



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Αναλυτική και πειραματική εκτίμηση  
ιδιοσυχνοτήτων σε μεταλλικούς πύργους  
και σύμμικτες δοκούς πλήρους κλίμακας



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καραφέρης Δ. Νικόλαος

Επιβλέπων: Βαμβάτσικος Δημήτριος

Αθήνα, Φεβρουάριος 2020

ΕΜΚ ΜΕ 2020/1

Καραφέρης Ν. Δ. (2020)  
Αναλυτική και πειραματική εκτίμηση ιδιοσυχνοτήτων σε μεταλλικούς πύργους και  
σύμμικτες δοκούς πλήρους κλίμακας  
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2020/1  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Karaferis N. D. (2020)  
Analytical and experimental estimation for the eigenfrequencies of full scale steel  
towers and composite beams  
Postgraduate Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2020/1  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Copyright © Καραφέρης Δ. Νικόλαος, 2020

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

Copyright © Karaferis D. Nikolaos, 2020

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this postgraduate 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 postgraduate 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).



# Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Abstract .....	4
Ευχαριστίες.....	5
1 Εισαγωγή.....	6
1.1 Γενικά - Συστήματα δομικής παρακολούθησης.....	6
1.2 Σκοπός.....	7
1.3 Δομή Εργασίας.....	7
2 Πειραματική Διαδικασία και Μέθοδος Ανάλυσης των Καταγραφών.....	9
2.1 Χαρακτηριστικά του αισθητήρα.....	9
2.2 Διαδικασία καταγραφής των επιταχυνσιογραφημάτων.....	13
2.3 Μέθοδος Ανάλυσης των καταγραφών.....	14
3 Μεταλλικοί Πύργοι .....	19
3.1 Γενικά - Στατικό μοντέλο και τοποθέτηση αισθητήρα .....	19
3.2 Αναλυτική εκτίμηση ιδιοσυχνοτήτων για τους πύργους.....	23
3.3 Πειραματικά αποτελέσματα για τους πύργους.....	24
3.3.1 Πύργος 1 με διαγώνιους συνδέσμους διατομής L45.5 .....	24
3.3.2 Πύργος 2 με διαγώνιους συνδέσμους διατομής L65.7 .....	25
3.3.3 Πύργος 3 με ενισχυμένους διαγώνιους συνδέσμους διατομής L45.5 (CFRP) .....	26
3.3.4 Πύργος 4 με διαγώνιους συνδέσμους διατομής L40.4 .....	27
3.3.5 Πύργος 5 με διαγώνιους συνδέσμους διατομής L60.6 .....	29
3.3.6 Πύργος 6 με ενισχυμένους διαγώνιους συνδέσμους διατομής L60.6 (CFRP) .....	30
3.4 Αποτελέσματα μεμονωμένων μελών.....	32
3.5 Συμπεράσματα.....	36
4 Σύμμικτες Δοκοί.....	38
4.1 Γενικά - Στατικό μοντέλο και τοποθέτηση αισθητήρα .....	38
4.2 Αποτελέσματα Σύμμικτων Δοκών .....	40
4.2.1 Αποτελέσματα για τη σύμμικτη δοκό #1.....	40
4.2.2 Αποτελέσματα για τη σύμμικτη δοκό #2.....	45
4.2.3 Αποτελέσματα για τη σύμμικτη δοκό #3.....	49
4.2.4 Αποτελέσματα για τη σύμμικτη δοκό #4.....	53
4.2.5 Αποτελέσματα για τη σύμμικτη δοκό #5.....	57
4.3 Συμπεράσματα.....	61
5 Τελικά Συμπεράσματα .....	63
Βιβλιογραφία.....	65
Παράρτημα Α - Αποτελέσματα ανάλυσης των μετρήσεων στους μεταλλικούς πύργους.....	66
Παράρτημα Β - Αποτελέσματα ανάλυσης των μετρήσεων στις σύμμικτες δοκούς.....	82



**Αναλυτική και πειραματική εκτίμηση ιδιοσυχνοτήτων σε  
μεταλλικούς πύργους και σύμμικτες δοκούς πλήρους κλίμακας**

Καραφέρης Ν. Δ. (Επιβλέπων: Βαμβάτσικος Δ.)

**Περίληψη**

Εφαρμόζεται σύστημα χαμηλού κόστους με χρήση απλών αισθητήρων επιταχύνσεως για την μέτρηση των ιδιοσυχνοτήτων δομικών φορέων και κατ' επέκταση των χαρακτηριστικών της δυσκαμψίας τους. Οι φορείς που εξετάζονται είναι εργαστηριακά δοκίμια πλήρους κλίμακας που υποβλήθησαν σε πειραματική εκτίμηση της αντοχής τους στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών ΕΜΠ. Συγκεκριμένα, πρόκειται για έξι μεταλλικούς πύργους και πέντε αμφιαρθρωτές σύμμικτες δοκούς διαφόρων διατομών.

Για κάθε μία από τις έντεκα κατασκευές εκτελέστηκαν τόσο αναλυτικοί υπολογισμοί με μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων όσο και πειραματικές μετρήσεις των συχνοτικών των χαρακτηριστικών. Ειδικότερα, για τους πύργους παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μεγάλη διασπορά στις εκτιμήσεις της πρώτης ιδιοπεριόδου, ενώ σε μετρήσεις που έγιναν σε μεμονωμένους διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας των πύργων, προέκυψαν πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα, κοντά στις θεωρητικές εκτιμήσεις. Στην περίπτωση των σύμμικτων δοκών, τα αποτελέσματα των μετρήσεων ήταν πιο σταθερά, χωρίς κατ' ανάγκη πάντα να συμφωνούν με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Επίσης, οι μετρήσεις που εκτελέστηκαν μετά την πειραματική δοκιμή της δοκού μέχρι αστοχίας κατέδειξαν τη δυνατότητα ανίχνευσης βλαβών λόγω μεταβολών της δυσκαμψίας τους.

Τέλος συμπεραίνεται πως παρ' όλο που με βάση την διαδικασία μετρήσεων που ακολουθήθηκε ήταν δύσκολη η ακριβής εκτίμηση της δυσκαμψίας του συνολικού φορέα για τον κάθε μεταλλικό πύργο, η μέθοδος αυτή δούλεψε πολύ αποτελεσματικά για πιο απλούς φορείς δίνοντας αποτελέσματα που κρίνονται αρκετά αξιόπιστα.

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

POSTGRADUATE THESIS  
EMK ME 2020/1

**Analytical and experimental estimation for the eigenfrequencies of  
full scale steel towers and composite beams**

Karaferis N. D. (supervised by Vamvatsikos D.)

**Abstract**

Using a low-cost system of simple acceleration sensors, measurements were taken to identify the eigenfrequencies of certain structures and therefore their stiffness characteristics. The structures examined are full-scale steel towers and composite beams that have been subjected to an experimental evaluation of their resistance at the Institute of Steel Structures of NTUA. Specifically, six towers and five composite beams of various cross-sections were examined.

For each of the eleven structures, finite element models were created, while experimental measurements of their eigenfrequencies were performed. In particular, for the towers it was observed that there is a large dispersion in the estimates of their corresponding eigenfrequencies, while measurements made on individual diagonal braces of the towers yielded more satisfactory results that were close to the theoretical estimates. Regarding the composite beams, the results of the measurements were more stable and thus more reliable even if they were not always consistent with the results of the simulations. Also, measurements performed after the experimental tests on the beams until their failure, demonstrated the capability of detecting damage through the changes in their stiffness.

In conclusion, although it was difficult to accurately estimate the overall stiffness of each steel tower based on the measurement procedure followed, this method worked very efficiently for simpler structures providing results that can be considered quite reliable.



## Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου κ. Βαμβάτσικο Δημήτριο καθώς και τον υπεύθυνο του εργαστηρίου μεταλλικών κατασκευών κ. Λιγνό Ξενοφώντα για την βοήθεια τους κατά την εκπόνηση της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας, καθώς η συμβολή τους ήταν καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω την οικογένειά μου που όλα αυτά τα χρόνια με στηρίζει και είναι δίπλα μου.

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά - Συστήματα δομικής παρακολούθησης

Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο ανακύπτει η ανάγκη για αποτελεσματικό έλεγχο της κατάστασης στην οποία βρίσκονται οι κατασκευές, τόσο μετά από κάποιο σεισμό αλλά και κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Αυτό λοιπόν κάνει όλο και πιο απαραίτητο ένα σύστημα ελέγχου που χωρίς μεγάλες παρεμβάσεις και φυσικά με μη καταστροφικό τρόπο θα μπορεί να προσφέρει στους μηχανικούς σημαντικές πληροφορίες για την στατική ακεραιότητα μιας κατασκευής αλλά και να προειδοποιεί εγκαίρως για τυχόν βλάβες που είτε άμεσα είτε μελλοντικά μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα.

Αυτές οι ανάγκες λοιπόν έρχονται σε μεγάλο βαθμό να απαντηθούν μέσω των συστημάτων δομικής παρακολούθησης (Health Monitoring) στις κατασκευές. Τα συστήματα αυτά συνήθως περιλαμβάνουν επιταχυνσιόμετρα, αισθητήρες ή και άλλα μέσα με τα οποία λαμβάνονται κατάλληλες καταγραφές που μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για την κατασκευή. Είναι άλλωστε προφανής η σημασία του να μπορεί ένας μηχανικός, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα επιταχυνσιόμετρα, να ελέγξει στο κτίριο που επιχειρεί να μελετήσει στοιχεία όπως η πλαστιμότητα που αναπτύχθηκε μετά από ένα σεισμό ή ακόμα να μετρήσει την πραγματική δυσκαμψία κάποιων μελών ή και ολόκληρης της κατασκευής. Πρέπει να αναφέρουμε μάλιστα πως ενώ η χρήση επιταχυνσιόμετρων είναι ένας αρκετά χαρακτηριστικός τρόπος μελέτης των στοιχείων αυτών, αντίστοιχα η χρήση οργάνων μέτρησης των μετακινήσεων ή ακόμα και των τάσεων σε κάποια σημεία του φορέα μπορούν να δώσουν πολύτιμες πληροφορίες σε ένα μηχανικό ώστε αυτός να δρομολογήσει τις παρεμβάσεις που πιθανόν να πρέπει να πραγματοποιηθούν. Σήμερα ιδιαίτερα με την συνεχή τεχνολογική πρόοδο στην ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης των κατασκευών σε πραγματικό χρόνο εξασφαλίζοντας συνεχή ροή δεδομένων με συστήματα που αξιοποιούν ακόμα και το διαδίκτυο. Δίνεται έτσι η δυνατότητα άμεσης εποπτείας των μεταβολών που υφίσταται κάποιος φορέας κατά τη διάρκεια της ζωής του, προσφέροντας ακόμα μεγαλύτερη ευχέρεια άμεσης παρέμβασης σε τυχόν προβλήματα και άρα μείωσης στα κόστη για ενδεχόμενες επισκευές, ενώ πολύ πιο άμεση μπορεί να είναι και η ενημέρωση των χρηστών της κατασκευής σε περίπτωση επικίνδυνων αστοχιών.

Όμως η τεχνολογική πρόοδος τείνει να μειώσει αν μη τι άλλο και το κόστος του εξοπλισμού που απαιτείται, τουλάχιστον για την καταγραφή κάποιων βασικών στοιχείων της κατασκευής, πράγμα που θα μπορούσε μελλοντικά να κάνει αυτά τα συστήματα ελέγχου πιο προσβάσιμα, καθώς σήμερα τείνουν να χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατασκευές όπως γέφυρες, μνημεία ή μεγάλης κλίμακας κτίρια, όπου όντως η παρακολούθηση της μεταβολής των χαρακτηριστικών τους μοιάζει σχεδόν αναγκαία. Στο πλαίσιο λοιπόν της παρούσας εργασίας θα ελεγχθεί σε ποιο βαθμό με

έναν μικρότερου κόστους αισθητήρα καταγραφής επιταχύνσεων μπορούμε να εξάγουμε αξιοποιήσιμα συμπεράσματα για κάποιους απλούς φορείς [5].

## 1.2 Σκοπός

Όπως αναφέρθηκε συνοπτικά και στη προηγούμενη ενότητα η παρούσα εργασία επιδιώκει να ελέγξει το κατά πόσο μπορούν να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε ότι έχει να κάνει με τις ιδιοσυχνότητες απλών φορέων, εφόσον αυτές μετρηθούν πειραματικά με χρήση κατάλληλου επιταχυνσιόμετρου χαμηλού κόστους. Με τη προσέγγιση αυτών των ιδιοσυχνοτήτων, μέσω των μετρήσεων που έγιναν, στόχος είναι η προσέγγιση της δυσκαμψίας των δοκιμίων που ελέγχονται, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις, και η ανίχνευση των μεταβολών στις δυσκαμψίες αυτές.

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας επιταχυνσιόμετρο αντίστοιχο με αυτό που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π. στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας του τότε φοιτητή Βασίλη Θωμά με τίτλο "Προγραμματισμός επιταχυνσιόμετρου βασισμένου στη πλατφόρμα Arduino για τον υπολογισμό των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών απλών μεταλλικών φορέων" [1] το εργαστήριο επέτρεψε τη χρήση του οργάνου αυτού σε πειράματα που διεξήγαγε κατά το χειμερινό εξάμηνο του ακαδημαϊκού έτους 2019-2020. Τα πειράματα αυτά αφορούσαν στη πειραματική μελέτη μεταλλικών πύργων τηλεπικοινωνιών καθώς και σύμμικτων δοκών πλήρους κλίμακας. Με την άδεια λοιπόν του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε το εν λόγω επιταχυνσιόμετρο ώστε να ληφθούν δεδομένα καταγραφών τα οποία είναι και αυτά που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

## 1.3 Δομή Εργασίας

Αρχικά παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα σε σχέση με τις ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν για τη συσκευή, καθώς και έλεγχοι που αναδεικνύουν την καταλληλότητά του σε σχέση με τις μετρήσεις που γίνονται. Ακόμα περιγράφεται η διαδικασία πραγματοποίησης των μετρήσεων καθώς και ο τρόπος ανάλυσης των καταγραφών για την προσέγγιση των ιδιοσυχνοτήτων του εκάστοτε φορέα.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αναλύσεις για την μελέτη των μεταλλικών πύργων. Μέσω ιδιομορφικής ανάλυσης για τον κάθε πύργο γίνεται εκτίμηση της θεωρητικής ιδιοσυχνότητάς του, και στη συνέχεια προσεγγίζεται η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα από τις απ' ευθείας μετρήσεις με τον αισθητήρα. Συγκεκριμένα μετρήσεις έγιναν σε συνολικά 6 μεταλλικούς πύργους το στατικό σύστημα των οποίων είναι χωροδικτύωμα με διαφορετικούς κάθε φορά διαγώνιους συνδέσμους, άρα και διαφορετική δυσκαμψία, αλλά με ίδιες συνθήκες στήριξης. Μάλιστα σε δύο περιπτώσεις κάποια μέλη των πύργων ήταν ενισχυμένα με ανθρακοελάσματα (CFRP). Οι μετρήσεις που έγιναν ήταν δύο ειδών, αρχικά επιχειρήθηκε η μέτρηση της ιδιοσυχνότητας του συνολικού φορέα και στη συνέχεια η μέτρηση της ιδιοσυχνότητας για κάποια μεμονωμένα μέλη που επιλέχθηκαν

δειγματοληπτικά ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά για τις διαφορετικές διατομές που υπήρχαν στους πύργους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, με αντίστοιχο τρόπο, αναλύονται οι σύμμικτες δοκοί πλήρους κλίμακας υπολογίζοντας τα χαρακτηριστικά της δυσκαμψίας τους με αναλυτικούς τύπους και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με τις εκτιμήσεις που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις. Στη παρούσα εργασία μελετήθηκαν συνολικά 5 δοκοί με διαφορετικές διατομές. Μάλιστα λόγω και της ύπαρξης του σκυροδέματος ήταν ευκολότερο να αποτυπωθεί η διαφορά στη δυσκαμψία τους, λόγω της αστοχίας τους κατά την πειραματική τους μελέτη στο εργαστήριο

Τέλος στο 5ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα με γενικότερα σχόλια για τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις στους φορείς που εξετάστηκαν.

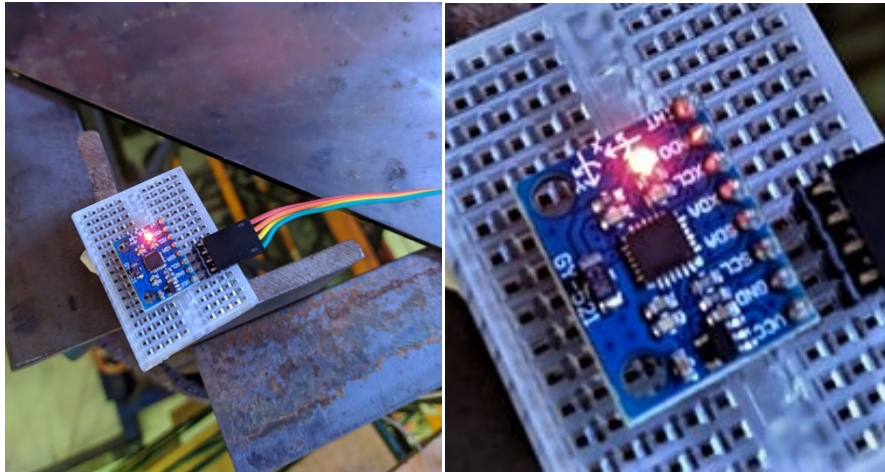
## 2 Πειραματική Διαδικασία και Μέθοδος Ανάλυσης των Καταγραφών

### 2.1 Χαρακτηριστικά του αισθητήρα

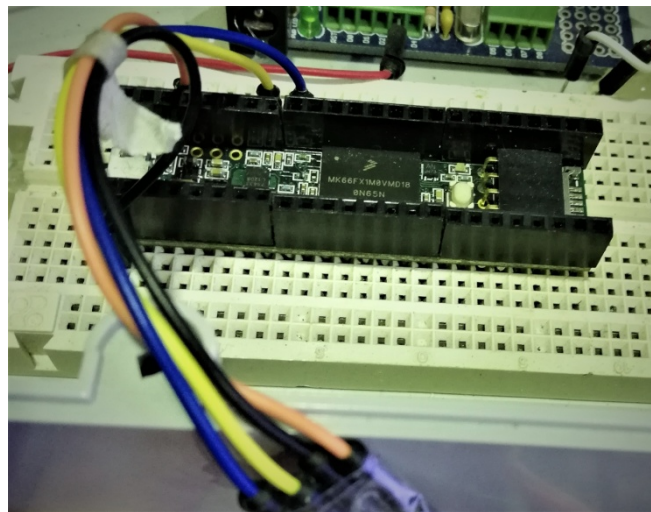
Για τη διενέργεια των απαραίτητων δοκιμών χρησιμοποιείται επιταχυνσιόμετρο παρόμοιο με αυτό που αναπτύχθηκε σε αντίστοιχη διπλωματική εργασία που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών [1]. Στην αντίστοιχη αυτή εργασία αναλύονται περισσότερο τα χαρακτηριστικά του επεξεργαστή και του αισθητήρα καθώς και οι ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν για τα όργανα, ενώ παρουσιάζεται πολύ πιο αναλυτικά και ο κώδικας που χρησιμοποιείται. Στο πλαίσιο πάντως της παρούσας εργασίας προφανώς και πρέπει να αναφερθούν τα παρακάτω στοιχεία.

Αρχικά χρησιμοποιείται αισθητήρας MPU6050 (προϊόν της εταιρίας InvenSense) ο οποίος λαμβάνει ψηφιακό σήμα και συνδέεται μέσω σειριακής σύνδεσης I2C με έναν επεξεργαστή τύπου ARM cortex - M4 180 MHz (MK66FX1M0VMD18), σε πλατφόρμα Teensy 3.6. Οι ρυθμίσεις στον αισθητήρα ήταν τέτοιες ώστε να έχει την απαραίτητη ευαισθησία και να παίρνει όσο γίνεται περισσότερες μετρήσεις το δευτερόλεπτο, ενώ οι ρυθμίσεις αυτές δεν μεταβλήθηκαν ιδιαίτερα κατά τα πειράματα. Εξαιρέση αποτελούν κάποιες περιπτώσεις όπου αυξήθηκε το όριο της μέγιστης-ελάχιστης επιτάχυνσης που μπορεί να καταγράψει, ανάλογα με τις υποδείξεις του φύλλου οδηγιών της συσκευής, αλλά αυτό δεν επηρέασε ιδιαίτερα την ακρίβεια καθώς πάντα το χρονικό διάστημα μεταξύ κάθε καταγραφής παρέμεινε μικρότερο των 0.010sec, τιμή που κρίθηκε ικανοποιητική. Επίσης αναφέρεται πως ο αισθητήρας είναι 3 αξόνων αλλά η τακτική που ακολουθήθηκε ήταν οι μετρήσεις να στοχεύουν κάθε φορά μία συγκεκριμένη διεύθυνση που κάθε φορά ήταν και η πιο χαρακτηριστική.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε με βάση συγκεκριμένες ρυθμίσεις, στο πλαίσιο της πειραματικής διερεύνησης των δυνατοτήτων του, και της χρησιμότητάς του σε εφαρμογές όπως αυτές που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια. Με βάση λοιπόν αυτές τις ρυθμίσεις προκύπτουν τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται παρακάτω. Η χρήση μάλιστα ενός οικονομικού αισθητήρα ήταν μια πρόκληση που θεωρήθηκε αρκετά ενδιαφέρουσα στη λογική της μείωσης του κόστους αυτών των συστημάτων, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται οι έλεγχοι που έγιναν στον αισθητήρα για να αποδειχθεί η κατ' αρχήν επάρκειά του ως προς τη χρήση του στις μετρήσεις που έγιναν [1, 6, 7].

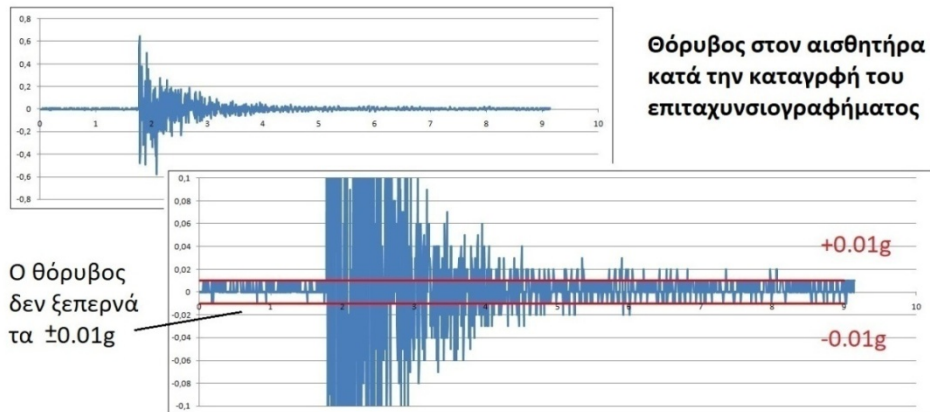


Σχήμα 2.1: Παρουσίαση του αισθητήρα MPU6050 στο εργαστήριο



Σχήμα 2.2: Παρουσίαση του Teensy 3.6 στο εργαστήριο

Αρχικά ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα είναι να γίνει ο έλεγχος του λόγου έντασης της καταγραφής προς τον θόρυβο που παράγει ο αισθητήρας (πάντα με βάση τις ρυθμίσεις του). Με άλλα λόγια να προσδιοριστεί ποιο είναι το κάτω όριο ως προς τις επιταχύνσεις που μπορεί να καταγράψει ο αισθητήρας με μια σχετική ασφάλεια. Παρατηρώντας τις καταγραφές που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων θεωρήθηκε πως η μέγιστη επιτάχυνση που θα καταγραφεί πρέπει να είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τον θόρυβο που παράγει ο αισθητήρας. Στο Σχήμα 2.3 λοιπόν παρουσιάζεται ενδεικτικά μια τυπική καταγραφή με τον αισθητήρα, στην οποία φαίνεται πως ο τυπικός θόρυβος που παράγεται είναι της τάξης των 0.01g (όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας), τουλάχιστον για τις μετρήσεις που έγιναν.



Σχήμα 2.3: Τυπική καταγραφή και θόρυβος οργάνου

Άρα εκτιμάται πως η μέγιστη επιτάχυνση πρέπει να είναι τουλάχιστον  $a_{\max} = 0.1 \text{ g}$  ώστε να μπορεί η καταγραφή να είναι αξιόπιστη και να μην διαστρεβλώνεται από την επίδραση των θορύβων ως προς το συχνοτικό της περιεχόμενο. Πρέπει να αναφερθεί βέβαια πως η παραπάνω θεώρηση γίνεται αυθαίρετα με βάση τις συνθήκες που επιθυμούνται σε σχέση με τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, οπότε αυτό δεν σημαίνει πως ο αισθητήρας δεν θα μπορούσε ενδεχομένως να καταγράψει με ασφάλεια και πιο ασθενείς επιταχύνσεις.

Στη συνέχεια έπρεπε να διευκρινιστεί ποιες συχνότητες μπορεί όντως να καταγράψει ο αισθητήρας, πράγμα που έχει να κάνει με τις μετρήσεις που παίρνει ανά δευτερόλεπτο και πάλι σε σχέση με τις ρυθμίσεις που έγιναν και με γνώμονα τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Για να βρεθεί λοιπόν η μέγιστη συχνότητα  $f$  (σε Hz) την οποία θα μπορεί να καταγράψει με ασφάλεια ο αισθητήρας, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη γεννήτρια συχνοτήτων η οποία συνδεδεμένη με ηχείο μπορούσε να παράγει ένα μεγάλο φάσμα συχνοτήτων παράγοντας ουσιαστικά απλά αρμονικά κύματα ημιτονοειδούς μορφής. Τοποθετώντας λοιπόν τον αισθητήρα στην επιφάνεια του ηχείου που συνδέθηκε με τη γεννήτρια, ο αισθητήρας δεχόμενος τις δονήσεις μπορούσε να ανιχνεύσει κάθε φορά την συχνότητα που παρήγαγε τελικά η γεννήτρια. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι δοκιμές που έγιναν στον αισθητήρα με τη γεννήτρια.



Σχήμα 2.4: Σχήμα της γεννήτριας συχνοτήτων που χρησιμοποιήθηκε

Πίνακας 2.1: Πίνακας αποτελεσμάτων των δοκιμών στον αισθητήρα με τη γεννήτρια συχνοτήτων.

Συχνότητα ελέγχου f (Hz)	Δοκιμές - μετρήσεις με τον αισθητήρα					Μέση Τιμή	Σφάλμα (%)
	t1	t2	t3	t4	t5		
1	0.98	1.00	0.99	0.99	1.01	0.99	0.60
2	2.00	2.04	1.99	2.01	2.02	2.01	0.60
3	2.99	3.02	2.99	3.00	2.99	3.00	0.07
4	4.01	4.01	4.01	4.01	4.00	4.01	0.20
5	4.99	5.00	5.00	4.99	5.01	5.00	0.04
6	6.00	6.01	5.98	6.01	6.00	6.00	0.00
7	7.00	6.96	7.01	6.99	7.03	7.00	0.03
8	7.99	8.04	8.02	7.99	8.00	8.01	0.10
9	8.99	9.01	9.00	9.00	9.03	9.01	0.07
10	9.99	10.00	9.98	10.01	10.00	10.00	0.04
15	15.01	15.01	14.98	15.00	14.99	15.00	0.01
20	19.99	19.98	19.97	20.02	20.02	20.00	0.02
25	25.01	25.02	24.98	24.99	25.03	25.01	0.02
30	30.00	29.99	30.03	30.04	30.04	30.02	0.07
35	35.01	34.98	34.99	35.00	34.99	34.99	0.02
40	40.01	39.99	40.03	39.99	40.03	40.01	0.03
45	45.01	44.98	44.97	45.04	45.04	45.01	0.02
50	50.00	50.02	50.03	49.98	50.02	50.01	0.02
55	54.99	55.04	55.01	54.98	55.02	55.01	0.01
60	60.01	59.97	60.02	60.04	60.02	60.01	0.02
65	65.03	65.00	65.03	65.01	64.99	65.01	0.02
70	70.02	70.01	70.01	70.00	70.02	70.01	0.02
75	75.04	75.03	74.99	74.97	74.99	75.00	0.01
80	79.98	80.02	80.00	80.02	79.99	80.00	0.00
81	80.98	81.02	80.98	81.05	81.02	81.01	0.01
82	82.01	82.01	82.01	82.06	82.01	82.02	0.02
83	83.03	83.03	83.02	83.01	83.03	83.02	0.03
84	84.02	84.02	84.02	83.98	84.02	84.01	0.01
85	85.02	84.98	85.00	84.96	85.02	85.00	0.00
86	85.98	85.89	86.02	85.15	85.13	85.63	0.43
87	87.02	86.96	84.11	84.09	84.10	85.26	2.00
88	83.08	83.11	83.09	83.13	83.15	83.11	5.55
89	82.16	82.10	82.14	82.16	82.13	82.14	7.71
90	81.08	81.14	81.04	81.12	81.11	81.10	9.89

Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι ο αισθητήρας αρχίζει να χάνει την ακρίβειά του από τα 87 Hz και μετά, ενώ όσο η συχνότητα γίνεται μεγαλύτερη από αυτή τη τιμή τόσο χειρότερα λειτουργεί ο αισθητήρας, πράγμα που φυσικά είναι λογικό καθώς δεν παίρνει αρκετές μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο για να περιγράψει τόσο υψίσυχνες καταγραφές. Παρ' όλα αυτά δίνεται ένα όριο ασφαλείας μέχρι τα 80 Hz , όπου φαίνεται πως ο αισθητήρας έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει τις συχνότητες αυτές με καλή ακρίβεια.

Άρα ο αισθητήρας μπορεί να ανταποκριθεί στις ανάγκες των μετρήσεων ως προς το συχνοτικό φάσμα που είναι σε θέση να καταγράψει καθώς στις μετρήσεις που παρουσιάζονται παρακάτω δεν ξεπερνάται ποτέ η συχνότητα των 80 Hz.

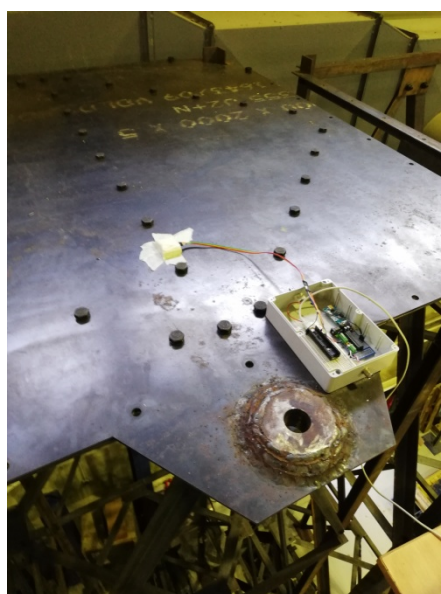


## 2.2 Διαδικασία καταγραφής των επιταχυνσιογραφημάτων

Για την καταγραφή των επιταχυνσιογραφημάτων ο αισθητήρας τοποθετείται σε κατάλληλο σημείο του φορέα, ώστε οι καταγραφές να είναι αντιπροσωπευτικές της ταλάντωσης που αυτός θα πραγματοποιήσει. Συγκεκριμένα για τις περιπτώσεις που εξετάζονται ο αισθητήρας τοποθετείται στη κορυφή του κάθε πύργου και στη μέση του ανοίγματος της κάθε δοκού (Σχήμα 2.5 και 2.6).

Στη συνέχεια επιβάλλεται ένα κρουστικό φορτίο στο φορέα που εξετάζεται ώστε αυτός να ταλαντωθεί και ο αισθητήρας να καταγράψει το επιταχυνσιογράφημα που αντιστοιχεί στη ταλάντωση αυτή. Με το τρόπο αυτό και λόγω της κρούσης, η απόκριση του φορέα θα καταλήξει σε ελεύθερη ταλάντωση, πράγμα που σημαίνει πως με την καταγραφή των αντίστοιχων ταλαντώσεων και την επεξεργασία των καταγραφών του αισθητήρα μπορεί να προκύψει η φυσική συχνότητα του φορέα και να εκτιμηθεί η δυσκαμψία του.

Αναφέρεται πως για την επιβολή κρουστικού φορτίου στους πύργους χρησιμοποιήθηκε ένα απλό σφυρί, ενώ το φορτίο επιβάλλονταν στη κορυφή του πύργου. Αντίστοιχα για τις δοκούς ένας μέσος βάρους άνθρωπος ανέβαινε στη κάθε δοκό, και μέσω μιας επί τόπου αναπήδησης η δοκός δεχόταν το απαραίτητο κρουστικό φορτίο ώστε να ταλαντωθεί. Αναφέρεται στο σημείο αυτό πως η διεύθυνση των επιταχύνσεων που εξετάζεται στους πύργους είναι μία οριζόντια διεύθυνση προς τη πλευρά που ασκείται το κρουστικό φορτίο, ενώ για τις δοκούς είναι φυσικά η κατακόρυφη διεύθυνση καταγραφής των επιταχύνσεων. Τέλος σημειώνεται πως συλλέχθηκαν δεδομένα και πριν και μετά τα πειράματα αντοχής που πραγματοποιήθηκαν στους πύργους και στις δοκούς στο πλαίσιο της συνολικής μελέτης τους από το εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών. Έτσι μπόρεσε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων πριν και μετά τα πειράματα ή με άλλα λόγια πριν και μετά την αστοχία του κάθε δοκιμίου (ιδιαίτερα σημαντικό για τις δοκούς).



