



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

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

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ :

***« ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΤΗΣ ΔΟΝΗΤΙΚΗΣ – ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ »***

**ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΣ
ΠΡΟΒΙΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΦΙΩΤΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ, 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

*Με την παρούσα εργασία μελετάται μια νέα προηγμένη μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων η οποία δύναται να εφαρμοστεί στην δομή σύγχρονων ή και ιστορικών κατασκευών με σκοπό την αξιολόγηση της δομικής τους ακεραιότητας. Η εργασία παρουσιάζει την εφαρμογή μιας μεθόδου μη καταστροφικού ελέγχου η οποία βασίζεται στο φαινόμενο μοντελοποίησης της επαλληλίας μεταξύ δύο κυμάτων διέγερσης, ενός βραδέως ανεπτυγμένου (χαμηλής συχνότητας) κύματος μεγέθυνσης, και ενός κύματος υψηλής συχνότητας διεισδυτικής ανίχνευσης, και ονομάζεται **ΔΟΝΗΤΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ (VAM)**.*

Η μέθοδος στηρίζεται στην μη γραμμική συμπεριφορά του δομικού στοιχείου υπό την διέγερση των ταυτόχρονων επιδράσεων οι οποίες ανακλούνται από τις αστοχίες του υλικού, και εμφανίζονται στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων με την μορφή σύνθεσης εγκάρσιων διακυμάνσεων.

*Το πεδίο των ερευνών της **Δονητικής Ακουστικής Μεθόδου** μπορεί να αποτελέσει μια διαγνωστική μέθοδο και διαδικασία διερεύνησης σφαλμάτων, η οποία μπορεί σε κλίμακα μεγάλου μεγέθους να εφαρμοστεί σε φέρουσες τοιχοποιίες από λιθοδομή ή και κατασκευές από σκυρόδεμα, προκειμένου να γίνει μελέτη και κατανόηση της ομοιογένειας της δομής τους.*

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 τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος 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
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
Έρευνες στο πεδίο αξιολόγησης και χαρακτηρισμού των υλικών	12
Οργάνωση περιεχομένων.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	15
ΜΚΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ - ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ VAM	15
1.1 Δομική ακεραιότητα των κατασκευών	15
1.2 Μηχανικές βλάβες και απώλεια αντοχής.....	16
1.3 Μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ) κατασκευών	17
1.4 Μέθοδοι (ΜΚΕ).....	19
1.5 Εισαγωγή στην έννοια της VAM.....	20
1.5.1 Δονητική ακουστική μέθοδος (VAM).....	21
1.5.2 Ευφυή πιεζοηλεκτρικά υλικά.....	25
1.6 Αναπτυσσόμενες τεχνικές έλεγχου στο πεδίο της VAM.....	26
1.6.1 Θερμικός έλεγχος για ανίχνευση σφάλματος σε σύνθετα υλικά	26
1.6.2 Υπερηχητικά κύματα	28
1.6.3 Διασταύρωση κυμάτων με χρήση δονητικής ακουστικής τεχνικής	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	32
ΟΡΓΑΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	32
2.1 Εισαγωγή	32
2.2 Εξοπλισμός	32
2.2.1 Γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος.....	33
2.2.2 Εξωτερικός διεγέρτης	33
2.2.3 Γεννήτρια σημάτων.....	34
2.2.3.1 Είδη σημάτων - Γενικά στοιχεία.....	34
2.2.3.2 Ημιτονικό Σήμα	35
2.2.3.3 Τετραγωνικό Σήμα.....	35
2.2.3.4 Τριγωνικό Σήμα.....	35
2.2.3.5 Πριονωτό σήμα	36

2.2.4	Πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης.....	36
2.2.5	Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας.....	37
2.2.6	Τελεστικός ενισχυτής.....	38
2.2.7	Παλμογράφος.....	38
2.3	Χρήση πλατφόρμας MATLAB.....	39
2.4	Μετασχηματισμός Φουριέ	40
2.4.1	Εφαρμογές μετασχηματισμού Φουριέ	41
2.4.2	Ερμηνεία από πλευράς χρόνου και συχνότητας	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο		42
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ.....		42
3.1	Εισαγωγή	42
3.2	Αναγνώριση ιδιομορφικών χαρακτηριστικών	42
3.3	Εύρεση ιδιοσυχνότητας μέσω παρατήρησης στο πεδίο του φάσματος.....	43
3.4	Πειραματική διαδικασία	44
3.5	Συμπεράσματα	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο		52
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ		52
4.1	Εισαγωγή – Περιγραφή διαδικασίας δημιουργίας μηχανικών ταλαντώσεων	52
4.2	Μεθοδολογία της πράξης (πειραματικά δεδομένα)	54
4.3	Ανάπτυξη δράσεων στο υγιές δοκίμιο	54
4.3.1	Έρευνα για τις θεμελιώδεις συχνότητες του κύματος μεγέθυνσης	54
4.3.2	Έρευνα για τις θεμελιώδεις συχνότητες του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης	57
4.4	Εφαρμογή δονητικό ακουστικών δοκιμών επάλληλης διαμόρφωσης	61
4.4.1	Πρώτο ζεύγος μετρήσεων στην περίπτωση του υγιούς δοκιμίου.....	61
4.4.2	Δεύτερο ζεύγος μετρήσεων στην περίπτωση του υγιούς δοκιμίου	65
4.4.3	Τρίτο ζεύγος μετρήσεων στην περίπτωση του υγιούς δοκιμίου.....	67
4.4.4	Τέταρτο ζεύγος μετρήσεων στην περίπτωση του υγιούς δοκιμίου.....	69
4.5	Προσδιορισμός των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου.....	71
4.6	Μεταβολή δυσκαμψίας στο δοκίμιο	73
4.6.1	Πρώτο ζεύγος μετρήσεων για την μεταβολή της δυσκαμψίας	74
4.6.2	Δεύτερο ζεύγος μετρήσεων για την μεταβολή της δυσκαμψίας	76
4.6.3	Τρίτο ζεύγος μετρήσεων για την μεταβολή της δυσκαμψίας	77
4.6.4	Τέταρτο ζεύγος μετρήσεων για την μεταβολή της δυσκαμψίας	78

4.7 Το φαινόμενο των πλευρικών διακυμάνσεων (side bands)	79
4.7.1 Συμπεράσματα μετρήσεων για την μεταβολή της δυσκαμψίας στο δοκίμιο.....	80
4.8 Δείκτες Βλάβης	84

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ VAM.....

5.1 Εφαρμογή μεθοδολογίας.....	86
5.2 Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κύβου σκυροδέματος.....	86
5.3 Έρευνα των συχνοτήτων του κύματος μεγέθυνσης	88
5.4 Έλεγχος μη γραμμικότητας.....	90
5.4.1 Έρευνα στην συχνότητα κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz	90
5.4.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	94
5.4.3 Έρευνα για την συχνότητα κύματος μεγέθυνσης στα 7,20 kHz.....	95
5.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μη γραμμικής συμπεριφοράς	102
5.6 Εφαρμογή της δονητικής ακουστικής μεθόδου σε τοιχοποιία λιθοδομής.....	104
5.7 Θέσεις μετρήσεων.....	104
5.8 Έρευνα για την εισαγωγή συχνοτήτων κύματος μεγέθυνσης	106
5.9 Έλεγχος μη γραμμικής συμπεριφοράς στο τοιχίο λιθοδομής.....	110
5.10 Έλεγχος γραμμικής συμπεριφοράς στο τοιχίο λιθοδομής	116

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....

6.1 Γενικά συμπεράσματα	120
6.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της μεθόδου.....	121
6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνά	121
6.4 Επίλογος – αξιολόγηση της μεθόδου	122

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Δονητική ακουστική μέθοδος είναι μία τεχνική για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας υλικών και κατασκευών. Βασίζεται στη καταγραφή και μελέτη κυμάτων λόγω της ανάκλασης τους από αστοχίες ή άλλες αιτίες. Οι κυματικές αυτές διεγέρσεις καταγράφονται από αισθητήρες και μετατρέπονται σε ηλεκτρικές κυματομορφές που παρέχουν την πληροφορία για τις ιδιότητες και την δομική κατάσταση του υλικού ή της κατασκευής. Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει την αρχή λειτουργίας της μεθόδου, τις πρόσφατες τάσεις και εφαρμογές της, τον εξοπλισμό, καθώς και την διαδικασία πειραματικού ελέγχου η οποία επιχειρείται στο εργαστήριο και επιβεβαιώνει την βιβλιογραφία για την μεθοδολογία της τεχνικής με σκοπό την αναγνώριση σφαλμάτων σε κατασκευές.

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.

Για την διερεύνηση της τεχνικής της δονητικής ακουστικής μεθόδου, γίνεται εφαρμογή της μεθοδολογίας σε δοκίμιο που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο, (το οποίο αποτελείται από την ένωση τριών κύβων σκυροδέματος). Αρχικά πραγματοποιείται έλεγχος των θεμελιωδών συχνοτήτων που προκύπτουν στο πεδίο του φάσματος, από μια διέγερση μιας χαμηλής συχνότητας κύματος μεγέθυνσης, και στην πορεία από μια διέγερση μιας υψηλότερης συχνότητας κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης. Ο έλεγχος αυτός συμβάλει στην επιλογή των τιμών των συχνοτήτων για την διασταύρωση των δονητικό ακουστικών δοκιμών στο υγιές υλικό.

Υπό την εφαρμογή των ταυτόχρονων διεγέρσεων η απόκριση του δομικού συστήματος στο πεδίο του φάσματος μας δείχνει την επαλληλία των κυμάτων χωρίς την εμφάνιση πλευρικών συχνοτήτων ως συνιστώσες των συχνοτήτων του κύματος μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης.

Η πειραματική διαδικασία επαναλαμβάνεται αφού χαλαρώσουμε τους δεσμούς συνάφειας στο δοκίμιο. Σε αυτήν την περίπτωση διαπιστώνουμε την ανάπτυξη πλευρικών συχνοτήτων γύρω από την θεμελιώδη συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης, καθώς και στην περιοχή των συχνοτήτων που αναπτύσσονται λόγω του κύματος μεγέθυνσης. Η ανάπτυξη αυτών των επιπλέον συνιστωσών είναι αποτέλεσμα της μη γραμμικής συμπεριφοράς του υλικού λόγω ύπαρξης αστοχίας .

Η τεκμηρίωση της μεθόδου γίνεται με τον έλεγχο ενός κύβου σκυροδέματος και ενός φέροντος οργανισμού από λιθοδομή. Ο κύβος ελέγχεται για δυο περιπτώσεις του κύματος μεγέθυνσης, μια χαμηλή και μια πιο υψηλή. Για τις παραπάνω περιπτώσεις σε συνδυασμό με

την ταυτόχρονη διέγερση του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης παρείχθησαν σημαντικές πληροφορίες για την δομική κατάσταση του υλικού.

Στην περίπτωση της χαμηλής τιμής του κύματος μεγέθυνσης διαπιστώθηκε η εμφάνιση πλευρικών συχνοτήτων γύρω από την θεμελιώδη συχνότητα του φάσματος του κύματος μεγέθυνσης, σαν αποτέλεσμα της αστοχίας στην δομή του υλικού. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, για την υψηλότερη τιμή του κύματος μεγέθυνσης, η απόκριση του δομικού συστήματος απάντησε στο πεδίο του φάσματος με την ανάπτυξη μιας θεμελιώδους συχνότητας στο πεδίο των τιμών του κύματος ανίχνευσης με εμφανή ίχνη πλευρικών συχνοτήτων των οποίων οι μέγιστες τιμές υποδηλώνουν το εύρος του σφάλματος στο δομικό υλικό.

Η εφαρμογή της μεθόδου συνεχίστηκε σε δοκίμιο με φέροντα οργανισμό από λιθοδομή με σκοπό:

A) να επαληθεύσουμε την μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής λόγω ανομοιογένειας και διάκενων στην δομή της

B) να διερευνήσουμε ένα δομικό υλικό της φερούσης κατασκευής προκειμένου να επιβεβαιώνουμε την γραμμική συμπεριφορά στην περίπτωση μιας συμπαγούς δομής.

ABSTRACT

The Vibro - Acoustic Modulation Method (VAM) is a technique for controlling the structural health of materials and structures. It is based on the recording and study of waves due to their reflection of faults or other causes. These signals are recorded by sensors and converted into electrical waveforms that provide information about the properties and structural condition of the materials or constructions. This diploma thesis presents the principle of operation of the method, its recent trends and applications, the equipment, as well as the experimental control procedure that is attempted in the laboratory and confirms the bibliography for the methodology of the technique in order to identify errors in constructions.

The experiment method initially started by recording and observing waveforms in the field of the frequency spectrum, in order to identify specimen's specific characteristics. The technique is based on the observation of the fundamental peaks of the frequencies, considering that the peak around which the extreme value occurs represents a specific feature of the material under consideration.

In order to investigate the technique of the Vibro - Acoustic Modulation Method , the methodology is applied to a specimen (consisting of the union of three concrete cubes).

The observation of the fundamental frequencies occurring in the field of the spectrum due to the excitation of specific waves was initially made. These frequencies occur by an excitation of a low pumping wave frequency, and by an excitation of a higher probing wave frequency.

The observation and study of the fundamental frequencies of pumping and probing waves helps to select the frequency values for the intersection of the vibro acoustic tests into healthy material. Under the application of concurrent excitations, the response of the material in the field of the spectrum shows the successiveness of the waveforms without the occurrence of side bands frequencies as components of the pumping and probing wave frequencies.

The experimental process is repeated after loosening the affinity bonds of the specimen. In this case, we see the development of side bands frequencies around the fundamental frequency of the probing wave, as well as in the field of frequencies of the pumping wave. The development of these additional components is the result of the non-linear behavior of the material due to an error.

The documentation of the method was made by checking a cube of concrete and a construction wall of masonry. The cube is checked for two cases of the pumping wave, one low and one higher value of frequency. For the above cases, in conjunction with the simultaneous excitation of the probing wave, important information was provided for the structural condition of the material.

In the case of the low value of the pumping wave, the occurrence of side bands frequencies around the fundamental frequency of the pumping wave was as a result of the error in the structure of the material. In contrast to the above, for the highest value, the building system responded to the field of the spectrum by developing a fundamental probing waveform

with visible traces of side bands frequencies whose maximum values indicate the error range in the building material.

The research of the method was continued in a test to a masonry structure in order to:

A) to verify the non-linear behavior of the masonry due to heterogeneity and gaps in its structure

B) to investigate a material of the masonry wall in order to confirm the linear behavior in the case of a compact structure.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος που διερευνάται στην παρούσα εργασία συνίσταται στην εφαρμογή της δονητικής ακουστικής τεχνικής (VAM) για ανίχνευση βλάβης από εξαναγκασμένη ταλάντωση με σκοπό την αξιολόγηση της ακεραιότητας των δομικών υλικών. Το υπό εξέταση στοιχείο διεγείρεται ταυτόχρονα από δύο αρμονικά κύματα ένα κύμα χαμηλής συχνότητας διέγερσης το οποίο ονομάζεται κύμα μεγέθυνσης ή *pumping wave*, και ένα υψηλής συχνότητας κύμα διείσδυσης το οποίο ονομάζεται *probing wave*. Οι γραμμικές μεταβολές πλάτους και συχνότητας κυμάτων που ανακλώνται ή και διασκορπίζονται στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων υποδεικνύουν την ύπαρξη της βλάβης στο υλικό [1].

Στο πεδίο της έρευνας έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές συμπεριλαμβανομένων υπερήχων, ακτινογραφίας, και θερμογραφίας. Η πλειονότητα των ερευνητικών ερευνών σχετίζεται με την ανίχνευση ρωγμών σε μεταλλικές κατασκευές, φύλλα αλουμινίου, γυαλί, άνθρακα ή και αλλά σύνθετα υλικά. Οι εφαρμογές σε άλλους τύπους υλικών πέρα των αναφερόμενων είναι λιγότερο συχνές, αλλά και το πεδίο της έρευνας του φαινομένου της μοντελοποίησης της επαλληλίας μεταξύ δύο κυμάτων διέγερσης τα οποία προέρχονται από δημιουργία εξαναγκασμένης μηχανικής ταλάντωσης είναι λιγότερο διαδεδομένο. Οπότε και με τη παρούσα μελέτη διερευνάται η συμπεριφορά των δομικών στοιχείων σκυροδέματος και λιθοδομής για ανίχνευση ζημιών υπό την δημιουργία δυο κυμάτων εξαναγκασμένης ταλάντωσης.

Έρευνες στο πεδίο αξιολόγησης και χαρακτηρισμού των υλικών

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς τομείς, όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η ναυπηγική, η βιομηχανία ενέργειας και η βιομηχανία αθλητικών ειδών. Το ελαφρύ βάρος, η υψηλή ειδική ισχύς και η ευελιξία στο σχεδιασμό είναι τα κύρια πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εφαρμογές [2]. Ωστόσο, υπάρχουν δύο σημαντικά μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών. Το πρώτο αφορά στην κατασκευαστική επαναληψιμότητα που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχίες λόγω ετερογενών συγκολλήσεων (ή ακόμα και σε διασπάσεις) προτού τα εξαρτήματα τεθούν σε πλήρη λειτουργία. Το δεύτερο μειονέκτημα είναι η ευαισθησία των σύνθετων υλικών για αντοχή σε καταπόνηση. Και οι δύο πτυχές προκαλούν μεγάλη ανησυχία και απαιτούν αποτελεσματική προσπάθεια μη καταστροφικής δοκιμής προκειμένου να διασφαλιστεί η επιθυμητή ποιότητα και ασφάλεια.

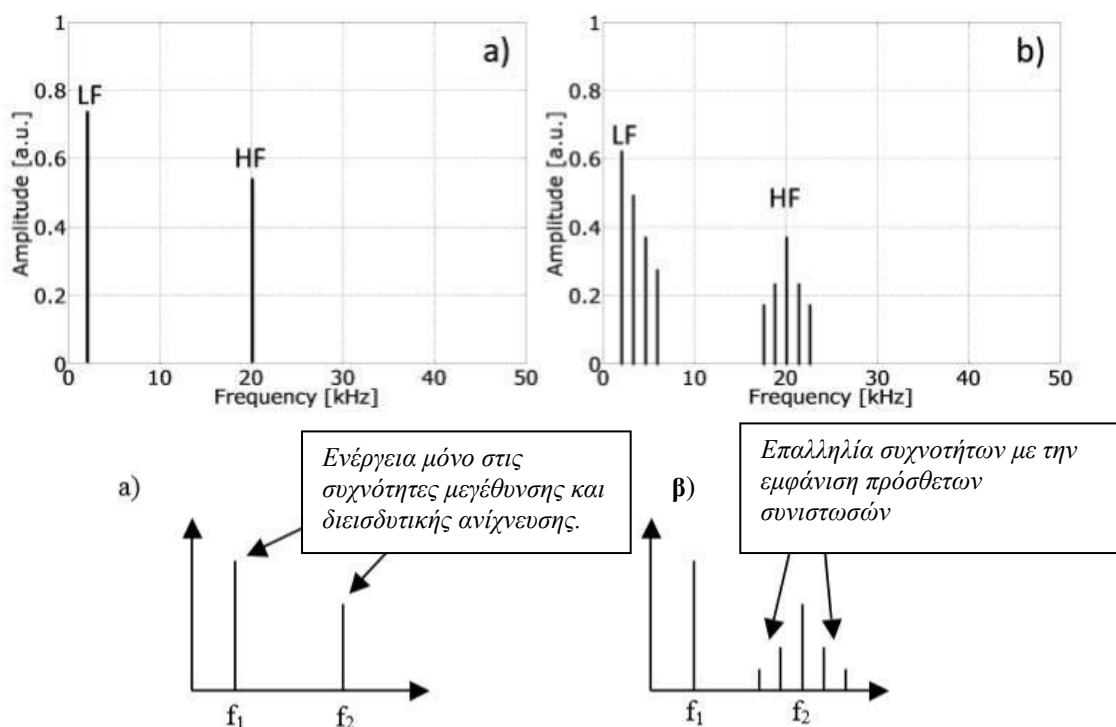
Πολλές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για μη καταστροφικές δοκιμές σύνθετων υλικών, συμπεριλαμβανομένων υπερήχων, ακτινογραφίας και θερμογραφίας μεταξύ άλλων [3]. Οι τεχνικές που βασίζονται στη μη γραμμική διαμόρφωση των δονητικών ακουστικών κυμάτων έλαβαν πρόσφατα μεγαλύτερη προσοχή και αποδείχθηκαν χρήσιμες στις δοκιμές των σύνθετων υλικών [4] [5]. Ωστόσο, παρά τις πολλές ερευνητικές προσπάθειες, εξακολουθεί να

υπάρχει ελάχιστη κατανόηση για το ποιοι είναι οι φυσικοί μηχανισμοί πίσω από τις παρατηρούμενες μη γραμμικότητες. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι όλα τα υλικά παρουσιάζουν απόκλιση από την ιδανική ελαστική συμπεριφορά, ακόμη και για πολύ μικρές τιμές παραμόρφωσης [8].

Οι περισσότερες από τις μεθόδους χαρακτηρισμού των υλικών ανιχνεύουν τη βλάβη με τη σύγκριση της τρέχουσας δομικής κατάστασης της κατασκευής σε σχέση με τις μετρήσεις και τα δεδομένα που ελήφθησαν για την κατασκευή σε υγιή κατάσταση. Οι παραπάνω μέθοδοι προϋποθέτουν τα δεδομένα των μετρήσεων της υγιούς κατάστασης μια δομής καθώς και της μεταβολής 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.

Για να αποφευχθούν τα λανθασμένα συμπεράσματα προερχόμενα από αποκλίσεις, αναπτύχθηκαν βασικές τεχνικές διάγνωσης όπως η vibro-acoustic διαμόρφωση (VAM) ή δονητική ακουστική μέθοδος.

Η VAM αποτελεί μια τεχνική κατά την οποία η δομή ενδιαφέροντος διεγείρεται από συνδυασμό συγκεκριμένων συχνοτήτων δίνοντας συμπεράσματα για την δομική της υπόσταση. Η τεχνική VAM υποθέτει ότι μια άθικτη κατασκευή μπορεί να αντιπροσωπευθεί από ένα γραμμικό σύστημα ενώ μια κατασκευή με φθορά εμφανίζει μη γραμμικότητα στην συμπεριφορά της. Η μη γραμμική συμπεριφορά του στοιχείου εκδηλώνεται με την εμφάνιση των πλευρικών συχνοτήτων. [9]



Εικόνα 1. Μηχανισμός μη γραμμικής συμπεριφοράς, (α) συχνότητες υγιούς κατασκευής (β) εμφάνιση πλευρικών συχνοτήτων για κατασκευή με δομικό ελάττωμα [8]

Οργάνωση περιεχομένων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η εκτίμηση βλαβών και σφαλμάτων σε δομικές κατασκευές με βάση την εκτίμηση της απόκρισης του υλικού, στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων υπό την επίδραση δυο εξαναγκασμένων μορφών μηχανικής ταλάντωσης, εφαρμόζοντας την θεωρία της δονητικής ακουστικής μεθόδου.

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 αξιολόγησης τους, με έμφαση και κατανόηση στις έρευνες και τεχνικές που αναπτύσσονται στο πεδίο VAM, με αναφορές σε σχετικές μελέτες για την αξιολόγηση δομικών στοιχείων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση και αναφορά στον εργαστηριακό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για την διερεύνηση και τεκμηρίωση της δονητικής ακουστικής μεθόδου

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται μια σύνοψη για την εύρεση των δυναμικών χαρακτηριστικών ενός δοκιμίου με την χρήση πειραματικής μεθόδου υπό την εφαρμογή εξαναγκασμένης ταλάντωσης και ανάλυση μέσω του φάσματος των συχνοτήτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται διερεύνηση της θεωρίας της VAM. Χρησιμοποιώντας τρεις κύβους σκυροδέματος, ο πρωταρχικός στόχος στο υπό εξέταση δοκίμιο είναι να αποδείξει την γραμμική συμπεριφορά σε μια υγιή κατάσταση, και αντίστοιχα την ανάπτυξη των πλευρικών ζωνών γύρω από τις θεμελιώδεις συχνότητες στην περίπτωση που στο δοκίμιο έχει γίνει μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών του. Οι μετρήσεις κατά τη διάρκεια της δοκιμής επιβεβαιώνουν αυτό το αποτέλεσμα και δίνουν έμφαση σε μερικά από τα ζητήματα που συνδέονται με την τεχνική.

Το πέμπτο κεφάλαιο, περιλαμβάνει την τεκμηρίωση και εφαρμογή της τεχνικής, παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας ενός δοκιμίου κύβου σκυροδέματος, όπως και του φέροντος οργανισμού από λιθοδομή. Καθώς κατά τα συμπεράσματα αυτών και μια συζήτηση της σημασίας τους.

Τέλος, το κεφάλαιο έξι, παρουσιάζει τα πιθανά πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της χρήσης VAM για την ανίχνευση και εντοπισμό αστοχιών σε δομικά υλικά, ενώ δίνονται συστάσεις για πρόσθετες ερευνητικές προσπάθειες προκειμένου να βελτιωθούν μερικοί από τους περιορισμούς της μεθόδου.

ΜΚΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ - ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ VAM**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 [19]. 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 [20].

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) [21] .

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 [20].

1.2 Μηχανικές βλάβες και απώλεια αντοχής [20]

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.

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 [19].

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 [21]:

- 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 [21]

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: [20]

- 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 [21].

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-X, και αισθητήρες υπερήχων δίνουν τώρα τη δυνατότητα ταχείας σάρωσης μεγάλων περιοχών των δομών για ελαττώματα. Αρκετές νέες εξελίξεις στους τομείς αυτούς επωφελήθηκαν 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: [19]

- 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 διάδοση μηχανικών κυμάτων και την ιδιοταλάντωση των κατασκευών είναι και η δονητική ακουστική μέθοδος. Η μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός υπό παρακολούθηση δομικού συστήματος από σκυρόδεμα 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 σκυροδέματος, τη γεωμετρία της μικροδομής του και την εξωτερική γεωμετρία του δομικού φορέα που διαδίδεται. Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού και η γεωμετρία της κατασκευής επηρεάζουν την ταχύτητα, το συχνотικό περιεχόμενο και την ενέργεια του διαδιδόμενου κύματος.

Η καταγραφή της δυναμικής απόκριση ενός δομικού συστήματος 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. Στις περιπτώσεις αυτές οι μέθοδοι είναι αποτελεσματικές επειδή το ενεργειακό περιεχόμενο της ιδιοταλάντωσης είναι σημαντικό, με αποτέλεσμα να ανιχνεύονται ευδιάκριτα τα δυναμικά χαρακτηριστικά του δομικού συστήματος κυρίως στο πεδίο των συχνοτήτων. Ο ΜΚΕ σε αυτές τις περιπτώσεις δεν επικεντρώνεται τόσο στον αυστηρό προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών της κατασκευής, όσο στην αξιολόγηση της δομικής κατάστασης από την μελέτη των μεταβολών που δύναται να εμφανιστούν τόσο στις χρονο-ιστορίες, όσο και στα φάσματα απόκρισης που καταγράφονται από τους αισθητήρες της δυναμικής κίνησης [20].

1.5 Εισαγωγή στην έννοια της VAM

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον στο πεδίο της έρευνας των μη γραμμικών αποτελέσματα για την ανίχνευση ζημιών. Το πρωτοποριακό έργο στον τομέα αυτό μπορεί να αναχθεί στη δεκαετία του 1970. Ωστόσο, οι σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες έχουν ενταθεί τα τελευταία 10 χρόνια, οδηγώντας σε πολλές ενδιαφέρουσες εξελίξεις [1]. Πολλαπλά μη γραμμικά φαινόμενα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση ζημιών. Τα παραδείγματα εφαρμογών περιλαμβάνουν μεθόδους που βασίζονται στη ανάμιξη συχνοτήτων, φάσματα συντονισμού, ανάλυση αντήχησης, έρευνες για αργή δυναμική συμπεριφορά [15] και ανάλυση διαμόρφωσης. Όλες αυτές οι τεχνικές έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό, την αλληλεπίδραση μεταξύ του ακουστικού κύματος υψηλής

συχνότητας και της διέγερσης των κραδασμών χαμηλής συχνότητας. Αυτή η συνδυασμένη δονητική ακουστική αλληλεπίδραση είναι ιδιαίτερα ισχυρή παρουσία διαφόρων δομικών σφαλμάτων όπως ρωγμές, ή επιφάνειες τριβής.

Η τεχνική επάλληλης διαμόρφωσης των δονητικών ακουστικών βλαβών έχει την προέλευσή της στο λεγόμενο φαινόμενο Λουξεμβούργου-Γκόργκι που παρατηρείται στα ραδιοκύματα που αλληλεπιδρούν στην ιονόσφαιρα [16] [13]. Τα δυναμικά διαμορφωμένα σήματα που παρήγαγαν οι δύο ραδιοφωνικοί σταθμοί στο Λουξεμβούργο και το Γκόργκι προκάλεσαν τη μεταφορά της διαμόρφωσης σε ασθενέστερα ραδιοκύματα που εκπέμπονταν από άλλους ραδιοφωνικούς σταθμούς [13].

Ουσιαστικά με την τεχνική ανίχνευσης βλαβών της επάλληλης διαμόρφωσης η δομή διεγείρεται ταυτόχρονα από δύο ζώνες αρμονικών κυμάτων το λεγόμενο κύμα διεισδυτικής ανίχνευσης και το κύμα μεγέθυνσης. Τα κύματα διέγερσης δεν είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά είναι κύματα κίνησης παρόμοια με τα θαλάσσια κύματα. Τα κύματα διαδίδονται μέσα στα υλικά, υφίστανται απόσβεση και ανακλώνται, ή διαθλώνται ή σκευάζονται όταν συναντούν εμπόδια ή ασυνέχειες, ανάλογα με τη συχνότητά τους. Την ιδιότητα αυτή τη χρησιμοποιούμε για να εντοπίσουμε τυχόν ατέλειες στο εσωτερικό ενός σώματος [21]

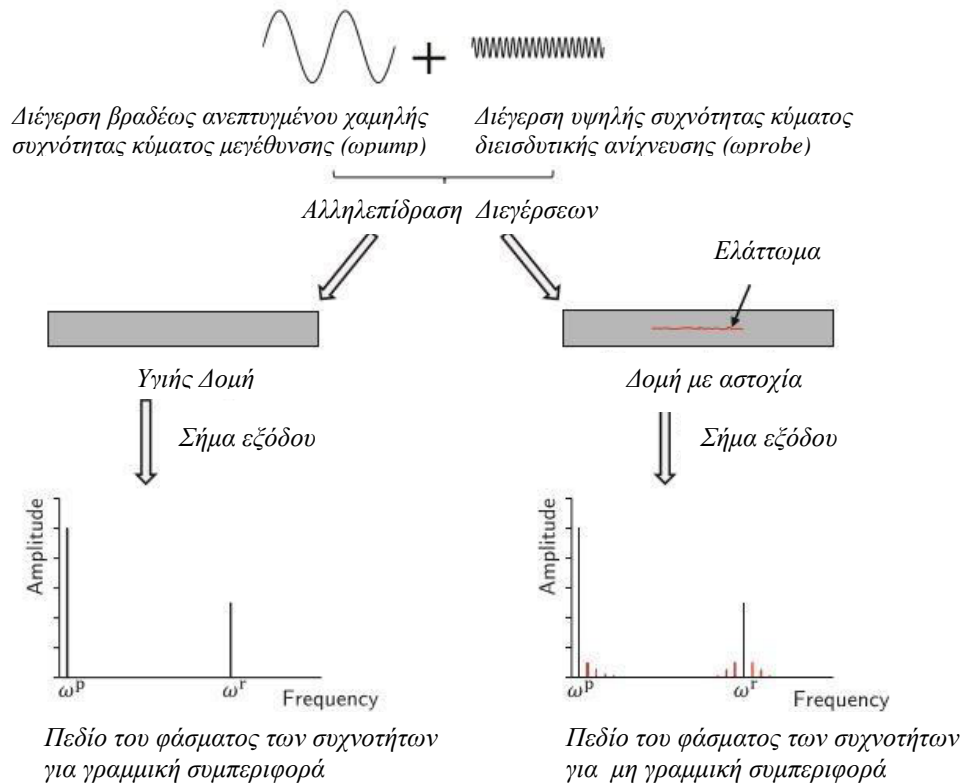
1.5.1 Δονητική ακουστική μέθοδος (VAM)

Η VAM αποτελεί μια τεχνική κατά την οποία η δομή ενδιαφέροντος διεγείρεται από συνδυασμό συγκεκριμένων συχνοτήτων δίνοντας συμπεράσματα για την δομική της υπόσταση. Η τεχνική VAM υποθέτει ότι μια άθικτη κατασκευή μπορεί να αντιπροσωπευθεί από ένα γραμμικό σύστημα ενώ μια κατασκευή με φθορά εμφανίζει μη γραμμικότητα στην συμπεριφορά της. Η μη γραμμική συμπεριφορά του στοιχείου εκδηλώνεται με την εμφάνιση των πλευρικών συχνοτήτων.

Η δονητική-ακουστική μέθοδος (VAM) έχει αποκτήσει ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Σε σχέση με άλλες μη καταστροφικές μεθόδους η VAM μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας συνδεδεμένους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες. Η μεθοδολογία βασίζεται στην εφαρμογή μιας χαμηλότερης συχνότητας κύματος διέγερσης (pumping wave) ή "**κύμα Μεγέθυνσης**", καθώς και στην εφαρμογή ενός δεύτερου κύματος διέγερσης υψηλότερης συχνότητας (probing wave) ή "**κύμα Διεισδυτικής Ανίχνευσης**".

Υπό την εφαρμογή των παραπάνω δράσεων οι υγιείς δομές θα επιστρέψουν μια απόκριση με ενέργεια μόνο στις συχνότητες μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης.

Ωστόσο, με την παρουσία των ζημιών, δημιουργούνται πρόσθετα μη γραμμικά στοιχεία λόγω μη γραμμικών αποτελεσμάτων οδηγώντας στην ανάμιξη των δύο σημάτων εισόδου. Για παράδειγμα, η παρουσία μιας ρωγμής δημιουργεί διαφορετικά χαρακτηριστικά δυσκαμψίας παράγοντας μια πιο σύνθετη δονητική απόκριση από εκείνη που παρατηρήθηκε σε ένα συστατικό χωρίς ρωγμές [9].



Εικόνα 1.2 Μηχανισμός λειτουργίας Δονητικής Ακουστικής Μεθόδου [14]

Το κλειδί για την ανίχνευση πιθανών σφαλμάτων με την μέθοδο VAM, είναι η παρουσία ενέργειας στις συχνότητες στις οποίες είναι παρούσες οι συχνότητες των probing και pumping wave. Αυτές οι νέες συχνότητες, ονομάζονται πλευρικές ζώνες συχνοτήτων, και οι τιμές τους εμφανίζονται ως συνιστώσες των συχνοτήτων των probing και pumping wave.

$$\omega_{1^{st} \text{ sideband}} = \omega_{probe} \pm 1 * \omega_{pump}$$

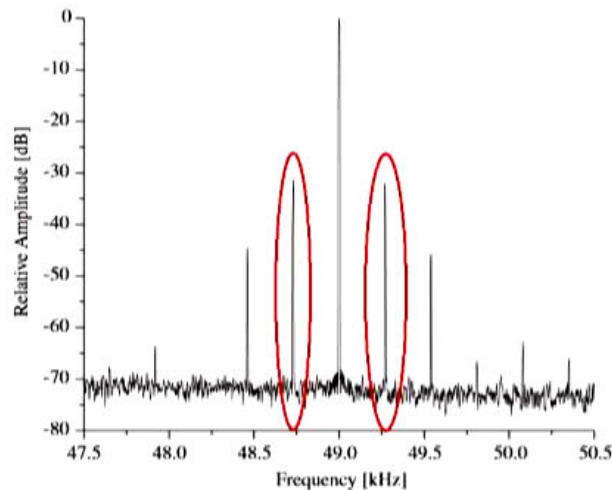
$$\omega_{2^{nd} \text{ sideband}} = \omega_{probe} \pm 2 * \omega_{pump}$$

$$\omega_{i^{th} \text{ sideband}} = \omega_{probe} \pm i * \omega_{pump}$$

Εξίσωση 1, 2, 3

Οι πλευρικές συχνότητες εμφανίζονται ως τιμές που είναι συνάρτηση των τιμών των συχνοτήτων της μεγέθυνσης και ανίχνευσης [10]

Οι χαμηλότερες και υψηλότερες πλευρικές ζώνες συχνοτήτων μπορούν να οριστούν ως συχνότητες που ισούνται με τις συχνότητες διεισδυτικής ανίχνευσης (ω_{probe}) συν ή μείον, μια - δύο - τρεις, και τέσσερις φορές την συχνότητα μεγέθυνσης (ω_{pump}).



***Εικόνα 1.3** Παράδειγμα ανάπτυξης πλευρικών συχνοτήτων στο πεδίο του φάσματος γύρω από την θεμελιώδη συχνότητα [10]*

Η μέθοδος βασίζεται στους αισθητήρες (καταγραφής της δυναμικής κίνησης και ενεργοποίησης της πιεζοηλεκτρικής πλακέτας), οι οποίοι τοποθετούνται σε συγκεκριμένα σημεία της κατασκευής, δημιουργώντας ένα πλέγμα παρακολούθησης, καταγράφοντας την δυναμική απόκριση της ιδιοταλάντωσης του δομικού συστήματος εξαιτίας της στοχευμένης εκπομπής ενός μηχανικού κύματος .

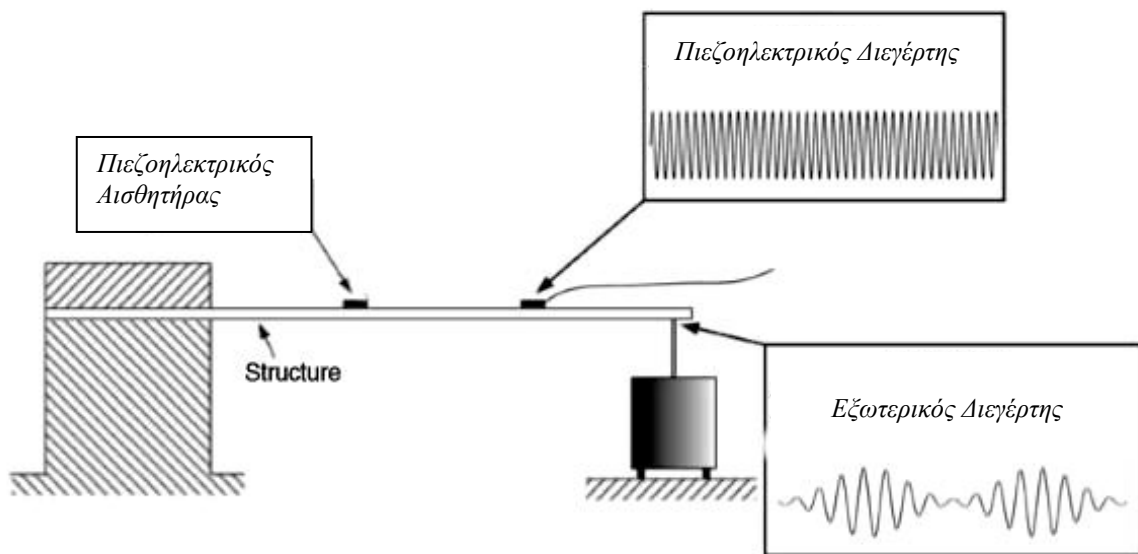
Συγκεκριμένα τοποθετείται ένας αισθητήρας ο οποίος καταγράφει την δυναμική απόκριση της ιδιοταλάντωσης του δομικού συστήματος εξαιτίας της στοχευμένης εκπομπής ενός μηχανικού κύματος με τη χρήση ενός εξωτερικού διεγέρτη, ο οποίος εξωθεί σε ταλάντωση την κατασκευή. Το μηχανικό κύμα που προκαλείται, καταγράφεται καθώς διαδίδεται στο εσωτερικό του δομικού συστήματος από τον αισθητήρα ανίχνευσης της δυναμικής κίνησης και μέσω του ενισχυτή σήματος μεταφέρεται σαν χρονοϊστορία στον παλμογράφο.

Μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου (βλέπε παρ. 1.5.2) επίσης, και λόγω της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο πιεζοηλεκτρικό πλακίδιο το οποίο είναι συνδεδεμένο στο δομικό σύστημα, είναι δυνατό να εκπνευστεί ένα μηχανικό κύμα με συχνότητα ίδια με εκείνη της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης. Κατά αυτό τον τρόπο η κατασκευή εξωθείται σε μια δεύτερη μηχανική ταλάντωση στο εσωτερικό της η οποία καταγράφεται από τον αισθητήρα ανίχνευσης της δυναμικής κίνησης.

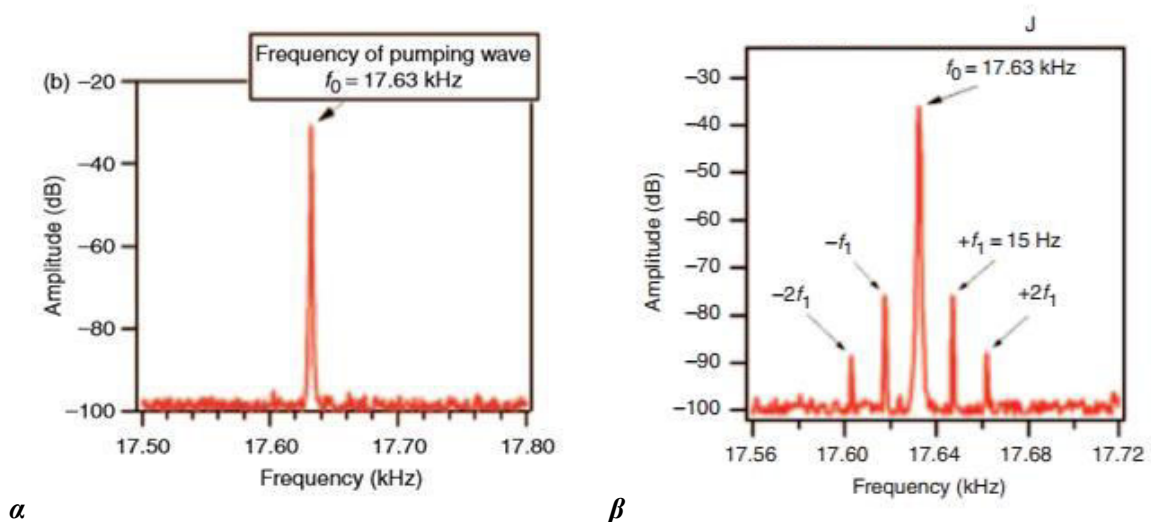
Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο καθώς τα συγκεκριμένα υλικά χρησιμοποιούνται ως στοιχεία αισθητήρων ή και πομπών μηχανικών κυμάτων (διεγέρτες μηχανικής ταλάντωσης). Σε αυτή την περίπτωση αξιοποιείται το φαινόμενο, όπου με την εφαρμογή μιας εξωτερικής ηλεκτρικής τάσης, σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση πόλωσης του υλικού, είναι δυνατό να παραχθεί ένα μηχανικό κύμα με συχνότητα ίδια με εκείνη της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης. Εξαιτίας της παραπάνω πολύ-λειτουργικής

συμπεριφοράς τα συγκεκριμένα υλικά στη βιβλιογραφία συναντούνται και ως Αισθητήρες/Διεγέρτες [20].

Για κατασκευές με ομοιογένεια, (χωρίς δομική φθορά) διαπιστώνουμε ότι οι γραφικές παραστάσεις των αρμονικών της συχνότητας κύματος δόνησης δεν αλληλοσυνδέονται και δεν επικαλύπτουν την θεμελιώδη αρμονική της συχνότητας του ακουστικού κύματος με την ανάπτυξη επαλληλίας διακυμάνσεων. Στην περίπτωση σφάλματος του δοκιμίου ένα μοτίβο από ζεύγη πλευρικών συχνοτήτων - διακυμάνσεων μπορεί να παραχθεί στο πεδίο του φάσματος των θεμελιωδών συχνοτήτων του κύματος μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης. Τα πλάτη των πλευρικών συχνοτήτων αυξάνονται ανάλογα με το εύρος και την ύπαρξη αστοχίας στο υλικό, και αντιπροσωπεύουν ένα ενδεικτικό δείκτη μέτρησης για τον βαθμό του.



Εικόνα 1.4 Μηχανισμός λειτουργίας Δονητικής Ακουστικής Μεθόδου [1]



Εικόνα 1.5 Μηχανισμός μη γραμμικής συμπεριφοράς στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων, (α) συχνότητες υγιούς κατασκευής (β) εμφάνιση πλευρικών συχνοτήτων για κατασκευή με δομικό ελάττωμα [1]

1.5.2 «Ευφυή» πιεζοηλεκτρικά υλικά [20]

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χαρακτηρίζονται από τη ιδιότητα τους να εμφανίζουν ηλεκτρική τάση σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση (διεύθυνση πόλωσης), όταν σε αυτή τη διεύθυνση ασκείται μια μηχανική δύναμη. Η συμπεριφορά αυτή καλείται Ευθύ Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο (Direct Piezoelectric Effect). Το αξιοσημείωτο όμως με τα συγκεκριμένα υλικά, είναι ότι επιδεικνύουν και την αντίστροφη συμπεριφορά. Δηλαδή, εμφανίζουν μηχανική παραμόρφωση σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση όταν σε αυτή εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο (Αντίστροφο Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο Inverse Piezoelectric Effect), (Giurgiutiu, 2008). Τα ηλεκτρικά και μηχανικά μεγέθη που εισέρχονται στη μελέτη του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου συσχετίζονται μεταξύ τους με βάση συγκεκριμένους ηλεκτρομηχανικούς καταστατικούς νόμους (Giurgiutiu, 2008). Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο στο ΜΚΕ των κατασκευών καθώς τα συγκεκριμένα υλικά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία αισθητήρων ή και πομπών μηχανικών κυμάτων (διεγέρτες μηχανικής ταλάντωσης). Στην πρώτη περίπτωση αξιοποιείται το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, όπου το υλικό αλληλεπιδρά με ένα διαδιδόμενο μηχανικό κύμα και παράγει ηλεκτρική τάση στη διεύθυνση ταλάντωσης του κύματος. Στη δεύτερη περίπτωση, με την εφαρμογή μιας εξωτερικής ηλεκτρικής τάσης σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση πόλωσης του υλικού, είναι δυνατό να παραχθεί να μηχανικό κύμα με συχνότητα ίδια με εκείνη της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης. Εξαιτίας της παραπάνω πολύ-λειτουργικής συμπεριφοράς τα συγκεκριμένα υλικά στη βιβλιογραφία συναντούνται και ως Αισθητήρες/Διεγέρτες.

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα φυσικά και τα τεχνητά. Τα φυσικά ή πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι όπως είναι ο χαλαζίας (Διοξείδιο του Πυριτίου-SiO₂) και ο τουρμαλίνης (Κυκλο-Πυριτικό ορυκτό, σε αρκετές περιπτώσεις πολύτιμος και ημιπολύτιμος λίθος), έχουν χρησιμοποιηθεί στην ωρολογοποιία, στην παρασκευή μικροφώνων και ακουστικών και την κατασκευή ηλεκτρονικών ταλαντωτών (Malvino and Bates, 2006). Οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι έχουν σχετικά υψηλό κόστος καθώς για τις εφαρμογές τους απαιτείται η κατάλληλη κοπή των κρυστάλλων. Το κόστος αυξάνεται όσο το απαιτούμενο μέγεθος κοπής μειώνεται πλησιάζοντας τις διαστάσεις της κρυσταλλικής μικροδομής του ορυκτού. Η καταστατική συμπεριφορά που επιδεικνύουν τα πιεζοηλεκτρικά υλικά οφείλεται στο γεγονός ότι έχουν την ικανότητα να μετασχηματίζουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και το αντίστροφο.

Τα φυσικά πιεζοηλεκτρικά υλικά σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμογών που σχετίζονται με την ενσωμάτωση τους σε αισθητήρες και πομπούς μηχανικών κυμάτων, κρίνονται ανεπαρκή ως προς το μέγεθος του ECC. Δηλαδή η μηχανική ενέργεια που αποδίδουν με τη μορφή μηχανικών κυμάτων είναι χαμηλή σε σχέση με την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τον εξαναγκασμό τους σε ταλάντωση. Η αδυναμία αυτή καθώς και οι περιορισμοί που τα χαρακτηρίζουν λόγω της φυσικής τους δομής, οδήγησε στην ανάπτυξη των τεχνητών

πιεζοηλεκτρικών υλικών. Τα συγκεκριμένα υλικά είναι κεραμικής προελεύσεως και για το λόγο αυτό στη βιβλιογραφία πολλές φορές αναφέρονται και ως Πιεζοκεραμικά Υλικά (Piezoceramic Materials). Παρασκευάζονται από κονιάματα χημικών ενώσεων του οξυγόνου με τα μέταλλα Βάριο (Br), Τιτάνιο (Ti), Ζirkόνιο (Zr) και Μόλυβδο (Pb). Η κονιώδης μορφή της συγκεκριμένης πρώτης ύλης προσφέρει τη δυνατότητα διαμόρφωσης πιεζοηλεκτρικών σωμάτων με μεγάλο εύρος γεωμετρικών χαρακτηριστικών (πλακίδια, ράβδοι, δίσκοι κ.α.) και διαστάσεων.

Τα πιο διαδεδομένα πιεζοκεραμικά υλικά στις εφαρμογές ΜΚΕ δομικών συστημάτων, είναι το Οξειδίο του Βαρίου και του Τιτανίου (Barium Titanate) με χημικό τύπο BaTiO_3 και το Οξειδίο του μολύβδου και των Ζirkονίου, Τιτανίου–PZT (Lead Zirconate Titanate) με χημικό τύπο $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$. Τα PZT συναντούνται στο πεδίο των τεχνικών εφαρμογών του μη καταστροφικού ελέγχου, με τη μορφή δισκοειδών πλακιδίων ή παραλληλογράμμων επιθεμάτων (patches), των οποίων το πάχος κυμαίνεται από 0.2 έως 20 mm και η επιφάνεια από 5 mm² έως και 20 cm².

1.6 Αναπτυσσόμενες τεχνικές έλεγχου στο πεδίο της VAM

Υπάρχουν πολλές αναπτυσσόμενες έρευνες στο πεδίο VAM, με στόχο την διερεύνηση ζημιών – αστοχιών στις σύνθετες δομές, μερικές από αυτές και οι εφαρμογές τους παρατίθενται και σχολιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

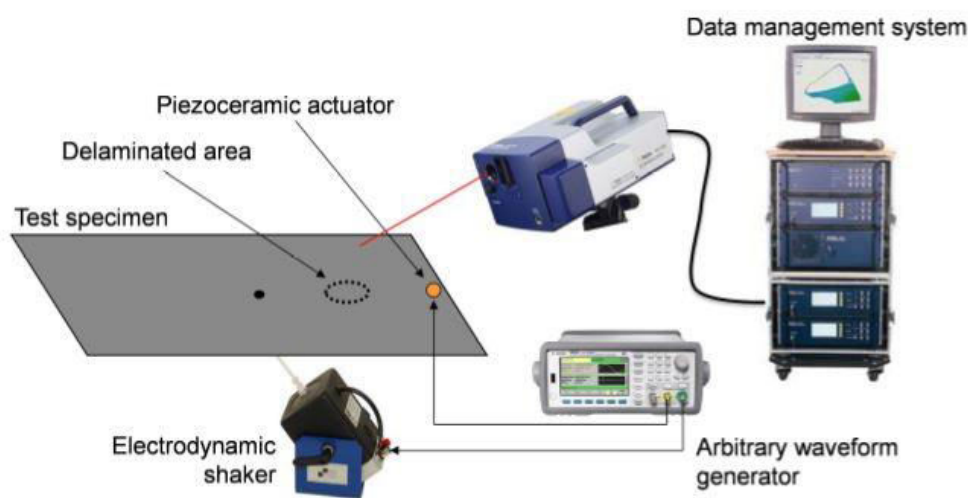
1.6.1 Θερμικός έλεγχος για ανίχνευση σφάλματος σε σύνθετα υλικά

Οι έρευνες οι οποίες διεξάγονται στο πεδίο για τον χαρακτηρισμό των υλικών και την κατανόηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς έχουν να κάνουν με την αλληλεπίδραση της χαμηλής συχνότητας μηχανικής ταλάντωσης με υψηλής συχνότητας ακουστικό κύμα ή την διερεύνηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς υλικών λόγω του πεδίου θερμότητας που αναπτύσσεται λόγω των αλληλεπιδράσεων, σε μια έρευνα για τον εντοπισμό αστοχιών – σφαλμάτων και τον χαρακτηρισμό των υλικών. Στην περίπτωση συσχέτισης της θερμότητας υπό την δράση ταυτόχρονων διεγέρσεων εξαναγκασμένης ταλάντωσης μια θερμοκάμερα υπέρυθρων χρησιμοποιείται για να συλλάβει το πεδίο θερμοκρασίας στην επιφάνεια του δοκιμίου. Σε αυτήν της περίπτωση εξετάζεται η θερμοκρασία που αναπτύσσεται για τις διαφορετικές δονήσεις. Στις θέσεις των αποκολλήσεων ή αστοχιών συνήθως παρουσιάζεται εναλλαγή θερμοκρασίας ή ισχυρή θέρμανση [8].

Η τεχνική βασίζεται στο γεγονός ότι η μηχανική ενέργεια λόγω των εξωτερικών δονήσεων μετατρέπεται σε θερμική με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται θερμότητα λόγω τριβής ακριβώς στις θέσεις, όπου εμφανίζονται ατέλειες, όπως ρωγμές και αποκολλήσεις στρωμάτων σε σύνθετα υλικά. Οι μηχανισμοί διάχυσης της ενέργειας δόνησης στη βλάβη δεν έχουν γίνει ακόμη πλήρως κατανοητοί, αλλά σίγουρα εξαρτώνται από τις παραμέτρους του

υλικού και τα χαρακτηριστικά της βλάβης. Συνεπώς, η ακριβής ποσότητα της θερμότητας που αναμένεται να διαχυθεί από ορισμένες ατέλειες δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων. Όμως, είναι γνωστό ότι η παραγόμενη θερμότητα εξαρτάται από τη συχνότητα και τη θέση της πηγής θερμότητας (ατέλεια) [19].

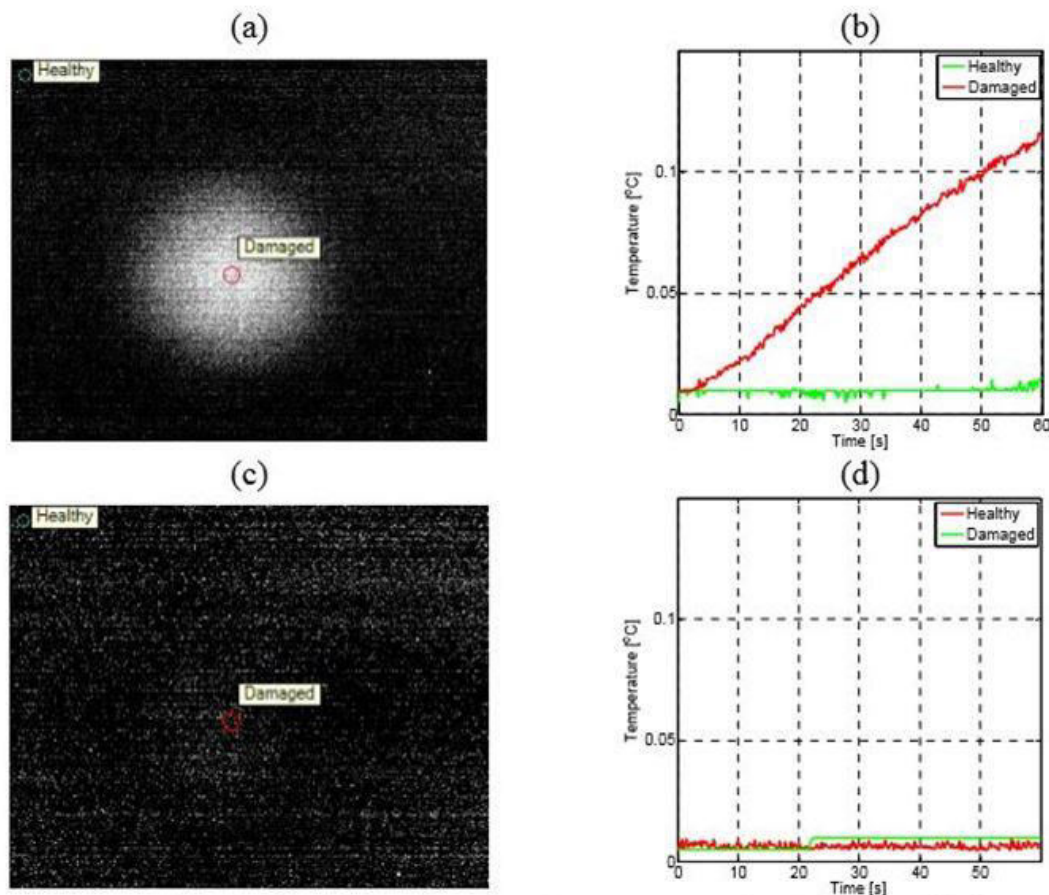
Σύμφωνα με την δημοσίευση του Πανεπιστημίου της επιστήμης και τεχνολογίας της Κρακοβίας για την διερεύνηση του μηχανισμού της μη γραμμικής συμπεριφοράς δονητικών ακουστικών κυμάτων σε σύνθετα πλαστικοποιημένα υλικά με την μέθοδο του θερμικού ελέγχου παρατίθεται η πειραματική διαδικασία η οποία διενεργήθηκε. Το δείγμα δοκιμής το οποίο εξετάστηκε αφορά σε μια πολυστρωματική σύνθετη πλάκα κατασκευασμένη από εποξειδικό άνθρακα. Οι διαστάσεις της πλάκας ήταν 588 χ 200 χ 1.2 mm. Η πλάκα περιελάμβανε μια αποφλοιωμένη διασπορά που δημιουργήθηκε με την τοποθέτηση ενός κυκλικού παρεμβλήματος τεφλόν μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου στρώματος πριν από την τελική ομογενοποίηση της. Η πλάκα τοποθετήθηκε σε ηλεκτροδυναμικό αναδευτήρα προκειμένου να διεξαχθούν πειραματικές δοκιμές τροχιάς για να βρεθούν διαρθρωτικοί συντονισμοί της. Για την διέγερση της δομής χρησιμοποιήθηκε ένα σήμα λευκού θορύβου. Το σήμα διέγερσης δημιουργήθηκε από μια ενσωματωμένη γεννήτρια σήματος Polytec και χρησιμοποιήθηκε ένα δονησιόμετρο λέιζερ σάρωσης Polytec για μετρήσεις κραδασμών χωρίς επαφή [8].



Εικόνα 1.6 Όργανα πειραματικού έλεγχου για τον θερμικό έλεγχο ανίχνευσης σφαλμάτων σε σύνθετα υλικά [8]

Δύο από τις αναγνωρισμένες φυσικές συχνότητες στα 270 και 300 Hz επιλέχθηκαν για περαιτέρω αναλύσεις. Αυτές οι συχνότητες χρησιμοποιήθηκαν για διέγερση χαμηλής συχνότητας σε μη γραμμικές δονητικές ακουστικές δοκιμές. Ο πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης για διέγερση υψηλής συχνότητας προσαρτήθηκε στην πλάκα χρησιμοποιώντας εποξειδική κόλλα δύο συστατικών. Ένα ημιτονοειδές κύμα υπερήχων – probing wave (HF = 60 kHz, πλάτος-κορυφή = 100 V) εισήχθη στον πιεζοηλεκτρικό διεγέρτη. Ταυτόχρονα, η δόνηση δομήθηκε με τη χρήση του ηλεκτροδυναμικού αναδευτήρα που οδηγούταν από μια ημιτονοειδή διέγερση

χαμηλής συχνότητας κύματος μεγέθυνσης – pumping wave (LF = 270 Hz και LF = 300 Hz). Το σήμα απόκρισης μετρήθηκε με το δονησιόμετρο λέιζερ σαρώσεως PSV-400 Polytec. Η δοκιμή διεξήχθη 20 λεπτά για κάθε εξελεγμένο τρόπο δόνησης. Το σχήμα απεικονίζει τις σχετικές τιμές θερμοκρασίας που μετρώνται στη θέση αποκόλλησης και στην υγιή περιοχή. Οι θέσεις μέτρησης σημειώνονται σε θερμογραφικές εικόνες στις Εικόνες 1.6α και 1.6β. Αλλαγή θερμοκρασίας 0,12 °C παρατηρήθηκε για τη λειτουργία δόνησης 270 Hz. [8]



Εικόνα 1.7 Κατανομή θερμοκρασίας (αριστερή στήλη) και ιστορικό χρόνου θερμοκρασίας (δεξιά στήλη) για τις δύο εξεταζόμενες καταστάσεις δόνησης: (a, b) 270 Hz, (c, d) 300 Hz [8]

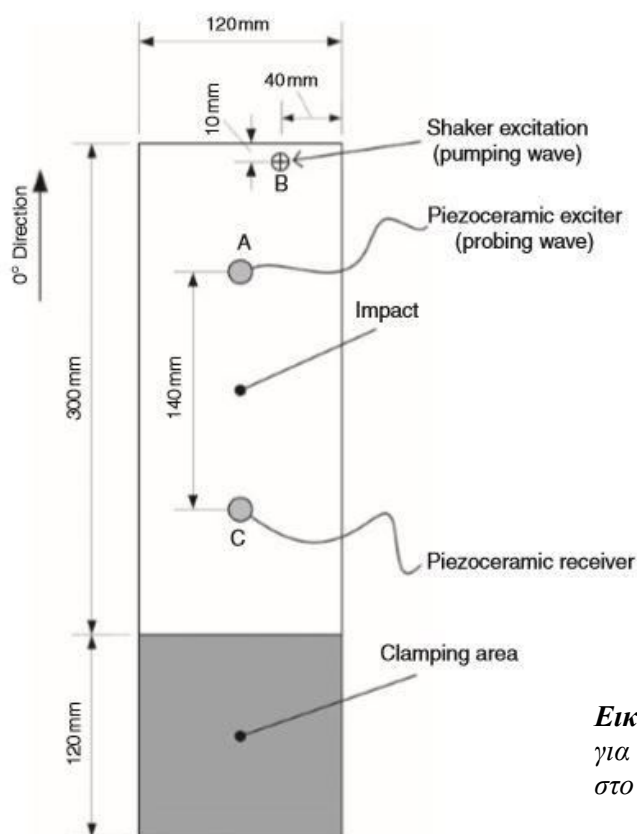
1.6.2 Κύματα Υπερήχων

Μια άλλη τεχνική στο πεδίο της πεδίο VAM, με στόχο την διερεύνηση ζημιών είναι τα κύματα υπερήχων, τα όποια χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανίχνευση δομικών βλαβών σε πολλούς τομείς της μηχανικής. Η τεχνική διαμόρφωσης κύματος είναι μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μη γραμμικές ακουστικές μεθόδους ανίχνευσης βλαβών. Τα κύματα υπερήχων δεν είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά είναι κύματα κίνησης παρόμοια με τα θαλάσσια κύματα. Τα κύματα των ήχων και των υπερήχων διαδίδονται μέσα στα υλικά, υφίστανται απόσβεση και ανακλώνται, διαθλώνται όταν συναντούν εμπόδια ή ασυνέχειες, ανάλογα με τη συχνότητά τους.

