

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ : «ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΜΑΤΩΝ**

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Π. ΜΠΟΥΚΑΣ

Επιβλέπων : Καθηγητής **Κωνσταντίνος Προβιδάκης**

ΧΑΝΙΑ, 2012

Στον Σοφοκλή Α. για την καθοριστική βοήθειά του, στο
ξεκίνημα της νέας μου ζωής

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη για την πολύτιμη βοήθειά του και το ενδιαφέρον που επέδειξε καθ' όλη τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών καθώς και της συγγραφής της.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Σωτηρόπουλο και τον Αν. Καθηγητή κ. Ιωάννη Τσομπανάκη για τις εύστοχες παρατηρήσεις τους τον πολύτιμο χρόνο τους για την αξιολόγηση της παρούσας εργασίας.

Οφείλω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στο Βαγγέλη Λιαράκο για την ανεκτίμητη βοήθεια του προκειμένου να ολοκληρωθεί με επιτυχία ένα μεγάλο μέρος των δοκιμών όσο και κατά τη διάρκεια τη συγγραφής της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, καθώς και για της χρήσιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την προπτυχιακή φοιτήτρια του τμήματος της Αρχιτεκτονικής, Κοτσώνη Νατάσσα για την πολύτιμη βοήθειά σε ένα μεγάλο μέρος των πειραματικών δοκιμών, και την κ. Τζαβάρα Ιωάννα για τις χρήσιμες συμβουλές της.

Τελειώνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και ιδιαίτερα τον πατέρα μου για τη στήριξή τους, κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην αείμνηστη γιαγιά μου Μαρία για την στήριξή της κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων όπως και τον Σοφοκλή Α. για την καθοριστική βοήθειά του στο ξεκίνημα της νέας μου ζωής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής στο κτίριο Επιστημών του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο λιθόστρωτο πεζόδρομο που συνδέει τις κτιριακές εγκαταστάσεις των τμημάτων Μηχανικών Περιβάλλοντος και Μηχανικών ορυκτών πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Χανιά, και στη Γαλλική σχολή όπου στεγάζεται το τμήμα της Αρχιτεκτονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Προβιδάκη και είχε διάρκεια περίπου ένα χρόνο. **Σκοπός της εργασίας ήταν η αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς και η εκτίμηση των χαρακτηριστικών αντοχής τοιχοποιιών σε πραγματική κλίμακα και σε κλίμακα πειραματικών δοκιμίων, ώστε με μη καταστρεπτικές μεθόδους να αξιολογήσουμε αν υπάρχουν στο εσωτερικό τους ατέλειες, κενά, ρωγμές ή αποκολλήσεις.**

Η διαδικασία που ακολούθησε, προκειμένου να αξιολογηθούν η τοιχοποιία και τα πειραματικά δοκίμια, περιελάμβανε δύο πειραματικές τεχνικές με τη βοήθεια των οποίων απεικονίστηκαν χρωματικά οι βλάβες των δοκιμίων και της τοιχοποιίας κατ'επέκταση.

Οι τεχνικές απεικόνισης βλαβών με χρήση ακουστικών κυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι:

- Τεχνική κρούσης-ηχούς (Impact Echo)
- Τεχνική Ακουστικής Τομογραφίας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	13
ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ.....	13
1.1 Τοιχοποιία.....	13
1.1.1 Κατηγορίες τοιχοποιίας.....	15
1.1.2 Τύποι τοιχοποιίας.....	16
1.2 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία στο εργαστήριο της εφαρμοσμένης μηχανικής.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	21
ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΜΑΤΩΝ.....	21
2.1 Κυματική Θεωρία.....	21
2.1.1 Μεγέθη Κυμάτων.....	22
2.1.2 Κύματα χώρου.....	25
2.1.3 Επιφανειακά Κύματα.....	28
2.1.4 Κυματικά φαινόμενα.....	31
2.2 Μετασχηματισμός Fourier.....	35
2.3 Ακουστική Τομογραφία.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	39
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ.....	39
3.1 Τεχνική Impact Echo.....	39
3.2 Τεχνική Τομογραφίας.....	41
3.3 Όργανα μετρήσεων – Υπολογιστικά Προγράμματα.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	48
ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	48
4.1 Γενικά.....	48
4.2 Εφαρμογή σε εργαστηριακά δοκίμια.....	49
4.2.1 Διάταξη οργάνων.....	49
4.2.2 Δοκίμιο Μαρμάρου Διονύσου.....	50
4.2.3 Δοκίμιο Ασβεστολίθου.....	51
4.2.4 Δοκίμιο Σκυροδέματος.....	52

4.2.5	Επεξήγηση διαδικασίας.....	53
4.2.6	Αποτελέσματα μεθόδου στο δοκίμιο ασβεστόλιθου.....	56
4.2.7	Αποτελέσματα μεθόδου στο δοκίμιο μαρμάρου Διονύσου.....	58
4.2.8	Αποτελέσματα μεθόδου στο δοκίμιο σκυροδέματος.....	60
4.2.9	Συμπέρασμα εφαρμογής στα τρία εργαστηριακά δοκίμια (ασβεστόλιθου, μαρμάρου Διονύσου, σκυροδέματος).....	61
4.3	Εφαρμογή σε τοιχοποιία από πέτρα του Πολυτεχνείου στο δρομάκι.....	62
	μεταξύ των κτιρίων ΜΗΠΕΡ – ΜΗΧΟΠ	
4.4	Τελική εφαρμογή σε τοιχοποιία της Γαλλικής σχολής.....	65
4.4.1	Εφαρμογή τεχνικής Impact Echo.....	66
4.4.2	Αποτελέσματα της τεχνικής Impact Echo.....	68
4.4.2.1	Αποτελέσματα 1 ^{ης} Τομής.....	68
4.4.2.2	Αποτελέσματα 2 ^{ης} Τομής.....	69
4.4.2.3	Αποτελέσματα 3 ^{ης} Τομής.....	70
4.4.2.4	Αποτελέσματα 4 ^{ης} Τομής.....	71
4.4.2.5	Αποτελέσματα 5 ^{ης} Τομής.....	72
4.4.2.6	Αποτελέσματα 6 ^{ης} Τομής.....	73
4.4.3	Εφαρμογή τεχνικής Τομογραφίας.....	74
4.4.4	Αποτελέσματα της τεχνικής Ακουστικής Τομογραφίας.....	79
4.4.4.1	Αποτελέσματα 1 ^{ης} Τομής.....	77
4.4.4.2	Αποτελέσματα 2 ^{ης} Τομής.....	78
4.4.4.3	Αποτελέσματα 3 ^{ης} Τομής.....	79
4.4.4.4	Αποτελέσματα 4 ^{ης} Τομής.....	80
4.4.4.5	Αποτελέσματα 5 ^{ης} Τομής.....	81
4.4.4.6	Αποτελέσματα 6 ^{ης} Τομής.....	82
4.4.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο τεχνικών.....	83
4.4.5.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων 1 ^{ης} Τομής.....	83
4.4.5.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων 2 ^{ης} Τομής.....	84
4.4.5.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων 3 ^{ης} Τομής.....	85
4.4.5.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων 4 ^{ης} Τομής.....	86
4.4.5.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων 5 ^{ης} Τομής.....	87
4.4.5.6	Σύγκριση αποτελεσμάτων 6 ^{ης} Τομής.....	88
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	89
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνική των μη-καταστρεπτικών ελέγχων (Non-Destructive Techniques - NDT) είναι ζωτικής σημασίας για τις κατασκευές. Για την ανίχνευση των διάφορων ατελειών, όπως η ρηγμάτωση και η διάβρωση, υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι διαθέσιμες, όπως η ακουστική τομογραφία, οι υπερηχητικές μέθοδοι, οι μέθοδοι ρευμάτων στροβίλου, και οι μαγνητικές μέθοδοι. Αυτές οι ατέλειες στις κατασκευές δημιουργήσαν σοβαρά ερωτήματα για την επάρκεια της τεχνολογίας, όσο αφορά την ασφάλεια με τη συγκεκριμένη μη καταστρεπτική δοκιμή. Κατά συνέπεια, απαιτούνται και έχουν πραγματοποιηθεί μακροπρόθεσμες έρευνες για να επιτρέψουν να διαμορφωθεί η τεχνογνωσία για την ανάπτυξη των μη-καταστρεπτικών μεθόδων.

Αρχίζοντας το 1983, η εστίαση της έρευνας για το NDT αφορούσε τον έλεγχο του σκυροδέματος και άλλων υλικών, μετατοπίστηκε προς την ανίχνευση των ατελειών της εσωτερικής τους δομής. Με βάση μια αναθεώρηση των διαθέσιμων μεθόδων, αποφασίστηκε να ακολουθηθεί μια μέθοδος δοκιμής, βασισμένη στα κύματα πίεσης, δεδομένου ότι η διάδοση κυμάτων πίεσης σε ένα στερεό επηρεάζεται άμεσα από τις μηχανικές ιδιότητες [Carino και Sansalone, 1984]. Η συγκεκριμένη έρευνα επιτελέστηκε με σκοπό την εργαστηριακή μελέτη της ανίχνευσης ρωγμών στο σκυρόδεμα με τη μέθοδο κρούσης – ηχούς και διήρκησε περίπου ένα χρόνο. Το σημαντικό συμπέρασμα που εξήχθη από τη συγκεκριμένη έρευνα αφορά την διαφοροποίηση των ήχων όταν το σκυρόδεμα περιείχε ατέλειες. Η σωστή μέτρηση του χρόνου της ηχητικής ανάκλασης, αποδείχθηκε πολύ σημαντική για την έρευνα.

Η τεχνική με την πάροδο ελάχιστων χρόνων, αναπτύχθηκε και έγινε γνωστή ως μέθοδος Impact Echo [Sansalone και Carino, 1986]. Η αρχική έρευνα παρείχε τη βάση για την τεχνική και κατέδειξε την ικανότητά της να ανιχνεύσει τις ρωγμές στα τοιχεία. Όμως η επόμενη έρευνα των [Sansalone και Carino, 1988] για την επονομαζόμενη μέθοδο **Impact Echo**, για τη μη καταστρεπτική δοκιμή στοιχείου από σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς για να εντοπίσει το βάθος των κάθετων ρωγμών στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Οι μελέτες πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακά δείγματα που περιείχαν τεχνητές ρωγμές σε γνωστές θέσεις. Η ανάλυση στο πεδίο των

συχνοτήτων των καταγραμμένων κυματοειδών μετατοπίσεων επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε για να καθορίσει τη θέση των διάφορων ρωγμών. Η έρευνα περιελάμβανε έναν συνδυασμό αριθμητικών προσομοιώσεων χρησιμοποιώντας τις μελέτες ελέγχου ρωγμών για να φθάσει στην καταλληλότερη διαμόρφωση μεθοδολογίας.

Η Mary Sansalone ήταν αυτή που κατά κύριο λόγο εφηύρε και τελειοποίησε μια μέθοδο και ένα όργανο, αποκαλούμενη τη μέθοδο αυτή ως Impact Echo, για μη καταστρεπτική αξιολόγηση των δομών σκυροδέματος και μεγάλων κατασκευαστικών έργων (εθνικές οδοί, κτήρια, γέφυρες, φράγματα, σήραγγες, κ.λπ.). Παράλληλα με την εκτεταμένη έρευνα της Mary Sansalone και του Carino, ένας απόφοιτος του πανεπιστημίου του Cornell (1983-86) σε συνεργασία με τους συμβούλους στο Cornell και το εθνικό γραφείο των προτύπων, ασχολήθηκε ιδιαίτερα με τις ηχητικές ανακλάσεις ύστερα από εφαρμογή κρούσεων στο εκάστοτε υλικό της κατασκευής.

Το 1987, η έρευνα σε σχέση με την τεχνική Impact Echo, μετατοπίστηκε στο Πανεπιστήμιο του Cornell, με τη βοήθεια της Mary Sansalone η οποία συμμετείχε στο πειραματικό κομμάτι της εργασίας. Οι απόφοιτοι του Cornell ανέπτυξαν ένα ευρύ φάσμα των πρακτικών εφαρμογών, δημοσιεύοντας σχεδόν 90 άρθρα σε περιοδικά και ερευνητικές εκθέσεις. Η έρευνα του Cornell επέκτεινε τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου και οδήγησε στην ανάπτυξη του πρώτου κατοχυρωμένου με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας οργάνου τομέων [Pratt και Sansalone, 1992].

Το οι Pessiki και Carino (1988) δοκίμασαν τεχνικές για να αξιολογήσουν τη μέθοδο Impact Echo για να καθορίσουν το χρόνο και για να παρακολουθήσουν την ανάπτυξη αντοχής του σκυροδέματος. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν για να εξετάσουν τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας (P-waves), όπως καθορίζεται με τη μέθοδο Impact Echo, και την αντοχή του σκυροδέματος. Το συμπέρασμα που προέκυψε από αυτή την έρευνα είναι ότι η μέθοδος Impact Echo είναι μια ελπιδοφόρος μη καταστρεπτική τεχνική για την ανάπτυξη των μηχανικών ιδιοτήτων στο σκυρόδεμα.

Το 1989 οι M. Sansalone and N. J. Carino άρχισαν έναν νέο κύκλο εργαστηριακών μελετών σε δοκίμια σκυροδέματος, καθώς έκαναν δοκιμές με τη πρόσφατα ονομαζόμενη μέθοδο Impact Echo, για την ανίχνευση ρωγμών και ατελειών στο σκυρόδεμα. Οι εργαστηριακές μελέτες πραγματοποιήθηκαν στις πλάκες 500 mm που περιείχαν ποικίλες τεχνητές ρωγμές που υπήρχαν σε γνωστές θέσεις. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάστηκαν από μια μελέτη σε δοκίμιο

σκυροδέματος στην οποία η μέθοδος Impact Echo χρησιμοποιήθηκε για να ερευνηθεί μια πλάκα 150 mm που δημιουργήθηκε ώστε να περιέχει κενά.

Το συμπέρασμα της συγκεκριμένης εργαστηριακής μελέτης είναι ότι η μέθοδος Impact Echo αποτελεί μία μη καταστρεπτική μέθοδος δοκιμής η οποία μπορεί να εντοπίσει με επιτυχία ατέλειες στο σκυρόδεμα. Η τεχνική αυτή είναι βασισμένη στον έλεγχο των μετατοπίσεων επιφάνειας ως αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων των διαμήκων κυμάτων (P-waves) με τις εσωτερικές ασυνέχειες. Σκοπός της μελέτης ήταν να παρουσιάσει τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μελετών με σκοπό να αξιολογήσουν τις ικανότητες της μεθόδου.

Το 1992 οι Y. Lin and M. Sansalone ασχολήθηκαν με την ανίχνευση ρωγμών στις στο σκυρόδεμα. Τα στοιχεία που εξετάζονται σε αυτή την έρευνα καταδεικνύουν τη δυνατότητα τη μεθόδου Impact Echo για τον εντοπισμό των ρωγμών στο σκυρόδεμα. Οι αριθμητικές μελέτες διεξήχθησαν για να κατανοήσουν την λειτουργία και ενδεχομένως τη βοήθεια της μεθόδου Impact Echo για τον εντοπισμό τους. Οι πειραματικές μελέτες πραγματοποιήθηκαν σε όλη την επιφάνεια των υλικών και ενίσχυσαν τα συγκεκριμένα τμήματα που περιέχουν τις ρωγμές στις γνωστές θέσεις. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτή την έρευνα δείχνουν ότι η ηχητική ανάκλαση μιας ατέλειας ή ρωγμής περιέχει διάφορες συχνότητες που προκαλούνται από τις κατά τόπου δονήσεις. Το 1997 οι Sansalone και Streett πραγματοποίησαν μια έρευνα την οποία και αποτύπωσαν τη συνέχεια και σε βιβλίο, το οποίο παρέχει μια περιεκτική περίληψη των εργαστηριακών μελετών που εξετάζουν τις διαφορετικές εφαρμογές της μεθόδου. Η μέθοδος απέκτησε πολλούς υποστηρικτές και γρήγορα έγινε ευρέως γνωστή.

Από το 1998 η μέθοδος Impact Echo είχε παγκόσμια απήχηση όσον αφορά τη μη καταστρεπτική δοκιμή του σκυροδέματος. Η μέθοδος αυτή αποτέλεσε την κύρια μη καταστρεπτική μέθοδο για ανίχνευση ζημιών η ατελειών παγκοσμίως σε πολλά και μεγάλα κατασκευαστικά έργα δεκάδων δισεκατομμυρίων δολαρίων. Εκτός από τη χρήση του σε πολλά δημόσια έργα (εθνικές οδοί, κτήρια, γέφυρες, φράγματα, σήραγγες, κ.λπ.), η **Impact Echo** έχει βρει σημαντική χρήση ως εργαλείο για την αξιολόγηση των ιστορικών κατασκευών και οικοδομημάτων.

Την περίοδο 1999-2002 οι Tawhed και Gassma μελέτησαν την κατασκευή ενός προτύπου της μεθόδου Impact Echo όπου θα εφαρμοζόταν για την αξιολόγηση και την ακεραιότητα γεφυρών στις οποίες εμφανίζονταν ατέλειες στη δομή της. Το 2002 δημιουργήθηκε ένα λογισμικό το οποίο ήταν χρήσιμο για να αξιολογήσει την

ακεραιότητα των συγκεκριμένων γεφυρών. Το λογισμικό αυτό αποδείχθηκε πολύ χρήσιμο και με την διαπίστωση των ζημιών που είχαν υποστεί, τοποθετήθηκαν πολυμερή σύνθετα υλικά για να επιδιορθωθούν.

Το 2002 οι Kessler, Spearing, Soutis άρχισαν να ερευνούν την ανίχνευση ζημιών στα σύνθετα υλικά, με μεθόδους κυμάτων. Η επιτυχημένη μη καταστρεπτική τεχνική Impact Echo συνέβαλε ώστε να αρχίσουν να γίνονται έρευνες και για εντοπισμό άλλων μη καταστρεπτικών τεχνικών. Η οικονομικώς αποδοτική και αξιόπιστη ανίχνευση ζημίας με μη καταστρεπτικές τεχνικές, είναι κρίσιμη για τη χρησιμοποίηση των σύνθετων υλικών. Ως συμπέρασμα αυτής της έρευνας προκύπτει ότι οι τεχνικές κυμάτων παρέχουν περισσότερες πληροφορίες για την παρουσία και το μέγεθος της ζημίας από τις προηγουμένως δοκιμασμένες μεθόδους, και παρέχουν τη δυνατότητα της θέσης ζημίας. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να αποδειχθούν κατάλληλες για τις δομικές εφαρμογές ελέγχου κατασκευών δεδομένου ότι έχουν την ικανότητα να διανύουν μεγάλες αποστάσεις και μπορούν να εφαρμοστούν με τους προσαρμόσιμους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές. Σε αυτή την έρευνα χρησιμοποιήθηκε πειραματικά η ακουστική τομογραφία χωρίς να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα κατά πόσο θα μπορούσε να βοηθήσει στην έρευνα μη καταστρεπτικών μεθόδων.

Το 2004-2005 οι Ertug˘rul C, Sadettin Orhan, Murat Lu˘y, πραγματοποίησαν μελέτη με σκοπό τη λήψη πληροφοριών για τη θέση και το βάθος των ρωγμών στις στο εσωτερικό του σκυροδέματος, δηλαδή μία ανάλυση της δομής της κατασκευής με τη βοήθεια της τεχνικής της ακουστικής τομογραφίας. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι η τεχνική της τομογραφίας σε συνδυασμό με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS (www.ansys.com) μπορούν να καθορίσουν τη θέση και το βάθος των ρωγμών με την ανάλυση από τα σήματα δόνησης.

Σκοπός της παρούσας έρευνας (2010-2011) με τίτλο **«Τεχνικές απεικόνισης βλαβών σε κατασκευές με χρήση ακουστικών κυμάτων»** η οποία εκπονήθηκε με ενόργανες μετρήσεις σε πειραματικά δοκίμια που κατασκευάστηκαν ή διαμορφώθηκαν σε εργαστηριακή κλίμακα στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, ή σε τμήματα λιθόκτιστων κατασκευών σε πραγματική κλίμακα που υπάρχουν στις κτιριακές εγκαταστάσεις των τμημάτων Μηχανικών Περιβάλλοντος και Μηχανικών ορυκτών πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, και στη Γαλλική σχολή όπου στεγάζεται το τμήμα της Αρχιτεκτονικής του Πολυτεχνείου Κρήτη, ήταν η αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς και η εκτίμηση των χαρακτηριστικών αντοχής λιθόκτιστων τοιχοποιιών

σε πραγματική και εργαστηριακή κλίμακα. Η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε, προκειμένου να αξιολογηθούν η τοιχοποιία και τα πειραματικά δοκίμια, περιελάμβανε δύο πειραματικές τεχνικές με τη βοήθεια των οποίων απεικονίστηκαν χρωματικά οι βλάβες των δοκιμίων και της τοιχοποιίας κατ' επέκταση.

Οι τεχνικές απεικόνισης βλαβών με χρήση ακουστικών κυμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι:

- Τεχνική κρούσης-ηχούς (Impact Echo)
- Τεχνική Ακουστικής Τομογραφίας

Η διαφορά της παρούσης έρευνας και η συνεισφορά της στην μελέτη των μη καταστρεπτικών μεθόδων με τις προγενέστερες εργασίες, έρευνες και μελέτες, όσον αφορά τις μη καταστρεπτικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν, είναι ότι στην ίδια έρευνα - εργασία μελετήθηκαν δύο διαφορετικές μη καταστρεπτικές τεχνικές και προέκυψαν χρήσιμα αποτελέσματα και κατ' επέκταση συμπεράσματα για το πώς μπορούν δύο διαφορετικές τεχνικές να συνεργαστούν και να εξάγουν εφάμιλλα συμπεράσματα μεταξύ τους, γεγονός που αποδεικνύει τη χρησιμότητα τους και την ορθότητα των αποτελεσμάτων τους.

Η παρούσα εργασία αποτελείται από 4 κεφάλαια:

- **Κεφάλαιο 1:** Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στην τοιχοποιία καθώς η τελική έρευνα έγινε στην τοιχοποιία της Γαλλικής σχολής, η οποία αποτελείται κατά κύριο λόγο από πέτρα, όπου στεγάζεται το τμήμα της Αρχιτεκτονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης,

- **Κεφάλαιο 2:** Θεωρία κυμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον ορισμό του κύματος, καθώς και στις ιδιότητες του. Επίσης αναφέρεται και περιγράφεται η μαθηματική εξίσωση κύματος. Ύστερα γίνεται λόγος για τα μεγέθη των κυμάτων καθώς και για τις δύο μεγάλες κατηγορίες τους όπου αναλύονται με λεπτομέρειες.

- κύματα χώρου
- επιφανειακά

Στο επόμενο τμήμα του κεφαλαίου γίνεται ανάλυση των κυματικών φαινομένων. Μετά την ανάλυση, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην επεξήγηση του μετασχηματισμού Fourier και στην Ακουστική Τομογραφία.

- **Κεφάλαιο 3:** Πειραματικές Τεχνικές

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά των δύο τεχνικών απεικόνισης βλαβών με χρήση ακουστικών κυμάτων.

- Τεχνική κρούσης-ηχούς (Impact Echo)
- Τεχνική Ακουστικής Τομογραφίας

Επιπλέον γίνεται εκτενής λόγος για τα όργανα μετρήσεων και για τα υπολογιστικά προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας.

- **Κεφάλαιο 4:** Ιστορικό εφαρμογής μεθόδου

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εκτενής λόγος για τις τεχνικές πειραματικές δοκιμές και για τον τρόπο που εφαρμόστηκαν με χρονολογική σειρά οι μέθοδοι.

- 1) Σε 3(τρία) εργαστηριακά δοκίμια στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής με την πειραματική τεχνική Impact Echo τα οποία είναι:
 - Δοκίμιο Μαρμάρου Διονύσου
 - Δοκίμιο Ασβεστολίθου
 - Δοκίμιο Σκυροδέματος
- 2) Εφαρμογή σε λιθόκτιστη τοιχοποιία που υπάρχει στις εγκαταστάσεις του Πολυτεχνείου, με την πειραματική τεχνική Impact Echo.
- 3) Τελική εφαρμογή σε λιθόκτιστη τοιχοποιία της Γαλλικής σχολής (όπου στεγάζεται το τμήμα της Αρχιτεκτονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης) με τις πειραματικές τεχνικές Impact Echo και Acoustic Tomography.

Επιπροσθέτως γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων από όλες τις πειραματικές τεχνικές που εφαρμόστηκαν για την παρούσα διατριβή. Τέλος, διατυπώνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές τεχνικές δοκιμές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ

1.1 Τοιχοποιία

Η ιστορία της τοιχοποιίας, δηλαδή της κατασκευής τοίχων, ξεκινάει από πολύ παλιά και αποτελεί τον αρχαιότερο τρόπο δόμησης, με εξαίρεση κάποιες κατασκευές από ξύλο. Ως τοιχοποιία, ορίζεται η πλήρωση (το γέμισμα) του κενού που υπάρχει μεταξύ των κατακόρυφων στοιχείων του εξωτερικού περιβλήματος κτιρίων, καθώς και των εσωτερικών χωρισμάτων των.



Εικόνα 1.1: Νεόδμητη πολυκατοικία (buildnet.gr)

Τα αρχαία χρόνια, για να κατασκευάσει κάποιος ένα τοίχιο χρησιμοποιούσε πέτρες, χωρίς κανένα συνδετικό κονίαμα (όπως π.χ. λάσπη). Η τεχνική αυτή, υστερούσε σε αντοχή, αλλά αν οι πέτρες είχαν τοποθετηθεί με σωστό τρόπο, το τοίχιο μπορούσε να σηκώνει αρκετά μεγάλο φορτίο. Με τη χρήση της λάσπης σαν συνδετικό εργαλείο, ο τοίχος άρχισε να αποκτά μεγαλύτερες αντοχές και αντιστάσεις. Η σωστή τοποθέτηση των υλικών, τόσο της λάσπης όσο και των λίθων, διαδραμάτιζαν σημαντικό ρόλο. Με το πέρασμα του χρόνου στην τοιχοποιία άρχισαν να χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά για να φτάσουμε στα σύγχρονα χρόνια που γίνεται χρήση δομικών στοιχείων (όπως

τούβλα, τσιμεντόλιθοι κ.λπ.), τσιμεντοκονιάς, χάλυβα αλλά και χαλύβδινων ινών (διαφόρων ειδών). Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί ότι τοιχοποιίες γίνονται και με γυαλί και μέταλλο, σε βιομηχανικά κτίρια, αποθήκες, κ.λπ.



Εικόνα 1.2: Τοιχοπλήρωση (buildnet.gr)

Στην Ελλάδα, η συνηθέστερη χρήση τοιχοποιίας στις μέρες μας, η τοιχοπλήρωση, η οποία κατασκευάζεται τις περισσότερες φορές με κοινά τούβλα (οπτόπλινθοι). Το κοινό κόκκινο τούβλο δεν είναι, όμως, και το μοναδικό: τσιμεντόλιθοι και τούβλα από ελαφρύ πορώδες μπετό, είναι μόνο μερικά από τα διαφορετικά άλλα είδη που υπάρχουν. Το κοινό κόκκινο τούβλο παράγεται σε 2 βασικά μεγέθη: μονό (με έξι οπές και διαστάσεις 6*9*19 cm) και διπλό (με δώδεκα οπές και διαστάσεις 9*12*19 cm). Ο λόγος που τα τούβλα κατασκευάζονται με οπές είναι:

- i. για μείωση του βάρους τους (ένα διπλό τούβλο ζυγίζει περίπου 1 κιλό, και αν δεν είχε τις οπές θα ζύγιζε περίπου 50% περισσότερο),
- ii. οι οπές δίνουν στο τούβλο καλύτερες θερμομονωτικές ιδιότητες,
- iii. βελτιώνουν και τις ηχομονωτικές του ιδιότητες και
- iv. χάρη στις οπές η λάσπη που μπαίνει ανάμεσα στα τούβλα, τα συνδέει καλύτερα απ' ό,τι αν δεν υπήρχαν οι οπές.

Η συντριπτική πλειονότητα των τούβλων που θα χρησιμοποιηθούν σε μία συμβατική κατοικία θα είναι διπλά (με δώδεκα οπές και διαστάσεις 9*12*19 cm). Οι εξωτερικοί τοίχοι κατασκευάζονται από διπλή σειρά τούβλων. Οι δύο σειρές τούβλων αφήνουν μεταξύ τους ένα κενό μέσα στο οποίο τοποθετείται θερμομόνωση (συνήθως πολυστερίνη, δηλαδή φελιζόλ). Για να δέσει μία κατασκευή από τούβλα απαιτείται και μία τουλάχιστο οριζόντια στρώση από μπετό πλάτους όσο το πλάτος του τοίχου και πάχους 10-12 εκ.. Η στρώση αυτή από μπετόν λέγεται σενάζ (από τη γαλλική λέξη chainage =αλυσιδωτό δέσιμο) και με την πίεση που ασκεί πάνω στα τούβλα, λόγω του βάρους της, σταθεροποιεί τα τούβλα μετατρέποντάς τα σε μία συμπαγή τοιχοποιία. Στην περίπτωση της διπλής σειράς των εξωτερικών τοίχων, το σενάζ γίνεται φαρδύτερο ώστε να συνδέει και τις δύο σειρές μεταξύ τους. Ένα τέτοιο σενάζ καλύπτει από την πάνω τους μεριά όλα τα ανοίγματα για πόρτες ή παράθυρα που αφήνουμε στην τοιχοποιία.

Όπως γίνεται κατανοητό υπάρχουν διάφορα είδη τοιχοποιιών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ενός κτιρίου. Αυτά διαφέρουν ανάλογα με το είδος της κατασκευής και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της τοιχοποιίας.

1.1.1 Κατηγορίες τοιχοποιίας:

Η τοιχοποιία ανάλογα με το σκοπό που επιτελεί, διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες:

- ✓ **Φέρουσα**, όταν από μόνη της αποτελεί σκελετό κτιρίου ή και μέρος του και αναλαμβάνει σημαντικά φορτία. Παράλληλα, η φέρουσα τοιχοποιία διακρίνεται σε άοπλη (όταν δεν περιλαμβάνει οπλισμό, δηλαδή σίδερα) και οπλισμένη (όταν περιλαμβάνει οπλισμό).
- ✓ **Πλήρωσης**, όταν χρησιμοποιείται για να γεμίσουμε κενά μεταξύ των στοιχείων του σκελετού, ενώ ο σκελετός έχει κατασκευαστεί από άλλο υλικό όπως π.χ. οπλισμένο σκυρόδεμα.
- ✓ **Διακοσμητική**, όταν τοποθετείται για να επικαλύψει άλλες επιφάνειες για λόγους εμφάνισης, διακόσμησης ή ακόμα και μόνωσης.

1.1.2 Τύποι τοιχοποιίας:

Ανάλογα με το υλικό δόμησης, υπάρχουν τέσσερις τύποι τοιχοποιίας:

✓ **Οπτοπλινθοδομή (τούβλο),** Τα τούβλα κατασκευάζονται κυρίως από άργιλο είναι διάτρητα και παράγονται σε δύο βασικά μεγέθη (μονό με 6 τρύπες και διπλό με 12 τρύπες). Η εξωτερική τοιχοποιία κατασκευάζεται με διπλή σειρά τούβλων με ενδιάμεσο κενό στο οποίο τοποθετείται εξηλασμένη πολυστερίνη πάχους σύμφωνα με τη μελέτη θερμομόνωσης. Για να σταθεροποιηθεί η τοιχοποιίας κατασκευάζονται οριζόντιες στρώσεις οπλισμένου σκυροδέματος πάχους όσο το πάχος της τοιχοποιίας (σενάζ).



