



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

**Ανάπτυξη μεθοδολογίας πρότυπων γεωτεχνικών ερευνών με
συνδυασμό γεωλογικών, γεωφυσικών, γεωτρητικών και
εργαστηριακών δεδομένων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παναγιώτης Κ. Κωλέττας
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων Καθηγητής: Ζαχαρίας Αγιουτάντης

Χανιά, Ιούνιος 2009



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

**Ανάπτυξη μεθοδολογίας πρότυπων γεωτεχνικών ερευνών με
συνδυασμό γεωλογικών, γεωφυσικών, γεωτρητικών και
εργαστηριακών δεδομένων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παναγιώτης Κ. Κωλέττας
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ζαχαρίας Αγιουτάντης (Επιβλέπων Καθηγητής)

Αντώνης Βαφείδης

Εμμανουήλ Μανούτσογλου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Ζαχαρίας Αγιουτάντης
Καθηγητής Π.Κ.

.....
Αντώνης Βαφείδης
Καθηγητής Π.Κ.

.....
Εμμανουήλ Μανούτσογλου
Αν. Καθηγητής Π.Κ.

.....
Γεώργιος Εξαδάκτυλος
Καθηγητής Π.Κ.

.....
Κωνσταντίνος Προβιδάκης
Καθηγητής Π.Κ.

.....
Ιωάννης Τσομπανάκης
Επικ. Καθηγητής Π.Κ.

.....
Μαρία Σταυρουλάκη
Λέκτορας Π.Κ.

Χανιά, Ιούνιος 2009

.....
Παναγιώτης Κ. Κωλέττας
Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Παναγιώτης Κ. Κωλέττας, 2009.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

*“Even the largest of trees starts from a tiny shoot
Even a journey of 1000 miles begins with a single step”*

-Lao Zi, “Dao De Jing”,
China, 400 B.C.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι γνωστό ότι ο γεωτεχνικός χαρακτηρισμός εδαφών και πετρωμάτων είναι μια πολύ σύνθετη διαδικασία η οποία στηρίζεται σε πλήθος πληροφοριών που αναδύονται από καταστροφικές και μη καταστροφικές δοκιμές στην περιοχή μελέτης και το εργαστήριο.

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας αναλύθηκαν μέσω φασματικής επεξεργασίας, τόσο τα λαμβανόμενα σεισμικά σήματα που διήλθαν μέσω ασβεστολιθικού σχηματισμού ευρισκόμενου εντός του γηπεδικού χώρου της Πολυτεχνειούπολης Χανίων όσο και σήματα υπερήχων τα οποία διήλθαν μέσω εργαστηριακών δοκιμών διαφόρων τύπων πετρωμάτων στον χώρο του Εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η επεξεργασία και αξιολόγηση των φασμάτων των λαμβανομένων σημάτων (σεισμικών και υπερήχων), πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή τόσο των μετασχηματισμών Fourier (NFFT και Lomb Periodogram) όσο και των μετασχηματισμών Wavelets σε μη ισοδύναμα και άνισα χρονικά διαστήματα. Από την επεξεργασία αυτή διαπιστώθηκε ότι όσον αφορά στις επί τόπου δοκιμές φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ κάποιων φυσικών χαρακτηριστικών του πετρώματος και της μέσης σταθμισμένης συχνότητας των λαμβανομένων σημάτων. Επίσης σε σχέση με τα εργαστηριακές δοκιμές εμφανίζεται συσχέτιση μεταξύ της μέσης ταχύτητας διάδοσης των σημάτων αυτών και της μέσης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του κάθε δοκιμίου, με το είδος του πετρώματος μέσω του οποίου διήλθε το εξεταζόμενο σήμα. Ως αποτέλεσμα της μελέτης αυτής προέκυψε μία καινοτόμος μεθοδολογία μη καταστροφικών δοκιμών με την χρήση φασματικής ανάλυσης σημάτων που οδηγεί στην ονομαζόμενη «φασματική υπογραφή» του κάθε τύπου πετρώματος.

Λέξεις Κλειδιά: Γεωφυσικές Μέθοδοι, Φασματική ανάλυση, Μη Καταστροφικές Δοκιμές, Δεσπόζουσα Συχνότητα, Μέση Σταθμισμένη Συχνότητα, Περιοδόγραμμα, Δοκιμή σε Μονοαξονική Θλίψη.

Η ολοκλήρωση της παρούσας Διατριβής μου δεν θα είχε καταστεί δυνατή αν δεν υπήρχε προς εμένα η παροχή της σημαντικής βοήθειας κάποιων ανθρώπων.

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου, από τα βάθη της καρδιάς μου, στον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη, ο οποίος εκτός του ότι μου προσέφερε απλόχερα το ευρύτατο γνωστικό και ανθρώπινο δυναμικό του, με την στοχευμένη καθοδήγησή του σε κάθε βήμα της ερευνητικής πορείας, υπήρξε ο καθοριστικός παράγοντας που συνέβαλε τόσο πολύ στην επίτευξη του στόχου που είχα θέσει.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω ιδιαίτερα τις ευχαριστίες μου στα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, στον Καθηγητή κ. Βαφείδη Αντώνιο καθώς και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μανούτσογλου Εμμανουήλ διότι, μέσα στα πλαίσια της παρακολούθησης της Διδακτορικής μου Διατριβής, οι παρεμβάσεις τους συνέβαλαν σημαντικά ιδιαίτερα σε επί μέρους ποιοτικές βελτιώσεις αυτής.

Η συμβολή των συναδέλφων επιστημόνων του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης υπήρξε επίσης ιδιαίτερα σημαντική σε οτιδήποτε ζητήθηκε και για τον λόγο αυτό τους ευχαριστώ.

Ευχαριστίες εκφράζονται προς της Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας για την χρηματοδότηση του έργου ΠΕΝΕΔ 03 ΕΔ 392. Το έργο συγχρηματοδοτήθηκε με 75 % της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο, 25 % της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας και από τον ιδιωτικό τομέα, στο πλαίσιο του μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα – Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης.

Επίσης, ευχαριστώ όλους τους ανθρώπους του Πολυτεχνείου Κρήτης που ασχολήθηκαν με το πρόγραμμα αυτό καθώς και την Εταιρεία ΓΕΩΤΕΚ, χωρίς την ενεργό συμμετοχή της οποίας (στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, στην μεταφορά τεχνογνωσίας καθώς και στην χρηματοδότησή της), δεν θα ήταν δυνατή η πραγματοποίηση της διατριβής αυτής.

Τελειώνοντας, δεν θα μπορούσα να παραβλέψω τις ευχαριστίες μου και την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου, η οποία υπήρξε για όλο το διάστημα για μένα η σταθερή πηγή υποστήριξης και ενθάρρυνσης των προσπαθειών μου, παρέχοντας μου την ηρεμία και οτιδήποτε απαιτείτο για να παραμείνω σταθερά προσηλωμένος και συγκεντρωμένος στο στόχο μου μέχρι τέλους.

Παναγιώτης Κωλέττας

30^η Ιουνίου 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΥΠΕΡΗΧΟΙ	21
1.1 Γενικά	21
1.2 Βασικές αρχές διάδοσης υπερήχων	23
1.3 Η ταχύτητα του ήχου	24
1.4 Ακουστική εμπέδηση και ένταση του ήχου	25
1.4.1 Ακουστική εμπέδηση	25
1.4.2 Ένταση του ήχου	26
1.5 Ανάκλαση – διάδοση – απορρόφηση και εξασθένηση υπερήχων	27
1.5.1 Ορισμοί	27
1.5.2 Απορρόφηση από υλικά	28
1.5.3 Εξασθένηση υπερήχων λόγω απορρόφησης από το μέσο διάδοσης, εύρους δέσμης και μετεωρολογικών φαινομένων	29
1.6 Εκπομπή και λήψη υπερήχων	32
1.6.1 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	32
1.6.2 Πιεζοηλεκτρικοί υπερηχητικοί αισθητήρες	33
1.6.3 Διέγερση του μετατροπέα και χαρακτηριστικά της δέσμης	34
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ	 39
2.1 Ανάλυση Fourier για σήματα διακριτού-χρόνου	39
2.2 Δειγματοληψία-Θεώρημα του Nyquist	40
2.3 Διακριτός μετασχηματισμός Fourier	45
2.4 Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (FFT)	49
2.5 Ο Μετασχηματισμός NFFT	50
2.6 Μετασχηματισμός Κυματιδίων (Wavelets)	52
2.6.1 Σχέση της wavelet ανάλυσης με την ανάλυση Fourier	52
2.6.2 Εφαρμογές	54
2.6.3 Εφαρμογές στην ιατρική	55
2.6.4 Χρήση των wavelets	55
2.6.5 Ιδιότητες των wavelets	56
2.6.6 Μετασχηματισμός Haar-Wavelet	57
2.6.7 Συνεχής μετασχηματισμός	60
2.6.8 Διακριτός μετασχηματισμός	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ.....	63
3.1 Εισαγωγή.....	63
3.2 Σεισμικά Κύματα.....	63
3.3 Τύποι Σεισμικών Κυμάτων	63
3.3.1 Κύματα Χώρου.....	63
3.3.2 Επιφανειακά Κύματα.....	65
3.4 Διάδοση των σεισμικών κυμάτων χώρου στο εσωτερικό της Γης.....	67
3.5 Διάδοση των κυμάτων χώρου στον φλοιό της Γής	67
3.6 Μέθοδος της Σεισμικής Διάθλασης	71
3.6.1 Βασική αρχή λειτουργίας	71
3.6.2 Συλλογή δεδομένων	72
3.6.3 Επεξεργασία των δεδομένων.....	72
3.6.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	72
3.7 Μέθοδος ηλεκτρικής διασκόπησης	72
3.7.1 Εισαγωγή.....	72
3.7.2 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ορυκτών και πετρωμάτων.....	73
3.7.3 Μέθοδος Ηλεκτρικής Αντίστασης	76
3.7.4 Διατάξεις ηλεκτροδίων.....	78
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ.....	 83
4.1 Εισαγωγή.....	83
4.2 Γεωτρητικά Δεδομένα	84
4.3 Ηλεκτρική Διασκόπηση	90
4.4 Φασματική Ανάλυση Σεισμικών Δεδομένων με την Χρήση FFTs και Wavelets.....	94
4.4.1 Φασματική Ανάλυση Δεδομένων Πεδίου με χρήση NFFT	96
4.4.2 Φασματική Ανάλυση Δεδομένων Πεδίου με χρήση Περιοδιογράμματος Lomb και Ανάλυσης Κυματιδίων (Wavelets).....	105
4.4.3 Μετρήσεις στον χώρο του Λατομείου Αλφάς Ρεθύμνου	109
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	 115
5.1 Εισαγωγή.....	115
5.2 Μετρήσεις Ακουστικών Σημάτων.....	116
5.3 Φασματική Ανάλυση Σημάτων με την Χρήση NFFT.....	122
5.4 Φασματική Ανάλυση Σημάτων με την Χρήση Wavelets Transform.....	130

5.5 Μετρήσεις Αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.....	135
5.6 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων	139
5.6.1 Περιοδογράμματα Lomb	139
5.6.2 Συσχετισμός Αποτελεσμάτων με την χρήση της Μέσης Σταθμισμένης Συχνότητας	145
5.6.3 Συσχετισμός Αποτελεσμάτων με την χρήση της Μέσης Ταχύτητας Διάδοσης σήματος	145
5.6.4 Συσχετισμός Αποτελεσμάτων με την χρήση της Μέσης Αντοχής σε Μοναξονική Θλίψη	146
5.6.5 Συσχετισμοί	147
5.6.6 Συμπεράσματα.....	148
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ	151
Α. Συμπεράσματα από την φασματική Ανάλυση των δεδομένων που ελήφθησαν στο πεδίο.	151
Β. Συμπεράσματα από την φασματική ανάλυση των εργαστηριακών δεδομένων...152	
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	155
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	173
 ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	189
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	191

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία έτη η ανάπτυξη της τεχνολογίας και της τεχνικής σε γενικό επίπεδο υπήρξε αλματώδης - ιδιαίτερα δε μετά τη σύγκλιση των επιστημών της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών - και οφείλεται κυρίως στην αξιοποίηση από τους ερευνητές των χρηστικών δυνατοτήτων που αναδύθηκαν από τη σύγκλιση αυτή.

Στο φάσμα δραστηριοτήτων των γεωεπιστημών αν και έχουν υπάρξει σημαντικότητα βήματα προόδου και εξέλιξης, τα περιθώρια περαιτέρω ανάπτυξης και έρευνας είναι ευρύτατα. Από τη δεκαετία του 1960 υπήρξε προσπάθεια εκ μέρους αρκετών μεμονωμένων ερευνητών και ερευνητικών ομάδων για τον χαρακτηρισμό των πετρωμάτων και των ιδιοτήτων τους χρησιμοποιώντας μη καταστροφικές δοκιμές. Οι προσπάθειες αυτές επικεντρώνονται τόσο στα θέματα αποσβέσεων (Galan, 1967) όσο και σε θέματα επίδρασης του πεδίου των ασυνεχειών στις μετρούμενες ιδιότητες (Molina and Wack, 1982, Sayers, 1988, Onur and Bakrac 2009), όσο και πιο πρόσφατα σε θέματα ανισοτροπίας (Lucet and Zinszner, 1992, Přikryl et al, 2007) καθώς σε συνδυασμό με νέες τεχνικές όπως ακουστικές εκπομπές (Donald, 2004, Xu et al, 2009, Tschelisnig, 1988).

Οι ερευνητικές προσπάθειες που έχουν πραγματοποιηθεί με την εφαρμογή της μεθόδου των υπερήχων έχουν συνεισφέρει αρκετά στην προσπάθεια ταξινόμησης των εξεταζόμενων πετρωμάτων (del Rio et al, 2006). Παρά το γεγονός όμως ότι οι μετρούμενες ταχύτητες (μετά από διέγερση κυρίως με υπερηχητικές συχνότητες) είτε των διαμήκων είτε των εγκάρσιων κυμάτων εξαρτώνται από ένα πλήθος παραγόντων (το οποίο αποτελεί και μειονέκτημα της μεθόδου) όπως οι ελαστικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης, η πυκνότητα των ασυνεχειών, η μεταβολή του πορώδους κ.λ.π. οι μετρήσεις των ταχυτήτων αυτών παρέχουν ένα έμμεσο μέτρο εκτίμησης των ιδιοτήτων του πετρώματος (ASTM, 2000, Tsuda., 2006, Zhang, et al, 2006).

Οι μέχρι σήμερα όμως έρευνες αν και έχουν αυξήσει το γνωστικό δυναμικό το σχετικό με τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των διαφόρων πετρωμάτων δεν έχουν ακόμη κατορθώσει να τυποποιήσουν και ταυτοποιήσουν τα διάφορα πετρώματα με βάση κάποια κοινή παράμετρο ή κάποιο κοινό χαρακτηριστικό. Τα περισσότερα πειράματα επικεντρώνονται σε εργαστηριακά δοκίμια καθώς έτσι είναι πιο εύκολο να ελεγχθούν οι παράμετροι που διέπουν το εξεταζόμενο φαινόμενο και να κατηγοριοποιηθούν τα αποτελέσματα.

Όμως μη καταστροφικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως και για τον χαρακτηρισμό επί τόπου σχηματισμών. Οι μη καταστροφικές μέθοδοι οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα σε ότι αφορά τις προσπάθειες χαρακτηρισμού του είδους

των πετρωμάτων και των ιδιοτήτων τους, είναι κυρίως οι σεισμικές μέθοδοι (διάθλασης, ανάκλασης, γεωραντάρ), η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας, οι μέθοδοι υπερήχων, οι μέθοδοι ακουστικής πρόσκρουσης και ακουστικών εκπομπών καθώς και η μέθοδος της αναπήδησης.

Αντίστοιχα, οι προσπάθειες που έχουν πραγματοποιηθεί με τη χρήση των σεισμικών μεθόδων χρησιμοποιώντας την ταχύτητα διάδοσης και το χρόνο άφιξης των σεισμικών κυμάτων, μεγέθη τα οποία εξαρτώνται από την ποιότητα και το μέγεθος του εξεταζόμενου υποβάθρου καθώς και από την ποιότητα των υλικών από τα οποία αυτό αποτελείται, επιχειρούν να ταξινομήσουν το εξεταζόμενο υπέδαφος σε σχέση με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του όπως είναι η φέρουσα ικανότητα του (Lagarde et al, 2006, Abraham and Derobert, 2003).

Η ηλεκτρική τομογραφία, εκτιμώντας το μέτρο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εξεταζόμενου υποστρώματος ή πετρώματος, επιχειρεί να εξάγει συμπεράσματα σχετικά με την διαστρωμάτωση του καθώς και με τις εναλλαγές υλικών και φάσεων στις οποίες αυτό ευρίσκεται. Αποτελεί μια μη καταστροφική μέθοδο που χρησιμοποιείται κυρίως στο πεδίο για την εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων σε σχέση με την φύση της διαστρωμάτωσης του υπεδάφους (Karhunen, et al 2009).

Οι μέθοδοι της ακουστικής εκπομπής εξετάζουν το παραγόμενο σήμα που προέρχεται από το ίδιο το πέτρωμα όταν αυτό βρίσκεται υπό φόρτιση. Τα κύματα της ακουστικής εκπομπής διαδίδονται μέσα στο πέτρωμα, ανιχνεύονται από αισθητήρες (πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους), μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα τα οποία ενισχύονται και επεξεργάζονται (Κατσικογιάννη και άλλοι, 2008). Το ανιχνευόμενο σήμα έχει πολύπλοκη μορφή η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της πηγής και του μέσου διάδοσης (μορφή κύματος, ταχύτητα, εξασθένιση, ανακλάσεις και συμβολές), όσο και από τα χαρακτηριστικά του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου. Οι κύριες μετρούμενες παράμετροι είναι το πλάτος του σήματος, ο χρόνος ανύψωσης, η διάρκεια του καθώς και η παράμετρος «απαριθμήσεις» η οποία προσδιορίζει πόσες φορές ένα σήμα ακουστικής εκπομπής υπερβαίνει το κατώφλι.

Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί ως μέθοδος επιτυχούς πρόβλεψης επικείμενης αστοχίας σε υπόγεια λατομία θαλάμων και στύλων ασβεστόλιθου από υψηλές οριζόντιες τάσεις και σε υπόγεια ανθρακωρυχεία με μέθοδο εκμετάλλευσης τα επιμήκη μέτωπα (Iannacchione et al., 2000 & 2005). Έχει επίσης εφαρμοστεί στην μελέτη ευστάθειας προστατευτικού στύλου οροφής σε υπόγειο μεταλλείο χαλκού (Choudhury et al, 2004) καθώς και στη συσχέτιση της ποιότητας της βραχομάζας με την εξασθένιση των ακουστικών κυμάτων (Mukhopadhyay, 2001). Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί στο ότι μπορεί

να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλες επιφάνειες και κατασκευές, εντοπίζει ατέλειες ακόμη και στα πιο δυσπρόσιτα σημεία, μειονεκτεί όμως στο ότι δεν εκπέμπονται παλμοί ακουστικής εκπομπής από όλες τις ατέλειες του υλικού, δεν καθορίζει το μέγεθος της ατέλειας και η απόδοση της εξαρτάται από το μέγεθος της φόρτισης και της ύπαρξης θορύβου.

Η μέθοδος αναπήδησης η οποία τελευταία εφαρμόζεται προσδιορίζει το μέγεθος της επιφανειακής σκληρότητας του εξεταζόμενου υλικού και χρησιμεύει για μια πρώτη σύντομη έμμεση εκτίμηση της επιφανειακής σκληρότητας αυτού και στη συνέχεια επιλεγμένων μηχανικών ιδιοτήτων του (Aydin and Basu, 2005, Ozkan and Bilim, 2007, Bilgin et al, 2002, Buyuksagis and Goktan, 2007, Aydin, 2009, Katz et al, 2000).

Αν και η κάθε μία από τις παραπάνω αναφερόμενες μεθόδους έχει συνεισφέρει στην εκτίμηση μεμονωμένων χαρακτηριστικών παραμέτρων του εξεταζόμενου υλικού (π.χ. ταχύτητα διάδοσης, ειδική ηλεκτρική αντίσταση, μέτρο σκληρότητας, χρόνος άφιξης κλπ) δεν έχει γίνει κατορθωτό η χρήση αυτών να οδηγεί στην ταυτοποίηση του εξεταζόμενου υλικού.

Από τα παραπάνω διαπιστώθηκε η αναγκαιότητα της προσπάθειας για την διερεύνηση της δυνατότητας ανάπτυξης μεθόδου για μια πιστότερη εκτίμηση των ιδιοτήτων του εξεταζόμενου υλικού. Το ζητούμενο είναι η κτίμηση αυτή μετά από συγκριτική αξιολόγηση με τα αποτελέσματα και άλλων μη καταστροφικών μεθόδων να μπορεί να χαρακτηρίζει ενδεχομένως και μονοσήμαντα ένα γεωυλικό είτε στο εργαστήριο είτε επί τόπου.

Η καινοτομία της μεθόδου η οποία πρόκειται να αναπτυχθεί στην παρούσα διατριβή έγκειται στο ότι σχεδιάστηκε να πραγματοποιηθεί φασματική ανάλυση και επεξεργασία σεισμικών κυμάτων από μετρήσεις πεδίου και σήματα υπερήχων από μετρήσεις δοκιμίων πετρωμάτων στο εργαστήριο. Η επεξεργασία και αξιολόγηση των φασμάτων των λαμβανομένων σημάτων (σεισμικών και υπερήχων), προβλέπεται να πραγματοποιηθεί με την εφαρμογή διαφόρων τύπων μετασχηματισμού Fourier όσο και μετασχηματισμών Wavelets σε μη ισοδύναμα και άνισα χρονικά διαστήματα. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αναμένεται να μπορούν να συσχετισθούν με άλλα μεγέθη χαρακτηρισμού των διαφόρων εδαφικών ή βραχωδών σχηματισμών όπως η ταχύτητα διάδοσης, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κλπ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή είναι δομημένη σε έξι επί μέρους κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 1 αναφέρονται τα γενικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των υπερήχων, περιγράφονται οι βασικές αρχές διάδοσης αυτών, η ακουστική εμπέδηση και

ένταση του ήχου, η ανάκλαση, η διάδοση, η απορρόφηση και εξασθένηση των, καθώς και το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και οι πιεζοηλεκτρικοί υπερηχητικοί αισθητήρες.

Στο Κεφάλαιο 2 δίδεται έμφαση στη θεωρητική παρουσίαση της ανάλυσης των σημάτων. Παρουσιάζεται η ανάλυση Fourier για σήματα διακριτού χρόνου, το Θεώρημα δειγματοληψίας του Nyquist, ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT), ο Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (FFT), ο Μετασχηματισμός σε μη ισοδύναμα χρονικά διαστήματα (NFFT) καθώς και ο Μετασχηματισμός Κυματιδίων (Wavelet Transformation).

Στο Κεφάλαιο 3, παρατίθενται οι τύποι των σεισμικών κυμάτων, περιγράφεται η διάδοση των σεισμικών κυμάτων χώρου στο εσωτερικό και στον φλοιό της γης καθώς επίσης γίνεται και αναλυτική παρουσίαση των μεθόδων σεισμικής διάθλασης και ηλεκτρικής διασκόπησης, οι οποίες και εφαρμόζονται στην παρούσα διατριβή.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται αναλυτικά και βήμα προς βήμα η γεωτεχνική έρευνα η οποία πραγματοποιήθηκε στο χώρο της Πολυτεχνειούπολης Χανίων καθώς και η φασματική ανάλυση και επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων με χρήση μετασχηματισμού NFFT, περιοδιογραμμάτων Lomb και μετασχηματισμού Wavelets. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην παρουσίαση της φασματικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της σεισμικής μεθόδου υπό μορφή διαγραμμάτων συγκριτικής απεικόνισης, καθώς και στην παρουσίαση της φασματικής ανάλυσης μετρήσεων γεωφυσικής διασκόπησης που πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του Λατομείου Αλφάς Ρεθύμνου.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται αναλυτικά και βήμα προς βήμα η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων και η οποία αφορά συχνοτική ανάλυση σε εργαστηριακές μετρήσεις ακουστικών σημάτων διερχόμενων μέσω δοκιμίων πετρωμάτων Αλφά, Σκληρής και Ασβεστολίθου, όταν αυτά βρίσκονται τόσο σε ξηρή όσο και σε υγρή κατάσταση, καθώς και σε εργαστηριακές μετρήσεις φασματικής ανάλυσης ακουστικών σημάτων σε δοκίμια μαρμάρων Γόρτυνας, Διονύσου, Νάξου καθώς και σε δοκίμια Γρανίτη. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην παρουσίαση της φασματικής ανάλυσης με τη χρήση μετασχηματισμού NFFT των δεδομένων που προέκυψαν από τις εργαστηριακές μετρήσεις, καθώς επίσης και με τη χρήση περιοδιογραμμάτων Lomb και μετασχηματισμού Wavelets. Παρουσιάζονται ακόμη και οι μετρήσεις προσδιορισμού αντοχής σε μονοαξονική θλίψη καθώς και ο συσχετισμός αυτών με τη μέση σταθμισμένη συχνότητα και τη μέση ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων.

Η διδακτορική διατριβή ολοκληρώνεται στο Κεφάλαιο 6 όπου παρατίθενται τα συμπεράσματα καθώς και οι προτάσεις επέκτασης της.

Η προσπάθεια λοιπόν που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης δίνει ιδιαίτερα έμφαση στη χρήση και αξιοποίηση σύγχρονων εργαλείων (χρήση μετασχηματισμών NFFT, μετασχηματισμών κυματιδίων - Wavelets, περιοδιογραμμάτων Lomb) μέσω των οποίων επιτυγχάνεται φασματική ανάλυση και επεξεργασία του συχνοτικού περιεχομένου των λαμβανομένων σημάτων από εφαρμογές μη καταστροφικών μεθόδων οι οποίες αποτελούν μια αρκετά καλή και χαμηλού κόστους επιλογή έρευνας. Ο αντικειμενικός στόχος της έρευνας αυτής, είναι ο καθορισμός φασματικού ίχνους – υπογραφής, ο οποίος να χαρακτηρίζει το κάθε ξεχωριστό πέτρωμα καθώς και τις επιμέρους ιδιότητές του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΥΠΕΡΗΧΟΙ

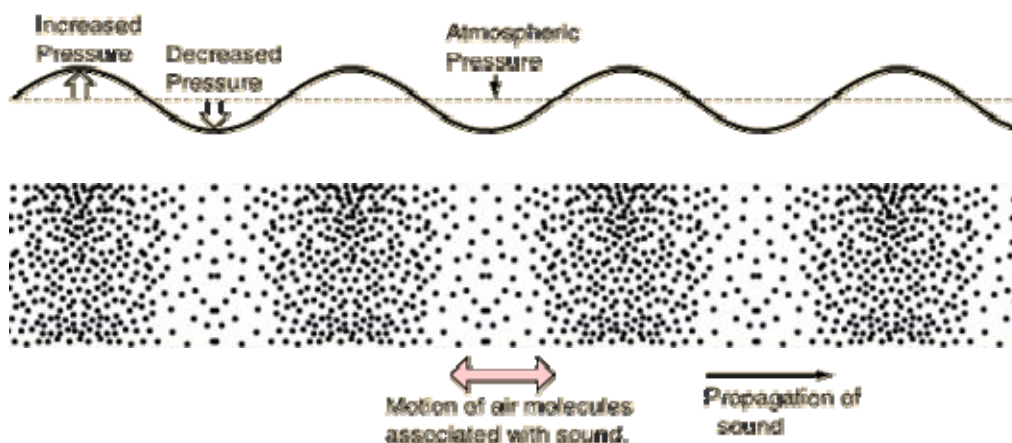
1.1 Γενικά

Οι υπέρηχοι είναι ακουστικά κύματα, δηλαδή μηχανικές ταλαντώσεις-δονήσεις της ύλης, με συχνότητα πάνω από το ακουστικό όριο (20 kHz). Χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως σε εφαρμογές της ιατρικής, της μηχανικής, της τεχνολογίας υλικών, της μεταλλουργίας και αλλού και η συνεισφορά τους στην εξέλιξη και ανάπτυξη αυτών των επιστημών είναι σημαντική καθώς γίνεται αξιοποίηση των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών τους.

Το 1883 κατασκευάστηκε η πρώτη υπερηχητική σειρήνα από τον Francis Galton. Οι επιστήμονες γνώριζαν ότι υπήρχαν παλμικές κινήσεις – μεγαλύτερες και μικρότερες – από εκείνες που μπορούσαν να δώσουν ήχο “ακουστό”, αλλά ο Galton ήταν ο πρώτος που κατασκεύασε μια τέτοια συσκευή η οποία έδινε πλέον τεχνητά τον υπέρηχο και απεδείχθη χρήσιμη όχι μόνο για το εργαστήριο αλλά και για πλείστες εφαρμογές. Παρόλο που το ανθρώπινο αυτί δε μπορούσε να ακούσει τον ήχο της σφυρίχτρας του, ο σκύλος του Galton τον άκουσε και αυτό ήταν το έναυσμα όχι μόνο για να καλεί κανείς τα διάφορα ζώα αλλά στη συνέχεια για να ερευνηθούν, αξιολογηθούν και αξιοποιηθούν οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των ηχητικών κυμάτων και δη των υπερήχων.

Τα ηχητικά κύματα διαφέρουν από τα κύματα του φωτός καθώς κινούνται πολύ πιο αργά από αυτά και η ταχύτητά τους εξαρτάται από το μέσο μέσα στο οποίο οδεύουν. Ο ήχος για παράδειγμα οδεύει με ταχύτητα 300m/sec στον αέρα, αλλά όταν διαδίδεται μέσα σε ατσάλι, η ταχύτητα αυτή μεγαλώνει σχεδόν 15 φορές. Το φως έχει σταθερή ταχύτητα και διαδίδεται και μέσα στο κενό στο οποίο ο ήχος δε μπορεί να περάσει. Μολονότι ο ήχος παρουσιάζεται έτσι με ένα μειονέκτημα, η ικανότητα όμως που έχει να κινείται δια μέσου στερεών σωμάτων – τα οποία εμποδίζουν τελείως τη μετάδοση του φωτός – με σταθερή ταχύτητα ανά δεδομένο μέσο και χωρίς να προκαλεί καμία ζημία στο τμήμα που ελέγχεται, τον καθιστά αρκετά χρήσιμο.

Η αξιοποίηση των υπερήχων λοιπόν, βασίζεται στις βασικές και θεμελιώδεις ιδιότητες της διάδοσης ενός κύματος. Το κύμα διαδίδεται σαν μια διαταραχή των σωματιδίων του μέσου που συντηρεί τη διάδοση του κύματος. Η διάδοση ενός επιπέδου κύματος απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Μετατόπιση των σωματιδίων για ένα διαδιδόμενο υπερηχητικό κύμα (Raichel, 2006).

Τα σωματίδια του μέσου βρίσκονται αρχικά σε ηρεμία και βρίσκονται τοποθετημένα ομοιόμορφα εάν δεν υφίσταται κυματική διαταραχή. Εξαιτίας της παρουσίας υπερηχητικού κύματος τα σωματίδια θα ταλαντωθούν γύρω από τη μέση θέση τους. Η ταλάντωση πραγματοποιείται κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος, καθιστώντας το ένα διαμήκες κύμα. Δεν υφίστανται ουσιαστικά συνολική μετατόπιση των σωματιδίων και μεταφορά μάζας. Το υπερηχητικό κύμα επιδρά ως απλή διαταραχή στο μέσο.

Η απόσταση που διανύεται από τα σωματίδια κατά την διάδοση του ήχου καλείται «σωματιδιακή» μετατόπιση και συνήθως είναι της τάξης του 1 nm. Η ταχύτητα των σωματιδίων που ταλαντώνονται καλείται «σωματιδιακή ταχύτητα». Θα πρέπει να τονιστεί ότι, η ταχύτητα αυτή διαφέρει από τον ρυθμό διάδοσης της ενέργειας σ' ένα μέσο, η οποία στην πραγματικότητα ορίζεται σαν «φασική ταχύτητα» και η οποία παίρνει αρκετά μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την «σωματιδιακή ταχύτητα». Τελικά, παρά το γεγονός ότι τα σωματίδια κινούνται μερικά nm, η διαταραχή που προκαλούν μεταδίδεται σε άλλα σωματίδια του μέσου σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση.

Στην ανάλυση που παρατίθεται παρακάτω για την περιγραφή των ηχητικών κυμάτων, χρησιμοποιείται η ακουστική πίεση (p) (Raichel, 2006). Με τον όρο ακουστική πίεση εννοείται η δημιουργούμενη υπερπίεση ή υποπίεση (σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση) που δημιουργεί το υπερηχητικό κύμα, κατά τη διάδοση του. Σε αντίθεση με την ακουστική πίεση, με τον όρο στατική πίεση (P) εννοείται η στατική πίεση του μέσου διάδοσης, που για την περίπτωση διάδοσης του ήχου στον αέρα είναι η ατμοσφαιρική πίεση.

Άλλες ποσότητες που χρησιμοποιούνται είναι:

- Το μήκος κύματος (λ) που είναι η απόσταση μεταξύ δύο μέγιστων ή ελάχιστων της πίεσης,
- Ο γωνιακός ή κυκλικός κυματαριθμός (k) που ισούται με $2\pi/\lambda$
- Η συχνότητα του ήχου (f) που είναι η συχνότητα ταλάντωσης των σωματιδίων του ελαστικού μέσου λόγω της διάδοσης του υπερηχητικού κύματος,
- Η ταχύτητα των σωματιδίων (u) που είναι η ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου διάδοσης.
- Η ταχύτητα του ήχου (c) που είναι η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής (ταχύτητα του κύματος) στο υλικό μέσο.

1.2 Βασικές αρχές διάδοσης υπερήχων

Ένα κύμα που διαδίδεται μόνο κατά μια διεύθυνση π.χ. τη διεύθυνση του άξονα x , θεωρείται επίπεδο. Επίπεδο μπορεί να θεωρηθεί ένα κύμα όταν αυτό παράγεται από πηγή της οποίας η επιφάνεια εκπομπής είναι ένα επίπεδο για μικρές αποστάσεις, ή πρακτικά από μια σημειακή πηγή που βρίσκεται σε πολύ μεγάλη (άπειρη θεωρητικά) απόσταση, όπου οι σφαιρικές επιφάνειες εκφυλίζονται σε επίπεδες. Αποδεικνύεται (Raichel 2006), ότι για επίπεδα κύματα που διαδίδονται σε μέσο χωρίς απώλειες, η πίεση του ήχου ικανοποιεί τη σχέση:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (1.1)$$

Η λύση της μονοδιάστατης κυματικής εξίσωσης έχει τη μορφή:

$$p(t) = p_o e^{j(\omega t \pm kx)} \quad (1.2)$$

Η παραπάνω λύση παριστά δύο κύματα που διαδίδονται σε αντίθετες διευθύνσεις: κατά τη διεύθυνση $+x$ και τη διεύθυνση $-x$.

Αν μας ενδιαφέρει μόνο η διεύθυνση $+x$ τότε η λύση παίρνει τη μορφή:

$$p(t) = p_o e^{j(\omega t - kx)} \quad (1.3)$$

Λόγω του ότι οποιαδήποτε παρατηρήσιμη ποσότητα είναι πάντα πραγματική, το πραγματικό μέρος της παραπάνω λύσης μπορεί να γραφεί με την μορφή:

$$p(t) = p_o \cos(\omega t - kx) \quad (1.4)$$

Στην παραπάνω σχέση το k είναι ο κυματάριθμος, λ το μήκος κύματος και ω η κυκλική συχνότητα. Τα μεγέθη αυτά συνδέονται με τις γνωστές σχέσεις:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 2\pi f = \frac{\omega}{c} \quad (1.5)$$

Ένας άλλος τύπος κύματος που παίζει σημαντικό ρόλο στην ακουστική των υπερήχων, είναι το σφαιρικό κύμα το οποίο σε ένα πολικό σύστημα συντεταγμένων ορίζεται από την σχέση:

$$p(r, t) = \frac{p_o}{r} \cos(\omega t - kr) \quad (1.6)$$

1.3 Η ταχύτητα του ήχου

Η ταχύτητα του ήχου που εξαρτάται από το μέσο διάδοσης για την περίπτωση διαμηκών κυμάτων που διαδίδονται σε αέρια (Raichel, 2006), δίνεται από τη σχέση:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{MB}} \quad (1.7)$$

όπου c , η ταχύτητα του ήχου,

T , η απόλυτη θερμοκρασία του αερίου,

R , σταθερά ($R = 8317 \text{ m/s/}^\circ\text{K}$),

γ , ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων υπό σταθερά πίεση και υπό σταθερό όγκο (για τον αέρα η τιμή $\gamma = 1,4$ είναι ικανοποιητική),

MB , το μοριακό βάρος του μέσου διάδοσης (για τον αέρα η τιμή 29 είναι ικανοποιητική),

ρ , η πυκνότητα του μέσου διάδοσης,

B , το μέτρο συμπίεστότητας των ρευστών.

Η παραπάνω σχέση για τον αέρα στη θερμοκρασία των 0°C δίνει ταχύτητα του ήχου:

$$c = \sqrt{\frac{1,4 \times 8317 \times 273,15}{29}} \approx 331 \text{ m/s}$$

Στην περίπτωση που υπάρχει υγρασία, τα μόρια των υδρατμών μεταβάλλουν το μέσο μοριακό βάρος του αέρα και συνεπώς μεταβάλουν και την ταχύτητα του ήχου. Στην περίπτωση παρουσίας υγρασίας στην ατμόσφαιρα, αποδεικνύεται ότι η ταχύτητα του ήχου δίδεται από τη σχέση:

$$c_w = c \sqrt{1 - \frac{P_a}{P_o} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_a} - \frac{5}{8} \right)} \quad (1.8)$$

όπου c_w , η ταχύτητα του ήχου σε υγρό περιβάλλον,

P_a , η μερική πίεση των ατμών,

P_o , η ατμοσφαιρική πίεση,

γ_a , γ_w , ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων για τον αέρα και το νερό.

Για την ταχύτητα του ήχου σε οποιαδήποτε θερμοκρασία, με ικανοποιητική προσέγγιση μπορεί να γραφεί:

$$c = 331 + 0.6\Theta \quad (1.9)$$

όπου Θ , η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου.

Επίσης, όταν απαιτείται προσεγγιστικός προσδιορισμός της ταχύτητας του ήχου σε μία θερμοκρασία (T), μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$c = 343.2 \sqrt{\frac{T}{T_o}} \quad (1.10)$$

όπου T , η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin και $T_o = 293,5$ °K.

1.4 Ακουστική εμπέδηση και ένταση του ήχου

1.4.1 Ακουστική εμπέδηση

Σε κάθε σύστημα, ως εμπέδηση ορίζεται το πηλίκο της διέγερσης που εφαρμόζεται σ' αυτό, προς το αποτέλεσμα της διέγερσης (Fahy, 2001). Στα ηλεκτρικά κυκλώματα πχ, ως εμπέδηση ορίζεται το πηλίκο της τάσης που εφαρμόζεται σε ένα στοιχείο (διέγερση) προς την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το στοιχείο (αποτέλεσμα). Σε ένα ακουστικό σύστημα, το ρόλο της διέγερσης τον παίζει η ακουστική πίεση, ενώ το αποτέλεσμα είναι η κίνηση των μορίων του μέσου διάδοσης. Για τον ήχο συνεπώς, μπορεί να δοθεί ο παρακάτω ορισμός.

Ακουστική εμπέδηση ενός μέσου ονομάζεται ο λόγος της ακουστικής πίεσης προς την ταχύτητα των σωματιδίων ή πιο απλά η ακουστική εμπέδηση δίνεται από τη σχέση:

$$Z = \frac{p(r,t)}{u(r,t)} \quad (1.11)$$

όπου p η πίεση και u η ταχύτητα των σωματιδίων. Μονάδα μέτρησης είναι το Rayl (προς τιμή του Rayleigh).

$$1 \text{ Rayl} = 1 \text{ kg} / \text{m}^2 / \text{sec}^2$$

Η ακουστική εμπίεση στην περίπτωση των επίπεδων κυμάτων είναι πραγματικός αριθμός, ενώ στην περίπτωση σφαιρικών, στάσιμων και γενικά κυμάτων που αποκλίνουν είναι μιγαδικός αριθμός.

Για τα επίπεδα κύματα, αποδεικνύεται ότι η ακουστική εμπίεση δίνεται από τη σχέση:

$$Z = \rho \cdot c \quad (1.12)$$

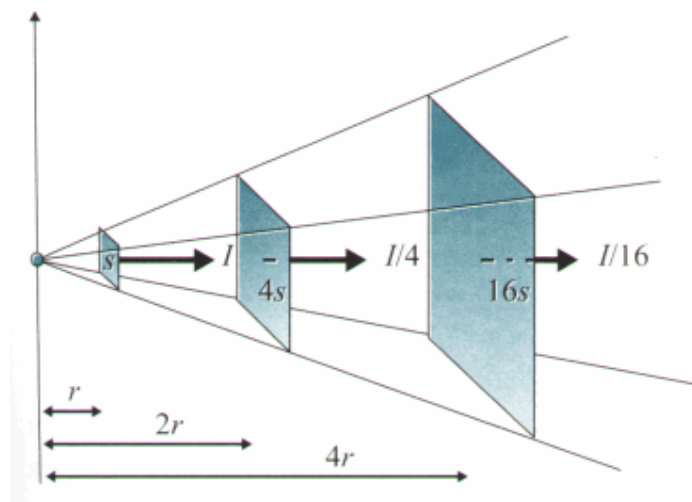
Η σχέση αυτή ονομάζεται χαρακτηριστική εμπίεση ή απλά ακουστική αντίσταση του μέσου διάδοσης. Για τον αέρα σε συνθήκες δωματίου ($P=1 \text{ atm}$, $\theta=22^\circ\text{C}$), προκύπτει ότι $Z=415 \text{ Rayls}$.

1.4.2 Ένταση του ήχου

Ένα ιδιαίτερα χρήσιμο μέγεθος στην ακουστική είναι η ένταση του ήχου. Η ένταση είναι διανυσματικό μέγεθος και εκφράζει τη ροή της ηχητικής ενέργειας. Ως διανυσματικό μέγεθος παρουσιάζει όμως δυσκολία στη μέτρηση του, διότι ο πλήρης καθορισμός ενός διανύσματος απαιτεί εκτός του μέτρου, τη γνώση της διεύθυνσης και φοράς.

Ηχητική ένταση σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου και προς μια καθορισμένη διεύθυνση, είναι το πηλίκο της μέσης ηχητικής ισχύος που διαπερνά κάθετα μία στοιχειώδη επιφάνεια δια του εμβαδού της επιφάνειας (Raichel, 2006). Μονάδα μέτρησης της έντασης είναι το W/m^2 :

$$I = \frac{W}{s} = pu \quad (1.13)$$



Σχήμα 1.2 Ορισμός έντασης ήχου (Raichel, 2006).

Το μέτρο της έντασης του ήχου σε κάποιο σημείο όταν είναι γνωστή η πίεση υπολογίζεται από την σχέση:

$$I = \frac{p_{rms}^2(r)}{\rho c} \quad (1.14)$$

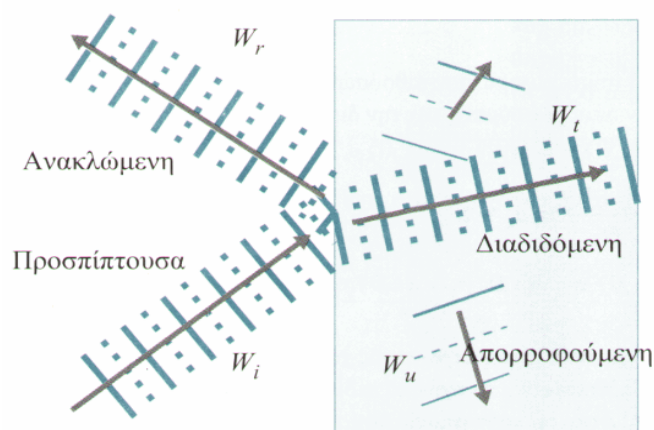
Ο τύπος αυτός ισχύει τόσο για επίπεδα ηχητικά κύματα όσο και για σφαιρικά κύματα (σε μεγάλη απόσταση r από την πηγή) και μόνο στην περίπτωση που ο ήχος διαδίδεται ελεύθερα.

1.5 Ανάκλαση – διάδοση – απορρόφηση και εξασθένηση υπερήχων

1.5.1 Ορισμοί

Όταν ένα υπερηχητικό κύμα πέσει επάνω σε ένα τοίχο ή γενικά σε κάποια επιφάνεια διαχωρισμού δύο μέσων, ένα μέρος από την ενέργεια που μεταφέρει ανακλάται, ενώ ένα άλλο μέρος απορροφάται ή διαδίδεται μέσω του τοίχου από την άλλη πλευρά.

Για τη μελέτη της ανάκλασης και της διάδοσης του υπερήχου ορίζονται οι παρακάτω συντελεστές:



Σχήμα 1.3 Ανάκλαση, απορρόφηση και διάδοση του υπερήχου (Σκαρλάτος, 2006).

α) Συντελεστής ανάκλασης α_r

Αντιπροσωπεύει το λόγο της ανακλώμενης από την επιφάνεια υπερηχητικής ενέργειας (W_r) προς την προσπίπτουσα (W_i):

$$\alpha_r = \frac{W_r}{W_i} = \frac{I_r}{I_i} \quad (1.15)$$

β) Συντελεστής διάδοσης τ

Αντιπροσωπεύει το λόγο της ενέργειας που διαδίδεται από την επιφάνεια διαχωρισμού των δυο μέσων (W_t), προς την προσπίπτουσα (W_i).

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} = \frac{I_t}{I_i} \quad (1.16)$$

γ) Συντελεστής απορρόφησης α

Αντιπροσωπεύει το λόγο της ενέργειας που απορροφάται (W_u) από μια επιφάνεια προς την προσπίπτουσα (W_i)

$$\alpha = \frac{W_u}{W_i} = \frac{I_u}{I_i} \quad (1.17)$$

1.5.2 Απορρόφηση από υλικά

Η απορρόφηση των υπερήχων από διάφορα υλικά οφείλεται κυρίως σε δύο φαινόμενα:

- α) Καθώς το υπερηχητικό κύμα εισχωρεί στο υλικό που είναι συνήθως πορώδες, το μέσο διάδοσης κατά την εκτέλεση των ταλαντώσεων λόγω τριβών με το υλικό χάνει ενέργεια. Η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται δηλαδή σε θερμική.

β) Το υπερηχητικό κύμα διεγείρει προς ταλάντωση (και συνεπώς προσφέρει ενέργεια) τα μόρια του απορροφητικού υλικού, οπότε η ενέργεια του υπερηχητικού κύματος μειώνεται.

Ο συντελεστής απορρόφησης που εκφράζει την απορρόφηση, εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις η γωνία πρόσπτωσης είναι άγνωστη ή μπορεί να μεταβάλλεται. Για το λόγο αυτό στην πράξη χρησιμοποιείται ο συντελεστής απορρόφησης κατά Sabine (α_s). Ο συντελεστής αυτός συνήθως δίδεται στη βιβλιογραφία.

Ως απορρόφηση μιας επιφάνειας (A) ορίζεται το γινόμενο του εμβαδού της επιφάνειας επί τον συντελεστή απορρόφησης της:

$$A = s \cdot \alpha_s \quad (1.18)$$

Η απορρόφηση των επιφανειών μετρείται σε Sabine. Μια επιφάνεια με εμβαδόν 1m^2 έχει απορροφητική ικανότητα 1 Sabine αν ο συντελεστής απορρόφησης είναι 1.

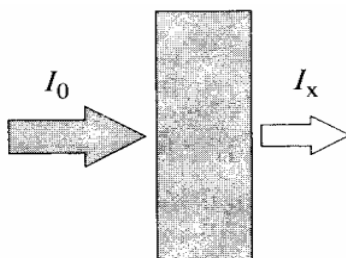
Τα απορροφητικά υλικά μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: στα πορώδη, στα απορροφητικά τύπου μεμβράνης και στους συντονιστές.

1.5.3 Εξασθένηση υπερήχων λόγω απορρόφησης από το μέσο διάδοσης, εύρους δέσμης και μετεωρολογικών φαινομένων

Εξασθένηση λόγω απορρόφησης από το μέσο διάδοσης

Εξασθένηση του υπερήχου ονομάζεται η απώλεια της ηχητικής ενέργειας του υπερήχου όταν αυτός διαδίδεται σε κάποιο μέσο. Η εξασθένηση αυτή οφείλεται σε δύο κυρίως μηχανισμούς :

- Εξασθένηση λόγω κλασικής απορρόφησης.
- Εξασθένηση λόγω του φαινομένου της θερμικής μοριακής αποκατάστασης.



Σχήμα 1.4 Εξασθένηση του ήχου από το μέσο διάδοσης (Raichel, 2006).

Η κυματική εξίσωση στην περίπτωση διάδοσης σε μέσο που προκαλεί απώλειες καταλήγει στην παρακάτω μορφή (εξίσωση Helmholtz):

$$(\nabla^2 + k^2)p = 0 \quad (1.19)$$

Η λύση της εξίσωσης αυτής στην περίπτωση επιπέδων κυμάτων που διαδίδονται κατά την διεύθυνση των x δίδεται από τη σχέση:

$$p = p_o e^{-ax} e^{i(\omega t - kx)} \quad (1.20)$$

Η σχέση αυτή δηλώνει ότι το πλάτος στα επίπεδα κύματα δεν είναι σταθερό ανεξάρτητα από την απόσταση, αλλά μειώνεται εκθετικά με αυτήν. Αν ληφθούν οι rms τιμές της πίεσης της παραπάνω εξίσωσης προκύπτει:

$$p_{rms,x}^2 = p_{rms,o}^2 e^{-2ax} \quad (1.21)$$

Για την ένταση που είναι ανάλογη με το τετράγωνο της rms πίεσης, ισχύει:

$$I_x = I_o e^{-2ax} \quad (1.22)$$

όπου:

I_x , η ένταση του υπερήχου μετά την διέλευση του από στρώμα πάχους x

I_o , η ένταση του υπερήχου στην είσοδο του στρώματος

α , συντελεστής που ονομάζεται συντελεστής απορρόφησης του υλικού.

Η παραπάνω σχέση αν χρησιμοποιηθεί η κλίμακα των dB μπορεί να γραφεί:

$$\Delta L_I = 10 \log e^{-2ax} = 8.7ax = mx \quad (1.23)$$

Ο συντελεστής απορρόφησης $m = 8.7 \cdot \alpha$ που έχει διαστάσεις dB/m μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

$$m = \alpha_c + \alpha_m \text{ όταν } \alpha / k \ll 1 \quad (1.24)$$

όπου α_c ο κλασικός συντελεστής απορρόφησης, α_m ο συντελεστής απορρόφησης που οφείλεται στη μοριακή θερμική αποκατάσταση και k ο κυματαριθμός.

Εξασθένηση υπερήχων λόγω εύρους δέσμης

Η ένταση μίας ηχητικής δέσμης που διαδίδεται σε ελεύθερο χώρο μειώνεται λόγω της γωνίας απόκλισης της δέσμης, δηλαδή το σχέδιο της δέσμης (beam pattern) γίνεται ευρύτερο και η ηχητική ενέργεια κατανέμεται σε μια μεγαλύτερη περιοχή, με αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης της δέσμης.

Η ένταση του ήχου σε ελεύθερη διάδοση είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης για σφαιρικά κύματα. Στην περίπτωση σφαιρικής διάδοσης από ισότροπη πηγή σύμφωνα με τον ορισμό της έντασης ισχύει:

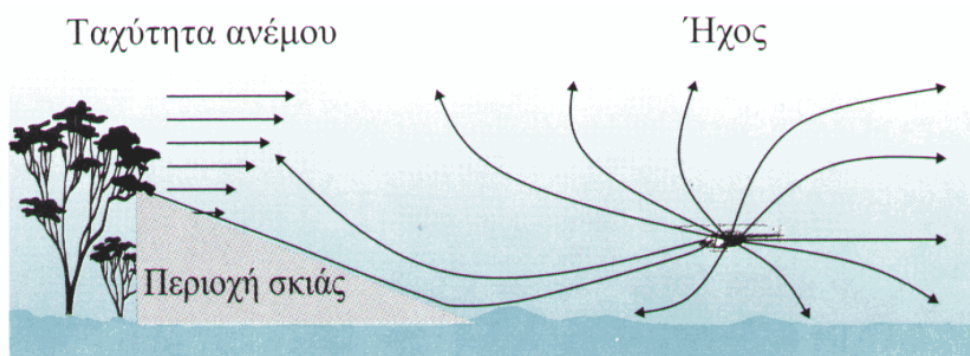
$$I = \frac{w}{4\pi r^2} \quad (1.25)$$

όπου w η ακουστική ισχύς της πηγής, ενώ στην περίπτωση που η πηγή δεν είναι ισότροπη αλλά έχει κατευθυντικότητα Q τότε η σχέση γίνεται:

$$I = \frac{Qw}{4\pi r^2} \quad (1.26)$$

Εξασθένηση υπερήχων λόγω μετεωρολογικών φαινομένων

Από μετρήσεις που έγιναν βρέθηκε ότι η επίδραση της βροχής, ομίχλης και άλλων μετεωρολογικών φαινομένων είναι αμελητέα. Η μόνη σοβαρή επίδραση στη διάδοση των υπερήχων είναι η ταχύτητα του ανέμου καθώς και οι θερμοκρασιακές αναστροφές.



Σχήμα 1.5 Σχηματισμός σκιάς που οφείλεται στην ταχύτητα του ανέμου (Σκαρλάτος, 2006).

Όταν φυσά άνεμος, λόγω τριβών με το έδαφος, τα κατώτερα στρώματα έχουν μικρότερη ταχύτητα από τα ανώτερα, με αποτέλεσμα η ταχύτητα του ανέμου να μεταβάλλεται με το ύψος. Η ταχύτητα του ανέμου στα διάφορα αέρια στρώματα συντίθεται διανυσματικά με τη ταχύτητα των υπερήχων, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της ταχύτητας του ήχου με το ύψος οπότε εμφανίζεται το φαινόμενο της διάθλασης. Το φαινόμενο αυτό είναι υπεύθυνο για την κάμψη των ηχητικών κυμάτων προς τα επάνω ή προς τα κάτω ανάλογα με την διαφοροποίηση της ταχύτητας οπότε εμφανίζονται ζώνες σκιάς.

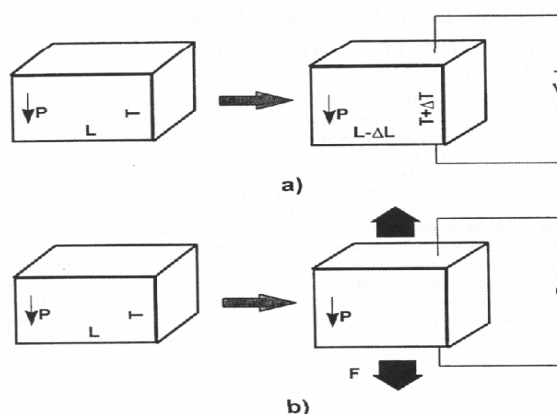
1.6 Εκπομπή και λήψη υπερήχων

1.6.1 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Η εκπομπή και η λήψη των υπερήχων στηρίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή στη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα από ειδικούς κρυστάλλους. Η πιεζοηλεκτρική ιδιότητα οφείλεται στη μετατόπιση και σχετική αναδιάταξη φορτίων που προκαλείται στη δομή των κρυστάλλων με την εφαρμογή μηχανικής πίεσης.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τους Jacques και Pierre Curie το 1880. Διαπίστωσαν ότι εάν ορισμένα κρύσταλλα υποβληθούν σε μηχανική πίεση, πολώνονται ηλεκτρικά και ο βαθμός πόλωσης ήταν ανάλογος με την εφαρμοσμένη πίεση. Επίσης παρατήρησαν ότι τα ίδια υλικά παραμορφώνονται όταν εκτίθενται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό έχει γίνει γνωστό ως αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται σε ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, τα πολωμένα μόρια θα ευθυγραμμιστούν με το ηλεκτρικό πεδίο και αυτή η ευθυγράμμιση των μορίων θα αναγκάσει το υλικό να αλλάξει τις διαστάσεις του. Επίσης όταν ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό αλλάζει τις διαστάσεις λόγω μιας εξωτερικής μηχανικής δύναμης, τότε αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναδιάταξη των φορτίων του κρυστάλλου και την εμφάνιση θετικών και αρνητικών φορτίων στις επιφάνειες του κρυστάλλου.



Σχήμα 1.6 Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο: α) Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί αλλαγή των διαστάσεων του υλικού β) Εφαρμογή πίεσης στο υλικό δημιουργεί επιφανειακά φορτία (Raichel, 2006).

1.6.2 Πιεζοηλεκτρικοί υπερηχητικοί αισθητήρες

Ο μετατροπέας (transducer) αποτελεί ίσως το σημαντικότερο στοιχείο σε ένα σύστημα υπερήχων. Η λειτουργία του έγκειται στο να μετατρέπει ηλεκτρικά σήματα σε κύματα πίεσης τα οποία διαδίδονται μέσα στο μέσο διάδοσης (εκπομπή υπερήχων) και να παράγει το ηλεκτρικό αντίστοιχο οποιασδήποτε λαμβανόμενης ακουστικής κυματομορφής (λήψη υπερήχων).

Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος τοποθετείται ανάμεσα σε δύο λεπτά επίπεδα ηλεκτρόδια. Η εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού σε αυτά προκαλεί τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου εντάσεως E και τη μεταβολή του πάχους z του κρυστάλλου:

$$\frac{dz}{z} = C_c \cdot E \quad (1.27)$$

όπου C_c η αντίστροφη πιεζοηλεκτρική σταθερά.

Η εφαρμογή μηχανικής πίεσης (στη συγκεκριμένη περίπτωση υπερηχητικής πίεσης p) στον κρύσταλλο δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο εντάσεως E :

$$E = C_d \cdot p \quad (1.28)$$

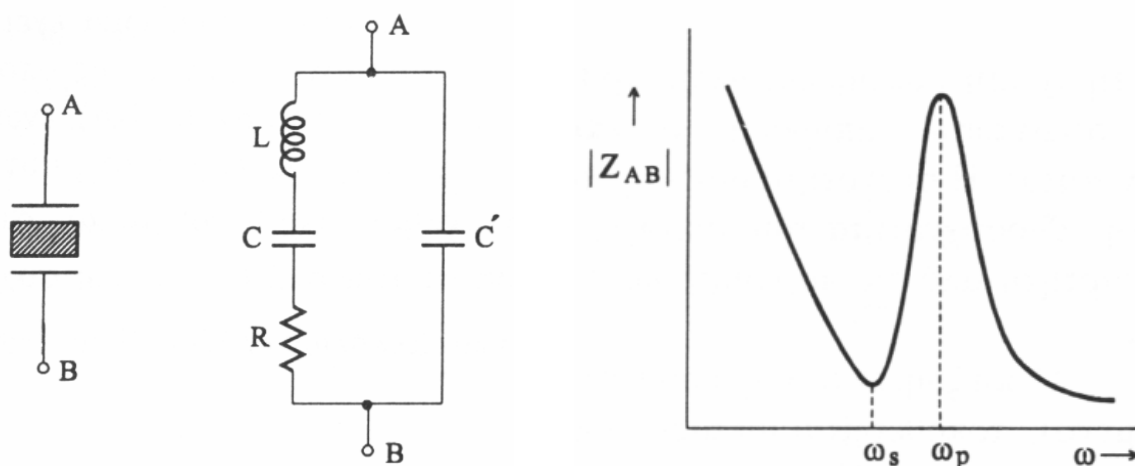
όπου C_d είναι η πιεζοηλεκτρική σταθερά.

Το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο πιεζοηλεκτρικό υλικό σήμερα είναι το PZT (lead - zirconate - titanate) λόγω της υψηλής απόδοσης ηλεκτρομηχανικής μετατροπής, των μικρών εγγενών απωλειών και των καλών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του, που προέρχονται από την υψηλή διηλεκτρική σταθερά του. Το PZT έχει μεγάλη μηχανική αντοχή, μπορεί να λάβει διάφορα σχήματα και μεγέθη, μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 100°C και είναι σταθερό για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι ιδιότητες του μπορούν να ρυθμιστούν με την τροποποίηση της αναλογίας zirconium/titanium και την προσθήκη μικρής ποσότητας άλλων ουσιών π.χ. lanthanum. Τα μειονεκτήματά του είναι η μεγάλη ακουστική εμπέδηση (30 MRayls) σε σύγκριση μ' εκείνη του αέρα (415 Rayls) και η ύπαρξη δευτερογενών λοβών. Η χρήση στρωμάτων ακουστικής σύζευξης (acoustic matching layers) μπορούν να μειώσουν την επίδραση των παραπάνω φαινομένων.

Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το BPT (barium lead titanate), το BPZ (barium lead zirconate), το PVDF (polyvinylidene difluoride) και το PMN (lead magnesium niobate).

Τα προαναφερθέντα υλικά παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με την συχνότητα και την εφαρμοζόμενη σε αυτά πίεση. Για την ακρίβεια υπάρχει

περιοχή συχνοτήτων όπου η απόκριση στην πίεση είναι σχεδόν γραμμική. Όταν προσεγγίζονται οι συχνότητες μηχανικού συντονισμού υπάρχει πολύ οξύς συντονισμός του κρυστάλλου και η απόκριση είναι μία πολύ οξεία καμπύλη (Σχήμα 1.7). Στη γραμμική περιοχή χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες πίεσης και σπανίως για μετατόπιση. Στην περιοχή συντονισμού χρησιμοποιούνται ως ταλαντωτές σε ηλεκτρονικά κυκλώματα και ως αισθητήρες (δέκτες ή πομποί) για υπερήχους. Το αντίστοιχο ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα για την περιοχή συντονισμού παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 1.7 Το ηλεκτρικό ισοδύναμο πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου όπου

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{και} \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC_{oz}}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{C}{C'}}$$

(Raichel, 2006).

Για συντονισμό σε συχνότητες της τάξης μερικών kHz, οι τιμές της αυτεπαγωγής είναι της τάξης του Henry, οι τιμές των πυκνωτών της τάξης των pF και η αντίσταση είναι μερικά Ohm.

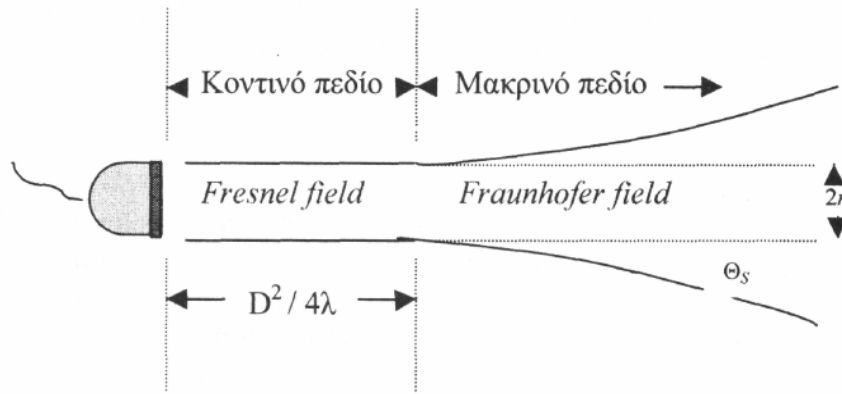
1.6.3 Διέγερση του μετατροπέα και χαρακτηριστικά της δέσμης

Η διέγερση του μετατροπέα πραγματοποιείται από έναν παλμό τάσης ο οποίος επιτυγχάνεται, είτε εκφορτίζοντας έναν πυκνωτή διαμέσου του κρυστάλλου, είτε χρησιμοποιώντας έναν τετραγωνικό παλμό μικρής διάρκειας. Το πλάτος ενός τέτοιου παλμού κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες Volt έως μερικά δέκατα του Volt.

Ο διεγερμένος κρύσταλλος ωθείται σε ταλάντωση με αποτέλεσμα να παράγεται ένα φθίνον υπερηχητικό κύμα το οποίο και καλείται παλμικό κύμα. Ο βασικός στόχος είναι να επιτευχθεί όσο το δυνατό μικρότερο χωρικό μήκος του

παλμού (spatial pulse length, SPL), δηλαδή παλμός μικρής χρονικής διάρκειας. Το εύρος του παλμού ισούται με το γινόμενο του μήκους κύματος επί των αριθμό των κύκλων.

Η μορφή του πεδίου που δημιουργεί θεωρητικά μια ιδανική δέσμη, απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8 Τυπική παράσταση δέσμης υπερήχων (Κουτσούρης και Νικήτα, 1999).

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, το κοντινό πεδίο ή πεδίο Fresnel εκτείνεται σε απόσταση που ορίζεται από την σχέση:

$$z = D^2 / 4\lambda \quad (1.29)$$

όπου D η διάμετρος του μετατροπέα. Εάν ο μετατροπέας είναι κυκλικός με ακτίνα r , η σχέση γίνεται:

$$z = r^2 / \lambda \quad (1.30)$$

Στο πεδίο αυτό, φαινόμενα περίθλασης λόγω πεπερασμένων διαστάσεων του κρυστάλλου δημιουργούν φαινόμενα χωρικής συμβολής με αποτέλεσμα η ένταση να μεταβάλλεται ακανόνιστα.

Στο μακρινό πεδίο ή πεδίο Fraunhofer ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος μπορεί να θεωρηθεί σημειακή πηγή η ένταση της οποίας είναι χωρικά ομοιόμορφη. Το πεδίο Fraunhofer αποκλίνει συναρτήσει της απόστασης με μία γωνία απόκλισης. Η γωνία απόκλισης δίνεται από την σχέση:

$$\Theta_s = \arcsin\left(1.22 \frac{\lambda}{D}\right) \quad \text{για μετατροπέα με διάμετρο } D \quad (1.31)$$

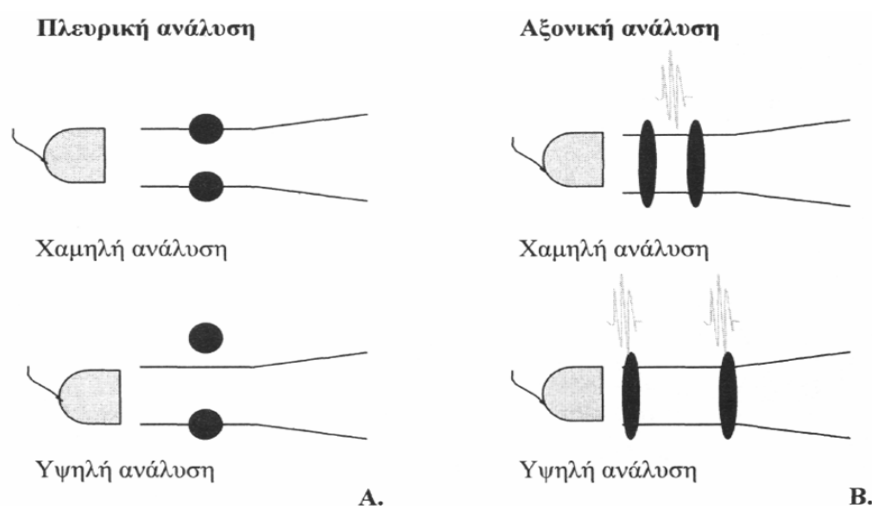
Υπάρχουν δύο είδη ανάλυσης, που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της δέσμης των υπερήχων. Το πρώτο είδος είναι η λεγόμενη αξονική ανάλυση (axial resolution). Η ανάλυση αυτή αντιπροσωπεύει την ελάχιστη απόσταση σε μήκος που

χωρίζει δύο διαφορετικούς στόχους έτσι ώστε αυτοί να γίνονται αντιληπτοί σαν δυο ξεχωριστά αντικείμενα και όχι σαν ένα (Σχήμα 1.9Α). Η ανάλυση αυτή σχετίζεται με το χωρικό μήκος παλμού (SPL) σύμφωνα με την σχέση:

$$\text{Αξονική ανάλυση} = \text{χωρικό μήκος παλμού} / 2 = cT_{\text{pulse}}/2 \quad (1.32)$$

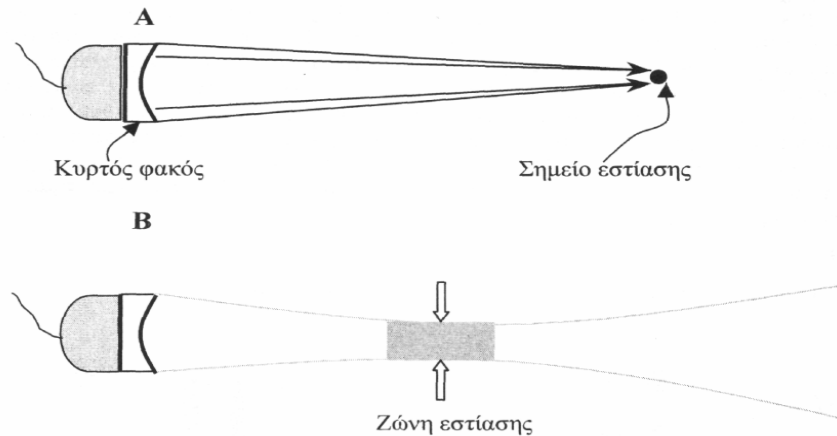
Από την παραπάνω σχέση είναι δυνατό να διαπιστωθεί ότι δύο αντικείμενα θα εκληφθούν σαν ξεχωριστοί στόχοι μόνο εάν η απόσταση που τα χωρίζει είναι μεγαλύτερη ή ίση του ενός δευτέρου του χωρικού μήκους του παλμού (SPL). Για να επιτευχθούν καλύτερες αξονικές αναλύσεις θα πρέπει το χωρικό μήκος του παλμού να είναι όσο το δυνατό μικρότερο γεγονός που οδηγεί σε δύο περιπτώσεις: (α) τη μείωση του μήκους κύματος λ ή (β) τη μείωση του αριθμού των κύκλων.

Το δεύτερο είδος ανάλυσης είναι η λεγόμενη πλευρική ή αξιμουθιακή ανάλυση. Αυτή αναφέρεται στην ελάχιστη απόσταση που πρέπει να χωρίζει δύο στόχους στο κάθετο επίπεδο απ' αυτό που διαδίδεται η δέσμη, ώστε αυτοί να γίνουν αντιληπτοί σαν δυο ξεχωριστά αντικείμενα (Σχήμα 1.9Β). Με άλλα λόγια αντιπροσωπεύει την ελάχιστη απόσταση που χωρίζει δύο αντικείμενα τη στιγμή που το ένα είναι εντός δέσμης και το άλλο εκτός αυτής. Από την περιγραφή αυτή είναι δυνατό να διαπιστωθεί ότι η ανάλυση αυτή υπολείπεται σε ακρίβεια της αξονικής και εξαρτάται από την διάμετρο της δέσμης. Μάλιστα όσο η δέσμη αποκλίνει σε συνάρτηση με την απόσταση τόσο ο διαχωρισμός των στόχων δυσχεραίνει.



Σχήμα 1.9 Α) Πλευρική ανάλυση, Β) Αξονική ανάλυση (Κουτσούρης και Νικήτα, 1999).

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του μετατροπέα το οποίο αξίζει ιδιαίτερη αναφορά είναι η εστίαση. Μέσω της εστίασης διαπιστώνεται η ικανότητα πλευρικής ανάλυσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.10. Η εστίαση μπορεί να επιτευχθεί με ακουστικούς φακούς, με τρόπο αντίστοιχο με τους οπτικούς φακούς ή με κυρτά σχηματισμένους κρυστάλλους. Η εστίαση πραγματοποιείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζεται μία ζώνη εστίασης παρά ένα σημείο εστίασης.



Σχήμα 1.10 Εστίαση δέσμης υπερήχων. Α) Εστίαση με κυρτό φακό όπου διακρίνεται το σημείο εστίασης. Β) Εστίαση όπου διακρίνεται η ζώνη εστίασης (Κουτσούρης και Νικήτα, 1999).

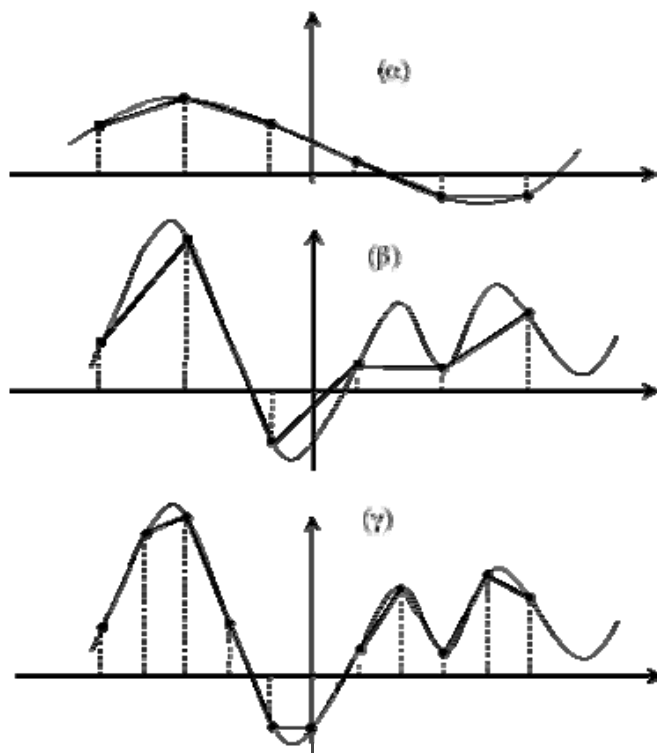
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ**2.1 Ανάλυση Fourier για σήματα διακριτού-χρόνου**

Σκοπός της ανάλυσης που παρουσιάζεται παρακάτω είναι η κατανόηση της χρήσης του FFT για την εύρεση του φάσματος $X(F)$, ενός σήματος συνεχούς-χρόνου $x(t)$. Για την ανάλυση αυτή απαιτείται η δειγματοληψία του σήματος, ώστε να προκύψει το διακριτού-χρόνου σήμα $\{x(nT_s)\}_{n=-\infty}^{\infty}$ (T_s είναι η περίοδος δειγματοληψίας). Το βήμα αυτό είναι απαραίτητο καθώς ένας H/Y δεν μπορεί να χειριστεί σήματα συνεχούς χρόνου ακόμη και αν αυτά ορίζονται σε ένα μικρό χρονικό διάστημα. Βέβαια, αν και η δειγματοληψία εξασφαλίζει διακριτού-χρόνου σήματα, το πλάτος των δειγμάτων $\{x(nT_s)\}$ μπορεί να παίρνει αυθαίρετες τιμές. Ένας H/Y μπορεί να χειριστεί μόνο ψηφιακά σήματα καθώς η αναπαράσταση ενός δείγματος αυθαίρετου πλάτους μπορεί να μην είναι εφικτή, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση που η τιμή του πλάτους είναι ένας άρρητος αριθμός. Η μετατροπή ενός διακριτού-χρόνου, συνεχούς-πλάτους σήμα σε ένα διακριτού-χρόνου, διακριτού-πλάτους σήμα, αυτό δηλαδή που ονομάζεται ψηφιακό σήμα, επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της κβάντισης. Αν και η διαδικασία της κβάντισης θεωρείται αναπόσπαστο κομμάτι της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, στην ανάπτυξη που ακολουθεί θεωρούνται μόνο σήματα διακριτού χρόνου και δεν εξετάζεται η επίδραση της κβάντισης στα σήματα αυτά.

Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται αναφορά στην δειγματοληψία ενός αναλογικού σήματος (η δειγματοληψία γεφυρώνει τον αναλογικό με τον ψηφιακό κόσμο και παρουσιάζονται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες αυτό είναι εφικτό), παρουσιάζεται το ανάπτυγμα σε σειρά Fourier ενός περιοδικού σήματος διακριτού-χρόνου $x(n)$, γίνεται αναφορά στον DTFT και τις ιδιότητές του και στην σχέση του με τον DFT. Παρουσιάζεται επίσης ο FFT για την εύρεση του DFT, ολοκληρώνεται η αναφορά στον μετασχηματισμό Fourier αναλύοντας πώς ο FFT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του φάσματος ενός σήματος με την βοήθεια του H/Y και γίνεται αναφορά στη χρησιμότητα και τα βασικά χαρακτηριστικά του αλγόριθμου NFFT και των μετασχηματισμών Wavelets.

2.2 Δειγματοληψία-Θεώρημα του Nyquist

Έστω ένα σήμα συνεχούς-χρόνου $x(t)$. Το θεώρημα του Nyquist το οποίο αναπτύσσεται παρακάτω, παρέχει τη δυνατότητα της αναπαράστασης ενός σήματος από ένα μετρήσιμο σύνολο σημείων του χωρίς απώλεια πληροφορίας.



Σχήμα 2.1 Δειγματοληψία σήματος (Mitra, 2001).

Το σήμα του Σχήματος 2.1(α) μεταβάλλεται αργά και μία γραμμική παρεμβολή των δειγμάτων του λαμβανόμενα ανά T_s sec, αναπαριστά ικανοποιητικά το σήμα. Όμως, η ίδια περίοδος δειγματοληψίας T_s δεν φαίνεται να οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση του σήματος του Σχήματος 2.1(β) το οποίο μεταβάλλεται πιο γρήγορα. Στην περίπτωση αυτή, τα δείγματα θα πρέπει να λαμβάνονται πιο συχνά (μικρότερο T_s) όπως για παράδειγμα στο Σχήμα 2.1(γ). Καθίσταται λοιπόν κατανοητό ότι όσο πιο απότομα μεταβάλλεται ένα σήμα τόσο συχνότερα θα πρέπει να λαμβάνονται τα δείγματά του. Ένα μέτρο του πόσο γρήγορα μεταβάλλεται ένα σήμα αποτελεί η μέγιστη συχνότητα που είναι παρούσα στο φάσμα του σήματος. Θα πρέπει λοιπόν να υπάρχει μια σχέση που να συνδέει το εύρος ζώνης συχνοτήτων ενός σήματος με τη συχνότητα δειγματοληψίας $F_s = 1/T_s$ για την ικανοποιητική αναπαράσταση του σήματος από τα δείγματά του. Η σχέση αυτή,

γνωστή και ως συνθήκη του Nyquist, είναι καθολική για κάθε είδος δειγματοληψίας, και προκύπτει όπως αναλυτικά αναφέρεται στη συνέχεια.

