



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

***Δ.Π.Μ.Σ: «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των
Κατασκευών»***

Επιβλέποντες: *Μανόλης Παπαδρακάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Βησσαρίων Παπαδόπουλος, Επίκουρος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.*

**«ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΕΥΣΤΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ
ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ»**

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΤΟΥ

ΙΩΑΝΝΗ Σ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ

Αθήνα, Ιούλιος 2014

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	i
Ευχαριστίες	iii
Περίληψη	iv
Abstract	vi
Κεφαλαίο 1 Εισαγωγή – Γενικά περί Δεξαμενών	
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Μεταλλικές δεξαμενές	5
2.2.1 Συγκολλητές δεξαμενές	5
2.2.2 Κοχλιωτές δεξαμενές	9
1.3 Ανάλυση περιεχομένων κεφαλαίων	12
Κεφάλαιο 2 Δράσεις επί των Δεξαμενών	
2.1 Εισαγωγή	14
2.2 Δράσεις Ανέμου	14
2.2.1 Γενικά	14
2.2.2 Εξωτερική Πίεση w_e	15
2.2.3 Πίεση ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$	15
2.2.4 Δυνάμεις ανέμου	17
2.2.5 Συντελεστής τραχύτητας	18
2.2.6 Ανεμοπίεση σε κατακόρυφες κυλινδρικές επιφάνειες	21
2.2.7 Ανεμοπίεση σε θόλους	23
2.3 Δράσεις Χιονιού	24
2.3.1 Γενικά	24
2.3.2 Φορτίο χιονιού σε στέγες	24
2.3.3 Συντελεστές φορτίου χιονιού	26

2.3.4	Φορτίο χιονιού σε κιγκλιδώματα ασφαλείας ή σε εμπόδια.....	27
2.3.5	Συντελεστής τραχύτητας.....	18
2.4	Υδροστατικές πιέσεις.....	28
2.5	Σεισμικές δράσεις.....	28
2.5.1	Γενικά.....	28
2.5.2	Κατακόρυφες άκαμπτες κυκλικές δεξαμενές πακτωμένες στη θεμελίωση.....	29
2.5.3	Κατακόρυφες εύκαμπτες κυκλικές δεξαμενές πακτωμένες στη θεμελίωση.....	39
2.5.4	Απλοποιημένη διαδικασία για δεξαμενές πακτωμένες στη βάση.....	41

Κεφάλαιο 3 Σχεδιασμός Μεταλλικών Δεξαμενών

3.1	Εισαγωγή.....	45
3.2	Οριακές καταστάσεις αστοχίας.....	47
3.2.1	Πλαστική οριακή κατάσταση (LS1).....	47
3.2.2	Ανακυκλική φόρτιση (LS2).....	49
3.2.3	Λυγισμός (LS3).....	50

Κεφαλαίο 4 Αριθμητικές Εφαρμογές

4.1	Εισαγωγή.....	62
4.2	Περιγραφή του προβλήματος.....	63
4.3	Σεισμικές διεγέρσεις.....	68
4.4	Αποτελέσματα αναλύσεων.....	77

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ..... 109

Ευχαριστίες

Μέσα από αυτές τις λίγες γραμμές θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους που βοήθησαν στην εκπόνηση αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας.

Καταρχήν στον άνθρωπο και σεβαστό δάσκαλό μου καθηγητή Μανόλη Παπαδρακάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντάς μου την ευκαιρία να εκπονήσω υπό την επίβλεψή του την παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία. Πρέπει επίσης να τονίσω ότι χωρίς τη βοήθειά του θα ήταν αδύνατο να εκπονήσω την παρούσα εργασία και να ολοκληρώσω το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον συνεπιβλέποντα καθηγητή Βησσαρίωνα Παπαδόπουλο για την βοήθεια που μου παρείχε σε βάρος του προσωπικού του χρόνου σε κρίσιμα σημεία της εργασίας και για τις ουσιώδεις συζητήσεις που είχαμε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της Μεταπτυχιακής Εργασίας .

Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω και τον Δρα Γεώργιο Μάρκου με τον οποίο είχα αρκετές συζητήσεις σε καθοριστικό σημείο της εκπόνησης της παρούσας εργασίας προκειμένου να επιλύσουμε θέματα της προσομοίωσης στο Abaqus.

Ιωάννης Σ. Παναγιώτου

Αθήνα, Ιούλιος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

**«ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΕΥΣΤΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ»**

Μεταπτυχιακή Εργασία του *Ιωάννη Σ. Παναγιώτου*

Επιβλέποντες: *Μανόλης Παπαδρακάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.*
Βησσαρίων Παπαδόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Οι κυλινδρικές δεξαμενές μεγάλης χωρητικότητας χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ποικίλων υγρών όπως για παράδειγμα, πόσιμου ύδατος, νερό για πυρόσβεση, πετρελαίου, χημικών προϊόντων και υγροποιημένου φυσικού αερίου. Οι δεξαμενές μπορεί να είναι υπόγειες, επίγειες και υπερυψωμένες. Ακόμη μπορεί να διαφέρουν ως προς το υλικό κατασκευής και τον τρόπο τοποθέτησής τους οριζόντια ή κατακόρυφα

Καθοριστικός παράγοντας στη μελέτη και το σχεδιασμό των δεξαμενών είναι η σεισμική διέγερση. Η ικανοποιητική απόκριση των δεξαμενών κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών είναι ζωτικής σημασίας τόσο για τις σύγχρονες εγκαταστάσεις όσο και για το κοινωνικό σύνολο. Δεξαμενές που είχαν σχεδιαστεί ανεπαρκώς είχαν υποστεί εκτεταμένες ζημιές κατά τη διάρκεια προηγούμενων σεισμών.

Ο λυγισμός διαδραματίζει θεμελιώδη ρόλο στο σχεδιασμό των δεξαμενών χάλυβα λόγω των μικρών παχών των τοιχωμάτων αυτής της κατηγορίας των κατασκευών. Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει τη σεισμική συμπεριφορά των πακτωμένων στη βάση δεξαμενών υγρών αποθήκευσης, διερευνώντας την υδροδυναμική αλληλεπίδραση του ρευστού – κατασκευής.

Σε παλαιότερες μελέτες, το πρόβλημα λυγισμού για τις χαλύβδινες δεξαμενές διερευνήθηκε μέσω αριθμητικών μοντέλων στα οποία οι διαφορετικοί τρόποι αστοχίας επισημαίνονται και συζητούνται χωριστά. Ωστόσο υπάρχει έλλειψη μελετών όπου η αστοχία της δεξαμενής να θεωρείται στο σύνολό της.

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην εν χρόνο ανάλυση των πακτωμένων μεταλλικών δεξαμενών εισάγοντας τη χρονοϊστορία της σεισμικής διέγερσης στη βάση τους. Η προσομοίωση της κατασκευής γίνεται με πεπερασμένα στοιχεία και λαμβάνεται υπ' όψη η αλληλεπίδραση του ρευστού – κατασκευής καθ' όλη την εξέλιξη του σεισμικού φαινομένου. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έγιναν με το πρόγραμμα Abaqus θεωρώντας μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία περιλαμβάνει τέσσερα κεφάλαια. Το κεφάλαιο 1 Εισαγωγή – Γενικά περί δεξαμενών και τρία επιπλέον κεφάλαια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή των δράσεων που πρέπει να ληφθούν υπόψη σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς κατά το σχεδιασμό των κατακόρυφων μεταλλικών δεξαμενών.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι απαιτούμενοι έλεγχοι επάρκειας των μεταλλικών δεξαμενών σύμφωνα με το EN1993 μέρος 1-6 που αφορά στη αντοχή και ευστάθεια κελυφών και το μέρος 4-2 που αναφέρεται στις δεξαμενές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι σεισμικές αναλύσεις που έγιναν σε μία συγκεκριμένη δεξαμενή με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus και δίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF STRUCTURAL ENGINEERING
STATICS AND ASEISMIC RESEARCH LABORATORY

«FLUID – STRUCTURE INTERACTION WITH FINITE ELEMENTS»

MSc Diploma thesis of *Ioannis S. Panagiotou*

Supervisors: *Manolis Papadrakakis, Professor NTUA*
Vissarion Papadopoulos, Assistant Professor NTUA

Abstract

Large-capacity cylindrical tanks are used to store a variety of liquids, e.g. water for drinking and firefighting, petroleum, chemicals, and liquefied natural gas. Tanks can be underground, surface and elevated. Even may differ in material and mounting horizontally or vertically.

A determining factor in the study and design of tanks is the seismic excitation. Satisfactory performance of tanks during strong ground shaking is crucial for both modern facilities and for society. Tanks that were inadequately designed or detailed have suffered extensive damage during past earthquakes.

Buckling plays a fundamental role in the design of steel tanks because of the small thicknesses of the walls of this class of structures. Many researchers have studied the seismic behaviour of anchored liquid-storage tanks, investigating the effect of hydrodynamic fluid–structure interaction on structural response.

In past studies, the buckling problem for steel tanks was investigated by means of numerical models in which the different failure modes are highlighted and discussed separately. However, there is lack of studies in where the failure of the tank to be considered in its entirety

This study focuses on the time history analysis of anchored steel tanks entering the time history of the seismic excitation at the base. The simulation of the construction is done by finite elements and takes into account the interaction of the fluid - construction throughout the evolution of the seismic phenomenon. The analyzes were performed with the program Abaqus considering material and geometry nonlinearity.

This thesis includes four chapters. Chapter 1 Introduction - Overview on tanks and three additional chapters.

In the second chapter is made a description of the actions that must be taken into account in accordance with applicable regulations in the design of vertical steel tanks.

In the third chapter described the required adequacy checks of tanks in accordance with EN1993 Part 6.1 related to the strength and stability of shells and 2.4 referred to the tanks.

In the fourth chapter described the seismic analyzes that performed in a particular tank with the finite element software Abaqus and given the results of these analyzes.

Εισαγωγή – Γενικά περί Δεξαμενών

1.1 Εισαγωγή

Οι κυλινδρικές δεξαμενές μεγάλης χωρητικότητας χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ποικίλων υγρών όπως για παράδειγμα, πόσιμου ύδατος, νερό για πυρόσβεση, πετρελαίου, χημικών προϊόντων και υγροποιημένου φυσικού αερίου. Οι δεξαμενές μπορεί να είναι υπόγειες, επίγειες και υπερυψωμένες. Ακόμη μπορεί να διαφέρουν ως προς το υλικό κατασκευής και τον τρόπο τοποθέτησής τους οριζόντια ή κατακόρυφα. Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επικεντρώνεται μόνο στη μελέτη επίγειων κυλινδρικών δεξαμενών πακτωμένων στη βάση.

Καθοριστικός παράγοντας στη μελέτη και το σχεδιασμό των δεξαμενών είναι η σεισμική διέγερση. Η ικανοποιητική απόκριση των δεξαμενών κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών είναι ζωτικής σημασίας για τις σύγχρονες εγκαταστάσεις. Δεξαμενές που είχαν σχεδιαστεί ανεπαρκώς είχαν υποστεί εκτεταμένες ζημιές κατά τη διάρκεια προηγούμενων σεισμών.

Οι σεισμικές βλάβες στις μεταλλικές δεξαμενές μπορούν να έχουν τις παρακάτω μορφές:

- ❖ Μεγάλες αξονικές θλιπτικές τάσεις λόγω της κάμψης της δεξαμενής ως δοκός μπορεί να προκαλέσουν λυγισμό του κελύφους στη βάση της τύπου “elephant-foot”.
- ❖ Ο κυματισμός του περιεχομένου υγρού μπορεί να προκαλέσει βλάβες στην οροφή και λυγισμό στην περιοχή κοντά στην κορυφή του κελύφους
- ❖ Υψηλές τάσεις στην περιοχή των ανεπαρκώς μελετημένων αγκυρώσεων στη βάση μπορεί να προκαλέσουν διάρρηξη του κελύφους
- ❖ Η τέμνουσα βάσης μπορεί να υπερβεί την τριβή μεταξύ δεξαμενής και πλάκας έδρασης με αποτέλεσμα την ολίσθηση της δεξαμενής
- ❖ Η ανύψωση της βάσης, σε μη αγκυρωμένες ή σε μερικώς αγκυρωμένες δεξαμενές, μπορεί να προκαλέσει αστοχία των συνδέσεων των σωληνώσεων που δεν μπορούν να παραλάβουν τις κατακόρυφες μετατοπίσεις, διάρρηξη της σύνδεσης πυθμένα – κελύφους και μπορεί ακόμη να προκαλέσει διαφορεική καθίζηση της θεμελίωσης

Στις Εικόνες 1.1, 1.2, 1.3 και 1.4 φαίνονται μορφές των βλαβών που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 1.1 Λυγισμός του κελύφους στη βάση της δεξαμενής τύπου “elephant-foot”
(1964 magnitude-9.2 Anchorage, Alaska earthquake)



Εικόνα 1.2 Λυγισμός της κορυφής του κελύφους δεξαμενών (Northridge earthquake, California)



Εικόνα 1.3 Θραύση σύνδεσης σωληνώσεων και λυγισμός τύπου “elephant-foot” λόγω ανύψωσης της βάσης



Εικόνα 1.4 Αστοχία της αγκύρωσης που περιλαμβάνει επιμήκυνση βλήτρου, παραμόρφωση κελύφους και θραύση δακτυλίου από σκυρόδεμα (2001 magnitude-8.4 Peru Earthquake)

Η σεισμική συμπεριφορά των δεξαμενών έχει γίνει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών στο παρελθόν. Έχει αποδειχθεί ότι ένα μέρος του περιεχομένου υγρού κινείται με μορφή κυματισμού μεγάλης περιόδου – γνωστό και ως κυκλοφορούσα συνιστώσα (convective)–, ενώ το υπόλοιπο κινείται άκαμπτα – γνωστό και ως ωστική συνιστώσα (impulsive) – με το τοίχωμα της δεξαμενής. Το τελευταίο μέρος του υγρού έχει την ίδια επιτάχυνση με το έδαφος και συμβάλει κυρίως στην τέμνουσα βάσης και στην ροπή ανατροπής της δεξαμενής. Η κυκλοφορούσα συνιστώσα προσδιορίζει το ύψος των κυμάτων και ως εκ τούτου την απαίτηση για ελεύθερο ύψος πάνω από την επιφάνεια του υγρού.

1.2 Μεταλλικές δεξαμενές

Το συνηθέστερο υλικό για την κατασκευή των επίγειων δεξαμενών είναι ο χάλυβας, σε συνδυασμό με το σκυρόδεμα για την κατασκευή της πλάκας έδρασης του χαλύβδινου κελύφους. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των μεταλλικών δεξαμενών και συνοπτικά η διαδικασία κατασκευής τους.

1.2.1 Συγκολλητές δεξαμενές

1.2.1.1 Γενικά

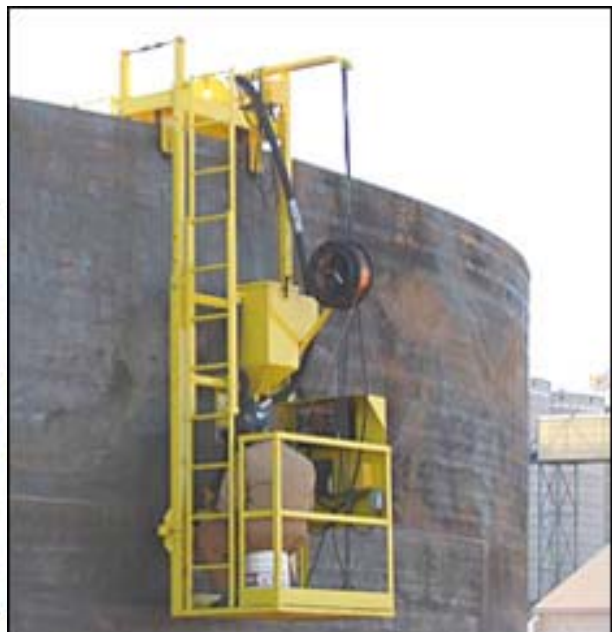
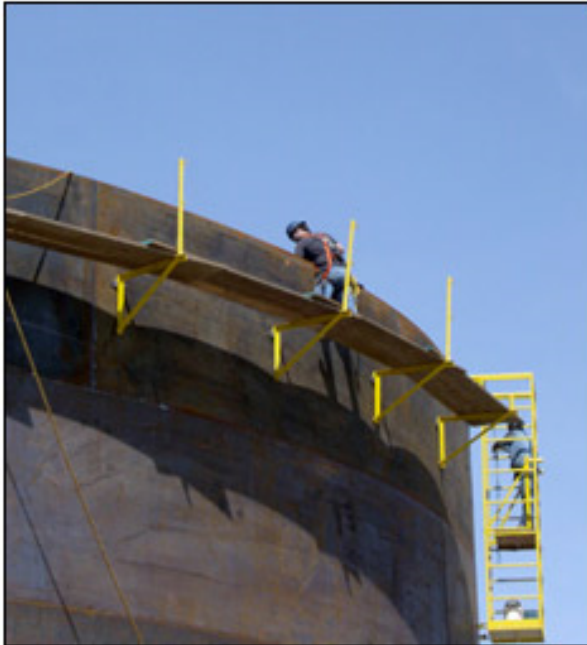
Σχεδόν όλα τα τμήματα των συγκολλητών δεξαμενών κατασκευάζονται στο εργοστάσιο και μεταφέρονται στο εργοτάξιο όπου και συγκολλούνται. Κάποια μέρη της δεξαμενής, όπως η οροφή, μπορεί να συναρμολογηθούν στο εργοστάσιο και να μεταφερθούν στη συνέχεια στο εργοτάξιο, εάν το μέγεθός τους είναι τέτοιο που αυτό είναι δυνατό. Ζητούμενο είναι να περιοριστούν οι συγκολλήσεις που θα χρειαστεί να πραγματοποιηθούν στο ύπαιθρο λόγω της ευαισθησίας της διαδικασίας της συγκόλλησης στις καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 1.5 Κοπή μεταλλικού ελάσματος στο εργοστάσιο σε μηχάνημα CNC plasma

Η κοπή και διαμόρφωση των μεταλλικών πλακών γίνεται με χρήση σύγχρονων εργαλειομηχανών CNC (computer numerical control). Η κοπή των μετάλλων γίνεται με

διάφορες μεθόδους, όπως η θερμική κοπή (φλόγα οξυγόνου ή τόξο πλάσματος), υδροκοπή ή κοπή με laser ενώ η διαμόρφωση της καμπυλότητας με ψυχρή έλαση. Οι ακμές των ελασμάτων καθαρίζονται και διαμορφώνονται προκειμένου να είναι προκειμένου να είναι δυνατή η συγκόλληση στο εργοτάξιο.



Εικόνα 1.6 Κατασκευή συγκολλητής μεταλλικής δεξαμενής

Οι συγκολλήσεις των μεταλλικών ελασμάτων γίνονται συνήθως με εφαρμογή των παρακάτω μεθόδων ηλεκτρικού τόξου:

- ❖ Συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια: Το ηλεκτρόδιο αποτελείται από τον πυρήνα και την επένδυση. Κατά τη συγκόλληση ο πυρήνας λιώνει δημιουργώντας τη ραφή, ενώ η επένδυση εξαερώνεται προστατεύοντας το τόξο και το υλικό απόθεσης πάνω στη ραφή
- ❖ Συγκόλληση με αδρανές (MIG) ή ενεργό (TIG)αέριο: Αντί ηλεκτροδίου που χρησιμοποιείται στην προηγούμενη μέθοδο, σ' αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται σύρμα το οποίο προωθείται μέσω μηχανής συγκόλλησης. Η διαφορά μεταξύ συγκολλήσεως με αδρανές ή ενεργό αέριο είναι ότι στην πρώτη το προστατευτικό αέριο είναι αργό ή ήλιο ενώ στην τελευταία είναι διοξείδιο του άνθρακα.
- ❖ Συγκόλληση βυθιζόμενου τόξου: Όπως και στην συγκόλληση με αέρια το τόξο δημιουργείται μεταξύ ενός σύρματος και του συγκολλούμενου μετάλλου, αλλά αντί αερίου, χρησιμοποιείται κονία για την προστασία από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες

Οι συγκολλήσεις μπορούν να γίνονται χειροκίνητα (από το συγκολλητή που τοποθετεί το ηλεκτρόδιο στη σωστή θέση και το αντικαθιστά μόλις τελειώσει), ημιαυτόματα (με τη χρήση πιστολιού που τροφοδοτεί το ηλεκτρόδιο) ή αυτόματα (χωρίς κάποιο χειριστή).

1.2.1.2 Βάση

Η βάση μεταφέρει τα φορτία της δεξαμενής απευθείας στη θεμελίωση. Το πάχος της μεμβράνης της βάσης πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να ικανοποιούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις του κανονισμού, λαμβάνοντας υπ' όψη και τον κίνδυνο διάβρωσης. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 4 το ελάχιστο ονομαστικό πάχος της βάσης στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ανοξείδωτος χάλυβας είναι 5mm και 3mm για συγκόλληση με εξωραφή και εσωραφή αντίστοιχα. Για δεξαμενές με διάμετρο μεγαλύτερη από 12.50m θα πρέπει να υπάρχει ένας δακτύλιος στη βάση που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις αντοχής και δυσκαμψίας του τμήματος του κελύφους στο οποίο θα εφάπτεται. Αυτός ο δακτύλιος θα πρέπει να έχει τουλάχιστον ονομαστικό πάχος t_a , χωρίς την απαραίτητη προσαύξηση λόγω διάβρωσης, ίσο με:

$$t_a = \frac{t_s}{3} + 3\text{mm}, \quad t_a \leq 6\text{mm} \quad (1.1)$$

Όπου t_s είναι το πάχος του τμήματος του κελύφους στο οποίο συνδέεται ο δακτύλιος.

1.2.1.3 Κέλυφος

Η ανέγερση του κελύφους γίνεται με δύο βασικές μεθόδους. Συνήθως κατασκευάζεται ο κατώτερος δακτύλιος και στη συνέχεια τοποθετούνται διαδοχικά τα υπόλοιπα τμήματα με τη χρήση γερανού. Σε δεξαμενές μεγάλου ύψους πιο οικονομική μέθοδος είναι η χρήση υδραυλικού γρύλου. Κατασκευάζεται η οροφή και οι δύο υψηλότεροι δακτύλιοι πρώτα, οι οποίοι στηρίζονται προσωρινά από το γρύλο. Στη συνέχεια το τμήμα αυτό μεταφέρεται μέσω του γρύλου ψηλότερα και συνεχίζεται η κατασκευή των υπόλοιπων δακτυλίων. Η οικονομικότητα της μεθόδου αυτής έγκειται στο ότι δεν χρειάζεται γερανός για την τοποθέτηση των τελευταίων δακτυλίων και της οροφής, καθώς και στο ότι όλες οι εργασίες συγκόλλησης γίνονται στο έδαφος.

1.2.1.4 Οροφή

Η οροφή μπορεί να είναι αυτοστηριζόμενη ή να στηρίζεται σε υποστυλώματα. Στις αυτοστηριζόμενες οροφές μπορεί να τοποθετούνται δοκίδες. Οι οροφές που στηρίζονται σε σύστημα δοκών και υποστυλωμάτων κατασκευάζονται μετά από την κατασκευή του κελύφους και του πλαισίου στο οποίο θα στηριχτεί. Στην περίπτωση των αυτοστηριζόμενων οροφών υπάρχουν περισσότερες επιλογές για την κατασκευή τους. Η οροφή μπορεί να κατασκευαστεί πριν το κέλυφος στη θέση που θα βρίσκεται τελικώς, με γερανό και να υποστηριχτεί προσωρινά. Ένας άλλος τρόπος είναι να κατασκευαστεί η οροφή στη βάση της δεξαμενής και να ανεβεί στη τελική της θέση όταν κατασκευασθεί το κέλυφος. Αυτό επιτυγχάνεται με πίεση που ασκείται από ανεμιστήρες μεγάλης ταχύτητας που τοποθετούνται στα ανοίγματα που υπάρχουν για να γίνεται έλεγχος της δεξαμενής.

1.2.2 Κοχλιωτές δεξαμενές

1.2.2.1 Γενικά

Ο τρόπος ανέγερσης μιας κοχλιωτής δεξαμενής διαφέρει ανάλογα με τον κατασκευαστή. Όταν χρησιμοποιούνται γρύλοι, συναρμολογείται ένα δακτυλιοειδές τμήμα του κελύφους το οποίο ανυψώνεται ώστε να τοποθετηθεί κάτω από αυτό ένα άλλο τμήμα. Έτσι η συναρμολόγηση γίνεται στο έδαφος και τα διάφορα τμήματα τοποθετούνται διαδοχικά με ανύψωσή τους στη κατάλληλη θέση. Τα χαλύβδινα φύλλα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή έχουν συνήθως μεταβλητές μορφές διάταξης των οπών ώστε να αντιστέκονται στο αυξημένο φορτίο καθώς το ύψος της δεξαμενής αυξάνεται κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Για τις κοχλιώσεις χρησιμοποιούνται κοχλίες, δακτύλιοι και περικόχλια διαφόρων μεγεθών. Για να εξασφαλιστεί η στεγανότητα του κελύφους χρησιμοποιούνται παρεμβήσματα και στεγανωτικά (σιλικόνη και ουρεθάνη) στις συνδέσεις.

1.2.2.2 Βάση

Η βάση μπορεί να κατασκευαστεί από σκυρόδεμα ή από χάλυβα. Στην περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί σκυρόδεμα μεταλλικά φύλλα θα ενσωματωθούν στη βάση σχηματίζοντας μια δακτυλιοειδή θεμελίωση στην οποία θα ανεγερθεί η δεξαμενή. Αν η βάση κατασκευαστεί από χάλυβα τότε θα στηριχτεί σε ένα πέδιλο σκυροδέματος με μορφή δακτυλίου ή σε πλάκα σκυροδέματος αν η κατάσταση του εδάφους ή άλλες συνθήκες το απαιτούν. Αν χρειάζεται τοποθετούνται αγκύρια πάνω από το πέδιλο.



Εικόνα 1.7 Μεταλλική δεξαμενή με κοχλιωτές συνδέσεις



Εικόνα 1.8 Αποψη εσωτερικού κοχλιωτής μεταλλικής δεξαμενής

1.2.2.3 *Κέλυφος*

Για την κατασκευή του κελύφους υπάρχουν δύο μέθοδοι. Στην πρώτη χρησιμοποιούνται ειδικά σχεδιασμένοι γρύλοι που αγκυρώνονται στη βάση της

δεξαμενής και περιμετρικά αυτής στις θέσεις που θα συνδεθούν τα φύλλα των τοιχωμάτων. Όταν τοποθετηθούν τα πρώτα φύλλα, σχηματίζοντας ένα τμήμα του κελύφους, τοποθετείται στις κατακόρυφες μεταξύ τους συνδέσεις στεγανωτικό υλικό και στη συνέχεια κοχλιώνονται. Στο σημείο αυτό τα τμήματα της οροφής κοχλιώνονται και συνδέονται με το πρώτο αυτό τμήμα του κελύφους. Το κέντρο της οροφής υποστηρίζεται προσωρινά μέχρι να γίνει η κοχλίωση. Όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή της οροφής αφαιρείται η υποστήριξη και το σύνολο (οροφή και πρώτο τμήμα κελύφους) ανυψώνονται για να ακολουθήσει η κατασκευή των επόμενων τμημάτων. Όταν κατασκευαστεί το δεύτερο τμήμα οι γρύλλοι αποσυνδέονται από το πρώτο και συνδέονται στο δεύτερο ώστε να το ανυψώσουν στο επόμενο επίπεδο. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται και κάθε τμήμα κοχλιώνεται στο προηγούμενο μέχρι να κατασκευαστεί και το κατώτερο τμήμα του κελύφους. Με αυτή τη μέθοδο έχουν κατασκευαστεί επιτυχώς δεξαμενές μέχρι και ύψους 36.50m .

Στη δεύτερη μέθοδο κατασκευής του κελύφους χρησιμοποιούνται εξωτερικά ικριώματα, αντί γρύλλοι, τα οποία μεταφέρονται διαδοχικά από τμήμα σε τμήμα του κελύφους ώστε να χρησιμοποιείται ο ελάχιστος αριθμός τους καλύπτοντας όλη την περίμετρο της δεξαμενής.

1.2.2.4 Οροφή

Υπάρχουν τουλάχιστον τρεις τύποι οροφών που κατασκευάζονται στην περίπτωση των κοχλιωτών δεξαμενών: αυτοστηριζόμενη οροφή, κεντρικά στηριζόμενη και αυτοστηριζόμενη οροφή σε σχήμα θόλου από αλουμίνιο. Οι αυτοστηριζόμενες οροφές αποτελούνται από κομμάτια που στηρίζονται προσωρινά στο κέντρο μέχρι να τοποθετηθούν και να κοχλιωθούν μεταξύ τους. Οι κεντρικά στηριζόμενες οροφές στηρίζονται σε έναν πόλο που εκτείνεται από τη βάση μέχρι την οροφή. Συνήθως τοποθετούνται ακτινικές δοκοί για τη στήριξη της οροφής όπως φαίνεται στην εικόνα 1.9.

Οι αυτοστηριζόμενες οροφές από αλουμίνιο σε σχήμα θόλου αποτελούνται από τριγωνικό δικτύωμα με ράβδους διατομής διπλού ταυ το οποίο επικαλύπτεται από μη διαβρώσιμα πανέλα. Μπορούν να κατασκευαστούν στη τελική τους θέση πάνω στο τελευταίο τμήμα του κελύφους ή να κατασκευαστούν στο έδαφος και στη συνέχεια να τοποθετηθούν στη θέση τους ως ενιαίο τμήμα.



Εικόνα 1.9 Κεντρικά στηριζόμενη οροφή



Εικόνα 1.10 Οροφή αλουμινίου σε σχήμα θόλου

1.3 Ανάλυση περιεχομένων κεφαλαίων

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία περιλαμβάνει τέσσερα κεφάλαια. Το κεφάλαιο 1 Εισαγωγή – Γενικά περί δεξαμενών και τρία επιπλέον κεφάλαια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή των δράσεων που πρέπει να ληφθούν υπόψη σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς κατά το σχεδιασμό των κατακόρυφων μεταλλικών δεξαμενών.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι απαιτούμενοι έλεγχοι επάρκειας των μεταλλικών δεξαμενών σύμφωνα με το EN1993 μέρος 1-6 που αφορά στη αντοχή και ευστάθεια κελυφών και το μέρος 4-2 που αναφέρεται στις δεξαμενές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι σεισμικές αναλύσεις που έγιναν σε μία συγκεκριμένη δεξαμενή με το λογισμικό πεπρασμένων στοιχείων Abaqus και δίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών.

Δράσεις επί των Δεξαμενών

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι δράσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη, σύμφωνα με τις ισχύουσες κανονιστικές διατάξεις, για τον σχεδιασμό κατακόρυφων επίγειων μεταλλικών δεξαμενών.

2.2 Δράσεις Ανέμου

2.2.1 Γενικά

Για τον υπολογισμό της ανεμοπίεσης χρησιμοποιείται το EN 1991 Μέρος 1-4 το οποίο περιέχει κανόνες και μεθόδους υπολογισμού των φορτίων ανέμου επί των κατασκευών και των επιμέρους στοιχείων τους και των προσαρτημάτων τους για ύψη μέχρι 200 m .

Τα φορτία ανέμου κατατάσσονται στις μεταβλητές καθορισμένες δράσεις. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ταυτόχρονη επιρροή και άλλων δράσεων επί της

κατασκευής, που είναι δυνατό να επιφέρουν αλλαγές στην επιφάνεια αναφοράς ή σε κάποιους συντελεστές, καθώς επίσης και αλλαγές του σχήματος κατά τη φάση της κατασκευής, που θα μπορούσαν να αλλάξουν την εξωτερική και εσωτερική πίεση ή τα δυναμικά χαρακτηριστικά.

Επιτρέπεται, πέραν της μεθοδολογίας που προτείνεται στο Μέρος αυτό, να χρησιμοποιούνται εναλλακτικές μέθοδοι, εφόσον βασίζονται σε αναλυτικές και αριθμητικές τεχνικές που έχουν επαληθευτεί, καθώς και σε μετρήσεις επί τόπου αλλά και σε πειραματικά αποτελέσματα μέσα σε τούνελ αέρα, όπου η προσομοίωση του ανέμου και του περιβάλλοντος την κατασκευή χώρου έχει γίνει με επαρκή ακρίβεια.

2.2.2 Εξωτερική Πίεση w_e

Η πίεση του ανέμου η οποία δρα κάθετα στις εξωτερικές επιφάνειες μιας κατασκευής προκύπτει από τη σχέση:

$$w_e = q_p(z_e) * c_{pe} \quad (2.1)$$

Όπου

$q_p(z_e)$ είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής

z_e είναι το ύψος αναφοράς για την εξωτερική πίεση και

c_{pe} είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης.

2.2.3 Πίεση ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$

Η πίεση ταχύτητας αιχμής σε ύψος z_i , η οποία περιλαμβάνει μέσες και μικρής διάρκειας διακυμάνσεις ταχύτητας, προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$q_p(z) = \left[1 + 7 * I_v(z)\right] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) = c_e(z) * q_b \quad (2.2)$$

όπου:

ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, που εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και τη βαρομετρική πίεση που αναμένονται σε μια περιοχή κατά

τη διάρκεια ανεμοθύελλας ($\rho = 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)

$I_v(z)$ είναι η ένταση του στροβιλισμού σε ύψος z

$c_e(z)$ είναι ο συντελεστής έκθεσης και δίνεται από τη σχέση:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (2.3)$$

q_b είναι η βασική πίεση που δίνεται από τη σχέση:

$$q_b = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2 \quad (2.4)$$

όπου :

v_b είναι η βασική ταχύτητα ανέμου, που ορίζεται ως συνάρτηση της διεύθυνσης του ανέμου και της εποχής του έτους, στα 10m πάνω από έδαφος κατηγορίας II, σύμφωνα με τη σχέση:

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} \quad (2.5)$$

Στη σχέση αυτή είναι:

c_{dir} είναι ο συντελεστής διεύθυνσης (ίσος με 1.0)

c_{season} είναι ο συντελεστής εποχής (ίσος με 1.0)

$v_{b,0}$ είναι η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου, η οποία είναι η χαρακτηριστική μέση ταχύτητα του ανέμου 10 λεπτών, ανεξάρτητα από τη διεύθυνσή του και της εποχής του έτους στα 10m πάνω από το έδαφος, σε ανοικτή περιοχή με χαμηλή βλάστηση, όπως γρασίδι και με μεμονωμένα εμπόδια ανά αποστάσεις μεταξύ τους τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων (έδαφος κατηγορίας II).

Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα, η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου $v_{b,0}$ για τη χώρα μας ορίζεται σε $33 \frac{m}{sec}$ για τα νησιά και τα παράλια μέχρι 10km από την ακτή και σε $27 \frac{m}{sec}$ για την υπόλοιπη χώρα.

Η μέση ταχύτητα ανέμου $v_m(z)$, σε ύψος z πάνω από το έδαφος, εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και τη τοπογραφική διαμόρφωση, προσδιορίζεται δε από τη σχέση:

$$v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b \quad (2.6)$$

όπου:

$c_r(z)$ είναι ο συντελεστής τραχύτητας

$c_0(z)$ είναι ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης (προτεινόμενη τιμή 1.0)

Η ένταση του στροβιλισμού $I_v(z)$ σε ύψος z υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) * \ln(z/z_0)} \quad \text{για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (2.7)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{για } z \leq z_{\min}$$

όπου:

k_1 είναι ο συντελεστής στροβιλισμού (ίσος με 1.0)

Για επίπεδο έδαφος όπου $c_0(z) = 1$, ο συντελεστής έκθεσης $c_e(z)$ δίνεται από το διάγραμμα στο Σχήμα 2.1 ως συνάρτηση του ύψους z πάνω από το έδαφος και της κατηγορίας εδάφους.

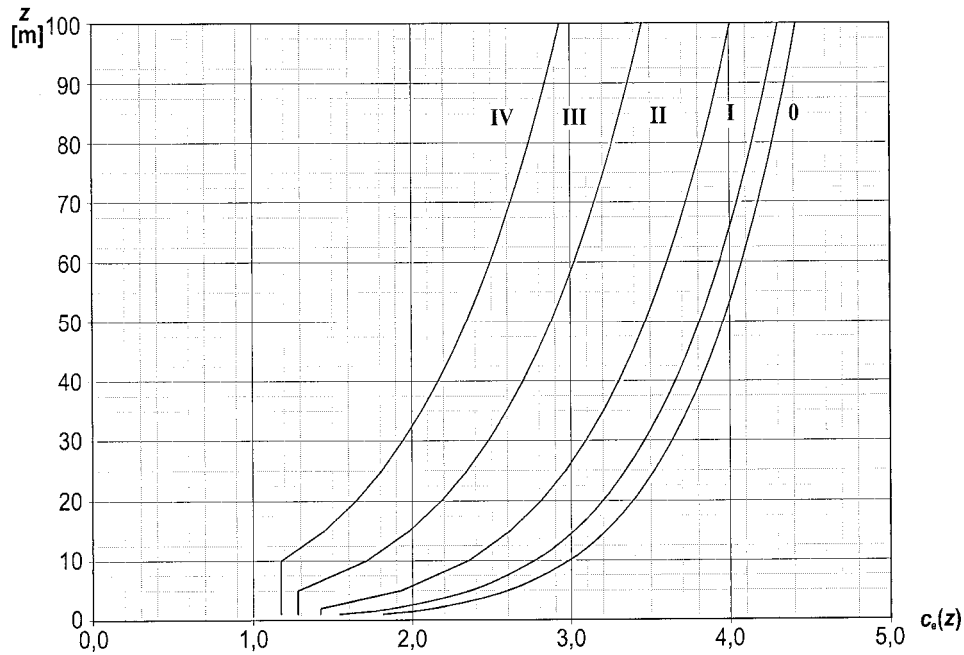
2.2.4 Δυνάμεις ανέμου

Η συνολική δύναμη του ανέμου F_w , η οποία επενεργεί επί μίας κατασκευής ή ενός επιμέρους στοιχείου της, θα προσδιορίζεται είτε με υπολογισμό δυνάμεων χρησιμοποιώντας τους συντελεστές δύναμης, είτε με υπολογισμό δυνάμεων από τις πιέσεις επί των επιφανειών από τη σχέση:

$$F_w = c_s c_d * c_f * q_p(z_e) * A_{ref} \quad (2.8)$$

όπου:

$c_s c_d$ είναι ο δυναμικός συντελεστής



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα συντελεστή έκθεσης $c_e(z)$ για $c_0 = 1.0$ και $k_1 = 1.0$

c_f είναι ο συντελεστής δύναμης για την κατασκευή ή το στοιχείο κατασκευής

$q_p(z_e)$ είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής σε ύψος αναφοράς z_e

A_{ref} είναι η επιφάνεια αναφοράς της κατασκευής ή του στοιχείου της κατασκευής, μετρούμενη γενικά ως η προβολή της κατασκευής σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση του ανέμου.

2.2.5 Συντελεστής τραχύτητας

Ο συντελεστής τραχύτητας $c_r(z)$ λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα της μέσης ταχύτητας ανέμου στη θέση της κατασκευής λόγω του ύψους πάνω από το έδαφος και λόγω της τραχύτητας του εδάφους της προσήνεμης περιοχής στη θεωρούμενη διεύθυνση του ανέμου, υπολογίζεται δε συναρτήσει του ύψους z με τις ακόλουθες λογαριθμικές σχέσεις:

$$c_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} = 200 \text{ m}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) = k_r * \ln\left(\frac{z_{\min}}{z_0}\right) \quad \text{για } z \leq z_{\min}$$
(2.9)

όπου

$$k_r = 0.19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} \quad (\text{συντελεστής εδάφους}) \quad (2.10)$$

Στις σχέσεις αυτές:

z_0 είναι το μήκος τραχύτητας σε m , όπως ορίζεται στον Πίνακα 2.1

$z_{0,II} = 0.05 \text{ m}$ (κατηγορία εδάφους II , Πίνακας 2.1)

z_{\min} είναι το ελάχιστο ύψος που ορίζεται στον Πίνακα 2.1

z_{\max} λαμβάνεται ίσο προς 200 m .

Η σχέση 2.9 ισχύει όταν το έδαφος στη διεύθυνση του ανέμου έχει ομοιόμορφη τραχύτητα σε αρκετά μεγάλο μήκος, ώστε να μπορεί να θεωρείται σταθερή η κατηγορία του εδάφους,

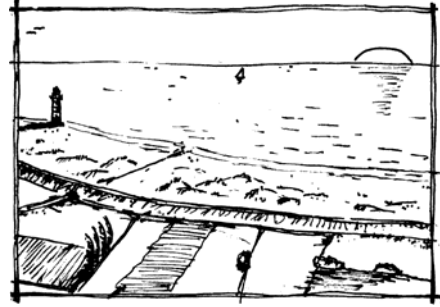
Προτεινόμενες τιμές για τα z_0 και z_{\min} δίνονται στον Πίνακα 2.1 για πέντε αντιπροσωπευτικές κατηγορίες εδάφους.

Πίνακας 2.1 Κατηγορίες εδάφους και παράμετροι εδάφους

Κατηγορία Εδάφους	z_0 m	z_{\min} m
0 Θάλασσα ή παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα	0.003	1
I Λίμνες ή επίπεδες και οριζόντιες περιοχές με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια	0.01	1
II Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων	0.05	2
III Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή με κτίρια ή με μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)	0.3	5
IV Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15m.	1.0	10

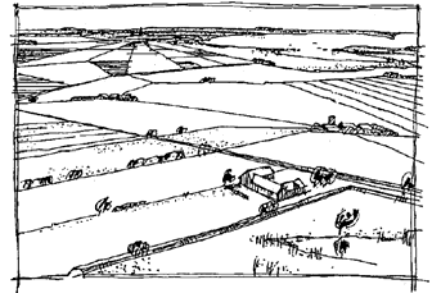
Κατηγορία Εδάφους 0

Θάλασσα, παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα



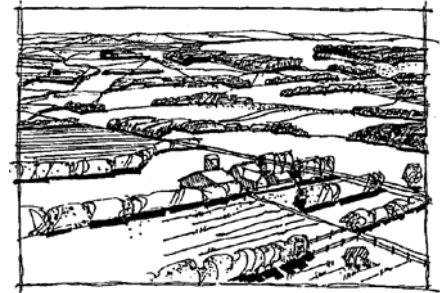
Κατηγορία Εδάφους I

Λίμνες ή περιοχή με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια



Κατηγορία Εδάφους II

Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων



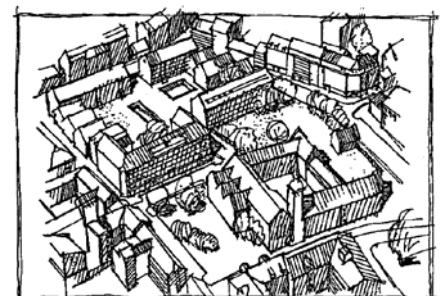
Κατηγορία Εδάφους III

Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή με κτίρια ή με μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)



Κατηγορία Εδάφους IV

Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15m.



Σχήμα 2.2 Απεικονίσεις της ανώτερης τραχύτητας κάθε κατηγορίας εδάφους

2.2.6 Ανεμοπίεση σε κατακόρυφες κυλινδρικές επιφάνειες

Οι συντελεστές πίεσης των διατομών εξαρτώνται από τον αριθμό Reynolds, ο οποίος είναι ίσος με:

$$Re = \frac{b * v(z_e)}{\nu} \quad (2.11)$$

όπου:

b είναι η διάμετρος του κυλίνδρου

ν είναι το κινηματικό ιξώδες του αέρα ($\nu = 15 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$)

$v(z_e)$ είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z_e .

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe} κυκλικών κυλίνδρων προσδιορίζονται από τη σχέση:

$$c_{pe} = c_{p,0} * \Psi_{\lambda\alpha} \quad (2.12)$$

όπου:

$c_{p,0}$ είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης χωρίς ροή ελευθέρων άκρων

$\Psi_{\lambda\alpha}$ είναι ο συντελεστής επίδρασης άκρων.

Ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης $c_{p,0}$ δίνεται στο Σχήμα 2.3 για διάφορους αριθμούς Reynolds, ως συνάρτηση της γωνίας α .

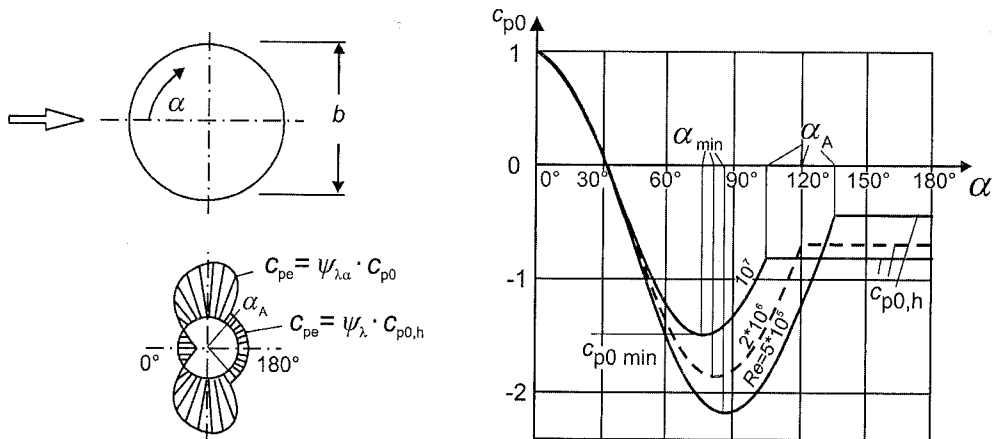
Ο συντελεστής επίδρασης άκρων $\Psi_{\lambda\alpha}$ δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \Psi_{\lambda\alpha} &= 1 && \text{για } 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\min} \\ \Psi_{\lambda\alpha} &= \Psi_\lambda + (1 - \Psi_\lambda) * \cos\left(\frac{\pi}{2} * \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}}\right)\right) && \text{για } \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_A \\ \Psi_{\lambda\alpha} &= \Psi_\lambda && \text{για } \alpha_A \leq \alpha \leq 180^\circ \end{aligned} \quad (2.13)$$

όπου:

α_A είναι η θέση διαχωρισμού (βλέπε Σχήμα 2.3)

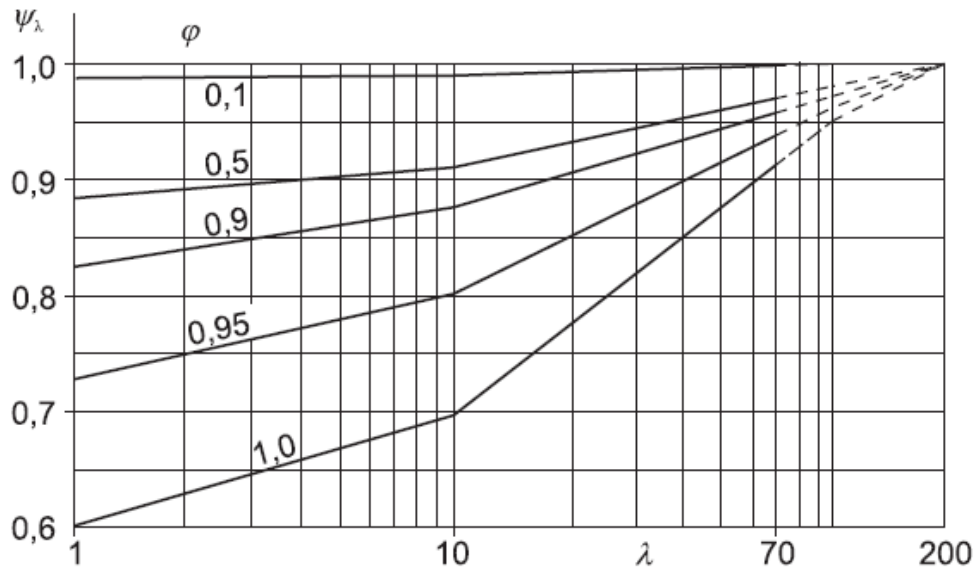
Ψ_λ είναι ο συντελεστής επίδρασης των άκρων.



Σχήμα 2.3 Κατανομή πιέσεων σε κυκλικούς κυλίνδρους για διάφορους αριθμούς Reynolds, χωρίς επίδραση των άκρων

Πίνακας 2.2 Προτεινόμενες τιμές του λ για κυλίνδρους, πολυγωνικές διατομές ορθογωνικές διατομές, πινακίδες σήμανσης, διατομές με αιχμηρές ακμές και δικτυωτές κατασκευές

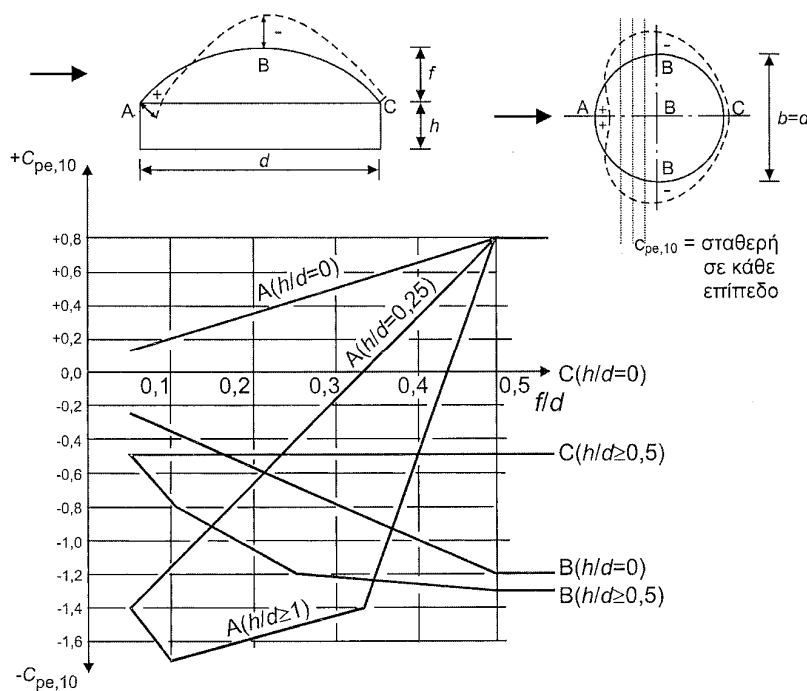
No.	Θέση της κατασκευής, άνεμος κάθετα στο επίπεδο της σελίδας	Ενεργός λυγηρότητα λ
1		Για πολυγωνικές, ορθογωνικές και διατομές με αιχμηρές γωνίες: για $\ell \geq 50 \text{ m}$, $\lambda = 1,4 \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο
2		για $\ell < 15 \text{ m}$, $\lambda = 2 \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο Για κυκλικούς κυλίνδρους: για $\ell \geq 50$, $\lambda = 0,7 \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο για $\ell < 15 \text{ m}$, $\lambda = \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο
3		Για ενδιάμεσες τιμές του ℓ , θα χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή
4		για $\ell \geq 50 \text{ m}$, $\lambda = 0,7 \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μεγαλύτερο για $\ell < 15 \text{ m}$, $\lambda = \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μεγαλύτερο Για ενδιάμεσες τιμές του ℓ , θα χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή



Σχήμα 2.4 Συντελεστής επίδρασης άκρων ψ_λ ως συνάρτηση του συντελεστή πληρότητας ϕ και της λυγηρότητας λ

2.2.7 Ανεμοπίεση σε θόλους

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης σε θόλους δίνονται στο Σχήμα 2.5. Το ύψος αναφοράς θα λαμβάνεται ίσο με: $z_e = h + f$



Σχήμα 2.5 Συντελεστές εξωτερικής πίεσης $c_{pe,10}$ για θόλους με κυκλική βάση

2.3 Δράσεις Χιονιού

2.3.1 Γενικά

Το EN 1991-1-3 παρέχει οδηγίες για τον προσδιορισμό των φορτίων λόγω χιονιού που θα χρησιμοποιούνται κατά την μελέτη κτιρίων και λοιπών τεχνικών έργων. Αυτό το Μέρος δεν ισχύει για τοποθεσίες με υψόμετρο μεγαλύτερο των 1500m εκτός αν ορίζεται διαφορετικά.

2.3.2 Φορτίο χιονιού σε στέγες

Το φορτίο χιονιού σε μια στέγη προσδιορίζεται από τις σχέσεις:

α. Για καταστάσεις διάρκειας ή παροδικές :

$$s = \mu_i * C_e * C_t * s_k \quad (2.14)$$

β. Για τυχηματικές καταστάσεις:

$$s = \mu_i * C_e * C_t * s_{Ad} \quad (2.15)$$

όπου:

μ_i είναι ο συντελεστής μορφής φορτίου χιονιού

s_k είναι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους

C_e είναι ο συντελεστής έκθεσης, ο οποίος για κανονικές συνθήκες λαμβάνεται ίσος με 1. Συνιστώμενες τιμές για άλλες συνθήκες είναι:

- Για έκθεση σε ισχυρούς ανέμους $C_e = 0.8$
- Για κατασκευές προστατευμένες (από κτίρια ή δένδρα) $C_e = 1.2$

C_t είναι ο θερμικός συντελεστής, ο οποίος είναι συνήθως ίσος με 1 για κανονικές συνθήκες θερμικής μόνωσης της στέγης. Μπορεί να επιτρέπονται μικρότερες τιμές, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή της απώλειας θερμότητας μέσω της στέγης.

$s_{Ad} = C_{esl} * s_k$ είναι η τιμή σχεδιασμού του φορτίου χιονιού επί του εδάφους (συντελεστής για εξαιρετικά φορτία χιονιού $C_{esl} = 2.0$)

Το φορτίο s θεωρείται ότι ενεργεί κατακόρυφα και αναφέρεται στην οριζόντια προβολή της στέγης.

Για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι τιμές του s_k για περίοδο επαναφοράς 50 ετών δίνονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3 Σχέσεις υψομέτρου – φορτίου χιονιού

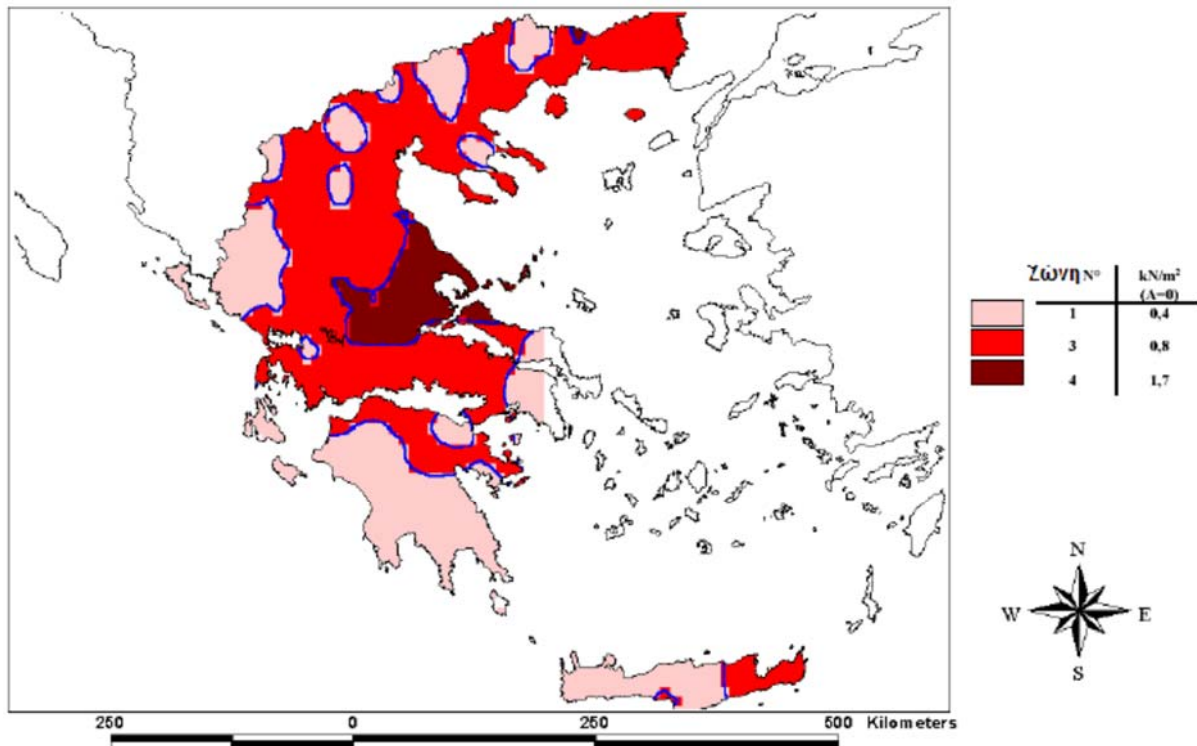
<i>Κλιματική Περιοχή</i>	<i>Έκφραση</i>
Αλπική περιοχή	$s_k = (0.642 * Z + 0.009) * \left[1 + \left(\frac{A}{728} \right)^2 \right]$
Κεντρική Ανατολική	$s_k = (0.264 * Z - 0.002) * \left[1 + \left(\frac{A}{256} \right)^2 \right]$
Ελλάς	$s_k = (0.420 * Z - 0.030) * \left[1 + \left(\frac{A}{917} \right)^2 \right]$
Ιβηρική χερσόνησος	$s_k = (0.190 * Z - 0.095) * \left[1 + \left(\frac{A}{524} \right)^2 \right]$
Μεσογειακή περιοχή	$s_k = (0.498 * Z - 0.209) * \left[1 + \left(\frac{A}{452} \right)^2 \right]$
Κεντρική Δυτική	$s_k = 0.164 * Z - 0.082 + \frac{A}{966}$
Σουηδία, Φιλανδία	$s_k = 0.790 * Z + 0.375 + \frac{A}{336}$
Ηνωμένο Βασίλειο, Δημοκρατία της Ιρλανδίας	$s_k = 0.140 * Z - 0.1 + \frac{A}{501}$

s_k είναι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους $[kN/m^2]$

A είναι το υψόμετρο της περιοχής πάνω από το επίπεδο της θάλασσας $[m]$

Z είναι ο αριθμός ζώνης που δίνεται στο χάρτη

Για την Ελλάδα το φορτίο χιονιού στο επίπεδο της θάλασσας καθώς και ο καθορισμός των ζωνών φαίνονται στο Σχήμα 2.6



Σχήμα 2.6 Φορτίο Χιονιού στο επίπεδο της θάλασσας και καθορισμός ζωνών

2.3.3 Συντελεστές φορτίου χιονιού

Για τον προσδιορισμό των αντίστοιχων συντελεστών μορφής λαμβάνονται υπόψη δύο μορφές κατανομής φορτίου:

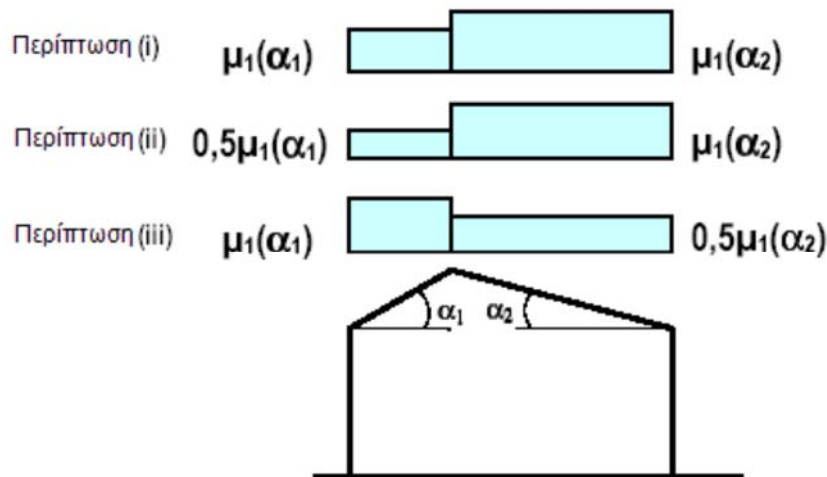
- ❖ Η πρώτη μορφή προκύπτει από μια ομοιόμορφη κατανομή του χιονιού πάνω σε ολόκληρη τη στέγη, εάν το χιόνι πέφτει με μικρή πνοή ανέμου.
- ❖ Η δεύτερη μορφή προκύπτει από μια αρχική ασύμμετρη κατανομή, ή από τοπική συγκέντρωση σε εμπόδια, ή από ανακατανομή του χιονιού που επηρεάζει την κατανομή του φορτίου στο σύνολο της στέγης (π.χ. χιόνι που μεταφέρεται από την προσήνεμη στην υπήνεμη πλευρά της στέγης).

Οι προβλεπόμενες διατάξεις για το συντελεστή μορφής φορτίου χιονιού σε δικλινείς στέγες φαίνονται στο Σχήμα 2.7.

Οι συντελεστές μορφής δίνονται στον Πίνακα 2.4 για διάφορες τιμές της γωνίας α της στέγης, όταν η ολίσθηση του χιονιού δεν παρεμποδίζεται. Εάν προβλέπεται στο χαμηλότερο άκρο της στέγης κάποιο κιγκλίδωμα ή στηθαίο ή άλλο εμπόδιο, ο συντελεστής μορφής δεν θα πρέπει να μειώνεται κάτω του 0.8.

Πίνακας 2.4 Συντελεστές μορφής φορτίου χιονιού

Κλίση Στέγης α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0.8	$0.8 * (60 - \alpha) / 30$	0.0
μ_2	$0.8 + 0.8 * \alpha / 30$	1.6	-

**Σχήμα 2.7** Συντελεστές σχήματος φορτίου χιονιού σε δικλινείς στέγες

2.3.4 Φορτίο χιονιού σε κιγκλιδώματα ασφαλείας ή σε εμπόδια

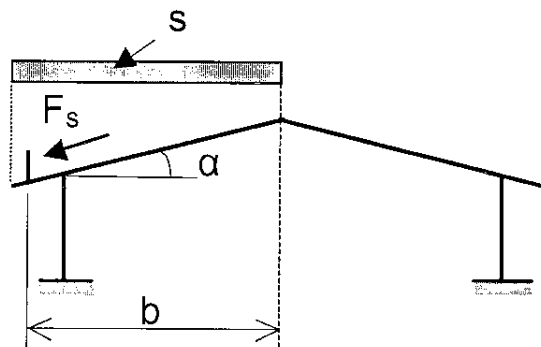
Το φορτίο F_s μιας ολισθαίνουσας μάζας χιονιού σε κεκλιμένες ή καμπύλες στέγες, το οποίο ενεργεί επί ειδικών κιγκλιδωμάτων ασφαλείας, που τοποθετούνται στις άκρες των στεγών ή επί των πιθανών εμποδίων, δίνεται από τη σχέση:

$$F_s = s * b * \sin \alpha \quad (2.16)$$

όπου:

- s το δυσμενέστερο δυνατό φορτίο χιονιού στρώματος σταθερού πάχους που αναλογεί στην επιφάνεια της στέγης από την οποία το χιόνι θα μπορούσε να ολισθήσει
- b είναι η οριζόντια απόσταση από το κιγκλιδωμά ή το εμπόδιο έως τον κορφιά (Σχήμα 2.8)

α είναι η κλίση της στέγης ως προς την οριζόντιο



Σχήμα 2.8 Φορτίο χιονιού F_s σε κιγκλίδωμα ασφαλείας

2.4 Υδροστατικές πιέσεις

Η πίεση p που ασκείται από το περιεχόμενο υγρό στα τοιχώματα της δεξαμενής μεταβάλλεται γραμμικά με το βάθος από την ελεύθερη επιφάνεια του περιεχομένου υγρού και προκύπτει από τη σχέση:

$$p(z) = \gamma * z \quad (2.17)$$

όπου:

γ είναι το ειδικό βάρος του υγρού

z είναι το βάθος από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού

Η πυκνότητα των διάφορων υγρών που μπορεί να αποθηκεύονται στις δεξαμενές δίνονται στον Πίνακα Α.10 του EN 1991-1-1.

2.5 Σεισμικές δράσεις

2.5.1 Γενικά

Στο Παράρτημα Α του EN 1998 μέρος 4 παρέχονται πληροφορίες σχετικά με διαδικασίες της σεισμικής ανάλυσης για δεξαμενές που υπόκεινται σε οριζόντια ή κατακόρυφη σεισμική δράση, και έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- α) είναι κυλινδρικού σχήματος, με κατακόρυφο άξονα και κυκλική ή ορθογωνική διατομή

- β) έχουν άκαμπτο ή εύκαμπτο θεμέλιο
- γ) έχουν πλήρη ή μερική αγκύρωση στη θεμελίωση

Μια εμπειριστατωμένη ανάλυση του φαινομένου της δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ της κίνησης του περιεχόμενου ρευστού, της παραμόρφωσης των τοιχωμάτων της δεξαμενής και του υποκείμενου εδάφους θεμελίωσης, συμπεριλαμβανομένης της ενδεχόμενης ανύψωσης της δεξαμενής, είναι ένα πρόβλημα ανάλυσης σημαντικής πολυπλοκότητας για το οποίο απαιτείται ασυνήθιστα υψηλό υπολογιστικό κόστος.

Αρκετές διαδικασίες ανάλυσης έχουν προταθεί, οι οποίες ισχύουν για συγκεκριμένες καταστάσεις σχεδιασμού. Δεδομένου ότι η ακρίβειά τους είναι εξαρτώμενη από το εκάστοτε πρόβλημα που εξετάζεται, η σωστή επιλογή της εκάστοτε μεθόδου απαιτεί ένα εξειδικευμένες γνώσεις από το σχεδιαστή.

Προσοχή απαιτείται στην σημασία ενός ενιαίου επιπέδου ακρίβειας σε όλη τη διαδικασία σχεδιασμού: δεν θα είναι συνεπές, για παράδειγμα, να χρησιμοποιηθεί μια ακριβής λύση για τον προσδιορισμό των υδροδυναμικών πιέσεων, και στη συνέχεια να μην χρησιμοποιηθεί ένα αντίστοιχα εκλεπτυσμένο μηχανικό μοντέλο της δεξαμενής (π.χ. ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων) για την αξιολόγηση των τάσεων λόγω των πιέσεων.

2.5.2 Κατακόρυφες άκαμπτες κυκλικές δεξαμενές πακτωμένες στη θεμελίωση

2.5.2.1 Οριζόντια σεισμική δράση

Η κίνηση του περιεχομένου υγρού σε μια άκαμπτη κυλινδρική δεξαμενή εκφράζεται ως το άθροισμα δύο ξεχωριστών συνιστωσών, της ωστικής (impulsive) και της κυκλοφορούσας (convective). Η ωστική συνιστώσα ικανοποιεί τις συνοριακές συνθήκες στα τοιχώματα και στον πυθμένα της δεξαμενής αλλά δίνει (λανθασμένα, λόγω της πίεσης από τον κυματισμό στη δυναμική απόκριση) μηδενική πίεση στην αρχική θέση της ελεύθερης επιφάνειας υπό στατικές συνθήκες. Η ωστική συνιστώσα δεν μεταβάλλει αυτές τις συνοριακές συνθήκες, ενώ ικανοποιεί τη σωστή κατάσταση ισορροπίας στην ελεύθερη επιφάνεια. Για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου της δεξαμενής ορίζεται ένα κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων r , z , θ , με αρχή των συντεταγμένων στο κέντρο του πυθμένα όπου z είναι ο κατακόρυφος άξονας.

Το ύψος της αρχικής ελεύθερης επιφάνειας του υγρού από τη βάση και η ακτίνα της δεξαμενής συμβολίζονται με H και R , αντίστοιχα, ρ είναι η πυκνότητα της μάζας του ρευστού, ενώ $\xi = r/R$ και $\zeta = z/H$ είναι οι αδιάστατες συντεταγμένες.

Ωστική Συνιστώσα

Η τιμή της ωστικής πίεσης σε κάθε θέση του υγρού στο χρόνο t δίνεται από τη σχέση:

$$p_i(\xi, \zeta, \theta, t) = C_i(\xi, \zeta) * \rho * H * \cos(\theta) * A_g(t) \quad (2.18)$$

όπου:

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

στην οποία:

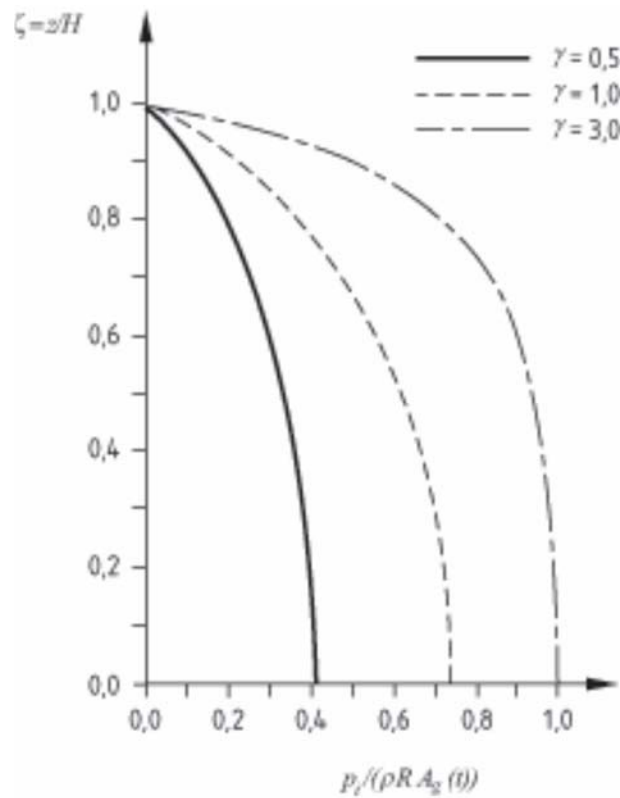
$$\nu_n = \frac{2 * n + 1}{2} * \pi$$

$$\gamma = H/R$$

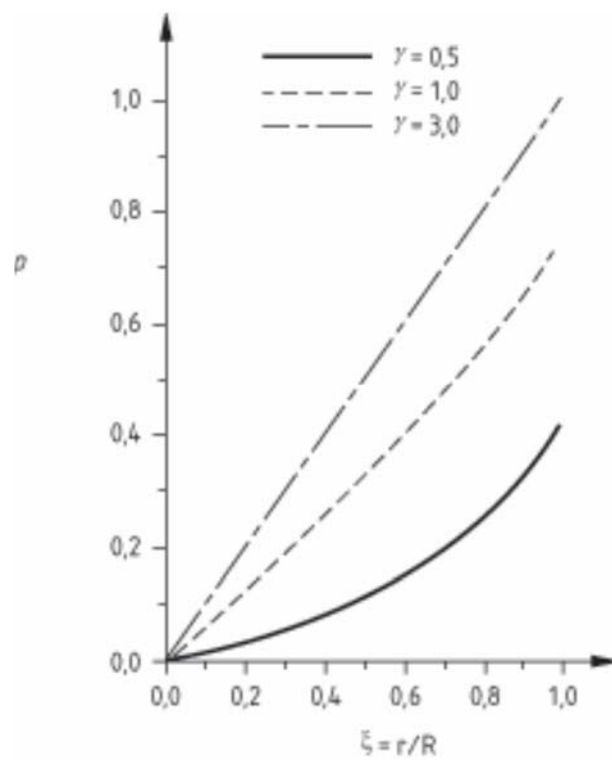
$I_1(\cdot)$ και $I_1'(\cdot)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτης τάξης και η παράγωγός της αντίστοιχα

$A_g(t)$ είναι η χρονοϊστορία της εδαφικής επιτάχυνσης (με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση α_g)

Η συνάρτηση $C_i(\xi, \zeta)$ δίνει την κατανομή καθ' ύψος της πίεσης p_i . Η ωστική πίεση (κανονικοποιημένη ως προς $r * R * \alpha_g$) στα τοιχώματα της δεξαμενής ($\xi = 1$) και στο επίπεδο της οριζόντιας σεισμικής διέγερσης ($\cos(\theta) = 1$) σε συνάρτηση με την κατακόρυφη απόσταση από τον πυθμένα, φαίνεται στο σχήμα 2.9 για τρεις τιμές του λόγου γ . Στο σχήμα 2.10 φαίνεται και η κατανομή της ωστικής πίεσης p_i στον πυθμένα της δεξαμενής ως συνάρτηση του λόγου γ . Για μεγάλες τιμές του λόγου γ η κατανομή της πίεσης στον πυθμένα της δεξαμενής γίνεται γραμμική.



Σχήμα 2.9 Καθ' ύψος μεταβολή της ωστικής πίεσης για τρεις τιμές του λόγου $\gamma = H/R$



Σχήμα 2.10 Ακτινική μεταβολή της ωστικής πίεσης στον πυθμένα της δεξαμενής για τρεις τιμές του λόγου $\gamma = H/R$

Η τέμνουσα βάσης λόγω της ωστικής συνιστώσας δίνεται από τη σχέση:

$$Q_i(t) = m_i * A_g(t) \quad (2.19)$$

Όπου m_i είναι η μάζα του υγρού που κινείται μαζί με τα τοιχώματα της δεξαμενής, ονομάζεται ωστική μάζα και δίνεται από τη σχέση:

$$m_i = m * 2 * \gamma * \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_1(\nu_n/\gamma)}{\nu_n^3 * I_1'(\nu_n/\gamma)} \quad (2.20)$$

Στη σχέση (2.20) $m = \rho * \pi * R^2 * H$ είναι η συνολική μάζα του περιεχομένου υγρού.

Η συνολική ροπή περί τον κάθετο άξονα στη διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης M_i' , ακριβώς κάτω από τον πυθμένα της δεξαμενής περιλαμβάνει τη συνεισφορά των πιέσεων στα τοιχώματα της δεξαμενής και των πιέσεων στον πυθμένα αυτής. Η συνολική ροπή M_i αμέσως πάνω από τον πυθμένα της δεξαμενής περιλαμβάνει μόνο τη συνεισφορά των πιέσεων στα τοιχώματα της δεξαμενής.

Η ωστική ροπή αμέσως κάτω από τη βάση της δεξαμενής δίνεται από τη σχέση:

$$M_i'(t) = m_i * h_i' * A_g(t) \quad (2.21)$$

όπου:

$$h_i'(t) = H * \frac{\frac{1}{2} + 2 * \gamma * \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\nu_n + 2 * (-1)^{n+1} I_1(\nu_n/\gamma)}{\nu_n^4 * I_1'(\nu_n/\gamma)}}{2 * \gamma * \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_1(\nu_n/\gamma)}{\nu_n^3 * I_1'(\nu_n/\gamma)}} \quad (2.22)$$

Η ωστική ροπή αμέσως πάνω από τη βάση της δεξαμενής δίνεται από τη σχέση:

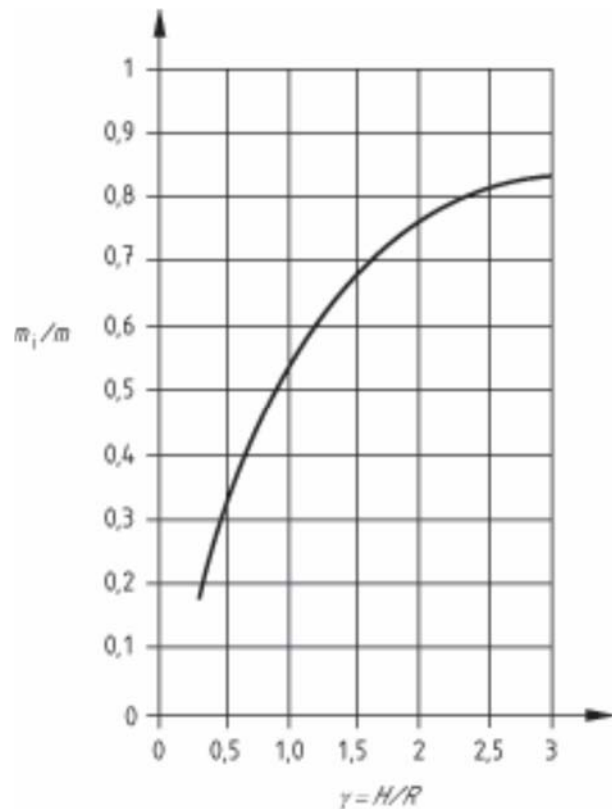
$$M_i(t) = m_i * h_i * A_g(t) \quad (2.23)$$

όπου:

$$h_i(t) = H * \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n I_1(\nu_n/\gamma)}{\nu_n^4 * I_1'(\nu_n/\gamma)} * (\nu_n * (-1)^n - 1)}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_1(\nu_n/\gamma)}{\nu_n^3 * I_1'(\nu_n/\gamma)}} \quad (2.24)$$

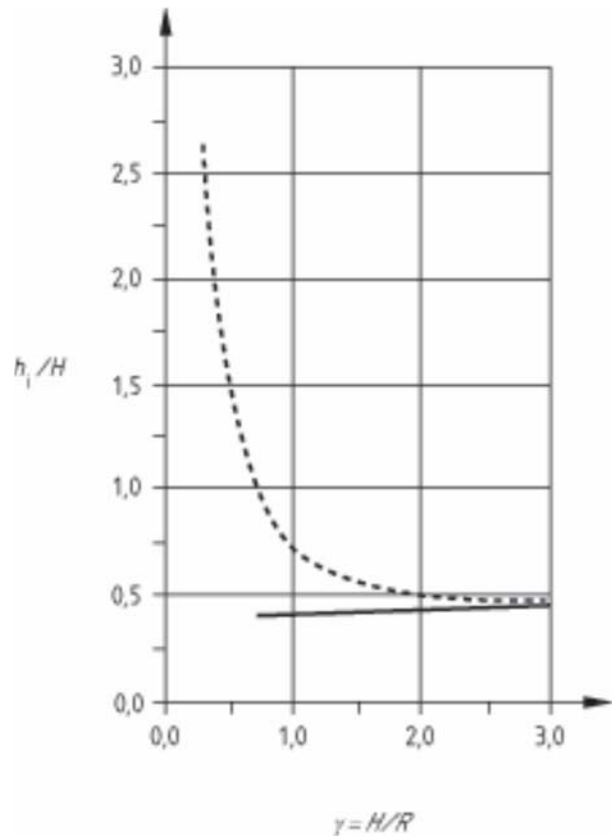
Στο σχήμα 2.11 φαίνεται η κανονικοποιημένη ωστική μάζα m_i ως προς τη συνολική μάζα m του περιεχομένου υγρού συναρτήσει του λόγου $\gamma = H/R$.

Η ωστική μάζα αυξάνει όσο αυξάνει ο λόγος γ τείνοντας ασυμπτωτικά στη συνολική μάζα του περιεχομένου υγρού



Σχήμα 2.11 Λόγος m_i/m ως συνάρτηση του λόγου $\gamma = H/R$

Στο σχήμα 2.12 φαίνονται οι κανονικοποιημένοι συντελεστές h_i και h'_i ως προς το ύψος H του περιεχομένου υγρού συναρτήσει του λόγου $\gamma = H/R$. Οι συντελεστές αυτοί τείνουν να σταθεροποιηθούν σε τιμές γύρω από το μέσο ύψος του υγρού. Για «κοντόχοντρες» δεξαμενές ο συντελεστής h_i είναι λίγο μικρότερος από το μέσο ύψος του υγρού ενώ ο συντελεστής h'_i είναι σημαντικά μεγαλύτερος του ύψους H του υγρού λόγω της κυρίαρχης συνεισφοράς στη ροπή M'_i (ροπή αμέσως κάτω από τη βάση της δεξαμενής) της πίεσης στον πυθμένα.



Σχήμα 2.12 Λόγος h_1/H (συνεχής γραμμή) και h'_1/H (διακεκομμένη γραμμή) ως συνάρτηση του λόγου $\gamma = H/R$

Κυκλοφορούσα συνιστώσα

Η τιμή της κυκλοφορούσας συνιστώσας της πίεσης σε κάθε θέση του υγρού στο χρόνο t δίνεται από τη σχέση:

$$p_c(\xi, \zeta, \theta, t) = \rho \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n * \cosh(\lambda_n \gamma \zeta) * J_1(\lambda_n \xi) * \cos(\theta) * A_{cn}(t) \quad (2.25)$$

όπου:

$$\psi_n = \frac{2 * R}{(\lambda_n^2 - 1) * J_1(\lambda_n) * \cosh(\lambda_n \gamma)}$$

J_1 είναι η συνάρτηση Bessel πρώτης τάξης

$$\lambda_1 = 1.841, \lambda_2 = 5.331, \lambda_3 = 8.536$$

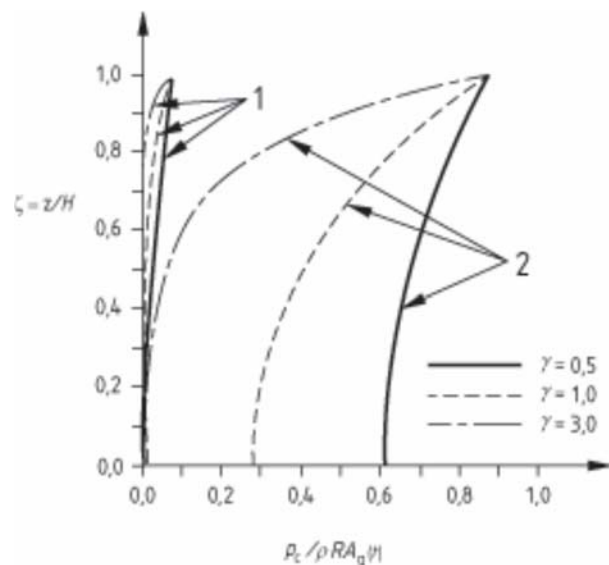
$A_{cn}(t)$ είναι η χρονοϊστορία της επιτάχυνσης ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή που έχει κυκλική συχνότητα ω_{cn} :

$$\omega_{cn} = \sqrt{g * \frac{\lambda_n}{R} * \tanh(\lambda_n \gamma)} \quad (2.26)$$

και συντελεστή απόσβεσης κατάλληλο για την κυματική απόκριση του υγρού.

Η συνολική πίεση λόγω της κυκλοφορούσας συνιστώσας είναι το άθροισμα απείρων ιδιομορφικών όρων, ο καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε μια κυματομορφή του ταλαντούμενου υγρού. Συνήθως αρκεί μόνο η πρώτη ιδιομορφή και συχνότητα για τους υπολογισμούς.

Η κατανομή των κυματικών πιέσεων σε συνάρτηση με το βάθος για τις δύο πρώτες ιδιομορφές φαίνεται στο σχήμα 2.13. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η συνεισφορά της 2ης ιδιομορφής είναι αμελητέα. Επίσης από το σχήμα αυτό είναι φανερό ότι σε δεξαμενές με μικρό λόγο γ (κοντόχοντρες) οι πιέσεις της κυκλοφορούσας συνιστώσας έχουν σημαντική τιμή στον πυθμένα της δεξαμενής ενώ σε δεξαμενές με μεγάλο λόγο γ (υψίκορμες) οι πιέσεις λόγω του κυματισμού περιορίζονται στην περιοχή της επιφάνειας του υγρού.



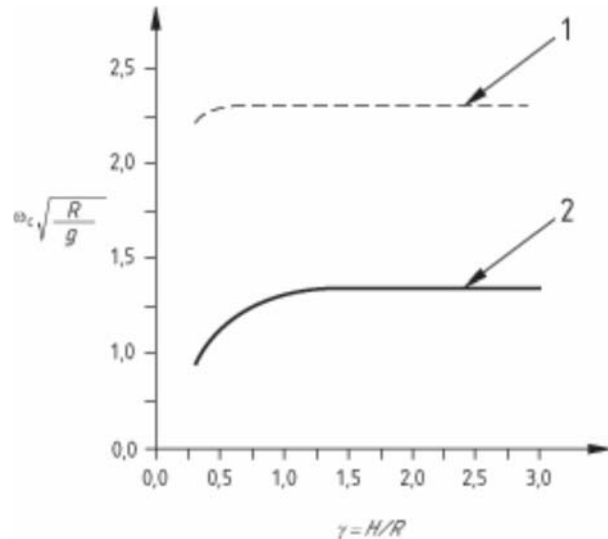
Σχήμα 2.13 Καθ' ύψος μεταβολή των πιέσεων της κυκλοφορούσας συνιστώσας των δύο πρώτων ιδιομορφών (1: 2^η ιδιομορφή, 2: 1^η ιδιομορφή)

Στο σχήμα 2.14 φαίνονται οι τιμές των δύο πρώτων ιδιοσυχνοτήτων του κυματισμού συναρτήσει του λόγου γ . Από το σχήμα αυτό είναι φανερό ότι οι ιδιοσυχνότητες του κυματισμού είναι σχεδόν ανεξάρτητες του λόγου γ όταν αυτός γίνεται μεγαλύτερος από περίπου 1.

Για τιμές του λόγου γ μεγαλύτερες από 1 η 1^η ιδιοσυχνότητα είναι περίπου ίση με:

$$\omega_{c1} = 4.2/\sqrt{R} \quad (R \text{ σε μέτρα}) \quad (2.27)$$

Η σχέση (2.27) για συνήθεις τιμές της ακτίνας R δίνει περιόδους κυματισμού της τάξης λίγων δευτερολέπτων.



Σχήμα 2.14 Τιμές των δύο πρώτων ιδιοσυχνοτήτων ως συνάρτηση του λόγου $\gamma = H/R$ (1: 2^η ιδιομορφή, 2: 1^η ιδιομορφή)

Η τέμνουσα βάσης λόγω του κυματισμού δίνεται από τη σχέση:

$$Q_c(t) = \sum_{n=1}^{\infty} m_{cn} * A_{cn}(t) \quad (2.28)$$

δηλαδή είναι το άθροισμα των δυνάμεων που συνεισφέρουν οι άπειροι ταλαντωτές με μάζα m_{cn} που είναι συνδεδεμένοι στην άκαμπτη δεξαμενή με ελατήρια ακαμψίας $K_n = \omega_n^2 * m_{cn}$ όταν το έδαφος υπόκειται σε οριζόντια διέγερση $A_g(t)$ και οι μάζες αποκρίνονται με επιτάχυνση $A_n(t)$.

