

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΧΩΡΟΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»**

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ:
«ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΙΣΤΟΡΙΚΟΥ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΜΕ ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ»**

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ :

**« ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΙΣΤΟΡΙΚΕΣ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ
ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ »**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΠΡΟΒΙΔΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

ΚΑΛΟΕΙΔΑΣ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗΣ

ΧΑΝΙΑ, 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρακάτω εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Χώρος, Σχεδιασμός και Δομημένο Περιβάλλον» με κατεύθυνση στη «Ολοκληρωμένη προστασία ιστορικού δομημένου περιβάλλοντος με προηγμένες τεχνολογίες και υλικά» της σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Κρήτης και αφορά μέθοδο εντοπισμού βλαβών η οποία δύναται να εφαρμοστεί στην δομή ιστορικών αλλά και σύγχρονων κατασκευών με σκοπό την αξιολόγηση της δομικής τους ακεραιότητας. Η εργασία παρουσιάζει την εφαρμογή μιας μεθόδου μη καταστροφικού ελέγχου η οποία βασίζεται στην ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών σε κατάσταση λειτουργίας με σκοπό την εύρεση των ιδιομορφικών εκείνων χαρακτηριστικών απ' όπου μπορούν να προκύψουν σημαντικά συμπεράσματα για την παθολογία των κατασκευών και την πρόωμη ανίχνευση πιθανής δομικής βλάβης.

Η μέθοδος στηρίζεται στον έλεγχο της γραμμικότητας του δυναμικού συστήματος του φορέα. Μέσα από την εκτίμηση του λόγου απόσβεσης της κατασκευής σε ελεύθερη ταλάντωση, η ύπαρξη μη γραμμικότητας προϋποθέτει ύπαρξη βλάβης στο στοιχείο μας, ενώ μια γραμμική συμπεριφορά δείχνει ότι δεν έχει προκληθεί βλάβη.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να αποτελέσει μια πολύ αποτελεσματική διαγνωστική μέθοδο και διαδικασία διερεύνησης σφαλμάτων, η οποία σε κλίμακα μεγάλου μεγέθους, μπορεί να εφαρμοστεί σε φέροντες οργανισμούς από λιθοδομή ή και σκυρόδεμα για τον εντοπισμό των αστοχιών όπως, ασυνέχειας στην δομή του υλικού και ανομοιογένειας του. Η ανάπτυξη και εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι ένα σημαντικό βήμα προς τη βελτίωση της αξιοπιστίας της απόδοσης των δομικών στοιχείων μιας κατασκευής

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Κωσταντίνο Προβιδάκη, για το θέμα της διπλωματικής εργασίας που μου πρότεινε, αλλά και για την καθοδήγηση, υποστήριξη και εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της.

Επίσης, νιώθω υποχρέωση να ευχαριστήσω προσωπικά όλους τον Αναπλ. Καθηγητή κ. Ι. Τσομπανακη και την Επικ. Καθηγήτρια κ. Μαρία Σταυρουλάκη, μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής για την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής για τις συμβουλές που μου έδωσαν καθόλη την διάρκεια της εκπόνησης της, καθώς και όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών για τις γνώσεις και εμπειρίες που αποκόμισα μέσα από αυτό.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου και τους φίλους μου που με αγάπη και αμέριστη συμπαράσταση με ενθάρρυναν στη συστηματική προσπάθεια που κατέβαλα για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Ανίχνευση βλαβών με χρήση μη-καταστροφικών ελέγχων (ΜΚΕ)	13
1.1. Δομική ακεραιότητα των κατασκευών	13
1.2. Μηχανικές βλάβες και απώλεια αντοχής	14
1.3. Μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ) κατασκευών.....	15
1.4. Μέθοδοι ΜΚΕ	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Θεωρητικό υπόβαθρο μεθοδολογίας.....	19
2.1. Η μη γραμμική απόσβεση σε κατασκευές	20
2.2. Η ιδιομορφική ανάλυση ταλαντώσεων σε κατάσταση λειτουργίας (Operational Modal Analysis – OMA)	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Εργαστηριακή τεκμηρίωση της μεθόδου.....	35
3.1. Εισαγωγή – περιγραφή διαδικασίας	35
3.2. Εργαστηριακός εξοπλισμός.....	36
3.3. Προσδιορισμός ιδιομορφικών χαρακτηριστικών δοκιμίου Ο/Σ	42
3.4. Εντοπισμός βλάβης σε δοκίμιο σκυροδέματος από τον τρόπο απόσβεσης της ταλάντωσης.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Εφαρμογή μεθόδου με χρήση της OMA σε δομικά στοιχεία	69
4.1. Εισαγωγή – περιγραφή διαδικασίας	69
4.2. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στο πεδίο	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : Συμπεράσματα	88
5.1 Γενικά συμπεράσματα.....	88
5.2. Προτάσεις για περεταίρω έρευνα.....	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	90

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο προσδιορισμός των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών σε μια κατασκευή μπορεί να αποτελέσει έναν σημαντικό τρόπο ώστε να εκτιμάται η κατάσταση «υγείας» της κατασκευής. Ένα κύριο χαρακτηριστικό που μπορεί να δώσει μια εκτίμηση για την κατάσταση αυτή είναι ο λόγος απόσβεσης της κατασκευής. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι μια ιξώδης μορφή στον τρόπο απόσβεσης κατασκευής από σκυρόδεμα, δείχνει γραμμικότητα στο σύστημα χωρίς δηλαδή την ύπαρξη βλάβης. Όταν έχουμε απόσβεση τριβής, θεωρείται μη γραμμικότητα στο σύστημα και πιθανόν ύπαρξη βλάβης. Στόχος της εργασίας αυτής είναι η επαλήθευση της μεθόδου αυτής σε δομικά στοιχεία και η εφαρμογή της σε μεγαλύτερης κλίμακας δομικά στοιχεία διαφορετικών υλικών όπως η τοιχοποιία. Στις περισσότερες μεθόδους που χρησιμοποιούν ιδιομορφική ανάλυση, ο προσδιορισμός αυτών των χαρακτηριστικών επιβάλλει την εισαγωγή φόρτισης στο σύστημα. Χρησιμοποιώντας την ιδιομορφική ανάλυση σε κατάσταση λειτουργίας ως μέσον, εκτιμάται η κατάσταση μιας κατασκευής χωρίς την εισαγωγή φόρτισης στο σύστημα.

Η εργασία ξεκινά με την καταγραφή και παρατήρηση των κυματομορφών μέσα από το πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων για τον εντοπισμό και την αναγνώριση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου. Η τεχνική βασίζεται στην παρατήρηση των θεμελιωδών κορυφών του φάσματος των συχνοτήτων, θεωρώντας ότι η κορυφή γύρω από την οποία συμβαίνει η ακραία τιμή του φάσματος αντιπροσωπεύει ένα ιδιομορφικό χαρακτηριστικό του υπό εξέταση υλικού. Έπειτα διερευνάτε η απόσταση από τον αισθητήρα που πρέπει να γίνει η διέγερση του συστήματος (πχ μια κρούση) ώστε να εμφανιστεί αυτή η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα που προέκυψε θεωρώντας ότι στη θέση αυτή γίνεται πιο αντιπροσωπευτική η συμπεριφορά του στοιχείου και μπορούμε να πάρουμε αξιόπιστα αποτελέσματα.

Για την διερεύνηση και τεκμηρίωση της μεθοδολογίας γίνεται εφαρμογή της σε δοκίμιο που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο, (το οποίο αποτελείται από την ένωση τριών κύβων σκυροδέματος). Αρχικά καταγράφεται η ταλάντωση του υγιούς συστήματος από διέγερση στις επιλεγμένες θέσεις που προέκυψαν στο προηγούμενο βήμα. Έπειτα καταγράφεται η αντίστοιχη ταλάντωση μετά την δημιουργία βλάβης στο σύστημα και συγκρίνονται οι λόγοι απόσβεσης πριν και μετά τη βλάβη.

Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε μεγαλύτερης κλίμακας δομικά στοιχεία κάνοντας χρήση της ιδιομορφικής ανάλυσης σε κατάσταση λειτουργίας (Operational Modal Analysis -OMA) . Η ανάλυση αυτή γίνεται χωρίς να εισάγεται εξαναγκασμένη διέγερση στο σύστημα, αφού χρησιμοποιεί μόνο τις μικροδονήσεις από το περιβάλλον, όπως αέρας, κίνηση οχημάτων κλπ. Εφαρμόζεται και καταγράφεται η απόκριση τριών δομικών στοιχείων (δυο τοιχία σκυροδέματος και ένα τοιχίο τοιχοποιίας) , η οποία μετασχηματίζεται σε απόκριση ελεύθερης ταλάντωσης. Με το μεταχηματισμό αυτό μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τον λόγο απόσβεσης και την ύπαρξη μη γραμμικότητας στο σύστημα, δηλαδή την ύπαρξη βλάβης.

Το βασικό συμπέρασμα της παρούσας εργασίας είναι ότι ο προσδιορισμός της γραμμικότητας του δυναμικού συστήματος ενός στοιχείου μέσω του λόγου απόσβεσης μπορεί να αποτελέσει μια διαγνωστική μέθοδο και διαδικασία ανίχνευσης δομικής βλάβης, η οποία σε κλίμακα μεγάλου μεγέθους και κάνοντας χρήση της ιδιομορφικής ανάλυσης σε κατάσταση λειτουργίας, μπορεί να εφαρμοστεί σε φέροντες οργανισμούς από λιθοδομή όπως συμβαίνει στην περίπτωση των ιστορικών κατασκευών για τον εντοπισμό των αστοχιών όπως, ασυνέχειας στην δομή του υλικού και ανομοιογένειας του. Η ανάπτυξη και εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι ένα σημαντικό βήμα προς τη βελτίωση της αξιοπιστίας της απόδοσης των δομικών στοιχείων μιας ιστορικής κατασκευής.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αναγνώριση των δυναμικών χαρακτηριστικών διά μέσω ενόργανων μετρήσεων μιας κατασκευής, συντελεί στην τεκμηριωμένη άρσης των αβεβαιοτήτων που διαθέτει η κατασκευή.

Η συστηματική εποπτεία των κατασκευών αποτελεί μια ανάγκη ζωτικής σημασίας πρωτίστως για την διασφάλιση της προβλεπόμενης και ασφαλούς λειτουργίας τους, αλλά και για μια σειρά άλλων ζητημάτων που ξεκινούν από την ορθή και έγκαιρη συντήρηση των κατασκευών και καταλήγουν στον ολικό έλεγχο ποιότητας αυτών. Η έγκαιρη διάγνωση μιας μηχανικής βλάβης σε ένα δομικό σύστημα, συνεισφέρει καθοριστικά στην αποτελεσματική αντιμετώπιση της, καθώς επιτρέπει στους εμπλεκόμενους μηχανικούς να επιλέξουν και να εφαρμόζουν τη βέλτιστη διαδικασία επιδιόρθωσης.

Η εκτίμηση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών των κατασκευών, με βάση στοιχεία μετρήσεων έχει αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες και αναδεικνύεται ως ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για τον προσδιορισμό της πραγματικής κατάστασης των κατασκευών.

Οι περισσότερες από τις μεθόδους ανάλυσης που προσδιορίζουν τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά ανιχνεύουν τη βλάβη με τη σύγκριση της τρέχουσας δομικής κατάστασης της κατασκευής σε σχέση με τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά και τα δεδομένα που ελήφθησαν για την κατασκευή σε υγιή κατάσταση. Οι παραπάνω μέθοδοι προϋποθέτουν να είναι γνωστά τα δεδομένα των μετρήσεων της υγιούς κατάστασης μια δομής καθώς και να έχουν ληφθεί κάτω από τις ίδιες συνθήκες προκειμένου να αφορούν σε συγκρίσιμες ποσότητες και να ελαχιστοποιήσουν κατά αυτόν τον τρόπο την πιθανότητα σφάλματος. Πράγμα το οποίο είναι αρκετά δύσκολο. Έτσι είναι αναγκαίο να γίνεται ο προσδιορισμός αυτών των δυναμικών χαρακτηριστικών και να εκτιμάται η κατάσταση μιας κατασκευής χωρίς την ύπαρξη μιας τέτοιας βάσης δεδομένων.

Πολλές έρευνες, οι οποίες λαμβάνοντας υπόψιν τους τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά, προσπαθούν να εκτιμήσουν την κατάσταση μια κατασκευής, έχουν καταλήξει στη θεώρηση ύπαρξης βλάβης σε ένα στοιχείο Ο/Σ σε σχέση με τον τρόπο με τον οποίο αποσβένει λόγω μιας διέγερσης. Παρατηρώντας την ελεύθερη ταλάντωση του στοιχείου προκύπτει η μορφή του λόγου απόσβεσης. Στα στοιχεία Ο/Σ των οποίων η καμπύλη απόσβεσης είναι ιξώδους μορφής, θεωρείται γραμμικότητα στο σύστημά τους, δηλαδή δεν υπάρχει διάχυση της ενέργειας η οποία το διεγείρει λόγω κάποιας ρωγμής – βλάβης. Όταν η καμπύλη έχει τη μορφή απόσβεσης τριβής, θεωρείται μη γραμμικότητα στο σύστημα και τελικά ύπαρξη βλάβης.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αρχικά η επαλήθευση της θεώρησης ύπαρξης βλάβης σε σχέση με τον τρόπο απόσβεσης της κατασκευής σε εργαστηριακό επίπεδο σε δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος. Έπειτα επιχειρείται ο προσδιορισμός της απόσβεσης και κατά συνέπεια πιθανής βλάβης σε μεγαλύτερης κλίμακας δομικά στοιχεία στο πεδίο, τα οποία έχουν διαφορετικό υλικό όπως τοιχίο από τοιχοποιία. Κάνοντας χρήση της μεθόδου της OMA, όπου δεν επιβάλλεται εξαναγκασμένη διέγερση στο σύστημα, μπορούν να παρθούν ακριβή αποτελέσματα για την γραμμικότητα του συστήματος της κατασκευής παραμένοντας σε κατάσταση λειτουργίας.

Η δομή της παρούσας εργασίας ξενικά με την *εισαγωγή*, για την κατανόηση και τον σκοπό της ερευνάς που διεξήχθη, παρουσιάζοντας το αντικείμενο μελέτης και την διάρθρωση των κεφαλαίων της διπλωματικής εργασίας.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών και των μεθόδων αξιολογής τους μέσω μη καταστροφικών μεθόδων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο και εφαρμογές της μεθόδου αναφορικά με τον τρόπο απόσβεσης μια κατασκευής, της χρήσης της OMA και τον τρόπο μετασχηματισμού της χρονοιστορίας σε ελεύθερη ταλάντωση.

Στο τρίτο κεφάλαιο, επιχειρείται η κατανόηση και η επαλήθευση της θεώρησης ύπαρξης βλάβης σε σχέση με τον τρόπο απόσβεσης στο εργαστήριο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται εφαρμογή της μεθόδου σε δομικά στοιχεία στο πεδίο, κάνοντας χρήση της μεθόδου της OMA και επαληθεύοντας άλλη μια φορά την μέθοδο προσδιορισμού της κατάστασης της κατασκευής ανάλογα με την γραμμικότητα του συστήματος.

Τέλος, το κεφάλαιο πέντε, παρουσιάζει τα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην ανίχνευση και εντοπισμό βλαβών σε δομικά στοιχεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Ανίχνευση βλαβών με χρήση μη-καταστροφικών ελέγχων (ΜΚΕ)

1.1. Δομική ακεραιότητα των κατασκευών

Ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας κατασκευών και υλικών βρίσκεται σε στενή σύνδεση με τις εξελίξεις στον τομέα των Μη Καταστροφικών Ελέγχων (ΜΚΕ). Πληροφορίες για τη δομική κατάσταση είναι σημαντικές για το σχεδιασμό και εκτέλεση συντήρησης και γενικά τη διαχείριση των κατασκευών. Γρήγορες, αξιόπιστες και σχετικά οικονομικές μεθοδολογίες ΜΚΕ γίνονται ολοένα και περισσότερο απαραίτητες στους διάφορους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας [1]. Η επιστήμη της μηχανικής των κατασκευών και των υλικών γεννήθηκε και συνέχισε να αναπτύσσεται προκειμένου να εκπληρώσει τους παραπάνω στόχους. Μέσα από τη συστηματική μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών και των τρόπων διαμόρφωσης λειτουργικών δομικών συστημάτων, έδωσε τα τεχνολογικά και επιστημονικά εργαλεία προκειμένου σε κάθε περίπτωση να είναι δυνατός ο βέλτιστος σχεδιασμός [2].

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια τάση να τοποθετούνται συστήματα αισθητήρων και ενεργοποιητών (actuators) σε έργα υποδομής (γέφυρες, δικτυώματα, φράγματα κ.λ.π.) και την αεροναυπηγική, με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης της κατασκευής και την παρακολούθηση της δομικής της ακεραιότητας. Πολλές φορές μια τέτοια κατασκευή χαρακτηρίζεται ως «έξυπνη» λόγω της ιδιότητας που έχει στο να αισθάνεται και να ανταποκρίνεται σε ερεθίσματα από το περιβάλλον. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να καταγράψουν φυσικά μεγέθη όπως παραμόρφωση, επιτάχυνση, κύματα ήχου, πίεση ή θερμοκρασία. Γενικά τα παραπάνω συστήματα μπορούν να διαχωριστούν σε παθητικά και ενεργητικά συστήματα δειγματοληψίας. Τα παθητικά συστήματα δειγματοληψίας είναι εκείνα που λειτουργούν ανιχνεύοντας την απόκριση της κατασκευής λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών χωρίς οποιαδήποτε εισαγόμενη τεχνητή ενέργεια, ενώ τα ενεργητικά συστήματα είναι εκείνα που απαιτούν εξωτερικά παρεχόμενη ενέργεια υπό μορφή πίεσης ή ηλεκτρομαγνητικού κύματος για να λειτουργήσουν κατάλληλα.

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας έχει ως στόχο να παρέχει, σε κάθε στιγμή κατά τη διάρκεια της ζωής μιας κατασκευής, μια διάγνωση της κατάστασης των υλικών των διαφόρων μερών της και των τμημάτων που την αποτελούν. Η κατάσταση κάθε κατασκευής πρέπει να παραμένει στα πλαίσια που προβλέπει η αρχική μελέτη, αν και μπορεί να μεταβληθεί από τη φυσιολογική πάροδο του χρόνου λόγω της χρήσης, με τη δράση του περιβάλλοντος, καθώς και από τυχαία γεγονότα. Η λήψη μετρήσεων ανά χρονικά διαστήματα καθιστά δυνατή την εξέταση του ιστορικού της κατασκευής ενώ παράλληλα με τη ταυτόχρονη παρακολούθηση κατά την χρήση, μπορεί να παρέχεται και πρόγνωση για το μέλλον της κατασκευής (εξέλιξη ρωγμών, υπολειπόμενη διάρκεια ζωής κλπ) [3] .

Ο όρος Δομική Ακεραιότητα (Structural Integrity) ή Δομική «Υγεία» (Structural Health) μιας κατασκευής περιγράφει την ικανότητα της να ανταπεξέλθει στις ανάγκες για τις οποίες σχεδιάστηκε. Στο πεδίο της μηχανικής η δομική ακεραιότητα μιας κατασκευής, μπορεί να εξειδικευτεί στην ικανότητα της να παραλαμβάνει κατά τη λειτουργίας της με ασφάλεια, όλα εκείνα τα μηχανικά φορτία, στατικά και δυναμικά, για τα οποία σχεδιάστηκε. Δεδομένης της ευρύτητας που παρουσιάζουν ως προς τη δομική πολυπλοκότητα οι κατασκευές, η δομική ακεραιότητα αποτελεί μια πολυπαραμετρική ιδιότητα η οποία συνίσταται από ένα σύνολο ***α) μηχανικών, β) φυσικών και γ) κατασκευαστικών χαρακτηριστικών.***

Στο πεδίο των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών εντάσσονται ιδιότητες όπως π.χ. η πυκνότητα, η θερμική αγωγιμότητα, η υδραυλική αγωγιμότητα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής, οι μηχανικές αντοχές (σε θλίψη, εφελκυσμό, διάτμηση) και οι μηχανικές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson, κ.α.) των υλικών που αποτελούν το υπό μελέτη δομικό σύστημα. Όσον αφορά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά αυτά εντοπίζονται στη γεωμετρία και το σχεδιασμό τόσο του συνόλου της κατασκευής όσο και των επιμέρους δομικών στοιχείων που τη συνθέτουν [2].

1.2. Μηχανικές βλάβες και απώλεια αντοχής

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η έννοια της δομικής ακεραιότητας επικεντρώνεται στην ικανότητα του φέροντος οργανισμού ενός δομικού συστήματος να παραλαμβάνει με ασφάλεια όλα εκείνα τα μηχανικά φορτία που προβλέπεται να ασκηθούν σε αυτό. Η ικανότητα αυτή είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την αντοχή των υλικών που το συνιστούν, τη διαμόρφωση και το σχεδιασμό του, καθώς και με τους παράγοντες που επηρεάζουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Οποιαδήποτε μη προβλεπόμενη μεταβολή στη αντοχή των υλικών ή τη διαμόρφωση του φέροντος οργανισμού, η οποία επιδεινώνει τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής και επιδρά αρνητικά στη συνολική μηχανική αντοχή της, χαρακτηρίζεται ως Μηχανική Βλάβη.

Η εμφάνιση μηχανικών βλαβών δεν σημαίνει αυτόματα την ολική απώλεια λειτουργικότητας της κατασκευής. Ωστόσο ανάλογα με την έκταση και τη σοβαρότητα της, εάν δεν εντοπιστεί και επιδιορθωθεί έγκαιρα είναι δυνατό να οδηγήσει σταδιακά στη πλήρη απώλεια αντοχών του δομικού συστήματος και πολλές φορές στην κατάρρευση του. Οι μηχανικές βλάβες κατηγοριοποιούνται α) σε εκείνες που σχετίζονται με την απομείωση των μηχανικών αντοχών των δομικών υλικών, β) σε εκείνες που σχετίζονται με τη διάρρηξη της δομικής συνέχειας στην έκταση ενός δομικού στοιχείου και γ) σε εκείνες που αφορούν τη διάρρηξη της δομικής συνέχειας σε επίπεδο φέροντος οργανισμού.

Τα αίτια που προκαλούν την μείωση της αντοχής των δομικών υλικών, εντοπίζονται κυρίως στην αλληλεπίδραση των υλικών με τις συνθήκες του φυσικού περιβάλλοντος, στην ύπαρξη ατελειών στη μικροδομή τους και στην εκδήλωση συνθηκών καταπόνησης οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά τη συνέχεια της μικροδομής τους. [2]

1.3. Μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ) κατασκευών

Ο χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων των υλικών είναι σημαντικός για την κατανόηση της συμπεριφοράς τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και αποτελεί τη βάση για τον σχεδιασμό προϊόντων. Η ανάγκη για αξιόπιστο χαρακτηρισμό υλικών και δομών που χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών (π.χ. αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία, θαλάσσιες κατασκευές, πυρηνική βιομηχανία, κατασκευές πολιτικού μηχανικού, μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς, κλπ.) έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνικών και οργανολογίας [1].

Μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ) ονομάζεται ο έλεγχος που δεν επιφέρει αλλοιώσεις στο εξεταζόμενο αντικείμενο. Οι μέθοδοι ΜΚΕ είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία και συντήρηση κάθε εξαρτήματος και κατασκευής καθώς και για την διατήρηση της πολιτισμικής κληρονομιάς και των αρχαιοτήτων. Ο πρωταρχικός σκοπός των μεθόδων του ΜΚΕ είναι ο έλεγχος της δομικής ακεραιότητας ώστε να υπολογίζεται ο κίνδυνος αστοχίας υλικών και κατασκευών. Οι Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι χρησιμοποιούνται για να διαπιστώνεται η ύπαρξη και το μέγεθος ελαττωμάτων σε μια κατασκευή, χωρίς όμως να καταστρέφεται ούτε να επηρεάζεται η λειτουργικότητά της. Με τη συνδυασμένη χρήση των μεθόδων Μη Καταστροφικού Ελέγχου και της Μηχανικής των Θραύσεων, μπορούμε να είμαστε συνεχώς ενήμεροι για την καλή κατάσταση λειτουργίας μιας κατασκευής (Health Monitoring) και για τον προβλεπόμενο χρόνο ζωής της (Residual Lifetime). Ο ΜΚΕ όμως δεν περιορίζεται στην ανίχνευση ρωγμών, αλλά σε ένα ευρύτερα αναπτυσσόμενο πεδίο που ασχολείται με τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών, όπως της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, τη μοριακή δομή, αλλά και με τα χαρακτηριστικά μικροδομής, όπως η σκληρότητα ή ο βαθμός πολυμερισμού ρητίνης κα. Παράλληλα η εφαρμογή ΜΚΕ σε έργα τέχνης και σε ιστορικά και αρχαιολογικά ευρήματα είναι επιβεβλημένη για προφανείς λόγους.

Πολλές κατασκευές, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, χρειάζονται περιοδικούς ελέγχους ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζημιές που δεν θα γίνονταν αντιληπτές με τους απλούς καθημερινούς τρόπους ελέγχου. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι: το κελύφους ή η επένδυση των αεροσκαφών, οι υπόγειες σωληνώσεις, οι κατασκευές από σκυρόδεμα και ο οπλισμός τους, τα πιεστικά δοχεία χημικών αντιδραστηρίων, τα συρματόσχοινα γεφυρών, κ.ά. Οι εφαρμογές των ΜΚΕ, σήμερα, καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα κατασκευαστικών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων και τις συναντάμε σχεδόν παντού. Οι λόγοι οι οποίοι οδήγησαν σε τόσο ραγδαία ανάπτυξη τις τεχνικές ΜΚΕ συνοψίζονται στους εξής [3]:

- Αυξημένη πολυπλοκότητα των σύγχρονων μηχανημάτων και εξαρτημάτων,
- Αυξημένη ζήτηση κατασκευών,
- Απαίτηση για ασφαλέστερες κατασκευές,
- Υψηλό κόστος των αστοχιών σε κατασκευές και μηχανήματα



Εικόνα 1.1 Διαδικασία ΜΚΕ σε κατασκευές [3]

Ένα μειονέκτημα που συνοδεύει της μεθόδους ΜΚΕ είναι η αβεβαιότητα στην ακρίβεια προσδιορισμού των τιμών των δομικών χαρακτηριστικών. Παρόλα αυτά, η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και των υπολογιστικών συστημάτων, καθώς και υιοθέτηση σημαντικών στατιστικών εργαλείων, επιτρέπει πλέον τον περιορισμό της αβεβαιότητας σε συγκεκριμένα όρια εμπιστοσύνης .

Η συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών παρατήρησης και των δομικών χαρακτηριστικών επιτυγχάνετε είτε μέσω εμπειρικών κανόνων-μοντέλων τα οποία έχουν προκύψει από τη στατιστική συσχέτιση ενός επαρκούς όγκου πειραματικών δεδομένων, είτε από φυσικά μοντέλα-εξισώσεις τα οποία έχουν προκύψει μέσω θεωρητικής προσεγγίσεως του υπό μελέτη προβλήματος. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των μη καταστροφικών μεθόδων είναι η δυνατότητα εφαρμογή τους στον επί τόπου έλεγχο των δομικών συστημάτων και μάλιστα από τα πρώτα στάδια της κατασκευής.

Επιπλέον, με την υιοθέτηση της ασύρματης τεχνολογίας, των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου και την ανάπτυξη της διαδικτυακής μεταφοράς, αποθήκευσης και προσπέλασης των πληροφοριών, οι μέθοδοι ΜΚΕ προσφέρουν τη δυνατότητα ανάπτυξης ολοκληρωμένων συστημάτων παρακολούθησης, τα οποία εγκαθίστανται μόνιμα σε κατασκευές και καταγράφουν την εξέλιξη της δομικής τους ακεραιότητας από τα πρώτα στάδια δόμησης και για το σύνολο του χρόνου ζωής τους. Σε αρκετές περιπτώσεις ο χρήστης δύναται να έχει άμεση και σε πραγματικό χρόνο διαδικτυακή πρόσβαση στα δεδομένα παρακολούθησης, πραγματοποιώντας απομακρυσμένο έλεγχο και επιθεώρηση της δομικής ακεραιότητας.

Με βάση τα παραπάνω οι μέθοδοι ΜΚΕ αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο στο πεδίο της αξιολόγησης των εργασιών παρασκευής των δομικών υλικών, των εργασιών κατασκευής των δομικών συστημάτων, την επιθεώρηση της αρτιότητας μιας κατασκευής και τον εντοπισμό συνθηκών έντονης καταπόνησης. Συνοπτικά οι στόχοι του ΜΚΕ δομικών στοιχείων και συστημάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι οι ακόλουθοι: [2]

- Επί τόπου έλεγχος ποιότητας των δομικών στοιχείων ή των υφιστάμενων δομικών συστημάτων.

- Ανίχνευση και εντοπισμός ρωγμών, ατελειών και κοιλοτήτων οι οποίες δύναται να προέρχονται είτε από έντονη μηχανική καταπόνηση, είτε από εσφαλμένη παραγωγή του υλικού.
- Ανίχνευση περιοχών της κατασκευής όπου εντοπίζεται επιδείνωση της δομικής ακεραιότητας λόγω έντονης μηχανικής φόρτισης, κόπωσης, εξωτερικής ή εσωτερικής χημικής διάβρωσης
- Παροχή χρήσιμων πληροφοριών για την ασφάλεια της κατασκευής

1.4. Μέθοδοι ΜΚΕ

Ο ΜΚΕ χρησιμοποιεί διάφορες μεθόδους, κάθε μια από τις οποίες βασίζεται σε συγκεκριμένη επιστημονική παραδοχή ή αρχή λειτουργίας και επίσης μπορεί να διακρίνεται σε περισσότερες από μια τεχνικές. Η αξία της κάθε μεθόδου εξαρτάται από το είδος του προβλήματος. Μια μέθοδος ή τεχνική, λόγω της φύσης και της λειτουργίας της, μπορεί να είναι από ιδανική έως και εντελώς ανεφάρμοστη. Για το λόγο αυτό η σωστή επιλογή είναι σημαντική για την τελική απόδοση του ΜΚΕ [3].

Η διαδικασία του ελέγχου συχνά περιπλέκεται από το γεγονός ότι πολλά υλικά είναι από τη φύση τους ανισότροπα (πχ. σύνθετα υλικά), ενώ οι περισσότερες τεχνικές ΜΚΕ αναπτύχθηκαν για ισότροπα υλικά, όπως τα μέταλλα. Η ανάπτυξη νέων τεχνικών ΜΚΕ για την αξιολόγηση ανισότροπων υλικών και δομών αποτελεί σημαντικό ερευνητικό αντικείμενο περιοχής της συγχώνευσης δεδομένων (data fusion) είναι ένα ακόμα αναδυόμενο πεδίο έρευνας στο τομέα των ΜΚΕ. Τα δεδομένα που συλλέγονται με μία τεχνική μπορούν με βάση το data fusion να συνδυαστούν με τα δεδομένα από μια διαφορετική τεχνική με σκοπό την ανίχνευση ατέλειας/βλάβης, η οποία δεν είναι ανιχνεύσιμη από μια μόνο τεχνική όταν αυτή χρησιμοποιείται ανεξάρτητα. Δεδομένα από διάφορες τεχνικές μπορούν λοιπόν να συγχωνευτούν για να παρέχουν μια πληρέστερη περιγραφή των λεπτομερειών της μικροδομής ενός υλικού από ότι είναι δυνατό με τη χρήση μεμονωμένων κλασσικών μεθόδων.

Η ανάπτυξη νέων, καινοτόμων τεχνολογιών επιτρέπουν την πραγματοποίηση πιο αποδοτικών προληπτικών ελέγχων. Νέες εξελίξεις στους ανιχνευτές στερεάς κατάστασης, στους ενσωματωμένους στη δομή αισθητήρες, καθώς και στη μετάδοση των αποτελεσμάτων ελέγχου με ασύρματη επικοινωνία επηρεάζουν τόσο την ικανότητα και αποτελεσματικότητα του ελέγχου όσο και το κόστος. Για παράδειγμα, νέου τύπου αισθητήρες θερμογραφίας υπερύθρου, ανιχνευτές ακτίνων-Χ, και αισθητήρες υπερήχων δίνουν τώρα τη δυνατότητα ταχείας σάρωσης μεγάλων περιοχών των δομών για ελαττώματα. Αρκετές νέες εξελίξεις στους τομείς αυτούς επωφεληθήκαν από τη θεαματική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια της μη επεμβατικής ιατρικής απεικόνισης.

Η επιτροπή για τη μη καταστροφική αξιολόγηση υλικών (National Materials Advisory Board-NMAB) υιοθέτησε ένα σύστημα για την κατηγοριοποίηση των ΜΚΕ σε έξι κύριες κατηγορίες: [1]

- Οπτικός έλεγχος
- Έλεγχος με διεισδυτικές ακτινοβολίες (penetrating radiation)
- Μαγνητικός-ηλεκτρικός έλεγχος
- Έλεγχος με μηχανικές δονήσεις
- Θερμικοί έλεγχοι
- Χημικοί και ηλεκτροχημικοί έλεγχοι

Μια μέθοδος ΜΚΕ που στηρίζεται στην καταγραφή της δυναμικής απόκριση ενός δομικού συστήματος είναι η ιδιομορφική ανάλυση σε κατάσταση λειτουργίας (Operational Modal Analysis) και περιέχει το σύνολο της χρήσιμης πληροφορίας που σχετίζεται με τη δυσκαμψία του φορέα, την κατανομή της μάζας στο εσωτερικό του και την απόσβεση του υλικού. Ο προσδιορισμός των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμος ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για την δομική κατάσταση της κατασκευής. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της OMA είναι ότι μπορεί να βγάλει αποτελέσματα από μικροδονήσεις που προέρχονται από το περιβάλλον και δεν χρειάζεται να διακοπεί πιθανή λειτουργία του κτιρίου, ώστε να εφαρμοστεί κάποια εξαναγκασμένη διέγερση κάτι το οποίο προϋποθέτουν οι περισσότερες ιδιομορφικές αναλύσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Θεωρητικό υπόβαθρο μεθοδολογίας

Η έρευνα σχετικά με την ανίχνευση ζημιών που βασίζεται σε μικροδονήσεις ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 στις αεροδιαστημικές δομές. Στη συνέχεια, στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η έρευνα αναδείχθηκε ιδιαίτερα σε κατασκευές πολιτικού μηχανικού όπως γέφυρες και μνημειακές κατασκευές. Πολλές τεχνικές και μέθοδοι ανίχνευσης ζημιών έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία 30 χρόνια. Ορισμένες εφαρμογές μεγάλης κλίμακας έχουν πραγματοποιηθεί, αλλά οι ερευνητές αντιμετώπιζαν δυσκολίες στο να επικυρώσουν και να επαληθεύσουν την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων μεθόδων, κυρίως λόγω της μη διαθεσιμότητας βάσης δεδομένων από υγιές κατασκευές χωρίς βλάβες.

Ενδιαφέρον είχε η έρευνα που έγινε από το 1995 στο Εθνικό Εργαστήριο του Los Alamos σε μεγάλες κατασκευές πολιτικού μηχανικού, καθώς επέτρεψε στους ερευνητές να συγκρίνουν την δυναμική απόκριση σε μια κατασκευή πριν και μετά από την επιβολή διαφόρου επιπέδου βλάβη σε αυτό. Οι περισσότερες από τις μελέτες αυτές βασίστηκαν στην αλλαγή των δυναμικών χαρακτηριστικών, δεδομένου ότι οι αλλαγές σε φυσικές ιδιότητες προκαλούν ανιχνεύσιμες μεταβολές στα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Συνήθως αυτές οι τεχνικές βασίζονται στην καταγραφή των αλλαγών στα δυναμικά χαρακτηριστικά όπως οι ιδιοσυχνότητες, οι ιδιομορφές και ο λόγος απόσβεσης. Αυτές οι τεχνικές βασίζονται στη γραμμική ανάλυση και η αξιοπιστία και το εύρος εφαρμογής τους είναι ευρέως γνωστά.

Το βασικό ζήτημα είναι ότι όταν εφαρμόζεται η παραπάνω τεχνική προσδιορισμού των κύριων ιδιομορφικών χαρακτηριστικών με σκοπό την εύρεση σεισμικών βλαβών, παρουσιάζεται μη γραμμικότητα στην απόκριση της κατασκευής. Οι περισσότερες από τις τεχνικές που αναπτύχθηκαν μέχρι τώρα και βασίζονται στις καταγραφές των κύριων ιδιομορφικών χαρακτηριστικών, προϋποθέτουν γραμμική συμπεριφορά στις αποκρίσεις των κατασκευών. Οπότε η ύπαρξη μιας μη γραμμικότητας προϋποθέτει ύπαρξη πιθανής βλάβης στην κατασκευή που έχει προκληθεί σε κάποια χρονική στιγμή που έχει ενεργήσει επιβλαβή φόρτιση.

[4]

2.1. Η μη γραμμική απόσβεση σε κατασκευές

Η ακριβής εκτίμηση της απόσβεσης ανοίγει τον δρόμο στην χρησιμοποίησή της για την εύρεση βλαβών στις κατασκευές. Αρκετές εφαρμογές έχουν κάνει χρήση της απόσβεσης για την απεικόνιση βλαβών [5-9] με τις πιο αντιπροσωπευτικές οι εφαρμογές σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος.

