

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Διπλωματική εργασία

Χαρακτηρισμός πετρωμάτων με μη καταστροφικές μεθόδους

Βογιατζή Στεφανία



Εξεταστική Επιτροπή:

Ζαχαρίας Αγιουτάντης Καθηγητής (Επιβλέπων) Κωνσταντίνος Προβιδάκης Καθηγητής Κωνσταντίνος Κομνίτσας Καθηγητής

Χανιά, Ιανουάριος 2008

Ευχαριστίες

Η διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό στην καθοδήγηση και τις συμβουλές του καθηγητή κ.Αγιουτάντη Ζαχαρία τον οποίο και οφείλω να ευχαριστήσω θερμά.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Κωνσταντίνο Προβιδάκη, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης για την παραχώρηση του παλμογράφου Nicolet 310, από το εργαστήριο Μηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης και γενικότερα για την πολύτιμη συνεργασία του για την ολοκλήρωση της εργασίας μου και τον κ. Διονύσιο Χριστόπουλο, επίσης Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την δική του συμβολή, στην διεξαγωγή της εργασίας καθώς και τον Καθηγητή κ. Κομνίτσα για τη νσυμμετοχή του.

Δεν ξεχνάω επίσης να ευχαριστήσω τον μεταπτυχιακό φοιτητή κ. Κωλέττα Παναγιώτη, για την πολύ σημαντική βοήθεια και υποστήριξη που μου προσέφερε, αλλά και τον κ. Μαυριγιαννάκη Στυλιανό για την πολύτιμη συμμετοχή του στις πειραματικές διαδικασίες της εργασίας. Σημαντική επίσης ήταν η συμβολή του προσωπικού της ερευνητικής μονάδας Γεωλογίας(Τεκτονικής- Στρωματογραφίας- Γεωλογίας Περιβάλλοντος) που με βοήθησε σε υλικό αλλά και ηθικό επίπεδο.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την διεύθυνση του λατομείου Αλφά για την συνεργασία αλλά και για τις πληροφορίες που προσέφεραν.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου και τους πολύτιμους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση που μου προσέφεραν αλλά και για την υπομονή τους καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Αφιερώνεται στους φίλους.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια από ασβεστολιθικά πετρώματα τριών τύπων και ορισμένα δοκίμια διάφορων τύπων μαρμάρου. Οι δύο τύποι (Αλφάς, Σκληρή) εντοπίστηκαν στο λατομείο Αλφά που βρίσκεται στην ομώνυμη κοινότητα του νομού Ρεθύμνης, από το οποίο και αποσπάστηκαν ορθογωνικοί όγκοι των παραπάνω πετρωμάτων. Ο τρίτος τύπος χαρακτηρίζει τα περιβάλλοντα πετρώματα της ευρύτερης περιοχής του Πολυτεχνείου Κρήτης, που βρίσκεται στο δήμο Ακρωτηρίου.

Η μελέτη των πετρωμάτων που προαναφέρθηκαν, είχε σαν σκοπό τον χαρακτηρισμό αυτών, μέσω της συσχέτισης καταστροφικών και μη καταστροφικών δοκιμών ελέγχου. Αναλυτικότερα, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές με τη χρήση συσκευής ελέγχου υπερήχων. Από τους χρόνους διαδρομής των κυμάτων διαμέσου των δοκιμίων, υπολογίστηκαν οι ταχύτητες αυτών, ενώ με τη χρήση παλμογράφου (με ενσωματωμένο σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων), απομονώθηκαν οι κυματομορφές των παλμών. Έπειτα, με ειδική επεξεργασία, πραγματοποιήθηκε φασματική ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων (βασισμένη στην εφαρμογή Ταχύ Μετασχηματισμού Fourier 'FFT') καθώς και προσδιορισμός του συντελεστή απόσβεσης κάθε κύματος με μαθηματική προσέγγιση. Τέλος, έγιναν δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε όλα τα δοκίμια εκτός των μαρμάρων. Από τις δοκιμές καταστροφικού ελέγχου υπολογίστηκαν η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ξηρά και υγρά δοκίμια (με παραμονή τους σε νερό για 24 ώρες), ενώ μελετήθηκαν και περιπτώσεις τεχνητά ενοποιημένων δοκιμίων.

Από την διαδικασία που περιγράφηκε, εξήχθησαν συμπεράσματα που συνδέουν τις ακουστικές παραμέτρους (ταχύτητα, απόσβεση υπερηχητικών κυμάτων) και τις συχνότητες που προέκυψαν, με τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων (αντοχή, μέτρο ελαστικότητας). Τέλος, τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών.

Πίνακας περιεχομένων

EĽ	ειΣαγΩγη			
<u>2</u>	<u>0</u>]	Ι ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ	10	
2.1]	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ	11	
2.1	.1	ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ	12	
2.1	.2	Ειδη κυματών	14	
2.1	.3	Απόσβεση υπερηχητικών κυματών	17	
2.1	.4	ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	20	
2.2	, r	Γο πιεζοηλεκτρικό φαινομένο	22	
2.2	.1	ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	23	
2.2	.2	Είδη υπερηχητικών μετατροπέων	25	
2.2	.3	ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΚΕΦΑΛΕΣ ΚΑΘΕΤΟΥ ΔΕΣΜΗΣ.	27	
<u>3</u>	M	ΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ FOURIER	29	
3.1	1	^C enika	29	
	-			
3.2		Η ΑΝΑΛΥΣΗ FOURIER	29	
3.3		Ο μετασχηματισμός Fourier	34	
3.4	Z	Δειγματοληψια	40	
3.5	Z	Διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DTFT)	41	
3.6	-	Γαχγς μετασχηματισμός Fourier	43	
<u>4</u>	E	ΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.	<u>45</u>	
4.1]	Προσδιορισμός μηχανικών χαρακτηριστικών σκυροδεματός ηλικίας 2 8	1	
HM	EP	ΩΝ ΚΑΙ 28 ΕΤΩΝ ΜΕ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ.	45	
4.1	.1	Σ χέση ωλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμιών -ταχύτητας υπερηχών	46	
4.1	.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.	48	
4.1	.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	48	
4.2]	Εκτιμήση της αντοχής σκυροδεματός μέσω της ταχύτητας		
YП	EPI	ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ.	49	
4.2	.1	Τροπός υπολογισμού του σύντελέστη απόσβεσης	50	
4.2	.2	ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	51	
4.2	.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	52	

4.3	Εκτιμήση της απόσβεσης και διασποράς υπερηχών με χρήση	
META	ασχηματισμού Fourier διακριτού χρονού	52
4.3.1	Αριωμητική προσομοιώση διαδόσης παλμού.	53
4.3.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΜΕ	ωοδο
STF1	F. 55	
4.3.3	ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ.	56
4.3.4	Πειραματικός ελεγχός	57
4.4	Εκτιμήση της αντοχής δομικών πετρωμάτων με μεθοδούς ανάλυς	HΣ
ΣΗΜΑ	ΑΤΟΣ.	59
4.4.1	Πειραματική διαδικάσια	59
4.4.2	Επεξεργασια-Αποτελεσματά	60
4.4.3	Συμπερασματα-Συζητήση	63
<u>5 E</u>	ΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.	64
E 1		()
5.1	$\Delta IAMOP\Phi \Omega \Sigma H \Delta OKIMI \Omega NO (W + DOT + D) +)$	64
5.1.1	ΕΡΙ ΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟ (ΚΑΡΟΤΑΡΙΑ).	66
5.1.2	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΔΙΣΚΟΠΡΙΟΝΟ ΚΟΠΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ.	6/
5.1.3	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΛΕΙΑΝΤΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.	68
5.2	Εργαστηριακές μετρήσεις υπερηχών.	69
5.2.1	Γεννητρία υπερήχων (Pundit 6)	72
5.2.2	ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΣ ΝΙCOLET 310	74
5.3	Δοκιμή μονοαξονικής θαιψής.	78
<u>6 E</u>	ΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.	80
6.1	Επεξεργασία μετρήσεων μη καταστροφικού ελεγχού.	80
6.2	Φασματική αναλύση σηματός.	87
6.3	Υπολογισμός του σύντελεστη απόσβεσης.	100
6.4	Επεξεργασία μετρήσεων δοκίμης σε μονοαξονική ωλιψή.	105
7Σ	ΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	108
_ =		
7.1	ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	108
7.2	Σύνοψη αποτελεσματών φασματικής αναλύσης	108
7.3	Σύνοψη αποτελεσματών σύντελεστών αποσβέσης	109

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		127
7.6	Προτάσεις για μελλοντική ερεγνα	124
7.5	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	110
7.4	Σύνοψη αποτελές matώn δοκίμης σε μονοαξονική θλιψη	110

1 Εισαγωγή

Η ανάγκη για γνώση των μηχανικών χαρακτηριστικών και κυρίως της αντοχής των υλικών, είναι ίσως το σημαντικότερο κεφάλαιο της μηχανικής και αφορά τόσο στις κατασκευές όσο και στα γεωυλικά πάνω στα οποία θεμελιώνονται έργα. Ο χαρακτηρισμός των υλικών οδηγεί σε σημαντικά σημπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και την ανθεκτικότητά των κατασκευών, γεγονός που οδήγησε σε έρευνες προς την κατεύθυνση αυτή. Οι έρευνες αυτές αφορούν κυρίως στον καταστροφικό έλεγχο των υλικών, όπως για παράδειγμα, η δοκιμή αντοχής σε θλίψη ή σε εφελκυσμό. Αυτός όμως ο έλεγχος των υλικών τους χαρακτηριστικών. Επιπλέον, οι μέθοδοι καταστροφικού ελέγχου, συχνά δεν δύνανται να εφαρμοστούν στο φυσικό περιβάλλον, σχετικά με γεωυλικά, ή στον τόπο λειτουργείας τους, σχετικά με κατασκευές.

Τα παραπάνω προβλήματα οδήγησαν στην ανάγκη για ανάπτυξη μη καταστροφικών μεθόδων ελέγχου, με πιο διαδεδομένη, την μέθοδο των υπερήχων. Η μέθοδος των υπερήχων ενώ εφαρμόστηκε αρχικά από τον Sokolov το 1929, έγινε γενικά αποδεκτή μετά το 1945 με την αυξανόμενη απαίτηση για μη καταστροφικούς ελέγχους (Πρασιανάκης, 1999).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό δύο ακουστικών παραμέτρων των υπερήχων (ταχύτητα, απόσβεση) αλλά και για την φασματική ανάλυση (μέσω Η/Υ) του γραφήματος που προκύπτει για την απομόνωση των δεσπόζουσων συχνοτήτων, με σκοπό τον χαρακτηρισμό διάφορων τύπων ασβεστολιθικών πετρωμάτων, τα οποία μελετήθηκαν πειραματικά σε εργαστήριο.

Ο συσχετισμός των παραπάνω μεγεθών με τις μηχανικές ιδιότητες (αντοχή, μέτρο ελαστικότητας του Young) μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για τον χαρακτηρισμό τους, ενώ μελλοντικά οι έρευνες προς αυτήν την κατεύθυνση μπορούν να οδηγήσουν στην αποφυγή των καταστροφικών ελέγχων. Τα μεγέθη αυτά επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες όπως η υγρασία των πετρωμάτων και κατ' επέκταση το πορώδες και η διαπερατότητα αλλά και η ύπαρξη ασυνεχειών. Η παρούσα μελέτη περιλαμβάνει και αυτές τις περιπτώσεις.

Για τη διεξαγωγή της εργασίας, έγινε πυρηνοληψία κυλινδρικών δοκιμίων από όγκους ασβεστολιθικών πετρωμάτων που ελήφθησαν από το λατομείο Αλφάς του νομού Ρεθύμνης. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν δύο τύποι ασβεστολίθου: (α)Αλφάς, (β) Σκληρή. Ο τύπος (α) παρουσιάζει μεγαλύτερη ανομοιογένεια, πορώδες και μικρότερη σκληρότητα από τον τύπο (β). Έγινε επίσης μελέτη σε δοκίμια ασβεστολίθου της περιοχής Ακρωτηρίου Χανίων αλλά και σε μερικά δοκίμια διάφορων τύπων μαρμάρου.

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία, με την μελέτη, εκτός της ταχύτητας των υπερήχων και δύο επιπλέον παραμέτρων, της απόσβεσης και της συχνοτικής ανάλυσης, γίνεται προσπάθεια για μια διαφορετική προσέγγιση προς την μέθοδο των υπερήχων για την άντληση όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών μπορεί να δώσει η μέθοδος αυτή.

2 Οι Μη Καταστροφικές Μέθοδοι Ελέγχου

Οι Μη Καταστροφικές Μέθοδοι ελέγχου βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά πεδία (βιομηχανία, ιατρική, κατασκευές, αεροναυπηγική κ.α.), γιατί παρέχουν έναν άμεσο, ταχύ, ασφαλή, αξιόπιστο και ακίνδυνο τρόπο ελέγχου. Η κάθε μέθοδος ανάλογα με την αρχή λειτουργίας της ειδικεύεται σε κάποιο από αυτά τα πεδία.

Η ακριβέστερη και αμεσότερη μέθοδος προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών είναι η μηχανική μέθοδος. Η μέθοδος όμως αυτή προϋποθέτει την καταστροφή των ελεγχόμενων δοκιμίων όπως η δοκιμή θλίψης, κάμψης, άμεσου ή έμμεσου εφελκυσμού.

Σε αντίθεση με αυτή την μέθοδο ο έλεγχος των υλικών όπως και ο προσδιορισμός των μηχανικών τους ιδιοτήτων, μπορεί να γίνει με τη βοήθεια των ακτίνων Χ, α, β, γ, ή ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, ή ηχητικών κυμάτων, που επειδή δεν καταστρέφουν τα υλικά ούτε επηρεάζουν τις ιδιότητές τους ονομάζονται μη καταστροφικές μέθοδοι ελέγχου των υλικών (Non-Destructive Testing, NDT). Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατός και ο επί τόπου έλεγχος των υλικών (πχ. πετρωμάτων) χωρίς να απαιτείται η λήψη πυρήνων.

Οι μη καταστροφικές μέθοδοι αναπτύχθηκαν κυρίως μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο και ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, μετά την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και της ηλεκτρονικής και εφαρμόζονται ευρύτατα στον έλεγχο υλικών, παράλληλη ή και σε αντικατάσταση των γνωστών καταστροφικών μεθόδων. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι ΜΚΕ υλικών οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες: α) στις βασικές μεθόδους που εφαρμόζονται ευρύτατα στον έλεγχο των υλικών και, β) στις άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούνται σε ειδικές μόνο περιπτώσεις.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν η μέθοδος των υπερήχων, η ακτινογραφική μέθοδος, η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων, η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών, και η μέθοδος των δινορευμάτων.

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν η μέθοδος της ξηροακτινογραφίας, των ακτίνων πυρηνικών σωματίων, νετρονίων, πρωτονίων, ραδιοϊσοτόπων, οι οπτικές μέθοδοι, οι θερμογραφικές μέθοδοι, άλλες ηλεκτρικές μέθοδοι, μέθοδοι των ψαθυρών επικαλύψεων, της ακουστικής εκπομπής, της διαρροής ρευστών κ.α.

Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για την ύπαρξη επικίνδυνων σημείων (πχ. μικρορωγμών στο εσωτερικό των υλικών), αλλά και να προσδιορίσουν μηχανικές ιδιότητες.

Από αυτές τις μεθόδους οι υπέρηχοι παρουσιάζουν σοβαρά πλεονεκτήματα έναντι των γνωστών συμβατικών δοκιμών, αλλά και έναντι των μη καταστροφικών μεθόδων, αφού είναι απόλυτα ασφαλής και ακίνδυνη για την υγεία του ανθρώπου και δεν χρειάζονται ειδικές προφυλάξεις όπως συμβαίνει με άλλες μεθόδους οι οποίες πολλές φορές είναι και δαπανηρές. Χρησιμοποιούνται για παχυμέτρηση των υλικών αλλά και για τον εντοπισμό ατελειών ή μικρορωγμών. Επίσης με την χρήση των υπερήχων είναι δυνατός ο προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών (μέτρο ελαστικότητας Ε, λόγος Poisson v) των υλικών χωρίς την θραύση τους (Πρασιανάκης 1997).

2.1 Η μέθοδος των υπερήχων

Εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από τον Sokolov το 1929 για την ανίχνευση ατελειών, ενώ το 1942 εφαρμόστηκε για τον έλεγχο των υλικών. Σήμερα βρίσκει ιδιαίτερη εφαρμογή σε έλεγχο κατασκευών υψηλού κινδύνου, όπως αεροπλάνα, πυρηνικοί αντιδραστήρες, δεξαμενές καυσίμων και χημικών ουσιών κ.α. Υπερέχει έναντι πολλών άλλων μη καταστροφικών μεθόδων ελέγχου, επειδή είναι αρκετά απλή, χρησιμοποιεί φορητές συσκευές χαμηλού κόστους, έχει αρκετά υψηλή ευαισθησία, δεν επηρεάζει καμία από τις ιδιότητες των υπό έλεγχο υλικών και είναι εντελώς ακίνδυνη για την υγεία του ανθρώπου (Πρασιανάκης, 1999).

Ένα ακόμη πολύ σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να προσδιορίσει ιδιότητες μιας ατέλειας στο υλικό σε βάθος μέχρι και 15 m, δηλαδή πολύ μεγαλύτερο από κάποια άλλη μέθοδο.

2.1.1 Φυσική των υπερήχων

Υπέρηχος είναι ένα μηχανικό κύμα με συχνότητα πάνω από το ακουστικό όριο (20 kHz), η διάδοση του οποίου απαιτεί την παρουσία κάποιου υλικού μέσου (στερεού, υγρού ή αέριου). Εξαιτίας της παρουσίας υπερηχητικού κύματος τα σωματίδια ταλαντεύονται γύρω από τη θέση ισορροπίας του. Το υπερηχητικό κύμα επιδρά ως απλή διαταραχή στο μέσο χωρίς να υφίσταται συνολική μετατόπιση των σωματιδίων και μεταφορά μάζας (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση της διάδοσης του ήχου (Λάμπρου, 2004).

Η μέθοδος των υπερήχων για τον έλεγχο εδαφών, βασίζεται στην διάδοση των κυμάτων του ήχου διαμέσου της βραχομάζας χρησιμοποιείται από τα περισσότερα εργαστήρια βραχομηχανικής σε όλο τον κόσμο (Birch, 1960) και επιτρέπει τον εντοπισμό εσωτερικών ατελειών, ρωγμών, πόρων, εγκλεισμάτων αλλά και διεπιφανειακών αστοχιών επιστρώματος, υποστρώματος.

Σε αυτήν την μέθοδο, τα σεισμικά κύματα υψηλής συχνότητας (50 kHz έως και μέχρι μερικά MHz) παράγονται από μια γεννήτρια παλμών και μετατρέπονται σε μηχανική δόνηση μέσω ενός πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα (πομπός). Η δόνηση αυτή εφαρμόζεται σε δοκίμιο του προς εξέταση σχηματισμού. Τα διαδιδόμενα σεισμικά κύματα μέσω του δοκιμίου μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα από έναν δέκτη ο οποίος

εφάπτεται σε κάποια άλλη θέση του δοκιμίου. Ο χρόνος διαδρομής των σεισμικών κυμάτων καταγράφεται ώστε η ταχύτητα να υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση :

$$V = \frac{L}{\Delta t}$$
(2.1)

όπου V είναι η ταχύτητα των διαμηκών, είτε των εγκαρσίων κυμάτων, L είναι το μήκος της διαδρομής των σεισμικών κυμάτων (απόσταση πομπού – δέκτη) και Δt είναι ο χρόνος διαδρομής των κυμάτων στο δείγμα.

Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων σε ένα δοκίμιο, λόγω των μεγάλων ταχυτήτων που αναμένονται στα υπό εξέταση υλικά και των σχετικά μικρών τους διαστάσεων, θα πρέπει να πραγματοποιούνται μετρήσεις με τη χρήση υψίσυχνων σημάτων, έτσι ώστε τα παραγόμενα μήκη κύματος των διαδιδόμενων σεισμικών κυμάτων να είναι πολύ μικρότερα των διαστάσεων των δοκιμίων και υψηλής χρονικής ακρίβειας, προκειμένου να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια διάταξη που επιτρέπει την δημιουργία υψίσυχνου παλμού σεισμικών κυμάτων (υπέρηχοι), ενώ παράλληλα έχει τη δυνατότητα να μετρά το χρόνο διάδοσης των κυμάτων αυτών στο υπό εξέταση υλικό με μεγάλη ακρίβεια της τάξεως του 0.1 μsec.

Η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων σε ένα στερεό ομογενές και ισότροπο (ή ελαφρά ανισότροπο) μέσο σχετίζεται άμεσα με την πυκνότητα του μέσου και τις ελαστικές του ιδιότητες (πχ. μέτρο ελαστικότητας του Young και λόγος του Poisson).

Η ποιότητα μερικών υλικών κάποιες φορές σχετίζεται με την ακαμψία τους, έτσι η μέτρηση της ταχύτητας παλμού υπερήχων σε τέτοια υλικά μπορεί συχνά να αποτελέσει ένδειξη της ποιότητάς τους καθώς επίσης και να προσδιορίσει τις ελαστικές του ιδιότητες.

Μπορεί να δειχθεί ότι η ταχύτητα ενός διαμήκους κύματος υπερήχου που διατρέχει ένα ελαστικό μέσο δίδεται ως (Pundit):

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - v}{(1 + v) \cdot (1 - 2v)}}$$
(2.2)

Ε δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

ρ πυκνότητα

ν λόγος Poisson

Η ταχύτητα V δεν εξαρτάται από την συχνότητα του παλμού αφού είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος κύματος λ και ισχύει :

 $V = \lambda f \tag{2.3}$

έτσι εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του υλικού και με βάση αυτό μπορούν να γίνουν παραδοχές για την κατάσταση του υλικού.

Το κύμα δεν διαδίδεται σε κενά αέρος, επομένως αν υπάρχουν τέτοια κενά στο υπό εξέταση μέσο τότε θα καταγραφεί ο χρόνος που έκανε το κύμα παρακάμπτοντας τα κενά μέσω της συντομότερης διαδρομής. Έτσι δημιουργώντας κάνναβο με τις μετρήσεις της ταχύτητας γύρω από την περιοχή που πιστεύεται ότι βρίσκονται, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν τέτοια κενά.

Η μέθοδος των υπερήχων βασίζεται σε θεμελιώδεις έννοιες της ακουστικής. Ακουστική είναι η επιστήμη που μελετά τον ήχο, περιγράφει το φαινόμενο των μηχανικών ταλαντώσεων και τη διάδοσή τους στην ύλη.

2.1.2 Είδη κυμάτων

Ήχος λέγεται η περιοδική μεταβολή της πίεσης του αέρα ικανή να ερεθίσει το αισθητήριο όργανο της ακοής. Σαν ήχους χαρακτηρίζονται τα τασικά ελαστικά κύματα που για την διάδοσή τους απαιτείται η ύπαρξη της ύλης, σε αντίθεση με τα ηλεκτρομαγνητικά, θερμικά και οπτικά κύματα. Το φάσμα των ήχων που γίνεται αντιληπτό από το άνθρωπο είναι 16Hz-20kHz

Γενικά οι ήχοι χωρίζονται σε ζώνες σύμφωνα με τον πίνακα 2.1:

Υπόηχοι	f<16Hz
Ακουστικοί ήχοι	16Hz <f<20khz< td=""></f<20khz<>
Υπέρηχοι	20kHz <f<20mhz< td=""></f<20mhz<>
υπερυπέρηχοι	20MHz <f< td=""></f<>

Πίνακας 2.1: κατηγορίες ηχητικού φάσματος

Τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου, είναι η συχνότητα διάδοσης f, ο κυματαριθμός κ και το πλάτος της έντασης α (Πρασιανάκης, 1997).

