

Κατασκευαστική επάρκεια σωληνώσεων φυσικού αερίου

**Απόστολος Ευθυμιάδης,**

*Δρ. Μηχ.Διπλ. Μηχ/γος-Ηλλ/γος ΜηχB' Αντιπρόεδρος Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Μηχανολόγων-Ηλεκτρολόγων*

**Ημερίδα ΤΕΕ για το φυσικό αέριο, Αθήνα, Νοέμβριος 2004**

## **1 Εισαγωγή**

Το 2003 αρχίζει στην χώρα μας η συστηματική και σε μεγάλη έκταση κατασκευή των δικτύων πόλεων φυσικού αερίου. Το έργο των δικτύων πόλεων φυσικού αερίου το οποίο αποτέλεσε μεγάλο όραμα του τεχνικού κόσμου της χώρας υλοποιείται σήμερα σε μεγάλη κλίμακα. Παράλληλα εξελίσσεται με γοργούς ρυθμούς το έργο των συνδέσεων των οικιακών καταναλωτών στο δίκτυο.

Το 2003 ολοκληρώθηκε και ο νέος κανονισμός εσωτερικών εγκαταστάσεων φυσικού αερίου έως και 1 bar (Αρ. Δ3/Α/11346, 15 Ιουλίου 2003) [1] ενώ ήδη ισχύει από το 1997 ο «Κανονισμός εγκαταστάσεων φυσικού αερίου με πίεση λειτουργίας άνω των 50mbar και μέγιστη πίεση λειτουργίας 16 bar» [2].

Επομένως σήμερα καθίσταται επιτακτική ανάγκη προώθησης και προβολής του θέματος της ασφαλούς κατασκευής των δικτύων και εγκαταστάσεων φυσικού αερίου και της τήρησης όλων των κανόνων ασφαλείας. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εμπέδωση ενός αισθήματος ασφάλειας των καταναλωτών, είναι η πλήρης ενημέρωση και εκπαίδευση του τεχνικού κόσμου επί των βασικών θεμάτων ασφαλείας τα οποία άπτονται των εγκαταστάσεων φυσικού αερίου και των κρίσιμων τεχνικών χαρακτηριστικών τους. Όπως αναφέρει ρητώς ο νέος κανονισμός [1] :

*«1.2.4 Ως κρίσιμα ελεγχόμενα τεχνικά χαρακτηριστικά των στοιχείων των εγκαταστάσεων αερίου θεωρούνται μεταξύ των άλλων τα ακόλουθα υπό συνθήκες τελικής χρήσης τους:*

*α) αντοχή σε εσωτερική ή εξωτερική πίεση, αντοχή σε διαμήκη κάμψη, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε πρόσκρουση, θερμική αντίσταση, αντοχή σε διάβρωση, ανθεκτικότητα έναντι διαφόρων ουσιών του εδάφους ή του περιβάλλοντος*

*β) πυραντίσταση, αναφλεξιμότητα, ρυθμός έκλυσης θερμότητας, ταχύτητα εξάπλωσης της φλόγας, ρυθμός παραγωγής καπνού, τοξικών αερίων, φλεγόμενων σωματιδίων*

*γ) στεγανότητα, πίεση, θερμοκρασία, αντίσταση στις εξωτερικές επιδράσεις, ευαισθησία, αξιοπιστία, ορατότητα, επισκεψιμότητα».*

Στην παρούσα εργασία περιγράφονται αναλυτικά οι βασικές τεχνικές για την για ανάλυση της κατασκευαστικής επάρκειας των σωληνώσεων φυσικού αερίου ως προς το εδάφιο α) ανωτέρω και ειδικότερα ως προς την αντοχή της εγκατάστασης σε εξωτερική ή εσωτερική πίεση, αντοχή σε διαμήκη κάμψη, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε πρόσκρουση, συμπεριλαμβανομένων των σεισμικών δράσεων και των θερμικών καταπονήσεων. Η εργασία επικεντρώνεται σε υπέργειες σωληνώσεις οικιακών, εμπορικών ή βιομηχανικών δικτύων φ.α. με πίεση μέχρι 4bar [2].

## 2 Συνθήκες αστοχίας και κανονισμοί σωληνώσεων

### 2.1 Οι κίνδυνοι από την διαρροή φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο δεν είναι τοξική ουσία. Τυχόν όμως διαρροή έστω και σε μικρές ποσότητες περικλείει κινδύνους αναφλέξεως ή πρόκλησης πυρκαγιάς εάν συνδυαστεί με άλλες εύφλεκτες ή εκρηκτικές ουσίες ή ακόμα και εκρήξεως.

Ο πιο σημαντικός από πλευράς αριθμού ατυχημάτων είναι η πρόκληση πυρκαγιάς λόγω διαρροής αερίου. Συχνά το φαινόμενο αυτό συνδέεται στενά με την σεισμική δράση που εμφανίζεται σε σεισμογενείς περιοχές. Αναλυτικά στοιχεία δίδονται στο [4] για τους τρεις τελευταίους σεισμούς την πολιτεία της Καλιφόρνια (Κοιλάδα Αγ. Φερνάνδρου 1995, Λόμα Πιέτρα-Αγ. Φραγκίσκου 1989 και στα Στενά του Whittier νοτίως του Los Angeles το 1987 καθώς και για τον σεισμό στο Kobe της Ιαπωνίας (1995). Στην έκθεση της Αμερικανικής Ένωσης Πολιτικών Μηχανικών προς τον Οργανισμό Αντισεισμικής Ασφάλειας της Καλιφόρνια διαπιστώνεται ότι από το σύνολο των πυρκαγιών που εκδηλώνεται μετά από κάθε μεγάλο σεισμό, το 20 έως 50% αυτών οφείλεται στο φυσικό αέριο [4].

