

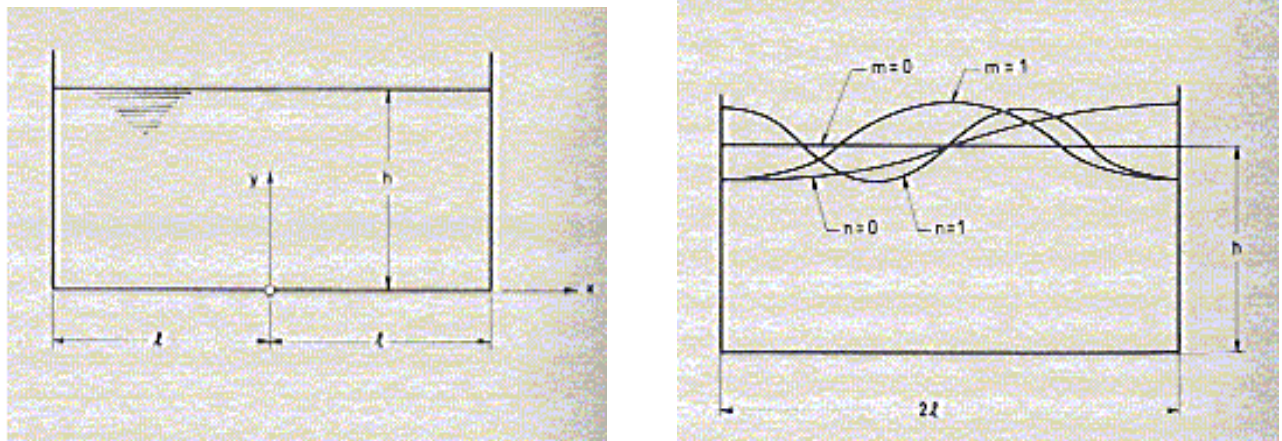
9. ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

9.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ

Κοινό χαρακτηριστικό όλων των δοχείων πίεσης και δεξαμενών αποθήκευσης υγρών είναι ότι το αποθηκευμένο υγρό έχει μία επιφάνεια της οποίας η κίνηση δεν περιορίζεται από τα τοιχώματα του δοχείου ή της δεξαμενής. Η επιφάνεια αυτή ονομάζεται ελεύθερη επιφάνεια του υγρού και επιτρέπει την σχετική κίνηση του ρευστού ως προς το δοχείο που έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση των κυματισμών στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού. Αποδεικνύεται ότι οι κυματισμοί είναι μόνιμοι δηλαδή η επιφάνεια του υγρού κινείται μόνο κάθετα ως προς τη βάση της δεξαμενής και τα μήκη κύματος ταυτίζονται με ένα φάσμα συγκεκριμένων διακριτών τιμών που αποτελούν τις ιδιοτιμές του συστήματος. Αντίστοιχα οι ιδιομορφές του συστήματος περιγράφουν την μορφή της ελεύθερης επιφάνειας.

Όταν μία από τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος υγρό-δοχείο είναι στην περιοχή ή ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα μιας εξωτερικής κίνησης, διαταραχής ή διέγερσης που ασκείται πάνω στη κατασκευή τότε εμφανίζεται συντονισμός και η ευστάθεια του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά. Επομένως ο προσδιορισμός των ιδιοσυχνοτήτων του φαινομένου του κυματισμού και γενικότερα η μελέτη της απόκρισης του συστήματος υγρό-δοχείο σε εξωτερική διέγερση αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον και σημασία.

Η ανάλυση του φαινομένου βασίζεται στην γενική θεωρία των επιφανειακών κυμάτων. Στο Σχήμα 9.1 απεικονίζονται γραφικά οι κυματισμοί στην ελεύθερη επιφάνεια ρευστού εντός μιας ορθογωνικής δεξαμενής πλάτους $2L$ με μέσο βάθος ρευστού h .



Σχήμα 9.1: Γραφική απεικόνιση κυματισμών στην ελεύθερη επιφάνεια υγρού εντός δεξαμενής τετραγωνικής διατομής.

Η κίνηση του ρευστού θεωρείται αστρόβιλη, το ρευστό ατριβές και η ροή ασυμπίεστη. Το διάνυσμα της ταχύτητας του ρευστού μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της κλίσης του δυναμικού της ταχύτητας που ικανοποιεί την εξίσωση Laplace.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (9.1)$$

Οι συνοριακές συνθήκες στα τοιχώματα της δεξαμενής είναι $\partial\phi/\partial n = 0$ που υποδηλώνουν ότι για ατρίβες ρευστό η κάθετη συνιστώσα του διανύσματος της ταχύτητας στο τοίχωμα είναι μηδέν.

Ωστόσο η ιδιαιτερότητα του προβλήματος του κυματισμού είναι η συνοριακή συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού ($y=\eta$) που προκύπτει σαν μιας κινηματικής και μιας δυναμικής συνοριακής συνθήκης. Η κινηματική συνοριακή συνθήκη υποδηλώνει ότι κάθε σωματίδιο του ρευστού που βρίσκεται στη ελεύθερη επιφάνεια παραμένει σ' αυτή. Από την εξίσωση στην ελεύθερη επιφάνεια $y-\eta=0$ συνεπάγεται ότι

$$\frac{D}{Dt}(y-\eta)=0 \quad (9.2)$$

ή σε δισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

$$-\frac{\partial\eta}{\partial t} - u \frac{\partial\eta}{\partial x} + v = 0 \quad (9.3)$$

Εκφράζοντας τις συνιστώσες της ταχύτητας συναρτήσει του δυναμικού της ταχύτητας η κινηματική συνοριακή συνθήκη γράφεται στη μορφή

$$\frac{\partial\eta}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{\partial\eta}{\partial x} = \frac{\partial\phi}{\partial y} \quad \text{στο } y=\eta \quad (9.4)$$

Η δυναμική συνοριακή συνθήκη υποδηλώνει ότι η πίεση είναι σταθερή στην ελεύθερη επιφάνεια ($y=\eta$). Η εφαρμογή της δυναμικής συνοριακής συνθήκης γίνεται μέσω της εξίσωσης Bernoulli

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} \nabla\phi \cdot \nabla\phi + g \eta = F(t) \quad \text{στο } y=\eta \quad (9.5)$$

που ισχύει για μη-μόνιμη, αστρόβιλη ροή λαμβάνοντας υπόψη τις βαρυτικές δυνάμεις καθώς επηρεάζουν σημαντικά τους κυματισμούς της ελεύθερης επιφάνειας.

