

## 6. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ

Οι σωληνώσεις μίας βιομηχανικής εγκατάστασης αποτελούν μία άλλη κατηγορία κατασκευών με σημαντικό ενδιαφέρον, ειδικά στα καμπύλα τμήματα των σωληνώσεων. Τα βοηθήματα σχεδιασμού σωληνώσεων πρέπει να αναθεωρηθούν για την περίπτωση ισχυρής ανακυκλιζόμενης φόρτισης μικρής διάρκειας. Οι βιομηχανικές σωληνώσεις χαρακτηρίζονται από τα καμπύλα τμήματα (elbows) τα οποία χρησιμοποιούνται για την αλλαγή της πορείας της σωλήνωσης, αλλά την δημιουργία τμήματος μεγάλης ευκαμψίας το οποίο θα παραλαμβάνει ισχυρά φορτία λόγω θερμικών συστολο-διαστολών, μεγάλες πιέσεις αλλά και ισχυρά οριζόντια φορτία λόγω σεισμού.



**Εικόνα 6.1:** Βιομηχανικές σωληνώσεις.

Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον υπάρχει όχι μόνον στις ίδιες τις σωλήνες αλλά και στις κατασκευές υποστήριξής τους (pipe racks). Γενικά όμως οι κατασκευές αυτές δεν διαφέρουν από τις κλασικές μεταλλικές κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού, και για τον σχεδιασμό τους θα πρέπει να ακολουθούνται οι βασικές διατάξεις του ΕΑΚ σε σχέση με αυτές του Παραρτήματος Γ του ΕΑΚ.

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται τα βασικά θέματα σχεδιασμού σωλήνων σε σχέση με τις απαιτήσεις αντισεισμικής προστασίας. Οι παρακάτω παράγραφοι παρουσιάζουν το γενικό πλαίσιο σχεδιασμού, με βάση κυρίως τις Αμερικανικές προδιαγραφές ASME (American Society of Mechanical Engineers) B31.3 – 1993 edition.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως παράλληλα με τα κατωτέρω, η ερευνητική ομάδα του έργου έχει αναπτύξει σημαντική ερευνητική δραστηριότητα για ορισμένα ειδικά θέματα σωληνώσεων, και συγκεκριμένα για την οριακή κατάσταση αστοχίας των σωληνώσεων σε κύρτωση, υπό την συνδυασμένη καταπόνηση καμπτικών ροπών και πίεσης. Μερικά αποτελέσματα αυτής της έρευνας παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.



**Εικόνα 6.2:** Βιομηχανικές σωληνώσεις και στηρίξεις (pipe racks).

## 6.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ, ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ

Τα υλικά των σωληνώσεων καθώς και οι συγκολλήσεις των διαφόρων τμημάτων θα πρέπει να ακολουθούν τις γενικές προδιαγραφές του Αμερικανικού κανονισμού ASME B31.3 για χημικές βιομηχανίες καθώς και τα όσα αναφέρονται για την αποφυγή της ψαθυρής θραύσης στο κεφάλαιο 8.

Η επιθεώρηση της σωλήνωσης αποτελεί ένα βασικό στοιχείο για την αξιόπιστη συμπεριφορά της σε σεισμό, δεδομένης της σημαντικής διάβρωσης που μπορεί να υποστεί. Σημειώνουμε πως η αστοχία του υλικού έχει ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό, υπό μη σεισμική ένταση, με μία φιλοσοφία leak-before-break (Wilkowski 2000). Με την μεθοδολογία αυτή, αποφεύγεται η ψαθυρή θραύση, επειδή ακριβώς υπάρχει προειδοποίηση λόγω διαρροής ρευστού. Η εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας απαιτεί την απλή επιθεώρηση της σωλήνωσης σε τακτά χρονικά διαστήματα. Στην περίπτωση του σεισμού, ο κίνδυνος είναι η ισχυρή σεισμική φόρτιση λίγο πριν την τακτική επιθεώρηση, σε περιοχές που έχουν ήδη υποστεί σημαντική αλλοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του μεταλλικού υλικού. Επομένως, σε βιομηχανίες που βρίσκονται σε ιδιαίτερα σεισμογενή περιοχή, το πρόγραμμα επιθεώρησης θα πρέπει να είναι πιο συχνό και αυστηρό ώστε να αποφεύγονται οι ανωτέρω κίνδυνοι.

## 6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΣ

Η ανάλυση μίας βιομηχανικής σωλήνωσης θα γίνεται θεωρώντας την σωλήνα αποτελούμενη από τμήματα ευθύγραμμης - καμπύλης δοκού. Η ανάλυση θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την ευκαμψία του σωλήνα καθώς και την ευκαμψία των στηρίξεων (pipe racks). Σε πρόσφατη ανακοίνωση της ειδικής επιτροπής της ASME (Slagis, 2001) η χρησιμοποίηση ελαστικής ανάλυσης είναι ενδεδειγμένη και επαρκής. Σημειώνεται πως για τον προσδιορισμό των τάσεων σε διάφορα τμήματα του

σωλήνα, το συνολικό σύστημα σωληνώσης – στήριξης θα πρέπει να αναλυθεί σε σεισμό.

Η ανάλυση θα πρέπει να λάβει υπόψη το ότι τα καμπύλα τμήματα του σωλήνα έχουν σημαντικά μεγαλύτερη ευκαμψία από τα ευθύγραμμα, ενώ παρουσιάζουν σημαντικά διαφορετική κατανομή τάσεων. Οι τάσεις αυτές είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίζει η κλασική θεωρία και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό. Οι ιδιαιτερότητες του σωλήνα σε σχέση με την αυξημένη ευκαμψία και τις αυξημένες τάσεις λαμβάνονται υπόψη με τους συντελεστές ευκαμψίας και τους συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων. Οι συντελεστές αυτοί αναφέρονται στην παράγραφο 6.2.2.

Σημειώνεται πως οι βιομηχανικές σωληνώσεις καταπονούνται από φορτίσεις οι οποίες είναι σημαντικά διαφορετικές από τις καταπονήσεις δομικών μελών σε συνήθη μεταλλικά κτήρια. Σημαντική είναι η επίδραση της εσωτερικής πίεσης η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της περιμετρικής τάσης και να προκαλέσει αστοχία ειδικά στα καμπύλα τμήματα. Η αστοχία των καμπύλων τμημάτων μίας σωληνώσης αποτελεί ένα ειδικό θέμα, το οποίο εξετάζεται σε βάθος από την ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, σε συνεργασία με την αντίστοιχη ομάδα του πανεπιστημίου του Delft της Ολλανδίας. Μία σχετική δημοσίευση που έχει υποβληθεί σε ένα επιστημονικό περιοδικό παρατίθεται στο παράρτημα Γ της παρούσας έκθεσης.



