



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.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΑΡΧΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ – STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM).....</b>	<b>1</b>
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.2	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ STRUCTURAL HEALTH MONITORING .....	2
1.3	ΑΞΙΑ ΤΟΥ STRUCTURAL HEALTH MONITORING .....	4
1.4	ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥ SHM ΣΤΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΟΥ .....	5
1.5	SHM ΚΑΙ ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΗ .....	7
1.6	ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ (SHM).....	8
<b>2</b>	<b>ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ .....</b>	<b>11</b>
2.1	ΤΟ SHM ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ .....	11
2.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ .....	12
2.2.1	ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ .....	12
2.2.1.1	ΟΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΙ ΔΕΩΔΑΙΤΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ (RTS) .....	12
2.2.1.2	ΤΟ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ (GNSS).....	13
2.2.1.3	ΤΟ ΕΠΙΓΕΙΟ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΟ ΡΑΝΤΑΡ (GB-RAR).....	14
2.2.1.4	Ο ΕΠΙΓΕΙΟΣ ΣΑΡΩΤΗΣ LASER .....	14
2.2.1.5	ΒΙΝΤΕΟΜΕΤΡΙΑ .....	15
2.2.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ .....	15
2.3	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ..	15
2.3.1	ΚΑΘΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ .....	15
2.3.1.1	ΚΥΡΙΑΡΧΕΣ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ .....	16
2.3.1.2	ΣΧΗΜΑ-ΔΙΑΝΥΣΜΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ .....	16
2.3.1.3	ΜΟΡΦΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ.....	17
2.3.1.4	ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΗΤΡΩΟ ΑΚΑΜΨΙΑΣ .....	17
2.3.1.5	ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ .....	18
2.3.2	ΤΟΠΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ .....	18
2.3.2.1	ΟΠΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ .....	18
2.3.2.2	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ.....	19
2.3.2.3	ΕΝΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ.....	19
2.3.2.4	ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ .....	19
2.4	ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟ SHM .....	20
2.4.1	ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ .....	20
2.4.1.1	ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ.....	20
2.4.1.2	ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ ΜΕ ΠΙΕΖΟΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ .....	21
2.4.1.3	ΧΩΡΗΤΙΚΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ.....	22
2.4.1.4	ΣΕΡΒΟΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ .....	22

2.4.2	ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ- ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ .....	23
2.4.2.1	ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ.....	23
2.4.2.2	ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΔΟΝΗΤΙΚΟ ΚΑΛΩΔΙΟ .....	24
2.4.3	ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ- ΒΕΛΟΜΕΤΡΑ .....	24
2.4.3.1	ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΑ.....	25
2.4.3.2	LVDT .....	25
2.4.4	ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΑ .....	26
2.4.4.1	ΔΟΝΗΤΙΚΑ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΑ .....	26
2.4.4.2	ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΑ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΑ .....	27
2.4.4.3	ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΑ .....	27
2.4.5	ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ.....	27
2.4.6	ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ .....	28
2.4.7	ΜΙΚΡΟ-ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (MEMS).....	29
2.5	ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	30
2.5.1	ΕΝΣΥΡΜΑΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ.....	31
2.5.2	ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ.....	31
<b>3</b>	<b>ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....</b>	<b>33</b>
3.1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	33
3.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΑΡΑΚΑΜΠΗΤΗΡΙΟΥ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΥ ΤΥΠΟΥ BYPASS STACK .....	35
3.3	ΣΤΟΧΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	36
3.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	38
3.4.1	ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	39
3.4.2	ΑΚΤΙΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΛΟΓΩ ΑΝΕΜΟΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	41
3.4.3	ΚΥΡΙΑΡΧΕΣ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ .....	43
<b>4</b>	<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΥ ΣΤΟ ADINA.....</b>	<b>47</b>
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	47
4.2	ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	48
4.3	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ – SHELL ELEMENTS .....	50
4.4	ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΕΔΡΑΣΗΣ .....	54
4.5	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - SHELL ELEMENTS .....	55
4.6	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΟΥ – BEAM ELEMENTS .....	57
4.7	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΣ ΦΟΡΕΑ .....	59
4.8	ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΦΟΡΕΑ .....	60
<b>5</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΣΤΟ ADINA.....</b>	<b>65</b>
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	65
5.2	ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	65
5.2.1	BEAM ELEMENTS.....	66



5.2.1.1	ΚΑΜΙΝΑΔΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΕΔΡΑΣΗΣ .....	66
5.2.1.2	ΚΑΜΙΝΑΔΑ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΕΔΡΑΣΗΣ .....	66
5.2.1.3	ΚΑΜΙΝΑΔΑ ΜΟΝΟ ΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΙΧΩΜΑ, ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ...	67
5.2.2	SHELL ELEMENTS .....	68
5.2.2.1	ΚΑΜΙΝΑΔΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΕΔΡΑΣΗΣ .....	68
5.2.2.2	ΚΑΜΙΝΑΔΑ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΕΔΡΑΣΗΣ .....	68
5.2.2.3	ΚΑΜΙΝΑΔΑ ΜΟΝΟ ΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΙΧΩΜΑ, ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ...	69
5.3	ΑΚΤΙΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΛΟΓΩ ΑΝΕΜΟΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	70
5.4	ΕΞΕΤΑΣΗ ΚΥΡΙΑΡΧΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ .....	73
5.5	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΟ ΑΔΙΝΑ .....	75
<b>6</b>	<b>ΓΕΝΙΚΟΤΕΡΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>77</b>
6.1	ΣΥΝΟΨΗ.....	77
6.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	78
6.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ .....	78
<b>7</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>81</b>



# **1 ΑΡΧΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ – STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM)**

## **1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η παρακολούθηση της Δομικής Ακεραιότητας της Κατασκευής, διεθνώς γνωστή με τον όρο Structural Health Monitoring (SHM), αποτελεί ένα νέο επιστημονικό κλάδο. Ο κλάδος αυτός αποβλέπει στην παροχή αξιόπιστων δεδομένων σχετικά με την ακεραιότητα κάθε τύπου κατασκευής, ώστε είτε να επιμηκυνθεί η λειτουργία της, είτε να επισκευασθεί, είτε ακόμη και να αποσυρθεί, λόγω αυξημένης επικινδυνότητας.

Στη σημερινή εποχή οι λόγοι για τους οποίους κρίνεται αναγκαία η συντήρηση των μεγάλων και σημαντικών έργων, είναι αρκετοί. Καταρχάς, το υψηλό κόστος κατασκευής επιβάλλει την παρακολούθηση των υφιστάμενων κατασκευών. Επίσης, οι αποκλίσεις που υπάρχουν μεταξύ μελέτης και κατασκευής, είτε λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών, είτε κατασκευαστικών ατελειών, είτε παραδοχών που λαμβάνονται σε επίπεδο μελέτης, δυσχεραίνουν την εύρεση των πραγματικών ιδιοτήτων και δυναμικών χαρακτηριστικών της ήδη υπάρχουσας κατασκευής. Ακόμα, η χρήση νέων συστημάτων και συσκευών (π.χ. εφέδρανα, υδραυλικοί αποσβεστήρες) που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του εκάστοτε φορέα, κάνει πιο σύνθετη τη δυναμική του απόκριση και συνεπώς λιγότερο προβλέψιμη. Καθώς, λοιπόν, η επιστήμη και η τεχνολογία παρουσιάζουν ραγδαία ανάπτυξη, μας επιτρέπεται η άντληση και αξιοποίηση προς όφελός μας, όλο και περισσότερων δεδομένων για τις φορτίσεις και τις διεγέρσεις (περιβαλλοντικές, σεισμικές, ανεμοφορτίσεις, φορτία λειτουργίας κ.α.) που δέχεται η κατασκευή. Συνεπώς, η εφαρμογή της ενόργανης παρακολούθησης στις κατασκευές κρίνεται απαραίτητη για την εξαγωγή αποτελεσμάτων από τα σήματα της απόκρισης τους, που αφορούν τη λειτουργικότητά και την ακεραιότητά τους.

Πληθώρα λοιπόν, οικονομικών, αξιόπιστων και με μεγάλη ακρίβεια αισθητήρων τοποθετούνται σε κρίσιμα σημεία πάνω στην κατασκευή (π.χ. περιοχές συγκέντρωσης τάσεων), ώστε να παρέχονται δεδομένα κατά τη διάρκεια της ομαλής της λειτουργίας. Συγκρίνοντας αυτά τα δεδομένα με την πρότυπη συμπεριφορά του φορέα, όπως προέκυψε από τη μελέτη, η παρακολούθηση σε αληθινό χρόνο της ακεραιότητας του, καθιστά ικανή την εύρεση περιοχών με ατέλειες. Χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία του SHM, αρκετές αβεβαιότητες που παρουσιάζονται στον αρχικό σχεδιασμό, δύνανται να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά, οδηγώντας σε χαμηλότερους συντελεστές ασφαλείας. Προσθετικά,

έγκαιρες διαγνώσεις ενδεχόμενων κατασκευαστικών ατελειών, ελαχιστοποιούν το ρίσκο καταστροφής και ατυχήματος κατά την ομαλή λειτουργία που οφείλονται στη διάδοση των φαινομένων κόπωσης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι τα οφέλη του SHM επιτυγχάνονται χωρίς να επιβάλλεται η απόσυρση της κατασκευής και με χαμηλό κόστος. Βέβαια, είναι κατανοητό πώς σε περίπτωση απόκλισης από την κανονική συμπεριφορά, απαιτείται διεξοδική έρευνα, προκειμένου να προσδιοριστεί η ακριβής θέση, η μορφή και ο βαθμός των αστοχιών, ώστε να αποφασισθεί είτε η επισκευή, είτε η καθολική απόσυρση του φορέα.

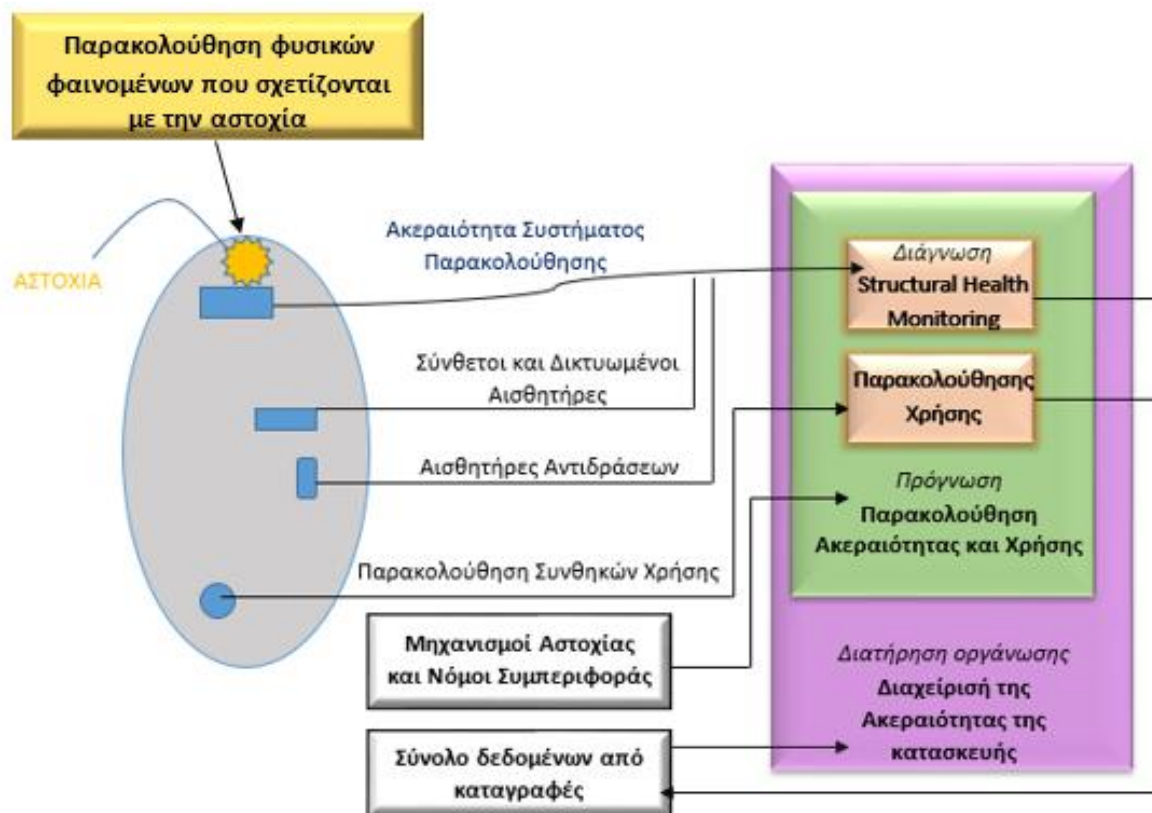
Ο κύριος άξονας για την εφαρμογή της Παρακολούθησης της Δομικής Ακεραιότητας (SHM) παρουσιάζεται παρακάτω:

- *Επιλογή κατάλληλης θέσης για την εγκατάσταση των αισθητήρων:* Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ακριβούς προσομοίωσης της αναμενόμενης συμπεριφοράς της κατασκευής, ώστε να ταυτοποιούνται πιθανές κρίσιμες περιοχές (π.χ. συγκέντρωση τάσεων, μέγιστες παραμορφώσεις κλπ.). Επίσης, πρέπει να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος αισθητήρων, ανάλογα με τον τύπο μέτρησης, που χρειάζεται να εκτελεσθεί, την ακρίβεια και το λειτουργικό περιβάλλον.
- *Συλλογή κατασκευαστικών δεδομένων:* Συνήθως, αυτό επιτυγχάνεται έπειτα από την ομαλή λειτουργία και την οριακή κατάσταση φόρτισης, ανακτώντας όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό μετρήσεων. Απαιτείται ακριβής γνώση των συνθηκών φόρτισης, ώστε οι συγκρίσεις να είναι αξιόπιστες σε σχέση με την τυπική συμπεριφορά.
- *Σύγκριση των καταγεγραμμένων μετρήσεων έναντι της τυπικής συμπεριφοράς:* Αυτή είναι η τελευταία και η πιο απαιτητική φάση. Περιλαμβάνει την αποτίμηση όλων των περισυλλεγμένων δεδομένων, ώστε να αποφασιστεί αν υπάρχει κατασκευαστική αστοχία και να εξακριβωθεί η φύση, η θέση και ο βαθμός της.

## 1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ STRUCTURAL HEALTH MONITORING

Ο στόχος της Παρακολούθησης της Δομικής Ακεραιότητας των Κατασκευών, όπου από εδώ και πέρα χάριν συντομίας θα αναφέρεται ως SHM (Structural Health Monitoring), είναι η διάγνωση, κάθε στιγμή κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής, της κατάστασης των συστατικών υλικών των διαφόρων μελών μεμονωμένα, αλλά και ολόκληρης της κατασκευής ως ενιαίο σύνολο αυτών. Η κατάσταση του φορέα πρέπει να παραμείνει όπως είχε σχεδιασθεί σε επίπεδο μελέτης, παρόλα αυτά ενδέχεται να αλλάξει λόγω γήρανσης του, ή των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν, ή λόγω τυχηματικών δράσεων. Χάριν της χρονικής διάστασης της παρακολούθησης, η οποία καθιστά δυνατή τη θεώρηση χρονικά ολοκληρωμένου ιστορικού της κατασκευής και με τη βοήθεια της παρακολούθησης της χρήσης της, παρέχεται μια ασφαλής πρόγνωση (π.χ. εξέλιξη αστοχιών, υπολειπόμενη διάρκεια ζωής κλπ.).

Αν αναλογιστούμε μόνο τη διάγνωση που παρέχεται μέσω του SHM, προκύπτει ότι αποτελεί ένα νέο και βελτιωμένο τρόπο για την επίτευξη μη καταστροφικών εκτιμήσεων. Αυτό εν μέρει είναι αλήθεια, όμως το SHM είναι πολύ περισσότερο. Ο νέος αυτός τομέας περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο σύστημα αισθητήρων, πιθανόν χρήση νέων «έξυπνων» υλικών, μετάδοση δεδομένων, υπολογιστική ισχύ και τη δυνατότητα επεξεργασίας της δομής της κατασκευής. Επιτρέπει την επανεξέταση του σχεδιασμού της κατασκευής και την πλήρη διαχείριση της ίδιας της δομής της και τη θεώρηση της ως μέρος ενός ευρύτερου συστήματος. Αυτό αποτυπώνεται στο παρακάτω Σχήμα 1-1 .



Σχήμα 1-1 : Οργάνωση Παρακολούθησης της Δομικής Ακεραιότητας

Στο Σχήμα 1-1, περιγράφεται λεπτομερώς πως λειτουργεί το SHM. Το αρχικό στάδιο του παραπάνω συστήματος που αντιστοιχεί στην παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας, προσδιορίζεται: από i) τον τύπο του φυσικού φαινομένου που σχετίζεται με την αστοχία, η οποία παρακολουθείται από τους αισθητήρες και ii) τον τύπο του φυσικού φαινομένου που χρησιμοποιούν οι αισθητήρες για την παραγωγή σημάτων (γενικώς ηλεκτρικά σήματα) που αποστέλλονται σε ένα υποσύστημα αποθήκευσης δεδομένων. Αρκετοί αισθητήρες του ίδιου τύπου, δημιουργούν ένα δίκτυο και συνδυάζουν τα δεδομένα που έχουν αντλήσει με τα αντίστοιχα δεδομένα άλλης ομάδας αισθητήρων. Άλλοι αισθητήρες που καταγράφουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες, μπορούν να καταγράψουν και να παρακολουθήσουν τη χρήση που γίνεται. Το σήμα, λοιπόν που μεταφέρεται από το υποσύστημα παρακολούθησης της ακεραιότητας, σε συνδυασμό με τα προηγούμενα καταχωρημένα δεδομένα, χρησιμοποιείται από τον ελεγκτή για την εξαγωγή μιας διάγνωσης. Ενοποιώντας τις πληροφορίες από το υποσύστημα παρακολούθησης της ακεραιότητας με εκείνο του υποσυστήματος παρακολούθησης της χρήσης και αξιοποιώντας τις γνώσεις σχετικά με τους διάφορους μηχανισμούς αστοχίας και τους νόμους συμπεριφοράς, καθίσταται δυνατός ο καθορισμός πρόγνωσης (υπολειπόμενου χρόνου ζωής) και διαχείρισης της ακεραιότητας της κατασκευής (οργάνωση συντήρησης, εργασίες επισκευής κλπ.). Τέλος, παρόμοια συστήματα διαχείρισης και παρακολούθησης που σχετίζονται με άλλες δομές, μπορούν να ρυθμίσουν ακόμη και υπέρ-συστήματα, όπως στόλος αεροσκαφών, ομάδα σταθμών ηλεκτροπαραγωγής κλπ. Ασφαλώς, λειτουργικά συστήματα μπορούν να είναι αποδοτικά ακόμη κι αν δεν είναι τόσο πλήρη όσο το παραπάνω.

### 1.3 ΑΞΙΑ ΤΟΥ STRUCTURAL HEALTH MONITORING

Η γνώση σχετικά με την κατάσταση της ακεραιότητας της κατασκευής, η οποία χρησιμοποιείται σε συνεχή βάση σε πραγματικό χρόνο, είναι αρκετά σημαντική για τους κατασκευαστές, τους τελικούς χρήστες και για την ομάδα συντήρησης. Συνεπώς, το SHM:

- Επιτρέπει τη βέλτιστη χρήση της κατασκευής, την ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας και την αποφυγή καταστροφικών αποτυχιών.
- Παρέχει στον κατασκευαστή βελτίωση του φορέα.
- Αλλάζει δραστικά την οργάνωση της εργασίας των υπηρεσιών συντήρησης:
  - I. Σκοπεύοντας στην αντικατάσταση της προγραμματισμένης και περιοδικής επιθεώρησης με βάση την απόδοση και την κατάσταση του φορέα, συντηρώντας (μακροπρόθεσμα), ή τουλάχιστον μειώνοντας την τρέχουσα εργασία συντήρησης, κυρίως αποφεύγοντας την αποσυναρμολόγηση και επισκευή των μελών που έχουν ανάγκη.
  - II. Ελαχιστοποιώντας δραστικά την ανθρώπινη παρέμβαση και επομένως μειώνοντας την εργασία, τις διακοπές λειτουργίας και τα ανθρώπινα λάθη, βελτιώνοντας έτσι την ασφάλεια και την αξιοπιστία.

Η βελτίωση της ασφάλειας φαίνεται να αποτελεί ισχυρό κίνητρο, ιδίως έπειτα από διάφορα ατυχήματα, λόγω:

- Μη ικανοποιητικής συντήρησης, όπως η κατάρρευση της γέφυρας στον ποταμό Mianus (Εικόνα 1-1 (α))
- Κακός έλεγχος κατά τη διάρκεια κατασκευής, όπως στη γέφυρα Injak (κατάρρευση) (Εικόνα 1-1 (β))

Και στις δύο παραπάνω καταστάσεις εντοπίζεται το πρόβλημα της γήρανσης της κατασκευής, το οποίο με τα σύγχρονα λογισμικά λαμβάνεται υπόψιν. Για να επισημανθεί, όμως η σημασία του προβλήματος της δομικής γήρανσης, αξίζει να αναφερθεί μόνο ότι κατά τις επιθεωρήσεις στα τέλη της δεκαετίας του '80, από τις 576.000 γέφυρες οδικού δικτύου στις Η.Π.Α., οι 236.000 βρέθηκαν ανεπαρκείς σύμφωνα με τα σημερινά πρότυπα.



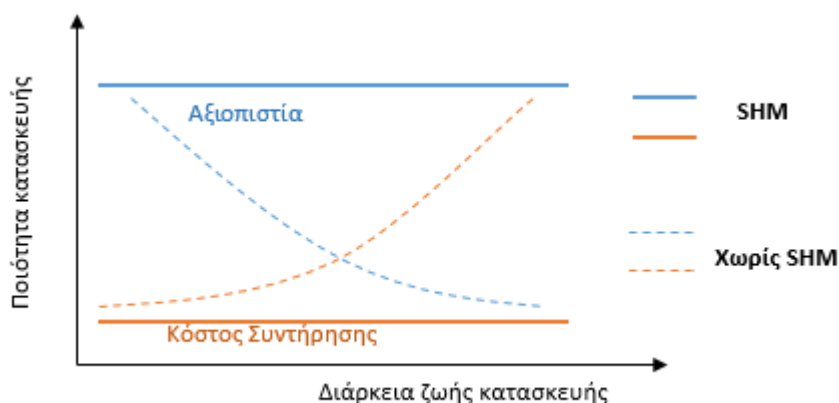
(α)



(β)

Εικόνα 1-1 : (α) Γέφυρα ποταμού Mianus, κατάρρευση λόγω ανεπαρκούς συντήρησης, (β) Γέφυρα Injak, κατάρρευση 1998, λόγω κακής επίβλεψης στη φάση κατασκευής

Επίσης, το οικονομικό κίνητρο είναι έντονο, κυρίως για τους τελικούς χρήστες της κατασκευής. Στην πραγματικότητα οι κατασκευές που έχουν συστήματα SHM, ωφελούνται και από τη μείωση στα έξοδα της συνεχούς συντήρησης και από την αύξηση της αξιοπιστίας που παρέχεται, συγκριτικά με τις κατασκευές που δεν εφαρμόζεται το SHM (Σχήμα 1-2).

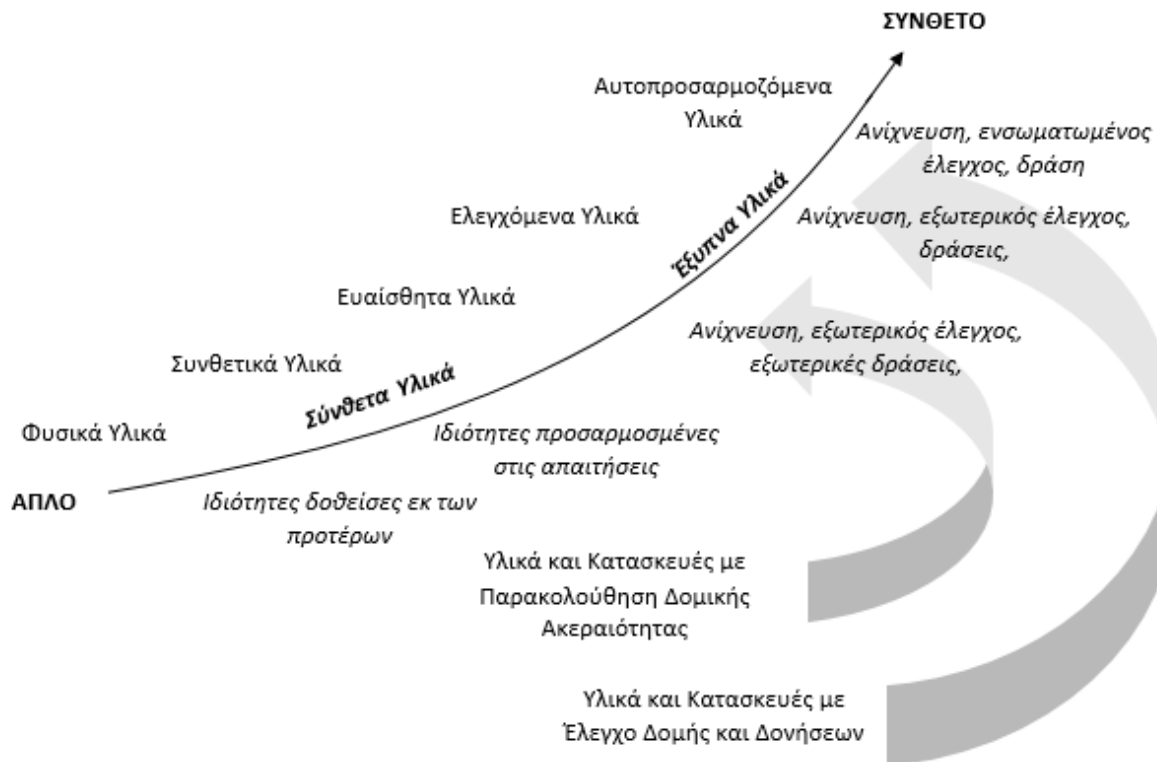


Σχήμα 1-2 : Πλεονεκτήματα του SHM

#### 1.4 ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥ SHM ΣΤΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΟΥ

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, η έννοια των έξυπνων υλικών και κατασκευών διαδίδεται και κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος στους κόλπους των μηχανικών. Οι νέες αυτές ιδέες έχουν βρει γόνιμο έδαφος εν μέρει στον τομέα της αεροναυπηγικής και του πολιτικού μηχανικού. Στην πραγματικότητα αυτή η έννοια αποτελεί στη σημερινή εποχή μια από τις κινητήριες δυνάμεις για καινοτομία σε όλους τους επιστημονικούς τομείς.

Η γενική ιδέα των Έξυπνων Υλικών/Κατασκευών (Smart Materials/Structures-SMS) μπορεί να θεωρηθεί ως ένα βήμα για τη γενική εξέλιξη των ανθρωπογενών αντικειμένων όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-3. Επικρατεί μια συνεχή τάση να οδηγούμαστε από το απλό στο σύνθετο στον τομέα της ανθρώπινης παραγωγής υλικών, ξεκινώντας από τη χρήση ομογενών υλικών, που παρέχονται από τη φύση και έχουν τις φυσικές τους ιδιότητες. Ακολουθούν ιδιαίτερα συνθετικά υλικά, που μας επιτρέπουν τη δημιουργία κατασκευών, με ιδιότητες προσαρμοσμένες σε συγκεκριμένες χρήσεις. Αυτά τα σύνθετα και τα σύμμικτα υλικά, έχουν αντικαταστήσει τα ομογενή υλικά σε όλο και περισσότερες κατασκευές. Αυτό συμβαίνει κατά κόρον στην αεροναυπηγική.



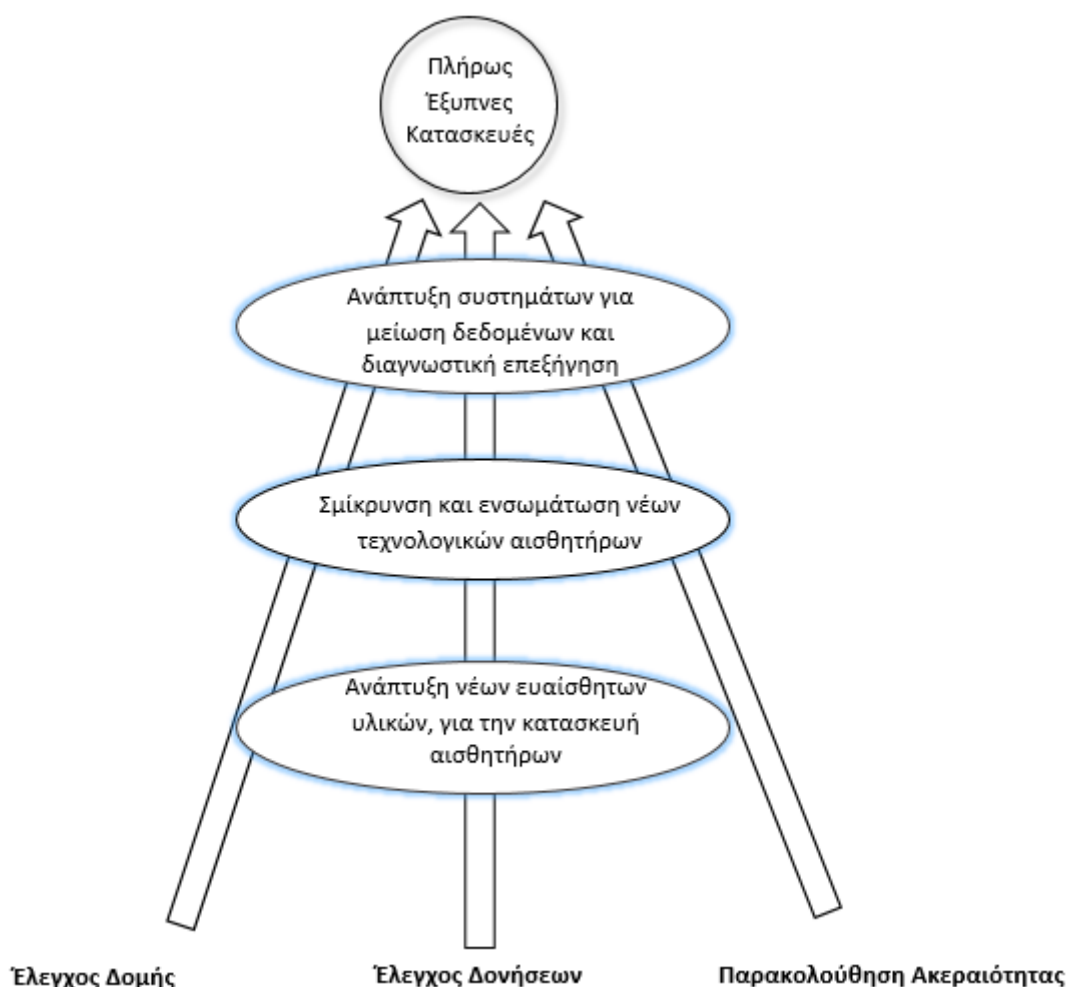
Σχήμα 1-3 : Γενική εξέλιξη των υλικών/κατασκευών και η θέση των έξυπνων κατασκευών και η χρήση του SHM

Το επόμενο βήμα συνίσταται στη δημιουργία υλικών και κατασκευών με ιδιότητες προσαρμοσμένες στην αλλαγή των περιβαλλοντικών συνθηκών. Αυτό απαιτεί να γίνουν πιο ευαίσθητα, ελεγχόμενα και ενεργητικά. Τα διάφορα επίπεδα «νοημοσύνης», αντιστοιχούν στην ύπαρξη ενός, δύο, ή τριών ιδιοτήτων. Έτσι, τα ευαίσθητα, ελεγχόμενα και αυτοπροσαρμοζόμενα υλικά/κατασκευές, μπορούν να ξεχωρίσουν. Υπάρχουν τρεις τύποι SMS: i) αυτά που ελέγχουν το σχήμα/δομή τους, ii) αυτά που ελέγχουν τους κραδασμούς τους και τις δονήσεις τους και iii) αυτά που ελέγχουν την ακεραιότητά τους. Είναι φανερό ότι τα υλικά και οι κατασκευές που ενσωματώνουν το σύστημα του SHM, τουλάχιστον στη σημερινή εποχή, ανήκουν στα λιγότερο έξυπνα υλικά. Στην πραγματικότητα, σχεδόν όλα τα επιτεύγματα σε αυτόν τον τομέα σκοπεύουν στη δημιουργία πιο ευαίσθητων υλικών και κατασκευών, ενσωματώνοντας αισθητήρες. Το επόμενο στάδιο για τις έξυπνες κατασκευές είναι να δημιουργηθούν υλικά και κατασκευές που αυτό-επισκευάζονται, ή τουλάχιστον με ιδιότητες που να μετριάσουν τις βλάβες και τις αστοχίες. Για το μετριασμό και περιορισμό των αστοχιών θα μπορούσαν να ενσωματωθούν ενεργοποιητές που να έχουν μνήμη σχήματος/δομής (Shape Memory Alloys-SMA), ώστε να μειωθούν οι τάσεις στις περιοχές συγκεντρώσεις έντασης. Αυτοί οι ενεργοποιητές θα μπορούσαν να έχουν τη μορφή καλωδίου ή και ταινίας. Όσο αναφορά τις αυτό-θεραπευτικές ιδιότητες της κατασκευής, έχουν γίνει λίγες προσπάθειες. Αξίζει να αναφερθεί ότι στον τομέα του Πολιτικού Μηχανικού, έχουν γίνει κάποιες προσπάθειες με σκυρόδεμα που περιέχει κοιλοότητες εύθραυστων ινών, γεμισμένες με κολλώδη ουσία, η οποία απελευθερώνεται όταν οι ίνες σπάσουν στην περιοχή που υπάρξει αστοχία.

Όπως διαφαίνεται παραπάνω, υπάρχουν αρκετές διαφορές μεταξύ των κατασκευών με SHM και SMS που ελέγχουν τη δομή και τις δονήσεις τους. Παρόλα αυτά είναι ενδιαφέρον να εξεταστούν και τα δύο ως μέρος ενός συνόλου (Σχήμα 1-4), αφού θα δημιουργούσαν μια αρκετά έξυπνη δομή, με τρεις βασικές λειτουργίες, που αποτελούν κοινές βασικές έρευνες με στόχο την:



- Επεξεργασία νέων ευαίσθητων υλικών για την κατασκευή αισθητήρων και ενεργοποιητών.
- Ανάπτυξη τεχνολογιών για την επίτευξη κατασκευής μικρότερων αισθητήρων και ενεργοποιητών, ώστε να μη χρειάζεται να πειραχτούν οι υποδομές της κατασκευής.
- Δημιουργία συστημάτων για την μείωση των δεδομένων και μιας φόρμουλας για τυποποίηση της διαδικασίας παραγωγής διάγνωσης.



Σχήμα 1-4

## 1.5 SHM ΚΑΙ ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΗ

Η έρευνα στον τομέα των έξυπνων υλικών και κατασκευών γενικά, και ειδικά στην Παρακολούθηση της Δομικής Ακεραιότητας (SHM), έχει επηρεαστεί λίγο ή πολύ από την Βιομιμητική. Αυτή η τάση αποτελεί την καλύτερη πηγή έμπνευσης και καινοτομίας.

Σχετικά με το SHM, υπάρχουν αρκετές ομοιότητες μεταξύ αυτού και των της δραστηριότητας του ανθρώπινου σώματος. Αυτό διαφαίνεται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1-1), όπου γίνεται παραλληλισμός μεταξύ των δύο.

Αρκετά συχνά, ευαίσθητες κατασκευές εξοπλισμένες με διαφόρων τύπου αισθητήρες, συγκρίνονται με το ανθρώπινο δέρμα. Αυτή η αναλογία δεν είναι ακριβής, καθώς το δέρμα αποτελεί μία πραγματικά

αυτοπροσαρμοζόμενη δομή που ελέγχει την ακεραιότητά της. Αυτό το επιτυγχάνει με τη βοήθεια των ενεργοποιητών που εξισορροπούν τις περιβαλλοντικές επιθέσεις. Σε μικροκλίμακα, ο αριθμός και η ποικιλία των επιδερμικών αισθητήρων είναι αδύνατον (με τα σημερινά δεδομένα) να προσεγγιστούν από ευαίσθητες δομές που φτιάχνει ο άνθρωπος (μόνο στο ένα χέρι, ο άνθρωπος έχει παραπάνω από 100.000 αισθητήρες). Τελικά η ικανότητα αναδόμησης της ύλης και της δομής είναι το πιο δύσκολο να επιτευχθεί.

Συχνά, μια άλλη αναλογία χρησιμοποιείται, μεταξύ του νευρικού συστήματος του ανθρώπινου είδους και των κατασκευών που εξοπλίζονται με αισθητήρες και έναν κεντρικό επεξεργαστή. Η απόσταση μεταξύ του ανθρώπινου νευρικού συστήματος και του τεχνητού, είναι μικρότερη από την προηγούμενη σύγκριση και η μελέτη των λειτουργιών του νευρικού συστήματος και του εγκεφάλου αποδεικνύονται χρήσιμες για να αφομοιωθούν από ένα κεντρικό τεχνητό σύστημα (επιρροή από περιβάλλον). Ύστερα από ανίχνευση καταστροφής από τον αισθητήρα που είναι ενσωματωμένος πάνω στην κατασκευή, ο κεντρικός επεξεργαστής μπορεί να εξάγει μια διάγνωση και πρόγνωση και να αποφασίσει τις δράσεις που θα λάβει υπόψιν (περιορισμοί κατά τη λειτουργία, ώστε να αποφευχθούν υπερφορτώσεις σε μια περιοχή αστοχίας και προγραμματισμός με βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες θεωρώντας κάποια πιθανή επιδιόρθωση).