Με βάση τα παραπάνω για την περίπτωση δεξαμενής τετραγωνικής διατομής η μαθηματική διατύπωση του φαινομένου του κυματισμού σε έχει ως εξής:

$$\begin{aligned} \nabla^2\phi &= 0 \\ \frac{\partial\eta}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{\partial\eta}{\partial x} &= \frac{\partial\phi}{\partial y} && \text{στο } y=\eta \\ \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} \nabla\phi \cdot \nabla\phi + g \eta &= F(t) && \text{στο } y=\eta \\ \frac{\partial\phi}{\partial y} &= 0 && \text{στο } y=-h \\ \frac{\partial\phi}{\partial x} &= 0 && \text{στο } x=0 \text{ και στο } x=2L \end{aligned} \quad (9.6)$$

Στη συνέχεια γραμμικοποιούνται οι μη γραμμικές συνοριακές συνθήκες θεωρώντας ότι το ύψος των κυματισμών $\eta(x)$ είναι μικρό σε σχέση με χαρακτηριστικά μήκη του προβλήματος όπως το μέσο βάθος του ρευστού και το μήκος κύματος του κυματισμού. Επομένως οι ποσότητες

$\partial\eta/\partial x$ και $\partial\phi/\partial x$ που εκφράζουν την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας και την συνιστώσα της ταχύτητας θα είναι μικρές. Επομένως, το γινόμενο $\partial\phi/\partial x \partial\eta/\partial x$ θα είναι πολύ μικρό (δεύτερης τάξης) και μπορούμε να το αγνοήσουμε σε σχέση με τους υπόλοιπους όρους που είναι πρώτης τάξης. Τότε η κινηματική συνοριακή συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια γίνεται

$$\frac{\partial\eta}{\partial t}(x,t) = \frac{\partial\phi}{\partial y}(x,\eta,t) \quad (9.7)$$

Αναλύοντας την συνιστώσα $\partial\phi/\partial y$ στο $y=\eta$ σε σειρά Taylor ως προς το $y=0$ και απαλείφοντας τους όρους δεύτερης τάξης προκύπτει η συνοριακή συνθήκη

$$\frac{\partial\phi}{\partial y}(x,0,t) = \frac{\partial\eta}{\partial t}(x,t) \quad y=0 \quad (9.8)$$

Η δυναμική συνοριακή συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια αντιμετωπίζεται με τον ίδιο τρόπο. Επειδή το ρευστό είναι σε ηρεμία και κάθε κίνηση του ρευστού προκαλείται από τον κυματισμό ο μη-γραμμικός όρος $u \cdot \nabla u = \nabla\phi \cdot \nabla\phi$ μπορεί να αγνοηθεί ως πολύ μικρός. Επιπλέον ο όρος $\partial\phi/\partial t$ μπορεί να αναλυθεί σε σειρά Taylor ως προς $y=0$ λαμβάνοντα υπόψη μόνο τον πρώτο όρο της σειράς. Τότε προκύπτει η συνοριακή σχέση

$$\frac{\partial\phi}{\partial t}(x,0,t) + \frac{P(x,t)}{\rho} + g \eta(x,t) = 0 \quad y=0 \quad (9.9)$$

Υπολογίζοντας την χρονική παράγωγο της τελευταίας εξίσωσης μπορούμε να αντικαταστήσουμε τον όρο $\partial\eta/\partial t$ συναρτήσει του $\partial\phi/\partial y$ και η δυναμική συνοριακή συνθήκη γράφεται

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}(x,0,t) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} + g \frac{\partial\phi}{\partial y}(x,0,t) = 0 \quad (9.10)$$

Τέλος ο όρος $\frac{\partial P(x,t)}{\partial t}$ είναι μηδέν καθώς η πίεση είναι σταθερή στην ελεύθερη επιφάνεια, άρα η τελική μορφή της συνοριακής συνθήκης είναι

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}(x,0,t) + g \frac{\partial\phi}{\partial y}(x,0,t) = 0 \quad y=0 \quad (9.11)$$

Μετά και τη γραμμικοποίηση για την περίπτωση δεξαμενή ορθογωνικής διατομής η μαθηματική διατύπωση του φαινομένου του κυματισμού σε έχει ως εξής:

$$\begin{aligned} \nabla^2\phi &= 0 \\ \frac{\partial\eta}{\partial t}(x,t) - \frac{\partial\phi}{\partial y}(x,0,t) &= 0 \quad \text{στο } y=0 \\ \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}(x,0,t) + g \frac{\partial\phi}{\partial y}(x,0,t) &= 0 \quad \text{στο } y=0 \\ \frac{\partial\phi}{\partial y}(x,-h,t) &= 0 \quad \text{στο } y=-h \\ \frac{\partial\phi}{\partial x} &= 0 \quad \text{στο } x=0 \text{ και στο } x=2L \end{aligned} \quad (9.12)$$

Η επίλυση του παραπάνω προβλήματος, με ομογενείς συνοριακές συνθήκες, αποτελεί κλασσικό πρόβλημα ιδιοτιμών και για το λόγο αυτόν το φαινόμενου του κυματισμού θεωρείται και επιλύεται σαν πρόβλημα ιδιοτιμών.

Στις περιπτώσεις που ασκείται εξωτερική διέγερση στην δεξαμενή το πρόβλημα μετατρέπεται σε πρόβλημα οριακών τιμών με την εμφάνιση μη ομογενών όρων στις συνοριακές συνθήκες στα τοιχώματα της δεξαμενής. Για την περίπτωση της δεξαμενής του Σχήματος 9.1 ορθογωνικής διατομής η μαθηματική έχει ως εξής:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \phi &= 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t}(x,t) - \frac{\partial \phi}{\partial y}(x,0,t) &= 0 && \text{στο } y=0 \\ \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}(x,0,t) + g \frac{\partial \phi}{\partial y}(x,0,t) &= 0 && \text{στο } y=0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial y}(x,-h,t) &= 0 && \text{στο } y=-h \\ \frac{\partial \phi}{\partial x} &= \dot{X}(t) && \text{στο } x=0 \text{ και στο } x=2L\end{aligned}\tag{9.13}$$