Οι κίνδυνοι εκρήξεως μίας διαρροής φυσικού αερίου είναι σχετικά περιορισμένοι λόγω της σπανιότητας των συνθηκών που απαιτούνται για την πρόκληση της έκρηξης (ποσότητα αερίου και ποσοστό ανάμιξης της με τον αέρα, ποσοστό υγρασίας, ύπαρξη κλειστών χώρων, κλπ). Όμως σε περίπτωση εκρήξεως υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες για την πρόκληση τραυματισμών ή και θανατηφόρων ατυχημάτων.

Τέλος οι κίνδυνοι από το ωστικό κύμα τυχόν απότομης διαρροής είναι πολύ μικροί, λόγω των χαμηλών πιέσεων που επικρατούν στα κτιριακά δίκτυα φυσικού αερίου, με εξαίρεση τα δίκτυα με πίεση >1bar.

Τα θέματα επικινδυνότητας του φυσικού αερίου, των ορίων της ζώνης επικινδυνότητας καθώς και των μέτρων καταστολής δίδονται στο [3].

### 2.2 Συνθήκες καταπονήσεων και αστοχίας σωληνώσεων

Η αστοχία και η διαρροή καυσίμου δύναται να προέλθει :

- από σεισμική δράση, μηχανική πρόσκρουση ή άλλη εξωτερική καταπόνηση επί της εγκατάστασης (π.χ. ατυχήματα, εκρήξεις από άλλες αιτίες ή άλλες παρεμβάσεις),
- από θερμική καταπόνηση της εγκατάστασης λόγω ύπαρξης πυρκαγιάς, η οποία δύναται να έχει προέλθει είτε από εξωγενείς αιτίες, είτε από διαρροή και ανάφλεξη διαρροής φυσικού αερίου από την ίδια την εγκατάσταση,
- από εσωτερική καταπόνηση της εγκατάστασης λόγω υπερπίεσης,
- από γήρανση ή διάβρωση των υλικών της εγκατάστασης (σωλήνες, βαλβίδες, παρεμβύσματα, στεγανωτικά υλικά, κλπ)

#### Σεισμικές καταπονήσεις

Οι κυριότερες αιτίες αστοχίας σωληνώσεων κατά την σεισμική δραστηριότητα περιλαμβάνουν:

- Αυξημένες οριζόντιες και κατακόρυφες σεισμικές δράσεις επί συνδέσεων ή στηριγμάτων ή αγκυρίων των στηριγμάτων επί των δομικών στοιχείων

- Αυξημένο βέλος κάμψεως σωληνώσεων λόγω σεισμικής ταλάντωσης.
- Διαφορικές μετατοπίσεις μεταξύ σωληνώσεων και συσκευών χρήσεως. Αυτή είναι μία από τις κυριότερες αιτίες αστοχίας, ιδιαίτερα όταν οι συσκευές χρήσεως φ.α. δεν είναι κατάλληλα αγκυρωμένες
- Αυξημένες οριζόντιες μετατοπίσεις στην κορυφή κατακόρυφων σωληνώσεων λόγω αυξημένου πλάτους οριζόντιας ταλάντωσης του κτιρίου καθ' ύψος
- Αυξημένες οριζόντιες διαφορικές μετατοπίσεις μεταξύ κτιρίων με αρμούς διαστολής χωρίς ενιαίο σύστημα θεμελίωσης ή σε σωληνώσεις μεγάλου μήκους.

#### Άλλες εξωτερικές καταπονήσεις

Οι σωληνώσεις θα πρέπει να είναι σε θέση να παραλαμβάνουν το ίδιο βάρος χωρίς να παρατηρείται μεγάλο βέλος κάμψεως των οριζοντίων γραμμών. Επίσης θα πρέπει να μπορούν να αντιμετωπίζουν τυχόν «τυχηματικές» δράσεις όπως η πτώση ενός αντικειμένου κατά την διάρκεια π.χ. ενός σεισμού.

#### Θερμικές καταπονήσεις

Οι θερμικές καταπονήσεις επί των σωληνώσεων φυσικού αερίου εμφανίζονται κατά την διάρκεια εκδήλωσης πυρκαγιάς. Σύμφωνα με τον κανονισμό αερίου [1] όλη η εγκατάσταση θα πρέπει να διαθέτει επαρκή πυραντίσταση, δηλαδή να διατηρεί την ακεραιότητά της σε θερμοκρασία 650 °C για χρονικό διάστημα τουλάχιστον 30 λεπτών. Καθ' όλη αυτή την διάρκεια αναπτύσσονται ισχυρές θερμικές διαστολές η παραλαβή των οποίων πρέπει να εξασφαλίζεται από την μελέτη. Τυχόν περιορισμός της ελεύθερης διαστολής των σωληνώσεων, δημιουργεί μεγάλες θλιπτικές τάσεις ή φορτία λυγισμού επί των σωληνώσεων και των στηριγμάτων αυτών η αντοχή στις οποίες θα πρέπει να εξασφαλίζεται κατά το στάδιο της μελέτης.

#### Εσωτερικές καταπονήσεις

Οι καταπονήσεις των σωληνώσεων λόγω εσωτερικών πιέσεων είναι μικρές (μέχρι 1 bar υπερπίεση = 2 bar απόλυτης πίεσεως). Το όριο πίεσεως για τους χαλυβδοσωλήνες με ραφή κατά ΕΛΟΤ 269 (DIN 2440) και ΕΛΟΤ 268 (DIN 2441) με υλικό St.33-1 είναι 10 bar για καύσιμα αέρα. Για καλύτερους χάλυβες και ή/και για σωλήνες χωρίς ραφή το όριο πίεσεως είναι αρκετά μεγαλύτερο.

Πάντως η θεωρία της αντοχής των σωληνώσεων σε εσωτερική καταπόνηση παρέχει την βάση για την επιλογή χαρακτηριστικών μεγεθών αντοχής του κάθε τύπου σωλήνωσης (όριο θραύσεως υλικού, όριο διαρροής, κλπ).

