



Ερευνητικό Πρόγραμμα «ΘΑΛΗΣ - ΕΜΠ»

**Σύγχρονη Μεθοδολογία Εκτίμησης της Σεισμικής Τρωτότητας  
και Αντισεισμικής Αναβάθμισης Λιμενικών Συστημάτων**

MIS : 380174.

**Ενότητα Εργασίας 6:**  
Μελέτη Συστημάτων Αποθήκευσης και Διανομής Ρευστών

**Παραδοτέα 6.1-6.3**

**Σύνταξη: Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**

Σεπτέμβριος, 2015

## Πίνακας περιεχομένων

|   |           |
|---|-----------|
| Πίνακας περιεχομένων .....  | 1         |
| <b>ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΟΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΚΑΙ<br/>ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΥΔΑΤΟΣ .....</b> | <b>2</b>  |
| 1. Δομική Συμπεριφορά Σωληνώσεων σε Σεισμικά Φορτία.....  | 2         |
| Μηχανική συμπεριφορά καμπύλων τμημάτων σωλήνων (elbows) .....   | 3         |
| Δομική συμπεριφορά κόμβων διακλάδωσης σωλήνων μορφής Tee .....  | 5         |
| Αλληλεπίδραση δεξαμενών και σωληνώσεων. Συμπεριφορά ακροφυσίων σε<br>ισχυρά κυκλικά φορτία .....            | 6         |
| Απλοποιημένα μοντέλα ανάλυσης σωληνώσεων .....  | 7         |
| 2. Δομική Συμπεριφορά Δεξαμενών Αποθήκευσης Υγρών σε Σεισμικά<br>Φορτία 11                                  |           |
| Μορφές αστοχίας δεξαμενών αποθήκευσης υγρών σε σεισμικά φορτία.....   | 13        |
| Αριθμητική προσομοίωση δεξαμενών με πεπερασμένα στοιχεία .....  | 18        |
| Ανάπτυξη απλοποιημένων προσομοιωμάτων .....   | 19        |
| 3. Παραδείγματα Εφαρμογής .....   | 22        |
| Εφαρμογή 1: σεισμική ανάλυση δεξαμενής υγρών .....  | 22        |
| Εφαρμογή 2: σεισμική ανάλυση συστήματος σωλήνωσης.....  | 24        |
| <b>ΣΧΗΜΑΤΑ .....</b>  | <b>26</b> |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>   | <b>46</b> |

---

# ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΟΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΥΔΑΤΟΣ

---

## 1. Δομική Συμπεριφορά Σωληνώσεων σε Σεισμικά Φορτία

Στις λιμενικές εγκαταστάσεις, υπάρχουν χιλιόμετρα σωλήνων για τη μεταφορά υγρών και αερίων καυσίμων καθώς και ύδατος από ένα σημείο της εγκατάστασης σε άλλο, για τη σύνδεση των όλων επιμέρους συστατικών της εγκατάστασης (δεξαμενές, αποστάξεις στήλες, φούρνοι, κλπ.). Ως εκ τούτου, τα συστήματα σωληνώσεων αντιπροσωπεύουν βασικές κατασκευαστικές δομές των εγκαταστάσεων που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής σε σχέση με την δομική τους επάρκεια, ειδικά για την περίπτωση ισχυρής φόρτισης από σεισμό. Οι διαθέσιμες αναφορές στη βιβλιογραφία, σε σχέση με τις σεισμικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν τα ανωτέρω συστήματα σωληνώσεων είναι ελάχιστες. Επιπλέον, πολλά θέματα μοντελοποίησης των εν λόγω συστημάτων δεν έχουν διερευνηθεί σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο. Η τρέχουσα πρακτική όπως αυτή αποτυπώνεται στο κείμενο αμερικανικών και ευρωπαϊκών προτύπων δεν περιλαμβάνει κανόνες και λεπτομερειών, για το σκοπό μιας σωστής αντισεισμικής ανάλυσης και σχεδιασμού συστημάτων βιομηχανικών σωληνώσεων.

Στην παρούσα δράση του έργου αναλύονται ορισμένα σημαντικά θέματα που σχετίζονται με μοντελοποίηση και ανάλυση συστημάτων σωληνώσεων, κυρίως όσον αφορά την μοντελοποίηση των κρίσιμων στοιχείων σωληνώσεων. Η μοντελοποίηση αυτή είναι σημαντική για την περαιτέρω ανάπτυξη μεθοδολογιών ανάλυσης και σχεδιασμού με βάση την επιτελεσματικότητα. Τα βασικά κρίσιμα σημεία όπου πιθανολογείται αστοχία μία σωλήνωσης είναι

- Τα καμπύλα τμήματα (elbows), συνήθως 90 μοιρών σε σωληνώσεις
- Οι διακλαδώσεις σωληνώσεων μορφής Tee (Tee junctions)
- Τα ακροφύσια (nozzles) των δεξαμενών, και η σύνδεσή τους με το σύστημα σωληνώσεων.

---

Τα ανωτέρω κρίσιμα σωληνωτά στοιχεία παρουσιάζονται κάτωθι, σε σχέση με την μηχανική τους συμπεριφορά και την μοντελοποίηση τους με πεπερασμένα στοιχεία, γίνεται δε αναφορά σε υπάρχουσες σχετικές πειραματικές δοκιμές που επιβεβαιώνουν τα βασικά χαρακτηριστικά της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Παρουσιάζονται επίσης και απλοποιημένα μοντέλα τα οποία είναι πολύ χρήσιμα για τη μοντελοποίηση ολόκληρων συστημάτων σωληνώσεων και την διενέργεια σεισμικών αναλύσεων. Τα μοντέλα αυτά είναι πιο απλοποιημένα και υπολογιστικώς πιο αποδοτικά από τα ακριβή μοντέλα, και ονομάζονται συχνά «αδρομερή» μοντέλα.

### **Μηχανική συμπεριφορά καμπύλων τμημάτων σωλήνων (elbows)**

Τα καμπύλα τμήματα σωλήνων, που συχνά αναφέρονται και ως elbows, είναι τμήματα που χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα σωληνώσεων για βιομηχανικές εγκαταστάσεις, διυλιστήρια, ή σταθμούς παραγωγής ενέργειας (**Σχήμα 1**). Η μηχανική συμπεριφορά τους, σε σύγκριση με ευθύγραμμα τμήματα ενός σωλήνα με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και υλικό, δείχνει πως είναι σημαντικά πιο εύκαμπτα και αναπτύσσουν σημαντικά υψηλότερες τάσεις και παραμορφώσεις. Βασικό χαρακτηριστικό της μηχανικής τους συμπεριφοράς είναι η πολύ έντονη παραμόρφωση της διατομής τους, η οποία αναφέρεται συχνά και ως οβαλοποίηση ("ovalization"). Λόγω της σημαντικής ευκαμψίας τους, μπορούν να παραλάβουν τις θερμικές διαστολές στην λειτουργία της σωληνώσεως, και να απορροφήσουν άλλα εξωτερικά-επιβαλλόμενα φορτία. Γενικώς θεωρούνται στοιχεία που είναι καίρια για τη δομική ακεραιότητα των σωληνώσεων. Για την περίπτωση φόρτισης σε επίπεδο οριακής κατάστασης, η μηχανική τους απόκριση και συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από διαξονική κατάσταση τάσεων και παραμορφώσεων, λόγω της εσωτερικής πίεσης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του καμπύλου τμήματος του σωλήνα, με μία μορφή αστοχίας που είναι αρκετά διαφορετική από αυτό που παρατηρείται σε ευθύγραμμους σωλήνες (Karapanos, 2015).

Τα καμπύλα σωληνωτά τμήματα που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικά συστήματα σωληνώσεων έχουν σχετικά μικρή ακτίνα καμπυλότητας κάμψης  $R$  σε σχέση με τη

---

διάμετρο  $D$  του σωλήνα (**Σχήμα 2**). Στο πρότυπο ASME 16.9 (ASME, 2007), τα προδιαγεγραμμένα καμπύλα τμήματα σωλήνων έχουν διάμετρο που κυμαίνεται από  $\frac{1}{2}$  έως 48 ίντσες, και ο λόγος της διαμήκου ακτίνας  $R$  προς τη διάμετρο του σωλήνα  $D$  ισούται είτε με 1 (καμπύλοι σωλήνες "μικρής ακτίνας") ή 1.5 (καμπύλοι σωλήνες "μεγάλης ακτίνας"). Παρόμοιες διαστάσεις καμπύλου σωλήνα καθορίζονται και από το σχετικό ευρωπαϊκό πρότυπο EN 10253-1.

Η γεωμετρία σε ένα τυπικό καμπύλο σωληνωτό τμήμα, που χρησιμοποιείται ευρέως στα συστήματα σωληνώσεων, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2**. Η γεωμετρία χαρακτηρίζεται από τη διάμετρο του σωλήνα  $D$ , το πάχος του σωλήνα  $t$ , και την ακτίνα του καμπύλου τμήματος  $R$ , και εκφράζεται συνήθως από την αδιάστατη παράμετρο  $\lambda$  (ή  $h$ ), που επίσης ορίζεται στο **Σχήμα 2**. Η παράμετρος  $\lambda$  προκύπτει από αναλυτικές λύσεις ανάλυσης τάσεων όπως περιγράφονται σε παλαιές σχετικές δημοσιεύσεις (π.χ. Rodabaugh & George, 1957), ενώ η παράμετρος  $h$  υιοθετείται συχνά σε πρότυπα σχεδιασμού σωληνώσεων, όπως τα πρότυπα ASME B31 (ASME, 2010a; 2010b) ή EN 13480-3.

Η απόκριση ενός χαρακτηριστικού καμπύλου σωληνωτού τμήματος 90-μοιρών υπό καμπτικό φορτίο εντός επιπέδου παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3α** και **Σχήμα 3β** για «κλείνουσες» και «ανοίγουσες» ροπές αντίστοιχα. Οι σωλήνες έχουν διάμετρο  $D = 114.3$  mm, πάχος  $t = 6$  mm ( $D/t = 19$ ) και ακτίνα καμπυλότητας  $R = 152$  mm. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται από αριθμητικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζονται στην μορφή διαγραμμάτων ροπής-μετακίνησης. Το υλικό του σωλήνα είναι X52, ισοδύναμο με το υλικό P355N των ευρωπαϊκών προτύπων. Τα διαγράμματα μονοτονικής και κυκλικής συμπεριφοράς του υλικού σε μονοαξονική ένταση φαίνονται στο **Σχήμα 4**. Το αντίστοιχο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται στο **Σχήμα 5**.

Τα αποτελέσματα δείχνουν μια πολύ σημαντική διαφορά στο κλείσιμο και το άνοιγμα του καμπύλου σωλήνα. Μια πρώτη παρατήρηση αναφέρεται στην καμπτική ικανότητα υπό μηδενική εσωτερική πίεση: η μέγιστη ροπή του καμπύλου σωληνωτού μέλους, αν και σημαντικού πάχους σε σχέση με την διάμετρό του, είναι

---

λιγότερο από το 50% της πλήρους-πλαστικής ροπής κάμψης της διατομής του σωλήνα.

Για την περίπτωση των «κλειουσών» ροπών, οι σημαντικότερες παραμορφώσεις παρουσιάζονται στις δύο πλευρικές θέσεις της διατομής του σωλήνα, λόγω της οβαλοποίησης, και συνεπάγονται την ανάπτυξη υψηλών τοπικών περιμετρικών παραμορφώσεων, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6**. Αντιθέτως, για την περίπτωση του ανοίγματος του καμπύλου τμήματος, η μέγιστη ροπή μπορεί να ξεπεράσει την ροπή πλήρους πλαστικοποίησης λόγω του φαινομένου της αντίστροφης οβαλοποίησης (reverse ovalization), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 7**.

Η επίδραση της εσωτερικής πίεσης έχει σημαντικές επιπτώσεις στην κάμψη καμπύλων σωλήνων 90 μοιρών με σχετικώς λεπτά τοιχώματα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3**. Εκτός από την αύξηση της καμπτικής δυσκαμψίας, στα πρώτα στάδια της φόρτισης, η επίδραση είναι ευεργετική στην εσωτερική πίεση στο μέγιστο φορτίο και είναι πιο έντονη στην περίπτωση των «κλειουσών» ροπών.

Η κυκλική φόρτιση καμπύλων τμημάτων παρουσιάζει επίσης σημαντικό ενδιαφέρον στην περίπτωση σεισμού. Το **Σχήμα 8** δείχνει το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο οποίο επιβάλλεται κυκλική φόρτιση  $\pm 50\text{mm}$  στη διεύθυνση z .

Η απόκριση του σωλήνα φαίνεται στο **Σχήμα 9** για μηδενική πίεση και για πίεση ίση με 30% της πίεσης πλήρους πλαστικότητας. Τέλος στο **Σχήμα 10** παρουσιάζεται η μεταβολή των παραμορφώσεων στην περιμετρική διεύθυνση (hoop strain) στους επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης. Το διάγραμμα δείχνει μία σημαντική αύξηση των παραμορφώσεων με την πάροδο των κύκλων φόρτισης, που αφορά μία συμπεριφορά τύπου ratcheting (συσσώρευση πλαστικών παραμορφώσεων).

### **Δομική συμπεριφορά κόμβων διακλάδωσης σωλήνων μορφής Tee**

Οι κόμβοι σωλήνα μορφής Ταυ (Tee junctions) είναι στοιχεία των συστημάτων σωληνώσεων που χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και εφαρμογές αγωγών (**Σχήμα 11**). Η μηχανική συμπεριφορά τους υπό συνθήκες σοβαρής φόρτισης είναι κρίσιμη για τη δομική ακεραιότητα μιας βιομηχανικής μονάδας. Όταν αυτά τα σωληνωτά στοιχεία υφίστανται ισχυρές φορτίσεις που

---

συνδέονται με κυκλική πλαστικότητα του μεταλλικού υλικού είναι δυνατόν να προκληθεί αστοχία, και απώλεια περιεχομένου. Η παρούσα παράγραφος εξετάζει εν συντομία τη συμπεριφορά των σωληνωτών κόμβων μορφής Ταυ σε ακραίες καταστάσεις φόρτισης. Το κόμβος σωλήνα μορφής Ταυ υποβάλλεται σε έντονη κυκλική κάμψη εντός και εκτός του επιπέδου, περιγράφοντας θέματα προσομοίωσης των εν λόγω κόμβων, ενώ γίνεται επίσης αναφορά σε ορισμένα βασικά πειραματικά αποτελέσματα.

Οι κόμβοι της μορφής αυτής είναι συνήθως 2 ειδών (**Σχήμα 12**):

- κόμβος τύπου "fitting" (TJF)
- κόμβος συγκολλητού τύπου με ενισχυτική πλάκα (TJWR)

Για κάθε τύπο συνδέσμου διακλάδωσης έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα ABAQUS χρησιμοποιώντας 8-κομβικά τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης (C3D8R). Η φόρτιση εφαρμόζεται στο ελεύθερο άκρο του δευτερεύοντος μέλους και είναι εκτός του επιπέδου της σύνδεσης, ως η πλέον δυσμενής για την δομική επάρκεια του κόμβου όπως φαίνεται στο **Σχήμα 13**.

Οι εικόνες στο **Σχήμα 14** δείχνουν την συμπεριφορά των 2 τύπων σωληνωτών συνδέσμων σε ισχυρή κυκλική φόρτιση, ως προς τη σχέση φορτίου και μετατόπισης. Οι σύνδεσμοι αυτοί αφορούν διακλαδώσεις σωλήνα 8 ιντσών σε σωλήνα 6 ιντσών, ενώ οι εικόνες στο **Σχήμα 15** δείχνουν την κατανομή των τάσεων von Mises στην κρίσιμη περιοχή.

### **Αλληλεπίδραση δεξαμενών και σωληνώσεων. Συμπεριφορά ακροφυσίων σε ισχυρά κυκλικά φορτία**

Η σύνδεση δεξαμενών και σωληνώσεων γίνεται μέσω ειδικών κατασκευαστικών λεπτομεριών που ονομάζονται «ακροφύσια». Τα ακροφύσια αποτελούν πολύ ευαίσθητα (ίσως τα πλέον ευαίσθητα) σημεία σε μία βιομηχανική σωλήνωση και συνδέουν σωληνώσεις σε μεγάλες δεξαμενές υγρών (**Σχήμα 16**). Τα στοιχεία αυτά μπορεί να είναι πολύ ευαίσθητα σε σοβαρές βλάβες από ισχυρό σεισμό. Ο κατάλληλος σχεδιασμός και οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες της σύνδεσης του

---

ακροφύσιου με το κέλυφος μπορεί να βελτιώσουν σημαντικά την αντισεισμική απόδοσή τους. Ζημιές σε ακροφύσια δεξαμενών παρουσιάζονται συχνά σε συνδυασμό με την αστοχία τοπικού λυγισμού τύπου “elephant’s foot”, ο οποίος μπορεί να καταστρέψει όλη την περιοχή, να προκαλέσει διάρρηξη του τοιχώματος της δεξαμενής κάτι που συνεπάγεται την απώλεια του περιεχομένου. Οι συνέπειες της αστοχίας εξαρτώνται από την επικινδυνότητα του υγρού περιεχόμενου, και επομένως η πρόληψη της διαρροής είναι ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό της δεξαμενής και της σωλήνωσης.