όπου η n -οστή ιδιομορφική κυκλοφορούσα μάζα είναι:

$$m_{cn} = m * \frac{2 * \tanh(\lambda_n \gamma)}{\gamma * \lambda_n * (\lambda_n^2 - 1)}$$

Η ροπή της κυκλοφορούσας μάζας, αμέσως κάτω από τη βάση της δεξαμενής είναι:

$$M'_c(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (m_{cn} * A_{cn}(t)) * h'_{cn} = \sum_{n=1}^{\infty} Q_{cn}(t) * h'_{cn} \quad (2.29)$$

όπου το ύψος h'_{cn} που πρέπει να εφαρμοστεί ο ταλαντωτής για να προκύψει η τιμή της ροπής M'_{cn} είναι:

$$h'_{cn} = H * \left(1 + \frac{2 - \cosh(\lambda_n \gamma)}{\lambda_n \gamma \sinh(\lambda_n \gamma)} \right)$$

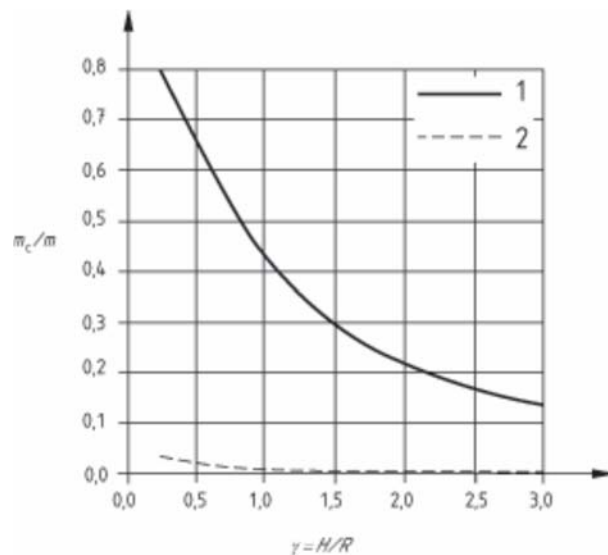
Η ροπή της κυκλοφορούσας μάζας, αμέσως πάνω από τη βάση της δεξαμενής είναι:

$$M'_c(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (m_{cn} * A_{cn}(t)) * h_{cn} = \sum_{n=1}^{\infty} Q_{cn}(t) * h_{cn} \quad (2.30)$$

όπου το ύψος h_{cn} που πρέπει να εφαρμοστεί ο ταλαντωτής για να προκύψει η τιμή της ροπής M'_{cn} είναι

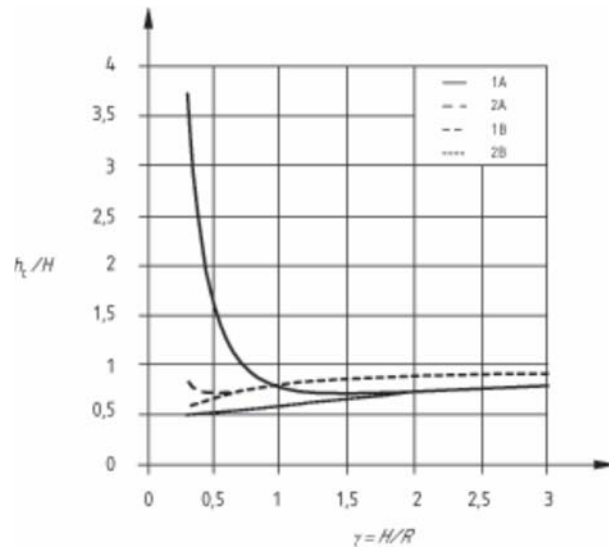
$$h_{cn} = H * \left(1 + \frac{1 - \cosh(\lambda_n \gamma)}{\lambda_n \gamma \sinh(\lambda_n \gamma)} \right)$$

Η μεταβολή της τιμής της κυκλοφορούσας μάζας για τις δύο πρώτες ιδιομορφές φαίνεται στο σχήμα 2.15



Σχήμα 2.15 Μεταβολή δύο πρώτων κυκλοφορούσων ιδιομορφικών μαζών ως συνάρτηση του λόγου $\gamma = H/R$ (1: 1^η ιδιομορφή, 2: 2^η ιδιομορφή)

Η μεταβολή των τιμών των h_{c1} , h_{c2} , h'_{c2} και h'_{c2} για τις δύο πρώτες ιδιομορφές φαίνεται στο σχήμα 2.16



Σχήμα 2.16 Μεταβολή των h_{c1} , h_{c2} , h'_{c2} και h'_{c2} ως συνάρτηση του λόγου $\gamma = H/R$

(1A: 1^η ιδιομορφή κάτω από τη βάση, 2A: 2^η ιδιομορφή κάτω από τη βάση

1B: 1^η ιδιομορφή πάνω από τη βάση, 2A: 2^η ιδιομορφή πάνω από τη βάση)

Το ύψος του κύματος λαμβάνοντας υπ' όψη την πρώτη ιδιομορφή είναι:

$$d_{\max} = 0.84 * R * S_e (T_{c1}) / g \quad (2.31)$$

όπου S_e είναι η ελαστική φασματική επιτάχυνση του υγρού που προκύπτει για κατάλληλη τιμή του συντελεστή απόσβεσης

Η χρονοϊστορία της ολικής πίεσης είναι άθροισμα των χρονοϊστοριών της ωστικής πίεσης (που εξαρτάται από την επιτάχυνση $A_g(t)$) και της κυκλοφορούσας πίεσης (που εξαρτάται από την επιτάχυνση $A_{c1}(t)$, αν αγνοηθούν οι όροι ανώτερης τάξης). Για κάθε συνιστώσα όμως της πίεσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός συντελεστής συμπεριφοράς q λόγω της διαφοράς στην απορρόφηση ενέργειας. Συγκεκριμένα, δεν συμβαίνει απορρόφηση ενέργειας που να σχετίζεται με την κυκλοφορούσα απόκριση (οπότε $q = 1$), σε αντίθεση με την ωστική απόκριση (που μπορεί να συνοδεύεται από υστερητική απορρόφηση ενέργειας οπότε μπορεί να ληφθεί $q = 1.5$). Για την επαλληλία των μεγίστων των δύο συνιστωσών χρησιμοποιείται το άθροισμα των απολύτων τιμών των μεγίστων καθώς η ρίζα του

αθροίσματος των τετραγώνων (SRSS) δίνει αποτελέσματα που δεν είναι συντηρητικά.

Η τέμνουσα δύναμη και η ροπή αμέσως πάνω από τη βάση της δεξαμενής χρησιμοποιούνται για των υπολογισμών των τάσεων στα τοιχώματα και στην ένωση τους με τη βάση, ενώ για τον υπολογισμό της θεμελίωσης χρησιμοποιείται η τιμή της ροπής αμέσως κάτω από τη βάση της δεξαμενής. Για τον υπολογισμό της ροπής ανατροπής ως προς τη βάση της δεξαμενής μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο η κυκλοφορούσα συνιστώσα λόγω της μεγάλης συχνότητας της ωστικής συνιστώσας και της αδράνειας των τοιχωμάτων.

2.5.2.2 Κατακόρυφη σεισμική δράση

Η υδροδυναμική πίεση στα τοιχώματα λόγω κατακόρυφης επιτάχυνσης του εδάφους $A_v(t)$ δίνεται από τη σχέση:

$$p_{vr}(z, t) = \rho * H * (1 - \zeta) * A_v(t) \quad (2.32)$$

Λόγω της συμμετρίας των δεξαμενών περί τον άξονα z η υδροδυναμική αυτή πίεση δεν προκαλεί τέμνουσα δύναμη ή ροπή σε κανένα οριζόντιο επίπεδο της δεξαμενής.

2.5.3 Κατακόρυφες εύκαμπτες κυκλικές δεξαμενές πακτωμένες στη θεμελίωση

Είναι συνήθως μη συντηρητικό να θεωρείται μια δεξαμενή ως άκαμπτη (ειδικά για δεξαμενές χάλυβα). Σε εύκαμπτες δεξαμενές η πίεση του υγρού συνήθως εκφράζεται ως το άθροισμα των τριών συνιστωσών: της ωστικής (rigid impulsive), της κυματικής (sloshing) ή κυκλοφορούσας (convective) και της εύκαμπτης (flexible). Η τελευταία ικανοποιεί τη συνθήκη η ακτινική ταχύτητα του υγρού κατά μήκος των τοιχωμάτων να εξισορροπεί την ταχύτητα παραμόρφωσης του τοιχώματος καθώς και τις συνθήκες μηδενικής κατακόρυφης ταχύτητας στη βάση και μηδενικής πίεσης στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού. Η παραμόρφωση των τοιχωμάτων οφείλεται επιπλέον και στις κυματικές πιέσεις και άρα η «κυματική» και η «εύκαμπτη» συνιστώσα συνδέονται μεταξύ τους. Η σύνδεση αυτή είναι μικρή λόγω της διαφοράς στις συχνότητες των δύο κινήσεων και έτσι η «εύκαμπτη» συνιστώσα μπορεί να λαμβάνεται υπ' όψη

ανεξάρτητα από τις άλλες δύο, που υπολογίζονται όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην περίπτωση των άκαμπτων δεξαμενών.

Δεν υπάρχει έκφραση κλειστής μορφής για τον υπολογισμό της «εύκαμπτης» συνιστώσας της πίεσης, αφού η τελευταία εξαρτάται από τις ιδιομορφές του συστήματος υγρό-δεξαμενή, οι οποίες όμως δεν είναι γνωστές εκ των προτέρων καθώς δεν είναι γνωστή η μάζα του υγρού που συμμετέχει στην κίνηση αυτή. Έτσι, για τον υπολογισμό της κατανομής της πίεσης λόγω της ευκαμψίας των τοιχωμάτων χρησιμοποιείται επαναληπτική διαδικασία η οποία περιγράφεται παρακάτω.

Αρχικά επιλέγεται μια δοκιμαστική μορφή της πρώτης ιδιομορφής, $f(s)$ και υπολογίζονται οι ακόλουθοι συντελεστές:

$$b'_n = 2 * \frac{(-1)^n * I_1(\nu_n/\gamma)}{\nu_n^2 * I'_1(\nu_n/\gamma)} \quad (2.33)$$

$$d_n = 2 * \frac{\int_0^1 f(\zeta) * \cos(\nu_n \zeta) * d_\zeta * I_1(\nu_n/\gamma)}{\nu_n * I'_1(\nu_n/\gamma)} \quad (2.34)$$

$$\psi = \frac{\int_0^1 f(\zeta) * \left[\frac{\rho_s * s(\zeta)}{\rho * H} + \sum_{n=0}^{\infty} b'_n * \cos(\nu_n \zeta) \right] * d_\zeta}{\int_0^1 f(\zeta) * \left[\frac{\rho_s * s(\zeta)}{\rho * H} * f(\zeta) + \sum_{n=0}^{\infty} d_n * \cos(\nu_n \zeta) \right] * d_\zeta} \quad (2.35)$$

Η πίεση λόγω της ευκαμψίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p_f(\zeta, \theta, t) = \rho * H * \psi * \cos(\theta) * \sum_{n=0}^{\infty} d_n * \cos(\nu_n \zeta) * A_{fn}(t) \quad (2.36)$$

όπου $s(\zeta)$ είναι το πάχος και ρ_s η πυκνότητα του κελύφους ενώ $A_{fn}(t)$ είναι η επιτάχυνση απόκρισης ενός ταλαντωτή με περίοδο και συντελεστή απόσβεσης της ιδιομορφής n .

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ενεργή πυκνότητα του κελύφους από τη σχέση:

$$\rho^i(\zeta) = \frac{p^i * f(\zeta)}{2 * g * s(\zeta) * f^i(\zeta)} + \rho(\zeta) \quad (2.37)$$

Η ενεργή πυκνότητα χρησιμοποιείται ώστε να υπολογιστεί ξανά η πίεση p_f και από την ανάλυση να προκύψει η νέα ιδιομορφή. Τα πιο πάνω επαναλαμβάνονται μέχρι να υπάρξει σύγκλιση.

2.5.4 Απλοποιημένη διαδικασία για δεξαμενές πακτωμένες στη βάση

2.5.4.1 Οριζόντια σεισμική δράση

Το σύστημα δεξαμενής και υγρού προσομοιώνεται από ένα σύστημα δύο μονοβάθμιων συστημάτων, ένα που αντιστοιχεί στην ωστική συνιστώσα, κινούμενο μαζί με το εύκαμπτο τοίχωμα, και το άλλο που αντιστοιχεί στην κυκλοφορούσα συνιστώσα. Ο συνδυασμός των δύο προκύπτει από το αριθμητικό άθροισμά τους.

Οι ιδιοπερίοδοι της ωστικής και κυκλοφορούσας συνιστώσας, σε δευτερόλεπτα, λαμβάνονται από τις σχέσεις:

$$T_{\text{imp}} = C_i * \frac{\sqrt{\rho} * H}{\sqrt{s/R} * \sqrt{E}} \quad (2.38)$$

$$T_{\text{con}} = C_c * \sqrt{R} \quad (2.39)$$

όπου:

- H είναι το ύψος της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού
- R είναι η ακτίνα της δεξαμενής
- s είναι το ισοδύναμο ομοιόμορφο πάχος των τοιχωμάτων της δεξαμενής
- ρ είναι η πυκνότητα του περιεχομένου υγρού και
- E είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της δεξαμενής

Οι συντελεστές C_i και C_c για τις ιδιοπεριόδους δίνονται στον πίνακα 2.5. Ο συντελεστής C_i είναι αδιάστατος, ενώ εάν η ακτίνα της δεξαμενής R είναι σε μέτρα ο συντελεστής C_c είναι σε $s/m^{1/2}$. Στον ίδιο πίνακα δίνονται και οι μάζες m_i και m_c , ως συνάρτηση της συνολικής μάζας m, καθώς και ύψη h_i και h_c από τη βάση της δεξαμενής για εφαρμογή της συνισταμένης των πιέσεων από την ωστική και

κυκλοφορούσα συνιστώσα τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ροπών ανατροπής.

Πίνακας 2.5 Συντελεστές C_i και C_c για τις ιδιοπεριόδους, μάζες m_i και m_c , και ύψη h_i και h_c από τη βάση της δεξαμενής για εφαρμογή της συνισταμένης των πιέσεων από την ωστική και κυκλοφορούσα συνιστώσα

H/R	C_i	C_c	m_i/m	m_c/m	h_i/H	h_c/H	h'_i/H	h'_c/H
0.3	9.28	2.09	0.176	0.824	0.400	0.521	2.640	3.414
0.5	7.74	1.74	0.300	0.700	0.400	0.543	1.460	1.517
0.7	6.97	1.60	0.414	0.586	0.401	0.571	1.009	1.011
1.0	6.36	1.52	0.548	0.452	0.419	0.616	0.721	0.785
1.5	6.06	1.48	0.686	0.314	0.439	0.690	0.555	0.734
2.0	6.21	1.48	0.763	0.237	0.448	0.751	0.500	0.764
2.5	6.56	1.48	0.810	0.190	0.452	0.794	0.480	0.796
3.0	7.03	1.48	0.842	0.158	0.453	0.825	0.472	0.825

Η συνολική τέμνουσα βάση είναι:

$$Q = (m_i + m_w + m_r) * S_e(T_{imp}) + m_c * S_e(T_{con}) \quad (2.40)$$

όπου:

m_w είναι η μάζα των τοιχωμάτων της δεξαμενής

m_r είναι η μάζα της οροφής της δεξαμενής

$S_e(T_{imp})$ είναι η ωστική φασματική επιτάχυνση, η οποία προκύπτει από το ελαστικό φάσμα απόκρισης με κατάλληλο συντελεστή απόσβεσης που εξαρτάται από την εξεταζόμενη κατάσταση σχεδιασμού (οριακή κατάσταση σχηματισμού βλαβών $\zeta = 2\%$ ή οριακή κατάσταση αστοχίας $\zeta = 5\%$)

$S_e(T_{con})$ είναι η κυκλοφορούσα φασματική επιτάχυνση, η οποία προκύπτει από το ελαστικό φάσμα απόκρισης με συντελεστή απόσβεσης $\zeta = 0.5\%$

Η ροπή ανατροπής ακριβώς πάνω από τη βάση είναι:

$$M = (m_i * h_i + m_w * h_w + m_r * h_r) * S_e(T_{imp}) + m_c * h_c * S_e(T_{con}) \quad (2.41)$$

όπου:

h_w είναι το ύψος του κέντρου βάρους των τοιχωμάτων της δεξαμενής

h_r είναι το ύψος του κέντρου βάρους της οροφής της δεξαμενής

Η ροπή ανατροπής ακριβώς κάτω από τη βάση είναι:

$$M' = (m_i * h'_i + m_w * h_w + m_r * h_r) * S_e(T_{imp}) + m_c * h'_c * S_e(T_{con}) \quad (2.42)$$

όπου τα ύψη h'_i και h'_c λαμβάνονται από τον πίνακα 2.5

Το ύψος του κύματος της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού δίνεται από τη σχέση 2.31

2.5.4.2 Κατακόρυφη σεισμική δράση

Εκτός από την πίεση $p_{vr}(\zeta, t)$ που δίνεται από την σχέση (2.32), λόγω του ότι η δεξαμενή κινείται άκαμπτα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση με επιτάχυνση $A_v(t)$, υπάρχει μια συνεισφορά στην πίεση, $p_{vr}(\zeta, t)$, εξαιτίας της παραμορφωσιμότητας (ακτινική «αναπνοή») του κελύφους.

Αυτός ο πρόσθετος όρος μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$p_{vr}(\zeta, t) = 0.815 * f(\gamma) * \rho * H * \cos\left(\frac{\pi}{2} * \zeta\right) * A_{vr}(t) \quad (2.43)$$

όπου:

$$f(\gamma) = 1.078 + 0.24 * \ln(\gamma) \quad \text{για } 0.8 \leq \gamma < 4$$

$$f(\gamma) = 1.0 \quad \text{για } \gamma < 0.8$$

$A_{vr}(t)$ είναι η απόκριση σε όρους επιτάχυνσης ενός ταλαντωτή με συχνότητα ίση με τη θεμελιώδη συχνότητα της αξονοσυμμετρικής δόνησης της δεξαμενής και του υγρού.

Η θεμελιώδης αυτή συχνότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f_{vd} = \frac{1}{4 * R} * \left[\frac{2 * E * I_1(\gamma_1) * s(\zeta)}{\pi * \rho * H * (1 - \nu^2) * I_1(\gamma_1)} \right]^{1/2} \quad \text{για } \zeta = 1/3 \quad (2.44)$$

όπου:

$$\gamma_1 = \pi / (2 * \gamma)$$

$I_0(\cdot)$ και $I_1(\cdot)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικής και πρώτης τάξης αντίστοιχα

E και ν είναι το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson του υλικού της δεξαμενής αντίστοιχα

Η τιμή της κατακόρυφης επιτάχυνσης προκύπτει από το αντίστοιχο φάσμα για την κατάλληλη τιμή του συντελεστή απόσβεσης. Αν αγνοείται η παραμορφωσιμότητα του εδάφους τότε ο συντελεστής απόσβεσης λαμβάνεται ίσος με το συντελεστή απόσβεσης του υλικού. Ως συντελεστής συμπεριφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό της ωστικής συνιστώσας και της αδράνειας των τοιχωμάτων. Ο δύο συνιστώσες της πίεσης που προκύπτουν από την κατακόρυφη διέγερση (άκαμπτη και εύκαμπτη) μπορούν να συνδυαστούν με τη μέθοδο SRSS ώστε να προκύψει η μέγιστη τιμή της πίεσης

Σχεδιασμός Μεταλλικών Δεξαμενών

3.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός και οι απαιτούμενοι έλεγχοι επάρκειας των μεταλλικών δεξαμενών περιγράφονται στο EN1993 και συγκεκριμένα στο μέρος 1-6 «Αντοχή και ευστάθεια κελυφών» και στο μέρος 4-2 «Δεξαμενές». Στα μέρη αυτά δίνονται αρχές και βασικοί κανόνες εφαρμογής για το σχεδιασμό κατακόρυφων επίγειων μεταλλικών δεξαμενών αποθήκευσης υγρών προϊόντων.

Οι οριακές καταστάσεις αστοχίας που πρέπει να ελεγχθεί μια δεξαμενή, σύμφωνα με το EN1993 μέρος 1-6 είναι:

α. LS1: Πλαστικό όριο

Η οριακή κατάσταση του πλαστικού ορίου θα πρέπει να λαμβάνεται ως η κατάσταση στην οποία η ικανότητα της κατασκευής να αντισταθεί στις δράσεις που ασκούνται σε αυτή εξαντλείται με τη διαρροή του υλικού. Η αντίσταση της κατασκευής στην οριακή αυτή κατάσταση είναι ίση με το πλαστικό φορτίο κατάρρευσης που λαμβάνεται από ένα μηχανισμό ο οποίος βασίζεται στη θεωρία

μικρών μετατοπίσεων. Οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση αυτή είναι:

- ❖ μεμβρανική θεωρία
- ❖ εκφράσεις από τα Παραρτήματα A & B του EN 1993-1-6
- ❖ γραμμική ελαστική ανάλυση (LA)
- ❖ μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA)
- ❖ μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας (GMNA)

β. LS2: Ανακυκλική φόρτιση

Είναι η κατάσταση στην οποία επαναλαμβανόμενοι κύκλοι φόρτισης και αποφόρτισης προκαλούν διαρροή σε εφελκυσμό και θλίψη στο ίδιο σημείο και εξάντληση της ικανότητας της κατασκευής σε απορρόφηση ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή ελέγχονται όλες οι δράσεις που μπορεί να έχουν περισσότερους από τρεις κύκλους στη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Τέτοια δράση είναι η υδροστατική πίεση που μεταβάλλεται με το γέμισμα και το άδειασμα της δεξαμενής και πιθανώς σε κάθε κύκλο να προκαλεί διαρροή του υλικού όταν η δεξαμενή είναι εντελώς γεμάτη. Ακόμη τέτοια φόρτιση είναι και η δράση του σεισμού. Για την ανάλυση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πιο κάτω μέθοδοι:

- ❖ εκφράσεις από το Παράρτημα C του EN1993-1-6
- ❖ γραμμική ελαστική ανάλυση (LA) ή ελαστική μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας (GNA)
- ❖ μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA) ή μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού (GMNA)

β. LS3: Λυγισμός

Στην οριακή κατάσταση λυγισμού ολόκληρη η κατασκευή ή μέρος αυτής εμφανίζει απότομα μεγάλες μετατοπίσεις κάθετες στην επιφάνεια του κελύφους, που προκαλούνται από την απώλεια ευστάθειας υπό τις θλιπτικές ή διατμητικές μεμβρανικές τάσεις. Σε τέτοια περίπτωση είναι πιθανό η κατασκευή να μην έχει την ικανότητα να δεχτεί οποιαδήποτε αύξηση των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτή. Οι ακόλουθες μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

- ❖ εκφράσεις από το Παράρτημα A του EN1993-1-6
- ❖ γραμμική ελαστική ανάλυση (LA)
- ❖ γραμμική ελαστική ανάλυση διακλάδωσης (LBA)

- ❖ μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA)
- ❖ μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με ατέλειες (GMNIA)

3.2 Οριακές καταστάσεις αστοχίας

3.2.1 Πλαστική οριακή κατάσταση (LS1)

Οι τιμές σχεδιασμού των δράσεων πρέπει να προκαλούν τον δυσμενέστερο συνδυασμό φορτίων (περιλαμβάνοντας τους σχετικούς συντελεστές γ_f και ψ).

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η μεμβρανική θεωρία για τον έλεγχο της κατασκευής οι συνισταμένες της πίεσης $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$ και $n_{x\theta,Ed}$ (δυνάμεις ανά μέτρο μήκους) αντιπροσωπεύονται από την ισοδύναμη τάση σχεδιασμού $\sigma_{eq,Ed}$ που δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{eq,Ed} = \frac{1}{t} * \sqrt{n_{x,Ed}^2 + n_{\theta,Ed}^2 - n_{x,Ed} * n_{\theta,Ed} + 3 * n_{x\theta,Ed}^2} \quad (3.1)$$

Σε κάθε περίπτωση που εξετάζεται οι τάσεις σχεδιασμού θα πρέπει να ικανοποιούν την ακόλουθη συνθήκη:

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd} \quad (3.2)$$

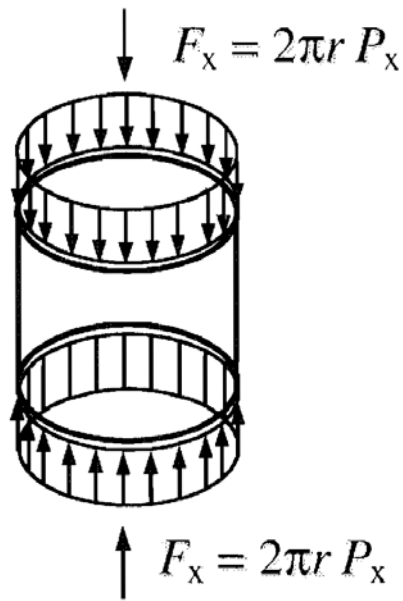
όπου:

$$f_{eq,Rd} = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (3.3)$$

Σύμφωνα με την παράγραφο 2.9.2.2 του EN1993-4-2 ο μερικός συντελεστής ασφαλείας είναι $\gamma_{M0} = 1.00$.

Ο προσδιορισμός των αξονικών τάσεων σ_x γίνεται σύμφωνα με το σχήμα 3.1 από την σχέση:

$$\sigma_x = - \frac{F_x}{2 * \pi * r * t} \quad (3.4)$$

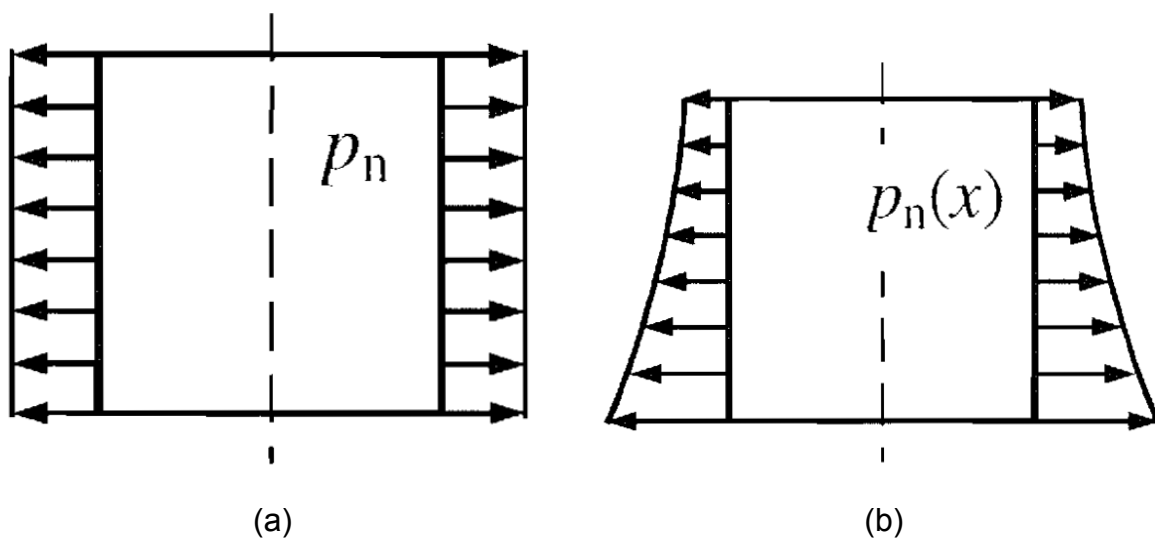


Σχήμα 3.1 Προσδιορισμός αξονικής τάσης σε κυλινδρικά κελύφη

Ο υπολογισμός των περιφερειακών μεμβρανικών τάσεων σ_θ λόγω της πίεσης του ανέμου (η οποία θεωρείται σταθερή σε όλο το ύψος της δεξαμενής) και της υδροστατικής πίεσης (μεταβαλλόμενη καθ' ύψος) γίνεται σύμφωνα με το σχήμα 3.2 από τις σχέσεις:

$$\sigma_\theta = p_n * \frac{r}{t} \quad \text{για σταθερή πίεση} \quad (3.5)$$

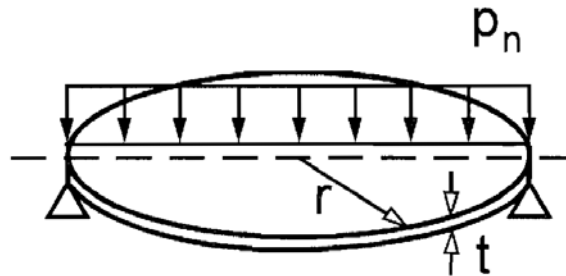
$$\sigma_\theta = p_n(x) * \frac{r}{t} \quad \text{για μεταβαλλόμενη πίεση} \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.2 Προσδιορισμός περιφερειακής μεμβρανικής τάσης για (a) σταθερή πίεση και (b) μεταβαλλόμενη πίεση

Ο υπολογισμός της αντοχής της οροφής σε ομοιόμορφη πίεση και απλή στήριξη γίνεται σύμφωνα με το σχήμα 3.3 από τη σχέση

$$p_{n,R} = 1.625 * \left(\frac{t}{r}\right)^2 * f_y \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.3 Υπολογισμός αντοχής της οροφής σε ομοιόμορφη πίεση

Στις σχέσεις (3.4), (3.5) (3.6) και (3.7) r είναι η ακτίνα και t το πάχος του στοιχείου που ελέγχεται.

Οι συνισταμένες των τάσεων $n_{x,ED}$ και $n_{\theta,ED}$ που θα χρησιμοποιηθούν στην εξίσωση (3.1) για τον υπολογισμό της ισοδύναμης τάσης υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$n_{x,Ed} = \sigma_{x,Ed} * t \quad (3.8)$$

$$n_{\theta,Ed} = \sigma_{\theta,Ed} * t \quad (3.9)$$

3.2.2 Ανακυκλική φόρτιση (LS2)

Η ανάλυση του κελύφους γίνεται με γραμμική ανάλυση ή μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας της δεξαμενής που υπόκειται στις δύο ακραίες τιμές των δράσεων F_{ED} . Για δύο διαδοχικές ακραίες τιμές του κύκλου υπολογίζονται οι τιμές σχεδιασμού της διαφοράς των δράσεων $\Delta\sigma_{x,Ed}$, $\Delta\sigma_{\theta,Ed}$ και $\Delta\tau_{x\theta,Ed}$ στην εσωτερική (που συμβολίζεται με 1) και στην εξωτερική (που συμβολίζεται με 2) επιφάνεια του κελύφους και σε κάθε σημείο της κατασκευής. Η τιμή σχεδιασμού της ισοδύναμης τάσης von Mises υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta\sigma_{eq,Ed,i} = \sqrt{\Delta\sigma_{x,Ed,i}^2 - \Delta\sigma_{x,Ed,i} * \Delta\sigma_{\theta,Ed,i} + \Delta\sigma_{\theta,Ed,i}^2 + 3 * \Delta\tau_{x\theta,Ed,i}^2} \quad (3.10)$$

Η μεταβολή της ισοδύναμης τάσης von Mises θα πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} \leq \Delta f_{eq,Rd} \quad (3.11)$$

όπου η ισοδύναμη μεταβολή της ισοδύναμης τάσης αντοχής von Mises υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta f_{eq,Rd} = 2 * f_{yd}$$

Αν για την ανάλυση σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι μη γραμμικής ανάλυσης υλικού ή μη γραμμικής ανάλυσης υλικού και γεωμετρίας τότε η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της δράσης πρέπει να θεωρηθεί ότι δρουν ταυτόχρονα με τις σταθερές τιμές της φόρτισης. Ακόμη θα πρέπει να υπολογιστεί η συσσωρευμένη πλαστική παραμόρφωση $\varepsilon_{p,eq,Ed}$ στο τέλος της διάρκειας ζωής του έργου. Αν δεν υπολογιστεί διαφορετικά τότε η συσσωρευμένη πλαστική παραμόρφωση μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\varepsilon_{p,eq,Ed} = n * \Delta\varepsilon_{p,eq,Ed} \quad (3.12)$$

όπου:

n είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης στη διάρκεια ζωής του έργου

$\Delta\varepsilon_{p,eq,Ed}$ είναι η μεγαλύτερη προσαύξηση στην ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση von Mises κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου φόρτισης σε οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής, που συμβαίνει μετά τον τρίτο κύκλο φόρτισης

Εάν δεν χρησιμοποιείται μια πιο ακριβής μέθοδος για την εκτίμηση της ολιγοκυκλικής κόπωσης, η τιμή συσσωρευμένης πλαστικής παραμόρφωσης θα πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$\varepsilon_{p,eq,Ed} = n_{p,eq} * (f_{yd}/E) \quad (3.13)$$

Η προτεινόμενη τιμή για το συντελεστή, αν δεν καθορίζεται διαφορετικά στο Εθνικό Προσάρτημα, είναι $n_{p,eq} = 25$.

3.2.3 Λυγισμός (LS3)

Στον έλεγχο σε λυγισμό λαμβάνονται υπ' όψη όλες οι δράσεις που προκαλούν θλιπτικές ή διατμητικές μεμβρανικές τάσεις. Τα ακόλουθα όρια που αφορούν τις γεωμετρικές ατέλειες θα πρέπει να ικανοποιούνται. Η απόκλιση από το κυκλικό σχήμα

αντιπροσωπεύεται από την παράμετρο U_r που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$U_r = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}} \quad (3.14)$$

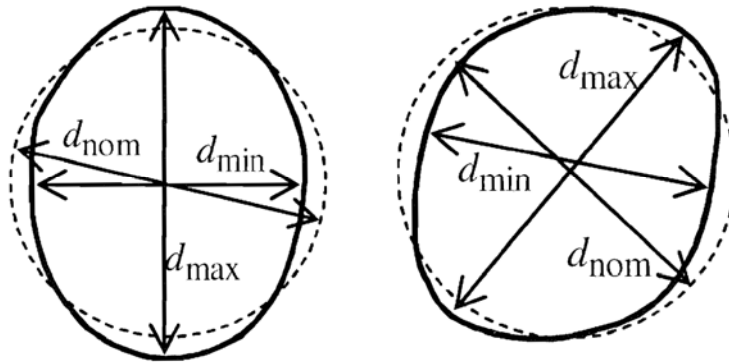
όπου:

d_{\max} είναι η μέγιστη μετρούμενη εσωτερική διάμετρος

d_{\min} είναι η ελάχιστη μετρούμενη εσωτερική διάμετρος

d_{nom} είναι η ονομαστική εσωτερική διάμετρος

Θα πρέπει να ληφθούν αρκετές μετρήσεις διαμέτρων ώστε να προσδιοριστεί η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή. Στο σχήμα 3.4 φαίνονται οι διάμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απόκλισης από το κυκλικό σχήμα.



Σχήμα 3.4 Διάμετροι για τον προσδιορισμό της απόκλισης από το κυκλικό σχήμα

Η παράμετρος U_r θα πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$U_r \leq U_{r,\max} \quad (3.15)$$

όπου $U_{r,\max}$ είναι η ανεκτή οριακή παράμετρος απόκλισης από τον κύκλο που εξαρτάται από την τάξη της ποιότητας της κατασκευής

Οι τιμές για την ανεκτή οριακή παράμετρος απόκλισης από τον κύκλο καθορίζονται από το Εθνικό Προσάρτημα. Οι προτεινόμενες τιμές δίνονται στον πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1 Προτεινόμενες τιμές της παραμέτρου απόκλισης από τον κύκλο

	Διάμετρος	$d [m] \leq 0.50$	$0.50 m \leq d [m] \leq 1.25 m$	$1.25 m \leq d [m]$
Ποιότητα κατασκευής	Περιγραφή	Συνιστώμενη τιμή του $U_{r,max}$		
Τάξη Α	Εξαιρετική	0.014	$0.007 + 0.0093 * (1.25 - d)$	0.007
Τάξη Β	Υψηλή	0.020	$0.010 + 0.0133 * (1.25 - d)$	0.010
Τάξη Γ	Κανονική	0.030	$0.015 + 0.0200 * (1.25 - d)$	0.015

Στις ενώσεις των τοιχωμάτων που είναι κάθετα στις μεμβρανικές θλιπτικές δυνάμεις η τυχηματική εκκενρότητα θα πρέπει να υπολογίζεται από τη σχέση:

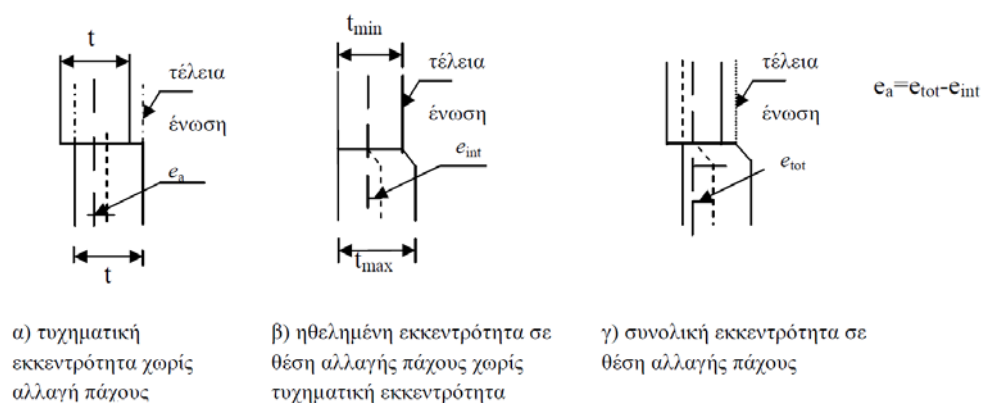
$$e_a = e_{tot} - e_{int} \quad (3.16)$$

όπου:

e_{tot} είναι η εκκενρότητα μεταξύ των μέσων επιφανειών στην ένωση των ελασμάτων (σχήμα 3.5γ)

e_{int} είναι η ηθελημένη μετατόπιση μεταξύ των μέσων επιφανειών στην ένωση των ελασμάτων (σχήμα 3.5β)

e_a είναι η τυχηματική εκκενρότητα της μέσης επιφάνειας στην ένωση των ελασμάτων (σχήμα 3.5α)

**Σχήμα 3.5** Τυχηματική και ηθελημένη εκκενρότητα σε ένωση ελασμάτων

Η παράμετρος της τυχηματικής εκκεντρότητας U_e θα πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$U_e \leq U_{e,\max} \quad (3.17)$$

όπου $U_{e,\max}$ είναι η ανεκτή οριακή παράμετρος εκκεντρότητας που εξαρτάται από την τάξη της ποιότητας της κατασκευής.

Η τιμή της παραμέτρου $U_{e,\max}$ δίνεται στον πίνακα 3.2

Πίνακας 3.2 Προτεινόμενες τιμές για την ανοχή σε τυχηματική εκκεντρότητα

Ποιότητα κατασκευής	Περιγραφή	Συνιστώμενη τιμή της παραμέτρου $U_{e,\max}$
Τάξη Α	Εξαιρετική	2mm
Τάξη Β	Υψηλή	3mm
Τάξη Γ	Κανονική	4mm

Η παράμετρος U_e δίνεται από τη σχέση:

$$U_e = \frac{e_a}{t_{av}} \quad (3.18)$$

όπου:

t_{av} είναι το μέσο πάχος του λεπτότερου και του παχύτερου τμήματος της σύνδεσης.

Οι τιμές για την ανεκτή οριακή παράμετρο εκκεντρότητας καθορίζονται από το Εθνικό Προσάρτημα. Οι προτεινόμενες τιμές δίνονται στον πίνακα 3.2

Πίνακας 3.3 Προτεινόμενες τιμές της μέγιστης επιτρεπόμενης τυχηματικής εκκεντρότητας

Ποιότητα κατασκευής	Περιγραφή	Συνιστώμενη τιμή της μέγιστης επιτρεπόμενης τυχηματικής εκκεντρότητας
Τάξη Α	Εξαιρετική	2mm
Τάξη Β	Υψηλή	3mm
Τάξη Γ	Κανονική	4mm

Η αντίσταση σε λυγισμό προσδιορίζεται από τις σχέσεις:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x * f_{yk}, \quad \sigma_{\theta,Rk} = \chi_{\theta} * f_{yk}, \quad \tau_{x\theta,Rk} = \chi_{\tau} * \frac{f_{yk}}{\sqrt{3}} \quad (3.19)$$

Οι μειωτικοί συντελεστές χ_x , χ_{θ} και χ_{τ} είναι συναρτήσεις της σχετικής λυγηρότητας $\bar{\lambda}$ του κελύφους και προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$\chi = 1 \quad \text{όταν} \quad \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad (3.20)$$

$$\chi = 1 - \beta * \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^{\eta} \quad \text{όταν} \quad \bar{\lambda}_0 \leq \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_p \quad (3.21)$$

$$\chi = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2} \quad \text{όταν} \quad \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda} \quad (3.22)$$

Όπου α είναι ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατέλειας, β είναι ο πλαστικός συντελεστής, η είναι ο δείκτης αλληλεπίδρασης και $\bar{\lambda}_0$ είναι η σχετική λυγηρότητα θλίψης.

Οι τιμές των πιο πάνω συντελεστών προκύπτουν από το Παράρτημα D του EN1993-1-6.

Το πλαστικό όριο της σχετικής λυγηρότητας $\bar{\lambda}_p$ υπολογίζεται από τη σχέση:

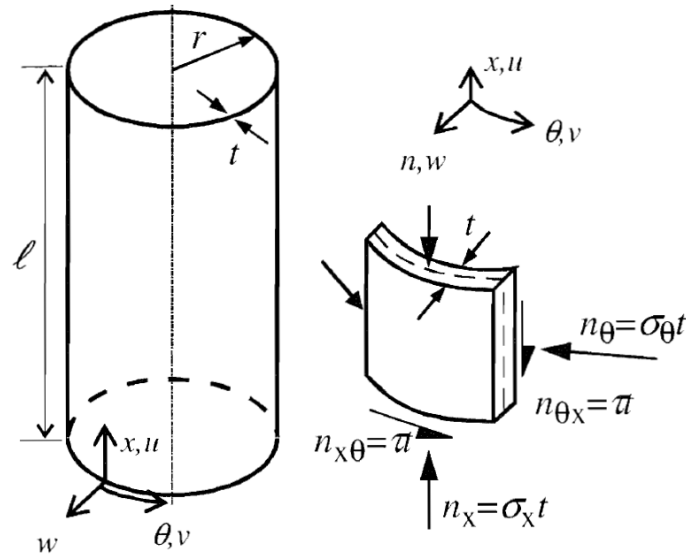
$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad (3.23)$$

Οι παράμετροι της σχετικής λυγηρότητας του κελύφους προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{\chi,Rcr}}, \quad \bar{\lambda}_{\theta} = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{\theta,Rcr}}, \quad \bar{\lambda}_{\tau} = \sqrt{(f_{yk} / \sqrt{3}) / \tau_{\chi\theta,Rcr}} \quad (3.24)$$

όπου οι ελαστικές κρίσιμες τάσεις λυγισμού προκύπτουν από το Παράρτημα D του EN1993-1-6.

Στο σχήμα 3.6 φαίνονται η γεωμετρία του κυλίνδρου, οι μεμβρανικές τάσεις και οι συνισταμένες αυτών.



Σχήμα 3.6 Γεωμετρία κυλίνδρου, μεμβρανικές τάσεις και συνισταμένες τάσεων

Για τον έλεγχο του λυγισμού θα πρέπει να ικανοποιούνται οι σχέσεις:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd}, \quad \sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd}, \quad \tau_{x\theta,Ed} \leq \tau_{x\theta,Rd} \quad (3.25)$$

Στην περίπτωση που συνυπάρχουν περισσότερες από μία συνιστώσες των τάσεων θα πρέπει να ικανοποιείται η σχέση

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_i * \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) * \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} \right)^{k_\tau} \leq 1 \quad (3.26)$$

Εάν οι τάσεις $\sigma_{x,Ed}$ ή $\sigma_{\theta,Ed}$ είναι εφελκυστικές τότε στη σχέση (3.26) λαμβάνονται ίσες με μηδέν.

Οι συντελεστές k_x , k_θ , k_τ και k_i σύμφωνα με το Παράρτημα D του EN1993-1-6 είναι:

$$k_x = 1.25 + 0.75 * \chi_x \quad (3.27)$$

$$k_\theta = 1.25 + 0.75 * \chi_\theta \quad (3.28)$$

$$k_\tau = 1.75 + 0.25 * \chi_\tau \quad (3.29)$$

$$k_i = (\chi_x * \chi_\theta)^2 \quad (3.30)$$

3.2.3.1 Κρίσιμες Τάσεις λυγισμού λόγω αξονικής θλίψης

Ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατέλειας α_x υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha_x = \frac{0.62}{1 + 1.91 * (\Delta w_k / t)^{1.44}} \quad (3.31)$$

Όπου Δw_k είναι το χαρακτηριστικό μέγεθος της ατέλειας και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} * \sqrt{\frac{r}{t}} * t \quad (3.32)$$

στην οποία Q είναι η παράμετρος της ποιότητας της κατασκευής και καθορίζεται στον πίνακα

Πίνακας 3.4 Τιμές παραμέτρου ποιότητας κατασκευής Q

Ποιότητα κατασκευής	Περιγραφή	Q
Τάξη Α	Εξαιρετική	40
Τάξη Β	Υψηλή	25
Τάξη Γ	Κανονική	16

Η οριακή λυγηρότητα θλίψης $\bar{\lambda}_{x0}$, ο πλαστικός συντελεστής β και ο δείκτης αλληλεπίδρασης η μπορούν να ληφθούν ίσοι με:

$$\bar{\lambda}_{x0} = 0.20, \quad \beta = 0.60, \quad \eta = 1.0 \quad (3.33)$$

Η ελαστική κρίσιμη αξονική τάση λυγισμού $\sigma_{x,Rcr}$ προκύπτει από τη σχέση:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0.605 * E * C_x * \frac{t}{r} \quad (3.34)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της δεξαμενής.