### **2.3 Προδιαγραφές, Κανονισμοί και θεσμικό πλαίσιο**

Οι βασικοί τεχνικοί κανόνες οι οποίοι διέπουν τον έλεγχο αντοχής σωληνώσεων σύμφωνα με τις κλασσική θεωρία δίδονται κατά DIN (Γερμανικοί Τεχνικοί Κανονισμοί) [5] και ASME (Αμερικάνικη Ένωση Μηχανολόγων Μηχανικών) και ειδικότερα τους κανονισμούς :

- ASME B31.1 : Σωληνώσεις θερμικών σταθμών
- ASME B31.3 : Σωληνώσεις μονάδων διεργασιών
- ASME B31.4 : Σωληνώσεις μεταφοράς υγρών πετρελαίων

- ASME B31.8 : Σωληνώσεις μεταφοράς και διανομής αερίων καυσίμων
- ASME B31.9 : Σωληνώσεις εξυπηρέτησης κτιρίων
- ASME : Κώδικας λεβήτων και δοχείων πίεσεως

Και οι δύο οικογένειες κανονισμών προβλέπουν κριτήρια αντοχής για σταθερά, μεταβλητά ή και εναλλασσόμενα φορτία τα οποία εν μέρει καλύπτουν και τα σεισμικά φορτία.

Βασική συμβολή στην κατασκευαστική μελέτη σωληνώσεων στην Ελληνική βιβλιογραφία έχει ο αείμνηστος Κ.Χ. Λέφας [6,7,8] με την οποία αποτυπώνεται η Γερμανική μέθοδος ανάλυσης κατά DIN 1626 (*Χαλύβδινες σωλήνες με ραφή για αγωγούς, συσκευές και δεξαμενές*), DIN 1629 (*Χαλύβδινες σωλήνες χωρίς ραφή για αγωγούς, συσκευές και δεξαμενές*), DIN 2413 (*Χαλυβδοσωλήνες: Υπολογισμός του πάχους τοιχώματος έναντι εσωτερικής πίεσεως*) καθώς και τα λοιπά DIN που περιλαμβάνονται στην αναφορά [5] και καλύπτουν ειδικότερες εφαρμογές των σωληνώσεων.

Σε ότι αφορά την αντισεισμική μελέτη των σωληνώσεων, οι βασικές αρχές του υπολογισμού περιλαμβάνονται ήδη στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (2000) [9]. Ο κανονισμός αυτός αντιμετωπίζει κάθε είδους κατασκευή η οποία δεν ανήκει στον φέροντα οργανισμό, ως Προσάρτημα του κτιρίου το οποίο περιλαμβάνει πάσης φύσεως εγκαταστάσεις επί του κτιρίου καθώς και αρχιτεκτονικά προσαρτήματα. Παρέχει μία απλή μεθοδολογία για τον υπολογισμό των σεισμικών δράσεων επί των προσαρτημάτων αυτών.

Ο ΕΑΚ 2000 εκτός των άλλων εναρμονίζει το Ευρωπαϊκό πρότυπο prEN 1998-1 «Ευρωκώδικας 8: Μελέτη κατασκευών για αντισεισμική θωράκιση-Μέρος 1 : Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια» [10] καθώς και το γενικό πρότυπο EN 1990 «Ευρωκώδικας: Βάσεις της κατασκευαστικής ανάλυσης» [11]. Σήμερα το πρότυπο prEN 1998-1 ευρίσκεται στο 6<sup>ο</sup> Σχέδιο (Ιανουάριος 2003), το οποίο περιέχει ήδη αρκετές βελτιώσεις έναντι των αρχικών σχεδίων τα οποία έχουν ενσωματωθεί στον ΕΑΚ2000.

Παράλληλα ετοιμάζεται και το πρότυπο prEN1998-4 «Ευρωκώδικας 8: Μελέτη κατασκευών για αντισεισμική θωράκιση. Μέρος 4: Σιλό, δεξαμενές και σωληνώσεις» [12]. Το πρότυπο αυτό ευρίσκεται ήδη στο 3<sup>ο</sup> Σχέδιο (Δεκέμβριος 2003) και αφορά εγκαταστάσεις οι οποίες είτε στηρίζονται απ' ευθείας επί των θεμελίων στο έδαφος, είτε εμμέσως μέσω ικριώματος ή άλλης σιδηροκατασκευής.

Στις ΗΠΑ ο βασικός κανονισμός αντισεισμικής θωράκισης δομικών κατασκευών και εγκαταστάσεων παρέχονται από τον κανονισμό FEMA 360 του Ομοσπονδιακού Γραφείου Διαχείρισης Εκτάκτων Αναγκών [13]. Ο κανονισμός αυτός κινείται στην ίδια κατεύθυνση με τους Ευρωκώδικες, αν και περιλαμβάνει απλουστευτικές διατάξεις οι οποίες διευκολύνουν πολύ τον μελετητή. Προσφάτως δημοσιεύτηκε ένα σχέδιο προτύπου το οποίο αφορά ειδικά την αντισεισμική θωράκιση σωληνώσεων το οποίο είναι προϊόν συνεργασίας μεταξύ του γραφείου FEMA και της ASCE (Αμερικάνικης Ένωσης Πολιτικών Μηχανικών) [14].

