

2. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ

Οι σωληνώσεις μίας βιομηχανικής εγκατάστασης αποτελούν μία κατηγορία κατασκευών με σημαντικό ενδιαφέρον, ειδικά τα καμπύλα τμήματα των σωληνώσεων (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 2.1: Βιομηχανικές σωληνώσεις.

Επίσης, ιδιαίτερο σχεδιαστικό 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.

Οι παρακάτω οδηγίες μελέτης παρουσιάζουν το γενικό πλαίσιο σχεδιασμού σωληνώσεων, με βάση κυρίως τις Αμερικανικές προδιαγραφές ASME (American Society of Mechanical Engineers) B31.3 – 1993 edition.

Επιλογή Υλικών, Συγκολλήσεις και Επιθεώρηση

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 σε επόμενο κεφάλαιο των προτεινόμενων οδηγιών σχεδιασμού. Η επιθεώρηση της σωλήνωσης αποτελεί ένα βασικό στοιχείο για την αξιόπιστη συμπεριφορά της σε σεισμό, δεδομένης της σημαντικής διάβρωσης που μπορεί να υποστεί. Στις κατασκευές αυτές οφείλει χρησιμοποιείται η φιλοσοφία σχεδιασμού leak-before-break, ώστε να 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. 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.



Εικόνα 2.2: Βιομηχανικές σωληνώσεις και στηρίξεις (pipe racks).

Ανάλυση Τάσεων Σωληνώσεως

Η ανάλυση μίας βιομηχανικής σωληνώσεως 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 η χρησιμοποίηση ελαστικής ανάλυσης είναι ενδεδειγμένη και επαρκής. Σημειώνεται πως για τον προσδιορισμό των τάσεων σε διάφορα τμήματα του σωλήνα, το συνολικό σύστημα σωληνώσεως – στήριξης θα πρέπει να αναλυθεί σε σεισμό.

Η ανάλυση θα πρέπει να λαμβάνει 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 σε επόμενη παράγραφο.

Σημειώνεται πως οι βιομηχανικές σωληνώσεις καταπονούνται από φορτίσεις οι οποίες είναι σημαντικά διαφορετικές από τις καταπονήσεις δομικών μελών σε συνήθη μεταλλικά κτήρια, λόγω σημαντικών πιέσεων. Η επιρροή της πίεσης στον σχεδιασμό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Έλεγχος Τάσεων για την Ειδική Περίπτωση Σεισμικής Φόρτισης

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

$$B_1 p \frac{D}{2t} + B_2 M \frac{D}{2I} \leq 4.5 S_m \quad (2.1)$$

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

$$B_2 = \frac{1.30}{h^{2/3}} \geq 1.0 \quad (2.2)$$

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



Εικόνα 2.3: Καμπύλα τμήματα (pipe elbows) σε βιομηχανικές σωληνώσεις.

Συντελεστές ευκαμψίας της σωλήνωσης

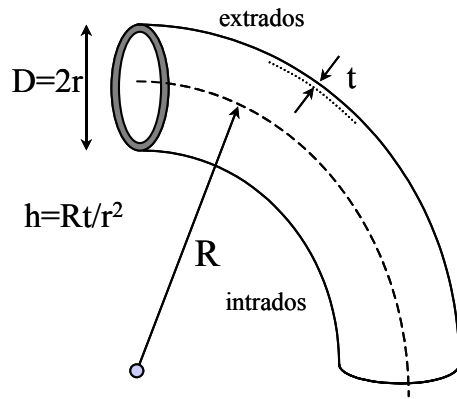
Για τον ακριβή προσδιορισμό των εντατικών μεγεθών (ροπές) στον αγωγό, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση η αυξημένη ευκαμψία των καμπύλων τμημάτων, μέσω κατάλληλων συντελεστών ευκαμψίας. Οι συντελεστές ευκαμψίας δείχνουν το πόσο πιο εύκαμπτο είναι ένα καμπύλο τμήμα σωλήνα σε σχέση με ένα αντίστοιχο ευθύγραμμο τμήμα. Τα αποτελέσματα εκφράζονται συναρτήσει της βασικής γεωμετρικής παραμέτρου h του καμπύλου τμήματος

$$h = \frac{tR}{r^2} \quad (2.3)$$

καθώς και την παράμετρο πίεσης ψ

$$\psi = \frac{pR^2}{Ert} \quad (2.4)$$

Οι παράμετροι R , r , t ορίζονται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: 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 ψ :

$$f = \frac{1.65}{h} \cdot \frac{1}{1 + f_1(h, \psi)} \quad (2.5)$$

Η συνάρτηση $f_1(h, \psi)$ 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 2.5.