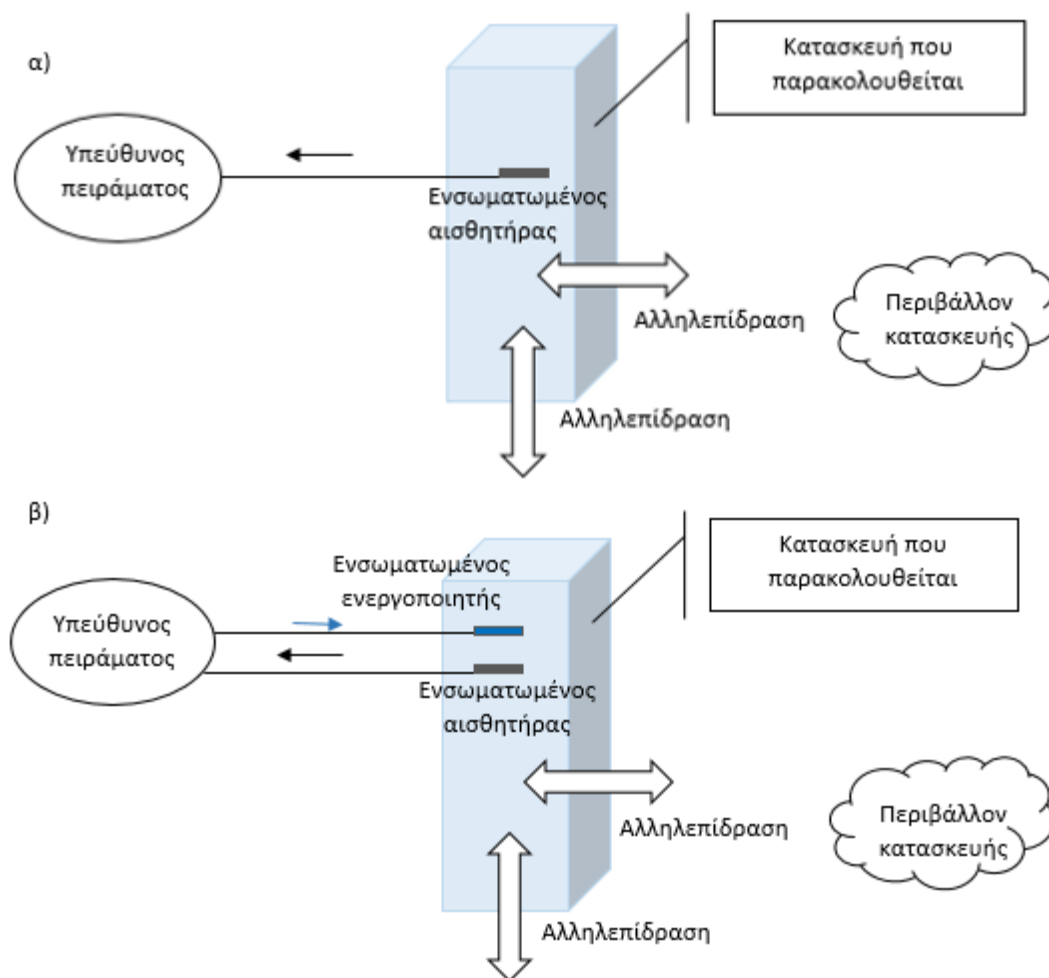
<b>ΦΑΣΕΙΣ ΖΩΗΣ</b>	<i>Άνθρωπος</i>	<i>Κατασκευή</i>
<b>Γέννηση</b>	Παρακολούθηση γέννας	Διαδικασία παρακολούθησης
<b>Διάρκεια ζωής</b>	Ιατρικό check-up	Παρακολούθηση ακεραιότητας και χρήσης
<b>Ασθένεια και θάνατος</b>	Κλινική παρακολούθηση	Παρακολούθηση βλάβης/καταστροφής

Πίνακας 1-1 : Παραλληλισμός μεταξύ ιατρικών δραστηριοτήτων και SHM

Η Βιομιμητική μπορεί να βοηθήσει στην δημιουργία νέων ιδεών, αλλά δε θα πρέπει να επιχειρηθεί η αντιγραφή της φύσης, καθώς δε χρησιμοποιούνται ούτε τα ίδια υλικά, αλλά ούτε οι ίδιες διαδικασίες. Για παράδειγμα, η Βιομιμητική έχει μεγάλη επίδραση στη στρατηγική που υιοθετούν οι ερευνητές που θεωρούν υποχρεωτική την ενσωμάτωση αισθητήρων μέσα στο υλικό της κατασκευής. Ως επιλογή είναι αρκετά σημαντική, καθώς θα έχει εξαιρετικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη πρακτικών συστημάτων. Η λύση της πλήρους ενσωμάτωσης περιπλέκει τις τεχνολογικές απαιτήσεις, δημιουργώντας προβλήματα διαφόρων ειδών, όπως: η υψηλή σμίκρυνση αισθητήρων, το πώς θα αποδειχθεί ότι η ενσωμάτωση/εμφύτευση των αισθητήρων στη δομή της κατασκευής δε θα επιφέρει βλάβες, η περίπλοκοι συσχετισμοί του σχεδιασμού της κατασκευής και της μεθοδολογίας παρακολούθησης, η προβληματική ικανότητα επιδιόρθωσης των αισθητήρων, οι αυξημένες απαιτήσεις του δικτύου αισθητήρων, οι διάρκειες ζωής αυτών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με αυτή της κατασκευής κ.α. Η αναγκαιότητα της εμφύτευσης αισθητήρων δεν είναι προφανής στις περισσότερες περιπτώσεις και τα αρνητικά της επιφανειακής τοποθέτησης δεν είναι τόσο κρίσιμα όσο σε πιο εξεζητημένες θεωρήσεις. Σε αυτή την περίπτωση αυτή η μερική έμπνευση από τη Βιομιμητική δεν αποτελεί καλή ιδέα.

## 1.6 ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ (SHM)

Το SHM ως μη καταστροφική εκτίμηση ( Non- Destructive Evaluation – NDE), μπορεί να θεωρηθεί είτε παθητικό, είτε ενεργητικό. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1-5), φαίνονται οι πιθανές περιπτώσεις, με τις οποίες αλληλοεπιδρά ο υπεύθυνος του πειράματος και η κατασκευή που εξετάζεται. Η κατασκευή είναι εξοπλισμένη με αισθητήρες και αλληλοεπιδρά με το φυσικό περιβάλλον της, με τέτοιο τρόπο, ώστε η κατάστασή της και οι φυσικές παράμετροι της να διαφοροποιούνται και να αλλάζουν.



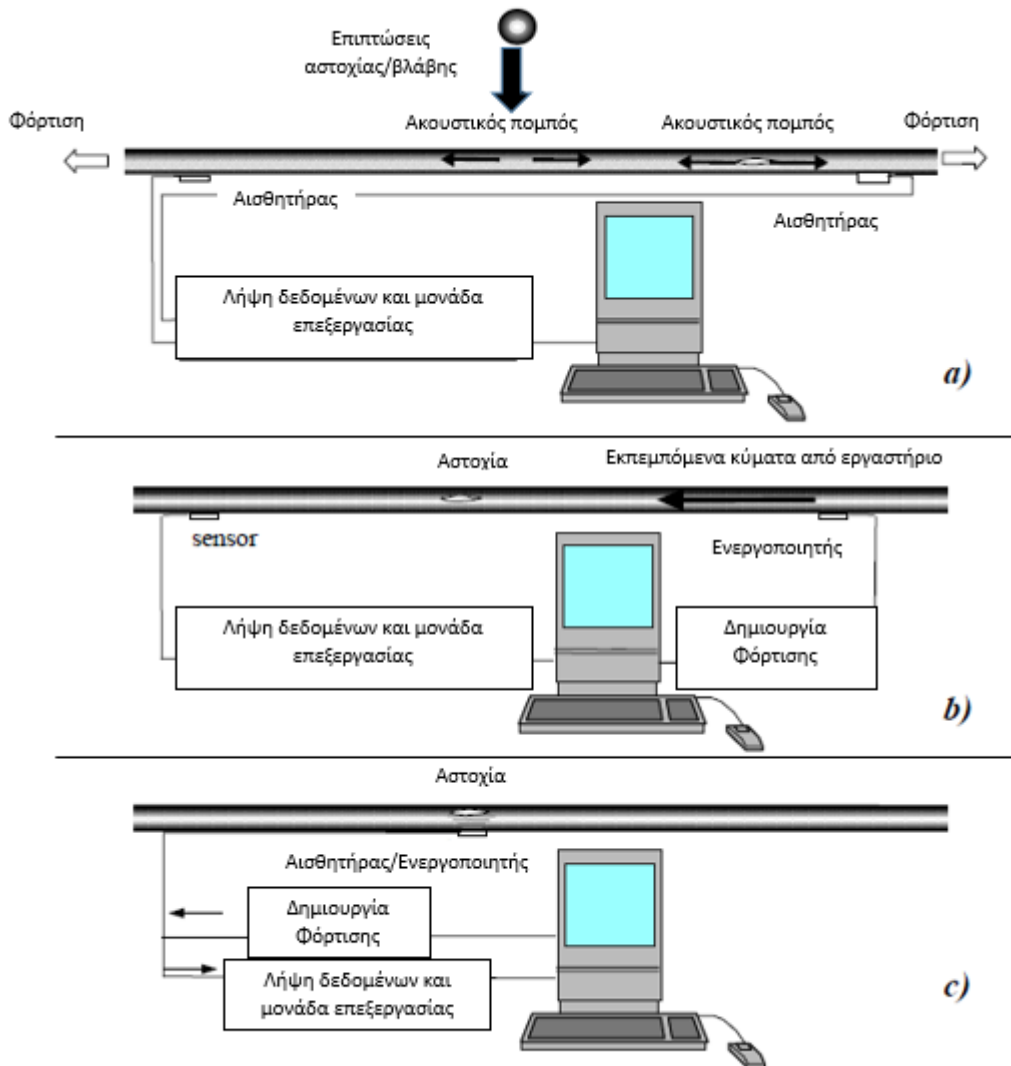
Σχήμα 1-5 : Περιπτώσεις SHM α) Παθητική παρακολούθηση και β) Ενεργητική παρακολούθηση

Αν αυτός που διεξάγει το πείραμα, αρκείται μόνο στην παρακολούθηση του, χάριν στους ενσωματωμένους αισθητήρες, τότε μιλάμε για «Παθητική Παρακολούθηση». Στο SHM αυτή η περίπτωση συναντάται με τεχνικές ανίχνευσης ακουστικών εκπομπών, για παράδειγμα, η εξέλιξη της αστοχίας ενός φορτισμένου φορέα, ή η παρουσία μιας βλάβης.

Αν ο φορέας είναι εξοπλισμένος με ενσωματωμένους αισθητήρες και ενεργοποιητές, δηλαδή συσκευές που τον φορτίζουν κατά κάποιο τρόπο, τότε είναι δυνατόν αυτός που διεξάγει το πείραμα να προκαλέσει διαταραχές στην κατασκευή και με τους αισθητήρες να παρακολουθήσει την απόκριση της. Σε αυτές τις περιπτώσεις, γίνεται λόγος για «Ενεργητική Παρακολούθηση». Για παράδειγμα, για την εξέλιξη μιας αστοχίας, ή βλάβης, στην ενεργητική παρακολούθηση υπάρχει ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας που χρησιμοποιείται ως ακουστικός ανιχνευτής εκπομπών και ένας δεύτερος που εκπέμπει υπερηχητικά κύματα. Ο αποδέκτης στην προκειμένη περίπτωση καταγράφει τα σήματα που λαμβάνει και που εκπέμπονται από την αλληλεπίδραση των κυμάτων αυτών με την πιθανή αστοχία ή βλάβη, επιτρέποντας την ανίχνευσή της.

Στις κλασικές μη καταστρεπτικές μεθόδους (NDE), η διέγερση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας εξωτερικές συσκευές στην κατασκευή, όμως η φιλοσοφία είναι η ίδια. Στο SHM ο ενεργοποιητής και ο αισθητήρας μπορεί να είναι ίδιας δομής ή διαφορετικοί εκ φύσεως. Θα μπορούσε λοιπόν να προκαλεί τη διέγερση ένα πιεζοηλεκτρικό τμήμα και την ανίχνευση να την αναλαμβάνει ένας αισθητήρας οπτικών ινών, ή ένας άλλος πιεζοηλεκτρικός σένσoras. Στην περίπτωση των πιεζοηλεκτρικών μετατροποιητών, αξίζει να αναφερθεί ότι η ίδια συσκευή δύναται να λειτουργήσει και ως πομπός και ως δέκτης, γεγονός

που κάνει πιο ευέλικτο το σύστημα παρακολούθησης με τις εναλλαγές στο ρόλο τους (Σχήμα 1-6). Με τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, ένας και μοναδικός μετατροπέας/αισθητήρας μπορεί να εκτελέσει και τις δύο λειτουργίες την ίδια στιγμή με την τεχνική της σύνθετης ηλεκτρομηχανικής αντίστασης.



Σχήμα 1-6 : Ευελιξία παρακολούθησης χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές με πιεζοηλεκτρικά α) Παθητική μέθοδος με ακουστικές εκπομπές, b) Ενεργητική με ακουστικό-υπερηχητικές μεθόδους παραγόμενες στο εργαστήριο, c) Ενεργητική με τεχνική ηλεκτρομηχανικής αντίστασης

## 2 ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

### 2.1 ΤΟ SHM ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ

Τα μεγάλα και σημαντικά τεχνικά έργα, όπως γέφυρες και κατασκευές που χρησιμοποιούνται καθημερινά από ανθρώπους, δε διατηρούν την αντοχή τους και τη λειτουργικότητά τους σε άριστη κατάσταση επ' αόριστον. Με την πάροδο του χρόνου και την έκθεση τους σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά και λόγω δυσμενών φορτίσεων, όπως σεισμός και άλλες τυχηματικές δράσεις, αυτές οι δομές φθείρονται και βλάπτεται η δομική τους ακεραιότητα. Το θέμα λοιπόν, της γήρανσης της κατασκευής έχει αποκτήσει έντονο ενδιαφέρον, καθώς τις τελευταίες δεκαετίες έχουν σημειωθεί αρκετά ατυχήματα που οφείλονται σε καταστροφικές αστοχίες στις υποδομές των έργων, λόγω της φθοράς του χρόνου. Συνεπώς, η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας και συμπεριφοράς των κατασκευών κρίνεται απαραίτητη, ώστε να εξασφαλιστεί η άρτια λειτουργία και η βιωσιμότητά τους. Η παρακολούθηση επιτυγχάνεται μέσω της συλλογής δεδομένων, που αφορούν τα κινηματικά και δυναμικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε φορέα, με τρόπο συστηματικό και αυτοματοποιημένο. Καθώς όμως υπάρχει πληθώρα αισθητήρων, αλλά και μεθόδων και τεχνικών που χρησιμοποιούνται στον τομέα του SHM, η επιλογή του κατάλληλου συστήματος καθορίζεται από κάποιους παράγοντες που ακολουθούν.

- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τα υλικά της κατασκευής και οι διαστάσεις της, που καθορίζουν τη στατική και δυναμική συμπεριφορά, αλλά και την περιοχή που θα εκτείνεται η μελέτη. Από αυτά εξαρτώνται το οπτικό πεδίο του οργάνου, η απαιτούμενη συχνότητα δειγματοληψίας και το εύρος μέτρησης.
- Η επιλογή κατάλληλων σημείων παρατήρησης, ώστε να αποτυπώνεται ορθά η συμπεριφορά του φορέα. Η δυνατότητα πρόσβασης και τοποθέτησης των αισθητήρων στα σημεία αυτά καθορίζει τα όργανα που θα χρησιμοποιηθούν.
- Η ευρύτερη τοπογραφία της περιοχής, καθώς θα πρέπει να προσφέρει καλή ορατότητα, προσβασιμότητα στην περιοχή, ή το αντικείμενο μελέτης και να ικανοποιεί τα όρια της εμβέλειας του οργάνου μέτρησης.
- Η ζητούμενη διάρκεια παρακολούθησης και οι περιβαλλοντικές συνθήκες που καθορίζουν την επιλογή των κατάλληλων οργάνων και μεθόδων.
- Η ζητούμενη ακρίβεια των μετρήσεων.

## 2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ

Οι μέθοδοι παρακολούθησης της συμπεριφοράς των κατασκευών μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις τοπογραφικές μεθόδους και τις μεθόδους πειραματικής μηχανικής.

### 2.2.1 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι τοπογραφικές μέθοδοι μπορεί να μην αποτελούν τον κλασικό τρόπο παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών, αλλά η χρήση τους τόσο μεμονωμένα, όσο και σε συνδυασμό με αισθητήρες (επιταχυνσιόμετρα, κλισίμετρα, οπτικές ίνες, κλπ.), μελετάται και συναντάται όλο και πιο συχνά. Το πλεονέκτημα των τοπογραφικών μεθόδων έναντι της αποκλειστικής χρήσης αισθητήρων, είναι ότι παρέχουν άμεσα ένα χωροχρονικό ζεύγος για τις μετρήσεις που καταγράφονται σε ένα προκαθορισμένο σύστημα αναφοράς. Συνεπώς, μεγέθη όπως, μετακίνηση, ταχύτητα, επιτάχυνση προκύπτουν άμεσα δίχως τη χρήση πολύπλοκων μαθηματικών μεθόδων.

Τα εργαλεία των τοπογραφικών μεθόδων αποτελούν, οι Ρομποτικοί Γεωδαιτικοί Σταθμοί (RTS), το Δορυφορικό Σύστημα Εντοπισμού (GNSS), το Επίγειο Μικροκυματικό Ραντάρ (GB-RAR), ο Επίγειος Σαρωτής Laser και τα συστήματα Βιντεομετρίας.

#### 2.2.1.1 ΟΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΙ ΔΕΩΔΑΙΤΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ (RTS)

Είναι η εξέλιξη των απλών γεωδαιτικών μεθόδων. Χαρακτηρίζονται για τη δυνατότητα ανίχνευσης και παρακολούθησης ενός κινούμενου στόχου, αλλά και για τον τηλεχειρισμό τους. Τελευταία παρατηρείται η χρήση τους και στην παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών.

Η βασική αρχή λειτουργίας τους, όσον αφορά τη μέτρηση και την καταγραφή γωνιών και μηκών, είναι ίδια με αυτή των κοινών γεωδαιτικών σταθμών. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά που έχουν είναι, η αυτόματη περιστροφή του τηλεσκοπίου του οργάνου κατά τον πρωτεύοντα και δευτερεύοντα άξονα, η αυτόματη αναγνώριση και παρακολούθηση στόχων και ο τηλεχειρισμός του οργάνου.



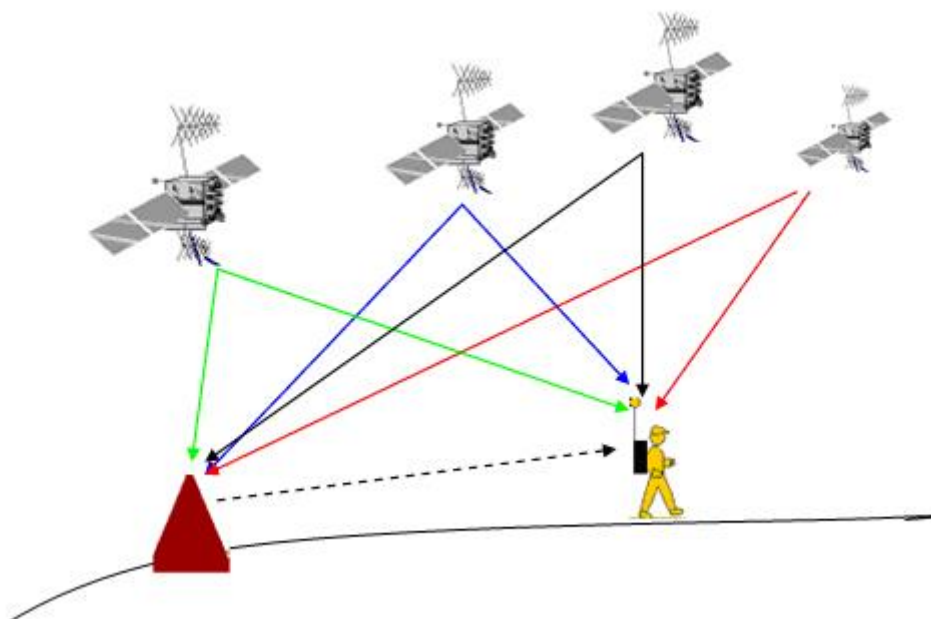
Εικόνα 2-1 : Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός "Leica Nova MS60"

Η χρήση ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών παρουσιάζει πέρα από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στα θετικά εντάσσεται το γεγονός ότι ακόμη και για ταλαντώσεις με εύρος της τάξης του 1cm, μπορούν

να γίνουν καταγραφές με σχετική ακρίβεια ( $\pm 5-10\text{mm}$ ). Επίσης, ο προσδιορισμός συχνοτήτων για 1Hz έως και 3Hz είναι ακριβής. Παρόλα αυτά, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στη χρήση τους που οφείλονται, είτε στις καιρικές συνθήκες, είτε στην απαγορευτική απόσταση οργάνου-πρίσματος (500-700m), είτε για την παρακολούθηση κατασκευών με υψηλές συχνότητες, καθώς η συχνότητα καταγραφής δεν ξεπερνά τα 10Hz.

### 2.2.1.2 ΤΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ (GNSS)

Είναι το δορυφορικό σύστημα τρισδιάστατου εντοπισμού θέσης σε παγκόσμια κλίμακα (π.χ. GPS, GLONASS, Galileo). Το σύστημα αποτελείται από τρία τμήματα. Το δορυφορικό, το τμήμα ελέγχου και το τμήμα χρηστών. Η αρχή λειτουργίας του GNSS βασίζεται στις μετρήσεις και τη φάση του φέροντος σήματος που λαμβάνουν οι επίγειοι δέκτες, συνήθως δύο, από τους δορυφόρους. Χρησιμοποιώντας τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους, το σύστημα προσδιορίζει τη σχετική θέση του ενός δέκτη ως προς τον άλλον με ακρίβεια μερικών χιλιοστών του μέτρου. Για την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός φορέα πραγματοποιούνται μετρήσεις που αφορούν τον σχετικό κινηματικό εντοπισμό, με επιλύσεις είτε σε πραγματικό χρόνο (real time kinematic), είτε εκ των υστέρων (post-processed kinematic). Ο ένας δέκτης, base, παραμένει σταθερός σε γνωστό σημείο αναφοράς, ενώ οι διορθώσεις που προκύπτουν στο σήμα του, λόγω της γνωστής του θέσης, χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν τη θέση του κινούμενου δέκτη, rover. Χρειάζεται προσοχή όμως, καθώς για να υπάρχει ισοδυναμία στις διορθώσεις, θα πρέπει η απόσταση μεταξύ τους να είναι της τάξης μερικών δεκάδων μέτρων.



Εικόνα 2-2 : Σχηματική αναπαράσταση του σχετικού κινηματικού εντοπισμού

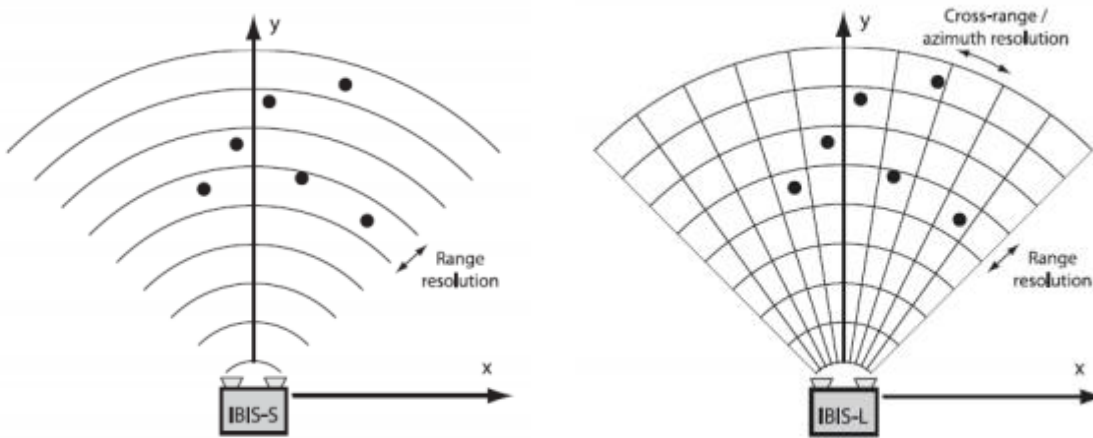
Έχοντας ως δεδομένη τη θέση, μέσω μαθηματικών υπολογισμών, προκύπτουν και μεγέθη όπως η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Επίσης, το GNSS χρησιμοποιεί υψηλή συχνότητα κατά τη δειγματοληψία (έως και 100 Hz). Οι μετρήσεις δεν παρεμποδίζονται από τις καιρικές συνθήκες και δεν απαιτείται ορατότητα μεταξύ των δεκτών. Παρόλα αυτά δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν σε κλειστούς χώρους, διότι απαιτείται ορατότητα από τους δορυφόρους. Τέλος, μια σειρά από διάφορους παράγοντες (όπως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, τροποσφαιρικές επιδράσεις κλπ.), ενδέχεται να υποβιβάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων κυρίως σε περιπτώσεις μόνιμων και ημι-μόνιμων παραμορφώσεων.

### 2.2.1.3 ΤΟ ΕΠΙΓΕΙΟ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΟ PANTAP (GB-RAR)

Το επίγειο Radar Πραγματικού ή Συνθετικού Ανοίγματος (GB-RAR/SAR) βασίζεται στις αρχές της μικροκυματικής συμβολομετρίας. Η χρήση του εξυπηρετεί κατασκευές και υψηλών αλλά και χαμηλών απαιτήσεων. Στα θετικά αυτής της μεθοδολογίας εντάσσεται το γεγονός ότι συνδυάζει μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις (<1mm) και μεγάλη συχνότητα στη δειγματοληψία, ενώ δεν απαιτείται πρόσβαση στο πεδίο μελέτης για την εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού.

Τα επίγεια Radar διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Το Radar Πραγματικού Ανοίγματος (RAR) που καταγράφει μεταβολές στη θέση κατά μία διάσταση, ακτινικά.
- Το Radar Συνθετικού Ανοίγματος (SAR) που καταγράφει μεταβολές στη θέση σε δύο διαστάσεις.



a) Radar Πραγματικού Ανοίγματος (RAR)

b) Radar Συνθετικού Ανοίγματος

Εικόνα 2-3 : Ανάλυση Μικροκυματικών Radar

Η μεθοδολογία αυτή προσφέρει τη δυνατότητα της ταυτόχρονης παρακολούθησης όλων των στόχων μέσα στην περιοχή μελέτης, ενώ δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες. Από την άλλη όμως, υπάρχουν αρκετά σφάλματα στις μετρήσεις, λόγω ανεπιθύμητων επιστροφών στα σήματα, ή λόγω περίπλοκης γεωμετρίας κατασκευής και μικρών αποστάσεων των σημείων ελέγχου που οδηγούν σε εσφαλμένη διάγνωση, που οφείλονται στην ακτινική ανάλυση του εκάστοτε σήματος Radar.

### 2.2.1.4 Ο ΕΠΙΓΕΙΟΣ ΣΑΡΩΤΗΣ LASER

Οι επίγειοι σαρωτές laser είναι 3D συσκευές, που αποτυπώνουν την επιφάνεια αντικειμένων και παρέχουν σε πραγματικό χρόνο τρισδιάστατα δεδομένα στο χρήστη. Τα μήκη κύματος laser που χρησιμοποιούνται βρίσκονται είτε στο ορατό, είτε στο υπέρυθρο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η διαδικασία που ακολουθείται αρχικά είναι ο ορισμός της περιοχής και της πυκνότητας σάρωσης και ακολουθεί η αποστολή της εικόνας της σαρωμένης επιφάνειας, που καταγράφεται από μια CCD κάμερα, στον συνδεδεμένο υπολογιστή. Στη συνέχεια ξεκινά η εκπομπή παλμού laser προς το υπό μελέτη αντικείμενο/μέλος με προκαθορισμένο γωνιακό βήμα. Κατά τη διάρκεια της σάρωσης, καταγράφεται ο χρόνος μετάβασης και επιστροφής της δέσμης, ώστε να υπολογιστεί η απόσταση κάθε σημείου. Καθώς η μεταφορά των πληροφοριών γίνεται σε πραγματικό χρόνο στον υπολογιστή, προκύπτει ένα τρισδιάστατο ανάγλυφο της περιοχής που σαρώθηκε.



### 2.2.1.5 ΒΙΝΤΕΟΜΕΤΡΙΑ

Τα συστήματα βιντεομετρίας που εφαρμόζονται στην παρακολούθηση των κατασκευών, βασίζονται στις αρχές της φωτογραμμετρίας και ανάλυσης εικόνας που αφορά σε μετρήσεις από κοντινές αποστάσεις. Αυτά τα συστήματα αποτελούνται από ψηφιακές βιντεοκάμερες υψηλής ευκρίνειας, με δυνατότητα παρακολούθησης αντικειμένων μικρότερα του 1mm και σε απόσταση μεγαλύτερη των 100m, συχνότητες δειγματοληψίας έως και 15Hz.

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ο συνδυασμός των ψηφιακών τεχνικών ανάλυσης εικόνας, με τις φωτογραμμετρικές μεθόδους, ενώ δεν απαιτείται πρόσβαση στο πεδίο μελέτης, καθώς το λογισμικό μπορεί να αναγνωρίσει χαρακτηριστικά σημεία (π.χ. κοχλίες, νευρώσεις, κλπ.). Ωστόσο κρίνεται εξαιρετικά δύσκολη η αποκατάσταση της κλίμακας μεταξύ εικόνας και αντικειμένου.

### 2.2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Στην παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών, όπως γέφυρες, ψηλά κτίρια κλπ., εφαρμόζονται κατά κόρον οι μέθοδοι πειραματικής μηχανικής. Ουσιαστικά, οι μεθοδολογίες αυτές αφορούν τη χρήση αισθητήρων μικρού μεγέθους και βάρους, που είναι εύκολοι στην τοποθέτηση και χρήσιμοι στην εξαγωγή σπουδαιών συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά της εκάστοτε κατασκευής. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται είναι τα επιταχυνσιόμετρα, όργανα μέτρησης της καταπόνησης, επιμηκυνσιόμετρα, κλινόμετρα, ακουστικοί πομποί, οπτικές ίνες και μικροηλεκτρομαγνητικοί αισθητήρες. Αναλυτικά η χρήση και η λειτουργία του κάθε οργάνου ακολουθεί στην υπό ενότητα 2.4.

## 2.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ

Στόχος της παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας μιας κατασκευής, είναι ο εντοπισμός της αστοχίας/βλάβης. Η ταυτοποίηση αυτής της αστοχίας/βλάβης χωρίζεται σε τέσσερα στάδια. Το πρώτο στάδιο ορίζει ότι υπάρχει βλάβη στην κατασκευή, ενώ στο δεύτερο και τρίτο εντοπίζεται η περιοχή της αστοχίας και αξιολογείται η έκταση της, αντίστοιχα. Στο τελευταίο στάδιο αξιοποιούνται τα δεδομένα από τα προηγούμενα βήματα, ώστε να προβλεφθεί η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής της κατασκευής, ή ο βαθμός που επηρεάζει την δομική ακεραιότητά της. Η υποφαινόμενη ενότητα θα ασχοληθεί με τα τρία πρώτα επίπεδα, για τα οποία υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες τεχνικών. Πρώτον, είναι οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την καθολική παρακολούθηση, οι οποίες δίνουν πληροφορίες για την κατασκευή, ως ενιαίο σύστημα και την ανταπόκριση της συνολικά έναντι των εκάστοτε φορτίσεων. Δεύτερον, υπάρχει η παρακολούθηση σε τοπικό επίπεδο ή επίπεδο μελών, η οποία χρησιμοποιείται για την ανάλυση τοπικών συμπεριφορών, σε κρίσιμα σημεία της κατασκευής.

Ανάλογα με το ποιές πληροφορίες σχετικές με την κατασκευή ενδιαφέρουν τον μηχανικό, αλλά και σε ποια κατηγορία τεχνικών παρακολούθησης, από τις δύο προαναφερθείσες, κατατάσσεται η εκάστοτε περίπτωση, υπάρχουν αρκετά συστήματα και τύποι αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή των επιθυμητών στοιχείων. Παρακάτω εξετάζονται οι δύο κατηγορίες τεχνικών παρακολούθησης και τα συστήματα που χρησιμοποιούνται.

### 2.3.1 ΚΑΘΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ

Βασική ιδέα της καθολικής παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας αποτελεί το γεγονός, ότι η ύπαρξη μιας αστοχίας/βλάβης αλλάζει τη δυσκαμψία, τη μάζα και την απόσβεση της κατασκευής και επομένως αλλάζει τη δυναμική συμπεριφορά συνολικά του φορέα. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του τύπου παρακολούθησης, είναι ότι η πιθανή περιοχή της αστοχίας/βλάβης δε χρειάζεται να είναι γνωστή πριν την εγκατάσταση του εξοπλισμού, γεγονός αρκετά σύνθηες. Η καθολική παρακολούθηση βασίζεται στις διαφορετικές ιδιότητες δομής της κατασκευής.

### 2.3.1.1 ΚΥΡΙΑΡΧΕΣ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ

Οι ιδιουσυχνότητες ιδιομορφών αποτελούν μια από τις βασικότερες ιδιότητες ταλαντώσεων της κατασκευής. Κάθε κατασκευή έχει μία κυρίαρχη ιδιουσυχνότητα για κάθε ιδιομορφή ταλάντωσης, η οποία σχετίζεται με τη μάζα και τη δυσκαμψία. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό της αστοχίας, μέσω της παρατήρησης των αλλαγών στις τιμές της κυρίαρχης ιδιουσυχνότητας. Παρόλο που αυτό αποτελεί ενδιαφέρουσα ιδέα, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στην πράξη.

Η κυρίαρχη ιδιουσυχνότητα αποτελεί καθολική παράμετρο και δεν παρέχει καμιά πληροφορία σε τοπικό επίπεδο, ή επίπεδο μελών της κατασκευής. Προφανώς, αυτή η τεχνική που βασίζεται στην αλλαγή της ιδιουσυχνότητας, μπορεί να είναι αποτελεσματική μόνο στην ανίχνευση της ύπαρξης ατελειών, καθώς για τον προσδιορισμό της περιοχής της αστοχίας και την εκτίμηση της σοβαρότητάς της απαιτούνται επιπλέον αναλύσεις. Θα πρέπει να προκληθούν σημαντικές ζημιές για να τροποποιηθεί η κυρίαρχη ιδιουσυχνότητα και μόνο ακριβή συστήματα μπορούν να ανιχνεύσουν την αλλαγή. Επίσης, είναι δύσκολο να αναγνωρισθεί, αν αυτή η αλλαγή οφείλεται σε κάποια μορφή αστοχίας/βλάβης, ή σε περιβαλλοντικούς ή λειτουργικούς παράγοντες.

Οι ιδιουσυχνότητες στις υψηλές ιδιομορφές που σχετίζονται με τοπικές μεταβολές είναι πιο ευαίσθητες σε μικρές βλάβες, οι οποίες είναι δύσκολο στην πραγματικότητα να διεγερθούν και να προκύψουν αυτές οι ιδιομορφές. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου έναντι των υπολοίπων στην καθολική παρακολούθηση είναι ότι μπορεί να εντοπιστεί η κυρίαρχη ιδιουσυχνότητα συντονισμού με μικρή σχετικά αβεβαιότητα.

Πολλές μέθοδοι παρακολούθησης που βασίζονται στις ιδιουσυχνότητες υποθέτουν ότι η μόνη μορφή αστοχίας είναι όταν υπάρχει ρωγμή, γεγονός που περιορίζει σημαντικά τις δυνατότητες της παρακολούθησης. Για παράδειγμα στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, η δυσκαμψία οφείλεται κατά κανόνα στις ιδιότητες του σκυροδέματος. Συνεπώς, με τη μέθοδο των ιδιουσυχνοτήτων θα εντοπισθούν μεταβολές μόνο όταν θα ρηγματωθεί το σκυρόδεμα και θα επηρεασθούν οι πρώτες ιδιομορφές, ενώ δε θα υπάρχει σαφής εικόνα για τον χάλυβα και τις άλλου είδους ενισχύσεις που μπορεί να έχουν υποστεί κάποια βλάβη. Ομοίως και για τις μεταλλικές κατασκευές, στις οποίες πέρα από τις σημαντικές αστοχίες, ενδέχεται να μην μπορούν να γίνουν αντιληπτές με τη μέθοδο των ιδιουσυχνοτήτων κάποιες μεταβολές που δεν επηρεάζουν τη δυσκαμψία και συνεπώς να απαιτούνται και άλλες μέθοδοι παρακολούθησης.

### 2.3.1.2 ΣΧΗΜΑ-ΔΙΑΝΥΣΜΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ

Τα σχήματα ιδιομορφών σχετίζονται με τις ιδιουσυχνότητες που προκύπτουν για συγκεκριμένες μορφές ταλάντωσης και αποτελούν ακόμη μία δυναμική ιδιότητα της κατασκευής. Οι ιδιομορφές επηρεάζονται από τη μάζα, τη δυσκαμψία και την απόσβεση του συστήματος και η τυχούσα βλάβη/αστοχία επιδρά σε αυτές όταν αλλάζει κάποια από τις παραπάνω παραμέτρους. Αρκετά πλεονεκτήματα σχετικά με την ανίχνευση αστοχιών, βασίζονται στις ιδιομορφές των ιδιουσυχνοτήτων, στις περιοχές όπου εμφανίζεται η βλάβη.

Οι ιδιομορφές αποτελούν μια χωρική αναπαράσταση και παρέχουν πληροφορίες που αφορούν την ύπαρξη αλλά και τη θέση της αστοχίας. Η δυσκολία με αυτή τη μέθοδο έγκειται στο γεγονός ότι απαιτείται σημαντικός αριθμός μετρήσεων θέσης/μετατόπισης για τον ακριβή προσδιορισμό της ιδιομορφής και οποιασδήποτε αλλαγής που ενδέχεται να προκληθεί λόγω κάποιας βλάβης. Όπως και με τη μέθοδο των κυρίαρχων ιδιουσυχνοτήτων, έτσι και σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν ζητήματα χαμηλής ευαισθησίας. Πολλές αστοχίες που συμβαίνουν αποτελούν τοπικά φαινόμενα και δεν μπορούν να ανιχνευθούν εύκολα με τις χαμηλές συχνότητες που παρατηρούνται στις μεγάλες κατασκευές, καθώς σε υψηλές συχνότητες είναι πιο έντονα τα τοπικά φαινόμενα. Μπορεί λοιπόν, τα σχήματα ιδιομορφών να υπερτερούν της μεθόδου που αφορά τις κυρίαρχες συχνότητες, όμως εξακολουθούν να είναι ανεπαρκή για μικρά επίπεδα βλαβών, πέρα από ρωγμές.

### 2.3.1.3 ΜΟΡΦΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ

Ένας εναλλακτικός τρόπος χρήσης των μορφών σχήματος είναι η ανίχνευση αστοχιών μέσω της καμπυλότητας του σχήματος της ιδιομορφής. Η καμπυλότητα προκύπτει από τη διπλή παραγωγή του διανύσματος της ιδιομορφής. Η τιμή της σε ένα σημείο στην κατασκευή ισούται με τον λόγο  $M/EI$ . Συνεπώς, αν η δυσκαμψία σε μια περιοχή μειωθεί λόγω κάποιας αστοχίας, η καμπυλότητα σε εκείνο το σημείο θα αυξηθεί. Κατά αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η ανίχνευση και ο εντοπισμός της αστοχίας πάνω στον φορέα, αλλά και η εκτίμηση της έκτασης της, μελετώντας την διακύμανση στις τιμές της καμπυλότητας. Η μελέτη της καμπυλότητας της ιδιομορφής αποδίδει εξαιρετικά τις μικρές αλλαγές στην κατασκευή, συγκριτικά με τη μελέτη του σχήματος της ιδιομορφής. Επομένως, με τη μέθοδο αυτή, χαμηλά επίπεδα βλαβών δύναται να ανιχνευθούν ακόμη και σε μικρές συχνότητες. Επιπλέον, η καμπυλότητα σχετίζεται άμεσα με την καμπτική λειτουργία των δοκών, των πλακών και των κελυφών. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η καμπτικότητα ενός μέλους είναι πιο ευαίσθητη σε χαμηλού επιπέδου βλάβες, σε σχέση με τη μελέτη των ιδιοσυχνοτήτων και των σχημάτων ιδιομορφής.