**Εικόνα 6.3:** Καμπύλα τμήματα (pipe elbows) σε βιομηχανικές σωληνώσεις.

### **6.2.1 Συντελεστές ευκαμψίας**

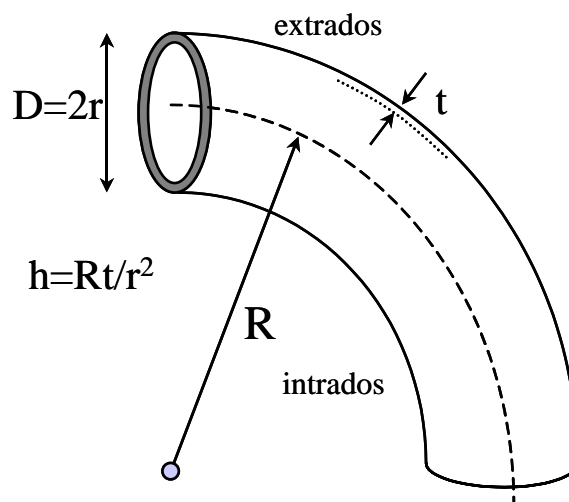
Οι συντελεστές ευκαμψίας δείχνουν το πόσο πιο εύκαμπτο είναι ένα καμπύλο τμήμα σωλήνα σε σχέση με ένα αντίστοιχο ευθύγραμμο τμήμα. Η θεωρία των καμπύλων σωληνών βασίζεται στην παλαιά θεωρία του von Karman (1911), και όπως τροποποιήθηκε και εμπλουτίστηκε από τους Rodabough & George (1957). Τα αποτελέσματα εκφράζονται συναρτήσει της βασικής γεωμετρικής παραμέτρου  $h$  του καμπύλου τμήματος

$$h = \frac{tR}{r^2}$$

καθώς και την παράμετρο πίεσης  $\psi$

$$\psi = \frac{pR^2}{Ert}$$

Οι παράμετροι  $R$ ,  $r$ ,  $t$  ορίζονται στο σχήμα 6.4.



**Σχήμα 6.4:** Γεωμετρικοί παράμετροι ενός καμπύλου τμήματος σωληνώσεων (pipe elbow).

Ο συντελεστής ευκαμψίας  $f$  που προτείνεται, χρησιμοποιείται ως παρανομαστής στην ονομαστική ακαμψία του σωλήνα (η οποία υπολογίζεται με βάση την απλή θεωρία της δοκού). Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από την τιμή του  $h$  και του  $\psi$ :

$$f = \frac{1.65}{h} \cdot \frac{1}{1 + f_1(h, \psi)}$$

Η συνάρτηση  $f_1(h, \psi)$  (Rodabough & George 1957) εξαρτάται από την τιμή της εσωτερικής πίεσης και την γεωμετρία του καμπύλου τμήματος. Ο συντελεστής ευκαμψίας  $f(h, \psi)$  δίνεται με γραφική μορφή στον Πίνακα 6.5.

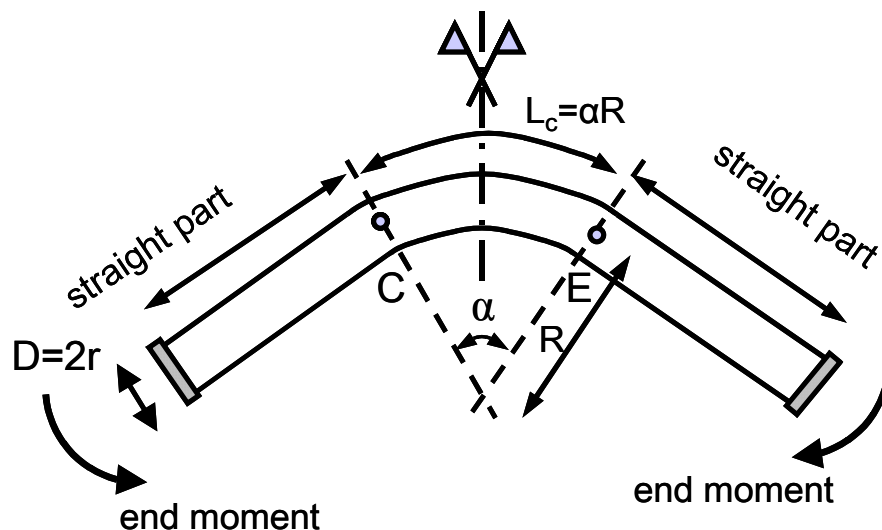
Σημειώνεται πως παραπάνω τύπος ισχύει για σωλήνες ομαλής καμπυλότητας. Για άλλες πιο σύνθετες περιπτώσεις σύνδεσης σωλήνων (π.χ. miter pipes, tee connections κτλ.) ο μελετητής θα πρέπει να συμβουλευτεί το Appendix D των προδιαγραφών ASME B31.3.

Σημειώνεται πως οι παραπάνω εξισώσεις δεν περιλαμβάνουν ως παράμετρο την γωνία του καμπύλου τμήματος (elbow angle  $\alpha$  στο σχήμα 6.6). Έχει αποδειχτεί πως η γωνία αυτή είναι σημαντική και επηρεάζει σημαντικά τον συντελεστή ευκαμψίας του καμπύλου, αλλά δεν υπάρχει τύπος ο οποίος παρέχει την ευκαμψία του καμπύλου

τμήματος, ο οποίος να περιλαμβάνει την επιρροή αυτής της γωνίας. Σημειώνεται πάντως πως στις περισσότερες περιπτώσεις βιομηχανικών εφαρμογών η γωνία μεταξύ των δύο ευθύγραμμων τμημάτων είναι  $90^\circ$  οπότε οι παραπάνω τύποι ισχύουν.

Συντελεστές ευκαμψίας για καμπύλα τμήματα σωλήνων υπό κάμψη										
h	ψ=0.0	ψ=0.001	ψ=0.002	ψ=0.004	ψ=0.008	ψ=0.016	ψ=0.032	ψ=0.064	ψ=0.128	ψ=0.512
0.010	173.206	55.377	35.398	21.927	13.460	8.304	5.205	3.363	2.288	1.352
0.015	115.470	50.447	33.859	21.526	13.366	8.282	5.200	3.362	2.288	1.352
0.020	86.602	45.719	32.124	21.020	13.239	8.252	5.193	3.360	2.288	1.352
0.030	57.734	37.792	28.619	19.827	12.907	8.170	5.174	3.355	2.286	1.352
0.040	43.300	31.832	25.458	18.547	12.502	8.062	5.147	3.349	2.285	1.352
0.050	34.639	27.341	22.756	17.292	12.055	7.933	5.114	3.340	2.283	1.352
0.060	28.865	23.886	20.482	16.115	11.589	7.787	5.075	3.330	2.280	1.352
0.070	24.741	21.167	18.568	15.036	11.122	7.630	5.030	3.319	2.277	1.352
0.080	21.647	18.980	16.949	14.056	10.663	7.464	4.981	3.305	2.273	1.351
0.100	17.315	15.698	14.384	12.376	9.797	7.120	4.871	3.274	2.265	1.351
0.150	11.555	10.919	10.357	9.410	8.006	6.273	4.556	3.176	2.237	1.349
0.200	8.675	8.352	8.055	7.529	6.684	5.523	4.222	3.056	2.200	1.346
0.300	5.728	5.609	5.496	5.285	4.919	4.347	3.593	2.790	2.107	1.338
0.400	4.204	4.149	4.097	3.997	3.815	3.511	3.065	2.524	2.001	1.328
0.500	3.293	3.265	3.238	3.185	3.088	2.916	2.646	2.284	1.892	1.315
0.600	2.709	2.693	2.678	2.649	2.593	2.491	2.322	2.078	1.788	1.301
0.800	2.041	2.035	2.029	2.018	1.996	1.956	1.884	1.768	1.608	1.271
1.000	1.693	1.691	1.688	1.683	1.673	1.655	1.620	1.561	1.471	1.240
1.500	1.321	1.321	1.320	1.319	1.317	1.313	1.305	1.290	1.264	1.171
2.000	1.184	1.183	1.183	1.183	1.182	1.181	1.178	1.173	1.163	1.122
3.000	1.083	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082	1.081	1.080	1.078	1.067
5.000	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.029	1.028

