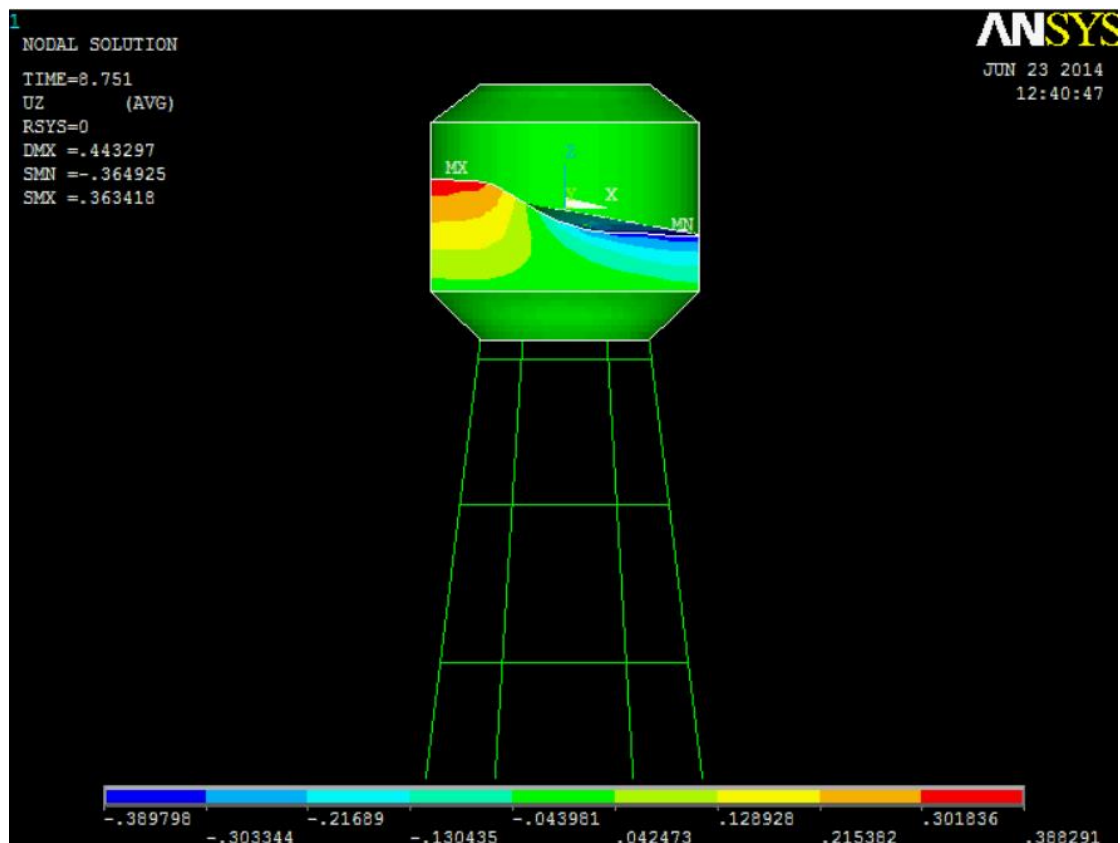


Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΕΛΕΤΗ ΥΔΑΤΟΠΥΡΓΟΥ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΥΔΑΤΟΠΥΡΓΟ ΡΙΩΝ ΠΑΤΡΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΦΙΛΙΠΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ
ΤΣΑΛΑΜΙΔΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Δρ Π. ΚΑΚΑΒΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ:

Έχοντας πλέον ολοκληρώσει την Πτυχιακή μας Εργασία αισθανόμαστε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε τον Εισηγητή και Επιβλέπων της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας τον Δρ Π. Κακαβά, Καθηγητή Τ.Ε.Ι., για την πολύτιμη βοήθεια που μας προσέφερε κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, τη συνεχή καθοδήγησή του και την υπομονή του. Επιπλέον ευχαριστούμε πολύ τον πολιτικό μηχανικό και φίλο Ανδρεόπουλο Μάριο που υπο την καθοδήγησή του μας βοήθησε στη γρήγορη εξοικείωση με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήσαμε (ANSYS). Επίσης ευχαριστούμε τον πολιτικό μηχανικό και αρχιτέκτονα Φώτη Τσιρλή, για τα σχέδια και τις μελέτες του υδατόπυργου του Ρίου που μας ήταν πολύτιμα για την δημιουργία και την ολοκλήρωση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας.

Πάτρα, Νοέμβριος 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζεται η επίδραση του φαινομένου του κλυδασμού στην απόκριση υδατόπυργου με κωνική και κυλινδρική δεξαμενή άκαμπτων τοιχωμάτων υπό οριζόντια σεισμική διέγερση. Συγκεκριμένα για τις κυλινδρικές δεξαμενές ασχοληθήκαμε ειδικά με τον υδατόπυργο του Ρίου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.

Για την ερμηνεία της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του περιεχόμενου υγρού υιοθετείται η θεώρηση της επαλληλίας των επιδράσεων δύο ανεξάρτητων κινήσεων: της κίνησης της κυκλοφορούσας μάζας και της κίνησης της ωστικής μάζας του υγρού. Προτείνεται μέθοδος για τον προσδιορισμό της κυκλοφορούσας και της ωστικής μάζας του υγρού και γίνεται προσπάθεια για προσομοίωση του υγρού της δεξαμενής του υδατόπυργου με ένα ισοδύναμο σύστημα διακριτών μαζών που έχει ίδια δυναμική συμπεριφορά.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιείται ιδιομορφική ανάλυση της κίνησης του κλυδασμού και εξάγονται οι σημαντικές ιδιομορφές και τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα. Βάσει αυτών υπολογίζονται οι τιμές των διακριτών μαζών που προσομοιώνουν το περιεχόμενο υγρό. Το σύστημα υποβάλλεται σε οριζόντια σεισμική διέγερση και γίνεται σύγκριση της συμπεριφοράς του λεπτομερούς μοντέλου (όπου το περιεχόμενο υγρό της δεξαμενής προσομοιώνεται με κατάλληλα χωρικά πεπερασμένα στοιχεία υγρού) και του απλοποιημένου μοντέλου (όπου το περιεχόμενο υγρό προσομοιώνεται με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων).

Τέλος εξετάζεται και η επίδραση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής στη δυναμική συμπεριφορά του υδατόπυργου. Η θεμελίωση του υδατόπυργου και το έδαφος προσομοιώνονται με σύστημα κατάλληλων μαζών και ελατηρίων και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της δυναμικής ανάλυσης με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση για πακτωμένη βάση της κατασκευής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ:	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΟΠΥΡΓΩΝ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΣΤΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ	12
2. ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΠΑΝΩ ΣΕ ΠΥΛΩΝΕΣ	14
2.1 ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ	14
2.2 ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ	15
2.2.1 ΔΕΞΑΜΕΝΗ	15
3. ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΚΛΥΔΑΣΜΟΥ	34
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΚΛΥΔΑΣΜΟΥ	34
3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ ΟΓΚΟΥ	35
3.3 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΚΛΥΔΑΣΜΟΥ	38
4. ΘΕΩΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΥΓΡΟΥ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΜΕ ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΜΑΖΕΣ	40
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	40
4.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΜΑΖΩΝ	42
4.3 ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ	45
4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΟΥ ΚΟΛΟΥΡΟΥ ΚΩΝΟΥ	48
5. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΥΔΑΤΟΠΥΡΓΟ ΜΕ ΠΑΚΤΩΜΕΝΗ ΒΑΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	48
5.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	48
5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ	53
5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	54
5.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	65
6. ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	66
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΘΕΩΡΙΑ	66
*6.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ – ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	69
6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ	70
6.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	76
6.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΜΑΖΩΝ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΜΕΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ SSI	77
6.6 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ANSYS	82
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ	90

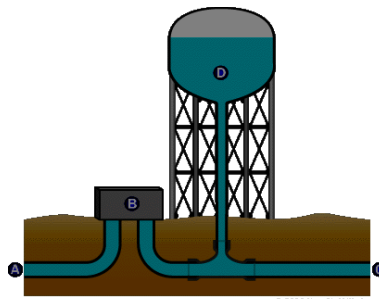
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ο ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΑΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς μιας κατασκευής υδατόπυργου όταν υποβληθεί σε οριζόντια σεισμική διέγερση. Εξετάζεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ περιεχόμενου υγρού και κατασκευής και γίνεται προσπάθεια για προσομοίωση της κατασκευής με ένα απλοποιητικό μοντέλο με ίδια δυναμική συμπεριφορά. Ακόμη εξετάζεται και η επιρροή του φαινομένου αλληλεπίδρασης μεταξύ εδάφους – κατασκευής στη δυναμική συμπεριφορά του υδατόπυργου¹.

Υδατόπυργος είναι η κατασκευή που στην κορυφή της βρίσκεται μια δεξαμενή που περιέχει νερό. Σκοπός ενός υδατόπυργου είναι όχι μόνο η αποθήκευση νερού, αλλά και η δημιουργία πίεσης στο δίκτυο διανομής νερού. Αυτό επιτυγχάνεται από το γεγονός ότι το νερό είναι αποθηκευμένο σε ύψος μεγαλύτερο από αυτό του δικτύου και συνεπώς δημιουργείται διαφορά πίεσης ανάλογης με το ύψος που βρίσκεται η δεξαμενή. Η διαφορά πίεσης που δημιουργείται στη βάση του πύργου για κάθε μέτρο ανύψωσης της δεξαμενής του από το έδαφος, είναι 9.81 kPa ή περίπου 0.0981 bar. Επομένως με την κατασκευή ενός υδατόπυργου ύψους 50m επιτυγχάνεται διαφορά πίεσης 4.9 bar. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για ένα δίκτυο διανομής νερού, η πίεση του νερού κυμαίνεται από 2 έως 12 bar με βέλτιστη επιθυμητή πίεση τα 3-4 bar.

Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει τη σύνδεση της δεξαμενής ενός υδατόπυργου με το δίκτυο διανομής νερού.



Σχήμα 1.1 Σύνδεση υδατόπυργου στο δίκτυο ύδρευσης μιας κοινότητας.

- A: νερό ερχόμενο από τη μονάδα επεξεργασίας
- B: αντλία
- C: νερό υπό πίεση με κατεύθυνση προς τους καταναλωτές
- D: δεξαμενή

Αν η αντλία παρέχει περισσότερο νερό από τις ανάγκες του συστήματος νερού, το περίσσειμα ρέει αυτόματα εντός της δεξαμενής. Εάν η κοινότητα απαιτεί περισσότερο νερό από ό,τι η αντλία μπορεί να παρέχει, στη συνέχεια, το νερό ρέει έξω από τη δεξαμενή προς το δίκτυο για την κάλυψη των αναγκών.

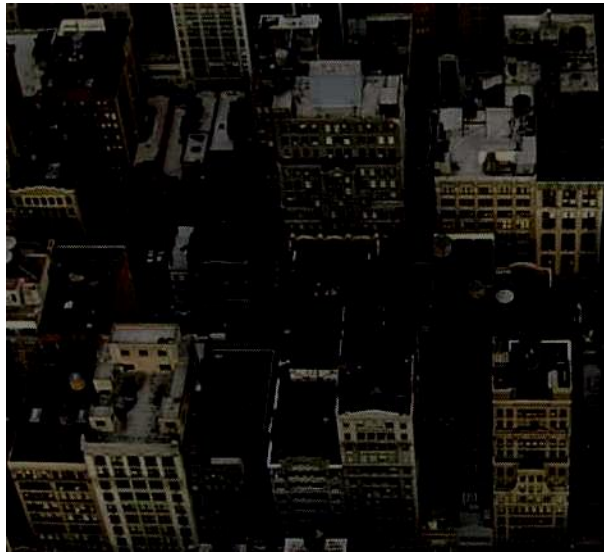
Βασικό πλεονέκτημα της χρήσης υδατόπυργων έναντι επιεδάφιας δεξαμενών εξοπλισμένων με αντλία είναι ότι σε περίπτωση διακοπής της ηλεκτροδότησης, όπου είναι αδύνατον να λειτουργήσουν οι αντλίες, υπάρχει διαθέσιμο υπό πίεση νερό, μια και η διαφορά πίεσης δημιουργείται λόγω της υπερυψωμένης θέσης αποθήκευσης του νερού. Ακόμη, σε περιπτώσεις αυξημένης ανάγκης νερού (π.χ. πρωινές ώρες, πυρόσβεση), μπορεί να χρησιμοποιηθεί το περίσσειμα νερού που έχει αποθηκευτεί στη δεξαμενή του υδατόπυργου, αντί να χρησιμοποιηθούν αντλίες μεγαλύτερης ισχύος (και συνεπώς σημαντικά μεγαλύτερου κόστους) για να καλυφθεί άμεσα η ζήτηση. Η αναπλήρωση του νερού της δεξαμενής μπορεί να γίνει τις ώρες μειωμένης ζήτησης νερού (συνήθως τις νυχτερινές ώρες).

Πολύ συχνή είναι η χρήση υδατόπυργων στην κορυφή ψηλών κτιρίων στις ΗΠΑ. Σε μια πόλη, τα ψηλά κτίρια συχνά πρέπει να λύσουν τα δικά τους προβλήματα πίεσης του νερού. Το ύψος των κτιρίων μπορεί να είναι τόσο μεγάλο, που να υπερβαίνει το ύψος που το δίκτυο διανομής νερού της πόλης μπορεί στείλει το νερό με την επιθυμητή πίεση. Έτσι, ένα ψηλό κτίριο θα έχει τις δικές του αντλίες και τους δικούς του υδατόπυργους. Στο Σχήμα 1.2, φωτογραφία που λαμβάνεται από το Empire State Building στη Νέα Υόρκη, υπάρχουν τουλάχιστον 30 πυργίσκοι νερού ορατοί στις κορυφές των γύρω κτιρίων¹.

Οι υδατόπυργοι κατασκευάζονται για να ικανοποιήσουν συνήθως τις ανάγκες νερού μιας κοινότητας ή ενός κτιρίου. Επομένως αντιλαμβάνεται κανείς ότι το μέγεθος της δεξαμενής καθώς και το ύψος του ίδιου του υδατόπυργου μπορεί να έχει μεγάλη διακύμανση. Οι μικρότεροι υδατόπυργοι που προορίζονται για οικιακή χρήση έχουν συνήθως ύψος μικρότερο των 10m και χωρητικότητα δεξαμενής μερικών κυβικών μέτρων. Όταν όμως κατασκευάζεται ένας υδατόπυργος για κοινοτική χρήση, το αναγκαίο ύψος του για την επίτευξη της επιθυμητής πίεσης στο δίκτυο ύδρευσης είναι συνήθως περί τα 40 m και η απαιτούμενη χωρητικότητα της δεξαμενής του, για την

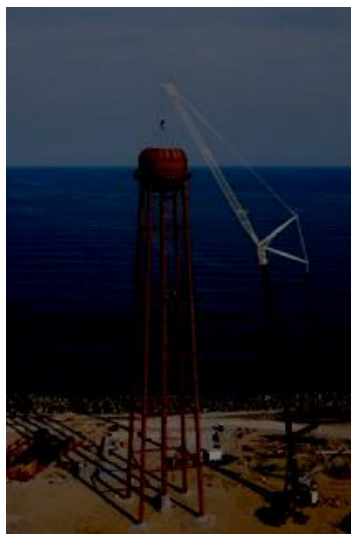
1

κάλυψη των αναγκών μιας μικρής κοινότητας σε νερό για 24 h, είναι περίπου 378500 lt (100000 gal).



Σχήμα 1. 2 Υδατόπυργοι στις ταράτσες των ψηλών κτιρίων στη Νέα Υόρκη.

Όσο μεγαλύτερες ανάγκες καλείται να καλύψει ένας υδατόπυργος, τόσο περισσότερο αυξάνονται και οι διαστάσεις του. Έτσι, ο ψηλότερος υδατόπυργος στον κόσμο βρίσκεται στο Wallops Island στην κοινοπολιτεία της Virginia με ύψος 87.5 m και χωρητικότητα 757000 lt (200000 gal) και εξυπηρετεί τη βάση της NASA που βρίσκεται εκεί (Σχήμα 1.3). Όσον αφορά στη μέγιστη χωρητικότητα δεξαμενής, ο υδατόπυργος στο Midrand της Νοτίου Αφρικής έχει τη δεξαμενή με τη μέγιστη χωρητικότητα σε όλο το νότιο ημισφαίριο με χωρητικότητα 6.5×10^6 λίτρων. (Σχήμα 1.4).

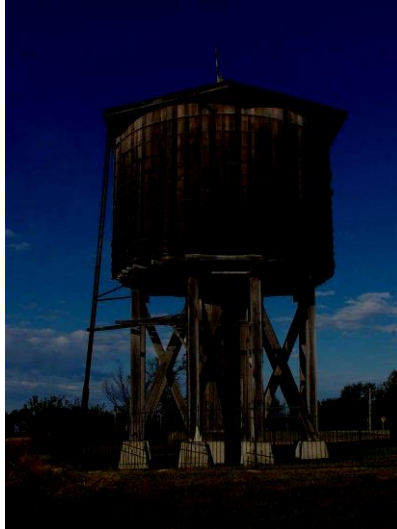


Σχήμα 1. 3 Ο υδατόπυργος του Wallops Island με ύψος 87.5 m.



Σχήμα 1.4 Ο υδατόπυργος στο Midrand της Ν.Αφρικής με δεξαμενή χωρητικότητας 6.5 μεγαλίτρων είναι κατασκευασμένος από προενταμένο σκυρόδεμα.

Οι τρόποι, καθώς και τα υλικά, κατασκευής μιας δεξαμενής υδατόπυργου ποικίλουν. Κυλινδρικές δεξαμενές σχετικά μικρού όγκου αποθήκευσης είναι δυνατόν να κατασκευαστούν από ξύλινες σανίδες που συγκρατούνται από μεταλλικά κολάρα (Σχήμα 1.5). Ένα ενδιαφέρον στοιχείο για δεξαμενές τέτοιου τύπου είναι το γεγονός ότι οι ενώσεις των σανίδων δεν χρειάζονται καλαφάτισμα, καθώς το νερό προκαλεί διόγκωση στο ξύλο και συνεπώς οι χαραμάδες σφραγίζονται. Για την κατασκευή δεξαμενών μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταλλικές πλάκες που συγκολλούνται μεταξύ τους για να δοθεί το επιθυμητό σχήμα. Κυλινδρικές δεξαμενές είναι δυνατόν να ενισχυθούν περιμετρικά και με μεταλλικές στεφάνες υπό ένταση. Διαδεδομένη είναι και η χρήση οπλισμένου και προεντεταμένου σκυροδέματος για την κατασκευή δεξαμενών. Οι δεξαμενές υδατόπυργων στηρίζονται σε μεταλλικές δικτυωτές κατασκευές ή σε κυλινδρικά βάθρα από οπλισμένο και συνήθως προεντεταμένο σκυρόδεμα.



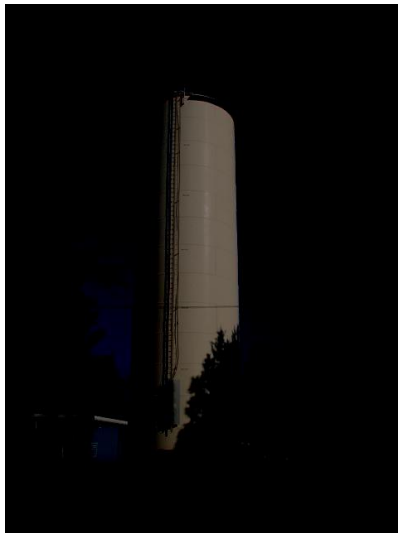
33Σχήμα 1.5

Υδατόπυργος με δεξαμενή κατασκευασμένη από ξύλινες σανίδες.

Οι πρώτοι υδατόπυργοι είχαν τη μορφή δεξαμενής σταθερής πίεσεως ύδατος (standpipe) (Σχήμα 1.6) και η κατασκευή τέτοιων δομημάτων συνεχίζεται μέχρι και σήμερα (Σχήμα 1.7). Άλλοι διαδεδομένοι τύποι δεξαμενών είναι η κυλινδρική (Σχήμα 1.8) και η σφαιρική (Σχήμα 1.9). Στη δεκαετία του 1950, η κατασκευή δεξαμενών νερού εξελίχθηκε με βελτιώσεις σε υλικά, σχεδιασμό και κατασκευαστικές τεχνικές με αποτέλεσμα την ανάπτυξη νέων τύπων δεξαμενών, όπως αυτούς της διπλά ελλειψοειδούς δεξαμενής (double-ellipsoidal water tank) (Σχήμα 1.10) και της torispherical (συνδυασμός κυλινδρικής στήλης με σφαιρικό πάτο και οροφή) (Σχήμα 1.11). Αργότερα, τη δεκαετία του 1960, έγιναν πολύ δημοφιλείς οι κατασκευές τύπου redisphere (σφαιρική δεξαμενή στηριζόμενη σε κυλινδρικό βάθρο) (Σχήμα 1.9) και hydropillar (κωνική ή κυλινδρική δεξαμενή επί κυλινδρικού βάρου μεγάλης διαμέτρου) (Σχήμα 1.12).



Σχήμα 1.6 Παλιός υδατόπυργος τύπου δεξαμενής σταθερής πίεσεως ύδατος.



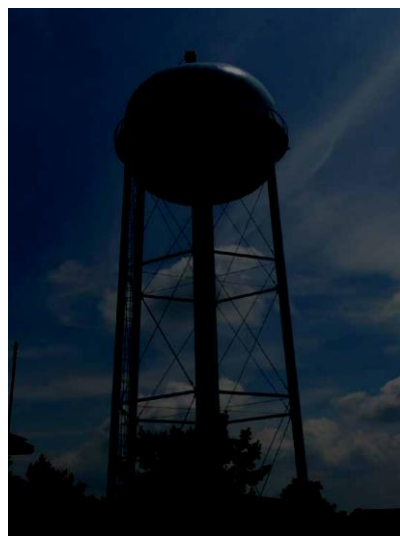
Σχήμα 1.7 Υδατόπυργος τύπου δεξαμενής σταθερής πίεσεως ύδατος στο Hillsborough, Αγγλία.



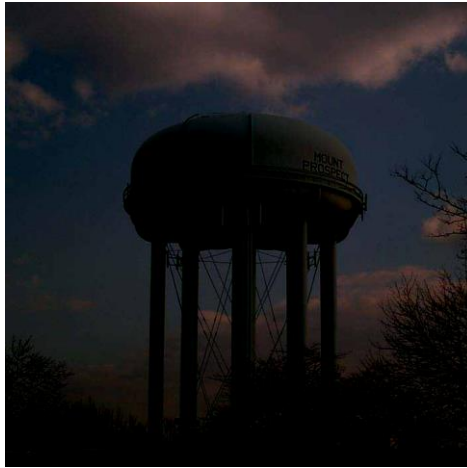
Σχήμα 1.8 Υδατόπυργος στο Δοξάτο Δράμας με κυλινδρική δεξαμενή.



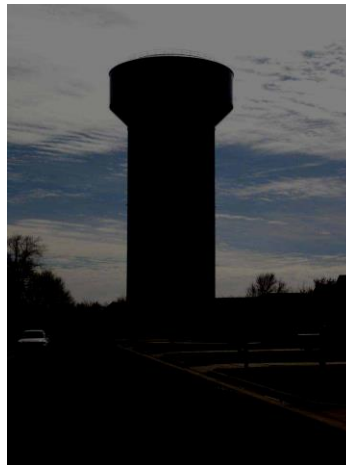
Σχήμα 1.9 Υδατόπυργος τύπου *pedi-sphere* με σφαιρική δεξαμενή στο Bierbeek, Βέλγιο.1



Σχήμα 1.10 Υδατόπυργος με ελλειψοειδή δεξαμενή.1



Σχήμα 1.11 Υδατόπυργος με δεξαμενή τύπου *torispherical*.1



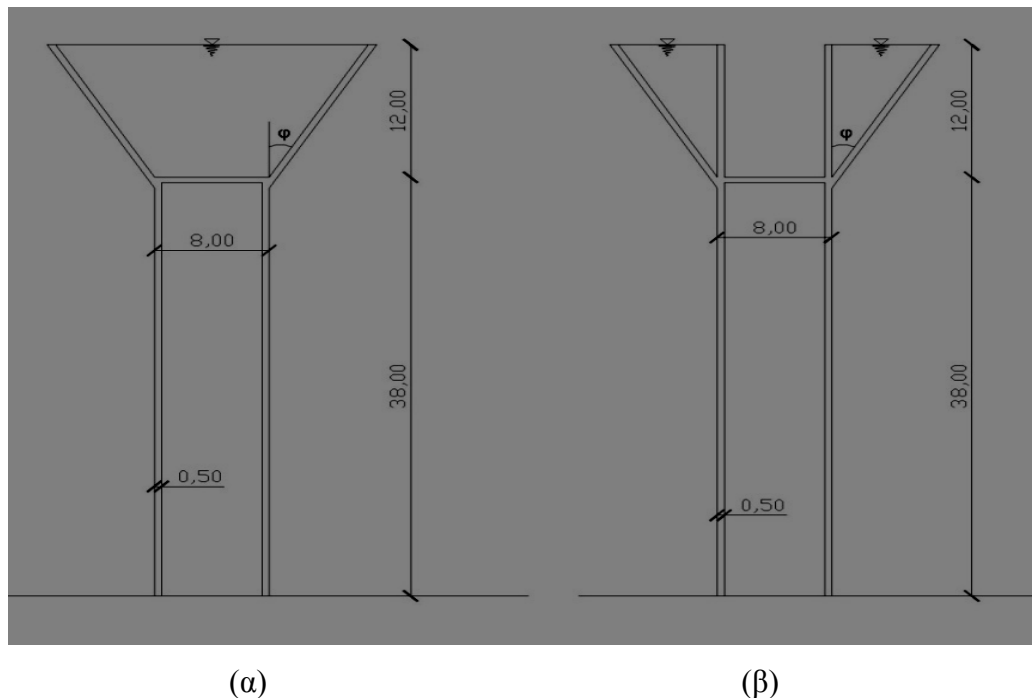
Σχήμα 1.12 Υδατόπυργος τύπου *hydropillar* στην πόλη *Tulsa, Oklahoma, ΗΠΑ*.1

1.2 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΟΠΥΡΓΩΝ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΣΤΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η κατασκευή που επιλέχθηκε για να μελετηθεί στην παρούσα εργασία είναι ένας υδατόπυργος ύψους 38 m από το έδαφος ως τη βάση της δεξαμενής του. Ο πύργος είναι κυκλικός και έχει τοιχώματα από οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα πάχους 0.5 m. Η ακτίνα του κυκλικού πύργου είναι 4 m. Στην κορυφή του πύργου βρίσκεται δεξαμενή με άκαμπτα τοιχώματα από σκυρόδεμα πάχους 0.5 m. Εξετάστηκαν τρεις τύποι δεξαμενής: α) με σχήμα ανεστραμμένου κολουρου κώνου (Σχήμα 1.13α) και β) με σχήμα ανεστραμμένου κολουρου κώνου με κυλινδρική τρύπα ακτίνας ίσης με την ακτίνα του πύργου κατά το ύψος της δεξαμενής (Σχήμα 1.13β). Και γ) κυλινδρικής συγκεκριμένα τον υδατόπυργο του Ρίου. Σε όλες τις δεξαμενές η ακτίνα στη βάση τους

r ήταν ίση με την ακτίνα του κυλινδρικού πύργου. Ο λόγος ύψος/ακτίνα βάσης (H/r) ήταν για κάθε δεξαμενή ίσος με 3. Η παράμετρος που μεταβαλλόταν από μοντέλο σε μοντέλο δεξαμενής που εξετάστηκε ήταν η γωνία φ που σχηματίζουν τα κεκλιμένα τοιχώματα της δεξαμενής με τον κατακόρυφο άξονα. Επομένως εξετάστηκαν δεξαμενές με χωρητικότητα από σχεδόν 700 m^3 έως 9000 m^3 .

Αρχικά εξετάζεται στο Κεφάλαιο 5 η συμπεριφορά του υδατόπυργου για κάθε τύπο δεξαμενής όταν υποβληθεί σε οριζόντια σεισμική διέγερση, έχοντας θεωρήσει τη βάση του πακτωμένη στο έδαφος. Παράλληλα γίνεται προσπάθεια προσομοίωσης του όγκου του νερού της δεξαμενής με κατάλληλο σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων, ώστε να προκύπτουν ίδια αποτελέσματα για το λεπτομερές - πραγματικό μοντέλο και το απλοποιητικό μοντέλο με τις διακριτές μάζες. Στο Κεφάλαιο 6 ερευνάται η σημασία της συνεισφοράς του φαινομένου αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής. Ο υδατόπυργος θεωρείται πια ότι διαθέτει κυκλικό θεμέλιο που εδράζεται στο έδαφος. Η ακτίνα του θεμελίου είναι 9 m και το ύψος του 2.5 m. Γίνονται νέες αναλύσεις χρονοϊστορίας και συγκρίνονται τα αποτελέσματά τους με αυτά που προέκυψαν στο Κεφάλαιο 5 για πακτωμένο υδατόπυργο.



Σχήμα 1.13

2. ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΠΑΝΩ ΣΕ ΠΥΛΩΝΕΣ

2.1 ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ

Η κατασκευή των υπερυψωμένων δεξαμενών είναι πρακτικά η ίδια με εκείνη των ορθογωνικών δεξαμενών που εδράζονται πάνω στο έδαφος.

Εξυπακούεται ότι ο πυθμένας, που φέρει το βάρος του υγρού, είναι ή μια συμπαγής, ή λίγο λιγότερο ή περισσότερο παχειά πλάκα ή μια δοκιδωτή πλάκα ή μια πλάκα πάνω σε εσχάρα δοκών (Σχήμα 2.1).

Ο πυλώνας αποτελείται:

- είτε από συμπαγή λεπτά τοιχώματα, θολωτά ή όχι,
- είτε από κατακόρυφα (ή σχεδόν) υποστυλώματα που συνδέονται (ή όχι) με μια ή περισσότερες οριζόντιες συνδετήριες δοκούς (Σχήμα 2.2).
- Γενικά τα υποστυλώματα είναι 4.

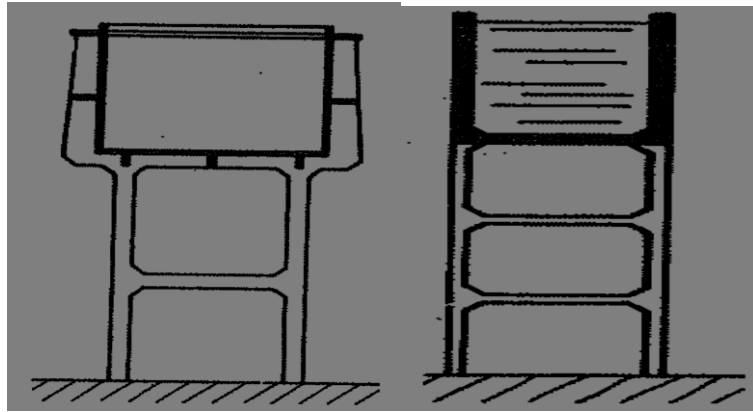
Άλλοτε η δεξαμενή ήταν τοποθετημένη στην κεφαλή του πυλώνα, πάνω σε περιμετρικές δοκούς. Αργότερα αναγνωρίστηκε ότι ήταν δυνατή η κατάργηση των δοκών, αφού τα τοιχώματα της δεξαμενής μπορούν να λειτουργούν σαν δοκοί (δίσκοι)

Στην περίπτωση μεγάλων δεξαμενών πάνω σε πυλώνες, λαμβάνονται προφανώς τα ίδια μέτρα με αυτά των μεγάλων δεξαμενών που εδράζονται πάνω στο έδαφος, δηλαδή επιτρέπεται το ελεύθερο <<παίξιμο>> των *ελαστικών δυνάμεων*, των *διαστολών* και της *συστολής πήξης*. Η κατασκευαστική αρχή είναι: να είναι η δεξαμενή “μονολιθική” πάνω στα υποστυλώματα διαστελλόμενη όλη μαζί περί των κατακόρυφο άξονα που περνά από το κέντρο βάρους της.

Δύο τρόποι υπάρχουν:

α) Να κατασκευάσουμε προς το κέντρο της δεξαμενής δύο διπλές δοκούς, πακτωμένες πάνω σε 4 υποστυλώματα και όλα τα υπόλοιπα υποστυλώματα να είναι αμφιαρθρωτά (σφαιρικές αρθρώσεις).

β) Να κάνουμε σε κάθε έδρα δύσκαμπτες συνδέσεις μεταξύ 2 ή 3 υποστυλωμάτων. Όλα τα υπόλοιπα υποστυλώματα θα έχουν σφαιρικές αρθρώσεις στην κεφαλή και στη βάση, ενώ τα 2 ή 3 υποστυλώματα κάθε έδρας που αναφέραμε θα έχουν κυλινδρικές αρθρώσεις στην κεφαλή.



Σχήμα 2. 1

Σχήμα 2. 2

2.2 ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ

2.2.1 ΔΕΞΑΜΕΝΗ

Διακρίνουμε τρία μέρη:

- το κύριο μέρος, κυκλικής κάτοψης ή *τοιχώματα*,
- το *κάλυμμα*,
- τον *πυθμένα* με τη σύνδεση με τον πυλώνα.

2.2.1.1 ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

Ανάλογα με το είδος της γενέτειρας, οι δεξαμενές διακρίνονται σε:

- *κυλινδρικές* (Σχήμα 2.3),
- *κολουροκωνικές*, με τη μικρή βάση προς τα κάτω (Σχήμα 2.4) ή προς τα πάνω (Σχήμα 2.5) ή με διεύρυνση προς τα πάνω (Σχήμα 2.6) ή προς τα κάτω (Σχήμα 2.7) ή σύνθετες (Σχήμα 2.10),
- *κυλινδροκωνικές*: κλασσικές (Σχήμα 2.8) ή διευρυμένες (Σχήμα 2.9),
- *σχήματος τουλίπας* (Σχήμα 2.12),
- *υπερβολοειδές* (Σχήμα 2.13α και 2.13β).

Όλες αυτές η επιφάνειες είναι λείες ή με νευρώσεις, κατακόρυφες ή με κλίση. Στην περίπτωση του υπερβολοειδούς, θα ήταν ενδιαφέρον να δοθεί στις νευρώσεις η

διεύθυνση των ευθύγραμμων γενετειρών που κλίση ως προς τα μεσημβρινά επίπεδα.

Αυτές οι νευρώσεις μπορούν να έχουν διάφορες διατομές:

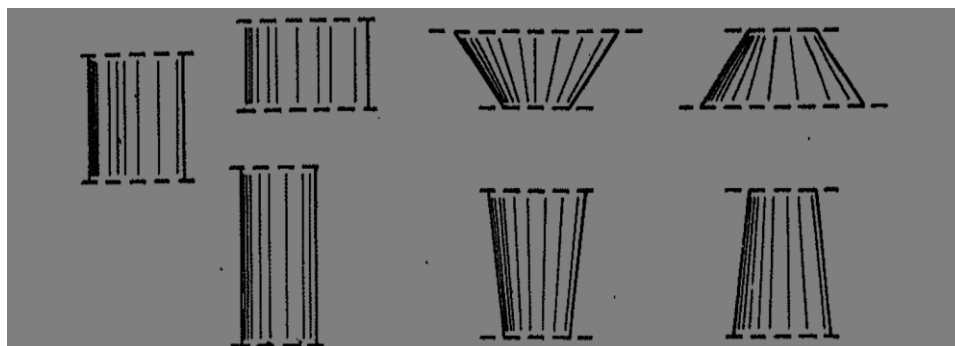
- ορθογωνικές (Σχήμα 2.16),
- τραπεζοειδείς (Σχήμα 2.17),
- τριγωνικές (Σχήμα 2.18),
- τριγωνικές με καμπύλες πλευρές (Σχήμα 2.19),
- στρογγυλές (Σχήμα 2.20).

Είναι δυνατό να καταλαμβάνουν όλο το ύψος της δεξαμενής μέχρι το πάνω περίζωμα ή μόνο το κάτω μέρος (Σχήμα 2.21). Το ύψος τους ποικίλει ανάλογα με την επιζητούμενη αισθητική.

Το τοίχωμα είναι σταθερού πάχους (ελάχιστο 7 cm) για τις μικρές δεξαμενές και μεταβλητού για τις μεγάλες.

Ο κανονισμός του Chambre Syndicale προδιαγράφει *ελάχιστο πάχος 12 cm*, ανεξάρτητα από τον τύπο της δεξαμενής. Πάντως φαίνεται ότι αυτό είναι υπερβολικό. Αντίθετα, για τις δεξαμενές πολύ μικρών διαστάσεων, δέχεται μειωμένα πάχη.