Κάθε είδος δειγματοληψίας αναλύεται με τη βοήθεια τριών βασικών σχέσεων (Mitra, 2001). Η πρώτη σχέση αφορά στην συνέλιξη ενός σήματος με τη συνάρτηση $\left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(u-nU) \right]$ ανεξάρτητα από το τι εκφράζει η μεταβολή u (χρόνο, συχνότητα ή άλλο φυσικό μέγεθος).

$$x(u) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(u-nU) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(u-nU) \quad (2.1)$$

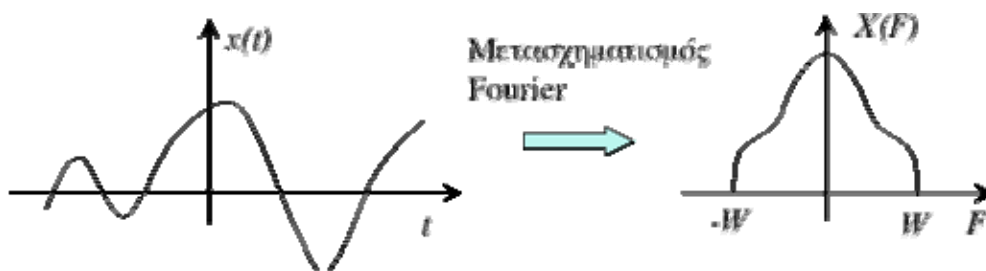
Η δεύτερη σχέση αφορά στον πολλαπλασιασμό ενός σήματος με τη συνάρτηση $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(u-nU)$, δηλαδή,

$$x(u) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(u-nU) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nU) \delta(u-nU) \quad (2.2)$$

Η τρίτη σχέση είναι ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(u-nU)$, δηλαδή:

$$F \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT_s) \right] = \frac{1}{T_s} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta \left(F - \frac{m}{T_s} \right) \quad (2.3)$$

Έστω τώρα ένα χαμηλοπερατό σήμα $x(t)$ με εύρος ζώνης W , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.

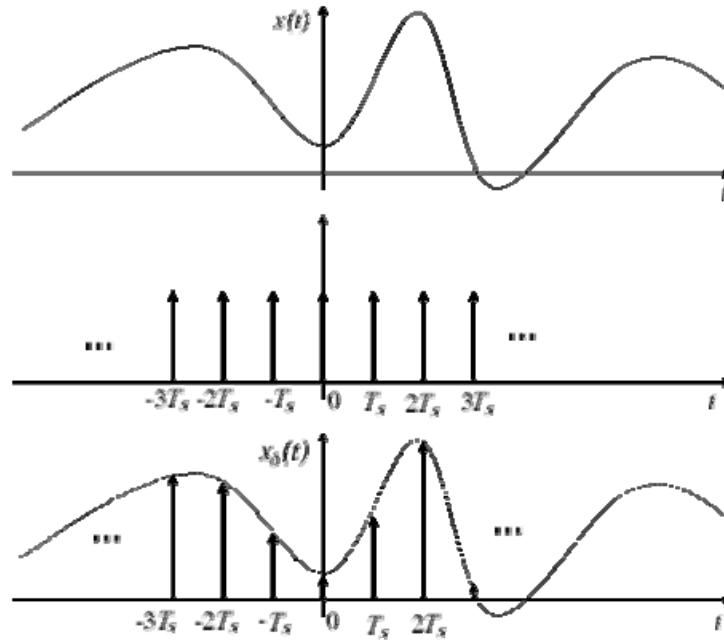


Σχήμα 2.2 Φάσμα χαμηλοπερατού σήματος $x(t)$ (Mitra, 2001).

Η ιδανική δειγματοληψία συνίσταται στον πολλαπλασιασμό του σήματος $x(t)$ με τη συνάρτηση $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT_s)$, όπου T_s είναι η περίοδος δειγματοληψίας. Η όλη διαδικασία απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3. Το σήμα που προκύπτει αποτελείται

από μία σειρά κρουστικών παλμών (τοποθετημένων σε πολλαπλάσια της περιόδου δειγματοληψίας) των οποίων το πλάτος έχει πολλαπλασιασθεί με τις τιμές του σήματος κατά τις χρονικές στιγμές δειγματοληψίας, δηλαδή

$$x_{\delta}(t) = x(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s) \delta(t - nT_s) \quad (2.4)$$

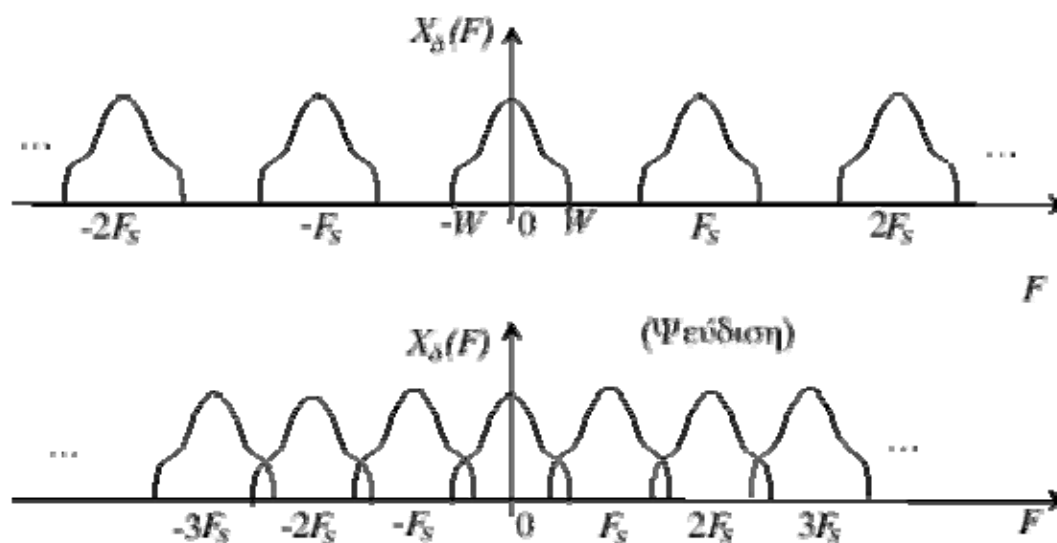


Σχήμα 2.3 Ιδανική δειγματοληψία σήματος (Mitra, 2001).

Το φάσμα του δειγματοληπτημένου σήματος, $X_{\delta}(F)$, βρίσκεται εύκολα λαμβάνοντας τον μετασχηματισμό Fourier των δύο μελών της εξίσωσης 2.4. Έτσι:

$$\begin{aligned} X_{\delta}(F) &= F \left[x(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \right] = X(F) * F \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \right] \\ &\stackrel{b}{=} X(F) * \frac{1}{T_s} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta \left(F - \frac{m}{T_s} \right) \stackrel{c}{=} \frac{1}{T_s} \sum_{m=-\infty}^{\infty} x \left(F - \frac{m}{T_s} \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Η ισότητα (a) προκύπτει από την ιδιότητα του γινομένου του μετασχηματισμού Fourier, δηλαδή, εάν $F[y(t)] = Y(F)$ και $F[w(t)] = W(F)$ τότε $F[y(t) \cdot w(t)] = Y(F) * W(F)$. Προκύπτει λοιπόν, ότι ο μετασχηματισμός Fourier $X_\delta(F)$ του δειγματοληπτημένου σήματος είναι το άθροισμα αντιγράφων του $X(F)$ μετατοπισμένων κατά πολλαπλάσια του $F_s = 1/T_s$. Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζεται το $X_\delta(F)$.



Σχήμα 2.4 Φάσμα δειγματοληπτημένου σήματος $X_\delta(F)$ (Mitra, 2001).

Εάν $T_s > \frac{1}{2W}$, $F_s < 2W$, τότε τα αντίγραφα του φάσματος του $x(t)$ παρουσιάζουν επικαλύψεις και δεν είναι δυνατή η ανακατασκευή του αρχικού σήματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *ψευδοφάνεια* (aliasing) και είναι αποτέλεσμα της υποδειγματοληψίας. Αντίθετα, εάν $T_s \leq \frac{1}{2W}$, $F_s \geq 2W$, τότε δεν υπάρχει επικάλυψη φασμάτων και με τη χρήση κατάλληλων φίλτρων καθίσταται δυνατό να ανακτηθεί το αρχικό σήμα. Η συχνότητα δειγματοληψίας $F_s = 2W$ είναι η ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας για την αποφυγή της ψεύδισης και ονομάζεται *συχνότητα ή ρυθμός δειγματοληψίας Nyquist*.

Για να ανακτηθεί όμως το αρχικό σήμα $x(t)$ από τα δείγματα $x(nT_s)$, θα πρέπει το δειγματοληπτημένο σήμα $x_\delta(t)$ να φιλτραρισθεί από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο με χαρακτηριστικά απόκρισης συχνότητας

1. $H(F) = T_s$ για $|F| < W$.
2. $H(F) = 0$ για $|F| \geq F_s - W$.

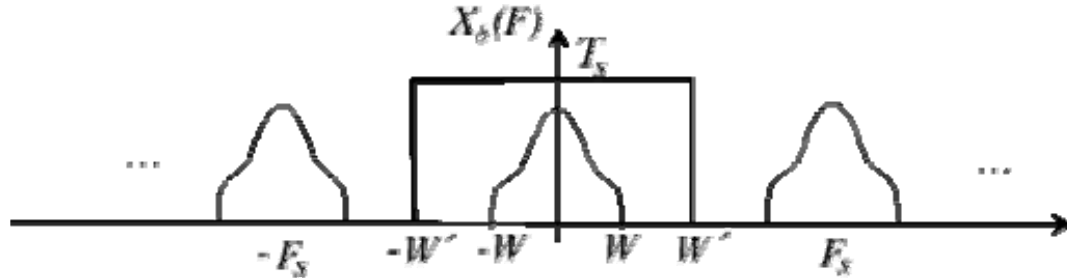
Με το φίλτρο αυτό αποκόπτονται τα αντίγραφα του $X(F)$ και απομένει μόνο το αρχικό φάσμα ή ισοδύναμα στο πεδίο του χρόνου το αρχικό σήμα $x(t)$. Για το διάστημα τιμών $W \leq |F| < F_s - W$, το φίλτρο μπορεί να έχει αυθαίρετη χαρακτηριστική έτσι ώστε να διευκολύνεται η υλοποίησή του. Μια επιλογή, που όμως δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμη, είναι αυτή ενός χαμηλοπερατού φίλτρου με χαρακτηριστική ορθογώνιου σχήματος και συχνότητα αποκοπής W' , όπου $W \leq W' \leq F_s - W$, δηλαδή

$$H(F) = T_s \Pi\left(\frac{F}{2W'}\right) \quad (2.6)$$

Με αυτή την επιλογή, η έξοδος του φίλτρου είναι (στο πεδίο συχνοτήτων)

$$X(F) = X_\delta(F) \cdot T_s \Pi\left(\frac{F}{2W'}\right) \quad (2.7)$$

όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 Αναπαράσταση ανακατασκευής σήματος στο πεδίο συχνοτήτων (Mittra, 2001).

Λαμβάνοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier και των δύο μελών της προηγούμενης εξίσωσης προκύπτει:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_\delta(t) * 2W' T_s \operatorname{sinc}(2W't) = \\ &= \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s) \delta(t - nT_s) \right) * 2W' T_s \operatorname{sinc}(2W't) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} 2W' T_s x(nT_s) \operatorname{sinc}(2W'(t - nT_s)) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Η σχέση αυτή δείχνει ότι η χρήση της συνάρτησης $\text{sinc}(\cdot)$ για την παρεμβολή μεταξύ των δειγμάτων οδηγεί σε τέλεια ανακατασκευή του σήματος. Εάν η δειγματοληψία γίνει στο ρυθμό Nyquist, τότε η μόνη δυνατή επιλογή για τη συχνότητα αποκοπής του φίλτρου ανακατασκευής είναι $W' = W = F_s/2$. Στην περίπτωση αυτή

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s) \text{sinc}(t/T_s - n) \quad (2.9)$$

Στην πράξη η δειγματοληψία γίνεται σε ρυθμούς πολύ μεγαλύτερους της συχνότητας Nyquist αφήνοντας έτσι μια ζώνη προστασίας εύρους $F_s - 2W$ μεταξύ δύο διαδοχικών αντιγράφων του φάσματος, διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο την υλοποίηση των φίλτρων ανακατασκευής.

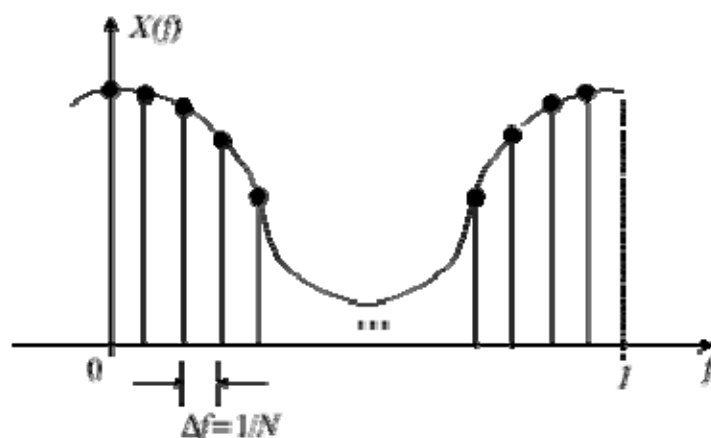
2.3 Διακριτός μετασχηματισμός Fourier

Η φασματική ανάλυση των σημάτων διακριτού-χρόνου συνήθως εκτελείται σε έναν ψηφιακό επεξεργαστή σήματος (Digital Signal Processor - DSP) ή με τη βοήθεια λογισμικού σε κάποιον υπολογιστή. Όμως το φάσμα ενός μη περιοδικού σήματος διακριτού-χρόνου $\{x(n)\}$, $X(f)$ ή $X(\omega)$, είναι συνεχής συνάρτηση της μεταβλητής f ή ω αντίστοιχα, και συνεπώς δεν είναι εφικτή η εύρεσή του με τη βοήθεια ενός Η/Υ. Για το σκοπό αυτό, θα πρέπει να γίνει η εύρεση των δειγμάτων του $X(f)$ ή $X(\omega)$, τα οποία λαμβάνονται αρκετά πυκνά ώστε να επιτευχθεί καλή προσέγγιση του φάσματος του σήματος. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στον Διακριτό Μετασχηματισμό Fourier (Discrete Fourier Transform - DFT) (Καραγιάννης και Καλλίνικος, 1991).

Έστω λοιπόν ένα μη περιοδικό σήμα τύπου ενέργειας $x(n)$ με φάσμα $X(f)$, το οποίο είναι περιοδική συνάρτηση της μεταβλητής f . Για διευκόλυνση θεωρείται το διάστημα συχνοτήτων $[0,1)$, το οποίο κα ισομοιράζεται σε N διαστήματα εύρους $\delta f = 1/N$. Στη συνέχεια υπολογίζεται το φάσμα $X(f)$ στις συχνότητες $f_k = k/N$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, δηλαδή

$$X(f) \Big|_{f=k/N} = X(fk) = X\left(\frac{k}{N}\right) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) e^{-j2\pi \frac{k}{N}n}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.10)$$

Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Δειγματοληψία στο πεδίο συχνοτήτων του $X(f)$ (Καραγιάννης και Καλλίνικος, 1991).

Το δειγματοληπτομένο φάσμα $X(k/N)$ είναι διακριτό και επομένως θα πρέπει να αντιστοιχεί σε περιοδικό σήμα (Rabiner and Schafer, 2007). Για να προσδιοριστεί το σήμα αυτό ομαδοποιούνται οι αθροίσεις ανά N , δηλαδή:

$$\begin{aligned} X\left(\frac{k}{N}\right) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) e^{-j2\pi \frac{k}{N} n} \\ &= \dots + \sum_{n=-N}^{-1} x(n) e^{-j2\pi \frac{k}{N} n} + \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi \frac{k}{N} n} + \sum_{n=N}^{2N-1} x(n) e^{-j2\pi \frac{k}{N} n} + \dots \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=mN}^{mN+(N-1)} x(n) e^{-j2\pi \frac{k}{N} n} \end{aligned}$$

Με την αλλαγή μεταβλητής $n \rightarrow n - mN$ στο εσωτερικό άθροισμα και την εναλλαγή των δύο αθροισμάτων λαμβάνεται:

$$\begin{aligned} X\left(\frac{k}{N}\right) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(n - mN) e^{-j2\pi \frac{k}{N} (n - mN)} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} x(n - mN) \right] e^{-j2\pi \frac{k}{N} n}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Το σήμα που εμφανίζεται στις τετραγωνικές αγκύλες, δηλαδή:

$$x_p(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(n - mN) \quad (2.12)$$

προκύπτει από την επανάληψη του $x(n)$ ανά N δείγματα και επομένως είναι περιοδικό με περίοδο N . Επομένως μπορεί να αναπτυχθεί σε σειρά Fourier ως:

$$x_p(n) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j2\pi \frac{k}{N}n}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.13)$$

με συντελεστές c_k μιγαδικούς που δίδονται από την σχέση

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_p(n) e^{-j2\pi \frac{k}{N}n}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.14)$$

δηλαδή,

$$c_k = \frac{1}{N} X\left(\frac{k}{N}\right) \quad (2.15)$$

και η

$$x_p = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X\left(\frac{k}{N}\right) e^{j2\pi \frac{k}{N}n} \quad (2.16)$$

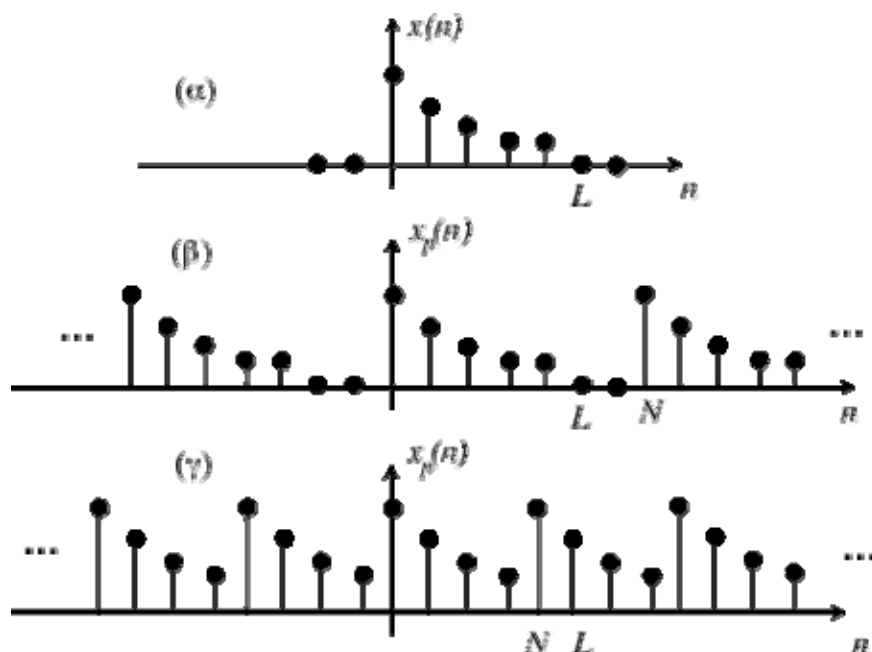
δείχνει πώς είναι δυνατό να ληφθεί το περιοδικό σήμα $x_p(n)$ από τα δείγματα του φάσματος $X(f)$. Όμως αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι είναι δυνατόν να ανακατασκευαστεί το αρχικό σήμα $x(n)$.

Για να είναι εφικτή η αναπαραγωγή του αρχικού σήματος $x(n)$ θα πρέπει η τιμή της παραμέτρου N να είναι μεγαλύτερη από τη διάρκεια του σήματος $x(n)$ ώστε να μην υπάρχει επικάλυψη των σημάτων κατά τη δημιουργία του $x_p(n)$.

Σε αυτή μόνο την περίπτωση

$$x(n) = \begin{cases} X_p(n) \rightarrow n=0, 1, \dots, N-1 \\ 0 \end{cases}$$

Η εξίσωση (2.16) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του αρχικού σήματος $x(n)$. Στο Σχήμα 2.7 απεικονίζεται ένα σήμα διάρκειας L και η περιοδική επέκτασή του (περίοδος N). Μόνο στην περίπτωση που $N \geq L$ είναι δυνατή η ανακατασκευή του σήματος από τα δείγματα του φάσματος $X(k/N)$.



Σχήμα 2.7 (α) Μη περιοδικό σήμα $x(n)$ διάρκειας L (β) Περιοδική επέκταση $N \geq L$
 (γ) Περιοδική επέκταση $N < L$ ψεύδιση (Καραγιάννης και Καλλίνικος, 1991).

Συνοψίζοντας, εάν ένα σήμα $x(n)$ έχει διάρκεια L , δηλαδή $x(n)=0$ για $n < 0$ και $n \geq L$ είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο μετασχηματισμός Fourier $X(f)$ του σήματος σε N ($N \geq L$) ισαπέχουσες συχνότητες χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$X(k) \equiv X\left(\frac{k}{N}\right) = \sum_{n=0}^{L-1} x(n) e^{-j2\pi \frac{k}{N}n}$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi \frac{k}{N}n}, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (2.17)$$

όπου στην ισότητα (α) το άνω όριο της άθροισης έχει αυξηθεί (για διευκόλυνση) από $L-1$ σε $N-1$, αφού $x(n)=0$ για $n \geq L$. Η σχέση αυτή καλείται *διακριτός μετασχηματισμός Fourier* του $x(n)$ ενώ η σχέση $x(n) = \frac{1}{N} \sum_{K=0}^{N-1} x(k) e^{j2\pi \frac{K}{N}n}$ για $n = 0, 1, \dots, N-1$ καλείται *αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier* (Inverse Discrete Fourier Transform – IDFT).

2.4 Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (FFT)

Έστω, $X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}$, $0 \leq k \leq N-1$ ο DFT του $[x(n)]$ όπου

$W_N^{nk} = e^{-j(2\pi/N)nk}$. Για να υπολογισθεί ο DFT του $x(n)$ μιας ακολουθίας μήκους N το για το κάθε ένα δείγμα DFT $X(k)$ απαιτούνται N μιγαδικοί πολλαπλασιασμοί και $(N-1)$ προσθέσεις. Επομένως ο υπολογισμός N δειγμάτων του DFT, $X(k)$, $k=0, N-1$, απαιτεί N^2 μιγαδικούς πολλαπλασιασμούς και $N(N-1)$ μιγαδικές προσθέσεις. Επειδή ο χρόνος εκτέλεσης του πολλαπλασιασμού είναι πολύ μεγαλύτερος της πρόσθεσης, οι αλγόριθμοι για τον ταχύ υπολογισμό του DFT επικεντρώνονται σε διάφορα τεχνάσματα που έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση των πολλαπλασιασμών.

Η κυριότερη μέθοδος για τον ταχύ υπολογισμό του DFT δημοσιεύτηκε από τους Cooley και Tukey το 1965 και αφορά την εξοικονόμηση χρόνου για τον υπολογισμό του. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη διάσπαση του αρχικού DFT σε μικρότερα τμήματα τα οποία στο τέλος επανασυνδέονται για τη δημιουργία του ζητούμενου DFT. Η διάσπαση αυτή μπορεί να γίνει στο πεδίο χρόνου ή στο πεδίο συχνότητας (decimation in time ή decimation in frequency) με τα ίδια αποτελέσματα. Όταν το N είναι δύναμη του 2 τότε ο αλγόριθμος ονομάζεται radix-2 FFT. Η βασική μέθοδος FFT μειώνει τον αριθμό των πολλαπλασιασμών από N^2 σε $(N/2)\log_2 N = N\log_2 N$ όπου $N=2^V$. Για παράδειγμα, όταν το μήκος δείγματος είναι $N=1024=2^{10}$ τότε ο υπολογισμός του DFT απαιτεί $1024^2=1.048.576$ πολλαπλασιασμούς ενώ ο FFT απαιτεί μόνο $(1024/2)10=5.120$ πολλαπλασιασμούς. Εάν ο χρόνος εκτέλεσης μιγαδικού πολλαπλασιασμού ενός υπολογιστή είναι $10\mu s$ τότε ο χρόνος υπολογισμού ενός DFT 1024 δειγμάτων είναι περίπου 10 s, ενώ με χρήση του FFT ο χρόνος αυτός μειώνεται σε 50 ms, δηλαδή επιτυγχάνεται μείωση της τάξης 200 προς 1 (όταν $N=1024$).

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τις αριθμητικές πράξεις που απαιτούνται για τον υπολογισμό του DFT.

Πίνακας 2.1 Σύγκριση μιγαδικών πράξεων που απαιτεί η κατευθείαν εφαρμογή του DFT με τον Cooley Tukey FFT (Καραγιάννης και Ραγκούση, 1993)

N	πολλαπλασιασμοί		προσθέσεις		φορές ταχύτερος
	DFT	FFT	DFT	FFT	$\frac{N^2}{\frac{N}{2} \log_2 N}$
4	16	4	12	8	4.0
8	64	12	56	24	5.3
16	256	32	240	64	8.0
32	1,024	80	992	160	12.8
64	4,096	192	4,032	384	21.3
128	16,384	448	16,256	896	36.6
256	65,535	1,024	65,280	2,048	64.0
512	262,144	2,304	261,632	4,608	113.8
1024	1,048,576	5,120	1,047,552	10,240	204.8
2048	4,194,304	11,264	4,192,256	22,528	372.4

2.5 Ο Μετασχηματισμός NFFT

Ο NFFT αξιοποιώντας καλά εντοπισμένα μη ισοδύναμα παράθυρα άντλησης πληροφορίας χρόνου και συχνότητας προσεγγίζει αποτελεσματικότερα την πραγματική τιμή (Fenn, 2005).

$$f(x_j) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \hat{f}_k e^{-2\pi i k x_j} \quad (j=1, \dots, M) \text{ για } x \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$$

Ο υπολογισμός του NFFT είναι βασισμένος στην προσέγγιση του ακόλουθου τριγωνομετρικού πολυωνύμου:

$$f(x) := \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \hat{f}_k e^{-2\pi i k x}$$

με κατάλληλους γραμμικούς συνδυασμούς μιας παραθυρικής παραμέτρου φ , που έχει μεγάλη ακρίβεια στον τομέα συχνότητας – χρόνου. Η αριθμητική πολυπλοκότητα του αλγόριθμου είναι $(N \log N + M \log \frac{1}{\varepsilon})$, όπου το ε δηλώνει την απαραίτητη ακρίβεια.

Εν κατακλείδι ο NFFT είναι ένας προσεγγιστικός αλγόριθμος που με χαρακτηριστική απλότητα εκμεταλλεύεται την αξιοποίηση καλά εντοπισμένων μη ισοδύναμων παραθύρων, γεγονός που τον καθιστά πολύ χρήσιμο σε εφαρμογές ανάλυσης χρονικά μεταβαλλόμενων σημάτων.

Έστω λοιπόν $N = N \in 2N$ και γι' αυτό $I_n = \left\{-\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}-1\right\}$. Στόχος είναι ο

γρήγορος υπολογισμός του περιοδικού τριγωνομετρικού πολυωνύμου:

$$f(x) := \sum_{k \in I_N} \widehat{f}_k e^{2\pi i k x} \quad (2.18)$$

Έστω φ μια παραθυρική συνάρτηση η οποία σχετίζεται με το μεταβλητό εύρος του παραθύρου δειγματοληψίας και της οποίας η περιοδική της μορφή

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}(x) &= \sum_{r \in \mathbb{Z}} \varphi(x+r) \text{ είναι τέτοια ώστε να έχει απόλυτη σύγκλιση σειράς Fourier} \\ \tilde{\varphi}(x) &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_k(\tilde{\varphi}) e^{-2\pi i k x} \end{aligned} \quad (2.19)$$

με τους συντελεστές Fourier

$$c_k(\tilde{\varphi}) := \int_{-1/2}^{1/2} \tilde{\varphi}(x) e^{2\pi i k x} dx = \int_{\mathbb{R}} \varphi(x) e^{2\pi i k x} dx \quad (k \in \mathbb{Z}) \quad (2.20)$$

Εισάγοντας τον παράγοντα $\sigma > 1$, $n := \sigma N$, και υπολογίζεται η f από τον τύπο:

$$s_1(x) := \sum_{\ell \in I_n} g_\ell \tilde{\varphi}\left(x - \frac{\ell}{n}\right) \quad (2.21)$$

και καθορίζεται η g_ℓ ώστε να ισχύει $s_1 \approx f$. Μεταβαίνοντας στο πεδίο της συχνότητας, προκύπτει:

$$\begin{aligned} s_1(x) &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} \widehat{g}_k c_k(\tilde{\varphi}) e^{-2\pi i k x} \\ &= \sum_{k \in I_n} \widehat{g}_k c_k(\tilde{\varphi}) e^{-2\pi i k x} + \sum_{r \in \mathbb{Z}/\{0\}} \sum_{k=-n}^{n-1} \widehat{g}_k c_{k+nr}(\tilde{\varphi}) e^{-2\pi i (k+nr)x} \end{aligned} \quad (2.22)$$

με τους διακριτούς συντελεστές Fourier:

$$\widehat{g}_k := \sum_{\ell \in I_n} g_\ell e^{2\pi i k \ell / n} \quad (2.23)$$

$$g_\ell := \frac{1}{n} \sum_{k \in I_n} \widehat{g}_k e^{-2\pi i k \ell / n} \quad (2.24)$$

Ας υποθεθεί ότι οι συντελεστές Fourier $c_k(\tilde{\varphi})$ είναι πολύ μικροί για $|k| \geq n - \frac{N}{2}$

και ότι $c_k(\tilde{\varphi}) \neq 0$ για $k \in I_N$, συγκρίνοντας τις σχέσεις (2.23) και (2.24),

προκύπτει ότι:

$$\hat{g}_k := \hat{g}_{k+nr} = \begin{cases} \hat{f}_k / c_k(\tilde{\varphi}) & k \in I_N \\ 0 & k \in I_n / I_N \end{cases} \quad (2.25)$$

για $r \in \mathbb{Z}$. Οι τιμές g_ℓ μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση (2.25) με ένα FFT μεγέθους n . Αυτή η προσέγγιση προκαλεί σφάλμα. Θεωρώντας δε στη συνέχεια ότι η φ είναι καλά ορισμένη στο πεδίο του χρόνου, έτσι ώστε να μπορεί να προσεγγιστεί από μια συνάρτηση της μορφής:

$$\psi(x) = \varphi(x) X_{\left[-\frac{m}{n}, \frac{m}{n}\right]}(x)$$

υποθέτοντας ότι $\psi = \left[-\frac{m}{n}, \frac{m}{n}\right]$ και η παράμετρος $m \in \mathbb{N}$ ($m \ll n$). Μαζί με την

πρώτη περιοδική έκδοση ψ και με τη βοήθεια του δείκτη

$$I_{n,m}(x_j) := \left\{ \ell \in I_n : nx_j - m \leq \ell \leq nx_j + m \right\}$$

μια προσέγγιση της S_1 καθορίζεται από την σχέση:

$$f(x_j) \approx s_1(x_j) \approx s(x_j) := \sum_{\ell \in I_{n,m}(x_j)} g_\ell \tilde{\psi}\left(x_j \frac{\ell}{n}\right) \quad (2.26)$$

Για σταθερό $x_j \in T$, το παραπάνω άθροισμα περιέχει το πολύ $2m+1$ μη μηδενικούς προσθετέους. Αυτή η προσέγγιση προκαλεί λάθος περικοπής.

Συνοψίζοντας, η NFFT προσεγγίζει την $f(x_j)$ με τον υπολογισμό της $s(x_j)$ μέσω των (2.23), (2.24) και (2.25) και (2.26) με $O(n \log n + mM)$ αριθμητικές πράξεις.

2.6 Μετασχηματισμός Κυματιδίων (Wavelets)

2.6.1 Σχέση της wavelet ανάλυσης με την ανάλυση Fourier

Η ανάλυση Fourier είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση χρονικά αμετάβλητων σημάτων. Το πρόβλημα είναι ότι δίνει μόνο τις συχνότητες που περιέχονται στο σήμα, και όχι το *πότε* αυτές εμφανίζονται. Αυτό δεν χρειάζεται στα χρονικά αμετάβλητα σήματα, διότι οι συχνότητες που τα αποτελούν υπάρχουν σε

όλες τις χρονικές στιγμές (Van Vilet, 2002). Για τα χρονικά μεταβαλλόμενα σήματα, η αναπαράσταση αυτή δεν είναι αρκετή. Χρειάζεται ένας μετασχηματισμός που να δίνει πληροφορίες τόσο για τις συχνότητες, όσο και για το χρόνο στον οποίο αυτές εμφανίζονται. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ο Short Time Fourier Transform (STFT), του οποίου η μόνη διαφορά με τον παραδοσιακό μετασχηματισμό Fourier είναι ότι το σήμα χωρίζεται σε τμήματα πριν αναλυθεί και τα τμήματα αυτά του σήματος είναι χρονικά αμετάβλητα (Torrence and Combo, 2000).

Το νέο πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι το ποιο θα πρέπει να είναι το μέγεθος αυτού του παραθύρου. Με βάση την αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg, δεν είναι γνωστό ποιες συχνότητες είναι παρούσες σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, αλλά είναι γνωστό ποιο *εύρος* συχνοτήτων υπάρχει σε ένα χρονικό *διάστημα*. Αν λοιπόν επιλεγεί πολύ μικρό παράθυρο, περιορίζεται το χρονικό διάστημα και αυξάνεται η αβεβαιότητα για τις συχνότητες που παρουσιάζονται σε αυτό. Όσο μεγαλώνει το παράθυρο, οι συχνότητες γίνονται πιο συγκεκριμένες, αλλά ο χρόνος στον οποίο αυτές υπάρχουν γίνεται πιο αβέβαιος.

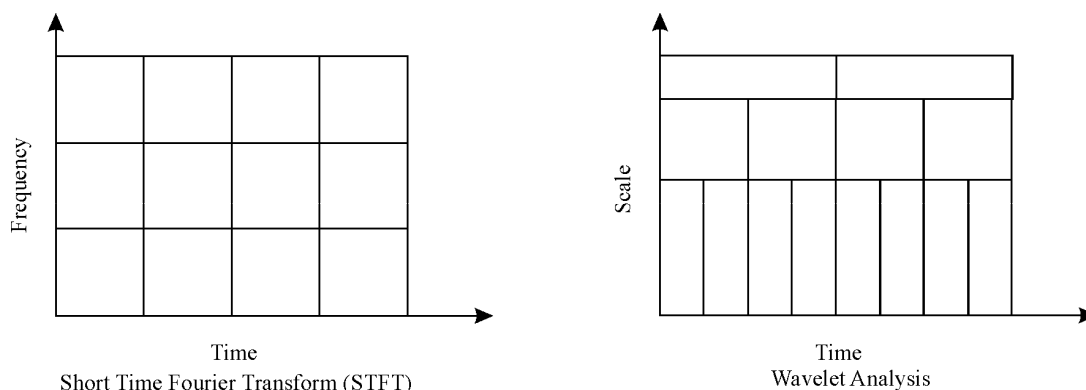
Το πρόβλημα λύνεται με τη ανάλυση σε wavelets (wavelet transform, WT), στην οποία το παράθυρο έχει μεταβλητό μέγεθος. Αφού υπολογιστεί το φάσμα χρησιμοποιώντας κάποιο μέγεθος παραθύρου, στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται για ένα λίγο μεγαλύτερο ή μικρότερο παράθυρο. Στο τέλος, το αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο αναπαραστάσεων χρόνου-συχνότητας, για διαφορετικά μεγέθη παραθύρων.

Η διαφορά STFT και WT φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Καταρχήν παρατηρείται ότι σε αυτά τα διαγράμματα δεν υπάρχουν *σημεία* αλλά *κουτιά*, λόγω της αρχής του Heisenberg. Τα κουτιά αυτά έχουν σταθερό εμβαδόν, που συμβολίζει τη μεγαλύτερη δυνατή πληροφορία που δύναται να υπάρχει για το χρόνο και τη συχνότητα του σήματος, χωρίς να παραβιάζεται η αρχή της απροσδιοριστίας.

Επισημαίνεται ότι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.9, στην ανάλυση σε wavelets δεν χρησιμοποιείται ο όρος «συχνότητα», αλλά «κλίμακα», μια έννοια αντίστροφη της συχνότητας.

Στο STFT όλα τα κουτιά έχουν τις ίδιες ακριβώς διαστάσεις λόγω του ότι χρησιμοποιείται σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης το ίδιο μέγεθος παραθύρου. Αντίθετα, στο WT οι διαστάσεις των κουτιών *αλλάζουν*. Υπάρχουν μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα στις χαμηλές συχνότητες (μεγάλη κλίμακα) και μικρότερα στις υψηλές (μικρή κλίμακα). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλή ανάλυση των

υψηλών συχνοτήτων στο πεδίο του χρόνου και καλή ανάλυση των χαμηλών συχνοτήτων στο πεδίο της συχνότητας. Αυτός ο μετασχηματισμός είναι κατάλληλος για σήματα που περιέχουν χαμηλής συχνότητας συνιστώσες για μεγάλη διάρκεια και υψηλής συχνότητας συνιστώσες για μικρή διάρκεια, δηλαδή για τα περισσότερα σήματα που πρακτικά συναντώνται.



Σχήμα 2.9 Διαφορά STFT – WT (Σαραντόπουλος και Αθανασούλης, 2008).

2.6.2 Εφαρμογές

Παρά τη μικρή ιστορία τους, τα wavelets έχουν αποκτήσει ήδη πολλές εφαρμογές σε τομείς όπως η αστρονομία, η ακουστική, η πυρηνική μηχανική, η σεισμολογία, τα ραντάρ και σε καθαρά μαθηματικά θέματα όπως η λύση μερικών διαφορικών εξισώσεων.

Ένα πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό του WT είναι η ικανότητα του στη συμπίεση δεδομένων.

Τα wavelets χρησιμοποιούνται επίσης για την απομάκρυνση του θορύβου από τα σήματα, επιλέγοντας ένα «κατώφλι» και μηδενίζοντας τους συντελεστές της ανάλυσης που το ξεπερνούν. Αυτοί οι συντελεστές χρησιμοποιούνται στη συνέχεια στην ανασύνθεση του αρχικού σήματος.

Μια άλλη εφαρμογή των wavelets είναι στο χώρο της ανθρώπινης και τεχνητής όρασης, για την επεξεργασία και κατανόηση των πολύπλοκων τρισδιάστατων εικόνων που δέχεται το οπτικό σύστημα.

Ο WT, κυρίως ο συνεχής WT, ο οποίος έχει ευκολότερη οπτική ερμηνεία, χρησιμοποιείται για την αναγνώριση της αυτο-ομοιότητας σε φυσικά ή τεχνητά σήματα. Δεδομένου ότι η ανάλυση μέσω wavelets γίνεται σε πολλές κλίμακες, είναι

φανερό ότι τα wavelets αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη της αυτο-ομοιότητας σε σήματα και εικόνες.

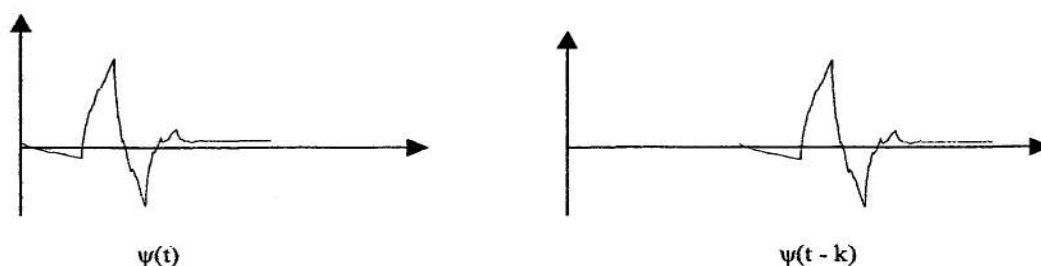
2.6.3 Εφαρμογές στην ιατρική

Τα wavelets έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία και στον ιατρικό χώρο, κυρίως στην επεξεργασία ιατρικών σημάτων και εικόνων. Μερικές από τις εφαρμογές τους είναι:

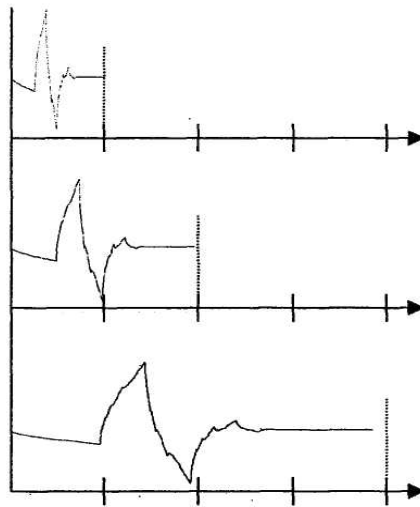
- ✓ Βιο-ακουστική: χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση και τον χαρακτηρισμό των καρδιακών ήχων (Khadra et al.)
- ✓ Ηλεκτροκαρδιογραφία: πέτυχαν τη διάκριση ανάμεσα σε φυσιολογικά και παθολογικά καρδιακά μοτίβα (Senhadji et al.)
- ✓ Ηλεκτροεγκεφαλογραφία: ο WT αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών κυματομορφών και τη διάγνωση της επιληψίας.
- ✓ Ελάττωση θορύβου: μια από τις πρώτες εφαρμογές του WT αποτέλεσε η απομάκρυνση του θορύβου από τις μαγνητικές τομογραφικές εικόνες.

2.6.4 Χρήση των wavelets

Κατ' αντιστοιχία με το μετασχηματισμό Fourier, που διασπά ένα σήμα σε μια σειρά ημιτονοειδών κυμάτων διαφόρων συχνοτήτων, ο WT διασπά το σήμα σε *wavelets*. Πρόκειται για συναρτήσεις που έχουν προέλθει από τη χρονική μετατόπιση (translation) και τη συστολή ή διαστολή (scaling) μιας βασικής συνάρτησης που ονομάζεται «mother wavelet». Οι δύο αυτές διαδικασίες παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.10 και 2.11 αντίστοιχα.



Σχήμα 2.10 Το wavelet Daubechies 4 μετατοπισμένο στο χρόνο (Torrence and Combo, 2000).



Σχήμα 2.11 Το wavelet Daubechies 4 σε τρεις διαφορετικές κλίμακες, αφού έχει υποστεί διαστολή (scaling) επί 2 και επί 4 (Torrence and Combo, 2000).

2.6.5 Ιδιότητες των wavelets

Σε αντίθεση με το μετασχηματισμό Fourier, που χρησιμοποιεί αποκλειστικά ημιτονοειδείς συναρτήσεις, οι συναρτήσεις μέσω των οποίων γίνεται η ανάλυση σε wavelets δεν είναι συγκεκριμένες. Έχουν όμως κάποιες κοινές ιδιότητες.

Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση $\psi(t)$ για την ανάλυση και την ανακατασκευή ενός σήματος χωρίς απώλεια πληροφορίας, πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\int \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (2.27)$$

όπου $\Psi(\omega)$ είναι ο μετασχηματισμός Fourier της $\psi(t)$. Η συνθήκη αυτή υπονοεί ότι το φάσμα της $\psi(t)$ έχει τιμή μηδέν στη μηδενική συχνότητα, που σημαίνει ότι στο πεδίο του χρόνου, ο μέσος όρος της είναι μηδέν:

$$\int \Psi(t) dt = 0 \quad (2.28)$$

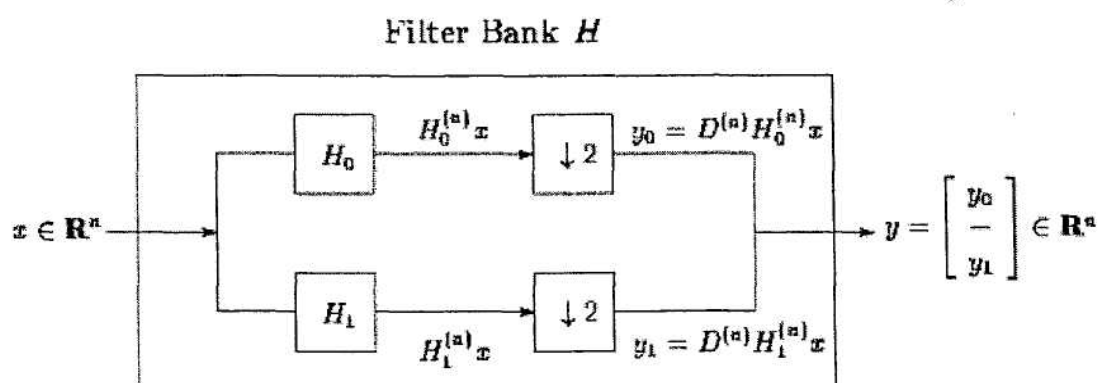
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το wavelet πρέπει να ταλαντεύεται γύρω από το μηδέν, δηλαδή να είναι *κύμα*. Μια ακόμα χαρακτηριστική ιδιότητα των wavelets είναι η περιορισμένη χρονική τους διάρκεια, σε αντίθεση με τις ημιτονοειδείς συναρτήσεις του μετασχηματισμού Fourier που εκτείνονται ως το άπειρο.

Πέρα από τις υπάρχουσες οικογένειες wavelets που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως η οικογένεια Daubechies, τα coiflets, τα simlets κ.α., υπάρχει η δυνατότητα να κατασκευαστούν και άλλες συναρτήσεις, αρκεί βεβαίως να πληρούνται οι απαιτούμενες μαθηματικές προϋποθέσεις.

2.6.6 Μετασχηματισμός Haar-Wavelet

Ο μετασχηματισμός Haar Wavelet συνίσταται στη διαδοχική εφαρμογή ενός υψιπερατού και ενός βαθυπερατού φίλτρου στο σήμα. Αυτό συμβαίνει με τον ακόλουθο τρόπο. Αρχικά το σήμα διέρχεται από τα δύο φίλτρα. Η έξοδος του βαθυπερατού διέρχεται εκ νέου από τα φίλτρα αυτά κ.ο.κ. Σε κάθε βήμα, το σήμα που τροφοδοτείται υποδιπλασιάζεται σε μέγεθος και τελικά ο αλγόριθμος τερματίζει όταν μείνει μονάχα ένα στοιχείο.

Στο Σχήμα 2.12 δίνεται γραφικά η εφαρμογή των φίλτρων που χρησιμοποιούνται για τον μετασχηματισμό.



Σχήμα 2.12 Εφαρμογή φίλτρων στον μετασχηματισμό WT (Σαραντόπουλος και Αθανασούλης, 2008).

όπου με H_0 συμβολίζεται το βαθυπερατό φίλτρο και με H_1 το υψιπερατό.

Το H_0 παίρνει ανά δύο τα δεδομένα εισόδου και υπολογίζει το ημιάθροισμά τους ενώ το H_1 υπολογίζει την ημιδιαφορά τους. Οι δύο αυτές λειτουργίες, καθώς είναι γραμμικές μπορούν να αναπαρασταθούν με πίνακες ως εξής:

$$H_0^{(n)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & & & & & & \\ & 1 & 1 & & & & & \\ & & 1 & 1 & & & & \\ & & & 1 & 1 & & & \\ & & & & \ddots & & & \\ & & & & & 1 & 1 & \\ & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{n \times n}.$$

και

$$H_1^{(n)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & & & & \\ & 1 & -1 & & & & & \\ & & 1 & -1 & & & & \\ & & & 1 & -1 & & & \\ & & & & \ddots & & & \\ & & & & & 1 & -1 & \\ & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{n \times n}.$$

Η συνάρτηση $D^{(n)}$ αναπαρίσταται από τον πίνακα:

$$D^{(n)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{\frac{n}{2} \times n}$$

με την εφαρμογή της οποίας επιλέγονται η πρώτη, η τρίτη κλπ. είσοδοι χ . Η συνδυασμένη εφαρμογή των φίλτρων και την συνάρτησης $D^{(n)}$ δίνουν τελικά τους ακόλουθους πίνακες για τον βαθυπερατό και τον υψιπερατό κλάδο αντίστοιχα:

$$L^{(n)} = D^{(n)} H_0^{(n)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & & & & & & \\ & 1 & 1 & & & & & \\ & & & \dots & & & & \\ & & & & 1 & 1 & & \\ & & & & & & 1 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{\frac{n}{2} \times n}.$$

και

$$B^{(n)} = D^{(n)} H_1^{(n)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & & \\ & 1 & -1 & & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & 1 & -1 & \\ & & & & 1 & -1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{\frac{n}{2} \times n}.$$

Τελικά, οι δύο κλάδοι (πάνω και κάτω) δίνουν:

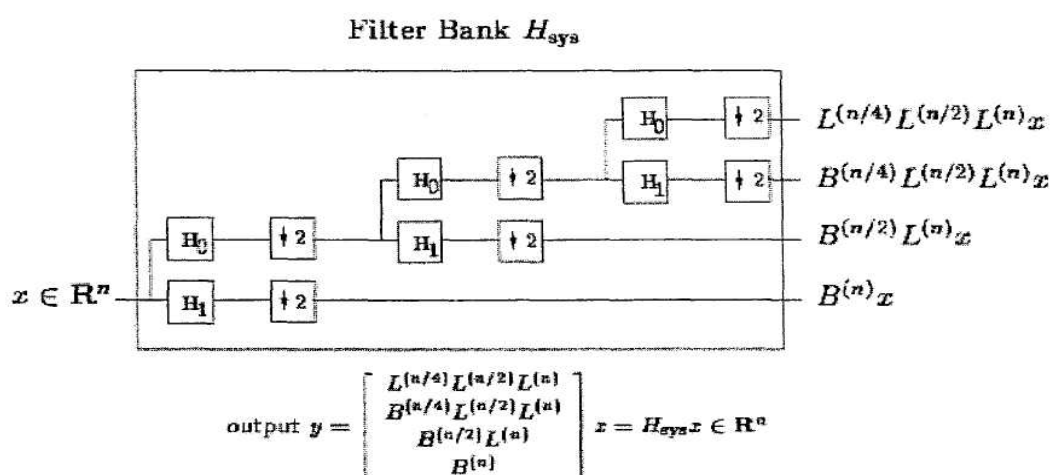
$$y_0 = L^{(n)} x \in R^{\frac{N}{2}} \quad \text{και} \quad y_1 = B^{(n)} x \in R^{\frac{N}{2}}$$

αντίστοιχα. Η τελική έξοδος της διάταξης είναι:

$$y = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^{(n)} x \\ B^{(n)} x \end{bmatrix} = H^{(n)} x \in R^n, \quad \text{όπου} \quad H^{(n)} = \begin{bmatrix} L^{(n)} \\ B^{(n)} \end{bmatrix} \in R^{n \times n}$$

Έχει δηλαδή εκφραστεί η έξοδος της διάταξης του φίλτρου Haar για είσοδο μήκους n , με τον πίνακα $H^{(n)}$.

Με βάση τη διάταξη αυτή δύναται να δημιουργηθεί μία ιεραρχική αναπαράσταση του σήματος με τη διαδοχική εφαρμογή του φίλτρου στη βαθυπερατή έξοδο όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13 Ιεραρχική αναπαράσταση του σήματος με τη διαδοχική εφαρμογή του φίλτρου στη βαθυπερατή έξοδο (Σαραντόπουλος και Αθανασούλης, 2008).

Σε κάθε βήμα της αναδρομής αυτής η τάξη του σήματος υποδιπλασιάζεται. Αν το σήμα είναι διακριτό, πεπερασμένο και το μήκος του είναι δύναμη του 2, τελικά μένει ένα σήμα με μόνο ένα δείγμα. Στην περίπτωση της διάταξης Haar, το δείγμα αυτό θα είναι ο μέσος όρος των δειγμάτων του αρχικού σήματος. Το άθροισμα των μεγεθών των εξόδων από όλα τα υψιπερατά βήματα και της εξόδου του τελευταίου βαθυπερατού φίλτρου ισούται με το μέγεθος την αρχικής εισόδου. Η τελική, ιεραρχική αναπαράσταση ενός σήματος εισόδου είναι μία συλλογή από λεπτομέρειες (details coefficients) σημάτων διαφόρων επιπέδων ανάλυσης (κλιμάκων) και μία συμπυκνωμένη εκδοχή του αρχικού σήματος (approximation coefficients) που είναι η έξοδος του τελευταίου βαθυπερατού φίλτρου.

2.6.7 Συνεχής μετασχηματισμός

Για να εφαρμοστεί ο συνεχής WT, αρχικά επιλέγεται ένα συγκεκριμένο wavelet το οποίο είναι κατάλληλο για την εφαρμογή και στη συνέχεια ακολουθούνται πέντε απλά βήματα:

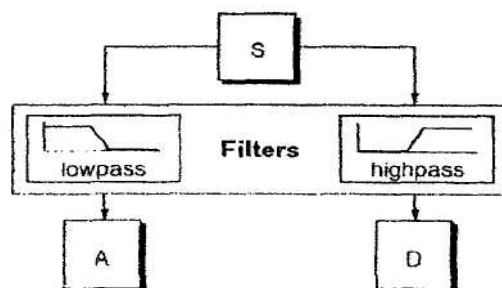
1. Συγκρίνεται το wavelet με ένα τμήμα του σήματος που αναλύεται, ιδίου μεγέθους με το wavelet, ξεκινώντας από την αρχή του σήματος,
2. Υπολογίζεται ένας αριθμός c που αντιπροσωπεύει την ομοιότητα του wavelet με αυτό το τμήμα του σήματος (δηλαδή όσο πιο μεγάλο είναι το c , τόσο περισσότερο ομοιάζουν τα δύο σήματα),
3. Μετατοπίζεται το wavelet προς τα δεξιά και επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 και 2 μέχρι να καλυφθεί ολόκληρο το σήμα,
4. Αυξάνεται ή ελαττώνεται η κλίμακα του wavelet και επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 3,
5. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 4 για όλες τις κλίμακες.

Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται ένα σύνολο συντελεστών από διαφορετικά τμήματα του σήματος σε διαφορετικές κλίμακες.

2.6.8 Διακριτός μετασχηματισμός

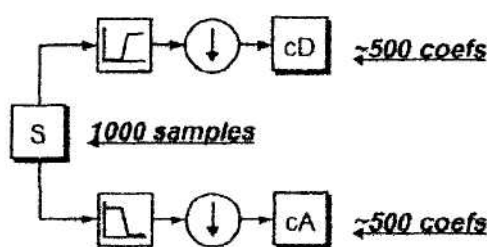
Το πρόβλημα με τον συνεχή WT είναι ότι ο υπολογισμός των συντελεστών σε όλες τις δυνατές κλίμακες είναι χρονοβόρος και παράγει υπερβολικά μεγάλο αριθμό δεδομένων. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε ο διακριτός WT, ο οποίος υπολογίζει τους συντελεστές σε διακριτές κλίμακες και μετατοπίσεις (Resnikoff and Wells, 1998).

Ένας αποδοτικός τρόπος για την υλοποίηση του διακριτού WT είναι με τη χρήση βαθυπερατών και υψιπερατών φίλτρων. Το υψιπερατό φίλτρο κρατά μόνο τις υψηλές συχνότητες (μικρή κλίμακα) του σήματος, όπου περιέχονται οι λεπτομέρειες, ενώ το βαθυπερατό κρατά τις χαμηλές (μεγάλη κλίμακα), που είναι συνήθως το πιο σημαντικό κομμάτι του σήματος. Με τον τρόπο αυτό διαχωρίζεται το σήμα σε *approximations* και *details*, όπου *approximations* είναι οι χαμηλών συχνοτήτων συνιστώσες και *details* οι υψίσυχνες. Η χρήση των φίλτρων φαίνεται στο Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14 Διαχωρισμός σήματος σε συνιστώσες υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων (Σαραντόπουλος και Αθανασούλης, 2008).

Με τη διαδικασία αυτή όμως διπλασιάζεται η συνολική πληροφορία για το σήμα και συνοδεύεται πάντα από υπο-δειγματισμό (downsampling), δηλαδή κρατούνται τα μισά μόνο σημεία των συνιστωσών και έτσι συνολικά διατηρείται το ίδιο μέγεθος πληροφορίας με το αρχικό σήμα. Η συνολική διαδικασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15 Φιλτράρισμα και υπο-δειγματισμός του σήματος (Σαραντόπουλος και Αθανασούλης, 2008).

Η ανάλυση δεν σταματά σε ένα επίπεδο: το κάθε approximation μπορεί να διαιρεθεί εκ νέου σε approximation και detail χαμηλότερων συχνοτήτων (μεγαλύτερης κλίμακας), μέχρι το επίπεδο που είναι επιθυμητό ή έως ότου απομείνει ένα μόνο σημείο σε κάθε συνιστώσα. Για την ανακατασκευή του σήματος

ακολουθείται προφανώς η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή πρώτα διπλασιάζεται ο αριθμός των σημείων (upsampling) και στη συνέχεια φιλτράρονται και αθροίζονται τα επιμέρους σήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ

3.1 Εισαγωγή

Στις παρακάτω ενότητες περιγράφονται οι μέθοδοι της ηλεκτρικής και της σεισμικής διασκόπησης σε επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης. Σε ότι αφορά την σεισμική διασκόπηση αναφέρονται τα είδη των σεισμικών κυμάτων που παράγονται τεχνητά, ο τρόπος με τον οποίο διαδίδονται αυτά, οι αρχές Huygens και Fermat, ο νόμος του Snell, οι μεταβολές που υφίστανται όταν αυτά διέρχονται από ελαστικό, ανελαστικό ή ανομοιογενές και ανελαστικό μέσο καθώς και η εφαρμογή στην πράξη των μεθόδων σεισμικής διάθλασης και σεισμικής ανάκλασης για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του μέσου από το οποίο αυτά διέρχονται. Σε ότι αφορά δε την ηλεκτρική διασκόπηση αναφέρονται βασικά χαρακτηριστικά της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, αναπτύσσεται η μέθοδος της εξέτασης των χαρακτηριστικών του υπεδάφους με την μέτρηση της ειδικής αντίστασης και περιγράφονται αναλυτικά οι εφαρμοζόμενες βασικές διατάξεις των ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται για την υλοποίηση της μεθόδου αυτής.

3.2 Σεισμικά Κύματα

Τα ελαστικά κύματά που παράγονται με φυσικό ή τεχνητό τρόπο μέσα ή επάνω στην επιφάνειά της Γης και διαδίδονται μέσα σ' αυτήν λέγονται σεισμικά κύματα. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη σεισμικών κυμάτων, και όλα κινούνται με διαφορετικούς τρόπους. Οι δυο κύριοι τύποι κυμάτων είναι τα κύματα χώρου και τα επιφανειακά κύματα. Τα κύματα χώρου διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις στο εσωτερικό της Γης, άλλα τα επιφανειακά κύματα διαδίδονται μόνο κατά μήκος των επιφανειακών στρωμάτων της Γης. Οι σεισμοί ακτινοβολούν την σεισμική ενέργεια ως κύματα χώρου και επιφανειακά κύματα.

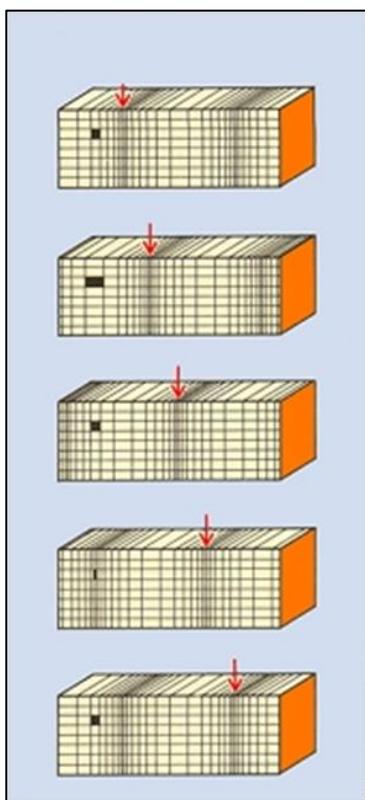
3.3 Τύποι Σεισμικών Κυμάτων

3.3.1 Κύματα Χώρου

Διακινούμενα μέσω του εσωτερικού της γης, τα κύματα χώρου (Body Waves) φθάνουν σε ένα σεισμολογικό σταθμό πριν από τα επιφανειακά κύματα που παράγονται στο σημείο της εστίας ενός σεισμού. Επίσης αυτά τα κύματα είναι υψηλότερης συχνότητας από τα επιφανειακά κύματα.

3.3.1.1 Επιμήκη Κύματα

Κατά την εκδήλωση ενός σεισμού, ο πρώτος παλμός της ενέργειας που έρχεται από το σημείο της εστίας περιλαμβάνει τα επιμήκη ή πρώτα κύματα (P-waves). Είναι διαμήκη κύματα των οποίων η ταχύτητα διάδοσης είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης των άλλων ειδών σεισμικών κυμάτων και συνεπώς είναι τα πρώτα που καταγράφονται από τα σεισμόμετρα. Τα επιμήκη κύματα μπορούν να κινηθούν μέσω των συμπαγών σχηματισμών της γης άλλα και των υγρών, όπως το νερό ή τα υγρά στρώματα της γης.

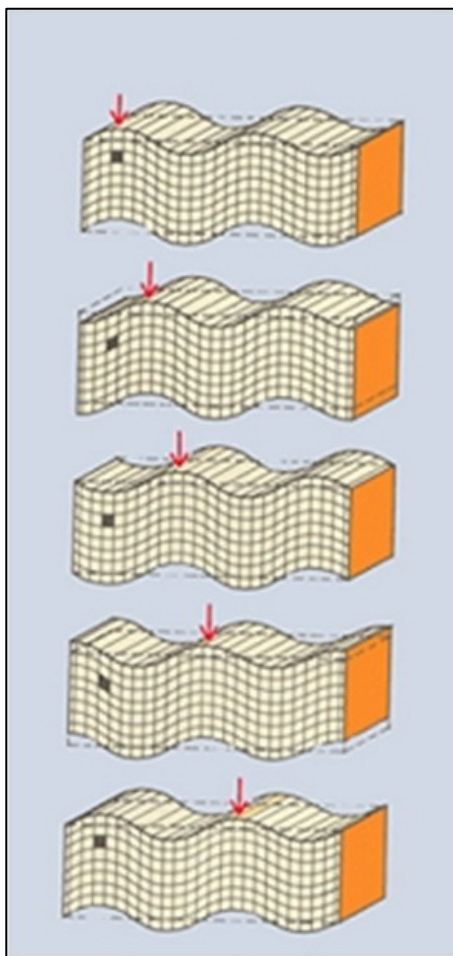


Σχήμα 3.1 Διάδοση επιμηκών κυμάτων (Sheriff and Geldart, 1995).

3.3.1.2 Εγκάρσια Κύματα

Τα επόμενα κύματα που φτάνουν στο σημείο καταγραφής είναι τα εγκάρσια ή δευτερεύοντα κύματα (S-waves). Είναι πιο αργά αλλά πιο ισχυρά και καταστρεπτικά από τα επιμήκη κύματα και ακολουθούν τα επιμήκη στο σειсмоγράφημα. Όπως και τα επιμήκη κύματα χαρακτηρίζονται ως κύματα χώρου και διαδίδονται προς κάθε κατεύθυνση τόσο στα επιφανειακά στρώματα όσο και στον πυρήνα. Κατά τη διάδοση των εγκαρσίων κυμάτων τα υλικά σημεία του πετρώματος ταλαντώνονται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (σχήμα 3.2), ταξιδεύουν περίπου δυο φορές

πιο αργά από τα διαμήκη κύματα και λόγω του μεγάλου τους πλάτους είναι αυτά που επιφέρουν την ισχυρή μετακίνηση του εδάφους - χαρακτηριστική των μεγάλων σεισμών.



Σχήμα 3.2 Διάδοση εγκάρσιων κυμάτων (Sheriff and Geldart, 1995).

3.3.2 Επιφανειακά Κύματα

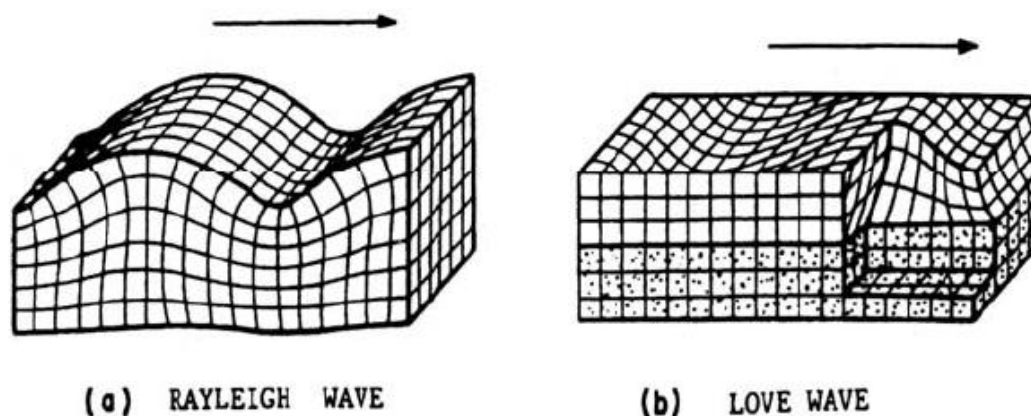
Διακινούμενα μόνο μέσω του φλοιού της γης, τα επιφανειακά κύματα είναι χαμηλότερης συχνότητας από τα κύματα χώρου, και κατά συνέπεια διακρίνονται εύκολα στο σειсмоγράφημα. Αν και φθάνουν μετά από τα κύματα χώρου, υπεύθυνα για τις καταστροφές που συνδέονται με τους σεισμούς είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου τα επιφανειακά κύματα. Η ισχύς δε των επιφανειών κυμάτων μειώνεται στους βαθύτερους σεισμούς.

3.3.2.1 Κύματα Love

Το πρώτο είδος επιφανειακών κυμάτων ονομάζεται Love (L) Wave (Σχήμα 3.3). Αν και τα κύματα αυτά είναι αρκετά πιο αργά από τα κύματα χώρου είναι τα γρηγορότερα από τα επιφανειακά κύματα και ταλαντώνουν το έδαφος οριζόντια. Δημιουργούν δηλαδή πλευρικές μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους. Περιορισμένα στην επιφάνεια του φλοιού της γης, τα κύματα Love παράγουν εξ ολοκλήρου την οριζόντια κίνηση. Λόγω δε αυτής της οριζόντιας κίνησης, τα αποτελέσματά τους είναι συνήθως καταστροφικά και εξαιτίας αυτών, σε αρκετούς σεισμούς προκαλούνται καταρρεύσεις κτιρίων και έργων υποδομής.

3.3.2.2 Κύματα Rayleigh

Τα κύματα Rayleigh είναι τα πιο αργά από όλους τους τύπους των σεισμικών κυμάτων και με κάποιους τρόπους τα πιο περίπλοκα. Τα κύματα Rayleigh μετακινούν το έδαφος με τον ίδιο τρόπο όπως ένα θαλάσσιο κύμα μετακινεί τα επιφανειακά νερά (Σχήμα 3.3). Επειδή το κύμα κυλά, κινεί το έδαφος πάνω-κάτω, δεξιά και αριστερά στην ίδια κατεύθυνση που αυτό κινείται. Το μεγαλύτερο μέρος του τινάγματος που γίνεται αισθητό από έναν σεισμό οφείλεται στα κύματα Rayleigh, τα οποία μπορούν να είναι πολύ μεγαλύτερου πλάτους από τους άλλους τύπους σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα 3.3 Διεύθυνση διάδοσης κυμάτων Love και Rayleigh (Sheriff and Geldart, 1995).

Υπάρχουν και άλλα είδη σεισμικών κυμάτων που αποτελούν συνδυασμό των προηγούμενων. Τέτοιου είδους κύματα είναι τα διαυλικά κύματα που διαδίδονται μέσα σε στρώμα μικρής ταχύτητας και τα στάσιμα κύματα που παράγονται από τη συμβολή των Love και Rayleigh.

3.4 Διάδοση των σεισμικών κυμάτων χώρου στο εσωτερικό της Γης

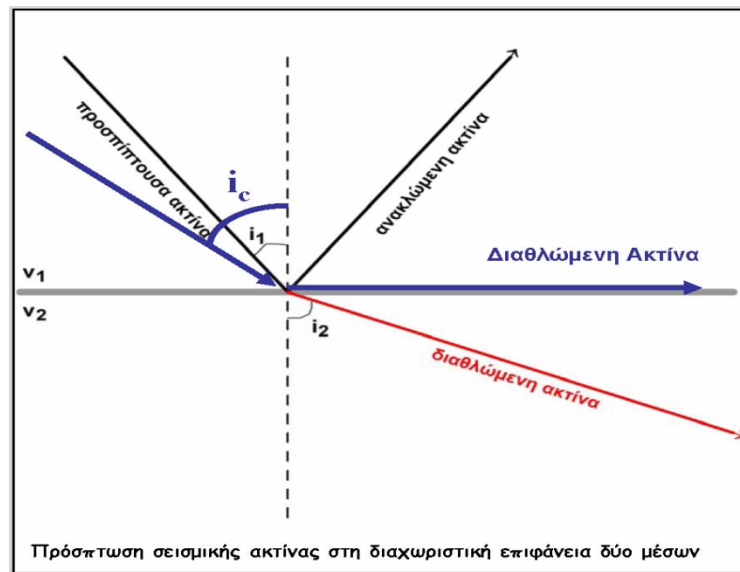
Τα παραγόμενα επιμήκη και εγκάρσια κύματα στην εστία ενός σεισμού επιμήκη και εγκάρσια κύματα διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης και φθάνουν στην επιφάνειά αυτής, όπου μπορούν να καταγραφούν από τα σεισμικά όργανα. Κατά τη διάδοση τους και μέχρι να καταγραφούν από τα σεισμικά όργανα, τα σεισμικά κύματα υφίστανται διαθλάσεις, ανακλάσεις, περιθλάσεις, σκεδάσεις, αποσβέσεις κλπ. Για το λόγο αυτό, καταγράφονται από τους σειсмоγράφους πολλές κατηγορίες σεισμικών κυμάτων. Η μελέτη των ιδιοτήτων των κυμάτων αυτών οδηγεί στην εξακρίβωση των συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό της Γης και συμβάλλουν στη γένεση τους. Η φαινόμενη ταχύτητα, V , διάδοσης ενός κύματος σε ορισμένο σημείο της επιφάνειας της Γης είναι ίση με το αντίστροφο της κλίσης της καμπύλης χρόνων διαδρομής, $d\Delta/dT$, για απόσταση ίση με την επικαιρική απόσταση (Reynolds, 1997), Δ , του σεισμού από το σημείο, δηλαδή:

$$V = \frac{d\Delta}{dT} \quad (3.1)$$

Η φαινόμενη ταχύτητα είναι ίση με την πραγματική ταχύτητα στο κατώτερο σημείο την ακτίνας, δηλαδή, στο κατώτερο σημείο του δρόμου τον οποίο διατρέχει το κύμα από την εστία μέχρι το σημείο παρατήρησης.

3.5 Διάδοση των κυμάτων χώρου στον φλοιό της Γής

Κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης ισχύουν οι αρχές του Fermat και του Huygens καθώς και ο νόμος του Snell όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



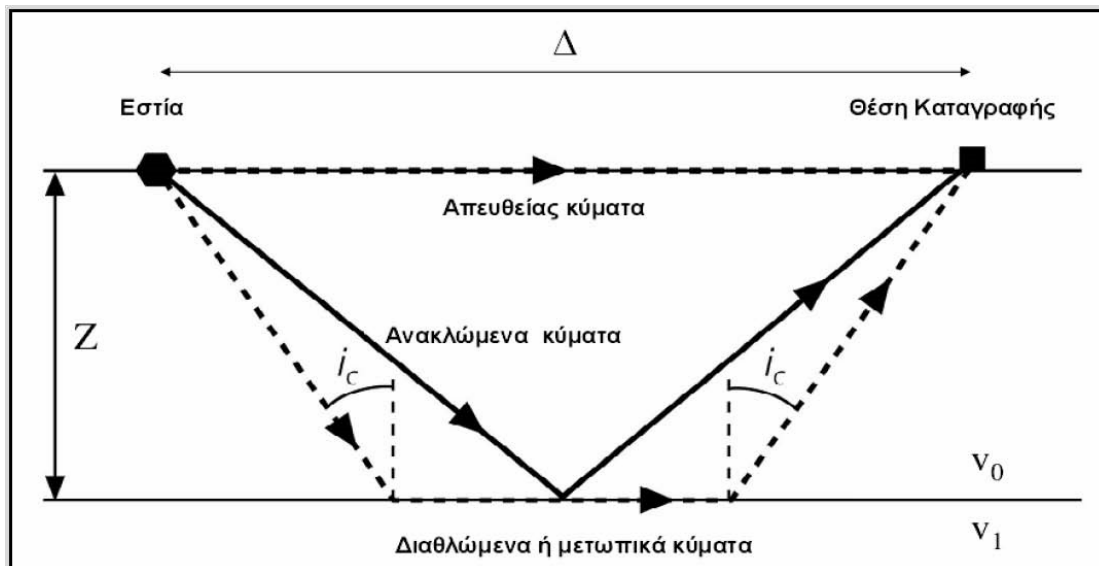
Σχήμα 3.4 Πρόσπτωση σεισμικής ακτίνας στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων (Reynolds, 1997).

Αρχή του Fermat: Όταν ένα κύμα διαδίδεται σε υλικό μέσο, ακολουθεί τη διαδρομή του ελάχιστου χρόνου.

Αρχή του Huygens: Κάθε υλικό σημείο που ταλαντώνεται κατά τη διέλευση κυμάτων, γίνεται με τη σειρά του πηγή δευτερογενούς ακτινοβολίας.

Νόμος του Snell:
$$\frac{\eta \mu i_1}{\eta \mu i_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.2)$$

Παρατηρείται ότι όταν η προσπίπτουσα ακτίνα αποκτά τιμή $i_1 = i_c$ τέτοια που η i_2 να γίνει ίση με 90° , θα ισχύει $\eta \mu i_c = \frac{v_1}{v_2}$ και τότε η διαθλώμενη ακτίνα θα ακολουθεί την διαχωριστική επιφάνεια των δύο (2) μέσων (Σχήμα 3.5). Τα κύματα στην περίπτωση αυτή ονομάζονται μετωπικά κύματα. Η γωνία i_c καλείται ορική γωνία.



Σχήμα 3.5 Διάδοση κυμάτων σε ένα στρώμα με ταχύτητα v_0 το οποίο βρίσκεται πάνω σε έναν ημιχώρο με ταχύτητα $v_1 > v_0$ (Reynolds, 1997).

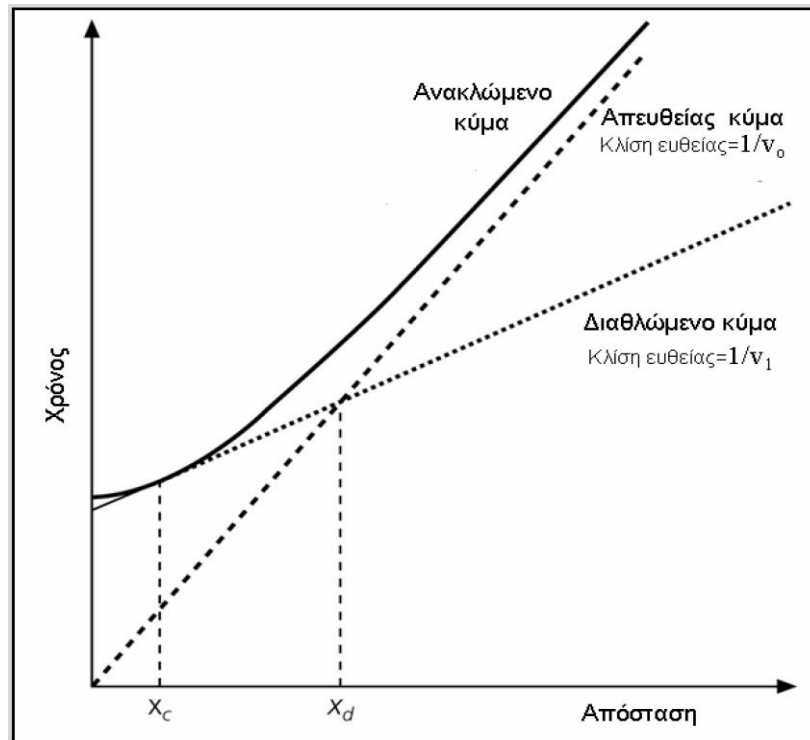
Οι εξισώσεις των χρόνων διαδρομής (T) σε συνάρτηση με την απόσταση Δ είναι:

$$\text{Απευθείας Κύματα: } T_1 = \frac{\Delta}{v_0} \quad (3.3)$$

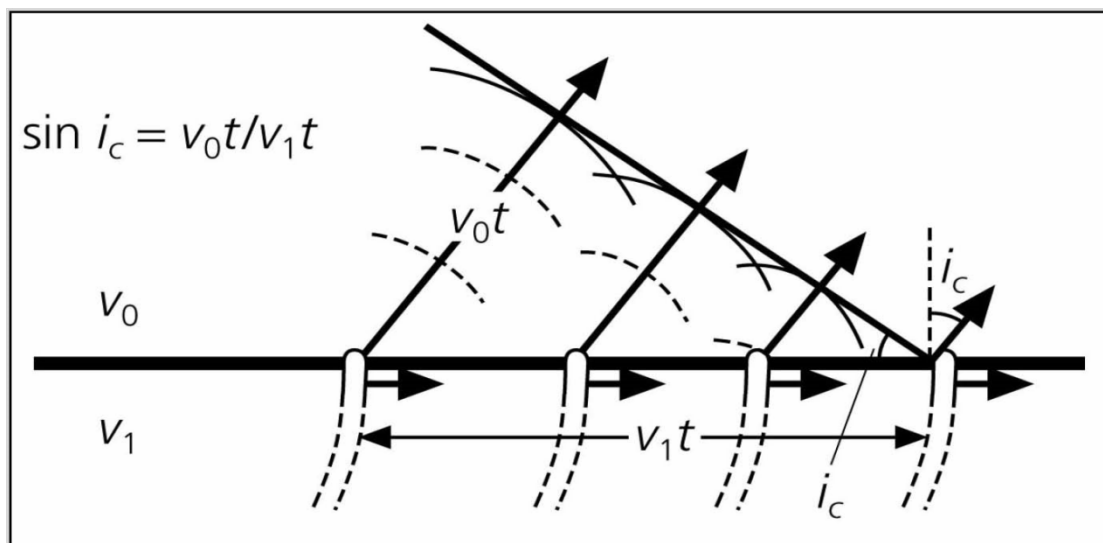
$$\text{Διαθλώμενα Κύματα: } T_2 = \frac{\Delta}{v_1} + 2Z \frac{\sqrt{v_1^2 - v_0^2}}{v_0 v_1} \quad (3.4)$$

$$\text{Ανακλώμενα Κύματα: } T_3 = \frac{\sqrt{\Delta^2 + 4Z^2}}{v_0} \quad (3.5)$$

όπου z είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ του σημείου της εστίας και του επιπέδου ανάκλασης και v_0 , v_1 , v_2 είναι οι ταχύτητες αντιστοίχως του αρχικού, του ανακλώμενου και του διαθλωμένου κύματος.