Σχήμα 2.5: Αισθητήρας στη κορυφή του πύργου



Σχήμα 2.6: Αισθητήρας στο μέσο της δοκού

### 2.3 Μέθοδος Ανάλυσης των καταγραφών

Μέσω των καταγραφών που συλλέγονται επιδιώκεται η προσέγγιση της βασικής ιδιοσυχνότητας του φορέα που κάθε φορά μελετάται. Όπως έχει ήδη αναφερθεί δίνοντας μια αρχική διέγερση σε ένα φορέα και προκαλώντας την ταλάντωσή του υπάρχει η δυνατότητα μέσω των επιταχυνσιογραφημάτων που καταγράφονται από τον αισθητήρα να προσδιοριστεί η φυσική ιδιοσυχνότητα με την οποία ταλαντώνεται το σύστημα [3].

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτό είναι μέσω της ανάλυσης του συχνοτικού περιεχομένου του επιταχυνσιογραφήματος, δηλαδή την ανίχνευση των συχνοτήτων που συνθέτουν την τελική καταγραφή. Αυτό πραγματοποιείται μέσω του μετασχηματισμού Fourier (FFT Spectrum) διαδικασία μέσω της οποίας μια περιοδική συνάρτηση  $a(t) - t$  (sec) διαχωρίζεται σε επιμέρους περιοδικές συναρτήσεις σταθερής συχνότητας που αν προστεθούν μπορούν να ανασυνθέσουν την αρχική συνάρτηση. Έτσι προκύπτει διάγραμμα  $A(f) - f$ (Hz) όπου  $A$  το πλάτος της επιμέρους περιοδικής συνάρτησης που ταλαντώνεται με αντίστοιχη συχνότητα  $f$ (Hz).

Ο γενικός τύπος του μετασχηματισμού Fourier παρουσιάζεται παρακάτω:

$$A(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) * e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

όπου:

$a(t)$  : η συνεχής συνάρτηση που αναλύεται

$f$ : η συχνότητα σε Hz

$t$ : η μεταβλητή για τη συνάρτηση  $a(t)$

Όμως όπως εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς τα δεδομένα για την επεξεργασία των οποίων χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Fourier είναι δεδομένα από καταγραφές του αισθητήρα, άρα έχουμε ζεύγη δεδομένων επιτάχυνσης και χρόνου που εδώ είναι μια διακριτή μεταβλητή. Για το λόγο αυτό ο τύπος μπορεί να γραφτεί όπως φαίνεται παρακάτω:

$$Af = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} a(n) * e^{-i2\pi f(n*dt)} \quad (2.2)$$

$$\Rightarrow \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} a(n) * \cos [-2\pi f(n * dt)] \right\} + \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} a(n) * \sin [-2\pi f(n * dt)] \right\} * i$$

$$\Rightarrow b(f) + c(f) * i$$

$$\text{και τελικά } A(f) = \sqrt{b(f)^2 + c(f)^2} \quad (2.3)$$

όπου:

$a(n)$  : η διακριτή συνάρτηση των επιταχύνσεων (σε g) για κάθε χρονική στιγμή  $t$

$f$  : η συχνότητα σε Hz

$t$  : η διακριτή μεταβλητή που αντιπροσωπεύει τον χρόνο (σε sec)

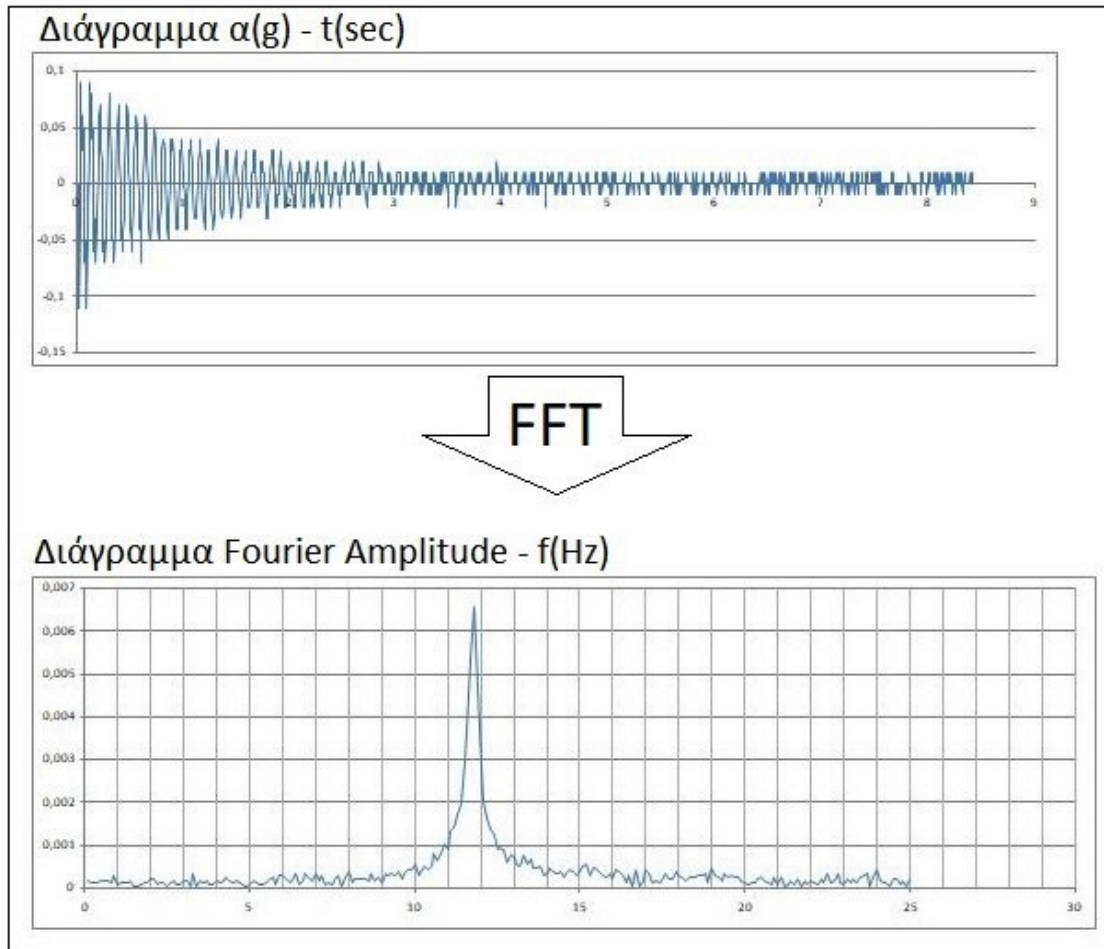
$dt$ : το χρονικό διάστημα που περνάει ανάμεσα στις καταγραφές, ορίζει και το πόσες μετρήσεις καταγράφονται ανά δευτερόλεπτο.

$N$ : ο συνολικός αριθμός των καταγραφών σε κάθε μέτρηση με τον αισθητήρα.

Από αυτή τη διαδικασία λοιπόν μπορεί να προκύψει η βασική συχνότητα που εμφανίζεται στο επιταχυνσιογράφημα μιας καταγραφής, καθώς αυτή θα έχει και τη μεγαλύτερη τιμή  $A(f)$  στο διάγραμμα. Μάλιστα σε πραγματικούς φορείς είναι χρήσιμες και άλλες τιμές του  $f$  οι οποίες εμπεριέχονται στη καταγραφή καθώς μπορεί να αντιστοιχούν και σε άλλα στοιχεία με φυσική σημασία όπως ανώτερης τάξης ιδιοσυχνότητες, ιδιοσυχνότητες μεμονωμένων μελών στις περιπτώσεις σύνθετων φορέων, συχνότητες που αντιστοιχούν σε ταλαντώσεις εκτός του επιπέδου της κύριας ταλάντωσης, συχνότητες που μπορεί να αφορούν τον τρόπο επιβολής του εξωτερικού φορτίου και άλλα τέτοια στοιχεία. Πάντως στις συνήθεις περιπτώσεις όπου ο φορέας ακολουθεί την πρώτη ιδιομορφή στην ταλάντωση του η τιμή του  $A(f)$  θα είναι μικρότερη για τις συχνότητες αυτές σε σχέση με την κύρια ιδιοσυχνότητα του συστήματος.

Με άλλα λόγια λοιπόν, μέσω της παραπάνω διαδικασίας διέγερσης και καταγραφή των επιταχύνσεων ενός συστήματος προσεγγίζεται η συχνότητα συντονισμού του, καθώς ο φορέας μέσω της ελεύθερης ταλάντωσης του έχει την

τάση να ταλαντώνεται στις συχνότητες αυτές που αντιστοιχούν στις βασικές ιδιομορφές που τον χαρακτηρίζουν.



Σχήμα 2.7 Διαγράμματα Μετασχηματισμού Fourier (FFT)

Στη περίπτωση όμως των φορέων που εξετάζονται, λόγω του μεγάλου πλήθους των καταγραφών σε κάποιες περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε για την τελική ανάλυση των αποτελεσμάτων η παρακάτω διαδικασία με σκοπό την παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τον κάθε φορέα σε ένα κοινό και εποπτικό διάγραμμα στο οποίο θα απεικονίζονται οι περιοχές συχνοτήτων που είναι οι πιο χαρακτηριστικές για την κάθε περίπτωση (συνήθως από 0 έως 25 Hz).

Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα για κάθε φορέα παρουσιάζονται σε κατάλληλο διάγραμμα  $\alpha(f) - f$  (σε Hz) όπου το  $\alpha$  ορίζεται ως εξής:

$$\alpha(f) = \frac{\sum \left( \frac{A_i(f)}{A_{max,i}} \right)}{N} \quad (2.4)$$

όπου :

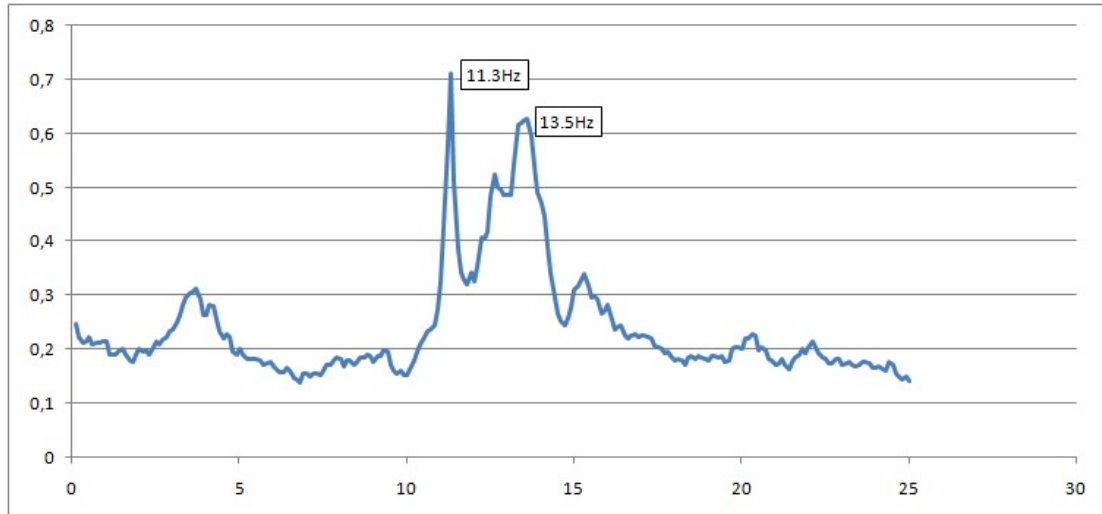
$i$  : ο δείκτης που ορίζει την κάθε περίπτωση δεδομένων για τις διαφορετικές μέτρησης που πραγματοποιούνται σε ένα φορέα (acceleration data  $i$ ).

$A_i(f)$ : είναι το πλάτος ταλάντωσης που προκύπτει από την FFT για κάθε περίπτωση δεδομένων  $i$  που αντιστοιχούν σε ένα φορέα, για τις διάφορες τιμές του  $f$ .

$A_{max,i}$ : η μέγιστη τιμή του πλάτους που υπολογίζεται από την FFT για την περίπτωση των δεδομένων της καταγραφής  $i$

$N$ : ο αριθμός των συνολικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για την κάθε περίπτωση φορέα.

Ο τρόπος αυτός επιλέχθηκε ως ο πιο αποτελεσματικός τρόπος να συνδυαστούν οι πληροφορίες που προκύπτουν από την ανάλυση των δεδομένων για την κάθε περίπτωση και να δώσουν στον αναγνώστη μια εποπτική εικόνα για τις σημαντικές συχνότητες που εμφανίζονται στις καταγραφές που συλλέχθηκαν για τον κάθε φορέα. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα τέτοιο διαγράμμα  $\alpha(f) - f$  για την παρουσίαση των δεδομένων.



Σχήμα 2.8: Παράδειγμα ενδεικτικού διαγράμματος  $\alpha(f) - f(\text{Hz})$

Προκειμένου να γίνει λίγο πιο κατανοητή η παραπάνω διαδικασία αναφέρεται πως στην ουσία η τιμή  $\alpha(f)$  αναδεικνύει το πόσο συχνά εμφανίστηκε, αλλά και τη σημασία που είχε, με βάση το σύνολο των δεδομένων που αναλύθηκαν για τον κάθε φορέα, η εκάστοτε συχνότητα  $f(\text{Hz})$ . Για παράδειγμα αν για μια συχνότητα  $f$  προέκυπτε τιμή  $\alpha(f)=1$  αυτό σημαίνει πως για τον συγκεκριμένο φορέα η συχνότητα αυτή είναι σημαντική σε όλα τα διαγράμματα που προέκυψαν από την ανάλυση των

καταγραφών με την χρήση του μετασχηματισμού Fourier (FFT graph) και πως πάντα το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης στο διάγραμμα της FFT εμφανίστηκε στη συγκεκριμένη συχνότητα. Πρέπει τέλος να σημειωθεί πως λόγω των τυχαίων διεγέρσεων που επιβάλλονταν στον κάθε φορέα (π.χ χτυπήματα με απλό σφυρί) κυρίως ως προς τη δύναμη που εφαρμόζεται κάθε φορά, αυτός ο τρόπος κάνει συγκρίσιμα τα αποτελέσματα για την κάθε περίπτωση φορέα ανάγοντας στη μονάδα το πλάτος ταλάντωσης που υπολογίζεται από τον μετασχηματισμό Fourier.

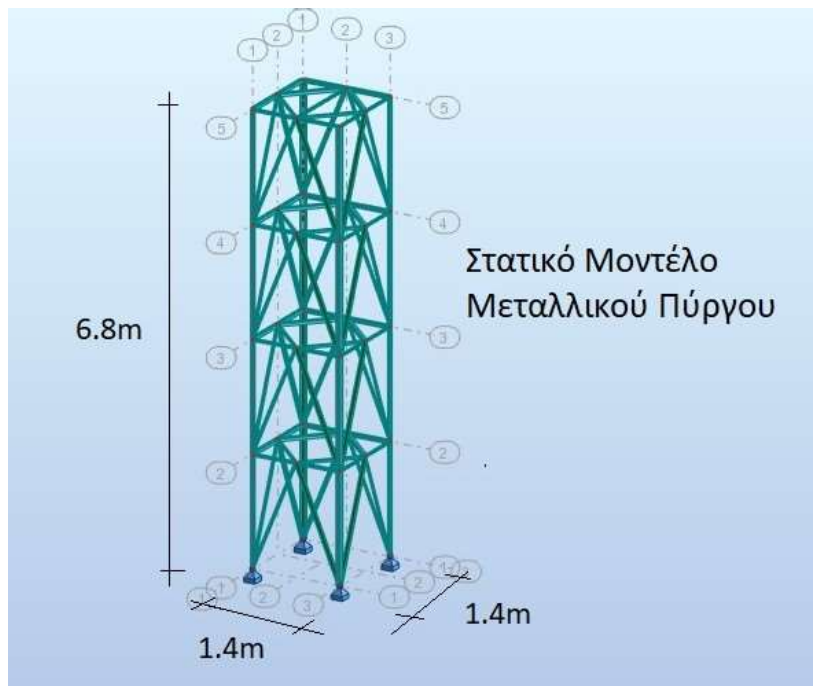
## 3 Μεταλλικοί Πύργοι

### 3.1 Γενικά - Στατικό μοντέλο και τοποθέτηση αισθητήρα

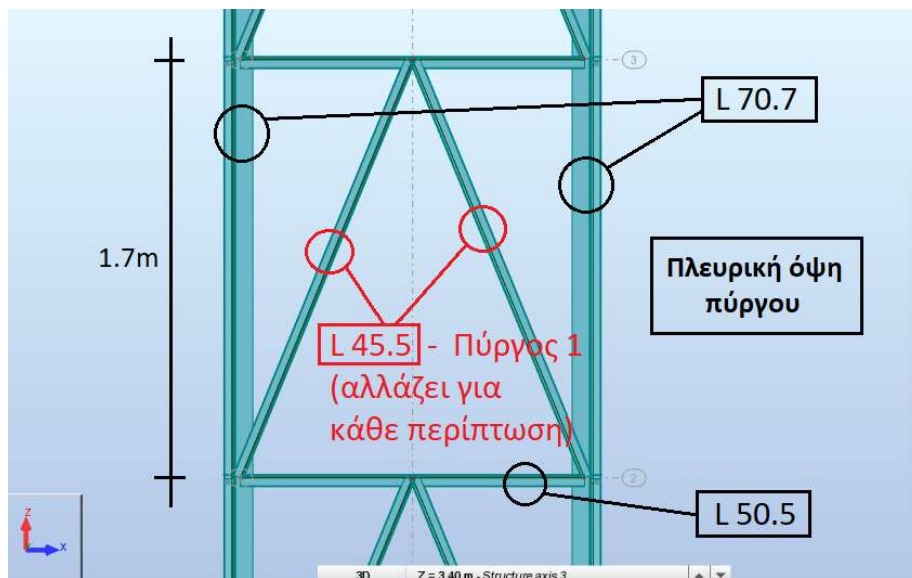
Παρουσιάζεται αρχικά μια γενική εικόνα ενός πύργου στον χώρο του εργαστηρίου ώστε να υπάρχει η απαραίτητη εποπτεία για τον φορέα (Σχήμα 3.1). Στα Σχήματα 3.2–3.4 φαίνονται το τυπικό στατικό μοντέλο που αντιστοιχεί στους πύργους που μελετήθηκαν, και οι λεπτομέρειες του φορέα ως προς τις διατομές που χρησιμοποιούνται. Συνολικά μελετήθηκαν 6 διαφορετικοί πύργοι με τον κάθε ένα να έχει διαφορετικές διατομές στους διαγώνιους συνδέσμους του. Πρέπει να σημειωθεί πως στο Σχήμα 3.3 φαίνονται ενδεικτικά για τους διαγώνιους συνδέσμους διατομές L45.5, όμως προφανώς σε κάθε διαφορετική περίπτωση η διατομή των διαγωνίων αλλάζει. Αναφέρεται ακόμα πως στη κορυφή κάθε μεταλλικού πύργου τοποθετήθηκε μεταλλικό καπάκι που επιβάλλει στον πύργο συνολική κατακόρυφη δύναμη  $\Sigma F_z = 1.0$  kN, ενώ προσομοιώνεται στο μοντέλο όπως φαίνεται Σχήμα 3.5. Τέλος στα Σχήματα 3.6 και 3.7 παρουσιάζονται οι θέσεις όπου τοποθετήθηκε ο αισθητήρας προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις με την διαδικασία που έχει περιγραφεί στα προηγούμενα.



Εικόνες 3.1: Μεταλλικός Πύργος στο χώρο του εργαστηρίου

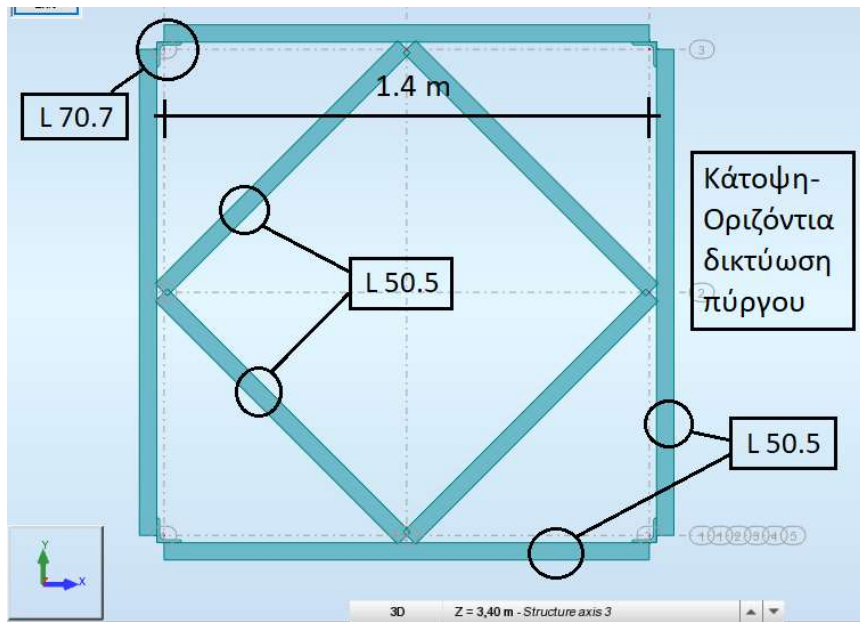


Σχήμα 3.2: Στατικό σύστημα τυπικού μεταλλικού πύργου

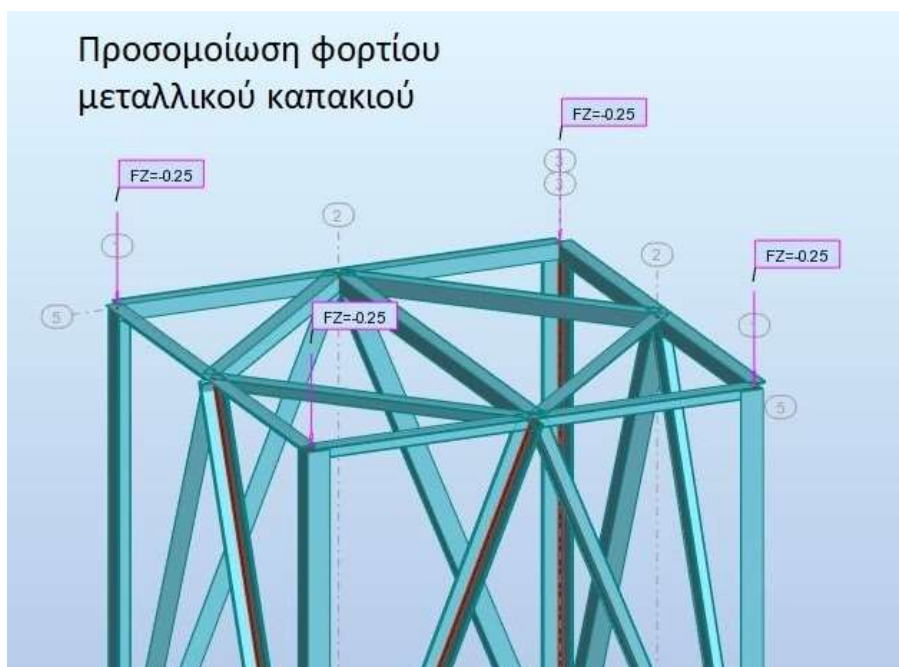


Σχήμα 3.3: Λεπτομέρεια πλευρικής όψης μεταλλικού πύργου

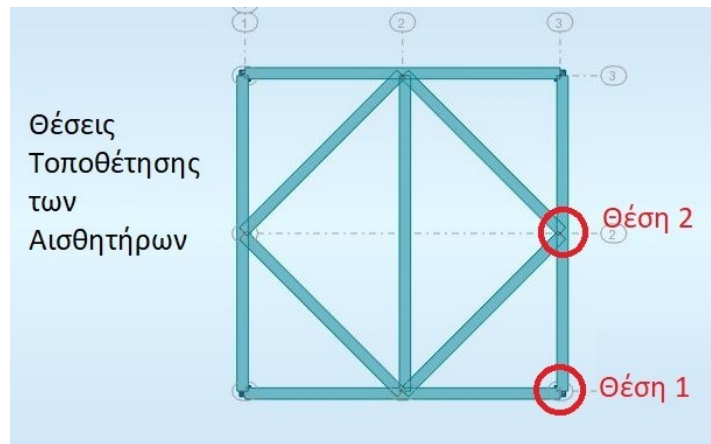




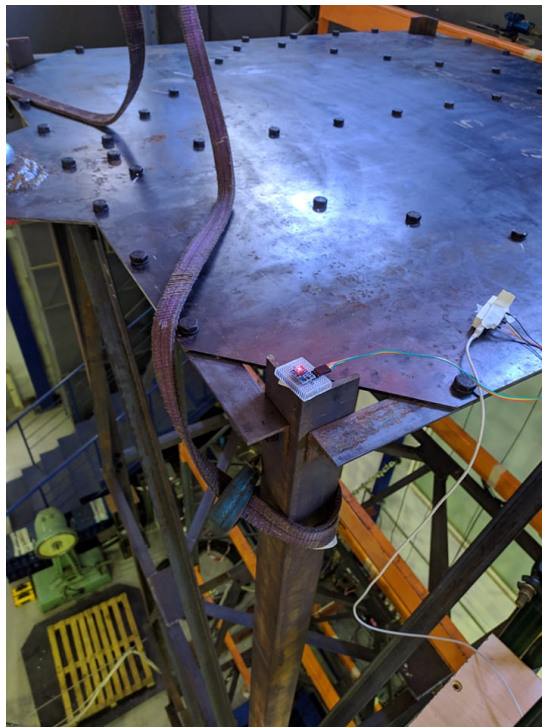
Σχήμα 3.4: Λεπτομέρεια κάτοψης μεταλλικού πύργου



Σχήμα 3.5: Τρόπος προσομοίωσης για το μεταλλικό καπάκι στο μοντέλο



Εικόνες 3.6: Θέσεις όπου τοποθετούνται οι αισθητήρες

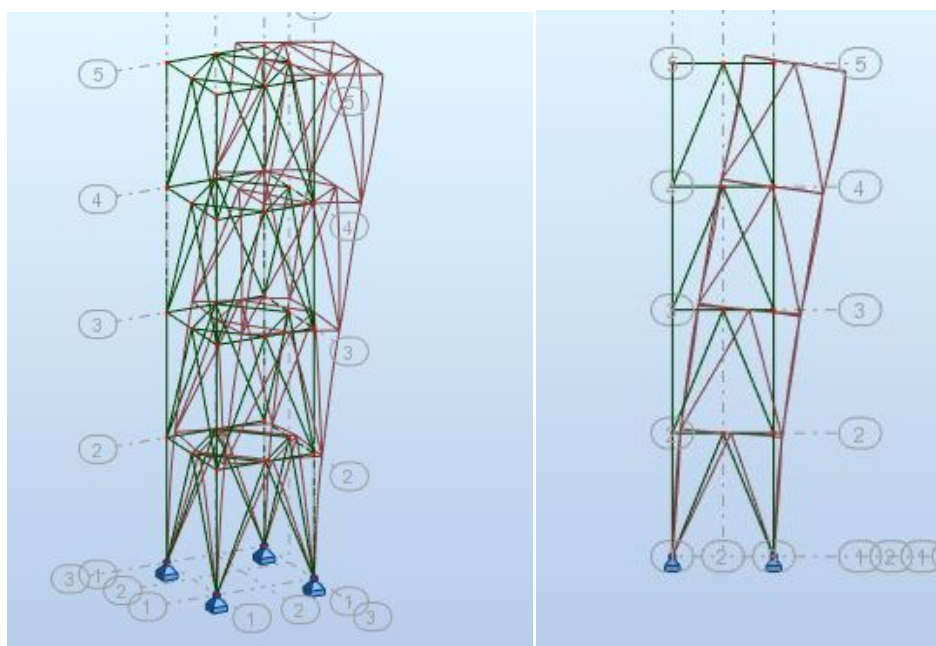


Εικόνες 3.7: Τοποθέτηση αισθητήρα στο πύργο

Σημειώνεται πως δοκιμάστηκαν διάφορες θέσεις τοποθέτησης του αισθητήρα αλλά αυτές δεν επηρέασαν ιδιαίτερα τα αποτελέσματα των καταγραφών, με δεδομένο βέβαια ότι ο αισθητήρας τοποθετείται πάντα στη κορυφή του εκάστοτε πύργου. Μάλιστα επειδή ο πύργος είναι συμμετρικός και οι δύο βασικές του διευθύνσεις (X και Y στο μοντέλο) έχουν αντίστοιχη συμπεριφορά, στα δεδομένα δεν σημειώνονται ιδιαίτερος για τη κάθε περίπτωση τα στοιχεία αυτά.

### 3.2 Αναλυτική εκτίμηση ιδιοσυχνοτήτων για τους πύργους

Με χρήση του προγράμματος Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2018 [8] πραγματοποιείται ιδιομορφική ανάλυση στο φορέα λαμβάνοντας υπόψη ως ιδιομορφική μάζα το ίδιο βάρος των μελών καθώς και το μεταλλικό καπάκι στη κορυφή. Η βασική ιδιομορφή για την κάθε περίπτωση είναι αυτή που παρουσιάζεται στην Σχήμα 3.8 ενώ η τιμή της αντίστοιχης ιδιοσυχνότητας εξαρτάται από τη περίπτωση που εξετάζεται. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν από τα μοντέλα για τις διάφορες περιπτώσεις διαγωνίων συνδέσεων.



Σχήμα 3.8: Ενδεικτικά η βασική ιδιομορφή στους πύργους

Πίνακας 3.1: Ιδιοσυχνότητες πύργων με βάση τα μοντέλα

Μεταλλικοί Πύργοι	Ιδιοσυχνότητες (Hz)
Πύργος 1 (L45.5)	16.65
Πύργος 2 (L65.7)	17.59
Πύργος 3 (L45.5/CFRP)	-
Πύργος 4 (L40.4)	15.67
Πύργος 5 (L60.6)	17.48
Πύργος 6 (L60.6/CFRP)	-

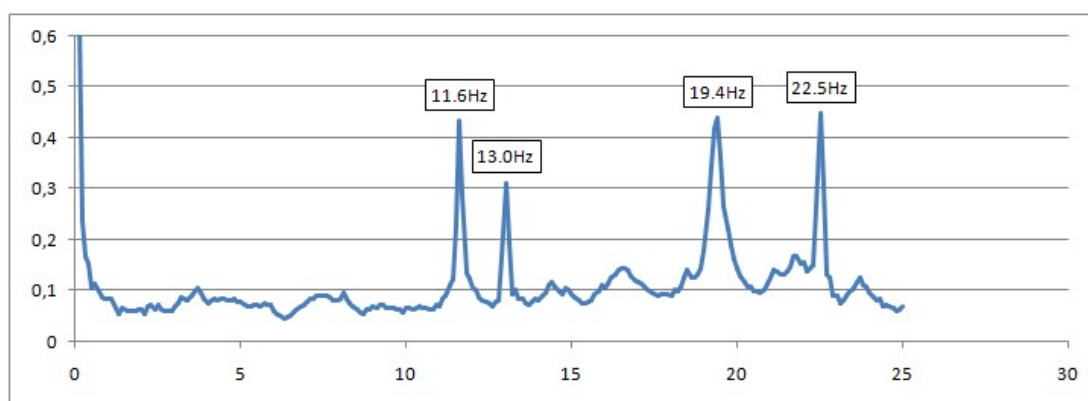
Σημειώνεται πως στους Πύργους 3 και 6 οι διαγώνιοι σύνδεσμοι ήταν ενισχυμένοι με CFRP οπότε δεν μοντελοποιήθηκε η συμπεριφορά τους λόγω έλλειψης στοιχείων για τις επιπτώσεις των ενισχύσεων αυτών.

### 3.3 Πειραματικά αποτελέσματα για τους πύργους

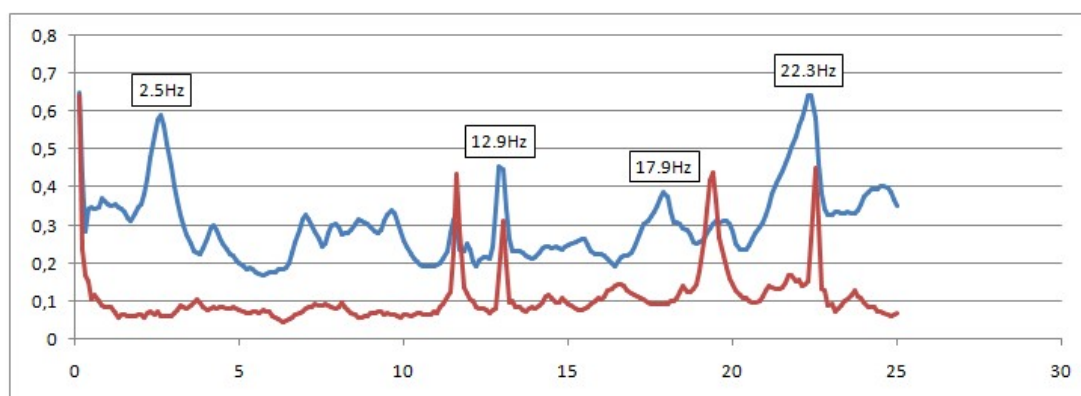
#### 3.3.1 Πύργος 1 με διαγώνιους συνδέσμους διατομής L45.5

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $a-f(\text{Hz})$  με τις συχνότητες που εμφανίστηκαν ως σημαντικές στις μετρήσεις που έγιναν στον πύργο αυτό. Μάλιστα στα Σχήματα 3.9 και 3.10 παρουσιάζονται δεδομένα πριν και μετά τα πειράματα αντοχής που έγιναν στον πύργο στο πλαίσιο της εργαστηριακής του μελέτης από το εργαστήριο. Στο Σχήμα 3.10 με τα αποτελέσματα μετά την αστοχία παρουσιάζονται και τα αρχικά αποτελέσματα (πριν το πείραμα) για σύγκριση.

Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι η ιδιοσυχνότητα για τον Πύργο 1 σύμφωνα με τις θεωρητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι 16.65 Hz , ενώ αναφέρεται χαρακτηριστικά πως η στρωφική ιδιομορφή για τον πύργο είναι 25.39Hz.



Σχήμα 3.9: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στον Πύργο 1 πριν το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$



Σχήμα 3.10: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στον Πύργο 1 μετά το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$

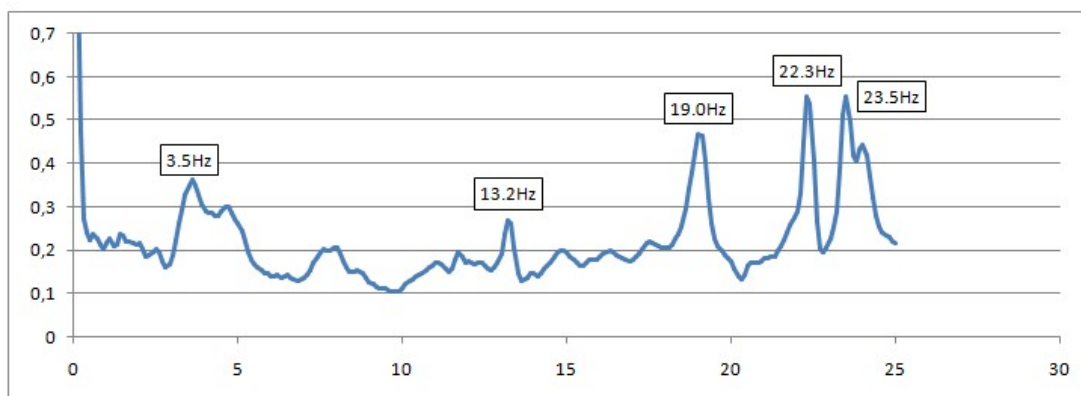
Φαίνεται πως στη περίπτωση αυτή δεν είναι τόσο εύκολο να απαντηθεί ποια από τις τιμές που εμφανίζονται στο φάσμα των συχνοτήτων που ελέγχεται αντιστοιχεί

στη φυσική ιδιοσυχνότητα του συνολικού φορέα και ποια σε κάποια στροφική ιδιομορφή, ανώτερη ιδιομορφή ή κάποια ιδιομορφή που αντιστοιχεί στη ταλάντωση κάποιου μεμονωμένου μέλους. Παρ' όλα αυτά είναι ενδιαφέρον ότι κάποιες συχνότητες εμφανίζονται και στα δύο διαγράμματα, ενώ μια εκτίμηση, λαμβάνοντας υπόψη και τα αναλυτικά μοντέλα, για την ιδιοσυχνότητα του Πύργου 1 θα μπορούσε να είναι η συχνότητα 19.40Hz ως η πιο κοντινή συχνότητα στην αντίστοιχη θεωρητική τιμή. Σημειώνεται πως τα πιο πάνω διαγράμματα προέκυψαν μετά από ανάλυση 26 μετρήσεων (acceleration data) στον πύργο 1 πριν το πείραμα και 31 μετρήσεων μετά, ενώ το χρονικό βήμα στις καταγραφές είναι  $dt=0.0045\text{sec}$ .

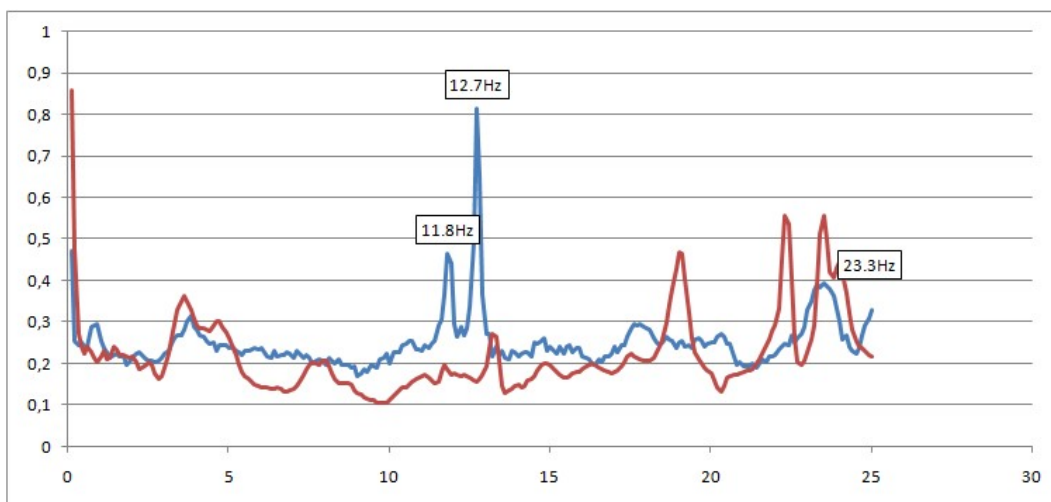
### 3.3.2 Πύργος 2 με διαγώνιους συνδέσμους διατομής L65.7

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $a-f(\text{Hz})$  με τις συχνότητες που εμφανίστηκαν ως σημαντικές στις μετρήσεις που έγιναν στον πύργο αυτό. Μάλιστα στα Σχήματα 3.11 και 3.12 παρουσιάζονται δεδομένα πριν και μετά τα πειράματα αντοχής που έγιναν στο πύργο στο πλαίσιο της εργαστηριακής του μελέτης από το εργαστήριο. Ενώ στο Σχήμα 3.12 με τα αποτελέσματα μετά την αστοχία παρουσιάζονται και τα αρχικά αποτελέσματα (πριν το πείραμα) για σύγκριση.

Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι η ιδιοσυχνότητα για τον Πύργο 2 σύμφωνα με τις θεωρητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι 17.59 Hz, ενώ αναφέρεται πως η στροφική ιδιομορφή για τον πύργο είναι 31.52Hz.



Σχήμα 3.11: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στον Πύργο 2 πριν το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$



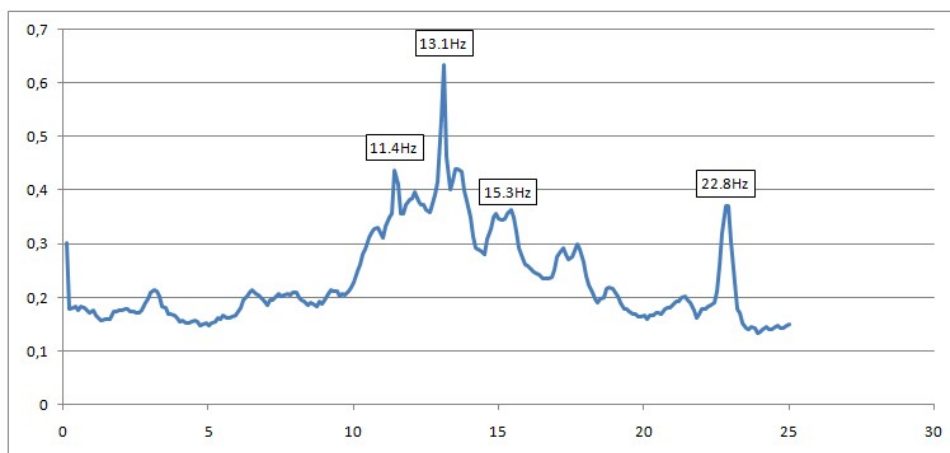
Σχήμα 3.12: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στον Πύργο 2 μετά το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$

Φαίνεται πως στο διάγραμμα πριν την αστοχία του πύργου τα αποτελέσματα μοιάζουν με αυτά του πρώτου πύργου, ενώ στα δεδομένα για τη συμπεριφορά του πύργου μετά το πείραμα ως προς τις ιδιοσυχνότητες που εμφανίστηκαν στο διάγραμμα που προέκυψε φαίνεται μία ιδιαίτερως χαρακτηριστική τιμή στα 12.7Hz. Παρατηρείται πως η τιμή 23.3 Hz παρουσιάζεται και στα δύο διαγράμματα, και πριν και μετά το πείραμα. Στη περίπτωση αυτή για την ιδιοσυχνότητα του Πύργου 2 η συχνότητα που επιλέγεται, έστω και αν τα αποτελέσματα δεν είναι τόσο ξεκάθαρα, είναι η συχνότητα στα 19.00Hz ως η πιο κοντινή συχνότητα στην αντίστοιχη θεωρητική τιμή. Σημειώνεται πως τα παραπάνω διαγράμματα προέκυψαν μετά από ανάλυση 29 μετρήσεων (acceleration data) στον πύργο 2 πριν το πείραμα και 52 μετρήσεων μετά, ενώ το χρονικό βήμα στις καταγραφές είναι  $dt=0.0045\text{sec}$ .

### 3.3.3 Πύργος 3 με ενισχυμένους διαγώνιους συνδέσμους διατομής L45.5 (CFRP)

Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$  με τις συχνότητες που εμφανίστηκαν ως σημαντικές στις μετρήσεις που έγιναν στον πύργο αυτό μετά το πείραμα. Αυτός ήταν ο πρώτος από τους πύργους ο οποίος αποτελούνταν από διαγώνιους συνδέσμους οι οποίοι ήταν ενισχυμένοι με CFRP και δυστυχώς λόγω του προγράμματος του εργαστηρίου δεν μπόρεσαν να ληφθούν δεδομένα πριν το πείραμα.

Στον πύργο αυτό μάλιστα δεν έχει γίνει κάποια εκτίμηση για την ιδιοσυχνότητα που χαρακτηρίζει την βασική του ιδιομορφή με βάση κάποιο είδους μοντελοποίηση και ανάλυση, καθώς όπως αναφέρθηκε τα χαρακτηριστικά των διαγωνίων μετά την ενίσχυσή τους δεν ήταν γνωστά εκ των προτέρων.



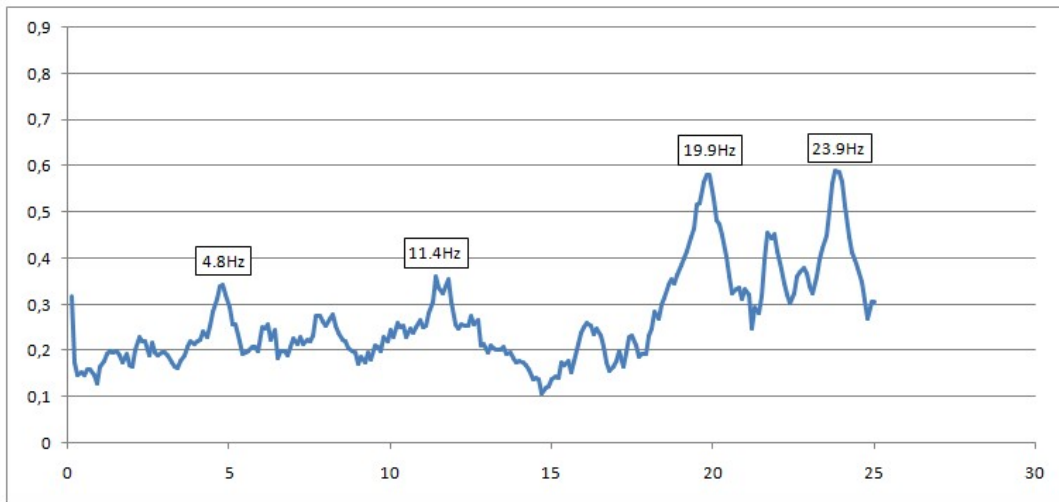
Σχήμα 3.13: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στον Πύργο 3 μετά το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$

Στη περίπτωση αυτή φαίνεται πως στο διάγραμμα μετά την αστοχία του πύργου παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική συχνότητα στα 13.1 Hz, ενώ φαίνεται πως σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζεται και η συχνότητα των 22.8Hz ως άλλη μία χαρακτηριστική τιμή. Στη περίπτωση αυτή για την ιδιοσυχνότητα του Πύργου 3 η συχνότητα που θα επιλεγεί είναι η συχνότητα των 22.8Hz με το σκεπτικό ότι είναι η μόνη χαρακτηριστική τιμή που εμφανίζεται να είναι μεγαλύτερη και από τη θεωρητική αλλά και από την πειραματική τιμή που εκτιμήθηκε ως η βασική ιδιοσυχνότητα για τον Πύργο 1, με τη λογική ότι ο Πύργος 3 έχει επίσης διαγώνιους διατομής L45.5 αλλά αυτοί είναι ενισχυμένοι με τα CFRP. Φυσικά η ύπαρξη μιας συχνότητας που φαίνεται να είναι τόσο χαρακτηριστική, όπως είναι η συχνότητα των 13.1 Hz, και η αγνόηση της, δείχνουν και πάλι πως τα αποτελέσματα δεν είναι ούτε εδώ ξεκάθαρα. Σημειώνεται πως το παραπάνω διάγραμμα προέκυψε μετά από ανάλυση 57 μετρήσεων (acceleration data) στον πύργο 3 μετά το πείραμα και το χρονικό βήμα στις καταγραφές είναι  $dt=0.0045\text{sec}$ .

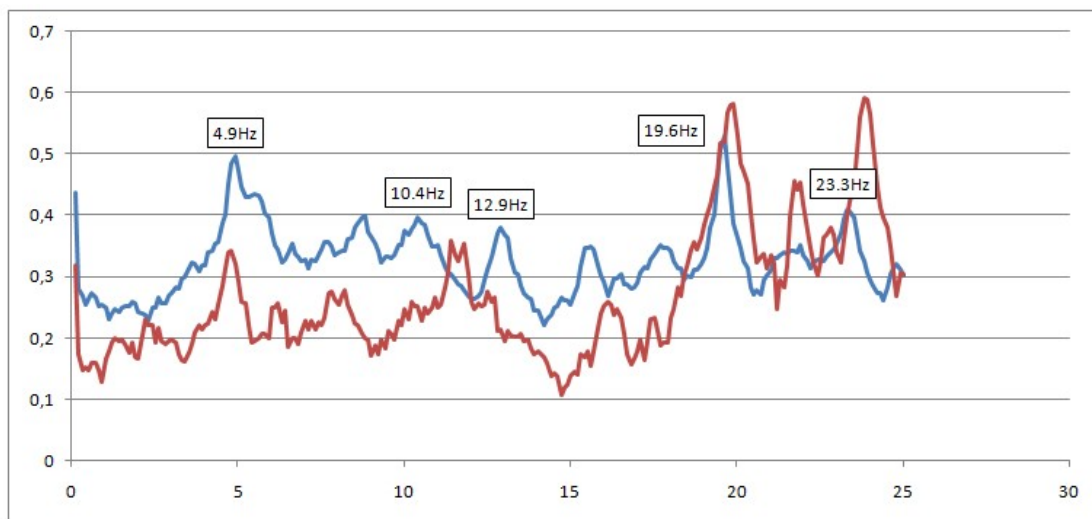
### 3.3.4 Πύργος 4 με διαγώνιους συνδέσμους διατομής L40.4

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $a-f(\text{Hz})$  με τις συχνότητες που εμφανίστηκαν ως σημαντικές στις μετρήσεις που έγιναν στον πύργο 4. Μάλιστα στα Σχήματα 3.14 και 3.15 παρουσιάζονται δεδομένα πριν και μετά τα πειράματα αντοχής που έγιναν στο πύργο στο πλαίσιο της εργαστηριακής του μελέτης από το εργαστήριο. Ενώ στο Σχήμα 3.15 με τα αποτελέσματα μετά την αστοχία παρουσιάζονται και τα αρχικά αποτελέσματα (πριν το πείραμα) για λόγους σύγκρισης.

Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι η ιδιοσυχνότητα για τον Πύργο 4 σύμφωνα με τις θεωρητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι 15.67 Hz, ενώ αναφέρεται πως η στρωφική ιδιομορφή για τον πύργο είναι 22.28Hz.



Σχήμα 3.14: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στον Πύργο 4 πριν το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$



Σχήμα 3.15: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στον Πύργο 4 μετά το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$

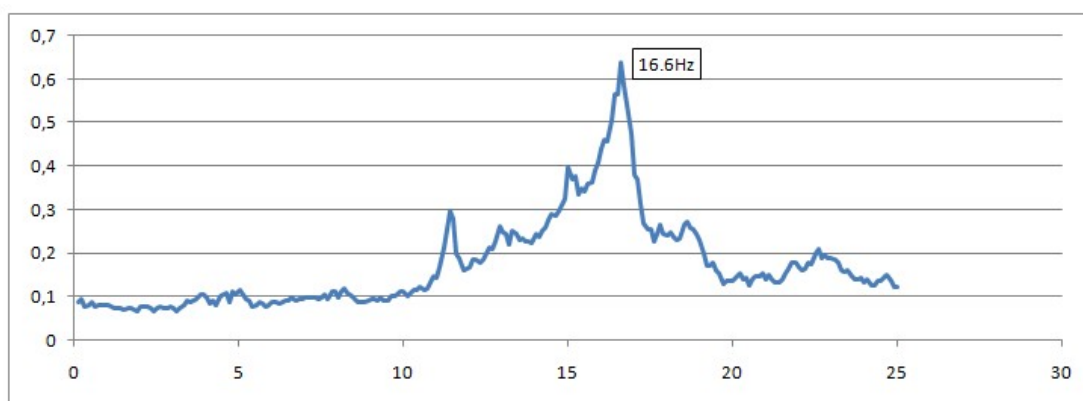
Στη περίπτωση του Πύργου 4 παρατηρείται και στα δύο διαγράμματα μία τιμή στα 19.9Hz η οποία μετά το πείραμα μειώνεται ελάχιστα σε 19.6Hz. Στη περίπτωση αυτή λοιπόν, για την ιδιοσυχνότητα του Πύργου 4, επιλέγεται η συχνότητα των 19.9Hz παρόλο που αφορά σε ένα πύργο που θεωρητικά θα περίμενε κανείς να είναι πιο εύκαμπτος. Σημειώνεται πως τα πιο πάνω διαγράμματα προέκυψαν μετά από ανάλυση 11 μετρήσεων (acceleration data) στον πύργο 4 πριν το πείραμα και 54 μετρήσεων μετά, ενώ το χρονικό βήμα στις καταγραφές είναι  $dt=0.0045\text{sec}$ .



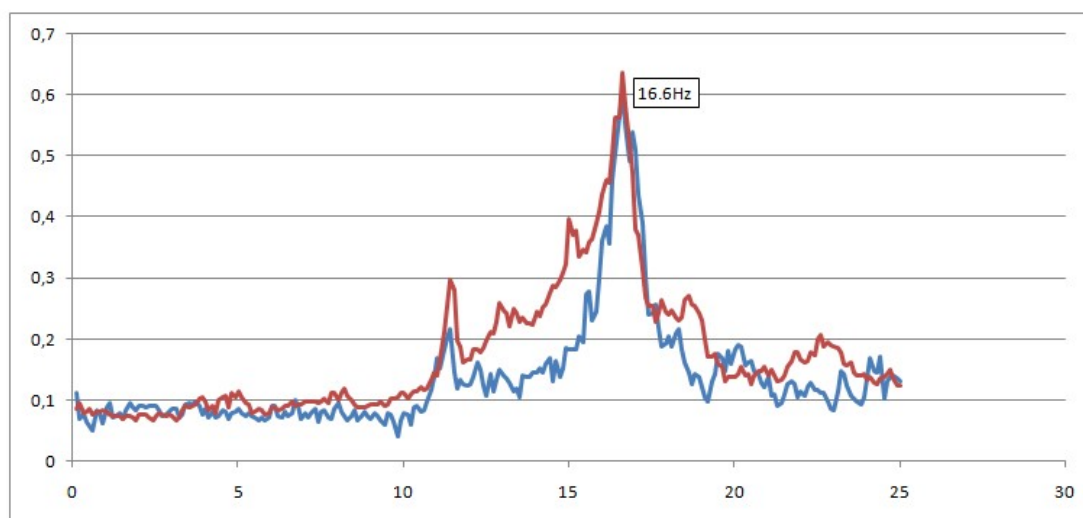
### 3.3.5 Πύργος 5 με διαγώνιους συνδέσμους διατομής L60.6

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $a-f(\text{Hz})$  με τις συχνότητες που εμφανίστηκαν ως σημαντικές στις μετρήσεις που έγιναν για τον πύργο 5. Μάλιστα στα Σχήματα 3.16 και 3.17 παρουσιάζονται δεδομένα πριν και μετά τα πειράματα αντοχής που έγιναν στον πύργο στο πλαίσιο της εργαστηριακής του μελέτης από το εργαστήριο. Ενώ στο Σχήμα 3.17 με τα αποτελέσματα μετά την αστοχία παρουσιάζονται και τα αρχικά αποτελέσματα (πριν το πείραμα) για σύγκριση.

Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι η ιδιοσυχνότητα για τον Πύργο 5 σύμφωνα με τις θεωρητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι 17.48 Hz , ενώ αναφέρεται πως η στρωφική ιδιομορφή για τον πύργο είναι 29.95Hz.



Σχήμα 3.16: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στον Πύργο 5 πριν το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$



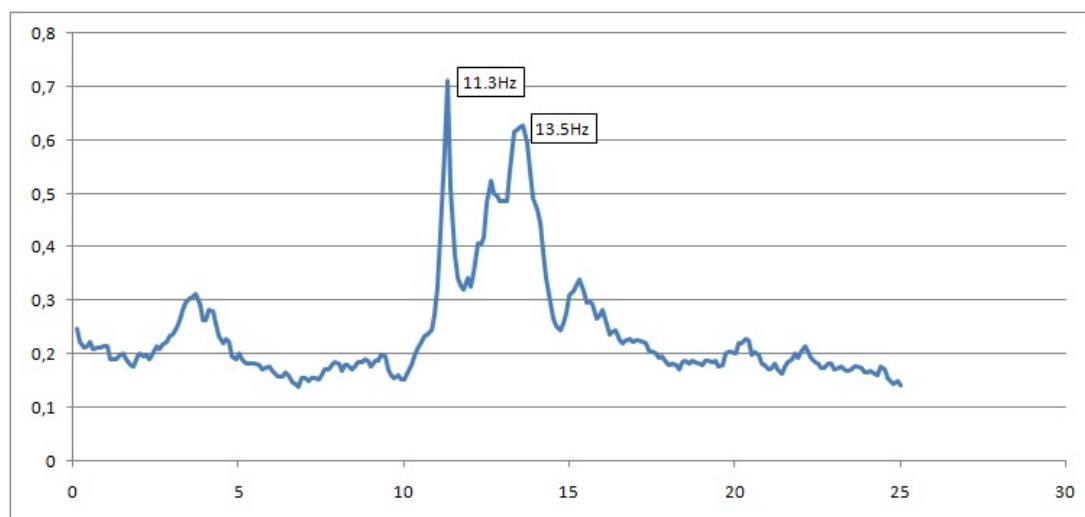
Σχήμα 3.17: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στον Πύργο 5 μετά το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$

Στη περίπτωση αυτή για την ιδιοσυχνότητα του Πύργου 5 η συχνότητα που επιλέγεται, και είναι προεξάρχουσα και στα δύο διαγράμματα, είναι η συχνότητα των 16.6Hz καθώς είναι η μόνη βασική συχνότητα που εμφανίζεται. Μάλιστα η συχνότητα αυτή είναι και πολύ κοντά στη θεωρητική τιμή, σε σύγκριση με τις άλλες περιπτώσεις. Σημειώνεται πως τα παραπάνω διαγράμματα προέκυψαν μετά από ανάλυση 32 μετρήσεων (acceleration data) στον πύργο 5 πριν το πείραμα και 17 μετρήσεων μετά, ενώ το χρονικό βήμα στις καταγραφές είναι  $dt=0.0045\text{sec}$ .

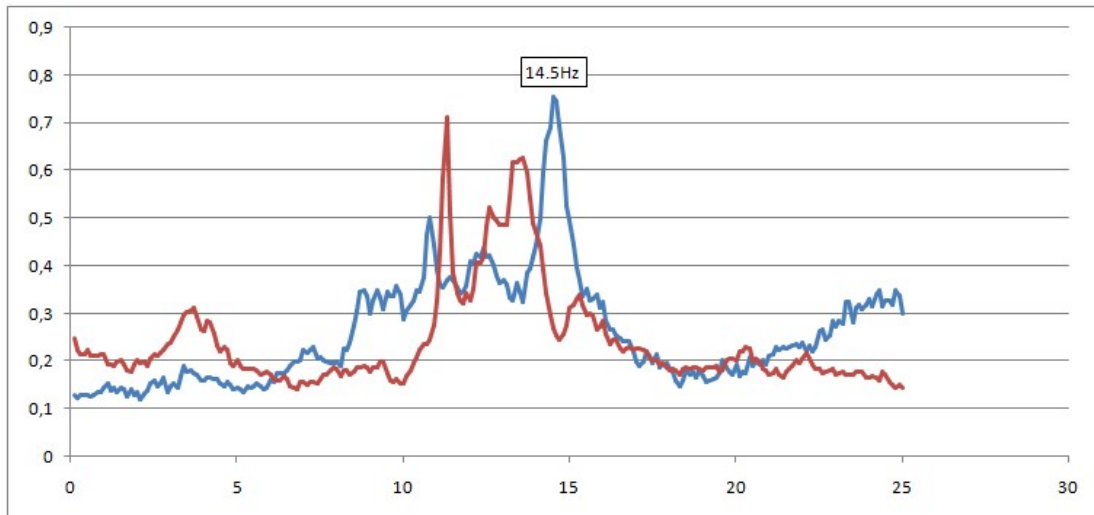
### 3.3.6 Πύργος 6 με ενισχυμένους διαγώνιους συνδέσμους διατομής L60.6 (CFRP)

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $a-f(\text{Hz})$  με τις συχνότητες που εμφανίστηκαν ως σημαντικές στις μετρήσεις που έγιναν στον πύργο αυτό. Μάλιστα στα Σχήματα 3.18 και 3.19 παρουσιάζονται δεδομένα πριν και μετά τα πειράματα αντοχής που έγιναν στο πύργο στο πλαίσιο της εργαστηριακής του μελέτης από το εργαστήριο. Ενώ στο Σχήμα 3.18 με τα αποτελέσματα μετά την αστοχία παρουσιάζονται και τα αρχικά αποτελέσματα (πριν το πείραμα) για σύγκριση.

Πρέπει να αναφερθεί πως στη περίπτωση αυτή παρουσιάζεται η δεύτερη περίπτωση πύργου με διαγώνιους συνδέσμους ενισχυμένους με CFRP για τον οποίο επίσης δεν έγινε εκτίμηση κάποιας θεωρητικής τιμής για την ιδιοσυχνότητα του.



Σχήμα 3.18: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στον Πύργο 6 πριν το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$



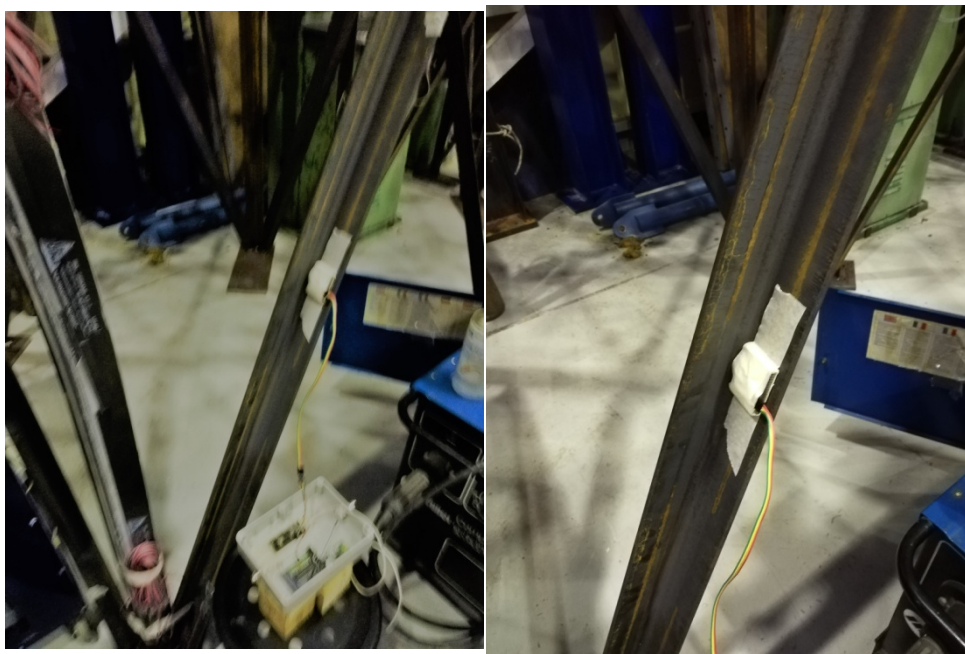
Σχήμα 3.19: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στον Πύργο 6 μετά το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$

Για το Πύργο 6 θα επιλεγεί η συχνότητα των 14.5Hz, έστω και αν το αποτέλεσμα αυτό αναφέρεται στα δεδομένα μετά το πείραμα, καθώς υπήρξε μεγαλύτερη σύγκλιση στα αποτελέσματα αυτά, αλλά και η τιμή ήταν κάπως μεγαλύτερη. Πάντως και σε αυτή τη περίπτωση η τιμή που προκύπτει προβληματίζει, καθώς στον θεωρητικά πιο δύσκαμπτο πύργο οι αξιοσημείωτες συχνότητες που εμφανίζονται έχουν σχετικά μικρή τιμή σε σχέση με αυτό που θα αναμενόταν. Σημειώνεται πως τα πιο πάνω διαγράμματα προέκυψαν μετά από ανάλυση 54 μετρήσεων (acceleration data) στον πύργο 6 πριν το πείραμα και 22 μετρήσεων μετά, ενώ το χρονικό βήμα στις καταγραφές είναι  $dt=0.0045\text{sec}$ .

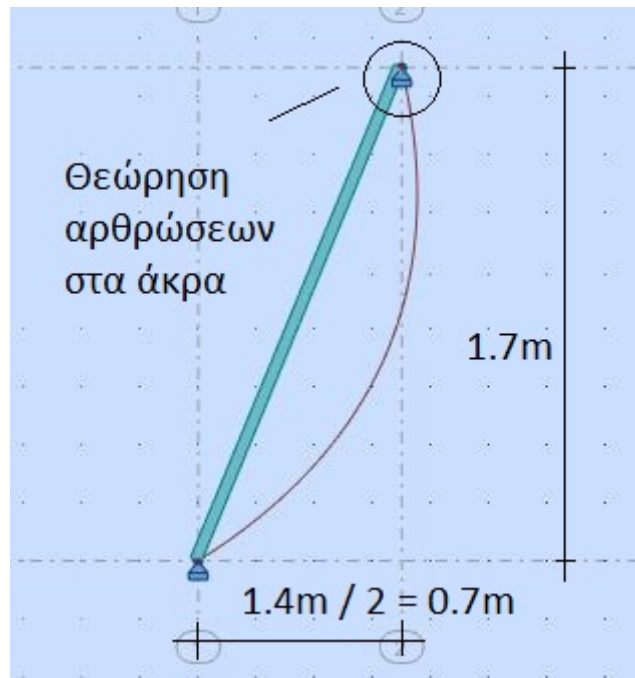
### 3.4 Αποτελέσματα μεμονωμένων μελών

Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων στους πύργους και παρατηρώντας την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων για την εκτίμηση της ιδιοσυχνότητας που αντιστοιχεί σε ολόκληρο το φορέα, αποφασίστηκε η διενέργεια επιπλέον μετρήσεων αυτή τη φορά σε κάποια μεμονωμένα μέλη που απαρτίζουν τους πύργους για να ελεγχθεί το κατά πόσο μπορεί να προσεγγιστεί η ιδιοσυχνότητα τους. Τα μέλη που επιλέχθηκαν και στα οποία έγιναν οι μετρήσεις επιλέχθηκαν τυχαία από διάφορους πύργους, με το σκεπτικό να ελεγχθούν κάποια από τα μέλη που εμφανίζονται στους πύργους. Στο Σχήμα 3.20 παρουσιάζεται ο αισθητήρας τοποθετημένος σε μεμονωμένα μέλη στο εργαστήριο ώστε να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες μετρήσεις.

Και στη περίπτωση αυτή η διαδικασία μετρήσεων και ανάλυσης των αποτελεσμάτων ήταν αντίστοιχη με αυτή που ακολουθήθηκε στις προηγούμενες περιπτώσεις. Μάλιστα στο Σχήμα 3.21 παρουσιάζεται το μοντέλο ενός μεμονωμένου μέλους στο πρόγραμμα Autodesk Robot [8] με το οποίο διενεργήθηκε και πάλι η ιδιομορφική ανάλυση για τα μέλη που εξετάστηκαν. Σημειώνεται πως οι έλεγχοι προφανώς και έγιναν για διάφορες περιπτώσεις διαγωνίων συνδέσμων, όμως το μοντέλο που παρουσιάζεται παρακάτω αντιστοιχεί σε όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις με αλλαγή φυσικά της διατομής για την εκάστοτε περίπτωση. Στο Σχήμα 3.21 φαίνεται ακόμα η γεωμετρία που θεωρήθηκε για τον κάθε διαγώνιο σύνδεσμο, η θεώρηση αρθρώσεων στα άκρα (κάπως δυσμενής αλλά εύλογη επιλογή) και η εικόνα της πρώτης ιδιομορφής για το μέλος.



