήθηκε με τις εντολές datum create και στη συνέχεια partition create που βρίσκονται στα tools.



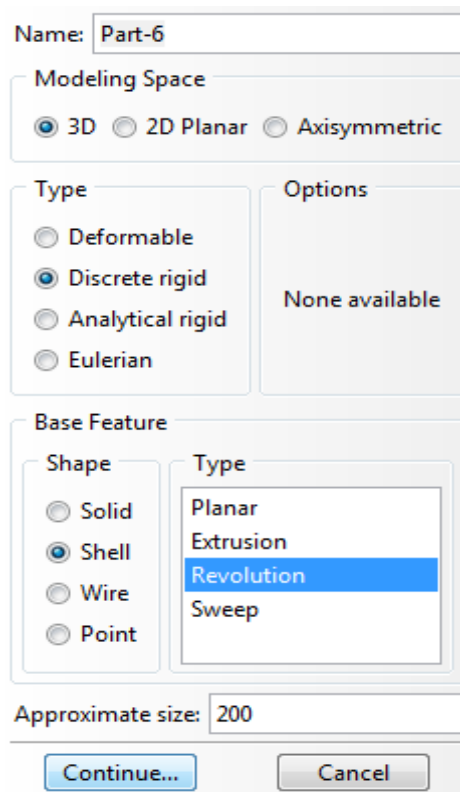
Σχήμα 2.3: Δημιουργία θεωρητικών επιπέδων (datum planes) κατά XY και XZ (αριστερά), ορισμός της γεωμετρίας των δαχτυλιδιών μέσω της διαίρεσης (partition) του κελύφους (δεξιά)

Στη συνέχεια, για την πιο εύκολη επεξεργασία των αποτελεσμάτων, μπορούμε να ορίσουμε τα sets (επιφάνειες, κόμβοι ή ευθείες) που θέλουμε με την εντολή set create που βρίσκεται στα tools.

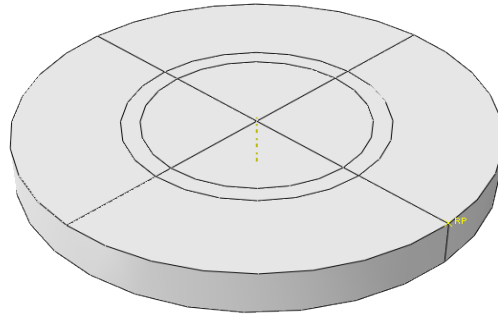


Σχήμα 2.4: Διαίρεση του κελύφους της μεταλλικής δεξαμενής στα αντίστοιχα δαχτυλίδια

Όσον αφορά τη δημιουργία του δεύτερου δομικού μέλους (part) της άκαμπτης πλάκας θεμελίωσης, επιλέγουμε part και στην συνέχεια create και ακολουθούμε την ίδια διαδικασία, με τη μόνη διαφορά ότι ορίζουμε το μέλος ως άκαμπτο (discrete rigid).



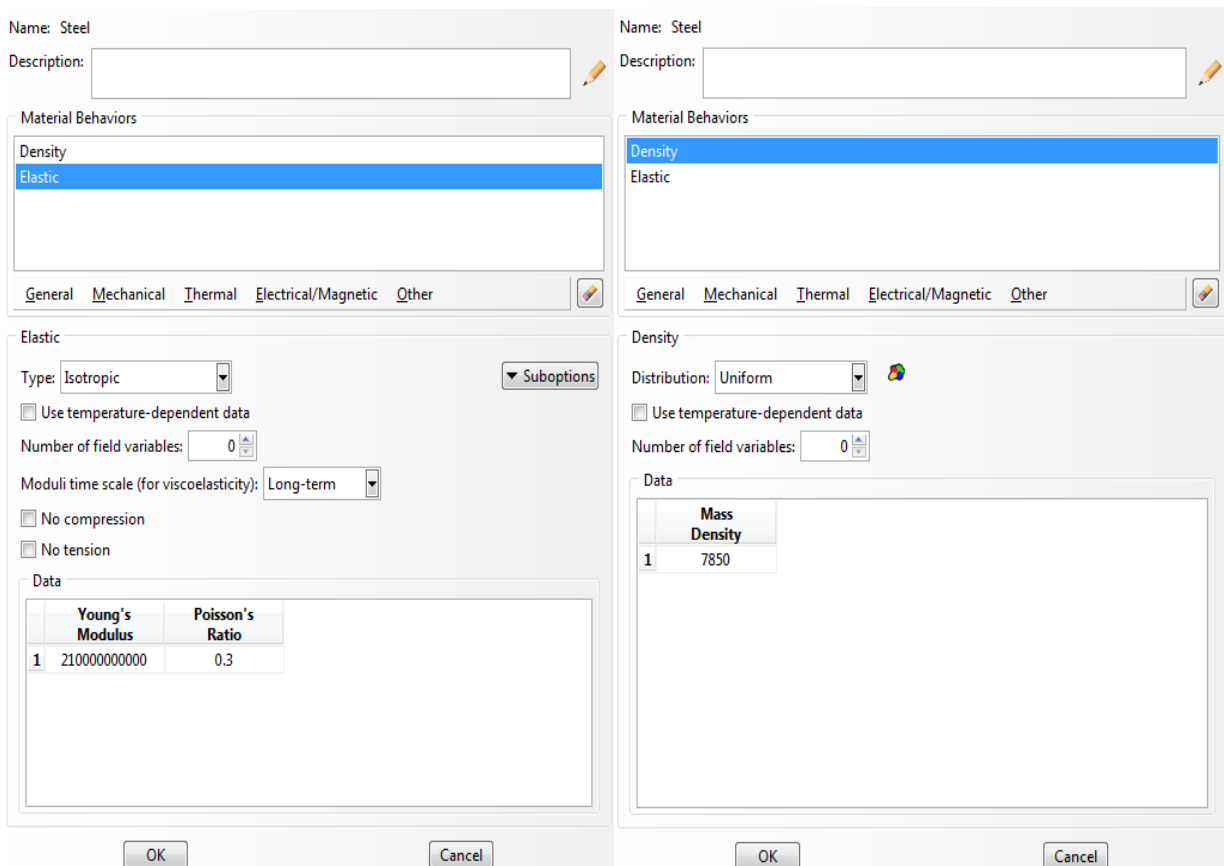
Σχήμα 2.5: Δημιουργία δομικού μέλους (part) της άκαμπτης πλάκας θεμελίωσης



Σχήμα 2.6: Άκαμπτη πλάκας θεμελίωσης

2.3 Υλικό

Το υλικό κατασκευής της μεταλλικής δεξαμενής είναι δομικός χάλυβας S235. Η συμπεριφορά του υλικού της βάσης της δεξαμενής και του περιμετρικού δαχτυλιδιού θεωρήθηκε ως μη γραμμική, ενώ η συμπεριφορά των τοιχωμάτων της θεωρήθηκε ως γραμμική. Αφού επιλέξουμε στο module τη λέξη property, για τον ορισμό της γραμμικής συμπεριφοράς του υλικού επιλέγουμε material και μετά part και στη συνέχεια general και μετά density για την πυκνότητα του χάλυβα και mechanical και μετά elasticity και μετά elastic για το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson.



Σχήμα 2.7: Ορισμός μέτρου ελαστικότητας και λόγου Poisson του γραμμικού υλικού (αριστερά), ορισμός της πυκνότητας του γραμμικού υλικού (δεξιά)

Για τον ορισμό της μη γραμμικότητας υλικού ακολουθούμε την ίδια διαδικασία προσθέτοντας τον μεταλαστικό κλάδο με σημεία τις τάσεις διαρροής και την αντίστοιχη πλαστική παραμόρφωση με τις εντολές mechanical και μετά plasticity και μετά plastic.

Name: SteelNL

Description:

Material Behaviors

Density
Elastic
Plastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Plastic

Hardening: Isotropic ▼ Suboptions

Use strain-rate-dependent data

Use temperature-dependent data

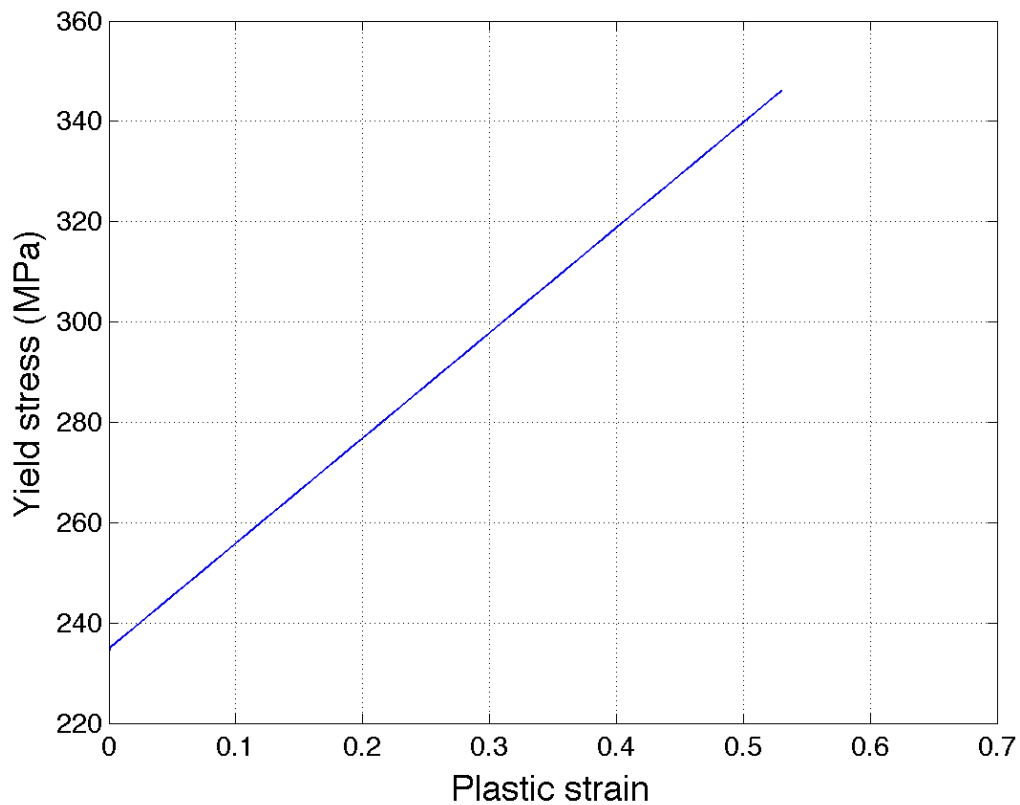
Number of field variables: 0

Data

	Yield Stress	Plastic Strain
1	234000000	0
2	234999582.4	0.001120928
3	236865351.6	0.009999978
4	238964715.8	0.019999958
5	241065057.1	0.029999963
6	243165376.2	0.040000036
7	245264771.8	0.049999958
8	247365095.2	0.059999996
9	249465411.2	0.070000004

OK Cancel

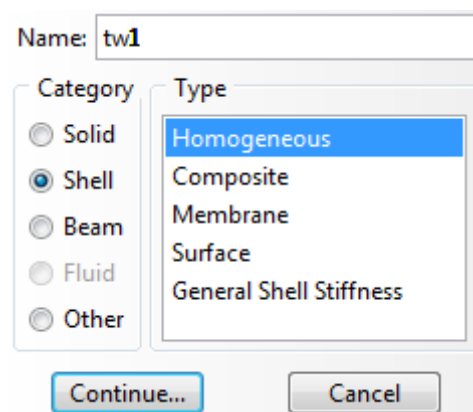
Σχήμα 2.8: Ορισμός του μεταλαστικού κλάδου του μη γραμμικού υλικού



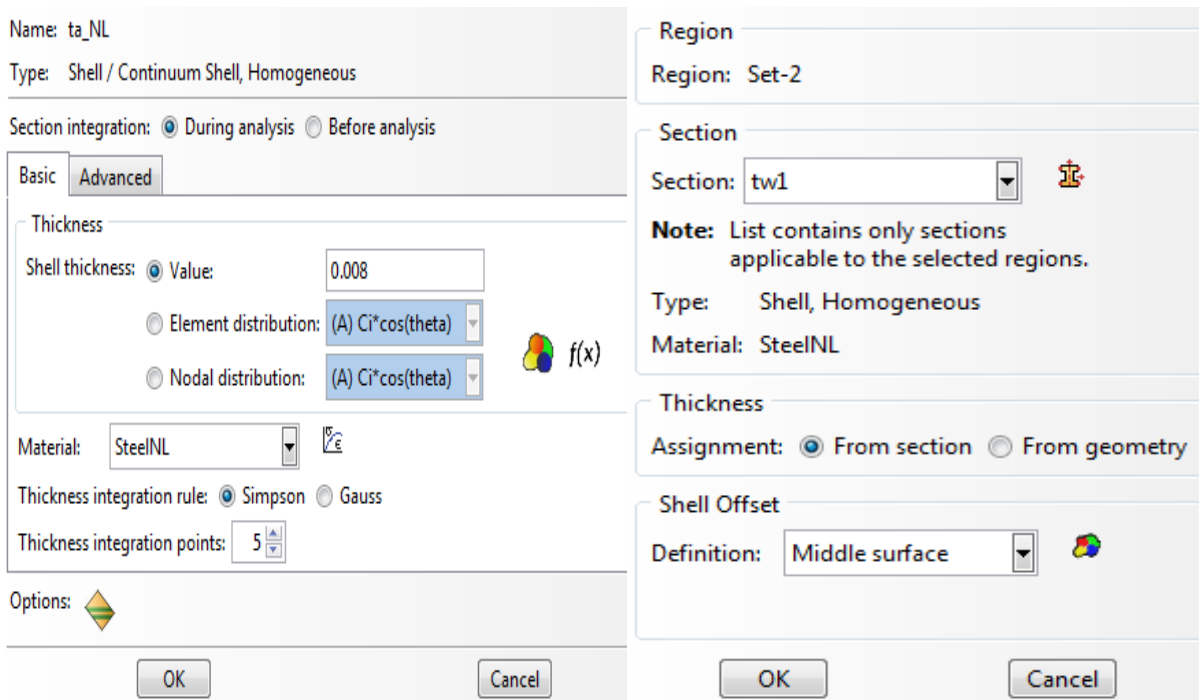
Σχήμα 2.9: Μετελαστική απόκριση του μη γραμμικού υλικού

2.4 Ορισμός διατομών

Για να οριστούν πλήρως τα παραπάνω δομικά μέλη (parts), πρέπει να οριστούν οι διατομές με το πάχος και το υλικό που τους αναλογούν και στη συνέχεια να ανατεθούν αντιστοίχως στις εκάστοτε επιφάνειες (sets) των δαχτυλιδιών. Με τις εντολές section και μετά create και στη συνέχεια assign και μετά section επιτυγχάνεται ο ορισμός των διατομών.



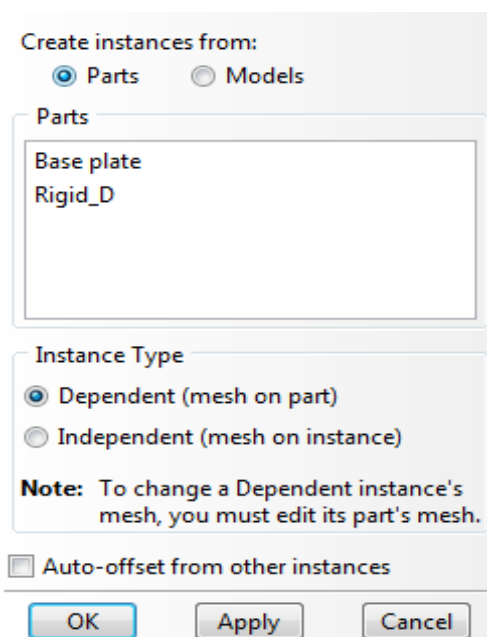
Σχήμα 2.10: Δημιουργία διατομής (section)



Σχήμα 2.11: Ορισμός πάχους και υλικού (αριστερά), ανάθεση (assignment) της διατομής στην αντίστοιχη επιφάνεια (set) των δαχτυλιδιών (δεξιά)

2.5 Συνδεσμολογία

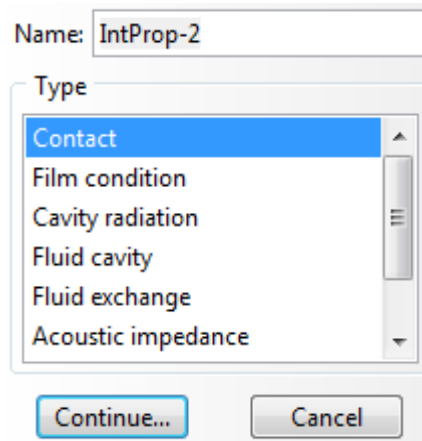
Για την συνδεσμολογία των δύο παραπάνω δομικών μελών πρέπει να ορίσουμε κάθε μέλος ως οντότητα (instance) όπου η διακριτοποίηση θα πραγματοποιηθεί στο ίδιο το μέλος. Επιλέγουμε στο module τη λέξη assembly και με τις εντολές instance και μετά create μπορούμε να ορίσουμε τη συνδεσμολογία των δύο μελών. Σε αυτό το σημείο μπορούν να οριστούν και οι επιφάνειες με την εντολή tools και μετά surface και μετά create οι οποίες είναι απαραίτητες όπως θα διαπιστώσουμε στη συνέχεια.



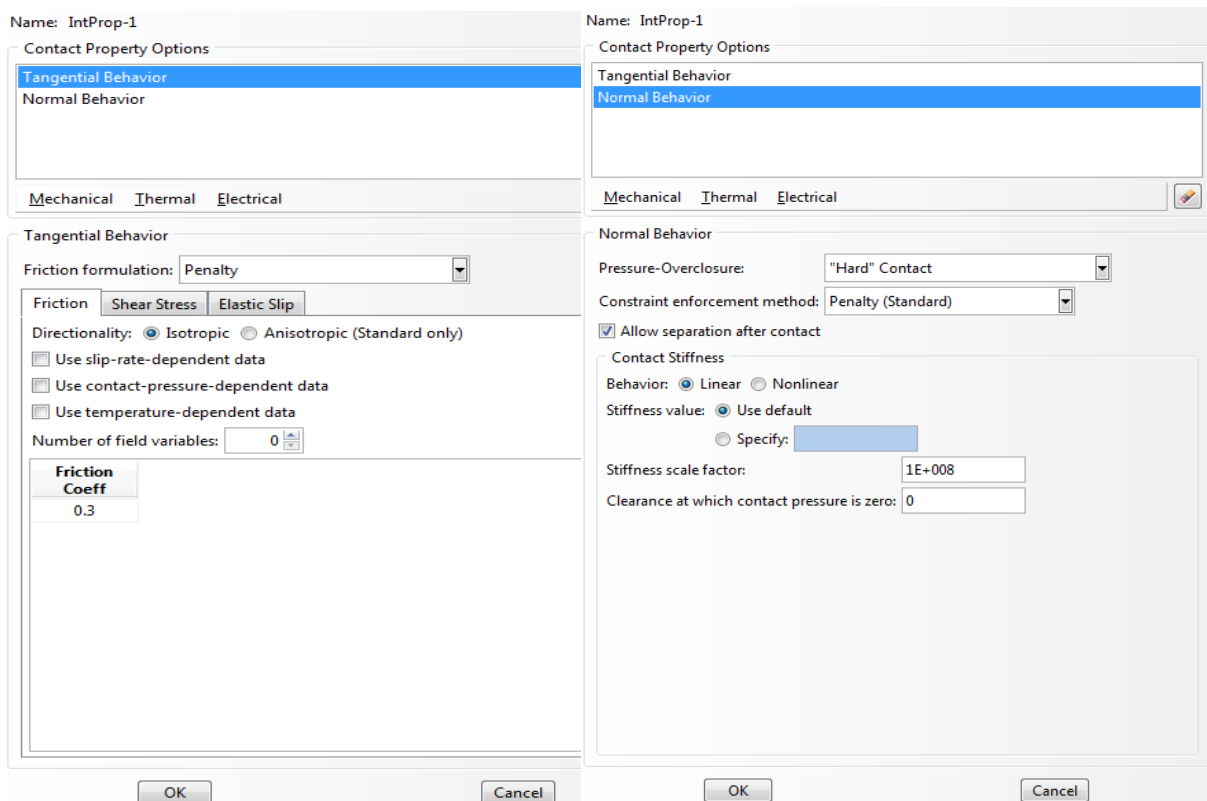
Σχήμα 2.12: Ορισμός του κάθε μέλους ως οντότητα (instance) με σκοπό την συνδεσμολογία τους

2.6 Αλληλεπίδραση δεξαμενής-θεμελίωσης

Η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης δεξαμενής-θεμελίωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Έχει παρατηρηθεί σε προηγούμενες προσομοιώσεις στο λογισμικό Abaqus ότι η απλή επαφή μια κατασκευής με τη θεμελίωσή της πρέπει να δεσμευτεί καθώς υπάρχει η πιθανότητα να ολισθήσει πάνω σε αυτήν. Αρχικά πρέπει να προσδιοριστούν οι ιδιότητες της αλληλεπίδρασης και στη συνέχεια να οριστεί η ίδια η αλληλεπίδραση στις επιφάνειες που επιθυμούμε. Επιλέγουμε στο module τη λέξη interaction και με τις εντολές interaction και μετά property και μετά create ορίζουμε τις ιδιότητες της αλληλεπίδρασης δεξαμενής-θεμελίωσης.

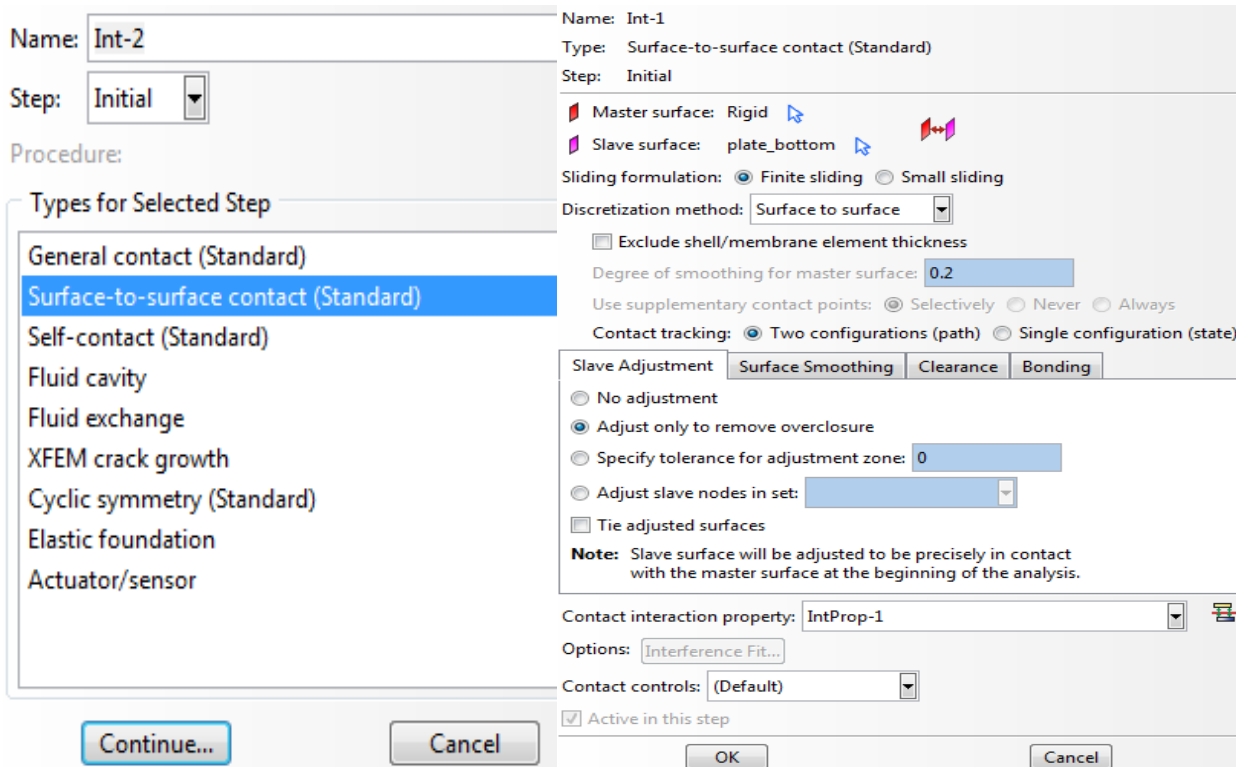


Σχήμα 2.13: Δημιουργία ιδιοτήτων της αλληλεπίδρασης δεξαμενής-θεμελίωσης



Σχήμα 2.14: Ορισμός ιδιοτήτων της αλληλεπίδρασης δεξαμενής-θεμελίωσης

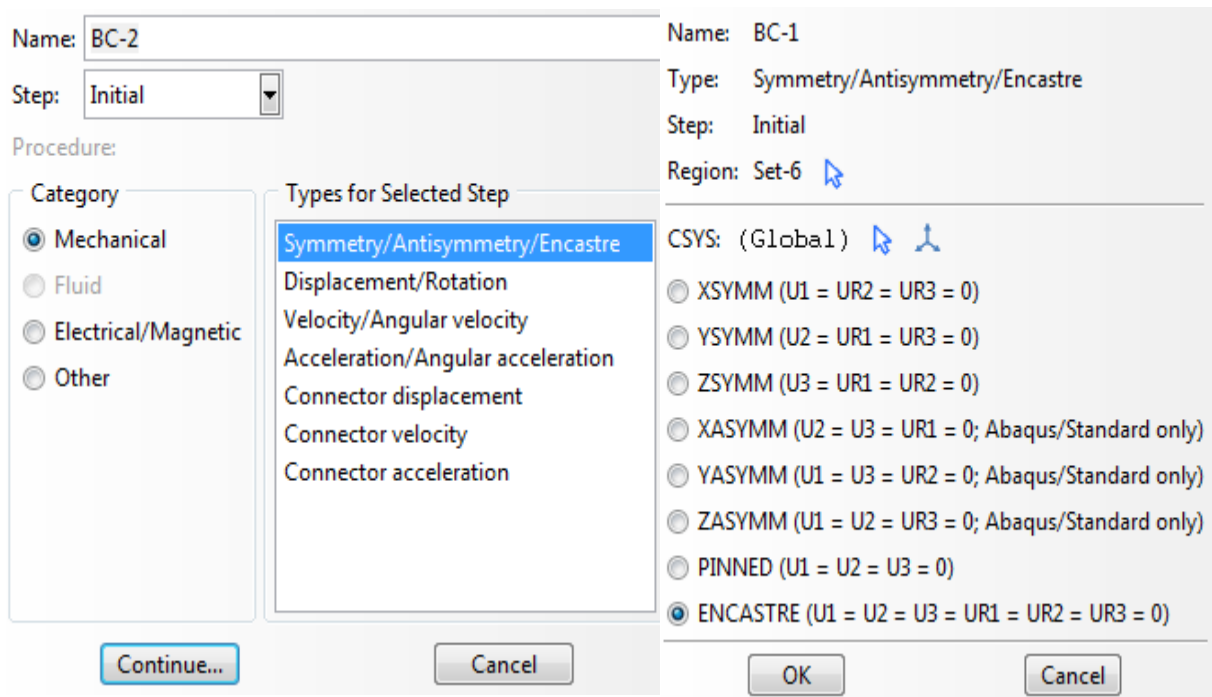
Όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 2.14, με την εντολή mechanical και μετά tangential behavior ορίζουμε τον συντελεστή τριβής και με την εντολή mechanical και μετά normal behavior ορίζουμε το είδος, την μέθοδο και την στιβαρότητα της επαφής. Έπειτα, με τις εντολές interaction και μετά create ορίζουμε την επιθυμητή αλληλεπίδραση καθώς αναθέτουμε στις επιφάνειες της άκαμπτης πλάκας (master surface) και της βάσης της μεταλλικής δεξαμενής (slave surface) τις παραπάνω ορισμένες ιδιότητες.



Σχήμα 2.15: Ανάθεση ιδιοτήτων της αλληλεπίδρασης δεξαμενής-θεμελίωσης

2.7 Συνοριακές συνθήκες

Για την δημιουργία των συνοριακών συνθηκών επιλέγουμε στο module τη λέξη load. Με την εντολή BC και μετά create ορίζουμε τις συνθήκες στήριξης της δεξαμενής οι οποίες προσομοιώνονται ως μια πλήρη πάκτωση, καθώς δεν επιτρέπουμε σε καμία διεύθυνση τις μετακινήσεις και τις στροφές. Η προσομοίωση της πάκτωσης πραγματοποιείται με την επιλογή ενός σημείου-κόμβου στην άκαμπτη πλάκα σκυροδέματος, πάνω στην οποία εδράζεται η μεταλλική δεξαμενή.

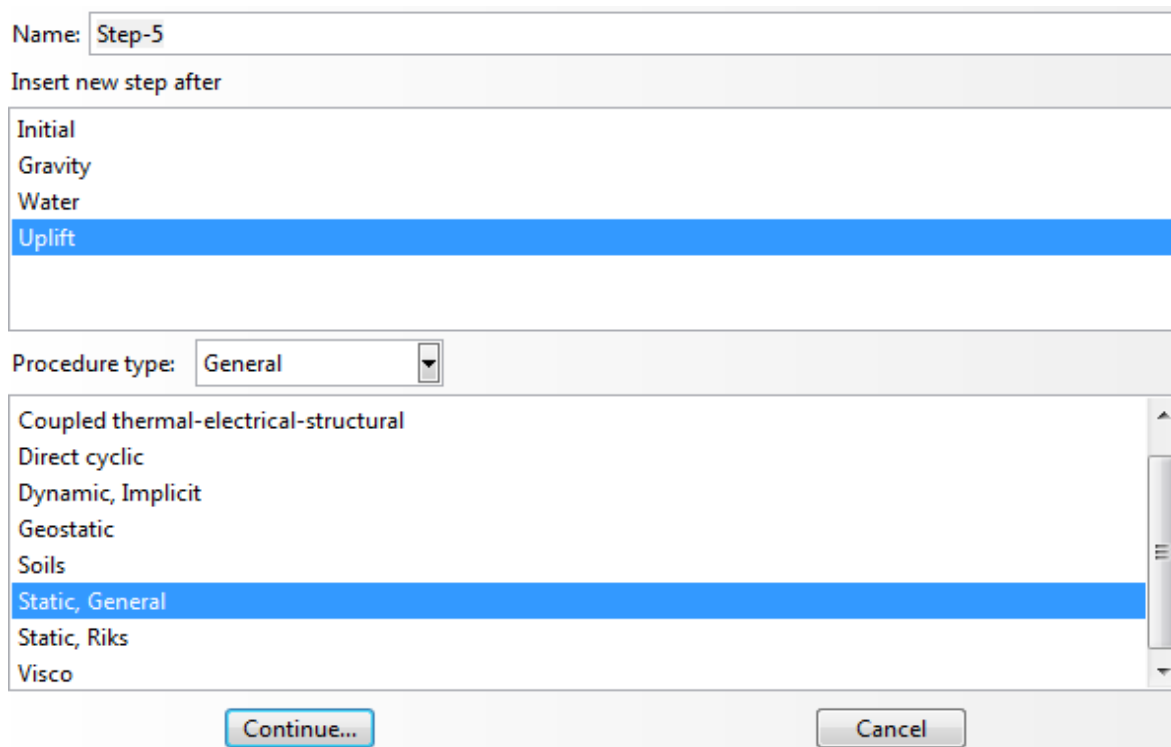


Σχήμα 2.16: Ορισμός συνοριακών συνθηκών

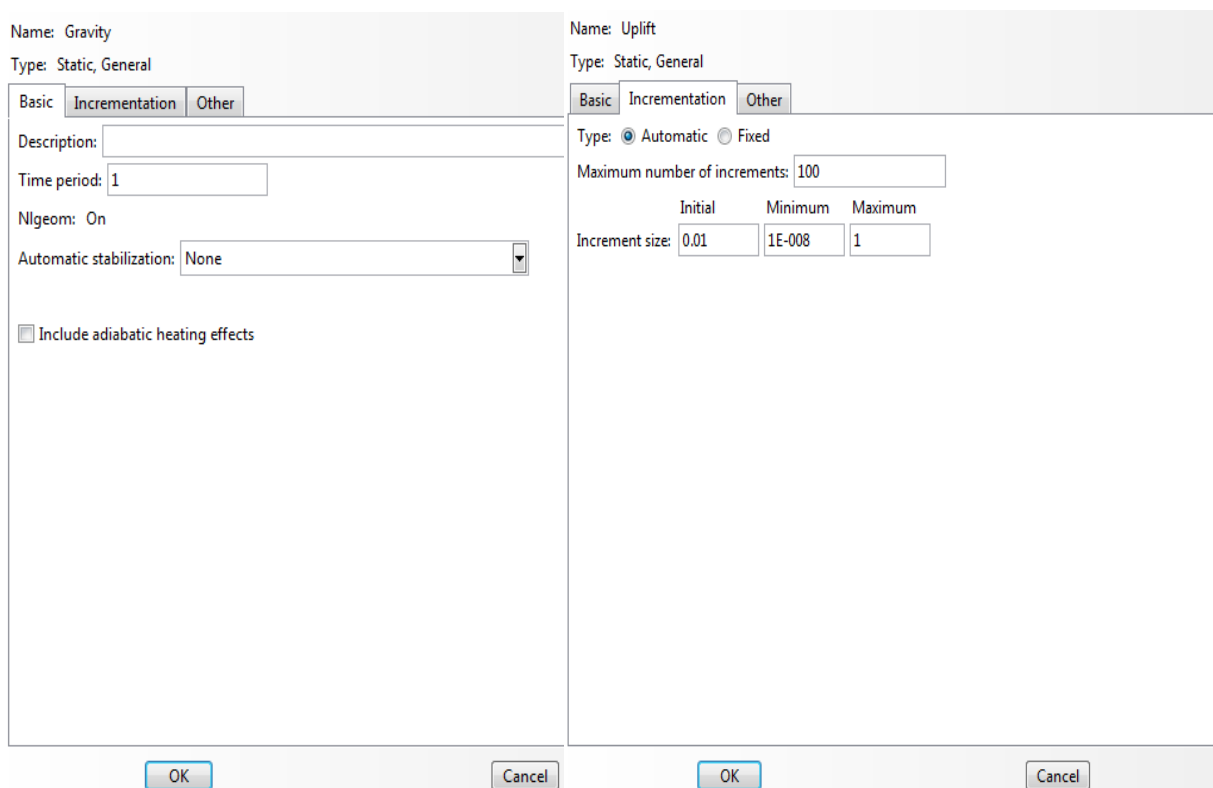
2.8 Επίπεδα φόρτισης

Για την προσομοίωση της φόρτισης της δεξαμενής δημιουργήθηκαν τέσσερα επίπεδα φόρτισης. Το αρχικό επίπεδο φόρτισης (initial step) είναι ορισμένο από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Αυτό το βήμα δεν αντιπροσωπεύει κάποιο επίπεδο φόρτισης της δεξαμενής, αλλά είναι απαραίτητο για το ορισμό του προσομοιώματος, καθώς σε αυτό το βήμα ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες και η αλληλεπίδραση δεξαμενής-θεμελίωσης. Το επόμενο βήμα προσομοιώνει το βάρος της ίδιας της μεταλλικής δεξαμενής λόγω βαρύτητας άνευ υγρού (gravity step). Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι κάθε επόμενο βήμα είναι συμπληρωματικό των προηγούμενων, καθώς όλες οι πληροφορίες των προηγούμενων βημάτων αυτομάτως εμπεριέχονται στο καινούργιο βήμα και απλώς ορίζουμε το νέο επίπεδο φόρτισης. Το τρίτο βήμα προσομοιώνει τις υδροστατικές πιέσεις (water step) και το τέταρτο και τελευταίο βήμα προσομοιώνει τις υδροδυναμικές πιέσεις με μια ισοδύναμη μη γραμμική προσανζητική φόρτιση (pushover), οι οποίες είναι υπεύθυνες για την ανύψωση της δεξαμενής (uplift step).