Τα ηχητικά κύματα διακρίνονται σε διαμήκη ή εγκάρσια. Στα υγρά και στα αέρια διαδίδονται μόνο διαμήκη κύματα, ενώ στα στερεά διαδίδονται είτε διαμήκη είτε εγκάρσια είτε συνδυασμός των δύο. Τα στερεά επιτρέπουν τη διάδοση πολλών ειδών κυμάτων όπως είναι τα ελαστικά, τα πλαστικά και τα κρουστικά. Στα διαμήκη κύματα η διεύθυνση ταλάντωσης των μορίων του σώματος συμπίπτει με την διεύθυνση διάδοσης του κύματος, ενώ στα εγκάρσια οι παραπάνω διευθύνσεις είναι κάθετες μεταξύ τους. Τα διαμήκη κύματα είναι το βασικότερο είδος κυμάτων που χρησιμοποιούνται στις μεθόδους ΜΚΕ και παράγονται εύκολα με τη βοήθεια ειδικών κεφαλών (probes). Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο σε υλικά που μπορούν να αναλάβουν διατμητικές τάσεις, γι'αυτό και καλούνται και κύματα διάτμησης. Δηλαδή διαδίδονται μόνο σε στερεά και σε ορισμένα παχύρρευστα υγρά όπως το μέλι και το πυκνό διάλυμα ζάχαρης, τα οποία και χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις ΜΚΕ και είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών των υλικών με τη μέθοδο των υπερήχων.

Καθαρά διαμήκη και εγκάρσια κύματα σχηματίζονται σε ένα υλικό όταν σε αυτό η διάσταση η κάθετη στη διάδοση του κύματος είναι μεγαλύτερη από το μήκος του χρησιμοποιούμενου υπερηχητικού κύματος. Σε αντίθετη περίπτωση εκτός από τα παραπάνω δύο είδη κυμάτων, παράγονται και άλλα όπως τα κύματα πλακών, τα διασταλτικά, τα καμπτικά, τα επιφανειακά και τα κύματα στρέψεως (Πρασιανάκης, 1997).

Ηχητικά κύματα στις συνοριακές επιφάνειες

Η παράμετρος που ορίζει το ποσοστό της διείσδυσης ενός κύματος σε ένα υλικό ονομάζεται **ακουστική αντίσταση** του υλικού (z) και ορίζεται ως:

 $Z = \rho \cdot c$ (2.4) όπου ρ είναι η πυκνότητα του υλικού και c η ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος σε αυτό. Στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών **ο συντελεστής ανάκλασης** (R) του κύματος θα ισούται με:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$
(2.5)

Ενώ ο συντελεστής διάθλασης (Τ) θα ισούται με:

$$T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$
(2.6)

Εάν οι ακουστικές αντιστάσεις δύο υλικών είναι ίσες $(Z_1=Z_2)$, τότε το κύμα δεν υφίσταται ανάκλαση και ισχύει R=0, ενώ περνάει όλο στο δεύτερο υλικό οπότε T=1.

Όταν το ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μία διαχωριστική επιφάνεια υπό τυχαία γωνία (δηλαδή γωνία πρόσπτωσης διάφορη του μηδενός), τότε ένα μεγάλο μέρος της ενέργειάς του μετατρέπεται σε άλλο είδος κύματος. Κατά την πλάγια πρόσπτωση παράγονται τέσσερα είδη κυμάτων, δύο από ανάκλαση και δύο από διάθλαση. Όπως και στην οπτική ισχύει και εδώ ο νόμος του Snell:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2} \tag{2.7}$$

Όπου α η γωνία πρόσπτωσης, β η γωνία ανάκλασης, c₁ η ταχύτητα του κυματος στο πρώτο υλικό και c₂ η ταχύτητα του κύματος στο δεύττερο υλικό.

Όταν ένα ηχητικό κύμα κατά την πορεία του μέσα σε ένα υλικό συναντήσει ένα εμπόδιο (ασυνέχεια, έγκοιλο, δευτερογενές σωματίδιο κ.α.), τότε ανάλογα με το μέγεθος του εμποδίου σε σχέση με το μήκος κύματος μπορεί να υποστεί σκέδαση, περίθλαση ή συμβολή. Έτσι προκύπτουν οι εξής περιπτώσεις:

a) eán d<, tóte to kúma den epipeázetai apó to empódio.

β) εάν d=λ, τότε το κύμα υφίσταται ανακλάσεις προς όλες τις κατευθύνσεις και παρατηρείται το φαινόμενο της σκέδασης.

 γ) εάν d>λ, τότε το κύμα παρακάμτει το εμπόδιο και διαδίδεται πίσω από αυτό. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται περίθλαση.

Τέλος παρατηρείται το φαινόμενο της συμβολής, όπου το ανακλώμενο κύμα υπερτίθεται στο αρχικό.

2.1.3 Απόσβεση υπερηχητικών κυμάτων

Απόσβεση του υπερήχου ονομάζεται η απώλεια της ηχητικής ενέργειας του υπερήχου όταν αυτός διαδίδεται σε κάποιο μέσο. Μετριέται με τον συντελεστή απόσβεσης α και εκφράζεται σε dB/m ή dB/mm.

Η ηχητική απόσβεση δεν εξαρτάται από τη γεωμετρία της διάδοσης αλλά είναι χαρακτηριστική ιδιότητα των υλικών και εξαρτάται από τη συχνότητα και το είδος του κύματος. Οφείλεται κυρίως σε δύο παράγοντες: στην **απορρόφηση** και στη **διασπορά**:

a) Η απορρόφηση είναι η μετατροπή της ενέργειας διάδοσης του παλμού σε θερμότητα και οφείλεται κυρίως στην εσωτερική τριβή αλλά και σε άλλους παράγοντες. Η απορρόφηση συνήθως αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας διάδοσης του παλμού (Πρασιανάκης,1997).

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

- Ι. Καθώς το υπερηχητικό κύμα εισχωρεί στο υλικό που είναι συνήθως πορώδες, το μέσο διάδοσης (συνήθως ο αέρας) κατά την εκτέλεση των ταλαντώσεων λόγω τριβών με το υλικό χάνει ενέργεια. Έχουμε δηλαδή μετατροπή ηχητικής ενέργειας σε θερμική.
- II. Το υπερηχητικό κύμα διεγείρει προς ταλάντωση (και συνεπώς προσφέρει ενέργεια) στα 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. 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.a. Η απορρόφηση των επιφανειών μετριέται σε Sabine. Μια επιφάνεια με εμβαδόν 1m² έχει απορροφητική ικανότητα 1 Sabine αν ο συντελεστής απορρόφησης είναι 1 (Λάμπρου, 2004).

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

$$(\nabla^2 + k^2)p = 0 \tag{2.8}$$

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

$$p = p_o e^{-ax} e^{i(\omega t - kx)}$$
(2.9)

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:

$$P_{rms,x}^{2} = p_{rms,o}^{2} e^{-2ax}$$
(2.10)

Οπότε για την ένταση που είναι ανάλογη με το τετράγωνο της rms πίεσης, προκύπτει:

$$I_r = I_o e^{-2ax} \tag{2.11}$$

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 σχέση 2.11 με χρήση της κλίμακας των dB μπορεί να γραφεί:

10 loge^{-ax} = 8,7ax (2.12) β) Η διασπορά οφείλεται στην ανομοιογένεια και ανισοτροπία των υλικών, δηλαδή στην παρουσία εγκλεισμάτων, πόρων, στον ρυχαίο προσανατολισμό των κόκκων και των κρυστάλλων του υλικού. Το φαινόμενο εντείνεται όταν το μήκος κύματος του διαδιδόμενου παλμού πλησιάζει στο μέγεθος των κόκκων. Σαν αποτέλεσμα, το κύμα ανακλάται ή διαθλάται υπό τυχαίες γωνίες ή παράγει άλλα είδη κύματος και ένα μέρος της αρχικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα (Πρασιανάκης, 1997).

Ανάλογα με το ρυθμό απόσβεσης, τα υλικά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες :

α) Χαμηλής απόσβεσης (<10dB/m) για διαμήκη κύματα, όπως κράμματα χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας, σίδηρος, γυαλί, πορσελάνη.

β) Μέσης απόσβεσης (<100dB/m) για διαμήκη κύματα, όπως κράμματα χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας, μόλυβδος κ.α.

 γ) Υψηλής απόσβεσης (>100dB/m), όπως τα πλαστικά, λάστιχο, ξύλο, κεραμικά, σκυρόδεμα κ.α.



Σήμα 2.2:Είδη ταλαντώσεων ανάλογα με την απόσβεσή τους (Πρασιανάκης, 1997).

Γενικά το πλάτος του παλμού που φτάνει στο δέκτη μετά τη δίαδοσή του σε ένα υλικό, δεν εξαρτάται μόνο από την απόσβεση αλλά και από άλλους παράγοντες όπως το είδος

του υπερηχητικού κύματος (διαμήκες, εγκάρσιο κ.α.), τη συχνότητα διάδοσης κ.α. Τα εγκάρσια κύματα έχουν πιο έντονη απόσβεση απ' ότι τα διαμήκη και ιδιαίτερα στα πλαστικά υλικά. Επίσης η απόσβεση αυξάνεται με τη θερμοκρασία και την υγρασία ενώ διαφοροποιείται ανάλογα με τη συχνότητα.

2.1.4 Απόσβεση υπερηχητικών κυμάτων σε συνάρτηση με την συχνότητα λειτουργίας και την υγρασία

Τα υπερηχητικά κύματα αποσβαίνουν λόγω απορρόφησης από το μέσω διάδοσης. Γνωρίζοντας την απορρόφηση είναι δυνατό να καθοριστεί η μέγιστη εμβέλεια του συστήματος. Η απόσβεση του ήχου αυξάνεται με τη συχνότητα (Σχήμα 2.3), και για δεδομένη συχνότητα η απόσβεση των υπερηχητικών κυμάτων εξαρτάται από την υγρασία (Σχήμα 2.4). Η ποσότητα της υγρασίας που προκαλεί τη μέγιστη απόσβεση δεν είναι η ίδια για όλες τις συχνότητες. Για παράδειγμα, πάνω από 125 kHz, η μέγιστη απόσβεση εμφανίζεται στα 100% PH (Phenomenal Humidity), ενώ στα 40 kHz, η μέγιστη απόσβεση εμφανίζεται στα 50% PH. Μια καλή εκτίμηση για τη μέγιστη απορρόφηση στον αέρα στη θερμοκρασία δωματίου σε όλες τις υγρασίες για τις συχνότητες μέχρι 50 kHz δίνεται από τη σχέση 2.13 (Λάμπρου, 2004):

α(f)=0.0328f,

(2.13)

ópou a(f) h exasquénts o se dB/m kai

f η συχνότητα του ήχου σε kHz

Μεταξύ 50 kHz και 300 kHz, η μέγιστη μείωση σε όλες τις υγρασίες είναι: α(f)=0.072f – 1.97 (2.14)



Σχήμα 2.3: Η απόσβεση του ήχου στον αέρα στη θερμοκρασία δωματίου σε όλες τις υγρασίες για συχνότητες από 40 kHz έως και 300 kHz (Λάμπρου, 2004)



Σχήμα 2.4: Η απόσβεση του ήχου στον αέρα σε θερμοκρασία δωματίου σε συνάρτηση με την υγρασία για συχνότητες από 40 kHz έως 200 kHz (Λάμπρου, 2004).

2.2 Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι παραγωγής υπερήχων: Η μηχανική μέθοδος, η μέθοδος της μαγνητοσυστολής και τέλος η μέθοδος του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου (Πρασιανάκης, 1997). Η τελευταία είναι η πιο δημοφιλής για τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών και αναλύεται παρακάτω.

Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού είναι μια ιδιότητα ορισμένων φυσικών ή και τεχνητών κρυστάλλων να εμφανίζουν ηλεκτρικά φορτία στις απέναντι επιφάνειές τους όταν αυτοί υποβάλλονται σε καταπόνηση (θλιπτική ή εφελκυστική τάση). Δηλαδή είναι το φαινόμενο μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα. Η πιεζοηλεκτρική ιδιότητα οφείλεται στην μετατόπιση και σχετική αναδιάταξη φορτίων που προκαλείται στην δομή των κρυστάλλων με την εφαρμογή μηγανικής πίεσης. Το πρόσημο του ηλεκτρικού φορτίου αλλάζει με την εναλλαγή της συχνότητας κατα την οποία εφαρμόζεται η καταπόνηση. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι αναστρέψιμο. Αυτό σημαίνει ότι αν εφαρμοστεί ηλεκτρικό δυναμικό στις απέναντι επιφάνειες ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου τότε αυτός θα παραμορφοθεί (εφελκυστικά ή θλιπτικά) ανάλογα με τη φορά του ηλεκτρικού δυναμικού. Εάν εφαρμοστεί εναλλασσόμενο ρεύμα τότε ο κρύσταλλος θα παραμορφώνεται με τηνίδια συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος. Το γεγονός ότι το φαινόμενο είναι αναστρέψιμο είναι ο λόγος που ο ίδιος κρύσταλλος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως πομπός και ως δέκτης. Ο κρύσταλλος που εμφανίζει καλύτερα το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ο κρύσταλλος χαλαζία (SiO₂) (Πρασιανάκης, 1997).

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. 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 κρύσταλλου (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5: Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο α) Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίουπροκαλεί αλλαγή των διαστάσεων του υλικού β) Εφαρμογή πίεσης στο υλικό δημιουργεί επιφανειακά φορτία (Λάμπρου, 2004)

2.2.1 Πιεζοηλεκτρικά υλικά

Ο μορφοτροπέας (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 αντίστροφα (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 Ε και τη μεταβολή του πάχους z του κρυστάλλου:

$$\frac{d_z}{z} = C_c E \tag{2.15}$$

Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Όπου C_c η αντίστροφη πιεζοηλεκτρική σταθερά. Η εφαρμογή μηχανικής πίεσης (στη συγκεκριμένη περίπτωση υπερηχητικής πίεσης p στον κρύσταλλο δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο εντάσεως Ε

$$E = C_d \cdot p \tag{2.16}$$

όπου Cd είναι η πιεζοηλεκτρική σταθερά.

Στους μη καταστροφικούς ελέγχους χρησιμοποιούνται ευρύτατα σιδηροηλεκτρικά υλικά που κάτω από κατάλληλη επεξεργασία γίνονται πιεζοηλεκτρικά. Τα πιο διαδεδομένα υλικά για ΜΚΕ είναι τα κεραμικά γιατί είναι δυνατή η κατασκευή πιεζοηλεκτρικών δίσκων μεγάλων διαστάσεων και επομένως παραγωγή υπερήχων χαμηλών συχνοτήτων με εύκολο και οικονομικό τρόπο. Ένα από τα πιο διαδεδομένα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά είναι ο ζιρκοτιτανικός μόλυβδος (PbZrO₃PbTiO₃) που εμφανίζει μεγάλη ευαισθησία.

Το PZT (lead - zirconate - titanate) χρησιμοποιείται λόγω και 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 ζιρκονίου-τιτανίου και την προσθήκη μικρής ποσότητας άλλων ουσιών π.χ. λανθάνιο.

Τα μειονεκτήματα 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. Στην 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 (Λάμπρου, 2004).

Το αντίστοιχο ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα για την περιοχή συντονισμού παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 2.6):



Σχήμα 2.6: Το ηλεκτρικό ισοδύναμο πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου (Λάμπρου, 2004).

Όπου
$$ω_s = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$
 και $ω_p = \frac{1}{\sqrt{LC_{o\lambda}}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 + \frac{C}{C}}$

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. Εδώ παρουσιάζεται το φαινόμενο να δημιουργείται μια τεράστια αυτεπαγωγή σε πολύ μικρού μεγέθους υλικό. Για την κατασκευή αντίστοιχης αυτεπαγωγής με πηνίο με πυρήνα από φερρίτη θα χρειαζόταν κύβο με διαστάσεις της τάξεως των μερικών εκατοστών.

2.2.2 Είδη υπερηχητικών μετατροπέων

Έκτος από τους πιεζοηλεκτρικούς μορφοτροπείς άλλα είδη υπερηχητικών μετατροπέων είναι:

1. Μηχανικός

- 2. Ηλεκτρομαγνητικός
- 3. Magnetostrictive

 Ηλεκτροστατικός (ουσιαστικά είναι ένας πυκνωτής με τη μία πλάκα σταθερή και την άλλη ελεύθερη ώστε να μπορεί να ταλαντώνεται)

Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζονται ένας πιεζοηλεκτρικός και ένας ηλεκτροστατικός μορφοτροπέας, ενώ στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται μία τομή του πιεζοηλεκτρικού μορφοτροπέα:



Σχήμα 2.7:Πιεζοηλεκτρικός (αριστερά) και ηλεκτροστατικός (δεξιά) μορφοτροπέας (Λάμπρου, 2004)



Σχήμα 2.8:Πιεζοηλεκτρικός μορφοτροπέας (Λάμπρου, 2004).

Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο κόβεται στο 1/2 του επιθυμητού μήκους κύματος. Η μία πλευρά του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου επικολλάται σ' ένα υλικό γνωστό ως υλικό υποστήριξης (backing material), με σκοπό την απόσβεση των ταλαντώσεων του στοιχείου για τη βελτίωση του εύρους συχνοτήτων (bandwidth) και τη μείωση της οπίσθιας διάδοσης του κύματος και των ανακλάσεων του από εσωτερικές δομές. Η πλευρά του στοιχείου προς το μέσο διάδοσης μπορεί καλύπτεται από ένα ή περισσότερα στρώματα (matching layers), με σκοπό τη σύζευξη των εμπεδήσεων του κρυστάλλου και του μέσου διάδοσης με σκοπό τη μείωση της απώλειας ηχητικής ενέργειας στη διαχωριστική τους επιφάνεια. Το πάχος του στρώματος θα πρέπει να είναι το 1/4 του μήκος κύματος εκπομπής.

Τέλος η μηχανική κατασκευή περιλαμβάνει παραμέτρους όπως η περιοχή επιφάνειας ακτινοβολίας, η μηχανική απόσβεση, το προστατευτικό περίβλημα, τον τύπο των συνδετήρων και άλλες μεταβλητές της φυσικής κατασκευής (Λάμπρου, 2004).

2.2.3 Πιεζοηλεκτρικές κεφαλές καθέτου δέσμης.

Οι κεφαλές εκείνες που εκπέμπουν και λαμβάνουν υπερηχητικούς παλμούς κάθετα προς την επιφάνεια του δοκιμίου, ονομάζονται κεφαλές καθέτου δέσμης. Εάν ο κρύσταλλος έχει κοπεί κατά την οριζόντια διεύθυνση τότε η κεφαλή παράγει διαμήκη κύματα, ενώ αν έχει κοπεί καθέτως τότε παράγει εγκάρσια κύματα. Οι κεφαλές καθέτου δέσμης χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις δοκιμές υπερηχητικού ελέγχου και κυρίως:

Στην ανίχνευση ατελειών ιδιαίτερα προσανατολισμένων παράλληλα στην επιφάνεια του δοκιμίου, στις παχυμετρήσεις, στον προσδιορισμό της ταχύτητας των υπερηχητικών κυμάτωνκαι στον προσδιορισμό της απόσβεσης τους κατα τη διέλευση τους μέσα από το ελεγχόμενο υλικό. Από τις ταχύτητες των υπερηχητικών κυμάτων στη συνέχεια προσδιορίζονται οι ελαστικές σταθερές των υλικών.

Το πάχος του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου μπορεί να ποικίλει, οπότε και να παράγει παλμούς αντίστοιχης συχνότητας σύμφωνα με τη σχέση:

 $f_0 = c/2d$ (2.15)

όπου f_0 η συχνότητα του παραγώμενου παλμού, c η ταχύτητα του παλμού και d η απόσταση που διανύει ο παλμός. Επίσης μποτεί να έχει κυκλικό ή ορθογωνικό σχήμα

οπότε ανάλογη θα είναι και η μορφή της παραγόμενης ηχητικής δέσμης (Πρασιανάκης, 1997).

3 Μετασχηματισμοί Fourier

3.1 Γενικά

Η ιστορία των μετασχηματισμών άρχισε το 1807 όταν ο J. Fourier ισχυρίστηκε, ότι οποιαδήποτε περιοδική συνάρτηση μπορεί να παρασταθεί με ένα άθροισμα ημιτονικών και συνημιτονικών όρων. Το 1829 ο Dirichlet καθόρισε με ακρίβεια τις συνθήκες κάτω από τις οποίες μία περιοδική συνάρτηση μπορεί να παρασταθεί με την σειρά Fourier. Στην συνέχεια ο Fourier ανέπτυξε τον ομώνυμο μετασχηματισμό για την παράσταση των απεριοδικών σημάτων. Ο μετασχηματισμός Fourier αποτελεί σημείο αναφοράς για κάθε επεξεργασία σήματος και για τους άλλους μετασχηματισμούς (Μερτίκας, 1999).

3.2 Η ανάλυση Fourier

Το σχήμα 3.1 απεικονίζει τη διαταραχή που προκαλείται από την υπέρθεση δύο αρμονικών συναρτήσεων οι οποίες έχουν διαφορετικά πλάτη και συχνότητες. Η συνισταμένη διαταραχή $y=y_1+y_2$ δεν είναι αρμονική (δηλαδή δεν είναι ημιτονοειδής). Συνδυάζοντας λοιπόν μερικές ημιτονοειδείς συναρτήσεις των οποίων τα πλάτη α, μήκη κύματος λ και σχετικές φάσεις φ έχουν επιλεγεί με προσοχή, μπορούν να συντεθούν μερικές ενδιαφέρουσες συναρτήσεις. Μια τεχνική για την επίτευξη αυτής της διαδικασίας επινοήθηκε από τον Γάλλο φυσικό Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830).



Σχήμα 3.1: Γραφική παράσταση της σύνθεσης ενός μη αρμονικού κύματος από δύο αρμονικές συναρτήσεις (Μερτίκας, 1999,τροποποιημένο).

Αυτή η διαδικασία ονομάζεται θεώρημα Fourier και δηλώνει ότι μία συνάρτηση g(x) που διαθέτει μήκος κύματος λ μπορεί να αναλυθεί σε άθροισμα αρμονικών συναρτήσεων, τα μήκη κύματος των οποίων είναι ακέραια υποπολλαπλάσια του θεμελιώδους μήκους κύματος λ (δηλαδή λ, λ/2, λ/3, λ/4, κλπ). Επομένως το ανάπτυγμα μιας συνάρτησης g(x) σε σειρά Fourier μπορεί να γραφεί ως:

$$g(x) = C_o + C_I \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \phi_1\right) + C_2 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda/2}x + \phi_2\right) + C_3 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda/3}x + \phi_3\right) + \dots$$
(3.1)

η σχέση (3.1) γράφεται και ως:

$$C_m \cos(m\frac{2\pi}{\lambda}x + \varphi_m) = C_m \cos(mkx = \varphi_m) = A_m \cos(mkx) + B_m \sin(mkx)$$
(3.2)

όπου :

$$\frac{2\pi}{\lambda} = k \kappa \alpha i \frac{1}{\lambda} = \kappa, \ \dot{\alpha} \rho \alpha \ k = 2\pi \kappa, \ A_m = C_m \cos(\varphi_m), \ B = -C_m \sin(\varphi_m)$$
(3.3)

όπου κ είναι η χωρική συχνότητα ή κυματαριθμός, λ είναι το θεμελιώδες μήκος κύματος της συνάρτησης, ενώ m=0, 1, 2, 3,..., κοκ. Ο όρος k ονομάζεται γωνιακή χωρική συχνότητα και εκφράζεται σε rad/m. Επομένως:

$$g(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos(m2\pi\kappa x) + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin(m2\pi\kappa x)$$
(3.4)

Η διαδικασία προσδιορισμού των συντελεστών A_0 , A_m , B_m για την g(x) ονομάζεται ανάλυση Fourier, και ισχύει—όχι πάντα—και για μη περιοδικές συναρτήσεις. Οι συντελεστές δίδονται από τις παρακάτω σχέσεις (Bendat και Piersol,1993):

$$A_m = \frac{2}{\lambda} \int_0^\lambda g(x) \cos(m2\pi\kappa x) dx, \quad B_m = \frac{2}{\lambda} \int_0^\lambda g(x) \sin(m2\pi\kappa x) dx \tag{3.5}$$

Εάν η g(x) είναι άρτια, δηλαδή g(x)=g(-x), τότε $B_m=0$ και η συνάρτηση περιέχει μόνο συνημιτονικούς όρους. Εάν η g(x) είναι περιττή, δηλαδή g(x)=-g(-x), τότε $A_m=0$ και

η συνάρτηση περιέχει μόνο ημιτονικούς όρους. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα διαγραμμάτων συναρτήσεων με ημιτονικούς όρους.