Στο **Σχήμα 17** παρουσιάζεται ένα αριθμητικό μοντέλο για την προσομοίωση του ακροφυσίου, με σωλήνα διαμέτρου 6 ιντσών, πάχους 7.3 mm, υλικού X52 (P355N) ο οποίος συνδέεται με δεξαμενή πάχους τοιχώματος 20 mm. Στην περιοχή του κελύφους της δεξαμενής γύρω από το ακροφύσιο υπάρχει μεγαλύτερο πάχος, για ενίσχυση (30 mm). Τα διαγράμματα στο **Σχήμα 18** δείχνουν την απόκριση του ακροφυσίου από την υπολογιστική προσομοίωση καθώς και από τα πειραματικά αποτελέσματα (Wieschollek *et al.* 2013), και η σύγκριση είναι πολύ επιτυχής. Η φόρτιση είναι κυκλική, με αυξανόμενο εύρος, μέχρι την αστοχία.

### **Απλοποιημένα μοντέλα ανάλυσης σωληνώσεων**

Ένα τυπικό σύστημα σωληνώσεων (ripping system) περιλαμβάνει όλα τα κρίσιμα ανωτέρω κρίσιμα τμήματα. Επομένως, ένα μοντέλο ανάλυσης σε σεισμό πρέπει να μπορεί να προσομοιώνει την συμπεριφορά των κάτωθι στοιχείων:

- (a) καμπύλα τμήματα (pipe-elbows): απαραίτητα σωληνωτά στοιχεία για την αλλαγή διεύθυνσης του άξονα της σωλήνωσης και για την παραλαβή των παραμορφώσεων που οφείλονται στις διακυμάνσεις της πίεσης και της θερμοκρασίας και τις αντίστοιχες συστολο-διαστολές,
- (b) διακλαδώσεις – κόμβοι (Tee-junctions): απαιτούνται πολύ συχνά για την διακλάδωση ενός κύριου κλάδου της σωλήνωσης σε έναν δευτερεύοντα κλάδο.
- (c) ακροφύσια (nozzles): οι σωλήνες συνδέονται με δεξαμενές ή δοχεία πίεσης. Στις θέσεις όπου συνδέονται τα στοιχεία αυτά εμφανίζεται σημαντική



---

ασυνέχεια και δυνητικά μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία των στοιχείων αυτών υπό ισχυρή κυκλική φόρτιση.

(d) Μεταλλική κατασκευή στήριξης (piperaek): πρόκειται για τον δομικό φορέα πάνω στον οποίο στηρίζονται οι σωληνώσεις. Η σεισμική συμπεριφορά και ο αντισεισμικός σχεδιασμός τους παρουσιάζει ιδιαιτερότητες καθώς υπάρχει αλληλεπίδραση των piperaeks με τις σωληνώσεις.

Η προσομοίωση ενός τέτοιου συστήματος σωληνώσεων πρέπει να έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός απλού, αξιόπιστου και αποτελεσματικού μοντέλου. Για αυτό το λόγο, είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν μεμονωμένα απλοποιημένα προσομοιώματα των ανωτέρω κρίσιμων τμημάτων, για την πιστοποίηση των οποίων έγιναν μια σειρά από αναλύσεις σε κυκλικές φορτίσεις και αντίστοιχες συγκρίσεις των αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα.

*Καμπύλα τμήματα (pipe elbows):*

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν ειδικά πεπερασμένα στοιχεία τύπου «elbow» τα οποία αναφέρονται συχνά και ως «special purpose pipe elements». Πρόκειται για ειδικά πεπερασμένα στοιχεία τα οποία είναι πρακτικώς μονοδιάστατα, αλλά μπορούν να λαμβάνουν υπόψη παραμορφώσεις της διατομής λόγω «ovalization» ή στρέβλωσης. Όπως έδειξαν οι αριθμητικές προσομοιώσεις, πέντε στοιχεία τύπου «elbow» κρίθηκαν αρκετά για την προσομοίωση του καμπύλου τμήματος.

Για να ελεγχθεί η αξιοπιστία της χρήσης στοιχείων «elbow», έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με πειραματικά αποτελέσματα. Ειδικότερα επιλέχθηκε ένα πείραμα των Varelis et al. (2013), σε κυκλική φόρτιση και προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα ABAQUS αποκλειστικά με elbow elements. Ειδικότερα για το καμπύλο τμήμα η προσομοίωση έγινε με πέντε στοιχεία. Σύμφωνα με την πειραματική διάταξη δύο ευθύγραμμα τμήματα σωληνώσεων ενώνονται με το καμπύλο τμήμα και υπόκεινται σε κυκλική κάμψη εντός επιπέδου (**Σχήμα 19**). Ο τρόπος στήριξης και η γεωμετρία του πειράματος παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο **Σχήμα 20**.

---

Κατά την διάρκεια του πειράματος, πραγματοποιήθηκε καταγραφή των καμπυλών δύναμης μετατόπισης του εμβόλου, καθώς και της παραμόρφωσης της διατομής σε δύο σημεία του καμπύλου τμήματος. Τα παραπάνω στοιχεία συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από το αριθμητικό μοντέλο, το οποίο αποτελείται από elbow elements (**Σχήμα 21**). Για κυκλική μετακίνηση του εμβόλου  $\delta = \pm 150 \text{ mm}$  προκύπτουν τα εξής πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα του σχήματος (**Σχήμα 22**).

Όπως φαίνεται στις ανωτέρω συγκρίσεις, τα αποτελέσματα στο διάγραμμα δύναμης-μετατοπίσεως μεταξύ πειράματος και αριθμητικού μοντέλου δεν έχουν σημαντικές διαφορές. Πραγματοποιήθηκε και έλεγχος σχετικά με την παραμόρφωση της διατομής στην κορυφή του καμπύλου τμήματος. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονισθεί ότι για την ανάγνωση των αποτελεσμάτων των τάσεων και των παραμορφώσεων στο πρόγραμμα ABAQUS σε στοιχεία τύπου «elbow», χρησιμοποιείται η ειδική υπορουτίνα feibow η οποία μπορεί να παρέχει στο χρήστη:

- Κατανομή των τάσεων πάνω στην περίμετρο μίας διατομής
- Κατανομή των τάσεων κατά μήκος του καμπύλου τμήματος
- Παραμορφωμένη γεωμετρία της διατομής (ovalization)

Από τη σχετική δημοσίευση των πειραμάτων (Varelis et al. 2013), για το παραπάνω πείραμα, η μετατόπιση στην κορυφή του καμπύλου τμήματος για διάφορες τιμές μετακίνησης  $\delta$  ήταν 16.1 mm, ενώ στο αριθμητικό μοντέλο, η μείωση της διαμέτρου της διατομής είναι ίση με 16 mm (**Σχήμα 23**), τιμή που είναι πολύ κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα. Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα στοιχεία τύπου elbow δύνανται να προσομοιώσουν με αξιοπιστία τα καμπύλα τμήματα των σωληνώσεων.

*Ακροφύσιο (nozzle):*

Στα ακροφύσια η τοπική παραμόρφωση στο τοίχωμα της δεξαμενής πιθανόν να προκαλέσει υψηλή συγκέντρωση τάσεων και παραμορφώσεων οι οποίες θα

---

οδηγήσουν στην αστοχία είτε γύρω από την συγκόλληση στη δεξαμενή είτε στο σωλήνα του ακροφυσίου. Αριθμητικά αποτελέσματα από το απλοποιημένο μοντέλο συγκρίθηκαν με πειράματα κάμψης του ακροφυσίου όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 24**.

Η προσομοίωση του ακροφυσίου έγινε με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (shell elements). Σχετικά με την γεωμετρία, το πάχος της δεξαμενής θεωρείται 20 mm, η μετωπική πλάκα στο σημείο της σύνδεσης έχει πάχος 30 mm και ο σωλήνας έχει διάμετρο 6in. Λόγω της μεγάλης διαμέτρου της δεξαμενής, το τμήμα που μελετάται στα πλαίσια του πειράματος θεωρείται επίπεδο. Όλα τα μέρη είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό P355N και εφαρμόστηκε μία σχετικώς αραιή διακριτοποίηση τετρακομβικών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (**Σχήμα 25**).

Στο πείραμα το έμβολο μετακινεί το ακροφύσιο  $\pm 80\text{mm}$  προκαλώντας κάμψη. Όπως προκύπτει από την σύγκριση των αποτελεσμάτων του πειράματος και του αναλυτικού μοντέλου (**Σχήμα 26**) το αδρομερές προσομοίωμα κρίνεται αρκετά ικανοποιητικό.

*Διακλαδώσεις σωληνώσεων (Tee-junction):*

Η διακλάδωση είναι το σημείο όπου ο κύριος σωλήνας ενώνεται με έναν δευτερεύοντα σωλήνα. Στην παρούσα φάση θεωρήθηκε ένας αντιπροσωπευτικός τύπος διακλάδωσης, σύνδεση με «fitting», όπως φαίνεται στο **Σχήμα 27**. Η προσομοίωση της σωληνωτής σύνδεσης έγινε με τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους. Για την εγκυρότητα του μοντέλου έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν από τα πειράματα των Paratheocharis et al. 2013. Η πειραματική διάταξη του σχήματος (**Σχήμα 28**) προσομοιώθηκε στο Abaqus με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Για την συγκεκριμένη σύνδεση τύπου «fitting» δημιουργήθηκε το παρακάτω μοντέλο (**Σχήμα 29**), όπου με βάση τα πειραματικά δεδομένα το πάχος του κύριου σωλήνα αυξάνεται στα 13.5 mm, ενώ στο δευτερεύοντα στα 11 mm. Η γεωμετρία της σύνδεσης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 30**. Παρατηρήθηκε ότι απαιτείται πλέγμα

---

με 20 σημεία πάνω στην περίμετρο των ακραίων διατομών (**Σχήμα 29**) ώστε τα αποτελέσματα να είναι αρκετά ικανοποιητικά. Τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου βρίσκονται σε αρκετά καλή συμφωνία με αυτά του πειράματος, όπως φαίνεται και στις καμπύλες δύναμης – μετατόπισης για ανακύκλιση στο ελεύθερο άκρο (**Σχήμα 31**). Από τα παραπάνω διαγράμματα η αδρομερής προσομοίωση των συγκεκριμένων συνδέσεων κρίνεται αρκετά ικανοποιητική.

## **2. Δομική Συμπεριφορά Δεξαμενών Αποθήκευσης Υγρών σε Σεισμικά Φορτία**

Οι δεξαμενές αποθήκευσης υγρού χρησιμοποιούνται σε συστήματα διανομής νερού και σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις για την αποθήκευση ή /και την επεξεργασία ποικιλίας υγρών, συμπεριλαμβανομένου του πετρελαίου, του υγροποιημένου φυσικού αερίου, χημικών υγρών και απόβλητων διαφόρων μορφών. Οι δεξαμενές αυτές κατηγοριοποιούνται σε δύο κυρίως τύπους: υπέργειες και υπερυψωμένες δεξαμενές. Στην παρούσα δράση παρουσιάζονται υπέργειες κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές.

Οι υπέργειες δεξαμενές διακρίνονται σε αγκυρωμένες και μη-αγκυρωμένες ανάλογα με το αν συγκρατούνται ή όχι σταθερά στο έδαφος με αγκύρια. Οι αστοχίες στις αγκυρωμένες δεξαμενές περιλαμβάνουν αστοχίες στη θεμελίωση, στις στηρίξεις και στα κελύφη λόγω θλίψης. Σε αντίθεση με τις αγκυρωμένες δεξαμενές οι οποίες δεν επιτρέπουν το ανασήκωμά τους, οι δεξαμενές που δε φέρουν αγκυρώσεις είναι πιθανό να ανασηκωθούν λόγω της κατακόρυφης κίνησης που δημιουργούν στο τοίχωμα οι υδροδυναμικές πιέσεις που προκαλεί ο σεισμός.

Καθώς η αναγκαιότητα και η σημασία των δεξαμενών αποθήκευσης υγρών έχει αυξηθεί κατά τη διάρκεια των ετών, κυρίως λόγω της ανάγκης για συνεχή παροχή ενέργειας και υδάτινων πόρων, τόσο αυξάνεται η ανάγκη για καλύτερη κατανόηση της δομικής συμπεριφοράς και της λειτουργίας τους. Ειδικότερα, η ανάλυση και ο σχεδιασμός των δεξαμενών αποθήκευσης υγρών σε σεισμικά φορτία έχει αναγνωριστεί ως ένα σημαντικό θέμα για τη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητάς

---

τους, και έχει αποτελέσει αντικείμενο πολυάριθμων αναλυτικών, αριθμητικών και πειραματικών εργασιών. Ο Housner (1957), έχοντας ως κίνητρο την ανάγκη για ακριβή προσδιορισμό των σεισμικών δράσεων σε δεξαμενές, παρουσίασε μια λύση για τις υδροδυναμικές δράσεις σε μη-παραμορφώσιμους κατακόρυφους κυλίνδρους και ορθογώνια. Για πρώτη φορά, η συνολική σεισμική δράση επιμερίστηκε σε δύο μέρη, στο ωστικό και το επαγωγικό. Συγκεκριμένα, το ωστικό μέρος παρακολουθεί την κίνηση της δεξαμενής και καταλαμβάνει το χαμηλό τμήμα της δεξαμενής. Αντιθέτως, το επαγωγικό μέρος είναι το μέρος του υγρού στο οποίο εμφανίζεται ο κυματισμός και, συνεπώς, βρίσκεται στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού, η κίνηση δε του οποίου είναι πολύ διαφορετική από την κίνηση που επιβάλλει ο σεισμός στο δοχείο. Η έννοια αυτή αποτελεί τη βάση για τις προδιαγραφές του Προτύπου API 650 (2003,2007) (Παράρτημα Ε) για τις κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές. Οι Veletsos και Yang (1977) και Haroun (1983), έχουν επεκτείνει τη διατύπωση αυτή έτσι ώστε να περιλαμβάνει τις επιδράσεις της παραμόρφωσης κελύφους καθώς και την αλληλεπίδρασή της με τις υδροδυναμικές δράσεις. Πιο πρόσφατα, μελετήθηκε εκτενώς σε περιοδικά το θέμα του ανασηκώματος (uplifting) των μη αγκυρωμένων δεξαμενών καθώς και οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μεταξύ εδάφους και κατασκευής, από τους Peek (1988), Natsiavas (1988), Veletsos & Tang (1990) και Malhotra (1995). Σημαντικές συνεισφορές στον προσδιορισμό της σεισμικής απόκρισης αγκυρωμένων και μη αγκυρωμένων δεξαμενών αποθήκευσης υγρών αποτελούν οι εργασίες των Fischer (1979) και των Rammerstorfer et al. (1988), με ιδιαίτερη έμφαση στις επιπτώσεις του σχεδιασμού. Προφανώς, αυτά τα κείμενα αποτελούν τη βάση για τις προδιαγραφές σεισμικού σχεδιασμού κατακόρυφων κυλινδρικών δεξαμενών του Μέρους 4 του Ευρωκώδικα 8 (Παράρτημα Α). Εκτός από τις πολυάριθμες αναλυτικές και αριθμητικές εργασίες, έχουν αναφερθεί στο θέμα αυτό άλλες αξιοσημείωτες εργασίες πειραματικού περιεχομένου (Niwa & Clough 1982, Manos & Clough 1982). Ο αναγνώστης παραπέμπεται στην εργασία των Rammerstorfer et al. (1990) για μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της απόκρισης δεξαμενών αποθήκευσης υγρών υπό σεισμική φορτία, συμπεριλαμβανομένων των φαινομένων αλληλεπίδρασης υγρού-κατασκευής όπως και εδάφους-κατασκευής. Πρόσφατα, ολοκληρώθηκε το ευρωπαϊκό ερευνητικό έργο INDUSE (Pappa et al. 2012) σχετικό

---

με τη σεισμική ανάλυση και σχεδιασμό των βιομηχανικών εγκαταστάσεων, με ιδιαίτερη έμφαση στις δεξαμενές αποθήκευσης υγρών. Αποτελέσματα από τη μελέτη αυτή έχουν ενσωματωθεί σε εγχειρίδια οδηγιών μελέτης (design guidelines).

Η σεισμική ανάλυση των δεξαμενών αποθήκευσης υγρών διαφέρει από άλλες τυπικές κατασκευές πολιτικού μηχανικού (κτίρια και γέφυρες) με δύο τρόπους: Πρώτον, κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης το υγρό μέσα στη δεξαμενή ασκεί υδροδυναμικές δυνάμεις στα τοιχώματα της δεξαμενής και της βάσης, λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ υγρού και δεξαμενής. Κατά δεύτερον, οι δεξαμενές αποθήκευσης υγρών είναι γενικά λεπτότοιχες κατασκευές πράγμα που τους προσδίδει σχετικά χαμηλή ολκιμότητα.

### **Μορφές αστοχίας δεξαμενών αποθήκευσης υγρών σε σεισμικά φορτία**

Η ιδιαιτερότητα της συμπεριφοράς μεταλλικών δεξαμενών υπό σεισμική διέγερση έγκειται πρωτίστως στην αλληλεπίδραση μεταξύ τοιχώματος και περιεχόμενου υγρού και οδηγεί σε ένα μεγάλο εύρος πιθανών μορφών αστοχίας. Συνήθεις μορφές αστοχίας μεταλλικών δεξαμενών που έχουν καταπονηθεί από σεισμό είναι οι εξής:

#### *(α) Αστοχία τύπου «elephant's foot»*

Προκαλείται από τις θλιπτικές τάσεις λόγω σημαντικής ροπής ανατροπής σε συνδυασμό με τον εφελκυσμό του τοιχώματος λόγω του περιεχομένου. Ο λυγισμός τύπου «elephant's foot» είναι ένα προεξέχον κύρτωμα λίγο πιο πάνω από τη βάση της δεξαμενής το οποίο συνήθως λαμβάνει χώρα σε δεξαμενές με μεγάλο λόγο H/R (ψηλές δεξαμενές). Την αστοχία στο τοίχωμα της δεξαμενής την προκαλεί η ροπή ανατροπής (overturning moment) που δημιουργείται από τις υδροδυναμικές πιέσεις, και προκαλεί ορθές θλιπτικές τάσεις. Το **Σχήμα 32** δείχνει τον τοπικό λυγισμό μιας δεξαμενής αυτής της μορφής μετά από ένα σεισμό.

Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι η αστοχία τύπου «elephant's foot» είναι στενά συνυφασμένη με την πλήρη αστοχία της δεξαμενής. Συγκεκριμένα, η μεταλυγισμική συμπεριφορά της δεξαμενής είναι ασταθής και οι τοπικές παραμορφώσεις είναι σημαντικές και μπορούν να οδηγήσουν στη θραύση του

λυγισμένου (διπλωμένου) τοιχώματος και στην άμεση απώλεια περιεχομένου. Η αστοχία αυτή μπορεί να ποσοτικοποιηθεί υπολογίζοντας την τάση στο κάτω μέρος της δεξαμενής και συγκρίνοντάς την με την αντοχή σε λυγισμό στο συγκεκριμένο σημείο. Η δρώσα τάση μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

- Για αγκυρωμένες δεξαμενές: (API 650, Παράγραφος E.6.2.2.2)

$$\sigma_x = \frac{1}{t_s} \left( w_t (1 + 0.4a_{gv}) + \frac{1.273M_T}{D^2} \right)$$

όπου  $t_s$  είναι το πάχος του κάτω τμήματος του τοιχώματος της δεξαμενής,  $w_t$  είναι το βάρος του κελύφους και της οροφής της δεξαμενής,  $a_{gv}$  είναι η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού στην κάθετη διεύθυνση,  $M_T$  είναι η ροπή ανατροπής και  $D$  η διάμετρος της δεξαμενής.

- Για μη-αγκυρωμένες δεξαμενές: (API 650, Παράγραφος E.6.2.2.1)

$$\sigma_x = \frac{1}{t_s} \left( \frac{w_t (1 + 0.4a_{gv}) + w_a}{0.607 - 0.18667[J]^{2.3}} - w_a \right)$$

όπου  $w_a$  είναι η δύναμη αντίδρασης στο ανασήκωμα και  $J$  ο λόγος αγκύρωσης.

Αντίστοιχα η αντοχή του κελύφους της δεξαμενής σε λυγισμό υπό πίεση μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

- Σύμφωνα με το EN 1993-1-6 (Παράγραφοι 8.5, D.15):

$$\sigma_b = \chi_\chi (\overline{\lambda}_\chi) \sigma_y$$

όπου  $\chi_\chi$  είναι ο μειωτικός παράγοντας λυγισμού,  $\lambda_\chi$  είναι η σχετική λυγηρότητα του κελύφους και  $\sigma_y$  είναι το όριο διαρροής του υλικού.

- Εναλλακτικά σύμφωνα με το EN 1998-4 (Παράγραφος A.10.3):

$$\sigma_b = \sigma_e \left[ 1 - \left( \frac{p_{\max} R}{t_{eq} \sigma_y} \right)^2 \right] \left( 1 - \frac{1}{1.12 + r^{1.15}} \right) \left[ \frac{r + \sigma_y / 250}{r + 1} \right]$$

---

$$r = \frac{R / t_{eq}}{400}$$

όπου  $\sigma_e$  είναι η κρίσιμη τάση λυγισμού,  $p_{max}$  είναι η μέγιστη πίεση,  $R$  είναι η ακτίνα της δεξαμενής,  $t_{eq}$  είναι το ισοδύναμο μέσο πάχος του τοιχώματος της δεξαμενής και  $\sigma_y$  είναι το όριο διαρροής του υλικού της δεξαμενής.

*(β) Αστοχία λόγω κυματισμού του υγρού*

Η αστοχία λόγω κυματισμού του υγρού στο άνω τμήμα του κελύφους της δεξαμενής (**Σχήμα 33**). Είναι γνωστό ότι η κίνηση του ρευστού, λόγω του σεισμού, μέσα στη δεξαμενή μπορεί να θεωρηθεί ως μία επαλληλία μιας ωστικής συνιστώσας (rigid impulsive) και μιας επαγωγικής συνιστώσας (convective) αντίστοιχα. Το ωστικό κομμάτι της κίνησης ακολουθεί την κίνηση του τοιχώματος και του πυθμένα της δεξαμενής, ενώ το επαγωγικό κομμάτι είναι αυτό που σχετίζεται με τον κυματισμό της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού.

Η αστοχία λόγω κυματισμού του υγρού στο άνω τμήμα του κελύφους της δεξαμενής μπορεί να ποσοτικοποιηθεί υπολογίζοντας την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού και συγκρίνοντάς την με το ύψος πάνω από την ανώτερη στάθμη ύδατος (freeboard height). Η ανύψωση μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

- Σύμφωνα με το EN 1998-4 (Παράγραφος A.2.1.4)

$$d_{max} = 0.84R\ddot{u}_{max} / g$$

όπου  $R$  είναι η ακτίνα της δεξαμενής,  $\ddot{u}_{max}$  είναι η μέγιστη τιμή επαγωγικής επιτάχυνσης και  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.

- Εναλλακτικά σύμφωνα με τον API 650 (Παράγραφος E.7.2)

$$\delta_s = 0.5DA_f$$

όπου  $D$  είναι η ονομαστική διάμετρος της δεξαμενής και  $A_f$  είναι ένας συντελεστής επιτάχυνσης.



---

Το ύψος πάνω από την ανώτατη στάθμη ύδατος μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\delta = H_t - H$$

όπου  $H_t$  είναι το συνολικό ύψος του τοιχώματος της δεξαμενής και  $H$  είναι το ύψος πλήρωσης του υγρού που περιέχεται στη δεξαμενή. Για να μην υπάρχει αστοχία θα πρέπει η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού να είναι μικρότερη από το freeboard height (API 650, Παράγραφος E.7.2).

#### *(γ) Αστοχία σε ακροφύσιο*

Η αστοχία σε ακροφύσιο συνδεδεμένο με δίκτυο σωληνώσεων φαίνεται στο **Σχήμα 34**. Η αστοχία στο ακροφύσιο και στο συνδεδεμένο δίκτυο σωληνώσεων μπορεί να ποσοτικοποιηθεί υπολογίζοντας κάποιες επιτρεπόμενες τιμές μετατοπίσεων ελλείψει μίας συστηματικής ανάλυσης του συστήματος σωληνώσεων. Αυτές οι μετατοπίσεις μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

- Σύμφωνα με το EN 1998-4 (Παράγραφος 4.5.2.3) μπορεί να υπολογιστεί η ελάχιστη σχετική μετατόπιση της σωλήνωσης με τη δεξαμενή

$$\Delta = \frac{x}{x_0} d_g$$

όπου  $x_0$  είναι ένα μήκος αναφοράς ίσο με 500 m,  $x$  είναι η απόσταση μεταξύ του σημείου αγκύρωσης της σωλήνωσης και του σημείου σύνδεσης με τη δεξαμενή και  $d_g$  είναι η εδαφική μετατόπιση σχεδιασμού.

- Εναλλακτικά ο API 650 (Παράγραφος E.7.3) περιέχει τον πίνακα E-8 που έχει χαρακτηριστικές τιμές μετατοπίσεων σχεδιασμού ανάλογα με τον τύπο δεξαμενής.

Η αντοχή του ακροφυσίου υπολογίζεται με βάση την αντοχή της λεπτομέρειας της σωλήνωσης και της δεξαμενής στην περιοχή του ακροφυσίου. Γι' αυτό το λόγο, αυτού του είδους η ατέλεια θα πρέπει να εξετάζεται έχοντας δεδομένα αναλύσεων των σωληνώσεων.

---

(δ) Αστοχία αγκύρωσης

Η αστοχία στην αγκύρωση της δεξαμενής (**Σχήμα 35**) μπορεί να ποσοτικοποιηθεί υπολογίζοντας με βάση τη ροπή διαρροής το φορτίο ανά αγκύριο και συγκρίνοντάς το με την αντοχή του αγκυρίου σε εφελκυσμό ή σε διαρροή. Συγκεκριμένα:

- Σύμφωνα με τον API 650 (Παράγραφος 5.12) το φορτίο ανά αγκύριο μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$F = U / n_A$$

για σεισμικό φορτίο:

$$U = \frac{4 \cdot M_s}{D} - W_2(1 - 0.4a_{gv})$$

και

$$W_2 = W_{shell} + W_{roof}$$

όπου U είναι το καθαρό φορτίο ανασηκώματος,  $n_A$  είναι ο αριθμός των αγκυρίων στην περιφέρεια της δεξαμενής,  $M_s$  είναι η σεισμική ροπή ανατροπής και  $a_{gv}$  είναι ο συντελεστής της κάθετης συνιστώσας επιτάχυνσης του σεισμού.

Η αντοχή του αγκυρίου μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

- Σύμφωνα με τον API 650, (Παράγραφος 5.12 – Πίνακας 5.21a) το φορτίο διαρροής του αγκυρίου δίνεται από τον τύπο:

$$F_Y = f_1 \sigma_Y A_s$$

- Σύμφωνα με το EN 1993-1-8 (Παράγραφος 3.6.1 – Πίνακας 3.4) η αντοχή του αγκυρίου σε εφελκυσμό δίνεται από τον τύπο:

$$F_U = f_2 \sigma_U A_s$$

Στις παραπάνω 2 εξισώσεις τα  $f_1$ ,  $f_2$  είναι κατάλληλοι συντελεστές ασφαλείας,  $\sigma_Y$  και  $\sigma_U$  είναι η τάση διαρροής και η απόλυτη αντοχή εφελκυσμού του αγκυρίου αντίστοιχα και  $A_s$  είναι η περιοχή εφελκυστικής τάσης του αγκυρίου.

---

### (ε) Αστοχία πλάκας έδρασης

Η σύνδεση πλάκας έδρασης με το κέλυφος (**Σχήμα 36**) είναι ένα πολύ ευαίσθητο σημείο μίας μη αγκυρωμένης δεξαμενής και μπορεί να αστοχήσει είτε λόγω θραύσης λόγω υπερβολικής εφελκυστικής παραμόρφωσης είτε από ολιγοκυκλική κόπωση.

Η αστοχία λόγω υπερβολικής εφελκυστικής παραμόρφωσης μπορεί να ποσοτικοποιηθεί συγκρίνοντας τη μέγιστη τοπική εφελκυστική παραμόρφωση  $\varepsilon_T$  στην περιοχή της συγκόλλησης με την αντοχή σε εφελκυσμό  $\varepsilon_{Tu}$  της περιοχής συγκόλλησης. Προτείνεται η τιμή 2% για την αντοχή σε εφελκυσμό  $\varepsilon_{Tu}$  της περιοχής συγκόλλησης, ενώ η τιμή 0.5% μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα όριο έντονης πλαστικοποίησης της περιοχής συγκόλλησης. Επιπλέον, η αστοχία της πλάκας έδρασης σε ολιγοκυκλική κόπωση μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με βάση την απόκριση της δεξαμενής στο σεισμικό φορτίο υπολογίζοντας το συντελεστή D από τον εμπειρικό κανόνα του Miner.

### **Αριθμητική προσομοίωση δεξαμενών με πεπερασμένα στοιχεία**

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της δομικής συμπεριφοράς των δεξαμενών έναντι οριζόντιων (πλευρικών) φορτίων. Στην περίπτωση της μη-αγκυρωμένης δεξαμενής, το κέλυφος της δεξαμενής και ο πυθμένας μοντελοποιούνται με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στη δακτυλιοειδή πλάκα στη βάση της δεξαμενής. Ειδικότερα, η δεξαμενή και ο πυθμένας μοντελοποιούνται με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης (S4R). Σε αυτήν την περίπτωση, οι επιπτώσεις του ανασηκώματος της μη-αγκυρωμένης δεξαμενής προσομοιώνονται με τη χρήση κατάλληλων συνθηκών επαφής μεταξύ της πλάκας έδρασης της δεξαμενής και του εδάφους. Η προσομοίωση του εδάφους γίνεται με χρήση συμπαγών (solid) οκτακομβικών στοιχείων μειωμένης ολοκλήρωσης (C3D8R). Ο συντελεστής τριβής μεταξύ της πλάκας έδρασης της δεξαμενής και του εδάφους θεωρείται ότι είναι 0.3. Η οροφή της δεξαμενής έχει μοντελοποιηθεί με δικομβικά πεπερασμένα στοιχεία (γραμμικά) τύπου δοκού (B31). Στην περίπτωση αγκυρωμένης δεξαμενής, προσομοιώνονται μόνο το τοίχωμα της δεξαμενής και η

---

οροφή, καθώς το τοίχωμα συγκρατείται με αγκύρια στο έδαφος και δε μας ενδιαφέρει τι συμβαίνει στον πυθμένα της δεξαμενής. Στην προσομοίωση, το τοίχωμα πακτώνεται στο κάτω μέρος.

Το υλικό της δεξαμενής περιγράφεται μέσω του κριτήριου διαρροής von Mises, με ιστροπική σκλήρυνση. Το όριο διαρροής του υλικού S235 είναι ίσο με 235 MPa, με μέτρο ελαστικότητας  $E=210.000$  MPa και μέτρο κράτυνσης 210 MPa που αντιστοιχεί στο 1/1000 του μέτρου ελαστικότητας. Η πυκνότητα του αποθηκευμένου υγρού είναι  $\rho= 1000$  kg/m<sup>3</sup>.

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς των δεξαμενών διεξάγεται χρησιμοποιώντας μια μη-γραμμική στατική ανάλυση σε τρία βήματα. Στο πρώτο στάδιο εφαρμόζεται η βαρύτητα της δεξαμενής, ενώ στο δεύτερο στάδιο, η δεξαμενή φορτίζεται λόγω υδροστατικής πίεσεως του υγρού. Τέλος, στο τρίτο βήμα, επενεργεί μια οριζόντια υδροδυναμική φόρτιση μέσω μιας ανελαστικής στατικής ανάλυσης, γνωστή και ως ανάλυση pushover. Η κατανομή των υδροδυναμικών πιέσεων στο τοίχωμα της δεξαμενής ακολουθεί την αντίστοιχη λύση του υδροδυναμικού προβλήματος, (άθροισμα ωστικής και επαγωγικής πίεσης).

Από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων εξάγεται η σχέση ροπής ανατροπής  $M$  και πλαστικής στροφής βάσης λόγω ανασηκώματος  $\psi$  η οποία είναι διαφορετική για κάθε δεξαμενή και χρησιμοποιείται στα απλοποιημένα προσομοιώματα.

### **Ανάπτυξη απλοποιημένων προσομοιωμάτων**

Η συνολική μάζα του ρευστού μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο μέρη, την ωστική μάζα (*impulsive mass*) και την επαγωγική μάζα (*convective mass*). Το ποσοστό μάζας που αντιστοιχεί στο επαγωγικό και το ωστικό κομμάτι, εξαρτάται από τη στάθμη πλήρωσης της δεξαμενής σε υγρό και από τη γεωμετρία της δεξαμενής. Γενικά σε μια ψηλή δεξαμενή (λόγος διαμέτρου προς ύψος  $D/H$  μικρότερου της μονάδας), η επαγωγική μάζα θα είναι ένα μικρό ποσοστό της συνολικής μάζας του ρευστού, ενώ σε μια χθαμαλή δεξαμενή (λόγος διαμέτρου προς ύψος  $D/H$  μεγαλύτερου της τιμής 2), η επαγωγική μάζα θα είναι ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής μάζας του ρευστού.

---

Το σύστημα δεξαμενής-υγρού προσομοιώνεται με ένα απλοποιημένο μοντέλο (απλοποιητικό «αδρομερές» προσομοίωμα) που λαμβάνει υπόψη τη γεωμετρία της κατακόρυφης κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης υγρού ακτίνας  $R$  και με ύψος πλήρωσης  $H$  και την υδροδυναμική απόκριση του υγρού με στόχο την προσέγγιση της δυναμικής συμπεριφοράς του λεπτομερούς μοντέλου (πεπερασμένων στοιχείων) των μεταλλικών δεξαμενών. Συγκεκριμένα, η ωστική και επαγωγική συνιστώσα της υδροδυναμικής επίδρασης του υγρού στην απόκριση της δεξαμενής μπορεί να μοντελοποιηθούν με ένα σύστημα διακριτών μαζών και ελατηρίων σε κατάλληλη διάταξη. Σε περίπτωση ύπαρξης σημαντικής ιξώδους απόσβεσης, στην διάταξη περιλαμβάνονται και αποσβεστήρες. Οι αρχές σύμφωνα με τις οποίες δομείται ένα τέτοιο μηχανικό μοντέλο είναι οι εξής:

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

Στο **Σχήμα 37α** παρουσιάζεται ένα μοντέλο διακριτών μαζών που προσομοιώνει τη συμπεριφορά του υγρού σε μια κυλινδρική κατακόρυφη αγκυρωμένη δεξαμενή. Η ωστική συνιστώσα της υδροδυναμικής επίδρασης του υγρού προσομοιώνεται από την ωστική μάζα  $m_i$ , που συνδέεται με τα τοιχώματα της δεξαμενής σε συγκεκριμένο ύψος  $h_i$ . Από την άλλη, η επαγωγική υδροδυναμική συμπεριφορά του υγρού προσομοιώνεται από την επαγωγική κυκλοφορούσα μάζα  $m_c$ , που συνδέεται με τα τοιχώματα της δεξαμενής σε ύψος  $h_c$ . Οι μάζες αυτές είναι συνδεδεμένες με το άκαμπτο τοίχωμα μέσω κατάλληλων οριζόντιων ελατηρίων και αποσβεστήρων ώστε να κινούνται με την συχνότητα της ιδιομορφής που εκπροσωπούν. Η ωστική μάζα και η επαγωγική μάζα είναι διαφορετικές για κάθε στάθμη πλήρωσης της

---

δεξαμενής. Το ίδιο ισχύει και για τα αντίστοιχα ύψη στα οποία διατάσσονται οι μάζες αυτές. Το άθροισμα των μαζών παραμένει σταθερό και ίσο με την συνολική μάζα του υγρού που αντιστοιχεί σε κάθε ποσοστό πλήρωσης.