Εικόνα 1.3: Εξωτερική τοιχοποιία από διπλή σειρά τούβλων (buildnet.gr)

✓ **Λιθοδομές από πορομπετόν,** Το πορομπετόν αποτελείται από φυσικά υλικά όπως τσιμέντο, χαλαζία, άσβεστο και νερό. Στην Ελλάδα είναι γνωστό ως πορομπετόν τύπου YTONG. Έχει χαμηλό βάρος, γεγονός που ενισχύει την αντισεισμικότητας της κατασκευής, παρέχει ικανοποιητική θερμότηταμόνωση χωρίς επιπλέον μόνωση, έχει ακρίβεια λόγω των μηδενικών αποκλίσεων στις διαστάσεις του και είναι γρήγορο για στις εργασίες που πρέπει να γίνουν από τον υδραυλικό και τον ηλεκτρολόγο, γιατί κόβεται εύκολα.



Εικόνα 1.4: Τοιχοποιία από πορομπετόν (buildnet.gr)

✓ **Τρισδιάστατο δομικό πλέγμα**, Πρόκειται για δομικό στοιχείο που έχει δύο παράλληλα πλέγματα και στο ενδιάμεσο υπάρχει πρόβλεψη για ενσωματωμένη πλάκα αυτοσβηνώμενης διογκωμένης πολυστερίνης. Συγκρατούνται μεταξύ τους με δισδιαγώνιες γαλβανισμένες ράβδους. Αφού τοποθετηθούν και στηριχθεί το τρισδιάστατο δομικό πλέγμα μεταξύ των μεταλλικών υποστυλωμάτων, ακολουθεί το επίχρισμα και ο χρωματισμός.



Εικόνα 1.5: Τοιχοποιία από τρισδιάστατο δομικό πλέγμα (buildnet.gr)

✓ **Ξηρά Δόμηση (Γυψοσανίδα/ Τσιμεντοσανίδα)**, Χωρίζεται σε εσωτερική και εξωτερική τοιχοποιία με γυψοσανίδα. Στην εσωτερική βιδώνονται πάνω σε μεταλλικό σκελετό και στο ενδιάμεσο τοποθετείται μόνωση πετροβάμβακα. Στην εξωτερική οι γυψοσανίδες κατασκευάζονται από τσιμέντο και άλλα πρόσμικτα αδρανή και η επιφάνειά τους ενισχύεται με υαλόπλεγμα. Και στις δύο περιπτώσεις μειώνεται σημαντικά ο χρόνος κατασκευής τους λόγω της ταχύτητας και ευκολίας στην τοποθέτηση.



Εικόνα 1.6: Τοιχοποιία από Γυψοσανίδα/ Τσιμεντοσανίδα (buildnet.gr)

✓ Τοιχοποιία από πέτρα (Λιθόκτιστη),

Στην παρούσα εργασία η παρούσα έρευνα βασίζεται σε τοιχοποιία από πέτρα, αυτό είναι δηλαδή το κύριο υλικό στο οποίο εστιάζεται η διατριβή. Στη χώρα μας, η χρήση πέτρας για χτίσιμο εφαρμόζεται κυρίως σε εξοχικά σπίτια ενώ ως επένδυση προτιμάται για διακόσμηση εσωτερικών και εξωτερικών χώρων.

Σύμφωνα με τα σύγχρονα πρότυπα οι πέτρινες κατασκευές είναι πλέον μικτές και συνδυάζονται με άλλα υλικά όπως είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα, το τούβλο κλπ. Πολλοί κατασκευάζουν ένα σπίτι αποκλειστικά με πέτρα και τη συμβατική κατασκευή (πλάκα μπετόν, δοκάρια μπετόν, τοιχοποιία τούβλα και εσωτερική και εξωτερική επένδυση με πέτρα). Η πρώτη είναι πολύ σπάνια στη χώρα μας και συναντάται κυρίως σε ορισμένες περιοχές της Πελοποννήσου (Μάνη) και της Ηπείρου. Ως κατασκευή κοστίζει αρκετά, και αυτός είναι και ο βασικός λόγος που δεν είναι τόσο διαδεδομένη. Πιο συχνή είναι η δόμηση με οπλισμένο σκυρόδεμα και επένδυση εσωτερικά και εξωτερικά με πέτρα ή ο συνδυασμός σκυροδέματος πέτρας ή ακόμη και πέτρας-ξύλου.

Βασικά πλεονεκτήματα της πέτρας είναι η αντοχή του υλικού στο χρόνο, η ευκολία συντήρησης (δεν χρειάζεται σοβάτισμα ή βάψιμο), η μεγάλη θερμοχωρητικότητα (βοηθά στην αποθήκευση θερμότητας) και η υψηλή αισθητική. Από την άλλη βασικά πλεονεκτήματα του υλικού είναι το υψηλό κόστος αγοράς και τοποθέτησης και η δυσκολία στην επισκευή. Η πέτρα χρησιμοποιείται κυρίως για το χτίσιμο ή την επένδυση εξοχικής κατοικίας, για την κατασκευή φράχτη, ως εσωτερική και εξωτερική επένδυση τοίχων, ως διακοσμητική επένδυση τμήματος τοίχου, ως πλακόστρωση και ως επένδυση για τζάκια και κτιστούς φούρνους.

Στις λιθοδομές χρησιμοποιούνται αργοί λίθοι που δεν υφίστανται καμιά επεξεργασία, λαξευτοί λίθοι που υφίστανται μερική επεξεργασία στην όψη και στις παράπλευρες επιφάνειες και λαξευτοί λίθοι που υφίστανται πλήρη επεξεργασία και λαμβάνουν κανονικά γεωμετρικά σχήματα. Ανάλογα με την προέλευσή τους, οι πέτρες κτισίματος μπορεί να είναι Ακροβουνιού, Άρτας, Θάσου, Καβάλας, Καρύστου, Κασσάνδρας, Νεοχωρίου, Παραμυθιάς, Πηλίου κα. Γνωστοί είναι επίσης οι σχιστόλιθοι Πεντέλης, Βυτίνας, Πάρνωνα και Ιωαννίνων. Για το κτίσιμο χρησιμοποιούνται επίσης και τεχνητές πέτρες από ρευστοκονίαμα γρανίτη-τσιμέντου.

Οι διαστάσεις της πέτρας που χρησιμοποιείται στη δόμηση ποικίλουν. Υπάρχουν τυποποιημένα μεγέθη και ακανόνιστα με συγκεκριμένο πάχος και ελεύθερο μήκος. Συνήθως προσαρμόζονται στις εκάστοτε κατασκευαστικές απαιτήσεις.

Συντήρηση πέτρινης κατασκευής

Η πέτρα φθείρεται κυρίως από τον ήλιο και τον πάγο. Το πιο συνηθισμένο πρόβλημα είναι οι ρωγμές που παρουσιάζονται στους αρμούς. Πολλοί τεχνίτες προτείνουν τοποθέτηση χωρίς αρμούς για να αποφευχθούν τέτοιου είδους προβλήματα εξαιτίας της διαστολής και της συστολής. Οι περισσότερες τεχνητές πέτρες έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες όπως είναι η αντοχή στην υγρασία ενώ μετά την τοποθέτησή τους υπάρχει η δυνατότητα να τοποθετηθεί αστάρι προκειμένου να αυξηθεί η ανθεκτικότητα.

Τα περισσότερα προβλήματα γίνονται εμφανή μετά την ολοκλήρωση των εργασιών τοποθέτησης. Υπολείμματα τσιμέντου, σκόνες, χώματα, λάδια και λίπη είναι οι συνήθεις ενδείξεις φθοράς που οφείλονται σε ελλιπές στέγνωμα, μη απομάκρυνση των ρύπων κατά την κατασκευή και σε κακή συντήρηση. Σε περίπτωση που δεν έχει γίνει σωστή αρχική τοποθέτηση των πλακών, οι πλάκες αποκολλούνται.

Με την πάροδο του χρόνου η επιφάνεια του δαπέδου φθείρεται εξαιτίας της χρήσης πετρωμάτων διαφορετικών ειδών με διαφορετική αντοχή σε φθορά από τριβή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι πλάκες να τρίβονται και να φθείρονται ανομοιόμορφα και η επιφάνεια του δαπέδου από πέτρα να αποκτά κυματοειδή μορφή. Ακόμη, η στρέβλωση πλακών από την υγρασία μπορεί να δημιουργήσει «φούσκωμα» που εμποδίζει τη χρήση του χώρου (πχ εμποδίζει το άνοιγμα της πόρτας κλπ).

Οι τεχνικές ενίσχυσης μια υφιστάμενης κατασκευής από τοιχοποιία, αλλά και η ανάπτυξη της κατάλληλης τεχνογνωσίας για την κατασκευή νέων κτιρίων, απαιτούν την διερεύνηση και την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς του συγκεκριμένου υλικού. Με τον όρο μηχανική συμπεριφορά ενός δομικού υλικού συνήθως εννοούνται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Τα ποσοτικά μεγέθη που περιγράφουν την αντοχή του υλικού σε διάφορους τύπους καταπόνησης. Σημαντικό ενδιαφέρον για υλικά σύνθετα και ψαθυρά όπως είναι το σκυρόδεμα και οι τοιχοποιίες, παρουσιάζουν η αντοχή σε θλίψη, σε εφελκυσμό λόγω κάμψης και σε διάτμηση. Επιπλέον πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η αντοχή του υλικού σε κόπωση, ο ερπυσμός, καθώς και η αντοχή

του σε αξονικό εφελκυσμό, η οποία είναι κατά κανόνα μικρότερη από την αντίστοιχη καμπτική.

- Οι τρόποι και οι συνθήκες αστοχίας των υλικών, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο φόρτισης και τις μηχανικές αντοχές. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δίνεται στις περιπτώσεις πολυαξονικής καταπόνησης, όπου λόγω της σύνθετης δομής του εντατικού πεδίου, ο προσδιορισμός του τρόπου και των συνθηκών αστοχίας αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα.
- Η σχέση μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων (καταστατική συμπεριφορά) ή δυνάμεων και μετατοπίσεων, η οποία μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική.

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο της τοιχοποιίας. Πολλές φορές αποτελούν και κριτήρια για την κατηγοριοποίηση των διαφορών τύπων τοιχοποιίας (π.χ. φέρουσες ή μη). Για το λόγο αυτό πέραν τον κλασσικών θεωρητικών και πειραματικών μεθόδων προσέγγισης της μηχανικής συμπεριφοράς μίας κατασκευής από τοιχοποιία, κρίνεται πλέον αναγκαία η χρήση εξειδικευμένων αριθμητικών μεθόδων. Οι μέθοδοι αυτοί, μέσω της κατάλληλης μαθηματικής μορφοποίησης, δίνουν τη δυνατότητα να μελετηθούν πολύπλοκα γεωμετρικά δομικά συστήματα, με την ταυτόχρονη ενσωμάτωση και των μηχανικών.

1.2 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρία εργαστηριακά δοκίμια τα οποία ελέγχθηκαν με την πειραματική τεχνική Impact Echo με τον εξοπλισμό που υπάρχει στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής. Τα εν λόγω υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις συνήθεις κατασκευές και είναι τα ακόλουθα:

- 1) Δοκίμιο Μαρμάρου Διονύσου
- 2) Δοκίμιο Ασβεστολίθου
- 3) Δοκίμιο Σκυροδέματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΜΑΤΩΝ

2.1 Κυματική Θεωρία

Κύμα ονομάζεται μια διαταραχή που μεταδίδεται στο χώρο και το χρόνο. Ο όρος κύμα (από το αρχαίο ελληνικό ρήμα "κύω" = φουσκώνομαι) χαρακτηρίζει τη μεταφορά της διαταραχής συνήθως διαμέσου ενός μέσου. Η μεταφορά αυτή (μετάδοση) γίνεται, στα υλικά μέσα, ως παλμική κίνηση μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων του μέσου, όμως ορισμένα είδη κυμάτων, όπως τα ηλεκτρομαγνητικά, μπορούν να διαδίδονται και στο κενό.

Η διαταραχή αφορά ένα συγκεκριμένο φυσικό μέγεθος, ανάλογα με το είδος του κύματος. Για παράδειγμα σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα η διαταραχή αφορά την ένταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Στα κύματα της θάλασσας αυτό που διαταράσσεται είναι το επιφανειακό στρώμα νερού. Υπάρχουν πολλά ακόμη είδη κυμάτων, όλα όμως έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: **μεταφέρουν ενέργεια.**

Για παράδειγμα ένα κύμα που κινείται στην επιφάνεια της θάλασσας αναγκάζει κάθε σώμα που επιπλέει να ανεβοκατεβαίνει. Αυτό συμβαίνει από την ενέργεια που μεταφέρει το κύμα και η οποία τελικά προκαλεί ταλαντώσεις στο σώμα που επιπλέει. Το ίδιο συμβαίνει και στον αέρα. Όταν ένα ηχητικό κύμα "ταξιδεύει" τα μόρια του αέρα ταλαντώνονται.

Τα κύματα είναι περιοδικά φαινόμενα, δηλαδή επαναλαμβάνονται με τον ίδιο τρόπο σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Στην περίπτωση των κυμάτων αυτό που επαναλαμβάνεται είναι η διαταραχή. Κάθε κύμα μπορεί να περιγραφεί με μαθηματικό τρόπο από την κυματική του εξίσωση:

$$\frac{1}{c^2} * \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \sum_{i=0}^n \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) = 0 \quad (2.1)$$

2.1.1 Μεγέθη των κυμάτων

Στη μηχανική-φυσική έχουν οριστεί τα εξής μεγέθη που αφορούν όλα τα κύματα. Ο κλάδος της που τα μελετάει ονομάζεται κυματική. Τα δύο πρώτα μεγέθη ορίζονται σε όλα τα περιοδικά φαινόμενα:

Περίοδος

Περίοδος ονομάζεται το χρονικό διάστημα μεταξύ της δημιουργίας δύο διαδοχικών διαταραχών, ή της διέλευσης δύο διαδοχικών χαρακτηριστικών μιας διαταραχής, για παράδειγμα δυο κορυφών του κύματος από ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου. Συμβολίζεται με T και μετριέται σε sec. Εξορισμού προκύπτει ότι $T = \Delta t / N$, όπου N είναι ο αριθμός των διαταραχών που πέρασαν σε χρονικό διάστημα Δt .

Συχνότητα

Συχνότητα ονομάζεται ο αριθμός των διαταραχών που δημιουργήθηκαν ή πέρασαν από ένα συγκεκριμένο σημείο ανά μονάδες χρόνου, δηλαδή ο αριθμός των διαταραχών διά του χρονικού διαστήματος στο οποίο μετρήσαμε τον αριθμό των διαταραχών. Συμβολίζεται με f (frequency) και μετριέται σε δευτερόλεπτα εις τη μείον ένα ή s^{-1} , ή hz. Έτσι, ισχύει $f = N / \Delta t$, όπου N είναι ο αριθμός των διαταραχών που πέρασαν σε χρονικό διάστημα Δt . Η συχνότητα είναι αντίστροφο μέγεθος της περιόδου.

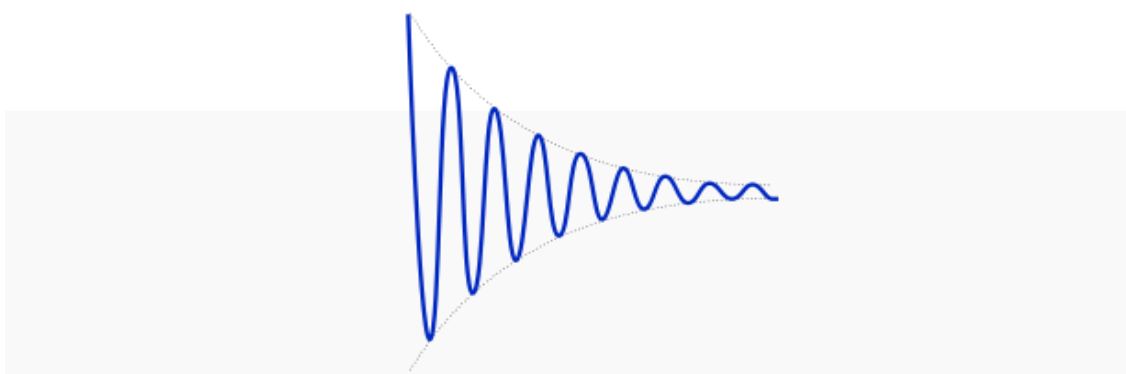
Φάση κύματος

Κατά τη μελέτη των κυμάτων αποδείχθηκε ότι αυτά μπορούν να μελετηθούν με βάση τις τριγωνομετρικές συναρτήσεις. Η Φάση είναι βασικό μέγεθος αυτών των συναρτήσεων. Συμβολίζεται με ϕ και μετριέται όπως και οι γωνίες σε rad (ακτίνια). Η φάση στα κύματα εξαρτάται από το σημείο και το χρόνο για το οποίο μελετάμε.

Η φάση συνήθως είναι γραμμική συνάρτηση της θέσης και του χρόνου, δηλαδή της μορφής $\varphi = at + \beta x$. Συμφασικά ή σε φάση ονομάζονται δύο σημεία που συμπεριφέρονται λόγω του κύματος με τον ίδιο τρόπο. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι βρίσκονται στο ίδιο σημείο της διαταραχής. Σε αντίθεση φάσης ονομάζονται τα σημεία που συμπεριφέρονται αντίθετα λόγω του κύματος. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι το ένα σημείο είναι συμφασικό με ένα τρίτο σημείο, που απέχει απόσταση μισό μήκος κύματος από το πρώτο στη διαταραχή.

Πλάτος κύματος

Το μέγεθος που διαταράσσεται λαμβάνει μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή. Είναι αδύνατον να διαταράσσεται περιοδικά ένα μέγεθος, δηλαδή να είναι περιοδικό φαινόμενο, χωρίς να λαμβάνει μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή. Θεωρώντας ως μηδέν το μέσο της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής, έχουμε ότι η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής είναι ίση με την απόλυτη τιμή της μέγιστης. Αυτή η απόλυτη τιμή ονομάζεται πλάτος του κύματος. Συμβολίζεται με A και μετριέται σε μονάδες μήκους, συνήθως μέτρα. Το πλάτος ενός κύματος δεν είναι πάντα σταθερό και συνήθως εξαρτάται, όπως και η φάση από τη θέση και το χρόνο στον οποίο μελετάμε ένα σημείο. Το πλάτος του κύματος σε ένα σημείο έχει άμεση σχέση με την ενέργεια του κύματος σε αυτό το σημείο.



Εικόνα 2.1: Κύμα στο οποίο το πλάτος μειώνεται προς τα αριστερά (www.Wikipedia.com)

Μήκος κύματος

Μήκος κύματος είναι η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου. Το κύμα είναι περιοδικό φαινόμενο, ουσιαστικά η επανάληψη μιας διαταραχής. Το μήκος αυτής της διαταραχής είναι το μήκος κύματος. Συμβολίζεται με λ και μετριέται όπως και το πλάτος του κύματος σε μονάδες μήκους, συνήθως σε μέτρα. Το μήκος κύματος είναι ίσο με την ελάχιστη δυνατή απόσταση μεταξύ δύο διαφορετικών συμφασικών σημείων.

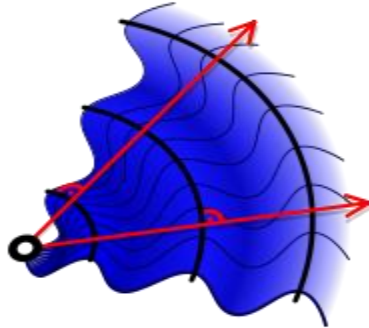
Ταχύτητα κύματος

Το κύμα μεταδίδεται στο χώρο. Η ταχύτητα της διαταραχής ονομάζεται ταχύτητα του κύματος. Συνήθως συμβολίζεται με v , και μετριέται ανάλογα με τις μονάδες μέτρησης των μεγεθών μήκος του κύματος και περίοδος, συνήθως σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s). Από τον ορισμό του μήκους κύματος προκύπτει ότι $v = \lambda/T = \lambda \cdot f$. Η εξίσωση $v = \lambda f$ ονομάζεται θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής και ισχύει σε όλα τα κύματα. Τα κύματα που διαδίδονται σε ένα μέσο διάδοσης έχουν ταχύτητα χαρακτηριστική του συγκεκριμένου μέσου και του συγκεκριμένου είδους κύματος. Αυτό το γεγονός είναι υπεύθυνο για διάφορα φαινόμενα στην κυματική κατά την αλλαγή μέσου διάδοσης ή κατά τη διάδοση στο ίδιο μέσο κυμάτων με ίδια όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά που διαφέρουν στον τρόπο μετάδοσης. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται και μέσα στην ύλη, αλλά και στο κενό, δε χρειάζονται ειδικό μέσο διάδοσης όπως τα υπόλοιπα κύματα. Η ταχύτητά τους στο κενό θεωρείται μία από τις σημαντικότερες σταθερές στη Φυσική.

Μέτωπο κύματος

Όταν αρχίζει η διαταραχή στην πηγή ή τις πηγές, αυτή μεταδίδεται σε άλλες περιοχές του μέσου. Το μέτωπο ενός κύματος είναι το σύνολο των σημείων στα οποία μόλις έφτασε η διαταραχή. Σημαντική ιδιότητα ενός μετώπου είναι ότι, όταν ένα επίπεδο

κύμα μεταδίδεται από ένα μέσο σε ένα άλλο, τότε το μέτωπο παραμένει σχηματικά αναλλοίωτο, δηλαδή παραμένει επίπεδο. Αυτό το φαινόμενο είναι η αιτία της διάθλασης.



Εικόνα 2.2: Επιφανειακό κύμα. Είναι σημειωμένα τα μέτωπα και μερικές ακτίνες του
(www.Wikipedia.com)

Ακτίνα κύματος

Αυτό το μέγεθος ορίζεται κυρίως στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Μία ακτίνα ενός κύματος είναι η πορεία (κατά μήκος μιας γραμμής) που ακολουθεί τη διάδοση του κύματος και είναι πάντα κάθετη στο μέτωπο. Οι ακτίνες μπορούν να θεωρηθούν ως οι πορείες των διαταραχών, και των φωτονίων στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η έννοια της ακτίνας χρησιμοποιείται συχνά για την κατανόηση της συμπεριφορά των κυμάτων σε φαινόμενα αλλαγής της πορείας τους, όπως στη διάθλαση, την ανάκλαση, την περίθλαση. Τέτοια φαινόμενα μελετά η ο φυσικός κλάδος της οπτικής για το φως, αλλά τα φαινόμενα ισχύουν για όλα τα κύματα. Αυτός ήταν ο λόγος για τον οποίο οι φυσικοί άρχισαν να σκέφτονται για το δυϊσμό του φωτός και μετά τη ύλης.

2.1.2 Κύματα χώρου

Τα κύματα χώρου διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις στερεού σώματος πχ. της γης και διακρίνονται σε δύο τύπους κυμάτων, ανάλογα με το είδος της διαταραχής που προκαλούν στην ύλη, δηλαδή της επιμήκους μεταβολής (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz}) και της μεταβολής στρέψης (ϵ_{xy} , ϵ_{yz} , ϵ_{zx}). Οι μεταβολές αυτές αντιστοιχούν στα **διαμήκη** (ή επιμήκη ή συμπίεσης ή P –) κύματα και τα **εγκάρσια** (ή διατμητικά ή στρέψης ή S –) κύματα, τα

οποία χαρακτηρίζονται έτσι από τον τρόπο και την ταχύτητα διάδοσης στους σχηματισμούς.

Διαμήκη Κύματα

Τα διαμήκη (P) είναι τα ταχύτερα κύματα, καταγράφονται πρώτα στα σειсмоγραφήματα (πρώτες αφίξεις) και διαδίδονται ακτινικά, προκαλώντας πυκνώματα και αραιώματα της ύλης κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης. Η ταχύτητα διάδοσης τους, εξαρτάται από τις σταθερές Lamé, λ και μ και από την πυκνότητα ρ (Lamé, 1866)

$$a = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

έχει χαρακτηριστική τιμή στα κορεσμένα εδάφη, που – ανάλογα με το πορώδες – δεν ξεπερνάει τα 1600 – 1800 m/sec. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από φασματικό περιεχόμενο με υψηλές συχνότητες και η διάδοσή τους επηρεάζεται έντονα από τον υδροφόρο ορίζοντα καθώς και από το πορώδες. Τα κύματα P είναι ευκολότερο να αναγνωρισθούν και για αυτό χρησιμοποιούνται κατά κόρο στις σεισμικές μεθόδους για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την δομή των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης.

Εγκάρσια Κύματα

Τα εγκάρσια κύματα S, εμφανίζονται στο σειсмоγράφημα μετά τα P και διαδίδονται εγκάρσια στη διεύθυνση διάδοσής τους, προκαλώντας διατμητική κίνηση στη δομή του υλικού. Η ταχύτητα διάδοσης των S – κυμάτων δίνεται σε συνάρτηση των σταθερών από την σχέση (Lamé, 1866):

$$\beta = \frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{\rho}} \quad (2.3)$$

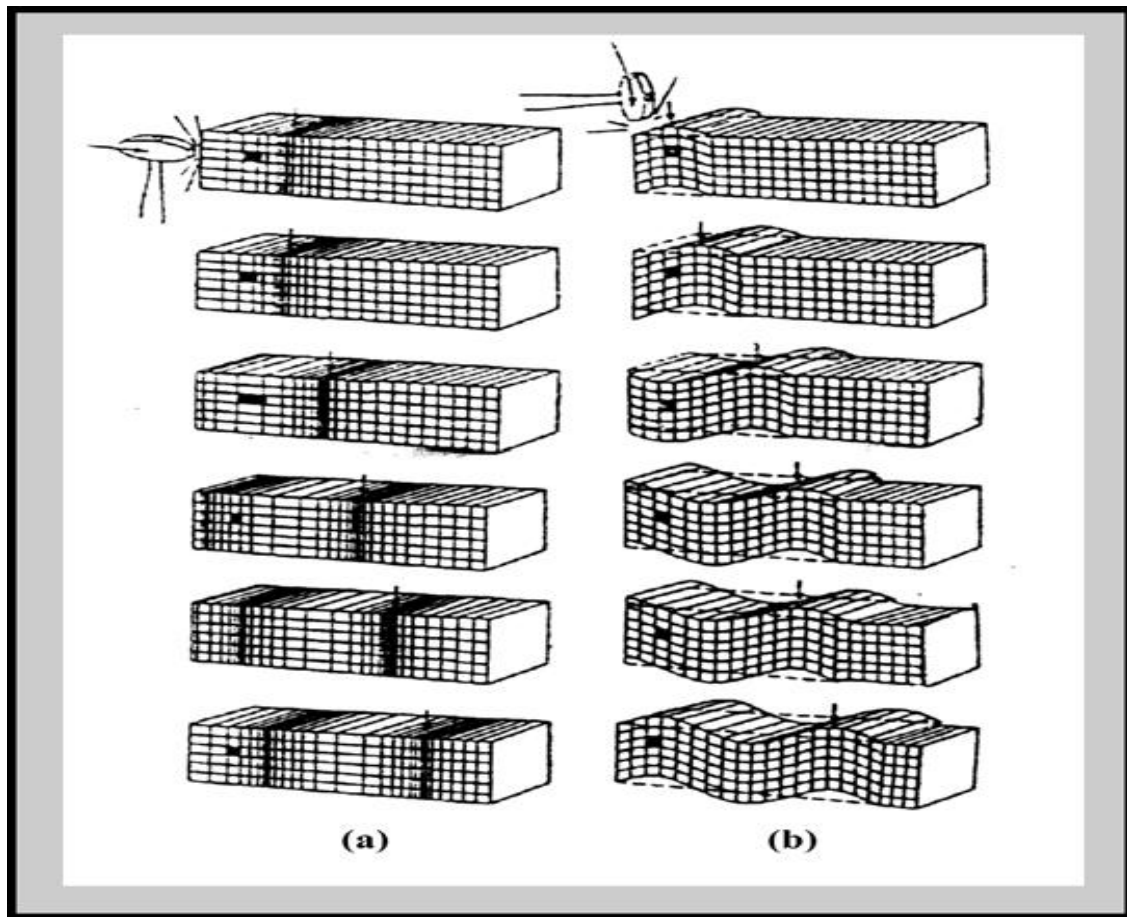
Η τάξη μεγέθους των ταχυτήτων των S – κυμάτων, κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα ανά δευτερόλεπτο για τα χαλαρά και μικρής ακαμψίας εδάφη (ιλύς, μαλακές άργιλοι κ.ά), μέχρι και χιλιάδες m/sec για το αποσαθρωμένο ή υγιές βραχώδες υπόβαθρο (γρανίτης, σχιστόλιθος, κ.ά).

Είναι κύματα πολωμένα καθότι έχουν δύο βαθμούς ελευθερίας με αντίστοιχες κινήσεις σε δύο διαφορετικά επίπεδα. Όταν η διεύθυνση διάδοσης και η κίνηση των υλικών σωματιδίων βρίσκονται σε κατακόρυφο επίπεδο τότε το κύμα είναι κατακόρυφα πολωμένο (SV). Ενώ, όταν η διεύθυνση της κίνησης των σωματιδίων είναι κάθετη στο κατακόρυφο επίπεδο (το οποίο περιέχει τη διεύθυνση διάδοσης), τότε είναι οριζόντια πολωμένο κύμα (SH). Στην περίπτωση που εμφανίζεται ένα από τα δύο SH ή SV, τότε είναι επίπεδα πολωμένα. Αν τα SV και SH κύματα έχουν την ίδια συχνότητα και μία ορισμένη διαφορά φάσης, τότε είναι ελλειπτικά πολωμένα, γεγονός που υποδηλώνει την ετερογενή φύση των διερχόμενων σχηματισμών.

Στο νερό, το μέτρο διάτμησης μ (ή G) είναι μηδενικό, ως εκ τούτου τα S – κύματα δεν διαδίδονται, δηλαδή τα εγκάρσια κύματα μπορούν να διαδοθούν σε οποιοδήποτε μέσο αρκεί να παρουσιάζει έστω και την ελάχιστη αντίσταση στην κάμψη, δηλαδή ο συντελεστής ακαμψίας μ διαφορετικό του μηδέν. Στα ρευστά όμως $\mu=0$ οπότε η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων είναι μηδέν, άρα τα εγκάρσια κύματα δε διαδίδονται στα ρευστά (υγρά και αέρια). Η ιδιότητα της πόλωσης τους, είναι πολύ χρήσιμη καθώς χρησιμοποιείται για την αναγνώρισή τους με σκοπό τον προσδιορισμό της ταχύτητας V_s .

Γενικά, η διάδοση και οι ταχύτητες των κυμάτων, στα πετρώματα εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το πορώδες, η λιθολογία, το βάθος, η γεωλογική ηλικία, η πίεση των πόρων, ο βαθμός κορεσμού των διάκενων με νερό κ.α.