Σχήμα 3.2: Μερικά παραδείγματα διαγραμμάτων αθροίσματος της σειράς Fourier (Μερτίκας, 1999).



Μερικές περιττές συναρτήσεις

 $\Pi\eta\gamma\dot{\eta}: www.ifoes.org/ElMathHandbook.htm$



Μερικές άρτιες συναρτήσεις

Πηγή:www.ifoes.org/ElMathHandbook.htm

3.3 Ο μετασχηματισμός Fourier

Μια συνάρτηση g(x) της απόστασης x σε [meters] μετασχηματίζεται σε μιγαδική συνάρτηση του κυματαριθμού κ [cycles/m] (χωρική συχνότητα) μέσω του ακόλουθου ολοκληρώματος:

$$G(\kappa) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) \exp(-j2\pi\kappa x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) e^{-j2\pi\kappa x} dx$$
(3.6)

και συμβολίζεται ως:

 $G(\kappa) = \Im[g(x)] \tag{3.7}$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier μιας συνάρτησης G(κ) του κυματαριθμού δίδεται από το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$g(t) = \mathfrak{I}^{-1} \{ G(\kappa) \} = \int_{-\infty}^{\infty} G(\kappa) \exp(j2\pi\kappa x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} G(\kappa) e^{j2\pi\kappa x} dx$$
(3.8)

Οι συναρτήσεις g(x) είναι πραγματικοί αριθμοί. Ο μετασχηματισμός Fourier μιας πραγματικής συνάρτησης είναι κατά κανόνα μιγαδικός, δηλαδή:

 $G(\kappa) = \operatorname{Re}[G(\kappa)] + j \operatorname{Im}[G(\kappa)]$ (3.9)

όπου Re και Im η πραγματική και η φανταστική συνιστώσα αντίστοιχα. Το όρισμα της συνάρτησης G είναι η μεταβλητή x, συνήθως σε [meters], και έχει ένα πεδίο ορισμού θεωρητικά από (- ∞ , + ∞). Η ανεξάρτητη μεταβλητή της χωρικής συχνότητας κ εκφράζεται συνήθως σε cpm (cycles per minute) ή, εάν η μεταβλητή είναι ο χρόνος *t*, se Hz=cps (cycles per second). Πολλές φορές χρησομοποιείται η κυκλική συχνότητα k=2πκ [rad/sec] (Μερτίκας, 1999).

Aν (i) οι συναρτήσεις f(t) και f'(t) είναι τμηματικά συνεχείς σε κάθε πεπερασμένο διάστημα -L < t < L, (ii) το $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt$ συγκλίνει και (iii) η f(t) ισούται με

 $\frac{1}{2}$ {f(t+0) + f(t-0)} σε κάθε σημείο ασυνέχειας, τότε:

$$f(t) = \kappa \tag{3.10}$$

όπου
$$A(\kappa) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \cos \kappa u du$$
 (3.11)

και
$$B(\kappa) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \sin \kappa u du$$
 (3.12)

Av
$$\eta f(t)$$
 είναι περιττή συνάρτηση [δηλ. $f(-t) = -f(t)$], τότε:

$$f(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \left[\int_0^\infty f(u) \sin \kappa u du \right] \sin \kappa t d\omega$$
(3.13)

Αν η f(t) είναι άρτια συνάρτηση [δηλ. f(-t) = f(t)], τότέ (3.14) ουσιαστικά, όλα τα προηγούμενα συνοψίζονται στο εξής: Όλη η πληροφορία που υπάρχει στο χώρο t [δηλ. στην f(t)] μπορεί με μια ολοκλήρωση (ως προς u) να μεταφερθεί στο χώρο ω και μετά, με μια δεύτερη ολοκλήρωση, πίσω στο χώρο t.

Η μετασχηματισμένη Fourier της f(t) ορίζεται με τη σχέση:

$$F(\kappa) = \Im\{f(t)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{i\kappa t} dt$$
(3.15)

Η αντίστροφη μετασχηματισμένη Fourier της $F(\kappa)$ ορίζεται με τη σχέση:

$$F(t) = \mathfrak{I}^{-1}\{F(\kappa)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\kappa) e^{-i\kappa t} d\kappa$$
(3.16)

Οι f(t) και $F(\kappa)$ καλούνται ζεύγος μετασχηματισμένων Fourier. Η f(t) αντιπροσωπεύει την πληροφορία στο χώρο του χρόνου και η $F(\kappa)$ στο χώρο των συχνοτήτων (συνήθως το t παριστάνει χρόνο και το κ συχνότητα)

Ιδιότητες

Av $F(\kappa) = \Im \{f(t)\}$ και $G(\kappa) = \Im \{g(t)\}$, τότε με *a* και *b* σταθερές προκύπτει:

- Γραμμικότητα : ℑ {af (t) + bg(t)} = aF(κ) + bG(κ)
 (3.17.α)
- Αλλαγή κλίμακας : ℑ {f(at)} = $a^{-1}F(\kappa/a)$ (3.17.β)
- Metatópisy: $\Im \{f(t+a)\} = e^{-ia\kappa}F(\kappa)$ (3.17.7)
- Πολλαπλασιασμός επί δύναμη : ℑ {tⁿ f(t)}=(-i)ⁿ dⁿ F/dκⁿ
 (3.17.δ)
- Πολλαπλασιασμός επί e^{iat} : $\Im \{f(t)e^{iat}\} = F(\kappa a)$ (3.17.ε)

- Av $\lim_{a\to 0} \Im\{f(t,a)\} = \Im\{f(t)\}$ tóte $\lim_{a\to 0} f\{f(t,a)\} = f(t)$, ópou f(t) eívai suvechic.
- Αν επιπλέον (α) υπάρχουν οι παράγωγοι f^(r)(t) μέχρι και τάξης n της f(t) για κάθε t και (β) f^(r)(t) → 0 για |t| → ∞ και κάθε r < n, τότε:

$$\Im \left\{ f(n)(t) \right\} = (-i\kappa)^n F(\kappa) \tag{3.17.57}$$

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι γραμμικός. Δηλαδή, πρώτον ο μετασχηματισμός του αθροίσματος δύο συναρτήσεων είναι ίσος με το άθροισμα των μετασχηματισμών δεύτερον, ο μετασχηματισμός Fourier μιας σταθεράς επί μία συνάρτηση είναι ίσος με τη σταθερά επί τον μετασχηματισμό Fourier της συνάρτησης (Μερτίκας, 1999).

Στο χώρο των χρόνων t η συνάρτηση g(t) μπορεί να είναι συμμετρική, πραγματική ή μιγαδική, ή μπορεί να είναι άρτια g(t)=g(-t) ή περιττή g(t)=-g(-t).

Στο σχήμα 3.3 φαίνεται η συνάρτηση του συνημιτόνου και ο αντίστοιχος μετασχηματισμός Fourier.



Σχήμα 3.3: Ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης του συνημιτόνου (Μερτίκας, 1999, τροποποιημένο).
Κατά κανόνα ισχύει:

	g(t) πραγματική		$G(-\kappa)=[G(\kappa)]^*$
	g(t) φανταστική		$G(-\kappa) = -[G(\kappa)]^*$
	g(t) άρτια		$G(-\kappa)=G(\kappa)$
Av	g(t) περιττή	Τότε	$G(-\kappa) = -G(\kappa)$
	g(t) πραγματική και άρτια		G(κ) πραγματική και άρτια
	g(t) πραγματική και περιττή		G(κ) μιγαδική και περιττή
	g(t) φανταστική και άρτια		G(κ) μιγαδική και άρτια
	g(t) φανταστική και περιττή		G(κ) πραγματική και περιττή



 $\Pi\eta\gamma\dot{\eta}: www.ifoes.org/ElMathHandbook.htm$



Πηγή:www.ifoes.org/ElMathHandbook.htm

3.4 Δειγματοληψία

Oi diakpités suvartísels prokúpiouv apó tis antístoices suneceís metá apó deigmatolymá. Estw loipón óti to analogikó súma g(t) tropodoteítai styn eísodo enós deigmatolúptin (Mertíkas, 1999). H éxodos autoú ba eínai y akoloubía g_m , ta stoiceía tys opoías antistoicoún stis metrúsels tou plátous tys g(t) aná croniká diastúmata Δt : $g_m=g(m\cdot\Delta t), m=0, 1, 2, 3,..(N-1).$ (3.18)

Η παράμετρος Δt αποτελεί την περίοδο δειγματοληψίας και το αντίστροφο αυτής τη συχνότητα ή τον ρυθμό δειγματοληψίας (Fs):

$$\Delta t \rightarrow [sec] \Rightarrow \frac{1}{\Delta t} \rightarrow [samples/sec]$$
 (3.19)

δηλαδή, το πλήθος των δειγμάτων που λαμβάνονται στη μονάδα του χρόνου.

Για οποιοδήποτε διάστημα δειγματοληψίας υπάρχει μία ειδική συχνότητα *B*, που ονομάζεται κρίσιμη συχνότητα δειγματοληψίας του Nyquist:

$$B \equiv \frac{1}{2\Delta t} [\text{samples/sec}]$$
(3.20)

Η έννοια της κρίσιμης συχνότητας B του Nyquist γίνεται κατανοητή μέσα από το θεώρημα της δειγματοληψίας, σύμφωνα με το οποίο:

Αν γίνει δειγματοληψία μιας συνεχούς συνάρτησης g(t) με διάστημα δειγματοληψίας Δt τότε στο φάσμα των κυματαριθμών η g(t) παρουσιάζει περιορισμένο εύρος ζώνης (band-limited), δηλαδή $-B < \kappa < B$ με $B=1/2\Delta t$. Αντίστροφα αν G(κ)=0 για όλα τα κ, $|\kappa| ≥ B$, τότε η συνεχής συνάρτηση g(t) καθορίζεται πλήρως από τα δείγματά της, με διάστημα δειγματοληψίας $\Delta t ≤ 1/2B$ (σχήμα 3.4), (Κανλής, 2002).



Σχήμα 3.4: Φάσμα αρχικού και δειγματοληπτημένου σήματος για $f_s > 2B$ (Κανλής, 2002).

Η σχέση που συνδέει τη συχνότητα Nyquist με την g(t) είναι:

$$g(t) = \Delta t \cdot \sum_{-\infty}^{+\infty} g_m \frac{\sin\{2\pi B[t - m(\Delta t)]\}}{\pi[t - m(\Delta t)]}$$
(3.21)

Αντίθετα αν γίνει δειγματοληψία μιας συνάρτησης που παρουσιάζει συχνότητες έξω από τη ζώνη $-B < \kappa < B$, τότε η ανάλυση του φάσματος για αυτές τις συχνότητες μετατοπίζεται πλασματικά μέσα σε αυτή τη ζώνη. Το φαινόμενο αυτό λέγεται αναδίπλωση ή φασματική επικάλυψη (aliasing, spectral overlap). Σε μια τέτοια περίπτωση η μορφή του φάσματος του αρχικού σήματος δεν διατηρείται στο φάσμα του δειγματοληπτημένου σήματος, με συνέπεια να μην είναι δυνατή η ακριβής ανακατασκευή του αρχικού αναλογικού σήματος.

3.5 Διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DTFT)

Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier είναι ο μετασχηματισμός μιας συνάρτησης από ένα πεπερασμένο αριθμό δειγματοληπτικών στοιχείων. Έστω m=N διαδοχικά σημεία:

$$g_m = g(m \cdot \Delta t), m = 0, 1, 2, 3, ..(N-1).$$
 (3.22)

Ο μετασχηματισμός Fourier αντί να γίνει σε όλες τις τιμές κ(κυματαριθμού) στο εύρος $-B < \kappa < B$ θα εφαρμοστεί μόνο για:

$$\kappa_n \equiv \frac{n}{N \cdot \Delta t} \quad n = -N/2, \dots, N/2.$$
(3.23)

Το ολοκλήρωμα του μετασχηματισμού Fourier θα είναι:

$$G(\kappa_n) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \cdot \exp(-j2\pi\kappa_n t) dt \cong \sum_{m=0}^{N-1} g_m \cdot \exp(-j2\pi\kappa_n t_m) \Delta t =$$

= $\Delta t \cdot \sum_{m=0}^{N-1} g_m \exp[-j2\pi m \frac{n}{N}] = \Delta x \cdot \sum_{m=0}^{N-1} g_m e^{-j2\pi m (\frac{n}{N})}$ (3.24)

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί ως:

Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

$$G_n \equiv G(n) = \sum_{m=0}^{N-1} g_m \cdot \exp[-j2\pi m \frac{n}{N}]$$
(3.25)

Επειδή τα δείγματα αυτά προκύπτουν από τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Fourier σε N ισαπέχουσες διακριτές συχνότητες, η παραπάνω σχέση ονομάζεται διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform, DFT), (σχήμα 3.5).

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier που ανακτά το σύνολο των διακριτών τιμών g_m της συνάρτησης από τις τιμές G_n , είναι:

$$g(m) = g_m = \frac{1}{N} \{ \sum_{m=0}^{N-1} G(n) \cdot \exp[j2\pi m \frac{n}{N}] \}$$
(3.26)



Σχήμα 3.5: Μια συνεχής συνάρτηση στην οποία γίνεται δειγματοληψία και ο αντίστοιχος μετασχηματισμός Fourier (Μερτίκας, 1999).



Σχήμα 3.6 Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier μετατοπισμένος (Μερτίκας, 1999).

Στο σχήμα 3.6 φαίνεται η συχνότητα Nyquist και η μετατόπιση του μετασχηματισμού Fourier.

3.6 Ταχύς μετασχηματισμός Fourier

Ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (fast Fourier transform, FFT) δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας αποδοτικός αλγόριθμος για τον υπολογισμό του DFT και αρχικά διατυπώθηκε από τους Cooley και Tukey (1965).

Εάν χρειάζονται N² μιγαδικοί πολλαπλασιασμοί για τον υπολογισμό του διακριτού μετασχηματισμού Fourier, για τον υπολογισμό του ταχύ μετασχηματισμού χρειάζονται *Nlog₂(N)*.

Θεωρείται ότι ο αριθμός Ν των δειγμάτων τυχαίνει να είναι άρτιος. Στην πράξη όλοι σχεδόν οι αλγόριθμοι υπολογισμού του FFT απαιτούν το Ν να εκφράζεται ως μια δύναμη του 2:

N= 2^p p = aképaios

Αν το N δεν είναι κάποια δύναμη του 2, τότε συμπληρώνονται τα υπόλοιπα στοιχεία με 0 ώστε να γίνει δύναμη του 2. Για παράδειγμα αν N=187, τότε συμπληρώνεται ο αριθμός 187 με 69 μηδενικά, ώστε να γίνει 256=2⁸ (Μερτίκας, 1999).

Σχηματίζονται δύο νέες σειρές δεδομένων από τα αρχικά g(m), m = 0, 1, 2, ..., N-1, που ονομάζονται y και z. Το πρώτο διάνυσμα y περιέχει τα στοιχεία του g(m) με άρτιο δείκτη *m*, και το δεύτερο διάνυσμα z περιέχει τα στοιχεία με περιττό δείκτη. Δηλαδή αν, για παράδειγμα, το g(m) περιείχε 8 στοιχεία, τότε:

$$y = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ y(2) \\ y(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(0) \\ g(2) \\ g(4) \\ g(6) \end{bmatrix} \qquad z = \begin{bmatrix} z(0) \\ z(1) \\ z(2) \\ z(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(1) \\ g(3) \\ g(5) \\ g(7) \end{bmatrix}$$
(3.27)

Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier μπορεί να γραφτεί ως το άθροισμα δύο μετασχηματισμών κάθε ένας από τους οποίους έχει μήκος N/2. Από την εξίσωση του διακριτού μετασχηματισμού προκύπτει ότι:

$$G(n) = \sum_{m=0}^{N-1} g(m) e^{-j2\pi n (\frac{n}{N})} = \sum_{m=0}^{N-1} g(m) W^{n \cdot m} =$$

= $\sum_{k=0}^{(N/2)-1} g(2k) W^{2nk} = \sum_{k=0}^{(N/2)-1} g(2k+1) W^{n(2k+1)} =$
= $\sum_{m=0}^{(N/2)-1} y(m) W^{2nm} + W^n \sum_{m=0}^{(N/2)-1} z(m) W^{2nm} =$
(3.28)

 $=Y(n)+W^n Z(n), \quad n=0, 1, 2, ..., N.$

όπου, Y(n) είναι η n-οστή συνιστώσα του μετασχηματισμού μήκους N/2 από τους άρτιους δείκτες m των δεδομένων g(m), και Z(n) ο αντίστοιχος μετασχηματισμός για περιττές συνιστώσες μήκους N/2.

Οι μετασχηματισμοί Y(n) και Z(n) είναι περιοδικοί με περίοδο N/2.

4 Εφαρμογή των μη καταστροφικών μεθόδων.

4.1 Προσδιορισμός μηχανικών χαρακτηριστικών σκυροδέματος ηλικίας 28 ημερών και 28 ετών με καταστροφικές μεθόδους και υπερήχους.

Σε διερεύνηση του Πρασιανάκη και Γκιόκα (2002) εξετάστηκε η εξέλιξη των χαρακτηριστικών σε σκυροόδεμα ηλικίας 28 ετών, του οποίου οι ιδιότητες σε ηλικίες 7, 28 και 90 ημερών είναι γνωστές. Το σκυρόδεμα αυτό ελέγχθηκε με καταστροφικές δοκιμές αλλά και με τη μέθοδο των υπερήχων. Επιπρόσθετα, ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη συσχέτηση της θλιπτικής αντοχής και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας με την ταχύτητα διαδόσεως των υπερηχητικών κυμάτων στο σκυρόδεμα.

Αρχικά τα δοκίμια είχαν εξεταστεί ως προς την αντοχή τους σε θλίψη, αντιδιαμετρική θλίψη, καθαρό εφελκυσμό, κάμψη και τριαξονική καταπόνηση (εφελκυσμό και θλίψη).

28 χρόνια πριν τη δευτερογενή διερεύνηση. Δευτερογενώς εξετάστηκαν κάποια από αυτά σε θλίψη, αντιδιαμετρική θλίψη και κάμψη σε διάφορες ηλικίες και προσδιορίστηκαν η αντοχή και το στατικό μέτρο ελαστικότητας ενώ πριν τον καταστροφικό έλεγχο τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε έλεγχο με υπερήχους στον οποίο μετρήθηκαν οι ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων. Οι σχέσεις που συνδέουν τις ταχύτητες διάδοσης με τις ελαστικές σταθερές των υλικών είναι οι εξής:

$$\mathbf{c}_{1} = \sqrt{\frac{E\delta \cdot (1-\delta)}{\rho \cdot (1+\delta) \cdot (1+2\delta)}}, \ \mathbf{c}_{t} = \sqrt{\frac{G\delta}{2\rho \cdot (1+\delta)}}, \ \mathbf{c}_{s} = \frac{0.87+1.12\delta}{1+\delta} \cdot \sqrt{\frac{G\delta}{2\rho \cdot (1+\delta)}},$$
(4.1)

όπου: C_1 : ταχύτητα διάδοσης διαμήκων κυμάτων,

- Ct: -«- εγκάρσιων -«-
- Cs: --- επιφανειακών ---
- Εδ: Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας.
- Εσ: Το αρχικό εφαπτομενικό (στατικό) μέτρο ελαστικότητας.
- G_{δ} : Το δυναμικό μέτρο στρέψεως.
- δ: Ο δυναμικός λόγος Poisson.
- ρ: Η πυκνότητα.

Οι παράγοντες, που επηρεάζουν τη μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων στο σκυρόδεμα, είναι: (α) η υγρασία του σκυροδέματος, (β) η θερμοκρασία του σκυροδέματος, (γ) το μήκος διαδρομής των υπερηχητικών κυμάτων και (δ) το σχήμα και οι διαστάσεις του δοκιμίου.

Η σχέση μεταξύ της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και, γενικότερα της αντοχής του, και της ταχύτητας των υπερήχων εξαρτάται από τους εξής παράγοντες: (α) την ηλικία του σκυροδέματος, (β) την περιεκτικότητα σε αέρα, (γ) το λόγο νερού προς τσιμέντο (N/T), (δ) τις συνθήκες συντήρησης και υγρασίας, (ε) το λόγο αδρανών προς τσιμέντο, (στ) τον τύπο του τσιμέντου και (ζ) το είδος και τα μεγέθη των αδρανών.

Οι υπερηχητικές κεφαλές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον έλεγχο με υπερήχους ήταν συχνότητας 500kHz.Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος ήταν η μέθοδος της διέλευσης, όπου οι δύο υπερηχητικές κεφαλές τοποθετήθηκαν σε δύο απέναντι πλευρές του δοκιμίου, λειτουργώντας η μία κεφαλή ως πομπός και η δεύτερη ως δέκτης.

4.1.1 Σχέση θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων -ταχύτητας υπερήχων

Στον πίνακα 4.1 περιέχονται η αντοχή σε θλίψη (εξαρτημένη μεταβλητή) και η ταχύτητα των υπερήχων κατά τη διεύθυνση σκυροδέτησης (ανεξάρτητη μεταβλητή), για κάθε κυλινδρικό δοκίμιο σκυροδέματος ενώ στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η μεταβολή της αντοχής σε σχέση με την ταχύτητα του υπερήχου.

ala	Αντοχή σε θλίψη	Ταχύτητα κατά τη διεύθυνση
u/u	(kp/cm^2)	σκυροδέτησης (km/sec)
1	362.41	4.557
2	448.96	4.716
3	429.98	4.771
4	315.50	4.361
5	286.47	4.269
6	329.46	4.408

Πίνακας 4.1: τιμές αντοχής και ταχύτητας υπερήχου για κάθε κυλινδρικό δοκίμιο.



Σχήμα 4.1: Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη συναρτήσει της ταχύτητας υπερήχου (Πρασιανάκης, Γκιόκας, 2002).

Η επιλογή της κατάλληλης μαθηματικής σχέσεως πραγματοποιήθηκε με βάση: (α) τις τιμές του πολλαπλού συντελεστή προσδιορισμού R^2 και του ελέγχου F και, (β) τις τιμές του στατιστικού ελέγχου t-Student για την παράμετρο της ανεξάρτητης μεταβλητής C_1 . Ως εξαρτημένη μεταβλητή χρησιμοποιείται η θλιπτική αντοχή σf, σε kp/cm2 και ως ανεξάρτητη η συνολική μέση τιμή της ταχύτητας των υπερηχητικών κυμάτων C_1 σε km/sec.