Σχήμα 3.20: Τοποθέτηση αισθητήρα σε μεμονωμένα μέλη

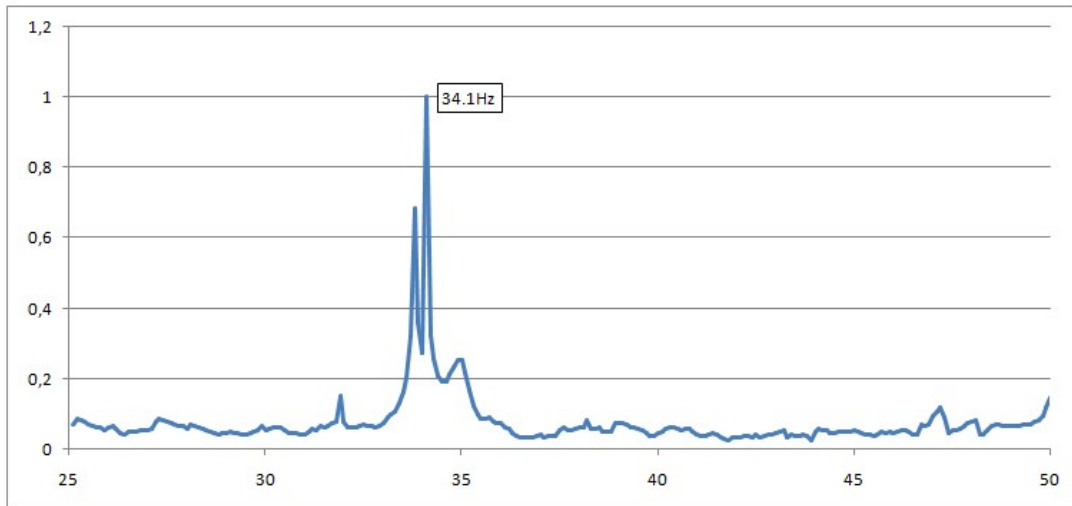


Σχήμα 3.21: Μοντέλο για την ιδιομορφική ανάλυση των μεμονωμένων μελών

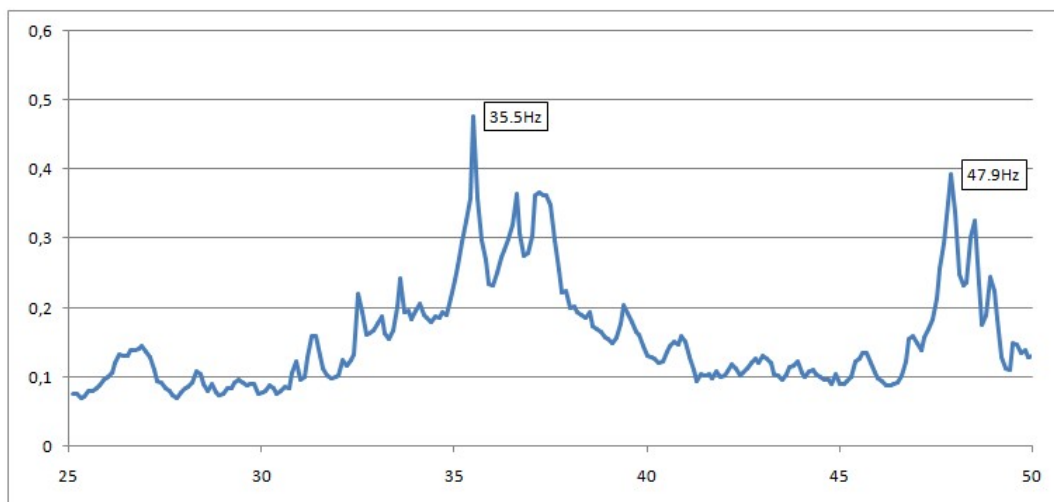
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κάθε περίπτωση που εξετάστηκε.

- Διαγώνιος διατομής L40.4 , με θεωρητική ιδιοσυχνότητα  $f=32.13\text{Hz}$ . Στο Σχήμα 3.22 φαίνεται πως οι πειραματικές μετρήσεις εκτιμούν για το μέλος ιδιοσυχνότητα  $f=34.10\text{Hz}$ . (6 μετρήσεις)
- Διαγώνιος διατομής L45.5 , με θεωρητική ιδιοσυχνότητα  $f=36.00\text{Hz}$ . Στο Σχήμα 3.23 φαίνεται πως οι πειραματικές μετρήσεις εκτιμούν για το μέλος ιδιοσυχνότητα  $f=35.50\text{Hz}$ . (12 μετρήσεις)
- Διαγώνιος διατομής L45.5 με CFRP , με εκτιμώμενη ιδιοσυχνότητα μεγαλύτερη της συχνότητας  $f=36.00\text{Hz}$ . Από το Σχήμα 3.24 προκύπτει πως οι πειραματικές μετρήσεις εκτιμούν για το μέλος ιδιοσυχνότητα  $f=38.10\text{Hz}$ . (13 μετρήσεις)
- Διαγώνιος διατομής L60.6 (1) , με θεωρητική ιδιοσυχνότητα  $f=48.42\text{Hz}$ . Στο Σχήμα 3.25 φαίνεται πως από τις πειραματικές μετρήσεις προκύπτει ως πιο χαρακτηριστική τιμή για το μέλος η ιδιοσυχνότητα  $f=50.4\text{Hz}$ . (15 μετρήσεις)
- Διαγώνιος διατομής L60.6 (2) , με θεωρητική ιδιοσυχνότητα  $f=48.42\text{Hz}$ . Στο Σχήμα 3.26 φαίνεται πως από τις πειραματικές μετρήσεις προκύπτει ως πιο χαρακτηριστική τιμή για το μέλος η ιδιοσυχνότητα  $f=50.6\text{Hz}$ . (15 μετρήσεις)

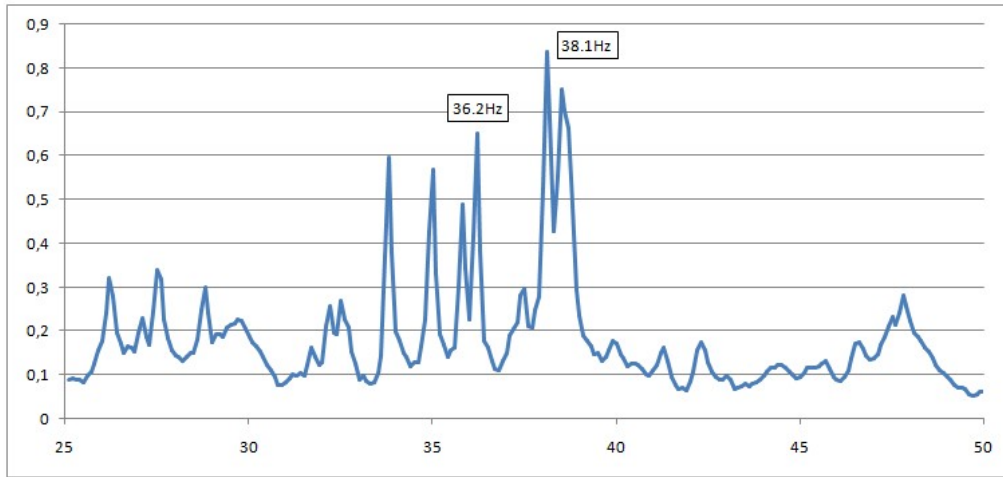
Επισημαίνεται πως για όλες τις περιπτώσεις εμφανίζεται το τμήμα του διαγράμματος στο οποίο εμφανίστηκαν οι βασικές συχνότητες για τις οποίες το διάγραμμα παίρνει τις μέγιστες τιμές. Το χρονικό βήμα των καταγραφών για όλες τις περιπτώσεις είναι  $dt=0.006\text{sec}$ .



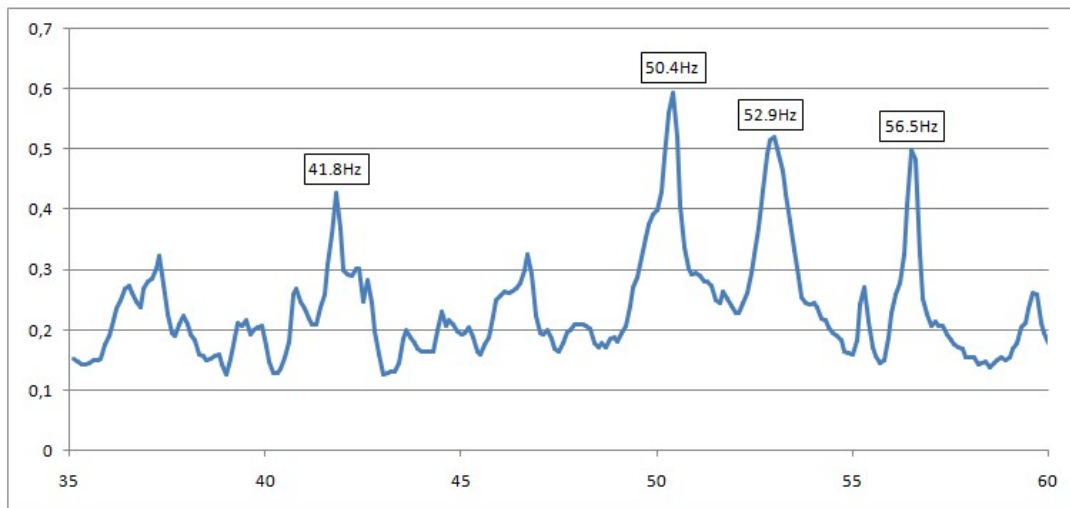
Σχήμα 3.22: Αποτελέσματα μετρήσεων για την ιδιοσυχνότητα στο μέλος διατομής L40.4 από το αντίστοιχο διάγραμμα  $\alpha-f(\text{Hz})$



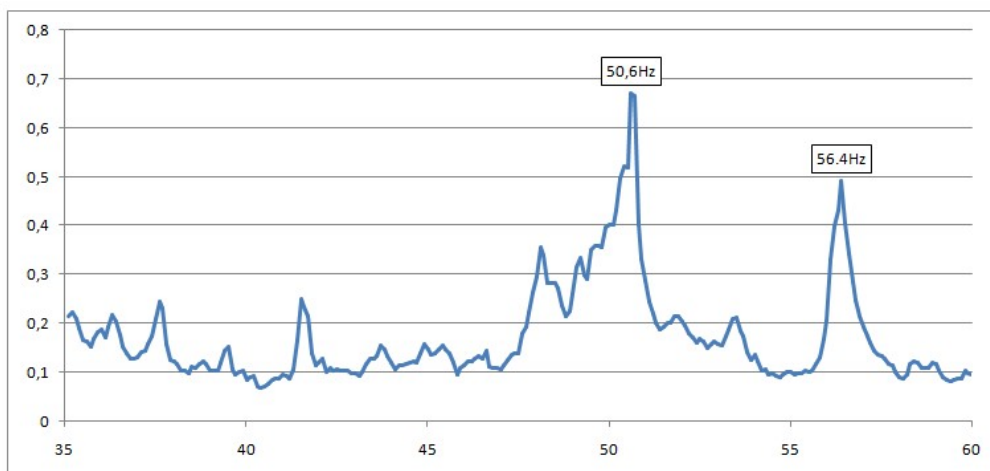
Σχήμα 3.23: Αποτελέσματα μετρήσεων για την ιδιοσυχνότητα στο μέλος διατομής L45.5 από το αντίστοιχο διάγραμμα  $\alpha-f(\text{Hz})$



Σχήμα 3.24 Αποτελέσματα μετρήσεων για την ιδιοσυχνότητα στο ενισχυμένο μέλος διατομής L45.5(CFRP) από το αντίστοιχο διάγραμμα  $\alpha$ - $f$ (Hz)



Σχήμα 3.25 Αποτελέσματα μετρήσεων για την ιδιοσυχνότητα στο μέλος διατομής L60.6 (1) από το αντίστοιχο διάγραμμα  $\alpha$ - $f$ (Hz)



Σχήμα 3.26 Αποτελέσματα μετρήσεων για την ιδιοσυχνότητα στο μέλος διατομής

### 3.5 Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται ξανά τα συνολικά αποτελέσματα για τους μεταλλικούς πύργους συγκεντρωμένα, ώστε να σχολιαστούν πιο αποτελεσματικά και να εξαχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα για την εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται στη παρούσα εργασία για την απευθείας μέτρηση της ιδιοσυχνότητας τους, αλλά και της ιδιοσυχνότητας κάποιων μεμονωμένων μελών που τους αποτελούν. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται αρχικά τα αποτελέσματα για την εκάστοτε βασική ιδιοσυχνότητα του κάθε πύργου, αναφερόμενοι στην ιδιοσυχνότητα του συνολικού φορέα.

Πίνακας 3.2: Τελικά αποτελέσματα για τους πύργους

Μεταλλικοί Πύργοι	Ιδιοσυχνότητες (Hz)		Διαφορά (%)
	Θεωρητικές Τιμές	Πειραματικές Μετρήσεις	
Πύργος 1 (L45.5)	16.65	19.40	16.52
Πύργος 2 (L65.7)	17.59	19.00	8.02
Πύργος 3 (L45.5/CFRP)	-	22.80	-
Πύργος 4 (L40.4)	15.67	19.90	26.99
Πύργος 5 (L60.6)	17.48	16.60	-5.03
Πύργος 6 (L60.6/CFRP)	-	14.50	-

Πρέπει να αναφερθεί πως για την εκτίμηση της βασικής ιδιοσυχνότητας των πύργων οι μετρήσεις ήταν αρκετά ασταθείς και λόγω της χρήσης μόνο ενός αισθητήρα είναι δύσκολο να διακρίνει κανείς πού αντιστοιχούν οι διαφορετικές ιδιοσυχνότητες που εμφανίζονται στα διαγράμματα. Όπως άλλωστε έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες σε ένα σύνθετο φορέα που αποτελείται από πολλά διαφορετικά μέλη πιθανώς στις καταγραφές να εμφανίζονται και συχνότητες που αντιστοιχούν και σε ταλαντώσεις μεμονωμένων μελών στο φορέα ή συχνότητες που αντιστοιχούν σε ανώτερης τάξης ιδιομορφές. Ίσως ακόμα να μην ήταν αρκετά αποτελεσματικός και ο τρόπος με τον οποίο επιβλήθηκε η διέγερση στη περίπτωση των πύργων, καθώς υπενθυμίζεται πως τα χτυπήματα δόθηκαν με τη χρήση ενός απλού σφυριού που πιθανώς να μην ήταν ικανά να προκαλέσουν ταλαντώσεις τέτοιες που θα ενεργοποιούσαν πραγματικά την φυσική ιδιοσυχνότητα που αντιστοιχεί στον συνολικό φορέα, ώστε αυτή να ξεχωρίσει με πιο ξεκάθαρο τρόπο στα διαγράμματα. Ακόμα και οι τιμές που τελικά επιλέγονται, τιμές που μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις απέχουν πολύ από αυτές που προβλέπουν οι θεωρητικές αναλύσεις, δεν μπορούν να χαρακτηριστούν επαρκώς αξιόπιστες και έχουν επιλεγεί ενδεικτικά ως οι πιο λογικές εκτιμήσεις που μπόρεσαν να γίνουν αξιολογώντας ταυτόχρονα αναλύσεις και πειραματικές μετρήσεις.



Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο Πίνακας 3.3 με τα αποτελέσματα που αφορούν στην πρόβλεψη των ιδιομορφών μεμονωμένων μελών, και συγκεκριμένα κάποιων διαγωνίων συνδέσμων, που αποτελούν μέλη διαφόρων πύργων. Υπενθυμίζεται πως η επιλογή των μελών έγινε δειγματοληπτικά με κριτήριο το να ελεγχθούν διάφορες διατομές από διαφορετικούς κάθε φορά πύργους.

Πίνακας 3.3: Τελικά αποτελέσματα για τα μεμονωμένα μέλη στους πύργους

Μεμονωμένοι διαγώνιοι σύνδεσμοι στους πύργους	Ιδιοσυχνότητες (Hz)		Διαφορά (%)
	Θεωρητικές Τιμές	Πειραματικές Μετρήσεις	
L40.4	32.13	34.10	6.13
L45.5	36.00	35.50	-1.39
L45.5-CFRP	-	38.10	-
L60.6 (1)	48.42	50.40	4.09
L60.6 (2)	48.42	50.60	4.50

Στη περίπτωση των μετρήσεων που στόχευαν στην εκτίμηση της ιδιοσυχνότητας κάποιων μεμονωμένων μελών η εικόνα είναι πολύ διαφορετική και ποιοτικά καλύτερη, καθώς παρατηρήθηκαν πολύ πιο σταθερά αποτελέσματα. Μάλιστα παρατηρείται πως τα αποτελέσματα αυτά είναι πολύ κοντά και στις θεωρητικές τιμές παρά τις θεωρήσεις που έγιναν, για παράδειγμα ως προς τις συνθήκες στήριξης των διαγωνίως που θεωρήθηκαν αρθρώσεις. Μάλιστα ακόμα και σε διαγράμματα που εμφανίστηκαν και άλλες συχνότητες, οι συχνότητες που φαίνονται στο πίνακα ήταν ξεκάθαρα οι πιο χαρακτηριστικές δείχνοντας πως η μέθοδος όταν χρησιμοποιείται σε πιο απλούς φορείς, όπως οι διαγώνιοι σύνδεσμοι στους πύργους, μπορεί πολύ πιο εύκολα να δώσει μια καλή εκτίμηση της δυσκαμψίας τους.

## 4 Σύμμικτες Δοκοί

### 4.1 Γενικά - Στατικό μοντέλο και τοποθέτηση αισθητήρα

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η ανάλυση των σύμμικτων δοκών που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ενώ αναφέρεται πως εξετάστηκαν συνολικά 5 διατομές διαφορετικών χαρακτηριστικών. Οι μετρήσεις με τον αισθητήρα πραγματοποιήθηκαν προφανώς με τον τρόπο που περιγράφεται στα αντίστοιχα κεφάλαια πράγμα που ισχύει και για την ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων αυτών. Το Σχήμα 4.2 παρουσιάζει το τυπικό στατικό μοντέλο που αντιστοιχεί στις σύμμικτες δοκούς που μελετήθηκαν καθώς και το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα ώστε να πραγματοποιηθούν αποτελεσματικά οι απαραίτητες μετρήσεις.



Εικόνες 4.1: Σύμμικτη δοκός στο χώρο του εργαστηρίου

Αναφέρεται πως η κάθε δοκός προσομοιώνεται σαν αμφιέρειστη δοκός μήκους  $L=7.2$  m , παρόλο που με βάση τον τρόπο που τοποθετήθηκε στο εργαστήριο είναι ουσιαστικά μία αμφιπρόεχουσα δοκός, γιατί οι πρόβολοι μετά τα σημεία στήριξης ήταν πολύ μικροί σε μήκος οπότε δεν επηρέασαν ουσιαστικά τη συμπεριφορά της δοκού ως προς τη στατική της θεώρηση. Σε κάθε περίπτωση είναι μία δυσμενέστερη επιλογή σε σχέση με τη σύγκριση που γίνεται στις επόμενες ενότητες μεταξύ των θεωρητικών αναλύσεων και της ανάλυσης των πειραματικών αποτελεσμάτων.



Εικόνες 4.2: Στατικό σύστημα για τις σύμμικτες δοκούς

Προφανώς και ο αισθητήρας τοποθετείται στο μέσο του ανοίγματος της δοκού, ενώ υπενθυμίζεται πως για την πρόκληση της ταλάντωσης της δοκού, ένας μέσου βάρους άνθρωπος ανέβαινε στη κάθε δοκό και μέσω μιας επί τόπου αναπήδησης η δοκός δεχόταν το απαραίτητο κρουστικό φορτίο ώστε να μπορέσει να ταλαντωθεί.

Με χρήση του προγράμματος Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2018 [8] πραγματοποιείται ιδιομορφική ανάλυση στο φορέα λαμβάνοντας υπόψη ως ιδιομορφική μάζα το ίδιο βάρος της κάθε δοκού με βάση τα χαρακτηριστικά της. Πρέπει να σημειωθεί πως για την ευκολότερη ανάλυση της κάθε δοκού ως προς την ιδιοσυχνότητά της και δεδομένου ότι ελέγχονται διάφορες περιπτώσεις για την δυσκαμψία της κάθε διατομής, θεωρώντας περιπτώσεις με τη διατομή αρηγμάτωτη και ρηγματωμένη, αφού υπολογιστεί αναλυτικά η δυσκαμψία για την κάθε περίπτωση στην εκάστοτε διατομή που εξετάζεται, ορίζεται μια ισοδύναμη συμπαγής, ορθογώνια και αβαρής διατομή για την αμφιέριστη δοκό και υπολογίζοντας και το αντίστοιχο ίδιο βάρος για τη κάθε περίπτωση, η ιδιομορφική ανάλυση γίνεται με αυτές τις παραμέτρους. Η θεώρηση αυτή δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης καθώς από τη στιγμή που ορίζεται σωστά η μάζα, η δυσκαμψία και το στατικό σύστημα η αναλυτική τιμή της ιδιοσυχνότητας θα είναι η σωστή, ενώ απλοποιείται αρκετά και το μοντέλο που χρησιμοποιείται.

Επίσης αξίζει να σημειωθεί πως αφού υπολογίζεται ούτως ή άλλως η δυσκαμψία  $I$  (σε  $\text{cm}^4$ ) της κάθε διατομής αναλυτικά, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και οι παρακάτω σχέσεις (Σχέσεις 4.1 και 4.2) για τον υπολογισμό της ιδιοσυχνότητας της κάθε δοκού.

$$K = \frac{16EI}{L^2} \quad (4.1)$$

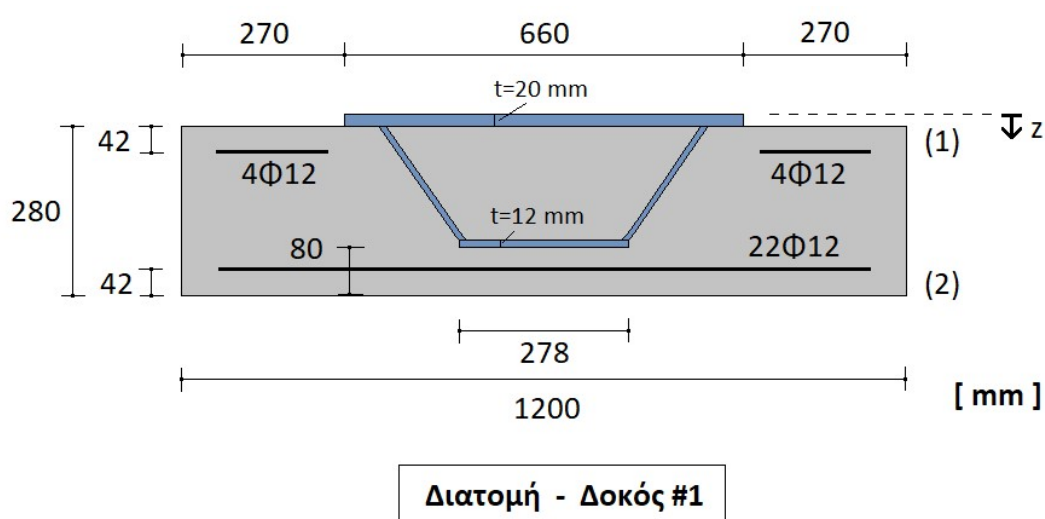
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (4.2)$$

Παρόλα αυτά θεωρήθηκε πως ακόμα και για έναν απλό στατικό φορέα σαν αυτόν που εξετάζεται, θα ήταν καλύτερη η δημιουργία ενός μοντέλου, ώστε να γίνουν οι υπολογισμοί αυτοί με μεγαλύτερη ακρίβεια, και καθώς η ιδιομορφική ανάλυση υπολογίζει και την ιδιοσυχνότητα για ανώτερης τάξης ιδιομορφές.

## 4.2 Αποτελέσματα Σύμμικτων Δοκών

### 4.2.1 Αποτελέσματα για τη σύμμικτη δοκό #1

Παρακάτω παρουσιάζεται μια τυπική διατομή για τη σύμμικτη δοκό που εξετάζεται στην ενότητα αυτή και ορίζεται ως διατομή 1.



Σχήμα 4.3 Διατομή σύμμικτης δοκού για την περίπτωση #1

Αναφέρεται πως στο Σχήμα 4.3 φαίνονται μόνο τα στοιχεία που απαιτούνται για την αναλυτική εκτίμηση της δυσκαμψίας της διατομής με βάση τα δεδομένα που διατέθηκαν από το εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών. Αρχικά αναφέρεται πως λαμβάνεται υπόψη τυπική τιμή για τον λόγο των μέτρων ελαστικότητας του χάλυβα προς αυτόν του σκυροδέματος:

$$\eta = E_a / E_c = 7.0 \quad (4.3)$$

θεωρώντας  $E_a=210\text{GPa}$  για το χάλυβα και  $E_c=30\text{GPa}$  για το σκυρόδεμα

Οι τιμές αυτές λαμβάνονται υπόψη ως τυπικές τιμές για τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών, ελλείψει περαιτέρω στοιχείων για τα ακριβή χαρακτηριστικά των υλικών κατά την περίοδο συγγραφής της παρούσας εργασίας, εξάλλου μικρές διαφορές στην τιμή του παραπάνω λόγου δεν μεταβάλλουν ιδιαίτερα

τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω. Παρουσιάζονται παρακάτω τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής, δηλαδή το εμβαδόν του εκάστοτε στοιχείου που αποτελεί τη διατομή και η απόσταση του κέντρου βάρους του από το σημείο αναφοράς που τέθηκε (άνω παρειά (1) στη διατομή, φαίνεται στο σχήμα).

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μεταλλικών ελασμάτων:

$$A_{a1} = 660 \cdot 20 = 13200 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{a1} = 10 \text{ mm}$$

$$A_{a2} = 278 \cdot 12 = 3336 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{a2} = 214 \text{ mm}$$

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαμήκους σπλισμού:

$$A_{s1} = 8 \cdot \pi \cdot \frac{12^2}{4} = 904.78 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{s1} = 62 \text{ mm}$$

$$A_{s2} = 22 \cdot \pi \cdot \frac{12^2}{4} = 2488.14 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{s2} = 258 \text{ mm}$$

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος:

$$A_c = 1200 \cdot 280 / \eta = 48000 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_c = 160 \text{ mm}$$

Γίνεται αναγωγή στα χαρακτηριστικά του χάλυβα, γι' αυτό και η διαίρεση στο εμβαδόν του σκυροδέματος με την τιμή του λόγου των μέτρων ελαστικότητας  $\eta$

Στη συνέχεια υπολογίζονται για την κάθε περίπτωση η θέση του κέντρου βάρους της διατομής και η συνολική δυσκαμψία της.

- Το κέντρο βάρους της διατομής προκύπτει με βάση την παρακάτω σχέση:

$$z_e = (A_{a1} \cdot z_{a1} + A_{a2} \cdot z_{a2} + A_{s1} \cdot z_{s1} + A_{s2} \cdot z_{s2} + A_c \cdot z_c) / A_e \quad (4.4)$$

$$\text{όπου: } A_e = A_{a1} + A_{a2} + A_{s1} + A_{s2} + A_c$$

- Η συνολική δυσκαμψία προκύπτει από τη σχέση:

$$I_e = I_{a1} + A_{a1} \cdot (z_{a1} - z_e)^2 + I_{a2} + A_{a2} \cdot (z_{a2} - z_e)^2 + A_{s1} \cdot (z_{s1} - z_e)^2 + \\ + A_{s2} \cdot (z_{s2} - z_e)^2 + I_c / \eta + A_c \cdot (z_c - z_e)^2 \quad (4.5)$$

- Υπενθυμίζεται ότι για ορθογώνιες διατομές η δυσκαμψία προκύπτει από τη σχέση:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4.6)$$

όπου  $b$ : το πλάτος της διατομής και

$h$ : το ύψος της διατομής

Με τη σχέση (4.6) υπολογίζονται οι δυσκαμψίες  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  και  $I_c$

Οι σχέσεις αυτές είναι λοιπόν που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας των διατομών που κάθε φορά ελέγχονται [2, 4]

Αναφέρεται στο σημείο αυτό και πάλι πως για κάθε διατομή υπολογίζεται και η δυσκαμψία της πλήρως αρηγμάτωτης διατομής αλλά και η δυσκαμψία με θεώρηση ρηγματωμένης διατομής. Μάλιστα επειδή η δυσκαμψία της ρηγματωμένης διατομής, και άρα η ιδιοσυχνότητα που προκύπτει από αυτή, συγκρίνεται με τη ιδιοσυχνότητα της δοκού που προκύπτει για τις μετρήσεις μετά το πείραμα αντοχής που διενεργήθηκε σε αυτή, και άρα αναφέρεται στη δοκό μετά την αστοχία της (ή έστω σε μια κατάσταση εκτεταμένης ρηγμάτωσης), όπου γίνεται αναφορά σε ρηγματωμένη διατομή θεωρείται ότι αγνοείται τελείως η συμβολή του σκυροδέματος στη διατομή. Αυτό μάλιστα είναι μεν μια απλοποίηση αλλά στις περισσότερες δοκούς που εξετάζονται στη παρούσα εργασία, οι διατομές έχουν στο πάνω μέρος τους ένα έλασμα αρκετά μεγάλου πάχους, με συνέπεια η θλιπτική δύναμη που επιβάλλεται στη διατομή λόγω της κάμψης μέσα από το ζεύγος δυνάμεων που προκύπτει, να παραλαμβάνεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από το χαλύβδινο έλασμα με το σκυρόδεμα να είναι ρηγματωμένο.

Παρουσιάζονται λοιπόν τα παρακάτω αποτελέσματα για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών δυσκαμψίας της δοκού #1:

- Δυσκαμψία Αρηγμάτωτης διατομής

Από τις σχέσεις (4.4), (4.5) και (4.6) προκύπτει:

$$z_e = 135.79 \text{ mm}^2$$

$$I_e = 613572471 \text{ mm}^4 = 61357.25 \text{ cm}^4$$

Άρα για την επίλυση στο μοντέλο θεωρείται ισοδύναμη τετραγωνική διατομή πλευράς  $b = 29.30 \text{ cm}$ . Γνωρίζοντας το μήκος του ανοίγματος και έχοντας το στατικό σύστημα (αμφιέριστη δοκός) αρκεί να υπολογιστεί η ιδιομορφική μάζα  $m$ , η οποία προκύπτει από τον υπολογισμό του φορτίου λόγω του ίδιου βάρους της δοκού ανά μέτρο μήκους. Συνεπώς προκύπτει:

$$g = (A_{a1} + A_{a2} + A_{s1} + A_{s2}) * \gamma_a + A_c * \gamma_c \quad (4.7)$$

όπου  $\gamma_a = 78.5 \text{ kN/m}^3$  , ειδικό βάρος χάλυβα

$\gamma_c = 25.0 \text{ kN/m}^3$  , ειδικό βάρος σκυροδέματος

Άρα  $g_I = 9.96 \text{ kN / m}$

Επίσης στο βάρος αυτό θα προστεθεί το πρόσθετο βάρος των μεταλλικών κορμών, του εγκάρσιου οπλισμού και του οπλισμού διάτμησης που εκτιμήθηκε με βάση τα στοιχεία που διατέθηκαν για τη δοκό και προκύπτει:

$$g'_I = 0.19 + 0.15 + 0.34 = 0.68 \text{ kN / m}$$

Άρα το φορτίο προκύπτει:

$$G = 9.96 + 0.68 = 10.64 \text{ kN / m}$$

Και τελικά η ιδιομορφική μάζα θα είναι:

$$m = G * L / g = 10.64 * 7.2 / 10 = 7.66 \text{ Mgr} \quad (4.8)$$

όπου:  $g = 10 \text{ m/sec}^2$  , η επιτάχυνση της βαρύτητας

Τελικά η θεωρητική ιδιοσυχνότητα που εκτιμάται από το μοντέλο για τη δοκό 1 , με θεώρηση αρηγμάτωτης διατομής, προκύπτει να είναι η τιμή:  $f = 11.62 \text{ Hz}$

#### - Δυσκαμψία Ρηγματωμένης διατομής

Με τις ίδιες σχέσεις (4.4) , (4.5) και (4.6) αλλά αγνοώντας το σκυρόδεμα, δηλαδή για  $A_c = 0$  και  $I_c = 0$  , προκύπτει:

$$z_e = 77.47 \text{ mm}^2$$

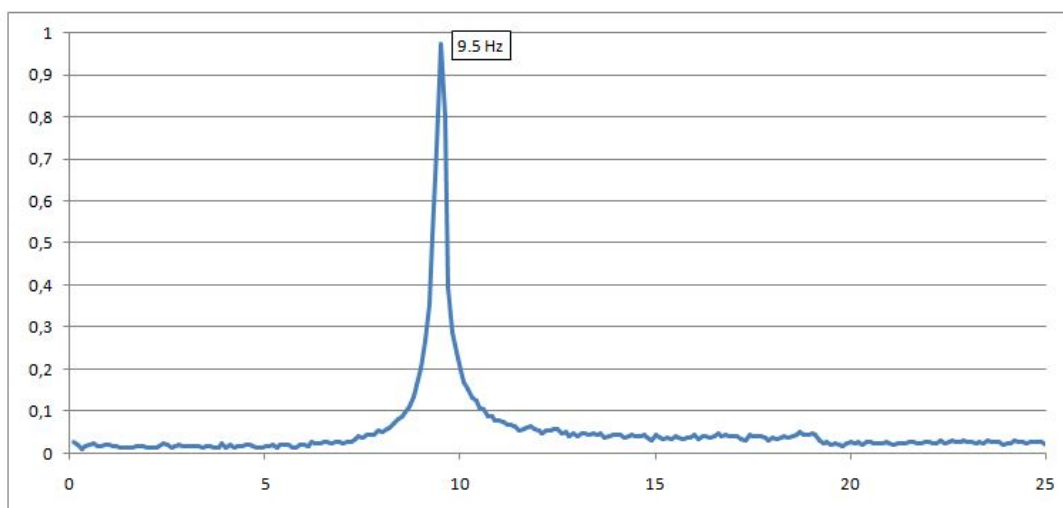
$$I_e = 204061344 \text{ mm}^4 = 20406.13 \text{ cm}^4$$

Άρα για την επίλυση στο μοντέλο θεωρείται ισοδύναμη τετραγωνική διατομή πλευράς  $b = 22.25 \text{ cm}$ . Το ίδιο βάρος  $G = 10.64 \text{ kN / m}$  προφανώς και δεν αλλάζει για την περίπτωση αυτή καθώς το βάρος του σκυροδέματος λαμβάνεται κανονικά υπόψη. Άρα και πάλι η μάζα εκτιμάται στα  $m = 7.66 \text{ Mgr}$

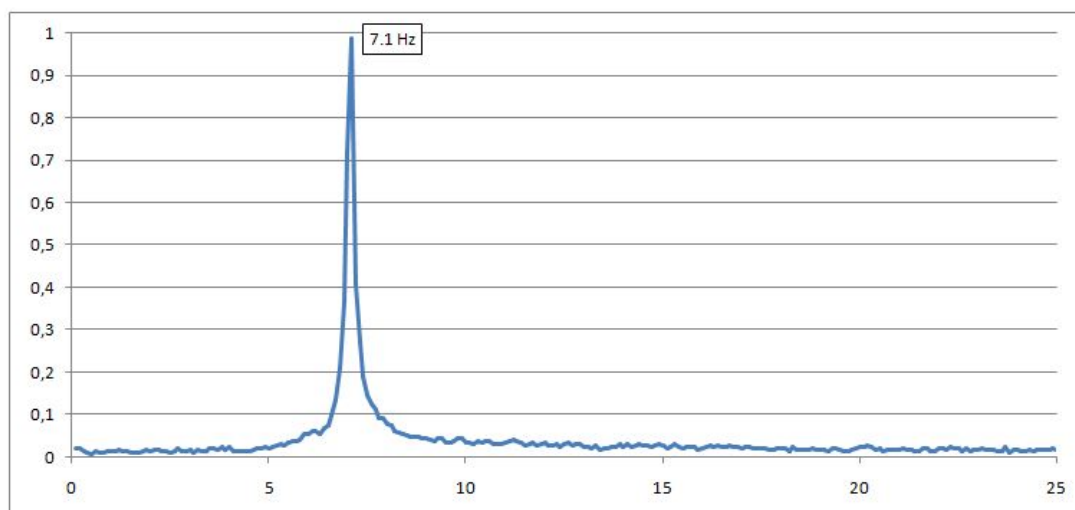
Τελικά η θεωρητική ιδιοσυχνότητα που εκτιμάται από το μοντέλο για τη δοκό 1, με θεώρηση ρηγματωμένης διατομής, προκύπτει να είναι η τιμή:  $f = 6.73 \text{ Hz}$ .