Στην περίπτωση ενός έντονα ετερογενούς και ανισότροπου μέσου, η διάκριση των S κυμάτων είναι εξαιρετικά δύσκολη (Sheriff and Geldart, 1995). Η δυσκολία αυτή οφείλεται, σε πλήθος αιτίων και φαινομένων, που συνδέονται με τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων – στο γεωλογικό μέσο – και αφορά τις πολλαπλές επάλληλες αφίξεις, που φθάνουν ταυτόχρονα στο σημείο παρατήρησης.

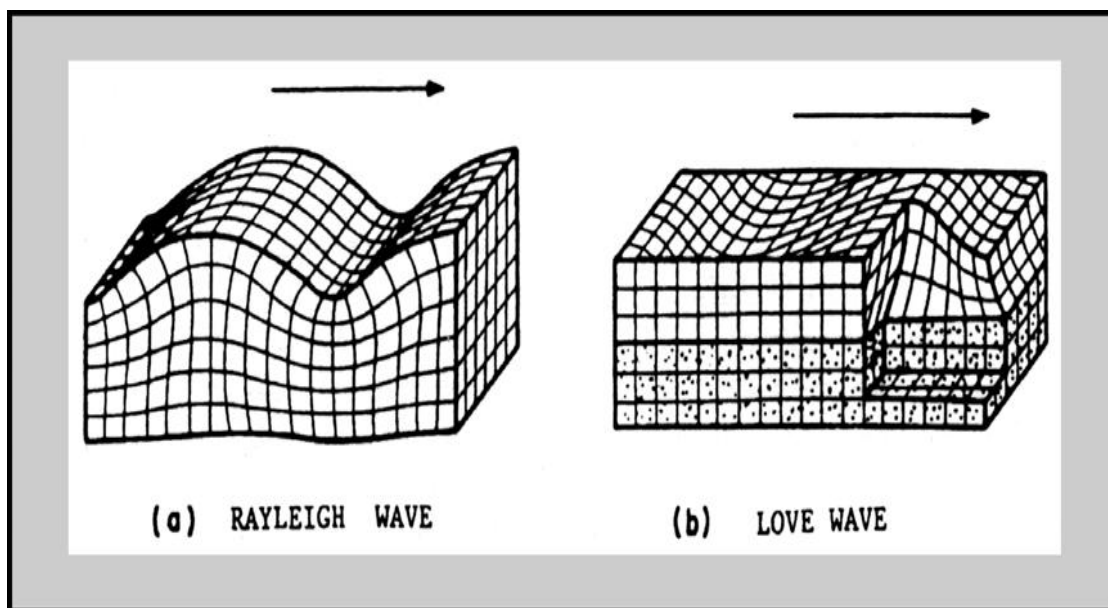


Εικόνα 2.3: Εδαφική κίνηση κατά τη διάδοση των κυμάτων χώρου. (a) P – κύματα, (b) S – κύματα [Sheriff and Geldart, 1995].

2.1.3 Επιφανειακά Κύματα

Τα κύματα επιφάνειας μελετήθηκαν για πρώτη φορά, ως κυματικό φαινόμενο στην ελεύθερη επιφάνεια, ομογενούς ελαστικού ημίσφαιρου. Στη συνέχεια ο Love (1911) μελέτησε τα SH επιφάνειας σε ομογενές στρώμα υπερκείμενο σε ομογενή ημίσφαιρο, ενώ ο Stoneley (1924), μελέτησε τα ομόνυμα κύματα Stoneley επιφάνειας, που διαδίδονται μεταξύ υδάτινου και εδαφικού στρώματος ή στη διαχωριστική επιφάνεια δύο εδαφικών ημίσφαιρων, όταν όμως ισχύει $\beta_1 \approx \beta_2$ και οι λόγοι ρ_1/ρ_2 και μ_1/μ_2 κυμαίνονται περίπου στη μονάδα (Sheriff and Geldart, 1995).

Εκτός από αυτούς τους τύπους επιφανειακών κυμάτων, υπάρχουν και τα σωληνοκύματα (tube waves), τα οποία διαδίδονται στη διεύθυνση του άξονα, πληρωμένης με νερό γεώτρησης και θεωρούνται σημαντικά για τις πληροφορίες που παρέχουν, για τις ελαστικές ιδιότητες του περιβάλλοντος μέσου.



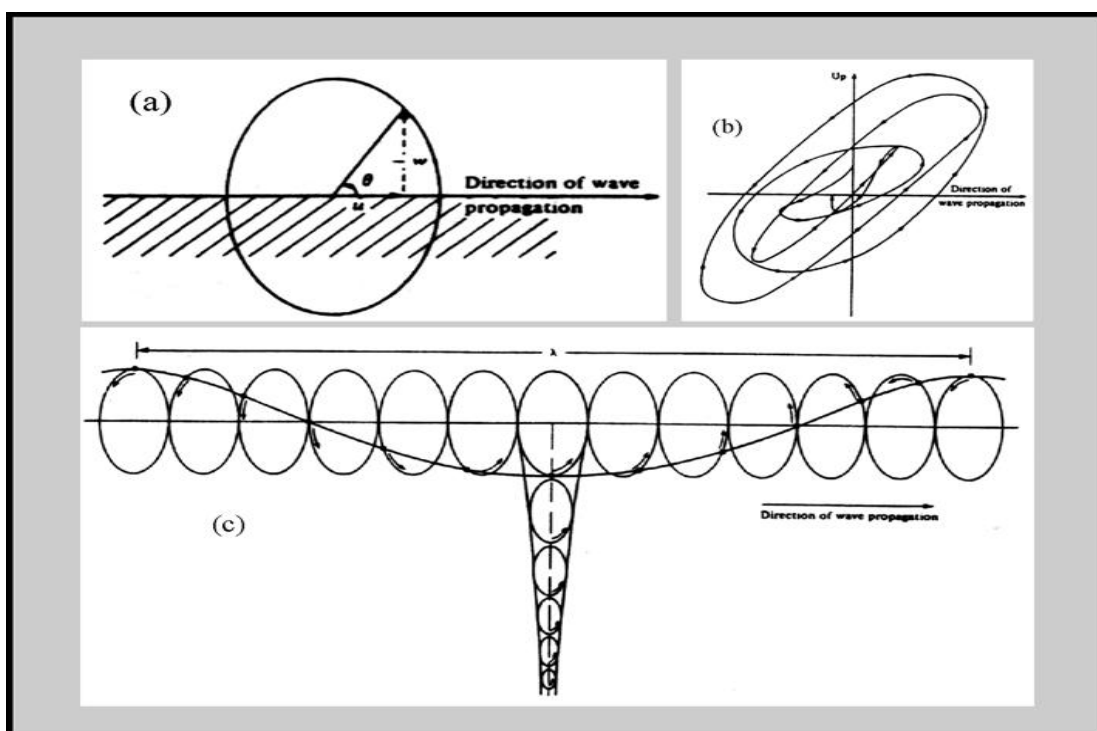
Εικόνα 2.4: Σχηματικός τρόπος διάδοσης των (a) Rayleigh και (b) Love επιφανειακών κυμάτων [Sheriff and Geldart, 1995]

Rayleigh Κύματα

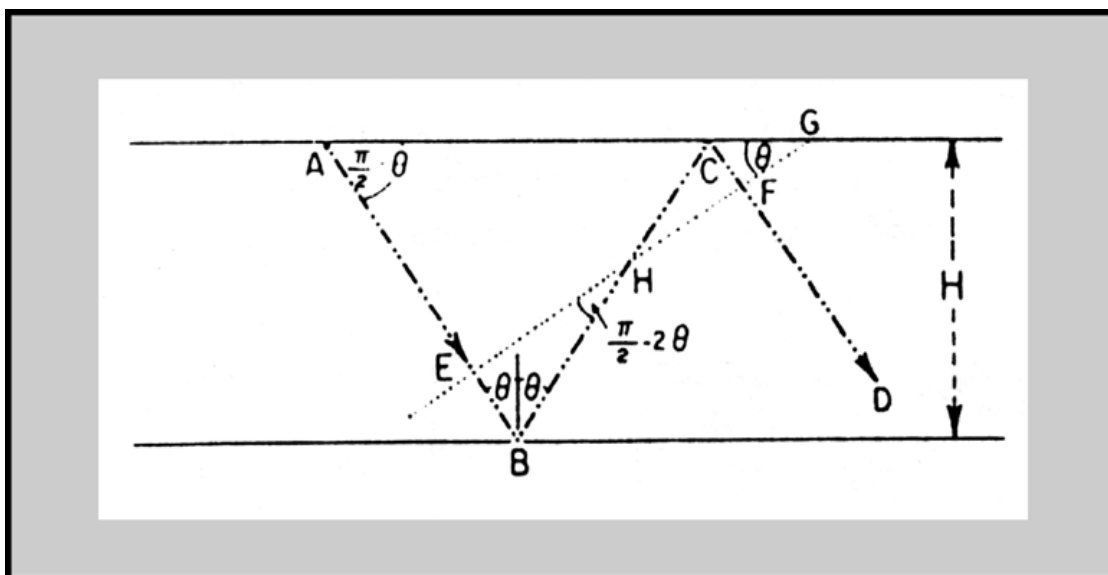
Τα κύματα Rayleigh είναι σύνθετα κύματα αποτελούμενα από P και SV συνιστώσες με αναλογία πλατών 1:1.5. Δηλαδή, οι ταλαντώσεις των υλικών σημείων γίνονται στο κατακόρυφο επίπεδο το οποίο περιέχει την διεύθυνση διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων. Οι ταλαντώσεις υλικού σημείου που αντιστοιχούν σε P και SV συνιστώσες της μετατόπισης είναι ίδιας συχνότητας αλλά διαφορετικής φάσης με αποτέλεσμα το υλικό σημείο να ακολουθεί ελλειπτική τροχιά με φορά αντίθετη της φοράς των δεικτών του ωρολογίου. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων Rayleigh είναι μικρότερη από την ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων. Η ταχύτητά τους εξαρτάται από τις ελαστικές σταθερές, την πυκνότητα αλλά και από την συχνότητα (ή το μήκος κύματος, όταν τα κύματα Rayleigh διαδίδονται σε μη ομογενή μέσα.

Κύματα Love και ψευδο-Rayleigh

Δημιουργούνται από την συμβολή ολικά ανακλώμενων κυμάτων χώρου. Απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία αυτών των κυμάτων είναι ύπαρξη λεπτού γεωλογικού στρώματος κοντά στην επιφάνεια της γης. Τα κύματα Love είναι κύματα συμβολής πολλαπλά ανακλώμενων κυμάτων SH. Τα υλικά σημεία κατά την διάδοση των κυμάτων Love πραγματοποιούν ταλαντώσεις οριζόντιας διεύθυνσης, η οποία είναι κάθετη στην διεύθυνσης διάδοσης του κύματος. Η ταχύτητα των κυμάτων Love εξαρτάται από την συχνότητα και είναι συνήθως μικρότερη από την ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων. Στις ψηλές συχνότητες, τα κύματα Love διαδίδονται με ταχύτητες συγκρίσιμες των κυμάτων S. Τα κύματα ψευδο-Rayleigh δημιουργούνται από την συμβολή πολλαπλά ανακλώμενα κυμάτων P ή και SV.



Εικόνα 2.5: Σχηματική παράσταση της διάδοσης των κυμάτων Rayleigh. (a) η προβλεπόμενη κίνηση στην επιφάνεια ενός ισότροπου ημιχώρου (Sheriff and Geldart, 1995), (b) η πραγματική κίνηση στο έδαφος) και (c) μια τομή της κίνησης των σωματιδίων από την επιφάνεια έως και κάποιο βάθος στον ημιχώρο (Sheriff and Geldart, 1995).



Εικόνα 2.6: Η αρχή γένεσης των κυμάτων Love στην περίπτωση ενός στρώματος υπερκείμενου του ημιχώρου.[Sheriff and Geldart, 1995]

2.1.4 Κυματικά φαινόμενα

Το κύμα συμμετέχει σε πάρα πολλά φαινόμενα της Φυσικής. Χαρακτηριστικά φαινόμενα των κυμάτων είναι:

- Συμβολή κυμάτων
- Στάσιμο κύμα
- Διάθλαση
- Περίθλαση
- Ανάκλαση
- Έκρηξη

Συμβολή κυμάτων

Συμβολή ονομάζεται η ταυτόχρονη διάδοση δύο κυμάτων στην ίδια περιοχή του μέσου. Για να παρατηρηθούν φαινόμενα συμβολής θα πρέπει οι κυματικές πηγές να είναι σύμφωνες, δηλαδή να έχουν ίδια ακριβώς συχνότητα και μονοχρωματικές,

δηλαδή να εκπέμπουν αποκλειστικά κύμα μίας συγκεκριμένης συχνότητας και μήκους κύματος. Η συμβολή συναντάται συχνά στις τηλεπικοινωνίες. Οι περιπτώσεις συμβολής στις ασύρματες επικοινωνίες είναι από τις κυριότερες αιτίες που οδηγεί σε διαλείψεις δηλαδή αλλοιώσεις του λαμβανόμενου σήματος.

Στάσιμο κύμα

Το στάσιμο κύμα είναι το κύμα που προκύπτει σε ένα υλικό μέσο από τη συμβολή δυο κυμάτων με ίδια συχνότητα που κινούνται μέσα στο μέσο προς αντίθετες κατευθύνσεις. Λέγεται στάσιμο (δηλαδή σταθερό σε μια θέση) επειδή όλα τα σημεία του μέσου εκτελούν μεν αρμονική ταλάντωση, με διαφορετικό πλάτος όμως το καθένα αντίθετα με ότι συμβαίνει σε ένα διαδιδόμενο κύμα, όπου τα σημεία του μέσου εκτελούν το ένα μετά το άλλο την ίδια ακριβώς κίνηση, εξασφαλίζοντας έτσι τη διάδοση της διαταραχής (του κύματος).

Ένα παράδειγμα στάσιμου κύματος είναι αυτό που δημιουργείται στις χορδές των εγχόρδων μουσικών οργάνων. Οι άκρες των χορδών είναι σταθερά στερεωμένες και δεν εκτελούν ταλάντωση, σε αντίθεση με το υπόλοιπο μέρος τους. Όταν λοιπόν πάλλεται μια χορδή, τα παραγόμενα κύματα "ταξιδεύουν" και προς τις δύο κατευθύνσεις των άκρων της χορδής, όπου εκεί ανακλώνται προς το αρχικό σημείο ταλάντωσης. Λόγω της διαφορετικής διεύθυνσης της κίνησης του κύματος που προέκυψε από την αρχική διαταραχή και αυτού που ανακλάστηκε από το άκρο της, τα δυο κύματα συμβάλλουν (δηλαδή συνδυάζονται) δημιουργώντας ένα στάσιμο κύμα, του οποίου το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης είναι διπλάσιο από αυτό των αρχικών κυμάτων που συμβάλλουν. Η δε συχνότητα του τελικού κύματος είναι σταθερή, δίνοντας μια συγκεκριμένη νότα από την κάθε χορδή.

Στάσιμο κύμα μπορεί να δημιουργηθεί όταν κύμα που διαδίδεται μέσα σε ένα μέσο ανακλάται στο ένα ή και τα δυο άκρα του μέσου. Μπορεί τα άκρα να είναι και τα δυο σταθερά στερεωμένα (πακτωμένα, όπως λέγεται μερικές φορές) όπως στο παράδειγμα της χορδής, ή μόνο το ένα (για παράδειγμα ένα σχοινί δεμένο σε τοίχο) ή το μέσο μπορεί να είναι "ανοικτό" και στα δυο του άκρα, όπως συμβαίνει με το φλάουτο, στο οποίο οι νότες αποτελούν το ηχητικό αποτέλεσμα των στάσιμων κυμάτων που δημιουργούνται στο εσωτερικό του.

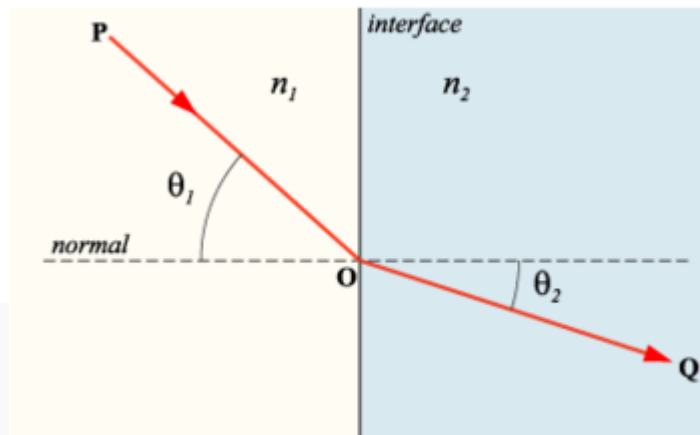
Διάθλαση

Διάθλαση ονομάζεται το φυσικό φαινόμενο της εκτροπής της ευθύγραμμης τροχιάς διάδοσης που υφίστανται φωτεινά ή άλλα κύματα όταν διέρχονται από ένα διαπερατό από αυτά μέσον σε έτερο.

Ιδιαίτερα, στην οπτική, Διάθλαση φωτός χαρακτηρίζεται κάθε οπτικό φαινόμενο της εκτροπής της διεύθυνσης των φωτεινών ακτινών κατά τη μετάβασή τους από ένα διαπερατό μέσο διάδοσης με δείκτη διάθλασης n_1 σε άλλο μέσο διάδοσης με δείκτη διάθλασης $n_2 \neq n_1$.

Η διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων ονομάζεται δίοπτρο. Το φαινόμενο αυτό, που οφείλεται στη διαφορετική ταχύτητα διάδοσης του φωτεινού κύματος και που εξαρτάται από το διαπερατό μέσο στο οποίο διαδίδεται το κύμα εξετάζει η Κυματική οπτική. Αντίθετα τη μελέτη των γωνιών η Γεωμετρική οπτική. Η σχέση που συνδέει τη γωνία πρόσπτωσης με τη γωνία διάθλασης, ως προς την κάθετο, στη διαχωριστική επιφάνεια είναι γνωστή ως "Νόμος του Σνελ".

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.4)$$



Εικόνα 2.7: Διάθλαση του φωτός στην επιφάνεια μεταξύ δύο μέσων διαφορετικών δεικτών διάθλασης, με $n_2 > n_1$. Η ταχύτητα είναι μικρότερη στο δεύτερο μέσο ($u_2 < u_1$), οπότε και η γωνία διάθλασης θ_2 είναι μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης θ_1 . Σημείωση στο διάγραμμα η διακεκομμένη ευθεία, είναι η κάθετος, στην επιφάνεια (www.Wikipedia.com)

Περίθλαση

Η περίθλαση είναι φαινόμενο της διάδοσης των κυμάτων. Είναι μία από τις περιπτώσεις στις οποίες το φως εκτρέπεται από την ευθεία πορεία του. Όταν το φως διέρχεται μέσα από μία λεπτή σχισμή ή οπή δεν εμφανίζεται ένα απλό φωτεινό αποτύπωμα σε μία οθόνη τοποθετημένη πίσω από την σχισμή που αντιστοιχεί στην εικόνα της οπής ή της σχισμής αλλά μία εικόνα που περιλαμβάνει φωτεινές και σκοτεινές περιοχές σε μία μεγάλη περιοχή γύρω από την θέση που θα έπρεπε να εμφανίζεται το φωτεινό αποτύπωμα. Το αντίστοιχο φαινόμενο εκτροπής του φωτός συμβαίνει όταν φως πέσει πάνω σε ιδιαίτερα λεπτό αντικείμενο. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αποτέλεσμα του φαινομένου της περίθλασης. Η περίθλαση επομένως είναι το φαινόμενο της διάχυσης των κυμάτων προς όλες τις κατευθύνσεις όταν αυτά συναντάνε ένα εμπόδιο ή μία οπή με διαστάσεις παραπλήσιες του μήκους κύματος. Η περίθλαση είναι αποτέλεσμα δύο κυματικών φαινομένων, της αρχής του Χόιγκενς και της συμβολής.

Ανάκλαση

Ανάκλαση ονομάζεται το φαινόμενο της αλλαγής διεύθυνσης διάδοσης ενός μετώπου κύματος, μέσα στο ίδιο μέσο, από μια διαχωριστική επιφάνεια. Τα πιο συνηθισμένα παραδείγματα ανάκλασης είναι αυτά των κυμάτων φωτός, ήχου και νερού. Οι επιφάνειες που προκαλούν το φαινόμενο της ανάκλασης ονομάζονται κάτοπτρα (καθρέπτες).

Έκρηξη

Με τον όρο έκρηξη στη Μηχανική, αλλά και γενικότερα, χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε προκαλούμενη αιφνίδια ρήξη που έχει ως συνέπεια την αποκεντρωμένη, (προς τα έξω), ισχυρή πίεση. Η έκρηξη γενικά είναι αποτέλεσμα εκτόνωσης αερίων, που συνήθως οφείλεται είτε σε ανάφλεξη εκρηκτικών υλών είτε από ισχυρή πίεση που ασκείται σε αέρια με μηχανικά μέσα.



Εικόνα 2.8: Πυροδότηση ενός αυτοσχεδιασμένου εκρηκτικού μηχανισμού (IED) κατά τη διάρκεια της διάθεσης εκρηκτικού πυροβολικού/της κατάρτισης κατάδυσης (EOD/Diving). (www.navy.mil)

2.2 Μετασχηματισμός Fourier

Η **ανάλυση Fourier** είναι ένα πεδίο των εφαρμοσμένων μαθηματικών το οποίο προέκυψε από την προσπάθεια αναπαράστασης μίας συνάρτησης ως αθροίσματος απλούστερων, περιοδικών τριγωνομετρικών συναρτήσεων. Επομένως κεντρική ιδέα στην ανάλυση Fourier είναι η προσπάθεια για κατανόηση των ιδιοτήτων μίας

συνάρτησης (η οποία μπορεί να αναπαριστά π.χ. ένα σήμα) μέσω διάσπασής της σε γνωστά, στοιχειώδη μέρη (*αποσύνθεση*). Η ανάστροφη διαδικασία, η κατασκευή μίας συνάρτησης από γνωστές, βασικές συναρτήσεις, ονομάζεται *σύνθεση*. Με τον όρο *ανάλυση Fourier* αναφερόμαστε και στις δύο διεργασίες. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από τον Josef Fourier στην προσπάθειά του να ερευνήσει τη διάδοση της θερμότητας.

Ο όρος **Μετασχηματισμός Fourier** (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 Fourier ή ως φάσμα, η οποία περιγράφει το κατά πόσον συμμετέχει κάθε στοιχειώδες ημίτονο στον σχηματισμό της αρχικής συνάρτησης (έστω f). Ο ΜΦ αποτελεί οριακή περίπτωση (για συνάρτηση f με άπειρη περίοδο, δηλαδή ουσιαστικά απεριοδική) της **σειράς Fourier**. Η σειρά Fourier εφαρμόζεται για περιοδική f και δίνει ως αποτέλεσμα μία νέα συνάρτηση με διακριτό πεδίο τιμών αντί για συνεχές (δηλαδή πεδίο τιμών σε μία σειρά Fourier είναι οι φυσικοί αριθμοί αντί για τους πραγματικούς).

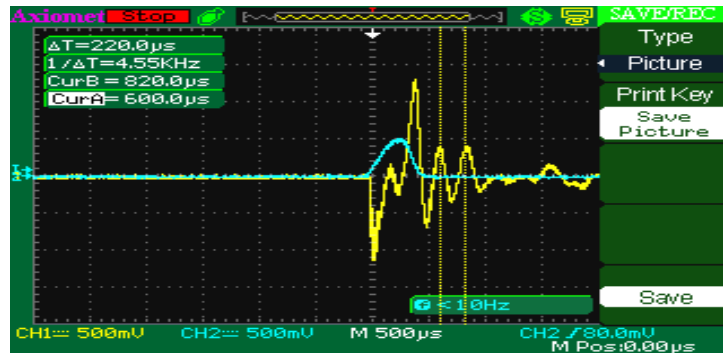
Για καθεμία από αυτές τις διεργασίες υπάρχει και ο αντίστροφος μετασχηματισμός, ο οποίος δέχεται ως είσοδο το φάσμα και δίνει ως έξοδο την αρχική συνάρτηση f . Όλοι οι τύποι μετασχηματισμών της ανάλυσης Fourier ανάγονται στον παρόμοιου σκοπού Μετασχηματισμό Laplace και αποτελούν περιπτώσεις ολοκληρωτικού μετασχηματισμού. Εν κατακλείδι καταλαβαίνουμε ότι οι ορισμοί του μετασχηματισμού κατά Fourier αφορούν στον άμεσο (direct) μετασχηματισμό από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων καθώς και τον αντίστροφο (inverse) μετασχηματισμό. Συνήθως ο άμεσος μετασχηματισμός γίνεται αναλυτικά με τη βοήθεια των μαθηματικών πινάκων, ο δε αντίστροφος γίνεται αριθμητικά χρησιμοποιώντας τον ταχύ αλγόριθμο μετασχηματισμού (FFT: fast Fourier transform). Η αποτελεσματικότητα του FFT είναι τόσο μεγάλη, που και οι δύο μετασχηματισμοί γίνονται με την ίδια ευκολία. Οι εξισώσεις στο πεδίο των συχνοτήτων προκύπτουν με τη βοήθεια των ιδιοτήτων του μετασχηματισμού Fourier.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μόνο ο άμεσος μετασχηματισμός Fourier με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος Matlab (www.MathWorks.com) .

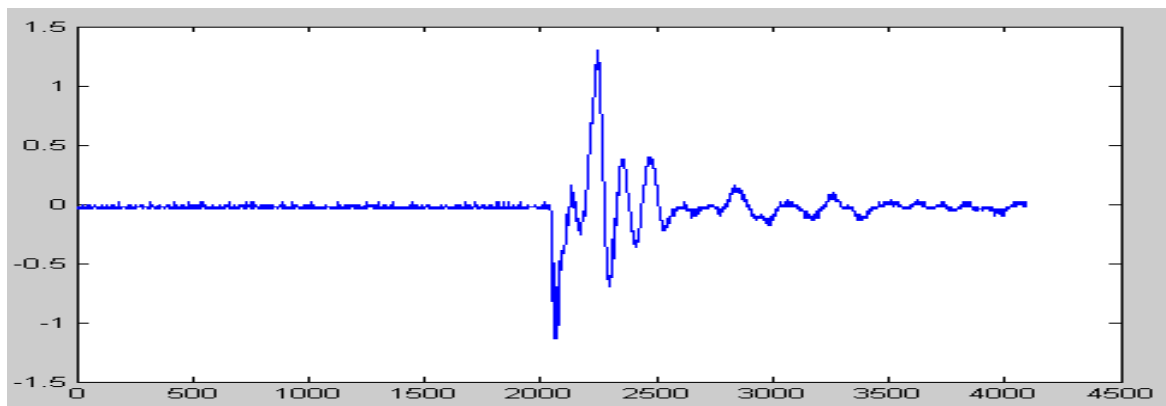
Ο Μετασχηματισμός Fourier αποτελεί γενίκευση της σειράς (Fourier) με μιγαδικούς όρους. Αντί των διακριτών όρων c_n χρησιμοποιεί την συνεχή συνάρτηση $F(t)$:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x)e^{2\pi ixt} dx \quad (2.5)$$

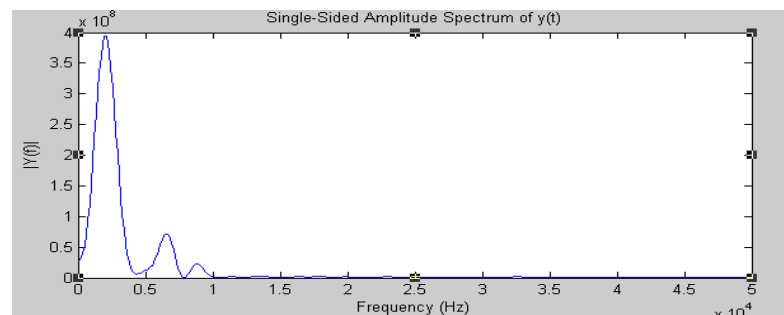
$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x)e^{-2\pi ixt} dx \quad (2.6)$$



Εικόνα 2.9: Τυπικό παράδειγμα χρονιστοριών καταγραφής μεταβολής τάσεων από τον παλμογράφο σε περίπτωση κρούσης υλικού (μπλε γραμμή) και καταγραφής της παραγόμενης κυματομορφής (κίτρινη γραμμή).



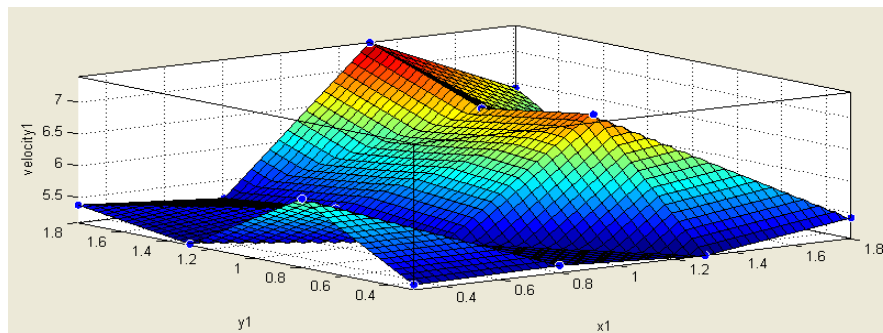
Εικόνα 2.10: Χρονιστορία καταγραφής μεταβολής τάσεων από τον παλμογράφο για τον αισθητήρα



Εικόνα 2.11: Πεδίο συχνοτήτων για ένα σημείο (φάσμα απόκρισης)

2.3 Ακουστική Τομογραφία

Τομογραφία είναι μία μη καταστρεπτική τεχνική απεικόνισης της εσωτερικής δομής ενός αντικειμένου. Οι κλάδοι της επιστήμης που χρησιμοποιούν την τεχνική της τομογραφίας είναι η βιολογία, η μηχανική, η γεωλογία, ωκεανογραφία, η αρχαιολογία και η επιστήμη των υλικών. Η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί από τα μέσα του εικοστού αιώνα και βελτιώνεται συνεχώς. Με τη χρησιμοποίηση της ακουστικής τομογραφίας, ένας μηχανικός μπορεί να έχει άποψη για την εσωτερική δομή μίας κατασκευής όσον αφορά κάποια ατέλεια, κενά ή ρωγμές χωρίς να της δημιουργήσει κάποια βλάβη ή να την καταστρέψει. Σε έναν τομέα όπως η αρχαιολογία, με την τεχνική αυτή εγγυάται ότι η ακεραιότητα των δειγμάτων θα διατηρηθεί με σεβασμό ενώ θα έχουν μελετηθεί στο εσωτερικό τους. Στην ιατρική, η τομογραφία (αξονική ή μαγνητική) είναι λιγότερο επεμβατική από μία χειρουργική επέμβαση, και μπορεί να παρέχει μια εξαιρετική διάγνωση για το τι συμβαίνει στο εσωτερικό του ασθενούς. Οι γεωλόγοι τη χρησιμοποιούν για να δουν διατομές των βράχων και άλλων υλικών όσον αφορά το έδαφος και το υπέδαφος που μελετούν.