Κατά τον χαρακτηρισμό της βλάβης με τη χρήση της απόσβεσης, πάνω απ' όλα πρέπει να επισημανθεί η επίδραση της βλάβης στην απόσβεση. Θεωρητικά η βλάβη προκαλεί αλλαγές στις δυναμικές ιδιότητες (ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές, λόγος απόσβεσης) και επομένως μπορεί να αντικατοπτριστεί μια βλάβη από την αλλαγή στον λόγο απόσβεσης. Ειδικότερα, αρκετές μελέτες είναι ελπιδοφόρες για τη επίδραση της βλάβης στον λόγο απόσβεσης αλλά όχι τόσο εκτεταμένα όπως οι έρευνες για τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές. Για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα διάφορες μελέτες έχουν διερευνήσει την επίδραση της βλάβης στον λόγο απόσβεσης με μερικά ενδιαφέροντα ευρήματα. [10,11]. Παρακάτω συνοψίζονται κάποιες αντιπροσωπευτικές μελέτες.

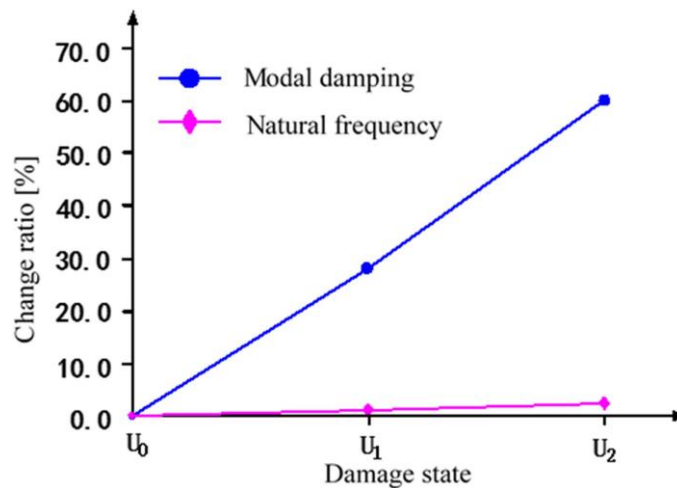
Ο Dieterle [12] διερεύνησε πειραματικά και αριθμητικά την συμπεριφορά του λόγου απόσβεσης σε ραγισμένες δοκούς Ο/Σ. Διαπιστώθηκε ότι οι ρωγμές θα μπορούσαν να προκαλέσουν αύξησης της απόσβεσης.

Ο Daneshjoo [13] εξέτασε την μεταβολή στην απόσβεση ραγισμένων δοκών Ο/Σ, με το φαινόμενο της αύξησης της απόσβεσης να αυξάνεται μαζί με την ανάπτυξη των ρωγμών.

Ο Bovsunovsky [14] χρησιμοποίησε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για να προβλέψει αλλαγές στον λόγο απόσβεσης σε ραγισμένες δοκούς Ο/Σ. Διαπιστώθηκε ότι τα ραγισμένα δείγματα είχαν μεγαλύτερη απόσβεση από εκείνα των άθικτων δειγμάτων.

Ο Παντελίδου Σ. [15] έδειξε ότι ο λόγος απόσβεσης αυξάνεται με την αύξηση του βάθους της ρωγμής. Συμπέρανε ότι η ανίχνευση ρωγμής, αλλάζοντας ο λόγος απόσβεσης έχει το πλεονέκτημα ότι δεν είναι τόσο ευαίσθητος στις συνοριακές συνθήκες στήριξης, όσο είναι οι ιδιοσυχνότητες.

Ο Shahzad [16] εξέτασε την ανίχνευση βλάβης λόγω διάβρωσης του οπλισμού σε δοκούς Ο/Σ παρατηρώντας τις αλλαγές στον λόγο απόσβεσης. Στη Εικόνα 2.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας.



Εικόνα 2.1 Αλλαγές στον λόγο απόσβεσης και στις ιδιοσυχνότητες με την αύξηση της διάβρωσης, ως βλάβη στο στοιχείο. U_0 , U_1 , U_2 υποδηλώνουν καταστάσεις βλάβης 0 (άθικτη), 1 και 2, αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι ο λόγος απόσβεσης αυξήθηκε με την αύξηση της διάβρωσης. Επίσης ο λόγος απόσβεσης είναι πιο ευαίσθητος στην αλλαγή από τις ιδιοσυχνότητες σε βλάβες από διάβρωση.

Πειράματα που διεξήχθησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1990 σε προκατασκευασμένα τεμάχια οπλισμένου σκυροδέματος [17] έδειξαν ότι η παρουσία μικρής, οπτικά ανιχνεύσιμης ρωγμής προκάλεσε αμελητέες αλλαγές στις συχνότητες αλλά σημαντική αύξηση της απόσβεσης της κατασκευής. Το βάθος των μελετών οδήγησε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει σαφής σχέση μεταξύ της ύπαρξης ζημιάς στο στοιχείο και ενός μη γραμμικού μηχανισμού που μπορεί να εκφραστεί μέσα από την μη γραμμική απόσβεση της απόκρισης του στοιχείου. Όπως επισήμαναν πολλές μελέτες, η ύπαρξη μη γραμμικής συμπεριφοράς της απόσβεσης σε σκυρόδεμα συνδέεται με την παρουσία ρωγμών σε αυτό.

Οι προηγούμενες μελέτες υποδηλώνουν έναν κανόνα ότι η απόσβεση συσχετίζεται με το βαθμό της βλάβης. Επίσης δίνεται έμφαση στην ευαισθησία στην αλλαγή της απόσβεσης που είναι μεγαλύτερη από αυτή των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών. Αυτός ο κανόνας παρέχει έναν βασικό οδηγό για τη χρήση της αλλαγής της απόσβεσης ως αποτελεσματικό δυναμικό χαρακτηριστικό γνώρισμα για την ανίχνευση, τον εντοπισμό και την ποσοτικοποίηση της βλάβης.

Υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα στις μεθόδους ανίχνευσης βλαβών που βασίζονται στα δυναμικά χαρακτηριστικά (ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές, απόσβεση) και σε εκείνες που βασίζονται στην αναγνώριση ανωμαλιών πχ μη γραμμικότητα. Στις μεθόδους που βασίζονται στις ιδιομορφικές παραμέτρους η βλάβη σχετίζεται με την διαφορά στη συμπεριφορά μεταξύ υγιούς και μη υγιούς κατάστασης της κατασκευής. Επομένως αυτές οι μέθοδοι έχουν δυσκολίες στην ανίχνευση βλαβών εάν τα χαρακτηριστικά της κατασκευής στην

υγιά της μορφή δεν είναι διαθέσιμα. Αντίθετα στην περίπτωση των μεθόδων που βασίζονται στη μη γραμμικότητα, η ίδια η ανωμαλία αποκαλύπτει την βλάβη, χωρίς αναφορά στην αρχική υγιά κατάσταση της κατασκευής [17].

Η απόσβεση σε μια δονούμενη κατασκευή συσχετίζεται με τη διάχυση της μηχανικής ενέργειας [18]. Η απορρόφηση ενέργειας ισούται με το έργο που πραγματοποιείται από την δύναμη απόσβεσης. Σε περίπτωση ελεύθερης ταλάντωσης, η παρουσία απόσβεσης έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή μείωση του πλάτους. Για κάθε περιοδικό κύκλο ταλάντωσης, η ποσότητα απώλειας ενέργειας ΔE μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\Delta E = \oint \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

Όπου σ είναι η τάση (ή εσωτερική δύναμη) και ε είναι η παραμόρφωση. Αυτή η ποσότητα αντιπροσωπεύει την περιοχή εντός του βρόγχου υστέρησης που σχηματίζεται για κάθε κύκλο. Αν το σύστημα έχει προσομοιωθεί ως ένας απλός γραμμικός ταλαντωτής, η διαφορική εξίσωση κίνησης εκφράζεται ως:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = F(t) \quad (2)$$

Όπου x είναι η μετατόπιση, m η μάζα του συστήματος, k είναι η ακαμψία και c η απόσβεση, ενώ $F(t)$ είναι η εξωτερική διέγερση. Πολλές έρευνες απέδειξαν πως στην υγιά κατάσταση, σε ένα στοιχείο σκυροδέματος, η διάχυση της ενέργειας οφείλεται στην απόσβεση υλικών η οποία εμφανίζεται μακροσκοπικά ιξώδης, δηλαδή αναλογικό με την ταχύτητα της κίνησης. Η ενέργεια που διαχέεται γίνεται

$$\Delta E_{visc} = \int_0^T (c\dot{x})\dot{x}dt = \pi c \omega x_0^2 \quad (3)$$

Όπου ω είναι η φυσική συχνότητα του συστήματος, x_0 είναι το αρχικό εύρος ταλάντωσης και η ολοκληρώνεται σε μια περίοδο.

Ο λόγος ιξώδους απόσβεσης μπορεί να οριστεί ως

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta E_{visc}}{E_{pot}} \quad (4)$$

Όπου E_{pot} είναι η μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης της κατασκευής

$$E_{pot} = \frac{1}{2} k x_0^2 \quad (5)$$

Στην περίπτωση της ελεύθερης ταλάντωσης, από τις εξισώσεις (3)-(4) ο λόγος ιξώδους απόσβεσης γίνεται

$$\xi = \frac{c}{2m\omega} \quad (6)$$

Αυτή η ποσότητα είναι ανεξάρτητη από το πλάτος της ταλάντωσης x_0 .

Οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα επηρεάζονται έντονα από την ύπαρξη ρωγμών. Αν το στοιχείο μας έχει βλάβη, μέσα στις ρωγμές μπορεί να είναι ο πιο σημαντικός μηχανισμός απόσβεσης, ο οποίος ορίζεται με πραγματική συμπεριφορά της τριβής του Coulomb. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της ολίσθησης μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος. Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει ένα σύστημα με λόγο απόσβεσης τριβής είναι

$$m\ddot{x} + F_c \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} + kx = F(t) \quad (7)$$

Όπου F_c είναι η δύναμη τριβής. Η εξίσωση (7) είναι μη γραμμική και η λύση της πρέπει να υπολογιστεί μέσω αριθμητικής ολοκλήρωσης. Συνήθως η F_c εκφράζεται με αναφορά στη δύναμη N που δρα μεταξύ των επιφανειών όπως

$$F_c = \mu N \quad (8)$$

Όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής, ο οποίος εξαρτάται μόνο από τα υλικά επαφής.

Η απώλεια ενέργειας ανά κύκλο για αυτό το μοντέλο, με αναφορά στην εξίσωση (1), γίνεται

$$\Delta E_{frict} = \int_0^T F_c \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} \dot{x} dt = 4F_c x_0 \quad (9)$$

Συνεπώς, ένας ισοδύναμος λόγος απόσβεσης τριβής μπορεί να οριστεί ως

$$\gamma = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta E_{frict}}{E_{pot}} = \frac{2F_c}{\pi k x_0} \quad (10)$$

Σε αντίθεση με τον λόγο ιξώδους απόσβεσης, αυτή η παράμετρος εξαρτάται από το αρχικό πλάτος x_0 . Το Figure 1 [19] δείχνει μια σύγκριση μεταξύ των βρόγχων υστέρησης που λαμβάνονται από τα δύο μοντέλα της ιξώδους απόσβεσης και απόσβεση τριβής αντίστοιχα. Σε αντίθεση με την ιξώδη απόσβεση το σχήμα του βρόγχου υστέρησης του συστήματος τριβής οφείλεται στο γεγονός ότι η δύναμη απόσβεσης έχει μια σταθερή ένταση, πάντα αντίθετη προς την κατεύθυνση της κίνησης, όπως φαίνεται στην εξίσωση (7). Οι λύσεις των εξισώσεων (2) και (7), στην περίπτωση της ελεύθερης ταλάντωσης παρουσιάζονται στο Figure 2 [4].

$$a(t) = x_0 e^{-\xi \omega t} \quad \text{for viscous damping} \quad (11)$$

$$a(t) = x_0 \left(1 - \frac{2}{\pi} \frac{x_{lim}}{x_0} \omega t\right) \quad \text{for friction damping} \quad (12)$$

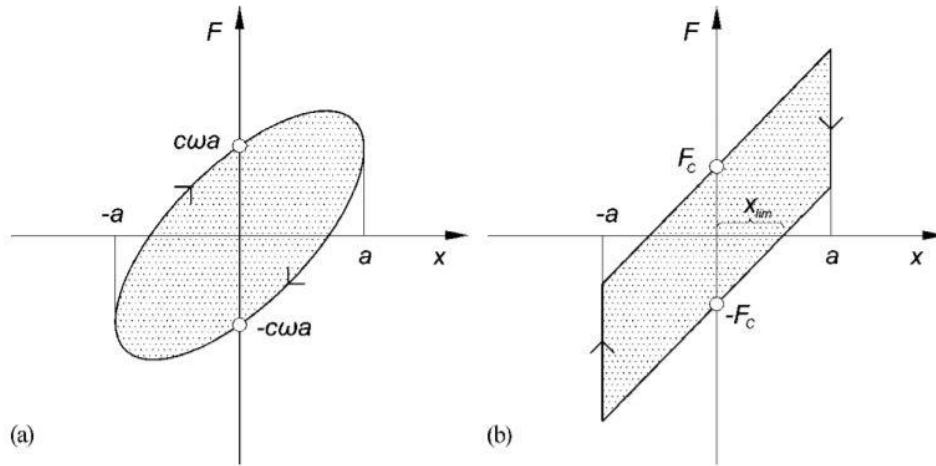


Figure 1. Hysteretic loops for (a) purely viscous damper and (b) purely friction damper. [19]

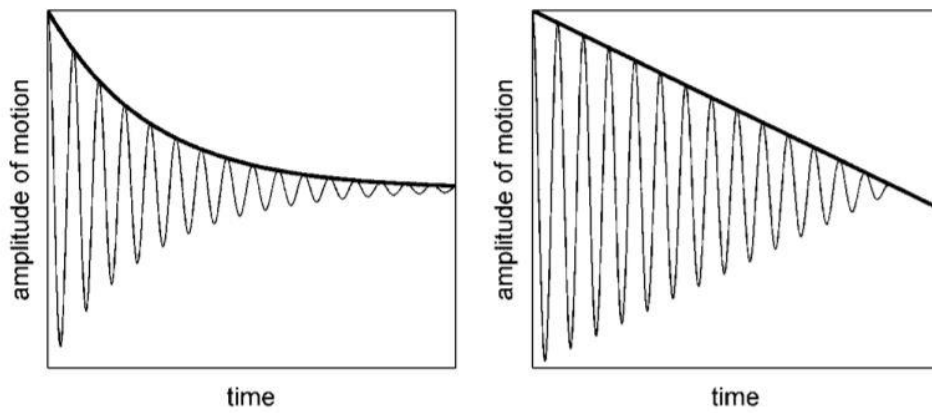


Figure 2. Free decay for (a) purely viscous damper and (b) purely friction damper. [4]

όπου x_{lim} είναι η οριακή μετατόπιση σε στατική ισορροπία που ορίζεται ως εξής

$$x_{lim} = \frac{F_c}{k} \quad (13)$$

Από τις εξισώσεις (10) και (13) ο λόγος απόσβεσης τριβής γ μπορεί να εκφράζεται ως

$$\gamma = \frac{2x_{lim}}{\pi x_0} \quad (14)$$

Επομένως η εξίσωση (12) γίνεται

$$a(t) = x_0(1 - \gamma \omega t) \quad (15)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν την πολυπλοκότητά του, ένα ραγισμένο καμπτόμενο στοιχείο, όπου τόσο τα φαινόμενα της ιξώδους απόσβεσης όσο και η απόσβεση τριβής συνυπάρχουν ταυτόχρονα, μπορούν να θεωρηθούν ως ένα συνδυασμένο σύστημα. Στο Figure 3 [4] δείχνει ότι στην ρηγματωμένη περιοχή, όπου υπάρχει τριβή στην επιφάνεια που ακουμπάει ο οπλισμός, η σημαντικότερη μορφή είναι αυτή της απόσβεσης τριβής. Αντίθετα, στην θλιβόμενη ζώνη μπορεί να υποτεθεί ότι υπάρχει μόνο ιξώδης απόσβεση. Επομένως το σύστημα του καμπτόμενου

στοιχείου μπορεί να μοντελοποιηθεί όπως φαίνεται στο Figure 3 [4], όπου το k αντιπροσωπεύει την καμπτική δυσκαμψία του στοιχείου και το m τη σχετική μάζα του.

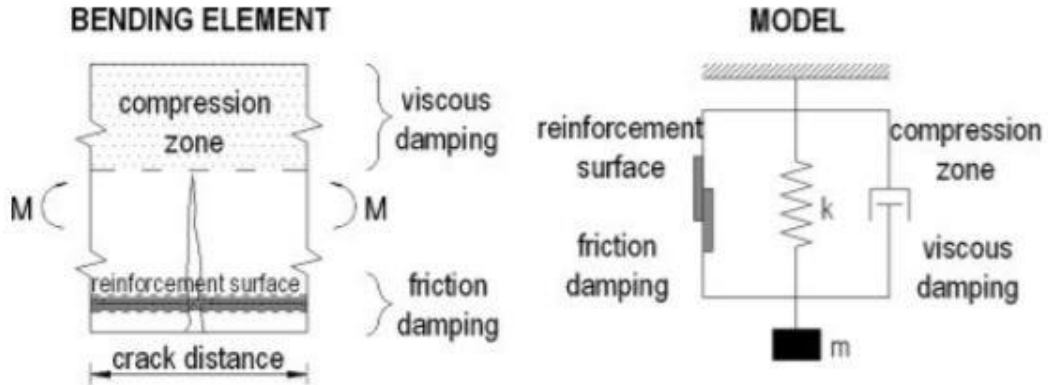


Figure 3. Cracked bending element and corresponding model. [4]

Η κανονικοποιημένη εξίσωση κίνησης του συνδυασμένου μοντέλου γίνεται

$$\ddot{x} + 2\omega\xi\dot{x} + \omega^2x_{\lim}\frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} + \omega^2x = 0 \quad (16)$$

Η εξίσωση (16) είναι μη γραμμική και η ακριβής λύση της μπορεί να βρεθεί από αριθμητική ολοκλήρωση [20]. Για πρακτικούς σκοπούς ελήφθη μια αρκετά ακριβής προσέγγιση, υποθέτοντας ότι η συνολική απώλεια ενέργειας ΔE_{tot} μπορεί να ερμηνευτεί ως ένα απλό άθροισμα της ιζώδους απόσβεσης και της απόσβεσης τριβής [21]. Εάν δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις στο σύστημα (free vibration) , το ΔE_{tot} ισούται με τη μεταβολή της ενέργειας του συστήματος. Δηλαδή

$$\Delta E_{pot} = \Delta E_{visc} + \Delta E_{frict} \quad (17)$$

Με την παρουσία ενός μηχανισμού τριβής Coulomb , η ελεύθερη κίνηση είναι γενικά μη ημιτονοειδής. Ωστόσο, μία ημιτονοειδής λύση της εξίσωσης (16) είναι αποδεκτή, όταν οι ελαστικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις τριβής. Σε αυτή την περίπτωση οι τρεις όροι στην εξίσωση (17) μπορούν να αντικατασταθούν με τις εξισώσεις (3),(5) και (9), θεωρώντας αυτή τη φορά x αντί x_0 .

$$\Delta\left(\frac{1}{2}\omega^2x^2\right) = 2\pi\xi\omega^2x^2 + 4\omega^2x_{\lim}x \quad (18)$$

Η ίδια ισορροπία μπορεί να εκφραστεί σαν ισχύ, διαιρώντας κάθε έλος με $\Delta t = T = 2\pi/\omega$.

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \xi\omega x + \frac{2}{\pi}\omega x_{\lim} \quad (19)$$

Με την ολοκλήρωση της εξίσωσης (19) σε μία περίοδο, η λύση της εξίσωσης (16) μπορεί να υπολογιστεί. Λαμβάνοντας υπόψιν τις εξισώσεις (6) και (14) ως συνάρτηση του αρχικού πλάτους x_0 , η συχνότητα του συστήματος μπορεί να εκφραστεί ως

$$a(t) = x_0 \left[\left(1 + \frac{\gamma}{\xi}\right) e^{-\xi \omega t} - \frac{\gamma}{\xi} \right] \quad (20)$$

Το Figure 4 [4] δείχνει την ελεύθερη ταλάντωση του περιγραφόμενου συνδυαστικού μοντέλου όπως ορίζεται από την εξίσωση (20). Οι τιμές των γ και ξ θα δώσουν πληροφορίες σχετικά με το ποσοστό της συνολικής ενέργειας που χάνεται από το φαινόμενο της απόσβεσης. Αν $\gamma=0$ τότε σημαίνει ότι δεν ασκείται καμία απόσβεση τριβής στο σύστημα, επομένως δεν υπάρχουν ρωγμές. Αντίθετα, μια θετική τιμή του γ σημαίνει ότι μια τριβή μειώνει την ενέργεια στο στοιχείο. Επομένως ο λόγος απόσβεσης τριβής γ μπορεί να συσχετιστεί άμεσα με την παρουσία βλάβης στο υπό εξέταση στοιχείο σκυροδέματος.

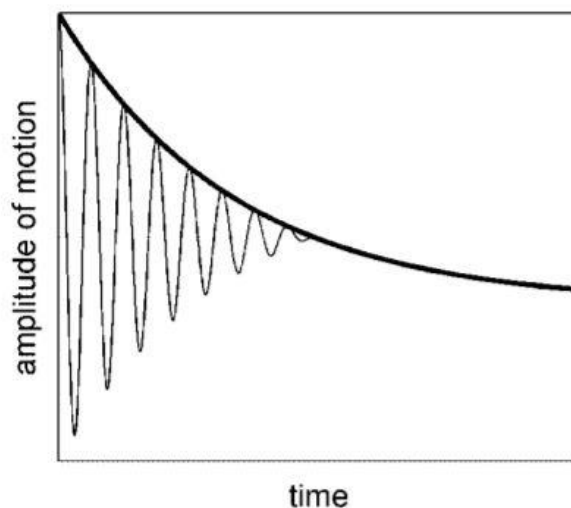


Figure 4. Free decay for the viscous and friction combined model. [4]

2.2. Η ιδιομορφική ανάλυση ταλαντώσεων σε κατάσταση λειτουργίας (Operational Modal Analysis – OMA)

Κάθε αντικείμενο γύρω μας, έμβιο ή άψυχο, ταλαντώνεται μοναδικά (ιδιοταλαντώνεται). Η ταλάντωση αυτή επηρεάζεται από τις μικροδονήσεις του περιβάλλοντος είτε είναι ανθρωπογενείς (από την λειτουργία μηχανημάτων, την κυκλοφορία οχημάτων κλπ) είτε φυσικές (από σεισμούς, ωκεάνια κύματα, κλπ). Οι δονήσεις, άλλοτε αντιληπτές και άλλοτε όχι, επιδρούν πάνω στις κατασκευές προκαλώντας ακόμη και την καταστροφή τους. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για την κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής και τον προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών όπως ιδιοσυχνότητες, λόγοι απόσβεσης, ιδιομορφές κλπ. Το γνωστικό αντικείμενο που μελετά την ιδιοταλάντωση μιας κατασκευής και την απόκρισή της στις μικροδονήσεις ονομάζεται **ιδιομορφική ανάλυση**. [22]

Υπάρχουν δύο τρόποι για τον προσδιορισμό των δυναμικών παραμέτρων. Η πρώτη μέθοδος που ονομάζεται θεωρητική ιδιομορφική ανάλυση υπολογίζει τα χαρακτηριστικά αυτά μέσω της παρκάτω εξίσωσης :

$$(K - \omega_i^2 M) \varphi_i = 0$$

όπου K: το μητρώο δυσκαμψίας ,

M: το μητρώο μάζας

ω_i : η ιδιοσυχνότητα και

φ_i : διάνυσμα ιδιομορφών

Η δεύτερη μέθοδος, η επονομαζόμενη **πειραματική ιδιομορφική ανάλυση**, χρησιμοποιεί την απόκριση του συστήματος σε δονήσεις και με τη βοήθεια τεχνικών ιδιομορφικής ανάλυσης, υπολογίζει τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής . [22]

Ο προσδιορισμός και η παρακολούθηση των δυναμικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής μπορεί να υπηρετήσει διάφορους σκοπούς σε μια κατασκευή όπως:

- την αξιολόγηση δομικής κατάστασης και αξιοπιστίας,
- την δημιουργία βάσης δεδομένων και την παρακολούθηση της «υγείας» της κατασκευής για μελλοντική ανίχνευση βλαβών σε περιπτώσεις έντονης διέγερσής της από ισχυρά φορτία όπως σεισμοί, φορτία ανέμου κ.α.,
- την ενημέρωση του θεωρητικού μας μοντέλου και εύρεση αποδοτικότερων λύσεων ενίσχυσης.

Υπάρχουν τρεις τύποι δυναμικού ελέγχου των κατασκευών ανάλογα με τον τρόπο που διεγείρεται η κατασκευή:

1. έλεγχος με εξαναγκασμένη δυναμική διέγερση,
2. έλεγχος με ελεύθερη δυναμική διέγερση,
3. έλεγχος των μικροδονήσεων (**ιδιομορφική ανάλυση σε κατάσταση λειτουργίας**).

2.2.1 Ιστορικά στοιχεία της μεθόδου

Η παραδοσιακή ιδιομορφική ανάλυση (Modal Analysis) χρησιμοποιήθηκε αρχικά περίπου το 1940 όταν προσπαθούσαν να καταλάβουν οι μηχανικοί τη δυναμική συμπεριφορά ενός πειραματικού αεροπλάνου. Προς το τέλος της δεκαετίας του '70 και εξαιτίας των πρόωρων τεχνικών προόδων της δεκαετίας του '80 που συνδέθηκε με τους προσωπικούς υπολογιστές ο εκσυγχρονισμός ώθησε την ανάλυση ιδιομορφών (modal analysis) ως αναλυτικό εργαλείο, που δίνει την ευκαιρία στην ανάλυση ιδιομορφών σε κατάσταση λειτουργίας των κατασκευών (Operational Modal Analysis) να αναπτυχθεί. Η Operational Modal Analysis έχει γίνει γνωστή επίσης και σαν Output-Only Modal Analysis επειδή στην πραγματικότητα, χρησιμοποιεί αποκλειστικά καταγραφές των αποκρίσεων των κατασκευών (δεδομένα εξόδου) . Το ενδιαφέρον για την εξέλιξη της ανάλυσης ιδιομορφών (modal analysis) έγκειται στο γεγονός ότι οι πειραματικές μετρήσεις εκτελούνται με τις αποκρίσεις της κατασκευής υπό τις συνθήκες λειτουργίας. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα διεγείρεται από τα φυσικά ή λειτουργικά φορτία όπως τα φορτία αέρα, τα φορτία κυμάτων, τα φορτία κυκλοφορίας, κ.λπ. Στην Operational Modal Analysis οι δυνάμεις (δεδομένα εισόδου – input) δεν καταγράφονται. Εντούτοις, οι δυνάμεις που ενεργούν σε μια κατασκευή μπορούν ακόμα να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας τις αποκρίσεις σε διάφορα σημεία μαζί με τη Frequency Response Function (FRF). [23]

2.2.2. Εφαρμογές OMA για ταυτοποίηση των κατασκευών

Αρχικά, στην παραδοσιακή ιδιομορφική ανάλυση που χρησιμοποιεί και τα δεδομένα εισόδου, ήταν γνωστή η αξία της εξαναγκασμένης δυναμικής διέγερσης στο δομικό σύστημα. Στη ιδιομορφική ανάλυση (OMA) σε κατάσταση λειτουργίας, πιο συγκεκριμένα στην ιδιομορφική ανάλυση με την χρήση μόνο των αποκρίσεων (δεδομένα εξόδου), μόνο η μεταβλητή εξόδου είναι γνωστή, δηλ. η δυναμική απόκριση. Το πλεονέκτημα της ιδιομορφικής ανάλυσης σε κατάσταση λειτουργίας είναι ότι οι δυναμικές αποκρίσεις λαμβάνονται από τη φυσική διέγερση π.χ. λόγω περιβαλλοντικών δονήσεων που παράγονται όπως λόγω του αέρα,

της κυκλοφορίας, των κυμάτων, κ.λπ. Δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί βαρύς εξοπλισμός διέγερσης για να παραγάγει τις εξαναγκασμένες δονήσεις. [23]

Η ιδιομορφική ανάλυση σε κατάσταση λειτουργίας είναι το όνομα που δίνεται στη διαδικασία όπου οι ιδιομορφικές παράμετροι μιας κατασκευής λαμβάνονται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα δόνησης που καταγράφονται από τις συγκεκριμένες συσκευές μέτρησης που τοποθετούνται σε συγκεκριμένα σημεία της κατασκευής. Με αυτήν την απλή μέθοδο είναι δυνατό να εκτιμηθούν ποσοτικά οι πολύ χρήσιμες πληροφορίες από την κατασκευή για τις φυσικές ιδιότητες της όπως οι μάζες, η ακαμψία και η απόσβεση. Η εκτίμηση ιδιομορφών με παραμετρική ανάλυση ή με εφαρμογή κατάλληλων καμπύλων ακολουθεί την διαδικασία εκτίμησης από τα πειραματικά δεδομένα. Επιπλέον, μπορεί να αποδειχθεί ότι ένα σύνολο ιδιομορφικών παραμέτρων είναι δυνατόν να χαρακτηρίσει απολύτως τις δυναμικές ιδιότητες οποιασδήποτε κατασκευής. Αυτό το σύνολο των παραμέτρων καλείται συχνά *ιδιομορφικό πρότυπο*. Οι σημαντικές ιδιομορφικές παράμετροι που περιγράφουν τις δυναμικές ιδιότητες οποιασδήποτε κατασκευής είναι:

- Η ιδιομορφική συχνότητα, f_n
- οι ιδιομορφικοί συσχετισμοί, Φ_n
- οι συντελεστές λόγου απόσβεσης, ξ_n

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι η λειτουργική ιδιομορφική ανάλυση μπορεί να καλύψει ένα ευρύ φάσμα των σκοπών και είναι δυνατό να ξεκαθαρίσουν μερικά ζητήματα που ελέγχονται από διαμόρφωση κάποιων γραμμικών συστημάτων. Οι πιο σχετικές εφαρμογές OMA είναι:

- Βελτιστοποίηση μοντελοποίησης κατασκευών

Η χρήση των μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία μπορεί να τεκμηριωθεί καλύτερα τώρα και να βελτιστοποιηθεί πειραματικά. Σε αυτήν την περιοχή είναι σημαντικό να ελεγχθεί η συμβολή των μη-δομικών (ή δευτερογενών) στοιχείων που παρεμβαίνουν συνήθως αρκετά στην ακαμψία της δομής (π.χ. τοίχοι αντιστήριξης, παρακείμενα κτήρια, κ.λ.π.).

- Αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών

Η αξιολόγηση και ο έλεγχος της ακεραιότητας των κατασκευών έχουν αναπτυχθεί σε πολύ υψηλό επίπεδο ακρίβειας λόγω των νέων εξελίξεων στο λογισμικό των υπολογιστών, της επεξεργασίας σήματος και της τεχνολογίας εργαστηριακών μετρήσεων. Έτσι γίνεται εφικτή η σωστή επιλογή της ενίσχυσης κρίσιμων δομών των κατασκευών όπως

σε περιπτώσεις π.χ. γεφυρών, φραγμάτων, παράκτιων πλατφόρμων, εγκαταστάσεων πυρηνικής ενέργειας κλπ.

- Εκτίμηση φορτίων

Η φόρτιση μιας κατασκευής μπορεί να υπολογιστεί μέσω του μητρώου μεταφοράς, η οποία λαμβάνεται από τις ιδιομορφικές ιδιότητες που είναι γνωστές μέσω των τεχνικών ιδιομορφικής ανάλυσης. Είναι ένας νέος και καινοτόμος τρόπος εκτίμησης των φορτίων στα διάφορα είδη κατασκευών.

- Αλληλεπιδράσεις εδάφους -κατασκευών

Η ανάλυση της αλληλεπίδρασης μεταξύ μιας κατασκευής, των θεμελίων της και του περιβάλλοντος εδαφολογικού μέσου έχει βελτιωθεί σημαντικά λόγω της νέας χρήσης των εργαστηριακών τεχνικών προσδιορισμού κατασκευών.

- Εφαρμοσμένη σεισμική μηχανική

Η ανάπτυξη σε αυτή την περιοχή της μηχανικής είναι αρκετά πρόσφατη εν τούτοις αρχίζει να αναλαμβάνει έναν σημαντικό ρόλο λόγω της ακρίβειας των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων. Η ιδιομορφική ανάλυση (Operational Modal Analysis) σε κατάσταση λειτουργίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθούν τα ακριβή μοντέλα απόκρισης έτσι ώστε τα δυναμικά χαρακτηριστικά των μεγάλων κατασκευών υπό την επίδραση σεισμικών φορτίων μπορούν να καθοριστούν αξιόπιστα. Δίνει επίσης την δυνατότητα να εκτιμηθεί το επίπεδο ζημίας σε μία κατασκευή μετά από έναν σεισμό. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει και να επικαιροποιήσει πιο αξιόπιστα τις μικροζωνικές μελέτες και τους αντίστοιχους χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας σε μία περιοχή. [23]

2.2.3. Μετασχηματισμός της χρονοϊστορίας μικροδονήσεων σε κατάσταση λειτουργίας σε απόκριση ελεύθερης ταλάντωσης της κατασκευής

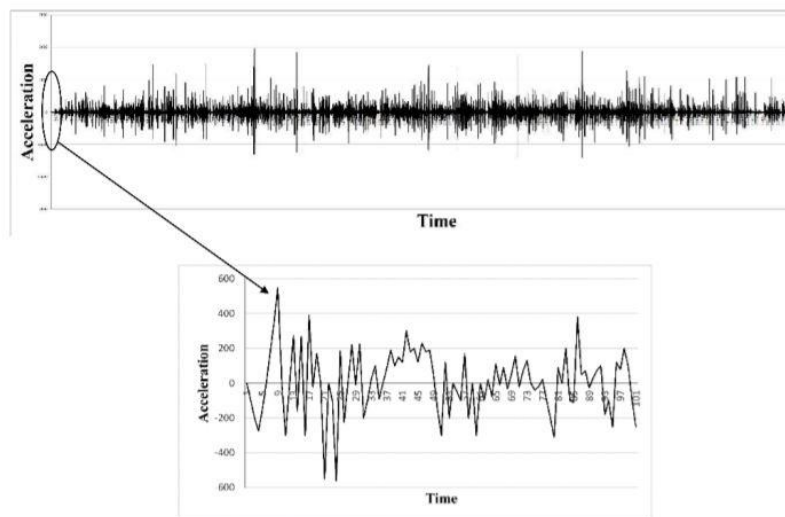
Η γενική εξίσωση για οποιοδήποτε σήμα από μικροδονήσεις περιβάλλοντος στο πεδίο του χρόνου είναι:

$$u(t) = Ce^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_D t + \alpha) + \textit{Particular Solution}$$

Το πρώτο μέρος αυτής της εξίσωσης $Ce^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_D t + \alpha)$ αντιπροσωπεύει την ελεύθερη ταλάντωση του συστήματος από δονήσεις περιβάλλοντος ενώ το δεύτερο (*Particular Solution*) αντιπροσωπεύει το θόρυβο των δονήσεων από το περιβάλλον.

Ο πρωταρχικός σκοπός αυτής της προσέγγισης είναι να εξαχθεί η ελεύθερη ταλάντωση της κατασκευής από την τυχαία απόκριση των δονήσεων στο πεδίο του χρόνου, παίρνοντας το μέσο όρο των τυχαίων τιμών του πρώτου μέρους της απόκρισης, εξαλείφοντας το δεύτερο μέρος με τον θόρυβο των δονήσεων. Το αποτέλεσμα είναι η ελεύθερη ταλάντωση που περιλαμβάνει όλες τις ιδιομορφές βάσει του ρυθμού δειγματοληψίας, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να εκτιμηθεί ο λόγος απόσβεσης καθώς να μεταφερθεί και στο πεδίο των συχνοτήτων χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Φουριέ (FFT). Αλλαγές στο λόγο απόσβεσης και στην ιδιοσυχνότητα είναι συνάρτηση της δομικής δυσκαμψίας και χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση στα δυναμικά χαρακτηριστικά και τελικά ανιχνεύει βλάβες. [24]

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα δείγμα από μια καταγραφή σήματος από δονήσεις περιβάλλοντος για ένα μοντέλο και η μεγένθυσή του στο αρχικό μέρος του.