### **3 Μεθοδολογία ελέγχου συμβατικής καταπόνησης σε αξονικές τάσεις**

#### **3.1 Ανάλυση μόνιμων αξονικών καταπονήσεων και επιλογή απόστασης στηριγμάτων**

Οι μόνιμες αξονικές καταπονήσεις των σωληνώσεων οφείλονται απ' ενός μεν στην εσωτερική πίεση και απ' ετέρου στις ροπές κάμψεως που αναπτύσσονται κατά μήκος του σωλήνα λόγω του ίδιου βάρους (το βάρος του αερίου είναι αμελητέο).

$$\frac{pd_i}{4s} + i \frac{M}{W} \leq \sigma_K = \frac{\sigma_{\varepsilon\pi}}{S} \nu \quad (1)$$

όπου

- p : η εσωτερική πίεση (άνω της ατμοσφαιρικής) σε N/mm<sup>2</sup>
- d : η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα (mm)
- s : το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα (mm)
- M: η ροπή κάμψης του σωλήνα (σύνθως η μέγιστη) (N.mm)
- W: η ροπή αντιστάσεως της διατομής του σωλήνα (= 2J/h) (mm<sup>3</sup>)
- i : συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων, ο οποίος εξαρτάται από τον τρόπο συνδέσεως των επιμέρους εξαρτημάτων (1 ~ 3)
- σ<sub>K</sub> : επιτρεπόμενη τάση του κανονισμού (N/mm<sup>2</sup>)
- σ<sub>επ</sub> : η επιτρεπόμενη τάση αντοχής (N/mm<sup>2</sup>), η οποία καθορίζεται ανάλογα με την ψαθυρότητα του υλικού με βάση την τάση θραύσεως σ<sub>B</sub> ή την τάση διαρροής σ<sub>0,2</sub>. Επίσης καθορίζεται με βάση την θερμοκρασία
- S : Συντελεστής ασφαλείας (1,5 έως 1,7)
- ν : Συντελεστής απόδοσης της συγκολλησεως ραφής του σωλήνα (ν=1 χωρίς ραφή)

Βάσει του ανωτέρω τύπου υπολογίζεται η μέγιστη απόσταση μεταξύ στηριγμάτων για τις οριζόντιες σωληνώσεις ώστε :

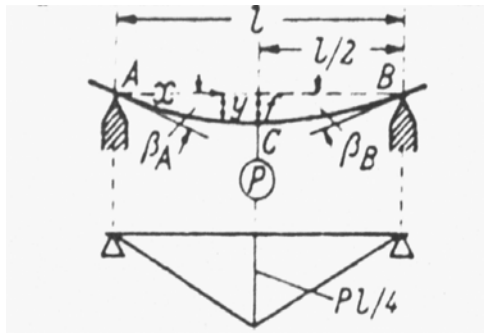
- α) Να διατηρείται ο σωλήνας στην θέση σχεδιασμού
- β) Να ελαχιστοποιείται το κρέμασμα της σωλήνας (βέλος κάμψεως)
- γ) Να διατηρούνται οι αξονικές τάσεις κάτω από την επιτρεπόμενη τάση του κανονισμού
- δ) Να διατηρείται η κλίση του σωλήνα (εφ' όσον απαιτείται)
- ε) Να στηρίζεται ο σωλήνας κατά την διάρκεια εργασιών συντήρησης.

Τα κριτήρια β και γ είναι εκείνα συνήθως που καθορίζουν τις οριζόντιες αποστάσεις των στηριγμάτων. Το βέλος κάμψεως ενός για τις διάφορες περιπτώσεις στηρίξεως του σωλήνα δίδεται με βάση την θεωρία της δοκού (πρβλ. για παράδειγμα [7, 15, 16 ή 17] . Στο σχήμα 1 δίδονται τα βέλη κάμψεως για διάφορους τύπους στηρίξεων και φορτίων.

Μία τυπική απόσταση στηριγμάτων δύναται να υπολογιστεί λαμβάνοντας μέγιστο βέλος κάμψεως ίσο με 2,5mm ή επιτρεπόμενη ανάπτυξη αξονικών τάσεων ίση με 15 N/mm<sup>2</sup> (= 15 MPa). Από τις εξισώσεις του Σχήματος 1 επιλύουμε ως προς το μήκος l με δεδομένο είτε το βέλος κάμψεως f ή την επιτρεπόμενη τάση σ<sub>K</sub>.

Η προτεινόμενες αποστάσεις στηριγμάτων του κανονισμού φ.α. έχουν υπολογιστεί με αυτές περίπου τις υποθέσεις. Οι προτεινόμενες αποστάσεις πρέπει να τροποποιούνται στις ακόλουθες περιπτώσεις [14] :

Σχήμα 1 : Βέλος κάμψεως και διάγραμμα καμπτικών ροπών [15]

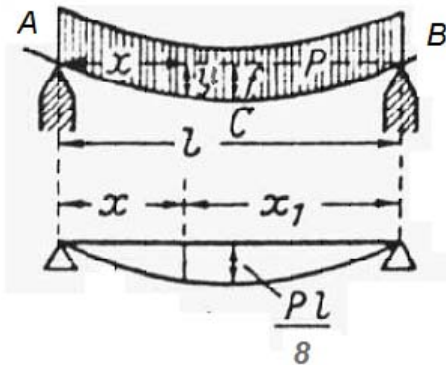


(α) Απλώς στηριζόμενη αμφιέριστη δοκός με φορτίο  $P$  στην μέση.

$$f = \frac{P l^3}{EJ 48}$$

ή συναρτήσει της επιτρεπόμενης τάσης :

$$f = \frac{1}{6} \frac{\sigma_K l^2}{E h}$$



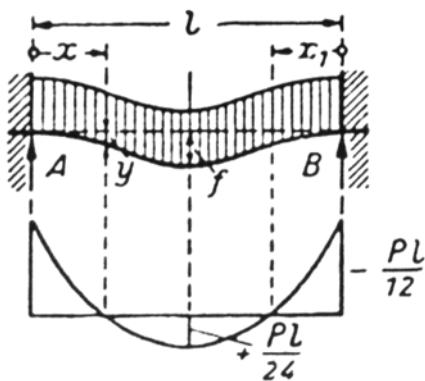
β) Απλώς στηριζόμενη αμφιέριστη δοκός με φορτίο συνεχές ομοιόμορφο φορτίο  $w$

$$w l = P$$

$$f = \frac{P 5l^3}{EJ 384}$$

ή συναρτήσει της επιτρεπόμενης τάσης :