Στην περίπτωση ισχυρής σεισμικής διέγερσης μιας μη-αγκυρωμένης δεξαμενής, μπορεί να έχουμε ανασήκωμα της βάσης της δεξαμενής. Η κύρια διαφορά μεταξύ αγκυρωμένης και μη-αγκυρωμένης δεξαμενής είναι αυτό το ανασήκωμα της δεξαμενής και μπορεί να μοντελοποιηθεί με την προσθήκη ενός μη γραμμικού στροφικού ελατηρίου στο προηγούμενο απλοποιημένο μοντέλο (**Σχήμα 37β**) (Malhotra & Veletsos 1994, Vathi & Karamanos 2014a, Vathi & Karamanos 2014b, Vathi & Karamanos 2015). Για την ακριβή μοντελοποίηση, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η σχέση  $M-\psi$  από το λεπτομερές μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Πρέπει να σημειωθεί ότι για λόγους απλότητας, η επαγωγική συνιστώσα μπορεί να παραλειφθεί στα ανωτέρω απλοποιημένα μοντέλα δεξαμενών.

Τα απλοποιημένα μοντέλα μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο αριθμητικής ολοκλήρωσης. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του αλγορίθμου αριθμητικής ολοκλήρωσης, για την αγκυρωμένη δεξαμενή χρησιμοποιείται η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών, ενώ για τη μη αγκυρωμένη δεξαμενή λόγω της μη γραμμικότητας του προβλήματος εξαιτίας της ύπαρξης του μη-γραμμικού στροφικού ελατηρίου στη βάση, χρησιμοποιείται η μέθοδος ολοκλήρωσης κατά Newmark των γραμμικοποιημένων εξισώσεων κίνησης, διότι είναι ευσταθής μέθοδος και δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Με τη χρήση αυτού του τρόπου μοντελοποίησης, μπορούν να υπολογιστούν η ροπή ανατροπής καθώς και οι τάσεις και παραμορφώσεις στα διάφορα σημεία της δεξαμενής. Κατ' αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιώντας κατάλληλα επιταχυνσιογραφήματα, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το αν οι συγκεκριμένες δεξαμενές παρουσιάζουν αστοχία σε ένα συγκεκριμένο σεισμό όπως και συγκρίνοντας με (μέγιστες) επιτρεπόμενες τιμές αντοχής των εν λόγω δεξαμενών (πχ. αστοχία σε elephant's foot, κόπωση κτλ.).

---

### 3. Παραδείγματα Εφαρμογής

#### Εφαρμογή 1: σεισμική ανάλυση δεξαμενής υγρών

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, αναλύεται μια τυπική δεξαμενή αποθήκευσης υγρού καυσίμου σε πετροχημική βιομηχανία, με και χωρίς αγκύρωση: Η δεξαμενή έχει διάμετρο 27.8 m και συνολικό ύψος 16.5 m. Το ύψος πλήρωσης της δεξαμενής είναι ίσο με 15.7 m, το οποίο αντιστοιχεί σε λόγο ύψους προς ακτίνα  $\gamma = H / R$  ίσο με 1.131. Το πάχος του μεταλλικού τοιχώματος της δεξαμενής δεν είναι ενιαίο, αλλά αλλάζει βαθμιαία κατά το ύψος της δεξαμενής. Το πάχος του μεταλλικού τοιχώματος ξεκινάει από 6.4 mm στο πάνω μέρος της δεξαμενής και φτάνει στα 17.7 mm στο κάτω μέρος της. Ο πυθμένας της δεξαμενής έχει πάχος 6,4 mm με δακτυλιοειδή περιμετρική πλάκα πάχους 8 mm.

Το υλικό της δεξαμενής περιγράφεται μέσω του κριτήριου διαρροής von Mises, με ισοτροπική σκλήρυνση. Το όριο διαρροής του υλικού S235 είναι ίσο με 235 MPa, με μέτρο ελαστικότητας  $E=210.000$  MPa και μέτρο κράτυνσης 210 MPa που αντιστοιχεί στο 1/1000 του μέτρου ελαστικότητας. Επίσης, η πυκνότητα του αποθηκευμένου υγρού είναι  $\rho= 1000$  kg/m<sup>3</sup>. Η γεωμετρία της δεξαμενής απεικονίζεται στο **Σχήμα 38**.

Η σχέση M-ψ της δεξαμενής αυτής που λαμβάνεται από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων απεικονίζεται στο **Σχήμα 39**. Στη σεισμική ανάλυση χρησιμοποιείται το επιταχυνσιογράφημα του **Σχήμα 40** από το σεισμό στο Düzce του 1999.

Για μια σειρά από σεισμικά γεγονότα αυξανόμενου πλάτους πραγματοποιείται ανάλυση της δεξαμενής. Θεωρώντας ως βάση το σεισμό στο Düzce, πολλαπλασιάζουμε τις τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης με ένα συντελεστή λ, ώστε να δημιουργήσουμε ένα επιταχυνσιογράφημα με την επιθυμητή τιμή PGA (Peak Ground Acceleration – Μέγιστη Τιμή Εδαφικής Επιτάχυνσης). Στη συνέχεια, για κάθε τιμή PGA, πραγματοποιούμε μια ανάλυση χρονοϊστορίας και εξετάζουμε αν η δεξαμενή αστοχεί. Η συμπεριφορά της δεξαμενής παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες για όλες τις πιθανές μορφές αστοχίας.

**Πίνακας 1:** Απόκριση της δεξαμενής σχετικά με την αστοχία τύπου elephant's foot για διάφορα επίπεδα PGA.

| PGA [g] | αγκύρωση | Παράμετρος             |                         | Αστοχία |
|---------|----------|------------------------|-------------------------|---------|
|         |          | Δράση $\sigma_x$ [MPa] | Αντοχή $\sigma_b$ [MPa] |         |
| 0.25    | ναι      | 16.47                  | 30.7                    | όχι     |
|         | όχι      | 10.37                  |                         | όχι     |
| 0.36    | ναι      | 23.53                  |                         | όχι     |
|         | όχι      | 11.18                  |                         | όχι     |
| 0.50    | ναι      | 32.94                  |                         | ναι     |
|         | όχι      | 15.87                  |                         | όχι     |

**Πίνακας 2:** Απόκριση της δεξαμενής σχετικά με την αστοχία λόγω κυματισμού του υγρού στο άνω τμήμα του κελύφους της δεξαμενής για διάφορα επίπεδα PGA.

| PGA [g] | αγκύρωση | Παράμετρος          |  | Αστοχία |
|---------|----------|---------------------|--|---------|
|         |          | Δράση $d_{max}$ [m] | Αντοχή<br>(i) $\delta$ [m]<br>(ii) $1.4\delta$ [m] |         |
| 0.25    | ναι      | 0.85                | (i) 0.814<br>(ii) 1.14                             | ναι     |
|         | όχι      | 0.82                |  | ναι     |
| 0.36    | ναι      | 1.22                |  | ναι     |
|         | όχι      | 1.22                |  | ναι     |
| 0.50    | ναι      | 1.70                |  | ναι     |
|         | όχι      | 1.70                |  | ναι     |

**Πίνακας 3:** Απόκριση της δεξαμενής σχετικά με την αστοχία στην αγκύρωση για διάφορα επίπεδα PGA.

| PGA [g] | αγκύρωση | Παράμετρος     |   | Αστοχία |
|---------|----------|----------------|---|---------|
|         |          | Δράση $F$ [kN] | Αντοχή<br>(i) $F_y$ [kN]<br>(ii) $F_u$ [kN] |         |
| 0.25    | ναι      | 508.7          | (i) 806.4                                   | 0       |
| 0.36    |          | 726.7          |   | 0       |
| 0.50    |          | 1017.4         | (ii) 1008                                   | ναι     |



**Πίνακας 4:** Απόκριση της δεξαμενής σχετικά με την αστοχία λόγω θραύσης της πλάκας έδρασης για διάφορα επίπεδα PGA, στο αριστερό (L) και δεξί (R) τμήμα της δεξαμενής.

| PGA [g]   | αγκύρωση | Παράμετρος            |  | Αστοχία |
|-----------|----------|-----------------------|--|---------|
|           |          | Δράση $\varepsilon_T$ | Αντοχή<br>i) $\varepsilon_Y$<br>ii) $\varepsilon_{Tu}$ |         |
| 0.25      | όχι      | 0.037 (L)             | i) 0.0011<br>ii) 0.02                                  | ναι     |
|           |          | 0.058 (R)             |  | ναι     |
| 0.36      |          | 0.058 (L)             |  | ναι     |
| 0.063 (R) |          | ναι                   |  |         |
| 0.50      |          | 0.081 (L)             |  | ναι     |
|           |          | 0.083 (R)             |  | ναι     |

**Πίνακας 5:** Απόκριση της δεξαμενής σχετικά με την αστοχία λόγω κόπωσης της πλάκας έδρασης για διάφορα επίπεδα PGA, στο αριστερό (L) και δεξί (R) τμήμα της δεξαμενής.

| PGA [g]   | αγκύρωση | Παράμετρος |                      | Αστοχία |
|-----------|----------|------------|----------------------|---------|
|           |          | Δράση $D$  | Αντοχή $D_{fatigue}$ |         |
| 0.25      | όχι      | 1.372 (L)  | 1                    | ναι     |
|           |          | 3.715 (R)  |                      | ναι     |
| 0.36      |          | 3.098 (L)  |                      | ναι     |
| 2.120 (R) |          | ναι        |                      |         |
| 0.50      |          | 5.191 (L)  |                      | ναι     |
|           |          | 3.818 (R)  |                      | ναι     |

## Εφαρμογή 2: σεισμική ανάλυση συστήματος σωληνώσεως

Η γεωμετρία του συστήματος φαίνεται στο **Σχήμα 41**. Αναλυτικότερα, επιλέχθηκε ένα τυπικό σύστημα σωληνώσεων το οποίο αποτελείται από (α) μία δεξαμενή, (β) το σύστημα σωληνώσεων και (γ) μια πλαισιακή κατασκευή (pipe rack) πάνω στην οποία στηρίζεται ένα μέρος του συστήματος σωληνώσεων.

Η δεξαμενή έχει διάμετρο 30 m και συνολικό ύψος 26,2 m. Το πάχος του μεταλλικού τοιχώματος της δεξαμενής είναι ενιαίο και ίσο με 20 mm. Το σύστημα σωληνώσεων έχει δύο κλάδους, ο ένας κλάδος είναι ένα σύστημα σωληνώσεων διαμέτρου 168,3 mm και πάχους 7,1 mm (6-inch SCH40), που συνδέεται με την

δεξαμενή με ένα ακροφύσιο του οποίου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά φαίνονται στο **Σχήμα 42**.

Ο δεύτερος κλάδος είναι ένα σύστημα σωληνώσεων διαμέτρου 219,1 mm και πάχους 8,2 mm (8-inch SCH40), το οποίο συνδέεται με τον πρώτο κλάδο με ένα κόμβο-διακλάδωση (Tee-junction). Δύο τύποι σύνδεσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν: σύνδεση-κόμβος με fitting ή με συγκολλημένη πλάκα ενίσχυσης. Και οι δύο κλάδοι έχουν καμπύλα τμήματα (elbows) των οποίων τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 6. Ένα μέρος του δεύτερου κλάδου στηρίζεται σε μία πλαισιακή κατασκευή με ύψος 4 m.

**Πίνακας 6:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των καμπύλων τμημάτων (elbows)

| Γεωμετρικά χαρακτηριστικά | Διάμετρος $D$ (mm) | Πάχος $t$ (mm) | Ακτίνα καμπυλότητας $R$ (mm) | $R/D$ |
|---------------------------|--------------------|----------------|------------------------------|-------|
| 8-inch SCH40 Long radius  | 219.1              | 8.2            | 304.8                        | 1.391 |
| 6-inch SCH40 Long radius  | 168.3              | 7.1            | 228.6                        | 1.358 |

Στο μοντέλο δεν προσομοιώνεται το σύνολο της δεξαμενής, καθώς το κρίσιμο τμήμα της είναι το ακροφύσιο και η περιοχή που το περιβάλλει. Η απόφαση αυτή στηρίχθηκε στην ανάγκη για τη δημιουργία ενός απλοποιημένου μοντέλου το οποίο ωστόσο θα παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα σε μικρό χρόνο. Για αυτό το λόγο κατασκευάστηκε ένα προσομοίωμα, τα μέρη του οποίου (nozzle, elbow και tee-junction) βαθμονομήθηκαν με τη χρήση πειραμάτων όπως περιγράφηκε ανωτέρω (**Σχήμα 43**, **Σχήμα 44**). Η προσομοίωση της μεταλλικής κατασκευής στήριξης σωληνώσεων (piperaek) πραγματοποιήθηκε με στοιχεία δοκού (**Σχήμα 45**, **Σχήμα 46**). Η γεωμετρία της κατασκευής παρουσιάζεται στα επόμενα κατασκευαστικά σχέδια. Αναφορικά με τα φορτία της κατασκευής, θεωρήθηκε η μάζα και το φορτίο των σωληνώσεων που της αντιστοιχούν.

Η σωλήνωση υποβάλλεται σε σεισμική διέγερση που φαίνεται στο **Σχήμα 47**, ως προς τις 2 οριζόντιες διευθύνσεις  $x$  και  $y$ . Στο **Σχήμα 48** παρουσιάζεται η

---

χρονοϊστορία της παραμόρφωσης σε ένα κρίσιμο σημείο της σωλήνωσης (στην σύνδεση διακλάδωσης Ταυ).

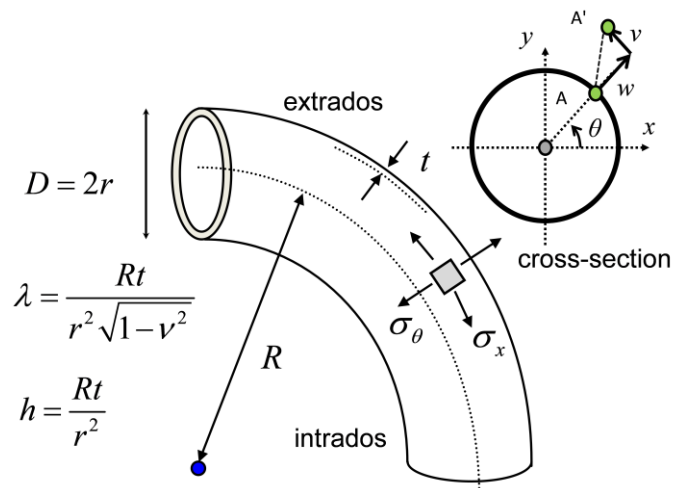
---

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**  
**ΣΧΗΜΑΤΑ**

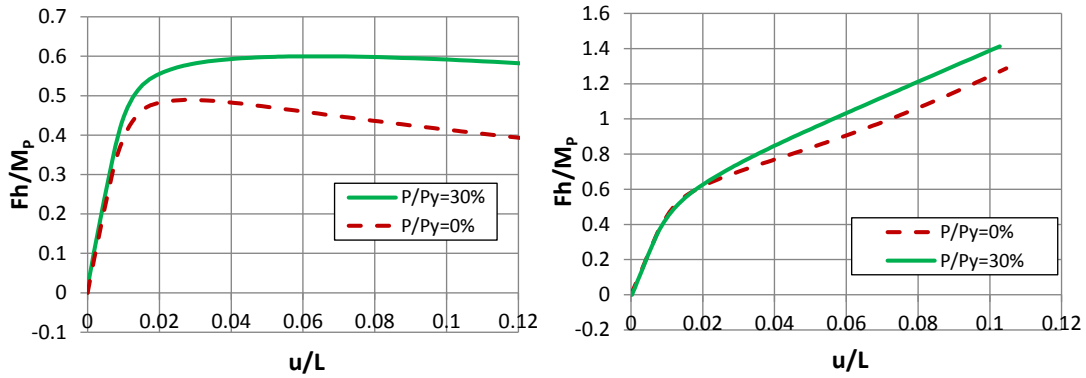
---



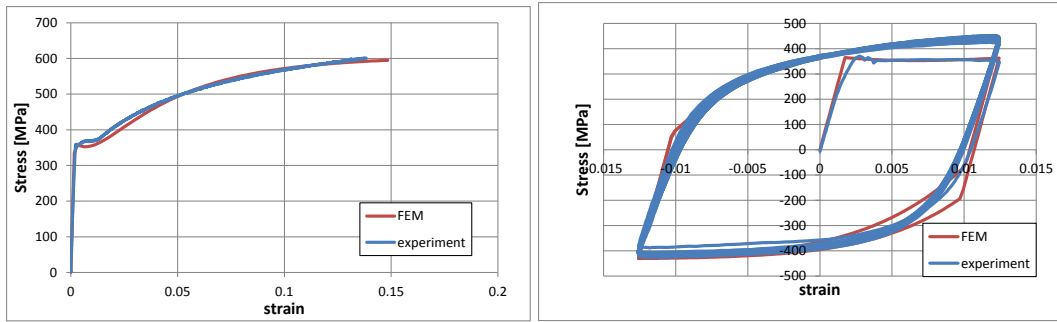
Σχήμα 1: Τυπικές σωληνώσεις με καμπύλα τμήματα.