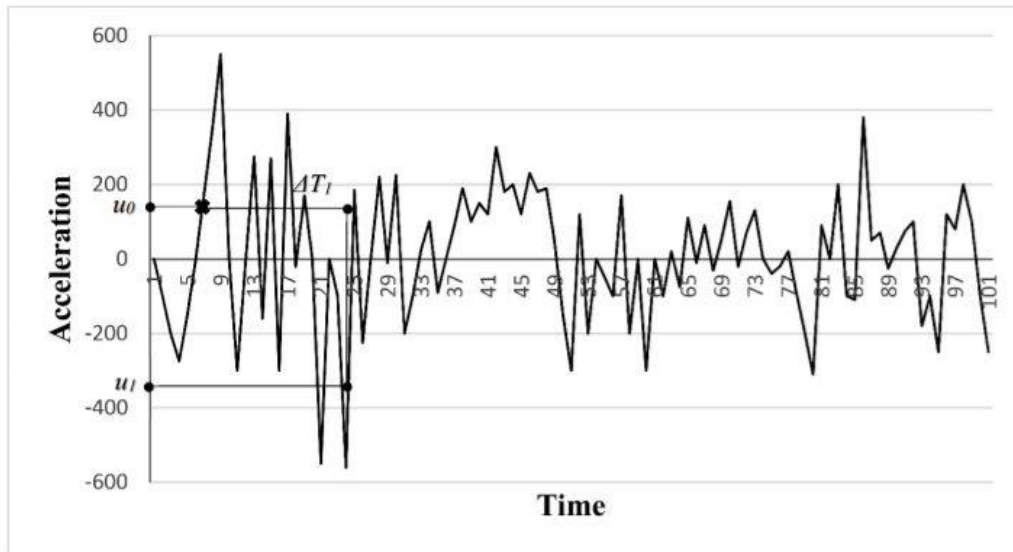


Εικόνα 2.2 Χρονοϊστορία σήματος καταγραφής μικροδονήσεων περιβάλλοντος και τμηματική μεγένθυσή του

Για την απλοποίηση της διατύπωσης, η επιτάχυνση u'' γράφεται (u). Η διαδικασία απαιτεί τα ακόλουθα βήματα:

1. Μια τιμή ενεργοποίησης για την αρχική επιτάχυνση (u_0) και τα χρονικά διαστήματα (ΔT) επιλέγονται έτσι ώστε η οριζόντια γραμμή να τέμνει όσο τον δυνατόν περισσότερα σημεία στην καμπύλη του σήματος.
2. Μια οριζόντια γραμμή παράλληλη με τον άξονα του χρόνου επεκτείνεται από την αρχική επιτάχυνση μέχρι να διασταυρώσει την καμπύλη. Είναι σημαντικό να καθοριστεί εάν το σημείο τομής είναι μεταξύ δύο αυξόντων ή κατιούντων τιμών.
3. Από το σημείο τομής, η οριζόντια γραμμή επεκτείνεται με μια τιμή ίση με ΔT_1
4. Όπου ο χρόνος του ΔT_1 τελειώνει, μία κατακόρυφη γραμμή επεκτείνεται (προς τα πάνω ή κάτω) διασταυρώνοντας την καμπύλη του σήματος. Η συντεταγμένη

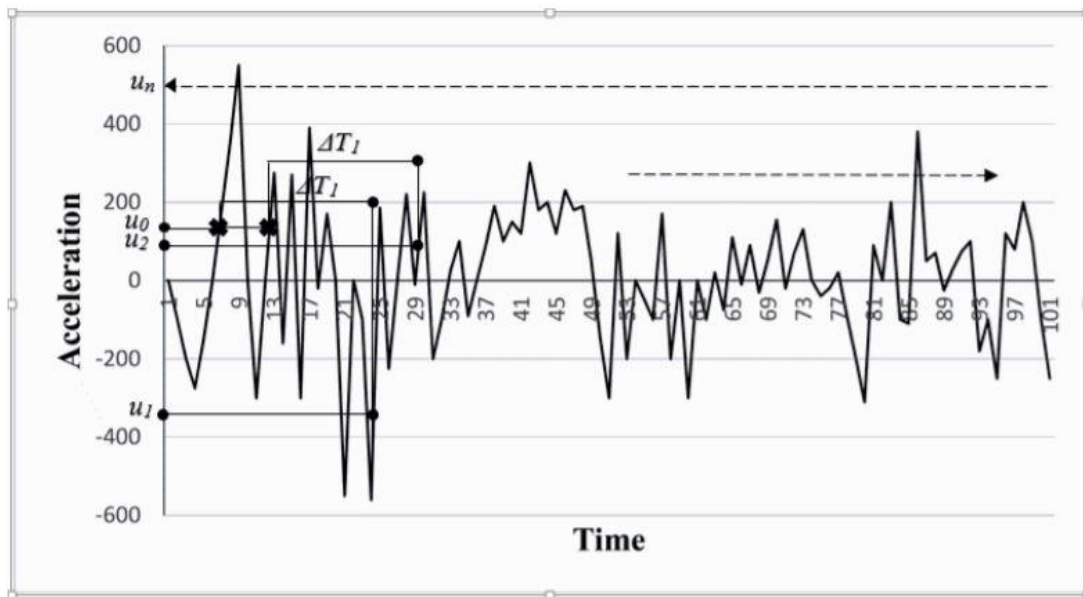
του σημείου αυτού γίνεται η επόμενη τιμή επιτάχυνσης (u_1). Η παρεμβολή είναι απαραίτητη για να επιτευχθεί ακριβής τιμή μεταξύ δύο αυξόντων ή κατιόντων σημείων στην καμπύλη.



Εικόνα 2.3 Αρχικό τμήμα χρονοϊστορίας

5. Από το σημείο τομής που περιγράφεται στο Βήμα 3. Μια οριζόντια γραμμή παράλληλη με τον άξονα του χρόνου εκτείνεται μέχρι να διασταυρωθεί ξανά η καμπύλη (προς τα πάνω αν το πρώτο σημείο ήταν στο αύξων τμήμα αλλιώς προς τα κάτω).
6. Από το νέο σημείο του Βήματος 5 , η οριζόντια γραμμή επεκτείνεται με μια τιμή ΔT_1 για μια ακόμη φορά και λαμβάνεται νέα τιμή επιτάχυνσης (u_2) , όπως κάναμε και στο Βήμα 4.
7. Τα βήματα 5 και 6 επαναλαμβάνονται διαδοχικά μέχρις ότου επιτευχθεί το τέλος της καμπύλης και τη τελική τιμή επιτάχυνσης (u_n) καταγραφεί. Όπου n είναι το τελευταίο σημείο τομής της καμπύλης.
8. Τα βήματα 3 έως 7 επαναλαμβάνονται με διαφορετικές τιμές (ΔT). Αυτές οι τιμές θα είναι που δηλώνονται ως $\Delta T_2, \Delta T_3, \dots, \Delta T_m$, όπου $\Delta T_2 = 2 \times \Delta T_1, \Delta T_3 = 3 \times \Delta T_1, \dots, \Delta T_m = m \times \Delta T_1$, με ΔT_m την τιμή ΔT στην τελευταία επανάληψη.

Σημείωση: Για λόγους υπολογιστικής αποτελεσματικότητας , η τιμή του m επιλέγεται έτσι ώστε να υπάρχει μια επαρκής ποσότητα στην καμπύλη των δονήσεων περιβάλλοντος (και όχι ολόκληρο το σήμα δονήσεων), καθώς η ελεύθερη ταλάντωση είναι συνήθως στο πρώτο μέρος της καμπύλης του σήματος και τα υπόλοιπα αντιπροσωπεύουν κυρίως το τμήμα της απόσβεσης. [24]



Εικόνα 2.4 Αρχικό τμήμα χρονοϊστορίας – διαστήματα ΔT_1

Με άλλα λόγια, τα σημεία στην καμπύλη της ελεύθερης ταλάντωσης είναι:

$$\text{First Point} = (\Delta T_1, U_1 = \frac{u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + \dots + u_n}{n})$$

$$\text{Second Point} = (\Delta T_2, U_2 = \frac{u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + \dots + u_n}{n})$$

$$\text{Third Point} = (\Delta T_3, U_3 = \frac{u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + \dots + u_n}{n})$$

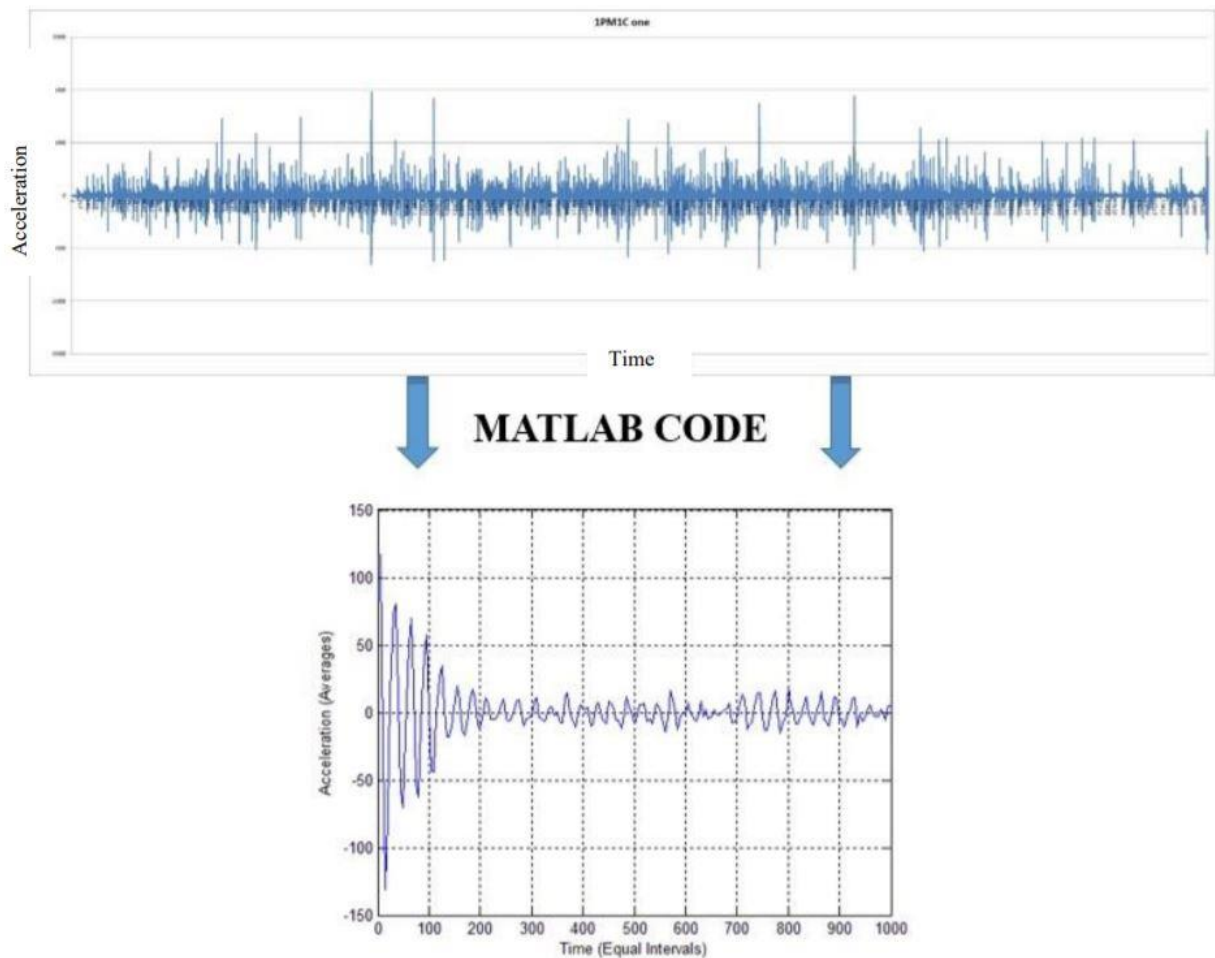
•
•
•

$$m \text{ th Point} = (\Delta T_m, U_m = \frac{u_n}{n})$$

where, $\Delta T_2 = 2 \times \Delta T_1$, $\Delta T_3 = 3 \times \Delta T_1$, $\Delta T_4 = 4 \times \Delta T_1$, ... $\Delta T_m = m \times \Delta T_1$

[24]

Η παραπάνω επαναληπτική διαδικασία γίνεται μέσω σειράς εντολών στο πρόγραμμα Matlab και το αποτέλεσμα αυτής απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.5 Μορφή καμπύλης ελεύθερης ταλάντωσης έπειτα από μετασχηματισμό χρονοϊστορίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Εργαστηριακή τεκμηρίωση της μεθόδου

3.1. Εισαγωγή – περιγραφή διαδικασίας

Στα πλαίσια κατανόησης του φαινομένου και επιβεβαίωσης της μεθόδου, επιχειρείται η εφαρμογή της σε δοκίμια σκυροδέματος στο εργαστήριο. Η μεθοδολογία της ανίχνευσης δομικών βλαβών γίνεται αρχικά από **γνωστή φόρτιση** που υπόκειται το στοιχείο μας με σκοπό τον εντοπισμό μη γραμμικότητας από τον τρόπο τον οποίο αποσβένει το στοιχείο μας στη συγκεκριμένη ταλάντωση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν :

1. Εύρεση ιδιοσυχνότητας (συντονισμού) του δοκιμίου από σκυρόδεμα στην οποία έχουμε την καλύτερη απόκριση του στοιχείου με γνωστή φόρτιση.
2. Εύρεση απόστασης της κρούσης (τυχαία φόρτιση) από τον αισθητήρα, στην οποία παρουσιάζεται η παραπάνω ιδιοσυχνότητα.

Για την δημιουργία βλάβης σε στοιχείο έγινε η εξής παραδοχή. Πάρθηκαν 3 κυβικά δοκίμια σκυροδέματος και ενώθηκαν με τένοντα- σύρμα ώστε να θεωρηθεί ένα στοιχείο μονολιθικό, χωρίς διεπιφάνειες. Έπειτα χαλαρώσαμε τον τένοντα λίγο και αφήσαμε να δημιουργηθεί διεπιφάνεια μεταξύ των δοκιμίων, προσομοιώνοντας έτσι βλάβη στο στοιχείο.

3. Καταγραφή απόκρισης στοιχείου έπειτα από κρούση στη συγκεκριμένη απόσταση από τον αισθητήρα που βρήκαμε στο προηγούμενο βήμα **πριν** την χαλάρωση του τένοντα.
4. Καταγραφή απόκρισης στοιχείου έπειτα από κρούση στην αντίστοιχη θέση με το προηγούμενο βήμα **μετά** την χαλάρωση του τένοντα.
5. Σύγκριση του τρόπου απόσβεσης του στοιχείου πριν και μετά την χαλάρωση του τένοντα και εντοπισμό πιθανής βλάβης σε αυτό.

3.2. Εργαστηριακός εξοπλισμός

Γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος

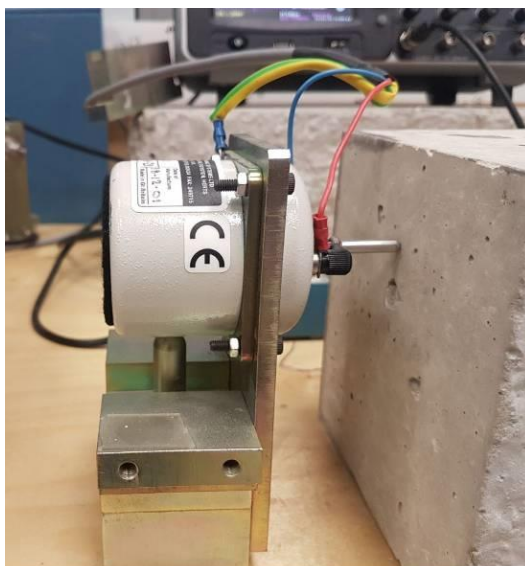
Η Γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος είναι μια συσκευή η οποία παρέχει ημιτονοειδές κύμα σταθερού πλάτους. Μέσω της γεννήτριας ενεργοποιείται ο εξωτερικός διεγέρτης προκειμένου να δημιουργήσουμε ημιτονοειδές κύμα σταθερού πλάτους που μεταφέρεται στο δοκίμιο. Στην γεννήτρια μέσω συνδεδεμένου καλωδίου υπάρχουν δυο ακροδέκτες για τη λήψη του σήματος. Ο ένας έχει το σύμβολο της γείωσης και πρέπει να συνδέεται πάντα στο κοινό σημείο του κυκλώματος. Ο άλλος ακροδέκτης συνδέεται μέσω διακλάδωσης ενός κόκκινου και μπλε καλωδίου στο σημείο του κυκλώματος που θα δώσουμε το σήμα.



Εικόνα 3.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός γεννήτριας ημιτονοειδούς κύματος

Εξωτερικός διεγέρτης

Ο διεγέρτης είναι το εργαλείο το οποίο δημιουργεί την διέγερση σταθερού πλάτους και χαμηλής συχνότητας του κύματος μεγέθυνσης. Βρίσκεται σε σύνδεση με την γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος και ενεργοποιείται λόγω της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης που δέχεται. Ο διεγέρτης φέρει έμβολο το οποίο ενεργοποιείται ασκώντας μια επαναλαμβανόμενη περιοδική κίνηση δημιουργώντας κατά αυτόν τον τρόπο το ημιτονοειδές κύμα.



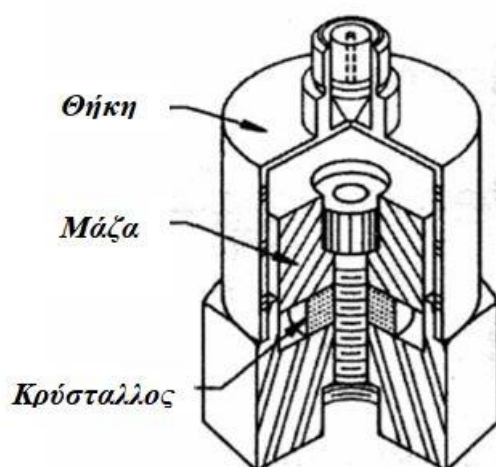
Εικόνα 3.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός εξωτερικού διεγέρτη για δημιουργία μηχανικής ταλάντωσης

Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας

Αφορά στο πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιογράφο το οποίο λειτουργεί σαν καταγραφέας για την λήψη των δεδομένων. Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού είναι το φαινόμενο μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα. Η πιεζοηλεκτρική ιδιότητα οφείλεται στην μετατόπιση και σχετική αναδιάταξη φορτίων που προκαλείται στην δομή του στοιχείου με την εφαρμογή μηχανικής πίεσης. Κατά συνέπεια η ηλεκτρική ενεργεία λαμβάνεται από τον πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιογράφο ο οποίος έχει συνδεθεί με το ενισχυτή διαμόρφωσης σήματος και από εκεί μεταφέρεται στον παλμογράφο όπου καταγράφεται η χρονοϊστορία της ταλάντωσης.



Εικόνα 3.3 Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας



Εικόνα 3.4 Τομή Πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα

Τα επιταχυνσιόμετρα αυτού του τύπου χρησιμοποιούν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο κάποιων υλικών για να ανιχνεύσουν παραμέτρους όπως επιτάχυνση, δόνηση κλπ και να τη μετατρέψουν σε ηλεκτρικό σήμα παρέχοντας έτσι πληροφορίες για την ποσότητα, ιδιότητα ή κατάσταση που ανιχνεύουν. Όπως και στα περισσότερα επιταχυνσιόμετρα έτσι και εδώ χρησιμοποιείται η γενική μέθοδος αίσθησης σύμφωνα με την οποία η επιτάχυνση ενεργεί πάνω σε μια μάζα που είναι αναρτημένη από ένα ελατήριο. Όταν μια δύναμη ασκείται στο επιταχυνσιόμετρο, η μάζα ενεργεί στο πιεζοηλεκτρικό υλικό σύμφωνα με τον Νόμο του Νεύτωνα ($F=ma$). Η ασκούμενη στο πιεζοηλεκτρικό υλικό δύναμη υποδεικνύεται από την αλλαγή στην ηλεκτροστατική δύναμη ή την ηλεκτρική τάση που παράγει το υλικό. Αυτό διαφέρει από το φαινόμενο της πιεζοαντίστασης κατά το οποίο στα αντίστοιχα υλικά αλλάζει το μέτρο της αντίστασής τους και όχι η ηλεκτρική τους τάση ή φόρτιση.

Εξαιτίας της μικρής έντασης του σήματος εξόδου τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούν εξωτερικούς ενισχυτές. Η πιεζοηλεκτρική τεχνολογία δεν επηρεάζεται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία και ραδιενέργεια, επιτρέποντας την διενέργεια μετρήσεων ακόμη κάτω από αντίξοες συνθήκες [25].

Τελεστικός ενισχυτής

Ο ενισχυτής (sensor signal conditioner) αφορά σε όργανο μέσω του οποίου διαμορφώνεται και ενισχύεται το σήμα που καταγράφει ο πιεζοηλεκτρικός επιταχυνσιογράφος. Στη φυσική τους κατάσταση, οι πληροφορίες που μεταφέρουν σήματα τάσης, ρεύματος, φορτίου, θερμοκρασίας, πίεσης και χρόνου είναι σε αναλογική μορφή. Για την μεταφορά των πληροφοριών αυτών στον παλμογράφο, και την επεξεργασία τους, είναι χρήσιμο να εκφραστούν οι μεταβλητές αυτές σε ψηφιακή μορφή το οποίο συντελείται μέσω του τελεστικού ενισχυτή [26]



Εικόνα 3.5 Εργαστηριακός εξοπλισμός ενισχυτή σήματος εξόδου

Παλμογράφος

Είναι το βασικότερο όργανο ενός εργαστηρίου ηλεκτρονικών. Χρησιμοποιείται για την παρατήρηση και τη μέτρηση ορισμένων χαρακτηριστικών μεγεθών ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτά μεγέθη είναι:

- Η συχνότητα μιας κυματομορφής
- Η διαφορά φάσης μεταξύ δύο κυματομορφών
- Το σχήμα μιας κυματομορφής
- Το πλάτος μιας κυματομορφής

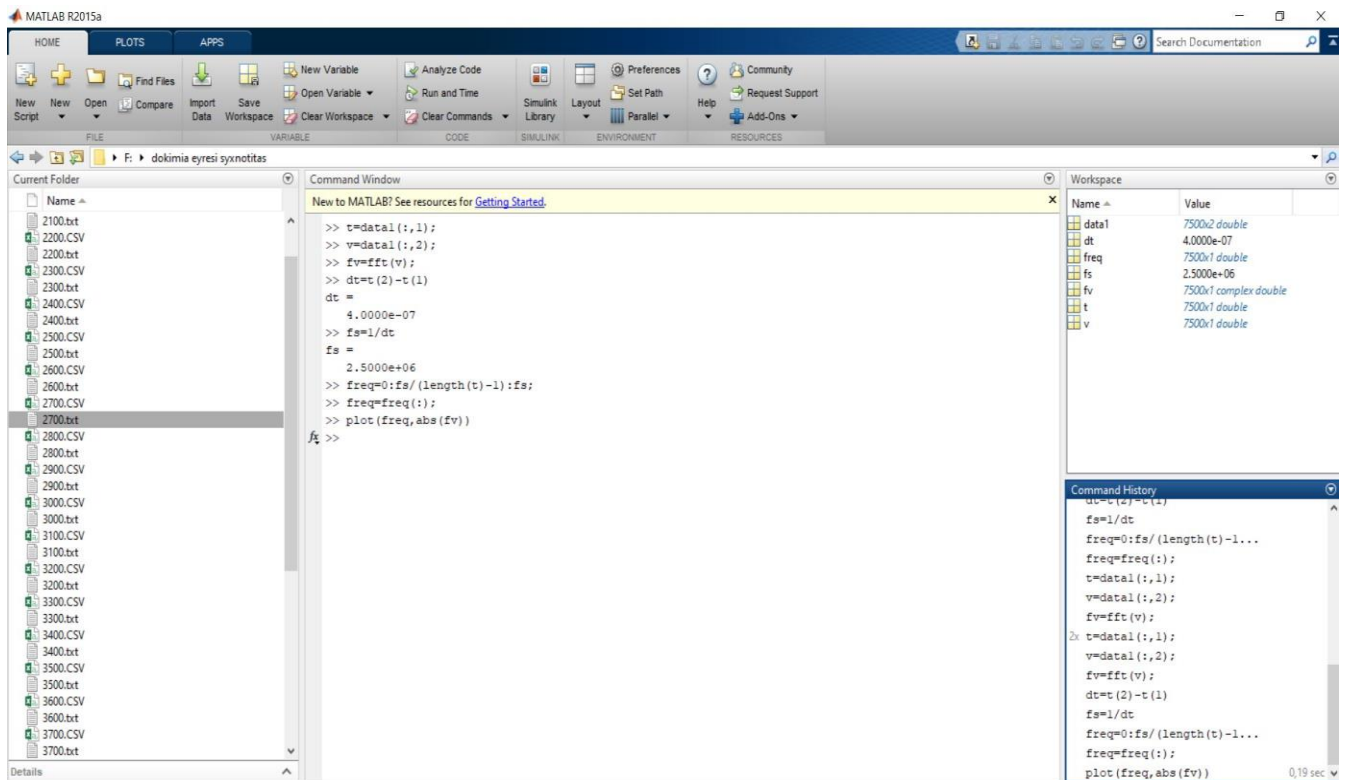
Ο παλμογράφος συνδέεται μέσω του ενισχυτή με τον πιεζοηλεκτρικό καταγραφέα για την λήψη των δεδομένων και την μετατροπή τους από ψηφιακή μορφή σε αναλογική. Ο παλμογράφος απεικονίζει την χρονοϊστορία της δομικής απόκρισης του υλικού για την διεξαγωγή και μελέτη των συμπερασμάτων ενώ ταυτόχρονα έχει την δυνατότητα για την επεξεργασία των δεδομένων και απεικόνιση τους στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων.



Εικόνα 3.6 Εργαστηριακός εξοπλισμός παλμογράφου

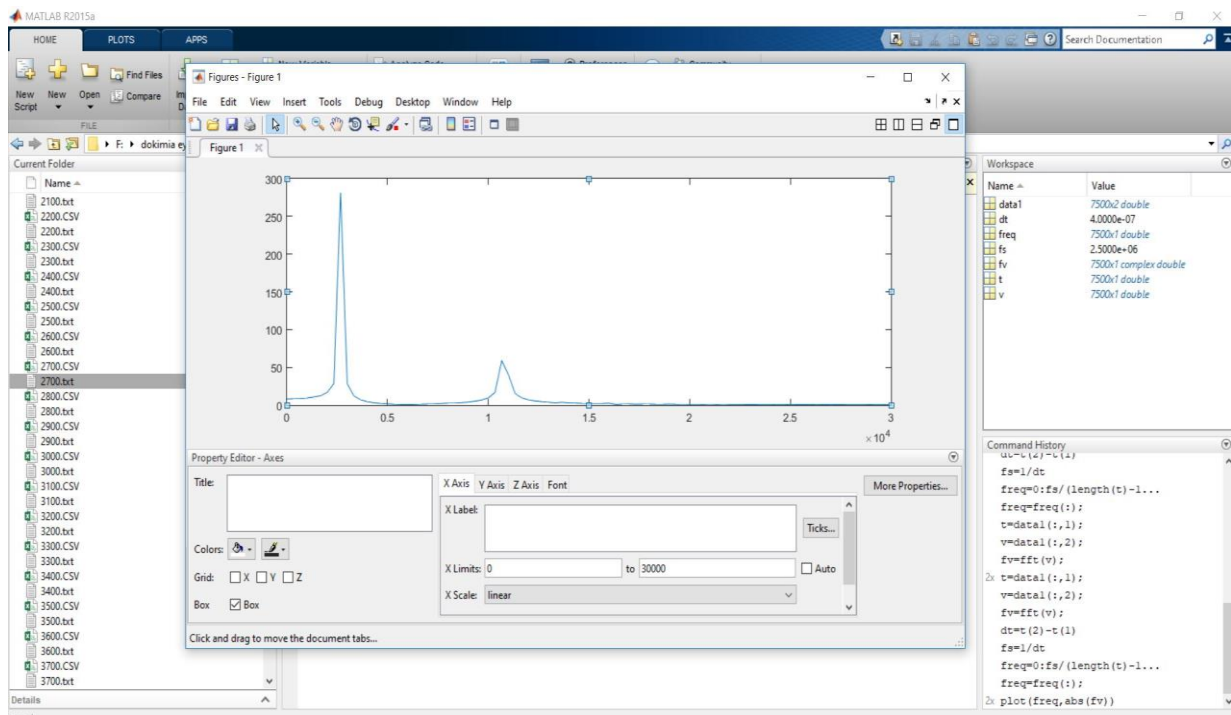
Χρήση πλατφόρμας MATLAB

Η επεξεργασία των μετρήσεων για την απεικόνιση τους στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων έγινε μέσω της μαθηματικής επίλυσης του γρήγορου μετασχηματισμού Φουριέ (Fast Fourier Transform, FFT). Για την επίλυση των σύνθετων μαθηματικών εξισώσεων και την παράγωγή των γραφημάτων των θεμελιωδών συχνοτήτων στο πεδίο φάσματος, έγινε η χρήση της πλατφόρμας MATLAB.



Εικόνα 3.7 Μαθηματικές συναρτήσεις του γρήγορου μετασχηματισμού Φουριέ οι οποίες επιλύθηκαν με την χρήση της πλατφόρμας Matlab για την παραγωγή των γραφημάτων των συχνοτήτων στο πεδίο του φάσματος

Η MATLAB είναι μία ισχυρή πλατφόρμα λογισμικού για υπολογισμούς που σχετίζονται με επιστημονικά προβλήματα και προβλήματα της επιστήμης των μηχανικών. Το όνομα MATLAB προέρχεται από τις λέξεις MATrix LABoratory, επειδή το πρόγραμμα σχεδιάστηκε για να εκτελεί γρήγορα και αποδοτικά υπολογισμούς πινάκων. Η μορφή του λογισμικού MATLAB είναι η ακόλουθη: Το περιβάλλον της MATLAB περιλαμβάνει τρία βασικά παράθυρα, το παράθυρο εντολών (command window), τον χώρο εργασίας (workspace) και το ιστορικό εντολών (command history). Στο παράθυρο εντολών ο χρήστης εισάγει τις κατάλληλες εντολές προς εκτέλεση, στον χώρο εργασίας εμφανίζονται όλες οι μεταβλητές τις οποίες έχει χρησιμοποιήσει ή δηλώσει ο χρήστης με τα χαρακτηριστικά τους, ενώ στο ιστορικό εντολών εμφανίζονται όλες οι προηγούμενες εντολές που έχει εισάγει ο χρήστης.



Εικόνα 3.8 Παραγωγή των γραφημάτων των συχνοτήτων στο πεδίο του φάσματος μέσω του λογισμικού Matlab

3.3. Προσδιορισμός ιδιομορφικών χαρακτηριστικών δοκιμίου Ο/Σ

Η εκτίμηση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών των κατασκευών, με βάση στοιχεία μετρήσεων (που λαμβάνονται από τη συνεχή παρακολούθηση με ψηφιακά όργανα) έχει αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες και αναδεικνύεται ως ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για τον προσδιορισμό της πραγματικής κατάστασης των κατασκευών.

Η συστηματική εποπτεία των κατασκευών αποτελεί μια ανάγκη ζωτικής σημασίας πρωτίστως για την διασφάλιση της προβλεπόμενης και ασφαλούς λειτουργίας τους, αλλά και για μια σειρά άλλων ζητημάτων που ξεκινούν από την ορθή και έγκαιρη συντήρηση των κατασκευών και καταλήγουν στον ολικό έλεγχο ποιότητας αυτών. Η έγκαιρη διάγνωση μιας μηχανικής βλάβης σε ένα δομικό σύστημα, συνεισφέρει καθοριστικά στην αποτελεσματική αντιμετώπιση της, καθώς επιτρέπει στους εμπλεκόμενους μηχανικούς να επιλέξουν και να εφαρμόζουν τη βέλτιστη διαδικασία επιδιόρθωσης [2].

Κύριος στόχος είναι η εκτίμηση βλαβών και αστοχιών σε δομικές κατασκευές με βάση την εκτίμηση των δυναμικών ή ιδιομορφικών χαρακτηριστικών τους. Ο προσδιορισμός των δυναμικών χαρακτηριστικών προκύπτει με βάση πειραματικά δεδομένα από την καταγραφή ταλαντώσεων των κατασκευών υπό την επιβολή οποιασδήποτε μορφής δόνησης. Σήμερα, είναι ουσιώδης η χρήση τέτοιων ισχυρών εργαλείων κατά την επεξεργασία των διαφόρων στοιχείων στις μελέτες ανάλυσης κατασκευών. Η αναγνώριση των δυναμικών χαρακτηριστικών διά μέσω ενόργανων μετρήσεων μιας κατασκευής, συντελεί στην τεκμηριωμένη άρσης των αβεβαιοτήτων που διαθέτει η κατασκευή.

3.3.1. Αναγνώριση ιδιομορφικών χαρακτηριστικών

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματεύεται την ανίχνευση - αναγνώριση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών δομικών συστημάτων τα οποία καθορίζονται μονοσήμαντα από τη δομή του συστήματος (γεωμετρία, μάζα, ακαμψία). Για τον σκοπό αυτό ακολουθείται μεθοδολογία μέσω της πλατφόρμας MATLAB. Οι μετρήσεις λόγω των ταλαντώσεων καταγράφονται από το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιογράφο, και μετατρέπονται με την εποπτεία του παλμογράφου σε αναλογική μορφή για την επεξεργασία τους μέσω της πλατφόρμας MATLAB. Η μεθοδολογία για την αναγνώριση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών, χρησιμοποιεί τους μετασχηματισμούς Φουριέ για την μετατροπή της δομικής απόκρισης του συστήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων.

Ο προσδιορισμός και η παρακολούθηση των δυναμικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής μπορεί να υπηρετήσει διάφορους σκοπούς σε μια κατασκευή όπως [27]:

- Την αξιολόγηση δομικής κατάστασης και αξιοπιστίας

- Την δημιουργία βάσης δεδομένων και την παρακολούθηση της «υγείας» της κατασκευής για μελλοντική ανίχνευση βλαβών σε περιπτώσεις έντονης διέγερσής της από ισχυρά φορτία όπως σεισμοί, φορτία ανέμου κ.α.
- Την δημιουργία και ενημέρωση του θεωρητικού μοντέλου της κατασκευής και την εύρεση αποδοτικότερων λύσεων ενίσχυσης.

3.3.2. Εύρεση ιδιοσυχνότητας μέσω παρατήρησης στο πεδίο του φάσματος

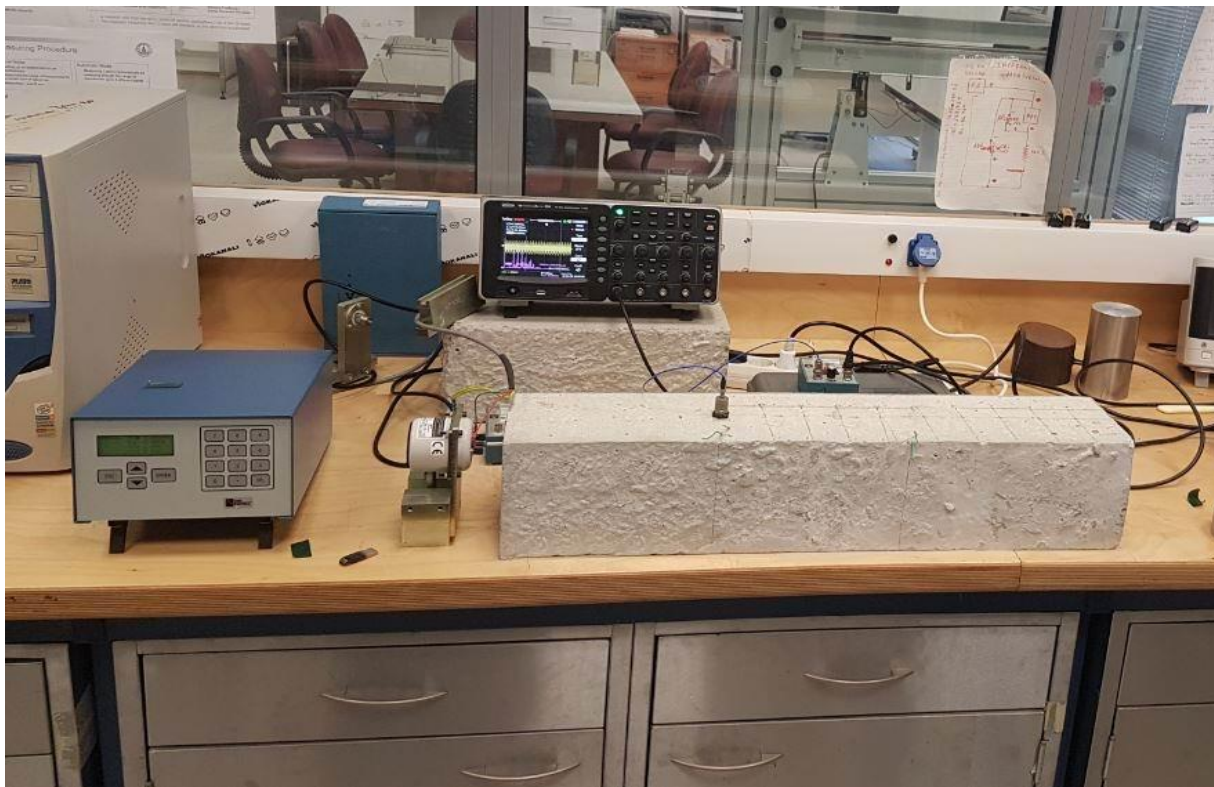
Η μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός υπό παρακολούθηση δομικού συστήματος και των διαδιδόμενων στο εσωτερικού του μηχανικών κυμάτων, είναι δυνατό να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τα μηχανικά του χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά ενός μηχανικού κύματος, το οποίο εκπέμπεται από μια πηγή μηχανικής ταλάντωσης και διαδίδεται στο φέρον οργανισμό μιας κατασκευής, καθορίζονται από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, τη γεωμετρία της μικροδομής του και την εξωτερική γεωμετρία του δομικού φορέα που διαδίδεται. Ένας τρόπος καταγραφής και αναγνώρισης των δυναμικών χαρακτηριστικών είναι μέσω της καταγραφής της χρονοϊστορίας.