Σχήμα 3.6 Συγκριτική αξιολόγηση κυμάτων ως προς τον χρόνο και την απόσταση (Reynolds, 1997).



Σχήμα 3.7 Γένεση μετωπικών κυμάτων στο επάνω στρώμα που διαδίδονται με ταχύτητα v_0 , τα οποία οφείλονται στη διάδοση των διαθλώμενων κυμάτων με ταχύτητα v_1 (διάδοση στο κάτω στρώμα) κατά μήκος της διαχωριστικής επιφάνειας (Sheriff and Geldart, 1995).

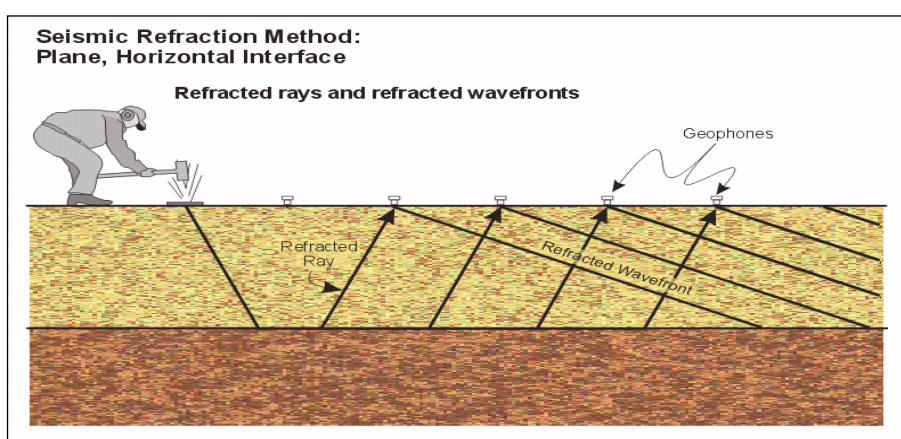
Εξετάζοντας το Σχήμα 3.7, παρατηρείται ότι το μετωπικό κύμα διαδίδεται με μικρότερη ταχύτητα από το διαθλώμενο στο οποίο οφείλεται. Το μετωπικό κύμα

αντιστοιχεί στη διαδρομή του ελαχίστου χρόνου. Με βάση την αρχή του Huygens διαπιστώνεται ότι το διαθλώμενο κύμα το οποίο διαδίδεται οριζόντια κατά μήκος της διαχωριστικής επιφάνειας με ταχύτητα αυτήν του κάτω στρώματος δημιουργεί σφαιρικά κύματα τα οποία διαδίδονται προς τα πάνω (στο πάνω στρώμα). Η συμβολή των κυμάτων αυτών δημιουργεί τα επίπεδα κύματα τα οποία φεύγουν από τη διαχωριστική επιφάνεια με την κρίσιμη γωνία i_c (Griffiths and King 1981, Stein and Wysession, 2003).

3.6 Μέθοδος της Σεισμικής Διάθλασης

3.6.1 Βασική αρχή λειτουργίας

Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης είναι μια από τις πλέον χρησιμοποιούμενες σήμερα μεθόδους για να βρεθεί το βάθος του υποβάθρου, ιδιαίτερα για βάθη μικρότερα των 30 μέτρων. Η μέθοδος απαιτεί την ύπαρξη μιας σεισμικής πηγής, συνήθως μια σφύρα για βάθη μικρότερα των 15 μέτρων ή πίπτον βάρος ή καψύλια για βάθη μέχρι 30 μέτρα. Τα σεισμικά κύματα που παράγονται από τη σεισμική πηγή διασχίζουν το επιφανειακό κάλυμμα και διαθλώνται κατά μήκος της επιφανείας του υποβάθρου. Κατά την διαδρομή τους στην επιφάνεια επαφής ιζημάτων – υποβάθρου, εκπέμπουν διαρκώς κύματα προς την επιφάνεια τα οποία καταγράφονται από ειδικούς αισθητήρες (γεώφωνα). Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται η διάταξη υπαίθρου και η καταγραφή.



Σχήμα 3.8 Διάταξη υπαίθρου και καταγραφή κύματος (Παναγιωτόπουλος, 2008).

3.6.2 Συλλογή δεδομένων

Ο σχεδιασμός ενός προφίλ μετρήσεων σεισμικής διάθλασης απαιτεί μια καλή πληροφόρηση σχετικά με τις αναμενόμενες ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων μέσα στα δύο μέσα (ιζήματα – υπόβαθρο). Με τον τρόπο αυτό, οι ταχύτητες μπορούν να αντιστοιχισθούν σωστά στα αντίστοιχα μέσα. Ακόμη, ανάλογα με τα ζητούμενα, θα πρέπει να αποφασισθεί η απόσταση μεταξύ των γεωφώνων καθώς και οι καλύτερες θέσεις για την δημιουργία των εκρήξεων.

3.6.3 Επεξεργασία των δεδομένων

Το πρώτο βήμα στην επεξεργασία δεδομένων σεισμικής διάθλασης είναι να μετρηθούν οι λεγόμενες «πρώτες αφίξεις». Μετά από αυτό κατασκευάζεται ένα διάγραμμα με τους χρόνους άφιξης συναρτήσει της απόστασης μεταξύ γεωφώνων και σημείου έκρηξης. Αυτό λέγεται διάγραμμα χρόνου – απόστασης και η επεξεργασία του γίνεται με υπολογιστή με διάφορους τύπους λογισμικού.

3.6.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης είναι πολύ αποτελεσματική για να δώσει το βάθος υποβάθρου γιατί κατά κανόνα υπάρχει μεγάλη διαφορά στις ταχύτητες διάδοσης των δύο μέσων. Επίσης η τοπογραφία του υποβάθρου δίνεται με σημαντική ακρίβεια (εξαρτάται βέβαια πάντοτε από την απόσταση μεταξύ γεωφώνων). Το μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί τα διαδοχικά εις βάθος στρώματα να έχουν και προοδευτικά αυξανόμενες ταχύτητες διάδοσης. Αυτό όμως δεν συμβαίνει πάντα με αποτέλεσμα μερικές φορές, στρώματα χαμηλών ταχυτήτων να μην γίνονται αντιληπτά στο προφίλ.

3.7 Μέθοδος ηλεκτρικής διασκόπησης

3.7.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος της ηλεκτρικής διασκόπησης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης και έχει ως στόχο τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών των πετρωμάτων από τα οποία αυτός αποτελείται. Επιδιώκεται με τη μέθοδο αυτή μέσω της μετρούμενης

ηλεκτρικής τάσης ο καθορισμός-κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της κατανομής των τιμών της στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού.

Η κατανομή αυτή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ονομάζεται γεωηλεκτρική δομή και στην πράξη επιτυγχάνεται με τη δημιουργία τεχνητών ηλεκτρικών πεδίων, μέσω των οποίων μετριέται η ηλεκτρική τάση (δυναμικό) και επιτυγχάνεται τοιούτοτρόπως ο καθορισμός της δομής.

3.7.2 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ορυκτών και πετρωμάτων

Η ειδική αντίσταση, ρ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Το αντίστροφο, $\sigma = \frac{1}{\rho}$ της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης λέγεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα περισσότερα ορυκτά και πετρώματα δεν είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Μόνο τα μεταλλικά ορυκτά και τα πετρώματα με σημαντική συγκέντρωση σε αυτά τα ορυκτά παρουσιάζουν αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω της αγωγής του ηλεκτρισμού από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια των μετάλλων (ηλεκτρονική αγωγή).

Τα πυριγενή και τα μεταμορφωμένα πετρώματα συνήθως παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές του ρ σε σχέση με τα ιζηματογενή. Αυτό οφείλεται στο ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των ιζηματογενών κυρίως πετρωμάτων επηρεάζεται από το πορώδες και τη περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα (ηλεκτρολυτική αγωγή). Η ακόλουθη εμπειρική σχέση συνδέει την ειδική αντίσταση ρ των ιζηματογενών πετρωμάτων και το πορώδες ϕ :

$$\rho = a\rho_v\phi - m \quad (3.6)$$

όπου ρ_v η ειδική αντίσταση του νερού που περιέχεται στους πόρους του πετρώματος, ϕ ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο του πετρώματος (πορώδες) και α , m σταθερές (με τιμές κατά προσέγγιση 0.5-2.5 για το α και 1,3-2,5 για το m (Παπαζάχος, 2005). Η σχέση αυτή γνωστή και ως νόμος του Archie, δείχνει ότι η ειδική αντίσταση αυξάνει όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος.

Η λιθολογία και η γεωλογική ηλικία των πετρωμάτων παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο. Με το πέρασμα του χρόνου, το συνολικό πάχος των υπερκείμενων στρωμάτων μεγαλώνει με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης που ασκούν τα στρώματα αυτά στα υποκείμενα. Άρα, τα μεγαλύτερης ηλικίας υποκείμενα στρώματα

παρουσιάζουν αυξημένη συνοχή, μικρό πορώδες και μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Ο γενικός αυτός κανόνας δεν ισχύει πάντα και ιδιαίτερα για τα τριτογενή ιζήματα τα οποία έχοντας σχηματιστεί σε γλυκό νερό, κατά κύριο λόγο, έχουν μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις από τα μεσοζωικά ιζήματα τα οποία σχηματίστηκαν σε αλμυρό νερό, αφού η περιεκτικότητα σε ιόντα παίζει ως γνωστό αποφασιστικό ρόλο στη διέλευση του ρεύματος.

Για τα πετρώματα που είναι διαποτισμένα με νερό υπάρχει έμμεση σχέση μεταξύ της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της λιθολογίας ή της γεωλογικής ηλικίας καθώς οι δύο παράγοντες αυτοί καθορίζουν το πορώδες. Στα κρυσταλλικά πετρώματα των οποίων το πορώδες είναι εξαιρετικά χαμηλό, η ηλεκτρική αγωγιμότητα οφείλεται αποκλειστικά σχεδόν, στις ρωγμές που υπάρχουν στα πετρώματα αυτά.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των ηλεκτρολυτών είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας (Παπαζάχος, 2005):

$$\rho_{\theta} = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha_{\theta}(\theta - 18^{\circ})} \quad (3.7)$$

όπου

ρ_{θ} : η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε θερμοκρασία $^{\circ}\text{C}$

ρ_{18} : η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε θερμοκρασία 18°C

α_{θ} : ο θερμικός συντελεστής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (για τους περισσότερους ηλεκτρολύτες $\alpha_{\theta} = 0,025/^{\circ}\text{C}$).

Συνοψίζοντας, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των υδροφόρων και μη σχηματισμών ελαττώνεται με την αύξηση:

- του όγκου του νερού στο πέτρωμα
- της περιεκτικότητας σε χλωριόντα ή ελεύθερα ιόντα του υπόγειου ύδατος
- της θερμοκρασίας (αύξηση της ευκινησίας των ιόντων)
- της περιεκτικότητας σε αργίλους
- του βαθμού κορεσμού του διαλύματος στους πόρους του πετρώματος
- της καρστικοποίησης
- της εξαλλοίωσης

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προέκυψαν από γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις αναφοράς σε θέσεις όπου τα πετρώματα εμφανίζονται επιφανειακά στην Κρήτη.

Πίνακας 3.1 Τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων πετρωμάτων (Βαφείδης, 2001).

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ωm)
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ	80-250
ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Αργίλοι	2-20
Μάργες	20-60
Άμμοι και Χαλίκια κορεσμένα	50-500
Εβαπορίτες (Γύψοι)	200
Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι	150-500
Κροκαλοπαγή βάσεως	200-300
Ψαμμίτες	50-70
Συμπαγής δολομίτης	>104
Πορώδης δολομίτης	100-1000
ΑΛΠΙΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Φλύσχης	70-80
Σχιστόλιθοι-Οφιόλιθοι	100-300
Ασβεστόλιθοι	>500
ΠΥΡΙΓΕΝΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	102-106

Στις διασκοπήσεις μικρού βάθους, η αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος επιτυγχάνεται κυρίως από διαλυμένα άλατα όπως το ανθρακικό ασβέστιο και ανθρακικό νάτριο που υπάρχουν στο ίδιο το έδαφος - κυρίως για αργιλώδη εδάφη - ή προέρχονται από τα υποκείμενα γεωλογικά στρώματα, βροχοπτώσεις, σύγχρονα γεωργικά λιπάσματα ή άλλες ανθρωπογενείς διαδικασίες. Επίσης συγκεντρώσεις ριζών και κολλοειδών στο νερό επηρεάζουν την αγωγιμότητα.

Επισημαίνεται δε ότι σε περίπτωση κορεσμού του εδάφους σε νερό η ειδική ηλεκτρική αντίσταση επηρεάζεται από τη σύνδεση μεταξύ των πόρων. Όταν

πρόκειται για ξηρά εδάφη ακόμα και οι ελάχιστες ποσότητες νερού που συγκρατούνται σε πολύ μικρούς πόρους είναι σημαντική.

Συνήθως το μέγεθος των ανωμαλιών είναι μεγαλύτερο μετά από μία μακρά περίοδο ξηρού και θερμού καιρού, με την παρατήρηση ότι σημαντικό ρόλο παίζει η συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Διακρίνοντας τα εδάφη σε κοκκώδη, και συμπαγή παρατηρήθηκε διαφορετική μεταβολή στις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ περιόδων διαφορετικής υγρασίας. Κατά τη διάρκεια λοιπόν της υγρής περιόδου, το επίπεδο της υγρασίας είναι μέγιστο και γι' αυτό η ειδική ηλεκτρική αντίσταση γίνεται ελάχιστη στα κοκκώδη εδάφη, ενώ στα συμπαγή εδάφη η υγρασία παραμένει μικρή και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μεγάλη. Αντίθετα την ξηρή περίοδο μόνο οι μικροί πόροι είναι πληρωμένοι με νερό, με αποτέλεσμα τα αργιλώδη να είναι πιο αγώγιμα από τα κοκκώδη εδάφη.

Είναι φανερό ότι συμπαγή πετρώματα όπως ο γρανίτης είναι ελάχιστα αγώγιμα, οι πιο πορώδεις δολομίτες είναι πολύ περισσότερο, ενώ ακόμη καλύτεροι αγωγοί είναι η άμμος και η άργιλος.

3.7.3 Μέθοδος Ηλεκτρικής Αντίστασης

Βασική αρχή λειτουργίας

Η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθούν τα βάθη υποβάθρου εάν αυτό παρουσιάζει διαφορετική αντίσταση από τα υπερκείμενα υλικά, γεγονός που κατά κανόνα συμβαίνει. Υπάρχουν δύο κοινές μέθοδοι ηλεκτρικής αντίστασης. Κατακόρυφες διασκοπήσεις και προφίλ ηλεκτρικών αντιστάσεων. Τα προφίλ ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιούνται συνήθως για να βρεθούν οριζόντιες μεταβολές στην ηλεκτρική αντίσταση και όχι τόσο για να βρεθεί το βάθος υποβάθρου (Βαφείδης, 1993).

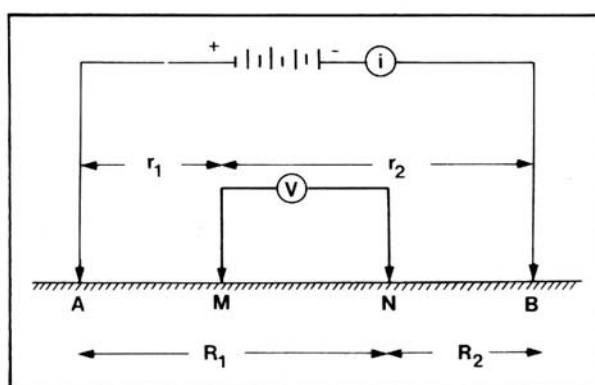
Συλλογή δεδομένων:

Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται η διάταξη που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους. Ηλεκτρικό ρεύμα διοχετεύεται με τη χρήση δύο ηλεκτροδίων στα σημεία Α και Β. Η τάση που προκαλείται λόγω αυτού του ρεύματος μετριέται στα ηλεκτρόδια Μ και Ν και είναι (Βαφείδης & Συνεργάτες, 2005):

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (3.8)$$

Χρησιμοποιώντας το ποσοστό του ρεύματος που πέρασε μέσα από τα ηλεκτρόδια στο έδαφος, την τάση που μετρήθηκε και ένα γεωμετρικό συντελεστή που αλλάζει διαρκώς, υπολογίζεται η αντίσταση του εδάφους. Τα ηλεκτρόδια μετά, μετατοπίζονται μακρύτερα από το κέντρο και γίνεται μια νέα μέτρηση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται με διαρκή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων A και B και παράλληλο υπολογισμό κάθε φορά της αντίστασης που αντιστοιχεί. Σε μικρές αποστάσεις ηλεκτροδίων, η αντίσταση αντιστοιχεί σε εκείνη των ιζημάτων αφού το ρεύμα δεν έχει φθάσει στο υπόβαθρο. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις ηλεκτροδίων, η αντίσταση αντιστοιχεί σε εκείνη του υποβάθρου. Με ειδικό λογισμικό, οι πραγματικές αντιστάσεις και τα βάθη δίνονται σε διάγραμμα κατακόρυφης μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης (γεωηλεκτρική στρωματογραφία).

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου της ηλεκτρικής αντίστασης είναι ότι αφενός δεν απαιτεί τα διαδοχικά στρώματα να έχουν και αντίστοιχα αυξανόμενες ηλεκτρικές αντιστάσεις όπως η σεισμική μέθοδος διάθλασης και αφετέρου ότι η διαδικασία μέτρησης στο ύπαιθρο είναι πολύ εύκολη και πολύ γρήγορη ενώ τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι παρουσιάζει δυσκολία στις περιοχές όπου είναι δύσκολο να καρφωθούν τα ηλεκτρόδια στο έδαφος (κατοικημένες περιοχές, ασφαλτος σκυρόδεμα), καθώς επίσης ότι σε στεγνά εδάφη, η επαφή των ηλεκτροδίων με το έδαφος πρέπει να ενισχύεται με νερό για να διοχετεύεται όσο το δυνατόν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια μέσα σε αυτό. Γενικά, για ένα βάθος X, εκτιμάται ότι το οριζόντιο ανάπτυγμα των ηλεκτροδίων πρέπει να φθάσει τουλάχιστον σε απόσταση 3X.



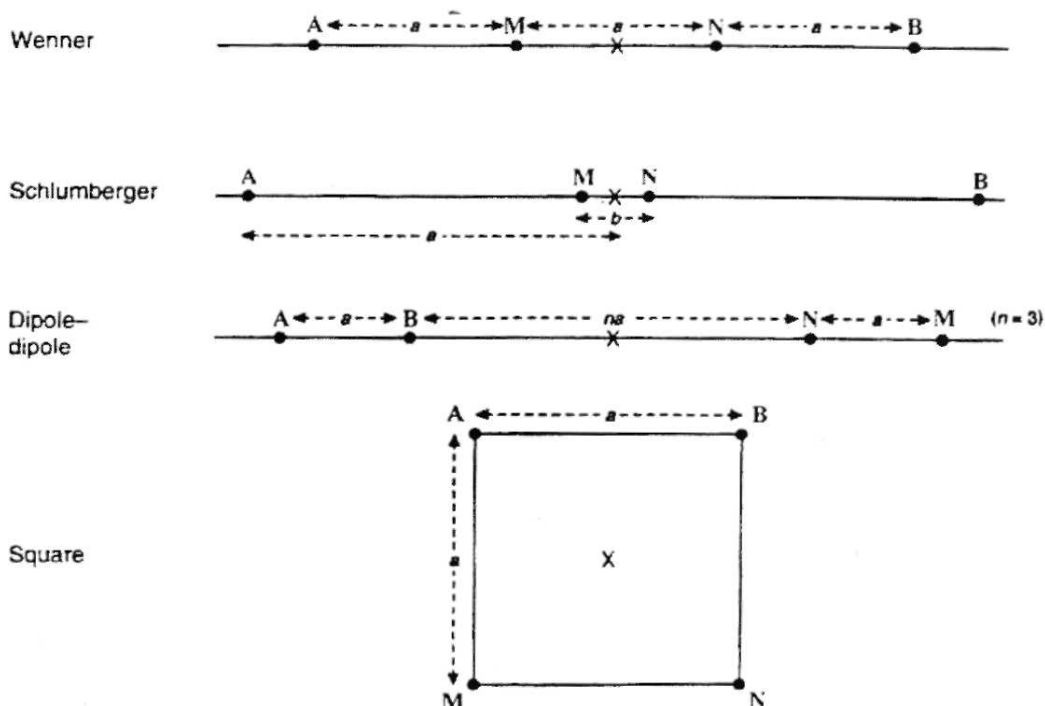
Σχήμα 3.9 Διάταξη μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης (Παπαζάχος, 2005).

Επεξεργασία Δεδομένων:

Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται συνήθως με ειδικό λογισμικό αναστροφής το οποίο παράγει ένα διάγραμμα της ηλεκτρικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους. Συνήθως οι κοιλότητες που έχουν μέσα αέρα παρουσιάζουν μια υψηλότερη ηλεκτρική αντίσταση από το περιβάλλον μέσο (βράχος) και ορίζονται ως γεωφυσικοί στόχοι υψηλής αντίστασης. Αντίθετα, αν οι κοιλότητες είναι γεμάτες με νερό (πολλές φορές και αλμυρό) τότε εμφανίζουν χαμηλότερη αντίσταση από το περιβάλλον τους και ορίζονται ως γεωφυσικοί στόχοι χαμηλής αντίστασης. Επειδή τελικά, η ηλεκτρική αντίσταση κάποιας κοιλότητας (κενό) είναι πολύ υψηλή, η μέθοδος έχει μεγάλη αποτελεσματικότητα, παρουσιάζει όμως πολύ δύσκολη εφαρμογή στο ύπαιθρο και απαιτεί πολύ μεγάλη γεωφυσική πείρα.

3.7.4 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Υπάρχουν πολλές διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται σήμερα στην ύπαιθρο, ανάλογα με την τεχνογνωσία της περιοχής, το μέγεθος των δομών που αναμένονται, τον εξοπλισμό και την εξοικείωση του προσωπικού. Στο Σχήμα 3.10 απεικονίζονται οι πιο συνηθισμένοι τύποι. Οι διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων επειδή ελαχιστοποιούν τα αποτελέσματα της αντίστασης επαφής, δηλαδή της ηλεκτρικής αντίστασης στη θέση του ηλεκτροδίου, είναι περισσότερο αποτελεσματικές.



Σχήμα 3.10 Διατάξεις ηλεκτροδίων (Βαφείδης, 2001).

Στη διάταξη Schlumberger, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων του δυναμικού $MN = 2l$ είναι πολύ μικρότερη της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων του ρεύματος $AB = 2L$ ($l < L/5$, $MN/AB < 1/3$) (Βαφείδης, 2001) (Σχήμα. 3.10). Όταν τα ηλεκτρόδια είναι συμμετρικά τοποθετημένα ως προς ένα σημείο X, τότε η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2l} \frac{\Delta V}{I} \quad (3.9)$$

Η ποσότητα $\frac{nL^2}{2l}$ ονομάζεται γεωμετρικός συντελεστής.

Για την ηλεκτρική βυθοσκόπηση τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά, ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται μετακινώντας τα συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης.

Το βάθος διασκόπησης με τη διάταξη Schlumberger εξαρτάται από το μήκος AB των ηλεκτροδίων ρεύματος. Αυτό το βάθος κυμαίνεται από το 1/2 έως το 1/5 του μήκους AB.

Η διάταξη Schlumberger παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων όπως :

- Κατά την ηλεκτρική βυθοσκόπηση απαιτείται η μετακίνηση των ηλεκτροδίων ρεύματος μόνο
- Η χρήση σταθερού δίπολου τάσης περιορίζει ανεπιθύμητες επιδράσεις από πλευρικές γεωλογικές ασυνέχειες στις μετρήσεις.

Στη διάταξη Wenner ισχύει $AM = MN = NB = a$ δηλαδή τα ηλεκτρόδια διατάσσονται σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις (Σχήμα 3.10). Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (3.10)$$

όπου ο γεωμετρικός συντελεστής ισούται με $2\pi a$.

Στη διάταξη δίπολου — δίπολου (Σχήμα 3.10) τα ηλεκτρόδια ρεύματος σχηματίζουν το δίπολο ρεύματος όπου το ανάπτυγμα παραμένει το ίδιο. Αντίστοιχα, τα ηλεκτρόδια δυναμικού σχηματίζουν το δίπολο δυναμικού με ανάπτυγμα a . Η απόσταση των δίπολων είναι na (ακέραιο πολλαπλάσιο του a). Ισχύει ότι:

$$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)a \frac{\Delta V}{I} \quad (3.11)$$

όπου ο γεωμετρικός συντελεστής είναι $\pi n(n+1)(n+2)a$.

Στη διάταξη πόλου - δίπολου τα ηλεκτρόδια δυναμικού M,N είναι ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ρεύματος A,B εκ των οποίων το ένα, έστω το B, είναι τοποθετημένο σε μεγάλη απόσταση θεωρητικά στο άπειρο. Αν οι αποστάσεις AM και AN συμβολιστούν με α και β αντίστοιχα, ισχύει:

$$\rho_a = \frac{2\pi\alpha\beta}{\beta - \alpha} \frac{\Delta V}{I} \quad (3.12)$$

Για την περίπτωση όπου το β είναι ανάλογο του α ($\beta = n\alpha$) τότε ισχύει:

$$\rho_a = 2\pi n(n+1)a \frac{\Delta V}{I} \quad (3.13)$$

Στη διάταξη πόλου - πόλου εκτός από το ηλεκτρόδιο ρεύματος και το ηλεκτρόδιο δυναμικού, έστω N, είναι τοποθετημένο σε μεγάλη απόσταση, θεωρητικά στο άπειρο, από τα υπόλοιπα δύο ηλεκτρόδια A, M. Η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση (3.11).

Μια παραλλαγή της διάταξης πόλου - πόλου όπου τα ηλεκτρόδια B, N είναι κοντά το ένα με το άλλο ονομάζεται δίδυμου ζεύγους ηλεκτροδίων (twin-probe). Επειδή η απόσταση BN δεν είναι πλέον άπειρη αλλά ίση με β , ισχύει:

$$\rho_{\alpha} = 2\pi \frac{\alpha\beta}{\alpha + \beta} \frac{\Delta V}{I} \quad (3.14)$$

Για την περίπτωση όπου $BN = AM = \alpha$ τότε προκύπτει:

$$\rho_{\alpha} = \pi\alpha \frac{\Delta V}{I} \quad (3.15)$$

Οι κυριότεροι παράγοντες κατά την επιλογή της διάταξης στην ηλεκτρική βυθοσκόπηση είναι το μέγιστο βάθος διασκόπησης και η διακριτική ικανότητα τους.

Οι διατάξεις στις οποίες χρησιμοποιούνται δίπολα (twin-probe, πόλου - δίπολου) έχουν μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης για συγκεκριμένο ανάπτυγμα ηλεκτροδίων (Βαφείδης, 2001) σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Οι διατάξεις Wenner, Schlumberger και δίπολου - δίπολου έχουν καλύτερη διακριτική ικανότητα στο ίδιο βάθος σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ**4.1 Εισαγωγή**

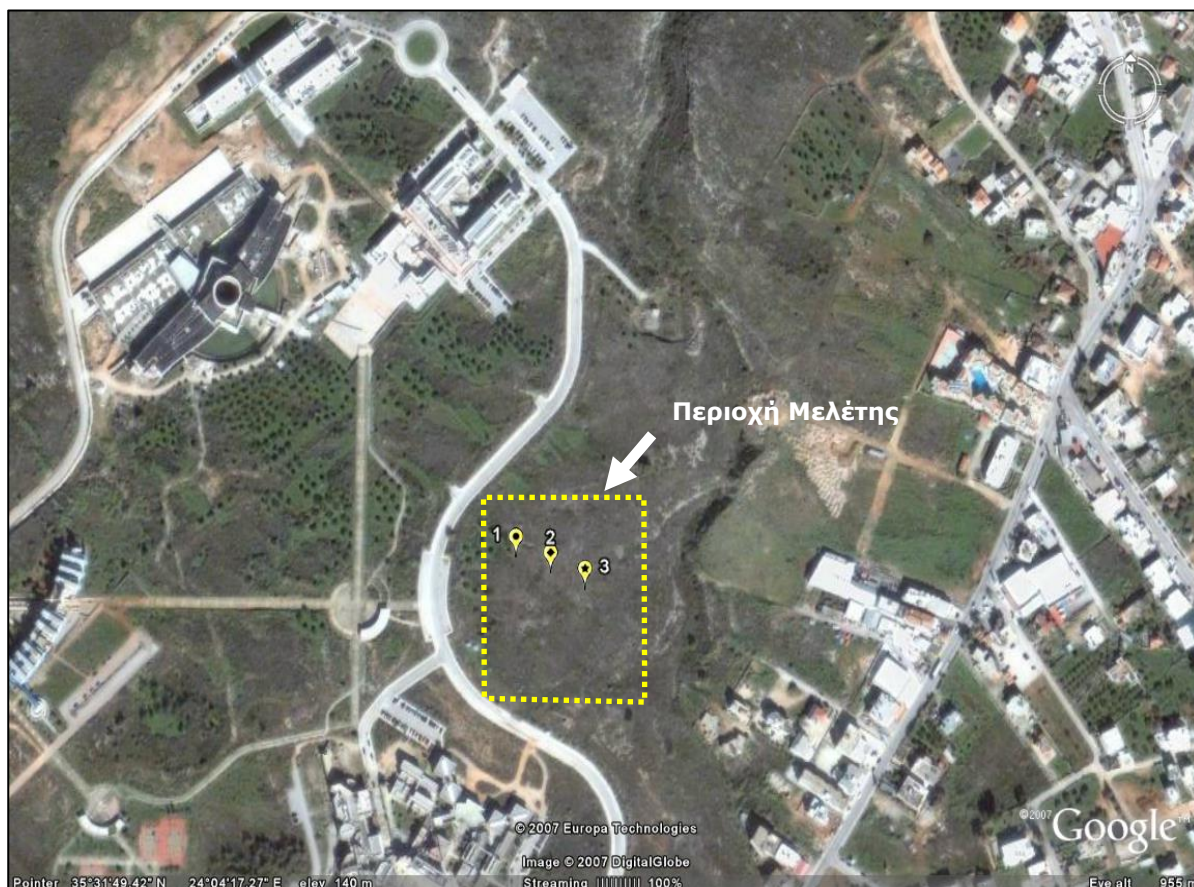
Είναι γνωστό ότι η ανάπτυξη νέων και καινοτόμων μεθόδων για την έρευνα του υπεδάφους ενθαρρύνεται και επιδιώκεται από πλείστα Ερευνητικά Ιδρύματα καθώς και από ιδιωτικούς φορείς διότι αυτές βελτιώνουν την γεωτεχνική πληροφορία, ενισχύουν και διευρύνουν το σχετικό γνωστικό δυναμικό και συμβάλουν σημαντικά, τόσο στην μείωση του κόστους, όσο και στην ενίσχυση της αξιοπιστίας των κατασκευών.

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας επιδιώκεται μέσω της Φασματικής Ανάλυσης γεωφυσικών και σεισμικών δεδομένων που προέκυψαν από μετρήσεις στο πεδίο, να πραγματοποιηθεί συγκριτική αξιολόγηση και συσχέτιση τους με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από έρευνες στο ίδιο πεδίο με κλασσικές γεωφυσικές και γεωτρητικές μεθόδους, με στόχο την διεύρυνση της υπάρχουσας πληροφόρησης για την σύσταση του εξεταζόμενου εδαφικού υποστρώματος.

Η εκπόνηση της γεωτεχνικής αυτής έρευνας που αναλύεται παρακάτω πραγματοποιήθηκε κατά το μεγαλύτερο τμήμα της σε επιλεγμένο χώρο εντός των γηπεδικών ορίων του Πολυτεχνείου Κρήτης στο Ακρωτήρι Χανίων. Ακριβέστερα ο υπόψη χώρος βρίσκεται στην Ανατολικά πλευρά της Πολυτεχνειούπολης και το κεντρικό στίγμα του έχει τα εξής χαρακτηριστικά: Γεωγραφικό Μήκος $24^{\circ} 4'16.68''\text{E}$, Γεωγραφικό Πλάτος $35^{\circ}31'46.20''\text{N}$ και Ύψος 147 m από την επιφάνεια της θάλασσας (Σχήμα 4.1).

Ο γεωλογικός σχηματισμός της περιοχής αυτής αποτελείται κυρίως από μαργαϊκό ασβεστόλιθο ο οποίος, λόγω καρστικοποίησης, εμφανίζει κατά θέσεις διαφορετική συμπεριφορά.

Ο χώρος αυτός επιλέχθηκε διότι υπήρχαν για αυτόν διαθέσιμα από προηγούμενη έρευνα γεωλογικά, γεωφυσικά και γεωτρητικά δεδομένα τα οποία μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία βάσης και συγκριτικής αξιολόγησης. Τα στοιχεία αυτά συμπληρώθηκαν με τα δεδομένα από νεότερες έρευνες που έγιναν στον ίδιο χώρο, στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, όπως αναλύεται παρακάτω.



Σχήμα 4.1 Δορυφορική φωτογραφία της ευρύτερης περιοχής του Πολυτεχνείου Κρήτης. Διακρίνεται η περιοχή μελέτης.

Για την επίτευξη λοιπόν του στόχου αυτού – συμπλήρωση και ποιοτική βελτίωση της γεωτεχνικής πληροφόρησης μέσω φασματικής ανάλυσης γεωφυσικών και γεωτεχνικών δεδομένων – χρησιμοποιήθηκαν:

- i. Γεωφυσικά και γεωτρητικά δεδομένα
- ii. Νέες μετρήσεις διαγραφιών εντός γεωτρήσεων.
- iii. Νέες στοχευμένες μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας.
- iv. Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης σεισμικών κυμάτων.

4.2 Γεωτρητικά Δεδομένα

Για την υπόψη περιοχή από την εκπόνηση μελέτης στα πλαίσια του Προγράμματος Cripno υπήρχαν διαθέσιμα και αξιοποιήθηκαν στοιχεία τριών (3) γεωτρήσεων Γ1, Γ2, Γ3, συνολικού μήκους 50,00 m (βλέπε δορυφορική φωτογραφία). Πέραν της αξιολόγησης και ταυτοποίησης των πυρήνων που ελήφθησαν και από τις τρεις (3) γεωτρήσεις πραγματοποιήθηκαν και γεωφυσικές

διαγραφίες εντός των γεωτρήσεων Γ1 και Γ2. Τα κύρια χαρακτηριστικά των γεωτρήσεων Γ1, Γ2 και Γ3 όπως αυτά είχαν καταγραφεί μετά το πέρας των διατρητικών εργασιών απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1)

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά γεωτρήσεων Γ1, Γ2 και Γ3.

Χαρακτηριστικά	Γ1	Γ2	Γ3
Μήκος Διάτρησης (m)	15	15	15
Απόλυτο Υψόμετρο Πυθμένα (m)			
Βάθος Απώλειας Υδάτων (m)	3,0	4,5	4,0
Ημερομηνία Έναρξης	24-11-2004	25-11-2004	26-11-2004
Ημερομηνία Ολοκλήρωσης	24-11-2004	26-11-2004	30-11-2004
Σωλήνωση/Διαμέτρημα	NAI/Φ75	NAI/Φ75	NAI Φ75
Τσιμέντωση	OXI	NAI	NAI
Ένεμα	-	Μπετονίτης	Μπετονίτης
Παρατηρήσεις Τσιμέντωσης		Όχι πλήρης. Απώλειες ενέματος σε διακλάσεις	Όχι πλήρης. Απώλεια ενέματος σε διακλάσεις.

Αναλυτικότερα πραγματοποιήθηκαν συνεχώς και κατά βάθος διαγραφίες μέτρησης διαμέτρου της γεώτρησης (Σχήματα 4.2 και 4.3), φυσικής ακτινοβολίας γάμμα, ηλεκτρικής αντίστασης και ηλεκτρικής αγωγιμότητας οι οποίες παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

Επισημαίνεται ότι οι μετρήσεις των φυσικών διαγραφιών που πραγματοποιήθηκαν, στην γεώτρηση Γ1 έγιναν εντός του εσωτερικού της γεώτρησης μετά την αφαίρεση του σωλήνα Φ75 (Σχήμα 4.4), ενώ οι αντίστοιχες μετρήσεις στην γεώτρηση Γ2 έγιναν εντός του σωλήνα Φ75 καθόσον διαπιστώθηκε ότι η εξαγωγή του σωλήνα θα συνοδευόταν από καταπτώσεις σαθρών τεμαχίων, τα οποία θα καθιστούσαν την γεώτρηση μη αξιοποιήσιμη.



Σχήμα 4.2 Άποψη της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 4.3 Άποψη της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε.

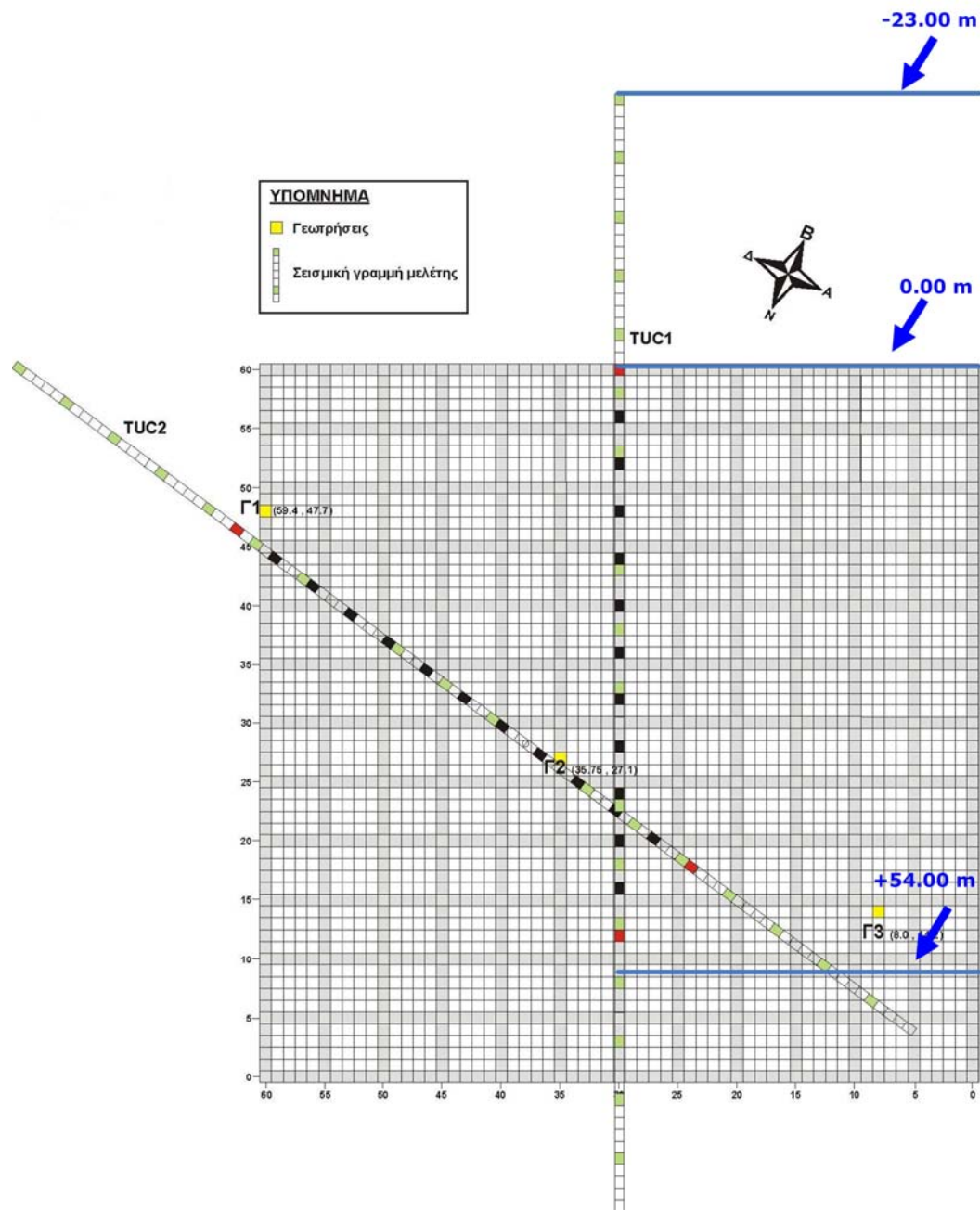


Σχήμα 4.4 Η γεώτρηση Γ1 μετά την αφαίρεση της σωλήνας Φ75.

Τα συνοπτικά αποτελέσματα δε που προέκυψαν στα πλαίσια του έργου αυτού από την επεξεργασία και την ανάλυση των πυρήνων τη γεώτρησης Γ2 (Σχήματα 4.6 και 4.7), η προβολή της οποίας αντιστοιχεί στο σημείο (+33,00) από την αρχή των αξόνων (Σχήμα 4.5) παρατίθενται ενδεικτικά στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα ανάλυσης πυρήνων γεώτρησης Γ2 (Βαφειδής, 2005)

Βάθος (m)	RQD	Χαρακτηρισμός
0 – 1,6	41,88	• Τεταρτογενή ιζήματα terra rossa για 0.00-0.80 m. • Ερυθρότεφρος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με αυξομειούμενο πορώδες για 0.80-3.20 m.
1,6 – 3,2	76,88	
3,2 – 4,8	75,31	• Ερυθρότεφρος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με αυξομειούμενο πορώδες.
4,8 – 6,4	30,00	
6,4 – 8,0	16,88	• Ερυθρότεφρος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με αυξομειούμενο πορώδες.
8 – 9,6	63,75	
9,6 – 11,2	88,44	• Ερυθρότεφρος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με αυξομειούμενο πορώδες για 10.0-13.6 m.
11,2 – 12,8	27,19	
12,8 -14,4	25,00	• Ερυθρότεφρος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με αυξομειούμενο πορώδες για 13.00-15.00 m.
14,4 – 15,0	0,00	
	Μέσος όρος: 44,53	



Σχήμα 4.5 Τοπογραφικό σκαρίφημα της περιοχής μελέτης. Διακρίνονται οι θέσεις των τριών (3) γεωτρήσεων και των δύο (2) σεισμικών γραμμών τα δεδομένα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν (Βαφείδης & Συνεργάτες, 2005).



Σχήμα 4.6 Τμήματα του πυρήνα της γεώτρησης Γ2 (Βαφείδης & Συνεργάτες, 2005).

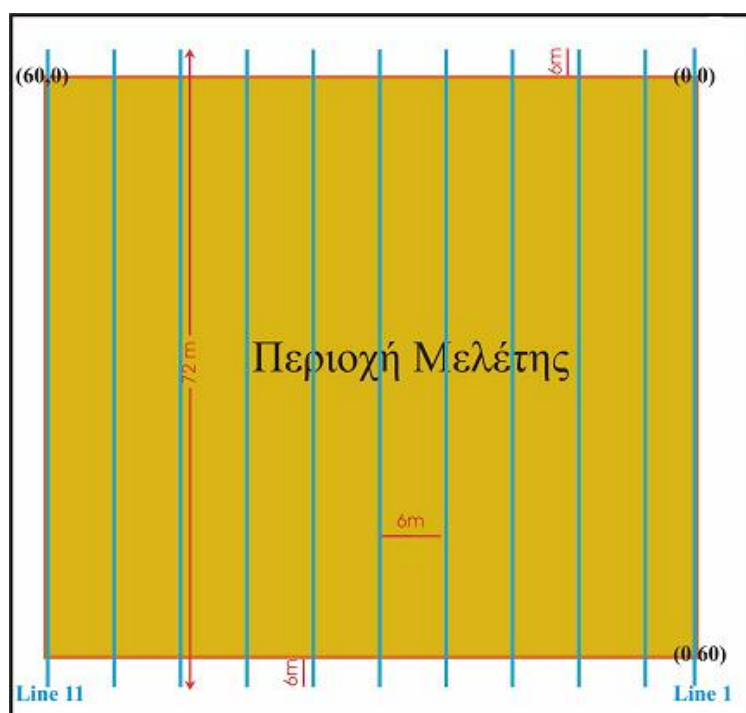


Σχήμα 4.7 Τμήματα του πυρήνα της γεώτρησης Γ2 (Βαφείδης & Συνεργάτες, 2005).

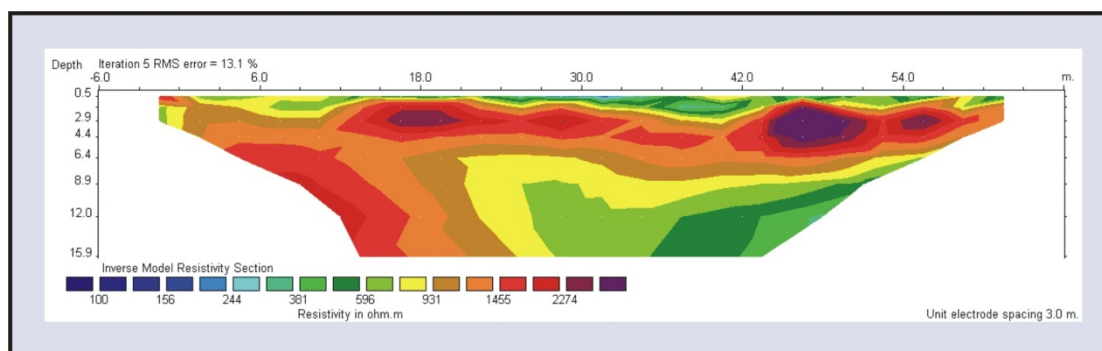
4.3 Ηλεκτρική Διασκόπηση

Για τις ανάγκες της υπόψη έρευνας, το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, διέθεσε γεωφυσικά και γεωτρητικά δεδομένα τα οποία είχαν συλλεχθεί από τον Καθηγητή κ Α. Βαφείδη και την ομάδα του η οποία αποτελείται από τους κκ Ν. Σπανουδάκη, Η. Hamdan, Γ. Κρητικάκη, Ν. Οικονόμου και Ν. Ανδρονικίδη. Η γεωφυσική αυτή διασκόπηση περιελάμβανε έντεκα (11) γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας, δύο (2) σεισμικές γραμμές και ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής διασκόπησης και των γεωτρητικών δεδομένων, παρατίθενται στην εκτενή Τεχνική έκθεση του παραπάνω έργου (Βαφείδης & Συνεργάτες, 2005) και αποτελούν στοιχεία βάσης και συγκριτικής αξιολόγησης για την παρούσα έρευνα.

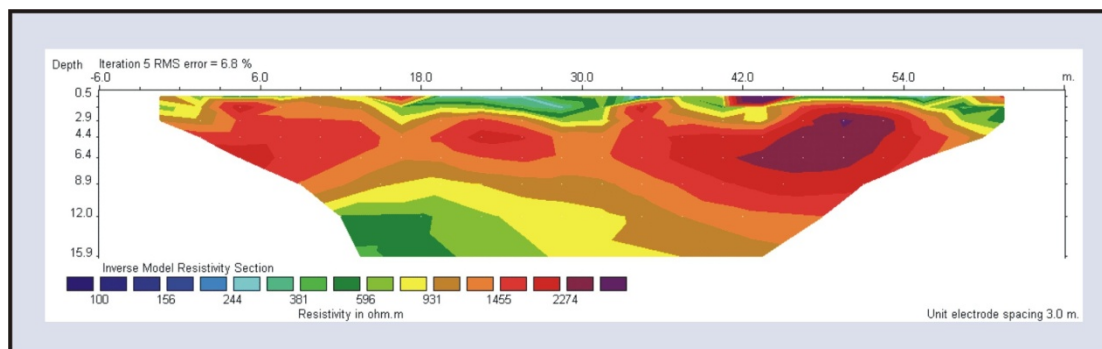
Δημιουργήθηκαν σε κάναβο 60 m X 60 m οι έντεκα (11) ηλεκτρικές γραμμές τομογραφίας καθώς και η γεωηλεκτρική τομή για κάθε γραμμή κατά την κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο (Σχήματα 4.8, 4.9, 4.10 και 4.11).



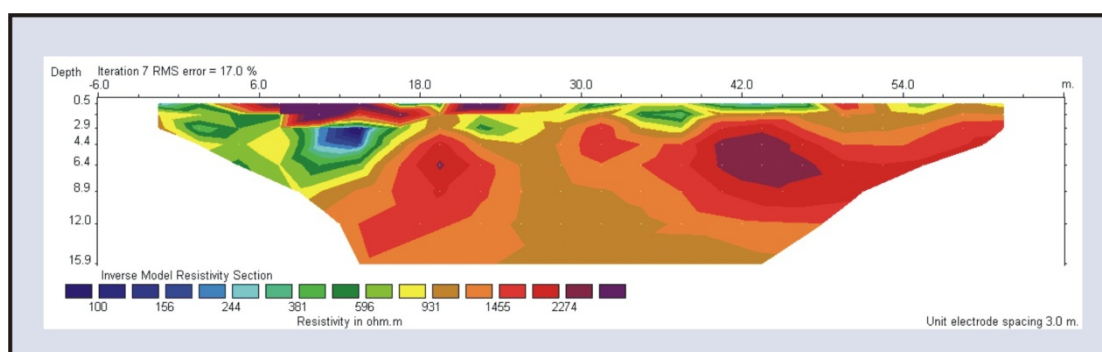
Σχήμα 4.8 Ο κάναβος της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας (Βαφείδης & Συνεργάτες, 2005).



Σχήμα 4.9 Η γεωηλεκτρική τομή για την δεύτερη γραμμή, με κατεύθυνση από Βορρά προς νότο, όπου εμφανίζεται η κατανομή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (συντεταγμένες $(-6, 6) - (66,6)$) (Βαφείδης & Συνεργάτες, 2005).



Σχήμα 4.10 Η γεωηλεκτρική τομή για την τέταρτη γραμμή, με κατεύθυνση από Βορρά προς νότο, όπου εμφανίζεται η κατανομή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (συντεταγμένες $(-6, 18) - (66,18)$) (Βαφείδης & Συνεργάτες, 2005).



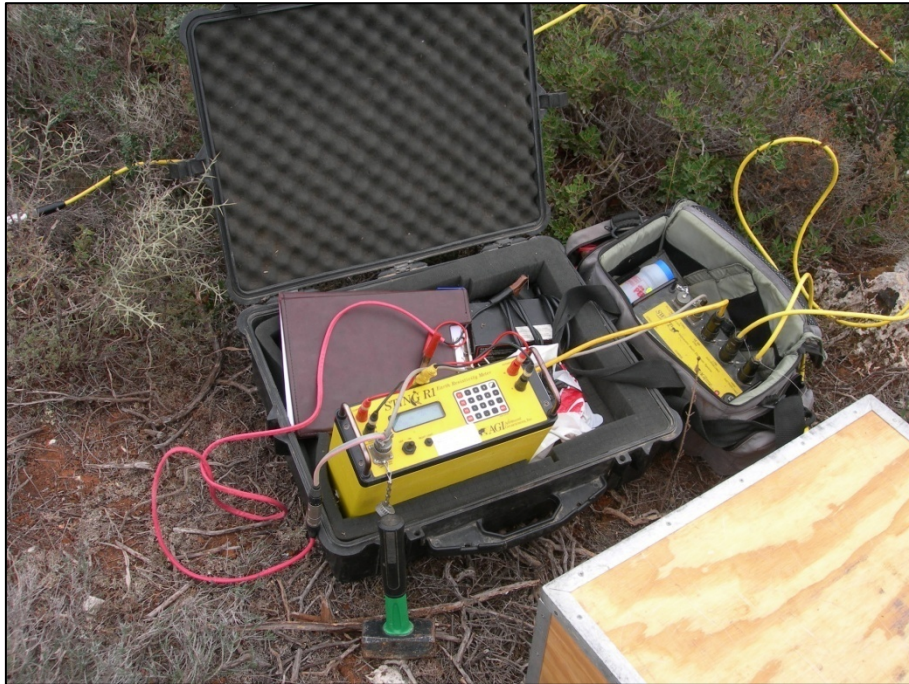
Σχήμα 4.11 Η γεωηλεκτρική τομή για την έβδομη γραμμή, με κατεύθυνση από Βορρά προς νότο, όπου εμφανίζεται η κατανομή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (συντεταγμένες $(-6, 60) - (66,60)$) (Βαφείδης & Συνεργάτες, 2005).

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν ακόμη κατάλληλα στοχευμένα δύο (2) νέες γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας (Σχήματα 4.12, 4.13 και 4.14) στην ίδια περιοχή που δημιουργήθηκαν και οι υπόλοιπες έντεκα (11) ηλεκτρικές γραμμές. Για κάθε νέα γραμμή εξ αυτών χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη διπόλου – διπόλου για την συλλογή δεδομένων με το μήκος της κάθε γραμμής να είναι 72,00 m το δε βήμα της 3,00 m.

Οι δύο νέες κατάλληλα στοχευμένες γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας δημιουργήθηκαν έτσι ώστε να συμπίπτουν χωρικά με τις δύο (2) σεισμικές γραμμές τα δεδομένα των οποίων αναλύονται και επεξεργάζονται στην παρούσα έρευνα. Επίσης επειδή η μία εκ των δύο νέων γραμμών συμπίπτει πλήρως με την 6^η γραμμή από τις παραπάνω έντεκα (11) αναφερόμενες γραμμές, είναι δυνατόν να υπάρξει συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μελετών αυτών.



Σχήμα 4.12 Εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας για την δημιουργία των δύο (2) νέων στοχευμένων γραμμών μελέτης.

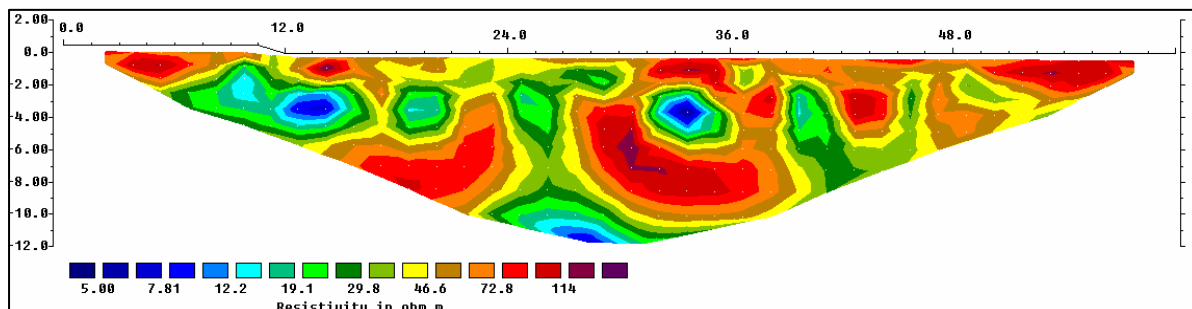


Σχήμα 4.13 Ο εξοπλισμός της ηλεκτρικής μεθόδου

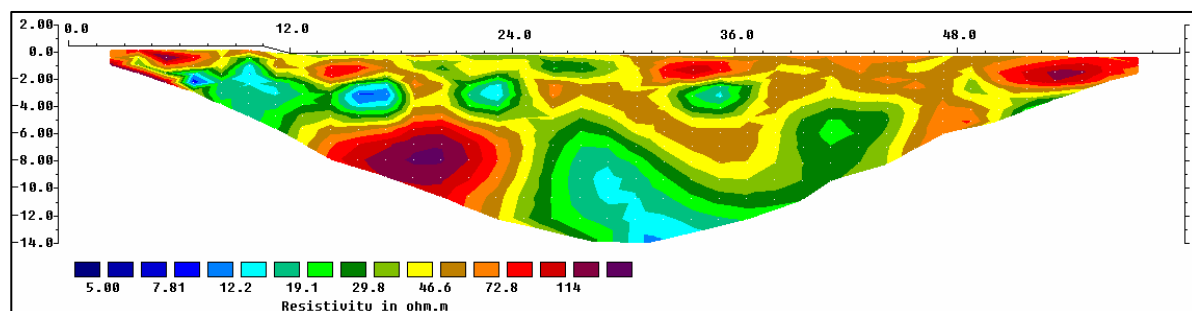


Σχήμα 4.14 Τυπικό ηλεκτρόδιο της μεθόδου ηλεκτρικής τομογραφίας.

Οι γεωηλεκτρικές τομές που προέκυψαν για τις δύο (2) νέες γραμμές μελέτης εμφανίζονται στα Σχήματα 4.15 και 4.16.



Σχήμα 4.15 Η γεωηλεκτρική τομή για την πρώτη από τις δύο νέες γραμμές μελέτης, με κατεύθυνση από Βορρά προς νότο, όπου εμφανίζεται η κατανομή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (η υπόψη γραμμή μελέτης συμπίπτει χωρικά με την 1^η γραμμή μελέτης της σεισμικής μεθόδου TUC 1 – Σχήμα 4.5).



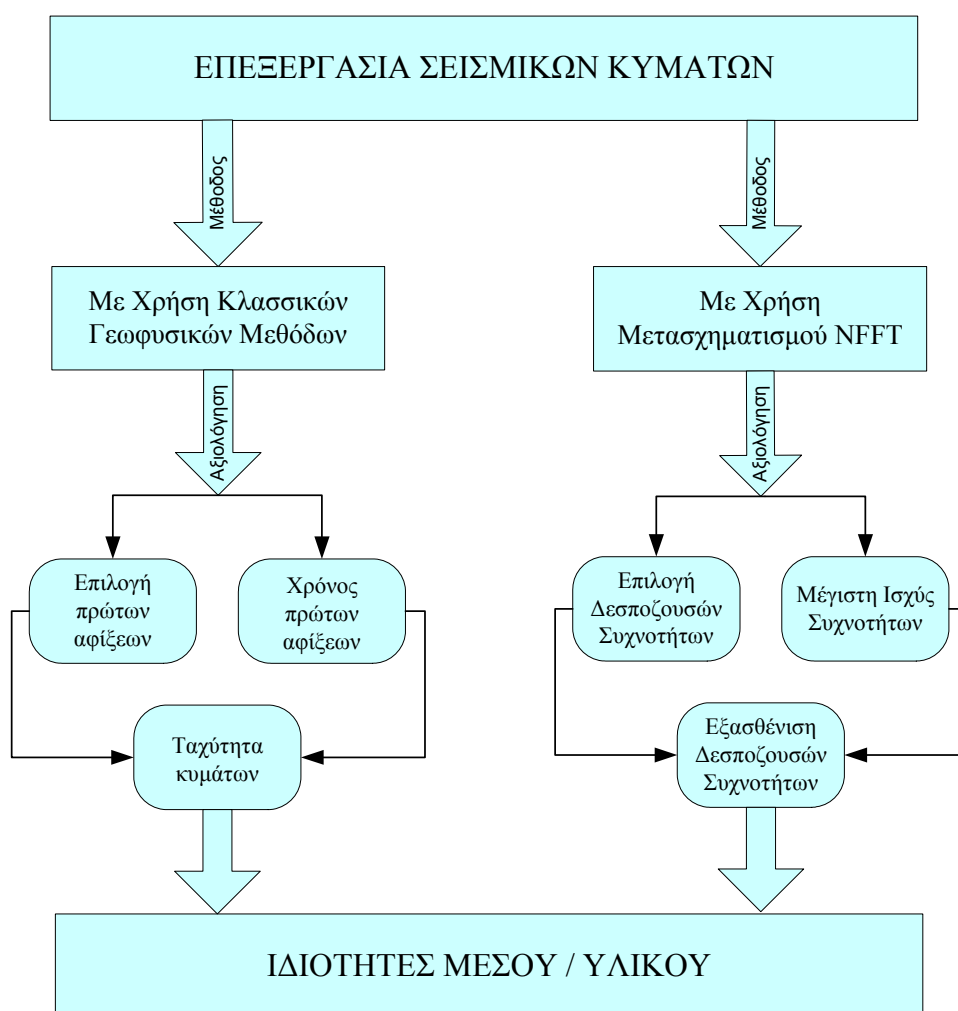
Σχήμα 4.16 Η γεωηλεκτρική τομή για την δεύτερη από τις δύο νέες γραμμές μελέτης, με κατεύθυνση από βορειοδυτικά προς νοτιοανατολικά, όπου εμφανίζεται η κατανομή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (η υπόψη γραμμή μελέτης συμπίπτει χωρικά με την 2^η γραμμή μελέτης της σεισμικής μεθόδου TUC 2 – Σχήμα 4.5).

4.4 Φασματική Ανάλυση Σεισμικών Δεδομένων με την Χρήση FFTs και Wavelets

Σύμφωνα με τις κλασσικές μεθόδους επεξεργασίας των λαμβανομένων σεισμικών κυμάτων έχει καταβληθεί ιδιαίτερη προσπάθεια εκ μέρους αρκετών μεμονωμένων ερευνητών και ερευνητικών ομάδων στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την μελέτη του χρόνου των πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων, από την επιλογή των πρώτων αφίξεων και από τον υπολογισμό των σεισμικών ταχυτήτων.

Με την εφαρμοζόμενη στην παρούσα μελέτη επεξεργασία μέσω χρήσης των Μετασχηματισμών FFT και Wavelet (συνεχής) σε λαμβανόμενα σεισμικά κύματα η προσπάθεια αυτή μετατοπίζεται σε αξιολόγηση καταγραφών συχνότητας - χρόνου και όχι πλάτους - χρόνου που μελετώνται κυρίως με τις κλασσικές μεθόδους. Αξιολογούνται και αναλύονται οι εμφανιζόμενες δεσπόζουσες συχνότητες, η χρονική διάρκεια αυτών, η ισχύς τους και η εξασθένηση τους με τον χρόνο.

Στο Σχήμα 4.17 παρατίθεται συνοπτικά η διαφοροποίηση της τεχνικής της επεξεργασίας των σημάτων με χρήση μετασχηματισμού NFFT σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους επεξεργασίας των σεισμικών κυμάτων. Και στις δύο περιπτώσεις το αναμενόμενο αποτέλεσμα είναι παράμετροι ή δείκτες χαρακτηρισμού του εξεταζόμενου υλικού ή μέσου.



Σχήμα 4.17 Επεξεργασία σημάτων με χρήση μετασχηματισμού NFFT σε σχέση με τις κλασσικές γεωφυσικές μεθόδους.

Σε ότι δε αφορά την φασματική επεξεργασία των δεδομένων σεισμικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή μελέτης του χώρου του Πολυτεχνείου Κρήτης επιχειρήθηκε και η συσχέτιση και σύγκριση με τα στοιχεία των γεωλογικών, γεωφυσικών και γεωτρητικών δεδομένων που διατέθηκαν από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής (Βαφείδης & Συνεργάτες, 2005), ενώ για τα δεδομένα που προέκυψαν από τις σεισμικές μετρήσεις στον χώρο του λατομείου της περιοχής του Οικισμού Αλφά του Νομού Ρεθύμνης (Κούβελας και Φέγγος, 2007), το ενδιαφέρον εστιάστηκε στην ανάδειξη, επεξεργασία και μελέτη των δεσποζουσών συχνοτήτων που προέκυψαν από την εξέταση του ομοιογενούς υλικού του υπόψη χώρου.

4.4.1 Φασματική Ανάλυση Δεδομένων Πεδίου με χρήση NFFT

Στον χώρο της Πολυτεχνειούπολης έγιναν μετρήσεις και καταγραφή δεδομένων οι οποίες αντιστοιχούν στις σεισμικές γραμμές 1 και 2 (TUC 1 και TUC 2) του Σχήματος 4.5.

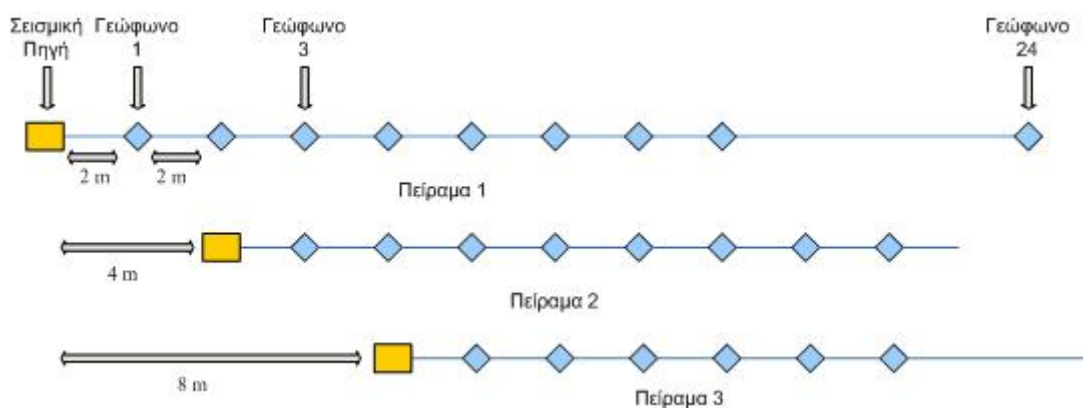
Σε κάθε περίπτωση για την επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν, ακολουθήθηκε με πιστότητα η ίδια διαδικασία όπως αυτή περιγράφεται παρακάτω αναλυτικά για την σεισμική γραμμή TUC1, η οποία όπως έχει αναφερθεί παραπάνω συμπίπτει απολύτως με την ηλεκτρική γραμμή έξι (6) των μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας. Η αναλυτική εξέταση και παρουσία των στοιχείων που προκύπτουν εξ' αιτίας αυτού του γεγονότος είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα καθ' όσον τα στοιχεία αυτά δύναται να συγκριθούν και αξιοποιηθούν παράλληλα με τα λοιπά στοιχεία που έχουν προκύψει για την γραμμή αυτή.

Για την συλλογή των σεισμικών μετρήσεων (Βαφείδης & Συνεργάτες, 2005) στην Γραμμή 1 (TUC1) η διεύθυνση της οποίας συμπίπτει με την διεύθυνση Βορρά – Νότου, το μήκος της οποίας σχεδιάστηκε στα 94 m, χρησιμοποιούνται 2 αναπτύγματα των 48 m με κάθε ανάπτυγμα να αποτελείται από 24 γεώφωνα σε ισαπόσταση 2 m. Η αφετηρία δε των μετρήσεων της γραμμής αυτής βρίσκεται 23 m βορειότερα της αφετηρίας των μετρήσεων με την ηλεκτρική μέθοδο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.5.

Ως σεισμική – δονητική πηγή χρησιμοποιείται ένα μεταλλικό σφυρί βάρους 5 kg το οποίο προσπίπτει με σταθερή δύναμη και από σταθερό ύψος επί μεταλλικής πλάκας που βρίσκεται στο έδαφος.

Ως χρονικό διάστημα δειγματοληψίας λαμβάνεται το 1 ms και ως συνολική διάρκεια καταγραφής τα 512 ms.

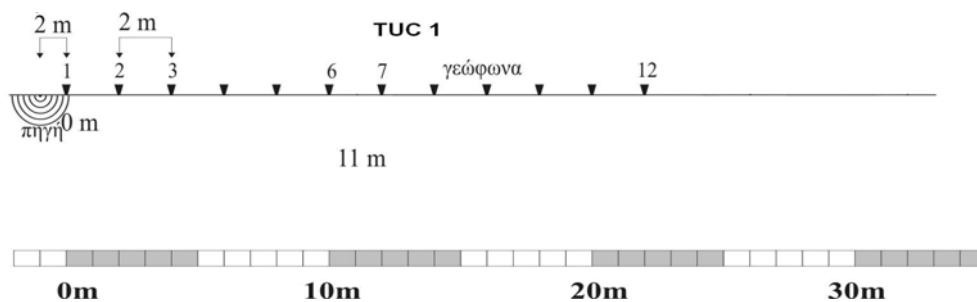
Για την συλλογή των σεισμικών δεδομένων χρησιμοποιείται διάταξη κοινής πηγής και κύλιση της με σταθερό βήμα προχώρησης το οποίο ορίστηκε στα 4 m (Σχήμα 4.18) και πραγματοποιούνται 13 πειράματα για κάθε γραμμή μελέτης. Σε κάθε πείραμα η πηγή βρίσκεται 2 m βορειότερα του πρώτου γεωφώνου.



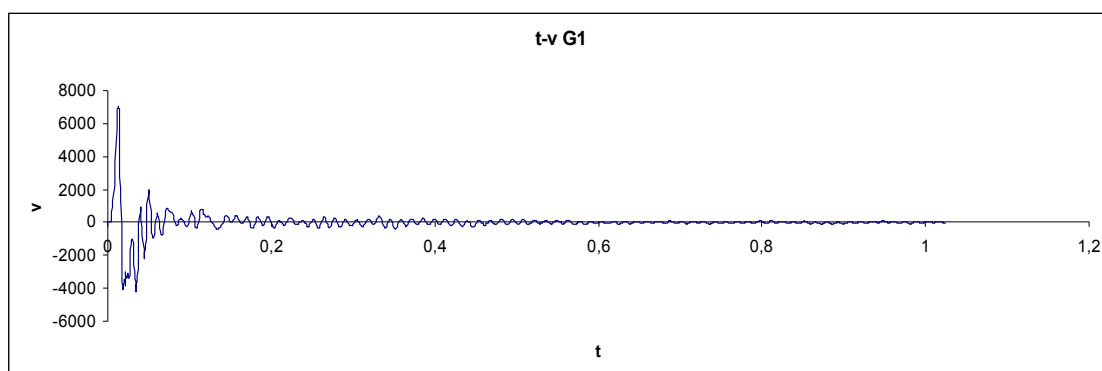
Σχήμα 4.18 Σχηματική απεικόνιση κινούμενης διάταξης.

Από τα 13 πειράματα της γραμμής 1, ελήφθησαν τα δεδομένα του 7ου, 8ου και 9ου πειράματος, σκαρίφημα του αναπτύγματος του οποίου την στιγμή της λήψης των δεδομένων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.19 με την πηγή στο σημείο μηδέν -1.00 m (για το 7ο πείραμα), +3.00 m (για το 8ο πείραμα) και +7.00 m (για την 9^ο πείραμα). Με τον τρόπο αυτό εξετάζεται – μελετάται και αξιολογείται ολόκληρη η περιοχή η οποία έχει μελετηθεί με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και εκτείνεται από 0.00 m έως 54.00 m.

Τα σεισμικά αυτά δεδομένα ελήφθησαν σε μορφή αρχείων .dat και .sgy (για κάθε μέτρηση), τα οποία περιείχαν πέραν των τεχνικών πληροφοριών της μέτρησης, πίνακα με 24 στήλες (όσα και τα γεωφώνια της διάταξης) και 1024 γραμμές (όσος και ο αριθμός των καταγραφών που πραγματοποιήθηκαν)(Σχήμα 4.20).

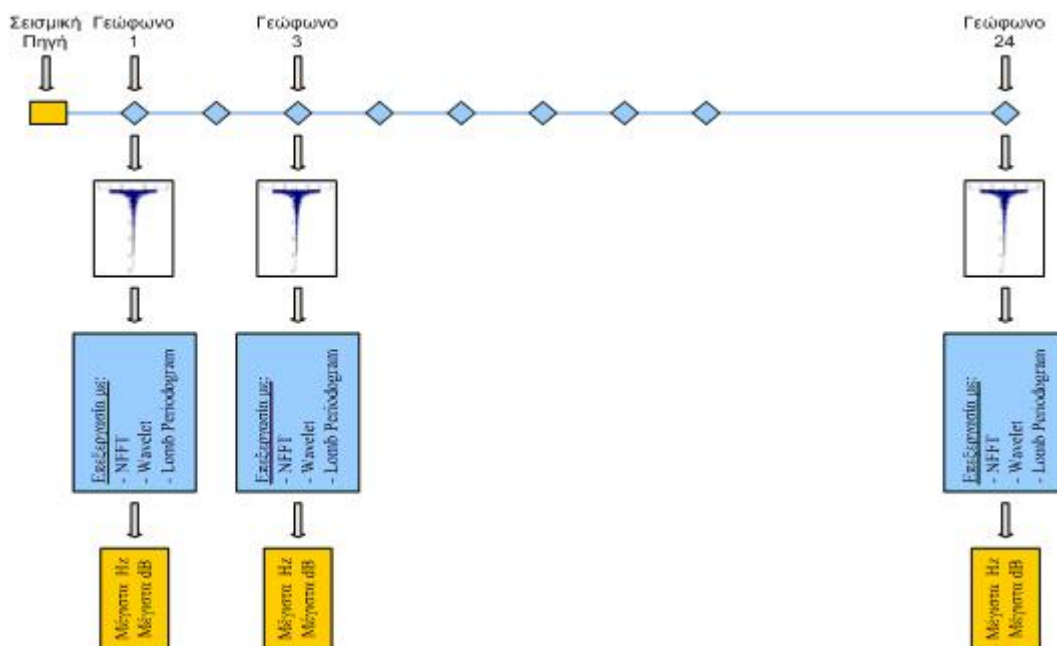


Σχήμα 4.19 Γεωμετρία της γραμμής μελέτης (TUC 1) κατά την στιγμή λήψης της πρώτης μέτρησης (Βαφειδής & Συνεργάτες, 2005).



Σχήμα 4.20 Τυπική σεισμική καταγραφή.

Στην συνέχεια τα στοιχεία αυτά εισήχθησαν στο πρόγραμμα Specgramdemo του signal analysis toolbox της Matlab και αναλύθηκαν με τον αλγόριθμο NFFT με στόχο την εξαγωγή του συχνοτικού τους περιεχομένου (Σχήμα 4.21). Το παράθυρο των αποτελεσμάτων της εφαρμογής Specgramdemo, περιλαμβάνει πληροφορίες για το συχνοτικό περιεχόμενο του εισαγόμενου σε αυτό σήματος (καταγραφή 1024 σημείων κάθε γεωφώνου, κάθε μέτρησης). Αναλυτικότερα, μέσω της χρήσης ενός σταυρονήματος που περιέχει η εφαρμογή, ο χρήστης δύναται να μελετήσει την χρονική μεταβολή της συχνότητας και της ισχύος του σήματος. Η χρωματική κλίμακα που διαθέτει η συγκεκριμένη εφαρμογή κάνει ευκολότερα αντιληπτά τα σημεία μέγιστης μεταφοράς ενέργειας του σήματος.



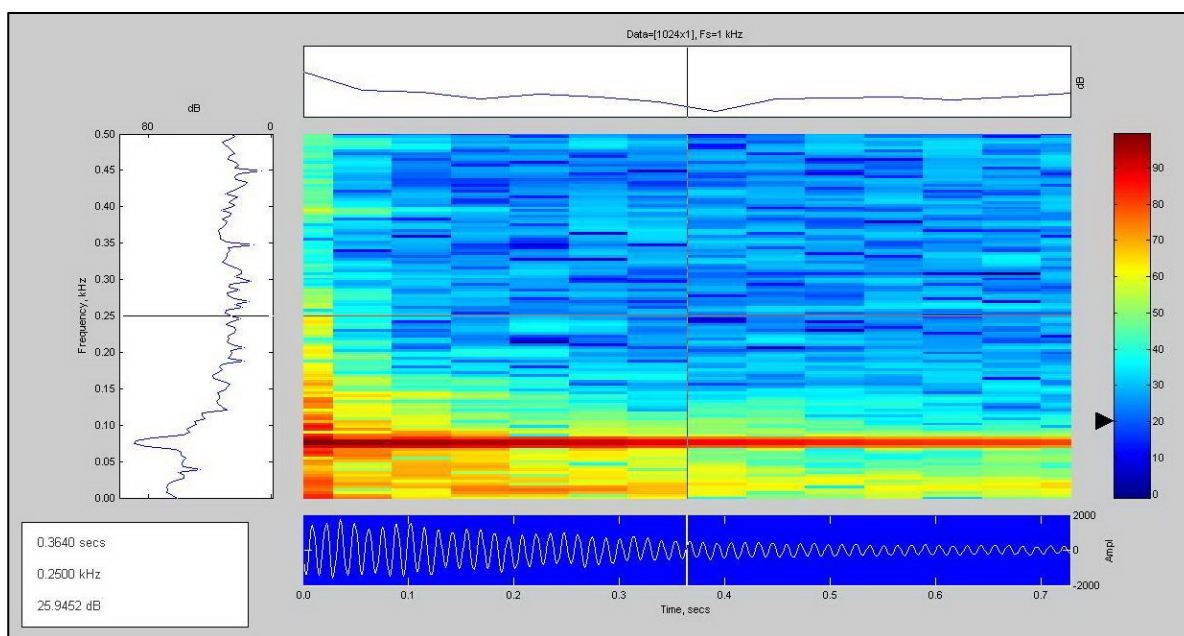
Σχήμα 4.21 Τυπική σεισμική καταγραφή.