Την ιδιότητα αυτή τη χρησιμοποιούμε για να εντοπίσουμε τυχόν ατέλειες στο εσωτερικό ενός σώματος χωρίς να το τεμαχίσουμε. Το κύμα υπέρηχων ρυθμίζεται από το κύμα κραδασμών σε αυτήν την τεχνική. Ως αποτέλεσμα, οι πλευρικές ζώνες παράγονται στο φάσμα ισχύος του υπερηχητικού σήματος απόκρισης, με τη συχνότητα αυτών των πλευρικών ζωνών να αντιστοιχεί στη συχνότητα των κραδασμών [21].

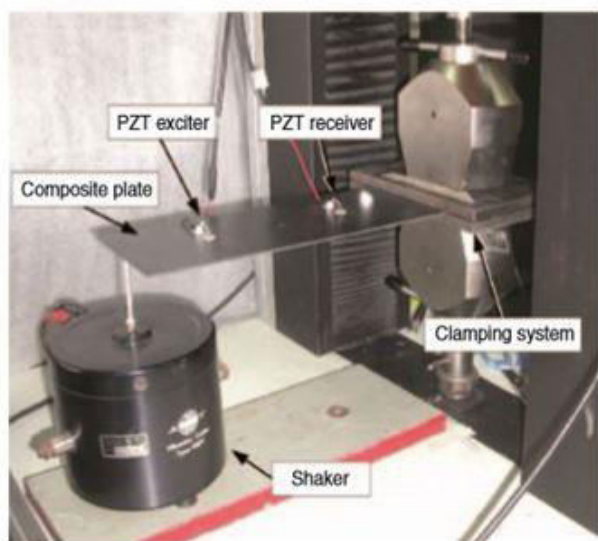
1.6.3 Διασταύρωση κυμάτων με χρήση δονητικής ακουστικής τεχνικής [1]

Ωστόσο η πιο διαδεδομένη τεχνική βασίζεται στο φαινόμενο της μοντελοποίησης της επαλληλίας μεταξύ δύο κυμάτων διέγερσης, δηλαδή ενός βραδέως ανεπτυγμένου κύματος μεγέθυνσης και ενός κύματος υψηλής συχνότητας διεισδυτικής ανίχνευσης. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς για την ανίχνευση ρωγμών στο γυαλί και τα στοιχεία αλουμινίου [13]. Σύμφωνα με την δημοσίευση των Aymerich, F., and Staszewski, για την διερεύνηση του μηχανισμού της μη γραμμικής συμπεριφοράς δονητικών ακουστικών διεγέρσεων σε σύνθετα υλικά παρατίθεται η πειραματική διαδικασία η οποία διενεργήθηκε. Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη, απεικονίζεται γραφικά στην εικόνα 1.8, αφορά σε ένα στρωματικό σύνθετο υλικό, πρόκειται για φύλλο αλουμινίου αποτελούμενο από διαστρώσεις προ-εμποτισμού άνθρακα/εποξειδίου. Το δείγμα υποβλήθηκε σε σάρωση με υπέρηχους πριν από τη δοκιμή, για να εκτιμηθεί η ποιότητα του ελάσματος και να αποκλειστεί η παρουσία ελαττωμάτων κατασκευής [1].



Εικόνα 1.8 Σχηματική διάταξη εξοπλισμού για δημιουργία εξαναγκασμένης ταλάντωσης στο σύνθετο υλικό [1]

Το δοκίμιο εξοπλίστηκε με πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα και διεγέρτη, τοποθετημένους όπως φαίνεται στην εικόνα 1.9. Τα πιεζοηλεκτρικά αυτά συγκολλούνται επιφανειακά χρησιμοποιώντας εποξειδική κόλλα δύο συστατικών και ενσύρματα χρησιμοποιώντας πρόσθετα συνδεδεμένους συνδετήρες. Η δοκιμαστική εργασία ανίχνευσης ζημιών με χρήση της δονητικής ακουστικής τεχνικής διασταύρωσης περιγράφεται με την παρακάτω πειραματική διαδικασία. Το σύνθετο δοκίμιο συσφίγγεται (όπως φαίνεται στην εικόνα 1.9) μεταξύ δύο χαλύβδινων πλακών. Η συσφιγμένη περιοχή της πλάκας υποδεικνύεται γραφικά στην εικόνα 1.8. Αυτή η διάταξη σύσφιξης χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις δονητικά-ακουστικές δοκιμές επάλληλης διαμόρφωσης.

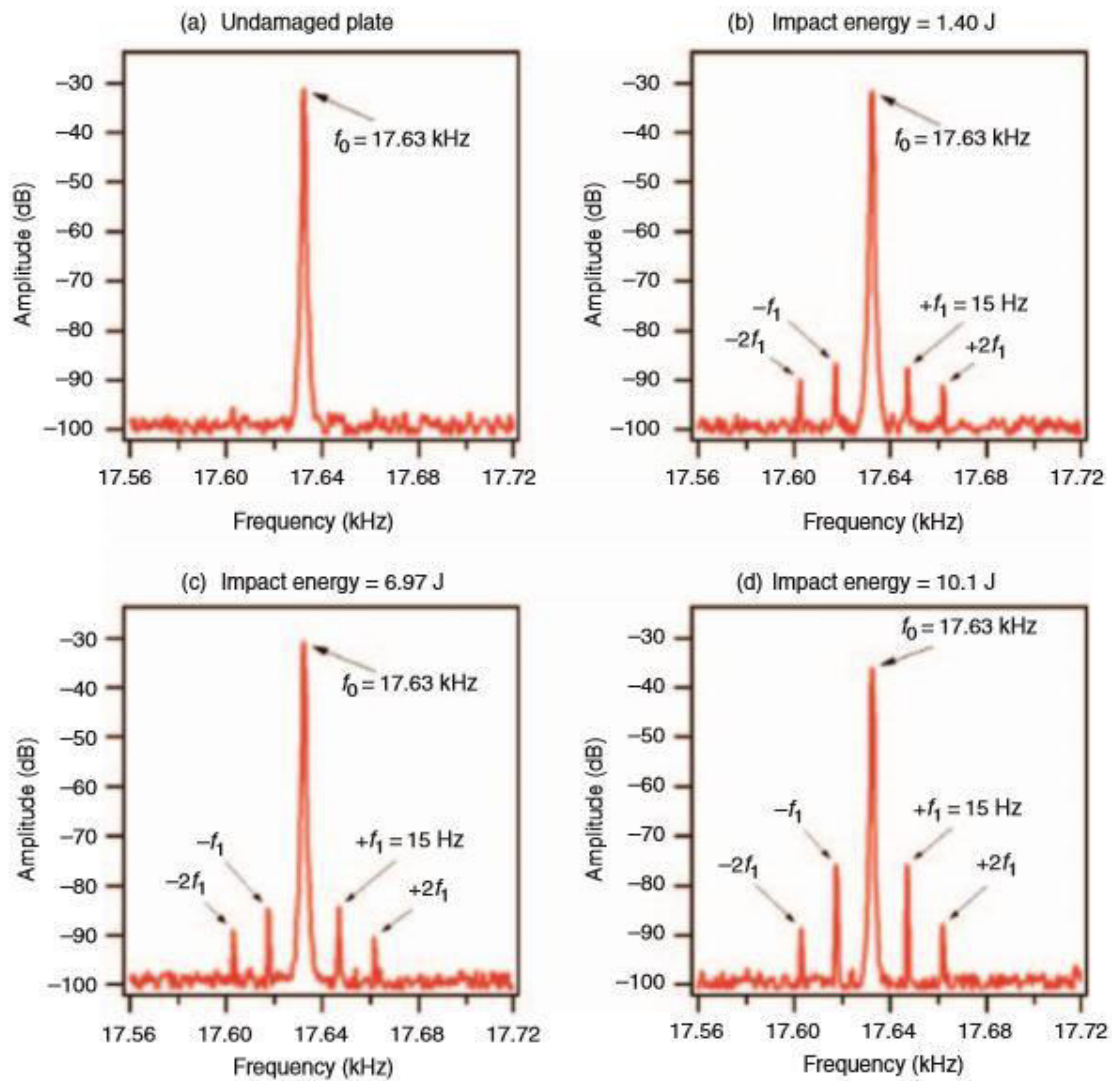


Εικόνα 1.9 Όργανα πειραματικού έλεγχου για δημιουργία εξαναγκασμένης ταλάντωσης [1]

Οι δονητικό ακουστικές δοκιμές επάλληλης διαμόρφωσης πραγματοποιήθηκαν αρχικά επί του μη κατεστραμμένου δείγματος και στη συνέχεια στο ίδιο δοκίμιο μετά την δημιουργία σφάλματος λόγω κρούσης από δοκιμαστικό εκκρεμές. Ένα ημιτονοειδές κύμα συχνότητας $f_0 = 17.63\text{kHz}$ και εύρος κορυφής έως κορυφή 20V χρησιμοποιήθηκε ως κύμα διεισδυτικής ανίχνευσης. Αυτό το κύμα διεισδυτικής ανίχνευσης εισήχθη στο πιεζοηλεκτρικό διεγέρτη χαμηλού προφίλ στη θέση Α (εικόνα 1.8) Ένα ημιτονοειδές κύμα συχνότητας $f_1 = 2.93\text{kHz}$, χρησιμοποιήθηκε ως κύμα μεγέθυνσης. Το κύμα μεγέθυνσης εισήχθη στην πλάκα στη θέση Β (εικόνα 1.8.) χρησιμοποιώντας τον ηλεκτρομαγνητικό αναδευτήρα. Τα κύματα διεισδυτικής ανίχνευσης και μεγέθυνσης εισήχθησαν ταυτόχρονα στην πλάκα. Το σήμα απόκρισης αποκτήθηκε από τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα στη θέση C. Τα φάσματα ισχύος σε αυτήν την περίπτωση έδειξαν ότι οι αρμονικές συχνότητες του κυματισμού μεγέθυνσης δεν επικαλύπτονται με τη θεμελιώδη αρμονική του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης με την εμφάνιση εγκάρσιων διαμορφώσεων.

Ωστόσο τα φάσματα απόκρισης που αποκτήθηκαν για τις ίδιες συχνότητες κύματος μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης μετά την υποβολή της πλάκας σε παραμόρφωση

εμφανίζουν ένα περίγραμμα πλευρικών λωρίδων γύρω από την συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης [1].



Εικόνα 1.10 Γραφικές παραστάσεις μη γραμμικής συμπεριφοράς στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων, για την συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης μετά την δημιουργία εξαναγκασμένης ταλάντωσης [1]

2.1 Εισαγωγή

Η μεθοδολογία της Δονητικής ακουστικής μεθόδου η οποία εξετάζεται με την παρούσα εργασία βασίζεται σε δυο ανεξάρτητα κύματα διέγερσης τα οποία ασκούνται ταυτόχρονα στην εξεταζόμενη κατασκευή και έχουν ως εξής:

A) Μια διέγερση χαμηλής συχνότητας η οποία δημιουργείται υπό άσκηση μηχανικής πίεσης, διαδίδεται κατά μήκος της επιφάνειας του υλικού και ονομάζεται pumping wave η κύμα μεγέθυνσης.

B) Μια διέγερση υψηλής συχνότητας η οποία δημιουργείται υπό την διοχέτευση τάσης επαναλαμβανόμενων κυματομορφών, διαδίδεται εντός του υλικού και ονομάζεται probing wave η κύμα διεισδυτικής ανίχνευσης .

Το υπό εξέταση στοιχείο διεγείρεται ταυτόχρονα από τα δύο κύματα τα οποία διαδίδονται στα υλικά, και ανακλώνται, διαθλώνται όταν συναντούν εμπόδια ή ασυνέχειες, ανάλογα με τη συχνότητά τους. Οι γραμμικές μεταβολές πλάτους και συχνότητας κυμάτων που ανακλώνται ή και διασκορπίζονται στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων υποδεικνύουν την ύπαρξη της βλάβης στο υλικό [1].

2.2 Εξοπλισμός

Η ανάπτυξη των διεγέρσεων για την δημιουργία της επάλληλης διαμόρφωσης των δονητικών ακουστικών κυμάτων επιτυγχάνεται με την χρήση γεννήτριας ημιτονοειδούς ρεύματος η οποία ενεργοποιεί τον εξωτερικό διεγέρτη που βρίσκεται σε επαφή με το δοκίμιο. Ο διεγέρτης μέσω εξαναγκασμένης ταλάντωσης δημιουργεί την διέγερση σταθερού πλάτους και χαμηλής συχνότητας του κύματος μεγέθυνσης.

Μια δεύτερη γεννήτρια συχνοτήτων η οποία έχει την δυνατότητα να παράγει κύματα σταθερού πλάτους διαφόρων κυματομορφών ενεργοποιεί την πλακέτα του πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη ο οποίος είναι συνδεδεμένος στο δοκίμιο και έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει ένα μηχανικό κύμα με συχνότητα ίδια με εκείνη της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης που δέχεται. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η διέγερση υψηλής συχνότητας του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης. Η λήψη των δεδομένων γίνεται μέσω πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα ο οποίος είναι συνδεδεμένος στο δοκίμιο για την καταγραφή της δομικής απόκρισης του υλικού. Η εποπτεία των καταγράφων γίνεται με την βοήθεια παλμογράφου ο οποίος μετατρέπει την ψηφιακή τους μορφή σε αναλογική για την διεξαγωγή και μελέτη των συμπερασμάτων.

Συγκεκριμένα ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται έχει ως εξής:

2.2.1 Γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος

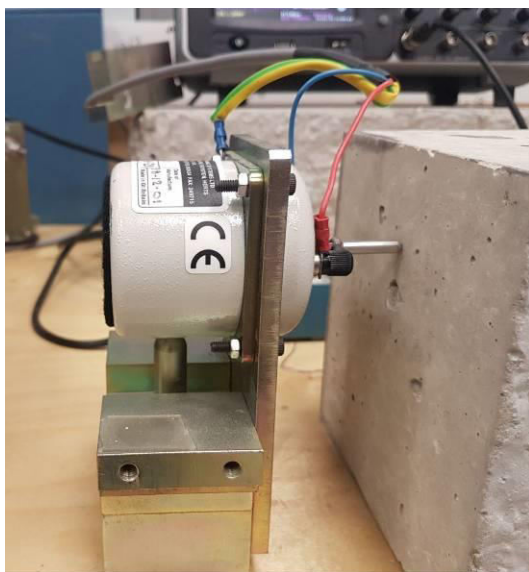
Η Γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος είναι μια συσκευή του εργαστηρίου η οποία παρέχει ημιτονοειδές κύμα σταθερού πλάτους. Μέσω της γεννήτριας ενεργοποιείται ο εξωτερικός διεγέρτης προκειμένου να δημιουργήσουμε ένα κύμα χαμηλής συχνότητας διέγερσης το οποίο ονομάζεται κύμα μεγέθυνσης.

Ουσιαστικά με την γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος διαμορφώνουμε την συχνότητα του κύματος που δέχεται ο εξωτερικός διεγέρτης για την δημιουργία του κύματος μεγέθυνσης. 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 2.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός γεννήτριας ημιτονοειδούς κύματος

2.2.2 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 εμβολο το οποίο ενεργοποιείται ασκώντας μια επαναλαμβανόμενη περιοδική κίνηση δημιουργώντας κατά αυτόν τον τρόπο μια διέγερση χαμηλής συχνότητας κύματος μεγέθυνσης

Εικόνα 2.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός εξωτερικού διεγέρτη για δημιουργία μηχανικής ταλάντωσης

2.2.3 Γεννήτρια σημάτων

Οι γεννήτριες σημάτων είναι όργανα που παρέχουν κύματα συνήθως με τη μορφή τάσης ή ρεύματος. Έχουν την δυνατότητα να παράγουν σήματα με ποικίλα χαρακτηριστικά τα οποία ελέγχονται από τον χρήστη. Τα σήματα που παράγονται από μια γεννήτρια, άλλα είναι επαναλαμβανόμενα και άλλα μη επαναλαμβανόμενα (αναλογικά και ψηφιακά). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και οι γεννήτριες συχνοτήτων, οι οποίες και παράγουν επαναλαμβανόμενες κυματομορφές τις οποίες από την ψηφιακή τους μορφή τις μετατρέπουμε σε αναλογική και η εποπτεία τους γίνεται με την βοήθεια παλμογράφου. Οι πιο σύνηθες επαναλαμβανόμενες κυματομορφές είναι η ημιτονοειδής, η τριγωνική, η πριονωτή και τετραγωνική [22].



Εικόνα 2.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός γεννήτριας συχνοτήτων

Για την διεξαγωγή του πειράματος η γεννήτρια συχνοτήτων παράγει τάση επαναλαμβανόμενων ημιτονοειδών κυματομορφών ενεργοποιώντας την πλακέτα του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα. Ως κυματομορφή ημιτονοειδούς ρεύματος ορίζεται εκείνη που μεταβάλλεται στο μέγεθος και στην κατεύθυνση με έναν ομαλό τρόπο ως προς τον χρόνο.

2.2.3.1 Είδη σημάτων - Γενικά στοιχεία

Όπως σε όλα τα σήματα, έτσι και στα ηλεκτρικά, η τάση και ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, διακρίνεται σε περιοδική και μη. Περιοδικά είναι τα σήματα που επαναλαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Στα περιοδικά σήματα η μεταβολή της τάσης ακολουθεί έναν κύκλο, δηλαδή επαναλαμβάνεται με συγκεκριμένο τρόπο σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να ολοκληρώσει μία πλήρης μεταβολή ονομάζεται περίοδος του σήματος και συνήθως συμβολίζεται με T . Ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων μεταβολών σε ένα δευτερόλεπτο ονομάζεται συχνότητα και συνήθως συμβολίζεται με f (frequency). Ισχύει $f=1/T$. Το πλάτος A είναι το μέγεθος ή η ένταση του κύματος της κυματομορφής και μετριέται σε volts. Η χρονική απόσταση μεταξύ δύο τμημάτων

του αυτού σήματος ή δύο διαφορετικών σημάτων ίδιας περιόδου (από τα οποία το ένα θεωρείται ως αναφορά) ονομάζεται διαφορά φάσης. Τα μη περιοδικά σήματα είναι καταστάσεις οι οποίες συμβαίνουν σε ακανόνιστα χρονικά διαστήματα. Σε αυτά τα σήματα μπορούμε να μιλήσουμε μόνο για χρονική διάρκεια και μορφή. Η ονομασία κάθε κυματομορφής προέρχεται είτε από τη συνάρτηση (μαθηματική έκφραση) η οποία το περιγράφει, είτε από την περιγραφή της μορφής του σήματος, όπως τριγωνικό, τετραγωνικό, πριονωτό κλπ [22].

2.2.3.2 Ημιτονοειδές Σήμα

Το ημιτονοειδές σήμα, είναι ένα περιοδικό σήμα, στο οποίο η μεταβολή της τάσης μεταβάλλεται με ημιτονοειδή μορφή. Η μαθηματική έκφραση που περιγράφει το ημιτονοειδές σήμα είναι $V=V_0\sin(\omega t)$, όπου V_0 το πλάτος της κυματομορφής στο οποίο η συνάρτηση παρουσιάζει μέγιστο, ω η γωνιακή ταχύτητα (ισοδυναμεί με $2\pi f$, όπου $\pi=3.14$, f η συχνότητα) και t η χρονική στιγμή, που μετρείται από την αρχή των χρόνων που ορίζουμε.

2.2.3.3 Τετραγωνικό Σήμα

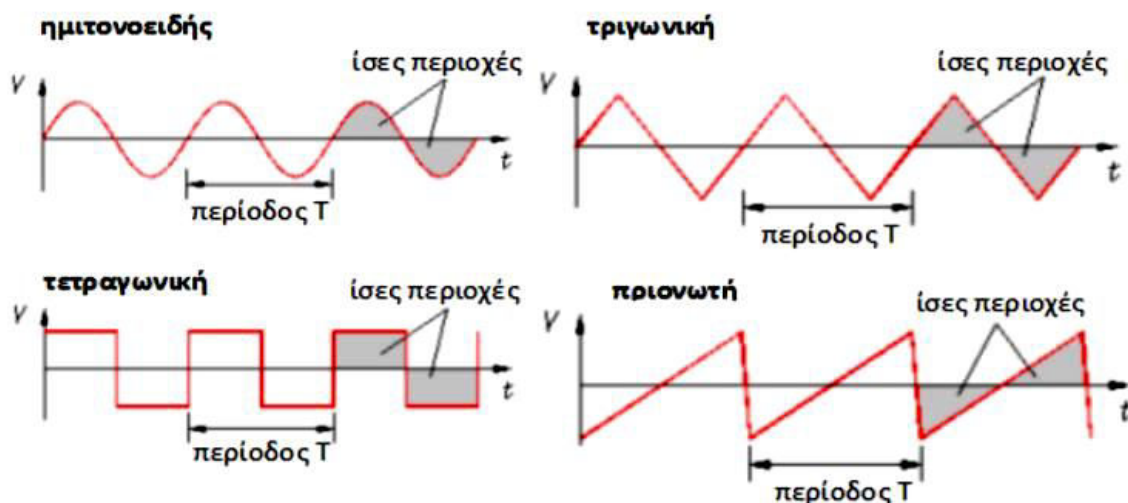
Το τετραγωνικό σήμα είναι περιοδικό, στο οποίο η τάση έχει δύο τιμές, την ελάχιστη (ή LOW level) και τη μέγιστη (ή HIGH level). Στη γραμμή λοιπόν εμφανίζεται αυτή η συνεχής εναλλαγή των δύο τιμών. Ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος του τετραγωνικού σήματος είναι το duty cycle, το οποίο δηλώνει το ποσοστό επί της % της διάρκειας του HIGH level σε σχέση με την περίοδο. Ένα τετραγωνικό σήμα δεν είναι τίποτα παραπάνω από ένα άθροισμα από ένα άπειρο αριθμό από ημιτονικά σήματα το καθένα με μια συχνότητα που είναι περικόττο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας. Αν κάνουμε ένα γράφημα με αυτά τα σήματα και τα προσθέταμε μεταξύ τους σημείο προς σημείο θα παίρναμε το τετραγωνικό σήμα.

2.2.3.4 Τριγωνικό Σήμα

Το σχήμα ενός τριγωνικού σήματος είναι πολύ κοντά στο σχήμα ενός ημιτονοειδούς σήματος σε αντίθεση με το τετραγωνικό σήμα, το οποίο διαφέρει αρκετά ειδικά στο ότι περιέχει ασυνέχειες δηλαδή χρονικές στιγμές στις οποίες η τιμή της τάσης μεταβάλλεται απότομα. Η παραγωγή τριγωνικού σήματος βασίζεται σε απλές εφαρμογές στη γραμμική φόρτιση - εκφόρτιση ενός πυκνωτή. Πρακτικά όμως, για να αλλάξει η λειτουργία από φόρτιση σε εκφόρτιση, θα πρέπει να υπάρχει ένα σήμα τετραγωνικό με μέτωπα στα σημεία αλλαγής της κατάστασης. Έτσι, τα κυκλώματα παραγωγής τριγωνικού σήματος συνοδεύονται απαραίτητα από παραγωγή τετραγωνικό

2.2.3.5 Πριονωτό σήμα

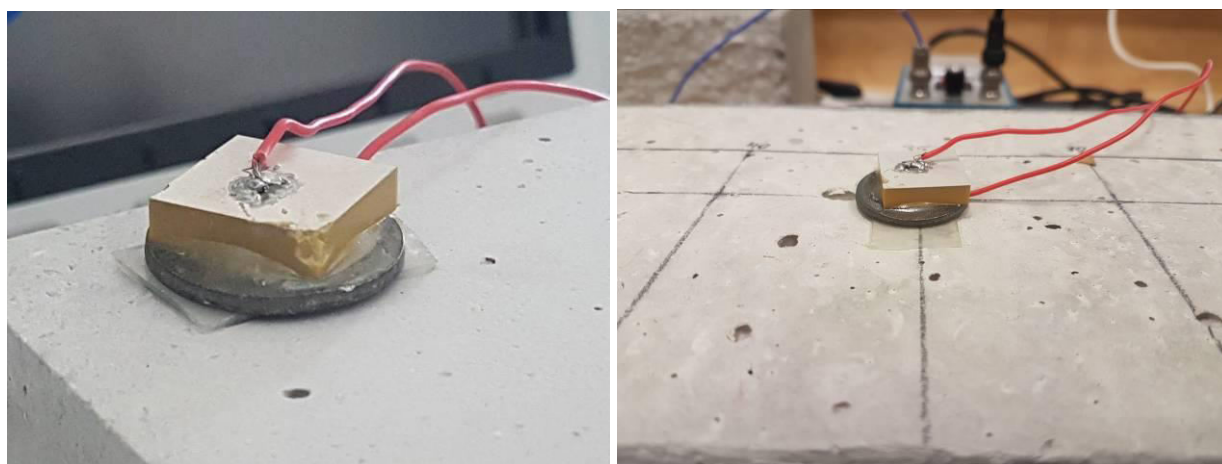
Θα μπορούσαμε να πούμε πως το πριονωτό σήμα είναι μία υποπερίπτωση του τριγωνικού σήματος καθώς η μόνη τους διαφορά είναι ότι το πριονωτό σήμα αφού φτάσει στην ανώτατη στάθμη τάσης αντί να μειώνεται μηδενίζεται [22].



Εικόνα 2.4 Είδη σημάτων

2.2.4 Πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης

Ο πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης συνδέεται με την γεννήτρια συχνοτήτων μέσω της οποίας δέχεται σταθερή τάση ημιτονοειδούς κύματος, για την ενεργοποίηση και δημιουργία της δεύτερης μηχανικής ταλάντωσης στο δοκίμιο. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο στο ΜΚΕ των κατασκευών καθώς τα συγκεκριμένα υλικά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία αισθητήρων ή και πομπών μηχανικών κυμάτων (διεγέρτες μηχανικής ταλάντωσης).



Εικόνα 2.4 Πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης

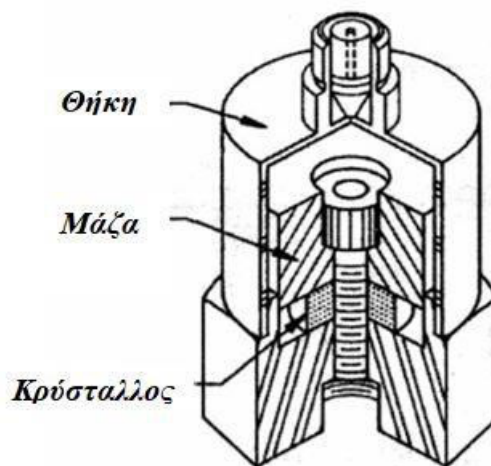
Μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και λόγω της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο πιεζοηλεκτρικό πλακίδιο το οποίο είναι συνδεδεμένο στο δοκίμιο, είναι δυνατό να εκπεμφθεί ένα μηχανικό κύμα με συχνότητα ίδια με εκείνη της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης. Κατά αυτό τον τρόπο η κατασκευή εξωθείται σε μια δεύτερη μηχανική ταλάντωση στο εσωτερικό της η οποία καταγράφεται από τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα ανίχνευσης της δυναμικής κίνησης.

2.2.5 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 2.5 Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας



Εικόνα 2.6 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 [26].

2.2.6 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 επεξεργασίας τους, είναι χρήσιμο να εκφραστούν οι μεταβλητές αυτές σε ψηφιακή μορφή το οποίο συντελείται μέσω του τελεστικού ενισχυτή [22]

Εικόνα 2.7 Εργαστηριακός εξοπλισμός ενισχυτή σήματος εξόδου

2.2.7 Παλμογράφος

Είναι το βασικότερο όργανο ενός εργαστηρίου ηλεκτρονικών. Χρησιμοποιείται για την παρατήρηση και τη μέτρηση ορισμένων χαρακτηριστικών μεγεθών ενός ηλεκτρονικού ή 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

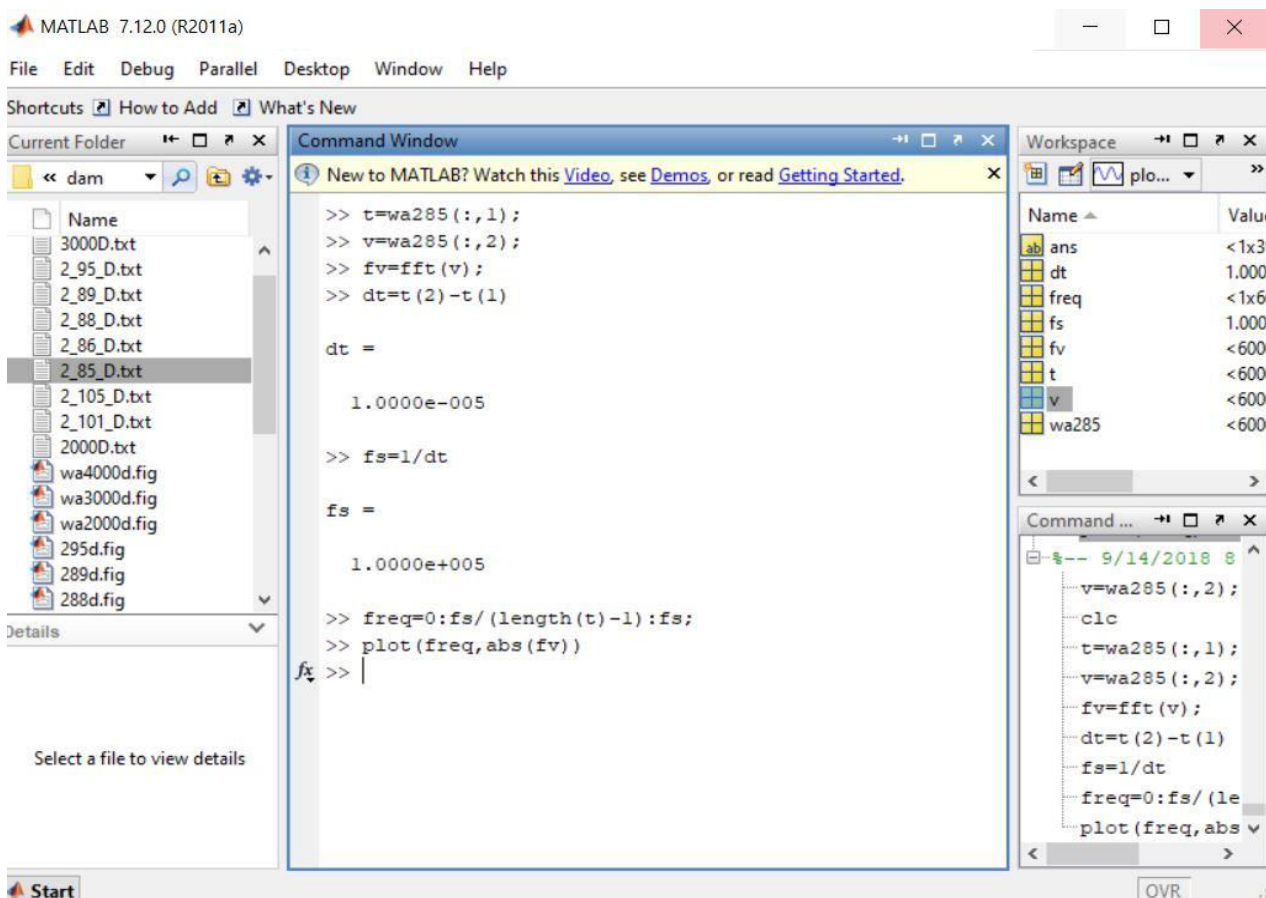
Ο παλμογράφος συνδέεται μέσω του ενισχυτή με τον πιεζοηλεκτρικό καταγραφέα για την λήψη των δεδομένων και την μετατροπή τους από ψηφιακή μορφή σε αναλογική. Ο παλμογράφος απεικονίζει την ιστορία της δομικής απόκρισης του υλικού για την διεξαγωγή και μελέτη των συμπερασμάτων ενώ ταυτόχρονα έχει την δυνατότητα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



Εικόνα 2.8 Εργαστηριακός εξοπλισμός παλμογράφου

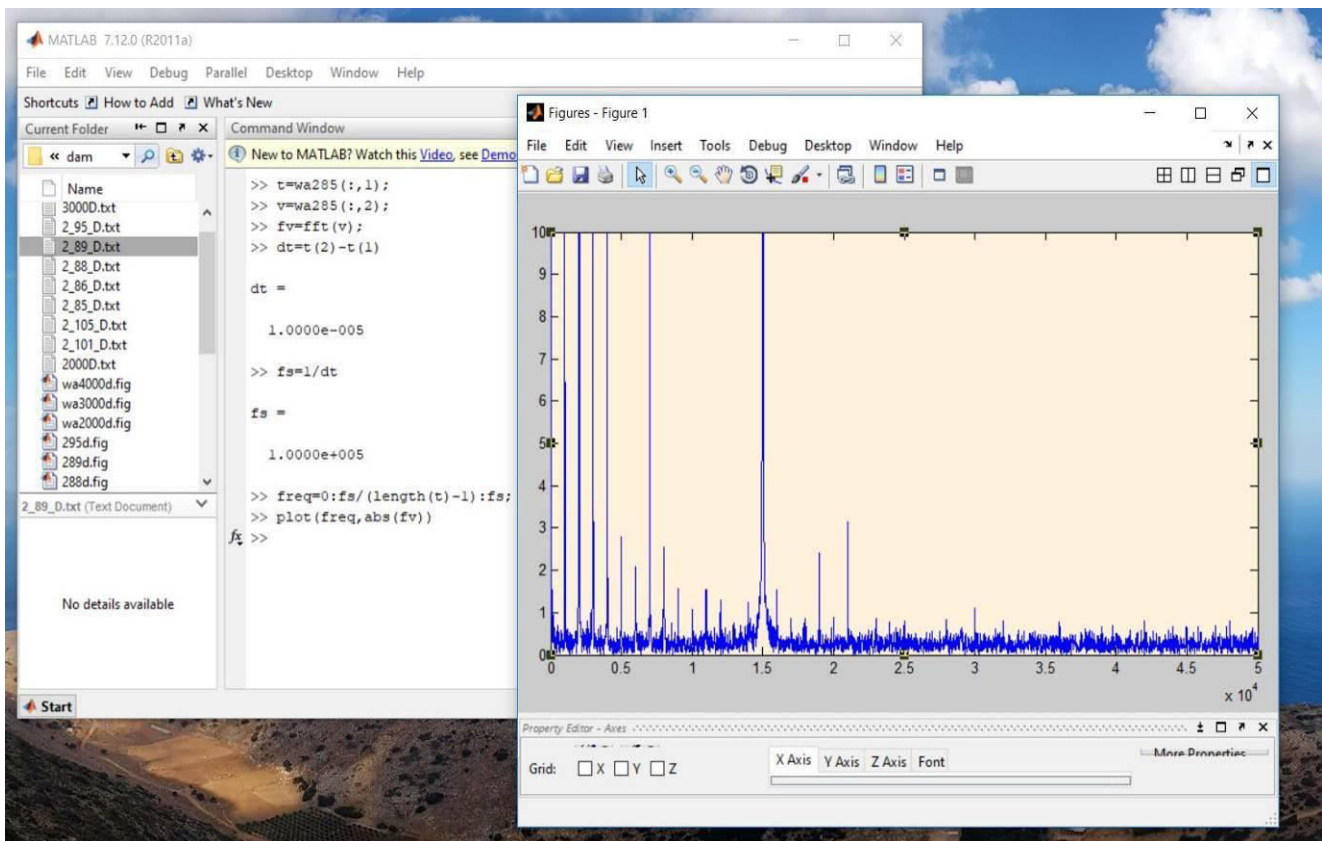
2.3 Χρήση πλατφόρμας MATLAB

Η επεξεργασία των μετρήσεων για την απεικόνισή 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 2.9 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 2.10 Παραγωγή των γραφημάτων των συχνοτήτων στο πεδίο του φάσματος μέσω του λογισμικού Matlab

2.4 Μετασχηματισμός Φουριέ [27]

Ο όρος Μετασχηματισμός Φουριέ (ΜΦ) αναφέρεται σε μία αυστηρώς ορισμένη μαθηματική διεργασία η οποία αποσυνθέτει μία συνάρτηση σε άθροισμα απείρων περιοδικών ημιτονοειδών και συνημιτονοειδών συναρτήσεων. Το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού είναι μία νέα συνάρτηση με διαφορετικό πεδίο ορισμού, επίσης γνωστή ως Μετασχηματισμός Φουριέ ή ως φάσμα, η οποία περιγράφει το κατά πόσο συμμετέχει κάθε

στοιχειώδεις ημίτονο στον σχηματισμό της αρχικής συνάρτησης. Η σειρά Φουριέ εφαρμόζεται για περιοδική συνάρτηση f και δίνει ως αποτέλεσμα μία νέα συνάρτηση με διακριτό πεδίο τιμών αντί για συνεχές (δηλαδή πεδίο τιμών σε μία σειρά Φουριέ είναι οι φυσικοί αριθμοί αντί για τους πραγματικούς).

Για συναρτήσεις διακριτής ανεξάρτητης μεταβλητής, όπου οι φυσικοί αριθμοί είναι το πεδίο ορισμού της f , υπάρχουν οι διακριτές παραλλαγές του ΜΦ: ο Μετασχηματισμός Φουριέ Διακριτού Χρόνου (ΜΦΔΧ), με συνεχές πεδίο τιμών και κατάλληλος για απεριοδικές συναρτήσεις, και ο Διακριτός Μετασχηματισμός Φουριέ (ΔΜΦ ή DFT), με διακριτό πεδίο τιμών και κατάλληλος για περιοδικές συναρτήσεις.

Για καθεμία από αυτές τις διεργασίες υπάρχει και ο αντίστροφος μετασχηματισμός, ο οποίος δέχεται ως είσοδο το φάσμα και δίνει ως έξοδο την αρχική συνάρτηση f . Όλοι οι τύποι μετασχηματισμών της ανάλυσης Φουριέ ανάγονται στον παρόμοιου σκοπού Μετασχηματισμό Λαπλάς και αποτελούν περιπτώσεις ολοκληρωτικού μετασχηματισμού. [27]

2.4.1 Εφαρμογές μετασχηματισμού Φουριέ [27]

Η ανάλυση Φουριέ έχει πολλές επιστημονικές εφαρμογές όπως στη φυσική, στην επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων, στη θεωρία αριθμών, στη συνδυαστική ανάλυση, στην επεξεργασία σήματος, στην επεξεργασία εικόνας, στη στατιστική, στην κρυπτογραφία, στην αριθμητική ανάλυση, στην ακουστική, στην ωκεανογραφία, στην οπτική και σε πολλούς άλλους τομείς.

2.4.2 Ερμηνεία από πλευράς χρόνου και συχνότητας [27]

Στην επεξεργασία σήματος ο μετασχηματισμός Φουριέ συχνά παίρνει μία χρονοσειρά ή μια συνάρτηση συνεχούς χρόνου και την αντιστοιχεί σ' ένα φάσμα συχνοτήτων. Δηλαδή, μεταφέρει μια συνάρτηση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων. Πρόκειται για μία αποσύνθεση της συνάρτησης σε ημιτονοειδείς διαφορετικών συχνοτήτων. Στην περίπτωση μιας σειράς Φουριέ ή ενός διακριτού μετασχηματισμού Φουριέ, οι ημιτονοειδείς είναι αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας της συνάρτησης η οποία αναλύεται.

Όταν η συνάρτηση f είναι μία συνάρτηση χρόνου και αναπαριστά ένα φυσικό σήμα, ο μετασχηματισμός έχει μία πρότυπη ερμηνεία όπως το φάσμα συχνοτήτων του σήματος. Το μέγεθος της συνάρτησης F που προκύπτει στην συχνότητα ω αναπαριστά το πλάτος μιας συνιστώσας της συχνότητας της οποίας η αρχική φάση δίνεται από τη φάση της F .

Οι μετασχηματισμοί Φουριέ δεν περιορίζονται σε συναρτήσεις χρόνου και χρονικές συχνότητες. Μπορούν εξίσου να εφαρμοστούν για την ανάλυση χωρικών συχνοτήτων και μάλιστα για σχεδόν κάθε πεδίο μιας συνάρτησης. Αυτό δικαιολογεί τη χρήση τους σε κλάδους τόσο διαφορετικούς όσο η επεξεργασία εικόνας, η θερμική αγωγιμότητα και ο αυτόματος έλεγχος. [27]

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ**3.1 Εισαγωγή**

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 [20].

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.

3.2 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 επεξεργασίας 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 [25]:

- 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 Εύρεση ιδιοσυχνότητας μέσω παρατήρησης στο πεδίο του φάσματος

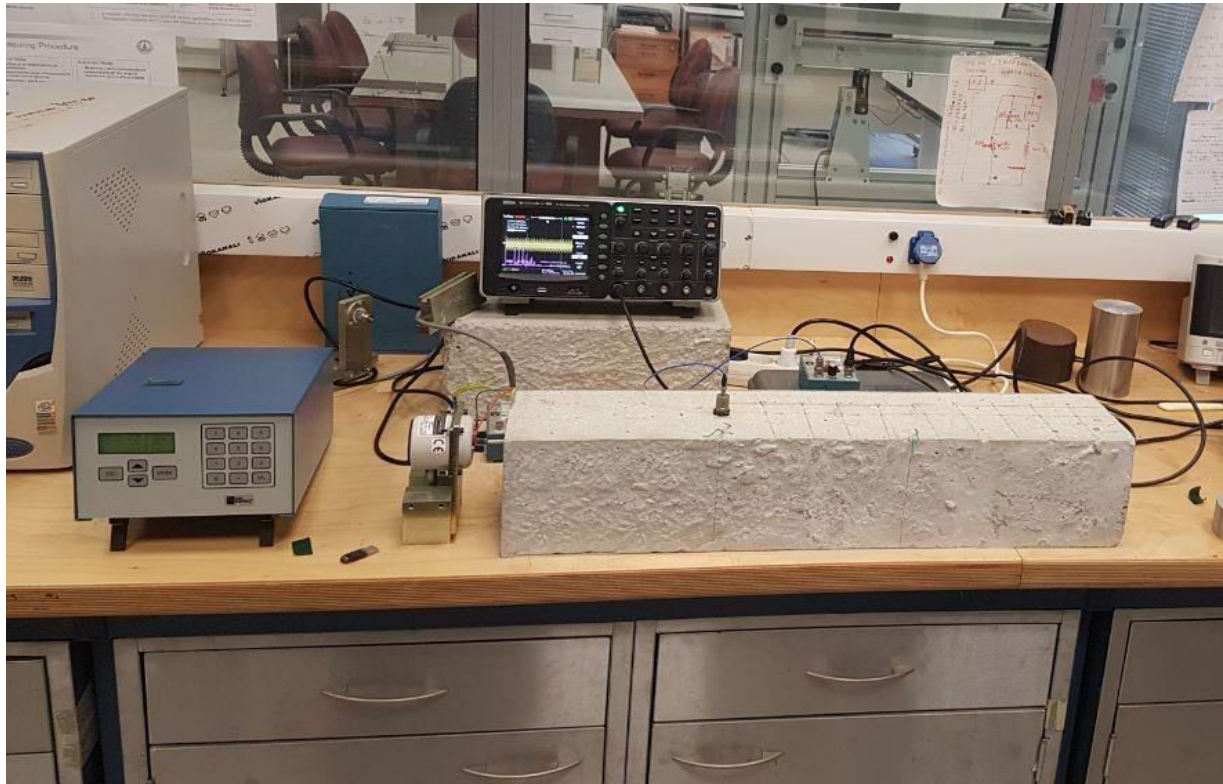
Η μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός υπό παρακολούθηση δομικού συστήματος και των διαδιδόμενων στο εσωτερικού του μηχανικών κυμάτων, είναι δυνατό να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τα μηχανικά του χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά ενός μηχανικού κύματος, το οποίο εκπέμπεται από μια πηγή μηχανικής 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, καθόσον 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. [25].

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.

3.4 Πειραματική διαδικασία

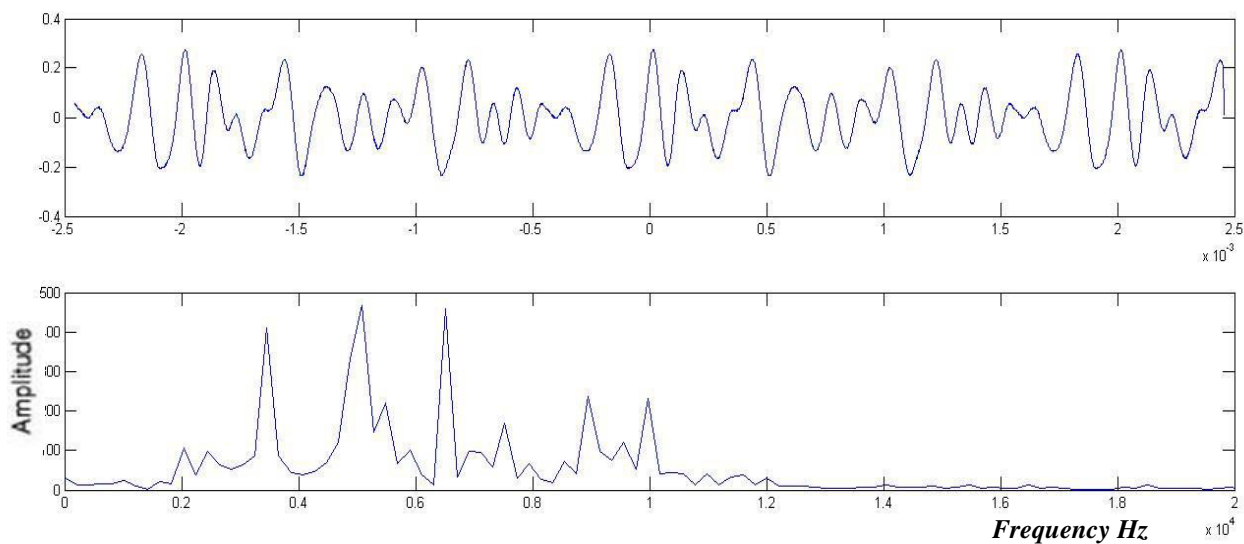
Για την πειραματική διαδικασία επιλέχθηκε δοκίμιο σκυροδέματος στο οποίο δημιουργείται μηχανική ταλάντωση μέσω εξωτερικού διεγέρτη. Ο εξωτερικός διεγέρτης είναι συνδεδεμένος με γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος για την ενεργοποίηση δόνησης και την δημιουργία της μηχανικής ταλάντωσης στο υλικό. Κατά αυτόν 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.



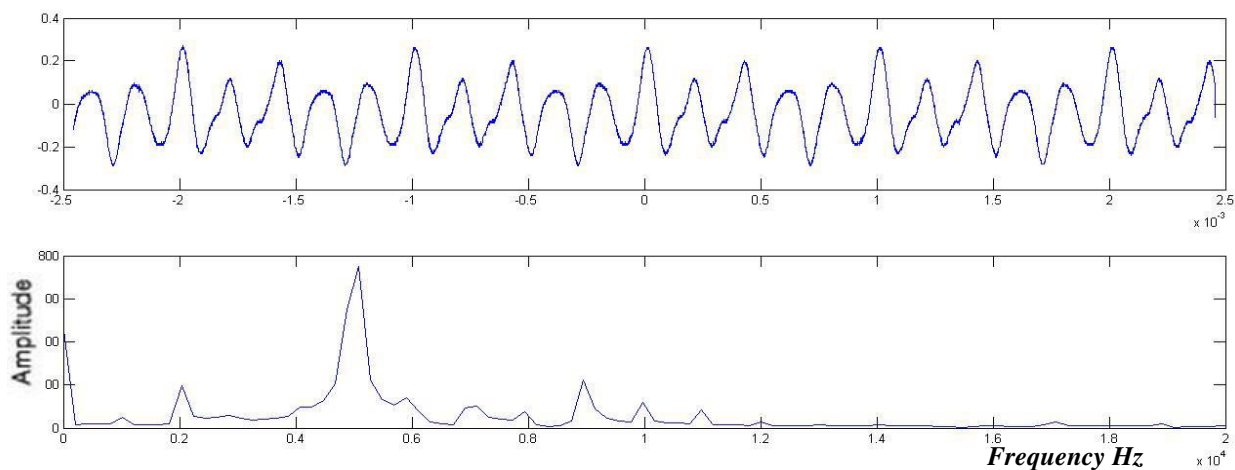
Εικόνα 3.1 Διάταξη πειραματικού εξοπλισμού για την δημιουργία διέγερσης χαμηλής συχνότητας και την καταγραφή της χρονοϊστορίας

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.

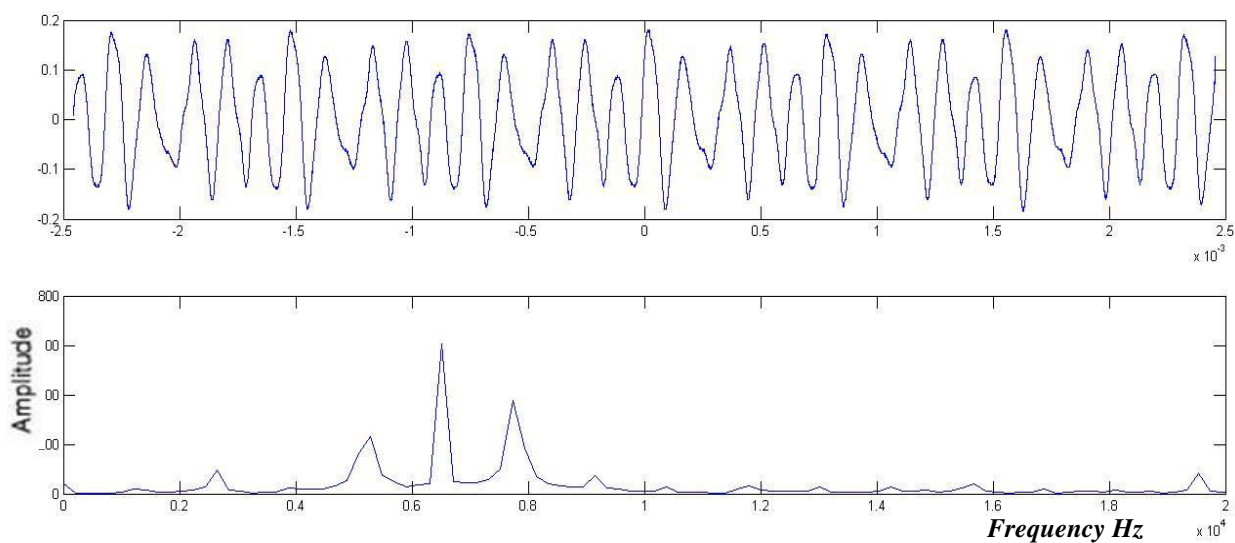
Με την επεξεργασία των καταγεγραμμένων μετρήσεων μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Φουριέ (Fast Fourier Transform, FFT) προσδιορίζονται στο πεδίο συχνοτήτων οι κορυφές του κανονικοποιημένου φάσματος. Για την εκτίμηση της ιδιοσυχνότητας του δοκιμίου η πειραματική διαδικασία δημιουργίας μηχανικής ταλάντωσης 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.



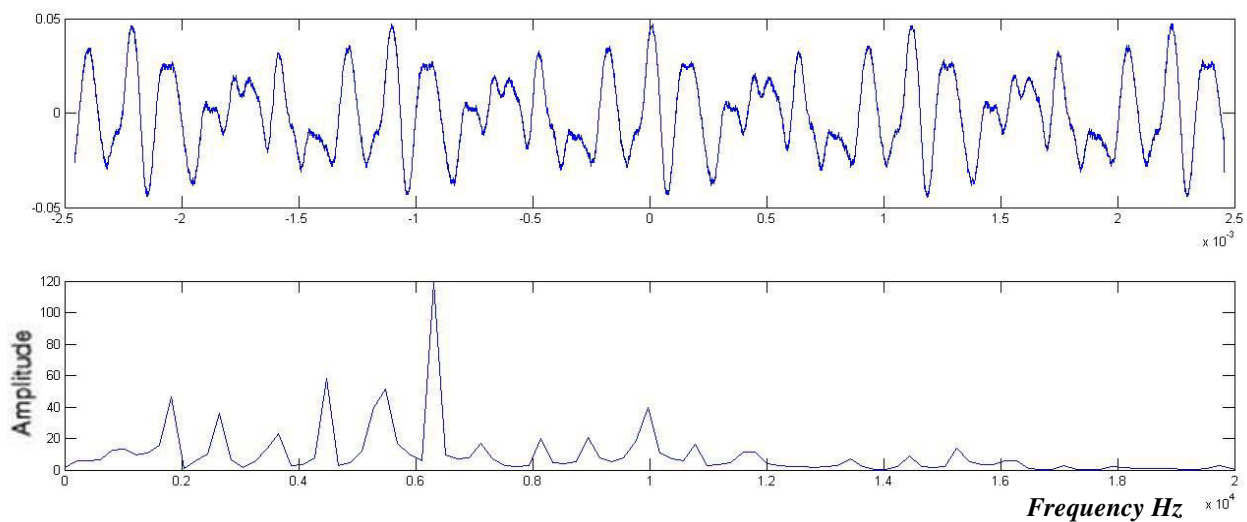
Εικόνα 3.2 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **500,00 Hz**



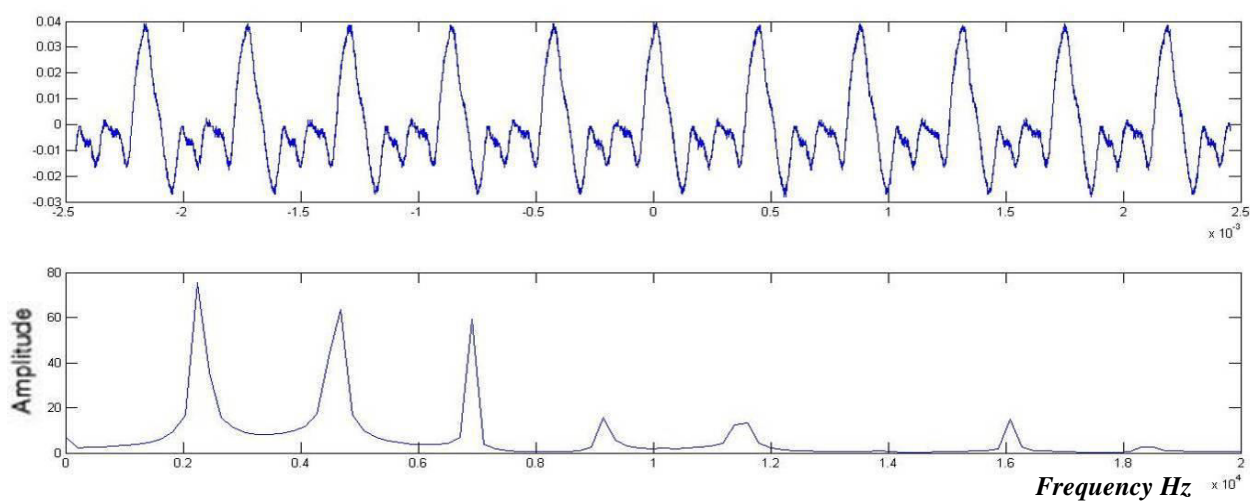
Εικόνα 3.3 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **1000,00 Hz**



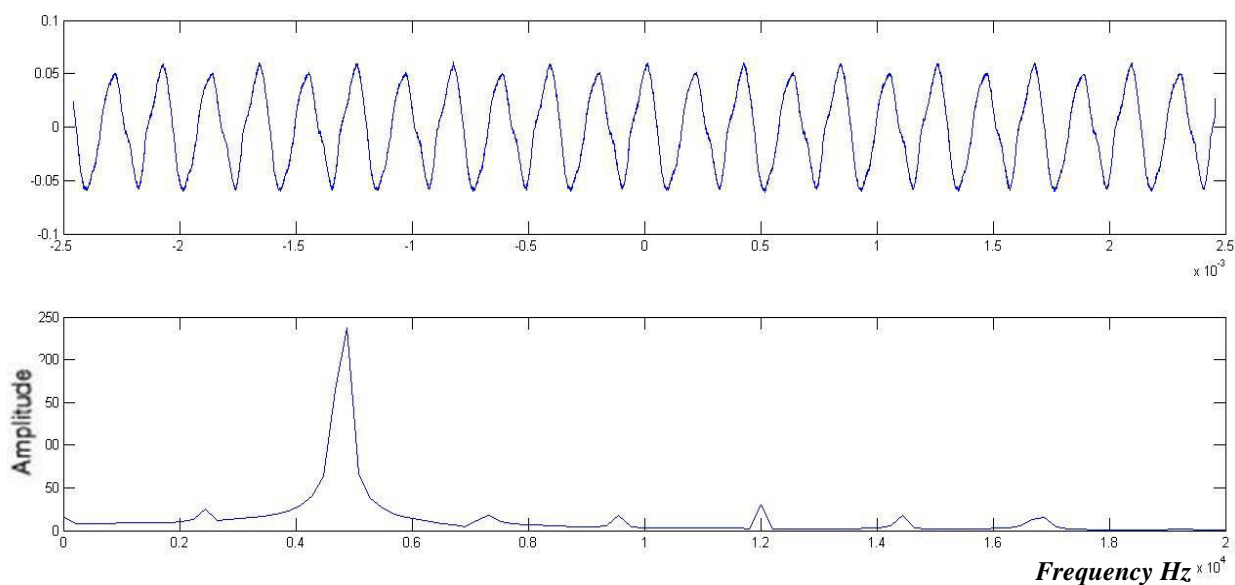
Εικόνα 3.4 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **1300,00 Hz**



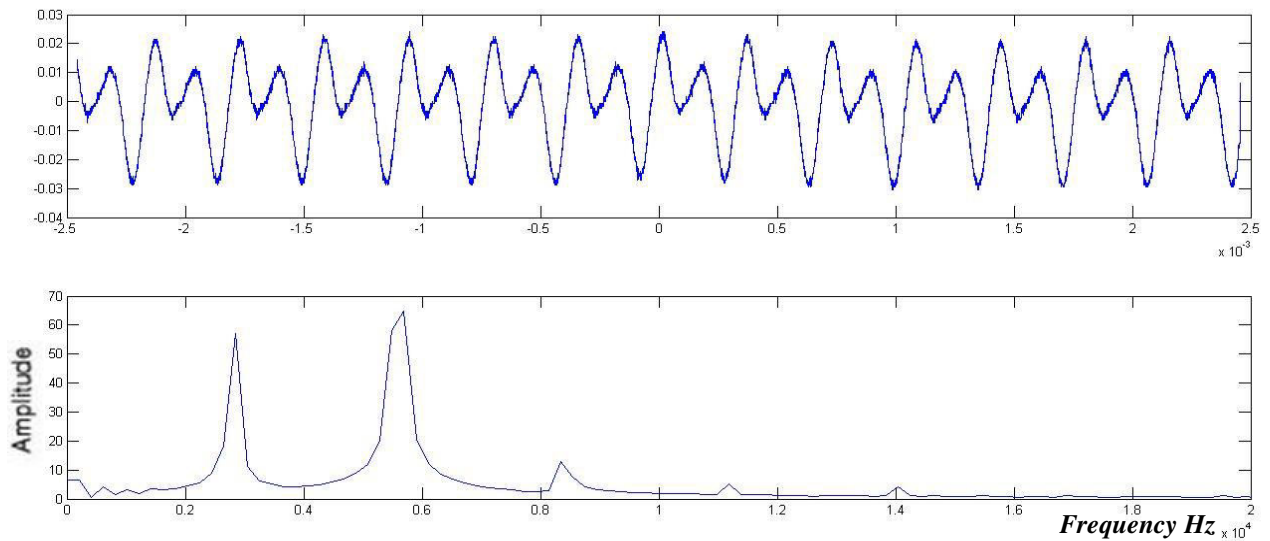
Εικόνα 3.5 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **1800,00 Hz**