1



Σχήμα 2.3

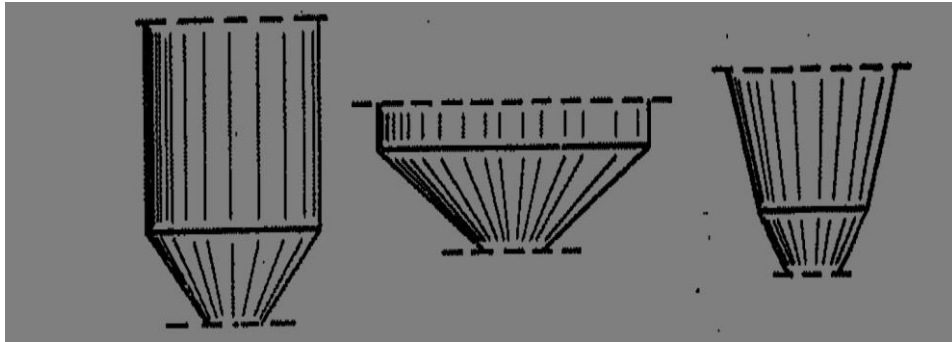
Σχήμα 2.4

Σχήμα 2.5



Σχήμα 2.6

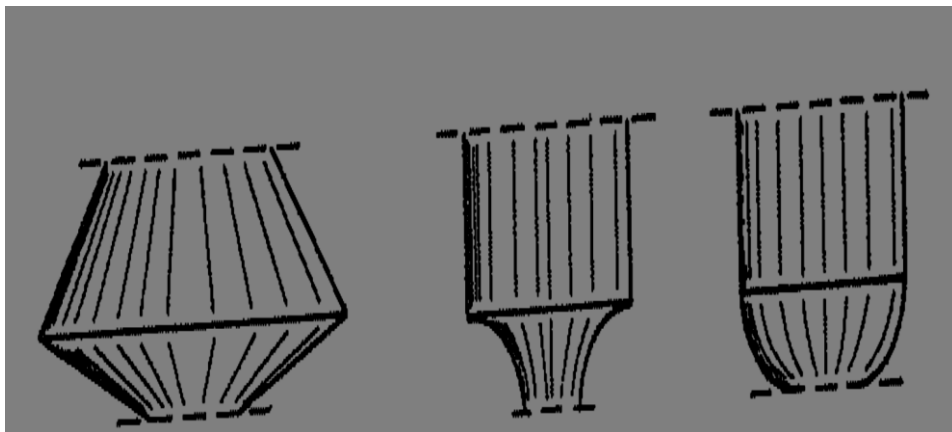
Σχήμα 2.7



Σχήμα 2.8

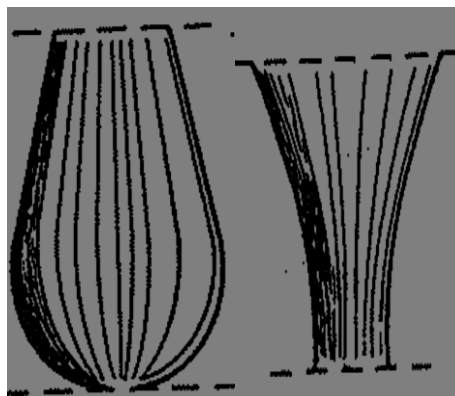
Σχήμα 2.9

Σχήμα 2.10α



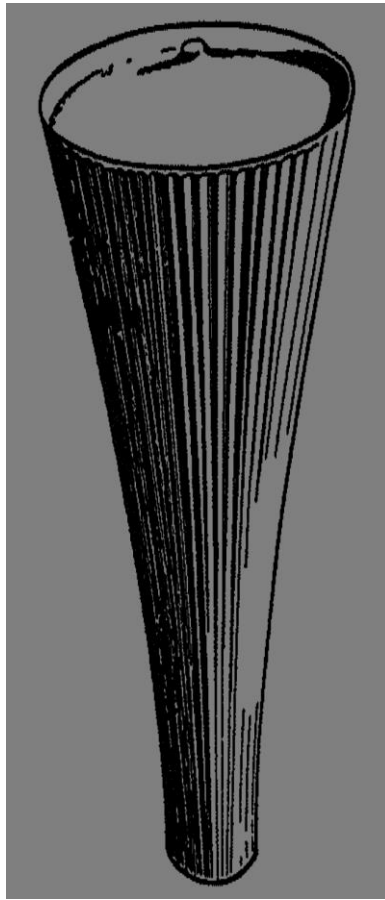
Σχήμα 2.10β

Σχήμα 2.11

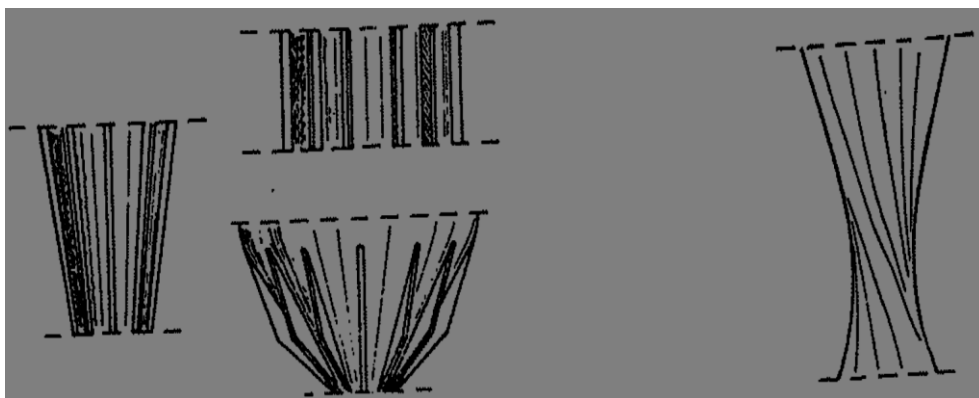


Σχήμα 2.12

Σχήμα 2.13α



Σχήμα 2.13β



Σχήμα 2.14

Σχήμα 2.15



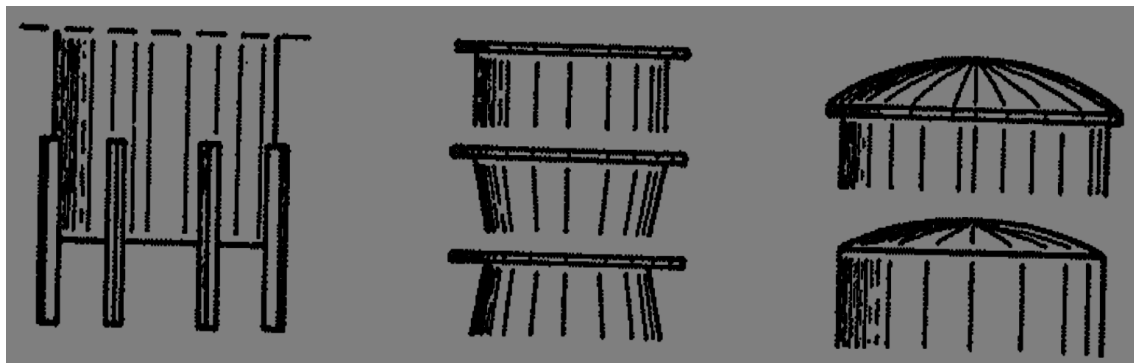
Σχήμα 2.16

Σχήμα 2.17

Σχήμα 2.18

Σχήμα 2.19

Σχήμα 2.20



Σχήμα 2.21

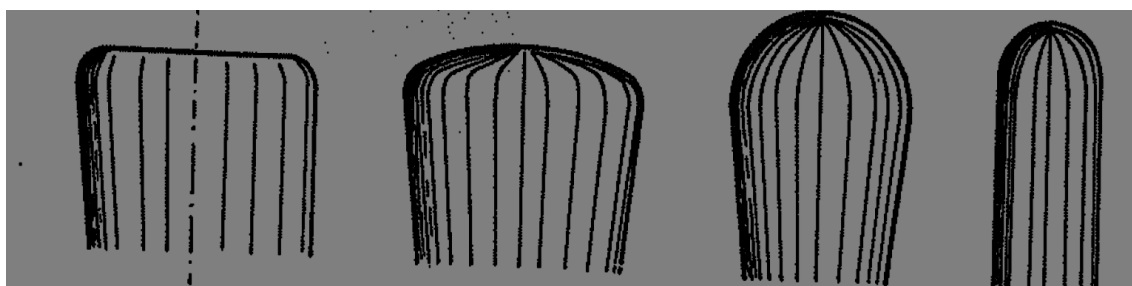
Σχήμα 2.22

Σχήμα 2.23



Σχήμα 2.24

Σχήμα 2.25

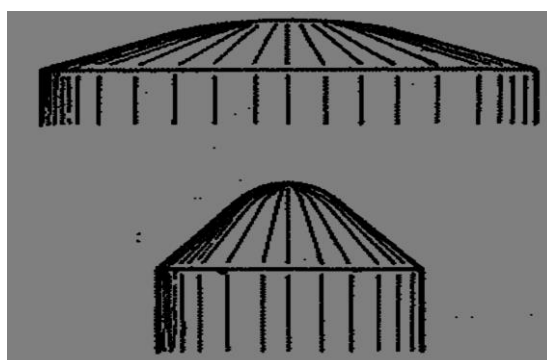


Σχήμα 2.26

Σχήμα 2.27

Σχήμα 2.28

Σχήμα 2.29



Σχήμα 2.30



Σχήμα 2.31

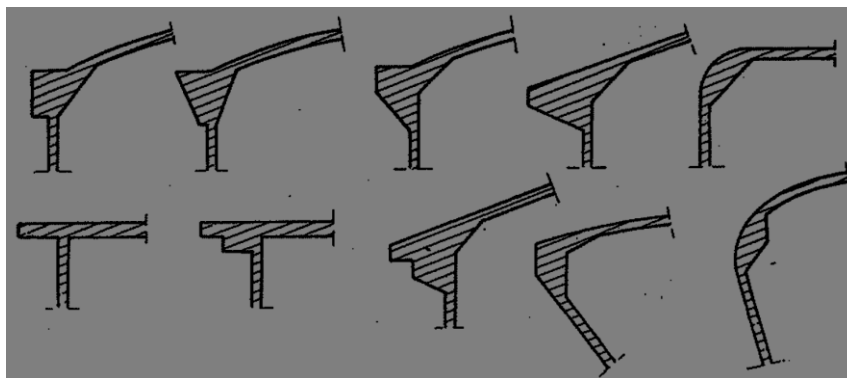
2.2.1.2 ΚΑΛΥΜΜΑ

Μπορεί να αποτελείται από:

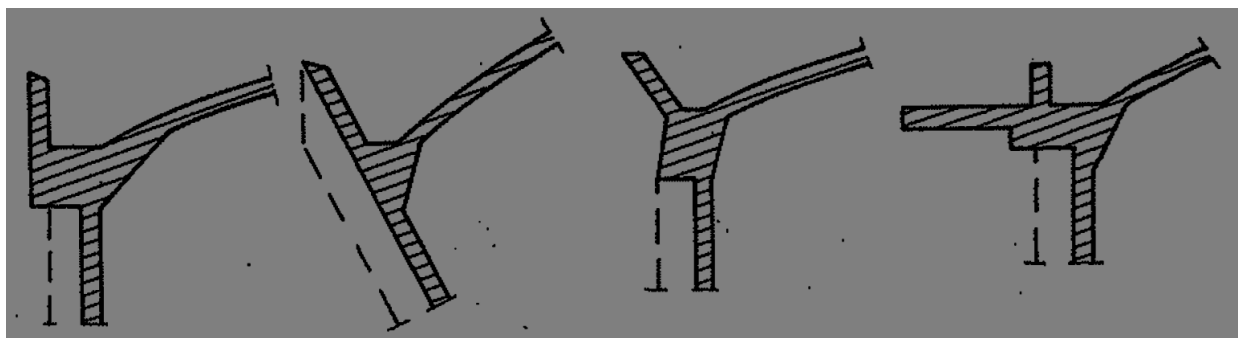
- μια επίπεδη πλάκα (μα κλίση 1cm ανά m) (Σχήμα. 2.22),
- ένα σφαιρικό ή παραβολοειδή θόλο (Σχήμα 2.23),
- ένα κώνο (Σχήμα 2.24),
- ένα κόλουρο κώνο (Σχήμα 2.25),
- μια επίπεδη πλάκα στρογγυλεμένη στα άκρα (Σχήμα 2.26),

- ένα θόλο “πεπλατυσμένο” και στρογγυλεμένο στα άκρα (Σχήμα 2.17),
- ένα ημισφαίριο (Σχήμα 2.28),
- ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής (Σχήμα 2.29),
- ένα κώνο και ένα θόλο (Σχήμα 2.30),
- μια δακτυλιοειδή πλάκα και ένα θόλο (Σχήμα 2.31).

Στη σύνδεση καλύμματος-τοιχώματος κατασκευάζεται ένα περίζωμα απλό (Σχήμα 2.32) ή σύνθετο (Σχήμα 2.33). Το κάλυμμα φέρει κύλινδρο εισόδου (κουβούκλιο), θυρίδες επίσκεψης και σωλήνες εξαερισμού.



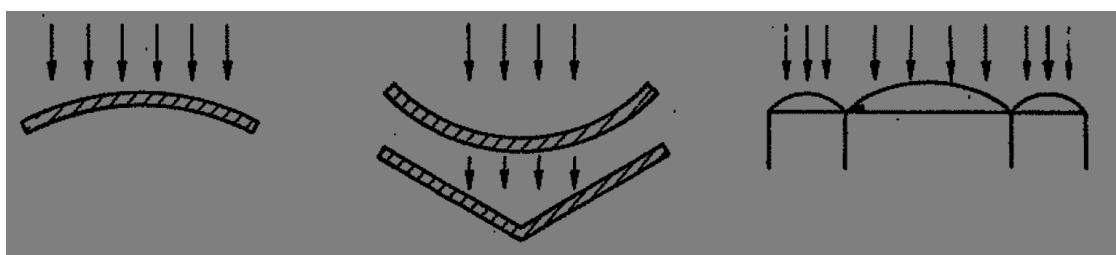
Σχήμα 2.32



Σχήμα 2.33

2.2.1.3 ΠΥΘΜΕΝΑΣ

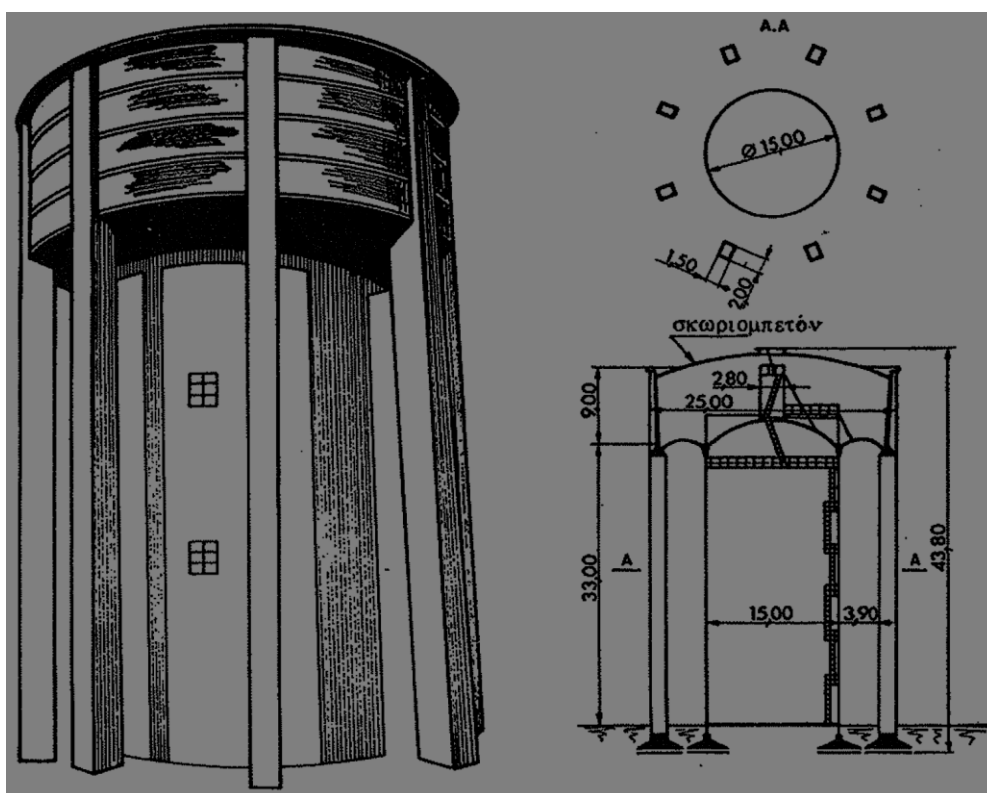
Ο πυθμένας είναι μια παχεία επίπεδη πλάκα ή ένας θλιβόμενος θόλος (Σχήμα 2.34) ή ένας εφελκυσμένος θόλος ή κόλουρος κώνος (Σχήμα 2.35), ή ένας κεντρικός και ένας δακτυλιοειδής θόλος (Σχήμα 2.36). Τα σχήματα 2.37 και 2.38 δείχνουν τη δεξαμενή των 30.000 κυβικών μέτρων του Hetraie κοντά στη Χάβρη, κατασκευασμένη πάνω σε κεντρικό κυλινδρικό τοίχωμα και κοίλα υποστυλώματα. Τα σχήματα 2.39 και 2.40 δείχνουν τη δεξαμενή του Fedala (Μαρόκκο), όπου κάλυμμα και πυθμένας της δεξαμενής αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο.



Σχήμα 2.34

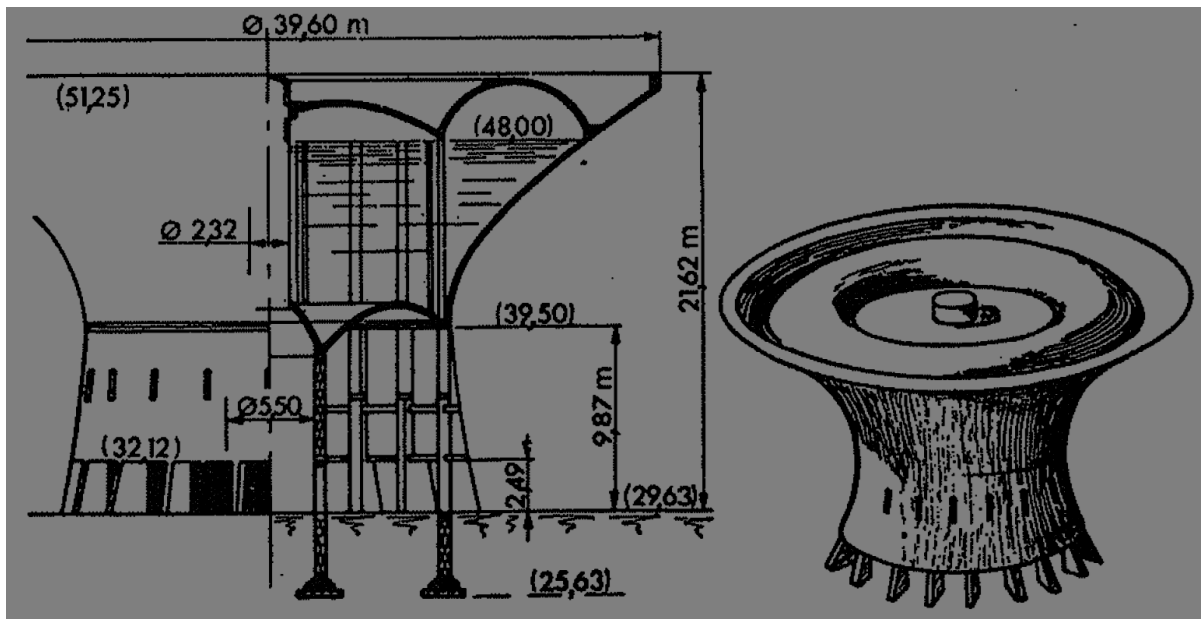
Σχήμα 2.35

Σχήμα 2.36



Σχήμα 2.37

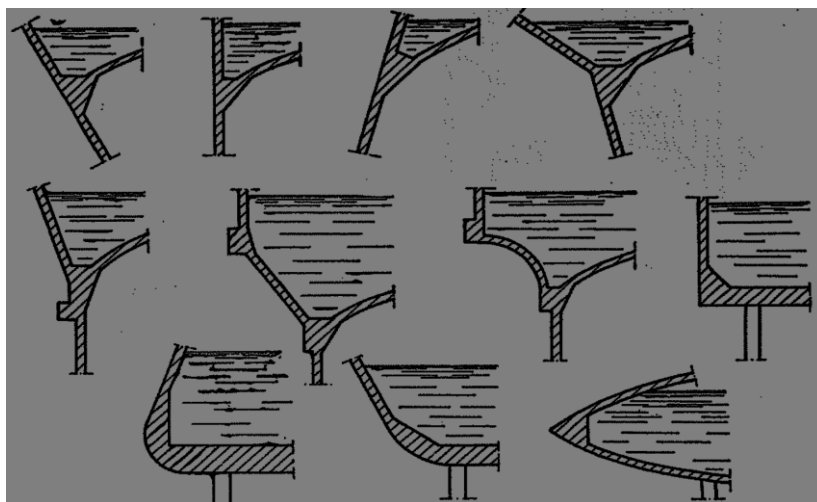
Σχημα 2.38



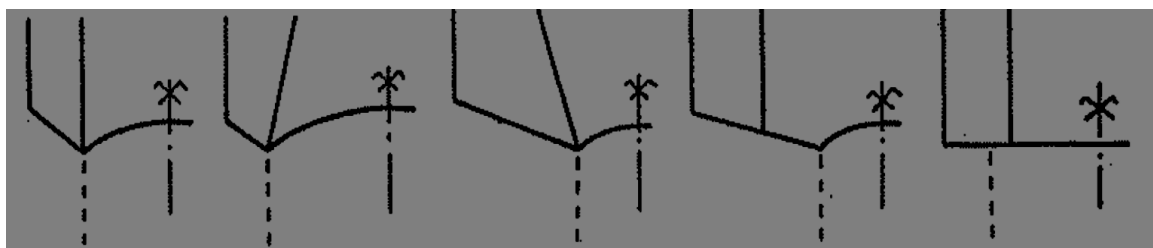
Σχήμα 2.39

Σχήμα 2.40

Στη συνάντηση τοιχώματος και πυθμένα, και πυθμένα και πυλώνα κατασκευάζονται περιζώματα (Σχήμα 2.41). Οι θλιβόμενοι θόλοι μπορεί να είναι σφαιρικοί, παραβολοειδής ή ελλειψοειδής. Οι δεξαμενές είναι δυνατό να περιλαμβάνουν περισσότερα διαμερίσματα, δύο γενικά, ίσης ή διάφορης χωρητικότητας. Η διαίρεση γίνεται με τη βοήθεια κυλινδρικών ή κωνικών τοιχωμάτων που κατασκευάζονται (ή όχι) στις θέσεις των περιζωμάτων (Σχήμα 2.42).



Σχήμα 2.41



Σχήμα 2.42

2.2.2 ΠΥΛΩΝΑΣ

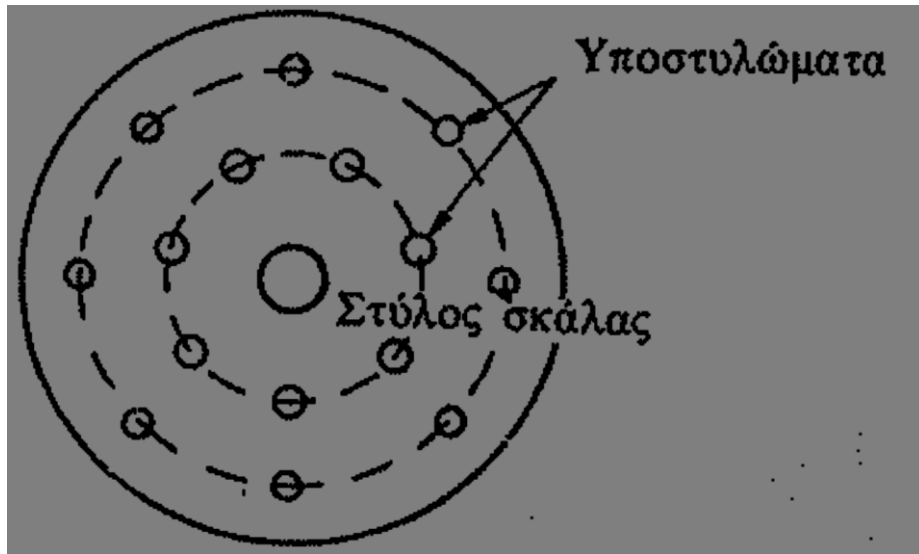
Ο πυλώνας, πάνω στον οποίο στηρίζεται η δεξαμενή, αποτελείται από υποστυλώματα ή από τοίχωμα κυκλικής κάτοψης (κυκλικό).

2.2.2.1 ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ

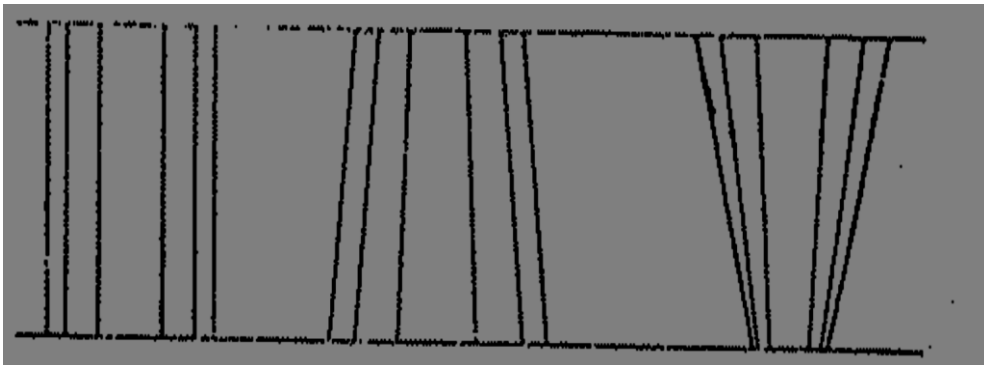
Ο αριθμός των υποστυλωμάτων ποικίλλει ανάλογα με τη σπουδαιότητα της δεξαμενής. Τρία είναι ένας ελάχιστος αριθμός που μπορεί να παρουσιάσει πλεονεκτήματα σε άσχημα εδάφη (με εξασφάλιση φυσικά πάντα της ευστάθειας). Οι μικρές δεξαμενές έχουν συνήθως 4, 6 ή 8 (μερικές φορές 10 ή 12). Υπερβαίνουν σπάνια αυτόν τον αριθμό. Όταν πάντως τον υπερβαίνουν, πρέπει οι δεξαμενές να στηρίζονται πλέον πάνω σε δύο ομόκεντρες σειρές υποστυλωμάτων (Σχήμα 2.43).

Ένα από τα υποστυλώματα αποτελεί και στύλος της κεντρικής σκάλας (αν υπάρχει). Η διατομή των υποστυλωμάτων μπορεί να είναι οποιαδήποτε, αλλά συνήθως είναι τετραγωνική, κυκλική, ορθογωνική ή μορφής λεπτού ελάσματος. Είναι κατακόρυφα ή συγκλίνουν προς τα πάνω ή προς τα κάτω (Σχήμα 2.44). Η διατομή τους μπορεί να λεπταίνει όπως στη δεξαμενή του σχήματος 2.45. Μπορεί επίσης να είναι σχήματος V (Σχήμα 2.46). Οι παλιοί πυλώνες είχαν πάντα οριζόντιες συνδετήριες δοκούς σε μια ή περισσότερες στάθμες, μερικές φορές και με ενισχύσεις (Σχήμα 2.47). Η όψη όμως δεν ήταν αισθητικά καλή και η κατασκευή ήταν ακριβή.

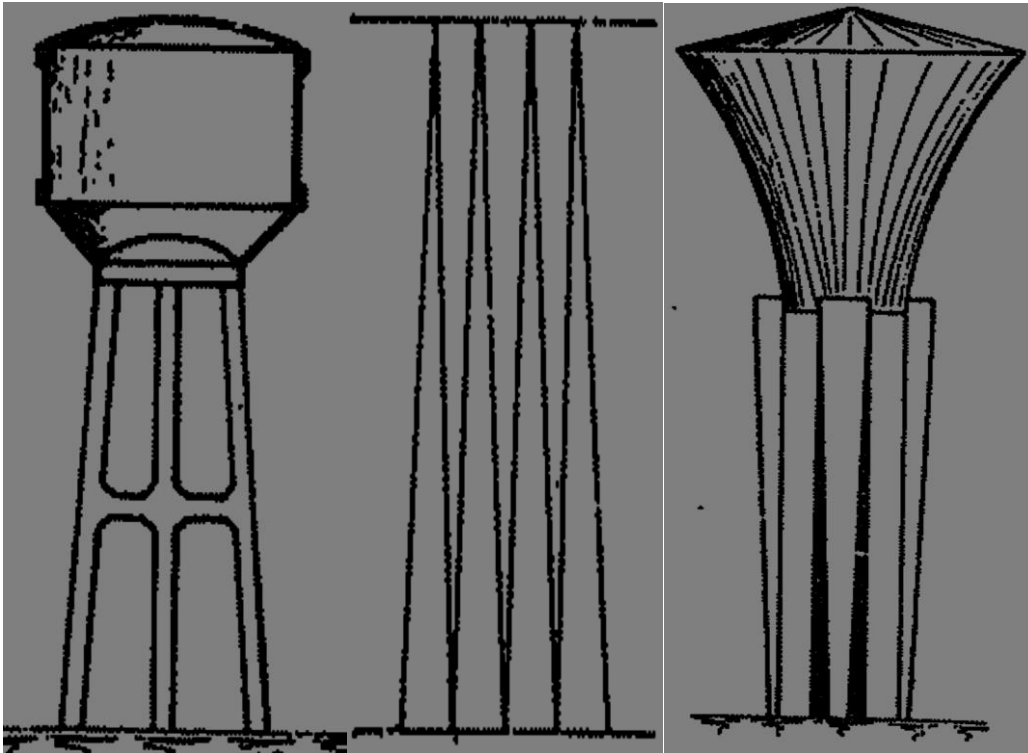
Είναι προτιμότερο να καταργήσουμε τελείως αυτές τις δοκούς, αφού εξασφαλιστούμε από τον κίνδυνο λυγισμού.



Σχήμα 2.43



Σχήμα 2.44



Σχήμα 2.45

Σχήμα 2.46

Σχήμα 2.47

2.2.2.2. ΚΥΚΛΙΚΟ ΤΟΙΧΩΜΑ

Πρόκειται:

- ή για λεπτό τοίχωμα μεταβλητού ή σταθερού πάχους,
- ή για λεπτό τοίχωμα με κατακόρυφες εσωτερικές και εξωτερικές νευρώσεις,
- ή για λεπτό τοίχωμα με οριζόντιες εσωτερικές νευρώσεις.

Η πρώτη είναι η φθηνότερη για μικρές κατασκευές. Η δεύτερη είναι πολύ ωραία αισθητικά.

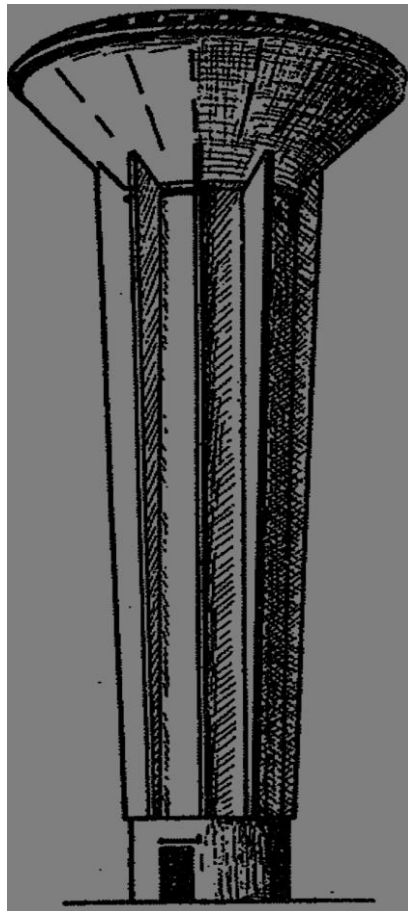
Η τρίτη είναι δυνατόν να παρουσιάσει ενδιαφέρον στην περίπτωση πολύ μεγάλης δεξαμενής με μεγάλο ύψος, γιατί αντέχει περισσότερο απ' ό,τι μόνο του το λεπτό τοίχωμα στα εντατικά μεγέθη που οφείλονται στον άνεμο. Το ελάχιστο πάχος του τοιχώματος είναι 10 έως 12 cm.

Η διατομή των νευρώσεων είναι μια από τις εικονιζόμενες στα σχήματα 1-16 έως 1-20. Το ύψος των νευρώσεων ποικίλλει, ανάλογα με την επιθυμητή όψη. Μπορεί επίσης να είναι μεταβλητό κατά μήκος της δεξαμενής και του πυλώνα. Το σχήμα 2.48 δείχνει μια δεξαμενή που κατασκευάστηκε στην Ουγγαρία. Το κυκλικό τοίχωμα είναι

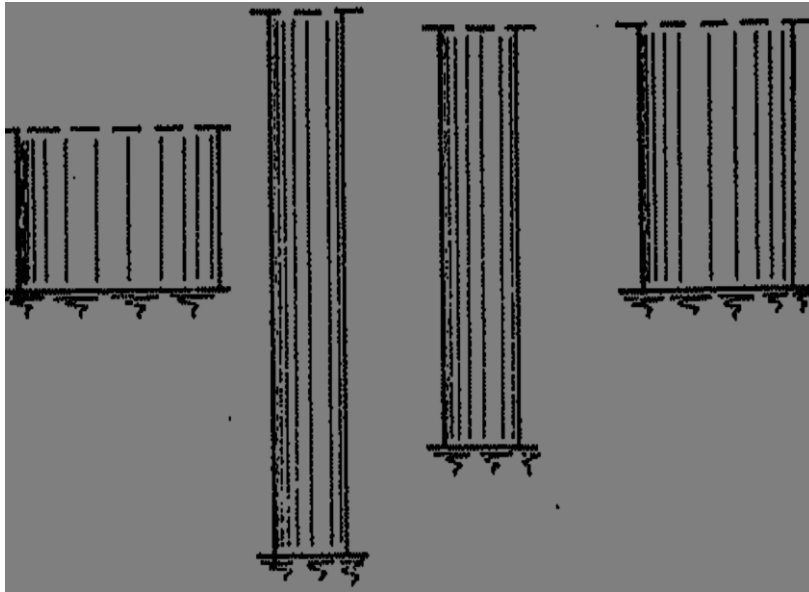
δυνατό να έχει λιγότερο ή περισσότερο τη διατομή της δεξαμενής ή εντελώς διαφορετική.

Μπορεί να είναι:

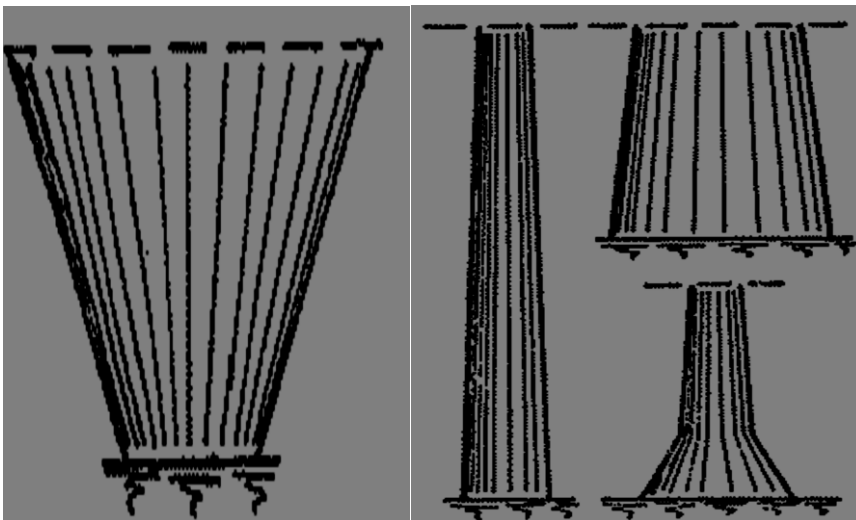
- κυλινδρικό (Σχήμα 2.49),
- κολουροκωνικό με την κατακόρυφη προς τα κάτω (Σχήμα 2.50),
- κολουροκωνικό με την κατακόρυφη προς τα πάνω (Σχήμα 2.51),
- κυλινδροκωνικό (Σχήμα 2.52),
- υπερβολοειδές (Σχήμα 2.53).