Το κυριότερο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής μπορεί να θεωρηθεί η ακρίβεια. Οι υπολογισμοί που γίνονται για την εύρεση της δεύτερης παραγώγου του σχήματος της ιδιομορφής, ενδέχεται να οδηγήσουν σε μη αληθή ανίχνευση βλάβης και να δώσουν λανθασμένα αποτελέσματα. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η στατιστική αβεβαιότητα στην εύρεση των τιμών της καμπυλότητας, μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στις τεχνικές των ιδιοσυχνοτήτων και σχημάτων ιδιομορφών. Ακόμη μια δυσκολία που μπορεί να προκύψει με τις τεχνικές παρακολούθησης που βασίζονται στην καμπυλότητα, αφορά την μη ύπαρξη διαθέσιμων στοιχείων αναφοράς για την αρχική δομή της κατασκευής. Για παράδειγμα αν υπάρχει γενικευμένη ζημιά στην κατασκευή, προτού συλλεχθούν οποιαδήποτε δεδομένα, τότε είναι εξαιρετικά δύσκολο να εντοπιστούν οι περιοχές αστοχιών, χωρίς να είναι γνωστή η τιμή της καμπυλότητας πριν τη βλάβη.

Η τεχνική με τη μελέτη της καμπυλότητας της ιδιομορφής, αποτελεί πιο πιθανή και αποτελεσματική επιλογή για παρακολούθηση μεγάλων έργων υποδομής, δεδομένου ότι απαιτεί πληροφορίες μόνο από ιδιομορφές χαμηλών συχνοτήτων. Παρόλα αυτά, τα προβλήματα σχετικά με την ακρίβεια και την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου χρήζουν αντιμετώπισης.

### 2.3.1.4 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΗΤΡΩΟ ΑΚΑΜΨΙΑΣ

Μία άλλη μέθοδος για την καθολική παρακολούθηση βασίζεται στον υπολογισμό του δυναμικού μητρώου ευκαμψίας της κατασκευής. Το μητρώο αυτό προκύπτει από την αντιστροφή του μητρώου δυσκαμψίας του φορέα και επομένως σχετίζεται με την εφαρμογή στατικής φόρτισης για τις μετακινήσεις. Το μητρώο υπολογίζεται βάσει της κανονικοποιημένης μάζας και των ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής. Κάθε στήλη του πίνακα αντιπροσωπεύει την ένταση που προκαλείται στον εκάστοτε βαθμό ελευθερίας, για μοναδιαία και μοναδική μετακίνηση για τον αντίστοιχο βαθμό ελευθερίας. Η ανίχνευση και ο προσδιορισμός, λοιπόν, πιθανής αστοχίας/βλάβης, μπορεί να γίνει και με τη μελέτη του μητρώου δυσκαμψίας. Ο βαθμός ελευθερίας που εμφανίζει τη μέγιστη μεταβολή συγκριτικά με το αρχικό, άρτιο δομικά μητρώο φανερώνει και την περιοχή της βλάβης. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι, ότι το μητρώο αυτό συνδέεται αντιστρόφως με τις ιδιοσυχνότητες, γεγονός που την κάνει πιο ευαίσθητη στις χαμηλές συχνότητες, που κυριαρχούν στις μεγάλες κατασκευές.

Υπάρχουν, σαφώς, ορισμένα μειονεκτήματα στη χρήση των μητρώων δυσκαμψίας. Στις περισσότερες εφαρμογές, μόνο ορισμένες ιδιομορφές είναι δυνατόν να υπολογιστούν. Καθώς όμως το μητρώο δυσκαμψίας απαιτεί όλες τις πιθανές ιδιομορφές, τότε ο υπολογισμός του γίνεται κατά προσέγγιση. Προσθετικά, αυτή η μέθοδος αποδίδει μόνο όταν υπάρχουν στοιχεία της κατασκευής στην αρχική, άθικτη φάση της, ώστε να γίνει η σύγκριση με την τρέχουσα κατάσταση. Αυτό απαιτεί, είτε να λαμβάνονται μετρήσεις αμέσως μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, είτε να χρησιμοποιείται μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της αρχικής δομής. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως, που οι μηχανικοί θέλουν να

εξετάσουν μία υπάρχουσα κατασκευή, οι αρχικές μετρήσεις πριν την εμφάνιση των αστοχιών/βλαβών δεν υπάρχουν. Επίσης, η χρήση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της αρχικής δομής, μπορεί να αποτελεί μια ικανοποιητική λύση, αλλά δεν παύει να βασίζεται σε μια σειρά υποθέσεων και παραδοχών, που χρησιμοποιούνται στη μελέτη κατασκευής και οδηγούν σε προσεγγιστικό μητρώο δυσκαμψίας. Επομένως, παρόλο που η μελέτη του μητρώου δυσκαμψίας της κατασκευής, βοηθά στην ανίχνευση αστοχιών/βλαβών σε χαμηλές συχνότητες, η ακρίβεια της δεν θεωρείται καλή, λόγω των παραδοχών που λαμβάνονται υπόψιν.

### 2.3.1.5 ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Μία άλλη κατηγορία τεχνικών παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας ασχολείται με τις ακουστικές ιδιότητες της δομής, αντί της μελέτης των δομικών και δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής. Αυτές οι τεχνικές βασίζονται στη μέτρηση των κυμάτων που διαδίδονται στο δομικό μέσο. Κάποιες μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην τοπική παρακολούθηση ακεραιότητας, εξετάζουν τον τρόπο με τον οποίο διαδίδονται τα κύματα σε περιοχές που παρατηρούνται ανωμαλίες στα υλικά.

Οι τεχνικές που αφορούν την ακουστική παρακολούθηση, όπως τα συστήματα ακουστικής εκπομπής, μπορούν να μετρήσουν πώς τα κύματα «στρες» ακτινοβολούν μέσω της δομικής ύλης. Η βασική ιδέα είναι ότι αυτά τα κύματα «στρες» παράγονται από μια αιφνίδια απελευθέρωση ενέργειας που οφείλεται σε μικρό-ρωγμές που πραγματοποιούνται στο υλικό. Αυτά τα κύματα μπορούν να γίνουν αντιληπτά από ακουστικούς πομπούς για την ανίχνευση ρωγμών, αλλά ακόμη και για τον εντοπισμό αυτών μέσω μεθόδων τριγωνισμού με τη χρήση πολλαπλών αισθητήρων.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των τεχνικών είναι ότι έχουν την ικανότητα να ανιχνεύσουν αστοχίες/βλάβες τη στιγμή που συμβαίνουν και όχι κατόπιν επεξεργασίας δεδομένων. Αυτό όμως, ελλοχεύει κινδύνους, καθώς απαιτεί συνεχόμενη συλλογή δεδομένων, αλλιώς οι εκπομπές των κυμάτων «στρες» μπορεί να μην γίνουν αντιληπτές. Η διαρκής συλλογή δεδομένων ενδέχεται να είναι αντιοικονομική, ή ακόμα και ανέφικτη. Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι, ότι τα κύματα που εκπέμπονται από τη δημιουργία μικρό-ρωγμών μπορεί να είναι πολύ αδύναμα και να είναι δύσκολο να ανιχνευθούν και να διακριθούν ανάμεσα στους θορύβους του περιβάλλοντος.

Οι μέθοδοι λοιπόν, παρακολούθησης ακουστικών εκπομπών είναι μια διαδεδομένη επιλογή, γιατί θεωρητικά ανιχνεύονται οι αστοχίες/βλάβες σε όλη την έκταση του φορέα, αμέσως μόλις δημιουργούνται. Αυτό θα μπορούσε να έχει σημαντικές εφαρμογές στα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης που αποσκοπούν στο κλείσιμο, ή στην εκκένωση των κατασκευών, εάν η ζημία υποδεικνύει πιθανή καταστροφική αστοχία/βλάβη.

## 2.3.2 ΤΟΠΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ

Μόλις καθοριστούν οι πιθανές θέσεις βλάβης, από τις τεχνικές καθολικής παρακολούθησης, ή εάν υπάρχουν κρίσιμες περιοχές αρχικά γνωστές, πραγματοποιούνται τοπικές μέθοδοι παρακολούθησης της ακεραιότητας, για να εκτιμηθεί η έκταση της αστοχίας/βλάβης και να συνεχιστεί η καταγραφή της εξέλιξης της. Υπάρχουν αρκετές τεχνικές για την τοπική ανίχνευση ζημιών και την αξιολόγησή τους, αλλά όλα εστιάζουν σε μικρές βασικές έννοιες, που αναλύονται παρακάτω.

### 2.3.2.1 ΟΠΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Ίσως ο πιο κοινός τύπος τοπικής παρακολούθησης που χρησιμοποιείται είναι ο οπτικός έλεγχος. Με αυτή την εξαιρετικά απλή μέθοδο, ανιχνεύονται βλάβες στην κατασκευή απλά με την παρακολούθηση της με γυμνό μάτι και συνήθως, διαπιστώνονται αλλαγές και ανωμαλίες στον φορέα. Αυτές οι οπτικές επιθεωρήσεις χρησιμοποιούνται υπερβολικά συχνά, στα μεγάλα έργα, κυρίως λόγω των τακτικών ελέγχων που γίνονται σε αυτά, είτε σε ετήσια, είτε σε εξαμηνιαία βάση. Η διεξαγωγή οπτικών παρατηρήσεων, απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα και συνήθως σε έργα όπως γέφυρες, διακοπή της

λειτουργίας της κατασκευής. Επίσης, απαιτείται αρκετό ανθρώπινο δυναμικό, όπως και διάφορες άλλες δαπάνες. Οι οπτικές επιθεωρήσεις εξαρτώνται επίσης, σε μεγάλο βαθμό από τις γνώμες και αποφάσεις του εκάστοτε επιθεωρητή και ενδέχεται να οδηγήσουν σε μεγάλες αποκλίσεις τα αποτελέσματα, λόγω της υποκειμενικότητας. Προσθετικά, μόνο εξωτερικές αστοχίες/βλάβες είναι ορατές και συνεπώς, εσωτερικές ζημιές μπορεί να αγνοηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επομένως, παρόλο που αυτή η τεχνική είναι ευρέως διαδεδομένη, έχει αρκετές ατέλειες και για αυτό κρίνεται απαραίτητη η αντικειμενικότητα και η εγκυρότητα των μετρήσεων, για την ασφαλή αξιολόγηση της τρέχουσας δομικής ακεραιότητας της κατασκευής.

#### 2.3.2.2 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ

Η παρακολούθηση και η αξιολόγηση αστοχιών/βλαβών μέσω των παραμορφώσεων, ή των μετακινήσεων αποτελεί μια ακόμη επιθυμητή τεχνική. Καθώς η κατασκευή εντείνεται και παραμορφώνεται, το υλικό και αυτό εντείνεται και παραμορφώνεται, διότι αποκρίνεται στη συνολική συμπεριφορά. Αν αυτές οι παραμορφώσεις υπερβαίνουν κάποιες τιμές, τότε υπάρχουν βάσιμες υποψίες για πιθανές αστοχίες/βλάβες. Αυτή η τεχνική, της παρακολούθησης των παραμορφώσεων, χρησιμοποιείται κυρίως για προληπτικούς λόγους, στις κρίσιμες περιοχές, δηλαδή σε σημεία σύνδεσης, ή σε «αδύναμες» διατομές, όπως αυτές προκύπτουν από την αρχική μελέτη, αλλά και από την καθολική παρακολούθηση του φορέα. Μια ακόμη εφαρμογή της καταγραφής των παραμορφώσεων είναι η συνεχής παρακολούθηση μιας ήδη γνωστής βλάβης, ώστε να διαπιστωθεί η εξέλιξη της και αν αυτή επιδεινώνεται.

Επίσης, πέρα από τη μέτρηση των παραμορφώσεων και μετακινήσεων, ωφέλιμη αποδεικνύεται και η καταγραφή της κλίσης της κατασκευής, ή του μέλους που μας ενδιαφέρει. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται στις γέφυρες αλλά και σε υψηλές κατασκευές, καθώς οι περιβαλλοντικές συνθήκες και οι φορτίσεις λειτουργίας, μπορεί να αλλάξουν τη γωνία στήριξης του φορέα.

Το κυριότερο πρόβλημα με αυτές τις τεχνικές παρακολούθησης αφορούν το πού θα πρέπει να επικεντρώνονται οι μετρήσεις αυτές, ώστε να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά. Συχνά, οι παραμορφώσεις μετρώνται σε εκατοστά (ή ίντσες), ή και λιγότερο και οι μετατοπίσεις και η κλίση καταγράφονται μόνο σε ένα σημείο και όχι σε μια ευρύτερη περιοχή. Σε γενικές γραμμές, οι τεχνικές αυτές κρίνονται αποτελεσματικές και χρησιμοποιούνται ευρέως.

#### 2.3.2.3 ΕΝΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

Μια άλλη τεχνική που χρησιμοποιείται στην τοπική παρακολούθηση είναι οι καταγραφές εντάσεων και φορτίσεων, που δέχεται μέρος της κατασκευής. Αν οι μετρήσεις έντασης, ή φόρτισης που δέχεται τοπικά ο φορέας, υπερβαίνουν ένα ανώτατο όριο, πιθανόν να προκληθεί κάποια ζημιά. Επίσης, αν οι σχετικές καταγραφές μειωθούν σημαντικά και απότομα, μπορεί να αποτελούν ένδειξη ότι κάποια αστοχία/βλάβη έχει προκύψει και ο φορέας αδυνατεί να αντέξει το φορτίο που δεχόταν. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται σπάνια, καθώς οι εντάσεις και τα φορτία είναι δύσκολο να μετρηθούν άμεσα, σε αντίθεση με τις μετατοπίσεις και τις παραμορφώσεις.

#### 2.3.2.4 ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Στην τοπική παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας χρησιμοποιούνται και ακουστικές τεχνικές, για την ανίχνευση αστοχιών/βλαβών. Σε αυτές τις τεχνικές εξετάζεται η διάδοση των ηχητικών κυμάτων μέσω του υλικού. Στην περίπτωση, όπου υπάρχουν ανωμαλίες, όπως φυσαλίδες, ή κενά αέρα στο υλικό, η αντανάκλαση των ηχητικών κυμάτων παρουσιάζει αλλαγές από την αναμενόμενη. Αυτή η αρχή είναι η βάση για τα διάφορα τεστ που γίνονται, είτε με δοκιμές με αλυσίδα, είτε με άλλες πειραματικές μεθόδους. Αρκετές μέθοδοι από αυτές όμως παρουσιάζουν πρόβλημα υποκειμενικότητας, καθώς τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τον εκάστοτε επιθεωρητή, που λαμβάνει και ακούει τους ήχους. Για παράδειγμα δύο διαφορετικοί επιθεωρητές μπορεί να βγάλουν εντελώς διαφορετικά πορίσματα. Ένα άλλο μειονέκτημα

των ακουστικών τεχνικών αφορά τη δυνατότητα πρόσβασης στην περιοχή εξέτασης. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για τις δοκιμές με το σύρσιμο της αλυσίδας που χρησιμοποιείται στις γέφυρες, απαιτείται το κλείσιμο της γέφυρας.

Μια άλλη μέθοδος που βασίζεται στην ακουστική, χρησιμοποιεί τη διάδοση των κυμάτων που δημιουργούνται από την άσκηση μιας δύναμης και διαφαίνεται αν έχουν διαταραχθεί οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Αυτή η τεχνική επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μιας κρουστικής δύναμης στην περιοχή όπου γίνεται η εξέταση και η ακρόαση από τον επιθεωρητή της ηχητική απόκρισης. Με βάση τη συχνότητα των αποκλίσεων των κυμάτων απόκρισης, δύναται να ανιχνευθούν κενά, ρωγμές, καθώς και η περιοχή στην οποία έχουν σχηματιστεί. Αυτό την κάνει να είναι πολύ ακριβής ως μέθοδος. Το μειονέκτημά της όμως, είναι ότι θα πρέπει ο έλεγχος να γίνει σε αρκετές περιοχές, ώστε να υπάρχει μια ολοκληρωμένη άποψη για την ανίχνευση και τον εντοπισμό των βλαβών. Τέλος, όταν εφαρμόζεται σε γέφυρες αυτή η τεχνική, αλλά και σε άλλα έργα που επιτελούν σημαντικές κοινωνικές δραστηριότητες, απαιτεί διακοπή της λειτουργίας τους.

## **2.4 ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟ ΣΗΜ**

Για την επίτευξη των μεθόδων και τεχνικών της παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών απαιτούνται τα κατάλληλα δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά πέρα από τις τοπογραφικές μεθόδους, όπως προαναφέρθηκαν στην ενότητα 2.2.1, αναλαμβάνουν να τα συλλέξουν όργανα και αισθητήρες, που τοποθετούνται σε κείρια σημεία στην κατασκευή, ή ενίοτε την διατρέχουν ολόκληρη. Υπάρχουν συσκευές που καταγράφουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά και άλλες που παίρνουν μετρήσεις από την ίδια την κατασκευή, σχετικά με τις φορτίσεις, τις μετακινήσεις και τις δομικές αλλαγές που υφίσταται. Τα όργανα και οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται εξελίσσονται διαρκώς. Παρακάτω αναφέρονται τα πιο διαδεδομένα, που έχουν καθιερωθεί, αλλά και νέα ελπιδοφόρα τεχνολογικά συστήματα.

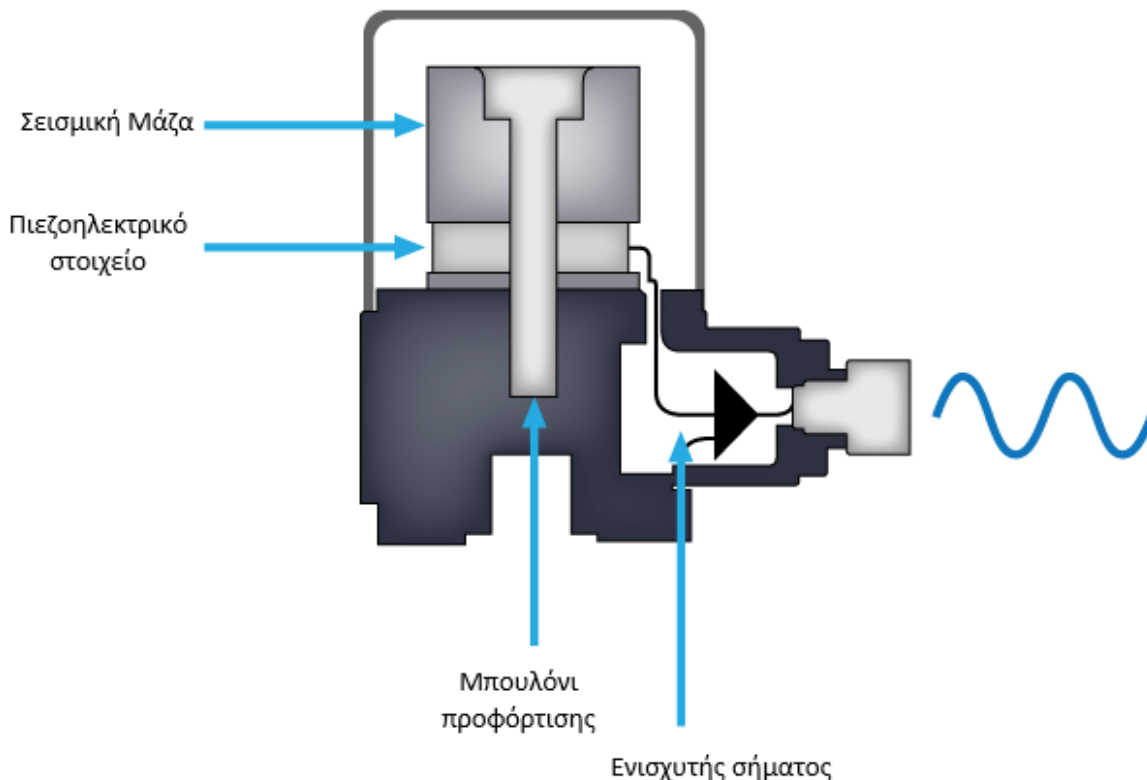
### **2.4.1 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ**

Τα επιταχυνσιόμετρα είναι αισθητήρες μέτρησης και καταγραφής επιτάχυνσης και παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Με την μέτρηση επιταχύνσεων, μπορεί να επιτευχθεί ο υπολογισμός συχνοτήτων, αποσβέσεως, αλλά και ιδιομορφών ενός έργου. Η αρχή λειτουργίας αυτών των οργάνων βασίζεται στη μέτρηση της επιτάχυνσης μιας μάζας που διεγείρεται από εξωτερικές δυνάμεις. Καθώς γίνεται ολοκλήρωση του μεγέθους της επιτάχυνσης ως προς τον χρόνο, προκύπτει η ταχύτητα και με δεύτερη ολοκλήρωση η θέση. Υπάρχουν τέσσερα είδη επιταχυνσιόμετρων που χρησιμοποιούνται, τα πιεζοηλεκτρικά, με πιεζοαντιστάσεις, τα χωρητικά και οι σερβομηχανισμοί.

#### **2.4.1.1 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ**

Τα πιεζοηλεκτρικά είναι τα πιο διαδεδομένα και έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως μικρό μέγεθος, υψηλή απόδοση, ανθεκτικότητα και ικανότητα παρακολούθησης ενός μεγάλου εύρους ιδιοσυχνοτήτων. Τα βασικά στοιχεία ενός πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου είναι η βάση, δηλαδή ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και μια σεισμική μάζα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-4. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε αυτούς τους αισθητήρες είναι τα βασικά συστατικά για τη λειτουργία. Έχουν τη μοναδική ιδιότητα, να παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο με τη διαφορά τάσης που δημιουργείται, λόγω της παραμόρφωσης του στοιχείου που προκύπτει από τη δράση μιας δύναμης. Καθώς λοιπόν, εφαρμόζεται επιτάχυνση στη βάση του αισθητήρα, τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία δέχονται μια δύναμη ανάλογη της μάζας, με την οποία συνδέονται και κατ' επέκταση με την επιτάχυνση που αναπτύσσεται. Αυτή η δύναμη προκαλεί ένα ηλεκτρικό σήμα που μπορεί να αποσταλεί μέσω ενός καλωδίου σε ένα σύστημα λήψης δεδομένων, όπου

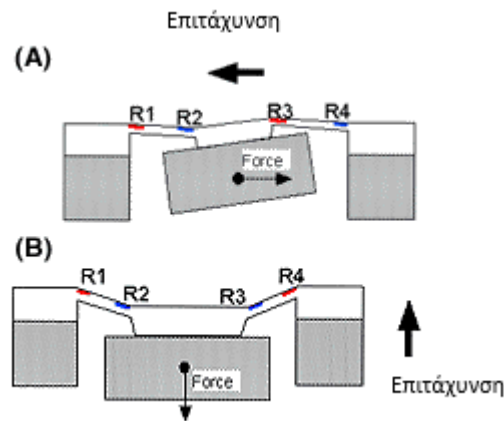
εκτελείται και η περαιτέρω επεξεργασία του. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι δε χρειάζεται σταθερή είσοδο ηλεκτρικής ενέργειας, ή κάποια πηγή ενέργειας, καθώς ο αισθητήρας, αυτό-δημιουργεί το σήμα που παράγει λόγω της ιδιότητας των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Επειδή το παραγόμενο σήμα είναι επιρρεπές σε περιβαλλοντικούς θορύβους, υπάρχουν ειδικά ηλεκτρονικά μέσα που διασφαλίζουν τη μετάδοση του σήματος σε μακριές αποστάσεις καλωδίων.



Εικόνα 2-4 : Δομή πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου

#### 2.4.1.2 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ ΜΕ ΠΙΕΖΟΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ

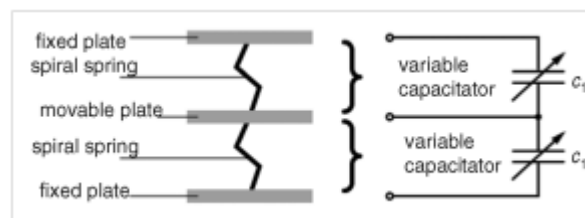
Ένας άλλος τύπος επιταχυνσιόμετρου χρησιμοποιεί δείκτες πίεσης, οι οποίοι χρησιμοποιούν αντιστάσεις από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Η ηλεκτρική αντίσταση αυτού του υλικού αλλάζει ανάλογα με την ένταση που ασκείται σε αυτό. Η κοινή δομή περιλαμβάνει τέσσερις πιεζοαντιστάσεις σε διάταξη γέφυρας, που συνδέονται με μια σεισμική μάζα (Εικόνα 2-5). Καθώς ο αισθητήρας δέχεται την επιτάχυνση, οι μετρητές τάσης κάμπτονται και με μεταβάλλεται η τάση στην έξοδο του ηλεκτρικού σήματος από το κύκλωμα γέφυρας (Wheatstone). Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να παραχθούν σε ένα πολύ μικρό μέγεθος τα ηλεκτρικά σήματα. Επίσης, τα επιταχυνσιόμετρα με πιεζοαντιστάσεις παρέχουν δυνατότητα καταγραφής πολύ χαμηλών συχνοτήτων. Το αρνητικό είναι ότι έχουν πολύ χαμηλό εύρος μέτρησης και απαιτούν σταθερή ηλεκτρική είσοδο για το κύκλωμα της γέφυρας.



Εικόνα 2-5 : Δομή επιταχυνσιόμετρου με πιεζοαντιστάσεις

#### 2.4.1.3 ΧΩΡΗΤΙΚΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ

Τα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα είναι παρόμοια με τα πιεζοαντιστατικά, καθώς μετρούν μια ηλεκτρική αλλαγή σε μια γέφυρα, με τη διαφορά ότι αυτοί οι αισθητήρες μετρούν τη μεταβολή της χωρητικότητας κάποιων πυκνωτών. Τρία φύλλα πυριτίου, τα οποία τοποθετούνται παράλληλα το ένα στο άλλο και συνδέονται με σπειροειδή ελατήρια, σχηματίζουν μια σύνδεση πυκνωτών σε σειρά. Τα δύο εξωτερικά φύλλα είναι σταθερά, ενώ το εσωτερικό, το οποίο παίζει το ρόλο της μάζας, έχει τη δυνατότητα να μετακινείται (Εικόνα 2-6). Οποιαδήποτε μετακίνηση του μεσαίου φύλλου προκαλεί διαφορά στην χωρητικότητα των πυκνωτών, η οποία μετρείται και μετατρέπεται σε μετρούμενη επιτάχυνση. Ως εκ τούτου δεν είναι αισθητήρες επιτάχυνσης, αλλά αισθητήρες δύναμης. Για τη μέτρηση της επιτάχυνσης σε τρεις διαστάσεις θα πρέπει να υπάρχουν τρεις τέτοιοι αισθητήρες, τοποθετημένοι κάθετα μεταξύ τους.



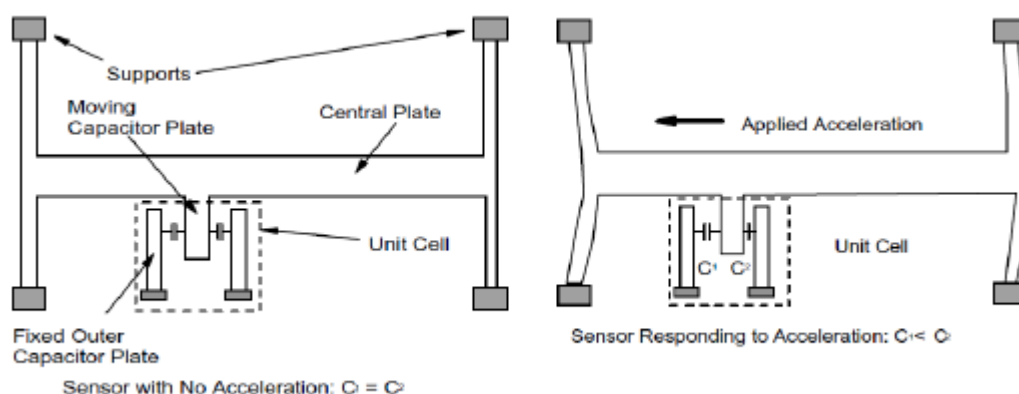
Εικόνα 2-6 : Δομή χωρητικού επιταχυνσιόμετρου

#### 2.4.1.4 ΣΕΡΒΟΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ

Η λειτουργία αυτού του τύπου επιταχυνσιόμετρων διαφέρει από τις προηγούμενες. Και οι τρεις προηγούμενες μετρούν την εκτροπή μιας σεισμικής μάζας, η οποία είναι ανάλογη με την επιτάχυνση που αναπτύσσεται και η διαδικασία που ακολουθείται αφορά αρχές ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Τα επιταχυνσιόμετρα με σερβομηχανισμούς, εκτελούν την κίνηση μιας εσωτερικής πλάκας πυκνωτών στο ελάχιστο, χρησιμοποιώντας ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις για να διατηρηθεί η μάζα σε ουδέτερη θέση. Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη που αναπτύσσεται είναι ανάλογη της αναπτυσσόμενης επιτάχυνσης. Ο αισθητήρας ενεργοποιείται σχεδόν αμέσως, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σχεδόν καμιά σχετική κίνηση μεταξύ της πλάκας και των στηριγμάτων της. Αυτός ο τύπος αισθητήρα είναι αρκετά ακριβής



συγκριτικά με τους άλλους τρεις, της τάξης mili-g. Το κύριο μειονέκτημα είναι το κόστος, που μπορεί να φτάσει μέχρι και δέκα φορές παραπάνω.



Εικόνα 2-7 : Δομή επιταχυνσιόμετρου με σερβομηχανισμό

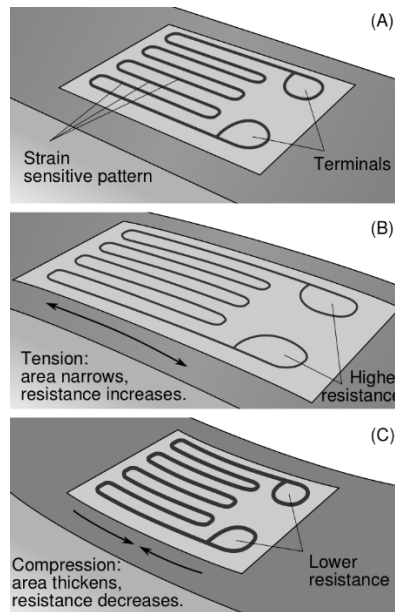
#### 2.4.2 ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ- ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ

Η μετρητές μηχανικής τάσης στην παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας, χρησιμοποιούνται για πολλούς λόγους. Το κυριότερο πλεονέκτημα τους είναι ότι είναι φθηνοί και τοποθετούνται εύκολα. Παρόλο που οι μετρητές τάσεις χρησιμοποιούνται για σημειακές μετρήσεις, οι πληροφορίες που συλλέγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν, σε συνδυασμό με ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, για την ανίχνευση αστοχίας/βλάβης. Η λογική που κρύβεται πίσω από τη χρήση τους, βασίζεται στην αρχή ότι όταν παρουσιαστεί κάποια βλάβη, αυτή θα οδηγήσει σε αλλαγή της διαδρομής του φορτίου και συνεπώς σε διαφορετική κατανομή της τάσης στα στελέχη της συσκευής. Δύο τύποι οργάνων υπάρχουν, αυτοί που χρησιμοποιούν ηλεκτρικές αντιστάσεις και αυτοί με δονητικό καλώδιο.

##### 2.4.2.1 ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ

Είναι γνωστοί ως ηλεκτρικοί μετρητές τάσεων αντοχής και αποτελούνται από φύλλα αλουμινίου. Η λειτουργία του οργάνου βασίζεται στη λογική ότι η ηλεκτρική αντίσταση ενός αγωγικού υλικού είναι ανάλογη του μήκους και αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους της εγκάρσιας τομής. Η τυπική δομή φαίνεται στο Εικόνα 2-8 και ουσιαστικά αποτελείται από ένα μεταλλικό φύλλο πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένο ένα μη αγωγικό φιλμ, που με τη σειρά του συνδέεται με ένα εποξικό, δηλαδή ένα ιξώδες υγρό. Κατά αυτόν τον τρόπο όταν ο μετρητής παραμορφωθεί, το φύλλο από τεντωμένο που είναι πάνω στο εξεταζόμενο μέλος, θα αλλάξει το μήκος και τη διατομή του αντιστάτη, μεταβάλλοντας έτσι και την ηλεκτρική αντίσταση. Η σχέση μεταξύ της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης και της αλλαγής του μήκους των φύλλων, καθώς είναι μοναδική για κάθε όργανο, δίνει ως αποτέλεσμα την καταπόνηση που υφίσταται η εξεταζόμενη διατομή.

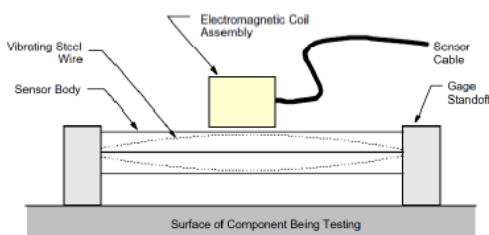
Επειδή η ηλεκτρική αντίσταση αλλάζει και λόγω της αλλαγής θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται συμπληρωματικά ένας μετρητής ελέγχου θερμοκρασίας. Επίσης, αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε δομικό υλικό. Γενικά όμως, αυτός ο τύπος οργάνου χρησιμοποιείται μόνο για βραχυπρόθεσμες μετρήσεις, καθώς χάνει την ακρίβειά του με τον χρόνο, λόγω ευαισθησίας σε δυσμενείς συνθήκες. Προσθετικά, η ακρίβεια στις μετρήσεις που κάνει είναι ικανοποιητική μόνο κατά τη διαμήκη κατεύθυνση, η οποία όμως μπορεί να επηρεαστεί και από τις εγκάρσιες κινήσεις και συνεπώς μειώνεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Παρόλα αυτά, αυτοί οι μετρητές τάσης αποτελούν τη συνηθέστερη επιλογή.



Εικόνα 2-8 : Δομή και λειτουργία μετρητή τάσης με ηλεκτρικές αντιστάσεις

#### 2.4.2.2 ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΔΟΝΗΤΙΚΟ ΚΑΛΩΔΙΟ

Αυτοί οι αισθητήρες παρέχουν εξαιρετικές επιδόσεις και μακροχρόνια ανθεκτικότητα και μπορούν να τοποθετηθούν εξωτερικά σε χάλυβα και σκυρόδεμα, αλλά και να ενσωματωθούν μέσα στο σκυρόδεμα. Περιλαμβάνουν ένα προεντεταμένο χαλύβδινο σύρμα, το οποίο είναι στερεωμένο σε αμφότερα στηρίγματα και ένα ηλεκτρομαγνητικό πηνίο, που χρησιμοποιείται για να διεγείρει το σύρμα και να «διαβάσει» τη συχνότητά του. Το σύρμα είναι τοποθετημένο μέσα σε ένα χαλύβδινο σωλήνα. Η τυπική διάταξη αυτών των αισθητήρων, παρουσιάζεται στο Εικόνα 2-9(α), ενώ η μορφή του στο Εικόνα 2-9(β).



(α) Τυπική δομή



(β) Εξωτερική μορφή

Εικόνα 2-9 : Μετρητής τάσης-Επιμηκυνσιόμετρο

Ουσιαστικά, η λειτουργία του οργάνου, βασίζεται στη μεταβολή της συχνότητας, καθώς και στο μήκος του προεντεταμένου σύρματος, ανάλογα με την τάση που εφαρμόζεται. Αυτές οι μετρήσεις έχουν αποδειχθεί ότι είναι πολύ σταθερές για μεγάλες χρονικές περιόδους και για αυτό αυτά τα όργανα χρησιμοποιούνται σε παρατηρήσεις βραδέως εξέλιξης. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι ότι αυτοί οι αισθητήρες δεν αφορούν δυναμικές παραμορφώσεις και μπορούν να επηρεαστούν τα αποτελέσματα λόγω θερμικών διαστολών του σύρματος.

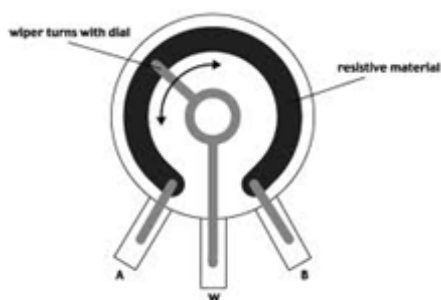
#### 2.4.3 ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ- ΒΕΛΟΜΕΤΡΑ

Η καταγραφή της μετατόπισης αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας. Χρησιμοποιείται συνήθως, για την εκτίμηση της κατάστασης κρίσιμων θέσεων. Τα πιο

συνηθισμένα όργανα για τη μέτρηση μετατόπισης είναι τα γραμμικά ποτενσιόμετρα και οι γραμμικοί μεταβαλλόμενοι διαφορικοί μετασχηματιστές (LVDTs).

#### 2.4.3.1 ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΑ

Το γραμμικό ποτενσιόμετρο είναι ένας μεταβλητός αντιστάτης. Αποτελείται από μια αγωγίμη πλάκα πάνω στην οποία κινείται μια επαφή, που αποτελεί επέκταση ενός καρουλιού. Ένα καλώδιο από ανοξείδωτο χάλυβα είναι τυλιγμένο γύρω από το καρούλι και ανάλογα με τη μετατόπιση η επαφή αλλάζει θέση. Το ένα άκρο του καλωδίου βρίσκεται συνδεδεμένο με το εξάρτημα που μετράει τη μετατόπιση. Ουσιαστικά, όταν το όργανο καταγράφει την αλλαγή θέσης ενός σημείου, το καλώδιο εκτεινεται ή μαζεύεται, με αποτέλεσμα να αλλάζει η ηλεκτρική αντίσταση, που είναι ανάλογη του μήκους του και η μεταβολή της αντίστασης γίνεται γραμμικά. Στα θετικά της χρήσης αυτού του οργάνου είναι το χαμηλό κόστος, η ικανότητα μέτρησης μεγάλων μετατοπίσεων, η ευκολία στη λειτουργία και στην εγκατάστασή του και η ακρίβειά του. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει ένα γραμμικό ποτενσιόμετρο είναι ότι δεν ικανοποιεί δυναμικές μετρήσεις και παρουσιάζει προβλήματα που σχετίζονται με τη θερμοκρασία και τη τριβή και φθορά των υλικών στο εσωτερικό του οργάνου.