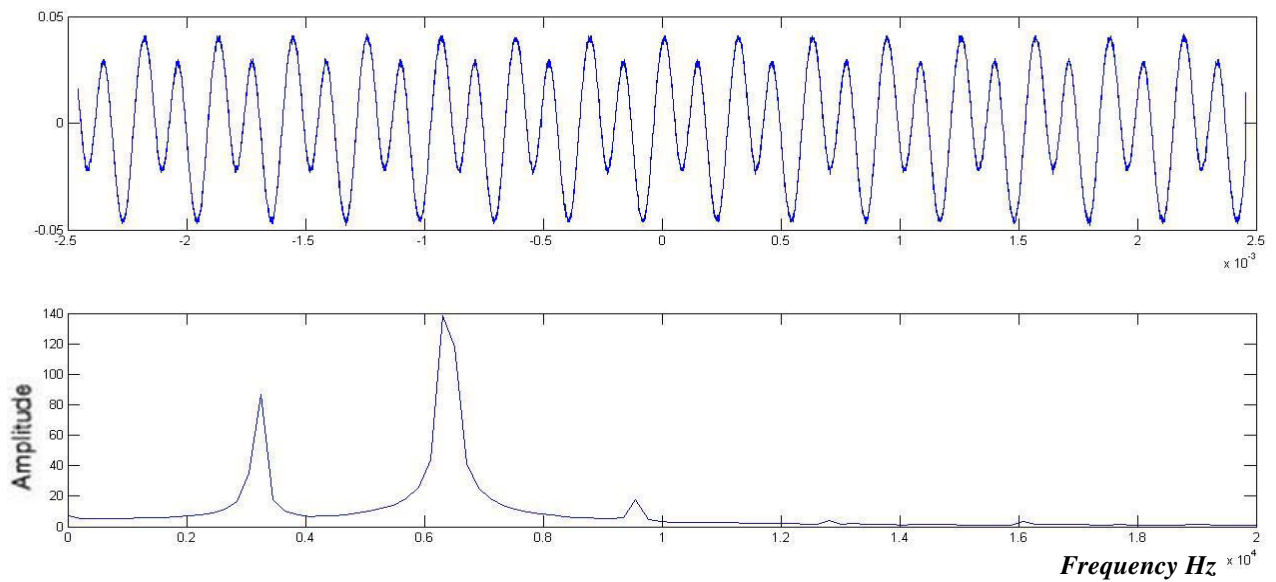
Εικόνα 3.6 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **2300,00 Hz**



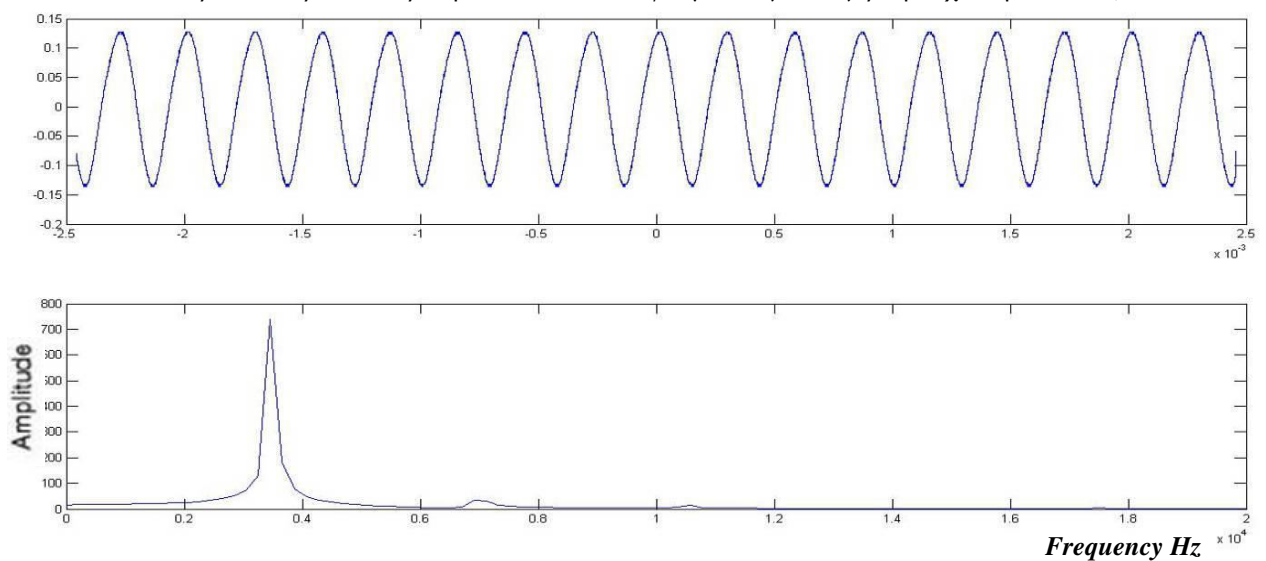
Εικόνα 3.7 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **2400,00 Hz**



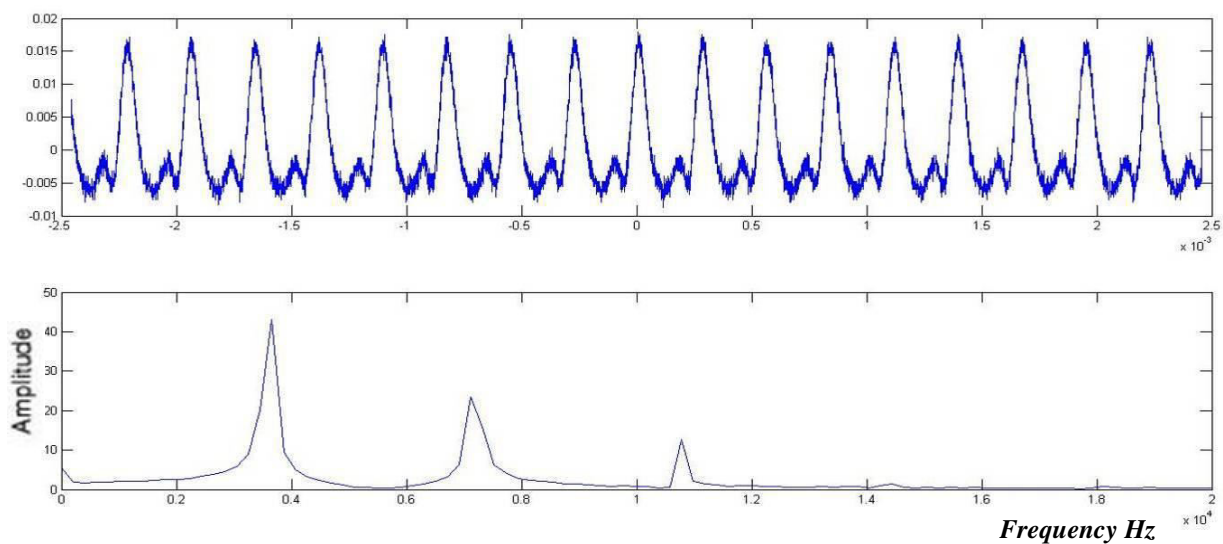
Εικόνα 3.8 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **2800,00 Hz**



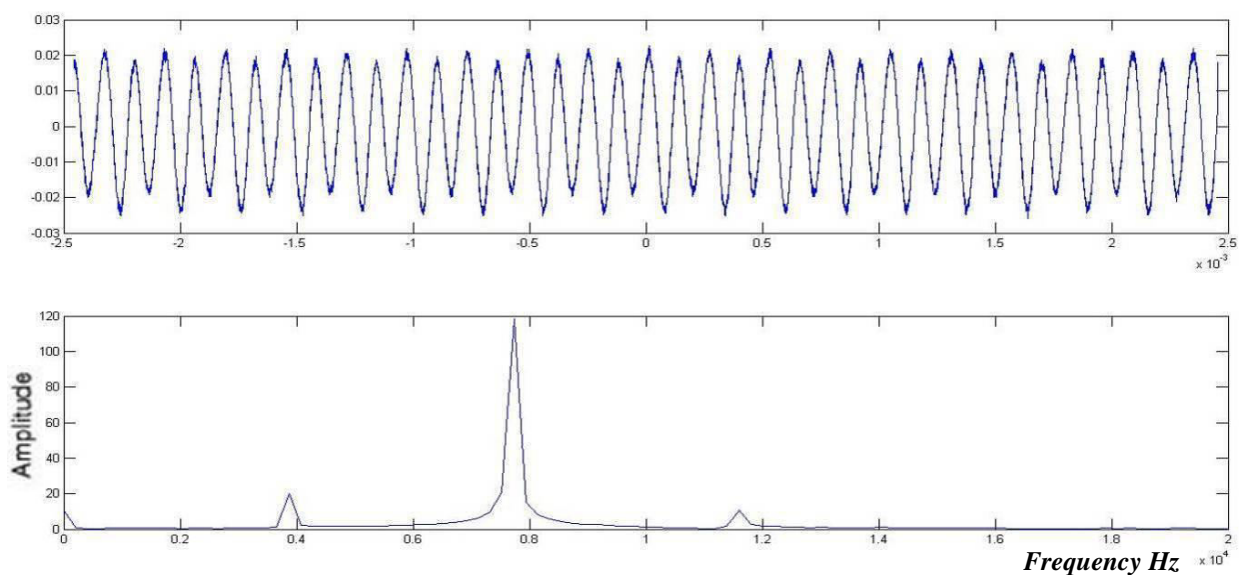
Εικόνα 3.9 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **3200,00 Hz**



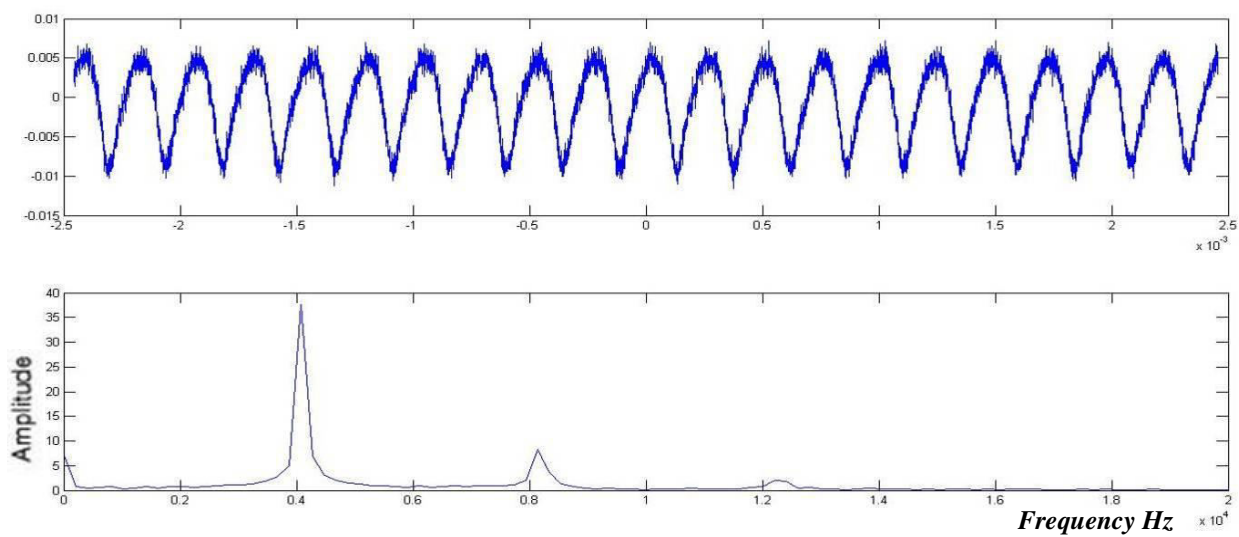
Εικόνα 3.10 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **3500,00 Hz**



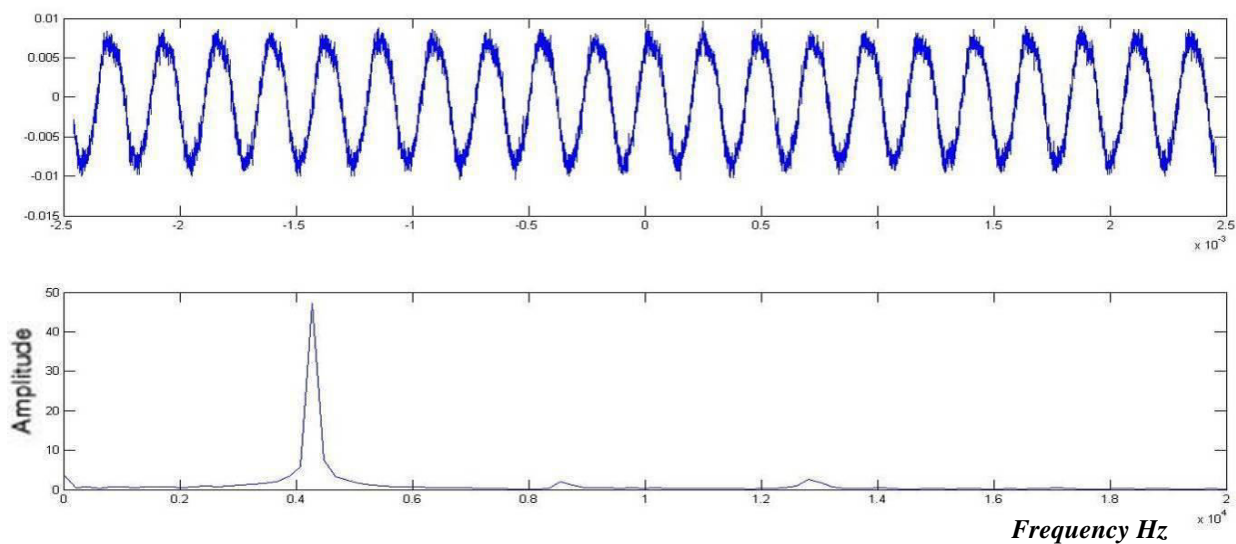
*Εικόνα 3.11 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **3600,00 Hz***



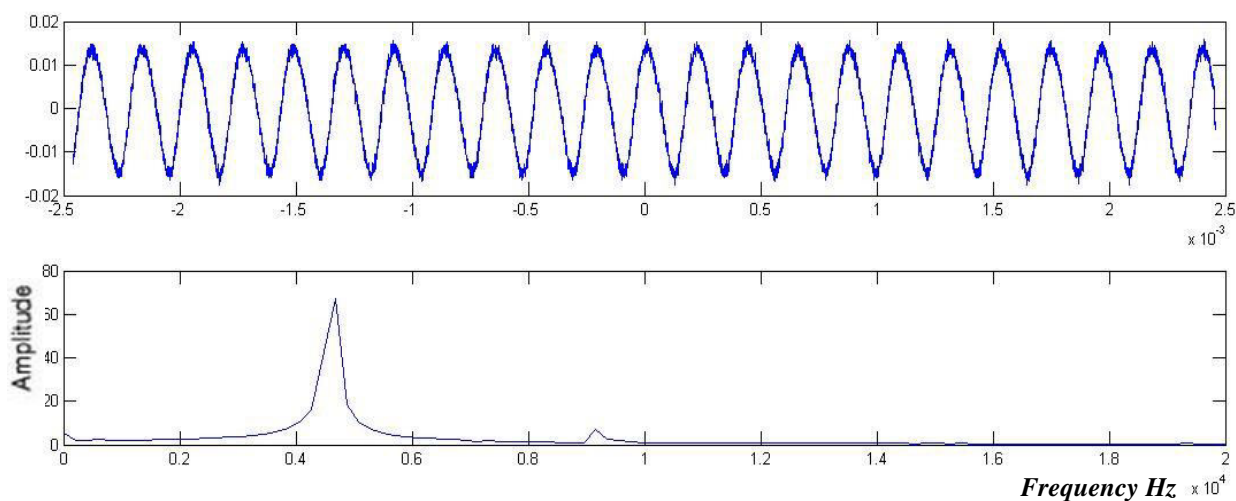
*Εικόνα 3.12 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **3850,00 kHz***



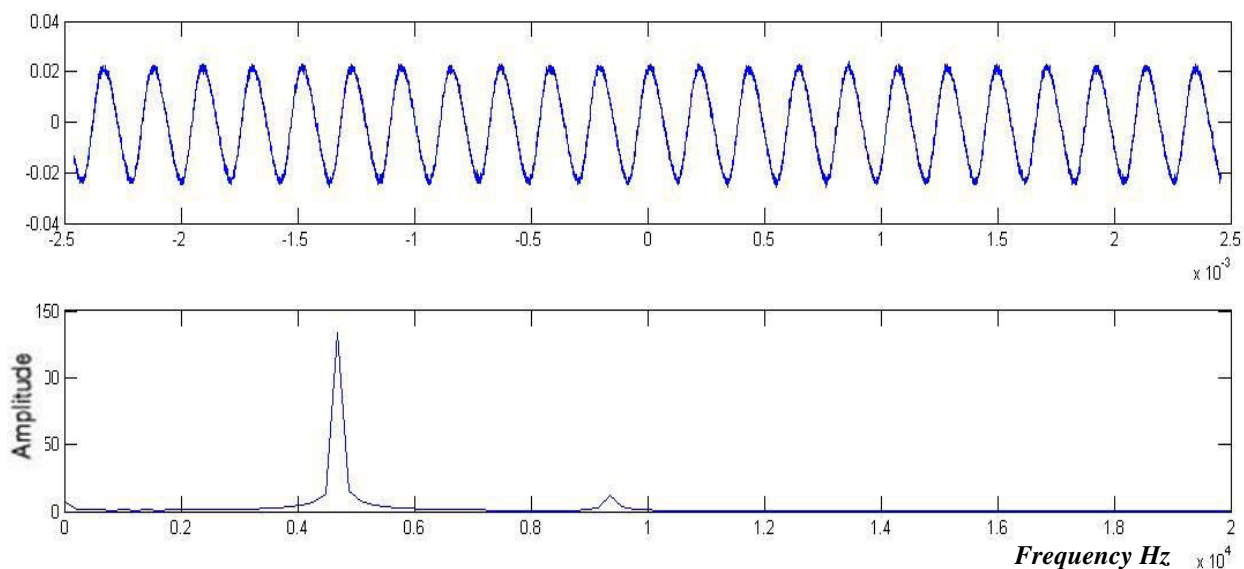
*Εικόνα 3.13 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **4100,00 Hz***



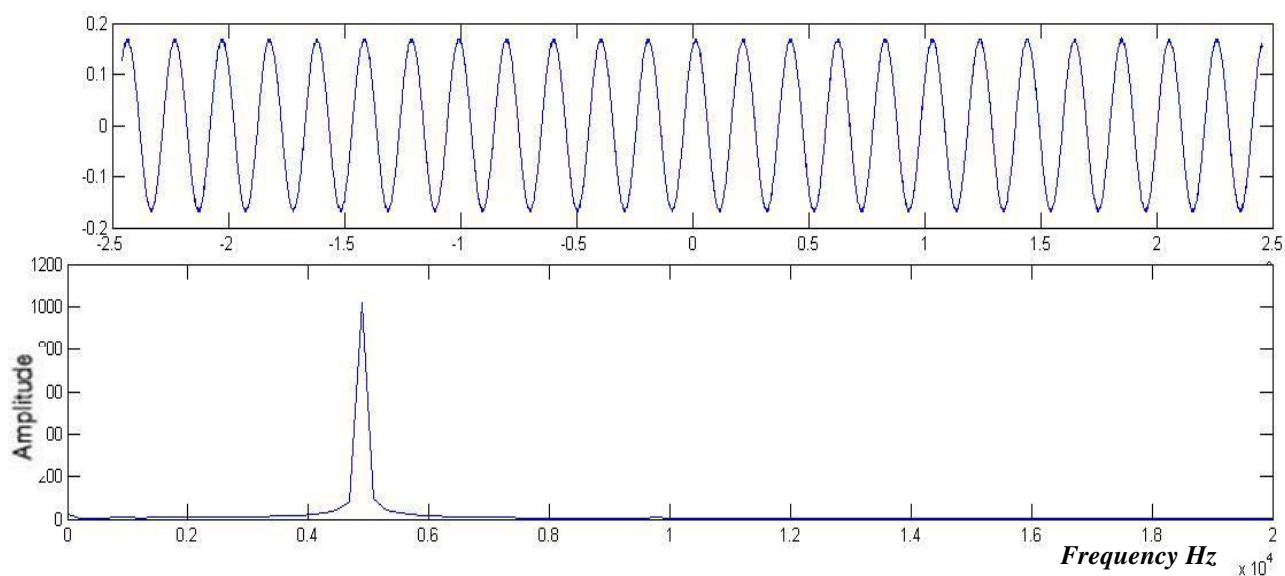
Εικόνα 3.14 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **4300,00 Hz**



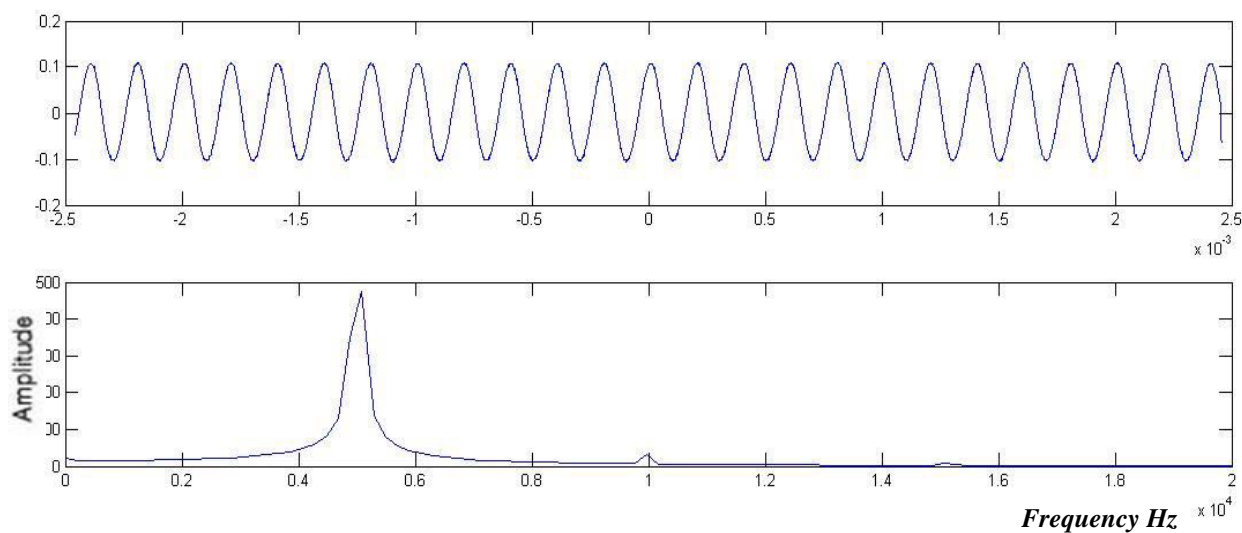
Εικόνα 3.15 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **4600,00 Hz**



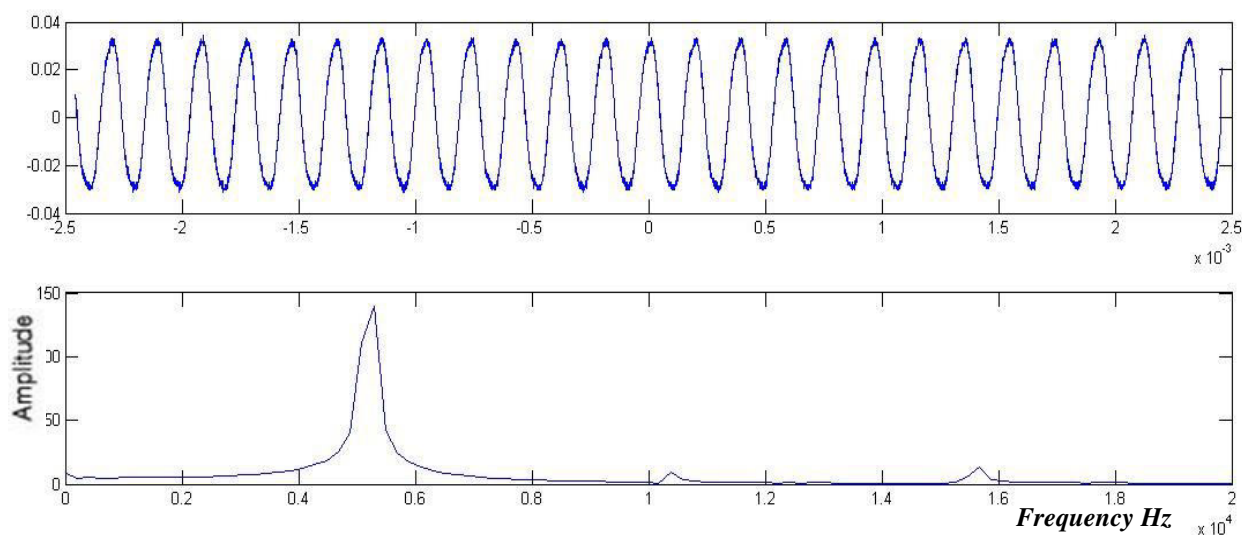
Εικόνα 3.16 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **4700,00 Hz**



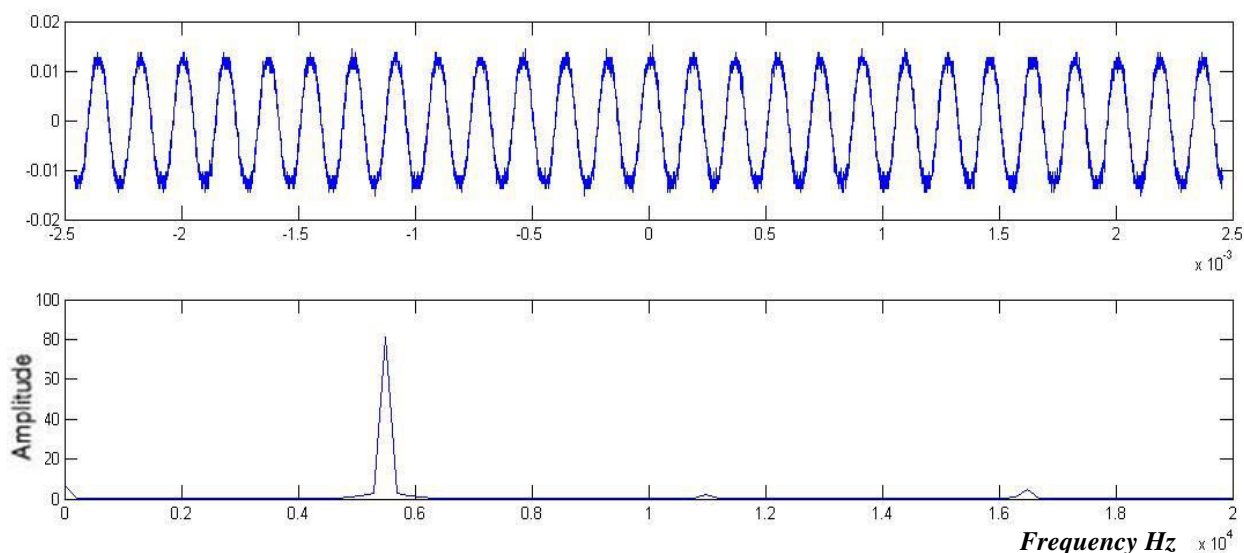
Εικόνα 3.17 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **4900,00 Hz**



Εικόνα 3.18 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **5000,00 Hz**



Εικόνα 3.19 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **5200,00 Hz**



Εικόνα 3.20 Χρονοϊστορία απόκρισης, και πεδίο του φάσματος για διέγερση συχνότητας **5500,00 Hz**

3.5 Συμπεράσματα

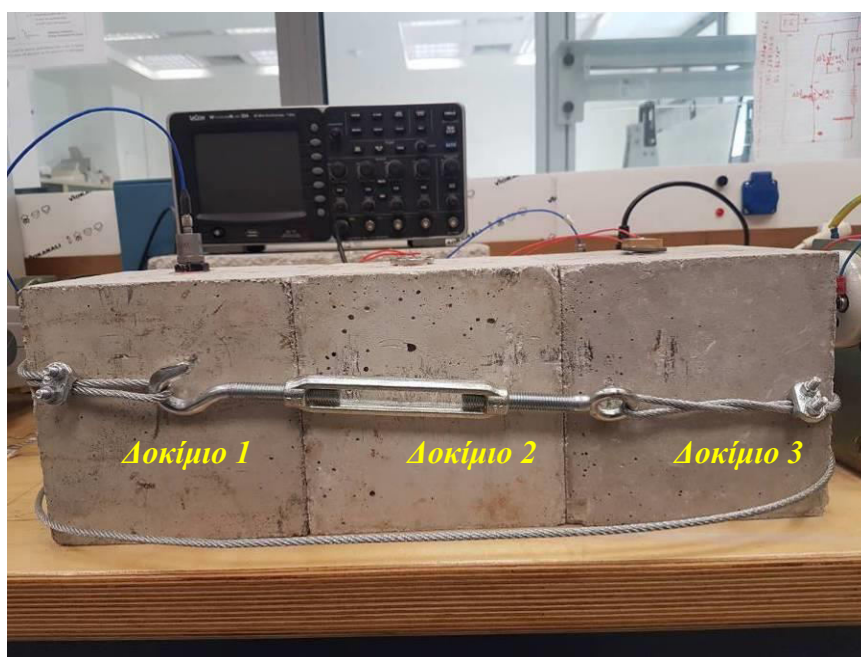
Η μέθοδος εύρεσης της ιδιοσυχνότητας όπως αναφέρθηκε, βασίζεται στην παρατήρηση των κορυφών του φάσματος. Η τιμή της συχνότητας γύρω από την οποία συμβαίνει η ακραία τιμή είναι συνήθως και η ιδιοσυχνότητα του συστήματος.

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.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ VAM ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ**4.1 Εισαγωγή – Περιγραφή διαδικασίας δημιουργίας μηχανικών ταλαντώσεων**

Στο κεφάλαιο διερευνάται η εφαρμογή της μεθόδου μη καταστροφικού ελέγχου της δονητικής ακουστικής μεθόδου η οποία βασίζεται στο φαινόμενο επάλληλης διαμόρφωσης μεταξύ δύο κυμάτων διέγερσης, ενός βραδέως ανεπτυγμένου κύματος μεγέθυνσης και ενός κύματος υψηλής συχνότητας διεισδυτικής ανίχνευσης. Οι δονητικό ακουστικές δοκιμές της επάλληλης διαμόρφωσης πραγματοποιήθηκαν αρχικά επί του μη κατεστραμμένου δείγματος, και στη συνέχεια επανελήφθησαν μετά την δημιουργία σφάλματος λόγω μεταβολής της δυσκαμψίας στο μέσο διάδοσης. Όπως διαπιστώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μέθοδος συνίσταται στον υπολογισμό των μετασχηματισμών Φουριέ, και στην εξαγωγή των συχνοτήτων των κορυφών του φάσματος. Μέσα από τα φάσματα απόκρισης για τα διαφορετικά ιδιομορφικά χαρακτηριστικά του ιδίου στοιχείου παρατηρούμε τις θεμελιώδεις διαφορές, προκειμένου να διεξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα λόγω της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων του.

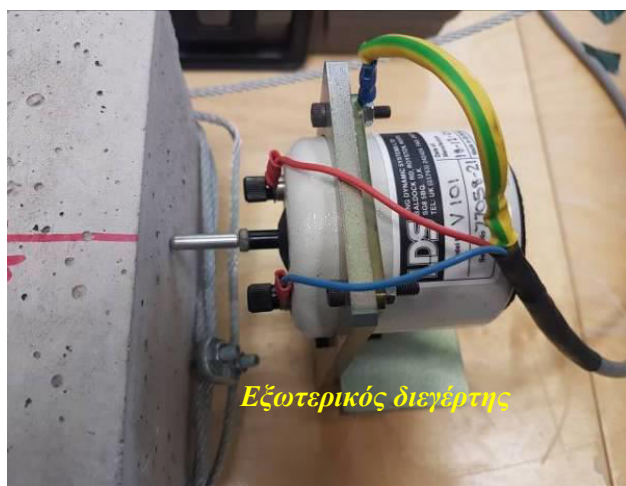
Για διεξαγωγή του παραπάνω σκοπού επιλέγονται τρία δοκίμια σκυροδέματος τα οποία ενώνονται μεταξύ τους (όσο το δυνατόν πιο ισχυρά). Η συνδεσμολογία πραγματοποιείται με την τοποθέτηση συρματόσχοινου και την περίσφιξη από γάντζο και άλλους μεταλλικούς συνδέσμους. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η δημιουργία διεπιφανιών μεταξύ των δοκιμίων, ενώ επιτυγχάνεται η διάδοση των μηχανικών κυμάτων στο εσωτερικό τους σαν να πρόκειται για ένα ομοιογενές σώμα.



Εικόνα 4.1 Περίδεση δοκιμίων σκυροδέματος για διεξαγωγή πειράματος

Για τη δημιουργία ενός κύματος απαιτείται μια πηγή διαταραχής ή πηγή του κύματος, δηλαδή η αιτία που θα προκαλέσει τη διαταραχή, καθώς και ένα υλικό (μέσο) στο οποίο κάθε μόριο αλληλεπιδρά με τα γειτονικά του (ελαστικό μέσο). Τα κύματα που διαδίδονται σε ένα ελαστικό μέσο ονομάζονται μηχανικά κύματα. Για να προκαλέσουμε την κυματική διαταραχή πρέπει να δώσουμε ενέργεια σε κάποια περιοχή. Η ενέργεια αυτή μεταφέρεται με το κύμα σε άλλες περιοχές μεταφέροντας ενέργεια και ορμή από το ένα σημείο του μέσου στο άλλο, όχι όμως και ύλη.

Αρχικά, στο δοκίμιο γίνεται χρήση εξωτερικού διεγέρτη μηχανικών ταλαντώσεων (shaker actuator) ο οποίος είναι συνδεδεμένος με γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος για την ενεργοποίηση κρούσης και την δημιουργία μηχανικής ταλάντωσης. Μέσω της άσκησης μηχανικός πίεσης, δημιουργείται μια διέγερση ενός βραδέως ανεπτυγμένου (χαμηλής συχνότητας) κύματος μεγέθυνσης (pumping wave).

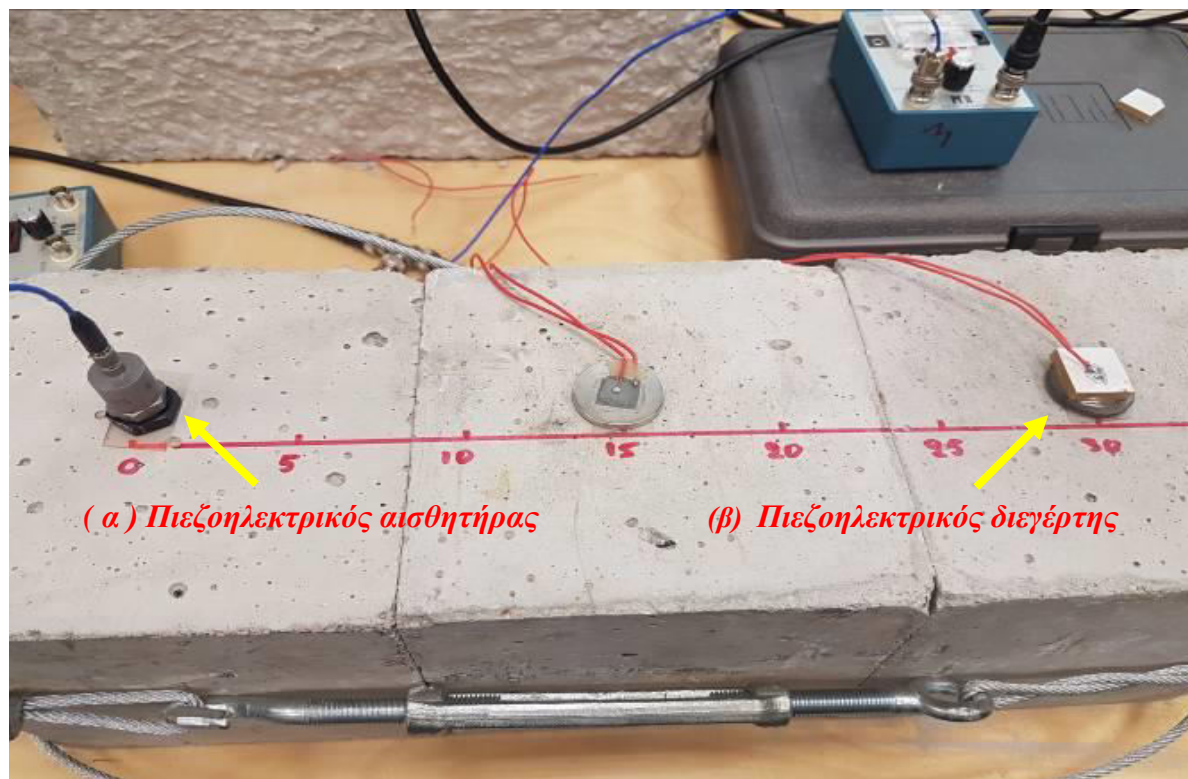


Εικόνα 4.2 Εξωτερικός διεγέρτης για δημιουργία χαμηλής συχνότητας κύματος μεγέθυνσης

Η δεύτερη διέγερση πραγματοποιείται με την σύνδεση του δοκιμίου με γεννήτρια συχνοτήτων και πιεζοηλεκτρικό διεγέρτη. Η δημιουργία της ταλάντωσης στο υλικό επιτυγχάνεται μέσω διοχέτευσης ημιτονοειδούς ρεύματος από την γεννήτρια συχνοτήτων ενεργοποιώντας κατά αυτόν τον τρόπο το πιεζοηλεκτρικό διεγέρτη, από τον οποίο είναι δυνατό να εκπεμφθεί ένα μηχανικό κύμα με συχνότητα ίδια με εκείνη της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης. Με αυτή την διαδικασία επιτυγχάνεται μια δεύτερη διέγερση διεισδυτικής ανίχνευσης υψηλότερης συχνότητας η οποία αποκαλείται και probing wave. Η απόκριση του δομικού συστήματος λόγω των κυμάτων διέγερσης λαμβάνεται από τον πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιογράφο ο οποίος έχει συνδεθεί με το ενισχυτή διαμόρφωσης σήματος και από εκεί πραγματοποιείται μεταφορά των δεδομένων στον παλμογράφο όπου καταγράφεται η χρονοϊστορία της ταλάντωσης.

Μέσω της δημιουργίας των παραπάνω ταλαντώσεων στο δοκίμιο, και της μετατροπής των δεδομένων μέσω του παλμογράφου από ψηφιακά σε αναλογικά μπορούν να διερευνηθούν προσεγγιστικά οι σημαντικότερες ιδιοσυχνότητες & ιδιομορφές της υφιστάμενης κατασκευής οι οποίες εμφανίζονται με την μορφή θεμελιώδους αρμόνικων στο φάσμα του πεδίου των

συχνοτήτων όπως διαπιστώθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η αναγνώριση των θεμελιωδών συχνοτήτων - ιδιομορφών μιας κατασκευής (στο πεδίο του φάσματος) και η σύγκριση αυτών όταν μεταβάλλεται η δυσκαμψία του δομικού υλικού συντελεί στην παρακολούθηση της «δομικής ακεραιότητας της κατασκευής».



Εικόνα 4.3 «Ευφυή» πιεζοηλεκτρικά υλικά α) για καταγραφή β) για δημιουργία ταλάντωσης

4.2 Μεθοδολογία του πειράματος (πειραματικά δεδομένα)

Χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία που περιγράφεται στο προηγούμενη παράγραφο, ο πρωταρχικός στόχος στο υπό εξέταση δοκίμιο είναι να αποδείξει την απουσία πλευρικών ζωνών σε μια υγιή περίπτωση, και αντίστοιχα την ύπαρξη και εμφάνιση τους, γύρω από τις θεμελιώδεις συχνότητες του κύματος μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης στην περίπτωση που το δοκίμιο έχει υποστεί ζημιά λόγω μεταβολής της δυσκαμψίας του ή των δυναμικών χαρακτηριστικών του.

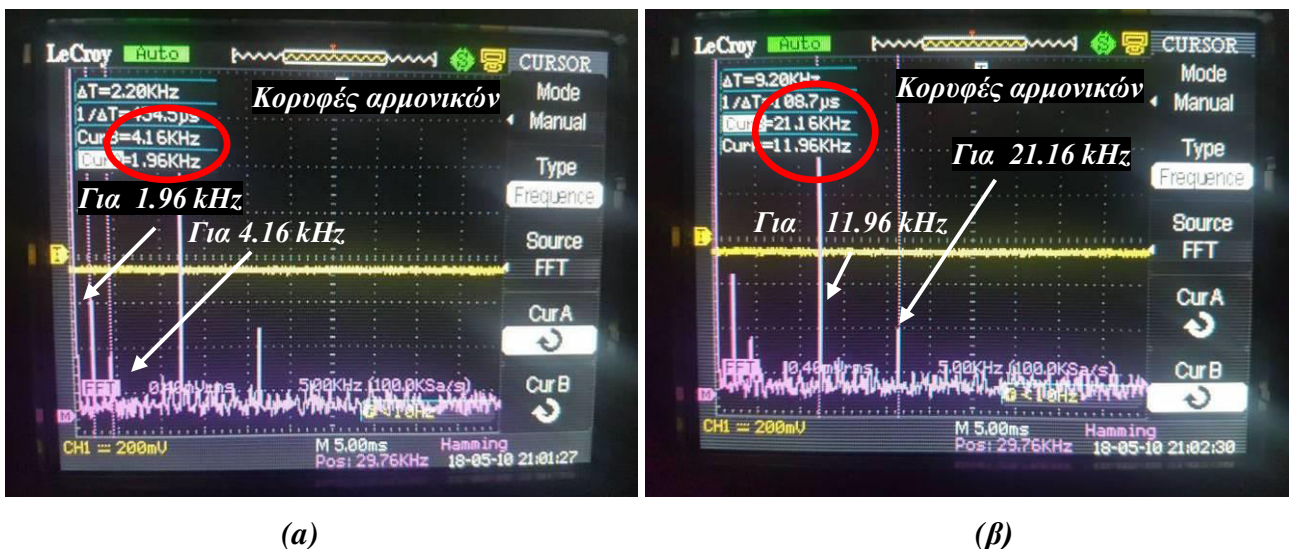
4.3 Ανάπτυξη διεγέρσεων στο υγιές δοκίμιο

4.3.1 Έρευνα στο πεδίο του φάσματος για τις θεμελιώδεις συχνότητες του κύματος μεγέθυνσης

Για την διερεύνηση των θεμελιωδών αρμόνικων του κύματος μεγέθυνσης στην περίπτωση του υγιούς δοκιμίου, έγινε δημιουργία μηχανικής ταλάντωσης μέσω του εξωτερικού διεγέρτη εναλλάσσοντας την ισχύ της ταλάντωσης σε βήματα ανά 1,00 kHz.

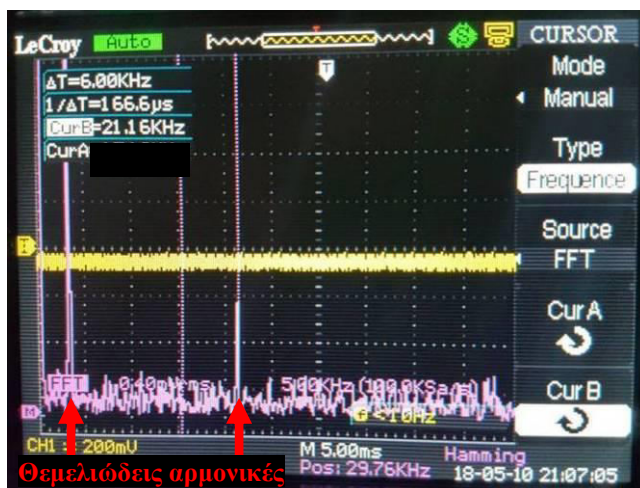
Η παρατήρηση των θεμελιωδών συχνοτήτων στο πεδίο του φάσματος έγινε από τον παλμογράφο (χωρίς την χρήση του λογισμικού MATLAB) μέσω της δυνατότητας του παλμογράφου για την επεξεργασία των μετρήσεων μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Φουριέ (Fast Fourier Transform, FFT). Διεξήχθησαν μετρήσεις για τις παρακάτω συχνότητες 2,00 kHz, για 3,00 kHz, 4,00 kHz και 5,00 kHz, τα αποτελέσματα έχουν ως εξής.

Για την εισαγωγή στη γεννήτρια της συχνότητας των 2,00 kHz και την δημιουργία της διέγερση χαμηλής συχνότητας κύματος μεγέθυνσης, η διαδικασία του γρήγορου μετασχηματισμού Φουριέ μας δίνει θεμελιώδεις αρμόνικες για 1,96 kHz \approx 2,00 kHz, και 4,16 kHz \approx 4,00 kHz οι οποίες καταγράφονται στην εικόνα 4.4 (α), το ίδιο γραφήματα του φάσματος των συχνοτήτων παράγει επίσης θεμελιώδεις αρμόνικες για τις συχνότητα των 12.00 kHz και 21.00 kHz εικόνα 4.4 (β).



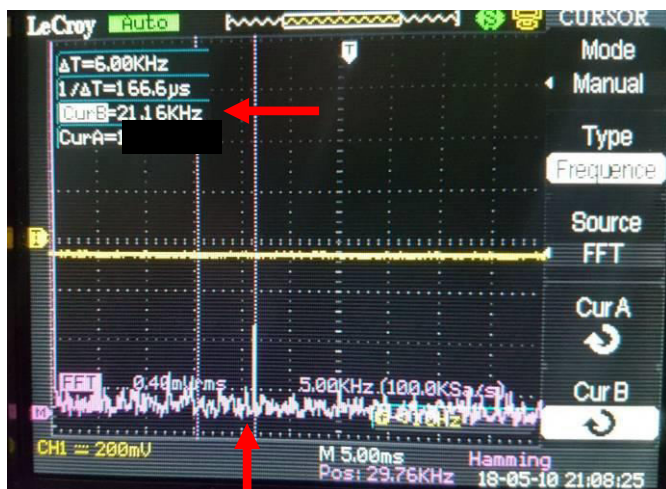
Εικόνα 4.4 θεμελιώδεις αρμονικές στο πεδίο του φάσματος γύρω από την συχνότητα μεγέθυνσης, (για την δημιουργία μηχανικής ταλάντωσης των 2,00 kHz)

Για την εισαγωγή στη γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος της συχνότητας των 3,00 kHz και την δημιουργία της διέγερση χαμηλής συχνότητας κύματος μεγέθυνσης, η διαδικασία του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier μας δίνει θεμελιώδεις αρμόνικες για για 3,00 kHz όπου είναι η ισχύς που εισάγουμε, καθώς και για 21,00kHz (εικόνα 4.5)



Εικόνα 4.5 θεμελιώδεις αρμονικές στο πεδίο του φάσματος γύρω για την συχνότητα του κύματος μεγέθυνσης των 3,00 kHz

Ακολούθως, για την εισαγωγή στην γεννήτρια της συχνότητας των 4,00 kHz και την δημιουργία της διέγερση χαμηλής συχνότητας κύματος μεγέθυνσης, η διαδικασία του γρήγορου μετασχηματισμού Φουριέ μας δίνει θεμελιώδεις αρμόνικες επίσης στα 21,00 kHz (εικόνα 4.6).

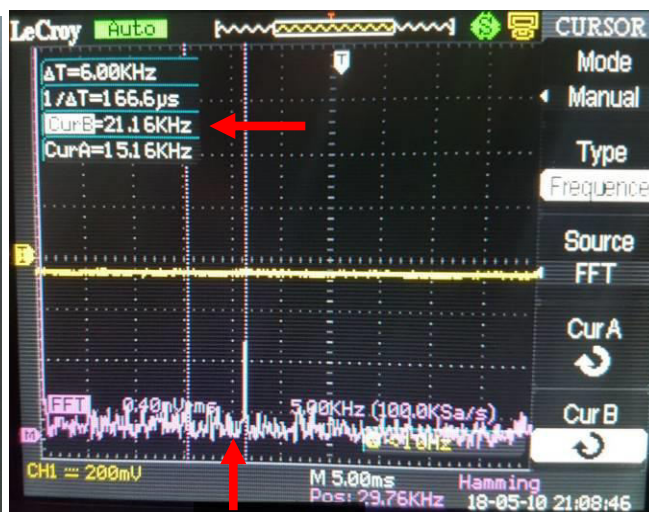


Εικόνα 4.6 θεμελιώδεις αρμονικές στο πεδίο του φάσματος για την συχνότητα του κύματος μεγέθυνσης των 4,00 kHz

Τέλος, για την εισαγωγή στην γεννήτρια της συχνότητας των 5,00 kHz, η διαδικασία του γρήγορου μετασχηματισμού Φουριέ επαναλαμβάνει ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα με πριν, δίνοντας θεμελιώδεις αρμόνικες για 21,00kHz, εικόνα 4.7 (β).



(α)



(β)

Εικόνα 4.7 (α) Γεννήτρια στην περίπτωση της παροχής τάσης των 5,00 kHz, (β) θεμελιώδεις αρμονικές στο πεδίο του φάσματος για την συχνότητα μεγέθυνσης των 5,00 kHz

Μετά τα παραπάνω, διαπιστώνουμε ότι, για δημιουργία μηχανικής ταλάντωσης με εισαγωγή συχνότητας 2,00 kHz, μέσω της διαδικασίας μετασχηματισμού Φουριέ παίρνουμε τις περισσότερες πληροφορίες για τις ιδιότητες του δοκιμίου.

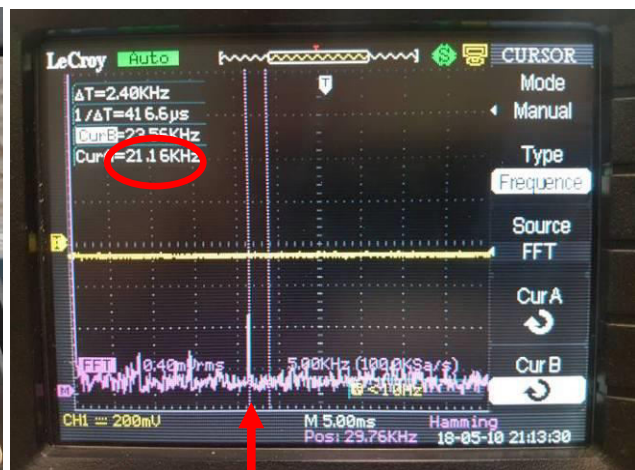
4.3.2 Έρευνα για τις θεμελιώδεις συχνότητες του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης

Για την διερεύνηση των θεμελιωδών αρμονικών συχνοτήτων του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης στην περίπτωση του υγιούς δοκιμίου, έγινε δημιουργία μηχανικής ταλάντωσης εισάγοντας αυτήν την φορά ημιτονοειδές ρεύμα (σταθερού πλάτους 20 V) μέσω γεννήτριας συχνοτήτων η οποία είναι συνδεδεμένη με πιεζοηλεκτρικό διεγέρτη. Ο διεγέρτης δημιουργεί ένα μηχανικό κύμα με συχνότητα ίδια με εκείνη της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης. Η καταγραφή της απόκρισης του υλικού, πραγματοποιείται από τον επιταχυνσιογράφο (δεύτερο πιεζοηλεκτρικό) το οποίο παραμένει συνδεδεμένο στο δοκίμιο, και μέσω του ενισχυτή μεταφέρει τα δεδομένα στον παλμογράφο. Εναλλάσσοντας την ισχύ της ημιτονοειδούς τάσης παρατηρούμε στον παλμογράφο μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Φουριέ (Fast Fourier Transform, FFT) πότε οι ενδείξεις των αρμονικών γίνονται πιο έντονες.

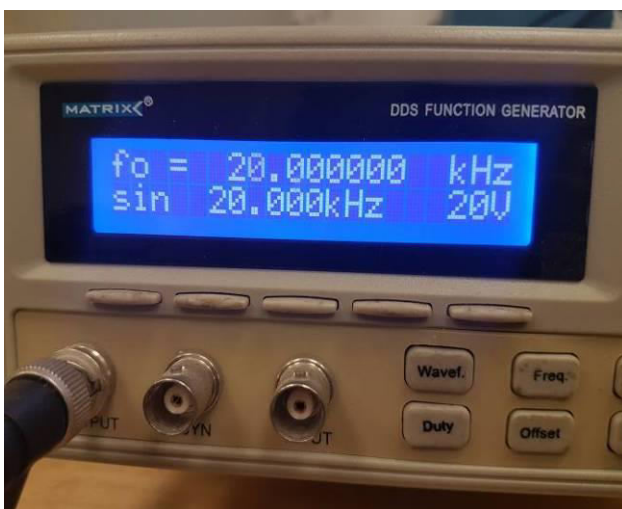
Από τις μετρήσεις που διεξήχθησαν διαπιστώνουμε ότι με την εφαρμογή ημιτονοειδούς τάσης 15,00 kHz και 20,00 kHz παράγεται ακριβώς το ίδιο γράφημα, δείχνοντας μια μόνο θεμελιώδη αρμονική για συχνότητα 21,00kHz.



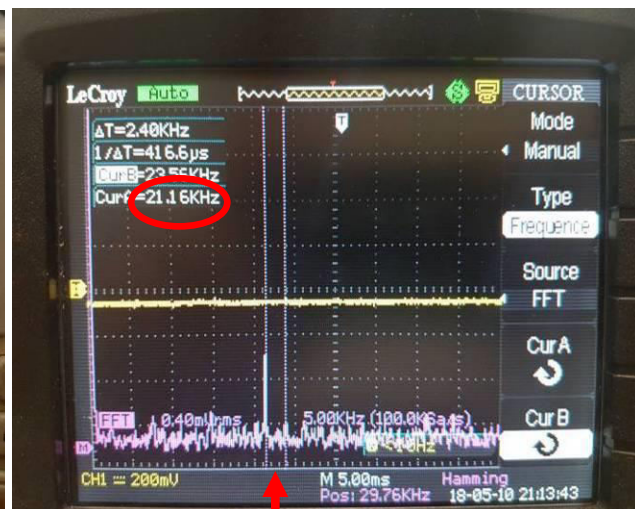
(a)



(b)



(c)



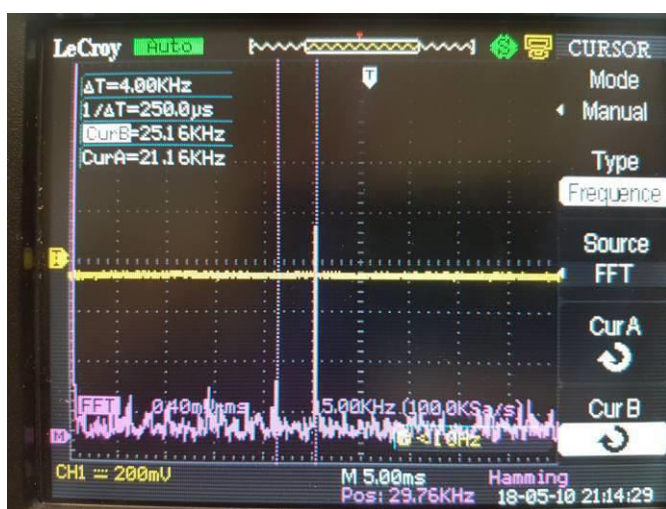
(d)

Εικόνα 4.8 (α),(c) Γεννήτρια ημιτονοειδούς για τάση 15,00 kHz και 20,00 kHz. (b), (d) θεμελιώδεις αρμονικές του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης για τάση 15,00 kHz και 20,00 kHz.

Προκειμένου να διαπιστώσουμε για ποιες συχνότητες οι ενδείξεις των αρμονικών γίνονται πιο έντονες (με μορφή μεγάλης κορυφής), εναλλάσσουμε την ισχύ της ημιτονοειδούς τάσης και παρατηρούμε στον παλμογράφο το φάσμα των συχνοτήτων.

Για την διευκόλυνση της παρατήρησης οι δείκτες του παλμογράφου A και B (οι ενδείξεις των οποίων φαίνονται στην πάνω αριστερή πλευρά της οθόνης) τοποθετούνται κάθε φορά ως εξής: ο δείκτης A στην θεμελιώδη αρμονική που εντοπίζεται στο φάσμα, ο δείκτης B στην τιμή της αρμονικής του κύματος εισαγωγής. Οι δείκτες απεικονίζονται στην οθόνη με τις διακεκομμένες κάθετες γραμμές.

Παρατίθενται κάποια από τα αποτελέσματα για την εφαρμογή ημιτονοειδούς τάσης από 25,00 kHz έως και 45,00 kHz.



(α)

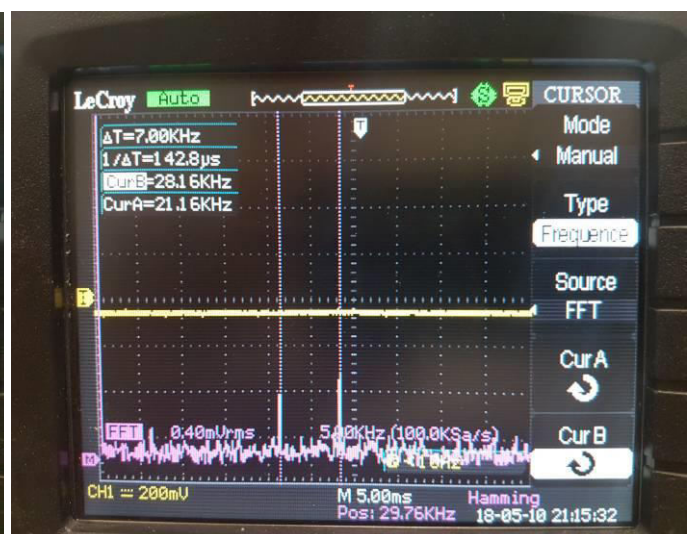


(β)

Εικόνα 4.9 (α),(β) Αρμονικές του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης για τάση ημιτονοειδούς 25,00 kHz και 26,00 kHz



(α)

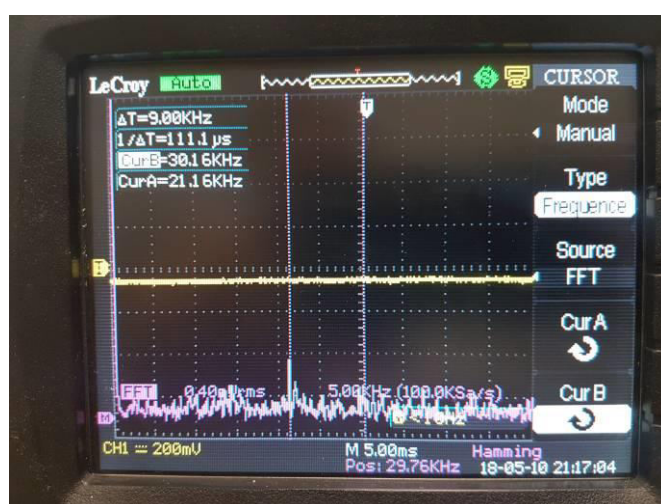


(β)

Εικόνα 4.10 (α),(β) Αρμονικές του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης για τάση ημιτονοειδούς 27,00 kHz και 28,00 kHz



(a)

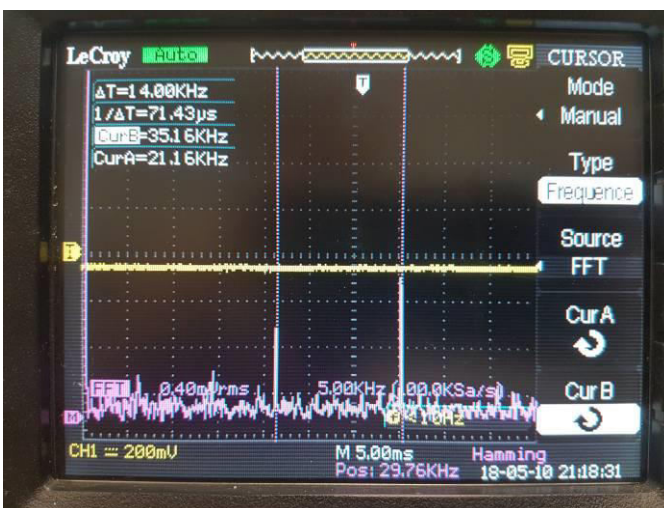


(b)

Εικόνα 4.11 (α),(β) Αρμονικές του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης για τάση ημιτονοειδούς 29,00 kHz και 30,00 kHz



(a)



(b)

Εικόνα 4.12 (α),(β) Αρμονικές του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης για τάση ημιτονοειδούς 31,00 kHz και 35,00 kHz



(a)

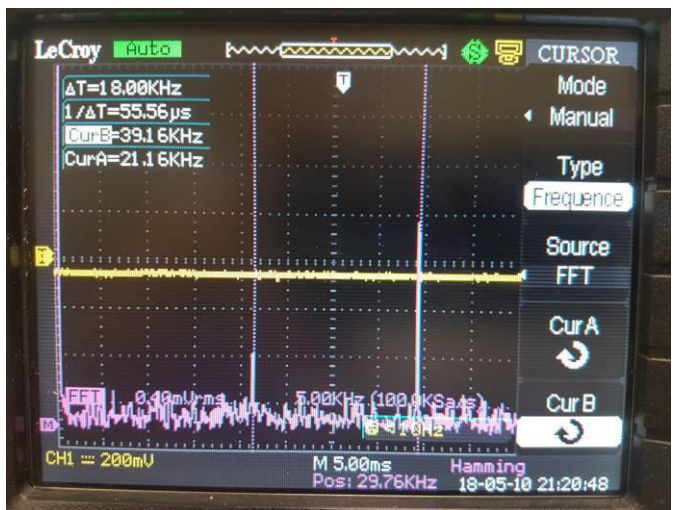


(b)

Εικόνα 4.13 (α),(β) Αρμονικές του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης για τάση ημιτονοειδούς 36,00 kHz και 37,00 kHz

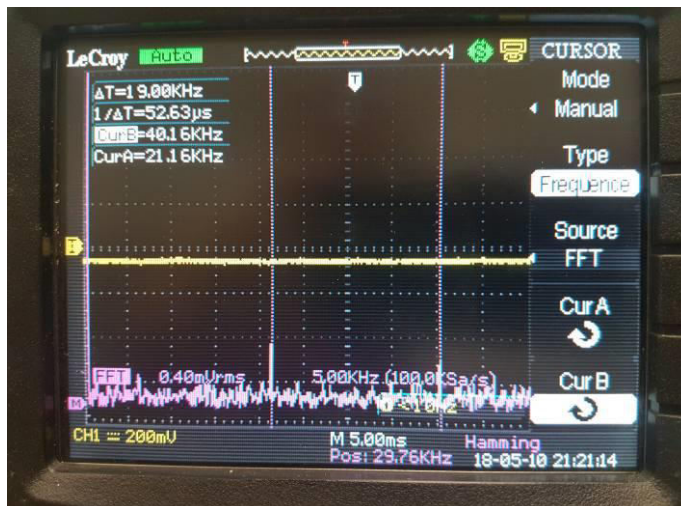


(a)

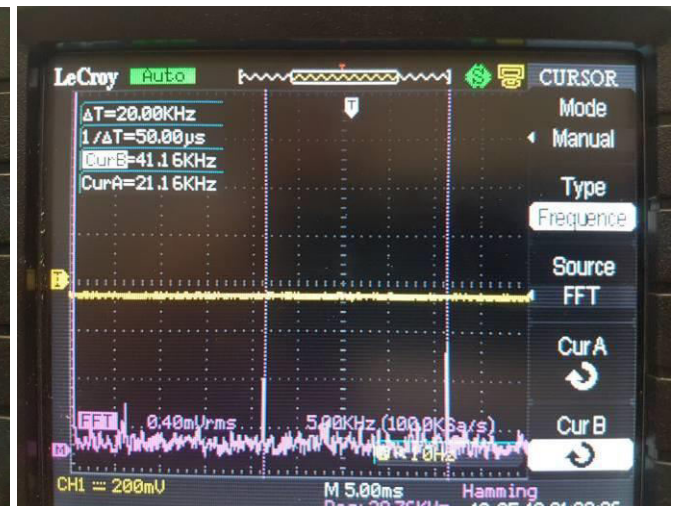


(b)

Εικόνα 4.14 (α),(β) Αρμονικές του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης για τάση ημιτονοειδούς 38,00 kHz και 39,00 kHz



(a)

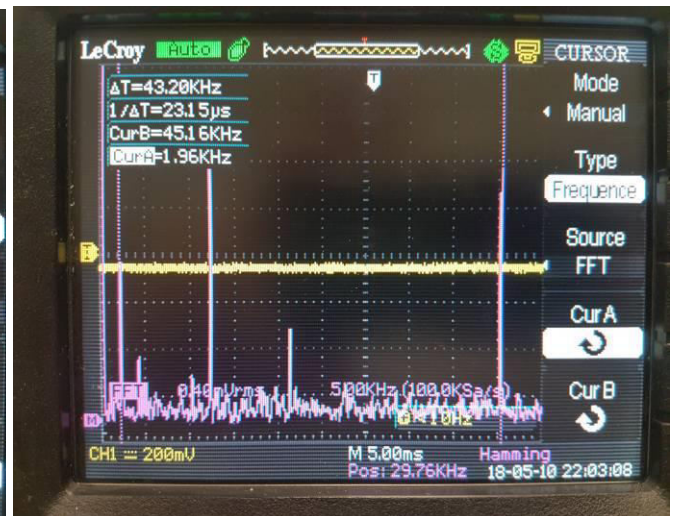


(b)

Εικόνα 4.15 (α),(β) Αρμονικές του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης για τάση ημιτονοειδούς 40,00 kHz και 41,00 kHz



(a)



(b)

Εικόνα 4.16 (α),(β) Αρμονικές του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης για τάση ημιτονοειδούς 42,00 kHz και 45,00 kHz

Διαπιστώνουμε ότι οι θεμελιώδεις συχνότητες με την μεγαλύτερη ένταση, στην περίπτωση της διέγερσης του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης ,παρατηρούνται στο πεδίο του φάσματος για τις τιμές των **25,00 kHz 35,00 kHz 39,00kHz και 45,00kHz.**

4.4 Εφαρμογή δονητικό ακουστικών δοκιμών επάλληλης διαμόρφωσης

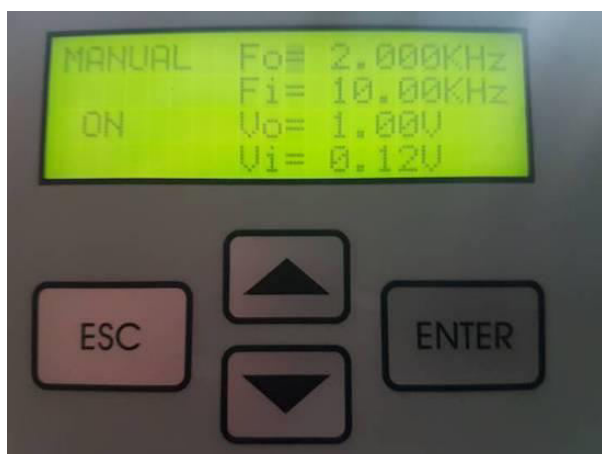
Μετά τα παραπάνω, για την ταυτόχρονη εφαρμογή των δυο διαφορετικών τύπων εξαναγκασμένης ταλάντωσης, ενός χαμηλής συχνότητας κύματος μεγέθυνσης και ενός κύματος υψηλής συχνότητας διεισδυτικής ανίχνευσης , με σκοπό την ταυτόχρονη διάδοση κυμάτων στο δοκίμιο, επιλέγονται οι συχνότητες οι οποίες μέσω της παρατήρησης στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων παράγουν τις περισσότερες πληροφορίες για το δομικό υλικό. Μετά την διερεύνηση των προηγούμενων παραγράφων για τις θεμελιώδεις συχνότητες του κύματος μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης, οι συχνότητες των δυο ανεξάρτητων ταλαντώσεων που επιλέχθηκαν να εφαρμοσθούν στο δοκίμιο προκειμένου να ελέγξουμε την επαλληλία τους στο φάσμα των συχνοτήτων, έχουν ως εξής:

A) Για την δημιουργία κύματος χαμηλής συχνότητας μεγέθυνσης κρατάμε σταθερή την ισχύ των 2,00 kHz στην γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος

B) Για την δημιουργία κύματος υψηλής συχνότητας (διεισδυτικής ανίχνευσης) εναλλάσσουμε στην γεννήτρια συχνοτήτων τις συχνότητες των 25,00 kHz, 35,00 kHz, 39,00kHz και 45,00kHz για την παράγωγη ημιτονοειδούς κύματος.

