



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ (ADERS)

"Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Συμπεριφορά, Ανάλυση και Διαστασιολόγηση  
Μεταλλικών Καπνοδόχων

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΧΡ. ΑΝΔΡΕΟΥ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός και Μηχανικός Περιβάλλοντος

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ**  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## **Συμπεριφορά, Ανάλυση και Διαστασιολόγηση Μεταλλικών Καπνοδόχων**

**Μεταπτυχιακή Εργασία**  
**του Ανδρέου Παναγιώτη**

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

### **Περίληψη**

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η συμπεριφορά, η ανάλυση καθώς και η διαδικασία διαστασιολόγησης μεταλλικών καπνοδόχων με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων. Μέσω των καπνοδόχων μεταβιβάζονται καυσαέρια σε ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, τα οποία προέρχονται κυρίως από λέβητες βιομηχανιών. Είναι συνήθως κυλινδρικού σχήματος και με ύψος που ξεπερνά τα 40 m. Γενικά, λόγω των διαστάσεων τους μπορούν να χαρακτηριστούν ως εύκαμπτες κατασκευές και επομένως είναι επιρρεπείς στη ροή του ανέμου. Λόγω της ροής του ανέμου οι καπνοδόχοι επηρεάζονται, συν τοις άλλοις, από στροβιλώδη διέγερση, οπότε η περιοδική διάχυση των δινών επιφέρει στη καπνοδόχο ταλαντώσεις εγκάρσια στη ροή του ανέμου.

Η όλη εργασία απαρτίζεται από δέκα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή για τη χρήση, τα υλικά κατασκευής, τις μεθοδολογίες σχεδιασμού καπνοδόχων, αλλά και για τα σημαντικά γεγονότα που ήταν καθοριστικά για τη διάθρωση και σύνταξη των σημερινών κανονιστικών κειμένων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο ρόλος των καπνοδόχων για το περιβάλλον. Γίνεται αναφορά στο πως η γεωμετρία, οι συνθήκες λειτουργίας της καπνοδόχου αλλά και η κατάσταση της ατμόσφαιρας επηρεάζουν τη διασπορά των ρύπων που εξάγονται από την καπνοδόχο.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον τρόπο σχεδιασμού και κατασκευής των θεμελιώσεων αυτοϊσορροπούμενων καπνοδόχων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία υπολογισμού της πίεσης αλλά και της συνολικής δύναμης λόγω της ροής του ανέμου στην καπνοδόχο. Οι υπολογισμοί γίνονται με βάση το EN1991-1-4. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κριτήρια και η μεθοδολογία ελέγχου της καπνοδόχου έναντι στροβιλώδους

διέγερσης. Στην αρχή του κεφαλαίου παρατίθεται το γνωστικό υπόβαθρο για την κατανόηση της συμπεριφοράς των καπνοδόχων υπό τη δράση του ανέμου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία ανάλυση της καπνοδόχου υπό σεισμικά φορτία με βάση το EN1998-1.

Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται οι διατάξεις του EN1991-1-5 για τον υπολογισμό των θερμικών δράσεων.

Το έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις πρόνοιες του EN1993-1-6 σχετικά με την αντοχή και ευστάθεια των κελυφών. Περιγράφονται οι δυνατές μέθοδοι ανάλυσης και σχεδιασμού κελυφών. Επίσης παρουσιάζονται οι απαιτούμενοι έλεγχοι για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας, ήτοι Πλαστική Αστοχία (LS1), Πλαστικότητα σε Ανακύλιση (LS2), Λυγισμός (LS3) και Κόπωση (LS4). Επίσης, αναφέρεται και ο έλεγχος έναντι λειτουργικότητας.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διατάξεις του EN1993-3.2 σχετικά με το σχεδιασμό των μεταλλικών καπνοδόχων. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τις μεθόδους μείωσης του μέγιστου εύρους ταλάντωσης εγκάρσια στη ροή του ανέμου, λόγω στροβιλώδους διέγερσης. Οι μέθοδοι αφορούν την χρήση αεροδυναμικών συσκευών ή αποσβεστήρων.