Εικόνα 2.12: Τρισδιάστατη χρωματική ανάλυση τομής τοιχοποιίας με την τεχνική της Ακουστικής Τομογραφίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

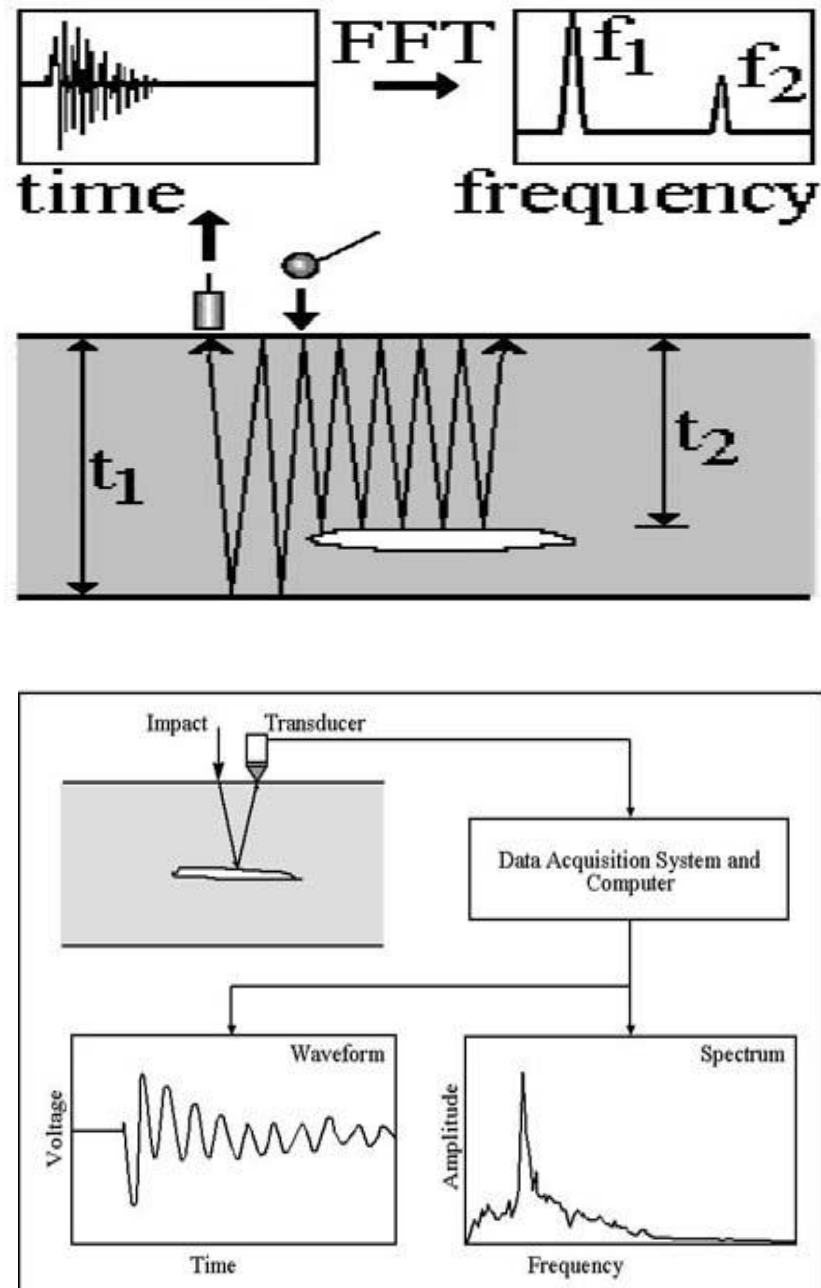
3.1 Τεχνική κρουστικής ηχούς (Impact Echo)

Η μέθοδος Impact Echo αποτελεί μία μη καταστρεπτική μέθοδο αξιολόγησης σκυροδέματος και τοιχοποιίας που προκύπτει από μία μικρής διάρκειας μηχανική κρούση με αποτέλεσμα να παράγονται κύματα που διαδίδονται μέσω της δομής και ανακλώνται από εσωτερικές ρωγμές και εξωτερικές επιφάνειες. Μέσω της ερμηνείας της συμπεριφοράς των κυματομορφών και με τη βοήθεια οργάνων και λογισμικών προγραμμάτων η μέθοδος Impact Echo μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να:

- ❖ μετρηθεί το πάχος κάποιας τοιχοποιίας ή εντοπίσει ρωγμές κενά και άλλες ατέλειες στις δομές τοιχοποιίας .
- ❖ γίνουν ακριβείς μετρήσεις σε συγκεκριμένες πλάκες και φύλλα.
- ❖ καθοριστεί η θέση και η έκταση των ρωγμών η ακόμη και αποκολλήσεων σε πειραματικά δοκίμια και όχι μόνο
- ❖ επίσης μπορεί να εντοπίσει κενά στις κατασκευές υπονόμων κάτω από πλάκες και πεζοδρόμια (Δυτική Αυστραλία).

Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος Impact Echo είναι μια τεχνική για την ανίχνευση ρωγμών στο σκυρόδεμα και σε άλλα υλικά κυρίως δομικά. Είναι βασισμένη στον έλεγχο της κίνησης της επιφάνειας ως αποτέλεσμα ενός μηχανικού Impact. Η μέθοδος υπερνικά πολλά από τα εμπόδια που συνδέονται με την ανίχνευση ρωγμών στο σκυρόδεμα βασισμένο στις υπερηχητικές μεθόδους. Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να παρουσιαστεί μια επισκόπηση της τεχνικής και να συζητηθούν οι σημαντικές παράμετροι που περιλαμβάνονται σε αυτόν τον τύπο δοκιμής. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι ο μετασχηματισμός του πεδίου του χρόνου κυματοειδούς περιοχών της κίνησης επιφάνειας, στο πεδίο συχνότητας. Ο αντίκτυπος

δίνει αφορμή για τους τρόπους δόνησης και η συχνότητα αυτών των τρόπων συσχετίζεται με τη γεωμετρία του αντικειμένου δοκιμής και την παρουσία ρωγμών. (Mary Sansalone and Nicholas J. Carino, 1988)



Εικόνα 3.1: Σχηματικά διαγράμματα, που επεξηγούν πώς λειτουργεί η τεχνική Impact Echo (www.impact-echo.com)

3.2 Τεχνική Ακουστικής Τομογραφίας

Τομογραφία είναι μία μη καταστρεπτική τεχνική απεικόνισης της εσωτερικής δομής ενός αντικειμένου. Οι κλάδοι της επιστήμης που χρησιμοποιούν την τεχνική της τομογραφίας είναι η βιολογία, η μηχανική, η γεωλογία, ωκεανογραφία, η αρχαιολογία και η επιστήμη των υλικών. Η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί από τα μέσα του εικοστού αιώνα και βελτιώνεται συνεχώς.

Με τη χρησιμοποίηση της ακουστικής τομογραφίας, ένας μηχανικός μπορεί να έχει άποψη για την εσωτερική δομή μίας κατασκευής όσον αφορά κάποια ατέλεια, κενά ή ρωγμές χωρίς να της δημιουργήσει κάποια βλάβη ή να την καταστρέψει. Σε έναν τομέα όπως η αρχαιολογία, με την τεχνική αυτή εγγυάται ότι η ακεραιότητα των δειγμάτων θα διατηρηθεί με σεβασμό ενώ θα έχουν μελετηθεί στο εσωτερικό τους. Στην ιατρική, η τομογραφία (αξονική ή μαγνητική) είναι λιγότερο επεμβατική από μία χειρουργική επέμβαση, και μπορεί να παρέχει μια εξαιρετική διάγνωση για το τι συμβαίνει στο εσωτερικό του ασθενούς. Οι γεωλόγοι τη χρησιμοποιούν για να δουν διατομές των βράχων και άλλων υλικών όσον αφορά το έδαφος και το υπέδαφος που μελετούν.

Η λέξη προέρχεται από την ελληνική ΤΟΜΟΣ λέξη που σημαίνει «μέρος» ή «ενότητα», που αντιπροσωπεύει την ιδέα του "ένα τμήμα", "μια φέτα» ή «σε ένα εργαστήριο". Μία τομογραφία των διαφόρων τμημάτων του σώματος είναι γνωστό ως *polytomography*. Υπάρχουν διάφορα είδη τομογραφίας όπως φαίνεται παρακάτω:

Σεισμική τομογραφία είναι μια μεθοδολογία για την εκτίμηση κυρίως του υπεδάφους της Γης. Στη σεισμολογία, σεισμική τομογραφία είναι μόνο ένα μέρος της σεισμικής απεικόνισης, και συνήθως έχει ένα πιο συγκεκριμένο σκοπό την εκτίμηση ιδιοτήτων, όπως πολλαπλασιαστικές ταχύτητες, διαμήκη κύματα (P-wave) και εγκάρσια κύματα (S-wave).

Γεωηλεκτρική τομογραφία (ERT) ή ηλεκτρική αντίσταση απεικόνισης (EEY) είναι μια γεωφυσική τεχνική για την απεικόνιση κάτω από την επιφάνεια, για δομές από ηλεκτρικές μετρήσεις που έγιναν στην επιφάνεια, ή με ηλεκτρόδια σε μία ή περισσότερες γεωτρήσεις. Είναι στενά συνδεδεμένη με την ιατρική τεχνική

απεικόνισης ηλεκτρικής τομογραφίας σύνθετης αντίστασης (EIT), και μαθηματικά είναι το ίδιο αντίστροφο πρόβλημα .

Λειτουργική μαγνητική τομογραφία ή λειτουργική μαγνητική τομογραφία (fMRI) είναι ένα είδος εξειδικευμένης μαγνητικής τομογραφίας η οποία χρησιμοποιείται για να μετρήσει την αιμοδυναμική ανταπόκριση (αλλαγή στη ροή του αίματος) που σχετίζονται με νευρική δραστηριότητα στον εγκέφαλο ή το νωτιαίο μυελό του ανθρώπου ή άλλων ζώων. Είναι ένα από τις πιο πρόσφατα αναπτυγμένες μορφές νευροαπεικόνισης .

Ακτινογραφία αξονική τομογραφία (CT) είναι μια ιατρική μέθοδος απεικόνισης που χρησιμοποιεί την τομογραφία που δημιουργείται από τη μηχανογραφική επεξεργασία. Η Ψηφιακή επεξεργασία γεωμετρίας χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει μια τρισδιάστατη εικόνα του εσωτερικού ενός αντικειμένου από μια μεγάλη σειρά των δισδιάστατων X-ray εικόνων που λαμβάνονται γύρω από έναν ενιαίο άξονα περιστροφής.

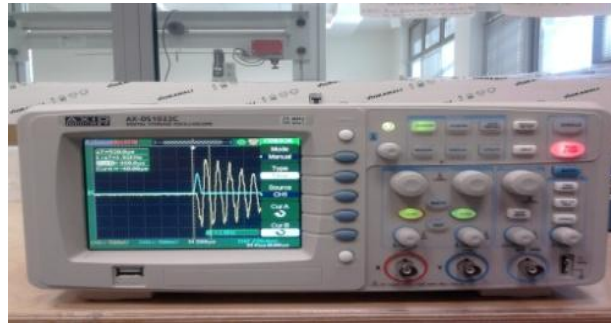
Νετρονίων τομογραφία είναι μια μορφή της υπολογιστικής τομογραφίας που αφορά την παραγωγή τρισδιάστατων εικόνων από την ανίχνευση της απορρόφησης των νετρονίων που παράγονται από μια πηγή νετρονίων. Δημιουργεί μια τρισδιάστατη εικόνα ενός αντικειμένου, συνδυάζοντας πολλαπλές επίπεδες εικόνες με έναν γνωστό διαχωρισμό. Έχει μια ανάλυση της τάξης των 200-500 μm .

Single-εκπομπής φωτονίων αξονική τομογραφία (SPECT, ή λιγότερο συχνά, SPET) είναι μια τεχνική απεικόνισης πυρηνικής ιατρικής τομογραφίας με ακτίνες γάμμα. Είναι παρόμοια με τη συμβατική πυρηνική ιατρική απεικόνισης χρησιμοποιώντας ακτίνες γάμμα. Ωστόσο, είναι σε θέση να παρέχει πραγματικές 3D πληροφορίες. Αυτές οι πληροφορίες παρουσιάζονται ως τομές μέσα από τον ασθενή, αλλά μπορεί να είναι ελεύθερα επαναδιαμορφωνόμενες ή παραποιημένες, όπως απαιτείται.

3.3 Όργανα μετρήσεων – Υπολογιστικά Προγράμματα

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας είναι τα εξής:

α) Ψηφιακός παλμογράφος ή Digital Storage Oscilloscope Ax – D51022C



Εικόνα 3.2: Digital Storage Oscilloscope Ax – D51022C

Ένας παλμογράφος είναι ένα ηλεκτρονικό όργανο ελέγχου που επιτρέπει την παρακολούθηση ενός συνεχούς μεταβαλλόμενου σήματος τάσεως, συνήθως ως δισδιάστατη γραφική παράσταση μιας ή περισσότερων ηλεκτρικών πιθανών διαφορών με χρήση τον κατακόρυφο άξονα ή «Y», ο οποίος χαράσσεται ως συνάρτηση του χρόνου, (οριζόντια ή άξονα «X»).

Οι παλμογράφοι χρησιμοποιούνται συνήθως για να καταγράψουν και να απεικονίσουν το ακριβές σχήμα του κύματος ενός ηλεκτρικού σήματος όπως και το πλάτος του σήματος, παραμόρφωση, το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο γεγονότων και τη σχετική χρονική στιγμή από δύο συναφή σήματα.

Οι παλμογράφοι χρησιμοποιούνται στις επιστήμες, την ιατρική, τη μηχανική, και τη βιομηχανία τηλεπικοινωνιών.

b) 2 ενισχυτές (Signal conditioners) οι οποίοι αυξάνουν την ισχύ του σήματος στον αισθητήρα καταγραφής και στη μηχανική κρούση του σφυριού

Τα Signal conditioners παρέχουν την ενίσχυση του σήματος, φιλτράροντας το και μετατρέποντας το, και άλλες διαδικασίες που απαιτούνται για να καταστήσουν τα αποτελέσματα των αισθητήρων κατάλληλα για τους πίνακες υπολογιστών. Χρησιμοποιούνται πρώτιστα, για την απόκτηση στοιχείων, στην οποία τα σήματα αισθητήρων πρέπει να ομαλοποιηθούν και να φιλτραριστούν στα κατάλληλα επίπεδα για την αναλογική μετατροπή σε ψηφιακή έτσι αυτοί μπορούν να διαβαστούν από τις αυτοματοποιημένες συσκευές. Ο ρυθμίζοντας τύπος το σημάτων, οι προδιαγραφές συσκευών, οι εισαγωγές σημάτων, οι εισαγωγές αισθητήρων, οι εξειδικευμένες εισαγωγές, οι μετατροπείς και η διέγερση, τα αποτελέσματα και το ενδιαμέσο με τον χρήστη είναι σημαντικές παράμετροι που εξετάζουν κατά έρευνα για τα signal conditioners. Άλλες προδιαγραφές για να εξετάσουν κατά την επιλογή των ρυθμίζοντας προϊόντων σημάτων περιλαμβάνουν την εφαρμογή, το λογισμικό, τη μνήμη και την αποθήκευση, τις προδιαγραφές δικτύων, τις προδιαγραφές φίλτρων, τις προδιαγραφές ενισχυτών, και τις περιβαλλοντικές παραμέτρους.



Εικόνα 3.3: ενισχυτής (Signal conditioners)

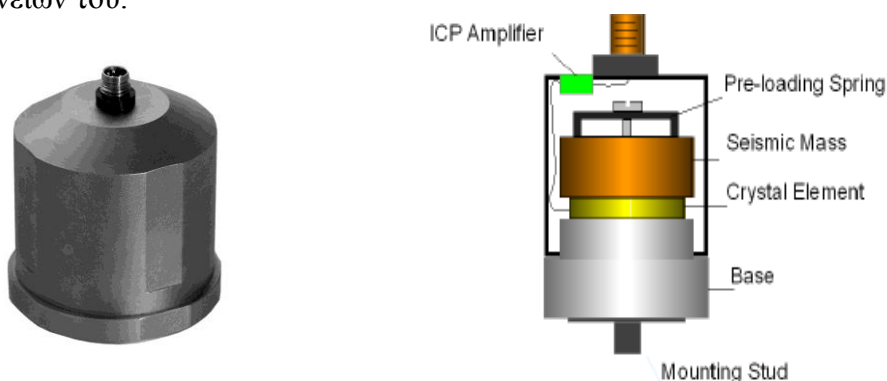
c) Καλώδια (2 μαύρα & 2 μπλε)



Εικόνα 3.4: Καλώδια παλμογράφου και accelerometer

d) Αισθητήρας καταγραφής σήματος (accelerometer)

Το accelerometer μπορεί να θεωρηθεί τυποποιημένος μετατροπέας δόνησης για τη μέτρηση δόνησης μηχανών. Γίνεται σε διάφορες διαφορετικές διαμορφώσεις, αλλά η απεικόνιση του τύπου συμπίεσης χρησιμεύει να περιγράψει την αρχή της λειτουργίας. Η σεισμική μάζα στερεώνεται στη βάση από ένα αξονικό μπουλόνι που συγκρατεί ένα κυκλικό ελατήριο. Το στοιχείο συμπιέζεται μεταξύ της μάζας και της βάσης. Όταν ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό δοκιμάζει μια δύναμη, παράγει μια ηλεκτρική δαπάνη μεταξύ των επιφανειών του.



Εικόνα 3.5: Accelerometer (www.Hbm.com) & Accelerometer (www.AzimaDLI.com)

Όταν το accelerometer κινείται στην διεύθυνση ενός κατακόρυφου άξονα, η δύναμη που απαιτείται για να κινήσει τη σεισμική μάζα γεννιέται από το ενεργό στοιχείο. Σύμφωνα με το δεύτερο νόμο Newton, αυτή η δύναμη είναι ανάλογη προς την επιτάχυνση της μάζας. Η δύναμη στο κρύσταλλο παράγει το σήμα παραγωγής, το οποίο είναι επομένως ανάλογο προς την επιτάχυνση του μετατροπέα. Τα accelerometer είναι εξαιρετικά γραμμικό υπό μια έννοια εύρους, σημαίνοντας ότι έχουν μια πολύ μεγάλη δυναμική περιοχή. Τα μικρότερα επίπεδα επιτάχυνσης μπορούν να αισθανθούν ότι καθορίζεται μόνο από τον ηλεκτρικό θόρυβο της ηλεκτρονικής, και τα πιο υψηλά επίπεδα περιορίζονται μόνο από την καταστροφή του ίδιου του στοιχείου.

Το πιεζοηλεκτρικό accelerometer είναι πολύ σταθερό κατά τη διάρκεια των μεγάλων περιόδων του χρόνου, και θα διατηρήσει τη βαθμολόγησή του εάν χρησιμοποιείται σωστά. Μια μικρή ρωγμή θα αναγκάσει την ευαισθησία για να μειωθεί και επίσης έχει επιπτώσεις πολύ στην αντήχηση, και έτσι την απάντηση συχνότητας. Είναι μια καλή ιδέα να βαθμολογηθούν τα accelerometer περίπου μία φορά το χρόνο εάν είναι στην υπηρεσία με τους φορητούς συλλέκτες στοιχείων.

Το φάσμα συχνότητας του accelerometer είναι πολύ ευρύ, εκτεινόμενο από τις πολύ χαμηλές συχνότητες σε μερικές μονάδες σε διάφορες δεκάδες Kz. Αυτή η αντήχηση παράγει μια πολύ υψηλή αιχμή στην απάντηση στη φυσική συχνότητα του μετατροπέα, και αυτό είναι συνήθως κάπου κοντά στα 30 kHz για τα συνήθως χρησιμοποιούμενα accelerometer. Μια εμπειροτεχνική μέθοδος είναι ότι ένα accelerometer είναι χρησιμοποιήσιμο μέχρι το περίπου 1/3 της φυσικής συχνότητάς του. Τα στοιχεία επάνω από αυτήν την συχνότητα θα τονιστούν από την ηχηρή απάντηση, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν εάν η επίδραση ληφθεί υπόψη.

Κατά τη χρησιμοποίηση ενός accelerometer, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία για να μην το υποβάλει στα επίπεδα επιτάχυνσης όπου η τάση παραγωγής θα υπερβεί διάφορα βολτ. Διαφορετικά, ο εσωτερικός προ ενισχυτής θα υπερφορτωθεί και θα οδηγήσει σε διαστρέβλωση στοιχείων.

ε) Σφυρί μηχανικής κρούσης

Το σφυρί μηχανικής κρούσης έχει ως σκοπό να διεγείρει και να μετρήσει τις δυνάμεις αντίκτυπου στις μικρομεσαίες ή μεσαίες δομές όπως οι φραγμοί μηχανών, τα πλαίσια αυτοκινήτων και τα αυτοκίνητα συστατικά. Ένα accelerometer χρησιμοποιείται για να μετρήσει την ‘ανταπόκριση’ της δομής. Με τη χρησιμοποίηση μιας multichannel FFT analyzer, όπως το σύστημα PULSE, η λειτουργία απόκρισης συχνότητας και οι μορφές δοκιμής της δομής, μπορούν έπειτα να παραχθούν. Το αντίθετο στη χρησιμοποίηση ηλεκτροδυναμικού exciter, ένα σφυρί μηχανικής κρούσης δεν εφαρμόζει την πρόσθετη μαζική φόρτωση στο αντικείμενο δοκιμής και παρέχει μια φορητή λύση για τη διέγερση.



Εικόνα 3.6: Σφυρί μηχανικής κρούσης

Χρήσεις σφυριού μηχανικής κρούσης

- * Μετρήσεις αντίκτυπου-δύναμης στις μικρομεσαίες ή μεσαίες δομές
- * Μέτρηση των λειτουργιών απόκρισης συχνότητας που χρησιμοποιούν τις τεχνικές διέγερσης αντίκτυπου
- * Ως τμήμα ενός δυναμικού δομικού εξεταστικού συστήματος για την ανάλυση και την πρόβλεψη της δομικής απόκρισης

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα σφυριού μηχανικής κρούσης

- * Τέσσερις τύποι hammer με ευαισθησία από 1 έως 22 mV/N
- * Εργονομική λαβή
- * Αμελητέες αλλαγές στις δυναμικές ιδιότητες της δομής δοκιμής
- * Τρεις αναπληρώσιμες άκρες
- * Επιτάχυνση αντισταθμισμένη

Το σφυρί αντίκτυπου, παρέχεται με τρεις ανταλλάξιμες άκρες αντίκτυπου του αλουμινίου, του πλαστικού και του λάστιχου. Η επιλογή της άκρης αντίκτυπου καθορίζει τη μορφή ώθησης (εύρος και διάρκεια) και το εύρος ζώνης της διέγερσης και επιλέγεται ανάλογα με την επιφάνεια της μηχανικής κρούσης.

f) Ηλεκτρονικός υπολογιστής και υπολογιστικά προγράμματα Matlab, Migratom, Excel

Το MATLAB είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστών για ανθρώπους που χρησιμοποιούν αριθμητικούς υπολογισμούς, ειδικά στη γραμμική άλγεβρα (πίνακες). Στο δυναμικό του Matlab συμπεριλαμβάνονται μοντέρνοι αλγόριθμοι, δυνατότητες χειρισμού τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων, και ισχυρά προγραμματιστικά εργαλεία. Το Matlab έρχεται ως πακέτο του βασικού προγράμματος, με πολλές "εργαλειοθήκες" όπως π.χ. το Toolbox της Curve Surface Fitting που χρησιμοποιήθηκε εκτενώς στην παρούσα εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

4.1 Γενικά

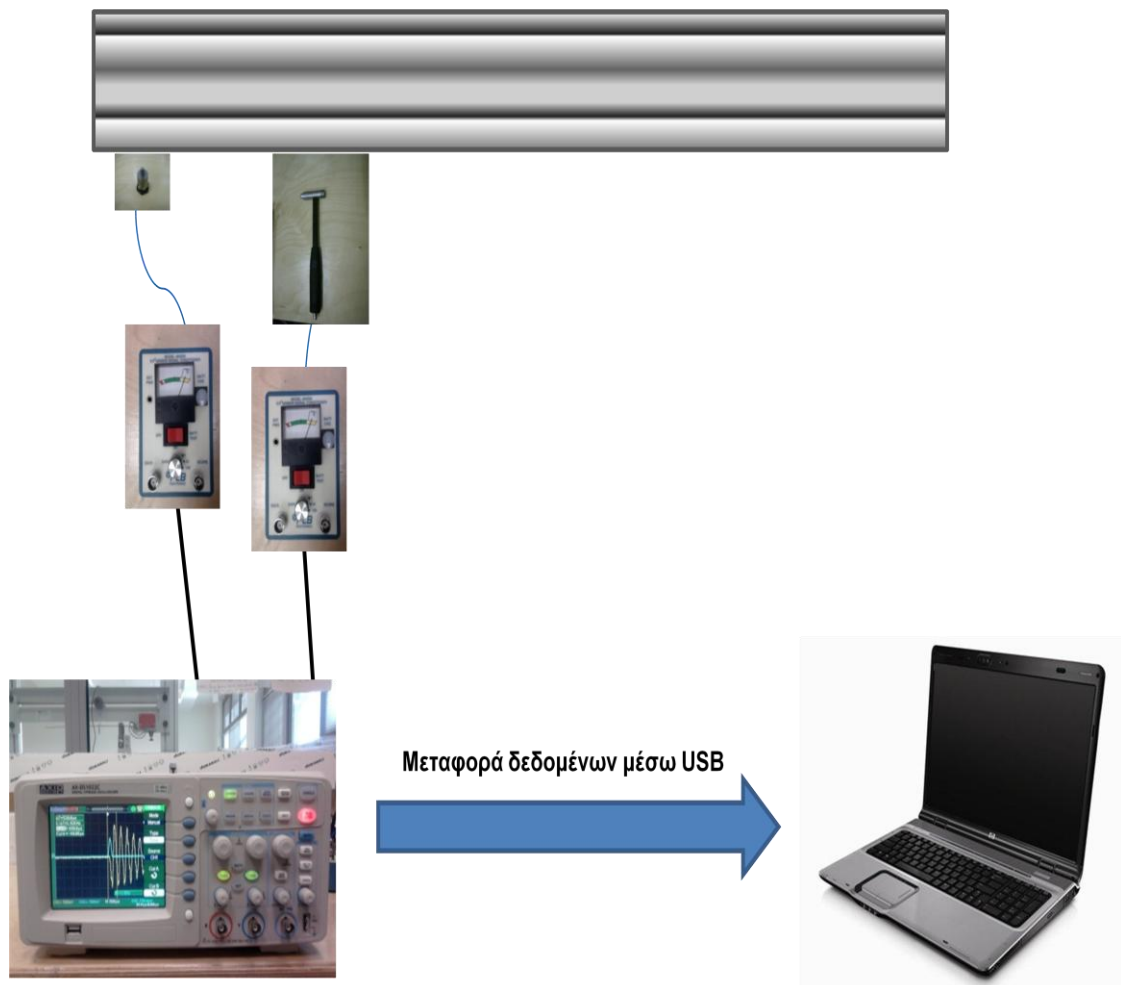
Οι τεχνικές πειραματικές δοκιμές εφαρμόστηκαν με χρονολογική σειρά :

- 1) Σε τρία εργαστηριακά δοκίμια στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής με την πειραματική τεχνική Impact Echo τα οποία είναι:
 - a) Δοκίμιο Μαρμάρου Διονύσου
 - b) Δοκίμιο Ασβεστολίθου
 - c) Δοκίμιο Σκυροδέματος
- 2) Εφαρμογή σε τοιχοποιία από πέτρα του Πολυτεχνείου στο λιθόστρωτο πεζόδρομο που συνδέει τις κτιριακές εγκαταστάσεις των τμημάτων Μηχανικών Περιβάλλοντος και Μηχανικών ορυκτών πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Χανιά, με την πειραματική τεχνική Impact Echo.
- 3) Τελική εφαρμογή σε τοιχοποιία από πέτρα της Γαλλικής σχολής (όπου στεγάζεται το τμήμα της Αρχιτεκτονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης) με τις πειραματικές τεχνικές Impact Echo και Tomography.

4.2 Εφαρμογή σε εργαστηριακά δοκίμια

4.2.1 Διάταξη οργάνων

Στην παρούσα διερεύνηση εφαρμόστηκε η διάταξη που φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 4.1.



Εικόνα 4.1: Διάταξη οργάνων

4.2.2 Δοκίμιο Μαρμάρου Διονύσου

Ιδιότητες Δοκιμίου Μαρμάρου Διονύσου ύστερα από μετρήσεις με τη βοήθεια χάρακα, ζυγαριάς και μελέτης από το διαδίκτυο: (www.dionyssomarble.com)

Διαστάσεις: μήκος * πλάτος * ύψος = 50 cm * 10 cm * 10 cm

Βάρος: w= 14 Kg

Ειδικό βάρος: $\rho = 2,8 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$

Λόγος Poisson: $\nu = 0,25$

Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας: $E_d = 40 \text{ GPa}$



Εικόνα 4.2: Δοκίμιο Μαρμάρου Διονύσου στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής

4.2.3 Δοκίμιο Ασβεστολίθου

Ιδιότητες Δοκιμίου Ασβεστολίθου ύστερα από μετρήσεις με τη βοήθεια χάρακα, ζυγαριάς και γνώσεων από το διαδίκτυο (<http://www.mineralszone.com>)

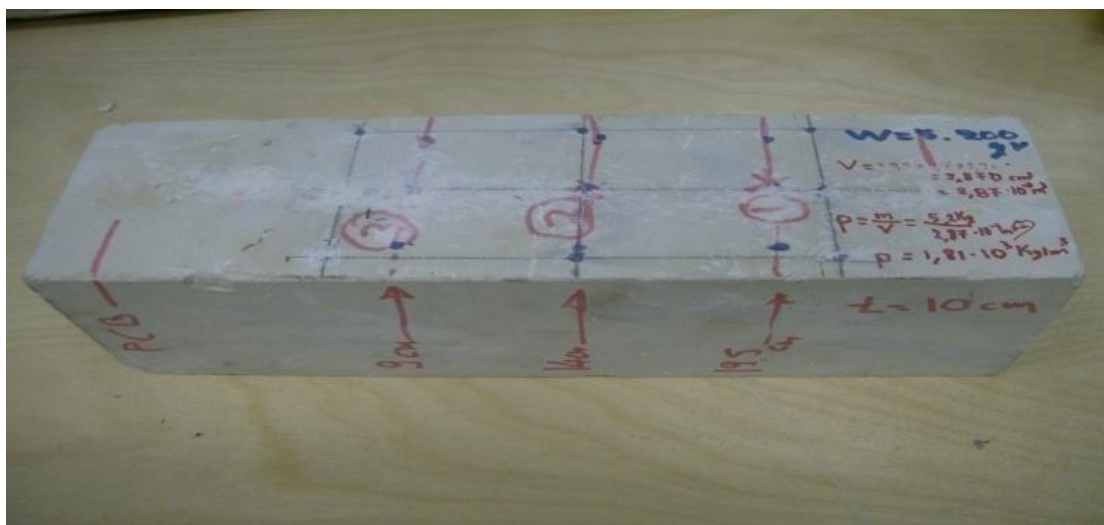
Διαστάσεις: μήκος * πλάτος * ύψος = 29,9 cm * 9,7 cm * 9,9 cm

Βάρος: $w = 5,2 \text{ Kg}$

Ειδικό βάρος: $\rho = 1,81 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$

Λόγος Poisson: $\nu = 0,26$

Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας: $E_d = 45 \text{ GPa}$



Εικόνα 4.3: Δοκίμιο Ασβεστολίθου στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής

4.2.4 Δοκίμιο Σκυροδέματος

Ιδιότητες Δοκιμίου Σκυροδέματος ύστερα από μετρήσεις με τη βοήθεια χάρακα, ζυγαριάς και γνώσεων από το διαδίκτυο: (<http://www.concretenetwork.com>)

Διαστάσεις: μήκος * πλάτος * ύψος = 75 cm * 15 cm * 15 cm

Βάρος: $w = 41 \text{ Kg}$

Ειδικό βάρος: $\rho = 1,42 * 10^3 \text{ Kg/m}^3$

Λόγος Poisson: $\nu = 0,21$

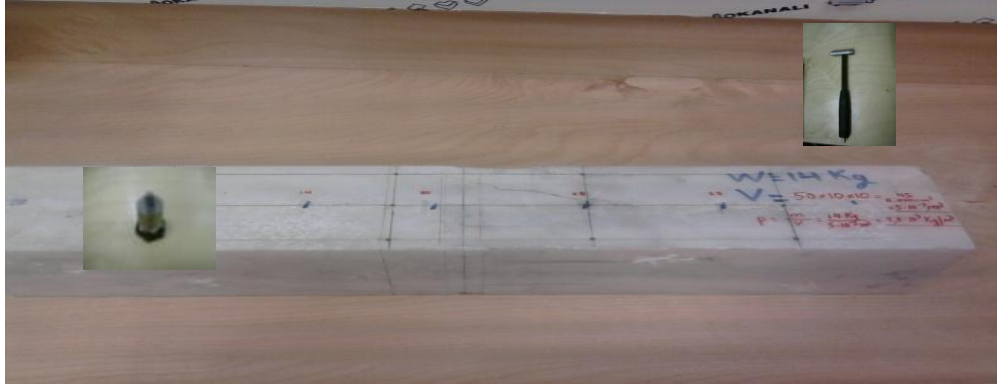
Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας: $E_d = 26 \text{ GPa}$



Εικόνα 4.4: Δοκίμιο Σκυροδέματος στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής

4.2.5 Επεξήγηση διαδικασίας

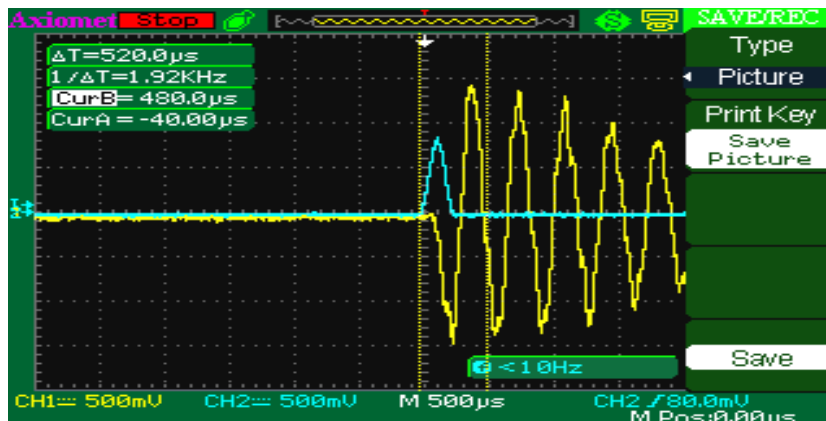
- 1) Εφαρμογή μηχανικής κρούσης σε όλο το μήκος του δοκιμίου από το σφυρί καθώς και παραγωγή σήματος



Εικόνα 4.5: Δοκίμιο Μαρμάρου Διονύσου

Γίνεται εφαρμογή μηχανικής κρούσης σε όλο το μήκος του δοκιμίου ανά ίσα διαστήματα στο κέντρο του δοκιμίου καθώς και στις άκρες του με το σφυρί μηχανικής κρούσης όπως φαίνεται στην εικόνα.