Για το ορισμό ενός καινούργιου βήματος επιλέγουμε στο module τη λέξη step. Με τις εντολές step και μετά create ορίζουμε το επίπεδο φόρτισης που επιθυμούμε. Ο χρήστης πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός όσον αφορά την μη γραμμικότητα της γεωμετρίας και την προσαύξηση των εσωτερικών βρόγχων επανάληψης (incrementation), για την ορθότητα των αποτελεσμάτων και τον υπολογιστικό φόρτο του προγράμματος αντίστοιχα.

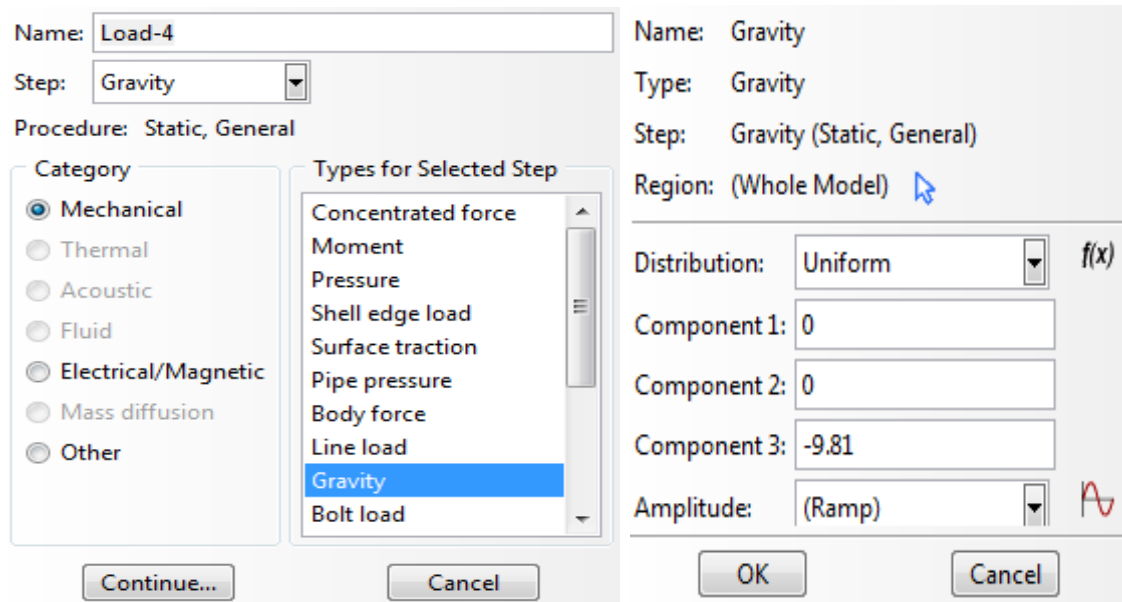


Σχήμα 2.17: Δημιουργία επιπέδου φόρτισης

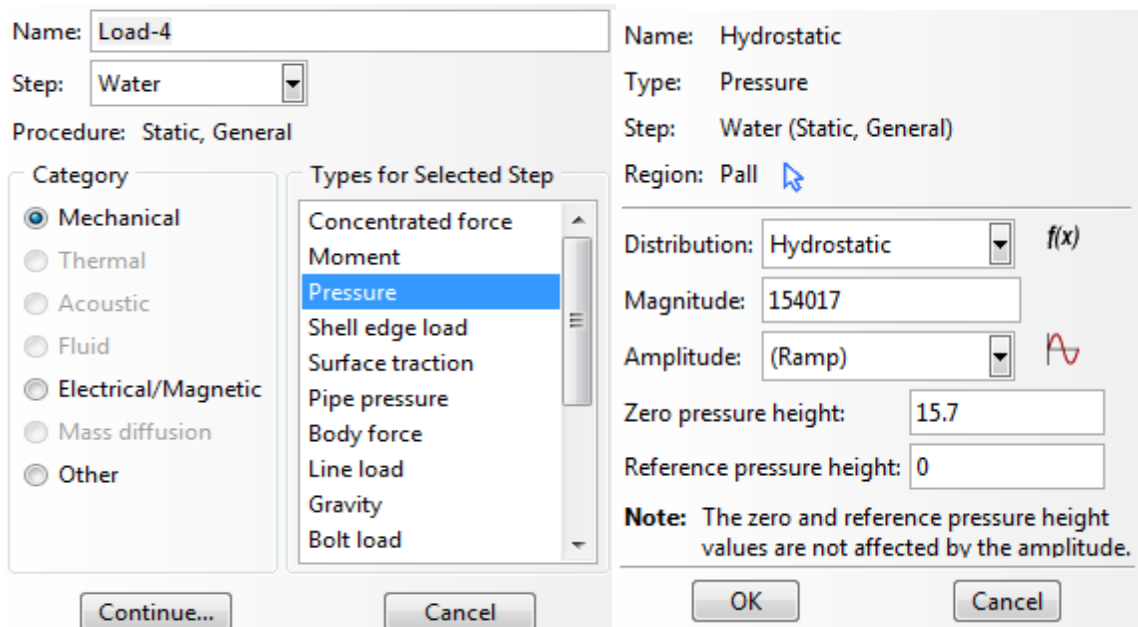


Σχήμα 2.18: Ενεργοποίηση μη γραμμικότητας γεωμετρίας (αριστερά), ορισμός προσαυξητικού βήματος (δεξιά)

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε σε κάθε επίπεδο φόρτισης. Έπειτα για κάθε επίπεδο φόρτισης ορίστηκε η αντίστοιχη φόρτιση που το περιγράφει με τις εντολές load και μετά create.



Σχήμα 2.19: Ορισμός φόρτισης βήματος που προσομοιώνει το βάρος της ίδιας της μεταλλικής δεξαμενής λόγω βαρύτητας άνευ υγρού (gravity step)



Σχήμα 2.20: Ορισμός φόρτισης βήματος που προσομοιώνει τις υδροστατικές πιέσεις (water step)

Στο Σχήμα 2.20 ως ύψος μηδενικής πίεσης ορίστηκε το ύψος της στάθμης του υγρού της δεξαμενής $1 \text{ H} = 15.7 \text{ m}$ (Πίνακας 1.1) ενώ η τιμή του μεγέθους των υδροστατικών πιέσεων ορίστηκε ως $\rho g H$, όπου $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$. Ως επιφάνεια ορίστηκε η επιφάνεια των τοιχωμάτων που είναι σε επαφή με το υγρό της δεξαμενής.

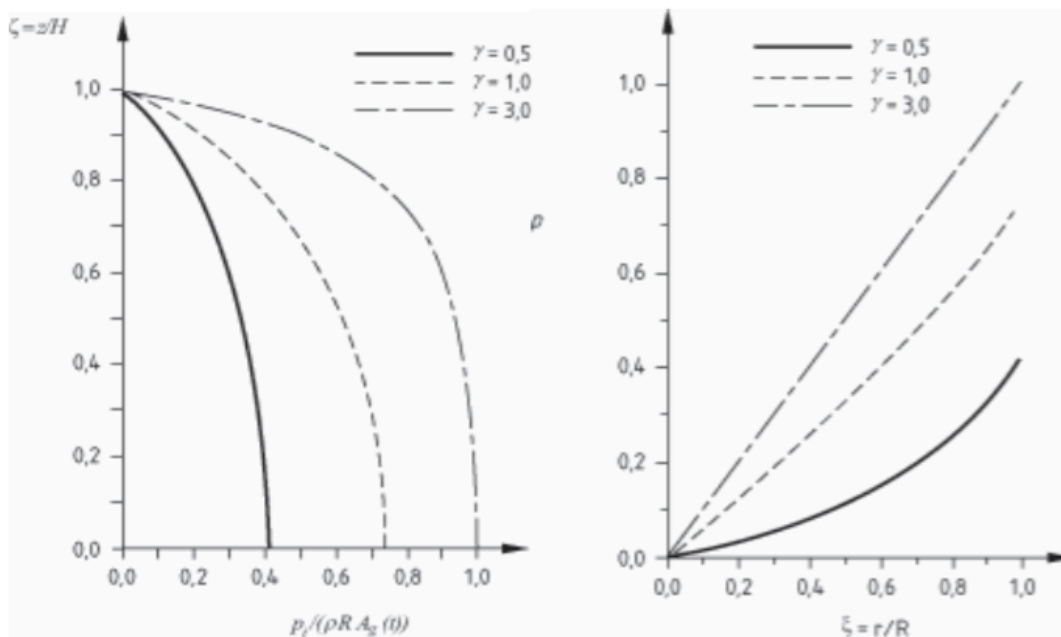
Το τέταρτο και τελευταίο βήμα διαφέρει από τα προηγούμενα επίπεδα φόρτισης καθώς πρέπει να οριστεί η κατανομή της υδροδυναμικής πίεσης λόγω της κίνησης της ωστικής συνιστώσας του υγρού. Ο υπολογισμός των επιπρόσθετων υδροδυναμικών πιέσεων που δημιουργούνται λόγω της σεισμικής διέγερσης περιγράφεται στον Ευρωκώδικα EN 1998-4:2006 σύμφωνα με την Σχέση 2.1.

$$p_i(\xi, \zeta, \theta, t) = C_i(\xi, \zeta) \rho H \cos \theta A_g(t), \quad (2.1)$$

όπου C_i η συνάρτηση κατανομής των υδροδυναμικών πιέσεων καθ' ύψος της δεξαμενής, ρ η πυκνότητα του υγρού αποθήκευσης, H το ύψος της στάθμης του υγρού και $A_g(t)$ η χρονοϊστορία της εδαφικής επιτάχυνσης. Ο πλήρης ορισμός της κατανομής της πίεσης επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων: r, z, θ με κέντρο το κέντρο της βάσης της δεξαμενής. Με αυτόν τον τρόπο ορίζονται οι σχετικές συντεταγμένες $\xi = r/R$ και $\zeta = z/H$. Η συνάρτηση κατανομής C_i ορίζεται σύμφωνα με την Σχέση 2.2.

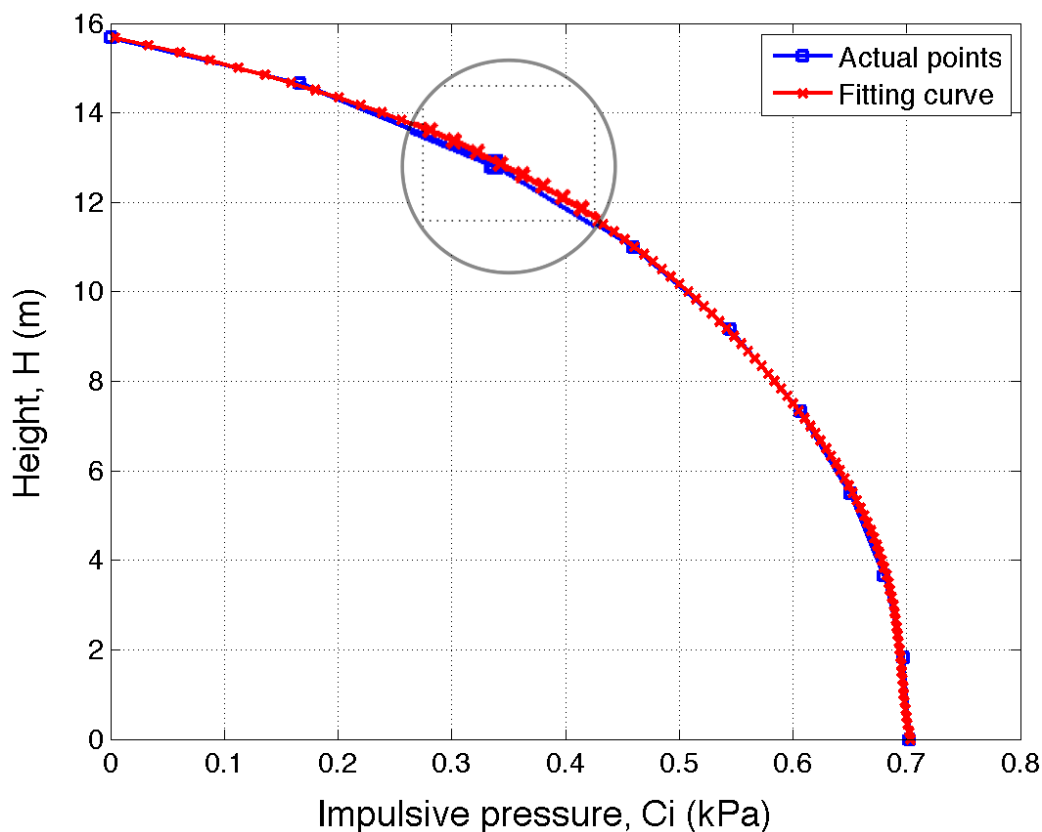
$$C_i(\xi, \zeta) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{I_1'(v_n/\gamma) v_n^2} \cos(v_n \zeta) I_1\left(\frac{v_n}{\gamma} \xi\right), \quad (2.2)$$

όπου $v_n = \frac{2n+1}{2} \pi$, $\gamma = H/R$, $I_1(\cdot)$ και $I_1'(\cdot)$ η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτης τάξης και η παράγωγός της αντίστοιχα.



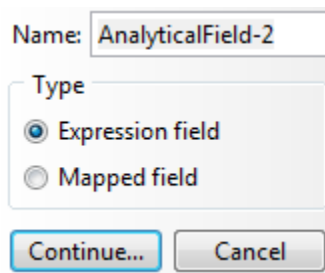
Σχήμα 2.21: Μεταβολή της υδροδυναμικής πίεσης (κανονικοποιημένη ως προς $\rho R A_g$) λόγω της κίνησης της ωστικής συνιστώσας του υγρού για τρεις τιμές του γ . Μεταβολή καθ' ύψος της δεξαμενής (αριστερά), ακτινική μεταβολή στη βάση της δεξαμενής (δεξιά), EN 1998-4:2006

Ωστόσο, η Σχέση 2.1 αντιπροσωπεύει μόνο τις περιπτώσεις των άκαμπτων δεξαμενών, αγκυρωμένων σε άκαμπτη βάση θεμελίωσης. Οι μη αγκυρωμένες δεξαμενές καθιστούν το πρόβλημα της προσομοίωσης των υδροδυναμικών πιέσεων ακόμα πιο περίπλοκο λόγω της αναμενόμενης ανύψωσης και συνεπώς είναι αναγκαία κάποια προσεγγιστική λύση. Η προσέγγιση του άπειρου αθροίσματος της συνάρτησης κατανομής C_i πραγματοποιήθηκε για κάθε δεξαμενή για τις 100 πρώτες ιδιομορφές της. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.22 υπολογίστηκε για τα σημεία αρχής και τέλους του κάθε δαχτυλιδιού η πραγματική τιμή C_i (actual points), όπως προκύπτει σύμφωνα με τη Σχέση 2.2, και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μια προσέγγιση αυτών των σημείων με ένα πολυώνυμο πέμπτου βαθμού (fitting curve).

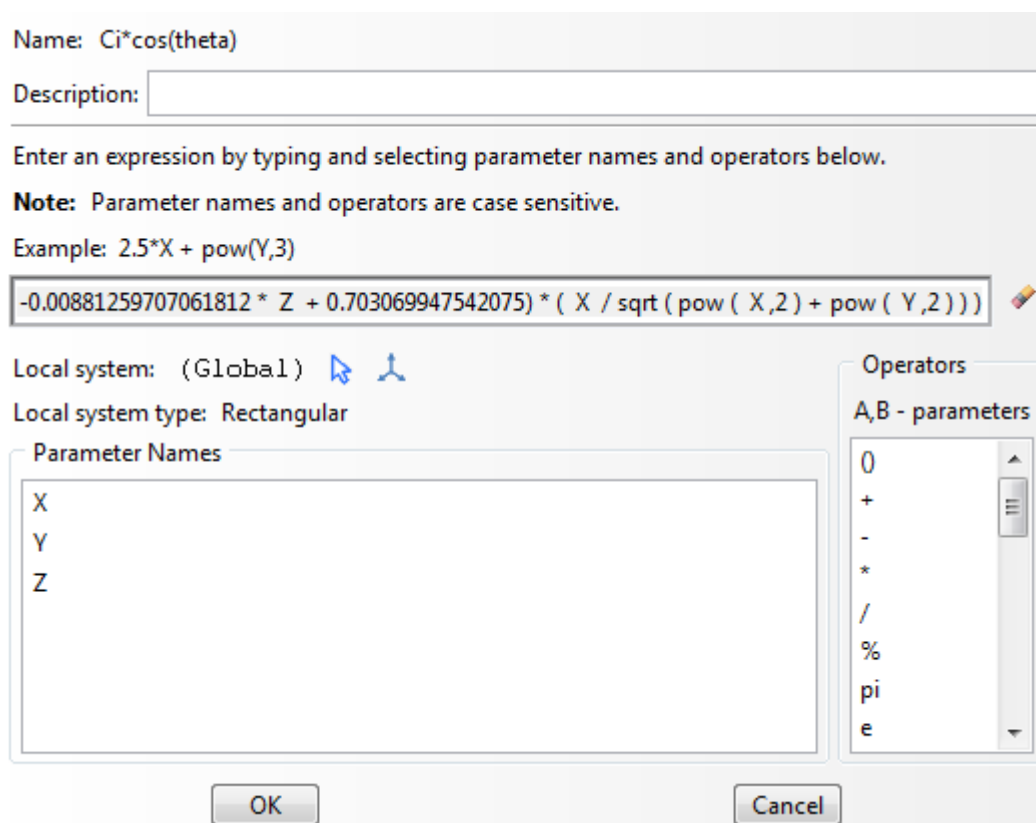


Σχήμα 2.22: Μεταβολή της συνάρτησης κατανομής των υδροδυναμικών πιέσεων C_i καθ' ύψος της δεξαμενής 1 με κυκλική τοπική μεγέθυνση

Με τις εντολές tools και μετά analytical fields και μετά create επιτυγχάνεται η εισαγωγή του πολυωνύμου στο λογισμικό των πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.



Σχήμα 2.23: Δημιουργία αναλυτικής συνάρτησης κατανομής των υδροδυναμικών πιέσεων $C_i(\zeta, \varsigma)\cos\theta$



Σχήμα 2.24: Ορισμός αναλυτικής συνάρτησης κατανομής των υδροδυναμικών πιέσεων $C_i(\zeta, \varsigma)\cos\theta$

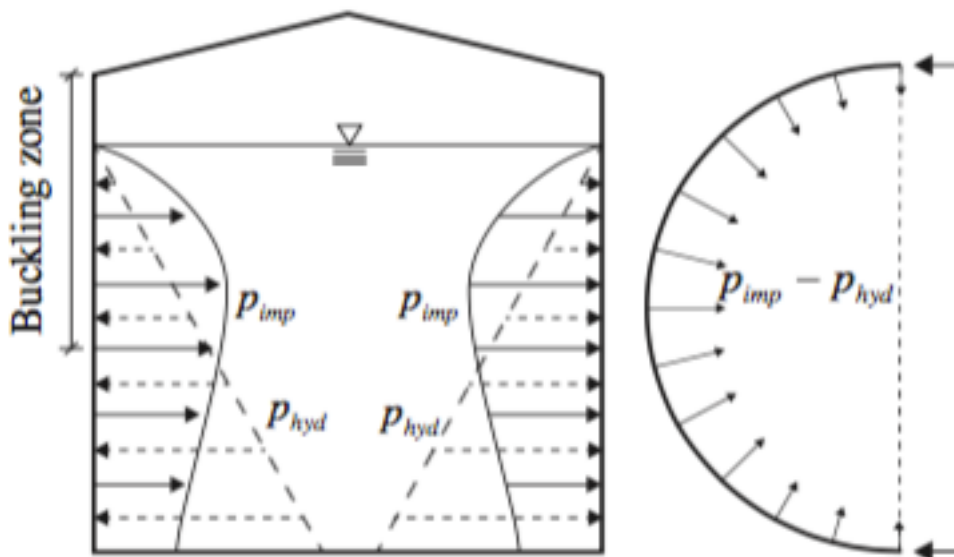
Στην συνέχεια, ορίζεται η ισοδύναμη φόρτιση των υδροδυναμικών πιέσεων με τις εντολές load και μετά create, επιλέγοντας ως επιφάνεια την επιφάνεια όλων των τοιχωμάτων της μεταλλικής δεξαμενής και ως κατανομή την ορισμένη αναλυτική συνάρτηση.

Name: Impulsive
 Type: Pressure
 Step: Uplift (Static, General)
 Region: Pi

Distribution: (A) $C_i \cdot \cos(\theta)$ $f(x)$
 Magnitude: 154017
 Amplitude: (Ramp)

OK Cancel

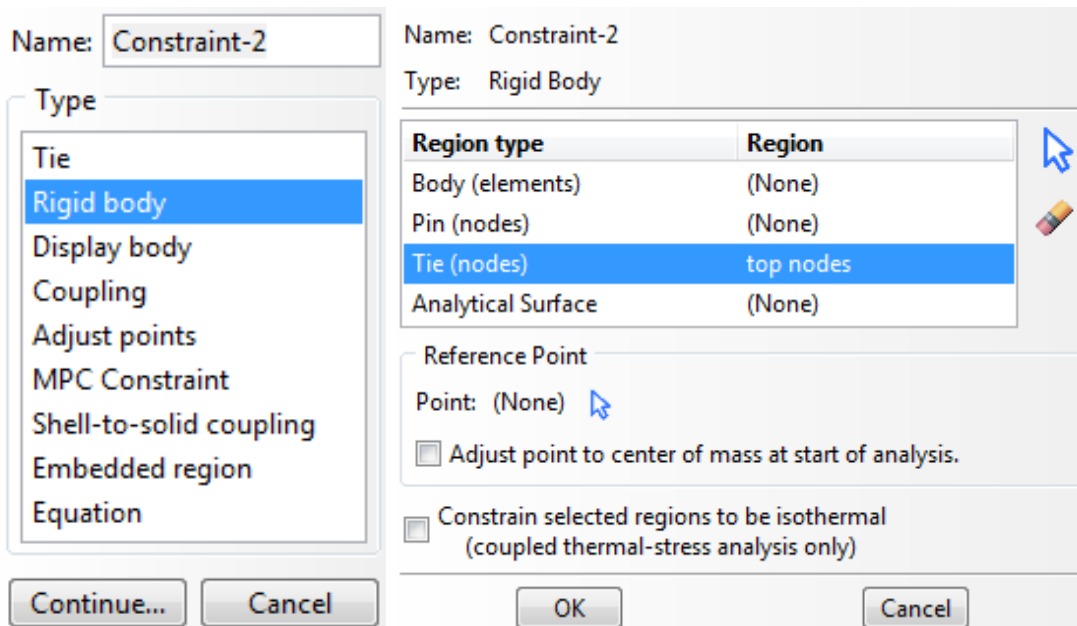
Σχήμα 2.25: Ορισμός φόρτισης βήματος που προσομοιώνει τις υδροδυναμικές πιέσεις (uplift step)



Σχήμα 2.26: Κατανομές υδροδυναμικών (p_{imp}) και υδροστατικών (p_{hyd}) πιέσεων, Burrati & Tavano (2013)

2.9 Διάφραγμα

Για την ορθή προσομοίωση της συμπεριφοράς των δεξαμενών με κλειστή οροφή είναι απαραίτητος ο ορισμός διαφράγματος. Οι δεξαμενές αυτές λόγω της οροφής τους παρουσιάζουν διαφραγματική λειτουργία σε αντίθεση με τις δεξαμενές με πλωτή οροφή. Αφού επιλέξουμε στο module τη λέξη interaction, με τις εντολές constraint και μετά create και την επιλογή των ανωτέρων κόμβων της δεξαμενής ορίζουμε το διάφραγμα της μεταλλικής δεξαμενής με κλειστή οροφή.

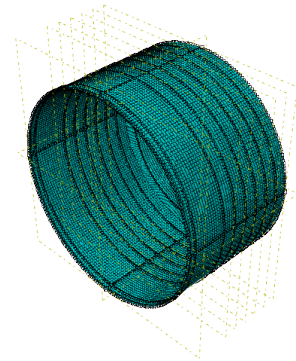
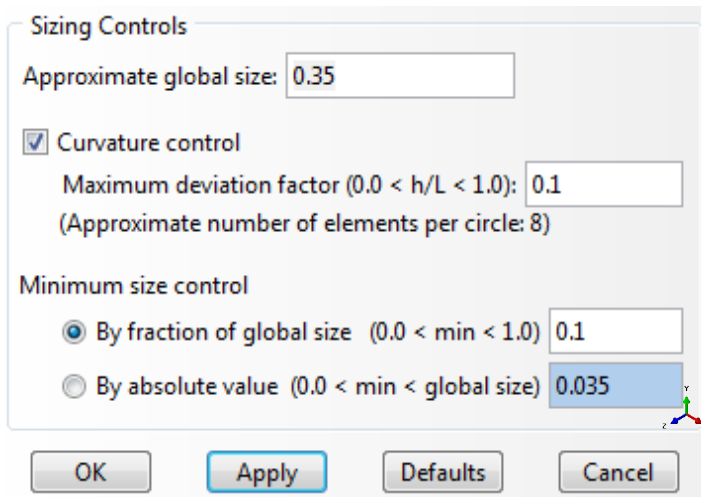


Σχήμα 2.27: Δημιουργία διαφράγματος δεξαμενών με κλειστή οροφή

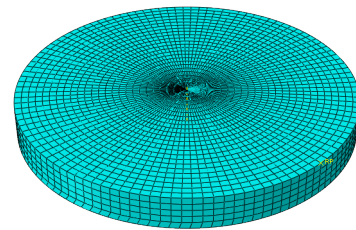
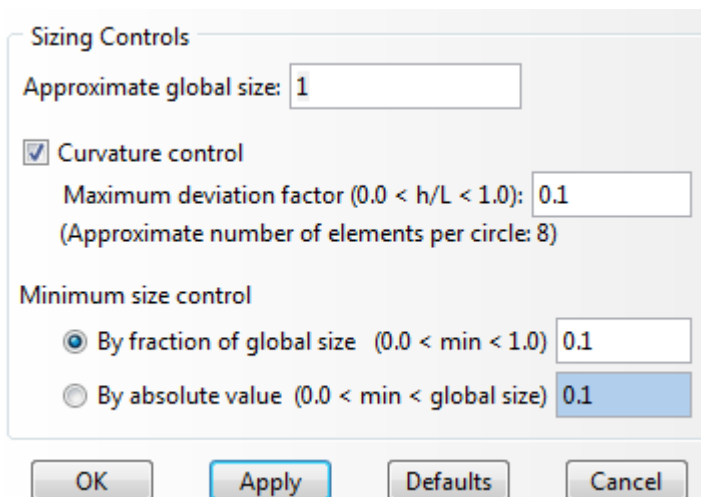
2.10 Διακριτοποίηση

Η διακριτοποίηση του προσομοιώματος αποτελεί ένα από τα βασικότερα, αν όχι το βασικότερο, κεφάλαια στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Μια αραιή διακριτοποίηση μπορεί να επηρεάσει την ορθότητα των αποτελεσμάτων, ενώ αντίθετα μια πυκνή διακριτοποίηση μπορεί να επηρεάσει τον υπολογιστικό φόρτο του προγράμματος. Επιπλέον δεν πρέπει να πραγματοποιείται άκριτα καθολική διακριτοποίηση του προσομοιώματος καθώς μπορούν να υπάρχουν περιοχές στις οποίες να απαιτείται τοπική πύκνωση. Μια τέτοια περιοχή είναι η βάση της δεξαμενής η οποία παρουσιάζει έντονη μη γραμμική συμπεριφορά κατά την ανύψωσή της. Ένας άλλος ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για μια αξιόπιστη διακριτοποίηση είναι συναρμογή των διάφορων πλεγμάτων που έχουν οριστεί. Ο λόγος των πλευρών ενός τετραπλευρικού πεπερασμένου στοιχείου (quad) πρέπει να κυμαίνεται κοντά στο 1. Είναι επιθυμητό όταν παρατηρούνται μακρόστενα πεπερασμένα στοιχεία με έντονες γωνίες να επαναλαμβάνεται η διακριτοποίηση έστω και τοπικά.

Πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι δεν υπάρχει μία μοναδική ορθή διακριτοποίηση καθώς διαφορετικά πλέγματα μπορούν να οδηγήσουν σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για την αξιόπιστη διακριτοποίηση ενός προσομοιώματος μπορούν να ληφθούν υπόψη κάποιες πρακτικές οδηγίες όπως η τιμή του λόγου των πλευρών ενός τετραπλευρικού πεπερασμένου στοιχείου (aspect ratio) αλλά κυρίως αυτή επαφίεται στην ικανότητα, την εμπειρία και την παρατηρητικότητα του χρήστη. Ο χρήστης οφείλει να ακολουθήσει μια κοπιώδη επαναληπτική διαδικασία για την βελτιστοποίηση της διακριτοποίησης του προσομοιώματος. Για τη διακριτοποίηση της δεξαμενής στο λογισμικό Abaqus αφού επιλέξουμε στο module τη λέξη mesh, με τις εντολές seed και μετά part διακριτοποιούμε το κάθε δομικό μέλος (part) ξεχωριστά. Μετά από πολλές απόπειρες τοπικής πύκνωσης και διαφορετικών πλεγμάτων η διακριτοποίηση πραγματοποιήθηκε όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.28 και 2.29. Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου S4R.



Σχήμα 2.28: Διακριτοποίηση μεταλλικής δεξαμενής



Σχήμα 2.29: Διακριτοποίηση άκαμπτης πλάκας σκυροδέματος

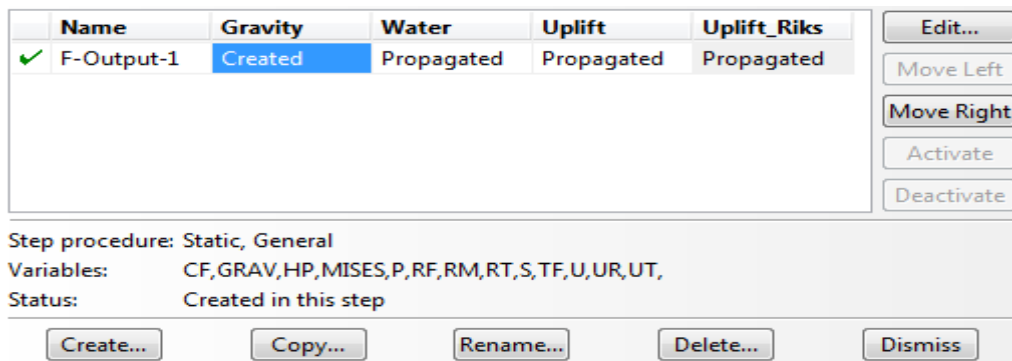
Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι σε αντίθεση με το δομικό μέλος της άκαμπτης πλάκας σκυροδέματος, η διακριτοποίηση της μεταλλικής δεξαμενής δεν πραγματοποιήθηκε καθολικά. Όπως επισημάνθηκε και παραπάνω, επιλέχτηκε ένα πιο πυκνό πλέγμα στην περιοχή της βάσης της δεξαμενής σε σύγκριση με το αντίστοιχο πλέγμα των τοιχωμάτων της. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι διακριτοποιήσεις και των τεσσάρων δεξαμενών. Η διακριτοποίηση της άκαμπτης πλάκας σκυροδέματος επιτεύχθηκε για όλες τις δεξαμενές σύμφωνα με το Σχήμα 2.29.

Πίνακας 2.1: Τρόπος διακριτοποίησης των τεσσάρων δεξαμενών

Δεξαμενή	Τοιχώματα	Πλάκα βάσης	Περιμετρικό δαχτυλίδι
1	0.35	0.15	0.20
2	0.60	0.15	0.25
3	0.15	0.10	0.10
4	0.25	0.15	0.15

2.11 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Για την μείωση του υπολογιστικού φόρτου και των ενδείξεων σφαλμάτων είναι αναγκαίο να εξαχθούν μόνο τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν. Επιλέγοντας στο module τη λέξη step, είναι δυνατόν να καθοριστούν τα αποτελέσματα που θα υπολογίσει το πρόγραμμα μέσω των εντολών output και μετά field output requests και μετά manager. Τροποποιώντας (edit) τα αποτελέσματα που επιθυμούμε στο βήμα «gravity», εξάγονται τα ίδια αποτελέσματα και στα υπόλοιπα επίπεδα φόρτισης. Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορούν κυρίως τις τάσεις, τις μετακινήσεις και τις δυνάμεις αντίδρασης.



Σχήμα 2.30: Τροποποίηση των εξαχθέντων αποτελεσμάτων

Name: F-Output-1
Step: Gravity
Procedure: Static, General

Domain: Exterior only

Frequency: n:

Timing:

Output Variables

Select from list below Preselected defaults All Edit variables

CF, GRAV, HP, MISES, P, RF, RM, RT, S, TF, U, UR, UT,

- Stresses
- Strains
- Displacement/Velocity/Acceleration
- Forces/Reactions
- Contact
- Energy
- Failure/Fracture
- Thermal

Note: Some error indicators are not available when Domain is Whole Model or Interac

Output for rebar

Output at shell, beam, and layered section points:

Use defaults Specify:

Include local coordinate directions when available

Σχήμα 2.31: Ορισμός των επιθυμητών εξαχθέντων αποτελεσμάτων

Τέλος, για την έναρξη της ανάλυσης του προσομοιώματος επιλέγουμε στο module τη λέξη job και με τις εντολές job και μετά create και ορίζουμε τις ιδιότητές της.

Name:

Source:


Σχήμα 2.32: Δημιουργία της ανάλυσης του προσομοιώματος

Name: Tank1_NR
Model: fine mesh 2
Analysis product: Abaqus/Standard
Description:

Submission **General** Memory Parallelization Precision

Job Type
 Full analysis
 Recover (Explicit)
 Restart

Run Mode
 Background Queue: Host name:
Type:

Submit Time
 Immediately
 Wait: hrs. min.
 At: 

Σχήμα 2.33: Ορισμός των ιδιοτήτων της ανάλυσης του προσομοιώματος

Κάνουμε υποβολή (submit) την ανάλυση και αναμένουμε την εξαγωγή των αποτελεσμάτων...