$$f = \frac{5}{24} \frac{\sigma_K l^2}{E h}$$

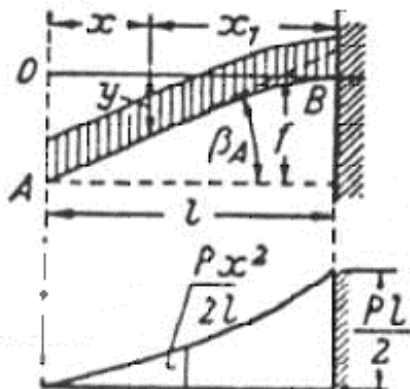


γ) Αμφίπακτη δοκός με συνεχές ομοιόμορφο φορτίο  $w$  όπου  $w l = P$

$$f = \frac{P l^3}{EJ 384}$$

ή συναρτήσει της επιτρεπόμενης τάσης :

$$f = \frac{1}{16} \frac{\sigma_K l^2}{E h}$$



δ) Πακτωμένη ράβδος με ελεύθερο άκρο (πρόβολος) με ομοιόμορφο συνεχές φορτίο  $w$

$$\text{όπου } w l = P$$

$$f = \frac{P l^3}{EJ 8}$$

ή συναρτήσει της επιτρεπόμενης τάσης:

$$f = \frac{1}{2} \frac{\sigma_K l^2}{E h}$$



- τοποθέτηση στηρίγματος δίπλα σε βαρύ εξοπλισμό (π.χ. ένας μειωτήρας πίεσεως)
- τοποθέτηση στηρίγματος πλησίον συνδέσεως με εξοπλισμό ή συσκευές, ώστε να επιτρέπεται η αποσυναρμολόγηση με σκοπό την συντήρηση
- τα στηρίγματα πρέπει να τοποθετούνται σε λογικές θέσεις για πρόσδεση με τα δομικά στοιχεία του κτιρίου
- νέα στηρίγματα θα πρέπει να εκμεταλλεύονται υφιστάμενα σημεία πρόσδεσης με δομικό χάλυβα ή σκυρόδεμα
- στήριξη κατακόρυφων σωλήνων για παραλαβή του βάρους και για εγκάρσια ευστάθεια.

### 3.2 Παραλαβή θερμικών διαστολών

Βασικό στοιχείο της μελέτης των δικτύων φυσικού αερίου είναι ο καθορισμός και ο έλεγχος του τρόπου παραλαβής των θερμικών διαστολών των σωληνώσεων σε περίπτωση πυρκαγιάς και ανάπτυξης θερμοκρασίας 650 °C. Η ανάλυση θερμικών διαστολών επιτυγχάνεται με την υποδιαίρεση του συνολικού μήκους του σωλήνα σε επιμέρους τμήματα τα οποία χωρίζονται με σταθερές στηρίξεις, δηλαδή στηρίξεις οι οποίες περιορίζουν την κίνηση και στους τρεις καρτεσιανούς άξονες (x, y ,z). Στην συνέχεια υπολογίζεται η διαστολή κάθε επιμέρους τμήματος και ελέγχεται ο τρόπος ανάπτυξης των διαστολών.

Χρησιμοποιώντας του συντελεστές θερμικής διαστολής του Πίνακα 1 που ακολουθεί, ο μελετητής μπορεί να εκτιμήσει την διαστολή  $dL$  ως εξής :

$$dL = \alpha L dT, \text{ όπου}$$

$dL$  = αλλαγή του μήκους

$\alpha$  = συντελεστής θερμικής διαστολής

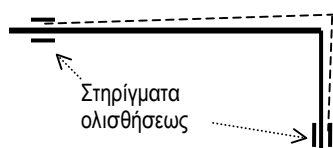
$L$  = αρχικό μήκος του σωλήνα σε συνθήκες περιβάλλοντος

$dT$  = Μεταβολή θερμοκρασίας, (=650 °C).

όπου ο συντελεστής  $\alpha$ , για μία μέση θερμοκρασία 260 °C ισούται με :

- 13,9. 10<sup>-6</sup> (1/°C) για τους χάλυβες χαμηλών προσμίξεων,
- 17,5. 10<sup>-6</sup> (1/°C) για ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα
- 16,5. 10<sup>-6</sup> (1/°C) για κράμα Cu-Ni (70/30)
- 20,5. 10<sup>-6</sup> (1/°C) για καθαρό χαλκό

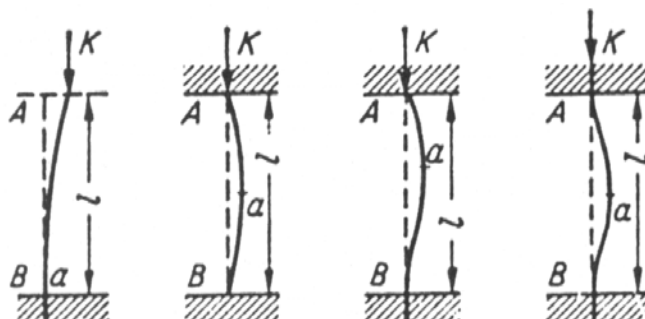
Για μία ευέλικτη παραλαβή των διαστολών, απαιτούνται πολλές μεταβολές κατεύθυνσης των επιμέρους τμημάτων σωληνώσεων με γωνία 90° και με ενδιάμεσες στηρίξεις οι οποίες επιτρέπουν την ελεύθερη ολίσθηση (στηρίξεις ολισθήσεως). Έτσι η διαστολή επιμέρους παραλαμβάνεται από τις παραμορφωμένες γωνίες προκαλώντας μία κάμψη στα γωνιακά τμήματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2 : Παραλαβή θερμικών διαστολών σε γωνιακά τμήματα

Σε περίπτωση μη δυνατότητας για κατασκευή διαδοχικών γωνιακών τμημάτων, τότε μεταξύ δύο σταθερών συνδέσεων θα πρέπει να ελέγχονται οι καταπονήσεις σε θλίψη και λυγισμό των επιμέρους τμημάτων. Τυπικές περιπτώσεις λυγισμού δίδονται στο σχήμα που ακολουθεί.