Σχήμα 2.48

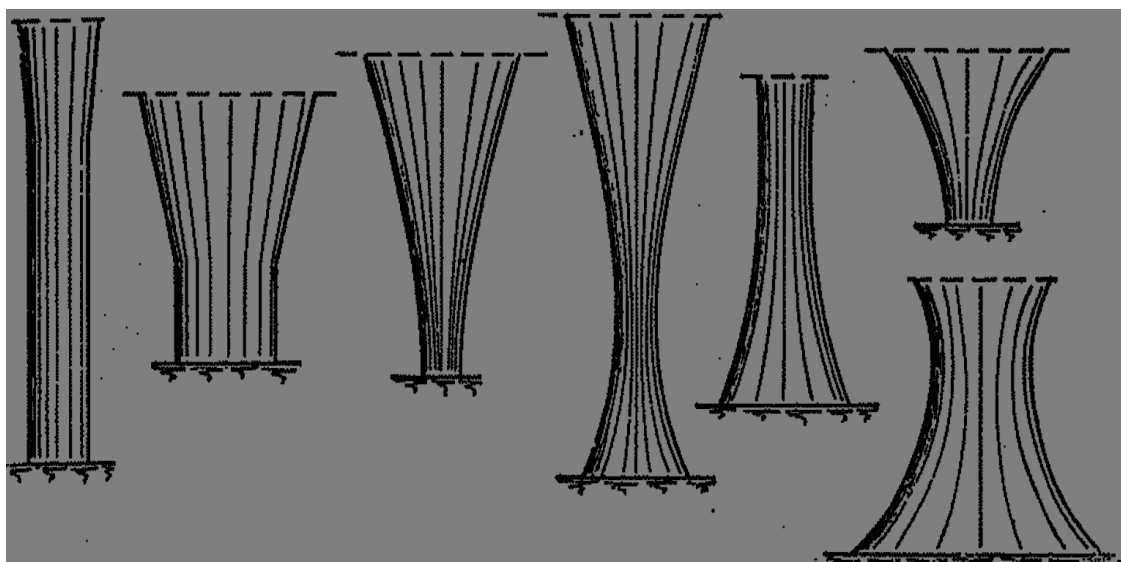


Σχήμα 2.49



Σχήμα 2.50

Σχήμα 2.51



Σχήμα 2.52

Σχήμα 2.53

Τα παρακάτω σχέδια δείχνουν διάφορες κατασκευές σχήματος υπερβολοειδούς:

Σχήμα 2.54: η δεξαμενή του Corgeno (Ain),

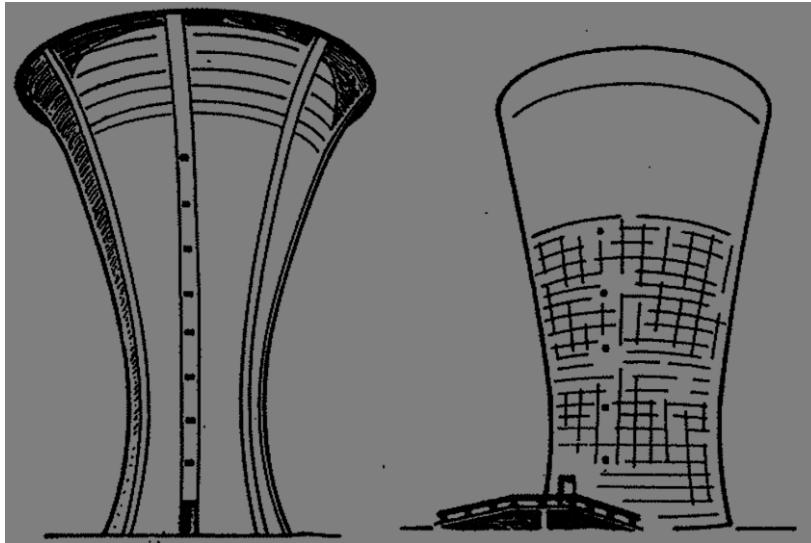
Σχήμα 2.59: η δεξαμενή του Groupe du Pigeonnier a Arras,

Σχήμα 2.55 και 2.60: η δεξαμενή του Merignac (Gironde).

Οι νευρώσεις των κυκλικών τοιχωμάτων ακολουθούν τους μεσημβρινούς (Σχήμα 2.56) ή τις ευθύγραμμες λοξές γενέτειρες των υπερβολοειδών εκ περιστροφής (Σχήμα 2.57).

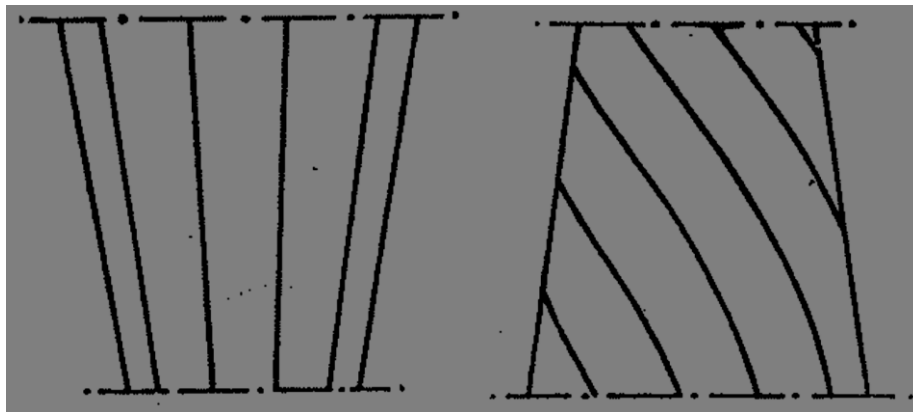
Μπορούν επίσης να γίνουν συνδυασμοί κυκλικού τοιχώματος και υποστλωμάτων (Σχήμα 2.62) και οριζόντια κοιλώματα στο τοίχωμα. Το σχήμα 2.63 δείχνει τη δεξαμενή του Cocody (2.000 κυβικά μέτρα) στο Abidjan και το σχήμα 2.64 την κατακόρυφη τομή τους.

Δεν υπάρχει τίποτα το αξιοσημείωτο για τη θεμελίωση (πεδילוδοκοί ή μεμονωμένα πέδιλα, κοιτόστρωση, πάσσαλοι ή φρεάτια (καταδυόμενα κιβώτια)). Τα μεμονωμένα πέδιλα, οι κεφαλόδεσμοί των πασσάλων και το επάνω μέρος των φρεάτων πρέπει να συνδέονται με συνδετήριες δοκούς.



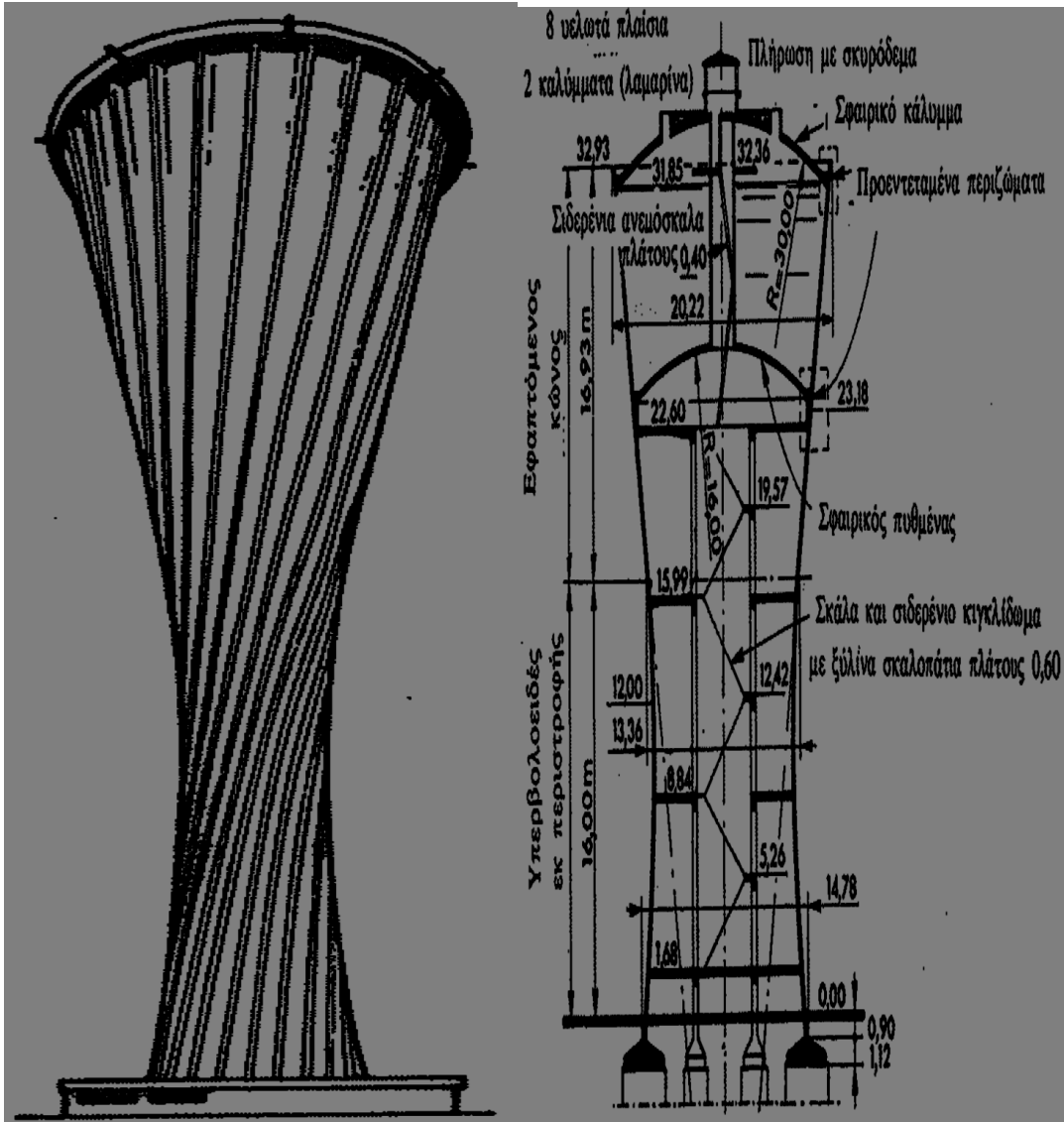
Σχήμα 2.54

Σχήμα 2.55



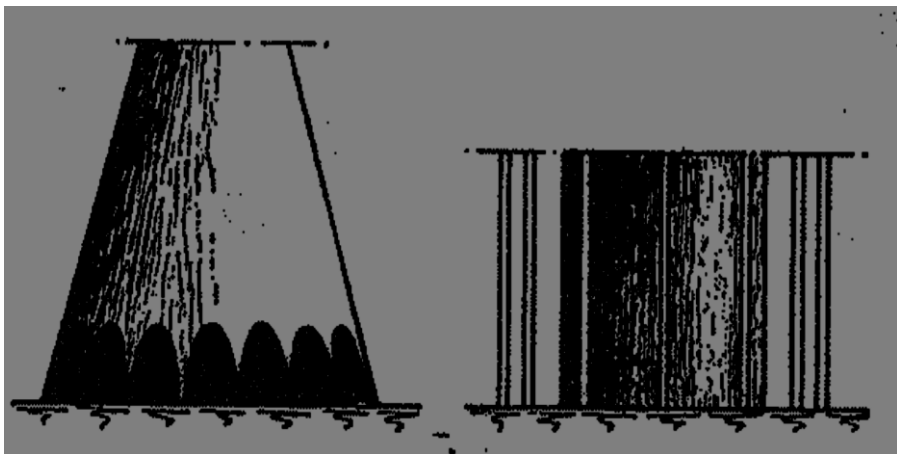
Σχήμα 2.56

Σχήμα 2.57



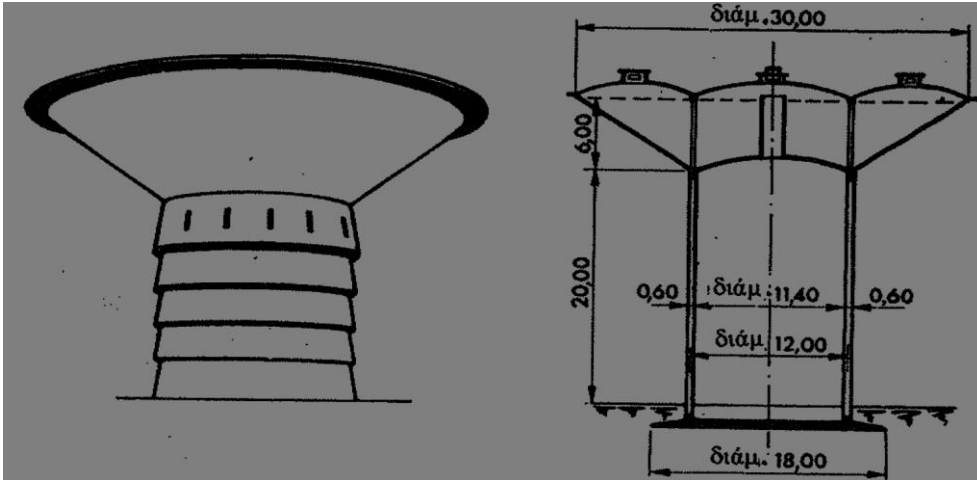
Σχήμα 2.5

Σχήμα 2.60



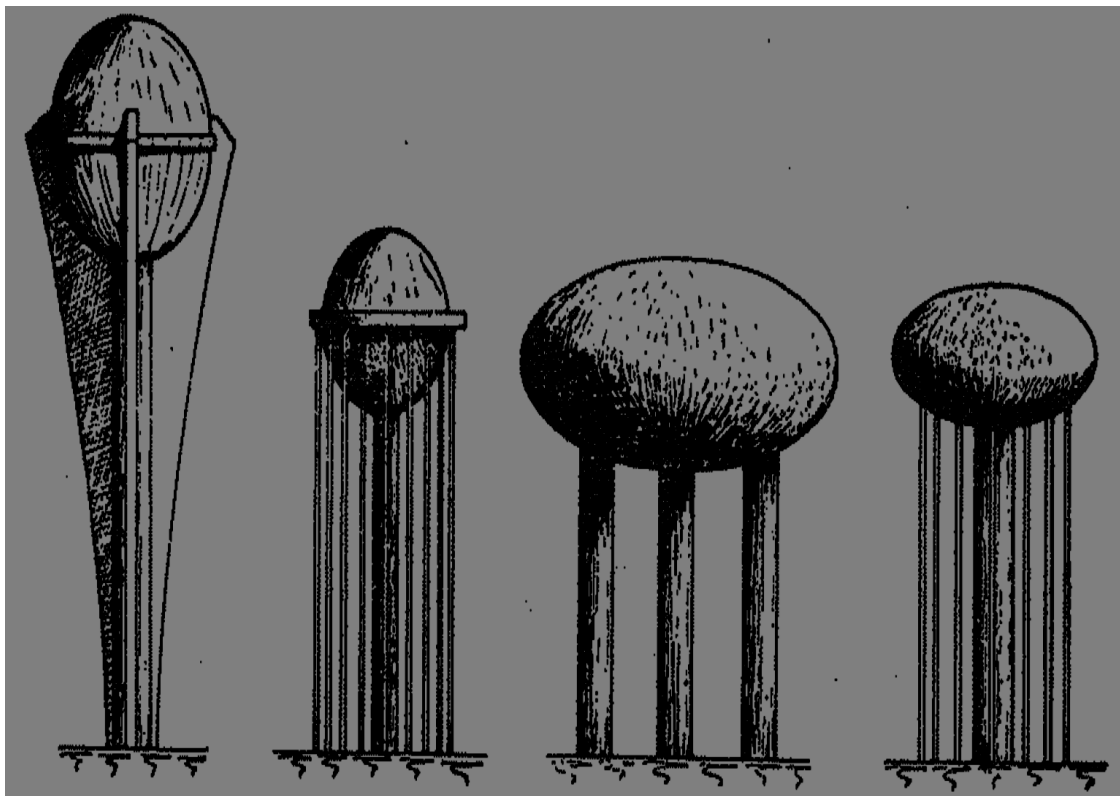
Σχήμα 2.61

Σχήμα 2.62



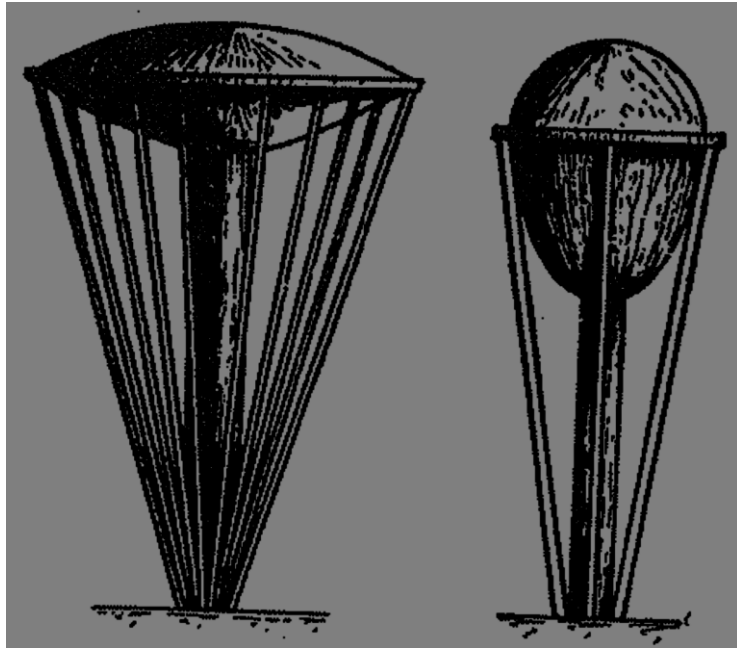
Σχήμα 2.63

Σχήμα 2.64



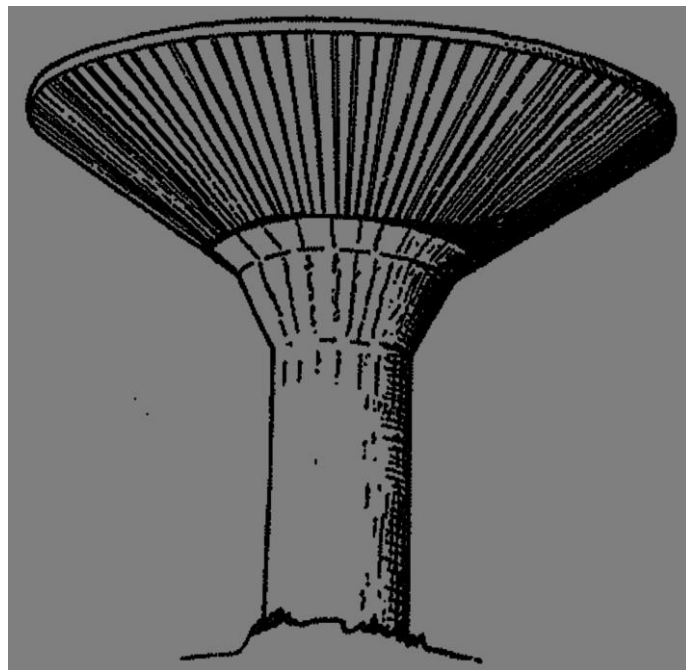
Σχήμα 2.65

Σχήμα 2.66

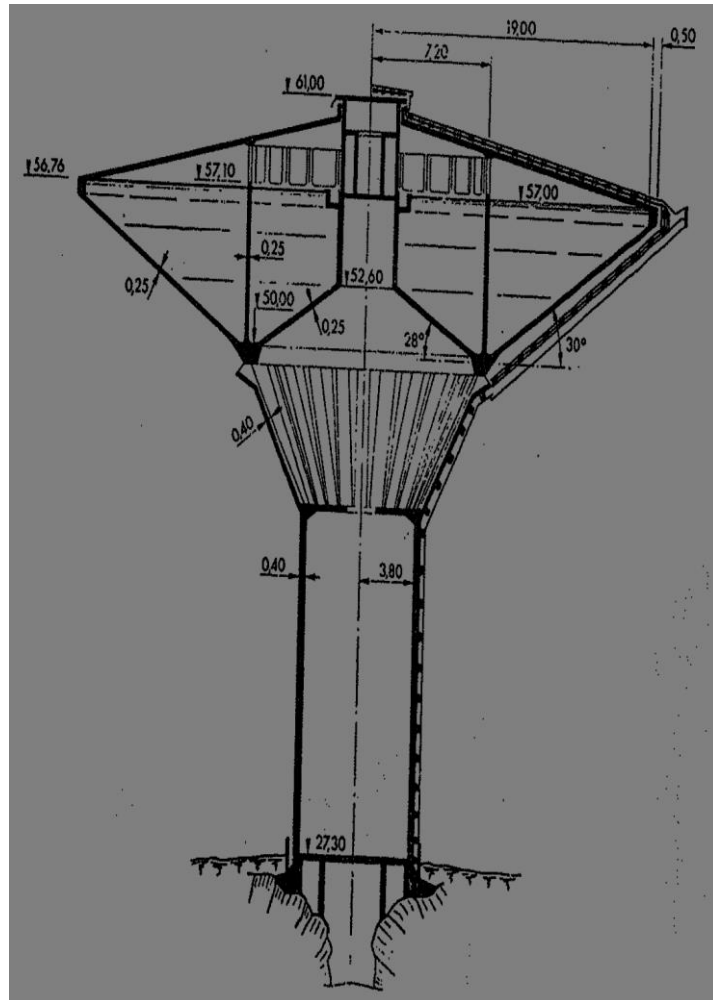


Σχήμα 2.67

Σχήμα 2.68



Σχήμα 2.69



Σχήμα 2.70

3.Η ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΚΛΥΔΑΣΜΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ : ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΚΛΥΔΑΣΜΟΥ

Το πρόβλημα του κλυδασμού θεωρείται ένα τυπικό γραμμικό πρόβλημα ιδιοτιμών, το οποίο εκφράζει τον κυματισμό της ελεύθερης επιφάνειας ενός ιδεατού ρευστού μέσα σε μια δεξαμενή [2]. Αυτός ο ελεύθερος κυματισμός περιγράφεται από την συνάρτηση ταχύτητας δυναμικού, που ικανοποιεί την εξίσωση Laplace για ιδεατά ρευστά, τις συνθήκες μη-διαπερατότητας στο όριο με το τοίχωμα της δεξαμενής και τις οριακές συνθήκες της ελεύθερης επιφάνειας. Θεωρώντας μικρού πλάτους κυματισμό και υποθέτοντας μια αρμονική λύση του προβλήματος, από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ένα τυπικό πρόβλημα ιδιοτιμών. Η επίλυση του εξασφαλίζει τις φυσικές ιδιοσυχνότητες της κίνησης του κλυδασμού καθώς και τις αντίστοιχες

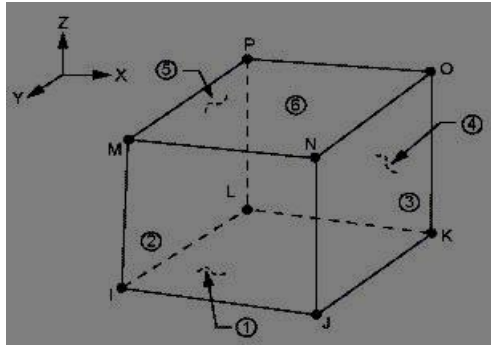
ιδιομορφές του, οι οποίες εξαρτώνται έντονα από τη μορφή της δεξαμενής. Η κίνηση του κλυδασμού μπορεί να προσδιοριστεί από τη σύνθεση ασύζευκτων ιδιομορφών του υγρού όγκου, οι οποίες προσδιορίζονται με ιδιομορφική ανάλυσή του.

Για ορθογωνικές και κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές, το πρόβλημα των ιδιοτιμών του κλυδασμού μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά χρησιμοποιώντας την μέθοδο διαχωρισμού των μεταβλητών για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης που προκύπτει. Οι ιδιομορφές που προκύπτουν είναι ορθογώνιες και ασύζευκτες μεταξύ τους. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά ενός υδατόπουργου με δεξαμενή κυλινδρικής γεωμετρίας με άκαμπτα τοιχώματα. Για δεξαμενές διαφορετικής γεωμετρίας από αυτής του κυλίνδρου και του κύβου δεν έχουν εξαχθεί αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις που να περιγράφουν τη συμπεριφορά του περιεχόμενου υγρού.

Η συμπεριφορά του περιεχόμενου υγρού θεωρείται ότι είναι μη συνεκτική, αστρόβιλη και γραμμική. Προϋπόθεση για αυτό είναι η μικρή αναλογία κατακόρυφης μετατόπισης της επιφάνειας του υγρού προς το μήκος της ελεύθερης επιφάνειάς του. Η συγκεκριμένη αναλογία δεν πρέπει να ξεπερνά το 5% προκειμένου να εξαχθούν ακριβή αποτελέσματα. Δεδομένου ότι τα παραπάνω πληρούνται, μπορεί να θεωρηθεί το πρόβλημα της ελεύθερης ταλάντωσης του υγρού ως ένα γραμμικό πρόβλημα ιδιοτιμών. Η επίλυσή του οδηγεί στην εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών των μορφών του κλυδασμού που το χαρακτηρίζουν.

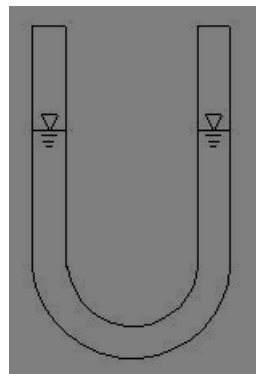
3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ ΜΑΣ ΟΓΚΟΥ

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στο ANSYS για την προσομοίωση του υγρού ονομάζονται FLUID80 (Σχήμα 3.1). Τα στοιχεία αυτά ορίζονται από 8 κόμβους με 3 μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας ο καθένας (UX,UY,UZ). Οι παράμετροι που απαιτούνται για τον ορισμό των συγκεκριμένων στοιχείων είναι το ιξώδες του υγρού (viscosity - VISC), το οποίο στα πλαίσια αυτής της εργασίας αγνοείται, αφού χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μητρώου απόσβεσης σε δυναμικές αναλύσεις, και το μέτρο διόγκωσης του υγρού (bulk modulus – EX), το οποίο ερμηνεύεται ως “μέτρο ελαστικότητας υγρού”. Η τιμή του μέτρου διόγκωσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι 2 GPa.



Σχήμα 3.1 Γεωμετρία του στοιχείου FLUID80.1

Τα στοιχεία FLUID80 παρέχουν τη δυνατότητα χρήσης ειδικών ελατηρίων βαρύτητας σε κάθε κόμβο, τα οποία χρησιμοποιούνται για να προσομοιώνουν την κατακόρυφη απόκριση της ελεύθερης επιφάνειας που αναπτύσσεται σε έναν επιταχυνόμενο όγκο υγρού. Ο τρόπος λειτουργίας των ελατηρίων αυτών γίνεται κατανοητός με τη μελέτη της συμπεριφοράς του υγρού που βρίσκεται σε ένα σωλήνα σχήματος U (U-tube) (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2 Διάταξη συγκοινωνούντων δοχείων (σωλήνας σχήματος U).

Αν η ελεύθερη επιφάνεια του υγρού στην αριστερή πλευρά του σωλήνα μετακινηθεί προς τα κάτω κατά απόσταση Δh , τότε η μάζα του υγρού που έχει εκτραπεί είναι:

$$M_D = \Delta h A \rho$$

, όπου το A είναι το εμβαδό της ελεύθερης επιφάνειας και ρ είναι η πυκνότητα του υγρού.

Τότε, η δύναμη που απαιτείται για να συγκρατήσει την ελεύθερη επιφάνεια στη θέση της είναι $F_D = M_D g$

, όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Τελικά η σταθερά επαναφοράς του ελατηρίου που συνδέεται με την ελεύθερη επιφάνεια για να προσομοιώσει το παραπάνω φαινόμενο προκύπτει από τη διαίρεση της απαιτούμενης δύναμης με την απόσταση εκτροπής της ελεύθερης επιφάνειας: $k_s = \rho A g$

Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν ελατήρια βαρύτητας στη στάθμη $Z=0$, που ταυτίζεται στο μοντέλο με το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού.

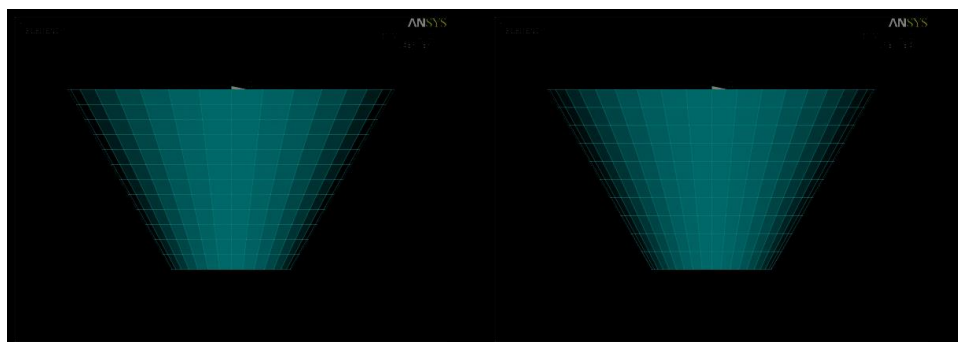
Η μόνη μέθοδος ιδιομορφικής ανάλυσης που είναι αποδεκτή σύμφωνα με το εγχειρίδιο θεωρίας του ANSYS [7] είναι η μέθοδος της απομείωσης (reduced Householder method). Κατά τη μέθοδο αυτή ορίζονται οι σημαντικοί δυναμικοί βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου (master degrees of freedom) που είναι χαρακτηριστικοί για τη δυναμική συμπεριφορά του υγρού που εξετάζεται. Οι δυναμικοί βαθμοί ελευθερίας που επιλέγονται σε μια τέτοια ανάλυση πρέπει να επιλέγονται σε κάθε κόμβο της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού και να είναι κάθετοι σε αυτή. Διαφορετικά μπορεί να δημιουργηθούν μεγάλες εσωτερικές στροφές. Στην προκειμένη περίπτωση είναι η κατακόρυφη μετακίνηση (UZ) των κόμβων που βρίσκονται στη θέση $Z=0$ στο σύστημα συντεταγμένων του μοντέλου, θέση που συμπίπτει με την ελεύθερη επιφάνεια του περιεχόμενου υγρού.

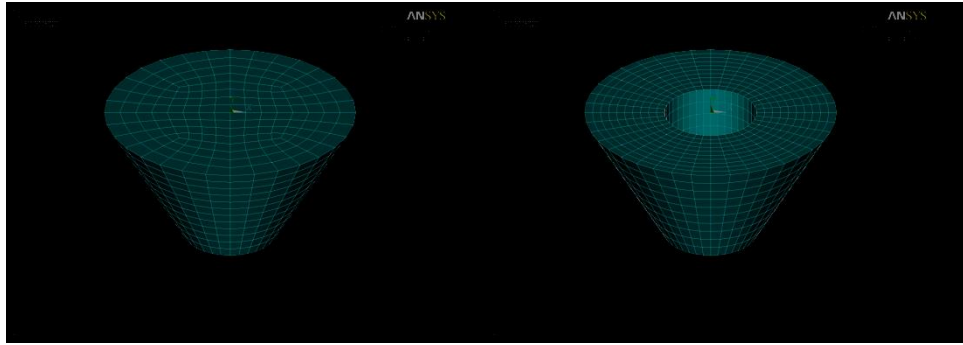
Από το πρόγραμμα χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων του μοντέλου:

$$[K]\{\Phi_i\} = \omega_i^2[M]\{\Phi_i\}$$

,όπου $[K]$ είναι το μητρώο δυσκαμψίας, $[M]$ το μητρώο μάζας, $\{\Phi_i\}$ και ω_i το ιδιοδιάνυσμα και το τετράγωνο της κυκλικής συχνότητας της i -οστής ιδιομορφής αντίστοιχα.

Η ύπαρξη του άκαμπτου τοιχώματος της δεξαμενής και ο περιορισμός της κίνησης που αυτό επιβάλλει στο περιεχόμενο υγρό προσομοιώνεται στο μοντέλο με δέσμευση της κάθετης κίνησης των κόμβων προς τις επιφάνειες της δεξαμενής. Στα Σχήματα 3.3, 3.4 φαίνεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για τη διακριτοποίηση του υγρού της δεξαμενής.

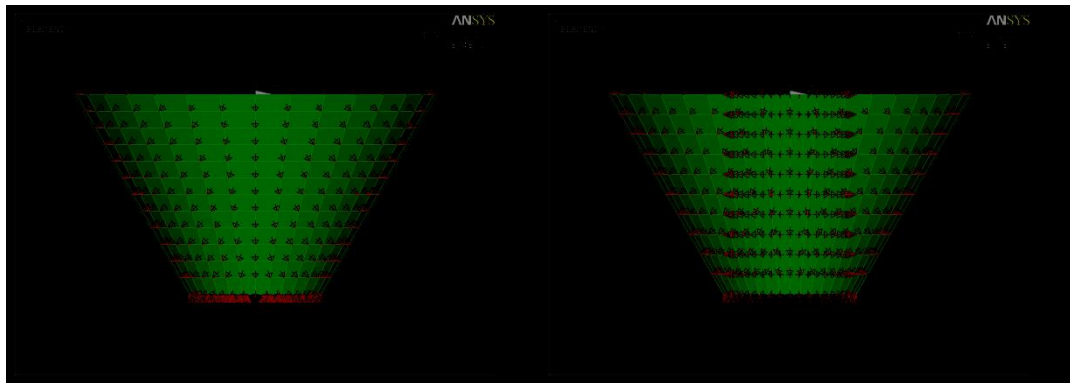




(α)

(β)

Σχήμα 3.3 Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του περιεχόμενου υγρού για τους δύο τύπους δεξαμενών που εξετάστηκαν στην εργασία: (α) περίπτωση δεξαμενής χωρίς τρύπα κατά το ύψος της, (β) περίπτωση δεξαμενής με τρύπα ακτίνας r κατά το ύψος της.



(α)

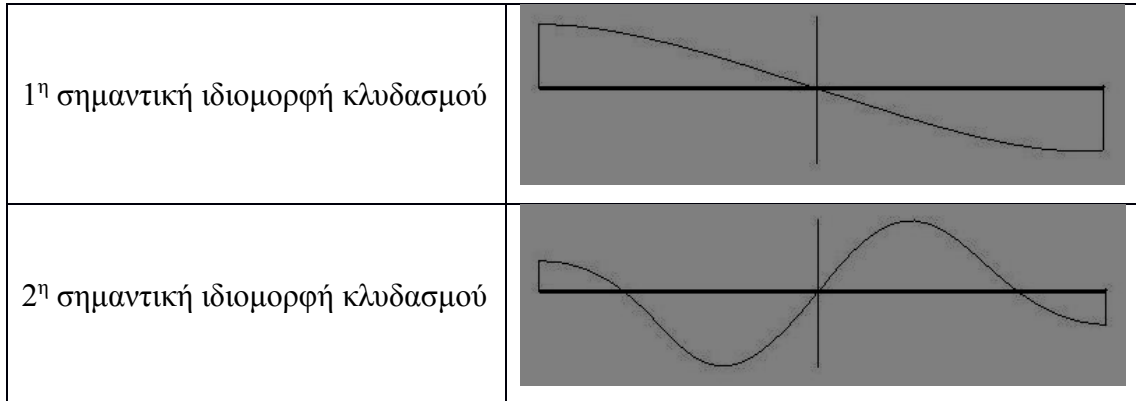
(β)

Σχήμα 3.4 Δέσμευση της κάθετης κίνησης προς τα τοιχώματα της δεξαμενής για την προσομοίωση των άκαμπτων τοιχωμάτων της δεξαμενής: (α) περίπτωση δεξαμενής χωρίς τρύπα κατά το ύψος της, (β) περίπτωση δεξαμενής με τρύπα ακτίνας r κατά το ύψος της.

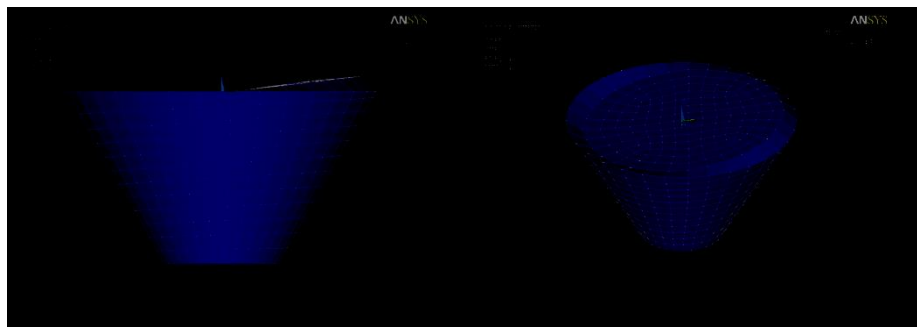
3.3 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ : ΟΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΤΟΥ ΚΛΥΔΑΣΜΟΥ

Οι ιδιομορφές που προκαλούν οριζόντια υδροδυναμική πίεση στα τοιχώματα της δεξαμενής και επομένως συμβάλλουν στη οριζόντια κίνηση της δεξαμενής είναι αυτές που παρατηρείται αντισυμμετρία της κατακόρυφης κίνησης της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού ως προς το επίπεδο που διέρχεται από το κέντρο της δεξαμενής και είναι κάθετο στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού. Αυτές οι ιδιομορφές θεωρούνται οι σημαντικές ιδιομορφές κλυδασμού που παίζουν ρόλο στην κατασκευή του μηχανικού μοντέλου που χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει τη δυναμική συμπεριφορά του περιεχόμενου υγρού, όπως εξηγείται και στο επόμενο κεφάλαιο. Στο Σχήμα 3.5

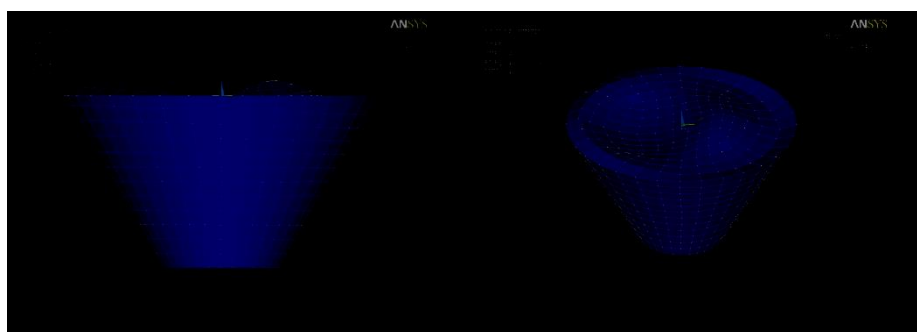
φαίνονται τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας των πρώτων δύο σημαντικών ιδιομορφών του κλυδασμού. Για τους τύπους δεξαμενών που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία φαίνονται στα Σχήματα 3.6-3.9 οι πρώτες δύο σημαντικές ιδιομορφές του κλυδασμού.



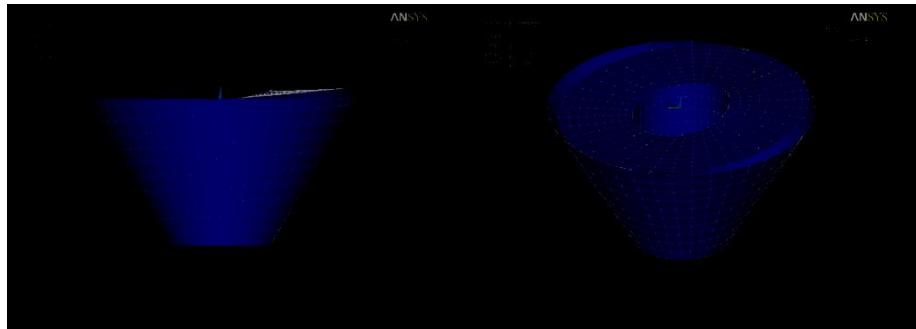
Σχήμα 3.5 Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας υγρού για τις πρώτες δύο σημαντικές ιδιομορφές κλυδασμού.