**Πίνακας 6.5:** Συντελεστές ευκαμψίας για καμπύλα τμήματα σωλήνων υπό κάμψη



**Σχήμα 6.6:** Γεωμετρία καμπύλου τμήματος σωλήνωσης.

### 6.2.2 Συγκέντρωση τάσεων σε καμπύλα τμήματα

Από θεωρητικής πλευράς, ένα καμπύλο τμήμα αναπτύσσει τάσεις οι οποίες είναι σημαντικά μεγαλύτερες των τάσεων που αναπτύσσει ένα ισοδύναμο ευθύγραμμο τμήμα με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Δύο λόγοι συντελούν σε αυτήν την αύξηση των τάσεων:

- Από την θεωρία των καμπύλων δοκών γνωρίζουμε πως η κατανομή των τάσεων σε ένα καμπύλο τμήμα μίας δοκού διαφέρει σημαντικά από την

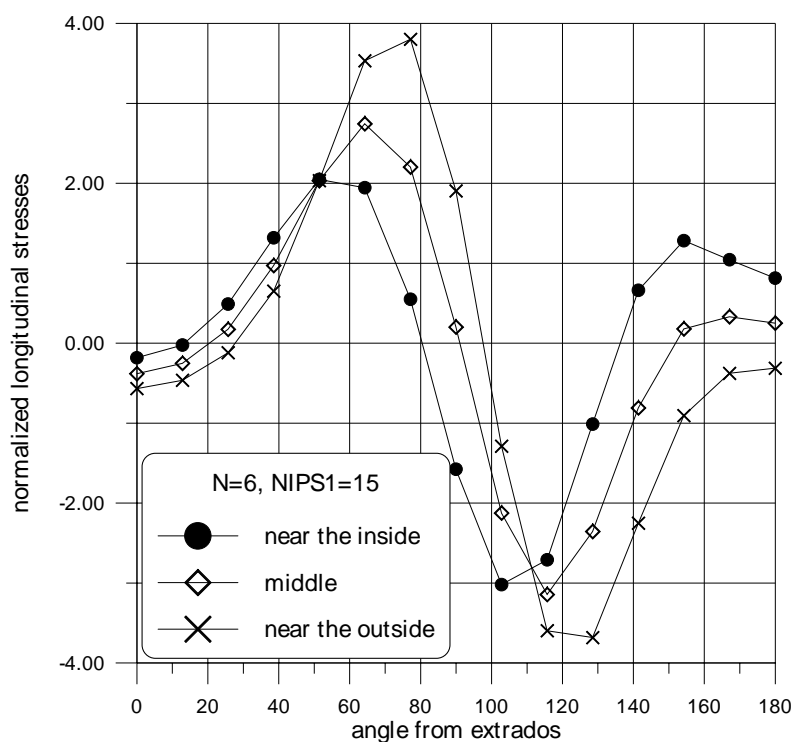
αντίστοιχη του ευθύγραμμου τμήματος, λόγω διαφοράς στον ορισμό της παραμόρφωσης στις εσωτερικές και τις εξωτερικές ίνες. Εντούτοις, ο λόγος αυτός δεν είναι ο σημαντικότερος.

- Ο σημαντικότερος λόγος που διαφέρουν οι τάσεις στους καμπύλους σωλήνες είναι οι πολύ σημαντικές περιμετρικές τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα καμπύλο τμήμα, οι οποίες είναι συνήθως μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες διαμήκεις τάσεις. Οι τάσεις αυτές οφείλονται στην αλλαγή της διατομής του σωλήνα από κυκλική σε σχήμα οβάλ (ovalization) και προκαλούν πρόωρη πλαστικοποίηση αλλά και αστοχία.

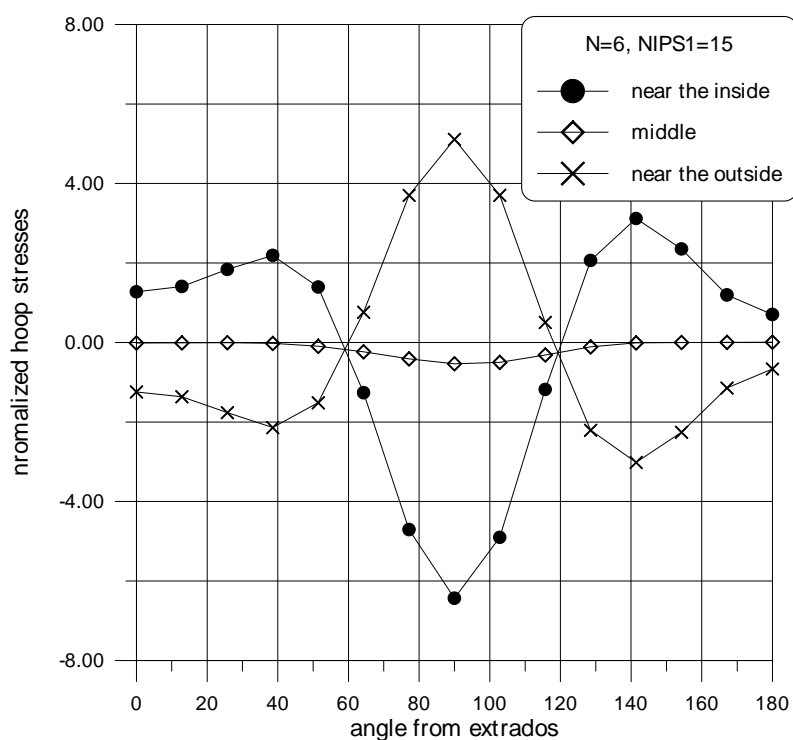
Στο σχήμα 6.7 παρουσιάζεται η κατανομή των διαμηκών και περιμετρικών τάσεων σε έναν σωλήνα με λόγο  $R/t=3$ , και λόγο  $r/t=21.3$ , που αντιστοιχεί σε  $h=0.141$  υπό καθαρά καμπτικό φορτίο στο επίπεδο του σωλήνα (in-plane bending), για ελαστική ανάλυση όπου σαφώς παρατηρείται αφενός διαμήκης τάση σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν που προβλέπει η βασική θεωρία της δοκού, και αφετέρου μεγάλη περιμετρική τάση.

Η αύξηση των τάσεων επηρεάζει σημαντικά τον σχεδιασμό υπό την έννοια ότι η μέγιστη (οριακή ή επιτρεπόμενη) τάση επηρεάζεται σημαντικά. Αυτό λαμβάνεται υπόψη με τους συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων οι οποίοι εκφράζουν την αυξημένη τάση που έχει αναπτυχθεί στον σωλήνα λόγω κάμψης σε σχέση με την αντίστοιχη τάση που θα υπολογίζαμε με βάση την κλασική θεωρία της δοκού. Σε πρώτη προσέγγιση, η άμεση επιρροή (coupling) της πίεσης στην τάση από κάμψη μπορεί να αγνοηθεί και να ληφθεί υπόψη εκ των υστέρων. Ο συντελεστής τάσεων  $S$  εξαρτάται από την γεωμετρική παράμετρο  $h$ , που ορίστηκε προηγουμένως.

Στο έλεγχο τάσεων που περιγράφεται κατωτέρω, ο συντελεστής  $B_2$  αναφέρεται ακριβώς στο συγκεκριμένο φαινόμενο.



(a)



(b)

**Σχήμα 6.7.** Διαμήκειες (a) και περιμετρικές (b) τάσεις σε καμπύλο τμήμα σωλήνα με  $h=0.141$  και  $R/r=3$ . Οι τάσεις αδιαστατοποιούνται με την μέγιστη τάση από την απλή θεωρία της δοκού.