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής. Το παράδειγμα αφορά την ανάλυση και διαστασιολόγηση της μεταλλικής καπνοδόχου που θα κατασκευαστεί στα πλαίσια επέκτασης του ηλεκτροπαραγωγού σταθμού στη Σύρο. Η καπνοδόχος είναι κυλινδρικού σχήματος με σταθερή εξωτερική διάμετρο 3.753 m και ύψος 60 m. Το πάχος του κελύφους της καπνοδόχου μεταβάλλεται καθ' ύψος. Υπολογίζονται αναλυτικά όλα τα φορτία που επιβάλλονται στην κατασκευή, τουτέστιν ίδια βάρη, φορτία ανέμου (πίεσεις ανέμου και δυνάμεις λόγω στροβιλώδους διέγερσης), σεισμικές και θερμικές δράσεις. Γίνεται προσομοίωση της καπνοδόχου στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Για τους σκοπούς της ανάλυσης αναπτύσσονται δύο στατικά προσομοιώματα: ένα με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων κελύφους και το άλλο με τη χρήση ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων. Γίνεται έλεγχος για τις τέσσερις οριακές καταστάσεις αστοχίας (LS1, LS2, LS3 και LS4) όπως και έλεγχος για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας με βάση το EN1993-1-6. Για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας αναπτύσσονται όλες οι δυνατές μέθοδοι ελέγχου, ήτοι έλεγχος με βάση τη μεμβρανική θεωρία μέσω των αναλυτικών σχέσεων του Παραρτήματος Α και Β του EN1993-1-6 αλλά και μέσω αριθμητικών μη γραμμικών αναλύσεων. Σε κάθε έλεγχο οριακής κατάστασης αστοχίας παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από όλες τις μεθόδους ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης, οι έλεγχοι πραγματοποιούνται και με τα δύο στατικά προσομοιώματα του αναπτύχθηκαν. Στα πλαίσια της οριακής κατάστασης αστοχίας LS4, μελετάται η μείωση του μέγιστου εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης μέσω αεροδυναμικών συσκευών αλλά και με τη χρήση αποσβεστήρα.

Τέλος, στο δέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά, ανάλυση και διαστασιολόγηση μεταλλικών καπνοδόχων, όπως προέκυψαν από την παρούσα εργασία. Επίσης, παρατίθενται προτάσεις για θέματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης και μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο για μελλοντικές μελέτες.



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS**  
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**DIVISION OF STRUCTURAL ENGINEERING**  
Laboratory of Steel Structures

## **Behaviour, Analysis and Design of Steel Chimneys**

**Master's Thesis  
of Panayiotis Andreou**

Supervisor: Charis J. Gantes, Associate Professor N.T.U.A.

### **Abstract**

In this master's thesis the behaviour, analysis and design of steel chimneys is studied, using the final version of Eurocodes. Gases are passed through the chimney in the upper level of the atmosphere, mainly originating from industrial boilers. They are usually cylindrical, with height exceeding 40 m. In general, due to their dimensions, they are considered to be flexible constructions and as such they are prone to wind flow. Because of wind flow, the chimneys are also affected by vortex shedding. Then, the periodic alternately shedding of vortices leads to chimneys' oscillations transverse to the wind flow.

This work consists of ten chapters. The first chapter is a flashback to the chimneys' usage, construction materials, design methodologies and other important events that have contributed to the development of the current regulatory documents.

The second chapter presents the role of the chimneys to the environment. Reference is made to how geometry, operating conditions of the chimney and the state of the atmosphere affect the dispersal of pollutants exported from the chimney.

The third chapter refers to the design and construction methodologies of foundations of self-supported chimneys.

The fourth chapter presents the methodology for calculating the pressure and the total force acting to the chimney due to wind flow. The calculations are made according to EN1991-1-4. In the same section, the criteria and the methodology for the check of the chimney against vortex shedding are presented. In the

beginning of the chapter the background for understanding the behavior of chimneys under wind flow is cited.

The fifth chapter describes the process of analyzing the chimney under seismic loads, based on the EN1998-1.

In the sixth chapter the provisions of EN1991-1-5 for the calculation of thermal actions are provided.

The seventh chapter includes the provisions of EN1993-1-6 regarding the strength and stability of shells. It describes all possible methods of analysis and design of shells. It also presents the required checks for pertinent limit states: Plastic limit state (LS1), Cyclic plasticity limit state (LS2), Buckling limit state (LS3), Fatigue limit state (LS4) and also the serviceability limit state.

The eighth chapter presents the provisions of EN1993-3.2 on the design of steel chimneys. Also, information on methods of reducing the cross wind amplitude due to vortex shedding is provided. The methods concern the use of aerodynamic devices or dampers.

The ninth chapter presents an example of steel chimney. The example concerns the analysis and design of a steel chimney to be built in the framework of extension of the power station in the Greek island of Syros. The chimney is cylindrical with a constant outer diameter 3.753 m and height 60 m. The thickness of the chimney's shell is being reduced according to height. In this chapter all the loads imposed on the structure, i.e., self weight, wind loads (wind pressures and forces due to vortex shedding), seismic and thermal effects, are being calculated analytically. The chimney is modeled by using the finite elements software ADINA. For the purposes of the analysis two models are developed; model 1 by using shell finite elements; model 2 by using beam elements. Checks are performed for the four ultimate limit states (LS1, LS2, LS3 and LS4) as well as for the serviceability limit state. For every limit state all possible check methods are being developed, i.e., check based on membrane theory through the analytical functions of the Annex to EN1993-1-6, as well as with numerical non linear analyses. For each analysis there is presentation and discussion of the results produced from every applied method. Additionally, the checks are carried out for both model 1 and model 2. At the ultimate limit state LS4 the reduction of the maximum width and model of transverse oscillation is being examined through aerodynamic devices and with the use of a damper.

Finally, the tenth chapter presents general conclusions about the behaviour, analysis and design of steel chimneys, as they have emerged from the present study. Furthermore, it proposes ad hoc suggestions for future studies on issues that need further investigation.