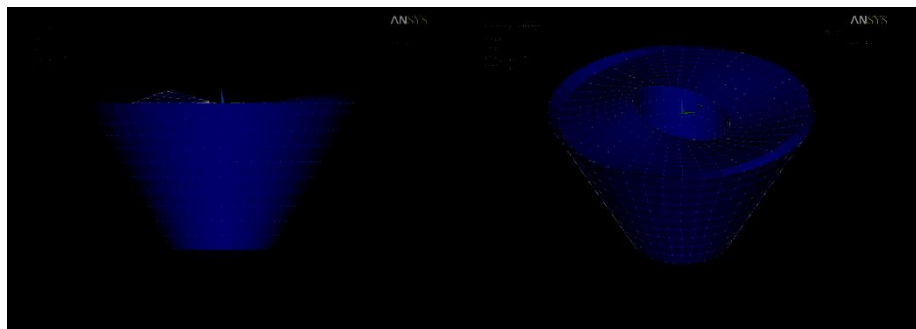
Σχήμα 3.6 Η 1^η σημαντική ιδιομορφή κλυδασμού για δεξαμενές χωρίς τρύπα κατά το ύψος τους.



Σχήμα 3.7 Η 2^η σημαντική ιδιομορφή κλυδασμού για δεξαμενές χωρίς τρύπα κατά το ύψος τους.



Σχήμα 3.8 Η 1^η σημαντική ιδιομορφή κλυδασμού για δεξαμενές με τρύπα κατά το ύψος τους.



Σχήμα 3.9 Η 2^η σημαντική ιδιομορφή κλυδασμού για δεξαμενές με τρύπα κατά το ύψος τους.

4. ΘΕΩΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΥΓΡΟΥ ΣΤΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ - ΜΕ ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΜΑΖΕΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

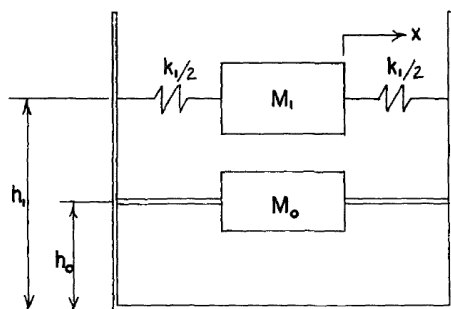
Για την προσομοίωση του υγρού που βρίσκεται στη δεξαμενή χρησιμοποιούμε το μοντέλο διακριτών μαζών από την εργασία των Veletsos & Shivakumar [8]. Σύμφωνα με τους Veletsos & Shivakumar, η υδροδυναμική πίεση που προκαλεί η κίνηση του υγρού στα τοιχώματα θα μπορούσε να αναλυθεί σε δύο ασύζευκτες συνιστώσες. Η μία ονομάζεται ωστική (impulsive) και μεταβάλλεται σε συγχρονισμό με την επιτάχυνση της δεξαμενής και προκαλείται από το μέρος εκείνο του υγρού (impulsive mass) που ακολουθεί την κίνηση της δεξαμενής ως στερεό. Η δεύτερη συνιστώσα ονομάζεται κυκλοφορούσα (convective) και προκαλείται από το φαινόμενο του κλυδασμού, δηλαδή τον κυματισμό της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού στη δεξαμενή.

Ο όγκος του υγρού μπορεί να προσομοιωθεί με ένα σύστημα διακριτών μαζών εφόσον συνδέεται άκαμπτα με τα τοιχώματα της δεξαμενής και έτσι αποκαλείται ωστική μάζα, και μίας που συνδέεται με τα τοιχώματα της δεξαμενής με κατάλληλη

διάταξη συστήματος ελατηρίων αποκαλείται κυκλοφορούσα μάζα. Για την ισχύ του παραπάνω μοντέλου θα πρέπει να τηρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Για μικρό κυματισμό το κέντρο βάρους να παραμένει το ίδιο με αυτό του πραγματικού συστήματος
2. Τα αδρανειακά χαρακτηριστικά του υγρού πρέπει να διατηρούνται στο μοντέλο των διακριτών μαζών.
3. Οι δυνάμεις που παράγονται από την απόκριση του μοντέλου διακριτών μαζών πρέπει να είναι ίσες με αυτές του πραγματικού συστήματος.
4. Το μοντέλο πρέπει να παράγει ιδιομορφές με την ίδια ιδιοσυχνότητα και ποσοστό συμμετοχής μάζας με αυτές του πραγματικού συστήματος.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ένα ανάλογο μηχανικό μοντέλο προσομοίωσης κυλινδρικής δεξαμενής με άκαμπτα τοιχώματα τ οποίο προτείνεται από τον Housner [6]. Η ωστική μάζα του υγρού αντιπροσωπεύεται από τη M_0 , ενώ η κυκλοφορούσα από τη M_1 . Ανάλογα με το πλήθος των ιδιομορφών που λαμβάνονται υπόψη για την προσομοίωση του φαινομένου του κλυδασμού, προστίθενται στο μοντέλο και άλλες κυκλοφορούσες μάζες M_n σε διαφορετικά ύψη h_n και συνδέονται με τα τοιχώματα της δεξαμενής με ελατήρια διαφορετικής σταθεράς k_n . Ο τρόπος προσδιορισμού των μεγεθών εξειγήτε αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 4.1 Μηχανικό μοντέλο προσομοίωσης κυλινδρικής δεξαμενής με άκαμπτα τοιχώματα.

4.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΜΑΖΩΝ

Απο εργασία των Veletsos & Shivakumar [8] προτείνεται η εξής σχέση για τον προσδιορισμό της συνολικής υδροδυναμικής πίεσης που ασκείται στα τοιχώματα της δεξαμενής σε κάθε στιγμή της οριζόντιας διέγερσης.

$$Q_b(t) = m_i \ddot{x}_g(t) + \sum_{n=1}^{\infty} m_{cn} A_{cn}(t) \quad (4.1)$$

, όπου Q_b είναι η συνολική οριζόντια δύναμη που προκαλεί ο κλυδασμός του υγρού της δεξαμενής οποιαδήποτε στιγμή, m_i είναι η ωστική μάζα που κινείται σε συγχρονισμό με την επιτάχυνση \ddot{x}_g της δεξαμενής, m_{cn} η κυκλοφορούσα μάζα που διεγείρεται με τη συχνότητα της n -στής ιδιομορφής κλυδασμού και A_{cn} μια στιγμιαία τιμή της ψευδοεπιτάχυνσης την οποία αποκτά ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής με κυκλική συχνότητα ίση με τη συχνότητα ω_n της αντίστοιχης ιδιομορφής κλυδασμού για διέγερση στήριξης \ddot{x}_g .

Με κατάλληλες τροποποιήσεις στην ανωτέρω σχέση για τον άμεσο προσδιορισμό των διακριτών μαζών προκύπτουν τα εξής:

Η τιμή της ψευδοεπιτάχυνσης ανά πάσα στιγμή δίνεται από τη σχέση

$$A_{cn}(t) = \omega_n^2 u_n(t) \quad (4.2)$$

, όπου u_n είναι η απόκριση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή με συχνότητα ω_n για διέγερση στήριξης \ddot{x}_g . Με αντικατάσταση της σχέσης (4.2) στη σχέση (4.1) προκύπτει :

$$Q_b(t) = m_i \ddot{x}_g(t) + \sum_{n=1}^{\infty} m_{cn} \omega_n^2 u_n(t) \quad (4.3)$$

Από τη θεωρία της δυναμικής ανάλυσης πολυβάθμιων συστημάτων, η συνολική οριζόντια δύναμη στη στήριξη ενός ταλαντωτή για οριζόντια διέγερση δίδεται από τη σχέση :

$$Q_b(t) = M_r \ddot{x}_g(t) + \sum_{n=1}^{\infty} M_{xn}^* \omega_n^2 \psi_n(t) \quad (4.4)$$

, όπου M_r είναι η μάζα του ταλαντωτή που συνδέεται άκαμπτα με τη βάση στήριξης και επιταχύνεται με τη διέγερση \ddot{x}_g , M_{xn}^* είναι η ενεργή ιδιομορφική μάζα στη διεύθυνση της οριζόντιας διέγερσης και μπορεί να οριστεί ως το μέρος της συνολικής μάζας του συστήματος που αποκρίνεται στη n -στή ιδιομορφή με συχνότητα ω_n και

ψ_n είναι η απόκριση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή με συχνότητα ω_n για διέγερση στήριξης \ddot{x}_g .

Με τη θεώρηση του περιεχόμενου υγρού της δεξαμενής ως πολυβάθμιο σύστημα διαπιστώνεται ότι η κυκλοφορούσα μάζα της n-οστής ιδιομορφής κλυδασμού είναι ίση με την ενεργή ιδιομορφική μάζα M_{xn}^* της εκάστοτε ιδιομορφής.

Παράλληλα, για τον προσδιορισμό της ροπής ανατροπής που αναπτύσσεται ακριβώς πάνω από τη βάση της δεξαμενής, προτείνεται από τους Veletsos & Shivakumar [8] η εξής σχέση:

$$M_b(t) = m_i h_i \ddot{x}_g(t) + \sum_{n=1}^{\infty} m_{cn} h_{cn} A_{cn}(t) \quad (4.5)$$

,όπου M_b η συνολική ροπή ανατροπής ακριβώς πάνω από τη βάση της δεξαμενής, h_i και h_{cn} τα ύψη της ωστικής μάζας και των κυκλοφορούσων μαζών αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα σύμβολα αναφέρονται στα μεγέθη που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Από τη θεωρία δυναμικής ανάλυσης πολυβάθμιων συστημάτων ισχύει ότι:

$$\sum_{n=1}^{\infty} m_n h_n = \sum_{n=1}^{\infty} h_n^* M_n^* \quad (4.6)$$

,όπου h_n^* το ενεργό ιδιομορφικό ύψος στη διεύθυνση της διέγερσης. Επομένως εύκολα προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα ύψη στα οποία τοποθετούνται οι κυκλοφορούσες μάζες στη δεξαμενή είναι τα εκάστοτε ιδιομορφικά ύψη.

Συνεπώς καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός των κυκλοφορούσων μαζών και των υψών στα οποία τοποθετούνται μέσα από την επίλυση του ιδιομορφικού προβλήματος του κλυδασμού. Ωστόσο, τα μεγέθη των ενεργών ιδιομορφικών μαζών και των ενεργών ιδιομορφικών υψών δεν γίνεται να εξαχθούν αμέσως με τη μέθοδο της απομείωσης (reduced method), που χρησιμοποιείται για την επίλυση του ανωτέρω ιδιομορφικού προβλήματος. Αυτό συμβαίνει επειδή στη συγκεκριμένη μέθοδο ορίζονται μόνο κατακόρυφοι δυναμικοί βαθμοί ελευθερίας (master DOFs) και επομένως η μάζα του περιεχόμενου υγρού στη οριζόντια διεύθυνση είναι μηδενική.

Για να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα της εξαγωγής των ενεργών ιδιομορφικών μαζών αναπτύχθηκε στα πλαίσια των εργασιών [2],[3] κώδικας στη γλώσσα προγραμματισμού και διαχείρισης APDL του προγράμματος ANSYS και στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN95. Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας, ο

κώδικας αυτός τροποποιήθηκε κατάλληλα και εξελίχθηκε ώστε να αποδίδει και τις τιμές των ενεργών ιδιομορφικών υψών για κάθε ιδιομορφή.

Για την εύρεση των ενεργών ιδιομορφικών μαζών και υψών χρησιμοποιήθηκαν σχέσεις από την κλασσική θεωρία δυναμικής των κατασκευών. Επομένως ισχύει σύμφωνα τον Chopra [4]:

$$M_n^* = \frac{(L_n^h)^2}{M_n} \quad (4.7)$$

και

$$h_n^* = \frac{L_n^\theta}{L_n^h} \quad (4.8)$$

,όπου M_n είναι η γενικευμένη μάζα για τη n-οστή ιδιομορφή και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M_n = \sum_{j=1}^N m_j \varphi_{jn}^2 \quad (4.9)$$

και τα μεγέθη L_n^h και L_n^θ υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$L_n^h = \sum_{j=1}^N m_j \varphi_{jn} \quad (4.10)$$

$$L_n^\theta = \sum_{j=1}^N h_j m_j \varphi_{jn} \quad (4.11)$$

φ_{jn} είναι οι τιμές του αποσυμπυκνωμένου ως προς όλους τους βαθμούς ελευθερίας (UX, UY, UZ) ιδιοδιανύσματος της n-οστής ιδιομορφής για το j-οστό κόμβο του συστήματος που μελετάται.

Ακόμη ισχύει ότι το άθροισμα των κυκλοφορούσων μαζών και της ωστικής μάζας ισούται με τη συνολική μάζα του περιεχόμενου υγρού στη δεξαμενή. Ισχύει δηλαδή ότι:

$$m_i + \sum_{n=1}^{\infty} m_{cn} = M \quad (4.12)$$

,όπου M η συνολική μάζα του περιεχόμενου υγρού.

Επομένως, έχοντας υπολογίσει τα μεγέθη των κυκλοφορούσων μαζών με την παραπάνω διαδικασία, γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός και της τιμής της ωστικής μάζας.

Το ύψος h_i στο οποίο τοποθετείται η ωστική μάζα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση που προτείνεται από τους Veletsos & Shivakumar [8]:

$$m_i h_i + \sum_{n=1}^{\infty} m_{cn} h_{cn} = M \frac{H}{2} \quad (4.13)$$

, όπου H το ύψος της δεξαμενής.

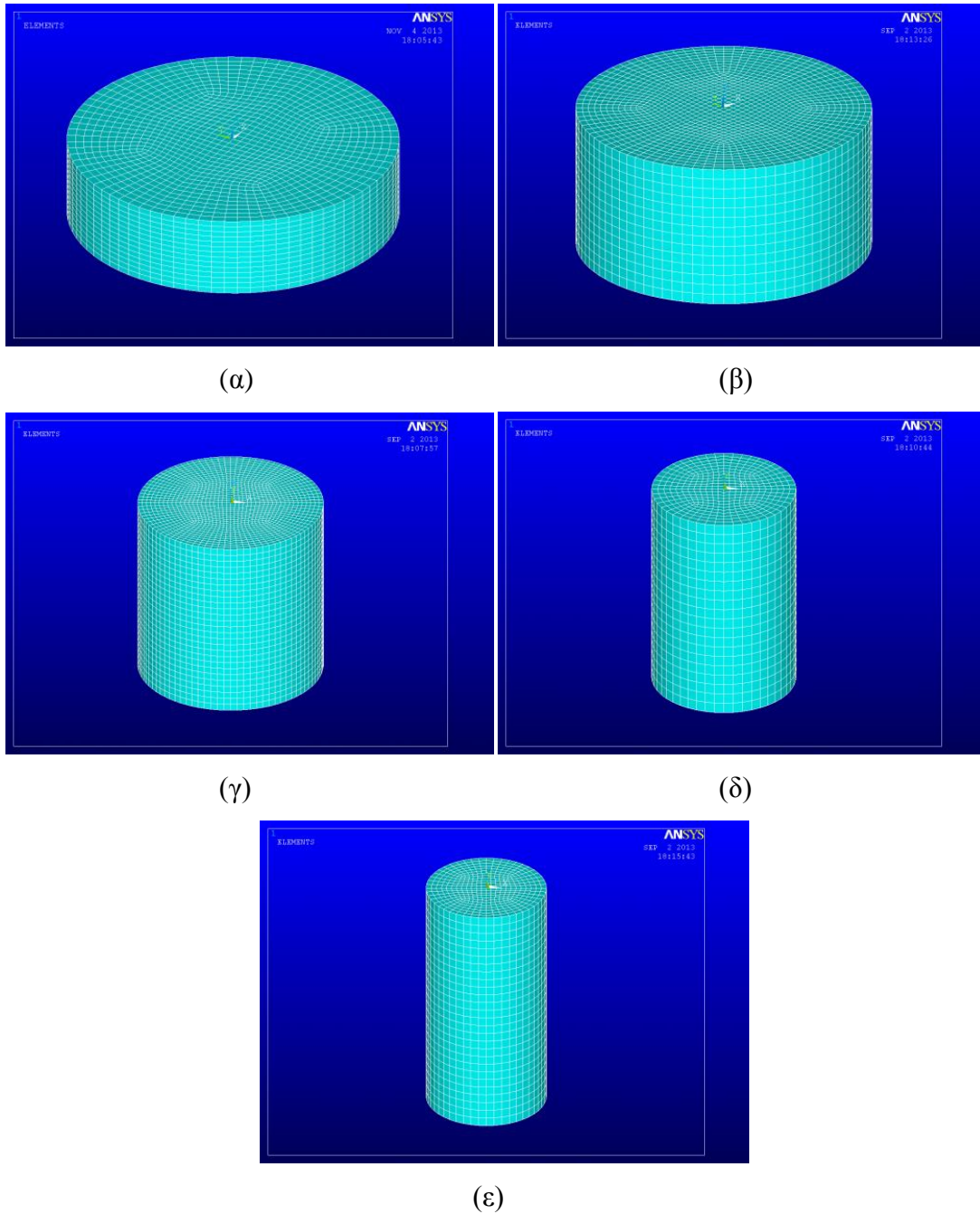
Τέλος, οι σταθερές k_{cn} των ελατηρίων που συνδέουν τις κυκλοφορούσες μάζες με τα τοιχώματα της δεξαμενής μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση:

$$k_{cn} = \omega_n^2 m_{cn} \quad (4.14)$$

4.3 ΣΤΟΙΧΕΙΟΘΕΤΩΝΤΑΣ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ

Οι Veletsos & Shivakumar εξήγαγαν στην εργασία τους [8] νομογραφήματα που προκύπτουν από αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό των κυκλοφορούσων μαζών και της ωστικής μάζας για κυλινδρικές δεξαμενές καθώς και για τον υπολογισμό των υψών, στα οποία αυτές τοποθετούνται στο μηχανικό ανάλογο της δεξαμενής. Οι τιμές των παραπάνω μεγεθών εξαρτώνται από το λόγο H/R της δεξαμενής, όπου H είναι το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού και R η ακτίνα της κυλινδρικής δεξαμενής.

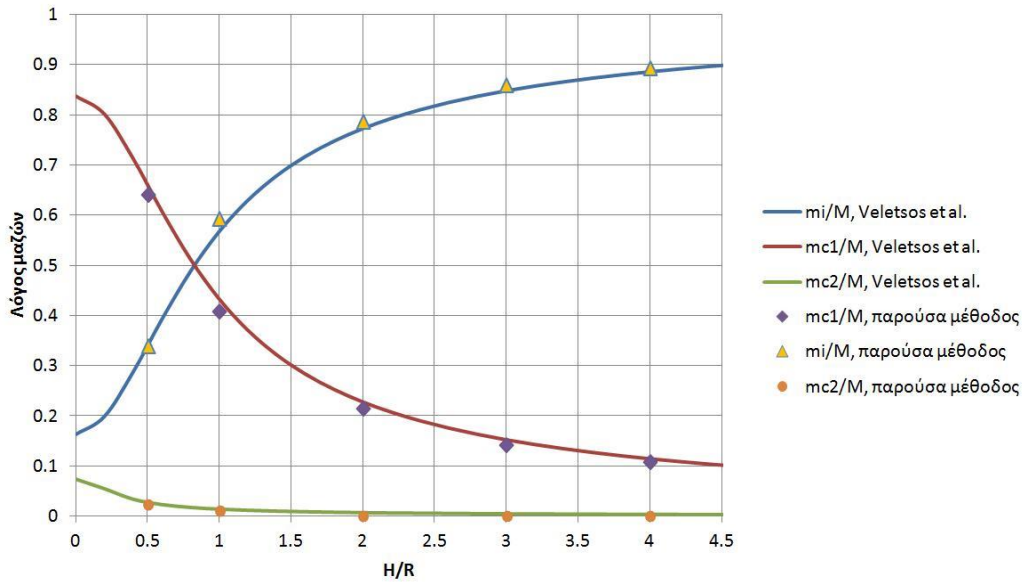
Η μεθοδολογία που προτάθηκε στην παραπάνω παράγραφο εφαρμόζεται για κυλινδρικές δεξαμενές με λόγους πλήρωσης $H/R = 0.5, 1, 2, 3, 4$. Για αυτές τις περιπτώσεις πλήρωσης λαμβάνεται υπόψη μόνο η πρώτη σημαντική ιδιομορφή του κλυδασμού, αφού η συνεισφορά των υπόλοιπων ιδιομορφών είναι πολύ μικρή. Στο Σχήμα 4.2 φαίνονται τα μοντέλα κυλινδρικών δεξαμενών, στα οποία εφαρμόστηκε η προτεινόμενη διαδικασία.



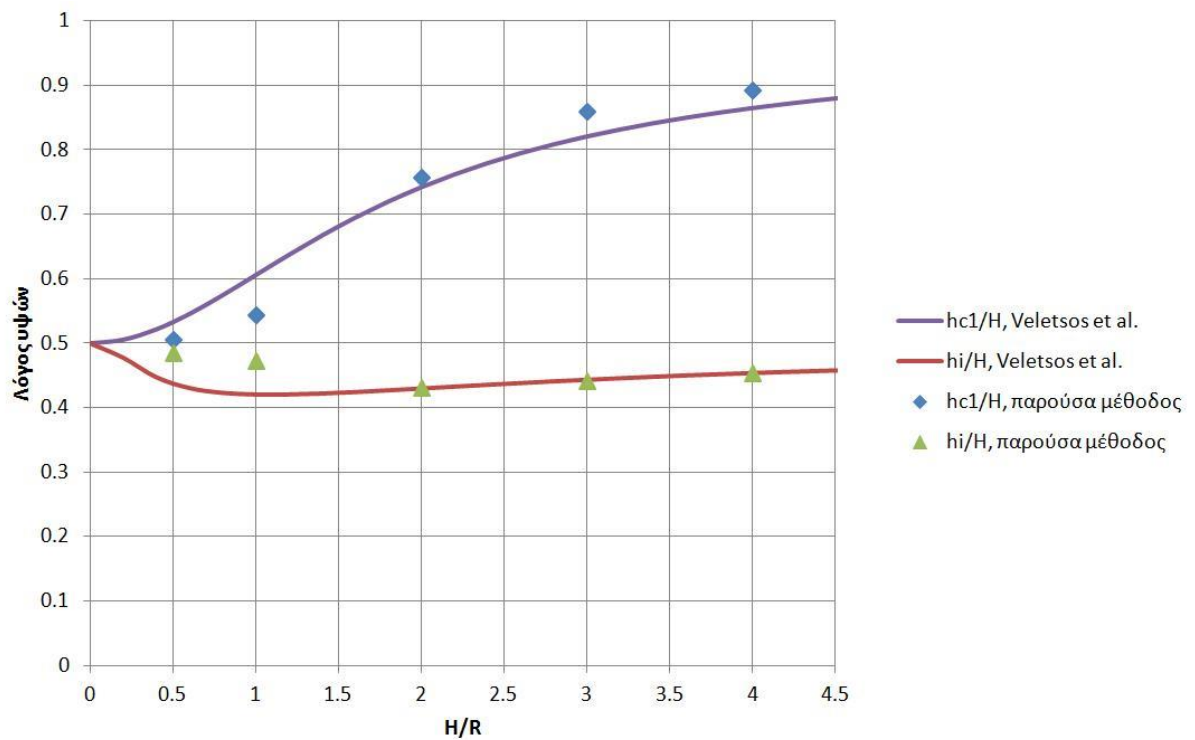
*Σχήμα 4.2 Μοντέλα κυλινδρικών δεξαμενών που δοκιμάστηκε η ισχύς της προτεινόμενης διαδικασίας προσομοίωσης του περιεχόμενου υγρού
(α) $H/R=0.5$, (β) $H/R=1$, (γ) $H/R=2$, (δ) $H/R=3$, (ε) $H/R=41$*

Στα Σχήματα 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της προτεινόμενης αριθμητικής μεθόδου υπολογισμού και συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν με χρήση των αναλυτικών σχέσεων της εργασίας των Veletsos & Shivakumar [8]. Παρατηρείται ότι υπάρχει μεγάλη συμφωνία στα

αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους όσον αφορά στα ποσοστά των διακριτών μαζών. Όταν πρόκειται όμως για τα ύψη τοποθέτησης των διακριτών μαζών παρατηρείται σημαντική απόκλιση όταν ο λόγος H/R είναι ίσος ή μεγαλύτερος της μονάδας 1 (δηλαδή για $mc1/M > 0.4$).



Σχήμα 4.3 Σύγκριση των κυκλοφορούσων και ωστικών συστασών της μάζας του υγρού που προκύπτουν από την εφαρμογή της αναλυτικής και της προτεινόμενης αριθμητικής μεθόδου.



Σχήμα 4.4: Σύγκριση των ενεργών υψών της κυκλοφορούσας και της ωστικής μάζας του υγρού που προκύπτουν από την εφαρμογή της αναλυτικής και της προτεινόμενης αριθμητικής μεθόδου.

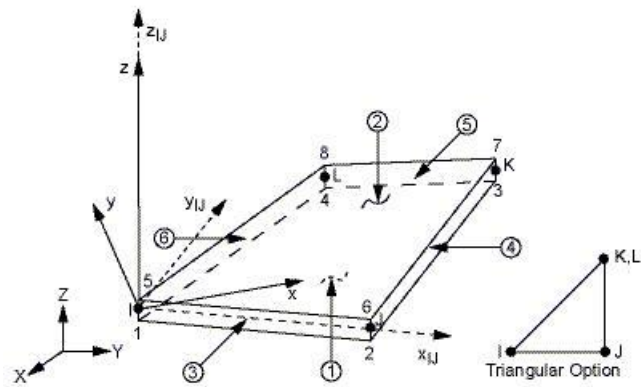
4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΟΥ ΚΟΛΟΥΡΟΥ ΚΩΝΟΥ

Στην παράγραφο 4.3 παρουσιάστηκαν οι πρώτες δύο σημαντικές ιδιομορφές του κλυδασμού για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του υγρού της δεξαμενής. Για αυτές τις ιδιομορφές εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο. Για τον προσδιορισμό των διακριτών μαζών και των ελατηρίων που τις συνδέουν με τη δεξαμενή χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (4.6)-(4.14). Η σχέση (4.13) τροποποιήθηκε κατάλληλα, μια και αναφέρεται καθαρά σε κυλινδρικές δεξαμενές, όπου $\frac{H}{2}$ είναι το ύψος του κέντρου βάρους του νερού. Αντί για $\frac{H}{2}$ χρησιμοποιήθηκε στην προκειμένη περίπτωση το ύψος του κέντρου βάρους του περιεχόμενου υγρού.

5. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΔΑΤΟΠΥΡΓΟΥ ΜΕ ΠΑΚΤΩΜΕΝΗ ΒΑΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

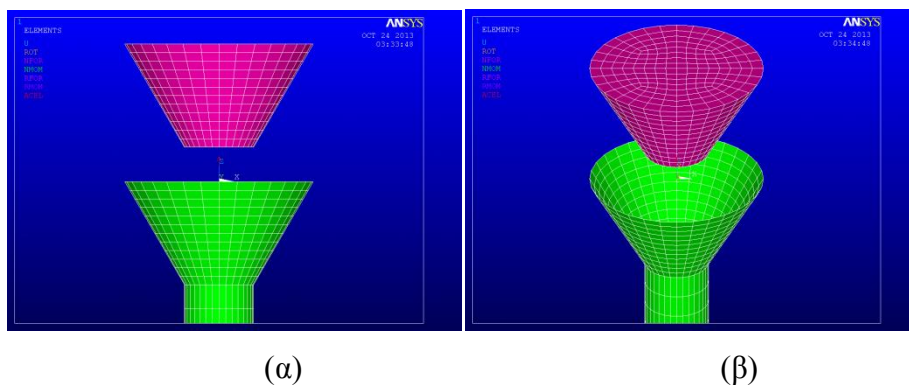
5.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για την προσομοίωση του υδατόπυργου χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία SHELL63 του ANSYS (Σχήμα 4.1). Πρόκειται για επίπεδα στοιχεία 4 κόμβων με 6 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, τρεις μεταφορικούς (UX, UY, UZ) και τρεις στροφικούς (ROTX, ROTY, ROTZ). Έχουν καμπτικές ιδιότητες, αλλά και ιδιότητες μεμβράνης και επιτρέπουν την επιβολή φορτίων κάθετων στην επιφάνειά τους, αλλά και μέσα στο επίπεδό τους. Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών αυτών των στοιχείων εισάγεται η τιμή του πάχους του κελύφους σε κάθε κόμβο TK(I), TK(J), TK(K), TK(L). Το υλικό κατασκευής του πύργου είναι προεντεταμένο σκυρόδεμα. Επομένως το μέτρο ελαστικότητας (EX) του υλικού επιλέχθηκε 35 GPa, η πυκνότητα είναι αντίστοιχη αυτής του σκυροδέματος (2500 kg/m³) και ο λόγος Poisson 0.2. Ως φυσική σταθερά (real constant) εισήχθη το πάχος του κελύφους 0.5 m. Για να εξασφαλιστεί η προϋπόθεση ότι τα τοιχώματα της δεξαμενής είναι άκαμπτα, επιλέχθηκε για αυτά υλικό με μέτρο ελαστικότητας 100 φορές μεγαλύτερο από αυτό του σκυροδέματος και με όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά ίδια. Οι κόμβοι στη βάση πακτώθηκαν στο έδαφος.

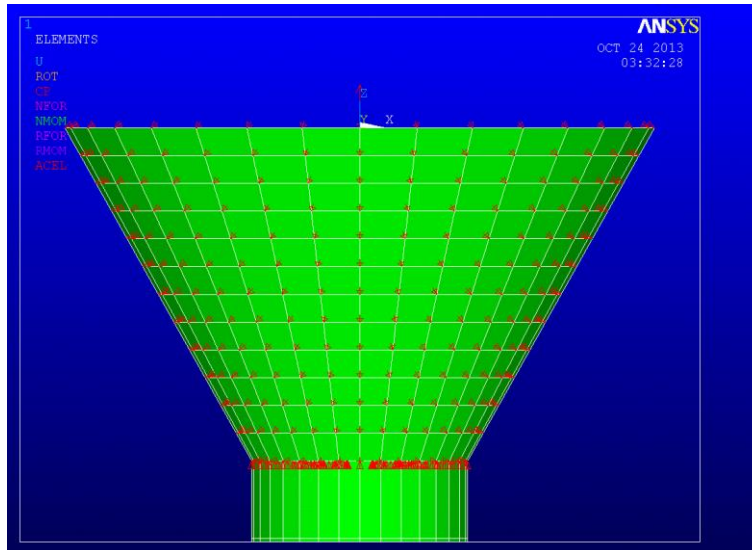


Σχήμα 5.1 Γεωμετρία του στοιχείου SHELL63.

Για την προσομοίωση του περιεχόμενου υγρού στη δεξαμενή χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία FLUID80, όπως εξηγήθηκε και στο 3^ο Κεφάλαιο. Για να εξασφαλισθεί η επαφή υγρού και δεξαμενής στη διεπιφάνειά τους, χρειάστηκε σύζευξη (coupling) των κόμβων τους εκεί. Βασική προϋπόθεση για αυτό είναι η επίτευξη πανομοιότυπης διακριτοποίησης των επιφανειών της δεξαμενής και των εξωτερικών επιφανειών του υγρού, ώστε να προκύπτουν κόμβοι με θέσεις που συμπίπτουν (coincident nodes) (Σχήμα 5.2(α), 5.2(β)). Στη συνέχεια πραγματοποιείται στροφή του συστήματος συντεταγμένων κάθε κόμβου, ώστε ο τοπικός άξονας X του κάθε κόμβου να είναι κάθετος προς την επιφάνεια στην οποία ανήκει ο κόμβος. Η σύζευξη της κίνησης των κοινών κόμβων υγρού και δεξαμενής γίνεται κατά τη διεύθυνση του άξονα X των κόμβων (Σχήμα 5.3).

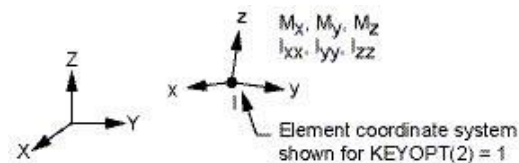


Σχήμα 5.2 Διακριτοποίηση δεξαμενής και υγρού, ώστε να συμπίπτουν οι περιμετρικοί τους κόμβοι.



Σχήμα 5.3 Σύζευξη της κίνησης των κόμβων της δεξαμενή και του υγρού κάθετα στη διεπιφάνεια υγρού – δεξαμενής.1

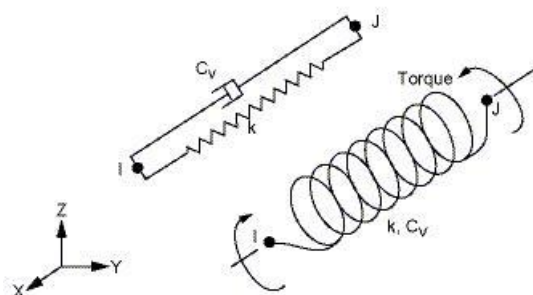
Στην περίπτωση της δυναμικής ανάλυσης του μοντέλου με προσομοίωση του υγρού όγκου με διακριτές μάζες χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία MASS21 για τις διακριτές μάζες (Σχήμα 5.4). Πρόκειται για σημειακά στοιχεία με έως 6 βαθμούς ελευθερίας, τρεις μεταφορικούς (UX, UY, UZ) και τρεις στροφικούς (ROTX, ROTY, ROTZ). Το μόνο μέγεθος (real constant) που εισάχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για να προσδιορίσει τα χαρακτηριστικά του στοιχείου αυτού είναι η μάζα κατά τη διεύθυνση του άξονα X (MASSX). Αυτό συμβαίνει επειδή εξετάζεται η συμπεριφορά του μοντέλου σε οριζόντια σεισμική διέγερση κατά τη διεύθυνση του άξονα X.



Σχήμα 5.4 Γεωμετρία του στοιχείου MASS21.

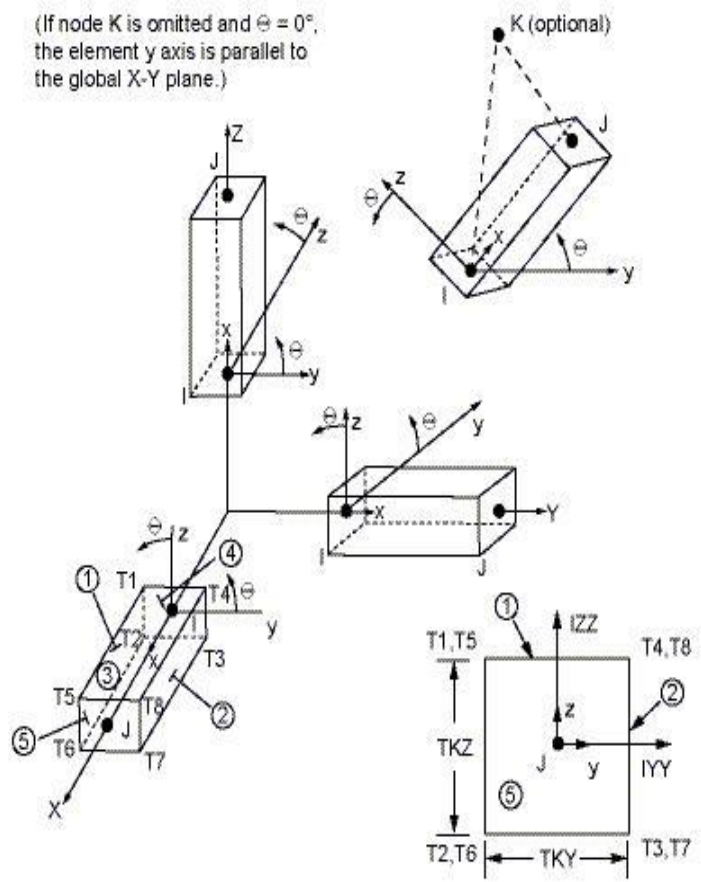
Τα ελατήρια που συνδέουν τις κυκλοφορούσες μάζες με τα τοιχώματα της δεξαμενής προσομοιώθηκαν στο μοντέλο με τη χρήση του στοιχείου COMBIN14 (Σχήμα 5.5). Πρόκειται για ένα στοιχείο που ορίζεται από δύο κόμβους και περιλαμβάνει ένα ελατήριο και ένα αποσβεστήρα. Προσφέρεται για μονοδιάστατες, δισδιάστατες και τρισδιάστατες εφαρμογές. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δύο

τρόπους: ως ελατήριο με αξονική μόνο παραμόρφωση (KEYOPT(3)=0) ή ως ελατήριο με στροφική μόνο παραμόρφωση (KEYOPT(3)=1). Αντίστοιχα, οι βαθμοί ελευθερίας σε κάθε κόμβο είναι είτε μεταφορικοί (UX, UY, UZ) είτε στροφικοί (RX, RY, RZ). Η συμπεριφορά του ελατηρίου μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική. Για την παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο αυτό ως μονοδιάστατο ελατήριο αξονικής παραμόρφωσης (UX), χωρίς απόσβεση και με γραμμική συμπεριφορά. Η σύνδεσή του με τα τοιχώματα της δεξαμενής έγινε με χρήση άκαμπτων στοιχείων δοκού (στοιχείο BEAM4 – περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο).