### 6.3 ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΙΔΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Ο έλεγχος τάσεων σε σεισμό αναφέρεται στην προσθήκη (Addenda) του 1994 στον ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III. Για σεισμικά φορτία μεγάλου μεγέθους, κλάσης D κατά ASME, ο βασικός έλεγχος τάσεων σε σεισμό είναι

$$B_1 p \frac{D}{2t} + B_2 M \frac{D}{2I} \leq 4.5 S_m$$

όπου ο πρώτος όρος αφορά την τάση λόγω εσωτερικής πίεσης (ανεξάρτητη του σεισμού) και ο δεύτερος όρος αφορά την τάση λόγω καμπτικής ροπής  $M$ , η οποία περιλαμβάνει και την ροπή λόγω ιδίου βάρους. Ο συντελεστής  $B_2$  είναι ένας αυξητικός συντελεστής της τάσης λόγω καμπτικών ροπών ώστε να λαμβάνει υπόψη την συγκέντρωση τάσεων στα μη ευθύγραμμα τμήματα του σωλήνα. Σύμφωνα με τις πρόσφατες προδιαγραφές της ASME Boiler & Pressure Vessel Code η τιμή του  $B_2$  λαμβάνεται ίση με

$$B_2 = \frac{1.30}{h^{2/3}} \geq 1.0$$

και  $S_m$  είναι η μέγιστη (οριακή ή επιτρεπόμενη) τάση στο υλικό της σωληνώσεως.

### 6.4 ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ

Η μελέτη της αστοχίας ειδικών καμπύλων στοιχείων σωληνώσεων (pipe elbows) έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, λόγω της ανάγκης να προταθούν ειδικές διατάξεις για τον αντισεισμικό σχεδιασμό τους. Σε σχετικά πρόσφατη αναθεώρηση του κανονισμού ASME Boiler and Pressure Vessel Code, η μέγιστη τάση που χρησιμοποιείται στον βασικό έλεγχο τάσεων είναι ίση με 4.5 φορές την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση του υλικού  $S_m$  (όπως αναφέρθηκε ανωτέρω).

Η ανωτέρω αναθεώρηση αποτέλεσε σημείο σημαντικής τριβής μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών δεδομένου ότι μέχρι το 1994, η αντίστοιχη τιμή ήταν 3 φορές η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση του υλικού  $S_m$ . Η παραπάνω ανάγκη για αξιόπιστη αντιμετώπιση του προβλήματος σχεδιασμού αντιμετωπίστηκε με μία σειρά από πειράματα, που περιγράφονται από τον Slagis (1999, 2001) και τους Fujiwaka et al. (1999).

Τα πειράματα αφορούν καμπύλα τμήματα ορθής γωνίας ( $90^\circ$  – degree elbows) που υπόκεινται σε κυκλική φόρτιση. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν πως η αστοχία των ευαίσθητων αυτών τμημάτων οφείλεται συνήθως στο φαινόμενο της ολιγοκυκλικής κόπωσης (low-cycle fatigue). Ο αναγνώστης παραπέμπεται στις αντίστοιχες δημοσιεύσεις για τα συγκεκριμένα πειράματα και τις μορφές αστοχίας που παρουσιάστηκαν λόγω δυναμικών φορτίσεων.

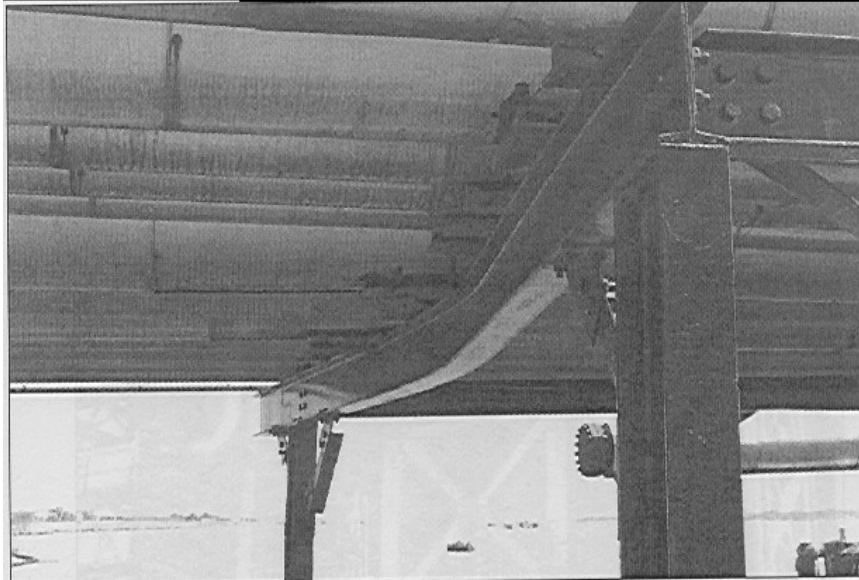
## 6.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ (PIPE RACKS)

Οι στηρίξεις των βιομηχανικών σωληνώσεων είναι ιδιαίτερες κατασκευές – pipe racks – οι οποίες έχουν συνήθως την μορφή πλαισίου. Οι κατασκευές αυτές συμπεριφέρονται ως κλασικά μεταλλικά πλαίσια και μερικά χαρακτηριστικά πλαίσια φαίνονται στην εικόνα 6.8. Η εικόνα δείχνει την αστοχία pipe rack από τον σεισμό της Νικομήδειας (Τουρκία, 1999).

Οι συνήθεις αντισεισμικές απαιτήσεις (αντοχής, πλαστιμότητας κτλ.) που ισχύουν για όλες τις μεταλλικές κατασκευές θα πρέπει να πληρούνται και στην παρούσα περίπτωση των στηρίξεων σωληνώσεων. Ο ενδιαφερόμενος μελετητής θα πρέπει να συμβουλευέται το Παράρτημα Γ του ΕΑΚ. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί πως οι λειτουργικές απαιτήσεις της βιομηχανίας πιθανώς να απαγορεύουν την δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα πλαίσια των στηρίξεων – λόγω κυρίως μεγάλων ανεπιθύμητων μετατοπίσεων, ενώ θα πρέπει να εξετάζονται και να επιθεωρούνται με μεγάλη προσοχή οι συνδέσεις των σωλήνων με τα πλαίσια στήριξης. Για την ενίσχυση της ακαμψίας των ανωτέρω πλαισίων (προς αποφυγή μεγάλων και ανεπιθύμητων μετατοπίσεων) αλλά και την αύξηση της αντοχής αυτών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδέσμων ακαμψίας μορφής Χ (βλ. Παράρτημα Γ του κειμένου του ΕΑΚ).



**Εικόνα 6.8:** Κατασκευές στήριξης βιομηχανικών σωληνώσεων (pipe racks).



**Εικόνα 6.9:** Αστοχία πλαισίου στήριξης βιομηχανικών σωληνώσεων σε σεισμό (Τουρκία 1999).

## 7. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΙ

### 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι βιομηχανικές καπνοδόχοι αποτελούν έναν από τους συνηθέστερους και γνωστότερους τύπους κατασκευών σε ένα βιομηχανικό συγκρότημα και στη βιομηχανία γενικότερα. Όπου υπάρχει καύση και παραγωγή καυσαερίων, υπάρχει και καπνοδόχος για την απαγωγή τους. Σε πολύ παλαιότερες εποχές, οι βιομηχανικές καπνοδόχοι κατασκευάζονταν από τούβλα. Ο τύπος αυτός σώζεται ακόμη και σήμερα σε παλιές βιομηχανίες, και μάλιστα πολλές φορές σε πυκνοκατοικημένες συνοικίες των πόλεων.

Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν ως υλικά κατασκευής το οπλισμένο σκυρόδεμα και ο χάλυβας, με τα οποία έγινε δυνατή η κατασκευή καπνοδόχων μεγάλου ύψους, π.χ. 100 μέτρων, 200 μέτρων ή και περισσότερων (π.χ. θερμοηλεκτρικά εργοστάσια).

Από λειτουργική άποψη η σπουδαιότητα μιας βιομηχανικής καπνοδόχου μπορεί να είναι σημαντική μέχρι και κρίσιμη, διότι διακοπή της λειτουργίας της λόγω κατασκευαστικής αστοχίας που οφείλεται σε ένα σεισμό, μπορεί να σημαίνει διακοπή της λειτουργίας της βιομηχανικής μονάδας, με ό,τι αυτό συνεπάγεται από οικονομική άποψη.



**Εικόνα 7.1:** Βιομηχανική καπνοδόχος ύψους 60 μέτρων.

Εάν όμως το ζήτημα εξετασθεί από ευρύτερη κοινωνική άποψη, τότε οι επιπτώσεις από την ενδεχόμενη αστοχία της καπνοδόχου μπορεί να μην περιορίζονται στην ίδια τη βιομηχανική μονάδα, αλλά να αφορούν το ευρύτερο κοινωνικό σύνολο και πιθανόν και την εθνική οικονομία ( π.χ. περίπτωση διακοπής λειτουργίας καπνοδόχου θερμοηλεκτρικού εργοστασίου, χημικής βιομηχανίας, κλπ ). Στις επιπτώσεις εξάλλου μπορεί να περιλαμβάνονται και ανθρώπινα θύματα, όταν σε ακραία περίπτωση σημειωθεί κατάρρευση της καπνοδόχου. Επομένως ο αντισεισμικός σχεδιασμός των βιομηχανικών καπνοδόχων πρέπει να αποτελεί σημαντικό μέρος του όλου σχεδιασμού των κατασκευών αυτών.

## **7.2 ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ**

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 ωπλισμένο 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 εκφεύγει του σκοπού του παρόντος, 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.).

## **7.3 ΕΙΔΙΚΩΤΕΡΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ Β.Κ.**

### **7.3.1 Φάσμα σχεδιασμού**

Για την χρησιμοποίηση του φάσματος σχεδιασμού προς καθορισμό των σεισμικών δυνάμεων, ο υπολογισμός της ορθής τιμής της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου της καπνοδόχου έχει ιδιαίτερη σημασία, δεδομένου ότι επειδή πρόκειται συνήθως για

εύκαμπτες κατασκευές, ιδίως για μεγάλα ύψη, η τιμή της  $T$  μπορεί να οδηγεί σε σημαντικά μειωμένες σεισμικές δυνάμεις. Γι' αυτό συνιστάται ο προσδιορισμός της  $T$  μέσω μιας αρχικής δυναμικής ανάλυσης.

Επίσης χρειάζεται προσοχή στην ορθή επιλογή του ποσοστού κρίσιμης απόσβεσης ( $\xi$ ) ανάλογα με το υλικό κατασκευής και τον τρόπο σύνδεσης των τμημάτων της καπνοδόχου μεταξύ των. Εφόσον η τιμή του ( $\xi$ ) είναι διαφορετική του 5%, θα πρέπει να υπολογισθεί ο διορθωτικός συντελεστής ( $\eta$ ), του οποίου η επιρροή μπορεί να είναι αξιόλογη. Π.χ. για ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης 2% (περίπτωση χαλύβδινων ηλεκτροσυγκολλητών καπνοδόχων), προκύπτει  $\eta = 1,32$ , δηλαδή αύξηση των σεισμικών δυνάμεων κατά 32%.

### 7.3.2 Συντελεστής συμπεριφοράς

Οι Β.Κ. είναι κατά κανόνα αυτοστήρικτες κατασκευές πακτωμένες στη βάση τους, που συμπεριφέρονται ως κατακόρυφοι πρόβολοι. Λίγες είναι οι περιπτώσεις όπου η καπνοδόχος δεν είναι αυτοστήρικτη, αλλά συγκρατείται σε ένα ή περισσότερα σημεία της με επιτόνους..

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, Μέρος 3, ο βασικός συντελεστής συμπεριφοράς έχει τις ακόλουθες τιμές :

Α) Για καπνοδόχους από σκυρόδεμα μπορεί να λάβει τιμή 3 εφόσον έχουν εξασφαλισθεί αυστηρές προϋποθέσεις πλαστικής συμπεριφοράς, άλλως λαμβάνεται τιμή 1.0.

Β) Για ολόσωμες καπνοδόχους από χάλυβα η τιμή φθάνει 2 εφόσον ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις πλαστικής ανάλυσης του Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1. Άλλως λαμβάνεται τιμή 1.0.

Γ) Για καπνοδόχους με επιτόνους λαμβάνεται τιμή 1.0

Σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000, εάν ληφθεί ως ( $q$ ) η μικρότερη τιμή μεταξύ 1.5 και  $q/2$ , πάντως όχι μικρότερη του 1.0, τότε δεν χρειάζεται να εφαρμοσθούν οι έλεγχοι για την εξασφάλιση αξιόπιστου ελαστοπλαστικού μηχανισμού. Κατόπιν τούτου είναι προφανές ότι στις περιπτώσεις (Β) και (Γ) η μικρότερη των δύο τιμών είναι η  $q/2 = 1.0$ , δηλαδή πρόκειται για ελαστικό σχεδιασμό.

### 7.3.3 Συντελεστής σπουδαιότητας

Η σπουδαιότητα μιας Β.Κ. από άποψη πιθανής κατάρρευσης, και όχι κατ' ανάγκη από σεισμό, λαμβάνεται σοβαρά υπόψη σε σύγχρονους κανονισμούς, όπως π.χ. ο Ευρωκώδικας 3, Μέρος 3.2 για τον σχεδιασμό καπνοδόχων από χάλυβα. Ο λόγος είναι κυρίως το μεγάλο ύψος των κατασκευών αυτών, όπου οι επιπτώσεις από μία κατάρρευση μπορεί να είναι πολύ σοβαρές, ακόμη και σε ανθρώπινα θύματα.

Στον ανωτέρω Ευρωκώδικα τούτο λαμβάνεται υπόψη με τη θέσπιση τριών κατηγοριών αξιοπιστίας της καπνοδόχου, και τον καθορισμό για κάθε μία από αυτές τιμών μερικών συντελεστών ασφαλείας που επιβάλλονται στα μόνιμα και μεταβλητά φορτία, και που κυμαίνονται μεταξύ 0.9 και 1.6. Από το άλλο μέρος, ο ΕΑΚ 2000 καθορίζει συντελεστές σπουδαιότητας που κυμαίνονται από 0.85 μέχρι 1.30, και επιβάλλονται στο φάσμα σχεδιασμού (επαυξάνουν τη φασματική επιτάχυνση).

Επομένως για μεν τα άλλα φορτία πλην σεισμού (μόνιμα, άνεμος) μπορούν να χρησιμοποιούνται οι μερικοί συντελεστές ασφαλείας που καθορίζονται από τον εκάστοτε χρησιμοποιούμενο κανονισμό, ανάλογα με την κατηγορία αξιοπιστίας, για δε τον σεισμό συνιστάται η εφαρμογή του πίνακα 2.3 του ΕΑΚ 2000.