Η εκτίμηση της σχέσεως μεταξύ της θλιπτικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων και της ταχύτητας των υπερήχων κατά τη διεύθυνση σκυροδέτησης πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη μαθηματικών προτύπων. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την κατάρτιση των μαθηματικών προτύπων, ήταν η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, δηλαδή η Ανάλυση Παλινδρόμησης.

Η μαθηματική σχέση, που κρίθηκε ικανοποιητικότερη για την εκτίμηση της αντοχής ενός κυλινδρικού δοκιμίου σκυροδέματος με βάση την ταχύτητα διαδόσεως των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων κατά τη διεύθυνση σκυροδετήσεως, είναι:

$$\Sigma_{\rm f} = e^{(9,810 - \frac{17,713}{c1})}, \, \mu\epsilon \, {\rm R}^2 = 0,97$$
 (4.2)

4.1.2 Προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας.

Με τη χρήση των ηλεκτρικών μηκυνσιομέτρων κατά τη δοκιμή της θλίψεως προσδιοριζόταν ο λόγος του Poisson ν (στατικός) για κάθε κυλινδρικό δοκίμιο. Εφαρμόζοντας στη συνέχεια την πρώτη από τις σχέσεις (4.1) υπολογιζόταν το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας Εδ για κάθε δοκίμιο. Η πυκνότητα για τα δοκίμια αυτά προσδιορίστηκε και βρέθηκε ίση με ρ = 2,45 g/cm³. Ο λόγος poisson, Το δυναμικό και στατικό μέτρο ελαστικότητας αλλα και ο μεταξύ τους λόγος παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2:

α/α	Λόγος poisson v	E_{δ} (GPa)	$E_{\sigma}(GPa)$	E_{δ}/E_{σ}
1	0,244	44,03	42,90	1,026
2	0,246	47,20	41,16	1,147
3	0,242	48,32	41,46	1,165
4	0,25	39,62	37,64	1,053
5	0,246	38,50	37,84	1,017
6	0,249	40,29	38,01	1,060
M.T.	0,246	42,99	39,84	1,078

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα μηχανικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων (v, E_{δ} , E_{σ} , E_{δ} / E_{σ}).

Επομένως, επαληθεύεται το ότι το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, που εξαρτάται από την ταχύτητα διαδόσεως των υπερήχων, είναι μεγαλύτερο από το στατικό, ενώ τα αποτελέσματα είναι μέσα στα αντίστοιχα όρια που αναφέρονται στους κανονισμούς και έχουν προκύψει από πειραματικά αποτελέσματα.

4.1.3 Συμπεράσματα

Από την παραπάνω διερεύνηση μεταξύ άλλων προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

Για τη συγκεκριμένη ποιότητα σκυροδέματος η σχέση 4.2 προσφέρεται για την καλύτερη εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων συναρτήσει της ταχύτητας των υπερήχων κατά τη διεύθυνση σκυροδετήσεως. Με βάση τη στατιστική καμπύλη σf = f(cl) του σχήματος 4.1, μπορεί να προσδιορίζεται για κάθε κυλινδρικό δοκίμιο η θλιπτική αντοχή με τη MKM των υπερήχων από τον υπολογισμό της

ταχύτητας των υπερήχων. Δηλαδή η μέθοδος βαθμονομήθηκε για τη συγκεκριμένη ποιότητα σκυροδέματος. Για κάθε διαφορετική ποιότητα σκυροδέματος μπορεί να είναι διαθέσιμη και μια διαφορετική μαθηματική σχέση, όπου όλοι οι παράγοντες, που επηρεάζουν τη σχέση της αντοχής με την ταχύτητα, παραμένουν σταθεροί. Σε αυτήν την περίπτωση το μέγεθος του στατιστικού δείγματος που απαιτείται είναι σχετικά μικρό. Η διαφορά της αντοχής που υπολογίζεται στο εργαστήριο μέσω στατιστικών δειγμάτων και της αντοχής που υπολογίζεται επί τόπου σε πραγματικές κατασκευές, είναι συχνά σημαντική και συχνά μεγαλύτερη από τη διαφορά της αντοχής που προσδιορίζεται από καταστροφικές και μη καταστροφικές δοκιμές (Popovics, 2001). Έτσι η ακρίβεια εκτίμησης της αντοχής είναι ικανοποιητική, μόνο στις περιπτώσεις που η ποιότητα του σκυροδέματος στην κατασκευή είναι περίπου ίδια με αυτήν των δοκιμίων που ελέγχθηκαν στο εργαστήριο και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση της μεθόδου των υπερήχων.

4.2 Εκτίμηση της αντοχής σκυροδέματος μέσω της ταχύτητας υπερηχητικού παλμού και του συντελεστή απόσβεσης.

O Galan (1967) στην εργασία του υπολόγισε την αντοχή σκυροδέματος (R_b) συναρτήσει της ταχύτητας παλμού (V_r) και του συντελεστή απόσβεσης (α), με ανάλυση παλινδρόμησης:

 $R_{b} = f(V_{r}, \alpha) \tag{4.3}$

Σε πολλές περιπτώσεις μόνη της η ταχύτητα είναι επάρκής παράμετρος για την εκτίμηση της αντοχής, όμως για επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας χρησιμοποιούνται δύο ακουστικές παράμετροι.

Η εξίσωση παλινδρόμησης είναι η εξής:

$$\mathbf{R}_{\mathbf{b}} = \boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{V}_{\mathbf{r}}^{\mathbf{b}} \cdot \boldsymbol{\alpha}^{\mathbf{c}} \tag{4.4}$$

και είναι πολύ ικανοποιητική σε πρώιμο στάδιο σκλήρυνσης του σκυροδέματος και σε συνθήκες κορεσμού σε νερό. Παρατηρήθηκε ότι σε πρώιμο στάδιο σκλήρυνσης, (όπου το σκυρόδεμα έχει χαμηλότερη αντοχή), η ταχύτητα υπερήχων στα ξηρά δείγματα είναι ίση ή ελαφρώς υψηλότερη από ότι στα υγρά. Δεν παρατηρείται το ίδιο σε αργότερο στάδιο σκλήρυνσης (όπου το σκυρόδεμα έχει υψηλότερη αντοχή). Αντίθετα ό συντελεστής απόσβεσης παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις δομικές αλλαγές που παρουσιάζονται λόγω κατάστασης κορεσμού σε νερό.

17 δοκίμια ποικίλων τύπων σκυροδέματος εξετάστηκαν σε χρόνο 1,2,4,7,14,28 και 36 μέρες από την παρασκευή τους. Επίσης έγινε εξέταση μετά από εμποτισμό των δοκιμίων 1 μέρα σε νερό και μετά την πάροδο 29 και 37 ημερών, καθώς επίσης και μετά από εμποτισμό 7 ημερών σε νερό και πάροδο 35 και 43 ημερών. Όλες οι τιμές αντοχής ταχύτητας και απόσβεσης υποβλήθηκαν σε ανάλυση παλινδρόμησης.

Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι η σχέση που περιγράφει καλύτερα τον συσχετισμό των τριών παραμέτρων είναι αυτή της εξίσωσης 4.4, με δείκτη συσχέτισης 0.963. Το πλεονέκτημα της παραπάνω εξίσωσης είναι ότι με σχετικά μικρό αριθμό δοκιμίων επιτυγχάνεται μια αρκετά καλή συσχέτιση. Γενικά προέκυψε μια πολύ καλή συμφωνία μεταξύ της αντοχής που προέκυψε από θραύση των δοκιμίων και αυτής που υπολογίστηκε με την εξίσωση παλλινδρόμησης.

4.2.1 Τρόπος υπολογισμού του συντελεστή απόσβεσης

Η γεωμετρία σε κανονκές δομές δεν επηρρεάζει την αποσβεση. Όμως σε δομές όπου η μία διάσταση είναι πολύ μεγαλύτερη από την κάθετή της υπάρχει τέτοια επιρροή. Σε αυτές τις περιπτώσεις η σταθερά απόσβεσης είναι χαμηλότερη στην επιμήκη διάσταση και κρίνεται απαραίτητο να μετρηθεί η απόσβεση και στην εγκάρσια διεύθυνση.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή απόσβεσης είναι σχετικά απλή. Στη συσκευή μέτρησης χρόνου διαδρομής υπερήχων, έγιναν μετρήσεις της τάξεως των 1, 2, και 5 milisec. Ο συντελεστής απόσβεσης εκφράζεται σε μονάδες του 0.01 microsec και μετριέται με τη βοήθεια γραφήματος με καμπύλες αναφοράς σε διαφανή πλάκα (Perspex) (Σχ.4.2). Πρακτικά, κατασκευάζεται «φάκελος» με τις καμπύλες απόσβεσης από την εκάστοτε μέτρηση στο 1, στα 2 και στα 5 milisec και έπειτα συγκρίνεται η καμπύλη της κάθε μέτρησης με αυτή αυτές του γραφήματος. Η καμπύλη που προσεγγίζει καλύτερα την μετρούμενη, δίνει το συντελεστή απόσβεσης σε 1/100 microsec. Για ενδιάμεσες τιμές γίνεται παρεμβολή στις καμπύλες αναφοράς.



Σχήμα 4.2: Καμπύλες αναφοράς του συντελεστή απόσβεσης για μετρήσεις στα 1, 2, 5 ms (Galan, 1967).

4.2.2 Γραφική παράσταση αποτελεσμάτων

Στο σχήμα. 4.3 παρουσιάζονται οι μεταβολές της αντοχής, του συντελεστή απόσβεσης και της ταχύτητας υπερήχων για τα δοκίμια σε διάφορες ηλικίες και σε κατάσταση κορεσμού σε νερό. Σημειώνονται με (**x**) οι τιμές της αντοχής όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση (R-CALC), με (•) οι τιμές της αντοχής όπως μετρήθηκαν από τη καταστροφική μεθοδο (R-DESTR), με (+) οι τιμές της ταχύτητας (V) και με (\circ) οι τιμές του συντελεστή απόσβεσης (α).



Σχήμα 4.3: Καμπύλες αντοχής, ταχύτητας και απόσβεσης για διάφορες ηλικίες και για κορεσμένα σε νερό δοκίμια (Galan, 1967).

4.2.3 Συμπεράσματα

Η αντοχή σκυροδέματος μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας την σεισμική ταχύτητα που εκφράζει τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού και την απόσβεση που εκφράζει τις ανελαστικες ιδιότητες του υλικού.

Ο συντελεστής απόσβεσης μπορεί ναυπολογιστεί κατασκευάζοντας βαθμονομημένες εκθετικές καμπύλες για μια δεδομένη συσκευή και συγκρίνοντάς αυτές με τον αποσβένωντα παλμό.

Ο συντελεστής απόσβεσης παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία σε αλλαγές στην αντοχή του υλικού για συνθήκες κορεσμού, όπως και σε κάθε άλλη δομική αλλαγή του σκυροδέματος σε νεαρό στάδιο σκλήρυνσης.

4.3 Εκτίμηση της απόσβεσης και διασποράς υπερήχων με χρήση μετασχηματισμού Fourier διακριτού χρόνου

Παρακάτω περιγράφεται περιληπτικά η εργασία που των Zhao et al. το 2004.

Η φασική ταχύτητα και ο συντελεστής απόσβεσης είναι σημαντικές ακουστικές παράμετροι και χρησιμοποιούνται ευρέως στο χαρακτηρισμό υλικών. Παραδείγματα τεχνικών για τον προσδιορισμό αυτών των παραμέτρων είναι η μέθοδος του συνεχούς αρμονικού κύματος και η τεχνική υπερήχων ευρείας ζώνης μέσω της μετάδοσης παλμών.

Σε αυτές τις τεχνικές τα σήματα υφίστανται μετασχηματισμό κατά Fourier. Το πλάτος του φάσματος των σημάτων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόσβεσης, ενώ το φάσμα φάσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της φασικής ταχύτητας. Κατά την επεξεργασία του φάσματος φάσης, προκύπτουν σφάλματα των υπολογισμών που συχνά οδηγούν σε λανθασμένα αποτελέσματα (Zhao et al., 2004).

Οι τεχνικές επεξεργασίας σήματος μπορούν να φανουν χρήσιμες στην εξάλειψη τέτοιων σφαλμάτων. Σε αυτήν την εργασία γίνεται προσέγγιση ώστε χρησιμοποιείται μόνο το φάσμα πλάτους της απόσβεσης και της διασποράς των υπερήχων. Αυτή η προσέγγιση εφαρμόζει μετασχηματισμό Fourier διακριτού χρόνου STFT (Short Time Fourier Transform) σε συνδυασμό με τη μέθοδο του «χρόνου πτήσης» TOF (Time Of Flight). Η TOF είναι μια από της πιο συνηθισμένες συμβατικές μεθόδους μέτρησης ταχύτητας υπερήχων. Ο TOF είναι η διαφορά δύο διαδοχικών χρόνων άφιξης στη

διεπιφάνεια. Η ταχύτητα που επιτυγχάνεται με αυτή τη μέθοδο είναι η συνολική ταχύτητα του σήματος που αποτελείται από υπέρθεση κυμάτων διαφορετικών συχνοτήτων. Παρόμοια με τη συμβατική μέθοδο η προτεινόμενη μέθοδος υπολογίζει τον TOF των εξαγώμενων εκ του παλμού συνιστωσών μιας μόνο συχνότητας εφαρμόζοντας μετασχηματισμό STFT στο σήμα: εφαρμόζοντας παράθυρο δοσμένου πλάτους κατά μήκος του σήματος και υπολογίζοντας το πλάτος του φάσματος στο τμήμα του σήματος που περιέχεται κάθε φορά στο παράθυρο. Η φασική ταχύτητα της συχνότητας προκύπτει υπολογίζοντας τη χρονική διαφορά μεταξύ δύο κορυφών, δεδομένου του πλάτους του δοκιμίου.

Εφαρμόζοντας αυτή τη μέθοδο εξαλείφονται τα σφάλματα υπολογισμού στο φάσμα της φάσης. Επίσης η διάδοση του κύματος μιας μονής συχνότητας απεικονιζεται στο πεδίο των χρόνων. Η εργασία ξεκινά με την παρουσίαση μιας μεθόδου παραγωγής υπερήχων με συγκεκριμένους συντελεστές διασποράς και απόσβεσης. Αυτές οι παράμετροι εξυπηρετούν ως τιμές αναφοράς για διόρθωση και βαθμονόμηση.

4.3.1 Αριθμητική προσομοίωση διάδοσης παλμού.

Όταν ένα κύμα ευρείας ζώνης υπερηχητικού παλμού διαπερνά ένα μέσο, τότε η κυματομορφή του αλλάζει ως αποτέλεσμα της διασποράς και της απόσβεσης λόγω του υλικού μέσου (He, 1998). Αυτό το φαινόμενο περιγράφεται μαθηματικά ως:

$$s(t) = \sum_{i=1}^{n} A_i e^{-\alpha_i x} \cos 2\pi f_i (t - x/c_i)$$
(4.5)

όπου: A_i, a_i και c_i είναι αντίστοιχα το πλάτος, ο συντελεστής απόσβεσης και η φασική ταχύτητα μιας συνιστώσας (i) σε συχνότητα f_i.

Για να προσομοιωθεί η διάδοση του κύματος που περιγράφεται από την εξίσωση 4.5, αρχικά παράγεται ένας παλμός s₁(t) σε σημείο x=0. για την προσομοίωση χρησιμοποιείται ο Γκαουσιανός παλμός:

$$s_1(t) = \frac{\exp(-t^2/4B)}{\sqrt{4\pi B}} \cos(2\pi f_c t), \qquad (4.6)$$

όπου: f_c είναι η κεντρική συχνότητα και B είναι το «-6dB πλάτος ζώνης», π.χ. το συχνοτικό εύρος όπου το φάσμα μειώνεται 50% σε πλάτος από τη μέγιστη τιμή του.

Η εξίσωση 4.6 περιγράφει το σήμα στο πεδίο του χρόνου και μπορεί να εκφραστεί και ως:

$$S_1(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos(2\pi f_i t - \theta_i),$$
(4.7)

όπου: A_i είναι το ίδιο με αυτό της εξίσωσης 4.5 αλλά λαμβάνεται εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Fourier στον Γκαουσιανό παλμό που περιγράφεται στην εξίσωση 4.6, θ_i είναι η γωνία φάσης του φάσματος. Με μήκος διαδρομής L, ο παλμός s₁(t) εξελίσσεται στον παλμό s₂(t) ως:

$$s_{2}(t) = \sum_{i=1}^{n} A_{i} e^{-\alpha_{i}L} \cos[2\pi f_{i}(t_{i} - L/c_{i}) - \theta_{i}]$$
(4.8)

Στο σχήμα 4.4 φαίνεται η προσομοίωση ενός Γκαουσιανού παλμού που διαπερνάει Plexiglass πάχους 8.33mm. Ο αρχικός παλμός παράγεται με f_c =8MHz, και B=0.4. Το διάστημα δειγματοληψίας ορίστηκε στα 0.01 μs που αντιστοιχεί σε συχνότητα δειγματοληψίας 100MHz ενώ το μήκος του σήματος ορίστηκε στα 10μs. Οι σχέσεις της απόσβεσης και της διασποράς είναι γραμμικές συναρτήσεις της συχνότητας σύμφωνα με έρευνα του He (2000):

$$c_i = c_0 + f \cdot (\mathrm{d}c/\mathrm{d}f) \tag{4.9}$$

$$\alpha_i = a_0 + f \cdot (\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}f), \tag{4.10}$$

όπου:

c_i είναι σε m/s και *f* σε MHz. Η προσομοίωση προγραμματίστηκε χρησιμοποιώντας Matlab.



Σχήμα 4.4: Προσομοίωση Γκαουσιανού παλμού σε Plexiglass πάχους 8.33mm (Zhao et al, 2004).

4.3.2 Προσδιορισμός της διασποράς και απόσβεσης χρησιμοποιώντας την μέθοδο STFT.

Ο STFT ενός σήματος s(t) προσδιορίζεται ως:

$$G_{\phi}s(b,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\phi_{b,\omega}(t)dt$$
(4.11)

$$\phi_{b\,\omega}(t) = \phi(t-b)e^{-j\omega t} \tag{4.12}$$

Η $\varphi(t)$ είναι μια συνάρτηση «παράθυρο» σύμφωνα με την οποία:

$$\varphi(t) = \varphi(t), \quad t(b-\tau, b+\tau) \qquad \dot{\eta}$$

$$\varphi(t) = 0, \quad \sigma \varepsilon \, \alpha \lambda \lambda \eta \, \pi \varepsilon \rho i \pi \tau \omega \sigma \eta.$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, **b** και **τ** είναι αντίστοιχα η χρονική στιγμή και το χρονικό πλάτος του παραθύρου του μετασχηματισμού STFT.

Οι παραπάνω εξισώσεις φανερώνουν ότι αποκόπτοντας το σήμα με ένα παράθυρο στη στιγμή *b* και πλάτους 2τ είναι εφικτό να υπολογιστεί η μεταφορά ενέργειας (μέσω του μετασχηματισμού Fourier), για τη στιγμή εκείνη και μετακινώντας το παράθυρο γίνεται το ίδιο και για το υπόλοιπο σήμα. Αν σημειωθεί η διαφορα χρόνου και πλάτους μεταξύ δύο κορυφών μιας δεδομένης συχνότητας που αντιστοιχεί σε σήματα δύο σημείων δεδομένης απόστασης τότε μπορούν να υπολογιστούν η φασική ταχύτητα και η απόσβεση ενός σήματος σε ένα μέσο.

Το σχήμα 4.5 απεικονίζει την διαδικασία του STFT στο σήμα του παλμού του σχήματος 4.4.



Σχήμα4.5: οπτικοποίηση της διάδοσης διαφορετικών συχνοτήτων-συνιστωσών του σήματος 4.4 (Zhao et al, 2004).

4.3.3 Διορθώσεις διασποράς και απόσβεσης.

• Διασπορά

Το σχήμα 4.6 απεικονίζει τις τιμές της φασικής ταχύτητας που προέκυψε από την εφαρμογή του STFT και αυτές που υπολογίστηκαν αλγεβρικά από τις εξισώσεις 4.7-4.10, ενός σήματος με κεντρική συχνότητα f_c =7.5MHz και πλάτους ζώνης B=1 με αντίστοιχη ταχύτητα 5500m/s. Από το σχήμα παρατηρείται μια συστηματική ασυμφωνία των επιμέρους ταχυτήτων ως προς την κλίση της ευθείας (dc/df) αλλά και της αρχικής τιμής c_0 . Η γραμμική σχέση της φασικής ταχύτητας (από STFT) με την συχνότητα εκφράζεται ως: $v = v_0 + f \cdot (dv/df)$ και βρέθηκε ότι ο λόγος dv/df είναι διπλάσιος από τον dc/df οπότε και χρησιμοποιείταιμε συντελεστής 0.5 για να διορθωθεί. Αντίστοιχες διορθώσεις έγιναν και στον παράγοντα F = (dv/df) / (dc/df) ανάλογα με την επίδραση της διασποράς των σχετικών ταχυτήτων [$r = (v_{max} - v_{min}) / v_{min}$].



Σχήμα 4.6: σύγκριση της φασικής ταχύτητας (από STFT) με αυτήν από την εξίσωση 4.9.

• Απόσβεση

Έγινε σύγκριση των τιμών της απόσβεσης από τη μέθοδο STFT και τις τιμές που προέκυψαν αλγεβρικά από την εξίσωση 4.10, για τέσσερις διαφορετικές κλίσεις (da/d f) και παρατηρείται πολύ μικρή απόκλιση (μέχρι 2%), που μεγαλώνει καθώς οι τιμές απομακρύνονται από την κεντρική συχνότητα (Σχ.4.7).



Σχήμα 4.7: Σύγκριση των τιμών τις απόσβεσης από υπολογισμό με STFT και με αυτές από την εξίσωση 4.10 (Zhao et al, 2004)..

4.3.4 Πειραματικός έλεγχος

Εφαρμόστηκε η μέθοδος της παλμικής ηχούς, με μετατροπέα 6.35mm και συχνότητας 2.25 MHz. που ρυθμιζόταν με κάρτα πομπού-δέκτη. Η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν F_s =100MHz. Χρησιμοποιήθηκε τετραγωνική πλάκα Plexiglass διαστάσεων 60x60mm και πάχους 8.45 mm. Η διάταξη βυθίστηκε σε νερό. Έγινε μέτρηση εκατό σημάτων ώστε να απαλοιφθεί ο θόρυβος.

Έπειτα εφαρμόστηκε παράθυρο τύπου Hamming πλάτους 150 σημείων για τη φασματική ανάλυση. Το παράθυρο μετακινούνταν ανά ένα σημείο κάθε φορά που αντιστοιχεί σε χρονικό διάστημα 0.01μs.

Στο σχήμα 4.8 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου, τα αποτελέσματα μετά τις διορθώσεις και αυτά από την διερεύνυση του He (2000). Η διασπορά της σχετικής ταχύτητας υπολογίστηκε r =0.5%, ενώ υπολογίστηκαν: v_0 =2745.7[m/s] και dv_0/df =5.6776[m/s/MHz], με δείκτη συσχέτισης R^2 =0.973.



Σχήμα 4.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων για τιμές ταχύτητας (Zhao et al, 2004).

Στο σχήμα 4.9 απεικονίζονται τα αποτελέσματα του συντελεστή απόσβεσης από τον πειραματικό έλεγχο και αυτά που υπολογίστηκαν από την εξίσωση 4.10. Ο συντελεστής απόσβεσης υπολογίστηκε ως:

$$\alpha = -\frac{8.86}{2l} \ln \left[\frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{(Z_w + Z_s)^2}{4Z_w Z_s} \right]$$
(4.13)

όπου: Z_w και Z_s είναι αντίστοιχα η αντίσταση του νερού και του δοκιμίου, P_1 και P_2 αντιστοιχούν στις ηχούς της μπροστινής και της πίσω επιφάνειας του δοκιμίου και Lτο μήκος σε cm. Τα πειραματικά αποτελέσματα της απόσβεσης σχεδόν ταυτίζονται με αυτά από την εξίσωση 4.10, όπου α_0 =0.96dB/cm και da / df = 0.89dB/cm/MHz υπολογίστηκαν με βάση τα δεδομένα του He.