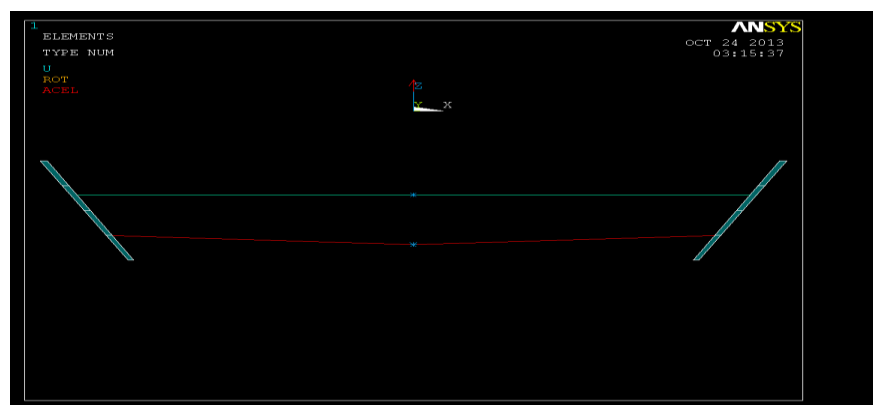


Σχήμα 5.5 Γεωμετρία του στοιχείου COMBIN14.1

Η άκαμπτη σύνδεση των ελατηρίων, αλλά και της ωστικής μάζας, με τα τοιχώματα της δεξαμενής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των στοιχείων BEAM4 (Σχήμα 5.6). Πρόκειται για στοιχεία δοκού που ορίζεται στις τρεις διαστάσεις και έχει ελαστική συμπεριφορά. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει καταστάσεις θλίψης, εφελκυσμού, κάμψης και στρέψης. Έχει έξι βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, τρεις μεταφορικούς (UX, UY, UZ) και τρεις στροφικούς (ROTX, ROTY, ROTZ). Οι φυσικές σταθερές (real constants) που χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιοριστεί η γεωμετρία της διατομής της δοκού είναι η επιφάνεια της διατομής της (AREA), οι ροπές αδράνειας της επιφάνειας (IYY, IZZ) γύρω από τους άξονες Y και Z του στοιχείου, το πάχος της δοκού (TKY, TKZ) κατά τους τοπικούς άξονες Y και Z και η πολική ροπή αδράνειας της επιφάνειας της διατομής (IXX) γύρω από τον τοπικό άξονα X του στοιχείου. Για να εξασφαλιστεί το γεγονός ότι τα εν λόγω στοιχεία δοκού πρέπει να είναι άκαμπτα και αβαρή, το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για να τα περιγράψει είχε πολύ υψηλό Μέτρο Ελαστικότητας (EX) (2.1×10^{13} Pa) και μηδενική πυκνότητα. Η σύνδεση των διακριτών μαζών με τα τοιχώματα της δεξαμενής απεικονίζεται στο Σχήμα 5.7.



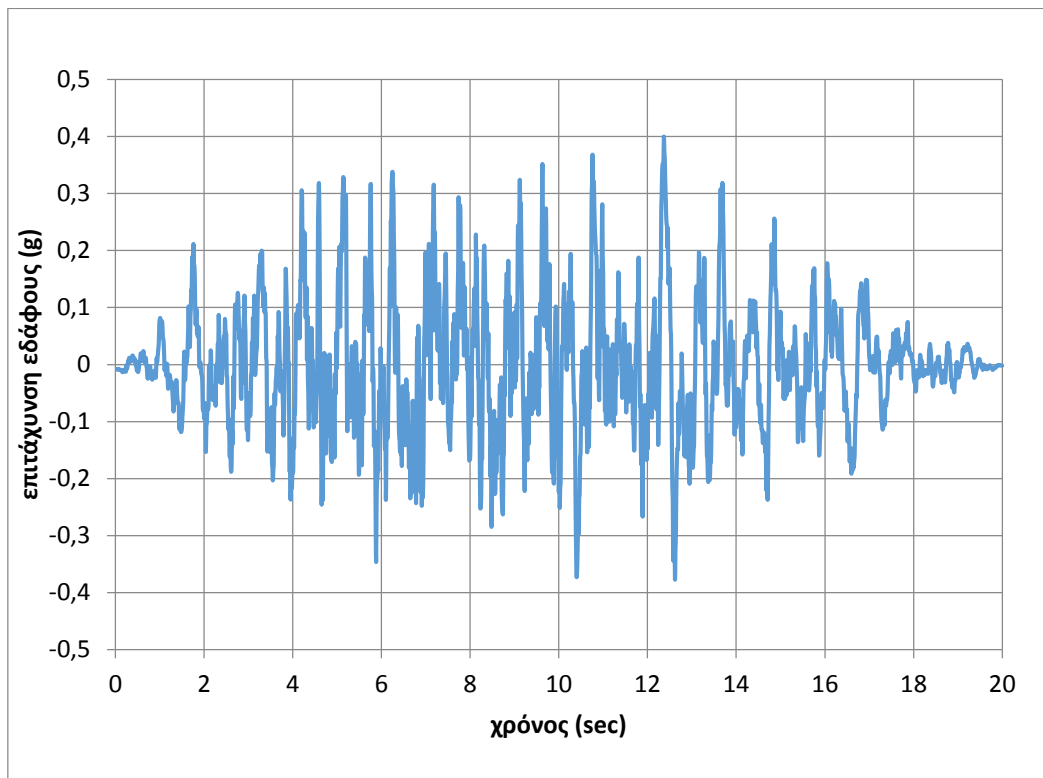
Σχήμα 5.6 Γεωμετρία του στοιχείου BEAM4



Σχήμα 5.7 Σύνδεση των διακριτών μαζών με τα τοιχώματα της δεξαμενής. Με γαλάζιο χρώμα φαίνονται τα στοιχεία SHELL63 του τοιχώματος της δεξαμενής. Με πράσινο χρώμα απεικονίζονται τα στοιχεία ελατηρίων COMBIN14, με κόκκινο χρώμα τα άκαμπτα στοιχεία BEAM4 και με γαλάζιο αστερίσκο φαίνονται οι διακριτές μάζες.

5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

Ως επιταχυνσιογράφημα χρησιμοποιήθηκε ένα τεχνητό επιταχυνσιογράφημα, συμβατό με το φάσμα του Ευρωκώδικα 8 για έδαφος κατηγορίας C και μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0.4g (Σχήμα 5.8)

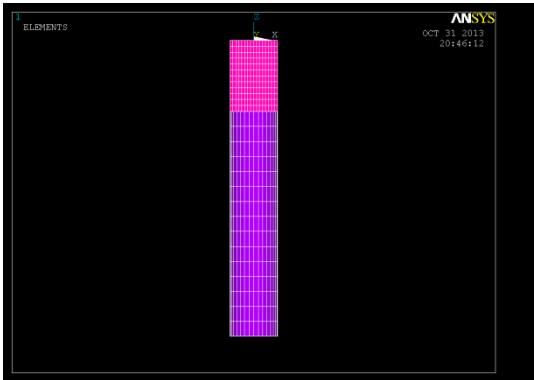


Σχήμα 5.8 Το επιταχυνσιογράφημα που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις χρονοϊστορίας.

5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για γεμάτες δεξαμενές με λόγο $h/r=3$, όπου h το ύψος της δεξαμενής και r η ακτίνα της δεξαμενής σχήματος ανεστραμμένου κώλουρου κώνου στη βάση της. Η παράμετρος που μεταβαλλόταν από μοντέλο σε μοντέλο και εξετάστηκε η συνεισφορά της στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, αλλά και στη δυνατότητα προσομοίωσης του με μοντέλα διακριτών μαζών, είναι η γωνία φ που ορίζεται από τα τοιχώματα της δεξαμενής και τον κατακόρυφο άξονα. Εξετάστηκε η συμπεριφορά υδατόπυργων με δεξαμενή με γωνία φ ίση με 0 (περίπτωση κυλινδρικής δεξαμενής), 5 , 10 , 15 , 30 , 45 και 60 μοίρες. Ακόμη εξετάστηκε η συμπεριφορά υδατόπυργων με δεξαμενή σχήματος ανεστραμμένου κώλουρου κώνου με τρύπα κατά μήκος του κατακόρυφου της άξονα με ακτίνα ίση με r . Για την τελευταία περίπτωση πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις χρονοϊστορίας για τιμές της γωνίας φ 30 , 45 και 60 μοίρες. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα για τις χρονοϊστορίες συνολικής τέμνουσας δύναμης στη βάση του πύργου και της μετακίνησης κορυφής του, καθώς και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση κάθε δεξαμενής.

1. Περίπτωση $\varphi = 0^\circ$ (κυλινδρική δεξαμενή)



$$V = 603.19 \text{ m}^3$$

$$f_{\text{sloshing}} = 0.338 \text{ Hz}$$

$$m_{c1}/M = 0.151, m_{c1} = 91081.69 \text{ kg}$$

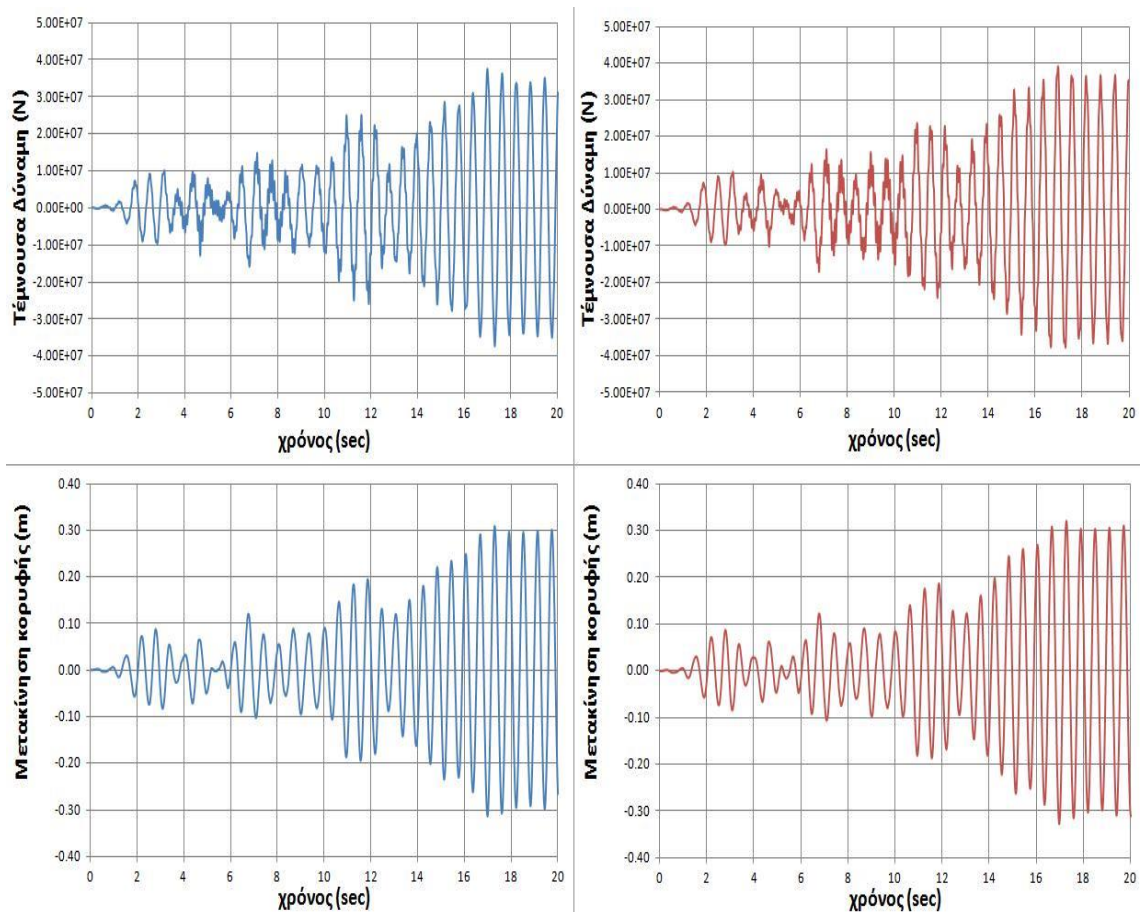
$$m_i/M = 0.849, m_i = 512108.31 \text{ kg}$$

$$h^*/H = 0.82$$

$$h_i/H = 0.44$$

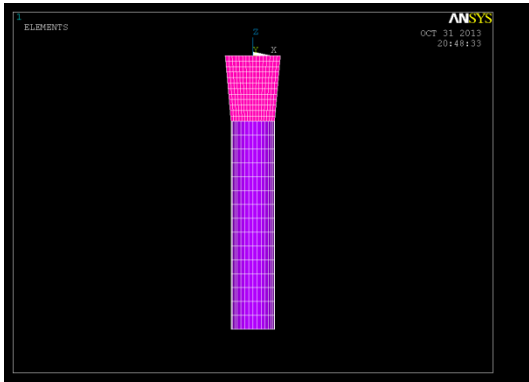
$$k_{c1} = 410794.12 \text{ kg/m}$$

Σχήμα 5.9 Ο υδατόπυργος με κυλινδρική δεξαμενή.



Σχήμα 5.10 Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων.

2. Περίπτωση $\varphi = 5^\circ$



$$V = 775.35 \text{ m}^3$$

$$f_{\text{sloshing}} = 0.306 \text{ Hz}$$

$$m_{c1}/M = 0.193, m_{c1} = 149642.55 \text{ kg}$$

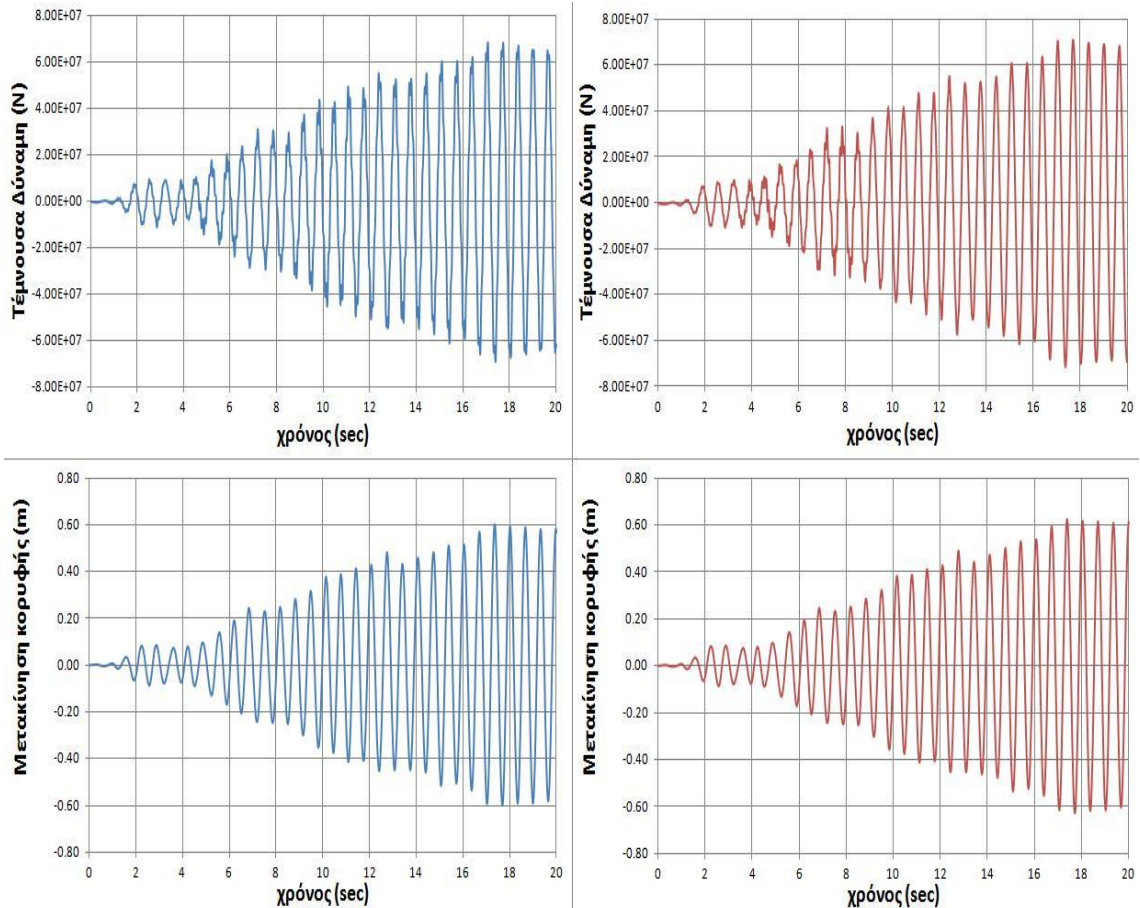
$$m_i/M = 0.807, m_i = 625707.45 \text{ kg}$$

$$h^*/H = 0.82$$

$$h_i/H = 0.47$$

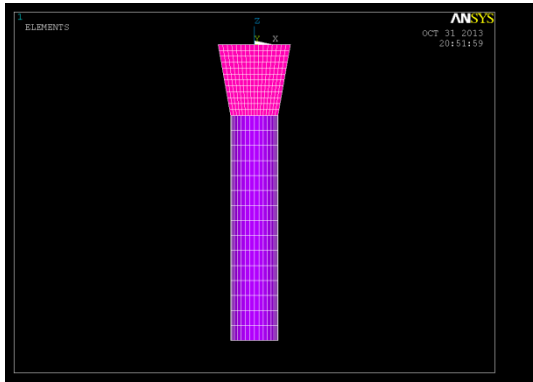
$$k_{c1} = 553168.82 \text{ kg/m}$$

Σχήμα 5.11 Ο υδατόπυργος με δεξαμενή με τοιχώματα υπό γωνία 5° ως προς τον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 5.12 Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων

3. Περίπτωση $\varphi = 10^\circ$



$$V = 978.52 \text{ m}^3$$

$$f_{\text{sloshing}} = 0.275 \text{ Hz}$$

$$m_{c1}/M = 0.266, m_{c1} = 260286.32 \text{ kg}$$

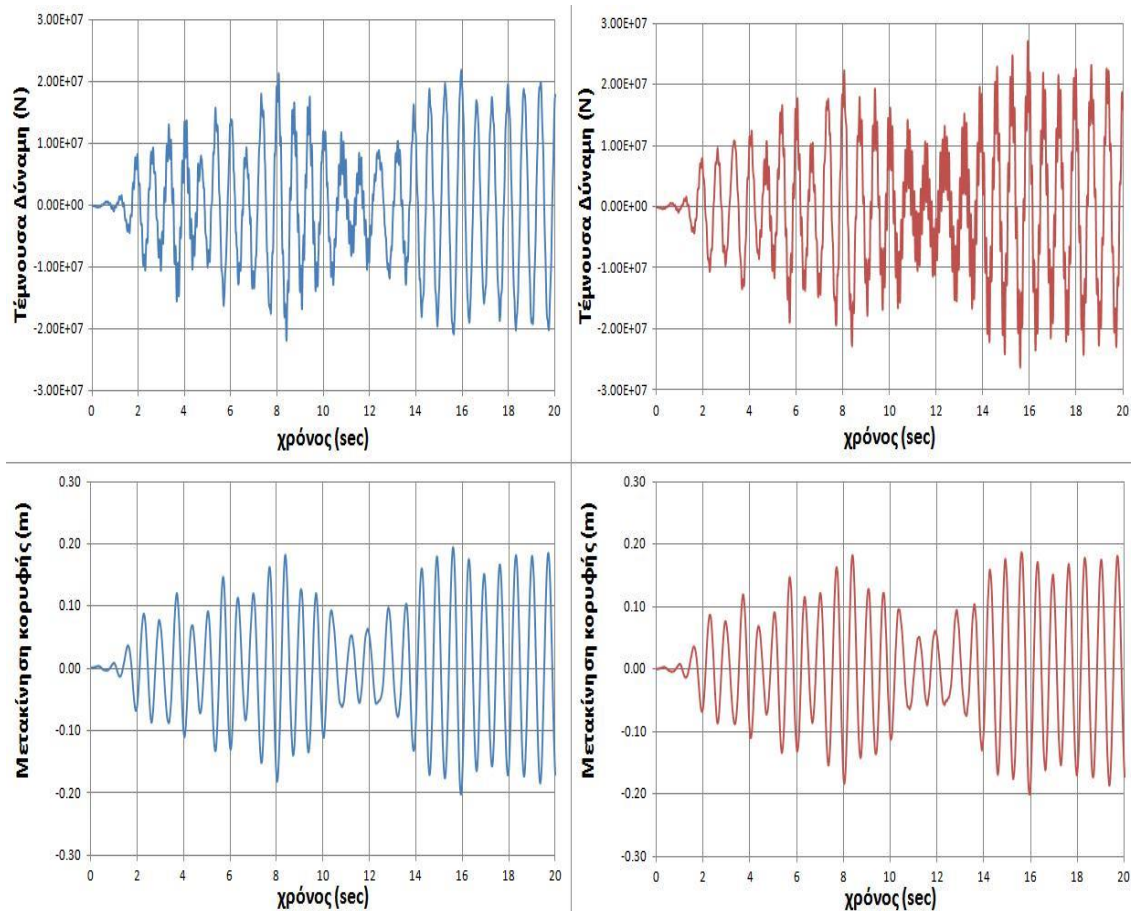
$$m_i/M = 0.734, m_i = 718233.68 \text{ kg}$$

$$h^*/H = 0.79$$

$$h_i/H = 0.49$$

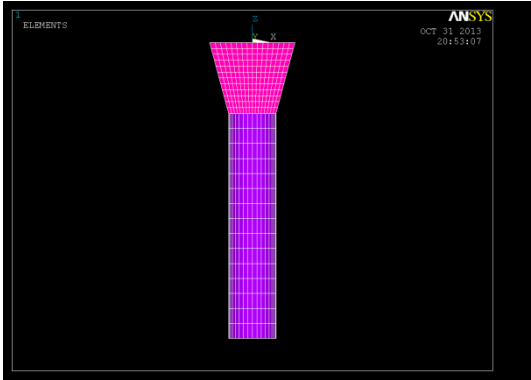
$$k_{c1} = 777099.21 \text{ kg/m}$$

Σχήμα 5.13 Ο υδατόπυργος με δεξαμενή με τοιχώματα υπό γωνία 10° ως προς τον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 5.14 Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων.

4. Περίπτωση $\varphi = 15^\circ$



$$V = 1218 \text{ m}^3$$

$$f_{\text{sloshing}} = 0.2485 \text{ Hz}$$

$$m_{c1}/M = 0.341, m_{c1} = 415338 \text{ kg}$$

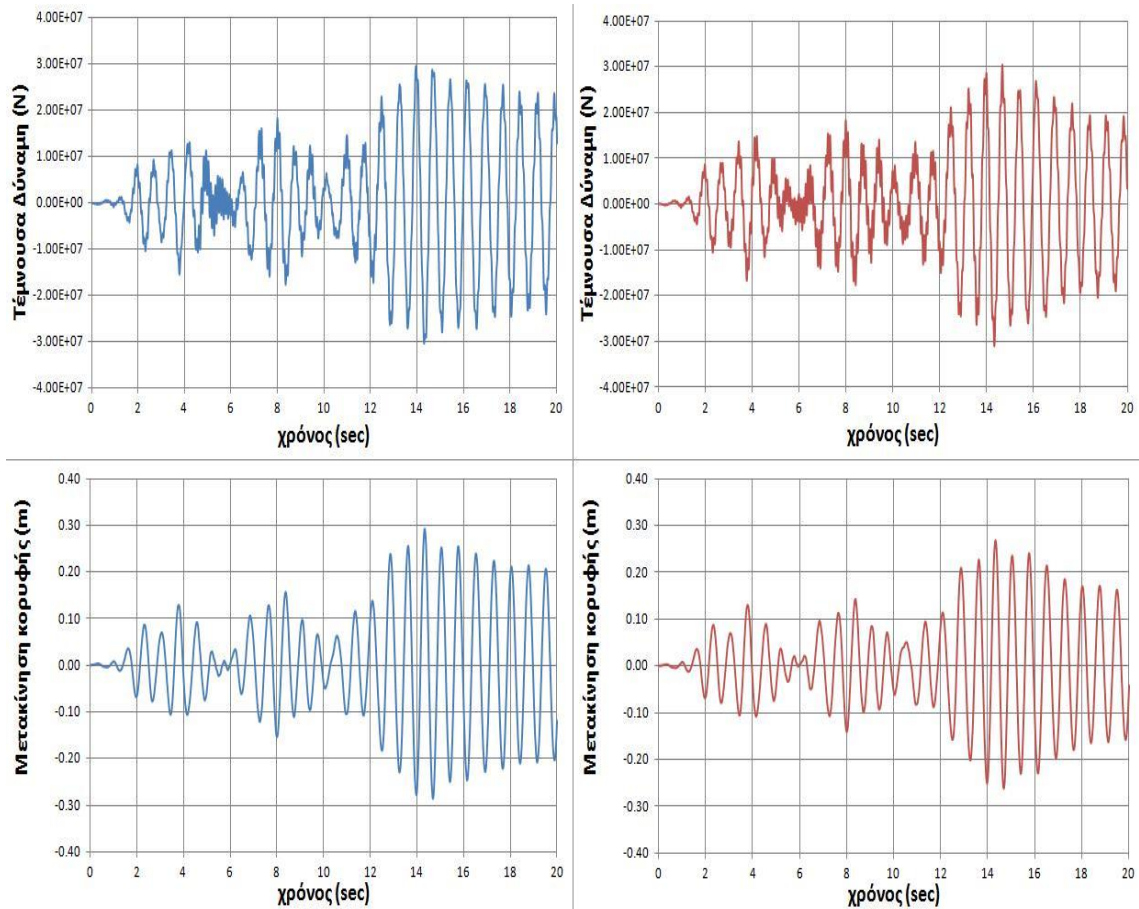
$$m_i/M = 0.659, m_i = 802662 \text{ kg}$$

$$h^*/H = 0.76$$

$$h_i/H = 0.51$$

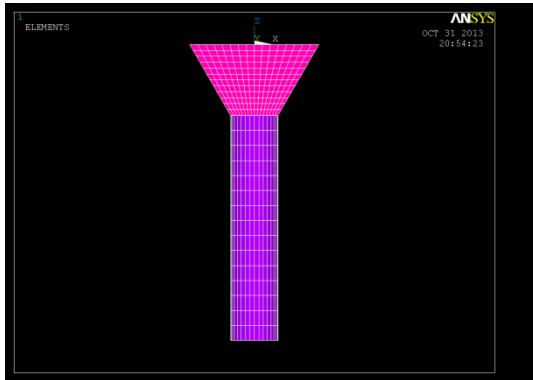
$$k_{c1} = 1012544.67 \text{ kg/m}$$

Σχήμα 5.15 Ο υδατόπυργος με δεξαμενή με τοιχώματα υπό γωνία 15° ως προς τον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 4.16 Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων.

5. Περίπτωση $\varphi = 30^\circ$



$$V = 2251.1 \text{ m}^3$$

$$f_{\text{sloshing}} = 0.1855 \text{ Hz}$$

$$m_{c1}/M = 0.552, m_{c1} = 1242607.2 \text{ kg}$$

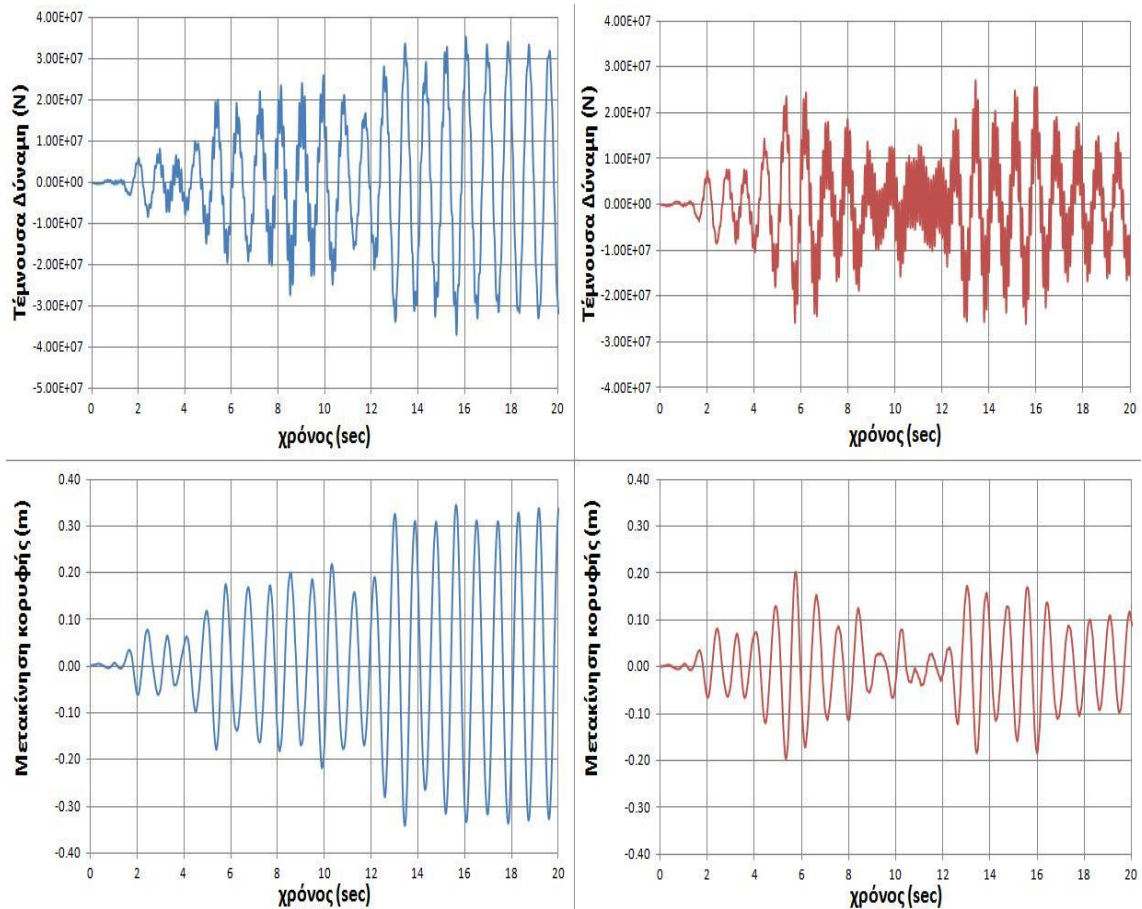
$$m_i/M = 0.448, m_i = 1008492.8 \text{ kg}$$

$$h^*/H = 0.72$$

$$h_i/H = 0.55$$

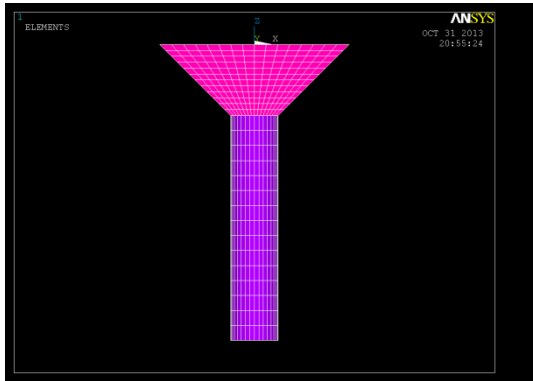
$$k_{c1} = 1688034.94 \text{ kg/m}$$

Σχήμα 5.17Ο υδατόπυργος με δεξαμενή με τοιχώματα υπό γωνία 30° ως προς τον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 5.18 Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων.

6. Περίπτωση $\varphi = 45^\circ$



$$V = 4222.3 \text{ m}^3$$

$$f_{\text{sloshing}} = 0.135 \text{ Hz}$$

$$m_{c1}/M = 0.732, m_{c1} = 3090723.6 \text{ kg}$$

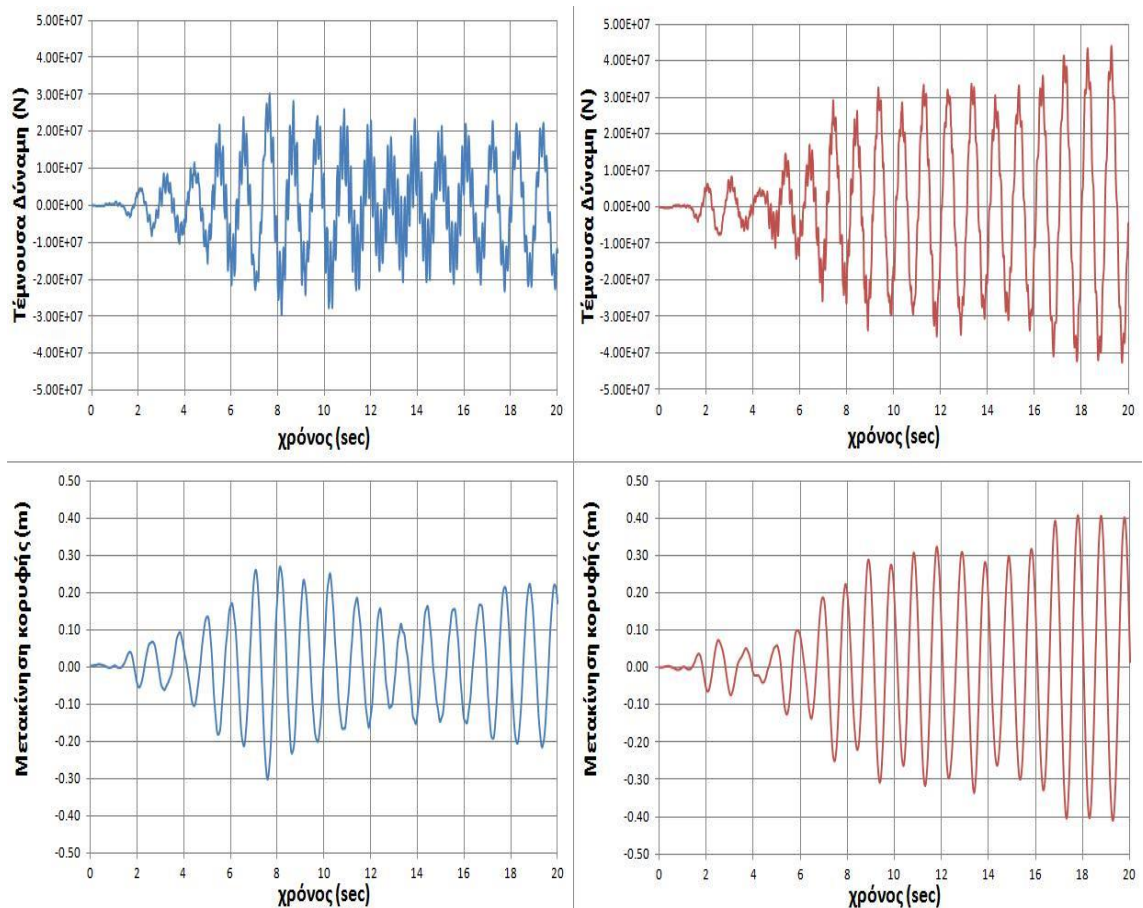
$$m_i/M = 0.268, m_i = 1131576.4 \text{ kg}$$

$$h^*/H = 0.71$$

$$h_i/H = 0.6$$

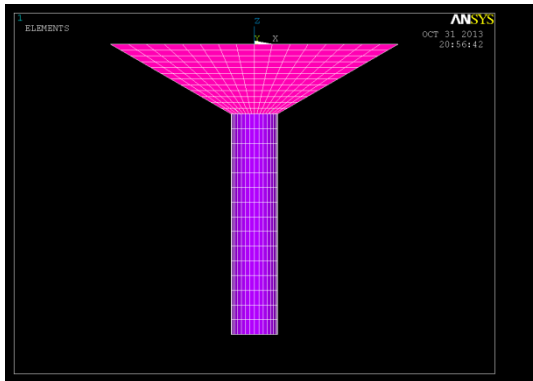
$$k_{c1} = 2223757.58 \text{ kg/m}$$

Σχήμα 5.19 Ο υδατόπυργος με δεξαμενή με τοιχώματα υπό γωνία 45° ως προς τον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 5.20 Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων.