Παράδειγμα : Έστω ότι πρόκειται για μεταλλική καπνοδόχο ύψους μικρότερου των 100 μέτρων, σε τυπική βιομηχανική περιοχή, όπου οι κατοικίες ευρίσκονται έξω από την ακτίνα πτώσης της. Τότε σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, Μέρος 3.2, η καπνοδόχος κατατάσσεται στην κατηγορία αξιοπιστίας 2 (κανονική), και τα φορτία πολλαπλασιάζονται με τους εξής συντελεστές :

- Όταν επιδρούν δυσμενώς : τα μόνιμα με 1.1, τα μεταβλητά με 1.4
- Όταν επιδρούν ευμενώς : τα μόνιμα με 0.9, τα μεταβλητά με 0

Για τον καθορισμό των σεισμικών φορτίων, σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000, η εν λόγω καπνοδόχος θα καταταγεί στην κατηγορία Σ2, επομένως ο συντελεστής σπουδαιότητας θα είναι  $\gamma=1$ .

## 7.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ

### 7.4.1 Αγκύρωση στη θεμελίωση

Η σύνδεση της καπνοδόχου με το θεμέλιό της από οπλισμένο σκυρόδεμα, καταπονείται συνήθως από σημαντικές ροπές, ιδίως για μεγάλα ύψη. Σε καπνοδόχους από οπλισμένο σκυρόδεμα όπου υπάρχει μονολιθική σύνδεση με το θεμέλιο, το ζήτημα αντιμετωπίζεται με επαρκείς διατομές και οπλισμούς. Σε καπνοδόχους από χάλυβα, η σύνδεση επιτυγχάνεται με ικανό αριθμό αγκυροβιδών, αγκυρωμένων σε επαρκές βάθος μέσα στο θεμέλιο. Κατά κανόνα οι αγκυρόβιδες αυτές αποτελούνται από χάλυβα υψηλής αντοχής και είναι μερικώς ή ολικώς προεντεταμένες. Ο λόγος είναι ότι, πλην του σεισμού, η καπνοδόχος υπόκειται και σε φόρτιση κόπωσης από άλλα αίτια, οπότε χωρίς προένταση οι αγκυρόβιδες θα έφθαναν σύντομα σε αστοχία.

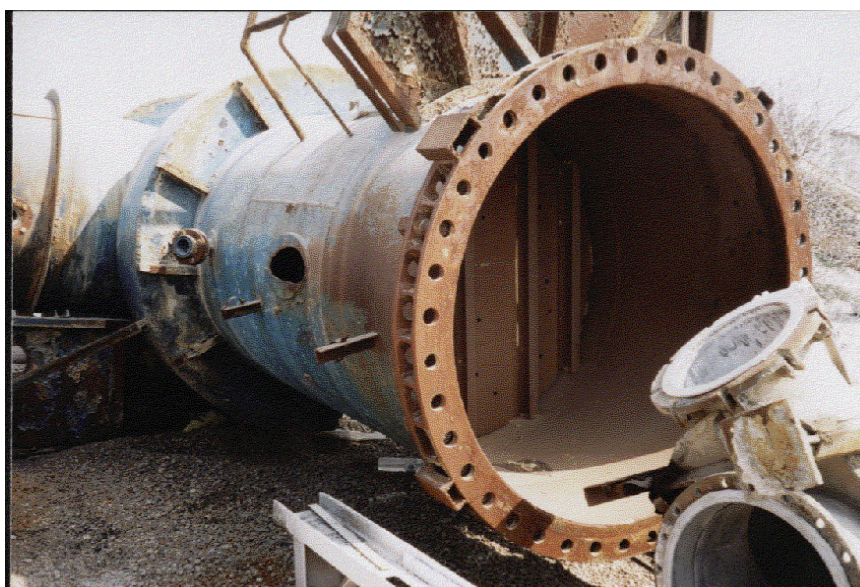
Με τον τρόπο αυτό, δηλαδή την προένταση των αγκυροβιδών, η χαμηλών κύκλων κόπωση (low-cycle fatigue) που προκαλεί ο σεισμός, αντιμετωπίζεται ταυτόχρονα με ικανοποιητικό τρόπο.

### 7.4.2 Συνδέσεις αγωγών στο σώμα της καπνοδόχου

Σε όλες τις καπνοδόχους, η εισαγωγή των καυσαερίων από τον λέβητα γίνεται κατά κανόνα σε στάθμη υψηλότερη από τη βάση πάκτωσης της κατασκευής, μέσω αγωγών καταλλήλων διαστάσεων. Η σύνδεση των αγωγών αυτών στο σώμα της καπνοδόχου, για λόγους αποφυγής καταναγκασμών εξαιτίας θερμοδιαστολών, γίνεται κατά πάγιο τρόπο μέσω εύκαμπτης διάταξης που επιτρέπει τη σχετική μετακίνηση των δύο σωμάτων. Αυτή η κατασκευαστική πρακτική λύνει σχεδόν εξ ολοκλήρου και το πρόβλημα του σεισμού, δεδομένου ότι μπορεί να υποτεθεί ότι η συμπεριφορά της καπνοδόχου δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη του αγωγού ή των αγωγών εισαγωγής των καυσαερίων.



**Εικόνα 7.2:** Θεμελίωση βιομηχανικής καπνοδόχου ύψους 60 μέτρων



**Εικόνα 7.3:** Φλαντζωτή σύνδεση βιομηχανικής καπνοδόχου.

### 7.4.3 Μονόπλευρες φλαντζωτές συνδέσεις με προεντέταμενους κοχλίες υψηλής αντοχής

Οι συνδέσεις του τύπου αυτού (εικόνα 7.3) χρησιμοποιούνται κατά κανόνα σε βιομηχανικές κατασκευές από χάλυβα των οποίων το σώμα ή τα μέλη αποτελούνται από κυλινδρικές διατομές, όπως καπνοδόχοι, πύργοι, σωληνώσεις κλπ, για την επιτόπου σύνδεση των επιμέρους τμημάτων κατά την ανέγερση.

Οι φλάντζες συνήθως είναι εξωτερικές αλλά σε περιπτώσεις κυλινδρικών διατομών μεγάλης διαμέτρου, πχ σε πύργους ανεμογεννητριών, μπορεί να είναι και εσωτερικές, οπότε η εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια του πύργου είναι λεία καθ' όλο το ύψος, πράγμα που αποτελεί πλεονέκτημα τόσο από αεροδυναμική όσο και από αισθητική άποψη. Βέβαια, φλάντζες εσωτερικές σε μία καπνοδόχο μεγάλης διαμέτρου δεν είναι νοητές, διότι θα παρεμπόδιζαν τη ροή των καυσαερίων.

