



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΠΝΟΔΟΧΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΛΥΓΙΣΜΟΥ



Διπλωματική Εργασία
Ειρήνη Νικολούδη

ΕΜΚ ΔΕ 2015 36

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπων: Κωνσταντίνος Καλοχαιρέτης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
School of Civil Engineering
Institute of Steel Structures

DESIGN OF STEEL INDUSTRIAL CHIMNEYS AGAINST BUCKLING



**Diploma Thesis of
Irimi Nikoloudi**

EMK ΔΕ 2015 36

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor of N.T.U.A.
Co-supervisor: Konstantinos Kalochairetis, Dr. Civil Engineer

Athens, October 2015

Copyright © Ειρήνη Νικολούδη, 2015
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Irini Nikoloudi, 2015
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Ειρήνη Νικολούδη (2015)

Σχεδιασμός Μεταλλικών Βιομηχανικών Καπνοδόχων Έναντι Λυγισμού
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2015 36
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Irini Nikoloudi (2015)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2015 36
Design of Steel Industrial Chimneys Against Buckling
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Με την παρούσα εργασία κλείνει ο πενταετής, γεμάτος εμπειρίες και γνώσεις, κύκλος σπουδών μου στο Ε.Μ.Π.. Νιώθω την ανάγκη λοιπόν να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου σε όλη αυτήν την πορεία, μέχρι και το τέλος: την οικογένειά μου, τους φίλους μου, τους καθηγητές μου. Ο επιβλέπων της διπλωματικής μου εργασίας, ο κ. Χάρης Γαντές, ήταν ο καθηγητής και κυρίως ο άνθρωπος που με ενέπνευσε ώστε να επιλέξω την κατεύθυνση των μεταλλικών κατασκευών. Η γνώση, η εμπειρία και η άριστη επικοινωνία του στάθηκαν αρωγός για τη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας και τον ευχαριστώ θερμά για αυτό.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον Κωνσταντίνο Καλοχαιρέτη, διδάκτορα του Ε.Μ.Π., ο οποίος με την αμεσότητα του χαρακτήρα του και τις πολύτιμες συμβουλές του βοήθησε στην επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας μου. Οι ουσιαστικές παρεμβάσεις του και η ευθύτητα της σκέψης του καθόρισαν την τελική της μορφή και επέκτειναν τους πνευματικούς μου ορίζοντες.

Ευχαριστώ ακόμα τον κ. Παύλο Θανόπουλο και τον κ. Τάσο Αβραάμ για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, είμαι ευγνώμων για την αμέριστη συμπαράσταση της οικογένειάς μου, καθώς και των φίλων μου. Η στήριξη, οι συμβουλές και η παρότρυνσή τους βοήθησαν στις επιλογές μου και μου έδωσαν δύναμη να συνεχίσω.

Ειρήνη Νικολούδη

Οκτώβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2015 36

Σχεδιασμός Μεταλλικών Βιομηχανικών Καπνοδόχων Έναντι Λυγισμού

Ειρήνη Νικολούδη

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπων: Κωνσταντίνος Καλοχαιρέτης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάλυση και ο σχεδιασμός των λεπτότοιχων κατασκευών ξεκίνησε ήδη από τις αρχές του εικοστού αιώνα, όταν προέκυψε η ανάγκη για σχεδιασμό αεροσκαφών, διαστημοπλοίων, ρουκετών, υποβρυχίων και άλλων συναφών κατασκευών. Η σημαντική διαφοροποίηση αυτών των κατασκευών σε σχέση με άλλες γρήγορα έγινε αισθητή, καθώς παρατηρήθηκε ότι ήταν ιδιαίτερα ευαίσθητες σε γεωμετρικές ατέλειες, τοπικό λυγισμό και πλαστικοποιήσεις.

Αρχικά, το ζήτημα του λυγισμού λεπτότοιχων κελυφών αντιμετωπίστηκε κάνοντας χρήση αναλυτικών μεθόδων σε σχετικά απλές εφαρμογές, όπως αυτήν της απλής αξονικής συμπίεσης. Ανάμεσα στους πρώτους ερευνητές που ασχολήθηκαν με το θέμα αυτό ήταν ο Timoshenko, ο Southwell και ο Lorenz, οι οποίοι καθιέρωσαν αναλυτικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται ευρέως ακόμα και σήμερα στους σύγχρονους κανονισμούς. Στις επόμενες δεκαετίες, πραγματοποιήθηκαν πολυάριθμα πειράματα, τα αποτελέσματα των οποίων σήμαναν τα μειονεκτήματα που προέκυπταν από τις υποθέσεις των αναλυτικών μεθόδων. Πρόσφατα, η σημαντική εξέλιξη των υπολογιστών και η ανάπτυξη της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού κατέστησαν δυνατή τη χρήση πιο ανεπτυγμένων αριθμητικών διαδικασιών.