7. Περίπτωση $\varphi = 60^\circ$



$$V = 9166.1 \text{ m}^3$$

$$f_{\text{sloshing}} = 0.087 \text{ Hz}$$

$$m_{c1}/M = 0.872, m_{c1} = 7992839.2 \text{ kg}$$

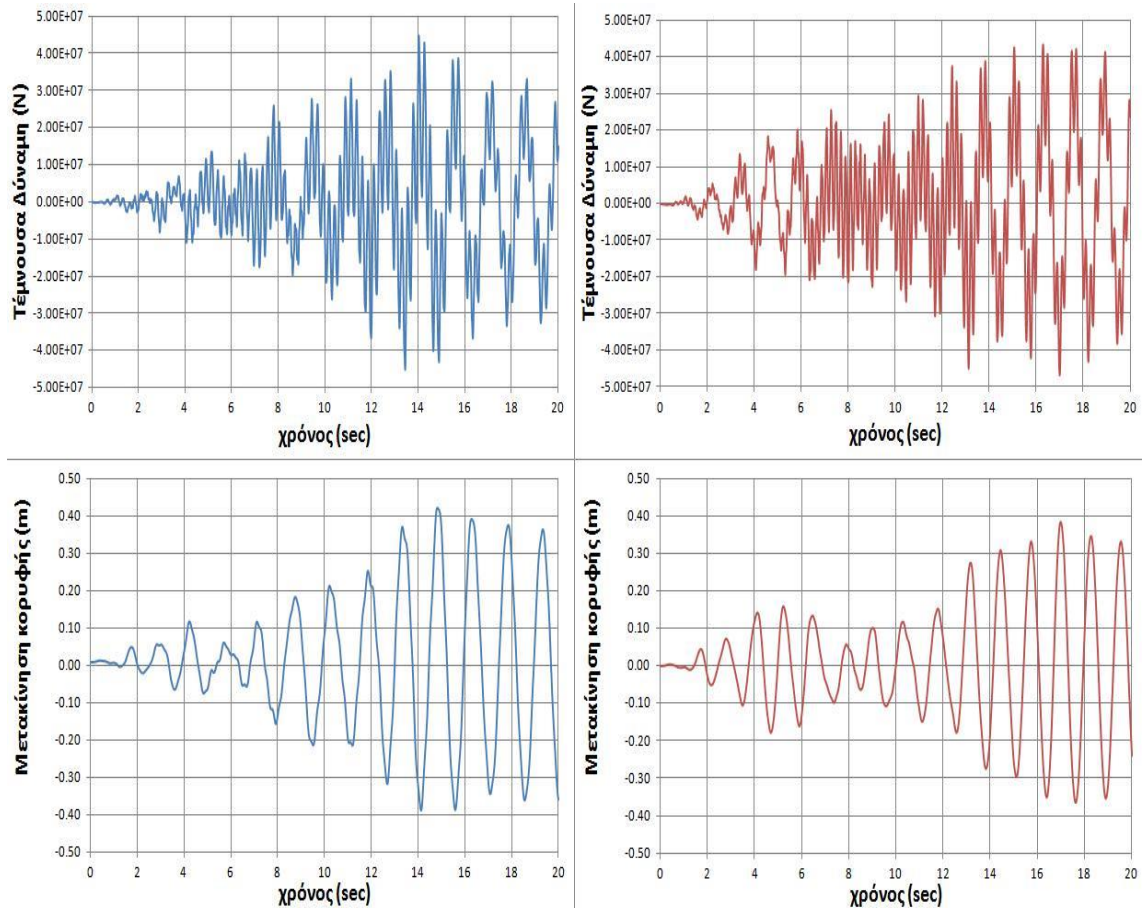
$$m_i/M = 0.0128, m_i = 1173260.8 \text{ kg}$$

$$h^*/H = 0.71$$

$$h_i/H = 0.6$$

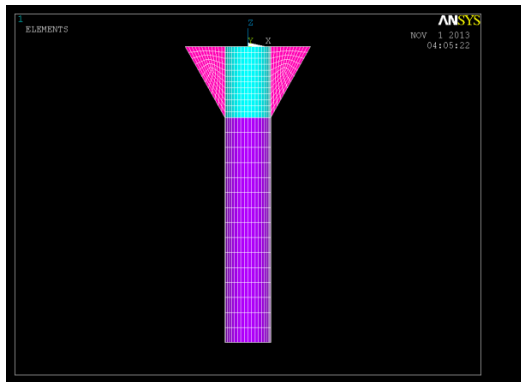
$$k_{c1} = 2388357.41 \text{ kg/m}$$

Σχήμα 5.21 Ο υδατόπυργος με δεξαμενή με τοιχώματα υπό γωνία 60° ως προς τον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 5.22 Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων

8. Περίπτωση $\varphi = 30^\circ$ με κυκλική οπή ακτίνας r σε όλο το ύψος της δεξαμενής



$$V = 1647.9 \text{ m}^3$$

$$f_{\text{sloshing1}} = 0.15 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{sloshing2}} = 0.337 \text{ Hz}$$

$$m_{c1}/M = 0.536, m_{c1} = 883274.2 \text{ kg}$$

$$m_{c2}/M = 0.06, m_{c2} = 98874 \text{ kg}$$

$$m_i/M = 0.404, m_i = 665751.6 \text{ kg}$$

$$h_1^*/H = 0.72$$

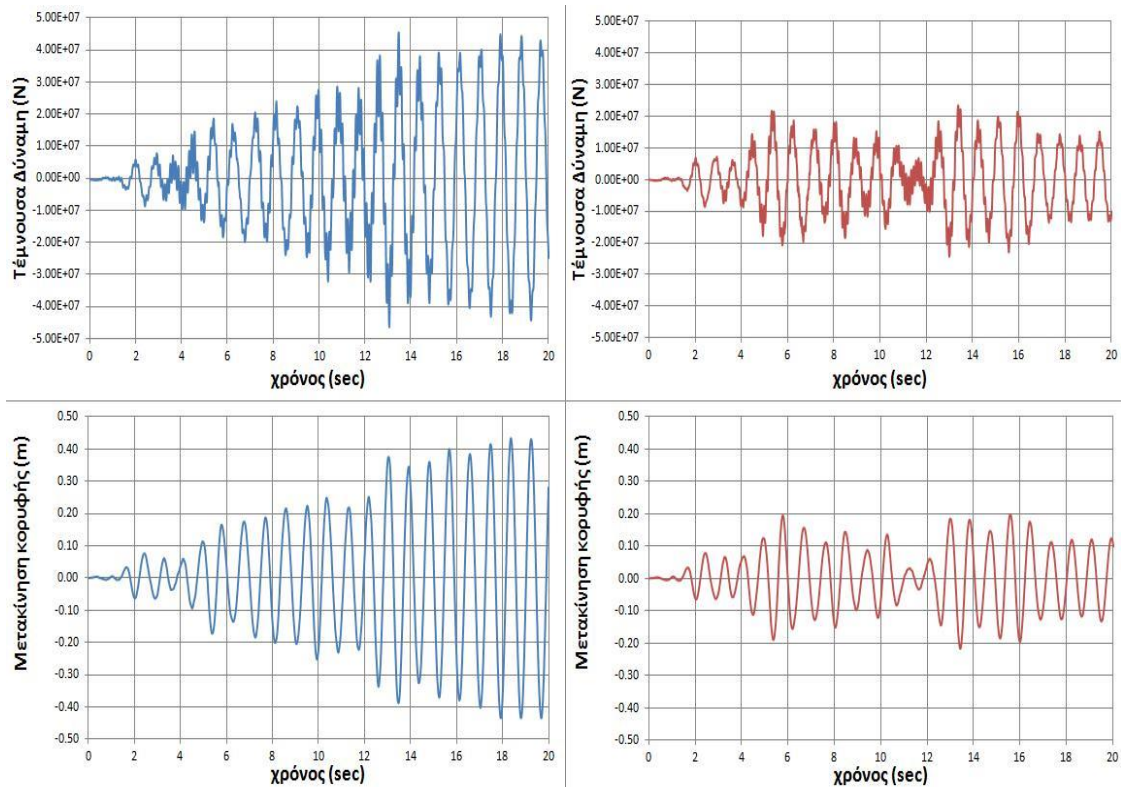
$$h_2^*/H = 0.92$$

$$h_i/H = 0.67$$

$$k_{c1} = 781446.02 \text{ kg/m}$$

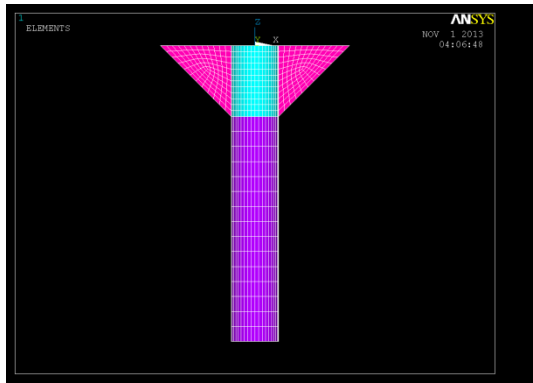
$$k_{c2} = 700977.16 \text{ kg/m}$$

Σχήμα 5.23 Ο υδατόπυργος με δεξαμενή με τοιχώματα υπό γωνία 30° ως προς τον κατακόρυφο άξονα και τρύπα ακτίνας r καθ' όλο το ύψος της.



Σχήμα 5.24 Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων.

9. Περίπτωση $\varphi = 45^\circ$ με κυκλική οπή ακτίνας r σε όλο το ύψος της δεξαμενής



$$V = 3619.1 \text{ m}^3$$

$$f_{\text{sloshing1}} = 0.1158 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{sloshing2}} = 0.258 \text{ Hz}$$

$$m_{c1}/M = 0.694, m_{c1} = 2511655.4 \text{ kg}$$

$$m_{c2}/M = 0.043, m_{c2} = 156345.12 \text{ kg}$$

$$m_i/M = 0.263, m_i = 951099.48 \text{ kg}$$

$$h_1^*/H = 0.72$$

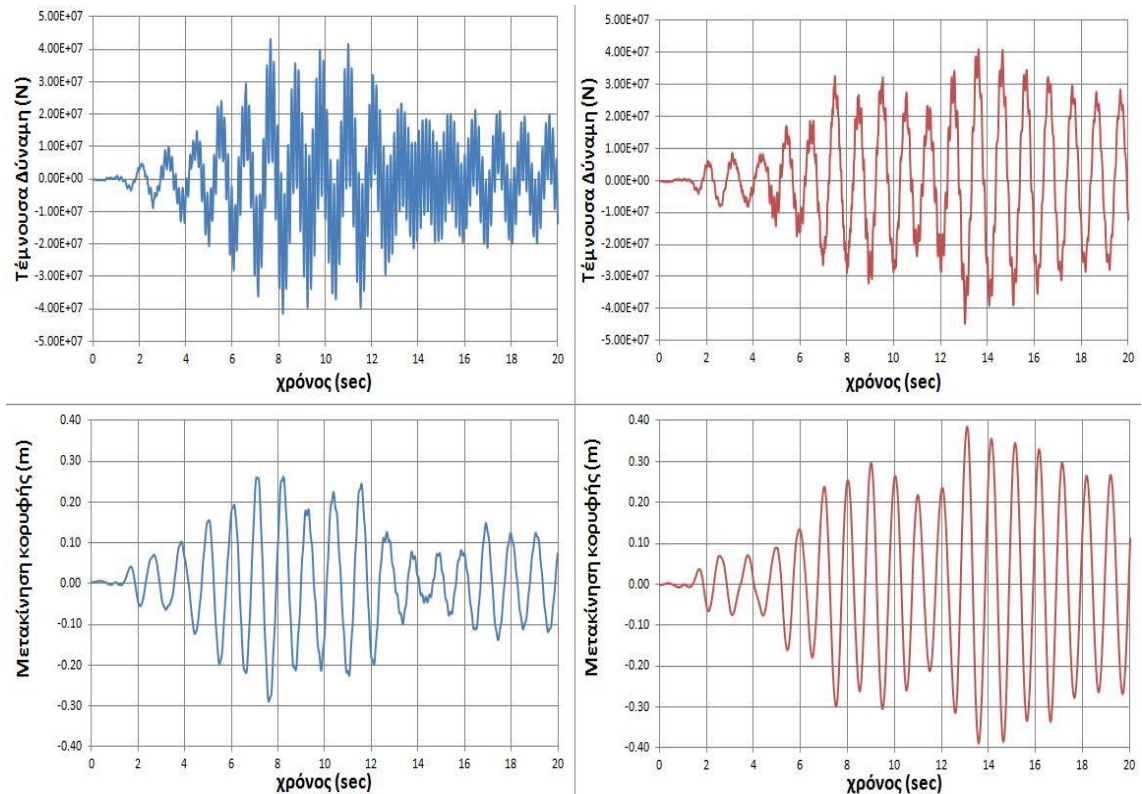
$$h_2^*/H = 0.94$$

$$h_i/H = 0.68$$

$$k_{c1} = 1329648.68 \text{ kg/m}$$

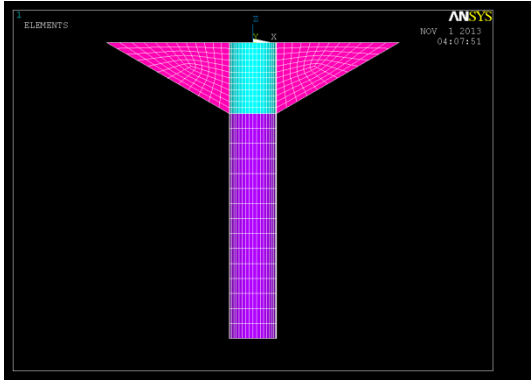
$$k_{c2} = 315027.2 \text{ kg/m}$$

Σχήμα 5.25 Ο υδατόπυργος με δεξαμενή με τοιχώματα υπό γωνία 45° ως προς τον κατακόρυφο άξονα και τρύπα ακτίνας r καθ' όλο το ύψος της.



Σχήμα 5.26 Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων

10. Περίπτωση $\varphi = 60^\circ$ με κυκλική οπή ακτίνας r σε όλο το ύψος της δεξαμενής



$$V = 8562.9 \text{ m}^3$$

$$f_{\text{sloshing1}} = 0.0805 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{sloshing2}} = 0.192 \text{ Hz}$$

$$m_{c1}/M = 0.835, m_{c1} = 7150021.5 \text{ kg}$$

$$m_{c2}/M = 0.014, m_{c2} = 119880.6 \text{ kg}$$

$$m_i/M = 0.151, m_i = 1292997.9 \text{ kg}$$

$$h_1^*/H = 0.73$$

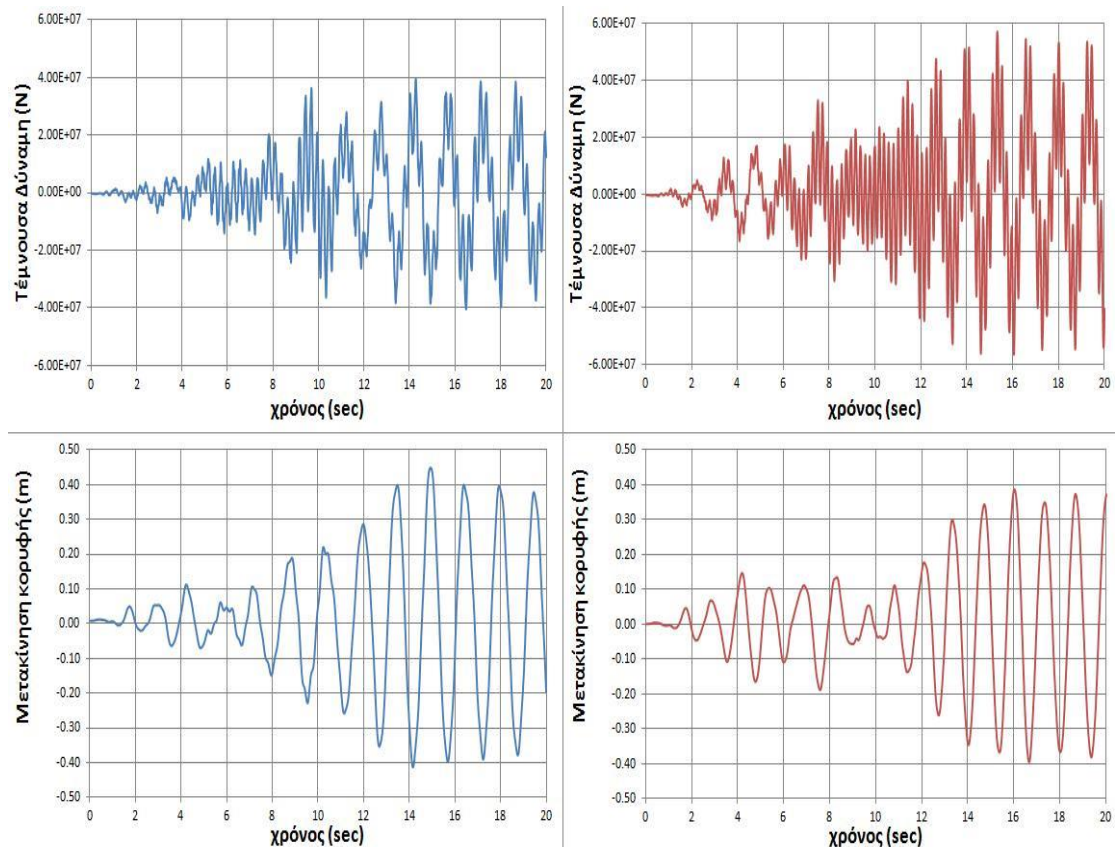
$$h_2^*/H = 1$$

$$h_i/H = 0.67$$

$$k_{c1} = 1829190.12 \text{ kg/m}$$

$$k_{c2} = 1.46 \text{ kg/m}$$

Σχήμα 5.27 Ο υδατόπυργος με δεξαμενή με τοιχώματα υπό γωνία 60° ως προς τον κατακόρυφο άξονα και τρύπα ακτίνας r καθ' όλο το ύψος της.



Σχήμα 5.28 Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων.

5.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΑΣ

Παρατηρείται ότι υπάρχει σχεδόν απόλυτη ταύτιση των αποτελεσμάτων για τις περιπτώσεις 1, 2, 3 και μεγάλη ομοιότητα για την περίπτωση 4. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις παρατηρείται ότι αυξάνεται η απόκλιση στα αποτελέσματα όταν αυξάνεται το ποσοστό της συνεισφοράς της 1^{ης} και 2^{ης} ιδιομορφής κλυδασμού. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση 5 (γωνία 30 μοιρών) παρατηρείται ότι οι η περίοδος του λεπτομερούς μοντέλου με χωρικά στοιχεία υγρού και του απλοποιητικού με τις διακριτές μάζες είναι ακόμη ίδια, αν και οι μέγιστες τιμές των τεμνουσών δυνάμεων και των μετακινήσεων κορυφής διαφέρουν σημαντικά. Στη συνέχεια παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις 5 και 6 (γωνία 45 και 60 μοιρών αντίστοιχα) αναπτύσσεται διαφορά φάσης ανάμεσα στα δύο μοντέλα, με αυτή να είναι $\Delta\phi=\pi$ για την περίπτωση των δεξαμενών με γωνία 45 μοιρών και $\Delta\phi=2\pi$ για την περίπτωση των δεξαμενών με γωνία 60 μοιρών. Αντίστοιχα είναι και τα αποτελέσματα όσον αφορά στους υδατόπυργους, όπου υπάρχει τρύπα κατά το ύψος της δεξαμενής.

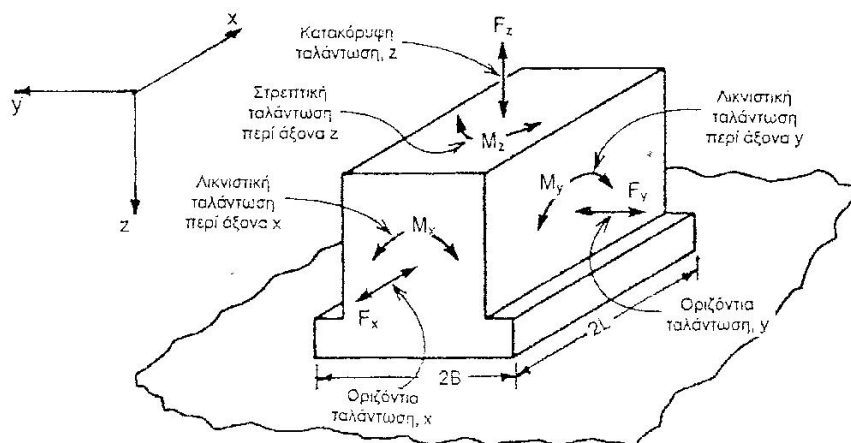
Πιθανή εξήγηση για τις αποκλίσεις που παρατηρούνται στις παραπάνω περιπτώσεις είναι ίσως η μειωμένη ακρίβεια που παρατηρήθηκε στο Κεφάλαιο 3 όσον αφορά στα ύψη τοποθέτησης των διακριτών μαζών. Υπενθυμίζεται ότι στη περίπτωση των κυλίνδρων παρατηρήθηκε καλή σύγκλιση των αποτελεσμάτων της παρούσας προτεινόμενης μεθόδου με αυτά της αναλυτικής λύσης του Housner για τις περιπτώσεις όπου ο λόγος της κυκλοφορούσας μάζας προς τη συνολική μάζα του υγρού ήταν μικρότερος του 0.4 ($H/R>1$). Έτσι και στην περίπτωση των κωνικών δεξαμενών παρατηρείται συμφωνία των αποτελεσμάτων του λεπτομερούς μοντέλου και των αποτελεσμάτων του προσεγγιστικού για τις περιπτώσεις 2,3 και 4, όπου ο λόγος m_{c1}/M δεν ξεπερνά το 0.35, και σταδιακά αυξανόμενη απόκλιση των αποτελεσμάτων με την αύξηση του λόγου m_{c1}/M .

6. ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΘΕΩΡΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η συνεισφορά του φαινομένου της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής (soil-structure interaction - SSI) στη δυναμική απόκριση του υδατόπυργου, που αναφέρεται η παρούσα εργασία. Γίνεται μια νέα δυναμική ανάλυση του υδατόπυργου, λαμβάνοντας υπόψη συνθήκες SSI και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της νέας ανάλυσης με αυτά των προηγούμενων αναλύσεων.

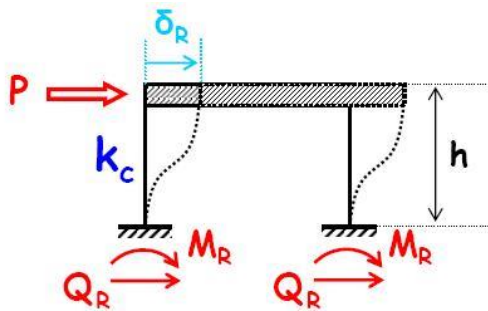
Κάθε άκαμπτη θεμελίωση, όπως αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 6.1, διαθέτει 6 βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή μπορεί να εκτελέσει 6 διαφορετικές μορφές ταλάντωσης [1]. Οι μορφές αυτές περιλαμβάνουν 3 μεταφορικές κινήσεις κατά τη διεύθυνση των τριών αξόνων X, Y, Z (κατακόρυφη ταλάντωση, οριζόντια παλινδική ταλάντωση κατά X, οριζόντια παλινδική ταλάντωση κατά Y) και 3 περιστροφικές κινήσεις (λικνιστική περί άξονα X, λικνιστική περί άξονα Y και στρεπτική περί άξονα Z). Κάθε μία από τις 6 μορφές ταλαντώσεων διεγείρεται κάτω από τη δράση των αδρανειακών δυνάμεων και ροπών που φαίνονται στο Σχήμα 6.1.



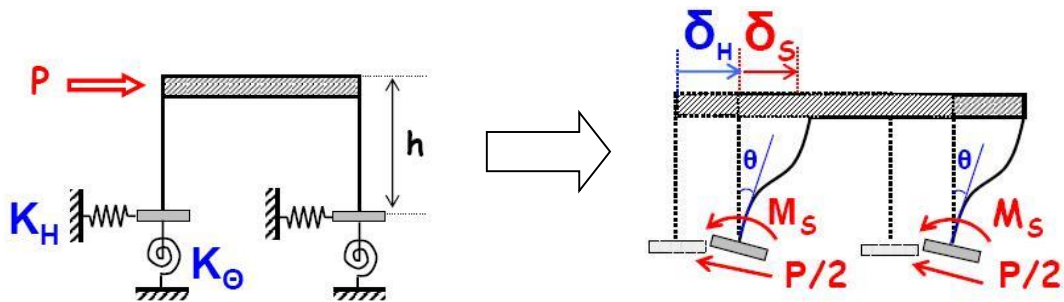
Σχήμα 6.1: Άκαμπτο θεμέλιο με έξι βαθμούς ελευθερίας.

Από τις έξι μορφές ταλαντώσεων μόνο η κατακόρυφη και η στρεπτική ταλάντωση μπορούν να λαμβάνουν χώρα ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες. Οι

ταλαντώσεις αυτές ονομάζονται ασύζευκτες. Αντίθετα, οι οριζόντιες και λικνιστικές ταλαντώσεις εξαρτώνται η μία από την άλλη, π.χ. η οριζόντια ταλάντωση κατά τη διεύθυνση του άξονα X δημιουργεί αναγκαστικά και λικνιστική ταλάντωση περί τον άξονα Y (οφειλόμενη στη ροπή που ασκείται από τις οριζόντιες αδρανειακές δυνάμεις του θεμελίου). Οι ταλαντώσεις αυτές ονομάζονται συζευγμένες, δηλαδή δεν είναι δυνατόν το θεμέλιο να εκτελεί μόνο μία από αυτές τις δύο. Στην περίπτωση αυτή το σύστημα θεμέλιο – έδαφος περιγράφεται από σύστημα δύο βαθμών ελευθερίας, όπου ο ένας βαθμός ελευθερίας αναφέρεται στην οριζόντια μετακίνηση δ και ο άλλος στην περιστροφή, θ , του κέντρου βάρους το θεμελίου (Σχήμα 6.2, 6.3)



Σχήμα 6.2: Κατασκευή πακτωμένη στο έδαφος, όπου δεν λαμβάνονται υπόψη συνθήκες SSI.



Σχήμα 6.3: Προσομοίωση του συστήματος θεμελίου-εδάφους με ελατήρια για οριζόντιες και λικνιστικές ταλαντώσεις.

Έχει αποδειχτεί ότι η δυναμική συμπεριφορά του άκαμπτου θεμελίου για κάθε βαθμό ελευθερίας i μπορεί να υπολογιστεί αντικαθιστώντας το έδαφος θεμελίωσης ελατήρια σταθεράς K_i και αποσβεστήρα με συντελεστή C_i . Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τιμές για τη δυσκαμψία και τους συντελεστές απόσβεσης ακτινοβολίας για τα ελατήρια που προσομοιώνουν το έδαφος θεμελίωσης για κυκλικό θεμέλιο επί ελαστικού ημιχώρου.

Πίνακας 6.1: Ισοδύναμες συγκεντρωμένες παράμετροι για ανάλυση κυκλικών θεμελίων επί ελαστικού ημιχώρου [5].

Είδος Ταλάντωσης	Κατακόρυφη ν	Οριζόντια h_x, h_y	Λικνιστική r_x, r_y	Στρεπτική t
Δυσκαμψία K	$\frac{4 G R}{1 - \nu}$	$\frac{8 G R}{1 - \nu}$	$\frac{8 G R^3}{3 (1 - \nu)}$	$\frac{16 G R^3}{3}$
Λόγος Μάζας \tilde{m}	$\frac{m (1 - \nu)}{4 \rho R^3}$	$\frac{m (2 - \nu)}{8 \rho R^3}$	$\frac{3 I_x (1 - \nu)}{8 \rho R^5}$	$\frac{I_z}{\rho R^5}$
Λόγος Απόσβεσης	$\frac{0.425}{\tilde{m}^{1/2}}$	$\frac{0.29}{\tilde{m}^{1/2}}$	$\frac{0.15}{\tilde{m}^{1/2} (1 + \tilde{m})}$	$\frac{0.5}{1 + 2 \tilde{m}}$
Φανταστική Προστιθέμενη Μάζα	$\frac{0.27 m}{\tilde{m}}$	$\frac{0.095 m}{\tilde{m}}$	$\frac{0.24 I_x}{\tilde{m}}$	$\frac{0.24 I_z}{\tilde{m}}$

Τα μεγέθη που αναφέρονται στον Πίνακα 6.1 είναι τα εξής:

I_x , η ροπή αδράνειας της μάζας του κυκλικού θεμελίου γύρω από οριζόντιο άξονα

I_z , η ροπή αδράνειας της μάζας του κυκλικού θεμελίου γύρω από κατακόρυφο άξονα

$$\text{Λόγος Απόσβεσης} = \frac{c}{c_{cr}}$$

$$C_{cr} = 2 (K_v m)^{1/2}, \text{ για κατακόρυφη ταλάντωση του θεμελίου}$$

$$C_{cr} = 2 (K_{hx} m)^{1/2}, \text{ για οριζόντια ταλάντωση του θεμελίου}$$

$$C_{cr} = 2 (K_{rx} I_x)^{1/2}, \text{ για λικνιστική ταλάντωση του θεμελίου (στροφική ταλάντωση γύρω από οριζόντιο άξονα)}$$

$$C_{cr} = 2 (K_t I_z)^{1/2}, \text{ για στρεπτική ταλάντωση του θεμελίου (στροφική ταλάντωση γύρω από κατακόρυφο άξονα)}$$

$$G, \text{ το μέτρο διάτμησης του εδάφους, όπου } G = V_s^2 \rho_{εδ}$$

R , η ακτίνα του κυκλικού θεμελίου

ν , ο λόγος Poisson του εδάφους

V_s , η ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων στο έδαφος

$\rho_{εδ}$, η πυκνότητα του εδάφους

*6.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ :ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θεωρήθηκε ότι ο υδατόπυργος έχει κυκλικό θεμέλιο ακτίνας $R = 9 \text{ m}$ και ύψους $h = 2.5 \text{ m}$ κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα πυκνότητας $\rho_{\theta\epsilon\mu} = 2500 \text{ kg/m}^3$. Θεωρήθηκε ότι το θεμέλιο εδράζεται σε ομοιογενή ελαστικό ημίχωρο. Το έδαφος που επιλέχθηκε για να γίνει η θεμελίωση είναι κατηγορίας Γ κατά τα πρότυπα του Ευρωκώδικα 8. Τα χαρακτηριστικά του εν λόγω εδάφους είναι τα εξής: $\nu_{\epsilon\delta}=0.33$, $\rho_{\epsilon\delta}=1800 \text{ kg/m}^3$ και $V_s=200 \text{ m/sec}$.

Στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που εξετάστηκε η απόκρισή τους στη σεισμική διέγερση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία τύπου ελατηρίου-αποσβεστήρα COMBIN14 και στοιχεία τύπου μάζας MASS21 για να προσομοιωθεί το θεμέλιο του πύργου. Οι κόμβοι της βάσης του πύργου συνδέθηκαν με άκαμπτα στοιχεία τύπου BEAM4 με έναν κεντρικό κόμβο στη βάση της κατασκευής, ο οποίος φέρει τη συγκεντρωμένη μάζα του θεμελίου και συνδέεται με το έδαφος με τα κατάλληλα ελατήρια. Οι σταθερές που προσδιορίζουν τις ιδιότητες των ελατηρίων και της συγκεντρωμένης μάζας του θεμελίου και προκύπτουν από τα παραπάνω δεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2:

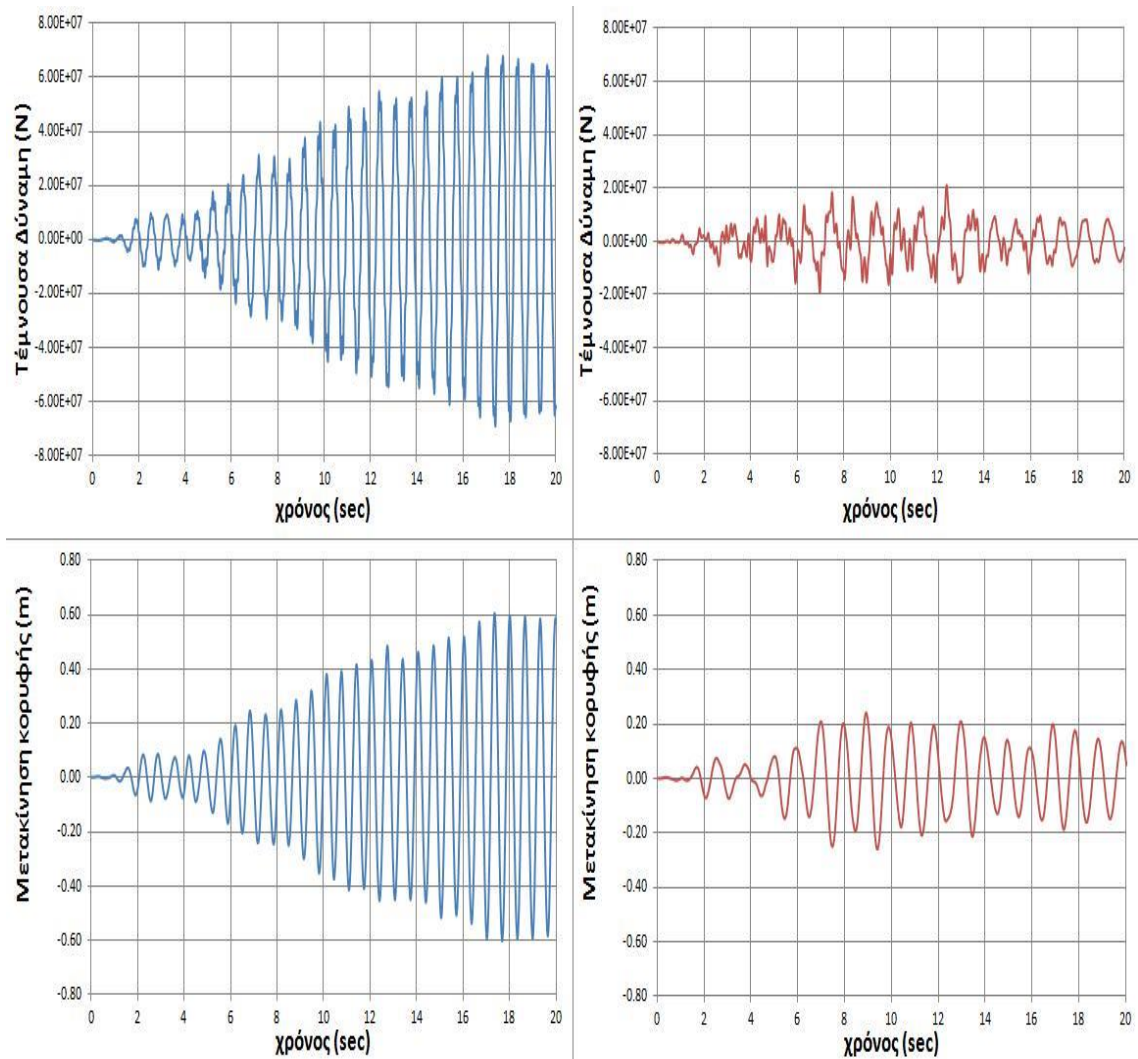
Πίνακας 6.2: Ιδιότητες ελατηρίων εδάφους και μάζας θεμελίου

Ιδιότητες στοιχείων ελατηρίου COMBIN14		Ιδιότητες στοιχείου μάζας MASS21	
$K_{hx} = K_{hy}$	$3.11 \times 10^9 \text{ N/m}$	$M_x = M_y$	$2.19 \times 10^6 \text{ kg}$
$C_{hx} = C_{hy}$	$8.12 \times 10^7 \text{ kg/sec}$	M_z	$3.72 \times 10^6 \text{ kg}$
K_v	$3.89 \times 10^9 \text{ N/m}$	$I_x = I_y$	$1.34 \times 10^8 \text{ kgm}^2$
C_v	$1.49 \times 10^8 \text{ kg/sec}$	I_z	$8.99 \times 10^7 \text{ kgm}^2$
$K_{rx} = K_{ry}$	$2.1 \times 10^{11} \text{ Nm/rad}$		
$C_{rx} = C_{ry}$	$2.63 \times 10^9 \text{ kgm}^2/\text{sec}$		
K_t	$2.8 \times 10^{11} \text{ Nm/rad}$		
C_t	$1.92 \times 10^9 \text{ kgm}^2/\text{sec}$		

6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ

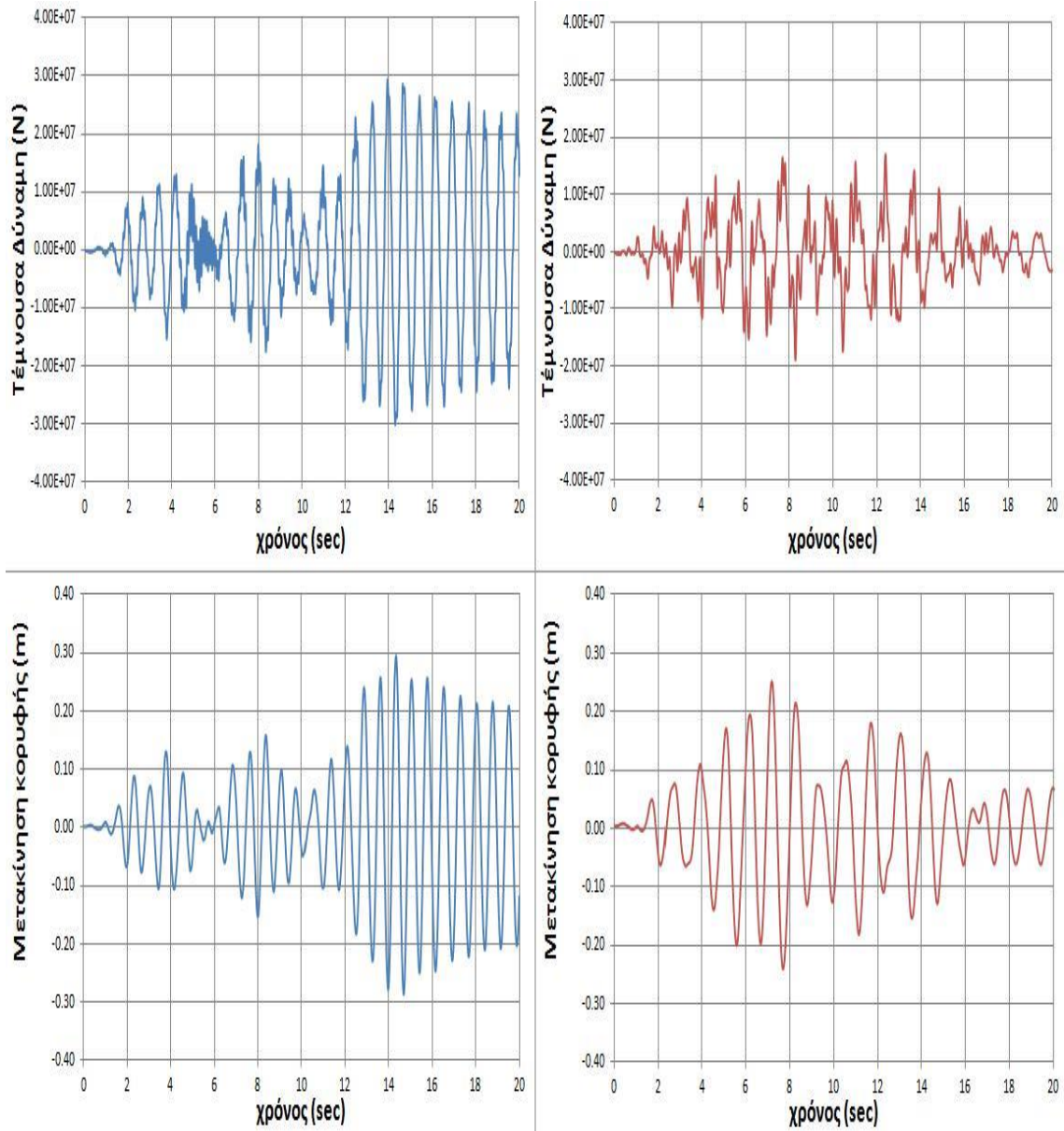
Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις χρονοϊστορίας για τους υδατόπυργους που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Εξετάστηκε η επιρροή της συνεισφοράς του φαινομένου της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής στα αποτελέσματα των αναλύσεων. Παρακάτω γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5 (όπου ο πύργος θεωρείται πακτωμένος) με αυτά που προκύπτουν λόγω συνθηκών SSI. Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν στα λεπτομερή μοντέλα υδατόπυργου, όπου γίνεται χρήση των χωρικών στοιχείων FLUID80. Εξετάζονται οι περιπτώσεις δεξαμενής χωρίς τρύπα κατά το ύψος της με γωνία φ ίση με 5, 15 και 45 μοίρες (περιπτώσεις 2,4,6 του Κεφαλαίου 5) και οι περιπτώσεις δεξαμενής με κυκλική οπή κατά το ύψος της και γωνία φ ίση με 30 και 45 μοίρες (περιπτώσεις 8, 9 του Κεφαλαίου 5).