3 Αριθμητική ανάλυση δεξαμενών με στοιχεία κελύφους

3.1 Εισαγωγή

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων απαιτούνται πολλές ώρες αναμονής καθώς η προσομοίωση των δεξαμενών παρ' όλες τις παραδοχές-απλοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν παραμένει σύνθετη και υπολογιστικά πολύ χρονοβόρα. Κάθε μία από τις τέσσερις δεξαμενές έπρεπε να υπολογιστεί εις διπλούν, καθώς ο πρώτος στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν η σύγκριση των δεξαμενών με πλωτή οροφή με τις αντίστοιχες δεξαμενές με κλειστή οροφή. Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον το πρόγραμμα Matlab. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δεξαμενών, η σημασία των διαγραμμάτων που επιλέχτηκαν και η ερμηνεία τους και τέλος τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν για τη συμπεριφορά των τεσσάρων μη αγκυρωμένων, μεταλλικών δεξαμενών που επιλέχτηκαν.

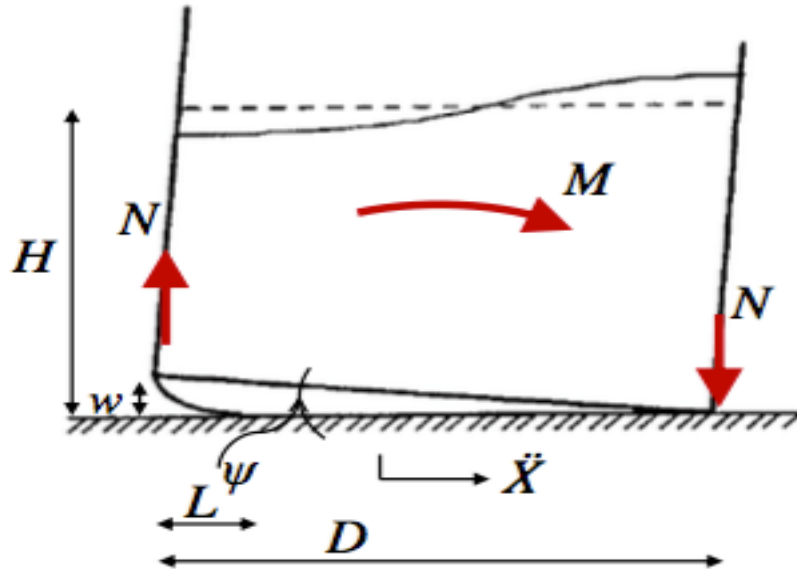
3.2 Διερεύνηση ανύψωσης

3.2.1 Πρόβλημα μήκους αποχωρισμού

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζουν οι μη αγκυρωμένες δεξαμενές είναι η ανύψωση της βάσης τους. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πολύ συχνά κατά της διάρκεια μιας έντονης σεισμικής διέγερσης και χρήζει ιδιαίτερης προσοχής καθώς μπορεί να προκαλέσει άκρως δυσμενείς επιπτώσεις, όπως έχει προαναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Η ανύψωση των δεξαμενών θα εξεταστεί συναρτήσει των παρακάτω μεγεθών:

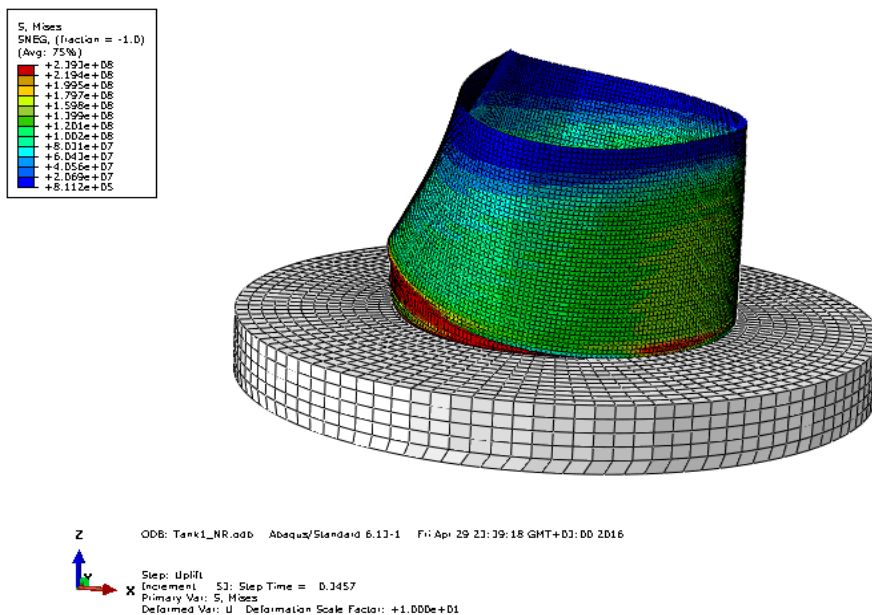
- I. Ανύψωση συναρτήσει μήκους αποχωρισμού
- II. Ανύψωση συναρτήσει πλαστικής στροφής
- III. Ανύψωση συναρτήσει οριζόντιων συντεταγμένων X

Το μήκος αποχωρισμού είναι ένα μέγεθος που μας υποδεικνύει ποια θα είναι ποιοτικά η παραμόρφωση της βάσης της δεξαμενής κατά την στιγμή της μέγιστης ανύψωσης. Ορίζεται ως το μήκος της βάσης της δεξαμενής, σε οριζόντια προβολή, το οποίο δεν είναι σε επαφή με την άκαμπτη πλάκα σκυροδέματος κατά την διάρκεια της ανύψωσης. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται μια απλοποιημένη απεικόνιση των βασικών παραμέτρων της ανύψωσης, ορίζοντας με αυτόν τον τρόπο το μήκος αποχωρισμού (separation length) και τη στρόφη, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο επόμενο υποκεφάλαιο.



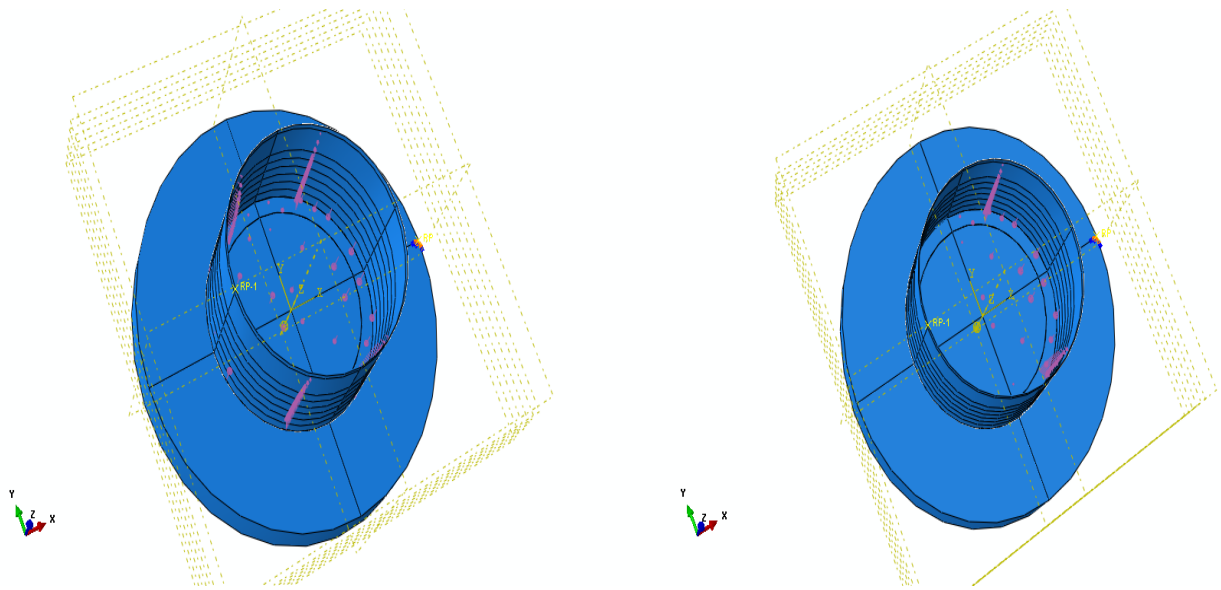
Σχήμα 3.1: Ορισμός του μήκους αποχωρισμού (L) και στροφής (ψ) για μέγιστη ανύψωση (w), Vathi et al (2013)

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της κάθε δεξαμενής πρέπει να γίνει αναφορά σε ένα πρόβλημα που παρουσιάστηκε και επηρέασε την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Το υδροδυναμικό φορτίο είχε ασκηθεί σε όλη την επιφάνεια των τοιχωμάτων και παρατηρήθηκε από την παραμόρφωση του άνω τμήματος των δεξαμενών ότι το υδροδυναμικό φορτίο έπρεπε να μηδενίζεται σε ορισμένα τμήματα κατά την ανύψωση των δεξαμενών. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2, ενδεικτικά για την δεξαμενή 1 με πλωτή οροφή, το υδροδυναμικό φορτίο ήταν υπεύθυνο για τον ελκυσμό της αριστερής πλευράς των δεξαμενών, με αποτέλεσμα να μην προσομοιώνεται ορθώς η κίνηση του ρευστού.



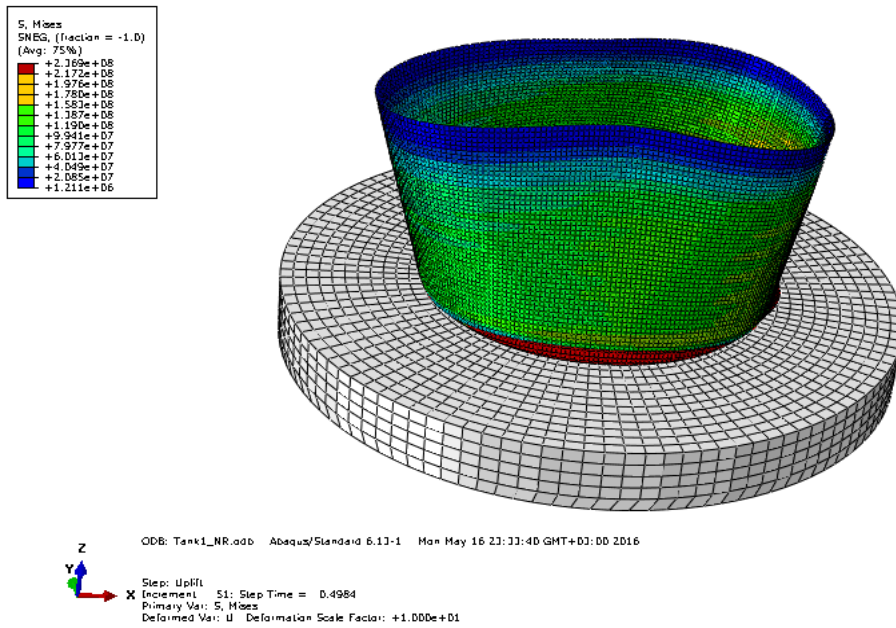
Σχήμα 3.2: Παραμόρφωση δεξαμενής 1 με πλωτή οροφή (αρχική προσέγγιση)

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος θεωρήθηκε ότι το υδροδυναμικό φορτίο ασκείται μόνο στην μισή επιφάνεια των τοιχωμάτων.



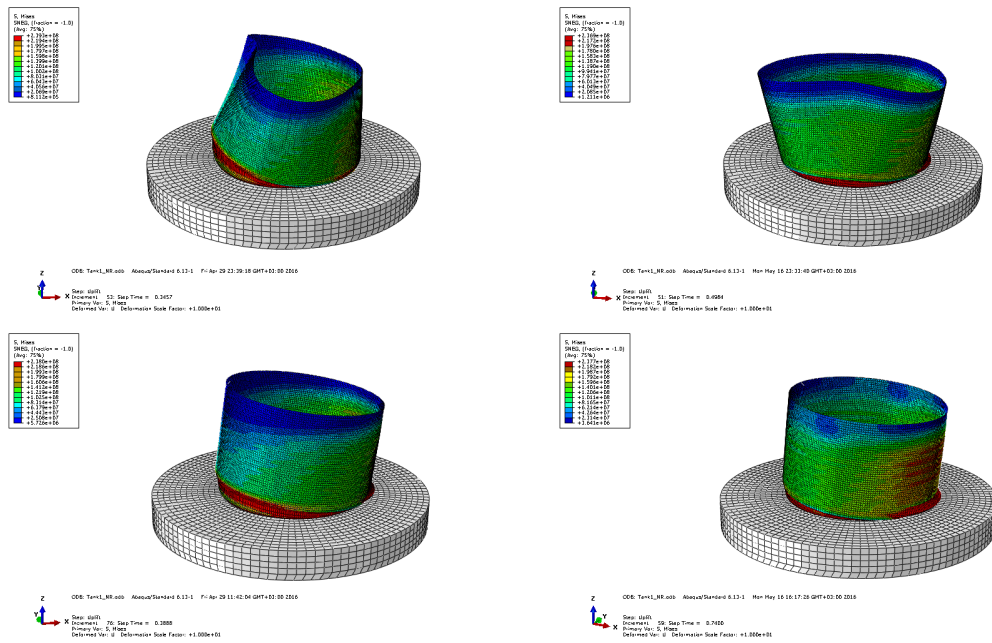
Σχήμα 3.3: Αρχική προσέγγιση υδροδυναμικού φορτίου (αριστερά), τελική προσέγγιση υδροδυναμικού φορτίου (δεξιά)

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι με την τελική προσέγγιση η παραμόρφωση των δεξαμενών αντικατοπτρίζει περισσότερο την πραγματικότητα.

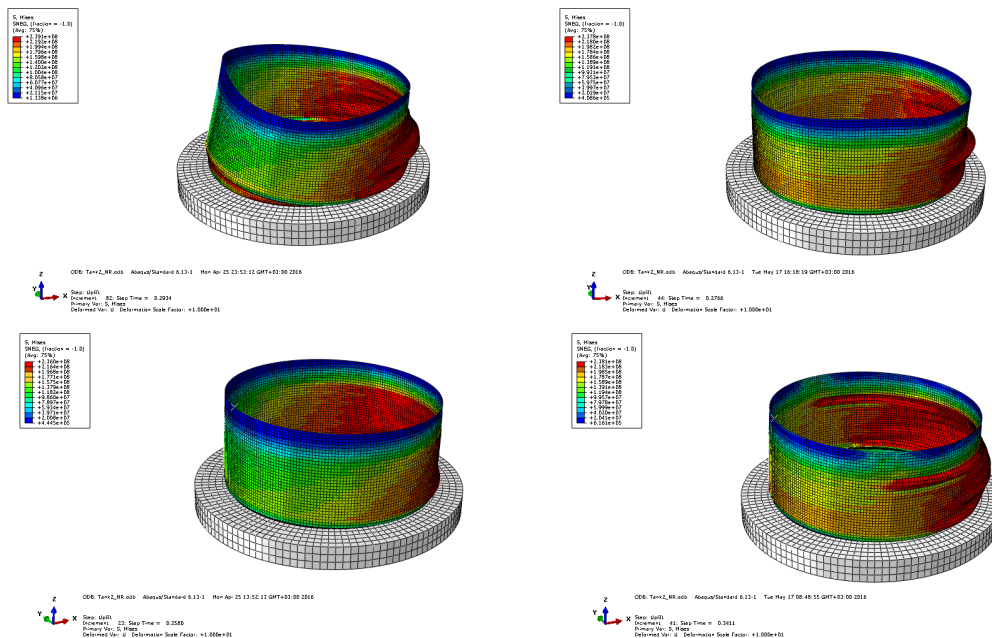


Σχήμα 3.4: Παραμόρφωση δεξαμενής 1 με πλωτή οροφή (τελική προσέγγιση)

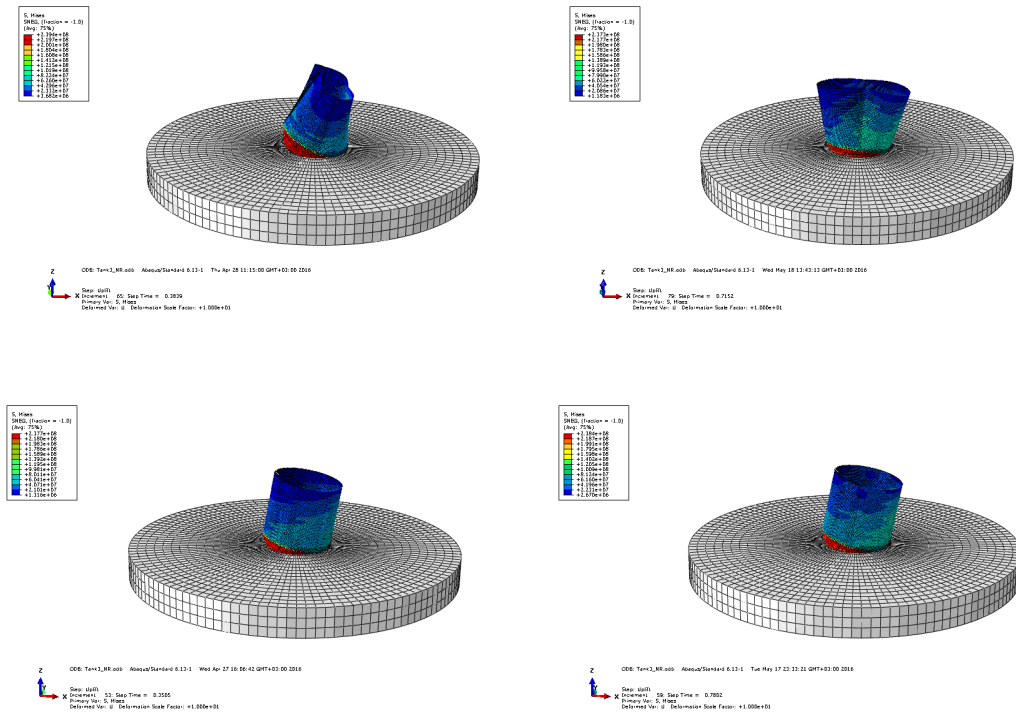
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των δεξαμενών τόσο με την αρχική, όσο και με την τελική προσέγγιση.



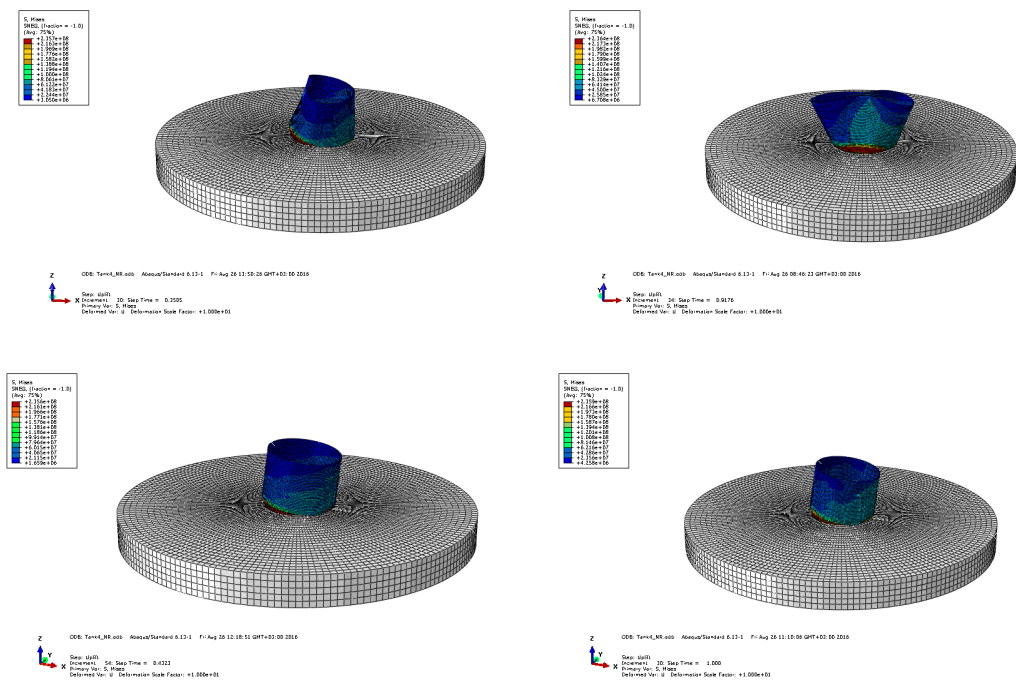
Σχήμα 3.5: Δεξαμενή 1 με πλωτή οροφή για αρχική και τελική προσέγγιση και κλειστή οροφή ομοίως (από πάνω προς τα κάτω-από αριστερά προς δεξιά)



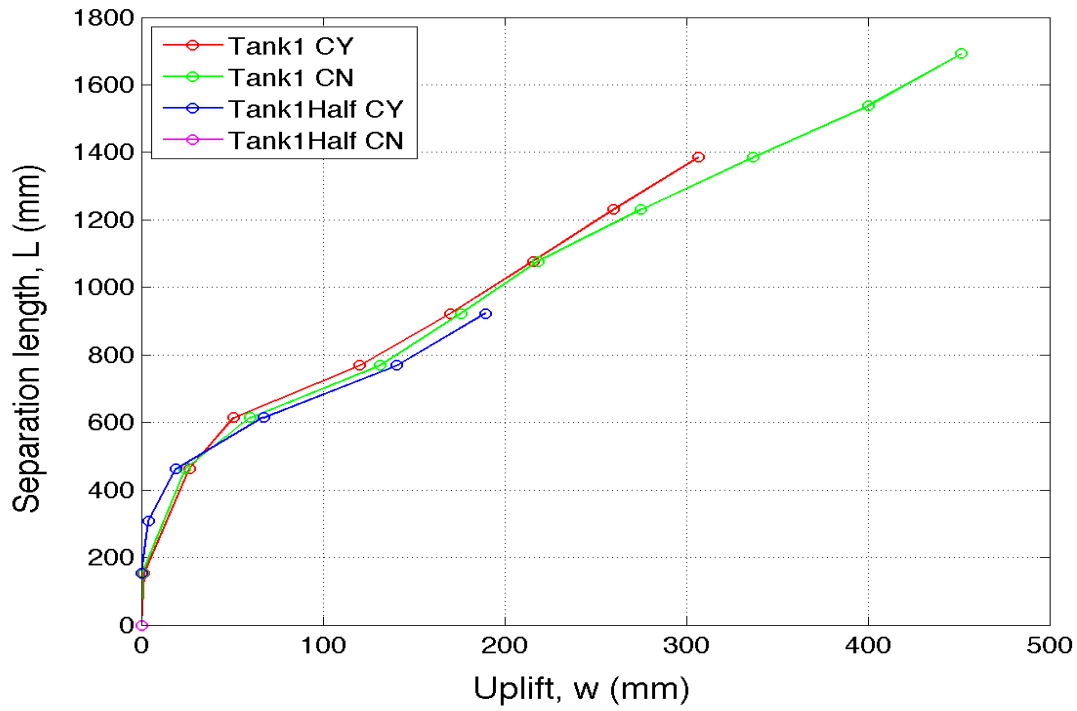
Σχήμα 3.6: Δεξαμενή 2 με πλωτή οροφή για αρχική και τελική προσέγγιση και κλειστή οροφή ομοίως (από πάνω προς τα κάτω-από αριστερά προς δεξιά)



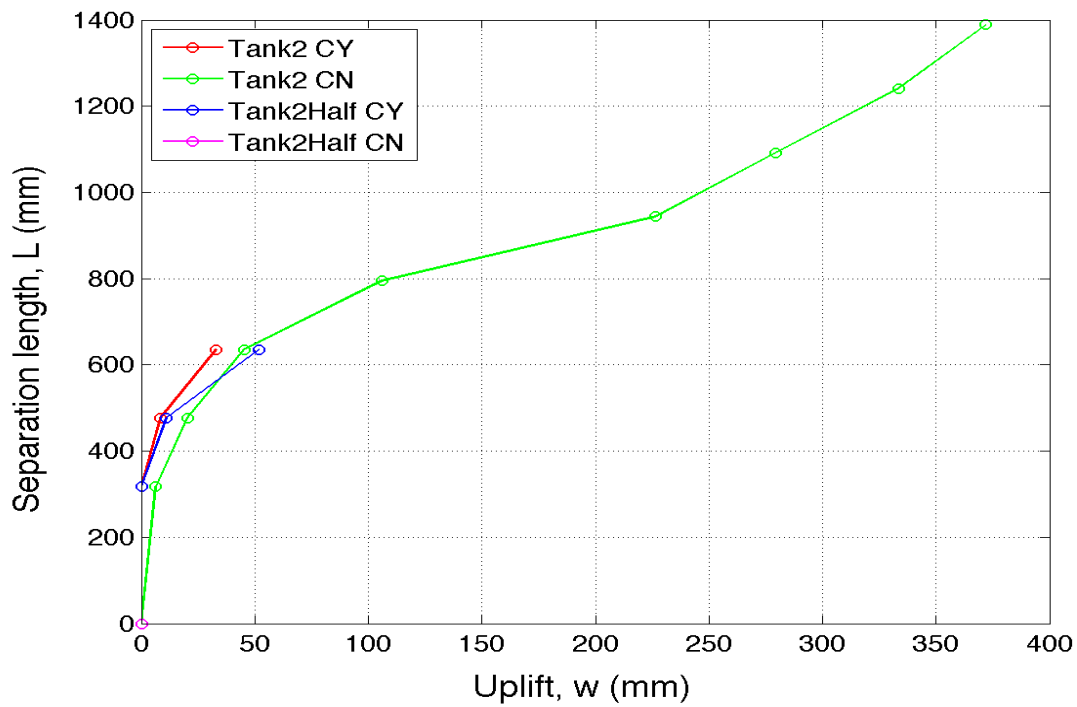
Σχίμα 3.7: Δεξαμενή 3 με πλωτή οροφή για αρχική και τελική προσέγγιση και κλειστή οροφή ομοίως (από πάνω προς τα κάτω-από αριστερά προς δεξιά)



Σχίμα 3.8: Δεξαμενή 4 με πλωτή οροφή για αρχική και τελική προσέγγιση και κλειστή οροφή ομοίως (από πάνω προς τα κάτω-από αριστερά προς δεξιά)



Σχήμα 3.9: Ανύψωση-μήκος αποχωρισμού δεξαμενής 1



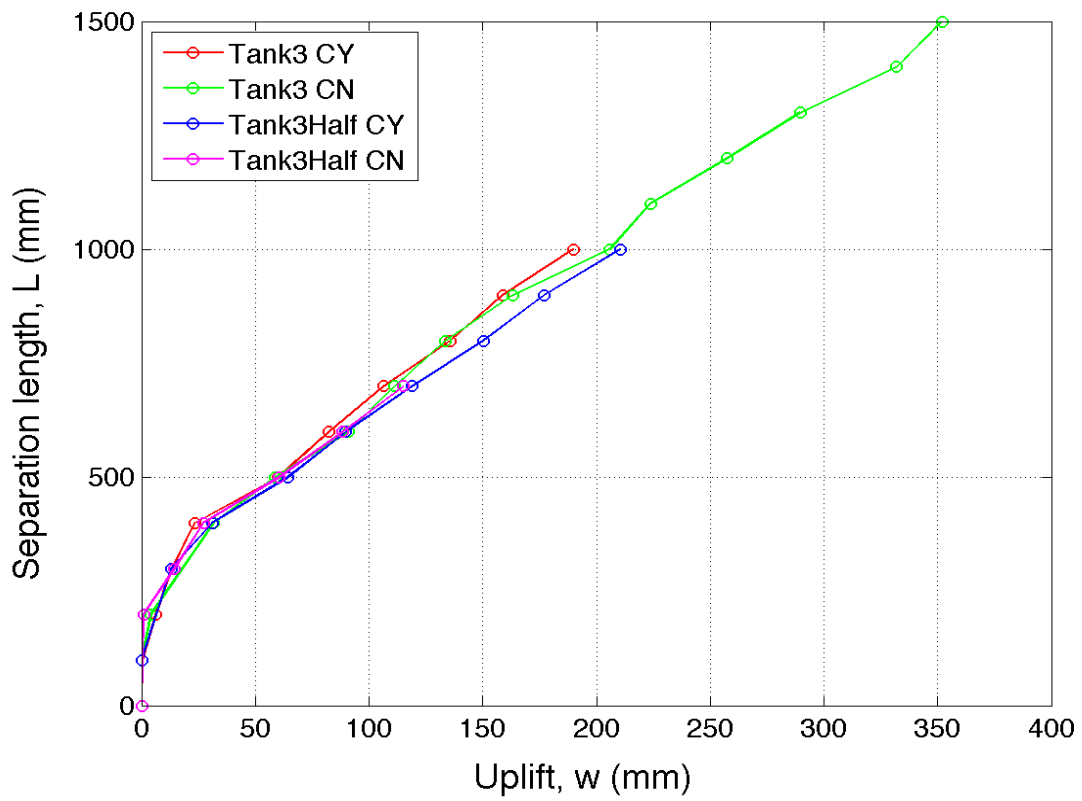
Σχήμα 3.10: Ανύψωση-μήκος αποχωρισμού δεξαμενής 2

¹ «Half» αναφέρεται στην τελική προσέγγιση

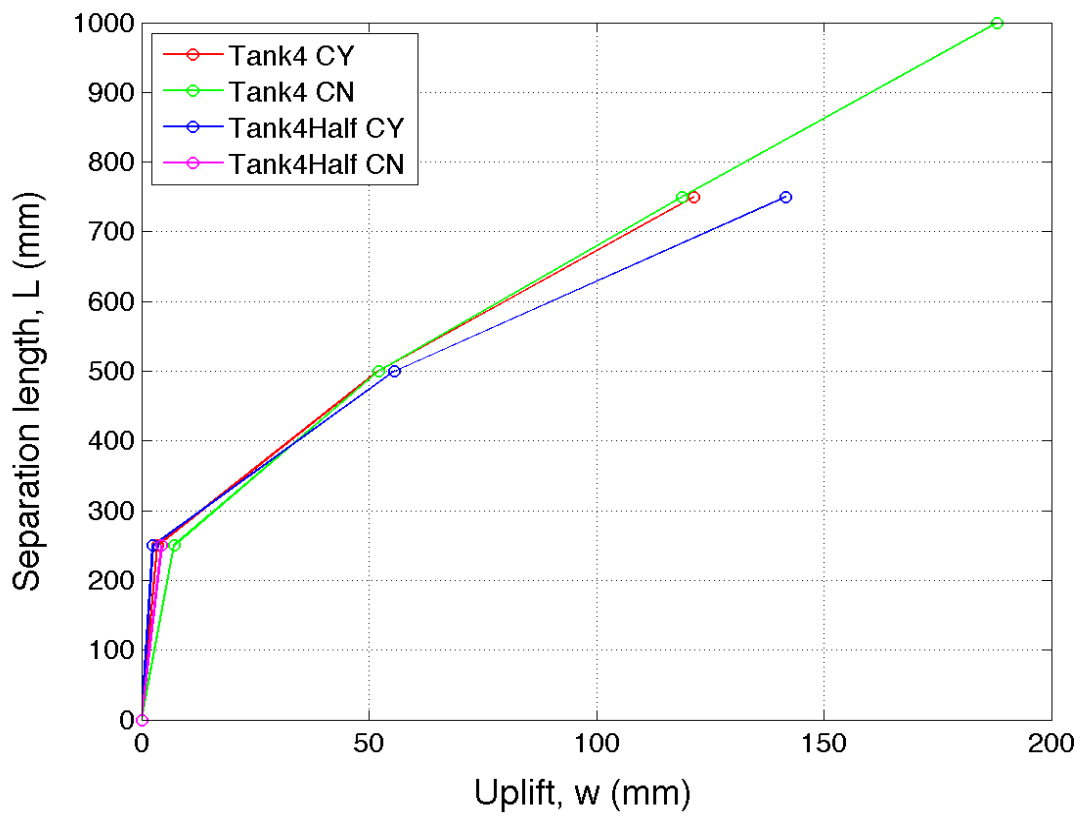
² Χωρίς «Half» αναφέρεται στην αρχική προσέγγιση

³ «CY» είναι η συντόμευση για το «Constraint Yes» και αναφέρεται στη δεξαμενή με κλειστή οροφή

⁴ «CN» είναι η συντόμευση για το «Constraint No» και αναφέρεται στη δεξαμενή με πλωτή οροφή



Σχήμα 3.11: Ανύψωση-μήκος αποχωρισμού δεξαμενής 3



Σχήμα 3.12: Ανύψωση-μήκος αποχωρισμού δεξαμενής 4

3.2.2 Πρόβλημα πλαστικής στροφής

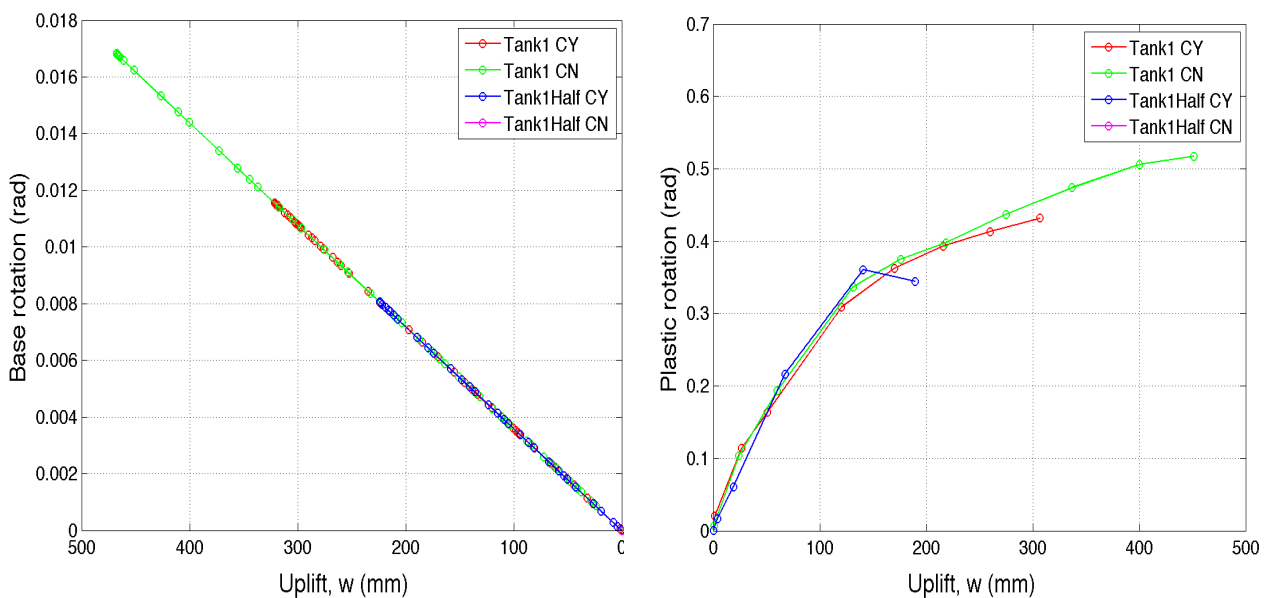
Η πλαστική στρόφη είναι ένα ακόμα μέγεθος το οποίο είναι καθοριστικό τόσο για το σχεδιασμό όσο και για την αποτίμηση των μεταλλικών δεξαμενών. Ο Ευρωκώδικας θέτει έναν ιδιαίτερα συντηρητικό περιορισμό ο οποίος έχει αμφισβητηθεί από διάφορες μελέτες στο παρελθόν. Η στρόφη ψ της βάσης της δεξαμενής οφείλεται στην ανύψωσή της και υπολογίζεται σύμφωνα με την Σχέση 3.1.