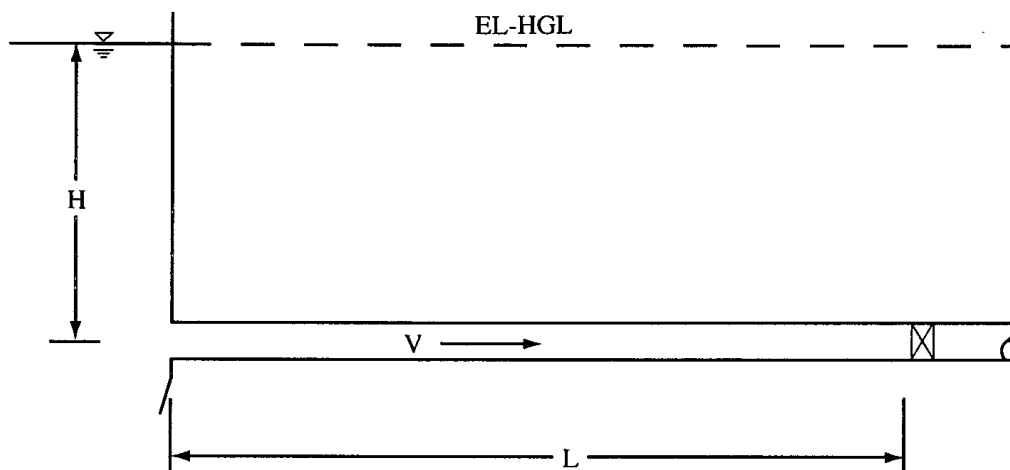
Οι μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος των συνοριακών τιμών διακρίνονται σε αναλυτικές και αριθμητικές. Οι αναλυτικές μέθοδοι είναι η μέθοδος διαχωρισμού των μεταβλητών και η σύμμορφη απεικόνιση. Η μέθοδος διαχωρισμού των μεταβλητών εφαρμόζεται σε ορθογωνικές και κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές. Σε σφαιρικές και σε οριζόντιες κυλινδρικές δεξαμενές το πρόβλημα είναι μη διαχωρίσιμο και εφαρμόζονται συνήθως μέθοδοι σύμμορφης απεικόνισης ή άλλες εξειδικευμένες τεχνικές. Τέλος οι υπολογιστικές μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών και στοιχείων εφαρμόζονται σε όλες τις γεωμετρίες αλλά απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό χώρο και χρόνο.

9.2 ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΠΛΗΓΜΑ

Το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος εμφανίζεται σε κλειστούς αγωγούς μεταφοράς υγρών όταν συμβαίνει απότομη επιβράδυνση ή επιτάχυνση της ροής που οφείλεται σε κακή λειτουργία ή απώλεια τμήματος του εξοπλισμού (π.χ. όταν τίθεται σε λειτουργία ή όταν σταματά μια αντλία και όταν ανοίγει ή κλείνει απότομα μία βαλβίδα του δικτύου). Όταν οι μεταβολές είναι γρήγορες εμφανίζεται ένα μη-μόνιμο υδραυλικό φαινόμενο που ονομάζεται υδραυλικό πλήγμα. Είναι ιδιαίτερα έντονο σε συμπιεστές ροές εντός αγωγών με ελαστικά τοιχώματα.

Το υδραυλικό πλήγμα συνδέεται έμμεσα με την αντισεισμική προστασία. Είναι προφανές ότι στη διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης είναι πιθανόν τμήμα του εξοπλισμού να υποστεί μερικές ή και ολικές ζημιές που θα οδηγήσουν με την σειρά τους σε σταματήματα εξοπλισμού με αλυσιδωτές συνέπειες (domino effect). Επομένως η μελέτη προστασίας του εξοπλισμού από το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος θα πρέπει να αποτελεί τμήμα της συνολικής αντισεισμικής προστασίας της βιομηχανικής μονάδας και των σεναρίων αντιμετώπισης επικινδύνων καταστάσεων λόγω θεομηνιών (π.χ. σεισμός).

Παρουσιάζονται συνοπτικά απλές περιπτώσεις υδραυλικού πλήγματος σε συστήματα δεξαμενών με αγωγούς τροφοδοσίας ή/και απομάκρυνσης καυσίμων ώστε να γίνει κατανοητή η φυσική του φαινομένου. Στη συνέχεια αναφέρονται και εξηγούνται οι θεμελιώδεις αρχές που είναι σημαντικές για την ανάλυση του φαινομένου και διατυπώνονται οι σχετικές εξισώσεις. Έστω ένα απλό σύστημα δεξαμενής / σωλήνα έτσι ώστε ο σωλήνας συνδέεται στο ένα άκρο του με τη δεξαμενή ενώ στο άλλο άκρο του υπάρχει μία βαλβίδα (Σχήμα 9.2).