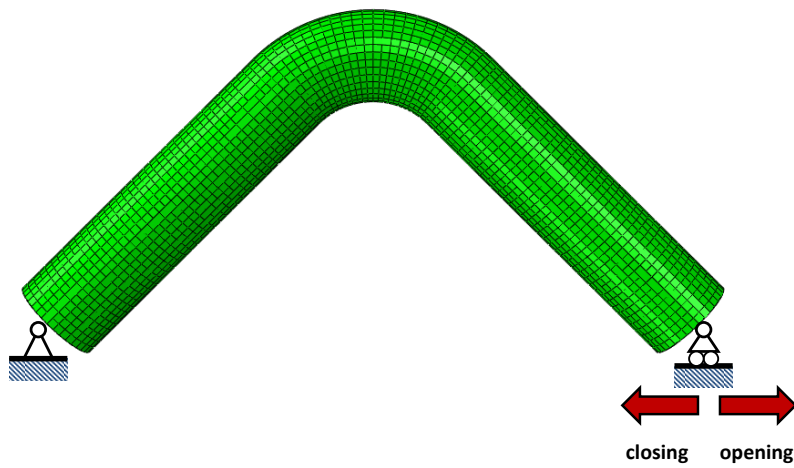
Σχήμα 2: Γεωμετρία τυπικού καμπύλου τμήματος βιομηχανικής σωληνώσης.



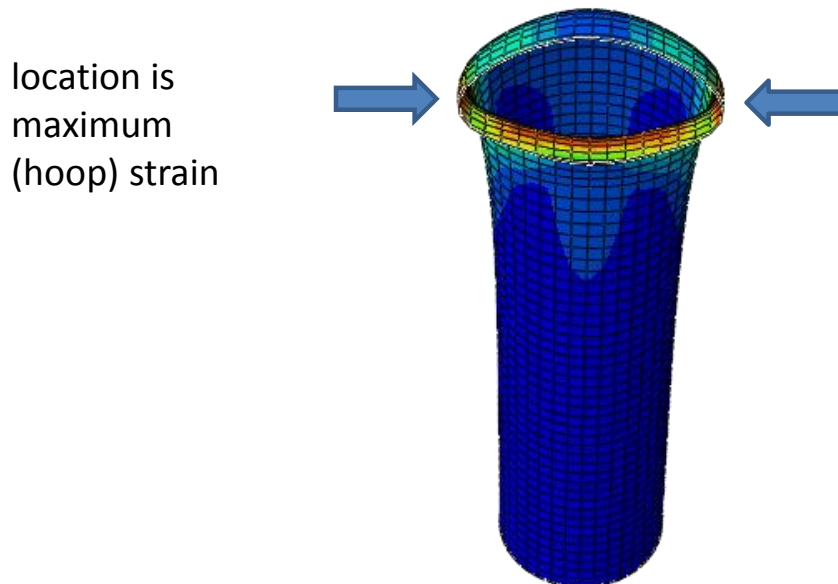
Σχήμα 3: Μηχανική συμπεριφορά καμπύλου σωλήνα σε (α) «κλείνουσες» ροπές κάμψης και (β) «ανοίγουσες» ροπές κάμψης.



**Σχήμα 4:** Μονοτονική και κυκλική συμπεριφορά υλικού X52 (P355N), από πειραματικές δοκιμές.

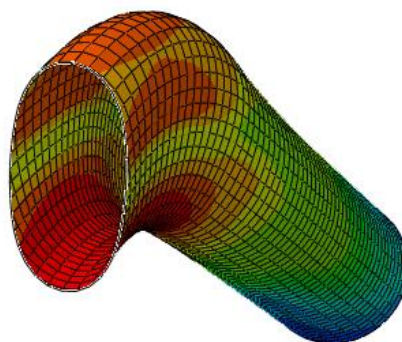


**Σχήμα 5:** Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση καμπύλου σωλήνα.

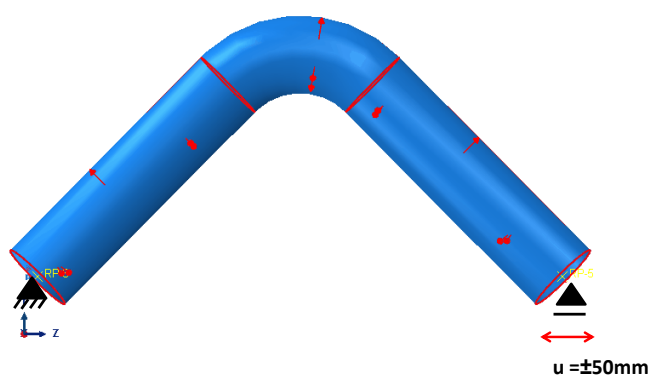


**Σχήμα 6:** Οβαλοποίηση της διατομής καμπύλου σωλήνα σε κάμψη «κλεινουσών» ροπών, και θέση μέγιστης τοπικής παραμόρφωσης.

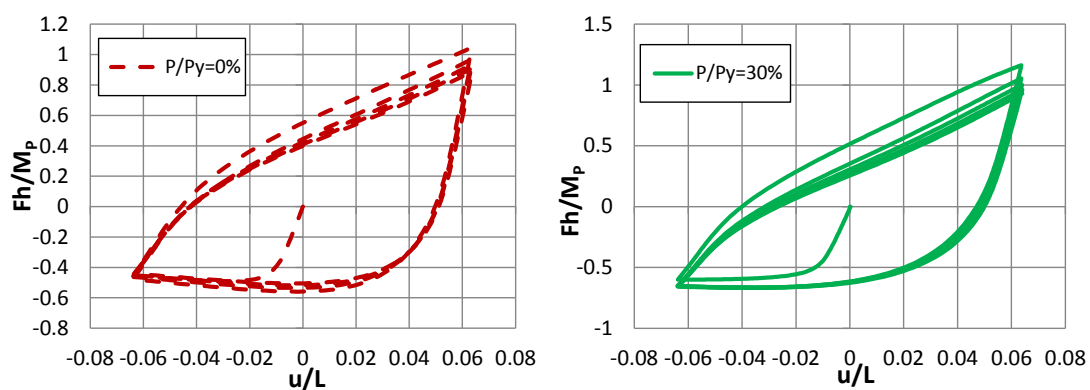
Reverse  
ovalization  
under  
opening  
bending  
moments



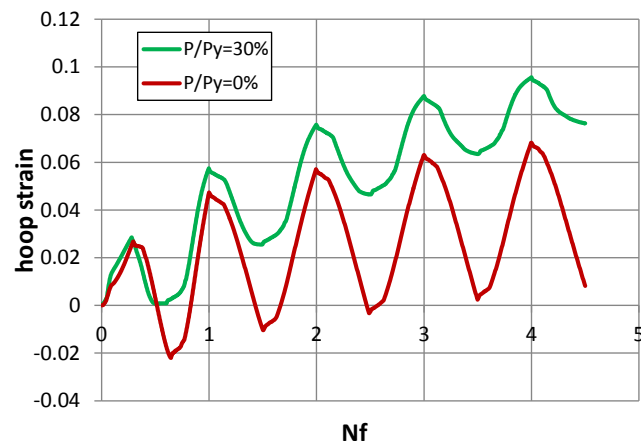
Σχήμα 7: Αντίστροφη οβαλοποίηση καμπύλου σωλήνα σε κάμψη «ανοιγουσών» ροπών κάμψης.



Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση της κυκλικής φόρτισης του καμπύλου σωλήνα.



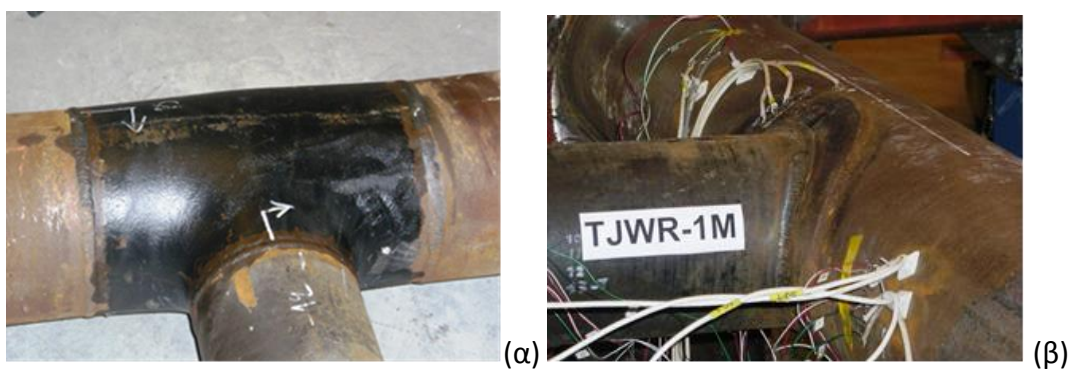
Σχήμα 9: Απόκριση του καμπύλου σωλήνα σε κυκλική φόρτιση (α) χωρίς πίεση, (β) με πίεση 30% της πίεσης πλαστικοποίησης.



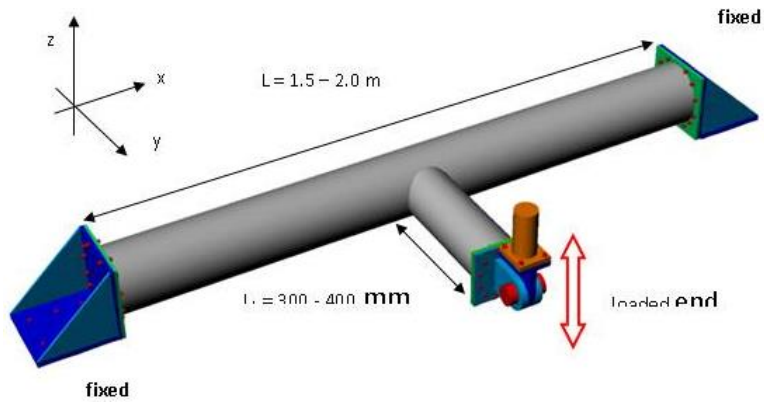
**Σχήμα 10:** Συσσώρευση παραμόρφωσης στον καμπύλο σωλήνα στο σημείο μέγιστης παραμόρφωσης.



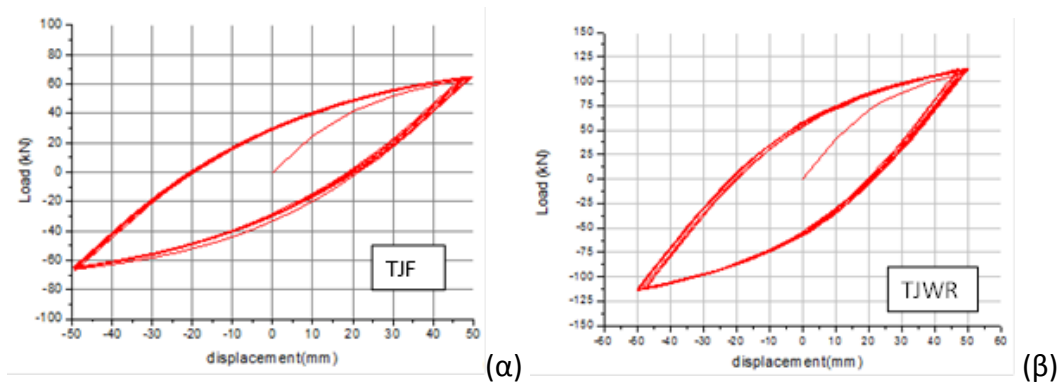
**Σχήμα 11:** Σωληνώσεις με συνδέσμους διακλάδωσης μορφής Ταυ.



**Σχήμα 12:** (α) κόμβος τύπου "fitting" (TJF) και (β) κόμβος συγκολλητού τύπου με ενισχυτική πλάκα (TJWR).

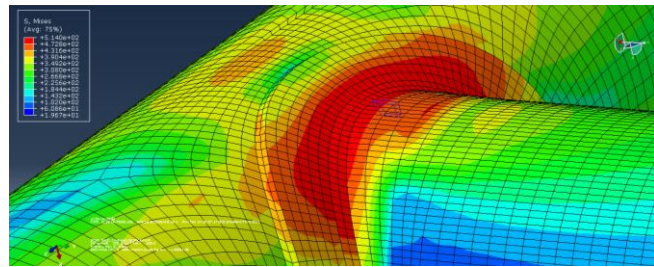
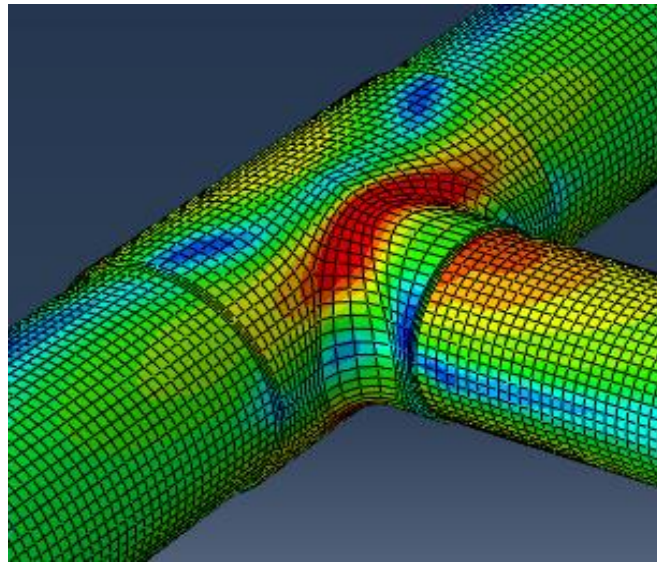


**Σχήμα 13:** Φόρτιση του κόμβου σε κάμψη εκτός του επιπέδου. Πειράματα από Paratheocharis et al. (2013).



**Σχήμα 14:** Συμπεριφορά των 2 τύπων σωληνωτών συνδέσμων σε ισχυρή κυκλική φόρτιση  $\pm 50\text{mm}$ , (α) κόμβος τύπου "fitting" και (β) κόμβος συγκολλητού τύπου με ενισχυτική πλάκα.

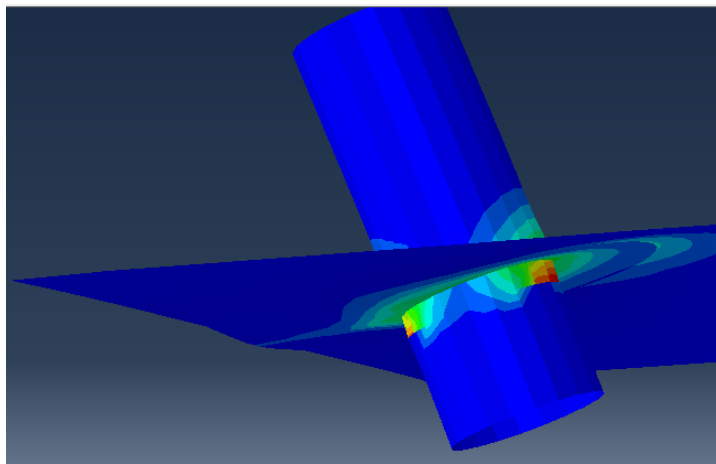
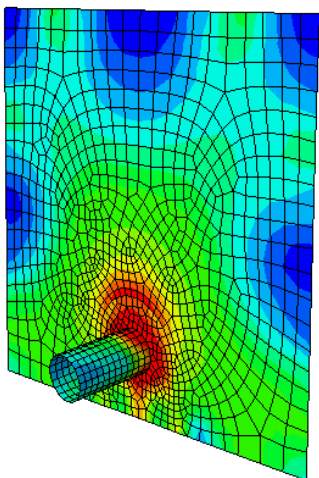
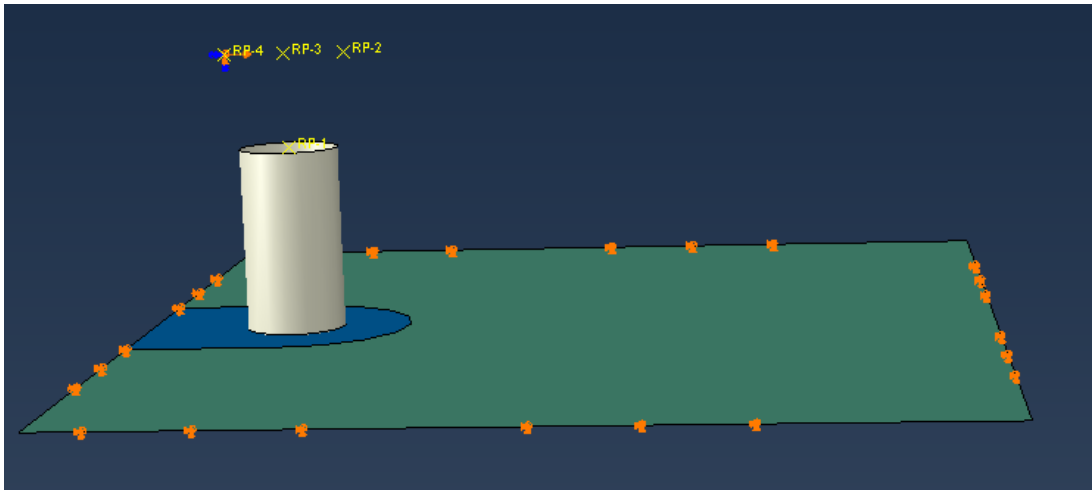




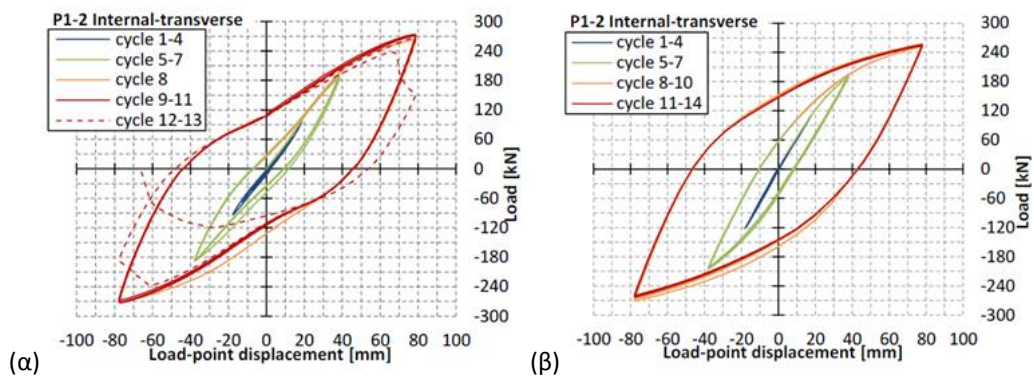
**Σχήμα 15:** Κατανομή των τάσεων σε σύνδεσμο μορφής Ταυ: (α) κόμβος τύπου "fitting" και (β) κόμβος συγκολλητού τύπου με ενισχυτική πλάκα.