$$\psi = w_{\max} / D, \quad (3.1)$$

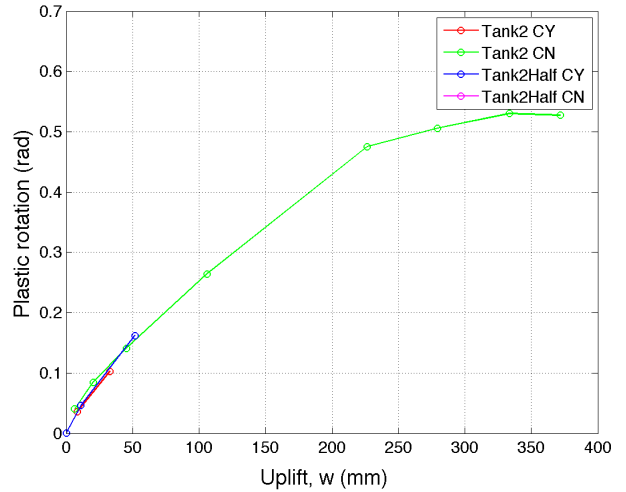
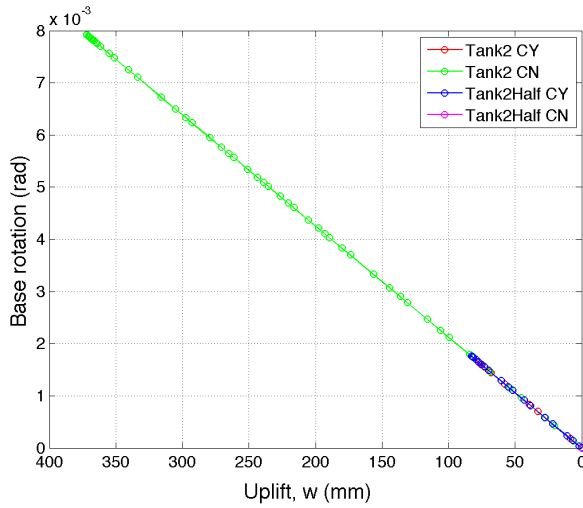
όπου w_{\max} η μέγιστη τελική ανύψωση της δεξαμενής και D η διάμετρος της δεξαμενής. Η πλαστική στρόφη η οποία σχετίζεται με την στρόφη της δεξαμενής υπολογίζεται σύμφωνα με την Σχέση 3.2.

$$\theta_p = \left(\frac{2w_{\max}}{L} - \frac{w_{\max}}{2R} \right), \quad (3.2)$$

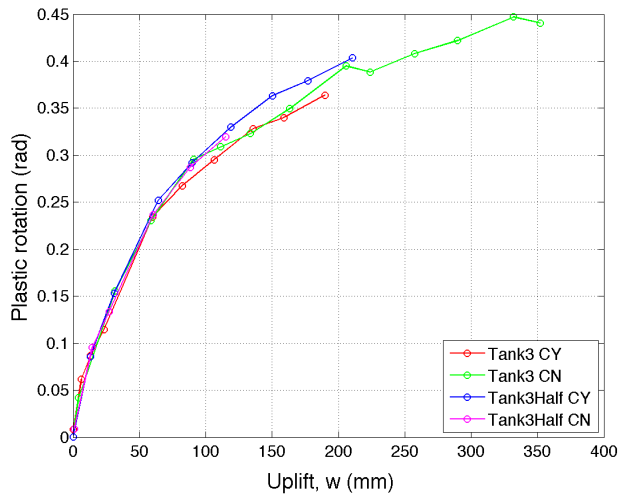
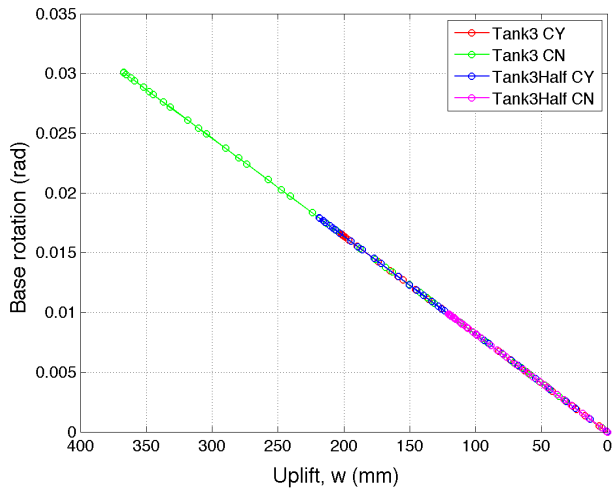
όπου w_{\max} η μέγιστη τελική ανύψωση της δεξαμενής, L το μήκος αποχωρισμού και R η ακτίνα της δεξαμενής. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα η τιμή της πλαστικής στροφής δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 0.20 rad, αλλά έχει παρατηρηθεί ότι μπορεί να φτάσει ως τα 0.40 rad. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι στρόφες και οι πλαστικές στρόφες των δεξαμενών συναρτήσει της ανύψωσής τους.



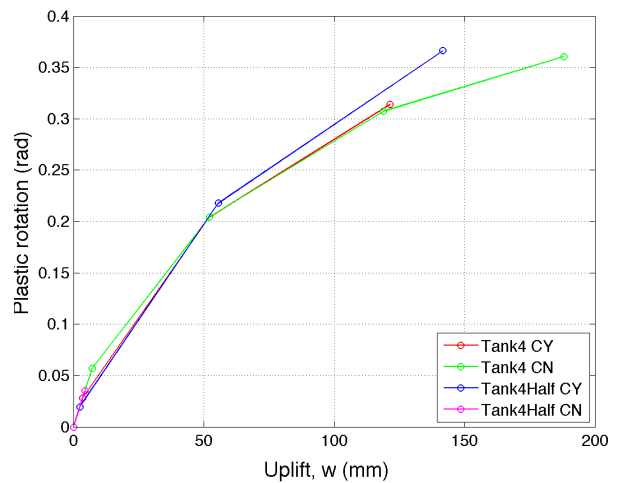
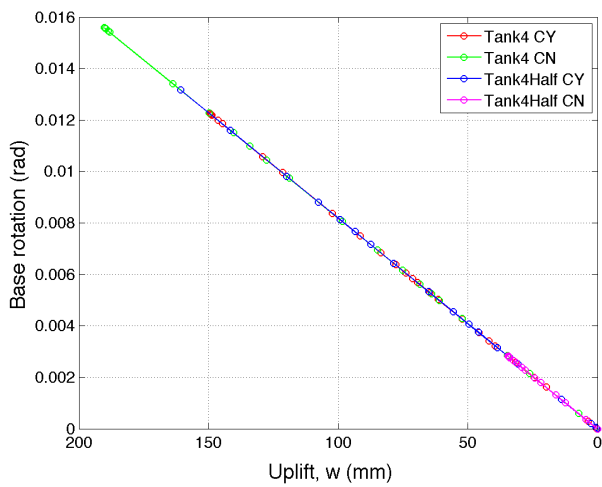
Σχήμα 3.13: Ανύψωση-στρόφη βάσης (αριστερά), ανύψωση-πλαστική στρόφη βάσης (δεξιά) δεξαμενής 1



Σχήμα 3.14: Ανύψωση-στροφή βάσης (αριστερά), ανύψωση-πλαστική στροφή βάσης (δεξιά) δεξαμενής 2



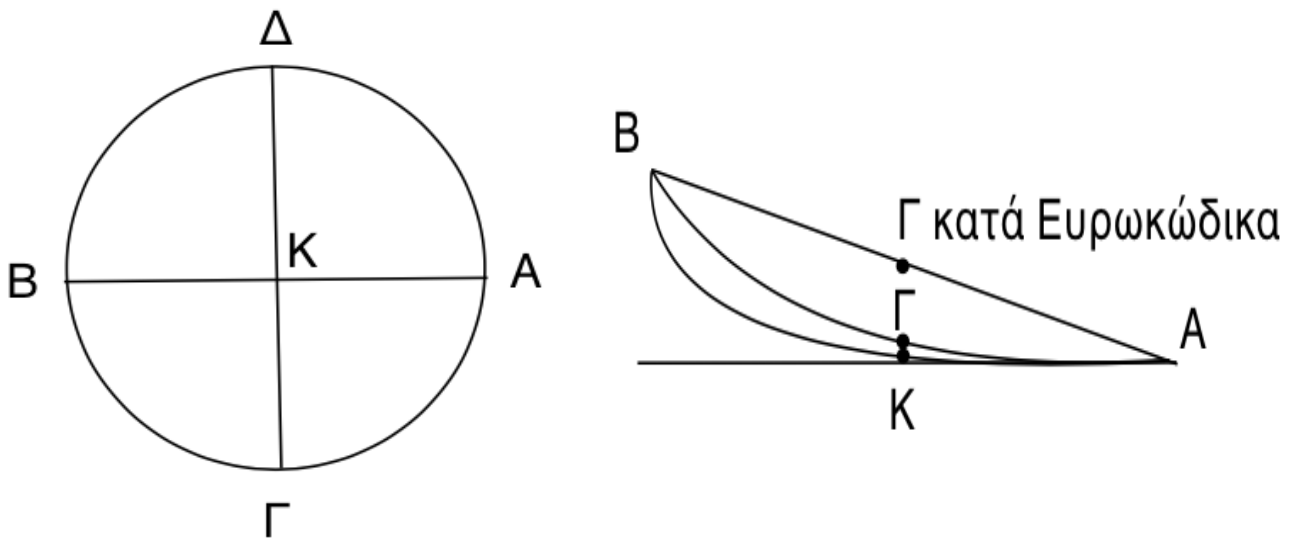
Σχήμα 3.15: Ανύψωση-στροφή βάσης (αριστερά), ανύψωση-πλαστική στροφή βάσης (δεξιά) δεξαμενής 3



Σχήμα 3.16: Ανύψωση-στροφή βάσης (αριστερά), ανύψωση-πλαστική στροφή βάσης (δεξιά) δεξαμενής 4

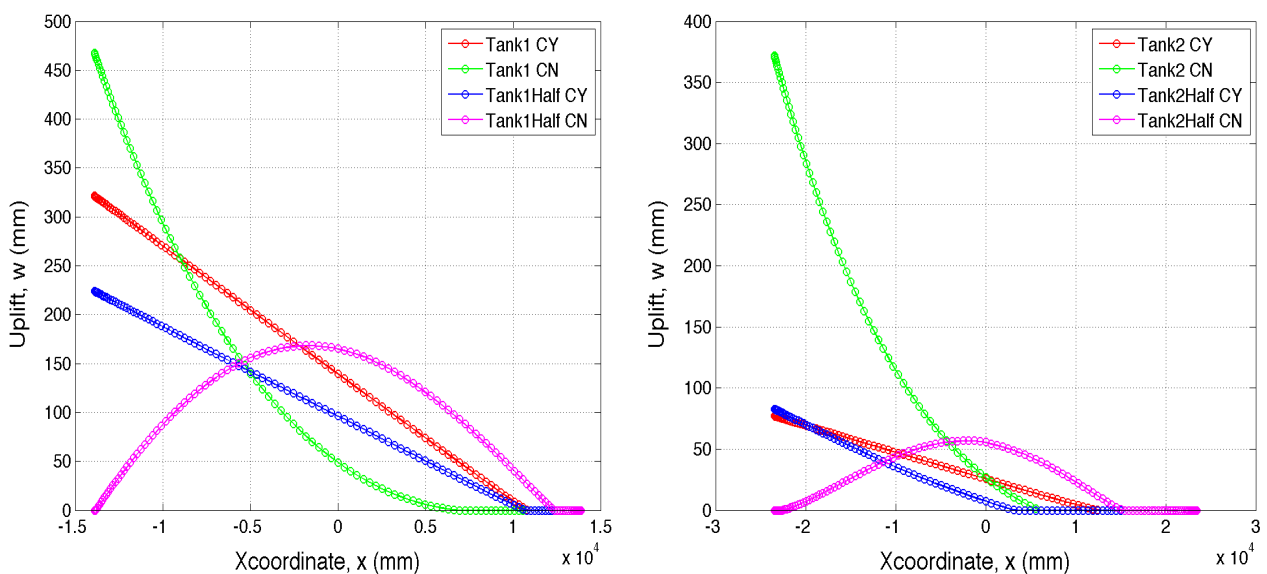
3.2.3 Πρόβλημα θεώρησης ευθείας

Ο Ευρωκώδικας κάνει την παραδοχή ότι η βάση της δεξαμενής κατά την ανύψωσή της δεν παραμορφώνεται και συνεπώς θεωρεί την στροφή της δεξαμενής ως στροφή στερεού σώματος. Αυτό έχει ως συνέπεια, να θεωρούνται τα σημεία A, B και Γ στην ίδια ευθεία, γεγονός που απέχει πολύ από την πραγματικότητα. Σκοπός του παρόντος υποκεφαλαίου είναι να αποδειχθεί ότι το σημείο Γ απέχει από την ευθεία AB.

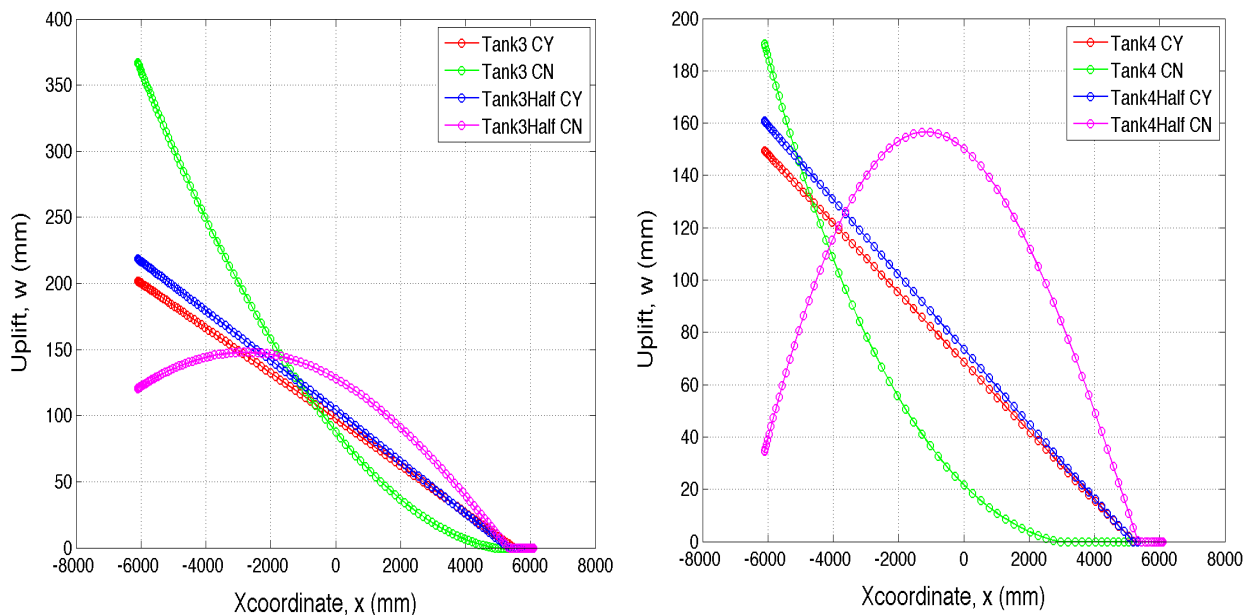


Σχήμα 3.17: Κάτοψη (αριστερά) και τομή (δεξιά) της βάσης της δεξαμενής

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα που απεικονίζουν στον κατακόρυφο άξονα το μέτρο της ανύψωσης για κάθε πεπερασμένο στοιχείο που ανήκει στο ημικύκλιο BΓA και στον οριζόντιο άξονα τις συντεταγμένες των αντίστοιχων στοιχείων στον άξονα X με ευθεία αναφοράς την BKA.



Σχήμα 3.18: Ανύψωση-οριζόντιες συντεταγμένες X δεξαμενής 1 (αριστερά) & 2 (δεξιά)

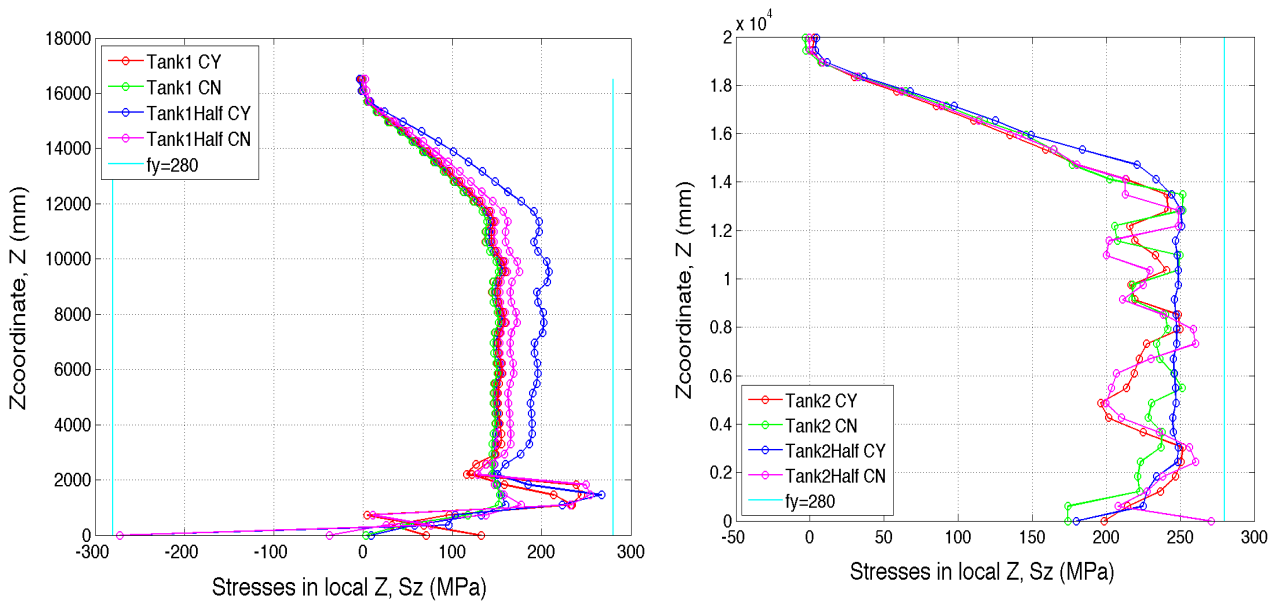


Σχήμα 3.19: Ανύψωση-οριζόντιες συντεταγμένες X δεξαμενής 3 (αριστερά) & 4 (δεξιά)

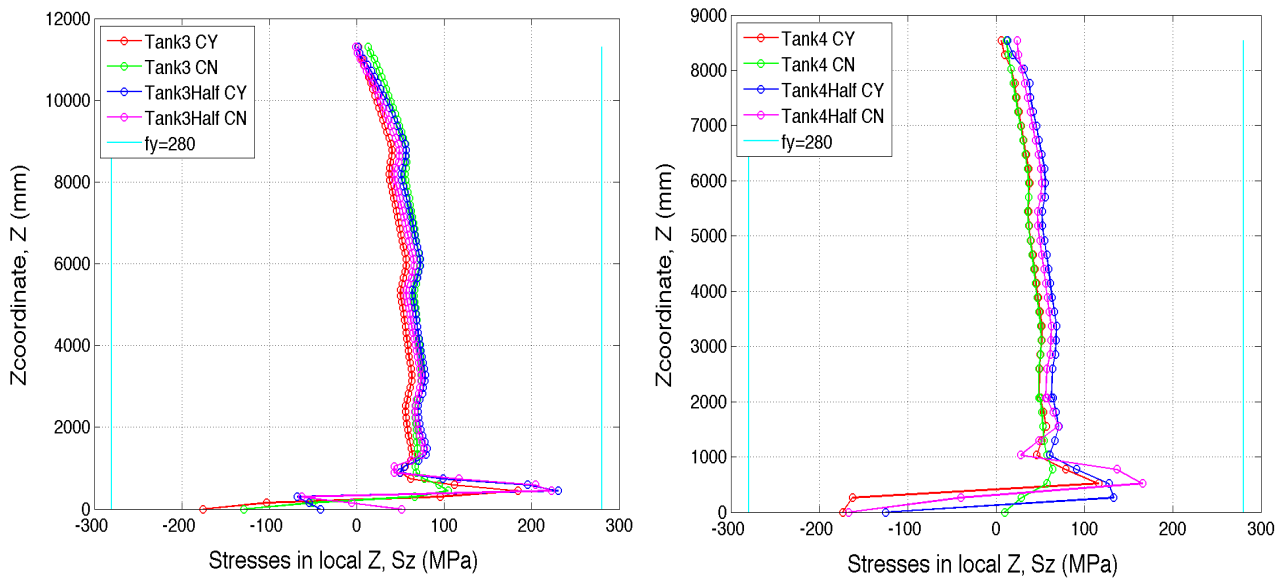
Στα παραπάνω διαγράμματα γίνεται εμφανές γιατί επανεξετάστηκε η αρχική προσέγγιση. Οι δεξαμενές 1 & 2 με πλωτή οροφή σύμφωνα με την τελική προσέγγιση παρουσιάζουν σχεδόν μηδενική ανύψωση στα σημεία A και B με σημαντική επαύξηση στο σημείο Γ (Σχήμα 3.18). Αντίθετα οι δεξαμενές 3 & 4 παρουσιάζουν ανύψωση και στο σημείο B. Έτσι με αυτόν τον τρόπο παρατηρούμε πόσο διαφορετική απόκριση μπορεί να έχει μια δεξαμενή ανάλογα με το λόγο ύψους προς ακτίνα που την διακρίνει. Τέλος, αποδεικνύεται ότι η προσέγγιση του Ευρωκώδικα μπορεί να δικαιολογηθεί για δεξαμενές με κλειστή οροφή αλλά παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις για δεξαμενές με πλωτή οροφή.

3.3 Ανάλυση τάσεων

Η ανάλυση των τάσεων είναι απαραίτητη για την αποτίμηση των δεξαμενών, καθώς μέσω της ροής των τάσεων μπορούν να ερμηνευτούν οι παραμορφώσεις και οι μορφές αστάθειας. Μέσω του προγράμματος Matlab υπολογίστηκαν οι τάσεις σ_z (όπου z : ο τοπικός κατακόρυφος άξονας του κάθε πεπερασμένου στοιχείου) καθ' ύψος της δεξαμενής πάνω στην κατακόρυφη ευθεία που διέρχεται από το σημείο A, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.17. Οι τάσεις αυτές υπολογίστηκαν για κάθε χρονικό βήμα της προσομοιωτικής μεθόδου pushover, στη παρούσα διπλωματική εργασία όμως θα παρουσιαστούν μόνο οι τάσεις κατά την μέγιστη ανύψωση της κάθε δεξαμενής.



Σχήμα 3.20: Μεταβολή τάσεων σ_z καθ' ύψος της δεξαμενής 1 (αριστερά) & 2 (δεξιά) κατά τη μέγιστη ανύψωση

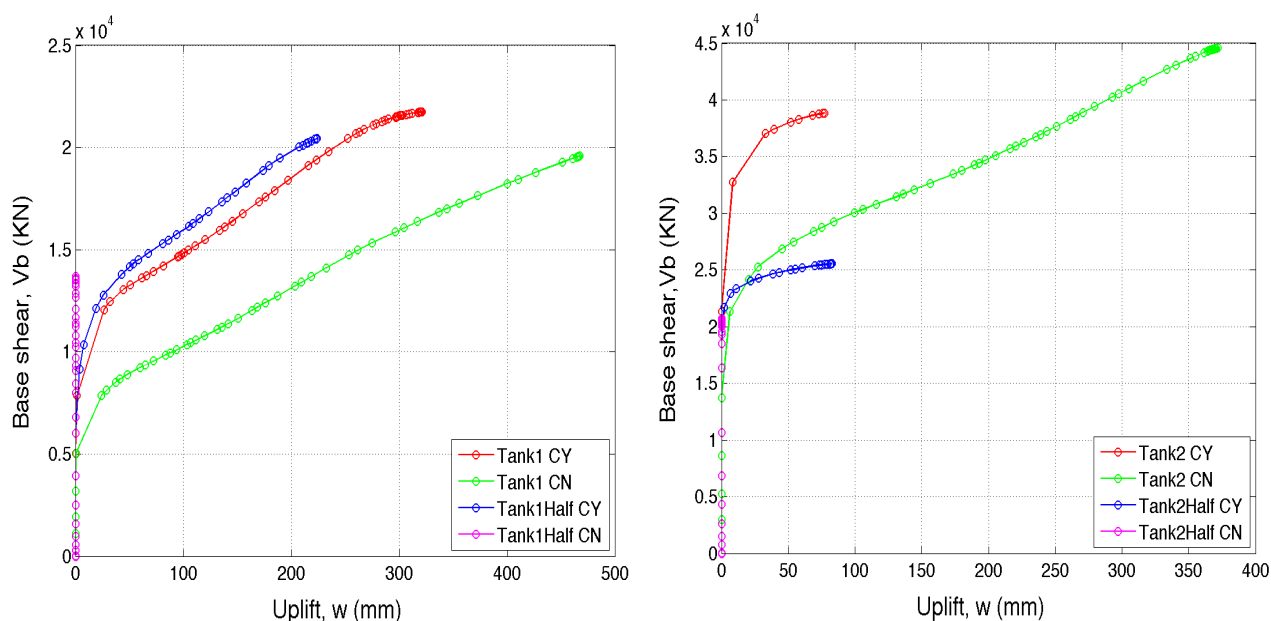


Σχήμα 3.21: Μεταβολή τάσεων σ_z καθ' ύψος της δεξαμενής 3 (αριστερά) & 4 (δεξιά) κατά τη μέγιστη ανύψωση

Στα παραπάνω διαγράμματα των τάσεων γίνεται εμφανής η παρουσία αυξημένων θλιπτικών τάσεων στην περιοχή κοντά στην βάση των δεξαμενών οι οποίες είναι υπεύθυνες για τον ελαστοπλαστικό λυγισμό (elephant's foot buckling).

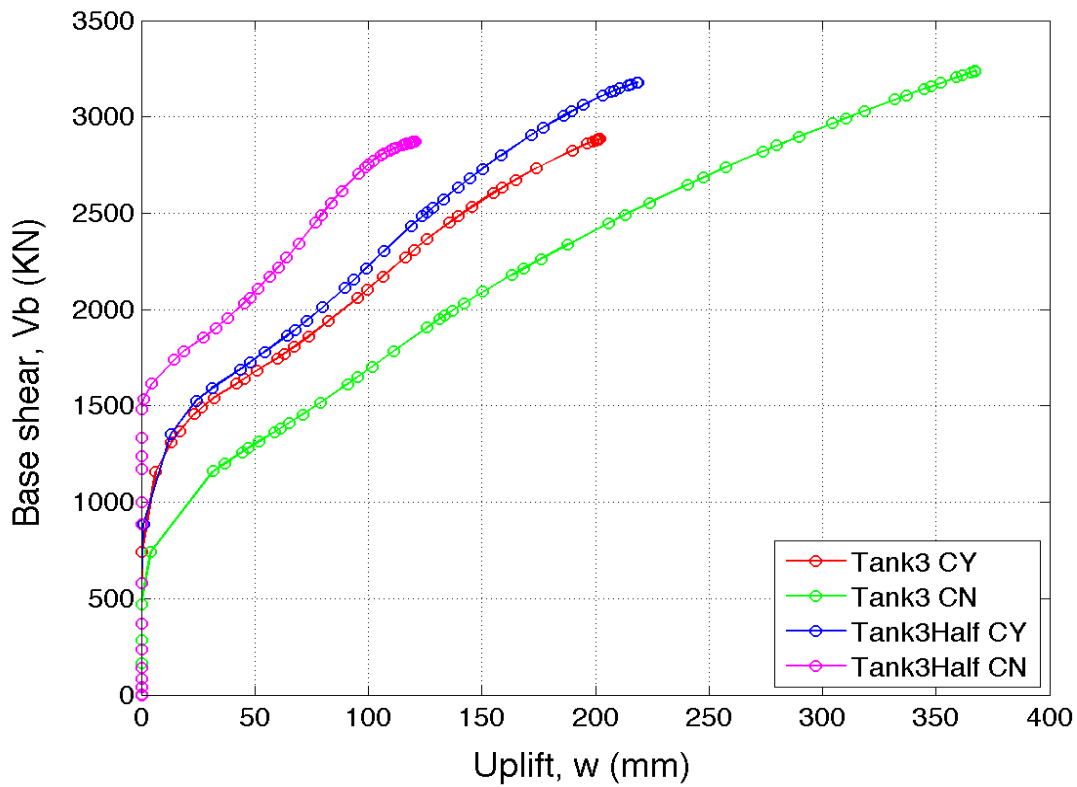
3.4 Σχέση τέμνουσας-ανύψωσης βάσης

Κατά την ανύψωση των μεταλλικών δεξαμενών, όπως έχει προαναφερθεί, λόγω της υδροδυναμικής δράσης αναπτύσσεται σημαντική τέμνουσα στη βάση τους. Η ανάπτυξη σημαντικής τέμνουσας μπορεί να προκαλέσει ολίσθηση της δεξαμενής, όπως επίσης και ιδιαίτερα σημαντικά εδαφοτεχνικά προβλήματα, καθώς επηρεάζει άμεσα την θεμελίωση της δεξαμενής. Στόχος του παρόντος υποκεφαλαίου είναι η εξαγωγή διαγραμμάτων τέμνουσας βάσης συναρτήσει της ανύψωσης των δεξαμενών, τόσο για την κατανόηση της φύσης του προβλήματος όσο και για την μετέπειτα αξιοποίησή τους για την βαθμονόμηση του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος των δεξαμενών στο λογισμικό OpenSees.

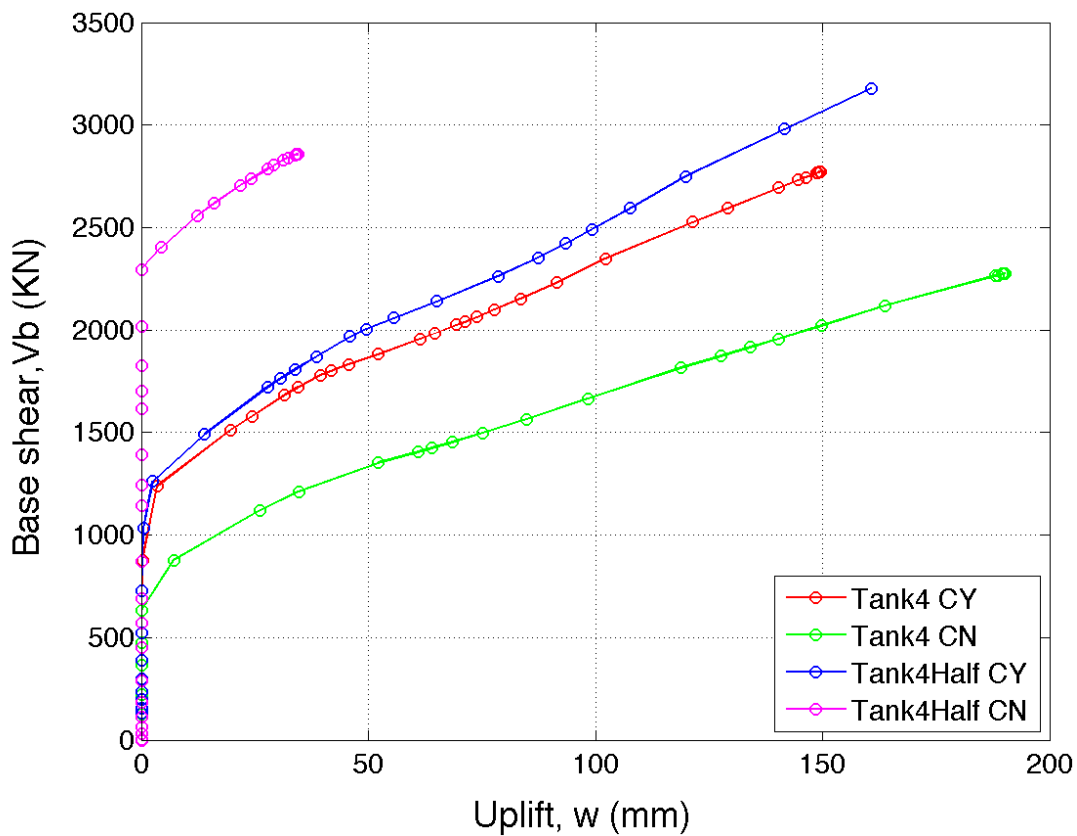


Σχήμα 3.22: Ανύψωση-τέμνουσα βάσης δεξαμενής 1 (αριστερά) & 2 (δεξιά)

Παρατηρείται ότι οι δεξαμενές 1 & 2 με πλωτή οροφή, στην περίπτωση της τελικής προσέγγισης με το φορτίο ασκούμενο στην μισή επιφάνεια των τοιχωμάτων, παρουσιάζουν σχεδόν μηδενική ανύψωση στο σημείο B (Σχήμα 3.18) σε κάθε βήμα της φόρτισης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται μόνο το μέτρο της τέμνουσας βάσης. Στα συγκεκριμένα διαγράμματα, μπορούν να παρατηρηθούν επίσης οι μεγάλες αποκλίσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των δεξαμενών με πλωτή οροφή σύμφωνα με την αρχική και τελική προσέγγιση. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι τα διαγράμματα ανύψωσης-τέμνουσας βάσης όλων των δεξαμενών μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα με μια διγραμμική προσέγγιση, λόγω του σημείου «διαρροής» που παρουσιάζουν. Αυτή η παρατήρηση θα αποδειχτεί ιδιαίτερα χρήσιμη για το επόμενο κεφάλαιο στο οποίο περιγράφεται η προσπάθεια προσομοίωσης των δεξαμενών στο OpenSees.



Σχήμα 3.23: Ανύψωση-τέμνουσα βάσης δεξαμενής 3



Σχήμα 3.24: Ανύψωση-τέμνουσα βάσης δεξαμενής 4

4 Προσομοίωση δεξαμενών με στοιχεία δοκού

4.1 Εισαγωγή

Τα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων των δεξαμενών διακρίνονται για την ακρίβειά τους, καθώς καταφέρνουν να καταγράψουν σύνθετες μορφές αστοχίας όπως ο τοπικός λυγισμός. Ωστόσο, η κατάρτιση του προσομοιώματος έγινε με στόχο την εκτέλεση μιας μη γραμμικής στατικής ανάλυσης με ισοδύναμα στατικά φορτία που αντιπροσωπεύουν τα δυναμικά φορτία αλληλεπίδρασης ρευστού-δεξαμενής. Η δυναμική αλληλεπίδραση ρευστού-δεξαμενής μπορεί να προσομοιωθεί και με άλλους τρόπους (π.χ. μέθοδος προστιθέμενης μάζας ή πεπερασμένα στοιχεία υγρού), αλλά όπως μπορεί να αναλογιστεί κανείς ο υπολογιστικός φόρτος αυξάνει πάρα πολύ και ακόμα και μία μόνο δυναμική ανάλυση καθίσταται χρονικά και υπολογιστικά ασύμφορη.