Στην παρούσα εργασία, μελετάται μία βιομηχανική μεταλλική καπνοδόχος μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η καπνοδόχος έχει τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά: ύψος 60m, διάμετρος 7m και σταθερό πάχος τοιχωμάτων ίσο με 0.013m. Επίσης, είναι ενισχυμένη με περιφερειακές νευρώσεις, ή δαχτυλίδια, σε σταθερά διαστήματα των 5m. Οι νευρώσεις αυτές έχουν διατομή σχήματος L και διαστάσεις L120/120/10. Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι χάλυβας S235 JR, σύμφωνα με τις διατάξεις του EN 13084-7. Ωστόσο, λόγω της θερμοκρασίας που λειτουργεί η καπνοδόχος, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα S235 JR μειώνονται (σύμφωνα με τις αντίστοιχες οδηγίες του EN 13084-7). Τελικά, προκύπτει όριο διαρροής ίσο με 160MPa και μέτρο ελαστικότητας ίσο με $2.025 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$. Ακόμα, ο λόγος του Poisson είναι 0.3. Τα φορτία που ασκούνται στην κατασκευή χωρίζονται σε κατακόρυφα και οριζόντια. Τα πρώτα αποτελούνται από τα ίδια βάρη του κελύφους, των νευρώσεων και του εξοπλισμού που αναμένεται να υπάρχει σε τέτοιου είδους κατασκευές. Τα δεύτερα αφορούν φορτία ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του EN 1991-1-4.

Η αναλυτική διαδικασία που ακολουθείται στην παρούσα εργασία είναι απλοποιημένη υιοθετώντας κάποιες παραδοχές. Πρώτα από όλα, στους αναλυτικούς υπολογισμούς πραγματοποιείται η παραδοχή

της θεωρίας δοκού. Σύμφωνα με αυτήν, η καπνοδόχος συμπεριφέρεται ως πρόβολος και, ως εκ τούτου, η μέγιστη τάση εμφανίζεται στη βάση της κατασκευής, στην πλευρά όπου ο άνεμος την συμπιέζει. Σε ό,τι αφορά τις αναλύσεις, πρώτον, θεωρούνται γραμμικές και ελαστικές συνθήκες, όπου υπολογίζεται η αντοχή λυγισμού, σύμφωνα με την κλασική ελαστική θεωρία λυγισμού. Δεύτερον, θεωρούνται μη γραμμικές και ανελαστικές συνθήκες, όπου υπολογίζεται η αντοχή κατάρρευσης της κατασκευής, σύμφωνα με τις οδηγίες του κανονισμού CICIND.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, πραγματοποιούνται αριθμητικές αναλύσεις μέσω του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA, με σκοπό τον υπολογισμό της απόκρισης και της αντοχής της καπνοδόχου. Ως εκ τούτου, δύο τύποι αριθμητικών προσομοιωμάτων μελετώνται, η μη ενισχυμένη και η ενισχυμένη κατασκευή. Η τελευταία ενισχύεται με εύκαμπτα (μέτρο ελαστικότητας ίσο με $2.025 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$) και ελαστο-πλαστικά (όριο διαρροής ίσο με 160MPa) ή ελαστικά δαχτυλίδια, στα πλαίσια των μη γραμμικών και γραμμικών αναλύσεων, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα τόσο των γραμμικών (LBA) όσο και των μη γραμμικών (GNA, MNA, GMNA) αναλύσεων παρουσιάζονται μέσω των δρόμων ισορροπίας και κατάλληλων στιγμιότυπων τη στιγμή της κατάρρευσης. Ως δείκτης αντοχής χρησιμοποιείται ένας φορτικός συντελεστής, ο οποίος πολλαπλασιάζει όλα τα φορτία μέχρι την κατάρρευση. Η σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων μεταξύ της μη ενισχυμένης και της ενισχυμένης κατασκευής δείχνει την επίδραση των νευρώσεων στην αντοχή και τις παραμορφώσεις. Η σύγκριση μεταξύ αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων της μη ενισχυμένης κατασκευής επιτρέπει τον έλεγχο της επάρκειας των αναλυτικών μεθόδων για τον σχεδιασμό μη ενισχυμένων καπνοδόχων.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται μια παραμετρική μελέτη, στα πλαίσια της οποίας διερευνάται η επίδραση στην αντοχή δύο παραμέτρων: του διαστήματος μεταξύ των νευρώσεων και της δυσκαμψίας των νευρώσεων. Το διάστημα μεταξύ των νευρώσεων ξεκινά από 20m και φτάνει μέχρι και τα 2.5m. Όσον αφορά τη δεύτερη παράμετρο, συγκρίνονται δυο κατασκευές, αυτή με τις εύκαμπτες νευρώσεις και αυτή με τις δύσκαμπτες νευρώσεις. Στην τελευταία, χρησιμοποιούνται πολύ δύσκαμπτα και ελαστικά δαχτυλίδια.