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής, προσδιορίζονται με βάση πειραματικά δεδομένα από την καταγραφή ταλαντώσεων της κατασκευής υπό την επιβολή δράσης οποιασδήποτε μορφής. Στην περίπτωση αυτή η κατασκευή υποβάλλεται σε γνωστή εκ των προτέρων δυναμική διέγερση με τεχνητά μέσα. Συγκεκριμένα, καθώς μια αρμονική διέγερση γνωστής συχνότητας εφαρμόζεται μέσω ενός εξωτερικού διεγέρτη στην κατασκευή, το πλάτος και η φάση της απόκρισης καταγράφονται. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται αλλάζοντας κάθε φορά τη συχνότητα της διέγερσης από χαμηλότερη σε υψηλότερη. Έτσι, σχεδιάζεται η συχνότητα απόκρισης της κατασκευής μέσω της οποίας μπορούν να στη συνέχεια, να διαπιστωθούν κάποια από τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. [27].

Η μέθοδος αυτή, είναι μια τεχνική για την εκτίμηση των ιδιομορφικών παραμέτρων της υπό μελέτη κατασκευής η οποία βασίζεται στον υπολογισμό των μετασχηματισμών Φουριέ, και στην εξαγωγή του φάσματος των συχνοτήτων. Οι συχνότητες αυτές αναφέρονται συνήθως στο γράφημα του φάσματος ως κορυφές θεμελιωδών συχνοτήτων. Το πλάτος της μεγίστης τιμής της κορυφής για κάθε καταγραφή δίνει ένα σημείο της ιδιομορφής. Με αυτόν τον τρόπο οι ιδιοσυχνότητες προσδιορίζονται απλά από την παρακολούθηση των κορυφών του κανονικοποιημένου φάσματος, το οποίο προσδιορίζεται μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Φουριέ (Fast Fourier Transform, FFT). Ο εντοπισμός της συχνότητας γύρω από την οποία συμβαίνει η ακραία τιμή είναι συνήθως και η ιδιοσυχνότητα του συστήματος.

3.3.3. Πειραματική διαδικασία

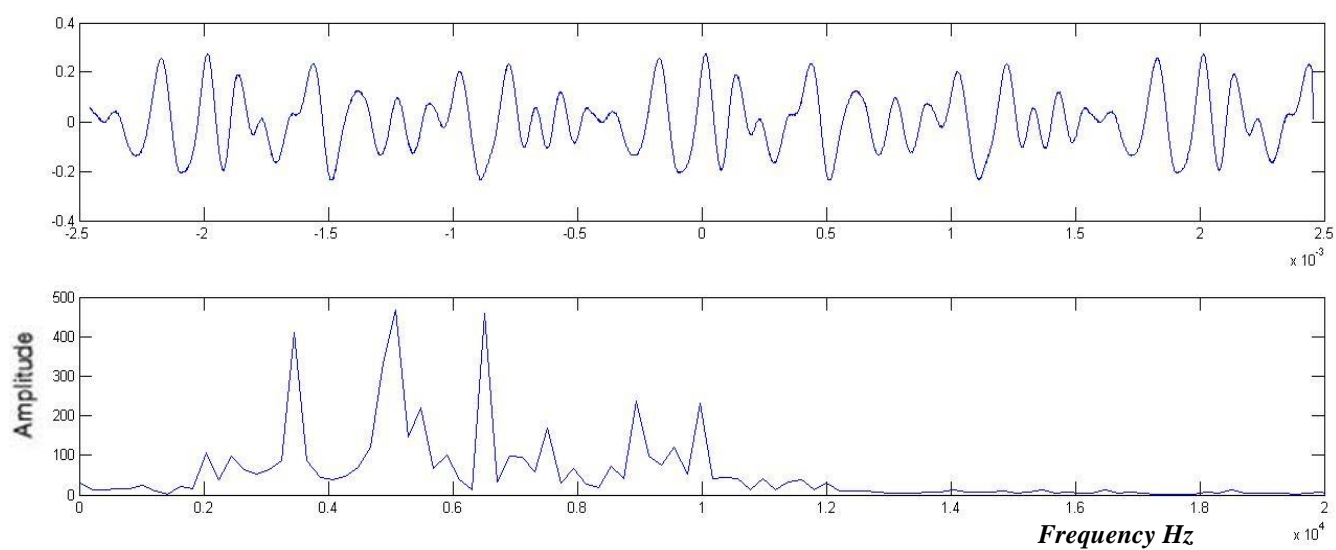
Για την πειραματική διαδικασία επιλέχθηκε ένα «υγιές» δοκίμιο σκυροδέματος στο οποίο δημιουργείται μηχανική ταλάντωση μέσω εξωτερικού διεγέρτη. Ο εξωτερικός διεγέρτης είναι συνδεδεμένος με γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος για την ενεργοποίηση δόνησης και την δημιουργία της μηχανικής ταλάντωσης στο υλικό. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η διέγερση χαμηλής συχνότητας του κύματος μεγέθυνσης η οποία διαδίδεται κατά μήκος της επιφάνειας του υλικού. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται αλλάζοντας κάθε φορά τη συχνότητα της διέγερσης από χαμηλότερη σε υψηλότερη.



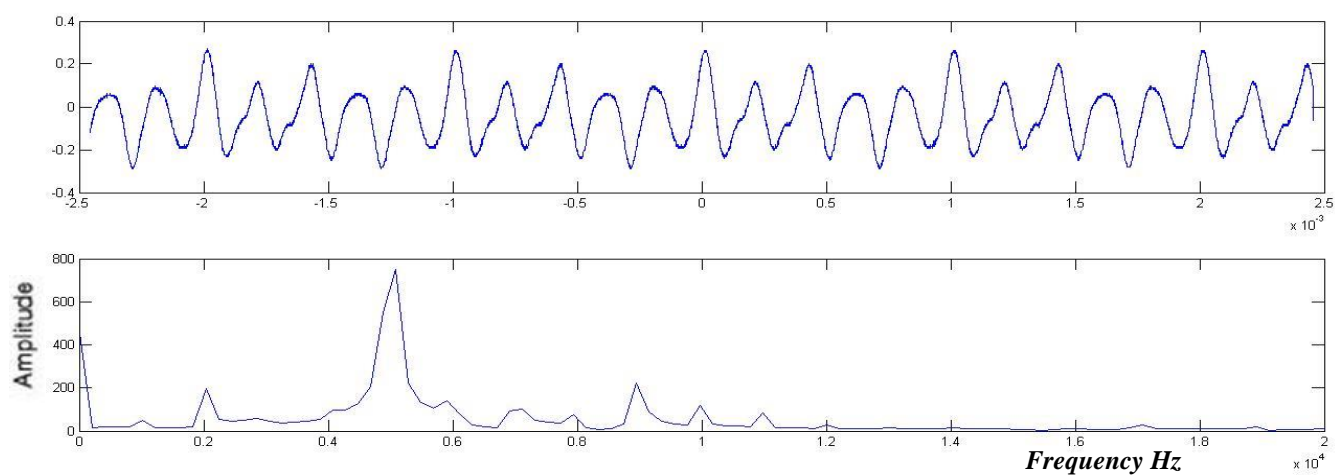
Εικόνα 3.9 Διάταξη πειραματικού εξοπλισμού για την δημιουργία διέγερσης χαμηλής συχνότητας και την καταγραφή της χρονοϊστορίας

Η καταγραφή και παρουσίαση των αποτελεσμάτων στον παλμογράφο βασίζεται στην δημιουργία πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, δηλαδή της μετατροπής της ταλάντωσης σε ηλεκτρική ενέργεια. Κατά συνέπεια η δομική απόκριση του υλικού λαμβάνεται από τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα ο οποίος έχει συνδεθεί με το ενισχυτή διαμόρφωσης σήματος και από εκεί μεταφέρεται στον παλμογράφο όπου καταγράφεται η χρονοϊστορία της ταλάντωσης.

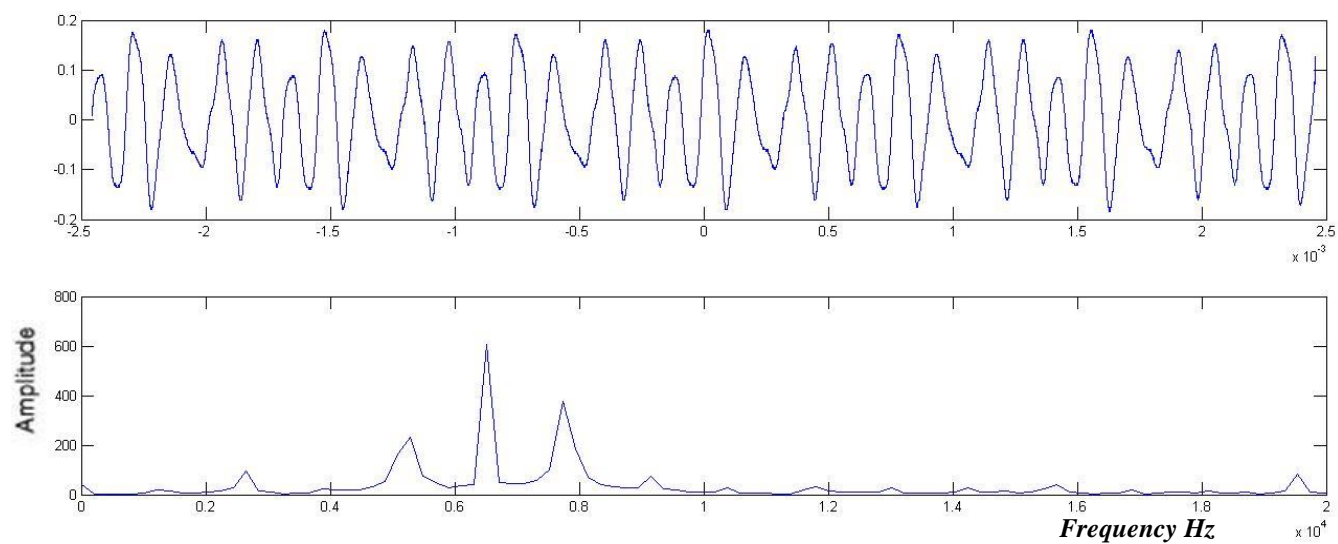
Με την επεξεργασία των καταγεγραμμένων μετρήσεων μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Φουριέ (Fast Fourier Transform, FFT) προσδιορίζονται στο πεδίο συχνοτήτων οι κορυφές του κανονικοποιημένου φάσματος. Για την εκτίμηση της ιδιοσυχνότητας του δοκιμίου η πειραματική διαδικασία δημιουργίας μηχανικής ταλάντωσης ελέγχτηκε για ένα εύρος συχνοτήτων από 500,00 Hz έως και 5500,00 Hz σε βήματα των 50,00 Hz. Μερικά από τα διαγράμματα της καταγραφής της χρονοϊστορίας σε συνάρτηση του διαγράμματος κορυφών στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων, παρατίθενται παρακάτω.



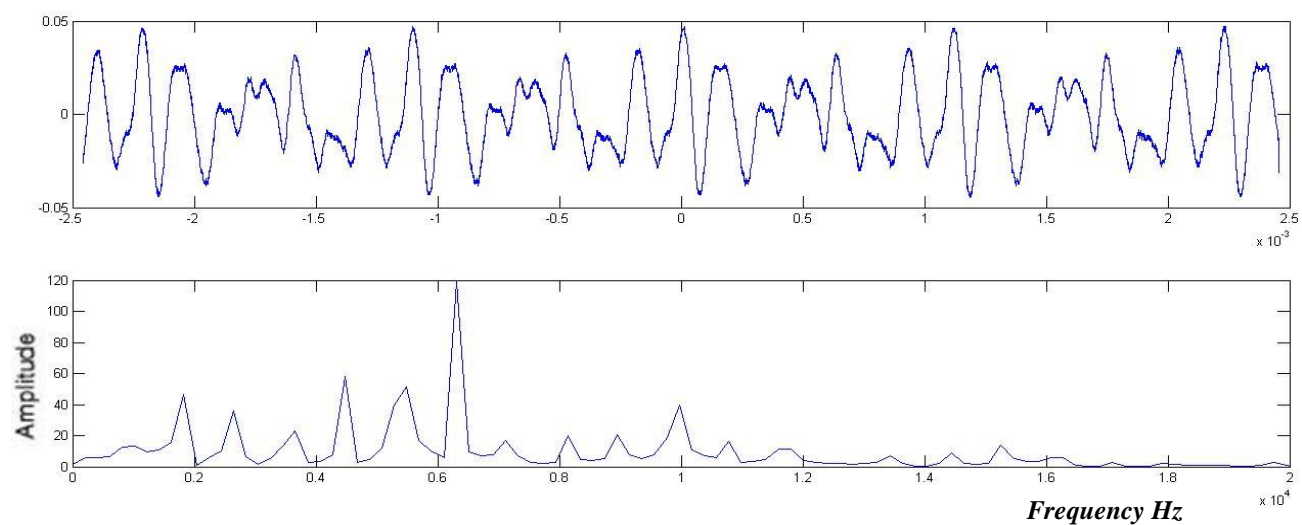
Εικόνα 3.10 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **500,00 Hz**



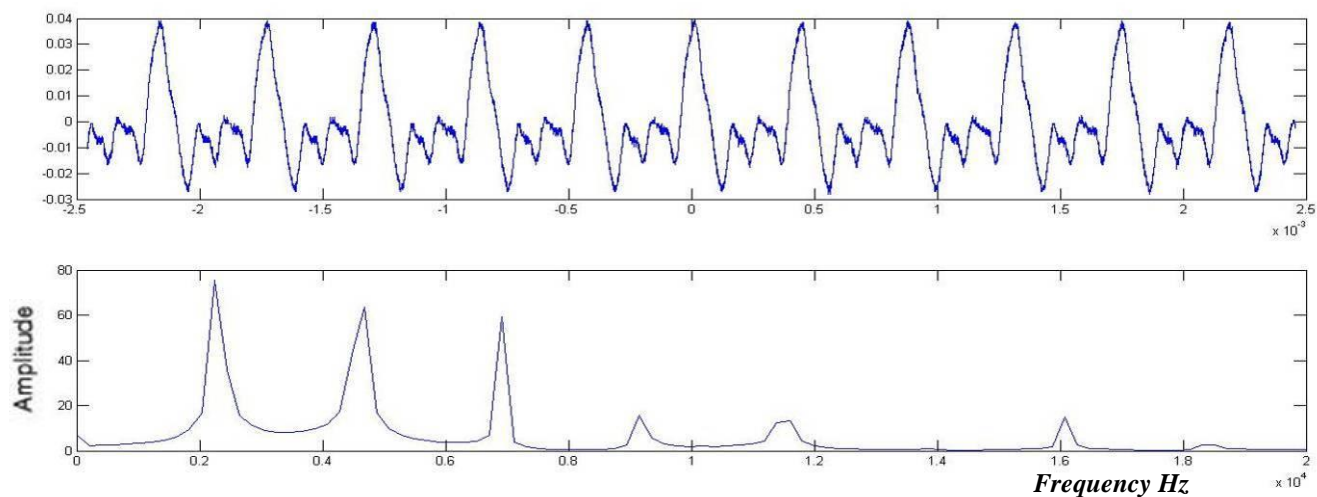
Εικόνα 3.11 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **1000,00 Hz**



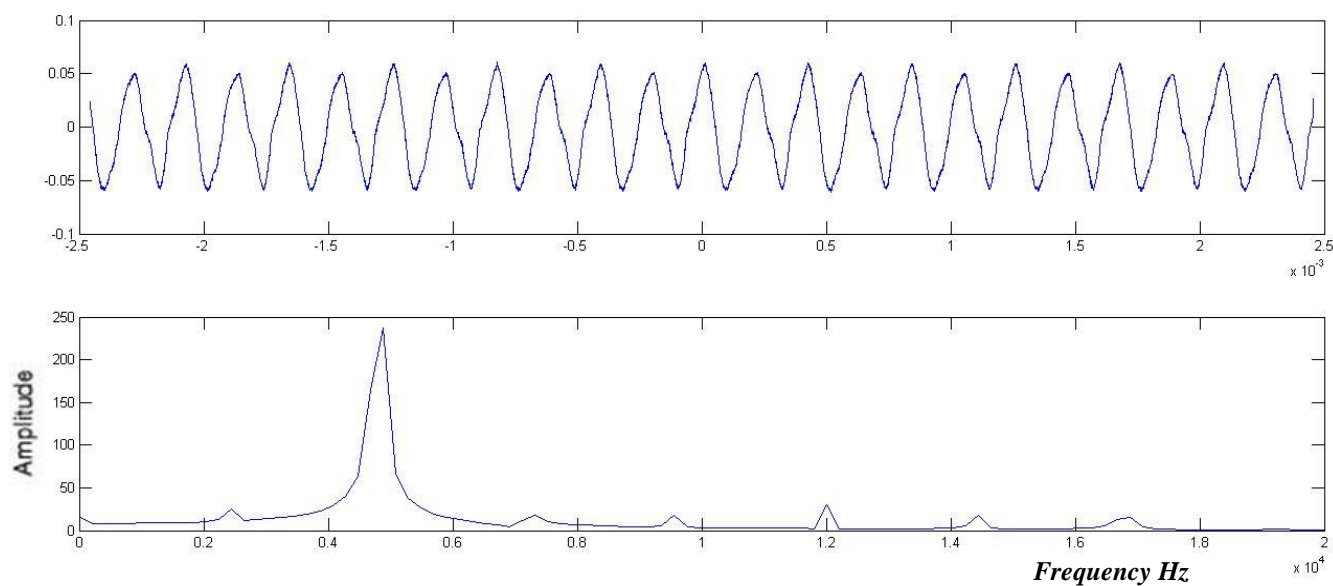
Εικόνα 3.12 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **1300,00 Hz**



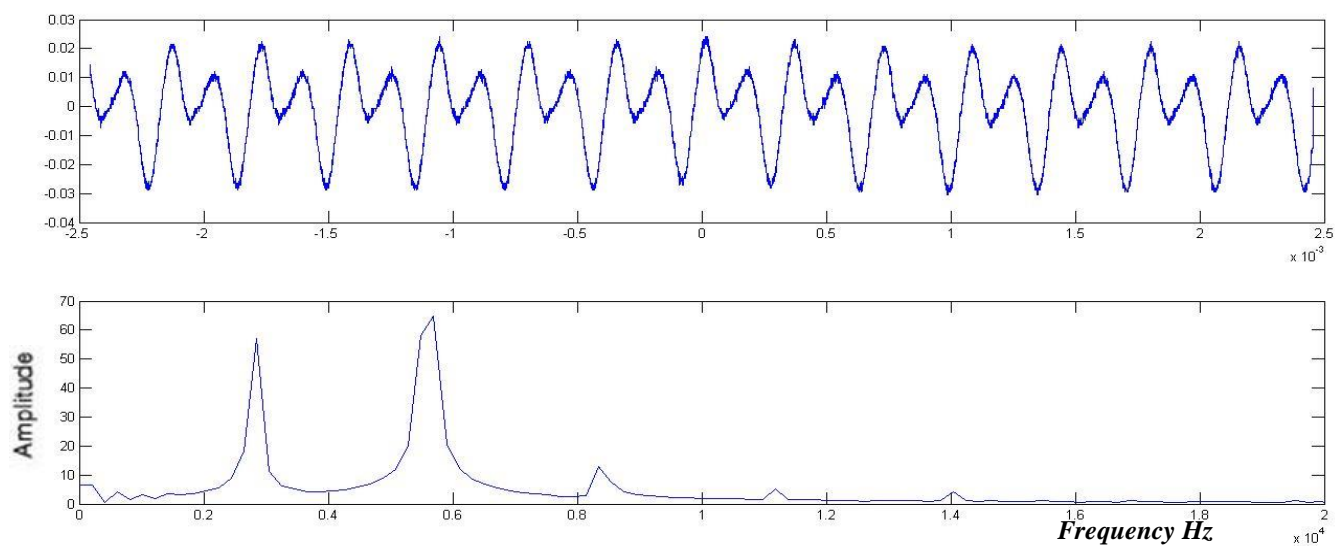
Εικόνα 3.13 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **1800,00 Hz**



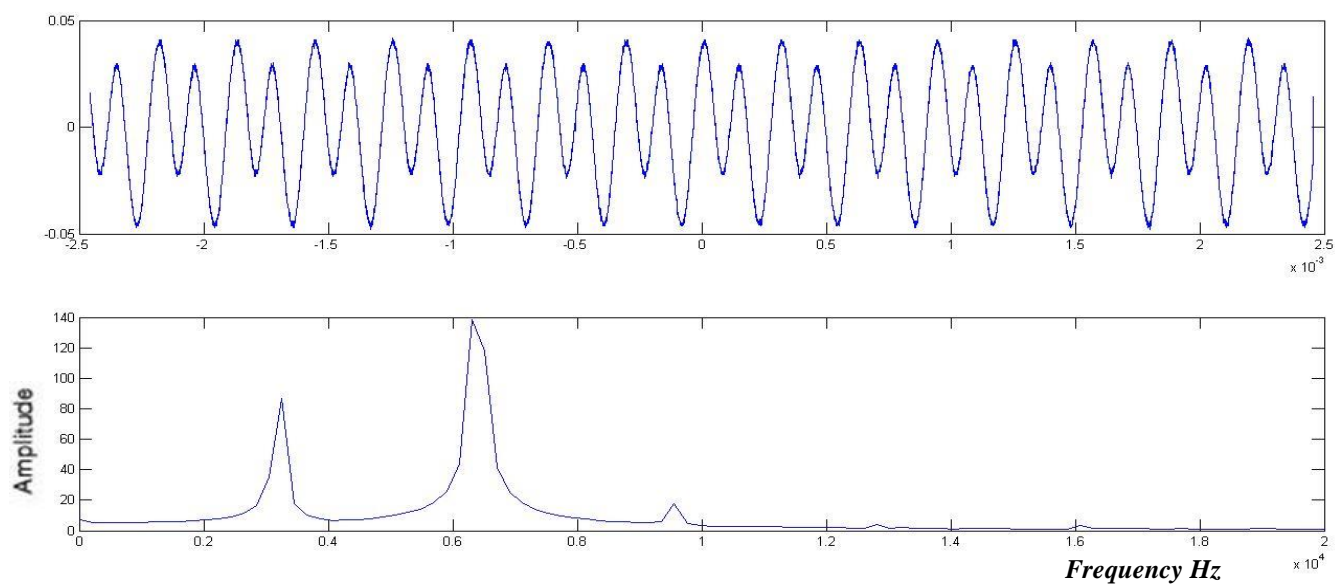
Εικόνα 3.14 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **2300,00 Hz**



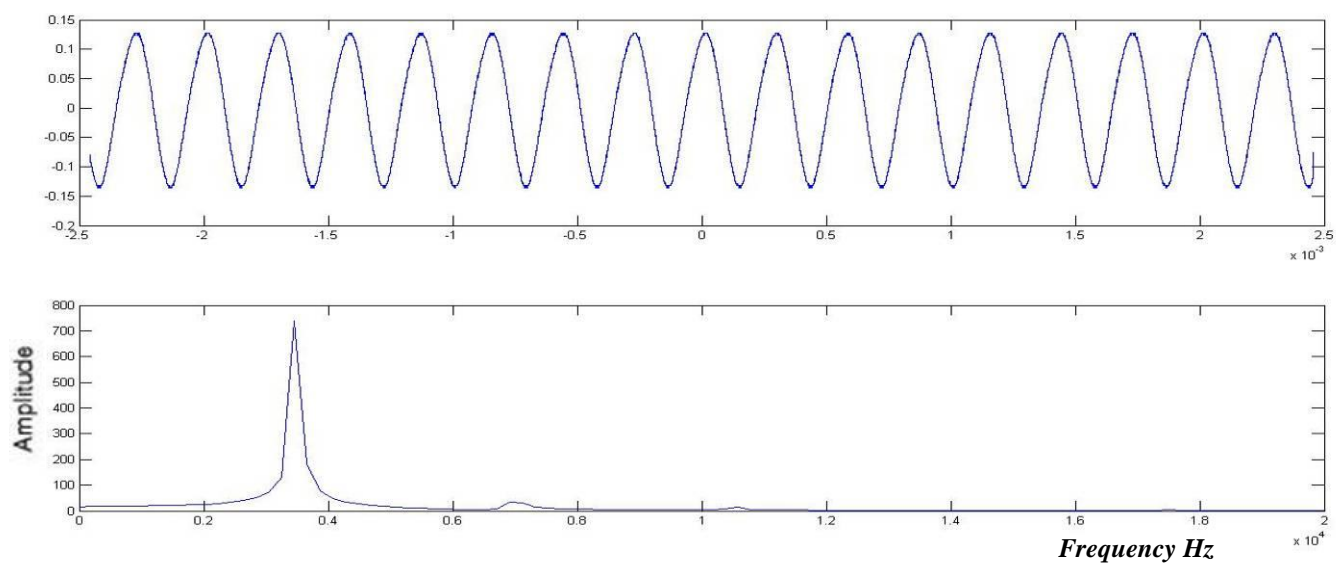
Εικόνα 3.15 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **2400,00 Hz**



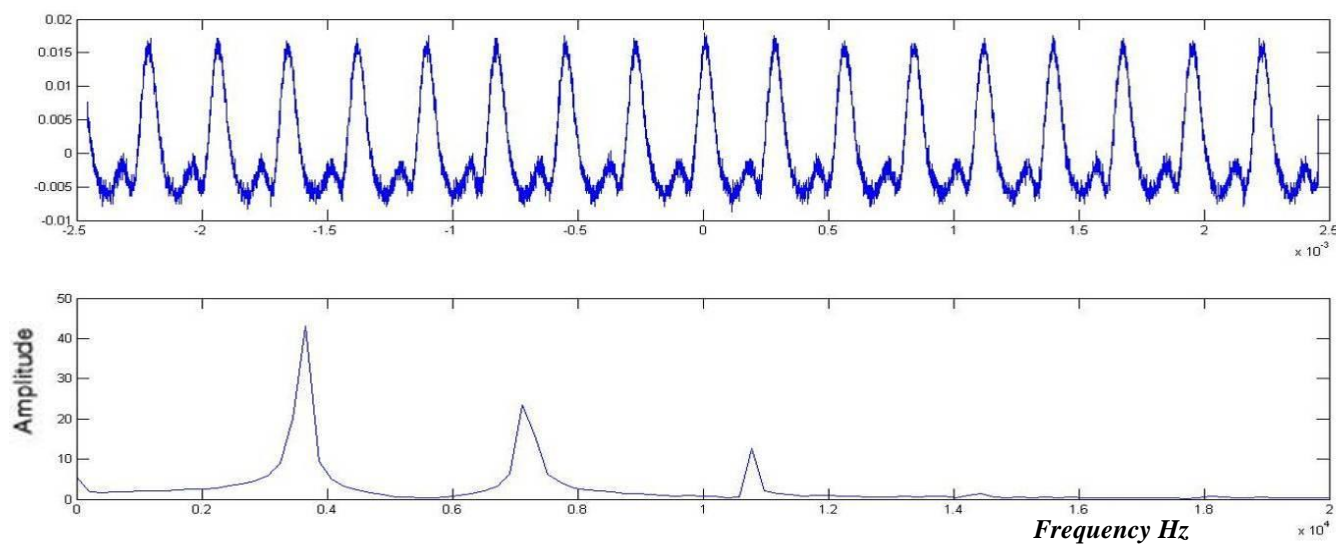
Εικόνα 3.16 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **2800,00 Hz**



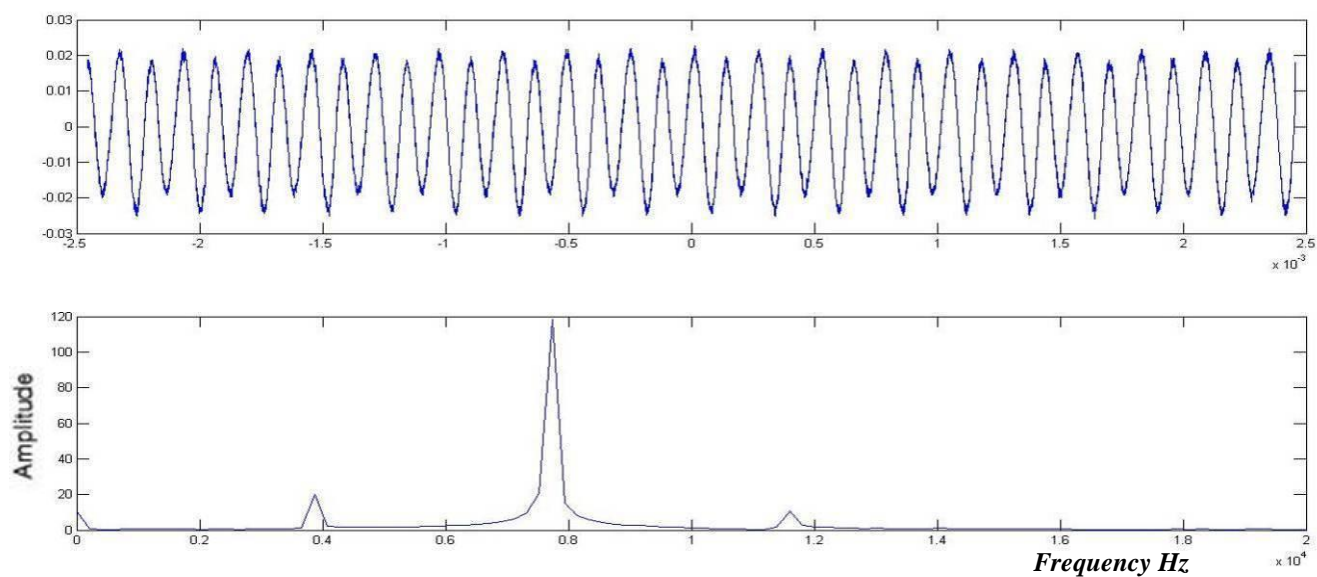
Εικόνα 3.17 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **3200,00 Hz**



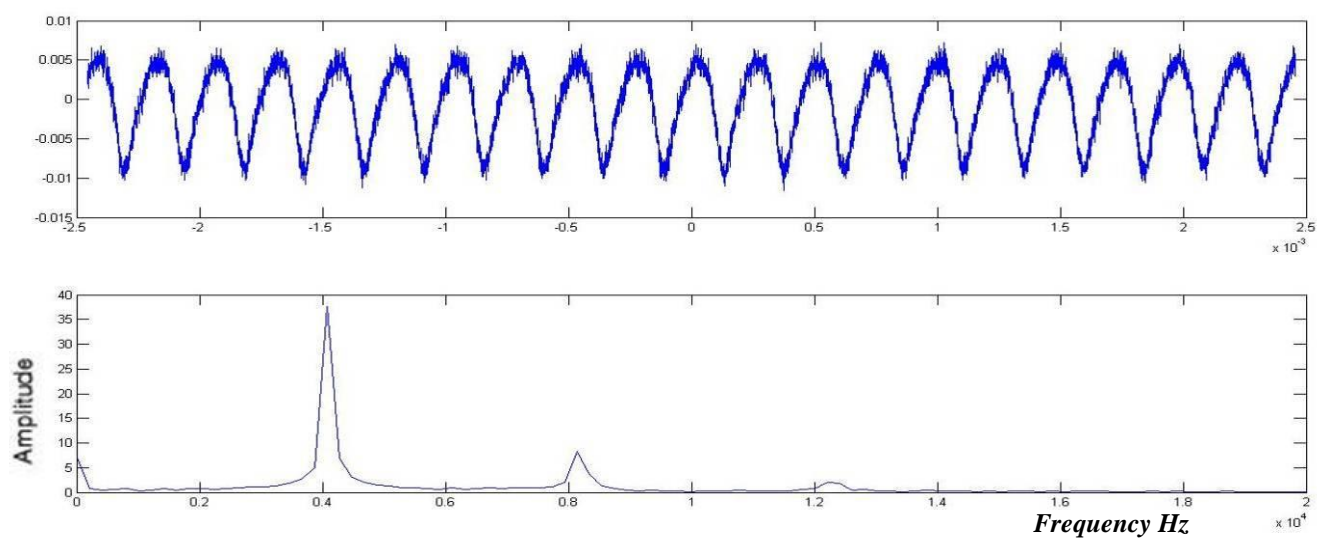
*Εικόνα 3.18 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **3500,00 Hz***



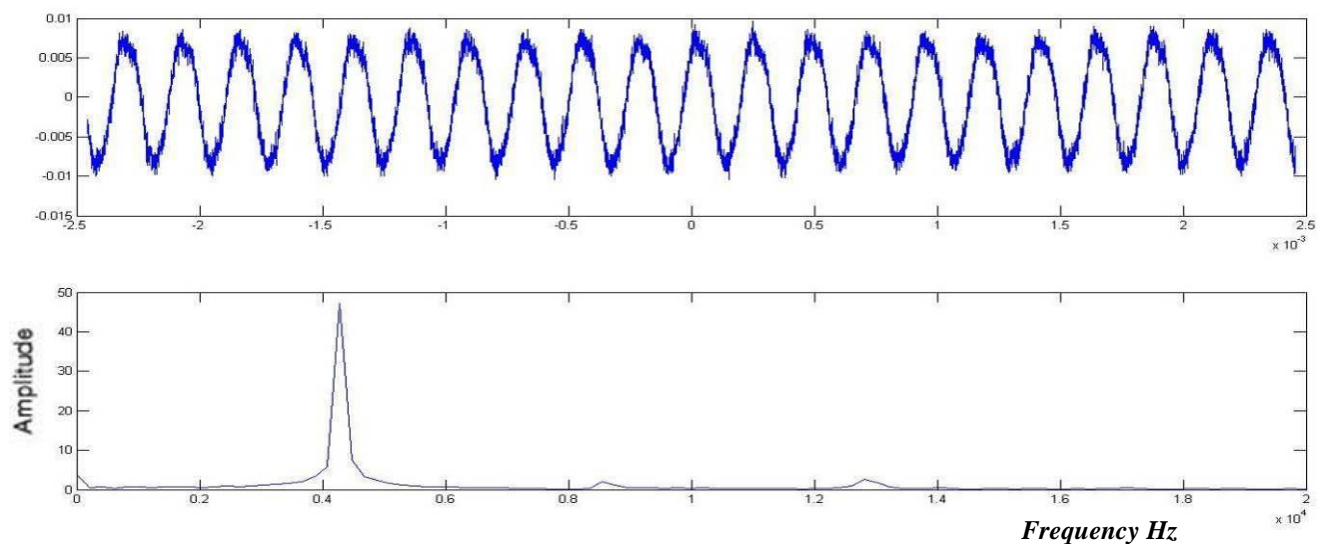
*Εικόνα 3.19 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **3600,00 Hz***



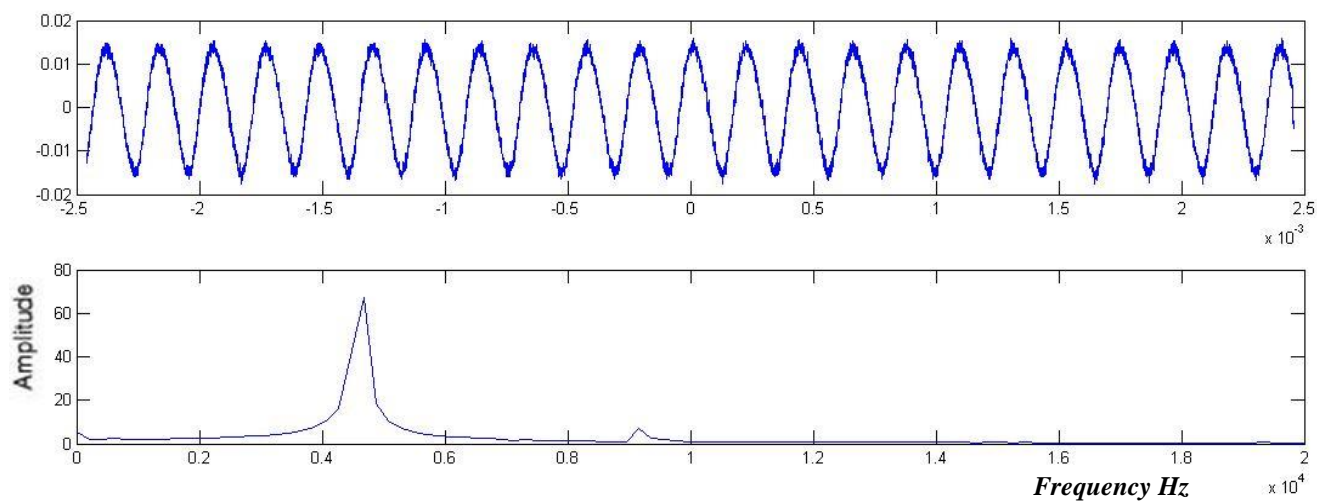
*Εικόνα 3.20 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **3850,00 kHz***