Ο συντελεστής C_x υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$C_x = 1.0 \quad \text{για} \quad 1.7 \leq \omega \leq 0.5 * \frac{r}{t} \quad (\text{κύλινδροι μεσαίου μεγέθους}) \quad (3.35)$$

$$C_x = 1.36 - \frac{1.83}{\omega} + \frac{2.07}{\omega^2} \quad \text{για} \quad \omega \leq 1.7 \quad (\text{κοντοί κύλινδροι}) \quad (3.36)$$

$$C_x = C_{x,N} \text{ για } \omega > 0.5 * \frac{r}{t} \text{ (μακρύς κύλινδροι)} \quad (3.37)$$

Η αδιάστατη παράμετρος του μήκους ω υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega = \frac{1}{r} * \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{1}{\sqrt{r * t}} \quad (3.38)$$

Ο παράγοντας $C_{x,N}$ λαμβάνεται ως η μεγαλύτερη τιμή από τις σχέσεις:

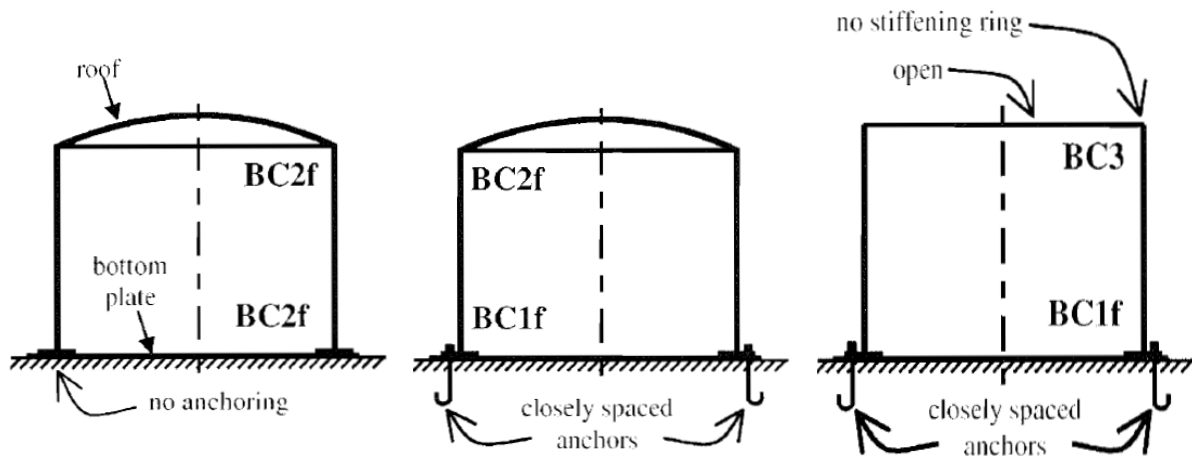
$$C_{x,N} = 1 + \frac{0.2}{C_{x,b}} * \left[1 - 2 * \omega * \frac{t}{r} \right] \quad (3.39)$$

$$C_{x,N} = 0.6 \quad (3.40)$$

Όπου $C_{x,b}$ είναι παράμετρος οι τιμές της οποίας δίνονται στον πίνακα 3.4 σε συνδυασμό με το σχήμα 3.7

Πίνακας 3.5 Παράμετρος $C_{x,b}$ για την επίδραση των συνοριακών συνθηκών στον ελαστικό αξονικό λυγισμό μακρών κυλίνδρων

Περίπτωση	Άκρο κυλίνδρου	Συνοριακές συνθήκες	$C_{x,b}$
1	άκρο 1	BC 1	6
	άκρο 2	BC 1	
2	άκρο 1	BC 1	3
	άκρο 2	BC 2	
3	άκρο 1	BC 2	1
	άκρο 2	BC 2	



Σχήμα 3.7 Συνοριακές συνθήκες

Οι κύλινδροι δεν χρειάζεται να ελεγχθούν σε αξονικό λυγισμό εάν ισχύει η σχέση:

$$\frac{r}{t} \leq 0.03 * \frac{E}{f_{yk}} \quad (3.41)$$

3.2.3.2 Κρίσιμες Τάσεις λυγισμού λόγω περιμετρικής θλίψης

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μειωτικού συντελεστή χ_θ μπορούν να ληφθούν από τις σχέσεις:

$$\bar{\lambda}_{\theta 0} = 0.40, \quad \beta = 0.60, \quad \eta = 1.0 \quad (3.42)$$

Ο περιμετρικός συντελεστής ατελειών, α_θ προκύπτει από τον πίνακα 3.5

Πίνακας 3.6 Τιμές του συντελεστή α_θ με βάση την ποιότητα κατασκευής

Ποιότητα κατασκευής	Περιγραφή	α_θ
Τάξη Α	Εξαιρετική	0.75
Τάξη Β	Υψηλή	0.65
Τάξη Γ	Κανονική	0.50

Ο υπολογισμός της ελαστικής περιμετρικής κρίσιμης τάσης λυγισμού γίνεται με τις σχέσεις:

$$\sigma_{\theta, Rcr} = 0.92 * E * \frac{C_\theta}{\omega} * \frac{t}{r} \quad \text{όταν ισχύει} \quad 20 \leq \frac{\omega}{C_\theta} \leq 1.63 * \frac{r}{t} \quad (3.43)$$

$$\sigma_{\theta, Rcr} = 0.92 * E * \frac{C_{\theta s}}{\omega} * \frac{t}{r} \quad \text{όταν ισχύει} \quad \frac{\omega}{C_{\theta}} < 20 \quad (3.44)$$

$$\sigma_{\theta, Rcr} = E * \left(\frac{t}{r}\right)^2 * \left[0.275 + 2.03 * \left(\frac{C_{\theta}}{\omega} * \frac{r}{t}\right)^4\right] \quad \text{όταν ισχύει} \quad \frac{\omega}{C_{\theta}} > 1.63 * \frac{r}{t} \quad (3.45)$$

Οι συντελεστές C_{θ} και $C_{\theta s}$ δίνονται στου πίνακες 3.7 και 3.8 αντίστοιχα σε συνδυασμό με το σχήμα 3.7

Πίνακας 3.7 Συντελεστές λυγισμού C_{θ} για κυλίνδρους μεσαίου μήκους

Περίπτωση	Άκρο κυλίνδρου	Συνοριακές συνθήκες	C_{θ}
1	άκρο 1	BC 1	1.50
	άκρο 2	BC 1	
2	άκρο 1	BC 1	1.25
	άκρο 2	BC 2	
3	άκρο 1	BC 2	1.00
	άκρο 2	BC 2	
4	άκρο 1	BC 1	0.60
	άκρο 2	BC 3	
5	άκρο 1	BC 2	0.00
	άκρο 2	BC 3	
6	άκρο 1	BC 3	0.00
	άκρο 2	BC 3	

Πίνακας 3.8 Συντελεστές λυγισμού $C_{\theta s}$ για κοντούς κυλίνδρους

Περίπτωση	Άκρο κυλίνδρου	Συνοριακές συνθήκες	$C_{\theta s}$
1	άκρο 1	BC 1	$1.5 + \frac{10}{\omega^2} - \frac{5}{\omega^3}$
	άκρο 2	BC 1	
2	άκρο 1	BC 1	$1.25 + \frac{8}{\omega^2} - \frac{4}{\omega^3}$
	άκρο 2	BC 2	
3	άκρο 1	BC 2	$1.0 + \frac{3}{\omega^{1.35}}$
	άκρο 2	BC 2	
4	άκρο 1	BC 1	$0.6 + \frac{1}{\omega^2} - \frac{0.3}{\omega^3}$
	άκρο 2	BC 3	
όπου $\omega = \frac{1}{\sqrt{r * t}}$			

Οι κύλινδροι δεν χρειάζεται να ελέγχονται σε περιμετρικό λυγισμό εάν ισχύει η σχέση:

$$\frac{r}{t} \leq 0.21 * \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}} \quad (3.46)$$

3.2.3.3 Κρίσιμες Τάσεις λυγισμού λόγω διάτμησης

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μειωτικού συντελεστή χ_τ μπορούν να ληφθούν από τις σχέσεις:

$$\bar{\lambda}_{\tau 0} = 0.40, \quad \beta = 0.60, \quad \eta = 1.0 \quad (3.47)$$

Ο διατμητικός συντελεστής ατελειών, α_τ προκύπτει από τον πίνακα 3.9

Πίνακας 3.9 Τιμές του συντελεστή α_τ με βάση την ποιότητα κατασκευής

Ποιότητα κατασκευής	Περιγραφή	α_τ
Τάξη Α	Εξαιρετική	0.75
Τάξη Β	Υψηλή	0.65
Τάξη Γ	Κανονική	0.50

Η ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού δίνεται από τη σχέση

$$\tau_{x0,Rcr} = 0.75 * E * C_\tau \sqrt{\frac{1}{\omega} * \frac{t}{r}} \quad (3.48)$$

Ο συντελεστής C_τ υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$C_\tau = 1.0 \quad \text{όταν ισχύει} \quad 10 \leq \omega \leq 8.7 * \frac{r}{t} \quad (3.49)$$

$$C_\tau = \sqrt{1 + \frac{42}{\omega^3}} \quad \text{όταν ισχύει} \quad \omega < 10 \quad (3.50)$$

$$C_\tau = \frac{1}{3} \sqrt{\omega * \frac{t}{r}} \quad \text{όταν ισχύει} \quad \omega > 8.7 * \frac{r}{t} \quad (3.51)$$

Οι κύλινδροι δεν χρειάζεται να ελέγχονται σε διατμητικό λυγισμό εάν ισχύει η σχέση:

$$\frac{r}{t} \leq 0.16 * \left(\frac{E}{f_{yk}} \right)^{0.67} \quad (3.52)$$

Αριθμητικές Εφαρμογές

4.1 Εισαγωγή

Ο λυγισμός διαδραματίζει θεμελιώδη ρόλο στο σχεδιασμό των δεξαμενών χάλυβα λόγω των μικρών παχών των τοιχωμάτων αυτής της κατηγορίας των κατασκευών. Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει τη σεισμική συμπεριφορά των πακτωμένων στη βάση δεξαμενών υγρών αποθήκευσης, διερευνώντας την υδροδυναμική αλληλεπίδραση του ρευστού – κατασκευής. Προηγούμενες μελέτες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι οι κυκλικές κυλινδρικές πακτωμένες στη βάση δεξαμενές που περιέχουν ένα ομοιογενές υγρό αναπτύσσουν μια συμπεριφορά τύπου προβόλου υπό οριζόντιες επιταχύνσεις. Η υδροδυναμική απόκριση του συστήματος των δεξαμενής – υγρό, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, χαρακτηρίζεται από την υπέρθεση δύο διαφορετικών συνεισφορών, της ωστικής και κυκλοφορούσας συνιστώσας. Αν τα τοιχώματα της δεξαμενής είναι άκαμπτα, η ωστική συνιστώσα αντιπροσωπεύει το τμήμα του υγρού που κινείται σε αρμονία με τα τοιχώματα της δεξαμενής. Το υγρό που κινείται με μια μακρά περίοδο κυματισμού στο άνω τμήμα της δεξαμενής αντιπροσωπεύεται από την κυκλοφορούσα συνιστώσα. Αυτές οι δύο συνιστώσες μπορούν να θεωρηθούν αποζευγμένες, διότι υπάρχουν σημαντικές

διαφορές στις φυσικές τους περιόδους. Επιπλέον, επειδή η κυκλοφορούσα συνιστώσα είναι κίνηση υγρού με μεγάλες περιόδους, η συνιστώσα αυτή δίνει μόνο μια μικρή συμβολή στη συνολική υδροδυναμική πίεση επί των τοιχωμάτων της δεξαμενής και, κατά συνέπεια, η ολική απόκριση δεξαμενή επηρεάζεται κυρίως από την ωστική συνιστώσα.

Ο περίπλοκος σχηματισμός της παραμορφωμένης κατάστασης των δεξαμενών αποθήκευσης υγρών και η αλληλεπίδραση του ρευστού – κατασκευής οδηγούν σε μια μεγάλη ποικιλία πιθανών μηχανισμών αστοχίας κατά τη διάρκεια ενός σεισμού.

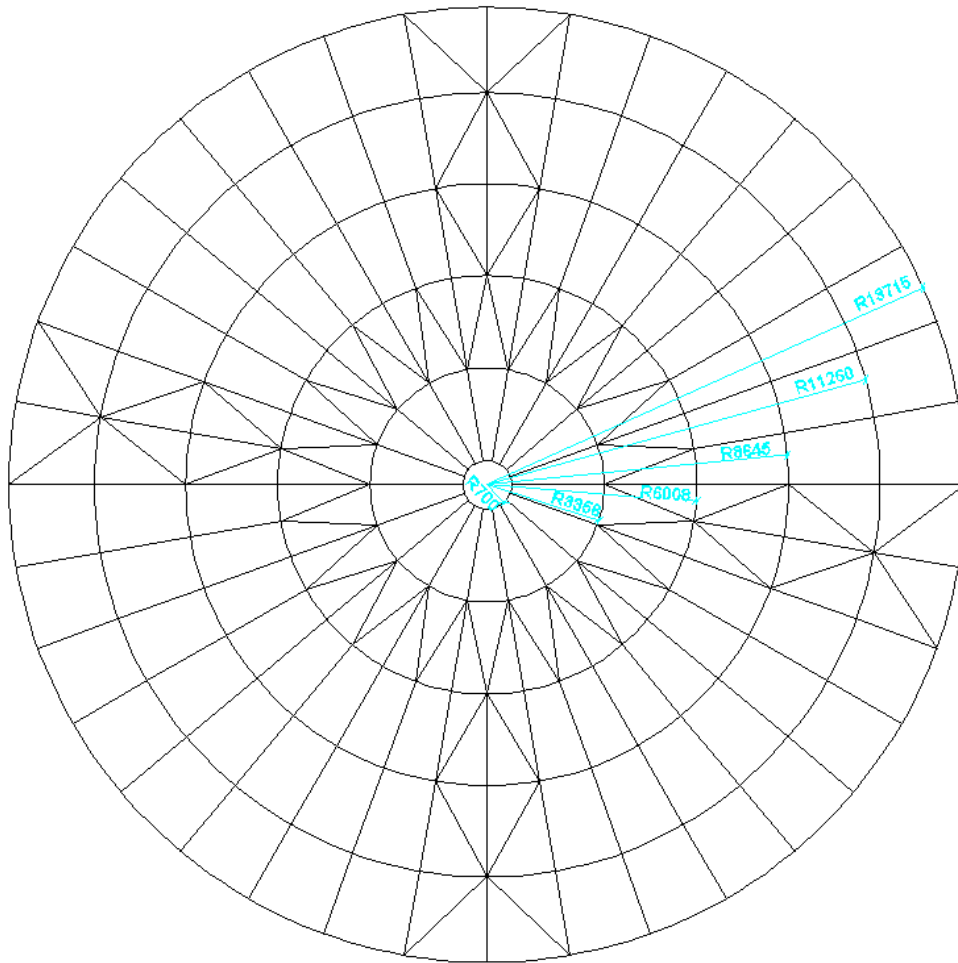
Ο λυγισμός του κελύφους, ζημιές και καταρρεύσεις των στεγών δεξαμενών, αστοχίες της βάσης αγκύρωσης, διαφορικές καθιζήσεις, μερική ανύψωση και αστοχίες του συστήματος των σωληνώσεων είναι οι πιο παρατηρούμενες αστοχίες

Σε παλαιότερες μελέτες, το πρόβλημα λυγισμού για τις χαλύβδινες δεξαμενές διερευνήθηκε μέσω αριθμητικών μοντέλων στα οποία οι διαφορετικοί τρόποι αστοχίας επισημαίνονται και συζητούνται χωριστά. Ωστόσο υπάρχει έλλειψη μελετών όπου η αστοχία της δεξαμενής να θεωρείται στο σύνολό της.

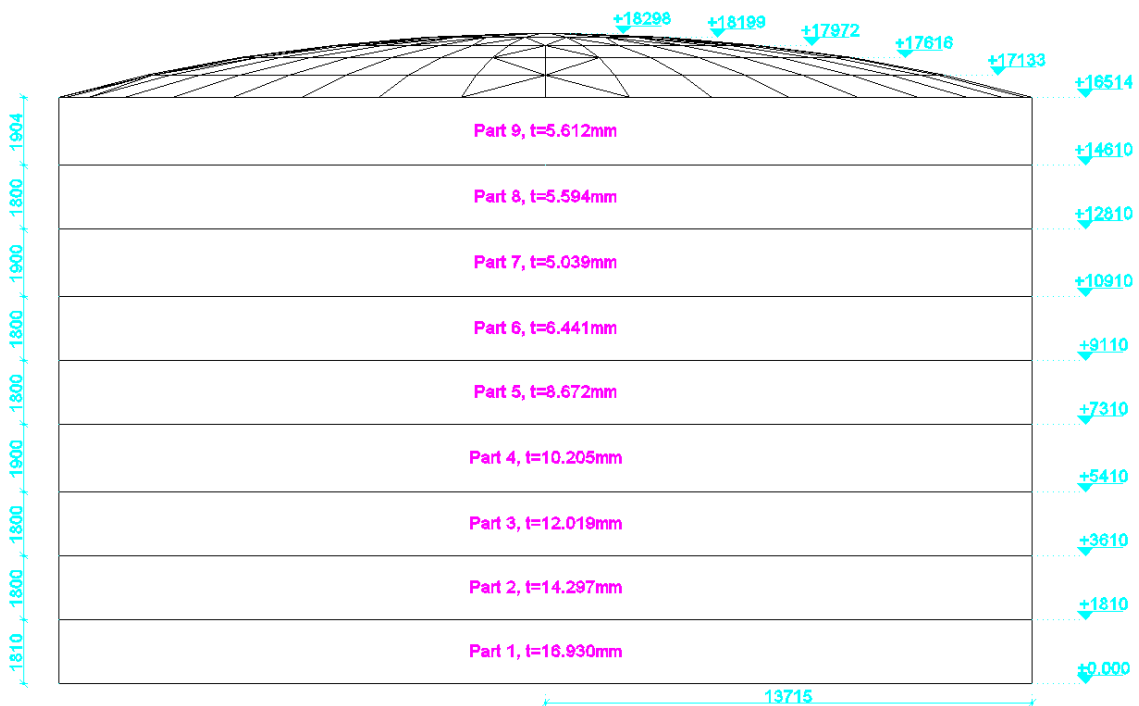
Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην εν χρόνο ανάλυση των πακτωμένων μεταλλικών δεξαμενών εισάγοντας τη χρονοϊστορία της σεισμικής διέγερσης στη βάση τους. Η προσομοίωση της κατασκευής γίνεται με πεπερασμένα στοιχεία και λαμβάνεται υπ' όψη η αλληλεπίδραση του ρευστού – κατασκευής καθ' όλη την εξέλιξη του σεισμικού φαινομένου. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έγιναν με το πρόγραμμα Abaqus θεωρώντας μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας.

4.2 Περιγραφή του προβλήματος

Η δεξαμενή που εξετάστηκε είναι μια κυκλική χαλύβδινη δεξαμενή ακτίνας 13715mm. Η στάθμη του κελύφους είναι στα 16514mm και η στάθμη της αυτοστηριζόμενης οροφής σε σχήμα θόλου είναι στα 18296mm. Το κέλυφος της δεξαμενής αποτελείται από εννέα ζώνες ύψους από 1800mm έως 1904mm μεταβλητού πάχους κυμαινόμενο από 16.93mm στην κατώτερη ζώνη μέχρι 5.61mm στην ανώτερη ζώνη. Τα γεωμετρικά στοιχεία της δεξαμενής φαίνονται στον Πίνακα 4.1 και στα σχήματα 4.1 και 4.2.



Σχήμα 4.1 Κάτοψη οροφής



Σχήμα 4.2 Κατακόρυφη τομή δεξαμενής

Πίνακας 4.1 Γεωμετρικά στοιχεία χαλύβδινης δεξαμενής

Ζώνη	Ύψος ζώνης [mm]	Ύψος βάσης ζώνης [mm]	Ύψος στέψης ζώνης [mm]	Πάχος ελάσματος [mm]
1	1810	0.000	1810	16.93
2	1800	1810	3610	14.30
3	1800	3610	5410	12.02
4	1900	5410	7310	10.21
5	1800	7310	9110	8.67
6	1800	9110	10910	6.44
7	1900	10910	12810	5.04
8	1800	12810	14610	5.59
9	1904	14610	16514	5.61

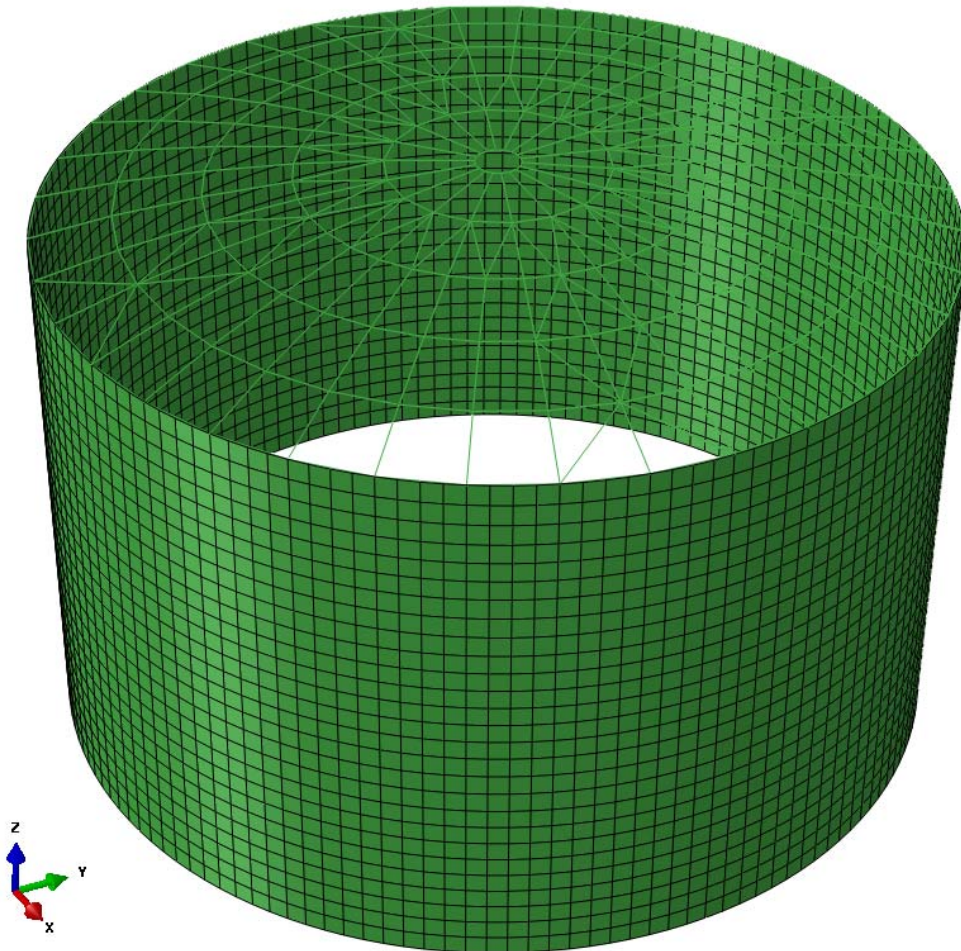
Η διακριτοποίηση της δεξαμενής έγινε με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους για το κέλυφος και με πεπερασμένα στοιχεία δοκού για την οροφή. Στο σχήμα 4.3 φαίνεται η διακριτοποίηση της δεξαμενής με πεπερασμένα στοιχεία.

Ο χάλυβας της δεξαμενής θεωρήθηκε γραμμικό ελαστικό – πλαστικό κρατυνόμενο υλικό. Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα είναι 210000MPa και ο λόγος Poisson $\nu = 0.3$. Η τάση διαρροής είναι $f_y = 235.26\text{MPa}$ και ανηγμένη παραμόρφωση διαρροής $\varepsilon_y = 1.12\%$. Η τάση θραύσεως είναι $f_u = 529.48\text{MPa}$ και ανηγμένη παραμόρφωση θραύσεως είναι $\varepsilon_u = 429.3\%$. Στο σχήμα 4.3 δίνεται το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του χάλυβα.

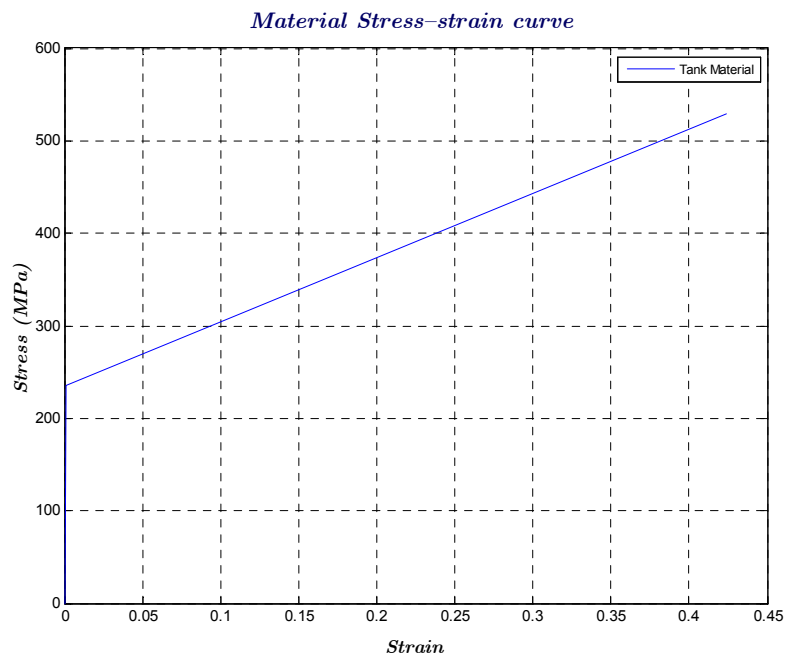
Η δεξαμενή θεωρήθηκε ότι περιέχει νερό η ελεύθερη στάθμη του οποίου ήταν στα 14610mm (πληρότητα δεξαμενής $\sim 90\%$). Το περιεχόμενο νερό θεωρήθηκε ασυμπίεστο χωρίς ιξώδες. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του νερού φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Η διακριτοποίηση του νερού έγινε μέσα από το γραφικό περιβάλλον του Abaqus. Λόγω των αναμενόμενων μεγάλων παραμορφώσεων του νερού χρησιμοποιήθηκε προσαρμοστικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο επιτρέπει τη διατήρηση ενός δικτύου πεπερασμένων στοιχείων υψηλής ποιότητας όταν συμβαίνουν μεγάλες παραμορφώσεις ή απώλειες υλικού επιτρέποντας στο δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων να κινείται ανεξάρτητα από το υλικό. Επίσης σε δύο περιπτώσεις έγινε ανάλυση της δεξαμενής με smooth particle hydrodynamic (SPH)

Μεταξύ του νερού και του κελύφους της δεξαμενής ορίσθηκαν επιφάνειες επαφής χωρίς τριβή.



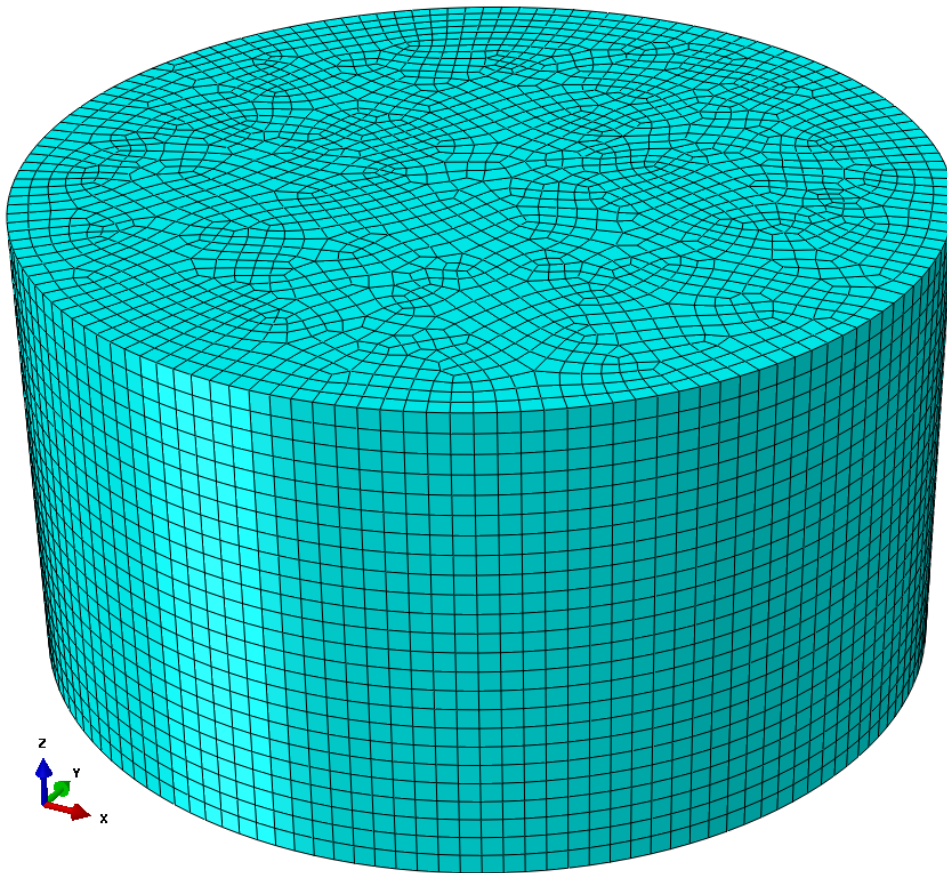
Σχήμα 4.3 Διακριτοποίηση δεξαμενής με πεπερασμένα στοιχεία



Σχήμα 4.4 Καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων χάλυβα

Πίνακας 4.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά νερού

Παράμετρος	Τιμή
Πυκνότητα	$1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Ιξώδες	$1.002 * 10^{-3} \frac{\text{N} * \text{sec}}{\text{m}^2}$
c0	$1480 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$
s	0
Γ_0	0



Σχήμα 4.5 Διακριτοποίηση περιεχομένου νερού με πεπερασμένα στοιχεία

4.3 Σεισμικές διεγέρσεις

Για τις αναλύσεις της κατασκευής που πραγματοποιήθηκαν έγινε χρήση των παρακάτω σεισμικών διεγέρσεων:

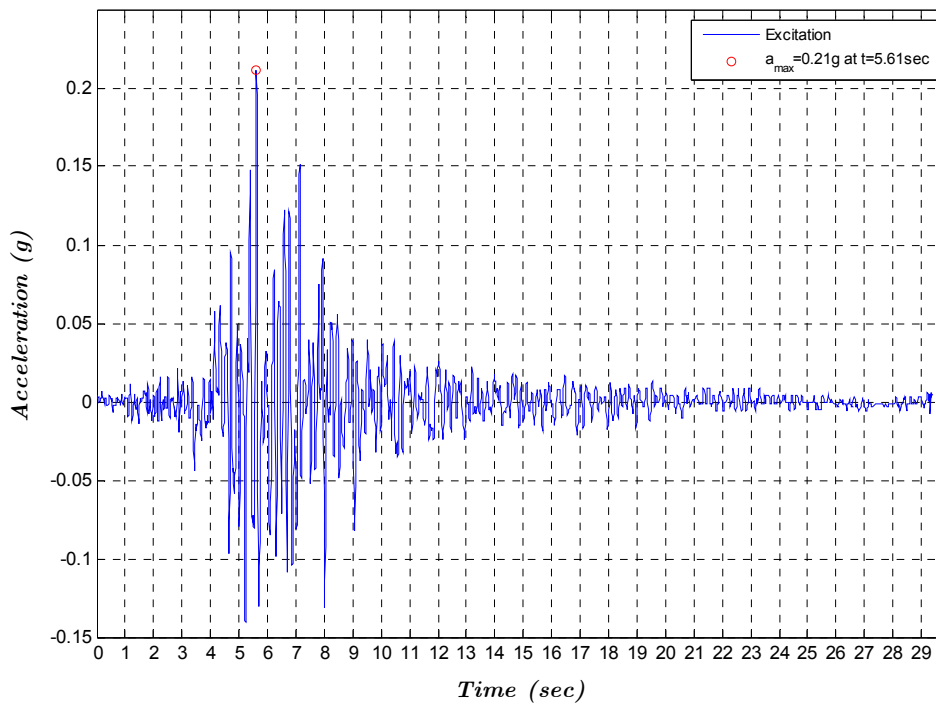
- ❖ KozaniEQ: χρονοϊστορία σεισμού Κοζάνης
- ❖ AigioEQ: χρονοϊστορία σεισμού Αιγίου
- ❖ Tabas: χρονοϊστορία σεισμού Tabas Iran (τρεις συνιστώσες)

Ειδικά για τη σεισμική διέγερση του Αιγίου έγινε μεγέθυνση κατά 1.5 και 4.0 φορές καθώς επίσης και προσαρμογή στο φάσμα του EC8.

Οι χρονοϊστορίες και τα φάσματα απόκρισης φαίνονται στα σχήματα 4.6 μέχρι 4.21.

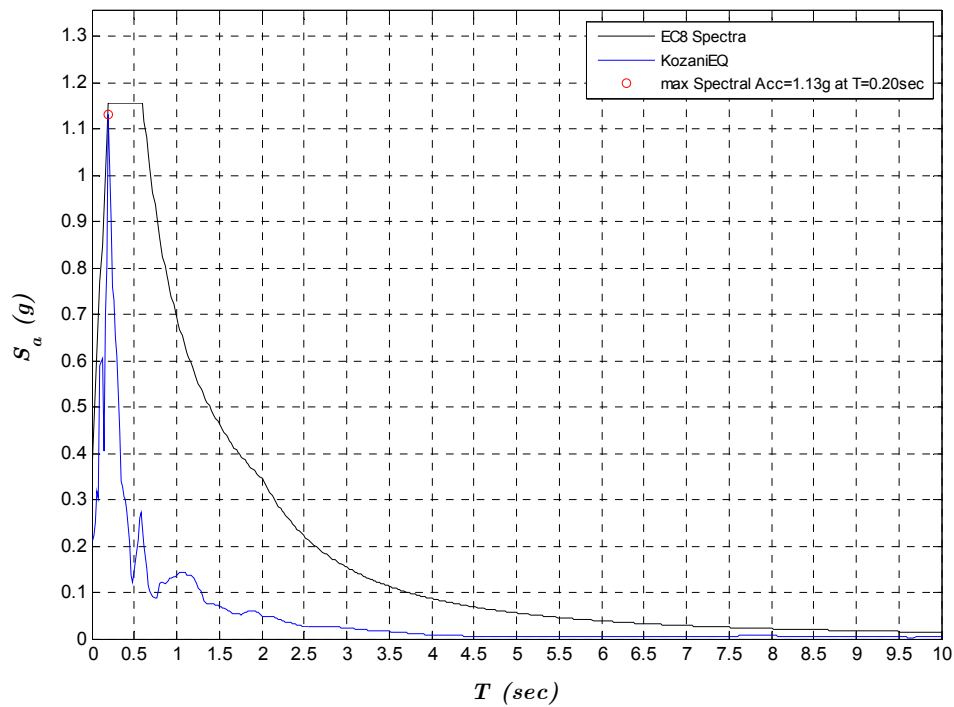
Στον Πίνακα 4.3 δίνονται τα συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά των χρονοϊστοριών για $\xi = 2\%$

*KozaniEQ Time History
of Acceleration*

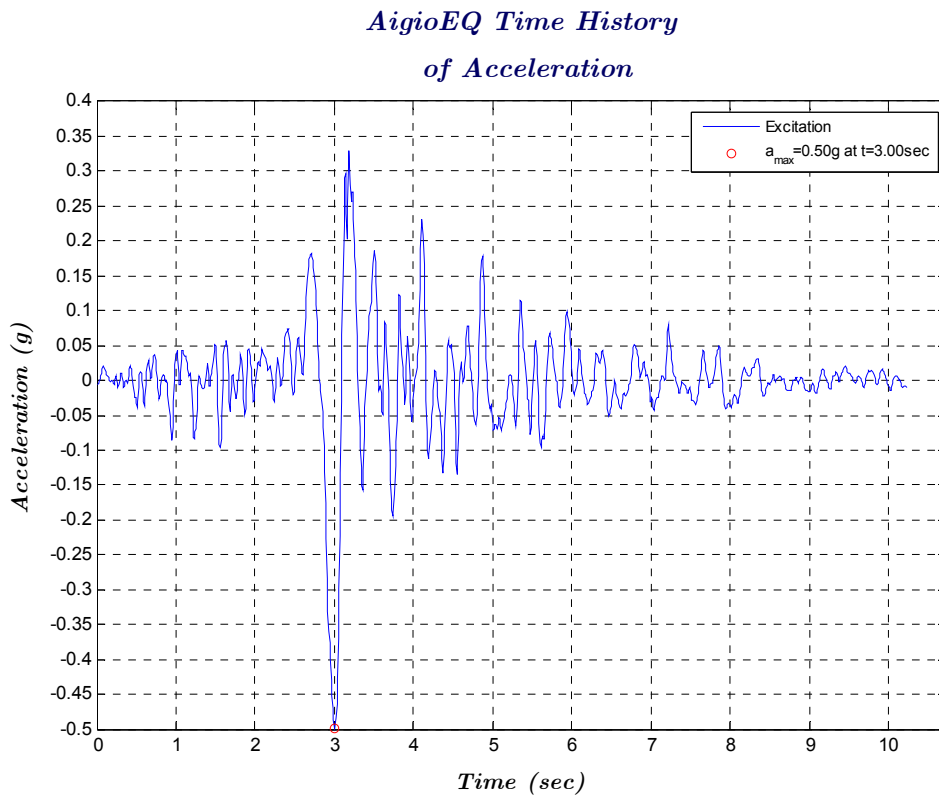


Σχήμα 4.6 Χρονοιστορία επιταχύνσεων σεισμού Κοζάνης

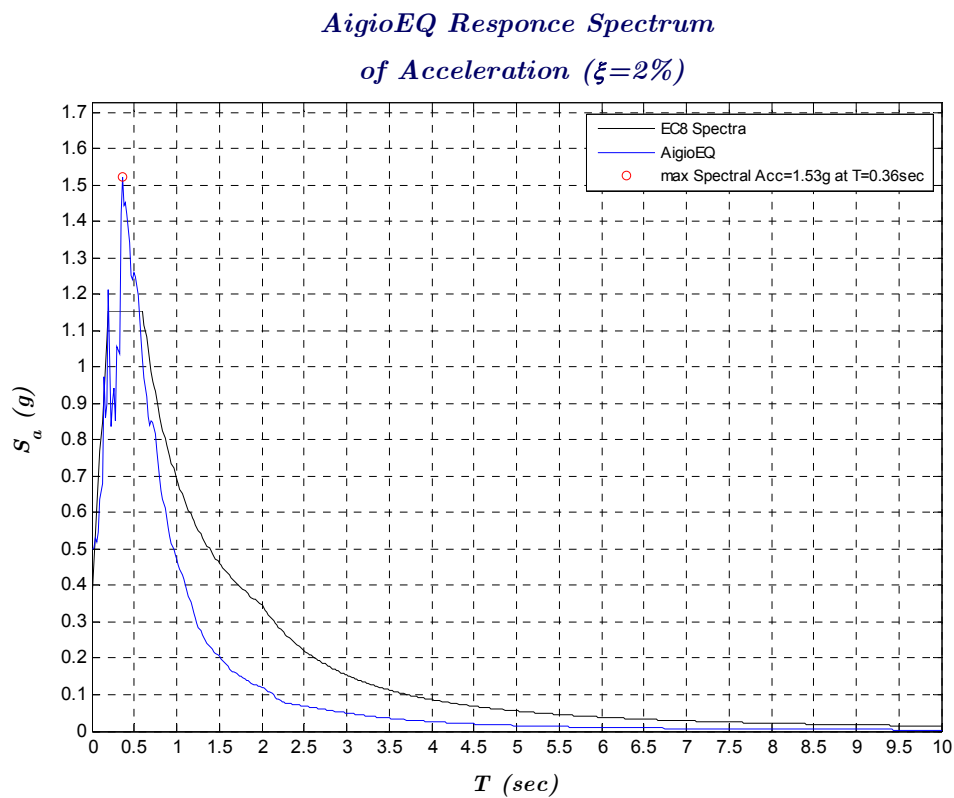
*KozaniEQ Responce Spectrum
of Acceleration ($\xi = 2\%$)*



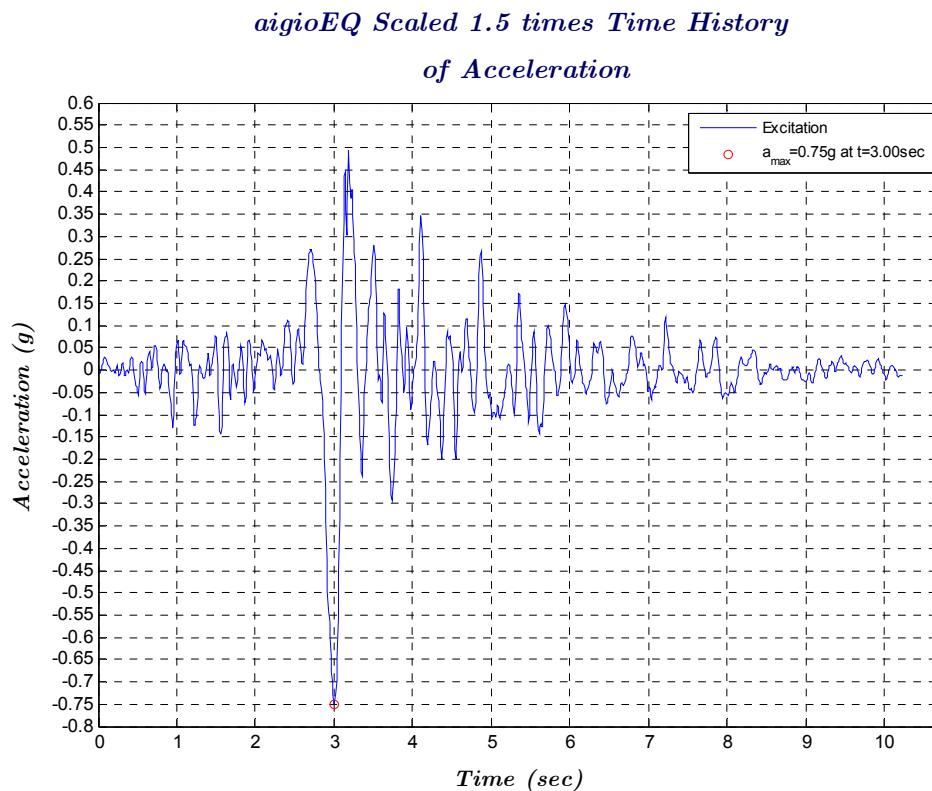
Σχήμα 4.7 Φάσμα απόκρισης σε όρους επιταχύνσεων σεισμού Κοζάνης