Σχήμα 4.9: Σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων της απόσβεσης και αυτών της εξίσωση 4.10 (Zhao et al, 2004)..

4.4 Εκτίμηση της αντοχής δομικών πετρωμάτων με μεθόδους ανάλυσης σήματος.

Παρακάτω περιγράφεται η μελέτη που έκαναν οι Benavente et al. το 2005.

Η συμεριφορά των υπερηχητικών κυμάτων είναι στενά συνδεδεμένη με τα δομικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων. Η μελέτη αυτής της συμπεριφοράς ενισχύεται από την φασματική ανάλυση των υπερηχητικών σημάτων που δίνει πληροφορίες στο πεδίο των συχνοτήτων για τις κεντρικές (δεσπόζουσες) συχνότητες του σήματος και του πλάτους της συχνοτικής ζώνης. Ένα παράδειγμα της παραπάνω ανάλυσης περιλαμβάνει εφαρμογή του ταχύ μετασχηματισμού Fourier (FFT), προσδιορισμό της καμπύληςφάκελο του μετασχηματισμού και έπειτα προσαρμογή σε αυτήν, της Γκαουσιανής καμπύλης που ορίζεται από την κεντρική συχνότητα και το πλάτος (Σχ.4.10).



Σχήμα 4.10: Παράδειγμα φασματικής ανάλυσης στο πεδίο α)των χρόνων και β)των συχνοτήτων (Benavente et al., 2005).

4.4.1 Πειραματική διαδικασία

Οι Benavente, Martinez, Jauregui, Rodriguez και Garcia del Cura (2005), πραγματοποίησαν εργαστηριακές μετρήσεις με υπέρηχους (σε ασυμπίεστα δοκίμια αλλά και υπό πίεση) και κατόπιν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε δύο είδη πετρωμάτων: α) ομογενούς βιογενούς ασβεστόλιθου και β) ετερογενούς κατακερματισμένου δολομίτη. Ο ασβεστόλιθος ανήκει γεωλογικά στο θαλάσσιο Ιώκαινο (Pena Zafra, Murcia, NA Ισπανία) και ο δολομίτης στο Τριασσικό-Ιουρασικό (Cerro Gordo, Almeria, NA Ισπανία).

Σκοπός των μετρήσεων ήταν η εκτίμηση της αντοχής των πετρωμάτων αυτών και ο χαρακτηρισμός τους μέσω των παραμέτρων των υπερήχων. Αναλυτικά, μελετήθηκαν οι ταχύτητες των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων (v_p και v_s αντίστοιχα), ο λόγος των ταχυτήτων (v_p/v_s), η ενέργεια και η απόσβεση των υπερηχητικών κυμάτων (ε και a αντίστοιχα), με τη μέθοδο της «άμεσης διάδοσης», με ζεύγος πομπού-δέκτη συχνότητας 500KHz. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν δέκα δοκίμια 6cm σε μήκος και διάμετρο, αφού είχαν ξηρανθεί για 48 ώρες στους 60 °C.

4.4.2 Επεξεργασία-Αποτελέσματα

Αρχικά οι μετρήσεις στο πεδίο των χρόνων A(t), μετασχηματίστηκαν στο πεδίο των συχνοτήτων A(v), (εφαρμογή FFT), ως:

$$A(v) = FFT(A(t)). \tag{4.14}$$

Έπειτα υπολογίστηκε η παράγωγος A'(v), ως:

$$A'(v) = i\omega \cdot A(v). \tag{4.15}$$

Τέλος εφαρμόστηκε ο αντίστροφος FFT της παραγώγου A'(v) ώστε να προκύψει η A'(t) που είναι ουσιαστηκά η ταχύτητα $A_V(t)$. Έτσι προέκυψαν οι τιμές της ενέργειας (σε αδιάστατη μορφή), ως:

$$\varepsilon = \int A_{\nu}^{2}(t)dt \tag{4.16}$$

Οι τιμές της απόσβεσης προέκυψαν προσαρμόζοντας εκθετική καμπύλη στο θετικό κομμάτι της κυματομορφής:

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha t} \tag{4.17}$$

Όπου A_0 είναι η τιμή της υψηλότερης κορυφής και t ο χρόνος.

Διάφοροι παράγοντες στη μικροδομή του πετρώματος συνεισφέρουν στη μείωση της ενέργειας και της ταχύτητας του κύματος. Η συνολική απόσβεση είναι συνισταμένη των

επιμέρους ανακλάσεων, διασπορών, απορροφήσεων και απωλειών λόγω τριβής. Η επίδραση ετερογενειών της δομής του πετρώματος στην ενέργεια αλλά και στην απόσβεση των κυμάτων παρατηρείται στο σχήμα 4.11.

Παρατηρείται ότι οι ετερογένειες συντελούν στην μείωση της ενέργειας από τις πρώτες αφίξεις και στο πλάτος των κορυφών, επομένως και στη μείωση του συντελεστή απόσβεσης.



Σχήμα 4.11: κυματομορφή p-κυμάτων σε α) ρωγματομένο και β) μη ρωγματομένο ασβεστόλιθο (Benavente et al., 2005).

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων υπό ελεγχόμενη πίεση παρατηρείται ότι για μικρές πιέσεις εμφανίζονται μεγάλες διαφορές στις ακουστικές παραμέτρους (Σχ.4.12-4.13):



Σχήμα 4.12: Μεταβολή της ταχύτητας α)διαμήκων (δεξιά) και β) εγκάρσιων (αριστερά) κυμάτων σε σχέση με την πίεση (Benavente et al., 2005).



Σχήμα 4.13: Μεταβολή της ενέργειας σε σχέση με την πίεση (Benavente et al., 2005).

Στους πίνακες 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της αντοχής αλλά και οι τιμές των ακουστικών παραμέτρων για τα δέκα δοκίμια ασβεστόλιθου και δολομίτη αντίστοιχα ενώστον πίνακα 4.5 οι συντελεστές συσχέτισης:

σ _c (MPa)	$v_p(\text{km/s})$	v _s (km/s)	v_p / v_s	ε x 10 ⁻¹⁷	$\alpha x 10^{-4}$ (µs ⁻¹)
89.79	6.07	4.12	1.47	0.03	3.51
103.55	6.19	3.68	1.68	2.23	1.09
104.96	6.13	3.18	1.93	4.38	1.94
118.02	6.14	3.12	1.97	5.75	2.14
121.37	6.23	2.93	2.12	4.2	1.99
123.79	6.21	3.31	1.88	6.11	1.16
124.77	6.26	2.88	2.17	12.4	2.54
128.87	6.24	2.8	2.23	2.95	3.96
133.42	6.16	2.92	2.11	0.44	5.42
134.87	6.13	2.98	2.06	0.85	4.66

Πίνακας 4.3: Τιμές αντοχής και ακουστικών παραμέτρων για δοκίμια ασβεστίλιθου (Benavente et al., 2005).

Πίνακας 4.4: Τιμές αντοχής και ακουστικών παραμέτρων για δοκίμια δολομίτη (Benavente et al., 2005).

σ _c (MPa)	v _p (km/s)	v _s (km/s)	v_p / v_s	ε x 10 ⁻¹⁷	α x 10 ⁻⁴ (μs ⁻¹)
66.10	5.27	3.40	1.55	0.28	4.72

73.78	4.94	3.34	1.48	0.26	0.40
73.89	5.18	2.79	1.86	0.25	2.65
76.69	5.69	2.93	2.01	0.48	5.63
76.74	5.68	3.62	1.63	1.00	0.36
94.57	5.30	2.93	1.81	0.41	2.74
101.01	5.81	3.56	1.63	0.41	1.79
101.10	5.91	3.84	1.41	2.91	4.19
113.94	5.60	2.58	2.17	3.04	7.84
155.09	5.93	3.22	1.84	3.43	2.98

Πίνακας 4.5: Συντελεστές συσχέτισης (Benavente et al., 2005).

είδος	$v_p(\text{km/s})$	v _s (km/s)	v_p / v_s	ε x 10 ⁻¹⁷	$\alpha \ge 10^{-4} (\mu s^{-1})$
ασβεστόλιθος	0.512	-0.872	<u>0.863</u>	0.172	0.446
δολομίτης	0.631	-0.103	0.298	0.842	0.195

4.4.3 Συμπεράσματα-Συζήτηση

Για τον ασβεστόλιθο παρατηρείται μια μέτρια συσχέτιση της αντοχής με την ταχύτητα v_p , ενώ η καλύτερη συσχέτιση είναι με τον δείκτη v_p/v_s . Ο δείκτης αυτός είναι πολύ ευαίσθητος για την εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων και παράγει πληροφορίες για το πορώδες και τη ρωγμάτωση ενώ σχετίζεται με το λόγο Poisson και το μέτρο ελαστικότητας του Young (Schon,1996). Επομένως είναι εφικτό να προσδιοριστεί η αντοχή του ασβεστόλιθου από τον λόγο v_p/v_s . Για τον δολομίτη, υπάρχει υψηλή συσχέτιση μεταξύ της αντοχής με την ενέργεια (ε), ενώ παρατηρείται και μια μέτρια συσχέτιση με την ταχύτητα v_p . Οι ετερογένειες στη μικροδομή του δολομίτη ευθύνονται για την μείωση της ενέργειας του κύματος. Επιπλέον, συντελούν στηην μείωση της αντοχής του και καθορίζουν τη διεύθυνση της επερχόμενης αστοχίας (Bell, 2000).

Η παραπάνω έρευνα τονίζει την ανάγκη ελέγχου παραπάνω από μία ακουστικές παραμέτρους και όχι μόνο της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων, για την εκτίμηση της αντοχής ενός πετρώματος, ώστε να γίνει επιλογή της παραμέτρου με την υψηλότερη συσχέτιση. Το γεγονός αυτό προσδίδει μεγαλυτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς.

5 Εργαστηριακές δοκιμές.

Οι εργαστηριακές δοκιμές περιλαμβάνουν τη διαδικασία διαμόρφωσης των δοκιμίων και έπειτα την πραγματοποίηση μη καταστροφικών δοκιμών με υπέρηχους σε δοκίμια διαφόρων πετρωμάτων με σκοπό τον χαρακτηρισμό τους μέσω των μετρούμενων μεγεθών (συχνότητα, ταχύτητα, απόσβεση) και το συσχετισμό των μεγεθών αυτών με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων αυτών (αντοχή, μέτρο ελαστικότητας), όπως αυτά προέκυψαν από δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Παράλληλα διερευνήθηκε η επίδραση της περιεχόμενης υγρασίας σε αυτά καθώς και κάποιας πιθανής ασυνέχειας στη δομή του πετρώματος.

Έγινε έλεγχος σε δοκίμια αλφά, σκληρής και ασβεστόλιθου καθώς και σε ένα δοκίμιο μαρμάρου. Συνολικά έγιναν μετρήσεις στα δοκίμια σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις: α) σε ξηρά δοκίμια, β) σε υγρά δοκίμια, γ) σε ξηρά δοκίμια με τεχνητή ασυνέχεια (συνδυασμό δοκιμίων).

5.1 Διαμόρφωση δοκιμίων.

Από το λατομείο Αλφά έγινε λήψη δύο ορθογωνικών όγκων (ένας από κάθε ορίζοντα) και στη συνέχεια έγινε πυρηνοληψία δοκιμίων στο χώρο του εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη χρήση εργαστηριακού γεωτρύπανου (καροταρία). Συνολικά διαμορφώθηκαν δώδεκα κυλινδρικά δοκίμια (έξι από κάθε όγκο), με διάμετρο κυλίνδρου περίπου 50mm. Στη συνέχεια, έγινε κοπή των δοκιμίων με τη χρήση εργαστηριακού δισκοπρίονου σε μήκος περίπου 110mm. Τέλος, με τον εργαστηριακό λειαντή, έγινε λείανση των δύο κυκλικών βάσεων του κάθε δοκιμίου, ώστε αυτές να είναι επίπεδες, με την ελάχιστη δυνατή τραχύτητα και παράλληλες μεταξύ τους.

Με τη χρήση παχύμετρου τύπου Vernier μετρήθηκαν με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια οι διαστάσεις των δώδεκα δοκιμίων. Η ονομασία των δοκιμίων παρουσιάζεται στον πίνακα 5.1, ενώ στα σχήματα 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται οι δύο τύποι του εξεταζόμενου πετρώματος.

Πίνακας 5.1: Ονομασία δοκιμίων.

Τύπος πετρώματος	Κωδικός
Μάρμαρο Διονύσου	М
	Ασ1
Δ σβεστό) 1θος	Ασ2
Αθρευτολίους	Ασ3
	Ασ4
	A1
	A2
Alaác	A3
Αλψας	A4
	A5
	A6
	Σ1
	Σ2
No. 2 and	Σ3
Σκληρη	Σ4
	Σ5
	Σ6

Επειδή ακολούθησε ξήρανση και κορεσμός σε νερό των δοκιμίων, παρακάτω θα παρουσιάζεται το όνομα του κάθε δοκιμίου με τα γράμματα «Υ» και «Ξ» στην αρχή, ανάλογα με κάθε κατάσταση: Υ=Υγρό, Ξ=ξηρό.





Σχήμα 5.2: Δοκίμια Αλφά.

Για την συνολική διαμόρφωση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν τα εξής όργανα:

α) γεωτρύπανο (καροταρία), β) δισκοπρίονο κοπής πετρωμάτων και γ) λειαντής δοκιμίων. Τέλος η μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμίων που προέκυψαν έγινε με παχύμετρο (Vernier). Τα εργαστηριακά όργανα παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

5.1.1 Εργαστηριακό γεωτρύπανο (καροταρία).

Η συσκευή αυτή είναι τοποθετημένη στο εργαστήριο μηχανικής πετρωμάτων του πολυτεχνείου και η αρχή λειτουργίας της μοιάζει με αυτήν του κανονικού γεωτρύπανου (Σχήμα 5.3). Στο άκρο της φέρει πυρηνολήπτη από χάλυβα διαμέτρου 54mm, ο οποίος καταλήγει σε εγκοπές περιμετρικά της κάτω βάσης, ώστε περιστρεφόμενος να επιτυγχάνει την κοπή του πετρώματος.

Η διάτρηση της βραχομάζας γίνεται χειροκίνητα μέσω μοχλού που είναι συνδεδεμένος στη δεξιά πλευρά της συσκευής. Η καλή λειτουργία και η ομοιόμορφη κοπή του κυλίνδρου επιτυγχάνεται με την εφαρμογή όσο το δυνατόν σταθερότερης δύναμης από τον χειριστή στο μοχλό. Η συσκευή φέρει περιστρεφόμενη βαλβίδα, ώστε ο πυρηνολήπτης να φτάσει στο επιθυμητό ύψος πριν αρχίσει η διαδικασία κοπής, δηλαδή στην επιφάνεια της βραχομάζας. Έπειτα η βαλβίδα «κλειδώνει», ενώ το σύστημα ασφαλίζεται με δύο ασφάλειες που βρίσκονται στη δεξιά πλευρά.

Η συσκευή είναι ενωμένη με λεκάνη στην οποία εδράζεται σχάρα όπου τοποθετείται ο όγκος πετρώματος και σταθεροποιείται πάνω σε αυτήν. Όλο το σύστημα είναι πακτωμένο έτσι ώστε να διατηρείται η μέγιστη δυνατή ισορροπία κατά τη διάρκεια της κοπής ενώ υπάρχει και σύστημα ροής νερού για την ψύξη του πυρηνολήπτη.



Σχήμα 5.3: Εργαστηριακό γεωτρύπανο (καροταρία).

5.1.2 Εργαστηριακό δισκοπρίονο κοπής δοκιμίων πετρωμάτων.

Μετά την κοπή των δοκιμίων πρέπει να διαμορφωθούν οι άκρες αυτών, γιατί κατά το τέλος της κοπής τα δοκίμια αποχωρίζονται με σπάσιμο από τον υπόλοιπο όγκο του πετρώματος. Έτσι τα κομμάτια αυτά στις άκρες του κυλίνδρου πρέπει να κοπούν για να δημιουργηθούν επίπεδες επιφάνειες.

Το κάθε δοκίμιο τοποθετείται στο μηχάνημα (Σχήμα.5.4) και στερεώνεται σταθερά, έτσι ώστε να βρίσκεται κάθετα στον άξονα περιστροφής του δίσκου. Το δοκίμιο αρχικά απέχει λίγα εκατοστά από το δίσκο. Ο δίσκος τίθεται σε κίνηση και μετακινείται με σταθερή ταχύτητα προς το δοκίμιο κόβοντας το ανώμαλο άκρο στο επιθυμητό μήκος που ορίζεται από τον χειριστή. Η ίδια διαδικασία γίνεται και για το άλλο άκρο του δοκιμίου.

Το μηχάνημα αυτό διαθέτει επίσης κλειστό κύκλωμα νερού για τη ψύξη του δίσκου.



Σχήμα 5.4: Εργαστηριακό δισκοπρίονο κοπής δοκιμίων πετρωμάτων.

5.1.3 Εργαστηριακός λειαντής δοκιμίων.

Μετά την κοπή των δοκιμίων με το εργαστηριακό δισκοπρίονο, οι επιφάνειές τους δεν είναι επίπεδες, επειδή κατά την κοπή δημιουργούνται μικροσπασίματα. Για τη διεξαγωγή των εργαστηριακών μετρήσεων οι επιφάνειες των δοκιμίων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο λείες και οριζόντιες. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση εργαστηριακού λειαντή δοκιμίων (Σχήμα 5.5).

Το δοκίμιο τοποθετείται σταθερά σε ειδική βάση που φέρει το μηχάνημα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η παραλληλότητά του με τον άξονα λείανσης, άρα και τη δημιουργία οριζόντιας επιφάνειας. Το μηχάνημα τίθεται σε λειτουργία. Ο τροχός λείανσης εφάπτεται στο δοκίμιο και λειαίνει την επιφάνεια του δοκιμίου. Η μετακίνηση του τροχού γίνεται χειροκίνητα κατά την οριζόντια διεύθυνση. Μετά από λίγες επαναλήψεις της οριζόντιας αυτής κίνησης ο τροχός σταματά να έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο. Τότε, ο τροχός μετακινείται χειροκίνητα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ώστε να έρθει πάλι σε επαφή με το δοκίμιο. Μετά από μια με δυο επαναλήψεις το δοκίμιο βγαίνει από τη μηχανή και τοποθετείται σε λεία οριζόντια επιφάνεια. Στη συνέχεια εξετάζεται η τέλεια εφαρμογή της λειανθείσας επιφάνειας με την επιφάνεια αυτή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί η τέλεια εφαρμογή τους και για τις δυο άκρες του δοκιμίου.

Το μηχάνημα διαθέτει επίσης κλειστό κύκλωμα νερού για τη ψύξη του δίσκου λείανσης.



Σχήμα .5.5: Εργαστηριακός λειαντής.

5.2 Εργαστηριακές μετρήσεις υπερήχων.

Η ξήρανση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με παραμονή τους στο ξηραντήριο στους 105°C για 24 ώρες (Σχήμα 5.6) που διατέθηκε από το εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, ενώ για να επιτευχθεί ο κορεσμός τους σε υγρασία, κρατήθηκαν σε δοχείο με νερό για 24 ώρες (Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.6:Ξήρανση δοκιμίων.



Σχήμα 5.7: Κορεσμός δοκιμίων.

Οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη τεχνητής ασυνέχειας με διάφορους συνδυασμούς παρουσιάζονται παρακάτω(κάθε φορά το πρώτο δοκίμιο επαφίεται στον πομπό της συσκευής υπερήχων ενώ το δεύτερο επαφίεται στο δέκτη):

- α) Αλφάς-Αλφάς.
- β) Σκληρή-Σκληρή.
- γ) Σκληρή-Αλφάς.
- δ) Αλφάς-Σκληρή.
- ε) Μάρμαρο-Αλφάς.
- στ) Αλφάς-Μάρμαρο.
- ζ) Μάρμαρο-Σκληρή.
- η) Σκληρή-Μάρμαρο.



Σχήμα 5.8:Μέτρηση υπερήχων σε αλφά.



Σχήμα 5.9: Μέτρηση υπερήχων σε σκληρή.



Σχήμα 5.10:Μέτρηση υπερήχων με τεχνητή ασυνέχεια (αλφάς-σκληρή).

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των μετρήσεων είναι τα εξής:

α) Γεννήτρια υπερήχων (Pundit), β) παλμογράφος με σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων (Nikolet) και, γ) ηλεκτρονικός υπολογιστής με την επιμέρους χρήση διάφορων λογισμικών.

Τα όργανα μέτρησης περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

5.2.1 Γεννήτρια υπερήχων (Pundit 6)

Μετά την προετοιμασία τους, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μετρήσεις μέσω της διάδοσης υπερηχητικών κυμάτων σε αυτά με τη χρήση της γεννήτριας υπερήχων του εργαστηρίου με την εμπορική ονομασία Pundit 6, με εφαρμογή της «άμεσης διάδοσης» (Σχήμα 5.8). Το πλήρες όνομα της συσκευής είναι «Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester».

Ο κύριος εξοπλισμός περιλαμβάνει:

α) την κεντρική μονάδα PUNDIT.

β) ένα ζεύγος μορφοπέων, πομπού-δέκτη (54kHz).

γ) ζεύγος ηλεκτροδίων για τους μετατροπείς.

δ) δερμάτινη θήκη.

ε) κύλινδρο αναφοράς για αρχικοποίηση των μετρήσεων.

στ) συσκευασία με λιπαντικό μέσο.

ζ) το εγχειρίδιο.

η) κεντρικά ηλεκτρόδια.

Η συσκευή δίνει άμεση αναφορά του χρόνου διαδρομής του παλμού και περιλαμβάνει δύο παράθυρα τιμών που καλύπτουν από 0.1μs έως 999.9μs με μονάδες του 0.1 μs και από 1μs έως 9999μs με μονάδες του 1μs.

Με τη συσκευή παρέχεται και ο κύλινδρος αναφοράς στον οποίο αναγράφεται ο χρόνος διαδρομής 26μs, με τον οποίο γίνεται η αρχικοποίηση (calibration).

Η γεννήτρια παλμού μπορεί να λειτουργήσει σε τάση είτε 1200V, ή 500V ανάλογα με την επιλογή που γίνεται από διακόπτη που βρίσκεται στον πίσω πίνακα ελέγχου. Η συχνότητα επαναληψιμότητας του παλμού PRF (pulse repetition frequency) επιλέγεται επίσης από διακόπτη στο πίσω μέρος της συσκευής είτε στους 10 pps (παλμούς ανά δευτερόλεπτο), ή στους 100 pps.

Οι μετατροπείς (πομπός-δέκτης) αποτελούνται από κεραμικά πιεζοηλεκτρικά στοιχεία ζιρκονικού-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.


Σχήμα 5.11: Διάταξη Pundit

Ένας παλμός διαμηκών ταλαντώσεων παράγεται από ένα ηλεκτροακουστικό μορφοτροπέα, ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με μία επιφάνεια του υπό εξέταση δοκιμίου. 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). Τέλος, με ηλεκτρονικά κυκλώματα μέτρησης χρόνου γίνεται δυνατή η μέτρηση του χρόνου διαδρομής του παλμού.