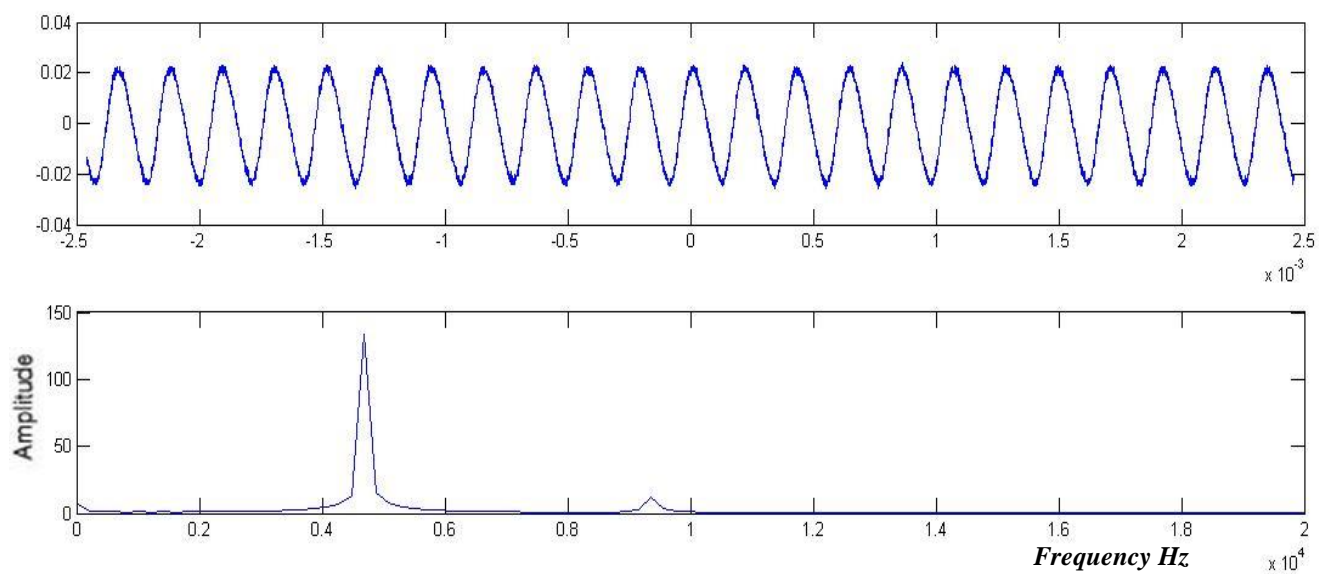
*Εικόνα 3.21 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **4100,00 Hz***



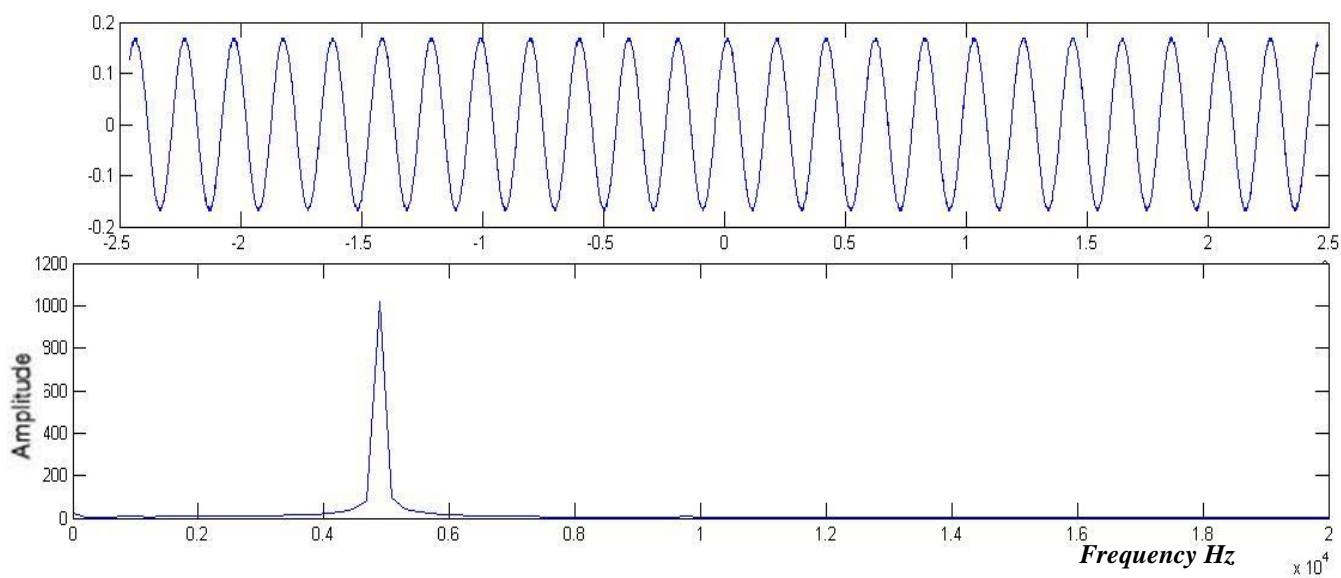
Εικόνα 3.22 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **4300,00 Hz**



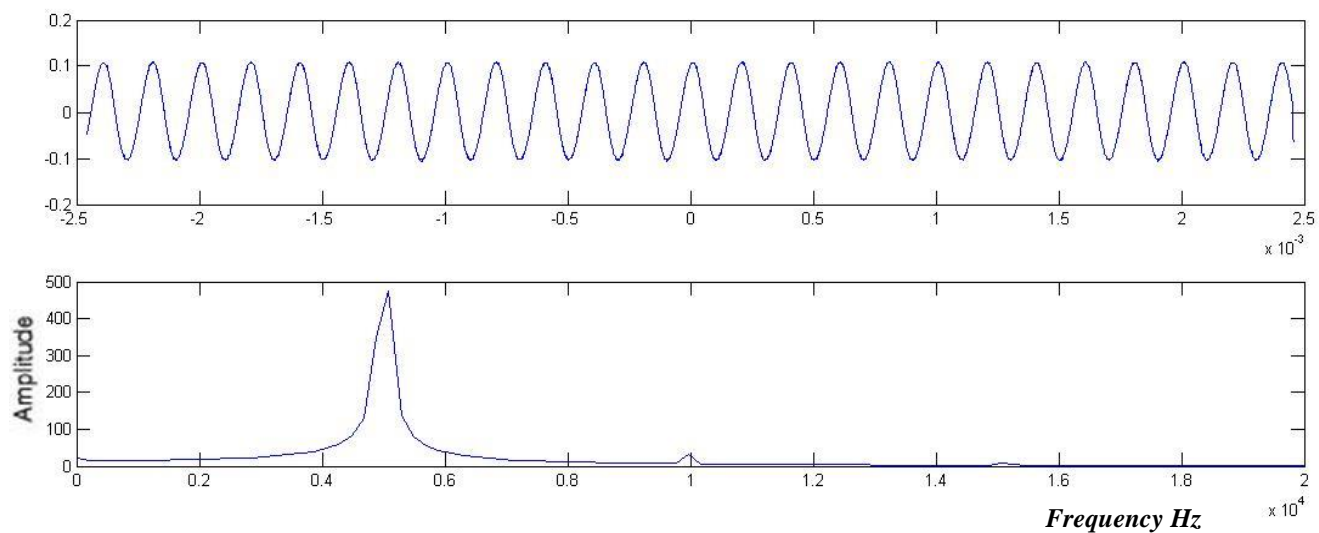
Εικόνα 3.23 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **4600,00 Hz**



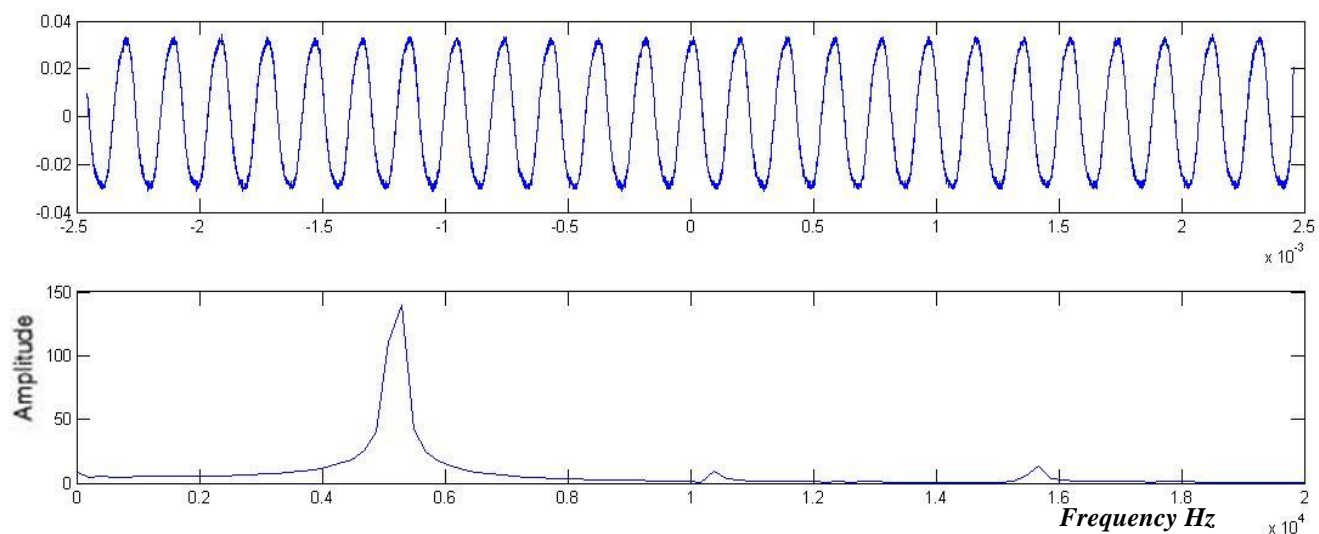
Εικόνα 3.24 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **4700,00 Hz**



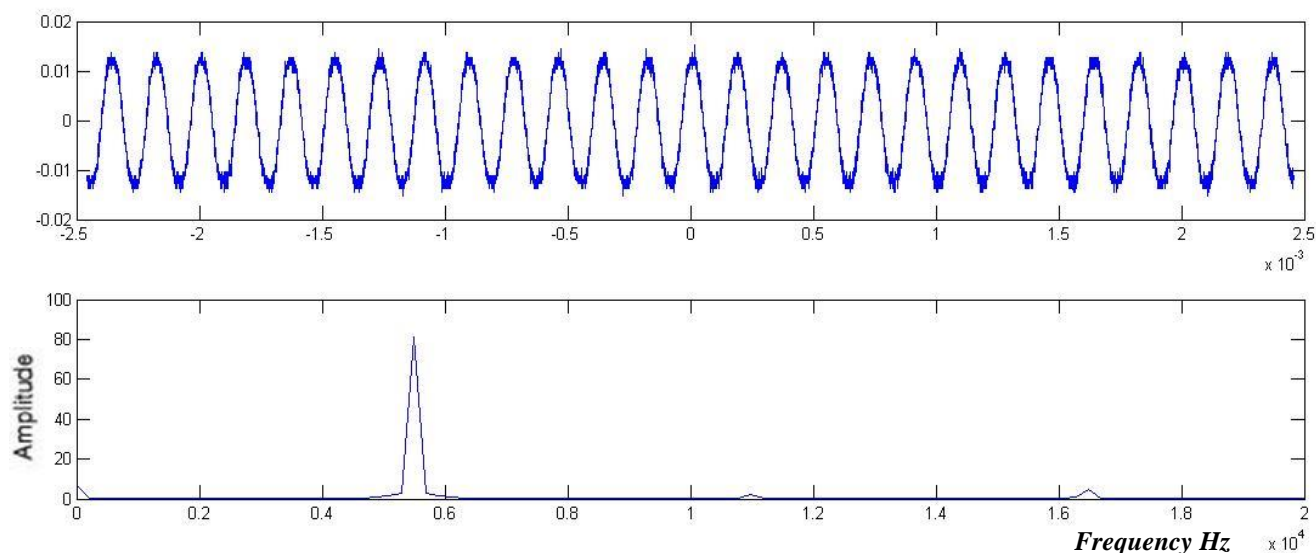
Εικόνα 3.25 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **4900,00 Hz**



Εικόνα 3.26 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **5000,00 Hz**



Εικόνα 3.27 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **5200,00 Hz**



Εικόνα 3.28 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **5500,00 Hz**

Η μέθοδος εύρεσης της ιδιοσυχνότητας όπως αναφέρθηκε, βασίζεται στην παρατήρηση των κορυφών του φάσματος. Η τιμή της συχνότητας γύρω από την οποία συμβαίνει η ακραία τιμή είναι συνήθως και η ιδιοσυχνότητα του συστήματος.

Από τις γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε επίσης, την καταγραφή της χρονοϊστορίας για την δυναμική απόκριση της κατασκευής κατά την διάρκεια της μηχανικής ταλάντωσης. Διαπιστώνουμε ότι, οι γραφικές παραστάσεις όπου η χρονοϊστορία αφορά σε αρμονική περιοδική κίνηση χωρίς να εμφανίζει ακμές ή γρέζια έχει αντίστοιχα στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων μια θεμελιώδη συχνότητα με μεγάλη τιμή χωρίς την εμφάνιση άλλων γειτονικών συχνοτήτων.

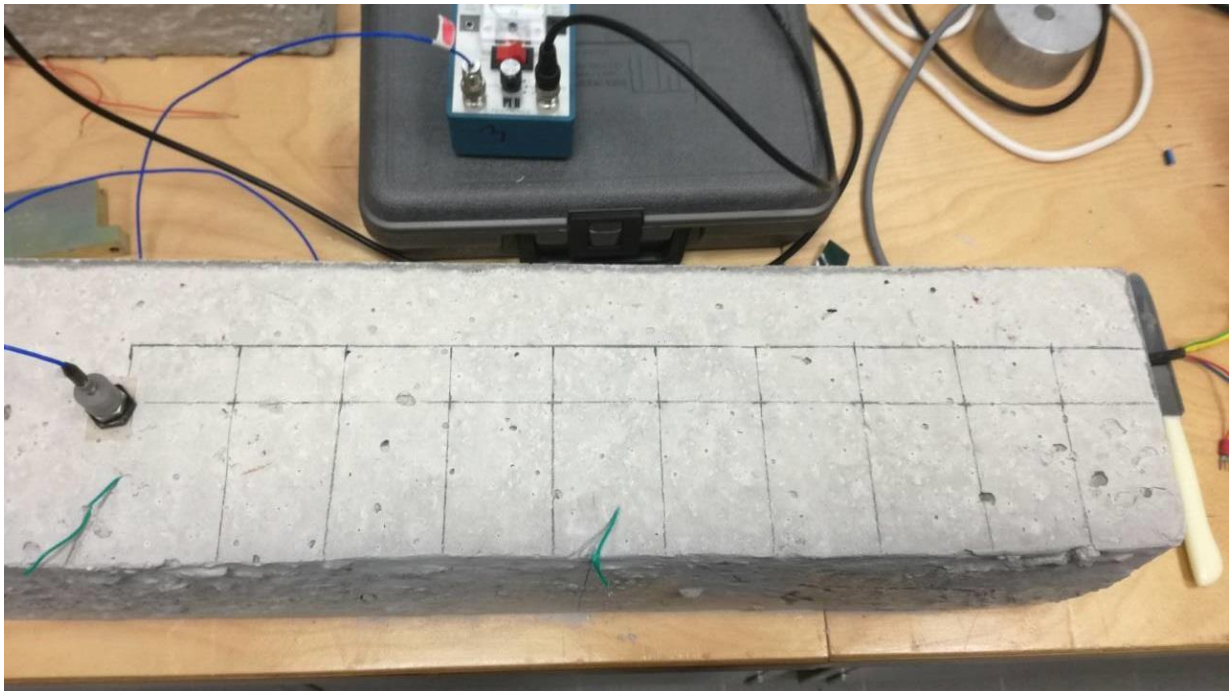
Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε προσδιορίσει ότι η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής αντιστοιχεί στα **4900,00 Hz** όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμή στο πεδίο του φάσματος χωρίς την εμφάνιση άλλων θεμελιωδών συχνοτήτων, ενώ η χρονοϊστορία αφορά επίσης σε αρμονική κίνηση.

3.3.4 Εύρεση απόστασης διέγερσης από τον αισθητήρα όπου παρουσιάζεται η ιδιοσυχνότητα του υλικού

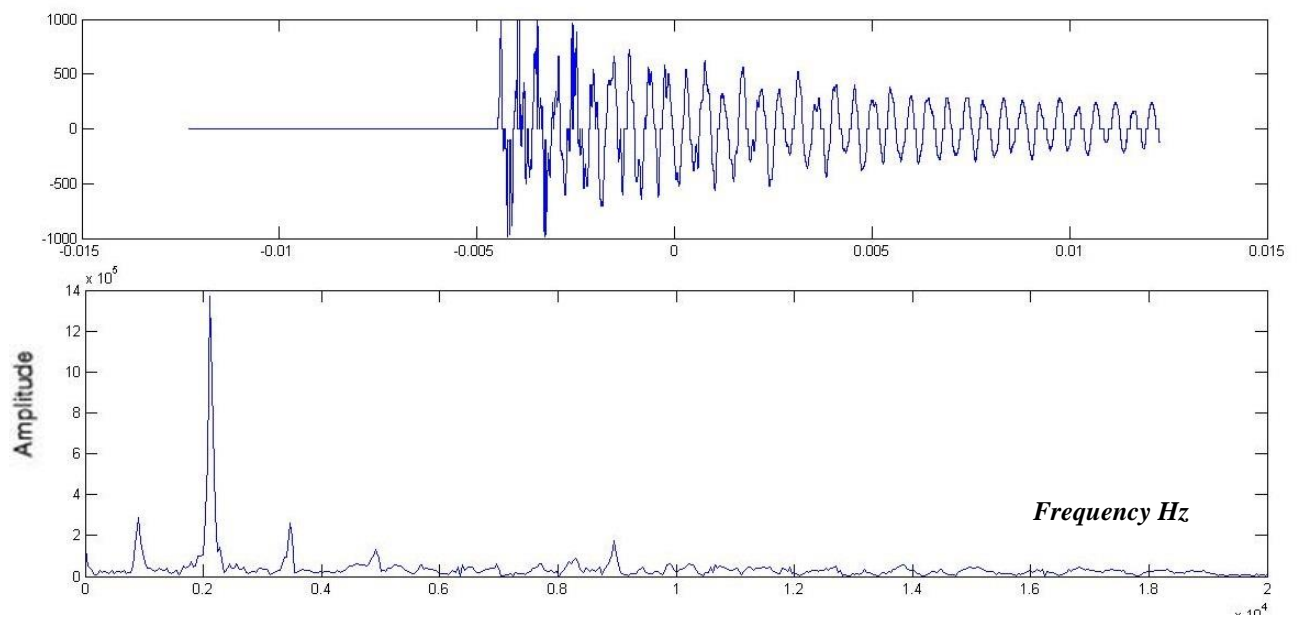
Ξέροντας την ιδιοσυχνότητα του δοκιμίου από Ο/Σ που προέκυψε διεγείροντάς το με γνωστή επιβαλλόμενη σταθερή φόρτιση, θέλουμε να βρούμε την απόσταση από τον αισθητήρα που μπορούμε να διεγείρουμε το δοκίμιό μας από **τυχαία στιγμιαία φόρτιση**, στην οποία εμφανίζεται η παραπάνω ιδιοσυχνότητα που βρήκαμε.

Για να πετύχουμε την στιγμιαία τυχαία φόρτιση, χρησιμοποιούμε ένα σφυράκι με το οποίο χτυπάμε το δοκίμιο και το υποβάλουμε σε μια ταλάντωση η οποία αποσβένει και μέσω του μετασχηματισμού Φουριέ βρίσκουμε την συχνότητα της ταλάντωσης. Χωρίζουμε το δοκίμιο σε ίσες αποστάσεις των 5cm από τον αισθητήρα-δέκτη του σήματος και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για κάθε θέση.

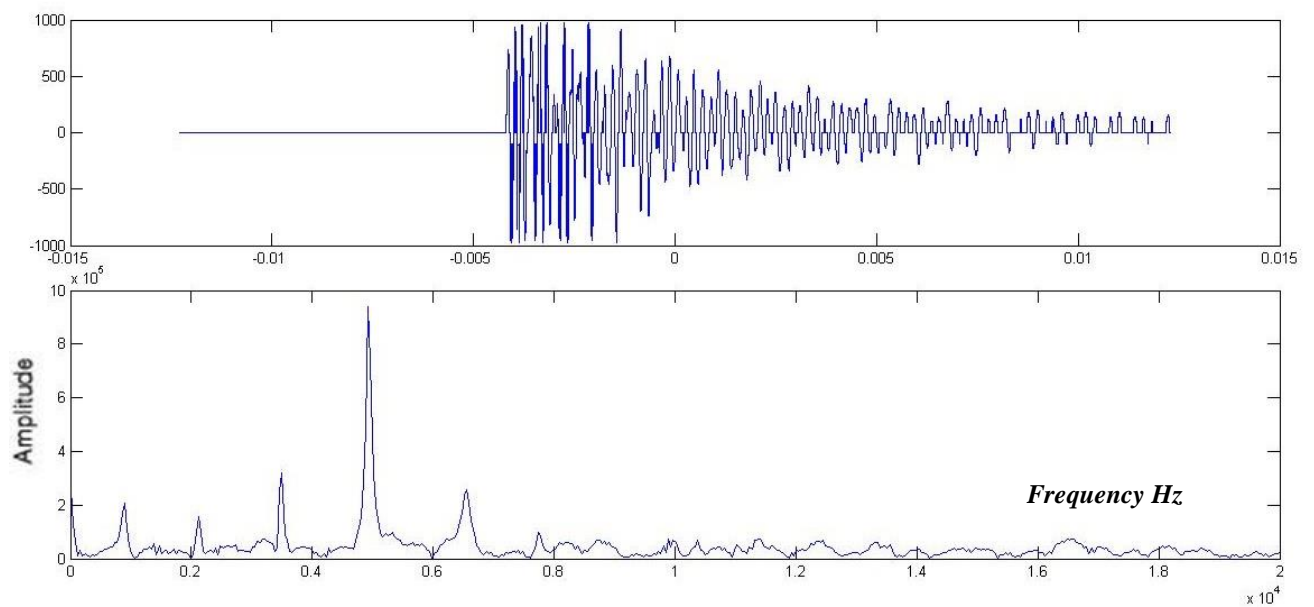
Στόχος είναι να δούμε σε ποια απόσταση εμφανίζεται η ιδιοσυχνότητα του υλικού στην οποία μπορούμε να δούμε την πιο χαρακτηριστική απόκριση της κατασκευής σε φόρτιση και να πάρουμε στοιχεία τα οποία προσδιορίζουν την κατάσταση της «υγείας» της εν λόγω κατασκευής. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των ταλαντώσεων και το πεδίο του φάσματος για κάθε διέγερση στις διάφορες αποστάσεις από τον αισθητήρα.



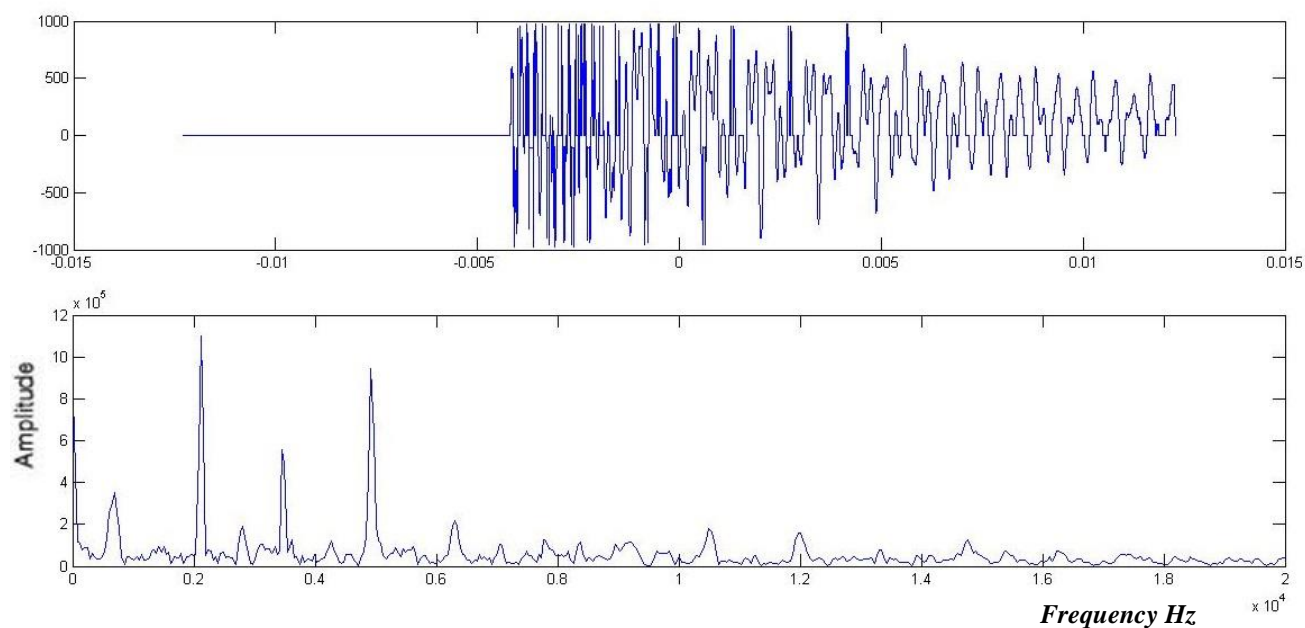
Εικόνα 3.29 Διαγράμμιση θέσεων σε απόσταση ανά 5cm από αισθητήρα



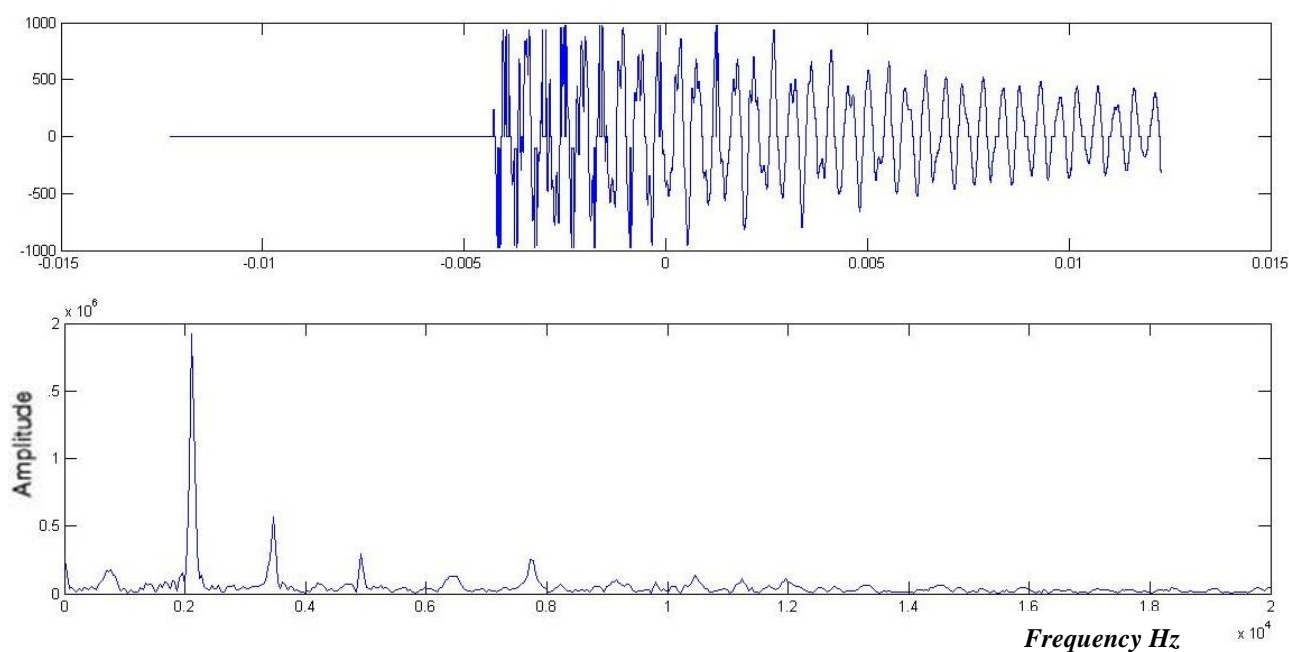
Εικόνα 3.30 Χρονοϊστορία απόκρισης και πεδίο του φάσματος σε απόσταση **5cm** από τον αισθητήρα



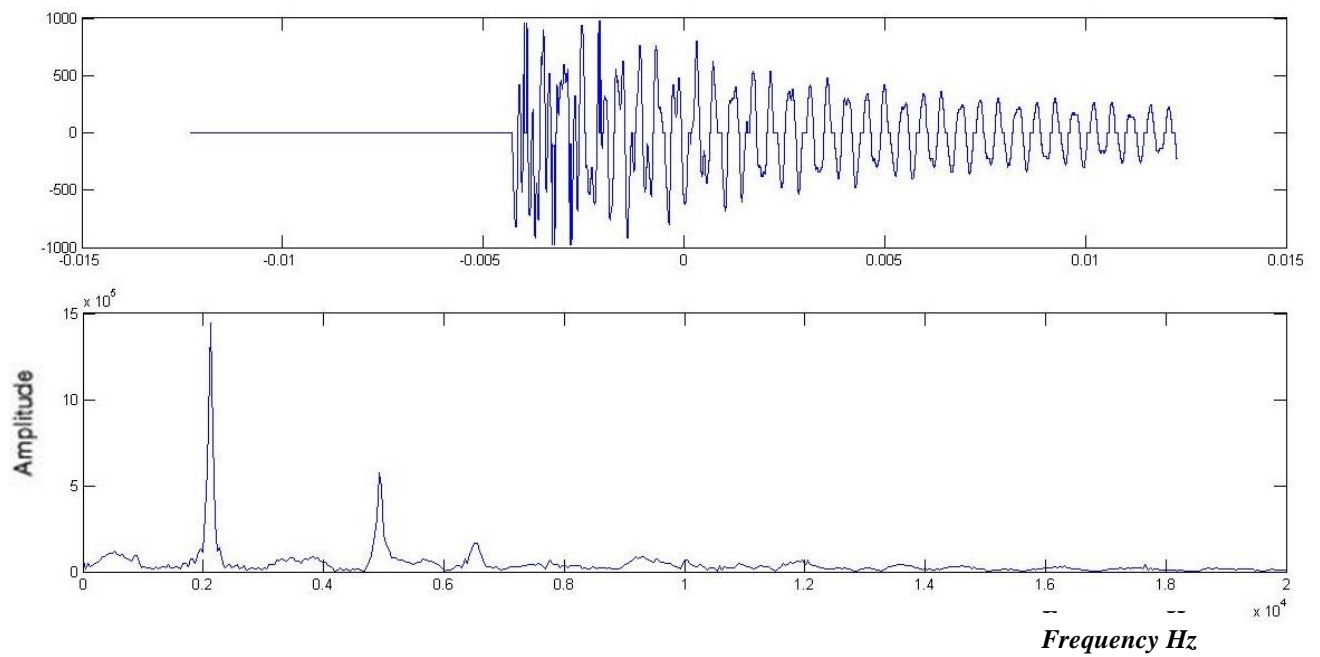
Εικόνα 3.31 Χρονοϊστορία απόκρισης και πεδίο του φάσματος σε απόσταση **10cm** από τον αισθητήρα



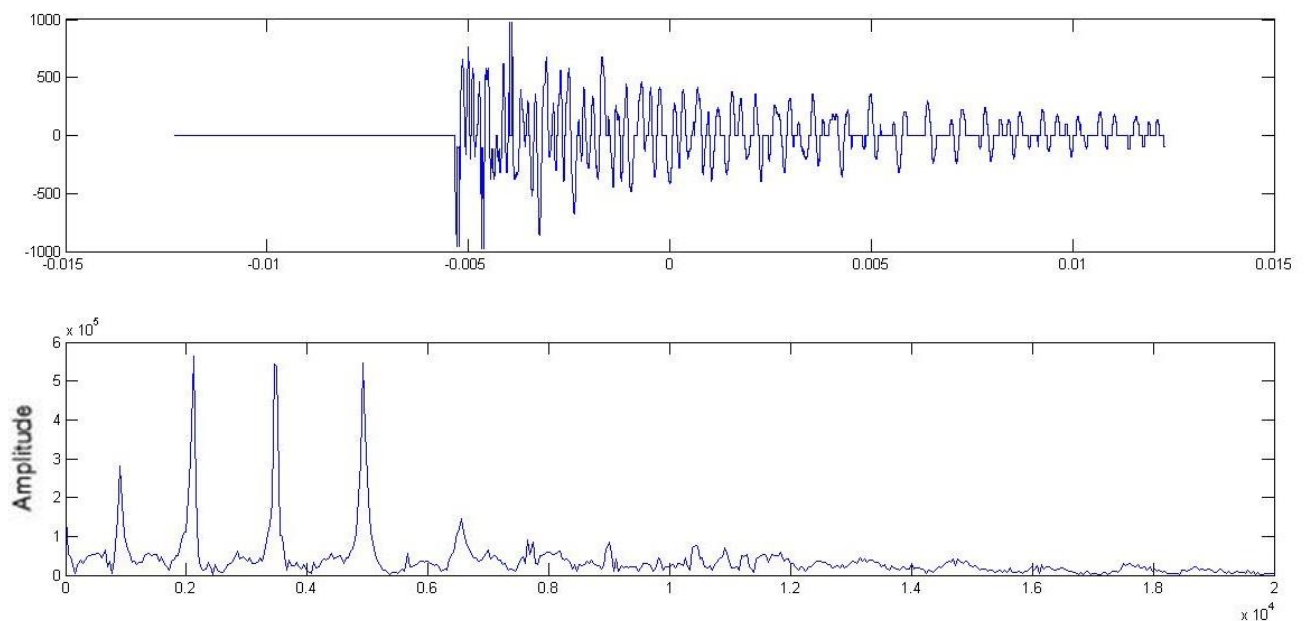
Εικόνα 3.32 Χρονοϊστορία απόκρισης και πεδίο του φάσματος σε απόσταση **15cm** από τον αισθητήρα



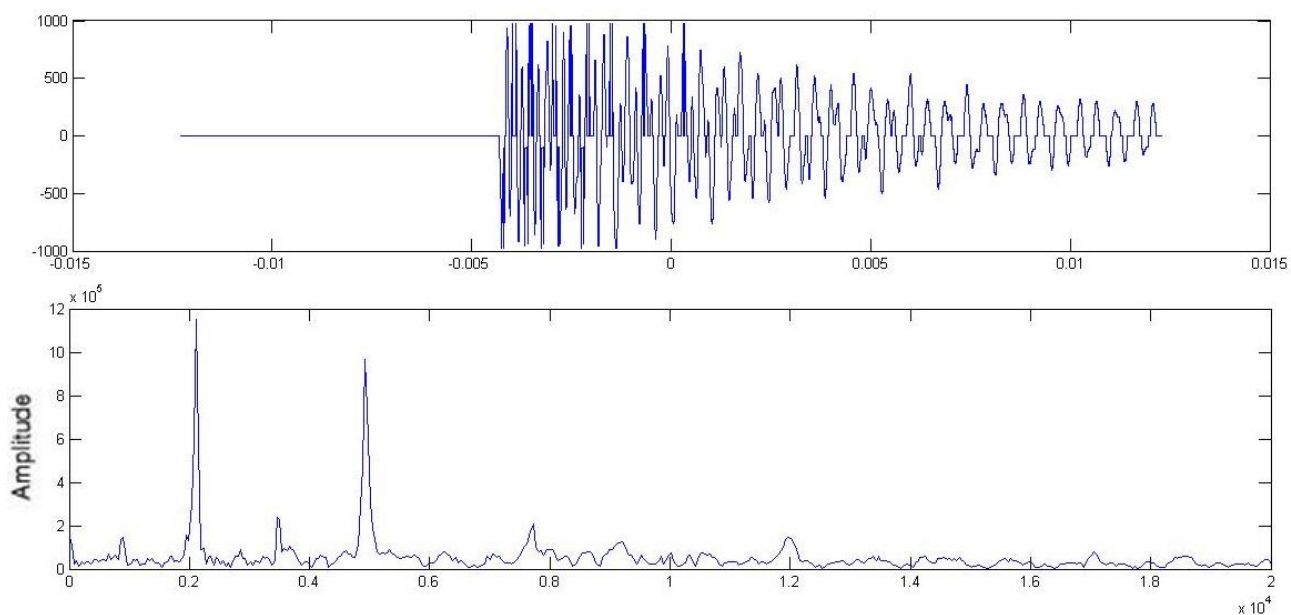
Εικόνα 3.33 Χρονοϊστορία απόκρισης και πεδίο του φάσματος σε απόσταση **20cm** από τον αισθητήρα



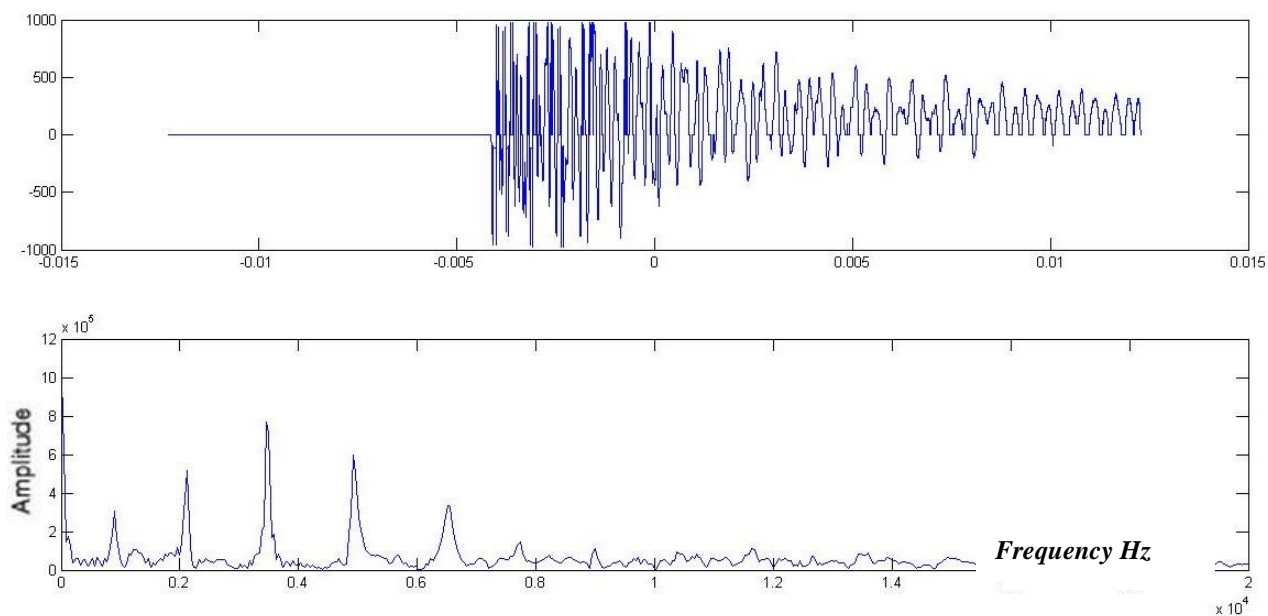
Εικόνα 3.34 Χρονοϊστορία απόκρισης και πεδίο του φάσματος σε απόσταση **25cm** από τον αισθητήρα



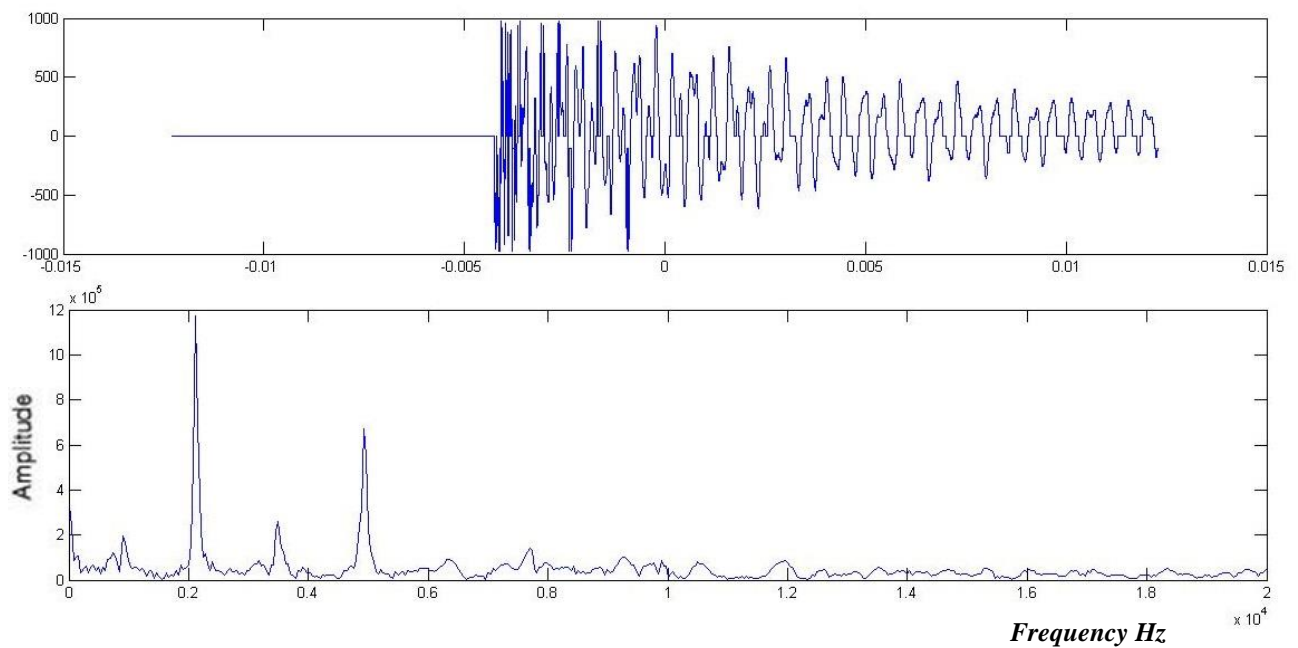
Εικόνα 3.35 Χρονοϊστορία απόκρισης και πεδίο του φάσματος σε απόσταση **30cm** από τον αισθητήρα



Εικόνα 3.36 Χρονοϊστορία απόκρισης και πεδίο του φάσματος σε απόσταση **35cm** από τον αισθητήρα



Εικόνα 3.37 Χρονοϊστορία απόκρισης και πεδίο του φάσματος σε απόσταση **40cm** από τον αισθητήρα



Εικόνα 3.38 Χρονοϊστορία απόκρισης και πεδίο του φάσματος σε απόσταση **45cm** από τον αισθητήρα.