Για την σύνδεση των φλαντζών μεταξύ τους, χρησιμοποιούνται κοχλίες υψηλής αντοχής, ποιότητας 8.8 και 10.9, οι οποίοι **κατά κανόνα προεντείνονται με μερική ή ολική προένταση**, για τους ακόλουθους λόγους :

- Πολλές από τις παραπάνω κατασκευές, όπως οι καπνοδόχοι, οι πύργοι, κλπ., υπόκεινται πάντοτε σε **κόπωση ( fatigue)** οφειλόμενη στην επιρροή του ανέμου που διεγείρει την κατασκευή σε ταλαντώσεις διαμήκεις ή εγκάρσιες, στη λειτουργία μηχανών στην κορυφή τους ( πχ ανεμογεννήτριες ), κοκ. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στη σύνδεση λόγω αυτής της φόρτισης, δεν μπορούν να παραληφθούν ικανοποιητικά παρά μόνον εάν οι κοχλίες είναι προεντεταμένοι. Άλλως θραύονται γρήγορα λόγω υπέρβασης του ορίου κόπωσης.
- Πέραν όμως του προηγούμενου βασικού λόγου της κόπωσης, υπάρχει και ο απλός λόγος ότι χωρίς προένταση δεν αξιοποιούνται καθόλου τα χαρακτηριστικά των κοχλίων αυτών. Αντίθετα με την προένταση, έστω και μερική, η σύνδεση αποκτά πλεονεκτήματα όπως **δυσκαμψία, στεγανότητα, κλπ.**
- Στην ειδική περίπτωση του **σεισμού**, είναι προφανής η ανάγκη πλήρους προεντάσεως των κοχλίων της σύνδεσης, τόσο για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής δυσκαμψίας (άρα μονολιθικότητας της κατασκευής), όσο και για την αντιμετώπιση της **ολιγο-κυκλικής κόπωσης (low-cycle fatigue)** που προκαλεί ο σεισμός.

#### 7.4.3.1 Ανάλυση της Σύνδεσης

Η φλαντζωτή σύνδεση τύπου L μπορεί να αναλυθεί με ένα από τους παρακάτω τρόπους :

- A) Με την ελαστική μέθοδο ( ή ελαστο-στατική θεωρία ).
- B) Με την πλαστική μέθοδο ( ή πλαστο-στατική θεωρία ).
- Γ) Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

### Ελαστική μέθοδος

Κατ' αυτήν λαμβάνονται υπόψη τα ελαστικά χαρακτηριστικά της σύνδεσης, δηλαδή των κοχλίων, των φλαντζών και του ελάσματος του κελύφους. Ο κοχλίας θεωρείται ότι έχει φορτιστεί με μία αρχική δύναμη προέντασης  $F_v$ . Ο υπολογισμός στοχεύει στον προσδιορισμό της δύναμης που αναπτύσσεται στη σύνδεση λόγω της επιβολής της εξωτερικής φόρτισης, στην κατανομή της δύναμης αυτής στον κοχλία και τις φλαντζες, και στον έλεγχο του κοχλία και των φλαντζών.

Οι έλεγχοι που πρέπει να γίνουν είναι :

- Έλεγχος αντοχής του κοχλία για τη μέγιστη δύναμη εφελκυσμού που αναλαμβάνει (προένταση και ποσοστό της εξωτερικής).
- Έλεγχος του κοχλία σε κόπωση.
- Έλεγχος των φλαντζών σε αποκόλληση (απώλεια της προέντασης).
- Έλεγχος αντοχής των φλαντζών σε κάμψη.

### Πλαστική μέθοδος

Κατ' αυτήν θεωρούνται τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί διαρροής της σύνδεσης. Η οριακή αντοχή της σύνδεσης προσδιορίζεται είτε α) από την οριακή αντοχή του κοχλία είτε β) από την οριακή αντοχή των φλαντζών. Ποιο από τα δύο είναι καθοριστικό, δεν είναι εκ των προτέρων γνωστό.

### Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος αυτή δεν είναι για πρακτική χρήση, μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί σε μία ειδική περίπτωση σύνδεσης όπου οι προηγούμενες μέθοδοι είτε είναι δύσκολο να εφαρμοσθούν, είτε οδηγούν σε μη αξιόπιστα αποτελέσματα.

Γενικώς η μέθοδος αυτή απαιτεί σημαντικό χρόνο και υπολογιστική εργασία.

## **7.5 ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ ΕΝΑΝΤΙ ΦΟΡΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΥ**

Η μέχρι πρότινος πρακτική στον σχεδιασμό βιομηχανικών καπνοδόχων στηριζόταν στο ότι η πίεση λόγω ανέμου είναι σημαντικά πιο κρίσιμη από τον την αντίστοιχη σεισμική δύναμη. Δεδομένου ότι οι καπνοδόχοι είναι σχετικά εύκαμπτες και μεγάλου ύψους κατασκευές, η γενική αίσθηση ήταν πως η σεισμική δύναμη υστερεί σε μέγεθος σε σχέση με την δύναμη λόγω ανέμου.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάζονται δύο τυπικές καπνοδόχοι, μία ύψους 40 μέτρων και μία 60 μέτρων. Οι καπνοδόχοι αναλύονται σε σεισμό και σε άνεμο και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με βάση την μέγιστη μεσημβρινή (διαμήκη) τάση  $\sigma_{xd}$ .

### 7.5.1 Καπνοδόχος ύψους 40 μέτρων

Η πρώτη καπνοδόχος έχει ύψος 40 μέτρα, σταθερής εξωτερικής διαμέτρου 2 μέτρων και πάχος μεταβλητό καθ' ύψος, όπως φαίνεται στο κάτωθι πίνακα.

Ύψος (m)	Αρχικό πάχος (mm)	Διαβρωμένο πάχος (mm)
0 – 5	16	12
5 – 10	14	10
10 – 15	12	8
15 – 40	10	6

Τα διαβρωμένα πάχη, ελλείνει άλλων στοιχείων, ελήφθησαν από τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 – μέρος 3 που αναφέρεται στο γενικό σχεδιασμό των καπνοδόχων.

Για την ανεμοπίεση χρησιμοποιήθηκε ο Ευρωκώδικας 1, που αναφέρεται στο συγκεκριμένο θέμα. Η ανάλυση που έγινε έδειξε πως η μέγιστη διαμήκης τάση  $\sigma_{xd}$  παρουσιάζεται στην βάση της δεξαμενής και είναι ίση με 49.3 MPa θεωρώντας μοντέλο δοκού (beam model) και 51.7 MPa θεωρώντας μοντέλου κελύφους, για την περίπτωση που θεωρηθούν διαβρωμένα πάχη.

Η ίδια κατασκευή αναλύθηκε σε σεισμό με βάση τις διατάξεις του ΕΑΚ, θεωρώντας πως έχουμε υψηλή σεισμική ζώνη τύπου ΙΙΙ, δηλαδή  $\alpha=0.24$ . Η ανάλυση έγινε λαμβάνοντας υπόψη

- Κανονικά πάχη και διαβρωμένα πάχη
- Μοντέλο δοκού και μοντέλο κελύφους
- Φασματική ανάλυση και ισοδύναμη στατική ανάλυση

Η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της καπνοδόχου είναι 0.62 sec. Με βάση αυτή την ιδιοπερίοδο, και για μοντέλο κελύφους, η μέγιστη διαμήκης τάση  $\sigma_{xd}$  υπολογίστηκε με την ισοδύναμη στατική μέθοδο

- 89.9 MPa για αρχικά πάχη
- 84.5 MPa για διαβρωμένα πάχη

Οι τιμές αυτές τροποποιούνται σημαντικά για την περίπτωση της πλήρους φασματικής ανάλυσης, ακόμη και στην περίπτωση που θεωρούμε 1 ιδιομορφή. Συγκεκριμένα

	Μέγιστη διαμήκης τάση (MPa)	
Αριθμός ιδιομορφών	Αρχικά πάχη	Διαβρωμένα πάχη
1	55.5	-
5	55.9	44.4
10	55.9	-

Σημειώνεται πως η ισοδύναμη στατική μέθοδος λαμβάνει υπόψη ολόκληρη την μάζα της καπνοδόχου, ενώ η μέθοδος της φασματικής ανάλυσης υπολογίζει τις μάζες της κάθε μίας ιδιομορφής. Η πρώτη ιδιομορφή στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι περίπου 55% της συνολικής μάζας, και αυτό εξηγεί την σημαντική διαφορά των δύο μεθόδων.

