



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ
ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

***ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΜΕΣΩ ΜΕΛΕΤΗΣ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ***

Αγγέλης Γ. Δημήτριος
Μηχανολόγος Μηχανικός

Διδακτορική διατριβή
στο
Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΑΤΡΑ 2004

1. Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο κατασκευαστικό υλικό παγκοσμίως [1]. Η επικράτησή του αυτή οφείλεται σε έναν εξαιρετικά ευνοϊκό συνδυασμό που το χαρακτηρίζει: την ευκολία με την οποία μορφώνονται κατασκευές σε ποικιλία σχημάτων και μεγεθών, στο χαμηλό κόστος και την άμεση διαθεσιμότητα των συστατικών του και φυσικά στις μηχανικές του ιδιότητες. Η δομή του είναι εξαιρετικά ανομοιογενής και πολύπλοκη, αφού ακόμα και σήμερα δεν έχει γίνει πλήρως κατανοητή η σχέση δομής-ιδιοτήτων και χρονικά μεταβαλλόμενη. Αμέσως μετά την ανάμειξη των επιμέρους υλικών συμπεριφέρεται ως αιώρημα σωματιδίων (κόκκοι τσιμέντου, άμμου, χαλίκια, φυσαλίδες αέρα) διαφόρων μεγεθών σε νερό, αλλά με την πάροδο του χρόνου και την πρόοδο της αντίδρασης ενυδάτωσης μετατρέπεται σε πορώδες στερεό υλικό. Αυτό οφείλεται στη δημιουργία των στερεών εγκλεισμάτων που σταδιακά σχηματίζουν ένα ενιαίο δίκτυο το οποίο είναι υπεύθυνο για την ικανότητα ανάληψης φορτίων του σκυροδέματος.

Μετά την ανάμειξη του τσιμέντου με το νερό και με την πάροδο του χρόνου, εμφανίζονται οι κρύσταλλοι ένυδρων ενώσεων που γεμίζουν τον χώρο που καλυπτόταν από νερό και κόκκους τσιμέντου [1,2]. Είναι σαφές ότι οι αρχικές αναλογίες των συστατικών παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στην απόδοση του σκυροδέματος. Το νερό, σε αναλογία προς το τσιμέντο κατά μάζα, w/c , περίπου 0.23 είναι στοιχειομετρικά απαραίτητο για την αντίδραση ενυδάτωσης. Οι κρύσταλλοι που δημιουργούνται χάρη σ' αυτήν καθώς αυξάνονται, μετατρέπονται σε ενιαίο δίκτυο, προσδίδοντας δυσκαμψία στο υλικό. Ωστόσο, ο λόγος w/c στην πράξη λαμβάνει τιμές πολύ υψηλότερες, αφενός μεν για να εξασφαλιστεί η πλήρης ενυδάτωση όλης της ποσότητας τσιμέντου, αφετέρου δε να καταστεί το νωπό υλικό μορφοποιήσιμο σε καλούπια αλλά και αντλήσιμο.

Το νερό, καθώς χρησιμοποιείται στην αντίδραση ενυδάτωσης και δεσμεύεται χημικά, αφήνει κενό δίκτυο πορώδους. Όπως γίνεται αντιληπτό, η περίσσεια νερού στο νωπό σκυρόδεμα οδηγεί σε αυξημένο πορώδες με δυσμενείς συνθήκες στην αντοχή, αλλά και μακροπρόθεσμα στην ανθεκτικότητα, αφού διαβρωτικοί παράγοντες διεισδύουν και υποβαθμίζουν τις ιδιότητες του ίδιου του σκυροδέματος αλλά και του μεταλλικού οπλισμού.

Η σχέση του w/c με την αντοχή έχει μελετηθεί από πολύ νωρίς. Γενικά θεωρούνται αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη [1,3]. Σε πολλές πειραματικές μελέτες έχει καταδειχθεί ότι με σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους, σκυρόδεμα με υψηλό w/c εμφανίζει χαμηλότερη θλιπτική αντοχή [4-7], καθώς ανάλογη είναι η επίδραση του w/c σε κονίαμα και τσιμεντόπαστα [8] όπως είναι άλλωστε αναμενόμενο. Άλλες ιδιότητες που έχει δειχθεί ότι επηρεάζονται δυσμενώς είναι η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, η επιφανειακή σκληρότητα και η ενέργεια θραύσης [6-7]. Όπως έχει προαναφερθεί, ο αυξημένος λόγος w/c οδηγεί σε εξίσου αυξημένο πορώδες [6,9].