Η αποτίμηση μιας κατασκευής πρέπει να γίνεται με βάση κάποια κριτήρια επιτελεσματικότητας μέσα σε ένα πιθανοτικό και όχι προσδιοριστικό (ντετερμινιστικό) πλαίσιο. Είναι αναγκαία, λοιπόν, η εφαρμογή πολλών δυναμικών αναλύσεων υπό διαφορετικών ιστοριών εδαφικής επιτάχυνσης σεισμών που πλήττουν την ευρύτερη περιοχή της κατασκευής. Η αναγκαιότητα αυτή καθιστά απαραίτητη την χρήση ενός απλοποιημένου προσομοιώματος, ικανού να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις υπολογιστικού φόρτου χωρίς σημαντική υποβάθμιση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Συνεπώς προτείνεται η κατάρτιση απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος με στοιχεία δοκού και σημειακά ελατήρια για την ταχεία δυναμική ανάλυση δεξαμενών πλωτής οροφής.

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές αρχές του συγκεκριμένου προσομοιώματος, η διαδικασία προσομοίωσής του στο λογισμικό OpenSees και τέλος η βαθμονόμησή του μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων του με τα αποτελέσματα του προσομοιώματος στο λογισμικό Abaqus.

4.2 Περιγραφή του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος

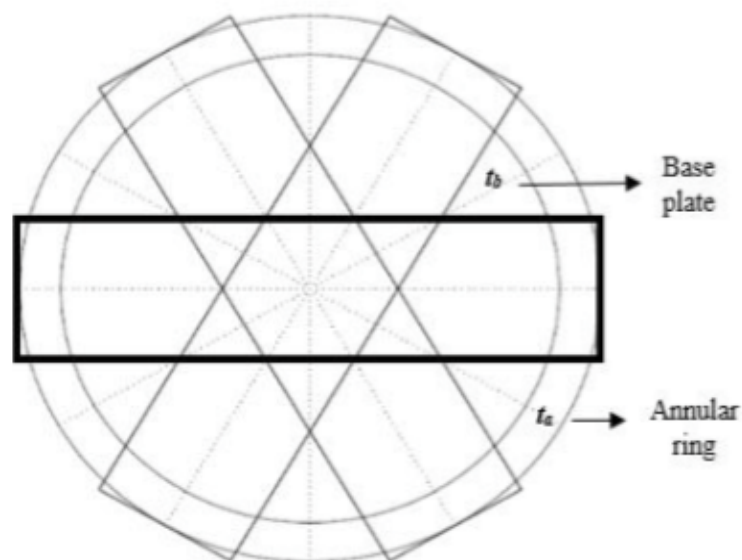
Στο απλοποιημένο μονοβάθμιο προσομοίωμα αγνοήθηκε η συμβολή της επαγωγικής μάζας m_c και λήφθηκε υπόψη μόνο η συμβολή της ωστικής μάζας m_i καθώς αυτή είναι η μάζα η οποία καθορίζει ως επί το πλείστον τη σεισμική συμπεριφορά της δεξαμενής. Ο βαθμός ελευθερίας του συστήματος, με αυτόν τον τρόπο γίνεται ένας, γεγονός που καθιστά την προσομοίωση αρκετά πιο εύκολη, χωρίς αυτό να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια και την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Η προσομοίωση του παρόντος απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος στηρίζεται στις αρχές που έχουν διατυπωθεί πρώτα από τους Malhotra & Veletsos (1994a), όπου η διαδικασία της ανάλυσης μια δεξαμενής διαιρείται σε δύο διακριτά βήματα. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει την ανάλυση μίας λωρίδας (strip) της βάσης με στόχο τον προσδιορισμό της αντίστασης έναντι ανύψωσης και στο δεύτερο βήμα υπολογίζεται η απόκριση της συνολικής βάσης της δεξαμενής με όρους ροπής-στροφής. Πρέπει να αναφερθεί ότι το παρόν προσομοίωμα έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει όχι μόνο μη αγκυρωμένες αλλά και μερικώς αγκυρωμένες δεξαμενές αποθήκευσης υγρού, με την βοήθεια ελατηρίων, κατανεμημένων σε όλη την περίμετρο, που προσεγγίζουν την πραγματική συμπεριφορά των αγκυριών.

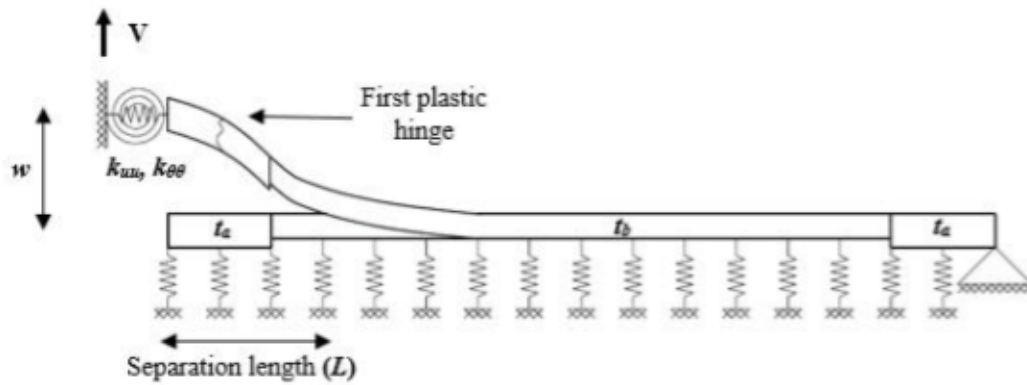
Πρακτικά το απλοποιημένο μονοβάθμιο προσομοίωμα διαιρείται στις εξής τρεις συνιστώσες:

- Βάση της δεξαμενής
- Μάζα του υγρού και της δεξαμενής
- Ελαστικό στοιχείο που συνδέει τις παραπάνω συνιστώσες

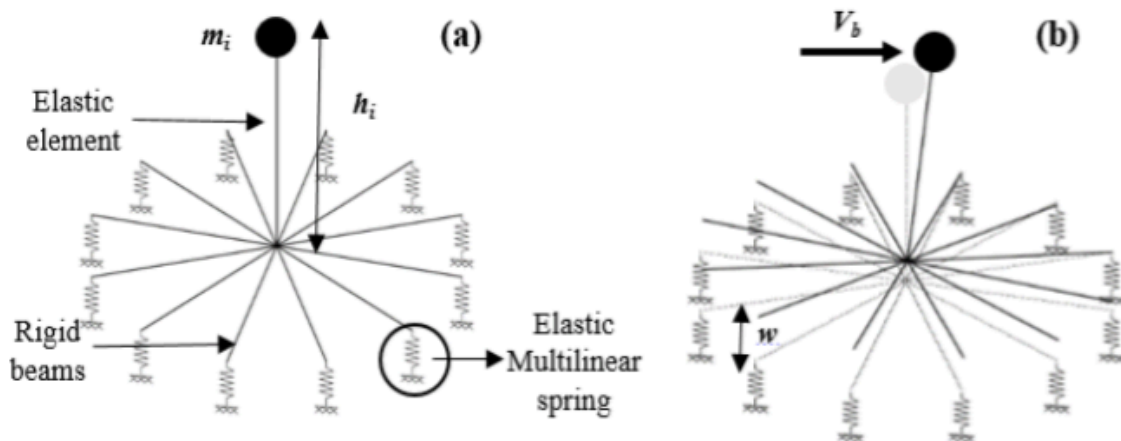
Η βάση της δεξαμενής είναι διαιρεμένη σε ένα ζυγό αριθμό λωρίδων και μία από αυτές τις λωρίδες υποβάλλεται σε προσαυξητική ανυψωτική στατική φόρτιση V με στόχο να προσδιοριστεί η σχετική αντοχή (Σχήμα 4.2). Το προσομοίωμα των λωρίδων αποτελείται από ίνες στοιχείων δοκού που καθορίζονται από την δύναμη και έχουν μήκος ίσο περίπου με το δεκαπενταπλάσιο πάχος της βάσης της δεξαμενής, t_b . Ένα μονοαξονικό ελαστοπλαστικό υλικό ανατίθεται στις ίνες με σκοπό την προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς της βάσης της δεξαμενής που θα παρατηρηθεί κατά την στιγμή της ανύψωσής της. Οι γεωμετρικές μη γραμμικότητες ελήφθησαν υπόψη στο προσομοίωμα μέσω του τύπου της συν-περιστροφής, γνωστού ως «co-rotational formulation». Η προσομοίωση της θεμελίωσης της δεξαμενής έγινε με την βοήθεια ελατηρίων Winkler τα οποία αντιπροσωπεύουν την δυσκαμψία του εδάφους ή της πλάκας σκυροδέματος. Τα ελατήρια Winkler ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπεριφέρονται ελαστικά χωρίς να έχουν την δυνατότητα να παραλάβουν εφελκυσμό. Πάνω στα ελαστικά πολυγραμμικά ελατήρια στηρίζονται οι άκαμπτες δοκοί που προσεγγίζουν την βάση της δεξαμενής. Τα ελατήρια αυτά παίζουν τον ρόλο της μη γραμμικής αντίστασης κατά την ανύψωση της κάθε δοκού, αντιπροσωπεύοντας την ίση επιφάνεια των τμημάτων την κυκλικής βάσης της δεξαμενής. Η μοναδική μάζα του συστήματος m_i συνδέεται με την βάση της δεξαμενής με την βοήθεια ενός ελαστικού στοιχείου. Τα βασικά στοιχεία του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος, όπως περιγράφηκαν παραπάνω, παρουσιάζονται ως εξής:



Σχήμα 4.1: Διαίρεση της βάσης της δεξαμενής σε λωρίδες (strips)



Σχήμα 4.2: Προσομοίωση της θεμελίωσης της κάθε λωρίδας με ελατήρια «Winkler»



Σχήμα 4.3: Συνολικό προσομοίωμα σε ηρεμία (αριστερά), συνολικό προσομοίωμα σε παραμορφωμένη κατάσταση (δεξιά)

Το συνολικό προσομοίωμα σε παραμορφωμένη κατάσταση στο Σχήμα 4.3 υποδεικνύει τον μηχανισμό ανύψωσης της δεξαμενής όπου η τέμνουσα δύναμη V_b προκαλεί μερική ανύψωση των δοκών. Το απλοποιημένο μονοβάθμιο προσομοίωμα, λοιπόν, με την βοήθεια του μηχανισμού ανύψωσης, δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης όλων των σημαντικών μορφών αστοχίας που εκφράζονται συναρτήσει της ανύψωσης. Οι υπόλοιπες μορφές αστοχίας που σχετίζονται με την επαγωγική μάζα m_c και το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας της δεξαμενής δεν μπορούν να μελετηθούν με το συγκεκριμένο προσομοίωμα, καθώς αυτή η μάζα αμελήθηκε. Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να εφαρμοστεί μια απλή φασματική ανάλυση μόνο για την μάζα m_c τηρώντας τους κανονισμούς του Ευρωκώδικα EN 1998. Στη διεθνή βιβλιογραφία, υπάρχουν άλλα δύο απλοποιημένα μοντέλα προσομοίωσης των δεξαμενών. Το ένα προσομοίωμα αναλύει τις δεξαμενές αποθήκευσης

υγρού σε δύο διευθύνσεις, ενώ το άλλο με την βοήθεια άκαμπτων δοκών και ισοδύναμων ελατηρίων στοχεύει στην δυναμική ανάλυση των δεξαμενών. Ωστόσο κανένα από αυτά δεν χρησιμοποιήθηκε για την αποτίμηση των τεσσάρων δεξαμενών, καθώς το πρώτο προσομοίωμα απαιτεί την συνεισφορά του προγραμματιστή, ενώ το δεύτερο απαιτεί την βαθμονόμηση του μοντέλου με ένα συγκεκριμένο λεπτομερές προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων.

4.3 Προσομοίωση του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος

Για την προσομοίωση του μονοβάθμιου προσομοιώματος στο OpenSees χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον το πρόγραμμα Matlab. Αρχικά, αφού οριστεί αν η δεξαμενή είναι αγκυρωμένη ή μερικώς αγκυρωμένη προσδιορίζονται όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής όπως επίσης και οι ιδιότητες του υλικού κατασκευής της. Στην συνέχεια, με την βοήθεια των παραπάνω παραμέτρων υπολογίζεται η μάζα της οροφής m_r , η μάζα του υγρού m_l και η μάζα των τοιχωμάτων m_w σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$m_r = 25000 \frac{R^2}{10^2}, \quad (4.1)$$

όπου R η ακτίνα της δεξαμενής, δεδομένου ότι η μάζα της οροφής δεξαμενής με ακτίνα $R = 10$ m είναι ίση με 25000 kg.

$$m_l = \rho \pi R^2 H, \quad (4.2)$$

όπου R η ακτίνα της δεξαμενής, ρ η πυκνότητα του υγρού και H το ύψος της στάθμης του υγρού.

$$m_w = 2\pi R h_r s \rho_s, \quad (4.3)$$

όπου R η ακτίνα της δεξαμενής, ρ_s η πυκνότητα του υλικού των τοιχωμάτων, h_r το ύψος της δεξαμενής και s το ισοδύναμο κανονικοποιημένο πάχος των τοιχωμάτων.

Με δεδομένο τον λόγο ύψους προς ακτίνα της δεξαμενής, μπορούν να προσδιοριστούν έπειτα οι συντελεστές των φυσικών περιόδων C_i^1 και C_c^2 , η ωστική και επαγωγική μάζα m_i και m_c , οι ενεργές συνιστώσες ύψους h_i και h_c , οι ενεργές δυσκαμψίες k_i και k_c και οι ιδιοπερίοδοι T_i και T_c . Όλα τα παραπάνω μεγέθη προσδιορίστηκαν με την βοήθεια του Πίνακα 4.1 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN 1998-4:2006.

¹ «i» αναφέρεται στην ωστική συνιστώσα (impulsive)

² «c» αναφέρεται στην επαγωγική συνιστώσα (conventive)

Πίνακας 4.1: Συντελεστές C_i και C_c για τις φυσικές περιόδους, μάζες m_i και m_c και ύψη h_i και h_c από τη βάση του σημείου εφαρμογής της πίεσης των τοιχωμάτων, για τη ωστική και επαγωγική συνιστώσα

H/R	C_i	C_c	m_i/m_1	m_c/m_1	h_i/H	h_c/H
0.3	9.28	2.09	0.176	0.824	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

$$T_i = C_i \frac{\sqrt{\rho H}}{\sqrt{s/R\sqrt{E}}}, \quad (4.4)$$

όπου R η ακτίνα της δεξαμενής, ρ η πυκνότητα του υγρού, H το ύψος της στάθμης του υγρού, s το ισοδύναμο κανονικοποιημένο πάχος των τοιχωμάτων και E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της δεξαμενής.

$$T_c = C_c \sqrt{R}, \quad (4.5)$$

όπου R η ακτίνα της δεξαμενής.

$$k_i = (m_i + m_w + m_r) \left(\frac{2\pi}{T_i} \right)^2, \quad (4.6)$$

όπου m_i η ωστική μάζα, m_w η μάζα των τοιχωμάτων, m_r η μάζα της οροφής και T_i η ιδιοπερίοδος της ωστικής κίνησης του υγρού.

$$k_c = m_c \left(\frac{2\pi}{T_c} \right)^2, \quad (4.7)$$

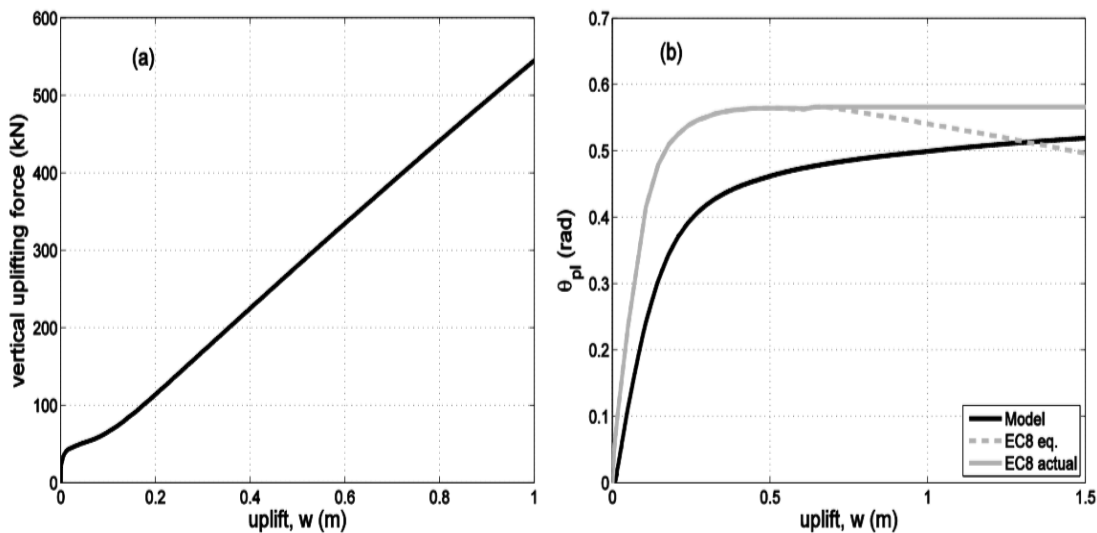
όπου m_c η επαγωγική μάζα και T_c η ιδιοπερίοδος της επαγωγικής μάζας του υγρού

Έπειτα αφού ληφθεί υπόψη απλοποιητικώς η επιρροή του περιμετρικού δαχτυλιδιού της βάσης της δεξαμενής, μία από τις λωρίδες υποβάλλεται σε προσαυξητική ανυψωτική στατική φόρτιση V με στόχο να προσδιοριστεί η σχετική αντοχή. Όπως έχει επισημανθεί η λωρίδα αυτή αποτελείται από ίνες στοιχείων δοκού και εδράζεται πάνω σε κατακόρυφα ελατήρια Winkler που αντιπροσωπεύουν την ευκαμψία της βάσης της δεξαμενής και της θεμελίωσης και ελαστικά πολυγραμμικά ελατήρια στην άκρη λόγω του τοπικού λυγισμού. Το ακραίο ελατήριο το οποίο αντιπροσωπεύει την αλληλεπίδραση της στροφής και της μετακίνησης $k_{\omega\theta}$ της συγκεκριμένης λωρίδας αμελήθηκε καθώς δεν μπορεί να συνεργαστεί με τα μονοαξονικά ελατήρια και η επιρροή του είναι στην πραγματικότητα ασήμαντη. Όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2 τα πολυγραμμικά ελατήρια ορίζονται ως εξής:

$$k_{uu} = \frac{Eb(t_w / R)^{3/2}}{2[3(1 - \nu^2)]^{1/4}}, \quad (4.8)$$

$$k_{\theta\theta} = \frac{Ebt_w^2(t_w / R)^{1/2}}{2[3(1 - \nu^2)]^{3/4}}, \quad (4.9)$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της δεξαμενής, t_w το ισοδύναμο πάχος της δεξαμενής, R η ακτίνα της δεξαμενής και ν ο λόγος Poisson. Ως k_{uu} και $k_{\theta\theta}$ ορίζονται η δυσκαμψία του μετακινησιακού και του στροφικού ελατηρίου αντίστοιχα. Για το πρώτο βήμα μια συγκεντρωμένη ροπή και ένα αξονικό φορτίο εφαρμόζονται στη συγκεκριμένη λωρίδα με στόχο να προσομοιωθεί η υδροδυναμική πίεση του υγρού στα τοιχώματα της δεξαμενής. Αυτές οι δράσεις προκαλούν μια τοπική ανύψωση στην περιοχή της άκρης της λωρίδας και προσδιορίζουν την αντίσταση έναντι ανύψωσης με την βοήθεια των διαγραμμάτων κατακόρυφης ανυψωτικής δύναμης-ανύψωσης, πλαστικής στροφής-ανύψωσης και του περιορισμού της πλαστικής στροφής που επιβάλλει ο Ευρωκώδικας EN 1998-4:2006.



Σχήμα 4.4: (a) Αντίσταση έναντι ανύψωσης λωρίδας και (b) ανύψωση έναντι πλαστικής στροφής, Bakalis et al (2014b)

Στο δεύτερο βήμα της προσομοίωσης, η ανυψωτική δυσκαμψία ολόκληρης της βάσης της δεξαμενής υπολογίζεται εφαρμόζοντας μία επαυξητική ροπή. Η βάση της δεξαμενής προσομοιώνεται με 12 λωρίδες με την παραπάνω σχετική αντίσταση και με υψηλό μέτρο ελαστικότητας E για να εξασφαλιστεί η άκαμπτη κίνηση του συστήματος. Θεωρείται ομοιόμορφο πάχος των λωρίδων ίσο με:

$$b_w = \frac{2\pi R}{n}, \quad (4.10)$$

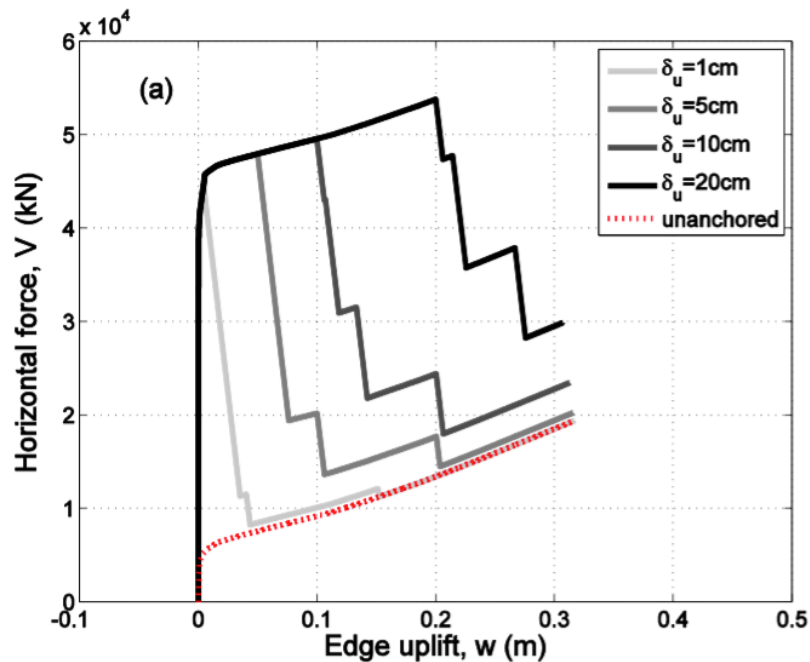
όπου n ο αριθμός των λωρίδων, $n = 12$.

Η μη γραμμική συμπεριφορά του συστήματος εξασφαλίζεται μέσω μηδενικού μήκους ελατηρίων τα οποία συνδέουν την βάση της δεξαμενής με το έδαφος που έχει τις ιδιότητες που έχουν οριστεί στο πρώτο βήμα. Ολόκληρη η δεξαμενή προσομοιώνεται με την βοήθεια των αποτελεσμάτων των δύο προαναφερθέντων βημάτων. Στη συνέχεια η μάζα m_i η οποία αντικατοπτρίζει την ωστική συνιστώσα του υγρού συνδέεται με την βάση μέσω ενός ελαστικού στοιχείου δοκού το οποίο ορίζεται με την βοήθεια των παραμέτρων h_i και T_i .

Για την προσομοίωση των αγκυρωμένων δεξαμενών ακολουθείται η ίδια διαδικασία με την προσθήκη ισοδύναμων ελατηρίων που αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές αγκυρώσεις. Η αγκύρωση της δεξαμενής επιτυγχάνεται με την βοήθεια κατακόρυφων μονοαξονικών ελατηρίων στη άκρη της κάθε λωρίδας. Κάθε ελατήριο θεωρείται ότι προσομοιώνει N αριθμό αγκυρίων τα οποία κατανέμονται ομοιόμορφα στο πάχος b_w της κάθε λωρίδας. Συνεπώς η δυσκαμψία των ελατηρίων ορίζεται ως:

$$k_b = \frac{E_s A_b}{L_b}, \quad (4.11)$$

όπου E_s το μέτρο ελαστικότητας του υλικού των αγκυρίων, A_b η συνολική επιφάνεια των αγκυρίων και L_b το αντίστοιχο μήκος. Τα ελατήρια αγκυρώσεων, λοιπόν, θεωρήθηκαν κατά την περίμετρο της βάσης της δεξαμενής και διακρίνονται για τη ελαστοπλαστική-μη θλιπτική συμπεριφορά. Το σημείο διαρροής των ελατηρίων κατά τον εφελκυσμό θεωρήθηκε τέτοιο ώστε τα ελατήρια να μπορούν να παραλάβουν το 25% της ροπής ανατροπής που οφείλεται στο υγρό της δεξαμενής. Για τη δυνατότητα συσσώρευσης ζημιάς στις αγκυρώσεις που έχουν διαρρεύσει υπό μορφή μόνιμης επιμήκυνσης, στη συμπεριφορά των ελατηρίων προστέθηκε μια οριακή μέγιστη παραμόρφωση δ_u που υποδεικνύει την θραύση και το λεγόμενο «σκαλοπάτι» βλάβης, όπως χαρακτηριστικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Ανύψωση άκρης-οριζόντια δύναμη για διάφορες τιμές οριακής μέγιστης παραμόρφωσης αγκυρίων δ_u , Bakalis et al (2014b)

4.4 Βαθμονόμηση του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος

Το απλοποιημένο μονοβάθμιο προσομοίωμα έχει την δυνατότητα στατικής προσαυξητικής μη γραμμικής ανάλυσης (pushover analysis) και δυναμικής μη γραμμικής ανάλυσης. Μέσω της αξιοποίησης των αποτελεσμάτων της στατικής προσαυξητικής μη γραμμικής ανάλυσης που προέκυψαν μέσω την βοήθεια του λογισμικού Abaqus πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος στο OpenSees. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε θεωρώντας τις μη αγκυρωμένες δεξαμενές με πλωτή οροφή ως μερικώς αγκυρωμένες με τη βοήθεια κάποιων ψευδοαγκυρίων για την σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών προσομοιωμάτων.

Το πιο αντιπροσωπευτικό διάγραμμα για την βαθμονόμηση του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος είναι το διάγραμμα ανύψωσης-τέμνουσας βάσης. Η μεγάλη τέμνουσα δύναμη που αναπτύσσεται στην βάση της δεξαμενής κατά την διάρκεια μιας ισχυρής σεισμικής διέγερσης σε συνδυασμό με την ροπή ανατροπής είναι οι κύριες αιτίες για την ενδεχόμενη αστοχία της κατασκευής. Συνεπώς, το διάγραμμα ανύψωσης-τέμνουσας βάσης είναι το πλέον κατάλληλο για την σύγκριση των αποτελεσμάτων των λογισμικών Abaqus και OpenSees, καθώς ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν είναι άλλος από την σεισμική αποτίμηση των δεξαμενών με πλωτή οροφή η οποία θα επιτευχθεί μέσω πολλαπλών δυναμικών αναλύσεων.

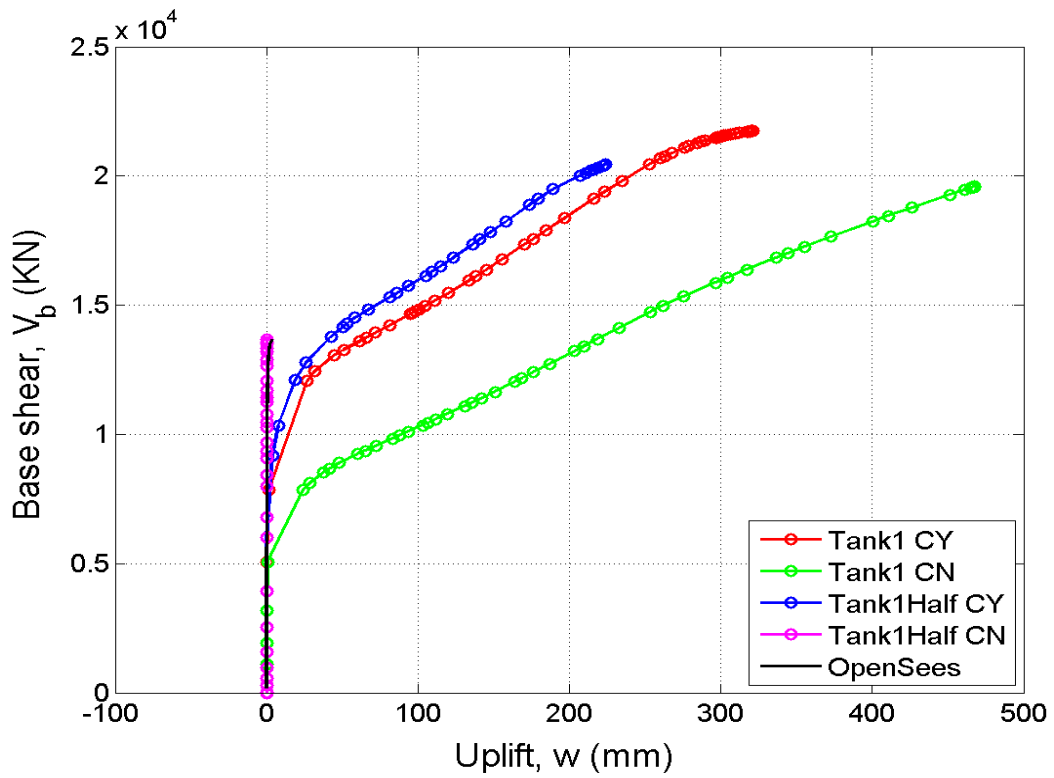
Οι μη αγκυρωμένες δεξαμενές με πλωτή οροφή προσομοιώθηκαν στο απλοποιημένο μονοβάθμιο προσομοίωμα με την βοήθεια κάποιων ψευδοαγκυρίων. Εισήχθησαν βοηθητικοί συντελεστές με στόχο να μπορεί ο χρήστης να ορίζει εξωτερικά την κατάλληλη συμπεριφορά αυτών των ψευδοαγκυρίων, καθώς ο προγραμματισμός του συνολικού προσομοιώματος είναι ιδιαίτερα σύνθετος. Για τον πλήρη ορισμό της απόκρισης των ψευδοαγκυρίων απαιτούνται τρεις βοηθητικές παράμετροι:

- Η παράμετρος που επηρεάζει την δυσκαμψία
- Η παράμετρος που επηρεάζει το σημείο διαρροής
- Η παράμετρος που επηρεάζει τη θραύση

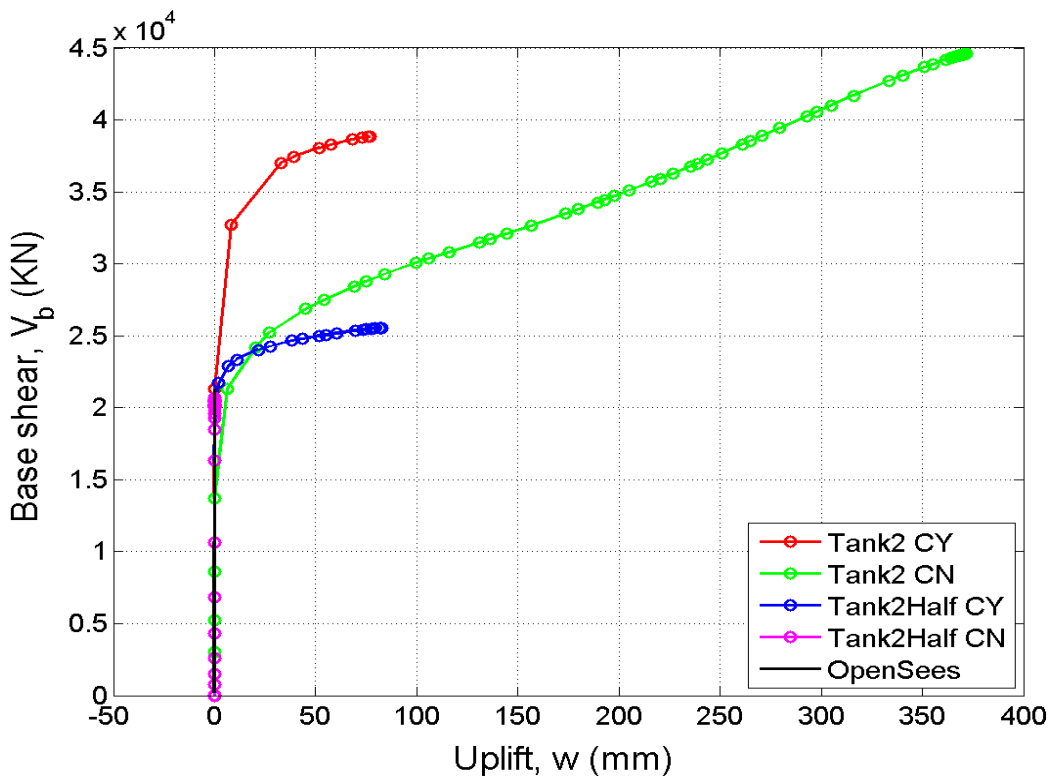
Η πρώτη παράμετρος που επηρεάζει την δυσκαμψία εισάγεται στο Matlab ως k_{bopen} και στόχος της είναι η αύξηση της ήδη υπάρχουσας δυσκαμψίας k_b (Σχέση 4.11). Η δεύτερη παράμετρος σχετίζεται με το σημείο διαρροής και με την βοήθεια του συντελεστή f_{yopen} ορίζεται το σημείο διαρροής της βαθμονόμησης πολλαπλασιάζοντας το ήδη υπάρχον σημείο διαρροής f_{yEPG} . Το υπάρχον σημείο διαρροής ορίζεται ως εξής:

$$f_{yEPG} = 0.25gb_w H^2, \quad (4.12)$$

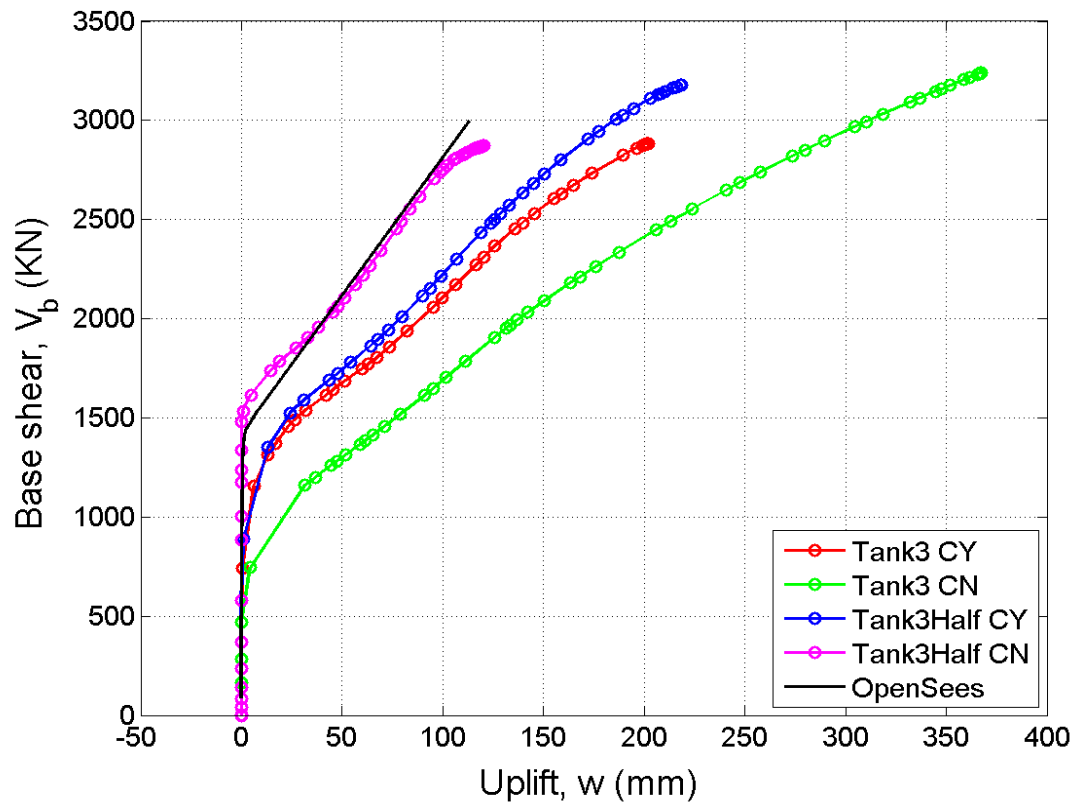
όπου H το ύψος της στάθμης του υγρού, b_w το πάχος της κάθε λωρίδας. Τέλος, η παράμετρος που επηρεάζει την θραύση ορίζεται εξ'ολοκλήρου εξωτερικά στο Matlab ως δ_u . Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης και για τις τέσσερις δεξαμενές, η οποία πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του διαγράμματος της ανύψωσης-τέμνουσας βάσης.