(α) Τυπική δομή

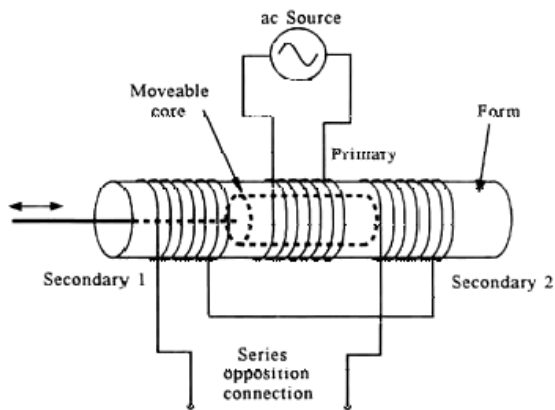


(β) Εξωτερική μορφή

Εικόνα 2-10 : Γραμμικό ποτενσιόμετρο

#### 2.4.3.2 LVDT

Οι γραμμικοί μεταβαλλόμενοι μετασχηματιστές βασίζονται στην αρχή της επαγωγής. Αποτελούνται από ένα κοίλο μεταλλικό κύλινδρο, που περιέχει ένα κύριο και δύο δευτερεύοντα ηλεκτρικά πηνία και έναν μαγνητικό πυρήνα (Εικόνα 2-11(α)). Αυτός ο αισθητήρας λειτουργεί όταν εφαρμόζεται μια ηλεκτρική τάση στο κεντρικό πηνίο, το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί τάση στα δύο δευτερεύοντα. Αυτές οι τάσεις από επαγωγή σχετίζονται γραμμικά με τη θέση του μαγνητικού πυρήνα που είναι προσαρτημένος στο μέλος του οποίου η μετατόπιση παρουσιάζει ενδιαφέρον. Καθώς, λοιπόν, ο μαγνητικός πυρήνας κινείται, οι μεταβαλλόμενες τάσεις στα δευτερεύοντα πηνία μετατρέπονται στο μέγεθος της μετατόπισης που προκύπτει. Γενικά, οι αισθητήρες LVDT είναι ακριβοί, αλλά παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Αξίζει να αναφερθεί ότι είναι κατάλληλοι για δυναμικές φορτίσεις, η ακρίβειά τους είναι  $\pm 1\text{nm}$ , αντέχουν σε χαμηλές θερμοκρασίες με ελάχιστη απώλεια ακρίβειας και δεν υπάρχει φθορά των υλικών στο εσωτερικό, καθώς ο μαγνητικός πυρήνας δεν έρχεται σε επαφή με τα ηλεκτρικά πηνία.



(α) Τυπική δομή



(β) Εξωτερική μορφή

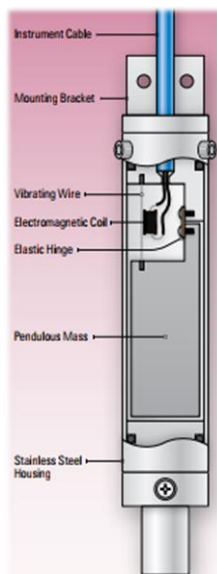
Εικόνα 2-11 : LVDT

#### 2.4.4 ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΑ

Όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, στην παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας, ενδέχεται να μας ενδιαφέρει και η κλίση μιας συγκεκριμένης περιοχής στον φορέα. Τα κλισίμετρα είναι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της κλίσης. Παρακάτω αναλύονται τριών ειδών κλισίμετρα, τα δονητικά, τα ηλεκτρολυτικά και τα αδρανειακά.

##### 2.4.4.1 ΔΟΝΗΤΙΚΑ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΑ

Αυτά τα όργανα αποτελούνται από μια μάζα, η οποία κρέμεται από ένα σύρμα. Καθώς ο αισθητήρας αποκτά κλίση, η βαρυτική δύναμη της μάζας την αναγκάζει σε ταλάντωση ανάμεσα στα τοιχώματα του ελαστικού περιβλήματος, ενώ κρέμεται από το ταλαντωμένο καλώδιο. Όσο η κλίση αυξομειώνεται, η μάζα περιστρέφεται εσωτερικά του οργάνου και η συχνότητα του καλωδίου μέσα στον αισθητήρα αλλάζει. Η διαφορά αυτών των συχνοτήτων καταγράφεται με τη χρήση μικρό-συστημάτων και μετατρέπεται σε γωνιακές αλλαγές της κλίσης. Ο αισθητήρας δεν ενδείκνυται για δυναμικά φαινόμενα.



(α) Τυπική δομή



(β) Εξωτερική μορφή

Εικόνα 2-12 : Κλισίμετρο τύπου Vibrating Wire Tiltmeter

#### 2.4.4.2 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΑ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΑ

Αυτά τα όργανα εκμεταλλεύονται τις ιδιότητες αγώγιμων υγρών και έχουν την ιδιότητα να μεταφράζουν αλλαγές στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υγρού σε αλλαγές στην κλίση. Ο προσδιορισμός της κλίσης στηρίζεται στη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ ηλεκτροδίων στην ελεύθερη επιφάνεια αγώγιμου υγρού, το οποίο ισορροπεί σε ειδική μικρό-κάψουλα στο εσωτερικό περίβλημα του οργάνου (Εικόνα 2-13).



(α) Αρχές ηλεκτρολυτικού κλισίμετρου

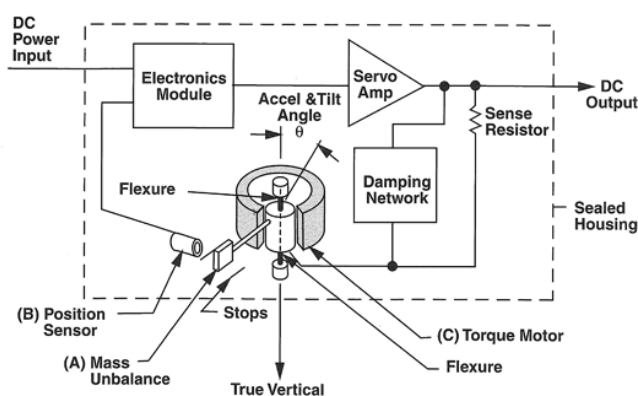


(β) Μορφή ηλεκτρολυτικού κλισίμετρου

Εικόνα 2-13 : Ηλεκτρολυτικό κλισίμετρο

#### 2.4.4.3 ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΑ

Τα κλισίμετρα που βασίζονται στην αδράνεια αποτελούν την κύρια επιλογή για τη μέτρηση δυναμικών αλλαγών κλίσης. Η τεχνολογία σε αυτές τις συσκευές είναι παρόμοια με αυτή ενός επιταχυνσιόμετρου με σερβομηχανισμό. Αυτοί οι αισθητήρες περιέχουν μια εκκρεμή μάζα και η κίνηση της ανιχνεύεται από έναν οπτικό σένσορα θέσης. Η ανάγνωση από αυτόν τον αισθητήρα θέσης, συγκρίνεται με την αρχική κατάσταση, παράγεται ρεύμα εξισορρόπησης και εφαρμόζεται δύναμη ροπή, για να επιστρέψει η μάζα στην αρχική της θέση (Εικόνα 2-14). Αυτά τα κλινόμετρα είναι εξαιρετικά ακριβή με δυνατότητες καταγραφής αλλαγών στην κλίση της τάξης μιας μοίρας για 0.1sec και αφορά υψηλά επίπεδα δονήσεων και κραδασμού.



(α) Τυπική δομή



(β) Εξωτερική μορφή

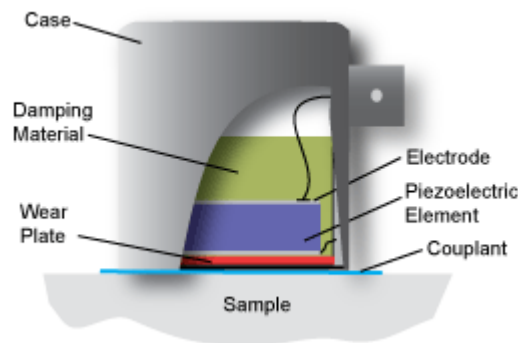
Εικόνα 2-14 : Αδρανειακά κλισίμετρα

#### 2.4.5 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Η πιο συνηθισμένη μορφή ακουστικού αισθητήρα είναι αυτή που χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, όπως αυτά στα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα. Αυτός ο τύπος αποδείχθηκε πιο ανθεκτικός και

ευαίσθητος από άλλους που βασίζονταν σε τεχνικές λέιζερ. Καθώς το ηχητικό κύμα φθάνει στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, τότε από τον παλμό του πιεζοηλεκτρικού παράγεται ηλεκτρικό σήμα. Το ηχητικό κύμα που μπορεί να προέρχεται από τη δημιουργία κάποιας ρωγμής, λαμβάνεται κατά αυτόν τον τρόπο ως ηλεκτρικό σήμα. Για να είναι αποδοτικοί αυτοί οι αισθητήρες και να αξιοποιηθεί στο έπακρον η λειτουργία τους, απαιτείται ένα δίκτυο πολλών αισθητήρων, ώστε να επιτυγχάνεται τριγωνισμός και να μπορεί να προσδιορισθεί η θέση της πηγής του ηχητικού κύματος. Το γεγονός ότι οι ακουστικοί αισθητήρες έχουν την ικανότητα να ανιχνεύσουν τη βλάβη την ώρα που συμβαίνει, χωρίς να είναι εγκατεστημένοι στη συγκεκριμένη περιοχή, αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα. Βέβαια, αυτό επιβάλλει τη συνεχή παρακολούθηση της κατασκευής μέσω αυτών των οργάνων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι ο χάλυβας αποτελεί το καλύτερο υλικό για την χρήση αυτών των αισθητήρων, αφού τα ηχητικά κύματα διαδίδονται πιο γρήγορα και «ταξιδεύουν» πιο μακριά.

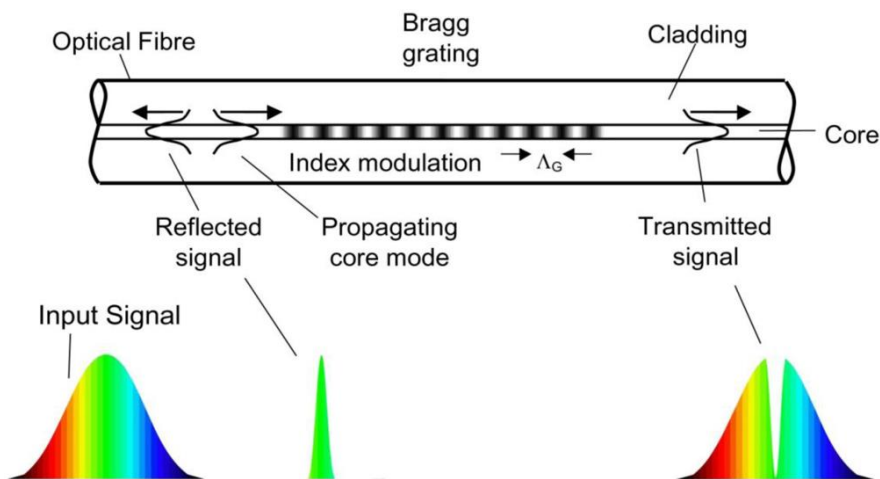
Η τυπική δομή ενός αισθητήρα φαίνεται στο Εικόνα 2-15 . Τα βασικά στοιχεία είναι το κέλυφος (Case) του αισθητήρα μέσα στο οποίο βρίσκονται το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο (piezoelectric element) και τα ηλεκτρόδια (Electrode), η θήκη στήριξης (Wear Plate) του μετατροπέα, καθώς και το υλικό που δίνει απόσβεση στο σύστημα (Damping Material). Τέλος, για την εφαρμογή του αισθητήρα στο υπό εξέταση υλικό είναι σημαντική η τοποθέτηση στο σημείο επαφής τους με την κατασκευή, κάποιου παχύρρευστου υγρού (couplant) για την μείωση των απωλειών.



Εικόνα 2-15 : Τυπική δομή αισθητήρα ακουστικής εκπομπής

#### 2.4.6 ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

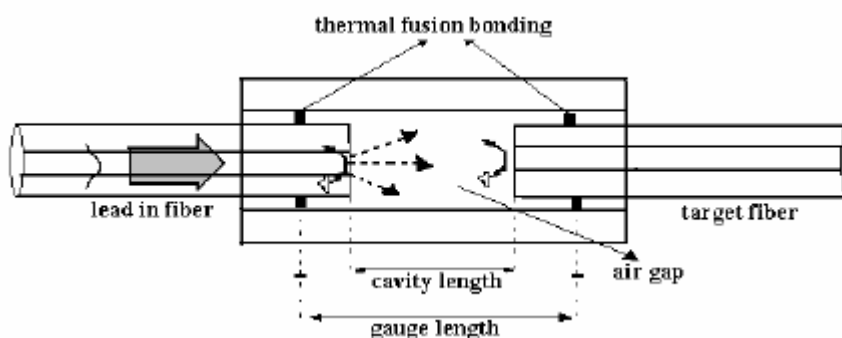
Η χρήση των αισθητήρων οπτικών ινών είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στην εποχή μας και αποτελεί την εξέλιξη των συμβατικών επιμηκυνσιομέτρων, αλλά και άλλων οργάνων. Ουσιαστικά, η λειτουργία τους περιλαμβάνει τη διάδοση δέσμης ακτινών, μέσω του καλωδίου οπτικής ίνας ανά τακτά χρονικά διαστήματα και ακολούθως τη μέτρηση των αλλαγών που συμβαίνουν, καθώς η δέσμη ανακλάται. Τέσσερις βασικές αρχές διέπουν τη λειτουργία τους, η παρεμβολή, η πόλωση, η φασματοσκοπία και η ένταση του φωτός. Η αρχή της παρεμβολής έχει ως αποτέλεσμα τη μέτρηση των περιβαλλοντικών αλλαγών, ανάλογα με την αλλαγή της κυματικής κατάστασης του φωτός. Με την πόλωση παρατηρείται η πόλωση του φωτεινού σήματος. Στην αρχή της φασματοσκοπίας βασίζεται το πιο συνηθισμένο όργανο οπτικών ινών το Fiber Bragg Grating (FBG). Το όργανο αυτό παρακολουθεί την αλλαγή στο μήκος κύματος των πηγών ανακλώμενου φωτός. Επίσης, οι αισθητήρες που ακολουθούν την αρχή της έντασης του φωτός, μετρούν την αλλαγή στην ένταση κατά μήκος όλης της ίνας.



Εικόνα 2-16 : Τυπική δομή και λειτουργία οπτικής ίνας τύπου Bragg

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της χρήσης οπτικών ινών είναι η δυνατότητα μέτρησης πολλαπλών παραμέτρων με μία μόνο ίνα. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα μέτρησης αλλαγών σε όλο το μήκος της ίνας και όχι μόνο σε μία συγκεκριμένη θέση. Ακόμη, οι αισθητήρες οπτικών ινών δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, ενώ πλέον ενσωματώνονται εύκολα σε άλλες συσκευές, όπως στα επιταχυνσιόμετρα. Επιπλέον, δύναται να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις πίεσης, κλίσης, μετατόπισης, επιτάχυνσης, ακόμη και ρωγμών εντός του σκυροδέματος.

Δύο τύποι συστημάτων οπτικών ινών είναι πιο κοινοί, οι αισθητήρες τύπου Bragg (FBG) και τύπου Fabry-Perot (EFPI). Ένας αισθητήρας τύπου FBG «καταγράφει» τον τρόπο μεταβολής του μήκους κύματος του ανακλώμενου φωτός, λόγω των φορτίσεων. Η λειτουργία του φαίνεται στην Εικόνα 2-16. Μπορεί να είναι πιο φθηνός από τον αντίστοιχο τύπου EFPI, όμως ενδέχεται να υστερεί στην ακρίβεια έναντι του EFPI. Στον αισθητήρα τύπου EFPI, το στοιχείο ανίχνευσης δεν είναι η ίδια η οπτική ίνα, αλλά υπάρχουν δύο καθρέφτες τοποθετημένοι σε δύο άκρες και ανάλογα με τη σχέση της απόστασης τους, αλλά και με το μήκος κύματος του ανακλώμενου φωτός προκύπτουν τα επιθυμητά στοιχεία (Εικόνα 2-17). Γενικά, το βασικό μειονέκτημα της χρήσης οπτικών ινών είναι το υψηλό κόστος έναντι όλων των άλλων μέσων.



Εικόνα 2-17 : Τυπική δομή και λειτουργία οπτικής ίνας τύπου EFPI

#### 2.4.7 ΜΙΚΡΟ-ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (MEMS)

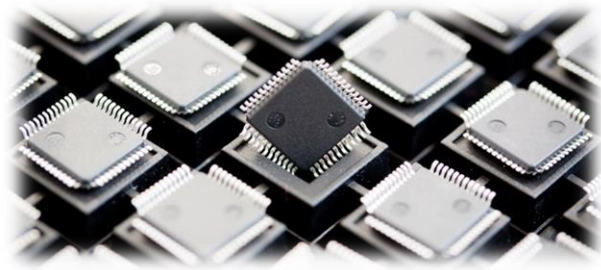
Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούν μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS), αποτελούν πρόσφατη τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα της παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας. Το κυριότερο πλεονέκτημα τους είναι ότι έχουν τη δυνατότητα να αισθάνονται, να ελέγχουν και να ενεργοποιούνται στη μικροκλίμακα και να παράγουν έργο στη μικροκλίμακα. Αυτό επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση ενός μικροεπεξεργαστή στο σύστημα αισθητήρων, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή

του σήματος σε ψηφιακό, ώστε να πραγματοποιούνται βασικοί υπολογισμοί, ή να εξυπηρετεί λειτουργίες διασύνδεσης του αισθητήρα, μειώνοντας τον όγκο δεδομένων προς επεξεργασία.

Στη γενικότερη τους μορφή, τα MEMS αποτελούνται από μηχανικές μικρό-δομές, μικροαισθητήρες, μικροενεργοποιητές και μικροηλεκτρονικά, όλα ενσωματωμένα πάνω στο ίδιο τσιπ πυριτίου. Ένας μικροαισθητήρας είναι μια συσκευή που συλλέγει συγκεκριμένες πληροφορίες από το περιβάλλον και παρέχει ένα ηλεκτρικό σήμα σε απάντηση της πληροφορίας που συνέλλεξε. Ένας μικροενεργοποιητής είναι μια συσκευή που μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα σε ενέργεια. Μπορεί να χρησιμοποιήσει την ενέργεια αυτή για να ενεργοποιήσει τον εαυτό του ή άλλες μηχανικές συσκευές, ή ακόμη να τη διοχετεύσει στο περιβάλλον για να εκτελέσει κάποια χρήσιμη λειτουργία. Οι μικροαισθητήρες ανιχνεύουν αλλαγές στο περιβάλλον του συστήματος μετρώντας μηχανικά, θερμικά, μαγνητικά, χημικά ή ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα και συλλέγουν πληροφορίες, ενώ ακόμη διοχετεύουν αυτές τις πληροφορίες στα ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος. Στη συνέχεια τα μικροηλεκτρονικά στοιχεία επεξεργάζονται αυτές τις πληροφορίες και δίνουν σήμα στους μικροενεργοποιητές για να αντιδράσουν και να δημιουργήσουν κάποια μορφή αλλαγών στο περιβάλλον.



(α) Θεωρητική μορφή MEMS



(β) Μορφή MEMS Hysitron

Εικόνα 2-18 : MEMS

Στην πραγματικότητα τα MEMS λειτουργούν ακριβώς όπως εμείς. Αντιλαμβάνονται, σκέφτονται, και έπειτα λειτουργούν, πάντα βάσει των δεδομένων που συλλέξαν από το περιβάλλον. Δεν είναι τυχαίο λοιπόν, ότι τα MEMS έχουν εφαρμογή και στη μικροβιολογία. Είναι ιδανικοί για τη μέτρηση της δύναμης και της μετατόπισης στο επίπεδο ενός κυττάρου, με την ικανότητα να μελετήσουν ένα μεγάλο πληθυσμό κυττάρων ταυτόχρονα. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται και στις έρευνες για την αναγνώριση και απομάκρυνση διάφορων αντικαρκινικών κυττάρων.

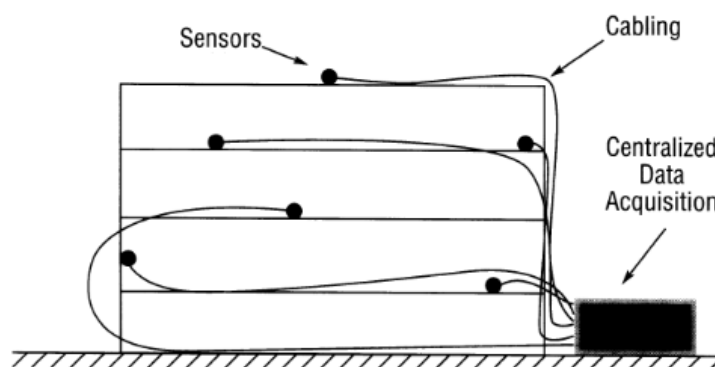
## 2.5 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Οι περισσότεροι κοινοί αισθητήρες παράγουν αναλογικά σήματα και για αυτό χρησιμοποιούνται εξελιγμένα συστήματα επεξεργασίας για την ψηφιοποίηση των σημάτων. Ο επεξεργαστής όμως, μπορεί να απέχει αρκετά από τα όργανα παρακολούθησης. Η ενσύρματη μεταφορά δεδομένων σε αυτήν την περίπτωση, οδηγεί σε αύξηση των θορύβων και των παρεμβολών στα δεδομένα. Επίσης, όταν ο αριθμός των οργάνων αυξάνεται αρκετά, τότε η πολυπλοκότητα του εξοπλισμού ως προς την καλωδίωση και η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς αυξάνονται αντίστοιχα. Με την ασύρματη επικοινωνία, αλλά και με τους ενσωματωμένους μικροεπεξεργαστές είναι δυνατόν η λήψη δεδομένων και ένα κομμάτι της επεξεργασίας αυτών να γίνεται απευθείας στην πηγή. Συνεπώς, υπάρχουν δύο τυπικές διατάξεις για τη μεταφορά των δεδομένων, η ενσύρματη και η ασύρματη.



### 2.5.1 ΕΝΣΥΡΜΑΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ

Τα δεδομένα των αισθητήρων συλλέγονται και αποθηκεύονται στον κεντρικό επεξεργαστή του συστήματος παρακολούθησης. Στο σύστημα της ενσύρματης επικοινωνίας, γίνεται χρήση δικτύου μέσω καλωδίου Ethernet LAN και κατά αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται και η πολυπλοκότητα της καλωδίωσης, αλλά και οι διάφορες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Πρέπει, να σημειωθεί ότι σε μεγάλες κατασκευές, όπου το μήκος της καλωδίωσης κρίνεται μεγάλο και απαιτείται έκθεση της σε περιβαλλοντικές συνθήκες, παρατηρείται και αλλοίωση του σήματος, αλλά και μεγάλο κόστος συντήρησης του συστήματος.

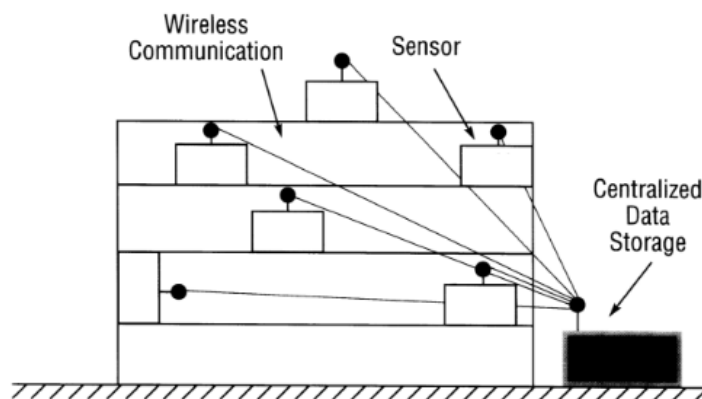


Εικόνα 2-19 : Ενσύρματη μετάδοση δεδομένων

### 2.5.2 ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ

Με την ενσύρματη μετάδοση δεδομένων προκύπτουν συχνά προβλήματα. Καταρχάς, απαιτείται να υπάρχει η κατάλληλη υποδομή, ώστε να είναι δυνατή η καλωδίωση. Επίσης, όσο πιο μεγάλες είναι οι κατασκευές και πιο σύνθετα τα ζητήματα παρακολούθησης, τα αναγκαία όργανα είναι πολλά και διαφορετικά, με αποτέλεσμα να περιπλέκονται οι διασυνδέσεις μεταξύ αυτών. Για το λόγο αυτό η χρήση αποκεντρωμένου υπολογιστικού συστήματος, μέσω ασύρματων τεχνικών παρακολούθησης είναι απαραίτητη.

Αυτό επιτυγχάνεται είτε με ραδιοσυχνότητες, είτε με ασύρματα δίκτυα μεταφοράς δεδομένων. Αυτά τα συστήματα αποτελούνται από κάποιες υπό-ομάδες αισθητήρων πάνω στην κατασκευή, που επικοινωνούν ασύρματα με μια μονάδα επεξεργασίας, αλλά και μεταξύ τους. Κάθε υπό-ομάδα αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή, έναν ασύρματο πομποδέκτη και αποτελεί ένα κύκλωμα συλλογής δεδομένων. Ακόμη, υπάρχει η δυνατότητα της αυτονομίας της εκάστοτε υπό-ομάδας και η τοπική επεξεργασία των δεδομένων, ή η αποστολή αυτών στην κεντρική μονάδα. Για την υλοποίηση ενός ασυρμάτου συστήματος χρειάζεται μια πηγή ενέργειας, συγκεκριμένη συχνότητα εκπομπής, διαμόρφωση σήματος και ομαδοποίηση οργάνων. Η σημαντικότερη όμως πρόκληση είναι ο συγχρονισμός των σημάτων των αισθητήρων σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου.



Εικόνα 2-20 : Ασύρματη μετάδοση δεδομένων

## 3 ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πέρα από το θεωρητικό υπόβαθρο της Παρακολούθησης της Δομικής Ακεραιότητας των Κατασκευών, το οποίο παρουσιάστηκε στις δύο προηγούμενες ενότητες, ασχολείται ως ένα βαθμό και με το πρακτικό κομμάτι. Η εφαρμογή των αρχών της Δομικής Παρακολούθησης επιχειρήθηκε να ακολουθηθεί με τη μελέτη μιας μεταλλικής καπνοδόχου τύπου Bypass-Stack, που βρίσκεται στη μονάδα IV, στο θερμοηλεκτρικό εργοστάσιο της ΔΕΗ Α.Ε. στο Λαύριο (ΑΗΣ Λαυρίου). Οι μετρήσεις που εκτελέστηκαν, έγιναν από τον κύριο Βασίλειο Γκίκα, καθηγητή της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., και την επιστημονική του ομάδα. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η τεχνική περιγραφή της κατασκευής και παραθέτονται οι μετρήσεις που διενέργησε ο κ. Γκίκας και τα αποτελέσματα αυτών, που αφορούν την προαναφερόμενη παρακαμπτήριο καμινάδα.



Εικόνα 3-1 : Γενική άποψη Μονάδας VI του ΑΗΣ Λαυρίου

Η κατασκευή που μελετάται είναι η παρακαμπτήριος καμινάδα, Αεροστροβίλου 41, Λέβητας C, της Μονάδας VI, του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού (ΑΗΣ) της ΔΕΗ Α.Ε. στο Λαύριο (Εικόνα 3-1). Η υπό μελέτη καμινάδα είναι η μεσαία, στην πίσω συστοιχία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-1. Η Μονάδα IV είναι συνδυασμένου κύκλου και αποτελείται από τρεις αεροστρόβιλους ονομαστικής ισχύος 119MW, τρεις αντίστοιχους λέβητες ανάκτησης θερμότητας, έναν ατμοστρόβιλο ονομαστικής ισχύος 203MW και έξι καπνοδόχους. Συνολικά η ισχύς της μονάδας είναι 560MW. Η κατασκευή της άρχισε το 1996 και τέθηκε σε λειτουργία σταδιακά από το 1998. Για καύσιμο χρησιμοποιείται φυσικό αέριο ή ελαφρύ πετρέλαιο (Diesel).

Για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθείται αυτοματοποιημένη διαδικασία, η οποία βασίζεται στη θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την καύση του εκάστοτε καυσίμου. Η θερμότητα αυτή χρησιμοποιείται για να θερμάνει το νερό, το οποίο κυκλοφορεί γύρω από το δοχείο της καύσης. Το νερό ακολούθως μετατρέπεται σε ατμό (και μάλιστα με πίεση) και καθώς απελευθερώνεται και κινείται μέσα στις σωληνώσεις, αποδίδεται στο σύστημα κινητική ενέργεια. Ο ατμός περιστρέφει τις τουρμπίνες, προσφέροντας την παραγόμενη κινητική ενέργεια, ενώ ο ίδιος αποβάλλει την θερμότητά του. Οι τουρμπίνες με τη σειρά τους γυρίζουν τις ηλεκτρογεννήτριες που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η διαδικασία εκτελείται για συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων και τελικά τα καυσαέρια αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα μέσα από τις καπνοδόχους. Οι καπνοδόχοι διοχετεύουν λοιπόν τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα, ώστε αυτά να διαλυθούν από τους στροβιλισμούς των αέριων μαζών. Το υψόμετρο διοχέτευσης των καυσαερίων καθορίζεται έτσι ώστε, η συγκέντρωση τους και τα πιθανά σωματίδια σκόνης που ενδέχεται να φέρουν να είναι σε ανεκτά επίπεδα. Για το λόγο αυτό οι καμινάδες έχουν μεγάλο σχετικά ύψος (~80m).



Εικόνα 3-2 : Λέβητας ανάκτησης θερμότητας

Στην προκειμένη μονάδα, οι αεροστρόβιλοι διαθέτουν συστήματα ελέγχου της θερμοκρασίας για την εύρυθμη λειτουργία των στροβίλων και για τη μέγιστη δυνατή μείωση των οξειδίων του αζώτου. Η έξοδος των καυσαερίων του κάθε αεροστροβίλου οδηγείται σε ένα λέβητα ανάκτησης θερμότητας, όπου ψύχονται. Εκεί υπάρχει διάφραγμα, damper (Εικόνα 3-3 (a),(b)), το οποίο δίνει τη δυνατότητα εκτροπής

των καυσαερίων, θέτοντας έτσι το σύστημα σε λειτουργία ανοικτού τύπου. Κατά αυτόν τον τρόπο απορρίπτονται τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα όταν δεν είναι επιθυμητά.



(a)

(b)

Εικόνα 3-3 : Damper

### 3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΑΡΑΚΑΜΠΤΗΡΙΟΥ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΥ ΤΥΠΟΥ BYPASS STACK

Γενικά το σχήμα και το ύψος της καπνοδόχου επιλέγονται έτσι ώστε η διοχέτευση των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα να γίνεται όσο το δυνατόν γρηγορότερα και ομαλότερα. Σε περίπτωση που δεν επιτυγχάνεται αυτό, παρουσιάζονται ταλαντώσεις στην κατασκευή, οι οποίες είναι ικανές να δημιουργήσουν προβλήματα τόσο λειτουργικά, όσο και στατικά. Το κυλινδρικό σχήμα ελαχιστοποιεί την τριβή των καυσαερίων στα τοιχώματα της καπνοδόχου, ενώ η επιλογή του ύψους, όπως προαναφέρθηκε, καθορίζεται από τη δημιουργία ικανής διαφοράς πίεσης, με σκοπό τα καυσαέρια να διοχετεύονται γρήγορα στην ατμόσφαιρα και να διαχέονται. Επίσης, η ύπαρξη διπλών τοιχωμάτων εξασφαλίζει τη διατήρηση της θερμοκρασίας καθ' ύψος της κατασκευής, ώστε τα καυσαέρια να συναντούν ομοιόμορφη θερμοκρασία.

Η παρακαμπτήριος καπνοδόχος στην οποία διενεργήθηκαν οι μετρήσεις, είναι αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 3-4. Αποτελεί μεταλλική κατασκευή σταθερής διατομής καθ' ύψος, διπλού τοιχώματος με ύψος 66.9m, η οποία εδράζεται πάνω σε πλατφόρμα, μεταλλικής κατασκευής, ύψους 13m και επομένως, το συνολικό ύψος της κατασκευής να φθάνει στα 79.9m. Η εξωτερική διατομή έχει διάμετρο 6.75m και η εσωτερική 6.20m. Προσθετικά, το εξωτερικό τοίχωμα είναι μεταβλητής καθ' ύψος διατομής με πάχος τοιχώματος από 10mm (χαμηλό ύψος), φθάνοντας έως και 20mm στην κορυφή. Το εσωτερικό τοίχωμα έχει σταθερό πάχος 6mm. Επίσης, πάνω στο τοίχωμα του εσωτερικού κυλινδρικού στοιχείου, στην εξωτερική μεριά υπάρχει θερμομονωτικό υλικό πάχους 120mm, ώστε να αποφεύγονται οι θερμοκρασιακές διαφορές σε περιπτώσεις ανοικτής λειτουργίας της μονάδας. Ακόμη, εξωτερικά της καπνοδόχου υπάρχουν δακτύλιοι σχεδόν ανά 5m, που κάνουν πιο δύσκαμπτη την κατασκευή και περιορίζουν τους τοπικούς λυγισμούς, ενώ δακτύλιοι παρουσιάζονται και στο εσωτερικό κυλινδρικό κέλυφος, από την εξωτερική πλευρά, ανά 5m ομοίως. Εσωτερικά της καπνοδόχου υπάρχουν

τοποθετημένες νευρώσεις καθ' ύψος με διάφορες διαστάσεις, που διατρέχουν την καμινάδα από τη βάση ως την κορυφή της. Τέλος, ο μηχανολογικός εξοπλισμός, βρίσκεται παραπλεύρως της καπνοδόχου και ενώνεται μαζί της μέσω μεταλλικής διατάξεως. Λεπτομέρειες όλων των παραπάνω στοιχείων, αναφέρονται στην Κεφάλαιο 4, όπου γίνεται αναλυτική παρουσίαση του φορέα και πώς αυτός προσομοιάστηκε στο λογισμικό ADINA.



Εικόνα 3-4 : Υπό μελέτη παρακαμπτήριος καπνοδόχος

### 3.3 ΣΤΟΧΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Σύμφωνα με τον φάκελο επιθεωρήσεων και συντήρησης της κατασκευής, η καμινάδα παρουσίασε φαινόμενα υψηλών κραδασμών από τα πρώτα στάδια λειτουργίας της, επηρεάζοντας κατά βάση λειτουργικά ζητήματα, αλλά και δομικά καθώς αρκετές συγκολλήσεις αστόχησαν (Εικόνα 3-5). Προκειμένου να περιοριστούν τα εν λόγω φαινόμενα επιβλήθηκαν μετατροπές στην κατασκευή (μετασκευή άνω τμήματος, προσθήκη ενισχύσεων στο εσωτερικό, τοποθέτηση περλίτη ενδιάμεσα στα τοιχώματα και στη συνέχεια αφαίρεση αυτού κλπ.) και διενεργήθηκαν σχετικοί έλεγχοι μετρήσεων κραδασμών. Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, υλοποιήθηκαν τμηματικά ενέργειες από το έτος 1999 έως και τον Μάρτιο του 2000. Οι εν λόγω μετρήσεις, που παραθέτονται σε αυτό το κεφάλαιο, αποτελούν αποτέλεσμα μελέτης του καθηγητή στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Βασιλείου Γκίκα και της επιστημονικής του ομάδας που πραγματοποιήθηκαν το έτος 2012. Ουσιαστικά οι μετρήσεις που έγιναν αφορούσαν την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς της καμινάδας και των δυναμικών της παραμέτρων.



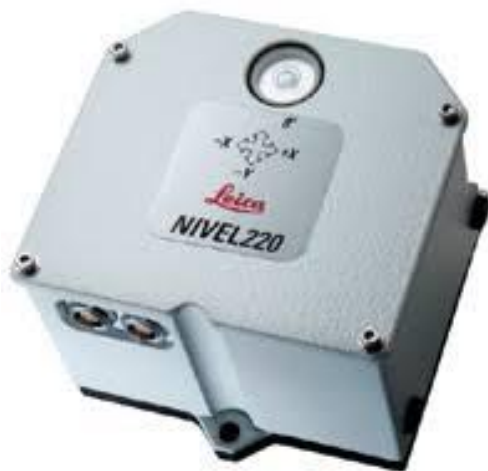
Εικόνα 3-5 : Αστοχίες συγκολλήσεων

Η παρακολούθηση της καπνοδόχου πραγματοποιήθηκε μέσα από μια σειρά μετρήσεων. Οι καταγραφές αυτές αφορούν τις ιδιομορφές της κατασκευής, τη δυναμική της απόκριση σε συνθήκες λειτουργίας και περιβαλλοντικών φορτίσεων και τις μετατοπίσεις της, το θόρυβο που προκαλείται, την πίεση και ταχύτητα του ανέμου, τη θερμοκρασία και τους κραδασμούς. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστούν ορισμένες μετρήσεις και τα αποτελέσματα αυτών. Αυτά θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό ADINA (Κεφάλαιο 4). Παρακάτω λοιπόν παραθέτονται τα συμπεράσματα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν σχετικά με:

- Τις ιδιομορφές της κατασκευής, όπως αυτές μετρήθηκαν από ψηφιακό κλισίμετρο.
- Τις μετατοπίσεις καθ' ύψος της καπνοδόχου, λόγω της φόρτισης ανέμου.
- Την κυρίαρχη συχνότητα της καμινάδας σε συνθήκες λειτουργίας.

Η συλλογή δεδομένων για την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς της καμινάδας έγινε με τρεις μεθόδους. Με ψηφιακό κλισίμετρο (NIVEL 220, Leica Geosystems – Εικόνα 3-6(a)), με Radar Μικροκυματικής Συμβολομετρίας (IBIS-S, IDS SpA – Εικόνα 3-7) και με Ρομποτικό Γεωδαιτικό Σταθμό (TCA 1800, Leica Geosystems – Εικόνα 3-6(b)), ενώ για την ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν

λογισμικά των οργάνων, αλλά και αλγόριθμοι προγραμματισμένοι στη MATLAB, βασιζόμενοι στη μέθοδο Output-Only.