4.4.1 Πρώτο ζεύγος μετρήσεων στην περίπτωση του υγιούς δοκιμίου

Ξεκινώντας την πειραματική διαδικασία της επαλληλίας των κυμάτων στο υπό εξέταση δοκίμιο, εφαρμόζουμε ταυτόχρονη διέγερση από τις δυο γεννήτριες (γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος και γεννήτρια συχνοτήτων). Στην πρώτη περίπτωση οι γεννήτριες για την παροχή τάσης διέγερσης ρυθμίζονται στα 2,00 kHz, και 25,00 kHz αντίστοιχα.



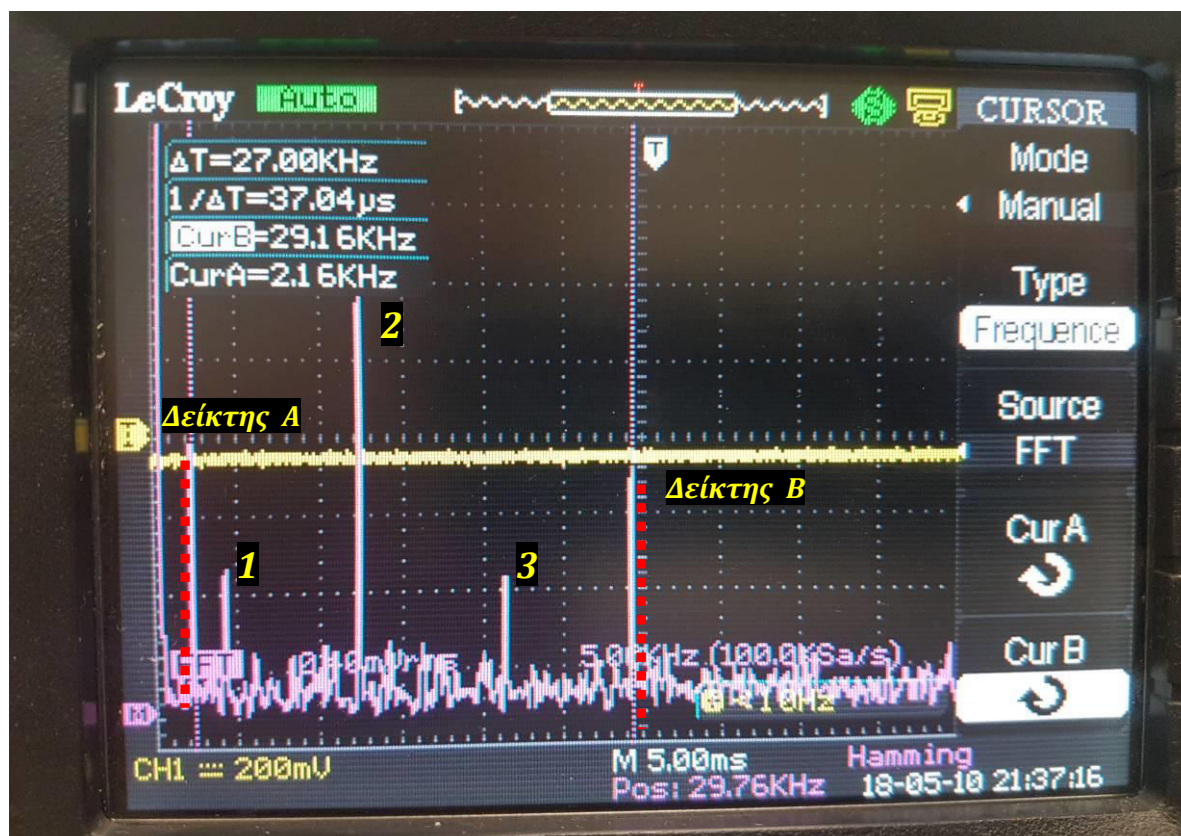
(α)



(β)

Εικόνα 4.17 (α),(β) Γεννήτριες για την παροχή τάσης διέγερσης, για την ταυτόχρονη εφαρμογή των δυο διαφορετικών τύπων εξαναγκασμένης ταλάντωσης

Οι αρμονικές του φάσματος των συχνοτήτων που παράγονται μέσω του μετασχηματισμού Φουριέ μας δίνουν τα παρακάτω αποτελέσματα Εικόνα 4.18 .



curA , curB

Δείκτης Α (curA 2,16 kHz)

Δείκτης Β (curB 29,16 kHz)

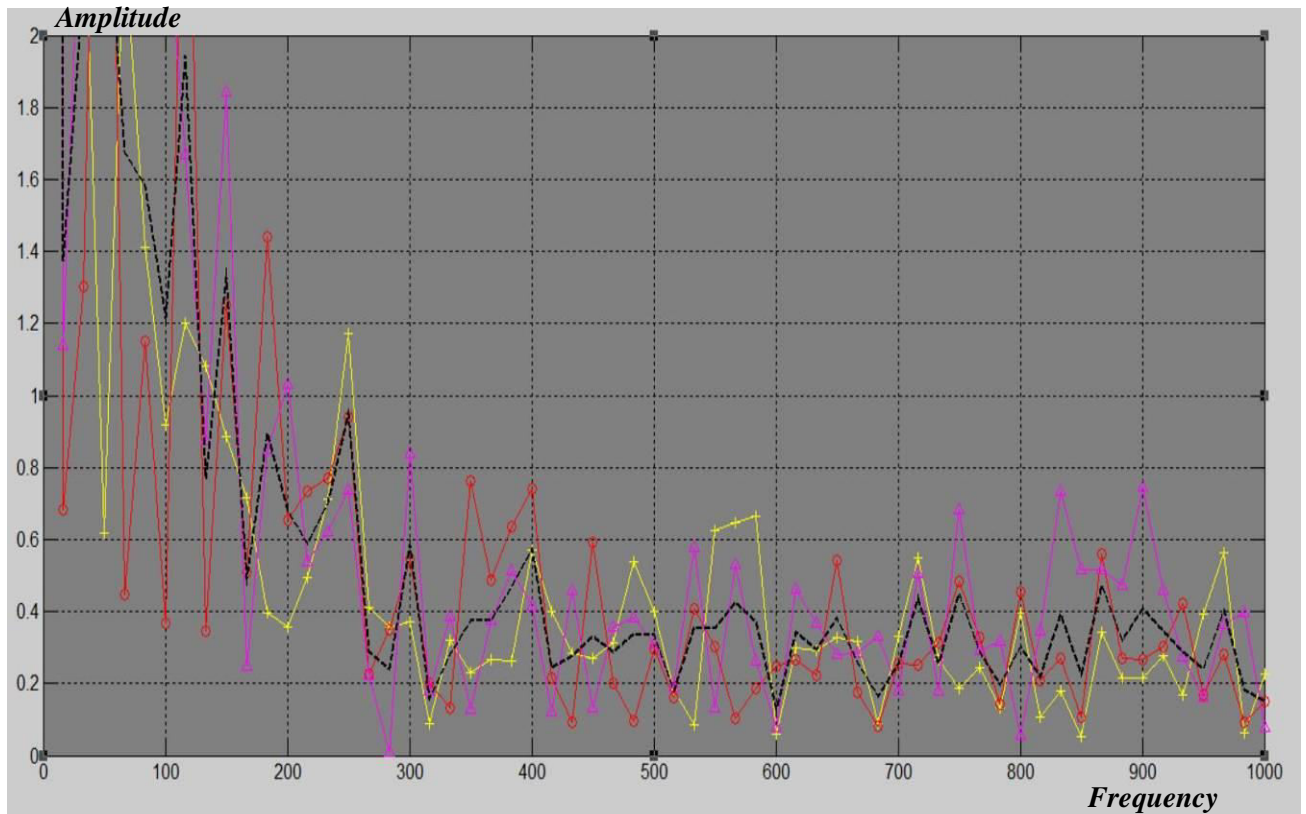
Εικόνα 4.18 Πεδίο του φάσματος στην περίπτωση εφαρμογής των δυο διεγέρσεων

Οι δείκτες Α και Β διαβάζουν αντίστοιχα τις συχνότητες των τιμών των κυμάτων μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης που έχουμε εισαγάγει, δηλαδή των 2,00 kHz και 29,00 kHz. Οι ενδιάμεσες αρμονικές **1, 2, 3** με την μορφή κορυφών μας δείχνουν στοιχεία των δυναμικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου. Παρατηρούμε ότι όλες οι θεμελιώδεις συχνότητες στο πεδίο του φάσματος δεν συνοδεύονται από την ανάπτυξη πλευρικών συχνοτήτων. Στην περίπτωση αυτή, καταλαβαίνουμε ότι οι συχνότητες απεικονίζουν χαρακτηριστικά του δομικού υλικού και δεν διαθλώνται ή διασκορπίζονται από την ύπαρξη σφαλμάτων με αποτέλεσμα την γέννηση πλευρικών συχνοτήτων.

Συνεπώς, για το υπό εξέταση δοκίμιο (για το οποίο γνωρίζουμε ότι δεν έχει δομική φθορά) διαπιστώνουμε ότι οι αρμονικές στο πεδίο του φάσματος δεν αλληλοσυνδέονται και δεν επικαλύπτονται με μορφή επαλληλίας διακυμάνσεων.

Η διαδικασία ολοκληρώνεται κατόπιν τριών μετρήσεων λόγω των αυξομειώσεων που διαπιστώνονται στις τιμές των αρμονικές του φάσματος. Οι αυξομειώσεις στις μετρήσεις των συχνοτήτων οφείλονται στο ότι οι συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος δεν είναι ιδανικές

αφού επηρεάζονται από τις εργαστηριακές συνθήκες και τον θόρυβο. Οι τρεις μετρήσεις έχουν σαν κύριο στόχο τον ορισμό του μέσου φάσματος προκειμένου να ελαχιστοποιήσουμε το επίπεδο του σφάλματος των αποτελεσμάτων. Κατά συνέπεια από την διενέργεια των μετρήσεων παράγονται τα παρακάτω αποτελέσματα μέσω της διαδικασίας Φουριέ.

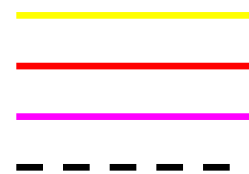


Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων πρώτης μέτρησης

Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων δεύτερης μέτρησης

Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων τρίτης μέτρησης

Μέση τιμή του φάσματος των τριών μετρήσεων

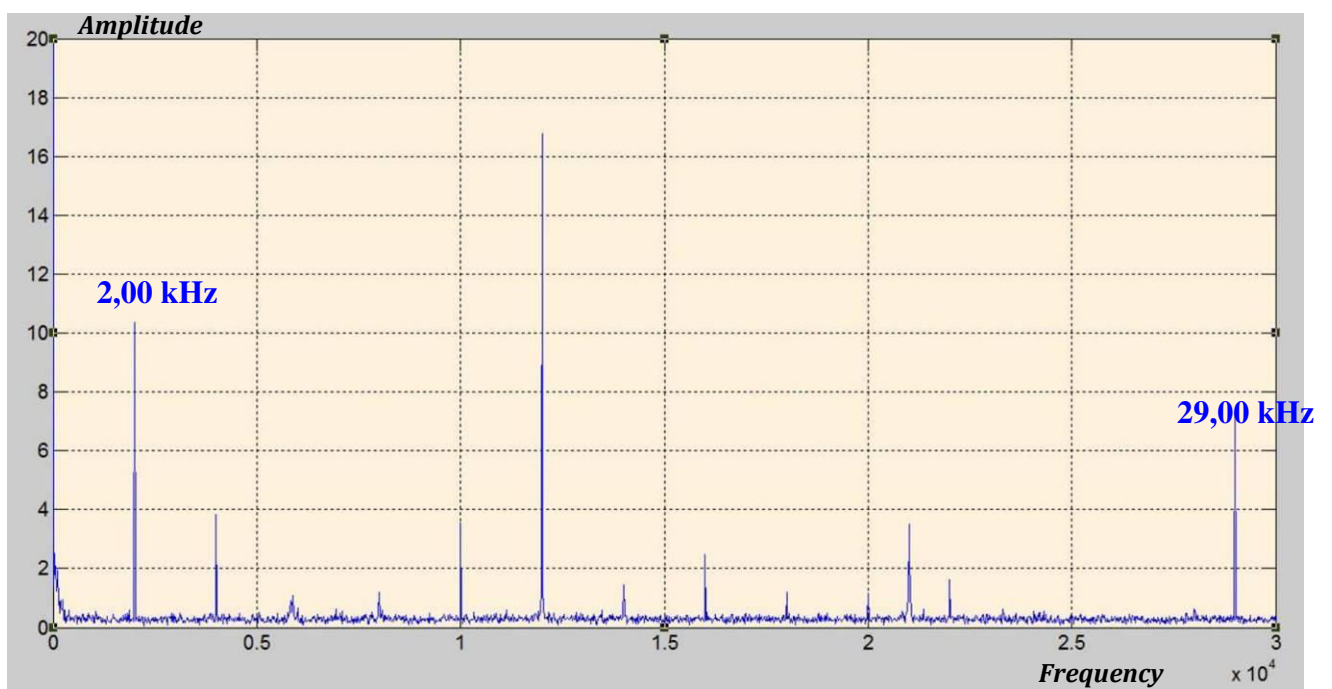


Εικόνα 4.19 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων για τις τρεις μετρήσεις στην περίπτωση των δονητικών ακουστικών δοκιμών του κύματος μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 29,00 kHz

Το πεδίο του φάσματος για όλο το εύρος της συχνότητας για την οποία εξετάστηκε, δίνεται από τα επόμενα γραφήματα (**Εικόνα 4.20 – 4.21**). Όπου στο πρώτο γράφημα απεικονίζονται συνολικά όλες οι μετρήσεις που διενεργήθηκαν, ενώ στο δεύτερο μόνο η μέση τιμή τους, όπως αυτά υπολογίστηκαν με χρήση της πλατφόρμας MATLAB για την επίλυση των συναρτήσεων Φουριέ και την δημιουργία των γραφημάτων του φάσματος των συχνοτήτων.



Εικόνα 4.20 Πεδίο του φάσματος στην περίπτωση των τριών μετρήσεων των δονητικό ακουστικών δοκιμών, του κύματος μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 29,00 kHz



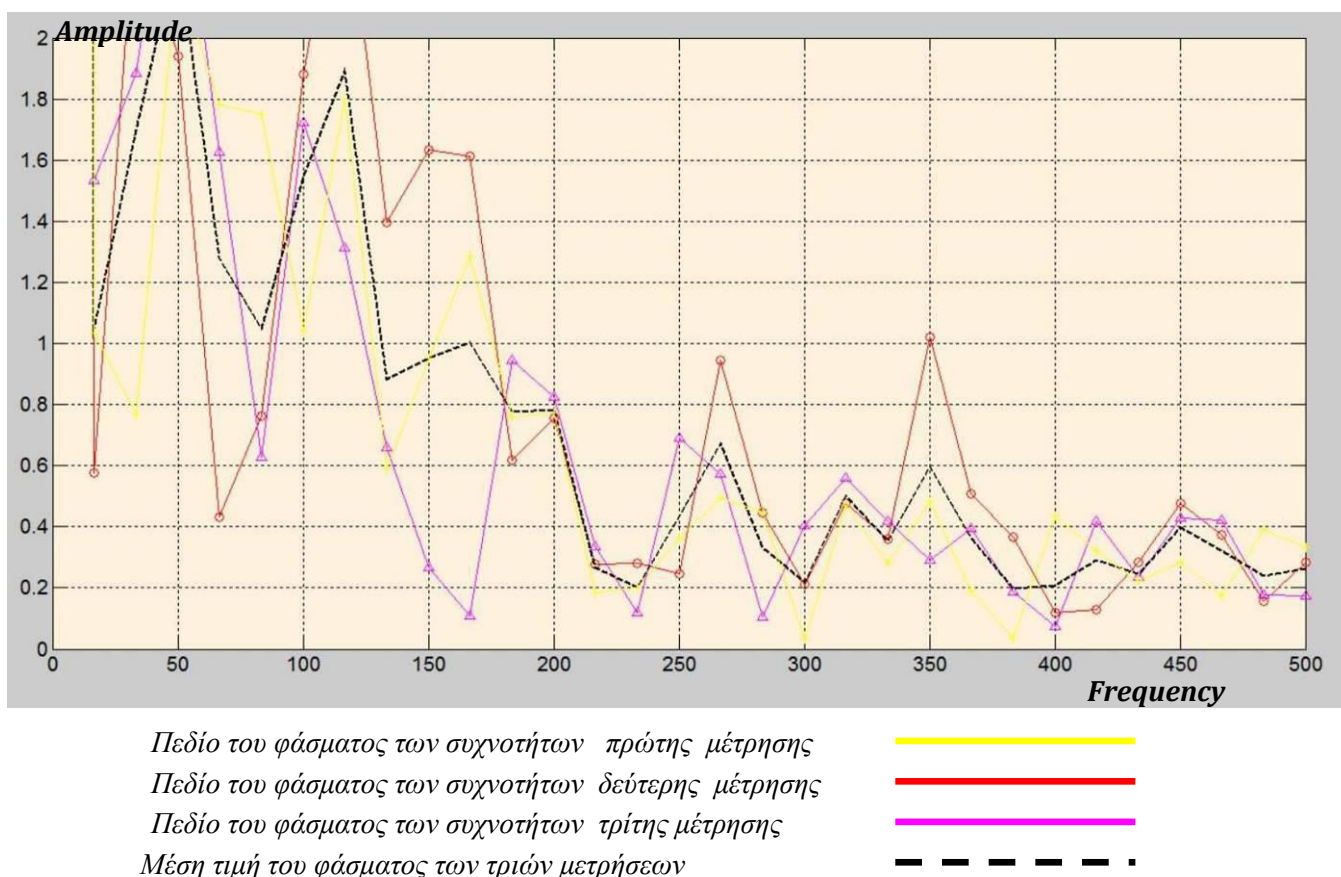
Εικόνα 4.21 Πεδίο του φάσματος για την μέση τιμή των τριών μετρήσεων του κύματος μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 29,00 kHz

Από το γράφημα της μέσης τιμής του φάσματος των συχνοτήτων παρατηρούμε τις συχνότητες των τιμών των κυμάτων μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης που έχουμε εισαγάγει, δηλαδή των 2,00 kHz και 29,00 kHz, ενώ διαπιστώνονται ενδιάμεσες αρμόνικες με την μορφή κορυφών χωρίς την εμφάνιση από ζεύγη πλευρικών συχνοτήτων. Παρατηρούμε

ότι τόσο οι θεμελιώδεις συχνότητες των κυμάτων μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης όσο και οι ενδιαμέσες αρμόνικες δεν συνοδεύονται από την ανάπτυξη πλευρικών συχνοτήτων, δηλαδή απεικονίζουν τα χαρακτηριστικά του δομικού υλικού και δεν διαθλώνται ή διασκορπίζονται από την ύπαρξη σφαλμάτων. Στην περίπτωση αυτή διαπιστώνουμε για το υπό εξέταση δοκίμιο ότι δεν έχει δομική φθορά αφού οι θεμελιώδεις αρμόνικες δεν αλληλοσυνδέονται και δεν επικαλύπτονται με μορφή διασταύρωσης διακυμάνσεων.

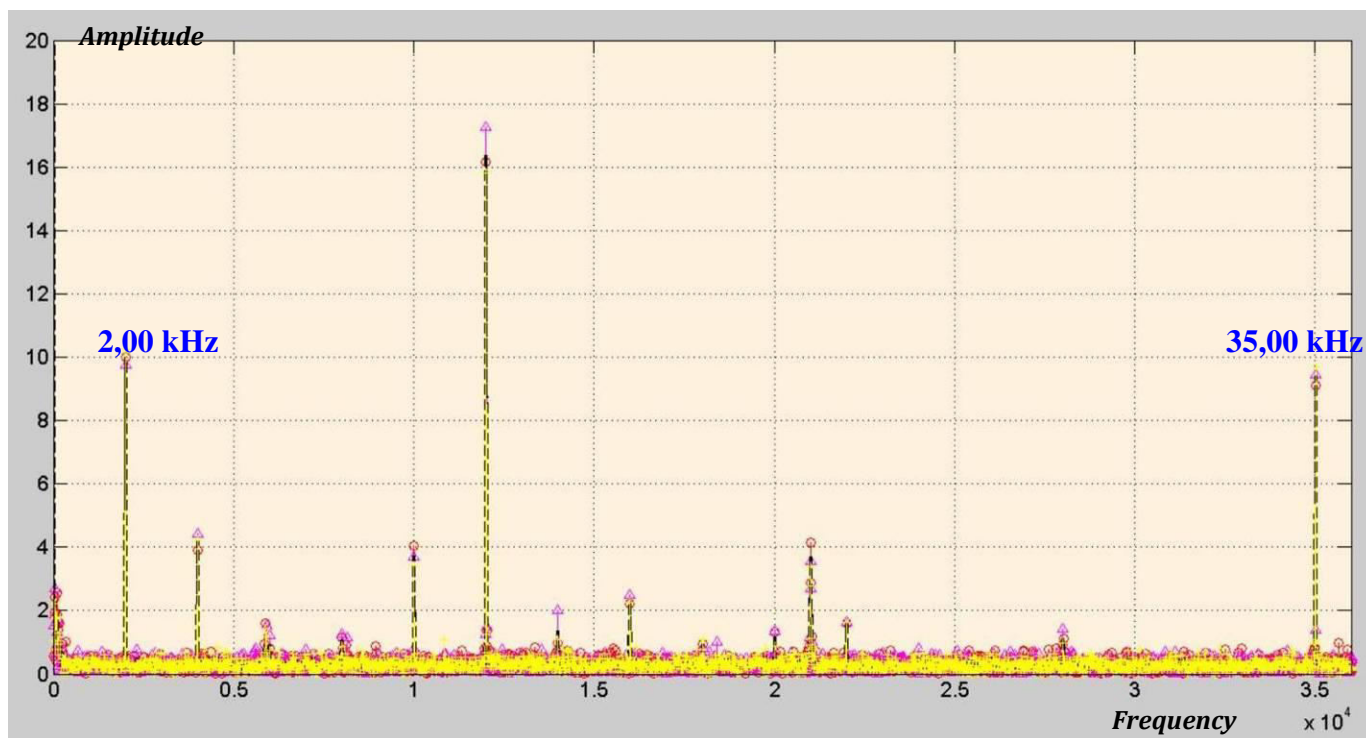
4.4.2 Δεύτερο ζεύγος μετρήσεων στην περίπτωση του υγιούς δοκιμίου

Συνεχίζοντας την πειραματική διαδικασία για την ταυτόχρονη εφαρμογή των δυο διαφορετικών τύπων εξαναγκασμένης ταλάντωσης, με σκοπό την ταυτόχρονη διάδοση κυμάτων στο δοκίμιο, εναλλάσσουμε την διέγερση του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης στο υπό εξέταση δοκίμιο. Σε αυτήν την περίπτωση η χαμηλή συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης παραμένει σταθερή στα **2,00 kHz**, ενώ η ισχύς του ημιτονοειδούς κύματος ορίζεται στα **35,00 kHz**. Η διαδικασία ολοκληρώνεται κατόπιν τριών μετρήσεων, (όπως και στην προηγούμενη περίπτωση) λόγω των αυξομειώσεων που διαπιστώνονται στις αρμονικές του φάσματος. Κατά συνέπεια από την διενέργεια των μετρήσεων οι αρμονικές του φάσματος των συχνοτήτων που παράγονται μέσω του μετασχηματισμού Φουριέ μας δίνουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

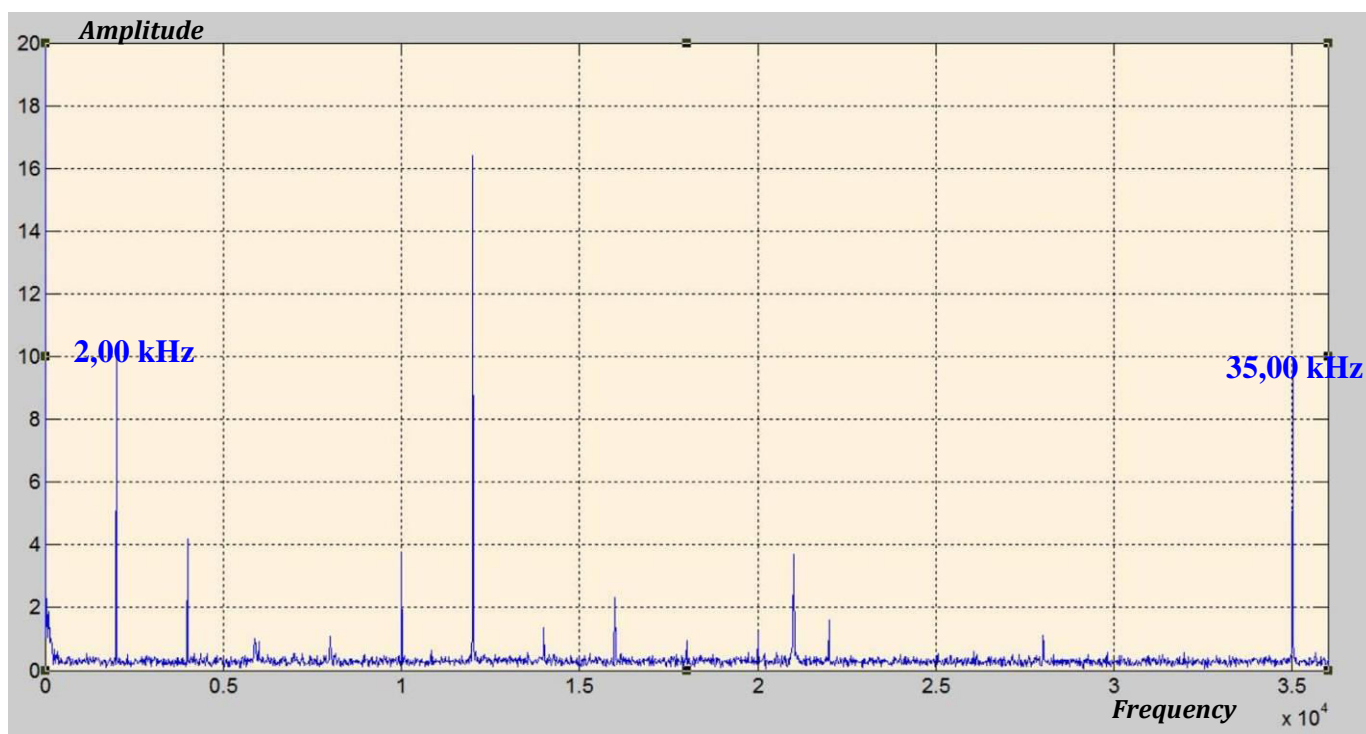


Εικόνα 4.22 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων για τις τρεις μετρήσεις, στην περίπτωση των δονητικό ακουστικών δοκιμών του κύματος μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 35,00 kHz

Το πεδίο του φάσματος για όλο το εύρος της συχνότητας για την οποία εξετάστηκε, δίνεται από τα επόμενα γραφήματα (*Εικόνα 4.23 – 4.24*). Όπου στο πρώτο γράφημα απεικονίζονται συνολικά όλες οι μετρήσεις που διενεργήθηκαν, ενώ στο δεύτερο μόνο η μέση τιμή τους, όπως αυτά υπολογίστηκαν με χρήση του λογισμικού MATLAB για την επίλυση των συναρτήσεων Φουριέ και την δημιουργία των γραφημάτων του φάσματος των συχνοτήτων.



Εικόνα 4.23 Πεδίο του φάσματος στην περίπτωση των τριών μετρήσεων, των δονητικό ακουστικών δοκιμών του κύματος μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 35,00 kHz

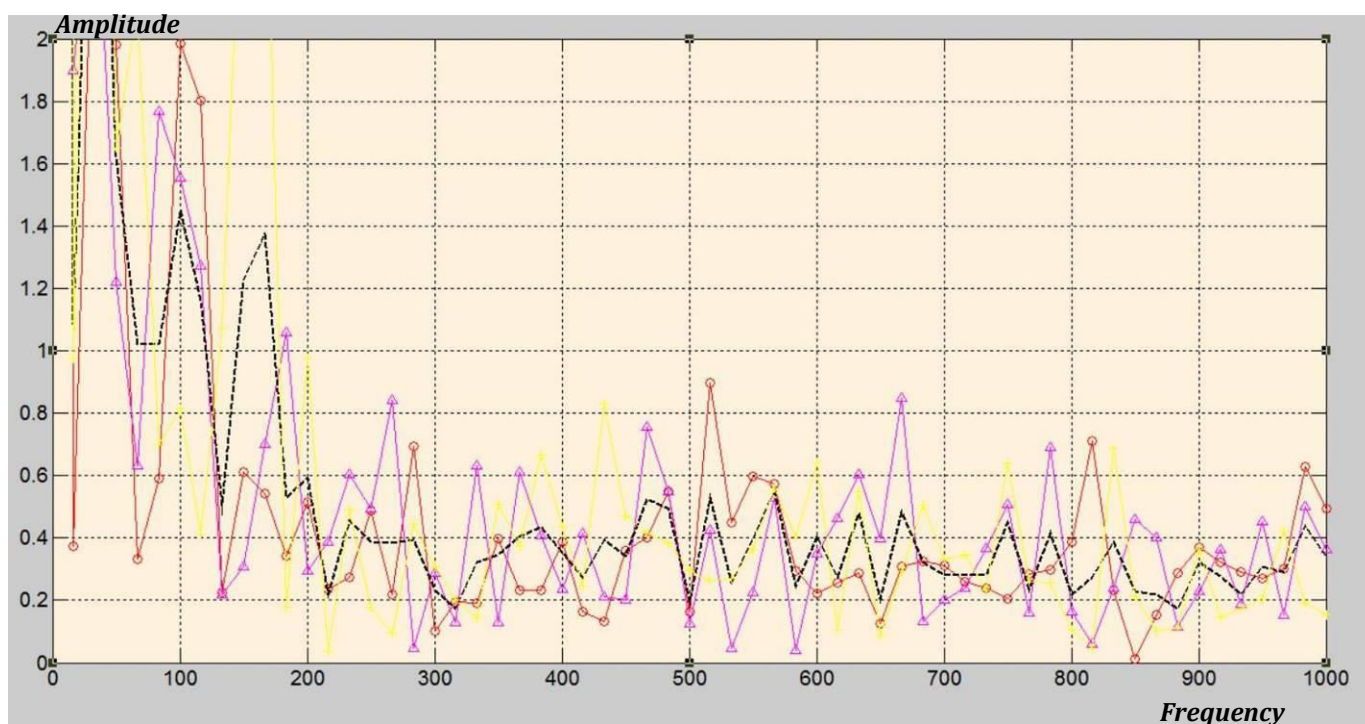


Εικόνα 4.24 Πεδίο του φάσματος για την μέση τιμή των τριών μετρήσεων του κύματος μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 35,00 kHz

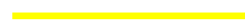
Από το γράφημα της μέσης τιμής του φάσματος των συχνοτήτων παρατηρούμε και σε αυτήν την περίπτωση ότι τόσο οι θεμελιώδεις συχνότητες των κυμάτων μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης όσο και οι ενδιάμεσες αρμόνικες δεν συνοδεύονται από την ανάπτυξη πλευρικών συχνοτήτων, δηλαδή απεικονίζουν τα χαρακτηριστικά του δομικού υλικού και δεν διαθλώνται ή διασκορπίζονται από την ύπαρξη σφαλμάτων.

4.4.3 Τρίτο ζεύγος μετρήσεων στην περίπτωση του υγιούς δοκιμίου

Συνεχίζοντας την πειραματική διαδικασία για το τρίτο ζεύγος τιμών των δυο διαφορετικών τύπων εξαναγκασμένης ταλάντωσης, η χαμηλή συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης παραμένει σταθερή στα **2,00 kHz**, ενώ η ισχύς του ημιτονοειδούς κύματος ορίζεται στα **39,00 kHz**. Η διαδικασία ολοκληρώνεται κατόπιν τριών μετρήσεων, (όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις). Κατά συνέπεια από την διενέργεια των μετρήσεων οι αρμονικές του φάσματος των συχνοτήτων που παράγονται μέσω του μετασχηματισμού Φουριέ μας δίνουν τα παρακάτω αποτελέσματα.



Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων πρώτης μέτρησης



Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων δεύτερης μέτρησης



Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων τρίτης μέτρησης

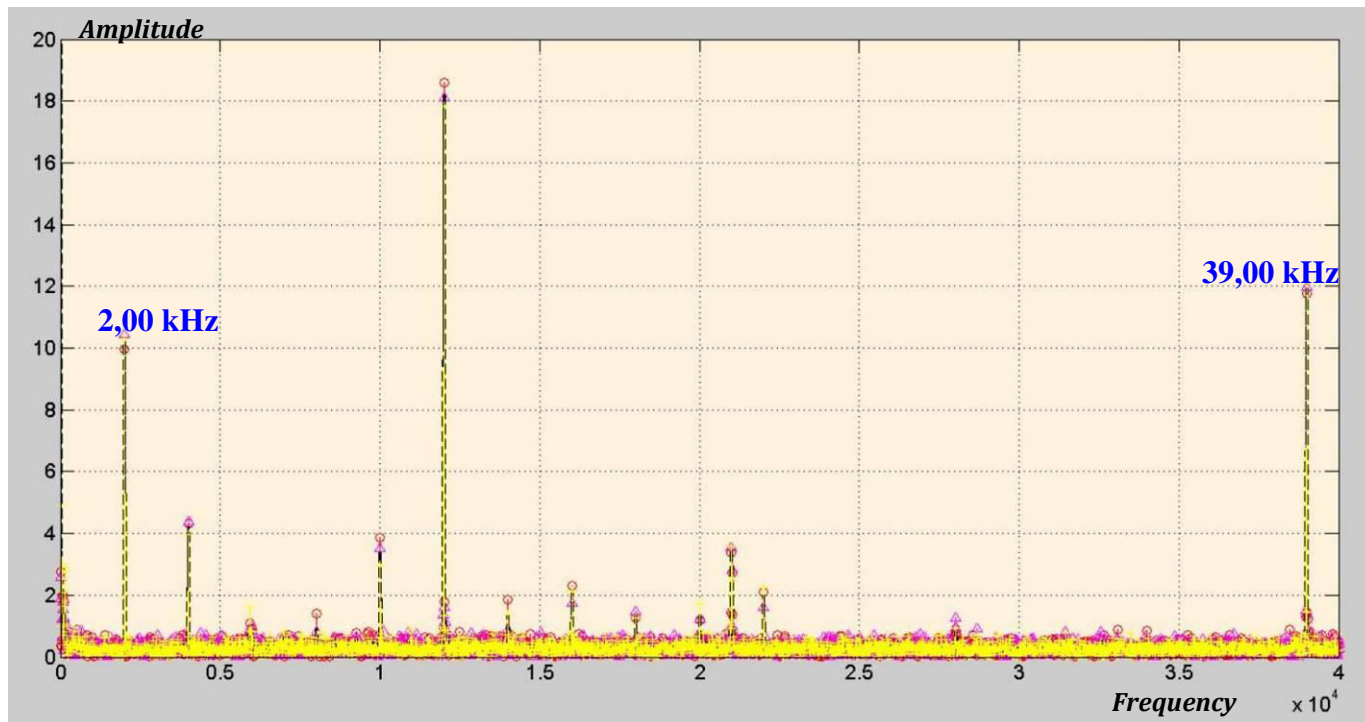


Μέση τιμή του φάσματος των τριών μετρήσεων

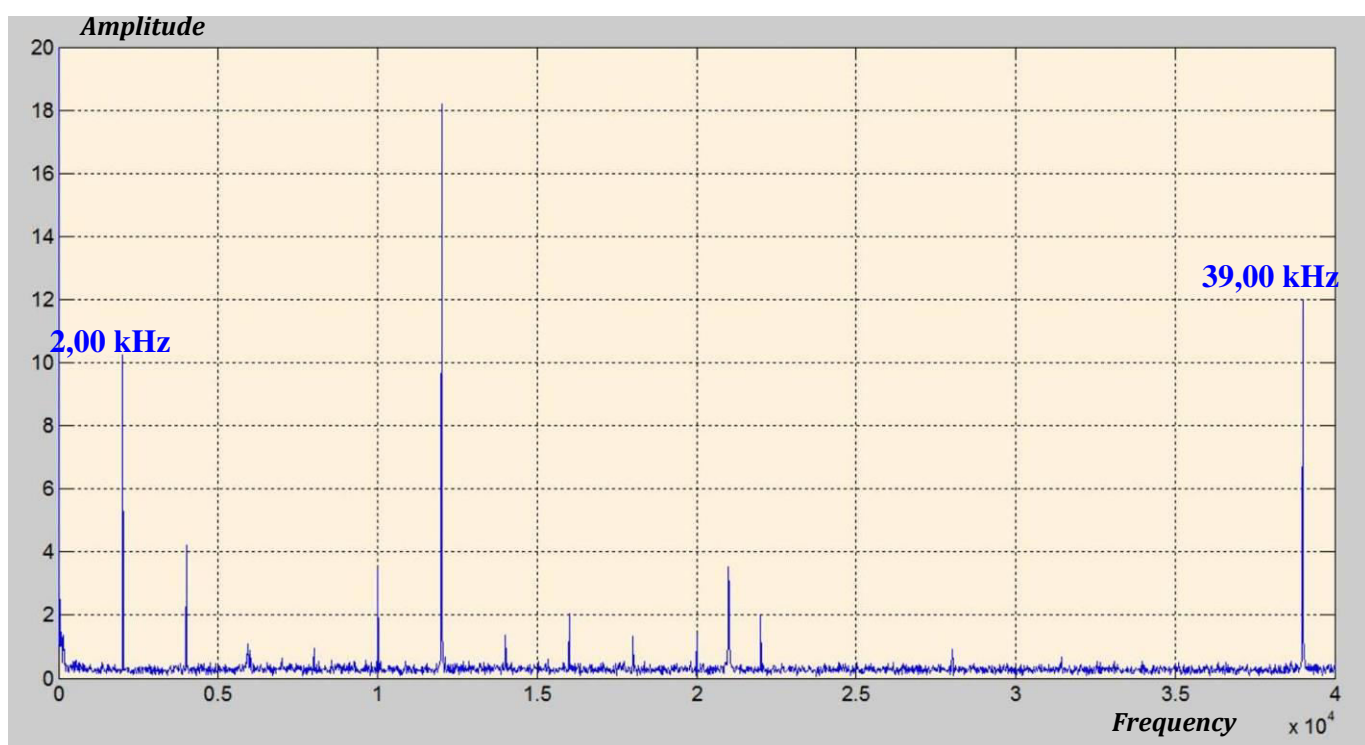


Εικόνα 4.25 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων για τις τρεις μετρήσεις, στην περίπτωση των δονητικό ακουστικών δοκιμών του κύματος μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 39,00 kHz

Το πεδίο του φάσματος για την τρίτη περίπτωση των μετρήσεων, δίνεται από τα επόμενα γραφήματα (*Εικόνα 4.26 – 4.27*). Όπου στο πρώτο γράφημα απεικονίζονται συνολικά όλες οι μετρήσεις που διενεργήθηκαν, ενώ στο δεύτερο μόνο η μέση τιμή τους, όπως αυτά υπολογίστηκαν με χρήση της πλατφόρμας MATLAB για την επίλυση των συναρτήσεων Φουριέ και την δημιουργία των γραφημάτων του φάσματος των συχνοτήτων.



Εικόνα 4.26 Πεδίο του φάσματος στην περίπτωση των τριών μετρήσεων, των δονητικό ακουστικών δοκιμών του κύματος μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 39,00 kHz

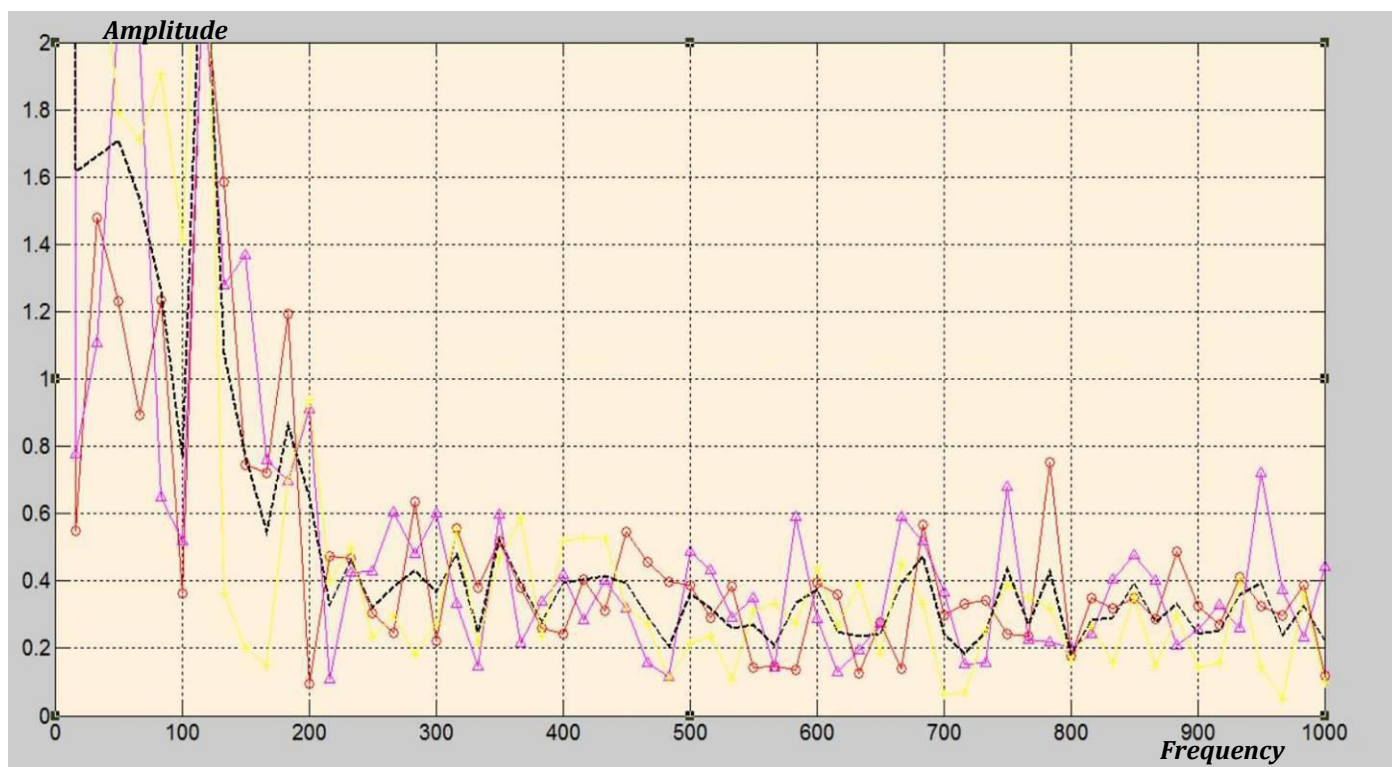


Εικόνα 4.27 Πεδίο του φάσματος για την μέση τιμή των τριών μετρήσεων του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 39,00 kHz

Από το γράφημα της μέσης τιμής του φάσματος των συχνοτήτων παρατηρούμε και σε αυτήν την περίπτωση ότι τόσο οι θεμελιώδεις συχνότητες των κυμάτων μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης όσο και οι ενδιάμεσες αρμονικές δεν συνοδεύονται από την ανάπτυξη πλευρικών συχνοτήτων, δηλαδή απεικονίζουν τα χαρακτηριστικά του δομικού υλικού και δεν διαθλώνται ή διασκορπίζονται από την ύπαρξη σφαλμάτων.

4.4.4 Τέταρτο ζεύγος μετρήσεων στην περίπτωση του υγιούς δοκιμίου

Για την διεξαγωγή της τελευταίας μέτρησης των δυο διαφορετικών τύπων εξαναγκασμένης ταλάντωσης, η χαμηλή συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης παραμένει σταθερή στα **2,00 kHz**, ενώ η ισχύς του ημιτονοειδούς κύματος ορίζεται στα **45,00 kHz**. Η διαδικασία ολοκληρώνεται κατόπιν τριών μετρήσεων, (όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις). Κατά συνέπεια από την διενέργεια των μετρήσεων οι αρμονικές του φάσματος των συχνοτήτων που παράγονται μέσω του μετασχηματισμού Φουριέ μας δίνουν τα παρακάτω αποτελέσματα.



Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων πρώτης μέτρησης

—

Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων δεύτερης μέτρησης

—

Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων τρίτης μέτρησης

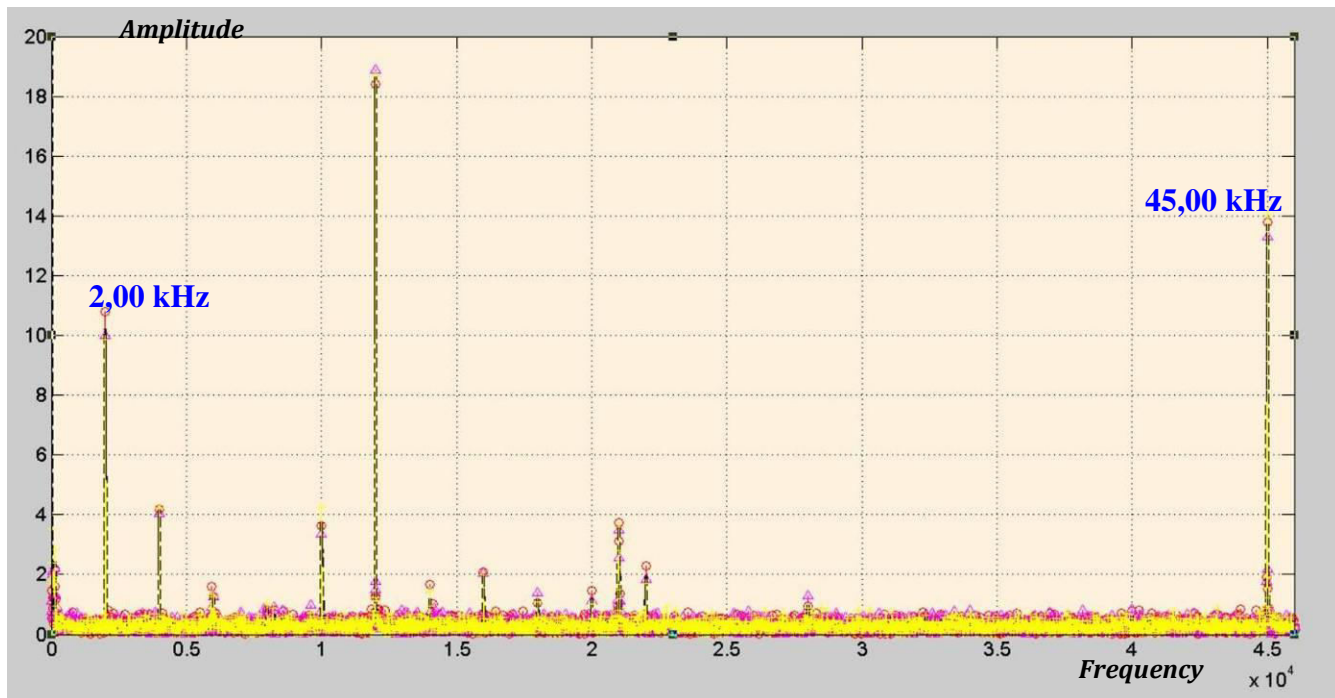
—

Μέση τιμή του φάσματος των τριών μετρήσεων

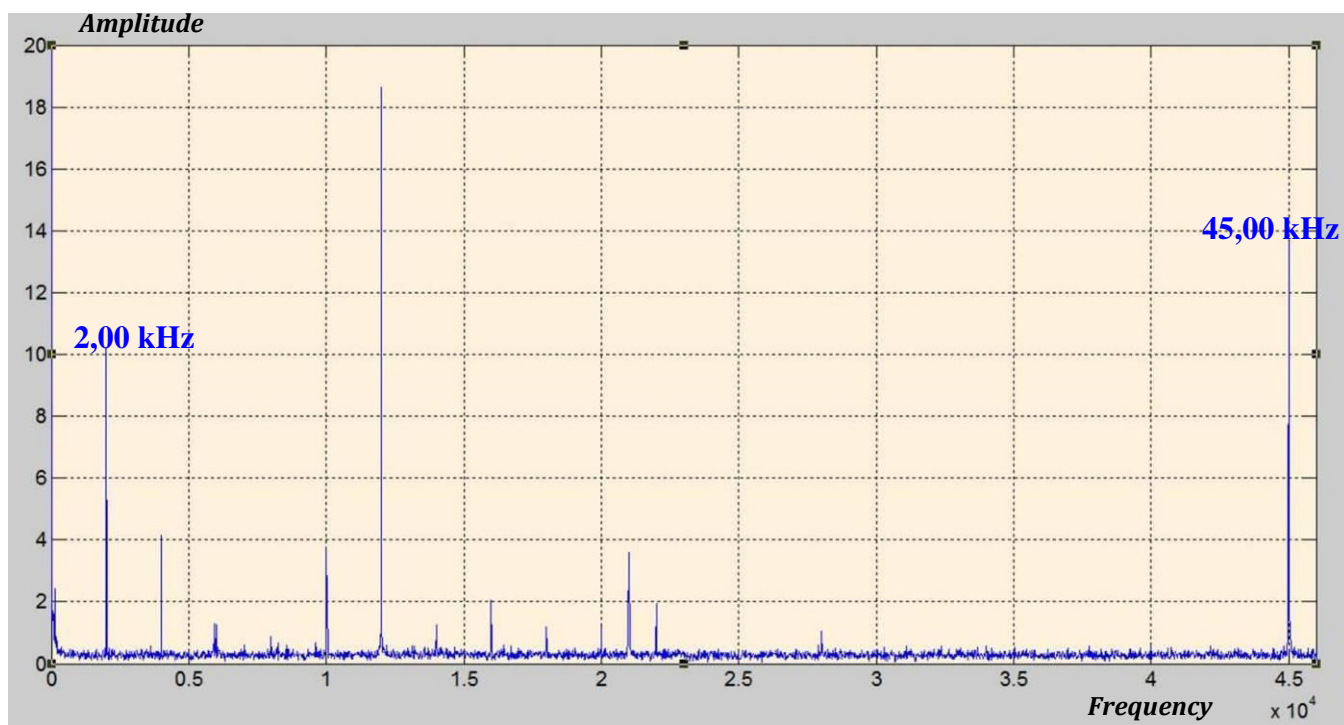
- - - - -

Εικόνα 4.28 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων για τις τρεις μετρήσεις, στην περίπτωση των δονητικό ακουστικών δοκιμών του κύματος μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 45,00 kHz

Το πεδίο του φάσματος για την τέταρτη περίπτωση των μετρήσεων, δίνεται από τα επόμενα γραφήματα (*Εικόνα 4.29 – 4.30*). Όπου στο πρώτο γράφημα απεικονίζονται συνολικά όλες οι μετρήσεις που διενεργήθηκαν, ενώ στο δεύτερο μόνο η μέση τιμή τους, όπως αυτά υπολογίστηκαν με χρήση του λογισμικού MATLAB για την επίλυση των συναρτήσεων Φουριέ και την δημιουργία των γραφημάτων του φάσματος των συχνοτήτων.



Εικόνα 4.29 Πεδίο του φάσματος στην περίπτωση των τριών μετρήσεων, των δονητικό ακουστικών δοκιμών του κύματος μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 45,00 kHz

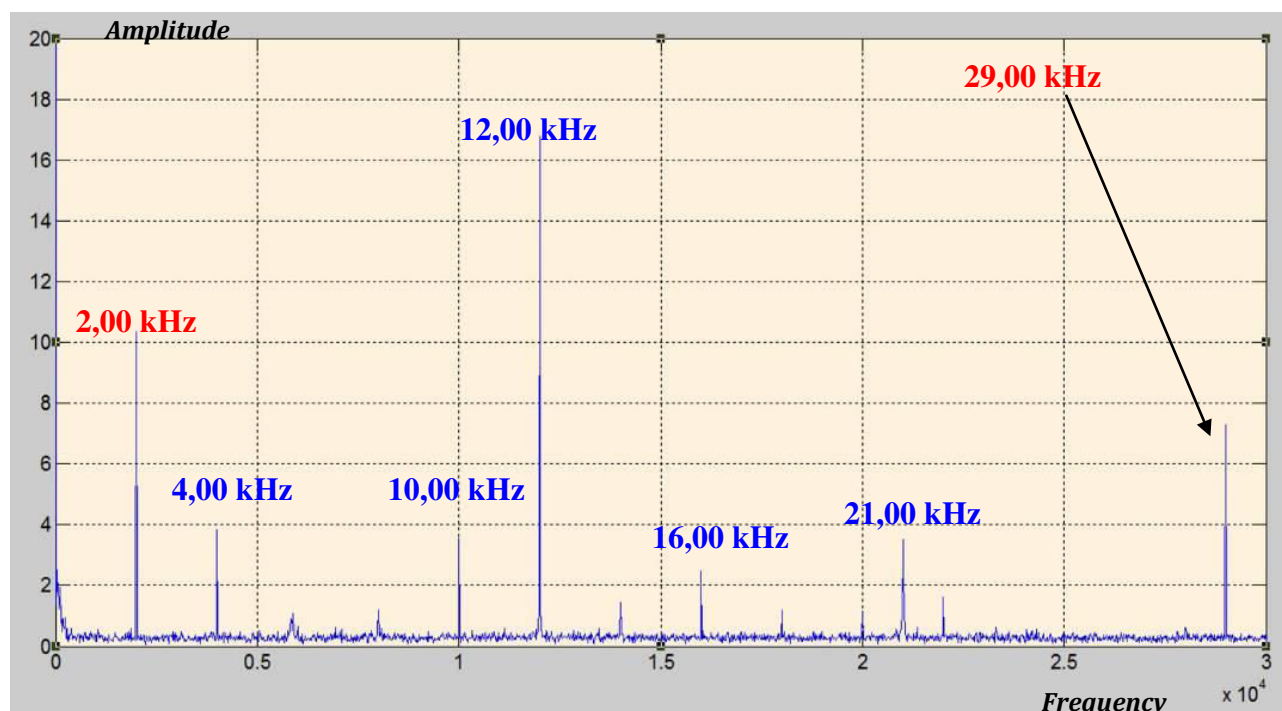


Εικόνα 4.30 Πεδίο του φάσματος για την μέση τιμή των τριών μετρήσεων του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 45,00 kHz

Από το γράφημα της μέσης τιμής του φάσματος των συχνοτήτων παρατηρούμε και σε αυτήν την περίπτωση ότι τόσο οι θεμελιώδεις συχνότητες των κυμάτων μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης όσο και οι ενδιάμεσες αρμόνικες δεν συνοδεύονται από την ανάπτυξη πλευρικών συχνοτήτων, δηλαδή απεικονίζουν τα χαρακτηριστικά του δομικού υλικού και δεν διαθλώνται ή διασκορπίζονται από την ύπαρξη σφαλμάτων.