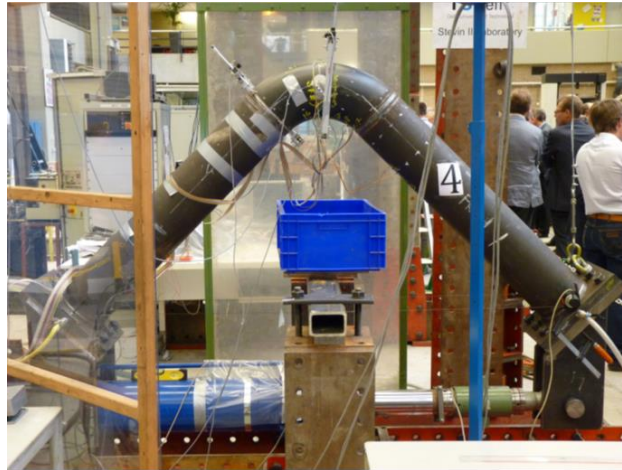
**Σχήμα 16:** Ακροφύσια δεξαμενής αποθήκευσης υγρών.



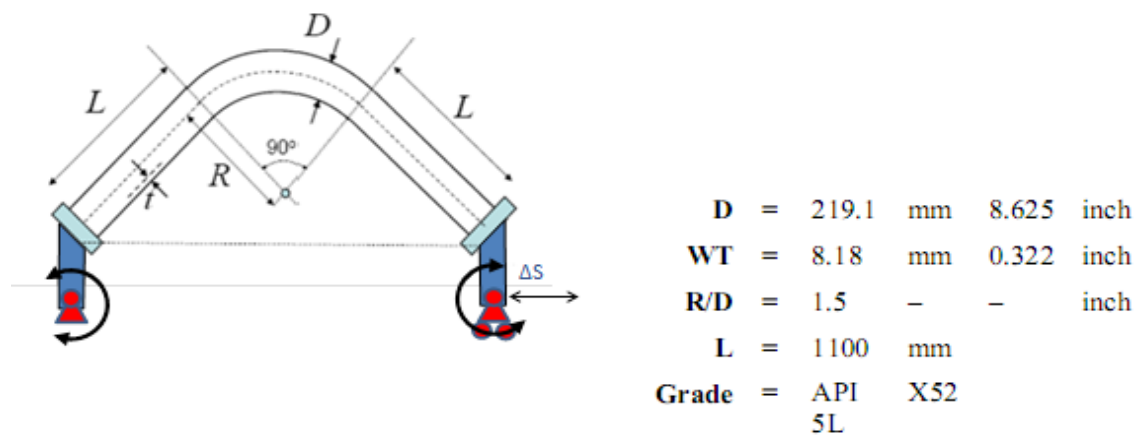
**Σχήμα 17:** Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για ακροφύσιο με ενίσχυση (Nozzle with internal reinforcement).



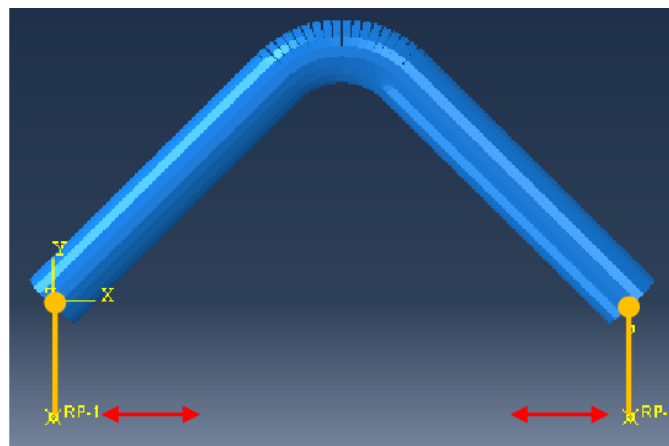
**Σχήμα 18:** Απόκριση ακροφυσίου σε κυκλική φόρτιση αυξανόμενου εύρους (α) πειραματικά αποτελέσματα (Wieschollek et al. 2013) και (β) αριθμητικά αποτελέσματα.



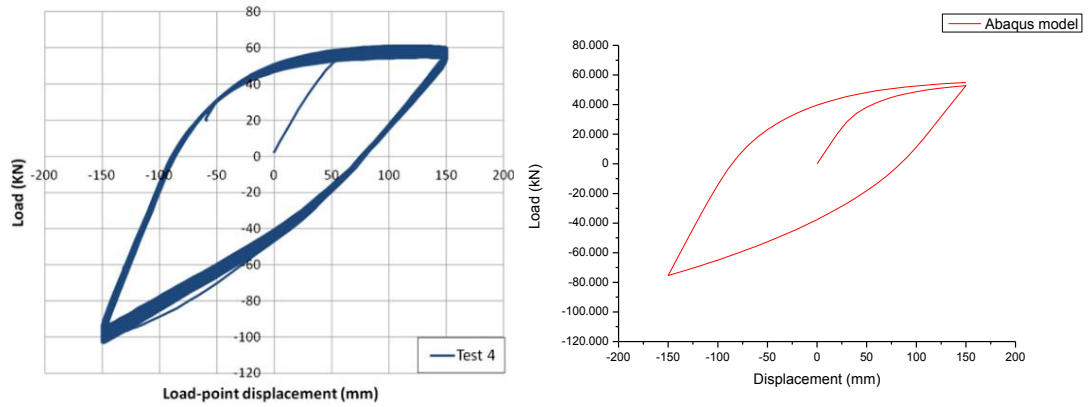
**Σχήμα 19:** Παρουσίαση πειραματικής διάταξης, όπου επιβάλλεται κυκλική μετακίνηση στην δεξιά στήριξη Varelis et al. (2013).



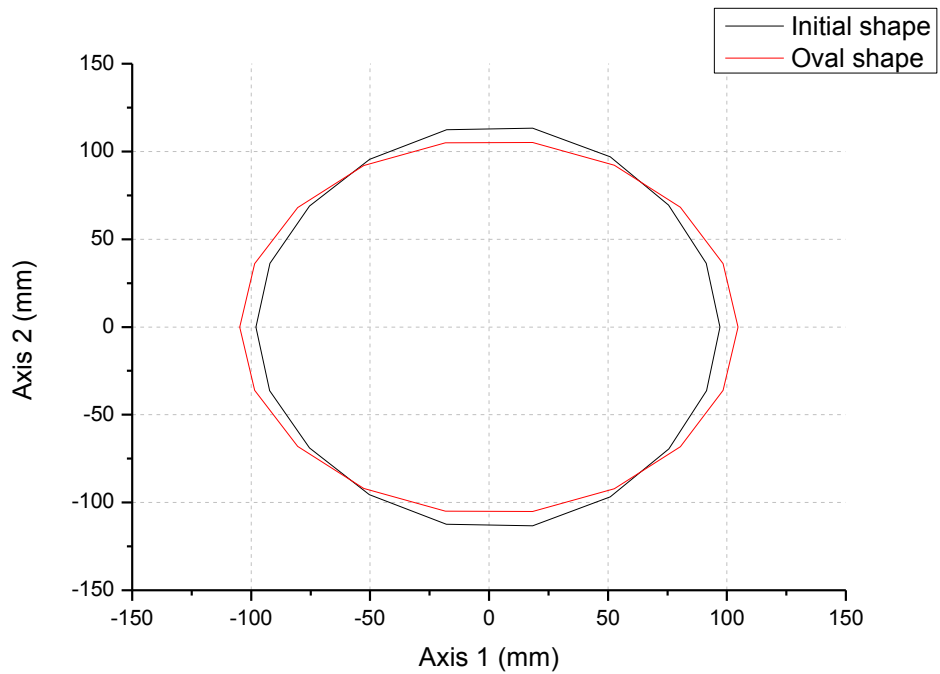
**Σχήμα 20:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πειραματικής διάταξης και αριθμητικού μοντέλου.



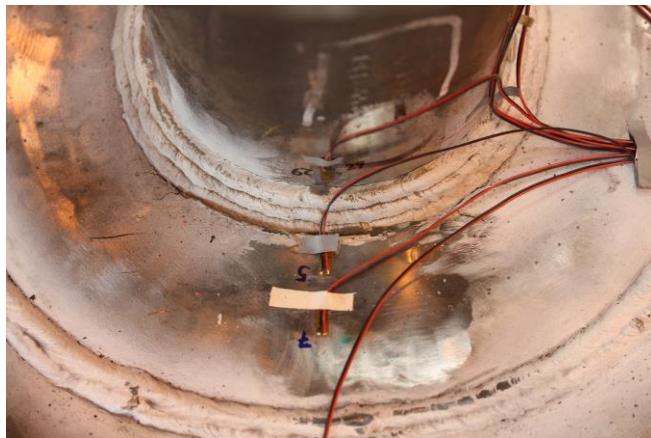
**Σχήμα 21:** Αριθμητικό προσομοίωμα του πειράματος στο Abaqus.



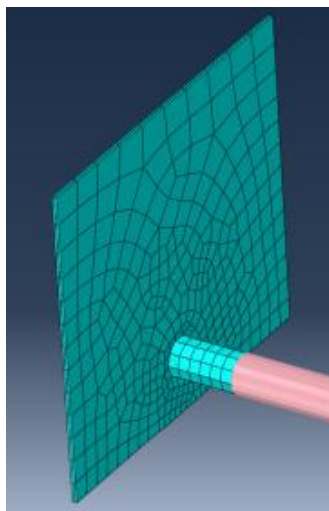
**Σχήμα 22:** Αποτελέσματα δύναμης μετακίνησης εμβόλου όπως προέκυψαν από το πείραμα (αριστερά) και όπως προέκυψαν από το αριθμητικό μοντέλο (δεξιά).



**Σχήμα 23:** Φαινόμενο "ovalization" της διατομής στο μοντέλο.

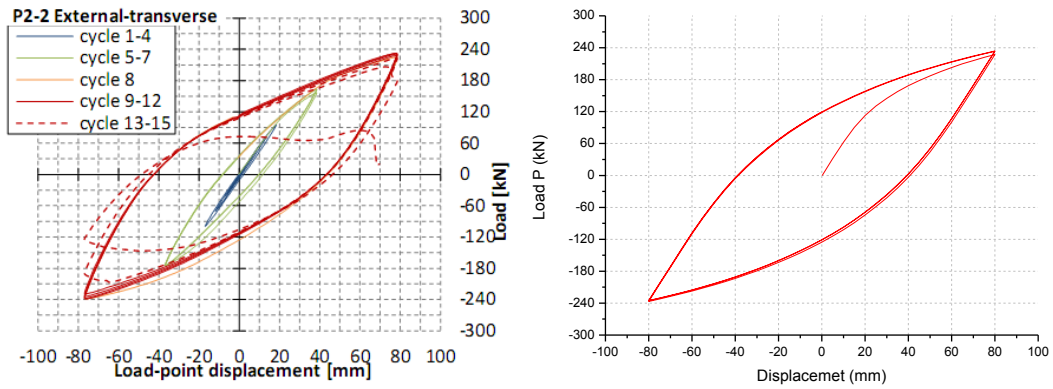


**Σχήμα 24:** Πειραματική διάταξη για δοκίμιο ακροφυσίου στο τεχνικό πανεπιστήμιο του Aachen (Wieschollek et al 2013)



**Σχήμα 25:** Προσομοίωση του ακροφυσίου με την χρήση τετρακομβικών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους.

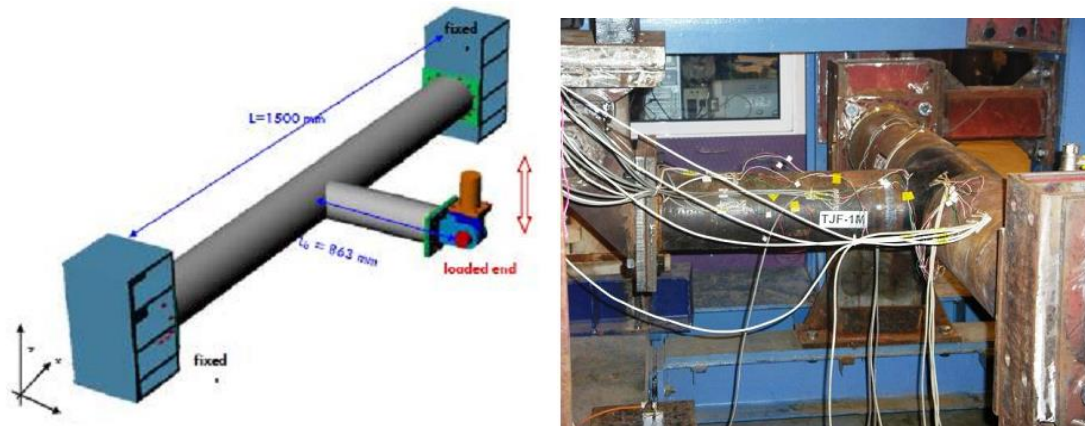




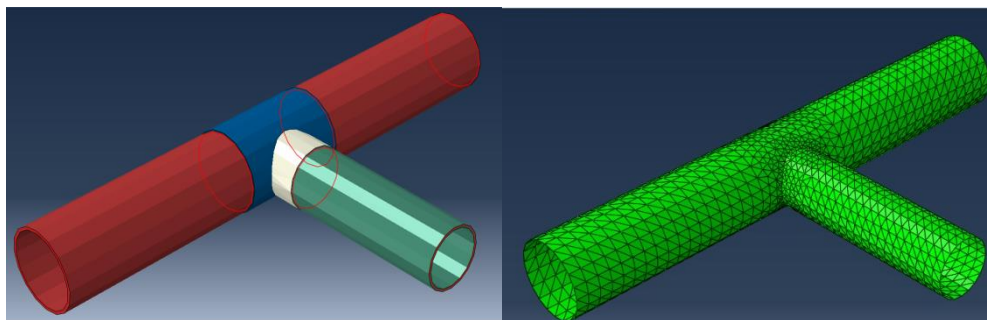
Σχήμα 26: Αποτελέσματα δύναμης μετακίνησης εμβόλου όπως προέκυψαν από το πείραμα (αριστερά) και όπως προέκυψαν από το μοντέλο (δεξιά).



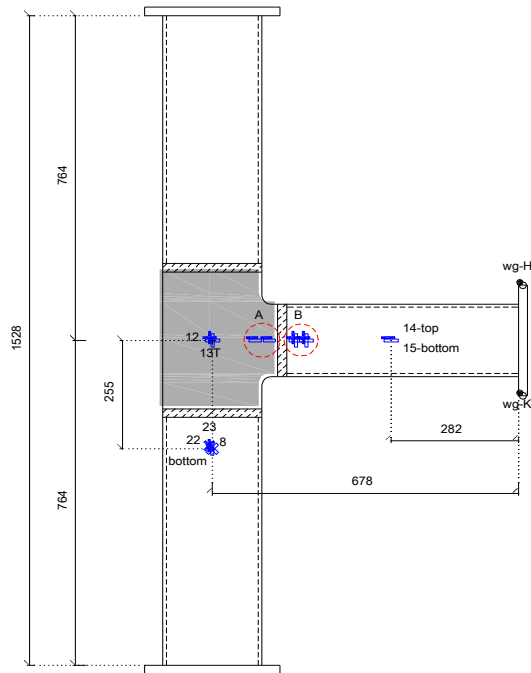
Σχήμα 27: Σύνδεση τύπου "fitting"(αριστερά) (Paratheocharis et al. 2013).