Σχήμα 3 : Τυπικές περιπτώσεις λυγισμού



Ο έλεγχος της θλίψεως θα πρέπει να γίνεται με βάση τις περιοριζόμενες θερμικές διαστολές  $\Delta l$  λόγω γεωμετρικών ή άλλων περιορισμών :

$$\sigma_{\theta\lambda\iota\psi\eta} = E \cdot \Delta l / l = E \alpha \cdot \Delta T \leq \sigma_{\epsilon\pi}$$

όπου  $\alpha$  ο συντελεστής θερμικής διαστολής και  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Η δύναμη που αναπτύσσεται κατά τον άξονα του σωλήνα θα είναι  $P = E \alpha \Delta T F$ . Για την αποφυγή του λυγισμού, η δύναμη αυτή θα πρέπει να είναι μικρότερη από την κρίσιμη δύναμη του λυγισμού η οποία υπολογίζεται με την εξίσωση του Euler :

$$P_k = \pi^2 EJ / (4l^2) \text{ (πρώτη περίπτωση του σχήματος 3 η οποία είναι η πλέον συντηρητική)}$$

Σημειώνεται ότι η  $\sigma_{\epsilon\pi}$  λαμβάνεται συνήθως εδώ ίση με την τάση διαρροής του υλικού στους  $650^\circ\text{C}$ , δηλαδή  $\sigma_{\epsilon\pi} = \sigma_{0,2/650^\circ\text{C}}$ . Η τάση αυτή είναι περίπου ίση με το 50% τις τάσεις διαρροής του ίδιου υλικού σε συνθήκες περιβάλλοντος:  $\sigma_{\epsilon\pi} = \sigma_{0,2/650^\circ\text{C}} \sim 0,4 \sigma_{0,2}$

## 4 Μεθοδολογία υπολογισμού σεισμικών και κρουστικών δράσεων

### 4.1 Η μεθοδολογία του ΕΑΚ 2000 – prEN 1998-1

Σε όλα τα προσαρτήματα του κτιρίου, η ισοδύναμη σεισμική οριζόντια δύναμη υπολογίζεται ως εξής :

$$F_p = \varepsilon W_p \gamma_p / q_p \quad (2)$$

με 
$$\varepsilon = \alpha \cdot \beta \cdot (1 + z / H) \quad (3)$$

με 
$$\beta = \frac{2}{1 + (1 - T_x / T)^2} \geq 1 \quad (4)$$

όπου :

$\alpha$  : ο συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης ο οποίος λαμβάνεται 0,16 για την ζώνη I, 0,24 για την ζώνη II και 0,36 για την ζώνη III

$T_p$  : η ιδιοπερίοδος του προσαρτήματος για πλήρη πάκτωση στο στηρίζον υπόβαθρο, η οποία υπολογίζεται από την θεμελιώδη αρμονική ταλάντωση του προσαρτήματος



- T: η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του κτιρίου για την οποία δίδονται αναλυτικές εξισώσεις υπολογισμού για κάθε τύπου κτιρίου στο πρότυπο prEN 1998-1 ενώ μια απλοϊκή μορφή δίδεται στον ΕΑΚ 2000.
- z η στάθμη (ύψος) στήριξης του προσαρτήματος
- H το ύψος του κτιρίου
- $W_p$  το βάρος του προσαρτήματος
- $\gamma_p$  συντελεστής σπουδαιότητας του προσαρτήματος ο οποίος λαμβάνεται εδώ ίσος με 1,5 επειδή αφορά εύφλεκτες ουσίες
- $q_p$  μειωτικός συντελεστής του προσαρτήματος ο οποίος λαμβάνεται εδώ ίσος με 1, λόγω επικινδυνότητας

Στο νέο σχέδιο προτύπου prEN 1998-1, ο συντελεστής  $\varepsilon$  τροποποιείται ως εξής:

$$\varepsilon = \alpha \cdot S \cdot [3(1 + z/H) / (1 + (1 - T_p/T)^2) - 0,5] \quad (5)$$

όπου  $S$  είναι ένας νέος παράγοντας εδάφους ο οποίος λαμβάνεται ίσος από 1 έως 1,8 ανάλογα με τον τύπο του εδάφους.

Σε περίπτωση όπου  $T_p = T$ , δηλαδή όταν η ιδιοπερίοδος της ταλάντωσης του προσαρτήματος συμπίπτει με εκείνη του κτιρίου, τότε ο παράγοντας  $\cdot [3(1 + z/H) / (1 + (1 - T_p/T)^2) - 0,5]$  λαμβάνει μέγιστη τιμή :

$$\varepsilon_{\max} = S [6 (1 + z/H) - 0,5] \quad (6)$$

Π.χ. για μία σωλήνα αερίου επί εδάφους ( $z=0$ ) και για ζώνη σεισμικότητας II και συντελεστή εδάφους  $S=1$ , τότε η σεισμική δύναμη υπολογίζεται κατά μέγιστο ίση με  $1,98W_p \sim 2W_p$ .

Με άλλα λόγια η οριζόντια επιτάχυνση υπολογίζεται περίπου ίση με  $2g$ , όπου  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας.

## 4.2 Αντισεισμικός σχεδιασμός στηριγμάτων

### Εγκάρσια ιδιομορφή

Με βάση την ανωτέρω ανάλυση, το θέμα του υπολογισμού της απόστασης των στηριγμάτων επανατοποθετείται με βάση την συνισταμένη επιτάχυνση της κατακόρυφης βαρύτητας  $g$  και της οριζόντιας επιτάχυνσης, π.χ.  $2g$ . Η συνισταμένη επιτάχυνση θα έχει μέτρο  $(1^2 + 2^2)^{0,5}$  δηλαδή ίσο με  $2,24g$ .