1. Περίπτωση $\varphi = 5^\circ$ (απλή κωνική δεξαμενή χωρίς κυκλική οπή)



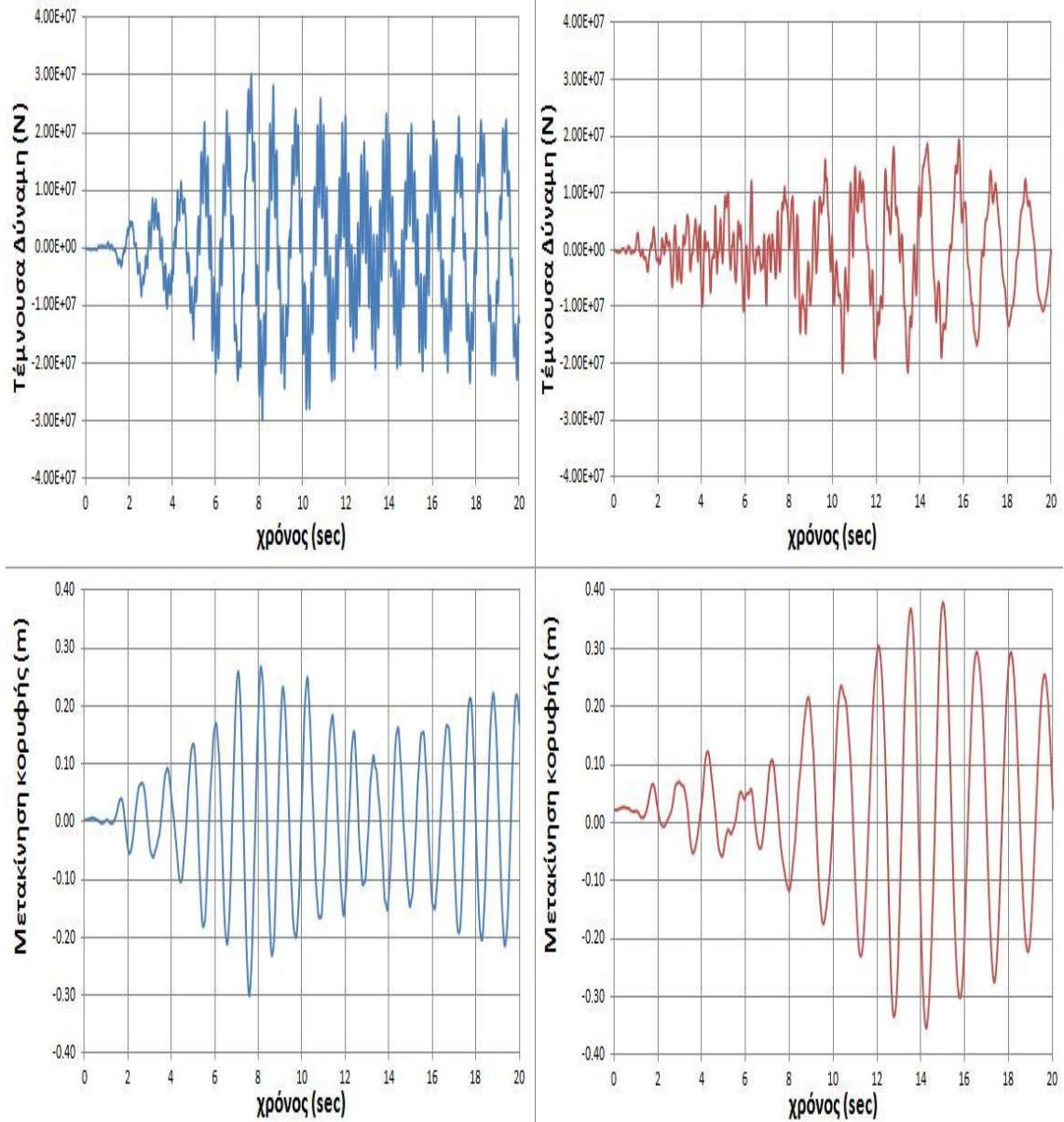
Σχήμα 6.4: Σύγκριση των χρονοϊστοριών Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης και Μετακίνησης κορυφής για πακτωμένο υδατόπυργο (μπλε χρώμα) και για υδατόπυργο όπου λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής (κόκκινο χρώμα).

2. Περίπτωση $\varphi = 15^\circ$ (απλή κωνική δεξαμενή χωρίς κυκλική οπή)



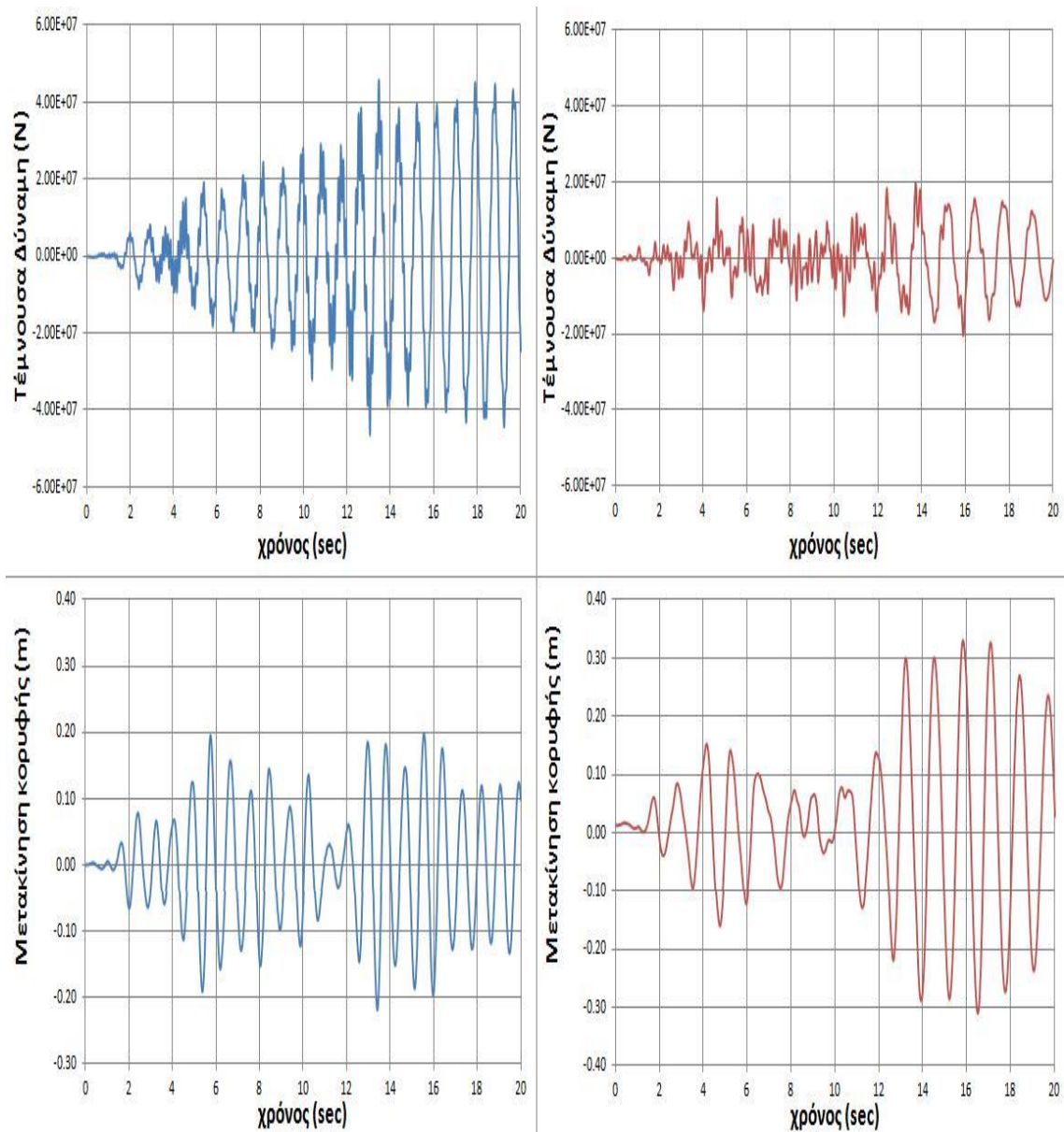
Σχήμα 6.5: Σύγκριση των χρονιοιστοριών Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης και Μετακίνησης κορυφής για πακτωμένο υδατόπυργο (μπλε χρώμα) και για υδατόπυργο όπου λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής (κόκκινο χρώμα).

3. Περίπτωση $\varphi = 45^\circ$ (απλή κωνική δεξαμενή χωρίς κυκλική οπή)



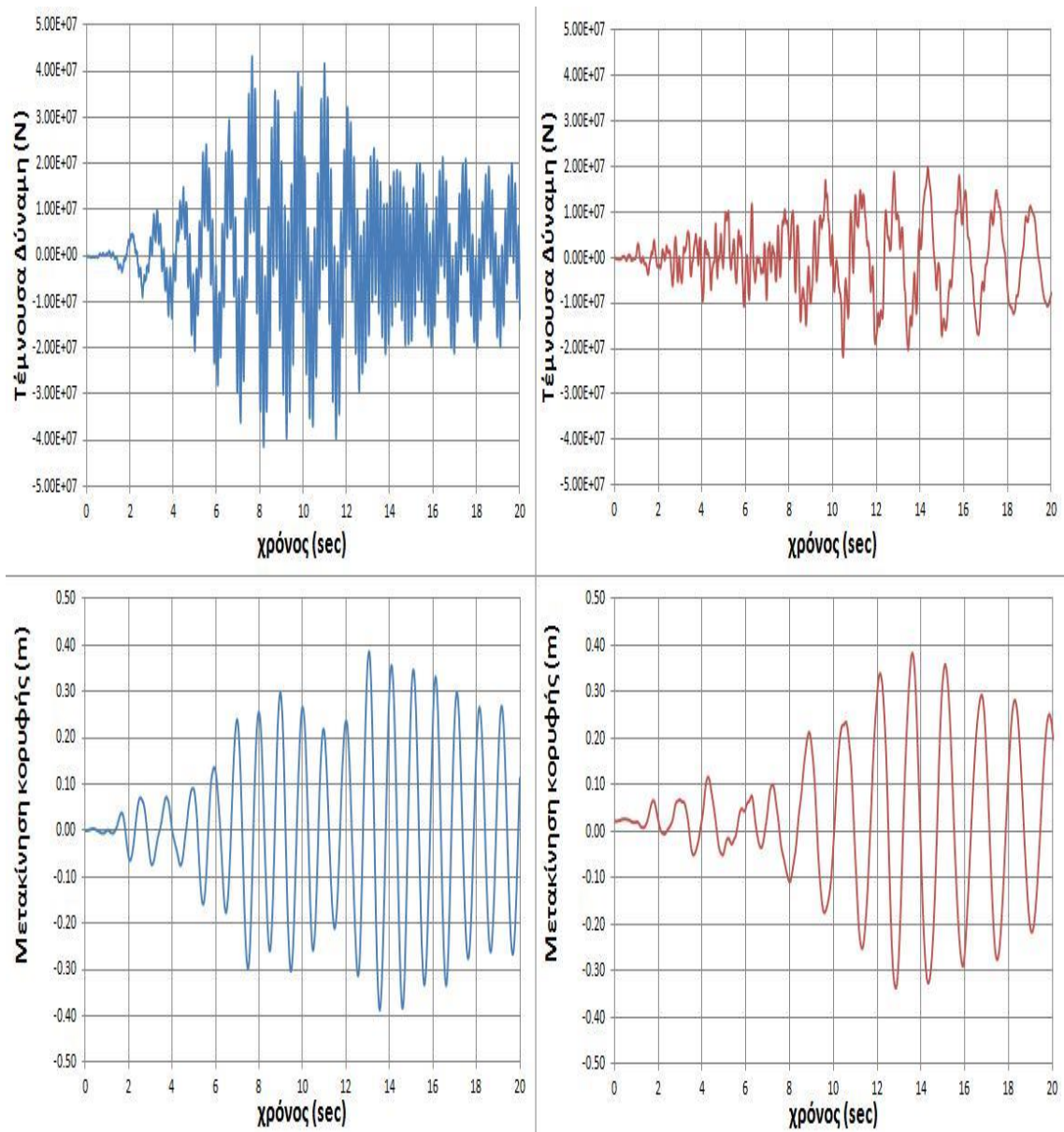
Σχήμα 6.6: Σύγκριση των χρονιοιστοριών Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης και Μετακίνησης κορυφής για τακτωμένο υδατόπυργο (μπλε χρώμα) και για υδατόπυργο όπου λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής (κόκκινο χρώμα).

4. Περίπτωση $\varphi = 30^\circ$ με κυκλική οπή ακτίνας r σε όλο το ύψος της δεξαμενής



Σχήμα 6.7: Σύγκριση των χρονοϊστοριών Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης και Μετακίνησης κορυφής για πακτωμένο υδατόπυργο (μπλε χρώμα) και για υδατόπυργο όπου λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής (κόκκινο χρώμα).

5. Περίπτωση $\varphi = 45^\circ$ με κυκλική σπή ακτίνας r σε όλο το ύψος της δεξαμενής



Σχήμα 6.8: Σύγκριση των χρονοϊστοριών Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης και Μετακίνησης κορυφής για πακτωμένο υδατόπυργο (μπλε χρώμα) και για υδατόπυργο όπου λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής (κόκκινο χρώμα).

6.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΑΣ ΚΑΙ ΤΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κυκλικό θεμέλιο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έχει διαστάσεις που αντιστοιχούν σε θεμέλια υδατόπυργων με δεξαμενή χωρητικότητας περίπου 3000 m³ και ίδιο ύψος και πάχος τοιχωμάτων [9] με αυτόν που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε το ίδιο θεμέλιο για όλους τους υδατόπυργους ανεξάρτητα από το μέγεθος της δεξαμενής τους. Ως εκ τούτου παρατηρείται μεγαλύτερη επιρροή των αποτελεσμάτων για τους πύργους με δεξαμενές μικρής χωρητικότητας, όπως στις περιπτώσεις 1 και 2 που η χωρητικότητα των δεξαμενών είναι 775 και 1218 m³ αντίστοιχα. Η επιρροή της δυσκαμψίας και της απόσβεσης των ελατηρίων εδάφους και της μάζας του θεμελίου (που τοποθετούνται για να προσομοιωθούν οι συνθήκες αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής) είναι προφανώς πολύ πιο σημαντική στις παραπάνω περιπτώσεις από τις περιπτώσεις όπου η δεξαμενή έχει μεγάλη χωρητικότητα (π.χ. περιπτώσεις 3 και 5 με όγκους δεξαμενών 4222 και 3619 m³ αντίστοιχα) και επομένως παίζει σημαντικότερο ρόλο στη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής.

Συγκεκριμένα, σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παρατηρείται μείωση της τέμνουσας δύναμης που αναπτύσσεται στη βάση του πύργου. Η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη όταν η χωρητικότητα της δεξαμενής είναι μικρή. Στην περίπτωση 1 η μείωση στην τέμνουσα βάσης είναι της τάξης του 65%, στην περίπτωση 2 είναι περίπου 45%, στην περίπτωση 3 είναι περίπου 33%. Το ίδιο παρατηρείται και στους υδατόπυργους με δεξαμενή που διαθέτει κατακόρυφη τρύπα ακτίνας r, όπου η μείωση στην τέμνουσα βάσης είναι 60% και 55% για τις περιπτώσεις 4 και 5.

Όσον αφορά στη μετακίνηση της κορυφής του υδατόπυργου παρατηρείται μείωσή της για τις περιπτώσεις 1 και 2, όπου η χωρητικότητα της δεξαμενής είναι σχετικά μικρή. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις μπορεί να παρατηρηθεί αύξηση της μετατόπισης (περιπτώσεις 3 και 4), αλλά και μικρή μείωση (περίπτωση 5). Ακόμη, παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις αύξηση της περιόδου στα διαγράμματα χρονοϊστοριών.

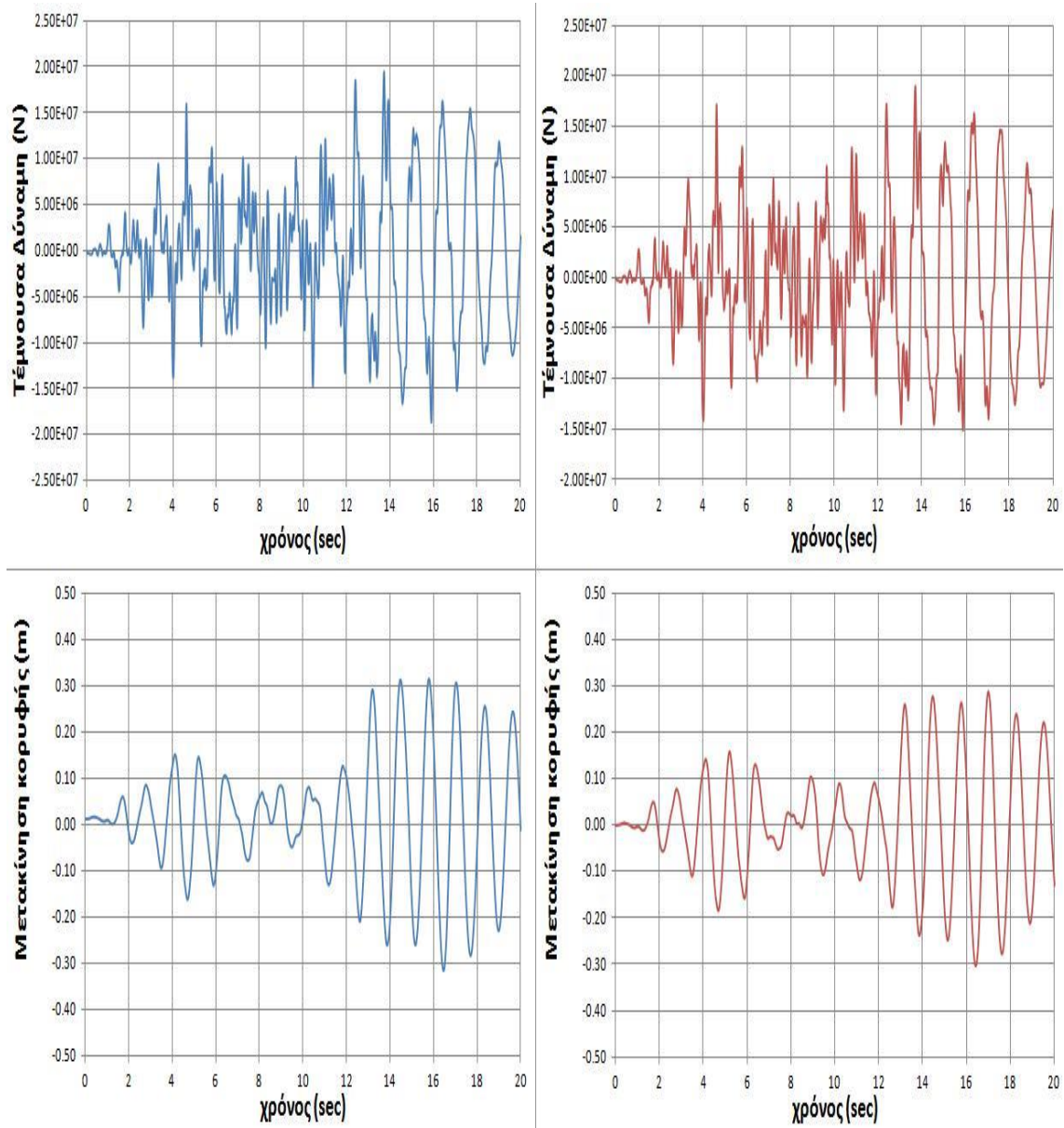
Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η δυναμική συμπεριφορά των συγκεκριμένων κατασκευών μπορεί να επηρεαστεί σε σημαντικό βαθμό από το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής. Για το λόγο αυτό εξετάζεται στην επόμενη παράγραφο ο βαθμός που είναι δυνατή η προσομοίωση του περιεχόμενου υγρού της

δεξαμενής με το σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων, όταν λαμβάνεται υπόψη και το φαινόμενο αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής.

6.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΜΑΖΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΛΕΠΤΟΜΕΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ SSI

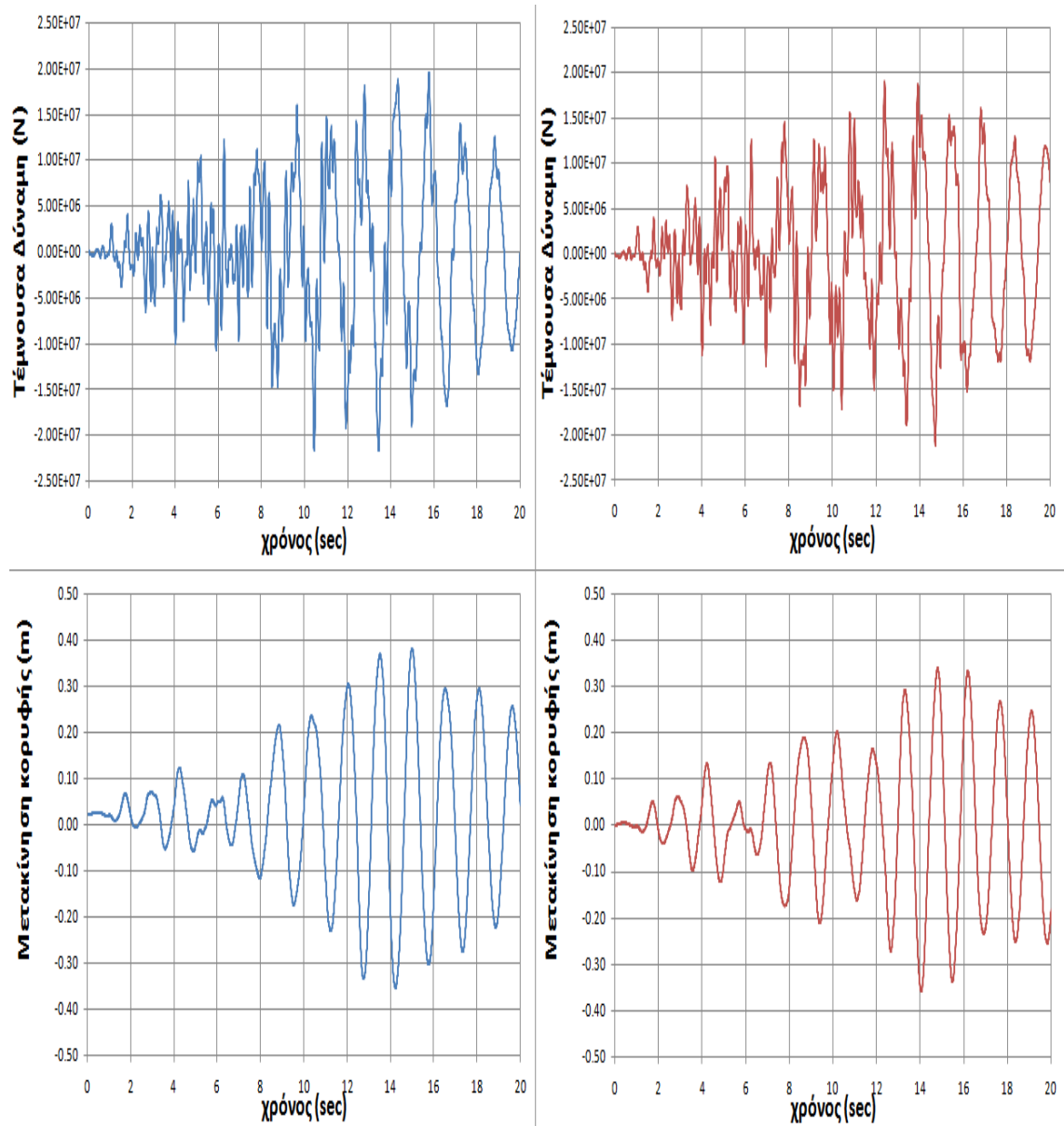
Σε αυτή την παράγραφο εξετάζεται η ισχύς του μοντέλου διακριτών μαζών και ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 4 όταν λαμβάνονται υπόψη συνθήκες SSI. Εξετάζονται ορισμένες περιπτώσεις που παρατηρήθηκαν αποκλίσεις στο Κεφάλαιο 4. Αυτές είναι για πύργους με δεξαμενή γωνίας φ ίση με 30 και 45 μοίρες (με κυκλική οπή, αλλά και χωρίς, κατά τη διεύθυνση του κατακόρυφου άξονα). Παρακάτω παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες για την τέμνουσα βάση και την μετακίνηση της κορυφής για τα λεπτομερή μοντέλα με χωρικά στοιχεία FLUID80 με συνθήκες SSI (μπλε χρώμα) και για τα απλοποιητικά μοντέλα με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων με συνθήκες SSI (κόκκινο χρώμα). Φαίνεται ότι η μεγάλη δυσκαμψία και απόσβεση των ελατηρίων εδάφους σε συνδυασμό και με τη μεγάλη συγκεντρωμένη μάζα του θεμελίου αναγκάζουν την κατασκευή να συμπεριφερθεί με ένα συγκεκριμένο τρόπο σε κάθε περίπτωση, είτε πρόκειται για το ακριβές μοντέλο, είτε για το προσεγγιστικό μοντέλο με τις διακριτές μάζες.

1. Περίπτωση $\varphi = 30^\circ$ (απλή κωνική δεξαμενή χωρίς κυκλική οπή)



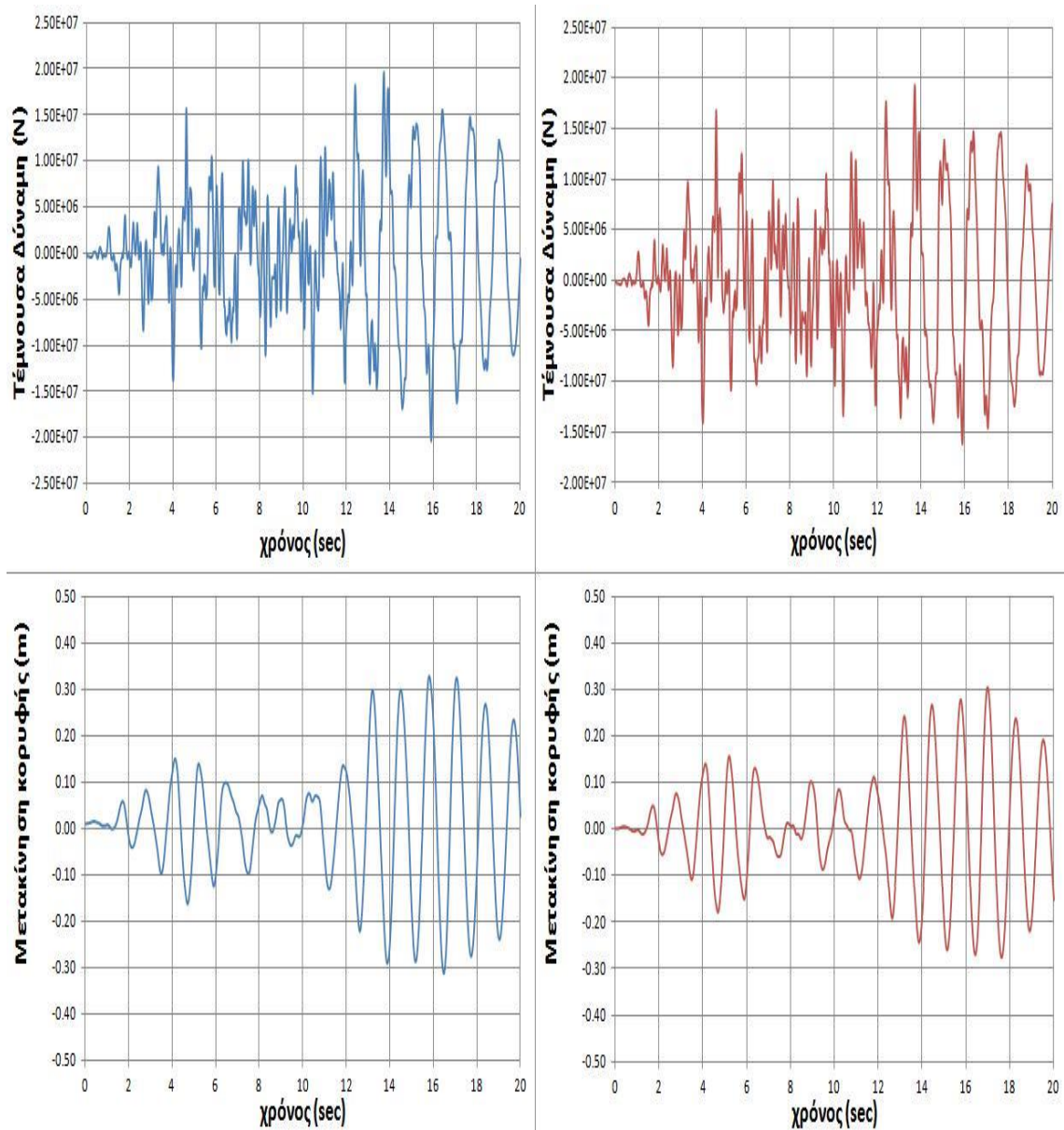
Σχήμα 6.9: Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου όταν λαμβάνονται υπόψη συνθήκες αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων.

2. Περίπτωση $\varphi = 45^\circ$ (απλή κωνική δεξαμενή χωρίς κυκλική οπή)



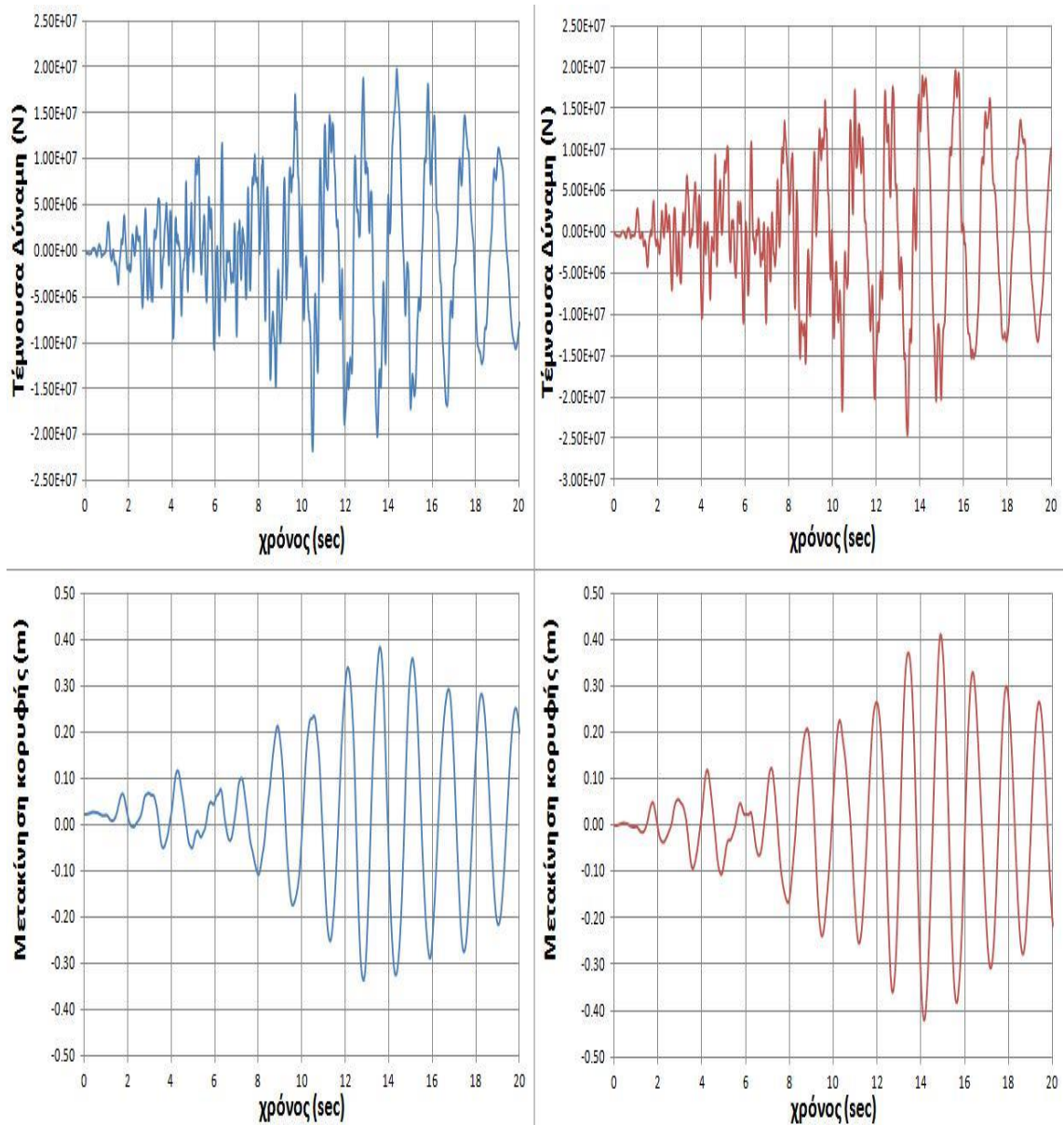
Σχήμα 6.10: Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου όταν λαμβάνονται υπόψη συνθήκες αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων.

3. Περίπτωση $\varphi = 30^\circ$ με κυκλική σπή ακτίνας r σε όλο το ύψος της δεξαμενής



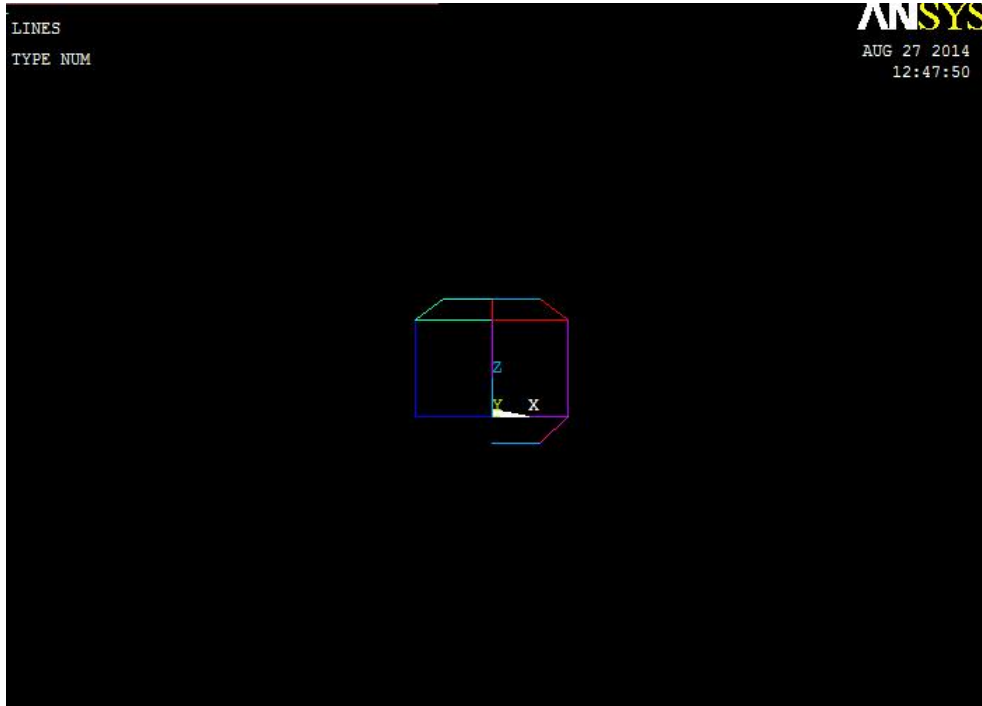
Σχήμα 6.11: Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου όταν λαμβάνονται υπόψη συνθήκες αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων.