Βέβαια, καθότι η αντοχή του σκυροδέματος (ιδιότητα που κατεξοχήν ενδιαφέρει) αναπτύσσεται με το χρόνο δεν είναι δυνατή η σαφής πρόβλεψη της τελικής αντοχής του και της εν γένει απόδοσής του σε μια κατασκευή. Η αντοχή αυτή μετράται συνήθως με θλιπτικές δοκιμές σε δοκίμια του υλικού που φυλάχτησαν υπό κατάλληλες συνθήκες, 28 ημέρες μετά την σκυροδέτηση. Η χρησιμότητα της μέτρησης αυτής ωστόσο είναι αμφίβολη διότι γίνεται πολύ καθυστερημένα και αφού το υλικό είναι πια μέρος της κατασκευής. Είναι σαφές λοιπόν ότι η εκτίμηση της ποιότητας του υλικού θα έπρεπε να γίνεται νωρίτερα, ακόμα και πριν το σκυρόδεμα τοποθετηθεί στο έργο. Εφόσον εξασφαλιστεί ότι το υλικό περιέχει τη σωστή αναλογία των επιμέρους συστατικών και τηρηθούν οι απαιτούμενες διαδικασίες δεν υπάρχει σοβαρή πιθανότητα οι τελικές ιδιότητες να μην είναι ικανοποιητικές [10-11]. Στην πραγματικότητα η αποδοχή ή όχι του νωπού υλικού στο εργοτάξιο στηρίζεται στη δοκιμή κάθισης (ASTM C143). Η κάθιση συσχετίζεται με την περιεκτικότητα σε νερό [5], χωρίς η σχέση αυτή να είναι σαφής και αξιόπιστη, αποτελώντας απλά και μόνο μία ένδειξη καταλληλότητας.

1.1 Εφαρμογές υπέρηχων σε σκληρυμένο σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα είναι το μοναδικό κατασκευαστικό υλικό στο οποίο επιχειρείται προσδιορισμός της αντοχής με μετρήσεις υπερήχων. Η προσπάθεια αυτή είναι αποτέλεσμα της ανάγκης για εκτίμηση της καταλληλότητας των κατασκευών, αφού η υποβάθμιση μιας κατασκευής είναι πιθανό να οδηγήσει σε κατάρρευση και κατά συνέπεια σε ανθρώπινες απώλειες αλλά οπωσδήποτε σε υψηλό οικονομικό κόστος. Εφόσον όμως εξαχθούν αξιόπιστα

συμπεράσματα για την κατάστασή της τότε είναι δυνατή η επιλογή των οικονομικά και τεχνικά κατάλληλων ενεργειών σχετικά με την επιδιόρθωσή της [12]. Εκτός αυτού είναι και η ίδια η φύση του υλικού που δεν επιτρέπει σαφείς προβλέψεις για την μετέπειτα απόδοσή του. Συνήθως συνοδεύεται με ενίσχυση χάλυβα που βελτιώνει κυρίως την χαμηλή εφελκυστική και καμπτική αντοχή του σκυροδέματος. Η παραγωγή του χάλυβα όμως γίνεται υπό προσεκτικά ελεγμένες συνθήκες και οι ιδιότητές του είναι εγγυημένες από πιστοποιητικό της βιομηχανίας. Η ποιότητα του τσιμέντου εξασφαλίζεται με τον ίδιο τρόπο και σπάνια αυτό το συστατικό αποτελεί πρόβλημα της κατασκευής. Ωστόσο το σκυρόδεμα, και όχι το τσιμέντο, είναι το δομικό υλικό. Τα δομικά στοιχεία συνήθως κατασκευάζονται στο εργοτάξιο και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διαδικασία της παρασκευής σκυροδέματος και της σκυροδέτησης [1]. Είναι λοιπόν κατανοητό γιατί ο έλεγχος του σκυροδέματος είναι αναγκαίος και έχει υιοθετηθεί από πολλές δεκαετίες.

Η κυματική διάδοση επηρεάζεται άμεσα από τις ελαστικές ιδιότητες, την πυκνότητα και τη γενική κατάσταση του υλικού στο οποίο γίνεται η διάδοση. Ως εκ τούτου, η σχέση της ταχύτητας διάδοσης υπερηχητικού παλμού με την αντοχή σκυροδέματος έχει μελετηθεί εκτενώς [4,13-17]. Εκτός από διαμήκη κύματα και σε περιπτώσεις όπου η πρόσβαση σε δύο απέναντι πλευρές του δοκιμίου (ή κατασκευής) για μέτρηση κατά το πάχος δεν είναι εφικτή, μπορεί να γίνει χρήση επιφανειακών κυμάτων [18].

Επιπλέον, γίνεται εκτίμηση των ελαστικών ιδιοτήτων, δηλαδή του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου poisson [16,19,20], αφού οι ιδιότητες αυτές συνδέονται άμεσα (όπως και η πυκνότητα) με την ταχύτητα διάδοσης στο μέσο.