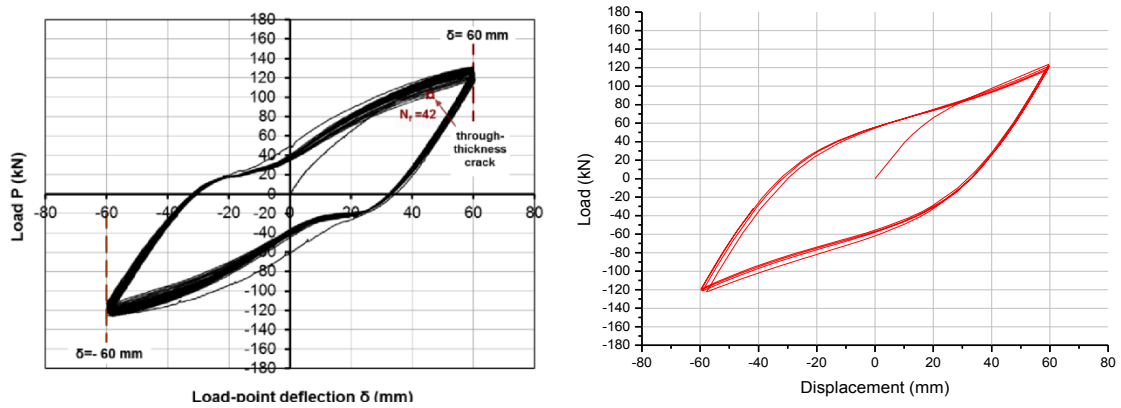
Σχήμα 28: Διάταξη πειράματος κυκλικής φόρτισης tee-junction.



Σχήμα 29: Αριθμητική προσομοίωση μοντέλου με fitting.



Σχήμα 30: Σχέδιο λεπτομεριών για τη σύνδεση τύπου Tee-fitting.



Σχήμα 31: Αποτελέσματα δύναμης μετακίνησης εμβόλου όπως προέκυψαν από το πείραμα (αριστερά) και όπως προέκυψαν από το μοντέλο (δεξιά).



Σχήμα 32: Λυγισμός μορφής «Elephant's foot».



**Σχήμα 33:** Αστοχία λόγω κυματισμού του υγρού στο άνω τμήμα του κελύφους της δεξαμενής.

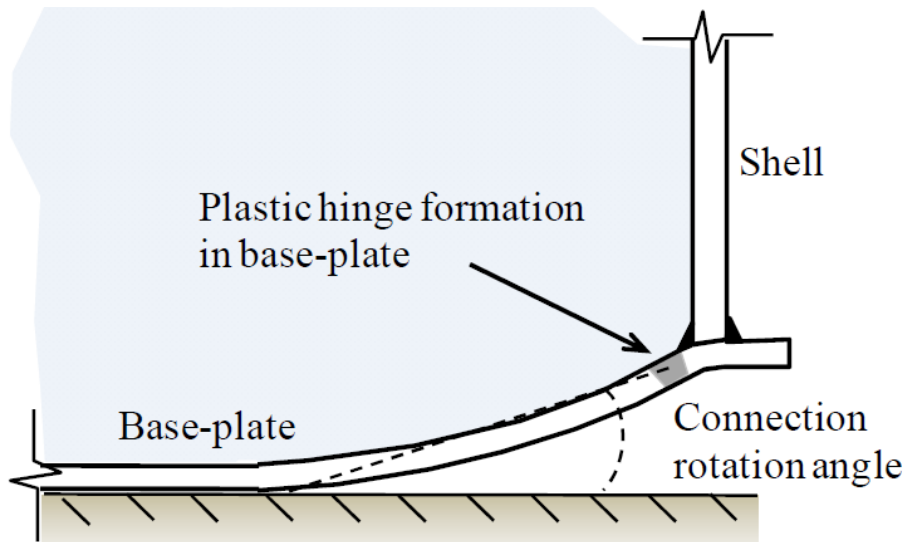


**Σχήμα 34:** Αστοχία σε ακροφύσιο.

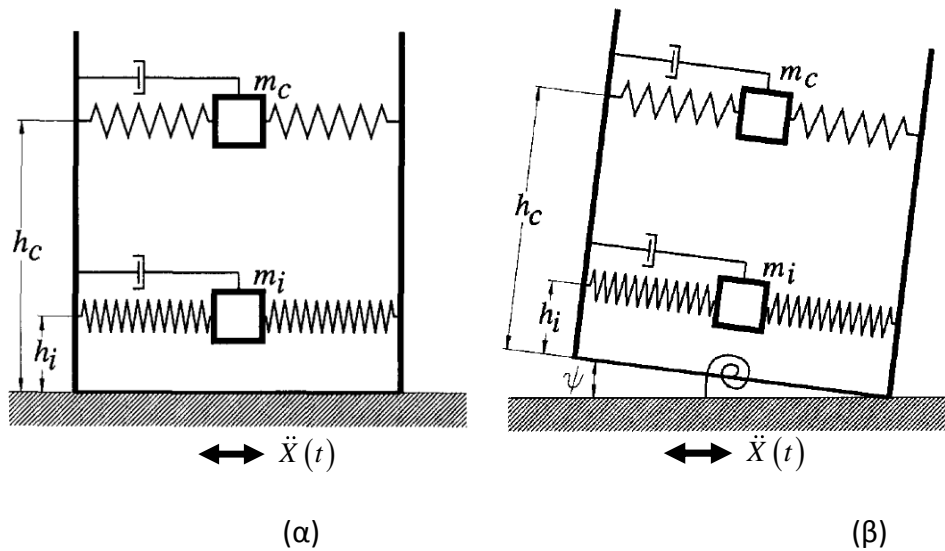


**Σχήμα 35:** Αστοχία στην αγκύρωση της δεξαμενής.

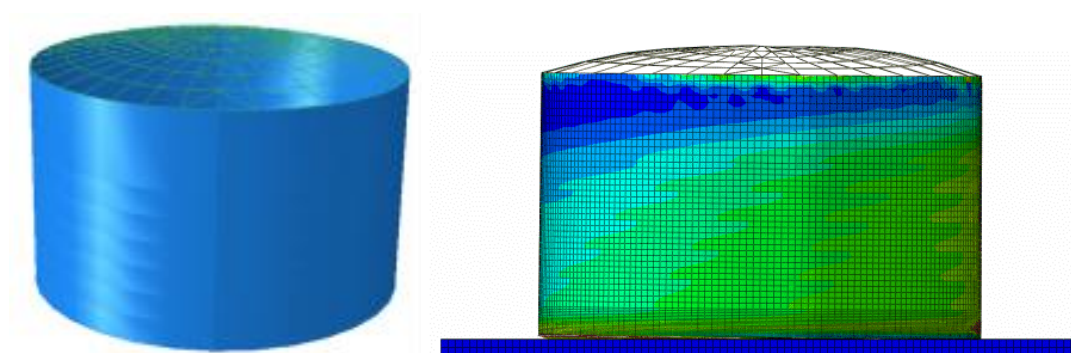




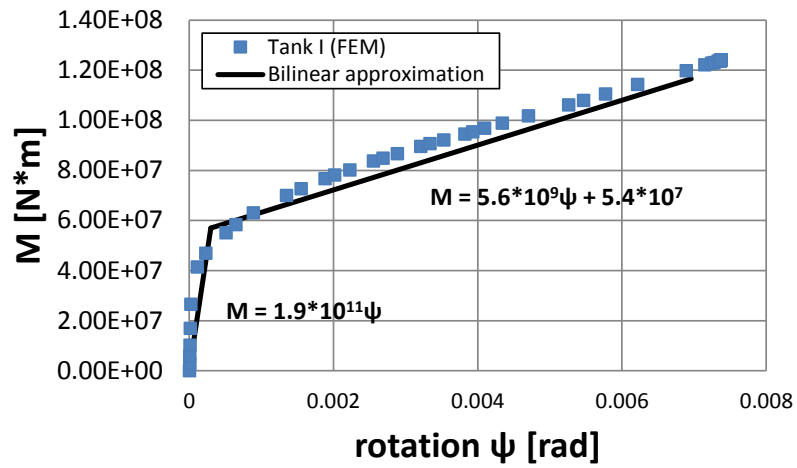
Σχήμα 36: Σύνδεση πλάκας έδρασης με το κέλυφος (Prinz & Nussbaumer 2012).



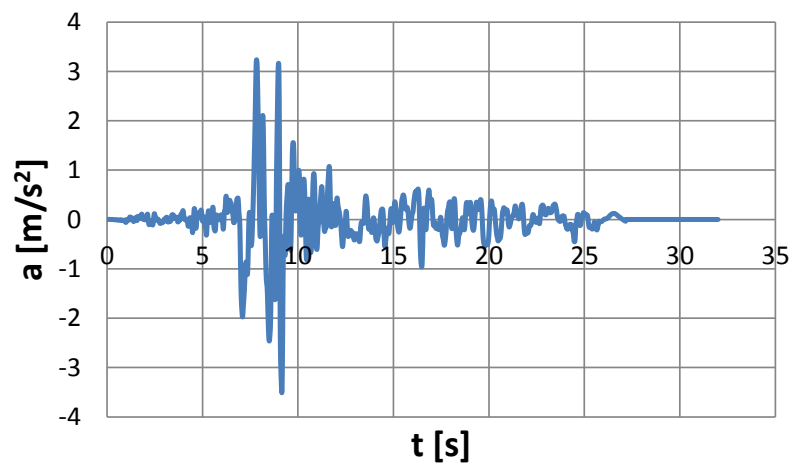
Σχήμα 37: Απλοποιημένα μοντέλα για (α) αγκυρωμένη δεξαμενή, (β) μη-αγκυρωμένη δεξαμενή (Malhotra & Veletsos 1994, Malhotra 2000).



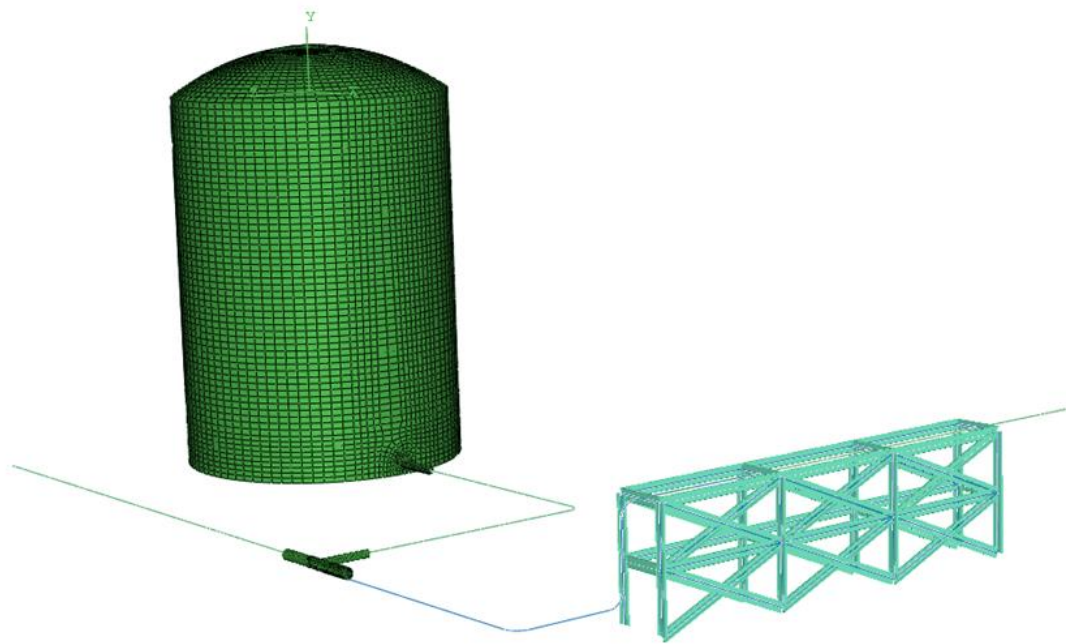
Σχήμα 38: Σχηματική αναπαράσταση της δεξαμενής που μελετήθηκε.



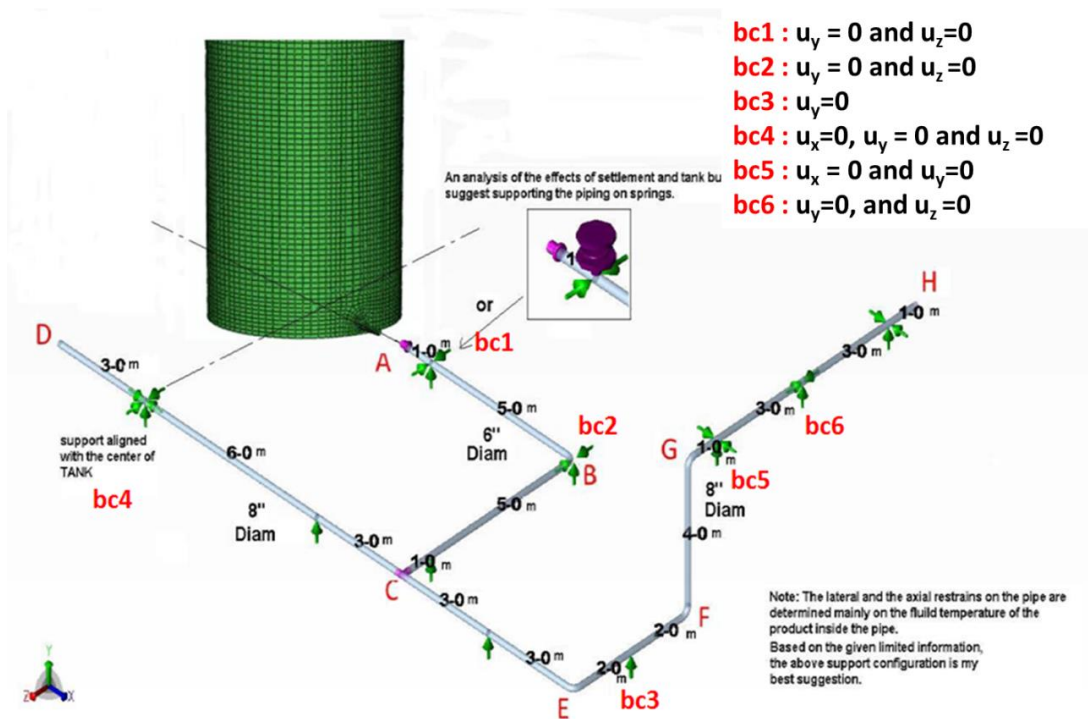
Σχήμα 39: Σχέση M-ψ της δεξαμενής που μελετήθηκε.



Σχήμα 40: Σεισμική κίνηση εδάφους από το σεισμό στο Düzce του 1999; PGA = 0.36g.

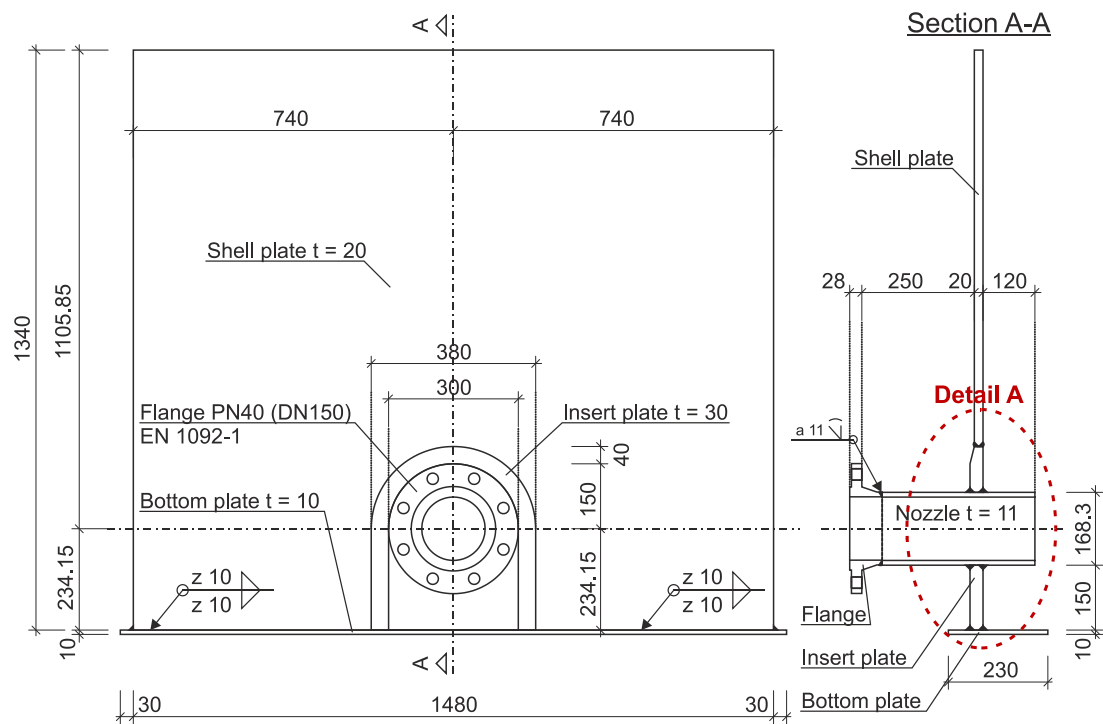


(α)

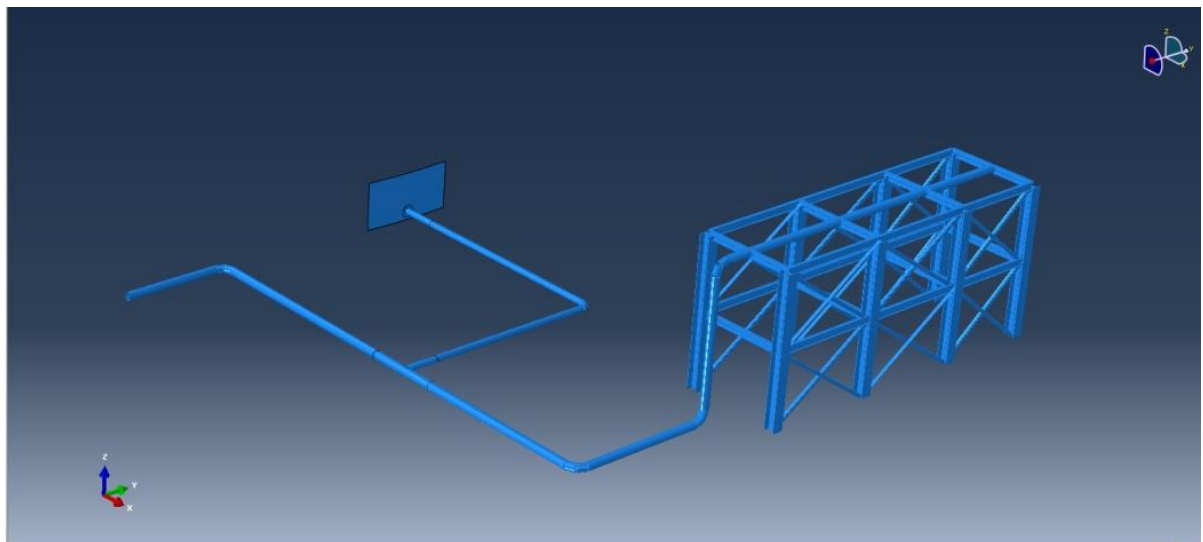


(β)