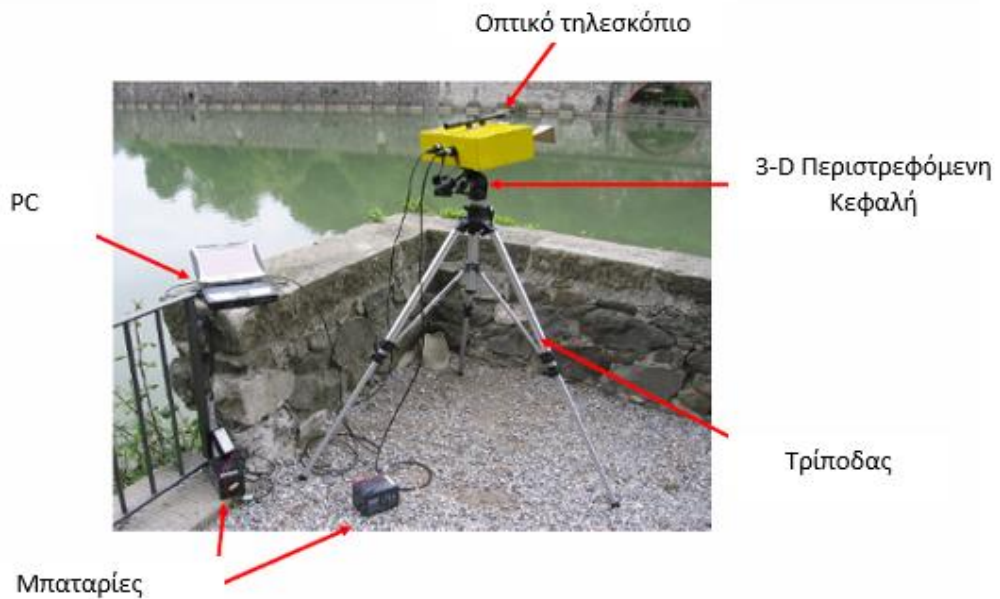


(a)



(b)

Εικόνα 3-6 : (a) NIVEL 220, Leica Geosystems, (b) TCA 1800, Leica Geosystems



Εικόνα 3-7 : IBIS-S, IDS SpA

### 3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

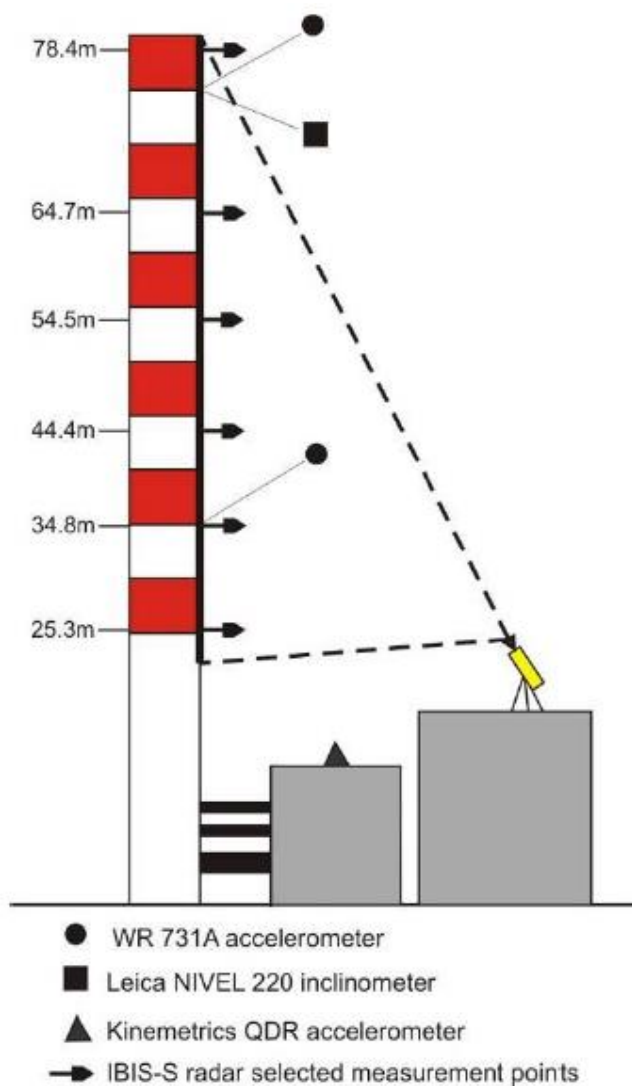
Σε αυτήν την υπό ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σχετικά με τις ιδιομορφές της κατασκευής, τις μετακινήσεις λόγω ανεμοφόρτισης και οι κυρίαρχες συχνότητες που συναντώνται σε συνθήκες λειτουργίας της μονάδας. Επίσης, αναφέρονται σχετικά στοιχεία με την εκάστοτε προσέγγιση των μετρήσεων.



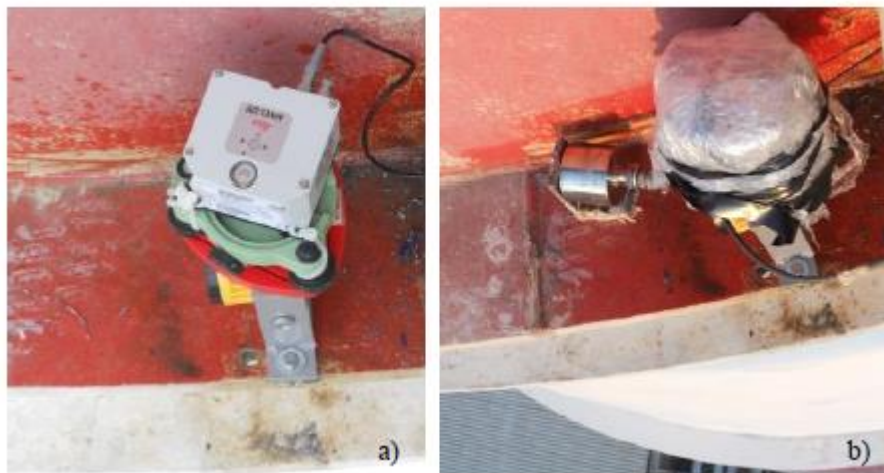
### 3.4.1 ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Δεδομένου του ιδιαίτερα δυναμικού χαρακτήρα της μελέτης, οι κυρίαρχες ιδιοσυχνότητες αναμένεται να είναι εντός της περιοχής 0-50Hz. Επιπλέον, προκειμένου να εξαχθούν ορθά και έγκυρα αποτελέσματα, σχετικά με τις δυναμικές παραμέτρους, κρίνεται απαραίτητη η καθ' ύψος παρακολούθηση της κυλινδρικής επιφάνειας του φορέα. Για την εκπλήρωση αυτών των απαιτήσεων, η παρακολούθηση των δονήσεων γίνεται με αισθητήρες μικροκυμάτων. Προσθετικά, χρησιμοποιούνται και άλλοι βοηθητικοί αισθητήρες που λειτουργούν συμπληρωματικά και βοηθούν στην ερμηνεία αρκετών μετρήσεων.

Η μονάδα radar που χρησιμοποιείται είναι κατά βάση το IBIS-S. Έχει πολύ καλή ακρίβεια στις υψηλές συχνότητες (έως 200Hz), και εξαιρετική ακρίβεια (<0.1mm). Η απόδοση του εξαρτάται από τον τύπο των κεραιών που χρησιμοποιούνται, την γενικότερη διάταξη της παρακολούθησης και την ανακλαστικότητα του υπό μελέτη αντικειμένου. Το σύστημα μετρά μόνο ακτινωτές κινήσεις και συνεπώς, για να προκύψουν οι προβαλλόμενες μετακινήσεις σχετικά με τη γεωμετρία της κατασκευής και της θέσης του αισθητήρα, πρέπει να επιλυθούν στο πεδίο των μετρήσεων. Προκαταρκτική δοκιμή έδειξε ότι η καλύτερη διάταξη μεταξύ radar και φορέα είναι αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-1. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-1, πέρα από το IBIS-S, χρησιμοποιήθηκαν τρεις ακόμη αισθητήρες (Εικόνα 3-8).

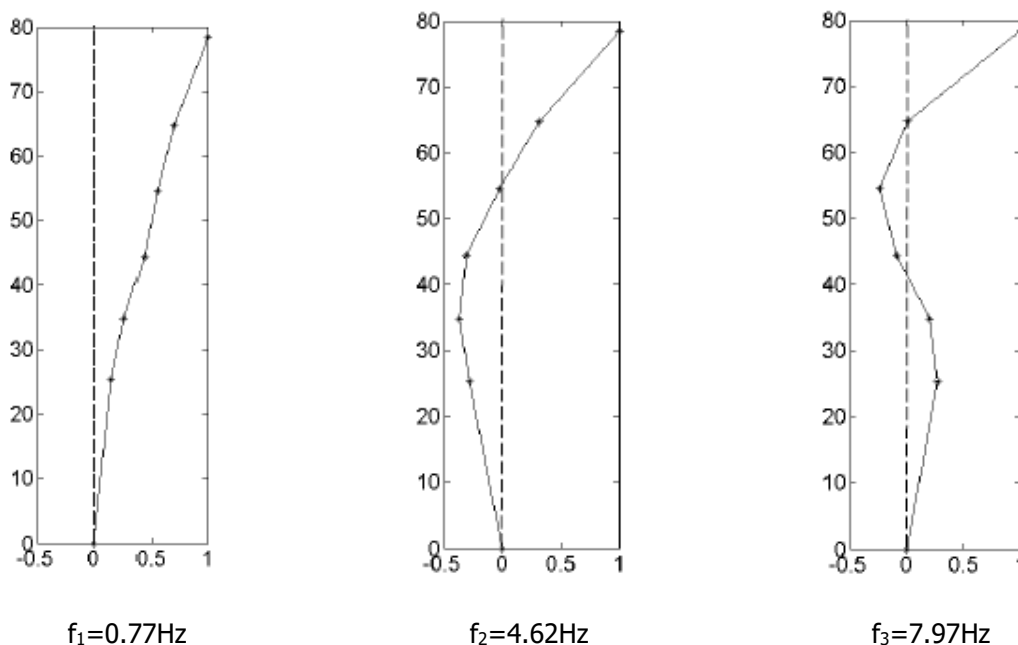


Σχήμα 3-1 : Θέση αισθητήρων και διάταξη παρακολούθησης



Εικόνα 3-8 : (α) Ψηφιακό κλισίμετρο (β) Επιταχυνσιόμετρο

Οι μετρήσεις που διενεργήθηκαν ήταν με τη μονάδα εκτός λειτουργίας, αλλά και βρισκόμενη σε ανοικτό κύκλο. Σχετικά με τις ιδιομορφές και τις ιδιοσυχνότητες αυτών που συναντήθηκαν, τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη μονάδα εκτός αλλά και σε λειτουργία, ήταν πολύ κοντά μεταξύ τους και παρουσιάζονται παρακάτω. Λόγω των πολύ μικρών διαφορών, παρουσιάζονται μόνο οι ιδιομορφές που προέκυψαν από τις καταγραφές της μονάδας σε λειτουργία (Σχήμα 3-2). Επίσης, να σημειωθεί ότι η εύρεση των ιδιομορφών αφορά μόνο τις καμπτικές ιδιομορφές, λόγω της ιδιαιτερότητας της διάταξης και των οργάνων. Τα τοπικά φαινόμενα, οι ιδιομορφές και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες αυτών δεν ήταν εφικτό να ευρεθούν και να σημειωθούν.



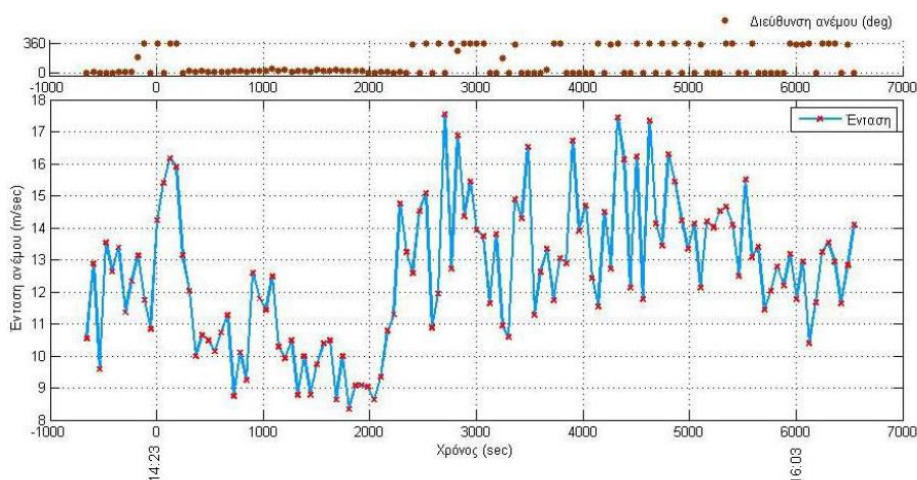
Σχήμα 3-2 : Οι τρεις πρώτες καμπτικές ιδιομορφές κατά τη διάρκεια λειτουργίας

Οι φυσικές ιδιοσυχνότητες της πρώτης, της δεύτερης και της τρίτης καμπτικής ιδιομορφής υπολογίστηκαν 0.77Hz, 4.62Hz και 7.97Hz αντίστοιχα. Επίσης, οι αναλύσεις των μετρήσεων έδειξαν και την τέταρτη και την Πέμπτη ιδιομορφή, οι οποίες δεν αναφέρονται, καθώς επιδέχονται παραπάνω διερεύνηση. Σαφώς, η αναγνώριση των υψηλότερων ιδιομορφών σχετίζεται με τα φάσματα συχνοτήτων και των μετατοπίσεων, ως αποτέλεσμα σύνθετων δονήσεων. Να σημειωθεί ότι, η απόσβεση της

κατασκευής υπολογίστηκε σε 1.1%, 2.5% και 1%, για την πρώτη, τη δεύτερη και την τρίτη ιδιομορφή αντίστοιχα.

### 3.4.2 ΑΚΤΙΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΛΟΓΩ ΑΝΕΜΟΦΟΡΤΙΣΗΣ

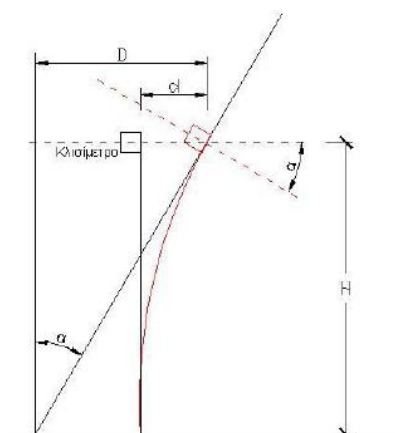
Οι συνθήκες των μετρήσεων για την εύρεση των μετακινήσεων της καμινάδας κοντά στην κορυφή της (περί τα 73.30m από το έδαφος) ήταν με την ένταση ανέμου να βρίσκεται 12.7m/s και με ηλιοφάνεια. Οι καταγραφές που πραγματοποιήθηκαν προήλθαν από τρία συστήματα. Από το NIVEL που τοποθετήθηκε κοντά στην κορυφή και όχι ακριβώς πάνω σε αυτήν, καθώς κρίθηκε ότι οι συνθήκες δεν ήταν κατάλληλες για τη λειτουργία του κλισίμετρου, λόγω των έντονων θερμοκρασιακών αυξομειώσεων, των δονήσεων, κλπ.), αλλά και από τα συστήματα IBIS και RTS. Για το IBIS και για το NIVEL, καταγράφηκαν τρεις σειρές μετρήσεων >15min, ενώ για το RTS δύο σειρές μετρήσεων, λόγω κάποιων επιπλοκών στο σύστημα. Η ένταση του ανέμου για το χρονικό διάστημα των καταγραφών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-3.



Σχήμα 3-3 : Διάγραμμα έντασης και διεύθυνσης του ανέμου για το χρονικό διάστημα της μελέτης

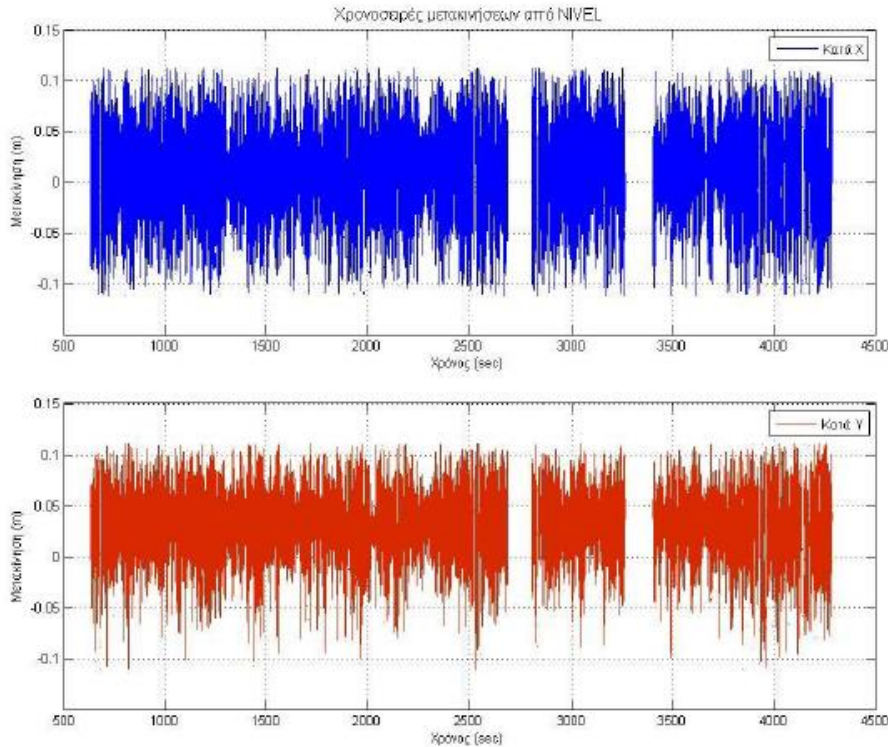
Από τα διαγράμματα γωνιών NIVEL που δημιουργήθηκαν κατά τους άξονες X και Y, προέκυψαν οι πλασματικές μετακινήσεις της κορυφής της καμινάδας, η οποία αναφέρεται ως φαινόμενη ( $D$ ) και είναι μεγαλύτερη από την πραγματική ( $d$ ). Η χρονοσειρά των φαινόμενων μετακινήσεων υπολογίστηκε σύμφωνα την παρακάτω σχέση (Σχήμα 3-4):

$$D = H * \sin \alpha$$



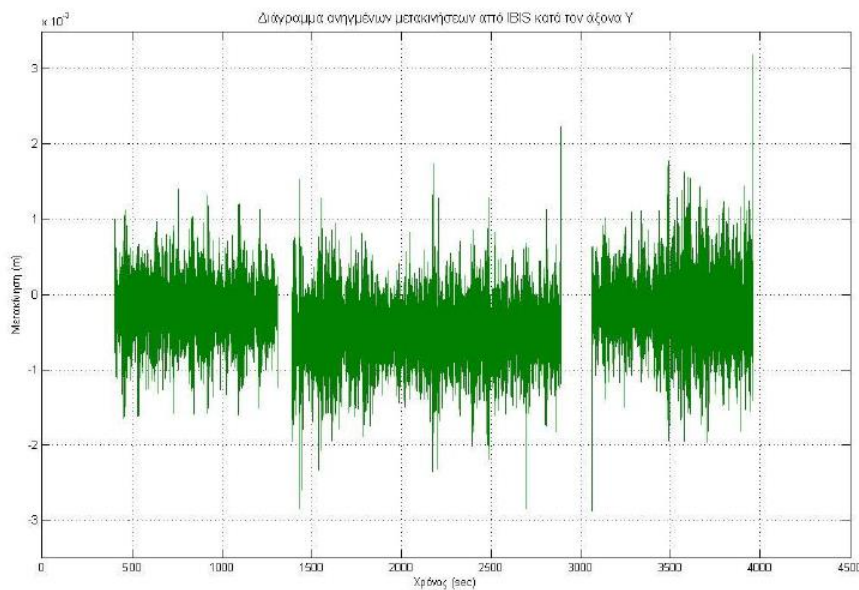
Σχήμα 3-4 : Γεωμετρία μετατροπής γωνιακής μέτρησης του κλισίμετρου σε απόσταση

Το Η είναι το ύψος της τοποθέτησης του NIVEL στην καμινάδα και το α η μετρημένη από το NIVEL γωνία σε rad. Τελικώς, τα διαγράμματα των χρονοσειρών των φαινόμενων μετακινήσεων από το NIVEL φαίνονται στο Σχήμα 3-5. Το φαινόμενο εύρος της ταλάντωσης για τον άξονα είναι περίπου  $\pm 10\text{cm}$  και για τον Y +8cm έως -15cm.



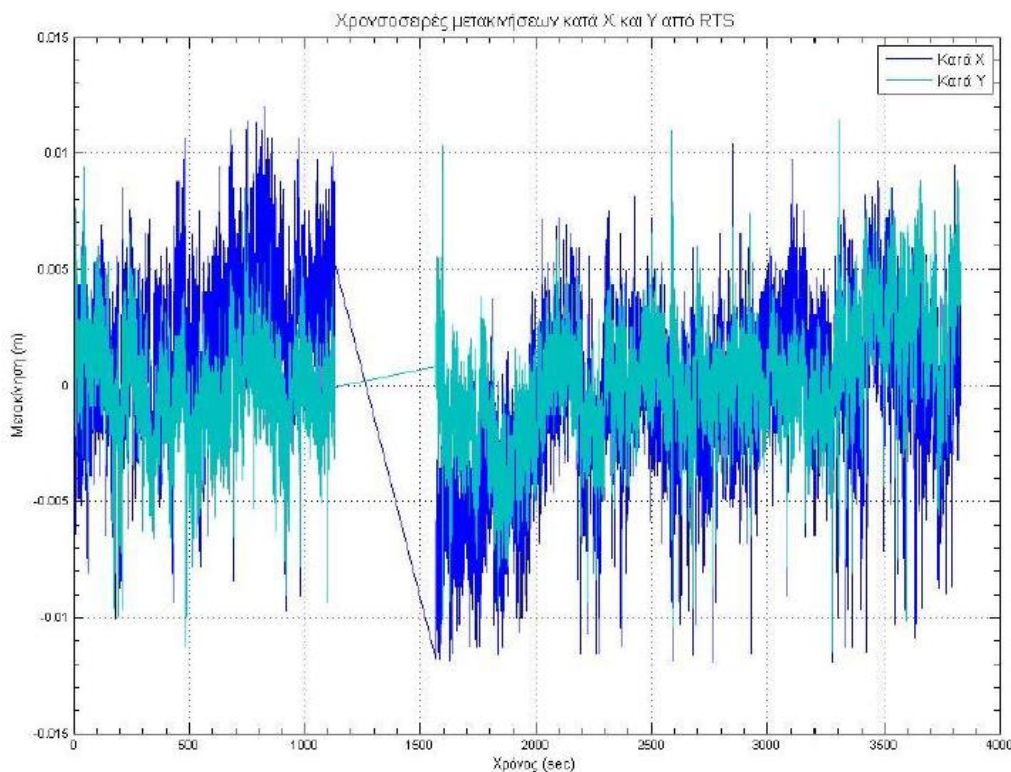
Σχήμα 3-5 : Διαγράμματα χρονοσειρών φαινόμενων μετακινήσεων NIVEL

Ακολουθώς, στο Σχήμα 3-6 παρουσιάζεται το διάγραμμα της χρονοσειράς των ανηγμένων μετακινήσεων που προέκυψαν από το σύστημα IBIS για το ύψος 73.30m, ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα με αυτά του NIVEL στο ίδιο ύψος. Όπως παρατηρείται, το μέγιστο εύρος της ταλάντωσης για τον άξονα Y είναι από +3.2mm έως -2.0mm.



Σχήμα 3-6 : Διάγραμμα χρονοσειράς ανηγμένων μετακινήσεων IBIS για H=73.30m

Ακόμα, στο Σχήμα 3-7 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των χρονοσειρών των συνολικών μετακινήσεων, όπως υπολογίστηκαν από τα δεδομένα του RST, κατά τους άξονες X και Y. Τα διαστήματα που εμφανίζονται χωρίς τιμές είναι τα διαστήματα που μεσολαβούν μεταξύ των περιόδων συλλογής δεδομένων. Αυτά τα κενά παρουσιάζονται και στα παραπάνω διαγράμματα και η εξήγηση είναι η ίδια, καθώς οι μετρήσεις που λήφθηκαν μπορεί να ήταν στη σειρά με διάρκεια από 15-20min, αλλά μεσολαβούσαν στο ενδιάμεσο διαστήματα παύσεων.



Σχήμα 3-7 : Διαγράμματα χρονοσειρών μετακινήσεων RST

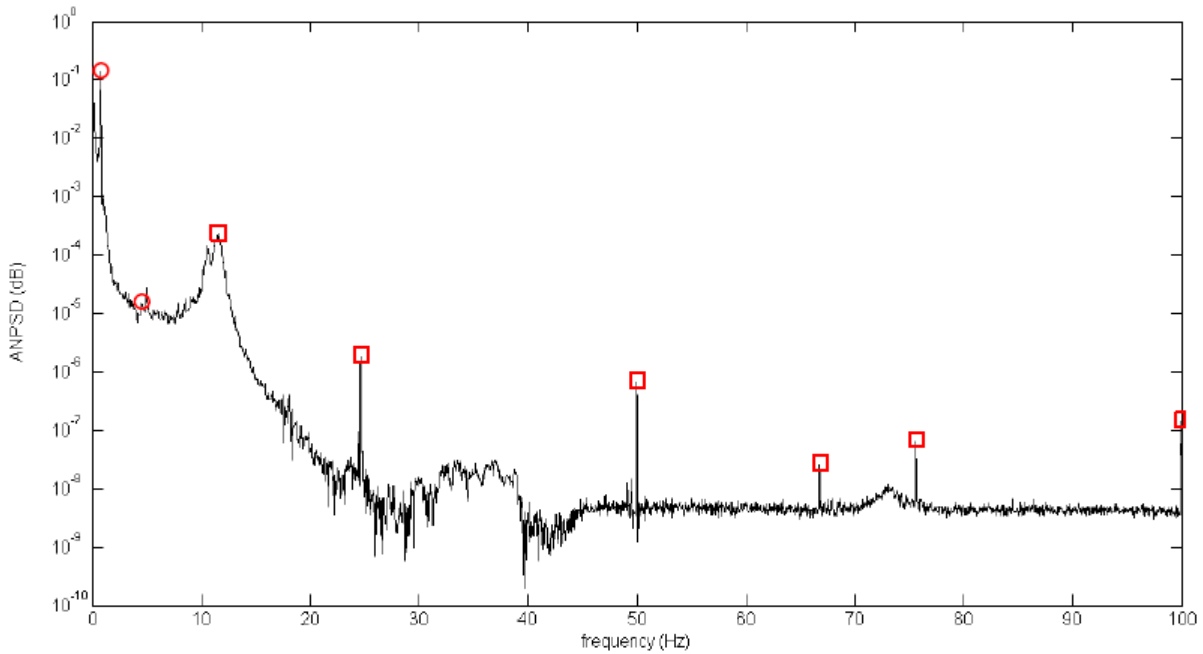
Συνεπώς, από το NIVEL προέκυψαν μέγιστες τιμές φαινόμενων μετακινήσεων 0.112m, από το σύστημα IBIS μέγιστη τιμή ανηγμένης μετακίνησης 0.0032m και από το σύστημα RST 0.012m

### 3.4.3 ΚΥΡΙΑΡΧΕΣ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ

Η μελέτη της δυναμικής απόκρισης της καπνοδόχου ουσιαστικά διακρίθηκε σε δύο περιπτώσεις, σε αυτήν όπου η καμινάδα βρίσκεται υπό την επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών, με ένταση ανέμου περίπου 13m/s σε συνδυασμό με συνθήκες κλειστού κύκλου και σε αυτήν με συνθήκες ανοικτού κύκλου (υπέρ λειτουργίας). Για αυτές τις μετρήσεις δημιουργήθηκαν αρχεία καταγραφών περίπου 20min, ενώ το φάσμα των συχνοτήτων που καταγράφηκε ήταν από 0-200Hz.

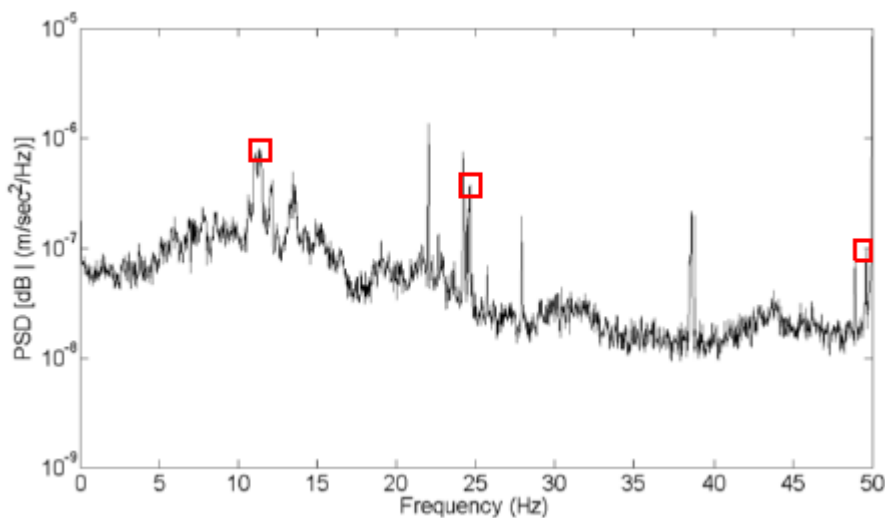
Πιο αναλυτικά η δυναμική ανάλυση σε περιβαλλοντικές συνθήκες πραγματοποιήθηκε με καταγραφή ανέμου 13m/s κατά μέσο όρο, με τη μονάδα να βρίσκεται σε συνθήκες λειτουργίας. Το αρχείο καταγραφής είχε διάρκεια 20 λεπτά, ενώ η ανάλυση είχε ρυθμό δειγματοληψίας 200Hz. Το Σχήμα 3-8 φανερώνει μια αιχμή στο 0.74Hz, ένδειξη ότι οι χαμηλές συχνότητες της κατασκευής επηρεάζονται από την ανεμοφόρτιση. Το Σχήμα 3-8 αποτελεί διάγραμμα ANPSD, δηλαδή ο μέσος όρος του κανονικοποιημένου φάσματος συχνοτήτων της κατασκευής, που προέκυψε από τις έξι τοποθεσίες των αισθητήρων με καλή ανακλαστικότητα (Σχήμα 3-1). Αυτό το "peak" στο Σχήμα 3-8 εμφανίστηκε και στα δεδομένα του κλισίμετρου που χρησιμοποιήθηκε και αποτελεί την πιο πιθανή συχνότητα ταλάντωσης συντονισμού του φορέα. Επίσης, στο Σχήμα 3-8 αποκαλύφθηκε ένας αριθμός κυρίαρχων συχνοτήτων στην περιοχή από 0-100Hz και αποδίδεται στο μηχανικό εξοπλισμό (συμπιεστές αέρος, αντλίες ψύξης,

γεννήτριες) της μονάδας παραγωγής ενέργειας. Προσθετικά, παρόμοια αποτελέσματα βγήκαν και από το φάσμα PSD που προέκυψε από επιταχυνσιόμετρο στην κορυφή του μηχανοστασίου (Σχήμα 3-9 & Σχήμα 3-1).



Σχήμα 3-8 : ANPSD διάγραμμα σε συνήθειες συνθήκες λειτουργίας με άνεμο 13m/s

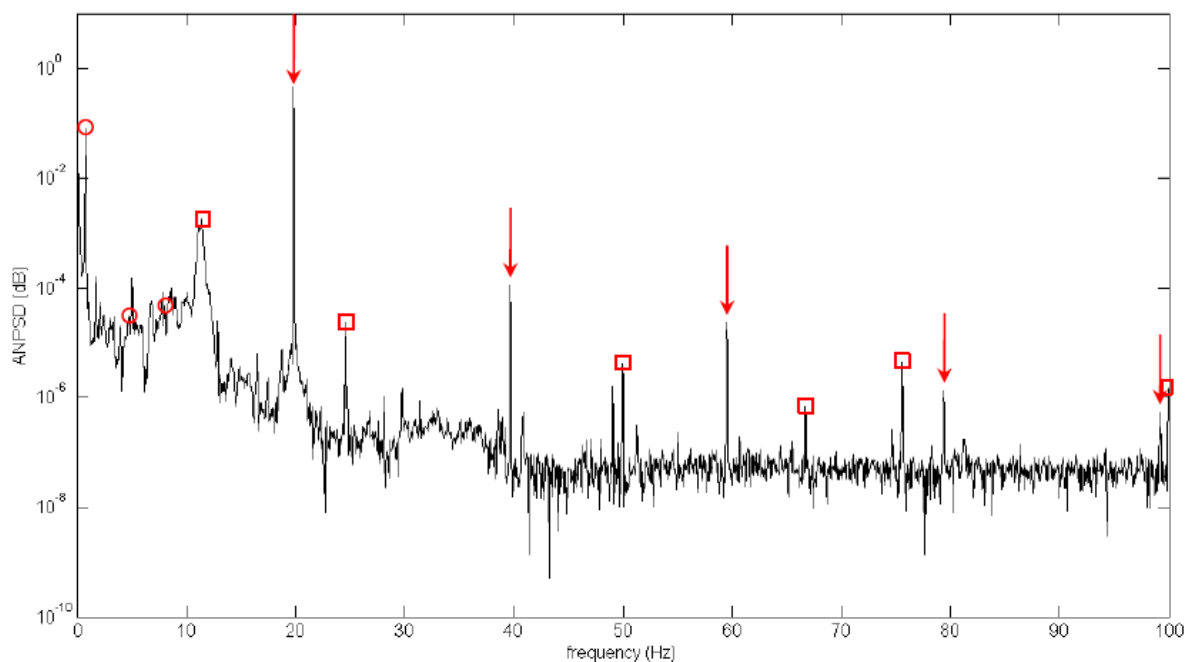
Προκύπτει λοιπόν, ότι τα αποτελέσματα των συχνότητων της κατασκευής συσχετίζονται με τη λειτουργία των μηχανών. Ακόμη, οι συχνότητες 66.71Hz, 75.59Hz και 99.95Hz αποδίδονται σε δονήσεις των μηχανών.



Σχήμα 3-9 : PSD διάγραμμα από Κίνεμετρικς QDR επιταχυνσιόμετρα στην κορυφή του μηχανοστασίου για περιβαλλοντικές συνθήκες

Από την άλλη η δυναμική ανάλυση υπό ακραίες συνθήκες λειτουργίας (ανοικτού κύκλου λειτουργίας), με τη μονάδα να λειτουργεί 112MW, πραγματοποιήθηκε και αυτή για 20 λεπτά με χαμηλής επιπέδου έντασης ανέμου. Οι καταγραφές που λήφθηκαν, προήλθαν από τις ίδιες πηγές που προήλθαν και τα αποτελέσματα της φόρτισης σε περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι καταγραφές αποτυπώνονται στο Σχήμα 3-10 και είναι φανερό ότι η κυρίαρχη συχνότητα είναι 19.85Hz και ξεπερνά όλες τις άλλες. Αυτή η συχνότητα δε φανερώθηκε στις περιβαλλοντικές συνθήκες και συνεπώς συσχετίζεται καθαρά με τις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας. Επίσης, φαίνονται ξεκάθαρα και άλλα "peak" συχνοτήτων όπως, 39.70Hz, 59.49Hz, 79.32Hz και 99.14Hz που δείχνουν να αποτελούν απλές αρμονικές συχνοτήτες της κυρίαρχης συχνότητας 19.85Hz. Καθώς αυτές οι συχνότητες δεν εμφανίζονται στο Σχήμα 3-8, αποδίδονται στα θερμικά φαινόμενα που προκύπτουν όταν η μονάδα λειτουργεί πλήρως και ανεβάζει ακραίες θερμοκρασίες. Αντιθέτως οι τετραγωνισμένες αιχμές του διαγράμματος στο Σχήμα 3-10, όπως 24.64Hz, 49.98Hz, 66.71Hz και 75.59Hz διαπιστώθηκαν και στις δύο αναλύσεις και αποδίδονται στις δονήσεις που δημιουργούνται λόγω του μηχανοστασίου.

Διαπιστώνεται λοιπόν, ότι οι συχνότητες 19.85Hz, 29.78Hz, 39.72Hz, 59.57Hz, 79.32Hz και 99.29Hz είναι οι εμφανέστερες. Προφανώς, η συχνότητα 19.85Hz και οι αρμονικές της δεν εμφανίστηκαν στις συνήθειες συνθήκες λειτουργίας και για αυτό το λόγο χρειάζονται περαιτέρω έρευνες για τον επακριβή προσδιορισμό των αιτιών των δονήσεων της καμινάδα, που αποτελούν αντικείμενο μελέτης της προκείμενης παρακολούθησης.



Σχήμα 3-10 : ANPSD διάγραμμα για συνθήκες πλήρους λειτουργίας και χαμηλής έντασης ανέμου

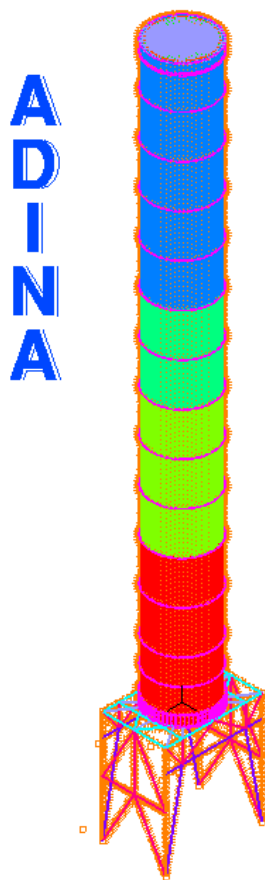




# 4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΥ ΣΤΟ ADINA

## 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η προσομοίωση της παρακαμπτήριου καπνοδόχου τύπου Bypass-Stack, στο λογισμικό ADINA (Εικόνα 4-1).



Εικόνα 4-1 : Προσομοίωμα καπνοδόχου στο λογισμικό ADINA

Έχει δοθεί μεγάλη προσπάθεια να αποδοθεί ο φορέας όσο πιο πιστά γίνεται, λαμβάνοντας όμως τις απαραίτητες παραδοχές. Οι παραδοχές κρίνονται αναγκαίες, προκειμένου το μοντέλο να είναι διαχειρίσιμο ανάλογα με την υπολογιστική ισχύ που προσφέρεται, χωρίς όμως να επηρεάζεται η «ταυτότητα» και η συνολική συμπεριφορά του φορέα. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση του φορέα, προέρχονται από τις μελέτες του κ. Γκίκα, καθώς και από τις αρχικές κατόψεις που χρησιμοποιήθηκαν στην αρχική μελέτη του έργου (από ΔΕΗ). Το γεγονός όμως ότι η κατασκευή παρουσίασε προβλήματα κατά την λειτουργία της, ανάγκασε τους υπεύθυνους του έργου να επέμβουν στην αρχική μελέτη και να προβούν σε δομικές και στατικές αλλαγές. Τελικώς, βρέθηκε εμπειρική λύση στα ζητήματα που προέκυψαν, κατόπιν προσεκτικής και συνεχούς παρακολούθησης για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Καθώς, λοιπόν, η επίλυση στο ζήτημα δόθηκε σύμφωνα με τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα αυτών, οι δομικές αλλαγές που έγιναν, λήφθηκαν υπόψιν στην παρούσα διπλωματική εργασία, έπειτα από προσεκτική μελέτη των τεχνικών εκθέσεων που γράφτηκαν από τους τότε κύριους του έργου. Σε αυτές τις τεχνικές εκθέσεις αναφέρονται οι διάφορες επιτυχημένες και μη, προσπάθειες που έγιναν για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του φορέα, αφήνοντας όμως αρκετές ασάφειες στον αναγνώστη για την τελική μορφή των παρεμβάσεων που πραγματοποιήθηκαν. Συνεπώς, η προσομοίωση της καπνοδόχου, πέραν των όποιων παραδοχών, παρουσιάζει κάποιες διαφορές με τον πραγματικό φορέα λόγω και των ασαφειών στις τεχνικές λεπτομέρειες.

Σε αυτή την ενότητα πέρα από την προσομοίωση του φορέα στο ADINA, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κάποιων αναλύσεων. Οι αναλύσεις που διενεργήθηκαν αφορούνται από τις μετρήσεις που έγιναν από τον κ. Γκίκα και αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Συνεπώς, οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό, αφορούν:

- Την εύρεση ιδιομορφών και των αντίστοιχων ιδιοσυχνοτήτων
- Τις μετατοπίσεις καθ' ύψος της καπνοδόχου, λόγω της φόρτισης ανέμου.
- Την κυρίαρχη συχνότητα της καμινάδας σε συνθήκες λειτουργίας.