Αναλυτικότερα δε, στο απεικονιζόμενο στο Σχήμα 4.22 φασματικό περιεχόμενο, ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει τον χρόνο σε sec, ο κατακόρυφος άξονας την συχνότητα σε kHz, ενώ η χρωματική κλίμακα την ισχύ του σήματος σε dB. Καθώς η μεταφορά ενέργειας μεγιστοποιείται σε μεμονωμένες δεσπόζουσες συχνότητες, στην περιοχή αυτή των διαγραμμάτων, η χρωματική κλίμακα είναι έντονα κόκκινη που αντιστοιχεί περίπου σε 100 db. Επίσης στην αριστερή πλευρά του Σχήματος 4.22 απεικονίζεται διάγραμμα συχνότητας (σε kHz) – ισχύος (σε dB) που αντιστοιχεί σε τομή του φασματικού περιεχομένου κατά τον κατακόρυφο άξονα του σταυρονήματος στην θέση όπου αυτό ευρίσκεται, ενώ στην επάνω πλευρά της ίδιας εικόνας απεικονίζεται διάγραμμα χρόνου (σε sec) – ισχύος (σε dB) που αντιστοιχεί σε τομή του φασματικού περιεχομένου κατά τον οριζόντιο άξονα του σταυρονήματος στην θέση όπου αυτό ευρίσκεται.

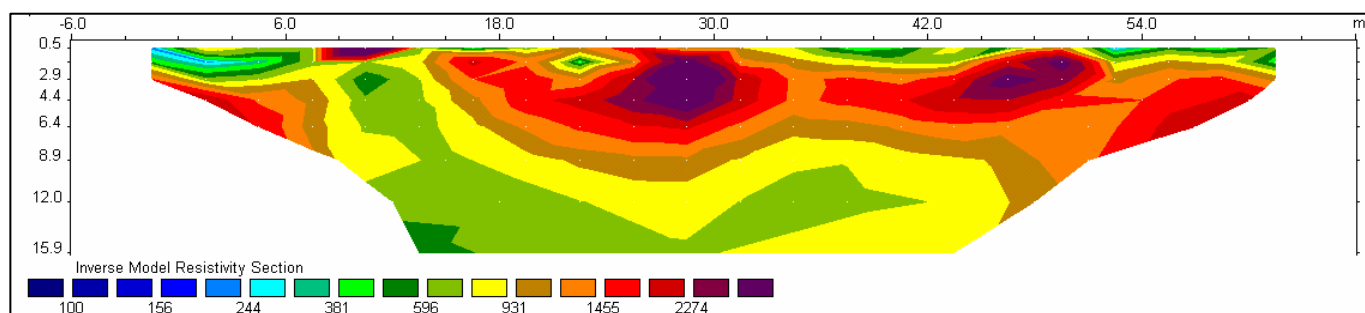
Από την προσεκτική παρατήρηση του φάσματος με τη χρήση του παραθυρικού FFT για τις 24 καταγραφές κοινής πηγής, διαπιστώθηκε ότι ένα από τα κοινά χαρακτηριστικά τους, είναι η παρουσία επίπεδου συχνότητας στο οποίο παρατηρείται συνεχής υψηλή μεταφορά ενέργειας και που απεικονίζεται με έντονη κόκκινη γραμμή παράλληλη με τον άξονα του χρόνου (time, sec). Μέσω της μετακίνησης του σταυρονήματος κατέστη δυνατό να ευρεθεί το επίπεδο της συχνότητας (Hz) στο οποίο γίνεται αυτή η συνεχής υψηλή μεταφορά ενέργειας καθώς

και η ισχύς του σήματος (dB) κατά την διάρκεια του χρόνου.

Η κυρίαρχη συχνότητα κάθε καταγραφής συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης του αντίστοιχου γεωφώνου παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.24, 4.26 και 4.28. Για τη συγκριτική δε επαλήθευση της εξαγόμενης πληροφορίας, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής μεθόδου στην γραμμή 6 που συμπίπτει με την γραμμή μελέτης 1 (TUC 1) της σεισμικής μεθόδου. Στην γεωηλεκτρική τομή 6 (Σχήμα 4.23), εμφανίζονται δύο γεωηλεκτρικά στρώματα τα οποία σύμφωνα με τη γεώτρηση Γ2 αποδίδονται σε βιογενείς ασβεστόλιθους του Νεογενούς. Στο επιφανειακό στρώμα (πάχους περίπου 6,5 μέτρων) η ειδική ηλεκτρική αντίσταση παρουσιάζει έντονη πλευρική μεταβολή λόγω του κάρστ και αυξημένες τιμές σε σχέση με το υποκείμενο στρώμα στο οποίο εμφανίζονται τυπικές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε βιογενείς ασβεστόλιθους του Νεογενούς.

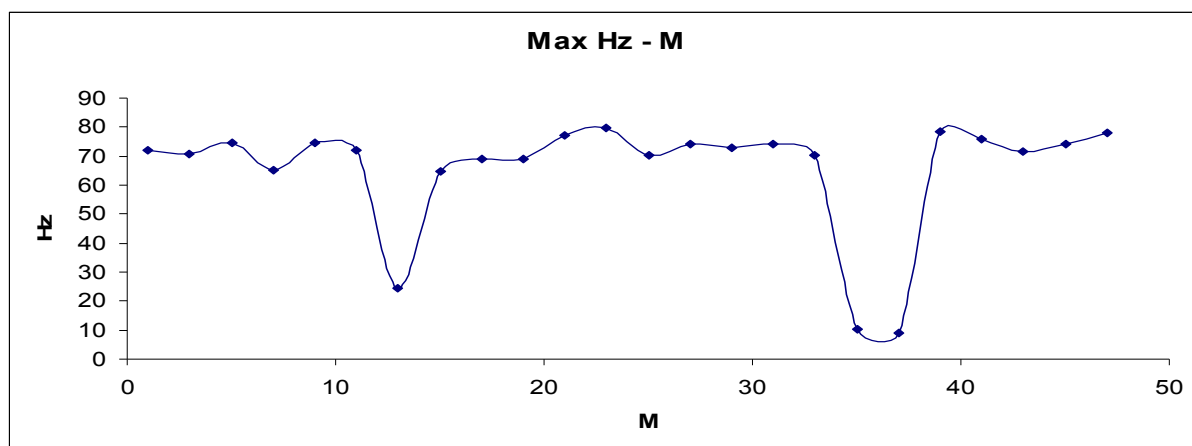


Σχήμα 4.22 Παράθυρο αποτελεσμάτων εφαρμογής *Specgramdemo*.

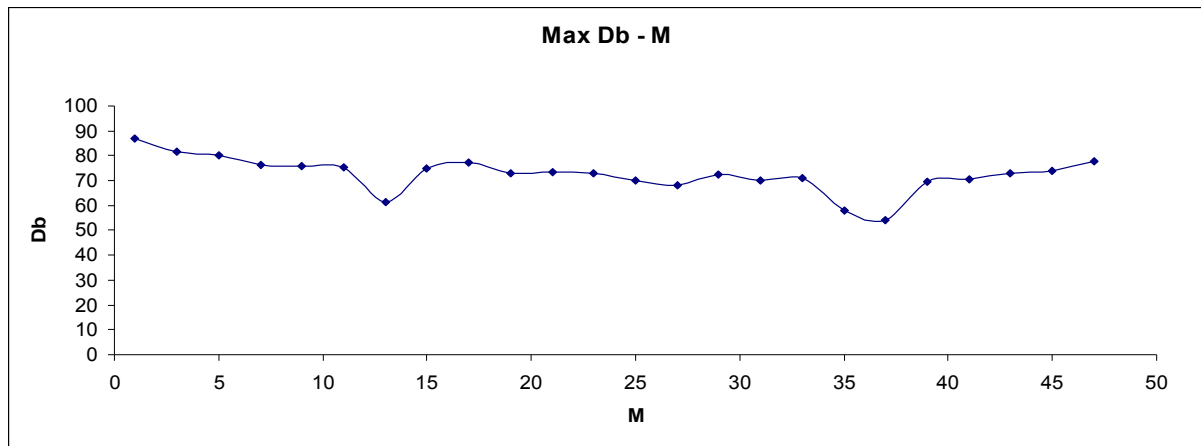


Σχήμα 4.23 Γεωηλεκτρική τομή στην γραμμή 6. Ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος σε μέτρα, ο οριζόντιος στην απόσταση των ηλεκτροδίων σε μέτρα και η χρωματική κλίμακα την ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε Ωm .

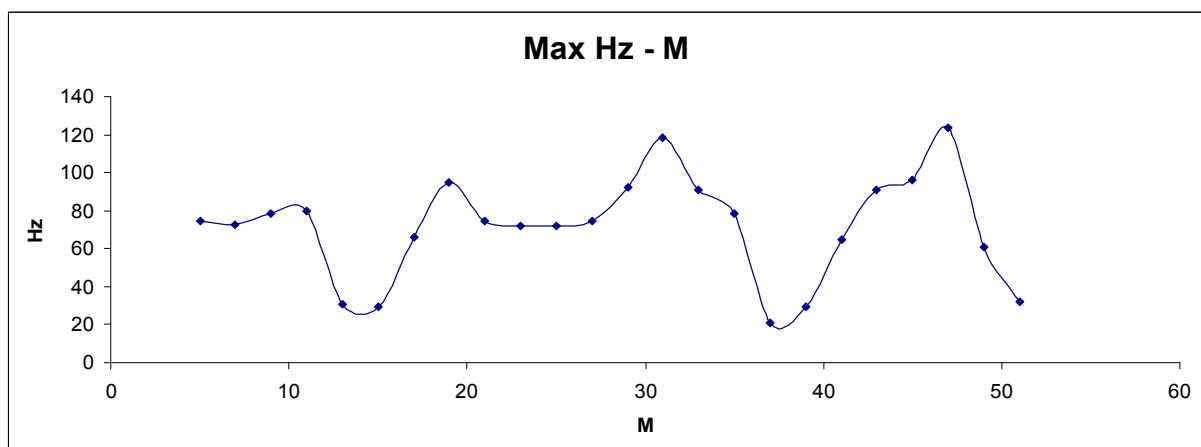
Επιπρόσθετα δημιουργήθηκαν διαγράμματα της χωρικής μεταβολής της μέγιστης ισχύος του φάσματος (Σχήματα 4.25, 4.27 και 4.29), καθώς και οι συγκριτικές απεικονίσεις αυτών (όπου M εννοούνται οι αποστάσεις των γεωφώνων από την αφετηρία για κάθε μέτρηση).



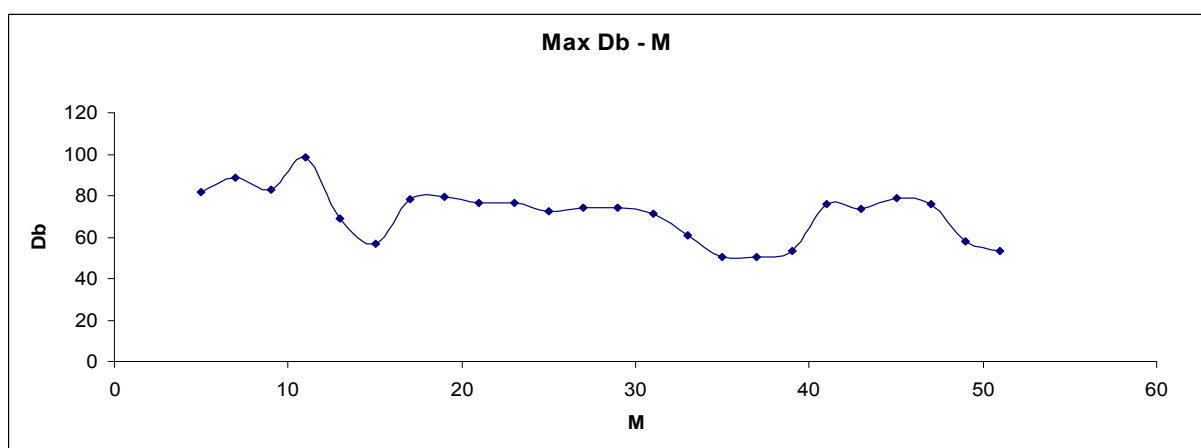
Σχήμα 4.24 Διάγραμμα μεταβολής της κυρίαρχης συχνότητας κατά μήκος της γραμμής μελέτης για το 7^ο πείραμα.



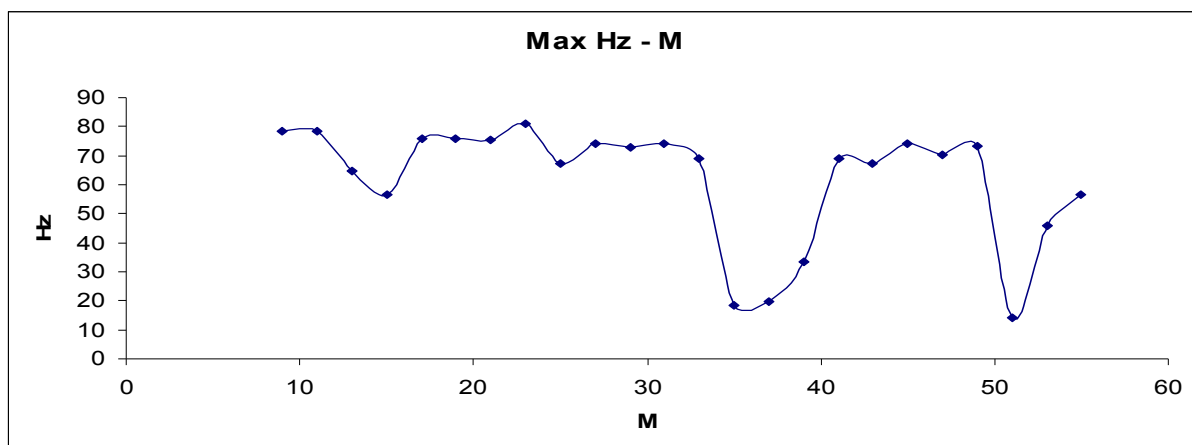
Σχήμα 4.25 Διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης ισχύος κατά μήκος της γραμμής μελέτης για το 7^ο πείραμα.



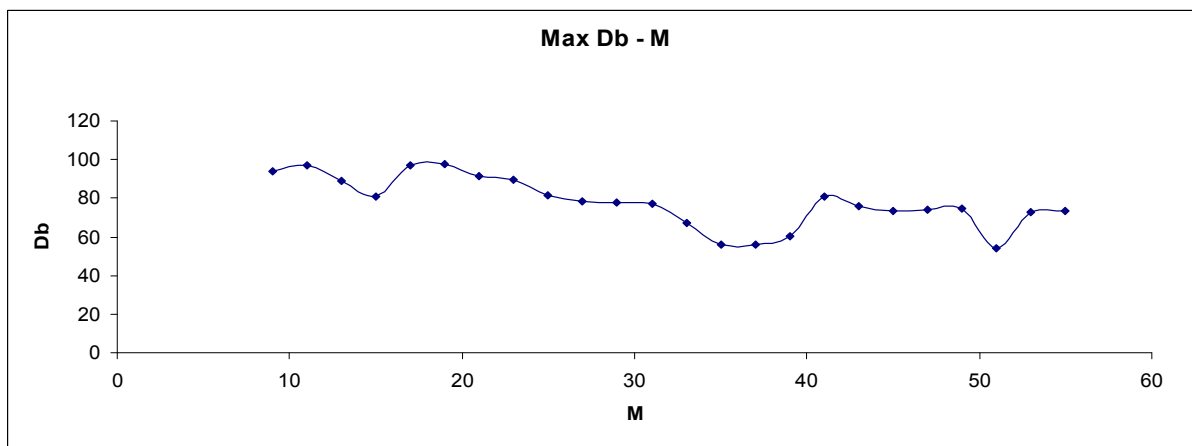
Σχήμα 4.26 Διάγραμμα μεταβολής της κυρίαρχης συχνότητας κατά μήκος της γραμμής μελέτης για το 8^ο πείραμα.



Σχήμα 4.27 Διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης ισχύος κατά μήκος της γραμμής μελέτης για το 8^ο πείραμα.



Σχήμα 4.28 Διάγραμμα μεταβολής της κυρίαρχης συχνότητας κατά μήκος της γραμμής μελέτης για το 9^ο πείραμα.

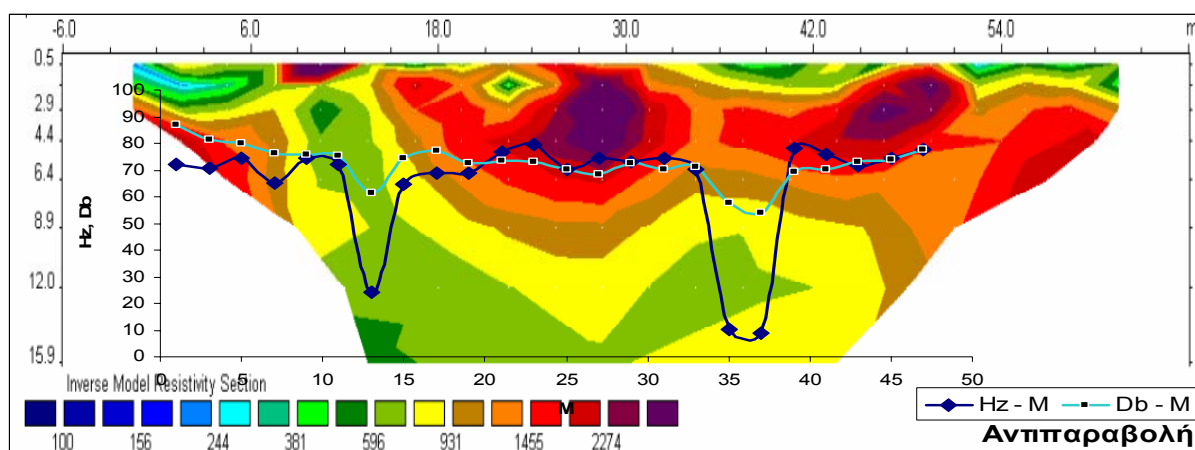


Σχήμα 4.29 Διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης ισχύος κατά μήκος της γραμμής μελέτης για το 9^ο πείραμα.

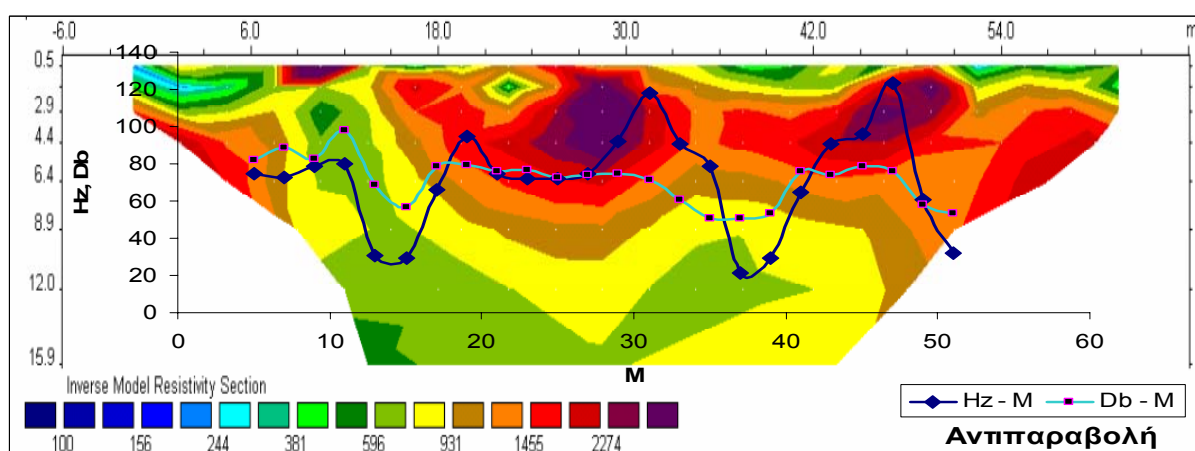
Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της σεισμικής μεθόδου στην γραμμή 1 (TUC 1) η οποία συμπίπτει χωρικά με την γραμμή 6 της Ηλεκτρικής Τομογραφίας προέκυψαν τα εξής:

1. Η κυρίαρχη συχνότητα στα τρία επιμέρους πειράματα (7^ο, 8^ο, 9^ο, Σχήματα 4.24, 4.26 και 4.28) παρουσιάζει τοπικά ελάχιστα στα σημεία +13 m, +37 m, +51 m από την αφετηρία της διάταξης – σημείο 0 m.
2. Η μέγιστη ισχύς στα τρία επιμέρους πειράματα (7^ο, 8^ο, 9^ο, Σχήματα 4.25, 4.27 και 4.29) παρουσιάζει τοπικά ελάχιστα στα ίδια σημεία +13 m, +37 m, +51 m από την αφετηρία της διάταξης.
3. Στο επιφανειακό στρώμα (πάχους περίπου 6,50 μέτρων) της γεωηλεκτρικής τομής 6 (Σχήμα 4.23), η ειδική ηλεκτρική αντίσταση παρουσιάζει έντονη πλευρική μεταβολή λόγω του κάρστ.

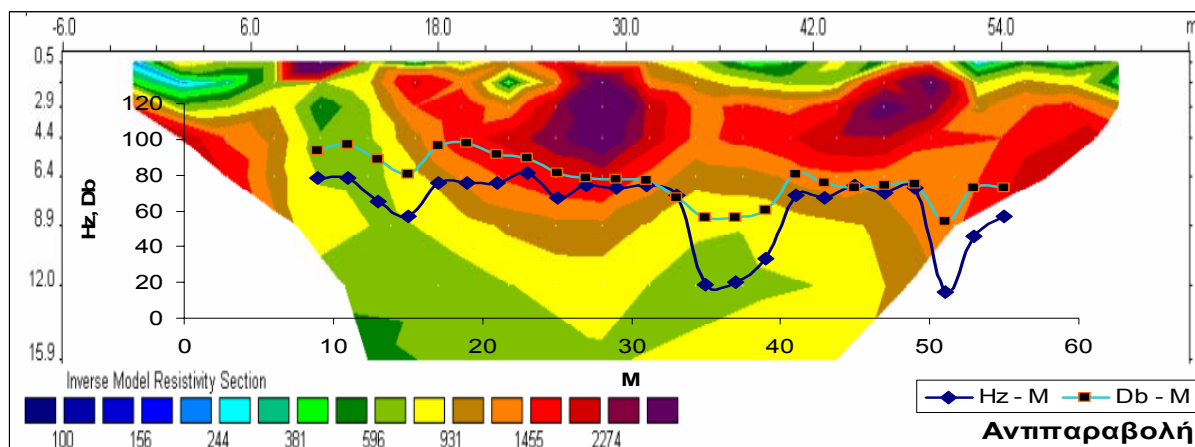
4. Στις θέσεις όπου η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε αυτό το στρώμα είναι υψηλή, τόσο η κυρίαρχη συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος όσο και η μέγιστη ισχύς του είναι σχετικά υψηλές, ενώ όπου η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μειώνεται αισθητά, τόσο η κυρίαρχη συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος όσο και η μέγιστη ισχύς του παρουσιάζουν αντίστοιχη μείωση. Παρατηρείται δηλαδή ανάλογης και ομοιότροπης μορφής μεταβολή του επιπέδου της συχνότητας και της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος με αυτό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Σχήματα 4.30 και 4.31).
5. Η πιλοτική εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής στην υπό μελέτη περιοχή υπέδειξε ότι αναγνωρίζει περιοχές τόσο με χαμηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις όσο και με υψηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις.



Σχήμα 4.30 Συγκριτική απεικόνιση των Διαγραμμάτων $Hz - M$ και $Db - M$ με τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας για το 7^ο πείραμα.



Σχήμα 4.31 Συγκριτική απεικόνιση των Διαγραμμάτων $Hz - M$ και $Db - M$ με τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας για το 8^ο πείραμα.



Σχήμα 4.32 Συγκριτική απεικόνιση των Διαγραμμάτων $Hz - M$ και $Db - M$ με τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας για το 9^ο πείραμα.

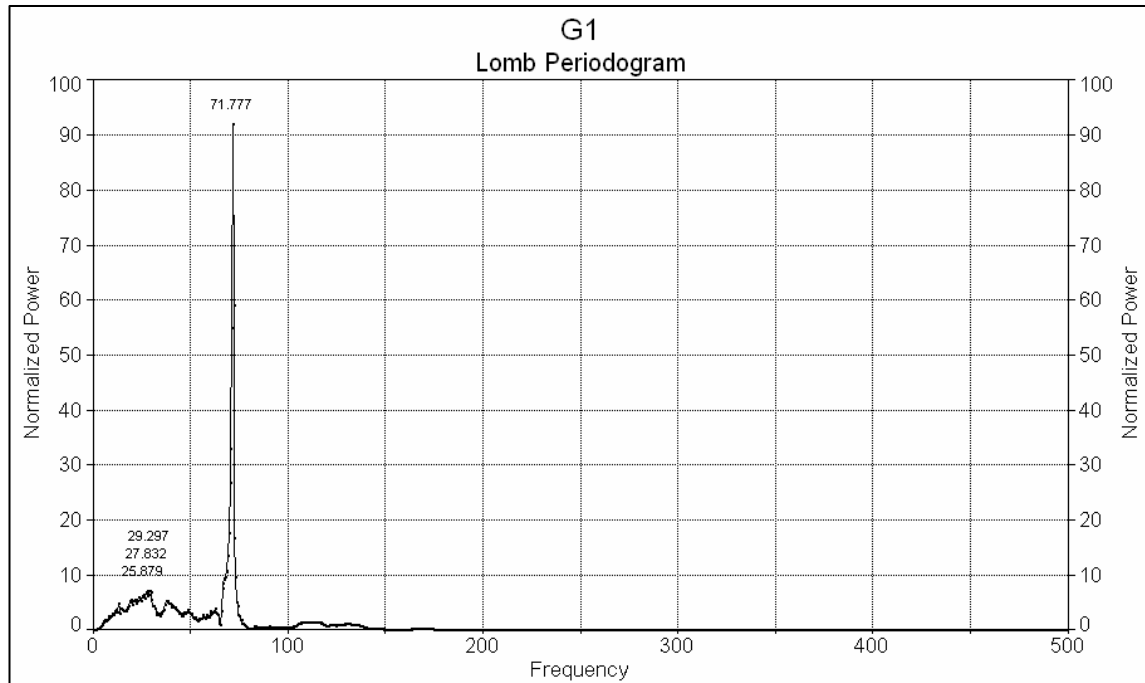
Από την εξέταση της γραμμής 2 εξήχθησαν ανάλογα αποτελέσματα συμπεριφοράς φασματικής υπογραφής με αυτά της γραμμής 1 (ομοιότροπη μεταβολή συχνότητας και ισχύος με την ειδική ηλεκτρική αντίσταση, όπως αυτή προκύπτει από τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας για την υπόψη γραμμή μελέτης), αποτέλεσμα αναμενόμενο καθ' όσον ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία σε σχεδόν ίδιο εδαφικό υπόστρωμα.

4.4.2 Φασματική Ανάλυση Δεδομένων Πεδίου με χρήση Περιοδιογράμματος Lomb και Ανάλυσης Κυματιδίων (Wavelets)

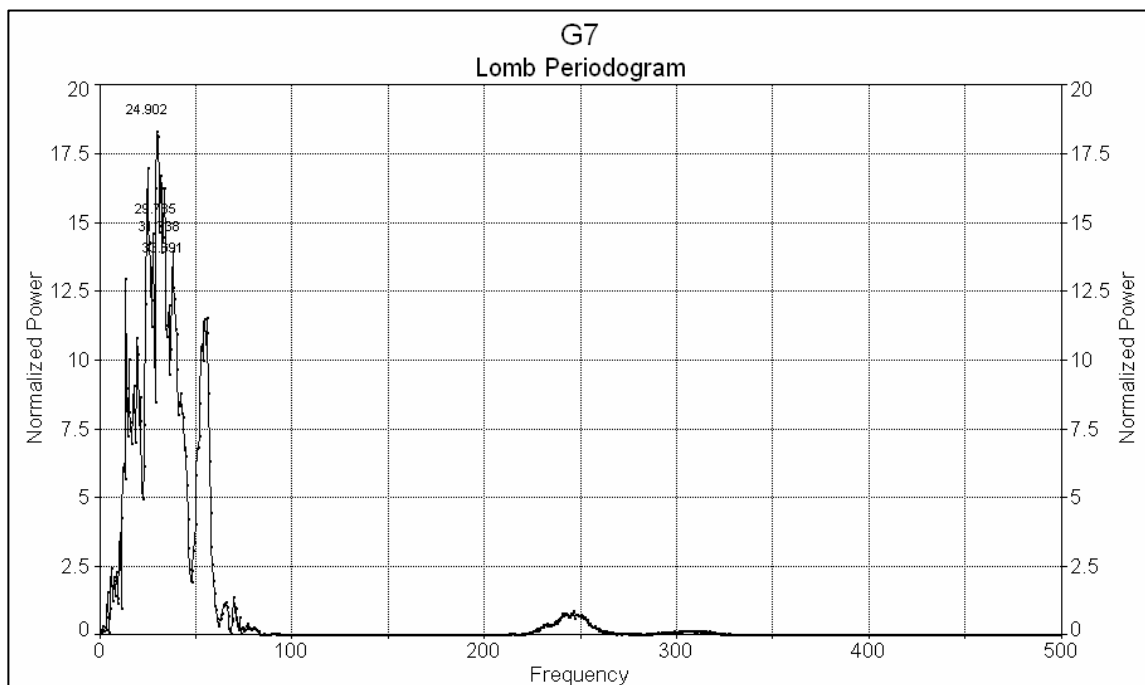
Στα δεδομένα που προέκυψαν από τις παραπάνω αναφερόμενες μετρήσεις πεδίου πραγματοποιήθηκε φασματική ανάλυση για την επαλήθευση και την συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με την χρήση Περιοδιογράμματος Lomb και Ανάλυσης Κυματιδίων (συνεχής μετασχηματισμός Wavelet).

Με την επεξεργασία αυτή ποσοτικοποιήθηκε με μεγαλύτερη ακρίβεια το μέτρο των δεσποζουσών συχνοτήτων και της ισχύος αυτών και διαπιστώθηκε ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν συμπίπτουν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με χρήση NFFT, γεγονός που πιστοποιεί την αξιοπιστία των συμπερασμάτων που εξήχθησαν.

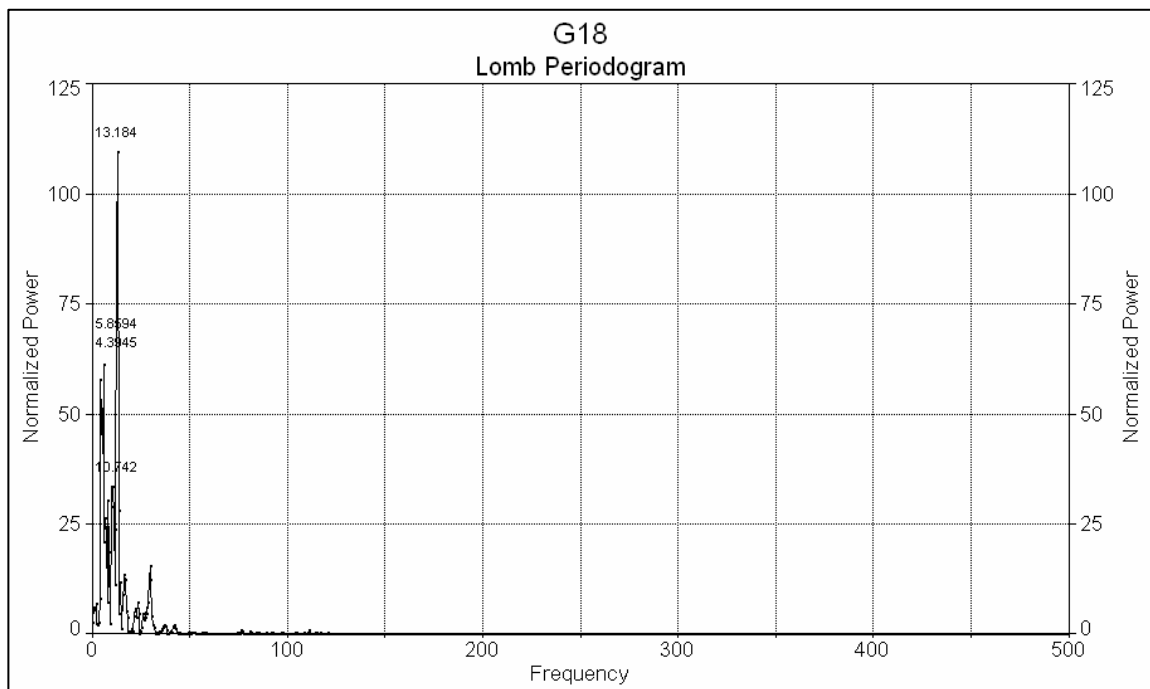
Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά διαγράμματα φασματικής ανάλυσης τόσο με την χρήση περιοδιογραμμάτων Lomb (Σχήματα 4.33, 4.34 και 4.35), όσο και με την χρήση της ανάλυσης κυματιδίων (Σχήματα 4.36, 4.37 και 4.38).



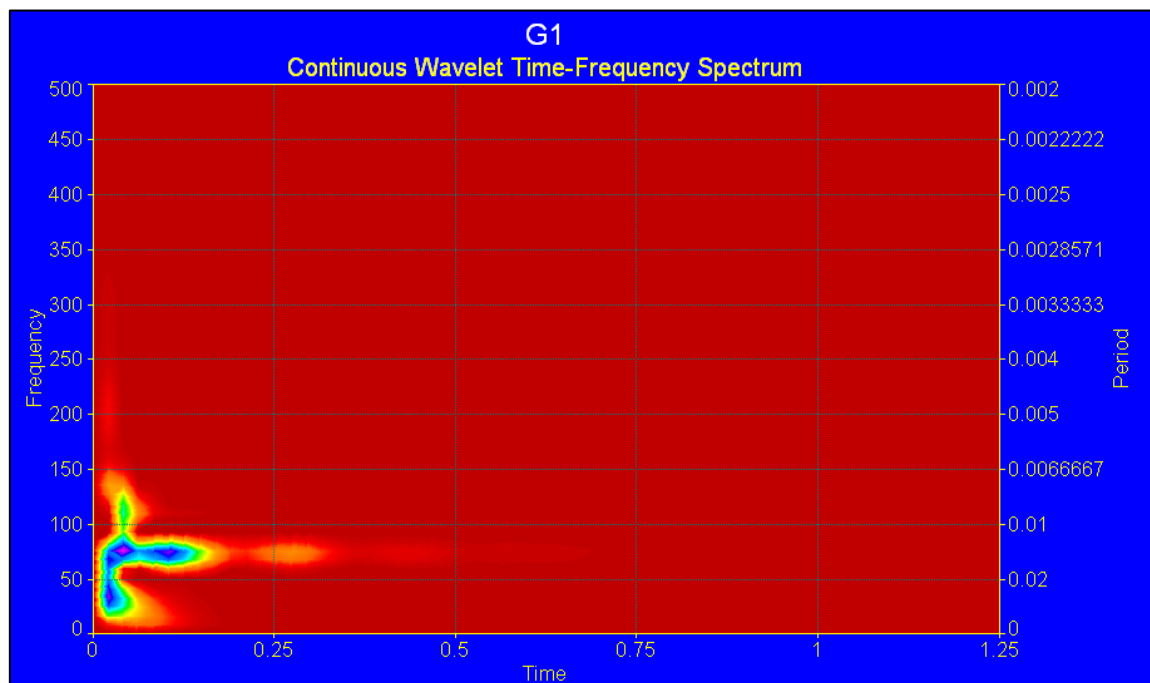
Σχήμα 4.33 Φασματική ανάλυση δεδομένων Γεωφώνου 1, με την χρήση περιοδογράμματος *Lomb*.



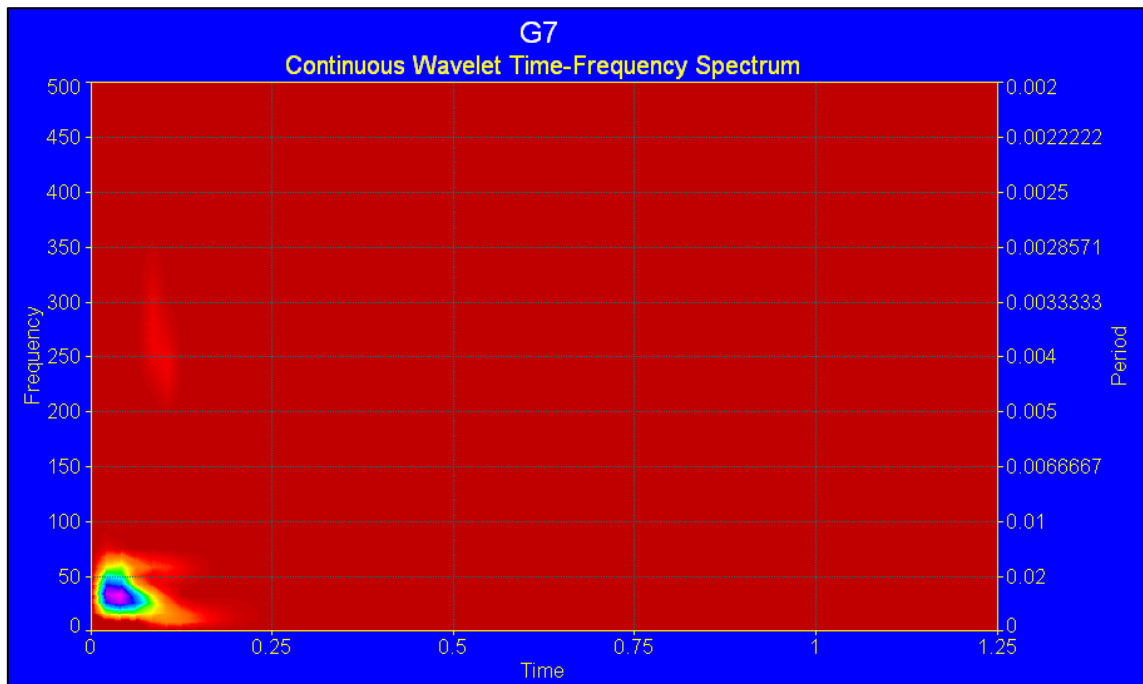
Σχήμα 4.34 Φασματική ανάλυση δεδομένων Γεωφώνου 7, με την χρήση περιοδογράμματος *Lomb*.



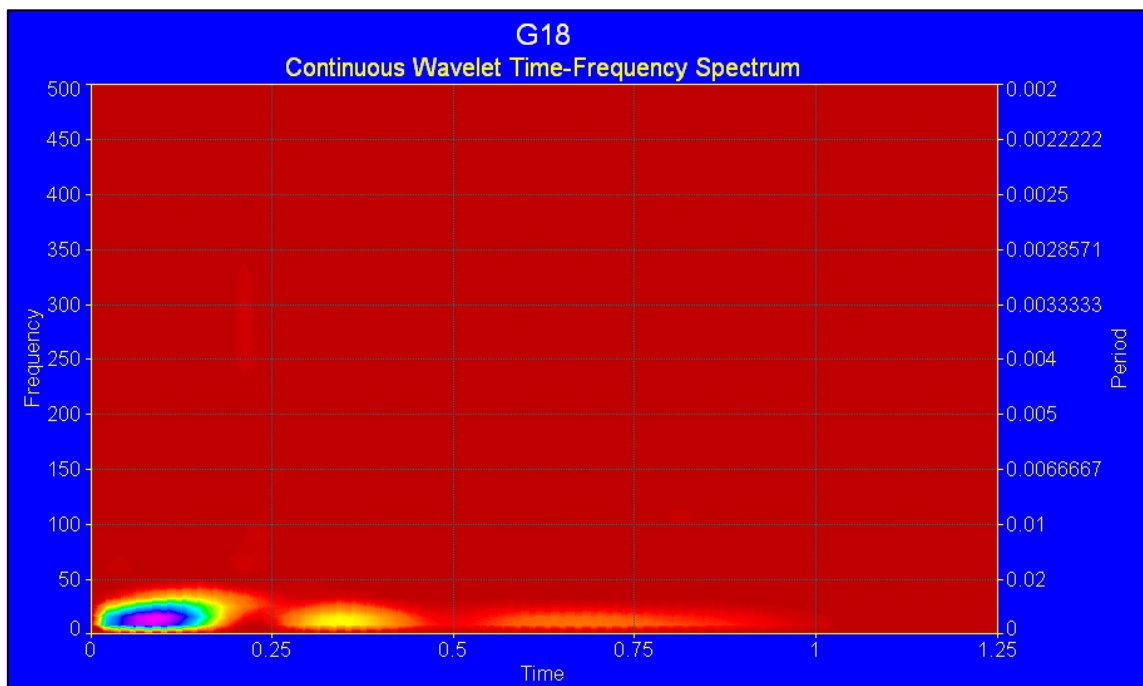
Σχήμα 4.35 Φασματική ανάλυση δεδομένων Γεωφώνου 18, με την χρήση περιοδογράμματος *Lomb*.



Σχήμα 4.36 Φασματική ανάλυση δεδομένων Γεωφώνου 1, με την χρήση *Wavelets*.



Σχήμα 4.37 Φασματική ανάλυση δεδομένων Γεωφώνου 7, με την χρήση Wavelets.



Σχήμα 4.38 Φασματική ανάλυση δεδομένων Γεωφώνου 18, με την χρήση Wavelets.

Η αντίστοιχη επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την 2^η Σεισμική Γραμμή παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

4.4.3 Μετρήσεις στον χώρο του Λατομείου Αλφάς Ρεθύμνου

Ο χώρος του λατομείου Αλφάς Ρεθύμνου όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις βρίσκεται Νοτιοδυτικά του Πολεοδομικού Συγκροτήματος του Ρεθύμνου με στίγμα Γεωγραφικό Μήκος $35^{\circ}17'40.41''\text{N}$ και Γεωγραφικό Πλάτος $24^{\circ}27'45.25''\text{E}$ (Σχήμα 4.39).



Σχήμα 4.39 Δορυφορική φωτογραφία του λατομείου στην περιοχή του Οικισμού Αλφάς.

Ο χώρος αυτό επιλέχτηκε προκειμένου να μελετηθούν οι εμφανιζόμενες δεσπόζουσες συχνότητες που προκύπτουν από την φασματική ανάλυση του ομογενούς υλικού που υπάρχει στον χώρο αυτό.

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε περιελάμβανε διασκόπηση σε διαφορετικά επίπεδα (βαθμίδες). Το πάνω διάζωμα, Β, αποτελείται από βραχώμαζα σύστασης 99% σε ασβεστίτη (CaCO_3) και 1% σε χαλαζία (SiO_2). Το κάτω διάζωμα, Γ, το οποίο είναι παρόμοιας σύστασης με το Β περιέχει ασβεστίτη σε ποσοστό 98.3% και χαλαζία 1.7%.

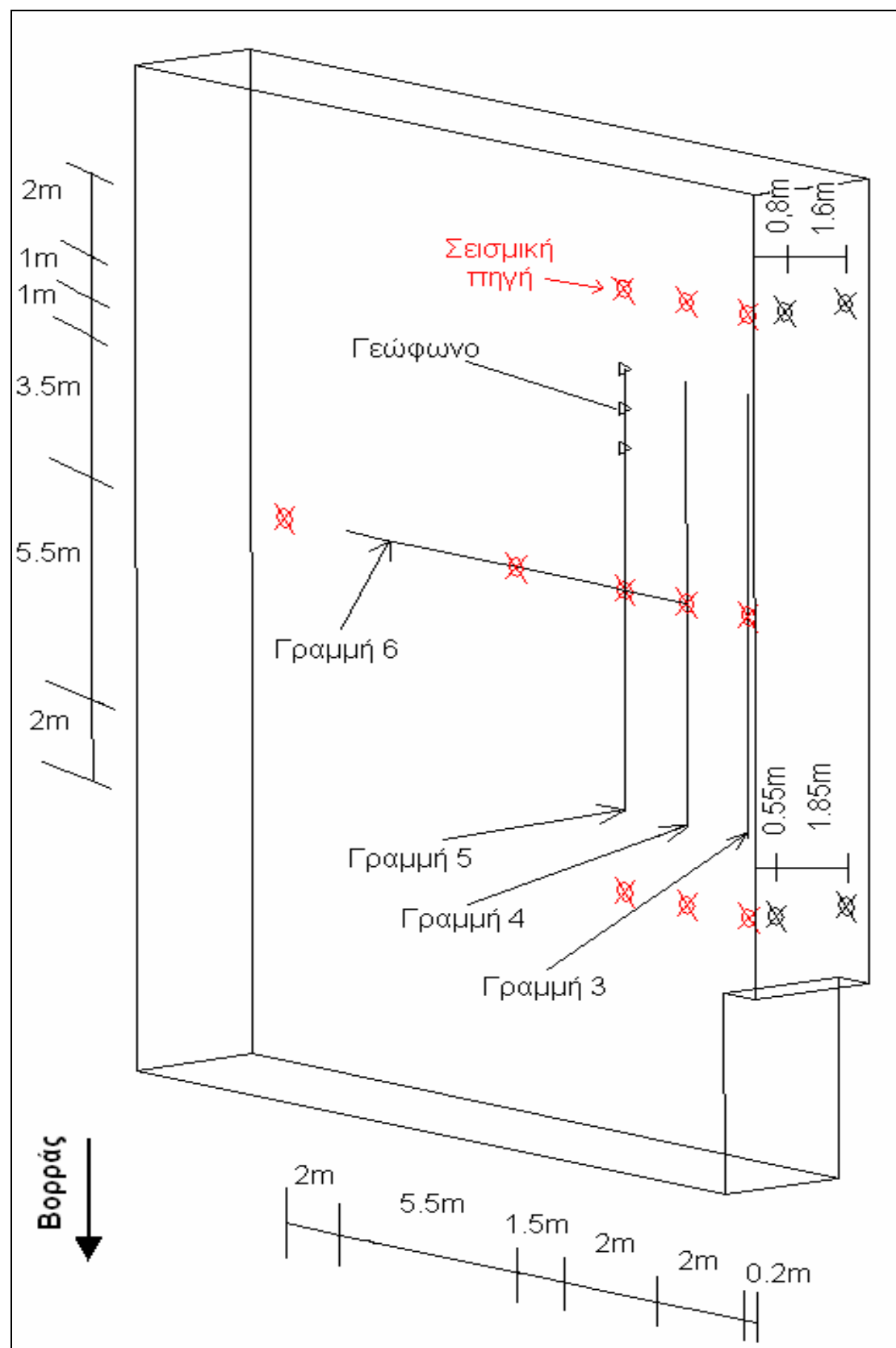
Ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με αυτή που αναλυτικά περιγράφηκε παραπάνω για την καταγραφή των σεισμικών δεδομένων (Σχήματα 4.40) τα οποία

συλλέχθηκαν στα πλαίσια Διπλωματικής Εργασίας (Κουβελάς & Φέγγος, 2006). Τα στοιχεία αυτά παραχωρήθηκαν από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής και εξετάστηκαν ανά διάζωμα οι γραμμές που φαίνονται στα Σχήματα 4.41 και 4.42.

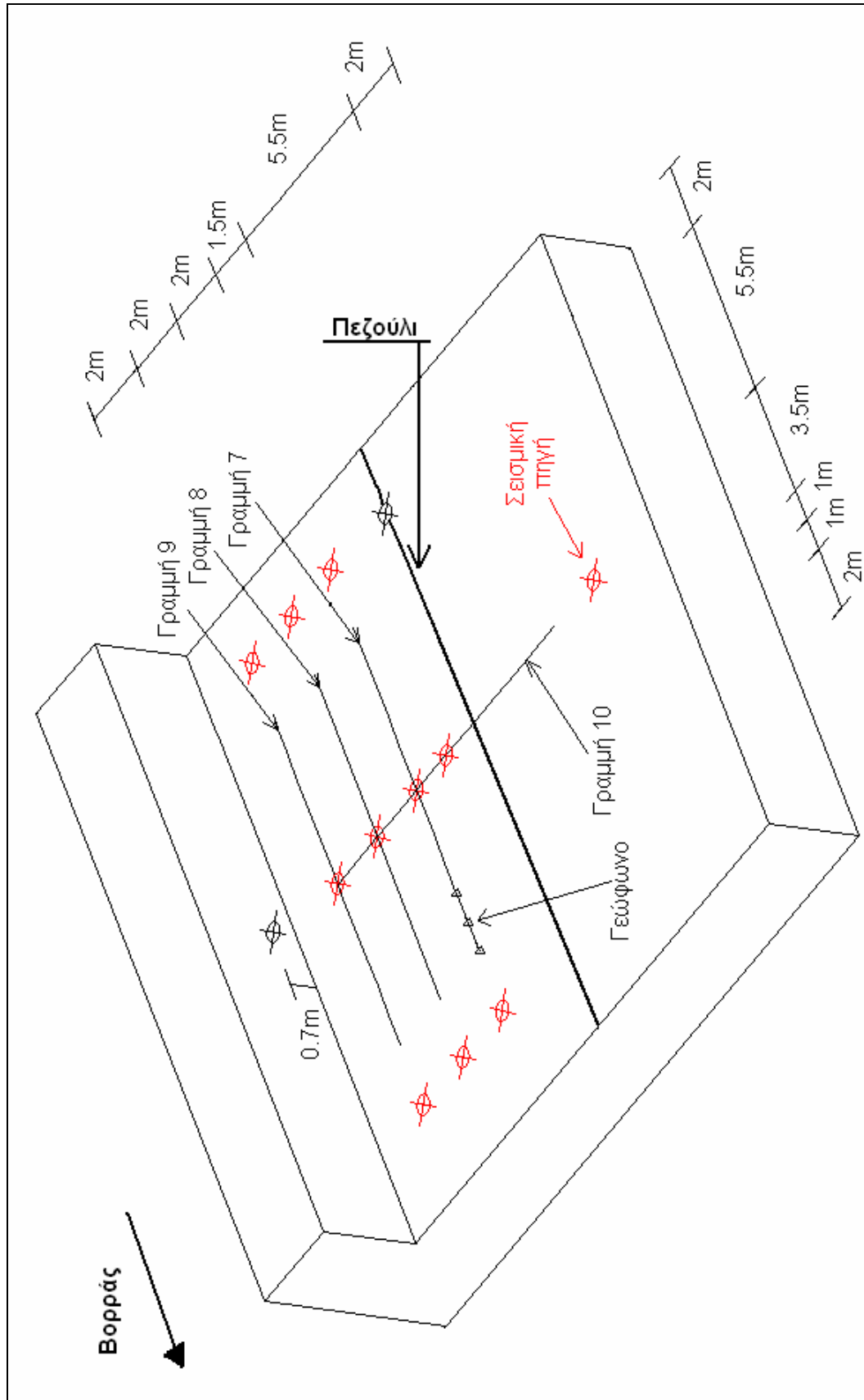


Σχήμα 4.40 Άποψη της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις εντός του λατομείου στην περιοχή του Οικισμού Αλφά Ρεθύμνης (Κουβελάς και Φέγγος, 2006).

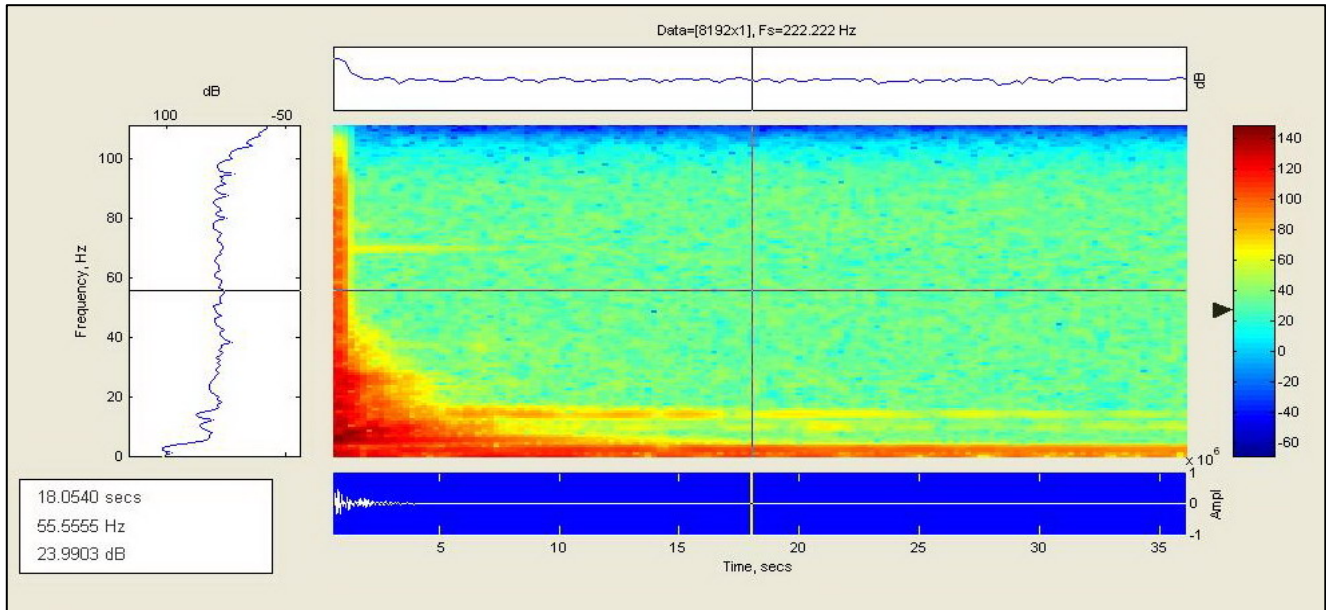
Η φασματική ανάλυση των σεισμικών σημάτων τα οποία επεξεργάστηκαν με την ρουτίνα Specgramdemo του Signal Analysis Toolbox της Matlab και αναλύθηκαν με τον αλγόριθμο NFFT, ανέδειξε όμοια δεσπόζουσες συχνότητες (Σχήματα 4.43, 4.44, 4.45) σε όλες τις καταγραφές ανεξαρτήτως λοιπών χαρακτηριστικών (απόσταση γεωφώνου καταγραφής από την σεισμική πηγή, χαρακτηριστικά γεννήτριας σεισμικού κύματος κ.λ.π), γεγονός αναμενόμενο αφού η ομοιογένεια του εδαφικού υποστρώματος εγγυάται την ομοιότροπη σεισμική απόκριση και άρα και την επανάληψη καταγραφών με όμοια συχνοτικά χαρακτηριστικά.



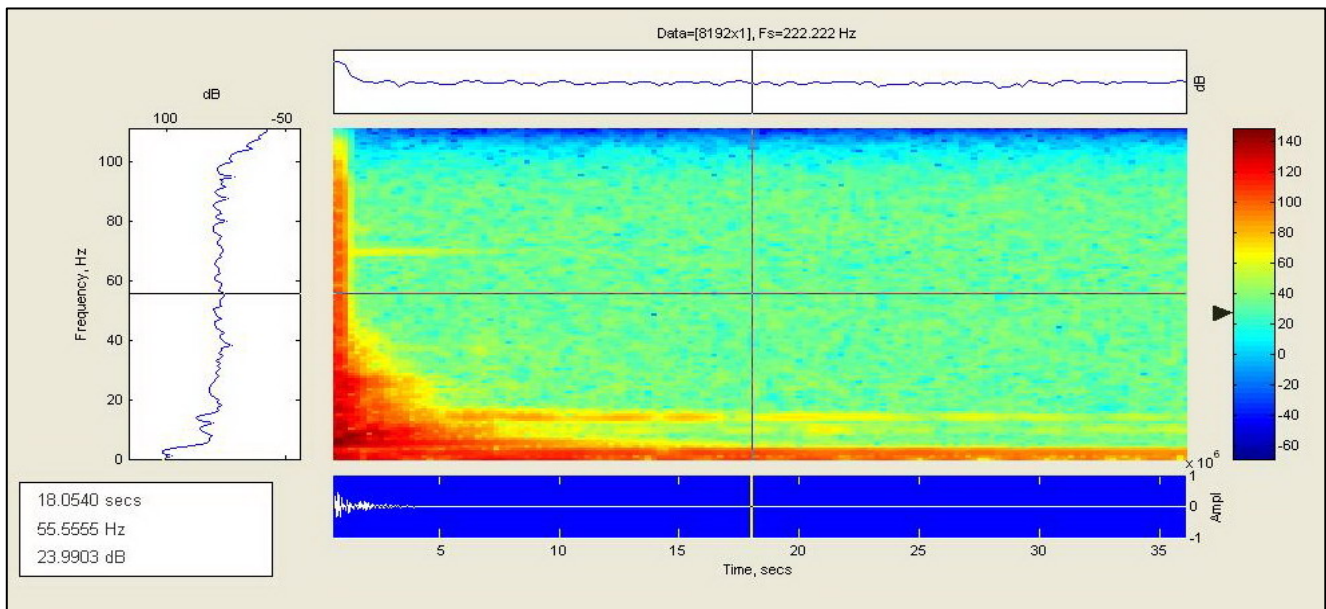
Σχήμα 4.41 Γραμμές μελέτης του κάτω διαζώματος (Κουβελάς και Φέγγος, 2006).



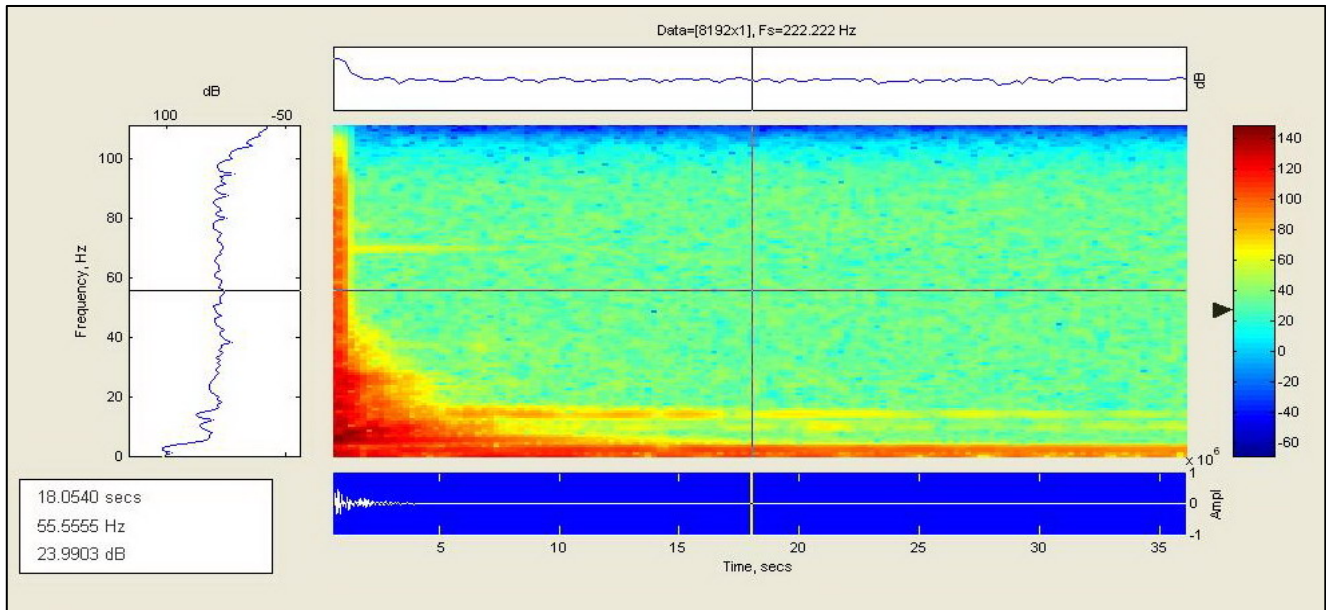
Σχήμα 4.42 Γραμμές μελέτης του πάνω διαζώματος (Κουβελάς και Φέγγος, 2006).



Σχήμα 4.43 Φασματική ανάλυση σεισμικού σήματος του λατομείου της περιοχής του Οικισμού Αλφάς (Γραμμή μελέτης 3 με την πηγή 2,00 m Βορειότερα του πρώτου γεωφώνου- Σχήμα 4.41).



Σχήμα 4.44 Φασματική ανάλυση σεισμικού σήματος του λατομείου της περιοχής του Οικισμού Αλφάς (Γραμμή μελέτης 4 με την πηγή 2,00 m Βορειότερα του πρώτου γεωφώνου- Σχήμα 4.41).



Σχήμα 4.45 Φασματική ανάλυση σεισμικού σήματος του λατομείου της περιοχής του Οικισμού Αλφάς (Γραμμή μελέτης 7 με την πηγή 2,00 m Νοτιότερα του πρώτου γεωφώνου- Σχήμα 4.42).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**5.1 Εισαγωγή**

Ο γεωτεχνικός χαρακτηρισμός εδαφών και πετρωμάτων είναι μια πολύ σύνθετη διαδικασία δεδομένου ότι πρέπει να στηριχτεί σε πλήθος πληροφοριών που περιλαμβάνουν τόσο καταστροφικές όσο και μη καταστροφικές δοκιμές στην περιοχή μελέτης και στο εργαστήριο. Η ευρέως αποδεκτή δειγματοληψία μέσω γεωτρητικών προγραμμάτων είναι πολύ αποτελεσματική αλλά απαιτείται πολύς χρόνος και υψηλό κόστος για να εξεταστεί με λεπτομέρεια μια μεγάλη περιοχή μελέτης. Οι εργαστηριακές όμως μη καταστροφικές δοκιμές με υπερήχους σε δοκίμια διαφόρων πετρωμάτων με σκοπό τον χαρακτηρισμό τους μέσω των μετρούμενων μεγεθών (συχνότητας, ταχύτητας, απόσβεσης) και τον συσχετισμό αυτών με μηχανικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων (π.χ. αντοχή σε μονοαξονική θλίψη) καθώς και με στοιχεία γεωτρήσεων στην ίδια περιοχή δύνανται να βοηθήσουν στην εκτίμηση των ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών των γεωυλικών που εξετάζονται

Η παρούσα μελέτη στοχεύει στην ανάδειξη χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων διαφόρων πετρωμάτων όπως αυτές προκύπτουν από εργαστηριακές μη καταστροφικές δοκιμές. Από την ανάλυση του φασματικού περιεχομένου που λαμβάνεται από διερχόμενο ακουστικό σήμα σε δείγματα ακέραιου πετρώματος, διαφαίνεται ότι μπορεί να εξαχθεί ένα διαφορετικό φασματικό ίχνος για κάθε είδος πετρώματος.

Η ανάλυση του φασματικού περιεχομένου των διερχόμενων ακουστικών σημάτων μέσω ακέραιων κυλινδρικών δοκιμίων πετρωμάτων γίνεται χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές μετασχηματισμών κατά Fourier και μετασχηματισμών κυματιδίων (συνεχής μετασχηματισμός Wavelet). Οι χαρακτηριστικές δεσπόζουσες συχνότητες που προκύπτουν φαίνεται ότι δεν επηρεάζονται από το ποσοστό υγρασίας του δείγματος, ενώ μεταβάλλονται ανάλογα με τον τύπο του εξεταζόμενου πετρώματος.

Στην συνέχεια και προκειμένου να συσχετιστούν οι μηχανικές ιδιότητες των διαφόρων πετρωμάτων με το φασματικό ίχνος που αναδείχτηκε από την επεξεργασία των εξεταζόμενων δοκιμίων, μετρήθηκε σε εργαστηριακές συνθήκες και η αντοχή αυτών σε μονοαξονική θλίψη.

Για την επίτευξη του στόχου της παρούσας διατριβής – συσχετισμός, συμπλήρωση και ποιοτική βελτίωση της γεωτεχνικής πληροφόρησης – πραγματοποιήθηκαν:

- i. Εργαστηριακές μετρήσεις ακουστικών σημάτων σε δοκίμια πετρωμάτων Αλφά, Σκληρής και Ασβεστόλιθου όταν αυτά ευρίσκονταν τόσο σε ξηρή όσο και σε υγρή κατάσταση (ταχύτητας διάδοσης, απόσβεσης, δεσπόζουσα συχνότητας).
- ii. Εργαστηριακές μετρήσεις ακουστικών σημάτων σε δοκίμια μαρμάρων Γόρτυνας (μάρμαρο της κατηγορίας πλακωδών ασβεστολίθων), Διονύσου, Νάξου καθώς και σε δοκίμια Γρανίτη (ταχύτητας διάδοσης, απόσβεσης, δεσπόζουσα συχνότητας).
- iii. Φασματική ανάλυση με την χρήση NFFT των δεδομένων που προέκυψαν από τις εργαστηριακές μετρήσεις.
- iv. Φασματική ανάλυση με την χρήση Wavelet Transform των δεδομένων που προέκυψαν από τις εργαστηριακές μετρήσεις.
- v. Μετρήσεις προσδιορισμού αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

5.2 Μετρήσεις Ακουστικών Σημάτων

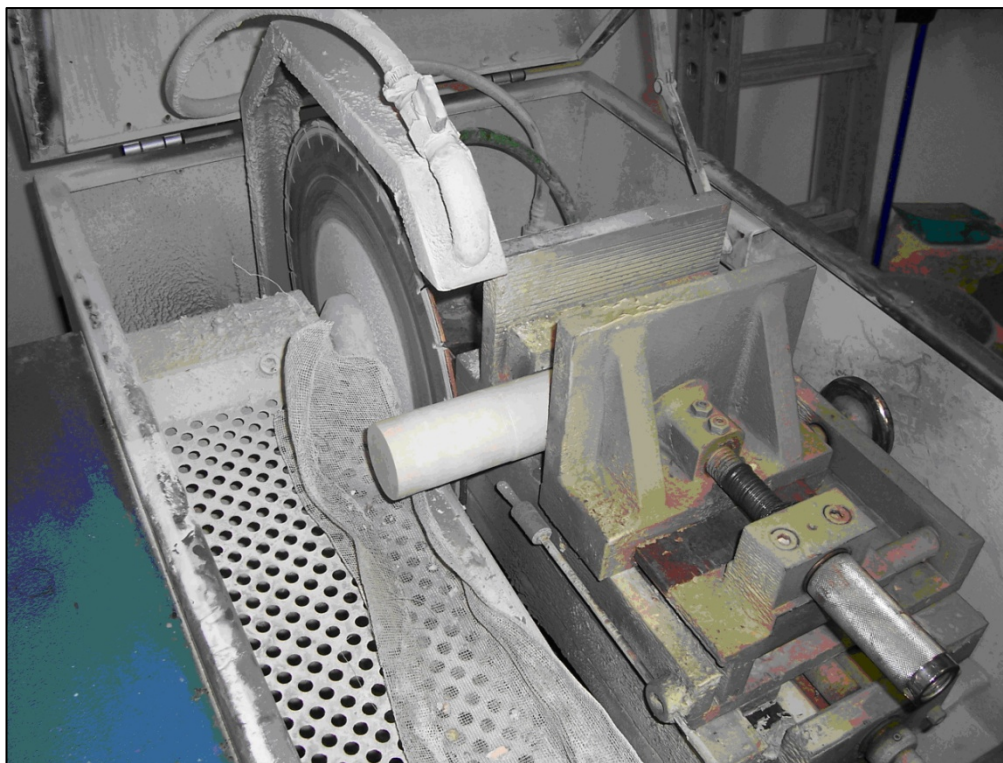
Προκειμένου να ερευνηθεί πειραματικά το φασματικό ίχνος διαφορετικών τύπων πετρωμάτων σε εργαστηριακές συνθήκες, προετοιμάστηκαν πέντε (5) σειρές δοκιμίων, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τρεις βασικές κατηγορίες πετρωμάτων. Ελήφθησαν τουλάχιστον έξι (6) δοκίμια σε κάθε σειρά. Δοκιμές έγιναν σε ξηρά καθώς και σε κορεσμένα σε νερό δοκίμια.

Τα ασβεστολιθικά δοκίμια ελήφθησαν από δύο διαφορετικές θέσεις (από την περιοχή Αλφά Ρεθύμνου για τα δοκίμια Αλφά και Σκληρής και από την περιοχή Ακρωτηρίου Χανίων για τα δοκίμια Ασβεστόλιθου) της Νήσου Κρήτη, ενώ τα δοκίμια γρανίτη Θράκης και μαρμάρων (μάρμαρο Διονύσου, μάρμαρο Γόρτυνας και μάρμαρο Νάξου) ελήφθησαν από τις αντίστοιχες περιοχές του Ελλαδικού χώρου.

Για την λήψη και διαμόρφωση των δοκιμίων αυτών χρησιμοποιήθηκαν το εργαστηριακό γεωτρύπανο (καροταρία), το εργαστηριακό δισκοπρίονο κοπής πετρωμάτων και ο εργαστηριακός λειαντής του Εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης (Σχήματα 5.1, 5.2 και 5.3).



Σχήμα 5.1 Το εργαστηριακό Γεωτρύπανο.

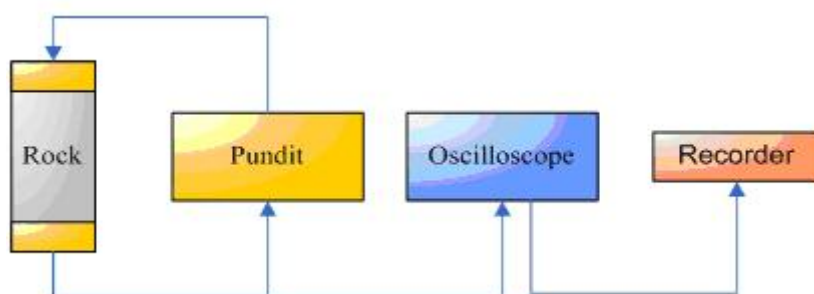


Σχήμα 5.2 Το εργαστηριακό δισκοπρίονο κοπής.

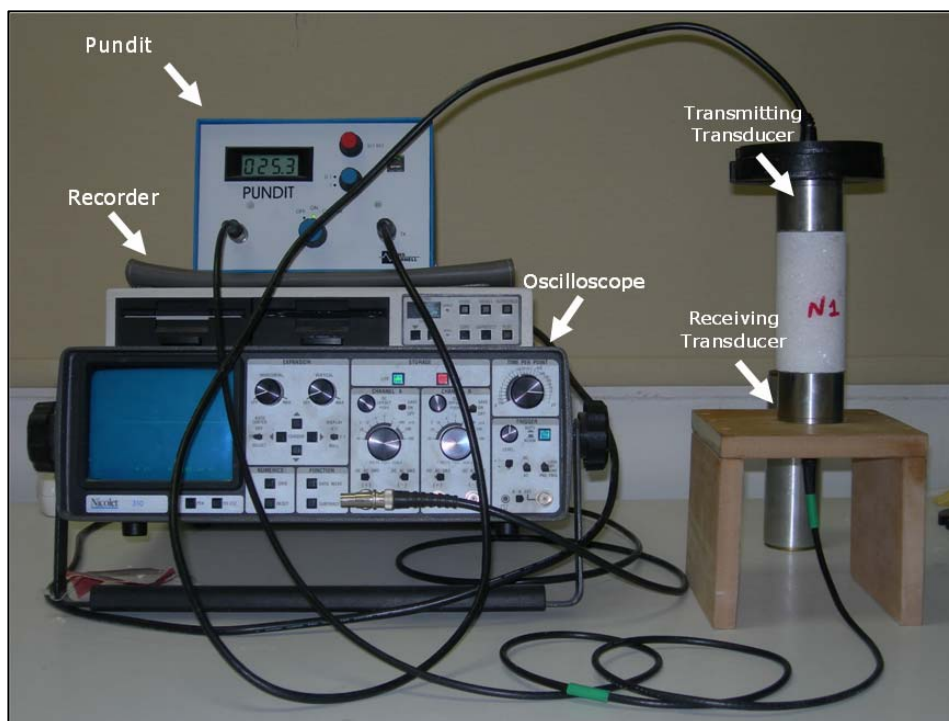


Σχήμα 5.3 Ο εργαστηριακός λειαντής δοκιμίων.

Η διάταξη που χρησιμοποιείται τόσο για την μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των μετωπικών κυμάτων (P waves) όσο και των χαρακτηριστικών απόσβεσης κάθε δείγματος παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.4 και 5.5. Η συσκευή αποτελείται από υπερηχητική γεννήτρια σημάτων (τύπου Pundit), δύο πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς σε συχνότητα 54 kHz και έναν παλμογράφο με δυνατότητα σύνδεσης με ψηφιακό όργανο καταγραφής. Οι μετατροπείς (πομπός-δέκτης) αποτελούνται από κεραμικά πιεζοηλεκτρικά στοιχεία ζirkονικού-τιτανικού μόλυβδου τοποθετημένα σε θήκες ανοξείδωτου χάλυβα, τα οποία εφάπτονται σφικτά στην εσωτερική επιφάνεια της θήκης ώστε να παρέχουν μετάδοση του κύματος με υψηλή απόδοση. Επίσης φέρουν υποδοχή για να είναι δυνατή η αλλαγή καλωδίων διαφορετικών μηκών και για να εξασφαλιστεί η όσο το δυνατόν καλύτερη επαφή μεταξύ πιεζοηλεκτρικών μορφοτροπέων και δοκιμίων και χρησιμοποιήθηκε λιπαντικό τύπου βαζελίνης σε συνδυασμό με κατάλληλα τοποθετημένο σταθερό βάρος στον κατακόρυφο άξονα του κάθε δοκιμίου.



Σχήμα 5.4 Η διάταξη καταγραφής ακουστικών σημάτων.



Σχήμα 5.5 Η χρησιμοποιούμενη εργαστηριακή διάταξη.

Το ακουστικό σήμα που παράγεται από την συσκευή υπερήχων διαβιβάζεται στο δοκίμιο μέσω του πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα εισόδου. Όταν ο παλμός που γεννάται μεταδίδεται στο δοκίμιο μέσω του μετατροπέα στην επιφάνεια, υφίσταται πολλαπλές ανακλάσεις στα όρια των διαφορετικών υλικών φάσεων μέσα στο δοκίμιο. Ένα πολύπλοκο σύστημα κυμάτων αναπτύσσεται, το οποίο περιλαμβάνει διαμήκη και εγκάρσια κύματα και διαδίδεται μέσα στο δοκίμιο. Τα πρώτα κύματα που φτάνουν στο δέκτη είναι τα διαμήκη κύματα, τα οποία μετατρέπονται σε ένα ηλεκτρικό σήμα

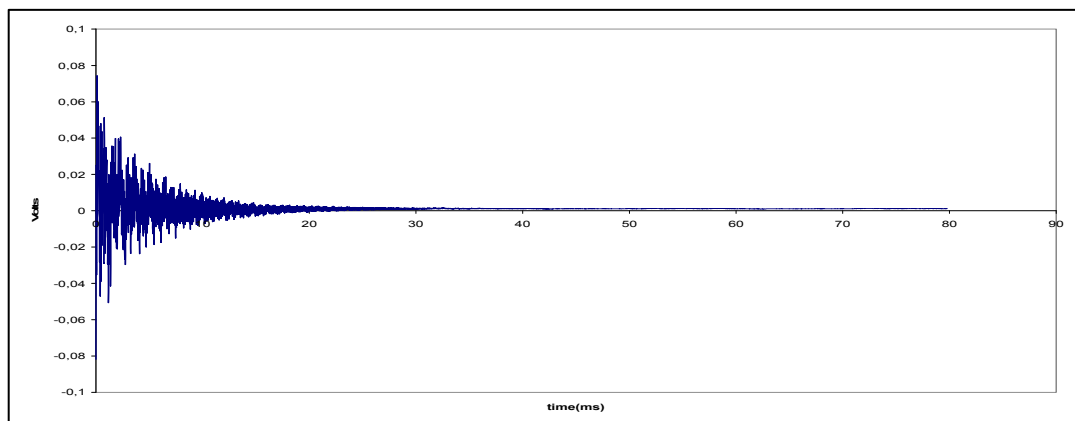
από τον δεύτερο μορφοτροπέα (δέκτη). Το διερχόμενο σήμα λαμβάνεται από τον πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα εξόδου και ανατροφοδοτείται στην υπερηχητική γεννήτρια για επεξεργασία. Με καλώδιο που συνδέει την έξοδο του Pundit (δέκτη), γίνεται είσοδος του εξελθόντος ηλεκτρικού σήματος, στον παλμογράφο, όπου ψηφιοποιείται και παρουσιάζεται στην οθόνη ως κυματομορφή. Το σήμα που λαμβάνεται από το pundit είναι αναλογικό και συνεχές και χαρακτηρίζεται από διαρκείς εναλλαγές τάσης. Ο παλμογράφος το λαμβάνει και το μετατρέπει σε διακριτό εμφανίζοντας την προκύπτουσα κυματομορφή με 4000 σημεία στην οθόνη (Εικόνα 5.5). Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε τόσο ανά 5 ms όσο και ανά 10 ms. Η επεξεργασία όμως έγινε στις μετρήσεις των 5 ms (T_s) ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη του Nyquist σύμφωνα με την οποία η συχνότητα δειγματοληψίας f_s πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του διπλάσιου της συχνότητας f του αρχικού σήματος ($f_s \geq 2f$). Για την συγκεκριμένη περίπτωση η εφαρμογή της παραπάνω σχέσης οδηγεί στην αποδεκτή ανισότητα $\frac{1}{T_s} \geq 2f$ και άρα $T_s \leq 9,25ms$.

Το απεικονιζόμενο στον παλμογράφο σήμα (Σχήματα 5.6 και 5.7) αποθηκεύεται στη συνέχεια σε ψηφιακή μορφή με την χρήση του οργάνου καταγραφής. Κατά τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν αφενός μεν να υπολογιστεί ο χρόνος διέλευσης των μετωπικών κυμάτων διαμέσου του εξεταζόμενου δοκιμίου μέσω της συσκευής Pundit, αφετέρου δε να πραγματοποιηθεί η φασματική ανάλυση του λαμβανόμενου σήματος αφού αυτό καταγραφεί στον παλμογράφο.

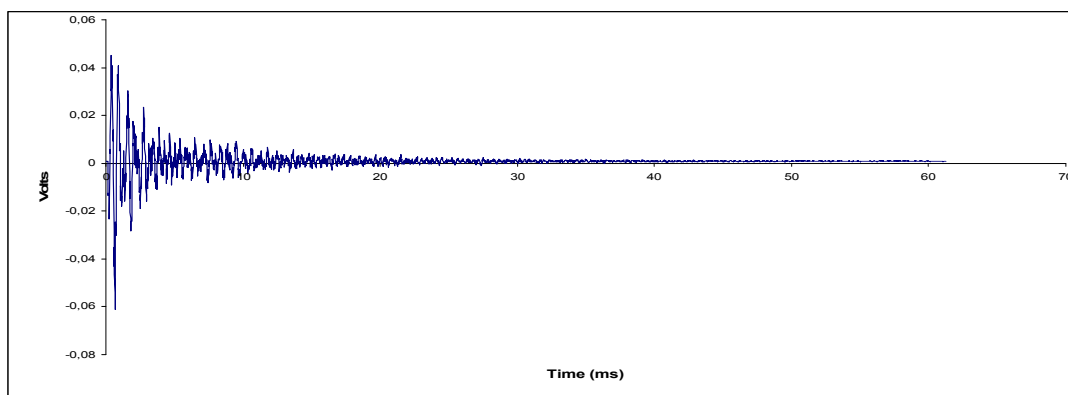
Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τις διαστάσεις των κυλινδρικών δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς επίσης και τις τιμές των ταχυτήτων των μετωπικών κυμάτων, όπως αυτές μετρήθηκαν για κάθε τύπο δοκιμίου με την διάταξη του Σχήματος 5.4. Τα Σχήματα 5.6 και 5.7 παρουσιάζουν χαρακτηριστικά σήματα απόκρισης όπως αυτά καταγράφονται ψηφιακά στον παλμογράφο.