Ως ένα πρώτο συμπέρασμα αναφέρεται πως η ισοδύναμη στατική μέθοδος είναι πολύ συντηρητική, σε σχέση με την πλέον ακριβή μέθοδο της φασματικής ανάλυσης. Το σημαντικότερο όμως συμπέρασμα είναι η σημαντική τιμή της διαμήκουσ τάσης  $\sigma_{xd}$  στην περίπτωση του σεισμού, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι σημαντικά μεγαλύτερη της αντίστοιχης τάσης λόγω ανέμου.

#### 7.5.2 Καπνοδόχος ύψους 60 μέτρων

Η καπνοδόχος αυτή βρίσκεται στον εργοστασιακό χώρο της Βιομηχανίας Φωσφορικών Λιπασμάτων Α.Ε. στην Θεσσαλονίκη. Έχει 60 μέτρα ύψος, και τα αρχικά πάχη της καπνοδόχου φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

Ύψος h(m)	Πάχος t (mm)
0 - 10	10
10- 14	14
14- 22,5	16
22,5 - 24	14
24 - 28	12
28 - 36	10
36 - 40	8
40 - 60	6

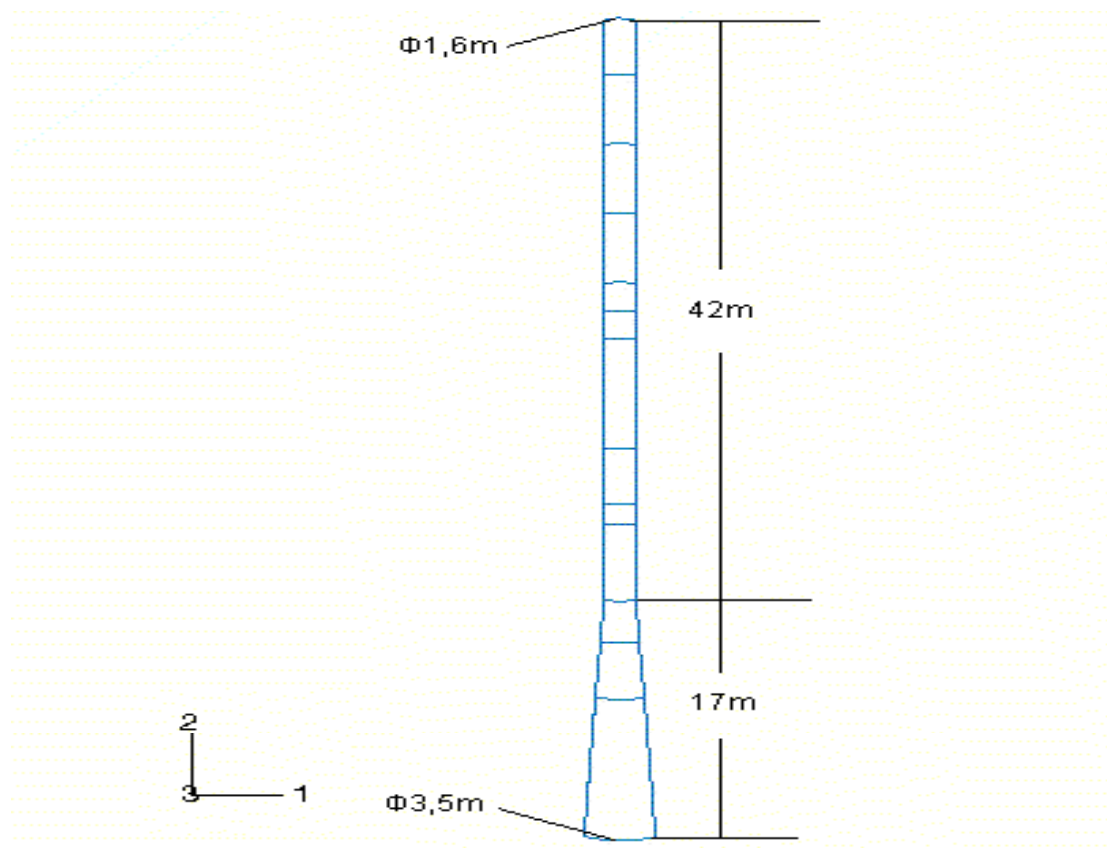
Πίνακας αρχικών παχών βιομηχανικής καπνοδόχου ύψους 60 μέτρων

Το ανώτερο τμήμα της καπνοδόχου λόγω διάβρωσης αντικαταστάθηκε από ένα αντίστοιχο τμήμα λίγο μικρότερου μήκους ώστε το παρόν ύψος της καπνοδόχου να είναι 59 μέτρα. Ο μέσος όρος των παχομετρήσεων της υπάρχουσας κατάστασης της καπνοδόχου φαίνεται στον επόμενο πίνακα. Οι παχομετρήσεις παραχωρήθηκαν από την Βιομηχανία Φωσφορικών Λιπασμάτων Α.Ε.

Η ανάλυση της καπνοδόχου αυτής ακολούθησε τα βήματα της καπνοδόχου των 40 μέτρων. Έγινε ανάλυση με φορτία ανέμου και σεισμού, με βάση τα πραγματικά πάχη όπως αυτά προέκυψαν από τις παχομετρήσεις. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του ανέμου έδωσαν μία μέγιστη διαμήκη τάση ίση με 70 MPa.

Ύψος h (m)	Πάχος t (mm)
0 - 10	9,625
10 - 14	14
14 - 22,5	15,65
22,5 - 24	13,5
24 - 28	10
28 - 36	8,3
36 - 38	6,5
38 - 40	9,8
40 - 45	8
45 - 50	6
50 - 54	4,5
54 - 59	5

Πίνακας υφιστάμενων παχών βιομηχανικής καπνοδόχου ύψους 60 μέτρων



**Εικόνα 7.4:** Υφιστάμενη κατάσταση στην βιομηχανική καπνοδόχο ύψους 60 μέτρων.

Η ανάλυση σε σεισμό με βάση το φάσμα ΕΑΚ και την ισοδύναμη στατική μέθοδο έδωσε μέγιστη διαμήκη τάση 123.5 MPa, ενώ τα αποτελέσματα της φασματικής μεθόδου ήταν τα εξής:

Αριθμός ιδιομορφών	Μέγιστη διαμήκης τάση (MPa)
1	50.7
2	51.2
3	51.2
30	51.2

Η διαφορά της ισοδύναμης στατικής ανάλυσης με την φασματική ανάλυση είναι παραπάνω από εμφανής. Στην περίπτωση αυτή, η τάση που προέρχεται από την σεισμική φασματική ανάλυση είναι λιγότερο κρίσιμη από την αντίστοιχη τάση λόγω ανέμου, αλλά σίγουρα όχι μικρή ή αμελητέα.

ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ: για περιοχές μεγάλης σεισμικότητας (ζώνη ΙΙΙ ή ΙV) και με βάση της σύγχρονες αντιλήψεις σχεδιασμού, δεν είναι γενικά προφανές το αν ο σεισμός ή ο άνεμος είναι η πλέον κρίσιμη φόρτιση για τον δομικό σχεδιασμό μίας βιομηχανικής καπνοδόχου. Και οι δύο περιπτώσεις φόρτισης θα πρέπει να εξετάζονται, ώστε να διαπιστώνεται η κρίσιμη κατάσταση.