



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟ ΤΥΠΟΥ BYPASS-STACK



Διπλωματική Εργασία

**Χρήστος Κ. Ζύγουρας**

ΕΜΚ ΔΕ 2017 29

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



National Technical University of Athens  
School of Civil Engineering  
Institute of Steel Structures

# **METHOD OF STRUCTURAL HEALTH MONITORING BY APPLICATION TO STEEL CHIMNEY BYPASS- STACK TYPE**



Diploma Thesis

**Chris K. Zygouras**

EMK ΔΕ 2017 29

Supervisor: Charis Gantes, Professor NTUA

Athens, October 2017

Copyright © Χρήστος Κ. Ζύγουρας, 2017  
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 του συγγραφέα. 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 τον συγγραφέα.

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

Copyright © Christos K. Zygouras, 2017  
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).

Χρήστος Κ. Ζύγουρας (2017)  
ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ  
ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟ ΤΥΠΟΥ BYPASS-STACK  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2017 29  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Christos K. Zygouras (2017)  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2017 29  
METHOD OF STRUCTURAL HEALTH MONITORING BY APPLICATION TO STEEL CHIMNEY BYPASS-  
STACK TYPE  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται μια πορεία πέντε χρόνων και κατ' επέκταση 17 χρόνων στα μαθητικά και φοιτητικά έδρανα, που πέραν των ακαδημαϊκών υποχρεώσεων περιλάμβαναν έντονες στιγμές σε κάθε πτυχή της ζωής του υποφαινόμενου. Υπήρξαν ευχάριστες και δυσάρεστες καταστάσεις, παρόλα αυτά, δόξα τω Θεώ, όλα κύλησαν ευνοϊκά και με προσμονή και αισιοδοξία αναμένεται το αύριο!

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ, που ήταν και ο επιβλέπων της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι γνώσεις του πάνω στο αντικείμενο με το οποίο ασχολείται και η οργανωτικότητα του, τόσο στη δουλειά του, όσο και στον τρόπο σκέψης του, βοήθησαν αρκετά στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Το χαρακτηριστικό, όμως που τον διακρίνει είναι ο τρόπος που διδάσκει μέσα στην αίθουσα, άλλοτε με παραγωγικούς και άλλοτε με επαγωγικούς συλλογισμούς, πάντοτε όμως με σοβαρότητα και αμεσότητα. Αποτελεί πρότυπο καθηγητή και θα ήθελα να τον ευχαριστήσω, καθώς παρά το βεβαρημένο του πρόγραμμα, ήταν πάντα έτοιμος να βοηθήσει και με την ηρεμία του και τις γνώσεις του, ώστε να διαλευκάνει οποιοδήποτε σκοτεινό σημείο.

Προσθετικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλειο Γκίκα, καθηγητή στη Σχολή των Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, για την παραχώρηση των μετρήσεων του και όλου του προσωπικού του υλικού που μας πρόσφερε, καθώς και για την άποψη συμπεριφορά και συνεργασία του.

Επίσης, πολύτιμη ήταν η βοήθεια του υποψήφιου διδάκτορα Ηλία Θανασούλα, στην επίλυση των διάφορων προβλημάτων που προέκυψαν και αφορούσαν το λογισμικό ADINA, κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Σημαντική ήταν και η συνεισφορά του Στέλιου Βερνάδου και της Βασιλικής Καρδούτσου.

Βέβαια, πέρα από το ακαδημαϊκό υπόβαθρο, αυτή η εργασία βασίζεται και στην ηθική και ψυχολογική υποστήριξη των παλιών και νέων φίλων. Θα ήθελα να ευχαριστήσω λοιπόν, τον Αναστάση, τον Δημήτρη, τον Ορέστη, τον Τάσο, τον Χρήστο, την Αλεξάνδρα, την Έλενα, την κα Κατερίνα και όλη την παρέα από τη σχολή, τον Δημήτρη, τον Γιάννη, την Εβίνα, την Έρση, την Ιωάννα, τη Μαντώ, τους Νίκους, τον Σαλίβερο, τον Σπύρο και την Χριστίνα.

Τέλος, την αμέριστη μου ευγνωμοσύνη οφείλω σε όλη μου την οικογένεια και κυρίως στους γονείς μου Κωνσταντίνο και Ιωάννα και στην αδελφή μου Βασιλική, για όλα αυτά που μου έχουν διδάξει και μου προσφέρει απλόχερα.

Χρήστος Κ. Ζύγουρας  
Νοέμβριος 2017

Στους γονείς μου, Κώστα και Ιωάννα  
και στην αδερφή μου Βασιλική,  
για την αληθινή και ανιδιοτελή αγάπη τους!