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικές τιμές διαστάσεων και ταχυτήτων των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν

Πέτρωμα	Μήκος mm	Διάμετρος mm	Ταχύτητα (P) m/sec	Αριθμός Δοκιμίων	Πορώδες
MG (Μάρμαρο Γόρτυνας)	126,08	52,0	6719	6	Χαμηλό
MGR (Γρανίτης Θράκης)	109,13	52,0	6013	6	Χαμηλό
MD (Μάρμαρο Διονύσου)	110,02	51,9	5372	6	Χαμηλό
MN (Μάρμαρο Νάξου)	104,27	52,0	4318	6	Χαμηλό
LP (Ασβεστόλιθος Χανίων)	106,50	51,5	3964	4	Υψηλό
LA (Αλφάς Ρεθύμνου)	112,50	51,0	3555	6	Υψηλό



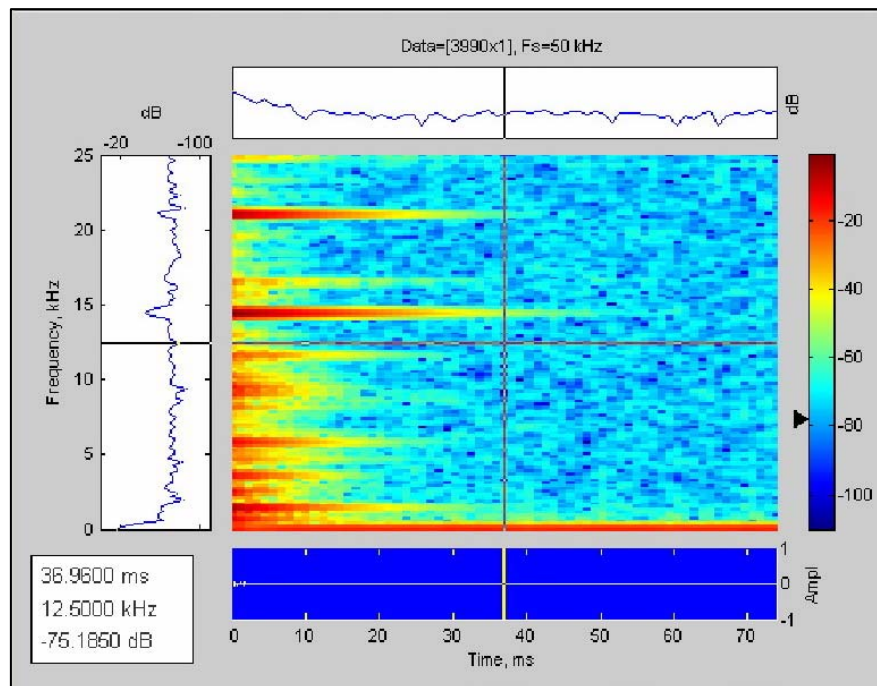
Σχήμα 5.6 Τυπικό καταγραφόμενο σήμα στην έξοδο του παλμογράφου.



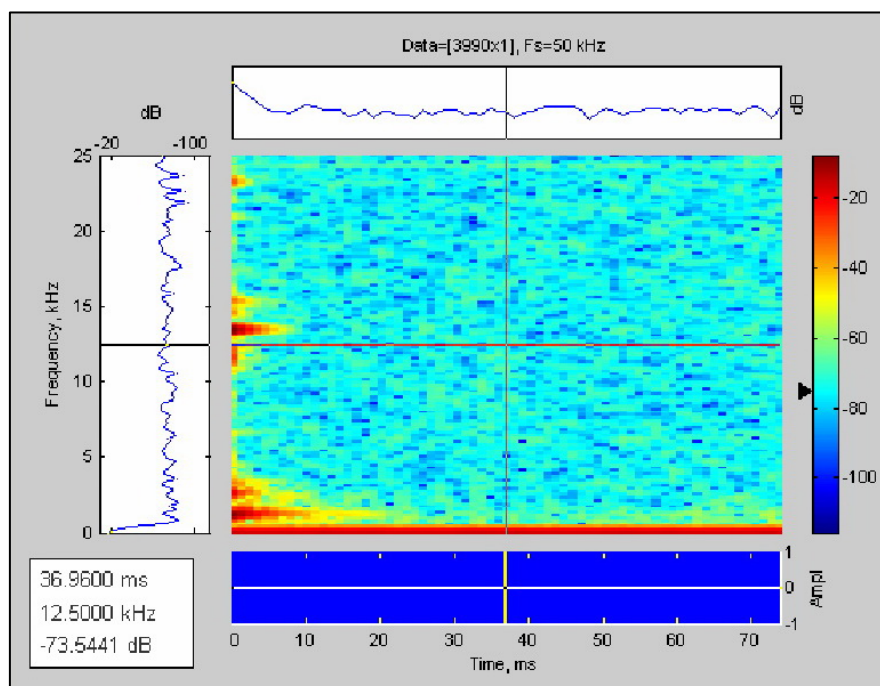
Σχήμα 5.7 Τυπικό καταγραφόμενο σήμα στην έξοδο του παλμογράφου.

5.3 Φασματική Ανάλυση Σημάτων με την Χρήση NFFT

Η επεξεργασία και η αξιολόγηση των λαμβανομένων σημάτων επιτυγχάνεται με κατάλληλο διαχωρισμό των δεσποζουσών συχνοτήτων σε συνδυασμό με την παρατήρηση της μέγιστης μεταφερόμενης ενέργειας στις συχνότητες αυτές. Το αποτέλεσμα αυτό λαμβάνεται με την χρήση του μετασχηματισμού Fourier σε μη ισοδύναμα και άνισα χρονικά διαστήματα (Agarwal and Wong, 1993). Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα προγράμματα Autosignal της εταιρίας Seasolve καθώς και η ρουτίνα Specgramdemo του Signal Analysis toolbox της Matlab 6.5 της εταιρίας Mathworks. Αρχικά, τα στοιχεία που καταγράφονται στον παλμογράφο εισάγονται στην ρουτίνα Specgramdemo προκειμένου να ληφθεί το φασματικό τους περιεχόμενο (Καραγιάννης και Καλλίνικος, 1991). Το παράθυρο αποτελεσμάτων παρουσιάζει τις συχνότητες στις οποίες υπάρχει μέγιστη μεταφορά ενέργειας καθώς και το χρονικό διάστημα στο οποίο αυτή η μεταφορά πραγματοποιείται (Σχήμα 5.8). Αναλυτικότερα δε, στο απεικονιζόμενο στο Σχήμα 5.18 φασματικό περιεχόμενο, όπου ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει τον χρόνο σε ms, ο κατακόρυφος άξονας την συχνότητα σε kHz, ενώ η χρωματική κλίμακα την ισχύ του σήματος σε dB, παρατηρείται ότι είναι ευδιάκριτες δύο (2) δεσπόζουσες συχνότητες (στα 14,00 kHz για όλη την διάρκεια της καταγραφής των 20 ms, και στα 46,00 kHz για χρονική διάρκεια περίπου 16,00 ms). Καθώς η μεταφορά ενέργειας είναι μέγιστη στις δεσπόζουσες συχνότητες, στην περιοχή αυτή των διαγραμμάτων, η χρωματική κλίμακα είναι έντονα κόκκινη που αντιστοιχεί σε 0db. Επίσης στην αριστερή πλευρά του Σχήματος 5.8 απεικονίζεται διάγραμμα συχνότητας (σε kHz) – ισχύος (σε Db) που αντιστοιχεί σε τομή του φασματικού περιεχομένου κατά τον κατακόρυφο άξονα του σταυρονήματος στην θέση όπου αυτό ευρίσκεται, ενώ στην επάνω πλευρά της ίδιας εικόνας απεικονίζεται διάγραμμα χρόνου (σε ms) – ισχύος (σε Db) που αντιστοιχεί σε τομή του φασματικού περιεχομένου κατά τον οριζόντιο άξονα του σταυρονήματος στην θέση όπου αυτό ευρίσκεται.

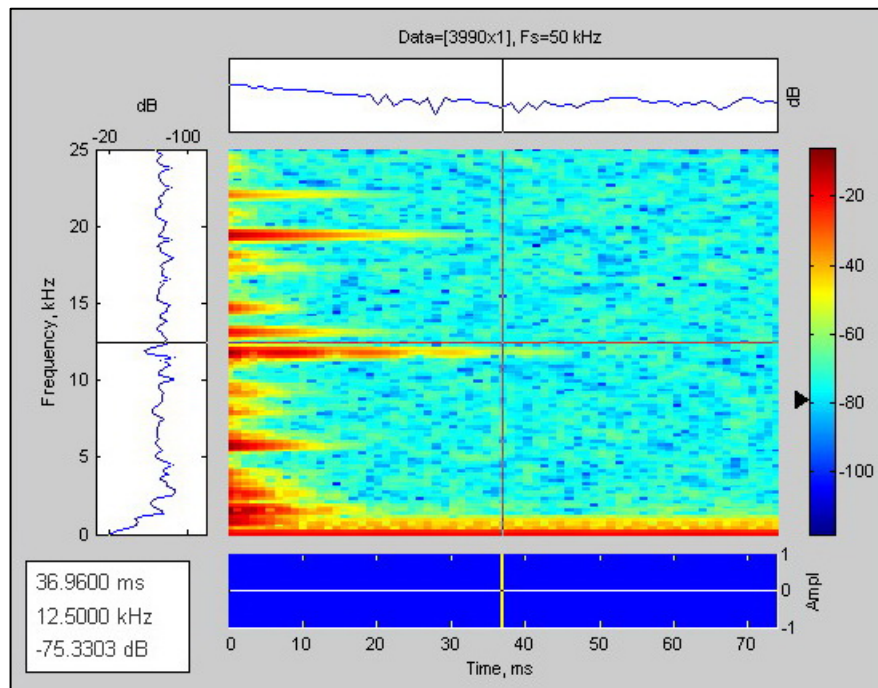


Σχήμα 5.8 Φασματικό περιεχόμενο για ξηρό δοκίμιο Αλφά (Δοκίμιο 1).

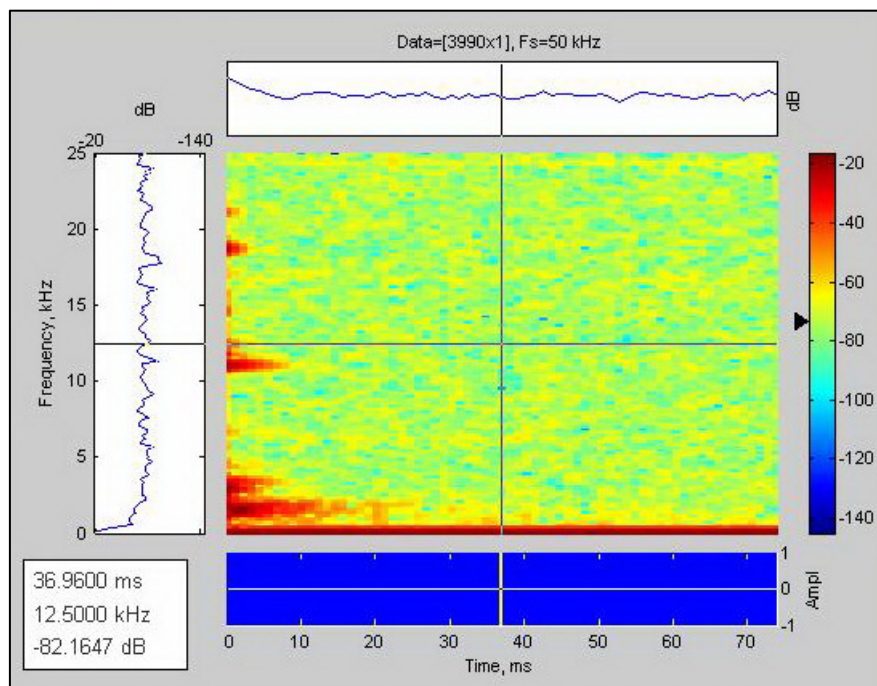


Σχήμα 5.9 Φασματικό περιεχόμενο για υγρό δοκίμιο Αλφά (Δοκίμιο 1).

Χρησιμοποιώντας την προαναφερθείσα εφαρμογή ελήφθη το φασματικό περιεχόμενο του διερχομένου σήματος από το σύνολο των δοκιμών που εξετάστηκαν.



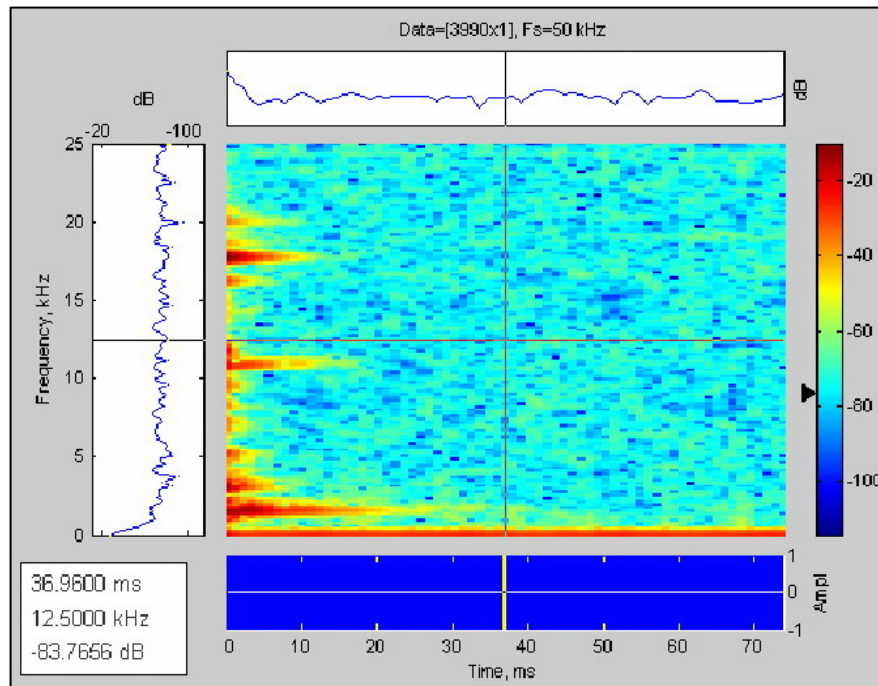
Σχήμα 5.10 Φασματικό περιεχόμενο για ξηρό δοκίμιο Σκληρής (Δοκίμιο 3).



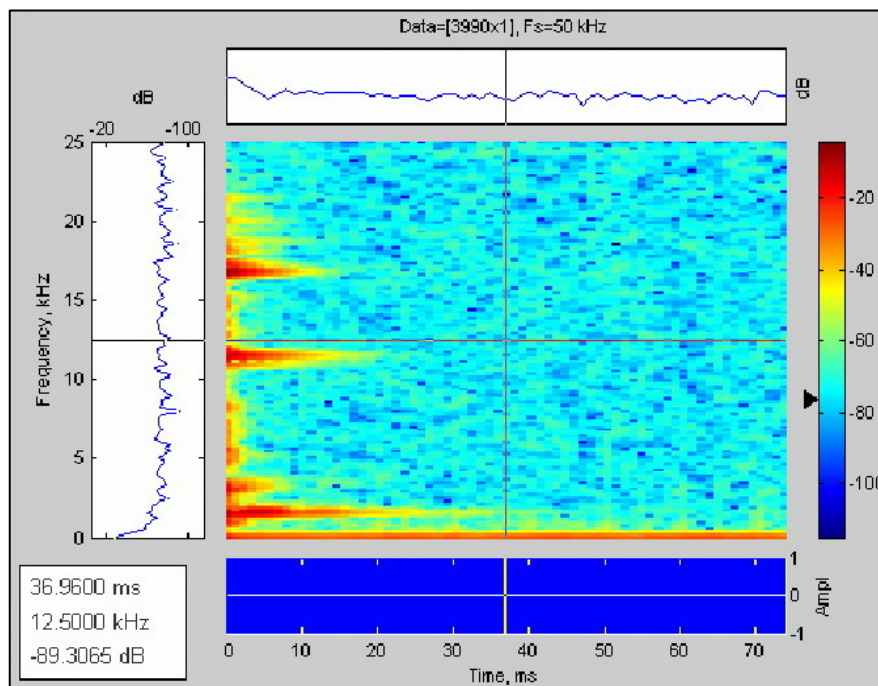
Σχήμα 5.11 Φασματικό περιεχόμενο για υγρό δοκίμιο Σκληρής (Δοκίμιο 3).

Παρατηρείται ότι το φασματικό περιεχόμενο των κορεσμένων σε νερό δοκιμίων παρουσιάζει διαφοροποιήσεις, με κυριότερες την αποκοπή των υψηλών συχνοτήτων

και την σημαντική μείωση του χρονικού διαστήματος στο οποίο πραγματοποιείται υψηλή μεταφορά ενέργειας (Σχήματα 5.8, 5.9, 5.10 και 5.11).

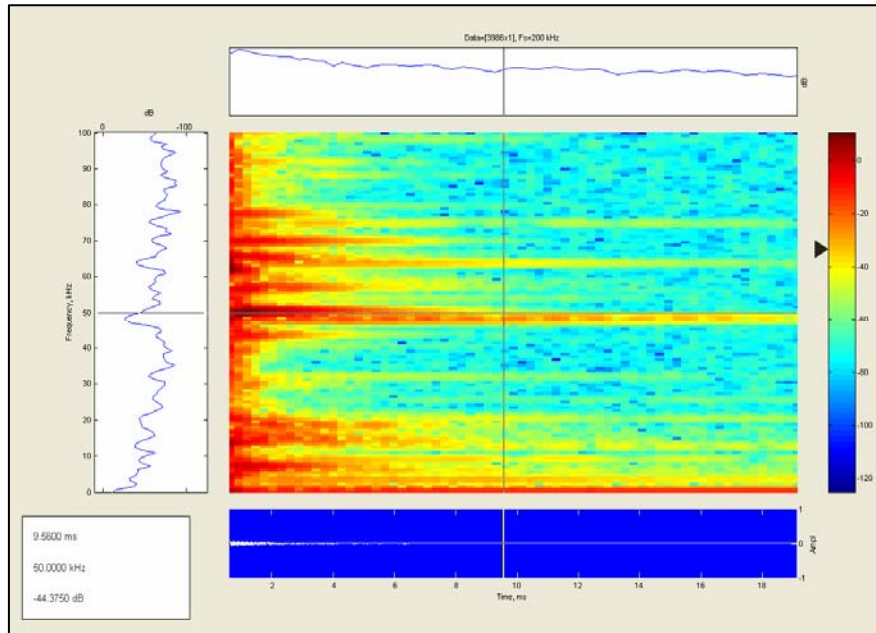


Σχήμα 5.12 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Ασβεστόλιθου (Δοκίμιο 3).

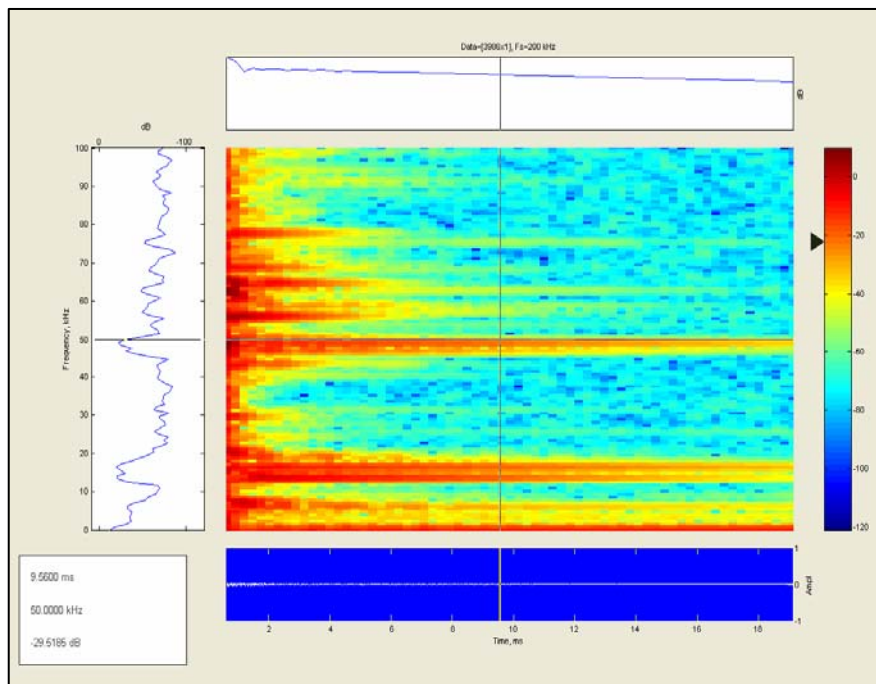


Σχήμα 5.13 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Ασβεστόλιθου (Δοκίμιο 2).

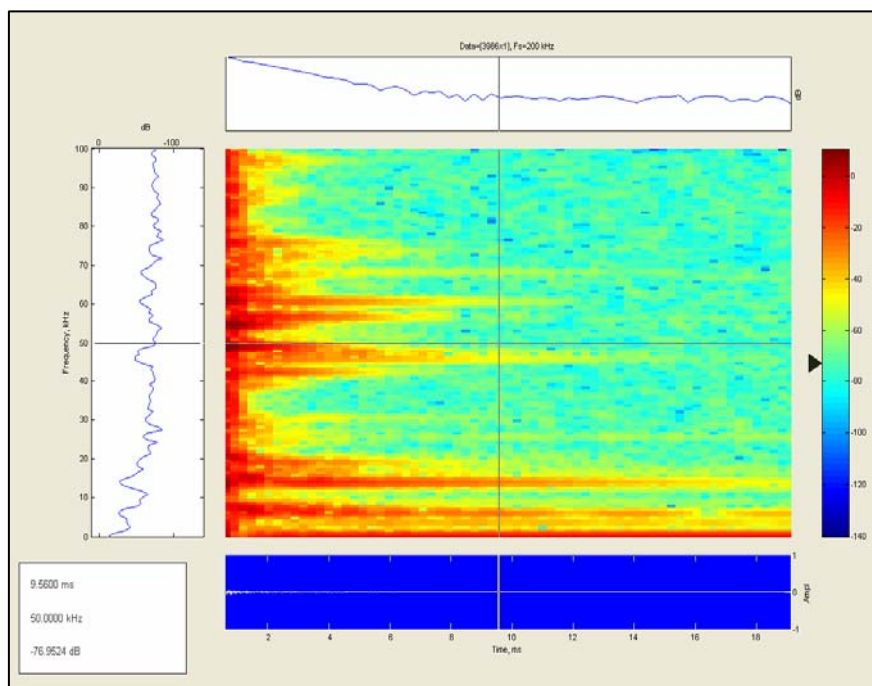
Επίσης παρατηρήθηκε ότι στο φασματικό περιεχόμενο δοκιμίων με ιδιαίτερα χαμηλό πορώδες (μάρμαρα, γρανίτης), τόσο η πυκνότητα των διακριτών συχνοτήτων, όσο και η χρονική διάρκεια μεταφοράς ενέργειας στις συχνότητες αυτές, είναι σαφώς υψηλότερες σε σχέση με δοκίμια μεγαλύτερου πορώδους (αυξημένο συχνοτικό και ενεργειακό περιεχόμενο, Σχήματα 5.12 έως 5.21).



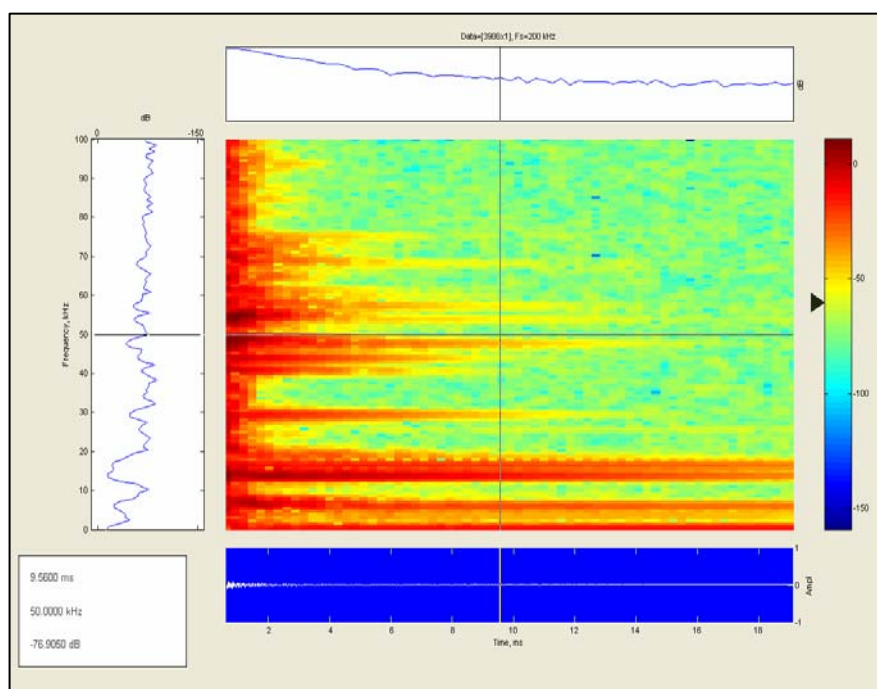
Σχήμα 5.14 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Γόρτυνας (Δοκίμιο 6).



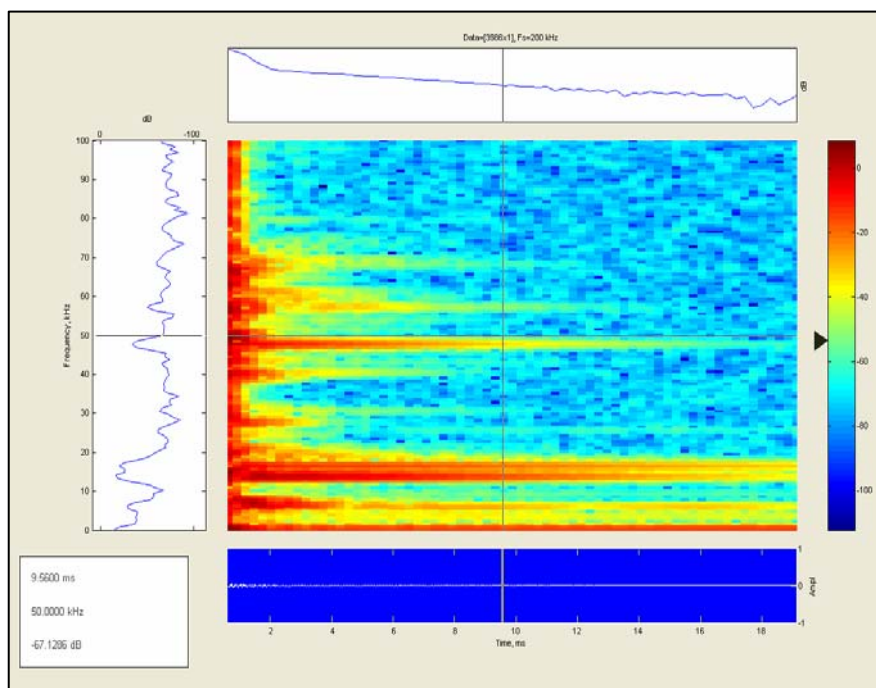
Σχήμα 5.15 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Γόρτυνας (Δοκίμιο 4).



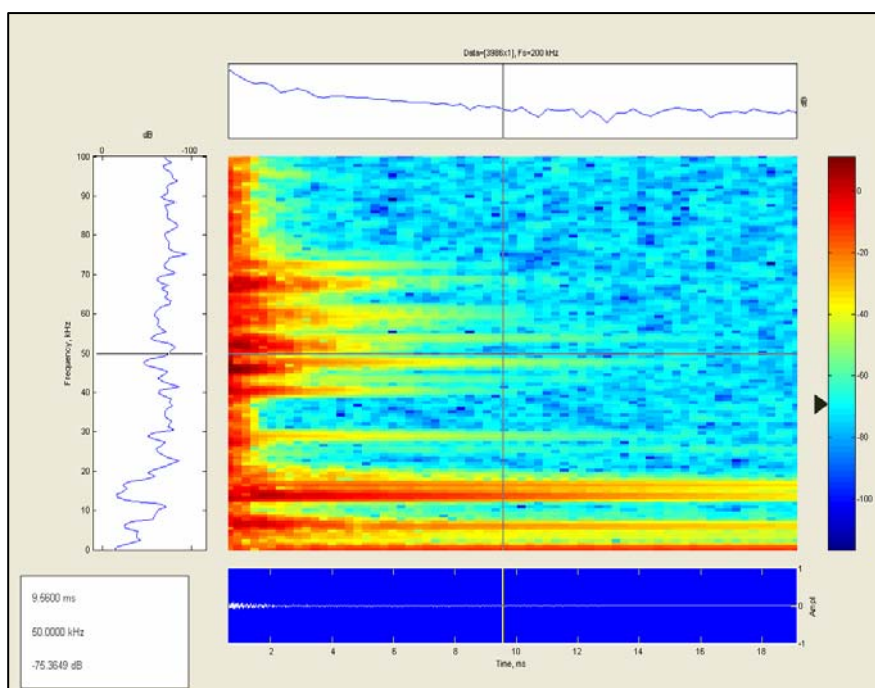
Σχήμα 5.16 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Γρανίτη (Δοκίμιο 2).



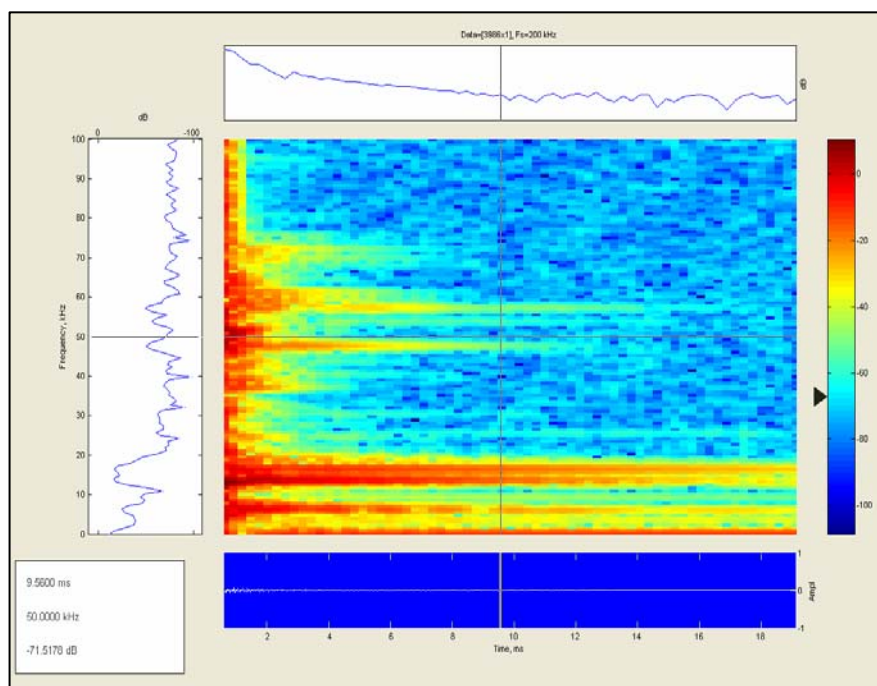
Σχήμα 5.17 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Γρανίτη (Δοκίμιο 3).



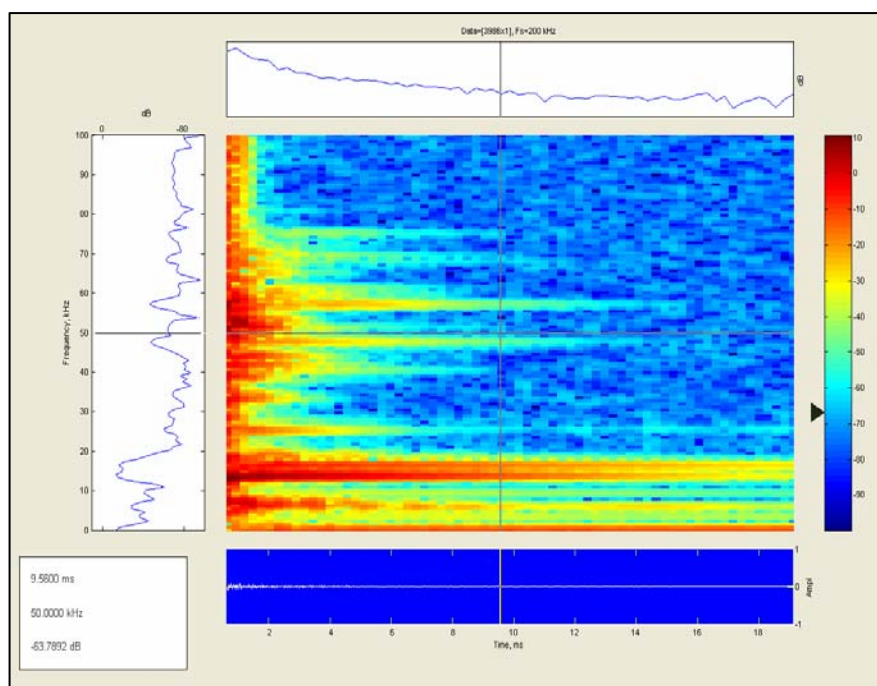
Σχήμα 5.18 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Διονύσου (Δοκίμιο 1).



Σχήμα 5.19 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Διονύσου(Δοκίμιο 5).



Σχήμα 5.20 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Νάξου (Δοκίμιο 6).



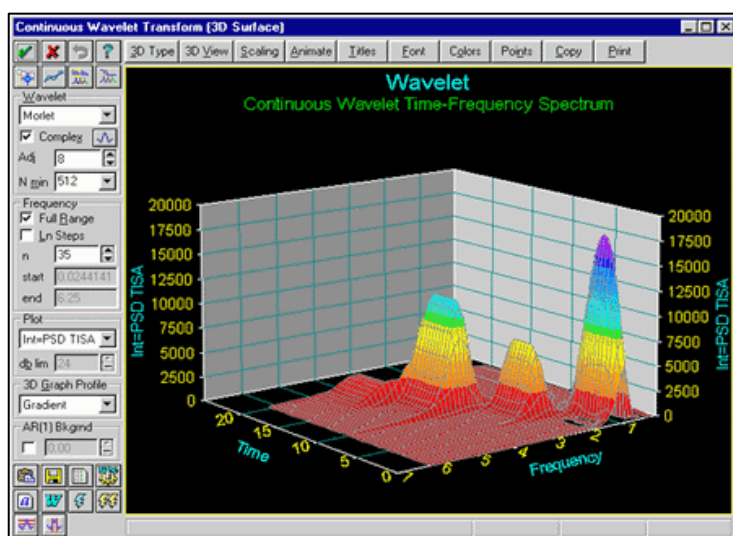
Σχήμα 5.21 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Νάξου (Δοκίμιο 2).

Οι επιμέρους κυματομορφές καθώς και το φασματικό περιεχόμενο (με χρήση του μετασχηματισμού NFFT) όλων των δοκιμίων που εξετάστηκαν παρατίθεται στο Παράρτημα Β.

5.4 Φασματική Ανάλυση Σημάτων με την Χρήση Wavelets Transform

Για την φασματική ανάλυση των λαμβανομένων σημάτων και επειδή αυτά είναι χρονικά μεταβαλλόμενα χρησιμοποιήθηκε προς επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με την συχνοτική ανάλυση μέσω της χρήσης του NFFT και ο Wavelet Transform (συνεχής) (Σχήμα 5.22)

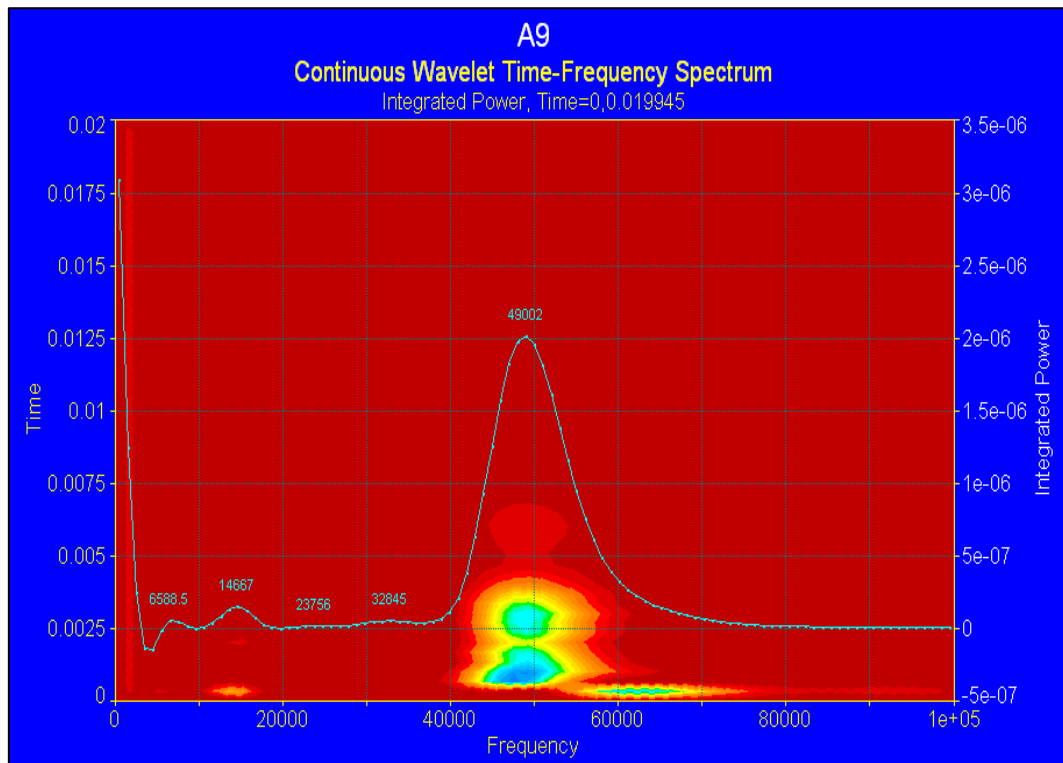
Ο μετασχηματισμός αυτός χρησιμοποιείται στην ανάλυση φασμάτων εκμεταλλευόμενος την δειγματοληψία μεταβλητών παραθύρων - «κουτιών» πληροφορίας και για αυτό κρίθηκε κατάλληλος για την παρούσα έρευνα καθώς τα λαμβανόμενα σήματα περιέχουν χαμηλής συχνότητας συνιστώσες για μεγάλη διάρκεια και υψηλής συχνότητας συνιστώσες για μικρή διάρκεια. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Autosignal της εταιρίας Seasolve όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.



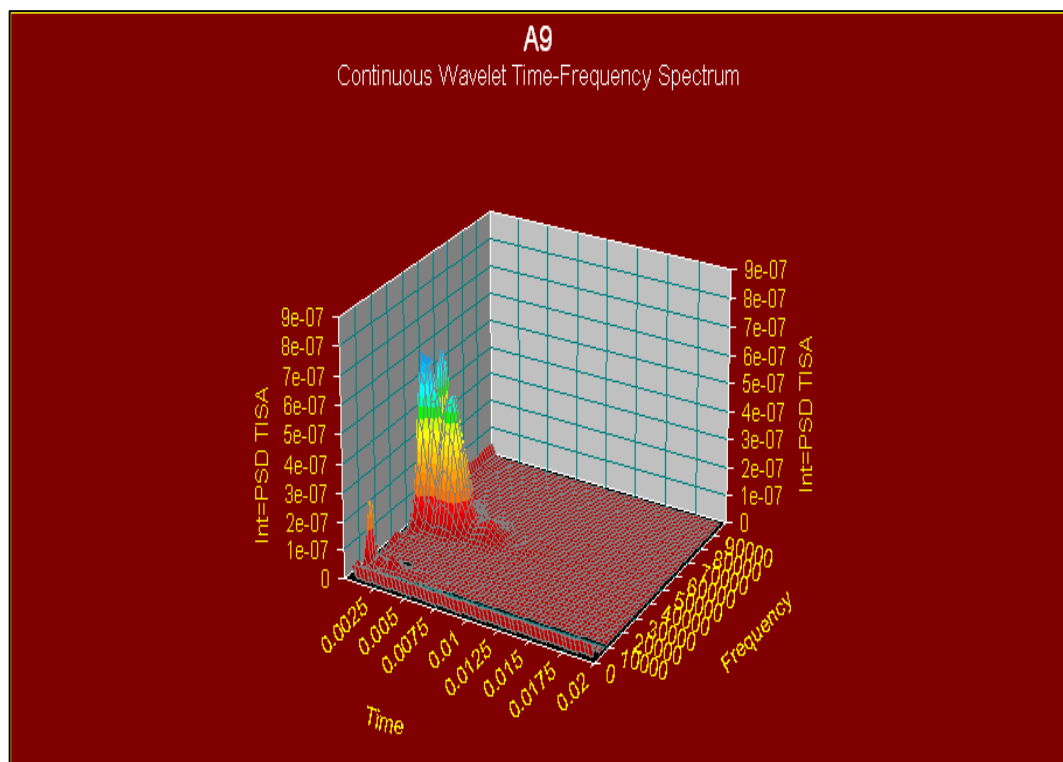
Σχήμα 5.22 Screenshot του λογισμικού Autosignal.

Από την χρησιμοποίηση του μετασχηματισμού Wavelet προέκυψε η φασματική ανάλυση για κάθε είδος εξεταζόμενου δοκιμίου η οποία απεικονίζεται στα Σχήματα 5.23 έως 5.30.

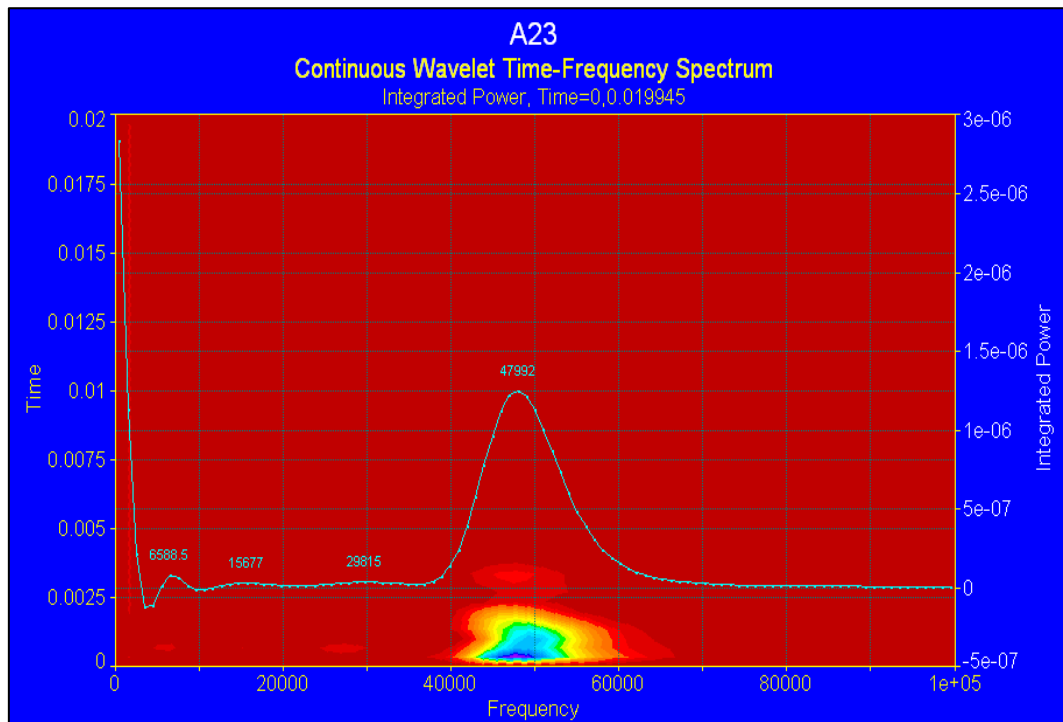
Για το σύνολο των δοκιμίων που εξετάστηκαν τα αντίστοιχα φασματικά περιεχόμενα που προέκυψαν παρατίθενται στο Παράρτημα Β.



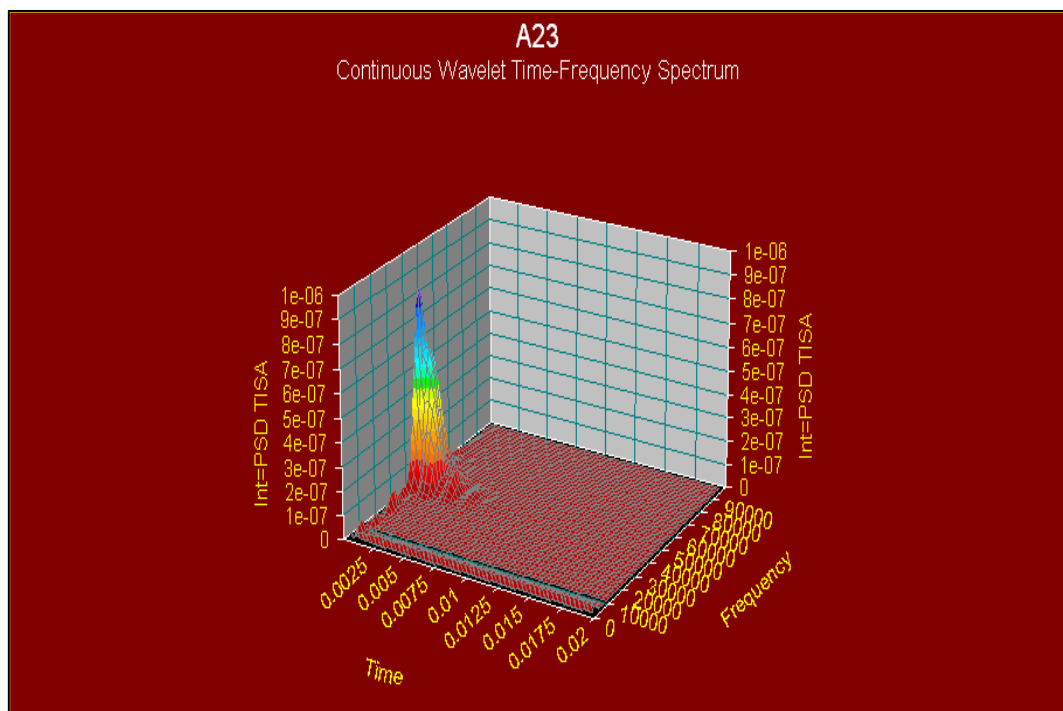
Σχήμα 5.23 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Γόρτυνας με χρήση μετασχηματισμού Wavelets (Δοκίμιο 6).



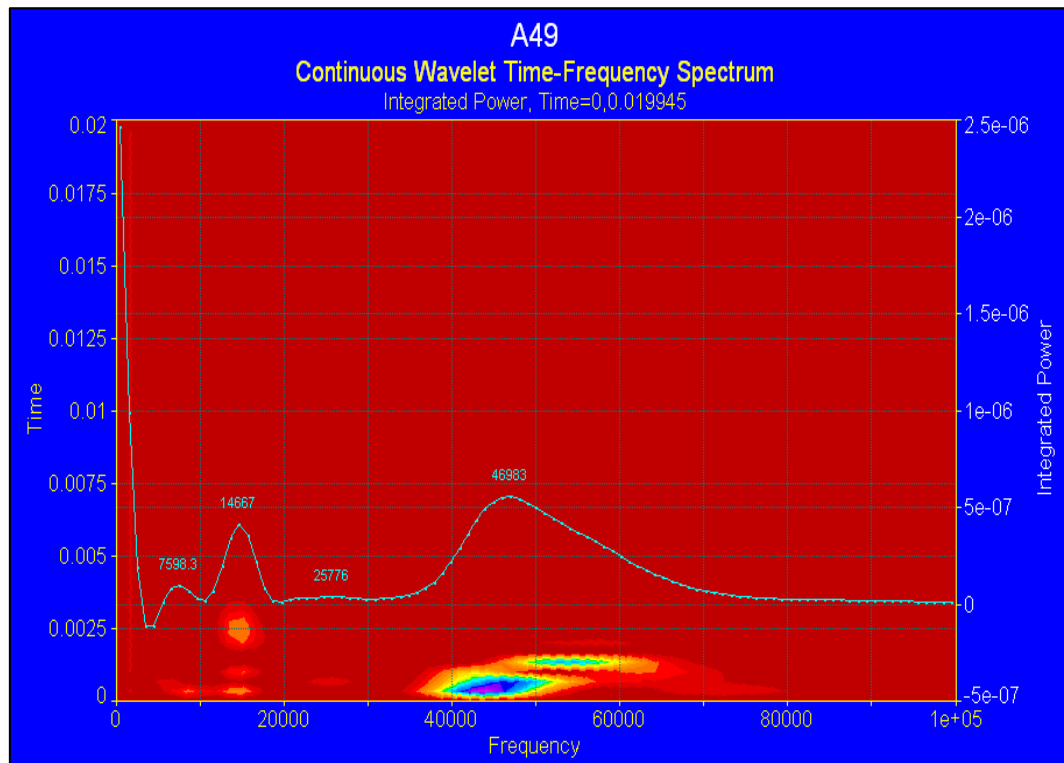
Σχήμα 5.24 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Γόρτυνας με χρήση μετασχηματισμού Wavelets (Δοκίμιο 6).



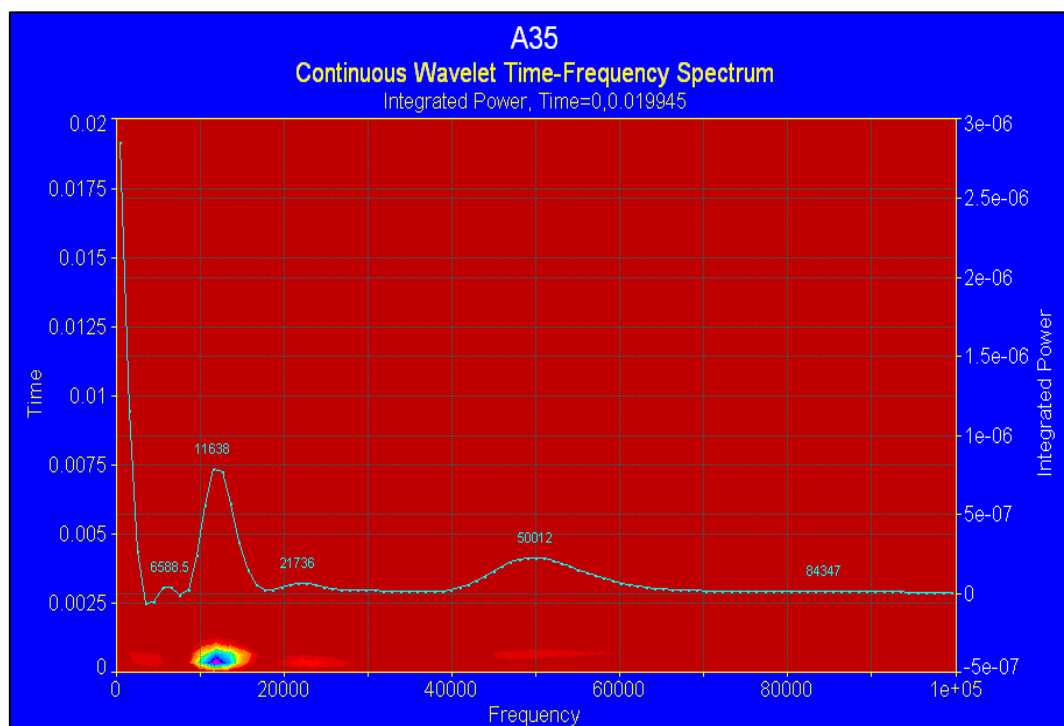
Σχήμα 5.25 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Γρανίτη με χρήση μετασχηματισμού Wavelets (Δοκίμιο 2).



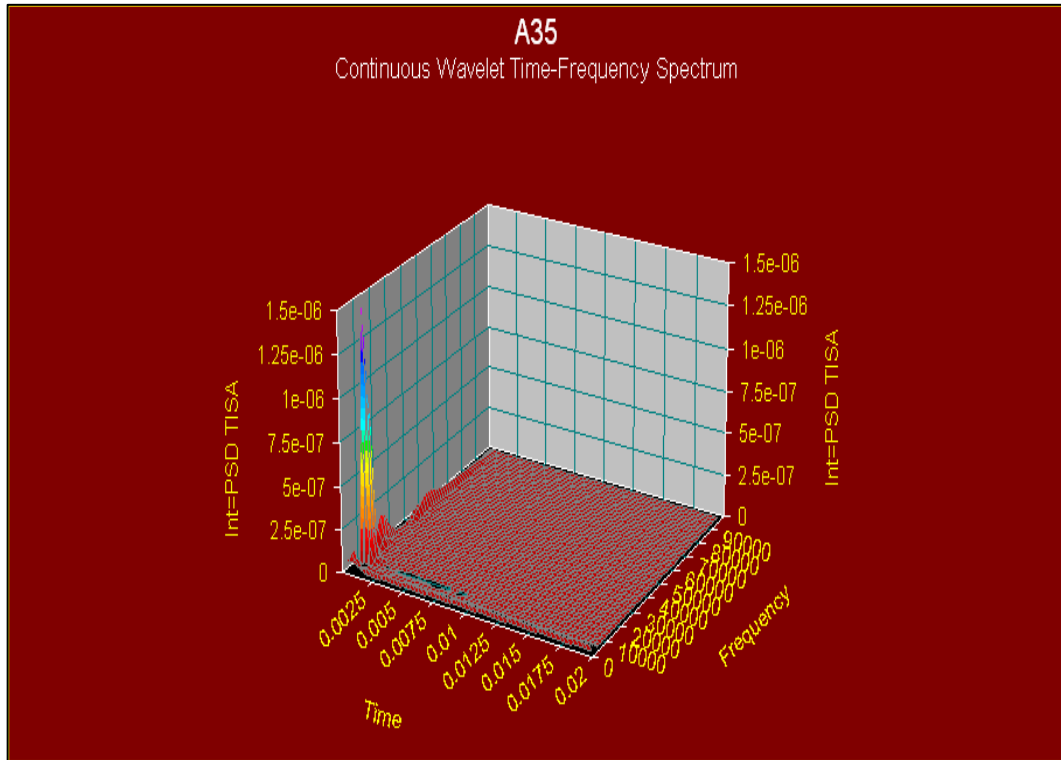
Σχήμα 5.26 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Γρανίτη με χρήση μετασχηματισμού Wavelets (Δοκίμιο 2).



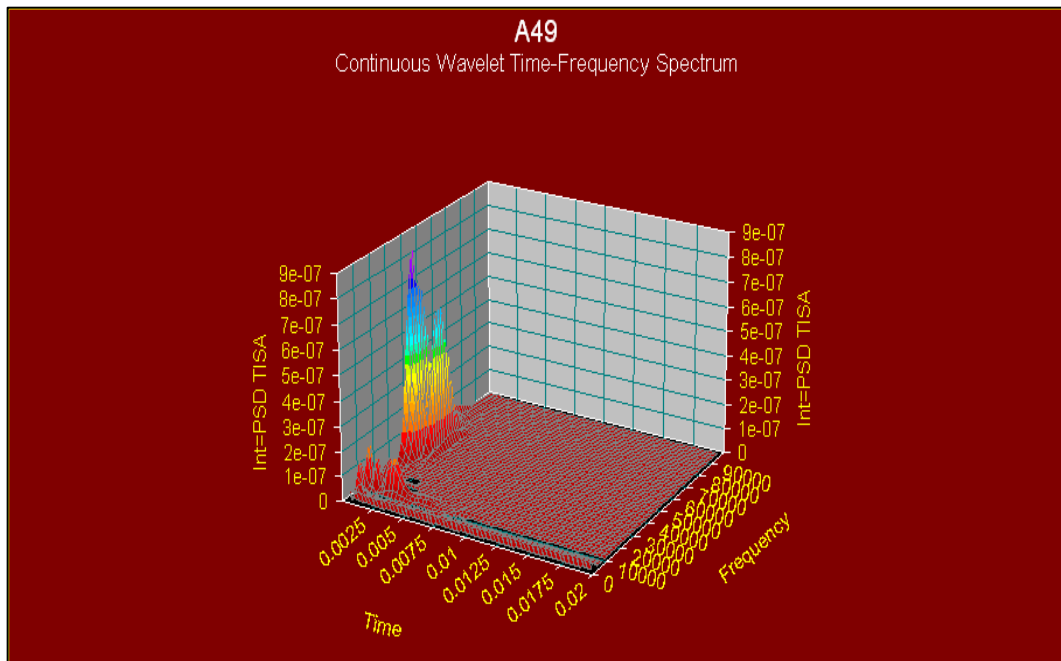
Σχήμα 5.27 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Διονύσου με χρήση μετασχηματισμού Wavelets (Δοκίμιο 5).



Σχήμα 5.28 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Νάξου με χρήση μετασχηματισμού Wavelets (Δοκίμιο 6).



Σχήμα 5.29 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Νάξου με χρήση μετασχηματισμού Wavelets (Δοκίμιο 6).



Σχήμα 5.30 Φασματικό περιεχόμενο για δοκίμιο Διονύσου με χρήση μετασχηματισμού Wavelets (Δοκίμιο 5).

5.5 Μετρήσεις Αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

Στην προσπάθεια να συσχετιστούν οι μηχανικές ιδιότητες των διαφόρων τύπων πετρωμάτων με το φασματικό τους ίχνος, μετρήθηκε σε εργαστηριακές συνθήκες η αντοχή των εξεταζόμενων δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη.

Η μέθοδος αφορά στον ταχύ προσδιορισμό της ανεμπόδιστης αντοχής αδιατάρακτου δείγματος ή συνεκτικού εδάφους κατά την εφαρμογή ενός αξονικού φορτίου. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η συνεκτικότητα του πετρώματος να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει τη διατήρηση της γεωμετρίας του δοκιμίου χωρίς την εφαρμογή πλευρικής πίεσεως. Η εκτέλεση της δοκιμής δεν είναι εφικτή στα μη συνεκτικά εδάφη, επειδή δεν είναι δυνατή η παρασκευή εδαφικών δοκιμίων (Αγιουτάντης, 2002).

Με τον όρο αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη εννοείται η θραύση μετά από φόρτιση ενός δείγματος σε κατάσταση φυσικής υγρασίας, κατά μία μόνο κατεύθυνση (κατακόρυφη), ενώ πλευρικά μπορεί να επεκτείνεται χωρίς κανένα εξωγενή περιορισμό. Με την δοκιμή αυτή μπορεί να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας ενός δοκιμίου, η διατμητική του αντοχή αλλά και άλλες γεωτεχνικές παράμετροι (συνοχή c , γωνία εσωτερικής τριβής φ).

Ο ρυθμός φόρτισης σε συνθήκη ελέγχου μετατόπισης (displacement control) που ασκήθηκε στο δοκίμιο ήταν της τάξης των 0.01mm/sec. Εναλλακτικά θα ήταν δυνατόν ο ρυθμός φόρτισης να γίνεται με έλεγχο φορτίου. Για την καλύτερη όμως επεξεργασία των αποτελεσμάτων θραύσης, η φόρτιση με την μέθοδο ελέγχου μετατόπισης κρίνεται ότι είναι αποτελεσματικότερη.

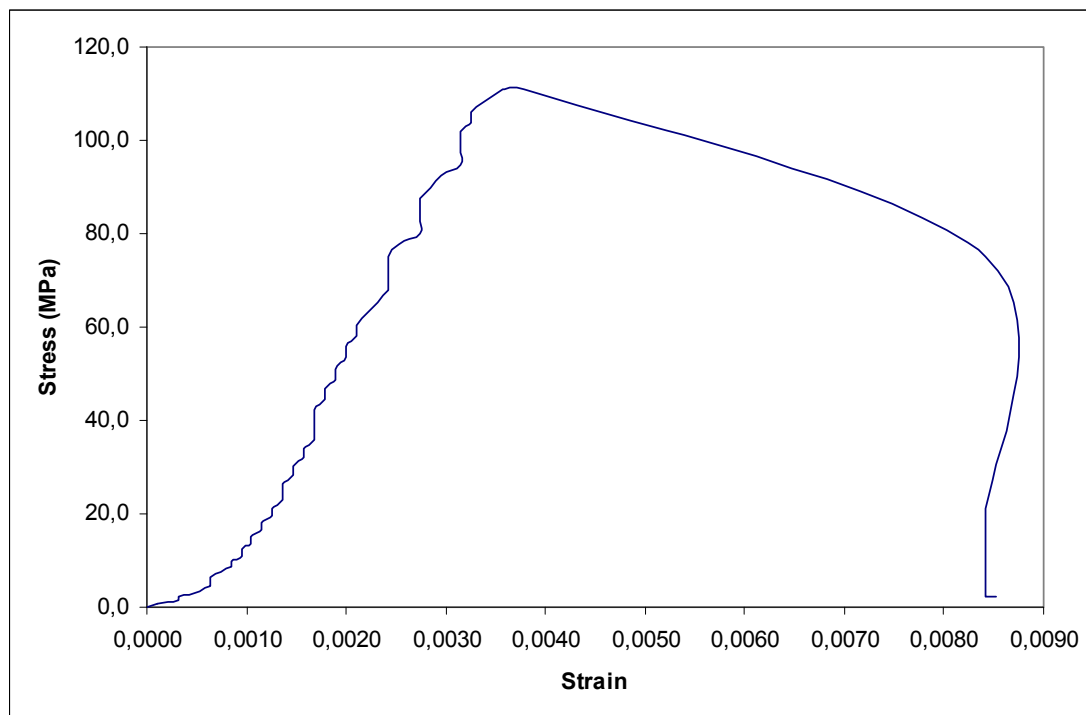
Τα δεδομένα των τιμών των φορτίων και των μετατοπίσεων καταγράφηκαν από ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με την μηχανή θραύσης.

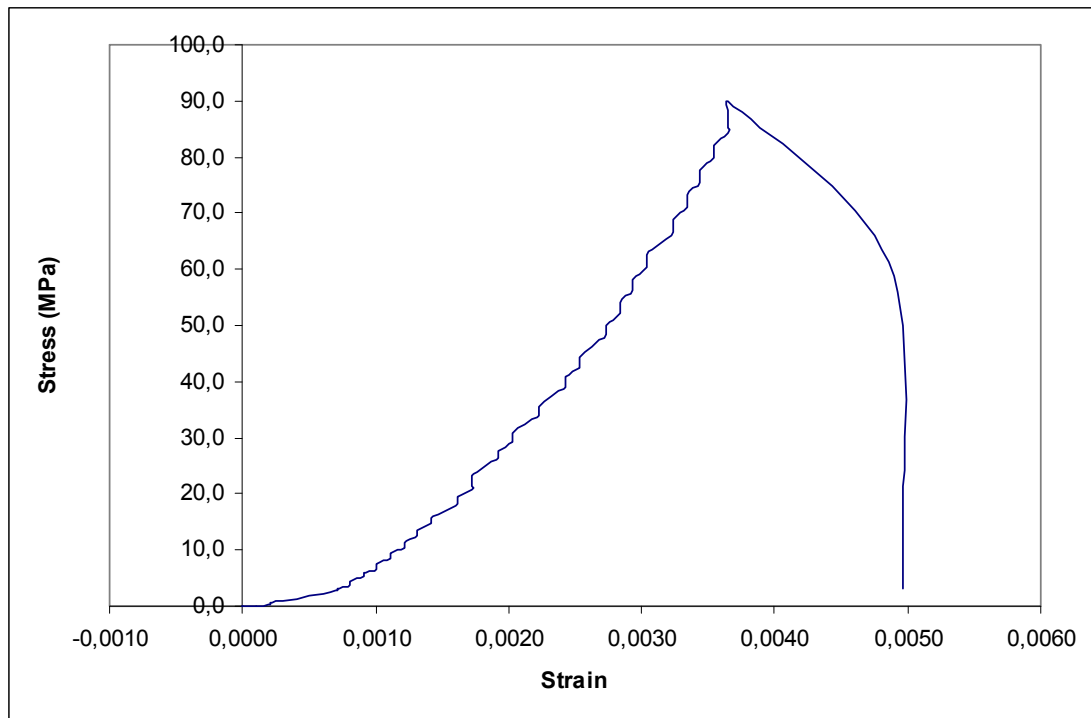
Από την διαδικασία αυτή προέκυψε ο Πίνακας 5.2 ο οποίος περιλαμβάνει ανά τύπο πετρώματος τις μέσες καταγεγραμμένες αντοχές σε μονοαξονική θλίψη. Στα Σχήματα 5.31 έως και 5.36 παρουσιάζεται γραφικά η μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη ανά πέτρωμα με φθίνουσα σειρά.

Τα αντίστοιχα Διαγράμματα Τάσεων – Παραμορφώσεων που προέκυψαν για κάθε δοκίμιο που εξετάστηκε παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

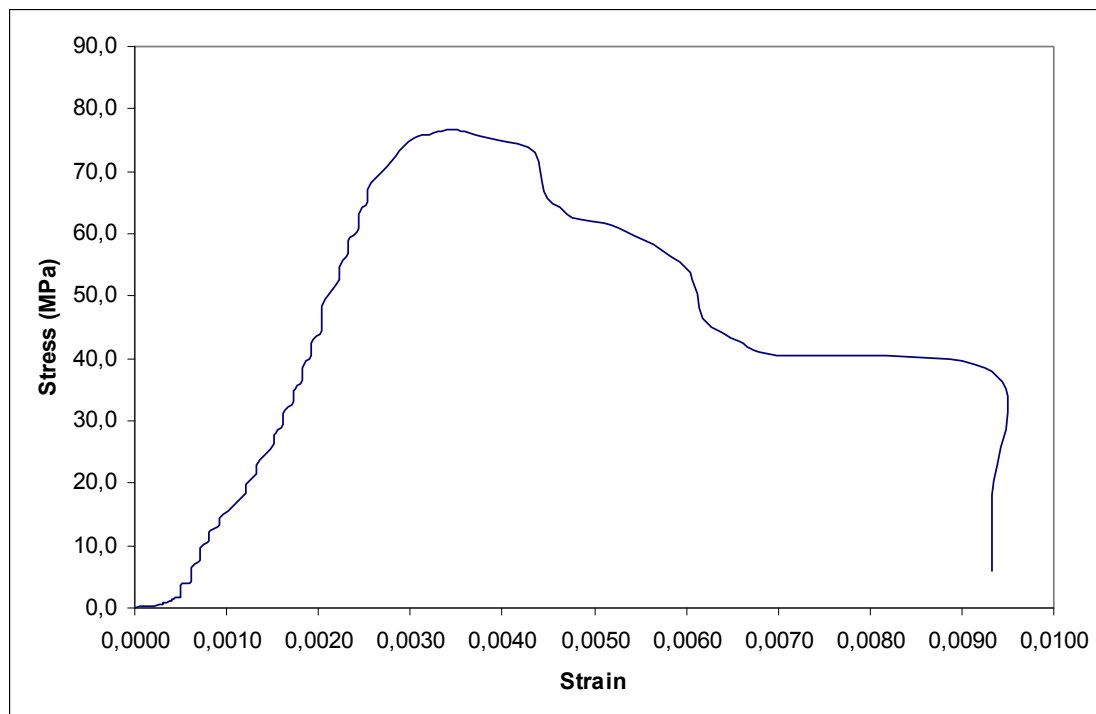
Πίνακας 5.2 Μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κάθε τύπου πετρώματος.

Πέτρωμα	Μέση Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη (MPa)
MG (Μάρμαρο Γόρτυνας)	109,6
MGR (Γρανίτης Θράκης)	94,3
MD (Μάρμαρο Διονύσου)	72,6
MN (Μάρμαρο Νάξου)	65,8
LP (Ασβεστόλιθος Χανίων)	42,6
LA (Αλφάς Ρεθύμνου)	23,3

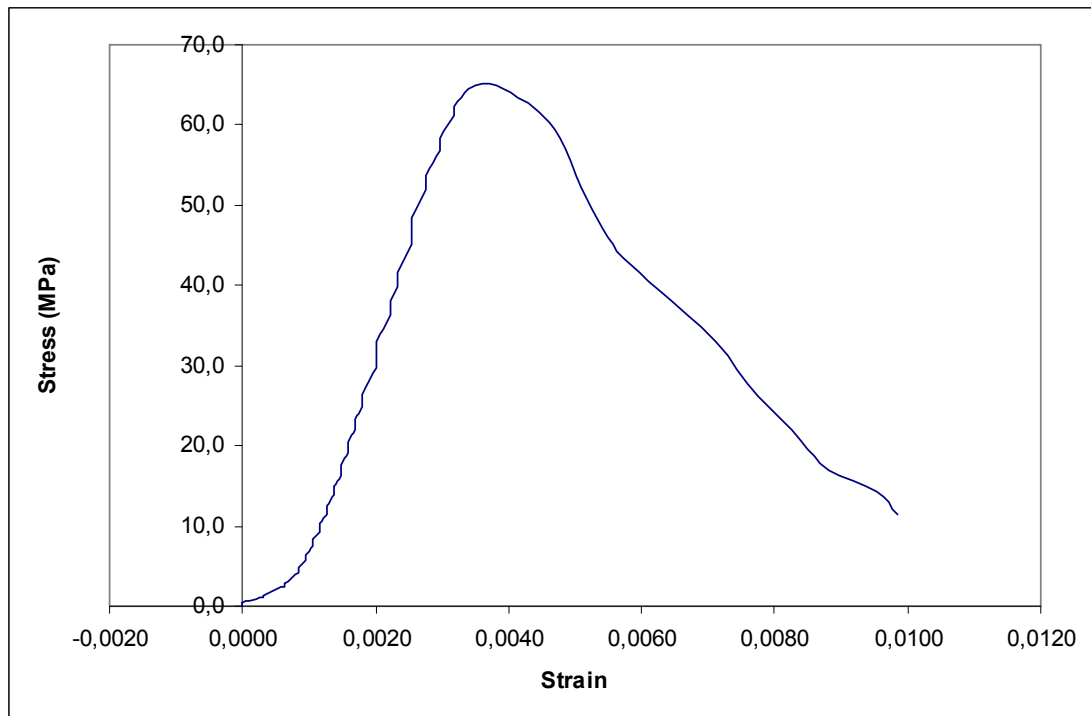
**Σχήμα 5.31** Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων δοκιμίου Γόρτυνας κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



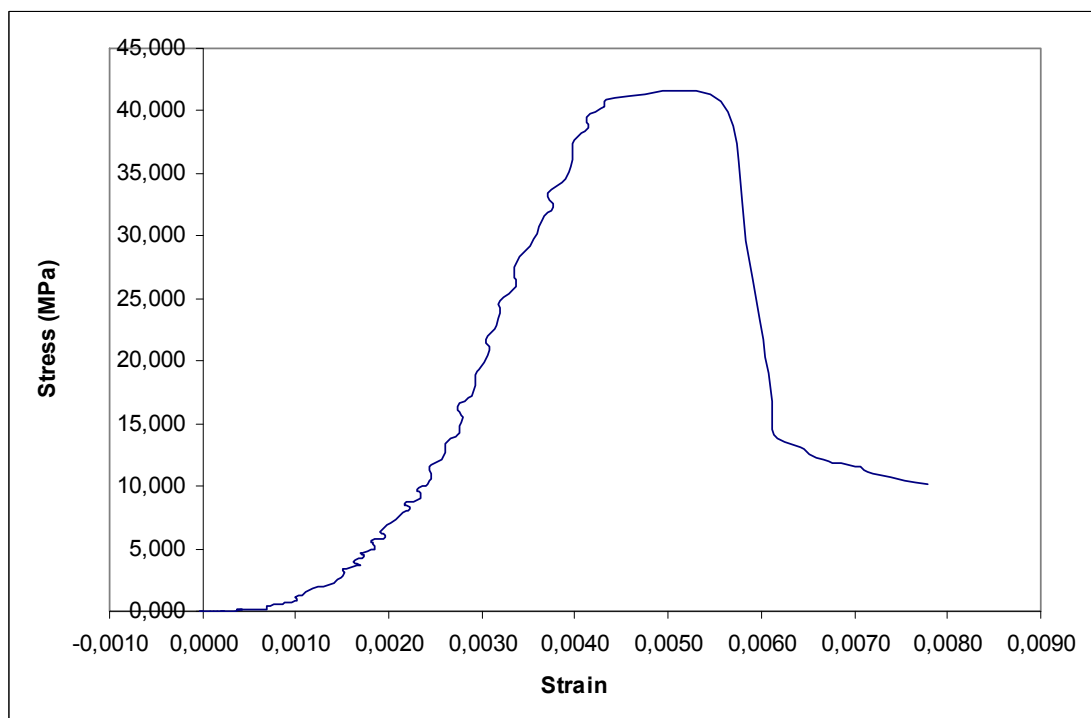
Σχήμα 5.32: Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων δοκιμίου Γρανίτη κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



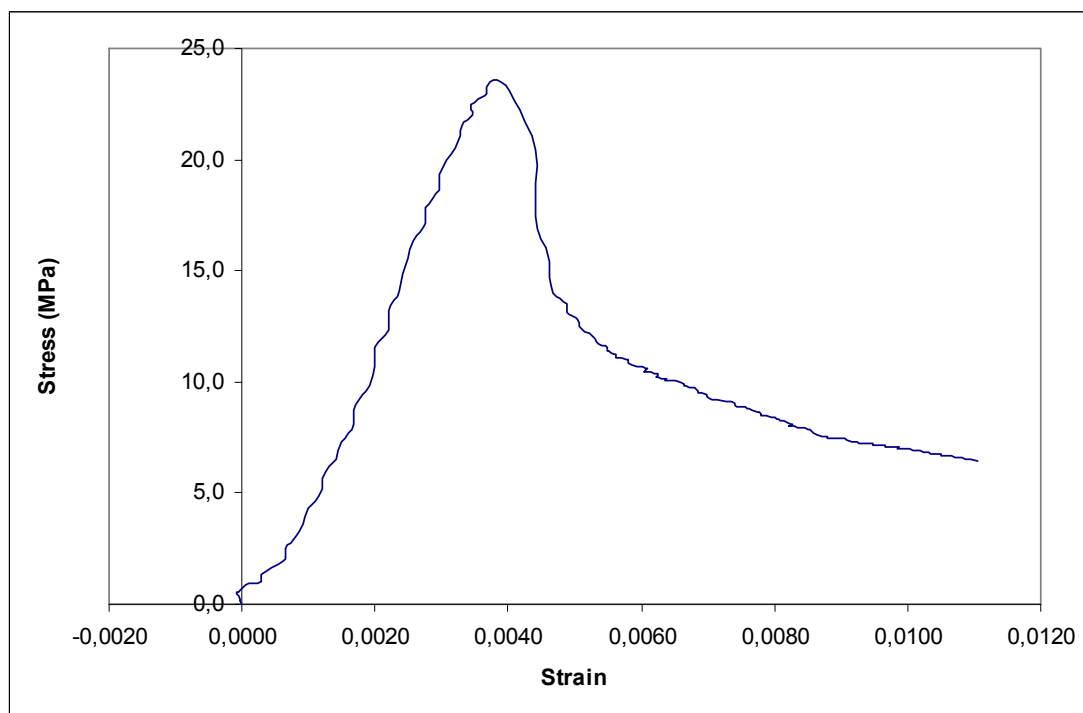
Σχήμα 5.33 Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων δοκιμίου Διονύσου κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 5.34 Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων δοκιμίου Νάξου κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 5.35 Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων δοκιμίου Ασβεστόλιθου κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 5.36 Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων δοκιμίου Αλφά κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

5.6 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

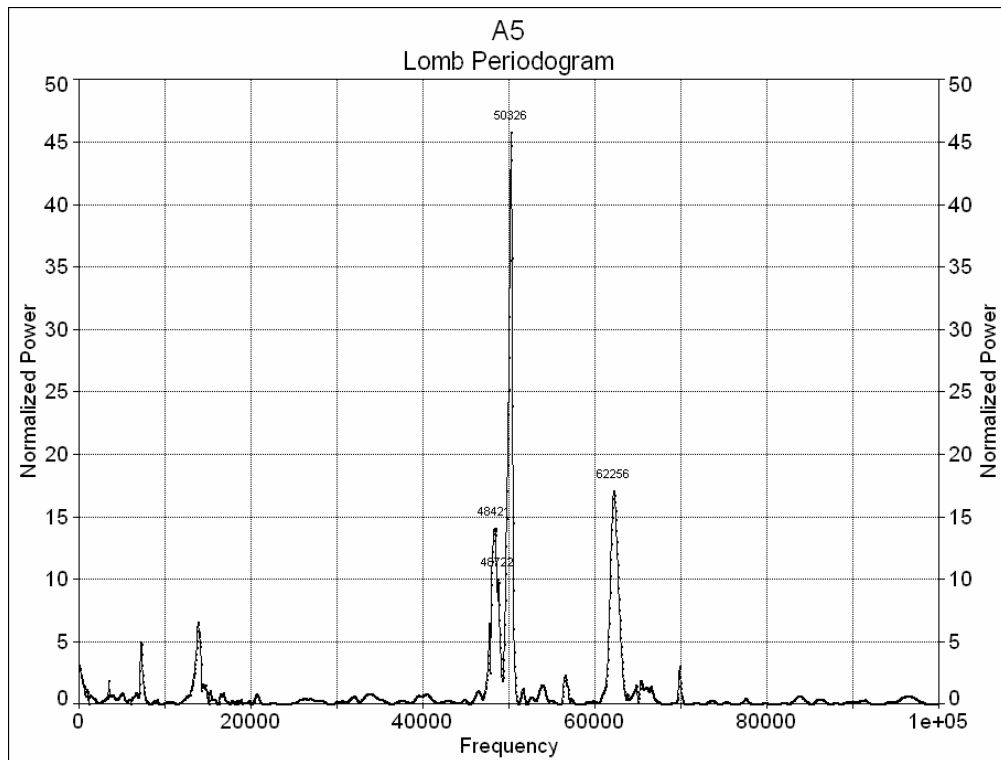
Στην προσπάθεια ποσοτικοποίησης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν πραγματοποιήθηκε συσχέτισμός και αξιολόγηση αυτών με την χρήση περιοδογραμμάτων Lomb, της μέσης σταθμισμένης συχνότητας, της μέσης ταχύτητας διάδοσης του σήματος, καθώς και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

5.6.1 Περιοδογράμματα Lomb

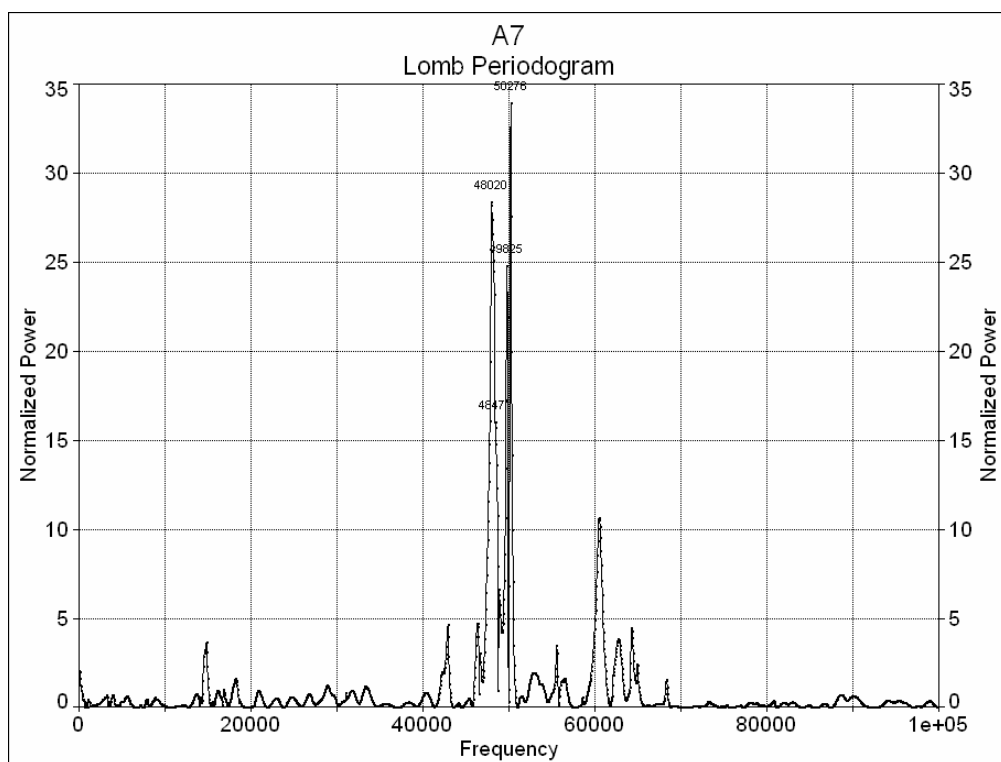
Στην προσπάθεια ποσοτικοποίησης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την χρήση της ρουτίνας Specgramdemo, τα στοιχεία που κατεγράφησαν στον παλμογράφο αναλύθηκαν περαιτέρω με αποτέλεσμα να προκύψει το κανονικοποιημένο τους περιοδόγραμμα Lomb. Στα Σχήματα 5.37 έως και 5.44 απεικονίζεται το κανονικοποιημένο περιοδόγραμμα Lomb για σήματα διερχόμενα από δοκίμια μαρμάρου Γόρτυνας, μαρμάρου Νάξου, μαρμάρου Διονύσου και γρανίτη Θράκης. Ο κατακόρυφος άξονας του περιοδογράμματος είναι κανονικοποιημένη ισχύς (%) ενώ ο οριζόντιος άξονας συχνότητα σε Hz.