Για τον ορισμό της μέγιστης απόστασης των στηριγμάτων, εφαρμόζονται πάλι τα κριτήρια  $\beta$  και  $\gamma$  της παραγράφου 3.1. Ως κριτήρια αντισεισμικής θωράκισης λαμβάνονται :

- μέγιστο βέλος κάμψης : 50 mm, ώστε να μην προσκρούει ο σωλήνας σε παρακείμενους τοίχους ή δομικά στοιχεία κατά την διάρκεια της σεισμικής ταλάντωσης
- Επιτρεπόμενη αντοχή σε κάμψη ίση με το 50% του ορίου διαρροής του υλικού του σωλήνα.

Με τα κριτήρια αυτά διασφαλίζεται η λειτουργία των σωληνώσεων ακόμα και μετά την παρέλευση του σεισμού μια και όλες οι παραμορφώσεις θα γίνονται στην ελαστική περιοχή

του υλικού του σωλήνα. Εναλλακτικά θα μπορούσαν να τεθούν άλλες τιμές στο επιτρεπόμενο βέλος κάμψεως και την αντοχή σε κάμψη.

Σε κάθε περίπτωση ο υπολογισμός των σεισμικών δυνάμεων θα πρέπει να γίνει και για τα ακύρια των στηριγμάτων. Συγκεκριμένα βάσει του υπολογισμού της ισοδύναμης σεισμικής επιτάχυνσης, υπολογίζονται οι ασκούμενες οριζόντιες αξονικές και διατμητικές τάσεις επί του κορμού των αγκυρίων.

#### Αξονική ιδιομορφή

Εφ' όσον η πρώτη οριζόντια σεισμική δράση κινείται κατά τον εγκάρσιο άξονα (έστω άξονας y) τότε η ετέρα σεισμική δράση θα κινείται προς το διαμήκη άξονα (x). Σε αυτή την περίπτωση θα ασκείται μία οριζόντια δύναμη  $2W$  στα σταθερά στηρίγματα του σωλήνα. Η ίδια αυτή η δύναμη θα πρέπει να παραληφθεί από τα ακύρια των αντίστοιχων σταθερών στηριγμάτων που επηρεάζονται από την ταλάντωση αυτή.

### 4.3 Κρουστικές επιδράσεις

Σε αρκετές περιπτώσεις και ιδιαίτερα στην περίπτωση των παλαιότερων κτισμάτων, είναι δυνατόν να εξεταστεί το κατά πόσο είναι δυνατόν να υπάρξει πτώση αντικειμένου, κρούση ή άλλη κρουστική καταπόνηση επί των σωληνώσεων φυσικού αερίου. Εφ' όσον αποφασιστεί ότι αυτού του είδους η «τυχηματική» δράση είναι πιθανή, τότε ο μελετητής θα πρέπει να υπολογίσει την δύναμη που ασκηθεί επί του σωλήνα καθώς και την αντίστοιχη μετατόπιση ή βέλος κάμψεως. Η εμπειρία από σεισμούς υποδεικνύει ότι οι ψευδοροφές, ο αναρτημένος από την οροφή εξοπλισμός (π.χ. φωτιστικά) και εσωτερική τοιχοποιία ή χωρίσματα, συχνά αποτελούν πηγές πτώσεως αντικειμένων.

Όταν ένα σώμα βάρους  $W$  πέφτει από ύψος  $h$  και προσκρούει σε ένα βάρος-στόχο  $W_b$  με ακαμψία  $k$ , η δύναμη κρούσης και η απόκλιση μπορεί να υπολογιστούν από τα θεωρήματα διατήρησης ενέργειας :

$$P = W + W_b + \sqrt{W_b^2 + 2W(W_b + kh)} \quad (7)$$

$$d = W_{st} + \sqrt{d_{st}^2 + 2h(d_{st} - d_s) - d_s^2} \quad (8)$$

όπου :

$P$  η δύναμη πρόσκρουσης

$d$  η μέγιστη μετατόπιση κατά την πρόσκρουση

$d_s$  η στατική μετατόπιση από το ίδιο βάρος

$d_{st}$  η αθροιστική στατική μετατόπιση λόγω των βαρών  $W$  και  $W_b$

Η δύναμη  $P$  εκτιμάται ανωτέρω κατά τρόπο συντηρητικό διότι δεν λαμβάνεται υπόψιν η αναπήδηση, η μόνιμη πλαστική παραμόρφωση του σωλήνα ή οι απώλειες θερμότητας. Η ακαμψία  $k$  μπορεί να εκτιμηθεί από την θεωρία των δοκών ως εξής :

- Πακτωμένος πρόβολος μήκους  $L$ , με φορτίο στο ελεύθερο άκρο :  $3EJ/L^3$

- Δοκός με σταθερές στηρίξεις και φορτίο σε αποστάσεις  $a$  και  $\beta$  από τις στηρίξεις :  $3EIL^3/(a^3b^3)$

- Δοκός με απλές στηρίξεις και φορτίο σε αποστάσεις  $a$  και  $\beta$  από τις στηρίξεις :  $3EIL/(a^2b^2)$

## 5 Συνδυασμός καταπονήσεων – έλεγχος αντοχής

Ο συνδυασμός των φορτίων των συμβατικών καταπονήσεων θα με τις σεισμικές-κρουστικές ή τυχηματικές καταπονήσεις πρέπει να γίνεται βάσει του ΕΑΚ 2000. Συνοπτικά σε κάθε Προσάρτημα του κτηρίου  $k$ , οι συνολική δράση  $S_k$  που συνδυάζει όλες τις υπόλοιπες καταπονήσεις σε περίπτωση σεισμικών φορτίων είναι :

$$S_k = G_k + E_k + \sum \psi_2 Q_{k,I} \quad (9)$$

όπου  $G_k$  το ίδιο βάρος του προσαρτήματος

$E_k$  η κύρια σεισμική δράση (π.χ. κατά τον οριζόντιο άξονα  $\chi$ )

$Q_{k,i}$  άλλες τυχηματικές δράσεις (π.χ. κρουστικές δράσεις)

$\psi_2$  συντελεστής συνδυασμού δράσης (0,3 για τα κτίρια)