Τελικά, παρουσιάζονται μερικά συμπεράσματα που αφορούν τον πρακτικό σχεδιασμό των λεπτότοιχων καπνοδόχων. Τα συμπεράσματα αυτά είναι βασισμένα στα αποτελέσματα των παραπάνω αριθμητικών αναλύσεων. Έτσι, εκτιμάται η χρήση της κλασικής ελαστικής θεωρίας λυγισμού στους αναλυτικούς υπολογισμούς. Επιπρόσθετα, μελετάται η αξιοπιστία της τάσης αστοχίας, σύμφωνα με τις οδηγίες του σχεδιαστικού κώδικα CICIND. Τέλος, λαμβάνει χώρα μια μελέτη βελτιστοποίησης της αντοχής, στα πλαίσια της οποίας εξετάζεται η παράμετρος του διαστήματος μεταξύ των νευρώσεων.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2015 36

Design of Steel Industrial Chimneys Against Buckling
Irini Nikoloudi

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.
Co-supervisor: Konstantinos Kalochairetis, Dr. Civil Engineer

ABSTRACT

The analysis and design of thin-shell structures began during the early 20th century due to the emerging requirements for designing aircrafts, spacecrafts, rockets, submarines and other types of structures. The significant differentiation of such structures from others was quickly observed, as it was found that they are particularly sensitive to geometric imperfections, local buckling and subsequent plastification.

Initially, the problem of shell buckling was investigated by making use of analytical methods in relatively simple problems, such as axial compression. Among the first researchers who worked on shell buckling were Timoshenko, Southwell and Lorenz, who established analytical methods that are widely used by modern design specifications. In the next decades, experimental tests took place and led to useful conclusions, highlighting drawbacks in the assumptions behind the analytical procedures. In the last decades, the development of computer and civil engineering sciences facilitated the use of more advanced numerical procedures.

In the present thesis, an industrial chimney of a combined cycle power plant is investigated. The thesis assumed chimney structure has a height equal to 60m, a diameter equal to 7m and a constant thickness of 0.013m. Additionally, it is stiffened by circumferential stiffeners (rings) at constant intervals of 5m. The geometric type of the stiffeners is L120/120/10. The used material is steel of grade S235 JR, according to EN 13084-7. However, due to the operating temperature, the following reduced mechanical properties for S235 are eventually used: yield stress $f_y=160\text{MPa}$ and elasticity module $E=2.025\times 10^8\text{kN/m}^2$. Additionally, the Poisson's ratio is equal to 0.3. The applied loads are divided into vertical and horizontal. The first ones consist of the self-weights of the shell, the stiffeners and the equipment supposed to be present in such chimneys. The second ones are the wind loads as described in EN 1991 Part 1-4.

The analytical process that is followed in this thesis is simplified making some assumptions. First of all, in the analytical calculations the consideration of beam theory is assumed. Based on the latter, the chimney behaves like a cantilever beam and, hence, the largest stress is assumed at the base of the structure, at the most compressed side due to wind. As far as the applied numerical analyses are concerned, firstly, linear and elastic conditions are assumed, where the buckling strength is calculated, according to the classical elastic buckling theory. Secondly, nonlinear and inelastic conditions are considered, where collapse strength is found based on the guidance of the design code CICIND.

In the context of this thesis, numerical analyses are carried out by means of the finite element software ADINA, in order to compute the response and the capacity of the assumed chimney structure. For this reason, two types of numerical models are investigated, the unstiffened and the stiffened one. The latter is stiffened with flexible ($E=2.025 \times 10^8 \text{kN/m}^2$) and elastoplastic ($f_y=160 \text{MPa}$) or elastic rings for nonlinear and linear analyses, respectively. Linear (LBA) and nonlinear (GNA, MNA and GMNA) numerical analyses are performed and are presented through appropriate equilibrium paths as well as snapshots at the time of failure. As strength indicator the load factor that multiplies all applied loads up to collapse is used. The comparison of the numerical results between the unstiffened and the stiffened model highlights the impact of ring stiffeners on the structure capacity and deformation. The comparison between the analytical and numerical results of the unstiffened structure leads to the investigation of the sufficiency of the assumed analytical process for the design of unstiffened chimney structures.

A parametric investigation is also conducted. In the context of that, the impact of stiffener spacing and the stiffener rigidity on structure's capacity is investigated. The stiffener spacing ranges from 20m to 2.5m. Investigating the stiffener rigidity, two stiffened structures are compared: the flexibly stiffened and the rigidly stiffened one. In the rigidly stiffened model, very stiff elastic rings are used.

Finally, some practical conclusions for the design of thin-shell chimneys are presented. Hence, the use of the classical elastic buckling theory in the analytical calculations is evaluated. Additionally, the reliability of the failure stress according to the design code CICIND is investigated. Finally, an optimization investigation of the capacity in terms of stiffener spacing takes place.