- 2) Καταγραφή κυματομορφής από τον παλμογράφο



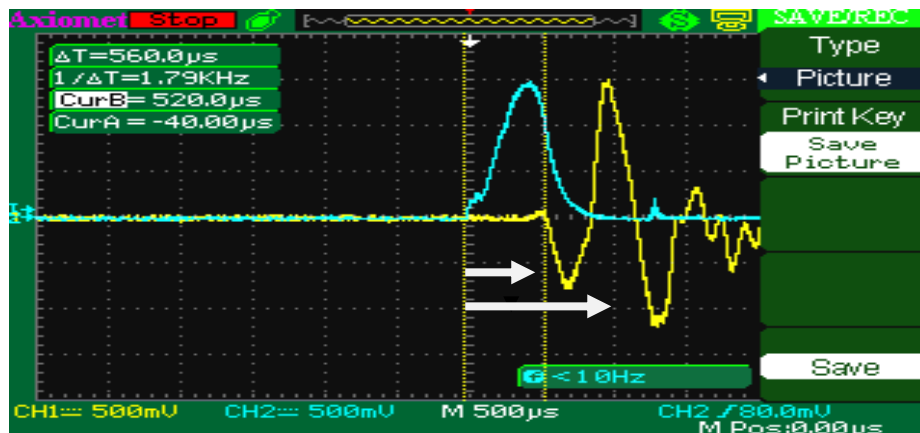
Εικόνα 4.6: Τυπικό παράδειγμα χρονοιστοριών καταγραφής μεταβολής τάσεων από τον παλμογράφο τόσο για το σφυράκι όσο και για τον αισθητήρα

Με την εφαρμογή της μηχανικής κρούσης σε διάφορα σημεία του δοκιμίου απεικονίζονται και καταγράφονται οι αντίστοιχες κυματομορφές από τον παλμογράφο.

3) Υπολογισμός $t_\delta(\mu s)$, $V_\delta(m/s)$, $t_R(\mu s)$, $V_R(m/s)$, $F(Hz)$, $T(m)$, ν , $E_d(GPa)$

➤ $t_\delta(\mu s)$ = χρόνος άφιξης διαμήκους κύματος

Υπολογίζεται από την εικόνα της κυματομορφής στον παλμογράφο όπου σαν χρόνος άφιξης του διαμήκους είναι η χρονική διαφορά, της μηχανικής κρούσης του σφυριού που καταγράφει ο παλμογράφος με το χρόνο άφιξης του μηχανικού κύματος το οποίο πέρασε από το υλικό και κατέγραψε ο αισθητήρας (όπως φαίνεται στην εικόνα) ο οποίος βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη και καθορισμένη απόσταση από το σημείο όπου το σφυρί εφάρμοσε μηχανική κρούση (όπως φαίνεται στην εικόνα).



Εικόνα 4.7: Τυπικό παράδειγμα χρονοιστοριών καταγραφής μεταβολής τάσεων από τον παλμογράφο τόσο για το σφυράκι όσο και για τον αισθητήρα

➤ $V_\delta(m/s)$ = ταχύτητα διαμήκους κύματος

Υπολογίζεται από το λόγο, της απόστασης του σημείου κρούσης του σφυριού από τον αισθητήρα, προς το χρόνο άφιξης του διαμήκους κύματος $t_\delta(\mu s)$

- **$t_R(\mu s)$ = χρόνος άφιξης επιφανειακού κύματος**

Υπολογίζεται από την εικόνα της κυματομορφής στον παλμογράφο όπου σαν χρόνος άφιξης του επιφανειακού είναι η χρονική διαφορά, της μηχανικής κρούσης του σφυριού που καταγράφει ο παλμογράφος, με το χρόνο άφιξης του επιφανειακού μηχανικού κύματος το οποίο κατέγραψε ο αισθητήρας (το πρώτο peak) ο οποίος βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη και καθορισμένη απόσταση από το σημείο όπου το σφυρί εφάρμοσε μηχανική κρούση (όπως φαίνεται στην εικόνα)

- **$V_R (m/s)$ = ταχύτητα επιφανειακού κύματος**

Υπολογίζεται από το λόγο, της απόστασης του σημείου κρούσης του σφυριού από τον αισθητήρα, προς το χρόνο άφιξης του επιφανειακού κύματος $t_R (\mu s)$

- **$F(Hz)$ = συχνότητα κυματομορφής**

Υπολογίζεται από την εικόνα της κυματομορφής και αφορά το αντίστροφο της χρονικής διαφοράς μεταξύ των 2 πρώτων κορυφών.

- **$T(m)$ = πάχος δοκιμίου (η τοιχοποιίας κατά περίπτωση)**

Υπολογίζεται από τον τύπο **$T(m) = V_\delta(m/s) / 2 * F(Hz)$** (4.1)

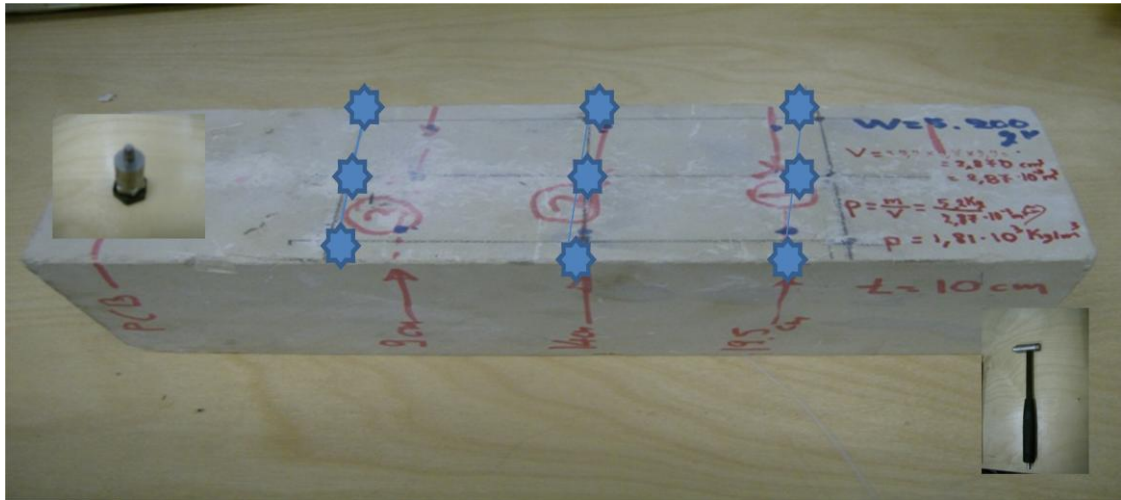
- **$\nu, E_d(GPa)$ = λόγος Poisson & Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας αντίστοιχα του εκάστοτε δοκιμίου (η τοιχοποιίας κατά περίπτωση)**

υπολογίζεται από το συνδυασμό των παρακάτω τύπων, ταυτόχρονα με τη βοήθεια των προγραμμάτων Excel και Matlab

$$V\delta^2 = Ed(1 - \nu)/[\rho(1 + \nu) * (1 - 2\nu)] \quad (4.2)$$

$$VR^2 = \frac{(0,87+1,12\nu)^2}{(1+\nu)^2} * \frac{Ed}{\rho} * 2(1 + \nu) \quad (4.3)$$

4.2.6 Αποτελέσματα μεθόδου στο δοκίμιο ασβεστόλιθου

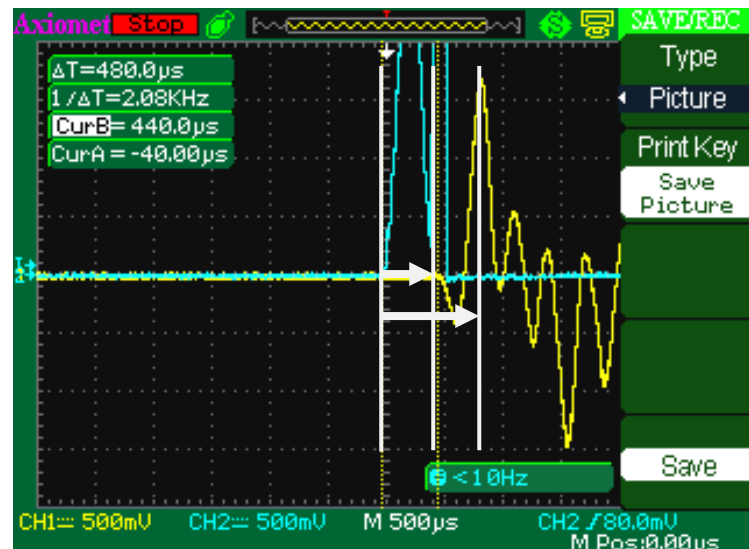


Εικόνα 4.8: Δοκίμιο Ασβεστόλιθου στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα για το δοκίμιο Ασβεστόλιθου

d(cm)	T(cm)	V	Ed(GPa)
7	10,1	0,22	44
7π	13,1	0,18	59
7κ	10,6	0,21	47
14	12,2	0,20	49
14π	15,9	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
14κ	13,8	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
21	13,4	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
21π	12,9	0,17	66
21κ	16,1	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ

Έχοντας τοποθετημένο τον αισθητήρα στο σημείο 0 του άξονα που δημιουργήθηκε στην επιφάνεια κατά μήκος του δοκιμίου, εφαρμόστηκε μηχανική κρούση σε διάφορα σημεία του δοκιμίου. Εφαρμόστηκε στα 7 cm, στα 14 cm και στα 21 cm στον κεντρικό άξονα του δοκιμίου καθώς και στις άκρες του δοκιμίου στα ίδια σημεία με πριν στα 7 cm, στα 14 cm και στα 21 cm, πάνω (π) και κάτω αντίστοιχα (κ) από τον κεντρικό άξονα, και προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

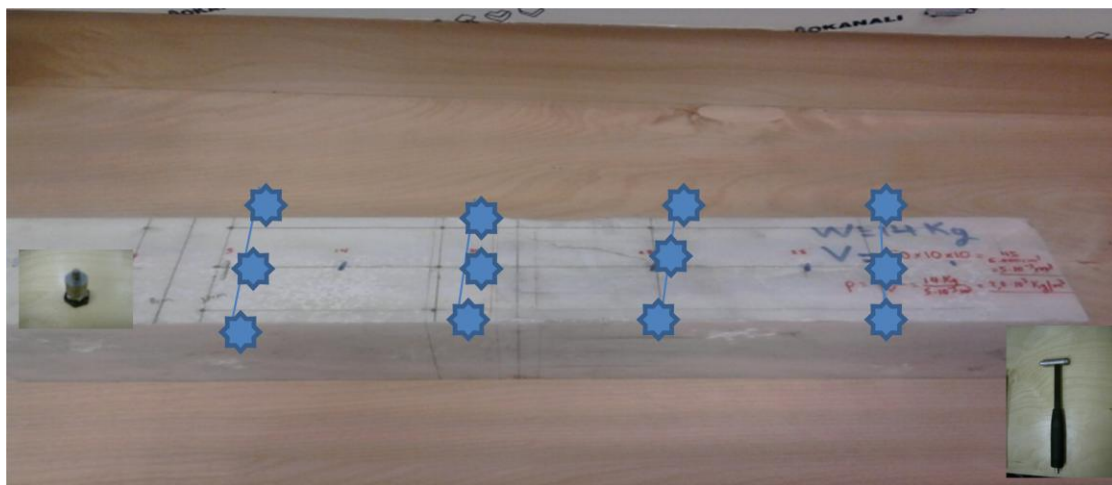


Εικόνα 4.9: Τυπικό παράδειγμα χρονοιστοριών καταγραφής μεταβολής τάσεων από τον παλμογράφο τόσο για το σφυράκι όσο και για τον αισθητήρα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα:

- όσο απομακρύνεται η μηχανική κρούση από τον αισθητήρα, τόσο τα αποτελέσματα αποκλίνουν από την πραγματικότητα,
- στα 7-14 cm εφαρμογής μηχανικής κρούσης η μέθοδος καταλήγει σε λογικά αποτελέσματα. Μετά τα 14 cm τα αποτελέσματα που προκύπτουν, αποκλίνουν σημαντικά από την πραγματικότητα.

4.2.7 Αποτελέσματα μεθόδου στο δοκίμιο μαρμάρου Διονύσου

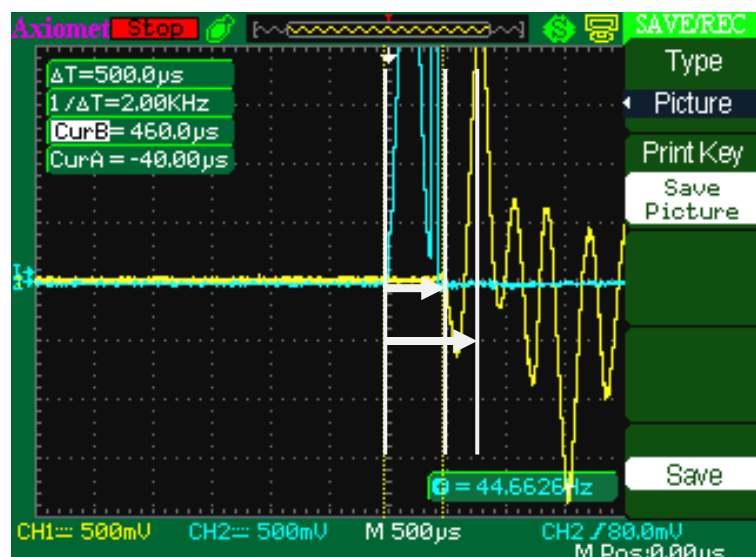


Εικόνα 4.10: Δοκίμιο Μαρμάρου Διονύσου στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής

Έχοντας τοποθετημένο τον αισθητήρα στο σημείο 0, του άξονα που δημιουργήθηκε στην επιφάνεια κατά μήκος του δοκιμίου, εφαρμόστηκε μηχανική κρούση σε διάφορα σημεία του δοκιμίου. Εφαρμόστηκε στα 10 cm, στα 20 cm, στα 30 cm και στα 40 cm στον κεντρικό άξονα του δοκιμίου καθώς και στις άκρες του δοκιμίου στα ίδια σημεία με πριν στα 10 cm, στα 20 cm, στα 30 cm και στα 40 cm, πάνω (π) και κάτω αντίστοιχα (κ) από τον κεντρικό άξονα, και προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα για το δοκίμιο Μαρμάρου Διονύσου

d(cm)	T(cm)	v	Ed(GPa)
10	10,3	0,25	42
10π	11,6	0,22	46
10κ	11,9	0,20	53
20	13,1	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
20π	14,2	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
20κ	14,8	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
30	15,5	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
30π	21	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
30κ	21	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
40	26,7	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
40π	28,5	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
40κ	29,5	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ



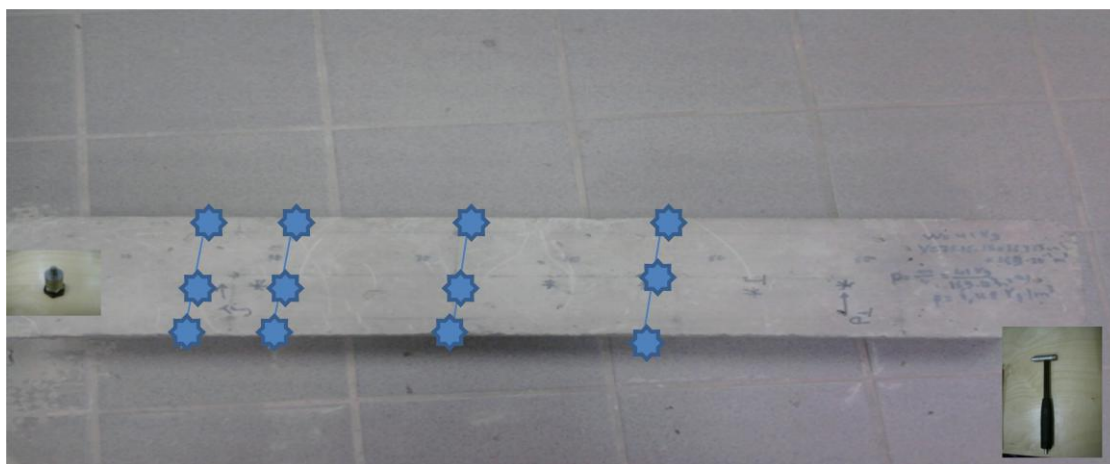
Εικόνα 4.11: Τυπικό παράδειγμα χρονοιστοριών καταγραφής μεταβολής τάσεων από τον παλμογράφο τόσο για το σφυράκι όσο και για τον αισθητήρα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν

- είναι ότι όσο απομακρύνεται η μηχανική κρούση από τον αισθητήρα, τόσο τα αποτελέσματα αποκλίνουν από την πραγματικότητα
- μέχρι τα 10 cm εφαρμογής μηχανικής κρούσης η μέθοδος δίνει ορθά αποτελέσματα. Επίσης παρατηρείται ότι η εφαρμογή μηχανικής κρούσης στο μέσο του δοκιμίου δίνει ορθότερα αποτελέσματα απ' ότι στις άκρες.

4.2.8 Αποτελέσματα μεθόδου στο δοκίμιο σκυροδέματος

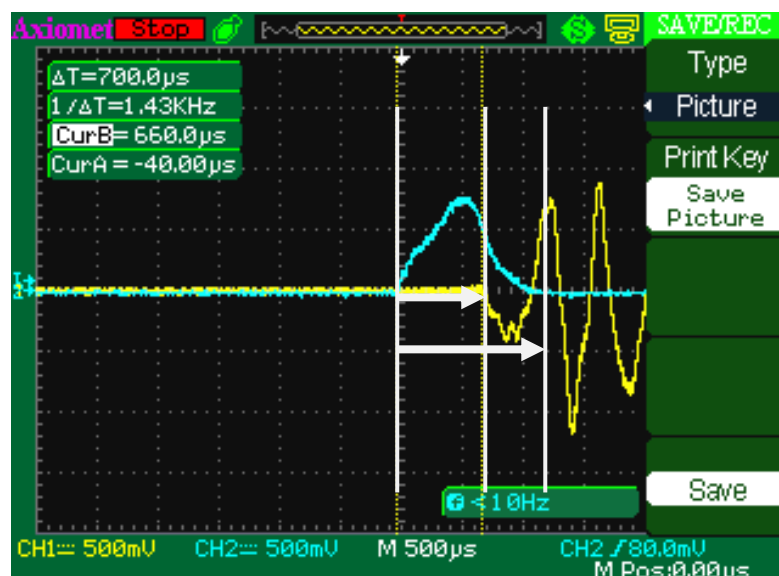
Έχοντας τοποθετημένο τον αισθητήρα στο σημείο 0, του άξονα που δημιουργήθηκε στην επιφάνεια κατά μήκος του δοκιμίου, εφαρμόστηκε μηχανική κρούση σε διάφορα σημεία του δοκιμίου. Εφαρμόστηκε στα 10 cm, στα 15 cm, στα 30 cm και στα 45 cm στον κεντρικό άξονα του δοκιμίου καθώς και στις άκρες του δοκιμίου στα ίδια σημεία με πριν στα 10 cm, στα 15 cm, στα 30 cm και στα 45 cm, πάνω (π) και κάτω αντίστοιχα (κ) από τον κεντρικό άξονα, και προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:



Εικόνα 4.12: Δοκίμιο Σκυροδέματος στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα για το δοκίμιο Σκυροδέματος

d(cm)	T(cm)	ν	Ed(GPa)
10	15,9	0,2	26
10π	16,2	0,19	26
10κ	16,1	0,19	26
15	16	0,18	27
15π	16,9	0,17	28
15κ	17,8	0,16	32
30	17,9	0,16	32
30π	2,02	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
30κ	20	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
45	19,1	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
45π	22	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ
45κ	22,5	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ



Εικόνα 4.13: Τυπικό παράδειγμα χρονοιστοριών καταγραφής μεταβολής τάσεων από τον παλμογράφο τόσο για το σφυράκι όσο και για τον αισθητήρα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν

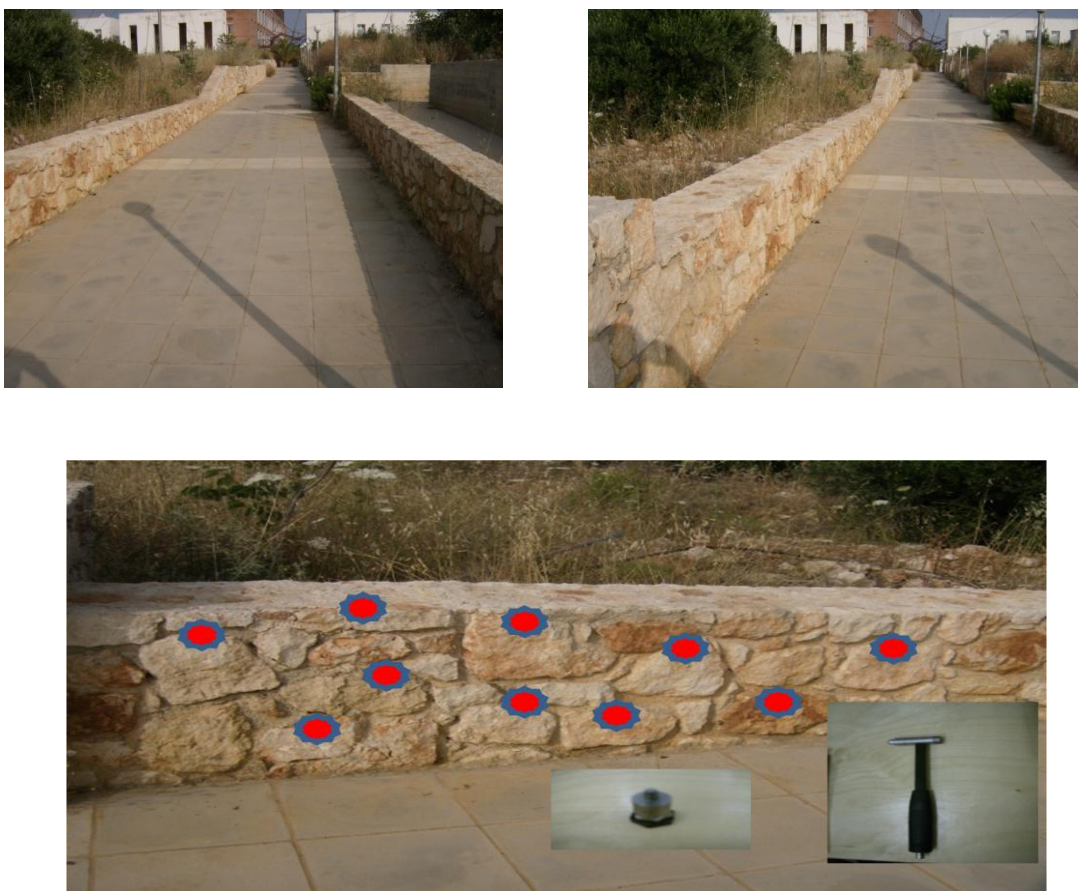
- είναι ότι όσο απομακρύνεται η μηχανική κρούση από τον αισθητήρα, τόσο τα αποτελέσματα αποκλίνουν από την πραγματικότητα,
- μέχρι τα 10 cm εφαρμογής μηχανικής κρούσης η μέθοδος καταλήγει σε λογικά αποτελέσματα. Από τα 10-15 εκατοστά δεν έχουμε μεγάλη απόκλιση της τάξεως του 10% ενώ από τα 15 εκατοστά εφαρμογής μηχανικής κρούσης τα αποτελέσματα είναι μη αξιόπιστα.

4.2.9 Συμπέρασμα εφαρμογής στα τρία εργαστηριακά δοκίμια (ασβεστόλιθου, μαρμάρου Διονύσου, σκυροδέματος)

Άρα όπως προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου στα εργαστηριακά δοκίμια η μηχανική κρούση πρέπει να εφαρμόζεται σε απόσταση μικρότερη των 10 cm από τον αισθητήρα για να δίνει λογικά και ακριβή αποτελέσματα.

4.3 Εφαρμογή σε μη φέρουσα λιθοδομή

Μετά την εφαρμογή στα εργαστηριακά δοκίμια και τα σημαντικά συμπεράσματα που εξήχθησαν, ακολουθεί εφαρμογή της μεθόδου τον Μάρτιο 2011, σε τοιχοποιία από πέτρα που συνδέει τις κτιριακές εγκαταστάσεις των τμημάτων Μηχανικών Περιβάλλοντος και Μηχανικών ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Χανιά.



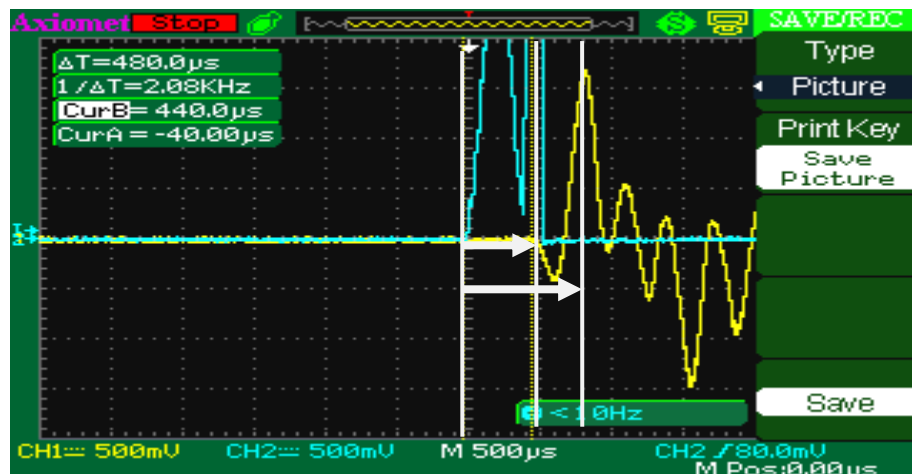
Εικόνα 4.14: Φωτογραφίες τοιχοποιίας μεταξύ των κτιριακών εγκαταστάσεων των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων και των Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης

Έχοντας τοποθετημένο τον αισθητήρα σε διάφορα σημεία της τοιχοποιίας, εφαρμόστηκε μηχανική κρούση σε διάφορα σημεία της τοιχοποιίας σε ακτίνα <10 cm από τον αισθητήρα κάθε φορά. Κάθε φορά που υπήρχε μηχανική κρούση, ο αισθητήρας και το σφυρί δε βρισκόταν απαραίτητα στην ίδια πέτρα της τοιχοποιίας

αλλά και σε γειτονική, με την προϋπόθεση να μην είχαν απόσταση μεταξύ τους μεγαλύτερη από 10 cm. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ύστερα από την ερμηνεία των κυματομορφών και από τους μαθηματικούς υπολογισμούς που χρησιμοποιήθηκαν και στα εργαστηριακά δοκίμια είναι τα εξής:

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα για τη λιθόχτιστη τοιχοποιία

d(cm)	T(m)	ν	Ed(GPa)
8	0,4347826	0,232	7,566533333
9	0,4535376	0,215	8,120519687
9,5	0,4378687	0,247	7,221200620
10	0,4273504	0,203	7,889989460
8,5	0,4517432	0,209	8,015576318
10	0,4528986	0,242	8,790409545
9	0,4310345	0,247	6,481077565
9,5	0,4349817	0,221	7,537022675
8,5	0,4267497	0,221	6,569877533
10	0,4434590	0,227	7,626765330
9	0,4290618	0,221	6,764530047
9	0,4487435	0,221	7,365537442
8	0,3979704	0,242	5,625862109



Εικόνα 4.15: Τυπικό παράδειγμα χρονοιστοριών καταγραφής μεταβολής τάσεων από τον παλμογράφο τόσο για το σφυράκι όσο και για τον αισθητήρα

Πάχος τοιχοποιίας ύστερα από μέτρηση με μέτρο → 43,5 cm

Λόγος Poisson & Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας → 0,22 & 7-8 GPa, αντίστοιχα.