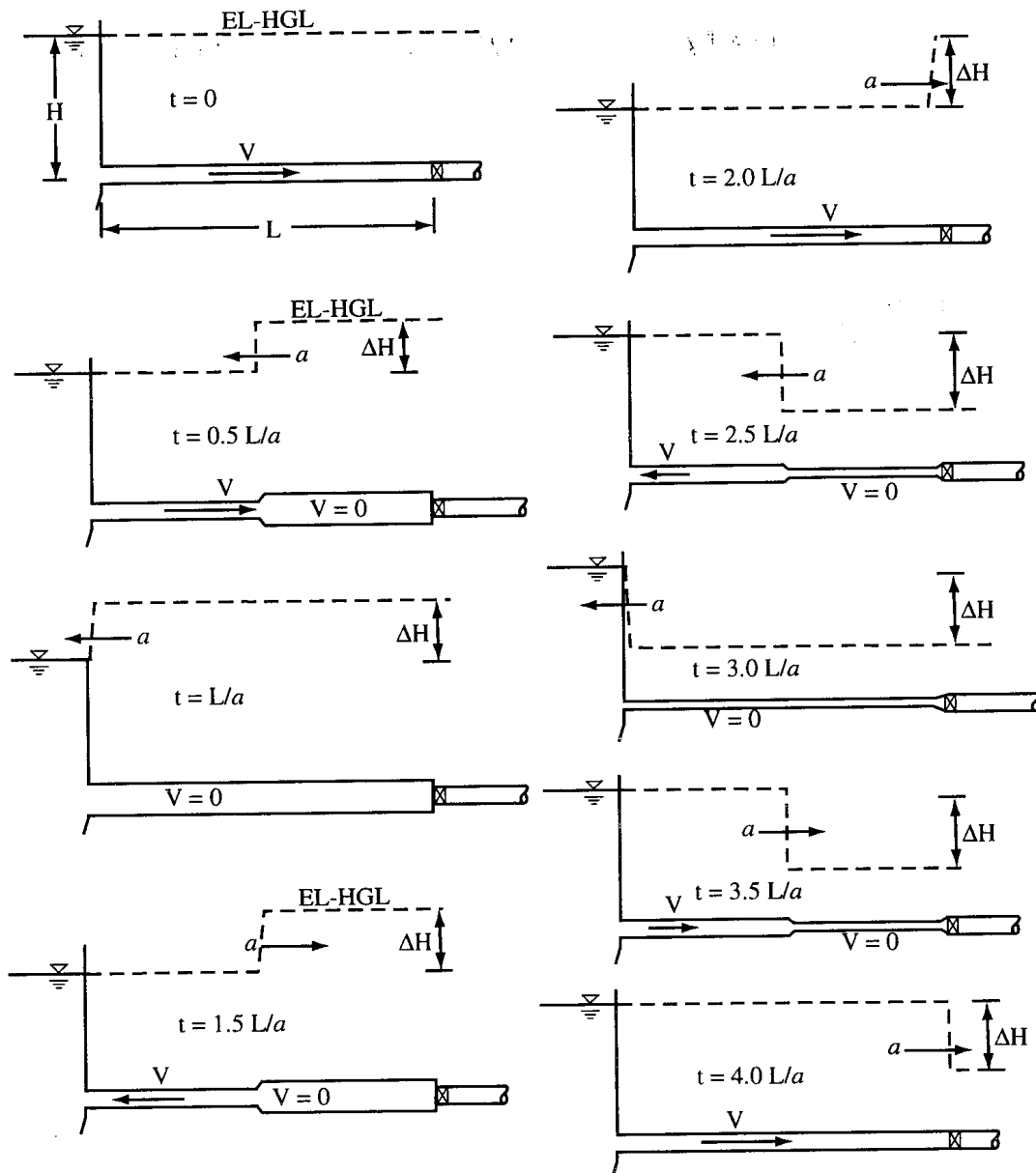
Σχήμα 9.2: Απλό σύστημα δεξαμενής- σωλήνα

Στον σωλήνα η ροή είναι μόνιμη με ταχύτητα V . Το μανομετρικό ύψος σε οποιοδήποτε σημείο του σωλήνα είναι σταθερό και ίσο με H αγνοώντας τις τριβές στα τοιχώματα του αγωγού. Εάν οι συνθήκες λειτουργίας της βαλβίδας μεταβληθούν δηλαδή η βαλβίδα κλείσει απότομα η ταχύτητα του ρευστού μπροστά από την βαλβίδα μηδενίζεται ακαριαία. Συνεπώς αυξάνεται το

μανομετρικό ύψος της πίεσης ανάντη της βαλβίδας κατά μία ποσότητα $\Delta H = aV/g$. Η αύξηση του μανομετρικού ύψους είναι ικανή να μηδενίσει την ορμή του κινούμενου ρευστού. Επιπλέον η απότομη αύξηση του μανομετρικού ύψους προκαλεί μικρή παραμόρφωση (μεγέθυνση) του σωλήνα και αύξηση της πυκνότητας του ρευστού. Η παραμόρφωση του αγωγού εξαρτάται από την διάμετρο, το πάχος και την ελαστικότητα του καθώς και από την συμπιεστότητα του ρευστού.

Η αύξηση του μανομετρικού ύψους προκαλεί ένα απότομο έμπροσθεν κύμα πίεσης που διαδίδεται ανάντη της βαλβίδας με ταχύτητα a (Σχήμα 9.3). Το μέτρο της ταχύτητας εξαρτάται από τις ιδιότητες του σωλήνα και του ρευστού. Το κύμα πίεσης φτάνει στην δεξαμενή σε χρόνο L/a από την στιγμή που κλείνουμε την βαλβίδα. Η ταχύτητα του ρευστού είναι μηδέν σε όλο το μήκος του σωλήνα, το μανομετρικό ύψος ισούται με $H + \Delta H$ σε κάθε σημείο του αγωγού ενώ ο σωλήνας έχει παραμορφωθεί και το ρευστό έχει γίνει συμπιεστό. Κάτω από αυτές τις συνθήκες το ρευστό στο σωλήνα και κοντά στη σύνδεση με την δεξαμενή δεν είναι σε ισορροπία τοπικά καθώς το μανομετρικό ύψος στην δεξαμενή είναι H . Επομένως το ρευστό αρχίζει να ρέει προς την περιοχή με το μικρότερο μανομετρικό (από τη βαλβίδα προς την δεξαμενή) καθώς ο παραμορφωμένος σωλήνας εξαναγκάζει την ροή να κινηθεί προς αυτήν την κατεύθυνση. Θεωρώντας αμελητέα την τριβή, το μέτρο της ταχύτητας της ροής προς τα αριστερά ισούται με το μέτρο της ταχύτητας της μόνιμης ροής καθώς έχει την ίδια κινούσα δύναμη δηλαδή το ίδιο μανομετρικό ύψος ΔH . Η αιτία που προκαλεί την ροή είναι το συμπιεστό ρευστό που αποθηκεύεται στο παραμορφωμένο μέρος του σωλήνα όπου έχουμε αύξηση της μανομετρικής πίεσης.

