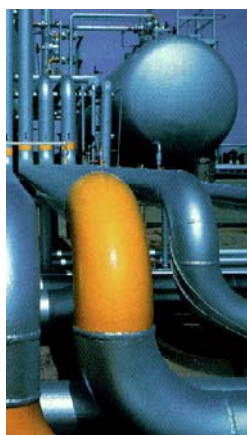


Τελική Έκθεση  
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Οδηγίες για τον Αντισεισμικό Σχεδιασμό Κατασκευών  
Βιομηχανικού Εξοπλισμού



Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος

και

Τεχνικό Γραφείο Αντώνιος Σ. Καραμάνος

σε συνεργασία με την

Βιομηχανία Φωσφορικών Λιπασμάτων Α.Ε.

Επιστημονικός Υπεύθυνος

Σπύρος Καραμάνος, *Πολιτικός Μηχανικός, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας*

Ομάδα εργασίας:

Δημήτρης Βαλουγεώργης, *Μηχανολόγος Μηχανικός, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας*

Αντώνιος Καραμάνος, *Πολιτικός Μηχανικός, Μελετητής*

Σπύρος Καραμάνος, *Πολιτικός Μηχανικός, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας*

Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος, *Μηχανολόγος Μηχανικός, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας*

Χρήστος Τουλόπουλος, *Μηχανολόγος Μηχανικός, Βιομ. Φωσφορικών Λιπασμάτων Α.Ε.*

Σπύρος Παπασπύρου, *Μηχανολόγος Μηχανικός, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας*

Σπύρος Σαμαράς, *Χημικός Μηχανικός, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας*

Νοέμβριος 2002

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Περίληψη
2. Εισαγωγή – Σεισμική απόκριση σε βιομηχανικές κατασκευές
  - 2.1 Σεισμική απόκριση κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού
  - 2.2 Ιδιαιτερότητες κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού
  - 2.3 Στόχος της παρούσας έρευνας
3. Γενική μεθοδολογία εκτέλεσης του ερευνητικού έργου
  - 3.1 Γενική προσέγγιση
  - 3.2 Φάσεις του παρόντος έργου
4. Βασικοί κώδικες σχεδιασμού κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού
  - 4.1 Δεξαμενές και δοχεία πίεσης
  - 4.2 Βιομηχανικές σωληνώσεις
  - 4.3 Βιομηχανικές καπνοδόχοι
5. Δεξαμενές και δοχεία πίεσης
  - 5.1 Εισαγωγή
  - 5.2 Κανονιστικές διατάξεις
  - 5.3 Μορφές αστοχίας
  - 5.4 Υπολογισμός των σεισμικών δυνάμεων
6. Βιομηχανικές σωληνώσεις
  - 6.1 Επιλογή υλικών, συγκολλήσεις και επιθεώρηση
  - 6.2 Ανάλυση τάσεων σωληνώσεως
  - 6.3 Έλεγχος τάσεων για την ειδική περίπτωση σεισμικής φόρτισης
  - 6.4 Αστοχία σωληνώσεων υπό σεισμική διέγερση
  - 6.5 Συστήματα στήριξης σωληνώσεων
7. Βιομηχανικές καπνοδόχοι
  - 7.1 Εισαγωγή
  - 7.2 Αντισεισμικός σχεδιασμός και Κανονισμοί
  - 7.3 Ειδικότερες Διατάξεις του Αντισεισμικού Σχεδιασμού Β.Κ.
  - 7.4 Κατασκευαστικές οδηγίες
  - 7.5 Σεισμικά φορτία έναντι φορτίων ανέμου
8. Αποφυγή ψαθυρής θραύσης – διάβρωση - συγκολλήσεις
  - 8.1 Εισαγωγή
  - 8.2 Μέτρηση δυσθραυστότητας
  - 8.3 Περιγραφή αστοχιών
  - 8.4 Επιλογή υλικού με βάση την δυσθραυστότητα
  - 8.5 Συγκολλήσεις
  - 8.6 Μέθοδοι ελέγχου επιθεώρησης κατασκευαστικών στοιχείων
9. Ειδικά θέματα σχεδιασμού
  - 9.1 Φαινόμενο κυματισμού
  - 9.2 Υδραυλικό πλήγμα

## 10. Συμπεράσματα

- 10.1 Δεξαμενές και δοχεία πίεσης
- 10.2 Βιομηχανικές σωληνώσεις
- 10.3 Βιομηχανικές καπνοδόχοι
- 10.4 Αποφυγή ψαθυρής θραύσης
- 10.5 Σημασία και χρησιμότητα του παρόντος έργου για τον ΟΑΣΠ

## 11. Βιβλιογραφία

Παράρτημα Α: Αναλύσεις για το φαινόμενο του κυματισμού σε δεξαμενές ειδικής μορφής

Παράρτημα Β: Παραδείγματα υπολογισμού της σεισμικής δύναμης σε δεξαμενές και δοχεία πίεσης

Παράρτημα Γ: Μη-γραμμική ανάλυση και αστοχία σιδηρών καμπυλών σωλήνων υπό κάμψη και πίεση

Παράρτημα Δ: Αναλύσεις τυπικής βιομηχανικής καπνοδόχου σε σεισμική διέγερση

## 1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος του παρόντος ερευνητικού προγράμματος είναι η παραγωγή βασικών προσωρινών οδηγιών μελέτης για την αντισεισμική θωράκιση κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού και η τεκμηρίωσή τους με βάση την υπάρχουσα επιστημονική γνώση και τις σύγχρονες αντισεισμικές αντιλήψεις για την συμπεριφορά των κατασκευών αυτών. Οι οδηγίες είναι προσωρινές, υπό την έννοια ότι με βάση την παρούσα έρευνα ο ΟΑΣΠ και οι συναρμόδιοι φορείς θα μπορέσουν στο μέλλον να εκπονήσουν κανονιστικές διατάξεις για τον αντισεισμικό σχεδιασμό και θωράκιση των κατασκευών αυτών.

Στην παρούσα έρευνα εξετάζονται τριών ειδών κατασκευές βιομηχανικού εξοπλισμού:

- Δεξαμενές και δοχεία πίεσης
- Βιομηχανικές σωληνώσεις
- Βιομηχανικές καπνοδόχοι

και παραθέτονται οι βασικοί κώδικες σχεδιασμού τους, επισημαίνοντας και τις ισχύουσες διατάξεις για αντισεισμικό σχεδιασμό (κεφάλαιο 4).

