

### 3. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΙ

Οι βιομηχανικές καπνοδόχοι αποτελούν έναν από τους συνηθέστερους και γνωστότερους τύπους κατασκευών σε ένα βιομηχανικό συγκρότημα και στη βιομηχανία γενικότερα. Οι συγκεκριμένες οδηγίες αφορούν την αντισεισμική μελέτη τους. Από λειτουργική άποψη η σπουδαιότητα μιας βιομηχανικής καπνοδόχου θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τυχόν 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. Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη πως 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



**Εικόνα 3.1:** Βιομηχανική καπνοδόχος ύψους 60 μέτρων.

#### 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 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 εκφεύγει του σκοπού των οδηγιών μελέτης για τον αντισεισμικό σχεδιασμό 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.).

## ΕΙΔΙΚΩΤΕΡΕΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

### Φάσμα σχεδιασμού

Για την χρησιμοποίηση του φάσματος σχεδιασμού προς καθορισμό των σεισμικών δυνάμεων σε βιομηχανικές καπνοδόχους, 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 οδηγή σε σημαντικά μειωμένες σεισμικές δυνάμεις. Γι' αυτό συνιστάται ο προσδιορισμός της  $T$  μέσω μιας αρχικής δυναμικής ανάλυσης. Επίσης χρειάζεται ιδιαίτερη μέριμνα 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%.

### 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 :

1. Για καπνοδόχους από σκυρόδεμα μπορεί να λάβει τιμή 3 εφόσον έχουν εξασφαλισθεί αυστηρές προϋποθέσεις πλαστικής (όλκιμης) συμπεριφοράς, άλλως λαμβάνεται τιμή 1.0.
2. Για ολόσωμες καπνοδόχους από χάλυβα η τιμή φθάνει 2 εφόσον ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις πλαστικής ανάλυσης του Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1. Αλλως λαμβάνεται τιμή 1.0.
3. 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 αξιοπίστου 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.

### Συντελεστής σπουδαιότητας

Η σπουδαιότητα μιας Β.Κ. από άποψη πιθανής κατάρρευσης, και όχι κατ' ανάγκην 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.

Για παράδειγμα, εάν 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  $\gamma=1$ .

## ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ

### Αγκύρωση στη θεμελίωση

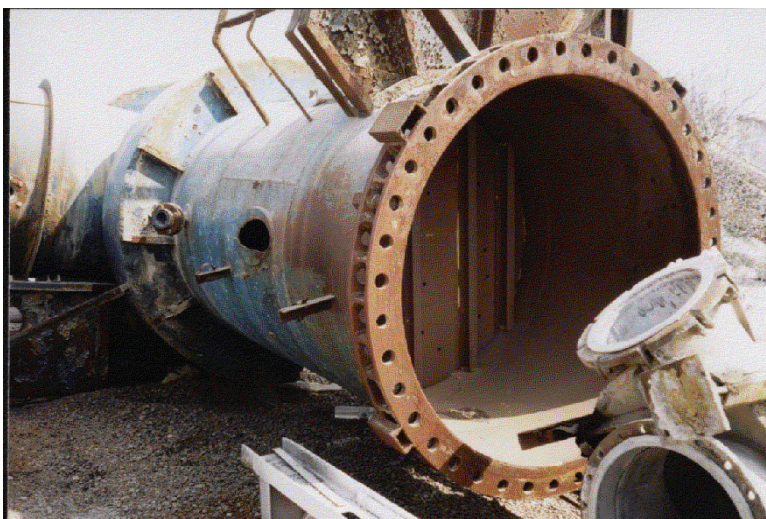
Η σύνδεση της καπνοδόχου με το θεμέλιό της από οπλισμένο σκυρόδεμα, καταπονείται συνήθως από σημαντικές ροπές, ιδίως για μεγάλα ύψη. Σε καπνοδόχους από οπλισμένο σκυρόδεμα όπου υπάρχει μονολιθική σύνδεση με το θεμέλιο, το ζήτημα πρέπει να αντιμετωπίζεται με επαρκείς διατομές και οπλισμούς. Σε καπνοδόχους 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.

### 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 3.2:** Θεμελίωση βιομηχανικής καπνοδόχου ύψους 60 μέτρων



**Εικόνα 3.3:** Φλαντζωτή σύνδεση βιομηχανικής καπνοδόχου.

### **Μονόπλευρες φλαντζωτές συνδέσεις με προεντεταμενους κοχλίες υψηλής αντοχής**

Οι συνδέσεις του τύπου αυτού (εικόνα 3.3) 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. 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 (**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.

#### Ανάλυση της Φλαντζωτής Σύνδεσης

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

- Με την ελαστική μέθοδο ( ή ελαστο-στατική θεωρία ).
- Με την πλαστική μέθοδο ( ή πλαστο-στατική θεωρία ).
- 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 φλάντζες, και στον έλεγχο του κοχλίου και των φλαντζών.

Οι έλεγχοι που πρέπει να γίνουν είναι :

- Έλεγχος αντοχής του κοχλίου για τη μέγιστη δύναμη εφελκυσμού που αναλαμβάνει (προένταση και ποσοστό της εξωτερικής).
- Έλεγχος του κοχλίου 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 κοχλίου 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.

## Σεισμικά Φορτία Έναντι Φορτίων Ανέμου

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  $\sigma_{xd}$ . Η εκτενής παρουσίαση των αναλύσεων των εν λόγω καπνοδόχων παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 7.5 της εκτενούς Τελικής Τεχνικής Έκθεσης. Το βασικό συμπέρασμα είναι πως για περιοχές μεγάλης σεισμικότητας (ζώνη III ή IV) 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.