Έτσι, σε κάθε περιοδόγραμμα απεικονίζονται οι δεσπόζουσες συχνότητες των μετρήσεων για κάθε τύπο πετρώματος σε συνδυασμό με την κανονικοποιημένη ισχύ του σήματος. Οι τιμές που αντιστοιχούν στις δύο μέσες δεσπόζουσες συχνότητες ανά

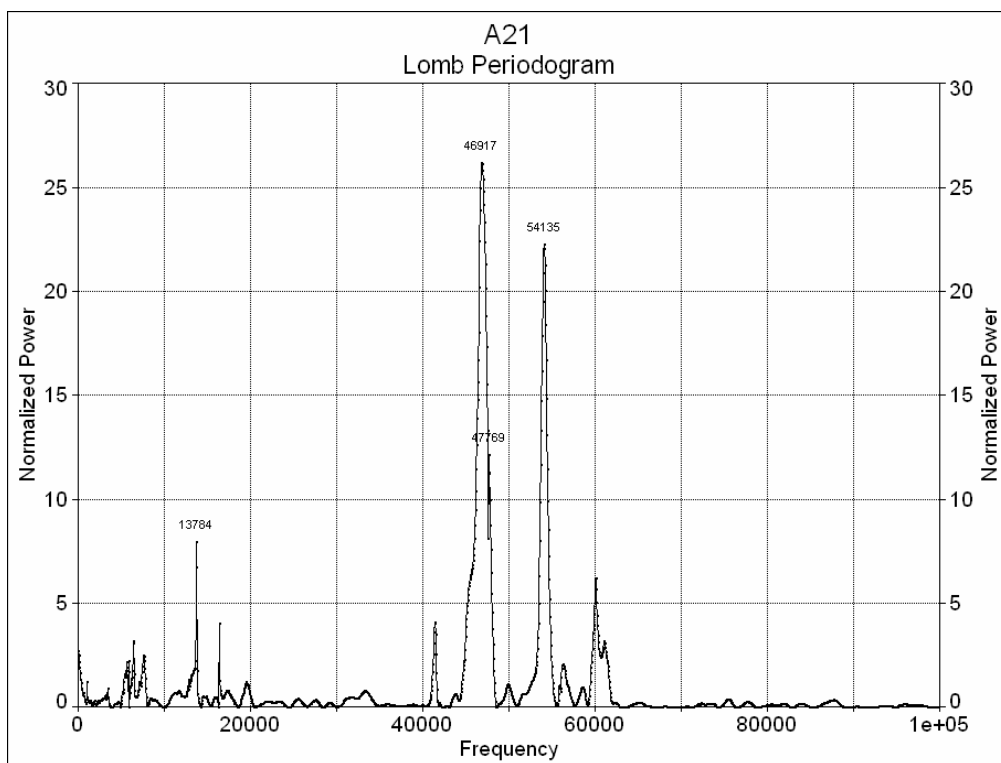
τύπο δοκιμίου καθώς και η αντίστοιχη μέση κανονικοποιημένη ισχύς του σήματος για τις συχνότητες αυτές δίνονται στον Πίνακα 5.3. Από την συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτών παρατηρείται ότι για κάθε τύπο πετρώματος δυνατόν να εμφανίζονται διακριτές δεσπόζουσες συχνότητες (με μέγιστη κανονικοποιημένη ισχύ) οι οποίες διαφαίνεται ότι μπορεί να αποτελέσουν στοιχείο χαρακτηρισμού κάθε τύπου πετρώματος.



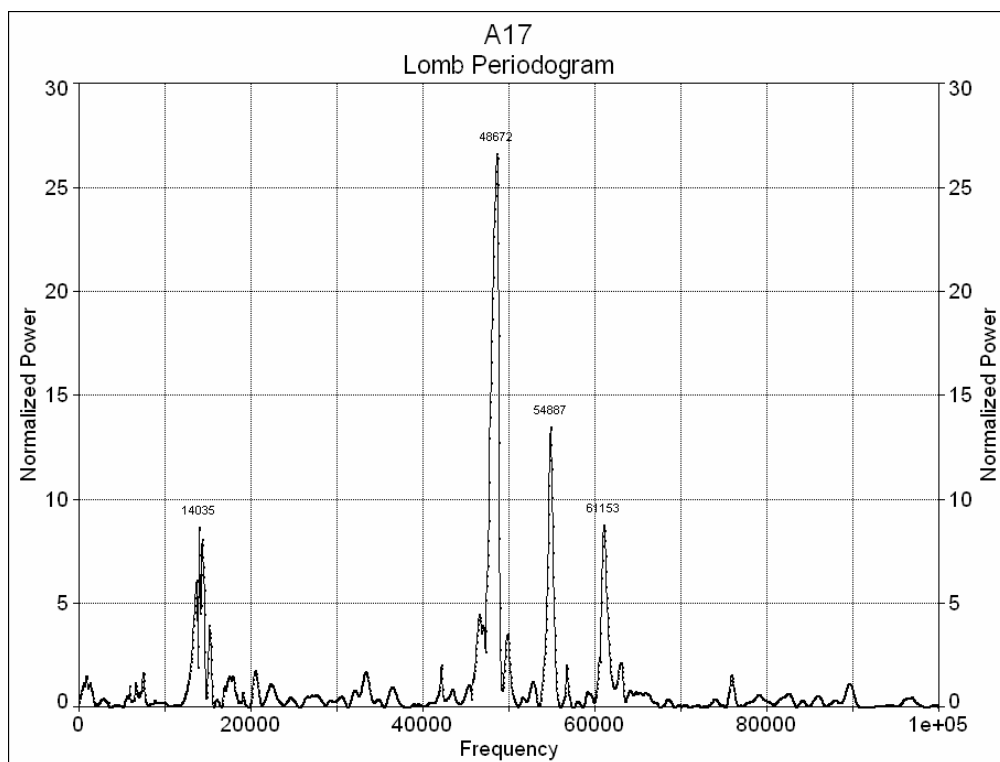
Σχήμα 5.37 Περιοδόγραμμα Lomb Γόρτυνας.



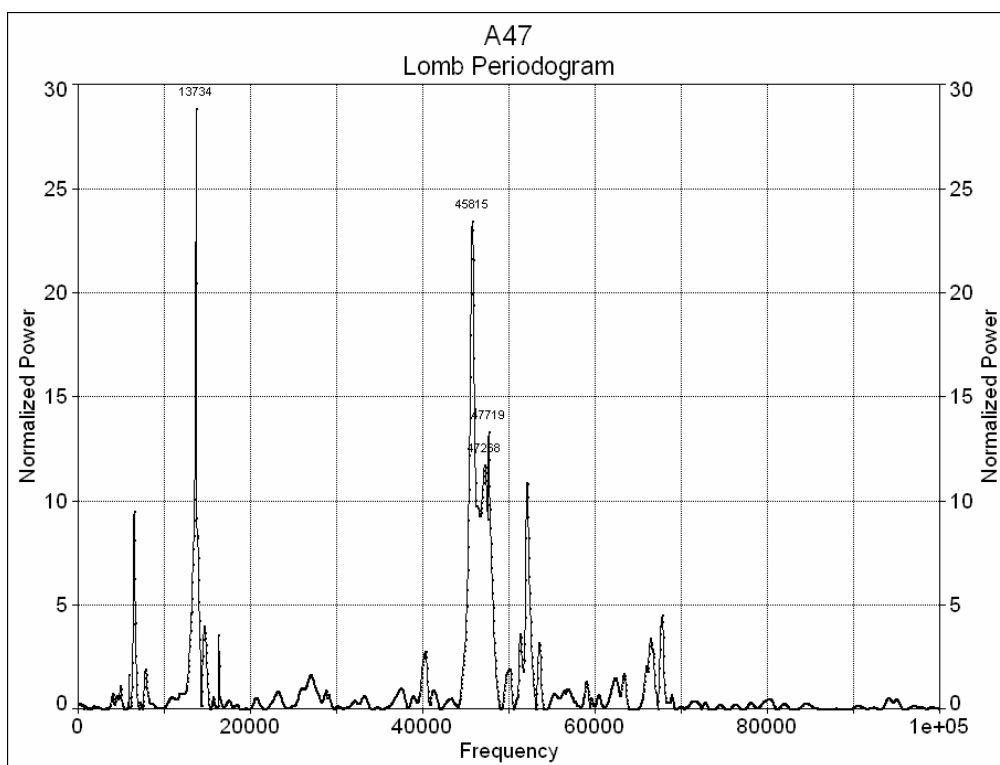
Σχήμα 5.38 Περιοδόγραμμα Lomb Γόρτυνας.



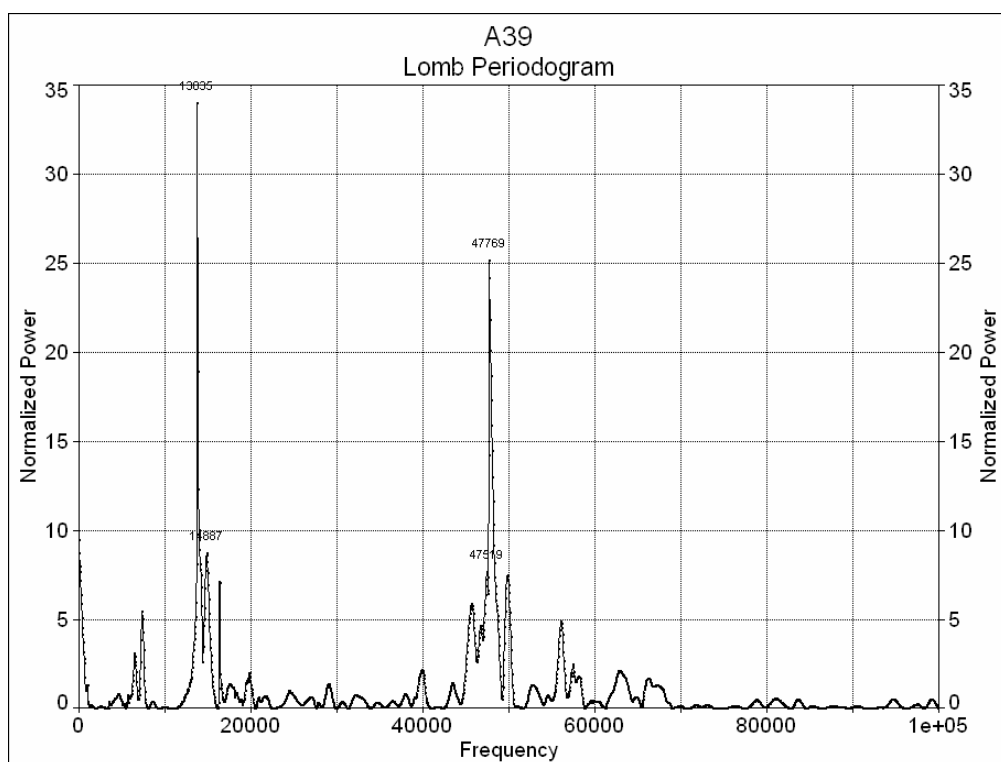
Σχήμα 5.39 Περιοδόγραμμα Lomb Γρανίτη.



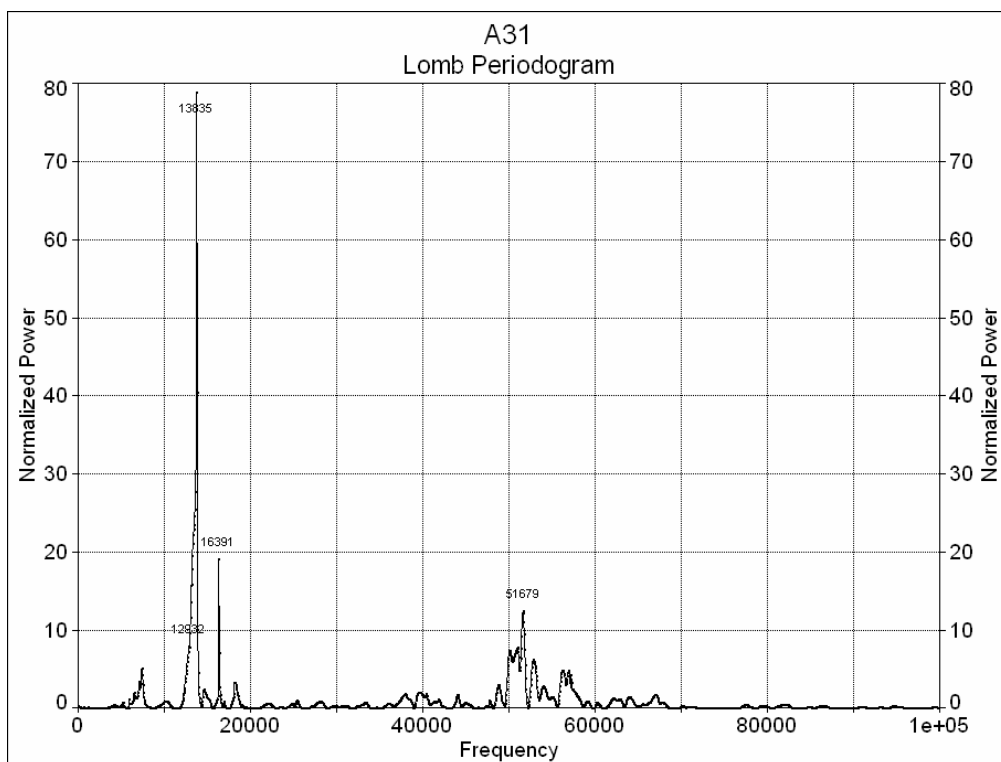
Σχήμα 5.40 Περιοδόγραμμα Lomb Γρανίτη.



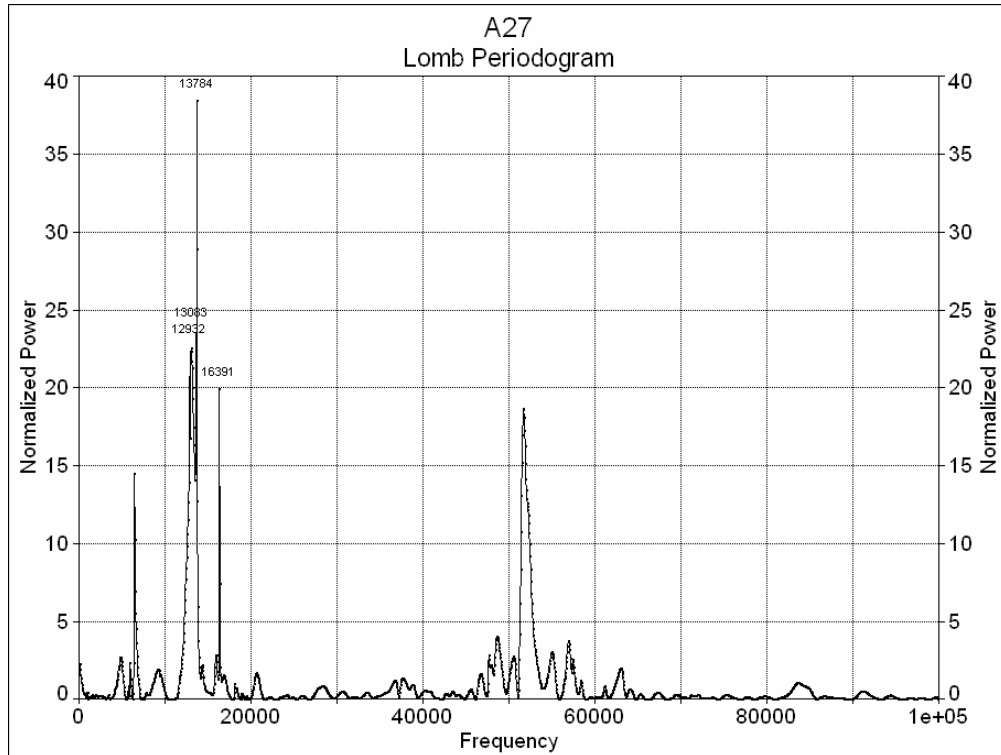
Σχήμα 5.41 Περιοδόγραμμα Lomb Διονύσου.



Σχήμα 5.42 Περιοδόγραμμα Lomb Διονύσου.



Σχήμα 5.43 Περιοδόγραμμα Lomb Νάξου.



Σχήμα 5.44 Περιοδόγραμμα Lomb Νάξου.

Πίνακας 5.3 Χαρακτηριστικές τιμές μέσων δεσποζουσών συχνοτήτων και μέσης κανονικοποιημένης ισχύος.

Πέτρωμα	Δεσπόζουσα Συχνότητα 1	Κανονικοποιημένη Ισχύς 1	Δεσπόζουσα Συχνότητα 2	Κανονικοποιημένη Ισχύς 2
MG (Μάρμαρο Γόρτυνας)	50,50	46,00	62,00	16,50
MGR (Γρανίτης)	47,00	26,50	54,00	22,50
MD (Μάρμαρο Διονύσου)	14,00	29,00	46,00	24,00
MN (Μάρμαρο Νάξου)	13,50	79,50	52,00	11,50
LP (Ασβεστόλιθος Χανίων)	14,50	140,00	21,00	26,00
LA (Αλφάς Ρεθύμνου)	1,50	14,00	17,00	16,00

Περαιτέρω φασματική επεξεργασία ανά κατηγορία εξεταζόμενων δοκιμίων παρατίθεται στο Παράρτημα Β.

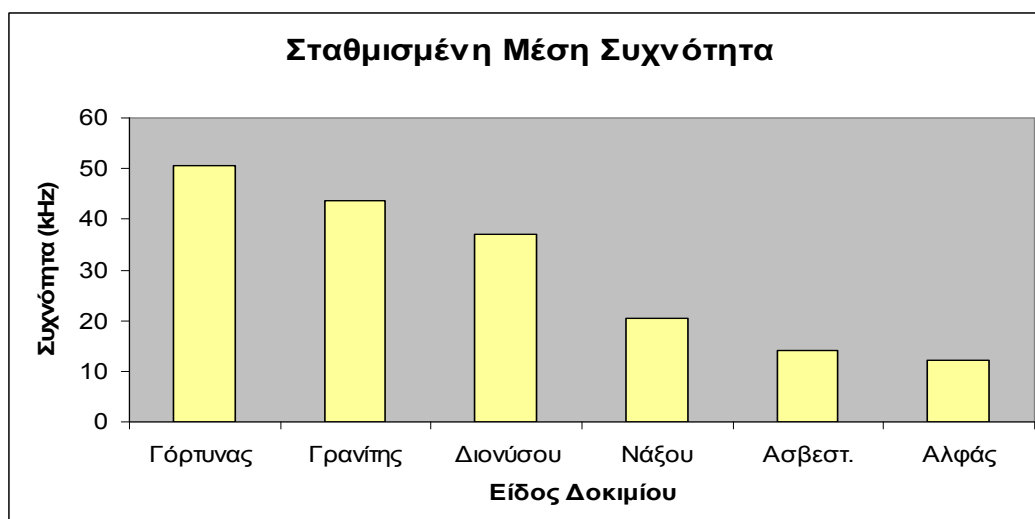
5.6.2 Συσχετισμός Αποτελεσμάτων με την χρήση της Μέσης Σταθμισμένης Συχνότητας

Από τις μέσες δεσπόζουσες συχνότητες προκύπτει η μέση σταθμισμένη συχνότητα (5.1) με συντελεστές βαρύτητας τις αντίστοιχες κανονικοποιημένες ισχύεις (Murray and Spiegel, 2002).

$$\bar{f} = \frac{P_1 f_1 + P_2 f_2 + \dots + P_k f_k}{P_1 + P_2 + \dots + P_k} \quad (5.1)$$

όπου $\bar{f}$ η μέση σταθμισμένη συχνότητα, $P_{1,2,\dots,k}$ οι κανονικοποιημένες ισχύεις, $f_{1,2,\dots,k}$ οι δεσπόζουσες συχνότητες και k ο αριθμός των δειγματικών συνόλων.

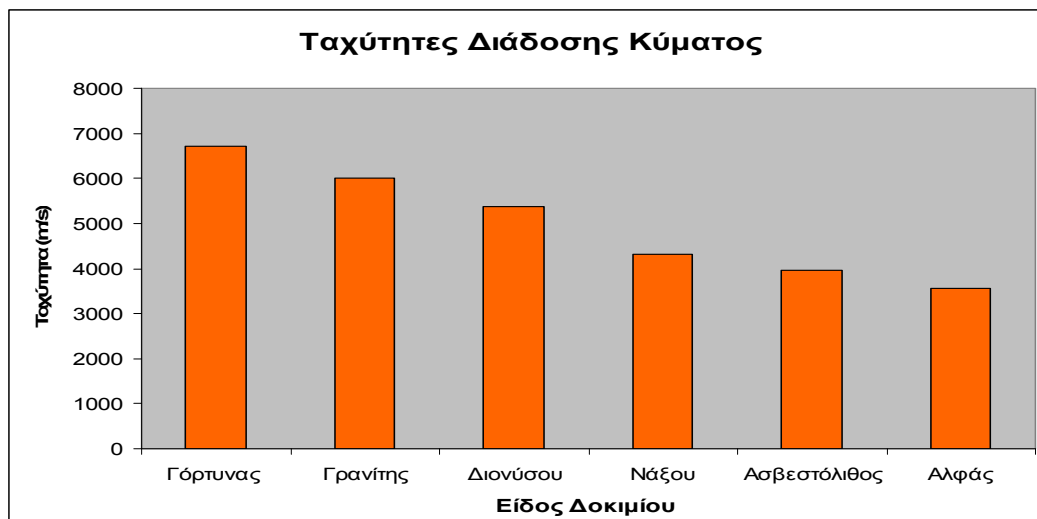
Στο Σχήμα 5.45 παρουσιάζεται γραφικά η μεταβολή της σταθμισμένης μέσης συχνότητας ανά πέτρωμα με φθίνουσα σειρά.



Σχήμα 5.45 Χαρακτηριστικές τιμές μέσης σταθμισμένης συχνότητας ανά είδος πετρώματος.

5.6.3 Συσχετισμός Αποτελεσμάτων με την χρήση της Μέσης Ταχύτητας Διάδοσης σήματος

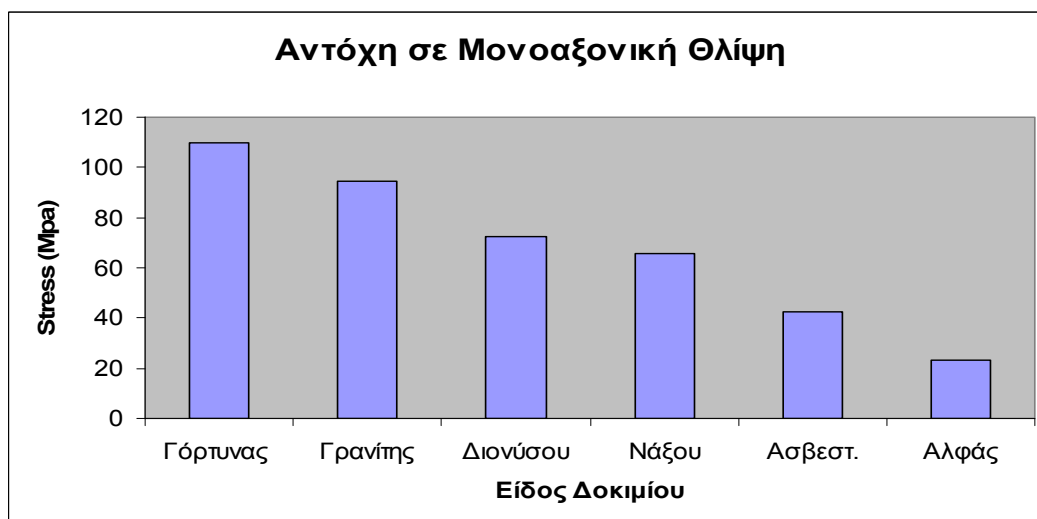
Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων μέτρησης των ακουστικών σημάτων προέκυψε γραφικά ανά πέτρωμα η μέση ταχύτητα διάδοσης των σημάτων κατά φθίνουσα σειρά (Σχήμα 5.46).



Σχήμα 5.46 Χαρακτηριστικές τιμές μέσης ταχύτητας διάδοσης αρχικών κυμάτων ανά είδος πετρώματος.

5.6.4 Συσχετισμός Αποτελεσμάτων με την χρήση της Μέσης Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων μέτρησης των της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, προέκυψε γραφικά ανά πέτρωμα η μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε φθίνουσα σειρά (Σχήμα 5.47).

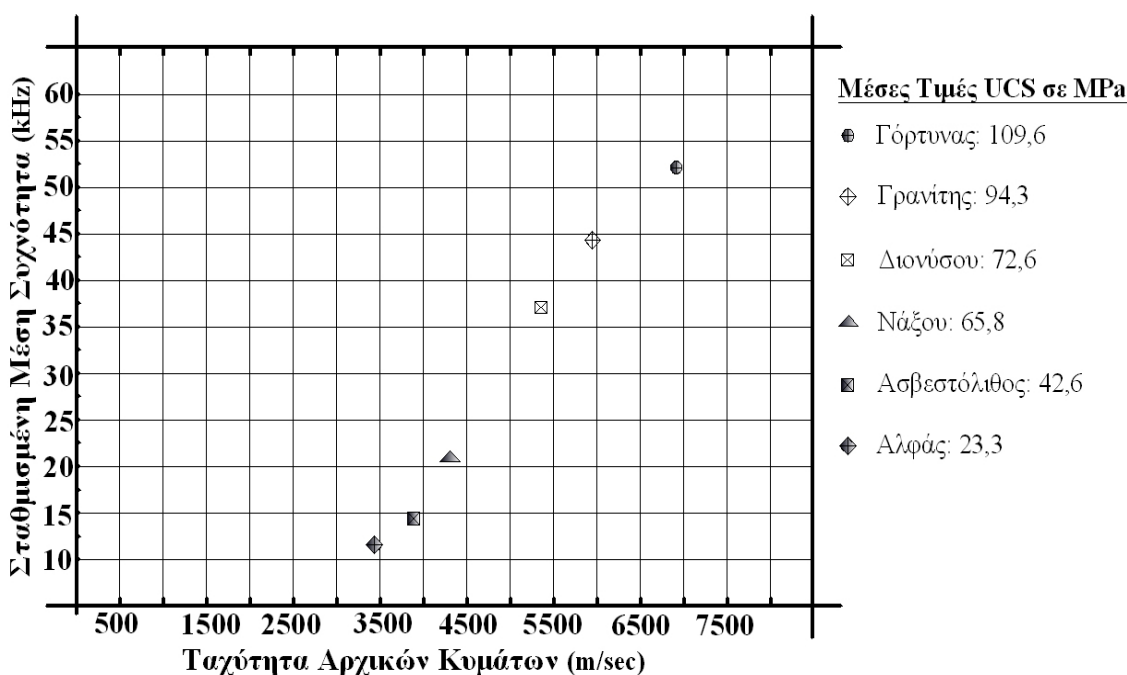


Σχήμα 5.47 Χαρακτηριστικές τιμές μέσης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη ανά είδος πετρώματος.

5.6.5 Συσχετισμοί

Στο Σχήμα 5.48 επιχειρείται να εξαχθεί ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα που να περιλαμβάνει όλες τις παραπάνω παραμέτρους δηλαδή τη σταθμισμένη μέση συχνότητα, τη μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και τη μέση ταχύτητα διάδοσης διαμήκων κυμάτων σε κάθε τύπο πετρώματος. Κάθε σημείο στο διάγραμμα αντιστοιχεί σε διαφορετικό πέτρωμα, ενώ δεξιά έχουν τοποθετηθεί οι τιμές μονοαξονικής θλίψης που αντιστοιχούν σε κάθε πέτρωμα.

Στο Σχήμα αυτό παρατηρείται ότι στα εξεταζόμενα πετρώματα η μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι ανάλογη της σταθμισμένης μέσης συχνότητας και της μέσης ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων. Στα πετρώματα στα οποία η μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη έχει υψηλή τιμή και οι αντίστοιχες τιμές της μέσης σταθμισμένης συχνότητας και της μέσης ταχύτητας είναι υψηλές ενώ στα πετρώματα στα οποία η μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη έχει χαμηλότερη τιμή και οι αντίστοιχες τιμές της μέσης σταθμισμένης συχνότητας και της μέσης ταχύτητας στα πετρώματα αυτά, είναι χαμηλότερες.



Σχήμα 5.48 Συνοπτική συσχέτιση παραμέτρων χαρακτηρισμού πετρωμάτων.

5.6.6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μία προσπάθεια συσχετισμού της συχνοτικής ανάλυσης ακουστικών σημάτων που διέρχονται από ακέραια εργαστηριακά δοκίμια ασβεστολίθων, μαρμάρων και γρανιτών, με χρήση γεννήτριας παλμών και πιεζοηλεκτρικών μορφοτροπέων συχνότητας 54 kHz, με την ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων σε αυτά καθώς και με την αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη. Εφαρμόστηκε επίσης μετασχηματισμός Fourier εντοπισμένος σε μη ισοδύναμα και άνισα χρονικά διαστήματα για την φασματική ανάλυση από την οποία εξήχθησαν οι δεσπόζουσες συχνότητες μεταφοράς ενέργειας. Η περιγραφόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε ικανό αριθμό δοκιμίων με παραπλήσια αποτελέσματα. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών διαφαίνεται ότι η φασματική απόκριση που λαμβάνεται από κάθε πέτρωμα μπορεί να αποτελέσει δείκτη με τον οποίο να είναι δυνατός ο χαρακτηρισμός του πετρώματος. Τα κυριότερα δε συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή είναι τα εξής:

1. Για κάθε τύπο πετρώματος λαμβάνεται διαφορετικό φασματικό περιεχόμενο.
2. Πετρώματα υψηλής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη εμφανίζουν πλούσιες σε φασματικό περιεχόμενο αποκρίσεις στις οποίες κυριαρχούν δεσπόζουσες συχνότητες υψηλής τιμής, ενώ πετρώματα χαμηλότερης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη εμφανίζουν πτωχότερες σε φασματικό περιεχόμενο αποκρίσεις στις οποίες οι δεσπόζουσες συχνότητες είναι χαμηλότερης τιμής.
3. Η μέση ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων είναι ανάλογη της παρατηρούμενης μέσης αντοχής του πετρώματος. Πετρώματα υψηλών τιμών αντοχών σε μονοαξονική θλίψη, επιτρέπουν την διάδοση των διαμήκων κυμάτων με υψηλότερες ταχύτητες ενώ αντιθέτως σε πετρώματα με χαμηλότερες τιμές αντοχών σε μονοαξονική θλίψη η διάδοση των διαμήκων κυμάτων πραγματοποιείται με χαμηλότερες ταχύτητες.
4. Η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας φαίνεται ότι αποκόπτει τις υψηλές συχνότητες διάδοσης με μείωση του χρονικού διαστήματος μεταφοράς ενέργειας.
5. Πετρώματα με υψηλότερο πορώδες χαρακτηρίζονται από μειωμένη ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων, καθώς και μειωμένη μέση σταθμισμένη συχνότητα και μείωση του χρονικού διαστήματος στο οποίο πραγματοποιείται υψηλή μεταφορά ενέργειας.

Σημειώνεται ότι χρησιμοποιώντας μορφοτροπείς των 54kHz, με την παραπάνω μεθοδολογία είναι δυνατόν να αναλυθούν συχνότητες έως και περίπου 100kHz γεγονός που φαίνεται να καλύπτει τα περισσότερα πετρώματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ

Αντικείμενο της συγκεκριμένης Διδακτορικής Διατριβής απετέλεσε η ανάπτυξη μεθοδολογίας μέσω της οποίας, με μη καταστροφικές δοκιμές δημιουργήθηκε ένα διαφορετικό και ξεχωριστό φασματικό ίχνος – υπογραφή, για κάθε εξεταζόμενο είδος πετρώματος.

Βασικό και καινοτόμο στοιχείο της μελέτης αυτής, απετέλεσε η εφαρμογή του Μετασχηματισμού NFFT, του Μετασχηματισμού Wavelets και του Περιοδογράμματος Lomb σε λαμβανόμενα από επιλεγμένες διατάξεις σήματα, αφού αυτά είχαν διέλθει από εδαφικούς σχηματισμούς ή δοκίμια αντίστοιχα, καθώς και η επεξεργασία και φασματική ανάλυση αυτών σε συνδυασμό με την συγκριτική αξιολόγηση και αξιοποίηση των αποτελεσμάτων από γεωτρητικά, γεωφυσικά και εργαστηριακά δεδομένα.

Από την επεξεργασία και την φασματική ανάλυση, όπως αυτή περιγράφηκε αναλυτικά στα Κεφάλαια 4 και 5 της υπόψη Διατριβής, προέκυψαν τα παρακάτω κύρια συμπεράσματα.

Α. Συμπεράσματα από την φασματική ανάλυση των δεδομένων που ελήφθησαν στο πεδίο.

1. Στις θέσεις όπου η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο εξεταζόμενο στρώμα είναι υψηλή, τόσο η κυρίαρχη συχνότητα του λαμβανομένου σήματος όσο και η μέγιστη ισχύς του είναι σχετικά υψηλές, ενώ όπου η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μειώνεται αισθητά τόσο η κυρίαρχη συχνότητα του λαμβανομένου σήματος όσο και η μέγιστη ισχύς του παρουσιάζουν αντίστοιχη μείωση. Παρατηρείται δηλαδή ανάλογης και ομοιότροπης μορφής μεταβολή του επιπέδου της συχνότητας και της ισχύος του λαμβανομένου σήματος με αυτό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
2. Η πιλοτική εφαρμογή της τεχνικής αυτής στην περιοχή που εξετάστηκε υπέδειξε ότι αναγνωρίζει περιοχές τόσο με χαμηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις όσο και με υψηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις.
3. Επιβεβαιώθηκε η συμβατότητα των αποτελεσμάτων της μεθόδου αυτής με τα αποτελέσματα που είχαν προκύψει με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.

B. Συμπεράσματα από την φασματική ανάλυση των εργαστηριακών δεδομένων.

1. Για κάθε τύπο πετρώματος λαμβάνεται διαφορετικό φασματικό περιεχόμενο.
2. Πετρώματα υψηλής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη εμφανίζουν πλούσιες σε φασματικό περιεχόμενο αποκρίσεις στις οποίες κυριαρχούν δεσπόζουσες συχνότητες υψηλής τιμής, ενώ πετρώματα χαμηλότερης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη εμφανίζουν πτωχότερες σε φασματικό περιεχόμενο αποκρίσεις στις οποίες οι δεσπόζουσες συχνότητες είναι χαμηλότερης τιμής.
3. Η μέση ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων είναι ανάλογη της παρατηρούμενης μέσης αντοχής του πετρώματος. Πετρώματα υψηλών τιμών αντοχών σε μονοαξονική θλίψη, επιτρέπουν τη διάδοση των διαμήκων κυμάτων με υψηλότερες ταχύτητες, ενώ αντιθέτως σε πετρώματα με χαμηλές τιμές αντοχών σε μονοαξονική θλίψη η διάδοση των διαμήκων κυμάτων πραγματοποιείται με χαμηλότερες ταχύτητες.
4. Η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας φαίνεται ότι αποκόπτει τις υψηλές συχνότητες διάδοσης με μείωση του χρονικού διαστήματος μεταφοράς ενέργειας.
5. Πετρώματα με υψηλότερο πορώδες χαρακτηρίζονται από μειωμένη ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων, μειωμένη μέση σταθμισμένη συχνότητα καθώς και μειωμένο χρονικό διάστημα στο οποίο πραγματοποιείται υψηλή μεταφορά ενέργειας.

Η προτεινόμενη έρευνα θα μπορούσε αρχικά και εύκολα να αξιοποιήσει τη λαμβανόμενη φασματική υπογραφή, για μια πρώτη εκτίμηση του είδους και των ιδιοτήτων του πετρώματος που εξετάζεται, ή των χαρακτηριστικών του υπεδάφους αντίστοιχα, σε μετρήσεις που πραγματοποιούνται στο πεδίο. Θα μπορούσε επίσης να αξιοποιηθεί για την εκτίμηση της μέσης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των εξεταζόμενων πετρωμάτων ανάλογα με τη μέση σταθμισμένη συχνότητα που αυτά παρουσιάζουν ή ανάλογα με την μέση ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εξέτασή τους. Εκτίμηση επίσης θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί για τον βαθμό κορεσμού των εξεταζόμενων δοκιμίων, στην περίπτωση που η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στο εργαστήριο. Πέραν αυτών όμως η μελέτη αυτή δύναται να αποτελέσει το υπόβαθρο για την εκπόνηση περαιτέρω έρευνας και εξέλιξης. Μερικές από τις εργασίες οι οποίες θα μπορούσαν να αναπτυχθούν και να βελτιώσουν το υπάρχον γεωτεχνικό γνωστικό δυναμικό είναι οι εξής.

- i. Διερεύνηση της επίδρασης της τιμής της αρχικής συχνότητας του εισερχόμενου σήματος στο τελικό αποτέλεσμα.
- ii. Διερεύνηση της εφαρμογής της υπόψη μεθοδολογίας σε διαφορετική γκάμα υλικών.
- iii. Διερεύνηση της εφαρμογής της μεθοδολογίας αυτής σε δοκίμια του ιδίου πετρώματος με ιδιαίτερη έμφαση στις περιπτώσεις που αυτά παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό καθαρότητας ή εμφανίζουν ασυνέχειες ή ρηγματώσεις ή παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό κορεσμού καθώς και όταν χρησιμοποιούνται δοκίμια διαφορετικών διαστάσεων
- iv. Διερεύνηση δυνατότητας εφαρμογής άλλου Μετασχηματισμού (πιθανόν με καλύτερα αποτελέσματα).
- v. Διερεύνηση δυνατότητας εφαρμογής της υπόψη μεθόδου σε ασβεστόλιθους με πληρωμένα καρστ σε σχέση με ασβεστόλιθους με κενά καρστ.
- vi. Διερεύνηση εφαρμογής της υπόψη μεθόδου σε λατομεία για εκτίμηση του βαθμού καθαρότητας και ομοιογένειας του υλικού τους.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Σχήμα Α.1 Η γεωηλεκτρική τομή για την δεύτερη από τις δύο γραμμές μελέτης, με κατεύθυνση από Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά, όπου εμφανίζεται η κατανομή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Σχήμα Α.2 Διάγραμμα, δεσποζουσών συχνοτήτων ανά Γεώφωνο σε συνάρτηση με την απόσταση.

Σχήμα Α.3 Προβολή διαγράμματος δεσποζουσών συχνοτήτων στην γεωηλεκτρική τομή..

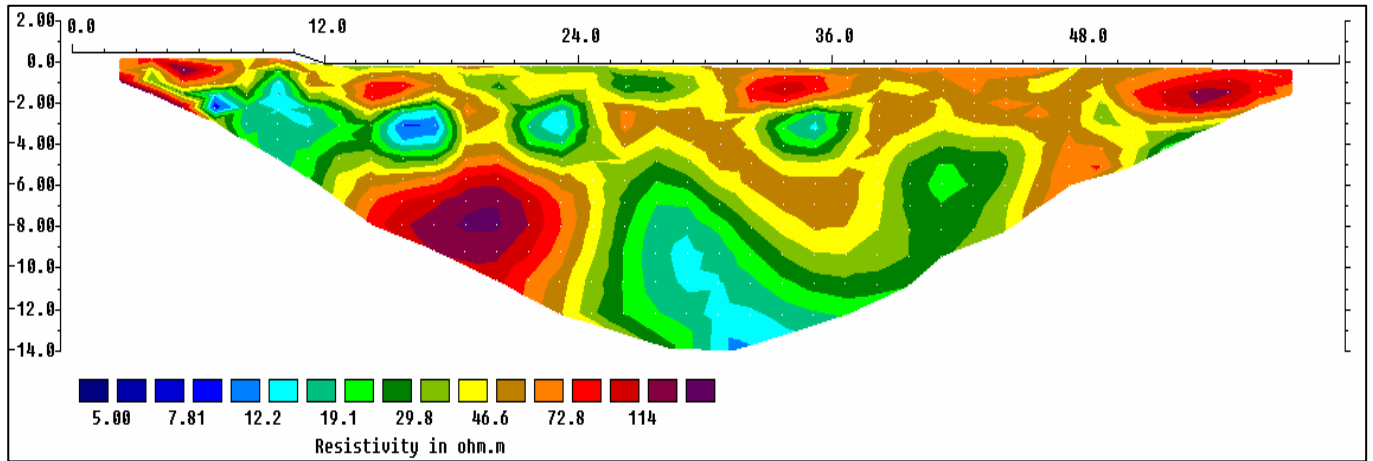
Σχήματα Α.4 έως Α.27 Περιοδογράμματα Lomb σημάτων λαμβανομένων από τα αντίστοιχα Γεώφωνα.

Σχήμα Α.28 έως Α.30 Αποτελέσματα διαγραφιών εντός της Γεώτρησης 2.

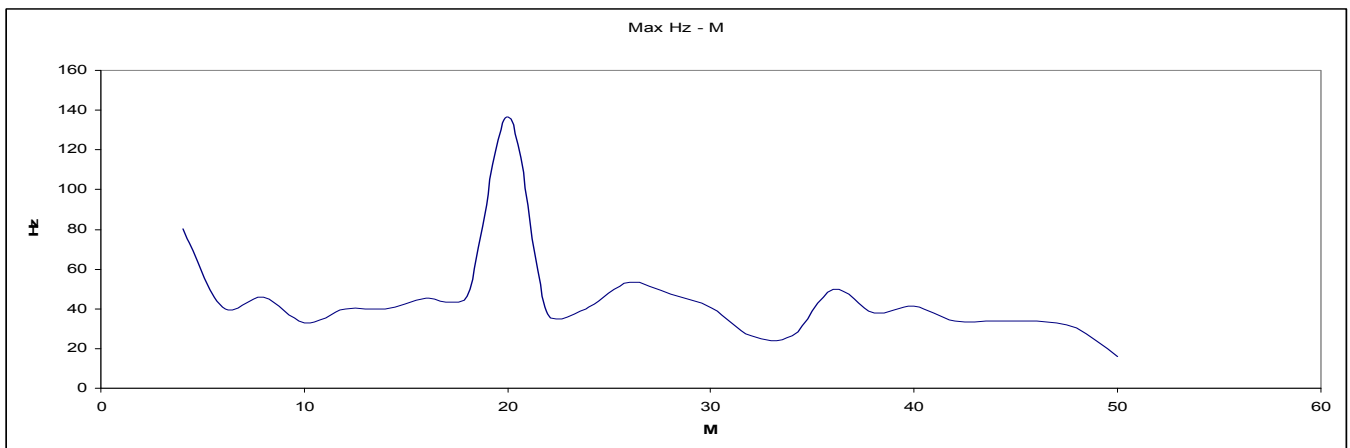
Σχήμα Α.31 Προκύπτοντα αποτελέσματα από την γεώτρηση Γ2 σε παράθεση επί της γεωηλεκτρικής τομής.

Σχήμα Α.32 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων διαγραφιών εντός της Γεώτρ. 2.

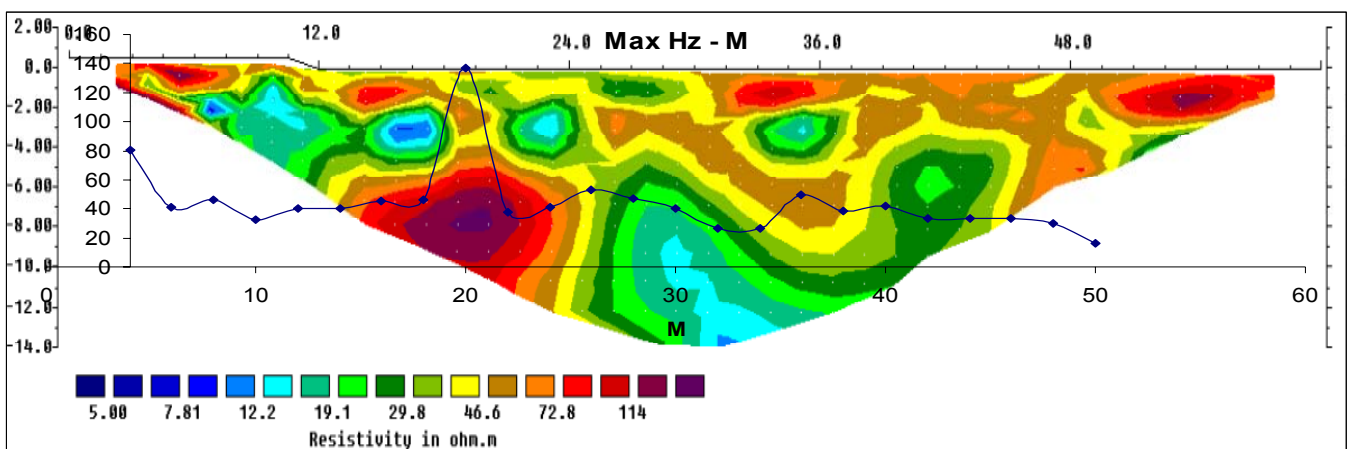
Σχήμα Α.33 Σύγκριση αποτελεσμάτων διαγραφιών εντός της Γεώτρησης 2, με αποτελέσματα από την γεωηλεκτρική τομή.



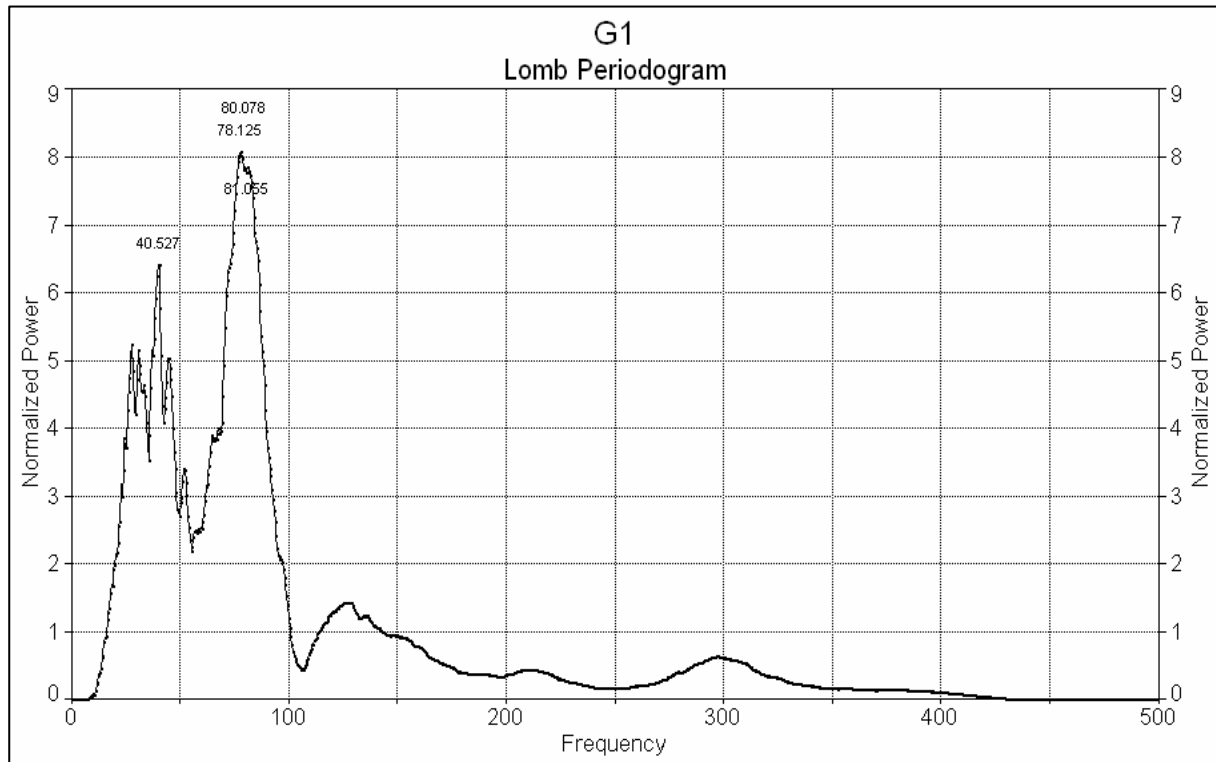
Σχήμα Α.1 Η γεωηλεκτρική τομή για την δεύτερη από τις δύο γραμμές μελέτης, με κατεύθυνση από Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά, όπου εμφανίζεται η κατανομή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



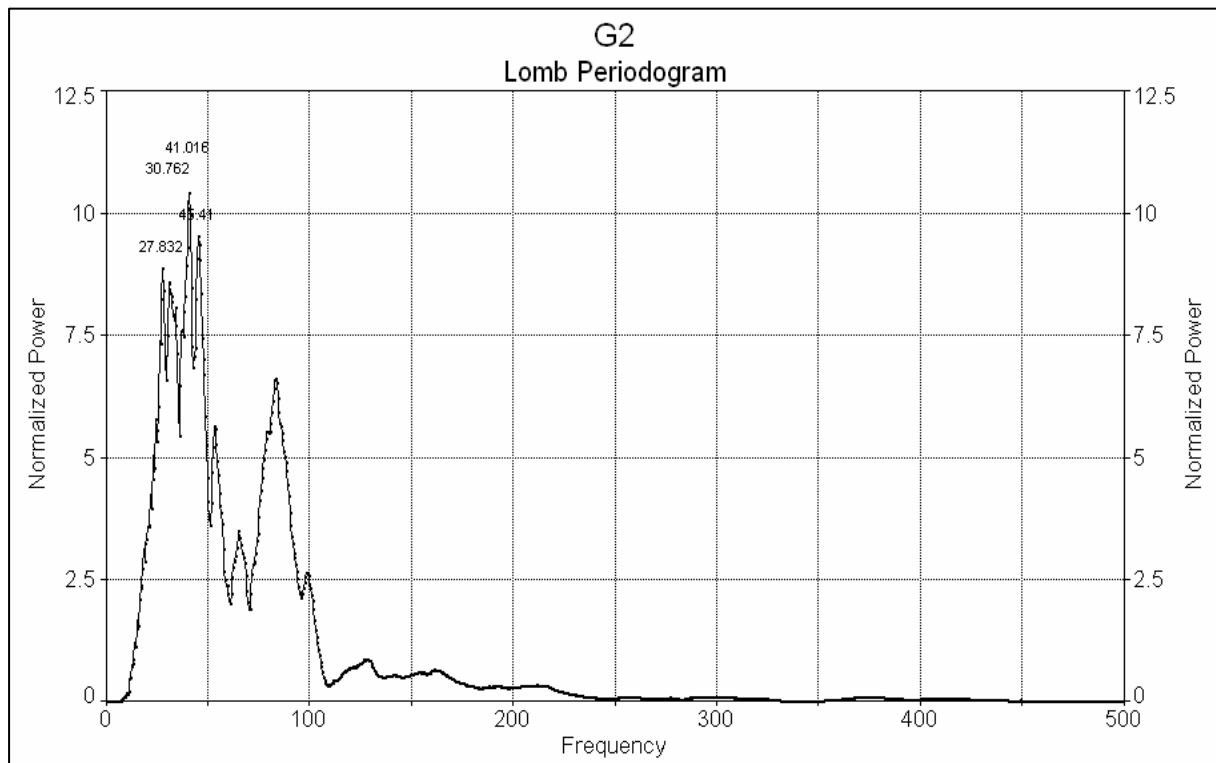
Σχήμα Α.2 Διάγραμμα, δεσποζουσών συχνοτήτων ανά Γεώφωνο σε συνάρτηση με την απόσταση.



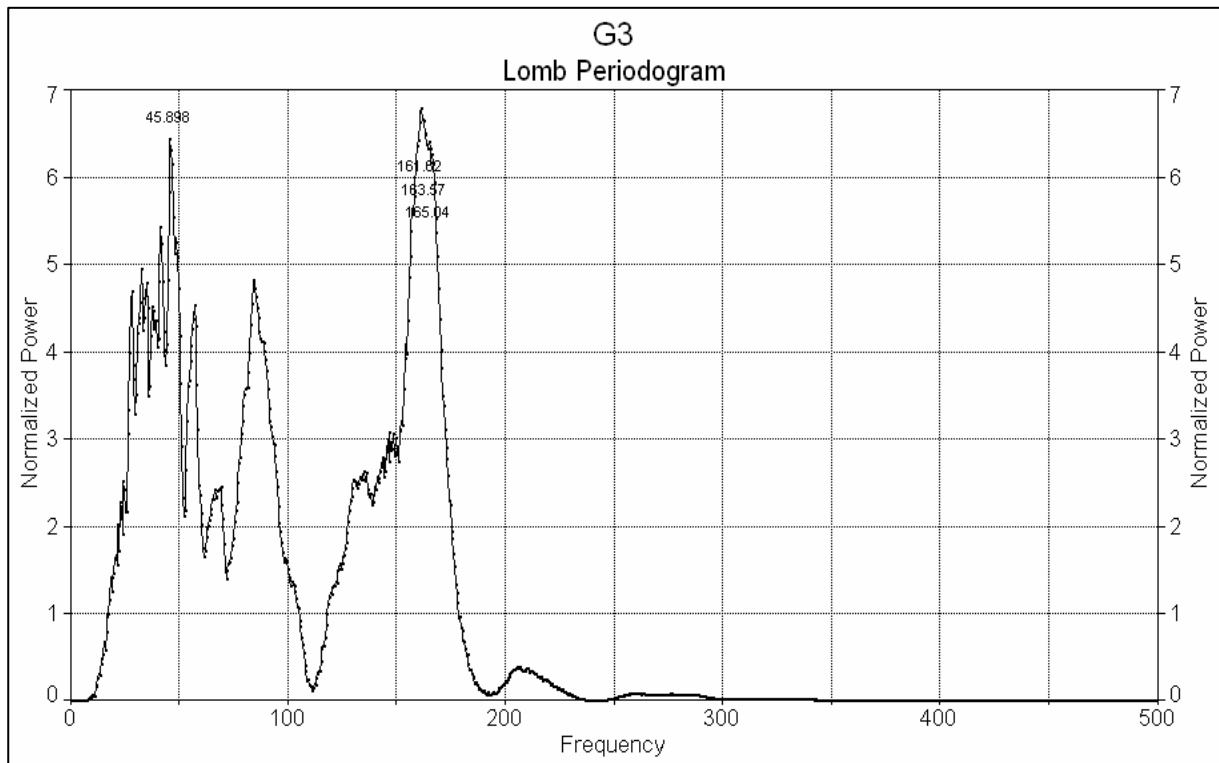
Σχήμα Α.3 Προβολή διαγράμματος δεσποζουσών συχνοτήτων στην γεωηλεκτρική τομή.



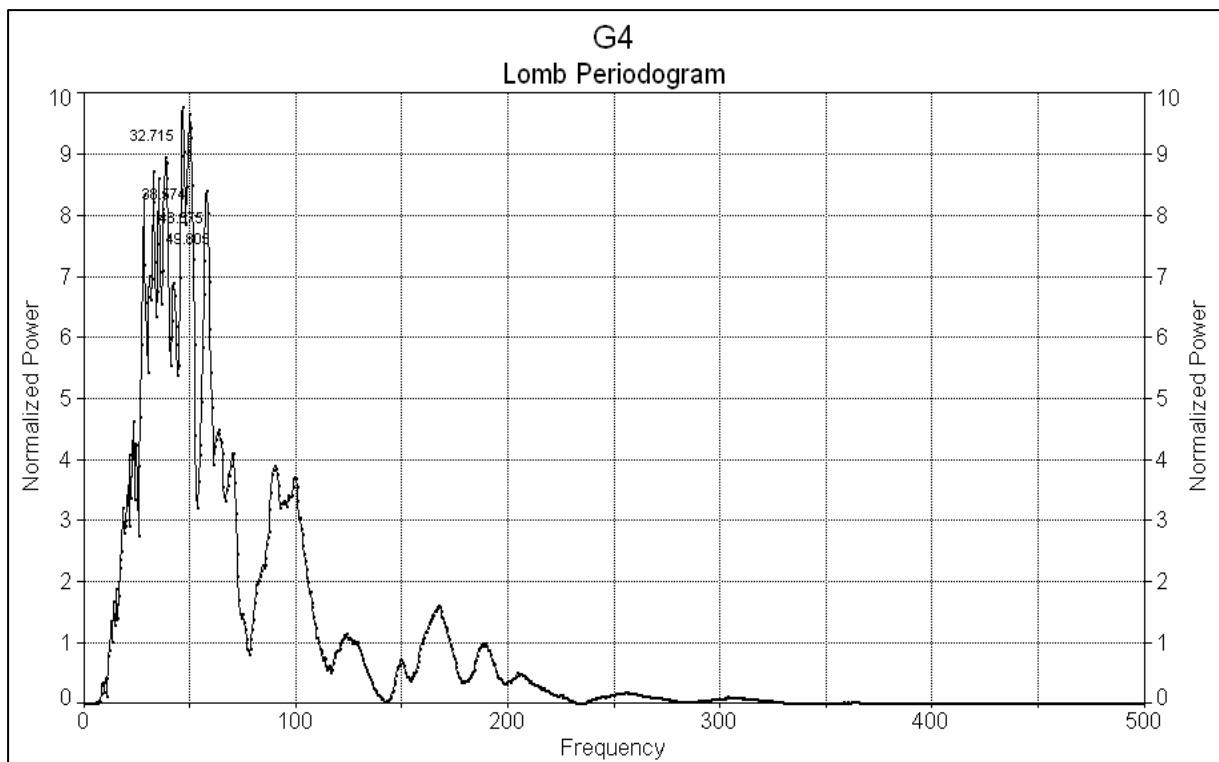
Σχήμα Α.4 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 1.



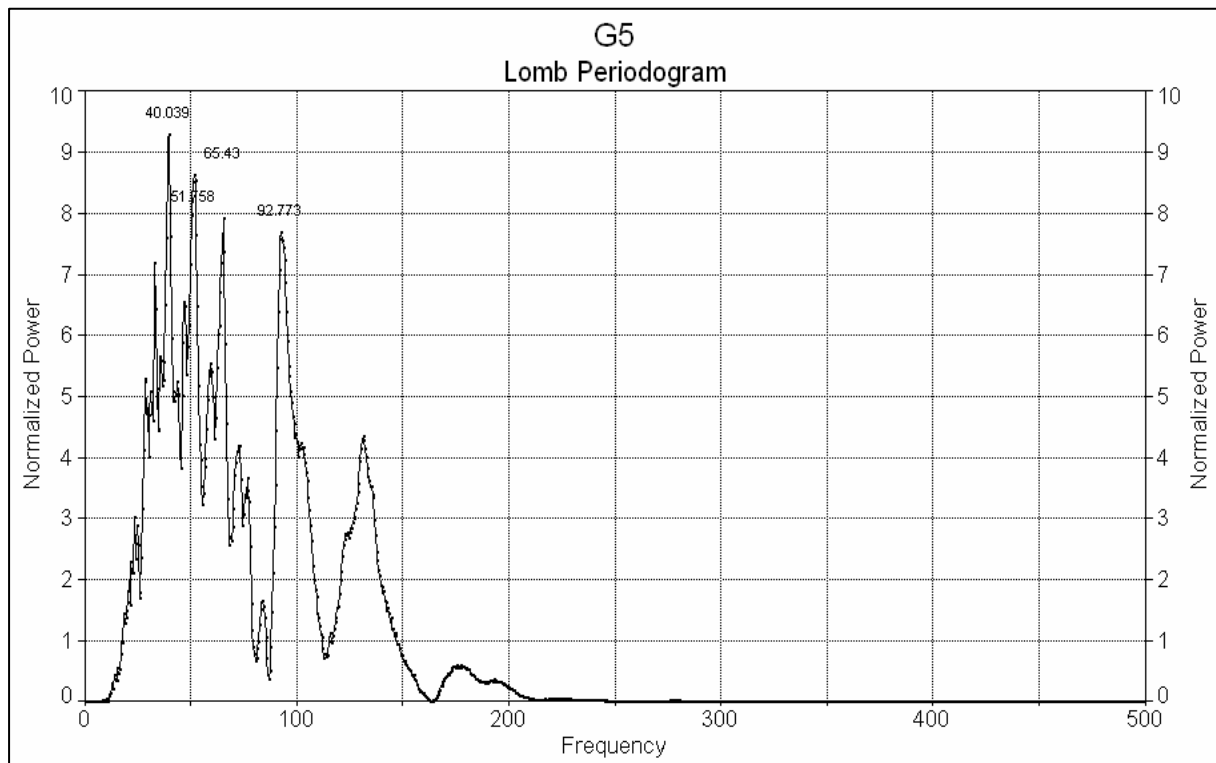
Σχήμα Α.5 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 2.



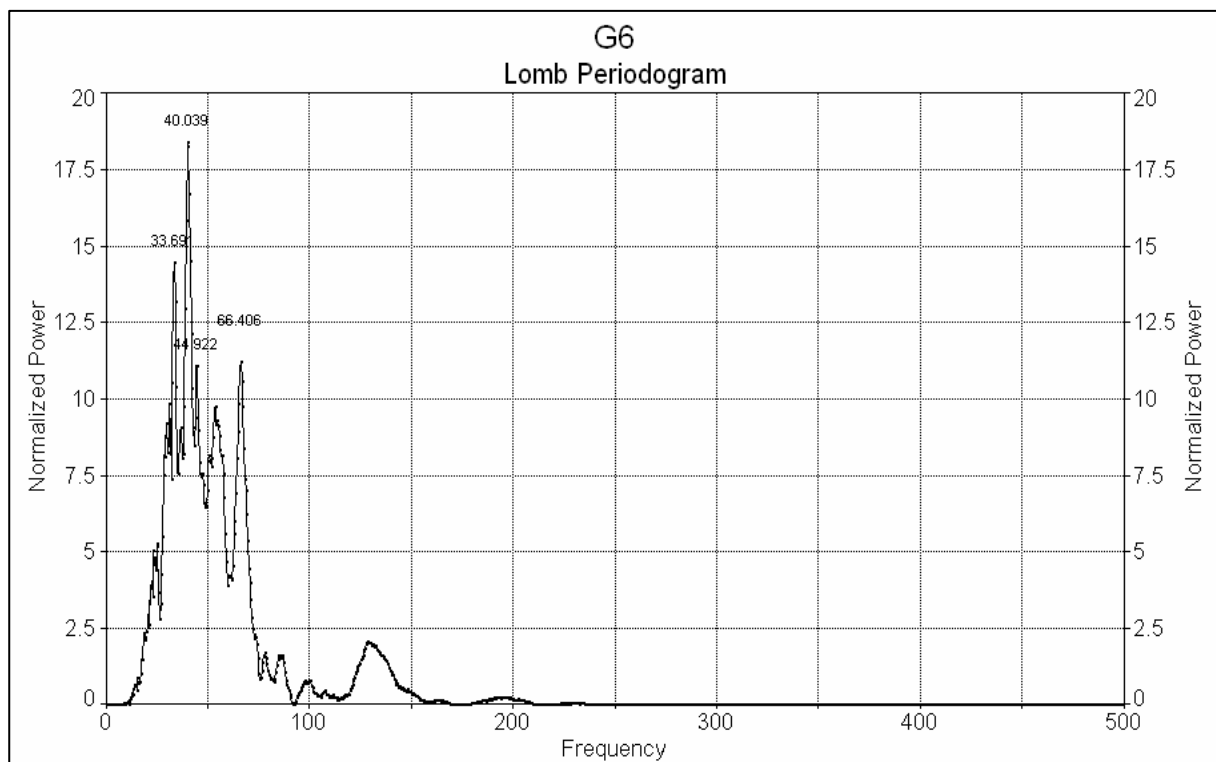
Σχήμα Α.6 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 3.



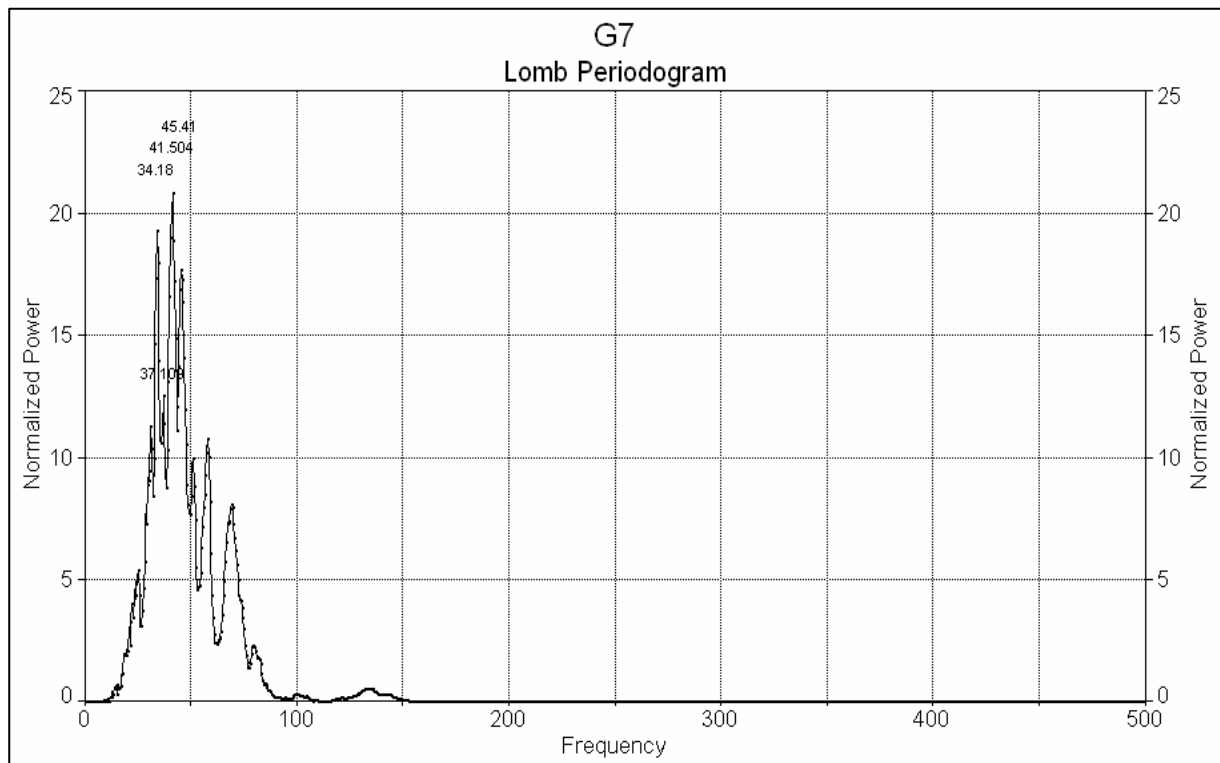
Σχήμα Α.7 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 4.



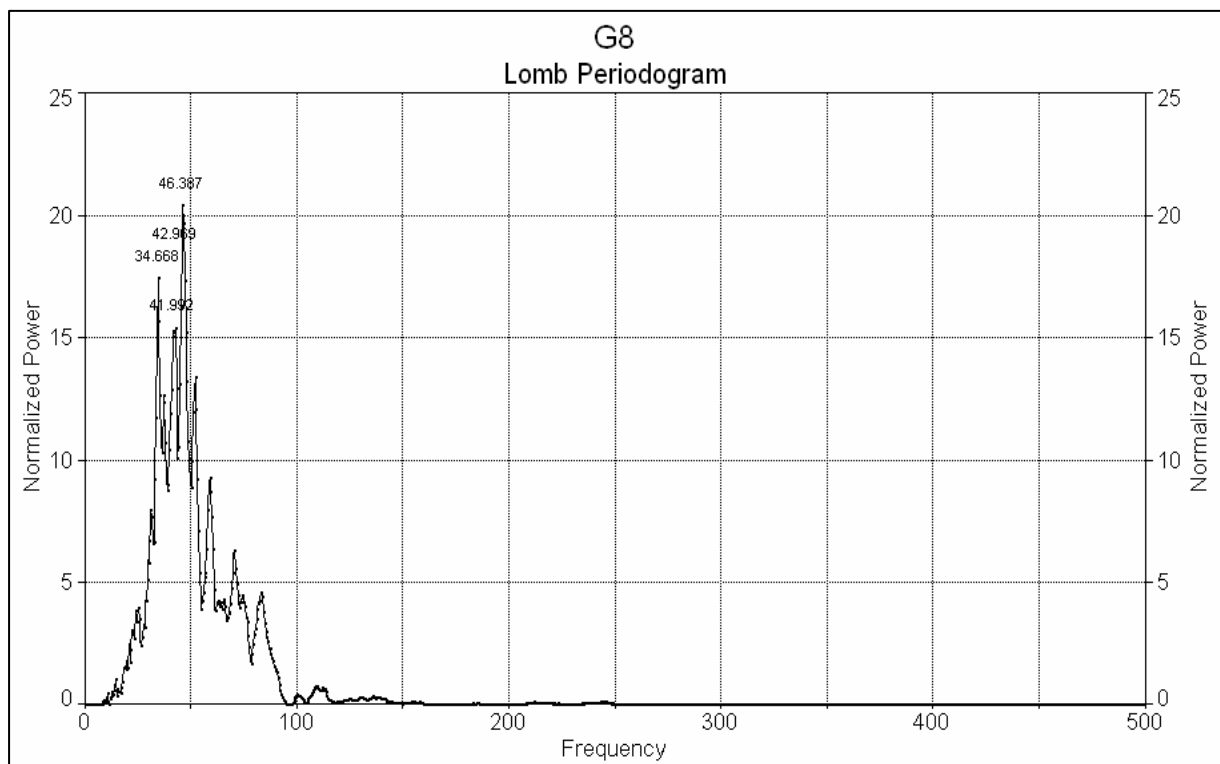
Σχήμα Α.8 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 5.



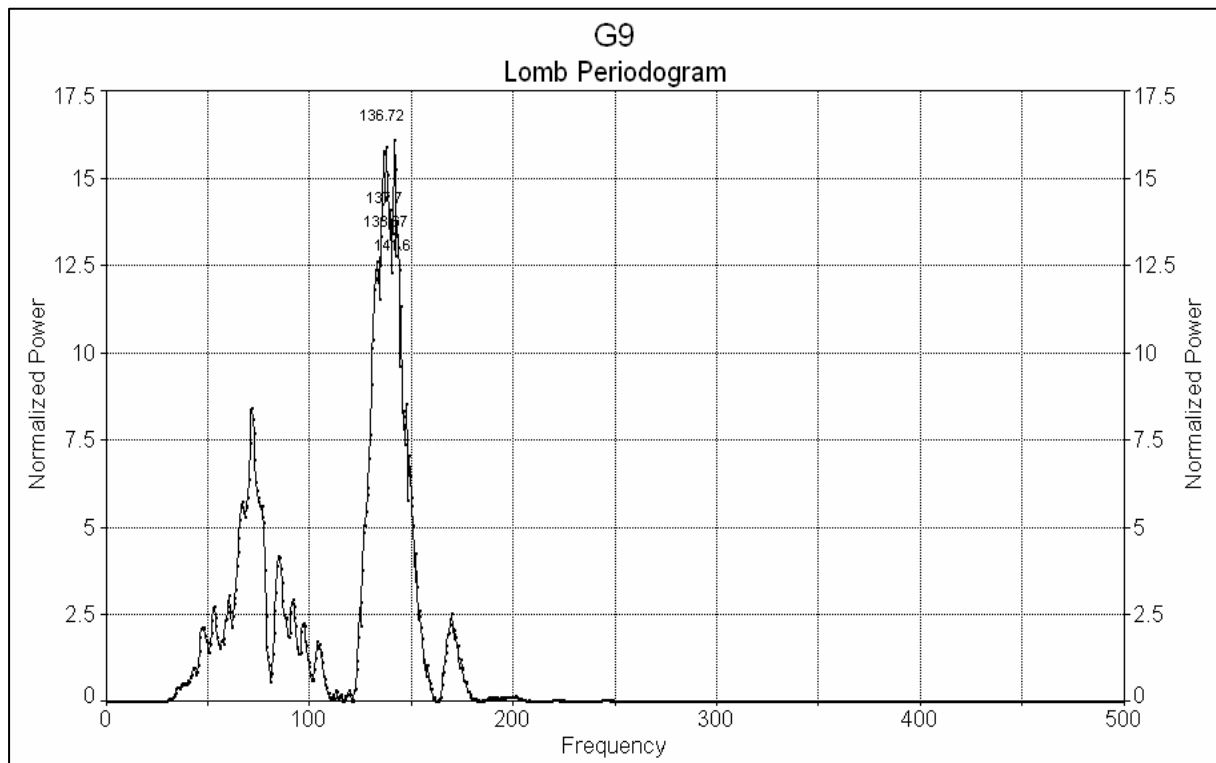
Σχήμα Α.9 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 6.



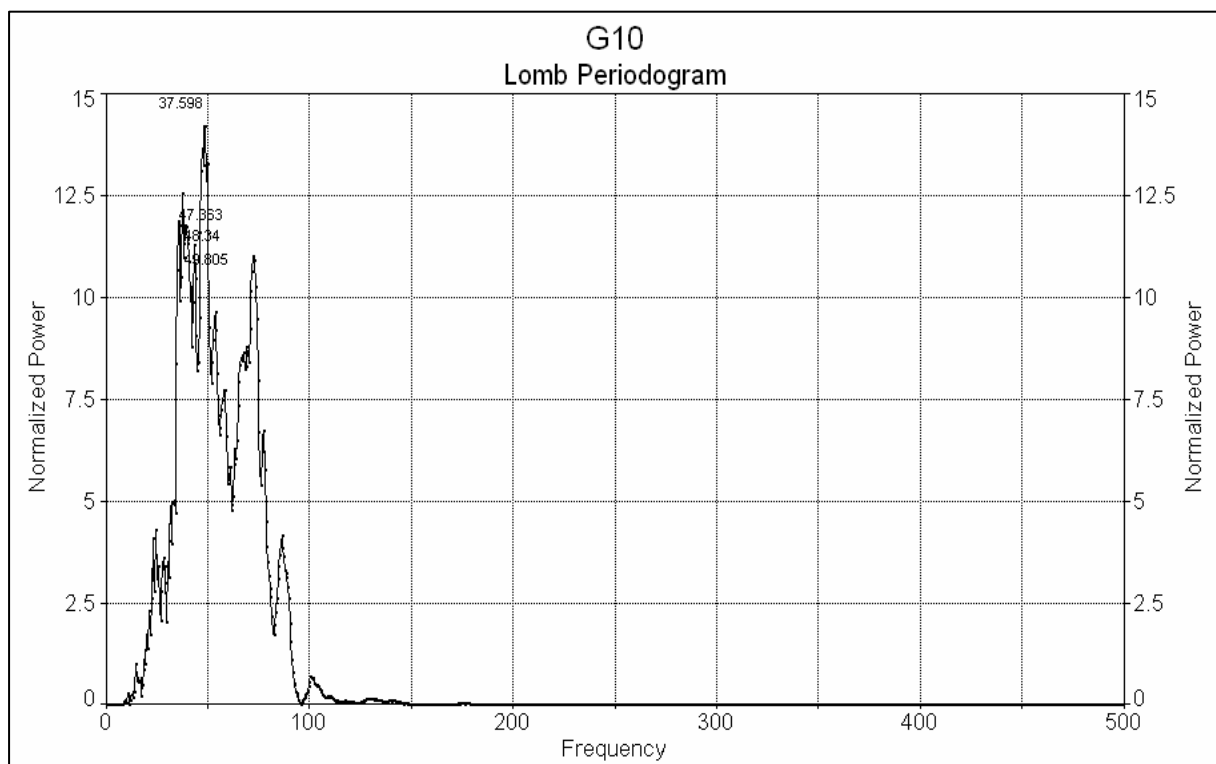
Σχήμα A.10 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 7.