Βασικό στοιχείο των οδηγιών αποτελούν ο καθορισμός των σεισμικών δυνάμεων στις υπόψη κατασκευές. Η μεθοδολογία υπολογισμού των σεισμικών δυνάμεων στις κατασκευές είναι ιδιαίτερα απαιτητικός στις κατασκευές δεξαμενών ή δοχείων πίεσης λόγω της αλληλεπίδρασης του ρευστού με την κατασκευή (σύντομη περιγραφή στο κεφάλαιο 9). Η παρούσα ερευνητική προσπάθεια παρουσιάζει μία «ενοποιημένη» μεθοδολογία για τον υπολογισμό των δυνάμεων σε δεξαμενές διαφόρων σχημάτων, οι οποίες υπόκεινται σε σεισμική διέγερση. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται στα δοχεία πίεσης μορφής οριζοντίου κυλίνδρου και σφαίρας, τα οποία είναι άμεσου ενδιαφέροντος για τις χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες, αλλά υπάρχουν ελάχιστα σχεδιαστικά βοηθήματα, και μάλιστα σημαντικά ελλιπή (κεφάλαιο 5). Στο θέμα αυτό, η ερευνητική ομάδα πιστεύεται πως έχει κάνει μία σημαντική συμβολή.

Εξετάζονται επίσης οι σωληνώσεις βιομηχανικών μονάδων, σε σχέση με τις ιδιαιτερότητές τους, και ιδιαίτερα τα καμπύλα τμήματά τους (pipe elbows), ώστε να επιτευχθεί μία αξιόπιστη ανάλυση τάσεων (κεφάλαιο 6). Επιπλέον, η παρούσα εργασία ασχολείται με την αντισεισμική μελέτη των βιομηχανικών καπνοδόχων, και εστιάζει σε βασικά κατασκευαστικά θέματα. Επίσης διερευνάται η κρισιμότητα της φόρτισης του ανέμου σε βιομηχανικές καπνοδόχους σε σχέση με την σεισμική φόρτιση σχεδιασμού (κεφάλαιο 7).

Τέλος, μελετάται η πιθανότητα ψαθυρής θραύσης του χάλυβα και των συγκολλήσεων, δεδομένου των ιδιαιτεροτήτων των ανωτέρω κατασκευών (μεγάλες μεταβολές πίεσης και θερμοκρασιακές μεταβολές, διάβρωση, ειδικοί χάλυβες και συγκολλήσεις), με βάση της δυσθραυστότητα (fracture toughness) των υλικών. Η παρούσα εργασία παραθέτει ορισμένες βασικές αρχές τις οποίες ο κάθε μελετητής μηχανικός πρέπει να λαμβάνει υπόψη ώστε να αποφευχθεί η αστοχία του υλικού και των συγκολλήσεων σε ισχυρή ολιγο-κυκλική σεισμική φόρτιση (κεφάλαιο 8).

## SUMMARY

This research project is aimed at developing tentative design guidelines for safeguarding the structural integrity of industrial equipment structures under seismic loads, which are compatible with the existing spectrum of earthquake engineering knowledge. The guidelines are tentative, in the sense that, based on the present work, the Earthquake Planning and Protection Organization, our sponsor, as well as every relevant organization, can develop design specifications for the seismic design of industrial structures.

Three types of industrial equipment structures are examined in the present study:

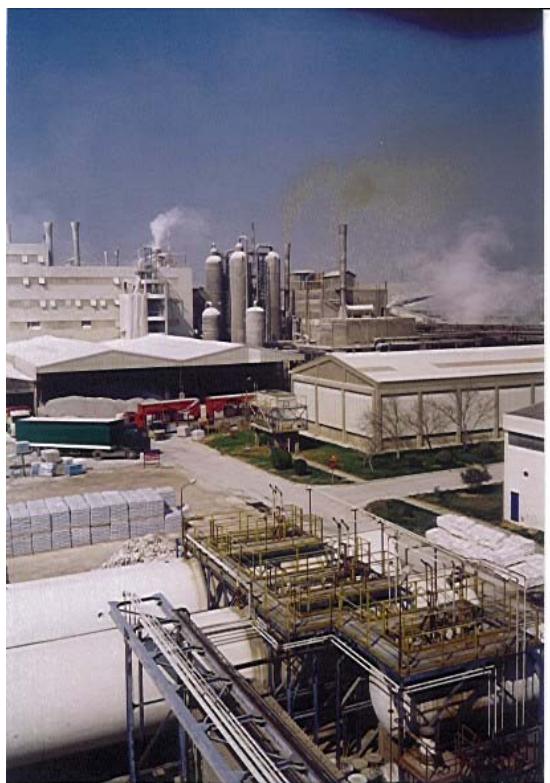
- Tanks and pressure vessels
- Industrial piping
- Industrial chimneys

and the basic design specifications are stated, with particular emphasis on the existing design rules or guidelines regarding their seismic design (Chapter 4).

The reliable calculation of seismic loads on those structures is of major importance in the present study. The methodology of determining those forces is quite demanding for the case of tanks and pressure vessels because of fluid-structure interaction phenomena (briefly described in Chapter 9). The present study presents a “unified” methodology for calculating those forces in tanks of various geometries, which are subjected to seismic excitation. In particular, the cases of horizontal-cylindrical and spherical pressure vessels are examined, which have not been investigated extensively in the past, despite their significant applications in chemical and petrochemical plants (Chapter 5). It is believed that in this subject, our research team has made a significant contribution.

In addition, industrial piping components are examined, in terms of their particularities and, in particular, the pipe elbows, so that a reliable stress analysis is achieved (Chapter 6). Furthermore, the present study deals with the seismic design of industrial chimneys, and focuses on several construction details that might be crucial during an earthquake. Moreover, the seismic design force in industrial chimneys is compared with the wind design force (Chapter 7).

Finally, the present study examines the possibility of brittle fracture of the steel material and the welds, given the particularities of the above structures (high pressure and temperature changes, corrosion, use of special steels and welds), based on the fracture toughness of the steel material. The present study states several basic principles that every design engineer should consider in order to avoid failure of the steel material and the welds during a strong low-cycle seismic loading sequence (Chapter 8).



**Εικόνα 1.1:** Μονάδες χημικών βιομηχανιών.



**Εικόνα 1.2:** Σύστημα βιομηχανικών σωληνώσεων.

## 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν έργο με τίτλο “Οδηγίες για τον Αντισεισμικό Σχεδιασμό Κατασκευών Βιομηχανικού Εξοπλισμού” αφορά στην αντισεισμικότητα των βιομηχανικών εγκαταστάσεων και πιο συγκεκριμένα σε εγκαταστάσεις χημικής βιομηχανίας και αποθήκευσης υγρών υδρογονανθράκων κρίσιμης ασφάλειας.