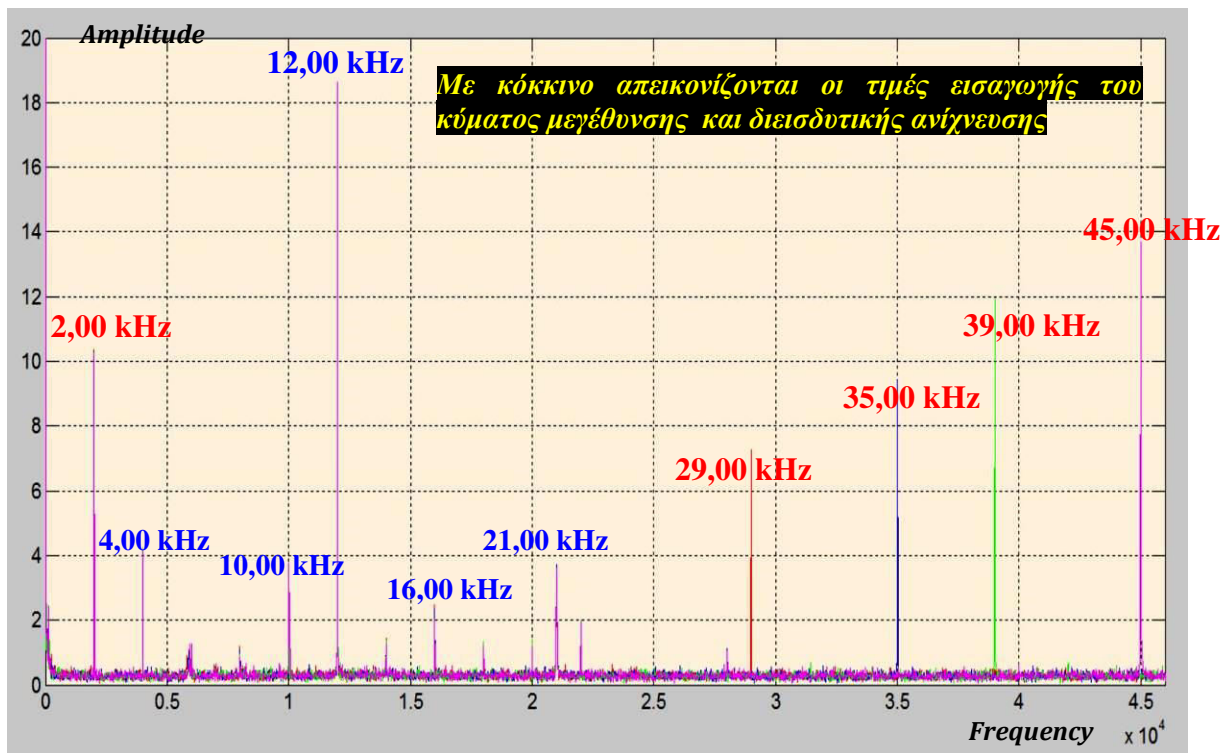
4.5 Συμπεράσματα - Προσδιορισμός των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου

Απο την διενέργεια των παραπάνω μετρήσεων, τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, προσδιορίζονται από την καταγραφή των δράσεων των μηχανικών ταλαντώσεων οι οποίες επαναλαμβάνονται κρατώντας κάθε φορά σταθερή την διέγερση του κύματος μεγέθυνσης, και μεταβαλλόντας τη συχνότητα της κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης από χαμηλότερη σε υψηλότερη. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, οι συχνότητες οι οποίες προσδιορίζουν τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά αναφέρονται συνήθως στο γράφημα του φάσματος ως κορυφές. Το πλάτος της κορυφής για κάθε καταγραφή δίνει ένα σημείο της ιδιομορφής. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την εικόνα 4.31 για μηχανική ταλάντωση χαμηλής συχνότητας "pumping wave" 2,00 kHz, καθώς και διέγερση υψηλής συχνότητας "probing wave" 29,00 kHz, διαπιστώνουμε θεμελιώδεις συχνότητες στα 12,00 kHz, καθώς και κάποιες μικρότερες στα 4,00 kHz, 10,00 kHz, 16,00 kHz και 21,00 kHz.



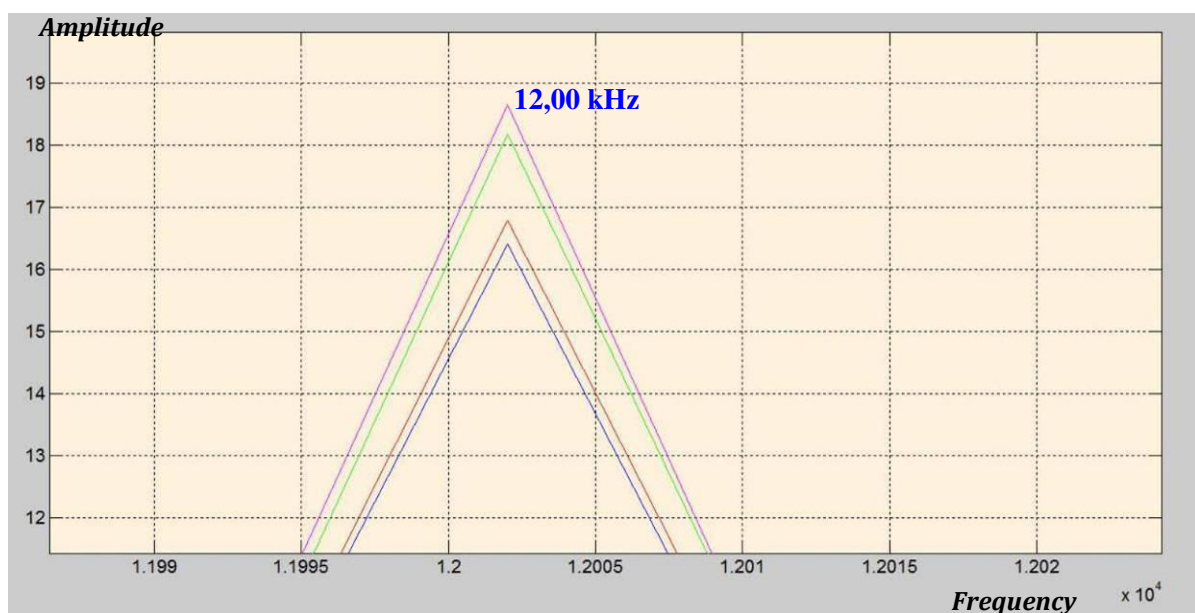
Εικόνα 4.31 Ιδιόμορφες στο πεδίο του φάσματος του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 29,00 kHz

Ωστόσο με την σύνθεση των τεσσάρων διαφορετικών φασμάτων παράγουμε το γράφημα της εικόνας 4.32 όπου διαπιστώνουμε, ότι παρά την ανάλυση των συχνοτήτων του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης οι θεμελιώδεις αρμόνικες εμφανίζονται στις ίδιες συχνότητες.



Εικόνα 4.32 Ιδιόμορφες μετά την σύνθεση των φασμάτων των διαφορετικών συχνοτήτων του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης

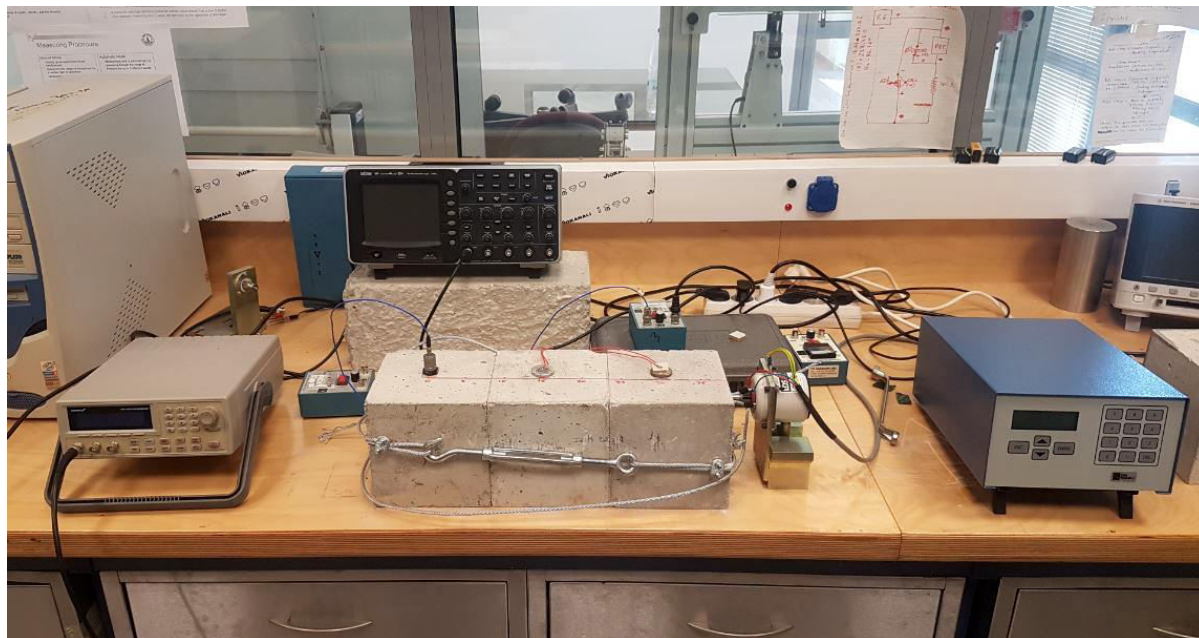
Σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα διαπιστώνουμε ότι μεταβάλλοντας τη συχνότητα της διέγερσης του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης από χαμηλότερη σε υψηλότερη, οι θεμελιώδεις αρμονικές της κατασκευής παραμένουν σταθερές υποδεικνύοντας ότι αφορούν σε ιδιοσυχνότητες και δυναμικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου. Ωστόσο αυτό που μεταβάλλεται είναι το πλάτος των θεμελιωδών συχνοτήτων, το οποίο παρατηρείται κυρίως στην κορυφή των 12,00 kHz. οδηγούμαστε λοιπόν στο συμπέρασμα για την ομοιογένεια του εσωτερικού στο δοκίμιο και την διάδοση της μηχανικής ταλάντωσης χωρίς απώλειες.



Εικόνα 4.33 Εναλλαγές που παρατηρούνται στο πλάτος της θεμελιώδους κορυφής του φάσματος στα 12,00 kHz για τις διαφορετικές τιμές του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης

4.6 Μεταβολή της δυσκαμψίας στο δομικό υλικό

Προκειμένου να διαπιστώσουμε αν το φάσμα των συχνοτήτων επηρεάζεται από την μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του δοκιμίου μεταβάλουμε τα δυναμικά χαρακτηριστικά του, χαλαρώνοντας την συνδεσμολογία του συρματοσχοινου και την περίσφιξη των μεταλλικών συνδέσμων στους τρεις κύβους σκυροδέματος οι οποίοι ενώνονται μεταξύ τους.



Εικόνα 4.34 Συνδεσμολογία πειραματικού εξοπλισμού για την δημιουργία των δοκιμών επάλληλης διαμόρφωσης των κυμάτων μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης

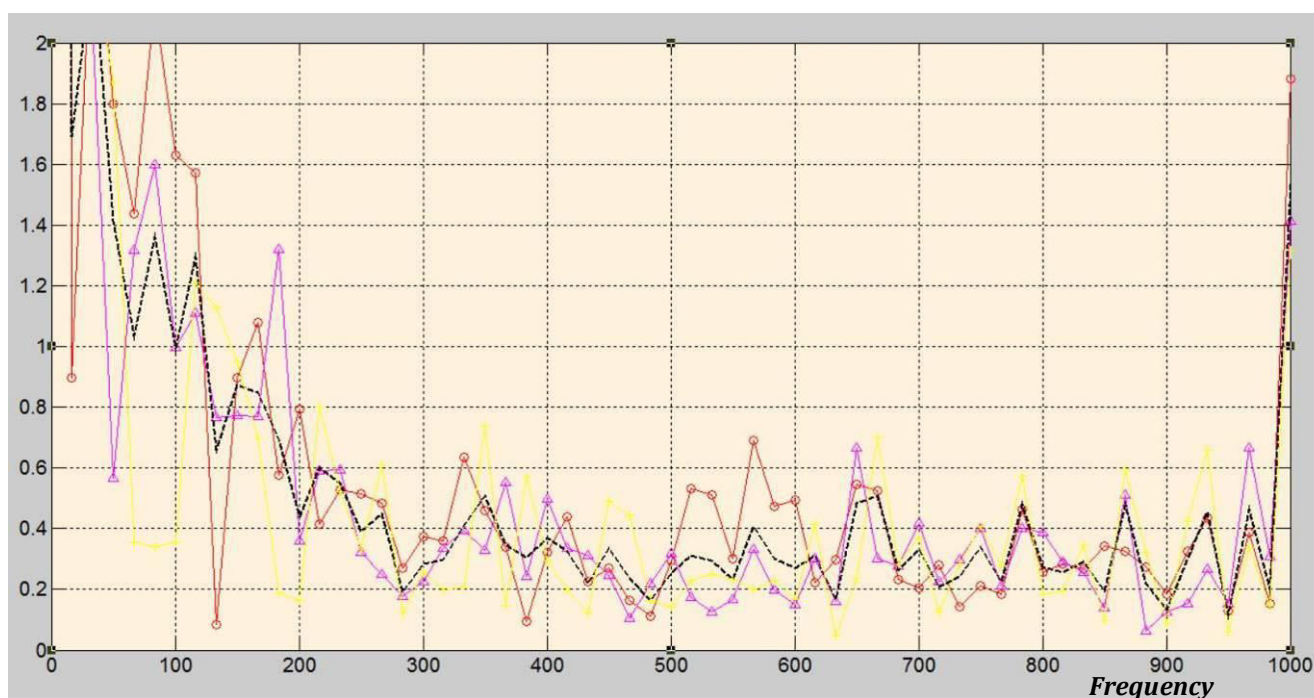
Σε αυτήν την κατάσταση διαπιστώνουμε τις μεταβολές που πραγματοποιούνται υπό την επιβολή των δράσεων εξαναγκασμένης ταλάντωσης (επαναλαμβάνοντας την διαδικασία όπως πραγματοποιήθηκε στο υγιές δοκίμιο), προκειμένου μέσα από τις θεμελιώδεις διαφορές των φάσματος απόκρισης για τα διαφορετικά ιδιομορφικά χαρακτηριστικά λόγω της μεταβολής της δυσκαμψίας να διεξαχθούν σημαντικές πληροφορίες για την δομική κατάσταση του υλικού. Όπως και προηγουμένως η διαδικασία της καταγραφής των ιδιομορφών στο υπό εξέταση δοκίμιο βασίζεται στην εφαρμογή των δυο τύπων εξαναγκασμένης ταλάντωσης με σκοπό την διάδοση κυμάτων στο εσωτερικό του. Για την διαπίστωση των μεταβολών που πραγματοποιούνται σε κατάσταση αστοχίας (προκειμένου να υπάρχει το ίδιο μέτρο σύγκρισης) εφαρμόζονται οι ίδιες συχνότητες εξαναγκασμένης ταλάντωσης με αυτές του υγιούς δοκιμίου.

Αρχικά, στο δοκίμιο γίνεται χρήση εξωτερικού διεγέρτη μηχανικών ταλαντώσεων (shaker actuator) ο οποίος είναι συνδεδεμένος με γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος για την δημιουργία μηχανικής ταλάντωσης και την διάδοση του κύματος μεγέθυνσης χαμηλής συχνότητας. Στην συνέχεια έχουμε ενεργοποίηση της δεύτερης μηχανικής ταλάντωσης, η οποία πραγματοποιείται μέσω διοχέτευσης ημιτονοειδούς ρεύματος από δεύτερη γεννήτρια, ενεργοποιώντας κατά αυτόν τον τρόπο, το πιεζοηλεκτρικό πλακίδιο, και μεταφέροντας

μηχανική ενέργεια στο δοκίμιο. Για την διεξαγωγή των μετρήσεων κρατάμε σταθερή την συχνότητα διέγερσης του κύματος των μεγέθυνσης 2,00 kHz, ενώ εναλλάσσουμε τη συχνότητα της διέγερσης του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης από χαμηλότερη σε υψηλότερη για τις τιμές των 29,00 kHz, 35,00 kHz, 39,00 kHz, και 45,00 kHz.

4.6.1 Πρώτο ζεύγος μετρήσεων για την μεταβολή της δυσκαμψίας του δοκιμίου

Εφαρμόζουμε την ίδια πειραματική διαδικασία στο δοκίμιο μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας του. Για την διέγερση των δυο διαφορετικών τύπων εξαναγκασμένης ταλάντωσης η χαμηλή συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης παραμένει σταθερή στα **2,00 kHz**, ενώ η ισχύς του ημιτονοειδούς κύματος ορίζεται στα **29,00 kHz**. Η διαδικασία ολοκληρώνεται κατόπιν τριών μετρήσεων, (όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις). Κατά συνέπεια από την διενέργεια των μετρήσεων οι αρμονικές του φάσματος των συχνοτήτων που παράγονται μέσω του μετασχηματισμού Φουριέ μας δίνουν τα παρακάτω αποτελέσματα.



Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων πρώτης μέτρησης

—

Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων δεύτερης μέτρησης

—

Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων τρίτης μέτρησης

—

Μέση τιμή του φάσματος των τριών μετρήσεων

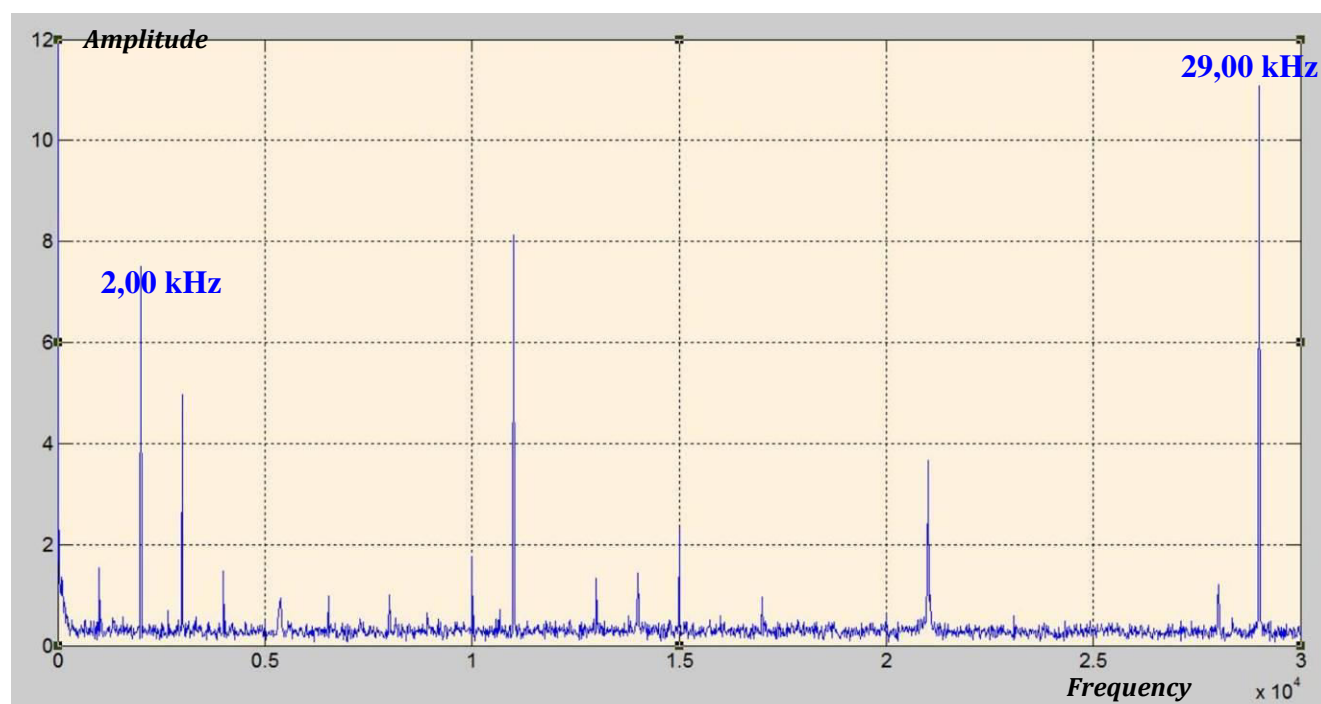
- - -

Εικόνα 4.35 Πεδίο του φάσματος των τριών μετρήσεων, για την μεταβολή της δυσκαμψίας, στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 29,00 kHz

Το πεδίο του φάσματος για όλο το εύρος της συχνότητας για την οποία εξετάστηκε, δίνεται από τα επόμενα γραφήματα (*Εικόνα 4.36 – 4.37*). Όπου στο πρώτο γράφημα απεικονίζονται συνολικά όλες οι μετρήσεις που διενεργήθηκαν, ενώ στο δεύτερο μόνο η μέση τιμή τους.



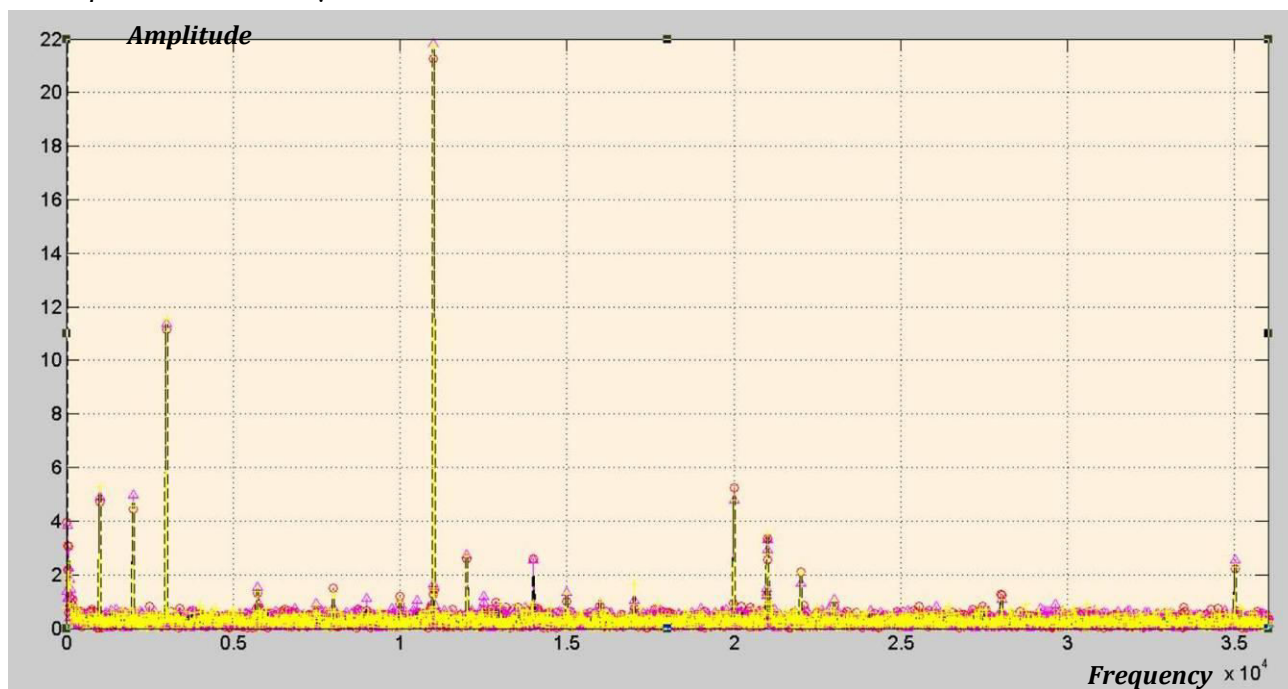
Εικόνα 4.36 Πεδίο του φάσματος στην περίπτωση των τριών μετρήσεων, μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας, για διέγερση μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 29,00 kHz



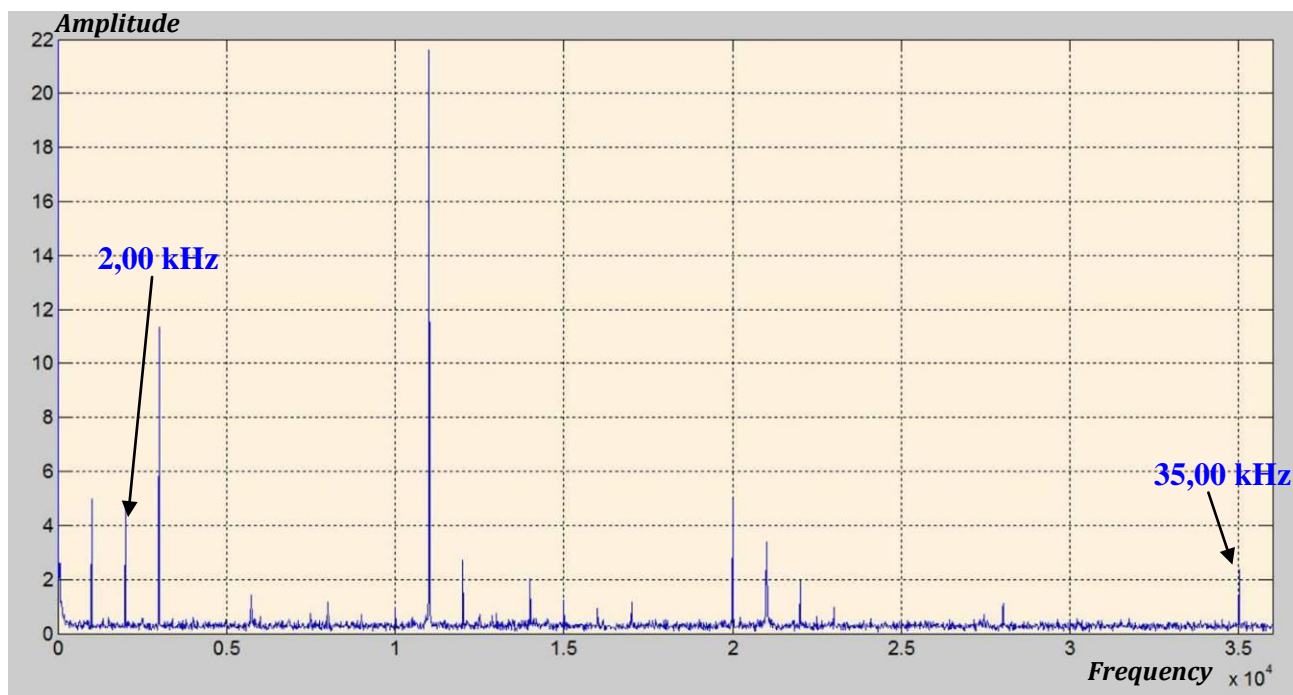
Εικόνα 4.37 Πεδίο του φάσματος για την μέση τιμή των τριών μετρήσεων μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας, για διέγερση μεγέθυνσης των 2,00 kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 29,00 kHz

4.6.2 Δεύτερο ζεύγος μετρήσεων για την μεταβολή της δυσκαμψίας του δοκιμίου

Για την διεξαγωγή της επόμενης μέτρησης μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας του δοκιμίου, η χαμηλή συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης παραμένει σταθερή στα **2,00 kHz**, ενώ η ισχύς του ημιτονοειδούς κύματος ορίζεται στα **35,00 kHz**. οι αρμονικές του φάσματος των συχνοτήτων που παράγονται μέσω του μετασχηματισμού Φουριέ μας δίνουν τα παρακάτω αποτελέσματα.



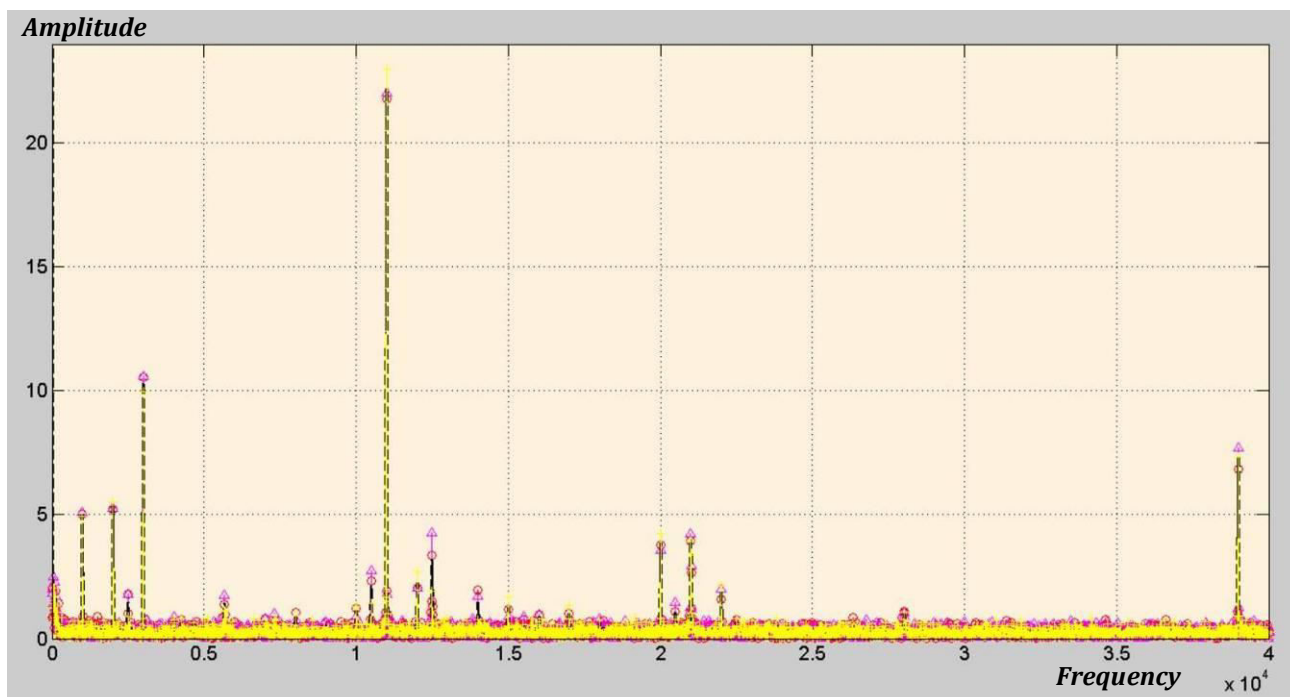
Εικόνα 4.38 Πεδίο του φάσματος στην περίπτωση των τριών μετρήσεων, μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας, για την διέγερση μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 35,00 kHz



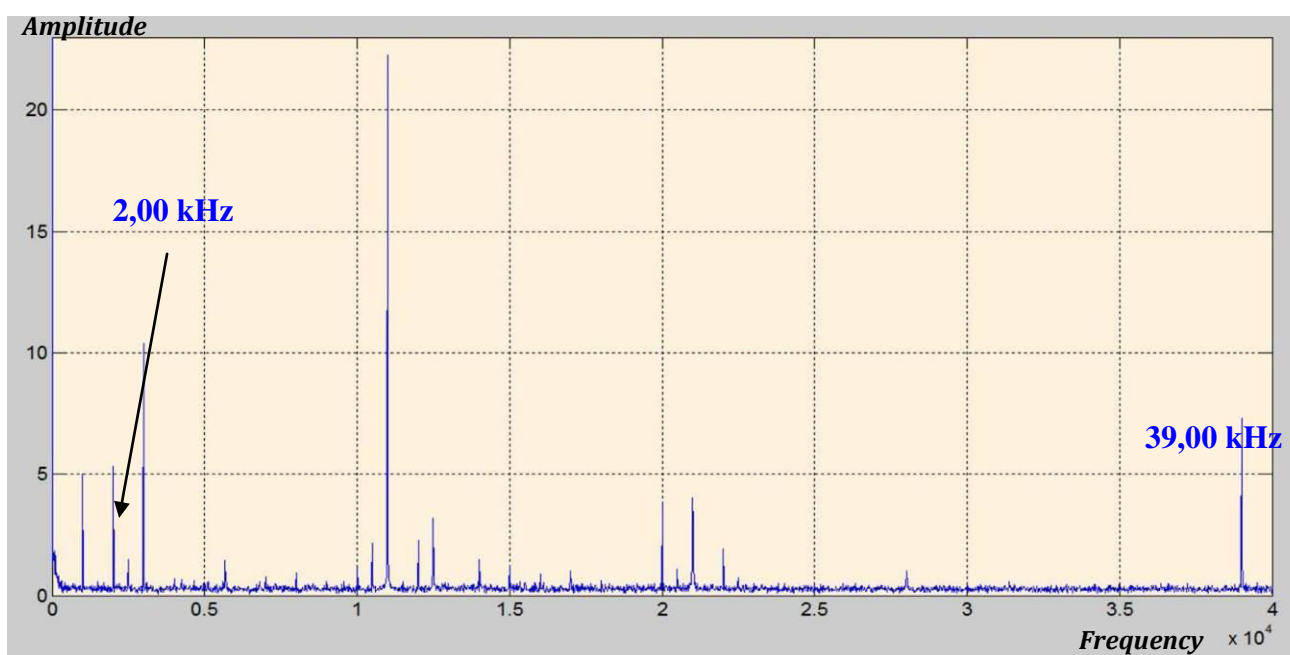
Εικόνα 4.39 Πεδίο του φάσματος για την μέση τιμή των τριών μετρήσεων μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας, για την διέγερση μεγέθυνσης των 2,00 kHz , και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 35,00 kHz

4.6.3 Τρίτο ζεύγος μετρήσεων για την μεταβολή της δυσκαμψίας του δοκιμίου

Για την διεξαγωγή της τρίτης μέτρησης μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας, η χαμηλή συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης παραμένει στα **2,00 kHz**, ενώ η ισχύς του ημιτονοειδούς κύματος ορίζεται στα **35,00 kHz**. οι αρμονικές του φάσματος των συχνοτήτων που παράγονται μέσω του μετασχηματισμού Φουριέ μας δίνουν τα παρακάτω αποτελέσματα.



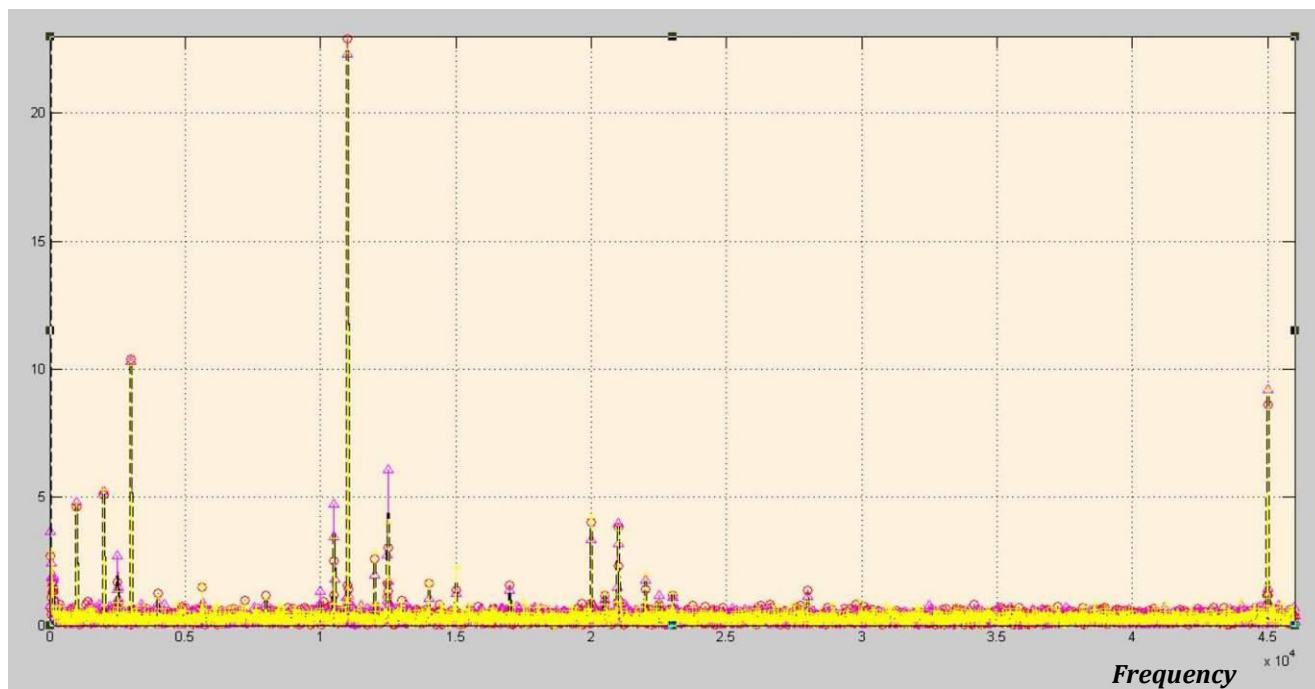
Εικόνα 4.40 Πεδίο του φάσματος στην περίπτωση των τριών μετρήσεων, μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας, για διέγερση μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 39,00 kHz



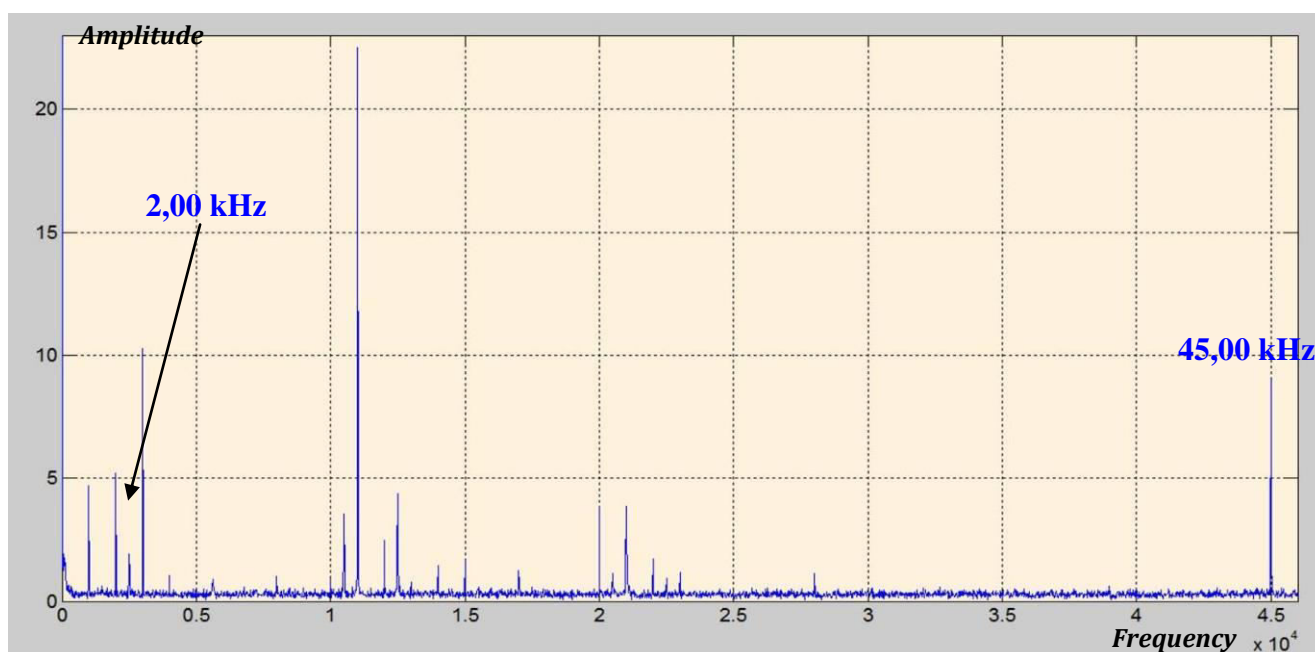
Εικόνα 4.41 Πεδίο του φάσματος για την μέση τιμή των τριών μετρήσεων μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας, για διέγερση μεγέθυνσης των 2,00 kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 39,00 kHz

4.6.4 Τέταρτο ζεύγος μετρήσεων για την μεταβολή της δυσκαμψίας του δοκιμίου

Για την διεξαγωγή της τελευταίας μέτρησης μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας η χαμηλή συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης παραμένει σταθερή στα **2,00 kHz**, ενώ η ισχύς του ημιτονοειδούς κύματος ορίζεται στα **45,00 kHz**. οι αρμονικές του φάσματος των συχνοτήτων που παράγονται μέσω του μετασχηματισμού Φουριέ μας δίνουν τα παρακάτω αποτελέσματα.



Εικόνα 4.42 Πεδίο του φάσματος στην περίπτωση των τριών μετρήσεων, μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας, για διέγερση μεγέθυνσης των 2,00kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 45,00 kHz



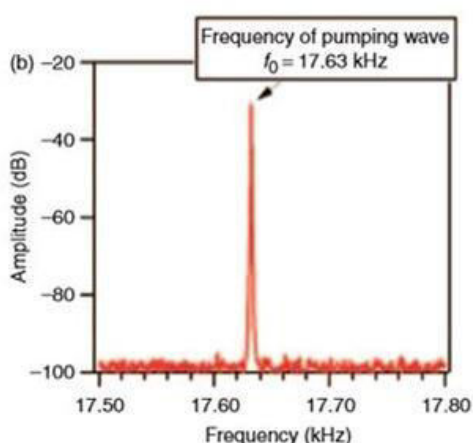
Εικόνα 4.43 Πεδίο του φάσματος για την μέση τιμή των τριών μετρήσεων μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας, για διέγερση μεγέθυνσης των 2,00 kHz και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 45,00 kHz

4.7 Το φαινόμενο των πλευρικών διακυμάνσεων (side bands)

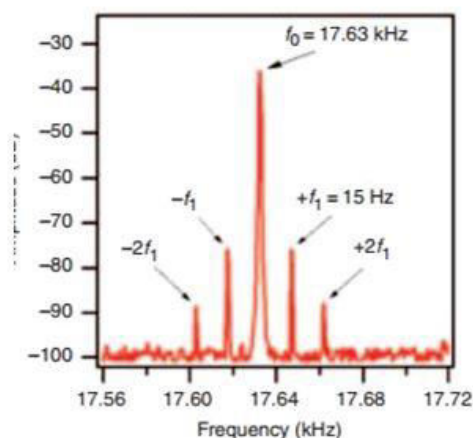
Η επαλληλία και η σύνθεση των κυμάτων τα όποια διαδίδονται ταυτόχρονα στο εσωτερικό του δοκιμίου μέσω της καταγραφής στον παλμογράφο και της διαδικασίας Φουριέ μας δίνουν το πλάτος των θεμελιωδών αρμονικών από τις οποίες διεξάγονται συμπεράσματα για τα δυναμικά χαρακτηριστικά του στοιχείου αλλά και των μεταβολών του.

Για κατασκευές με ομοιογένεια, (χωρίς δομική φθορά) διαπιστώσαμε ότι οι γραφικές παραστάσεις των θεμελιωδών συχνοτήτων στο πεδίο του φάσματος δεν αλληλοσυνδέονται. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην περίπτωση ομοιογένειας στο εσωτερικό του υλικού, έχω σωστή διάδοση της μηχανικής ενέργειας χωρίς ανακλάσεις από αστοχίες ή άλλες δομικές φθορές, σε αυτή την περίπτωση στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων έχουμε μόνο κορυφές θεμελιωδών συχνοτήτων.

Στην περίπτωση του σφάλματος, ένα μοτίβο από ζεύγη πλευρικών συχνοτήτων – διακυμάνσεων μπορεί να παραχθεί στο πεδίο του φάσματος. Τα πλάτη των πλευρικών συχνοτήτων αυξάνονται ανάλογα με το εύρος και την ύπαρξη σφάλματος στο υλικό, και αντιπροσωπεύουν ένα ενδεικτικό δείκτη μέτρησης για τον βαθμό του.



Εικόνα 4.44 Θεμελιώδης συχνότητα στην περίπτωση δοκιμίου χωρίς δομικό ελάττωμα



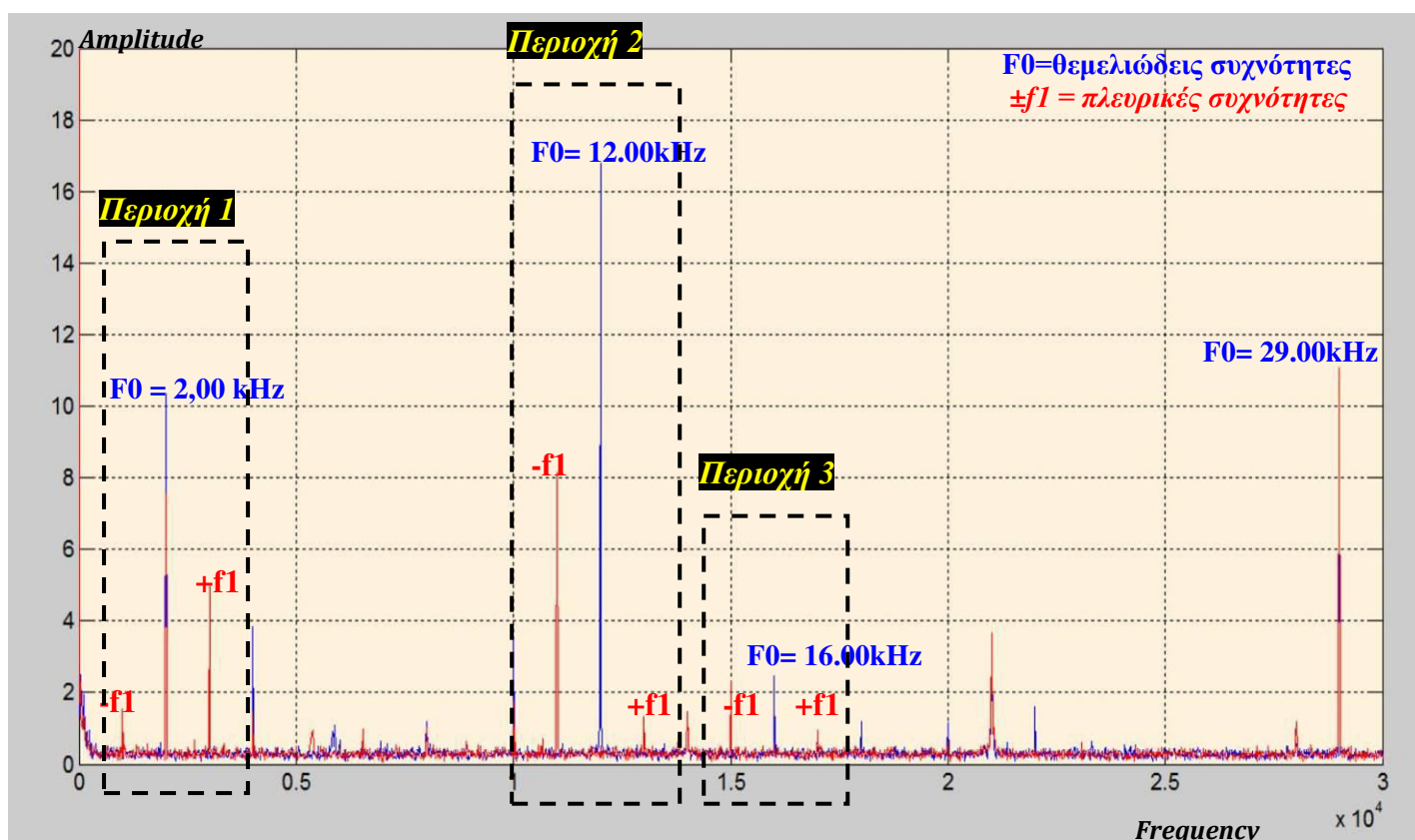
Εικόνα 4.45 Ανάπτυξη πλευρικών διακυμάνσεων γύρω από την θεμελιώδη συχνότητα στην περίπτωση δοκιμίου με δομικό ελάττωμα

Η σύνθεση των συχνοτήτων οι οποίες επιδρούν στο δοκίμιο ταυτόχρονα, ενεργοποιεί τα ζεύγη των πλευρικών συχνοτήτων γύρω από τις θεμελιώδεις κορυφές του φάσματος στην περίπτωση του δομικού σφάλματος. Υπό την εφαρμογή των παραπάνω δράσεων οι υγιείς δομές θα αποκριθούν με ενέργεια μόνο στις συχνότητες μεγέθυνσης και διεισδυτικής αντίχνευσης. Ωστόσο, με την παρουσία των ζημιών, δημιουργούνται πρόσθετα μη γραμμικά στοιχεία λόγω μη γραμμικών αποτελεσμάτων οδηγώντας στην ανάμιξη των δύο σημάτων εισόδου. Για παράδειγμα, η παρουσία μιας ρωγμής δημιουργεί διαφορετικά χαρακτηριστικά δυσκαμψίας παράγοντας μια πιο σύνθετη δονητική απόκριση από εκείνη που παρατηρήθηκε σε ένα συστατικό χωρίς ρωγμές. Στην περίπτωση εμφάνισης των πλευρικών συχνοτήτων καταλαβαίνουμε ότι υπάρχει σφάλμα, δεν υπάρχει σωστή διάδοση του κύματος λόγω

ανάκλασης από αστοχία του υλικού στο εσωτερικό του. Αυτό χαρακτηρίζει και την μη γραμμική συμπεριφορά του δοκιμίου.

4.7.1 Συμπεράσματα μετρήσεων για την μεταβολή της δυσκαμψίας του δοκιμίου

Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου, και προκειμένου να διαπιστώσουμε αν η αλληλεπίδραση των διεγέρσεων, ενεργοποιεί τα ζεύγη των πλευρικών συχνοτήτων γύρω από τις θεμελιώδεις κορυφές του φάσματος στην περίπτωση μεταβολής της δυσκαμψίας του μέσου διάδοσης παράγουμε την σύνθεση των γραφικών παραστάσεων των συχνοτήτων των φασμάτων, για την περίπτωση του υγιούς δοκιμίου και την περίπτωση όπου έχουμε χαλαρώσει τους δεσμούς συνάφειας. Η πρώτη γραφική παράσταση (εικόνα 4.46) αφορά στην σύνθεση των φασμάτων, όταν η συχνότητα του κύματος μεγέθυνσης παραμένει σταθερή στα 2,00 kHz, ενώ η συχνότητα του ημιτονοειδούς για την ανάπτυξη του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης ορίζεται στα 29,00 kHz. Από την σύγκριση μέσω της σύνθεσης, γίνεται ξεκάθαρο ότι ένα ζεύγος πλευρικών συχνοτήτων εμφανίζεται στο πεδίο της συχνότητας του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz, καθώς και γύρω από τις θεμελιώδεις συχνότητες των 12,00 kHz, και 16,00 kHz. Η ανάπτυξη αυτών των πλευρικών συχνοτήτων είναι ενδεικτικές του σφάλματος του δοκιμίου στο οποίο έχουμε χαλαρώσει τους δεσμούς συνάφειας μεταξύ των τριών κύβων σκυροδέματος.

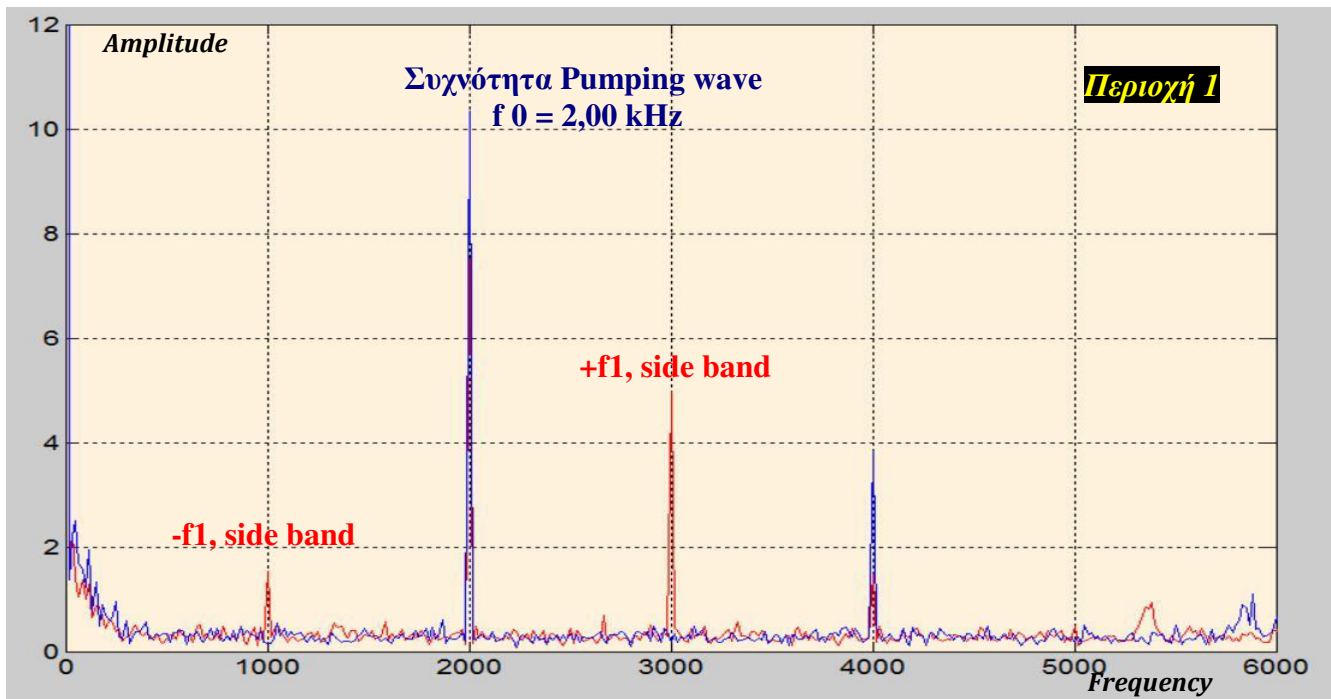


Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση υγιούς δοκιμίου

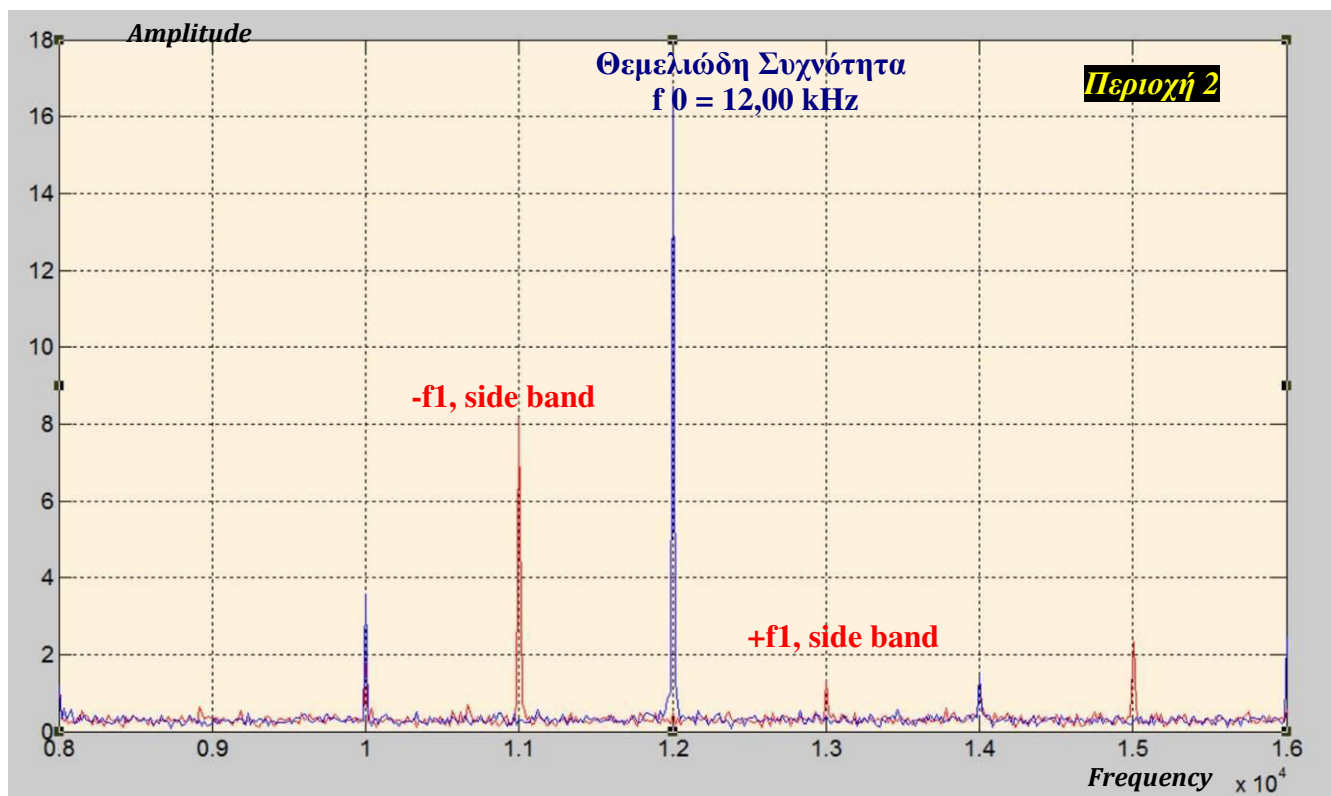
Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση μεταβολής της δυσκαμψίας

Εικόνα 4.46 Ανάπτυξη του φαινομένου των *side bands* για την πρώτη περίπτωση των μετρήσεων μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας στο δοκίμιο

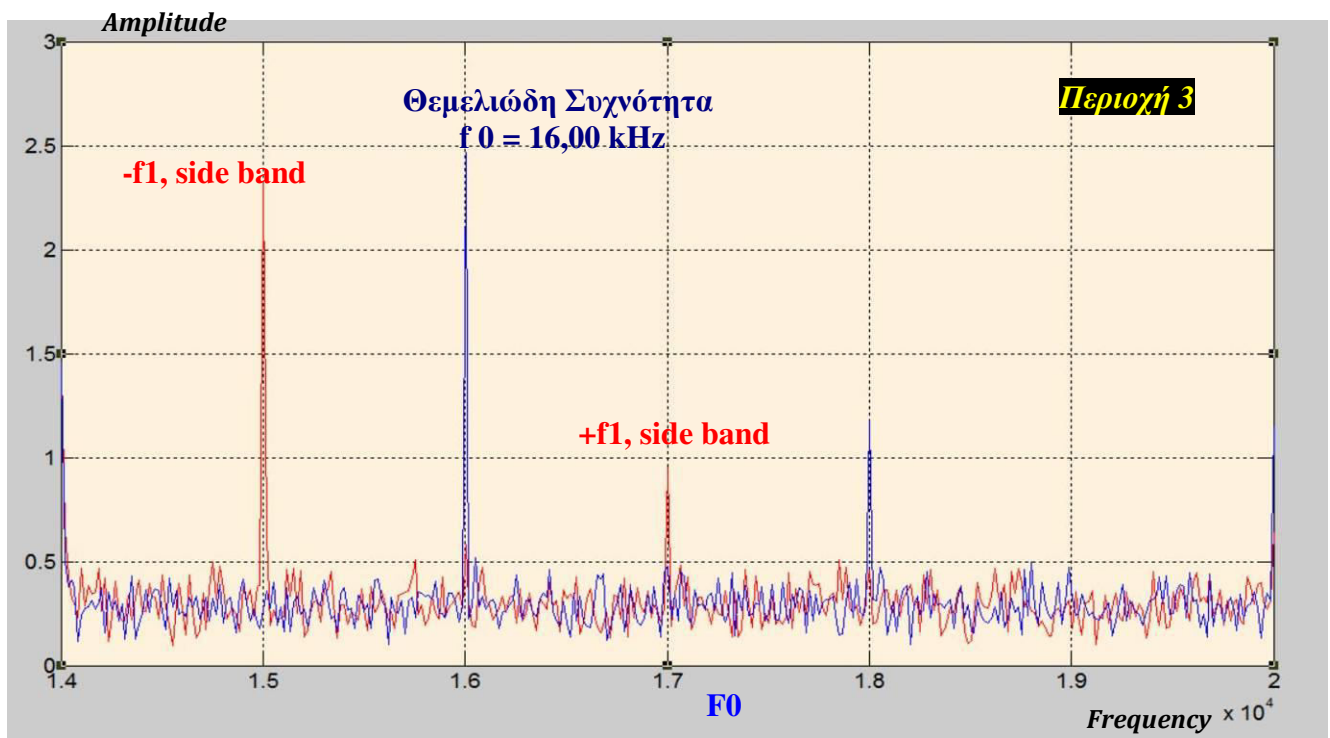
οι εικόνες 4.47, 4.48 και 4.49 μας δείχνουν πιο αναλυτικά τις περιοχές 1, 2, 3 όσο αφορά την ανάπτυξη των πλευρικών διακυμάνσεων γύρω από τις θεμελιώδεις συχνότητες στην πρώτη περίπτωση των μετρήσεων μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας.