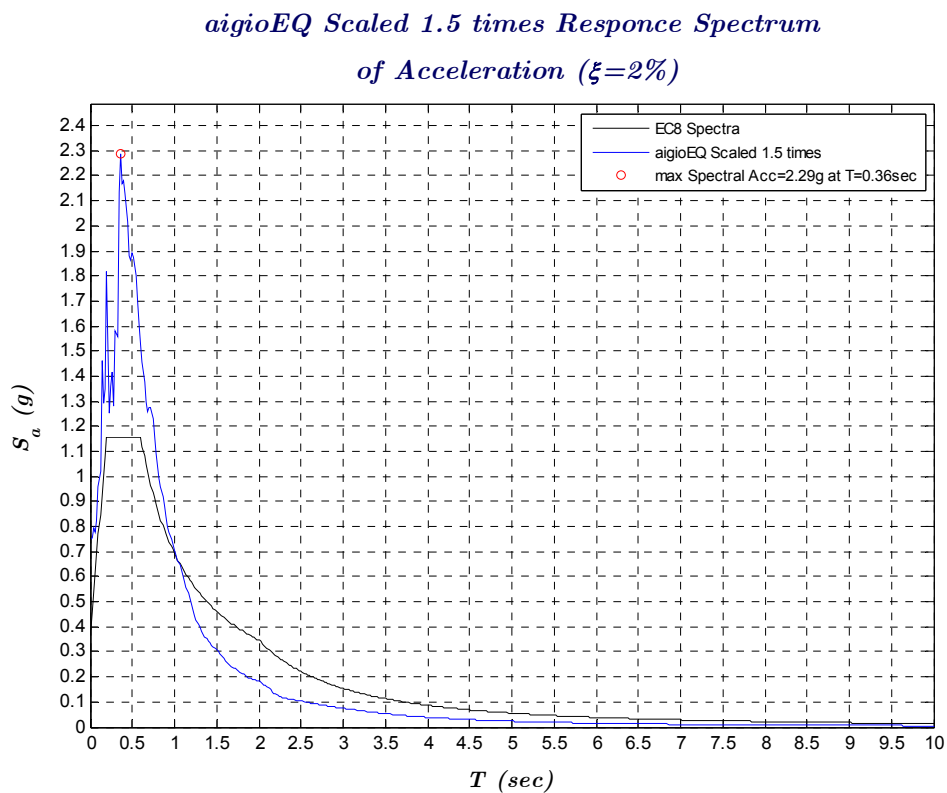
Σχήμα 4.8 Χρονοιστορία επιταχύνσεων σεισμού Αιγίου



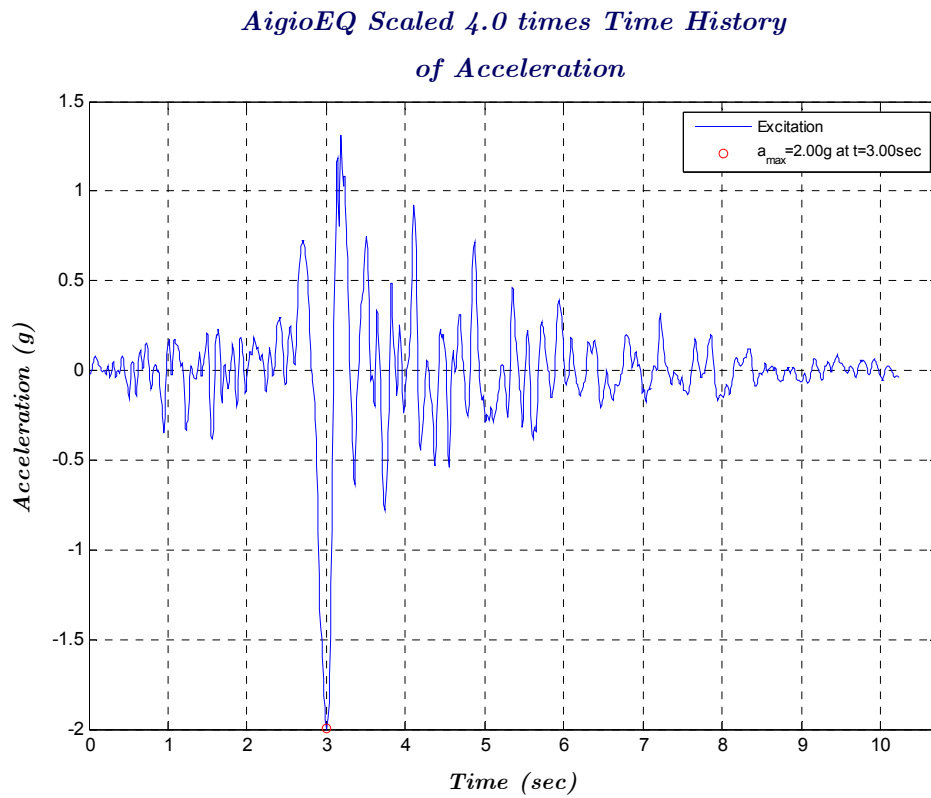
Σχήμα 4.9 Φάσμα απόκρισης σε όρους επιταχύνσεων σεισμού Αιγίου



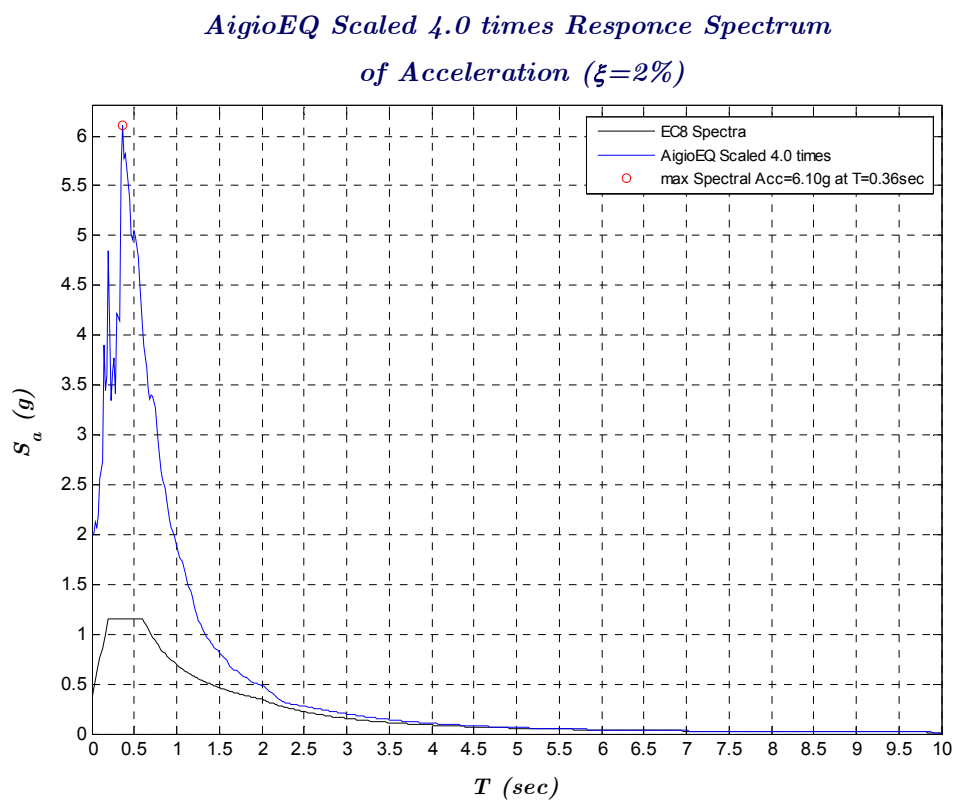
Σχήμα 4.10 Χρονοιστορία επιταχύνσεων σεισμού Αιγίου μεγεθυμένου 1.5 φορές



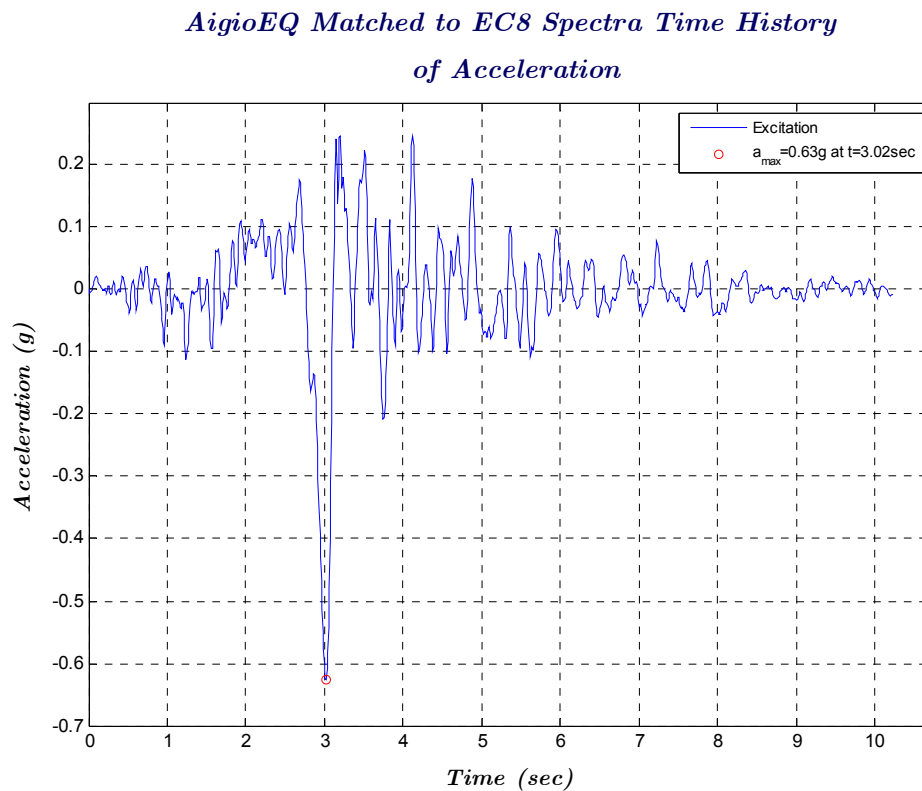
Σχήμα 4.11 Φάσμα απόκρισης σε όρους επιταχύνσεων σεισμού Αιγίου μεγεθυμένου 1.5 φορές



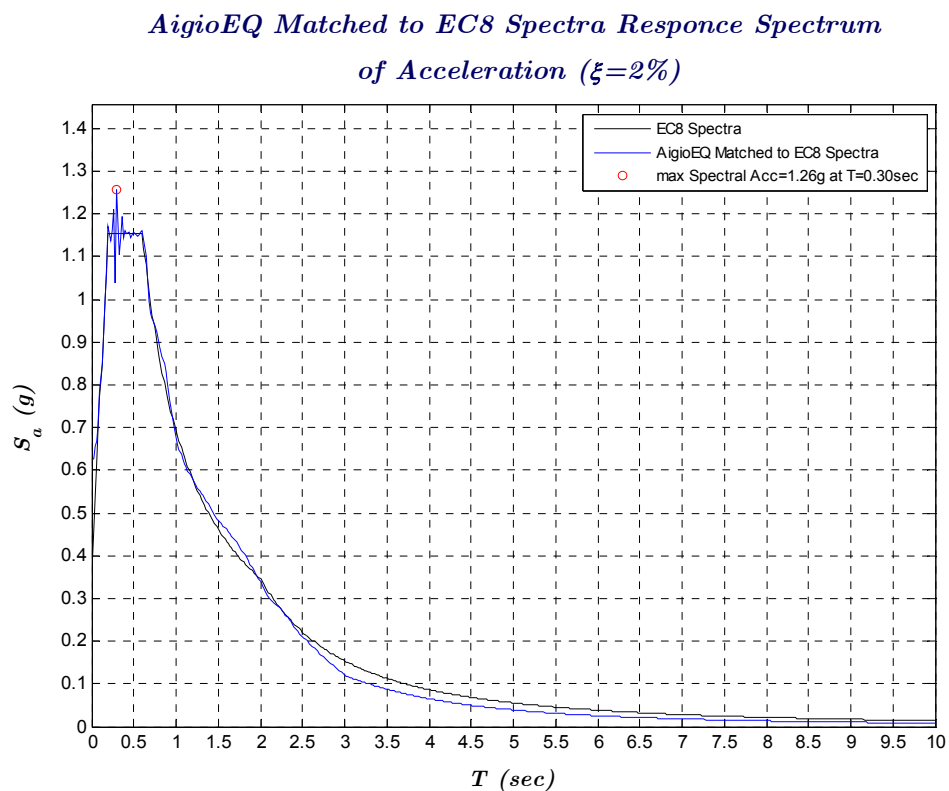
Σχήμα 4.12 Χρονοιστορία επιταχύνσεων σεισμού Αιγίου μεγεθυμένου 4.0 φορές



Σχήμα 4.13 Φάσμα απόκρισης σε όρους επιταχύνσεων σεισμού Αιγίου μεγεθυμένου 4.0 φορές

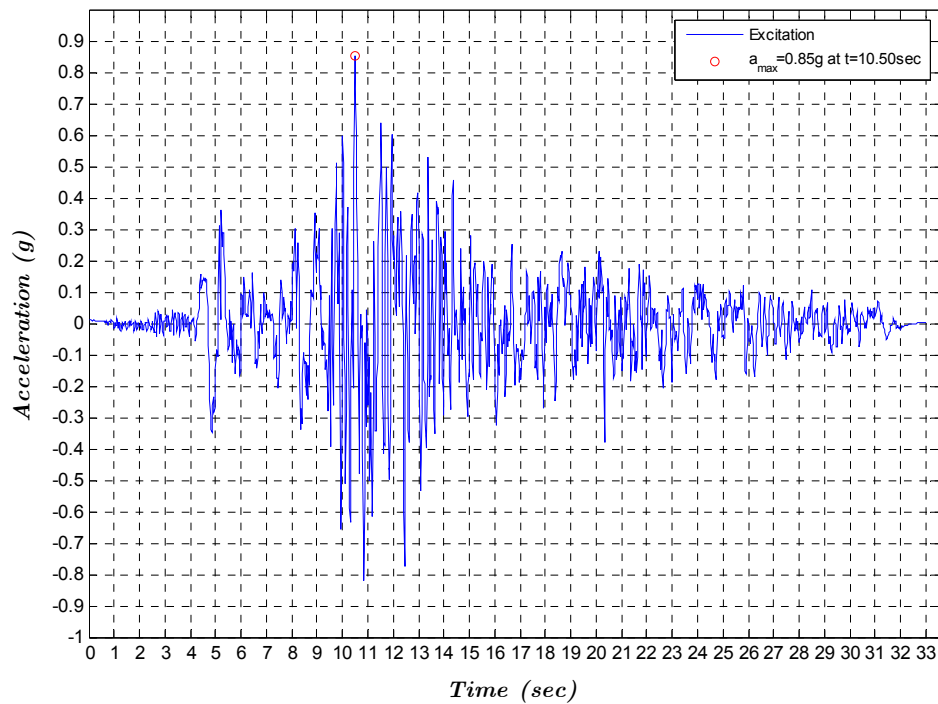


Σχήμα 4. 14 Χρονοιστορία επιταχύνσεων σεισμού Αιγίου προσαρμοσμένη στο φάσμα απόκρισης του EC8



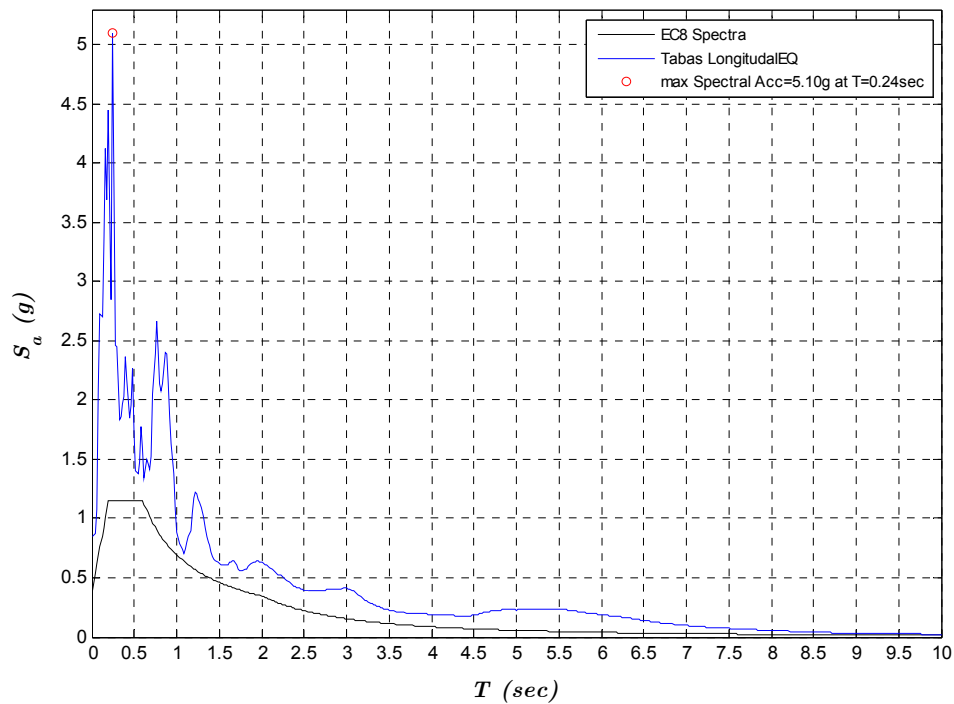
Σχήμα 4. 15 Φάσμα απόκρισης σε όρους επιταχύνσεων σεισμού Αιγίου προσαρμοσμένου στο φάσμα απόκρισης του EC8

*Tabas LongitudalEQ Time History
of Acceleration*



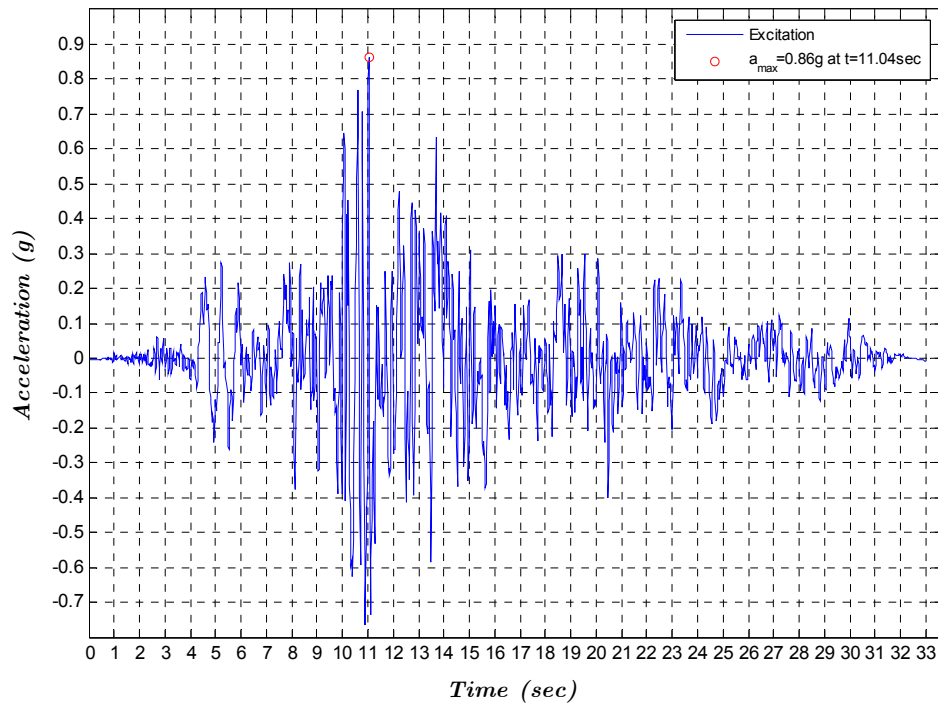
Σχήμα 4.16 Χρονοιστορία επιταχύνσεων διαμήκη σεισμού Tabas

*Tabas LongitudalEQ Responce Spectrum
of Acceleration ($\xi=2\%$)*



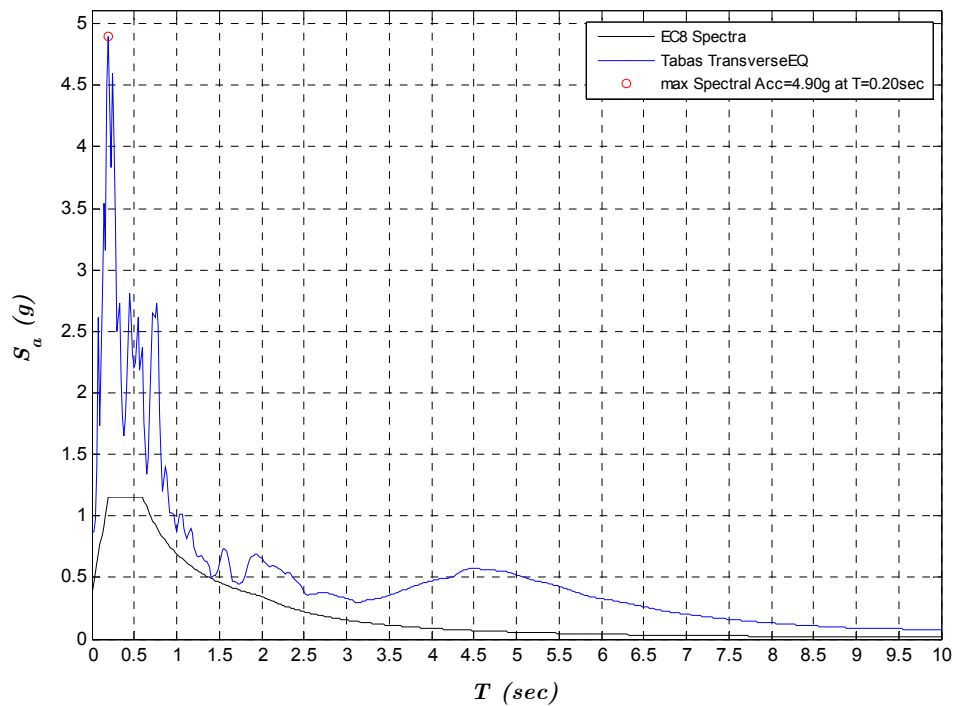
Σχήμα 4.17 Φάσμα απόκρισης σε όρους επιταχύνσεων διαμήκους συνιστώσας σεισμού Tabas

*Tabas TransverseEQ Time History
of Acceleration*



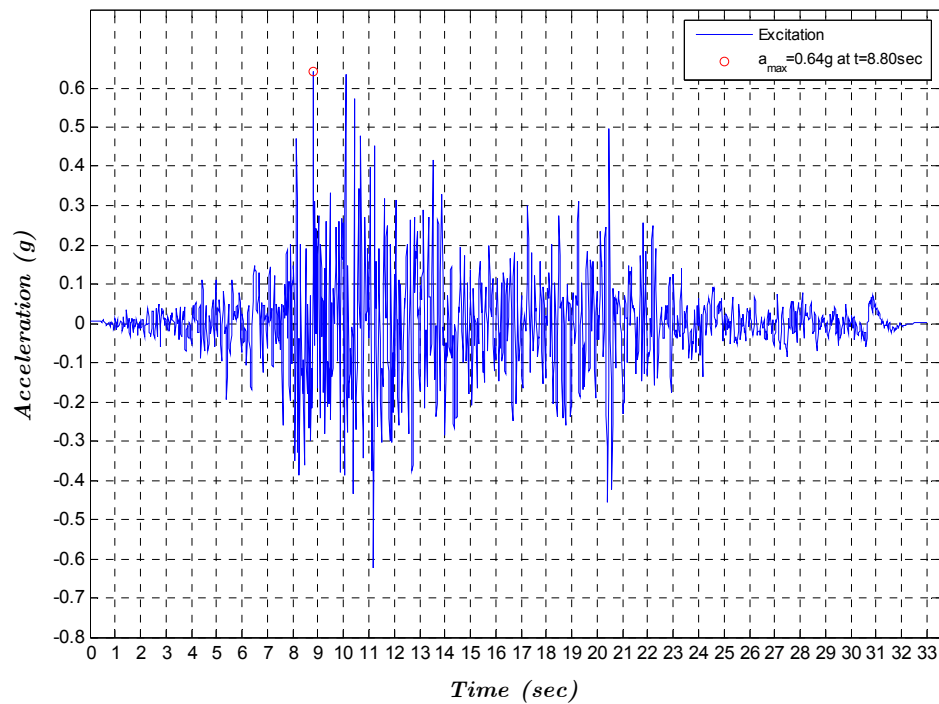
Σχήμα 4.18 Χρονοιστορία επιταχύνσεων εγκάρσιας συνιστώσας σεισμού Tabas

*Tabas TransverseEQ Responce Spectrum
of Acceleration ($\xi = 2\%$)*



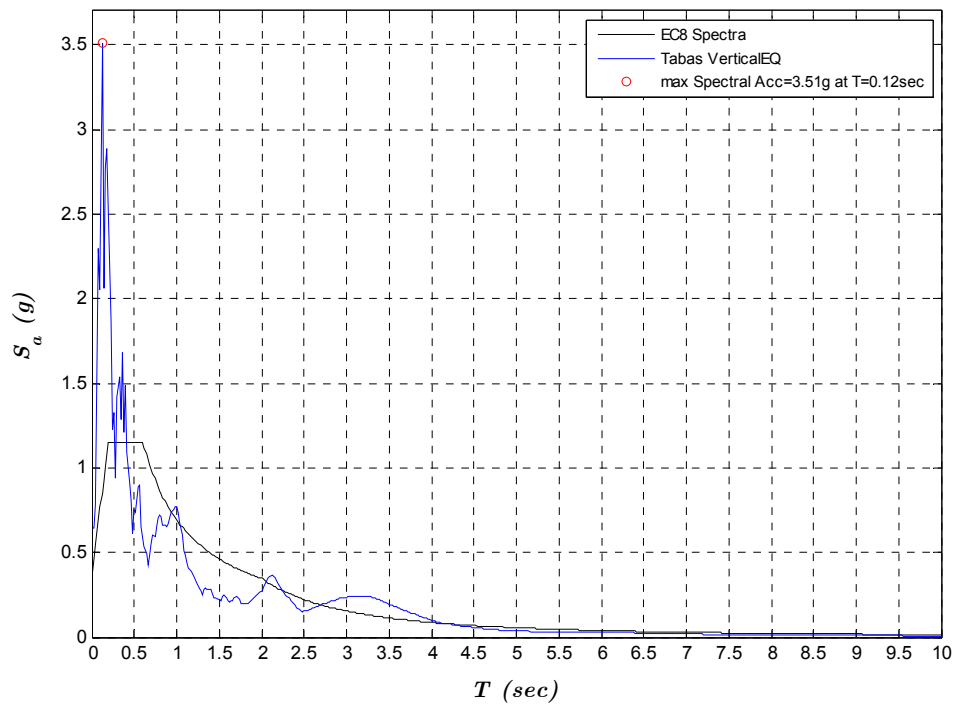
Σχήμα 4.19 Φάσμα απόκρισης σε όρους επιταχύνσεων εγκάρσιας συνιστώσας σεισμού Tabas

*Tabas VerticalEQ Time History
of Acceleration*



Σχήμα 4.20 Χρονοιστορία επιταχύνσεων κατακόρυφης συνιστώσας σεισμού Tabas

*Tabas VerticalEQ Responce Spectrum
of Acceleration ($\xi = 2\%$)*



Σχήμα 4.21 Φάσμα απόκρισης σε όρους επιταχύνσεων κατακόρυφης συνιστώσας σεισμού Tabas

Πίνακας 4.3 Συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά των χρονοϊστοριών για $\xi = 2\%$

Χρονοϊστορία	PGA [g]	maxSa [g]	Διάρκεια [sec]
KozaniEQ	0.21	1.13	29.37
AigioEQ	0.50	1.53	10.22
AigioEQ Scaled 1.5	0.75	2.29	10.22
AigioEQ Scaled 4.0	2.00	6.10	10.22
AigioEQ Matched	0.63	1.26	10.22
Tabas LongitudalEQ	0.85	5.10	32.98
Tabas TransverseEQ	0.86	4.90	32.98
Tabas VerticalEQ	0.64	3.51	32.98

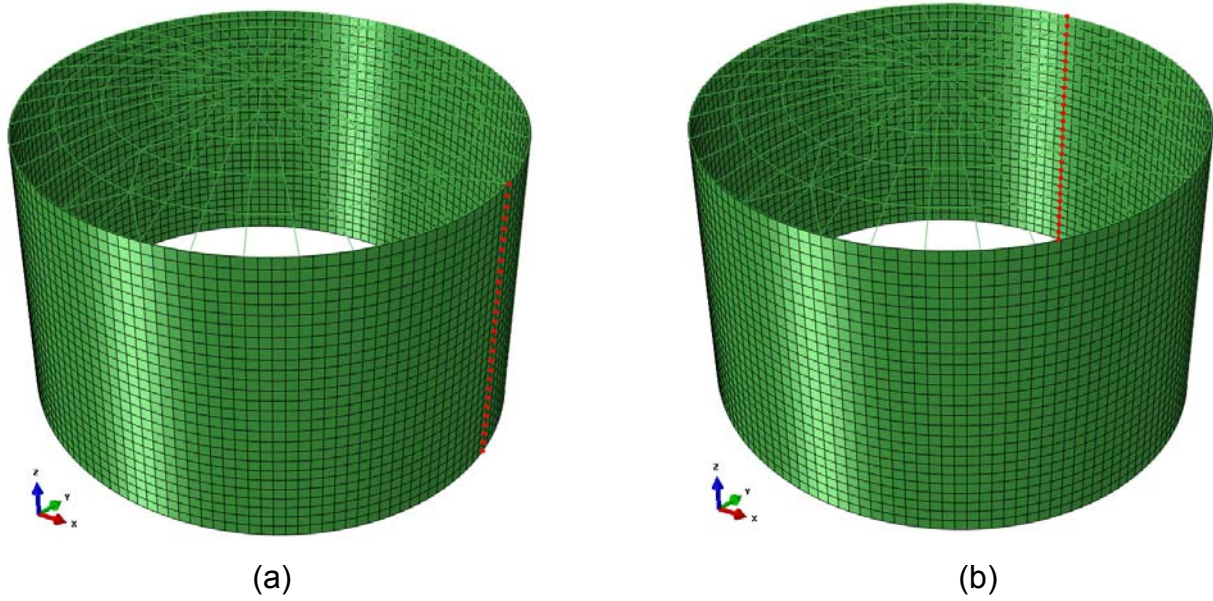
4.4 Αποτελέσματα αναλύσεων

Για τη μελέτη της δεξαμενής πραγματοποιήθηκαν συνολικά επτά αναλύσεις. Η σεισμική διέγερση κατά διεύθυνση για κάθε περίπτωση ανάλυσης φαίνεται στον Πίνακα 4.4.

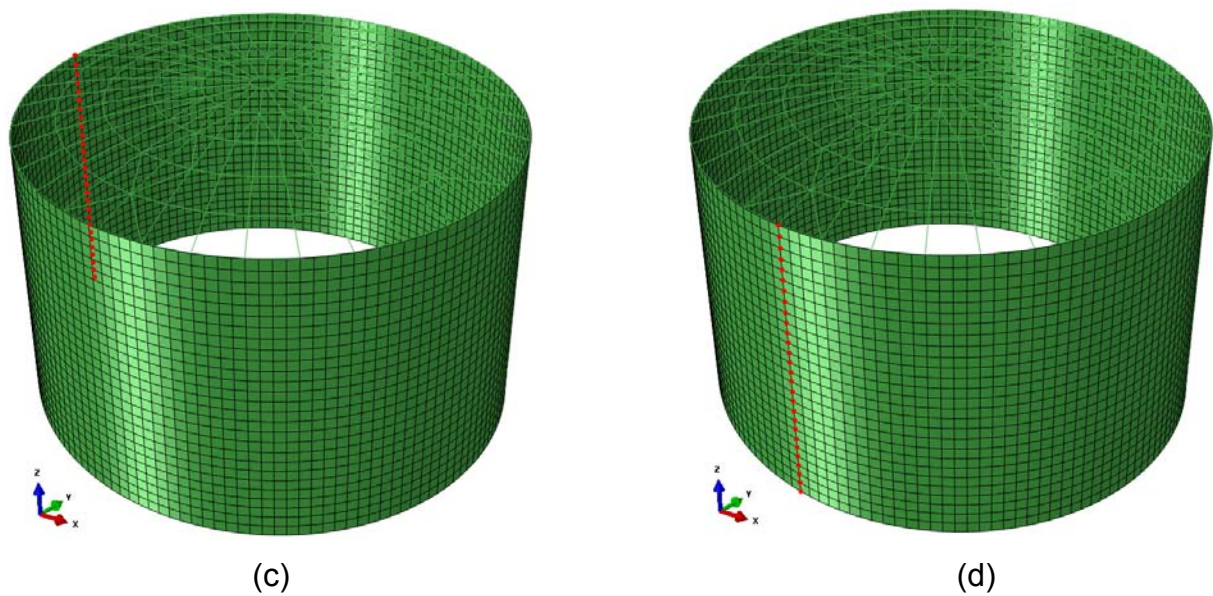
Πίνακας 4.4 Σεισμική διέγερση κατά διεύθυνση για κάθε περίπτωση ανάλυσης

ΑΝΑΛΥΣΗ	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ		
	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
KozaniEQ	<i>KozaniEQ</i>	0	0
AigioEQ	<i>AigioEQ</i>	0	0
AigioEQ HV	<i>AigioEQ</i>	0	$0.45 * AigioEQ$
AigioEQ Matched	<i>AigioEQ Matched</i>	0	0
AigioEQ Scaled 1.5	<i>AigioEQ Scaled 1.5</i>	0	0
AigioEQ Scaled 4.0	<i>AigioEQ Scaled 4.0</i>	0	0
TabasEQ	<i>Tabas LongitudalEQ</i>	<i>Tabas TransverseEQ</i>	<i>Tabas VerticalEQ</i>

Για την παρακολούθηση της χρονικής εξέλιξης των μετατοπίσεων ορίσθηκαν τέσσερα σετ κόμβων κατά μήκος αντίστοιχων κατακόρυφων γενέτειρων του κυλινδρικού κελύφους το ίχνος των οποίων βρίσκεται στις θέσεις $\theta = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $\theta = 180^\circ$ και $\theta = 270^\circ$ αντίστοιχα όπως φαίνεται στα σχήματα 4.22 και 4.23.



Σχήμα 4.22 Σετ κόμβων για $\theta = 0^\circ$ (a) και για $\theta = 90^\circ$ (b)

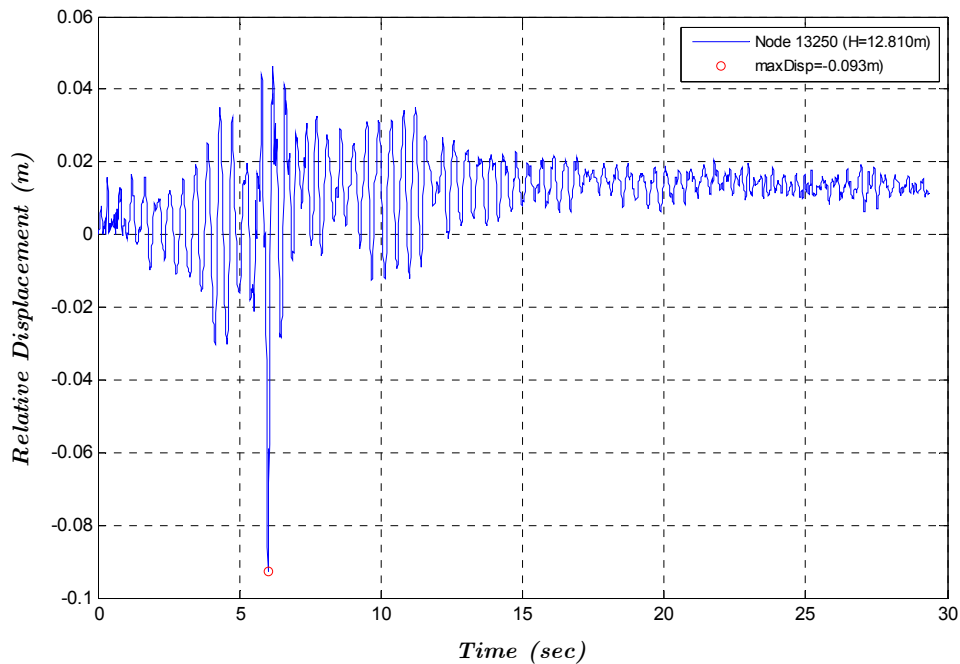


Σχήμα 4.23 Σετ κόμβων για $\theta = 180^\circ$ (c) και για $\theta = 270^\circ$ (d)

Στα σχήματα 4.24 έως 7.79 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των μετατοπίσεων και οι παραμένουσες παραμορφώσεις για κάθε μία από τις αναλύσεις του Πίνακα 4.4.

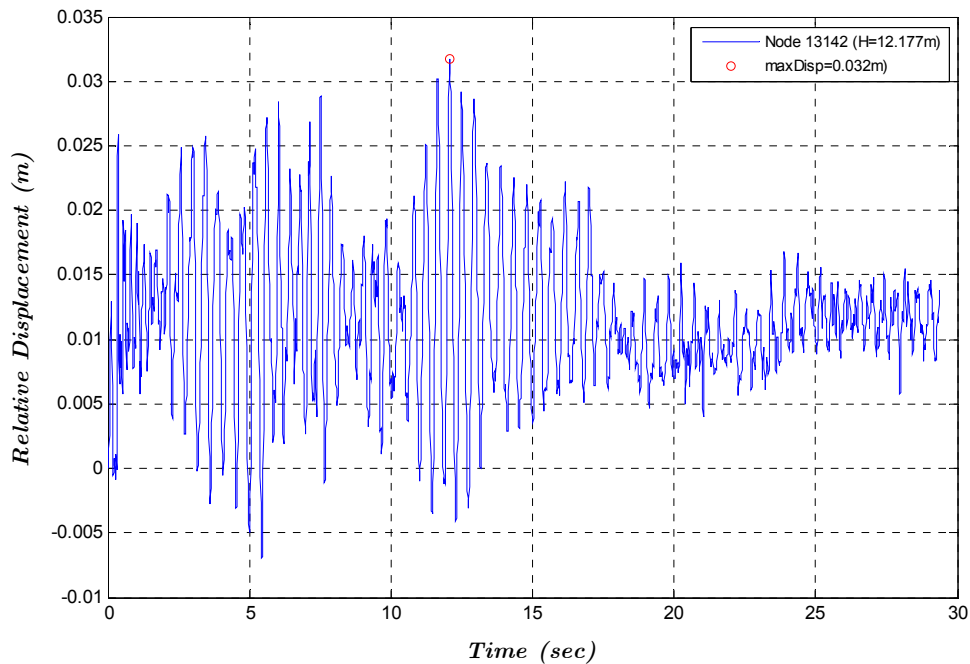
Στον Πίνακα 4.5 δίνονται συγκεντρωτικά οι μέγιστες τιμές των παραπάνω μεγεθών καθώς και η μέγιστη τάση που αναπτύχθηκε στη δεξαμενή κατά τη διάρκεια κάθε ανάλυσης.