Το ερευνητικό έργο συντονίζεται από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και αποσκοπεί στην κάλυψη μίας σημαντικής ανάγκης της Ελληνικής Βιομηχανίας. Σημαντικό μέρος της δραστηριότητας του Τμήματος συνδέεται με την σεισμική ανάλυση και αντισεισμικό σχεδιασμό βιομηχανικών εγκαταστάσεων υπό ειδικές συνθήκες λειτουργίας. Συγκεκριμένα, υπάρχει μία σημαντική διασύνδεση του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας με χημικές κυρίως βιομηχανίες σε θέματα ανάλυσης και σχεδιασμού κατασκευών - υλικών.

Οι οδηγίες μελέτης που εκπονούνται αποτελούν το βασικό προϊόν του έργου:

- είναι συμβατές με τις ισχύουσες προδιαγραφές και κανονισμούς μελέτης βιομηχανικών κατασκευών σε συνδυασμό με τις σύγχρονες αντιλήψεις αντισεισμικού σχεδιασμού όπως αυτές εκφράζονται στον ΕΑΚ και τον Ευρωκώδικα 8.
- λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες των βιομηχανικών κατασκευών, με έμφαση στην αποφυγή των καταστροφικών συνεπειών μιας αστοχίας
- μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον ΟΑΣΠ ως βάση για την σύνταξη διατάξεων αντισεισμικού κανονισμού για τις ως άνω κατασκευές.

Στην ομάδα εργασίας συμμετέχει μελετητικό γραφείο αλλά και άμεσα ενδιαφερόμενη χημική βιομηχανία. Συγκεκριμένα αποτελείται από 3 μέλη ΔΕΠ, 1 μηχανικό της βιομηχανίας, 1 μελετητή μεταλλικών και βιομηχανικών κατασκευών, και 2 νέους ερευνητές μηχανικούς.

Το κόστος της ερευνητικής εργασίας μετά την αναπροσαρμογή του προϋπολογισμού από τον ΟΑΣΠ ανέρχεται σε 15.000.000 δρχ. (44,202 €) συμπεριλαμβανομένου και του ΦΠΑ και η διάρκειά του σε 24 μήνες (2 έτη). Σημειώνεται πως η αρχική πρόταση της ερευνητικής ομάδας (Φεβρουάριος του 2000) συμπεριλάμβανε προϋπολογισμό 30,000,000 δρχ., (88,404 €) χωρίς το ΦΠΑ, δηλαδή τον υπερδιπλάσιο του τελικώς εγκεκριμένου.

### 2.1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

Η αντισεισμική θωράκιση βιομηχανικών εγκαταστάσεων είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή ανεπιθύμητων και πολλές φορές απρόβλεπτων επιπτώσεων στον πληθυσμό, στο περιβάλλον και στην οικονομία. Σε ορισμένες περιπτώσεις αποτελούν σημαντικότερο θέμα από την θωράκιση των απλών κατασκευών, διότι μία πιθανή αστοχία ενδέχεται να συνεπάγεται αλυσιδωτές καταστροφές, λόγω επικίνδυνων χημικών ουσιών (κόστος σε ανθρώπινες ζωές, στην οικονομία και στο περιβάλλον) αλλά και να καθιστά απαγορευτική την λειτουργία του βιομηχανικού συγκροτήματος στην άμεσα μετασεισμική περίοδο.

Η παρούσα ερευνητική εργασία αφορά στην αντισεισμικότητα των βιομηχανικών εγκαταστάσεων και πιο συγκεκριμένα εγκαταστάσεων χημικής βιομηχανίας. Ως χαρακτηριστικά παραδείγματα αναφέρονται βιομηχανικά συγκροτήματα παραγωγής και αποθήκευσης χημικών προϊόντων σε βιομηχανίες (π.χ. αμμωνία, VCM, NLG, προπυλένιο κτλ.) και οι εγκαταστάσεις



δυλιστηρίων (πετροχημική βιομηχανία). Το πολύ σημαντικό θέμα των πυρηνικών αντιδραστήρων δεν εξετάζεται στην παρούσα πρόταση διότι δεν αφορά τον Ελλαδικό χώρο.

Ως παράδειγμα καταστροφικής επίπτωσης ενός ισχυρού σεισμού αναφέρεται η σχετικά πρόσφατη εμπειρία στον σεισμό της Νικομήδειας (Τουρκία, Αύγουστος 1999), όπου συνέβησαν εκτεταμένες καταστροφές σε εγκαταστάσεις δυλιστηρίου σε μεγάλες συνέπειες. Σε πρώτη φάση, η αστοχία μίας χημικής βιομηχανικής εγκατάστασης υψηλού κινδύνου μπορεί να συνοδευτεί με αλυσιδωτές εκρήξεις και πυρκαγιά που θέτει σε κίνδυνο το σύνολο των εγκαταστάσεων αλλά και την ευρύτερη περιοχή. Ο κίνδυνος για ανθρώπινες ζωές είναι μεγάλος λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης ατόμων στην βιομηχανική περιοχή, ενώ η διαρροή μίας τοξικής ουσίας, που συνοδεύεται συνήθως από την παρουσία τοξικού νέφους ενδέχεται να έχει σημαντικές επιπτώσεις στον πληθυσμό και στο περιβάλλον της ευρύτερης περιοχής.

Η σπουδαιότητα των βιομηχανικών εγκαταστάσεων απαιτεί την θωράκισή τους έναντι σεισμού με βάση τις σύγχρονες αντιλήψεις αντισεισμικού σχεδιασμού οι οποίες εξασφαλίζουν την απαιτούμενη από την πολιτεία αξιοπιστία. Με δεδομένο ότι μέχρι τώρα οι αντίστοιχες μελέτες βιομηχανικών κατασκευών βασίζονται σε παλαιές φιλοσοφίες σχεδιασμού, θα πρέπει να εξεταστεί η επάρκεια των κατασκευών αυτών στις σύγχρονες αντιλήψεις και η συμβατότητά τους με τους νέους αντισεισμικούς κανονισμούς.

Η παρούσα ερευνητική εργασία αντιμετωπίζει τον σχεδιασμό των βιομηχανικών κατασκευών με μία συνολική προσέγγιση. Συγκεκριμένα, τίθενται οι βασικές αρχές σε σχέση με τυπικό βιομηχανικό εξοπλισμό (δεξαμενές, καπνοδόχους και σωληνώσεις), επεξηγούνται, κωδικοποιούνται και ενοποιούνται αρκετές ισχύουσες διατάξεις, ενώ παράγονται αποτελέσματα και προτάσεις που ισχύουν συμπληρωματικά με υπάρχοντες κανονισμούς. Στα πλαίσια του προτεινόμενου έργου προτείνονται προσωρινές οδηγίες σχεδιασμού που θα λαμβάνουν υπόψη την ιδιαιτερότητα των βιομηχανικών εγκαταστάσεων εξασφαλίζοντας η συμβατότητα των ως άνω οδηγιών με τις ισχύοντες αντισεισμικές διατάξεις του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού και, κατ' επέκταση, του Ευρωκώδικα 8.