Εικόνα 4.47 Ανάπτυξη του φαινομένου των side bands γύρω από την συχνότητα του κύματος μεγέθυνσης

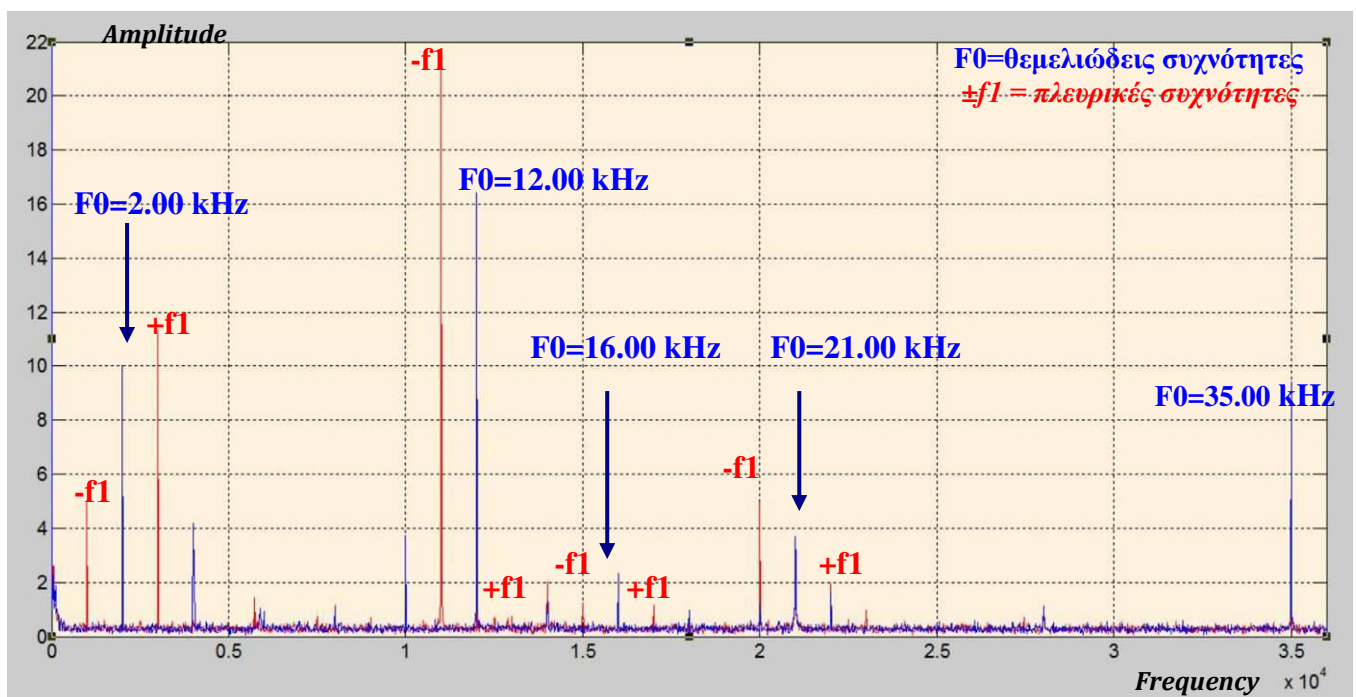


Εικόνα 4.48 Ανάπτυξη του φαινομένου των side bands γύρω από την θεμελιώδη συχνότητα των 12,00 kHz



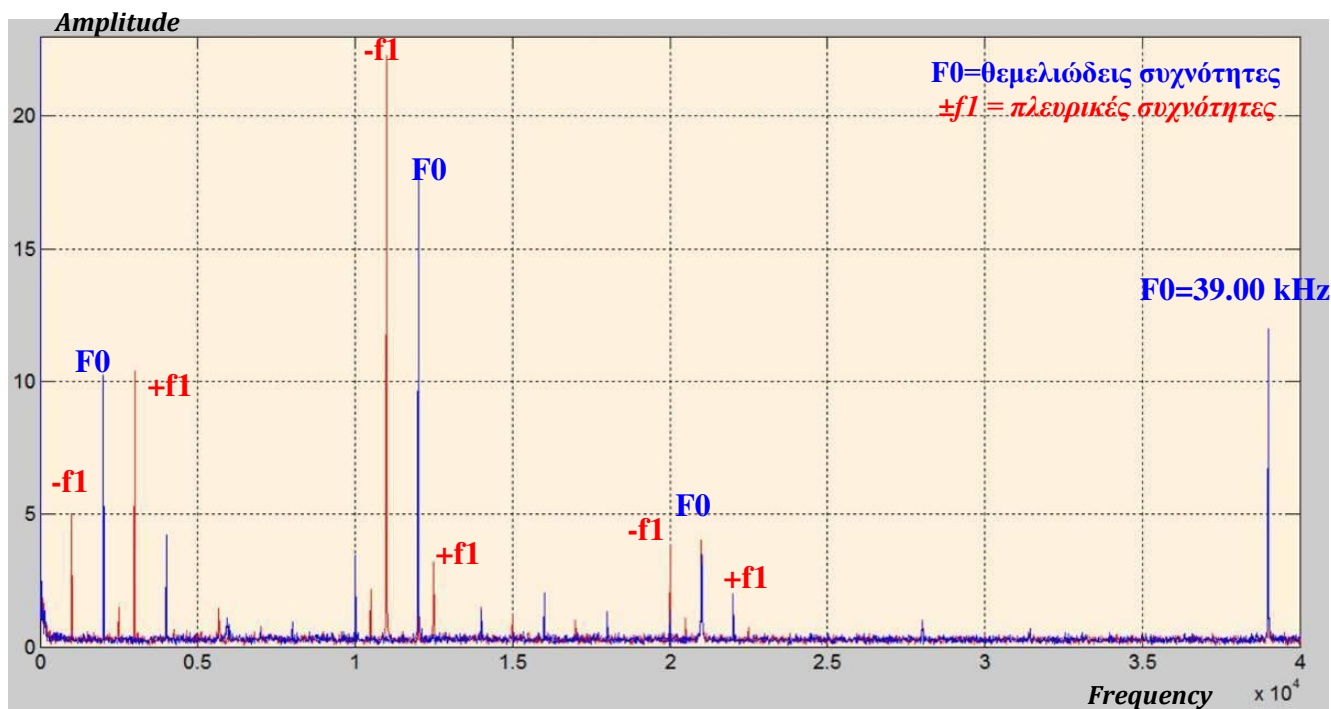
Εικόνα 4.49 Ανάπτυξη του φαινομένου των side bands γύρω από την θεμελιώδη συχνότητα των 16,00 kHz

Το φαινόμενο των πλευρικών συχνοτήτων διαπιστώνεται και από την δεύτερη περίπτωση των μετρήσεων, όπου η συχνότητα του ημιτονοειδούς για την ανάπτυξη του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης ορίζεται στα 35,00 kHz. Η ανάπτυξη των πλευρικών συχνοτήτων επαναλαμβάνεται όπως και προηγουμένως γύρω από της ίδιες θεμελιώδεις συχνότητες στο πεδίο του φάσματος, ενώ σε αυτήν την περίπτωση το φαινόμενο είναι πιο έντονο, αφού έχω δημιουργία side bands και για την συχνότητα των 21,00 kHz.



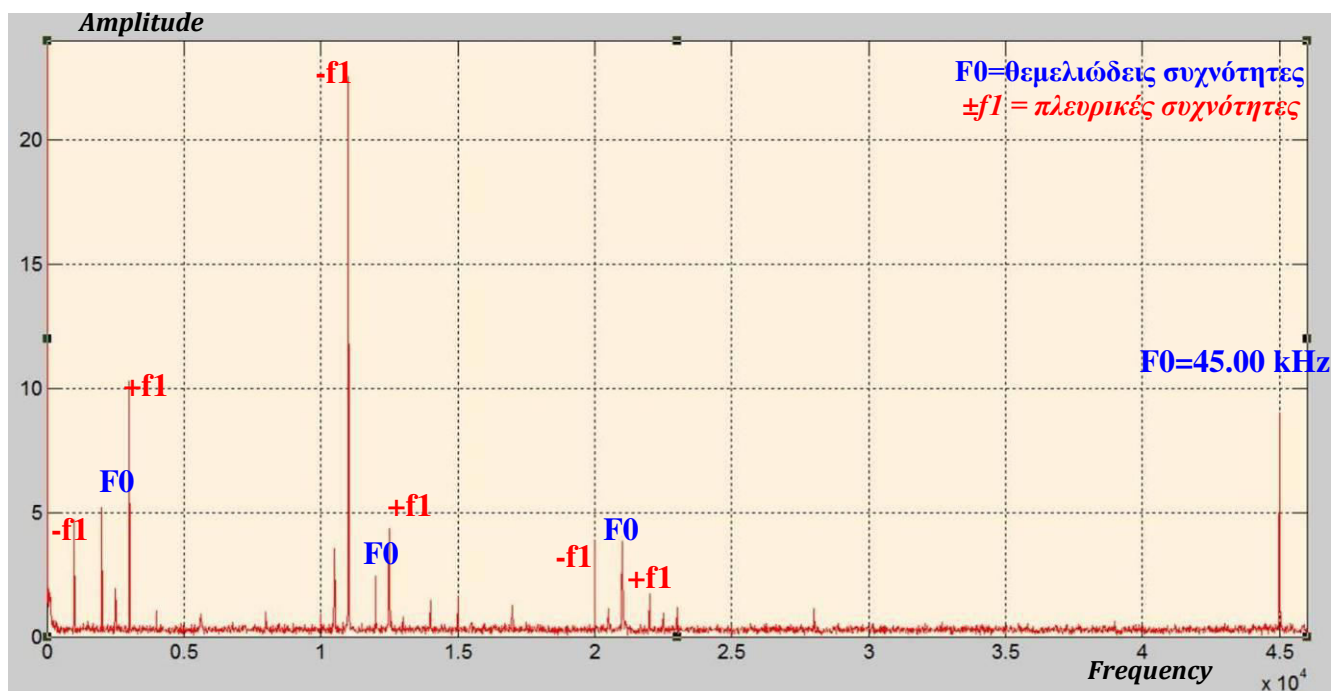
Εικόνα 4.50 Ανάπτυξη του φαινομένου των side bands για την δεύτερη περίπτωση των μετρήσεων μετά την μεταβολή δυσκαμψίας στο δοκίμιο

Το φαινόμενο των πλευρικών συχνοτήτων διαπιστώνεται και από την τρίτη περίπτωση των μετρήσεων, όπου η συχνότητα του ημιτονοειδούς για την ανάπτυξη του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης ορίζεται στα 39,00 kHz.



Εικόνα 4.51 Ανάπτυξη του φαινομένου των side bands για την τρίτη περίπτωση των μετρήσεων μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας στο δοκίμιο

Το φαινόμενο των πλευρικών συχνοτήτων διαπιστώνεται και από την τρίτη περίπτωση των μετρήσεων, όπου η συχνότητα του ημιτονοειδούς για την ανάπτυξη του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης ορίζεται στα 39,00 kHz.



Εικόνα 4.52 Ανάπτυξη του φαινομένου των side bands για την τέταρτη περίπτωση των μετρήσεων μετά την μεταβολή της δυσκαμψίας στο δοκίμιο

4.8 Δείκτες Βλάβης

Ένα από τα κυριότερα σημεία για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών είναι ο καθορισμός κατάλληλων συναρτήσεων των μεγεθών απόκρισης που υπολογίστηκαν από την ανάλυση των δοκιμίων που μελετήθηκαν, οι οποίες μπορούν να εκφράσουν το βαθμό βλάβης που έχει υποστεί κάθε στοιχείο της κατασκευής αλλά και η κατασκευή ως σύνολο. Οι συναρτήσεις αυτές ονομάζονται δείκτες βλάβης (ή συναρτήσεις βλάβης) μπορεί να περιέχουν μία ή περισσότερες παραμέτρους βλάβης.

Οι δείκτες βλάβης προέκυψαν από την ανάγκη να εκτιμηθεί ποσοτικά ο βαθμός βλάβης ενός στοιχείου ή και μιας κατασκευής στο σύνολό της, και να εκφραστεί όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά η υφιστάμενη κατάσταση τους από την άποψη της υποβάθμισης της συνολικής αντοχής τους, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ταξινόμηση και η αντικειμενική σύγκριση στοιχείων ή κατασκευών που έχουν υποστεί οποιασδήποτε μορφής βλάβη [20].

Η απλούστερη δυνατή μεθοδολογία αξιολόγησης της διαφοροποίησης της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής είναι ο προσδιορισμός στατιστικών μεγεθών τα οποία στηρίζονται στον υπολογισμό της απόκλισης (Deviation) μεταξύ μιας Κατάστασης Αναφοράς (RS) σε συσχέτιση με κάποια Τρέχουσα Κατάσταση (CS), του δομικού συστήματος. Τα μεγέθη αυτά συναντούνται στη διεθνή βιβλιογραφία ως Δείκτες Βλάβης (Damage Index). Ο πιο διαδεδομένος δείκτης βλάβης είναι ο RMSD (Root Mean Square Deviation) ο οποίος περιγράφονται μαθηματικά από τις παρακάτω σχέσεις :

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (\hat{y}_t - y_t)^2}{T}}.$$

[28]

Το RMSD του αριθμού των μεταβολών t της εξαρτώμενης μεταβλητής \bar{y}_t , για μεταβολές οι οποίες πραγματοποιούνται για χρονική περίοδο T , υπολογίζονται για αυτήν την χρονική περίοδο T ως τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου των τετραγώνων των αποκλίσεων.

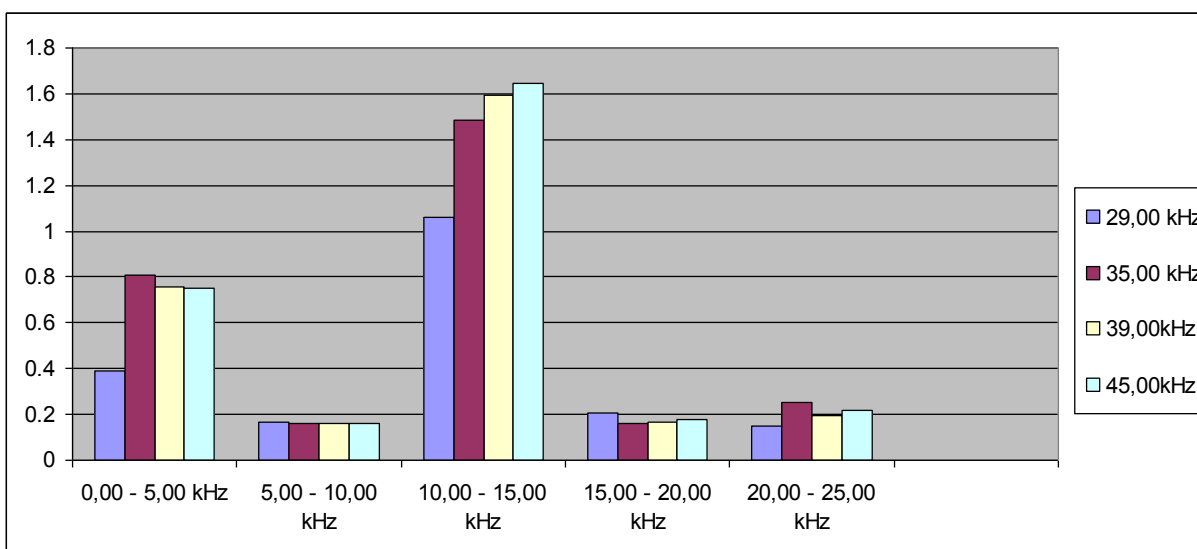
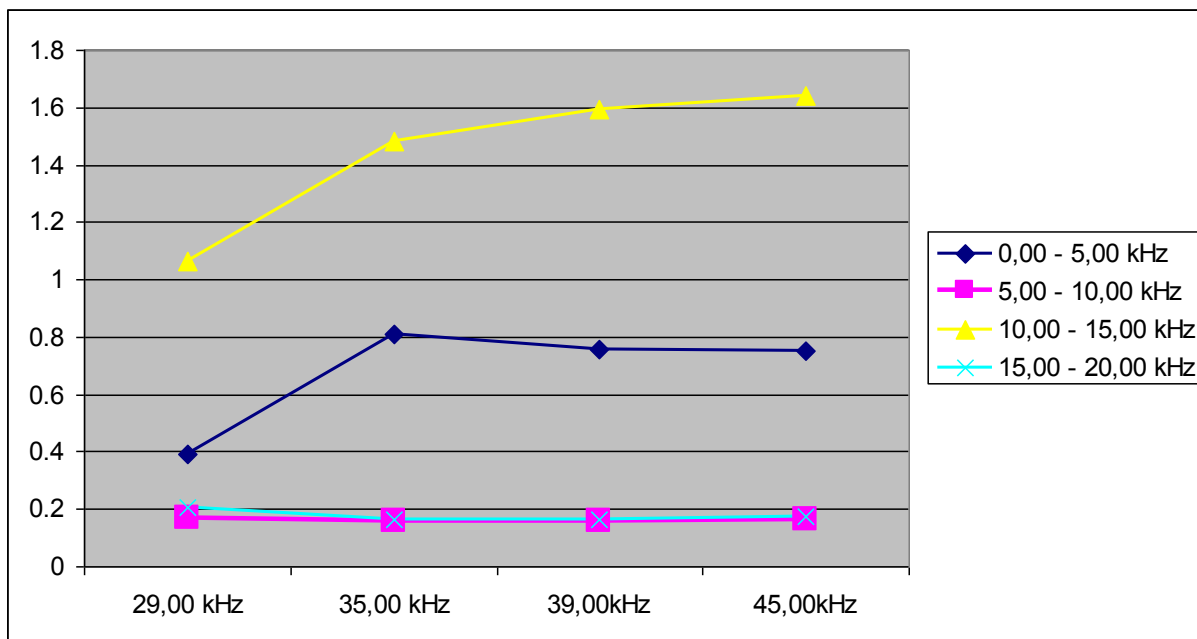
Σε μερικές περιπτώσεις, το RMSD χρησιμοποιείται για να συγκρίνει τις διαφορές ανάμεσα σε δύο χρονικές στιγμές που μπορεί να μεταβάλλονται, έτσι ώστε καμία από αυτές να μην μπορεί να είναι αποδεκτή ως «πρότυπο». Για παράδειγμα, όταν μετράμε τη μέση διαφορά μεταξύ δύο χρονικών περιόδων μεταβολής. Σε αυτήν την περίπτωση ο τύπος γίνεται :

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (x_{1,t} - x_{2,t})^2}{T}}.$$

[28]

Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται οι τιμές των δεικτών RMSD όπως προσδιορίστηκαν γύρω από τις θεμελιώδεις αρμονικές στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων, για τις 4 περιπτώσεις των ταυτόχρονων διεγέρσεων του κύματος διεισδυτικής

ανίχνευσης των 29,00 kHz, 35,00 kHz, 39,00 kHz και 45,00 kHz και για ένα εύρος $\pm 5,00$ kHz γύρω από αυτές, ώστε να συμπεριλαμβάνονται τα side bands. Από την τιμή των δεικτών βλάβης επιβεβαιώνεται αυτό που εποπτικά μπορεί να διαπιστωθεί μέσω από την διαδικασία Φουριέ σχετικά με την μεταβολή της δυσκαμψίας στο δοκίμιο. Η διαφοροποίηση των δεικτών βλάβης γύρω από τις συχνότητες των 0,00 έως 5,00 kHz, και 10,00 έως 15,00 kHz όπου και εντοπίζονται οι θεμελιώδεις αρμόνικες του δοκιμίου αποτυπώνουν την μεταβολή της δομικής ακεραιότητας του δομικού συστήματος το οποίο εξετάζεται λόγω της ανάπτυξης μεγάλου πλάτους πλευρικών συχνοτήτων



Εικόνα 4.53 Τιμές των δεικτών *RMSD* στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων, για τις 4 περιπτώσεις των ταυτόχρονων διεγέρσεων για ένα εύρος $\pm 5,00$ kHz γύρω από αυτές, ώστε να συμπεριλαμβάνονται τα side bands

5.1 Εφαρμογή μεθοδολογίας

Για την αξιολόγηση δομικού υλικού η μέθοδος της δονητικής ακουστικής μεθόδου εφαρμόζεται σε κύβο σκυροδέματος προκειμένου να γίνει έλεγχος της δομικής του ακεραιότητας.

Η μέθοδος όπως και προηγουμένως βασίζεται στους αισθητήρες (καταγραφής της δυναμικής κίνησης και ενεργοποίησης της πιεζοηλεκτρικής πλακέτας, οι οποίοι τοποθετούνται σε συγκριμένα σημεία της κατασκευής, δημιουργώντας ένα πλέγμα παρακολούθησης, καταγράφοντας την δυναμική απόκριση της ιδιοταλάντωσης του δομικού συστήματος εξαιτίας της στοχευμένης εκπομπής των μηχανικών κυμάτων .

Συγκεκριμένα τοποθετείται ένας αισθητήρας ο οποίος καταγράφει την δυναμική απόκριση της ιδιοταλάντωσης του δοκιμίου εξαιτίας ενός μηχανικού κύματος το οποίο δημιουργείται με τη χρήση ενός εξωτερικού διεγέρτη, ο οποίος εξωθεί σε ταλάντωση την κατασκευή. Το μηχανικό κύμα που προκαλείται, καταγράφεται από τον αισθητήρα ανίχνευσης της δυναμικής κίνησης και μέσω του ενισχυτή σήματος μεταφέρεται στον παλμογράφο.

Μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου επίσης, και λόγω της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο πιεζοηλεκτρικό πλακίδιο το οποίο είναι συνδεδεμένο στο δοκίμιο, είναι δυνατό να εκπεμφθεί ένα μηχανικό κύμα με συχνότητα ίδια με εκείνη της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης. Κατά αυτό τον τρόπο η κατασκευή εξωθείται σε μια δεύτερη μηχανική ταλάντωση.

Σε αυτή την περίπτωση αξιοποιείται το φαινόμενο, όπου με την εφαρμογή μιας εξωτερικής ηλεκτρικής τάσης, είναι δυνατό να εκπεμφθεί ένα μηχανικό κύμα με συχνότητα ίδια με εκείνη της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης [20].

5.2 Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κύβου σκυροδέματος

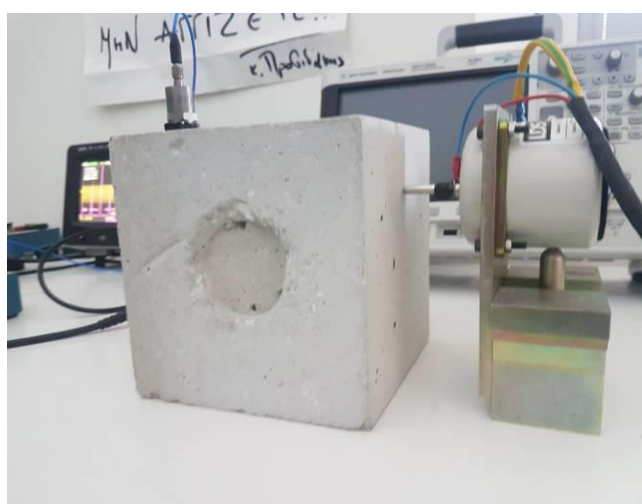
Η διαδικασία για την καταγραφή του φάσματος των συχνοτήτων στον κύβο σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο με σκοπό την αξιολόγηση της δομικής του ακεραιότητας.

Μέσω του κατάλληλου εξοπλισμού των γεννητριών και του παλμογράφου εξασφαλίζεται η δημιουργία των μηχανικών ταλαντώσεων για την επαλληλία των κυμάτων στο εσωτερικό του δοκιμίου καθώς και την καταγραφή της χρονοϊστορίας για την παροχή των πληροφοριών που αξιολογούν την δομική κατάσταση της κατασκευής.



Εικόνα 5.1 Διάταξη εξοπλισμού πειραματικού έλεγχου για την αξιολόγηση του δομικού υλικού

Για την καταγραφή της δυναμικής κίνησης της ιδιοταλάντωσης του δοκιμίου εξαιτίας της εκπομπής του μηχανικού κύματος μέσω του εξωτερικού διεγέρτη, τοποθετείται ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας καταγραφής.



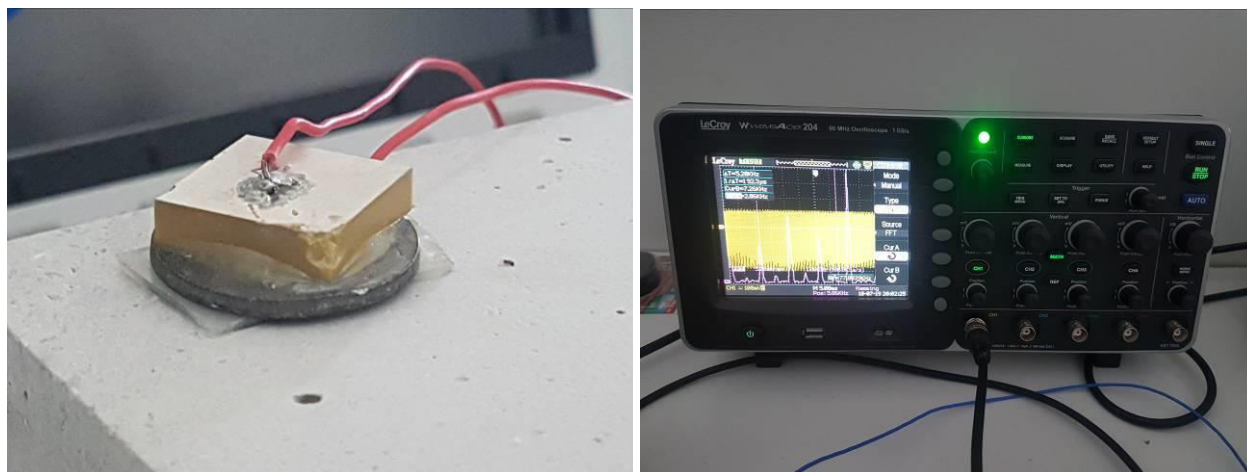
(α)



(β)

Εικόνα 5.2 (α) Εξωτερικός διεγέρτης (β) Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας

Για την ενεργοποίηση και την εκπομπή του δεύτερου μηχανικού κύματος στο δοκίμιο, τοποθετείται ο αισθητήρας του πιεζοηλεκτρικού πλακιδίου, ο οποίος ενεργοποιείται μέσω της παροχής ημιτονοειδούς ρεύματος. Κατά αυτό τον τρόπο η κατασκευή εξωθείται σε μια δεύτερη μηχανική ταλάντωση στο εσωτερικό της. Η επαλληλία ή οι διασταυρώσεις των διακυμάνσεων των μηχανικών κυμάτων καταγράφονται από τον αισθητήρα καταγραφής και μεταφέρονται στον παλμογράφο.



(α)

(β)

Εικόνα 5.2 (α) Πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης (β) Παλμογράφος

Όπως και προηγουμένως η διαδικασία της καταγραφής του φάσματος στο υπό εξέταση δοκίμιο οπλισμένου σκυροδέματος βασίζεται στην εφαρμογή των δυο τύπων εξαναγκασμένης ταλάντωσης με σκοπό την διάδοση κυμάτων στο εσωτερικό του. Σε αυτήν την κατάσταση διαπιστώνουμε τις μεταβολές που πραγματοποιούνται, προκειμένου μέσα από τις πληροφορίες των φασμάτων απόκρισης να διεξαχθούν σημαντικές πληροφορίες για το δοκίμιο.

5.3 Έρευνα των συχνότητων του κύματος μεγέθυνσης

Το υπό εξέταση δομικό υλικό αφορά σε κύβο σκυροδέματος ο οποίος σκυροδετήθηκε στο εργαστήριο. Η πειραματική διαδικασία βασίζεται στην εφαρμογή μιας χαμηλότερης συχνότητας κύματος διέγερσης (pumping wave) ή "κύμα Μεγέθυνσης", καθώς και στην εφαρμογή ενός δεύτερου κύματος διέγερσης υψηλότερης συχνότητας (probing wave) ή "κύμα διεισδυτικής ανίχνευσης". Για την καταγραφή της δυναμικής απόκρισης του δοκιμίου προκειμένου να αντλήσουμε πληροφορίες που αξιολογούν την δομική του κατάσταση πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανίχνευσης για δυο διαφορετικές του κύματος συχνότητες μεγέθυνσης, μια χαμηλότερη και μια πιο υψηλή.

Αρχικά, μέσω της ενεργοποίησης του εξωτερικού διεγέρτη, δημιουργείται το κύμα μεγέθυνσης χαμηλής συχνότητας. Υπό την εφαρμογή μόνο του κύματος μεγέθυνσης (pumping wave) η εξεταζόμενη δομή επιστρέφει μια απάντηση με ενέργεια μόνο στις συχνότητες που

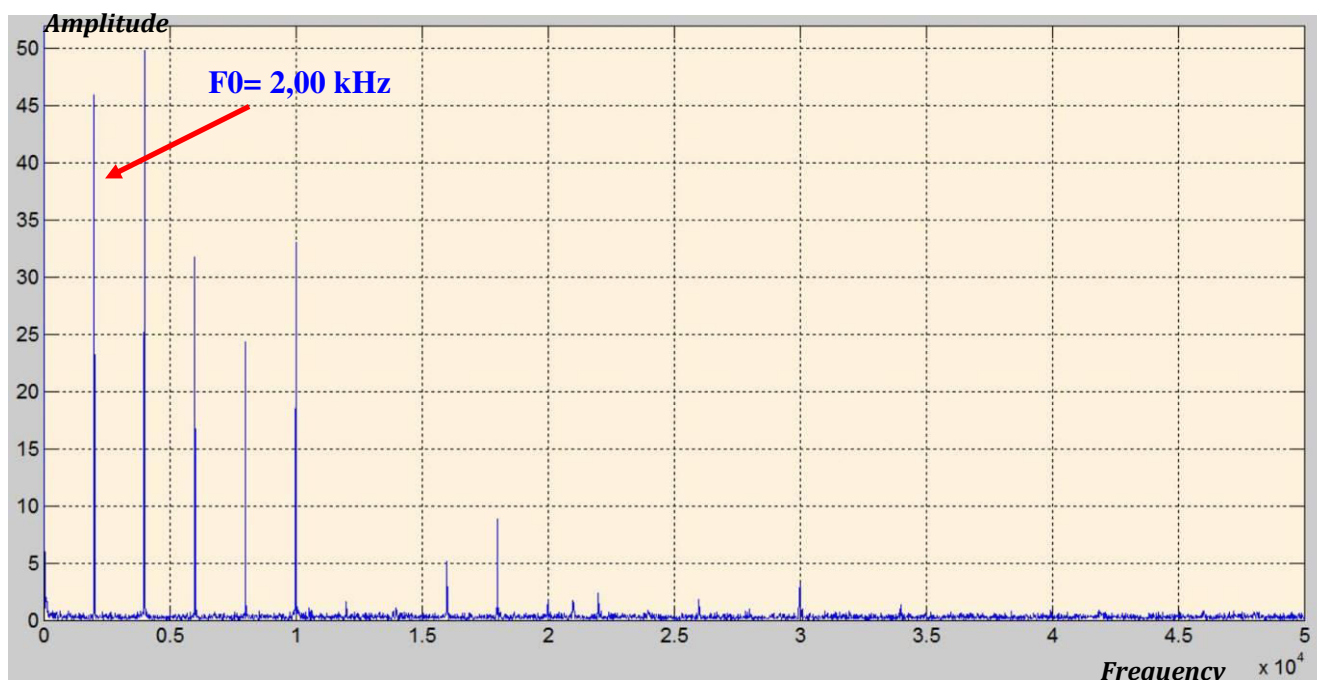
εισάγονται δηλαδή στις αρχικές συχνότητας μεγέθυνσης. Ωστόσο, με την παρουσία των ζημιών, και με την εφαρμογή δεύτερου μηχανικού κύματος, δημιουργούνται πρόσθετα μη γραμμικά στοιχεία λόγω μη γραμμικών αποτελεσμάτων οδηγώντας στην ανάμιξη των δύο σημάτων εισόδου.

Το κλειδί για την ανίχνευση πιθανών σφαλμάτων με την μέθοδο VAM, είναι η παρουσία ενέργειας – συχνοτήτων στις συχνότητες, στις οποίες είναι παρούσες οι συχνότητες των probing και pumping wave. Αυτές οι νέες συχνότητες, ονομάζονται πλευρικές ζώνες συχνοτήτων, και οι τιμές τους εμφανίζονται ως συνιστώσες των συχνοτήτων των probing και pumping wave [9].

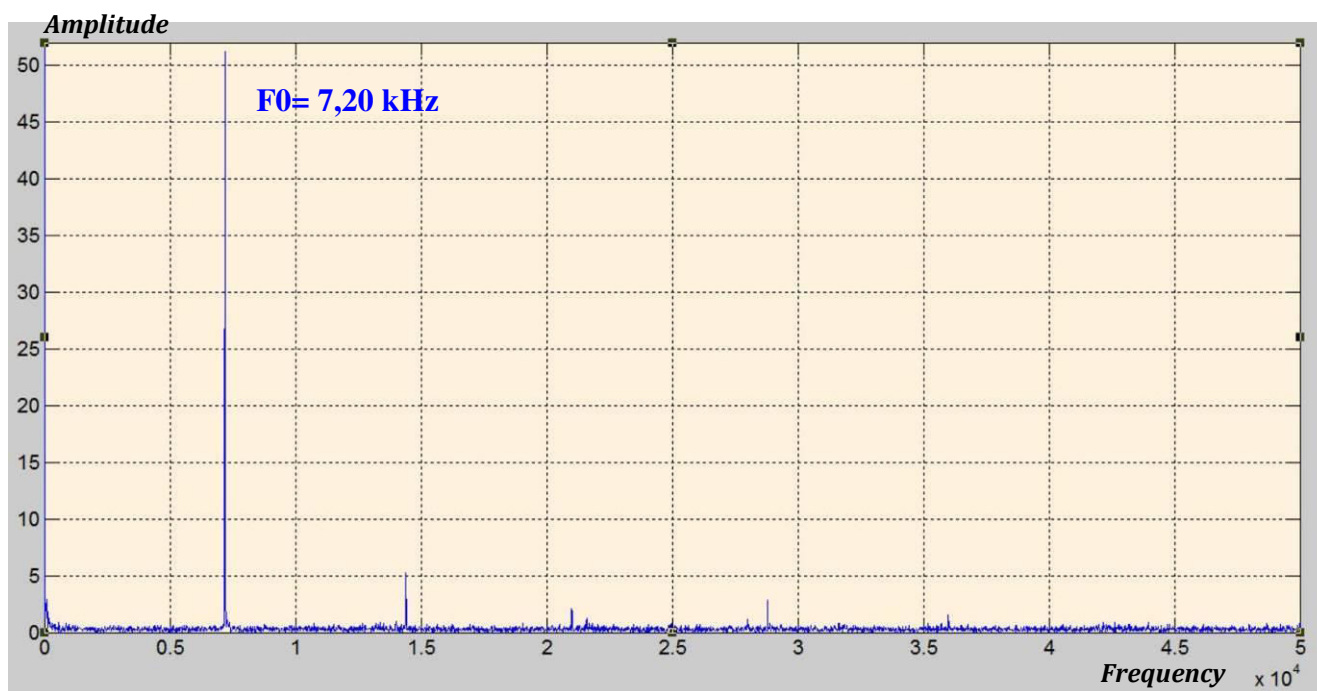
Στην περίπτωση εμφάνισης των πλευρικών συχνοτήτων καταλαβαίνουμε ότι υπάρχει σφάλμα, δεν υπάρχει σωστή διάδοση του κύματος λόγω ανάκλασης από αστοχία του υλικού στο εσωτερικό του, αυτό χαρακτηρίζει και την μη γραμμική συμπεριφορά του δοκιμίου.

Οι συχνότητες μεγέθυνσης – pumping, οι οποίες εφαρμόστηκαν στο δοκίμιο σκυροδέματος με την ενεργοποίηση του εξωτερικού διεγέρτη και την δημιουργία μηχανικής διέγερσης αφορούν στα 2,00 kHz και 7,20 kHz. Υπό την εφαρμογή μόνο αυτών των συχνοτήτων η εξεταζόμενη δομή απάντησε με ενέργεια στις συχνότητες που εισήχθησαν, καθώς και σε ενέργειες οι οποίες αφορούν στα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου.

Συγκεκριμένα για την εφαρμογή των παραπάνω τιμών παρατίθενται τα παρακάτω γραφήματα:



Εικόνα 5.3 Διάγραμμα του φάσματος των συχνοτήτων υπό την εφαρμογή του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz



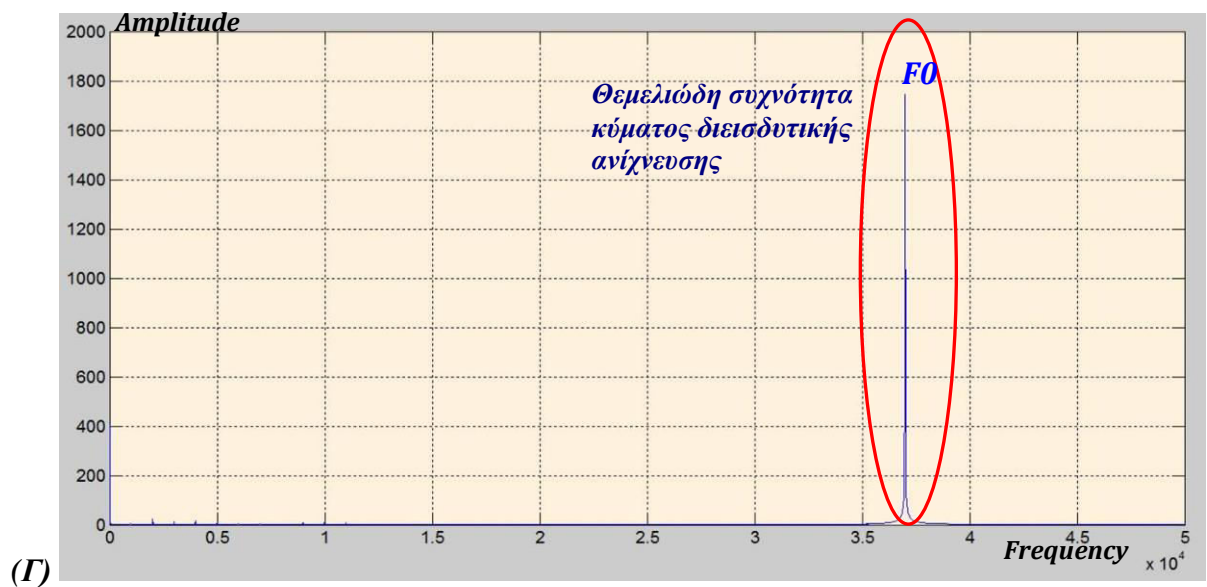
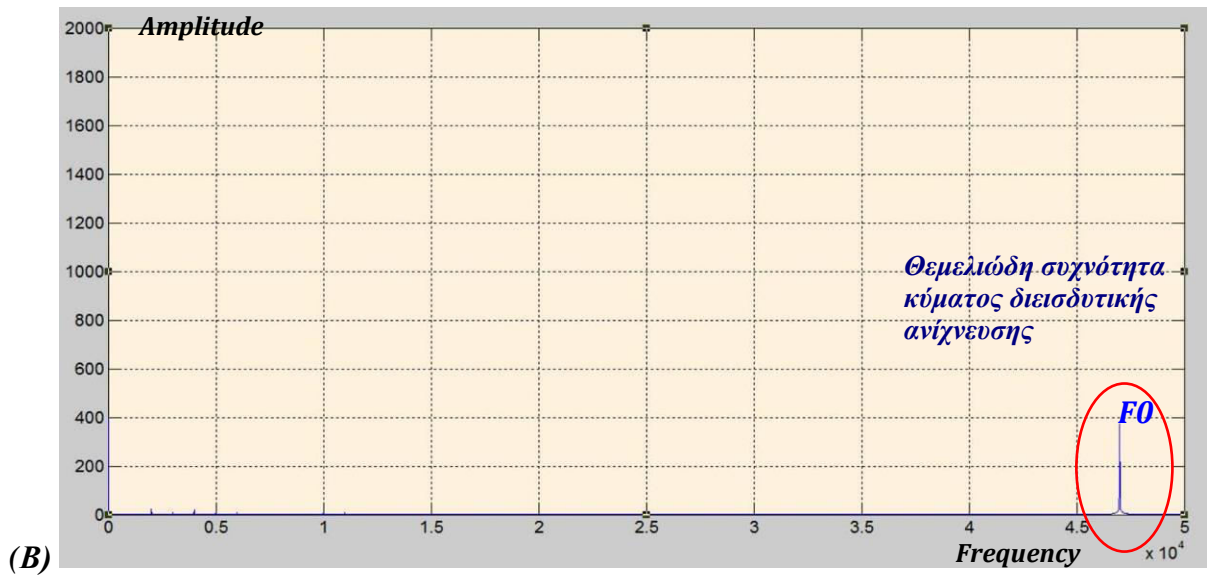
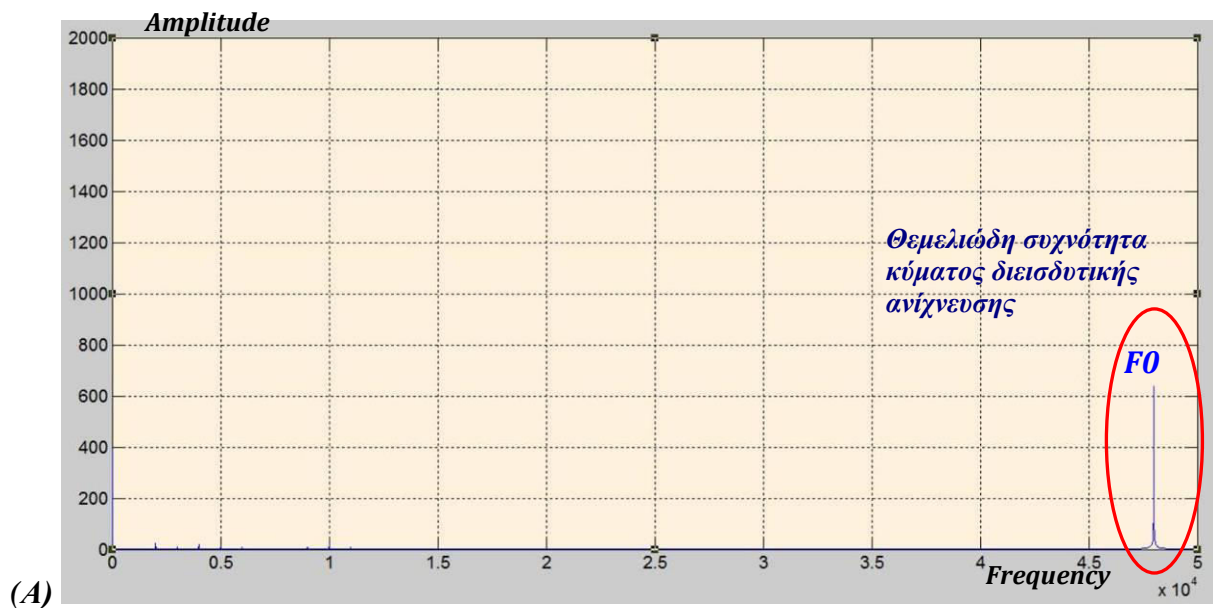
Εικόνα 5.4 Διάγραμμα του φάσματος των συχνότητων υπό την εφαρμογή του κύματος μεγέθυνσης των 7,20 kHz

Από την σύγκριση των φασμάτων απόκρισης (εικόνες 5.3 & 5.4) για δυο διαφορετικές τιμές του κύματος μεγέθυνσης, διαπιστώνουμε ότι για την υψηλότερη συχνότητα των 7,20 kHz παίρνουμε λιγότερες πληροφορίες για το δομικό υλικό, αφού στο πεδίο του φάσματος των συχνότητων απαντάται μόνο η συχνότητα εισαγωγής. Σε αντίθεση η εφαρμογή των 2,00 kHz δίνει αρκετές θεμελιώδεις συχνότητες στο πεδίο του φάσματος των συχνότητων συνεπώς σημαντικές πληροφορίες για τα δυναμικά χαρακτηριστικά και τις ιδιοσυχνότητες του υλικού.

5.4 Έλεγχος μη γραμμικότητας

5.4.1 Έρευνα στην συχνότητα κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz

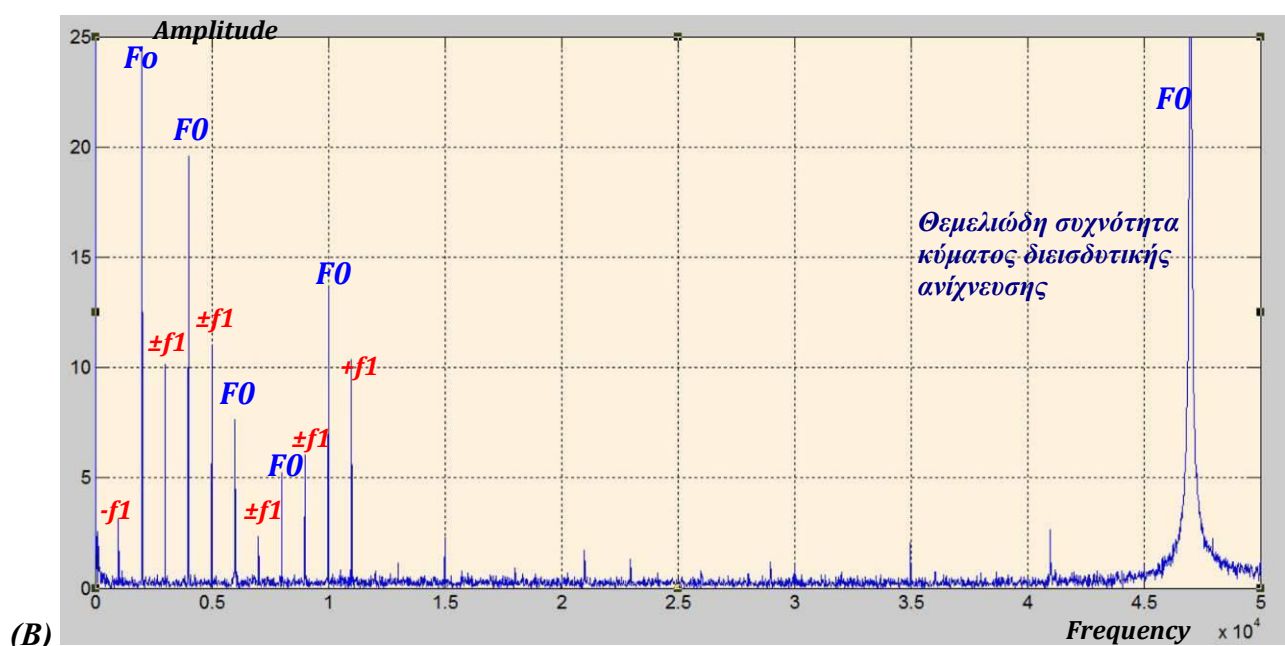
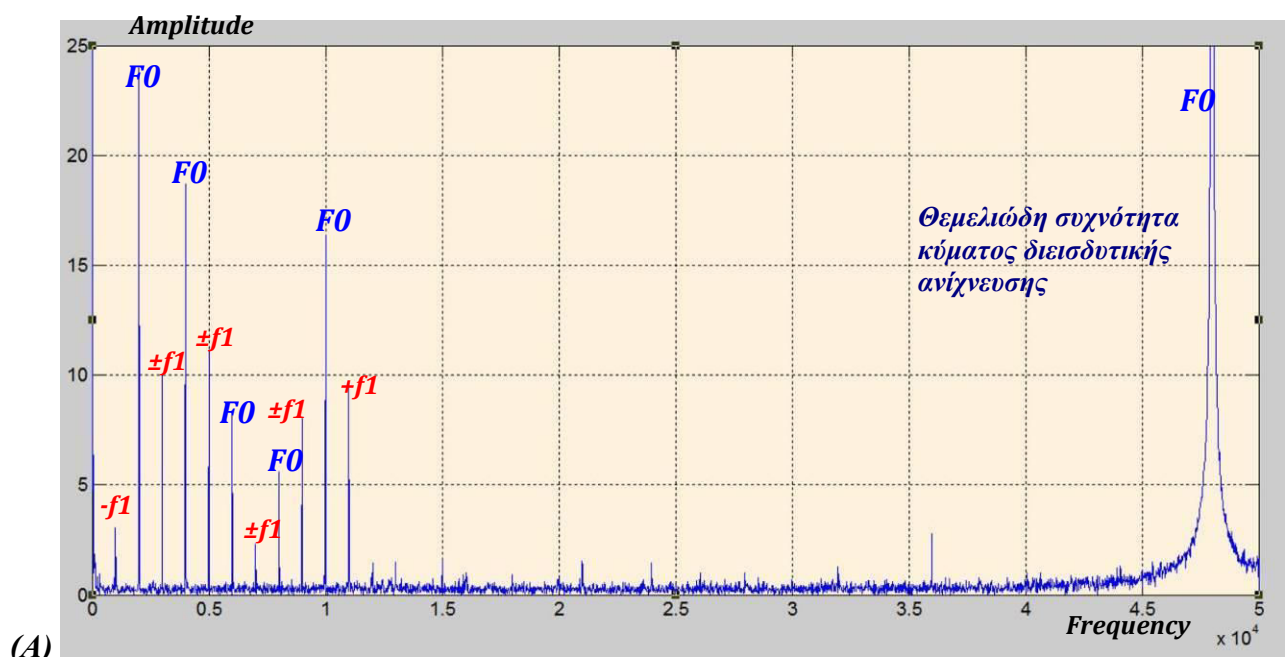
Για τον έλεγχο της μη γραμμικής συμπεριφοράς, εφαρμόζουμε στο δοκίμιο δεύτερη μηχανική ταλάντωση μέσω της ενεργοποίησης της πιεζοηλεκτρικής πλακέτας. Για την διεξαγωγή της έρευνας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εισάγοντας κύμα διεισδυτικής ανίχνευσης και για τις δυο διαφορετικές συχνότητες του κύματος μεγέθυνσης, (οι οποίες ελέγχθηκαν παραπάνω), προκειμένου να υπάρχουν συγκριτικά στοιχεία για την καταγραφή της δυναμικής απόκρισης του δομικού συστήματος τόσο σε χαμηλές όσο και σε υψηλότερες συχνότητες του κύματος μεγέθυνσης. Συνεπώς για το πρώτο κύμα μεγέθυνσης των 2,00 kHz εισήχθησαν διάφορες συχνότητες δια μέσω της ενεργοποίησης του πιεζοηλεκτρικού πλακιδίου προκειμένου να έχουμε δεδομένα απόκρισης στο πεδίο του φάσματος των συχνότητων. Οι συχνότητες των οποίων οι καταγραφές αποθηκευτήκαν αφορούν τα 52,00 kHz 53,00 kHz και 63,00 kHz. Τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αποτελεσμάτων λόγω της ανάμιξης των δύο σημάτων εισόδου μας έδωσαν τα γραφήματα που παρατίθενται παρακάτω:



Εικόνα 5.5 Διαγράμματα του φάσματος, (A) Για συχνότητα κύματος ανίχνευσης 52,00 kHz, (B) Για συχνότητα κύματος ανίχνευσης 53,00 kHz, (Γ) Για συχνότητα κύματος ανίχνευσης 63,00 kHz

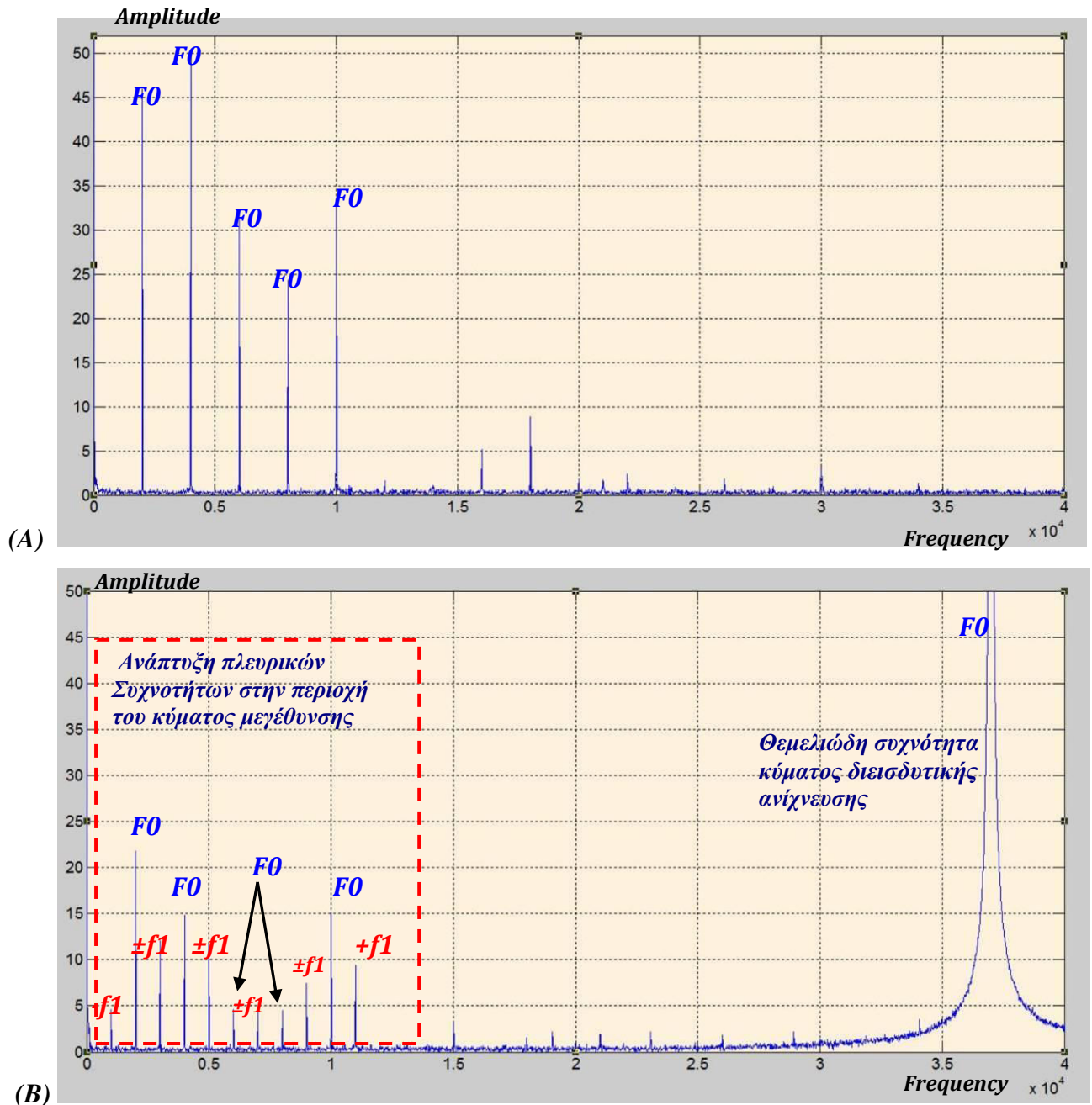
Υπό την εφαρμογή των παραπάνω δράσεων, διαπιστώνουμε ότι και στις τρεις γραφικές παραστάσεις που παράγονται, αποτυπώνεται η ανάπτυξη μιας θεμελιώδους συχνότητας η τιμή της οποίας αυξάνεται αρκετά όσο μεγαλώνουμε την συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης με αποτέλεσμα στην τελευταία γραφική παράσταση να έχει την μεγίστη τιμή του πλάτους.

Για τον πιο ενδελεχή έλεγχο έγινε η ανάπτυξη των παραπάνω γραφημάτων σε μεγαλύτερη κλίμακα προκειμένου να διαπιστώσουμε αν αναπτύσσονται πλευρικές ζώνες συχνοτήτων οι οποίες δεν είναι ορατές. Για τον παραπάνω σκοπό δόθηκε έμφαση στο πεδίο της συχνότητας τόσο του κύματος μεγέθυνσης όσο και του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης προκειμένου να διαπιστώσουμε αν παράγονται πλευρικές ζώνες συχνοτήτων (ως συνιστώσες των συχνοτήτων των pumping wave και probing wave).



5.4.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Για την κατανόηση του φαινομένου γίνεται αντιπαράθεση του αρχικού διαγράμματος του φάσματος των συχνοτήτων το οποίο παράγεται από την εισαγωγή μόνο του κύματος μεγέθυνσης σε συσχέτιση με το διάγραμμα μετά την ανάμιξη των δύο σημάτων εισόδου. Ενδεικτικά παρατίθεται το διάγραμμα στην συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 63,00 kHz.



Εικόνα 5.7 Σύγκριση των διαγραμμάτων του φάσματος, (A) φάσμα μόνο του κύματος μεγέθυνσης, (B) φάσμα μετά την ανάμιξη των δύο σημάτων εισόδου

Από την πρώτη γραφική παράσταση διαπιστώνουμε ότι για την δημιουργία ενός κύματος μέσω της άσκησης μηχανικής ταλάντωσης (κύμα μεγέθυνσης των 2,00 kHz) οι θεμελιώδεις συχνότητες των ιδιοχαρακτηριστικών του υλικού απαντώνται στα 2,00 - 4,00 - 6,00 - 8,00 και 10,00 kHz. Από την δεύτερη γραφική παράσταση η οποία προκύπτει μετά την εφαρμογή του δεύτερου μηχανικού κύματος (κύμα ανίχνευσης των 63,00 kHz), διαπιστώνουμε τις επιπλέον συνιστώσες που παράγονται ως αποτέλεσμα της μη γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου οδηγώντας στην ανάμιξη των δύο σημάτων εισόδου, υποδεικνύοντας κατ' αυτό τον τρόπο την ύπαρξη πιθανής βλάβης.