Ο ενισχυτής έχει αρκετά υψηλή εσωτερική αντίσταση, επιτρέποντας τη χρήση του οργάνου με πιεζοηλεκτρικούς ή φερροηλεκτρικούς μορφοτροπείς, σε εύρος συχνοτήτων από 5KHz έως 1MHz.

Για μετρήσεις πεδίου, υπάρχει εσωτερική μπαταρία νικελίου-καδμίου που όταν φορτιστεί πλήρως, παρέχει λειτουργία περίπου 12 ωρών συνεχούς χρήσης του οργάνου. Μέσω ειδικού αισθητήρα υπάρχει ένδειξη ειδοποίησης όταν η μπαταρία πλησιάζει στο τελικό σημείο αποφόρτισης.

- To pundit έχει τα παρακάτω γενικά χαρακτηριστικά:
- α) Ακρίβεια: ±0.1μs
- β) Αντίσταση: περίπου 500kΩ.

- γ) Σύνδεση σε κεντρική παροχή ρεύματος 96/125V-190-250V, 50-60Hz.
- δ) Οθόνη υγρών κρυστάλλων τεσσάρων ψηφίων, 12 mm.
- ε) Αντοχή σε θερμοκρασία 0-40° C.

Γενικά, υπάρχουν τρεις κύριες μέθοδοι εφαρμογής του Pundit (Σχήμα 5.12) και κάθε μία διεξάγεται ανάλογα με το είδος και το μέγεθος του εξεταζόμενου δοκιμίου, αλλά και σχετικά με το είδος του κύματος που μετρείται (πχ. επιφανειακά, ανακλώμενα κτλ). Αυτές είναι α) η άμεση διάδοση, όπου οι μορφοστροπείς τοποθετούνται αντιδιαμετρικά του δοκιμίου, β) η ημι-άμεση διάδοση, όπου οι μορφοτροπείς τοποθετούνται ο ένας στην οριζόντια και ο άλλος στην κάθετη επιφάνεια και, γ) η έμμεση διάδοση, όπου και οι δύο μορφοτροπείς τοποθετούνται στην ίδια οριζόντια επιφάνεια, γι' αυτό ονομάζεται και επιφανειακή διάδοση.



Σχήμα 5.12: οι τρεις κύριες μέθοδοι εφαρμογής του Pundit.

5.2.2 Παλμογράφος Nicolet 310

Παράλληλα και σε σύνδεση με το Pundit χρησιμοποιήθηκε παλμογράφος με ενσωματωμένο σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης των δεδομένων, ονομαστικής

ισχύος 85 watts (Σχήμα 5.13). Με καλώδιο που συνδέει την έξοδο του Pundit (δέκτη), γίνεται είσοδος του εξελθέντος 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.



Σχήμα 5.13: Παλμογράφος Nicolet 310.

Αρχικά, πατώντας το «grid button», αντικαθίσταται ο κέρσορας της οθόνης με κάνναβο 10 x 10 ψηφίδων που εξυπηρετεί την απεικόνιση του σήματος. Στην οθόνη (Σχ:5.14) αναγράφονται, κάτω αριστερά ο χρόνος ανά ψηφίδα και δεξιά η τάση ανά ψηφίδα.

Η συχνότητα δειγματοληψίας του παλμογράφου, (δηλαδή το χρονικό ισοδιάστημα σε με κατά το οποίο καταγράφεται τιμή της τάσης του σήματος), επιλέγεται από τον χειριστή με γύρισμα του διακόπτη με τη ένδειξη «time per point», στην επιθυμητή συχνότητα, δηλαδή στη συχνότητα κατά την οποία λαμβάνεται η μέγιστη δυνατή πληροφορία ανάλογα με τις ανάγκες της μελέτης. Η μετατροπή της συχνότητας σε Hertz γίνεται ως εξής: Εάν για παράδειγμα γίνεται καταγραφή κάθε 20 με τότε η συχνότητα δειγματοληψίας ισούται με 1 / 20μs = 50kHz.



Σχ.5.14: Ένδειξη των τιμών χρόνου και τάσης στην οθόνη.

Όσο μικραίνει η τιμή του διακόπτη, τόσο μεγαλώνει η χρονική ανάλυση του σήματος αλλά μικραίνει το μήκος της κυματομορφής που θα καταγραφεί (πίνακας 5.2) εφόσον η πληροφορία που καταγράφεται είναι σταθερή και ίση με 4000 τιμές.

Time per point	Sample number
1µs	1, 2, 3, 44000
2µs	2, 4, 6, 88000
10µs	10, 20, 30, 40 40000

Πίνακας 5.2: Τρόπος δειγματοληψίας παλμογράφου.

Η οθόνη χωρίζεται επίσης σε 4096 επίπεδα τάσης (2047 θετικά, 2048 αρνητικά και το μηδέν). Κατά την καταγραφή, κάθε σημείο εμφανίζεται στο επίπεδο που ανταποκρίνεται στη διακριτή τιμή τάσης του σημείου.

Το καταγραφικό σύστημα βρίσκεται ενσωματωμένο στο πάνω μέρος του παλμογράφου και περιλαμβάνει δύο οδηγούς δισκέτας 3,5 ιντσών και πίνακα με κουμπιά για επεξεργασία των δεδομένων. Η οθόνη του παλμογράφου αλλάζει από δυναμική σε στατική με τη χρήση των κουμπιών «live» και «hold» αντίστοιχα. Για να είναι εφικτή η καταγραφή πρέπει να έιναι πατημένο το «hold» ώστε η οθόνη να «παγώσει». Ανάλογα με το κομμάτι της κυματομορφής που είναι ορατό στην οθόνη γίνεται και η καταγραφή των

αντίστοιχων τιμών, πατώντας το κουμπί «unprotect» και έπειτα «store» από τον πίνακα του καταγραφικού. Το «unprotect» επιλέγεται σε περίπτωση που η δισκέτα είναι καταγεγραμμένη με δεδομένα και είναι επιθυμητό να παραληφθούν γράφοντας νέα δεδομένα από πάνω. Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται από το καταγραφικό σύστημα είναι το MS-Dos και η κάθε δισκέτα που χρησιμοποιείται πρέπει να περιέχει το πρόγραμμα ανάγνωσης των δεδομένων. Η μικρή οθόνη που βρίσκεται επάνω στον πίνακα αναγράφει τον αριθμό της μέτρησης που λαμβάνεται ο οποίος αυξάνεται αυτόματα κάθε φορά που ολοκληρώνεται μια καταγραφή.

Με κατάλληλη επιλογή του διακόπτη που βρίσκεται στο πίσω μέρος της συσκευής pundit και γύρισμα του διακόπτη «time per point», επιλέχθηκαν για κάθε δοκίμιο τέσσερα διαφορετικά ζεύγη συχνοτήτων. Όπου prf (pulse repetition frequency): η συχνότητα επαναληψιμότητας παλμού του pundit σε παλμούς/sec και fs (frequency of sampling): η συχνότητα δειγματοληψίας του παλμογράφου σε ms/ψηφίδα:

α) για prf=10 και fs=8.

β) για prf=10 και fs=20.

- γ) για prf=100 και fs=0.8.
- δ) για prf=100 και fs=2.

Τέλος, χρησιμοποιώντας πρόγραμμα MS-Dos σε Η/Υ γίνεται εύκολα η μετατροπή των αρχείων σε αρχεία «dat» που επεξεργάζονται με τη χρήση του προγράμματος Excel.



Σχ.5.15: Πλήρης διάταξη εργαστηριακής μέτρησης.

5.3 Δοκιμή μονοαζονικής θλίψης.

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία μετρήσεων με τη χρήση της μη καταστροφικής μεθόδου των υπερήχων, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη με τη χρήση της συσκευής που παρέχεται από το εργαστήρια μηχανικής πετρωμάτων (Σχήμα 5.16 και 5.17), ώστε να υπολογιστεί η αντοχή τους σε θλίψη.



Σχήμα .5.16: Συσκευή φόρτισης MTS 1600 kN.



Σχήμα5.17: Δοκίμιο σκληρής έπειτα από θραύση.

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 πιέσεως. 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 (Σχήμα 5.18).



Σχήμα 5.18: Ολοκληρωμένο σύστημα καταγραφής δεδομένων ανεμπόδιστης μονοαξονικής

6 Επεξεργασία αποτελεσμάτων.

6.1 Επεξεργασία μετρήσεων μη καταστροφικού ελέγχου.

Τα δεδομένα που προέκυψαν από τις μετρήσεις με το Pundit αποθηκεύτηκαν σε δισκέτα και επεξεργάστηκαν σε Η/Υ με χρήση του λογισμικού Excel, ώστε να προκύψουν οι γραφικές παραστάσεις πλάτους (Volts)-χρόνου(ms). Ενδεικτικά παρουσιάζονται στα σχήματα 6.1 με 6.4 οι γραφικές παραστάσεις ξηρού αλφά στα τέσσερα ζεύγη συχνοτήτων:



Σχήμα 6.1:Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους (10prf).



Σχήμα 6.2:Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους (10prf).



Σχήμα 6.3: Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους (100prf).



Σχήμα 6.4:Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους (100prf).

Για να εντοπιστεί το μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό πληροφορίας από κάθε καταγραφή, ήταν σκόπιμο, από τη στιγμή που δεκαπλασιάστηκε η συχνότητα επαναληψιμότητας του παλμού, να υποδεκαπλασιαστεί η συχνότητα δειγματοληψίας του παλμογράφου, δηλαδή να γίνουν πιο πυκνά τα διαστήματα δειγματοληψίας.

Μετά από παρατήρηση των αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμο να ληφθεί ως πηγή συμπερασμάτων μόνο το ένα από τα τέσσερα ζεύγη συχνοτήτων, δηλαδή το α) για prf=10 και fs=8, για τους παρακάτω λόγους:

Στο β) μειώνεται πολύ η ανάλυση για να μεγαλώσει το μήκος, ενώ στα γ) και δ) η συχνότητα επαναληψιμότητας του παλμού είναι πολύ υψηλή ώστε με την δεδομένη συχνότητα δειγματοληψίας να μην γίνεται εφικτή η καταγραφή του σήματος μέχρι την πλήρη απόσβεσή του στα ξηρά δείγματα και επομένως να μην μπορούν να διεξαχθούν τα

αντίστοιχα συμπεράσματα. Να σημειωθεί ότι έγιναν δοκιμές με χαμηλότερες συχνότητες δειγματοληψίας, αλλά όπως αναφέρθηκε παραπάνω δεν ήταν ικανές να δώσουν την απαιτούμενη πληροφορία.

Στα σχήματα 6.5 έως 6.15 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι γραφικές παραστάσεις για κάθε είδος δοκιμίου:



Σχήμα 6.5: Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους για δοκίμιο μαρμάρου.



Σήμα 6.6: Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους για δοκίμιο ασβεστόλιθου.



Σχήμα6.7: Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους για δοκίμιο ξηρού αλφά.



Σχήμα 6.8: Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους για δοκίμιο υγρού αλφά.







Σχήμα 6.10: Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους για δοκίμιο υγρής σκληρής.



Σχήμα 6.11: Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους για τεχνητά ενοποιημένα δοκίμια ξηρού αλφά.



Σχήμα 6.12:Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους για τεχνητά ενοποιημένα δοκίμια ξηρής σκληρής.



Σχήμα 6.13: Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους για τεχνητά ενοποιημένα ξηρά δοκίμια σκληρής-αλφά.



Σχήμα 6.14: Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους για τεχνητά ενοποιημένα δοκίμια μαρμάρου-ξηρής σκληρής.



Σχήμα 6.15: Γραφική παράσταση χρόνου-πλάτους για τεχνητά ενοποιημένα δοκίμια ξηρού αλφάμαρμάρου. Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι διαστάσεις των δοκιμίων όπως αυτά μετρήθηκαν με το παχύμετρο, ενώ στους πίνακες 6.2 και 6.3 παρουσιάζονται οι χρόνοι διαδρομής των υπερήχων όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις με το pundit και οι αντίστοιχες ταχύτητες διάδοσης,για ξηρά και υγρά δοκίμια καθώς και για δοκίμια με τεχνητή ασυνέχεια:

Κωδικός	Μήκος (cm)	Διάμετρος (cm)	Εμβαδόν (cm ²)
Ασ1	10.72	4.94	19.16
Ασ2	10.60	4.91	18.92
Ασ3	10.66	5.06	20.10
Ασ4	9.88	5.31	22.13
М	9.75	5.05	20.02
A1	11.5	5.1	20.42
A2	11.2	4.88	18.69
A3	11.31	5.1	20.42
A4	11.32	5.1	20.42
A5	11.05	5.05	20.10
A6	11.2	5.1	20.42
Σ1	11.15	5.07	20.18
Σ2	11.2	5.08	20.26
Σ3	11.0	5.13	20.66
Σ4	11.0	5.1	20.42
Σ5	10.97	5.08	20.26
Σ6	11.0	5.1	20.42

Πίνακας	6.1:	διαστάσεις	δοκιμίων
---------	------	------------	----------

Πίνακας 6.2: Χρόνοι και ταχύτητες διάδοσης για ξηρά και υγρά δοκίμια.

Κωδικός	Ξ	Ξηρό	Υγρό		
ittootkoy	Χρόνος (μs)	Ταχύτητα (m/s)	Χρόνος (μs)	Ταχύτητα (m/s)	
Ασ1	24.6	4357.72	-	-	
Ασ2	27.2	3897.06	-	-	
Ασ3	25.5	4180.39	-	-	

Ασ4	25.4	3889.76	-	-
М	14.3	6818.18	-	-
A1	32.8	3506.10	34.6	3323.70
A2	33	3393.94	30.8	3636.36
A3	32.3	3501.55	32	3534.38
A4	30.5	3711.48	32.4	3493.83
A5	29.5	3745.76	29.3	3771.33
A6	32	3500.00	34.7	3227.67
Σ1	24.5	4551.02	24.4	4569.67
Σ2	23	4869.57	22	5090.91
Σ3	24	4583.33	22.6	4867.26
Σ4	23.1	4761.90	21.1	5213.27
Σ5	22.8	4811.40	21.4	5126.17
Σ6	24.2	4545.45	22.6	4867.26

Πίνακας 6.3: χρόνοι και ταχύτητες διάδοσης για δείγματα με τεχνητή ασυνέχεια.

κωδικός	Συνολικό μήκος (cm)	Χρόνος (μs)	Ταχύτητα (m/s)
EA6-EA1	22.7	73.5	3088.44
ΞΣ5-ΞΣ4	22	57	3859.65
ΞΣ5-ΞΑ4	22.3	62.5	3568.00
ΞΑ4-ΞΣ5	22.3	63.5	3511.81
M-EA4	21.05	52.5	4009.52
ΞA4-M	21.05	51.8	4063.71
Μ-ΞΣ5	20.75	43.8	4737.44
ΞΣ5-Μ	20.75	46.5	4462.37

6.2 Φασματική ανάλυση σήματος.

Μετά την ολοκλήρωση των εργαστηριακών μετρήσεων με υπερήχους και τη διεξαγωγή των αντίστοιχων γραφικών παραστάσεων με τη χρήση του προγράμματος Excel, οι μετρήσεις υποβλήθηκαν σε δευτερεύουσα επεξεργασία με τη χρήση της εντολής «specgramdemo» του Signal Processing Toolbox του λογισμικού Matlab. Η παραπάνω εντολή εφαρμόζει τον Ταχύ Μετασχηματισμό Fourier διακριτού χρόνου στο

εισαχθέν σήμα, (το οποίο εισάγεται ως διάνυσμα στο πεδίο "workspace" του Matlab, για να προκύψει η ανάλυσή του στο πεδίο των συχνοτήτων.

Αρχικά γίνεται άνοιγμα του πεδίου "workspace" του προγράμματος Matlab και εισάγονται σε αυτό μεταβλητές με τη μορφή διανυσμάτων, κάνοντας 'κλικ' στο εικονίδιο 'New variable':

🙏 MATLAB				
File Edit View Graphics Debug Desktop Window Help				
□ ☞ ※ 凾 電 ∽ ∼ 第 営 *	💡 Current Directory: C:'MATLAB701 \work			
Shortcuts 🖉 How to Add 📝 What's New				
Workspace	ه م ج			
🛅 🖆 🚇 📸 🎒 🕍 🔝 🔹 Stack	: Ba 💌			
N <mark>New variable</mark> Value	Class			
🗄 A <3990x1 double>	double			
🗄 B <3990x1 double>	double			
🗄 C <3990x1 double>	double			
田 D <3990x1 double>	double			
🗄 E <3990x1 double>	double			
🖽 F <3990x1 double>	double			
🖽 G <3990x1 double>	double			
H <3990x1 double>	double			
🖽 I <3990x1 double>	double			
🖽 J <3990x1 double>	double			
₩K <3990x1 double>	double			
🗄 L <3990x1 double>	double			
H <3990x1 double>	double			
MY_LICENSE 'C:\LINDOAPI5\LICEN	√SE\IndapiX.lic' char (global)			
	double			
☐ 0 <3990x1 double>	double			
P <3990x1 double>	double			
🕀 Q <3990x1 double>	double			
Command Window Current Directory Workspace	a) Help			
📣 Start				
🏄 Start 🔞 🥭 💽 🥪 🚱 炎 eba	🔞 Avû 🔄 334 😏 My C 🔁 vivlio 🔁 fouri 🔄 spec 🚺 mat 👔 Polyl			

Έπειτα με 'διπλό κλικ' πάνω στα εικονίδια των μεταβλητών ανοίγεται παράθυρο στο οποίο γίνεται εισαγωγή των δεδομένων:

	in Debus Dedus Ultram Ula									_	₽×
	G C) Ca J III g Current Directory: C:MATLAB/	U1 WYORK				<u> </u>					
Shortcuts 🕐 How to Ac	id 🛃 What's New										
Workspace		* ×	≦ ^	rray Editor - A							××
16 🖬 🖉 🎼 🍜	🎽 🚾 👻 Stack: Ba 💌			👗 🖻 🛍	3	🔨 🛛 t	Sta	ck: Ba 💌	⊞ ⊡ E	380	× 5
Name 🛆	Value	Class		1	2		3	4	5	6	
⊞ A	<3990x1 double>	double	1	0.00145							^
В	<3990x1 double>	double	2	0.00155							
⊞c	<3990x1 double>	double	3	0.00155							
🗄 D	<3990x1 double>	double	5	0.00145							-
E	<3990x1 double>	double	6	0.00155							+
F F	<3990x1 double>	double	7	0.0015							-
₽⊞G	<3990x1 double>	double	8	0.00155							
Н н	<3990x1 double>	double	9	0.00155							
E I	<3990x1 double>	double	10	0.00145							_
⊞ 1	<3990x1 double>	double	11	0.0015							_
Шĸ	<3990x1 double>	double	12	0.0015							
HE L	<3990x1 double>	double	13	0.00155							
🗄 M	<3990x1 double>	double	15	0.00135							-
MY_LICENSE	'C:\LINDOAPI5\LICENSE\IndapiXX.lic'	char (glc	16	0.00145							-
H N	<3990x1 double>	double	17	0.00155							
⊞o	<3990x1 double>	double	18	0.0015							
⊞ P	<3990x1 double>	double	19	0.0015							
l⊞ Q	<3990x1 double>	double	20	0.00155							_
			21	0.0015							
			22	0.00145							
			23	0.0016							
			24	0.00155							
			26	0.0016							-
			27	0.00155							
			28	0.00155							
			29	0.00155							
			30	0.0015							_
		•	31	0.00165							-
Command Window Cur	rent Directory Workspace Help										▶
📣 Start											
🏄 Start 🔞 🍠 📀	🥪 🞯 na 🔞 Av 🖳 334 🛃 My 🌔	🗅 vivli [🔵 fou	. 📑 spe	📣 МА	M Poly.	🦉 (unti	EN «	🧾 🕨 4:3	4 PM

Μετά γίνεται εργασία στο πεδίο "command window". Η εντολή εισάγεται ως εξής: Specgramdemo(x,Fs)

Όπου x είναι το όνομα της εκάστοτε μεταβλητής και Fs η συχνότητα δειγματοληψίας (Frequency of Sampling) σε Hz, όπως αυτή δόδηκε κατά την καταγραφή του σήματος στον παλμογράφο. Πατώντας enter εμφανίζεται στην οθόνη παράθυρο με το φασματογράφημα της μεταβλητής.

Πχ: Specgramdemo(A,20000):



Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει το φασματογράφημα μαρμάρου με συχνότητα δειγματοληψίας f_s=20KHz. Παρατηρείται ότι υπάρχουν τρεις κλίμακες, κάθε μία από τις οποίες προσδίδει την τιμή της αντίστοιχης μεταβλητή σε κάθε σημείο της εικόνας εάν μετακινηθεί το σταυρόνημα που αρχικά βρίσκεται στο κέντρο. Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται ο χρόνος σε seconds, στον κάθετο άξονα (αριστερά της εικόνας) η συχνότητα σε Hertz, ενώ δεξιά της εικόνας υπάρχει μια χρωματική κλίμακα που αντιπροσωπεύει την ένταση του σήματος σε decibel. Κάτω και αριστερά της εικόνας αναγράφονται οι εκάστοτε τιμές των μεταβλητών.

Κάτω και δεξιά της εικόνας εμφανίζονται τρία πλαίσια τα οποία περιέχουν μία τιμή, αναλυτικά: -το πλαίσιο "Nwin" ορίζει το μήκος του κάθε τμήματος (παράθυρο) της διακριτοποίησης που εφαρμόζεται.

Το πλαίσιο "Nlap" ορίζει τον αριθμό των δειγμάτων στα οποία θα γίνει «υπέρθεση» σε κάθε τμήμα.

Το πλαίσιο "Nfft" ορίζει το μήκος του μετασχηματισμού, δηλαδή καθορίζει τις συχνότητες οι οποίες θα προκύψουν μετά τον υπολογισμό του μετασχηματισμού. Η μεταβλητή αυτή παίρνει τιμές ως δυνάμεις του 2, όπως $2^8=256$ και $2^9=512$.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές των τριών μεταβλητών για τις κύριες (δεσπόζουσες) συχνότητες που προέκυψαν από τη φασματική ανάλυση, για ξηρά δοκίμια (πίνακας 6.5)

και για υγρά δοκίμια (πίνακας 6.6), ενώ στον πίνακα 6.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ξηρά δοκίμια με τεχνητή ασυνέχεια:

Κωδικός	Συχνότητα	Χρόνος	Ένταση
KOUKUS	(kHz)	(ms)	(dB)
	13	65	-20
	3	65	-30
IVI	2	42	7
	5	33	3
	1.7	28	-20
A = 1	3.5	10	-17
Ασι	13	8.6	-30
	19	8	-15
	1.4	18	-10
Ασ2	12	11	-6
	18	9	-18
	1.6	25	-15
A = 2	19	8.5	-15
Ασ3	3.4	8	-18
	13	6	-35
A = 4	1.9	18	-20
A04	11	12	-17
	14	35	-11
	1.3	25	-10
EAI	22	22	-27
	12	17.5	-24
ΞΔ2	14	43	-10
	22	29	-24
	14	37	-10
ΞA3	12.5	16	-30
	21	12	-30

Пі чакас 6.5 :4	Αποτελέσματα	φασματικής	ανάλυσης	σε ξηρ	ά δοκίμια
	100000000000000000000000000000000000000	\$ 0.0 prostering	00	~~~~	or o o respector.