*Relative Displacement Time History
of Node with max Relative Displacement
during KozaniEQ for $\theta=0^\circ$*



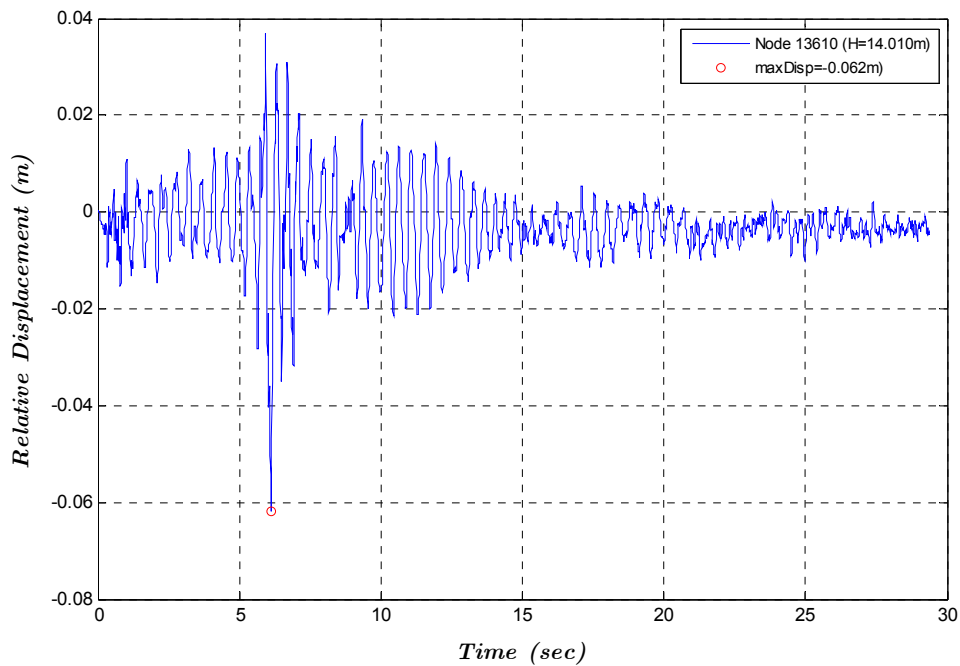
Σχήμα 4.24 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση KozaniEQ για $\theta = 0^\circ$

*Relative Displacement Time History
of Node with max Relative Displacement
during KozaniEQ for $\theta=90^\circ$*



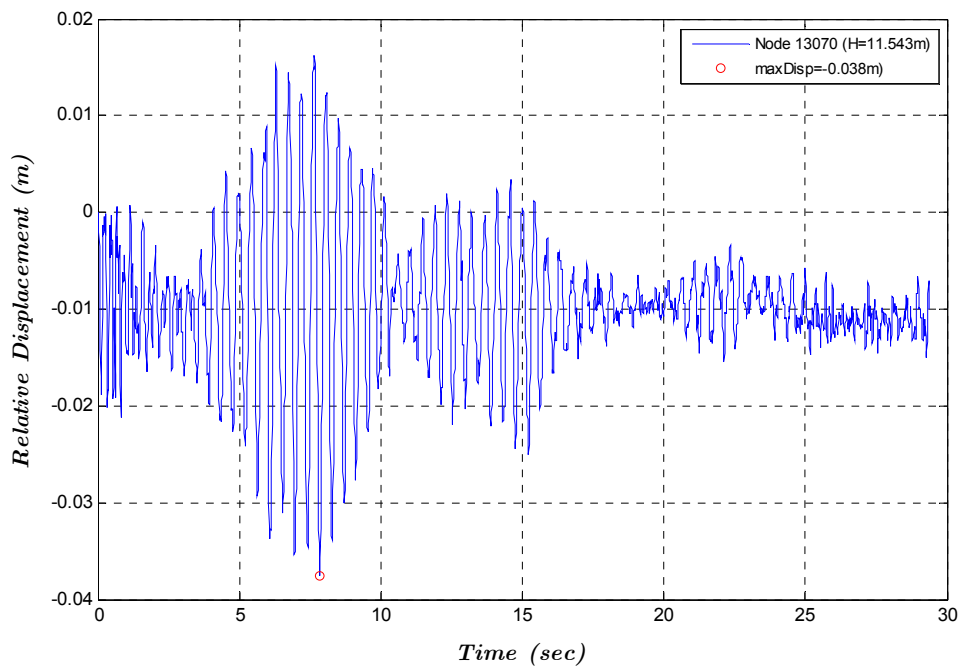
Σχήμα 4.25 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση KozaniEQ για $\theta = 90^\circ$

*Relative Displacement Time History
of Node with max Relative Displacement
during KozaniEQ for $\theta=180^\circ$*

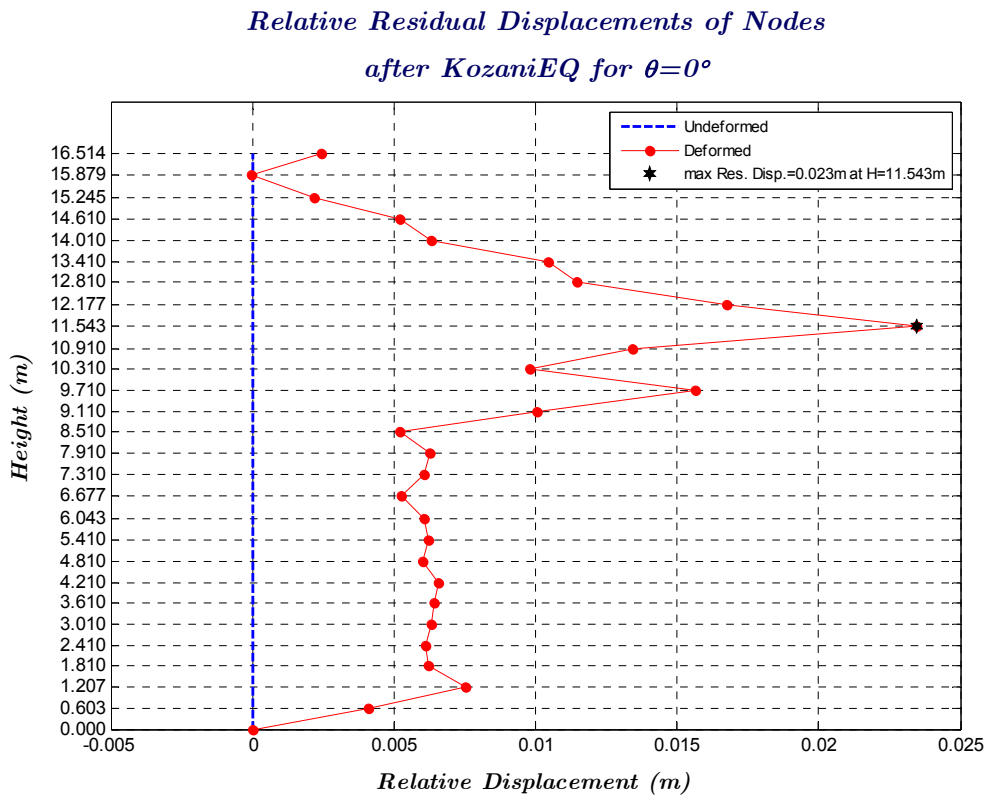


Σχήμα 4.26 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση KozaniEQ για $\theta = 180^\circ$

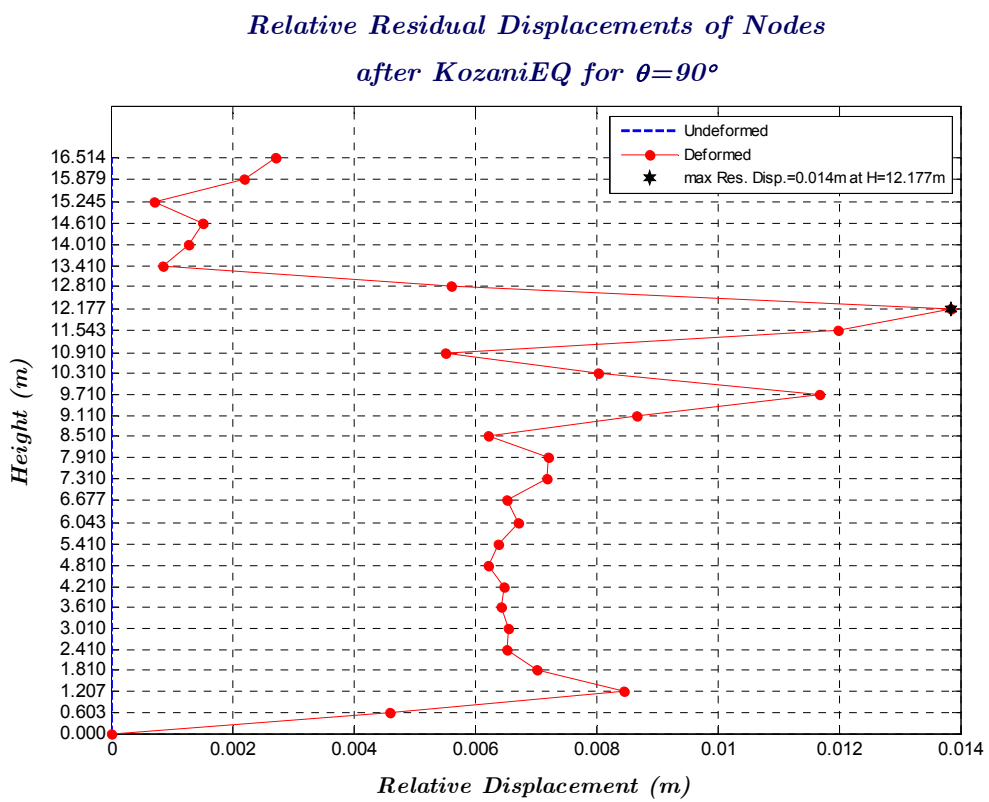
*Relative Displacement Time History
of Node with max Relative Displacement
during KozaniEQ for $\theta=270^\circ$*



Σχήμα 4.27 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση KozaniEQ για $\theta = 270^\circ$

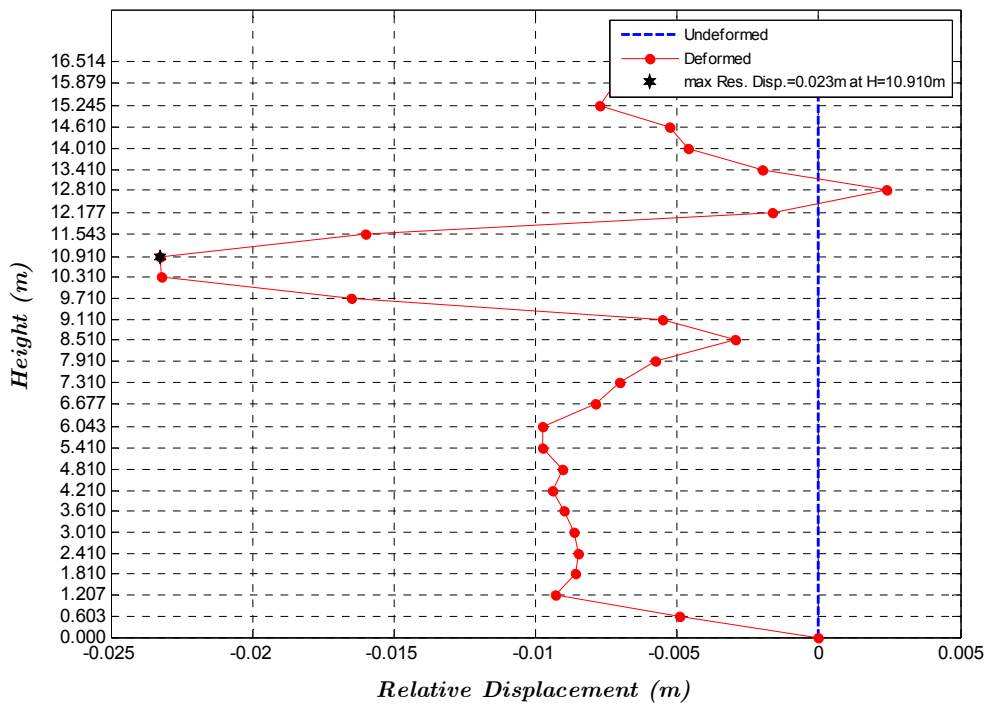


Σχήμα 4.28 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση KozaniEQ για $\theta = 0^\circ$



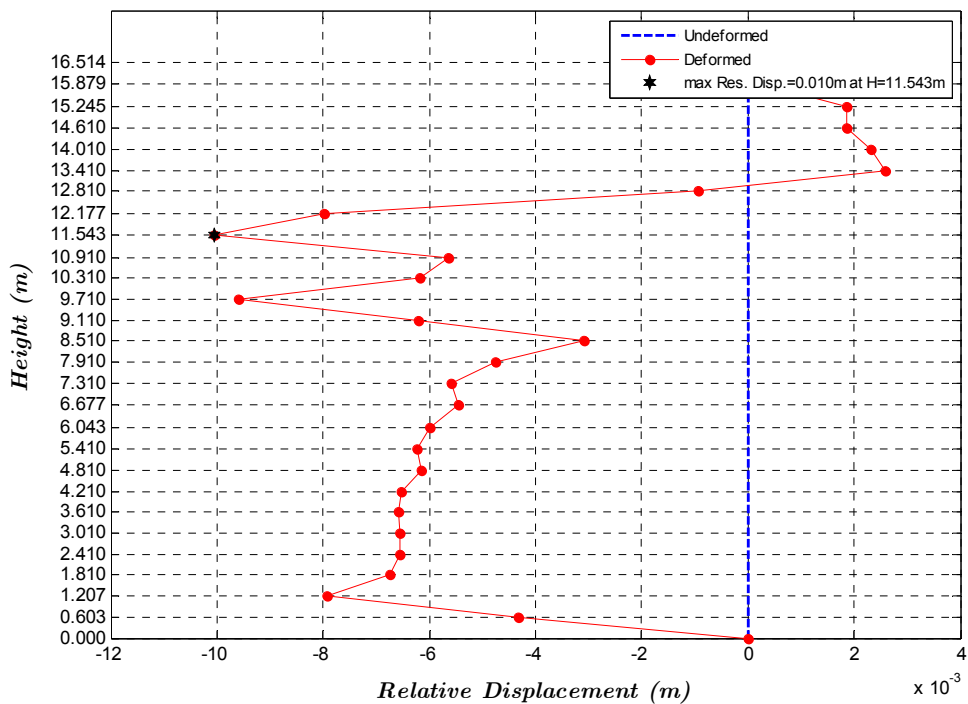
Σχήμα 4.29 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση KozaniEQ για $\theta = 90^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after KozaniEQ for $\theta=180^\circ$*



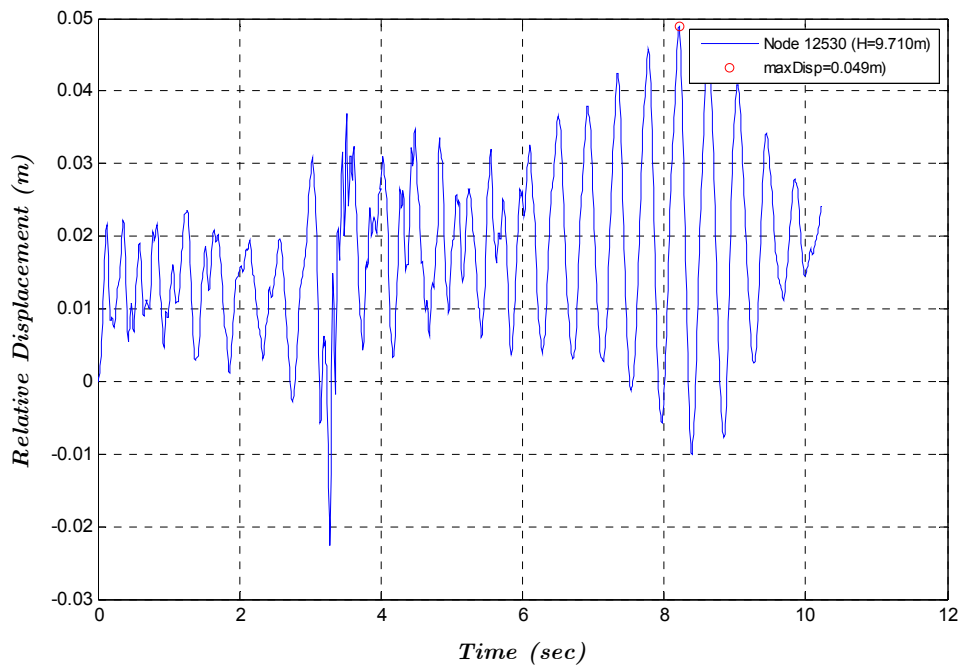
Σχήμα 4.30 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση KozaniEQ για $\theta = 180^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after KozaniEQ for $\theta=270^\circ$*



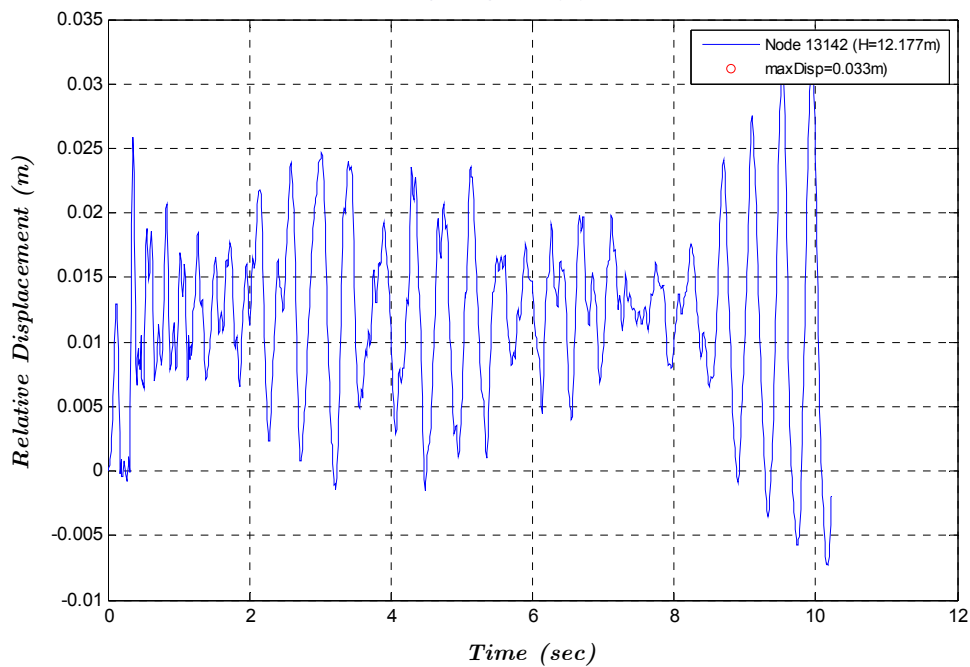
Σχήμα 4.31 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση KozaniEQ για $\theta = 270^\circ$

*Relative Displacement Time History
of Node with max Relative Displacement
during AigioEQ for $\theta=0^\circ$*

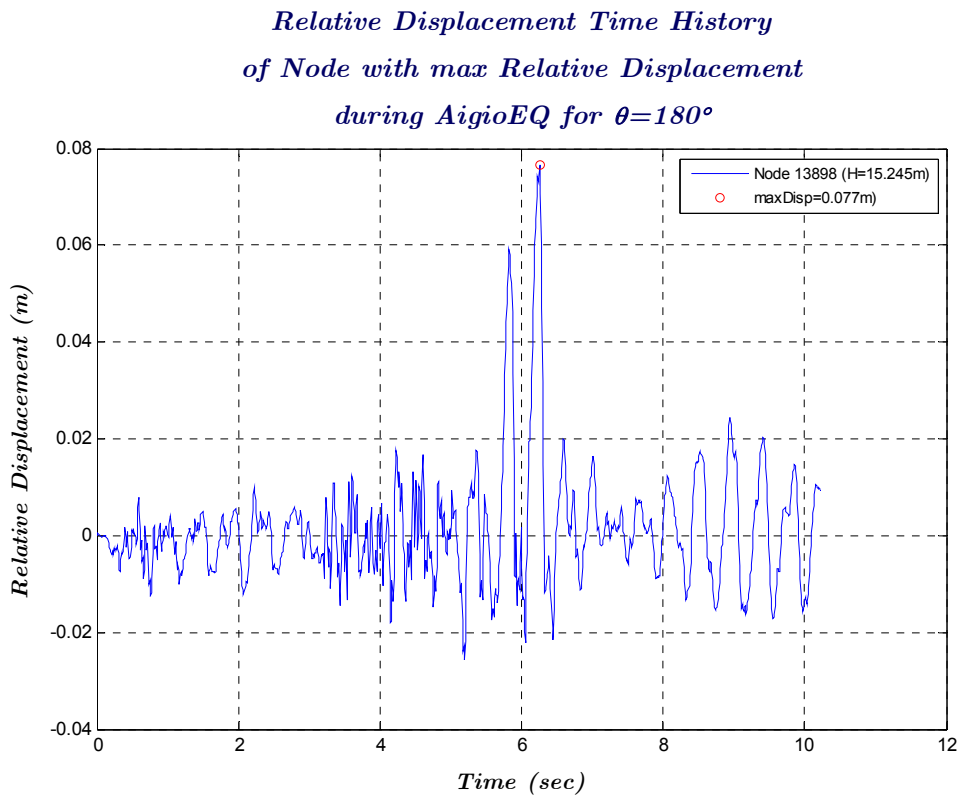


Σχήμα 4.32 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ για $\theta = 0^\circ$

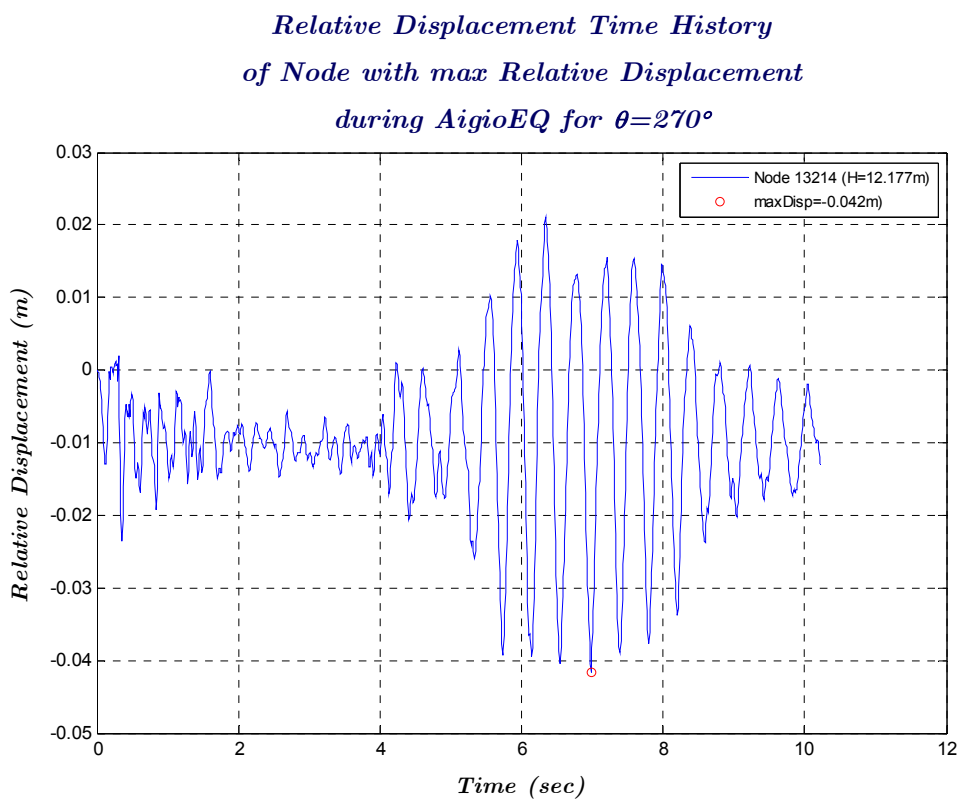
*Relative Displacement Time History
of Node with max Relative Displacement
during AigioEQ for $\theta=90^\circ$*



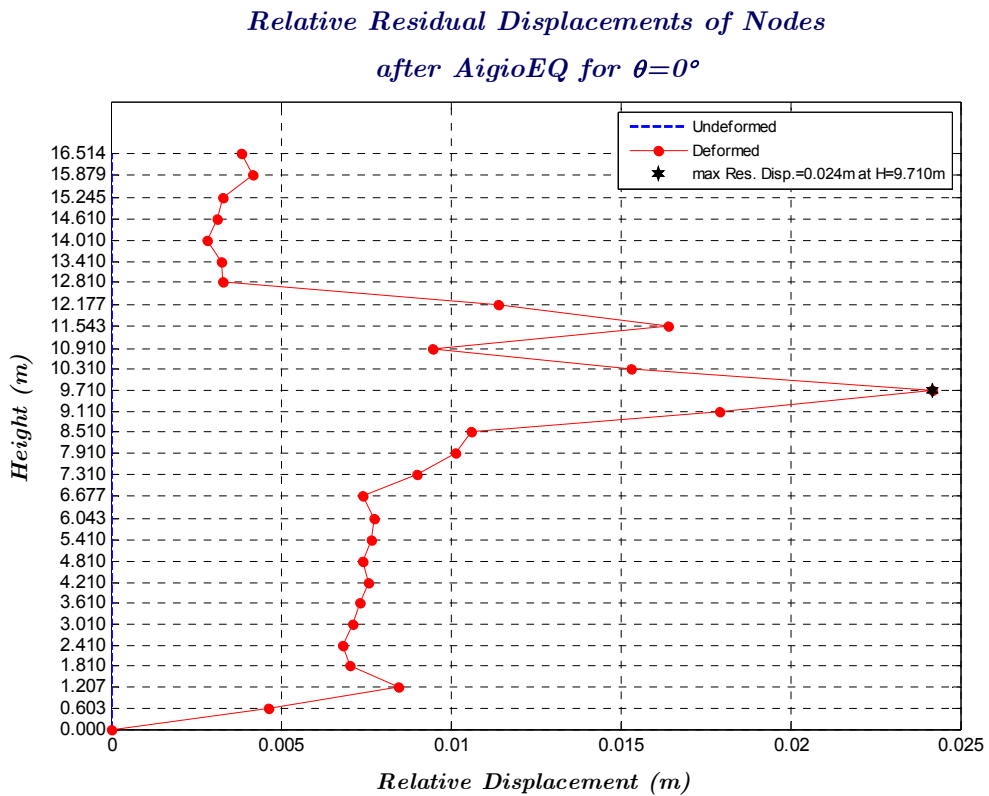
Σχήμα 4.33 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ για $\theta = 90^\circ$



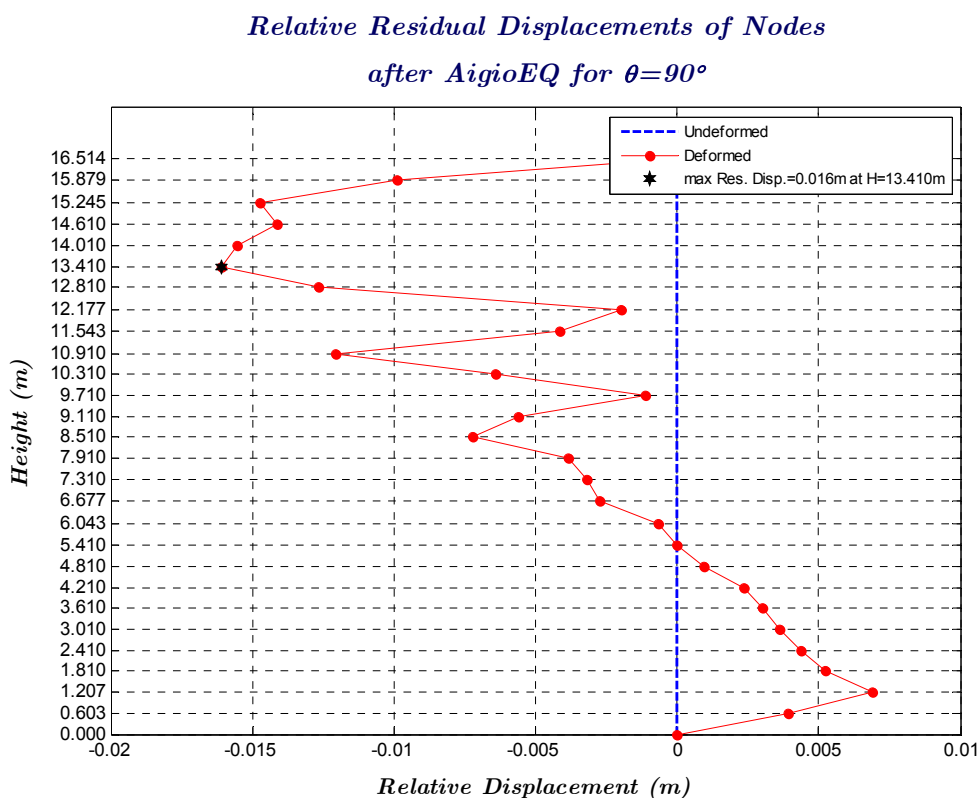
Σχήμα 4.34 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ για $\theta = 180^\circ$



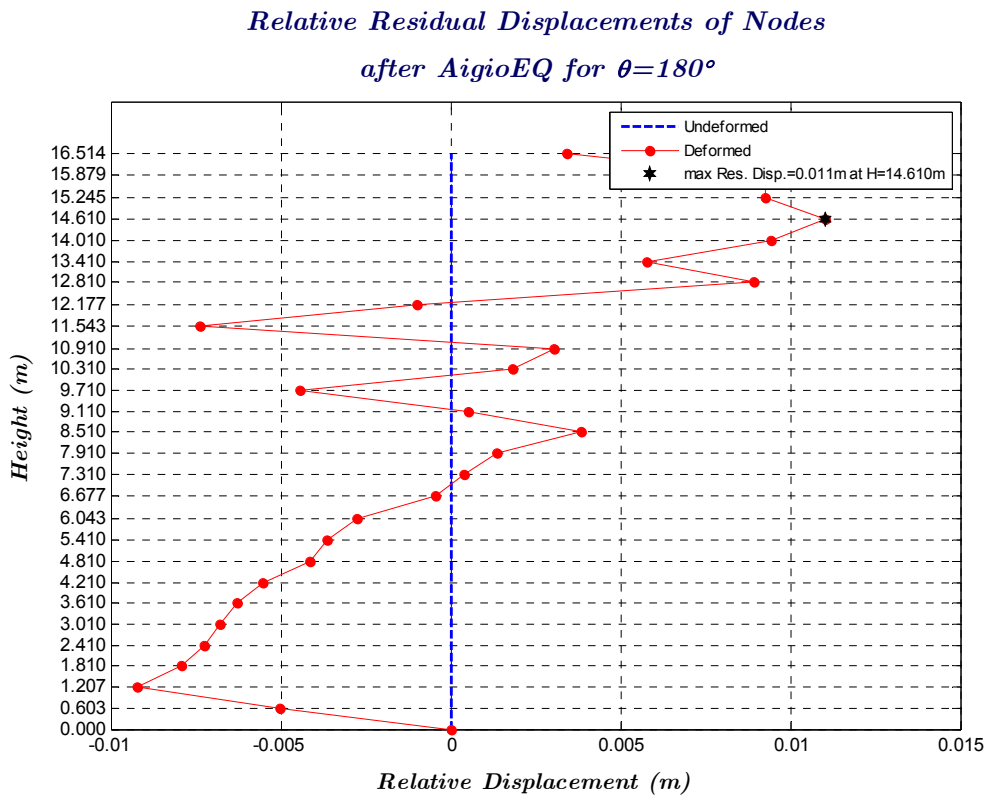
Σχήμα 4.35 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ για $\theta = 270^\circ$



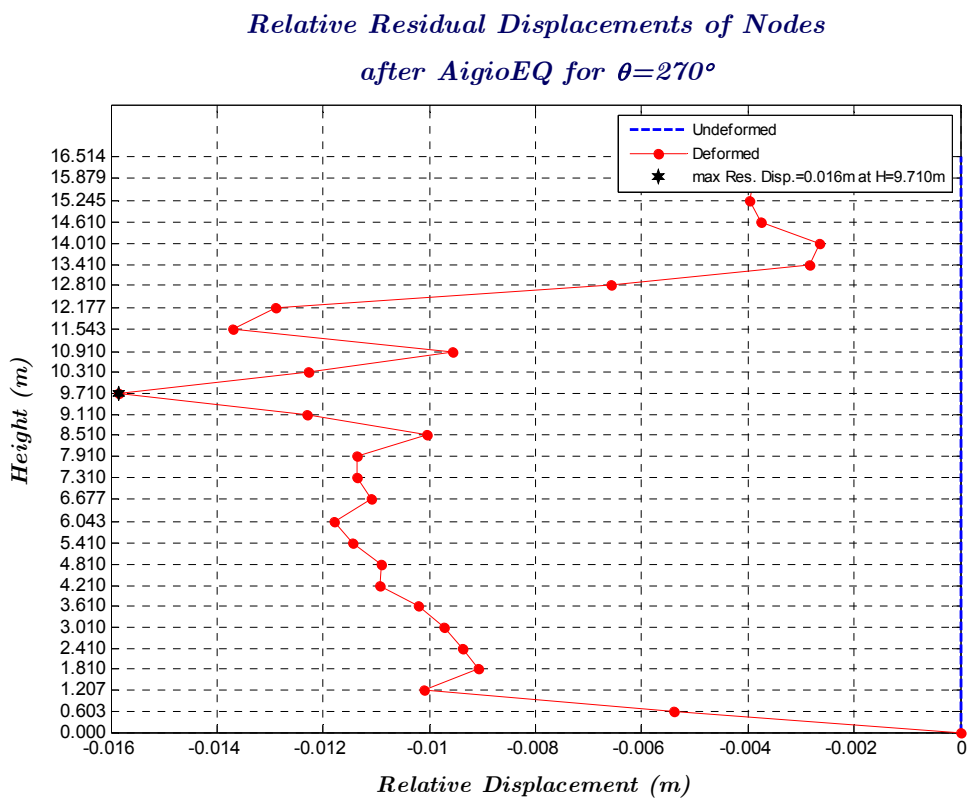
Σχήμα 4.36 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ για $\theta = 0^\circ$



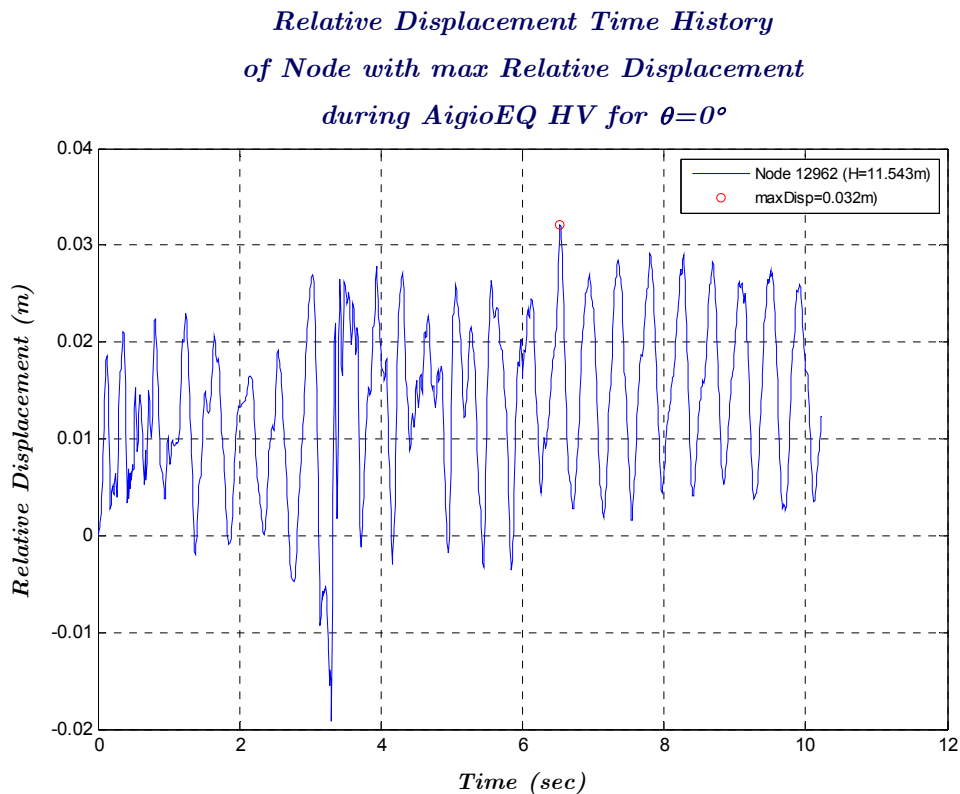
Σχήμα 4.37 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ για $\theta = 90^\circ$



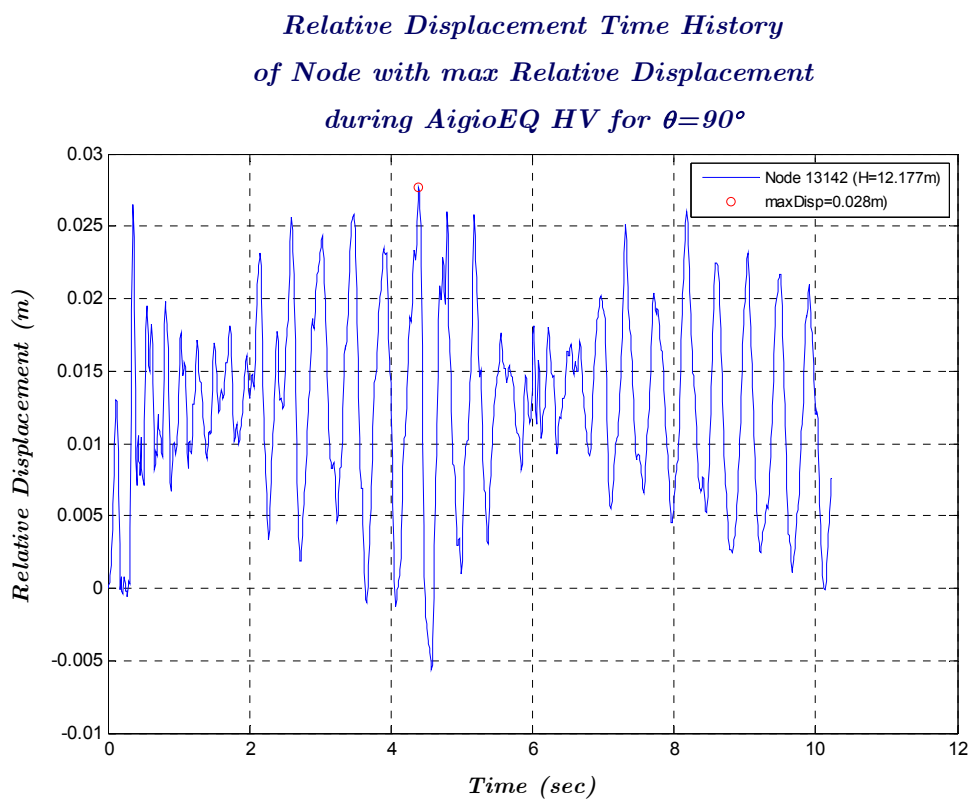
Σχήμα 4.38 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ για $\theta = 180^\circ$



Σχήμα 4.39 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ για $\theta = 270^\circ$

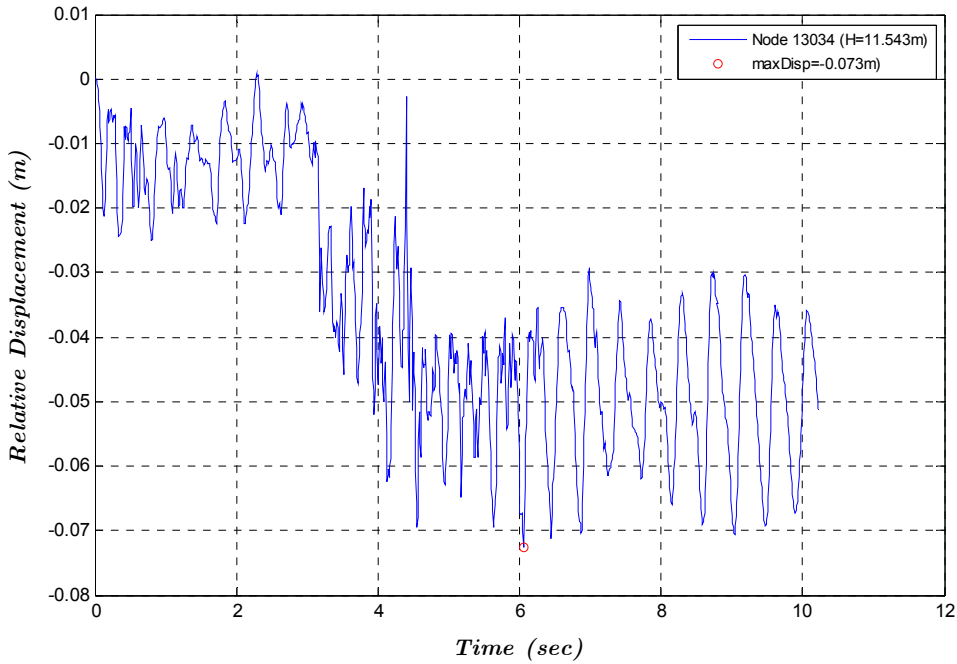


Σχήμα 4.40 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ HV για $\theta = 0^\circ$



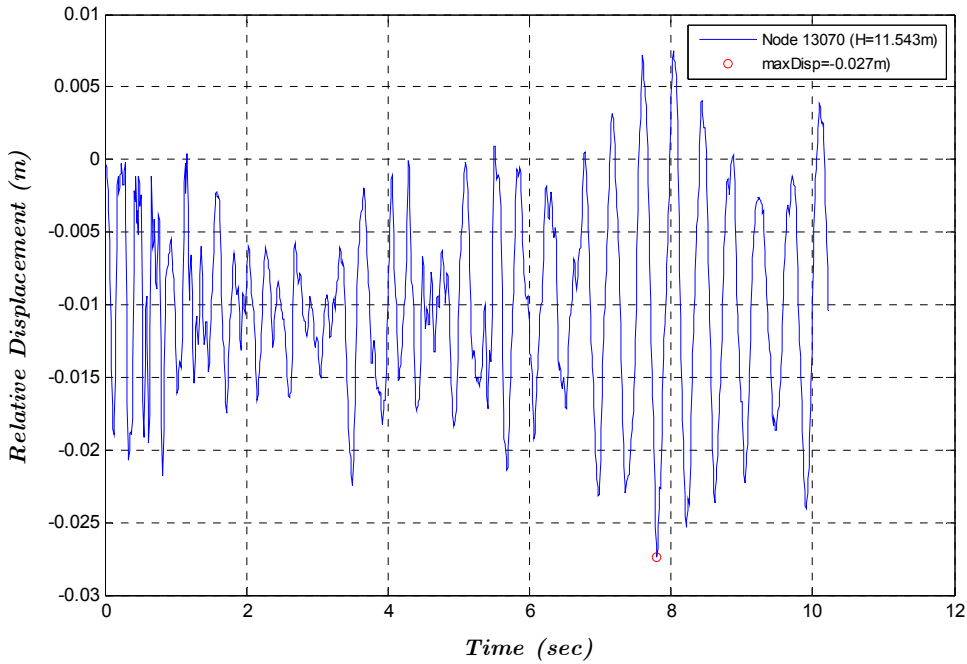
Σχήμα 4.41 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ HV για $\theta = 90^\circ$

*Relative Displacement Time History
of Node with max Relative Displacement
during AigioEQ HV for $\theta=180^\circ$*

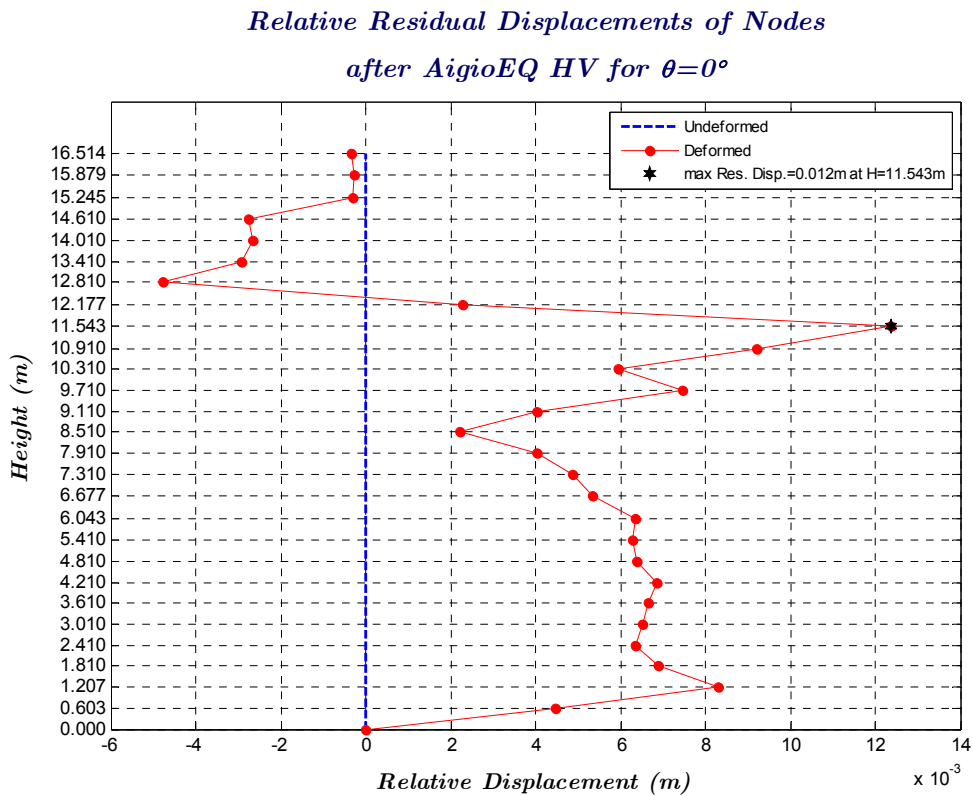


Σχήμα 4.42 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ HV για $\theta = 180^\circ$

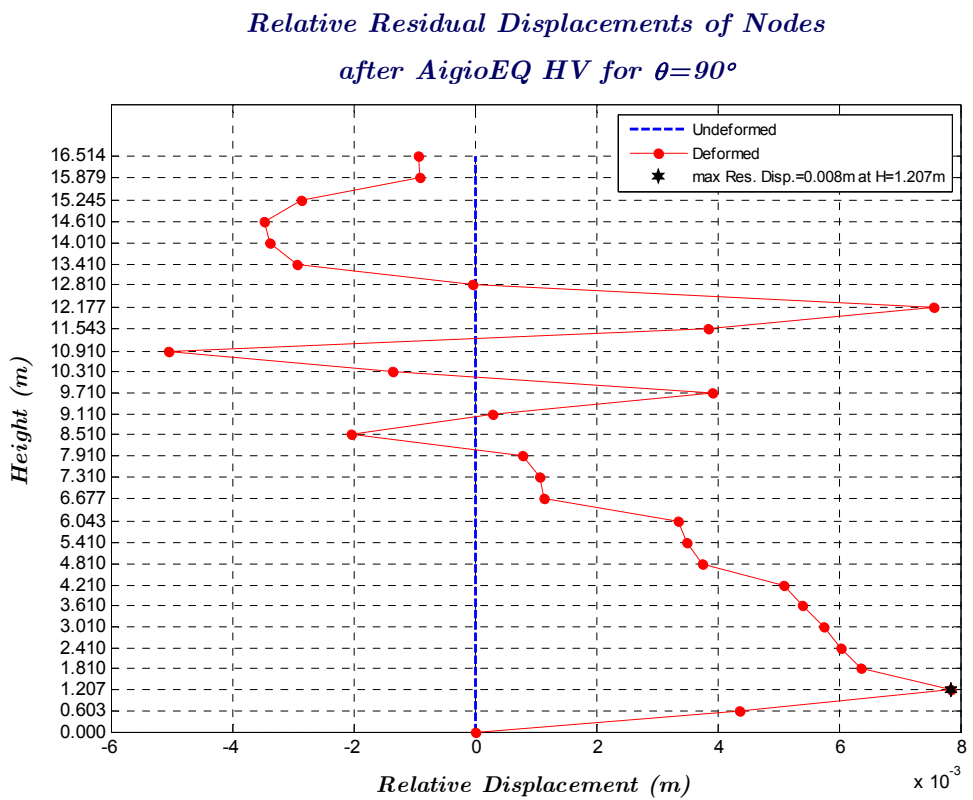
*Relative Displacement Time History
of Node with max Relative Displacement
during AigioEQ HV for $\theta=270^\circ$*



Σχήμα 4.43 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ HV για $\theta = 270^\circ$

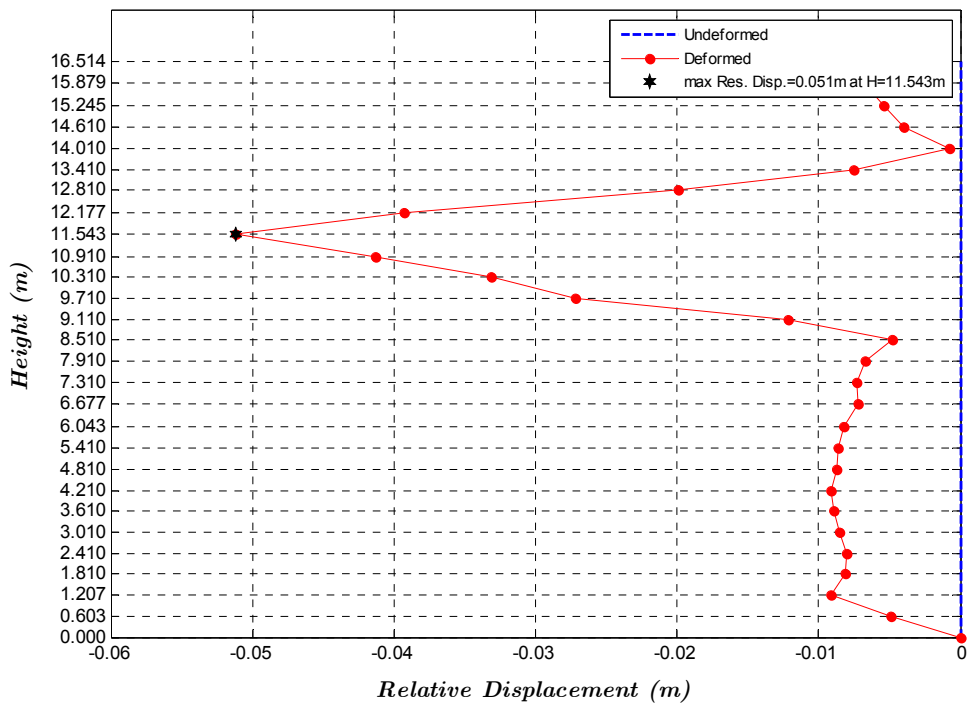


Σχήμα 4.44 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ HV για $\theta = 0^\circ$