Όπως προκύπτει από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα εργαστηριακά δοκίμια και στην τοιχοποιία από πέτρα που συνδέει τις κτιριακές εγκαταστάσεις των τμημάτων Μηχανικών Περιβάλλοντος και Μηχανικών ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Χανιά:

- Η μέθοδος δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα, άρα είναι εφικτή η εφαρμογή της μεθόδου σε τοιχοποιία κτιρίου (μεγάλης ηλικίας) από πέτρα, και συγκεκριμένα στο κτίριο της Γαλλικής σχολής.
- Αποτελεί μία μέθοδο όπου η εφαρμογή της για ερευνητικό πρόγραμμα έχει πολύ χαμηλό οικονομικό κόστος.
- Ο χρόνος που χρειάστηκε για την εφαρμογή της όσο και για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων αποτελεί ένα μεγάλο πλεονέκτημά της καθώς ήταν ελάχιστος.
- Τα υπολογιστικά προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν εύκολα στη χρήση και στην αναζήτηση
- Η μέθοδος είναι αξιόπιστη καθώς σε όλα τα υλικά που εφαρμόστηκε έδωσε παρόμοια συμπεράσματα

4.4 Εφαρμογή σε φέρουσα τοιχοποιία

Η τελική εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιήθηκε στη ΒΑ πλευρά της Γαλλικής σχολής τον Μάιο και τον Ιούνιο 2011, παραπλεύρως κλιμακοστασίου στο κτίριο όπου στεγάζεται η Αρχιτεκτονική σχολή του Πολυτεχνείου Κρήτης.



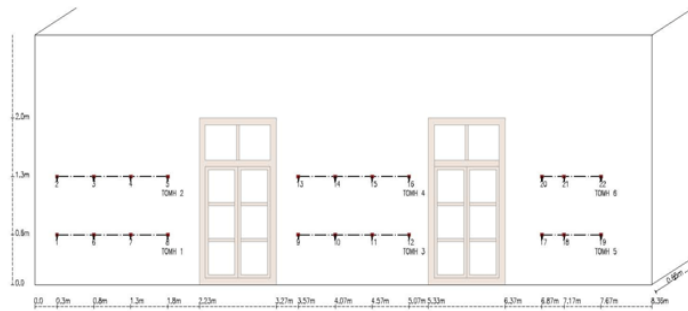
Εικόνα 4.16: Φωτογραφία ΒΑ τοιχοποιίας της κτιριακής εγκατάστασης της Αρχιτεκτονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης (Γαλλική)

Για διασταύρωση πληροφοριών και για καλύτερη και αναλυτικότερη ανάλυση και μελέτη της τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκαν 2 πειραματικές τεχνικές:

- Πειραματική τεχνική Impact Echo
- Πειραματική τεχνική της Τομογραφίας

4.4.1 Εφαρμογή τεχνικής Impact Echo

Εφαρμόστηκε η μέθοδος Impact Echo, με σκοπό να μελετηθεί η τοιχοποιία όσον αφορά την κατάσταση της, ώστε να αξιολογηθεί αν υπάρχουν στο εσωτερικό της ατέλειες, κενά, ρωγμές ή αποκολλήσεις.



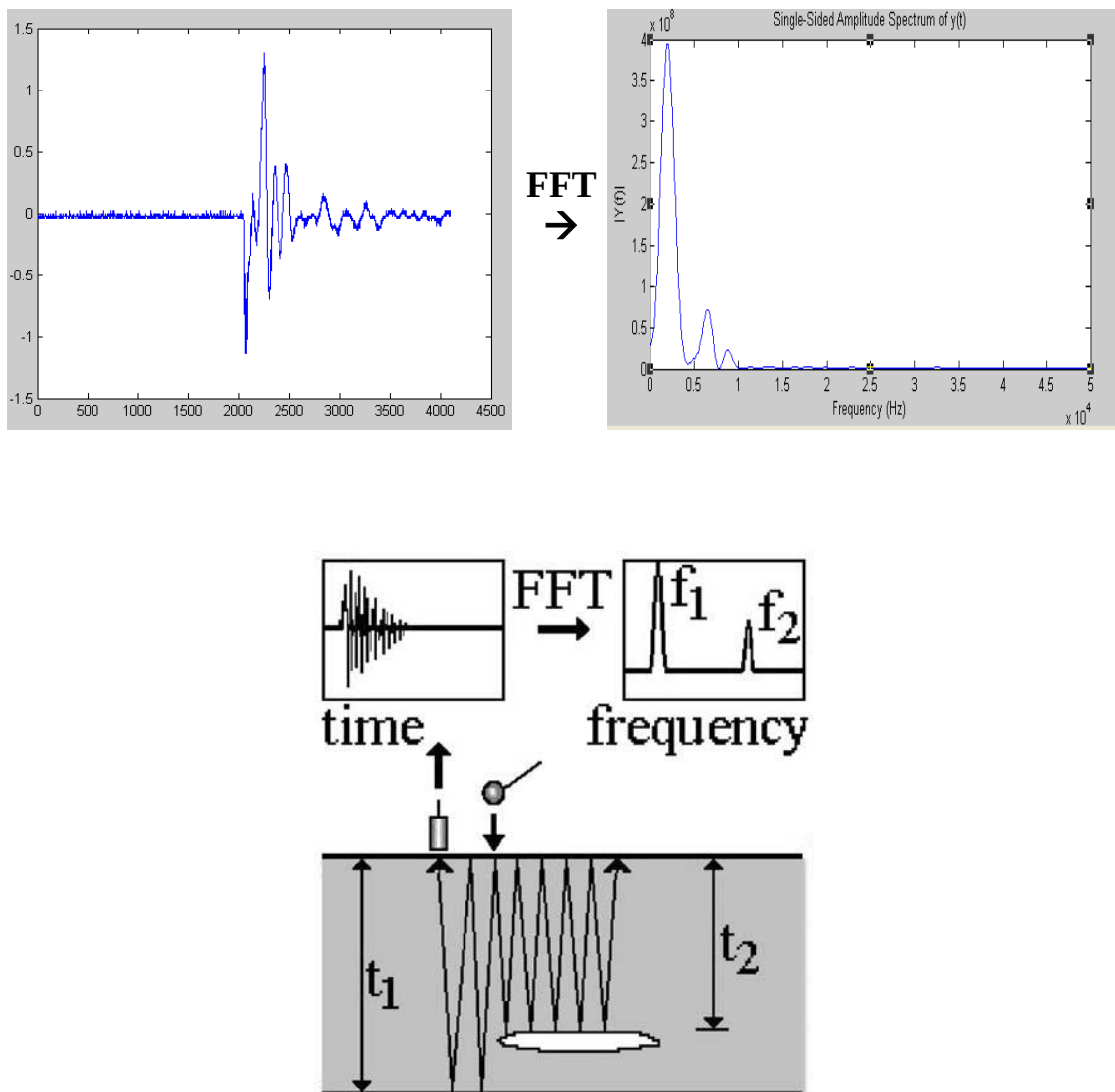
Εικόνα 4.17: Σχέδιο της ΒΑ τοιχοποιίας της κτιριακής εγκατάστασης της Αρχιτεκτονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης (Γαλλική)

Βήματα πειραματικής τεχνικής Impact Echo

- 1) Χωρίστηκε η τοιχοποιία σε κάναβο.
- 2) Σχεδιάστηκαν 6 τομές στις οποίες σημειώθηκαν σημεία, πάνω στα οποία τοποθετήθηκε ο αισθητήρας και εφαρμόστηκε μηχανική κρούση με το σφυρί γύρω από τα σημεία αυτά, σε ακτίνα <10cm από τον αισθητήρα, για την παραγωγή σήματος.
- 3) Καταγραφή κυματομορφής από τον παλμογράφο.
- 4) Υπολογισμός t_p , T , F από την κυματομορφή του παλμογράφου με τη βοήθεια των τύπων που έχουν ήδη αναφερθεί.
- 5) Μεταφορά των αρχείων .text καθώς και των εικόνων του παλμογράφου με USB στο PC για περαιτέρω επεξεργασία με το λογισμικό πρόγραμμα Matlab.
- 6) Μεταφέρθηκαν τα δεδομένα στη Matlab και σχεδιάστηκε εκ νέου η χρονιστορία της κυματομορφής.

- 7) Με τη βοήθεια της MATLAB και με το μετασχηματισμό Fourier περάσαμε από το πεδίο του χρόνου (χρονοιστορία) στο πεδίο των συχνοτήτων (φάσμα απόκρισης)
- 8) Ύστερα δημιουργήθηκε μέσω του Toolbox της Matlab Curve Surface Fitting η χρωματική ανάλυση κάθε τομής σε δύο, καθώς και σε τρεις διαστάσεις.
- 9) Εξαγωγή συμπερασμάτων

Στην Εικόνα 4.18 παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα μετασχηματισμού Fourier.



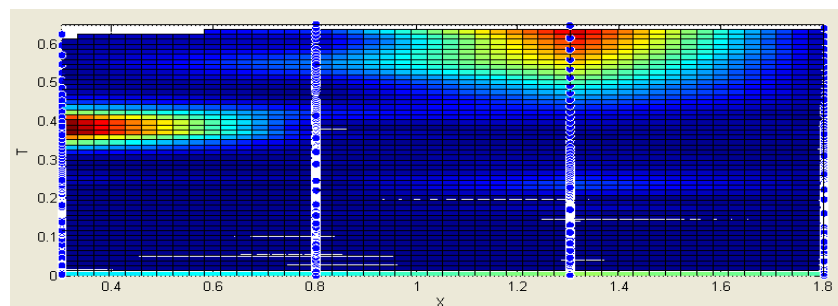
Εικόνα 4.18: Παράδειγμα Μετασχηματισμού Fourier (www.Impact-echo.com)

4.4.2 Αποτελέσματα της τεχνικής Impact Echo

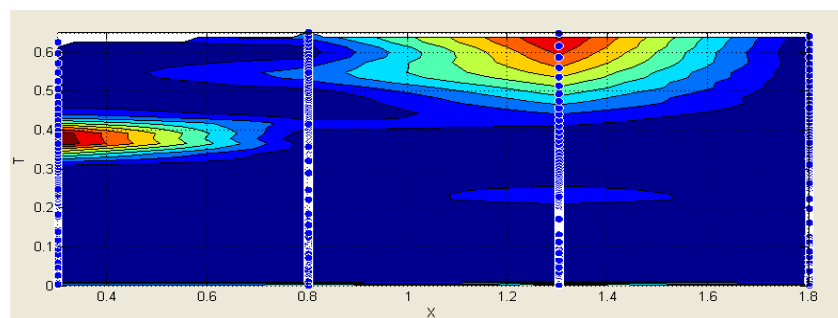
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τεχνικής **Impact Echo**, όπως αυτή εφαρμόστηκε σε έξι τομές στη ΒΑ τοιχοποιία της κτιριακής εγκατάστασης της Αρχιτεκτονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης στη Γαλλική σχολή.

4.4.2.1 Αποτελέσματα 1^{ης} Τομής

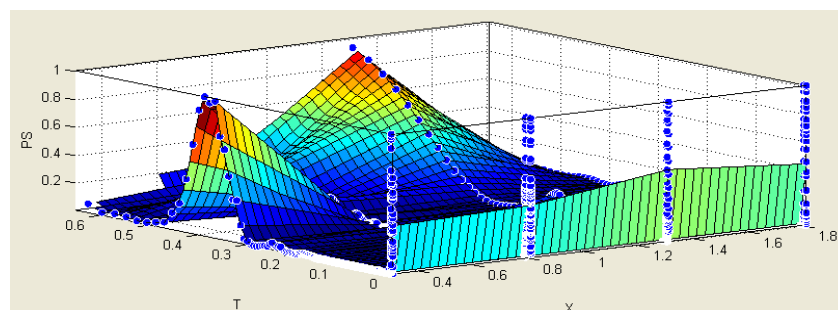
Στην εικόνα 4.19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής τεχνικής Impact Echo από την εφαρμογή της, στη θέση της 1ης τομής. Είναι προφανές ότι οι χρωματικές αλλαγές που παρατηρούνται στη χρωματική ανάλυση της τομής προκύπτουν λόγω της εξωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας. Υπάρχει μία μικρή χρωματική διαφορά στα (1.3 , 0.2) που οφείλεται πιθανόν σε κάποιο κενό, ρωγμή, ατέλεια ή αποκόλληση της εσωτερικής δομής της τοιχοποιίας.



(α)



(β)

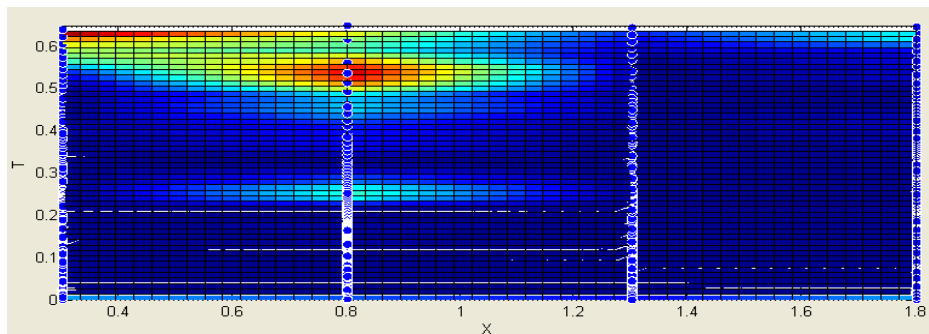


(γ)

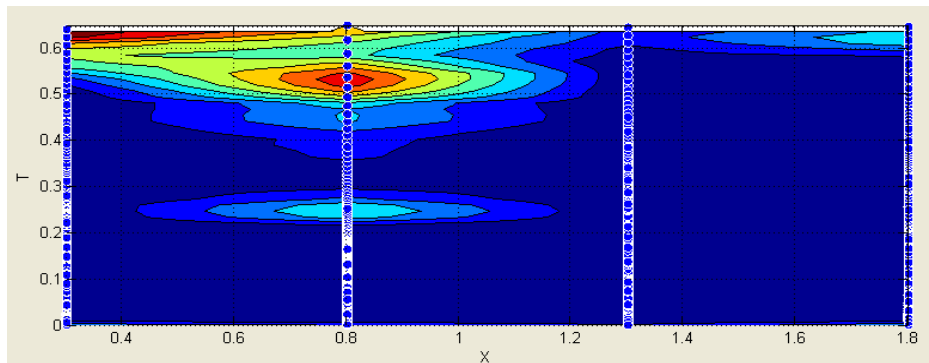
Εικόνα 4.19: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης για την τεχνική Impact Echo (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς (γ) 3D pixels

4.4.2.2 Αποτελέσματα 2^{ης} Τομής

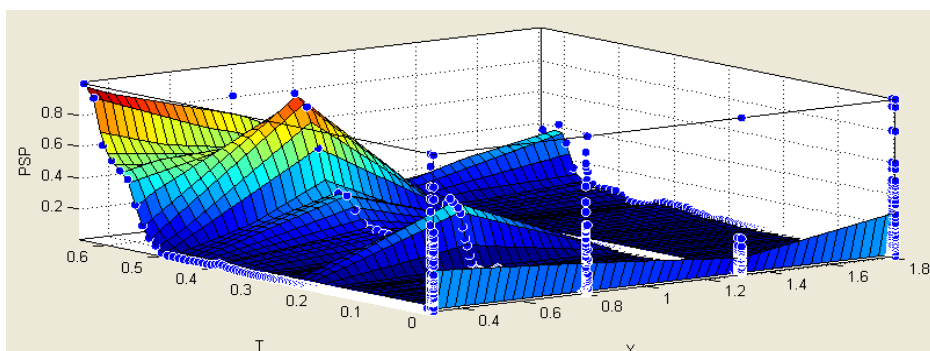
Στην εικόνα 4.20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής τεχνικής Impact Echo από την εφαρμογή της στη θέση της 2ης τομής. Όπως φαίνεται οι χρωματικές αλλαγές που παρατηρούνται στη χρωματική ανάλυση της τομής προκύπτουν λόγω της ανάκλασης στην εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας. Υπάρχει μία μικρή χρωματική διαφορά στα (0.8 , 0.25) που οφείλεται πιθανόν σε κάποιο κενό, ρωγμή, ατέλεια ή αποκόλληση της εσωτερικής δομής της τοιχοποιίας.



(α)



(β)

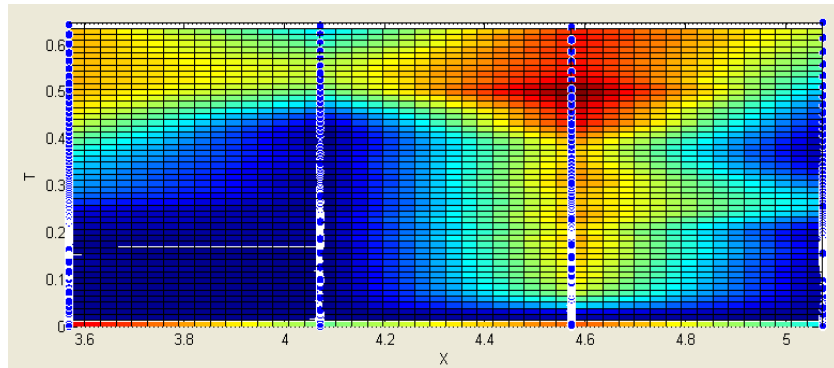


(γ)

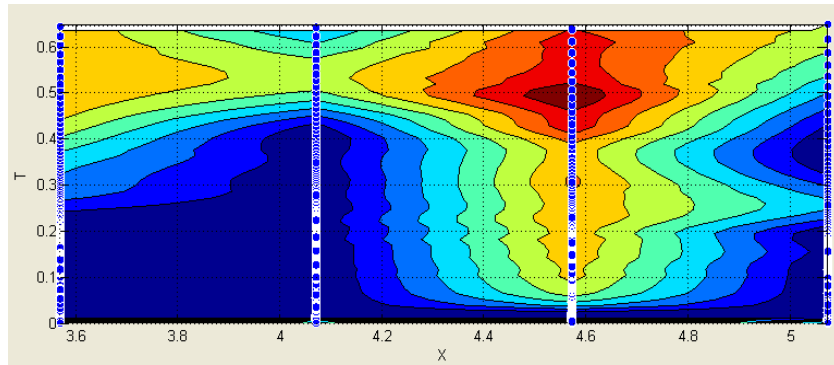
Εικόνα 4.20: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης για την τεχνική Impact Echo (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς (γ) 3D pixels

4.4.2.3 Αποτελέσματα 3^{ης} Τομής

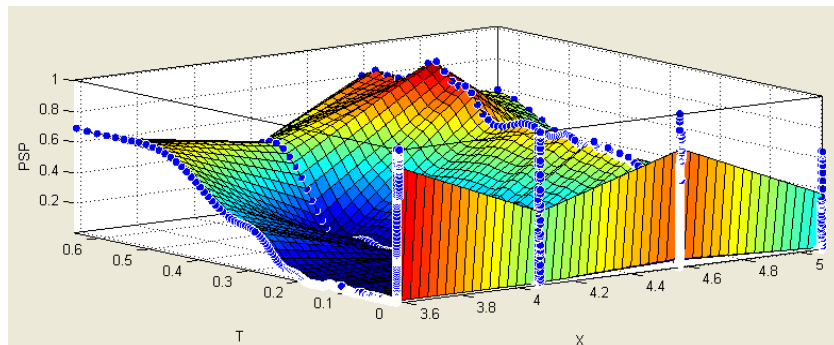
Στην εικόνα 4.21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής τεχνικής Impact Echo από την εφαρμογή της, στη θέση της 3ης τομής. Όπως φαίνεται οι χρωματικές αλλαγές που παρατηρούνται στη χρωματική ανάλυση της τομής προκύπτουν λόγω της ανάκλασης στην εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας. Υπάρχει μία μικρή χρωματική διαφορά στα (4.6 , 0.1-0.3) που οφείλεται πιθανόν σε κάποιο κενό, ρωγμή, ατέλεια ή αποκόλληση της εσωτερικής δομής της τοιχοποιίας.



(α)



(β)

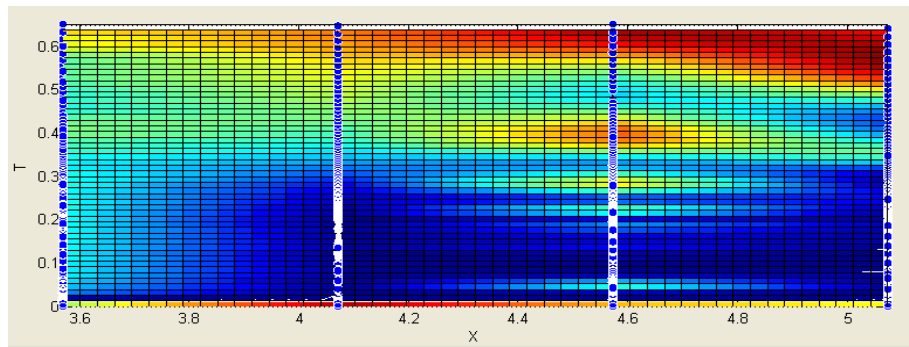


(γ)

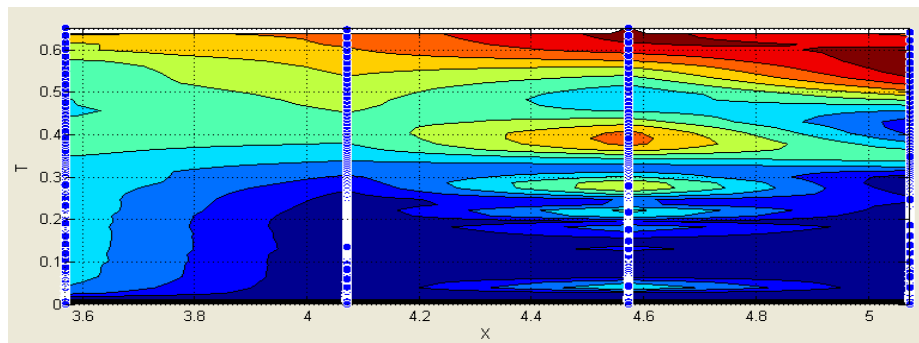
Εικόνα 4.21: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης για την τεχνική Impact Echo (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς (γ) 3D pixels

4.4.2.4 Αποτελέσματα 4^{ης} Τομής

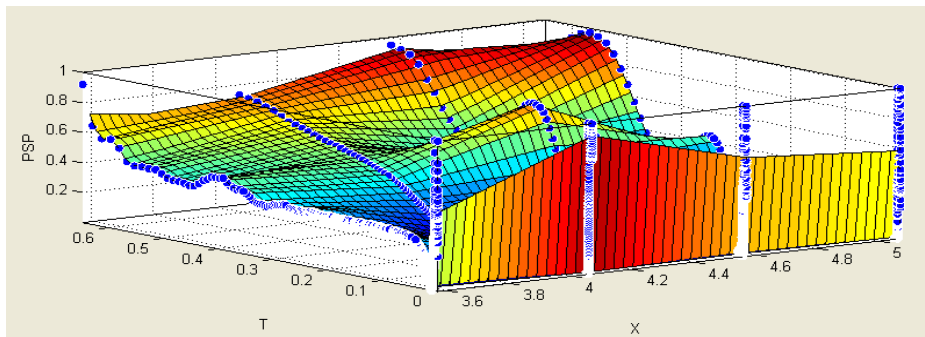
Στην εικόνα 4.22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής τεχνικής Impact Echo από την εφαρμογή της, στη θέση της 4ης τομής. Όπως φαίνεται οι χρωματικές αλλαγές που παρατηρούνται στη χρωματική ανάλυση της τομής προκύπτουν λόγω της ανάκλασης στην εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας. Υπάρχει μία μικρή χρωματική διαφορά στα (4.6 , 0.2-0.45) που οφείλεται πιθανόν σε κάποιο κενό, ρωγμή, ατέλεια ή αποκόλληση της εσωτερικής δομής της τοιχοποιίας.



(α)



(β)

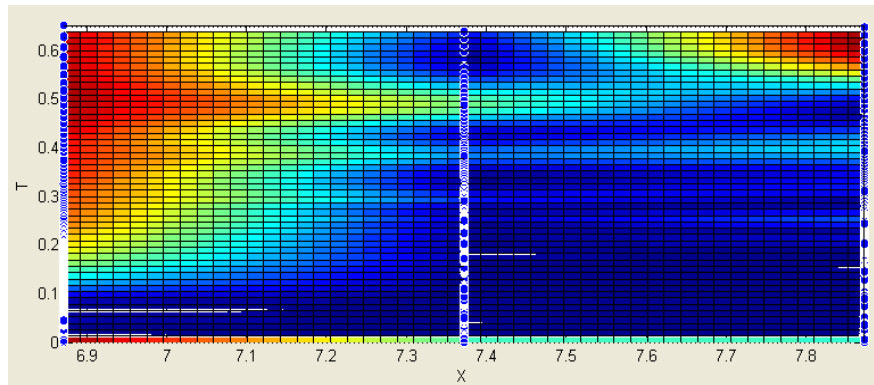


(γ)

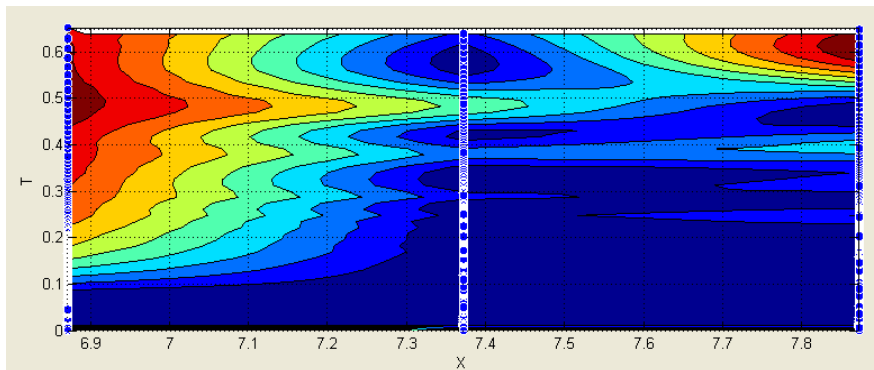
Εικόνα 4.22: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης για την τεχνική Impact Echo (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς (γ) 3D pixels

4.4.2.5 Αποτελέσματα 5^{ης} Τομής

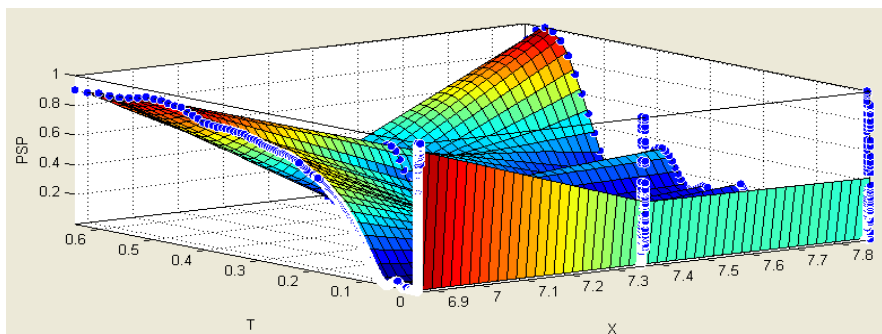
Στην εικόνα 4.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής τεχνικής Impact Echo από την εφαρμογή της, στη θέση της 5ης τομής. Όπως φαίνεται οι χρωματικές αλλαγές που παρατηρούνται στη χρωματική ανάλυση της τομής προκύπτουν λόγω της ανάκλασης στην εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας.



(α)



(β)

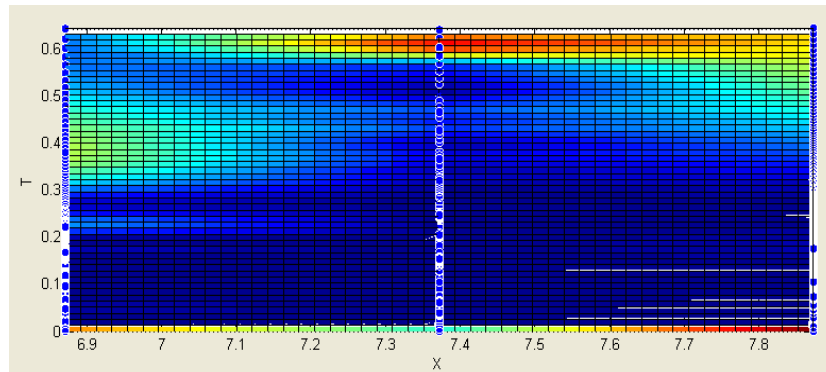


(γ)

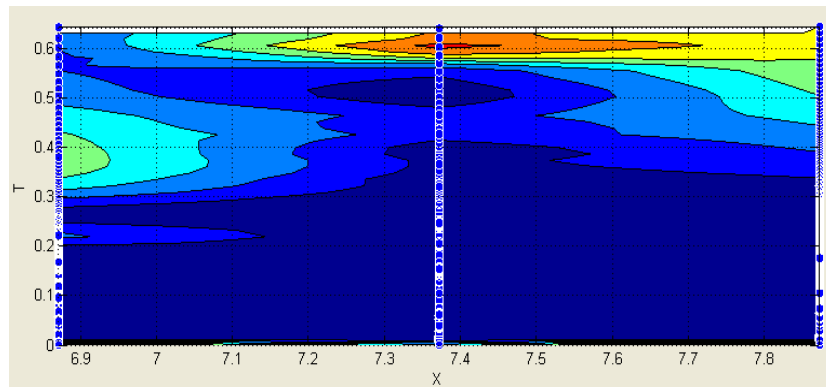
Εικόνα 4.23: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης για την τεχνική Impact Echo (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς (γ) 3D pixels

4.4.2.6 Αποτελέσματα 6^{ης} Τομής

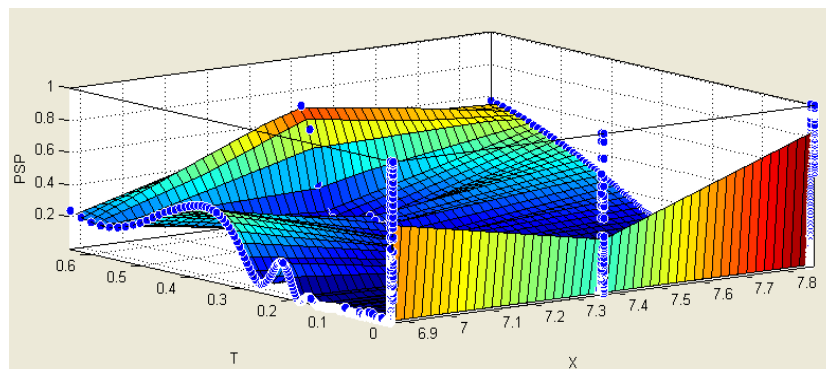
Στην εικόνα 4.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής τεχνικής Impact Echo από την εφαρμογή της, στη θέση της 6ης τομής. Όπως φαίνεται οι χρωματικές αλλαγές που παρατηρούνται στη χρωματική ανάλυση της τομής προκύπτουν λόγω της ανάκλασης στην εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας.