Η αντισεισμική συμπεριφορά βιομηχανικών κατασκευών (κυρίως της χημικής βιομηχανίας) έχει απασχολήσει κατά καιρούς την επιστημονική κοινότητα. Ορισμένα στοιχεία (components) βιομηχανικού εξοπλισμού έχουν αναλυθεί σε σεισμό και γενικά σε δυναμικά φορτία (Housner 1957). Εντούτοις, οι υπάρχουσες οδηγίες αντισεισμικού σχεδιασμού είναι περιορισμένες για ορισμένους τύπους βιομηχανικών κατασκευών. Γενικά, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις σε δυλιστήρια και χημικά εργοστάσια προδιαγράφονται και κατασκευάζονται με βάση διεθνείς κανονισμούς όπως οι κώδικες της American Society of Mechanical Engineering. Η γενική φιλοσοφία των κανονισμών αυτών συνήθως δεν συμβαδίζει με την αντίστοιχη του ΕΑΚ. Επομένως, η ύπαρξη πολλών κανονισμών και οι ασυμβατότητες που περιέχουν δημιουργούν πρόσθετα ερωτηματικά και διλήμματα σχετικά με το εύρος της εφαρμογής τους. Η μέχρι τώρα εμπειρία δείχνει πως το γενικότερο πρόβλημα του ολοκληρωμένου αντισεισμικού σχεδιασμού μίας πολύπλοκης βιομηχανικής εγκατάστασης δεν έχει αντιμετωπιστεί, με βάση την σύγχρονη τεχνογνωσία της Σεισμικής Μηχανικής και του Αντισεισμικού Σχεδιασμού.

## 2.2 ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

Οι βιομηχανικές κατασκευές παρουσιάζουν σημαντικές ιδιαιτερότητες σε σχέση με τις προδιαγραφές κατασκευών Πολιτικού Μηχανικού και αυτές θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην εκπόνηση των οδηγιών μελέτης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή των νέων αντισεισμικών αντιλήψεων αναφέρεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στις κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού και συγκεκριμένα σε κτίρια, γέφυρες ή γεωτεχνικές κατασκευές (πρανή, ειδικές θεμελιώσεις, τοίχοι



αντιστήριξης, υπόγεια έργα). Η μελέτη κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού σε σεισμό οφείλει να είναι εναρμονισμένη με τις γενικότερες απαιτήσεις καλής και ασφαλούς λειτουργίας ενός βιομηχανικού συγκροτήματος, οι οποίες όμως είναι σημαντικά διαφορετικές από αυτές των κτηρίων και των γεφυρών. Οι κατασκευές μιας βιομηχανικής εγκατάστασης θα πρέπει να θωρακιστούν σε βαθμό που εξαρτάται από την κρισιμότητα του εξοπλισμού σε περίπτωση αστοχίας και θα πρέπει να εξασφαλίζουν αφενός την ασφαλή διακοπή του εργοστασίου, την ασφαλή αναζήτηση ζημιών ή αστοχιών και αφετέρου την επαναλειτουργία της βιομηχανίας σε εύλογο χρονικό διάστημα. Η λειτουργικότητα θα πρέπει να εξασφαλίζεται κυρίως στα πρώτα μετασεισμικά στάδια, όπου συνήθως η καλή λειτουργία μίας βιομηχανικής εγκατάστασης είναι επιβεβλημένη.

Εκτός των προφανών διαφορών των κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού με τις συνήθεις κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού (π.χ. γεωμετρία και βαθμός σπουδαιότητας σχετικά με τις επιπτώσεις μίας πιθανής αστοχίας), αναφέρονται επίσης ενδεικτικά τα ακόλουθα:

- Η αλληλεπίδραση ρευστού – κατασκευής (μεταβολή των ιδιοπεριόδων που επηρεάζουν την σεισμική ένταση)
- Η παρουσία υψηλών πιέσεων (κίνδυνος θραύσης και επακόλουθης έκρηξης)
- Η χρησιμοποίηση πολύ λεπτών μεταλλικών ελασμάτων (κίνδυνος ήβωσης)
- Οι μεγάλες αυξομειώσεις στην θερμοκρασία (μείωση του απομένοντα χρόνου ζωής λόγω ανάπτυξης ανακυκλιζόμενων θερμικών τάσεων)
- Ο κίνδυνος ψαθυρής αστοχίας λόγω της χρήσης χαλύβων υψηλής αντοχής και λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας
- Η αλλοίωση των ιδιοτήτων του υλικού και η μείωση του συνολικού πάχους των ελασμάτων λόγω διάβρωσης

Σε σχέση με τις ως άνω ιδιαιτερότητες, η παρούσα πρόταση αναφέρεται κατ' αρχήν στην στατική επάρκεια των κατασκευών. Εκτός όμως από την μακροσκοπική εξέτασή τους (δηλαδή από την πλευρά του δομοστατικού σχεδιασμού) εστιάζεται παράλληλα και στο σημαντικό θέμα της διερεύνησης του ρόλου των μηχανικών ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων κατασκευαστικών υλικών στις αστοχίες λόγω σεισμού. Οι ιδιότητες μεγάλου ενδιαφέροντος μπορεί να είναι οι συνήθεις μηχανικές ιδιότητες των υλικών (μέτρο ελαστικότητας, όριο διαρροής) αλλά και η ολκιμότητα, η δυσθραυτότητα (fracture toughness), η αντοχή σε κόπωση (ειδικά σε ολιγοκυκλική καταπόνηση) κτλ.

Η παρούσα ερευνητική εργασία αποσκοπεί στην προσαρμογή της νέας φιλοσοφίας αντισεισμικού σχεδιασμού (όπως αυτές εκφράζονται μέσα από τον ΕΑΚ) στις ισχύοντες διατάξεις και προδιαγραφές μελέτης βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Βασικό στοιχείο της παρούσας εργασίας αποτελεί ο αξιόπιστος προσδιορισμός των σεισμικών δυνάμεων στις κατασκευές βιομηχανικού εξοπλισμού, ειδικά σε δεξαμενές και δοχεία πίεσης, αλλά επίσης, σε σωληνώσεις και καπνοδόχους.