5.4.3 Έρευνα για την συχνότητα κύματος μεγέθυνσης στα 7,20 kHz

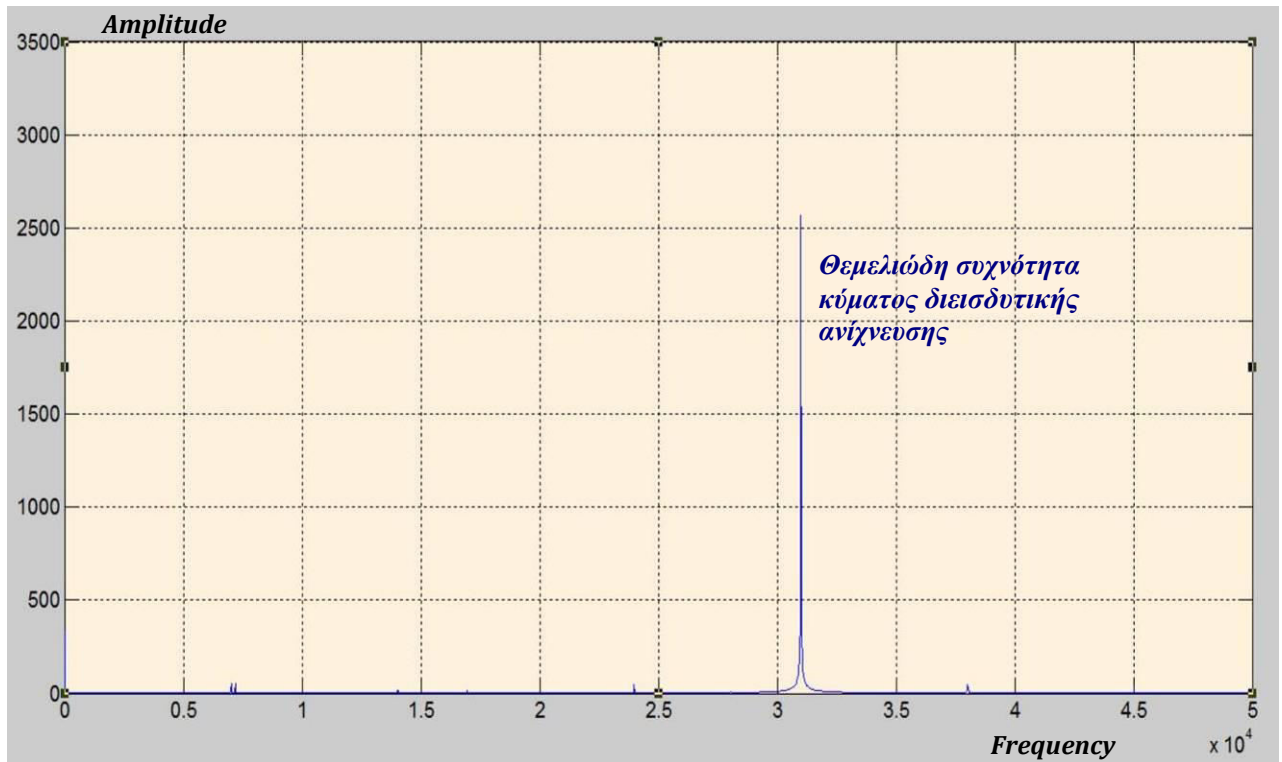
Για τον έλεγχο της μη γραμμικής συμπεριφοράς, εξετάζουμε το δοκίμιο επαναλαμβάνοντας την διαδικασία και για την συχνότητα του κύματος μεγέθυνσης στα 7,20 kHz. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε υψηλότερη συχνότητα προκειμένου να υπάρχουν συγκριτικά στοιχεία για την καταγραφή της δυναμικής απόκρισης του δομικού συστήματος τόσο σε χαμηλές όσο και σε υψηλότερες συχνότητες του κύματος μεγέθυνσης. Συνεπώς για το κύμα μεγέθυνσης των 7,20 kHz εισήχθησαν διάφορες συχνότητες διεισδυτικής ανίχνευσης μέσω της ενεργοποίησης του πιεζοηλεκτρικού πλακιδίου προκειμένου να έχουμε δεδομένα απόκρισης στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων. Οι συχνότητες των οποίων οι καταγραφές αποθηκευτήκαν αφορούν τα 65,00 - 69,00 - 70,00 - 71,00 - 73,00 και 74,00 kHz. Τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αποτελεσμάτων λόγω της ανάμιξης των δύο σημάτων εισόδου μας έδωσαν τις γραφικές παραστάσεις που παρατίθενται παρακάτω:

A. Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 65,00 kHz



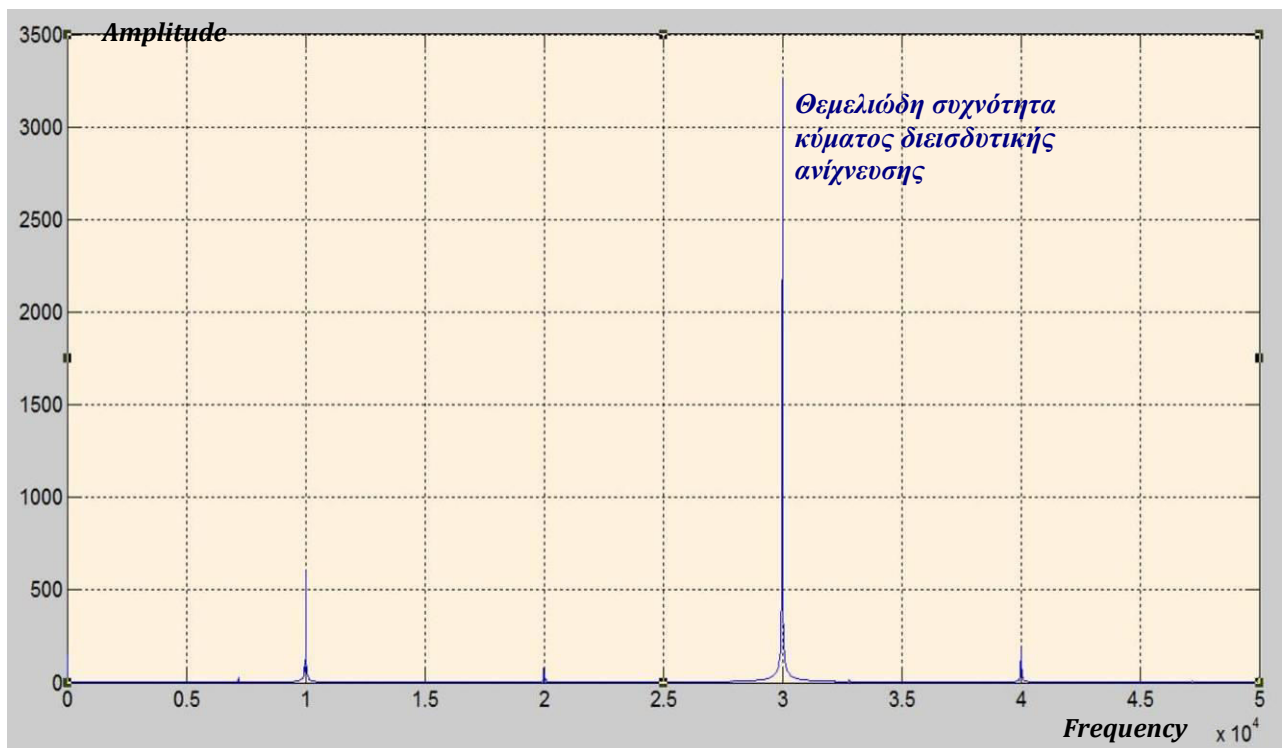
Εικόνα 5.8 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 7,20 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 65,00 kHz

Β. Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 69,00 kHz



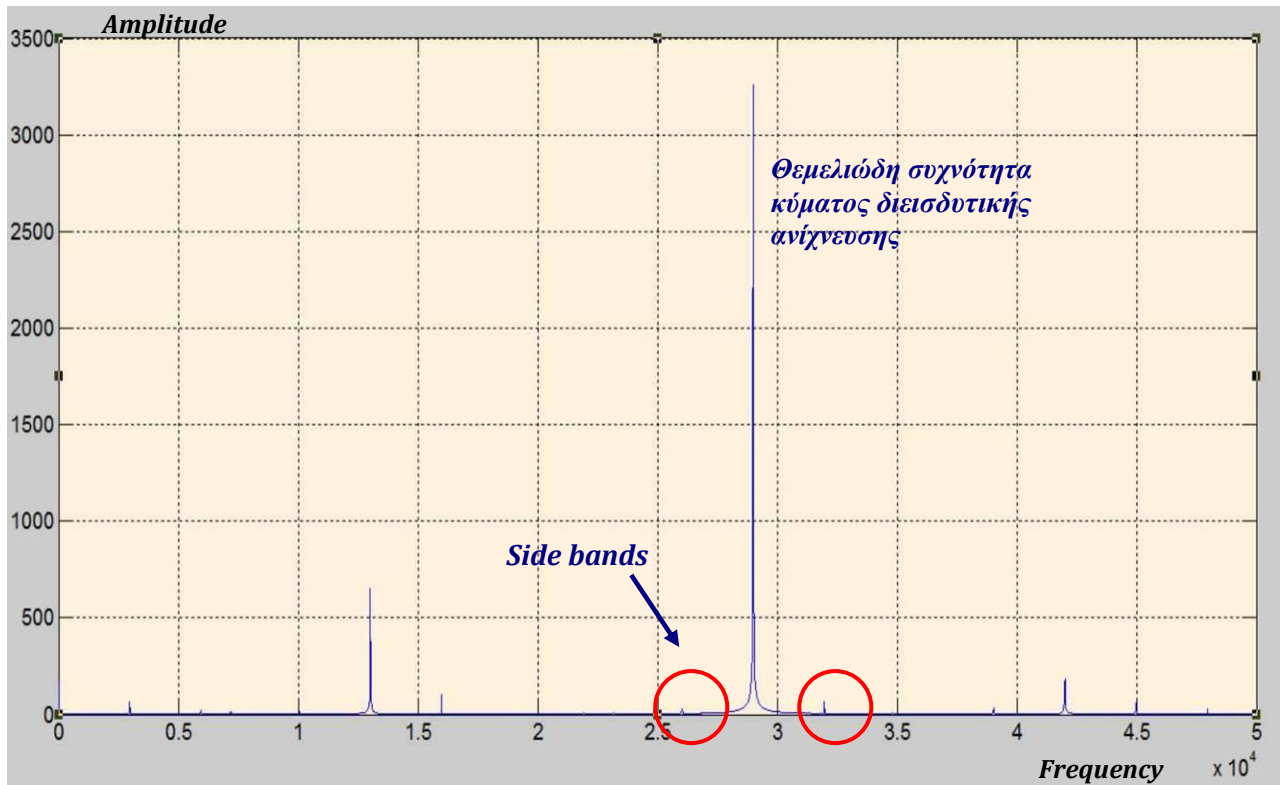
Εικόνα 5.9 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 7,20 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 69,00 kHz

Γ. Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 70,00 kHz



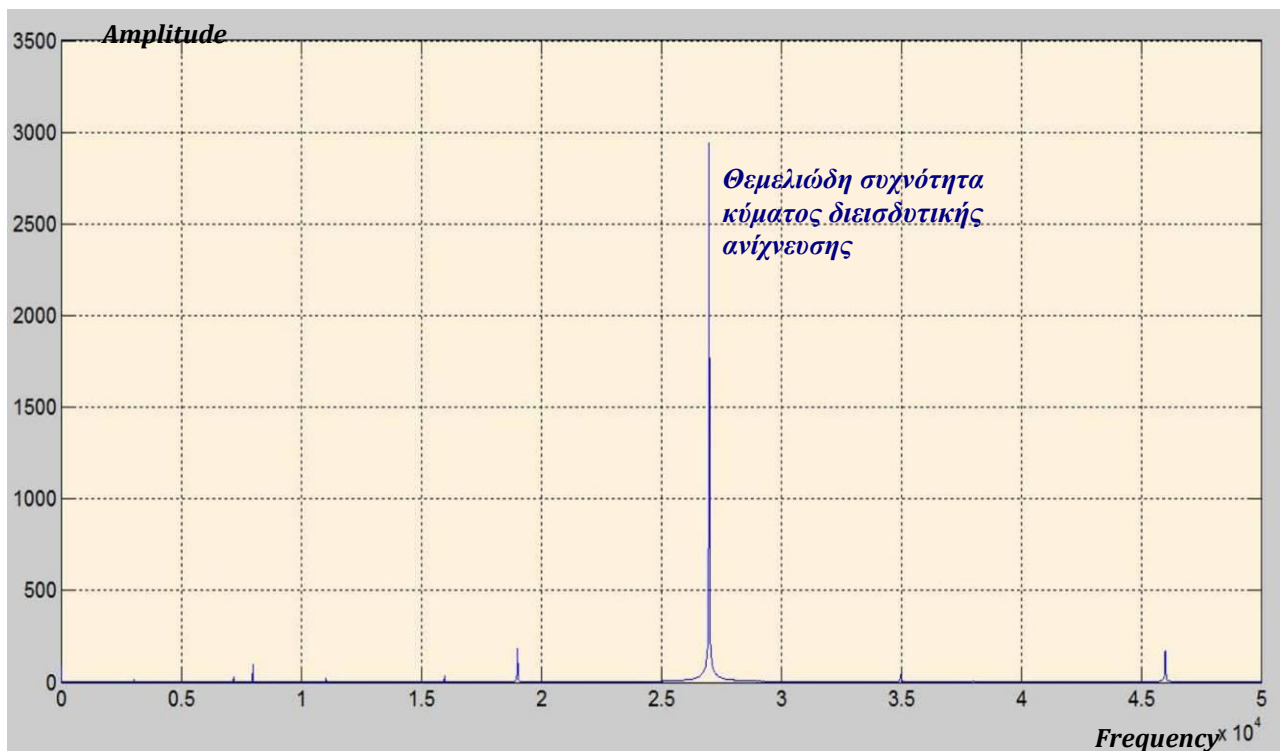
Εικόνα 5.10 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 7,20 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 70,00 kHz

Δ. Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 71,00 kHz



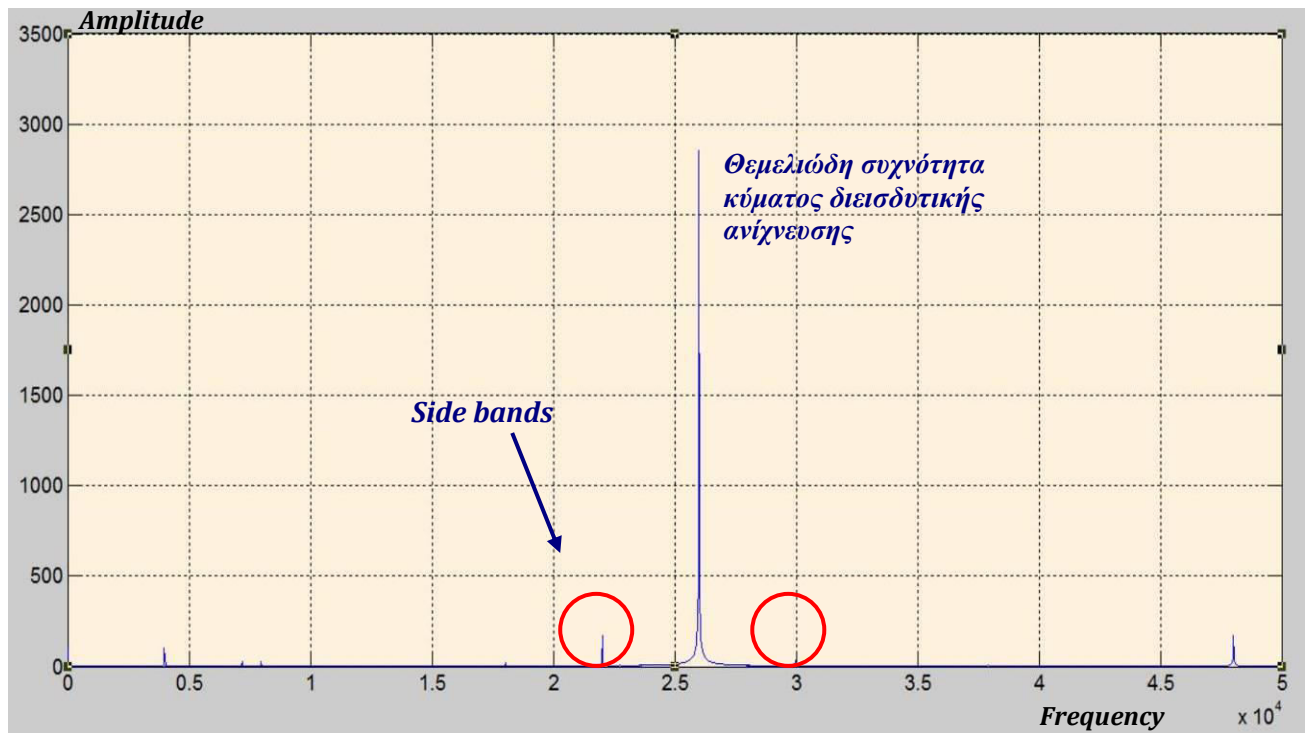
Εικόνα 5.11 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 7,20 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 71,00 kHz

Ε. Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 73,00 kHz



Εικόνα 5.12 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 7,20 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 73,00 kHz

ΣΤ. Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 74,00 kHz



Εικόνα 5.13 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 7,20 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 74,00 kHz

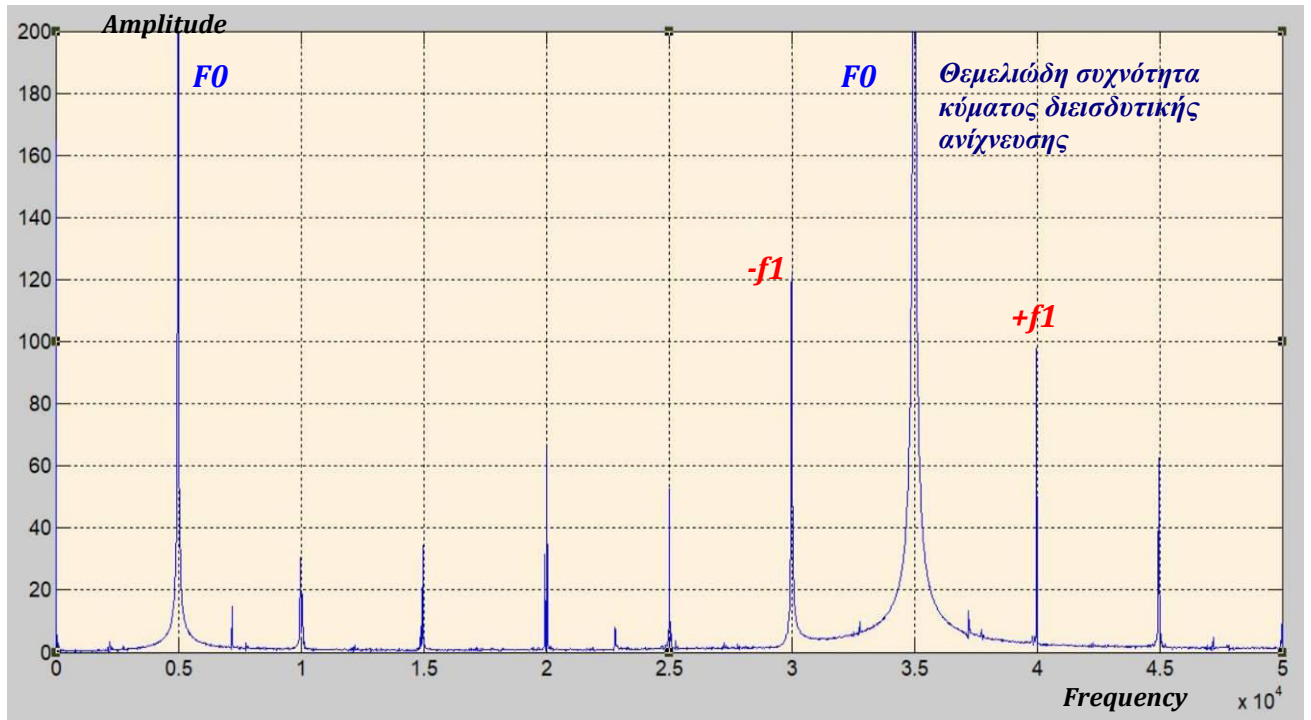
Υπό την εφαρμογή των παραπάνω δράσεων, διαπιστώνουμε ότι και στις έξι γραφικές παραστάσεις που παράγονται, αποτυπώνεται η ανάπτυξη μιας θεμελιώδους συχνότητας αρκετά μεγάλου πλάτους. Σε κάποιες από τις γραφικές παραστάσεις η εμφάνιση των πλευρικών συχνοτήτων είναι ορατή.

Η τιμή της θεμελιώδους συχνότητας όσο μεγαλώνουμε την συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης μεταβάλλεται σε τιμή πλάτους μεταξύ 2500,00 mV και 3500,00 mV.

Για τον πιο ενδελεχή έλεγχο του φαινομένου και προκειμένου να διαπιστώσουμε την ύπαρξη πλευρικών συχνοτήτων οι οποίες δεν είναι ορατές, έγινε η ανάπτυξη των παραπάνω γραφημάτων σε μεγαλύτερη κλίμακα προκειμένου να εξετάσουμε αν παράγονται πλευρικές ζώνες συχνοτήτων ως συνιστώσες των συχνοτήτων των pumping και probing wave αντίστοιχα.

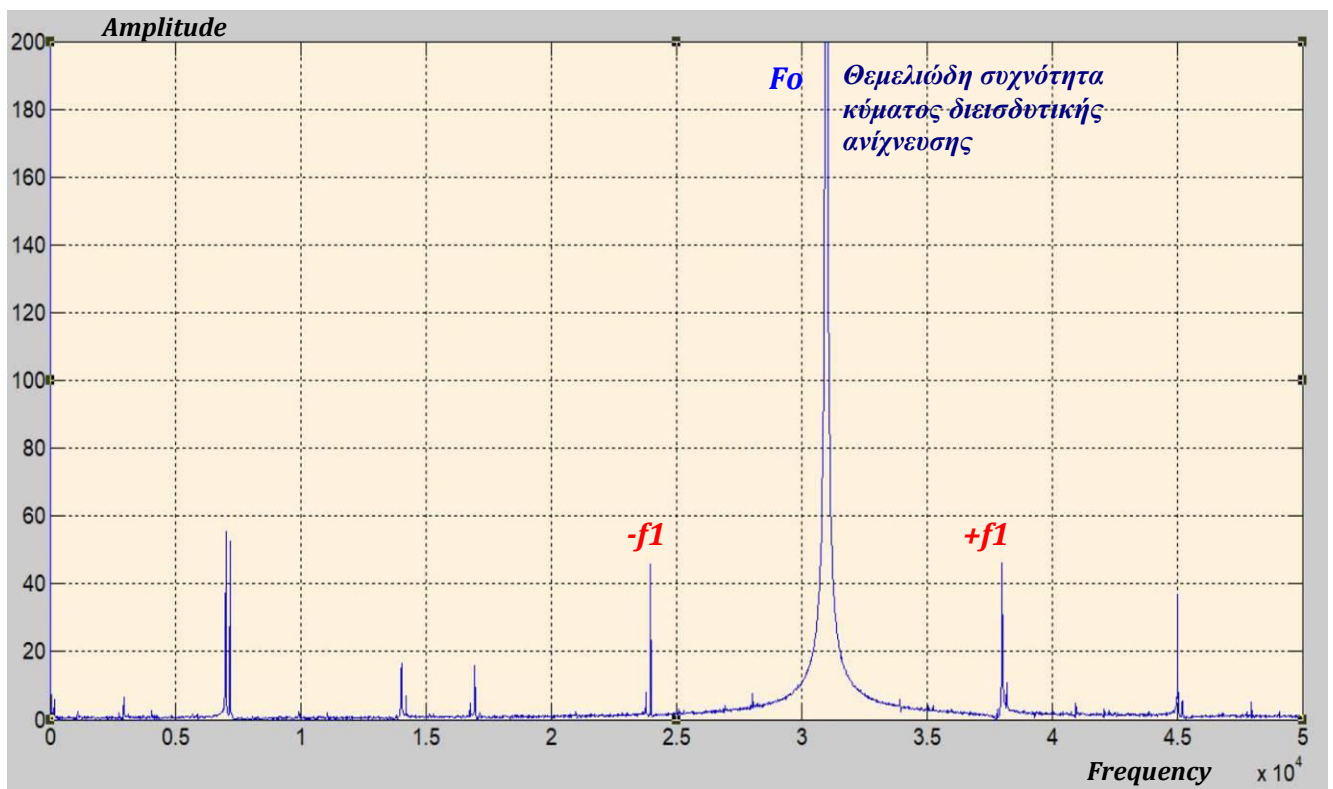
Τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αποτελεσμάτων λόγω της ανάμιξης των δύο σημάτων εισόδου μας έδωσαν τις γραφικές παραστάσεις που παρατίθενται παρακάτω:

A. Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 65,00 kHz



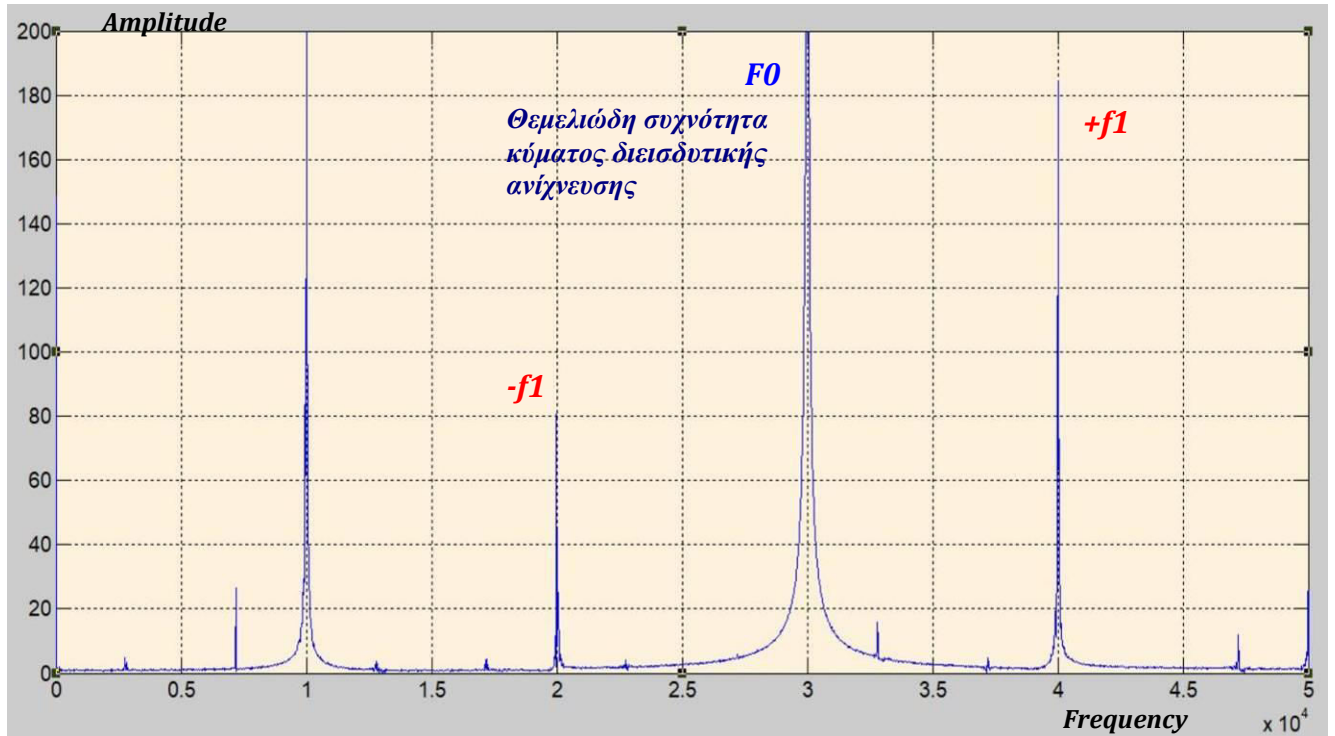
Εικόνα 5.14 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 7,20 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 65,00 kHz

B. Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 69,00 kHz



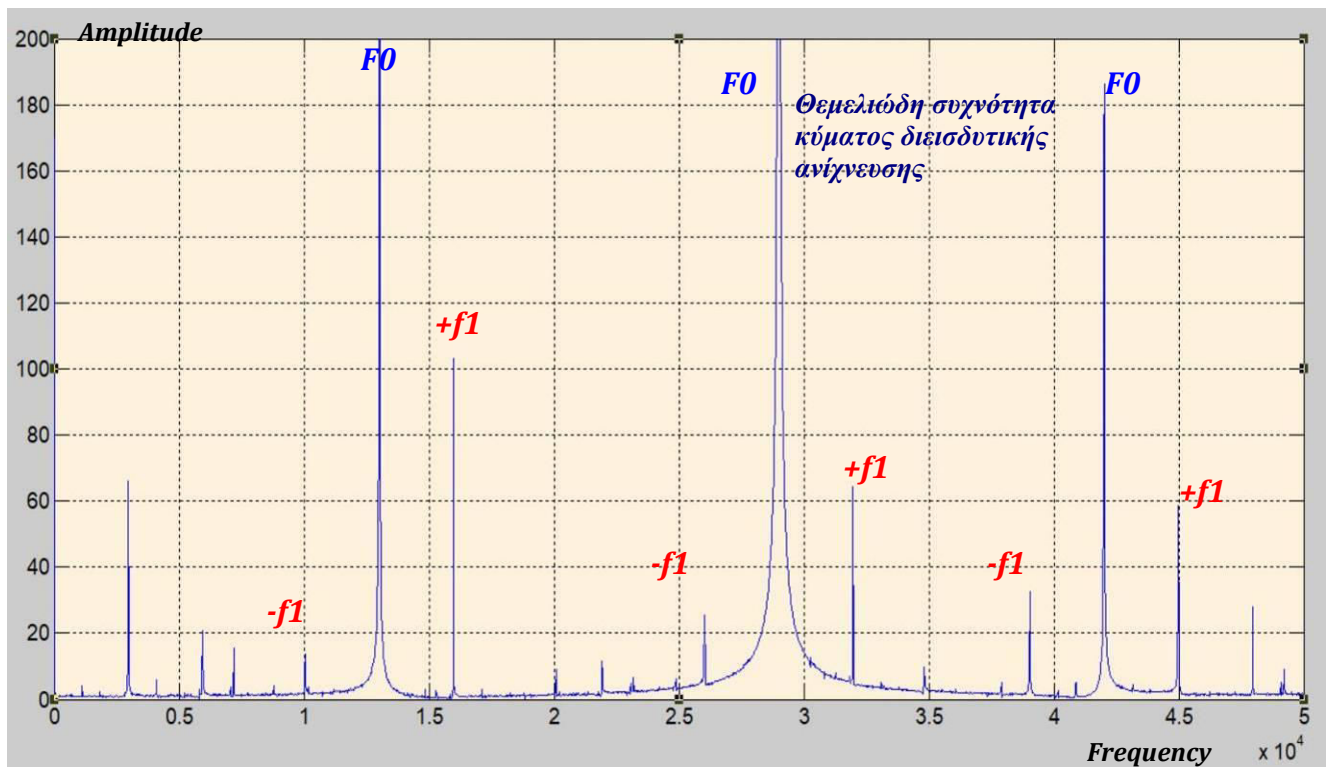
Εικόνα 5.15 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 7,20 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 69,00 kHz

Γ. Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 70,00 kHz



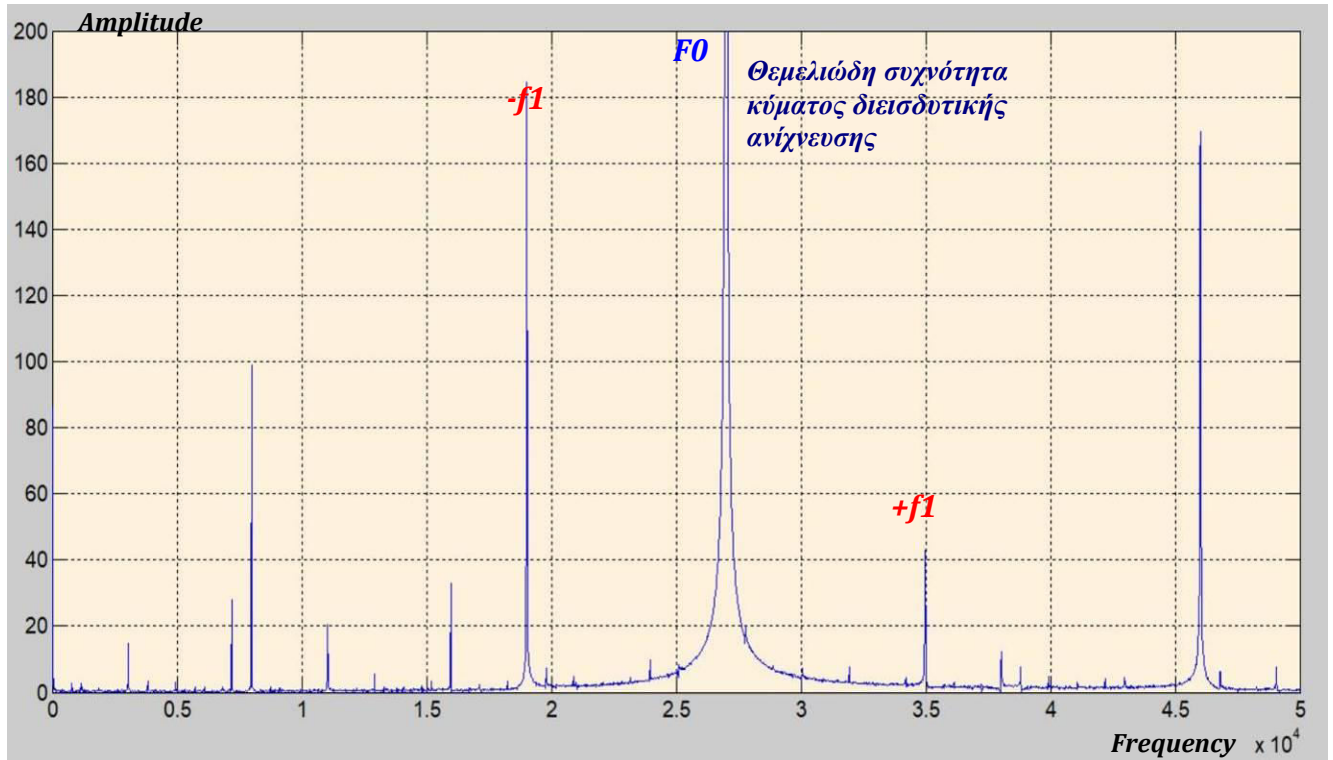
Εικόνα 5.16 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 7,20 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 70,00 kHz

Δ. Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 71,00 kHz



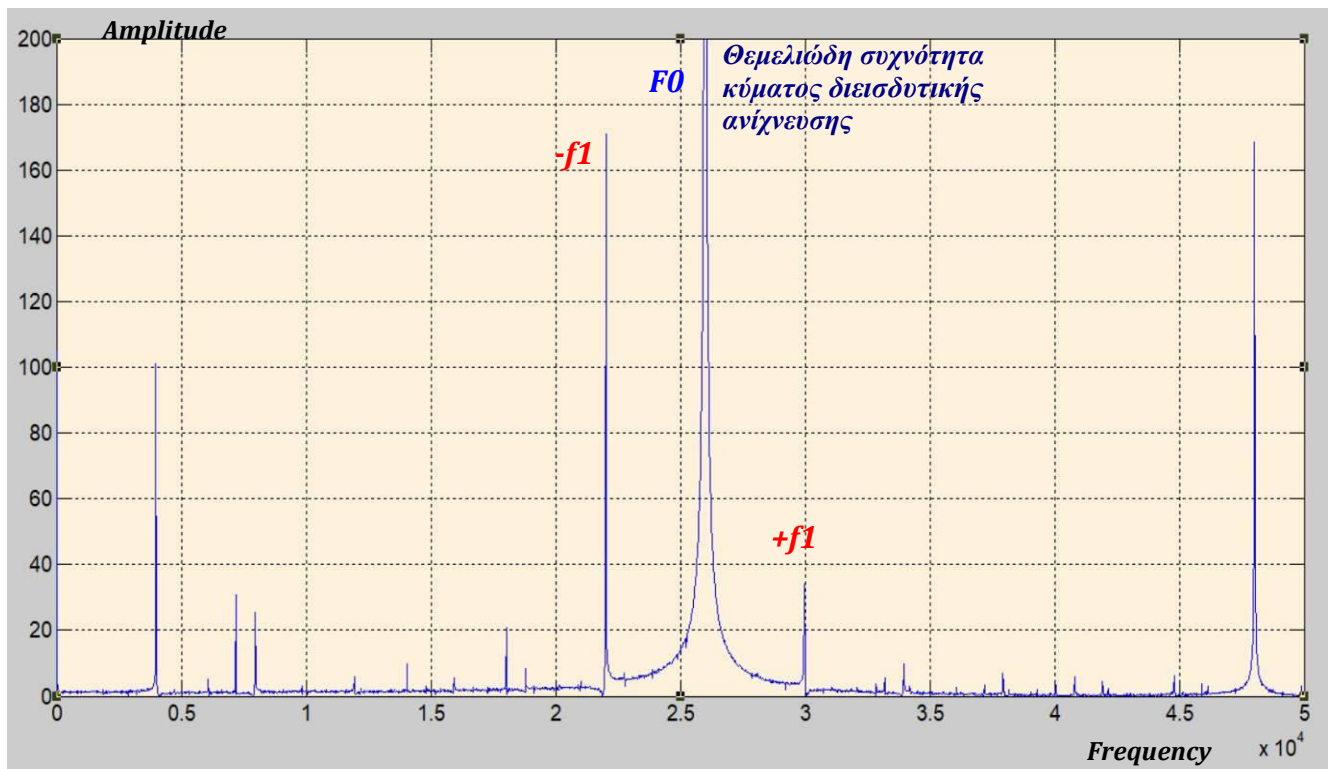
Εικόνα 5.17 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 7,20 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 71,00 kHz

Ε. Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 73,00 kHz



Εικόνα 5.18 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 7,20 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 73,00 kHz

ΣΤ. Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 74,00 kHz



Εικόνα 5.19 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 7,20 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 74,00 kHz

Από τις γραφικές παραστάσεις των φασμάτων, διαπιστώνουμε ότι όσο αυξάνεται η τιμή της συχνότητας του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης – (probing wave), αυξάνεται και η τιμή του πλάτους των πλευρικών συχνοτήτων οι οποίες αναπτύσσονται περιμετρικά της θεμελιώδους συχνότητας. Το φαινόμενο παρατηρείται έντονα για τις συχνότητες των 65,00 - 70,00 και 73,00 kHz. Διαπιστώνουμε επίσης ότι για τις συχνότητες του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 65,00 - 70,00 και 73,00 το διάστημα της απόστασης μεταξύ των πλευρικών συχνοτήτων γίνεται όλο και μεγαλύτερο. Οι παραπάνω παρατηρήσεις της αύξησης της τιμής του πλάτους, αλλά και της απόστασης του διαστήματος των πλευρικών συχνοτήτων είναι ενδεικτικές του εύρους του σφάλματος του δομικού υλικού, και αποτελούν ένα στοιχείο αξιολόγησης του βαθμού της βλάβης στο εσωτερικό του δοκιμίου.

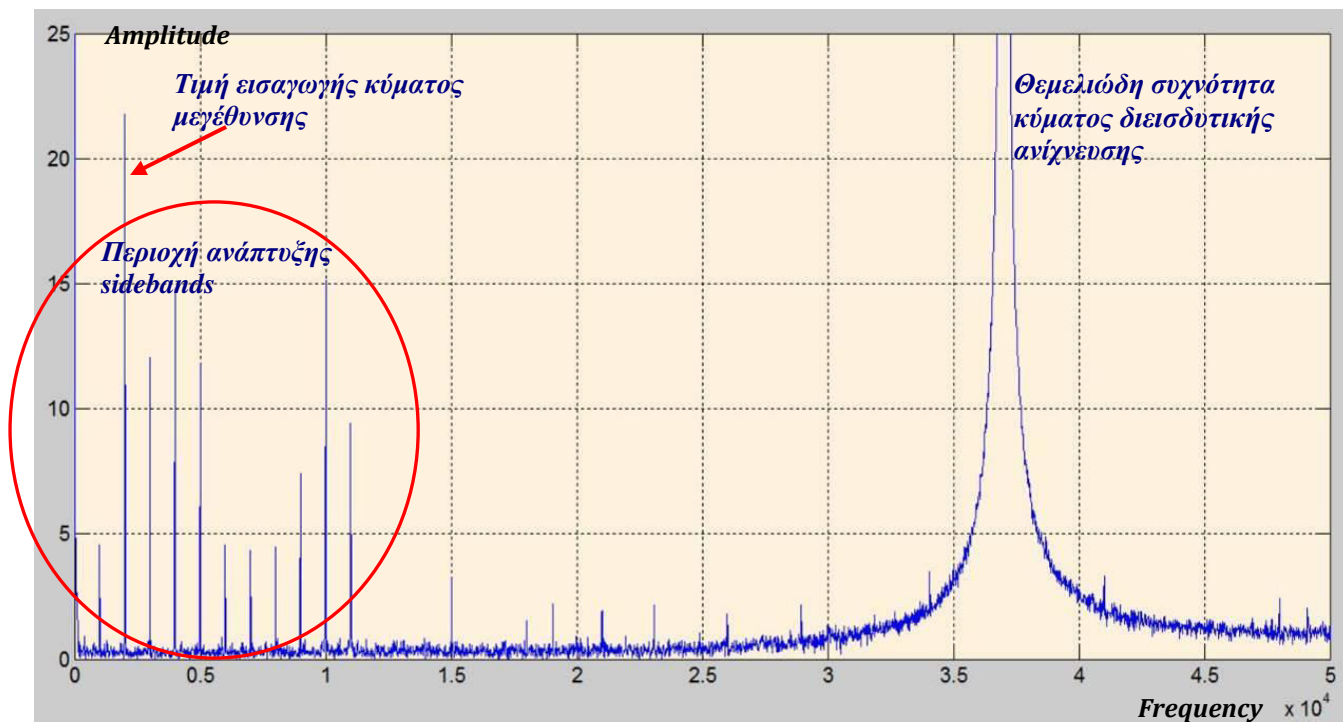
Ωστόσο, στην τιμή του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 73,00 kHz παρατηρείται ότι η απόσταση των πλευρικών συχνοτήτων αρχίζει να μικραίνει, συνεπώς θεωρείται ότι οι ενδεικτικές συχνότητες εύρους του σφάλματος του δοκιμίου είναι μεταξύ των 70,00 και 73,00 kHz όπου οι πλευρικές συχνότητες έχουν το μέγιστο πλάτος τιμής καθώς και το μεγαλύτερο διάστημα απόστασης μεταξύ τους.

5.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μη γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου για τις διαφορετικές συχνότητες εισαγωγής του κύματος μεγέθυνσης

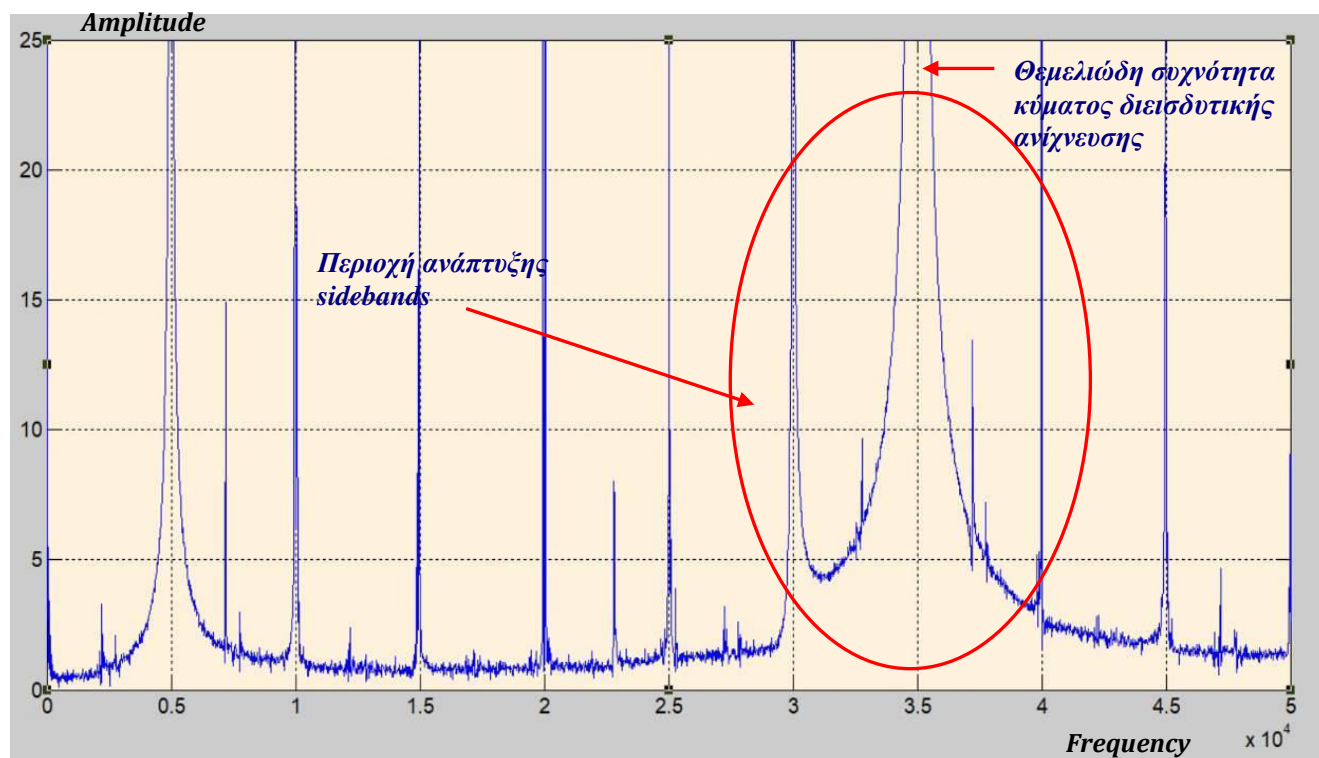
Η σύγκριση της μη γραμμικής συμπεριφοράς αφορά στα αποτελέσματα που παράγονται λόγω των διαφορετικών τιμών των συχνοτήτων μεγέθυνσης – pumping, οι οποίες εφαρμόστηκαν στο δοκίμιο σκυροδέματος και αφορούν στα 2,00 kHz και 7,20 kHz. Υπό την εφαρμογή μόνο αυτών των συχνοτήτων η εξεταζόμενη δομή απάντησε με ενέργειες οι οποίες αφορούσαν στα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου, αλλά και σε συνδυασμό με την εισαγωγή των συχνοτήτων διεισδυτικής ανίχνευσης παρήχθισαν σημαντικές πληροφορίες για την απόκριση του δομικού συστήματος και την αξιολόγηση των πιθανών σφαλμάτων. Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι η χαμηλή τιμή της συχνότητας μεγέθυνσης απάντησε με αποτελέσματα ανάπτυξης πλευρικών συχνοτήτων σε μικρό εύρος απόστασης από την τιμή εισαγωγής του κύματος μεγέθυνσης, ενώ ταυτόχρονα παρήγαγε αρκετές πληροφορίες για τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, διαπιστώσαμε ότι, για την υψηλότερη τιμή της συχνότητας μεγέθυνσης η απόκριση του δομικού συστήματος, απάντησε στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων με την ανάπτυξη μια θεμελιώδους συχνότητας αρκετά μεγάλης τιμής πλάτους καθώς και ανάπτυξη πλευρικών συχνοτήτων γύρω από αυτήν. Οι πλευρικές συχνότητες οι οποίες ανεπτύχθησαν σε αυτήν την περίπτωση διαπιστώσαμε ότι δύναται να παράγουν πληροφορίες για το εύρος του δομικού σφάλματος. Διαπιστώθηκε επίσης ότι για τις υψηλότερες τιμές του κύματος μεγέθυνσης δεν ανεπτύχθησαν πλευρικές συχνότητες γύρω από την τιμή εισαγωγής μεγέθυνσης .

Παρατίθενται συγκριτικά οι παρακάτω ενδεικτικές γραφικές παραστάσεις έρευνας του δομικού συστήματος του δοκιμίου.



Εικόνα 5.20 Απόκριση δομικού συστήματος για συχνότητα μεγέθυνσης στα 2,00 kHz και συχνότητα διεισδυτικής ανίχνευσης στα 63,00 kHz



Εικόνα 5.21 Απόκριση δομικού συστήματος για συχνότητα μεγέθυνσης στα 7,20 kHz και συχνότητα διεισδυτικής ανίχνευσης στα 65,00 kHz

5.6 Εφαρμογή της δονητικής ακουστικής μεθόδου σε τοιχοποιία λιθοδομής

Για την επαλήθευση της τεχνικής της δονητικής ακουστικής μεθόδου και την καταγραφή της δυναμικής απόκρισης τοιχοποιίας από λιθοδομή, προκειμένου να διεξαχθούν συμπεράσματα τόσο για την εφαρμογή της μεθοδολογίας, όσο και για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης του υλικού, η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε δοκίμιο λιθοδομής.

Το δοκίμιο αφορά σε δομικό στοιχείο το οποίο έχει φέροντα οργανισμό αποτελούμενο από ακανόνιστους λίθους με διαφορετική ορυκτολογική σύσταση και μεγάλο πορώδες, ενώ το υλικό συνάφειας μεταξύ των λίθων αφορά σε σύννητες τσιμεντοκονίαμα. Το παραπάνω δοκίμιο κατασκευάστηκε στο εργαστήριο, και αποτελείται από συνδετικό υλικό τσιμεντοκονίας το οποίο δεν ενδείκνυται σε φέρουσες τοιχοποιίες λιθοδομής ή σε αποκαταστάσεις μνημειακών κτιρίων, παρόλα αυτά το συναντάμε ευρέως σε ενισχύσεις, αποκαταστάσεις ή ανακατασκευές συγχρόνων ή και παλαιών κτιρίων με φέροντα οργανισμό από λιθοδομή.



Εικόνα 5.22 Δοκίμιο λιθοδομής

5.7 Θέσεις μετρήσεων

Για την επαλήθευση της μεθοδολογίας, και προκειμένου να αντλήσουμε πληροφορίες που αξιολογούν την δομική κατάσταση της κατασκευής, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε διαφορετικές θέσεις το δομικού υλικού. Ο σκοπός επιλογής των θέσεων εξυπηρετεί την επαλήθευση της μεθόδου για τις παρακάτω περιπτώσεις:

- A. Για την μη γραμμική συμπεριφορά στην περίπτωση οποιασδήποτε μορφής βλάβης*
- B. Για την γραμμική συμπεριφορά στην περίπτωση μιας υγιούς κατασκευής*

Στην πρώτη περίπτωση η θέση που επιλέχτηκε, για την τοποθέτηση των διεγερτών μηχανικής ταλάντωσης, αφορά σε λίθους οι οποίοι βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους ώστε να γίνει σκιαγράφιση μιας ευρείας περιοχής του δομικού υλικού για ανίχνευση βλάβης. Ο

πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας για την καταγραφή του φαινομένου, τοποθετήθηκε σε τυχαία θέση σε μικρή απόσταση.

Μεταξύ των θέσεων των διεγερτών παρεμβάλλονται διάκενα των λίθων, καθώς και μεγάλο ποσοστό κονιάματος σε αναλογία με το δομικό υλικό το οποίο δημιουργεί αρκετά παχύ αρμό με πιθανότητα να υπάρχει ασυνέχεια στο εσωτερικό του. Σε αυτήν την περίπτωση, όπου οι διεγέρτες ταλάντωσης βρίσκονται σε απόσταση, ο αισθητήρας καταγραφής λαμβάνει δεδομένα μέσω της διάδοσης των μηχανικών ταλαντώσεων για την αξιολόγηση μιας ευρείας επιφάνειας του δομικού υλικού.



Εικόνα 5.23 θέσεις τοποθέτησης εξοπλισμού διεγερτών και καταγραφέα για τον έλεγχο της μη γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου

Στην δεύτερη περίπτωση των μετρήσεων, επιλέχτηκε η θέση των εξωτερικών διεγερτών να είναι σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Δηλαδή ο εξωτερικός διεγέρτης για την δημιουργία της μηχανικής διαταραχής μέσω της ενεργοποίησης της πιεζοηλεκτρικής πλακέτας, και ο διεγέρτης ο οποίος δημιουργεί την μηχανική ταλάντωση μέσω κρούσης τοποθετήθηκαν στο ίδιο δομικό στοιχείο. Σε αυτήν την περίπτωση ο αισθητήρας για την καταγραφή του φαινομένου τοποθετήθηκε σε μικρή απόσταση προκειμένου να μη παρεμβάλλονται διάκενα ή αστοχίες συνέχειας στο δομικό υλικό. Σε αυτήν την περίπτωση η συνδεσμολογία των στοιχείων έγινε με κριτήριο να εξασφαλιστεί η δομική ακεραιότητα του υλικού προκειμένου να τεκμηριωθεί η μεθοδολογία για την γραμμική συμπεριφορά στην περίπτωση της υγιούς δομής.



Εικόνα 5.24 θέσεις τοποθέτησης εξοπλισμού διεγερτών και καταγραφέα για τον έλεγχο της γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου

5.8 Έρευνα για την εισαγωγή συχνοτήτων κύματος μεγέθυνσης

Η διαδικασία για την καταγραφή του φάσματος των συχνοτήτων έγινε όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία μέσω του κατάλληλου εξοπλισμού των γεννητριών και του παλμογράφου. Με τα παραπάνω όργανα εξασφαλίζεται

η δημιουργία των μηχανικών ταλαντώσεων στο εσωτερικό της κατασκευής καθώς και η καταγραφή των δεδομένων για την παροχή των πληροφοριών που αξιολογούν την δομική κατάσταση της λιθοδομής.

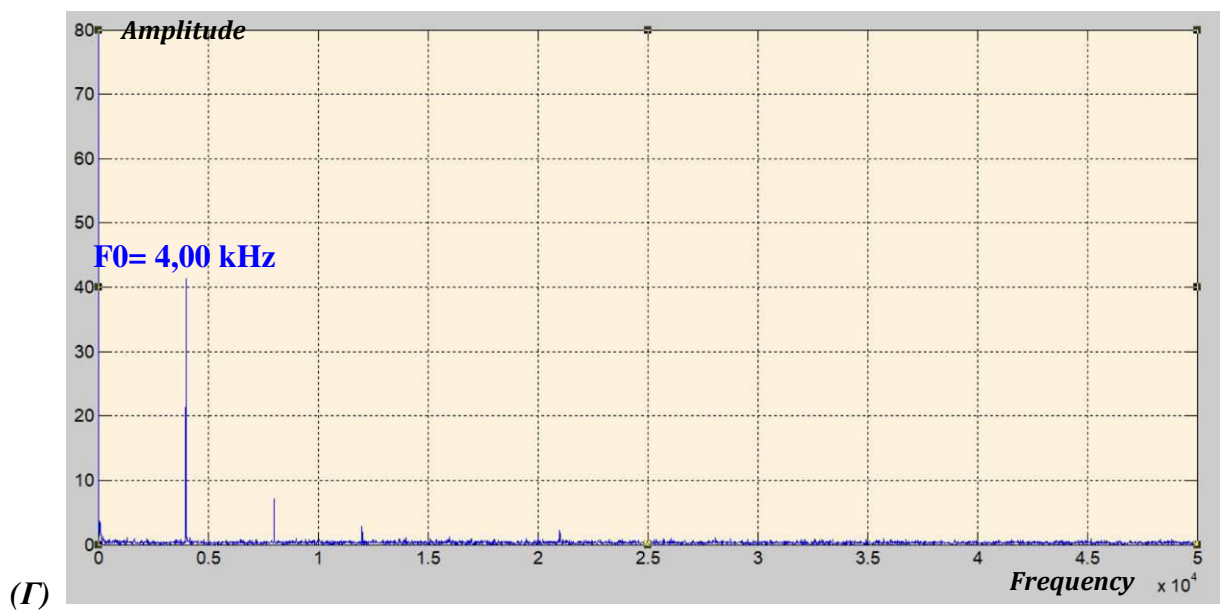
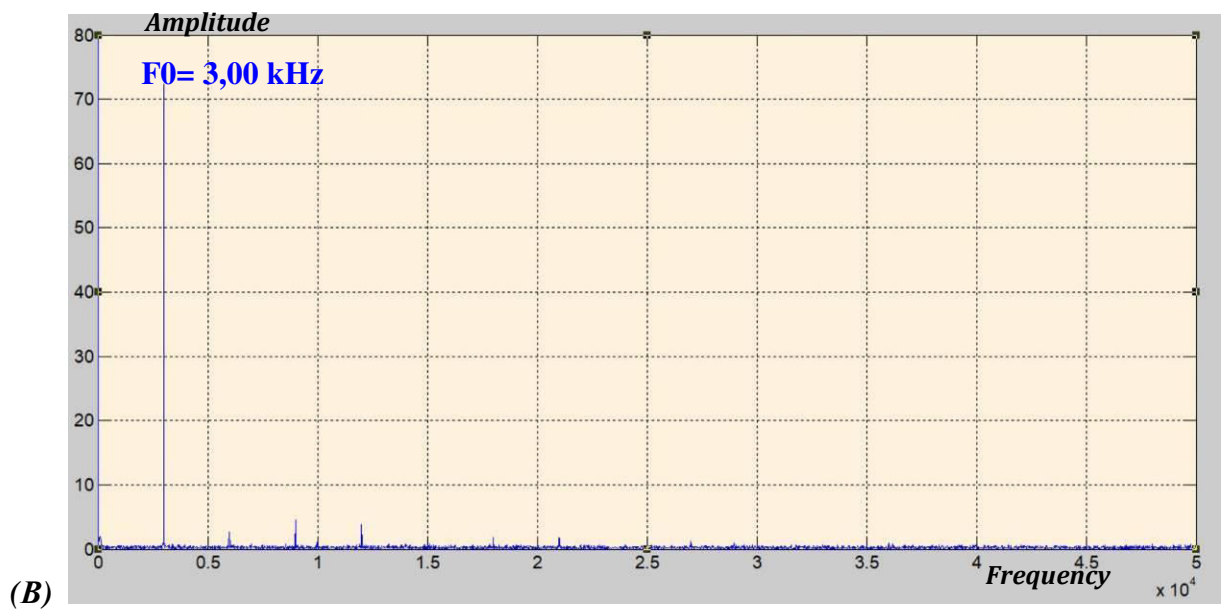
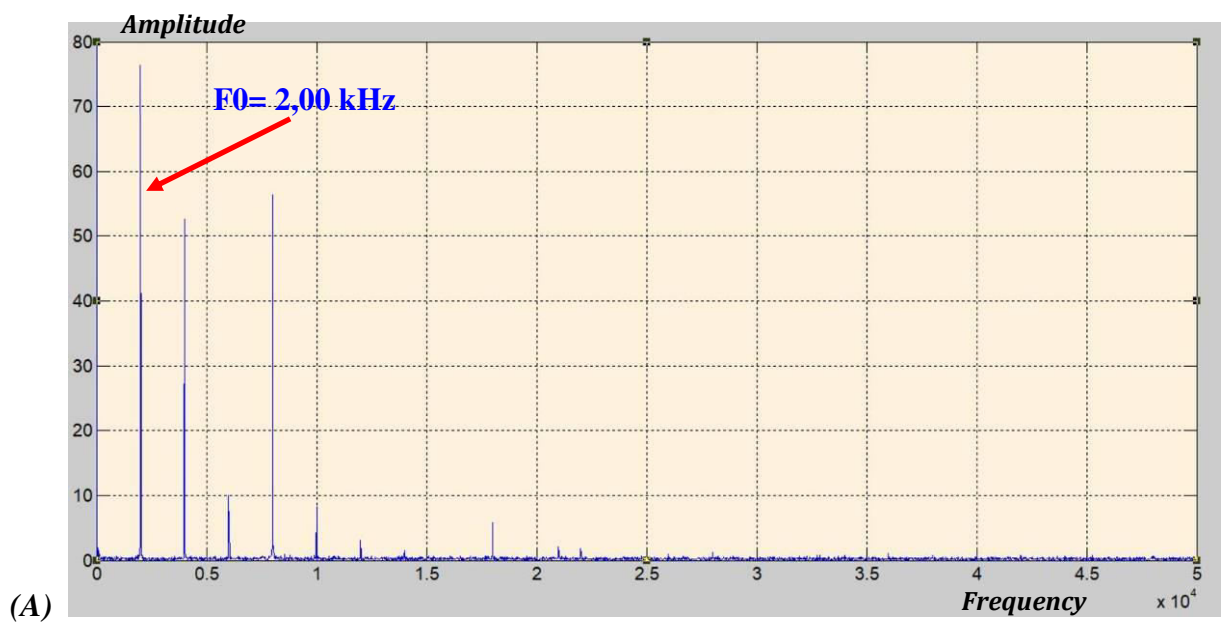


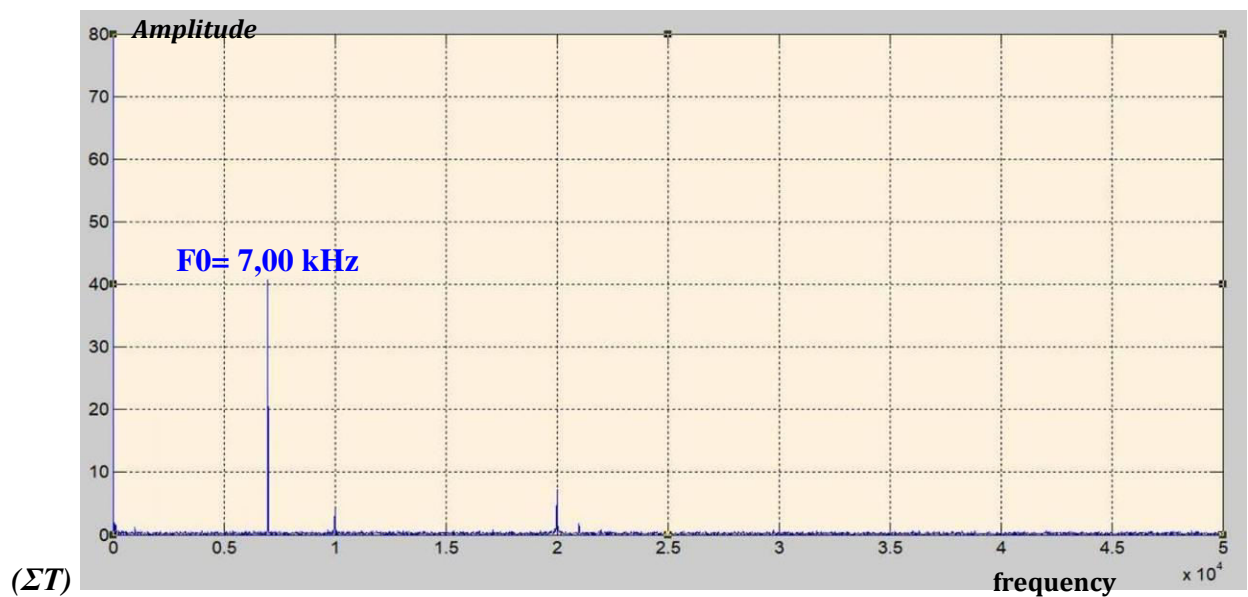
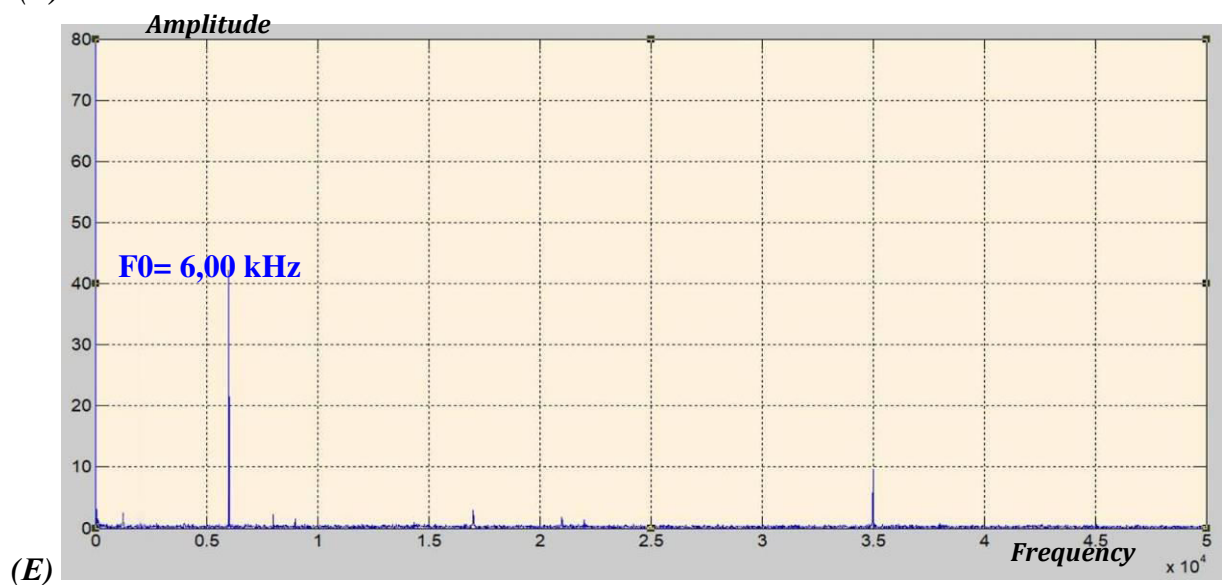
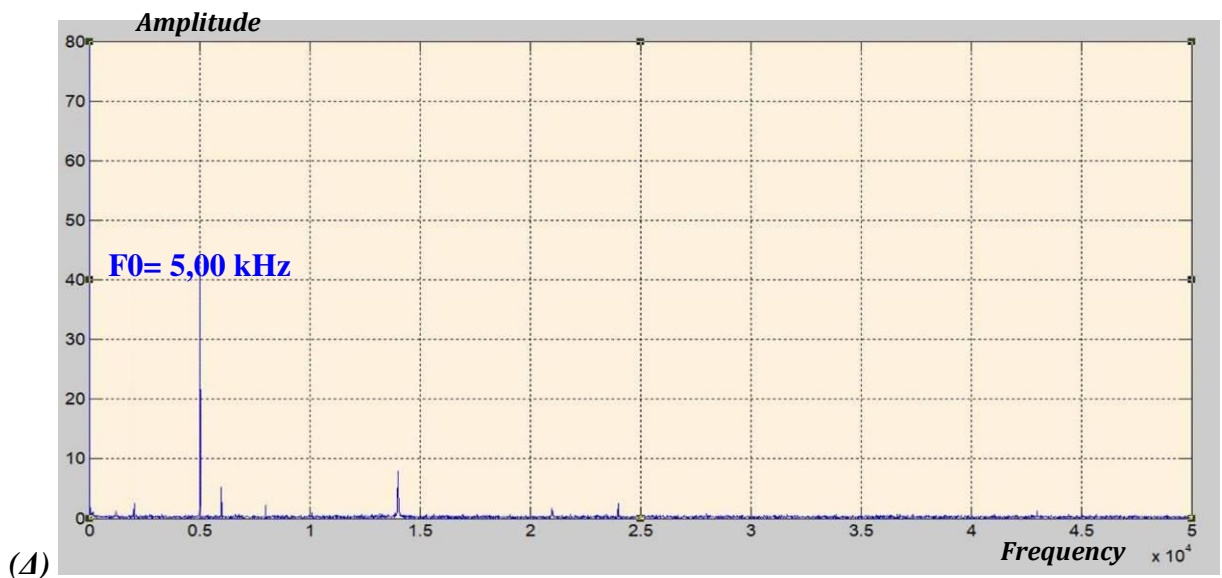
Εικόνα 5.25 Διάταξη πειραματικού εξοπλισμού για αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας δοκιμίου από λιθοδομή

Η πειραματική διαδικασία ξεκίνησε εισάγοντας διάφορες τιμές για την συχνότητα του κύματος μεγέθυνσης – rumping wave. Για αυτές τις τιμές πραγματοποιήθηκε διερεύνηση στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων, προκειμένου να διαπιστώσουμε πότε παράγονται σημαντικές πληροφορίες για τα δυναμικά χαρακτηριστικά και τις ιδιοσυχνότητες του υλικού.

Κατά συνέπεια με την ενεργοποίηση του εξωτερικού διεγέρτη και την δημιουργία μηχανικής ταλάντωσης πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος στις τιμές του κύματος μεγέθυνσης από 2,00 kHz, έως και 7,00kHz σε βήμα ανά 1,00 kHz. Υπό την εφαρμογή αυτών των συχνοτήτων σε μεμονωμένο επίπεδο χωρίς την εισαγωγή δεύτερης μηχανικής ταλάντωσης η εξεταζόμενη δομή απάντησε με ενέργεια στις συχνότητες που εισήχθησαν, καθώς και σε ενέργειες οι οποίες αφορούν στα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου.

Συγκεκριμένα για την εφαρμογή των τιμών που εξετάστηκαν παρατίθενται τα παρακάτω γραφήματα:





Εικόνα 5.26 Διάγραμμα του φάσματος για την συχνότητα του κύματος μεγέθυνσης, Α) για τιμή 2,00 kHz, Β) τιμή των 3,00 kHz, Γ) τιμή των 4,00 kHz, Δ) τιμή των 5,00 kHz, Ε) τιμή εισαγωγής των 6,00 kHz, ΣΤ) τιμή εισαγωγής των 7,00 kHz,

Από την σύγκριση των παραπάνω διαπιστώνουμε ότι για την υψηλότερη συχνότητα των 7,00 kHz παίρνουμε λιγότερες πληροφορίες για το δομικό υλικό, αφού στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων απαντάται μόνο η συχνότητα εισαγωγής. Σε αντίθεση η εφαρμογή της συχνότητας των 2,00kHz δίνει αρκετές θεμελιώδεις στο πεδίο του φάσματος συνεπώς περισσότερες πληροφορίες για τα δυναμικά χαρακτηριστικά του υλικού.