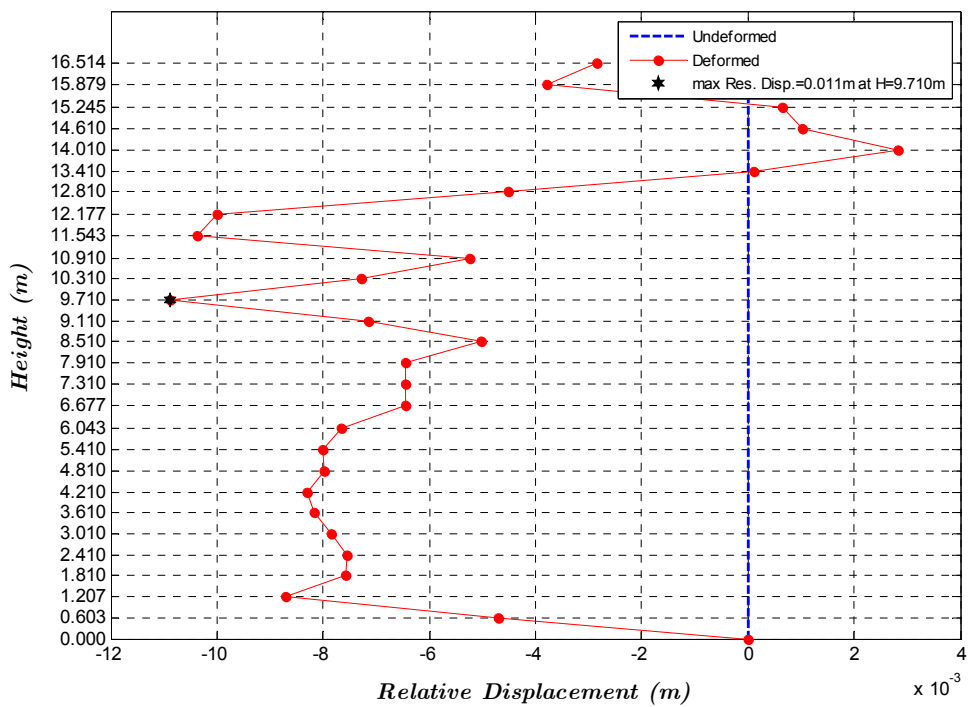
Σχήμα 4.45 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ HV για $\theta = 90^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after AigioEQ HV for $\theta=180^\circ$*

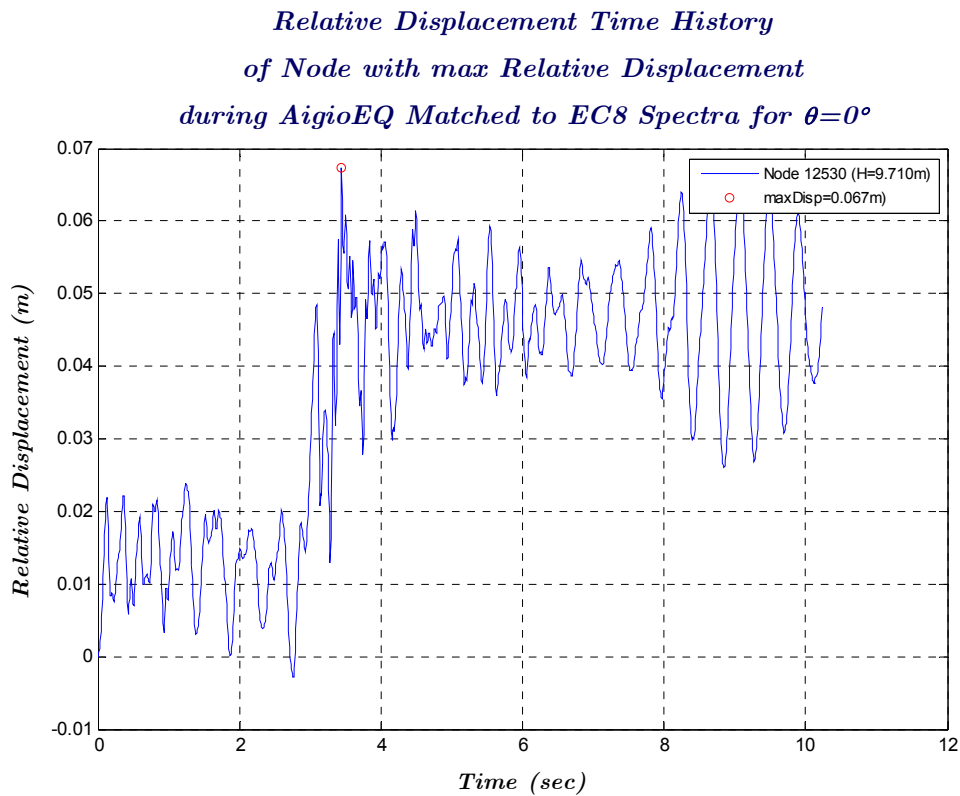


Σχήμα 4.46 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ HV για $\theta = 180^\circ$

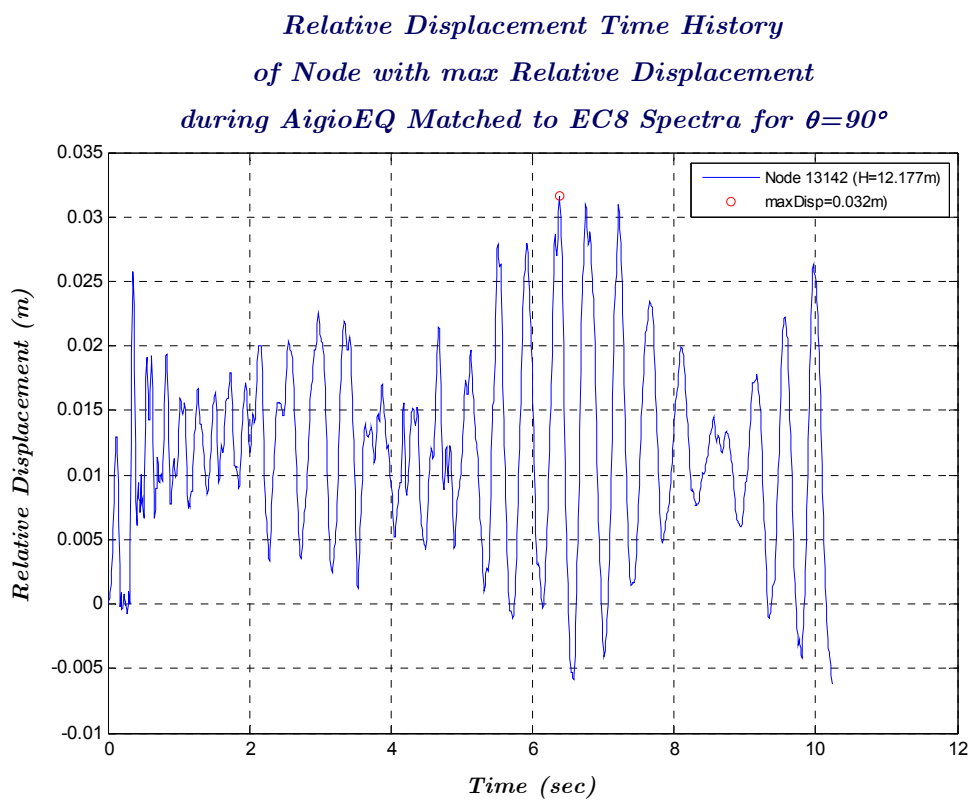
*Relative Residual Displacements of Nodes
after AigioEQ HV for $\theta=270^\circ$*



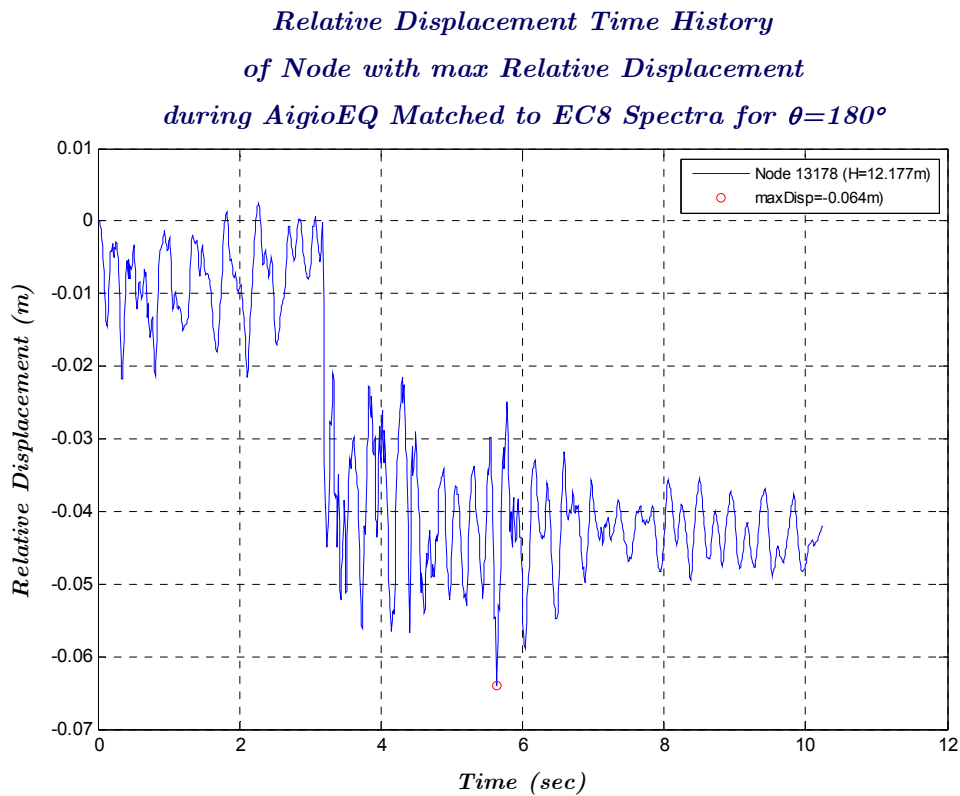
Σχήμα 4.47 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ HV για $\theta = 270^\circ$



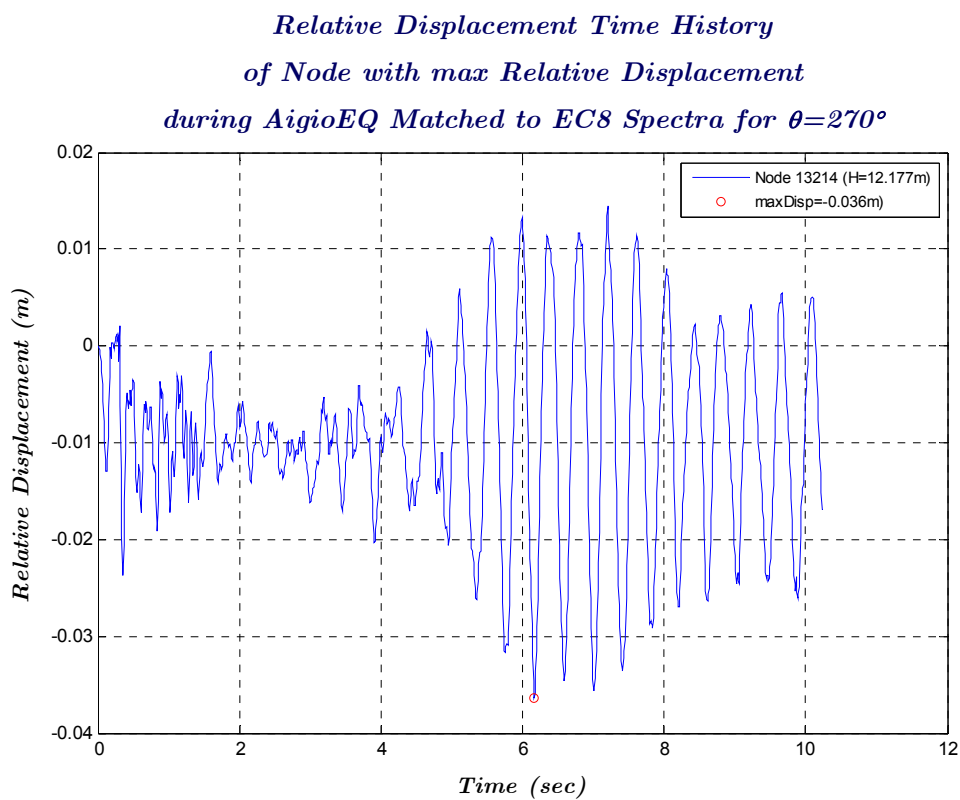
Σχήμα 4.48 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ Matched για $\theta = 0^\circ$



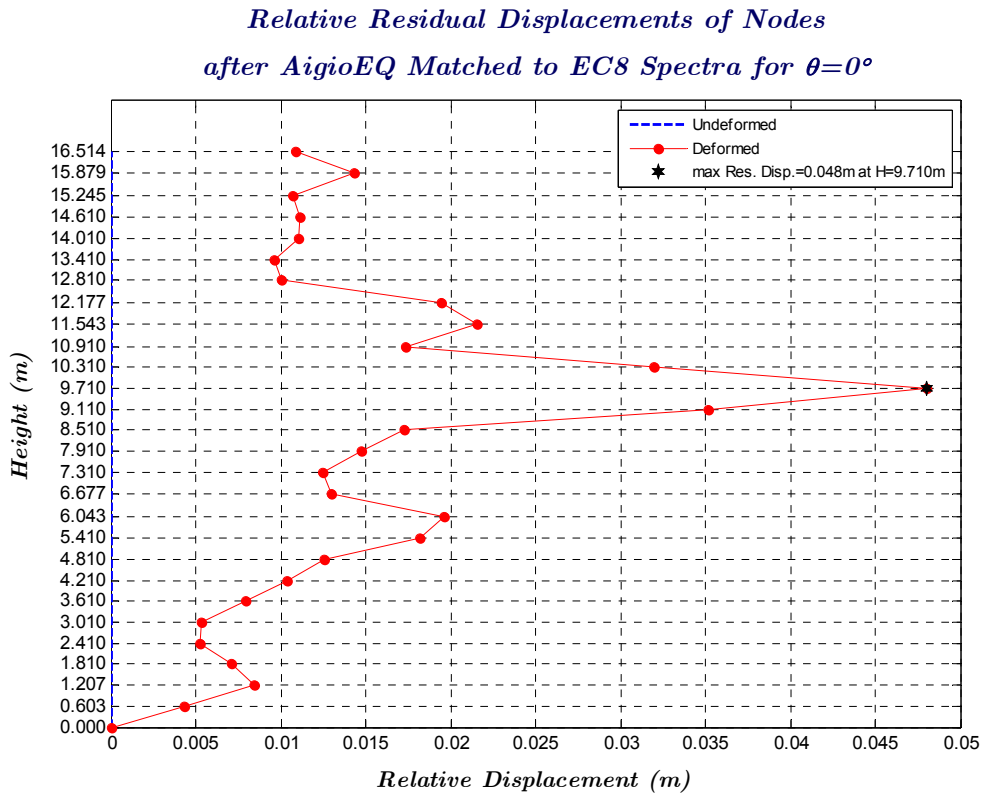
Σχήμα 4.49 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ Matched για $\theta = 90^\circ$



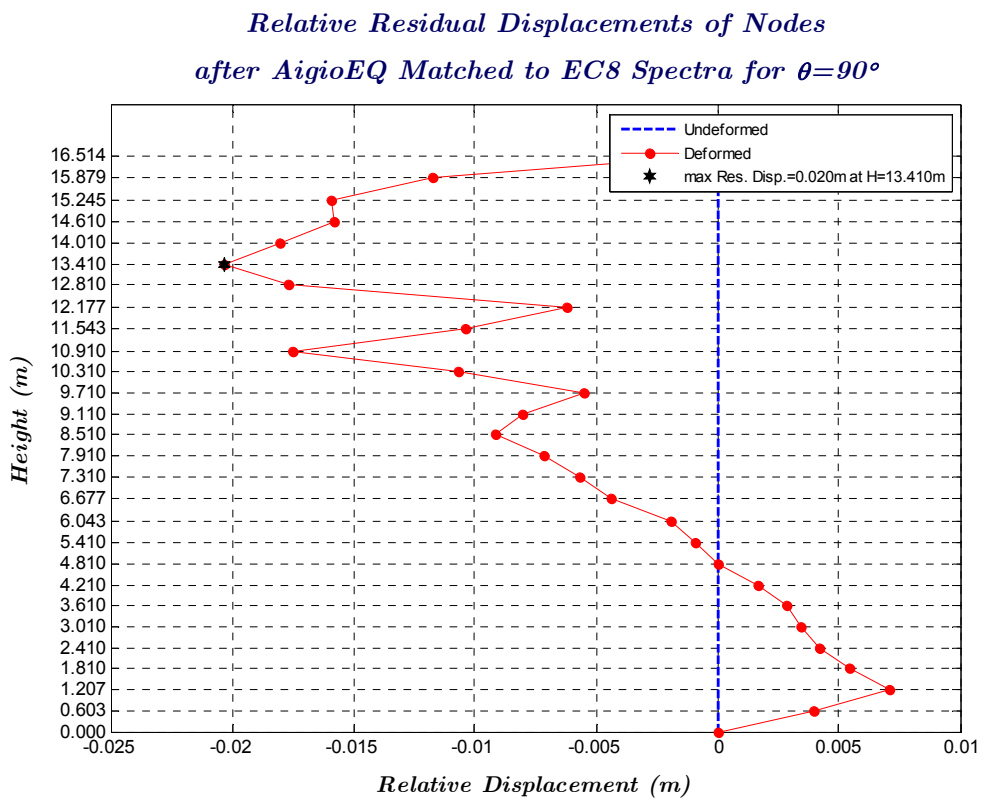
Σχήμα 4.50 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ Matched για $\theta = 180^\circ$



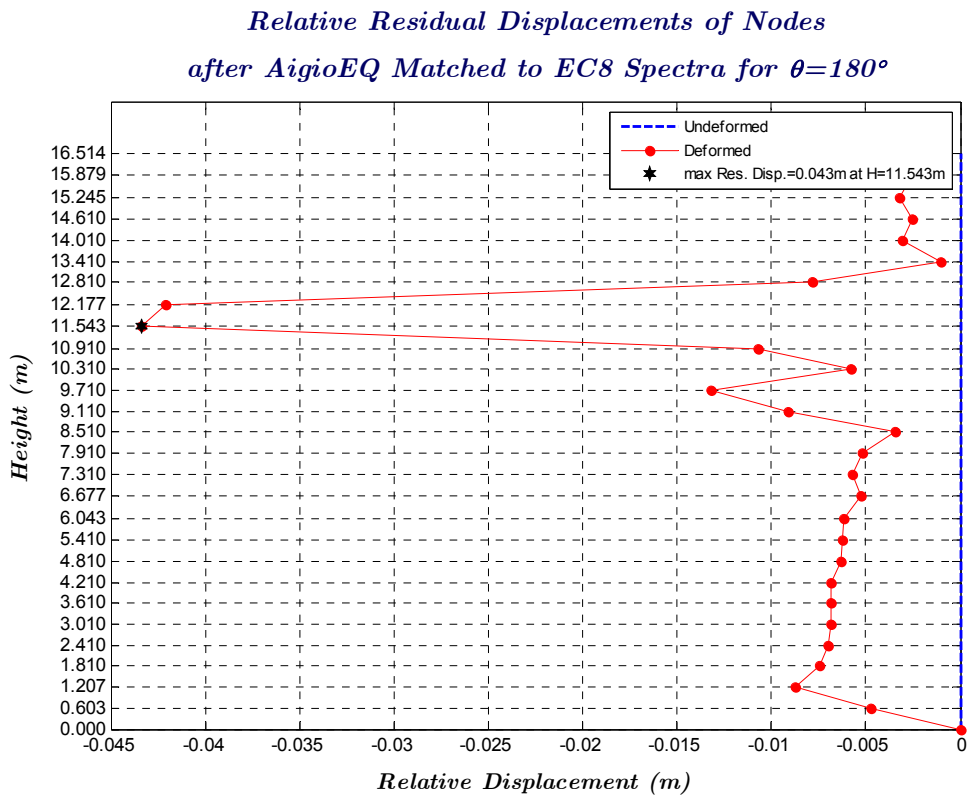
Σχήμα 4.51 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ Matched για $\theta = 270^\circ$



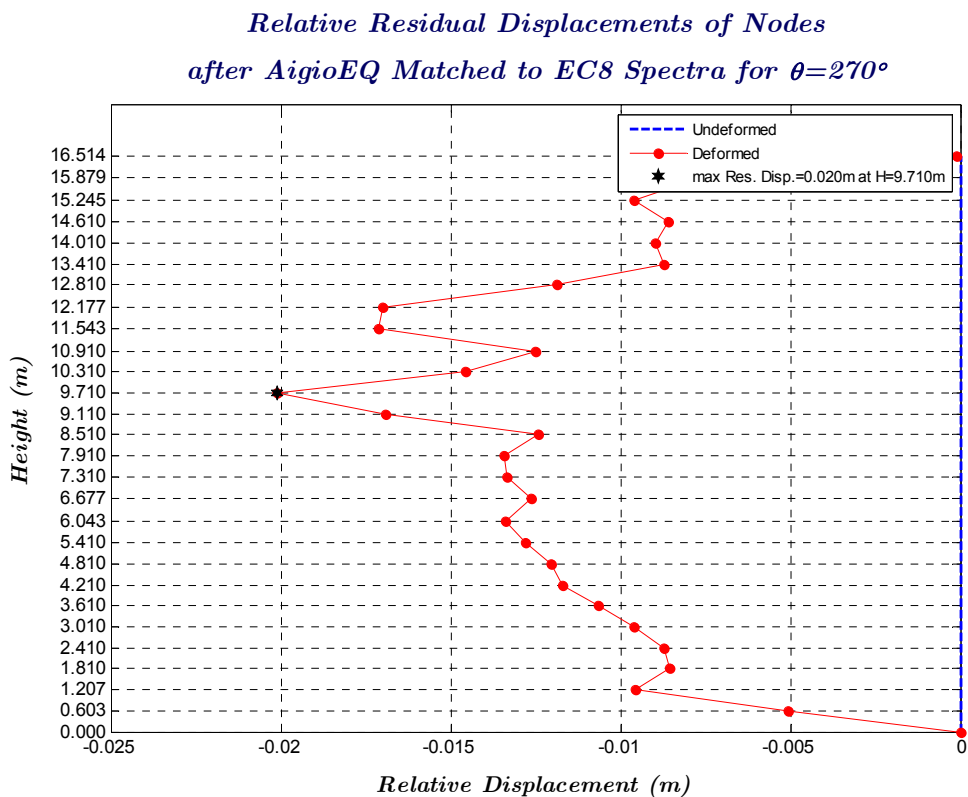
Σχήμα 4.52 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ Matched για $\theta = 0^\circ$



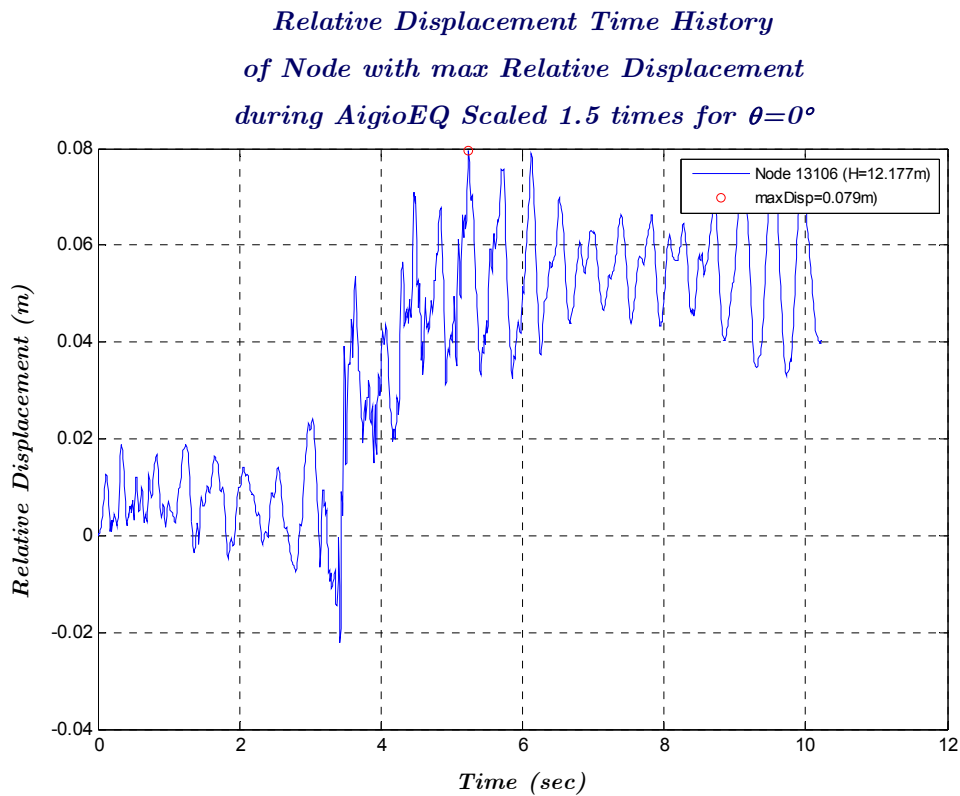
Σχήμα 4.53 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ Matched για $\theta = 90^\circ$



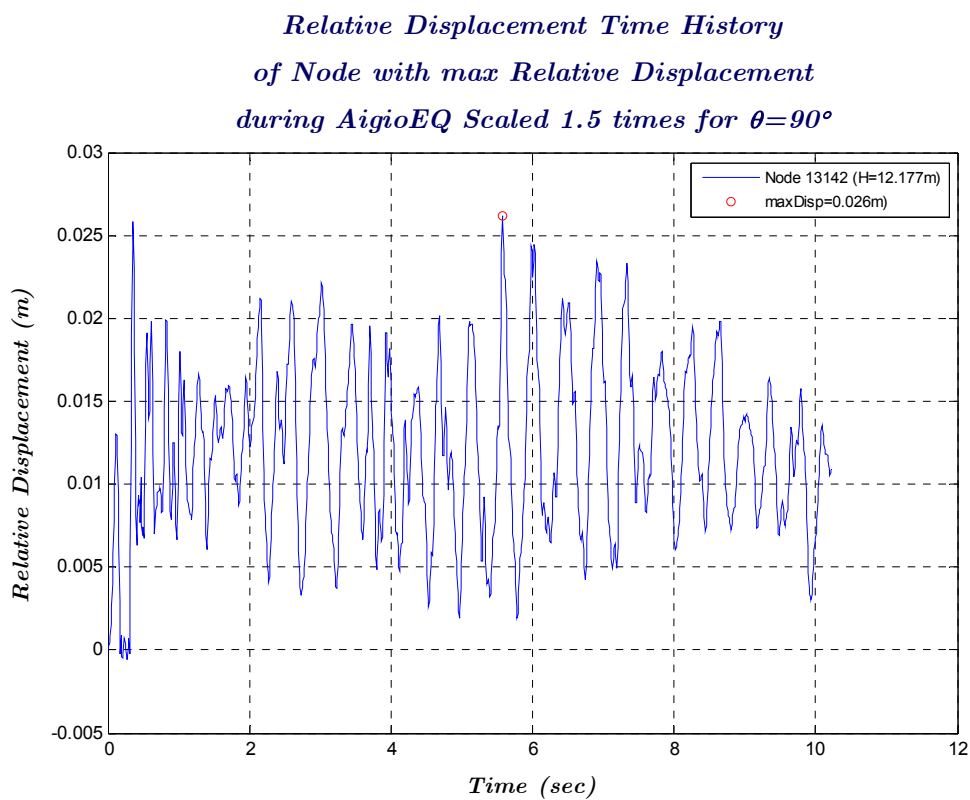
Σχήμα 4.54 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ Matched για $\theta = 180^\circ$



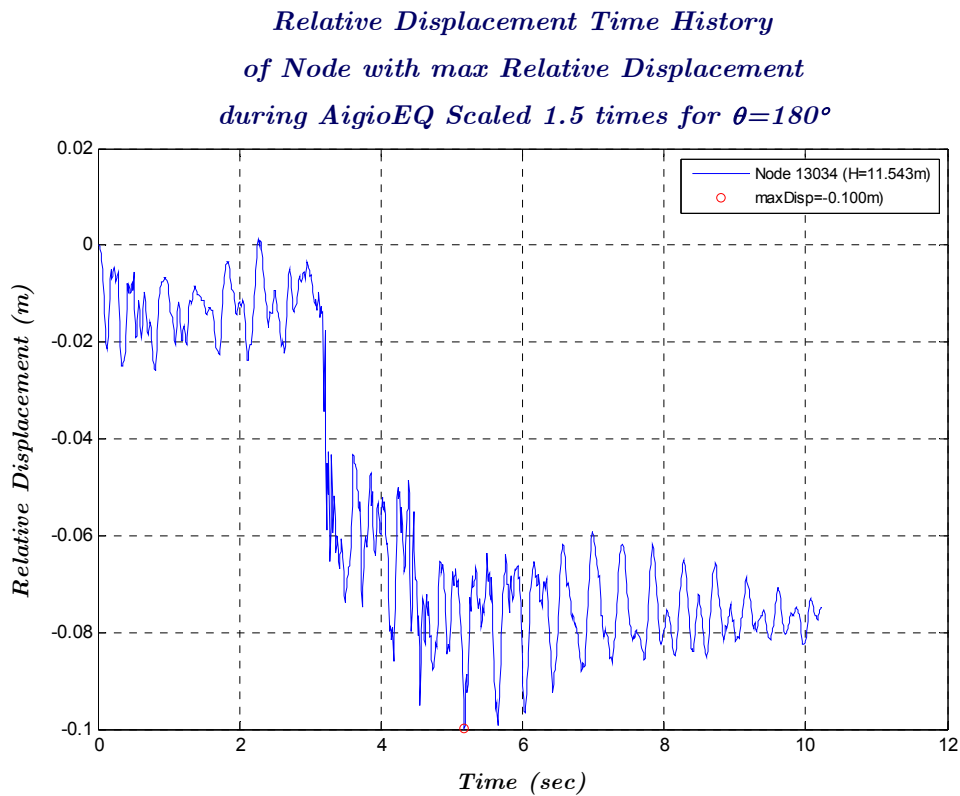
Σχήμα 4.55 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ Matched για $\theta = 270^\circ$



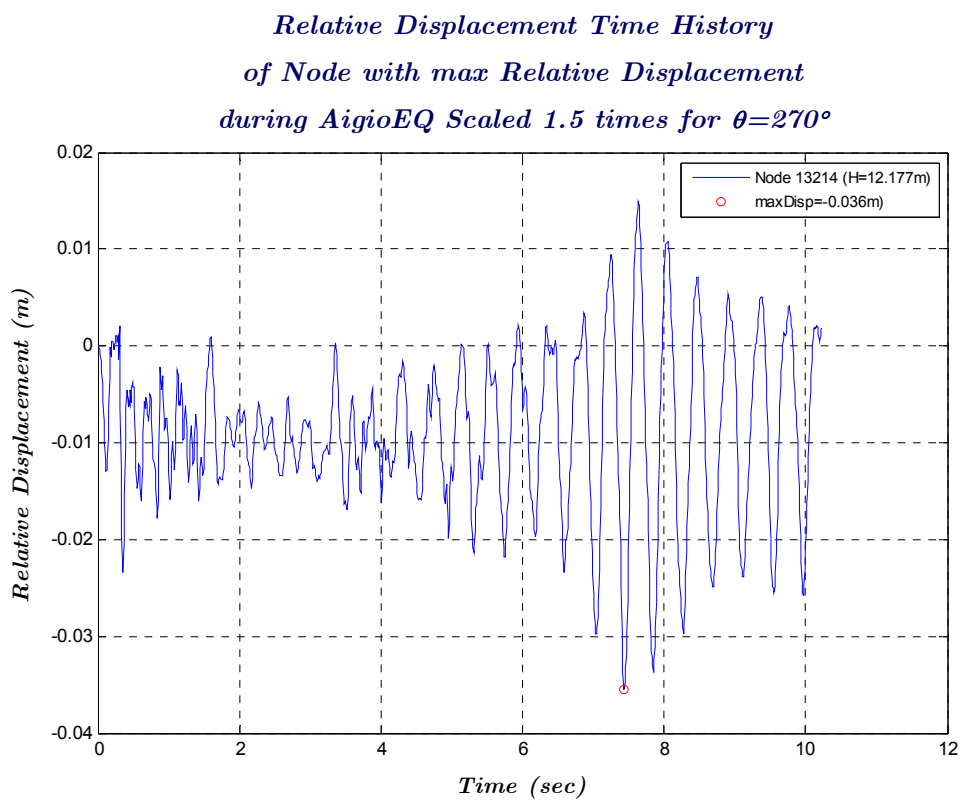
Σχήμα 4.56 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ Scaled 1.5 για $\theta = 0^\circ$



Σχήμα 4.57 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ Scaled 1.5 για $\theta = 90^\circ$

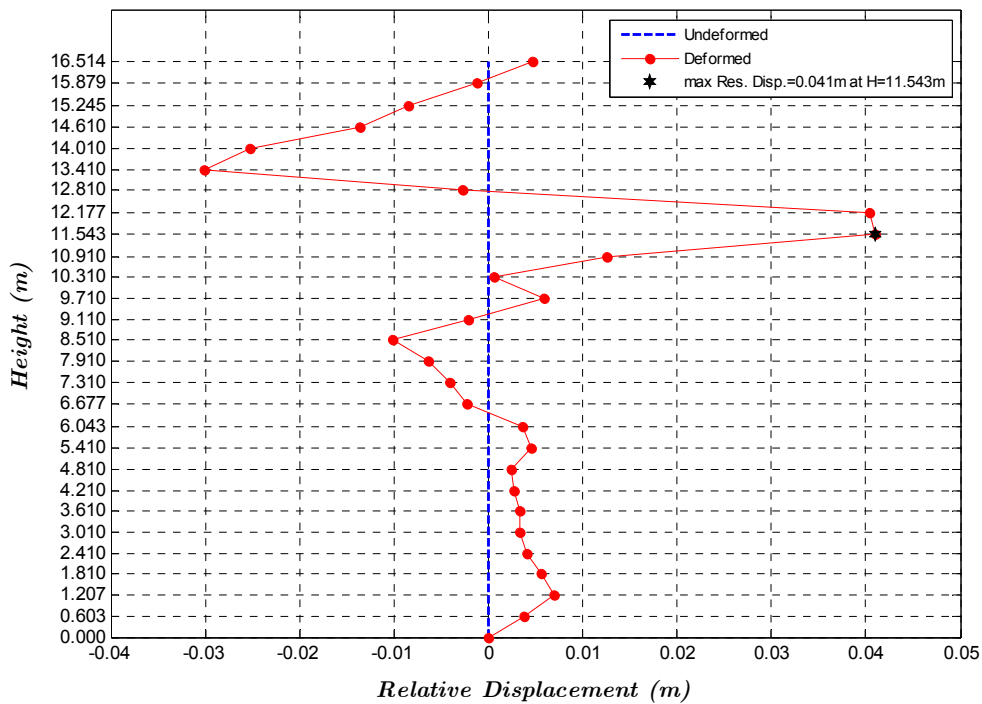


Σχήμα 4.58 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ Scaled 1.5 για $\theta = 180^\circ$



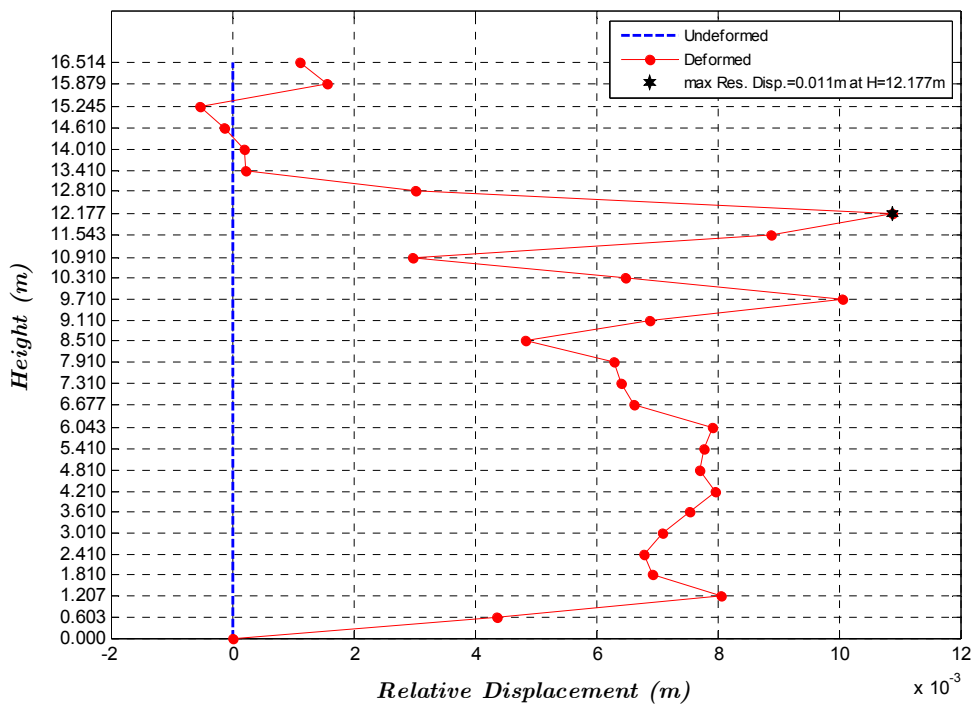
Σχήμα 4.59 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ Scaled 1.5 για $\theta = 270^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after AigioEQ Scaled 1.5 times for $\theta=0^\circ$*



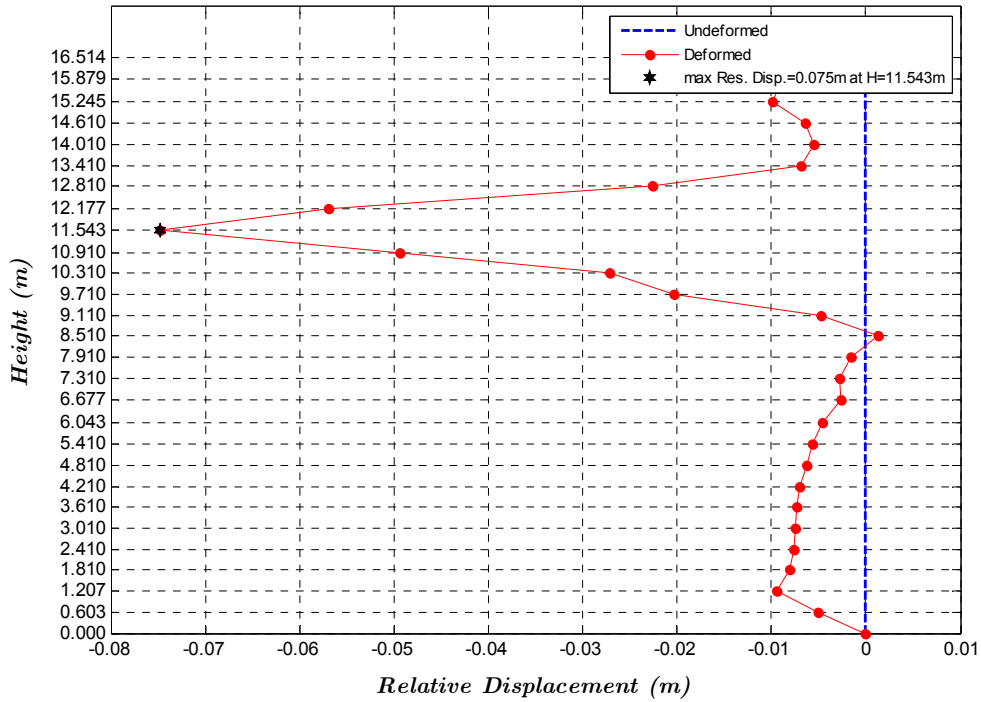
Σχήμα 4.60 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ Scaled 1.5 για $\theta = 0^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after AigioEQ Scaled 1.5 times for $\theta=90^\circ$*



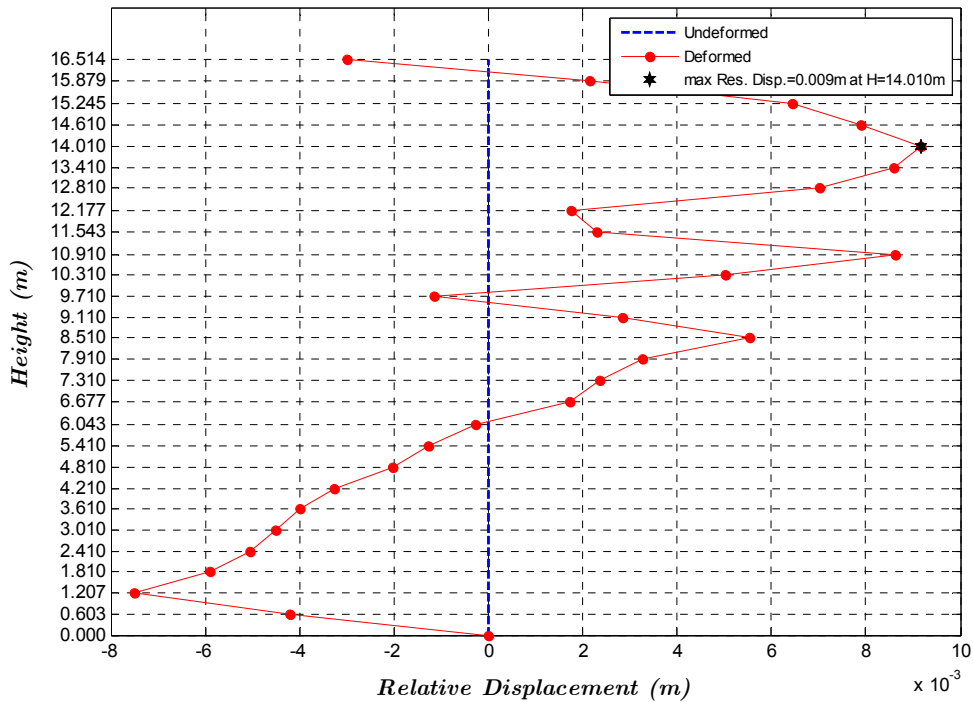
Σχήμα 4.61 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ Scaled 1.5 για $\theta = 90^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after AigioEQ Scaled 1.5 times for $\theta=180^\circ$*