**Εικόνα 2.1:** Μονάδα πετροχημικής βιομηχανίας.

## 2.3 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Το παρόν ερευνητικό έργο αποβλέπει στην ανάπτυξη κατευθυντήριων οδηγιών μελέτης κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού για την περίπτωση σεισμικής φόρτισης. Οι οδηγίες μπορούν να χαρακτηριστούν προσωρινές, υπό την έννοια ότι ενδέχεται να ενσωματωθούν στο μέλλον σε ειδικές αντισεισμικές κανονιστικές διατάξεις για το είδος των κατασκευών αυτών.

Οι βασικές αρχές σχεδιασμού του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ) υιοθετούνται και στο παρόν έργο. Συγκεκριμένα, εξετάζονται και ορίζονται μεταξύ άλλων οι παράμετροι σχεδιασμού, ο τρόπος υπολογισμού των σεισμικών δράσεων σε συγκεκριμένα σημεία πολύπλοκων κατασκευών, οι οριακές συνθήκες αστοχίας και λειτουργικότητας για τα είδη των κατασκευών που εξετάζονται στο παρόν έργο. Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιούνται, όπου αυτό είναι δυνατόν, στοιχεία κατάλληλα προσαρμοσμένα από σχετικές οδηγίες και δημοσιεύματα άλλων χωρών, όπως των ΗΠΑ, ή της Νέας Ζηλανδίας, χώρες με παράδοση σε θέματα αντισεισμικού σχεδιασμού βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Οι κατασκευές που εξετάζονται στην παρούσα ερευνητική προσπάθεια είναι

- Δεξαμενές
- Δοχεία πίεσης
- Βιομηχανικές σωληνώσεις
- Βιομηχανικές καπνοδόχοι

Θα πρέπει να σημειωθεί πως σημαντική προσπάθεια στην παρούσα εργασία θα πρέπει να καταβληθεί για την συμβατότητα των ως άνω διατάξεων με τους ισχύοντες κανονισμούς για βιομηχανικές κατασκευές, οι οποίοι είναι κανονισμοί Μηχανολόγου Μηχανικού και βασίζονται κατά σημαντικό μέρος τους σε διαφορετικές αρχές και φιλοσοφίες σχεδιασμού.

Το ερευνητικό έργο είναι εφαρμοσμένο, με την έννοια ότι τα αποτελέσματά του είναι άμεσα εφαρμόσιμα από τον ΟΑΣΠ. Με το έργο αυτό 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 παραδοτέες οδηγίες σχεδιασμού αποτελούν το βασικό στόχο του προτεινόμενου έργου (βασικό παραδοτέο). 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 έχει στην κατοχή του 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 και ASTM που χρησιμοποιούνται ευρέως από τις πετροχημικές βιομηχανίες.

### 3. ΓΕΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΑΡΟΝ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΓΟ

Η ομάδα εργασίας αποτελείται από Πολιτικούς Μηχανικούς με εμπειρία σε αντισεισμικές κατασκευές και σχεδιασμό και από Μηχανολόγους και Χημικούς Μηχανικούς με εμπειρία και ειδίκευση σε βιομηχανικό σχεδιασμό και συμπεριφορά βιομηχανικών υλικών. Γενικά, η ομάδα μελέτης συνδυάζει εμπειρία σε ανάλυση και μελέτη βιομηχανικών εγκαταστάσεων, επίβλεψη κατασκευής και συντήρηση υλικών και κατασκευών.

Η συνεργασία του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με το Τεχνικό Γραφείο Α.Σ. Καραμάνος εξασφάλισε την πρόσβαση σε μελέτες, σχέδια και προδιαγραφές βιομηχανικών κατασκευών. Επίσης, η συνεργαζόμενη Βιομηχανία Φωσφορικών Λιπασμάτων Α.Ε. (ΒΦΛ Α.Ε.) ως άμεσα ενδιαφερόμενος φορέας παρείχε πληροφορίες και as-built σχέδια πραγματικών κατασκευών, καθώς και στοιχεία από μελλοντικές κατασκευές. Ο Μηχανολόγος Μηχανικός της ΒΦΛ Α.Ε. παρακολούθησε τις εργασίες της ερευνητικής ομάδας και συμμετείχε στην εκπόνηση του τελικού κειμένου των οδηγιών αντισεισμικής μελέτης.

Οι βασικές αρχές σχεδιασμού του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ) υιοθετούνται και στο παρόν έργο. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν και ορίστηκαν μεταξύ άλλων οι παράμετροι σχεδιασμού, ο τρόπος υπολογισμού των σεισμικών δράσεων σε συγκεκριμένα σημεία πολύπλοκων κατασκευών, οι οριακές συνθήκες αστοχίας και λειτουργικότητας για τα είδη των κατασκευών που αναφέρονται στην ενότητα 5 της παρούσας πρότασης. Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν, όπου αυτό είναι δυνατόν, στοιχεία κατάλληλα προσαρμοσμένα από σχετικές οδηγίες και δημοσιεύματα άλλων χωρών, όπως των ΗΠΑ, της Ιαπωνίας, της Νέας Ζηλανδίας, χώρες με παράδοση σε θέματα αντισεισμικού σχεδιασμού βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Με το παρόν ερευνητικό έργο αντιμετωπίζεται με μία «συνολική προσέγγιση» 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.

#### 3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Το παρόν έργο δστο μεγαλύτερο μέρος του δεν αποτελεί ερευνητικό έργο βασικής έρευνας. Είναι έργο εφαρμοσμένης έρευνας, με την έννοια ότι χρησιμοποιεί πληροφορίες από την σύγχρονη βιβλιογραφία και από τις σύγχρονες αντισεισμικές αντιλήψεις και τις συνδυάζει με στόχο την παραγωγή άμεσα εφαρμόσιμων οδηγιών μελέτης. Η βάση της παρούσας έρευνας είναι οι βασικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 8, τόσο σε σχέση με τις βασικές αρχές σχεδιασμού όσο και σε σχέση με τον υπολογισμό των σεισμικών δυνάμεων.

Εντούτοις, παρόλο τον εφαρμοσμένο χαρακτήρα του παρόντος έργου, η ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας διεξάγει παράλληλα έρευνα σε ορισμένα επιστημονικά αντικείμενα στα οποία έχει ήδη παρουσιάσει σημαντικό έργο. Συγκεκριμένα, έχουν ήδη ετοιμαστεί ή ετοιμάζονται επιστημονικές δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια, στα θέματα

- (α) της απόκρισης δεξαμενών σχήματος οριζοντίου κυλίνδρου και σφαίρας
- (β) της οριακής αντοχής σωληνώσεων

δύο σημαντικά θέματα άμεσου ενδιαφέροντος για βιομηχανικές εφαρμογές.