## Πειραματικά αποτελέσματα για τη δοκό 1

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $a-f(\text{Hz})$  με τις συχνότητες που εμφανίστηκαν ως σημαντικές στις μετρήσεις που έγιναν στην σύμμικτη δοκό 1. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πριν η δοκός υποβληθεί στα πειράματα αντοχής που έγιναν στο εργαστήριο ενώ στο Σχήμα 4.5 τα αποτελέσματα αναφέρονται στην δοκό μετά τα πειράματα.



Σχήμα 4.4: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στην Δοκό 1 πριν το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$



Σχήμα 4.5: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στην Δοκό 1 μετά το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$

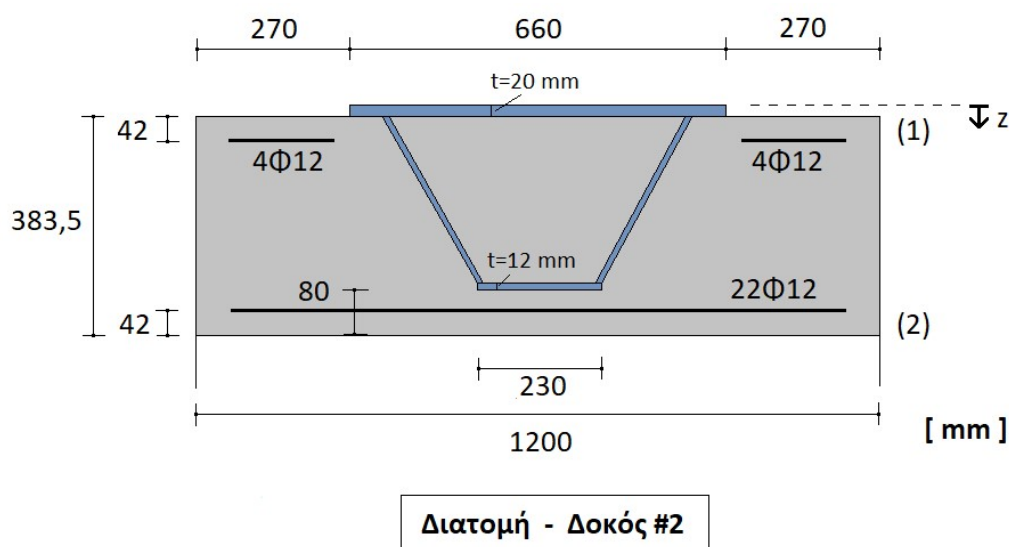
Από τα διαγράμματα φαίνεται πως τα αποτελέσματα είναι ξεκάθαρα και πως γενικά υπάρχει σύγκλιση σε συγκεκριμένες τιμές κάθε φορά για την ιδιοσυχνότητα της δοκού 1 σε κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα για την περίπτωση πριν το πείραμα προκύπτει πως η ιδιοσυχνότητα είναι  $f = 9.5 \text{ Hz}$ , ενώ αντίστοιχα η ιδιοσυχνότητα μετά το πείραμα προέκυψε να είναι  $f = 7.1 \text{ Hz}$ . Σημειώνεται πως τα πιο πάνω



διαγράμματα προέκυψαν μετά από ανάλυση 12 μετρήσεων (acceleration data) στη δοκό 1 πριν το πείραμα και 10 μετρήσεων μετά, ενώ το χρονικό βήμα στις καταγραφές είναι  $dt=0.0060$  sec.

## 4.2.2 Αποτελέσματα για τη σύμμικτη δοκό #2

Παρακάτω παρουσιάζεται μια τυπική διατομή για τη σύμμικτη δοκό που εξετάζεται στην ενότητα αυτή και ορίζεται ως διατομή 2.



Σχήμα 4.6 Διατομή σύμμικτης δοκού για την περίπτωση #2

Αναφέρεται πως στο Σχήμα 4.6 φαίνονται μόνο τα στοιχεία που απαιτούνται για την αναλυτική εκτίμηση της δυσκαμψίας της διατομής με βάση τα δεδομένα που διατέθηκαν. Παρουσιάζονται παρακάτω τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής, δηλαδή το εμβαδόν του εκάστοτε στοιχείου που αποτελεί τη διατομή και η απόσταση του κέντρου βάρους του από το σημείο αναφοράς που τέθηκε (άνω παρειά (1) στη διατομή, φαίνεται στο σχήμα).

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μεταλλικών ελασμάτων:

$$A_{a1} = 660 \cdot 20 = 13200 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{a1} = 10 \text{ mm}$$

$$A_{a2} = 230 \cdot 12 = 2760 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{a2} = 317.5 \text{ mm}$$

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαμήκους οπλισμού:

$$A_{s1} = 8 * \pi * \frac{12^2}{4} = 904.78 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{s1} = 62 \text{ mm}$$

$$A_{s2} = 22 * \pi * \frac{12^2}{4} = 2488.14 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{s2} = 361.5 \text{ mm}$$

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος:

$$A_c = 1200 * 383.5 / \eta = 65742.86 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_c = 211.75 \text{ mm}$$

Γίνεται αναγωγή στα χαρακτηριστικά του χάλυβα, γι' αυτό και η διαίρεση στο εμβαδόν του σκυροδέματος με την τιμή του λόγου των μέτρων ελαστικότητας, η τιμή του είναι  $\eta = 7.0$

Στη συνέχεια υπολογίζονται για την κάθε περίπτωση η θέση του κέντρου βάρους της διατομής και η συνολική δυσκαμψία της με βάση τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.2.1 [2, 4].

- Δυσκαμψία Αρηγμάτωτης διατομής

Από τις σχέσεις (4.4), (4.5) και (4.6) προκύπτει:

$$z_e = 186.67 \text{ mm}^2$$

$$I_e = 1396929326 \text{ mm}^4 = 139692.93 \text{ cm}^4$$

Άρα για την επίλυση στο μοντέλο θεωρείται ισοδύναμη τετραγωνική διατομή πλευράς  $b = 35.98 \text{ cm}$ . Γνωρίζοντας το μήκος του ανοίγματος και έχοντας το στατικό σύστημα (αμφιέριστη δοκός) αρκεί να υπολογιστεί η ιδιομορφική μάζα  $m$ , η οποία προκύπτει από τον υπολογισμό του φορτίου λόγω του ίδιου βάρους της δοκού ανά μέτρο μήκους. Συνεπώς προκύπτει (Σχέση 4.7):

$$g = (A_{a1} + A_{a2} + A_{s1} + A_{s2}) * \gamma_a + A_c * \gamma_c \quad (4.7)$$

όπου  $\gamma_a = 78.5 \text{ kN/m}^3$ , ειδικό βάρος χάλυβα

$\gamma_c = 25.0 \text{ kN/m}^3$ , ειδικό βάρος σκυροδέματος

Άρα  $g_2 = 13.02 \text{ kN/m}$

Επίσης στο βάρος αυτό θα προστεθεί το πρόσθετο βάρος των μεταλλικών κορμών, του εγκάρσιου οπλισμού και του οπλισμού διάτμησης που εκτιμήθηκε με βάση τα στοιχεία που διατέθηκαν για τη δοκό και προκύπτει:

$$g'_2 = 0.19 + 0.15 + 0.34 = 0.68 \text{ kN/m}$$

Άρα το φορτίο προκύπτει:

$$G = 13.02 + 0.68 = 13.70 \text{ kN / m}$$

Και τελικά η ιδιομορφική μάζα θα είναι (Σχέση 4.8):

$$m = G * L / g = 13.70 * 7.2 / 10 = 9.87 \text{ Mgr} \quad (4.8)$$

όπου:  $g = 10 \text{ m/sec}^2$  , η επιτάχυνση της βαρύτητας

Τελικά η θεωρητική ιδιοσυχνότητα που εκτιμάται από το μοντέλο για τη δοκό 2 , με θεώρηση αρηγματώτης διατομής, προκύπτει να είναι η τιμή:  $f = 15.41 \text{ Hz}$

#### - Δυσκαμψία Ρηγματωμένης διατομής

Με τις ίδιες σχέσεις (4.4) , (4.5) και (4.6) αλλά αγνοώντας το σκυρόδεμα, δηλαδή για  $A_c = 0$  και  $I_c = 0$  , προκύπτει:

$$z_e = 101.48 \text{ mm}^2$$

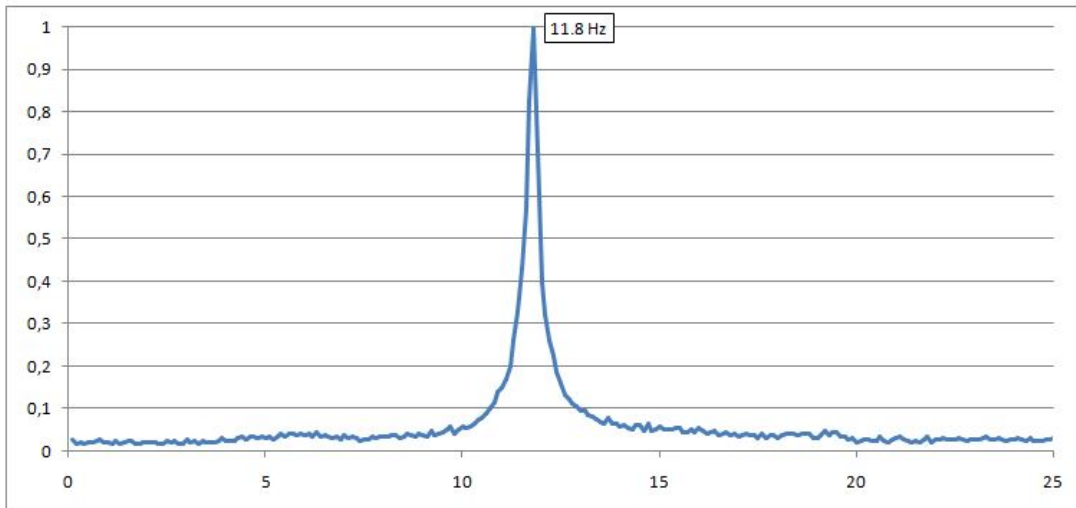
$$I_e = 409367407 \text{ mm}^4 = 40936.74 \text{ cm}^4$$

Άρα για την επίλυση στο μοντέλο θεωρείται ισοδύναμη τετραγωνική διατομή πλευράς  $b = 26.47 \text{ cm}$ . Το ίδιο βάρος  $G = 13.70 \text{ kN / m}$  προφανώς και δεν αλλάζει για την περίπτωση αυτή καθώς το βάρος του σκυροδέματος λαμβάνεται κανονικά υπόψη. Άρα και πάλι η μάζα εκτιμάται στα  $m = 9.87 \text{ Mgr}$

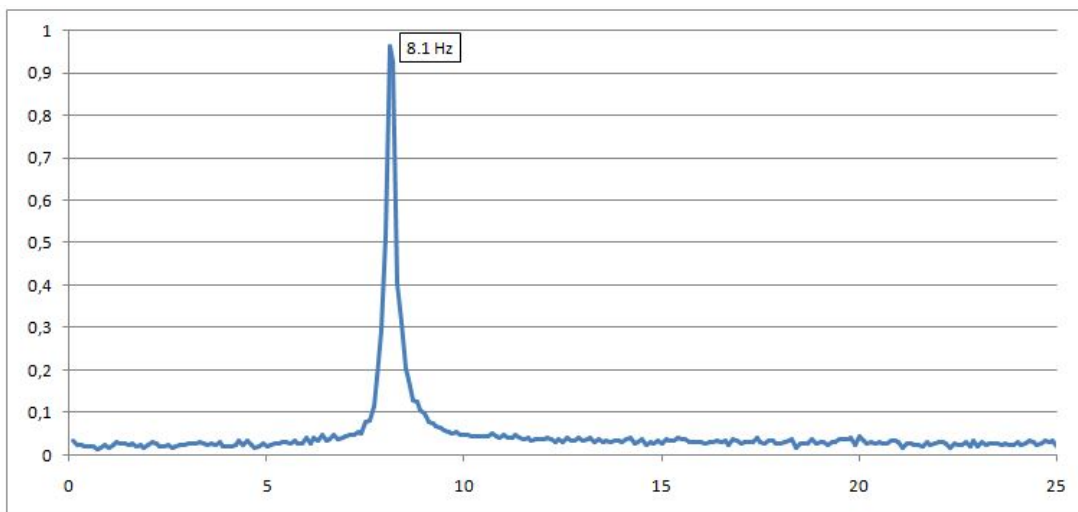
Τελικά η θεωρητική ιδιοσυχνότητα που εκτιμάται από το μοντέλο για τη δοκό 2 , με θεώρηση ρηγματωμένης διατομής, προκύπτει να είναι η τιμή:  $f = 8.36 \text{ Hz}$

#### Πειραματικά αποτελέσματα για τη δοκό 2

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $a-f(\text{Hz})$  με τις συχνότητες που εμφανίστηκαν ως σημαντικές στις μετρήσεις που έγιναν στην σύμμικτη δοκό 2. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πριν η δοκός υποβληθεί στα πειράματα αντοχής που έγιναν στο εργαστήριο ενώ στο Σχήμα 4.8 τα αποτελέσματα αναφέρονται στην δοκό μετά τα πειράματα.



Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στην Δοκό 2 πριν το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$

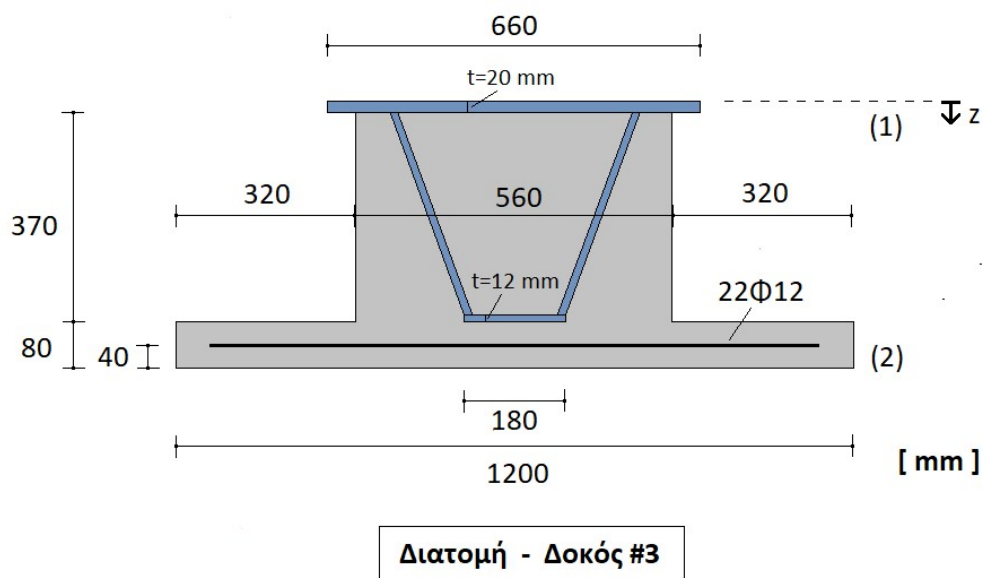


Σχήμα 4.8: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στην Δοκό 2 μετά το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$

Από τα διαγράμματα φαίνεται πως τα αποτελέσματα είναι ξεκάθαρα και πως γενικά υπάρχει σύγκλιση σε συγκεκριμένες τιμές κάθε φορά για την ιδιοσυχνότητα της δοκού 2 σε κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα για την περίπτωση πριν το πείραμα προκύπτει πως η ιδιοσυχνότητα είναι  $f = 11.8 \text{ Hz}$ , ενώ αντίστοιχα η ιδιοσυχνότητα μετά το πείραμα προέκυψε να είναι  $f = 8.1 \text{ Hz}$ . Σημειώνεται πως τα πιο πάνω διαγράμματα προέκυψαν μετά από ανάλυση 15 μετρήσεων (acceleration data) στη δοκό 2 πριν το πείραμα και 10 μετρήσεων μετά, ενώ το χρονικό βήμα στις καταγραφών είναι  $dt=0.0060 \text{ sec}$ .

### 4.2.3 Αποτελέσματα για τη σύμμικτη δοκό #3

Παρακάτω παρουσιάζεται μια τυπική διατομή για τη σύμμικτη δοκό που εξετάζεται στην ενότητα αυτή και ορίζεται ως διατομή 3.



Σχήμα 4.9 Διατομή σύμμικτης δοκού για την περίπτωση #3

Αναφέρεται πως στο Σχήμα 4.9 φαίνονται μόνο τα στοιχεία που απαιτούνται για την αναλυτική εκτίμηση της δυσκαμψίας της διατομής με βάση τα δεδομένα που διατέθηκαν. Παρουσιάζονται παρακάτω τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής, δηλαδή το εμβαδόν του εκάστοτε στοιχείου που αποτελεί τη διατομή και η απόσταση του κέντρου βάρους του από το σημείο αναφοράς που τέθηκε (άνω παρειά (1) στη διατομή, φαίνεται στο σχήμα).

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μεταλλικών ελασμάτων:

$$A_{a1} = 660 \cdot 20 = 13200 \text{ mm}^2, \quad z_{a1} = 10 \text{ mm}$$

$$A_{a2} = 180 \cdot 12 = 2160 \text{ mm}^2, \quad z_{a2} = 384 \text{ mm}$$

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαμήκους οπλισμού:

$$A_{s2} = 22 \cdot \pi \cdot \frac{12^2}{4} = 2488.14 \text{ mm}^2, \quad z_{s2} = 430 \text{ mm}$$

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος:

$$A_{c1} = 560 \cdot 370 / \eta = 29600 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{c1} = 205 \text{ mm}$$

$$A_{c2} = 1200 \cdot 80 / \eta = 13714.29 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{c2} = 430 \text{ mm}$$

Γίνεται αναγωγή στα χαρακτηριστικά του χάλυβα, γι' αυτό και η διαίρεση στο εμβαδόν του σκυροδέματος με την τιμή του λόγου των μέτρων ελαστικότητας, η τιμή του είναι  $\eta = 7.0$

Στη συνέχεια υπολογίζονται για την κάθε περίπτωση η θέση του κέντρου βάρους της διατομής και η συνολική δυσκαμψία της με βάση τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.2.1 [2, 4]. Στη περίπτωση αυτή βέβαια υπάρχει η διαφορά ότι υπάρχει διαμήκης οπλισμός μόνο στη κάτω παρειά (2) της διατομής ενώ το σκυρόδεμα για τους υπολογισμούς χωρίζεται σε δύο μέρη. Αυτό προφανώς αλλάζει αντίστοιχα τους τύπους που έχουν παρουσιαστεί, αλλά οι διαφορές είναι προφανείς και δεν έχει νόημα να παρουσιαστούν ξανά οι τύποι για τους υπολογισμούς.

- Δυσκαμψία Αρηγμάτωτης διατομής

Από τις σχέσεις (4.4), (4.5) και (4.6) (με τις αντίστοιχες μετατροπές) προκύπτει:

$$z_e = 228.84 \text{ mm}^2$$

$$I_e = 1702088387 \text{ mm}^4 = 170208.84 \text{ cm}^4$$

Άρα για την επίλυση στο μοντέλο θεωρείται ισοδύναμη τετραγωνική διατομή πλευράς  $b = 37.80 \text{ cm}$ . Γνωρίζοντας το μήκος του ανοίγματος και έχοντας το στατικό σύστημα (αμφιέριστη δοκός) αρκεί να υπολογιστεί η ιδιομορφική μάζα  $m$ , η οποία προκύπτει από τον υπολογισμό του φορτίου λόγω του ίδιου βάρους της δοκού ανά μέτρο μήκους. Συνεπώς προκύπτει:

$$g = (A_{a1} + A_{a2} + A_{s2}) \cdot \gamma_a + (A_{c1} + A_{c2}) \cdot \gamma_c \quad (4.9)$$

όπου  $\gamma_a = 78.5 \text{ kN/m}^3$ , ειδικό βάρος χάλυβα

$\gamma_c = 25.0 \text{ kN/m}^3$ , ειδικό βάρος σκυροδέματος

Άρα  $g_3 = 8.98 \text{ kN/m}$

Επίσης στο βάρος αυτό θα προστεθεί το πρόσθετο βάρος των μεταλλικών κορμών, του εγκάρσιου οπλισμού και του οπλισμού διάτμησης που εκτιμήθηκε με βάση τα στοιχεία που διατέθηκαν για τη δοκό και προκύπτει:

$$g'_3 = 0.19 + 0.15 + 0.34 = 0.68 \text{ kN/m}$$

Άρα το φορτίο προκύπτει:

$$G = 8.98 + 0.68 = 9.66 \text{ kN / m}$$

Και τελικά η ιδιομορφική μάζα θα είναι (Σχέση 4.8):

$$m = G * L / g = 9.66 * 7.2 / 10 = 6.96 \text{ Mgr} \quad (4.8)$$

όπου:  $g = 10 \text{ m/sec}^2$  , η επιτάχυνση της βαρύτητας

Τελικά η θεωρητική ιδιοσυχνότητα που εκτιμάται από το μοντέλο για τη δοκό 3 , με θεώρηση αρηγμάτωτης διατομής, προκύπτει να είναι η τιμή:  $f = 20.21 \text{ Hz}$

#### - Δυσκαμψία Ρηγματωμένης διατομής

Με τις ίδιες σχέσεις (4.4) , (4.5) και (4.6) (με τις αντίστοιχες μετατροπές) αλλά αγνοώντας το σκυρόδεμα, δηλαδή για  $A_c = 0$  και  $I_c = 0$  , προκύπτει:

$$z_e = 113.81 \text{ mm}^2$$

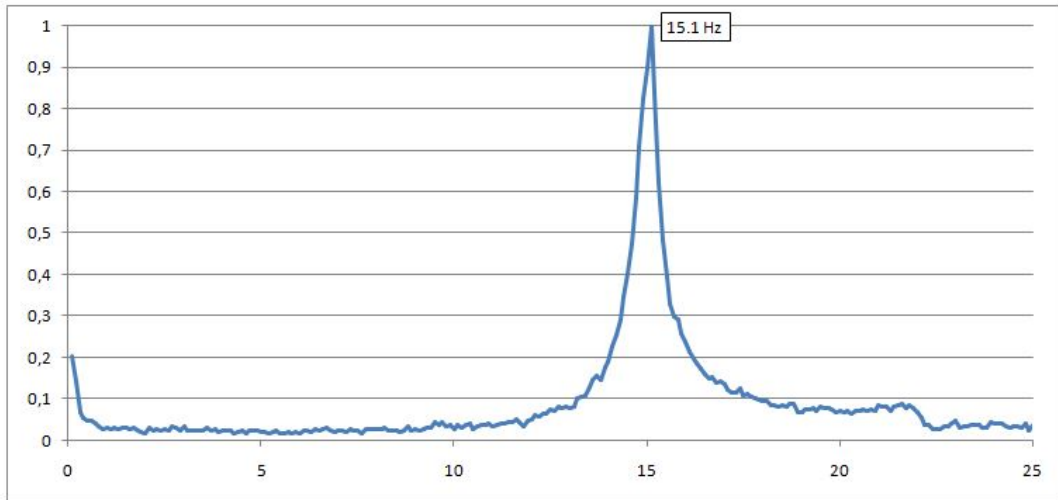
$$I_e = 549156338 \text{ mm}^4 = 54915.63 \text{ cm}^4$$

Άρα για την επίλυση στο μοντέλο θεωρείται ισοδύναμη τετραγωνική διατομή πλευράς  $b = 28.49 \text{ cm}$ . Το ίδιο βάρος  $G = 9.66 \text{ kN / m}$  προφανώς και δεν αλλάζει για την περίπτωση αυτή καθώς το βάρος του σκυροδέματος λαμβάνεται κανονικά υπόψη. Άρα και πάλι η μάζα εκτιμάται στα  $m = 6.96 \text{ Mgr}$

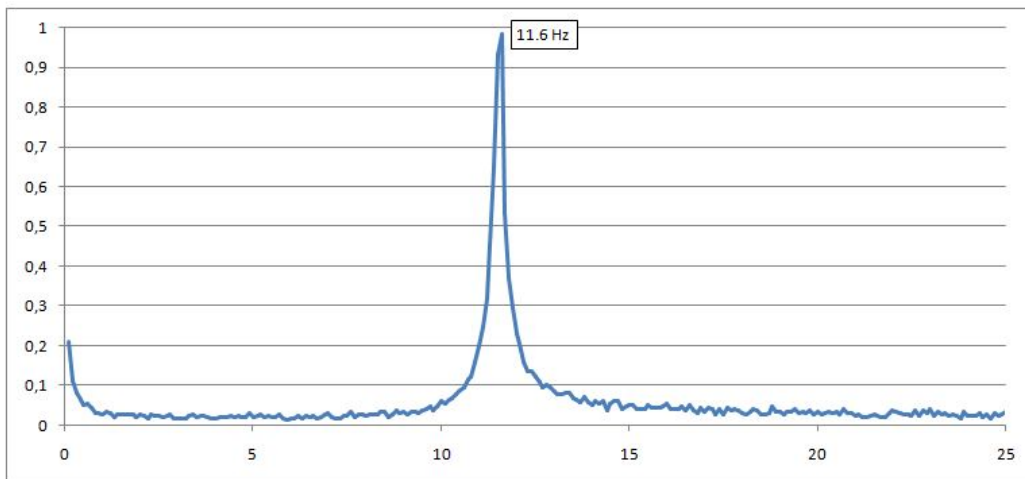
Τελικά η θεωρητική ιδιοσυχνότητα που εκτιμάται από το μοντέλο για τη δοκό 3, με θεώρηση ρηγματωμένης διατομής, προκύπτει να είναι η τιμή:  $f = 11.49 \text{ Hz}$

#### Πειραματικά αποτελέσματα για τη δοκό 3

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $a-f(\text{Hz})$  με τις συχνότητες που εμφανίστηκαν ως σημαντικές στις μετρήσεις που έγιναν στην σύμμικτη δοκό 3. Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πριν η δοκός υποβληθεί στα πειράματα αντοχής που έγιναν στο εργαστήριο ενώ στο Σχήμα 4.11 τα αποτελέσματα αναφέρονται στην δοκό μετά το πείραμα.



Διάγραμμα 4.10: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στην Δοκό 3 πριν το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$



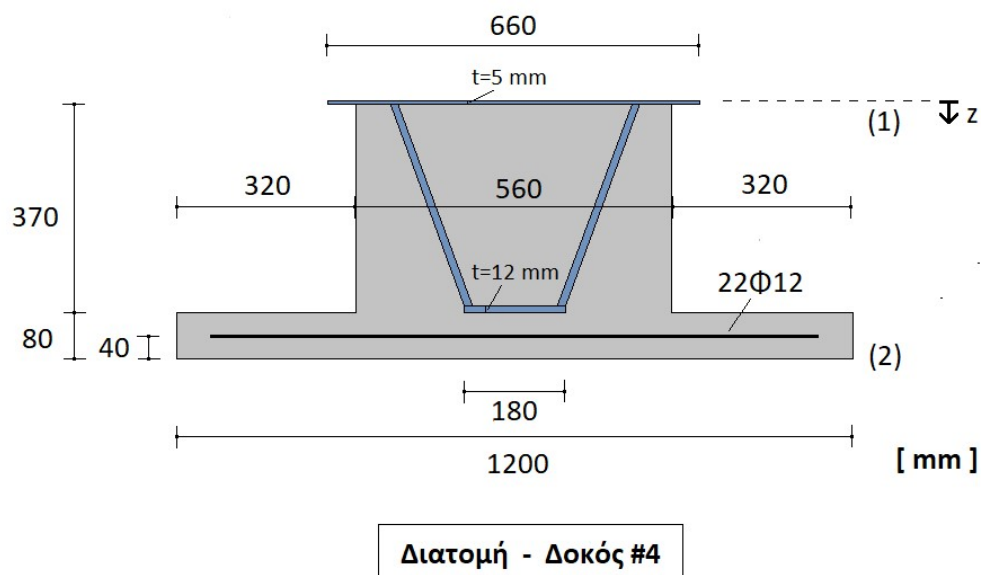
Σχήμα 4.11: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στην Δοκό 3 μετά το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$

Από τα διαγράμματα φαίνεται πως τα αποτελέσματα είναι ξεκάθαρα και πως γενικά υπάρχει σύγκλιση σε συγκεκριμένες τιμές κάθε φορά για την ιδιοσυχνότητα της δοκού 3 σε κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα για την περίπτωση πριν το πείραμα προκύπτει πως η ιδιοσυχνότητα είναι  $f = 15.1 \text{ Hz}$ , ενώ αντίστοιχα η ιδιοσυχνότητα μετά το πείραμα προέκυψε να είναι  $f = 11.6 \text{ Hz}$ . Σημειώνεται πως τα πιο πάνω διαγράμματα προέκυψαν μετά από ανάλυση 10 μετρήσεων (acceleration data) στη δοκό 3 πριν το πείραμα και 10 μετρήσεων μετά, ενώ το χρονικό βήμα στις καταγραφών είναι  $dt=0.0060 \text{ sec}$ .



#### 4.2.4 Αποτελέσματα για τη σύμμικτη δοκό #4

Παρακάτω παρουσιάζεται μια τυπική διατομή για τη σύμμικτη δοκό που εξετάζεται στην ενότητα αυτή και ορίζεται ως διατομή 4.



Σχήμα 4.12 Διατομή σύμμικτης δοκού για την περίπτωση #4

Αναφέρεται πως στο Σχήμα 4.12 φαίνονται μόνο τα στοιχεία που απαιτούνται για την αναλυτική εκτίμηση της δυσκαμψίας της διατομής με βάση τα δεδομένα που διατέθηκαν. Παρουσιάζονται παρακάτω τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής, δηλαδή το εμβαδόν του εκάστοτε στοιχείου που αποτελεί τη διατομή και η απόσταση του κέντρου βάρους του από το σημείο αναφοράς που τέθηκε (άνω παρειά (1) στη διατομή, φαίνεται στο σχήμα).

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μεταλλικών ελασμάτων:

$$A_{a1} = 660 \cdot 5 = 3300 \text{ mm}^2, \quad z_{a1} = 2.5 \text{ mm}$$

$$A_{a2} = 180 \cdot 12 = 2160 \text{ mm}^2, \quad z_{a2} = 369 \text{ mm}$$

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαμήκους οπλισμού:

$$A_{s2} = 22 \cdot \pi \cdot \frac{12^2}{4} = 2488.14 \text{ mm}^2, \quad z_{s2} = 415 \text{ mm}$$

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος:

$$A_{c1} = 560 \cdot 370 / \eta = 29600 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{c1} = 190 \text{ mm}$$

$$A_{c2} = 1200 \cdot 80 / \eta = 13714.29 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{c2} = 415 \text{ mm}$$

Γίνεται αναγωγή στα χαρακτηριστικά του χάλυβα, γι' αυτό και η διαίρεση στο εμβαδόν του σκυροδέματος με την τιμή του λόγου των μέτρων ελαστικότητας, η τιμή του είναι  $\eta = 7.0$ .