## 4.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η καπνοδόχος δεν αποτελείται αμιγώς από μια συγκεκριμένη ποιότητα χάλυβα. Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται στο εσωτερικό της καμινάδας που έρχεται σε άμεση επαφή με τις θερμές αέριες μάζες, διαφέρει από τον αντίστοιχο του εξωτερικού φλοιού που βρίσκεται σε επαφή με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Το εξωτερικό λοιπόν κυλινδρικό κέλυφος και οι ενισχύσεις που το πλαισιώνουν, αποτελούνται από δομικό χάλυβα τύπου St 37.2 σύμφωνα με τον DIN 17100, ή καλύτερα σύμφωνα με τον EN 10025 S235JR. Το μέτρο ελαστικότητας  $E=202.5\text{GPa}$ , με  $\nu=0.3$ ,  $\gamma=78.5\text{kN/m}^3$  και όριο διαρροής  $f_y=235\text{MPa}$ , σύμφωνα όμως με τον EN 13084-7, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας που έχει όταν τίθεται σε λειτουργία  $f_y=160\text{MPa}$ . Η χημική του σύσταση και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στους Πίνακες 4-1 και 4-2.

Chemical elements	C≤ 16mm max	C>16mm max	Si max	Mn max	P max.	S max.
%,by mass	0.17	0.17	--	1.40	0.045	0.045

Πίνακας 4-1 : Χημική σύσταση S235JR

thickness	Yield Strength $R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ] transv. min.	Tensile Strength $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ] transv.	Fracture Elongation[%] transv. min.	Notch Impact Energy $1)Ch V$ complete sample longitud. min [J]
t ≤ 16mm t > 16mm	235 225			Degree: 0 AV: 27J
t < 3mm t ≥ 3mm		360-510 340-470		
Up to 1.5mm 1.51-2.00mm 2.01-2.50mm 2.51-2.99mm ≥ 3mm			16 17 18 19 24	

Πίνακας 4-2 : Τεχνικά χαρακτηριστικά S235JR

Το εσωτερικό κέλυφος και οι ενισχύσεις που το πλαισιώνουν αποτελούν δομικό χάλυβα ποιότητας 1.4571, καθώς είναι ανθεκτικό στις κρυσταλλικές διαβρώσεις, έχοντας υψηλή αντοχή στη διάβρωση. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3. Στην παρούσα προσομοίωση τα χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν ήταν, μέτρο ελαστικότητας  $E=200\text{GPa}$ , με  $\nu=0.3$ ,  $\gamma=80\text{kN/m}^3$  και όριο διαρροής  $f_y=240\text{MPa}$ , λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας που έχει όταν τίθεται σε λειτουργία  $f_y=165\text{MPa}$ .

Temperature	1,0% Yield strength in high temperatures	0,2% Yield strength in high temperatures	Tensile strength in high temperatures	E-Modul in high temperatures
°C / °F	$R_p 0,2$	$R_p 1,0$	$R_m$	
	N/mm <sup>2</sup> / ksi	N/mm <sup>2</sup> / ksi	N/mm <sup>2</sup> / ksi	N /mm <sup>2</sup>
50 / 122	205 / 29,73	240 / 34,80	490 / 71	
100 / 212	190 / 27,55	220 / 31,90	440 / 63,8	16,500
200 / 392	165 / 23,90	192 / 27,80	390 / 56,6	17,500
300 / 572	145 / 21,00	175 / 25,40	375 / 54,4	18,500
400 / 752	135 / 19,60	164 / 23,80	375 / 54,4	18,500
500 / 932	129 / 18,70	158 / 22,90	360 / 52,2	19,000

Πίνακας 4-3 : Τεχνικά χαρακτηριστικά 1.4571

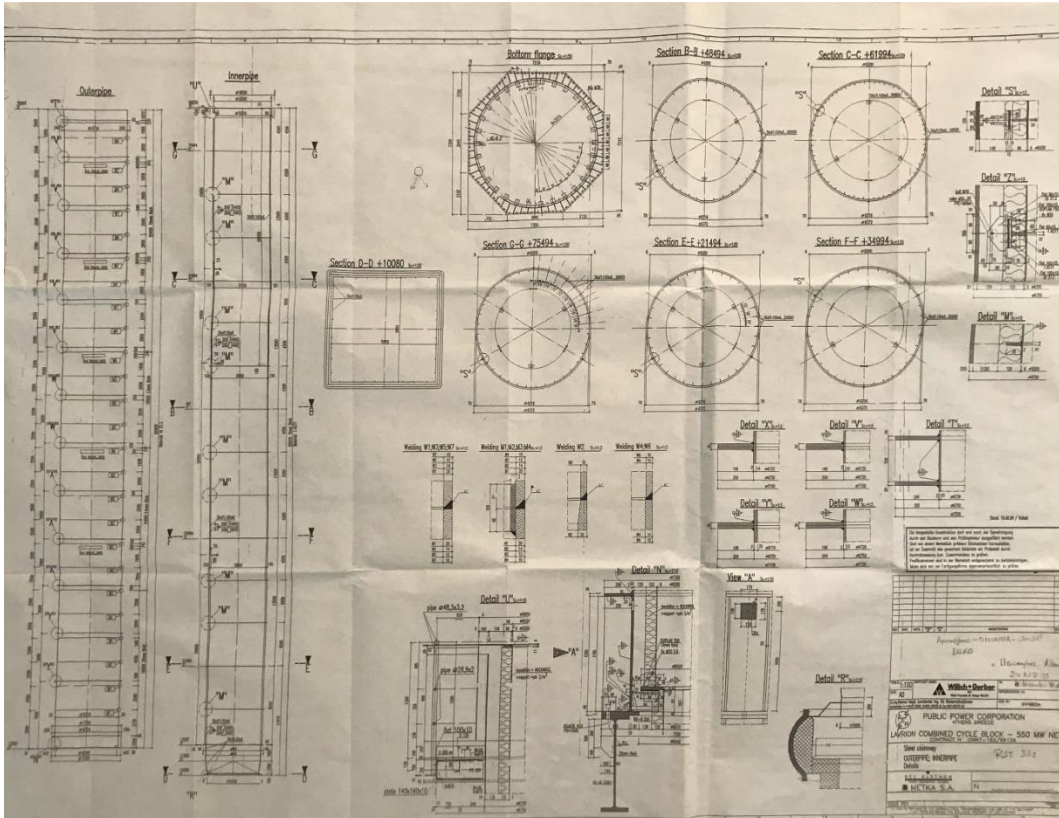
Επίσης, ως θερμομονωτικό υλικό το οποίο βρίσκεται στην εξωτερική μεριά του εσωτερικού κελύφους, χρησιμοποιείται το ISOPLAN 750 με δυνατότητα χρήσης μέχρι και 750°C, που αποτελείται από βιοδιασπώμενες, ορυκτές και κεραμικές ίνες. Κατά αυτόν τον τρόπο παρέχεται μεγάλη θερμοκρασιακή αντίσταση, λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν ήταν,  $E=400\text{MPa}$ ,  $\gamma=9.3\text{kN/m}^3$ .



Εικόνα 4-2 : ISOPLAN 750

### 4.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ – SHELL ELEMENTS

Τα στοιχεία της κατασκευής συγκεντρώθηκαν από ενδεικτική κάτοψη (Εικόνα 4-3) που παραχωρήθηκε από το υπεύθυνο τμήμα της ΔΕΗ, καθώς και από επιτόπου μετρήσεις, του υποφαινόμενου, που διενεργήθηκαν στη βάση της καπνοδόχου. Να σημειωθεί ότι παρακάτω παρουσιάζονται τα στοιχεία γεωμετρίας του φορέα, όπως προέκυψαν από τις παραδοχές που λήφθηκαν υπόψιν. Κάποιες από αυτές είναι, η παράλειψη της προσομοίωσης των συγκολλήσεων, τοπικά τεχνικών λεπτομερειών που δεν επηρεάζουν τη στατικότητα και τη συμπεριφορά του φορέα, αλλά και τη διαφοροποίηση των θέσεων των νευρώσεων, ώστε το μοντέλο να μην είναι αρκετά «βαρύ».



Εικόνα 4-3 : Σχέδια αρχικής μελέτης

Η καμινάδα αποτελεί φορέα με διπλά τοιχώματα, με τη διάμετρο του εξωτερικού κελύφους να είναι 6.75m και του εσωτερικού 6.20m, ενώ εδράζεται πάνω σε μια πλατφόρμα ύψους 13m από το έδαφος. Η καμινάδα έχει καθαρό ύψος 66.9m, συνεπώς το τελικό ύψος της κατασκευής ανέρχεται στα 79.9m από το έδαφος. Το εξωτερικό κέλυφος αποτελείται από μεταβαλλόμενη καθ' ύψος διατομή, από χάλυβα κατηγορίας S235JR (Πίνακας 4-4). Στην Εικόνα 4-1, φαίνονται με χρωματική διαβάθμιση οι διαφορές στα πάχη. Το εσωτερικό κέλυφος αποτελείται από χάλυβα ποιότητας 1.4571, όπως προαναφέρθηκε, και έχει σταθερό πάχος 0.006m.

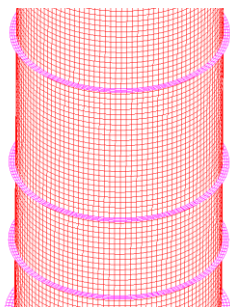
Στάθμη (από το έδαφος) m	Πάχος εξωτερικού τοιχώματος m
13.00-30.00	0.02
30.00-45.00	0.014
45.00-55.00	0.012
55.00-77.90	0.010

Πίνακας 4-4 : Πάχος διατομής εξωτερικού τοιχώματος

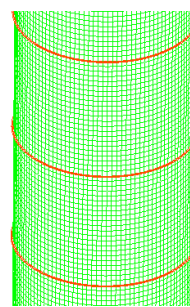
Όπως είναι λογικό, ο φορέας διατρέχεται από εγκάρσιες και διαμήκεις ενισχύσεις, καθώς φανερώνει έντονα τοπικά φαινόμενα, λόγω της μεγάλης διαμέτρου και του μικρού πάχους (κατηγορία 4). Το εξωτερικό τοίχωμα έχει δακτυλίους καθ' ύψος από την εξωτερική πλευρά του (Πίνακας 4-5), όπου στο σύνολό τους ανέρχονται στους 16, με πλάτος δακτυλικής διατομής  $b=0.20\text{m}$  και πάχος δακτυλίου  $t=0.03\text{m}$  (Εικόνα 4-4 α). Ομοίως και το εσωτερικό τοίχωμα έχει δακτυλίους καθ' ύψος από την εξωτερική μεριά (Πίνακας 4-5), όπου στο σύνολό τους ανέρχονται στους 14 δακτυλίους με πλάτος  $b=0.078\text{m}$  και πάχος  $t=0.015\text{m}$  (Εικόνα 4-4 β).

ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΙ ΔΑΚΤΥΛΙΟΙ		ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΙ ΔΑΚΤΥΛΙΟΙ	
b (m)	0.20	b (m)	0.078
t (m)	0.03	t (m)	0.015
ΣΤΑΘΜΕΣ * (m)	4.00	ΣΤΑΘΜΕΣ * (m)	3.80
	7.00		8.40
	12.00		12.80
	17.00		17.40
	22.00		21.80
	27.00		26.40
	32.00		30.80
	37.00		35.40
	42.00		39.80
	47.00		44.40
	52.00		48.80
	57.00		53.40
	62.00		57.80
	65.70		62.00
	65.90		*από βάση πλατφόρμας +13m
66.90			

Πίνακας 4-5 : Δακτύλιοι εσωτερικών και εξωτερικών τοιχωμάτων



(a)



(b)

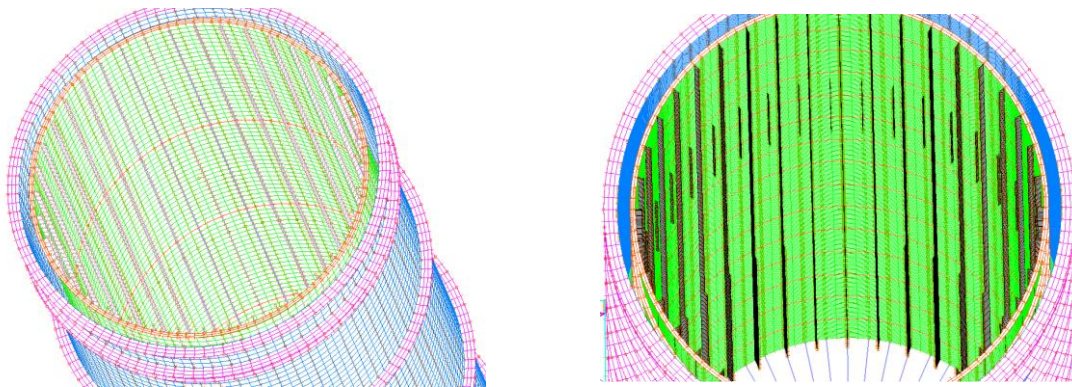
Εικόνα 4-4 : (a) Εξωτερικό κέλυφος με τους δακτυλίους, (b) Εσωτερικό κέλυφος με δακτυλίους

Επίσης, στο εσωτερικό τοίχωμα, από την εσωτερική πλευρά διατρέχουν διαμήκεις ενισχύσεις οι οποίες αλλάζουν διαστάσεις και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες (Πίνακας 4-6). Οι ενισχύσεις αυτές είναι τοποθετημένες αξονικά, ανά  $10^\circ$  (Εικόνα 4-5). Κύρια λειτουργία τους αποτελεί η διευκόλυνση απομάκρυνσης των καυσαερίων προς την ατμόσφαιρα, αλλά και την αύξηση της δυσκαμψίας του εσωτερικού κελύφους.

ΣΤΑΘΜΕΣ*(m)	ΠΛΗΘΟΣ	ΜΟΙΡΕΣ ( $^\circ$ )	ΜΗΚΟΣ (m)	ΠΛΑΤΟΣ (m)	ΠΑΧΟΣ (m)
0.00m-22.00m	40	9	22.00	0.15	0.006
22.00m-66.90m	40	9	44.90	0.10	0.006
42.00m-52.00m	40	9	10.00	0.05	0.006

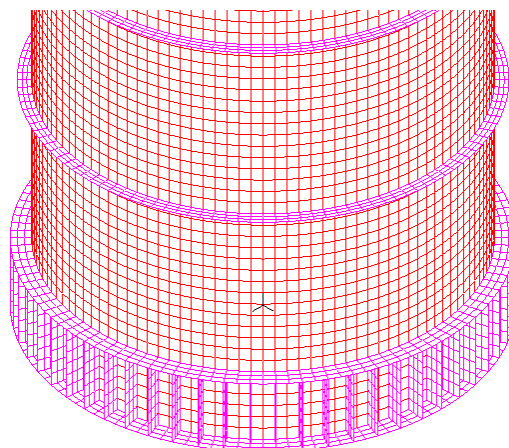
\*από τη βάση της πλατφόρμας +13m

Πίνακας 4-6 : Στοιχεία κατακόρυφων ενισχύσεων εσωτερικά του εσωτερικού κελύφους



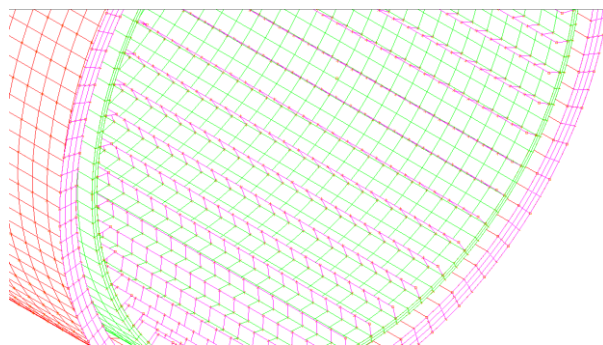
Εικόνα 4-5 : Άποψη κατακόρυφων ενισχύσεων στην εσωτερική παρειά του εσωτερικού τοιχώματος

Ακόμη, ο φορέας στη βάση του, πάνω στην πλατφόρμα, είναι οκταγωνικός και λόγω της ευαισθησίας τοπικά της περιοχής, είναι ενισχυμένος με 60 εγκάρσιες νευρώσεις, οι οποίες βρίσκονται εντός δύο διαδοχικών δακτυλίων. Οι εγκάρσιες αυτές νευρώσεις έχουν ύψος  $h=1.20\text{m}$ , πλάτος  $b=0.30\text{m}$ , πάχος  $t=0.03\text{m}$  και είναι διατεταγμένες ακτινικά ανά  $6^\circ$ . Η προσομοίωση στο ADINA έγινε με κυκλική βάση, ενώ τα στοιχεία των νευρώσεων και των δακτυλίων αποτυπώθηκαν σύμφωνα με τα μελετητικά σχέδια (Εικόνα 4-6).

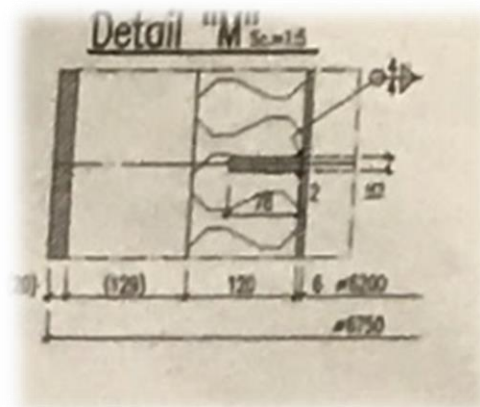


Εικόνα 4-6 : Βάση καμινάδας στο ADINA

Προσθετικά, έγινε προσομοίωση και του θερμομονωτικού υλικού που εφάπτεται στην εξωτερική παρειά του εσωτερικού τοιχώματος. Αυτό έχει πάχος  $t=0.12m$  και η λειτουργία του ως θερμομονωτικό υλικό είναι απαραίτητη, καθώς δεν αφήνει τη θερμότητα των καυσαερίων να επηρεάσουν τη θερμοκρασία του εξωτερικού τοιχώματος που έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα. Επειδή, ο ρόλος του ISOPLAN 750 έχει λειτουργικό χαρακτήρα και όχι τόσο στατικό, λόγω των ιδιοτήτων του, στις αναλύσεις που ακολουθούν δε λαμβάνεται υπόψιν, ώστε να μην επιβαρύνεται με περιττά στατικά στοιχεία το προσομοίωμα (Εικόνα 4-7). Να αναφερθεί ότι η προσομοίωση στο ADINA έγινε με 3D-Solid στοιχεία.



(a) Με πράσινο χρώμα ADINA



(b) Κατακόρυφη τομή

Εικόνα 4-7 : ISOPLAN 750

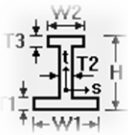

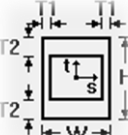

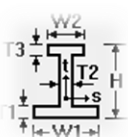

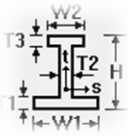

Τέλος, μέσα στα σχέδια φαίνονται διάφοροι αποστατήρες καθ' ύψος, αλλά και περιμετρικά στην εκάστοτε στάθμη που τοποθετούνται. Καθώς όμως παρουσιάστηκαν τα σχετικά ζητήματα με τις δονήσεις, θεωρήθηκε απαραίτητη η αλλαγή αυτών των αποστατήρων και η αντικατάστασή τους με μηχανισμούς, τύπου spacer (Εικόνα 4-8), όπως και η μείωση του πλήθους τους τόσο καθ' ύψος, όσο και στα αντίστοιχα επίπεδα. Τελικώς στο μοντέλο με τα Shell elements που δημιουργήθηκε για τους σκοπούς της εργασίας, αυτά τα spacers προσομοιώθηκαν με rigid links με point to point, σε πέντε στάθμες και σε κάθε μία από αυτές τρία rigid links που ενώνουν το εξωτερικό τοίχωμα με το εσωτερικό και έχουν διαφορά  $120^\circ$ . Πιο συγκεκριμένα οι τριάδες των rigid links βρίσκονται στις στάθμες 12.00m, 22.00m, 37.00m, 52.00m και 62.00m.



Εικόνα 4-8 : Spacer

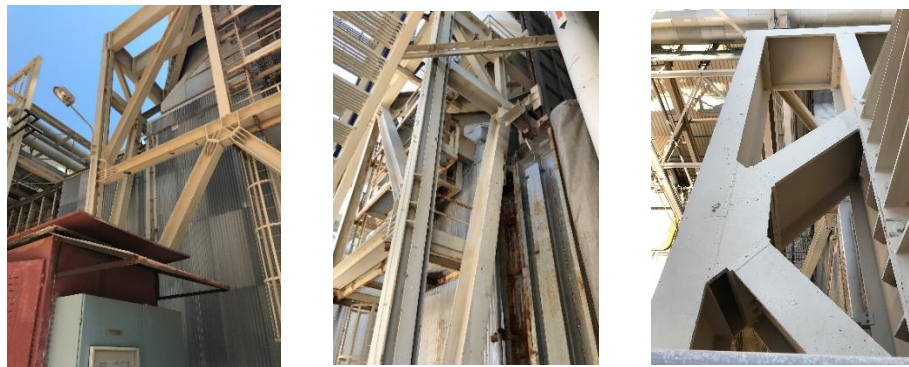
#### 4.4 ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΕΔΡΑΣΗΣ

Η καπνοδόχος ουσιαστικά εδράζεται σε μια πλατφόρμα μεταλλικής κατασκευής, η οποία φθάνει μέχρι το υψόμετρο των 13.00m. Από εκεί και επάνω η καπνοδόχος φθάνει μέχρι και τα 79.90m από το έδαφος. Αυτή η κατασκευή πέρα από την ανάγκη έδρασης της καμινάδας, ικανοποιεί και λειτουργικά ζητήματα, όπως την άρτια επικοινωνία της μονάδας που βρίσκονται τα μηχανήματα και οι γεννήτριες, με την καπνοδόχο. Για την επικείμενη κατασκευή χρησιμοποιήθηκαν διατομές τύπου I και HEA, καθώς και συγκολλητές διατομές, κατά κόρον. Λόγω των ελλειπών στοιχείων από τα δοθέντα σχέδια και τις πληροφορίες, πραγματοποιήθηκε επιτόπου επίσκεψη και μέτρηση των διατομών και της γενικότερης διάταξης της πλατφόρμας. Από την παραπάνω καταγραφή διαπιστώθηκαν οι παρακάτω διατομές (Πίνακας 4-7). Επίσης, οι διαστάσεις της ορθογωνικής κάτοψης της κατασκευής είναι 10.55m x 8.40m (Εικόνα 4-10 (a),(b),(c),(d)), ενώ το συνολικό ύψος, όπως προαναφέρθηκε, 13.00m.

ΔΙΑΤΟΜΗ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ	b (m)	h (m)	t <sub>f</sub> (m)	t <sub>w</sub> (m)	Εικόνα
	Σύνδεσμοι Δυσκαμψίας		0.30	0.30	0.02	0.03	Εικόνα 4-9 (a)
	Υποστυλώματα		0.41	0.41	0.02	0.02	Εικόνα 4-9 (b)
	Δοκός- Σύνδεσμοι Δυσκαμψίας		0.30	0.38	0.02	0.03	Εικόνα 4-9 (b)
	Δοκοί έδρασης		0.30	1.00	0.03	0.04	Εικόνα 4-9 (c)
<p>*Η διατομή Νο2 επιλέχθηκε κατόπιν παραδοχής, καθώς ήταν διπλό I συμμετρικό και στις δύο διευθύνσεις.</p> <p>**Όλα τα στοιχεία των διατομών δεν είναι ακριβή, καθώς οι μετρήσεις έγιναν με απλά μέσα, χωρίς ικανοποιητική ακρίβεια.</p>							

Πίνακας 4-7 : Στοιχεία διατομών πλατφόρμας



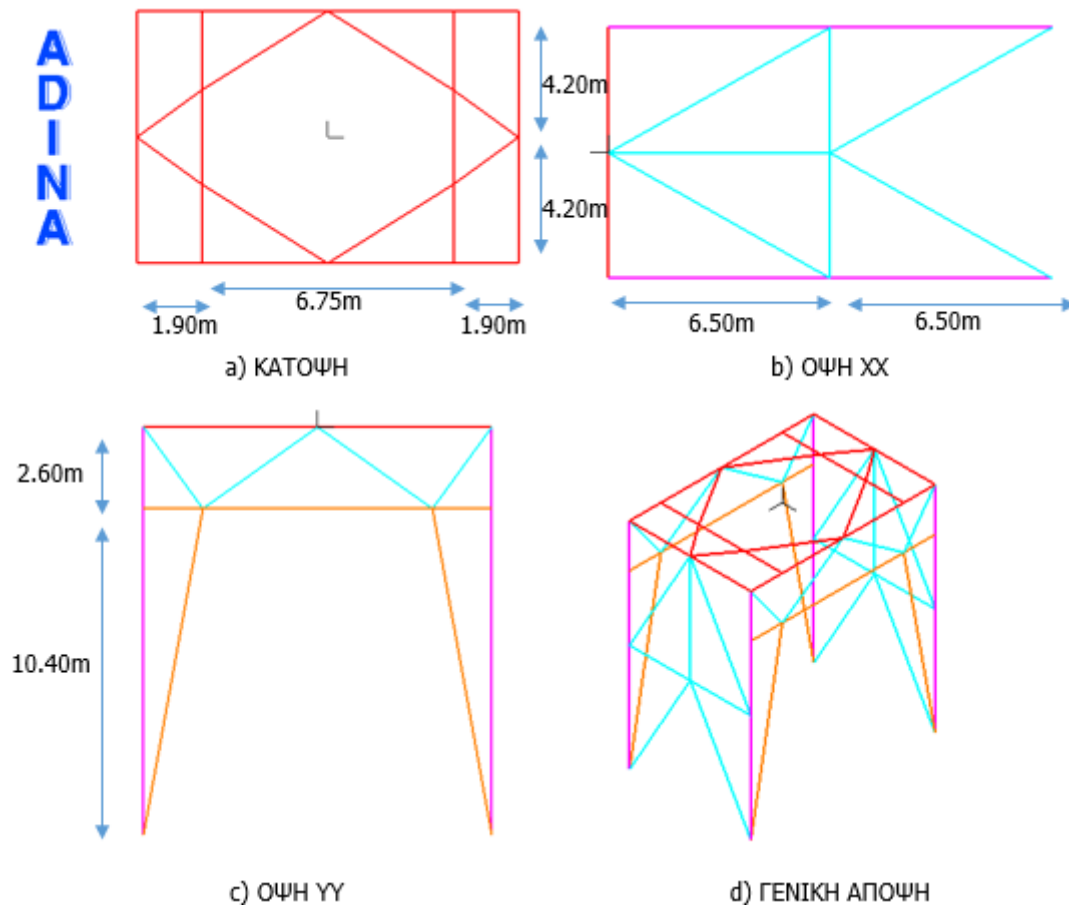


(a)

(b)

(c)

Εικόνα 4-9 : Φωτογραφίες από πλατφόρμα



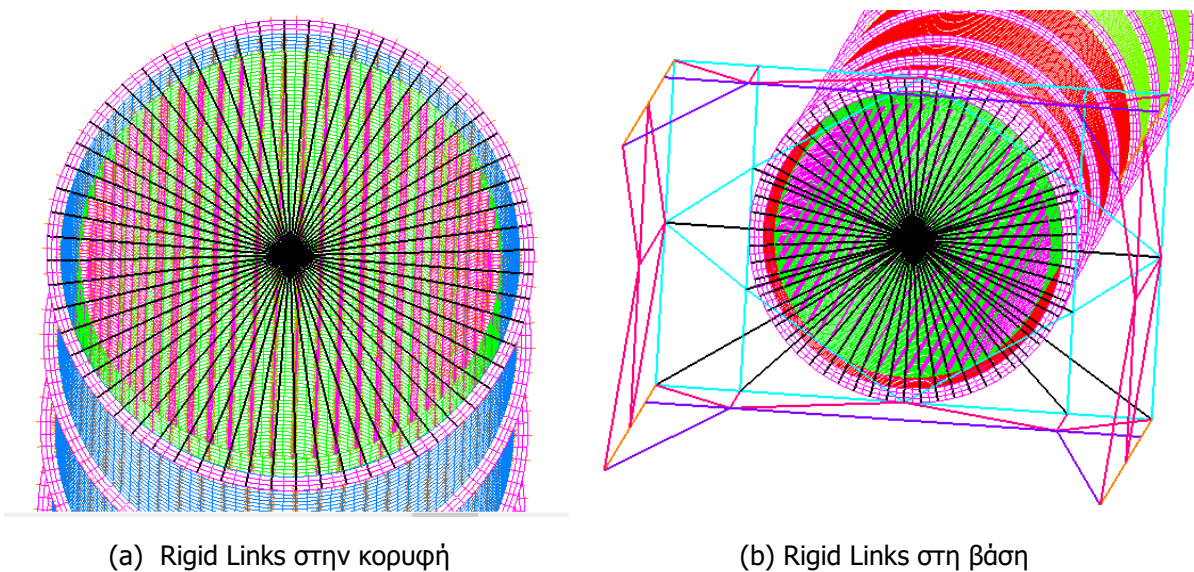
Εικόνα 4-10 : Σχέδια αποτύπωσης της πλατφόρμας

#### 4.5 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - SHELL ELEMENTS

Η ακριβής προσομοίωση του φορέα (κυρίως κορμός της καμινάδας) στην παρούσα διπλωματική επιτεύχθηκε με την κατασκευή μοντέλων με shell elements, ώστε να λαμβάνονται υπόψιν φαινόμενα τοπικών φαινομένων, διότι η καμινάδα αποτελεί φορέα μεγάλου ύψους και διαμέτρου, με λεπτά τοιχώματα. Η προσομοίωση με στοιχεία κελύφους (shell elements), φαίνεται και στην υπό ενότητα 4.2.2.

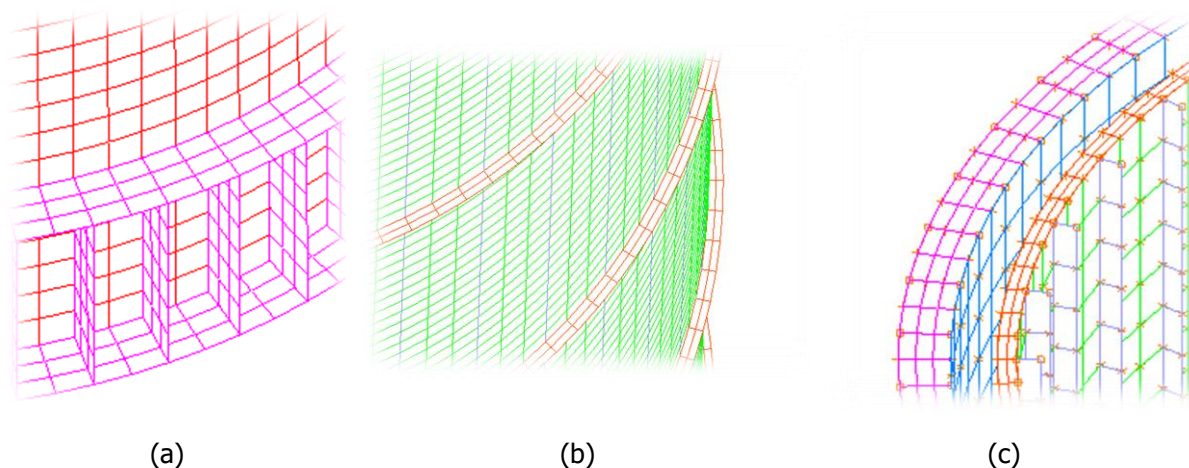
Στην παρούσα υπό ενότητα παρουσιάζονται στοιχεία που δεν προαναφέρθηκαν και λαμβάνονται υπόψη στις αναλύσεις στο λογισμικό ADINA.

Πέραν, λοιπόν, των γεωμετρικών στοιχείων και αποτυπώσεων του φορέα που είναι ήδη γνωστά, πρέπει να αναφερθεί ότι επιλέχθηκε να δημιουργηθούν δύο ακόμα ομάδες rigid links, εκτός από αυτές που αφορούν τους αποστατήρες. Η μία ομάδα rigid links, έχει ως master point το κεντρικό σημείο της κορυφής της καμινάδας και ως slaves τα περιμετρικά σημεία του εσωτερικού και του εξωτερικού κελύφους (Εικόνα 4-11 a). Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται κάτι σα διαφραγματική λειτουργία, καθώς γίνεται η παραδοχή ότι η κορυφή διατηρεί την επιπεδότητα της και δε παραμορφώνεται εκτός επιπέδου του δακτυλίου. Αντίστοιχη παραδοχή λαμβάνεται και για τη βάση της καμινάδας πάνω στη μεταλλική πλατφόρμα, στην οποία εδράζεται. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ως master point το κεντρικό σημείο στη βάση της καμινάδας (H=13.00m) και ως slave points όλα τα περιμετρικά στοιχεία του εσωτερικού και του εξωτερικού κελύφους, αλλά και σημεία πάνω στην πλατφόρμα και πιο συγκεκριμένα στις δοκούς έδρασης (Εικόνα 4-11 b).



Εικόνα 4-11 :Rigid Links TOP-BASE

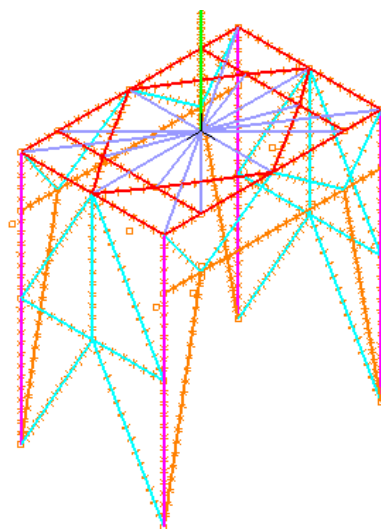
Προσθετικά, η διακριτοποίηση του φορέα αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι στην προσομοίωση με shell elements. Αρχικά, είχε επιλεχθεί διακριτοποίηση του εσωτερικού και του εξωτερικού κελύφους, ανά 5cm, όμως αυτή η ενέργεια έκανε το μοντέλο αρκετά «βαρύ», με αποτέλεσμα την ανάγκη αραίωσης. Τελικά, επιλέχθηκε καθ' ύψος διακριτοποίηση ανά 20cm, ενώ περιφερειακά τα κελύφη χωρίζονται σε 120 τμήματα, δηλαδή 16-17cm. Συνεπώς, η καμνοδόχος έγινε προσπάθεια να παρουσιάζει όσο πιο τετραγωνισμένη και επαρκή διακριτοποίηση γινόταν, χωρίς να χρειάζεται τεράστια υπολογιστική ισχύς. Με την ίδια φιλοσοφία ορίστηκε και το mesh των ενισχυτικών δακτυλίων, των διαμηκών κατακόρυφων ενισχύσεων του εσωτερικού τοιχώματος, αλλά και των νευρώσεων στη βάση. Έτσι, κάθε δακτύλιος περιφερειακά χωρίστηκε εξίσου σε 120 τμήματα, ώστε να «συμφωνούν» οι κόμβοι και να είναι κοινοί, ενώ ακτινικά οι μεν εξωτερικοί σε 3 τμήματα και οι δε εσωτερικοί σε 2 τμήματα (Εικόνα 4-12 a,b). Επίσης, οι νευρώσεις στη βάση ακολουθούν την ίδια διακριτοποίηση με τους εξωτερικούς δακτυλίους. Αντιθέτως, οι εσωτερικές, κατακόρυφες, διαμήκεις νευρώσεις του εσωτερικού τοιχώματος μπορεί να παρουσιάζουν την ίδια καθ' ύψος διακριτοποίηση, όμως για ευνόητους λόγους κρίθηκε μη αναγκαία ο περεταίρω διαχωρισμός τους ακτινικά (Εικόνα 4-12 c).



Εικόνα 4-12 : Meshing σε διάφορες περιπτώσεις

#### 4.6 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΟΥ – BEAM ELEMENTS

Στο παρόν μοντέλο, τα μέλη της πλατφόρμας προσομοιώθηκαν ως στοιχεία δοκού, καθώς οι τοπικές λυγηρότητες δε μας ενδιαφέρουν. Η μελέτη μας επικεντρώνεται πάνω στην καπνοδόχο, διότι σε αυτήν εντοπίστηκαν τα διάφορα λειτουργικά ζητήματα. Η μεταλλική κατασκευή, λοιπόν, που αποτελεί έδραση της καμινάδας αποτυπώνεται με στοιχεία δοκού και πιο συγκεκριμένα με διατομές, όπως έχουν προαναφερθεί στον Πίνακα 4-7. Να σημειωθεί ότι η διακριτοποίηση σε αυτά τα στοιχεία είναι περίπου ανά 0.60m και διακρίνεται στην Εικόνα 4-13.



Εικόνα 4-13 : Διακριτοποίηση μελών πλατφόρμας

Επίσης, για την πληρότητα των μετρήσεων και για ποικιλία στις αναλύσεις, με απώτερο σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων και έγκυρων συμπερασμάτων δημιουργήθηκε και προσομοίωμα της καπνοδόχου αποκλειστικά με στοιχεία δοκού (Beam Elements). Για την ορθή απόδοση του φορέα με στοιχεία δοκού, χρειάστηκε να δοθεί προσεγγιστικά μια ισοδύναμη διατομή για την προσομοίωση της διπλής κυλινδρικής διατομής, ώστε να γίνει εισαγωγή στο λογισμικό ADINA. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε διατομή ενός δακτυλίου με  $D=6.75\text{m}$ ,  $d=6.725\text{m}$  και  $t=0.03\text{m}$ . Η εύρεση της ισοδύναμης αυτής διατομής βασίστηκε στην εξίσωση της ροπής αδράνειας της νέας διατομής, με δεδομένη την εξωτερική διάμετρο  $D=6.75\text{m}$  και της διπλής διατομής δακτυλίων με την απλοποιητική παραδοχή ότι υπάρχει πλήρης συνεργασία μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού τοιχώματος, που εξασφαλίζεται εν μέρει με τους

αποστατήρες. Παρακάτω φαίνεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να βρεθεί το πάχος της νέας ισοδύναμης διατομής (Πίνακας 4-8). Αξίζει να διευκρινιστεί ότι οι αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν με στοιχεία δοκού μπορεί να μην αποδώσουν τελείως αξιόπιστα αποτελέσματα, όμως βοηθούν αρκετά στην κατανόηση της συμπεριφοράς και της απόκρισης του φορέα. Ακόμη, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω, τα beam elements μπορούν να καλύψουν τυχούσες «αδυναμίες» των shell elements, που αφορούν το μεγάλο όγκο δεδομένων που απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύς.