Η διαδικασία συνεχίζει να εξελίσσεται στο χρόνο. Την χρονική στιγμή $2L/a$ η κατανομή της πίεσης στον σωλήνα είναι ίδια με την αρχική αλλά η ταχύτητα της ροής έχει αντίθετη διεύθυνση (Σχήμα 2). Σε αυτή την περίπτωση η αποθήκευση του συμπιεστού ρευστού εξαντλείται και το κύμα πίεσης ανακλάται δηλαδή η μανομετρική πίεση μειώνεται κατά ΔH σε σχέση με την πίεση στην αρχική μόνιμη κατάσταση. Αυτή η πτώση πίεσης και το κλείσιμο της βαλβίδας μηδενίζουν την ταχύτητα ροής πίσω από το κύμα ενώ ο σωλήνας συρρικνώνεται και το ρευστό διαστέλλεται. Την χρονική στιγμή $3L/a$ το αρνητικό κύμα έχει φτάσει στην δεξαμενή και η ταχύτητα είναι παντού μηδενική. Ωστόσο η μανομετρική πίεση στην δεξαμενή δεν είναι σε ισορροπία με το μανομετρικό ύψος της δεξαμενής και επομένως το ρευστό ρέει από την δεξαμενή στον σωλήνα με ταχύτητα V . Πίσω από το νέο κύμα η μανομετρική πίεση είναι σε ισορροπία με το μανομετρικό ύψος της δεξαμενής. Την χρονική στιγμή $4L/a$ το κύμα έχει φτάσει στην βαλβίδα (Σχήμα 9.3). Όλες οι μεταβλητές παίρνουν τις τιμές που είχαν στην μόνιμη κατάσταση πριν κλείσει η βαλβίδα. Αυτή η χρονική διάρκεια περιγράφει ένα μη-μόνιμο υδραυλικό κύκλο που στην ιδανική περίπτωση της ατρίβους ροής συνεχίζεται χωρίς απόσβεση.



Σχήμα 9.3: Χρονική εξέλιξη του υδραυλικού πλήγματος στο απλό σύστημα δεξαμενής - σωλήνα.

Οι θεμελιώδεις αρχές στις οποίες βασίζεται η ανάλυση του υδραυλικού πλήγματος είναι ο δεύτερος νόμος του Newton και η αρχή διατήρησης της μάζας. Εφαρμόζοντας τις αρχές αυτές σε έναν στοιχειώδη όγκο ελέγχου του ρευστού, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του αγωγού προκύπτουν η εξίσωση Euler

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(H + \frac{V^2}{2g} \right) + \frac{f}{D} \frac{V|V|}{2g} = 0 \quad (9.14)$$

και η εξίσωση διατήρησης της μάζας

$$-\frac{\partial}{\partial s}(\rho A V) ds = \frac{\partial}{\partial t}(\rho A ds) \quad (9.15)$$

Αναπτύσσοντας τις παρενθέσεις της εξίσωσης (9.15), ανασυντάσσοντας του όρους και διαιρώντας με τον όγκο ελέγχου $\rho A ds$ προκύπτει η εξίσωση

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{1}{s} \frac{ds}{dt} = 0 \quad (9.16)$$

Τέλος λαμβάνοντας υπόψη την ελαστική παραμόρφωση του σωλήνα δηλαδή την μεταβολή του όγκου του σωλήνα λόγω ελαστικότητας και την μεταβολή του όγκου του ρευστού λόγω συμπιεστότητας προκύπτει η σχέση

$$a^2 \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (9.17)$$

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος του υδραυλικού πλήγματος αποτελείται από τις εξισώσεις (9.14) και (9.17). Για την επίλυση του υδραυλικού πλήγματος δηλαδή των εξισώσεων (9.14) και (9.17) χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι όπως η μέθοδος των χαρακτηριστικών και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση την διεθνή βιβλιογραφία και ειδικές αναλύσεις της ερευνητικής ομάδας, στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές σχεδιασμό βιομηχανικών κατασκευών, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντικές ιδιαιτερότητες σε σχέση με τις συνήθεις κατασκευές πολιτικού μηχανικού. Οι κατασκευές που εξετάστηκαν είναι

- Δεξαμενές και δοχεία πίεσης
- Βιομηχανικές σωληνώσεις
- Βιομηχανικές καπνοδόχοι

Μετά από συστηματική ανάλυση και διερεύνηση, προτάθηκαν ειδικές οδηγίες σχεδιασμού των ανωτέρω κατασκευών, οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν την βάση για την μελλοντική δημιουργία κανονιστικών διατάξεων, εναρμονισμένες με τις γενικές διατάξεις σχεδιασμού και την σύγχρονη αντίστοιχη πρακτική όπως αυτές εκφράζονται μέσα από τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό.

10.1 ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ

Η παρούσα εργασία σε ένα μεγάλο μέρος της, αναφέρεται στην αντισεισμική ανάλυση και αντισεισμικό σχεδιασμό δεξαμενών και δοχείων πίεσης, με έμφαση στον υπολογισμό των σεισμικών δυνάμεων. Παρουσιάζονται οι βασικοί κανονισμοί σχεδιασμού των κατασκευών αυτών, όπως επίσης και οι ειδικές διατάξεις που έχουν κατά καιρούς προταθεί για τον αντισεισμικό σχεδιασμό τους. Επίσης, εξετάζονται οι μορφές αστοχίας των κατασκευών αυτών σε σχέση με την γεωμετρία τους και τις λοιπές ιδιαιτερότητές τους.

Έμφαση δίνεται στον υπολογισμό των σεισμικών δυνάμεων. Με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία εξετάστηκαν όλες οι μεθοδολογίες που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό των σεισμικών δυνάμεων στις υπόψη κατασκευές. Είναι όμως φανερό πως ενώ στην περίπτωση των κατακόρυφων κυλινδρικών δεξαμενών υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία (από την πλευρά των βιομηχανικών εφαρμογών αλλά και λόγω των αεροναυπηγικών εφαρμογών), στην περίπτωση των δεξαμενών ή δοχείων πίεσης άλλης γεωμετρίας (ορθογωνικό, οριζόντιο κυλινδρικό και σφαιρικό) δεν υπάρχει η ανάλογη αντιμετώπιση. Η παρούσα ερευνητική εργασία προτείνει μία απλή αναλυτική μεθοδολογία, με απλές εξισώσεις και διαγράμματα μέσω των οποίων ο μελετητής μηχανικό μπορεί να υπολογίσει την συνολική σεισμική δύναμη που ασκείται στην κατασκευή του, ώστε να εξετάσει την σεισμική της επάρκεια.

Βασικό στοιχείο της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ο συνοπολογισμός του φαινομένου του κυματισμού στην συνολική απόκριση. Το ρευστό αλληλεπιδρά με την κατασκευή και οι υδροσυναμικές πιέσεις στο τοίχωμα συνεισφέρουν στην συνολική τέμνουσα βάσης. Το φαινόμενο αυτό σε επίπεδο σχεδιασμού αντιμετωπίζεται με τον διαχωρισμό της συνολικής μάζας του ρευστού σε ένα «ωστικό τμήμα» το οποίο ακολουθεί στη κίνηση της δεξαμενής και ένα «επαγωγικό τμήμα» το οποίο εκφράζει τον κυματισμό του ρευστού. Η μεθοδολογία αυτή αντιμετωπίζει το θέμα του υπολογισμού των σεισμικών δράσεων σε μία ενοποιημένη βάση, ανεξαρτήτου της γεωμετρίας του δοχείου ή της δεξαμενής.