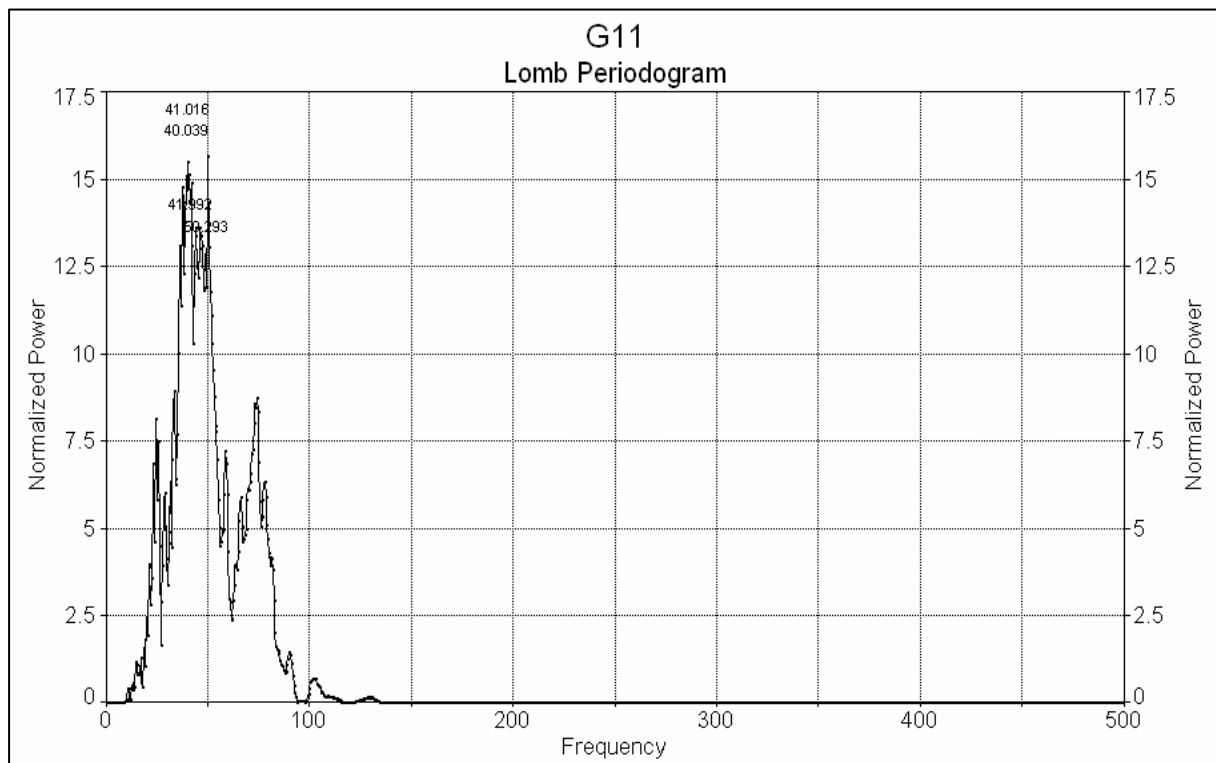
Σχήμα A.11 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 8.



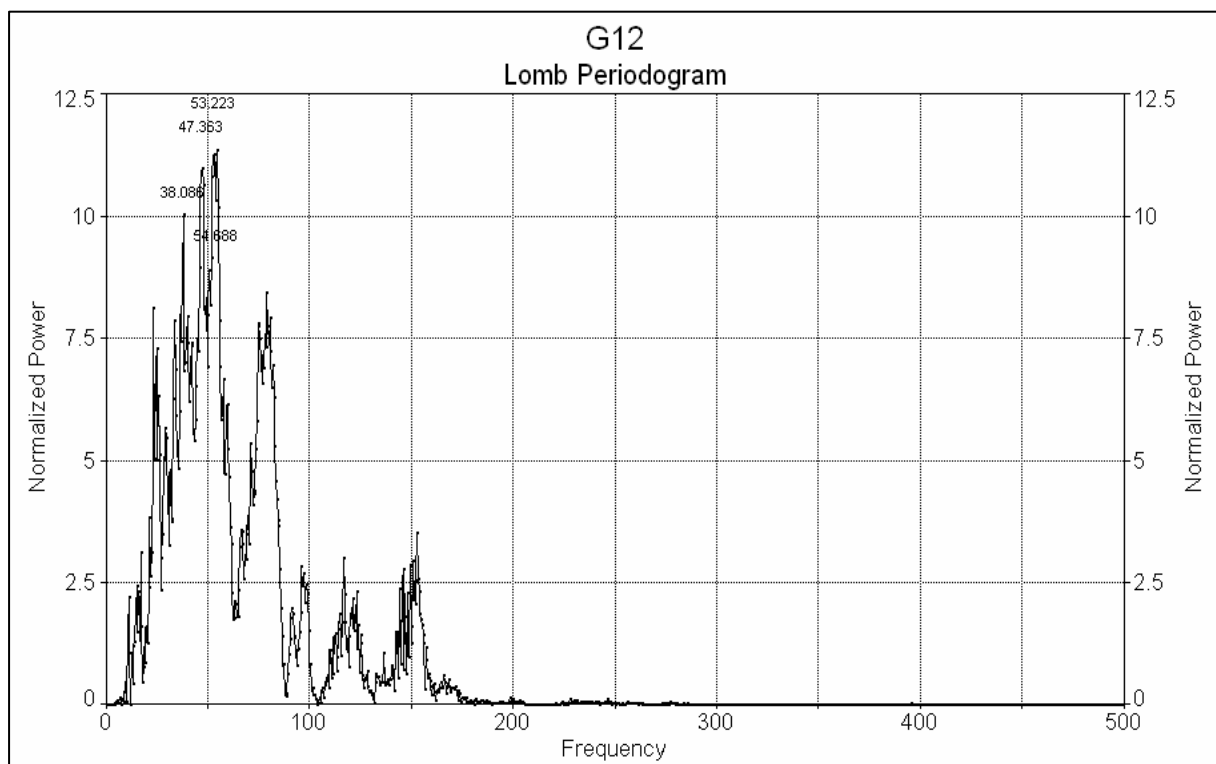
Σχήμα A.12 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 9.



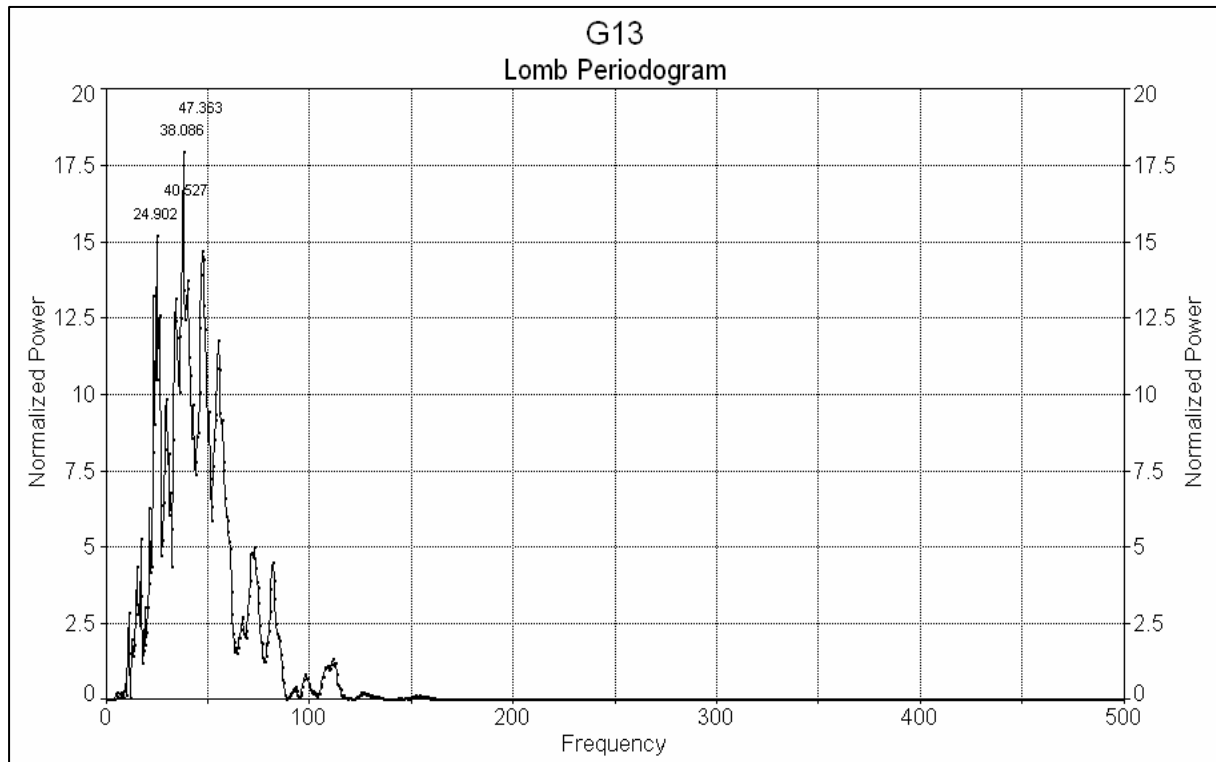
Σχήμα A.13 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 10.



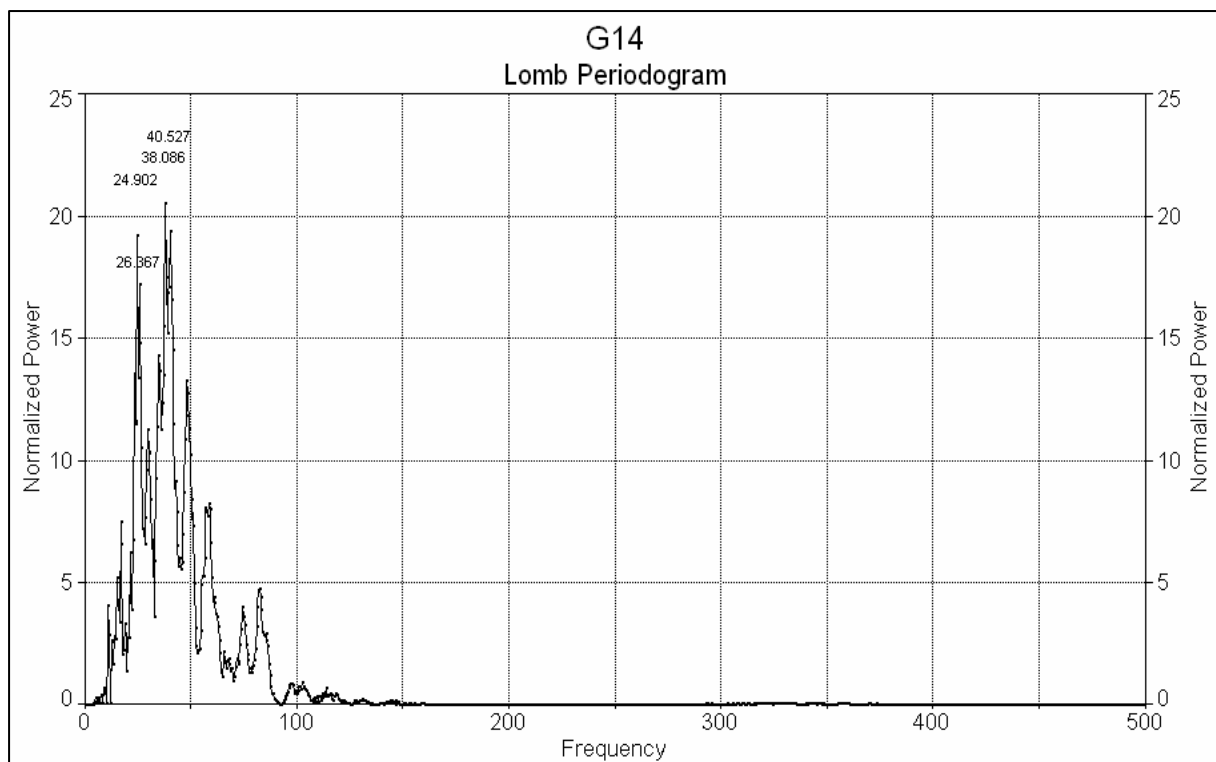
Σχήμα Α.14 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 11.



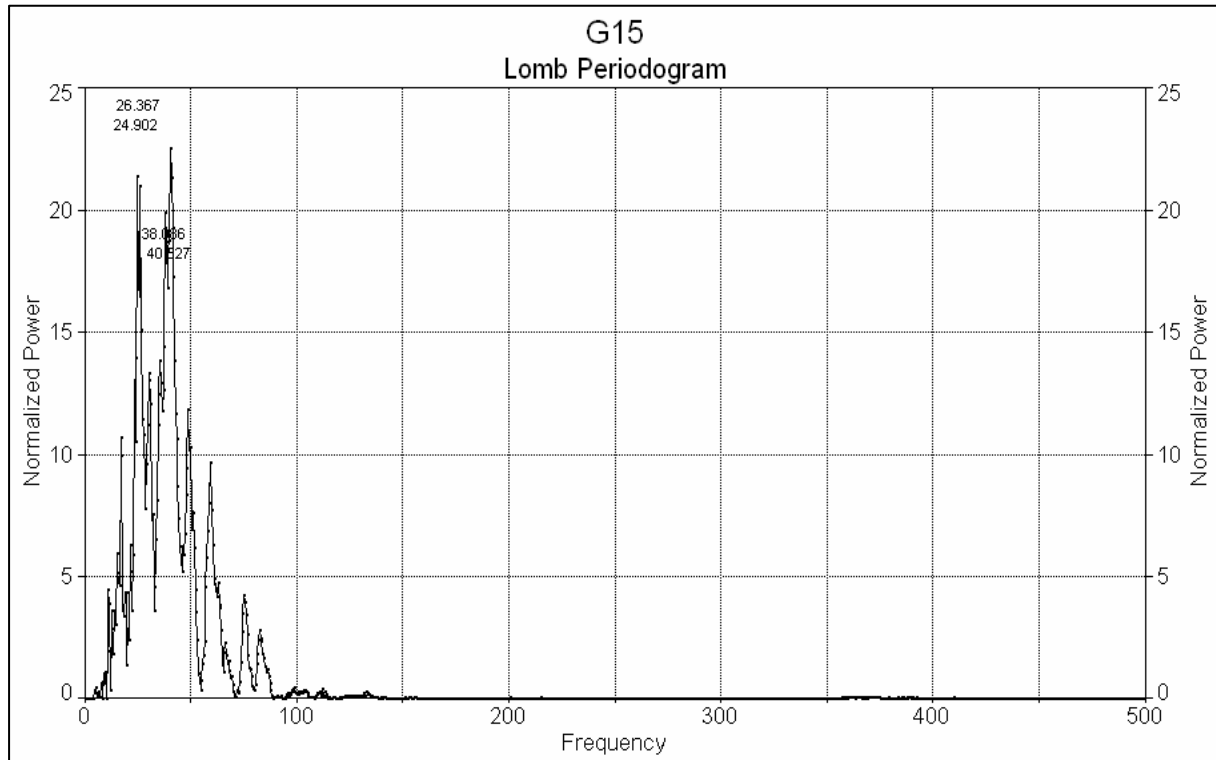
Σχήμα Α.15 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 12.



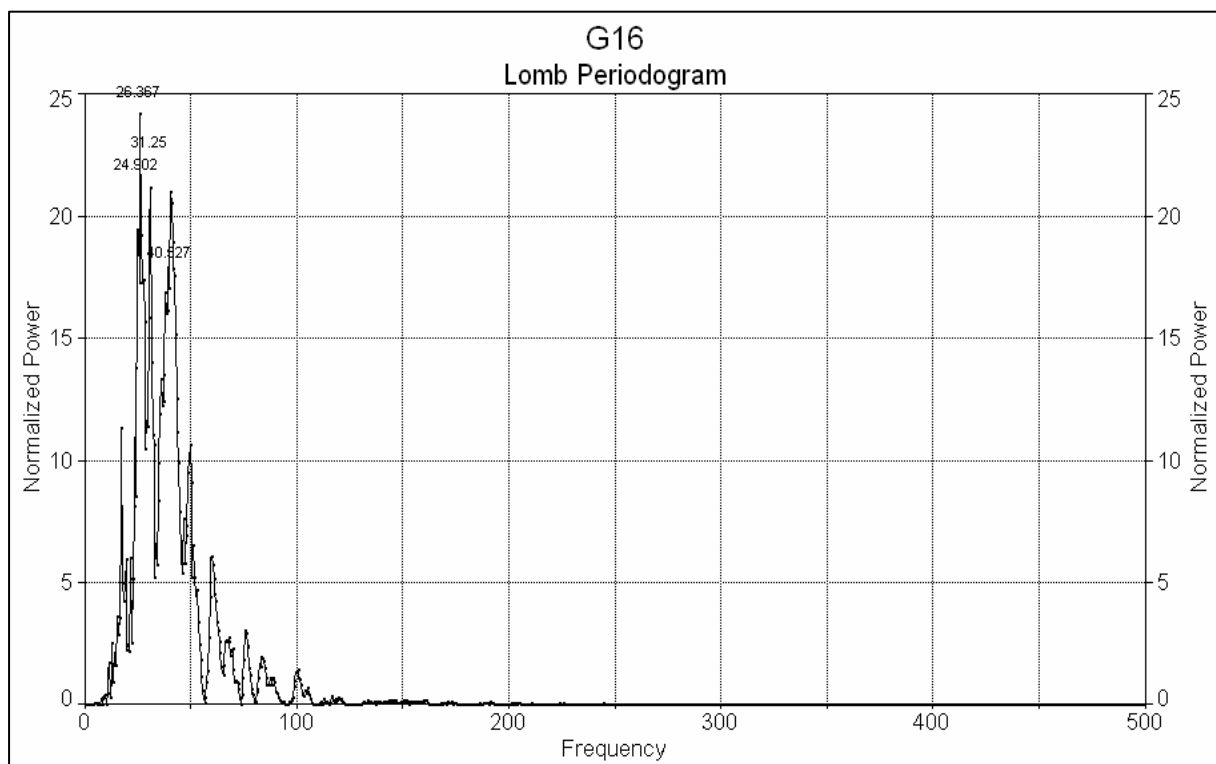
Σχήμα A.16 Περιοδόγραμμα *Lomb*, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 13.



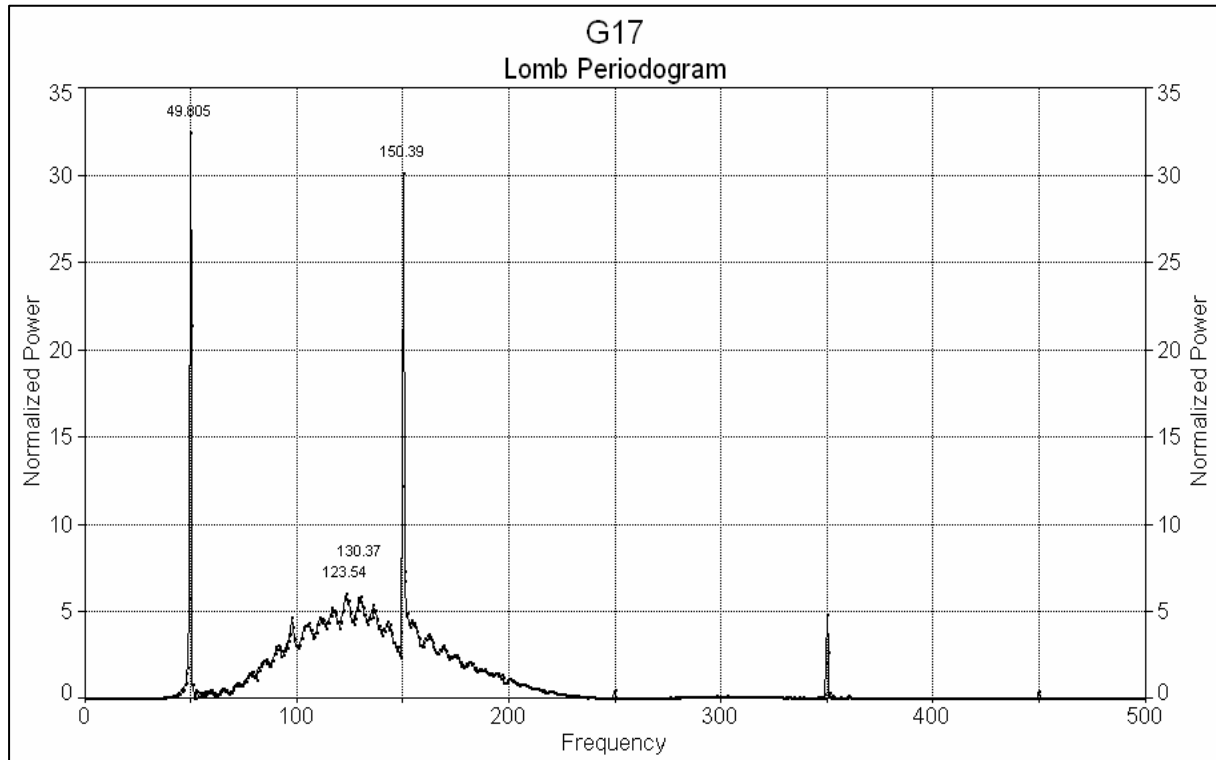
Σχήμα A.17 Περιοδόγραμμα *Lomb*, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 14.



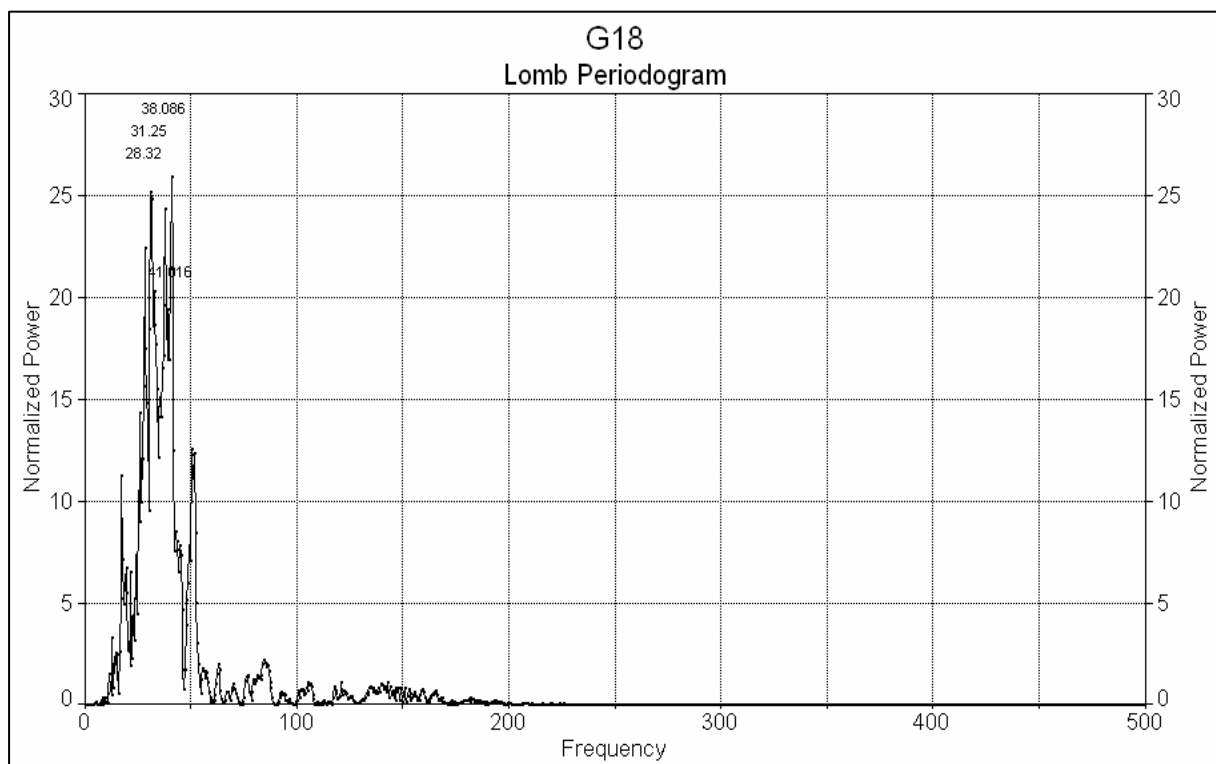
Σχήμα Α.18 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 15.



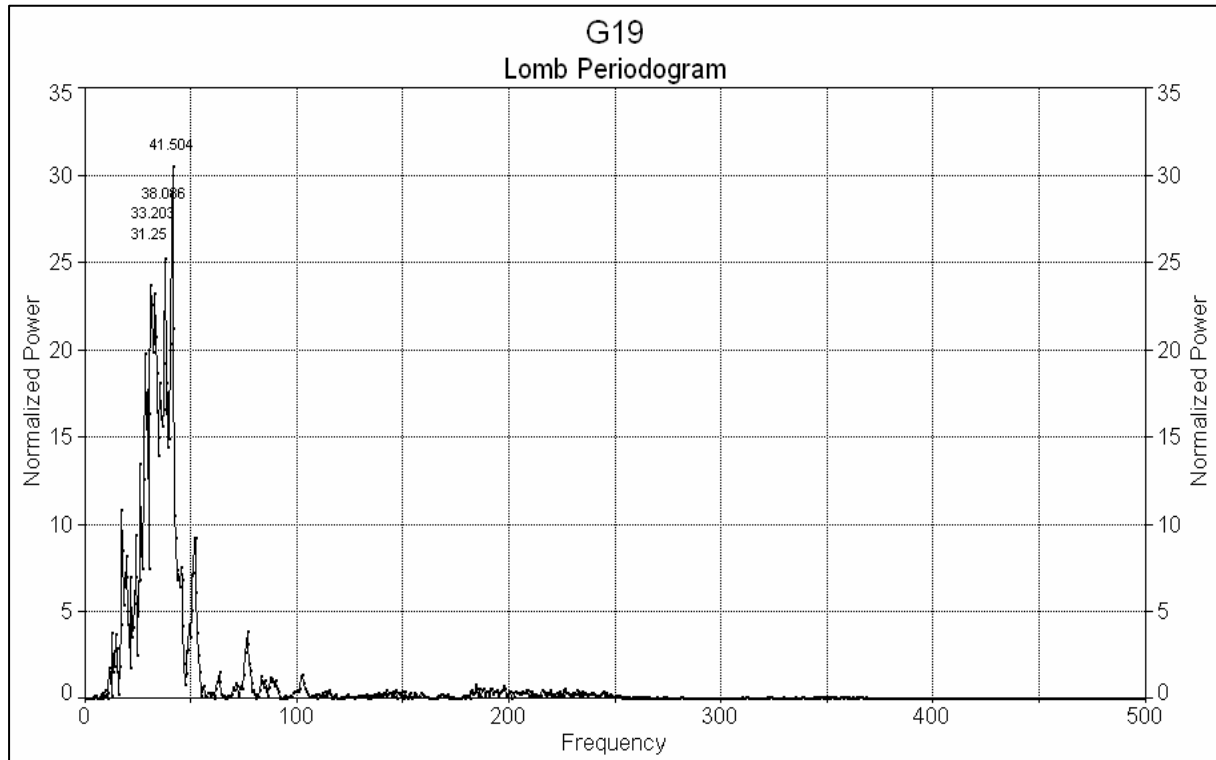
Σχήμα Α.19 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 16.



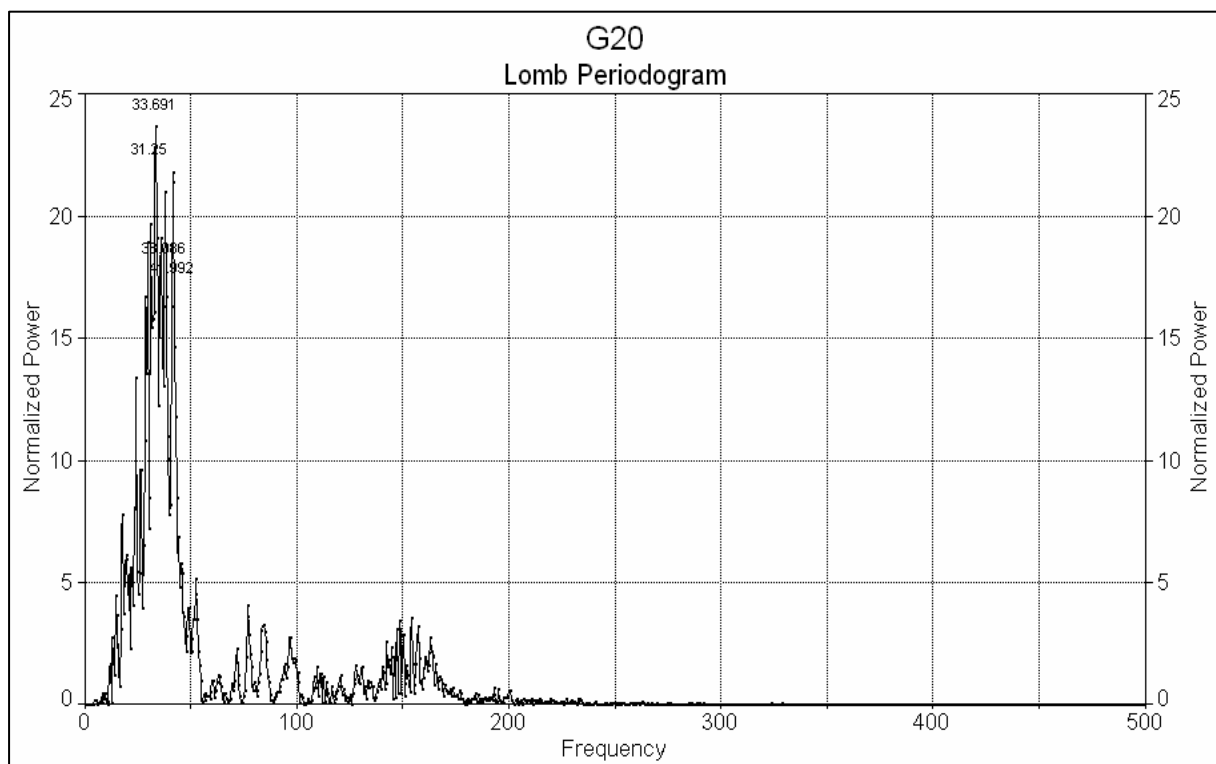
Σχήμα Α.20 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 17.



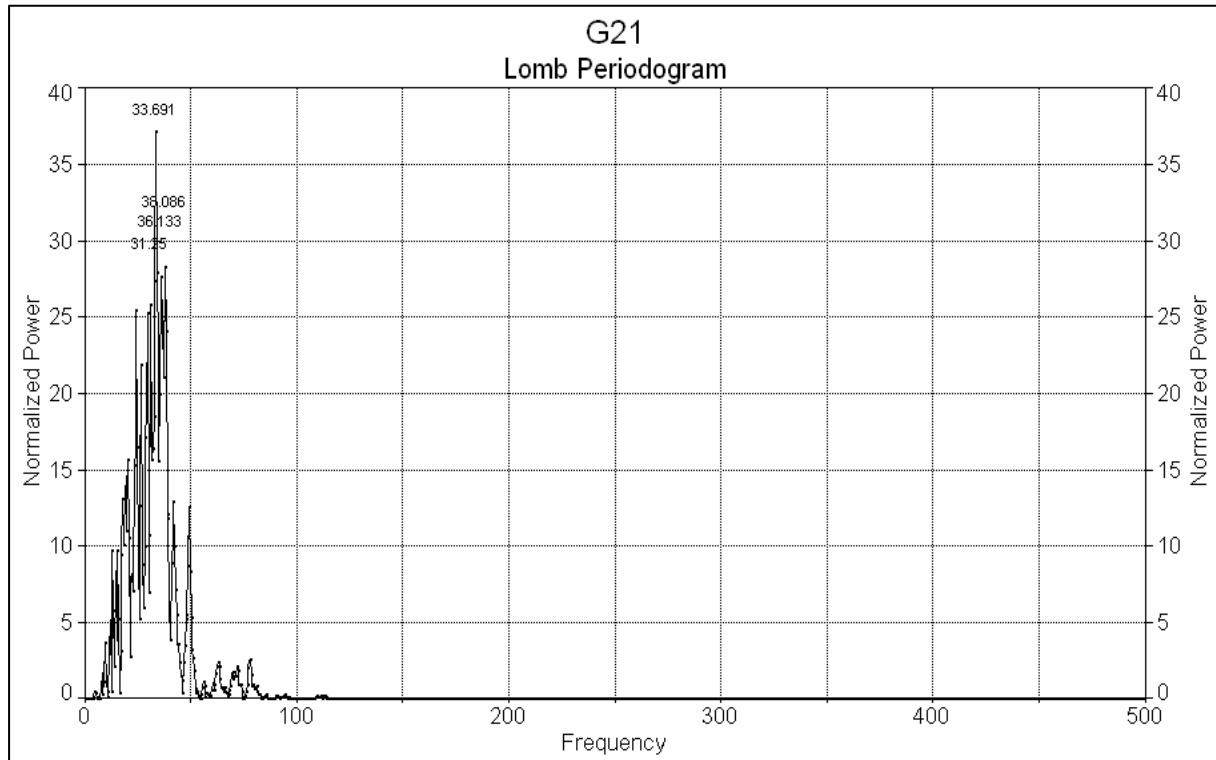
Σχήμα Α.21 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 18.



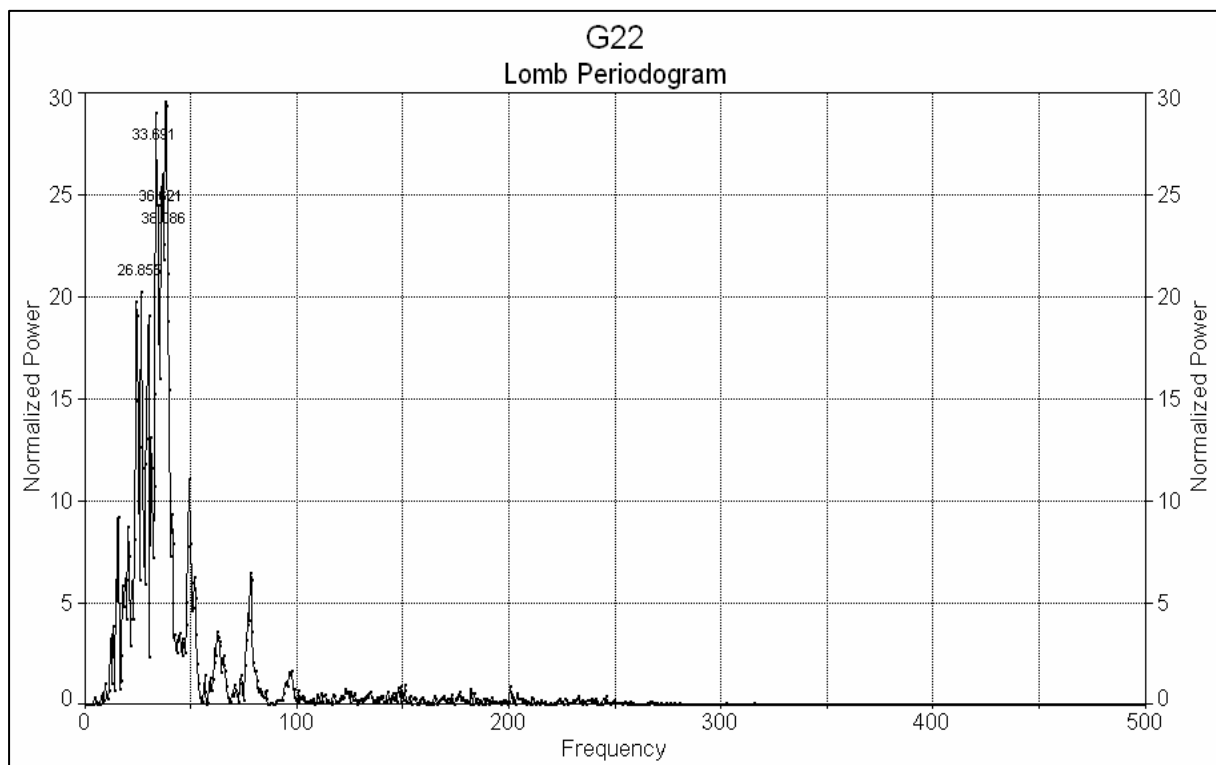
Σχήμα A.22 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 19.



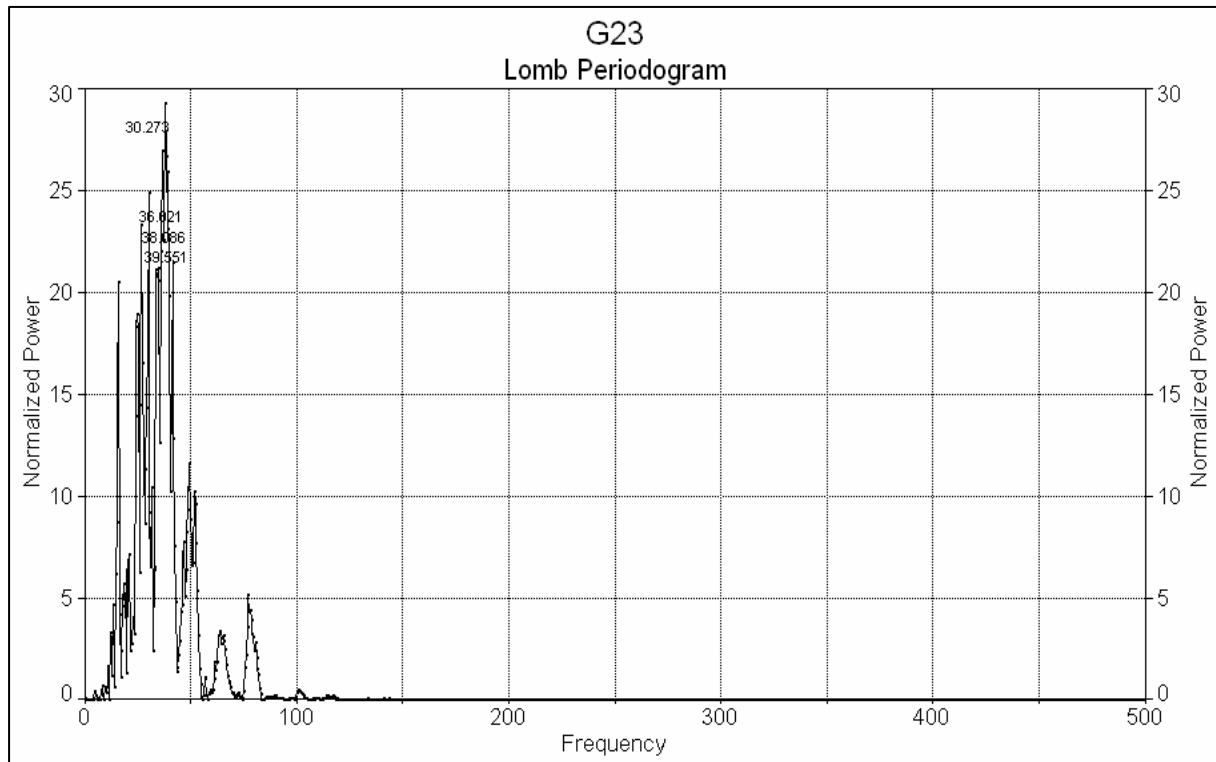
Σχήμα A.23 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 20.



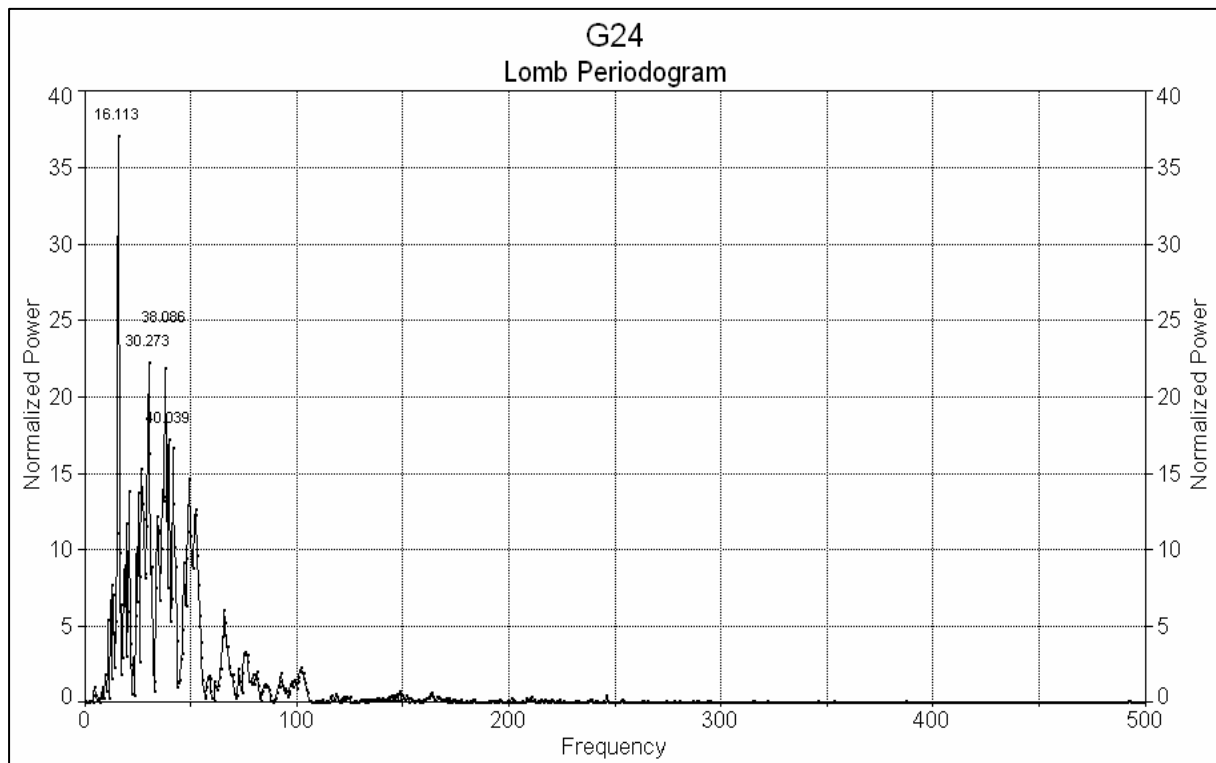
Σχήμα A.24 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 21.



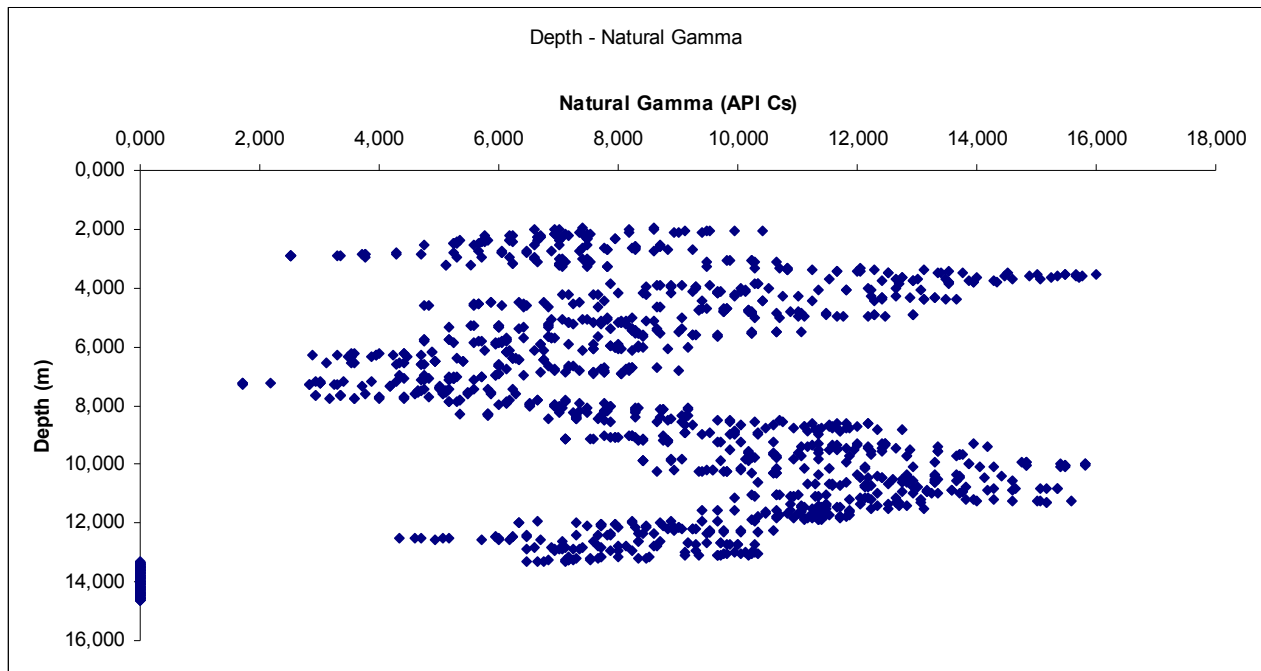
Σχήμα A.25 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 22.



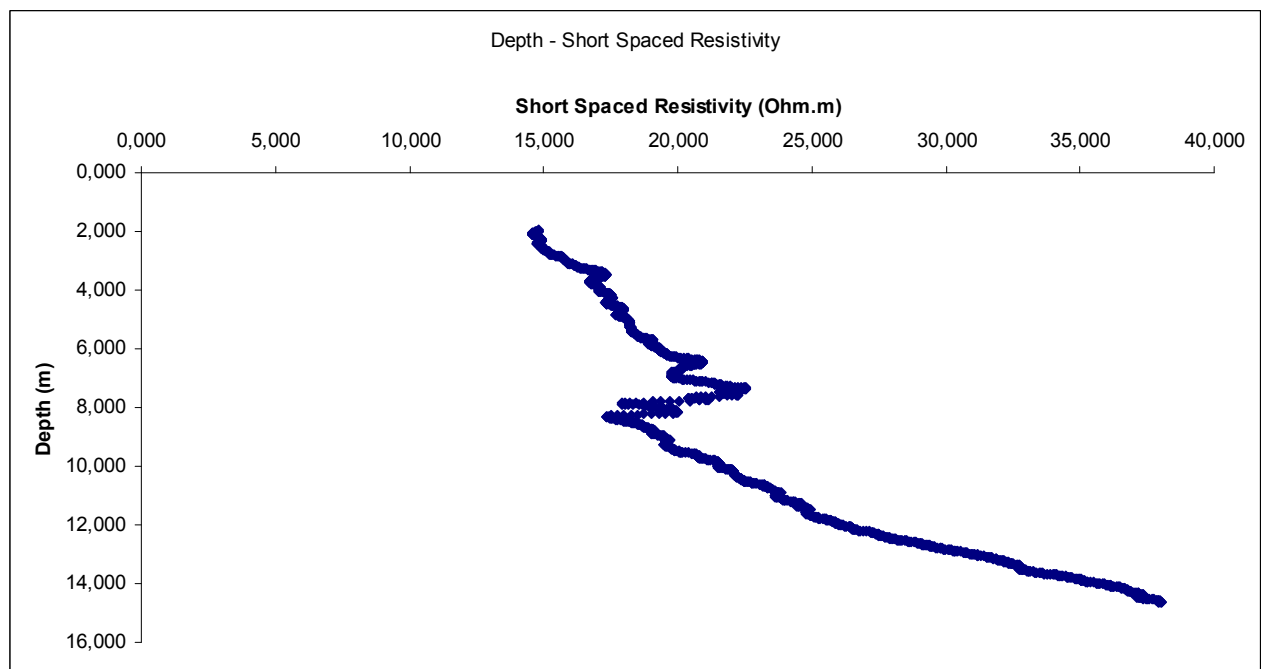
Σχήμα Α.26 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 23.



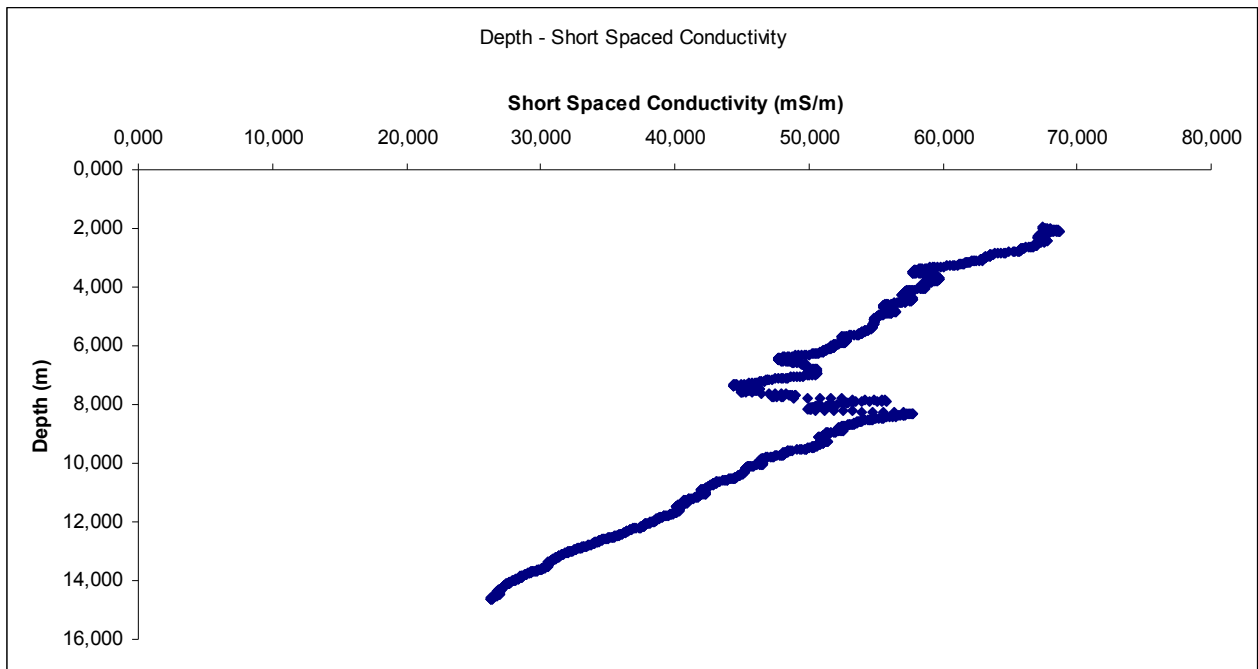
Σχήμα Α.27 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από το Γεώφωνο 24.



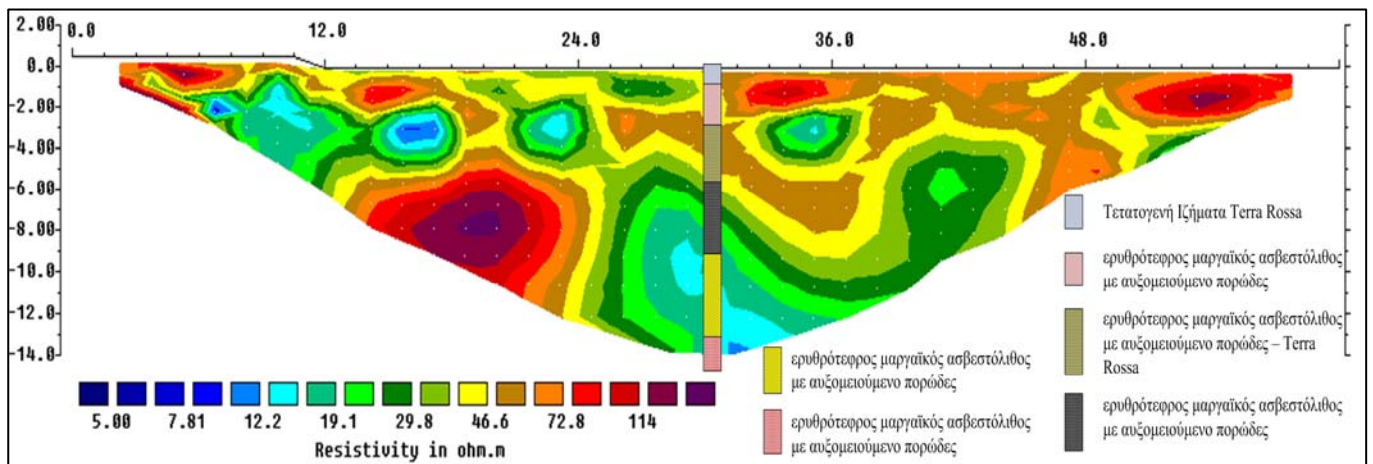
Σχήμα Α.28 Αποτελέσματα Διαγραφιών εντός της Γεώτρησης 2.



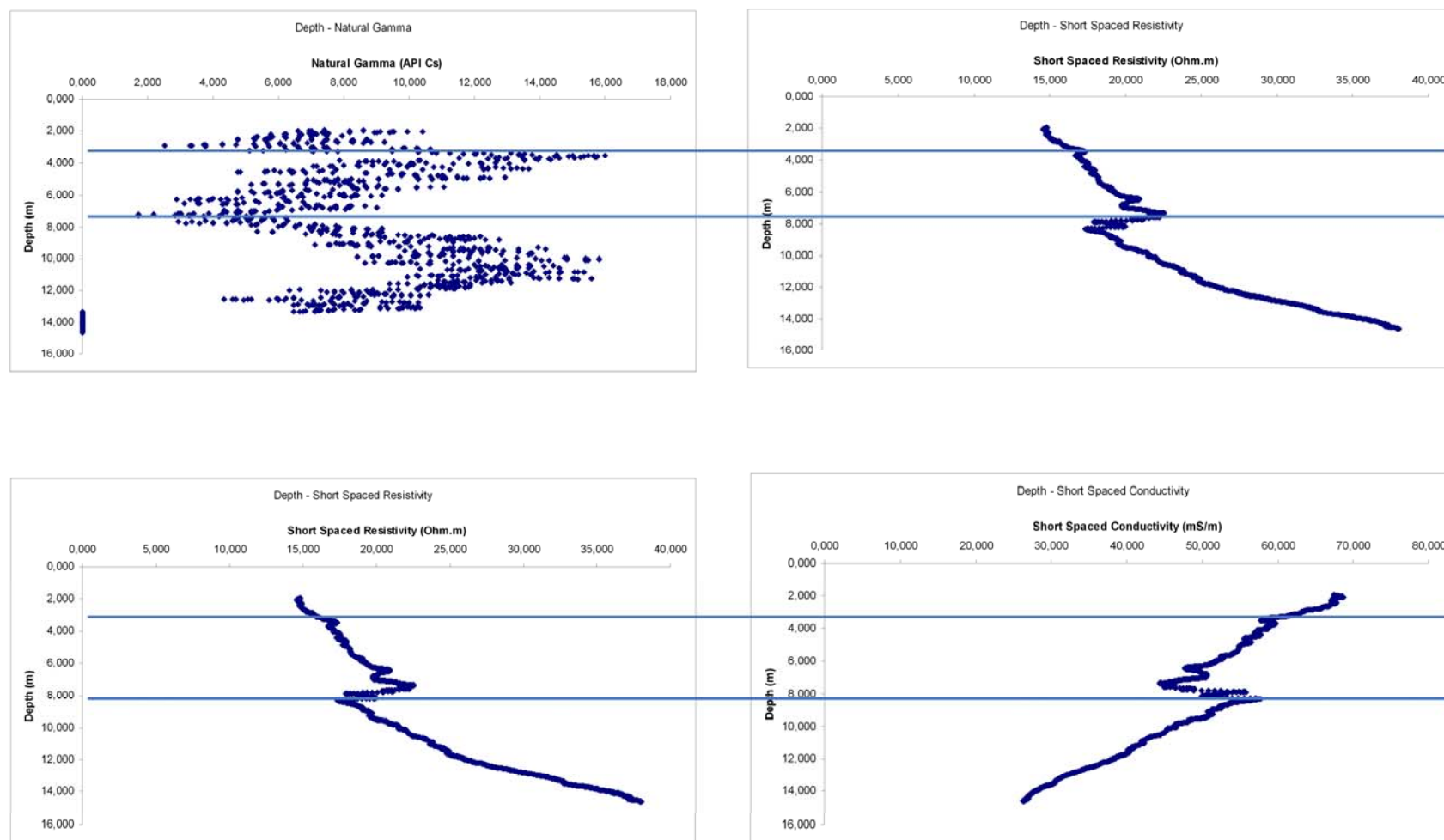
Σχήμα Α.29 Αποτελέσματα Διαγραφιών εντός της Γεώτρησης 2.



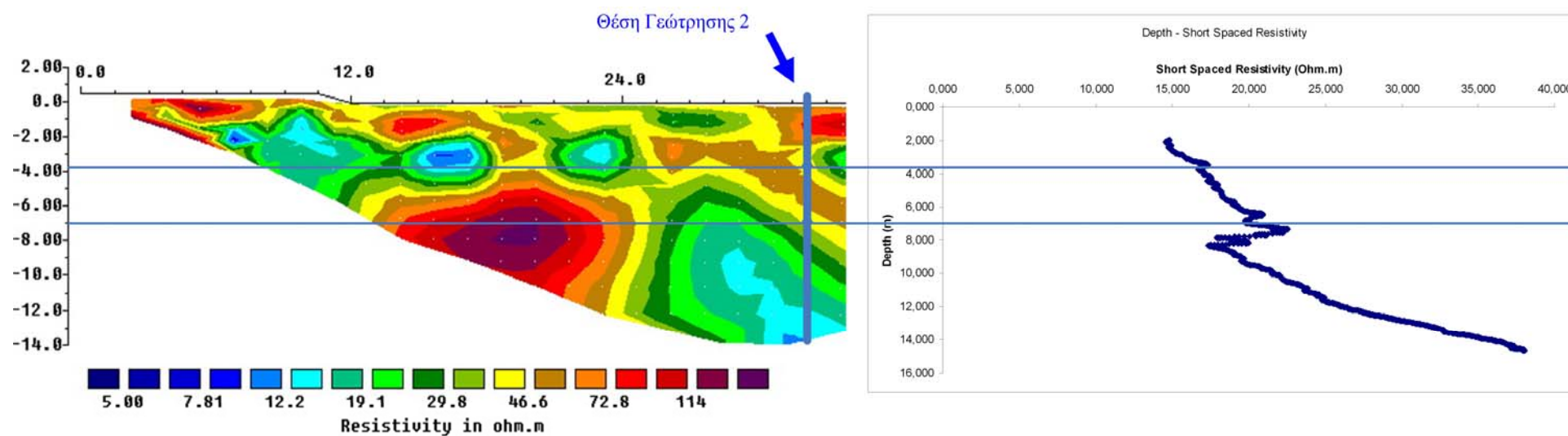
Σχήμα Α.30 Αποτελέσματα Διαγραφιών εντός της Γεώτρησης 2.



Σχήμα Α.31 Προκύπτοντα αποτελέσματα από την γεώτρηση Γ2 σε παράθεση επί της γεωηλεκτρικής τομής.



Σχήμα Α.32 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων διαγραφιών εντός της Γεώτρησης 2.



Σχήμα Α.33 Σύγκριση αποτελεσμάτων διαγραφιών εντός της Γεώτρησης 2, με αποτελέσματα από γεωηλεκτρική τομή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Σχήμα Β.1 Τυπικό Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμίου Ασβεστόλιθου.

Σχήματα Β.2 έως Β.4 Περιοδογράμματα Lomb, σημάτων λαμβανομένων από δοκίμιο Ασβεστόλιθου (υπ' αριθ. 1, 2, 3).

Σχήμα Β.5 Τυπικό Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμίου Αλφά.

Σχήματα Β.6 έως Β.8 Περιοδογράμματα Lomb, σημάτων λαμβανομένων από δοκίμιο Αλφά (υπ' αριθ. 2, 3, 5).

Σχήμα Β.9 Τυπικό Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμίου Σκληρής.

Σχήματα Β.10 έως Β.12 Περιοδογράμματα Lomb, σημάτων λαμβανομένων από δοκίμιο Σκληρής (υπ' αριθ. 1, 4, 5).

Σχήμα Β.13 Τυπικό Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμίου Γόρτυνας.

Σχήματα Β.14 έως Β.16. Περιοδογράμματα Lomb, σημάτων λαμβανομένων από δοκίμιο Γόρτυνας (υπ' αριθ. 1, 5, 7).

Σχήμα Β.17 Τυπικό Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμίου Διονύσου.

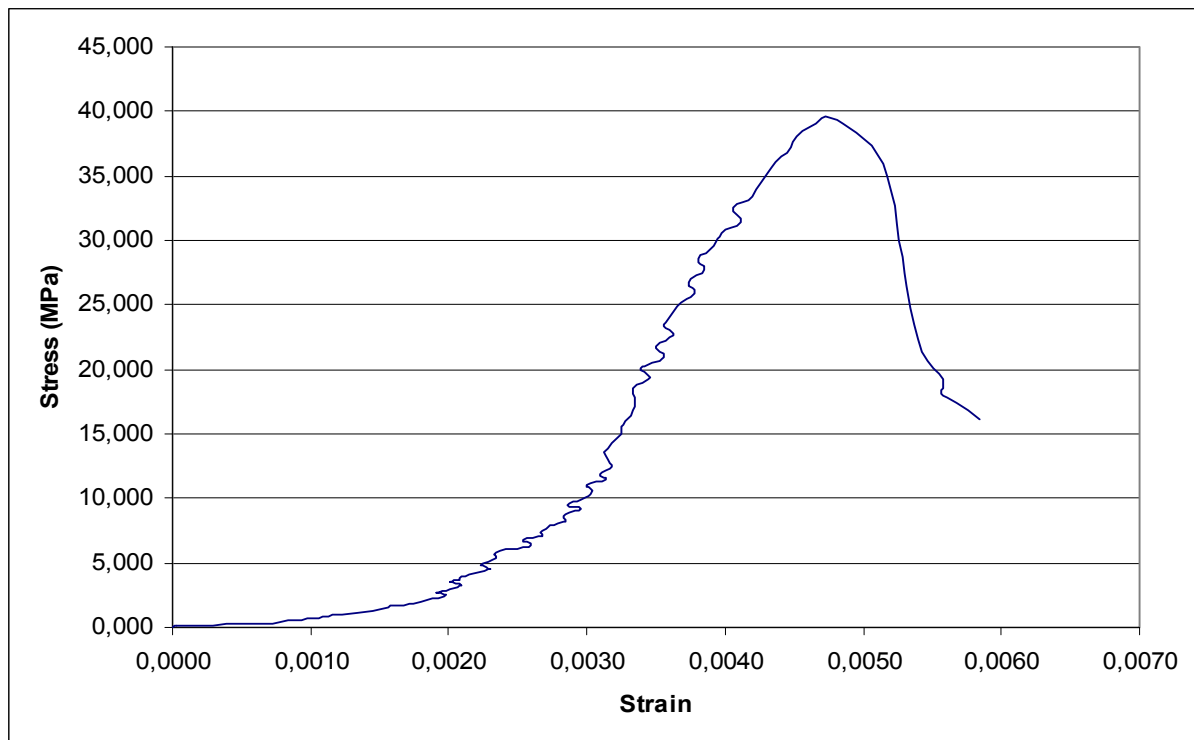
Σχήματα Β.18 έως Β.20 Περιοδογράμματα Lomb, σημάτων λαμβανομένων από δοκίμιο Διονύσου (υπ' αριθ. 41, 45, 47).

Σχήμα Β.21 Τυπικό Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμίου Νάξου.

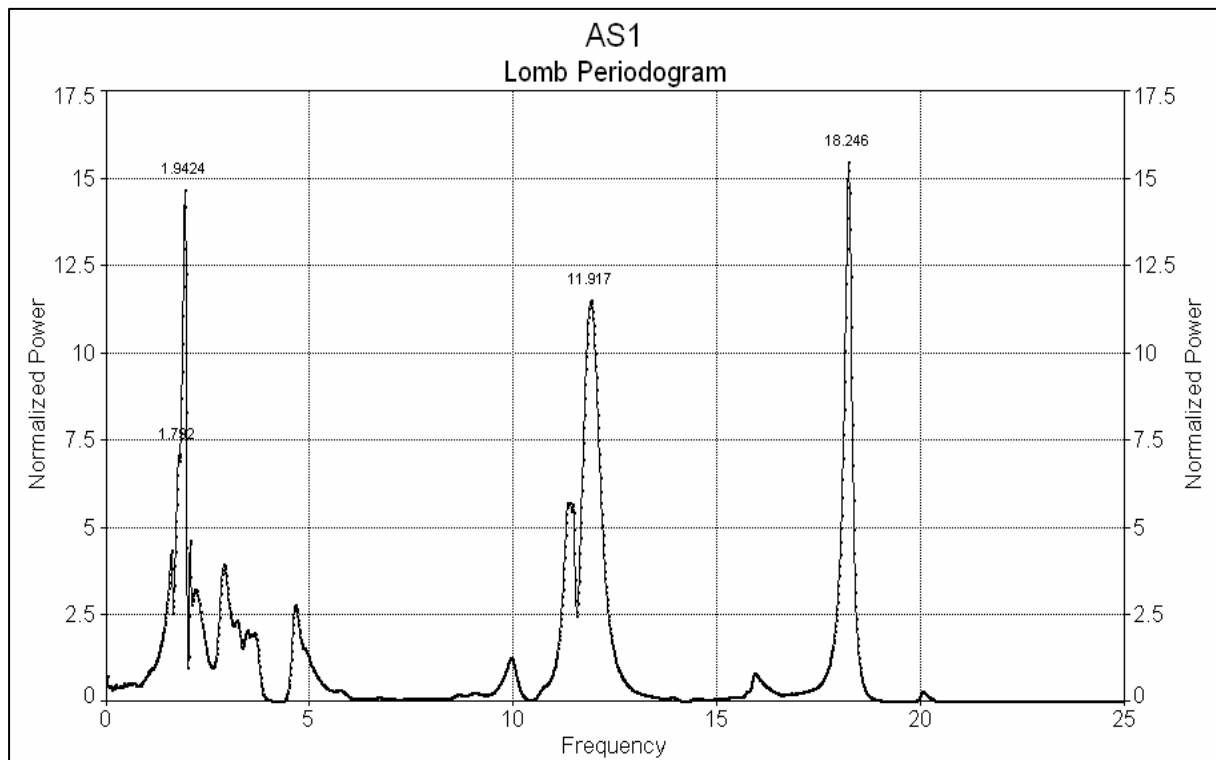
Σχήματα Β.22 έως Β.24 Περιοδογράμματα Lomb, σημάτων λαμβανομένων από δοκίμιο Νάξου (υπ' αριθ. 31, 35, 37).

Σχήμα Β.25 Τυπικό Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμίου Γρανίτη.

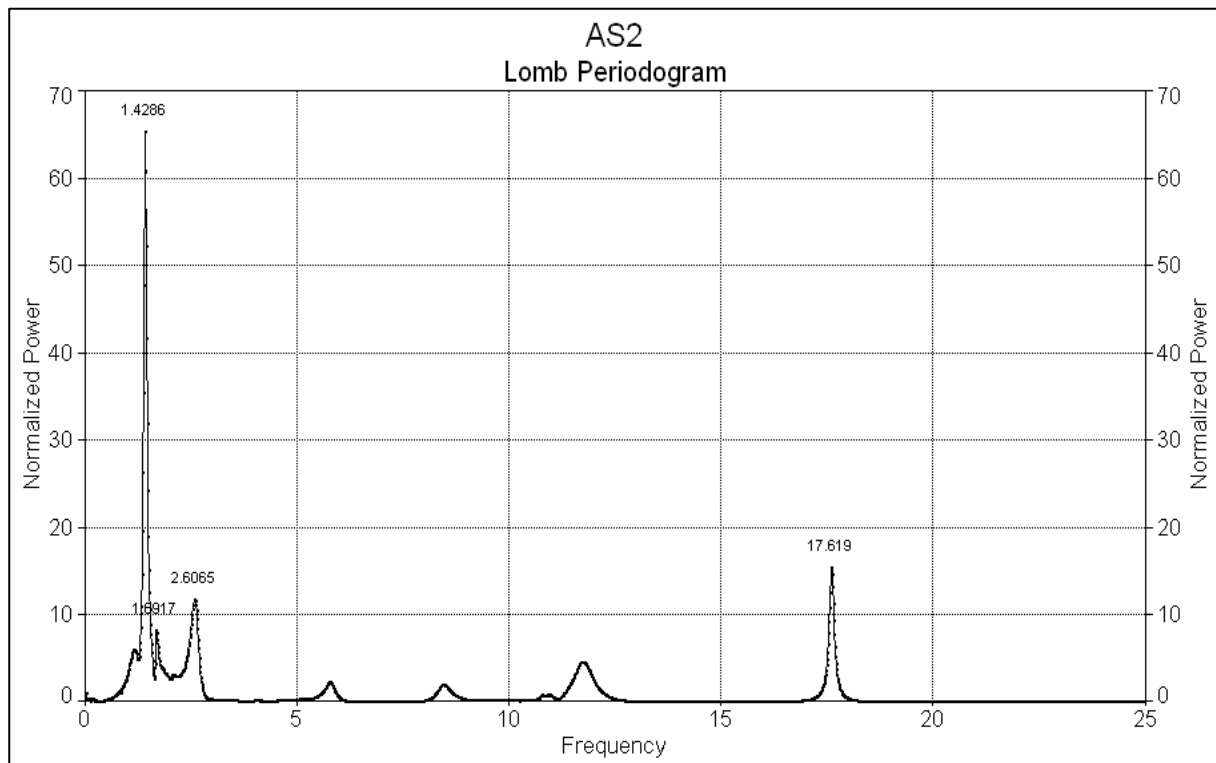
Σχήματα Β.26 έως Β.28 Περιοδογράμματα Lomb, σημάτων λαμβανομένων από δοκίμιο Νάξου (υπ' αριθ. 15, 21, 23).

Επεξεργασία Δοκιμών Ασβεστόλιθου

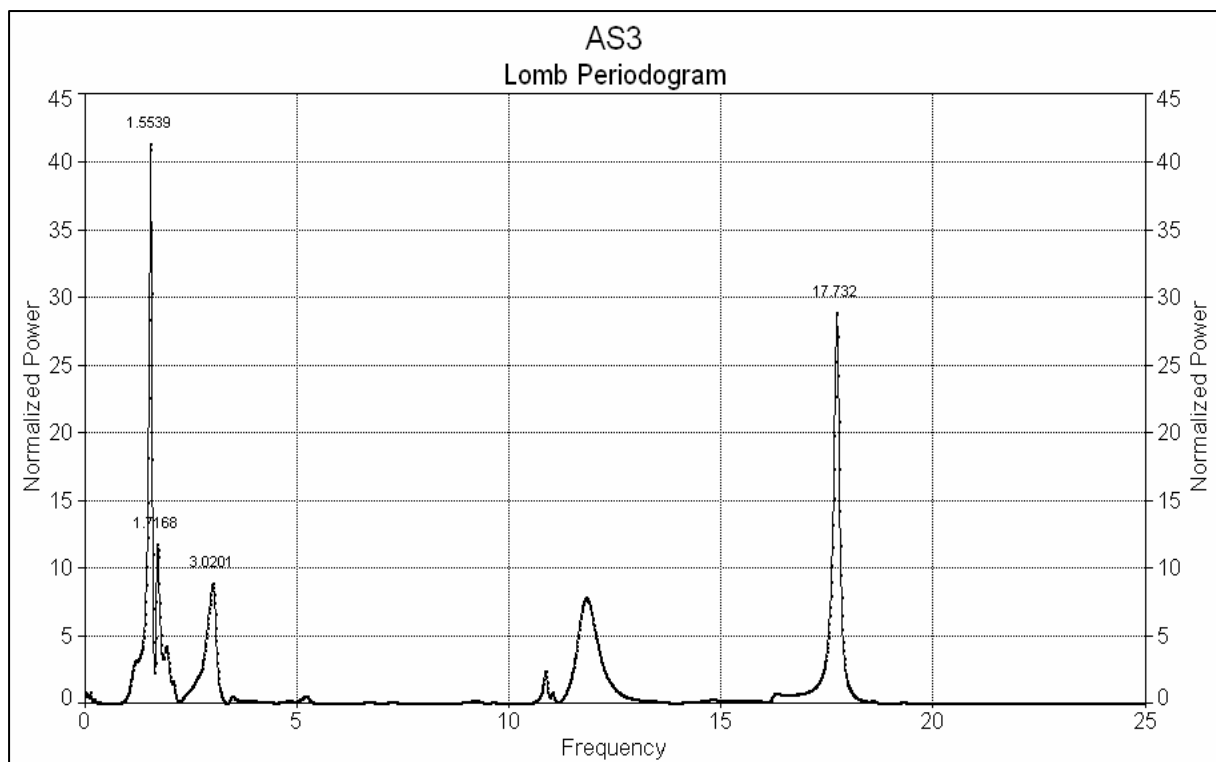
Σχήμα Β.1 Τυπικό Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων δοκιμίου Ασβεστόλιθου.



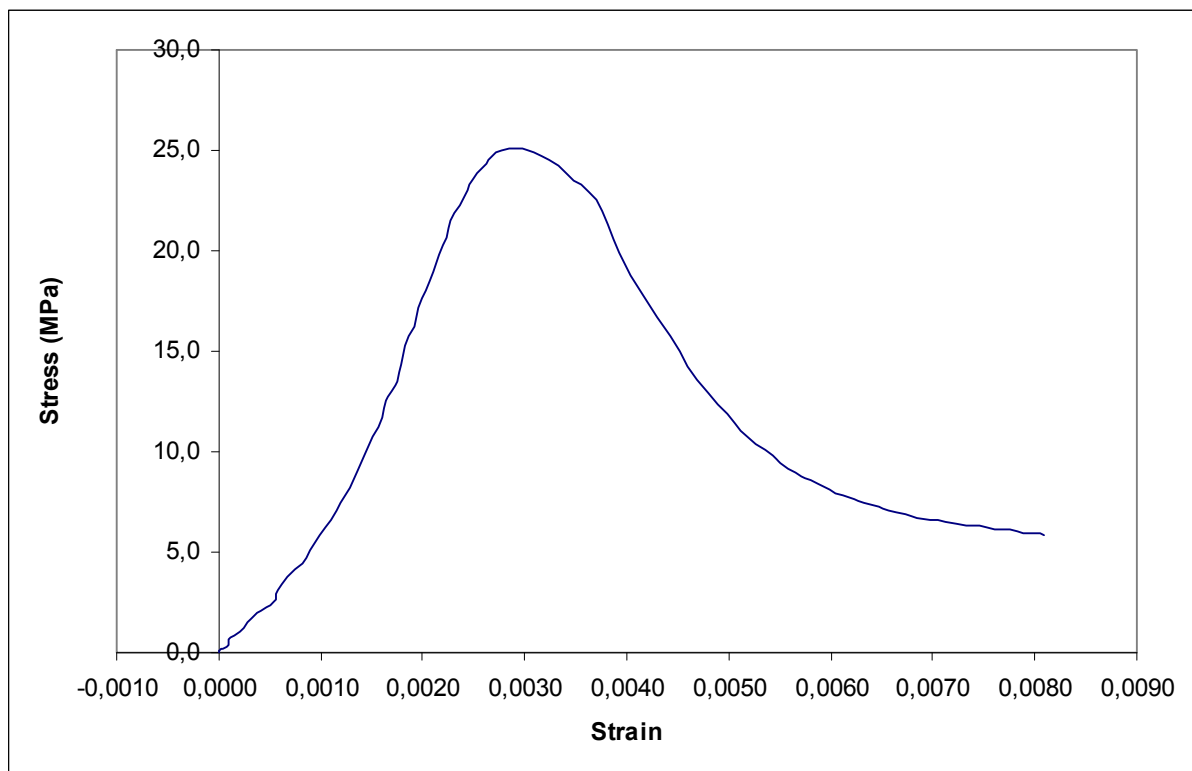
Σχήμα Β.2 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Ασβεστόλιθου (υπ' αριθ. 1).



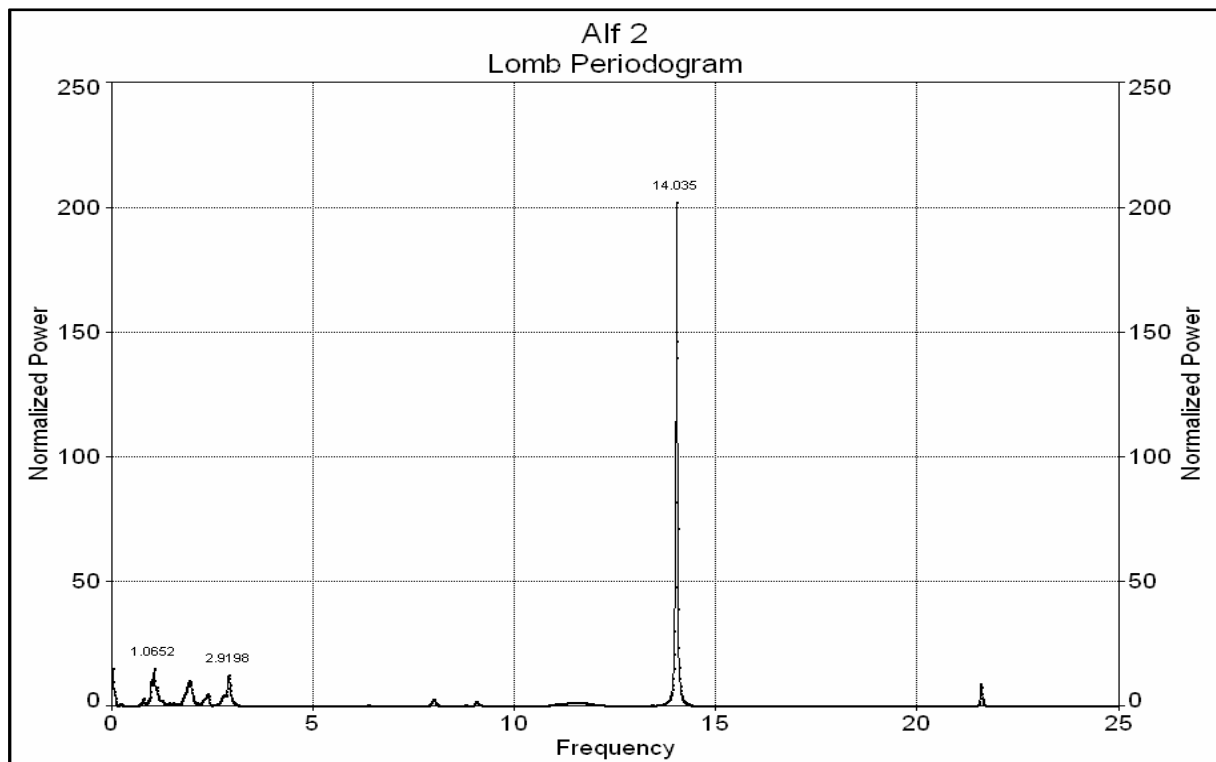
Σχήμα Β.3 Περιοδόγραμμα *Lomb*, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Ασβεστόλιθου (υπ' αριθ. 2).