I = I <sub>outer</sub> + I <sub>inner</sub>		I <sub>ισοδύναμη</sub>	
$I_{\text{ΔΑΚΤ.}} = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$			
D <sub>out</sub> (m)	6.75	D (m)	6.75
d <sub>out</sub> (m)	6.71	d (m)	;
t <sub>out</sub> (m)	0.02	t (m)	f(d)=;
D <sub>in</sub> (m)	6.20	I <sub>out</sub> = 2.394m <sup>4</sup>	
d <sub>in</sub> (m)	6.188	I <sub>in</sub> = 0.56 m <sup>4</sup>	
t <sub>in</sub> (m)	0.006	I <sub>ισοδ.</sub> = I <sub>out</sub> + I <sub>in</sub> = 2.954 m <sup>4</sup>	
d = 6.725m → t = 0.025m			

Πίνακας 4-8 : Διαδικασία εύρεσης t(m) ισοδύναμης διατομής για Beam Elements

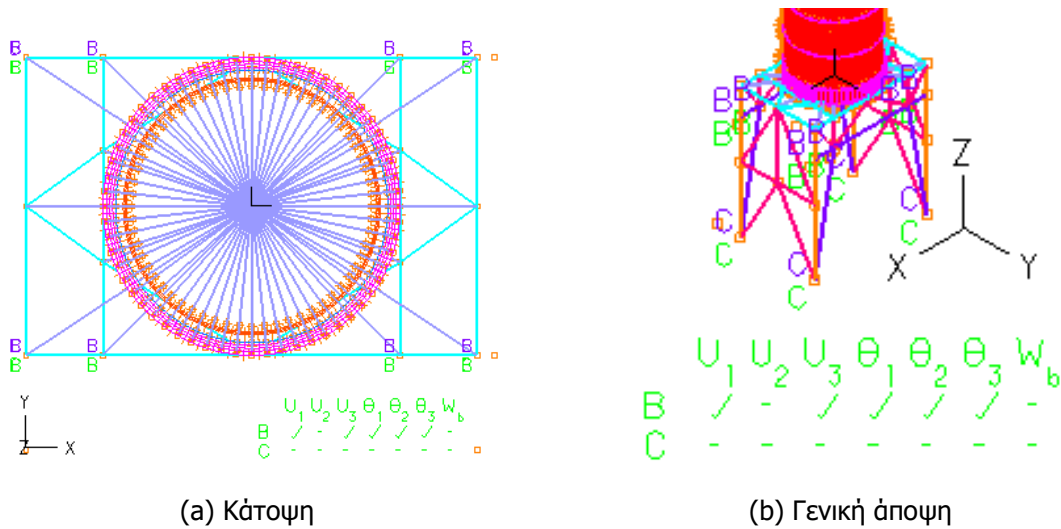
Η παραπάνω διαδικασία έδωσε ως πάχος ισοδύναμης διατομής t=0.025m, για το μέρος της καπνοδόχου με t=0.02m. Εξαιτίας όμως και των πρόσθετων νευρώσεων (δακτυλίων και κατακόρυφων στο εσωτερικό) γίνεται αποδεκτή μια προσαύξηση κατά 0.005. Απλοποιητικά για τον υπόλοιπο φορέα μέχρι την κορυφή τα διπλά τοιχώματα προσομοιώθηκαν με δακτυλική διατομή t=t<sub>shell</sub>+c (c από Πίνακα 4-9). Σύμφωνα με αυτήν την παραδοχή προκύπτει φορέας με στοιχεία δοκού ως έχει παρακάτω (Πίνακας 4-9). Η διακριτοποίηση της καμινάδας έγινε ανά 0.20m. Προσθετικά, έγινε η παραδοχή ότι στη βάση της καπνοδόχου, όπου είναι σε επαφή με την πλατφόρμα, η ισοδύναμη διατομή, λόγω των πυκνών εγκάρσιων νευρώσεων, έχει πάχος t=1m. Τέλος να αναφερθεί ότι η ποιότητα χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για τα στοιχεία δοκού είναι S235JR.

ΣΤΑΘΜΗ*(m)	D(m)	t(m)
0.00-1.20	6.75	1.00
1.20-17.00	6.75	0.03
17.00-32.00	6.75	0.026
32.00-42.00	6.75	0.023
42.00-66.90	6.75	0.021

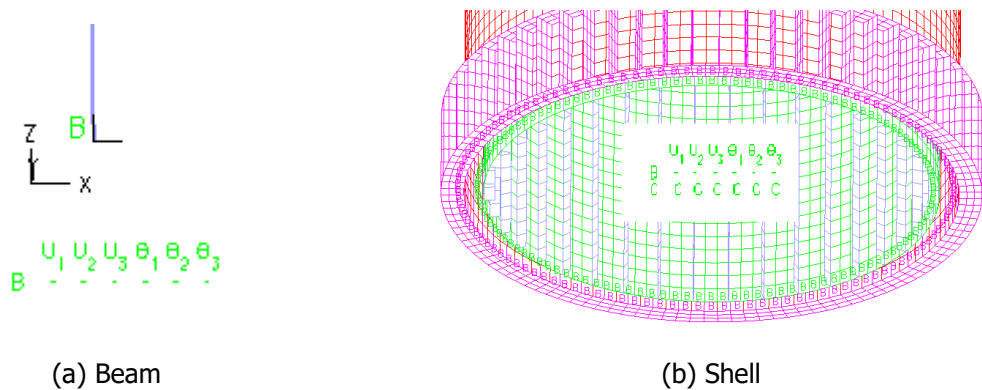
Πίνακας 4-9 : Στοιχεία διατομών για Beam Elements

### 4.7 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΣ ΦΟΡΕΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν ποίκιλα μοντέλα, τα οποία διακρίνονται σε δύο κατηγορίες των shell και των beam elements. Βέβαια η βασική δομή του φορέα είναι η ίδια, πέραν από κάποιες παραμέτρους που άλλοτε λαμβάνονται υπόψιν και άλλοτε όχι. Μία από αυτές τις παραμέτρους είναι η ύπαρξη, ή η αγνόηση της πλατφόρμας έδρασης. Στην περίπτωση που η μεταλλική κατασκευή έδρασης υπάρχει στην προσομοίωση, τότε τα τέσσερα υποστυλώματα στη βάση τους πακτώνονται. Επίσης, καθώς στην πραγματικότητα η πλατφόρμα έρχεται σε επαφή με παραπλήσια μεταλλική κατασκευή που φέρνει σε επικοινωνία το μηχανοστάσιο με την καπνοδόχο, για αυτό και τοποθετούνται και δεσμεύσεις κατά τον άξονα γγ (Εικόνα 4-14). Από την άλλη όταν γίνονται αναλύσεις χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η πλατφόρμα, τότε οι συνθήκες στηρίξεως του φορέα, στα shell elements αρκούνται στη δέσμευση των μετακινήσεων κατά τους άξονες xx, γγ, zz περιμετρικά στη βάση και του εσωτερικού και του εξωτερικού τοιχώματος και στα beam elements πακτώνεται η βάση της καμινάδας (Εικόνα 4-15).



Εικόνα 4-14 : Boundary Conditions με Πλατφόρμα



Εικόνα 4-15 : Boundary Conditions χωρίς πλατφόρμα

#### 4.8 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΦΟΡΕΑ

Στα αρχεία και τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο ADINA λήφθηκαν υπόψιν τα ίδια βάρη της κατασκευής, καθώς και η ένταση που προκαλείται από τον άνεμο. Τα ίδια βάρη της κατασκευής υπολογίζονται κατευθείαν από το λογισμικό, αφού στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν έχει δοθεί και το ίδιο βάρος του εκάστοτε υλικού, όπως προαναφέρθηκε στην υπό ενότητα 4.2.1. Να αναφερθεί ότι το ίδιο βάρος της κατασκευής αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για να προκύψουν οι ιδιομορφές του φορέα.

Για την εξέταση της ανεμοφόρτισης, χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που υπάρχει στον EN 1991-1-4 και παρουσιάζεται παρακάτω. Στον Πίνακα 4-10, φαίνονται συγκεντρωμένα τα δεδομένα όπως προκύπτουν από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη δομή του φορέα, καθώς και τα στοιχεία που προκύπτουν από αυτές.

Terrain category	0
z0,0	0.05
zmin	1
vb,0 (από χάρτη)	36
cdir	1
cseason	1
v <sub>b</sub>	36
z <sub>0</sub>	0.05
c <sub>0</sub> (z)	1
k <sub>1</sub>	1
k (mm) cast iron	0.2
ρ	1.25
b (diametre)	6.75
v	0.000015
k/b	2.96296E-05
ψλ	0.675
** με κόκκινο τα δεδομένα που αφορούν τη φύση του φορέα	

Πίνακας 4-10 : Δεδομένα και αποτελέσματα από EN 1991-1-4

Τα δεδομένα που προκύπτουν από τη διαδικασία που αναφέρεται στον EN 1991-1-4, χρησιμοποιούνται για να δοθεί η χωρική κατανομή της πίεσης που ασκεί ο άνεμος πάνω στην καμινάδα. Είναι πρόδηλο πως η κατανομή που παρουσιάζεται, δεν αποτελεί πιστή αναπαράσταση της πραγματικότητας, αλλά είναι πολύ κοντά σε αυτή και έχει προκύψει έπειτα από αρκετές έρευνες και ικανοποιητικές παραδοχές. Η ανεμοπίεση κατανέμεται περιμετρικά της διατομής (Εικόνα 4-16), σύμφωνα με τον EN 1991 και οι τιμές υπολογίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις.

$$w_e = q_p(z_e) * c_{pe}$$

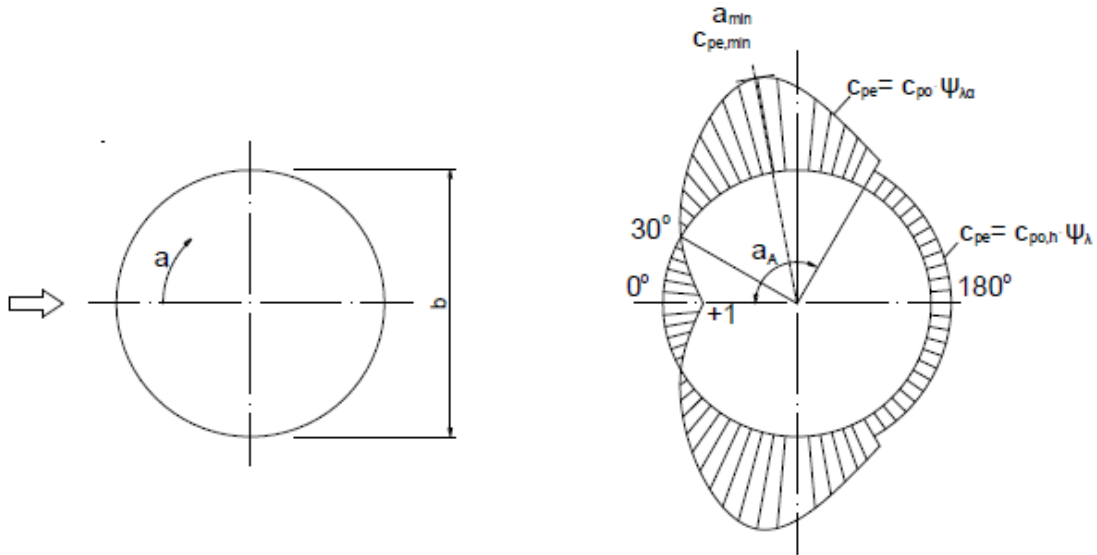
$$c_{pe} = c_{po} * \psi_{\lambda\alpha}$$

$$c_{pe} = c_{po,h} * \psi_{\lambda}$$

Όπου:

a<sub>min</sub> γωνιακή θέση σημείου με τη μικρότερη πίεση [ο]

- $c_{p0,min}$  ελάχιστη τιμή του συντελεστή πίεσης
- $a_A$  γωνία περιοχής μεταβολής πίεσης
- $c_{p0,h}$  βασικός συντελεστή πίεσης
- $\psi_\lambda, \psi_{\lambda a}$  πρόσθετος συντελεστής πίεσης



Εικόνα 4-16 : Κατανομή πίεσης περιμετρικά της καμινάδας

Επίσης, η κατανομή της πίεσης μεταβάλλεται και με το ύψος, σύμφωνα με τον EN 1991-1-4. Ακολουθώντας την κατάλληλη μεθοδολογία προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 4-11 & 4-12), θεωρώντας την πίεση σταθερή στα διαστήματα ανάμεσα στους εξωτερικούς δακτυλίους.

ΣΤΑΘΜΗ*(m)	$\ln(z/z_0)$	$c_r(z)$	$V_m$	$I_v$	$q_p(z)$	Re	$c_{r0}$	$c_f$	$F_w$
1.2	3.178054	0.60383	21.73789	0.31465798	0.945841	17505786	0.775836	0.523689	3.677802
7	4.941642	0.938912	33.80083	0.20236187	1.72555	23644836	0.790131	0.533339	6.833247
12	5.480639	1.041321	37.48757	0.182460478	2.000139	25456730	0.793496	0.53561	7.954362
17	5.828946	1.1075	39.86999	0.171557614	2.186619	26617000	0.795501	0.536963	8.717945
22	6.086775	1.156487	41.63354	0.164290621	2.329228	27471258	0.79691	0.537914	9.302967
27	6.291569	1.195398	43.03433	0.158942861	2.445274	28147267	0.797987	0.538641	9.779659
32	6.461468	1.227679	44.19644	0.154763588	2.543407	28706513	0.798855	0.539227	10.1832
37	6.60665	1.255264	45.18949	0.151362638	2.628602	29183332	0.799579	0.539716	10.53383
42	6.733402	1.279346	46.05647	0.148513339	2.703989	29598858	0.800198	0.540134	10.84433
47	6.84588	1.300717	46.82582	0.146073261	2.771673	29967018	0.800738	0.540498	11.12327
52	6.946976	1.319925	47.51732	0.143947525	2.83314	30297482	0.801216	0.54082	11.37674
57	7.038784	1.337369	48.14528	0.142070003	2.889477	30597233	0.801643	0.541109	11.60916
62	7.122867	1.353345	48.72041	0.140392913	2.941507	30871480	0.80203	0.54137	11.8239
66.9	7.198931	1.367797	49.24069	0.138909508	2.988931	31119346	0.802376	0.541604	12.01972

Πίνακας 4-11 : Κατανομή δύναμης ανέμου

ΣΤΑΘΜΗ*(m)	$a_{min}$	$c_{p0,min}$	$a_A$	$c_{p0,h}$	$c_{pe}=c_{p0}*\psi_\lambda$			$w_e=q_p(z_e)*c_{pe}$		
					$a=0^\circ$	$a_{min}$	$a_A$	$a=0^\circ$	$a_{min}$	$a_A$
1.2	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	0.945841	-1.41876	-0.69992
7	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	1.72555	-2.58833	-1.27691
12	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	2.000139	-3.00021	-1.4801
17	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	2.186619	-3.27993	-1.6181
22	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	2.329228	-3.49384	-1.72363
27	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	2.445274	-3.66791	-1.8095
32	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	2.543407	-3.81511	-1.88212
37	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	2.628602	-3.9429	-1.94517
42	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	2.703989	-4.05598	-2.00095
47	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	2.771673	-4.15751	-2.05104
52	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	2.83314	-4.24971	-2.09652
57	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	2.889477	-4.33422	-2.13821
62	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	2.941507	-4.41226	-2.17672
66.9	75	-1.5	105	-0.8	1	-1.5	-0.74	2.988931	-4.4834	-2.21181

Πίνακας 4-12 : Συντελεστές πίεσης

Τέλος στον Πίνακα 4-13 παρουσιάζονται συνοπτικά οι τελικοί συντελεστές της κατανομής της πίεσης περιφερειακά σε κάθε στάθμη που υπολογίστηκαν.

LEVELS	$0^\circ$	$a_{min}$	$a_A$	$180^\circ$
0-1,2	0.945841	-1.41876	-0.69992	-0.51075423
1,2-7	1.72555	-2.58833	-1.27691	-0.93179711
7-12	2.000139	-3.00021	-1.4801	-1.08007519
12-17	2.186619	-3.27993	-1.6181	-1.18077445
17-22	2.329228	-3.49384	-1.72363	-1.25778333
22-27	2.445274	-3.66791	-1.8095	-1.32044771
27-32	2.543407	-3.81511	-1.88212	-1.37343977
32-37	2.628602	-3.9429	-1.94517	-1.41944481
37-42	2.703989	-4.05598	-2.00095	-1.46015395
42-47	2.771673	-4.15751	-2.05104	-1.49670364
47-52	2.83314	-4.24971	-2.09652	-1.52989573
52-57	2.889477	-4.33422	-2.13821	-1.56031782
57-62	2.941507	-4.41226	-2.17672	-1.58841381
62-66,9	2.988931	-4.4834	-2.21181	-1.61402279

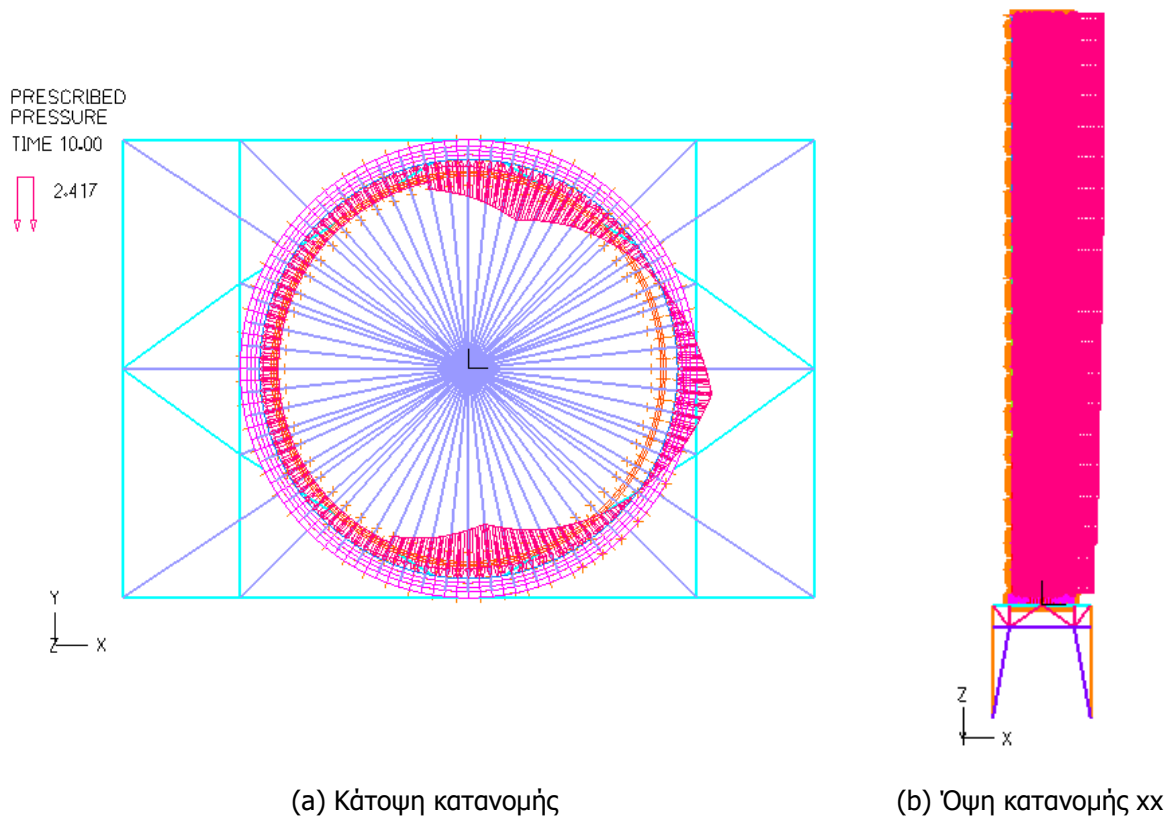
Πίνακας 4-13 : Συνοπτική παρουσίαση συντελεστών ανεμοπίεσης

Η προσομοίωση της ανεμοπίεσης στο ADINA, πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των «Χωρικών Συναρτήσεων» (Spatial Functions) με γραμμικές κατανομές. Ουσιαστικά, λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα σχετικά με τις γωνίες για τις οποίες μεταβάλλεται η πίεση του ανέμου περιμετρικά ( $a_A$ ,  $a_{min}$ ),  $30^\circ$ ,  $75^\circ$  και  $105^\circ$ , αλλά και έχοντας προηγηθεί η διακριτοποίηση του φορέα στην περιφέρεια της εκάστοτε κυκλικής διατομής ανά  $6^\circ$ , προκύπτουν τα εξής διαστήματα θεωρώντας ως  $0^\circ$  τον xx.

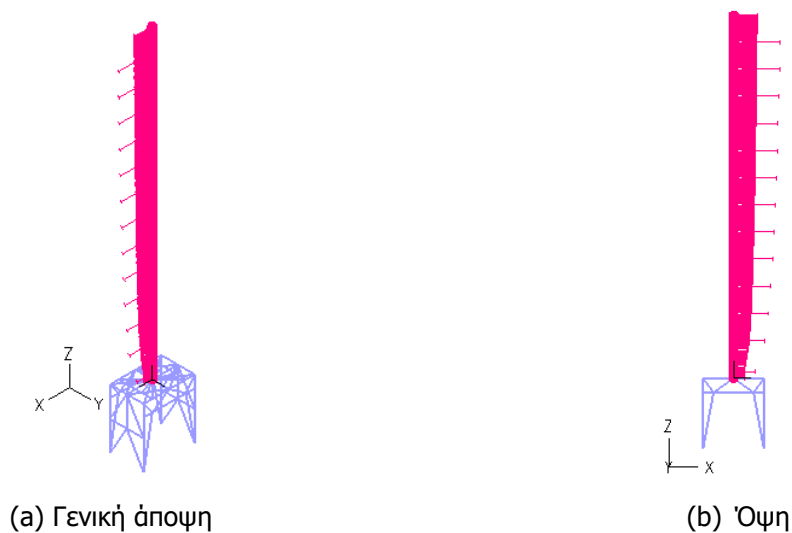
- Από  $0^\circ$ - $30^\circ$  &  $330^\circ$ - $360^\circ$  είναι  $5+5=10$  επιφάνειες.
- Από  $30^\circ$ - $78^\circ$  (ώστε να διαιρείται με το  $6 \rightarrow 6^\circ$ ) &  $282^\circ$ - $330^\circ$  είναι  $8+8=16$  επιφάνειες.
- Από  $78^\circ$ - $108^\circ$  (ώστε να διαιρείται με το  $6 \rightarrow 6^\circ$ ) &  $252^\circ$ - $282^\circ$  είναι  $5+5=10$  επιφάνειες.
- Από  $108^\circ$ - $252^\circ$  είναι 24 επιφάνειες.



Η τελική διάταξη της ανεμοπίεσης πάνω στον φορέα φαίνεται στην Εικόνα 4-17 και αφορά τις αναλύσεις για τα Shell Elements. Η κατανομή της δύναμης του ανέμου στις αναλύσεις με Beam Elements φαίνεται στην Εικόνα 4-18 και προκύπτει από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4-11.



Εικόνα 4-17 : Κατανομή ανεμοπίεσης σε Shell elements



Εικόνα 4-18 : Κατανομή φορτίο ανέμου σε Beam Elements



# 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΣΤΟ ADINA

## 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αντιστοιχία με τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που έγιναν στο λογισμικό ADINA. Στις αναλύσεις που εκτελέστηκαν χρησιμοποιήθηκαν κατά βάση δύο μοντέλα, το ένα με Shell Elements και το άλλο με Beam Elements. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν «τρεξίματα» με και χωρίς την ύπαρξη της μεταλλικής κατασκευής στη βάση (πλατφόρμα έδρασης). Προσθετικά, έγιναν αναλύσεις με τη δομή της καπνοδόχου ως έχει στην πραγματικότητα, δηλαδή με διπλό τοίχωμα, αλλά και με αποκλειστικά το εξωτερικό κέλυφος. Η τελευταία συσχέτιση γίνεται για λόγους σύγκρισης και με κυριότερο λόγο την απλοποίηση του φορέα για τις δυναμικές αναλύσεις.

Οι αναλύσεις λοιπόν που εκτελέστηκαν στο λογισμικό ADINA, αφορούν αρχικά τις ιδιομορφές και τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες του φορέα, την απόκρισή του σε μια δεδομένη ιστορία ανέμου (κοντά σε αυτή των μετρήσεων) και τέλος την αξιοποίηση των στοιχείων των επιτόπου μετρήσεων σχετικά με τις κυρίαρχες συχνότητες. Όλες οι αναλύσεις χρησιμοποιούν τις παραδοχές και τα προσομοιώματα, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Η μεθοδολογία για κάθε μία από τις τρεις διαδικασίες αναφέρεται αναλυτικά παρακάτω. Στόχος αυτών των αναλύσεων αποτελεί η όσο το δυνατόν καλύτερη σύγκριση των πραγματικών μετρήσεων και των αποτελεσμάτων από το λογισμικό, για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων που θα ακολουθήσουν στο Κεφάλαιο 6.

## 5.2 ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Στις αναλύσεις για την εύρεση των ιδιομορφών και των αντίστοιχων ιδιοσυχνοτήτων του φορέα χρησιμοποιείται η ενότητα «Frequencies/Modes» και ζητείται ένας ικανοποιητικός αριθμός ιδιομορφών προκειμένου να εντοπιστούν οι τρεις πρώτες καμπικές ιδιομορφές. Το προσομοίωμα υποβάλλεται σε ιδιομορφικές αναλύσεις, αλλάζοντας κάθε φορά κάποιο στοιχείο του. Οι περιπτώσεις που διακρίνονται είναι οι εξής:

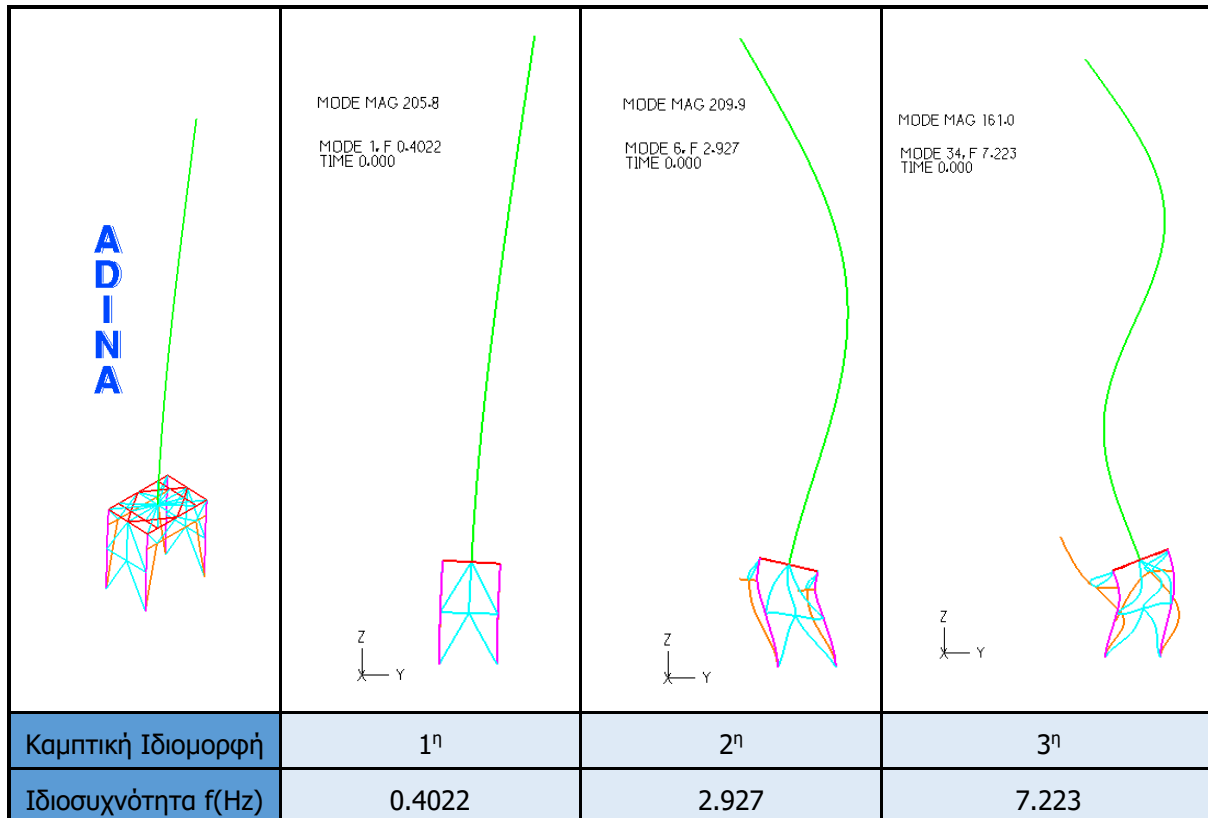
- Καμινάδα με την πλατφόρμα έδρασης
- Καμινάδα χωρίς την πλατφόρμα έδρασης
- Καμινάδα, μόνο με το εξωτερικό τοίχωμα, χωρίς την πλατφόρμα έδρασης

### 5.2.1 BEAM ELEMENTS

Στα στοιχεία δοκού (Beam Elements) η προσομοίωση της καπνοδόχου έχει πραγματοποιηθεί όπως αναφέρθηκε στην υπό ενότητα 4.6.

#### 5.2.1.1 ΚΑΜΙΝΑΔΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΕΔΡΑΣΗΣ

Σε αυτό το προσομοίωμα έχουν αποτυπωθεί όλα τα στοιχεία που έχουν προκύψει από τις παραδοχές, σχετικά με τη μοντελοποίηση με τα στοιχεία δοκού (π.χ. ισοδύναμη διατομή και μεταβολή αυτής καθ' ύψος).



Πίνακας 5-1 : Οι ιδιομορφές και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες για την καμινάδα (ισοδύναμη διατομή) με την πλατφόρμα έδρασης

Παρατηρούμε ότι οι ιδιομορφές που προκύπτουν έχουν χαμηλότερες ιδιοσυχνότητες από αυτές των καταγραφών. Η 3<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα προσεγγίζει καλύτερα την αντίστοιχη των μετρήσεων (0.77Hz) και σε ακρίβεια ακολουθεί η 2<sup>η</sup> και η 1<sup>η</sup> που παρουσιάζουν απόκλιση περίπου 35% και 45% αντίστοιχα.

#### 5.2.1.2 ΚΑΜΙΝΑΔΑ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΕΔΡΑΣΗΣ

Στο παρακάτω προσομοίωμα απουσιάζει η μεταλλική πλατφόρμα και η ανάλυση γίνεται μόνο για την καμινάδα. Η καμινάδα, όπως και προηγουμένως αποτελείται από διάφορα cross sections (ενότητα 4.6).

	<p>MODE MAG 175.7 MODE 1, F 0.5924 TIME 0.000</p>	<p>MODE MAG 180.4 MODE 3, F 3.206 TIME 0.000</p>	<p>MODE 7, F 8.464 TIME 0.000 MODE MAG 146.3</p>
	<p>Καμπτική Ιδιομορφή</p>	<p>1<sup>η</sup></p>	<p>2<sup>η</sup></p>
<p>Ιδιοσυχνότητα f(Hz)</p>	<p>0.5924</p>	<p>3.206</p>	<p>8.464</p>

Πίνακας 5-2 : Οι ιδιομορφές και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες για την καμινάδα (ισοδύναμη διατομή) ΧΩΡΙΣ την πλατφόρμα έδρασης

5.2.1.3 ΚΑΜΙΝΑΔΑ ΜΟΝΟ ΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΙΧΩΜΑ, ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ

Σε αυτό το μοντέλο απουσιάζει η μεταλλική πλατφόρμα και η διατομή της καμινάδας είναι ίδια με αυτή του εξωτερικού στοιχείου (ενότητα 4.3).

	<p>MODE 1, F 0.6497 TIME 0.000 MODE MAG 114.2</p>	<p>MODE 3, F 3.306 TIME 0.000 MODE MAG 116.0</p>	<p>MODE MAG 113.1 MODE 7, F 8.516 TIME 0.000</p>
	<p>Καμπτική Ιδιομορφή</p>	<p>1<sup>η</sup></p>	<p>2<sup>η</sup></p>
<p>Ιδιοσυχνότητα f(Hz)</p>	<p>0.6497</p>	<p>3.306</p>	<p>8.516</p>

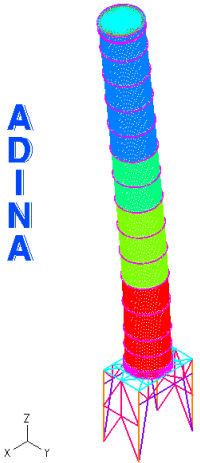
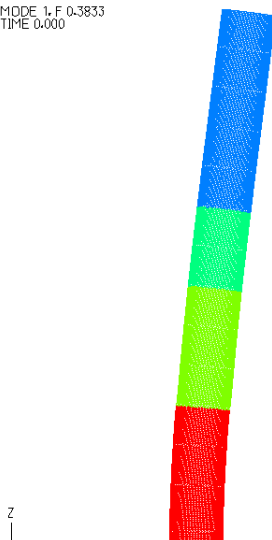
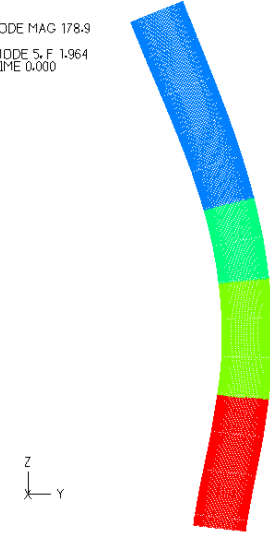
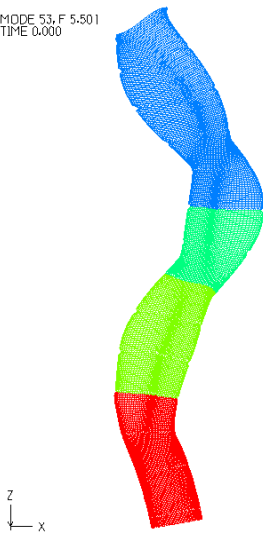
Πίνακας 5-3 : Οι ιδιομορφές και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες για την καμινάδα ΜΟΝΟ με εξωτερική διατομή και ΧΩΡΙΣ την πλατφόρμα έδρασης

## 5.2.2 SHELL ELEMENTS

Στα επιφανειακά στοιχεία (Shell Elements) η προσομοίωση της καπνοδόχου έχει πραγματοποιηθεί όπως αναφέρθηκε στην υπό ενότητα 4.5. Οι διαφορές στις ιδιομορφές και τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες του με τα στοιχεία δοκού είναι εμφανείς και λογικές. Αυτό συμβαίνει καθώς στα επιφανειακά στοιχεία λαμβάνονται υπόψιν τα τοπικά φαινόμενα και συνεπώς προκύπτουν περισσότερες ιδιομορφές και οι ιδιοσυχνότητες βρίσκονται πιο χαμηλά. Να σημειωθεί ότι στους παρακάτω πίνακες, έχει επιλεγεί να φαίνεται γραφικά μόνο το εξωτερικό κέλυφος, ώστε να είναι εμφανείς οι καμπτικές ιδιομορφές και να μην επηρεάζονται γραφικά από τοπικά φαινόμενα των ενισχύσεων, ή του εσωτερικού κελύφους.

### 5.2.2.1 ΚΑΜΙΝΑΔΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΕΔΡΑΣΗΣ

Σε αυτό το προσομοίωμα έχουν αποτυπωθεί όλες οι λεπτομέρειες και τα στοιχεία που έχουν αντληθεί από τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4.

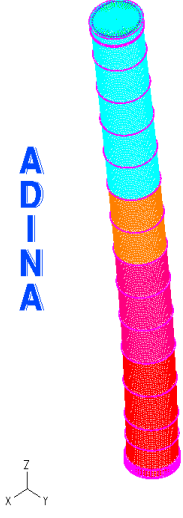
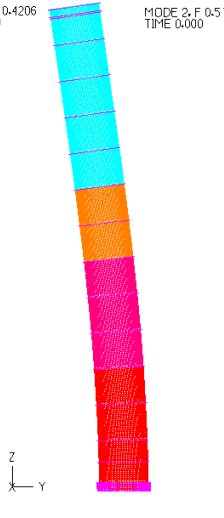


	<p>MODE MAG 164.5 MODE 1, F 0.3833 TIME 0.000</p> 	<p>MODE MAG 178.9 MODE 5, F 1.964 TIME 0.000</p> 	<p>MODE MAG 178.6 MODE 53, F 5.501 TIME 0.000</p> 
<p>Καμπτική Ιδιομορφή</p>	<p>1<sup>η</sup></p>	<p>2<sup>η</sup></p>	<p>3<sup>η</sup></p>
<p>Ιδιοσυχνότητα f(Hz)</p>	<p>0.3833</p>	<p>1.964</p>	<p>5.501</p>

Πίνακας 5-4 : Οι ιδιομορφές και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες για την καμινάδα με την πλατφόρμα έδρασης

Παρατηρούμε ότι οι ιδιοσυχνότητες που εντοπίστηκαν στις τρεις πρώτες ιδιομορφές είναι αρκετά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες των πραγματικών μετρήσεων. Επίσης, η πρώτη ιδιομορφή γενικά που συναντάται είναι η 1<sup>η</sup> καμπτική και έπονται οι ιδιομορφές που αφορούν τοπικά φαινόμενα. Προσθετικά, να επισημανθεί ότι στις ανώτερες καμπτικές ιδιομορφές (2<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup>, κλπ.) δεν παρουσιάζονται αμιγώς καμπτικές ιδιομορφές, αλλά «κρύβονται», ή καλύτερα φαίνονται και τοπικά φαινόμενα, τα οποία προφανώς και ευθύνονται για τη μείωση των συχνοτήτων.

### 5.2.2.2 ΚΑΜΙΝΑΔΑ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΕΔΡΑΣΗΣ

Στο προσομοίωμα αυτό έχει αφαιρεθεί η μεταλλική πλατφόρμα έδρασης. Ο φορέας είναι πακτωμένος περιμετρικά στη βάση του, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία είναι ίδια με το παραπάνω μοντέλο.

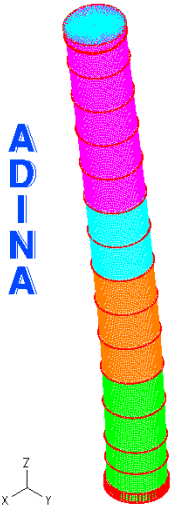
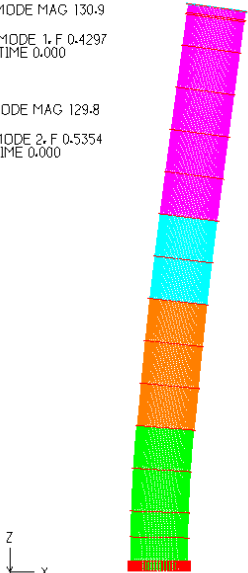

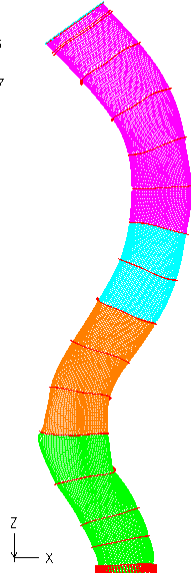
	 <p>MODE MAG 159.7 MODE 1, F, 0.4206 TIME 0.000</p> <p>MODE MAG 154.5 MODE 2, F, 0.5142 TIME 0.000</p>	 <p>MODE MAG 191.4 MODE 3, F, 2.480 TIME 0.000</p>	 <p>MODE MAG 180.7 MODE 52, F, 6.003 TIME 0.000</p>
Καμπτική ιδιομορφή	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>
Ιδιοσυχνότητα f(Hz)	0.4206/0.5142	2.48	6.003

Πίνακας 5-5 : Οι ιδιομορφές και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες για την καμινάδα ΧΩΡΙΣ την πλατφόρμα έδρασης

Διαπιστώνεται ότι αφαιρώντας τη μεταλλική πλατφόρμα από το μοντέλο, οι ιδιοσυχνότητες των ιδιομορφών αυξάνονται. Η παρατήρηση αυτή είναι λογική, καθώς όταν αφαιρείται η μεταλλική κατασκευή έδρασης και η καπνοδόχος είναι πακτωμένη περιμετρικά, ο φορέας στο σύνολο του γίνεται πιο δύσκαμπτος, άρα μειώνεται η περίοδος (T) και επομένως αυξάνεται η συχνότητα.