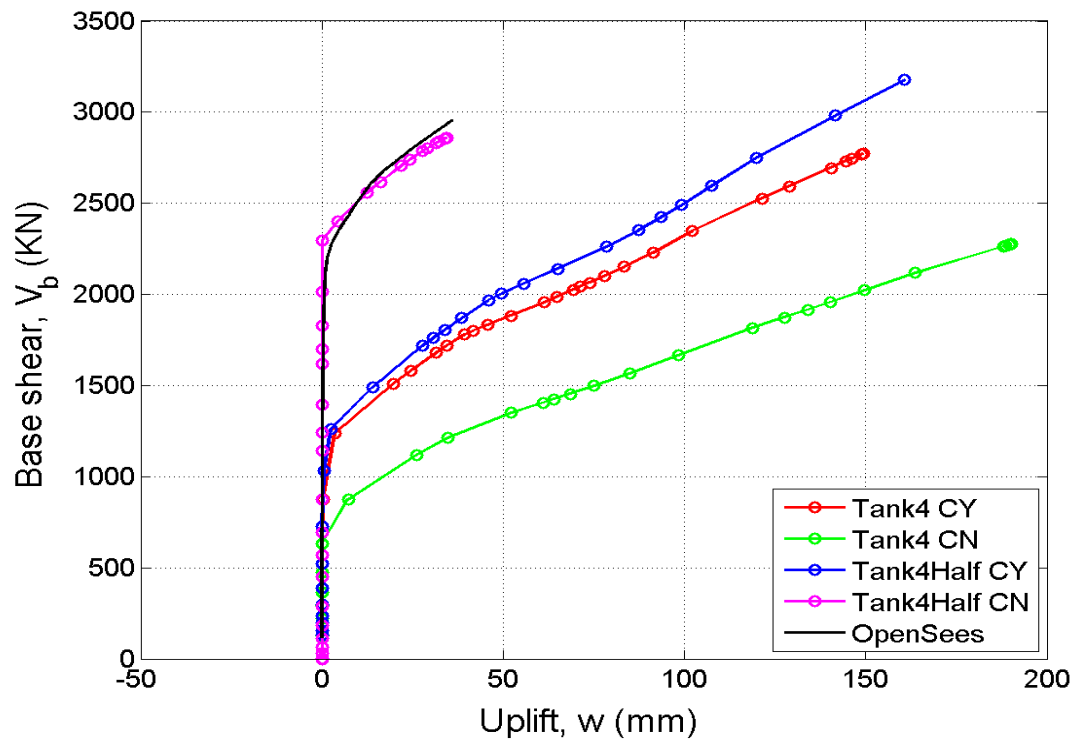
Σχήμα 4.6: Βαθμονομημένο διάγραμμα ανύψωσης-τέμνουσας βάσης δεξαμενής 1



Σχήμα 4.7: Βαθμονομημένο διάγραμμα ανύψωσης-τέμνουσας βάσης δεξαμενής 2



Σχήμα 4.8: Βαθμονομημένο διάγραμμα ανύψωσης-τέμνουσας βάσης δεξαμενής 3

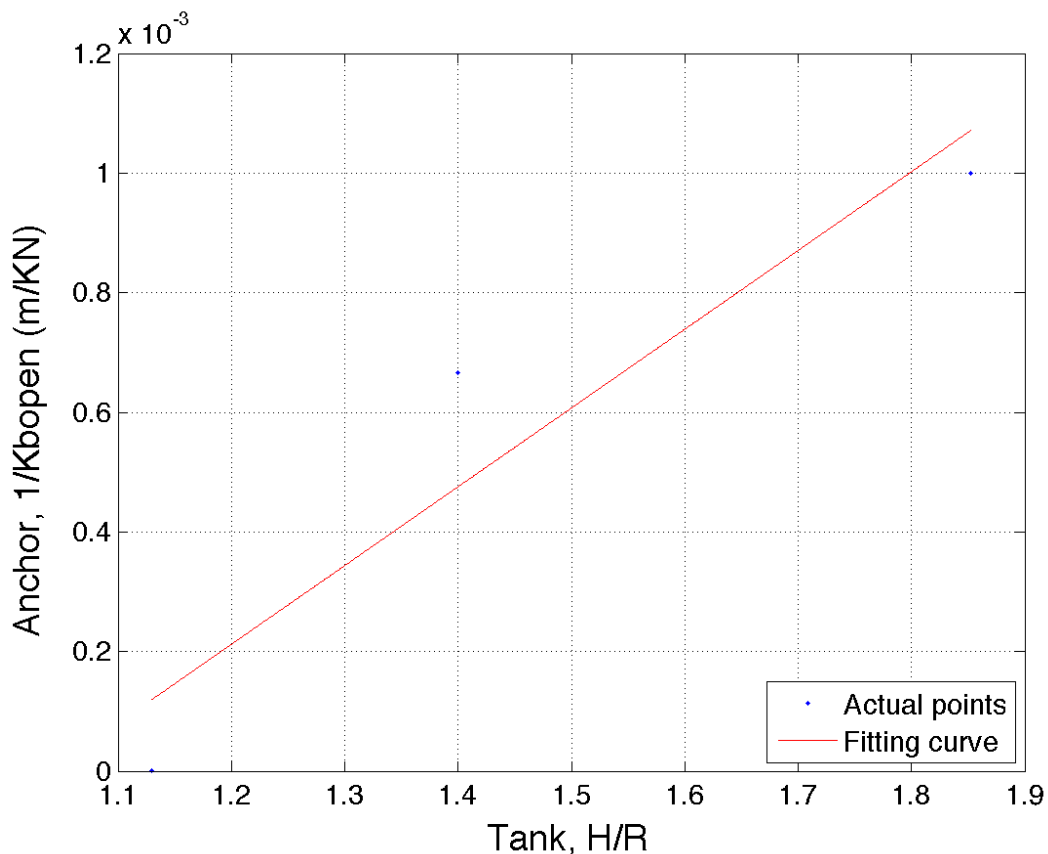


Σχήμα 4.9: Βαθμονομημένο διάγραμμα ανύψωσης-τέμνουσας βάσης δεξαμενής 4

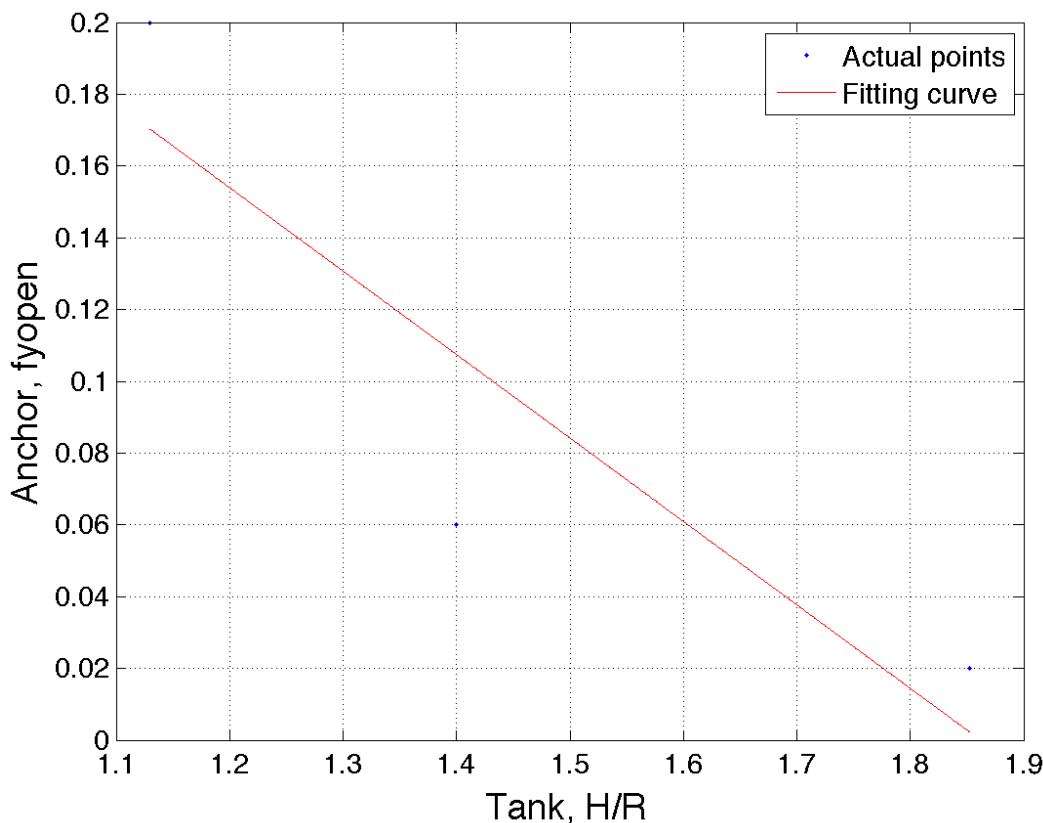
Πίνακας 4.2: Πρόσθετη δυσκαμψία και συντελεστής της δύναμης διαρροής των ψευδοαγκυρίων κάθε δεξαμενής για το προσομοίωμα στοιχείων δοκού μετά τη βαθμονόμηση

Δεξαμενή	H/R	K_{bopen}	f_{yopen}
1	1.1299	e^7	0.20
2	0.8076	e^7	0.32
3	1.8525	1000	0.02
4	1.400	1500	0.06

Οι τέσσερις δεξαμενές επιλέχτηκαν με τρόπο ώστε ο λόγος H/R να διαφέρει και να καλύπτει ένα επαρκές εύρος. Συνεπώς, τα δεδομένα του Πίνακα 4.2 που υπολογίστηκαν με δοκιμές καθιστούν εφικτή την εξαγωγή διαγραμμάτων που απεικονίζουν προσεγγιστικώς την μεταβολή των βοηθητικών παραμέτρων συναρτήσει του λόγου H/R . Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα της πρόσθετης ευκαμψίας και του συντελεστή της δύναμης διαρροής σε σχέση με το λόγο H/R . Πρέπει να αναφερθεί ότι σαν παραμόρφωση θραύσης των ψευδοαγκυρίων δόθηκε μια αρκετά υψηλή τιμή ($\delta_u = 1$) έτσι ώστε η παραμόρφωση των ψευδοαγκυρίων να μην επηρεάζει την απόκριση των δεξαμενών.



Σχήμα 4.10: Λόγος ύψους προς ακτίνα δεξαμενής-πρόσθετη ευκαμψία των ψευδοαγκυρίων



Σχήμα 4.11: Λόγος ύψους προς ακτίνας δεξαμενής-συντελεστής της δύναμης διαρροής των ψευδοαγκυριών

Πρέπει να επισημανθεί ότι στα παραπάνω διαγράμματα επιλέχθηκαν τρία από τα τέσσερα σημεία για την βέλτιστη παλινδρόμηση των δεδομένων σημείων. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.10 αμελήθηκε η πρόσθετη δυσκαμψία της δεξαμενής 2 (Πίνακας 4.2). Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι ο χρήστης για δεξαμενή με λόγο $H/R = [0.80, 1.13]$ πρέπει να εισάγει ως k_{bopen} μια μεγάλη τιμή της τάξεως e^7 . Ομοίως στο Σχήμα 4.11 αμελήθηκε το σημείο διαρροής της δεξαμενής 2 (Πίνακας 4.2). Ο χρήστης αντίστοιχα για δεξαμενή με λόγο $H/R = [0.80, 1.13]$ πρέπει να εισάγει ως f_{yopen} μια τιμή που ανήκει στο διάστημα $[0.20, 0.32]$ με βάση την κλίση της ευθείας του Σχήματος 4.11.

Τα παραπάνω διαγράμματα είναι μια πρώτη απλοποιημένη προσέγγιση δεδομένου ότι τα τέσσερα μόνο σημεία δεν επαρκούν για να περιγράψουν με ακρίβεια την μεταβολή των βοηθητικών παραμέτρων k_{bopen} και f_{yopen} σε σχέση με το λόγο H/R . Συνεπώς, χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση με δεξαμενές διαφορετικών λόγων H/R για την εξαγωγή περισσότερων σημείων και τον πληρέστερο ορισμό των διαγραμμάτων.

5 Εξαγωγή καμπυλών σεισμικής τρωτότητας

5.1 Εισαγωγή

Η ορθή αποτίμηση μιας κατασκευής, λόγω διάφορων αβέβαιων παραμέτρων, οφείλει να γίνεται μέσα σε ένα πιθανοτικό πλαίσιο ικανό να ορίσει την πιθανότητα μερικής ή πλήρους αστοχίας της κατασκευής συναρτήσει της σφοδρότητας της σεισμικής διέγερσης. Με τη βοήθεια του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος είναι εφικτή η αποδοτική εφαρμογή πολλαπλών δυναμικών αναλύσεων με στόχο την αποτίμηση των δεξαμενών η οποία καθίσταται αναγκαία λόγω των κινδύνων που επιφυλάσσονται σε περίπτωση μιας έντονης σεισμικής διέγερσης.

Η αποτίμηση των δεξαμενών διακρίνεται λοιπόν σε τρεις άξονες. Αρχικά, ορίζονται οι στάθμες επιτελεστικότητας και ταξινομούνται οι κίνδυνοι-μορφές αστοχίας σύμφωνα τις οποίες θα αποτιμηθούν οι δεξαμενές. Στη συνέχεια, με την επιβολή 44 χρονοϊστοριών εδαφικής επιτάχυνσης σεισμών που ορίζει ο FEMA P-695, εκτιμάται η σεισμική συμπεριφορά των τεσσάρων δεξαμενών με τη βοήθεια του απλοποιημένου μονοβάθμιου μοντέλου που προσομοιώθηκε στο λογισμικό OpenSees. Τέλος, αφού οριστεί το πιθανοτικό πλαίσιο στο οποίο εξετάζεται η αποτίμηση των δεξαμενών εξάγονται οι καμπύλες σεισμικής τρωτότητας για κάθε μία δεξαμενή για κάθε πιθανή μορφή αστοχίας της.

5.2 Στάθμες επιτελεστικότητας

Όσον αφορά την αποτίμηση των δεξαμενών, οι υπάρχοντες κανονισμοί αναφέρονται συνοπτικά σε κάποιους περιορισμούς όπως η μέγιστη επιτρεπόμενη πλαστική στροφή της βάσης της δεξαμενής, η μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική τάση και το μέγιστο επιτρεπόμενο ελεύθερο ύψος της δεξαμενής. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι πρέπει να οριστούν με σαφήνεια οι στάθμες επιτελεστικότητας για την ορθή αποτίμηση των δεξαμενών. Με την έννοια επιτελεστικότητα ορίζεται η απόδοση που πρέπει να έχει μία δεδομένη κατασκευή καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της και εξαρτάται από τις πιθανές μορφές αστοχίας της.

Στις δεξαμενές, οι πιο καταστρεπτικές μορφές αστοχίας σχετίζονται κυρίως με την θραύση της βάσης ή των τοιχωμάτων, καθώς αυτές οι περιπτώσεις μπορούν να συντελέσουν σε απώλεια του αποθηκευμένου υγρού. Μια πιθανή θραύση του κελύφους μια δεξαμενής είναι δυνατόν να προκαλέσει μια μη ελεγχόμενη απώλεια του αποθηκευμένου υγρού, με ό,τι επιπτώσεις αυτό συνεπάγεται για το περιβάλλον και την ίδια την δεξαμενή. Οι Bakalis et al (2015) έχουν αναπτύξει μια μεθοδολογία αποτίμησης με βάση την επιτελεστικότητα για ατμοσφαιρικές μεταλλικές δεξαμενές αποθήκευσης υγρού. Οι αρχές της σεισμικής μηχανικής βάσει επιτελεστικότητας (Performance-Based-Earthquake-Engineering) θεωρούν τα εξής τρία επίπεδα επιτελεστικότητας, αυξανόμενης σφοδρότητας:

1. Αμελητέες ζημιές (DS1)
2. Εκτεταμένες ζημιές, χωρίς απώλεια του υγρού αποθήκευσης (DS2)
3. Πολύ εκτεταμένες ζημιές, με απώλεια του υγρού αποθήκευσης (DS3)

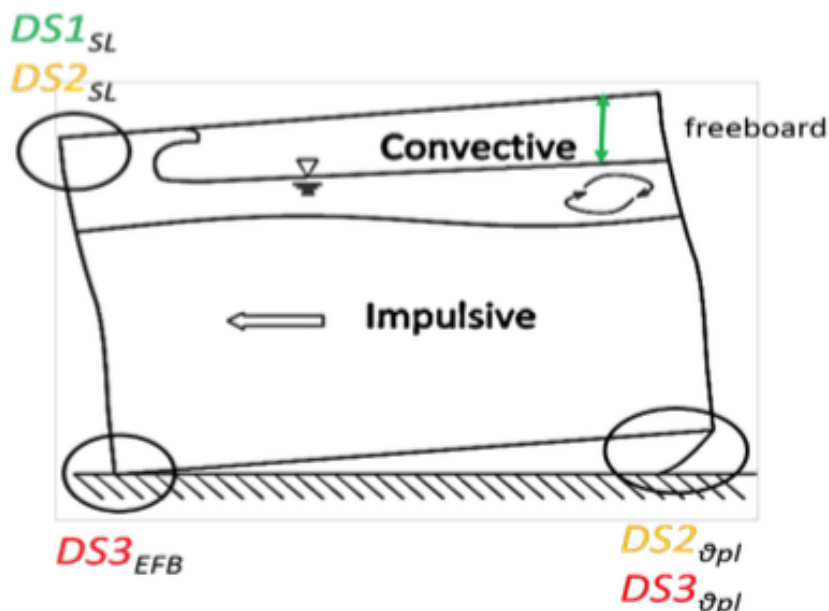
Ωστόσο, η παραπάνω κατηγοριοποίηση δεν μπορεί να είναι επαρκή για έναν Μηχανικό, καθώς δεν μπορεί να αποδώσει με σαφήνεια την έκταση της ζημιάς. Επίσης, με μία τέτοια γενική κατηγοριοποίηση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σαφή και ορθή αποτίμηση μιας δεξαμενής, καθώς ένα συγκεκριμένο επίπεδο επιτελεστικότητας μπορεί να συνδέεται με περισσότερες από μια μορφή αστοχίας οι οποίες μπορούν να συμβάλλουν με διαφορετικό τρόπο και βαθμό στην απώλεια ή μη του υγρού αποθήκευσης. Για παράδειγμα, η αστοχία λόγω της επαγωγικής κίνησης του υγρού προκαλεί σχετικά επισκευάσιμες ζημιές στην κορυφή της δεξαμενής, σε αντίθεση με την υπέρβαση της επιτρεπόμενης πλαστικής στροφής στη βάση της.

Συνεπώς, είναι απαραίτητο να κατηγοριοποιηθούν οι στάθμες επιτελεστικότητας με βάση κάθε μορφή αστοχίας. Οι μορφές αστοχίας οι οποίες θα εξεταστούν κατά την αποτίμηση των τεσσάρων μη αγκυρωμένων δεξαμενών είναι:

- Η πλαστική στρόφη βάσης (θ_{pl} =Plastic rotation)
- Η επαγωγική κίνηση του υγρού στα ανώτερα τμήματα των τοιχωμάτων (SL=Sloshing)
- Ο ελαστοπλαστικός λυγισμός (EFB=Elephant's foot buckling)

5.3 Κριτήρια αστοχίας

Για την αποτίμηση των δεξαμενών, αφού έχουν οριστεί οι στάθμες επιτελεστικότητας, πρέπει να αναφερθούν τα κριτήρια ή αλλιώς οι επιτρεπόμενες τιμές που πρέπει ικανοποιούν οι παραπάνω στάθμες. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι επιτρεπόμενες τιμές με τις οποίες θα γίνει η σύγκριση των αντίστοιχων μεγεθών που θα υπολογιστούν σύμφωνα με το απλοποιημένο μονοβάθμιο προσομοίωμα.



Σχήμα 5.1: Τοπικές στάθμες επιτελεστικότητας μη αγκυρωμένων δεξαμενών

Πίνακας 5.1: Κριτήρια αποτίμησης τοπικών σταθμών επιτελεστικότητας

Local DSi	DS Capacities	Reference
DS1 _{SL}	Freeboard ¹	API-650 (2007)
DS2 _{SL}	1.4*Freeboard	API-650 (2007)
DS2 _{opl}	0.2 rad	CEN (2006)
DS3 _{opl}	0.4 rad	Cortez et al (2012)
DS3 _{EFB}	EFB strenght ²	CEN (2006)

Τα κριτήρια αποτίμησης του Πίνακα 5.1 ορίζουν ένα απλοποιημένο πλαίσιο για την κατανόηση της έκτασης των βλαβών μια δεξαμενής, παρέχοντας παράλληλα τη δυνατότητα εκτίμησης κόστους των βλαβών. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα ορισμού καθολικών στόχων επιτελεστικότητας για μία ή περισσότερες δεξαμενές, χωρίς αναφορά της μορφής αστοχίας που παρουσιάστηκε. Συγκεκριμένα, το *DS1* αντιπροσωπεύει αμελητέες ζημιές οι οποίες έχουν προκληθεί όταν το ύψος του αποθηκευμένου υγρού λόγω επαγωγικής κίνησής του γίνει ίσο με το ελεύθερο ύψος της δεξαμενής. Το *DS2* αναφέρεται σε εκτεταμένες ζημιές χωρίς απώλεια του αποθηκευμένου υγρού, όταν το ύψος του υγρού λόγω επαγωγικής κίνησής του γίνει ίσο με 1.4 φορές του ελεύθερου ύψους της δεξαμενής ή η πλαστική στροφή της βάσης γίνει ίση με 0.2 rad. Τέλος, το *DS3* απευθύνεται σε πολύ εκτεταμένες ζημιές με απώλεια του αποθηκευμένου υγρού, όταν η θλιπτική τάση γίνει ίση με την αντοχή έναντι ελαστοπλαστικού λυγισμού ή η πλαστική στροφή βάσης γίνει ίση με 0.4 rad.

Πίνακας 5.2: Καθολικές στάθμες επιτελεστικότητας

Global (DSi)	DS Capacities
DS1	DS1 _{SL}
DS2	DS2 _{SL} or DS2 _{opl}
DS3	DS3 _{opl} or DS3 _{EFB}

Οι παραπάνω μορφές αστοχίας δεν είναι οι μοναδικές οι οποίες μπορούν να παρουσιαστούν σε μια μεταλλική δεξαμενή αποθήκευσης υγρού λόγω μια ισχυρής σεισμικής διέγερσης. Έχουν παρατηρηθεί στο παρελθόν και άλλες μορφές αστοχίας όπως ο λυγισμός στα ανώτερα τοιχώματα της δεξαμενής λόγω της αρνητικής πίεσης κατά την διάρκεια ταλάντωσης του ρευστού ή ο λυγισμός ενός τμήματος του κελύφους λόγω μικρού πάχους κατά τη διάρκεια μιας εξωτερικής πίεσης. Επιπλέον, υπάρχει η πιθανότητα στις δεξαμενές αποθήκευσης ενός εύφλεκτου υλικού με πλωτή οροφή να αναπτυχθεί φωτιά λόγω της τριβής της άκρης της οροφής με το τοίχωμα της δεξαμενής. Ωστόσο, αυτές οι μορφές αστοχίας είναι δύσκολο να προσομοιωθούν και παρατηρούνται σπανίως και γι' αυτό δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

¹Ως «Freeboard» αναφέρεται το ελεύθερο ύψος της δεξαμενής, δηλαδή η διαφορά του ύψους της μεταλλικής δεξαμενής και του ύψους του αποθηκευμένου υγρού σε ηρεμία.

²Ως «EFB strength» αναφέρεται η αντοχή της δεξαμενής έναντι του ελαστοπλαστικού λυγισμού και περιγράφεται αναλυτικά στο επόμενο υποκεφάλαιο.

5.4 Αριθμητικός υπολογισμός καμπυλών σεισμικής τρωτότητας

Οι καμπύλες σεισμικής τρωτότητας είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την αποτίμηση μιας κατασκευής. Ένας Μηχανικός με τις καμπύλες σεισμικής τρωτότητας είναι σε θέση να προβλέψει τη πιθανότητα που έχει η κατασκευή να αστοχήσει, όπως επίσης και την μορφή της αστοχίας της, συναρτήσει της σεισμικής δραστηριότητας της ευρύτερης περιοχής της κατασκευής. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αξιολογηθούν και να συγκριθούν οι μορφές αστοχίας της κατασκευής και να εντοπιστούν τα «ευάλωτα» χαρακτηριστικά της. Ο Μηχανικός λοιπόν γνωρίζοντας τις «αδυναμίες» μια κατασκευής και αφού λάβει υπόψη μια σειρά από άλλους παράγοντες (π.χ. κόστος, απαιτούμενη ασφάλεια, κ.τ.λ.) είναι σε θέση να λάβει αξιόπιστες αποφάσεις ανάλογα με τις απαιτήσεις που υπάρχουν. Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να εξαχθούν οι καμπύλες σεισμικής τρωτότητας και στη συνέχεια γίνεται διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς των τεσσάρων δεξαμενών.

Σύμφωνα με τον Porter (2015) ένας κοινός, μη τεχνικός ορισμός της τρωτότητας είναι «το πόσο εύκολα μπορεί να σπάσει κάτι ή να πάθει ζημιά». Στην πραγματικότητα η σεισμική τρωτότητα εκφράζει την πιθανότητα να συμβεί ένα ανεπιθύμητο συμβάν (στην δεδομένη περίπτωση όταν η δεξαμενή δεν ικανοποιεί ένα επίπεδο επιτελεστικότητας) συναρτήσει ενός μεγέθους της σεισμικής διέγερσης (π.χ. επιτάχυνση, μετακίνηση, κτλ). Οι στόχοι επιτελεστικότητας ποσοτικοποιούνται με την βοήθεια των γενικών όρων «απαίτησης» και «ικανότητας» οι οποίοι προσδιορίζονται με την βοήθεια μη γραμμικών, δυναμικών μετακινήσεων της δεξαμενής. Με την βοήθεια κοινών πιθανοτικών εργαλείων ανάλυσης που θα αναλυθούν στη συνέχεια, λαμβάνεται υπόψη η τυχρηματικότητα και η αβεβαιότητα των χαρακτηριστικών της κίνησης του εδάφους, της δομικής απαίτησης και της ικανότητας του δομικού συστήματος. Συνεπώς, μέσα σε αυτό το πιθανοτικό πλαίσιο η αποτίμηση και ο έλεγχος μια κατασκευής γίνεται με όρους απαίτησης και ικανότητας αντικαθιστώντας τον συντηρητικό τρόπο της φόρτισης και του συντελεστή αντίστασης. Μπορεί να συμπεράνει κάποιος ότι οι καμπύλες σεισμικής τρωτότητας σχετίζονται στην πραγματικότητα με τα εξής τρία μεγέθη:

- Μέγεθος της σεισμικής διέγερσης ($IM=Intensity\ Measure$)
- Απαίτηση ($D=Demand$)
- Ικανότητα ($C=Capacity$)

Για να πραγματοποιηθεί μια ορθή εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας των δεξαμενών αποθήκευσης, πρέπει να υιοθετηθεί ένα IM που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του στατικού συστήματος με βέλτιστο τρόπο. Στην περίπτωση των δεξαμενών πρέπει να θεωρηθεί μια φασματική επιτάχυνση που σχετίζεται με την ωστική κίνηση του υγρού, η οποία καθορίζει σχεδόν αποκλειστικά την συμπεριφορά τους. Η φασματική επιτάχυνση για ωστική περίοδο $S_a(T_{imp})$ ή η μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους PGA , η οποία είναι όμοια με την $S_a(T_{imp})$ λόγω χαμηλής ωστικής ιδιοπεριόδου T_{imp} , είναι δύο μεγέθη της σεισμικής διέγερσης τα οποία κάλλιστα μπορούν να υιοθετηθούν για την αποτίμηση των δεξαμενών. Όσον αφορά τους όρους της απαίτησης και της ικανότητας των δεξαμενών θα οριστούν στη συνέχεια σύμφωνα με τις στάθμες επιτελεστικότητας και τον Πίνακα 5.1.

Σύμφωνα με τους Cornell et al (2002), η συνάρτηση επικινδυνότητας $H(s_a)$ αντιπροσωπεύει την ετήσια πιθανότητα μια τυχαία επιτάχυνση S_a να είναι ίση ή μεγαλύτερη με μια συγκεκριμένη επιτάχυνση s_a . Η συνάρτηση επικινδυνότητας εκφράζει όλους τους πιθανούς σεισμούς που μπορούν να πλήξουν την ευρύτερη περιοχή της

κατασκευής και εκτιμάται συνήθως από τους σεισμολόγους. Η εκτίμηση των απαιτήσεων της κατασκευής για κάθε πιθανό σεισμό σε συνδυασμό με την εκτίμηση των ικανοτήτων για διάφορες μορφές αστοχίας είναι αντικείμενο του Μηχανικού. Η εξαγωγή των καμπυλών σεισμικής τρωτότητας γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο σχετίζονται τα μεγέθη της επικινδυνότητας S_a και της απαίτησης με στόχο την παραγωγή της καμπύλης της σεισμικής επικινδυνότητας $H_D(d)$ για την δεδομένη απαίτηση. Η καμπύλη αυτή εκφράζει την ετήσια πιθανότητα η απαίτηση D να υπερβεί μια δεδομένη τιμή d . Το δεύτερο στάδιο συνδυάζει την καμπύλη της σεισμικής επικινδυνότητας με το τρίτο μέγεθος, την ικανότητα, με σκοπό να παραχθεί η P_{PL} , δηλαδή η ετήσια πιθανότητα να μην ικανοποιείται η στάθμη επιτελεστικότητας. Στη συνέχεια ορίζονται οι τύποι που καθορίζουν τις παραπάνω ετήσιες πιθανότητες.

$$H_D(d) = \int P[D \geq d | S_a = x] |dH(x)|, \quad (5.1)$$

όπου $P[D \geq d | S_a = x]$ η πιθανότητα η απαίτηση να υπερβεί μια δεδομένη τιμή d δεδομένου ότι η τιμή S_a είναι γνωστή και προκύπτει από την ανάλυση της στατικής συμπεριφοράς και $|dH(x)|$ η απόλυτη τιμή της παραγώγου της καμπύλης επικινδυνότητας της φασματικής επιτάχυνσης της ευρύτερης περιοχής της κατασκευής επί dx .

$$P_{PL} = \int P[C \leq d] |dH_D(x)|, \quad (5.2)$$

όπου $P[C \leq d]$ η πιθανότητα η ικανότητα να μην υπερβεί μια δεδομένη τιμή απαίτησης d και $|dH_D(x)|$ η απόλυτη τιμή της παραγώγου της καμπύλης επικινδυνότητας της εδαφικής κίνησης.