6 Επεčεονασ	ία Αποτε	ελεσμάτων
υ Επεςεργαυ	$i \alpha m \sigma i c$	ncopulov

$\Xi \Lambda A$	14	40	-5
<u>-</u> A+	21	30	-9
EA5	14.5	35	-2
EA5	20.4	26	-9
	13	33	0.8
ΞA6	1.5	29	-17
	22	22	-30
	11	31	-16
TN 1	18	26	-12
	1.3	18	-6
	20	12	-35
	11	34	-13
	19	28	-10
ΞΣ2	13.8	17	-17
	1.8	16	-5
	5	16	-6
ΞΣ2	11	30	-6
	18	25	-10
	11.5	37	-12
224	19	30	-11.5
<u>-</u> 24	13	19	-20
	6	15	-11
TS 5	11.7	35	-11
225	19.5	24	-13
	11.5	27	-9
ΞΣ6	18.6	20	-12
	14.5	13	-23

Πίνακας 6.5 (συνέχεια).

TZ S Z	Συχνότητα	Χρόνος	Ένταση
Κωδικος	(kHz)	(ms)	(dB)
	1.3	16	-9
YA1	13	7	-10
	12	3	-35
VA2	1.3	12-19	-18
1 A2	13	6	-13
VA2	1.3	12-16	-13
IAS	13	6	-11
VAA	1.3	12-18	-11
1 74	13	7	-11.5
VA5	1.3	15	-9
IAS	13	6	-9
	1.3	9-16	-11
YA6	12.2	5.3	-3
	14.2	5.7	-25
VΣ1	1.4	13	-8
121	3.2	7.5	-23
ΥΣ2	1-2.5	15	-17
1 22	3.2	7.5	-17
ΥΣ3	1-2.5	12	-9
νΣ4	1-3.5	16	-10
124	11.4	8.5	-6
ΥΣ5	1-3.5	16	-16
1 23	11	6.6	-22
ΥΣ6	1-3.5	16	-10
120	10.7	5	-20

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης σε υγρά δοκίμια.

V. S. V.	Συχνότητα	Χρόνος	Ένταση	
κωσικος	(kHz)	(ms)	(dB)	
	12.9	32.8	-7	
A6-A1	1	22	-13	
	2.2	16	-12	
	11.8	32.8	-7	
Σ5-Σ4	19.4	25.5	-8	
	0-3	20	-12	
	1.2	19	-10	
Σ5-A4	14.6	16	-25	
	12	10.2	-35	
	11.7	31	-24	
Α4-Σ5	1-3.5	30	-5	
	14.5	18.8	-25	
ΜΔΔ	21.2	22	-6.6	
101-744	1-3	18	-11	
A-M	21	19	-2	
	1.3-3	16.5	-17	
Μ-Σ	1-3	15	-8	
Σ-Μ	1-3.4	16	-7	

Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης σε ξηρά δοκίμια με τεχνητή ασυνέχεια.



Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω τα φασματογραφήματα για κάθε είδος δοκιμίου (Σχήμα 6.16-Σχήμα 6.24):

Σχήμα 6.16: Φασματική ανάλυση σε δοκίμιου μαρμάρου.



Σχήμα 6.17: Φασματική ανάλυση σε δοκίμιου ασβεστόλιθου.



Σχήμα 6.18: Φασματική ανάλυση σε δοκίμιο αλφά, σε ξηρή κατάσταση (αριστερά) και σε υγρή κατάσταση (δεξιά).



Σχήμα 6.19: Φασματική ανάλυση σε δοκίμιο σκληρής, σε ξηρή κατάσταση (αριστερά) και σε υγρή κατάσταση (δεξιά).



Σχήμα 6.20: Φασματική ανάλυση σε τεχνητά ενοπιημένα δοκίμια μαρμάρου-ξηρής σκηρής



Σχήμα 6.21: Φασματική ανάλυση σε τεχνητά ενοπιημένα δοκίμια ξηρού αλφά-μαρμάρου.



Σχήμα 6.22 : Φασματική ανάλυση σε τεχνητά ενοπιημένα ξηρά δοκίμια σκληρής- αλφά.



Σχήμα 6.23: Φασματική ανάλυση σε τεχνητά ενοπιημένα ξηρά δοκίμια σκληρής



Σχήμα 6.24: Φασματική ανάλυση σε τεχνητά ενοπιημένα ξηρά δοκίμια αλφά

6.3 Υπολογισμός του συντελεστή απόσβεσης.

Εκτός από την μέτρηση της ταχύτητας των υπέρηχων και της φασματικής ανάλυσης, έγινε μια επιπλέον επεξεργασία με σκοπό τον υπολογισμό μιας δεύτερης ακουστικής παραμέτρου, του συντελεστή απόσβεσης.

Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ξανά το πρόγραμμα Matlab και πιο συγκεκριμένα η σύνταξη κώδικα. Παρακάτω θα περιγραφεί η διαδικασία πυ ακολουθήθηκε.

Αρχικά, δημιουργήθηκε αρχείο «excel» που περιέχει τις μετρήσεις όλων των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή την διερεύνηση, ταξινομημένες ανά στήλη, ενώ η πρώτη στήλη περιέχει τις τιμές του χρόνου σύμφωνα με το βήμα της δειγματοληψίας. Το αρχείο αποθηκεύτηκε στο πεδίο «workspace» με τη μορφή «dat». Έπειτα, έγινε διόρθωση σε όλες τις τιμές αφαιρώντας το θόρυβο, έτσι ώστε η εκάστοτε κυματομορφή να αποσβαίνει στο μηδέν.

Η σύνταξη του κώδικα ξεκινάει με δεδομένο ότι ο συντελεστής απόσβεσης θα εξαχθεί από τις τιμές που βρίσκονται πάνω από τον θετικό ημιάξονα. Έπειτα δημιουργείται μία καμπύλη «φάκελος» ως εξής: Αρχικά λαμβάνεται ως πρώτη τιμή, η μέγιστη τιμή της έντασης ενώ ως επόμενη λαμβάνεται η τιμή που θα έχει την ελάχιστη διαφορά από την προηγούμενη. Αυτό το κριτήριο εξασφαλίζει α) τη φθίνουσα σειρά των επιλεχθέντων μετρήσεων και β) οτι κάτω από την καμπύλη που δημιουργείται μικρότερες). Εν ολίγοις, η καμπύλη αυτή αποτελεί το γεωμετρικό τόπο των τοπικών μέγιστων των αρχικών δεδομένων.

Τέλος, γίνεται μία θεώρηση ότι η καμπύλη αυτή αποτελεί την καλύτερη δυνατή απεικόνιση του ρυθμόυ απόσβεσης και η εύρεση μιας δεύτερης καμπύλης που θα περιγράφεται με μια δεδομένη αλγεβρική εξίσωση και θα προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό την αρχική, θα περιέχει και την τιμή του συντελεστή απόσβεσης. Η δεύτερη αυτή καμπύλη περιγράφεται από την γενική εξίσωση:

$$y = a \cdot e^{-b \cdot x},\tag{6.1}$$

η οποία περιγράφει το γεγονός ότι η ένταση του σήματος (y) μειώνεται εκθετικά με το χρόνο (x) και έχει συντελεστή απόσβεσης (b). Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που συντάχθηκε.

```
clear all
close all

    εισάγεται ο αριθμός της εκάστοτε στήλης:

I=19;
load dokimi.dat;
k=0;

    εισάγεται ο περιορισμός οτι οι τιμές αποτελούν το θετικό ήμισυ της

      κυματομορφής:
for i=1:3990
    if dokimi(i,I)>=0
        k=k+1;
        x1(k)=dokimi(i,1);
        y1(k)=dokimi(i,I)-;
    end
ends
   • ορίζονται οι αρχικές τιμές και το όριο για την «λούπα»
      που ακολουθεί:
orio=length(y1);
[f,g]=max(y1);
y(1) = f;
x(1)=x1(g);
step=1;

    δημιουργείται νέο διάνυσμα με το κριτήριο της ελάχιστης

      διαφοράς:
while g<orio
    temp=max(y1);
    for i=g+1:orio
        if y(step)-y1(i)<temp</pre>
            temp=y(step)-y1(i);
            pos=i;
        end
    end
    step=step+1;
    y(step)=y1(pos);
    x(step)=x1(pos);
    g=pos;
end

    ορίζονται οι τελικές τιμές:

y(step+1)=y1(orio);
x(step+1)=x1(orio);
```

 ορίζεται η συνάρτηση (fmincon) που ελαχιστοποιεί τις απόλυτες διαφορές ανάμεσα στις τιμές της καμπύλης που προέκυψε και σε αυτές μιας νέας καμπύλης που την προσεγγίζει:

```
[alpha,value]=FMINCON(@(a)norm(abs(a(1)*exp(a(2)*x)y)),
[1,1],[],[],[],[],[0,0],[inf,inf]);
alpha
```

```
• καταγράγεται το σφάλμα της προσέγγισης (error):
dif=0;
error=0;
for i=1:length(y)
   dif=dif+abs(y(i)-alpha(1)*exp(-alpha(2)*x(i)));
end
dif
sum = sum(abs(y))
error=dif/sum
figure(1)
plot(x1,y1,'LineWidth',2)
hold on
plot(x,y,'Color','r','LineWidth',2)
grid
ylabel('Volts')
xlabel('ms')
axis([0 max(x) 0 max(y)+0.05*max(y)])
figure(2)
plot(x,alpha(1)*exp(-alpha(2)*x),'LineWidth',2)
hold on
plot(x,y,'Color','r','LineWidth',2)
grid
ylabel('(volts)')
```

axis([0 max(x) 0 max(y)+0.05*max(y)])

xlabel('(ms)')



Σχήμα 6.25 (figure 1): απεικόνιση της καμπύλης-φάκελο (κόκκινη γραμμή) που προκύπτει σύμφωνα με τον παραπάνω κώδικα.



Σχήμα 6.26 (figure 2): απεικόνιση της προσέγγισης (μπλε γραμμή), πάνω στην καμπύλη φάκελο(κόκκινη γραμμή).

Στον πίνακα 6.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την παραπάνω διερεύνυση. Από την εξίσωση $y = a \cdot e^{-b \cdot x}$, έχουν υπολογιστεί οι συντελεστές *a*, *b* για κάθε δοκίμιο καθώς και το εκάστοτε σφάλμα προσέγγισης (*error*). Επίσης, σε αυτήν τη διερεύνυση συμπεριλαμβάνονται τρία ακόμη δοκίμια μαρμάρου με τους εξής κωδικούς: MΣ:μάρμαρο Σκύρου, MK:μάρμαρο Καρράρας, ΜΦ:μάρμαρο Φρυγείας.

κωδικός	a	b	error
A1	0.024	0.199	0.147
A2	0.016	0.197	0.239
A3	0.028	0.254	0.293
A4	0.065	0.210	0.124
A5	0.053	0.230	0.152
A6	0.067	0.256	0.192
Σ1	0.044	0.2691	0.119
Σ2	0.064	0.296	0.157
Σ3	0.054	0.255	0.210
Σ4	0.043	0.332	0.209
Σ5	0.063	0.352	0.192
Σ6	0.045	0.303	0.155
Ασ1	0.114	0.931	0.220
Ασ2	0.052	0.625	0.331
Ασ3	0.057	0.624	0.215
Ασ4	0.110	0.772	0.366
MΔ	0.095	0.168	0.152
ΜΣ	0.043	0.251	0.213
MK	0.044	0.350	0.187
МΦ	0.017	0.433	0.346
YA1	0.104	0.905	0.213
YA2	0.109	1.342	0.243
YA3	0.112	0.942	0.196
YA4	0.081	0.825	0.214
YA5	0.117	1.160	0.220
YA6	0.148	0.688	0.217
ΥΣ1	0.054	0.706	0.215

	Πίνακας 6.8:	Αποτελέσματα	προσέγγισης.
--	--------------	--------------	--------------

ΥΣ2	0.072	1.188	0.386
ΥΣ3	0.050	0.771	0.332
ΥΣ4	0.070	0.608	0.263
ΥΣ5	0.066	1.598	0.311
ΥΣ6	0.063	0.695	0.256

6.4 Επεξεργασία μετρήσεων δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη.

Οι μετρήσεις από τη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη καταγράφονται με τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 6.27, ενώ τα αποτελέσματα της επεξεργασίας παρουσιάζονται στον πίνακα 6.9. Στη στήλη A του excel καταγράφεται η ώρα που λαμβάνεται η κάθε μέτρηση, ενώ στις στήλες C και F καταγράφονται οι μετρήσεις του φορτίου (F) σε kN και της βράχυνσης του δοκιμίου (ΔL) σε mm.

Η μετατροπή του φορτίου σε τάση σ (στήλη Η) γίνεται ως:

x (kN)→ [x*10/εμβαδόν (cm²)] (MPa).

- Η μετατροπή της βράχυνσης σε παραμόρφωση ε (στήλη G) γίνεται ως: $\Delta L \text{ (mm)} \rightarrow (\Delta L\text{-}L_o)/\mu \eta \kappa o \varsigma \text{ (mm)}.$
- Το μέτρο ελαστικότητας Ε (κελί J6) υπολογίζεται ως:

E (GPa)= $[\Delta \sigma (MPa)/\Delta \epsilon]/10^3$.

Η τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη C (κελί K6) ισούται με τη μέγιστη τιμή της τάσης που παραλαμβάνει το δοκίμιο.

	A	В	С	D	E	F	G	Н	J	K
1	Windmill L	oqaer - MTS	S.IMS	_		διάμετοος(cm)	Euβαδόν(cm ²)	Mńĸoc(mm)	-	
2	File opene	d at 12:36:5	59 Fri 21 M	ar 2008		5.1	20,41785	115		
3	File closed	at 12:38:4	9 Fri 21 Ma	ar 2008						
4										
5	Time	LOAD MT	LOAD CE	DISPL MT	DISPL LV	DISP LVDTnew	ε (ΔL/Lo)	Load	E(Gpa)	C(MPa)
6	Secs	kN _	kN _	mm _	mm _	mm _	-	Мра	9,880887	15,52715
7	12:36:59	-1,4	0,453125	-3,56719	0,003437	2,49363	0	. 0		
8	12:37:00	-1,3	0,625	-3,55469	0,002406	2,50516	0,000100261	0,3061047		
9	12:37:01	-0,85	0,84375	-3,54531	0,003437	2,51525	0,000188	0,4132414		
10	12:37:02	-0,05	1,25	-3,53437	0	2,52679	0,000288348	0,6122094		
11	12:37:03	0,35	1,76563	-3,52187	0,00275	2,53255	0,000338435	0,8647482		
12	12:37:04	1,65	2,42188	-3,5125	-0,00275	2,54264	0,000426174	1,1861582		
13	12:37:05	2,45	3,1875	-3,50625	-0,00241	2,54841	0,000476348	1,561134		
14	12:37:06	2,85	4,09375	-3,49375	0,00275	2,57147	0,00067687	2,0049858		
15	12:37:07	4,65	4,96875	-3,48281	-0,00138	2,57723	0,000726957	2,4335324		
16	12:37:08	5,5	6,0625	-3,47344	0,001719	2,59021	0,000839826	2,9692157		
17	12:37:09	6,55	7,17187	-3,46875	0	2,6003	0,000927565	3,5125491		
18	12:37:10	8,55	8,45313	-3,45781	0,000687	2,61039	0,001015304	4,1400686		
19	12:37:11	9,5	9,73438	-3,44531	-0,00206	2,61183	0,001027826	4,7675833		
20	12:37:12	11	11,1875	-3,4375	0,001031	2,62913	0,001178261	5,4792743		
21	12:37:13	13	12,5781	-3,42188	-0,00309	2,62768	0,001165652	6,160345		
22	12:37:14	13,95	14,0781	-3,41719	-0,00034	2,6421	0,001291043	6,8949963		
23	12:37:15	16	15,5625	-3,40156	-0,00103	2,64066	0,001278522	7,6220072		
24	12:37:16	17,55	17,0938	-3,39219	-0,00241	2,65363	0,001391304	8,3719882		
25	12:37:17	18,65	18,6563	-3,3875	0,003437	2,66372	0,001479043	9,13725		
26	12:37:18	20,85	20,2031	-3,36875	-0,00275	2,66804	0,001516609	9,8948224		
27	12:37:19	21,9	21,5781	-3,3625	-0,00241	2,67525	0,001579304	10,568253		
28	12:37:20	22,9	23,125	-3,36094	0,001719	2,69255	0,001729739	11,325874		
29	12:37:21	24,85	24,5469	-3,34375	0,001719	2,70264	0,001817478	12,022275		
30	12:37:22	25,5	25,8594	-3,33281	0,000344	2,70552	0,001842522	12,665095		
31	12.37.23	26 65	27 125	-3 32813	0.00275	2 7257	0.002018	13 28/9//		

Σχήμα 6.27: Μετρήσεις και υπολογισμοί από τη διεξαγωγή μονοαξονικής θλίψης.

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα δοκιμής.

κωδικός	Αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)
Ασ1	47.32	22.25
Ασ2	40.89	18.25
Ασ3	39.49	21.33
Ασ4	23.67	12.33
YA1	15.53	9.88
YA2	8.97	6.88
YA3	21.39	9.08
ΞA4	25.15	13.21
EA5	23.60	7.76
ΞA6	12.62	7.55
ΥΣ1	63.78	22.23
ΥΣ2	92.22	26.30
ΥΣ3	65.39	19.81
ΞΣ4	137.66	28.61
ΞΣ5	146.76	28.99
ΞΣ6	96.64	21.55

Παρακάτω παρουσιάζεται ενδεικτικά μια τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για δοκίμιο ξηρού αλφά (Σχ.6.28):



Σχήμα 6.28: καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για δοκίμιο ξηρού αλφά.

7 Συμπεράσματα

7.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων μη καταστροφικού ελέγχου

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις με τη μέθοδο των υπερήχων σε έξι δοκίμια αλφά σε ξηρή και υγρή κατάσταση, σε έξι δοκίμια σκληρής σε ξηρή και υγρή κατάσταση και σε τέσσερα δοκίμια ασβεστόλιθου από την περιοχή του Ακρωτηρίου σε ξηρή κατάσταση:

- Ο μέσος όρος των ταχυτήτων για το πέτρωμα αλφάς σε ξηρή μορφή είναι 3560m/s, ενώ για το ίδιο πέτρωμα σε υγρή μορφή είναι 3498m/s.
- Ο μέσος όρος των ταχυτήτων για το πέτρωμα σκληρή σε ξηρή μορφή είναι
 4687 m/s, ενώ για το ίδιο πέτρωμα σε υγρή μορφή είναι 4956m/s.
- Ο μέσος όρος των ταχυτήτων για τον ασβεστόλιθο Ακρωτηρίου είναι 4081 m/s.
 Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 6.1.

7.2 Σύνοψη αποτελεσμάτων φασματικής ανάλυσης

Από την φασματική ανάλυση που έγινε μέσω ανάλυσης κατά Fourier (FFT), με τη χρήση του Specgramdemo του Matlab προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα που αφορούν στις δεσπόζουσες συχνότητες των πετρωμάτων:

- Σχετικά με το πέτρωμα ξηρού αλφά, παρατηρήθηκε στα γραφήματα κοινό ίχνος και στα 6 δοκίμια που κυμαίνεται από 13 kHz έως 14.5 kHz με εμμονή στα 14 kHz στα 4 από τα 6 δοκίμια και με μεση διάρκεια περίπου 37ms. Επίσης παρατηρήθηκε ένα δεύτερο κοινό ίχνος και στα 6 δοκίμια, συχνότητας που κυμαίνεται από 20.4 kHz έως 22kHz με μέση διάρκεια περίπου 24ms.
- Σχετικά με το πέτρωμα υγρού αλφά, παρατηρήθηκε ίχνος συχνότητας 1.3 kHz και μέσης διάρκειας περίπου 17ms, κοινό και στα 6 δοκίμια. Το αμέσως επόμενο σε διάρκεια ίχνος (περίπου 6ms), παρατηρήθηκε στα 5 από τα 6 δοκίμια ενώ στο 6° είχε ελάχιστη απόκλιση.
- Σχετικά με το πέτρωμα ξηρής σκληρής, παρατηρήθηκε ίχνος κοινό και στα
 6 δοκίμια, συχνότητας 11-11.7 kHz και μέσης διάρκειας 32ms, καθώς και
 ένα δεύτερο ίχνος που κυμαίνεται από 18 έως 19.5kHz και με μέση διάρκεια
 περίπου 26ms.
- Σχετικά με το πέτρωμα υγρής σκληρής, παρατηρήθηκε ένα ίχνος που περιλαμβάνει ένα εύρος συχνοτήτων 1-3.5kHz περίπου και διάρκειας περίπου 15kHz και εμφανίζεται σε όλα τα γραφήματα.
- Σχετικά με το πέτρωμα ασβεστόλιθου, παρατηρήθηκε ίχνος κοινό και στα 6 δοκίμια, το οποίο όμως δεν αποτελούσε τη δεσπόζουσα συχνότητα σε όλα τα δοκίμια αφού παρουσιάστηκαν ίχνη πολύ μεγαλύτερης διάρκειας σε κάποια από τα δοκίμια. Το ίχνος αυτό έχει τιμή 11-13 kHz και μέση διάρκεια περίπου 9ms.
- Στα δοκίμια με τεχνητή ασυνέχεια παρατηρήθηκε η εξής συσχέτιση: η διάταξη αλφά-αλφά έχουν ίχνος μέγιστης διάρκειας 32.8ms και συχνότητας 12.9kHz παρόμοιο με εκείνο του αλφά χωρίς ασυνέχεια. Επίσης η διάταξη σκληρή-σκληρή έχει ίχνος μέγιστης διάρκειας 32.8 ms και συχνότητας 11.8 kHz παρόμοιο με εκείνο της σκληρής χωρίς ασυνέχεια.

Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 6.2.

7.3 Σύνοψη απότελεσμάτων συντελεστών απόσβεσης

Μέσω της διαδικασίας εξαγωγής του συντελεστή απόσβεσης με τη χρήση κώδικα στο Matlab, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Ο μέσος όρος του συντελεστή απόσβεσης στα δοκίμια ξηρού αλφά είναι 0.224, ενώ στα υγρά δοκίμια είναι 0.977. Το αντίστοιχο μέσο σφάλμα που προκύπτει είναι 19.10% και 21.70%.
- Ο μέσος όρος του συντελεστή απόσβεσης στα δοκίμια ξηρής σκληρής είναι
 0.301, ενώ στα υγρά δοκίμια είναι 0.927. Το αντίστοιχο μέσο σφάλμα είναι
 17.38% και 29.39%.

Ο μέσος όρος του συντελεστή απόσβεσης στα δοκίμια ασβεστόλιθου είναι
 0.738. Το αντίστοιχο μέσο σφάλμα είναι 28.28%.

Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 6.3.

7.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων δοκιμής σε μονοαζονική θλίψη

Από τη διεξαγωγή της δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων ξηρού αλφά είναι 20.6MPa ενώ ο μέσος όρος του μέτρου ελαστικότητας Coulomb είναι 9.5GPa.
- Η μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων υγρού αλφά είναι 15.3MPa ενώ ο μέσος όρος του μέτρου ελαστικότητας Coulomb είναι 8.6 GPa.
- Η μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων ξηρής σκληρής είναι 127MPa ενώ ο μέσος όρος του μέτρου ελαστικότητας Coulomb είναι 26.4GPa.
- Η μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων υγρής σκληρής είναι
 73.8MPa ενώ ο μέσος όρος του μέτρου ελαστικότητας Coulomb είναι 22.8GPa.
- Η μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων ασβεστόλιθου είναι
 37.8MPa ενώ ο μέσος όρος του μέτρου ελαστικότητας Coulomb είναι 18.5GPa.