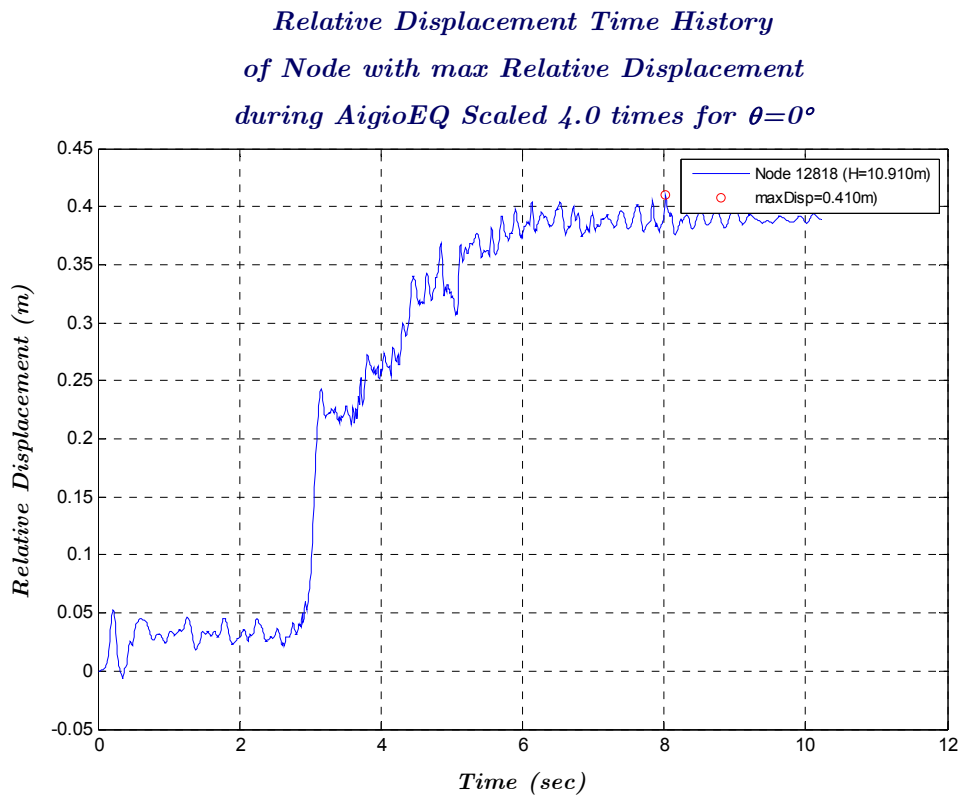


Σχήμα 4.62 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ Scaled 1.5 για $\theta = 180^\circ$

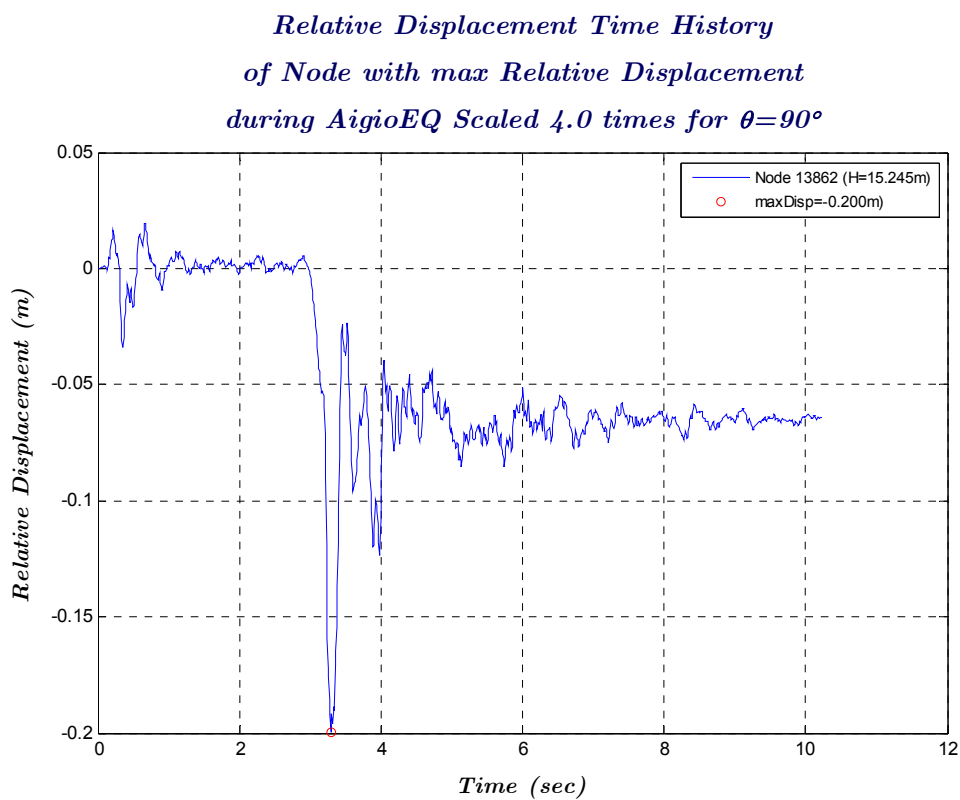
*Relative Residual Displacements of Nodes
after AigioEQ Scaled 1.5 times for $\theta=270^\circ$*



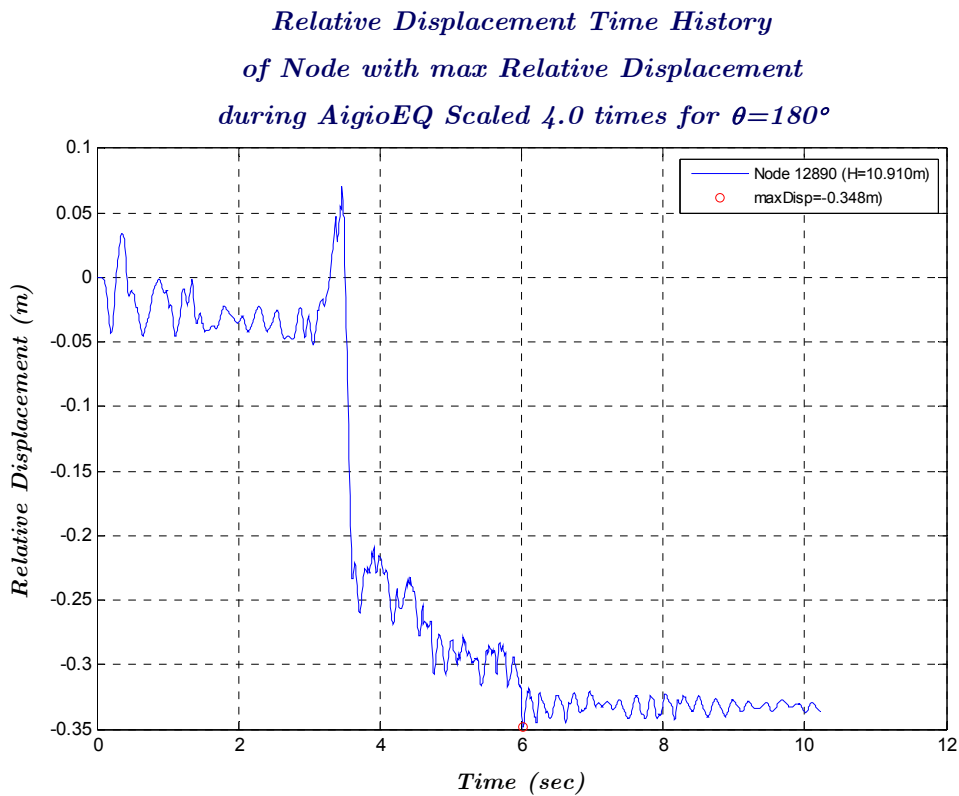
Σχήμα 4.63 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ Scaled 1.5 για $\theta = 270^\circ$



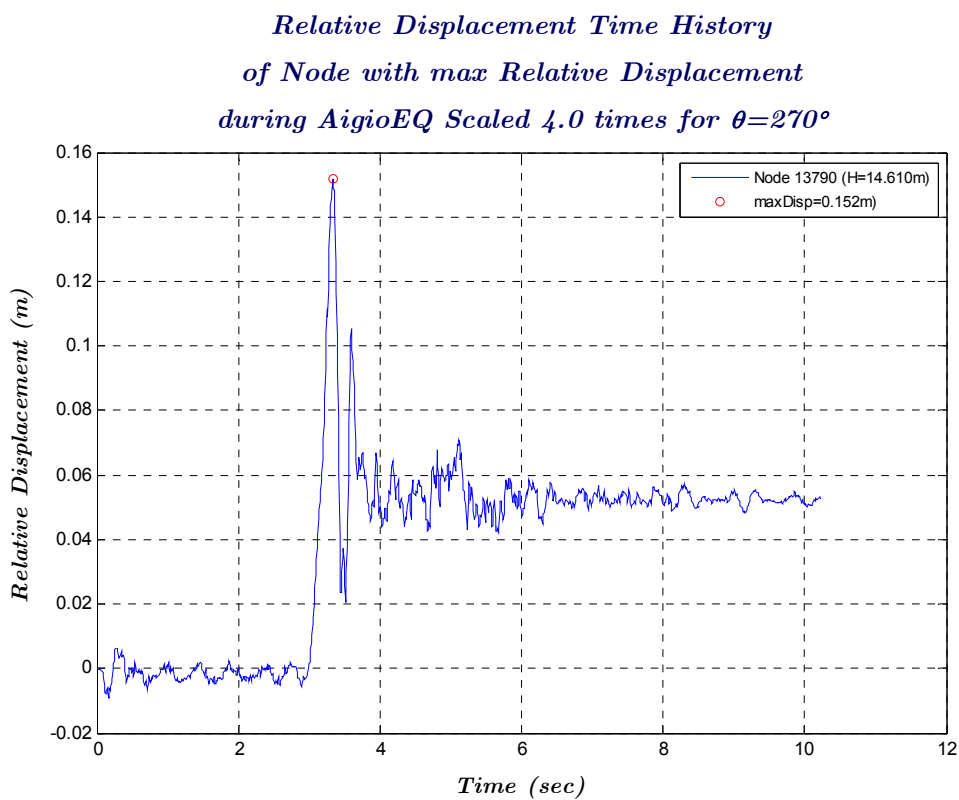
Σχήμα 4.64 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ Scaled 4.0 για $\theta = 0^\circ$



Σχήμα 4.65 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ Scaled 4.0 για $\theta = 90^\circ$

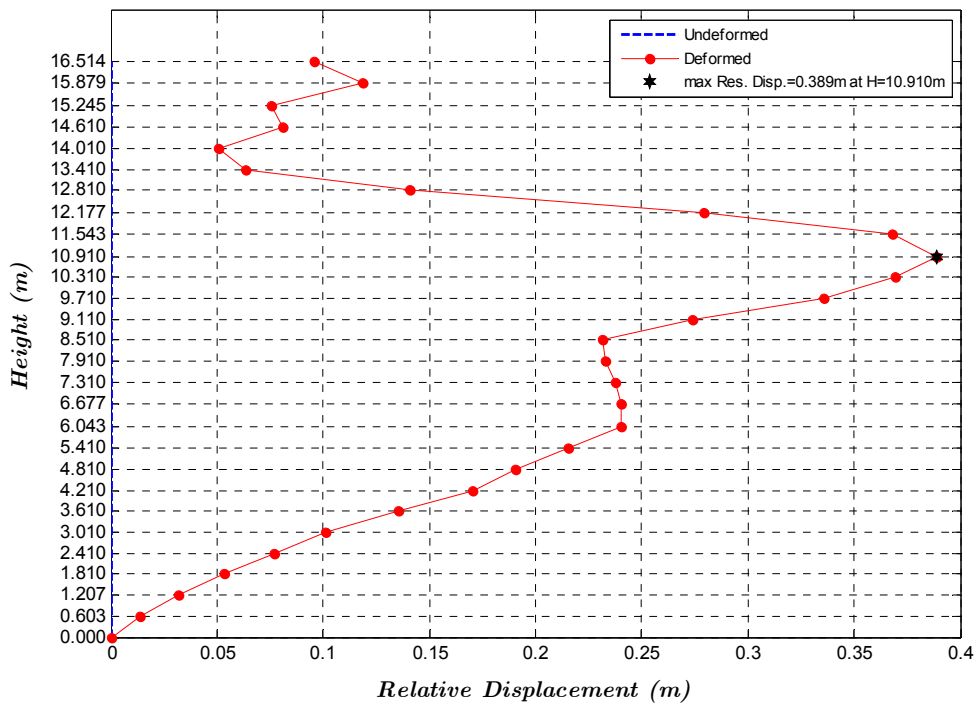


Σχήμα 4.66 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ Scaled 4.0 για $\theta = 180^\circ$



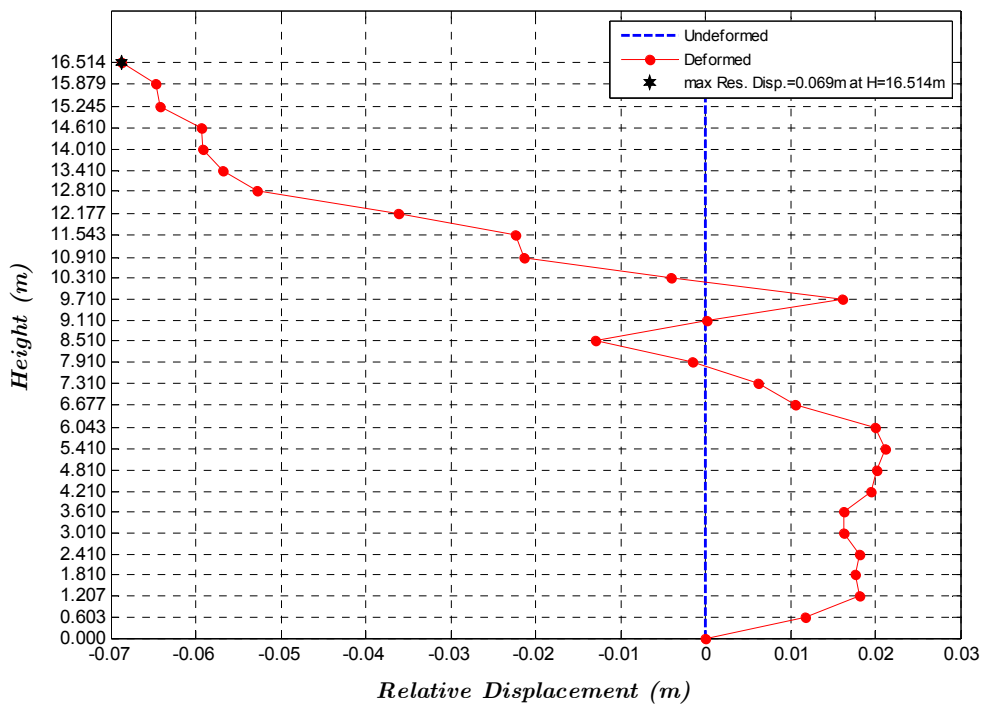
Σχήμα 4.67 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση AigioEQ Scaled 4.0 για $\theta = 270^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after AigioEQ Scaled 4.0 times for $\theta=0^\circ$*



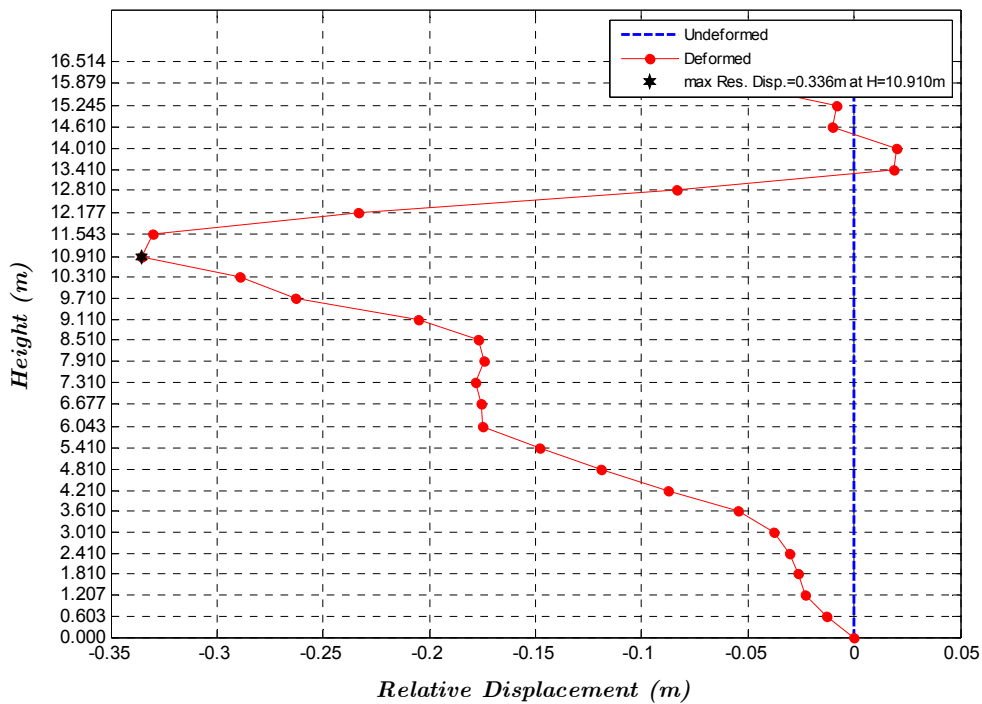
Σχήμα 4.68 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ Scaled 4.0 για $\theta = 0^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after AigioEQ Scaled 4.0 times for $\theta=90^\circ$*



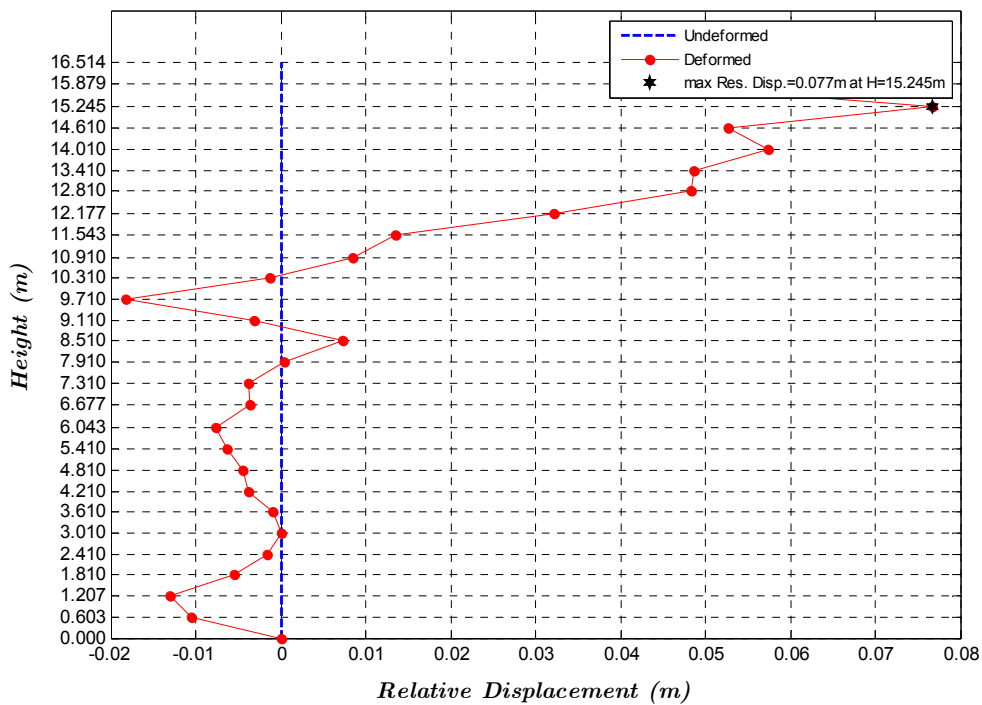
Σχήμα 4.69 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ Scaled 4.0 για $\theta = 90^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after AigioEQ Scaled 4.0 times for $\theta=180^\circ$*



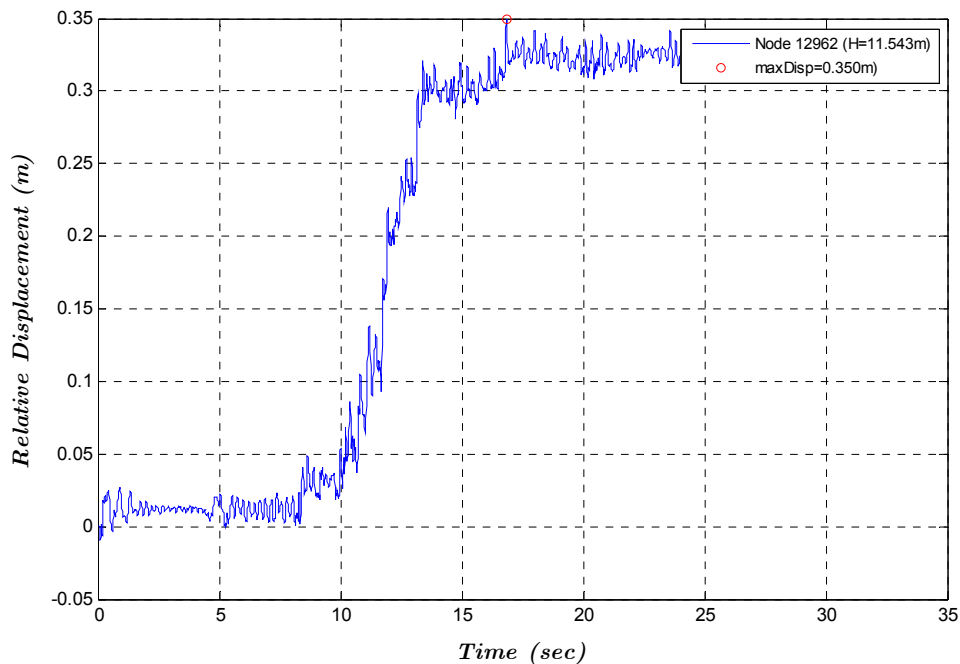
Σχήμα 4.70 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ Scaled 4.0 για $\theta = 180^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after AigioEQ Scaled 4.0 times for $\theta=270^\circ$*



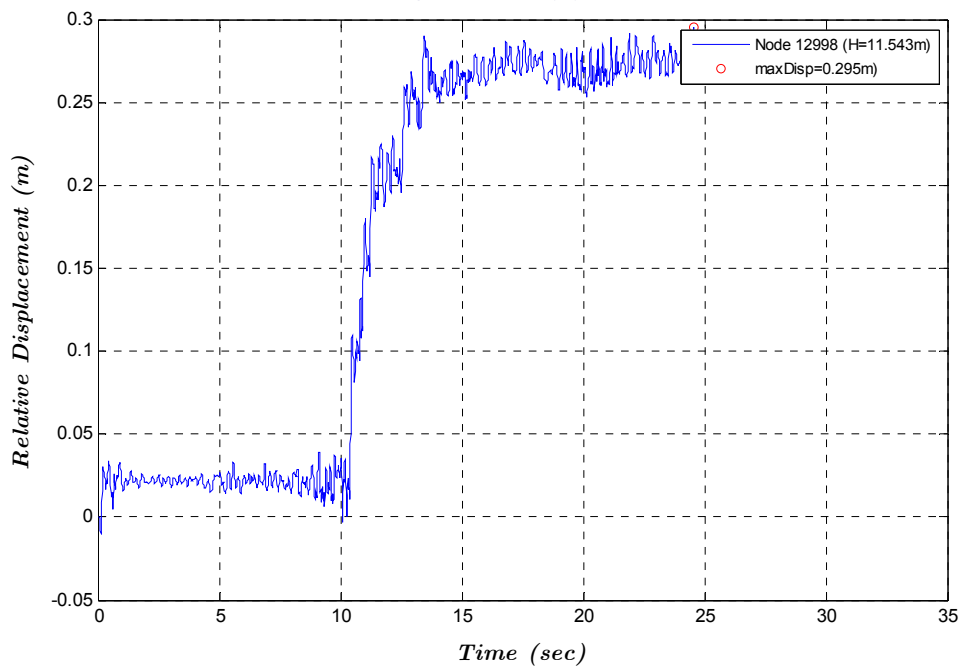
Σχήμα 4.71 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση AigioEQ Scaled 4.0 για $\theta = 270^\circ$

*Relative Displacement Time History
of Node with max Relative Displacement
during TabasEQ for $\theta=0^\circ$*



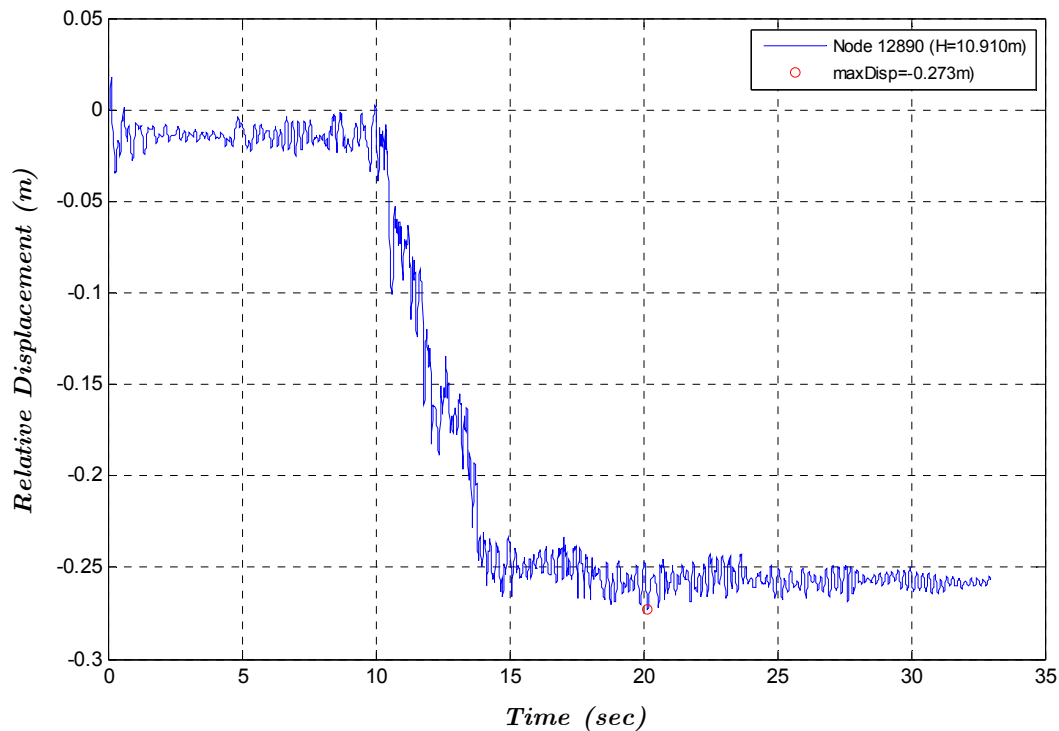
Σχήμα 4.72 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση TabasEQ για $\theta = 0^\circ$

*Relative Displacement Time History
of Node with max Relative Displacement
during TabasEQ for $\theta=90^\circ$*



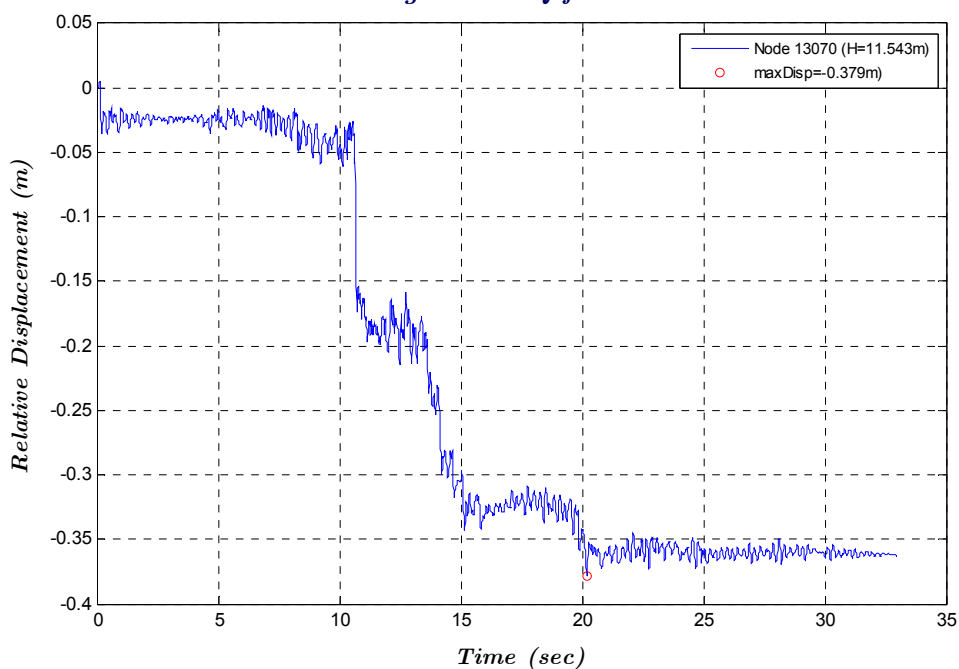
Σχήμα 4.73 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση TabasEQ για $\theta = 90^\circ$

*Relative Displacement Time History
of Node with max Relative Displacement
during TabasEQ for $\theta=180^\circ$*



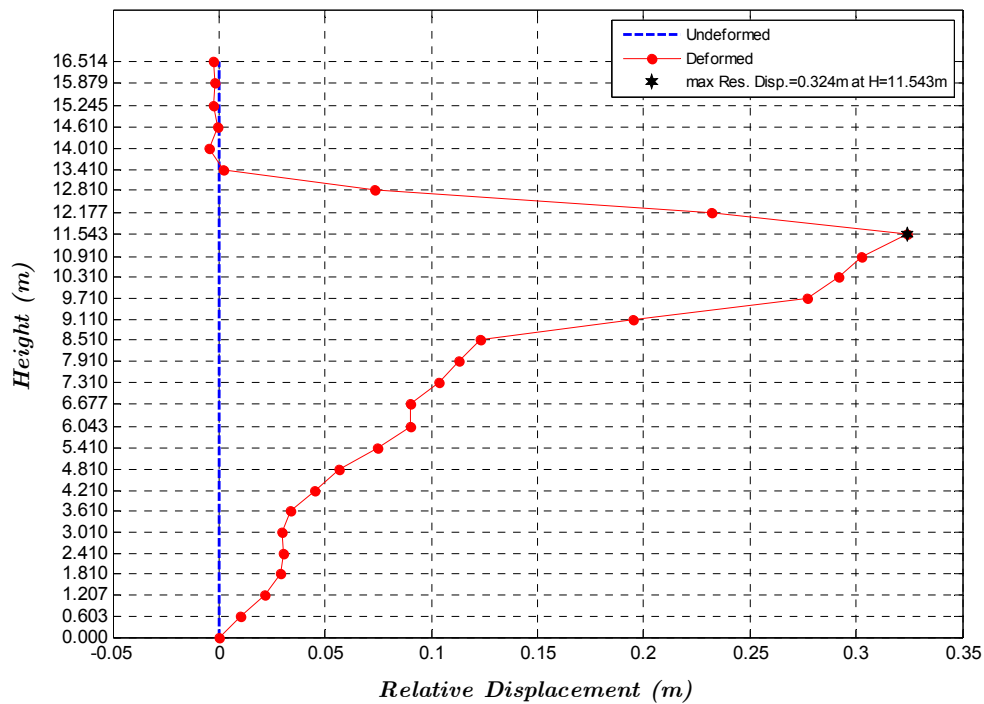
Σχήμα 4.74 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση TabasEQ για $\theta = 180^\circ$

*Relative Displacement Time History
of Node with max Relative Displacement
during TabasEQ for $\theta=270^\circ$*



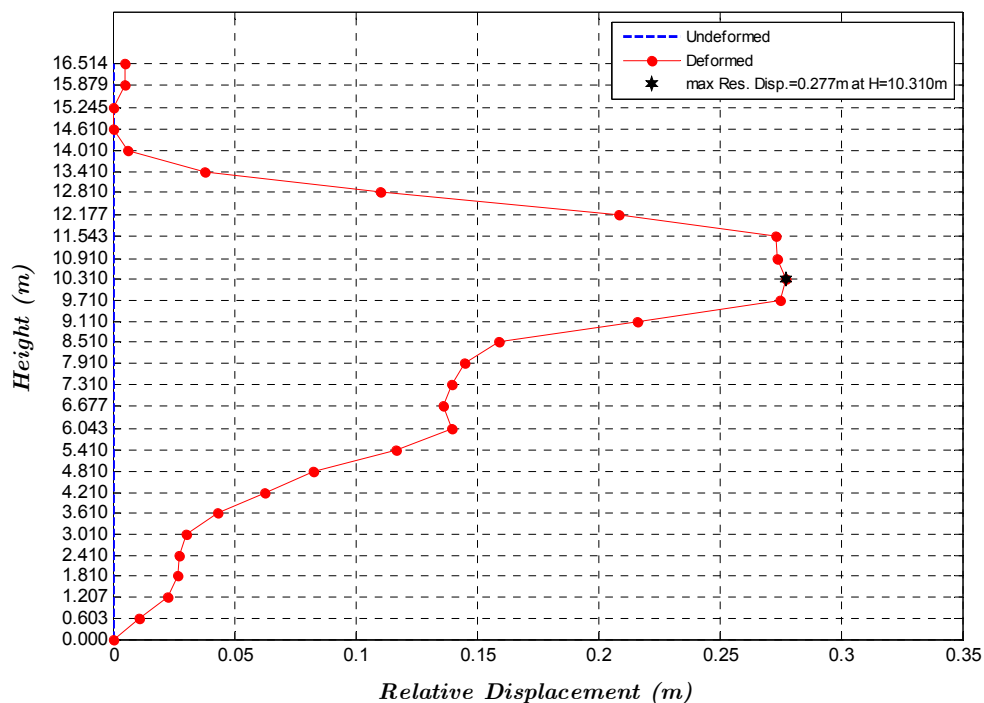
Σχήμα 4.75 Χρονοϊστορία σχετικών μετατοπίσεων κόμβου με τη μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση για την ανάλυση TabasEQ για $\theta = 270^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after TabasEQ for $\theta=0^\circ$*



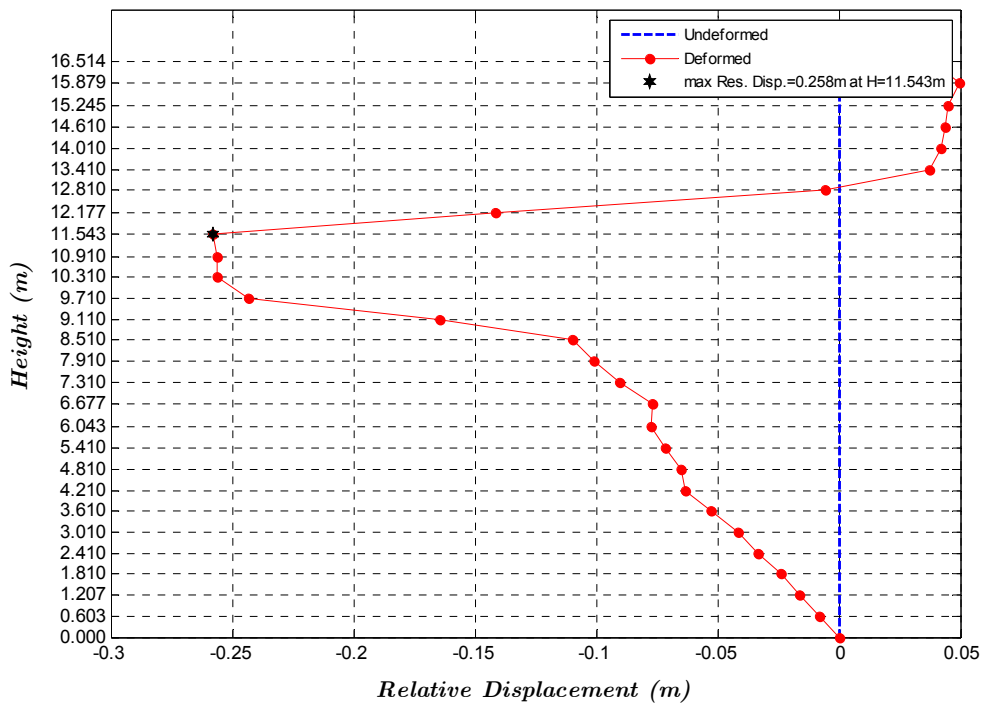
Σχήμα 4.76 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση TabasEQ για $\theta = 0^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after TabasEQ for $\theta=90^\circ$*



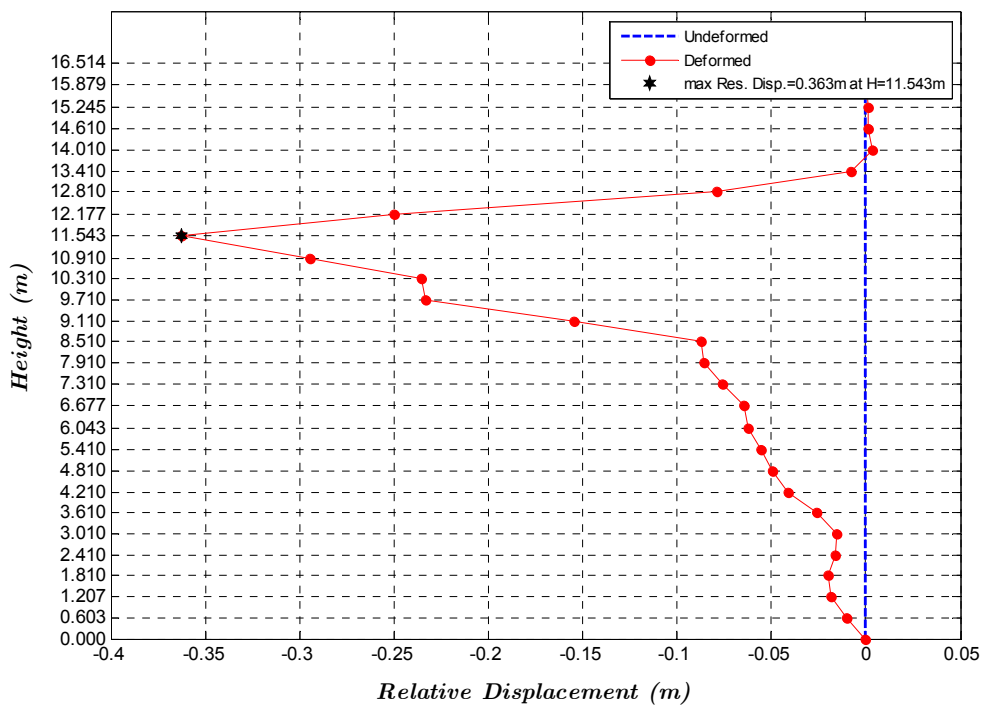
Σχήμα 4.77 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση TabasEQ για $\theta = 90^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after TabasEQ for $\theta=180^\circ$*



Σχήμα 4.78 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση TabasEQ για $\theta = 180^\circ$

*Relative Residual Displacements of Nodes
after TabasEQ for $\theta=270^\circ$*



Σχήμα 4.79 Παραμένουσες παραμορφώσεις από την ανάλυση TabasEQ για $\theta = 270^\circ$

Πίνακας 4.5 Μέγιστες σχετικές και παραμένουσες μετατοπίσεις για κάθε ανάλυση

ΑΝΑΛΥΣΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΩΠΙΣΗ				ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΜΕΤΑΤΩΠΙΣΗ				ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ
	[m]				[m]				
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°	
KozaniEQ	-0.093 $H = 12.810$	0.032 $H = 12.177$	-0.062 $H = 14.010$	-0.038 $H = 11.543$	0.023 $H = 11.543$	0.014 $H = 12.177$	-0.023 $H = 10.910$	-0.010 $H = 11.543$	236.78MP _a
AigioEQ	0.049 $H = 9.710$	0.033 $H = 12.177$	0.077 $H = 15.245$	-0.042 $H = 12.177$	0.024 $H = 9.710$	-0.016 $H = 13.410$	0.011 $H = 14.610$	-0.016 $H = 9.710$	236.00MP _a
AigioEQ HV	0.032 $H = 11.543$	0.028 $H = 12.177$	-0.073 $H = 11.543$	-0.027 $H = 11.543$	0.012 $H = 11.543$	0.008 $H = 1.207$	-0.051 $H = 11.543$	-0.011 $H = 9.710$	237.39MP _a
AigioEQ Matched	0.067 $H = 9.710$	0.032 $H = 12.177$	-0.064 $H = 12.177$	-0.036 $H = 12.177$	0.048 $H = 9.710$	-0.020 $H = 13.410$	-0.043 $H = 11.543$	-0.020 $H = 9.710$	236.44MP _a
AigioEQ Scaled 1.5	0.079 $H = 12.177$	0.026 $H = 12.177$	-0.100 $H = 11.543$	-0.036 $H = 12.177$	0.041 $H = 11.543$	0.011 $H = 12.177$	-0.075 $H = 11.543$	0.009 $H = 14.010$	238.61MP _a
AigioEQ Scaled 4.0	0.410 $H = 10.910$	-0.200 $H = 15.254$	-0.348 $H = 10.910$	0.152 $H = 14.610$	0.389 $H = 10.910$	0.069 $H = 16.514$	-0.336 $H = 10.910$	0.077 $H = 15.245$	249.85MP _a
TabasEQ	0.350 $H = 11.543$	0.295 $H = 11.543$	-0.273 $H = 10.910$	-0.379 $H = 11.543$	0.324 $H = 11.543$	0.277 $H = 10.310$	-0.258 $H = 11.543$	-0.363 $H = 11.543$	255.06MP _a

Από τον Πίνακα 4.5 σε συνδυασμό με τη μορφή των σχημάτων 4.24 έως 7.79 είναι φανερό ότι το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης ρευστού – κατασκευής είναι έντονα μη γραμμικό, αφού για σεισμική φόρτιση συμμετρικής κατασκευής σε μία διεύθυνση οι παραμορφώσεις διαφέρουν τόσο ως προς το μέγεθος όσο και ως προς την τοπολογία.

Καθοριστικό ρόλο στις παραπάνω παραμορφώσεις έχει η κυκλοφορούσα συνιστώσα, η οποία φαίνεται να αλληλεπιδρά με το σχήμα και την παραμορφωμένη κατάσταση της κατασκευής κάθε χρονική στιγμή.

Επίσης από τον Πίνακα 4.5, τα επιταχυνσιογραφήματα, τα φάσματα απόκρισης και τον Πίνακα 4.3 φαίνεται ότι καθοριστικό ρόλο στην απόκριση της κατασκευής έχει το συχνοτικό περιεχόμενο της σεισμικής διέγερσης και όχι η μέγιστη εδαφική και φασματική επιτάχυνση.

Βιβλιογραφία – Βιβλιογραφικές Παραπομπές

- [1] Γεωργία Χατζηιωσήφ “Μελέτη μεταλλικών κυλινδρικών δεξαμενών” Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Ιούλιος 2011
- [2] J.C.Virella, L.A. Godoy, L.E. Suárez, “ Dynamic buckling of anchored steel tanks subjected to horizontal earthquake excitation” Journal of constructional steel research 62 (2006) 521-531
- [3] G. Cortés, A. Nussbaumer, C. Berger, E. Lattion “Experimental determination of the rotational capacity of wall-to-base connections in storage tanks”, Journal of constructional steel research 67 (2011) 1174-1184
- [4] N. Buratti, M. Tavano “Dynamic buckling and seismic fragility of anchored steel tanks by the added mass method”, Earthquake engineering & structural dynamics 2014, 43:1-21
- [5] Praveen K. Malhotra, Thomas Wenk, Martin Wieland, “Simple procedure for seismic analysis of liquid storage tanks”, Structural engineering international 3/2000
- [6] P.K. Malhotra, A.S. Veletsos, “Beam model for base uplifting analysis of cylindrical tanks” J. Struct. Eng. 1994.120:3471-3488
- [7] P.K. Malhotra, A.S. Veletsos, “Uplifting analysis of base plates in cylindrical tanks” J. Struct. Eng. 1994.120:3489-3505
- [8] P.K. Malhotra, A.S. Veletsos, “Uplifting response of unanchored liquid storage tanks” J. Struct. Eng. 1994.120:3525-3547
- [9] P.-O. Persson, G. Strang, “A Simple Mesh Generator in MATLAB” SIAM Review, Volume 46 (2), pp. 329-345, June 2004
- [10] Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads
- [11] Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4 :General actions - Wind actions
- [12] Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Actions in silos and tanks
- [13] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings
- [14] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-6 Strength and Stability of Shell Structures
- [15] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 4-2 Tanks
- [16] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1-1: General rules and rules for buildings

-
- [17] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 4: Silos, tanks and pipelines
 - [18] Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Ground Motion Database -- NGA-West2
 - [19] Abaqus Analysis User's Guide, "Explicit dynamic analysis," Section 6.3.3
 - [20] Abaqus Analysis User's Guide, "ALE Adaptive meshing: overview," Section 12.2.1
 - [21] Abaqus Analysis User's Guide, "Equation of state," Section 25.2.1
 - [22] Abaqus Example Problems Guide, "Water sloshing in a baffled tank," Section 2.1.14
 - [23] Abaqus Benchmarks Guide, "Water sloshing in a pitching tank," Section 1.12.7