Στη συνέχεια υπολογίζονται για την κάθε περίπτωση η θέση του κέντρου βάρους της διατομής και η συνολική δυσκαμψία της με βάση τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.2.1 [2, 4]. Στη περίπτωση αυτή βέβαια υπάρχει η διαφορά ότι υπάρχει διαμήκης οπλισμός μόνο στη κάτω παρειά (2) της διατομής ενώ το σκυρόδεμα για τους υπολογισμούς χωρίζεται σε δύο μέρη. Αυτό προφανώς αλλάζει αντίστοιχα τους τύπους που έχουν παρουσιαστεί, αλλά οι διαφορές είναι προφανείς και δεν έχει νόημα να παρουσιαστούν ξανά οι τύποι για τους υπολογισμούς.

- Δυσκαμψία Αρηγμάτωτης διατομής

Από τις σχέσεις (4.4), (4.5) και (4.6) (με τις αντίστοιχες μετατροπές) προκύπτει:

$$z_e = 256.59 \text{ mm}^2$$

$$I_e = 1123213679 \text{ mm}^4 = 112321.37 \text{ cm}^4$$

Άρα για την επίλυση στο μοντέλο θεωρείται ισοδύναμη τετραγωνική διατομή πλευράς  $b = 34.07 \text{ cm}$ . Γνωρίζοντας το μήκος του ανοίγματος και έχοντας το στατικό σύστημα (αμφιέριστη δοκός) αρκεί να υπολογιστεί η ιδιομορφική μάζα  $m$ , η οποία προκύπτει από τον υπολογισμό του φορτίου λόγω του ίδιου βάρους της δοκού ανά μέτρο μήκους. Συνεπώς προκύπτει (Σχέση 4.9):

$$g = (A_{a1} + A_{a2} + A_{s2}) \cdot \gamma_a + (A_{c1} + A_{c2}) \cdot \gamma_c \quad (4.9)$$

όπου  $\gamma_a = 78.5 \text{ kN/m}^3$ , ειδικό βάρος χάλυβα

$\gamma_c = 25.0 \text{ kN/m}^3$ , ειδικό βάρος σκυροδέματος

Άρα  $g_4 = 8.20 \text{ kN/m}$

Επίσης στο βάρος αυτό θα προστεθεί το πρόσθετο βάρος των μεταλλικών κορμών, του εγκάρσιου οπλισμού και του οπλισμού διάτμησης που εκτιμήθηκε με βάση τα στοιχεία που διατέθηκαν για τη δοκό και προκύπτει:

$$g'_4 = 0.19 + 0.15 + 0.34 = 0.68 \text{ kN/m}$$

Άρα το φορτίο προκύπτει:

$$G = 8.20 + 0.68 = 8.88 \text{ kN / m}$$

Και τελικά η ιδιομορφική μάζα θα είναι (Σχέση 4.8):

$$m = G * L / g = 8.88 * 7.2 / 10 = 6.40 \text{ Mgr} \quad (4.8)$$

όπου:  $g = 10 \text{ m/sec}^2$  , η επιτάχυνση της βαρύτητας

Τελικά η θεωρητική ιδιοσυχνότητα που εκτιμάται από το μοντέλο για τη δοκό 4 , με θεώρηση αρηγματώτης διατομής, προκύπτει να είναι η τιμή:  $f = 17.17 \text{ Hz}$

#### - Δυσκαμψία Ρηγματωμένης διατομής

Με τις ίδιες σχέσεις (4.4) , (4.5) και (4.6) (με τις αντίστοιχες μετατροπές) αλλά αγνοώντας το σκυρόδεμα, δηλαδή για  $A_c = 0$  και  $I_c = 0$  , προκύπτει:

$$z_e = 231.23 \text{ mm}^2$$

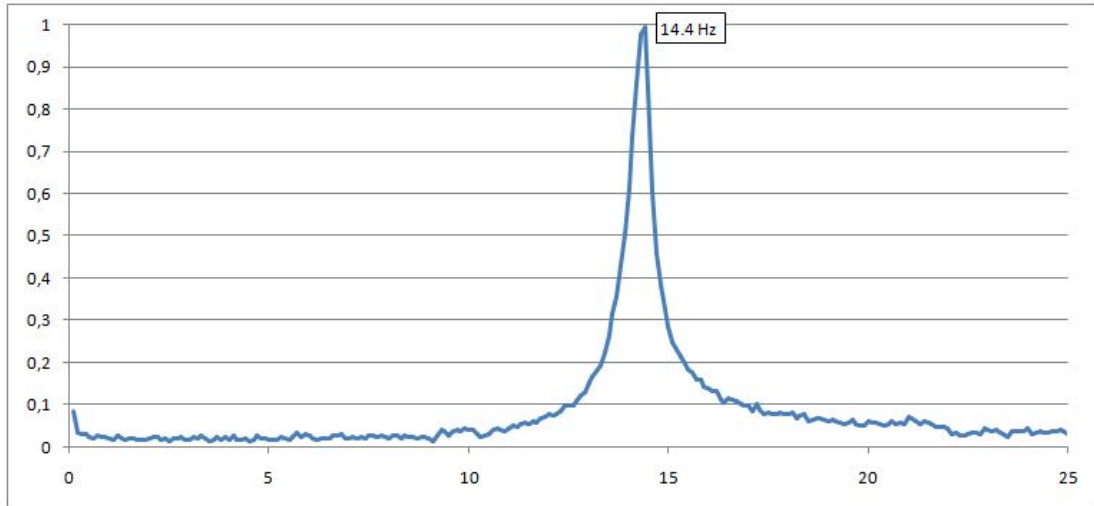
$$I_e = 297706345 \text{ mm}^4 = 29770.63 \text{ cm}^4$$

Άρα για την επίλυση στο μοντέλο θεωρείται ισοδύναμη τετραγωνική διατομή πλευράς  $b = 24.45 \text{ cm}$ . Το ίδιο βάρος  $G = 8.88 \text{ kN / m}$  προφανώς και δεν αλλάζει για την περίπτωση αυτή καθώς το βάρος του σκυροδέματος λαμβάνεται κανονικά υπόψη. Άρα και πάλι η μάζα εκτιμάται στα  $m = 6.40 \text{ Mgr}$

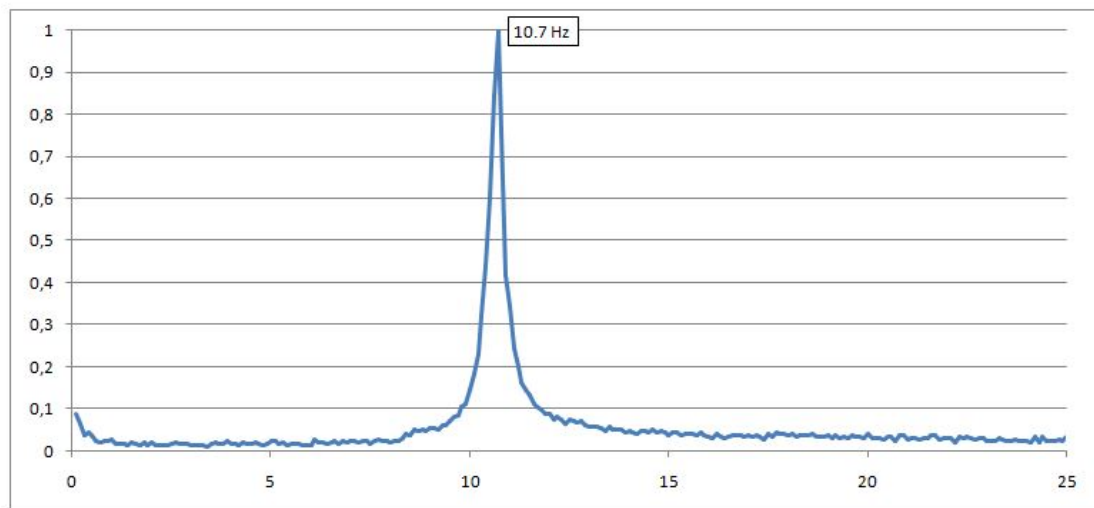
Τελικά η θεωρητική ιδιοσυχνότητα που εκτιμάται από το μοντέλο για τη δοκό 4 , με θεώρηση ρηγματωμένης διατομής, προκύπτει να είναι η τιμή:  $f = 8.86 \text{ Hz}$

#### Πειραματικά αποτελέσματα για τη δοκό 4

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $\alpha-f(\text{Hz})$  με τις συχνότητες που εμφανίστηκαν ως σημαντικές στις μετρήσεις που έγιναν στην σύμμικτη δοκό 4. Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πριν η δοκός υποβληθεί στα πειράματα αντοχής που έγιναν στο εργαστήριο ενώ στο Σχήμα 4.14 τα αποτελέσματα αναφέρονται στην δοκό μετά τα πειράματα.



Σχήμα 4.13: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στην Δοκό 4 πριν το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a$ - $f$ (Hz)

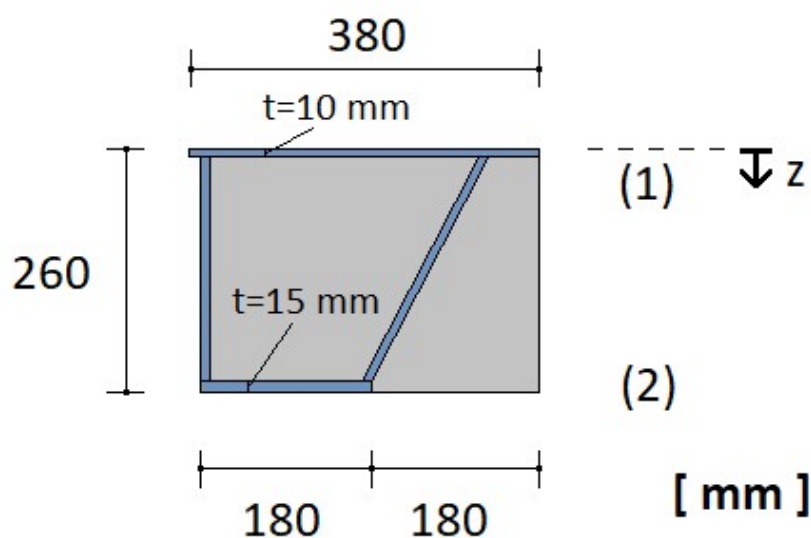


Σχήμα 4.14: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στην Δοκό 4 μετά το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a$ - $f$ (Hz)

Από τα διαγράμματα φαίνεται πως τα αποτελέσματα είναι ξεκάθαρα και πως γενικά υπάρχει σύγκλιση σε συγκεκριμένες τιμές κάθε φορά για την ιδιοσυχνότητα της δοκού 4 σε κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα για την περίπτωση πριν το πείραμα προκύπτει πως η ιδιοσυχνότητα είναι  $f = 14.4 \text{ Hz}$ , ενώ αντίστοιχα η ιδιοσυχνότητα μετά το πείραμα προέκυψε να είναι  $f = 10.7 \text{ Hz}$ . Σημειώνεται πως τα πιο πάνω διαγράμματα προέκυψαν μετά από ανάλυση 10 μετρήσεων (acceleration data) στη δοκό 4 πριν το πείραμα και 10 μετρήσεων μετά, ενώ το χρονικό βήμα στις καταγραφών είναι  $dt=0.0060 \text{ sec}$ .

#### 4.2.5 Αποτελέσματα για τη σύμμικτη δοκό #5

Παρακάτω παρουσιάζεται μια τυπική διατομή για τη σύμμικτη δοκό που εξετάζεται στην ενότητα αυτή και ορίζεται ως διατομή 5.



Σχήμα 4.15 Διατομή σύμμικτης δοκού για την περίπτωση #5

Αναφέρεται πως στο Σχήμα 4.15 φαίνονται μόνο τα στοιχεία που απαιτούνται για την αναλυτική εκτίμηση της δυσκαμψίας της διατομής με βάση τα δεδομένα που διατέθηκαν. Παρουσιάζονται παρακάτω τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής, δηλαδή το εμβαδόν του εκάστοτε στοιχείου που αποτελεί τη διατομή και η απόσταση του κέντρου βάρους του από το σημείο αναφοράς που τέθηκε (άνω παρειά (1) στη διατομή, φαίνεται στο σχήμα).

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μεταλλικών ελασμάτων:

$$A_{a1} = 380 \cdot 10 = 3800 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{a1} = 5 \text{ mm}$$

$$A_{a2} = 180 \cdot 15 = 2700 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_{a2} = 252.5 \text{ mm}$$

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος:

$$A_c = 250 \cdot 360 / \eta = 12857.14 \text{ mm}^2 \quad , \quad z_c = 135 \text{ mm}$$

Γίνεται αναγωγή στα χαρακτηριστικά του χάλυβα, γι' αυτό και η διαίρεση στο εμβαδόν του σκυροδέματος με την τιμή του λόγου των μέτρων ελαστικότητας, η τιμή του είναι  $\eta = 7.0$ .

Στη συνέχεια υπολογίζονται για την κάθε περίπτωση η θέση του κέντρου βάρους της διατομής και η συνολική δυσκαμψία της με βάση τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.2.1 [2,4]. Στη περίπτωση αυτή βέβαια δεν υπάρχει διαμήκης οπλισμός που να έχει νόημα να ληφθεί υπόψη για τη δυσκαμψία της διατομής. Αυτό προφανώς αλλάζει αντίστοιχα τους τύπους που έχουν παρουσιαστεί, αλλά και σε αυτή τη περίπτωση οι διαφορές είναι προφανείς και δεν έχει νόημα να ξαναπαρουσιαστούν οι τύποι για τους υπολογισμούς.

- Δυσκαμψία Αρηγμάτωτης διατομής

Από τις σχέσεις (4.4), (4.5) και (4.6) (με τις αντίστοιχες μετατροπές) προκύπτει:

$$z_e = 125.87 \text{ mm}^2$$

$$I_e = 166929549 \text{ mm}^4 = 16692.95 \text{ cm}^4$$

Άρα για την επίλυση στο μοντέλο θεωρείται ισοδύναμη τετραγωνική διατομή πλευράς  $b = 21.16 \text{ cm}$ . Γνωρίζοντας το μήκος του ανοίγματος και έχοντας το στατικό σύστημα (αμφιέριστη δοκός) αρκεί να υπολογιστεί η ιδιομορφική μάζα  $m$ , η οποία προκύπτει από τον υπολογισμό του φορτίου λόγω του ίδιου βάρους της δοκού ανά μέτρο μήκους. Συνεπώς προκύπτει:

$$g = (A_{a1} + A_{a2}) \cdot \gamma_a + A_c \cdot \gamma_c \quad (4.10)$$

όπου  $\gamma_a = 78.5 \text{ kN/m}^3$ , ειδικό βάρος χάλυβα

$\gamma_c = 25.0 \text{ kN/m}^3$ , ειδικό βάρος σκυροδέματος

Άρα  $g_s = 2.76 \text{ kN/m}$

Επίσης στο βάρος αυτό θα προστεθεί το πρόσθετο βάρος των μεταλλικών κορμών, που εκτιμήθηκε με βάση τα στοιχεία που διατέθηκαν για τη δοκό και προκύπτει:

$$g'_s = 0.25 \text{ kN/m}$$

Άρα το φορτίο προκύπτει:

$$G = 2.76 + 0.25 = 3.01 \text{ kN/m}$$

Και τελικά η ιδιομορφική μάζα θα είναι (Σχέση 4.8):

$$m = G * L / g = 3.01 * 7.2 / 10 = 2.17 \text{ Mgr} \quad (4.8)$$

όπου:  $g = 10 \text{ m/sec}^2$  , η επιτάχυνση της βαρύτητας

Τελικά η θεωρητική ιδιοσυχνότητα που εκτιμάται από το μοντέλο για τη δοκό 5 , με θεώρηση αρηγμάτωτης διατομής, προκύπτει να είναι η τιμή:  $f = 11.43 \text{ Hz}$

#### - Δυσκαμψία Ρηγματωμένης διατομής

Με τις ίδιες σχέσεις (4.4) , (4.5) και (4.6) (με τις αντίστοιχες μετατροπές) αλλά αγνοώντας το σκυρόδεμα, δηλαδή για  $A_c = 0$  και  $I_c = 0$  , προκύπτει:

$$z_e = 107.81 \text{ mm}^2$$

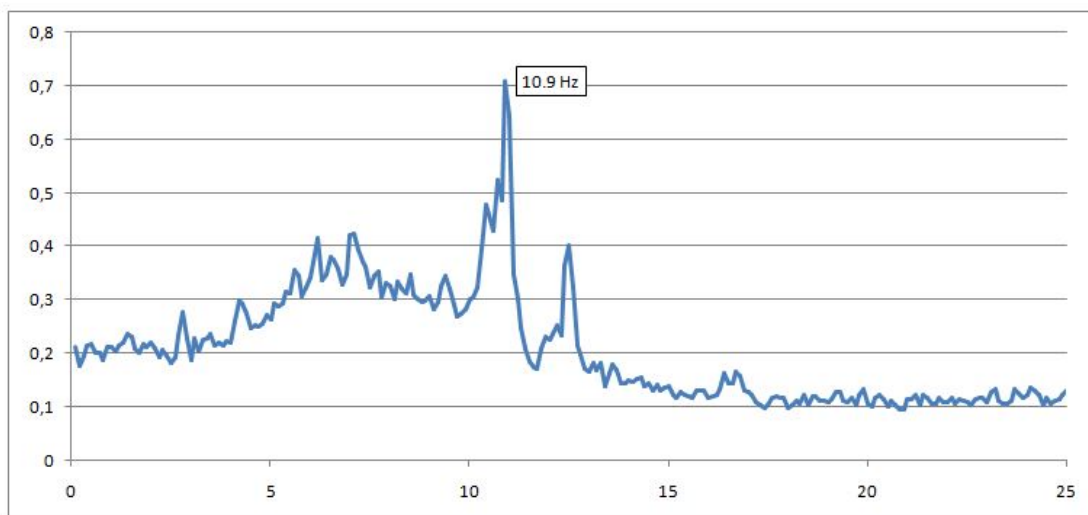
$$I_e = 96772926 \text{ mm}^4 = 9677.29 \text{ cm}^4$$

Άρα για την επίλυση στο μοντέλο θεωρείται ισοδύναμη τετραγωνική διατομή πλευράς  $b = 18.46 \text{ cm}$  . Το ίδιο βάρος  $G = 3.01 \text{ kN / m}$  προφανώς και δεν αλλάζει για την περίπτωση αυτή καθώς το βάρος του σκυροδέματος λαμβάνεται κανονικά υπόψη. Άρα και πάλι η μάζα εκτιμάται στα  $m = 2.17 \text{ Mgr}$ .

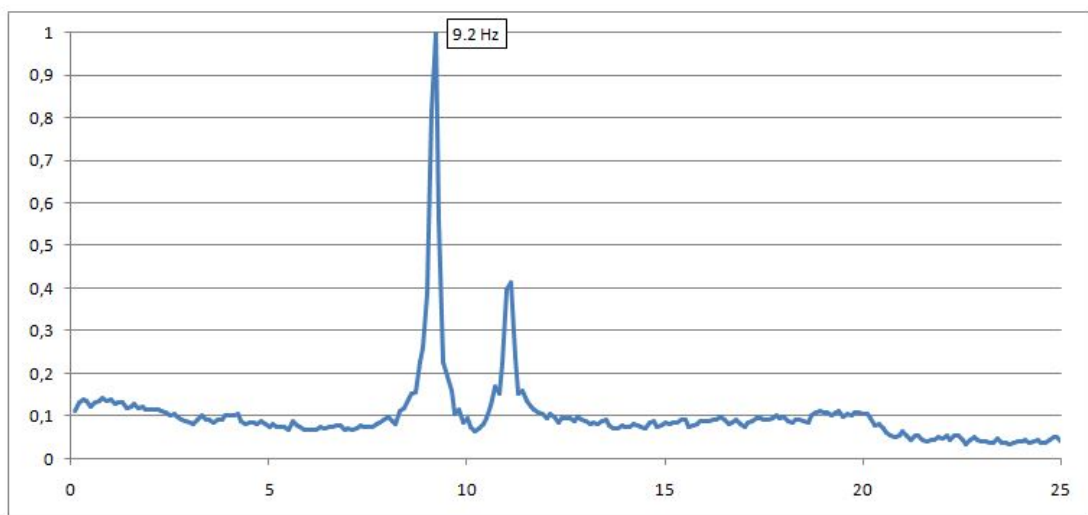
Τελικά η θεωρητική ιδιοσυχνότητα που εκτιμάται από το μοντέλο για τη δοκό 5 , με θεώρηση ρηγματωμένης διατομής, προκύπτει να είναι η τιμή:  $f = 8.71 \text{ Hz}$

#### Πειραματικά αποτελέσματα για τη δοκό 5

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $a-f(\text{Hz})$  με τις συχνότητες που εμφανίστηκαν ως σημαντικές στις μετρήσεις που έγιναν στην σύμμικτη δοκό 5. Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πριν η δοκός υποβληθεί στα πειράματα αντοχής που έγιναν στο εργαστήριο ενώ στο Σχήμα 4.17 τα αποτελέσματα αναφέρονται στην δοκό μετά τα πειράματα.



Σχήμα 4.16: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στην Δοκό 5 πριν το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$



Σχήμα 4.17: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συχνότητες στην Δοκό 5 μετά το πείραμα από το αντίστοιχο διάγραμμα  $a-f(\text{Hz})$

Από τα διαγράμματα φαίνεται πως τα αποτελέσματα είναι ξεκάθαρα και πως γενικά υπάρχει σύγκλιση σε συγκεκριμένες τιμές κάθε φορά για την ιδιοσυχνότητα της δοκού 5 σε κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα για την περίπτωση πριν το πείραμα προκύπτει πως η ιδιοσυχνότητα είναι  $f = 10.9 \text{ Hz}$ , ενώ αντίστοιχα η ιδιοσυχνότητα μετά το πείραμα προέκυψε να είναι  $f = 9.2 \text{ Hz}$ . Σημειώνεται πως τα πιο πάνω διαγράμματα προέκυψαν μετά από ανάλυση 16 μετρήσεων (acceleration data) στη δοκό 5 πριν το πείραμα και 12 μετρήσεων μετά, ενώ το χρονικό βήμα στις καταγραφών είναι  $dt=0.0060 \text{ sec}$ .



### 4.3 Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα για τις σύμμικτες δοκούς που μελετήθηκαν, ώστε να σχολιαστούν πιο αποτελεσματικά και να εξαχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα για την εφαρμογή της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για απευθείας μέτρηση της ιδιοσυχνότητας τους πριν και μετά τα πειράματα αντοχής στα οποία υποβλήθηκαν κατά την πειραματική διερεύνηση της αντοχής τους από το εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών.

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακες 4.1 και 4.2) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις δύο θεωρήσεις που έγιναν για τις δοκούς. Συγκεκριμένα συγκρίνονται οι θεωρητικές τιμές για τις ιδιοσυχνότητες, με τη θεώρηση ότι οι διατομές είναι πλήρως αρηγμάτωτες, με τα αποτελέσματα των μετρήσεων πριν τα πειράματα, και αντίστοιχα οι θεωρητικές τιμές για τις ιδιοσυχνότητες, με τη θεώρηση ότι οι διατομές είναι πλήρως ρηγματωμένες (πλήρης αγνόηση του σκυροδέματος), με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των μετρήσεων μετά το πείραμα.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα για τις δοκούς πριν τα πειράματα

Σύμμικτες Δοκοί (αρηγμάτωση διατομή)	Ιδιοσυχνότητες (Hz)		Διαφορά (%)
	Θεωρητικές Τιμές	Πειραματικές Μετρήσεις	
Δοκός 1	11.62	9.50	-18.24
Δοκός 2	15.41	11.80	-23.43
Δοκός 3	20.21	15.10	-25.28
Δοκός 4	17.17	14.40	-16.13
Δοκός 5	11.43	10.90	-4.64

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα για τις δοκούς μετά τα πειράματα

Σύμμικτες Δοκοί (ρηγματωμένη διατομή)	Ιδιοσυχνότητες (Hz)		Διαφορά (%)
	Θεωρητικές Τιμές	Πειραματικές Μετρήσεις	
Δοκός 1	6.73	7.10	5.50
Δοκός 2	8.36	8.10	-3.11
Δοκός 3	11.49	11.60	0.96
Δοκός 4	8.86	10.70	20.77
Δοκός 5	8.71	9.20	5.63

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί πως τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων για τις δοκούς ήταν σε όλες τις περιπτώσεις πολύ σταθερά και πάντα οι μετρήσεις συνέκλιναν προς μία συγκεκριμένη τιμή για την ιδιοσυχνότητα της κάθε δοκού σε κάθε φάση στην οποία ελέγχονταν. Μάλιστα τα αποτελέσματα αυτά φαίνεται να είναι και αρκετά ακριβή, έχοντας δείξει σε προηγούμενη ενότητα ότι ο αισθητήρας έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει αποτελεσματικά τις ιδιοσυχνότητες στο φάσμα συχνοτήτων που εξετάζεται.

Ως προς τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με τις θεωρητικές τιμές, σε σχέση με τις τιμές του πίνακα 4.1 και λαμβάνοντας υπόψη το σφάλμα που παρατηρείται, προκύπτει πως η θεώρηση για πλήρως αρηγμάτωση διατομή είναι

προφανώς υπερβολική. Σίγουρα λόγω και του ανοίγματος  $L = 7.2 \text{ m}$  οι δοκοί θα έχουν κάποιο αρχικό βέλος κάμψης που σίγουρα θα οδηγεί το σκυρόδεμα σε κάποιο βαθμό ρηγματώσης. Μάλιστα τα ποσοστά σφάλματος έχουν κάποια λογική καθώς για παράδειγμα στη διατομή 5, όπου η γεωμετρία της διατομής δείχνει πως ο χάλυβας σε πολλά σημεία περιβάλλει πλήρως το σκυρόδεμα, ενώ και το ποσοστό του χάλυβα προς το σκυρόδεμα φαίνεται να είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις άλλες διατομές, το σφάλμα είναι πολύ μικρότερο. Άρα στη διατομή με το λιγότερο σκυρόδεμα προκύπτει το μικρότερο σφάλμα, ενώ στις άλλες περιπτώσεις τα ποσοστά σφάλματος είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Αυτό ενισχύει ακόμα περισσότερο τη θεώρηση πως οι διαφορές που προκύπτουν αφορούν κυρίως τη ρηγματώση του σκυροδέματος και πως αυτό που καταγράφεται από τον αισθητήρα είναι εν τέλει η ενεργώς δυσκαμψία της εκάστοτε διατομής.

Για την δεύτερη περίπτωση που αφορά στα αποτελέσματα του πίνακα 4.2 είναι ενδιαφέρον το γεγονός πως σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από την περίπτωση της διατομής 4, το σφάλμα των μετρήσεων σε σχέση ακόμα και με την ακραία θεώρηση της πλήρους αγνόησης του σκυροδέματος είναι πολύ μικρό συγκριτικά. Αυτό προκύπτει καθώς οι διατομές μετά την πειραματική τους διερεύνηση ήταν σε μια κατάσταση όπου το σκυρόδεμα είχε σχεδόν εξολοκλήρου ρηγματωθεί, αφού οι διατομές οδηγήθηκαν σε μεγάλα βέλη κάμψης. Ο λόγος μάλιστα που θεωρείται πως όντως το σκυρόδεμα κατέληξε να ρηγματωθεί σχεδόν πλήρως και να χάσει τη συμβολή του στη δυσκαμψία της διατομής είναι το γεγονός πως, εκτός της διατομής 4, σε όλες τις άλλες περιπτώσεις υπάρχει ένα ισχυρό μεταλλικό έλασμα στη κορυφή της κάθε διατομής που σε συνθήκες κοντά στην αστοχία, ή εν πάση περίπτωση κατά την πλαστικοποίηση των διατομών, τα χαρακτηριστικά του (δηλαδή το εμβαδόν του ελάσματος) δείχνουν πως παραλαμβάνει εξολοκλήρου την θλιπτική δύναμη που προκύπτει από το ζεύγος δυνάμεων που ορίζει η κάμψη στη διατομή. Άρα αφού το σκυρόδεμα καταλήγει να εφελκύεται σχεδόν πλήρως είναι λογικό ακόμα και με την αγνόησή του τα θεωρητικά αποτελέσματα να είναι πολύ κοντά στις πειραματικές μετρήσεις. Μάλιστα η συμπεριφορά της δοκού 4 ενισχύει ακόμα περισσότερο την θεώρηση αυτή καθώς είναι η μοναδική διατομή της οποίας το έλασμα με βάση τα χαρακτηριστικά της είναι πολύ λεπτό (έλασμα πάχους  $t=5\text{mm}$ ) σε σχέση για παράδειγμα με τη διατομή 3 που έχει τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με μόνη διαφορά το πολύ πιο ισχυρό έλασμα (έλασμα πάχους  $t=20\text{mm}$ ). Άρα στη περίπτωση αυτή όντως η διατομή αναγκάζεται να βασιστεί και στο σκυρόδεμα για να υπάρξει ισορροπία των εσωτερικών δυνάμεων κατά την κάμψη της, πράγμα που εξηγεί το σφάλμα που παρουσιάζεται ειδικά στη περίπτωση αυτή, αφού το να αγνοηθεί τελείως το σκυρόδεμα είναι πολύ δυσμενής θεώρηση για τη συγκεκριμένη διατομή.

## 5 Τελικά Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο στόχος είναι να δοθεί μια τελική απάντηση για την αξιοπιστία της μεθόδου που ακολουθήθηκε στη παρούσα εργασία για την απ' ευθείας μέτρηση των ιδιοσυχνοτήτων των φορέων που παρουσιάστηκαν, λαμβάνοντας υπόψη τα συνολικά αποτελέσματα και για τους μεταλλικούς πύργους, αλλά και για τις σύμμικτες δοκούς που ελέγχθηκαν, ενώ τελικά θα επισημανθούν πλεονεκτήματα και δυσκολίες που παρατηρήθηκαν σε όλη αυτή τη διαδικασία των απευθείας μετρήσεων των ιδιοσυχνοτήτων με τη χρήση επιταχυνσιομέτρου.

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί πως με τις δοκιμές που έγιναν στον αισθητήρα φαίνεται πως ακόμα και ένας τέτοιος αισθητήρας χαμηλού κόστους μπορεί να χρησιμεύσει για την εκτίμηση των ιδιοσυχνοτήτων κάποιου φορέα. Σίγουρα υπάρχουν κάποιοι περιοριστικοί παράγοντες που κυρίως αφορούν την ευαισθησία του οργάνου, με βάση τουλάχιστον τις ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν στην παρούσα εργασία για το αισθητήρα, αλλά σε πολλές περιπτώσεις φαίνεται πως η χρήση του μπορεί να δώσει χρήσιμα αποτελέσματα.

Σε πολλές περιπτώσεις βέβαια που αφορούσαν φορείς με πιο σύνθετο στατικό σύστημα παρατηρήθηκαν μετρήσεις των οποίων τα αποτελέσματα προέκυψαν αρκετά ασταθή κατά την ανάλυσή τους. Φυσικά η αναφορά αυτή έχει σχέση με την αδυναμία που υπήρξε ως προς τη προσέγγιση μιας μονοσήμαντης και αξιόπιστης μέτρησης για τις ιδιοσυχνότητες που θα χαρακτήριζαν τους μεταλλικούς πύργους συνολικά ως προς το φορέα τους. Όπως έχει όμως αναφερθεί, πιθανότατα αυτό θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με χρήση περισσότερων αισθητήρων που λειτουργώντας ταυτόχρονα θα μπορούσαν να δώσουν περισσότερες πληροφορίες για το που αντιστοιχούν οι διάφορες ιδιοσυχνότητες που εμφανίζονταν κατά την ανάλυση της κάθε καταγραφής. Με το τρόπο αυτό θα μπορούσε κανείς να εκτιμήσει αν οι ιδιοσυχνότητες που εμφανίζονται στα αντίστοιχα διαγράμματα αντιστοιχούν σε κάποια ανώτερη ιδιομορφή, αν πρόκειται για τιμές που αντιστοιχούν σε μεμονωμένα μέλη ή αν ακόμα είναι τιμές που οφείλονται σε άλλους παράγοντες, για παράδειγμα σε σφάλματα που προκύπτουν από εξωγενείς δονήσεις στο περιβάλλον των εργασιών ή παράγονται από τυχόν μη σταθερή τοποθέτησή του αισθητήρα στο φορέα.

Βέβαια στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει και μια ειδική αναφορά και στο τρόπο επιβολής του κρουστικού φορτίου, το οποίο θα πρέπει να είναι ικανό να προκαλέσει κάθε φορά την ελεύθερη ταλάντωση του εκάστοτε φορέα, ώστε να εμφανιστούν στα διαγράμματα που προκύπτουν από τις καταγραφές οι βασικές ιδιοσυχνότητες που χαρακτηρίζουν το φορέα αυτό. Ιδιαίτερα για τους πύργους λοιπόν, η επιβολής αυτής της διέγερσης με ένα σημειακό χτύπημα με τη χρήση ενός σφυριού ίσως να μην επαρκούσε. Οι βασικές διαφορές που αντιστοιχούν στη μελέτη του συνολικού φορέα του πύργου σε σχέση με τα μεμονωμένα μέλη του, αλλά και με τις δοκούς που εξετάστηκαν, είναι αφενός μεν ο πιο σύνθετος φορέας του, αλλά είναι και οι πολύ μεγαλύτερες διαστάσεις του. Αυτό σημαίνει πως πιθανώς τα χτυπήματα θα έπρεπε να

είναι πιο ισχυρά χρησιμοποιώντας κάποιον άλλο τρόπο ώστε το κρουστικό φορτίο να είναι πιο κατάλληλο. Ίσως να οφείλεται εκεί λοιπόν η αδυναμία της μεθόδου να παράξει αποτελέσματα για τους πύργους, την ώρα που σε όποια άλλη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε προέκυψαν κάποια πολύ πιο ξεκάθαρα αποτελέσματα. Η περίπτωση πάντως των μετρήσεων σε πιο σύνθετους φορείς χρήζει σίγουρα περαιτέρω διερεύνησης.