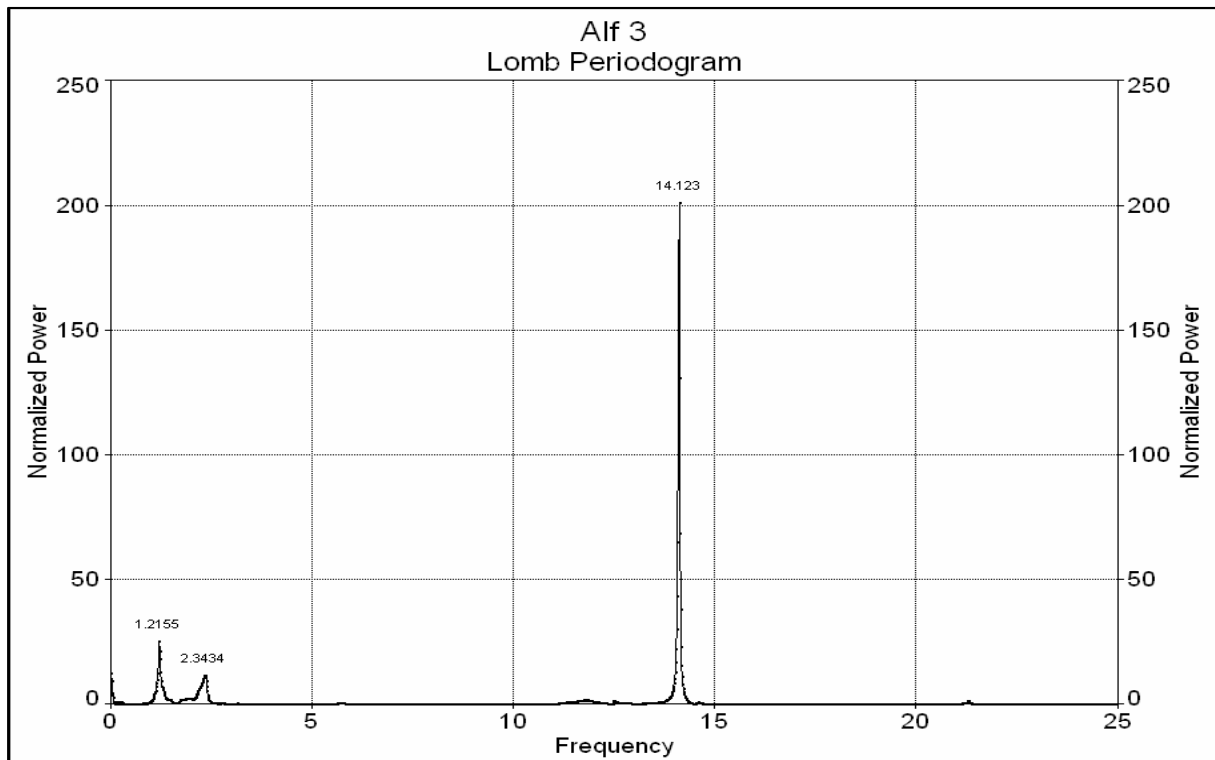
Σχήμα Β.4 Περιοδόγραμμα *Lomb*, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Ασβεστόλιθου (υπ' αριθ. 3).

Επεξεργασία Δοκιμίων Αλφά

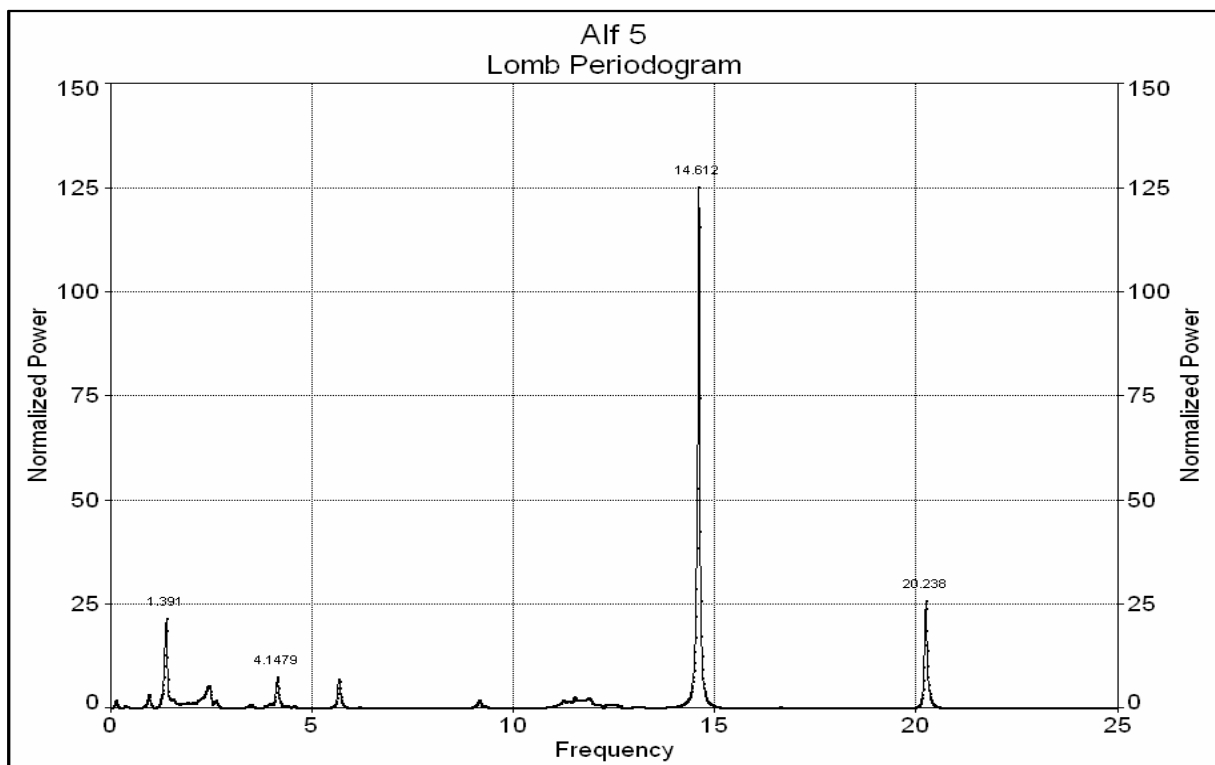
Σχήμα Β.5 Τυπικό Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων δοκιμίου Αλφά.



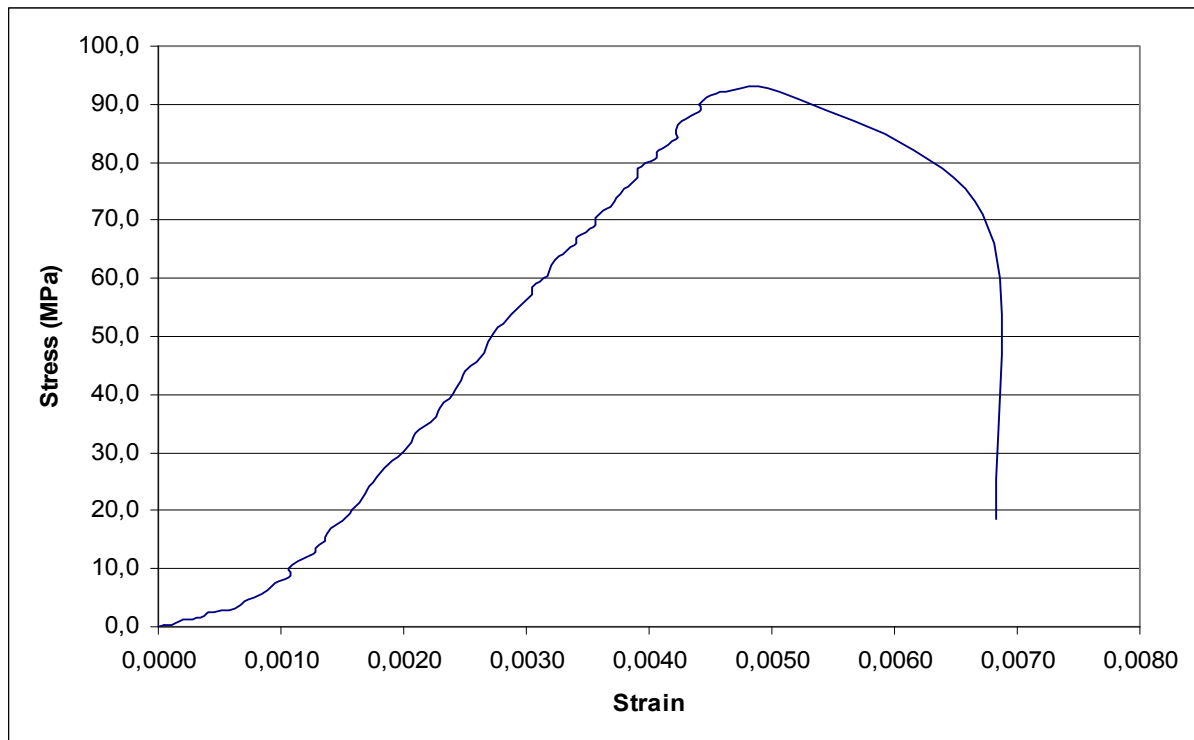
Σχήμα Β.6 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Αλφά (υπ' αριθ. 2).



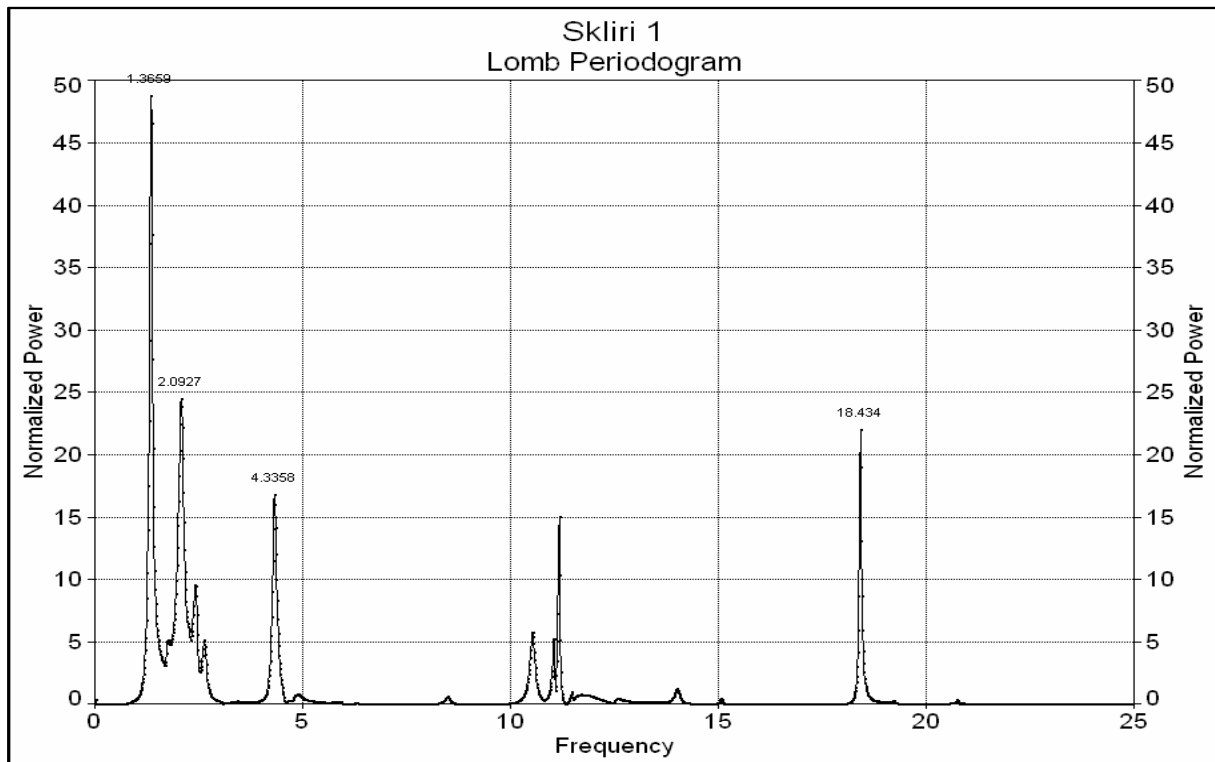
Σχήμα Β.7 Περιοδόγραμμα *Lomb*, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Αλφά (υπ' αριθ. 3).



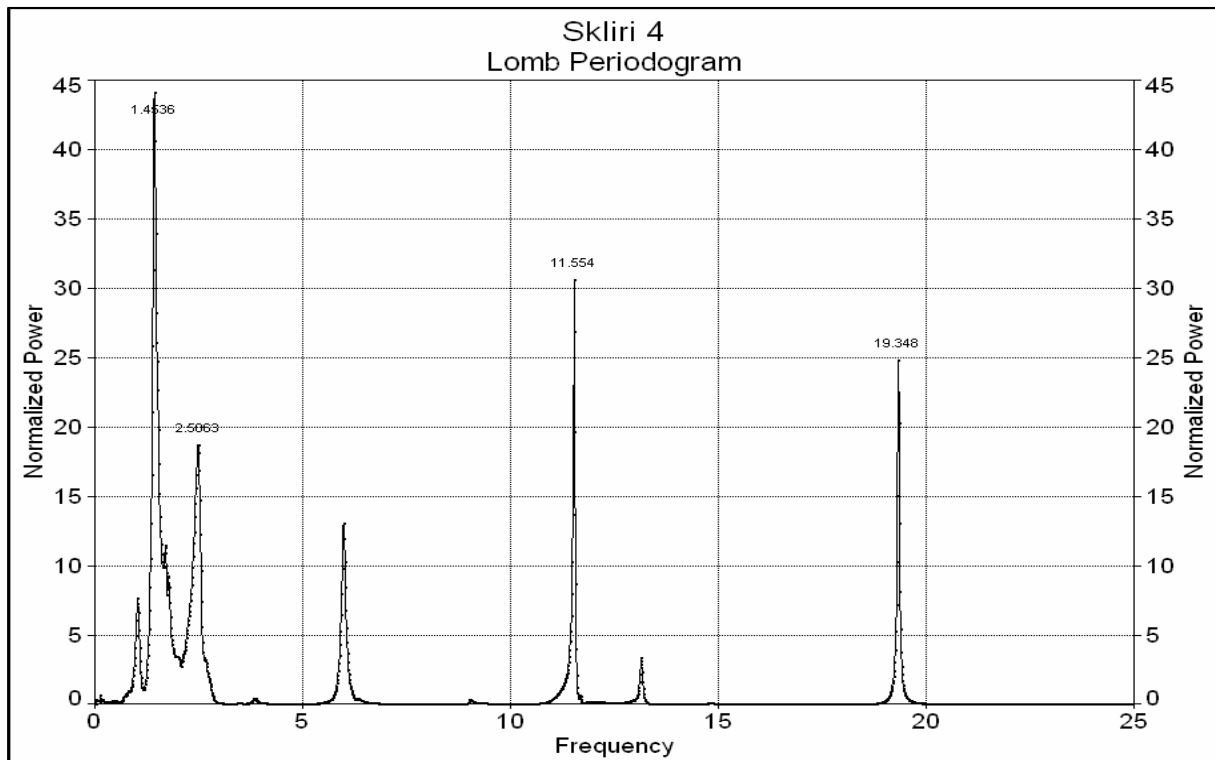
Σχήμα Β.8 Περιοδόγραμμα *Lomb*, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Αλφά (υπ' αριθ. 5).

Επεξεργασία Δοκιμών Σκληρής

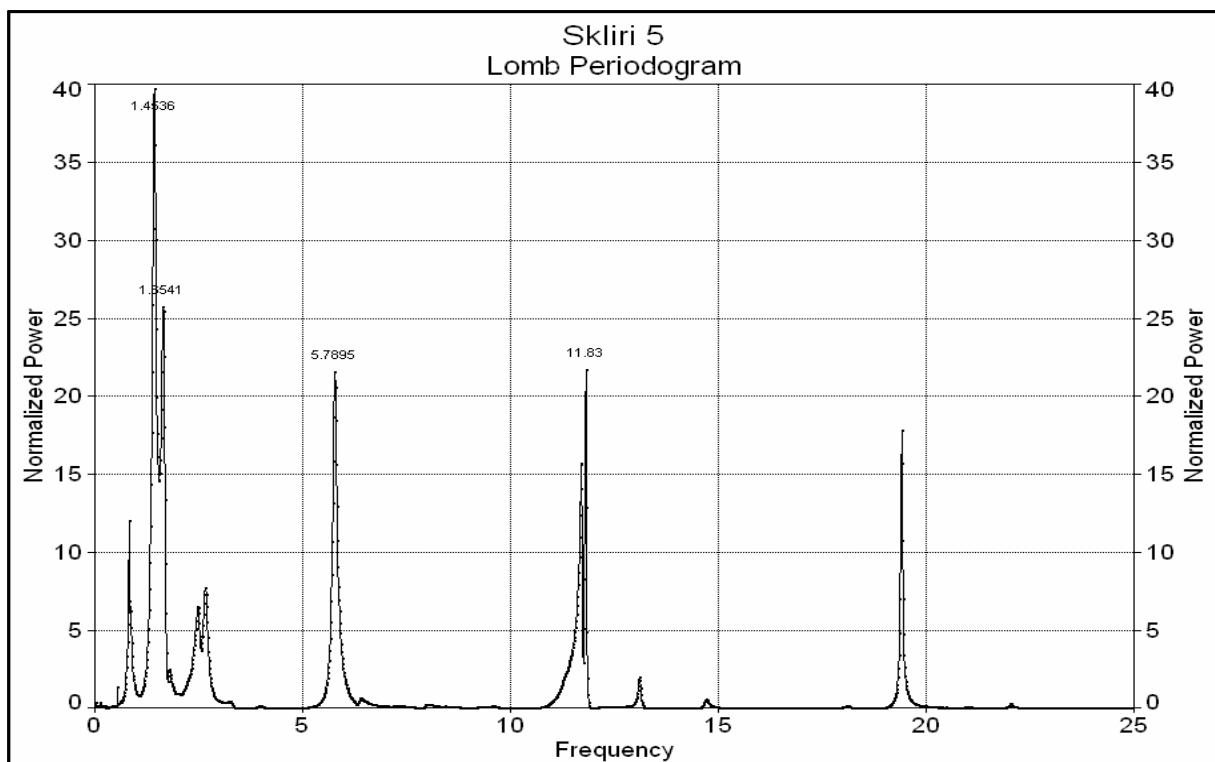
Σχήμα Β.9 Τυπικό Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων δοκιμίου Σκληρής.



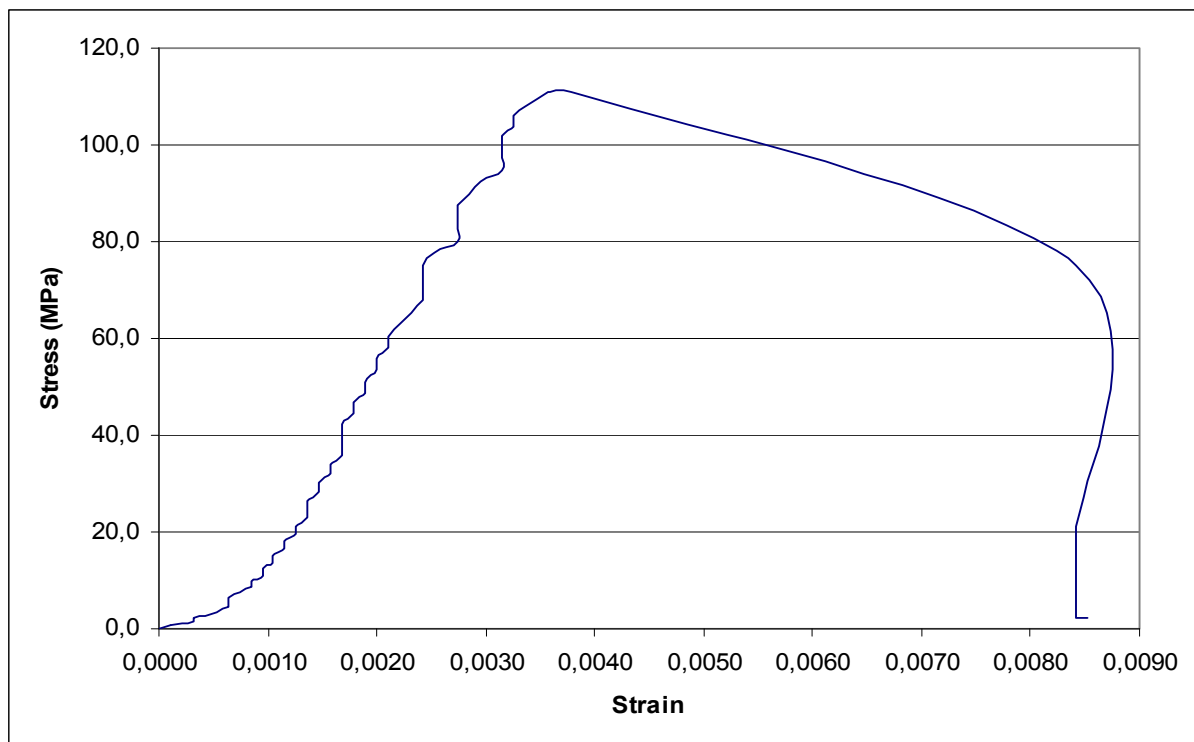
Σχήμα Β.10 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Σκληρής (υπ' αριθ. 1).



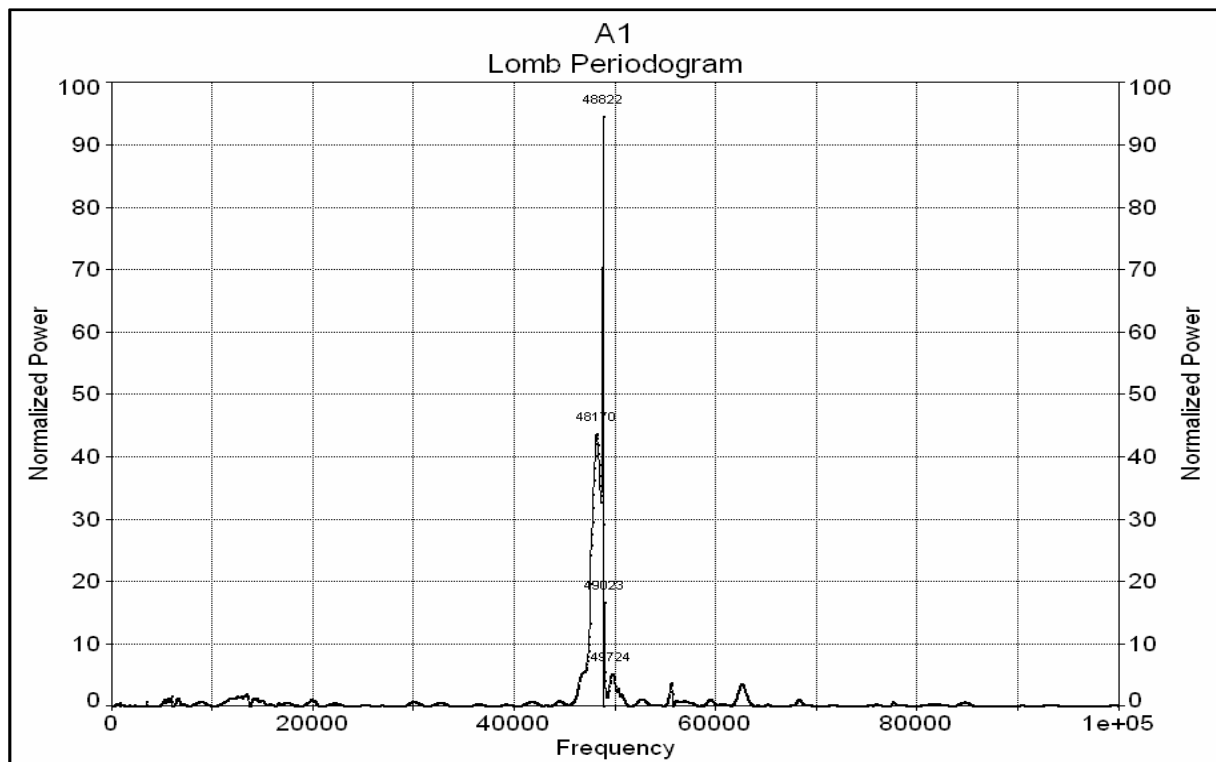
Σχήμα Β.11 Περιοδόγραμμα *Lomb*, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Σκληρής (υπ' αριθ. 4).



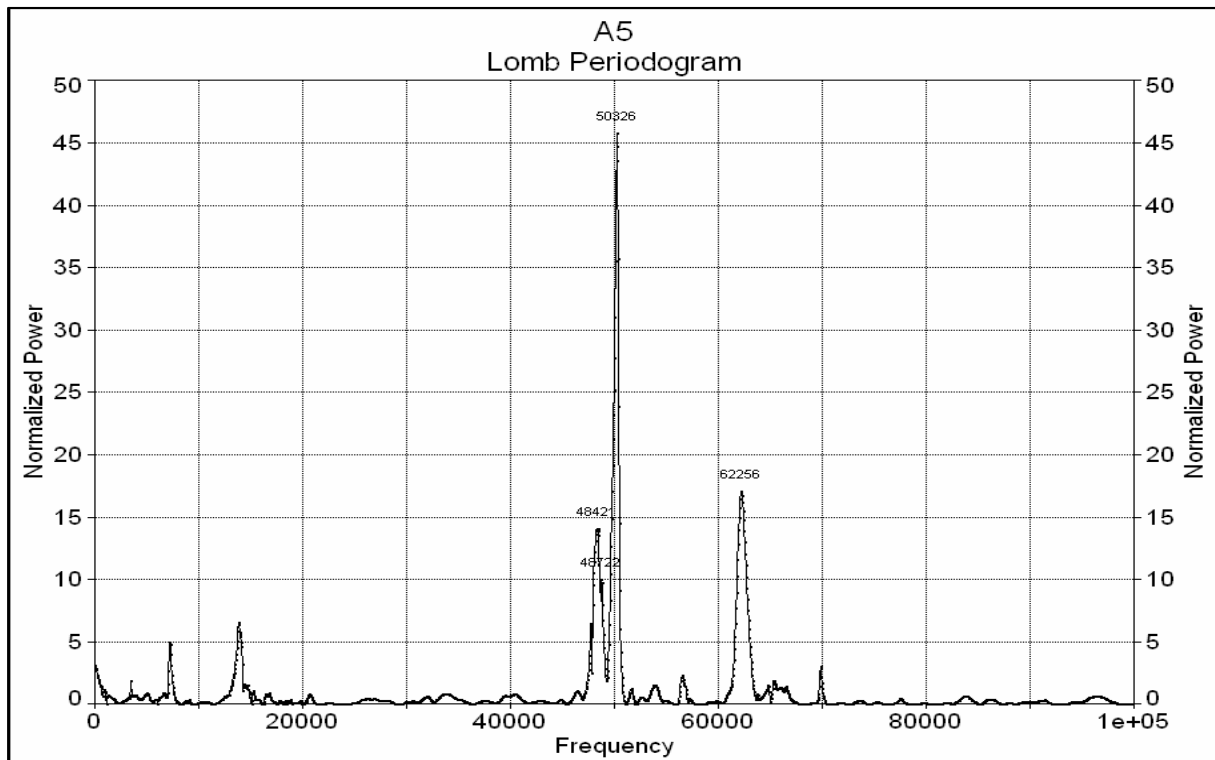
Σχήμα Β.12 Περιοδόγραμμα *Lomb* σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Σκληρής (υπ' αριθ. 5).

Επεξεργασία Δοκιμών Γόρτυνας

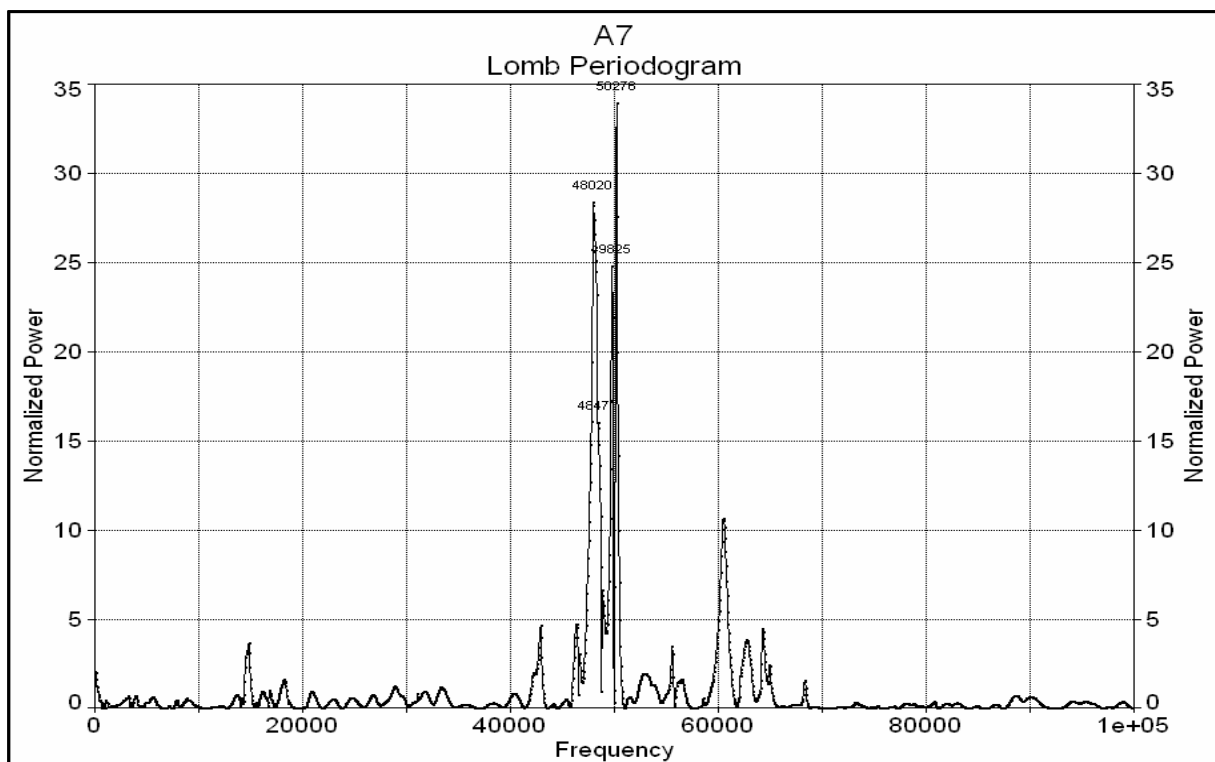
Σχήμα Β.13 Τυπικό Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων δοκιμίου Γόρτυνας.



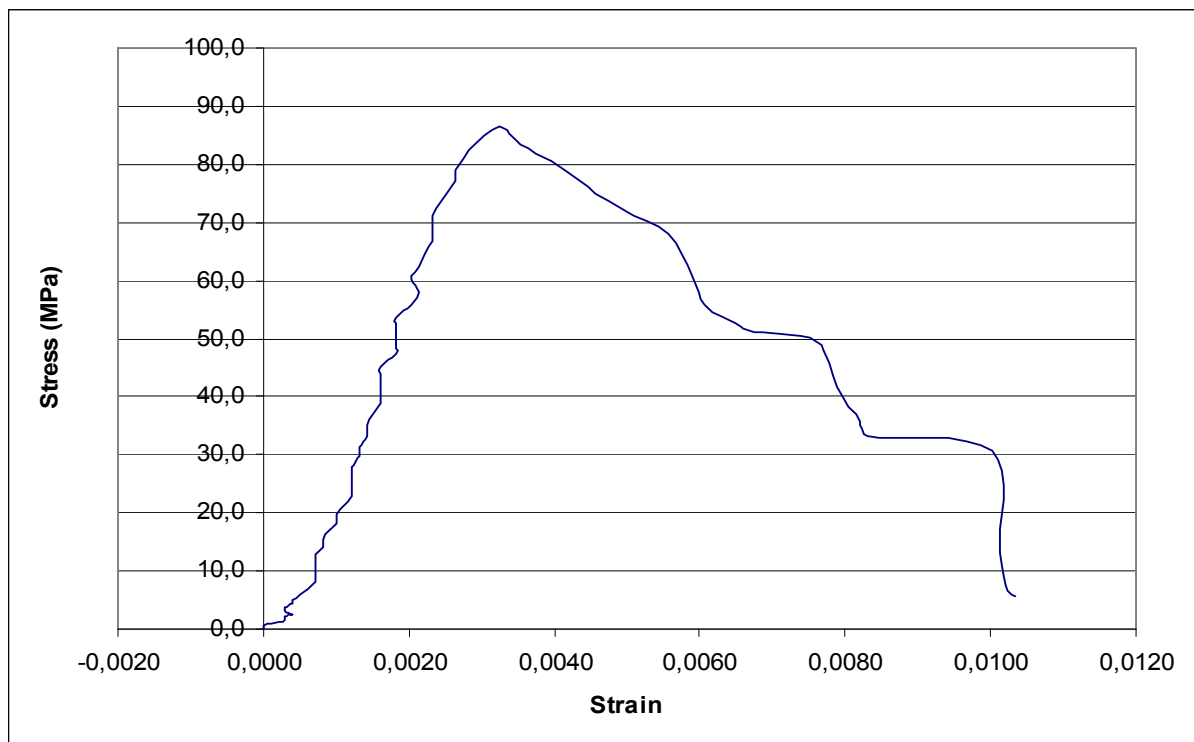
Σχήμα Β.14 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Γόρτυνας (υπ' αριθ. 1).



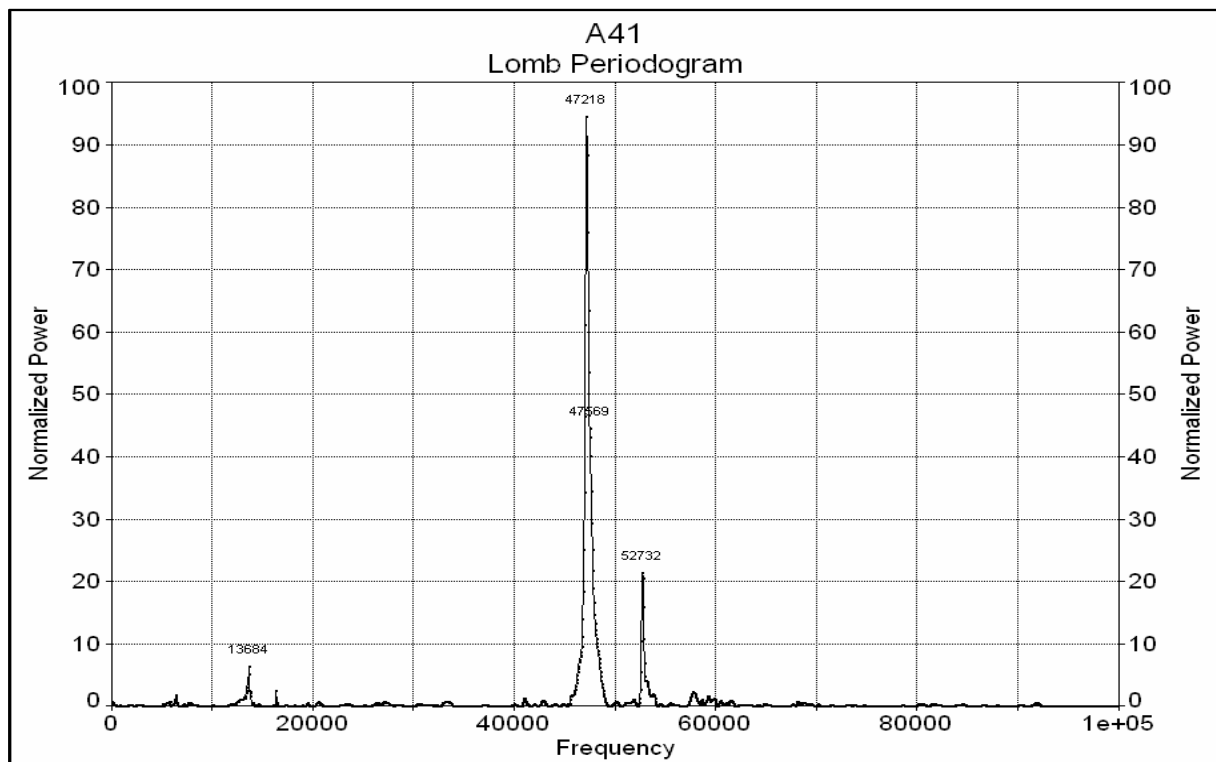
Σχήμα Β.15 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Γόρτυνας (υπ' αριθ. 5).



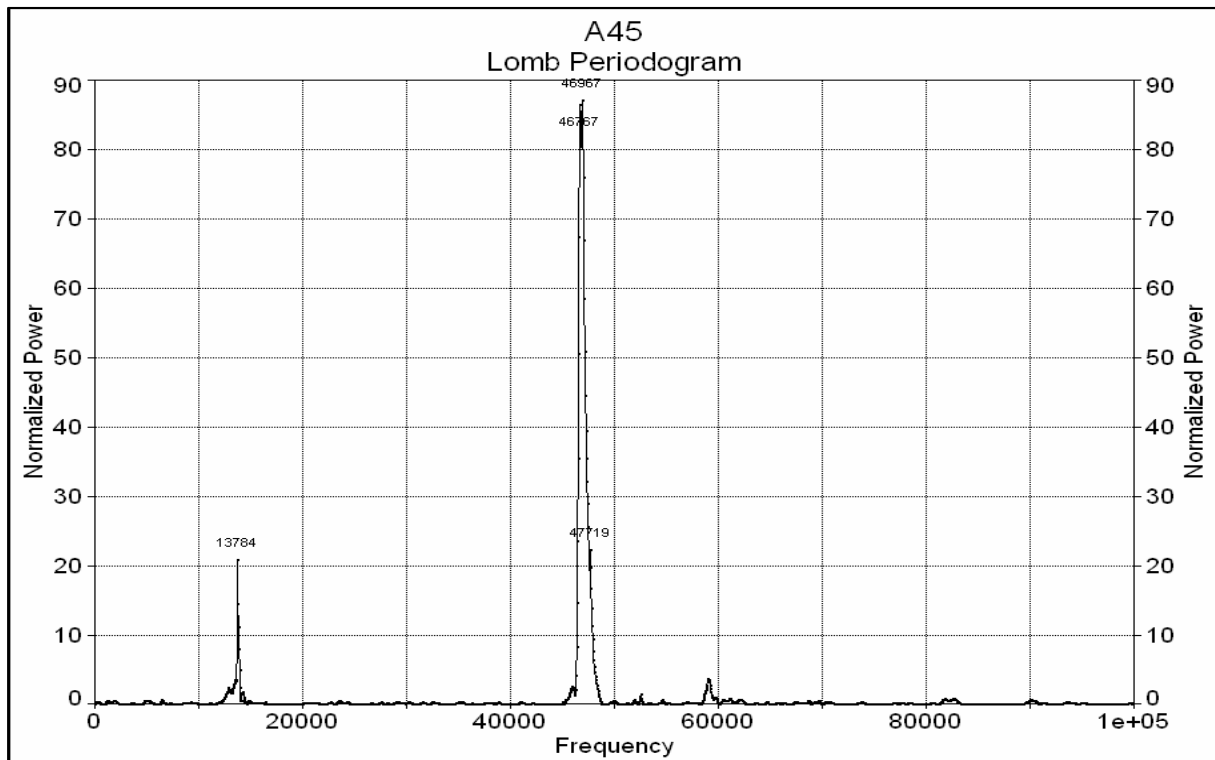
Σχήμα Β.16 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Γόρτυνας (υπ' αριθ. 7).

Επεξεργασία Δοκιμών Διονύσου

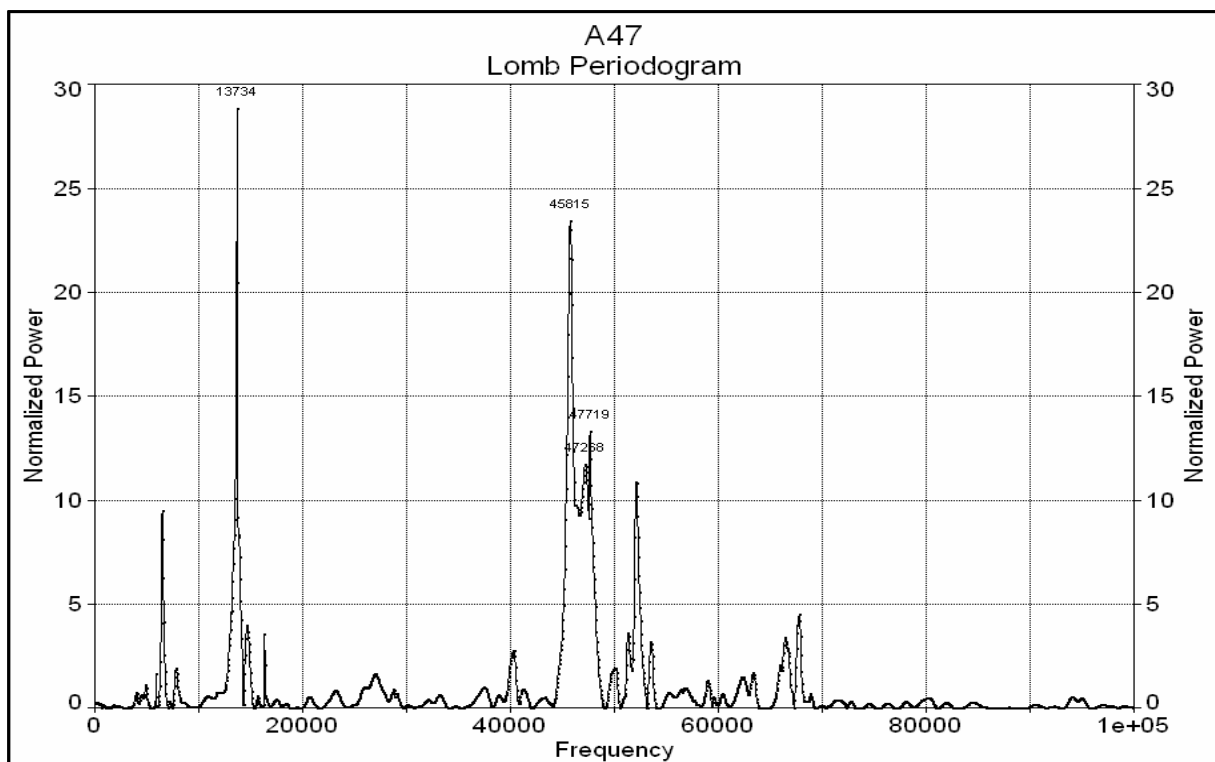
Σχήμα Β.17 Τυπικό Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων δοκιμίου Διονύσου.



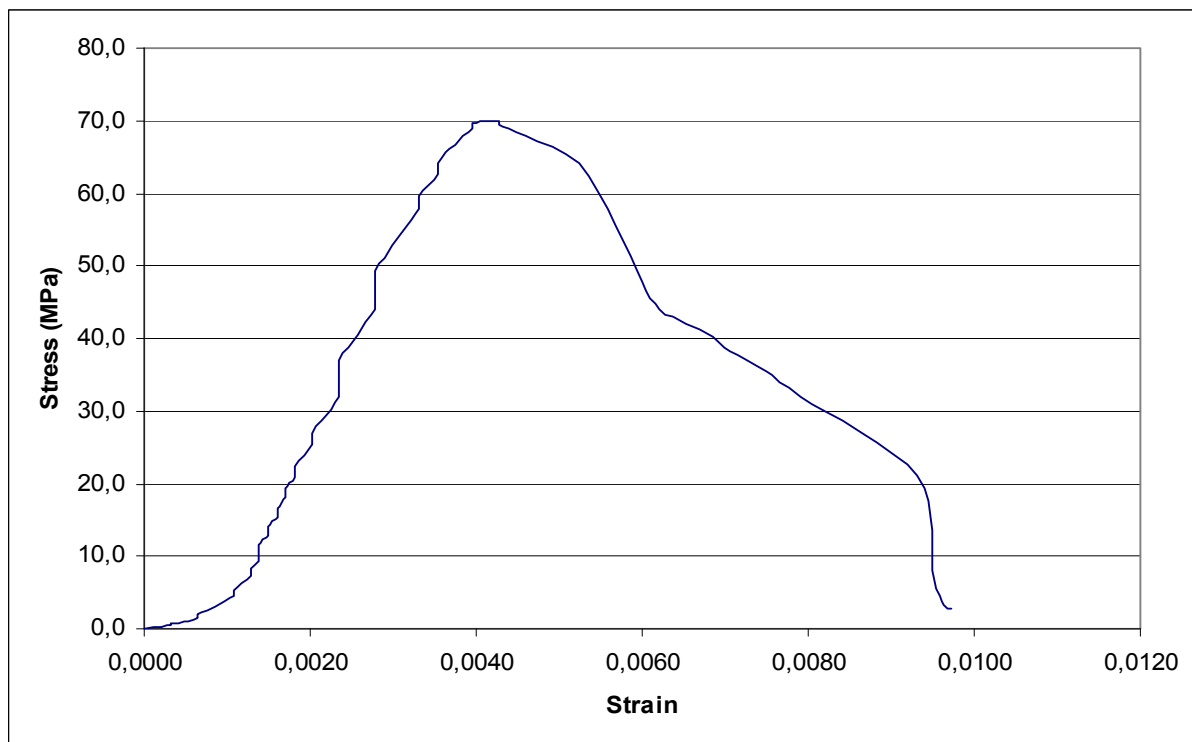
Σχήμα Β.18 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Διονύσου (υπ' αριθ. 4).



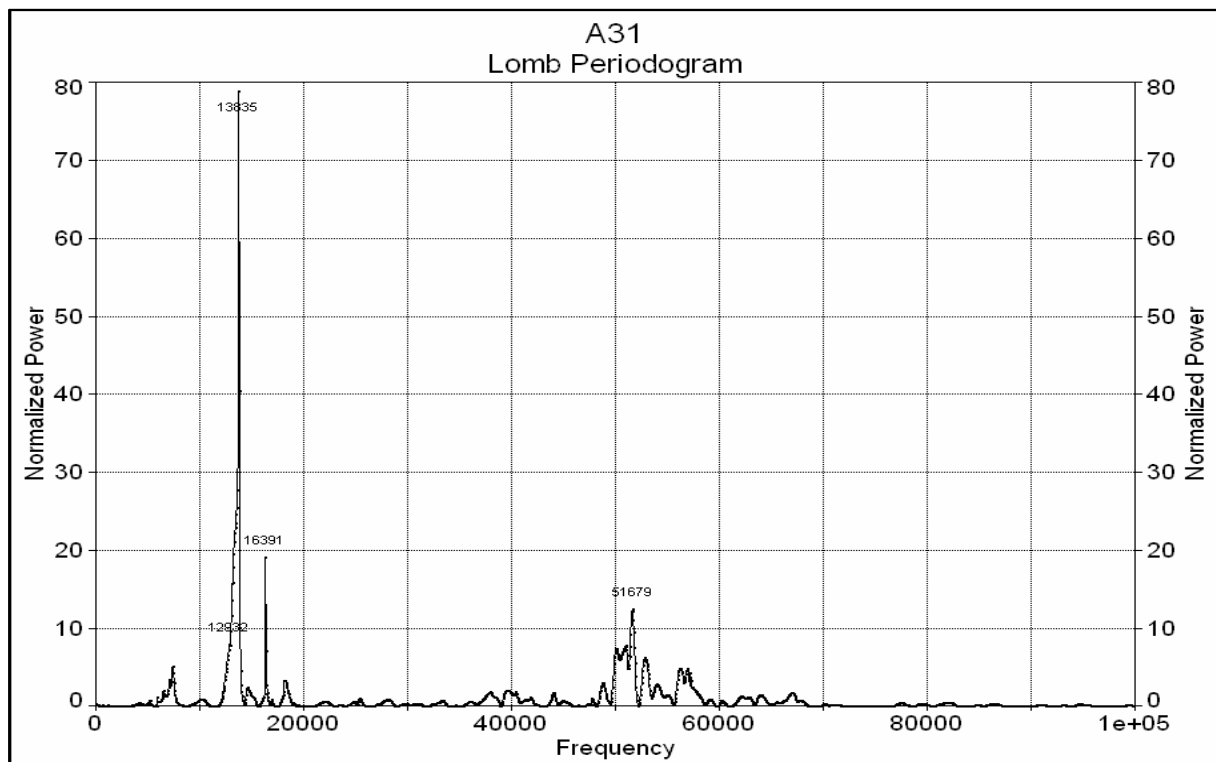
Σχήμα Β.19 Περιοδόγραμμα *Lomb*, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Διονύσου (υπ' αριθ. 2).



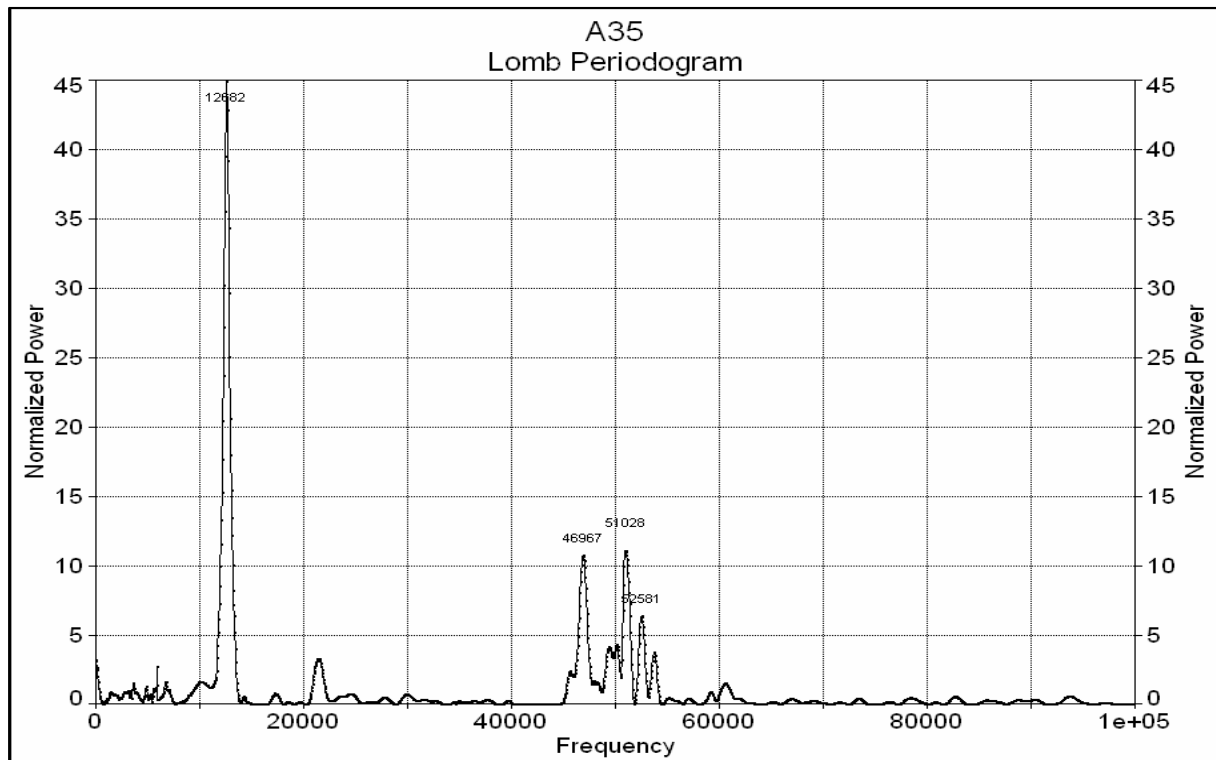
Σχήμα Β.20 Περιοδόγραμμα *Lomb*, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Διονύσου (υπ' αριθ. 1).

Επεξεργασία Δοκιμίων Νάξου

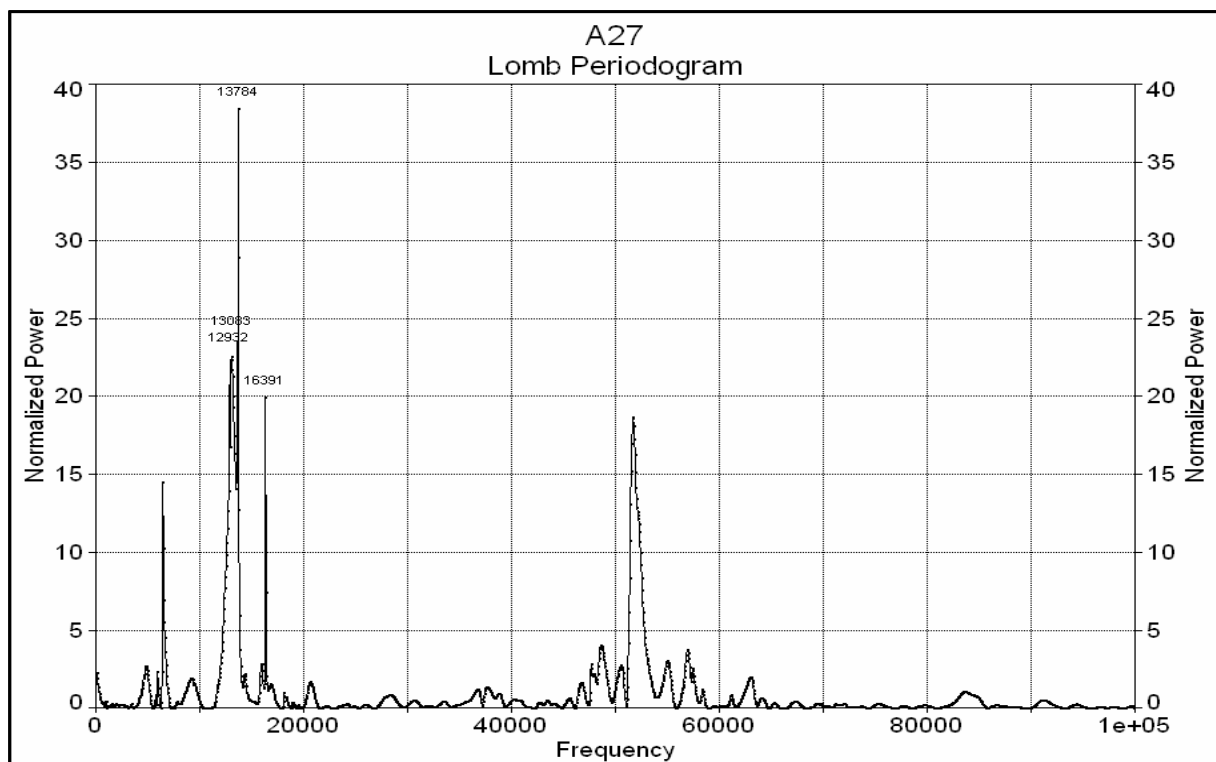
Σχήμα Β.21 Τυπικό Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων δοκιμίου Νάξου.



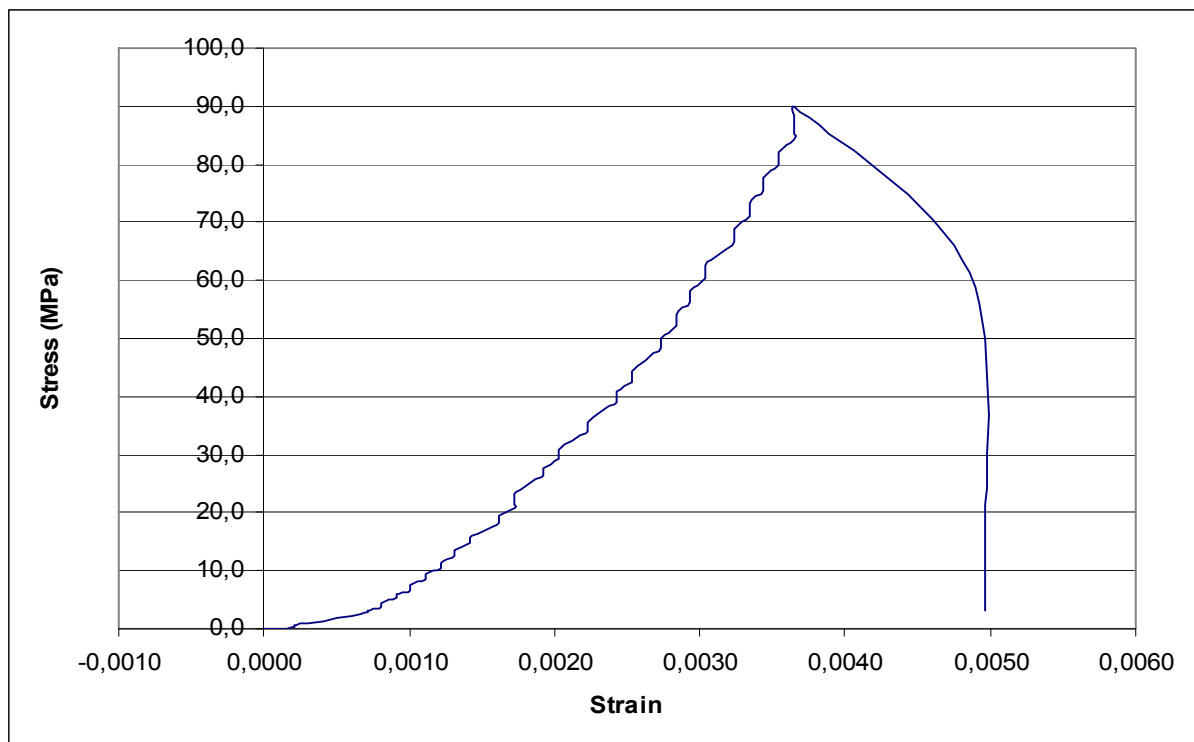
Σχήμα Β.22 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Νάξου (υπ' αριθ. 3).



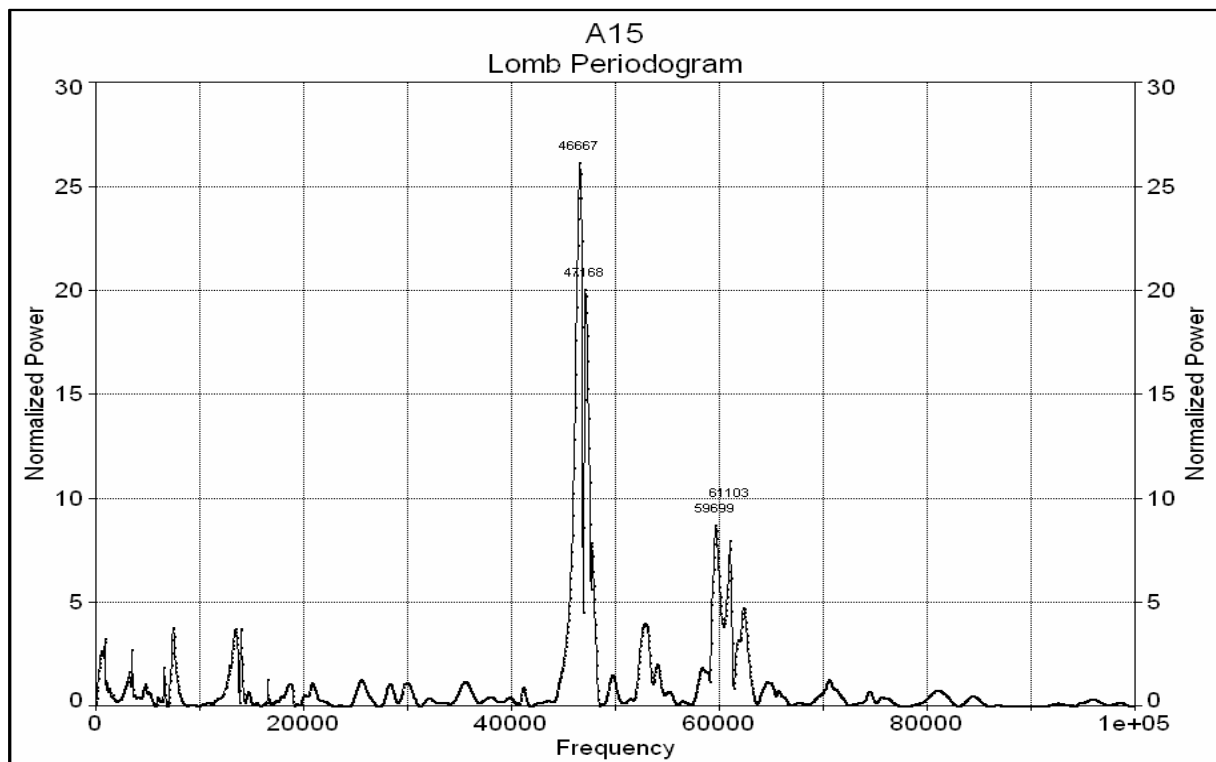
Σχήμα B.23 Περιοδόγραμμα *Lomb*, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Νάζου (υπ' αριθ. 5).



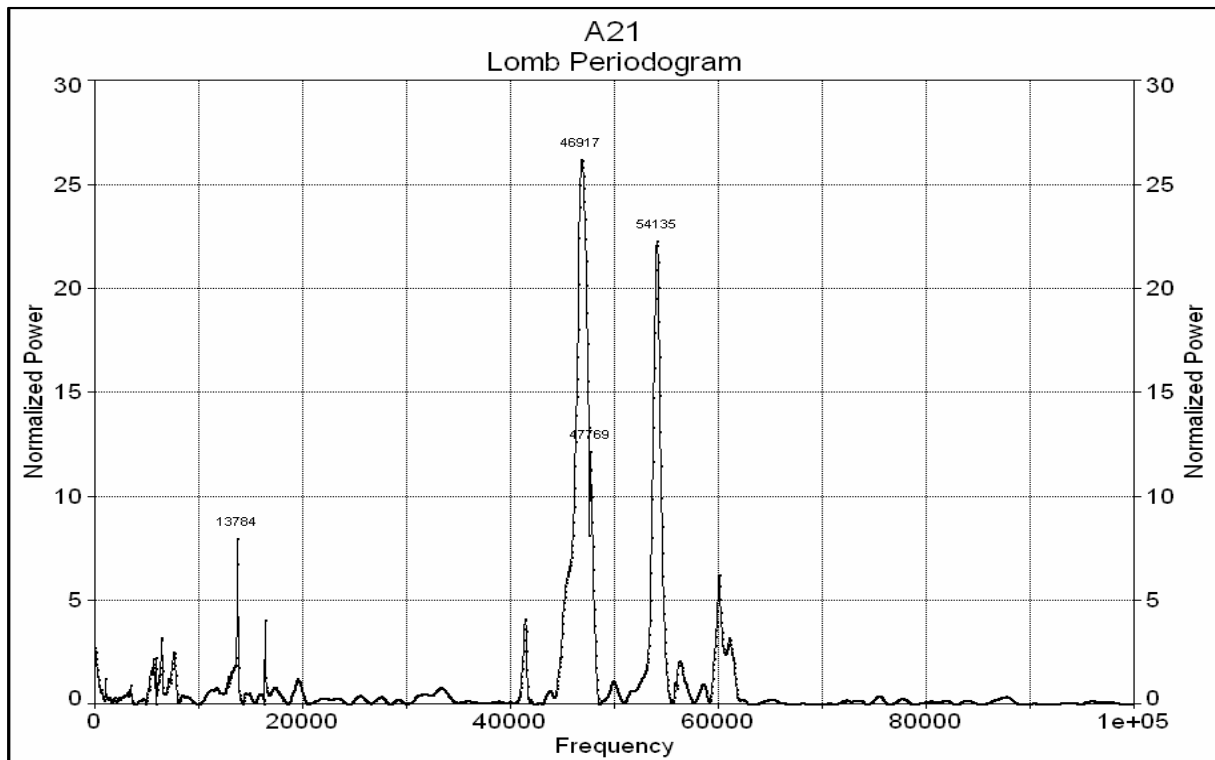
Σχήμα B.24 Περιοδόγραμμα *Lomb*, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Νάζου (υπ' αριθ. 4).

Επεξεργασία Δοκιμών Γρανίτη

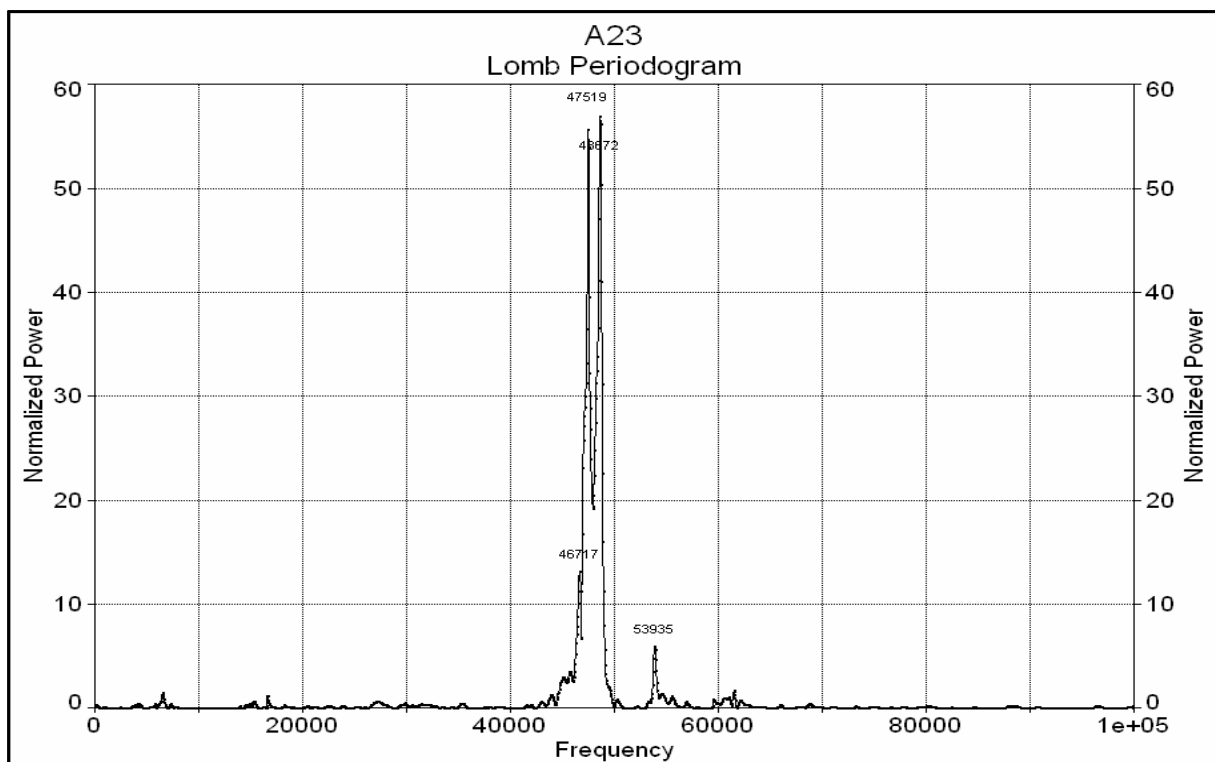
Σχήμα Β.25 Τυπικό Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων δοκιμίου Γρανίτη.



Σχήμα Β.26 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Γρανίτη (υπ' αριθ. 7).



Σχήμα B.27 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Γρανίτη (υπ' αριθ. 4).



Σχήμα B.28 Περιοδόγραμμα Lomb, σήματος λαμβανομένου από δοκίμιο Γρανίτη (υπ' αριθμ.1).

**ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ
ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**

- Kolettas, P. Vogiatzi S. and Agioutantis Z., Spectral signature of ultrasonic attenuation profiles for rock characterization, 2nd International Workshop on Geoenvironment and Geotechnics (GEOENV 2008), 8-9 September 2008, Milos, Greece pp. 13-18.
- **Κωλέττας Π., Αγιουτάντης Ζ., 2009, «Μη καταστροφική μέθοδος χαρακτηρισμού πετρωμάτων μέσω συχνοτικής ανάλυσης ακουστικών σημάτων», Περιοδικό Ορυκτός Πλούτος, Τεύχος 151, Απριλίου – Ιουνίου 2009, σελ. 19-30.**
- Kolletas P. and Agioutantis Z, Spectral Response of Greek Marbles to Ultrasonic Signals, Ecomining 2009, 4-5 September 2009, Milos, Greece, pp. 147-157
- **Κωλέττας Π., Βαφείδης Α., Αγιουτάντης Ζ., 2009, «Πρότυπη Μέθοδος Γεωφυσικής Διερεύνησης Υπεδάφους, μέσω συχνοτικού προσδιορισμού σεισμικών κυμάτων και πιλοτική εφαρμογή της σε καρστικούς ασβεστόλιθους του Νεογενούς στην περιοχή Κουνουπιδιανά, Χανίων», Τεχνικά Χρονικά ΤΕΕ (υπο εκτύπωση),.**

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. **Abraham O., Derobert X., 2003**, Non – Destructive testing of fired tunnel walls: The Mont – Blanc Tunnel Case study. NDT&E International 36, p. 411-418.
2. **Agarwal and Wong, 1993**. Error Inequalities in Polynomial Interpolation and Their applications. Τόμος 262 of Mathematics and its Applications, Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht.
3. **ASTM, 2000b**, Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, ASTM Designation: D 2845–00.
4. **Aydin A., 2009**, ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 46, p. 627-634.
5. **Aydin A., Basu A., 2005**, The Schmidt hammer in rock material characterization. Engineering Geology 81 p.1-14.
6. **Bilgin N., Dincer T., Copur H., 2002**, The performance prediction of impact hammers from Schmidt hammer rebound values in Istanbul metro tunnel drivages, Tunnelling and Underground Space Technology 17, p. 237-247.
7. **Buyuksagis I., Goktan R., 2007**, The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 44, p. 299-307.
8. **Choudhury PB, Raina AK, Ramulu M, Chakraborty AK, Bandopadhyay C., 2004**, Crown pillar stability assessment in an underground copper mine using acoustic emission. Paper 1B 07 - SINOROCK2004 , Int J Rock Mech Min Sci, 41 (3).
9. **Del Rio L.M., Lopez F., Esteban F.J., Tejado J.J., Mota M., Gonzalez I., San Emeterio J.L., Ramos A., 2006**, Ultrasonic characterization of granites obtained from industrial quarries of Extremadura (Spain). Ultrasonics 44, e1057-e1061.
10. **Donald J., Butt S., Iakovlev S., 2004**, Adaptation of a triaxial cell for ultrasonic P-wave attenuation, velocity and acoustic emission measurements. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41, p.1001-1011.
11. **Fahy, 2001**. The foundations of Engineering Acoustics, Elsevier Academic

12. Press.
13. **Fenn, 2005**. Fast Fourier Transform at Nonequispaced Nodes and Applications, Manheim, 130p.
14. **Galan, 1967**, Estimate of Concrete Strength by Ultrasonic Pulse Velocity and Damping Constant, ACI Journal.
15. **Griffiths and King, 1981**. Applied geophysics for geologists and engineers: The elements of geophysical prospecting 2nd edition, Pergamon Press, 230p.
16. **Iannacchione AT, Bajpayee TS, Edwards JL, 2005**, Forecasting Roof Falls with Monitoring Technologies - A Look at the Moonee Colliery Experience. Proc 24th Int Conf Ground Control in Mining. Morgantown, West Virginia University, p.44-51.
17. **Iannacchione, A.T., Prosser, L.J., Grau III, R.H., Oyler, D.C., Dolinar, D.R., Marshall, T.E. and Compton, C.S. 2000**, Roof Monitoring Helps Prevent Injuries in Stone Mines. Mining Engineering, November, p.32-37.
18. **Xu J., Li S., Tao Y., Tao X., Wu X., 2009**, Acoustic emission characteristic during rock fatigue damage and failure. Procedia Earth and Planetary Science 1, p. 556-559.
19. **Karhunen K., Seppanen A., Lehtikoinen A., Monteiro P., Kaipio J., 2009**, Electrical Resistance Tomography imaging of concrete. Cement and Concrete Research, vol. 3991.
20. **Katz O., Reches Z., Roegiers J., 2000**, Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 37, p. 723-728.
21. **Lagarde J., Abraham O., Laguerre L., Cota P., Piguet J., Balland C., Armand G., 2006**, Use of surface wave and seismic refraction for the inspection of circular concrete structures. Cement & Concrete Composites 28, p. 337-348.
22. **Lucet N., Zinszner B., 1992**, Effects of heterogeneities and anisotropy on sonic and ultrasonic attenuation of rocks. Geophysics V57, N8, P1018-1026.
23. **Mitra, 2001**. Digital Signal Processing - A Computer Based Approach, McGraw-Hill, 855 p.
24. **Molina J-P, Wack B., 1982**, Crack Field Characterization by Ultrasonic Attenuation – Preliminary Study on Rocks. Int. J Rock Mech. Sci. & Abstr. Vol 19, pp. 267 - 278.

25. **Mukhopadhy C., 2001**, Investigation of Acoustic Wave Attenuation as an Indication of Rock Mass Quality in Advancing Headings. MSc Thesis, Dalhousie University, Canada.
26. **Murray R. και Spiegel John Liu, 2002**. Μαθηματικό Εγχειρίδιο Τύπων και Πινάκων, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελίδα 214.
27. **Onur A., Bakrac S., 2009**, Determination of discontinuities in marble blocks via a non-destructive ultrasonic technique. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Volume 16, Number 5, Page 487.
28. **Ozkan I., Bilim N., 2008**, A new approach for applying the in-situ Schmidt hammer test on a coal face, Internation Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. p. 888-898.
29. **Přikryl R., Lokajicek T., Pros Z., Klima K., 2007**, Fabric symmetry of low anisotropic rocks inferred from ultrasonic sounding: Implications for the geomechanical models. Tectonophysics 431, p.83-96.
30. **Rabiner and Schafer, 2007**. Introduction to Digital Speech Processing, Foundations & Trends in Signal Processing,.
31. **Raichel, 2006**. The science and applications of acoustics, Springer, second edition.
32. **Resnikoff and Wells, 1998**. *Wavelet Analysis: The Scalable Structure of Information*, Springer-Verlag, New York.
33. **Reynolds, 1997**. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 796 pp.
34. **Sayers C. M., 1988**, Inversion of ultrasonic wave velocity measurements to obtain the microcrack orientation distribution function in rocks. Koninklijke/Shell Exploratie en Produktie Laboratorium, Volumerlaan 6.
35. **Sheriff and Geldart, 1995**. Exploration seismology, Cambridge University Press, U.K.
36. **Stein and Wysession, 2003**. An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth. England Geological Magazine 140 p.733-734
37. **Torrence and Combo, 2000**. A practical guide to Wavelet Analysis, Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Colorado, Boulder, Colorado.

38. **Tschelisnig P., 1988**, Acoustic emission testing (AET) – an integral non-destructive testing method. International Journal of Materials and Product Technology, Vol. 3, Nos 3-4, pp. 267-275.
39. **Tsuda H., 2006**, Ultrasound and damage detection in CFRP using fiber bragg grating sensor. Compos. Sci. Technol., 66, p.676.
40. **Van Vilet, 2002**. Windowed Fourier Transform, Pattern Recognition Group, Department of Imaging Science and Technology
41. **Zhang F., Krishnaswamy S., Fei D., Rebinsky D., Feng B., 2006**, Ultrasonic characterization of mechanical properties of Cr- and W- doped diamond like carbon hard coating. Thin Solid Films, 503, p.250.
42. **Αγιουτάντης, 2002**, «Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων», Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, 400 σελ.
43. **Βαφείδης & Συνεργάτες, 2005**, «Project Crinno – Final Report», Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
44. **Βαφείδης, 1993**. «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική – Σεισμικές Μέθοδοι», Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
45. **Βαφείδης, 2001**. «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική», Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
46. **Καραγιάννης και Καλλίνικος, 1991**. Σήματα και συστήματα με έμφαση στον Διακριτό χρόνο, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 253 σελ.
47. **Καραγιάννης και Ραγκούση, 1993**. Ψηφιακή Επεξεργασία Σημάτων, Εκδόσεις Συμεών.
48. **Κατσικογιάννη Π., Νομικός Π.Π., Σοφιανός Α.Ι., 2008**, Η ακουστική εκπομπή στη μηχανική των πετρωμάτων, Ορυκτός Πλούτος.
49. **Κουτσούρης και Νικήτα, 1999**. Ιατρικά Απεικονιστικά Συστήματα.
50. **Παναγιωτόπουλος, 2008**. Σημειώσεις Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.
51. **Παπαζάχος, 2005**. Εισαγωγή στην Σεισμολογία, Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
52. **Σαραντόπουλος και Αθανασούλης, 2008**. Κυματιδιακή Ανάλυση (Wavelets) Αρμονική Ανάλυση και Εφαρμογές.
53. **Σκαρλάτος, 2006**. Εφαρμοσμένη Ακουστική, Εκδόσεις Φιλομάθεια, Αθήνα.
54. **Χατζηδημητρίου και Καρακαϊσής, 2008**. Εισαγωγή στην Σεισμολογία, Τομέας Γεωφυσικής Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