### 3.2 ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΑΡΟΝΤΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

Οι φάσεις του παρόντος ερευνητικού έργου που ακολουθήθηκαν είναι συμβατές με αυτές που παρουσιάστηκαν στην πρόταση (Φεβρουάριος 2000) καθώς και στην περιγραφή του Τεχνικού Αντικειμένου (Νοέμβριος 2000) που αποτελεί μέρος του συμβατικού αντικειμένου. Συνοπτικά αναφέρονται:

#### 3.2.1 Φάση 1

##### Στάδιο βιβλιογραφικής αναζήτησης και επιλογή αντιπροσωπευτικών κατασκευών

Στο στάδιο αυτό περιλαμβάνει την κατ' αρχήν ευρεία αναζήτηση στη διεθνή βιβλιογραφία πληροφοριών και στοιχείων σχετικών με την πραγματική αντισεισμική συμπεριφορά των κατασκευών που περιλαμβάνονται στις εξεταζόμενες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Η βιβλιογραφική αναζήτηση έγινε για τις κατασκευές του άμεσου ενδιαφέροντος της παρούσας πρότασης (δεξαμενές, δοχεία πίεσης, σωληνώσεις, βιομηχανικές καπνοδόχοι). Στη συνέχεια αναζητήθηκαν επίσης οι τυχόν υπάρχουσες οδηγίες ή προδιαγραφές ή κανονισμούς για τον σχεδιασμό κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού σε άλλες χώρες. Ως βάση για τις προδιαγραφές που αφορούν στον γενικό σχεδιασμό των υπόψη κατασκευών θα χρησιμοποιούνται οι Αμερικανικοί κανονισμοί ASME και API, σε συνδυασμό με αντίστοιχες οδηγίες της ASCE, ενώ για την επιλογή των υλικών χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχοι κώδικες ASTM που χρησιμοποιούνται ευρέως ειδικά στις κατασκευές πετροχημικής βιομηχανίας.

Παράλληλα, έγινε επιλογή αντιπροσωπευτικών (τυπικών) κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού, και μάλιστα από βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Για κάθε τύπο κατασκευής (δεξαμενή, καπνοδόχος, σωληνώσεις) καταγράφηκαν όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά της, καθώς και ο ρόλος της στη λειτουργία της βιομηχανικής εγκατάστασης. Στοιχεία μελέτης, σχέδια και αντίστοιχες προδιαγραφές διατέθηκαν από το τεχνικό γραφείο Α. Σ. Καραμάνος, και την Βιομηχανία Φωσφορικών Λιπασμάτων Α.Ε. από υπάρχουσες κατασκευές, και ειδικά από τυπικές λεπτομέρειες. Η συμμετέχουσα χημική βιομηχανία διέθεσε επίσης στοιχεία για τα υλικά και τις συγκολλήσεις των υπόψη κατασκευών, καθώς και στοιχεία για διαβρώσεις του υλικού (βλ. βιομηχανική καπνοδόχος).

#### 3.2.2 Φάση 2

##### Σεισμική Ανάλυση και Σχεδιασμός – Παραδείγματα Αντισεισμικού Σχεδιασμού Κατασκευών Βιομηχανικού Εξοπλισμού

Η φάση 2 περιλάμβανε το κύριο μέρος της έρευνας, που συνίσταται στον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών. Ο σχεδιασμός αυτός ακολουθεί εν γένει τις διατάξεις του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού, αλλά εφόσον απαιτείται γίνεται χρήση και άλλων εγκύρων κανονισμών, όπως του Ευρωκώδικα 8, του UBC, κλπ. Η συμπεριφορά των κατασκευών αυτών εξετάστηκε με βάση την διεθνώς δημοσιευμένη επιστημονική βιβλιογραφία, ενώ σε περιπτώσεις που αυτό απαιτήθηκε θα γίνουν επιπλέον αναλύσεις και υπολογισμοί, μέσα στα χρονικά πλαίσια του παρόντος προγράμματος. Εντούτοις, δεν πρέπει να αγνοηθεί το γεγονός ότι για όλες τις βιομηχανικές κατασκευές (πλην των κατακόρυφων κυλινδρικών δεξαμενών) η επιστημονική βιβλιογραφία είναι περιορισμένη σε ότι αφορά την σεισμική απόκριση και τον αντισεισμικό σχεδιασμό. Η φάση αυτή διευκρίνισε τα φορτία που αναπτύσσονται στις κατασκευές τις οριακές καταστάσεις αντοχής, και γενικά όλες τις παραμέτρους σχεδιασμού

εναρμονισμένες με τις ισχύουσες διατάξεις του ΕΑΚ. Για την κατανόηση των διερευνήσεων του προηγούμενου σταδίου, εκπονήθηκαν δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα γενικής σεισμικής ανάλυσης κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού, που παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

### 3.2.3 Φάση 3

#### Τελική Έκθεση - Διατύπωση οδηγιών αντισεισμικού σχεδιασμού

Η Τελική Έκθεση περιλαμβάνει το σύνολο των αποτελεσμάτων του ερευνητικού προγράμματος. Θα περιλαμβάνει μία εκτεταμένη εισαγωγή, στην οποία αναλύονται ο σκοπός του προγράμματος, περιγράφεται με αναλυτικό τρόπο η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην πορεία του έργου, αναφέρονται συνοπτικά οι επιμέρους φάσεις του προγράμματος, και τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Οι οδηγίες μελέτης αποτελούν μέρος της Τεχνικής Έκθεσης. Η διατύπωση των προσωρινών οδηγιών σχεδιασμού ακολούθησε της επεξεργασίας της κάθε κατασκευής από άποψη αντισεισμικού σχεδιασμού, και ολοκληρώνει το τελικό παραδοτέο και περιλαμβάνει την διατύπωση οδηγιών μελέτης (design guidelines) οι οποίες περιλαμβάνουν γενικές αρχές σχετικές με τον καθορισμό των σεισμικών φορτίων, μεθόδους ανάλυσης, όπου αυτό είναι δυνατό κανόνες εφαρμογής για την διαστασιολόγηση. Στις γενικές αυτές οδηγίες επισημαίνονται επίσης ευαίσθητα σημεία των επιμέρους κατασκευών μίας βιομηχανικής μονάδας που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή, καθώς και πιθανές εσφαλμένες λύσεις προς αποφυγήν. Οι οδηγίες σχεδιασμού είναι διατυπωμένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να αποτελέσουν υλικό χρήσιμο για την μελλοντική αλλά και άμεση σύνταξη ενός αντισεισμικού κανονισμού βιομηχανικών εγκαταστάσεων από τους αρμόδιους φορείς.