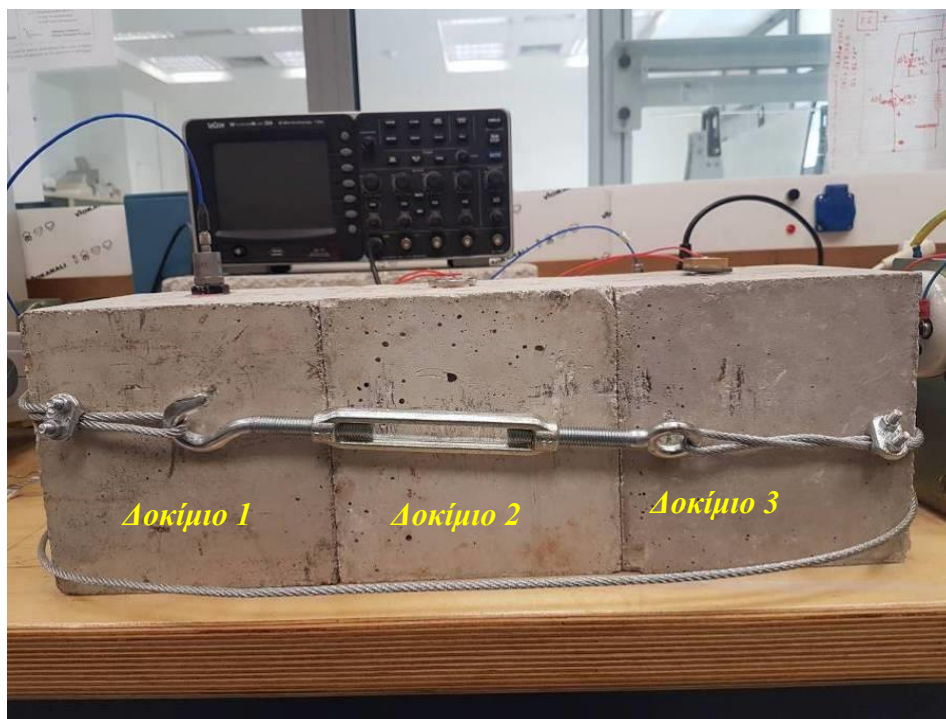
Παρατηρούμε από τα αποτελέσματα ότι η συχνότητα συντονισμού που βρήκαμε παραπάνω στα 4900Hz εμφανίζεται σχεδόν σε όλες τις θέσεις των κρούσεων. Στην θέση των 10 cm από τον αισθητήρα παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμή της συχνότητας των 4900Hz , ξεχωρίζοντας από όλες τις υπόλοιπες συχνότητες. Επίσης βλέπουμε αντίστοιχη τιμή στη θέση των 35cm από τον αισθητήρα, μαζί όμως με μία ένδειξη στα 2100Hz περίπου, συχνότητα η οποία εμφανίζεται συχνά στο οπλισμένο σκυρόδεμα.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μπορούμε να προσδιορίσουμε ιδιομορφικά χαρακτηριστικά και την κατάσταση της «υγείας» του σκυροδέματος σε επιβολή τυχαίας φόρτισης σε απόσταση 10cm από τον αισθητήρα – δέκτη του σήματος της διέγερσης, σε αντίστοιχους τύπους κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα.

3.4. Εντοπισμός βλάβης σε δοκίμιο σκυροδέματος από τον τρόπο απόσβεσης της ταλάντωσης

Τα στοιχεία από σκυρόδεμα υποθέτουν γραμμική συμπεριφορά. Η ύπαρξη μιας μη γραμμικότητας στο στοιχείο, προσδιορίζει μια πιθανή βλάβη που έχει προκληθεί. Η επιβολή στιγμιαίας φόρτισης επιφέρει ταλάντωση στο στοιχείο το οποίο αποσβένει με συγκεκριμένο τρόπο. Ο προσδιορισμός της μη γραμμικότητας μπορεί να προκύψει από τον τρόπο απόσβεσης του στοιχείου.

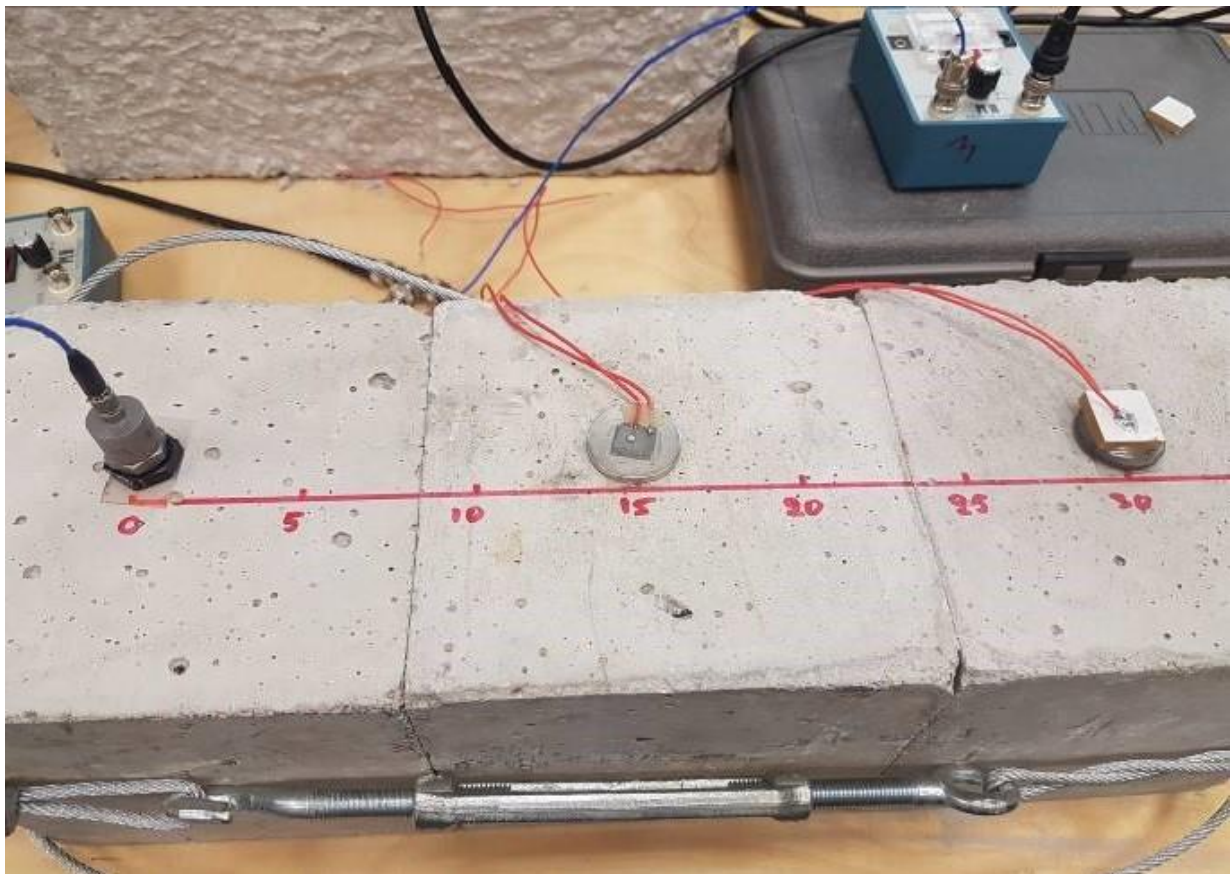
Για την διερεύνηση του φαινομένου πραγματοποιούνται εργαστηριακές δοκιμές από τις οποίες προκύπτει και συγκρίνεται ο τρόπος απόσβεσης πριν και μετά από μια πιθανή βλάβη. Για διεξαγωγή του παραπάνω σκοπού επιλέγονται τρία δοκίμια σκυροδέματος τα όποια ενώνονται μεταξύ τους (όσο το δυνατόν πιο ισχυρά). Η συνδεσμολογία πραγματοποιείται με την τοποθέτηση συρματόσχοινου και την περίσφιξη από γάντζο και άλλους μεταλλικούς συνδέσμους. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η δημιουργία διεπιφανειών μεταξύ των δοκιμίων, ενώ επιτυγχάνεται η διάδοση των μηχανικών κυμάτων στο εσωτερικό τους σαν να πρόκειται για ένα ομοιογενές μονολιθικό σώμα. Η προσομοίωση πιθανής βλάβης πραγματοποιείται με την μικρή χαλάρωση του συρματόσχοινου και την δημιουργία διεπιφανειών μεταξύ των δοκιμίων. Έτσι όλο το σύστημα των τριών δοκιμίων που μελετάται σαν ένα σώμα έχει ασυνέχειες στο εσωτερικό του και η διάδοση κύματος γίνεται διαφορετικά.



Εικόνα 3.39 Περίδεση δοκιμίων σκυροδέματος για διεξαγωγή πειράματος

Η επιβολή της φόρτισης γίνεται με χτύπημα από σφυράκι στις συγκεκριμένες θέσεις που βρήκαμε στην προηγούμενη παράγραφο στις οποίες εμφανίζεται η ιδιοσυχνότητα του στοιχείου και στην οποία μπορούμε να βγάλουμε ποιοτικά συμπεράσματα για τον τρόπο απόσβεσης της ταλάντωσης. Έτσι εφαρμόζεται κρούση στις αποστάσεις των 10cm και 35cm από τον αισθητήρα – δέκτη του σήματος.

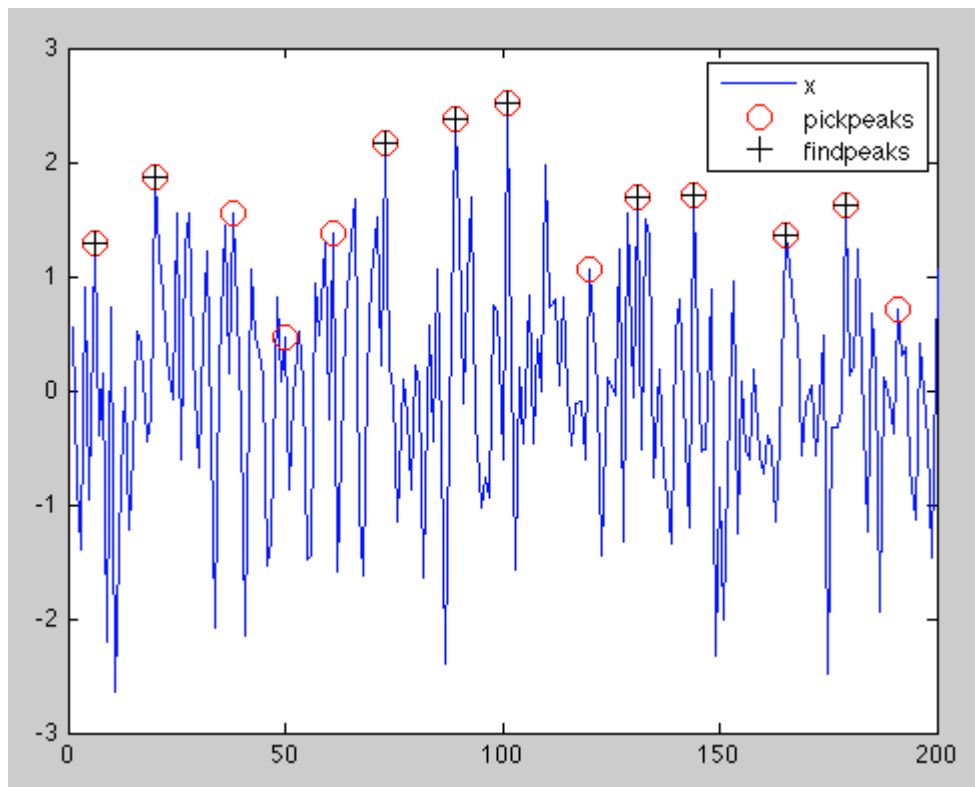
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι αποστάσεις από τον αισθητήρα. Ο αισθητήρας τοποθετείται στο Δοκίμιο 1. Η απόσταση των 10cm βρίσκεται στο Δοκίμιο 2 όπου παρεμβάλλεται μία διεπιφάνεια ως τον αισθητήρα, ενώ η απόσταση των 35cm βρίσκεται στο Δοκίμιο 3 και παρεμβάλλονται δύο διεπιφάνειες.



Εικόνα 3.40 Περίδωση δοκιμίων σκυροδέματος για διεξαγωγή πειράματος

Η καταγραφή της χρονοϊστορίας της ταλάντωσης γίνεται από τον παλμογράφο από τον οποίο μπορείς να εξάγεις την καταγραφή αυτή σε μορφή .txt . Με την βοήθεια της πλατφόρμας της Matlab και κάποιου script κώδικα (run_pickpeaks.m)επιλέγονται τα peaks της καταγραφής. Παρακάτω φαίνονται οι εντολές του συγκεκριμένου κώδικα και ένα παράδειγμα από την επιλογή των peaks μιας χρονοϊστορίας.

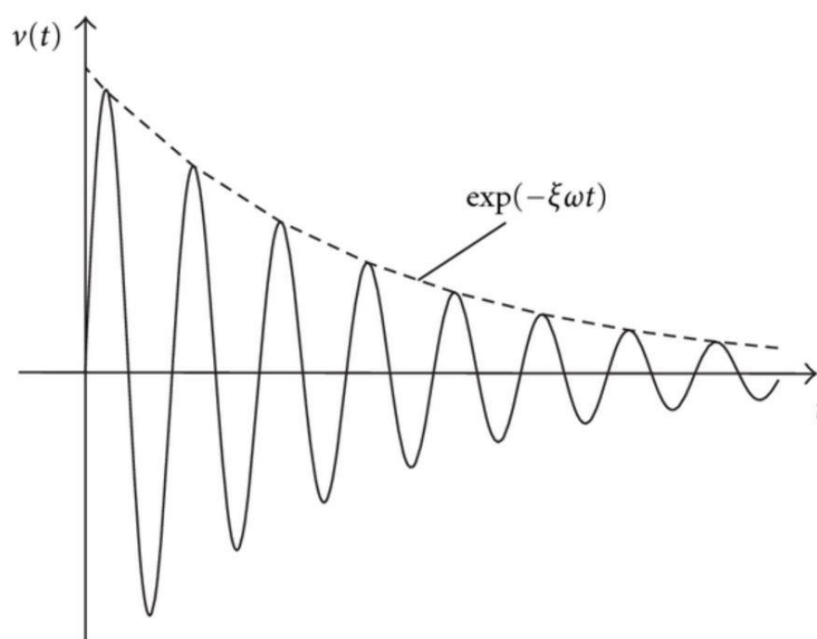
```
% x = randn(200,1);
[VarName1, VarName2]=importfile('10.txt',1,6000);
y=VarName2;
x = y';
...
...
figure, plot(x), hold all, plot(ind,val,'ro', loc,pks,'k+',
'MarkerSize',10), legend('x','pickpeaks','findpeaks')
% Other examples of usage are: [Vo,Io] = PICKPEAKS(X); [Vo,Io] =
% PICKPEAKS(X,[],[],'troughs'); [Vo,Io] = PICKPEAKS(X,10,[],'troughs'); %
% require at least 10 samples distance between troughs. [Vo,Io] =
% PICKPEAKS(X,[],2); % search for peaks across rows
...
...
[xres, gof1]=createFit(row,b1);
```



Εικόνα 3.41 Επιλογή των peaks σε χρονοϊστορία ταλάντωσης

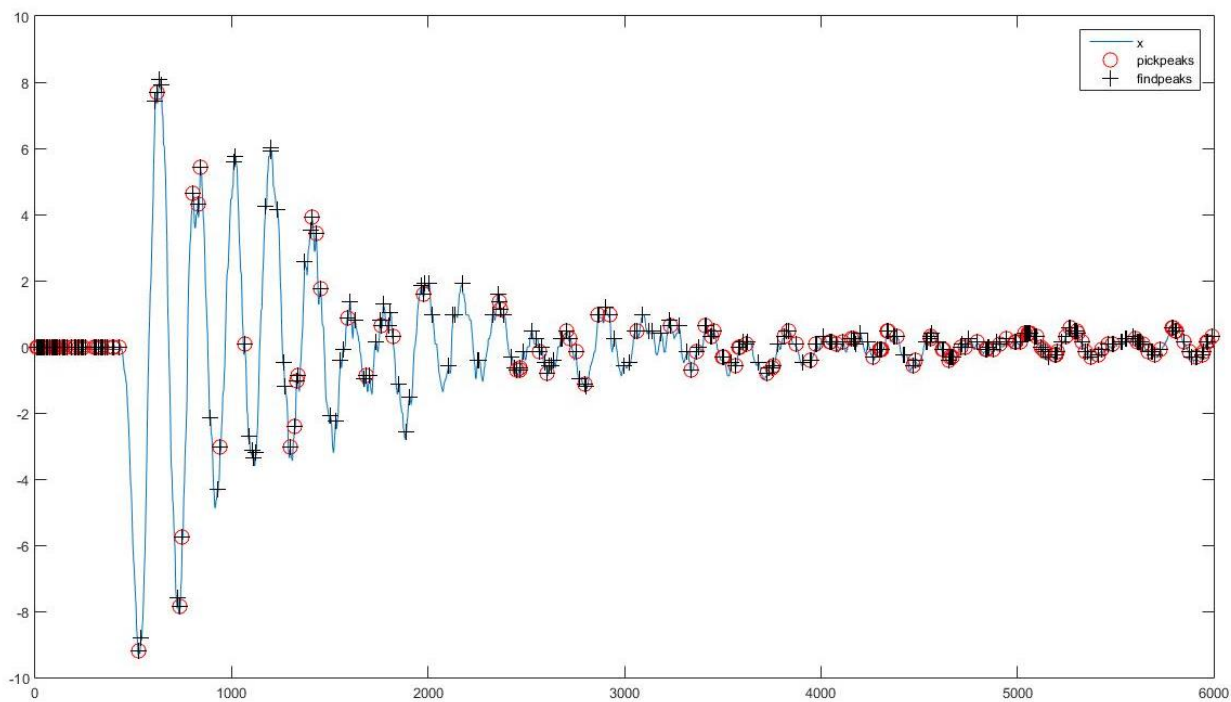
Το ίδιο script κώδικα προσαρμόζει μία καμπύλη (curve fitting) ανάμεσα στα σημεία των peaks που επέλεξε. Η καμπύλη αυτή που σχηματίζεται μας δείχνει και την μορφή με την οποία αποσβένει η ταλάντωση που επιβάλλεται στο στοιχείο.

Το δομικό στοιχείο που δεν έχει βλάβες, συμπεριφέρεται γραμμικά και περιμένουμε να δούμε την καμπύλη απόσβεσης να έχει ιξώδης μορφή (viscous damper) όπως η εικόνα παρακάτω. Αντιθέτως σε περίπτωση βλάβης η καμπύλη απόσβεσης είναι ευθεία και απότομη (friction damper) και κάποιες φορές τέμνει τον οριζόντιο άξονα του χρόνου.

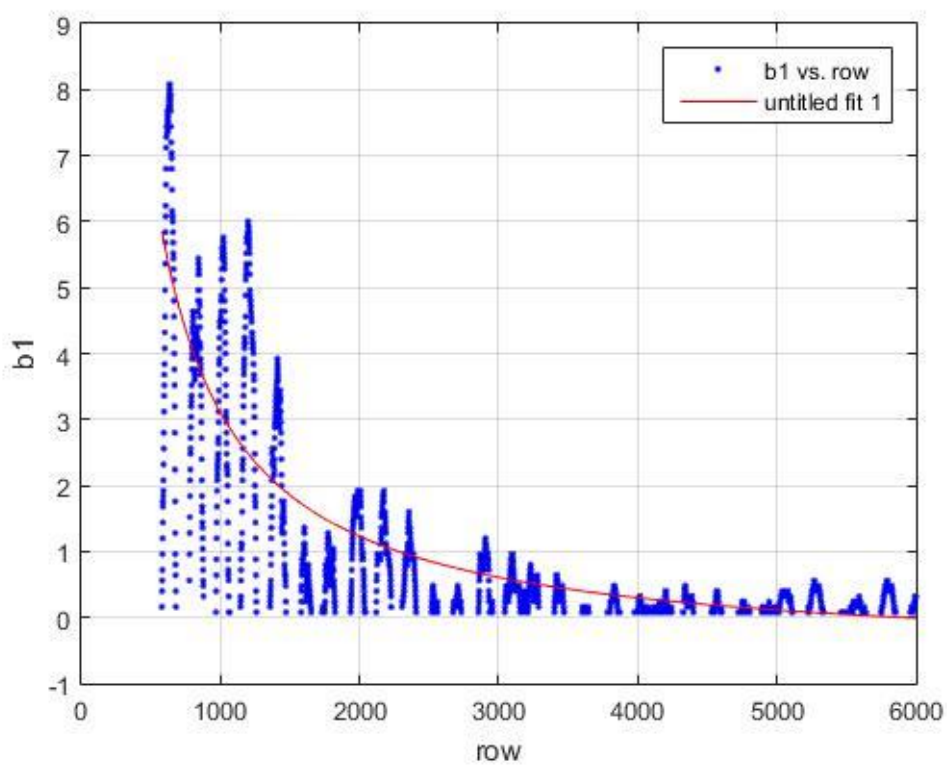


Εικόνα 3.42 Ιξώδης μορφή καμπύλης απόσβεσης υγιούς στοιχείου

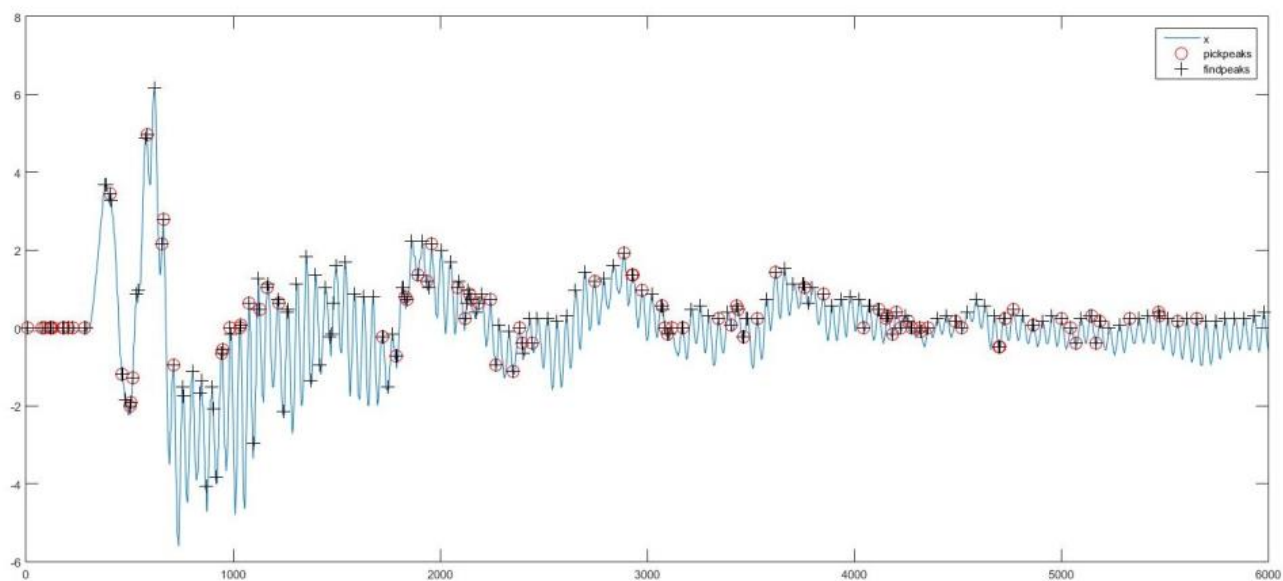
Παρακάτω παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της ταλάντωσης και οι καμπύλες απόσβεσης για τις περιπτώσεις φόρτισης από τις αποστάσεις 10cm και 35cm από τον αισθητήρα, πριν τη βλάβη.



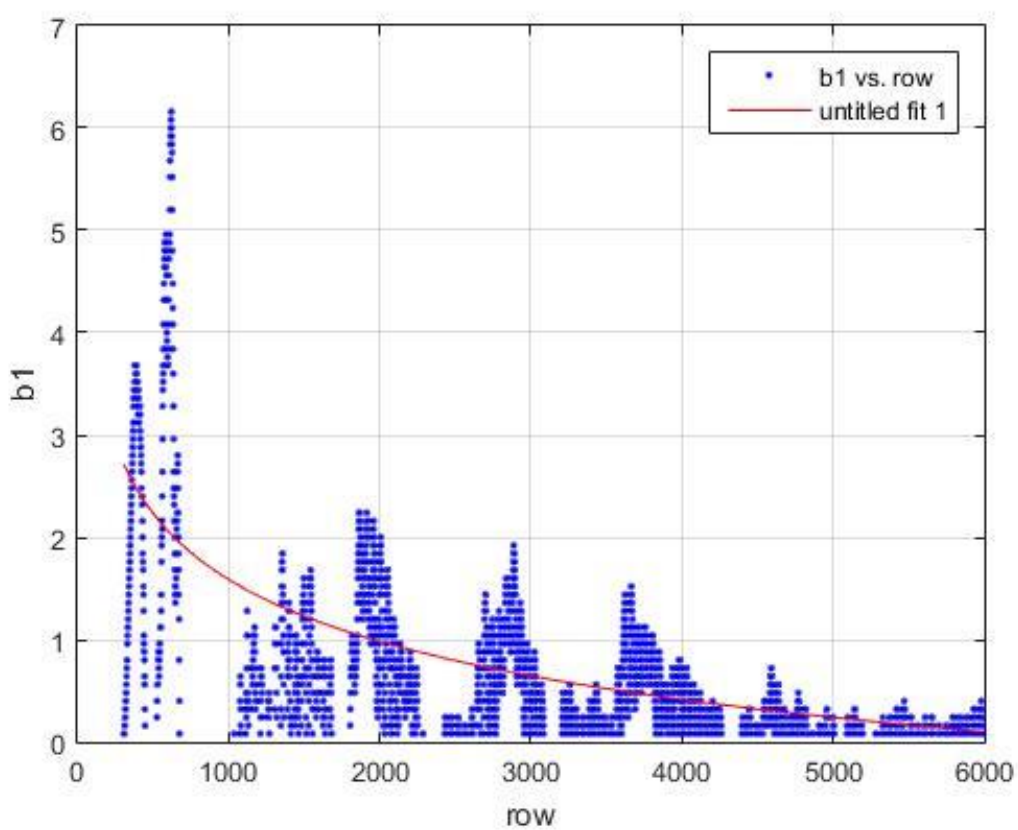
Εικόνα 3.43 Χρονοϊστορία ταλάντωσης για φόρτιση στα 10cm από τον αισθητήρα πριν τη βλάβη



Εικόνα 3.44 Καμπύλη απόσβεσης για φόρτιση στα 10cm από τον αισθητήρα πριν τη βλάβη



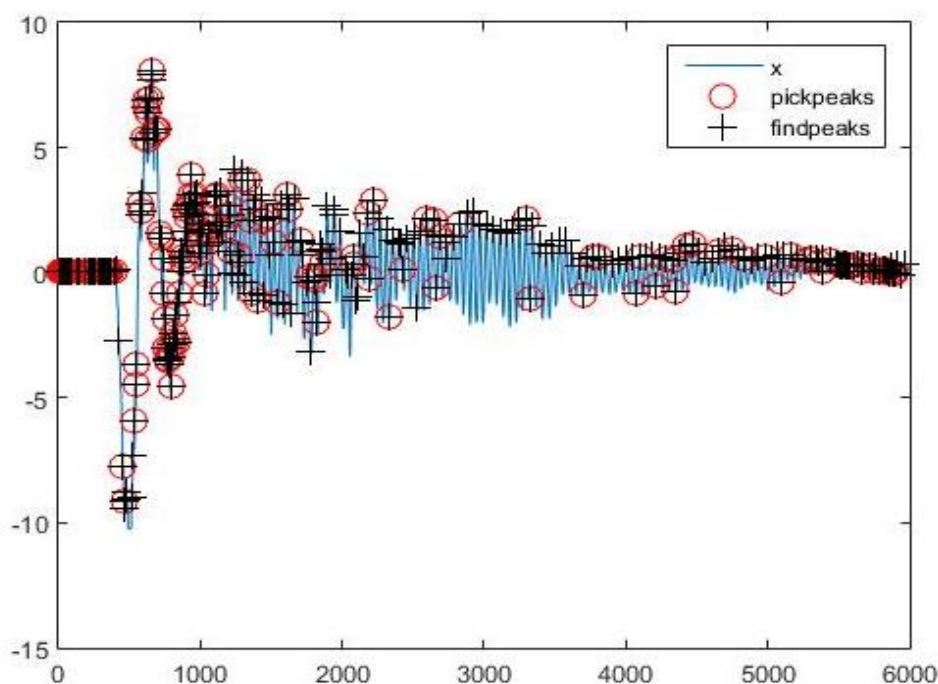
Εικόνα 3.45 Χρονοϊστορία ταλάντωσης για φόρτιση στα 35cm από τον αισθητήρα πριν τη βλάβη



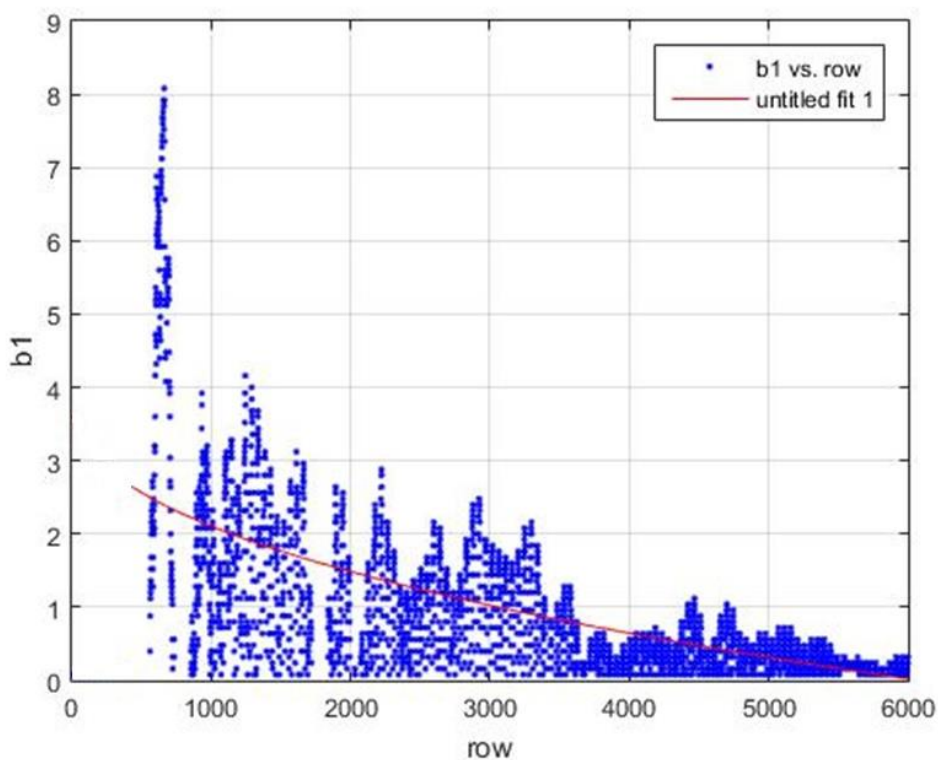
Εικόνα 3.46 Καμπύλη απόσβεσης για φόρτιση στα 35cm από τον αισθητήρα πριν τη βλάβη

Για την δημιουργία βλάβης στο σύστημα των δοκιμών χαλαρώσαμε το συρματόσκοινο κατά 2 στροφές με σκοπό την δημιουργία διεπιφανειών στο σύστημα.