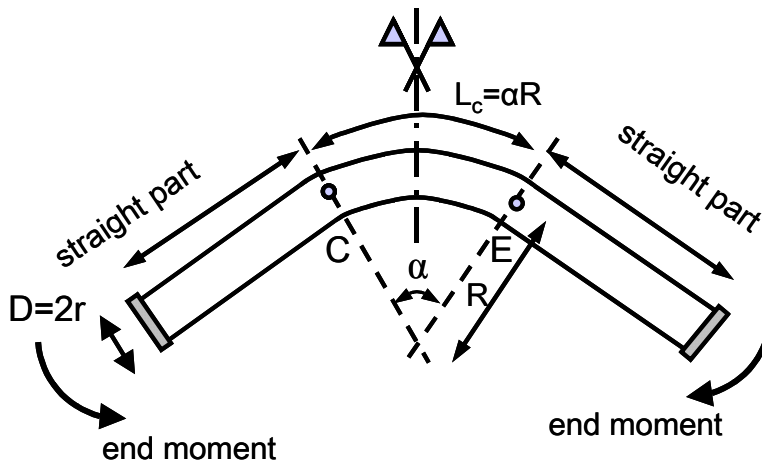
Συντελεστές ευκαμψίας για καμπύλα τμήματα σωλήνων υπό κάμψη										
h	$\psi=0.0$	$\psi=0.001$	$\psi=0.002$	$\psi=0.004$	$\psi=0.008$	$\psi=0.016$	$\psi=0.032$	$\psi=0.064$	$\psi=0.128$	$\psi=0.512$
0.010	173.206	55.377	35.398	21.927	13.460	8.304	5.205	3.363	2.288	1.352
0.015	115.470	50.447	33.859	21.526	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 2.5: Συντελεστές ευκαμψίας για καμπύλα τμήματα σωλήνων υπό κάμψη

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 επίσης πως οι παραπάνω εξισώσεις δεν περιλαμβάνουν ως παράμετρο την γωνία του καμπύλου τμήματος (elbow angle α στο σχήμα 2.6). 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° οπότε οι παραπάνω τύποι ισχύουν.



Σχήμα 2.6: Γεωμετρία καμπύλου τμήματος σωλήνωσης.

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 διαμήκειες τάσεις. Οι τάσεις αυτές οφείλονται στην αλλαγή της διατομής του σωλήνα από κυκλική σε σχήμα οβάλ (ovalization) και προκαλούν πρόωρη πλαστικοποίηση αλλά και αστοχία.

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.

Στο έλεγχο τάσεων που περιγράφηκε ανωτέρω, ο συντελεστής B_2 αναφέρεται ακριβώς στο συγκεκριμένο φαινόμενο.

Αστοχία Στοιχείων Σωληνώσεων υπό Σεισμική Διέγερση

Σε σχετικά πρόσφατη αναθεώρηση του κανονισμού ASME Boiler and Pressure Vessel Code, η μέγιστη τάση που χρησιμοποιείται στον βασικό έλεγχο τάσεων σε ειδικά καμπύλα στοιχεία σωληνώσεων (pipe elbows) 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 εμπλεκομένων 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 αφορούν καμπύλα τμήματα ορθής γωνίας (90° – 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).

Συστήματα Στήριξης Σωληνώσεων (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 2.7. 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 συμβουλευτεί 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 X (βλ. Παράρτημα Γ του κειμένου του ΕΑΚ).



Εικόνα 2.7: Κατασκευές στήριξης βιομηχανικών σωληνώσεων (pipe racks).



Εικόνα 2.8: Αστοχία πλαισίου στήριξης βιομηχανικών σωληνώσεων σε σεισμό (Νικομήδεια, Τουρκία 1999).