Επίσης, σε χωριστό κεφάλαιο της Τελικής Έκθεσης, περιγράφεται η χρησιμότητα των αποτελεσμάτων του προγράμματος και διατυπώνονται προτάσεις προς τον ΟΑΣΠ για την αξιοποίησή τους. Εν κατακλείδι, η Τελική Έκθεση περιλαμβάνει τον κύριο όγκο του ερευνητικού έργου, τις αναλύσεις επιμέρους κατασκευών, τις ερευνητικές προσπάθειες σε ειδικά θέματα, τα παραδείγματα σχεδιασμού κλπ.

## 4. ΒΑΣΙΚΟΙ ΚΩΔΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΔΗΓΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

### 4.1 ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ

Ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η εγκατάσταση, η επιθεώρηση και ο έλεγχος των συγκολλήσεων ατμοσφαιρικών δεξαμενών αποθήκευσης υγρών καυσίμων πάνω από την επιφάνεια του εδάφους βασίζονται στον κώδικα API Standard 650 (Welded Steel Tanks for Oil Storage). Άλλοι κώδικες στους οποίους παραπέμπει ο κώδικας API 650 ή εφαρμόζονται συμπληρωματικά του API 650 είναι οι κώδικες ASME, Section VIII (Pressure Vessels, Division I) και Section IX (Welding and Brazing Qualifications) και οι κώδικες ASTM Standards, A370 (Mechanical Testing of Steel Products) και E23 (Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials).

Ο βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού, κατασκευής και επιθεώρησης μεταλλικών δοχείων πίεσης εμπεριέχονται στους κώδικες ASME, Section I (Power Boilers) και Section VIII (Pressure Vessels, Division I & II). Οι δύο αυτοί κώδικες αποτελούν τον κύριο οδηγό σχεδιασμού δοχείων πίεσης για πολλές δεκαετίες σε διυλιστήρια και στη πετροχημική βιομηχανία διεθνώς. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν εθνικοί κώδικες όπως το British Standard 5500 και πιο πρόσφατα οι αντίστοιχοι Ευρωκώδικες. Συμπληρωματικά του κώδικα ASME εφαρμόζονται οι κώδικες ASME/ANSI Standard B16.5 (Pipe Flanges and Flanged Fittings), API Standards 601 & 605 (Metallic Gaskets for Raised-Face Pipe Flanges and Flanged Connections) και ASTM Standards A193, A194, A320 & A453 (Bolting Materials). Επίσης ο τελικός ιδιοκτήτης και χρήστης του εξοπλισμού (δεξαμενές και δοχεία πίεσης) δύναται να ζητήσει και να επιβάλλει συμπληρωματικές εξειδικευμένες προδιαγραφές και απαιτήσεις σύμφωνα με τις ανάγκες και την επικινδυνότητα των εγκαταστάσεων.

Ειδικότερα, όσον αφορά τον αντισεισμικό σχεδιασμό των δεξαμενών και των δοχείων πίεσης, υπάρχουν οδηγίες αντισεισμικού σχεδιασμού όπως έχουν διατυπωθεί σε διάφορους κανονισμούς (EC 8, API 650) και άλλα επίσημα δημοσιεύματα διεθνώς αναγνωρισμένων οργανισμών όπως η Αμερικανική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών (ASCE-1984) και η Νέο-Ζηλανδική Ένωση Αντισεισμικής Μηχανικής NZ-1986). Μία συνοπτική παρουσίαση αυτών των οδηγιών για αντισεισμικό σχεδιασμό αναφέρεται παρακάτω.

#### 4.1.1 Ευρωπαϊκός Κώδικας Αντισεισμικού Σχεδιασμού (Eurocode 8, part 4)

Ο Ευρωπαϊκός Αντισεισμικός Κανονισμός Eurocode 8, part 4 αναφέρεται σε silos, δεξαμενές και αγωγούς (pipelines). Το κεφάλαιο 4.1 περιλαμβάνει γενικές διατάξεις σχεδιασμού, ενώ το 4.3 αναφέρεται σε δεξαμενές. Το παράρτημα Α αναφέρεται σε ειδικά θέματα, κυρίως στο υπολογισμό των υδροδυναμικών δυνάμεων, αλλά και στην αντοχή του τοιχώματος της δεξαμενής.

Οι οδηγίες λαμβάνουν υπόψη την αλληλοεπίδραση του εδάφους με την κατασκευή, την ελαστικότητα των τοιχωμάτων της δεξαμενής, την κατακόρυφη διέγερση και την επίδραση της ανύψωσης της βάσης της δεξαμενής, στην κατανομή των αξονικών τάσεων στο τοίχωμα της.

Όσον αφορά ειδικότερα το φαινόμενο του κυματισμού, αρχικά αναλύει την περίπτωση του απαραμόρφωτου τοιχώματος υπολογίζοντας τις μάζες ώσης και κυματισμού, τις πιέσεις ώσης και κυματισμού, την ολική διατμητική δύναμη βάσης και την ροπή ανατροπής. Στην συνέχεια λαμβάνει υπόψη την κίνηση των τοιχωμάτων της δεξαμενής ως ανεξάρτητη συνιστώσα θεωρώντας την κίνηση ώσης και κυματισμού γνωστές από την προηγούμενη ανάλυση. Στον



κείμενο του κανονισμού αυτού έχει στηριχθεί σε μεγάλο βαθμό η παρούσα ερευνητική εργασία για την σύνταξη οδηγιών αντισεισμικού σχεδιασμού κατασκευών βιομηχανικού εξοπλισμού.

#### **4.1.2 Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (API 650 και API 620)**

Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου έχει αναπτύξει μία συστηματική προσέγγιση για τον αντισεισμικό σχεδιασμό, η οποία βασίζεται στην δημοσίευση των Wozniak και Mitchell (1978). Η προτεινόμενη μεθοδολογία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Ε του API 650 και το Παράρτημα L του API 620. Αυτή η προσέγγιση του αντισεισμικού σχεδιασμού παρουσιάζει με σαφή τρόπο τον υπολογισμό της μέγιστης εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης για δεξαμενές με στηρίξεις και χωρίς στηρίξεις. Της παρουσιάζει της ελάχιστες απαιτήσεις για δεξαμενές με στηρίξεις. Όσον αφορά την σεισμική διέγερση λαμβάνει υπόψη μόνο την οριζόντια συνιστώσα ενώ η επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας δεν λαμβάνεται υπόψη. Τέλος η ανάλυση του φαινομένου του κυματισμού γίνεται με την θεώρηση των τοιχωμάτων της δεξαμενής ως απαραμόρφωτα.