7.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Συγκρίνοντας τις τιμές της ταχύτητας υπερήχων στα δοκίμια με τις τιμές της αντοχής παρατηρούνται τα εξής δύο φαινόμενα:

Ι. Το πέτρωμα υψηλότερης αντοχής (σκληρή), έχει μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας και στις δύο καταστάσεις (ξηρή-υγρή) από το πέτρωμα χαμηλής αντοχής (αλφάς). Πιθανώς το φαινόμενο αυτό να οφείλεται στην μεγαλύτερη ομοιογένεια που παρατηρείται στα δοκίμια σκληρής και την φαινομενικά μεγαλύτερη πυκνότητά της, επομένως και στην απουσία εγκοίλων ασυνεχειών και παρεμβολών ετερογενών σωμάτων στο υλικό, γεγονός που σαφώς επιβραδύνει τη διάδοση κυμάτων. Από θεωρεία, ισχύει ότι η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων σε ένα στερεό ομογενές και ισότροπο (ή ελαφρά ανισότροπο)

μέσο σχετίζεται άμεσα με την πυκνότητα του μέσου και με τις ελαστικές του ιδιότητες (Πρασιανάκης, 1997). Πιο αναλυτικά η συσχέτιση αυτή περιγράφεται στην ενότητα 2.1.1.

Προκύπτει ότι στα πετρώματα χαμηλής αντοχής (δοκίμια αλφά), η ταχύτητα των κυμάτων στα ξηρά δοκίμια κατά μέσο όρο είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτήν των υγρών, ενώ στα πετρώματα υψηλής αντοχής (δοκίμια σκληρής), παρατηρείται το αντίθετο. Αντίστοιχο συμπέρασμα έχει διεξαχθεί από την ανάλυση του A.Galan σε δοκίμια σκυροδέματος, διαφορετικών σταδίων ωρίμανσης (άρα και διαφορετικής αντοχής), σε υγρή και ξηρή κατάσταση. Αναλυτικότερα η εργασία του A.Galan περιγράφεται στην ενότητα 4.2.

Οι τιμές αντοχής και ταχύτητας υπερήχων παρουσιάζονται διαγραμματικά στα σχήματα 7.1 και 7.2.



Σχήμα 7.1: Τιμές αντοχής ανά δοκίμιο στα διάφορα είδη πετρωμάτων.



Σχήμα 7.2: Τιμές ταχύτητας υπέρηχου ανά δοκίμιο στα διάφορα είδη πετρωμάτων.

Σε προηγούμενες έρευνες έχει γίνει προσπάθεια για την καλύτερη δυνατή συσχέτιση μεταξύ αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και ταχύτητας υπέρηχου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της συσχέτισης στην παρούσα εργασία και παραδείγματα άλλων ερευνών από βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Στον πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μετρήσεων για κάθε είδος πετρώματος για τα μεγέθη (αντοχή, μέτρο ελαστικότητας, ταχύτητα), ενώ στο διάγραμμα του σχήματος 7.5 παρουσιάζεται η συσχέτιση των αντίστοιχων τιμών. Στον πίνακα 7.2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις όλων των δοκιμίων για τα ίδια μεγέθη και στο διάγραμμα του σχήματος 7.6 παρουσιάζεται η αντίστοιχη συσχέτισή τους. Στα σχήματα 7.7 και 7.8 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα ταχύτητας-μέτρου ελαστικότητας.

κωδικός	Αντοχή(MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	ταχύτητα (m/s)
YA	15.30	8.61	3629.26
ΥΣ	73.80	22.78	3608.71
А	20.46	9.51	3574.44

Πίνακας 7.1: Μέσες τιμές αντοχής και ταχύτητας.

Σ	127.02	26.38	3593.05
Ασ	37.84	18.54	3618.98

Μέτρο ταχύτητα ελαστικότητας (m/s) κωδικός Αντοχή(MPa) (GPa) YA1 15.53 15.53 3323.7 YA2 8.97 8.97 3636.36 YA3 21.39 21.39 3534.38 ΥΣ1 63.78 63.78 4569.67 ΥΣ2 92.22 92.22 5090.91 $Y\Sigma 3$ 65.39 65.39 4867.26 $\Xi A4$ 25.15 25.15 3711.48 ΞA5 23.6 23.6 3745.76 $\Xi A6$ 12.62 12.62 3500 4761.9 ΞΣ4 137.66 137.66 ΞΣ5 146.76 146.76 4811.4 $\Xi\Sigma6$ 96.64 96.64 4545.45 47.32 47.32 4357.72 Aσl 40.89 40.89 3897.06 $A\sigma 2$ 39.49 39.49 4180.39 $A\sigma 3$ 23.67 23.67 3889.76 Aσ4

Πίνακας 7.2: Τιμές ταχύτητας και αντοχής για όλα τα δοκίμια.



Σχήμα 7.5:Συσχέτιση ταχύτητας-αντοχής στους μέσους όρους των τιμών κάθε είδους.



Σχήμα 7.6: Συσχέτιση ταχύτητας-αντοχής σε όλες τις τιμές ανεξαρτήτου είδους πετρώματος.



Σχήμα 7.7: Συσχέτιση ταχύτητας-μέτρου ελαστικότητας μέσους όρους των τιμών κάθε είδους.



Σχήμα 7.8: Συσχέτιση ταχύτητας- μέτρου ελαστικότητας σε όλες τις τιμές ανεξαρτήτου είδους πετρώματος.

Ακολουθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την διερεύνυση που έκαναν ο Πρασιανάκης και Γκιόκας (2002) σε δοκίμια σκυροδέματος σε διάφορα στάδια ωρίμανσης (πίνακας 7.3 και σχήμα 7.7).

α/α	Αντοχή σε θλίψη (Kp/cm ²)	Ταχύτητα κατά τη διεύθυνση σκυροδέτησης (Km/sec)
1	362.41	4.557
2	448.96	4.716
3	429.98	4.771
4	315.50	4.361
5	286.47	4.269
6	329.46	4.408

Πίνακας 7.3 : Τιμές αντοχής και ταχύτητας υπερήχου για κάθε κυλινδρικό δοκίμιο (Πρασιανάκης, 2002):





Η σχέση που περιγράφει την καμπύλη του σχήματος 7.7 είναι: Σ $_{\rm f} = e^{(9,810 - \frac{17,713}{c1})}$ με ${\rm R}^2 = 0.97$

Ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση των Tugrul και Zarif (1999) σε δοκίμια γρανιτών διάφορων τύπων (πίνακας 7.4, Σχήμα 7.8).

Αριθμός	Μέση	Μέση
δείγματος	αντοχή	ταχύτητα
	'UCS'	'UPV'
	(MPa)	(km/s)
Gr 1	158.16	5.39
Gr 2	125.28	5.44
Gr 3	129.04	5.74
Gr 4	142.40	6.31
Gr 5	109.17	4.74
Gr 6	121.28	4.93
Gr 7	165.79	6.37
Gr 8	193.33	6.36
Gr 9	173.40	6.21
Gr 10	170.56	5.98
Gr 11	175.49	6.69
Gr 12	159.52	6.43
Gr 13	129.60	5.51
Gr 14	150.08	5.69
Gr 15	175.84	5.86
Gr 16	157.62	5.84
Gr 17	136.32	5.57
Gr 18	177.52	6.22
Gr 19	178.56	6.44

Πίνακας 7.4 Τιμές μέσης αντοχής και μέσης ταχύτητας (Tugrul, Zarif, 1999): .



Σχήμα 7.8: Συσχέτιση ταχύτητας-αντοχής σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 7.4.

Στον πίνακα 7.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη διερεύνυση του Kahraman (2001) σε διάφορα πετρώματα και στο διάγραμμα του σχήματος 7.9 η συσχέτιση των δύο μεγεθών σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα.

FíSoc	Αντοχή	Ταχύτητα
Ειδος πετρώματος	'UCS'	'UPV'
	(MPa)	(km/s)
Δολομίτης	68	6.3
Ψαμμίτης-1	149.2	4.6
Ψαμμίτης-2	45.2	4.5
Εξαλλοιωμένος	20.1	2
ψαμμίτης	20.1	
Ασβρστόλιθος	51.3	5.4
Μάργα	39.5	3.1
Διαβάσης	110.9	5.2
Σερπεντίνης	69.1	2.9
Ασβεστόλιθος	123.8	5.3
Αργιλώδης ασβεστόλιθος	45.1	3.3

Πίνακας 7.5: Τιμές ταχύτητας και αντοχής (Kahraman, 2001):

Αιματίτης	61.8	2.8
Μεταψαμμίτης	25.7	5.2
Σερπεντίνης	54.3	5
Ασβεστόλιθος	15.7	2.2
Ασβεστόλιθος	85.2	5.5
Ψαμμίτης	70.5	3.7
Ασβεστόλιθος	42.1	4.7
Δολομίτης	96.3	5.6
Ασβεστόλιθος	49.9	4.1
Ασβεστόλιθος	76.1	5.6
Λατυποπαγής ασβεστόλιθος	36.1	3.3
Ασβεστόλιθος	68.4	5
Μάργα	64.9	3.4
Μάργα	13.5	1.5
Μάργα	21.4	1.9
Τόφος	10.1	1.2
Μάργα	10.5	1



Σχήμα 7.9: Συσχέτιση ταχύτητας-αντοχής σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 7.5.

Παρακάτω γίνεται μια τελευταία βιβλιογραφική αναφορά για τη συσχέτιση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και ταχύτητας υπέρηχου. Η αναφορά που ακολουθεί είναι από τη διερεύνηση των Vasconcelos, Lourenco και Pablona (2008) σε γρανίτες διάφορων τύπων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δύο μεγεθών παρουσιάζονται στο διάγραμμα του σχήματος 7.10. Επίσης ακολουθεί διάγραμμα (Σχήμα 7.11) με καμπύλες συσχέτισης των δύο μεγεθών, σε δείγματα ασβεστοκονιάματος, σύμφωνα με άλλους ερευνητές, όπως αυτές παρουσιάστηκαν σε εργασία των Popovics et al., 1989.



Σχήμα 7.10: Συσχέτιση ταχύτητας-αντοχής σύμφωνα με τα δεδομένα των Vasconcelos et al.



Σχήμα 7.11: Καμπύλες συσχέτισης αντοχής-ταχύτητας (Popovics et al., 1989).

Παρατηρώντας τα διαγράμματα συσχέτισης της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και της ταχύτητας υπέρηχου που προέκυψαν από τις εργασίες των ερευνητών που προαναφέρθηκαν, προκύπτει ότι οι δύο διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε γρανιτικά πετρώματα έδωσαν γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών (Tugrul, Vasconcelos et al.), ενώ οι υπόλοιπες διερευνήσεις (Πρασιανάκης, Kahraman, κ.α.) που αφορούν διάφορους τύπους πετρωμάτων και σκυροδέματος έδωσαν εκθετική συσχέτιση μεταξύ τους.

Στην παρούσα εργασιά, (διερεύνηση ασβεστολιθικών πετρωμάτων), προκύπτει ότι η εκθετική συσχέτιση δίνει πολύ υψηλότερο συντελεστή από ότι η γραμμική,όσον αφορά την αντοχή:

- Για τις μέσες τιμές: $R^2_{\epsilon}=0.88$ έναντι $R^2_{\gamma}=0.69$.
- Για όλες τις τιμές: R^2_{ϵ} =0.83 έναντι R^2_{γ} =0.72.

Από τα διαγράμματα ταχύτητας-μέτρου ελαστικότητας φαίνεται ότι η εκθετική με την γραμμική συσχέτιση δεν έχουν μεγάλη διαφορά.

Παρατηρείται επίσης ότι το μέγεθος που συσχετίζεται καλύτερα με την ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων, είναι το μέτρο ελαστικότητας αφού δίνει υψηλότερους συντελεστές:

- Για τις μέσες τιμές: $R^2_{\epsilon}=0.90$ έναντι $R^2_{\gamma}=0.88$.
- Για όλες τις τιμές: $R^2_{\ \epsilon} = 0.79$ έναντι $R^2_{\ \gamma} = 0.82$.

Συγκρίνοντας τις τιμές του συντελεστή απόσβεσης με τις τιμές της αντοχής, παρατηρείται ότι:

- Ι. Γενικά η υγρασία επηρεάζει έντονα το συντελεστή απόσβεσης.
- II. Τα δοκίμια σε υγρή κατάσταση παρουσιάζουν ισχυρότερη απόσβεση από αυτά σε ξηρή κατάσταση, ανεξάρτητα από το είδος τους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη πυκνότητα του νερού σε σχέση με τον αέρα αλλά και στην μεγαλύτερη τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των κόκκων του νερού και του υλικού που οδηγεί σε ισχυρότερη απορρόφηση ενέργειας.
- III. Σε υγρή κατάσταση ο αλφάς παρουσιάζει κατά μέσο όρο ισχυρότερη απόσβεση από ότι η σκληρή, ενώ σε ξηρή κατάσταση συμβαίνει το αντίστροφο. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται πιθανώς διότι ο αλφάς (οπτικά) φαίνεται να έχει μεγαλύτερο πορώδες και πιθανών καλύτερη διαπερατότητα και δεδομένου ότι και τα δύο είδη υποβλήθηκαν σε κορεσμό στην ίδια διάρκεια (24 ώρες), ο βαθμός κορεσμού του αλφά προκύπτει υψηλότερος άρα και η απορρόφηση ισχυρότερη. Αντίστοιχα σε ξηρή κατάσταση, η παραπάνω ιδιότητα και η φαινομενικά μεγαλύτερη πυκνότητα της σκληρής φέρει το αντίθετο αποτέλεσμα. Οι τιμές του συντελεστή απόσβεσης ανά δοκίμιο παρουσιάζονται στο διάγραμμα 7.3.



Σχήμα 7.3:Τιμές του συντελεστή απόσβεσης ανά δοκίμιο, στα διάφορα είδη πετρωμάτων.

Παρατηρώντας τις τιμές της ταχύτητας και αυτές του συντελεστή απόσβεσης προκύπτει ότι τα δύο αυτά μεγέθη δεν σχετίζονται άμεσα. Ωστόσο τα ζεύγη τιμών τους ομαδοποιούνται σε διακριτές περιοχές ανάλογα με το είδος του υπό μελέτη πετρώματος, οι οποίες δεν τέμνονται μεταξύ τους (Σχήμα 7.4).



Σχήμα 7.4:Συσχέτιση ταχύτητας-απόσβεσης σε όλες τις τιμές ανά τύπο πετρώματος.

Από τη διαδικασία της φασματικής ανάλυσης προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- είναι σαφές ότι η φασματική υπογραφή είναι διακριτή σε κάθε πέτρωμα και ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται (ξηρή-υγρή). Από τα γραφήματα της ανάλυσης Fourier είναι ευκρινής ο διαχωρισμός των «παραθύρων διέλευσης» των δεσπόζουσων συχνοτήτων κάθε πετρώματος.
- II. Είναι ευδιάκριτο ότι όλα τα πετρώματα που μελετήθηκαν απορροφούν περισσότερη ενέργεια όταν βρίσκονται σε κατάσταση κορεσμού, καθώς και ότι αλλάζουν οι συχνότητες οι οποίες απορροφούνται. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται γενικά ότι τα δοκίμια ξηρού αλφά έχουν «παράθυρο διέλευσης» σε συχνότητες ελαφρώς υψηλότερες από αυτές της ξηρής σκληρής, ενώ τα υγρά δοκίμια και των δύο πετρωμάτων σε πολύ χαμηλότερες συχνότητες. Από θεωρεία προκύπτει ότι η απορρόφηση αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας διάδοσης του παλμού (Πρασιανάκης, 1999). Το φαινόμενο της απόσβεσης των κυμάτων περιγράφεται αναλυτικά στις υποενότητες 2.1.3 και 2.1.4.
- III. Η τεχνητή ασυνέχεια δεν επηρεάζει τη φασματική υπογραφή των πετρώματος ούτε ως προς την ενέργεια που απορροφάται σε κάθε περίπτωση (με ή χωρίς τεχνητή ασυνέχεια), ούτε ως προς τις συχνότητες που προκύπτουν.

7.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κατά την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας και κατά την εξέταση των δύο ακουστικών παραμέτρων (ταχύτητα, συντελεστής απόσβεσης), έγινε αντιληπτό ότι τα δύο αυτά μεγέθη επηρεάζονται από ένα μεγάλο αριθμό παραγώντων. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν το είδος των εξεταζόμενων υλικών, τις μηχανικές τους ιδιότητες, τις συνθήκες κάτω από τις οποίες βρίσκονται τα δείγματα και τις συνθήκες υπό τις οποίες γίνεται η πειραματική μελέτη των δειγμάτων.

Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη μόνο σε ασβεστολιθικά πετρώματα και σε μερικά δοκίμια μαρμάρων και εξετάστηκε περιορισμένος αριθμός δοκιμίων. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κατάσταση κορεσμού μόνο με ποιοτικό διαχωρισμό από την ξηρή κατάσταση, ενώ κατά τις μετρήσεις της ταχύτητας υπέρηχου δεν παρεβλήθη κάποιο υλικό στην διεπιφάνεια των μορφοτροπέων και του δοκιμίου. Επίσης, η συσχέτιση των ακουστικών παραμέτρων έγινε μόνο με την αντοχή των δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη. Από βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψαν πολύ ενδιαφέρουσες συσχετίσεις των ακουστικών παραμέτρων και με άλλα μεγέθη που αφορούν κυρίως τις μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες αλλά και την ορυκτολογία των υλικών που εξετάστηκαν.

Ο μη καταστροφικός έλεγχος των υλικών κερδίζει συνεχώς έδαφος παγκοσμίως και οι έρευνες που γίνονται προς αυτήν την κατεύθυνση είναι συνεχώς περισσότερες.

Θα ήταν ενδιαφέρουσα μια πιο ενδελεχής διερεύνηση προς αυτήν την κατεύθυνση που να περιλαμβάνει ευρύτερο πεδίο έρευνας όσον αφορά τα είδη πετρωμάτων ή και άλλων υλικών. Επίσης, είναι σημαντική η ανάγκη για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό εξεταζόμενων δοκιμίων, ώστε να πραγματοποιείται η εξαγωγή πιο έγκυρων αποτελεσμάτων.

Μελλοντικά προτείνεται η εξέταση όσο το δυνατόν περισσότερων παραμέτρων των υλικών και η προσπάθεια συσχέτισής τους με τις ακουστικές παραμέτρους. Επιγραμματικά, θα ήταν ενδιαφέρον να εξεταστούν το πορώδες, η διαπερατότητα, η πυκνότητα, το μέγεθος κόκκων, η ορυκτολογική σύσταση και ο χημισμός των υλικών καθώς και η αντοχή τους σε κάθε είδους καταπονήσεις (πχ.αντοχή σε διάτμηση).

Μια περισσότερο λεπτομερής εξέταση θα περιλάμβανε την μέτρηση και των εγκάρσιων υπερηχητικών κυμάτων αφού λόγω δυσλειτουργίας των αντίστοιχων μορφοτροέων της συσκευής PUNDIT αυτό δεν ήταν εφικτό στη συγκεκριμένη εργασία. Όσον αφορά την συμπεριφορά των υπερηχητικών κυμάτων στις διεπιφάνειες των υλικών (πχ. μια πιθανή ασυνέχεια), θα μπορούσαν να εξεταστούν περιπτώσεις κατά τις οποίες θα χρησιμοποιηθούν διαφορετικά υλικά επαφής μεταξύ των τεχνητά ενωποιημένων μελών.

Επίσης, είναι εφικτό να εξεταστούν οι περιτώσεις υγρασίας σε διάφορα στάδια (διάφορους βαθμούς κορεσμού), καθώς και η εξέταση των δοκιμίων όταν αυτά υποβληθούν σε τεχνητή φθορά (κύκλους ψύξης-θέρμανσης).

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συντελεστής απόσβεσης των κυμάτων. Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια προσέγγισης του συντελεστή με μαθηματικό τρόπο και με αρκετές θεωρήσεις. Αυτό έγινε γιατί δεν ήταν εφικτή η πρόσβαση σε συσκευή

μέτρησης απόσβεσης η οποία δεν προμηθεύεται πλέον από την εταιρία του Pundit. Σε αυτήν την κατεύθυνση προτείνεται η αγορά συσκευής νεότερης τεχνολογίας που θα περιλαμβάνει και την αντίστοιχη λειτουργία.

Η προσέγγιση του μη καταστροφικού ελέγχου από τη σκοπιά της φασματικής ανάλυσης, ήταν μια αρκετά καινοτόμος μέθοδος και αντίστοιχες προσπάθειες είναι αρκετά περιορισμένες. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει επίσης μεγάλο ενδιαφέρον και μια πιο διεξοδική έρευνα θα έδινε καλύτερα συμπεράσματα.

Ελληνική βιβλιογραφία

- Αγιουτάντης, Ζ.Γ. και Σ. Π. Μερτίκας, (2003). Ένας πρακτικός οδηγός για τη Συγγραφή Τεχνικών Κειμένων. Εκδόσεις Ίων, Αθήνα
- Αγιουτάντης, Ζ.Γ., (2002). Στοιχεία Γεωμηχανικής Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
- Κανλής, Α (2002). Αναλογικές και ψηφιακές επικοινωνίες. Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων.
- Λάμπρου, Θ.Π(2004). Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος μέτρησης απόστασης με χρήση υπερήχων. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα.
- Μερτίκας, Σ.Π (1999). Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή ανάλυση εικόνας. Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
- Πρασιανάκης, Ι.Ν (1997). Μη καταστροφικός έλεγχος των υλικών-Η μέθοδος των υπερήχων. Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Αθήνα.
- Πρασιανάκης, Ι.Ν και Γκιόκας, Π. (2002). Προσδιορισμός Μηχανικών Χαρακτηριστικών Σκυροδέματος Ηλικίας 28 Ημερών και 28 Ετών με Καταστροφικές Μεθόδους και Υπερήχους. Τεχνικά Χρονικά – Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, Ι, τεύχ. 1-2. <u>http://www.srcosmos.gr</u>
- Σκόδρας, Α και Αναστασόπουλος, Β (2004). Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων και Σημάτων. Εκδόσεις ΕΑΠ, Πάτρα.
- 9. Φέγγος, Γ.Ν και Κουβελάς, Μ.Ι (2006). Χαρακτηρισμός βιογενούς ασβεστόλιθου περιοχής Αλφά Ρεθύμνου με επιτόπιες και εργαστηριακές μετρήσεις. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Benavente D., Martinez-Martinez J., Jaurequi P., Rodriguez M.A., Garcia del Cura M.A. (2005). Assessment of the strength of building rocks using signal processing procedures, Construction and Building Materials Vol.20, pp 562-568, retrieved March, 21, 2005, from: <u>http://www.sciencedirect.com</u>.
- 2. Brigham, E.O. (1974). *The Fast Fourier Transform,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- 3. Galan A. (1967). Estimate of concrete strength by ultrasonic pulse velocity and damping constant, ACI Journal, pp 678-684.
- Kahraman S. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol.38, pp 981-994, retrieved July, 13, 2001, from: <u>http://www.sciencedirect.com</u>.
- 5. Nic-310-Digital Oscilloascope-Operating Manual-Nicolet Instruments Corporation.
- 6. **Popovics S., Rose J. L., Popovics J. S. (1989).** *The behavior of ultrasonic pulses in concrete,* Cement and Concrete Research, Vol. 20 pp 259-279.
- 7. Pundit 6-Operating Manual- CNS Farnell.
- Tugrul A., Zarif I.H. (1999). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey, engineering Geology, Vol.51, pp 303-317, retrieved May, 13,1998, from: <u>http://www.sciencedirect.com</u>.
- Vasconcelos G , Lourenco P.B., Alves C.A.S. , Pamplona J. (2008). Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites, ultrasonics Vol.48, pp 453-466, retrieved March, 19, 2008, from: <u>http://www.sciencedirect.com</u>.
- Zhao B., Basir O.A., Mittal G.S. (2004). Estimation of ultrasound attenuation and dispersion using short time Fourier transform, Ultrasonics, Vol.43, pp 375-381, retrieved September, 11, 2004, from: <u>http://www.sciencedirect.com</u>.