10.2 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ

Οι σωληνώσεις και οι στηρίξεις θα πρέπει επίσης να σχεδιάζονται με βάση τα σεισμικά φορτία, όπως αυτά προκύπτουν από μία ελαστική ανάλυση, λαμβανομένης υπόψη της πραγματικής ευκαμψίας των σωληνωτών μελών, ειδικότερα των καμπύλων τμημάτων (elbows), μέσω κατάλληλων συντελεστών ευκαμψίας. Επίσης, ο έλεγχος τάσεων θα πρέπει να συνεκτιμά την μεγάλη συγκέντρωση τάσεων στα καμπύλα τμήματα, μέσω κατάλληλων συντελεστών συγκέντρωσης τάσης. Θα πρέπει να σημειωθεί πως δεν έχει έως τώρα τεθεί θέμα ελαστοπλαστικού σχεδιασμού σε σεισμό με βάση τα πραγματικά αποθέματα πλαστιμότητας μίας σωλήνωσης, δηλαδή δεν έχουν προταθεί συντελεστές συμπεριφοράς q με τιμές μεγαλύτερες της μονάδας.

Οι συγκολλήσεις των σωληνώσεων είναι σημαντικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες όπου μπορεί να προκληθεί αστοχία λόγω ισχυρής ολιγο-κυκλικής κόπωσης και έλλειψη ικανού βαθμού δυσθραυστότητας. Οι γενικές διατάξεις του κεφαλαίου 8 θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό.

Οι κατασκευές στηρίξεως των σωληνώσεων είναι ευαίσθητες σε αστοχία, αλλά δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από κλασικές μεταλλικές κατασκευές, οι οποίες αντιμετωπίζονται με τις συνήθεις διατάξεις του αντισεισμικού σχεδιασμού.

10.3 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΙ

Οι καπνοδόχοι των βιομηχανικών μονάδων αποτελούν κατασκευές που ενδέχεται να αστοχήσουν σε σεισμό. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι βασικοί κανονισμοί σχεδιασμού, με ιδιαίτερη μνεία στις αντισεισμικές διατάξεις. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις κατασκευαστικές λεπτομέρειες, όπου για θέματα ψαθυρής συμπεριφοράς γίνεται άμεση αναφορά στα όσα αναφέρονται στο κεφάλαιο 8, ενώ αναφέρονται οι βασικοί κανόνες σχεδιασμού φλαντζωτών συνδέσεων.

Επίσης, εξετάστηκε η σπουδαιότητα της σεισμικής δύναμης σε σχέση με την δύναμη του ανέμου για δύο τυπικές βιομηχανικές καπνοδόχους. Το βασικό συμπέρασμα των αναλύσεων είναι πως η δύναμη του σεισμού είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την δύναμη του ανέμου, και σε ορισμένες περιπτώσεις, ενδέχεται να είναι κρίσιμη.

10.4 ΑΠΟΦΥΓΗ ΨΑΘΥΡΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ

Βασικό στοιχείο του όλου σχεδιασμού αποτελεί η αντιμετώπιση της ψαθυρής θραύσης. Σημειώνεται πως η ψαθυρή θραύση άρχισε να αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο του αντισεισμικού σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών από τον σεισμό του Northridge του 1994. Στην προκειμένη όμως περίπτωση οι κατασκευές βιομηχανικού εξοπλισμού καταπονούνται σημαντικά κατά την διάρκεια ζωής τους από παράγοντες οι οποίοι επιφέρουν αλλοίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών. Επομένως εκτός από την μακροσκοπική εξέταση των υλικών (δηλαδή από την πλευρά του δομοστατικού σχεδιασμού) ο μηχανικός οφείλει να εξετάσει και το σημαντικό θέμα της διερεύνησης του ρόλου των μηχανικών ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων κατασκευαστικών υλικών στις αστοχίες λόγω σεισμού. Με άλλα λόγια, ιδιότητες μεγάλου ενδιαφέροντος μπορεί να είναι όχι μόνον οι συνήθεις μηχανικές ιδιότητες των υλικών (μέτρο

ελαστικότητας, όριο διαρροής) και η ολκιμότητα, αλλά και η δυσθραυτότητα (fracture toughness), η αντοχή σε κόπωση (ειδικά σε ολιγοκυκλική καταπόνηση) κτλ. Το κεφάλαιο 8 παρουσιάζει ορισμένες αρχές τις οποίες ο δομοστατικός μηχανικός - μελετητές οφείλει να έχει υπόψη του στον σχεδιασμό, ώστε αποφευχθεί η αστοχία του υλικού.

10.5 ΣΗΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΑΡΟΝΤΟΣ ΕΡΓΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΟΑΣΠ

Τα αποτελέσματα του ερευνητικού έργου είναι άμεσα εφαρμόσιμα από τον ΟΑΣΠ. Αντιμετωπίζεται με μία “συνολική προσέγγιση” (integrated approach) η αντισεισμική θωράκιση χημικών βιομηχανικών συγκροτημάτων, η ασφάλεια των οποίων κρίνεται αναγκαία για την αποφυγή αστοχίας με σημαντικότερο κόστος σε ανθρώπινες ζωές, στο περιβάλλον και στην οικονομία.

Οι οδηγίες σχεδιασμού που αναφέρονται στην παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελούν το βασικό στόχο του προτεινόμενου έργου. Οι οδηγίες είναι διατυπωμένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να αποτελέσουν την βάση για την μελλοντική αλλά άμεση σύνταξη ενός αντισεισμικού κανονισμού βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Με την περαίωση του παρόντος έργου, ο ΟΑΣΠ διαθέτει ένα βασικό κείμενο με αναλύσεις και προκαταρκτικές αντισεισμικές διατάξεις που είναι εναρμονισμένες με την γενική μεθοδολογία του ΕΑΚ, και είναι συμβατές με τις ισχύουσες προδιαγραφές μελέτης και κανονισμούς βιομηχανικών εγκαταστάσεων, όπως κανονισμοί ASME, API και ASM που χρησιμοποιούνται ευρέως από τις χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες.