ή πιο λεπτομερώς :

$$S_k = G_k \pm E_{k,x} \pm 0,3E_{k,y} + \sum 0,3Q_{k,I} \quad (10)$$

Στην εξίσωση 10 οι δύο σεισμικές δράσεις κατά τον άξονα  $\chi$  και  $y$  αντίστοιχα αντιμετωπίζονται ως τυχηματικές, δηλαδή δεν προστίθενται ταυτοχρόνως με ίση βαρύτητα, αλλά η μία πάντα λαμβάνει συντελεστή συνδυασμού δράσης. Συνεπώς η εξίσωση 10 θα μπορούσε και να γραφεί ως :

$$S_k = G_k \pm 0,3 E_{k,x} \pm E_{k,y} + \sum 0,3Q_{k,I} \quad (11)$$

## 6 Συμπεράσματα

Οι σωληνώσεις αερίων καυσίμων υπάγονται σε ένα πλήθος διεθνών κανόνων και κανονισμών ως προς την κατασκευαστική τους επάρκεια και ακεραιότητα, συμπεριλαμβανομένης και της αντισεισμικής θωράκισης.

Στην παρούσα ανάλυση παρουσιάστηκαν οι κυριότερες δράσεις που επηρεάζουν την κατασκευαστική ακεραιότητα των σωληνώσεων και διατυπώθηκαν απλουστευμένες συντηρητικές εκδράσεις για την εκτίμηση των δράσεων αυτών. Επίσης παρουσιάστηκαν οι βασικές τεχνικές μέσω των οποίων είναι δυνατόν να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα κάτω από διαφορετικούς συνδυασμούς δράσεων. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στον σχεδιασμό και επιλογή των στηριγμάτων των σωληνώσεων (αποστάσεις, τύπος στηρίξεων, έλεγχος αγκυρώσεων).

Οι τεχνικές αυτές πρέπει πάντα να εφαρμόζονται με προσοχή, λαμβάνοντας κάθε φορά τα πραγματικά δεδομένα της κατασκευής. Σε συνδυασμό με την τήρηση των υφιστάμενων κανονισμών [1,2] και την σωστή σχεδίαση των προστατευτικών διατάξεων και ασφαλειών του δικτύου, η κατασκευαστική επάρκεια των δικτύων σωληνώσεων αποτελεί σημαντικό στοιχείο στην συνολική ασφάλεια των εγκαταστάσεων φυσικού αερίου.

## 7 Αναφορές

1. ΚΥΑ Αριθ. Δ3/Α/11346 «Κανονισμός εσωτερικών εγκαταστάσεων φυσικού αερίου με πίεση λειτουργίας έως και 1 bar», Ιούλιος 2003.
2. ΚΥΑ Αριθ. Δ3/Α/5286, «Κανονισμός εγκαταστάσεων φυσικού αερίου με πίεση λειτουργίας άνω των 50mbar και μέγιστη πίεση λειτουργίας 16 bar», Μάρτιος 1997
3. Απ. Ευθυμιάδης, «Ασφάλεια εγκαταστάσεων φυσικού αερίου», Δελτίο Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, Δεκέμβριος 2004 (προς δημοσίευση)

4. Improving Natural Gas Safety in Earthquakes, Prepared by:ASCE-25 Task Committee On Earthquake, Safety Issues For Gas Systems Adopted July 11, 2002
5. DIN Taschenbuch 15, Normen fur Stahlrohrleitungen, Beuth, 1976
6. Κ.Χ. Λέφας, Β.Η Σελλούντος, «Εισαγωγή στην τεχνολογία του φυσικού αερίου», ΣΕΛΚΑ-4Μ ΤΕΧΛΟΤΙΚΗ, 4η Εκδοση 2004
7. Κ.Χ. Λέφας, Παραδόσεις Κατασκευαστικής Μηχανολογίας, Τόμος Ι, Πάτρα 1978
8. Κ.Χ. Λέφας, «Θερμικά δίκτυα και κυκλώματα», Παραδόσεις στο Πανεπιστήμιο Πατρών, Τόμος Ι, Πάτρα 1981
9. Υπ. Απόφαση : Εγκριση Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού ΕΑΚ-έκδοση 2000, Αριθ. Δ 17α/141/3/ΦΝ 275, Φ.Ε.Κ. 2184 Β'/ 20-12-1999.
10. CEN PrEN1998-1 «Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings», Draft No 6, January 2003
11. CEN prEN1990—Eurocode: Basis of structural Design-Stage 34, April 2001, CEN 2001.
12. CEN PrEN1998-4 «Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 4: Silos, tanks and pipelines », Draft No 2, December 2003
13. NEHRP Recommended Provisions, for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, 2000 Edition, (FEMA 368), Prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, D.C., 2001
14. AmericanLifelinesAlliance - a public-private partnership between the Federal Emergency Management Agency (FEMA) and the American Society of Civil Engineers (ASCE), “Seismic Design and Retrofit of Piping Systems”, July 2002,
15. HUTTE, Des Ingenieurs Taschenbuch, 28 Auflage, Verlag Von Wilhelm Ernst&Sohn, Berlin 1955.
16. Μ. Κ. Κωβαίος, «Αντοχή των υλικών», Αθήνα, 1964
17. S. P. Timoshenko και D.H.Young, «Αντοχή των υλικών», Πέμπτη έκδοσης, Εκδόσεις Καραβία, Αθήνα 1969
18. The Copper Tube Handbook, Copper Development Association Inc., 260 Madison Avenue, New York, NY 10016, Published 2004
19. Talos Gas, “Εσωτερικές εγκαταστάσεις φυσικού αερίου: Το εγχειρίδιο του υδραυλικού σύμφωνα με τον νέο κανονισμό ΦΕΚ 963/Μάρτιος 2003, Τεύχος Β»,
20. Recknagel-Sprenger, Θέρμανση και Κλιματισμός, Τόμος 1 : Θέρμανση, 59<sup>η</sup> Εκδοση, Εκδότης Μ. Γκιούρδας, Αθήνα 1989.