4. Περίπτωση $\varphi = 45^\circ$ με κυκλική σπή ακτίνας r σε όλο το ύψος της δεξαμενής

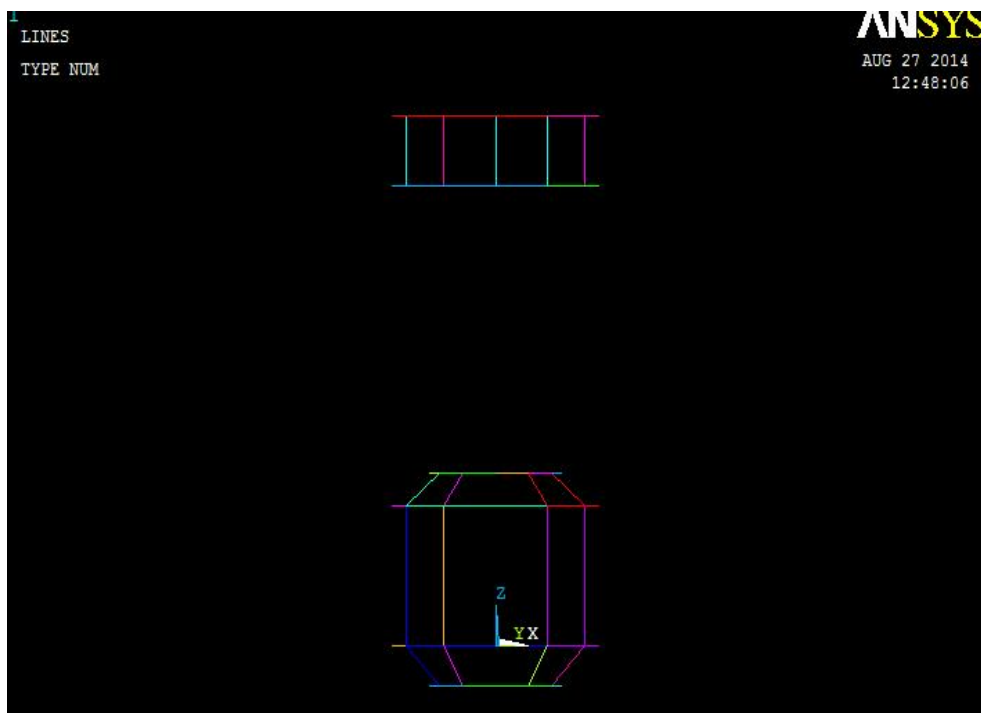


Σχήμα 6.12: Χρονοϊστορίες Συνολικής Τέμνουσας Δύναμης στη βάση του πύργου και Μετακίνησης της κορυφής του πύργου όταν λαμβάνονται υπόψη συνθήκες αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το λεπτομερές μοντέλο με στοιχεία FLUID80, ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το απλοποιητικό μοντέλο με σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων.

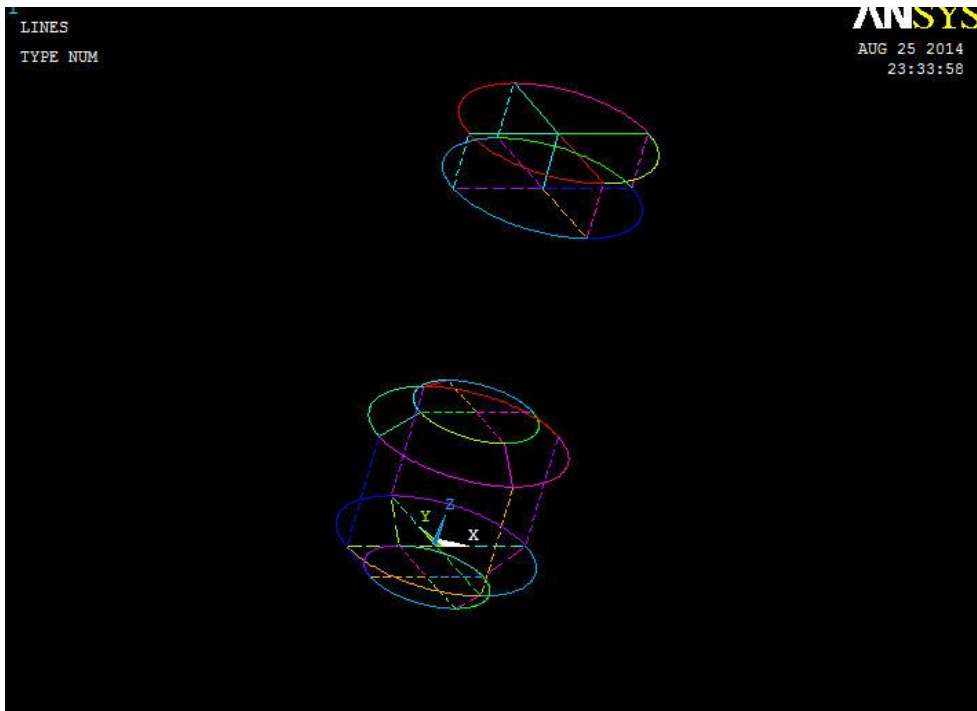
6.6 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ANSYS ΥΔΑΤΟΠΥΡΓΟΣ ΡΙΟΥ



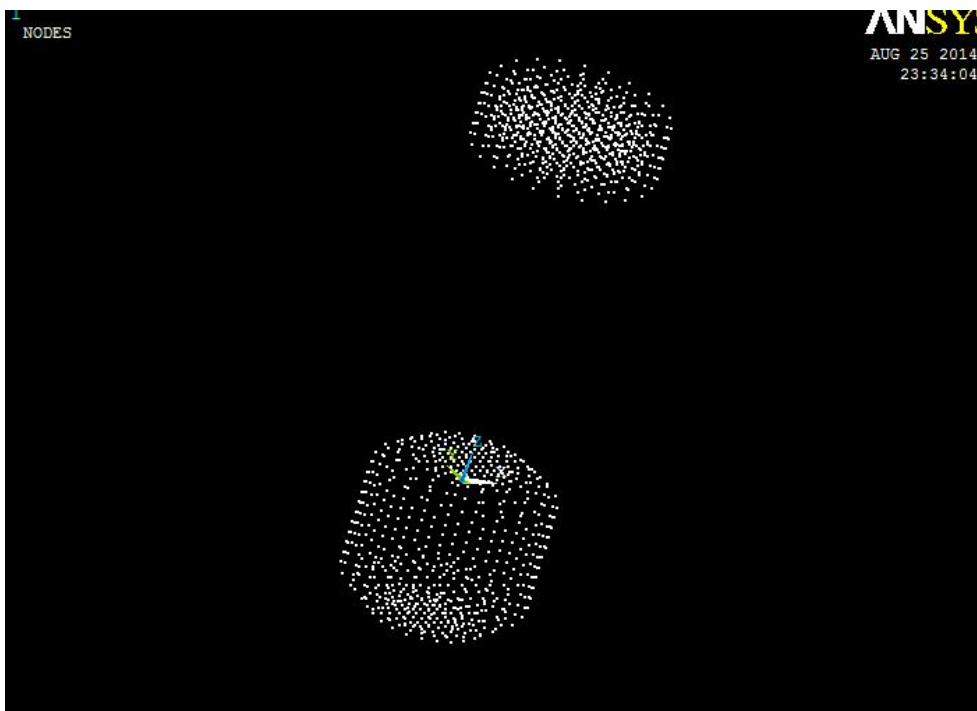
Εικόνα 1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΟΨΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ



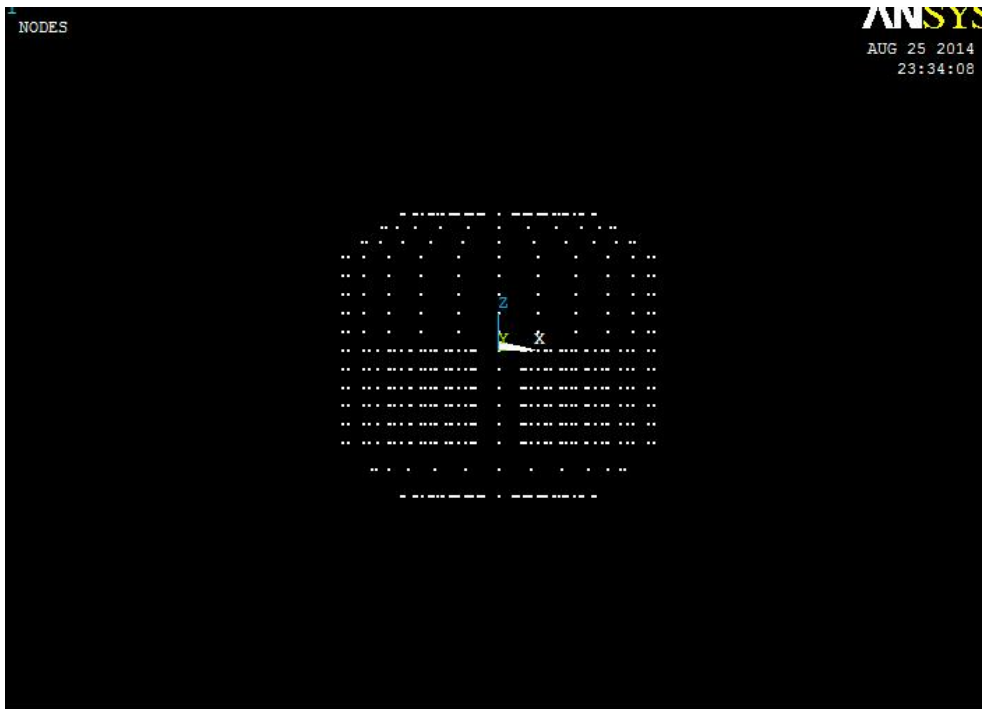
Εικόνα2 ΠΡΟΣΟΨΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ ΝΕΡΟΥ



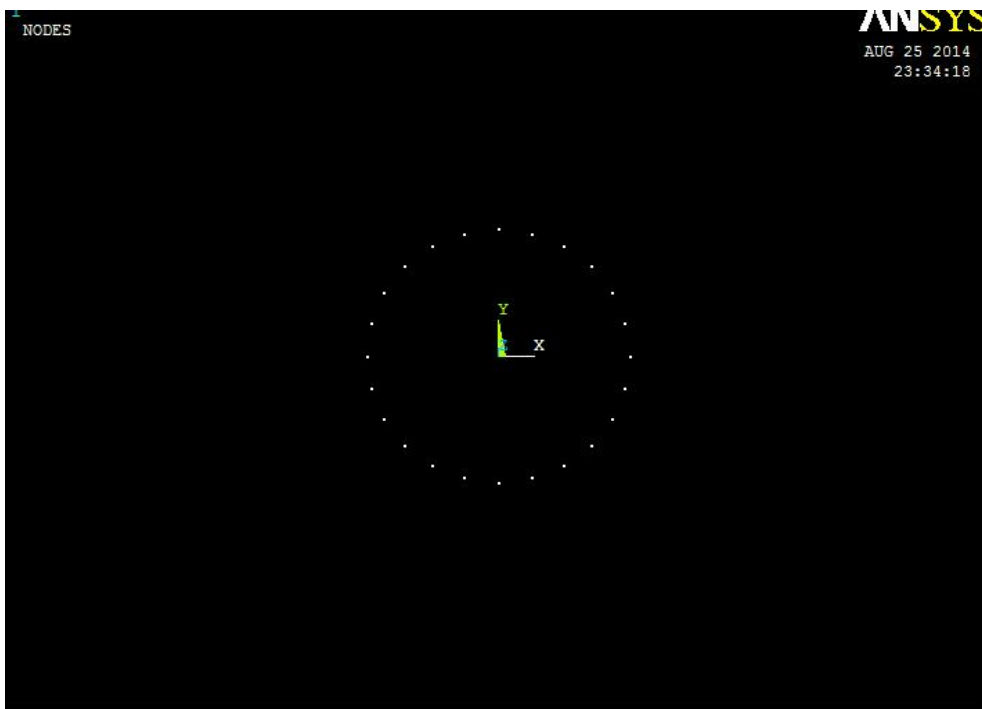
Εικόνα3 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ 360 ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ



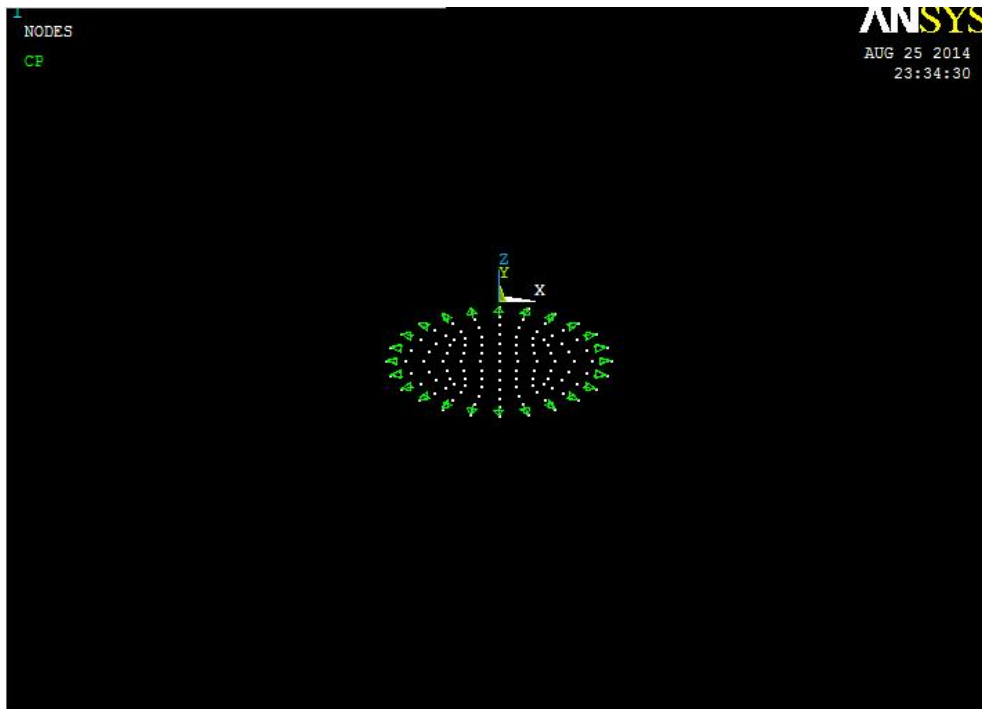
Εικόνα4 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ



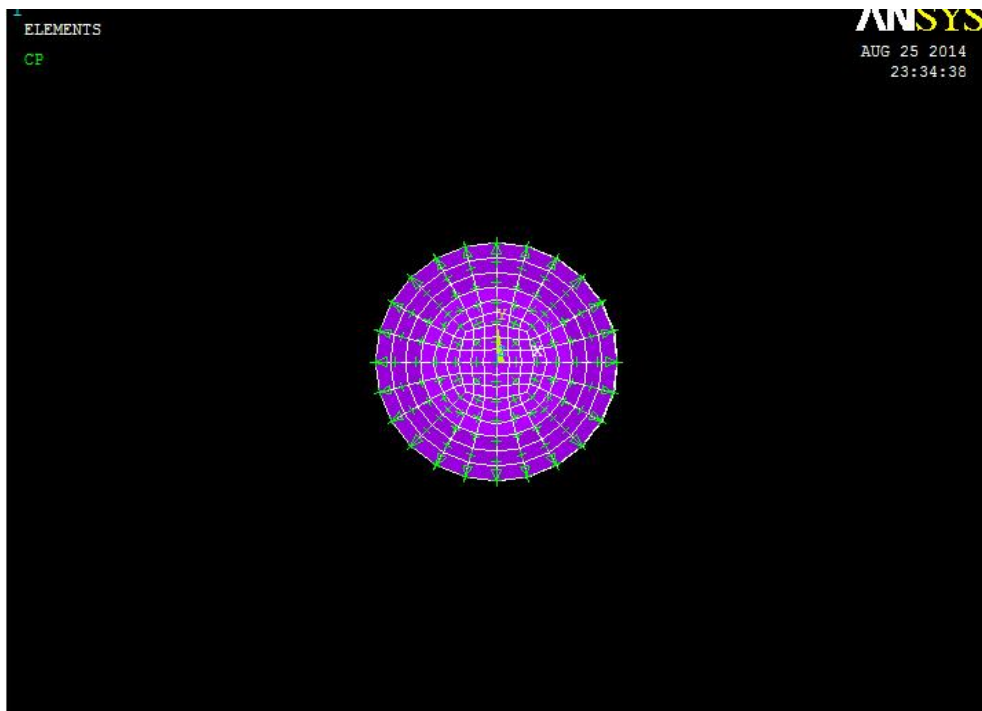
*Εικόνα5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ
(ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΑΖΩΝ ΙΔΙΑ)*



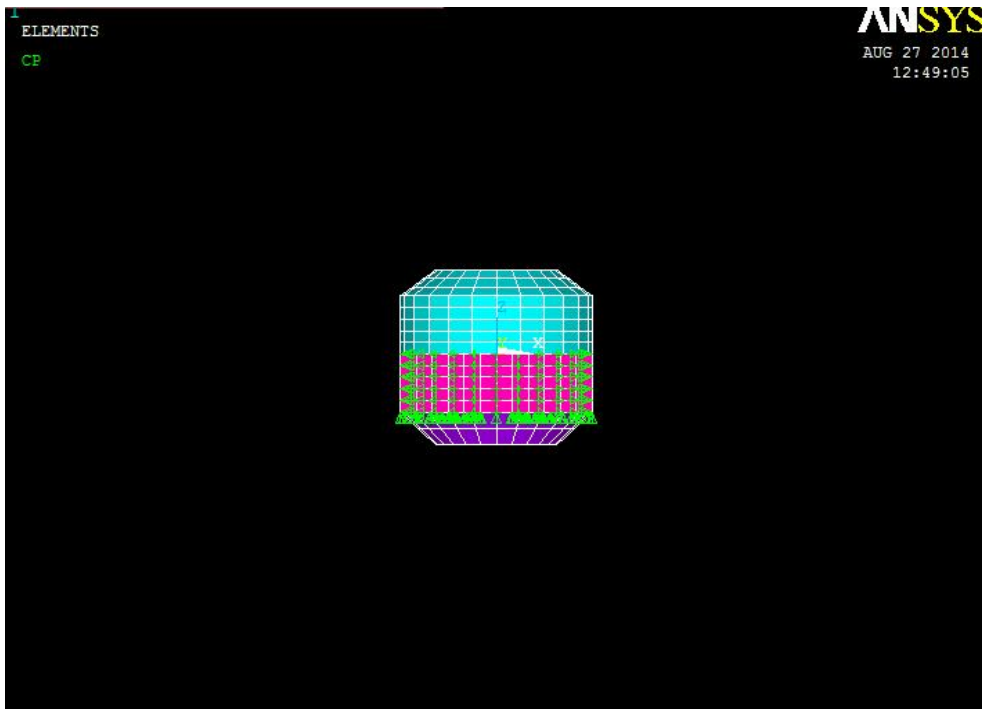
Εικόνα6 ΑΠΟΜΟΝΩΣΗ ΤΩΝ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΚΟΜΒΩΝ



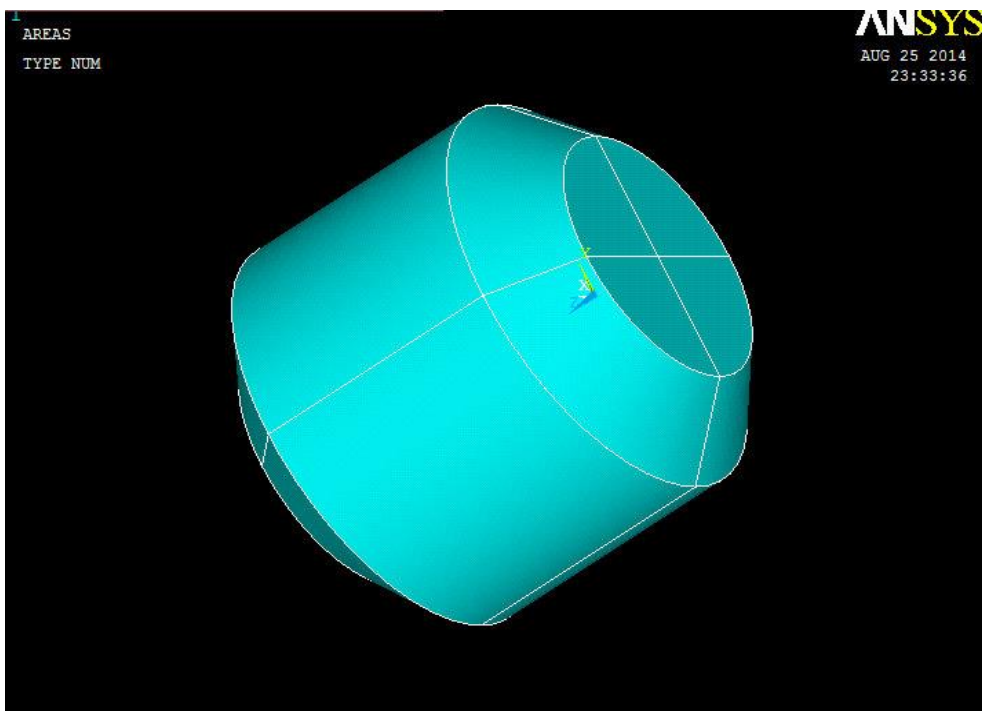
Εικόνα7 ΜΕ ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ ΟΡΙΖΟΥΜΕ ΤΑ ΟΡΙΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ



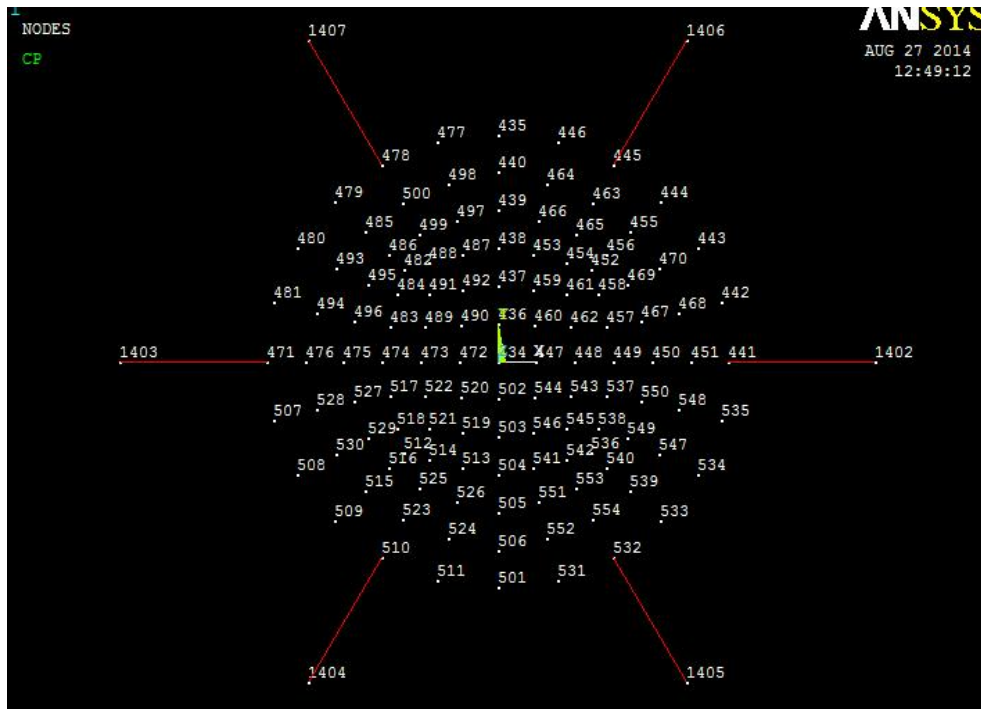
Εικόνα8 ΚΑΤΟΨΗ ΜΑΖΑΣ ΝΕΡΟΥ



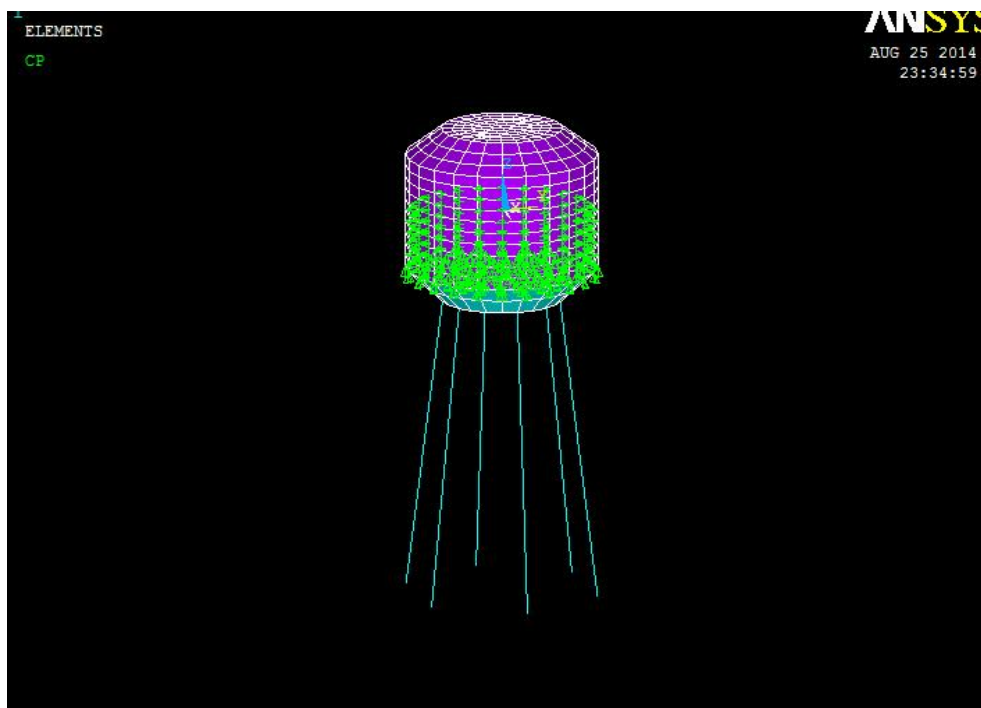
Εικόνα9 ΠΡΟΣΟΨΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ-ΝΕΡΟΥ



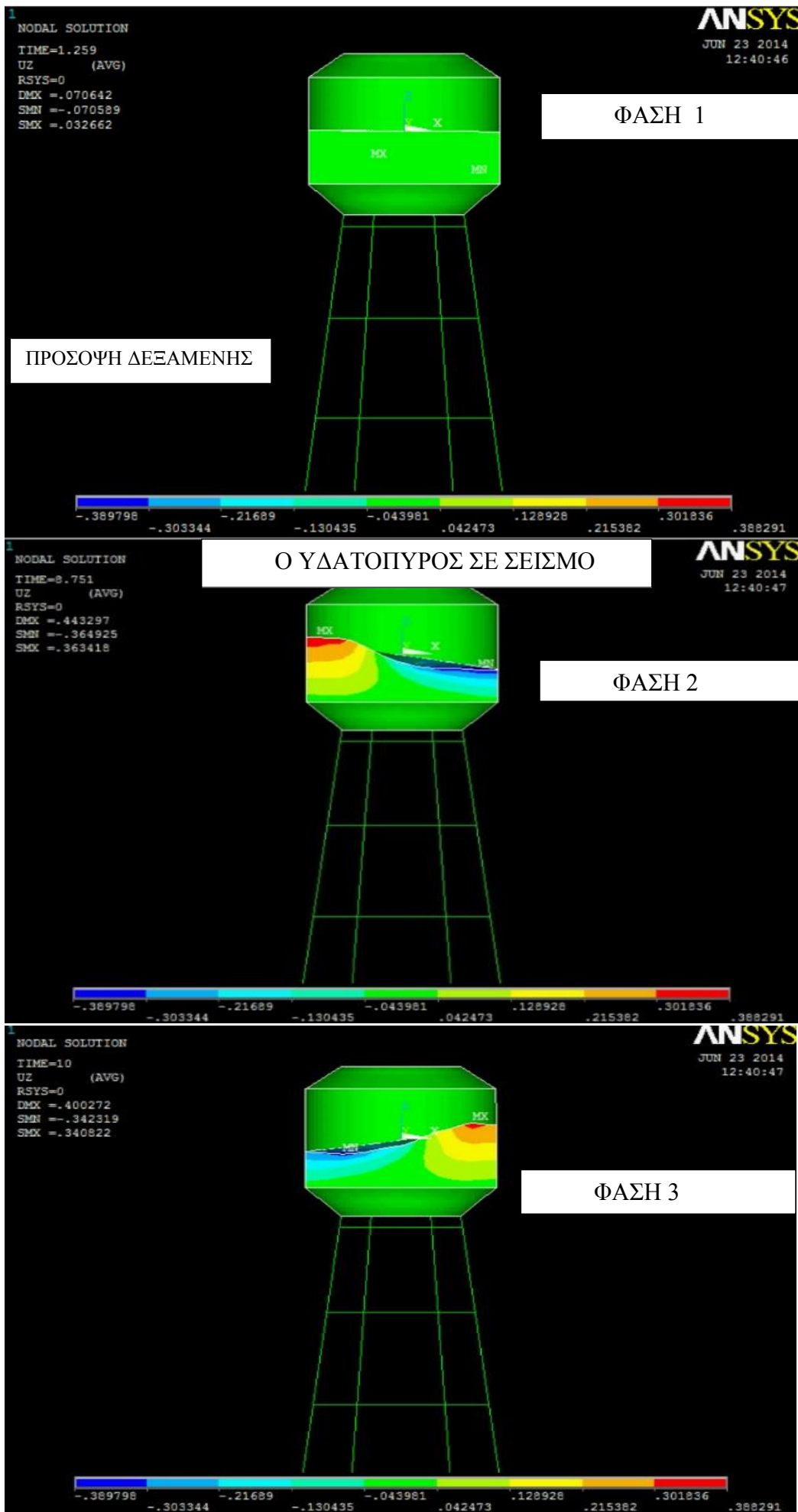
Εικόνα10 ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΟΨΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ



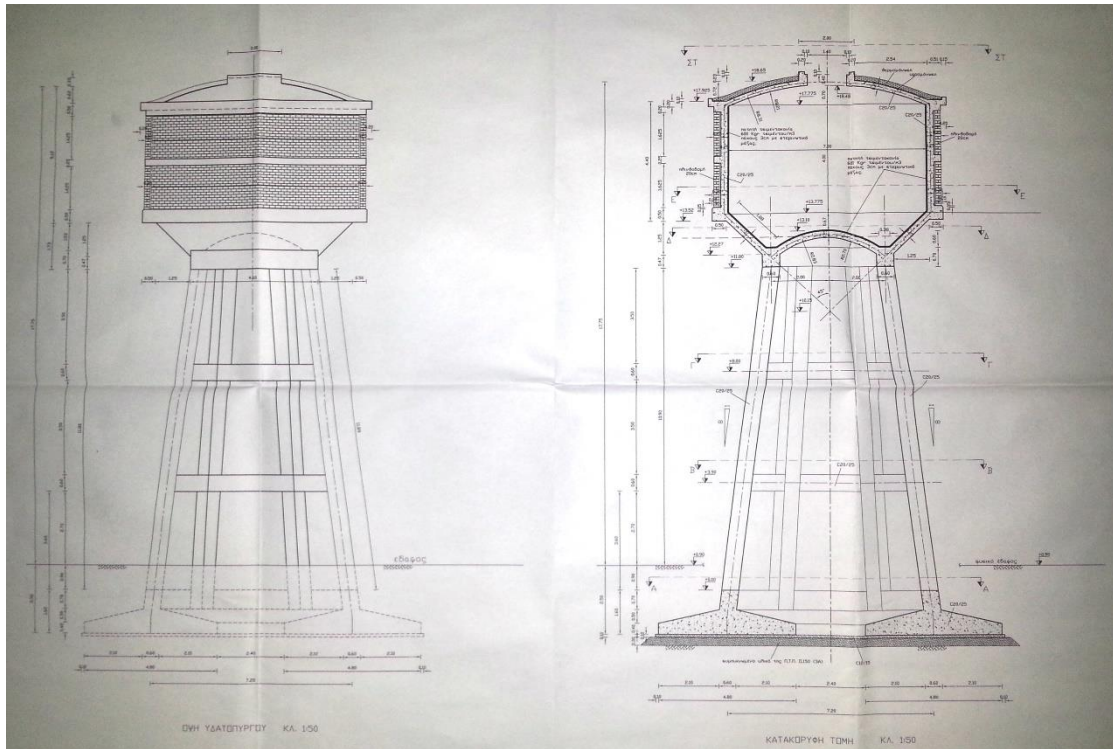
Εικόνα.11 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΟΛΩΝΕΣ ΠΟΥ ΕΧΕΙ Η ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΜΑΣ



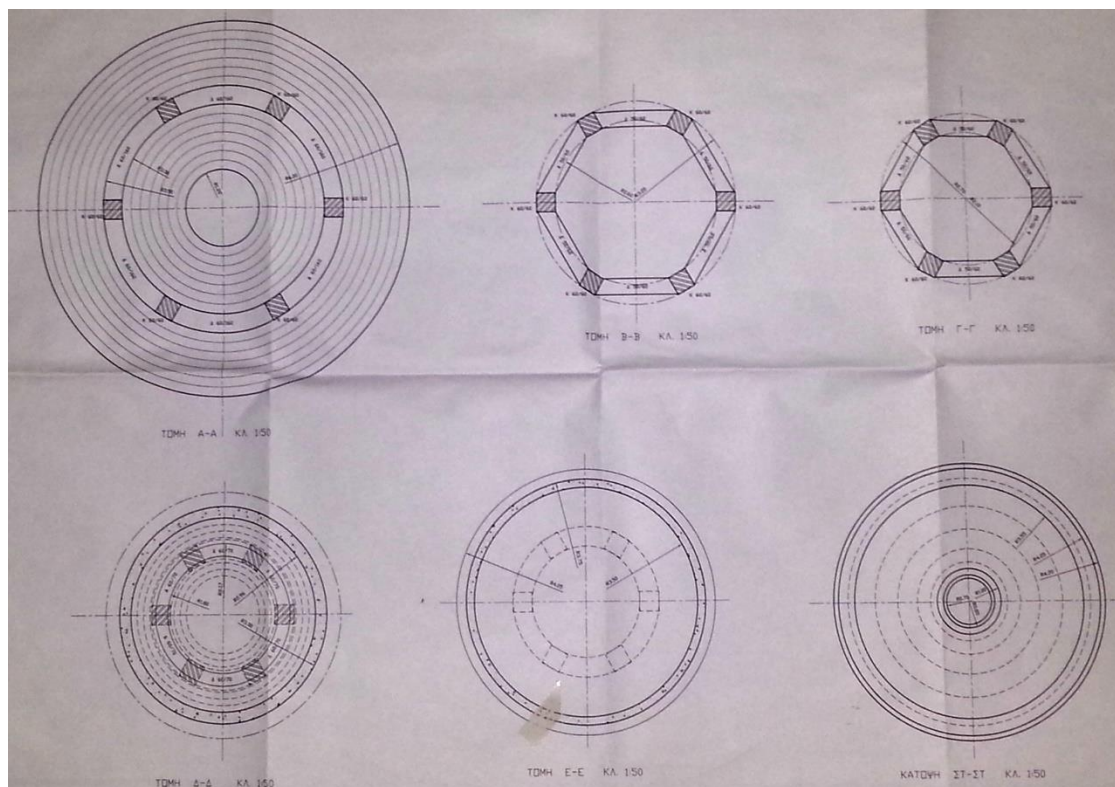
Εικόνα.12 ΠΡΟΒΟΛΗ ΥΠΟ ΓΩΝΙΑ



ΤΑ ΣΧΕΔΙΑ ΠΟΥ ΜΑΣ ΒΟΗΘΗΣΑΝ ΝΑ ΒΓΑΛΟΥΜΕ ΕΙΣ ΠΕΡΑΣ ΤΗΝ
ΠΑΡΟΥΣΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ :



Όψη υδατόπυργου και κατακόρυφη τομή



Τομές

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ελληνική Βιβλιογραφία

[1] Chorpa A.K., “Δυναμική Των Κατασκευών, Θεωρία και Εφαρμογές στη Σεισμική Μηχανική”, 2^η Ελληνική Επανεκδοση, Μ. Γκούρδας

[2] Δρόσος Ι.Χ. (2005), “Μελέτη συστημάτων σεισμικής προστασίας σφαιρικών δεξαμενών”, Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα

[3] Δρόσος Γ.Χ. (2005), “Επίδραση κλυδασμού στη σεισμική απόκριση σφαιρικών δεξαμενών”, Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα

[4] Αθανασόπουλος Γ.Α. (2013), “Μαθήματα Δυναμικής Του Εδάφους”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα

[5] A. GUERRIN R.C. LAVAUUR, “Δεξαμενές, Υδατόπυργοι, Πισίνες από οπλισμένο σκυρόδεμα”. Μετάφραση ‘Νικόλος Θανόπουλος πολιτικός μηχανικός ΕΜΠ.’

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

[6] VSL INTERNATIONAL LTD. (1983), “Concrete storage structures – Use of the VSL special construction methods”, Berne/Switzerland 1983

[7] SAS IP (2004), ANSYS: Inc. Theory Reference, ANSYS Release 9.0

[8] Housner G.W. (1963), “The dynamic behavior of water tanks”, Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 53, No. 2, pp. 381-387. February, 1963

[9] Veletsos, A. S. and Shivakumar, P. “Tanks containing liquids or solids.” Chapter 15 in: D.E. Beskos, S.A. Anagnostopoulos (eds), Computer Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures A Handbook, Advances in Earthquake Engineering, Computational Mechanics Publications.

[10] Gazetas G. (1983), “Analysis of machine foundation vibrations: state of the art”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1983, Vol. 2, No. 1