Οι εξισώσεις (5.1), (5.2) μπορούν να επιλυθούν αριθμητικά για οποιαδήποτε υπόθεση σχετικά με τη μορφή των πιθανοτικών αναπαραστάσεων των τριών παραπάνω μεγεθών. Ωστόσο, τα ολοκληρώματα πρέπει να είναι εύκολα επιλύσιμα για να μπορούν να εκφραστούν με όρους συντελεστών απαίτησης και ικανότητας. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με τρεις αναλυτικές εκτιμήσεις αυτών των αναπαραστάσεων οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στο Σχήμα 5.2. Αρχικά, γίνεται η υπόθεση ότι η καμπύλη επικινδυνότητας μπορεί να εκτιμηθεί στην περιοχή γύρω της $P_{PL_{S_a}}$, δηλαδή σε ένα εύρος τιμών φασματικών επιταχύνσεων για επίπεδο επικινδυνότητας ίσο με το οριακό επίπεδο της πιθανότητας P_{PL} . Συνεπώς η καμπύλη επικινδυνότητας παίρνει την εξής μορφή:

$$H(s_a) = P[S_a \geq s_a] = k_o s_a^{-k}, \quad (5.3)$$

όπου $k = [1,4]$ η κλίση και k_o ένας συντελεστής που εξαρτάται από την γραμμική παλινδρόμηση, θεωρώντας με αυτόν τρόπο την καμπύλη επικινδυνότητας γραμμική σε λογαριθμικούς άξονες στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Γίνεται, επίσης, η θεώρηση ότι για δεδομένο επίπεδο φασματικής επιτάχυνσης S_a , η εκτιμώμενη απαίτηση \hat{D} (η οποία εκφράζεται ως μέση τιμή) μπορεί να εκτιμηθεί ομοίως στην περιοχή γύρω της $P_{PL_{S_a}}$, σύμφωνα με τη Σχέση 5.4.

$$\hat{D} = \alpha (S_a)^b, \quad (5.4)$$

όπου οι συντελεστές α , b προκύπτουν με την βοήθεια γραμμικής παλινδρόμησης των

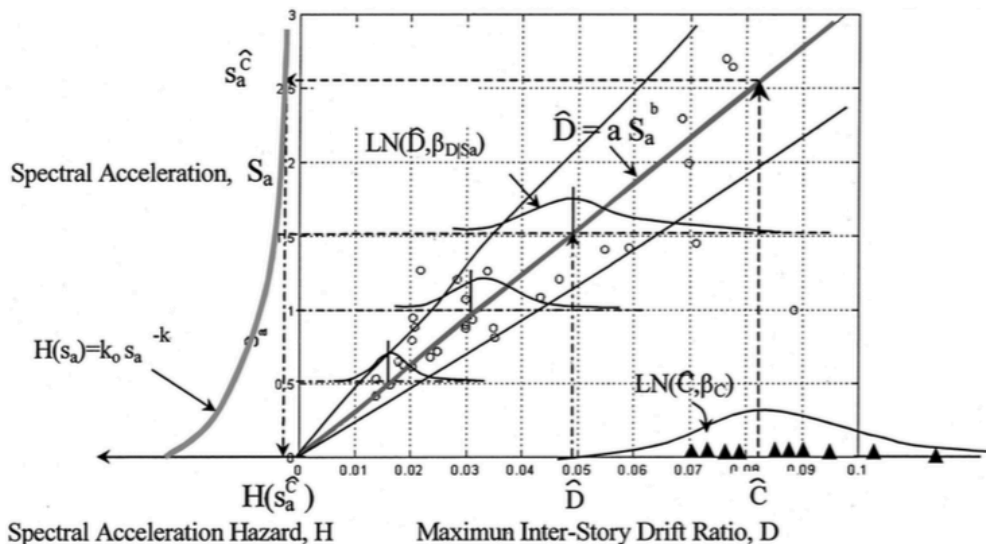
αποτελεσμάτων της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2. Για να πραγματοποιηθεί η πιθανοτική αναπαράσταση της απαίτησης δεδομένης της φασματικής επιτάχυνσης μπορεί να θεωρηθεί ότι η απαίτηση ακολουθεί την λογαριθμική κατανομή με μέση τιμή \hat{D} και τυπική απόκλιση $\beta_{D|S_a}$ (η οποία αναφέρεται στην διεθνή βιβλιογραφία ως «dispersion», δηλαδή «διασπορά»). Για την εκτίμηση των παραμέτρων a , b και $\beta_{D|S_a}$ πραγματοποιείται ένας αριθμός μη γραμμικών αναλύσεων και μετέπειτα γίνεται γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των μεγεθών $\ln D$ και $\ln S_a$. Με την υπόθεση της λογαριθμικής κατανομής ο πρώτος παράγοντας της εξίσωσης (5.1) γίνεται:

$$P[D \geq d | S_a = x] = 1 - \Phi(\ln[d / ax^b] / \beta_{D|S_a}), \quad (5.5)$$

όπου Φ η τυποποιημένη κανονική κατανομή. Ομοίως, η ικανότητα της κατασκευής θεωρείται ότι έχει μια μέση τιμή \hat{C} και ακολουθεί την λογαριθμική κατανομή με τυπική απόκλιση β_C . Συνεπώς, ο πρώτος παράγοντας της εξίσωσης (5.2) γίνεται:

$$P[C \leq d] = \Phi(\ln[d / \hat{C}] / \beta_C), \quad (5.6)$$

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι η εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας πραγματοποιείται μέσα σε ένα πιθανοτικό πλαίσιο, όπου οι απαιτήσεις και οι ικανότητες θεωρούνται λογαριθμικά κατανομημένες γύρω από τις αντίστοιχες μέσες εκτιμήσεις με δεδομένες «διασπορές» που αντιπροσωπεύουν την τυχνηματικότητα και την αβεβαιότητα τους. Η πιθανότητα, λοιπόν, η μέση απαίτηση να υπερβεί την μέση οριακή κατάσταση ικανότητας για δεδομένη σεισμική ένταση μπορεί να υπολογιστεί εύκολα μέσω της αθροιστικής συνάρτησης κανονικής κατανομής.



Σχήμα 5.2: Βασικές συνιστώσες: επικινδυνότητα φασματικής επιτάχυνσης $H(s_a)$, λογαριθμική κατανομή της απαίτησης D δεδομένης S_a με μέση τιμή \hat{D} και διασπορά $\beta_{D|S_a}$, λογαριθμική κατανομή της ικανότητας C με μέση τιμή \hat{C} και διασπορά β_C , Cornell et al (2002)

Με τη βοήθεια του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος γίνονται πολλαπλές δυναμικές μη γραμμικές αναλύσεις για την κάθε δεξαμενή. Για κάθε μία από τις 44 χρονοϊστορίες εδαφικής επιτάχυνσης σεισμών που επιλέχτηκαν σύμφωνα με το FEMA P-695 υπολογίζεται η απαίτηση ή *EDP* (Engineering Demand Parameter) για κάθε μορφή αστοχίας (*SL*, θ_{pl} και *EFB*) και το μέγεθος της σεισμικής διέγερσης που επιλέχτηκε (*IM=PGA*). Θεωρώντας ότι τα μεγέθη *EDP* και *IM* συνδέονται με τη Σχέση 5.7

$$EDP = aIM^b \Leftrightarrow \ln(EDP) = \ln a + b \ln(IM), \quad (5.7)$$

με γραμμική παλινδρόμηση των σημείων (*EDP,IM*) που έχουν προκύψει για κάθε δυναμική μη γραμμική ανάλυση για κάθε σεισμό, υπολογίζονται οι συντελεστές *a*, *b* και η «διασπορά» της απαίτησης β_D . Η παραπάνω διαδικασία είναι γνωστή ως «cloud analysis».

Για την εξαγωγή των καμπυλών σεισμικής τρωτότητας πρέπει να οριστεί η πιθανότητα που υπάρχει για δεδομένο *IM* η απαίτηση να υπερβεί την ικανότητα. Σύμφωνα με τις εξισώσεις (5.5) και (5.6) ισχύουν τα εξής:

$$PoE = P[D \geq C | IM = im] = \Phi\left(\frac{\ln(D/C)}{\beta}\right), \quad (5.8)$$

όπου *PoE* = Probability of Exceedance, *D* = Demand, *C* = Capacity, *IM* = αβέβαιο μέγεθος της σεισμικής διέγερσης που επιλέχτηκε, *im* = μια συγκεκριμένη τιμή του μεγέθους της σεισμικής διέγερσης που επιλέχτηκε. Ως β ορίζεται η γενική «διασπορά» του συστήματος δηλαδή η «διασπορά» λόγω αβεβαιότητας της απαίτησης β_D και της ικανότητας β_C . Μέσω του κεντρικού οριακού θεωρήματος η γενική «διασπορά» μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\beta = \sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2}, \quad (5.9)$$

όπου ως β_C θεωρήθηκε η τιμή 0.3 για όλες τις περιπτώσεις των ενδεχόμενων μορφών αστοχίας. Η απαίτηση *D* θα οριστεί στη συνέχεια για κάθε μορφή αστοχίας ξεχωριστά ενώ η ικανότητα *C* έχει οριστεί στον Πίνακα (5.1). Άρα η Σχέση (5.8) με την βοήθεια της Σχέσης (5.7) μπορεί να οριστεί ως εξής:

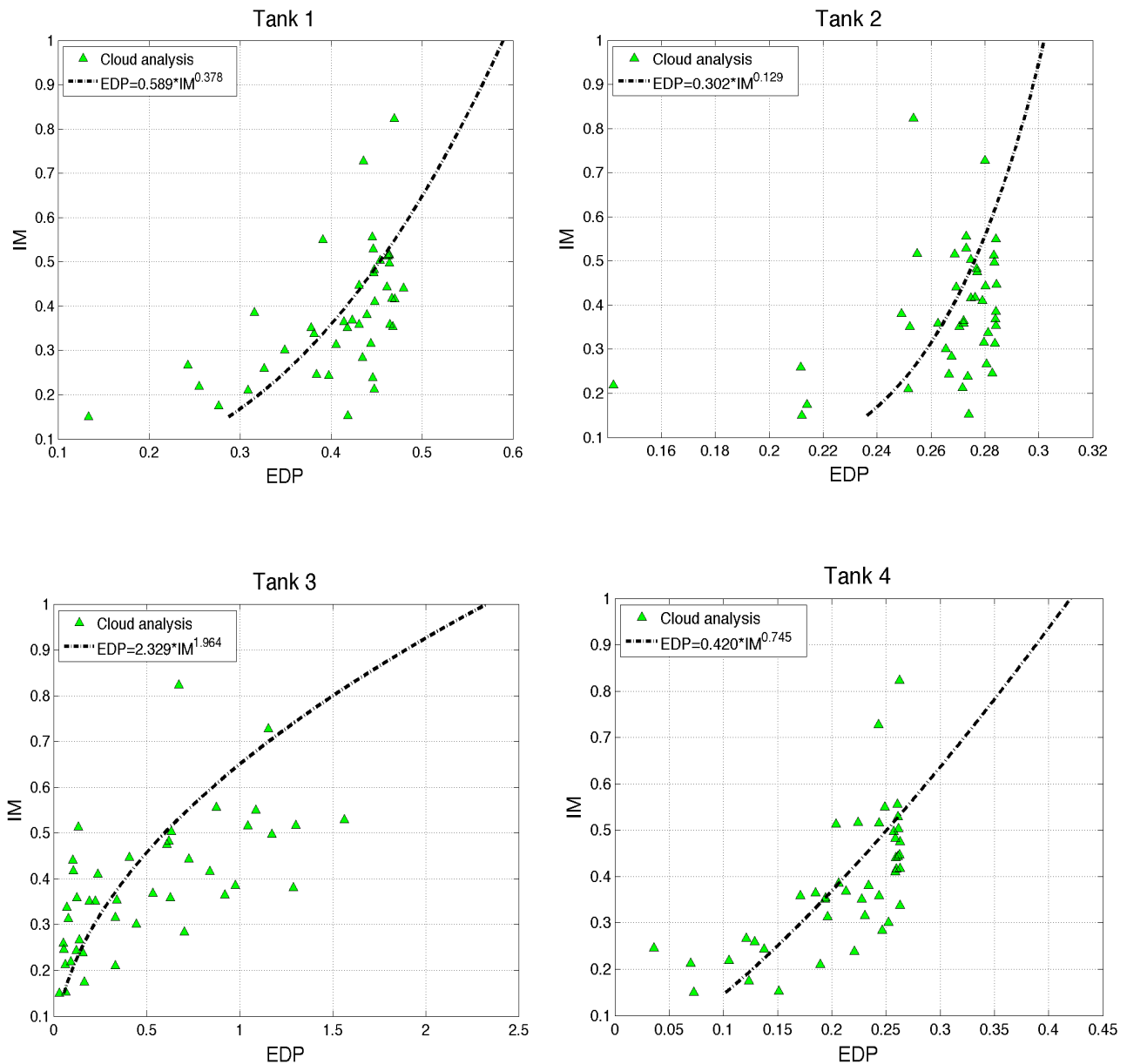
$$PoE = \Phi\left(\frac{\ln(D/C)}{\beta}\right) = \Phi\left(\frac{\ln D - \ln C}{\beta}\right) = \Phi\left(\frac{\ln(aIM^b) - \ln C}{\beta}\right), \quad (5.10)$$

$$PoE = \Phi\left(\frac{\ln a + b \ln IM - \ln C}{\beta}\right) = \Phi\left(\frac{\ln IM + \frac{1}{b} \ln(a/C)}{\frac{1}{b} \beta}\right), \quad (5.11)$$

$$PoE = \Phi\left(\frac{\ln IM + \ln((a/C)^{1/b})}{\frac{1}{b} \beta}\right), \quad (5.12)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης για κάθε μορφή αστοχίας που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία και τέλος παρουσιάζονται τα διαγράμματα των καμπυλών σεισμικής τρωτότητας των τεσσάρων δεξαμενών.

Για την αποτίμηση της πλαστικής στροφής βάσης της δεξαμενής ορίστηκε η απαίτηση θ_{pl} σύμφωνα με την Σχέση 3.2. Όσον αφορά την ικανότητα των δεξαμενών έναντι πλαστικής στροφής βάσης θεωρήθηκαν τα κριτήρια που αναφέρονται στον Πίνακα (5.1).

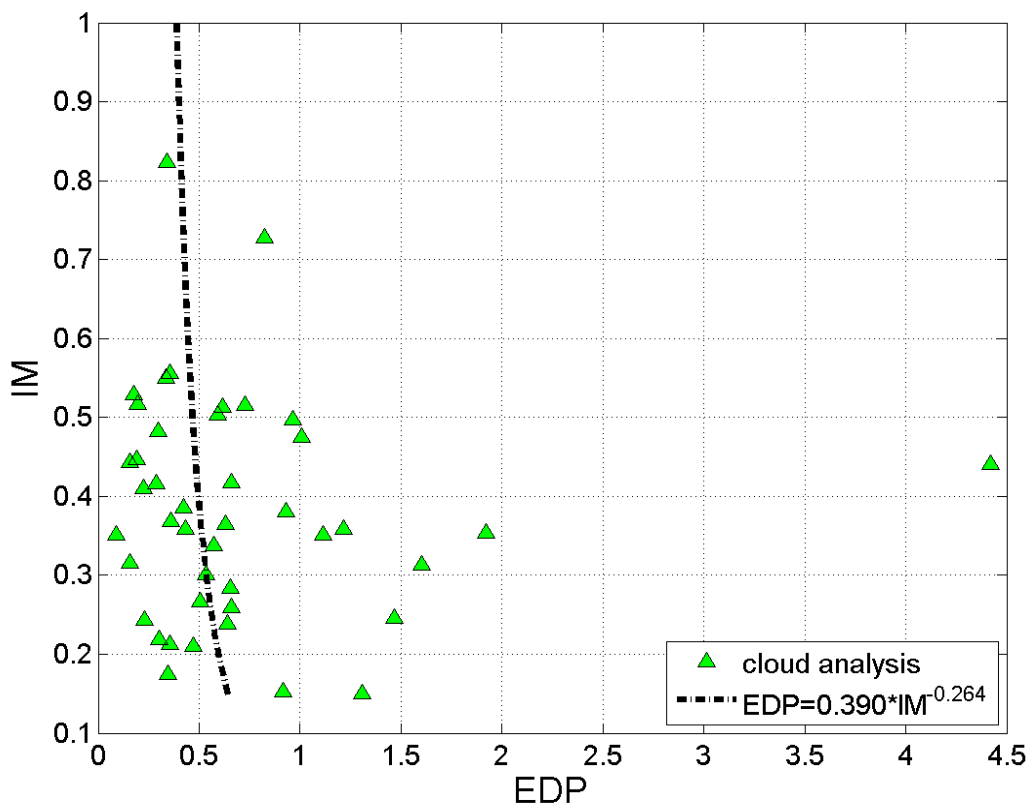


Σχήμα 5.3: Γραμμική παλινδρόμηση των μεγεθών θ_{pl} και PGA σε λογαριθμικούς άξονες των τεσσάρων δεξαμενών

Για την αποτίμηση της επαγωγικής κίνησης του υγρού στα ανώτερα τοιχώματα ($SL=Sloshing$) ορίστηκε η απαίτηση σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα ως εξής:

$$d_{\max} = 0.84RS_e(T_{c1})/g, \quad (5.13)$$

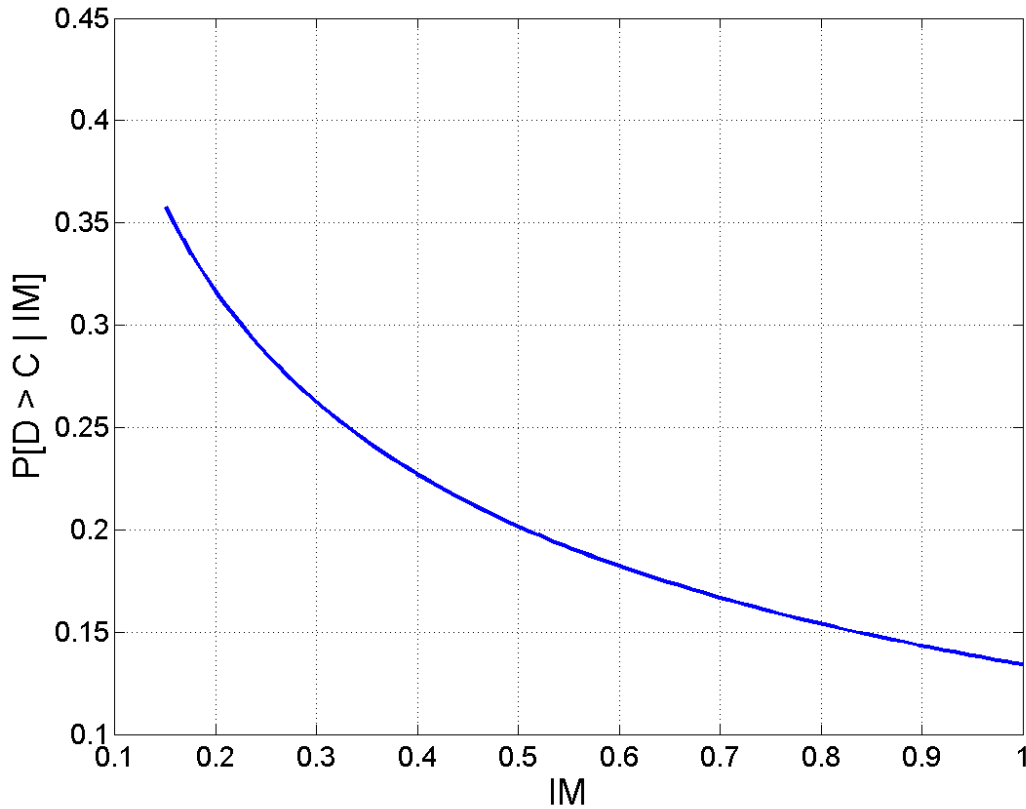
όπου R η ακτίνα της δεξαμενής και $S_e(T_{c1})$ η ελαστική φασματική επιτάχυνση της πρώτης επαγωγικής ιδιομορφής του αποθηκευμένου υγρού για λόγο απόσβεσης 0.5%. Όσον αφορά την ικανότητα των δεξαμενών έναντι της επαγωγικής κίνησης του υγρού στα ανώτερα τοιχώματα θεωρήθηκαν τα κριτήρια που αναφέρονται στον Πίνακα 5.1. Πρέπει να αναφερθεί ότι η αποτίμηση για την συγκεκριμένη μορφή αστοχίας πραγματοποιήθηκε μόνο για τις δεξαμενές 1 και 2 καθώς για τις δεξαμενές 3 και 4 έχει θεωρηθεί το ύψος του αποθηκευμένου υγρού ίσο με το ύψος της δεξαμενής (Πίνακας 1.1) και συνεπώς μπορούμε να γνωρίζουμε εκ των προτέρων ότι η $RoE=1$ για κάθε επίπεδο σεισμικής έντασης.



Σχήμα 5.4: Γραμμική παλινδρόμηση των μεγεθών d_{\max} και PGA σε λογαριθμικούς άξονες της δεξαμενής 1

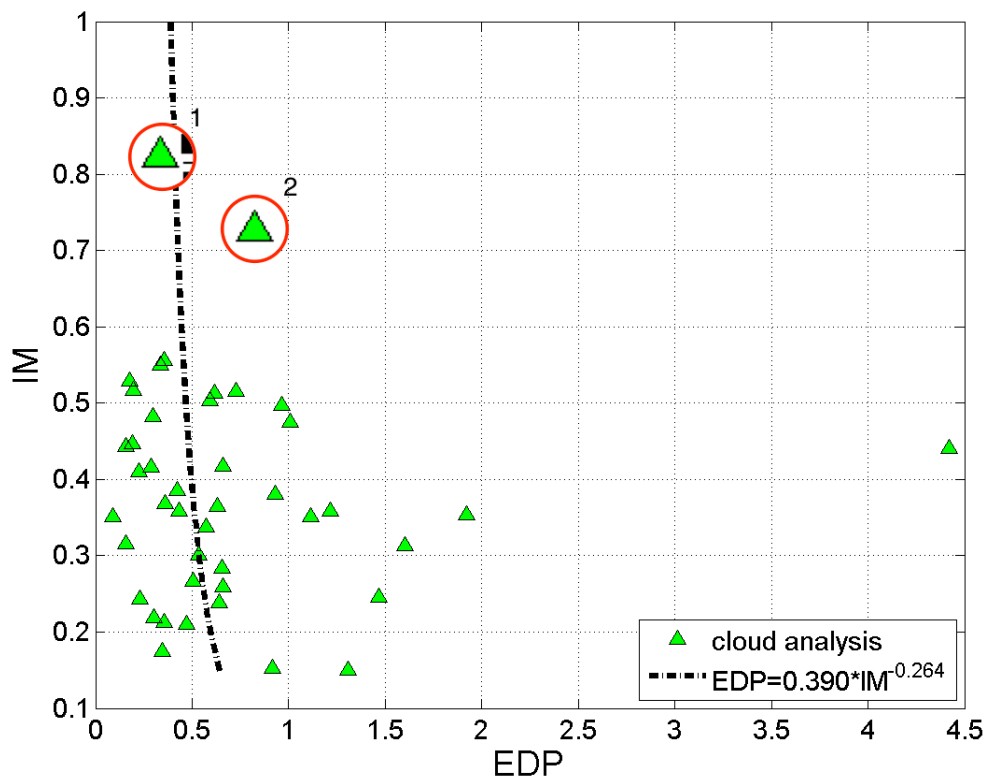
Στο Σχήμα 5.4 η ευθεία και οι συντελεστές a και b υποδηλώνουν τη μη ικανοποιητική γραμμική παλινδρόμηση των μεγεθών d_{\max} και PGA . Παρατηρούνται σημεία τα οποία ενώ έχουν πολύ μεγάλη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA προκαλούν μικρή απαίτηση της επαγωγικής κίνησης του υγρού στα ανώτερα τοιχώματα (ανομοιόμορφος κίνδυνος). Το σφάλμα αυτό γίνεται αντιληπτό ιδιαίτερα με την βοήθεια της εξαγωγής της καμπύλης της σεισμικής τρωτότητας. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται ενδεικτικά η καμπύλη σεισμικής

τρωτότητας της δεξαμενής 1 για κριτήριο αποτίμησης τοπικού στόχου επιτελεστικότητας $DS2_{SL}$.

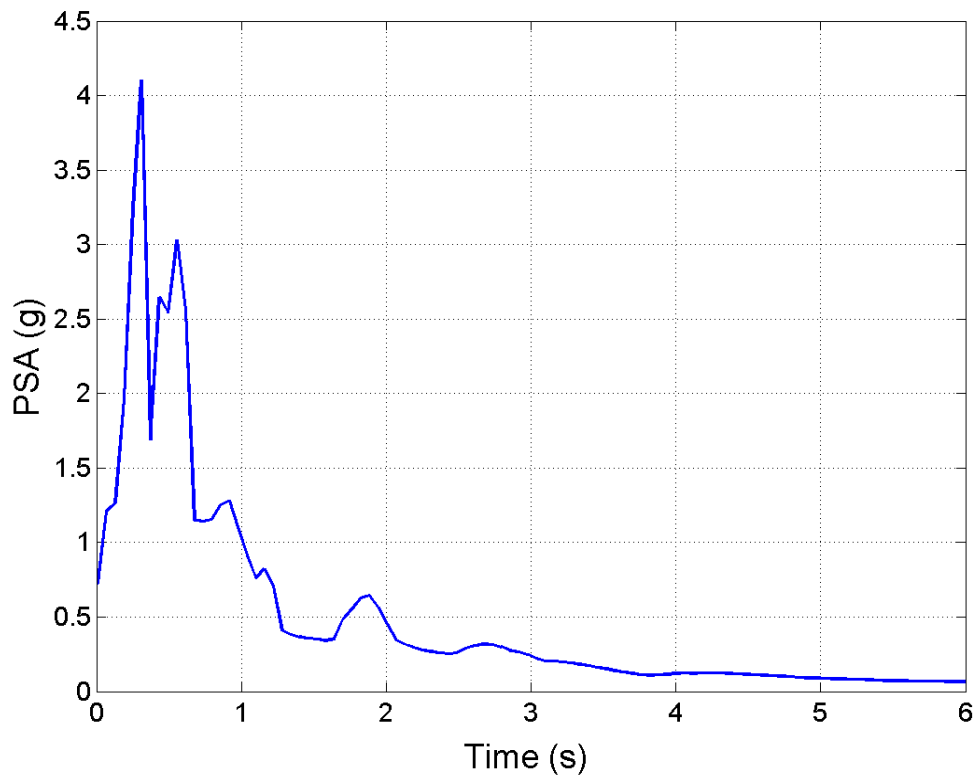


Σχήμα 5.5: Καμπύλη σεισμικής τρωτότητας της επαγωγικής κίνησης του υγρού στα ανώτερα τοιχώματα της δεξαμενής 1

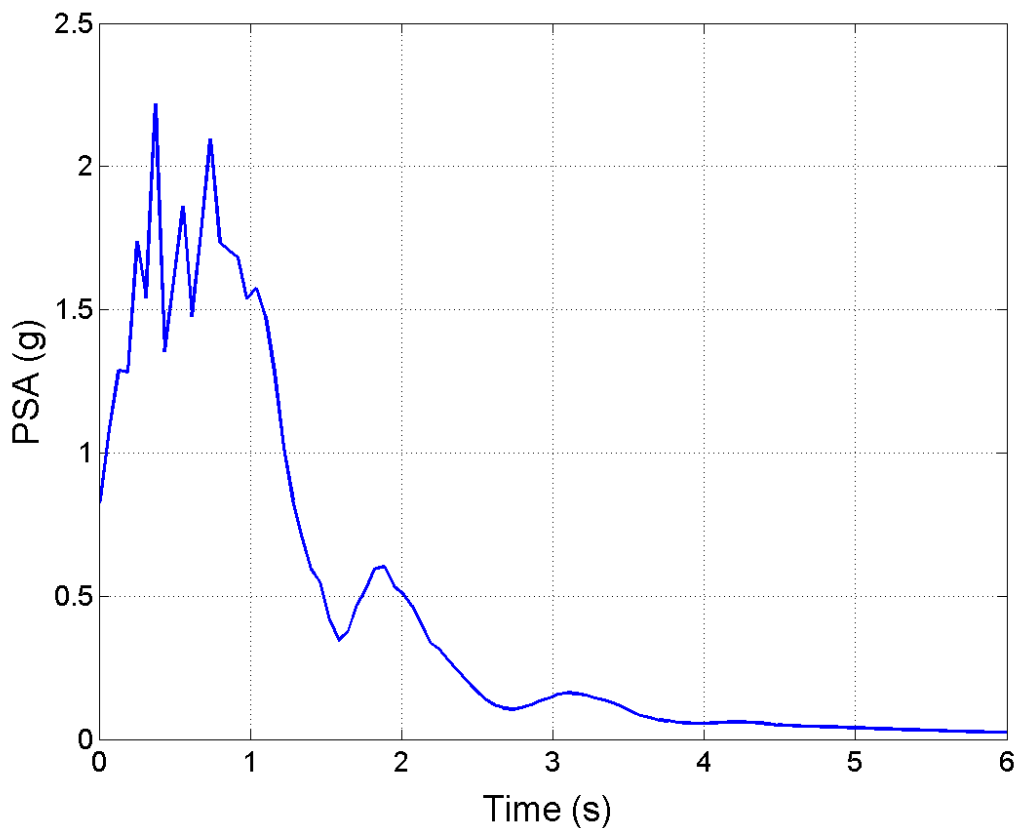
Επιβεβαιώνεται, λοιπόν, η εκτίμησή μας για αρχική μη ικανοποιητική γραμμική παλινδρόμηση των μεγεθών d_{max} και PGA . Για την διερεύνηση του προβλήματος είναι αναγκαίο να εξετάσουμε την σχέση του μεγέθους της σεισμικής διέγερσης που επιλέχτηκε (PGA) με την ελαστική φασματική επιτάχυνση της πρώτης επαγωγικής ιδιομορφής $S_e(T_{c1})$ του αποθηκευμένου υγρού για λόγο απόσβεσης 0.5%. Στη συνέχεια εξετάζονται μεμονωμένα οι χρονοϊστορίες 2 σεισμών που διακρίνονται για την υψηλή τιμή του PGA και την μικρή τιμή του d_{max} και συνεπώς του $S_e(T_{c1})$ λόγω της Σχέσης 5.13. Τα σημεία που εξετάζονται είναι τα σημεία 1 και 2.



Σχήμα 5.6: Γραμμική παλινδρόμηση των μεγεθών d_{max} και PGA σε λογαριθμικούς άξονες της δεξαμενής 1 με τα σημεία 1 και 2 που επρόκειτο να εξεταστούν



Σχήμα 5.7: Χρονοϊστορία σεισμού του σημείου 1



Σχήμα 5.8: Χρονοϊστορία σεισμού του σημείου 2

Με τη βοήθεια των παραπάνω επιταχυνσιογραφήματων γίνεται αντιληπτή η σημαντική διαφορά μεταξύ των μεγεθών PGA και $S_e(T_{c1})$. Η ιδιοπερίοδος της επαγωγικής κίνησης του υγρού T_{c1} μιας δεξαμενής κυμαίνεται συνήθως από 2 έως 6 sec, με αποτέλεσμα η φασματική του επιτάχυνση $S_e(T_{c1})$ να λογίζεται αρκετά μικρή. Το πρόβλημα προκύπτει συνήθως κυρίως λόγω του φιλτραρίσματος των μικρών ιδιοσυχνοτήτων που γίνεται στα επιταχυνσιογραφήματα από τους σεισμολόγους με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της απόκρισης για $T > 4s$. Για την επίλυση του δεδομένου προβλήματος θα έπρεπε να λάβουμε υπόψη μας ένα άλλο μέγεθος της σεισμικής διέγερσης, όπως η επαγωγική φασματική επιτάχυνση, με το οποίο θα μπορούσε να περιγραφεί με ακρίβεια η μορφή αστοχίας των ανώτερων τοιχωμάτων της δεξαμενής λόγω της επαγωγικής κίνησης του αποθηκευμένου υγρού. Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι σε ένα σύνθετο στατικό σύστημα όπως οι δεξαμενές είναι σχεδόν απίθανο ένα δεδομένο μέγεθος της σεισμικής διέγερσης να μπορεί να περιγράψει με επάρκεια την συμπεριφορά του συστήματος και όλες τις πιθανές μορφές αστοχίας του. Αυτό είναι ένα ενδιαφέρον πρόβλημα που απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση, αλλά δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Για να μπορεί να γίνει κατά την αποτίμηση των δεξαμενών η σύγκριση όλων των μορφών αστοχίας στις καμπύλες σεισμικής τρωτότητας το μέγεθος της σεισμικής διέγερσης θα παραμείνει το PGA και θα οριστεί ένα κριτήριο με σκοπό να απομονώνει τα σημεία που έχουν περισσότερο έντονο το παραπάνω χαρακτηριστικό του ανομοιόμορφου κινδύνου.

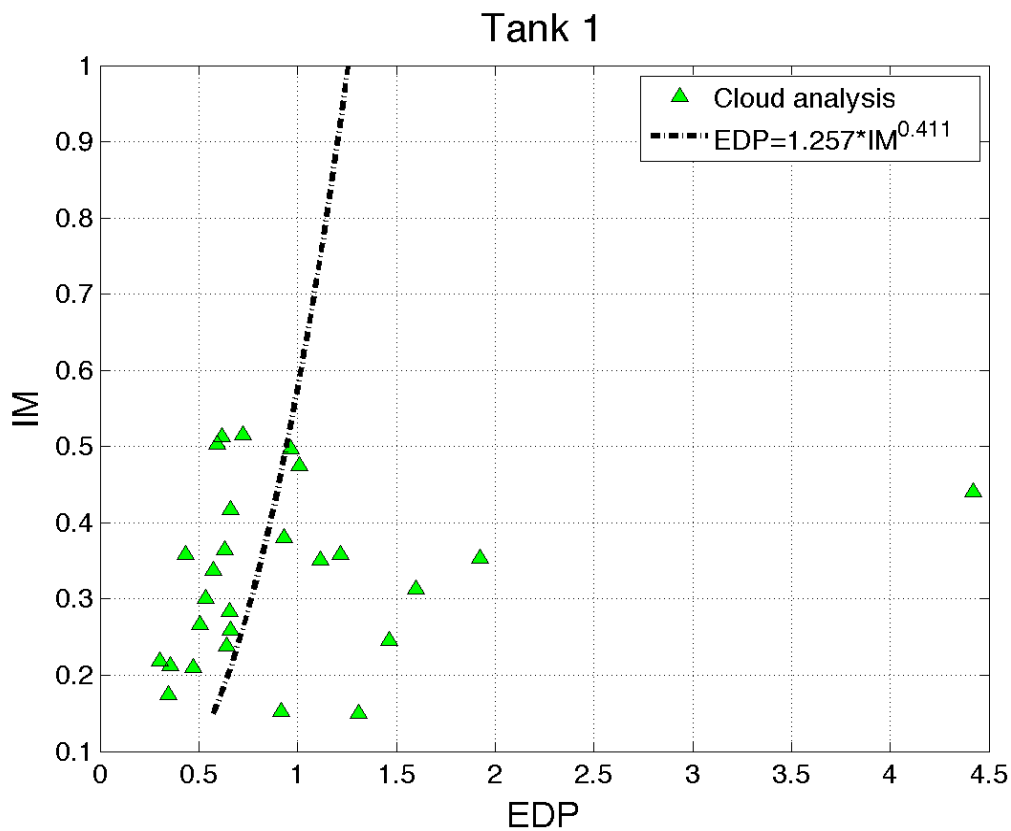
Το κριτήριο που θα αποφασίζει για την αποδοχή ή όχι των σημείων προς γραμμική παλινδρόμηση ορίστηκε ως εξής:

$$PGA / S_e(T_{c1}) > 10 , \quad (5.14)$$

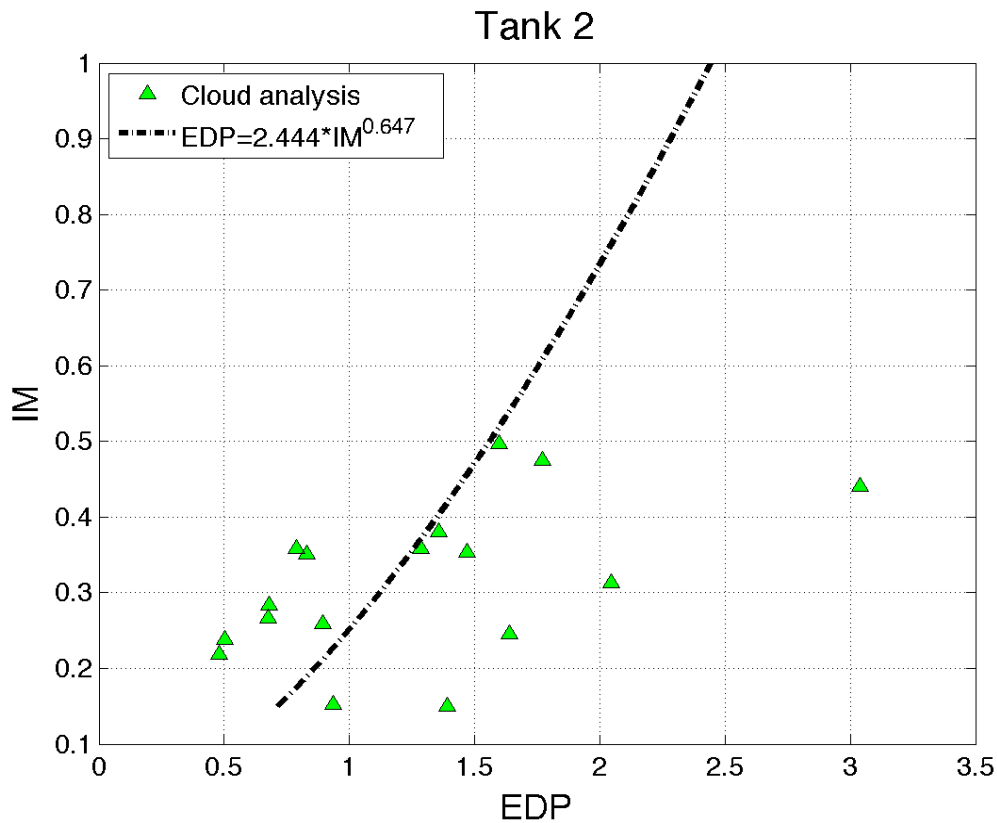
Ένα άλλο κριτήριο που θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη είναι:

$$S_e(T_{c1}) < 0.05g , \quad (5.15)$$

Προτιμήθηκε το κριτήριο της Σχέσης 5.14 καθώς και για τις δύο δεξαμενές 1 & 2 απέρριπτε τα λιγότερα σημεία. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των μεγεθών d_{max} και PGA σε λογαριθμικούς άξονες να πραγματοποιηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς τα δεδομένα ήταν περισσότερα με το συγκεκριμένο κριτήριο απόρριψης.