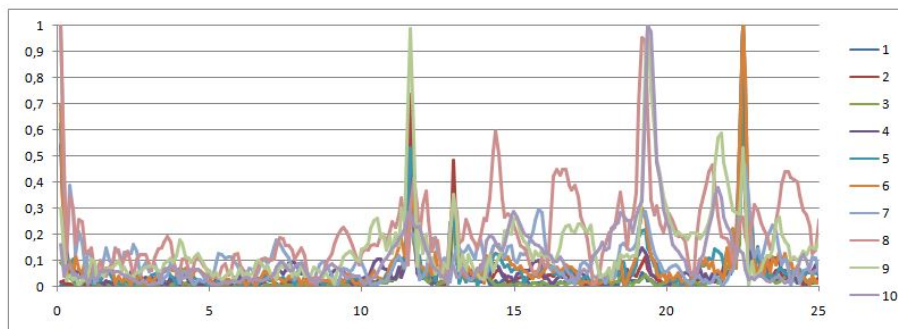
Κλείνοντας βέβαια, πρέπει να τονιστεί ότι σε πολλές περιπτώσεις η μέθοδος που ακολουθήθηκε λειτούργησε σωστά, και οι καταγραφές όντως κατέληξαν σε αποτελέσματα που ήταν σε θέση να εκτιμήσουν τις ιδιοσυχνότητες των μελών που εξετάστηκαν. Οι μετρήσεις σε μεμονωμένους διαγώνιους συνδέσμους των πύργων έδωσαν αποτελέσματα αρκετά ικανοποιητικά, ενώ για τις σύμμικτες δοκούς εκτιμήθηκαν αποτελεσματικά και οι ιδιοσυχνότητες που αφορούν στην ενεργό δυσκαμψία των στοιχείων αυτών, αλλά εκτιμήθηκαν και οι μεταβολές στις δυσκαμψίες αυτές, που προέκυψαν μετά τα πειράματα αντοχής στα οποία υποβλήθηκαν οι σύμμικτες δοκοί. Άρα τελικά παρόλο που χρειάζεται κάποια προσοχή, η μέθοδος αυτή μπορεί όντως να δώσει πολύ χρήσιμα αποτελέσματα και στοιχεία για την ιδιοσυχνότητα και κατ' επέκταση τη δυσκαμψία κάποιου φορέα που μελετάται.

## Βιβλιογραφία

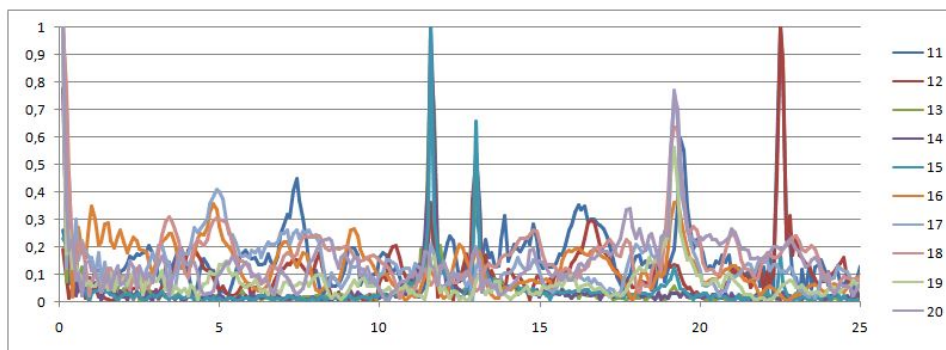
1. Θωμάς Β. Γ. , «Προγραμματισμός επιταχυνσιομέτρου βασισμένου στη πλατφόρμα Arduino για τον υπολογισμό των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών απλών μεταλλικών φορέων», Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2019/19 , Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2019
2. Βάγιας Ι., «Σύμμικτες Κατασκευές από Χάλυβα και Οπλισμένο Σκυρόδεμα», 3η Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2010
3. Chopra A.K, «Δυναμική των Κατασκευών, Θεωρία και εφαρμογές στη σεισμική μηχανική» , 3η Έκδοση, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, Αθήνα 2015
4. EN1994-1-1:2004, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-  
-Part 1-1: General rules and rules for buildings.
5. Helmut Wenzel (Editor), «Industrial Safety and Life Cycle Engineering», publisher: VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH, Vienna 2013
6. Invensense (2019), mpu6050 datasheet ,  
URL: [www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis](http://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis)
7. PJRC Electronic Projects, σελίδα με τις πληροφορίες του επεξεργαστή (teensy 3.6),  
URL: [www.pjrc.com/teensy](http://www.pjrc.com/teensy) ,
8. Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2018

# Παράρτημα Α - Αποτελέσματα ανάλυσης των μετρήσεων στους μεταλλικούς πύργους

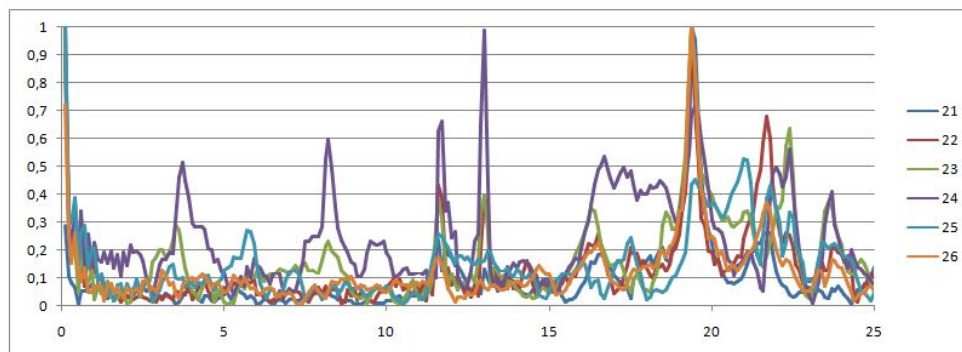
## - Μεταλλικός Πύργος 1 - Αποτελέσματα πριν το πείραμα



Σχήμα Α.1: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)

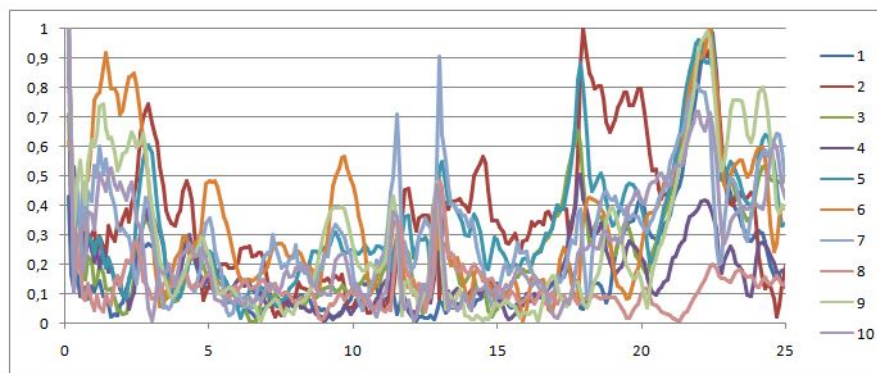


Σχήμα Α.2: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 - 20 (acceleration data 11 - 20)

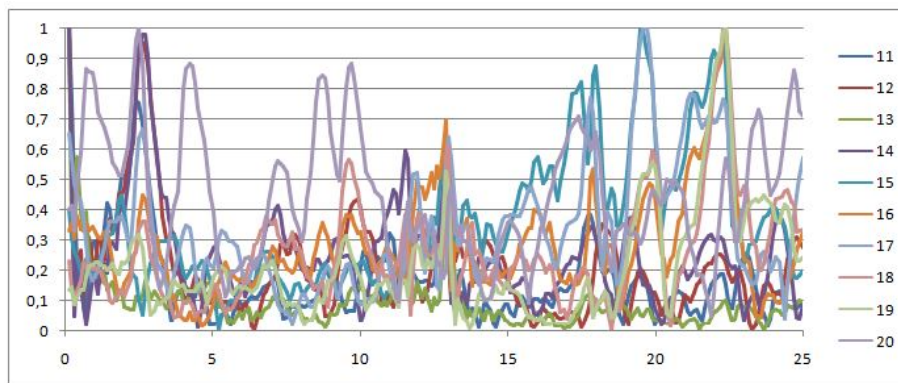


Σχήμα Α.3: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 21 - 26 (acceleration data 21 - 26)

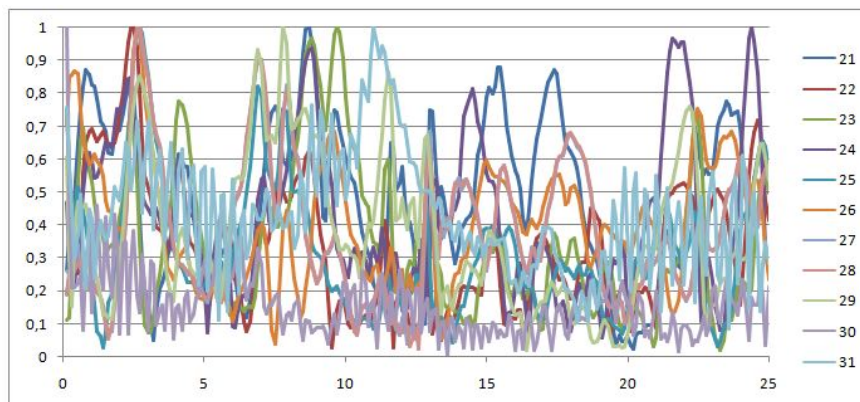
- Μεταλλικός Πύργος 1 - Αποτελέσματα μετά το πείραμα



Σχήμα Α.4: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)

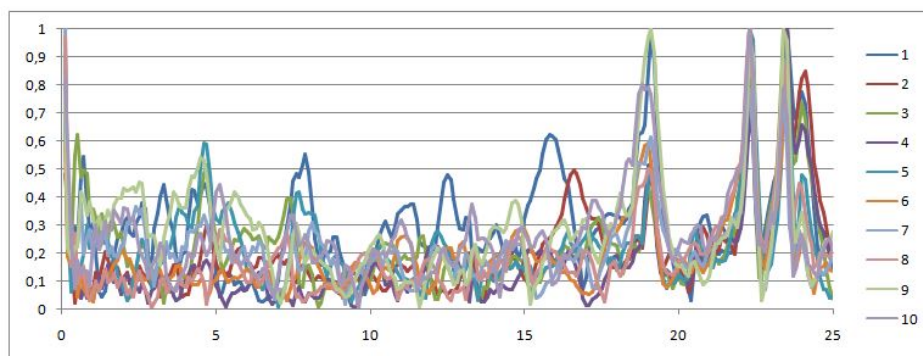


Σχήμα Α.5: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 -20 (acceleration data 11 - 20)

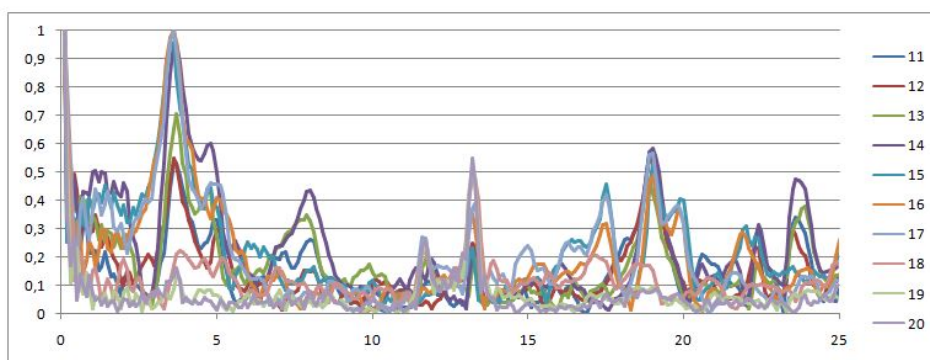


Σχήμα Α.6: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 21 - 31 (acceleration data 21 - 31)

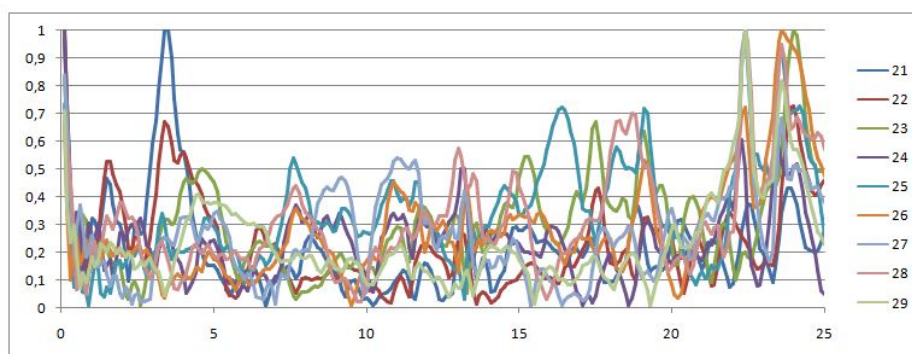
- Μεταλλικός Πύργος 2 - Αποτελέσματα πριν το πείραμα



Σχήμα Α.7: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)



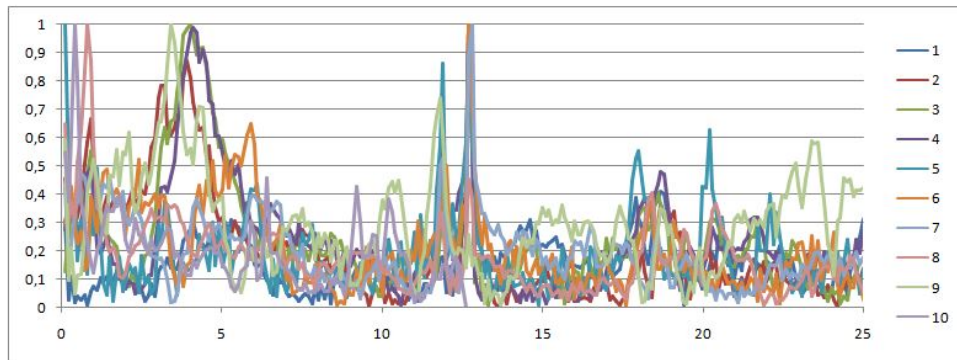
Σχήμα Α.8: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 -20 (acceleration data 11 - 20)



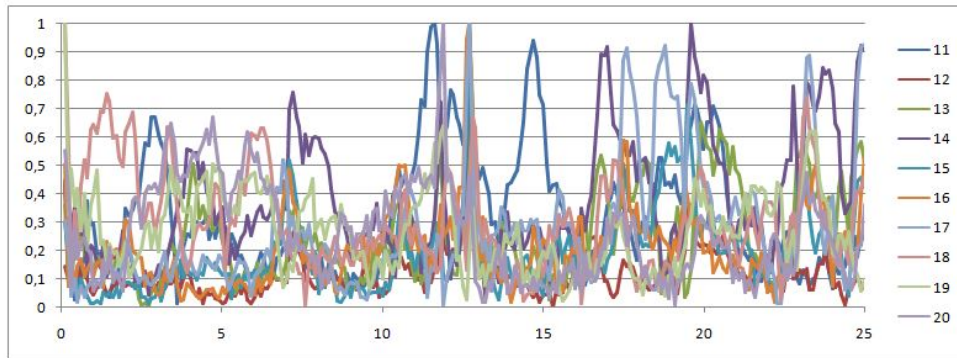
Σχήμα Α.9: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 21 - 29 (acceleration data 21 - 29)



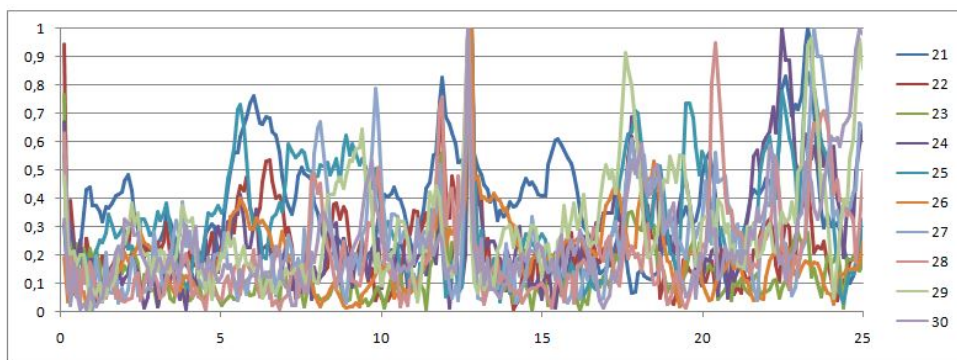
- Μεταλλικός Πύργος 2 - Αποτελέσματα μετά το πείραμα



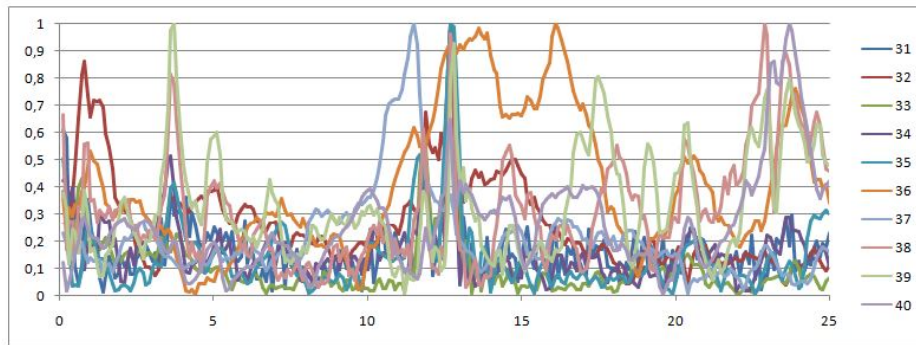
Σχήμα Α.10: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)



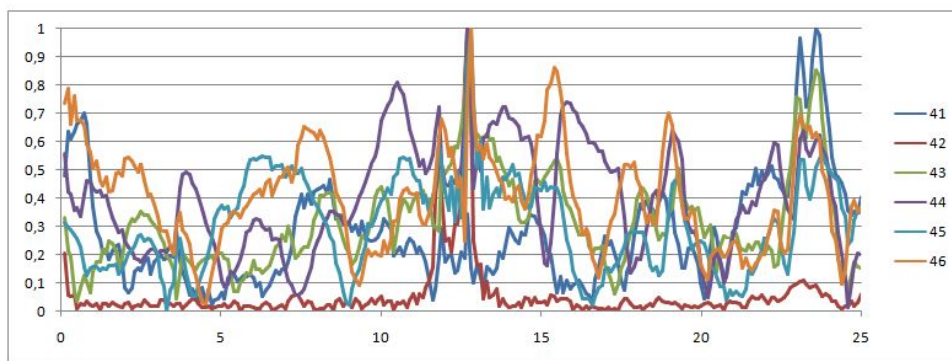
Σχήμα Α.11: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 -20 (acceleration data 11 - 20)



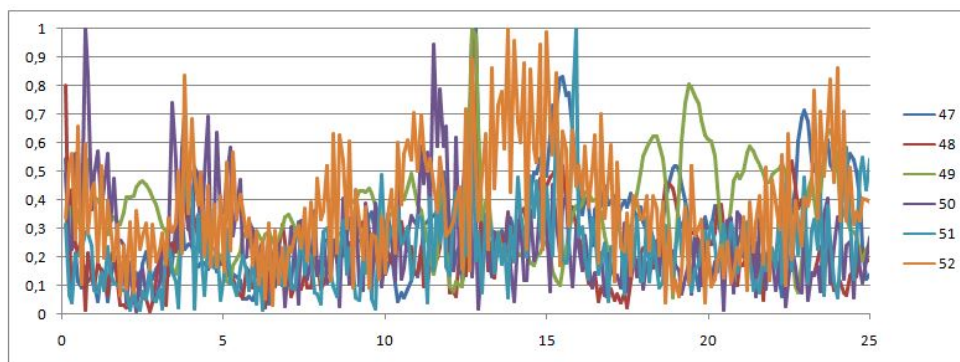
Σχήμα Α.12: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 21 - 30 (acceleration data 21 - 30)



Σχήμα Α.13: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 31 - 40 (acceleration data 31 - 40)

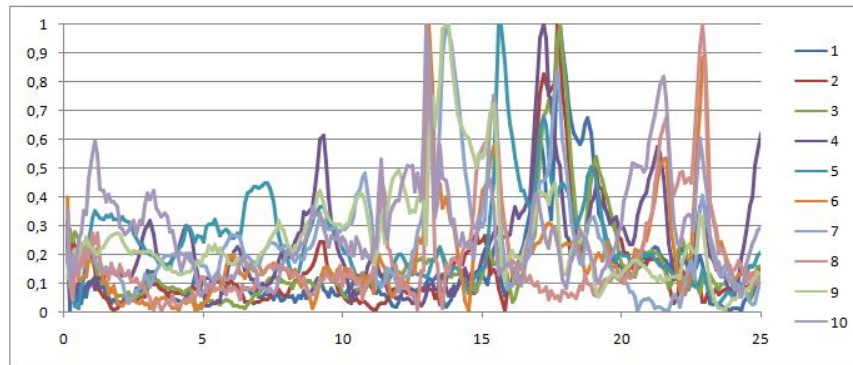


Σχήμα Α.14: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 41 -46 (acceleration data 41 - 46)

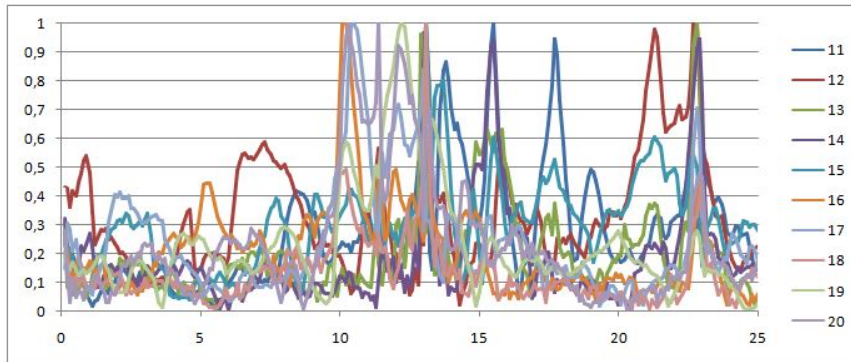


Σχήμα Α.15: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 47 - 52 (acceleration data 47 - 52)

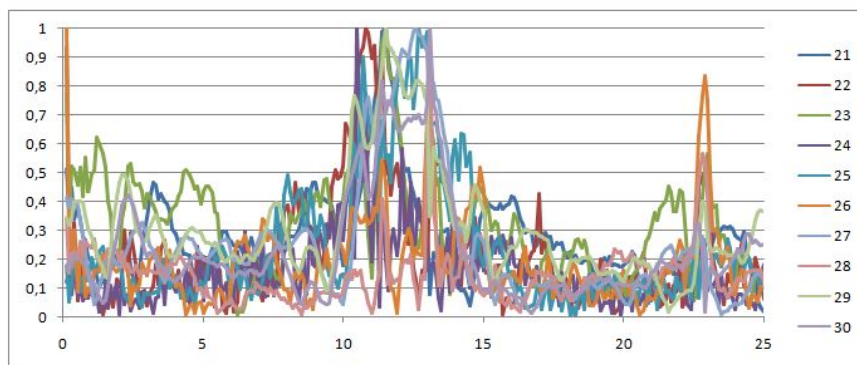
- Μεταλλικός Πύργος 3 - Αποτελέσματα μετά το πείραμα



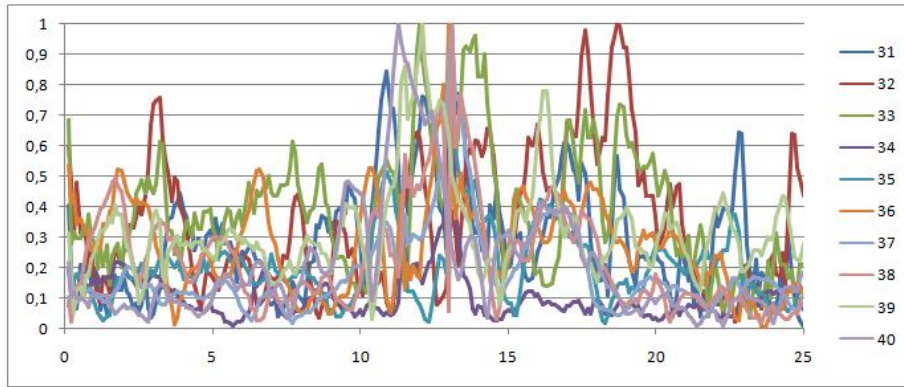
Σχήμα Α.16: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)



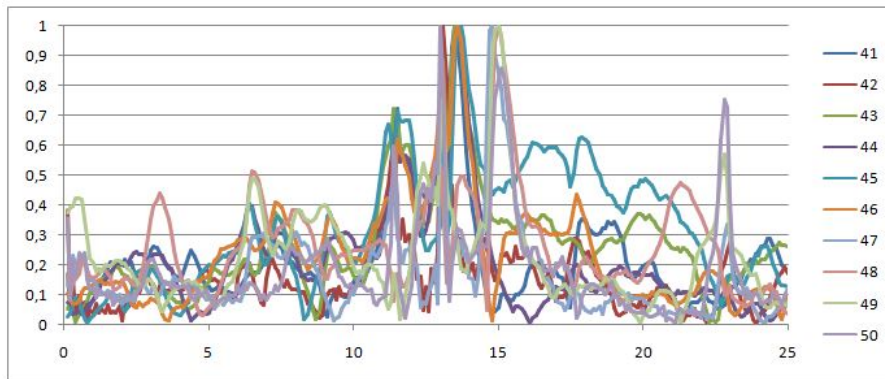
Σχήμα Α.17: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 - 20 (acceleration data 11 - 20)



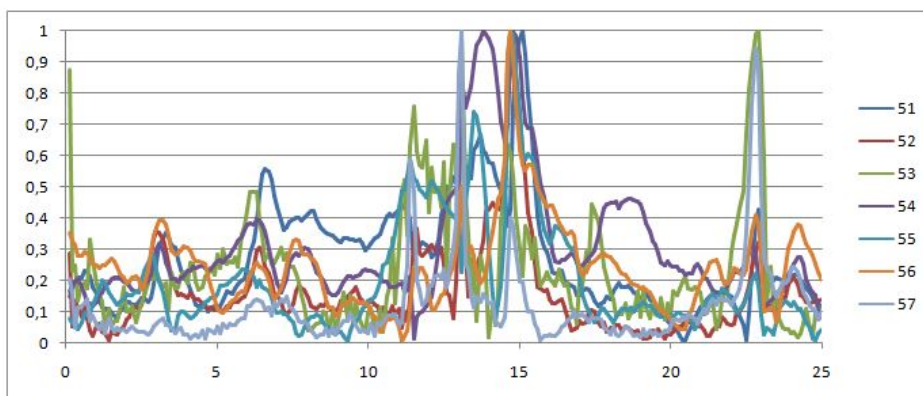
Σχήμα Α.18: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 21 - 30 (acceleration data 21 - 30)



Σχήμα Α.19: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 31 - 40 (acceleration data 31 - 40)

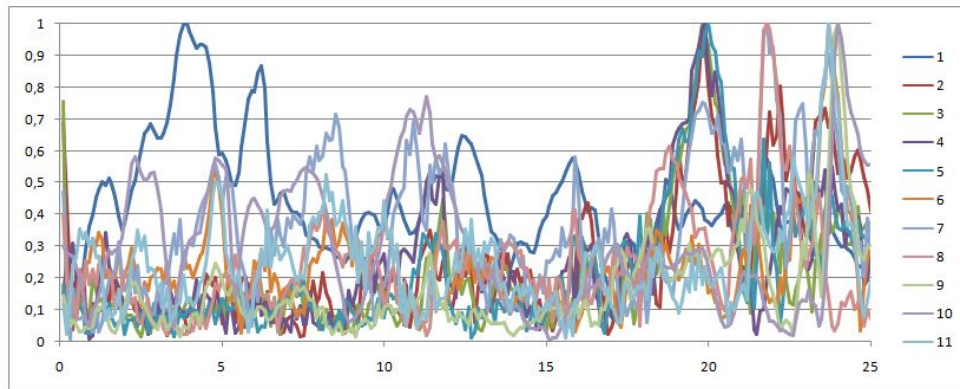


Σχήμα Α.20: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 41 - 50 (acceleration data 41 - 50)



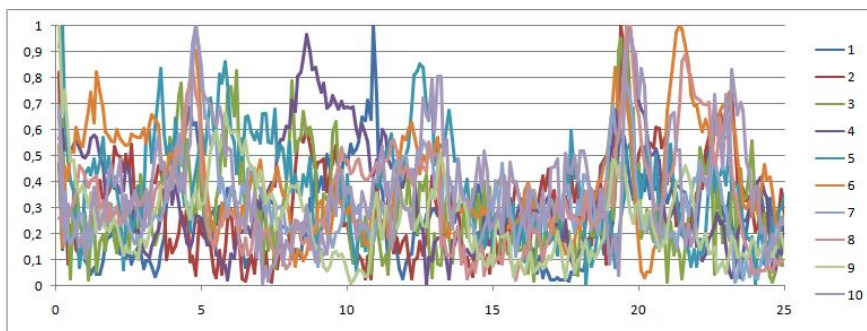
Σχήμα Α.21: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 51 - 57 (acceleration data 51 - 57)

- Μεταλλικός Πύργος 4 - Αποτελέσματα πριν το πείραμα

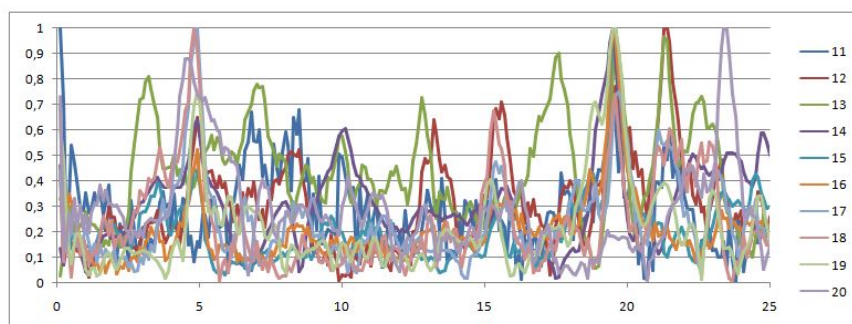


Σχήμα Α.22: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 11 (acceleration data 1 - 11)

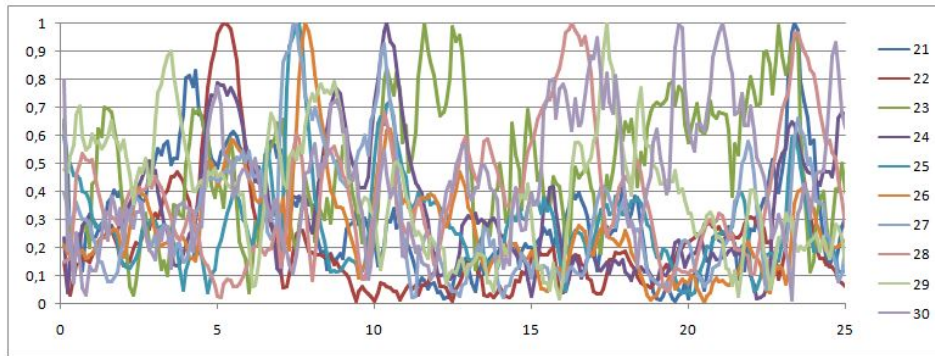
- Μεταλλικός Πύργος 4 - Αποτελέσματα μετά το πείραμα



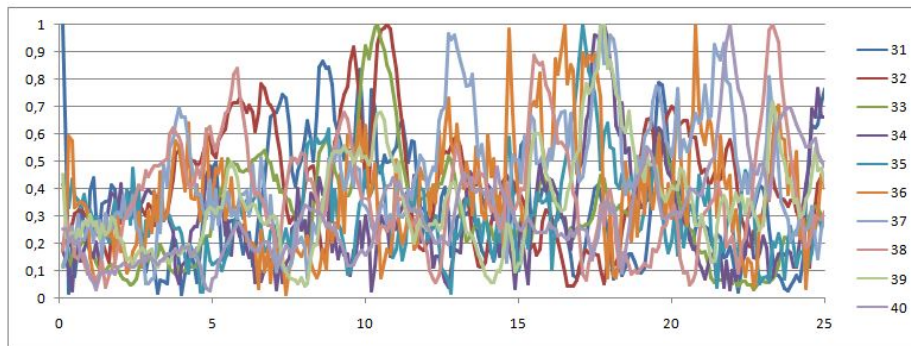
Σχήμα Α.23: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)



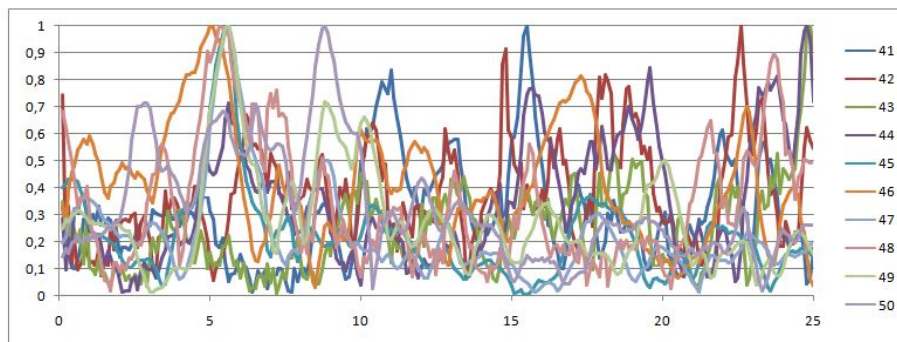
Σχήμα Α.24: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 - 20 (acceleration data 11 - 20)