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2017 29

**ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ  
ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟ ΤΥΠΟΥ BYPASS-STACK**

**Χρήστος Κ. Ζύγουρας**

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές  
Οκτώβριος 2017

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το κεφάλαιο της Παρακολούθησης της Δομικής Ακεραιότητας των Τεχνικών Έργων και Δομικών Κατασκευών, γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως Structural Health Monitoring (SHM). Αναλύεται πώς το SHM αξιοποιείται σήμερα στον κατασκευαστικό τομέα και μελετάται αναλυτικά ένας υφιστάμενος φορέας, όπου η χρήση μέσων παρακολούθησης οδήγησε στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων και στη λήψη έγκαιρων και έγκυρων αποφάσεων για τη δομική ακεραιότητα και αρτιότητα της κατασκευής. Συγκεκριμένα μελετάται καμινάδα τύπου bypass-stack, η οποία βρίσκεται στο θερμοηλεκτρικό εργοστάσιο της Δ.Ε.Η. στο Λαύριο.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σκοπός του Structural Health Monitoring και το πώς στη σημερινή εποχή αξιοποιείται στον κατασκευαστικό τομέα. Παρατίθεται ο ορισμός του νέου αυτού επιστημονικού πεδίου, για την κατανόηση και την ανάδειξη του σημαντικού του ρόλου σε μια εποχή που οι πληροφορίες αυξάνονται ραγδαία και οι βάσεις δεδομένων διογκώνονται.

Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί μια διεισδυτική ματιά στο θεωρητικό υπόβαθρο της ενόργανης Παρακολούθησης της Δομικής Ακεραιότητας των Κατασκευών. Αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο αντλούνται τα στοιχεία που αφορούν τον εκάστοτε μηχανικό, αλλά και πώς ερμηνεύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Επίσης, εξηγείται επιστημονικά η διαδικασία του SHM και η λειτουργία των συστημάτων καταγραφής.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο φορέας που έχει επιλεγεί για να μελετηθεί, σύμφωνα με τη φιλοσοφία του SHM. Πρόκειται για καμινάδα τύπου bypass-stack, που έχει κατασκευαστεί στο θερμοηλεκτρικό εργοστάσιο της Δ.Ε.Η. στο Λαύριο. Ο προκείμενος φορέας επιλέχθηκε, λόγω των λειτουργικών ζητημάτων που είχαν παρουσιαστεί και τελικά ερμηνεύθηκαν και επιλύθηκαν με την αξιοποίηση των ενόργανων καταγραφών. Στο εν λόγω κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν ύστερα από την ολοκλήρωση των επισκευών. Οι μετρήσεις που παραθέτονται αποτελούν αποτέλεσμα μελετών του κύριου Βασιλείου Γκίκα, καθηγητή στη σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Ακολούθως, στο τέταρτο και στο πέμπτο κεφάλαιο υλοποιείται, η αναλυτική προσομοίωση της καμινάδας, με τη χρήση του λογισμικού ADINA και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις που διενεργήθηκαν αντίστοιχα. Ο απώτερος σκοπός αυτής της αποτύπωσης είναι η καλύτερη δυνατή

προσέγγιση των τεχνικών και δομικών χαρακτηριστικών της κατασκευής και η πλήρης κατανόηση της συμπεριφοράς της σε συνθήκες λειτουργίας και μη.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη σύγκριση των επιτόπου καταγραφών μέσω οργάνων και των στοιχείων που προκύπτουν από τη προσομοίωση του φορέα στο ADINA και τις αναλύσεις που έγιναν σε αυτό το λογισμικό. Ακόμη, αναφέρονται τα γενικότερα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα εργασία και αναδεικνύεται ο καίριος ρόλος του SHM σήμερα και η αναγκαιότητά του.





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

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2017 29

**METHOD OF STRUCTURAL HEALTH MONITORING BY APPLICATION TO STEEL CHIMNEY  
BYPASS-STACK TYPE**

**Christos K. Zygouras**

Supervisor: Professor Charis Gantes  
October 2017

**ABSTRACT**

This diploma thesis focuses on the Structural Health Monitoring (SHM). The main aim is to analyze how SHM is currently utilized in the construction industry. The existing structure concerning the use of monitoring sensors and others specified methods of monitoring are evaluated. Thus, significant conclusions and timely and valid decisions about the structural integrity of the construction are achieved. In particular, a bypass-stack, which is located at the thermoelectric power plant of PPC in Lavrio, is evaluated.

The first chapter presents the purpose of Structural Health Monitoring and the way it is currently utilized in the construction field. In this chapter, this new scientific field for civil engineering is defined in order to outline its role. At this time, data sets become larger and more complex and databases need to store and manage this data sets.

The second chapter elaborates on the theoretical background of the instrumental structural health monitoring. It analyzes the way that engineers collect data and how the results of the measurements are interpreted. Also, the SHM process and the operation of the recording systems are considered in detail.

The third chapter deals with the construction which is selected to evaluate, according to SHM's philosophy. This is a bypass-stack chimney, which has been built at the thermoelectric power plant of PPC, in Lavrio. This construction was chosen because of the operational issues that were presented and eventually resolved by the use of instrumental records and monitoring. This chapter shows the measurements which were made after the reparation of damages. These measurements are the results of studies conducted by Mr. Vassilios Gikas, who is a professor at the Scholl of Rural and Surveying Engineering of N.T.U.A.

In the fourth and fifth chapters, the analytical simulation of the chimney is carried out. For that purpose, ADINA software is utilized and the results obtained from the analysis are presented. The ultimate purpose of this simulation has to do with the best way in order to approximate the technical and structural features of construction and to fully appreciate its behavior in operating and non-operating conditions.

Finally, the sixth chapter presents the results from the comparison between instrumental monitoring and the data that was obtained from the simulation and the analysis in ADINA. Furthermore, general conclusions from this diploma thesis are considered and SHM's current key role and its necessity are highlighted.