Σχήμα 5.9: Γραμμική παλινδρόμηση των μεγεθών d_{max} και PGA σε λογαριθμικούς άξονες της δεξαμενής 1



Σχήμα 5.10: Γραμμική παλινδρόμηση των μεγεθών d_{max} και PGA σε λογαριθμικούς άξονες της δεξαμενής 2

Για την αποτίμηση του ελαστοπλαστικού λυγισμού της δεξαμενής ορίστηκε η απαίτηση EFB . Η απαίτηση EFB ουσιαστικά υπολογίζεται ως η θλιπτική τάση που αναπτύσσεται στα κατώτερα τοιχώματα συνήθως της δεξαμενής και οφείλεται στις μεσημβρινές θλιπτικές τάσεις σ_x σε συνδυασμό με τον περιμετρικό εφελκυσμό λόγω της εσωτερικής πίεσης. Στο απλοποιημένο μονοβάθμιο προσομοίωμα το μέτρο του ελαστοπλαστικού λυγισμού EFB υπολογίζεται ισοδύναμα ως η μέγιστη θλιπτική δύναμη του ελατηρίου N_{EFB} προς το εμβαδόν του A . Το εμβαδόν του ελατηρίου ορίζεται ως εξής:

$$A = 2\pi R t_w / n, \quad (5.16)$$

όπου n ο αριθμός των λωρίδων ($n = 12$), R η ακτίνα της δεξαμενής και t_w το ισοδύναμο πάχος των τοιχωμάτων.

Όσον αφορά την ικανότητα των δεξαμενών έναντι ελαστοπλαστικού λυγισμού, ως EFB strength ορίζεται στη Σχέση 5.17 η οριακή τάση σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN 1998-4:2006.

$$\sigma_m = \sigma_{cl} \left[1 - \left(\frac{pR}{sf_y} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{1}{1.12 + r^{1.15}} \right) \left[\frac{r + f_y / 250}{r + 1} \right], \quad (5.17)$$

όπου σ_m η μέγιστη κατακόρυφη μεμβρανική τάση, σ_{cl} η ιδανική κρίσιμη τάση λυγισμού για κυλίνδρους φορτισμένους υπό αξονική θλίψη, f_y η τάση διαρροής του υλικού των

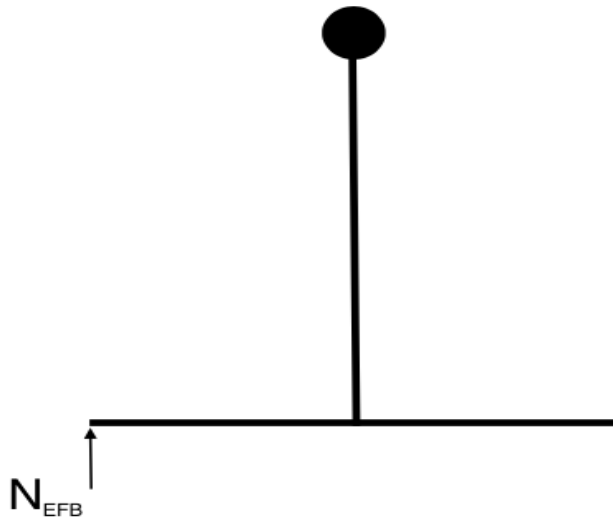
τοιχωμάτων της δεξαμενής σε MPa, s το πάχος τοιχώματος της δεξαμενής, R η ακτίνα της δεξαμενής και p η μέγιστη δυνατή εσωτερική πίεση σε μια σεισμική κατάσταση σχεδιασμού. Τα μεγέθη σ_{cl} και r ορίζονται ως εξής:

$$\sigma_{cl} = 0.6E \frac{s}{R}, \quad (5.18)$$

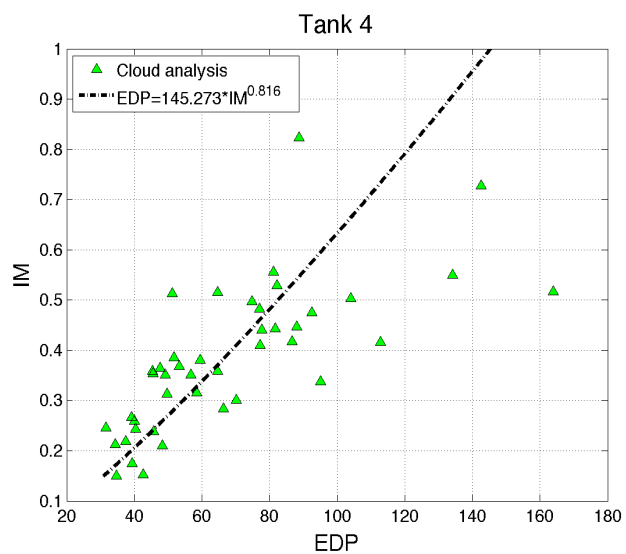
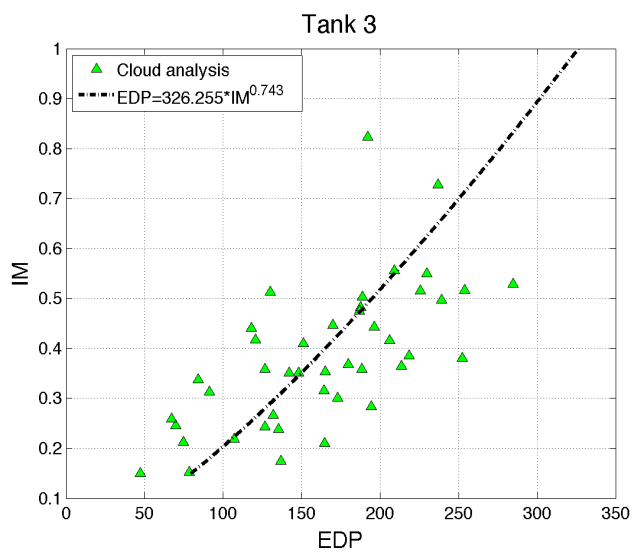
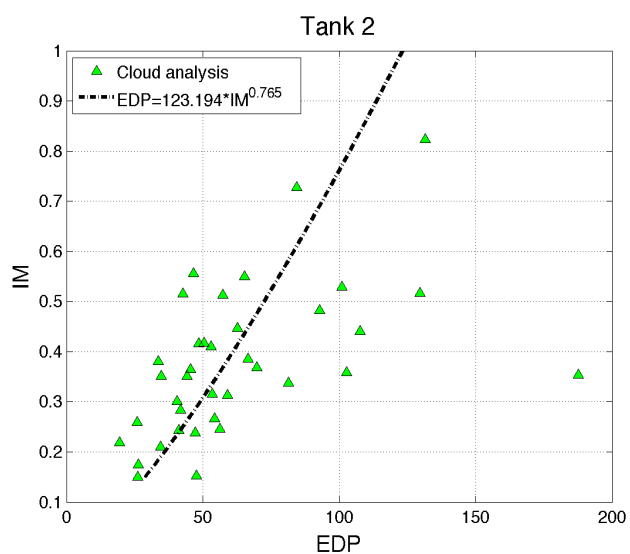
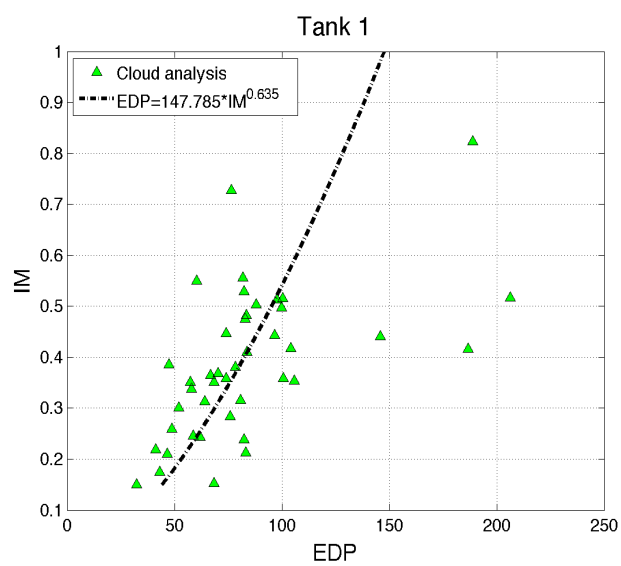
$$r = \frac{R/s}{400}, \quad (5.19)$$

Από την Σχέση 5.17 παρατηρούμε λοιπόν ότι η επιτρεπόμενη τάση του ελαστοπλαστικού λυγισμού EFB δεν είναι συνάρτηση μόνο του πάχους του τοιχώματος αλλά και της εσωτερικής πίεσης που δρα στα τοιχώματα κατά την σεισμική διέγερση. Ως εσωτερική πίεση ορίζεται το άθροισμα της υδροστατικής και της υδροδυναμικής ωστικής συνιστώσας. Η τελευταία περιλαμβάνει την επιτάχυνση της ωστικής μάζας, που υπονοεί ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ανελαστική θεμελιώδη φασματική επιτάχυνση αντί της αντίστοιχης της ελαστικής. Όπως αντιλαμβάνεται κανείς η Σχέση 5.17 που δίνει ο Ευρωκώδικας EN 1998-4:2006 είναι αρκετά περίπλοκη και πρέπει να υπολογιστεί για κάθε δαχτυλίδι του τοιχώματος ξεχωριστά, καθώς το πάχος όπως και η υδροδυναμική πίεση δεν είναι σταθερά μεγέθη καθ' ύψος της δεξαμενής. Σύμφωνα με τους Vathi et al (2015) η τιμή της ικανότητας μιας δεξαμενής έναντι του ελαστοπλαστικού λυγισμού κυμαίνεται κοντά στα 30.7 MPa ανεξάρτητα της αγκύρωσης ή μη της δεξαμενής.

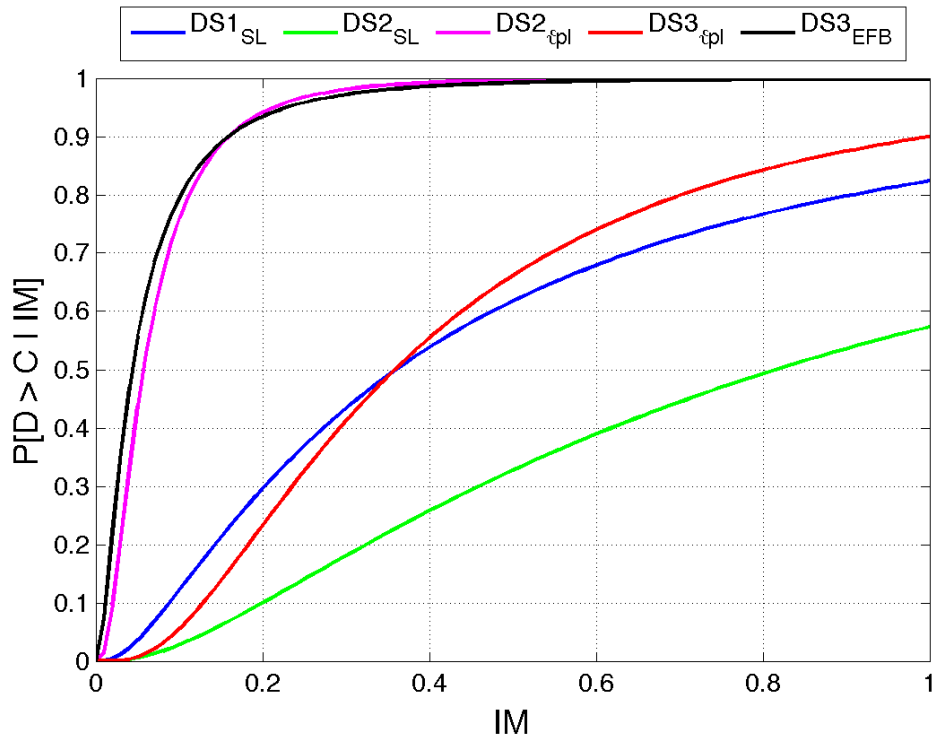
Στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπου η απαίτηση EFB ορίζεται με τη βοήθεια των ελατηρίων του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.11, είναι δύσκολο να προσδιορίσουμε την αντίστοιχη ικανότητα σύμφωνα με την Σχέση 5.17 καθώς δεν μπορούμε να διευκρινίσουμε το πάχος του τοιχώματος και την εσωτερική πίεση του σημείου που εξετάζουμε. Για την απλοποίηση του δεδομένου προβλήματος θεωρούμε ότι η ικανότητα και των τεσσάρων δεξαμενών έναντι ελαστοπλαστικού λυγισμού ορίζεται στα 30.7 MPa.



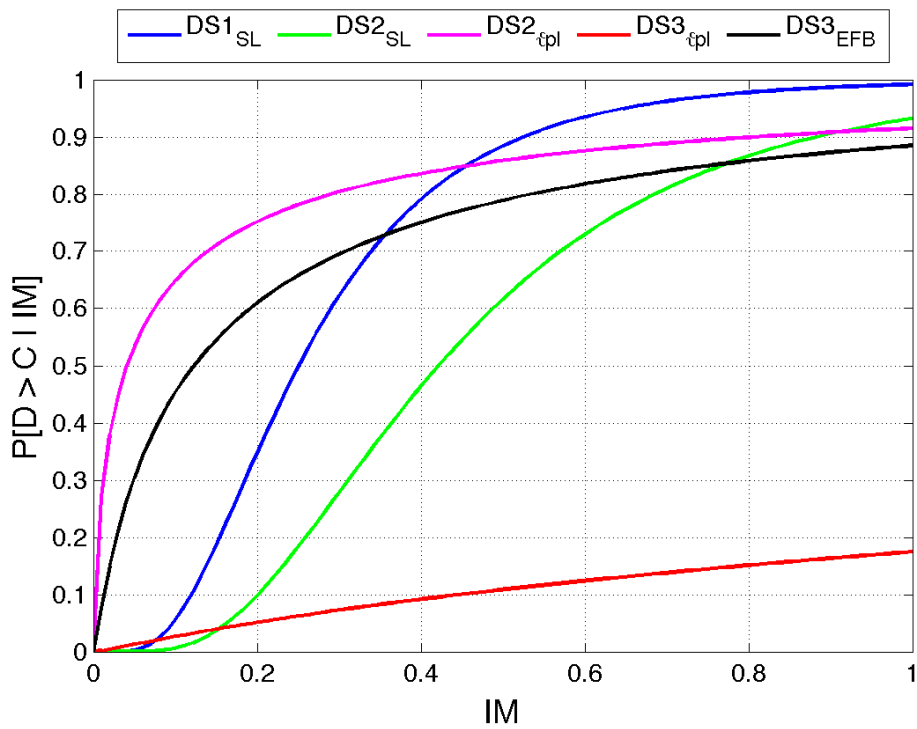
Σχήμα 5.11: Ισοδύναμη θεώρηση του μέτρου του ελαστοπλαστικού λυγισμού EFB ως τη μέγιστη θλιπτική δύναμη του ελατηρίου N_{EFB}



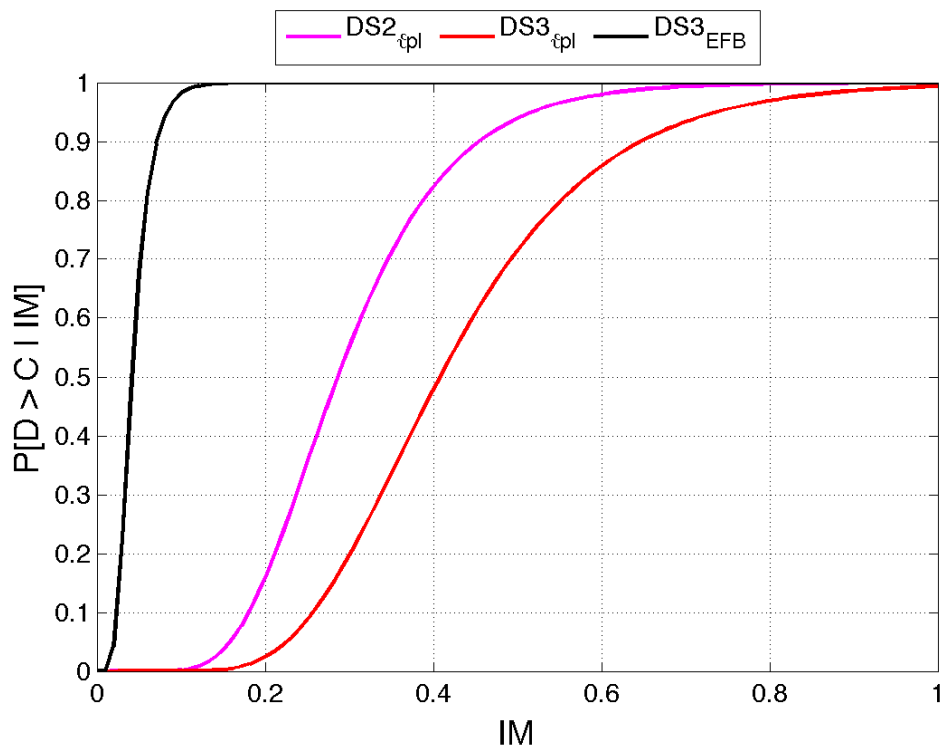
Σχήμα 5.12: Γραμμική παλινδρόμηση των μεγεθών EFB και PGA σε λογαριθμικούς άξονες των τεσσάρων δεξαμενών



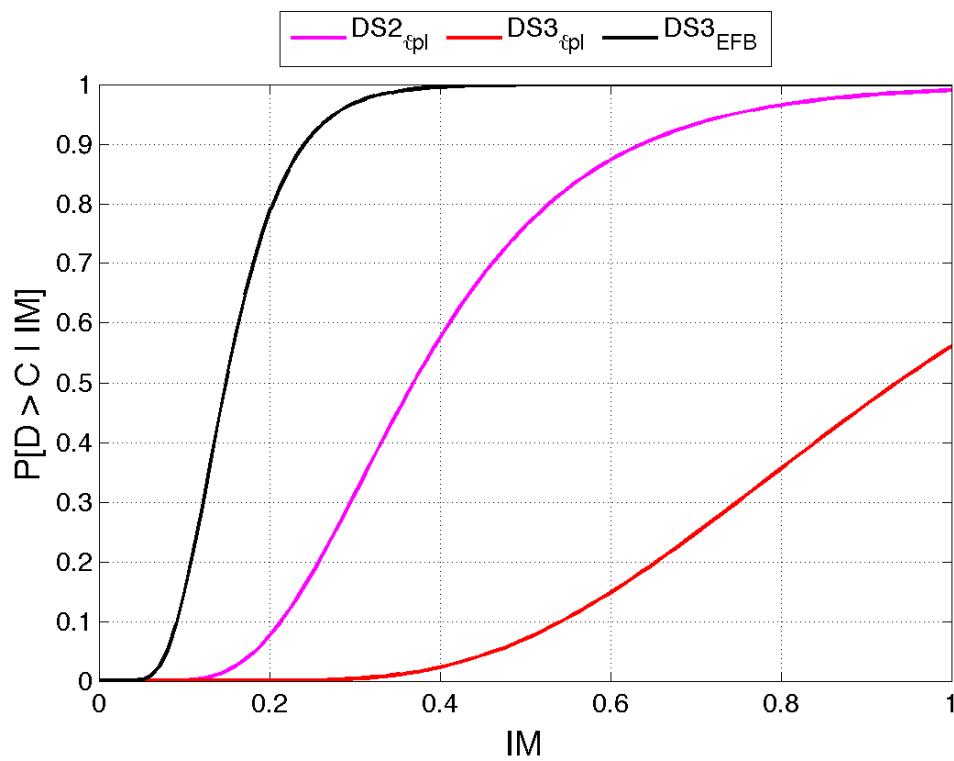
Σχήμα 5.13: Καμπύλη σεισμικής τρωτότητας δεξαμενής 1



Σχήμα 5.14: Καμπύλη σεισμικής τρωτότητας δεξαμενής 2



Σχήμα 5.15: Καμπύλη σεισμικής τρωτότητας δεξαμενής 3



Σχήμα 5.16: Καμπύλη σεισμικής τρωτότητας δεξαμενής 4

6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η σεισμική συμπεριφορά ελεύθερα εδραζόμενων δεξαμενών με πλωτή οροφή με στόχο την αξιόπιστη αποτίμησή τους. Για την πλήρη κατανόηση της απόκρισης αυτού του τύπου των δεξαμενών μελετήθηκαν τέσσερις δεξαμενές με διαφορετικό λόγο ύψους προς ακτίνα με στόχο να εξεταστεί η ανομοιογενής συμπεριφορά τους. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διερεύνησης αυτής στηρίχθηκε στις αρχές της σεισμικής μηχανικής βάσει επιτελεσματικότητας (Performance-Based-Earthquake-Engineering) και στις οδηγίες του FEMA P-695 που αποσκοπούν στην αποτίμηση διάφορων κατασκευών.

Κατά την προσομοίωση των δεξαμενών στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus διαπιστώθηκε ότι η εκτέλεση μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων καθίσταται απαγορευτική λόγω ιδιαίτερα αυξημένου απαιτούμενου υπολογιστικού φόρτου. Για το λόγο αυτό υιοθετήθηκε μια ισοδύναμη επαύξητική μη γραμμική στατική ανάλυση με στόχο την εξισορρόπηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων και του υπολογιστικού φόρτου. Για τον ίδιο λόγο η διακριτοποίηση και το βήμα επαύξεσης του υδροδυναμικού φορτίου χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής κατά την μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς μια δεξαμενής.

Με την βοήθεια ενός άρτια ορισμένου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων δεξαμενής υπάρχει η δυνατότητα να εξεταστούν με ικανοποιητική ακρίβεια τοπικά φαινόμενα όπως ο ελαστοπλαστικός λυγισμός γνωστός και ως «elephant's foot buckling» λόγω της ιδιαίτερης μορφής του. Παρατηρήθηκε ότι η συγκεκριμένη μορφή αστοχίας εμφανίζεται ως επί το πλείστον στην περιοχή κοντά στη βάση της δεξαμενής, αλλά μπορεί να εμφανιστεί και στα ανώτερα τοιχώματα για δεξαμενές με μικρές τιμές του λόγου ύψους προς ακτίνα όπως η δεξαμενή 2. Η έντονη μη γραμμικότητα που παρουσιάζεται λόγω του ελαστοπλαστικού λυγισμού μπορεί να παρατηρηθεί επίσης με την βοήθεια των διαγραμμάτων των κατακόρυφων τοπικών τάσεων καθ' ύψος της δεξαμενής.

Λόγω της μη αναμενόμενης παραμόρφωσης της οροφής των δεξαμενών κατά την αρχική προσέγγιση (ελκυσμός της αριστερής πλευράς των δεξαμενών), θεωρήθηκε μια ισοδύναμη φόρτιση όπου το υδροδυναμικό φορτίο ασκήθηκε μόνο στην μισή επιφάνεια των τοιχωμάτων με στόχο την ορθή προσομοίωση της κίνησης του ρευστού. Διαπιστώθηκε, λοιπόν, ότι με την τελική προσέγγιση η παραμόρφωση των δεξαμενών αντικατοπτρίζει περισσότερο την πραγματικότητα. Όσον αφορά το μέγεθος της πλαστικής στροφής, τα αποτελέσματα όλων των δεξαμενών υποδηλώνουν ότι το όριο που θέτει ο Ευρωκώδικας EN 1998-4:2006, δηλαδή στα 0.2 rad, είναι αρκετά συντηρητικό και δυσμενές και συνεπώς απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για την αναθεώρησή του.

Η παραδοχή που κάνει ο Ευρωκώδικας EN 1998-4:2006 ότι η βάση της δεξαμενής κατά την ανύψωσή της δεν παραμορφώνεται, θεωρώντας την στρόφη της δεξαμενής ως στρόφη στερεού σώματος, αποδείχτηκε ότι αποτελεί μια απλοποιητική παραδοχή η οποία απέχει από την πραγματικότητα σύμφωνα με την μορφή των διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν στο πρόβλημα θεώρησης ευθείας. Γενικά, από τα αποτελέσματα της μελέτης της σεισμικής συμπεριφοράς των δεξαμενών με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Abaqus μπορούμε να κατανοήσουμε την διαφορετική απόκριση μη αγκυρωμένων δεξαμενών με κλειστή και πλωτή οροφή. Λόγω της διαφραγματικής λειτουργίας της οροφής, οι δεξαμενές με κλειστή οροφή παρουσιάζουν μεγαλύτερη

ανύψωση καθώς προσεγγίζουν περισσότερο την στροφή ενός στερεού σώματος. Αντίθετα, στις δεξαμενές με πλωτή οροφή μέρος της ανύψωσης «εκτονώνεται» κατά την παραμόρφωση των ανώτερων τοιχωμάτων με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μικρότερη ανύψωση. Η παραπάνω παρατήρηση σχετικά με την ανύψωση των δύο τύπων δεξαμενών υποδηλώνει την σχέση και των άλλων μεγεθών (πχ τάσεις, διάτμηση βάσης, μήκος αποχωρισμού, κτλ) όπως αποδεικνύεται στα υπόλοιπα διαγράμματα.

Η αποτίμηση των δεξαμενών έγινε σε ένα πιθανοτικό πλαίσιο με την βοήθεια ενός απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος ικανού να πραγματοποιήσει πολλαπλές δυναμικές αναλύσεις. Διαπιστώθηκε ότι με την χρήση κάποιων παραμέτρων που αντικατοπτρίζουν την συμπεριφορά ψευδοαγκυρίων μπορεί να προσομοιωθεί η συμπεριφορά των δεξαμενών με πλωτή οροφή. Για την απευθείας χρήση του απλοποιημένου μονοβάθμιου προσομοιώματος μέσω της βαθμονόμησης των τεσσάρων δεξαμενών έγινε η εξαγωγή προσεγγιστικών διαγραμμάτων των παραμέτρων αυτών συναρτήσει του λόγου ύψους προς ακτίνα μιας δεξαμενής. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι δεξαμενές με μεγάλο λόγο ύψους προς ακτίνα απαιτούν ψευδοαγκύρια με μικρότερη δυσκαμψία και δύναμη διαρροής, γεγονός που γίνεται αντιληπτό από τις μέγιστες ανυψώσεις των τεσσάρων δεξαμενών.

Κατά την εξαγωγή των καμπυλών σεισμικής τρωτότητας διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA , η οποία επιλέχτηκε ως μέγεθος της σεισμικής διέγερσης IM , δεν μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια τη μορφή αστοχίας των ανώτερων τοιχωμάτων της δεξαμενής λόγω της επαγωγικής κίνησης του αποθηκευμένου υγρού εξαιτίας του φιλτραρίσματος των μικρών ιδιοσυχνοτήτων που γίνεται στα επιταχυνσιογραφήματα από τους σεισμολόγους με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της απόκρισης για $T > 4s$. Για την επίλυση του δεδομένου προβλήματος θα έπρεπε να λάβουμε υπόψη μας ένα άλλο μέγεθος της σεισμικής διέγερσης, όπως η επαγωγική φασματική επιτάχυνση αλλά για να μπορεί να πραγματοποιηθεί, κατά την αποτίμηση των δεξαμενών, η σύγκριση όλων των μορφών αστοχίας στις καμπύλες σεισμικής τρωτότητας, το μέγεθος της σεισμικής διέγερσης παρέμεινε το PGA .

Κατά την αποτίμηση των δεξαμενών μέσω των καμπυλών σεισμικής τρωτότητας αποδείχτηκε ότι η πιο κρίσιμη μορφή αστοχίας μια δεξαμενής με μεγάλο λόγο ύψους προς ακτίνα είναι ο ελαστοπλαστικός λογισμός EFB . Αντίθετα στις δεξαμενές με μικρό λόγο ύψους προς ακτίνα η πιο κρίσιμη μορφή αστοχίας που παρατηρείται είναι η πλαστική στροφή για μέγιστη επιτρεπόμενη ικανότητα 0.2 rad . Για ιδιαίτερα ισχυρούς σεισμούς γίνεται εύκολα κατανοητό ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αστοχίας των ανώτερων τοιχωμάτων λόγω της επαγωγικής κίνησης του υγρού (SL).

Τέλος, παρακάτω παρατίθενται κάποιες προτάσεις για μελλοντική εργασία:

- Διερεύνηση περισσότερων δεξαμενών με σκοπό τον πληρέστερο ορισμό των παραμέτρων των ψευδοαγκυρίων συναρτήσει του λόγου ύψους προς ακτίνα μιας δεξαμενής
- Μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των δεξαμενών με διαφορετικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων (π.χ. μέθοδος προστιθέμενης μάζας ή πεπερασμένα στοιχεία υγρού) και σύγκριση των διαγραμμάτων
- Προσομοίωση ομάδας δεξαμενών και σεισμική αποτίμησή της ευρύτερης περιοχής εγκατάστασής τους
- Εκτίμηση κόστους επισκευής ζημιών δεξαμενής

7 Βιβλιογραφία

1. Λαβασάς Ι., Ζέρβας Π., Νικολαΐδης Γ., Μπανιωτόπουλος Χ. Κ. (2005). «Επισκευή μεταλλικής δεξαμενής αργού πετρελαίου με έντονες παραμορφώσεις λόγω καθιζήσεων του εδάφους.» Καλοχώρι Θεσσαλονίκης, Ελληνικά Πετρέλαια.
2. API-650. (2007). “Seismic Design of Storage Tanks-Appendix E: Welded steel tanks for oil storage.” American Petroleum Institute, 11th Edition, Washington DC.
3. Bakalis K., Vamvatsikos D., Fragiadakis M. (2014a). “Surrogate Modelling and Sensitivity Analysis of Steel Liquid Storage Tanks.” 8th Hellenic National Conference of Steel Structures, Tripoli, Greece.
4. Bakalis K., Vamvatsikos D., Fragiadakis M. (2014b). “Seismic Reliability Assessment of Liquid Storage Tanks.” 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turkey.
5. Bakalis K., Vamvatsikos D., Fragiadakis M. (2015). “Surrogate Modelling of Liquid-Storage Tanks for Seismic Performance Design and Assessment.” 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete, Greece.
6. Buratti N., Tavano M. (2013). “Dynamic buckling and seismic fragility of anchored steel tanks by the added mass method.” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(21), 1096-9845.
7. CEN. (2004). European Standard EN 1988-1. “Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.” European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
8. CEN. (2006). European Standard EN 1988-4. “Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 4: Silos, tanks and pipelines.” European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
9. Cornell C. A., Jalayer F., Hamburger R. O., Foutch D. A. (2002). “Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines.” *Journal of Structural Engineering*, 128(4), 526-733.
10. Cortes G., Prinz G. S., Nussbaumer A., Koller M. G. (2012). “Cyclic Demand at the Shell-Bottom Connection of Unanchored Steel Tanks.” 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
11. FEMA. (2005). “Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures.” Report FEMA 445, Applied Technology Council for Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
12. FEMA. (2009). “Quantification of Building Seismic Performance Factors.” Report FEMA P-695, Applied Technology Council for Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
13. FEMA. (2012). “Seismic Performance Assessment of Buildings.” Report FEMA P-58, Applied Technology Council for Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
14. Housner G. W. (1963). “The dynamic behavior of water tanks.” *Bull. Seismological Soc. of Am.*, 53(20), 381-387.
15. Jacobsen L. S. (1949). “Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of fluid surrounding a cylindrical pier.” *Bull. Seismological Soc. of Am.*, 39(20), 189-203.

16. Malhotra P. K., Veletsos A. S. (1994a). "Beam model for Base-Uplifting Analysis of Cylindrical Tanks." *Journal of Structural Engineering*, 120(12), 3471-88.
17. Malhotra P. K., Veletsos A. S. (1994b). "Uplifting Analysis of Base Plates in Cylindrical Tanks." *Journal of Structural Engineering*, 120(12), 3489-505.
18. Malhotra P. K., Veletsos A. S. (1994c). "Uplifting Response of Unanchored Liquid-Storage Tanks." *Journal of Structural Engineering*, 120(12), 3525-47.
19. Malhotra P. K. (1997). "Seismic Response of Soil-Supported Unanchored Liquid-Storage Tanks." *Journal of Structural Engineering*, 123(4), 440-50.
20. Malhotra P. K., Wenk T., Wieland M. (2000). "Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks." *Journal of Structural Engineering*, 10(3), 197-201.
21. NZEE. (2009). "Seismic Design of Storage Tanks." New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Wellington, New Zealand.
22. Rotter K. (2015). "A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk." University of Colorado Boulder <http://spot.colorado.edu/~porterka/Porter-beginners-guide.pdf>
23. Vamvatsikos D., Cornell C. A. (2002). "Incremental Dynamic Analysis." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491-514.
24. Vamvatsikos D., Cornell C. A. (2006). "Direct Estimation of the Seismic Demand and Capacity of Oscillators with Multi-Linear Static Pushovers through IDA." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(4), 1097-1117.
25. Vathi M., Pappa P., Karamanos A. S. (2013). "Seismic Response of Unanchored Liquid Storage Tanks." *Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Division Conference*, Paris, France.
26. Vathi M., Karamanos A. S., Kapogiannis A. I., Spiliopoulos V. K. (2015). "Performance Criteria for Liquid-Storage Tanks and Piping Systems subjected to Seismic Loading." *Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels & Piping Conference*, Boston, Massachusetts, USA.