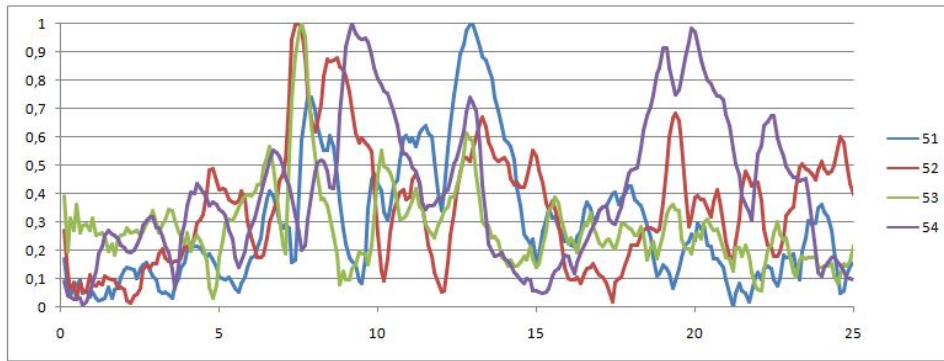
Σχήμα Α.25: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 21 - 30 (acceleration data 21 - 30)



Σχήμα Α.26: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 31 -40 (acceleration data 31 - 40)

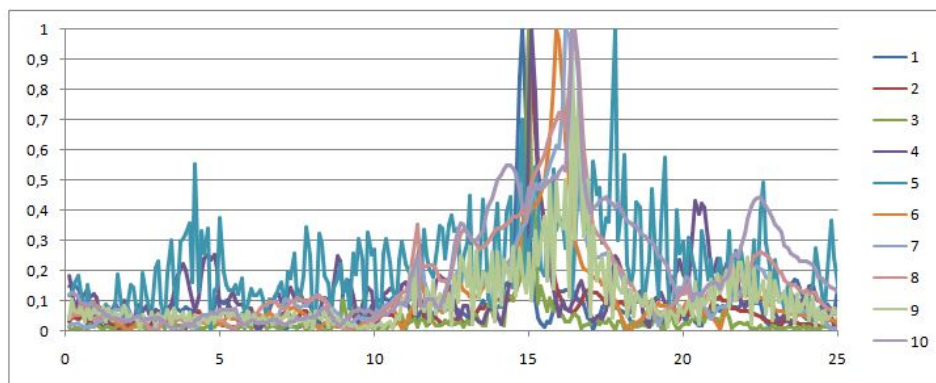


Σχήμα Α.27: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 41 - 50 (acceleration data 41 - 50)

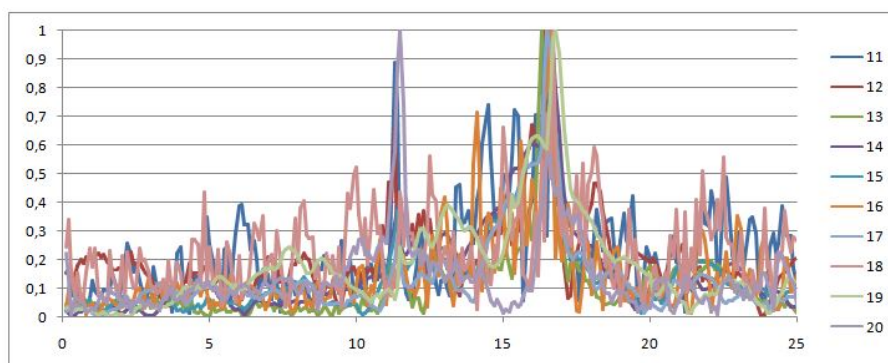


Σχήμα Α.28: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 51 - 54 (acceleration data 51 - 54)

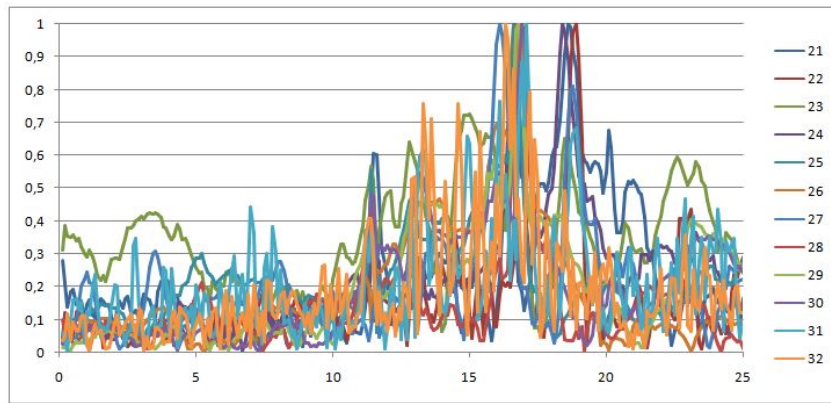
- Μεταλλικός Πύργος 5 - Αποτελέσματα πριν το πείραμα



Σχήμα Α.29: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 -10 (acceleration data 1 - 10)

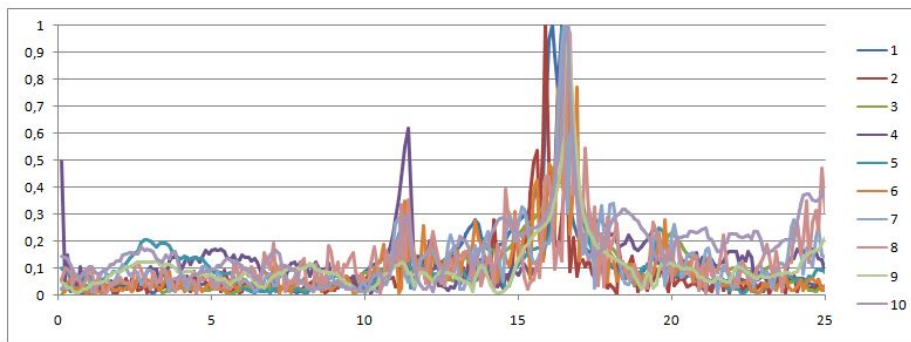


Σχήμα Α.30: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 - 20 (acceleration data 11 - 20)

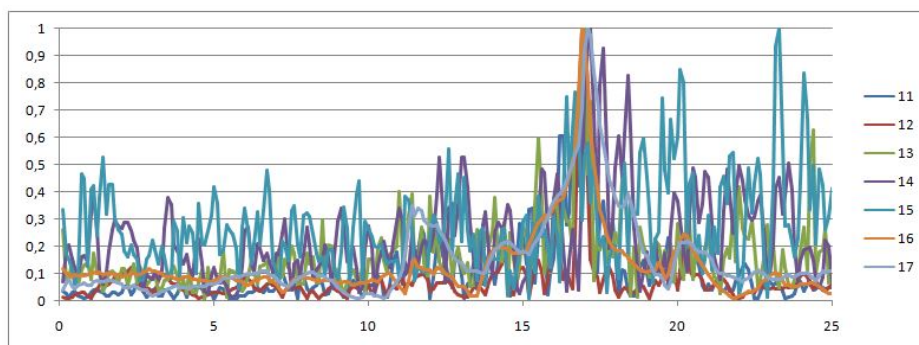


Σχήμα Α.31: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 21 - 32 (acceleration data 21 - 32)

- Μεταλλικός Πύργος 5 - Αποτελέσματα μετά το πείραμα



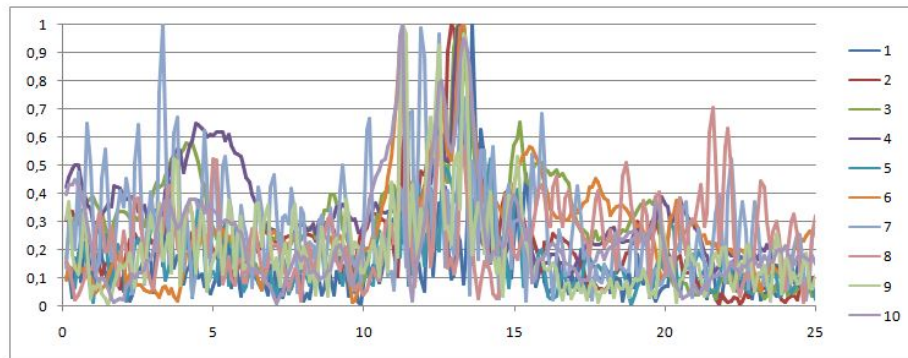
Σχήμα Α.32: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)



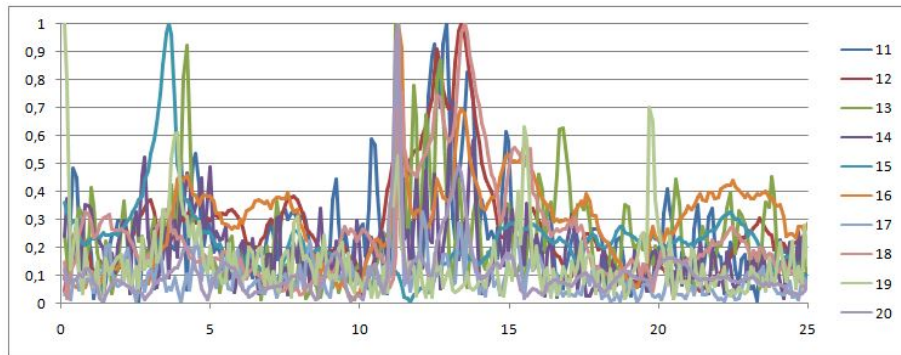
Σχήμα Α.33: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 - 17 (acceleration data 11 - 17)



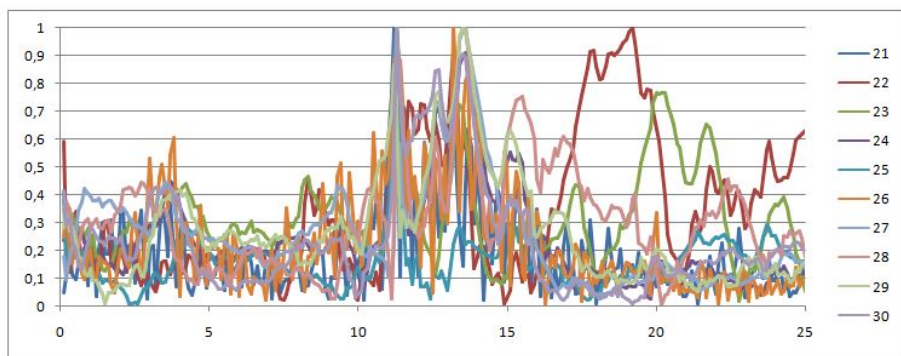
- Μεταλλικός Πύργος 6 - Αποτελέσματα πριν το πείραμα



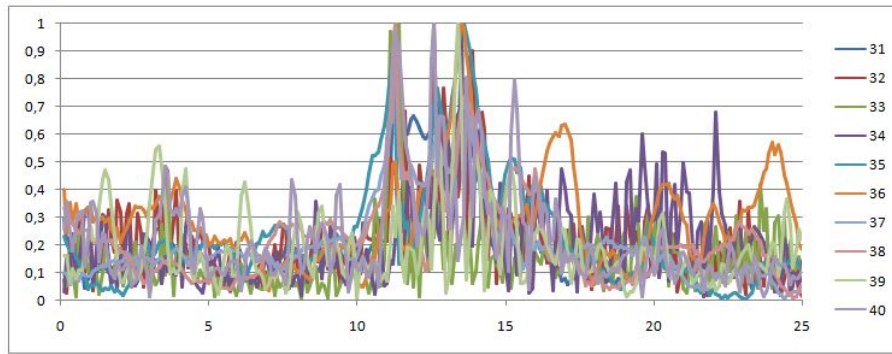
Σχήμα Α.34: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)



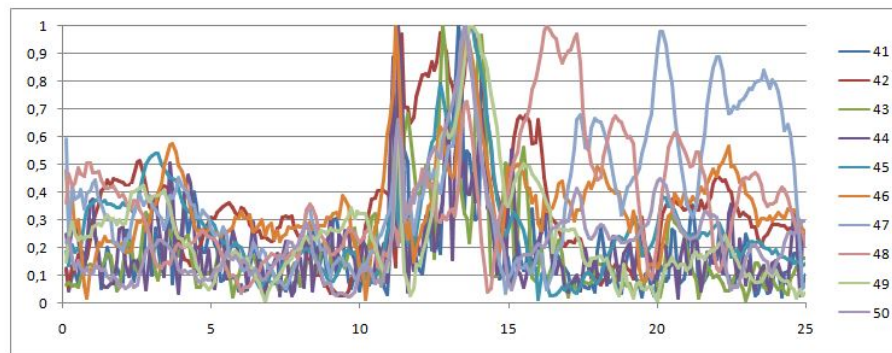
Σχήμα Α.35: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 - 20 (acceleration data 11 - 20)



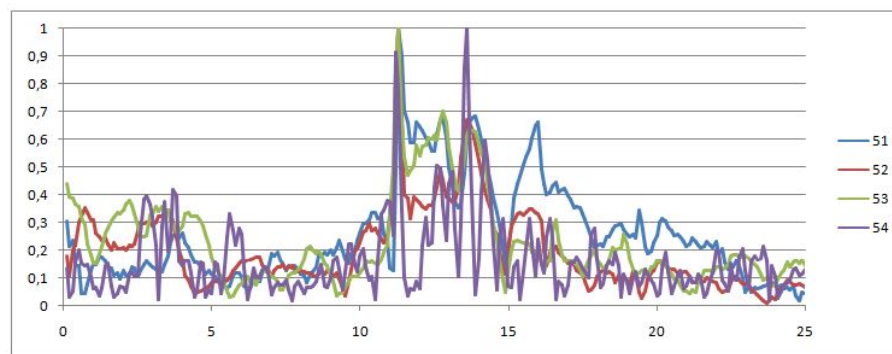
Σχήμα Α.36: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 21 - 30 (acceleration data 21 - 30)



Σχήμα Α.37: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 31 - 40 (acceleration data 31 - 40)

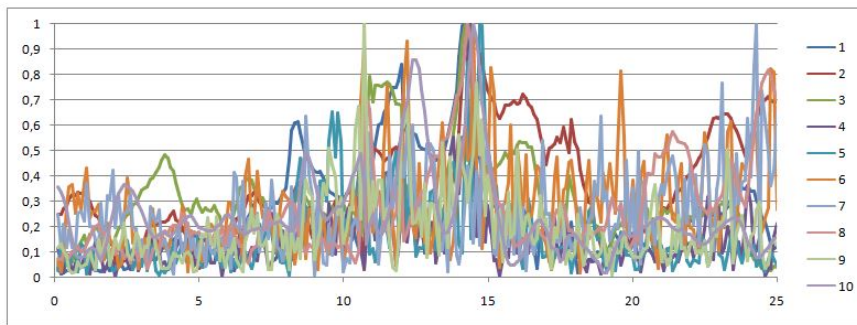


Σχήμα Α.38: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 41 - 50 (acceleration data 41 - 50)

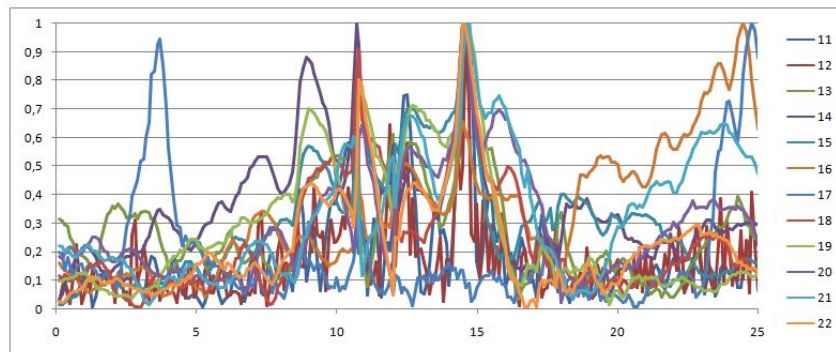


Σχήμα Α.39: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 51 - 54 (acceleration data 51 - 54)

- Μεταλλικός Πύργος 6 - Αποτελέσματα μετά το πείραμα

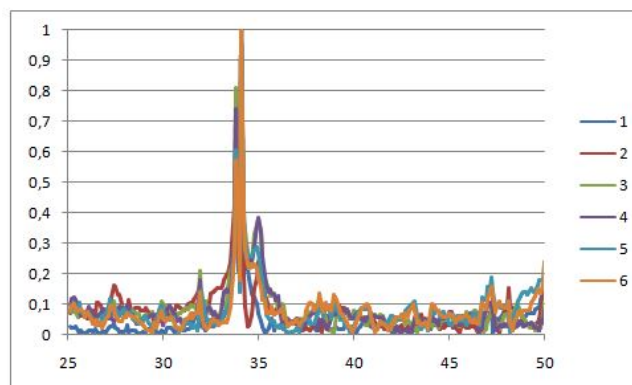


Σχήμα A.40: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)



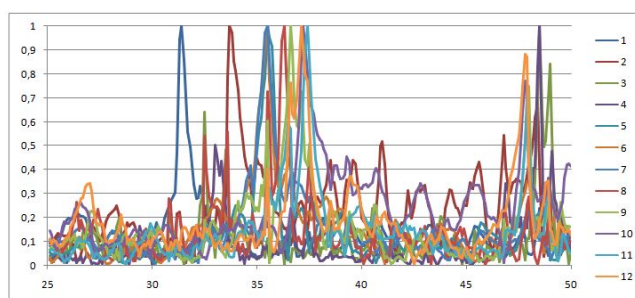
Σχήμα A.41: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 - 22 (acceleration data 11 - 22)

- Μεμονωμένοι διαγώνιοι σύνδεσμοι πύργων - Αποτελέσματα για διατομή L40.4



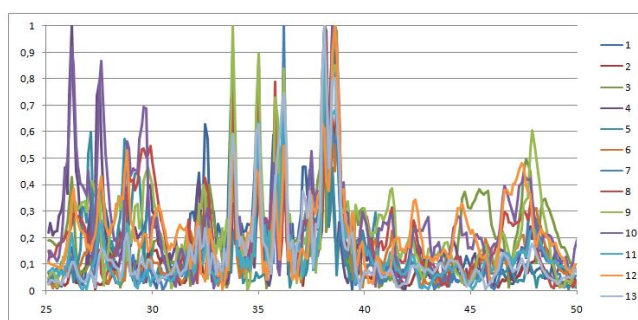
Σχήμα A.42: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 6 (acceleration data 1 - 6)

- Μεμονωμένοι διαγώνιοι σύνδεσμοι πύργων - Αποτελέσματα για διατομή L45.5



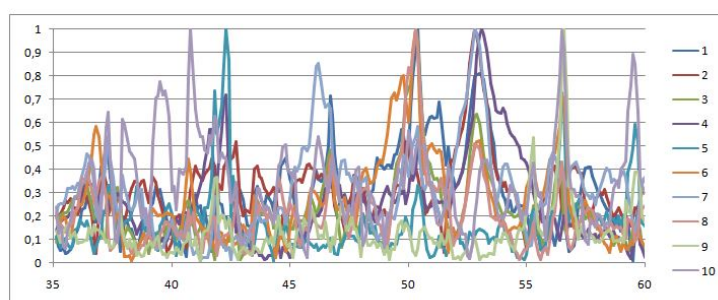
Σχήμα A.43: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 12 (acceleration data 1 - 12)

- Μεμονωμένοι διαγώνιοι σύνδεσμοι πύργων - Αποτελέσματα για διατομή L45.5 ενισχυμένη με CFRP

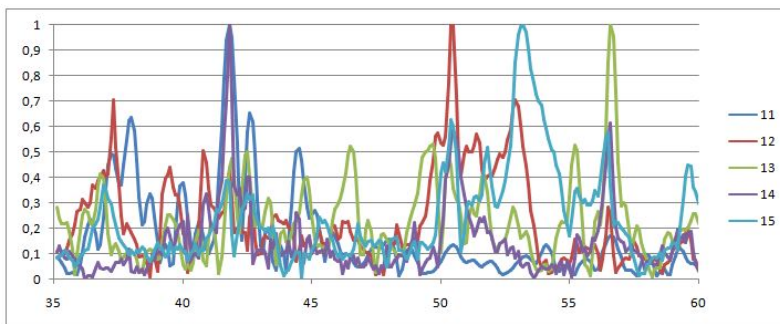


Σχήμα A.44: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 13 (acceleration data 1 - 13)

- Μεμονωμένοι διαγώνιοι σύνδεσμοι πύργων - Αποτελέσματα για διατομή L60.6-1

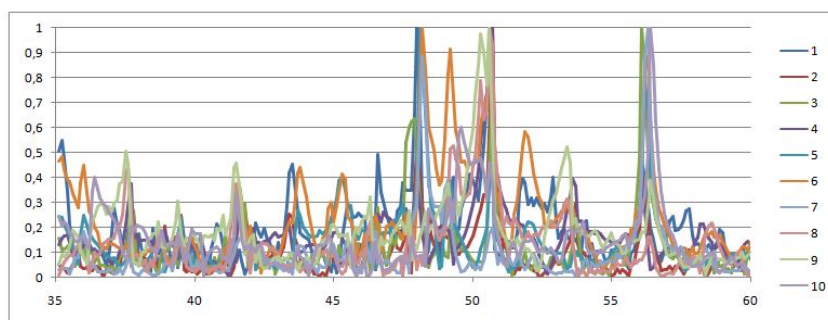


Σχήμα A.45: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)

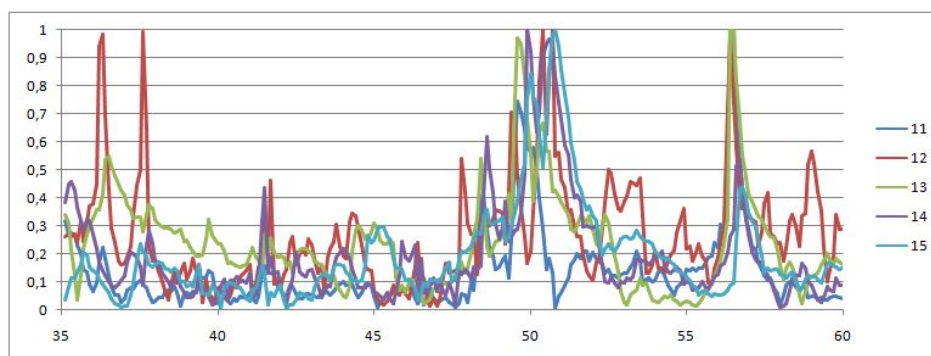


Σχήμα Α.46: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 - 15 (acceleration data 11 - 15)

- Μεμονωμένοι διαγώνιοι σύνδεσμοι πύργων - Αποτελέσματα για διατομή L60.6-2



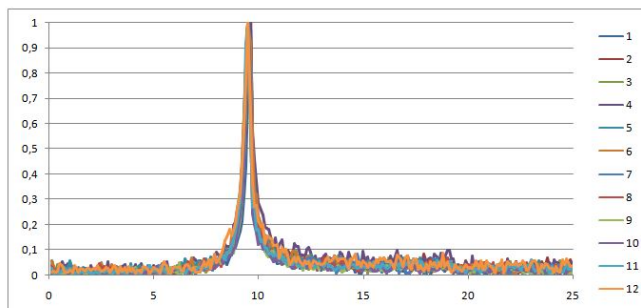
Σχήμα Α.47: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)



Σχήμα Α.48: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 - 15 (acceleration data 11 - 15)

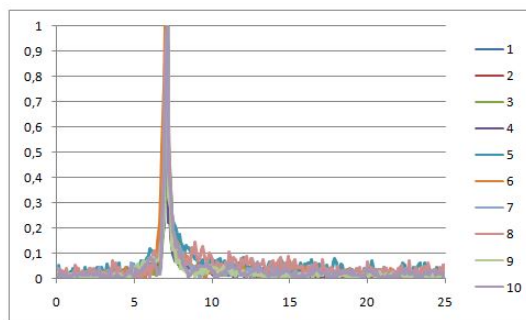
## Παράρτημα Β - Αποτελέσματα ανάλυσης των μετρήσεων στις σύμμικτες δοκούς

### - Σύμμικτη Δοκός 1 - Αποτελέσματα πριν το πείραμα



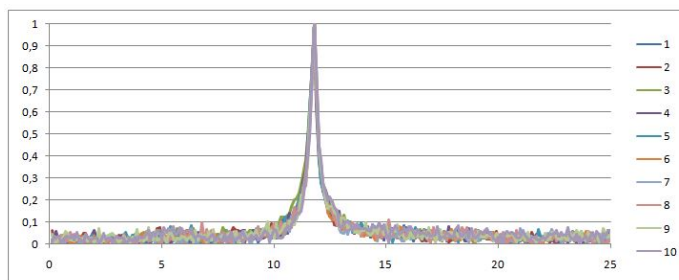
Σχήμα Β.1: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 12 (acceleration data 1 - 12)

### - Σύμμικτη Δοκός 1 - Αποτελέσματα μετά το πείραμα

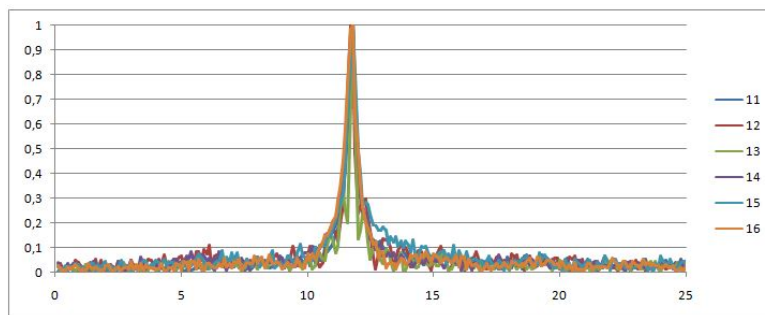


Σχήμα Β.2: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)

### - Σύμμικτη Δοκός 2 - Αποτελέσματα πριν το πείραμα

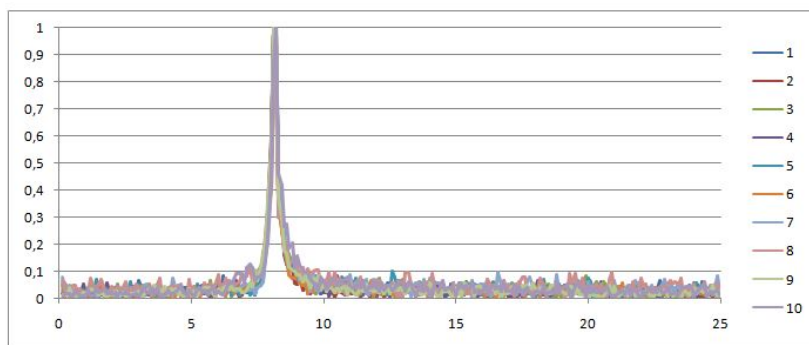


Σχήμα Β.3: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)



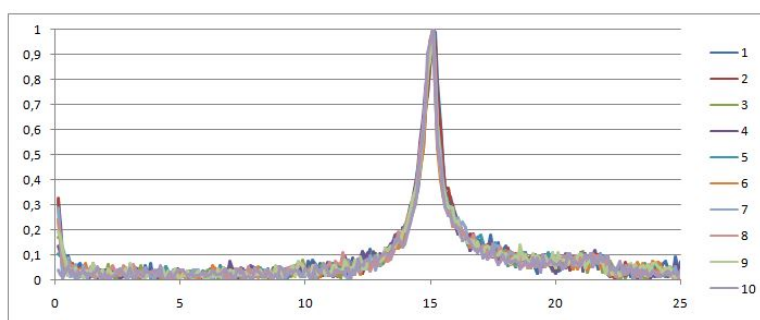
Σχήμα Β.4: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 -16 (acceleration data 11 - 16)

- Σύμμικτη Δοκός 2 - Αποτελέσματα μετά το πείραμα



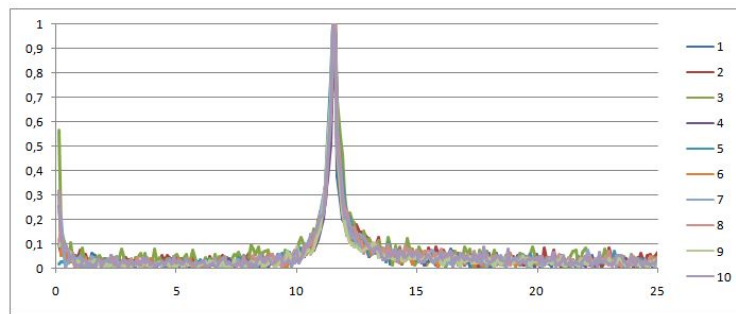
Σχήμα Β.5: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)

- Σύμμικτη Δοκός 3 - Αποτελέσματα πριν το πείραμα



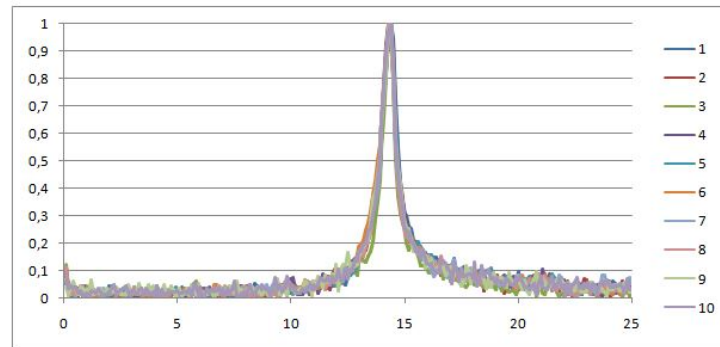
Σχήμα Β.6: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)

- Σύμμικτη Δοκός 3 - Αποτελέσματα μετά το πείραμα



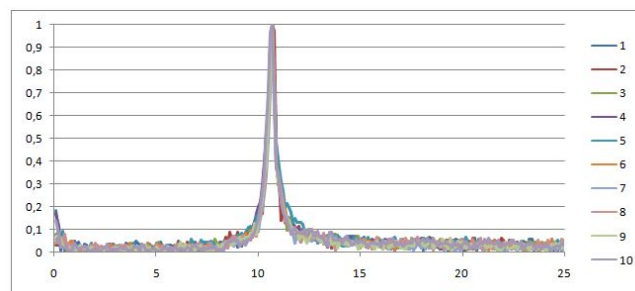
Σχήμα Β.7: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)

- Σύμμικτη Δοκός 4 - Αποτελέσματα πριν το πείραμα



Σχήμα Β.8: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)

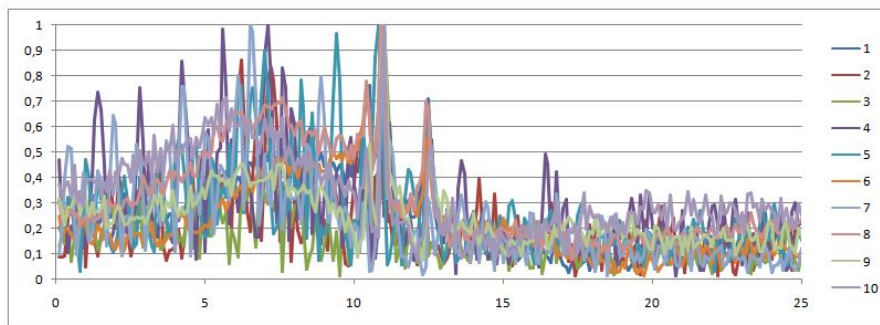
- Σύμμικτη Δοκός 4 - Αποτελέσματα μετά το πείραμα



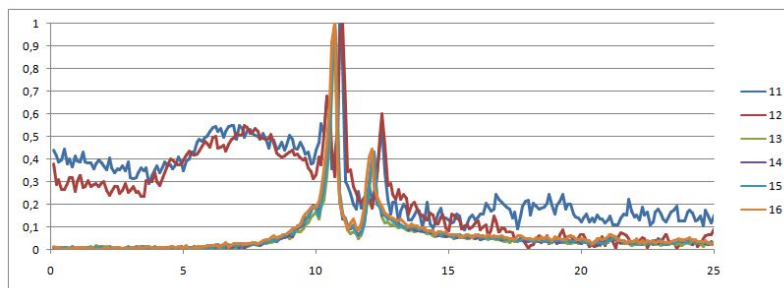
Σχήμα Β.9: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)



- Σύμμικτη Δοκός 5 - Αποτελέσματα πριν το πείραμα

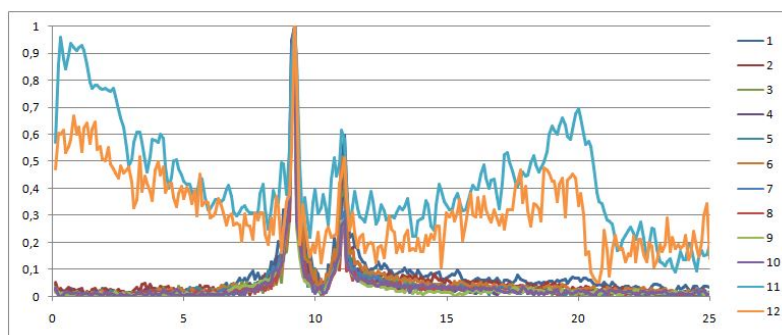


Σχήμα Β.10: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 10 (acceleration data 1 - 10)



Σχήμα Β.11: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 11 - 16 (acceleration data 11 - 16)

- Σύμμικτη Δοκός 5 - Αποτελέσματα μετά το πείραμα



Σχήμα Β.12: Αποτελέσματα ανάλυσης FFT (τιμές ανηγμένες στη μονάδα) για τα δεδομένα από τα επιταχυνσιογραφήματα 1 - 12 (acceleration data 1 - 12)