5.9 Έλεγχος μη γραμμικής συμπεριφοράς στο τοιχίο λιθοδομής

Για τον έλεγχο της μη γραμμικής συμπεριφοράς στην λιθοδομή, η πειραματική διαδικασία συνεχίζεται επαναλαμβάνοντας την ίδια μεθοδολογία.

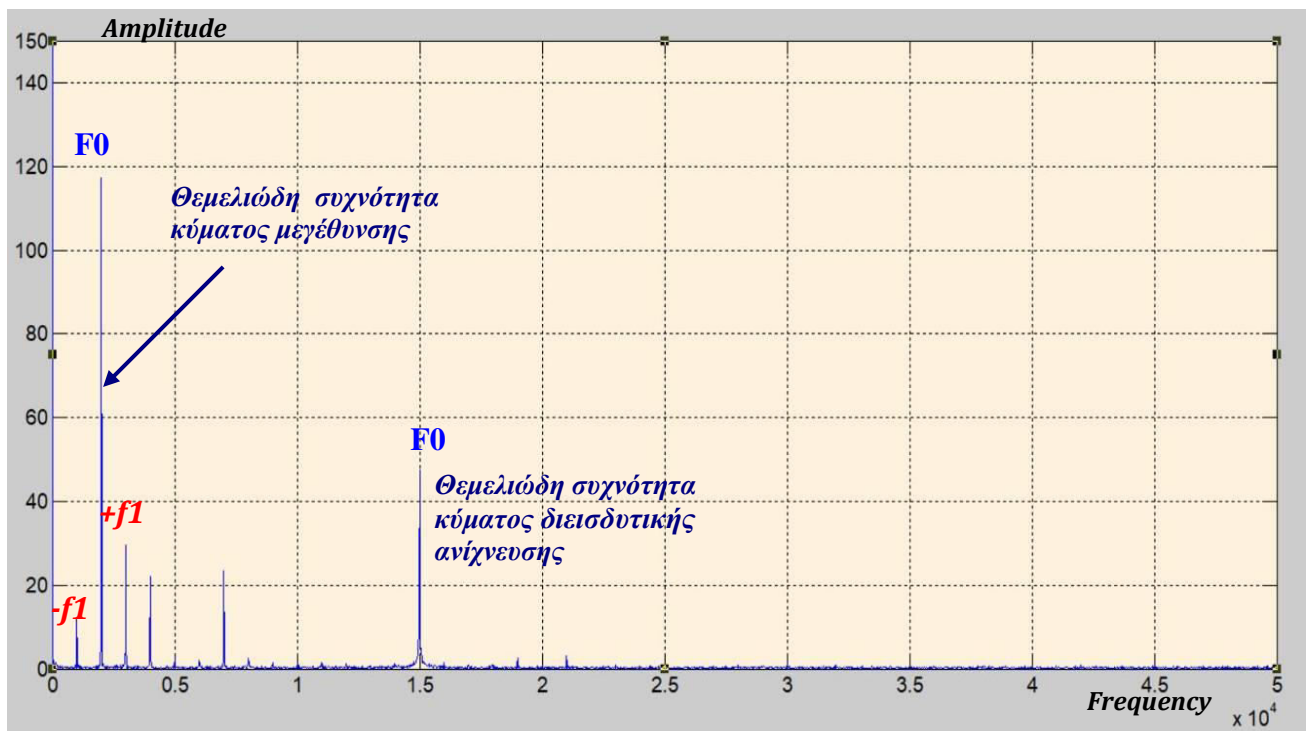
Η μέθοδος όπως και προηγουμένως βασίζεται στους αισθητήρες, για την καταγραφή της δυναμικής κίνησης και την ενεργοποίηση της μηχανικής ταλάντωσης μέσω της πιεζοηλεκτρικής πλακέτας, αλλά και στον εξωτερικό διεγέρτη για την εισαγωγή του κύματος μεγέθυνσης. Η συνδεσμολογία και οι θέσεις του εξοπλισμού τοποθετούνται σε συγκριμένα σημεία της κατασκευής όπως ορίστηκαν στην παράγραφο 5.7 δημιουργώντας έτσι ένα πλέγμα παρακολούθησης, καταγράφοντας την δυναμική απόκριση της ιδιοταλάντωσης του δομικού συστήματος.



Εικόνα 5.27 Διάταξη εξοπλισμού για τον έλεγχο της μη γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου

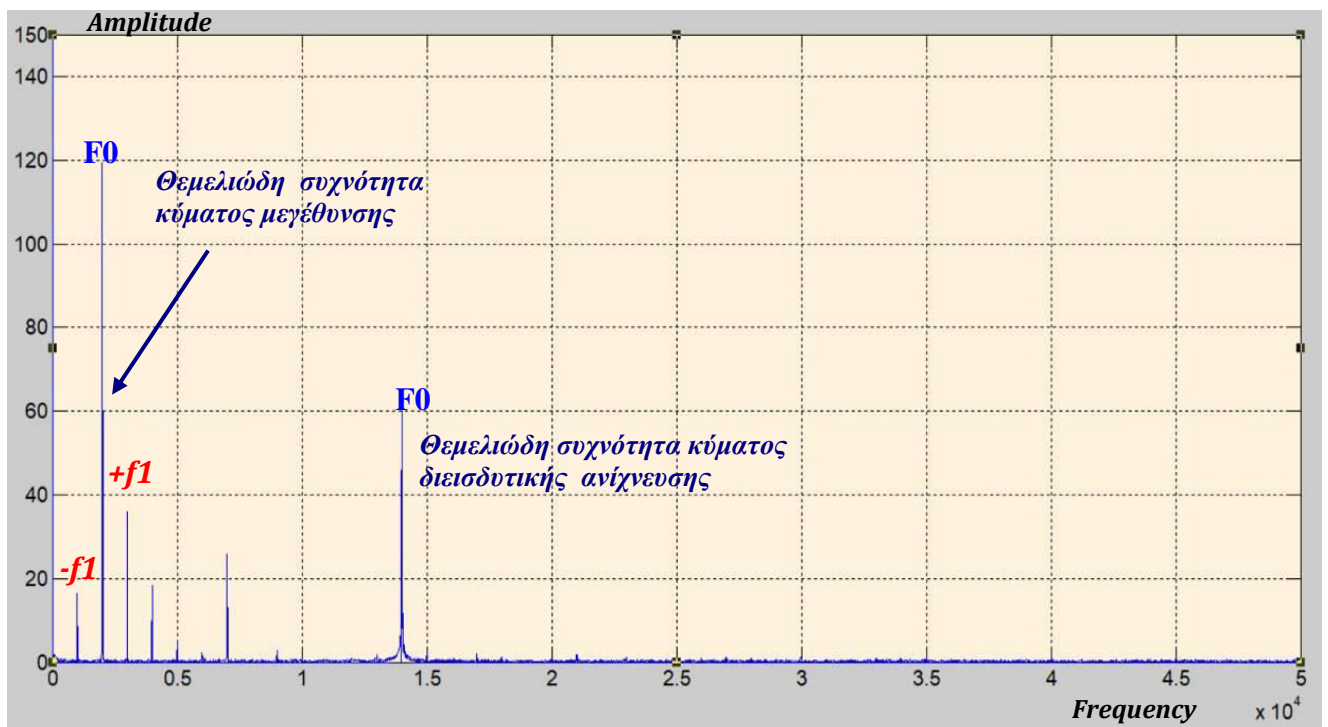
Για την διεξαγωγή της έρευνας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εισάγοντας διάφορες τιμές για την συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης, κρατώντας σταθερή την τιμή της συχνότητας του κύματος μεγέθυνσης στα 2,00 kHz σύμφωνα με την διερεύνηση για την συχνότητα του κύματος μεγέθυνσης που προηγήθηκε. Οι τιμές του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης οι οποίες εισήχθησαν καλύπτουν το εύρος των 2,00 έως 110,00 kHz. Οι συχνότητες των οποίων οι καταγραφές αποθηκευτήκαν αφορούν τα 85,00 kHz - 86,00 kHz - 87,00 kHz - 88,00 kHz- 89,00 kHz - 95,00 kHz και 105,00 kHz όπου το φαινόμενο παρατηρείται αρκετά έντονο. Τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αποτελεσμάτων λόγω της ανάμιξης των δύο σημάτων εισόδου μας έδωσαν τα γραφήματα που παρατίθενται παρακάτω:

Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 85,00 kHz



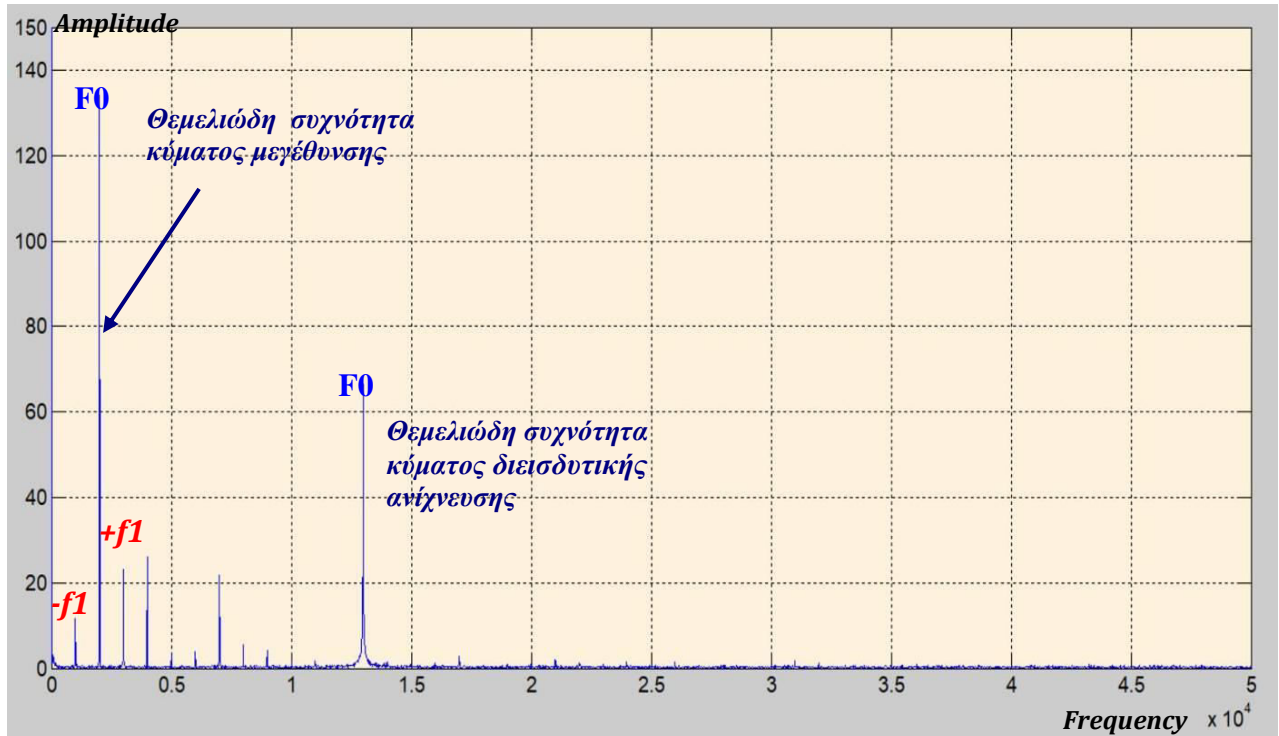
Εικόνα 5.28 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 85,00 kHz

Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 86,00 kHz



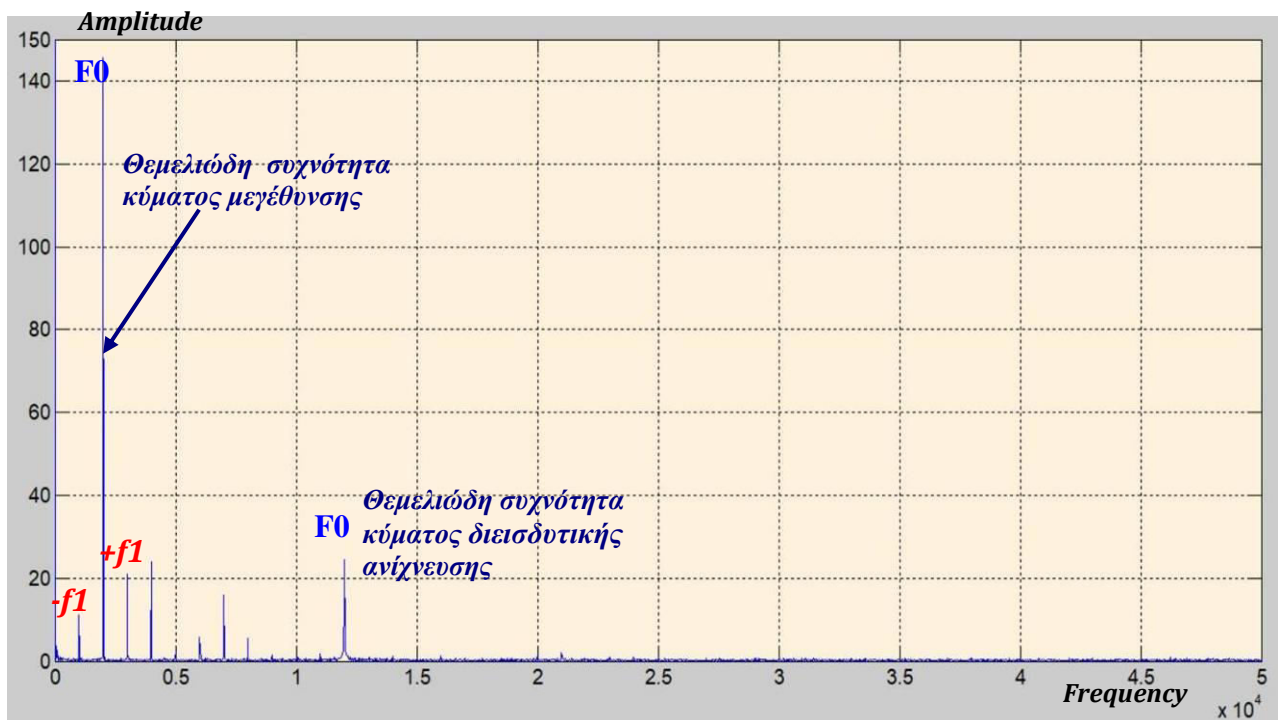
Εικόνα 5.29 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 86,00 kHz

Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 87,00 kHz



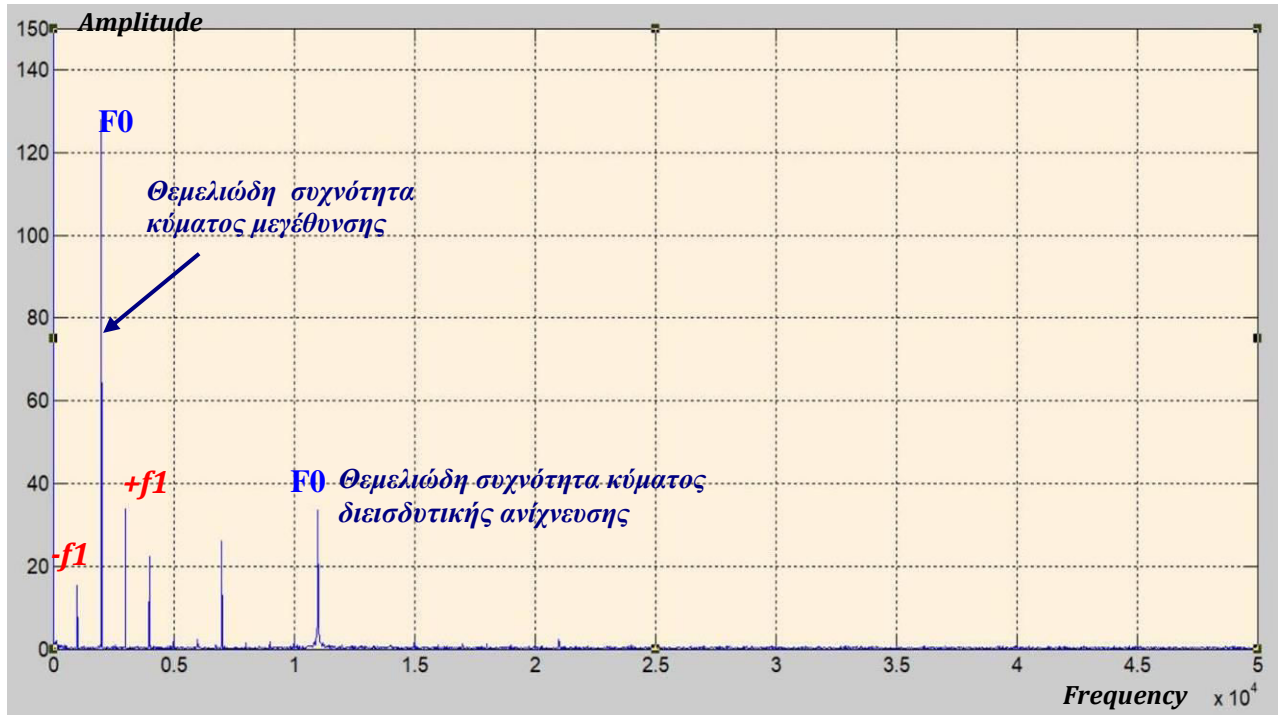
Εικόνα 5.30 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 87,00 kHz

Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 88,00 kHz



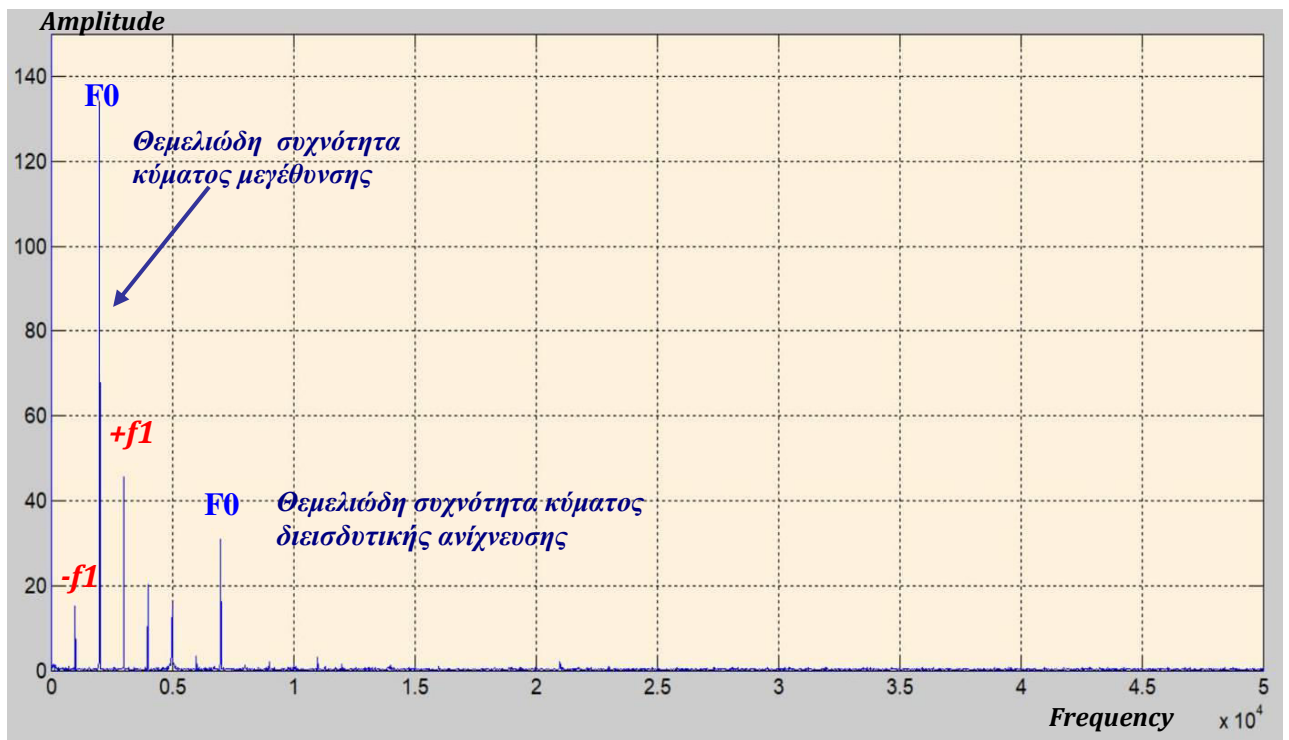
Εικόνα 5.31 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 88,00 kHz

Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 89,00 kHz



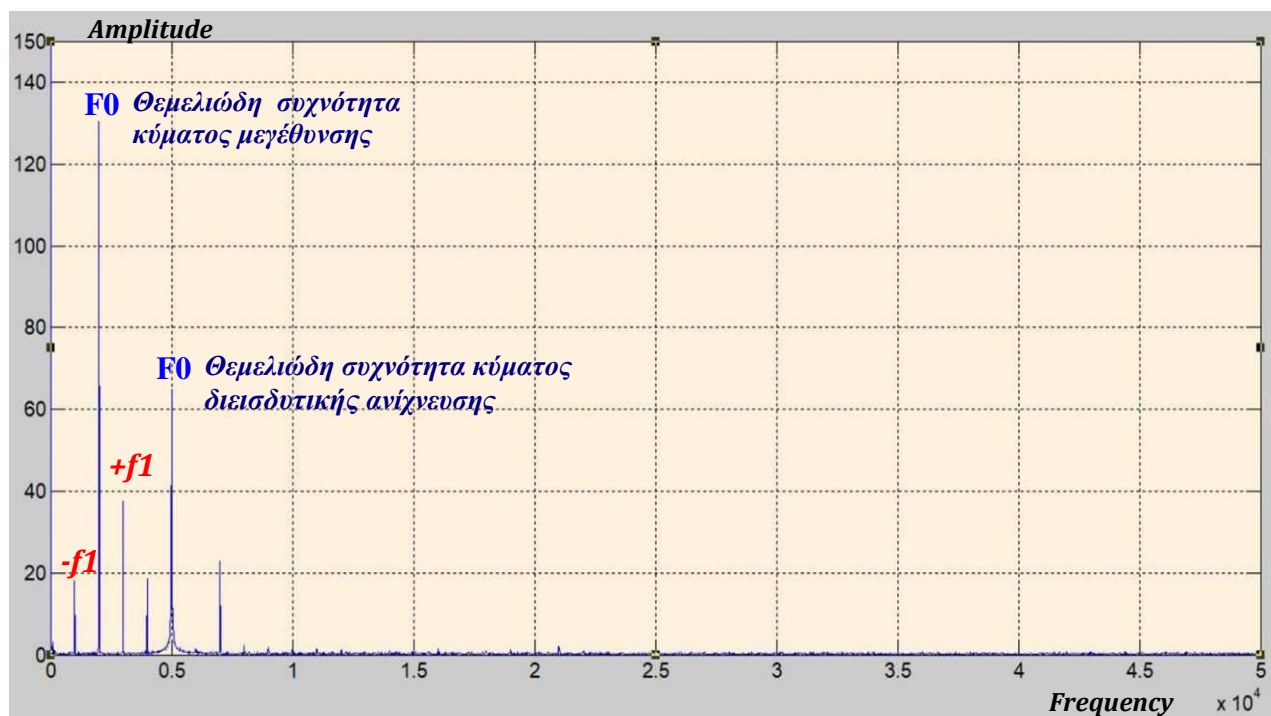
Εικόνα 5.32 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 89,00 kHz

Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 95,00 kHz



Εικόνα 5.33 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 95,00 kHz

Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 105,00 kHz

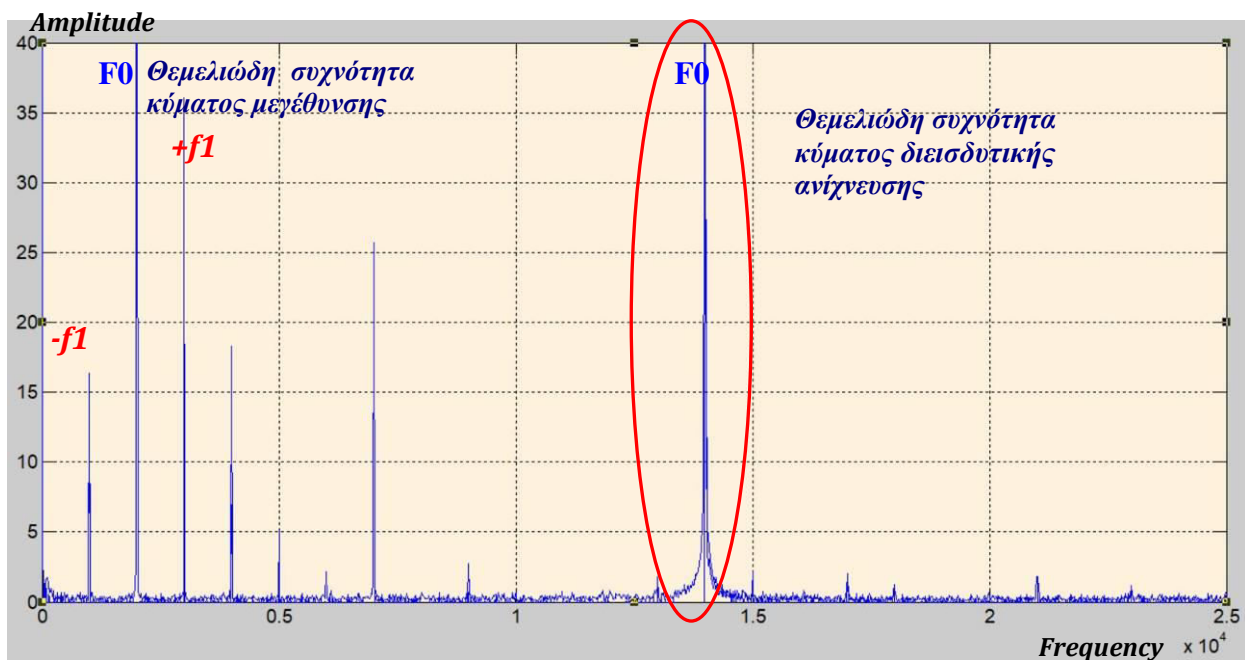


Εικόνα 5.34 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 105,00 kHz

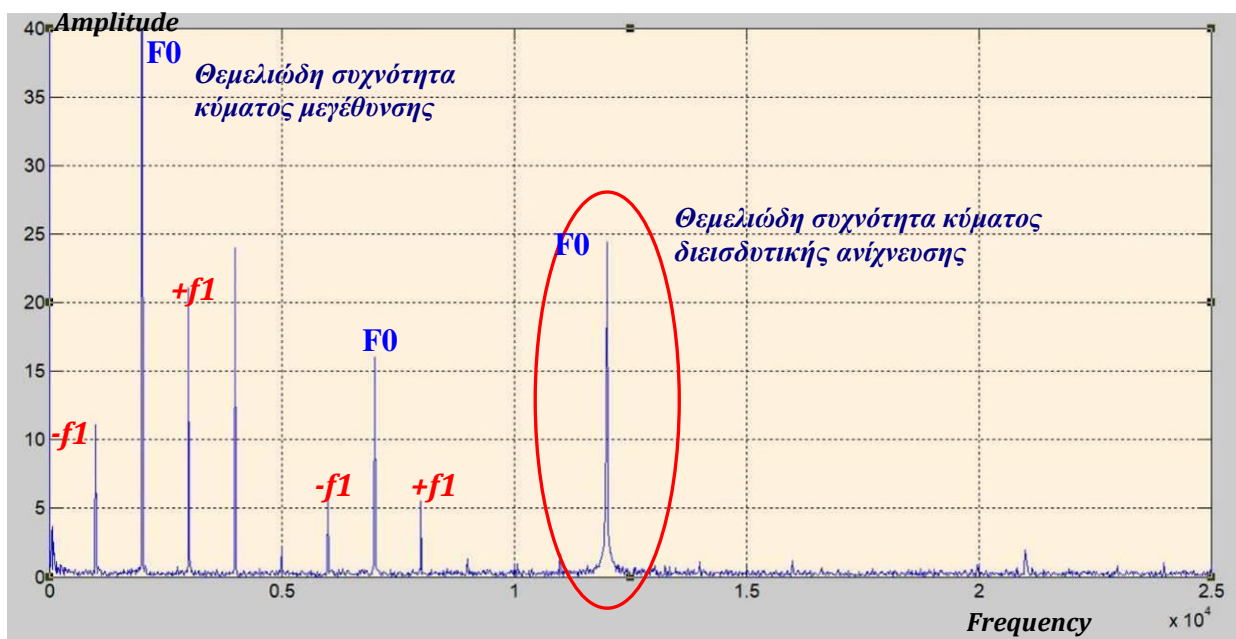
Μετά τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι, η πειραματική διαδικασία έλεγχου της μη γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου υπό την επίδραση δυο ταυτόχρονων σημάτων εισαγωγής επιβεβαιώνεται και για το τοιχίο της λιθοδομής. Συγκεκριμένα και στις επτά γραφικές παραστάσεις διαπιστώνουμε την ανάμιξη των δύο σημάτων εισόδου ως αποτέλεσμα της αστοχίας του υλικού οδηγώντας στην δημιουργία των πλευρικών συχνοτήτων.

Υπό την εφαρμογή της χαμηλής τιμής του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz σε συνδυασμό με την εισαγωγή των διαφόρων τιμών συχνοτήτων του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης, το φαινόμενο πλευρικών συχνοτήτων επαναλαμβάνεται ακριβώς όπως και στον κύβο σκυροδέματος γύρω από τις θεμελιώδεις συχνότητες στο πεδίο τιμών του pumping wave.

Για τον πιο ενδελεχή έλεγχο του φαινομένου και προκειμένου να διαπιστώσουμε την ύπαρξη πλευρικών συχνοτήτων οι οποίες μπορεί να μην είναι ορατές, έγινε η ανάπτυξη κάποιων γραφημάτων σε μεγαλύτερη κλίμακα προκειμένου να εξετάσουμε αν παράγονται πλευρικές ζώνες συχνοτήτων ως συνιστώσες της θεμελιώδους συχνότητας που αναπτύσσεται λόγω της εισαγωγής των τιμών του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης. Συγκεκριμένα παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις των 86,00 και 88,00 kHz



Εικόνα 5.35 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 86,00 kHz



Εικόνα 5.36 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz και κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης των 88,00 kHz

Απο τις γραφικές παραστάσεις που παρατίθενται παραπάνω διαπιστώνεται ότι και σε αυτήν την περίπτωση όπως και στον κύβο σκυροδέματος για τις χαμηλές τιμές των συχνοτήτων του κύματος μεγέθυνσης δεν αναπτύσσονται πλευρικές συχνότητες γύρω από την θεμελιώδη του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης . Ωστόσο έχουμε ανάπτυξη των πλευρικών συχνοτήτων γύρω από το πεδίο της τιμής εισαγωγής του κύματος μεγέθυνσης . Με την παρουσία των πλευρικών συχνοτήτων επιβεβαιώνεται η μεθοδολογία της δονητικής

ακουστικής μεθόδου στο δοκίμιο της λιθοδομής στο οποίο παρατηρείται ανομοιογένεια και διάκενα μεταξύ των δομικών υλικών.

5.10 Έλεγχος γραμμικής συμπεριφοράς στο τοιχίο λιθοδομής

Για τον έλεγχο της γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου, ο πειραματικός εξοπλισμός τοποθετείται στα σημεία της κατασκευής όπως ορίστηκαν στην παράγραφο 5.7 της παρούσας. Η μέθοδος όπως και προηγουμένως βασίζεται στους αισθητήρες, για την καταγραφή της δυναμικής κίνησης και την ενεργοποίηση της μηχανικής ταλάντωσης του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης, αλλά και στον εξωτερικό διεγέρτη για την εισαγωγή του κύματος μεγέθυνσης. Σε αυτήν την περίπτωση, επιλέχτηκε η θέση των εξωτερικών διεγερτών να είναι σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Δηλαδή ο αισθητήρας για την δημιουργία της μηχανικής διαταραχής μέσω της ενεργοποίησης της πιεζοηλεκτρικής πλακέτας, και ο διεγέρτης ο οποίος δημιουργεί την μηχανική ταλάντωση μέσω κρούσης τοποθετηθήκαν στο ίδιο δομικό στοιχείο. Η συνδεσμολογία των στοιχείων έγινε προκειμένου να επαληθεύουμε την μεθοδολογία κατά την οποία σε ένα δομικό υλικό χωρίς φθορά δεν έχω ανάμειξη των σημάτων που εισάγονται και κατά συνέπεια η απόκριση του δομικού στοιχείου στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων ανταποκρίνεται γραμμικά.

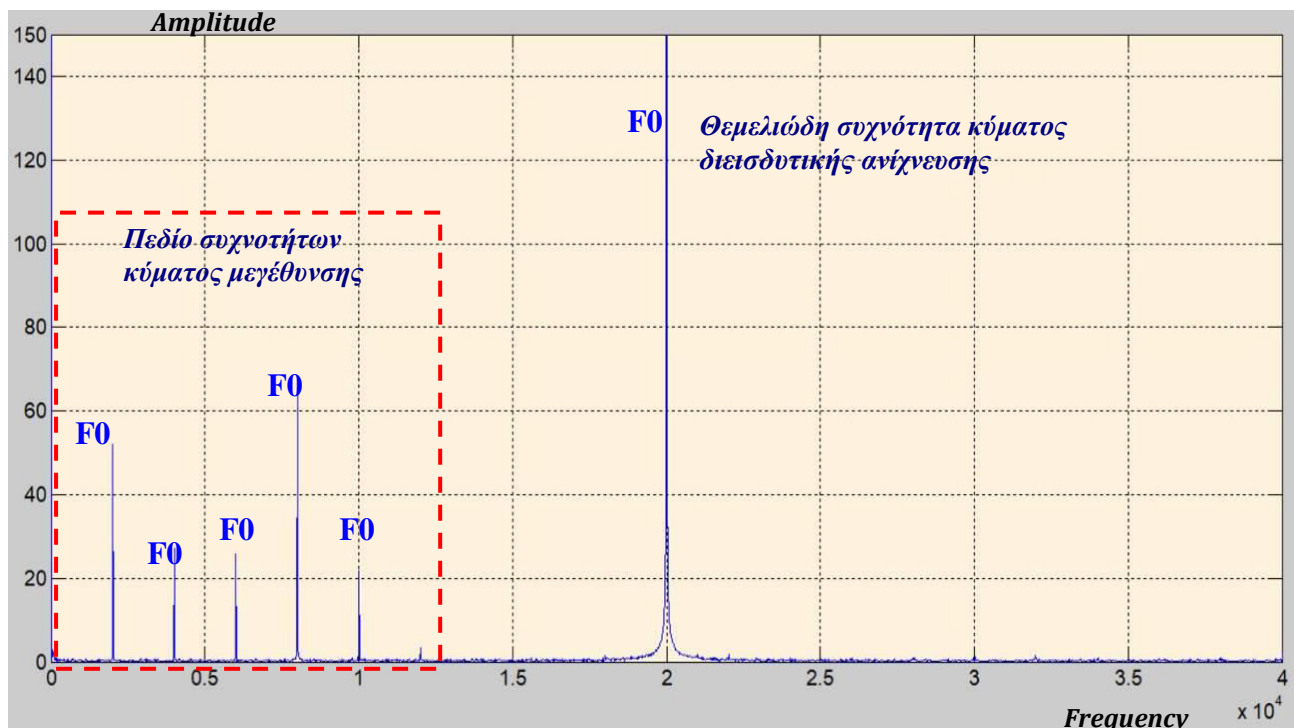


Εικόνα 5.37 Διάταξη εξοπλισμού για τον έλεγχο της γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου

Για την διεξαγωγή της έρευνας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εισάγοντας διάφορες τιμές για την συχνότητα του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης, κρατώντας σταθερή την τιμή της συχνότητας του κύματος μεγέθυνσης στα 2,00 kHz. Συνεπώς εισήχθησαν διάφορες συχνότητες δια μέσω της ενεργοποίησης του πιεζοηλεκτρικού πλακιδίου προκειμένου να έχουμε δεδομένα απόκρισης στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων. Οι τιμές του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης οι οποίες εισήχθησαν καλύπτουν ένα εύρος από 2,00 έως 110,00 kHz. Οι συχνότητες των οποίων οι καταγραφές αποθηκευτήκαν αφορούν τα 80,00 kHz –

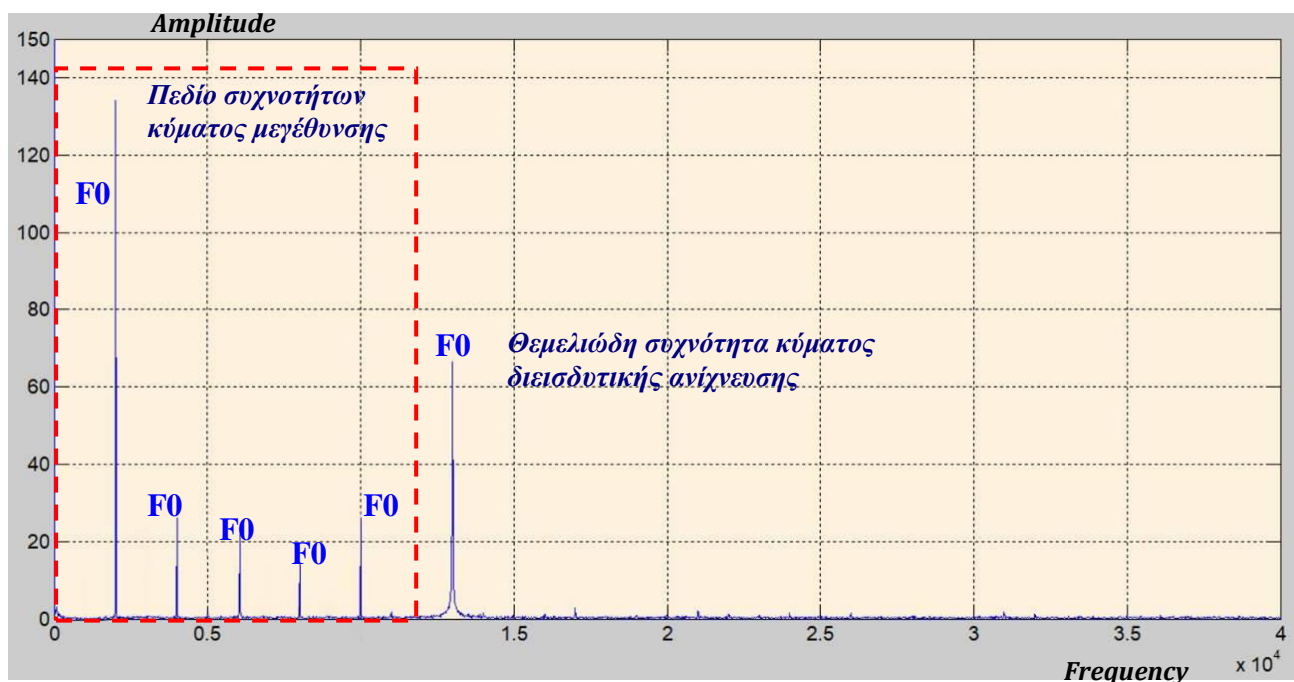
87,00 kHz - 90,00 kHz - 97,00 kHz- 110,00 kHz. Τα αποτελέσματα των γραμμικών αποτελεσμάτων λόγω της επαλληλίας των δύο σημάτων εισόδου μας έδωσαν τα γραφήματα που παρατίθενται παρακάτω:

Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 80,00 kHz



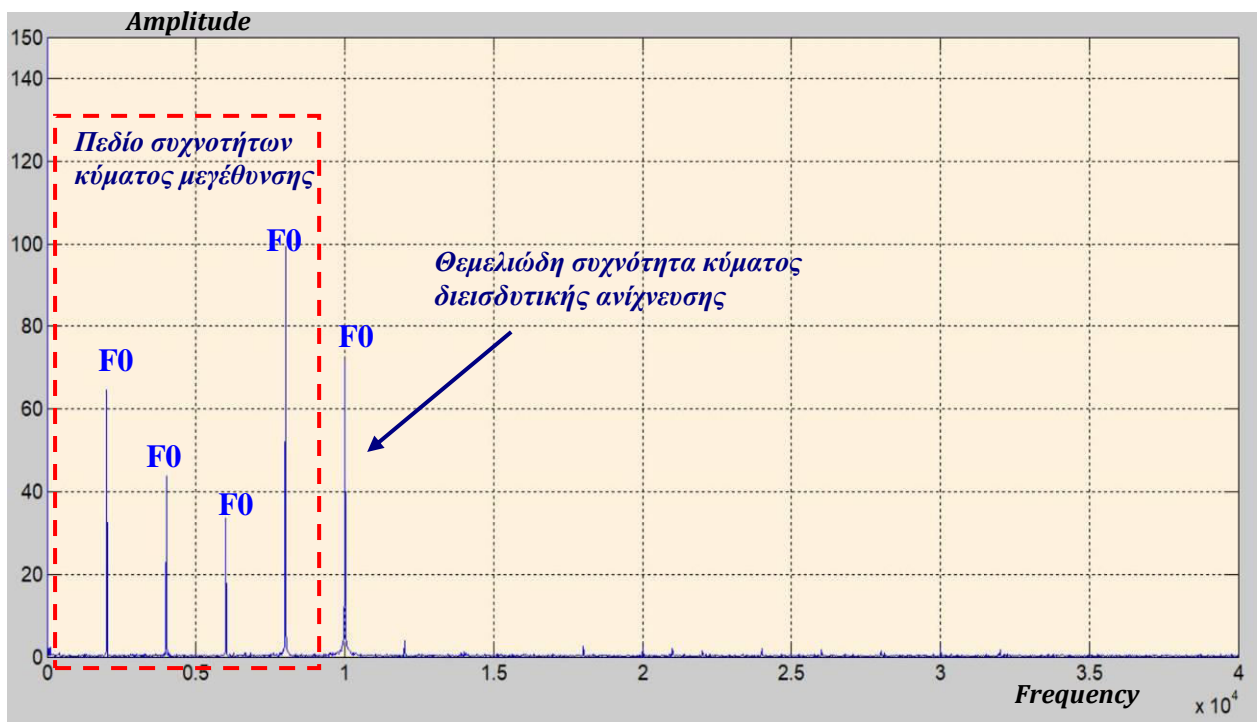
Εικόνα 5.37 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου, για κύμα μεγέθυνσης 2,00 kHz και κύμα διεισδυτικής ανίχνευσης 80,00 kHz

Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 87,00 kHz



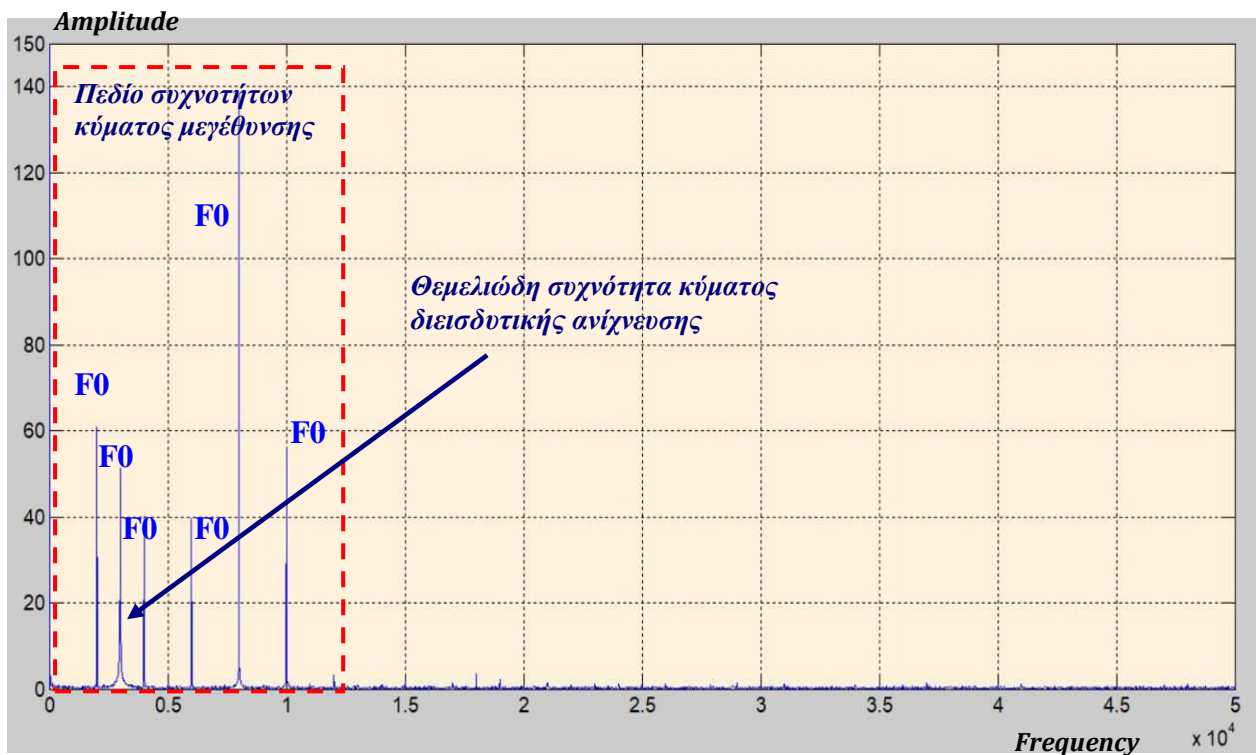
Εικόνα 5.38 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου, για κύμα μεγέθυνσης 2,00 kHz και κύμα διεισδυτικής ανίχνευσης 87,00 kHz

Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 90,00 kHz



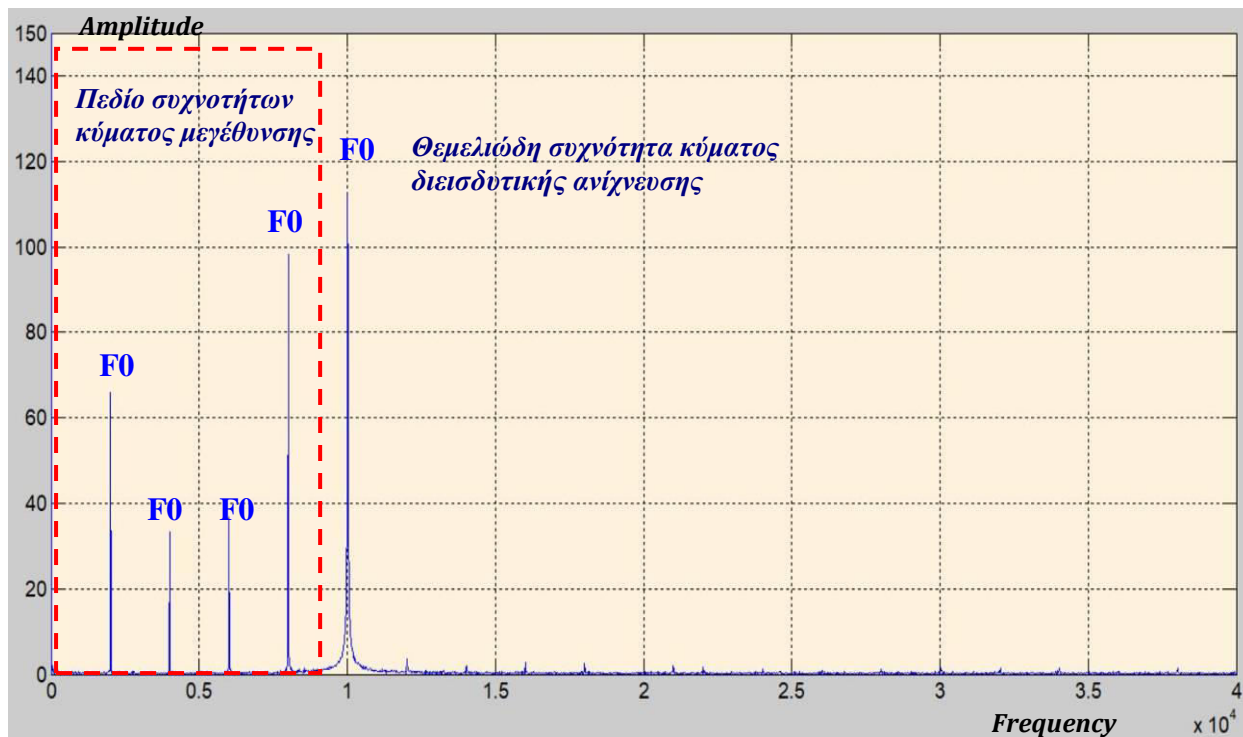
Εικόνα 5.39 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου, για κύμα μεγέθυνσης 2,00 kHz και κύμα διεισδυτικής ανίχνευσης 90,00 kHz

Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 97,00 kHz



Εικόνα 5.40 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου, για κύμα μεγέθυνσης 2,00 kHz και κύμα διεισδυτικής ανίχνευσης 97,00 kHz

Για συχνότητα κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης 110,00 kHz



Εικόνα 5.41 Πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων στην περίπτωση γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου, για κύμα μεγέθυνσης 2,00 kHz και κύμα διεισδυτικής ανίχνευσης 110,00 kHz

Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις διαπιστώθηκε ότι, για την πειραματική διαδικασία έλεγχου της γραμμικής συμπεριφοράς, ενός συγκεκριμένου δομικού στοιχείου του υλικού υπό την εφαρμογή της χαμηλής τιμής του κύματος μεγέθυνσης των 2,00 kHz σε συνδυασμό με την εισαγωγή των διαφόρων τιμών συχνοτήτων του κύματος διεισδυτικής ανίχνευσης, το φαινόμενο πλευρικών συχνοτήτων δεν εμφανίζεται, επιβεβαιώνοντας ότι η απόκριση του δομικού υλικού στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων απαντά με τις συχνότητες εισαγωγής καθώς και άλλες θεμελιώδεις χαρακτηριστικές των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών του.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ**6.1 Γενικά συμπεράσματα**

Με την παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μια διερεύνηση και τεκμηρίωση της δονητικής ακουστικής τεχνικής επάλληλης διαμόρφωσης για την ανίχνευση βλάβης σε δομικά και σύνθετα υλικά. Η μέθοδος βασίστηκε σε δύο ανεξάρτητα κύματα διέγερσης τα οποία ασκούνται ταυτόχρονα στο δομικό υλικό, το χαμηλής συχνότητας κύμα μεγέθυνσης, και το υψηλής συχνότητας κύμα διεισδυτικής ανίχνευσης. Τα κύματα καταγράφονται από αισθητήρες και μετατρέπονται σε ηλεκτρικές κυματομορφές που παρέχουν πληροφορία για την δομική ακεραιότητα του υλικού.

Υπό την εφαρμογή των παραπάνω δράσεων οι υγιείς δομές θα επιστρέψουν μια απάντηση με ενέργεια μόνο στις συχνότητες μεγέθυνσης και διεισδυτικής ανίχνευσης.

Ωστόσο, με την παρουσία των ζημιών, δημιουργούνται πρόσθετα μη γραμμικά στοιχεία, τα οποία οφείλονται στην ανάκλαση της ενέργειας από την αστοχία του υλικού στο εσωτερικό του. Αυτό χαρακτηρίζει και την μη γραμμική συμπεριφορά του δοκιμίου.

Τα πρόσθετα μη γραμμικά στοιχεία εμφανίζονται με την μορφή εγκάρσιων διακυμάνσεων γύρω από τις βασικές συχνότητες των κυμάτων διεισδυτικής ανίχνευσης και μεγέθυνσης στο πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων. Αυτές οι νέες συχνότητες, ονομάζονται πλευρικές ζώνες συχνοτήτων, και οι τιμές τους δηλώνουν το εύρος και μέγεθος του σφάλματος στο δομικό υλικό.

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την πειραματική διαδικασία σε αυτή τη μελέτη συμφωνούν με την υπάρχουσα βιβλιογραφία και επιβεβαιώνουν ότι υπάρχει σύνδεση μεταξύ των μη γραμμικών διαμορφώσεων των δονητικών ακουστικών κυμάτων και της αστοχίας του υλικού.

Η ερευνά και τεκμηρίωση της δονητικής ακουστικής μεθόδου, 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, για την διερεύνηση διάκενων λόγω κατασκευαστικών σφαλμάτων ή λόγω ατελής χύτευσης, αλλά και για τον εντοπισμό αποσπαθώσεων λόγω παλαιότητας και έλλειψης συντήρησης. Η ανάπτυξη και εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι ένα σημαντικό βήμα προς τη βελτίωση της αξιοπιστίας της απόδοσης των δομικών στοιχείων μιας κατασκευής.

Επιπλέον, με βάση αυτή την μεθοδολογία θα μπορούσε να είναι δυνατή μια σχετικά γρήγορη επιθεώρηση (σε σχέση με τις υφιστάμενες μεθόδους ΜΚΕ) ανά τακτά χρονικά διαστήματα, προκειμένου να ελεγχτεί και ανακτηθεί το παραμορφωσιακό πεδίο μιας κατασκευής.

6.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της μεθόδου

Πλεονεκτήματα

- Πρόκειται για μέθοδο η οποία συλλέγει πληροφορίες για αξιολόγηση με ένα μικρό αριθμό αισθητήρων. Ο έλεγχος παρέχει άμεσα αποτελέσματα με την χρήση ενός παλμογράφου που έχει δυνατότητα της μαθηματικής επίλυσης του γρήγορου μετασχηματισμού Φουριέ (Fast Fourier Transform, FFT)
- Δεν απαιτούνται αναλώσιμα (εκτός από αισθητήρες, που μερικές φορές μπορούν να επισκευαστούν)
- Ανιχνεύει εσωτερικές ατέλειες, και είναι εφαρμόσιμη για μεγάλο εύρος γεωμετρικών σχημάτων
- Εύκολη εφαρμογή, φορητότητα, εύκολη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, και μόνιμο αρχείο των αποτελεσμάτων
- Μεγάλη διεισδυτική ικανότητα που επιτρέπει την ανίχνευση ατελειών επιφανειακά αλλά και σε μεγάλο βάθος
- Για τον εντοπισμό της φθοράς απαιτείται πρόσβαση σε μία μόνο επιφάνεια του υπό έλεγχο αντικειμένου.
- Απαιτείται ελάχιστη προετοιμασία του αντικειμένου προς έλεγχο.
- Δεν έχει κόστος
- Δεν υπάρχει κίνδυνος για την υγεία των χειριστών από τη χρήση της μεθόδου.

Μειονεκτήματα

- Δεν προσφέρεται για την μόνιμη παρακολούθηση των κατασκευών
- Μεγάλη σημασία πρέπει να δίνεται στην αποφυγή θορύβου ειδικά σε περιπτώσεις ελέγχου στο πεδίο, όπου πολλοί αστάθμητοι παράγοντες μπορεί να προκαλέσουν ακουστικά σήματα που αν δεν φιλτραριστούν θα επηρεάσουν τα δεδομένα (π.χ. αέρας, βροχή, κίνηση οχημάτων)
- Μικρή διακριτική ικανότητα ανάμεσα σε ατέλειες διαφορετικών τύπων

6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνά

Παρόλα αυτά η έρευνα αυτή βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί, κάποια ζητήματα τα οποία χρήζουν επιπλέον θεωρητικής και τεχνικής διερεύνησης και είναι δυνατό να αποτελέσουν το αντικείμενο μελλοντικής έρευνας, είναι τα ακόλουθα.

Για τον έλεγχο μιας μεγάλης επιφάνειας δεν είναι εύκολα προσδιορίσιμη η θέση της βλάβης. Για τον παραπάνω λόγο και τον εντοπισμό της ακριβούς θέσης της αστοχίας θα μπορούσαν να χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότεροι αισθητήρες. Η λειτουργία βασίζεται στην καθυστέρηση λήψης του κύματος μεταξύ αισθητήρων τοποθετημένων σε διαφορετικά σημεία. Εφόσον οι δύο αισθητήρες καταγράψουν κύμα ταυτόχρονα, αυτόματα γίνεται

κατανοητό ότι το γεγονός έλαβε χώρα στο μέσο του διαστήματος, ενώ όταν ο ένας αισθητήρας λάβει κύμα νωρίτερα, το γεγονός τοποθετείται εγγύτερα σε αυτόν.

6.4 Επίλογος – αξιολόγηση της μεθόδου

Συνοψίζοντας, διαπιστώνουμε ότι το πεδίο των ερευνών της **Δονητικής Ακουστικής Μεθόδου** μπορεί να αποτελέσει μια διαγνωστική μέθοδο και διαδικασία διερεύνησης σφαλμάτων, η οποία μπορεί σε κλίμακα μεγάλου μεγέθους να εφαρμοστεί σε φέροντες οργανισμούς από λιθοδομή ή και σκυρόδεμα, προκειμένου να γίνει μελέτη και κατανόηση της ομοιογένειας της δομής τους.

Η αλληλεπίδραση της υψηλής συχνότητας και χαμηλής συχνότητας κυμάτων διέγερσης σε ένα υλικό κάνει ιδιαίτερα ισχυρή την παρουσία της σε επιφανειακές αστοχίες, όπως στις περιπτώσεις :

- *Ρωγμών*
- *Ασυνέχειας στην δομή του υλικού και ανομοιογένειας του*
- *Διάκενων λόγω κατασκευαστικών σφαλμάτων ή λόγω ατελής χύτευσης σε περίπτωση σκυροδέματος*
- *Υγρασίες*
- *Ύπαρξη ξένων σωμάτων*
- *Χαλάρωση των δεσμών συνάφειας*

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Aymerich, F., and Staszewski, W. J., Impact-Damage Detection in Composite Laminates using a Cross-Modulation Vibro-Acoustic Technique. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(9) (2010) 1084–1092
2. D. Gay, S.V. Hoa, S.W. Tsai, *Composite Materials Design and Applications*, CRC Press, 2003
3. W.J. Staszewski, C. Boller, G.R. Tomlinson (Eds.), *Health Monitoring of Aerospace Structures*, John Wiley & Sons, 2003
4. Donskoy, D.M. and Sutin, A.M. (1998). Vibro-acoustic modulation nondestructive evaluation technique. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 1998
5. Z. Parsons, W.J. Staszewski, Nonlinear acoustics with low-profile piezoceramic excitation for crack detection in metallic structures, *Smart Materials and Structures*, 15 (2006) 1110–1118
6. Meo, M. and Zumpano, G. (2005). Nonlinear elastic wave spectroscopy identification of impact damage on a sandwich plate. *Computers & Structures*
7. Zumpano, G. and Meo, M. (2007). Damage localization using transient non-linear elastic wave spectroscopy on composite structures. *International Journal of Non-Linear Mechanics*
8. Lukasz Pieczonka, Wieslaw J. Staszewski^{1,b} and Tadeusz Uhl. Investigation of Nonlinear Vibro-Acoustic Wave Modulation Mechanisms in Composite Laminates, *University of Science and Technology, Krakow, Poland*. ISSN: 1662-9795, Vols. 569-570, pp 96-102
9. Yoder, N.C. and D.E. Adams, “Vibro-Acoustic Modulation Utilizing a Swept Probing Signal for Robust Crack Detection,” *Structural Health Monitoring* 9, no. 3 (2010): 257-267
10. Zacharias, K., E. Balabanidou, I. Hatzokos, I.T. Rekanos, and A. Trochidis, “Microdamage evaluation in human trabecular bone based on nonlinear ultrasound vibro-modulation (NUVM),” *Journal of Biomechanics* 42, no. 5 (2009): 581-586
11. Duffour, P., Morbidini, M. and Cawley, P. (2006). A study of the vibro-acoustic modulation technique for the detection of cracks in metals. *Journal of the Acoustic Society of America*
12. Ryles, M., Ngau, F.H., McDonald, I. and Staszewski, W.J. (2008). Comparative study of nonlinear acoustic and Lamb wave techniques for fatigue crack detection in metallic structures. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure*
13. Zaitsev, V., V.E. Gusev, and B. Castagnede, “Luxembourg-Gorky Effect Retooled for Elastic Waves: A Mechanism and Experimental Evidence,” *Physical Review Letters* 89, no. 10 (2002)
14. Bo-Yang Chen, Su-Kiat Soh, Heow-Pueh Lee, Tong-Earn Tay and Vincent B. C. Tan., A Vibro-Acoustic Modulation Method for the Detection of Delamination and Kissing Bond in Composites. *Journal of Composite Materials* (xx. 1-17, 2015)

15. Guyer, R.A., McCall, K.R. and Van Den Abeele, K. (1998). Slow elastic dynamics in a resonant bar of rock. *Geophysical Research Letters*, 25, 1585–1588
16. Tellegen, B.D.H. (1933). Interaction between radio waves, *Nature*, 131, 840
17. Staszewski, W.J. (2004). Structural health monitoring using guided ultrasonic waves. In: Holnicki-Szulc, J. and Mota Soares, C.A. (eds), *Advances in Smart Technologies in Structural Engineering*
18. Dutta, D., Sohn, H., Herries, K.A. and Rizzo, P. (2009). A nonlinear acoustic technique for crack detection in metallic structures. *Structural Health Monitoring*, 8(3), 251–262
19. Ματίκας, Θ., Αγγελής Δ., Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2015
20. Λιαράκος, Ε. Διάγνωση βλαβών σε κατασκευές σκυροδέματος με χρήση "ευφών" πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων σαν αδρανή σκυροδέματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2015
21. Χριστόπουλος, Α., Έλεγχος της δομικής ακεραιότητας με καινοτόμες μεθόδους μη καταστροφικού έλεγχου σε κατασκευές και σύνθετα υλικά, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012
22. Μειμαρίδης, Δ., Πάλλης Δ., Μελέτη και υλοποίηση γεννήτριας σήματος, βασισμένη στην πλατφόρμα Arduino, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα Σερρών, 2013
23. Van Den Abeele, K., Carmeliet, T., TenCate, J.A. and Johnson, P.A. (2000). Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) technique to discern material damage. Part II: Single mode nonlinear acoustic spectroscopy. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*
24. Donskoy, D.M. and Sutin, A.M. (1998). Vibro-acoustic modulation nondestructive evaluation technique. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 1998
25. 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).
26. https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric_accelerometer
27. https://el.wikipedia.org/wiki/ανάλυση_φουριέ
28. https://en.wikipedia.org/wiki/Root-mean-square_deviation