11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ASTM E23-88 (1988): Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM.
- [2] Abramson, H. N. (1966), “The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers.”, *prepared by Southwest Research Institute*, NASA SP-106, Washington, DC.
- [3] American Society of Civil Engineers – ASCE (1984), *Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems*. In particular: A. S. Veletsos, “Seismic response and design of liquid storage tanks”, ASCE, New York, pp. 255-370.
- [4] American Society of Materials (1992a), ASM HANDBOOK, ‘Materials Selection and Design’, Volume 20, ASM International, The Materials Information Society.
- [5] American Society of Materials (1992b), ASM HANDBOOK, ‘Welding, Brazing and Soldering’, Volume 6, ASM International, The Materials Information Society.
- [6] American Society of Materials (1992c), ASM HANDBOOK, ‘Nondestructive Evaluation and Quality Control’, Volume 17, ASM International, The Materials Information Society.
- [7] American Society of Mechanical Engineers - ASME, (1993), *Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping*, ASME B31.3, 1993 Edition, New York, NY.
- [8] American Petroleum Institute (1996), *Appendix L: Seismic Design of Storage Tanks*, in API Standard 620, Design and Construction of Large, Welded Low-Pressure Storage Tanks, Ninth-Edition, Washington DC.
- [9] American Petroleum Institute (1998), *Appendix E: Seismic Design of Storage Tanks*, in API Standard 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage, Tenth Edition, Washington DC.
- [10] American Society of Mechanical Engineers - ASME, (1998), *Boiler and Pressure Vessel Code*, Section III, Division 1, New York, NY.
- [11] British Standard Institution (1989), Specification for Steel Chimneys, BS 4076, 1989.
- [12] BWRA (1966), BWRA Bulletin, 7, No.6, June 1966.
- [13] Budiansky B. (1960), “Sloshing of liquids in circular canals and spherical tanks”, *Journal of Aero/Space Sciences*, Vol. 27, pp. 161-173.
- [14] Comité Européen de Normalization – CEN (1998), Design of steel structures: Chimneys, Eurocode 3 – part 3.2, ENV 1993 part 3.2, CEN, Brussels, December 97
- [15] Comité Européen de Normalization – CEN (1998), “Silos, tanks and pipelines Part 4”, *Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance*, CEN ENV-1998, Brussels.
- [16] Comité Européen de Normalization – CEN (1995), Free-standing industrial chimneys, ENV 297 Part 3, CEN / TC 297, 1995.
- [17] DIN Standards (1991) Schornsteine aus Stahl, Deutsche Norm, DIN 4133, November 1991.
- [18] Fujiwaka, T., Endou, R., Furukawa, S.-I., Ono, S. and Oketani, K. (1999), “Study on Strength of Piping Components Under Elastic-Plastic Behavior Due to Seismic loading.”, *Seismic Engineering*, PVP-Vol. 428-1, ASME.
- [19] Gazetas, G. (1983), “Analysis of Machine Foundation Vibrations: State-of-the-Art.”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 2, No.1.

- [20] Greek Seismic Code (2000), ΕΑΚ 2000 Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, Φ.Ε.Κ. 2184 Β / 20-12-1999.
- [21] Haidemenopoulos, G. N., (1994), “Αστοχίες Συγκολλητών Κατασκευών από Ψαθυρή Θραύση”, *Τεχνικά Χρονικά Β*, Τόμος 14, Νο. 4, σελ. 63 – 74.
- [22] Haroun, M. A. and Housner, G. W. (1981), “Seismic design of liquid storage tanks”, *J. Technical Councils*, ASCE, Vol. 107, No. TC1.
- [23] HMSO (1967), Report of the Inquiry into the Causes of the Accident of the Drilling Rig Sea Gem, HMSO Cmnd.3409.
- [24] Housner, G. W. (1957), “Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers”, *Bull. Seismological Society of America*, Vol. 47, No.1, pp. 15-35.
- [25] Housner, G. W. (1963), “The dynamic behavior of water tanks”, *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 53, No. 2, pp. 381-387.
- [26] Hrysoulakis, G. D. and Pantelis, D. I. (1996), `Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών`, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [27] International Committee on Industrial Chimneys - CICIND (1988), Model Code for Steel Chimneys, May 88.
- [28] International Committee on Industrial Chimneys - CICIND (1989), Commentaries for the Model Code for Steel Chimneys, CICIND March 89
- [29] Karman, Th. von, (1911). “Über die Formuänderung dünnwandiger Rohre” [in German], *Zeit. Des Vereines deutscher Ingenieure*, **55**, pp. 1889-1895.
- [30] Kobayashi, N., Mieda, T., Shibata, H. and Shinozaki, Y. (1989), “A Study of the Liquid Slosh Response in Horizontal Cylindrical Tanks”, *J. Pressure Vessel Technology*, ASME, Vol. 111, pp. 32-38.
- [31] Lain Le May (1982), ‘Failure Analysis of a Crude Oil Storage Tank’, *Metal Progress*, August.
- [32] Lamiral G. and Lesler R. (1962), ‘La Realisation a Chinon des Caissons de Reacteurs EDF1 et EDF2’, *Soudage et Techniques Connexes*, 16, No 11/12, November.
- [33] Luft, R. W. (1985), “Vertical Accelerations in Prestressed Concrete Tanks.”, *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 4, pp. 706-713.
- [34] Malhotra, P. K. (1995), “Base Uplifting Analysis of Flexibly Supported Liquid-Storage Tanks”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, No. 12, pp. 1591-1607.
- [35] Malhotra, P. K., Wenk, T. and Wieland, M. (2000), “Simple procedure for seismic analysis of liquid storage tanks”, *Structural Engineering Int.*, No. 3/2000, pp. 197-201.
- [36] Manos, G. C. and 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.
- [37] Manos, G. C. and Clough, R. W. (1983), “The measured and predicted shaking table response of a broad tank model”, *PVP publication*, Vol. 77, ASME, NY, pp. 14-20.
- [38] Manos G. C. and Clough, R. W. (1985), “Tank damage during the May 1983 Coalinga Earthquake, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 449-466.