(α)



(β)



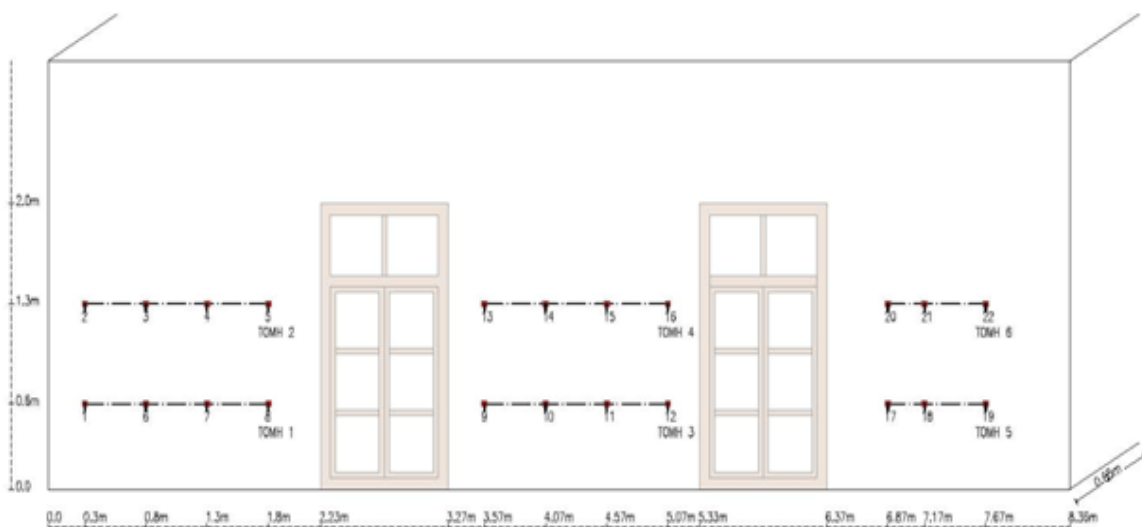
(γ)

Εικόνα 4.24: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης για την τεχνική Impact Echo (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς (γ) 3D pixels

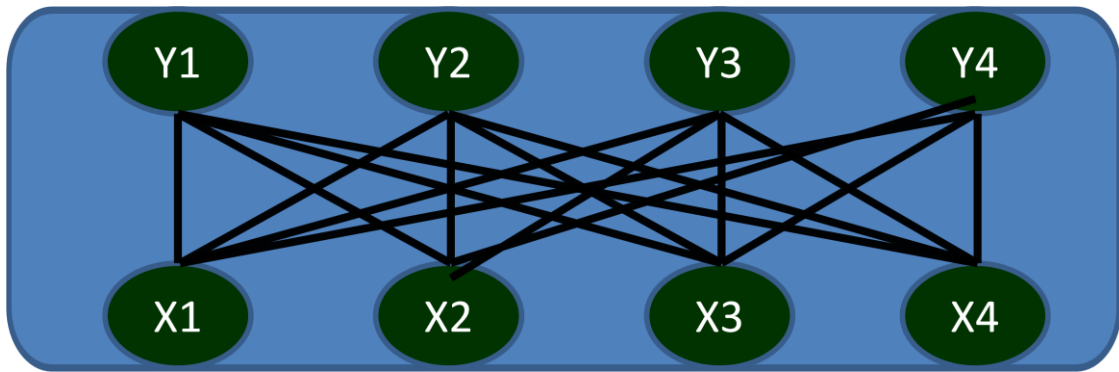
4.4.3 Εφαρμογή τεχνικής Ακουστικής Τομογραφίας

Με τη χρησιμοποίηση της τομογραφίας, ένας μηχανικός μπορεί να έχει άποψη για την εσωτερική δομή μίας κατασκευής όσον αφορά κάποια ατέλεια, κενά ή ρωγμές χωρίς να της δημιουργήσει κάποια βλάβη ή να την καταστρέψει. Στηρίζεται στην ακουστική τομογραφία όπου τα ακουστικά κύματα που παράγονται από τη σεισμική πηγή (σφυρί κρούσης) διασχίζουν το επιφανειακό κάλυμμα και διαθλώνται στις διεπιφάνειες. Κατά την διαδρομή τους στο εσωτερικό της τοιχοποιίας διαθλώνται και αναδύονται στην επιφάνεια όπου καταγράφονται από ειδικούς αισθητήρες. Η αρχή της μεθόδου αυτής βασίζεται στον πειραματικό προσδιορισμό των χρόνων διαδρομής των διαμήκων κυμάτων για τον καθορισμό των ταχυτήτων με τη βοήθεια του προγράμματος MIGRATOM. (M.J.Jackson and D.R. Tweeton). Γι'αυτό το πρώτο βήμα στην επεξεργασία δεδομένων είναι να υπολογιστούν οι χρόνοι άφιξης των διαμήκων κυμάτων. Παρατηρείται ότι ο χρόνος άφιξης των διαμήκων είναι σχετικά ανάλογος της απόστασης. Από μαθηματική άποψη κάθε χρόνος t αντιπροσωπεύει ένα ολοκλήρωμα αντίστροφο της ταχύτητας κατά μήκος της αντίστοιχης πορείας από τον πομπό στο δέκτη.

$$t = \int_S^R \frac{1}{v} * dl = \int_S^R p * dl \quad (4.4)$$



Εικόνα 4.25: Αρχιτεκτονικό σχέδιο τοιχοποιίας BA τοιχοποιίας Γαλλικής σχολής



Εικόνα 4.26 Κάτοψη πρώτης τομής

- Έστω ότι η κάτοψη της πρώτης τομής που φαίνεται παραπάνω είναι χαρακτηριστική και ενδεικτική και των υπόλοιπων τομών.
- Τα σημεία $X1, X2, X3$ και $X4$ είναι τα σημεία όπου τοποθετήθηκε ο αισθητήρας καταγραφής του ακουστικού κύματος
- Τα σημεία $Y1, Y2, Y3$ και $Y4$ είναι τα σημεία όπου εφαρμόστηκε με το σφυρί μηχανική κρούση

Όταν ο αισθητήρας βρισκόταν στο σημείο $X1$ εφαρμόστηκε μηχανική κρούση στο $Y1$ και προέκυψε μια κυματομορφή όπου έγιναν υπολογισμοί και προέκυπτε ένας χρόνος άφιξης διαμήκους κύματος t_{d11} .

Τα βήματα που ακολούθησαν ήταν τα εξής:

Βήματα 2^{ης} πειραματικής τεχνικής

- 1) Εφαρμογή μηχανικής κρούσης στα σημεία του κανάβου της τοιχοποιίας με το σφυρί για την παραγωγή σήματος
- 2) Καταγραφή κυματομορφής από τον παλμογράφο
- 3) Υπολογισμός t_p (χρόνου άφιξης διαμήκους κύματος) από την κυματομορφή του παλμογράφου

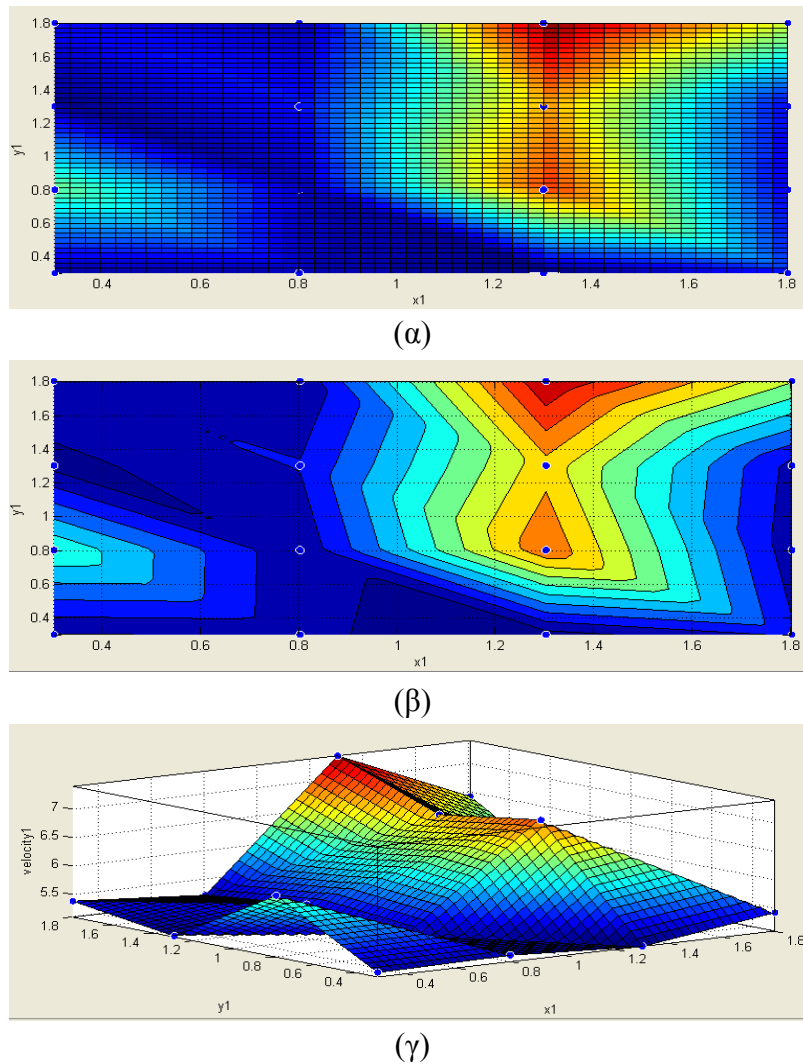
- 4) Κάθε ζευγάρι πομπού δέκτη δίνει μία τιμή tp . Καταγραφή αυτής της τιμής και δημιουργία ενός αρχείου με την ονομασία $X_Y.txt$ το οποίο περιλαμβάνει όλα τα ζευγάρια πομπού δέκτη με τις αντίστοιχες tp τιμές τους
- 5) Μεταφορά των αρχείων $.text$ τα οποία περιέχουν το χρόνο και τις αντίστοιχες τάσεις του σφυριού και του accelerometer καθώς και των εικόνων του παλμογράφου με USB στο PC.
- 6) Εισαγωγή του $X_Y.txt$ στο λογισμικό πρόγραμμα MIGRATOM και υπολογισμός πίνακα με τιμές velocity.
- 7) Εισαγωγή του νέου πίνακα velocity στη Matlab και με τη βοήθεια των συντεταγμένων των ζευγαριών πομπού δέκτη, δημιουργία χρωματικής ανάλυσης για κάθε μία από τις έξι τομές με τη βοήθεια του Toolbox της Matlab Curve Surface Fitting.
- 8) Εξαγωγή συμπερασμάτων

4.4.4 Αποτελέσματα της τεχνικής Ακουστικής Τομογραφίας

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τεχνικής Ακουστικής Τομογραφίας, όπως αυτή εφαρμόστηκε σε έξι τομές στη ΒΑ τοιχοποιία της κτιριακής εγκατάστασης της Αρχιτεκτονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης στη Γαλλική σχολή.

4.4.4.1 Αποτελέσματα 1^{ης} Τομής

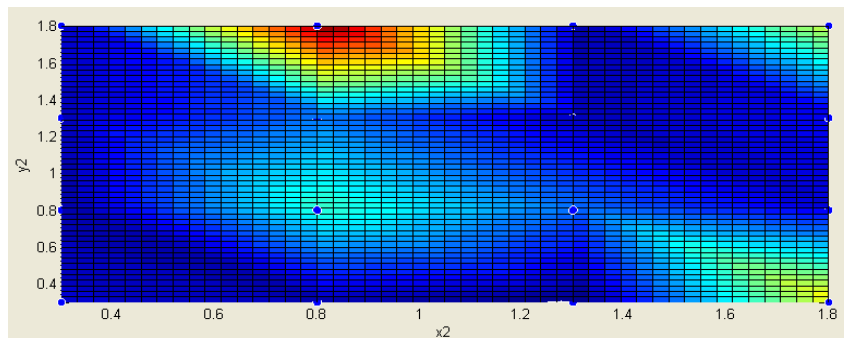
Στην εικόνα 4.27 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής της τεχνικής Ακουστικής Τομογραφίας από την εφαρμογή της, στη θέση της 1ης τομής. Είναι προφανές ότι οι χρωματικές αλλαγές που παρατηρούνται στη χρωματική ανάλυση της τομής, προκύπτουν λόγω της εξωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας. Υπάρχει μία σημαντική χρωματική διαφορά στο 1.3 που οφείλεται πιθανόν σε κάποιο κενό, ρωγμή, ατέλεια ή αποκόλληση της εσωτερικής δομής της τοιχοποιίας.



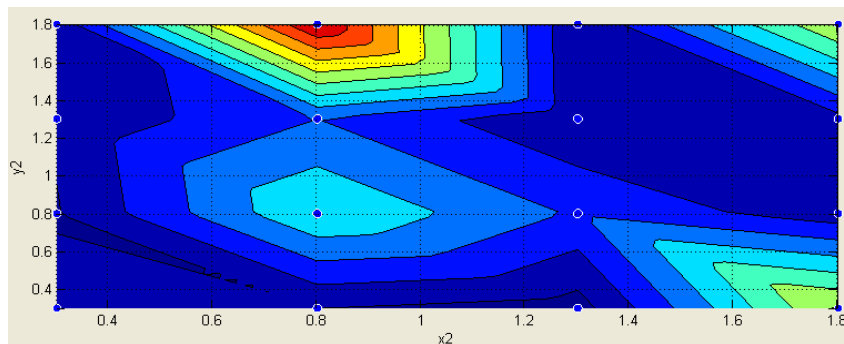
Εικόνα 4.27: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης για την τεχνική Ακουστικής Τομογραφίας (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς (γ) 3D pixels

4.4.4.2 Αποτελέσματα 2^{ης} Τομής

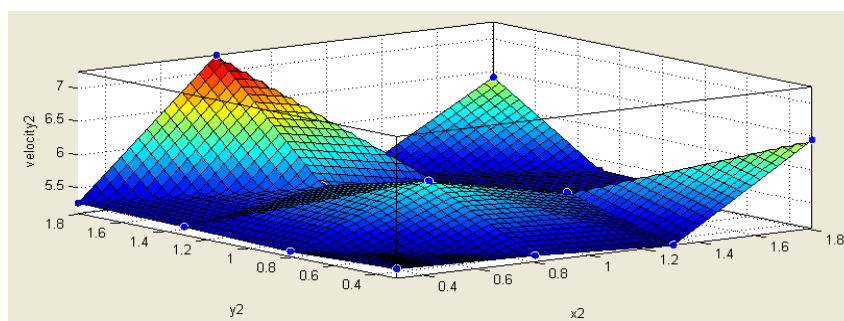
Στην εικόνα 4.28 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής **της τεχνικής Ακουστικής Τομογραφίας** από την εφαρμογή της, στη θέση της 2ης τομής. Παρακάτω φαίνεται ότι οι χρωματικές αλλαγές που παρατηρούνται στη χρωματική ανάλυση της τομής, προκύπτουν λόγω της εξωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας. Υπάρχει μία μικρή χρωματική διαφορά στο 0.8 που οφείλεται πιθανόν σε κάποιο κενό, ρωγμή, ατέλεια ή αποκόλληση της εσωτερικής δομής της τοιχοποιίας.



(α)



(β)

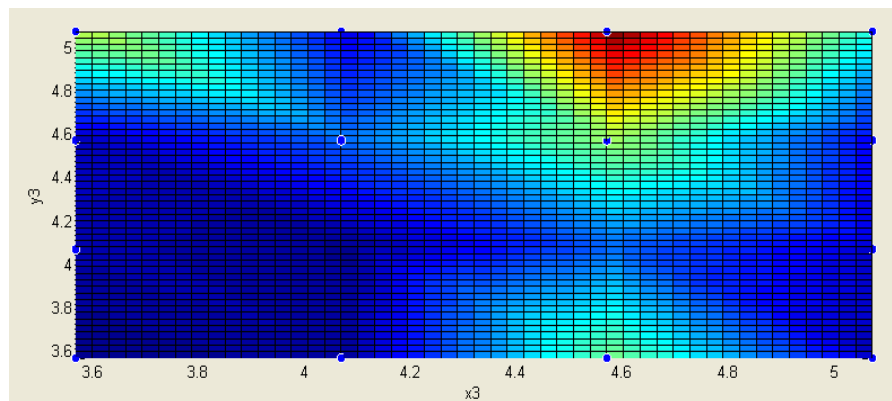


(γ)

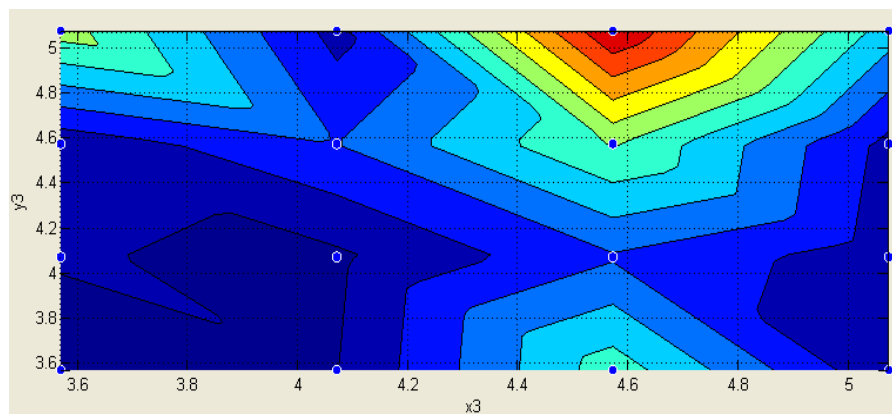
Εικόνα 4.28: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης για την τεχνική Ακουστικής Τομογραφίας (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς (γ) 3D pixels

4.4.4.3 Αποτελέσματα 3^{ης} Τομής

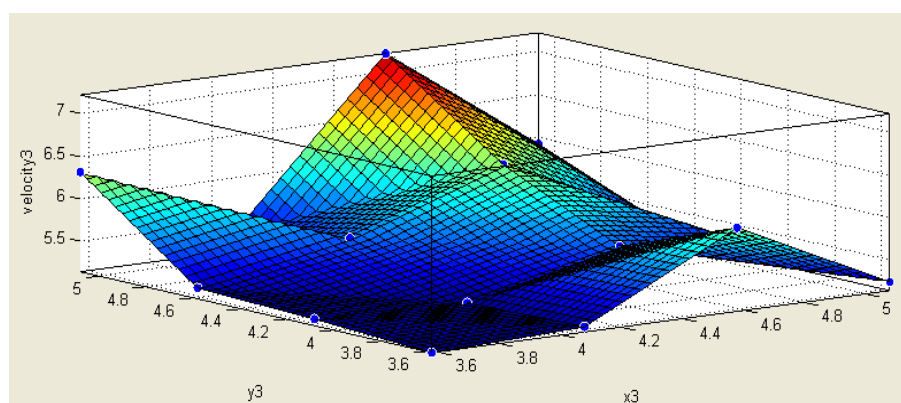
Στην εικόνα 4.29 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής της τεχνικής **Ακουστικής Τομογραφίας** από την εφαρμογή της, στη θέση της 3ης τομής. Παρακάτω φαίνεται ότι οι χρωματικές αλλαγές που παρατηρούνται στη χρωματική ανάλυση της τομής, προκύπτουν λόγω της εξωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας.



(α)



(β)

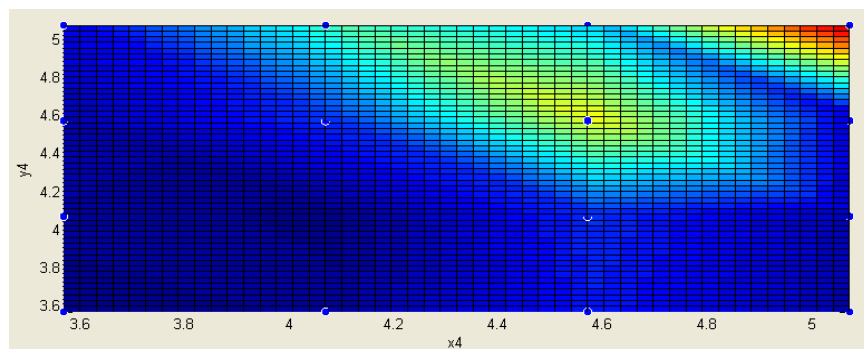


(γ)

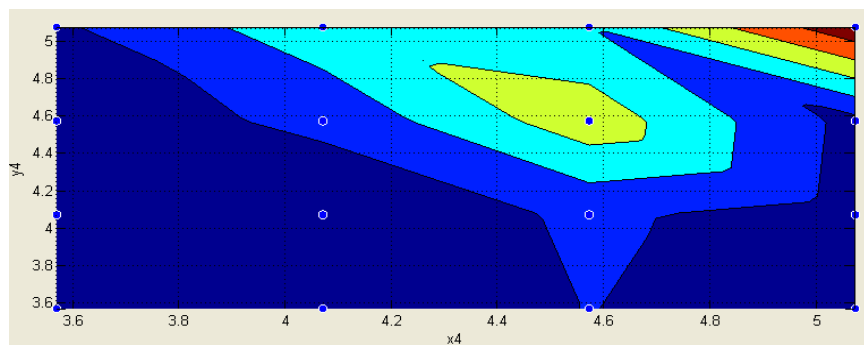
Εικόνα 4.29: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης για την τεχνική Ακουστικής Τομογραφίας (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς (γ) 3D pixels

4.4.4.4 Αποτελέσματα 4^{ης} Τομής

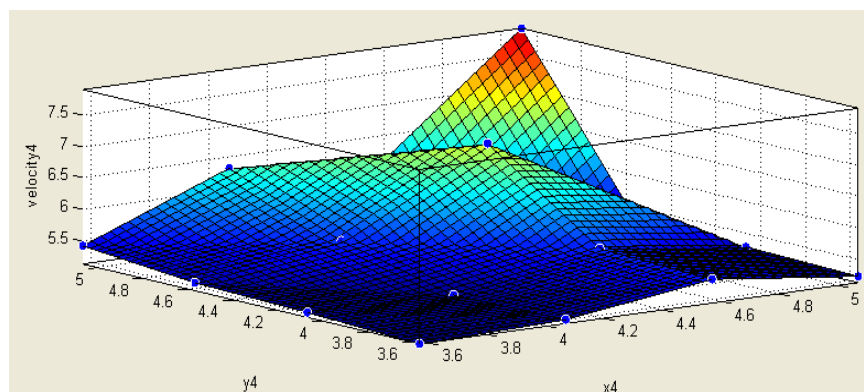
Στην εικόνα 4.30 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής της **τεχνικής Ακουστικής Τομογραφίας** από την εφαρμογή της, στη θέση της 4ης τομής. Παρακάτω φαίνεται ότι οι χρωματικές αλλαγές που παρατηρούνται στη χρωματική ανάλυση της τομής, προκύπτουν λόγω της εξωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας. Υπάρχει μία μικρή χρωματική διαφορά στο 4.6 που οφείλεται πιθανόν σε κάποιο κενό, ρωγμή, ατέλεια ή αποκόλληση της εσωτερικής δομής της τοιχοποιίας.



(α)



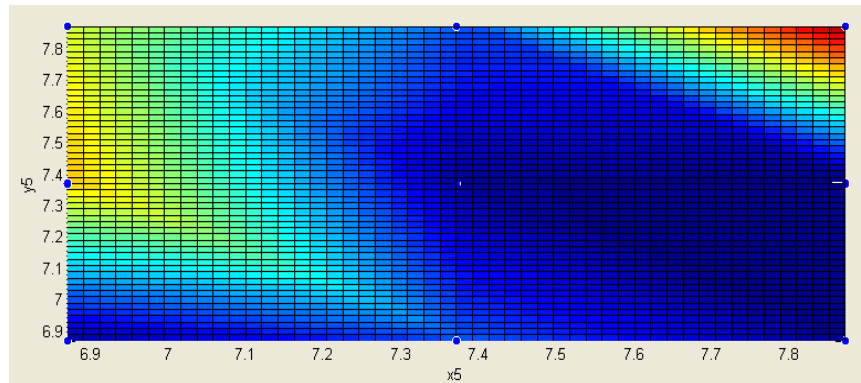
(β)



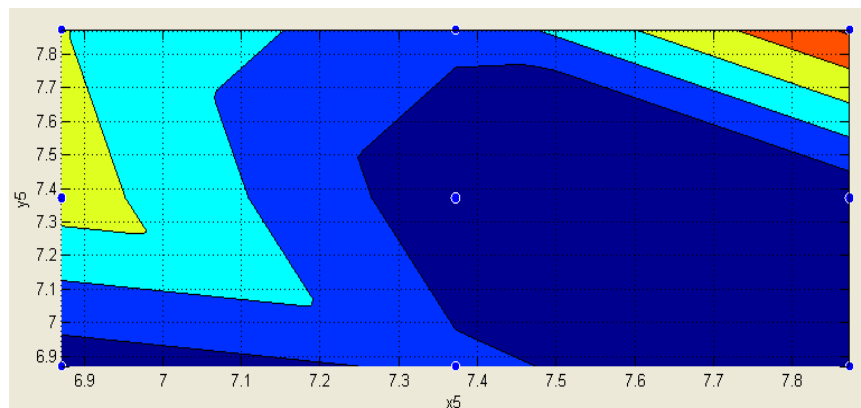
Εικόνα 4.30: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης για την τεχνική Ακουστικής Τομογραφίας (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς (γ) 3D pixels

4.4.4.5 Αποτελέσματα 5^{ης} Τομής

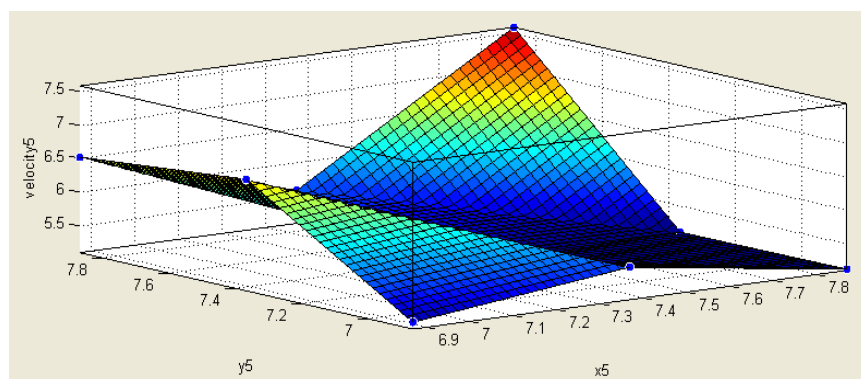
Στην εικόνα 4.31 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής της τεχνικής **Ακουστικής Τομογραφίας** από την εφαρμογή της, στη θέση της 5ης τομής. Παρακάτω φαίνεται ότι οι χρωματικές αλλαγές που παρατηρούνται στη χρωματική ανάλυση της τομής, προκύπτουν λόγω της εξωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας.



(α)



(β)

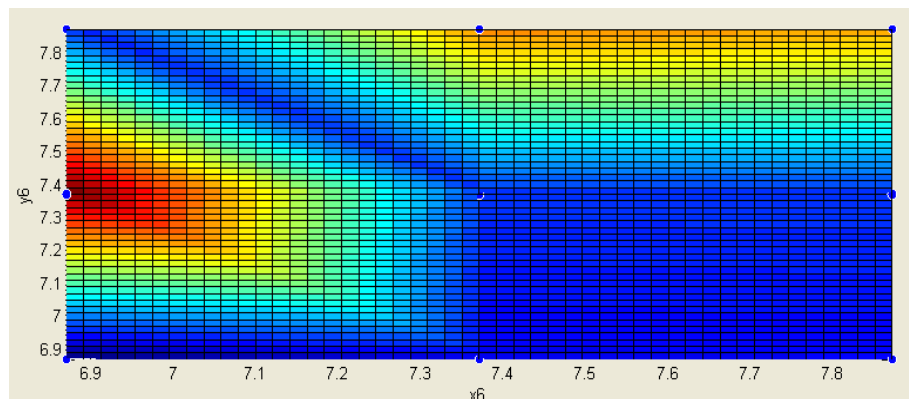


(γ)

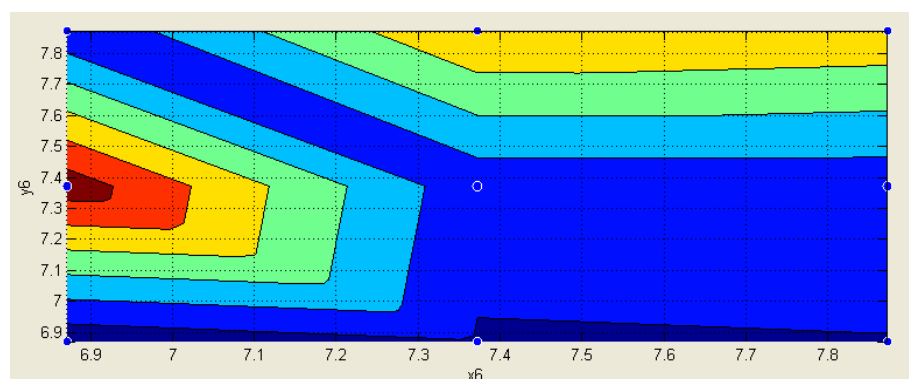
Εικόνα 4.31: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης για την τεχνική Ακουστικής Τομογραφίας (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς (γ) 3D pixels

4.4.4.5 Αποτελέσματα 6^{ης} Τομής

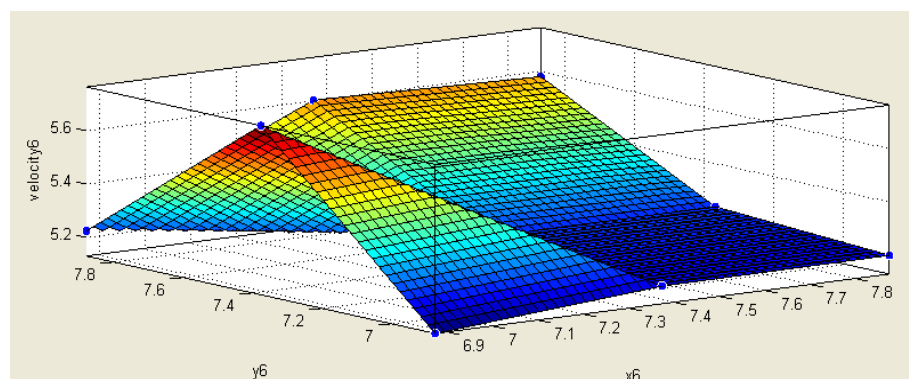
Στην εικόνα 4.32 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής της τεχνικής **Ακουστικής Τομογραφίας** από την εφαρμογή της, στη θέση της 6ης τομής. Παρακάτω φαίνεται ότι οι χρωματικές αλλαγές που παρατηρούνται στη χρωματική ανάλυση της τομής, προκύπτουν λόγω της εξωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας.