#### **4.1.3 Αμερικανική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών (ASCE – 1984)**

Η Αμερικανική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών (ASCE 1984) έχει συντάξει αντίστοιχες οδηγίες αντισεισμικού σχεδιασμού. Οι οδηγίες αυτές λαμβάνουν υπόψη της την παραμορφωσιμότητα των τοιχωμάτων της δεξαμενής, την αλληλοεπίδραση του εδάφους με την κατασκευή και την κατακόρυφη διέγερση. Ωστόσο δεν λαμβάνεται υπόψη η ανακατανομή και αλλαγή των αξονικών και περιμετρικών τάσεων λόγω ανύψωσης της βάσης της δεξαμενής. Όσον αφορά το φαινόμενο του κυματισμού προτείνει την απευθείας επαλληλία των αποτελεσμάτων λόγω ώσης και κυματισμού. Επιπλέον, δεν λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη δύο οριζόντιων συνιστωσών σεισμικής διέγερσης. Τέλος, προτείνει ένα κανόνα για την πρόσθεση της κατακόρυφης και οριζόντιας υδροδυναμικής πίεσης χρησιμοποιώντας την μέθοδο της τετραγωνικής ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων (SRSS). Αποτελεί ένα σύγχρονο κείμενο σχεδιασμού δεξαμενών, αλλά αναφέρεται ειδικότερα στην περίπτωση των δεξαμενών σχήματος κατακόρυφου κυλίνδρου.

#### **4.1.4 Οδηγίες σχεδιασμού της Νέο-Ζηλανδικής Ένωσης Αντισεισμικής Μηχανικής**

Οι οδηγίες αυτές αποτελούν μία σημαντική προσπάθεια για την αντιμετώπιση του προβλήματος αντισεισμικού σχεδιασμού δεξαμενών, με βάση την τότε υπάρχουσα γνώση και πρακτική. Με ορισμένα τμήματά του το κείμενο των Νέο-Ζηλανδικών οδηγιών είναι εναρμονισμένο με τις προδιαγραφές της ASCE – 1984. Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές αρχές σχεδιασμού, και προτείνεται μία μεθοδολογία υπολογισμού των σεισμικών δυνάμεων. Η μεθοδολογία βασίζεται στην διάκριση «ωστικής» και «επαγωγικής» μάζας, αλλά αναφέρεται κυρίως σε δεξαμενές κατακόρυφου κυλίνδρου. Στην συνέχεια παρατίθενται βασικές οδηγίες για τον υπολογισμό των τάσεων του τοιχώματος, καθώς και οι βασικοί έλεγχοι τάσεων. Τέλος, εξετάζεται η αντοχή και ο σχεδιασμός της θεμελίωσης της δεξαμενής, και κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Σημειώνεται πως σημαντικά τμήματα των οδηγιών αυτών βρίσκονται ενσωματωμένα στο κείμενο του Ευρωκώδικα 8 – μέρος 4.

### **4.2 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ**

Για τον σχεδιασμό των σωληνώσεων σε χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες χρησιμοποιείται γενικά ο κώδικας ASME B31.3, *Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping*. Ο κανονισμός

αυτός καθορίζει τις επιτρεπόμενες τάσεις του κάθε υλικού για κάθε στοιχείο (component) της σωλήνωσης, και δίνει σαφείς οδηγίες για τον υπολογισμό της πραγματικής ευκαμψίας του σωλήνα, καθώς και τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων. Εντούτοις, δεν περιέχει συγκεκριμένη διάταξη για σχεδιασμό έναντι σεισμικών φορτίων.

Ο κώδικας *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Section III, που χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό κυρίως σωληνώσεων σε πυρηνικούς αντιδραστήρες (nuclear pipes), περιέχει ορισμένες διατάξεις για αντισεισμικό σχεδιασμό, υπό την έννοια ότι καθορίζει το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο τάσης όταν λαμβάνεται υπόψη το σεισμικό φορτίο, το ποίο είναι σαφώς αυξημένο σε σχέση με το αντίστοιχο επίπεδο των συνθηκών λειτουργίας.

### 4.3 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΙ

Ο στατικός και δυναμικός σχεδιασμός μιας καπνοδόχου ανάλογα με το υλικό κατασκευής διέπεται από σημαντικό αριθμό κανονισμών, τόσο εθνικών όσο και διεθνών. Π.χ. για τον σχεδιασμό βιομηχανικών καπνοδόχων από οπλισμένο σκυρόδεμα έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στη χώρα τους ο Γερμανικός κανονισμός DIN. Άλλοι γνωστοί εθνικοί κανονισμοί είναι ο Γερμανικός DIN 4133 και ο Αγγλικός BS 4076 για τον σχεδιασμό καπνοδόχων από χάλυβα. Η Διεθνής Επιτροπή Βιομηχανικών Καπνοδόχων (CICIND) έχει εκδώσει Πρότυπα Κωδίκων (Model Codes) για τον σχεδιασμό καπνοδόχων από οπλισμένο σκυρόδεμα και δομικό χάλυβα. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η Τεχνική Επιτροπή TC297 τους CEN έχει συντάξει πρότυπο για τον σχεδιασμό βιομηχανικών καπνοδόχων.

Τέλος, σε επίπεδο Ευρωκωδίκων, υπάρχει το μέρος 3.2 του Ευρωκώδικα 3 (ENV 1993-3.2 : 1997) το οποίο αναφέρεται στον σχεδιασμό των καπνοδόχων από χάλυβα. Το πρότυπο αυτό ευρίσκεται ήδη υπό καθεστώς μετατροπής του σε EN, που σημαίνει ότι όταν περάσει όλα τα προβλεπόμενα στάδια της διαδικασίας τους, θα αποτελεί πρότυπο υποχρεωτικής εφαρμογής τους χώρες μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Η περαιτέρω αναφορά σε όλους τους σχετικούς κανονισμούς στατικού και δυναμικού σχεδιασμού βιομηχανικών καπνοδόχων είναι έξω από τον σκοπό της παρούσας εργασίας, που είναι ο αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών αυτών.

Ως γνωστόν στην Ελλάδα ισχύει ο Αντισεισμικός Κανονισμός ΕΑΚ 2000, του οποίου οι μεν γενικές αρχές ισχύουν για όλους τους τύπους των δομικών κατασκευών, ενώ οι ειδικότερες διατάξεις και οι κανόνες εφαρμογής αναφέρονται κυρίως σε οικοδομικά έργα. Επομένως ο ΕΑΚ 2000 εφαρμόζεται εν γένει και στον αντισεισμικό σχεδιασμό των βιομηχανικών καπνοδόχων (Β.Κ.).