#### 5.2.2.3 ΚΑΜΙΝΑΔΑ ΜΟΝΟ ΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΙΧΩΜΑ, ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ

Σε αυτό το προσομοίωμα απουσιάζει και η μεταλλική πλατφόρμα, αλλά και το εσωτερικό τοίχωμα, με όλες τις ενισχύσεις του. Ουσιαστικά εξετάζεται μόνο το εξωτερικό κέλυφος με συνθήκες στήριξης όπως στο προηγούμενο μοντέλο. Συγκριτικά, με τα προηγούμενα προσομοιώματα, σε αυτήν την περίπτωση οι συχνότητες των τριών πρώτων ιδιομορφών παρουσιάζονται αυξημένες.

	<p>MODE MAG 130.9 MODE 1, F 0.4297 TIME 0.000</p> <p>MODE MAG 129.8 MODE 2, F 0.5354 TIME 0.000</p> 	<p>MODE MAG 143.4 MODE 6, F 2.516 TIME 0.000</p> 	<p>MODE MAG 145.6 MODE 22, F 6.307 TIME 0.000</p> 
Καμπτική ιδιομορφή	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>
Ιδιοσυχνότητα f(Hz)	0.4297/0.5354	2.516	6.307

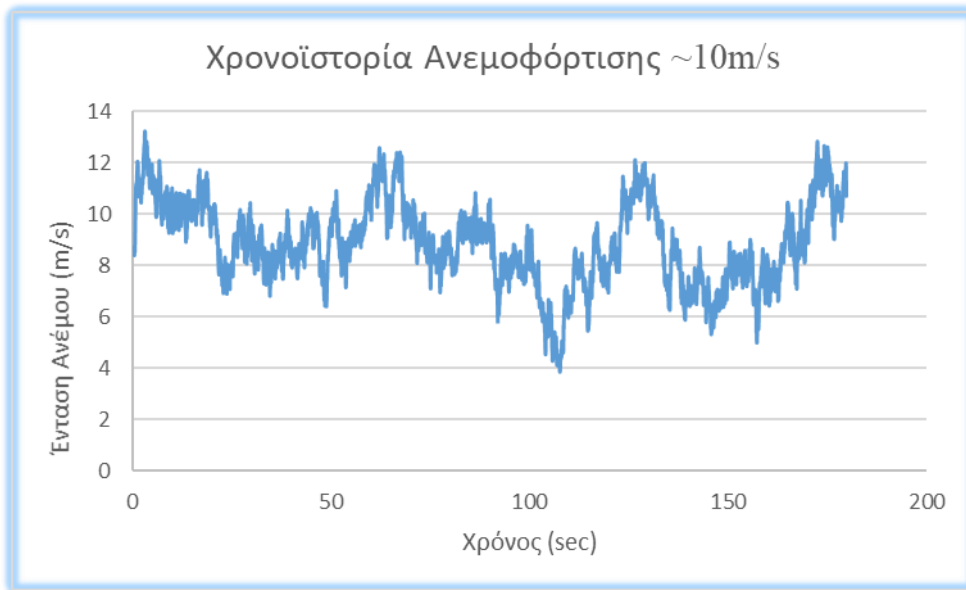
Πίνακας 5-6 : Οι ιδιομορφές και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες για την καμινάδα MONO με το εξωτερικό κέλυφος και ΧΩΡΙΣ την πλατφόρμα έδρασης

### 5.3 ΑΚΤΙΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΛΟΓΩ ΑΝΕΜΟΦΟΡΤΙΣΗΣ

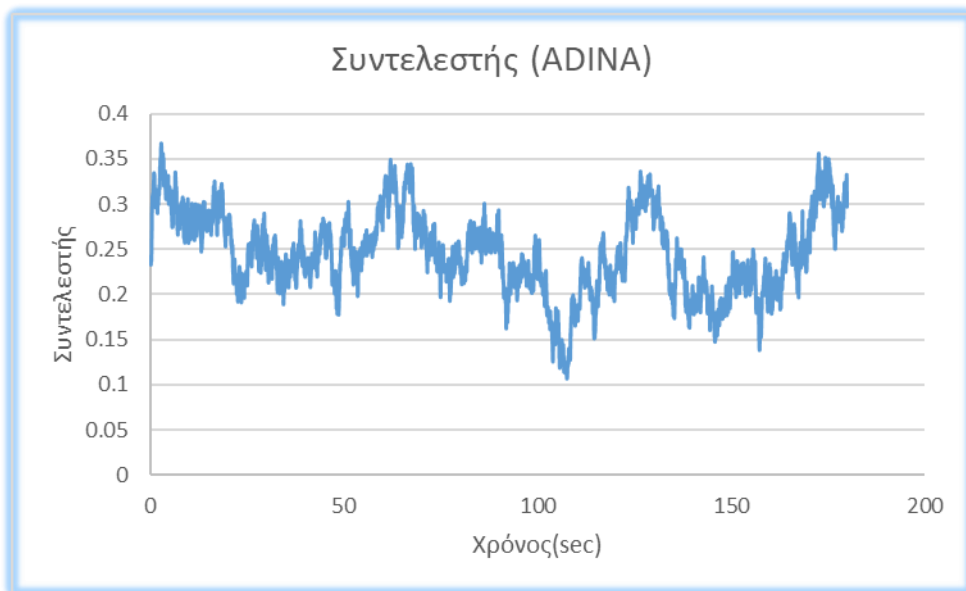
Σε αυτήν την κατηγορία αναλύσεων, καταβλήθηκε προσπάθεια προκειμένου να γίνει εξαγωγή συγκρίσιμων αποτελεσμάτων με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από τον κ. Γκίκα και την ομάδα του σε δυναμική φόρτιση (υπό ενότητα 3.4.2). Καθώς η χρονοσειρά που έχει καταγραφεί από τα όργανα κοντά στο πεδίο της μέτρησης έχει «κακή» κλίμακα, στο λογισμικό ADINA και στις αναλύσεις χρησιμοποιείται χρονοϊστορία ανέμου που έχει βρεθεί από άλλες μελέτες με κοντινά ανεμολογικά στοιχεία. Επίσης, για την έγκυρη, όσο το δυνατόν, προσέγγιση των συνθηκών των μετρήσεων, η ένταση του ανέμου που χρησιμοποιήθηκε για αυτήν τη δυναμική φόρτιση ήταν 10m/s (Σχήμα 5-1). Η εισαγωγή στο λογισμικό της έντασης, έγινε μέσω αναγωγής, διαιρώντας με το 36 (αρχική παραδοχή 36m/s για τη μελέτη, υπό ενότητα 4.8) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-2.

Στο λογισμικό ADINA για την εκτέλεση της δυναμικής ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε η εντολή "Dynamic Implicit" σύμφωνα με τη μέθοδο Newmark και συντελεστές Delta=0.5 και Alpha=0.25. Το βήμα που ακολουθήθηκε ήταν αυτό που είχε η χρονοσειρά, δηλαδή 0.05sec. Η δυναμική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε αφορά το προσομοίωμα με στοιχεία δοκού. Το εν λόγω προσομοίωμα είναι αυτό με την αποτύπωση της καμινάδας με τα διπλά τοιχώματα μέσω της ισοδύναμης διατομής (Σχήμα 5-3 & Σχήμα 5-4). Αποπειράθηκε δυναμική ανάλυση για τα επιφανειακά στοιχεία, όμως το λογισμικό σταματούσε τη διαδικασία σε πολύ αρχικό στάδιο, με αποτέλεσμα η απόκριση της καμινάδας να μην αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείγμα της γενικότερης συμπεριφοράς (Σχήμα 5-5). Παρόλα αυτά παρακάτω παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα από τα επιφανειακά στοιχεία.

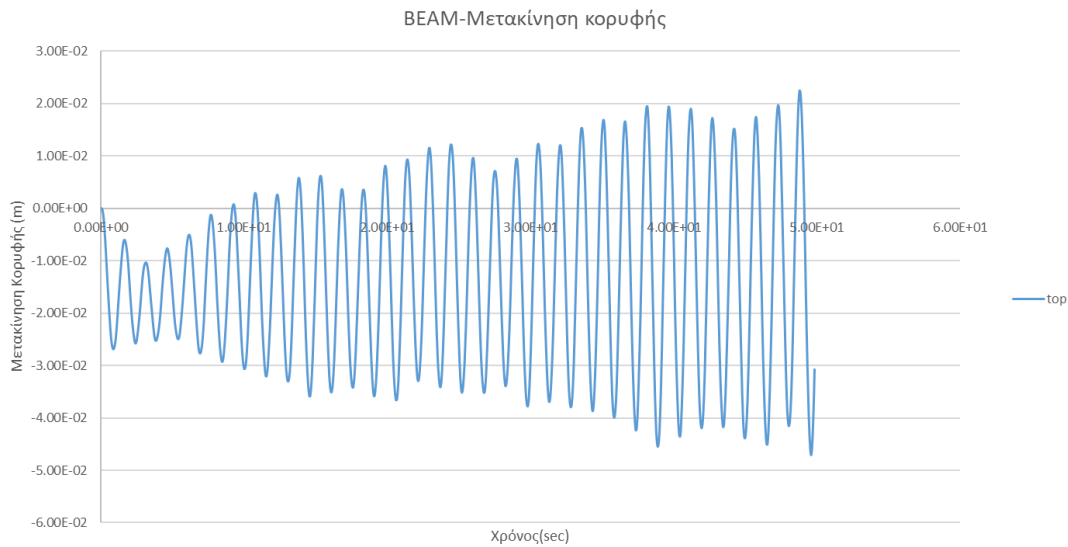




Σχήμα 5-1 : Χρονοϊστορία ανεμοφόρτισης για ένταση ανέμου περίπου 14m/s

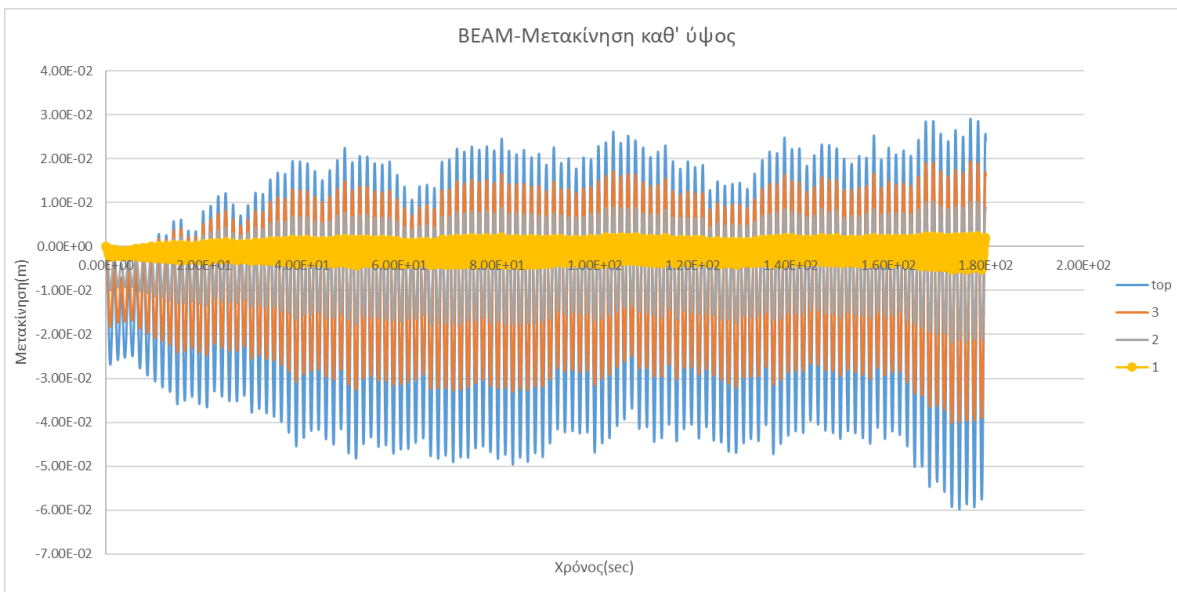


Σχήμα 5-2 : Χρονοϊστορία συντελεστών Ανεμοφόρτισης

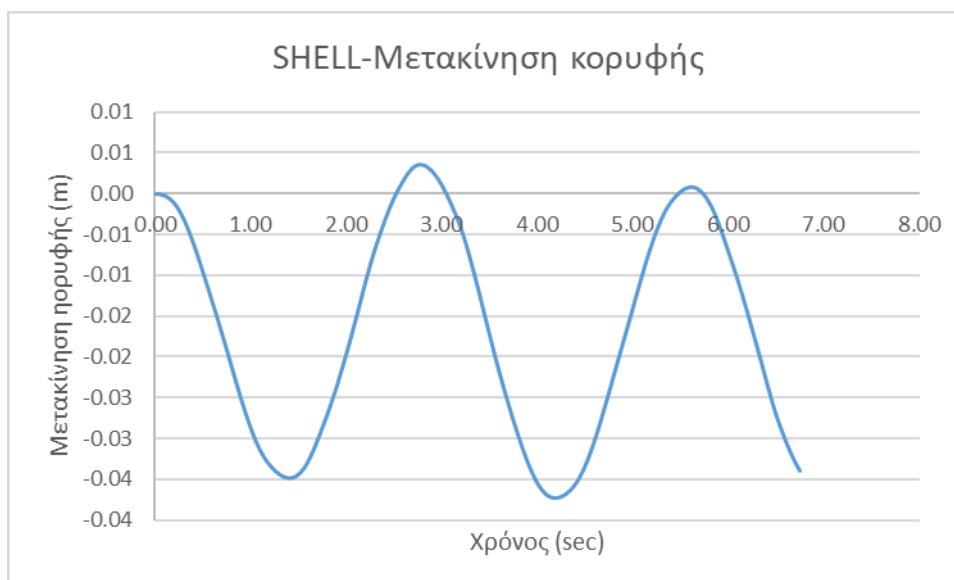


Σχήμα 5-3 : Μετακίνηση Κορυφής Καπνοδόχου

Στο παρακάτω Σχήμα 5-4 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις καθ' ύψος της καπνοδόχου. Η στάθμη 1 έχει ύψος 17m, η στάθμη 2 έχει ύψος 35m και η στάθμη 3 έχει ύψος 52m. Είναι φανερό και λογικό, ότι οι μετακινήσεις αυξάνουν προοδευτικά καθ' ύψος της καμινάδας. Η μέγιστη μετακίνηση παρατηρείται στη κορυφή και είναι περίπου 6cm. Γενικά η μετακίνηση της κορυφής κυμαίνεται από 2.5cm έως 4cm, με διακύμανση  $\pm 2$ cm.



Σχήμα 5-4 : Μετακινήσεις από διάφορα καθ' ύψος σημεία

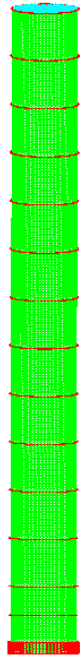


Σχήμα 5-5 : Μετακίνηση κορυφής

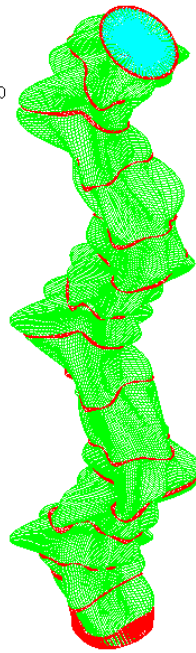
#### 5.4 ΕΞΕΤΑΣΗ ΚΥΡΙΑΡΧΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Σε αυτήν την υπό ενότητα, ουσιαστικά δε πραγματοποιείται κάποια ανάλυση, αλλά αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των καταγραφών που έγιναν στην επιτόπου παρακολούθηση της κατασκευής, εξάγονται χρήσιμα στοιχεία που αφορούν τις κυρίαρχες ιδιοσυχνότητες της καμινάδας. Καθώς από τις μετρήσεις προέκυψε ότι οι κυρίαρχη ιδιοσυχνότητα συναντάται στα 19.85Hz και στις αρμονικές συχνότητες αυτής, αποφασίστηκε η διερεύνηση των ιδιομορφών που αντιστοιχούν σε αυτές τις ιδιοσυχνότητες. Οι ιδιομορφές που εξετάζονται είναι επιθυμητό να συμπεριλαμβάνουν και τα τοπικά φαινόμενα και όχι μόνο καμπτικές ιδιομορφές. Συνεπώς, το προσομοίωμα θα έπρεπε να αποτελείται από επιφανειακά στοιχεία. Επίσης, η συχνότητα 19.85Hz, αποτελεί αρκετά μεγάλη συχνότητα διερεύνησης συγκριτικά με το μέγεθος του αρχείου και συναντάται σε πολύ ανώτερες ιδιομορφές. Ομοίως και οι αρμονικές της, οι οποίες απαιτούν πολλαπλάσια μνήμη για την εύρεση τους μέσω του λογισμικού. Για το λόγο αυτό απλοποιήθηκε το μοντέλο και αναζητήθηκαν οι ιδιομορφές του μοντέλου, χωρίς την πλατφόρμα, η οποία από μόνη της «πιάνει» αρκετές ιδιομορφές και μόνο με το εξωτερικό τοίχωμα και τα στοιχεία που το πλαισιώνουν. Προσθετικά, η διερεύνηση της κυρίαρχης ιδιοσυχνότητας επικεντρώθηκε μόνο κοντά στα 19.85Hz και κυρίως πιο χαμηλά από αυτή τη συχνότητα. Παρακάτω παρουσιάζονται διάφορες πιθανές ιδιομορφές στην κοντινή περιοχή γύρω από τα 19Hz. Λόγω των παραδοχών οι πραγματικές ιδιοσυχνότητες σίγουρα διαφέρουν από αυτές του προσομοιώματος και αν θέλουμε να τις εντοπίσουμε θα πρέπει να τις αναζητήσουμε πιο χαμηλά, αφού με τις απλοποιήσεις το μοντέλο έχει γίνει πιο εύκαμπτο.

**A  
D  
I  
N  
A**

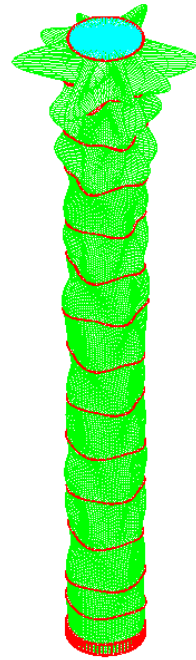


MODE MAG 108.5  
MODE 170, F 17.60  
TIME 0.000



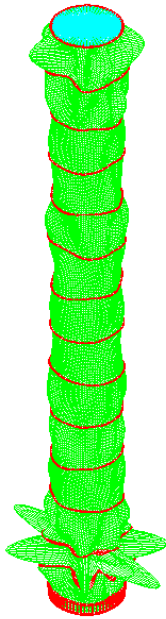
f=17.60Hz

MODE MAG 28.54  
MODE 172, F 17.64  
TIME 0.000



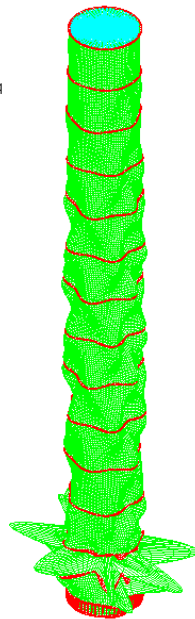
f=17.64Hz

MODE MAG 26.40  
MODE 179, F 18.42  
TIME 0.000



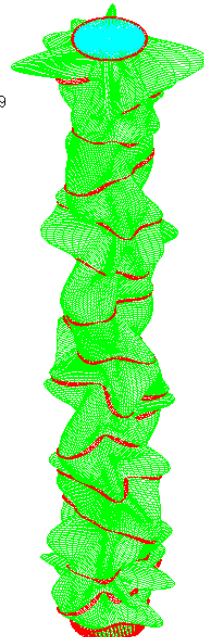
f=18.42Hz

MODE MAG 29.94  
MODE 184, F 19.14  
TIME 0.000

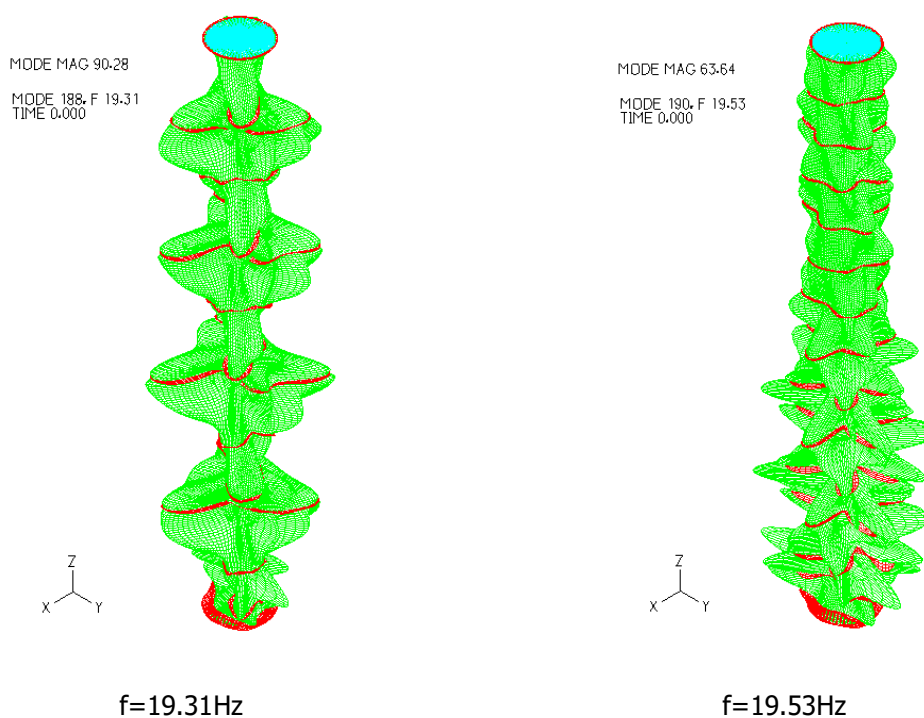


f=19.14Hz

MODE MAG 61.42  
MODE 185, F 19.19  
TIME 0.000



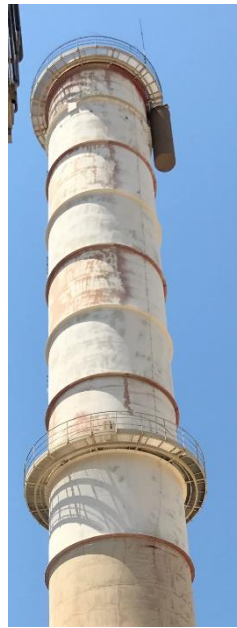
f=19.19Hz



Πίνακας 5-7 : Παρουσίαση ιδιομορφών κοντά στα 19Hz

## 5.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΟ ADINA

Παρακάτω στον Πίνακα 5-8 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων στο ADINA και συγκρίνονται με αυτά που προέκυψαν από τις καταγραφές. Είναι φανερό ότι οι ιδιοσυχνότητες των ιδιομορφών για τα στοιχεία δοκού είναι πιο κοντά σε αυτές της πραγματικότητας, σε σχέση με αυτές των επιφανειακών στοιχείων. Επίσης, οι ιδιοσυχνότητες των επιφανειακών στοιχείων είναι εύλογο να είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες των προσομοιωμάτων με στοιχεία δοκού, καθώς στις πρώτες κρύβονται τοπικές ιδιομορφές. Τα τοπικά αυτά φαινόμενα χαμηλώνουν τις ιδιοσυχνότητες των καμπτικών ιδιομορφών, αφού εμφανίζονται ταυτόχρονα. Προσθετικά, πρέπει να τονιστεί ότι οι αποκλίσεις που υπάρχουν στις ιδιοσυχνότητες, πέραν από τις διάφορες παραδοχές, ή και ελλιπείς πληροφορίες για τη δομή του φορέα, ενδέχεται να οφείλονται και στην ύπαρξη ενός «βαριδίου» (θα το χαρακτήριζε κάποιος) που φαίνεται να επηρεάζει την αδρανειακή φύση του φορέα (Εικόνα 5-1). Πληροφορίες για αυτό το «βαρίδι» δε βρέθηκαν σε κανένα σχέδιο, ούτε και σε κάποια τεχνική έκθεση και για αυτό δεν έγινε η αποτύπωση αυτού στο λογισμικό. Πάντως, η τοποθέτηση αυτού πάνω στην κατασκευή, σύμφωνα και με τα αποτελέσματα, φαίνεται ότι διαδραματίζει κάποιο ρόλο. Λογικά, λειτουργεί ως αποσβεστήρας, με αποτέλεσμα να μειώνει την περίοδο, δηλαδή να αυξάνει την ιδιοσυχνότητα του φορέα ( $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2*\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$ ).



Εικόνα 5-1 : "Βαρίδι" στην κορυφή της καπνοδόχου

BEAM ELEMENTS							
Καμπτικές ιδιομορφές	f(Hz)	Ολόκληρος φορέας		Χωρίς πλατφόρμα		Μόνο εξωτερικό κέλυφος	
		f(Hz)	Απόκλιση %	f(Hz)	Απόκλιση %	f(Hz)	Απόκλιση %
1 <sup>η</sup>	0.77	0.4022	47.77%	0.5924	23.06%	0.6497	15.62%
2 <sup>η</sup>	4.62	2.927	36.65%	3.206	30.61%	3.306	28.44%
3 <sup>η</sup>	7.97	7.223	9.37%	8.464	6.20%	8.516	6.85%

Πίνακας 5-8 : Σύγκριση αποτελεσμάτων Ιδιομορφών - BEAM ELEMENTS

SHELL ELEMENTS							
Καμπτικές ιδιομορφές	f(Hz)	Ολόκληρος φορέας		Χωρίς πλατφόρμα		Μόνο εξωτερικό κέλυφος	
		f(Hz)	Απόκλιση %	f(Hz)	Απόκλιση %	f(Hz)	Απόκλιση %
1 <sup>η</sup>	0.77	0.3833	50.22%	0.5142	33.22%	0.5354	30.47%
2 <sup>η</sup>	4.62	1.964	57.49%	2.48	46.32%	2.516	45.54%
3 <sup>η</sup>	7.97	5.501	30.98%	6.003	24.68%	6.307	20.87%

Πίνακας 5-9 : Σύγκριση αποτελεσμάτων Ιδιομορφών - SHELL ELEMENTS

Τέλος, τα αποτελέσματα από τις μετακινήσεις της δυναμικής ανάλυσης, προέκυψαν ίδιας τάξης μεγέθους με αυτά των μετρήσεων. Λόγω των διαφορετικών ιστοριών ανεμοφόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν στην κάθε περίπτωση, δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων, αλλά μόνο σε ποιοτικό επίπεδο.

## 6 ΓΕΝΙΚΟΤΕΡΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 6.1 ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η διαδικασία της Παρακολούθησης της Δομικής Ακεραιότητας των Κατασκευών (SHM). Στα δύο πρώτα κεφάλαια δόθηκε το υπόβαθρο του SHM, εξηγώντας τόσο τι είναι και τι πραγματεύεται, όσο και πώς υλοποιείται στην πραγματικότητα. Αποδόθηκαν έτσι τεχνικές και μέθοδοι της Δομικής Παρακολούθησης που χρησιμοποιούνται στη σημερινή εποχή. Ακολούθως, παρουσιάστηκε και το πρακτικό κομμάτι της θεματικής ενότητας που μελετάται, επιλέγοντας τη μελέτη μεταλλικής καπνοδόχου που βρίσκεται στο θερμοηλεκτρικό εργοστάσιο της Δ.Ε.Η. στο Λαύριο (Α.Η.Σ.). Το ενδιαφέρον για αυτήν την κατασκευή προκλήθηκε, καθώς στο παρελθόν είχε παρουσιάσει προβλήματα ταλαντώσεων. Έπειτα όμως, από τεχνικές παρεμβάσεις επιδιορθώθηκαν τα ζητήματα. Οι καταγραφές από τις επιτόπου μετρήσεις που παρουσιάστηκαν αποτελούν υλικό από τις μελέτες του κ. Γκίκα και της ομάδας του.

Από όλες τις καταγραφές που ήταν διαθέσιμες, χρησιμοποιήθηκαν τρεις ομάδες μετρήσεων. Αρχικά, παρουσιάστηκαν οι πρώτες καμπτικές ιδιομορφές της καπνοδόχου, όπως αυτές προέκυψαν από τα διάφορα τεχνικά μέσα και όργανα που είχαν τοποθετηθεί πάνω σε αυτήν. Επίσης, κρίθηκε σκόπιμο να αναφερθεί ποια είναι η απόκριση της κατασκευής στις δυναμικές φορτίσεις που δέχεται, όπως αυτή του ανέμου και πιο συγκεκριμένα ποια είναι η μετακίνηση της κορυφής. Οι τελευταίες μετρήσεις που παρουσιάστηκαν, αφορούσαν τις κυρίαρχες συχνότητες που εμφανιζόντουσαν στην κατασκευή όταν βρίσκεται σε συνθήκες συνθήκες ή σε πλήρη λειτουργία.

Τέλος, στα τελευταία κεφάλαια περιγράφονται, η διαδικασία προσομοίωσης του υπό μελέτη φορέα και οι αναλύσεις και τα αντίστοιχα αποτελέσματα αυτών, που πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό ADINA. Η διαδικασία προσομοίωσης περιλάμβανε την αποτύπωση του φορέα με επιφανειακά, αλλά και με στοιχεία δοκού. Σε αντιστοιχία με τα δεδομένα που προέκυψαν από τις επιτόπου μετρήσεις, διενεργήθηκαν οι κατάλληλες αναλύσεις. Καταρχάς, βρέθηκαν όχι μόνο οι καμπτικές ιδιομορφές του φορέα, αλλά και αυτές που φανερώνουν τοπικά φαινόμενα. Στη συνέχεια υλοποιήθηκε δυναμική ανάλυση για ανεμοφόρτιση κοντά στα δεδομένα των μετρήσεων και παρουσιάστηκαν οι μετακινήσεις που προέκυψαν. Τέλος, έγινε προσπάθεια διερεύνησης των ιδιομορφών που αντιστοιχούν σε συχνότητες κοντά στις κυρίαρχες.

## 6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις συγκρίσεις των αποτελεσμάτων των αναλύσεων στο ADINA και των μετρήσεων εξάγονται κάποια συμπεράσματα, τόσο για τη δομή του φορέα, όσο και για τη γενικότερη φιλοσοφία του Structural Health Monitoring. Σχετικά με τη διαδικασία της προσομοίωσης του φορέα και τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Οι ιδιομορφές των Beam Elements βρίσκονται πιο κοντά στον πραγματικό φορέα συγκριτικά με τα Shell Elements. Αυτό μπορεί να οφείλεται, όχι μόνο στα ελλιπή στοιχεία για τη δομή του φορέα, αλλά και στην αδυναμία των αισθητήρων και των τεχνικών μέσων κατά τη διάρκεια των καταγραφών, να πιάσουν τα τοπικά φαινόμενα. Έτσι, οι μετρούμενες ιδιοσυχνότητες ταιριάζουν καλύτερα στις αμιγώς καμπτικές ιδιομορφές των στοιχείων δοκού.
- Οι αποκλίσεις των ιδιοσυχνοτήτων που δείχνουν ότι το προσομοίωμα παρουσιάζει χαμηλότερες ιδιοσυχνότητες, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι ιδιομορφές των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν έχουν μεγαλύτερη ιδιοπερίοδο, άρα μικρότερη δυσκαμψία από την πραγματική, ή μεγαλύτερη μάζα ( $f \downarrow \rightarrow T \uparrow \rightarrow K \downarrow$ , ή  $m \uparrow$ , ή  $\frac{m}{K} \uparrow$ ).
- Στην προσομοίωση του φορέα δε δόθηκε σημασία στο μεταλλικό στοιχείο που βρίσκεται στην κορυφή της καμινάδας (βαρίδι), το οποίο φαίνεται να επιτελεί αδρανειακό ρόλο στη συμπεριφορά της κατασκευής. Αν ισχύει η πρόταση αυτή, η μεγάλη απόκλιση των αποτελεσμάτων οφείλεται στο γεγονός ότι το κυλινδρικό μεταλλικό στοιχείο λειτουργεί ως αποσβεστήρας και συνεπώς μειώνει την ιδιοπερίοδο της κατασκευής, άρα αυξάνει και την ιδιοσυχνότητά της.
- Από τη διερεύνηση των ιδιομορφών που αντιστοιχούν στις κυρίαρχες συχνότητες του φορέα, λόγω των φορτίσεων που δέχεται (ανεμοφόρτιση, πλήρης λειτουργία) και πιο συγκεκριμένα για τα 19.85Hz, προκύπτει ότι ο φορέας επηρεάζεται περισσότερο τοπικά (και όχι καθολικά καμπτικά) στη βάση και στην κορυφή της καπνοδόχου.
- Τέλος, η προσομοίωση των αποστατήρων/spacers, που διατρέχουν καθ' ύψος την καμινάδα και είναι τρία στην εκάστοτε διατομή, ως rigid links, ενδέχεται να μην είναι πλήρως ορθή και να επηρεάζουν αρνητικά την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων των αναλύσεων.

Σχετικά με τη γενικότερη φιλοσοφία της Παρακολούθησης της Δομικής Ακεραιότητας των Κατασκευών εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Για την άρτια και αποτελεσματική παρακολούθηση μιας κατασκευής, απαιτείται η αφετηρία της παρακολούθησής της από την αρχή της, ώστε να υπάρχουν καταγραφές εκκίνησης. Πρώτον, για να γίνει σύγκριση της ολοκληρωμένης κατασκευής με τη μελέτη, αλλά και για τη συνεχή καταγραφή της συμπεριφοράς της, σε ενδεχόμενες μεταβολές της δομής και των στατικών και δυναμικών στοιχείων της.
- Σε περίπτωση που η παρακολούθηση της κατασκευής ξεκινήσει σε μετέπειτα στάδιο από την ολοκλήρωσή της, θα πρέπει για όποιες μεταβολές στη δομή, από στατικής άποψης, προκληθούν να ενημερώνονται τα αντίστοιχα σχέδια μελέτης και να διορθώνονται. Κατά αυτόν τον τρόπο η διάγνωση και η πρόβλεψη ορισμένων ζητημάτων θα είναι πιο εύκολη και διαχειρίσιμη.
- Επίσης, οι διάφορες καταγραφές που προκύπτουν από τη συνεχή παρακολούθηση, σε συνδυασμό με τη χρήση λογισμικών Η/Υ, κάνουν το Structural Health Monitoring πιο έγκυρο, άμεσο και αποτελεσματικό.

## 6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Σχετικά με την καπνοδόχο που επιλέχθηκε υπάρχουν αρκετές καταγραφές που μπορούν να αξιοποιηθούν. Για παράδειγμα μπορούν να γίνουν αναλύσεις του φορέα σχετικά με τις επιταχύνσεις καθ'



ύψος, οι οποίες από τα στοιχεία των μετρήσεων φαίνεται να παρουσιάζουν ενδιαφέρον, λόγω των αυξημένων επιταχύνσεων κυρίως στη μέση της κατασκευής. Επίσης, εξαιρετική σημασία θα είχε η προσέγγιση για το πώς οι θερμές αέριες μάζες (καυσαέρια) που βγαίνουν από την καμινάδα, επιδρούν στη δυναμική συμπεριφορά του φορέα. Αυτό αποτελεί σημαντικό στοιχείο προς διερεύνηση για κάθε καπνοδόχο, καθώς αποτελεί μια δυναμική φόρτιση, η οποία δύσκολα προσομοιάζεται και ενδέχεται να είναι γενεσιουργός αρκετών ζητημάτων σε μια κατασκευή. Τέλος, θα ήταν ενδιαφέρον από μια ερευνητική ομάδα, και όχι μόνο, να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε αρκετές, ή ακόμη καλύτερα σε όλες τις καπνοδόχους της Ελλάδας. Κατά αυτόν τον τρόπο, θα δοθεί η ευκαιρία να κατηγοριοποιηθούν όλες οι καπνοδόχοι ανάλογα, με τα υλικά κατασκευής, το ύψος, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά και την ηλικία. Έτσι, μπορούν να αποδοθούν γενικότερα συμπεράσματα για τη δομή και τη φύση των καμινάδων, για το ποια ζητήματα προκύπτουν και από ποιο χρονικό διάστημα και μετά από τη στιγμή της κατασκευής, όπως και για την εύρεση της βιωσιμότητας του εκάστοτε φορέα και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας συντήρησης αυτών.



## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. CICIND, Model Code for Steel Chimneys, Revision 1, March 2002.
2. Vassilis Gikas, George Piniotis, Thanassis Mpimis, 2013: Dynamic Testing and Output-Only Modal Analysis of Bypass-Stack During Extreme Operating Conditions.
3. Σαραφιάν Κριστίνε, Βασίλειος Γκίκας, 2012: «Πειραματική Διερεύνηση Ψηφιακών Κλισιμέτρων ακρίβειας στη Μελέτη Ταλαντώσεων Υψηλών Κατασκευών έναντι του Ανέμου».
4. Πασχαλίδου Ευφροσύνη, Βασίλειος Γκίκας, 2012: «Μελέτη Κραδασμών Παρακαμπτήριου Καπνοδόχου σε Οριακές Συνθήκες Φόρτισης του Αεροστρόβιλου με τη Μέθοδο της Μικροκυματικής Συμβολομετρίας».
5. ADINA R&D (www.adina.com), Theory and Modeling Guide – Volume I: ADINA Solids & Structures, Report ARD 05-7, (2005).
6. EN 1993-1-6, "Design of Steel Structures – Strength and Stability of Shell Structures", 2004.
7. EN 1993-3-2. "Design of Steel Structures – Chimneys", 2006.
8. Βασίλειος Γκίκας, 2012: «Μελέτη Δυναμικής Συμπεριφοράς Παρακαμπτήριου Καμινάδας Μον. IV, ΑΗΣ Κ-Λαυρίου».
9. D. Goyal, B.S.Pabla, 2015: "The Vibration Monitoring Methods and Signal Processing Techniques for Structural Health Monitoring".
10. Alivia Plankis, 2012: "STRUCTURAL HEALTH MONITORING MEMS SENSORS USING ELASTICITY-BASED BEAM VIBRATIONS".
11. Charis J. Gantes, Michael Angelides, Konstantinos E. Kalochairetis, 2015: "BUCKLING OF LARGE DIAMETER STEEL CHIMNEYS".
12. F. Ansari, 2009 : "Structural health monitoring with fiber optic sensors".
13. [http://www.garyfallidou.org/energeia4/level\\_1/thermoelectic\\_factories.html](http://www.garyfallidou.org/energeia4/level_1/thermoelectic_factories.html)
14. <http://www.metka.com/el/tomeis-drasthriopoihs/erga/ahs-lavriou-monada-iv-syndyasmenu-kyklou-550-mw>