(α)



(β)



(γ)

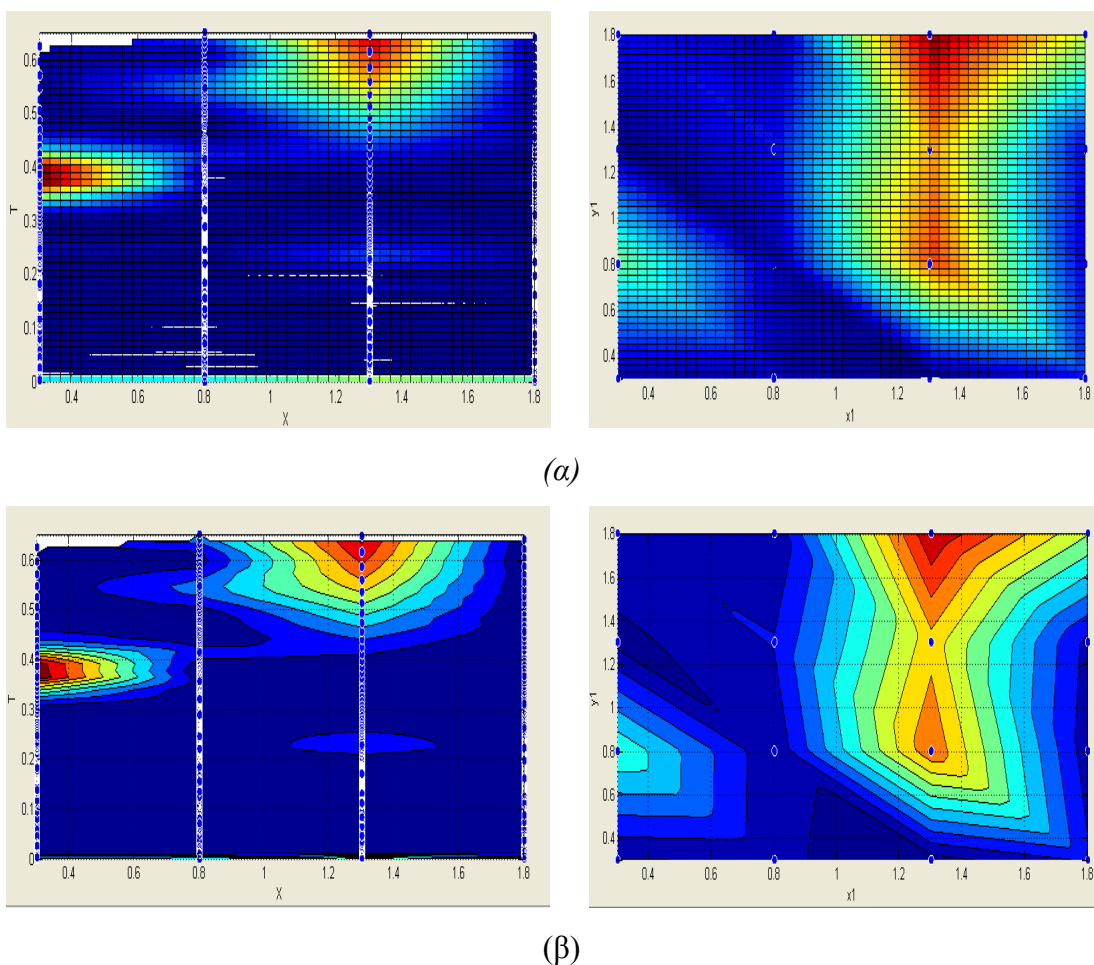
Εικόνα 4.32: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης για την τεχνική Ακουστικής Τομογραφίας (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς (γ) 3D pixels

4.4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο τεχνικών

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο τεχνικών που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης: Impact Echo και Ακουστικής Τομογραφίας, όπως αυτές εφαρμόστηκαν σε έξι τομές στη ΒΑ τοιχοποιία της κτιριακής εγκατάστασης της Αρχιτεκτονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης στη Γαλλική σχολή.

4.4.5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων 1^{ης} Τομής

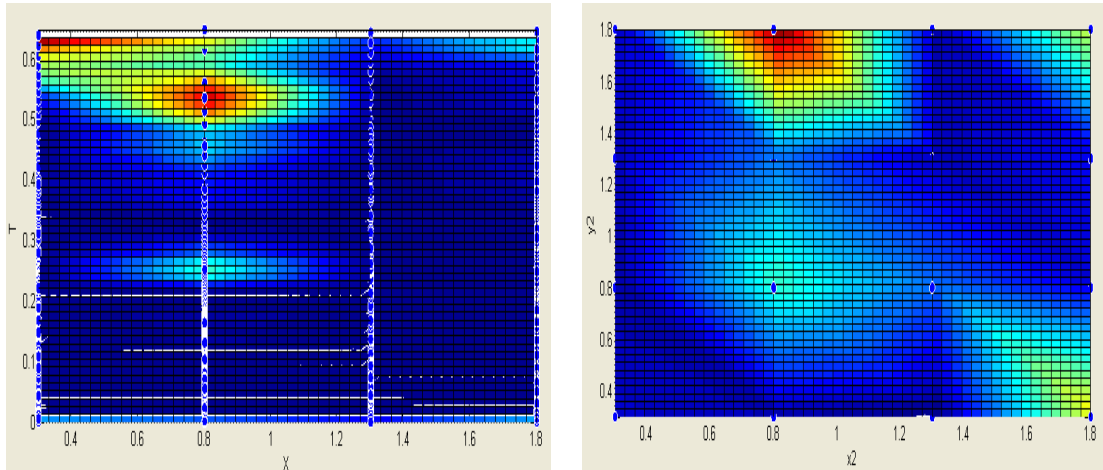
Στις εικόνες του Σχήματος 4.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο πειραματικών τεχνικών από την εφαρμογή τους στη θέση της 1ης τομής. Παρατηρείται ότι υπάρχει σχετικά καλή συσχέτιση μεταξύ των 2 πειραματικών τεχνικών όσο αφορά την εσωτερική δομή της τοιχοποιίας



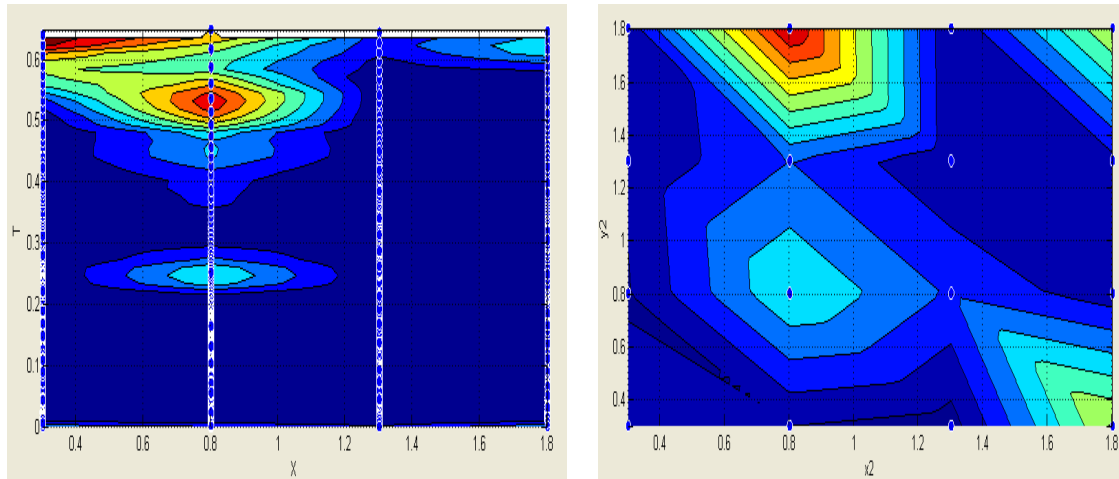
Σχήμα 4.33: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης και για τις δύο τεχνικές, Impact Echo (αριστερή στήλη) και Ακουστικής Τομογραφίας(δεξιά στήλη), για τη θέση της 1^{ης} τομής: (α) με pixels, (β)με ισοϋψείς.

4.4.5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων 2^{ης} Τομής

Στις εικόνες του Σχήματος 4.34 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο πειραματικών τεχνικών από την εφαρμογή τους στη θέση της 2ης τομής. Είναι προφανές ότι υπάρχει σχετικά καλή συσχέτιση μεταξύ των 2 πειραματικών τεχνικών όσο αφορά την εσωτερική δομή της τοιχοποιίας.



(α)

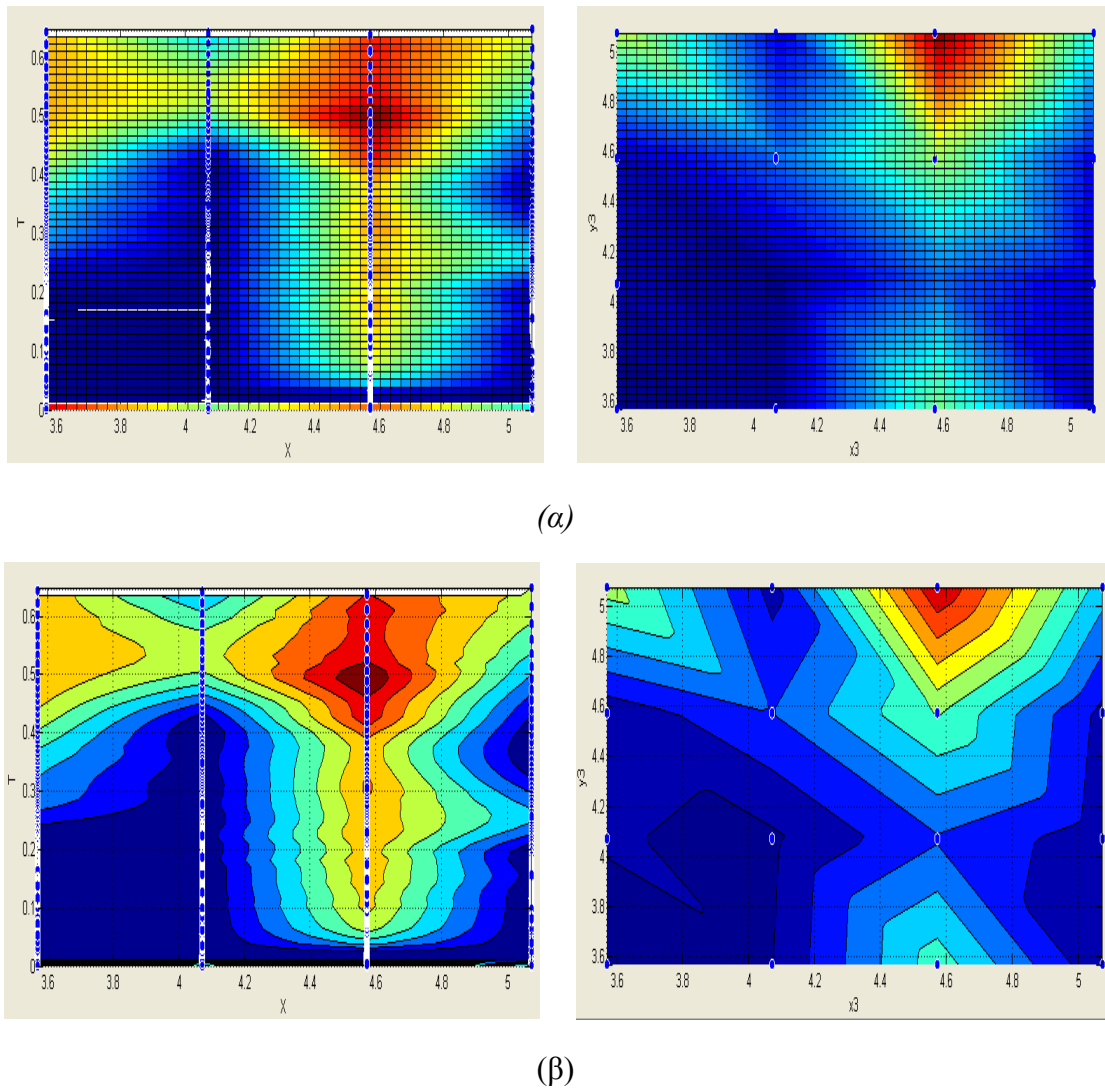


(β)

Σχήμα 4.34: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης και για τις δύο τεχνικές, *Impact Echo* (αριστερή στήλη) και *Ακουστικής Τομογραφίας* (δεξιά στήλη), για τη θέση της 1^{ης} τομής: (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς.

4.4.5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων 3^{ης} Τομής

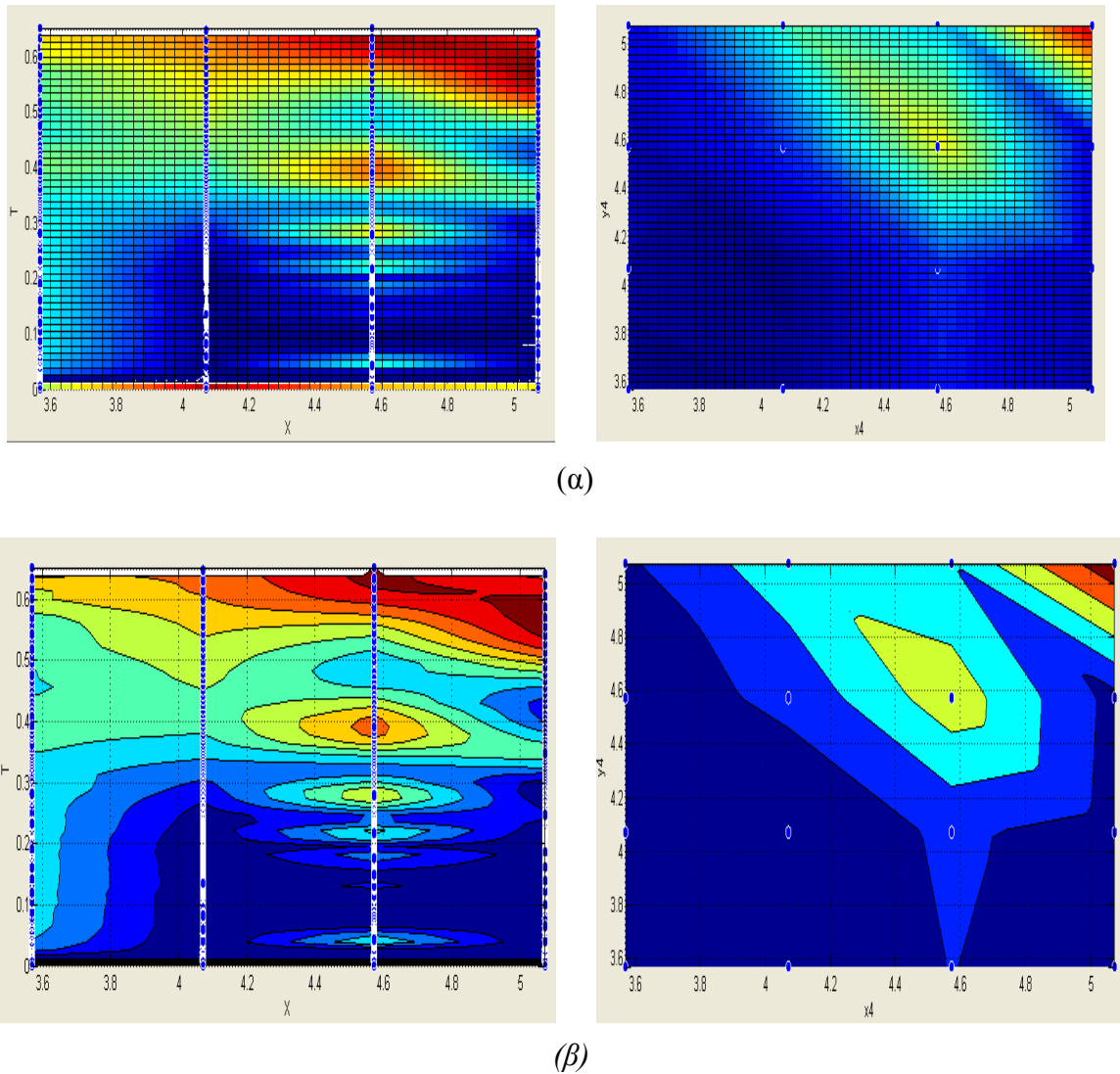
Στις εικόνες του Σχήματος 4.35 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο πειραματικών τεχνικών από την εφαρμογή τους στη θέση της 3ης τομής. Διαφαίνεται ότι υπάρχει σχετικά καλή συσχέτιση μεταξύ των 2 πειραματικών τεχνικών όσο αφορά την εσωτερική δομή της τοιχοποιίας.



Σχήμα 4.35: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης και για τις δύο τεχνικές, *Impact Echo* (αριστερή στήλη) και *Ακουστικής Τομογραφίας*(δεξιά στήλη), για τη θέση της 1^{ης} τομής: (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς.

4.4.5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων 4^{ης} Τομής

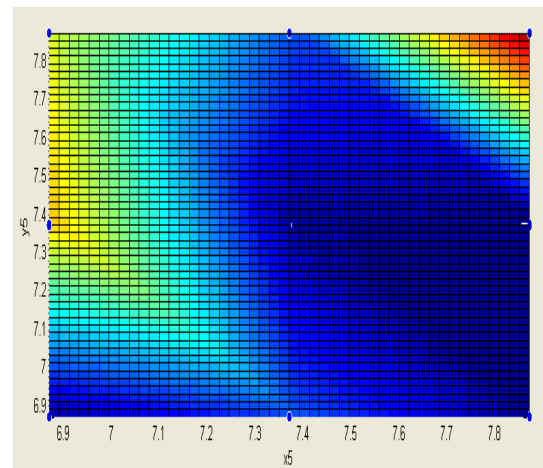
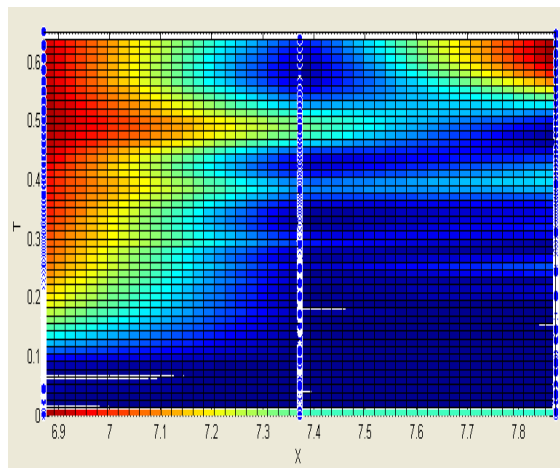
Στις εικόνες του Σχήματος 4.36 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο πειραματικών τεχνικών από την εφαρμογή τους στη θέση της 4ης τομής. Παρατηρείται ότι υπάρχει σχετικά καλή συσχέτιση μεταξύ των 2 πειραματικών τεχνικών όσο αφορά την εσωτερική δομή της τοιχοποιίας.



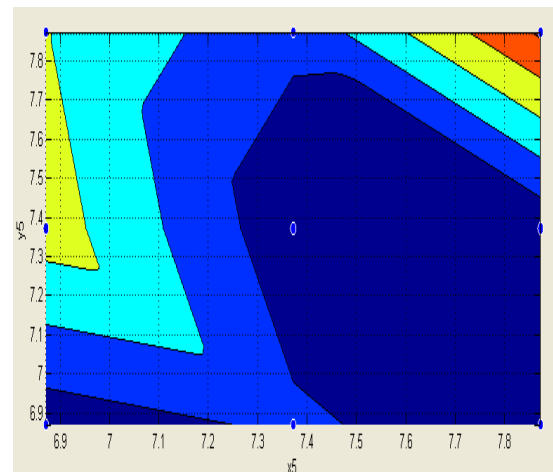
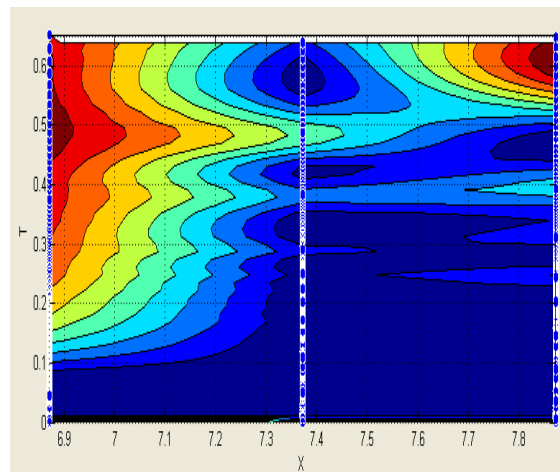
Σχήμα 4.36: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης και για τις δύο τεχνικές, *Impact Echo* (αριστερή στήλη) και *Ακουστικής Τομογραφίας* (δεξιά στήλη), για τη θέση της 4^{ης} τομής: (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς.

4.4.5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων 5^{ης} Τομής

Στις εικόνες του Σχήματος 4.37 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο πειραματικών τεχνικών από την εφαρμογή τους στη θέση της 5ης τομής. Υπάρχει σχετικά καλή συσχέτιση μεταξύ των 2 πειραματικών τεχνικών όσο αφορά την εσωτερική δομή της τοιχοποιίας αν και παρατηρούνται χρωματικές διαφοροποιήσεις στα 6,9 – 7,2 cm.



(α)

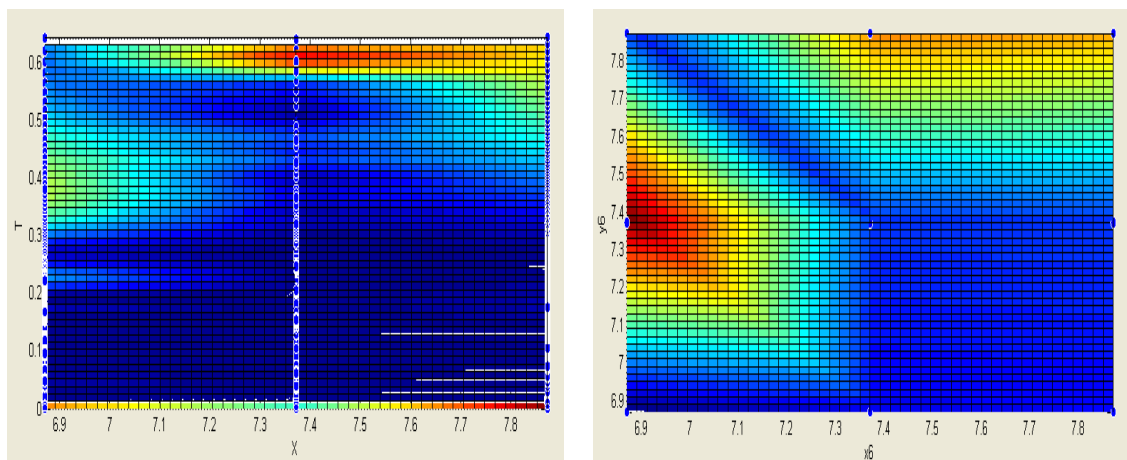


(β)

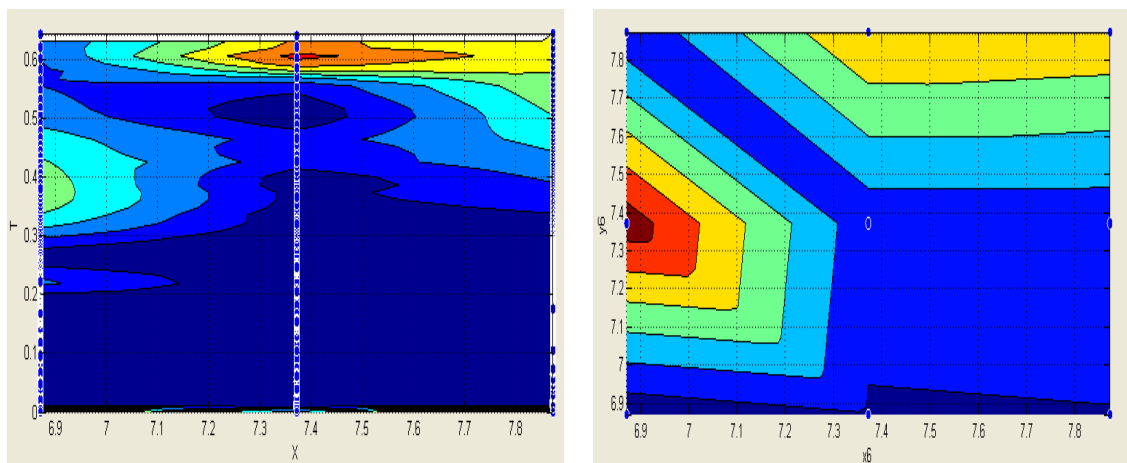
Σχήμα 4.37: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης και για τις δύο τεχνικές, *Impact Echo* (αριστερή στήλη) και *Ακουστικής Τομογραφίας* (δεξιά στήλη), για τη θέση της 1^{ης} τομής: (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς.

4.4.5.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων 6^{ης} Τομής

Στις εικόνες του Σχήματος 4.38 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο πειραματικών τεχνικών από την εφαρμογή τους στη θέση της 6ης τομής. Είναι προφανές ότι υπάρχει σχετικά καλή συσχέτιση μεταξύ των 2 πειραματικών τεχνικών όσο αφορά την εσωτερική δομή της τοιχοποιίας. Μικρές χρωματικές διαφορές παρατηρούνται στο (6,9-7,2) cm.



(α)



(β)

Σχήμα 4.38: Αποτελέσματα χρωματικής ανάλυσης και για τις δύο τεχνικές, *Impact Echo* (αριστερή στήλη) και *Ακουστικής Τομογραφίας* (δεξιά στήλη), για τη θέση της 1^{ης} τομής: (α) με pixels, (β) με ισοϋψείς.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο τεχνικών της Impact Echo και της ακουστικής Τομογραφίας, γεγονός που σημαίνει ότι και οι δύο πειραματικές τεχνικές είναι αξιόπιστες και εφάμιλλες ως προς τα αποτελέσματα που δίνουν.

Η μέθοδο Impact-Echo είναι μία πολύ ενδιαφέρουσα μέθοδος, με πληθώρα εφαρμογών, με πολύ καλές πειραματικές τεχνικές να την υποστηρίζουν σε παγκόσμια δημόσια και ιδιωτικά έργα π.χ. (εθνικές οδοί, κτήρια, γέφυρες, φράγματα, σήραγγες, κ.λπ.). Έχει μάλιστα αξιόλογες εφαρμογές στην αξιολόγηση της δομικής κατάστασης, σημαντικών μνημειακών κατασκευών συμπεριλαμβανομένης της μεγάλης πυραμίδας του Χέοπα και του καθεδρικού ναού της Αιγύπτου, ST Paul στο Λονδίνο, το κτήριο Κεντρικής Τράπεζας των ΗΠΑ στη Νέα Υόρκη, και τον Λευκό Οίκο στην Αμερική.

Και οι 2 τεχνικές μέθοδοι είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες, κυρίως η Impact Echo που χρησιμοποιείται από μεγάλες κατασκευαστικές εταιρείες ανά τον κόσμο. Αυτό που συνέβαλλε στην εφαρμογή της σε πολλά τεχνικά έργα στον κόσμο είναι κυρίως το χαμηλό οικονομικό κόστος της.

Ο χρόνος που απαιτείται για την εφαρμογή της όσο και για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων αποτελεί ένα ισχυρό επιπλέον πλεονέκτημά της καθώς θεωρείται πολύ μικρότερος σε σχέση με άλλες μη-καταστρεπτικές μεθόδους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αγιουτάντης Ζ, **«Στοιχεία Γεωμηχανικής - Μηχανική Πετρωμάτων»**, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα, 2002

Ζαγορίτη Αικατερίνη, Διπλωματική Εργασία **«Μελέτη Δομικής Σεισμικής Επικινδυνότητας σε εγκατάσταση Βιολογικού καθαρισμού»**, Χανιά, 2008

Καραντώνη Φ.Β, **«Κατασκευές από τοιχοποιία, Σχεδιασμός και επισκευές»**, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2004

Κρητικάκης Γεώργιος, Διδακτορική Διατριβή **«Επιφανειακά κύματα: εφαρμογές σε περιβαλλοντικά και γεωτεχνικά προβλήματα»**, Χανιά, 2010

Λιαράκος Ευάγγελος, Μεταπτυχιακή Διατριβή **«Αριθμητική διερεύνηση κριτηρίων αστοχίας και μεθόδων ενίσχυσης κατασκευών από τοιχοποιία»**, Χανιά, 2008

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Abraham Odile, Leonard Christelle, Cote Philippe, and Piwakowski Bogdan,**
«Time Frequency Analysis of Impact-Echo Signals: Numerical Modeling and
Experimental Validation», Materials Journal, 97(6), pp: 645-657, 2000
- Algernon Daniel and Wigggenhauser Herbert «**Impact Echo Data Analysis Based on
Hilbert-Huang Transform**», Aip Conference Proceedings, pp: 649-656, 2008
- Carino Nicholas J, «**Laboratory Study of Flaw Detection in Concrete by the Pulse-
Echo Method**», NTIAC/NT, 1984
- Carino Nicholas J, «**THE IMPACT-ECHO METHOD: AN OVERVIEW**»,
National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2001
- Chopra K. A, «**Dynamic of structures**», Prentice Hall, New Jersey, 1995
- Coleman Thomas, Branch Mary Ann, Grace Andrew, «**Optimization Toolbox**»,
Paderborn, Germany, 2006
- Colla C, Lausch R, «**Influence of source frequency on impact-echo data quality for
testing concrete structures**», Berlin, Germany, 2002
- Ertug˘rul C, am, Sadettin Orhan, Lu˘y, «**An analysis of cracked beam structure
using impact echo method**», Faculty of Engineering, Kırıkkale University,
Kırıkkale, Turkey, 2005
- Hill Martyn and Turner, «**Cross-Sectional Modes in Impact-Echo Testing of
Concrete Structures**», J. Struct. Eng. 222-228, 1999
- Jackson M. J. and Tweeton D. R. «**MIGRATOM – Geophysical Tomography Using
Wave front Migration and Fuzzy Constraints**», Bureau of Mines, Minneapolis,
1998

- Kessler Seth, Spearing Mark and Soutis Constantinos, «**Damage detection in composite materials using wave methods**», Smart Materials and Structures, pp:269-278, 2002
- Kosovichev A.G, Duvall T.L, «**Acoustical Tomography of solar convective flows and structures**», San Francisco, 1995
- Krause M, Bärmann M, Frielinghaus R, Kretzschmar F, Kroggel, Langenberg K. J, Maierhofer, Müller W, Neisecke, Schickert M, Schmitz V, Wiggenhauser, Wollbold F, «**Comparison of pulse -Impact Echo - for testing concrete**», Germany, NDT & E Int., pp: 195–204, 1997
- Lamé, «**Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides**», Paris, 1866
- Lin and Sansalone Mary, «**Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact-Echo Method**», Materials Journal of the American Concrete Institute, Vol. 89, 1992
- Momayez M, Sadri & Hassani F. P, McGill University, «**Impact-Echo: A technique for determining the mechanical properties of rocks**», Permission to Distribute - American Rock Mechanics Association, Rotterdam, 1995
- Pessiki Stephen and Carino Nicolas J, «**Setting Time and Strength of Concrete Using the Impact-Echo Method**», ACI Materials Journal, Volume: 85, Issue: 5, pp: 389-399, 1988
- Qixian Luo and Bungey J. H, «**Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete**», Liverpool, 1996
- Qixian, Fu Xiang, Song Renxin, Zhu Dazheng, Wang Wuping «**Impact-Echo Method and Testing System for Detecting Internal Defects and Thickness of Concrete**», Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China, 2005
- Sadri Afshin, «**Application of (Impact Echo) technique in diagnoses and repair of stone masonry structures**», Toronto, Canada, 2003
- Sansalone M. and Carino N.J., «**Impact-Echo Method**», Illinois, 1988

- Sansalone M. and Carino N.J., «**Laboratory and Field Studies of the Impact-Echo Method for Flaw Detection in Concrete**», Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication of the American Concrete Institute, pp: 1-20, 1988,
- Sansalone Mary and Jaeger Barbara J, «**Using Impact-Echo to Assess Tendon Ducts**», Materials Journal of the American Concrete Institute, 1997
- Sansalone Mary, Y. Lin, Pratt, and Cheng, «**Advancements and New Applications in Impact-Echo Testing**», published in the Proceedings of the International Conference on Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovations in Design, Hong Kong, 1991
- Sansalone, M, and Carino, N.J. «**Impact-Echo: A New Method for Inspecting Construction Materials**», Proceedings of Nondestructive Testing and Evaluation of Materials for Construction, University of Illinois, 1988
- Schubert Frank and Köhler Bernd, «**Ten Lectures on Impact-Echo**», Journal of Nondestructive Evaluation, Volume: 27, Issue: 1-3, pp: 5-21, 2008