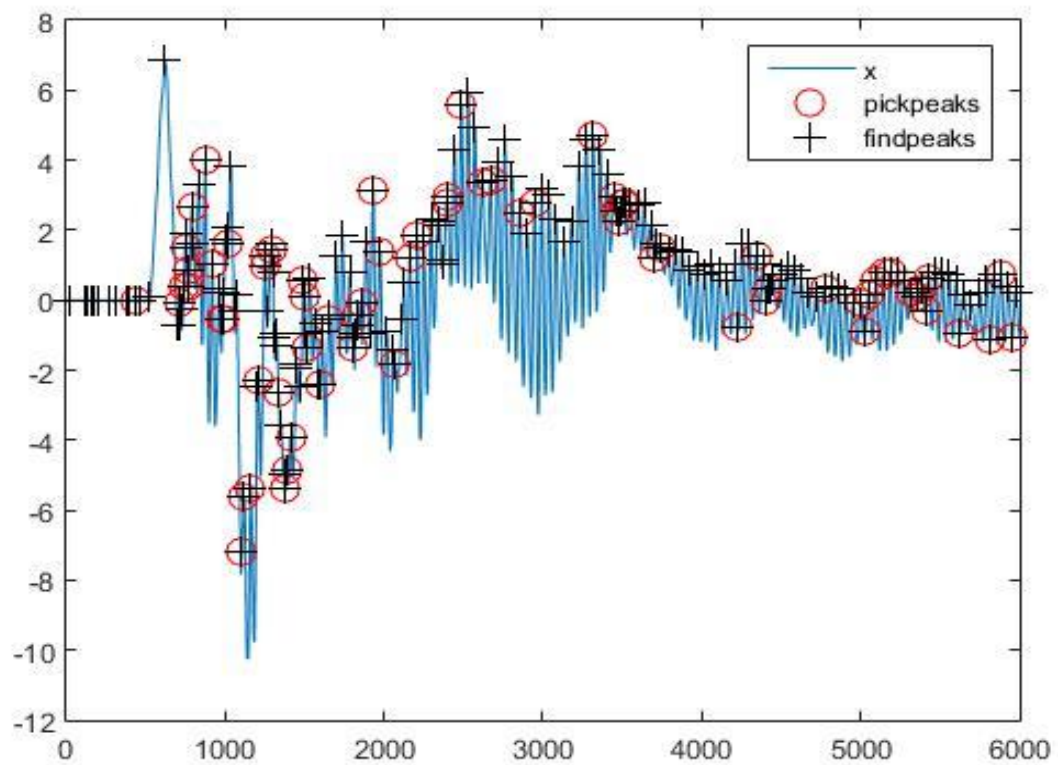
Παρακάτω παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της ταλάντωσης και οι καμπύλες απόσβεσης για τις περιπτώσεις φόρτισης από τις αποστάσεις 10cm και 35cm από τον αισθητήρα, μετά τη βλάβη.



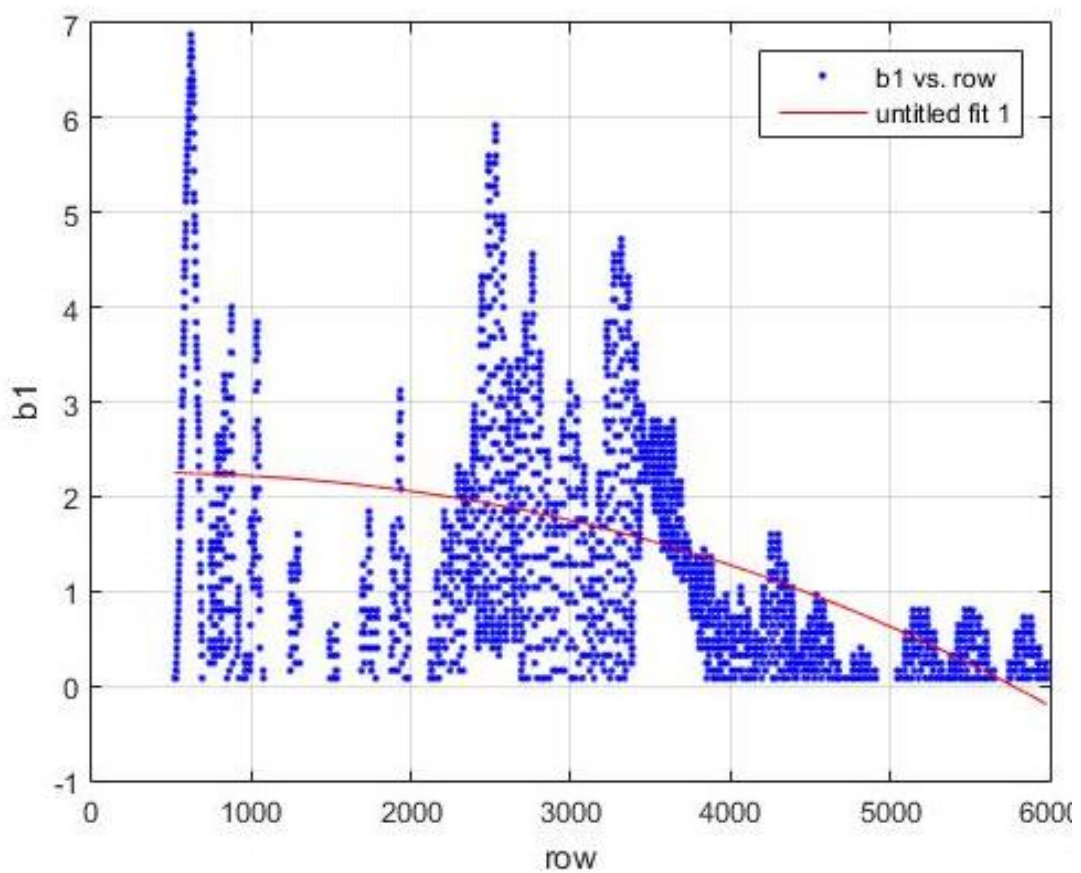
Εικόνα 3.47 Χρονοϊστορία ταλάντωσης για φόρτιση στα 10cm από τον αισθητήρα μετά τη βλάβη



Εικόνα 3.48 Καμπύλη απόσβεσης για φόρτιση στα 10cm από τον αισθητήρα μετά τη βλάβη



Εικόνα 3.49 Χρονοϊστορία ταλάντωσης για φόρτιση στα 35cm από τον αισθητήρα μετά τη βλάβη



Εικόνα 3.50 Καμπύλη απόσβεσης για φόρτιση στα 35cm από τον αισθητήρα μετά τη βλάβη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Εφαρμογή μεθόδου με χρήση της OMA σε δομικά στοιχεία

4.1. Εισαγωγή – περιγραφή διαδικασίας

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε στο πεδίο σε δομικά στοιχεία, κάνοντας χρήση της μεθόδου της Ιδιομορφικής Ανάλυσης σε Κατάσταση Λειτουργίας (OMA-Operational Modal Analysis). Σε αντίθεση με το πείραμα στο εργαστήριο που εφαρμόζαμε, σύμφωνα με τα προηγούμενα, μια εξαναγκασμένη διέγερση στο υπό μελέτη στοιχείο, η OMA χρησιμοποιεί στις μικροδονήσεις από το περιβάλλον ως διέγερση του συστήματος. Γίνεται η καταγραφή του σήματος της απόκρισης και εκτιμώνται τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά του στοιχείου με σκοπό τον εντοπισμό βλαβών.

Ο εντοπισμός βλαβών γίνεται εκτιμώντας τον τρόπο του λόγου απόσβεσης ενός στοιχείου σε ελεύθερη ταλάντωση, αν είναι ιξώδης απόσβεση ή απόσβεση τριβής. Η ύπαρξη απόσβεσης τριβής υποδηλώνει μη γραμμικότητα στο στοιχείο δηλαδή πιθανή βλάβη.

Γνωρίζουμε από προηγούμενες μελέτες ότι ένα υγιές στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος σε ελεύθερη ταλάντωση αποσβένει με ιξώδης μορφή. Για να αποδείξουμε ότι με τη χρήση της μεθόδου της OMA μπορεί να προκύψει συμπέρασμα για την ύπαρξη βλάβης στο σύστημα, δηλαδή μη γραμμικότητας, γίνεται η εφαρμογή της σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος καθώς και τοιχοποιίας η οποία, λόγω του τρόπου κατασκευής της και των υλικών της, συμπεριφέρεται μη γραμμικά.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν :

1. Καταγραφή απόκρισης σε κατάσταση λειτουργίας δύο τοιχίων οπλισμένου σκυροδέματος
2. Καταγραφή απόκρισης σε κατάσταση λειτουργίας τοιχίου από τοιχοποιία.
3. Επεξεργασία δεδομένων και μετασχηματισμό απόκρισης σε απόκριση ελεύθερης ταλάντωσης για κάθε στοιχείο.
4. Σύγκριση του τρόπου απόσβεσης των ελεύθερων ταλαντώσεων.

Να σημειωθεί ότι η καταγραφή της απόκρισης για κάθε στοιχείο γίνεται σε 30 περιόδους των 10sec, δηλαδή συνολικής χρονικής διάρκειας 30 min.

4.2. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στο πεδίο

Για την καταγραφή του σήματος απόκρισης σε κατάσταση λειτουργίας χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός με επιταχυνσιόμετρα από την εταιρεία Syscom καθώς και η επεξεργασία δεδομένων με την πλατφόρμα της Matlab. [28]

4.2.1. Εξοπλισμός επιταχυνσιόμετρων

Ο αισθητήρας επιτάχυνσης

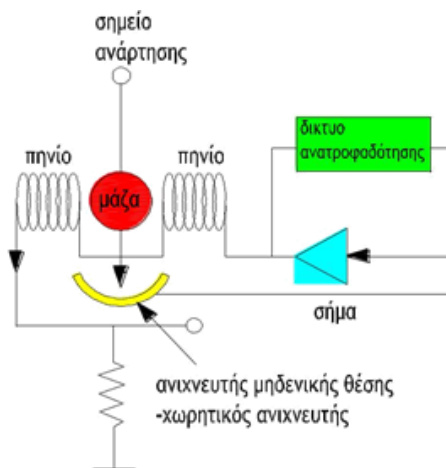
Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες επιτάχυνσης τύπου «MS2005+» («MS») της εταιρείας SYSCOM. Οι αισθητήρες αυτοί είναι κατά βάση τριαξονικά servo επιταχυνσιόμετρα που βασίζουν την λειτουργία του στις αρχές ενός χωρητικού αισθητήρα δύναμης αντιστάθμισης. Έχει μικρές διαστάσεις θήκης (80x75x57 mm) και μικρό βάρος 500gr. Έχει εύρος μετρήσεων $\pm 4g$ και συχνοτήτων από 0 έως 150Hz.



Εικόνα 4.1: Αισθητήρες επιτάχυνσης «MS» πάνω όψη & πλάγια όψη όπου φαίνεται η υποδοχή του καλωδίου σύνδεσης

Σύμφωνα με την αρχή της δύναμης αντιστάθμισης, η μάζα που μετατοπίζεται από την θέση ηρεμίας (μηδενική θέση) εξαιτίας μιας άγνωστη δύναμης επανέρχεται στην θέση της με την εφαρμογή σε αυτήν μιας δύναμης αντίθετης. Το μέγεθος της δύναμης σταθεροποίησης είναι εύκολα υπολογίσιμο και ανάλογο με αυτό της άγνωστης δύναμης. Αναλυτικότερα, η διάταξη του αισθητήρα για κάθε άξονα x,y,z είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 4.2. Όπως φαίνεται και εκεί μια αναρτημένη μάζα υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας που αρχικά βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας στην θέση μηδέν αναγκάζεται να μετακινηθεί λόγω των δονήσεων. Η κίνηση αυτή γίνεται αντιληπτή από έναν χωρητικό αισθητήρα ο οποίος με την σειρά του ενεργοποιεί ένα πηνίο με την βοήθεια ενός servo ενισχυτή. Το πηνίο, παράγει τόσο ρεύμα όσο

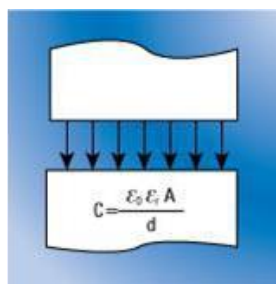
χρειάζεται ώστε η μάζα να σταθεροποιηθεί. Έτσι, μετρώντας το ρεύμα που παράγει το πηνίο προσδιορίζεται το μέγεθος της δύναμης και άρα της μετατόπισης. [28]



Εικόνα 4.2: Διάταξη αισθητήρα μετατόπισης.

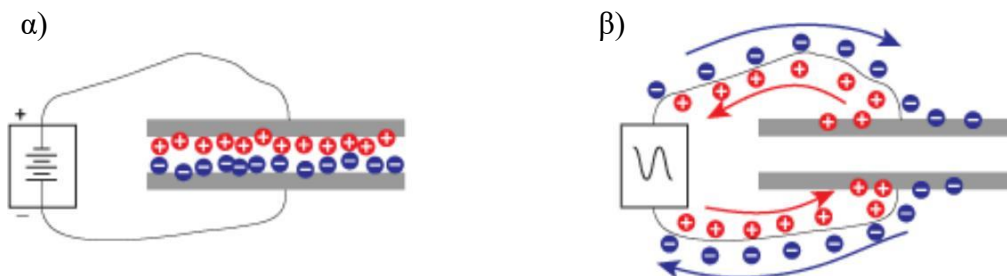
Βασικό στοιχείο της διάταξης είναι ο χωρητικός αισθητήρας καθώς πρέπει να έχει μεγάλη ανάλυση και εύρος. Υψηλής ακρίβειας αισθητήρες μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν καθώς το εύρος της μετακίνησης της μάζας είναι εξαιρετικά μικρό. Μάλιστα αυξάνοντας την ευαισθησία του ανιχνευτή η ακρίβεια στις μετρήσεις της επιτάχυνσης θα είναι πολλαπλά μεγαλύτερη. Καθώς το ενεργό μέρος της διάταξης δεν μετακινείται σημαντικά σε συνήθη λειτουργία η υστέρηση στην απόδοση της καταγραφής είναι εξαιρετικά μικρή και οφείλεται περισσότερο σε υστέρηση των ηλεκτρικών κυκλωμάτων παρά σε μηχανική υστέρηση. Αυτού του τύπου οι αισθητήρες δεν είναι κατάλληλοι για χρήση σε περιβάλλον με ισχυρές μετακινήσεις καθώς κατά την πραγματοποίηση ενός έντονου γεγονότος οι δυνάμεις που επιβάλλονται στην αναρτημένη μάζα είναι επίσης έντονα μεγάλες.

Οι χωρητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν την ιδιότητα της χωρητικότητας για την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Η χωρητικότητα είναι μια ιδιότητα που υπάρχει ανάμεσα σε οποιαδήποτε αγωγή αντικείμενα όταν η μεταξύ τους απόσταση είναι αρκετά μικρή (εικόνα 4.3). Αλλαγές στην απόσταση ανάμεσα στις δύο επιφάνειες έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή στην χωρητικότητα. Είναι αυτή η αλλαγή που οι χωρητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν για να υποδείξουν τυχόν αλλαγή στην θέση του στόχου. [28]



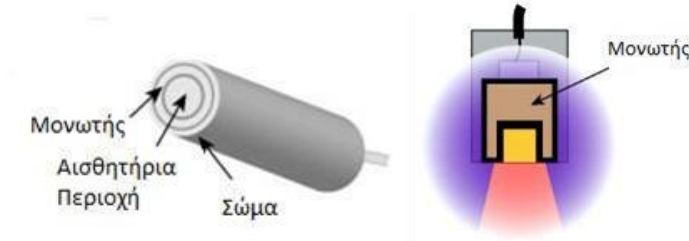
Εικόνα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση της ιδιότητας της χωρητικότητας.

Αναλυτικότερα, όταν τάση εφαρμόζεται στα αγωγήματα αντικείμενα δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσά τους με θετικό και αρνητικό πόλο (εικόνα 4.4α). Αν η πολικότητα αντιστραφεί θα προκληθεί μεταφορά φορτίου δημιουργώντας μεταβολή του ρεύματος που ανιχνεύεται από τον αισθητήρα (εικόνα 4.4β).



Εικόνα 4.4: Θετική και αρνητική φόρτιση των αγωγικών υλικών σε συνεχές(α) και εναλλασσόμενο ρεύμα(β).

Με την δημιουργία εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου το φορτίο που μεταφέρεται ανιχνεύεται από τους χωρητικούς αισθητήρες και το μέγεθος της ροής εξαρτάται από την χωρητικότητα. Η χωρητικότητα με την σειρά της είναι ανάλογη της επιφάνειας των αντικειμένων και της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού που βρίσκεται στο μέσον αλλά είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης ανάμεσα στα αντικείμενα. Έτσι, μεγαλύτερα και πιο κοντινά αντικείμενα προκαλούν μεγαλύτερη ροή ρεύματος σε σχέση με πιο μικρά και απομακρυσμένα αντικείμενα. Καθώς το μέγεθος και το ενδιαμέσο υλικό θεωρείται ότι είναι σταθερά οποιαδήποτε αλλαγή στην χωρητικότητα είναι αποτέλεσμα της αλλαγής στην μεταξύ τους απόσταση. [28]



Εικόνα 4.5: Στοιχεία χωρητικού αισθητήρα. **Εικόνα 4.6:** Σχηματική τομή όπου φαίνεται ο μονωτής και η αισθητήρια περιοχή

Πλεονεκτήματα αυτού του τύπου αισθητήρα σε σχέση με άλλους αισθητήρες είναι:

1. η δυνατότητα μεγάλης ανάλυσης στις μετρήσεις, της τάξης ακόμη και μικρότερη των νανόμετρων,
2. το γεγονός ότι δεν επηρεάζονται από αλλαγές στο υλικό των αγωγών,
3. είναι οικονομικότεροι σε σχέση με αισθητήρες laser
4. Οι χωρητικοί αισθητήρες δεν θα πρέπει να επιλέγονται όταν πρόκειται για μετρήσεις:
5. σε μολυσμένο ή υγρό περιβάλλον,

6. όταν υπάρχει μεγάλο κενό ανάμεσα στον αισθητήρα και τον αντικείμενο.

Καταγραφικό μετρήσεων επιτάχυνσης

Η συσκευή καταγραφικού των μετρήσεων επιτάχυνσης είναι τύπου «MR2002» («MR») της εταιρείας SYSCOM. Η συσκευή αυτή είναι διαστάσεων 210x200x110mm και βάρους περίπου 7,5Kgr. Ο ρόλος της συσκευής αυτής είναι η ενεργοποίηση και η διαχείριση του αισθητήρα επιτάχυνσης καθώς και η καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων του. Με την συσκευή αυτή και την βοήθεια του λογισμικού «MR communication» ο χρήστης ελέγχει την έναρξη, την λήξη και την διάρκεια των καταγραφών είτε χειροκίνητα είτε από λογικές συνθήκες που έχει προεπιλέξει είτε και από συνδυασμό τους. Η μνήμη του είναι 2MB SRAM και μπορεί να λειτουργήσει χωρίς τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος για περίπου 40ώρες. Στο επάνω μέρος της θήκης (εικόνα 4.7) υπάρχουν λυχνίες και οθόνη για την ενημέρωση του χρήστη για την κατάσταση της λειτουργίας της συσκευής, της ελεύθερης μνήμης, των μηνιαίων αυτοελέγχων και τυχόν σφαλμάτων. Από την πλαϊνή όψη υπάρχουν οι υποδοχές για την σύνδεση της συσκευής με τον αισθητήρα, την παροχή ρεύματος, τον υπολογιστή και την συσκευή διαχείρισης «NCC». [28]

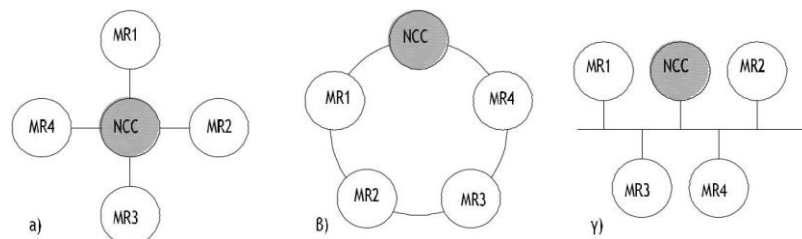


Εικόνα 4.7: Συσκευή καταγραφικού «MR», πάνω όψη και πλάγια όψη όπου φαίνονται οι υποδοχές των καλωδίων σύνδεσης.

Χαρακτηριστικά της συσκευής διαχείρισης των αισθητήρων επιτάχυνσης

Η συσκευή διαχείρισης των αισθητήρων επιτάχυνσης ήταν τύπου «NCC Light» της εταιρείας SYSCOM. Αποτελείται από μια θήκη αλουμινίου διαστάσεων 210x200x170mm και ζυγίζει περίπου 9Kgr. Μπορεί να συνδέσει μέχρι και 4 MR σε ένα δίκτυο με τοπολογία αστέρα

(εικόνα 4.8). Η ανίχνευση και καταγραφή πραγματοποιείται αυτόνομα από τα «MR» αλλά και συντονισμένα από τη συσκευή «NCC». Η σύνδεση των αισθητήρων, των καταγραφικών και της συσκευής συντονισμού είναι ψηφιακή με ειδικά καλώδια τα οποία ανθίσταται σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.



Εικόνα 4.8: Τρεις κυριότερες τοπολογίες δικτύων: α) Αστέρα, β) Δακτυλίου και γ) Διαύλου.

Αναλυτικότερα, η συσκευή διαχείρισης «NCC light»:

1. Παρακολουθεί αδιάλειπτα την κατάσταση λειτουργίας κάθε MR του δικτύου και την μεταξύ τους σύνδεση
2. Πραγματοποιεί ταυτόχρονη έναρξη των καταγραφικών σε όλα τα κανάλια
3. Λειτουργεί σαν λειτουργικός διακόπτης με το οποίο μπορούμε να ανακτήσουμε όλες τις καταγραφές και να παραμετροποιήσουμε όλα τα MR του δικτύου.
4. Στέλνει στοιχεία ημερομηνίας και ώρας σε όλα τα MR για να έχουν σχετικό συντονισμό
5. Φέρει συσκευή GSM για απομακρυσμένη διαχείριση
6. Μπορεί να στέλνει μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου σε περίπτωση βλάβης ή εκδήλωσης συναγερμού

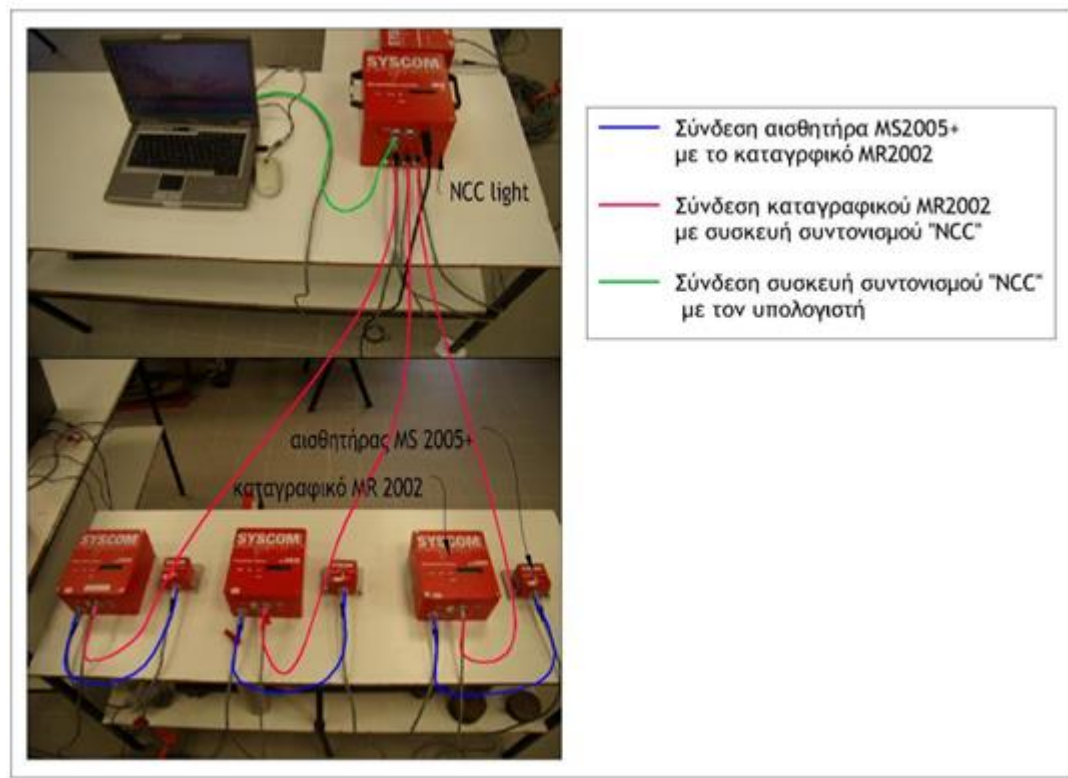
Η επικοινωνία ανάμεσα στο «NCC» και τα «MR» έχει την μορφή ερωτοαπαντήσεων. Τα «MR2002» ενεργούν πάντα παθητικά απαντώντας στις ερωτήσεις του «NCC» διασφαλίζοντας έτσι ότι οποιαδήποτε βλάβη στην επικοινωνία θα εντοπιστεί αμέσως.



***Εικόνα 4.9:** Συσκευή διαχείρισης «NCC light», πάνω όψη όπου φαίνονται οι λυχνίες και η οθόνη και πλάγια όψη όπου φαίνονται οι υποδοχές των καλωδίων σύνδεσης.*

Συνδεσμολογία διάταξης οργάνων εταιρείας «Syscom»

Η συνδεσμολογία των οργάνων γίνεται με την ακόλουθη σειρά. Ο αισθητήρας «MS» συνδέεται με το καταγραφικό «MR», το καταγραφικό με τη συσκευή διαχείρισης «NCC» και η συσκευή διαχείρισης με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Έτσι, η τελική συνδεσμολογία είναι αυτή που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



***Εικόνα 4.10:** Συνδεσμολογία των οργάνων της εταιρείας «Syscom».*

Λογισμικό «View 2002»

Η διαδικασία καταγραφής αφού ολοκληρωθεί, απομένει μόνο η ανάλυση των αποθηκευμένων αρχείων από το λογισμικό «View 2002». Με το λογισμικό αυτό είναι δυνατόν η επεξεργασία των δεδομένων και η παρουσίασή τους υπό μορφή γραφημάτων. Η χρονική ανάλυση περιλαμβάνει την παρουσίαση των καταγεγραμμένων σημάτων σαν χρονοϊστορίες, τον υπολογισμό των σημάτων σαν μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση (ανάλογα τον αισθητήρα που χρησιμοποιείται) και τον υπολογισμό του συνολικού διανύσματος. Τα δεδομένα μπορούν να αποθηκευτούν και να εξαχθούν με τη μορφή .txt.

4.2.2. Λογισμικό πλατφόρμας Matlab για επεξεργασία δεδομένων

Έχοντας εξάγει τις καταγραφές των αποκρίσεων σε κατάσταση λειτουργίας για κάθε δομικό στοιχείο, υπό την μορφή .txt, τα εισάγουμε στο πρόγραμμα της πλατφόρμας Matlab με σκοπό την επεξεργασία τους και την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Παρακάτω παρουσιάζεται το script (code.m) με μια σειρά εντολών της Matlab με το οποίο γίνεται μετατροπή της καταγραφής από απόκριση σε κατάσταση λειτουργίας, στην καμπύλη της ελεύθερης ταλάντωσης του στοιχείου. Εδώ μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τον τρόπο απόσβεσης του στοιχείου και την ύπαρξη μη γραμμικότητας σε αυτό. Με χρήση του script που χρησιμοποιήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο (run_pickpeaks.m) επιλέγονται τα peaks της καταγραφής και προσαρμόζει μία καμπύλη (curve fitting) ανάμεσα στα σημεία των peaks που επέλεξε. Η καμπύλη αυτή που σχηματίζεται μας δείχνει και την μορφή με την οποία αποσβένει η ελεύθερη ταλάντωση του στοιχείου. [24]

Κώδικας μετασχηματισμού χρονοϊστορίας απόκρισης σε καμπύλη ελεύθερης ταλάντωσης (code.m)

```
%INITIAL DATA PROVIDED BY USER
realTlimit=500; %in sec., the maximum period of the expected free vibration
frequency
theTimeStep=2; %in sec., real time step we choose to be added to previous
time
timeIncrement=1; %in sec., the time increment in the data file (time starts
from 0 and increases by this increment to the end
a= ... %the initial condition set as 1/10 of max
%END OF INITIAL DATA
mystep= ... %number of increments within the time step we chose
Tlimit= ... %number of increments within the time limit
TM=mystep;%this is each step (in number of increments)
...
%size(myData)
%disp('beginning')
while ...
%disp('first while')
m=1;%this is number of row in the data, used to read the corresponding
second column that is value
n=0;%this is number of values found at the given TM for the given initial
condition a
data=0;%summation of values with TM and initial a
Flag=false;%checking if we have already set the AD flag
AD=false;%flag to know if ascending or descending at the initial point of a
while ...
%disp(' cycle second while')
if Flag==false
%disp('inside Falg falklse')
if D(m,2)==a
data=data+D(m+TM,2);
n=n+1;
%disp('Flag False')
if D(m+1,2)>D(m,2)
```

```

AD=true;
else
AD=false;
end
Flag=true;
elseif D(m+1,2)==a
data=D(m+1+TM,2);
n=n+1;
%disp('Flag False')
if D(m+1,2)>D(m,2)
AD=true;
else
AD=false;
end
Flag=true;
elseif D(m,2)<a && a<D(m+1,2)
ratio=...
data= ...
n=n+1;
%if D(m+1,2)>D(m,2)
AD=true;
%else
% AD=false;
%end
Flag=true;
elseif D(m,2)>a && a>D(m+1,2)
ratio= ...
data= ...
n=n+1;
%if D(m+1,2)>D(m,2)
% AD=true;
% else
AD=false;
% end
Flag=true;
end
end
if Flag==true
%disp('inside TRUE Flag')
if AD==true
if D(m+1)>D(m)
if D(m,2)==a
data= ...
n=n+1;
%disp('AD True')
elseif D(m+1,2)==a
data=data+D(m+1+TM,2);
n=n+1;
%disp('AD True')
elseif (D(m,2)<a) && (a<D(m+1,2))
ratio= ...
data= ...
n=n+1;
%disp('AD True')
end
end
elseif AD==false
if D(m+1)<D(m)
if D(m,2)==a
data=data+D(m+TM,2);
n=n+1;
%disp('AD False')

```

```

elseif D(m+1,2)==a
data=data+D(m+1+TM,2);
n=n+1;
%disp('AD False')
elseif D(m+1,2)<a && a<D(m,2)
ratio= ...
data= ...
n=n+1;
%disp('AD False')
end
end
end
end
m=m+1;
end
%data
%n
%TM
%Tlimit

...
...
...
...

%TM
end
%size(myData)
%myData
plot(myData(:,1),myData(:,2));
%TM=nstep*step
xlabel('Time (Equal Intervals)')
ylabel('Acceleration (Averages)')
grid

```

4.3. Εφαρμογή της μεθόδου σε τοιχία Ο/Σ

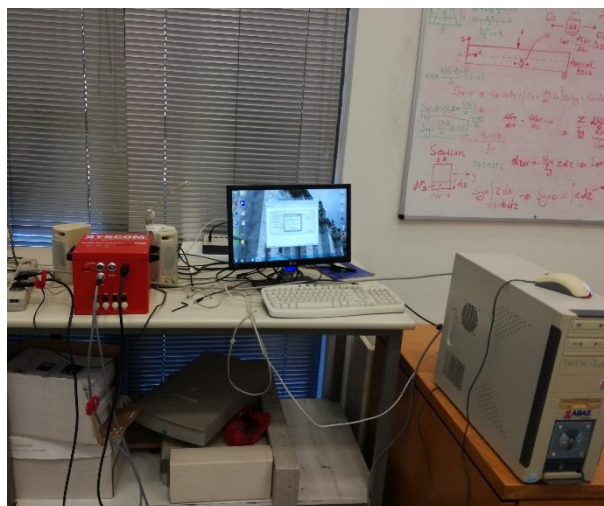
Η παραπάνω μέθοδος εφαρμόστηκε αρχικά σε δύο τοιχία οπλισμένου σκυροδέματος τα οποία φαίνονται στις εικόνες 4.11 και 4.12 καθώς και η συνδεσμολογία που έγινε:



Εικόνα 4.11: Τοιχίο οπλισμένου σκυροδέματος Νο1.



Εικόνα 4.12: Τοιχίο οπλισμένου σκυροδέματος Νο2.



Εικόνα 4.13: Τοποθέτηση επιταχυνσιογράφου και σύνδεση με υπολογιστή.

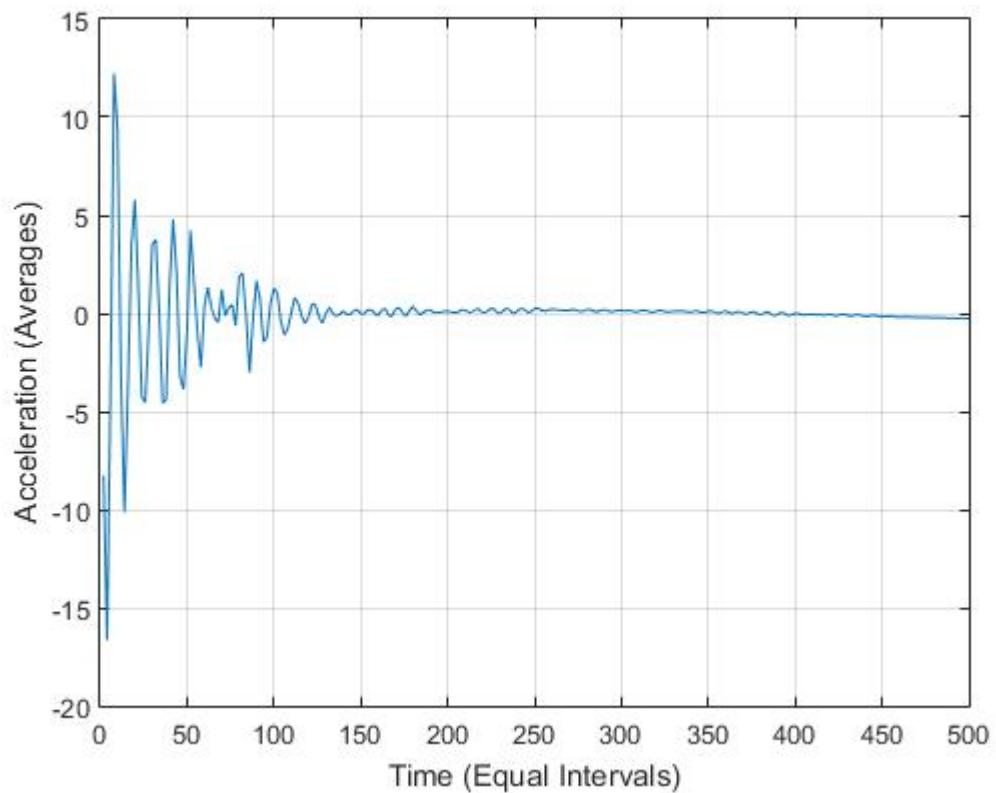
Ο καταγραφέας χωρίζει το σήμα σε events συνολικής διάρκειας 60 sec το καθένα. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγονται 30 events , δηλαδή έχουμε καταγραφή απόκρισης συνολικής διάρκειας 30 min για κάθε στοιχείο που μελετάται.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων από την καταγραφή (χρονοϊστορία) , η μετατροπή μέσω του κώδικα της Matlab (code.m) σε καμπύλη ελεύθερης ταλάντωσης, η επιλογή των peaks της καμπύλης και η προσαρμογή εκθετικής καμπύλης ανάμεσα στα σημεία που επιλέχτηκαν.