- [39] Masubuchi K. (1980), 'Analysis of Welded Structures', International Series on Materials Science and Technology, Volume 33, Pergamon Press.
- [40] Moan T. (1980), The Alexander L. Kielland Accident, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.
- [41] Moncarz P.D., McDonald B.M., Caligiuri R.D., (2001) 'Earthquake Failures of Welded Building Connections', International Journal of Solid and Structures, 38, p.2025-2032.
- [42] Natsiavas S. and Babcock C. D. (1987), "Buckling at the top of a fluid-filled tank during base excitation", *J. Pressure Vessel Technology*, ASME, Vol. 109, No. pp. 374-380.
- [43] Niwa, A. and Clough, R. W. (1982), "Buckling of Cylindrical Liquid-Storage Tanks Under Earthquake Excitation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, pp. 107-122.
- [44] Papazoglou, V (1987), 'Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων', ΕΜΠ.
- [45] Priestley, M. J. N. (Chairman & Editor), Davidson, B. J., Honey, G. D., Hopkins, D. C., Martin, R., J., Ramsey, G., Vessey, J. V. and Wood, J. H. (1986), *Seismic Design of Storage Tanks*, Recommendations of a Study Group of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering.
- [46] 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.
- [47] Rotter, J. M. (1985a), Buckling of Ground-Supported Cylindrical Steel Bins Under Vertical Compressive Wall Loads.", *Proceedings of Metal structures Conference*, Institution of Civil Engineers, Australia, Melbourne, pp. 112-127.
- [48] Rotter, J. M. (1985b), Local Inelastic Collapse of Pressurized Thin Cylindrical Steel Shells Under Axial Compression.", *Research report, School of Civil and Mining Engineering*, University of Sydney.
- [49] Slagis, G. C. (1998), "Experimental data on seismic response of piping components", *J. Pressure Vessel Technology*, ASME, Vol. 120, No.4, pp. 449 – 455.
- [50] Slagis, G. C. (1999), "The 1998 Forum on Appropriate Criteria and Methods for Seismic design of Nuclear Piping", *Seismic Engineering*, PVP-Vol. 387, ASME.
- [51] Slagis, G. C. (2001), "The 2000 Forum on Appropriate Criteria and Methods for Seismic design of Nuclear Piping", *Seismic Engineering*, PVP-Vol. 428-1, ASME.
- [52] Tang, A. K. (2000), "Izmit (Kocaeli), Turkey, Earthquake of August 17, 1999, Lifeline performance.", Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, Monograph No. 17
- [53] Tide R.H.R. (1998), 'Stability of Weld Metal Subjected to Cyclic Static and Seismic Loading', *Engineering Structures*, Vol.20, No 4-6, p.562-569.
- [54] Veletsos, A. S. and Tang, Y. (1986), "Dynamics of Vertically Excited Liquid Storage Tanks.", *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 6, pp. 1228-1246.
- [55] Veletsos, A. S. and Yang, J. Y. (1977), "Earthquake response of liquid storage tanks", *2nd Engineering Mechanics Conference*, ASCE, Raleigh, NC, pp. 1-24.
- [56] Veletsos, A. S. and Tang, Y. (1990), "Soil-Structure Interaction Effects for Laterally Excited Liquid Storage Tanks", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19, pp. 473-496.

- [57] Veletsos, A. S., and Shivakumar, P., (1997), "Computer Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures", *Advances in Earthquake Engineering, A Handbook*, Computational Mechanics Publications, Southampton.
- [58] Warnitchai, P., and Pinkaew, T., (1998), "Modelling of liquid sloshing in rectangular tanks with flow-dampening devices", *Engineering Structures*, Vol. 20, No 7, pp. 593-600.
- [59] Weiss E. and Joost H. (1997), "Local and global flexibility of nozzle-to-vessel-intersections under local loads as boundary conditions for piping system design.", *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, Vol. 73, pp. 241-247.
- [60] Wozniak R. S. and Mitchell, W. W. (1978), "Basis of Seismic Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks.", *Proceedings, Refining Department, API*, Volume 57, Washington DC, pp. 485-501.
- [61] Wyllie, L.A., Bolt B., Durkin, M.E., Gates, J.H., McCormick, D., Smith, P.D., Abrahamson, N., Castro, G., Escalante, L., Luft, R., Olson, R.S., and Vallenias, J. (1986)," *The Chile Earthquake of March 3, 1985*", *Earthquake Spectra*, Vol. 2, No 2, Chapter 5, pp 373-409.
- [62] Wilkowski, G. (2000), "Leak-before Leak-Before-Break: What Does It Really Mean?", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Volume 122, Issue 3, pp. 267-272.

11.1 Δημοσιεύσεις της ερευνητικής ομάδας που βασίζονται στην παρούσα έρευνα

- [1] Papaspyrou S., Valougeorgis D. and Karamanos, S. A., “Refined Solutions of Externally Induced Sloshing in Half-Full Spherical Containers”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, submitted for publication, February 2002.
- [2] Karamanos, S. A., Giakoumatos, E. and Gresnigt, A. M., “Nonlinear Response and Failure of Steel Elbows under In-plane Bending and Pressure.”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, ASME, submitted for publication, November 2002.
- [3] Papaspyrou S., Valougeorgis D. and Karamanos, S. A., “Sloshing in Half-Full Horizontal Cylindrical under Longitudinal Excitation”, *Journal of Applied Mechanics*, ASME, submitted for publication, December 2002.
- [4] Papaspyrou S., Valougeorgis D. and Karamanos, S. A., “Analytical Solutions of Sloshing Effects in Horizontal Cylindrical and Spherical Vessels”, ASME – Greek Section, *1st National Conference on Recent Advances in Mechanical Engineering*, Patras, Greece, September 2001.
- [5] Papaspyrou S., Valougeorgis D. and Karamanos, S. A., “Damping Effects on Sloshing Response of Horizontal-Cylindrical Liquid Storage Tanks”, *4th National Congress on Computational Mechanics*, Patras, Greece, June 2002.
- [6] Karamanos, S. A., Papaspyrou S., and Valougeorgis D., “Sloshing Effects in Spherical Vessels and Their Supports”, Paper No. 474, *12th European Conference on Earthquake Engineering*, London, UK, September 2002.
- [7] Papaspyrou S., Valougeorgis D. and Karamanos, S. A., “Longitudinal sloshing effects in half full horizontal cylindrical vessels”, *2nd MIT Conference on Computational Mechanics*, Boston, MA, June 2003.