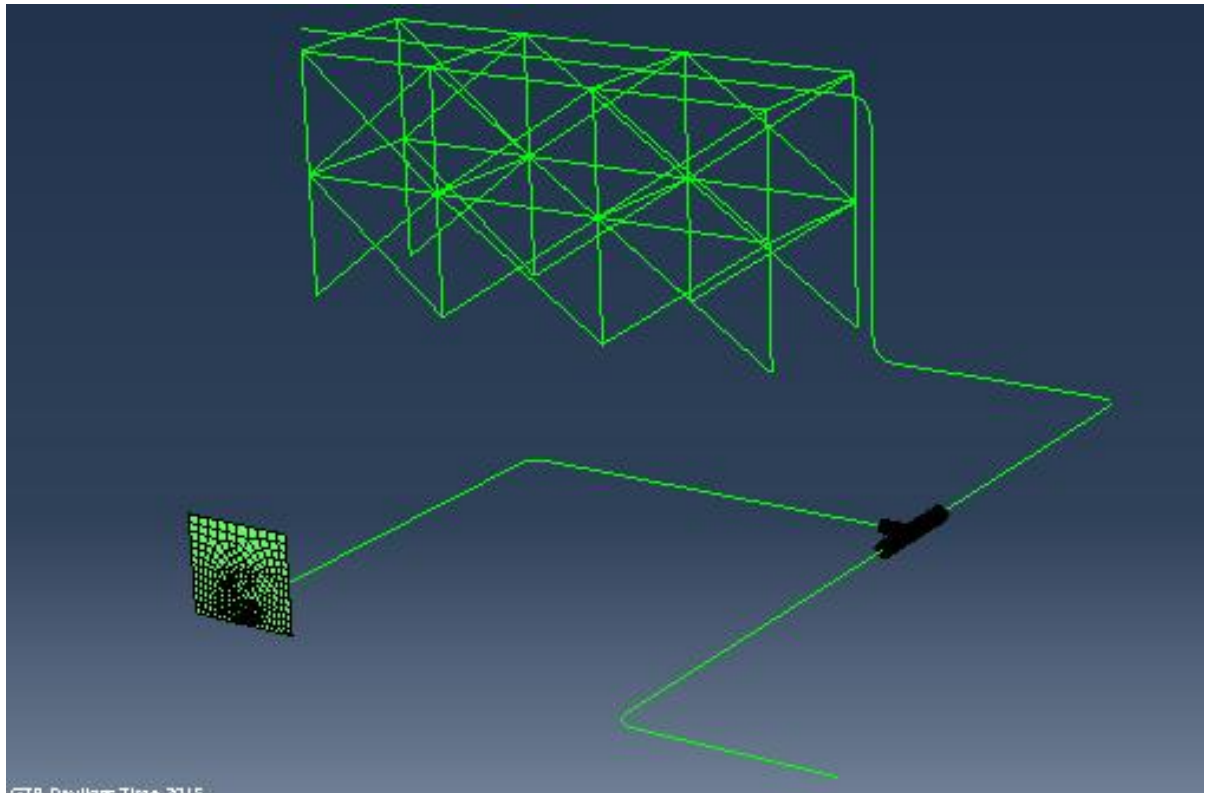
Σχήμα 41: (α) Γενική διάταξη και (β) στηρίξεις του συστήματος σωληνώσεων



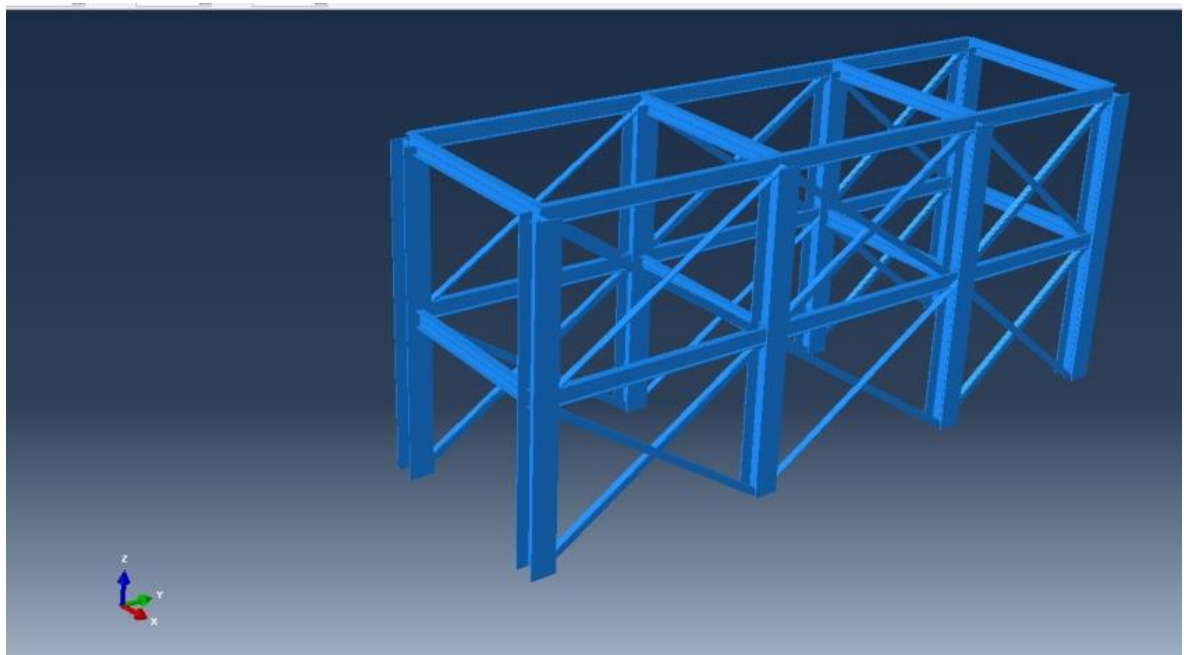
**Σχήμα 42:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ακροφυσίου της δεξαμενής του παραδείγματος εφαρμογής [διαστάσεις σε mm].



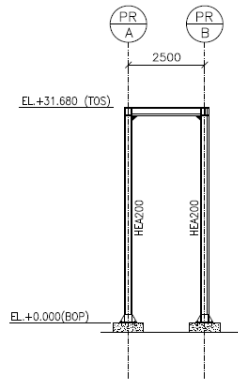
**Σχήμα 43:** Μοντέλο του συστήματος σωληνώσεων.



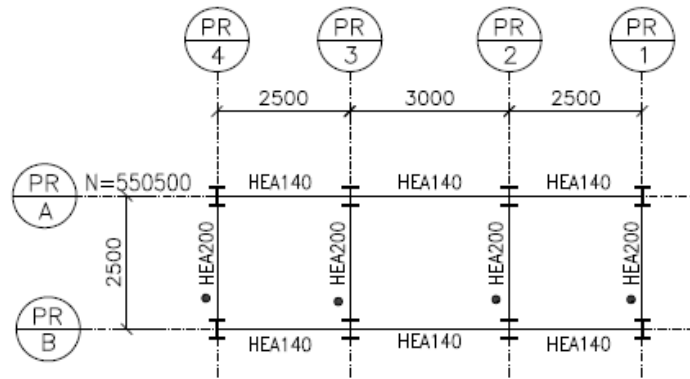
**Σχήμα 44:** Στοιχεία του μοντέλου του συστήματος σωληνώσεων: καμπύλα τμήματα, ακροφύσιο και σύνδεσμος διακλάδωσης μορφής Ταυ.



**Σχήμα 45:** Μοντέλο προσομοίωσης της κατασκευής στήριξης σωληνώσεων (piperack).

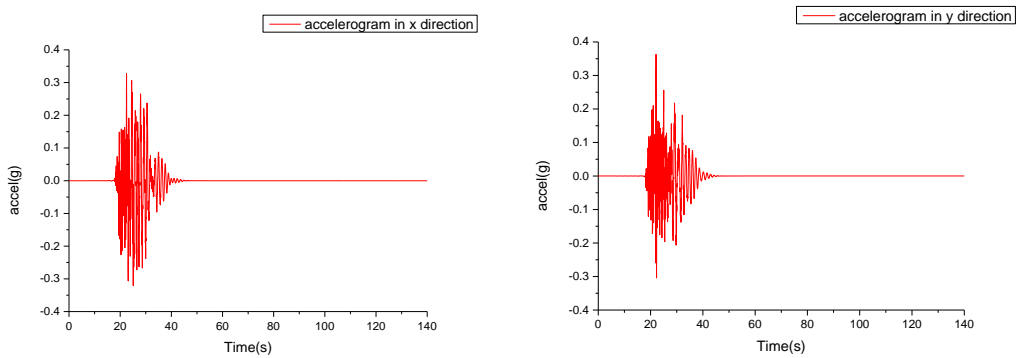


ELEV. ON ALIG. PR/4 (TYP)

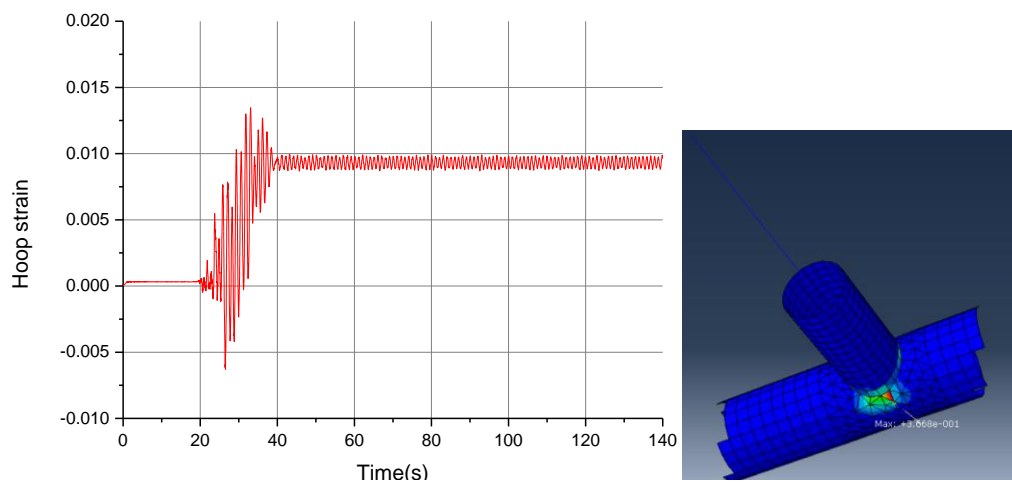


PLAN AT EL 4.000

Σχήμα 46: Σχέδια λεπτομερειών της μεταλλικής κατασκευής στήριξης.



Σχήμα 47: Σεισμική διέγερση κατά τις 2 οριζόντιες διευθύνσεις x, y.



Σχήμα 48: Απόκριση του συστήματος στην σεισμική διέγερση. Μεταβολή της παραμόρφωσης στο σημείο σύνδεσης διακλάδωσης.

---

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- American Petroleum Institute (2007), Seismic Design of Storage Tanks - Appendix E, Welded Steel Tanks for Oil Storage, API 650, 11th Edition, Washington, D.C.
- American Society of Mechanical Engineers, 2007, Factory-Made Wrought Butt-welding Fittings, B16.9, ASME Code for Pressure Piping, New York, NY.
- American Society of Mechanical Engineers, 2010a, Power Piping, B31.1, ASME Code for Pressure Piping, New York, NY.
- American Society of Mechanical Engineers, 2010b, Process Piping, B31.3, ASME Code for Pressure Piping, New York, NY.
- European Committee for Standardization (1999), Butt-welding pipe fittings, Eurocode 10253, Part 1: Wrought carbon steel for general use and without specific inspection requirements, Standard EN 10253-1, Brussels.
- European Committee for Standardization (2002), Metallic industrial piping - Part 3: Design and calculation, Standard EN 13480-3, Brussels.
- European Committee for Standardization (2006), Silos, tanks and pipelines, Eurocode 8, Part 4, CEN/TC 250, EN 1998-4, Brussels.
- European Committee for Standardization (2007), Strength and Stability of Shell Structures, Eurocode 3, Part 1-6, CEN/TC 250, EN 1993-1-6, Brussels.
- European Committee for Standardization (2006), Design of Joints, Eurocode 3, Part 1-8, CEN/TC 250, EN 1993-1-8, Brussels.
- Karamanos, S. A., 2015, "Mechanical Behavior of Steel Pipe Bends; An Overview.", Journal of Pressure Vessel Technology, ASME, Invited paper: special issue for the 50th Anniversary of PVPD, accepted for publication, to appear.
- Fischer, F. D. (1979), "Dynamic Fluid Effects in Liquid-Filled Flexible Cylindrical Tanks", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 7, 587-601.
- Haroun, M. A. (1983), "Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 11, 179-206.
- Housner, G. W. (1957), "Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers", Bulletin Seismological Society of America, 47, 15-35.
- Malhotra, P. K., and Veletsos, A. S., (1994). "Uplifting Response of Unanchored Liquid-Storage Tanks", Journal of Structural Engineering, 120(12), pp. 3525-3547.
- Malhotra, P. K. (1995), "Base Uplifting Analysis of Flexibly Supported Liquid-Storage Tanks", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24(12), 1591-1607.



- 
- Malhotra, P. K., (2000). "Practical Nonlinear Seismic Analysis of Tanks," *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 2, pp. 473-492.
- Manos, G. C., & Clough, R. W. (1982), "Further Study of the Earthquake Response of a Broad Cylindrical Liquid-Storage Tank Model", Report No. UCB/EERC-82/7, University of California, Berkeley.
- Natsiavas, S. (1988), "An Analytical Model for Unanchored Fluid-Filled Tanks under Base Excitation", *Journal of Applied Mechanics*. ASME, 55, 648-653.
- Niwa, A., & Clough, R. W. (1982), "Buckling of Cylindrical Liquid-Storage Tanks Under Earthquake Excitation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*", 10, 107-122.
- Papatheocharis T., Diamanti K., Varelis, G.E., Perdikaris P. C., Karamanos S.A. (2013), "Experimental and numerical investigation of pipe Tee junctions under strong cyclic loading", ASME 2013 PVP Conference, Paris, France.
- Pappa, P. et al. (2012), "Structural safety of industrial steel tanks, pressure vessels and piping systems under seismic loading (INDUSE)", RFCS Project Final Report, Brussels [www.mie.uth.gr/induse](http://www.mie.uth.gr/induse).
- Peek, R. (1988), "Analysis of Unanchored Liquid Storage Tanks Under Lateral Loads", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 1087-1100.
- Prinz, G. S., & Nussbaumer, A., (2012), "Fatigue analysis of liquid-storage tank shell-to-base connections under multi-axial loading", *Engineering Structures*, 40, 77-82.
- Rodabaugh, E. C., and George, H. H., 1957, "Effect of internal pressure on the flexibility and stress intensification factors of curved pipe or welding elbows.", *Transactions of the ASME*, Vol. 79, pp. 939-948
- Rammerstorfer, F. G., Fischer, F. D. & Scharf, K. (1988), "A Proposal for the Earthquake Resistant Design of Tanks – Results from the Austrian Project", Proc. 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Vol. VI, 715-720.
- Rammerstorfer, F. G., Fischer, F. D. & Scharf, K. (1990), "Storage Tanks Under Earthquake Loading", *Applied Mechanics Reviews*, ASME, 43(11), 261-283.
- Varelis, G. E., Karamanos, S. A., and Gresnigt, A. M. (2013), "Steel Elbow Response Under Strong Cyclic Loading.", *Journal of Pressure Vessel Technology*, ASME, Vol. 135, No.1, Article Number: 011207.
- Vathi, M., Karamanos, S. A. (2014a). "Modeling of Uplifting Mechanism in Unanchored Liquid Storage Tanks Subjected to Seismic Loading," *2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2ECEES)*, 24-29 August 2014, Istanbul, Turkey.



- 
- Vathi, M., Karamanos, S. A. (2014b). "Liquid Storage Tanks: Seismic Analysis," *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, Article: 368990, Chapter: 144, Springer.
- Vathi, M., and Karamanos, S. A. (2015). "Simplified Model for the Seismic Response of Unanchored Liquid Storage Tanks," *Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2015*, July 19-23, 2013, Boston, Massachusetts, USA.
- Veletsos A. S., Tang Y. (1990), "Soil-structure interaction effects for laterally excited liquid storage tanks", *Earthq Eng Struct Dyn* 19:473–496.
- Veletsos A. S., Yang J. Y. (1977), "Earthquake response of liquid storage tanks", 2nd engineering mechanics conference, ASCE, Raleigh, pp 1–24.
- Wieschollek, M., Hoffmeister, B., Feldmann, M. (2013), "Experimental and numerical investigations on nozzle reinforcement", *Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Division Conference - PVP 2013*, Paris, France, July 14-18, Paper No. 97430.