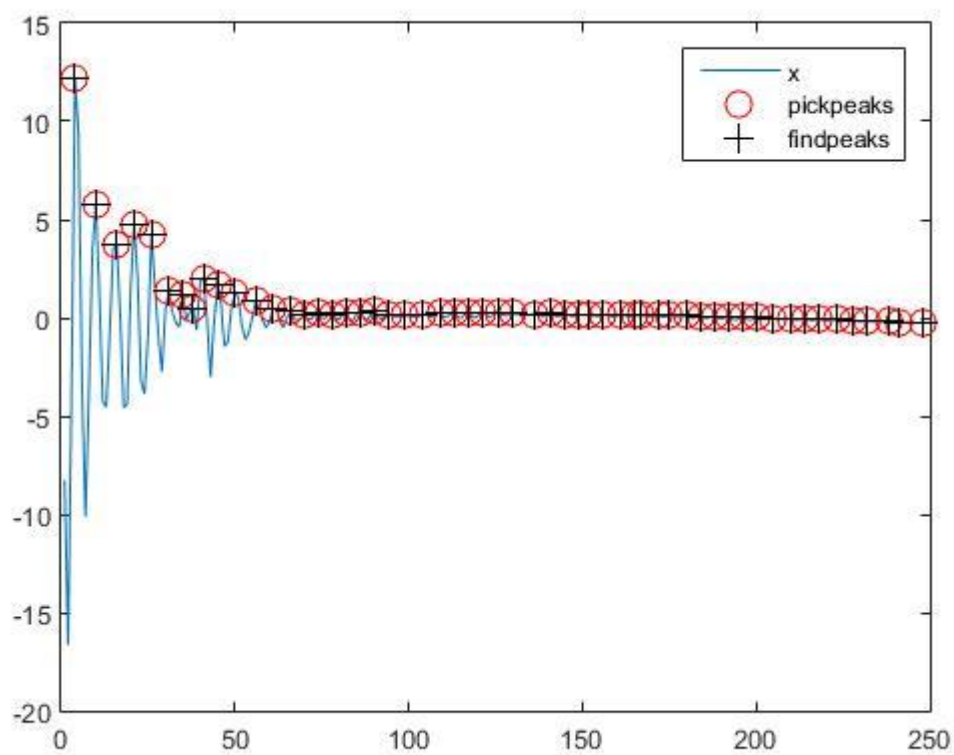
Τοιχίο Ο/Σ No1



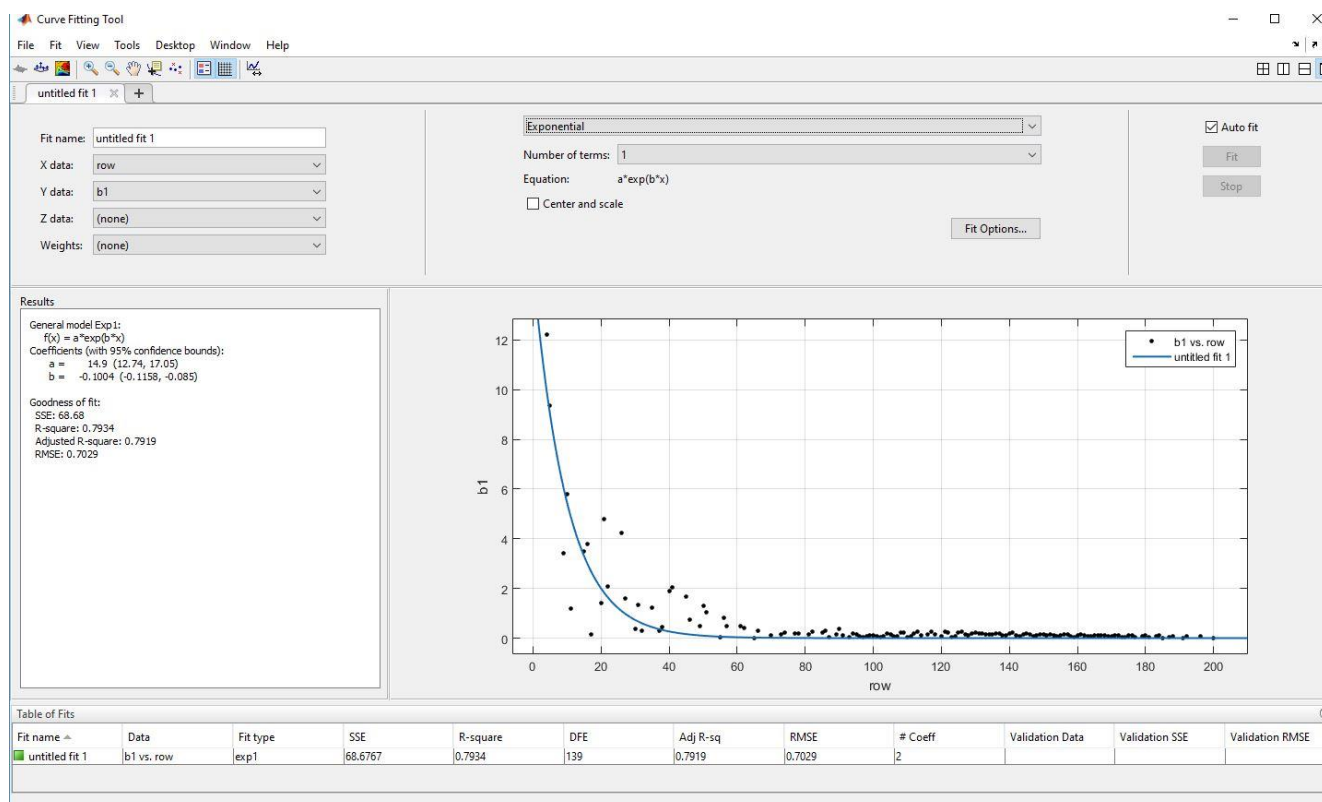
Εικόνα 4.14: Χρονοϊστορία απόκρισης τοιχίου – ambient vibration signal



Εικόνα 4.15: Ελεύθερη ταλάντωση τοιχίου – free vibration response

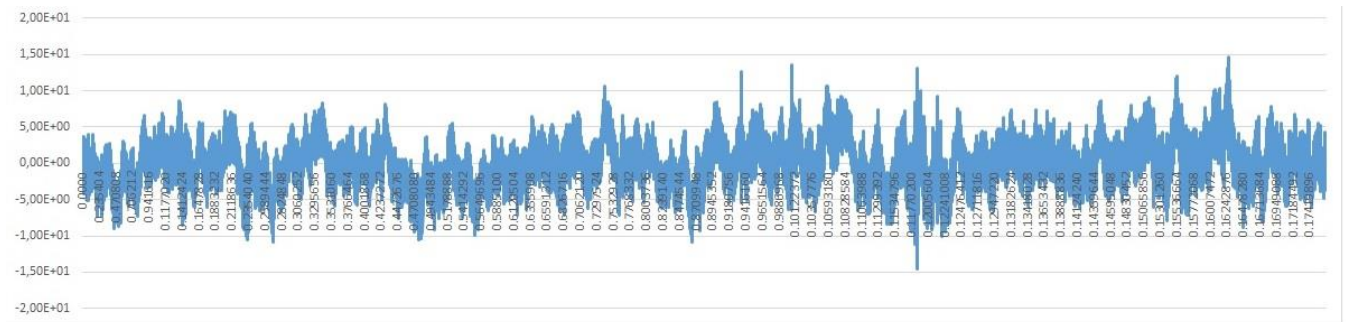


Εικόνα 4.16: Επιλογή των peaks της ελεύθερης ταλάντωσης

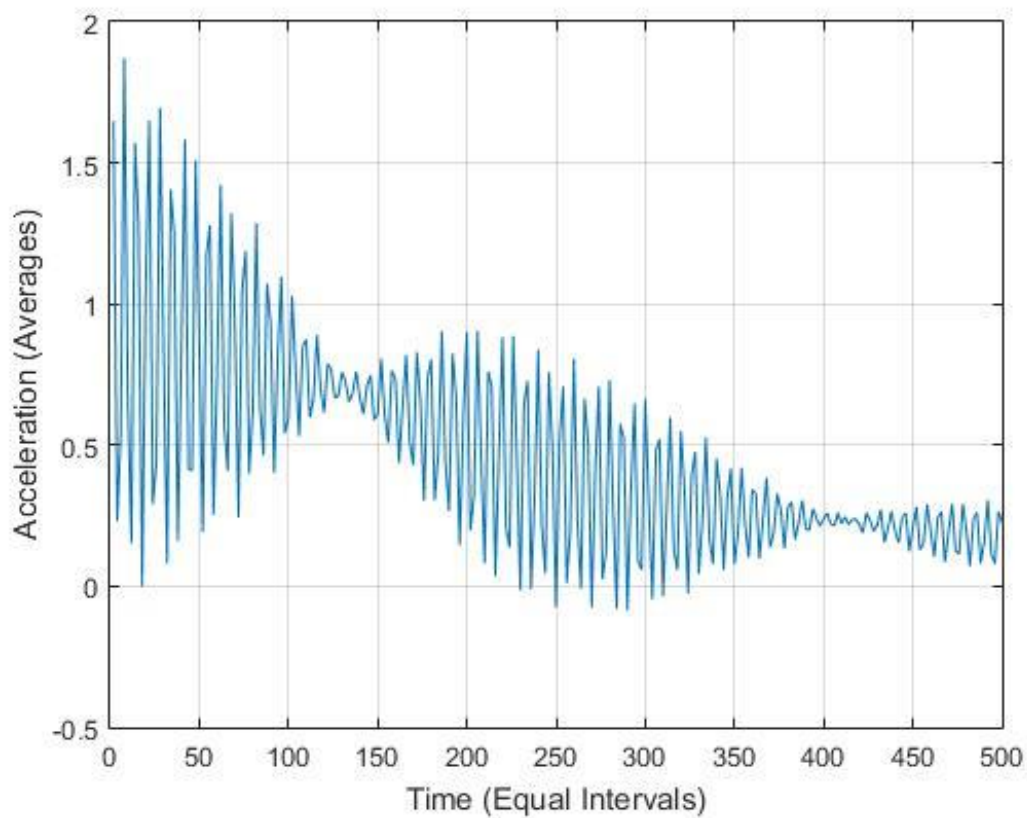


Εικόνα 4.17: Καμπύλη απόσβεσης ταλάντωσης – Curve fitting

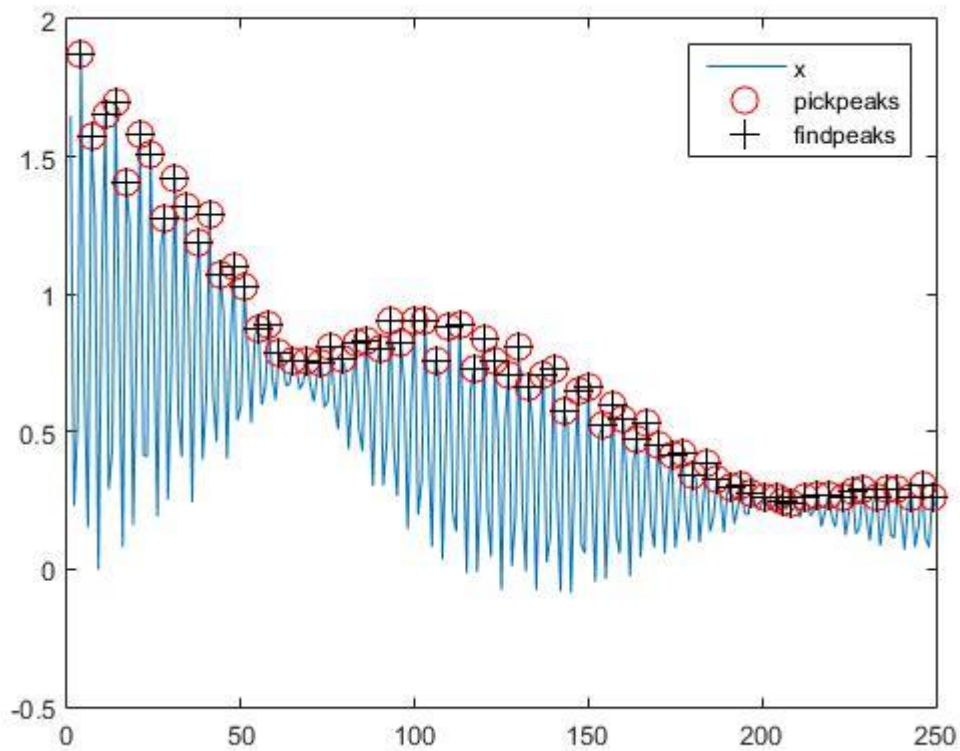
Τοιχίο Ο/Σ No2



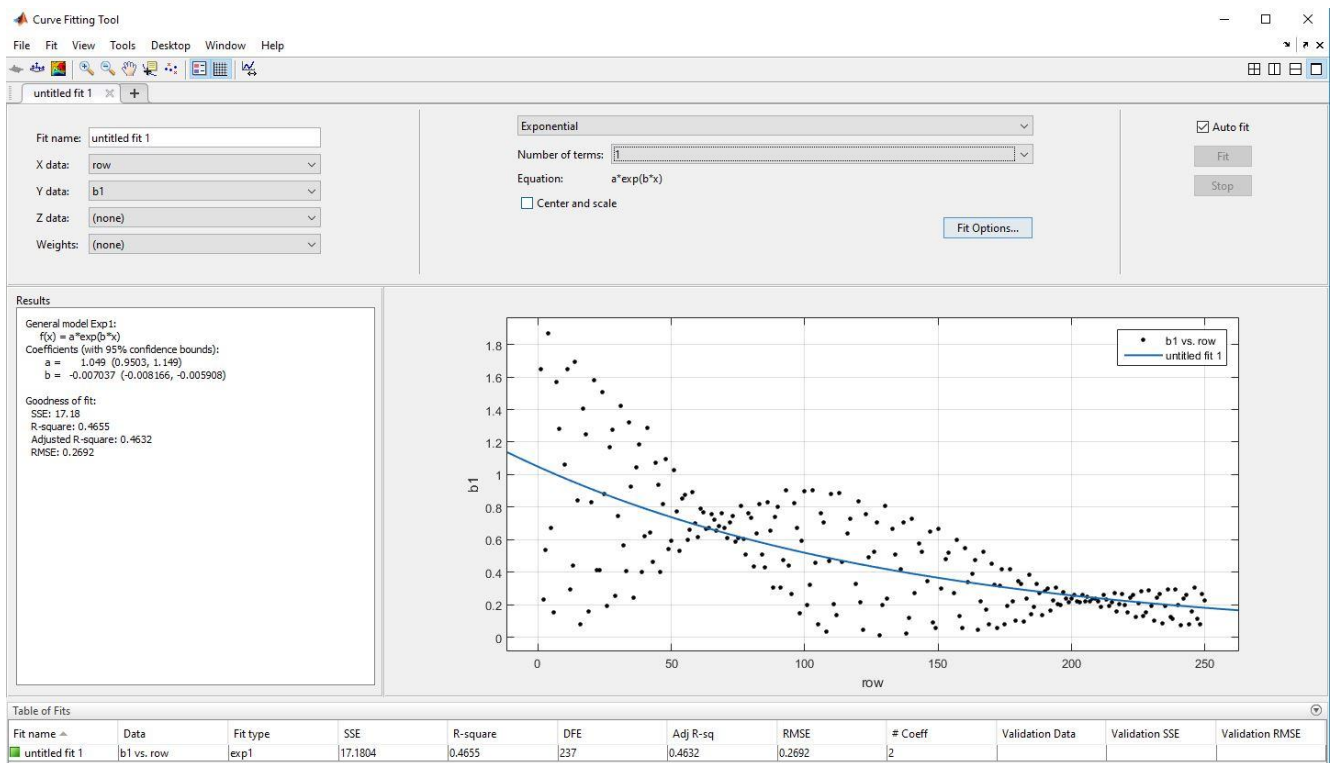
Εικόνα 4.18: Χρονοϊστορία απόκρισης τοιχίου – ambient vibration signal



Εικόνα 4.19: Ελεύθερη ταλάντωση τοιχίου – free vibration response



Εικόνα 4.20: Επιλογή των peaks της ελεύθερης ταλάντωσης



Εικόνα 4.21: Καμπύλη απόσβεσης ταλάντωσης – Curve fitting

4.4. Εφαρμογή της μεθόδου σε τοιχίο τοιχοποιίας

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε και σε τοιχίο κατασκευασμένο από τοιχοποιία, με σκοπό την ύπαρξη μη γραμμικότητας στο στοιχείο. Η ύπαρξη αυτή οφείλεται στον τρόπο δόμησης του τοιχίου και των υλικών που χρησιμοποιούνται.



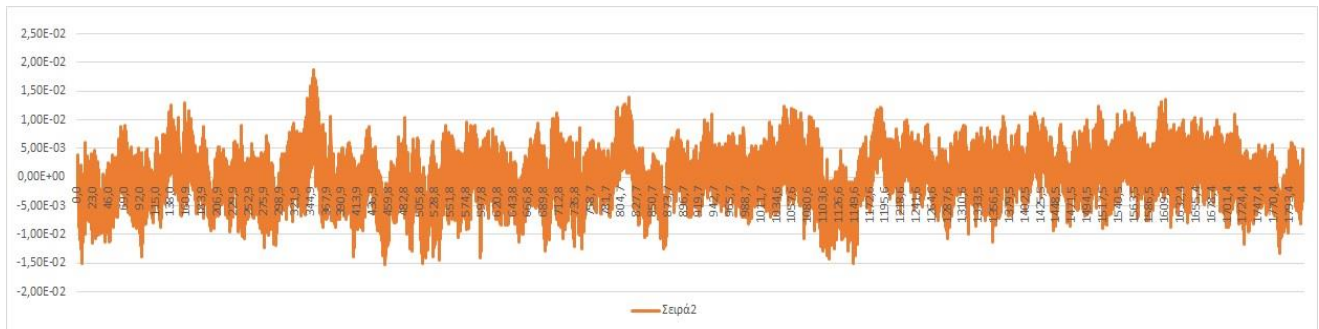
Εικόνα 4.22: Τοιχίο τοιχοποιίας



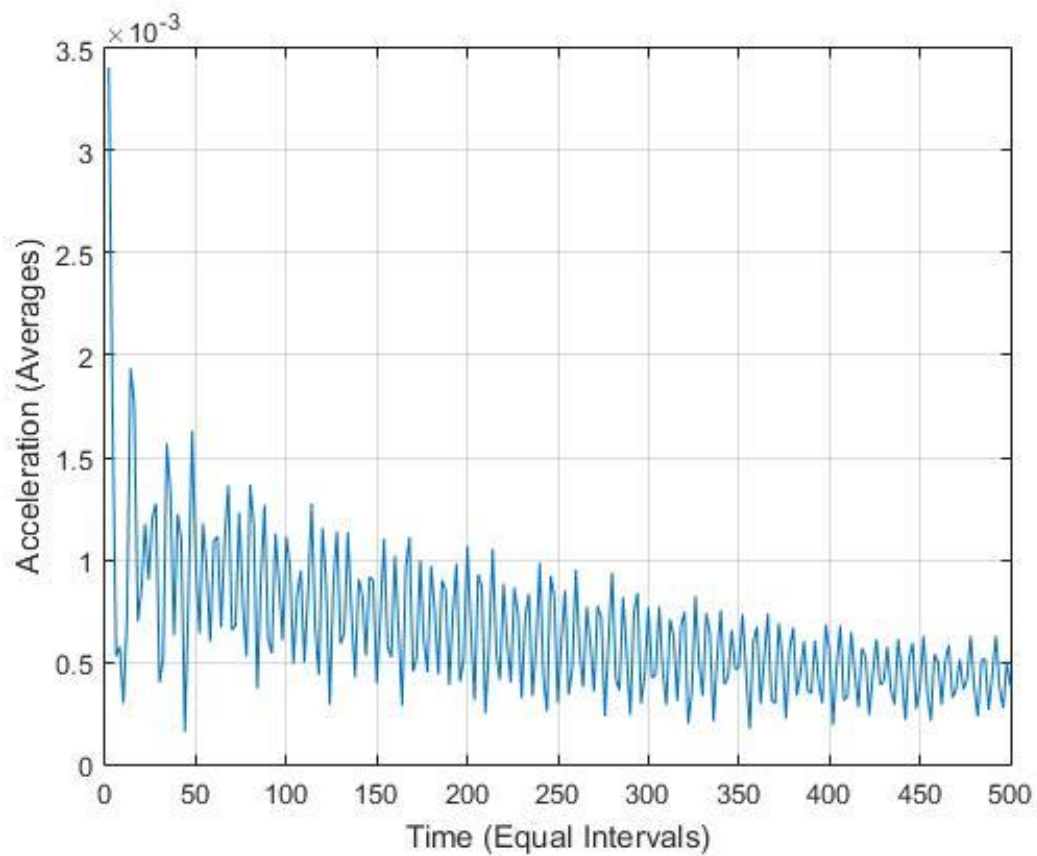
Εικόνα 4.23: Τοποθέτηση επιταχυνσιογράφου και σύνδεση με καταγραφέα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων από την καταγραφή (χρονοϊστορία) , η μετατροπή μέσω του κώδικα της Matlab (code.m) σε καμπύλη ελεύθερης ταλάντωσης, η επιλογή των peaks της καμπύλης και η προσαρμογή εκθετικής καμπύλης ανάμεσα στα σημεία που επιλέχτηκαν.

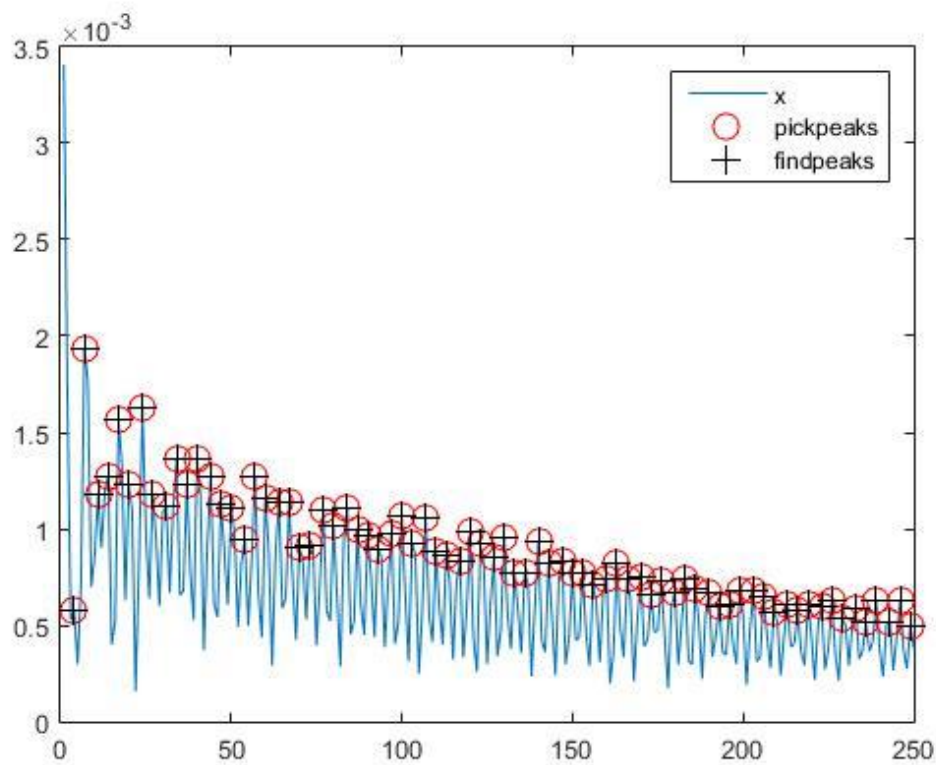
Τοιχίο τοιχοποιίας



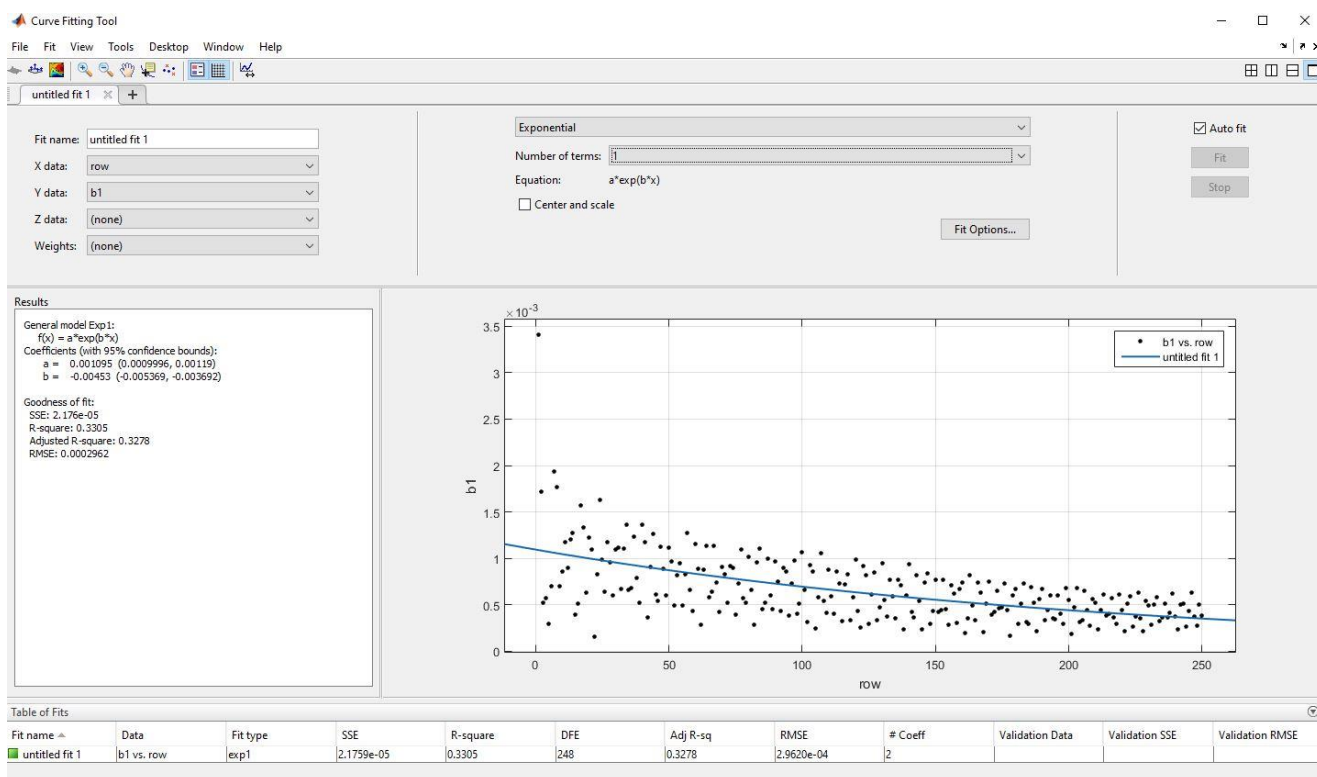
Εικόνα 4.24: Χρονοϊστορία απόκρισης τοιχίου – ambient vibration signal



Εικόνα 4.25: Ελεύθερη ταλάντωση τοιχίου – free vibration response



Εικόνα 4.26: Επιλογή των peaks της ελεύθερης ταλάντωσης



Εικόνα 4.27: Καμπύλη απόσβεσης ταλάντωσης – Curve fitting

4.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Έπειτα από τη καταγραφή των αποκρίσεων σε κατάσταση λειτουργίας, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του τοιχίου από Ο/Σ, η απόσβεση της ελεύθερης ταλάντωσης έχει την μορφή που περιμένουμε να δούμε σε ένα «υγιές» στοιχείο σκυροδέματος, δηλαδή ιξώδης μορφή. Οπότε συμπεραίνουμε ότι το τοιχίο σκυροδέματος Νο1 θεωρείται ένα υγιές δομικό στοιχείο χωρίς βλάβη.

Αντιθέτως στην περίπτωση του τοιχίου από τοιχοποιία παρατηρείται απότομη πτώση της καμπύλης απόσβεσης, όπως η μορφή που έχει η απόσβεση τριβής που αναμένεται να εμφανιστεί σε στοιχεία σκυροδέματος με βλάβες. Αυτό οφείλεται στον τρόπο ταλάντωσης της τοιχοποιίας, η οποία λόγω τρόπου κατασκευής, παρουσιάζει μη γραμμικότητα στην συμπεριφορά της.

Τέλος, το τοιχίο σκυροδέματος Νο2, παρουσιάζει αντίστοιχα καμπύλη απόσβεσης τριβής. Η ύπαρξη όμως «φουσκωμάτων» στην ελεύθερη ταλάντωση δείχνει ότι ενδεχομένως κάποιο άλλο σώμα ενεργεί (πιθανόν από επαφή) πάνω του και δημιουργεί κάποια εξαναγκασμένη διέγερση σε αυτό. Εναλλακτικά είναι πιθανό το τοιχίο να έχει υποστεί βλάβη στο εσωτερικό του κάποια χρονική στιγμή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : Συμπεράσματα

5.1 Γενικά συμπεράσματα

Η εκτίμηση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών των κατασκευών (ιδιομορφές, ιδιοσυχνότητες, απόσβεση), η οποία έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη για τον προσδιορισμό της πραγματικής κατάστασης των κατασκευών. Ο προσδιορισμός και η παρακολούθηση των δυναμικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής μπορεί να υπηρετήσει διάφορους σκοπούς σε μια κατασκευή όπως την αξιολόγηση δομικής κατάστασης και αξιοπιστίας, την δημιουργία βάσης δεδομένων και την παρακολούθηση της «υγείας» της κατασκευής για μελλοντική ανίχνευση βλαβών σε περιπτώσεις έντονης διέγερσής της από ισχυρά φορτία και την δημιουργία και ενημέρωση του θεωρητικού μοντέλου της κατασκευής και την εύρεση αποδοτικότερων λύσεων ενίσχυσης.

Οι περισσότερες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί θεωρούν γραμμική συμπεριφορά σε υγιή δομικά στοιχεία. Η ύπαρξη μιας μη γραμμικότητας υποθέτει πιθανή βλάβη στο στοιχείο. Ο εντοπισμός της μη γραμμικότητας μπορεί να φανεί από τον τρόπο απόσβεσης του στοιχείου σε μια διέγερση. Στην περίπτωση ιξώδους μορφής θεωρούμε γραμμικότητα στο σύστημα επομένως υγιές στοιχείο. Αντιθέτως στην περίπτωση της απόσβεσης τριβής θεωρούμε μη γραμμικότητα και πιθανή βλάβη στο στοιχείο.

Με την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου στο εργαστήριο σε δοκίμια Ο/Σ επιβεβαιώνουμε την υπάρχουσα βιβλιογραφία και τις εφαρμογές που έχουν γίνει, αφού τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει εμφανής σύνδεση του λόγου απόσβεσης του στοιχείου με την ύπαρξη βλάβης σε αυτό.

Στην περίπτωση αυτή, το στοιχείο μας υποβαλλόταν σε εξαναγκασμένη διέγερση και γινόταν σύγκριση της κατάστασής του πριν και μετά τη βλάβη. Η σύγκριση αυτή δεν είναι πάντα εύκολο να γίνει αφού σε περιπτώσεις κατασκευών που έχουν πάθει βλάβη, δεν είναι εύκολο να γνωρίζουμε την αρχική κατάσταση όπου ήταν υγιές.

Η ιδιομορφική ανάλυση σε κατάσταση λειτουργίας (OMA) αποτελεί ένα δυνατό εργαλείο προσδιορισμού των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών μια κατασκευής χωρίς να την αναγκάσουμε σε εξαναγκασμένη ταλάντωση. Δεν χρειάζεται να εισάγουμε φόρτιση στο σύστημα ώστε να παράξουμε αποτελέσματα. Η OMA χρησιμοποιεί τις διεγέρσεις από μικροδονήσεις του περιβάλλοντος ώστε να καθορίσει αυτά τα χαρακτηριστικά.

Για τον προσδιορισμό του λόγου απόσβεσης με την μέθοδο της OMA με σκοπό την εκτίμηση για την ύπαρξη μη γραμμικότητας-βλάβης στο στοιχείο, εφαρμόζουμε την παραπάνω μέθοδο σε τοιχία Ο/Σ και τοιχοποιίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μετασχηματίζοντας την

καταγραφή της απόκρισης σε απόκριση ελεύθερης ταλάντωσης μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τον λόγο απόσβεσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν γραμμικότητα- υγεία στο τοιχίο Ο/Σ και μη γραμμικότητα στην τοιχοποιία.

Επομένως μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι ο προσδιορισμός της γραμμικότητας του συστήματος της κατασκευής που μελετάμε μέσα από την εύρεση του λόγου απόσβεσης της κατασκευής μπορεί να αποτελέσει μια διαγνωστική μέθοδο και διαδικασία διερεύνησης σφαλμάτων, η οποία σε κλίμακα μεγάλου μεγέθους, μπορεί να εφαρμοστεί σε φέροντες οργανισμούς από λιθοδομή ή και σκυρόδεμα για τον εντοπισμό των αστοχιών όπως, ασυνέχειας στην δομή του υλικού και ανομοιογένειας του. Η εφαρμογή της σε μεγαλύτερης κλίμακας δομικά στοιχεία μπορεί να γίνει κάνοντας χρήση της μεθόδου της OMA η οποία αποτελεί μία μη καταστροφική μέθοδος που μπορείς να προσδιορίσεις τα δυναμικά χαρακτηριστικά και την γραμμικότητα μιας κατασκευής μόνο από τις μικροδονήσεις του περιβάλλοντος, παραμένοντας σε κατάσταση λειτουργίας.

5.2. Προτάσεις για περεταίρω έρευνα

Η ανάπτυξη και εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι ένα σημαντικό βήμα προς τη βελτίωση της αξιοπιστίας της απόδοσης των δομικών στοιχείων μιας κατασκευής. Αξίζει να ερευνηθεί περεταίρω η διαδικασία και σε μεγαλύτερης κλίμακας κατασκευές διαφόρων μεγεθών, μορφώσεων και υλικών κατασκευής, με σκοπό τον εντοπισμό βλαβών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι ιστορικές κατασκευές που είναι κατά πλειονότητα από τοιχοποιία, υλικό το οποίο παρουσιάζει συχνά ανομοιομορφίες, κακοτεχνίες και η ύπαρξη βλαβών είναι συνηθισμένο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Ματίκας, Θ., Αγγελής Δ., Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2015**
- 2. Λιαράκος, Ε. Διάγνωση βλαβών σε κατασκευές σκυροδέματος με χρήση "ευφύων" πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων σαν αδρανή σκυροδέματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2015**
- 3. Χριστόπουλος, Α., Έλεγχος της δομικής ακεραιότητας με καινοτόμες μεθόδους μη καταστροφικού έλεγχου σε κατασκευές και σύνθετα υλικά, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012**
- 4. Michele Frizzarin, Maria Q. Feng, Paolo Franchetti, Serdar Soyoz, Claudio Modena., Damage detection based on damping analysis of ambient vibration data, 2008**
- 5. Curadelli R O et al 2008 Damage detection by means of structural damping identification Eng. Struct. 30 3497–504**
- 6. Kyriazoglou C, Le Page B H and Guild F J 2004 Vibration damping for crack detection in composite laminates Composites A 35 945–53**
- 7. Frizzarin M et al 2010 Damage detection based on damping analysis of ambient vibration data Struct. Control Health Monit. 17 368–85**
- 8. Dammika A J et al 2013 Energy-based damping estimation of steel bridges and its applicability to damage detection Proc. 13th East Asia-Pacific Conf. on Structural Engineering and Construction H-2-4**
- 9. Dammika A J et al 2014 Analytical damping evaluation complementary to experimental structural health monitoring of bridges J. Bridge Eng. 20 04014095**
- 10. Rezaee M and Hassannejad R 2010 Free vibration analysis of simply supported beam with breathing crack using perturbation method Acta Mech. Solida Sin. 23 459–70**
- 11. Kyriazoglou C and Guild F J 2005 Quantifying the effect of homogeneous and localized damage mechanisms on the damping properties of damaged GFRP and CFRP continuous and woven composite laminates—an FEA approach Composites A 36 367–79**

- 12.** Dieterle R and Bachmann H 1981 Experiments and Models for the Damping Behavior of Vibrating Reinforced Concrete Beams in the Uncracked and Cracked Conditions (Basel: Birkhäuser)
- 13.** Daneshjoo F and Gharighoran A 2008 Experimental and theoretical dynamic system identification of damaged RC beams Electron. J. Struct. Eng. 8 29–39
- 14.** Bovsunovsky A P and Surace C 2005 Considerations regarding superharmonic vibrations of a cracked beam and the variation in damping caused by the presence of the crack J. Sound Vib. 288 865–86
- 15.** Panteliou S D et al 2001 Damping factor as an indicator of crack severity J. Sound Vib. 241 235–45
- 16.** Shahzad S et al 2013 Detection of corrosion-induced damage in reinforced concrete beams based on structural damping identification Proc. 13th East Asia-Pacific Conf. on Structural Engineering and Construction G-2-4
- 17.** Modena C, Sonda D, Zonta D. Damage localisation in reinforced concrete structures by using damping measurements. Key Engineering Materials 1999; 167–168:132–141.
- 18.** Mahrenholtz O, Bachmann H. Appendix C—damping. Comite' Euro- International du Beton–CEB, Lausanne, Switzerland, vol. 209, 1991; 169–180.
- 19.** Daniele Zonta, Structural damage detection and localization by using vibrational measurements , Bologna, Gennaio 2000
- 20.** Tomlinson GR, Hibbert JH. Identification of the dynamic characteristics of a structure with coulomb friction. Journal of Sound and Vibration 1979; 64(2):233–242.
- 21.** Zonta D. Structural damage detection and localization by using vibrational measurements. Ph.D. Dissertation, DISTART, Università degli Studi, Bologna, Italy, 2000.
- 22.** Τραχαλάκη Σοφία, Εκτίμηση δυναμικών χαρακτηριστικών κατασκευών με ενόργανη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Χανιά, 2012
- 23.** Γιανναράκη Δέσποινα, Ιδιομορφική ανάλυση του Νεωρίου του Μορο, Χανιά 2009
- 24.** Nader Nabil Aziz Tadros, Structural damage detection using ambient vibrations, Kansas State University , Manhattan 2014

25. https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric_accelerometer

26. Μεϊμαρίδης, Δ., Πάλλης Δ., Μελέτη και υλοποίηση γεννήτριας σήματος, βασισμένη στην πλατφόρμα Arduino, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα Σερρών, 2013

27. E. Yo, D. H. Whang, J. P. Conte, J. P. Stewart and J. W. Wallace, «Force vibration testing of buildings using the linear shaker seismic simulation» (LSSS) testing method, (2005).

28. Τραχαλάκη Σοφία , Εγχειρίδιο χρήσης οργάνων Syscom, Χανιά 2012

29. Neid, Using non-linear vibration to detect damage in concrete bridges, University of Oxford, July 2001

30. Jean-Jacques Sinou. A review of damage detection and health monitoring of mechanical systems from changes in the measurement of linear and non-linear vibrations. Robert C. Sapri. Mechanical Vibrations: Measurement, Effects and Control, Nova Science Publishers, Inc., pp.643-702, 2009, 978- 1-60692-037-4.

31. Hiroki Yamaguchi, Damage detection based on modal damping change in bridges, Saitama University, Japan

32. R.O. Curadelli a,, J.D. Riera b, D. Ambrosini a, M.G. Amania, Damage detection by means of structural damping identification, Laboratory of Experimental Dynamic, National University of Cuyo, CONICET, Mendoza, Argentina, 2007

32. P. Franchetti & C. Modena, Nonlinear Damping Identification in Precast Prestressed Reinforced Concrete Beams, Padova, Italy, 2009

33. Luke Bornn , Charles R. Farrar , Gyuhae Park, Damage detection in initially nonlinear systems, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, United States, 2010