Ανιχνεύσιμη επίδραση έχει και το ποσοστό υγρασίας αφού η ταχύτητα διάδοσης μετράται ανάλογη αυτής, λόγω πιθανότατα της πλήρωσης των κενών πόρων που διευκολύνει την κυματική διάδοση [21, 22].

Το πορώδες έχει και αυτό σημαντική επίδραση στην τιμή της ταχύτητας υπερήχων [23] μειώνοντας αισθητά την τιμή της έως και 500m/s για διαφορά πορώδους περίπου 7% [9,24].

Κατά τον ίδιο τρόπο επιδρά και η κατανεμημένη βλάβη στην κυματική διάδοση περιορίζοντας την ταχύτητα και το εύρος του σήματος αφού ο παλμός δεν διαδίδεται μέσω του κενού των ρωγμών. Έχει διαπιστωθεί ότι αυξανόμενη βλάβη, επηρεάζει αρνητικά το μέτρο ελαστικότητας και την ταχύτητα παλμού. Ωστόσο η μείωση του εύρους του σήματος είναι πολύ πιο σημαντική από αυτήν της ταχύτητας όπως έχει δειχθεί από μετρήσεις μετά από κύκλους ψύξης-απόψυξης [25, 26] ενώ το ίδιο ισχύει και κατά τη διάρκεια φόρτισης του υλικού, λόγω της ανάπτυξης μικρορωγμών [8,14]. Η πτώση του εύρους του παλμού είναι ανιχνεύσιμη αρκετά πριν από το τελικό στάδιο φόρτισης (σε αντίθεση με την ταχύτητα) [27, 28] και ως εκ τούτου η χρήση του υπόσχεται περισσότερα όσον αφορά στην έγκαιρη διάγνωση βλάβης.

Άλλη εφαρμογή υπερήχων είναι η παρακολούθηση της ενυδάτωσης του σκυροδέματος. Στην ουσία ενδιαφέρον παρουσιάζει ο ρυθμός με τον οποίο το σκυρόδεμα αναπτύσσει την αντοχή του. Για το συγκεκριμένο θέμα γίνεται εκτενέστερη αναφορά στην παράγραφο για τον έλεγχο του νεπού σκυροδέματος, αλλά αφού η ανάπτυξη της αντοχής εξακολουθεί και μετά την πήξη, αναφέρονται ενδεικτικές μελέτες σε στερεό υλικό. Συγκεκριμένα η ταχύτητα παλμού αυξάνεται με την ηλικία [4] με ρυθμό διαρκώς μειούμενο, όπως περίπου και η αντοχή [14-16] ενώ η παρατήρηση έχει γίνει με τη χρήση κυρίως διαμήκων αλλά και διατμητικών κυμάτων [23]. Εκτός από την ταχύτητα και αλλά χαρακτηριστικά του κύματος, όπως ο αριθμός υπερβάσεων κατωφλίου [29] το εύρος και η ενέργεια του παλμού που έχουν μελετηθεί στο πλαίσιο της διατριβής αυτής δείχνουν αντίστοιχη συμπεριφορά.

Σε όλες τις παραπάνω εργασίες, υφίσταται συσχέτιση των παραμέτρων τασικού παλμού με τις διάφορες ιδιότητες του σκυροδέματος. Αυτό οφείλεται στο ότι παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή έχουν παρόμοια επίδραση και στην κυματική διάδοση. Αυτή η σχέση όμως δεν είναι απολύτως συγκεκριμένη καθιστώντας τα αποτελέσματα ποιοτικά και όχι ποσοτικά. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι με βάση τον κανονισμό μετρήσεων υπερήχων σε σκυρόδεμα κατά ASTM (C 597) η εκτίμηση της αντοχής γίνεται με ακρίβεια 20% σε εργαστηριακές συνθήκες. Η ακρίβεια σε συνθήκες εργοταξίου είναι ακόμα χαμηλότερη [12]. Έτσι λοιπόν και παρά την ύπαρξη πολυάριθμων κανονισμών για τον έλεγχο σκυροδέματος με υπερήχους (π.χ. ASTM C597, DIN/ISO 8047, BS 1881, RILEM 1 1972) πρέπει να

διατηρείται σοβαρή επιφύλαξη για τον υπολογισμό της αντοχής. Είναι λοιπόν επιτακτική η ανάγκη να ενισχυθεί ο έλεγχος του σκυροδέματος, με χαρακτηριστικά εκτός της «ταχύτητας παλμού», η οποία υπολογίζεται με βάση την απόσταση μεταξύ των αισθητήρων και του ηλεκτρονικά μετρούμενου χρόνου διάδοσης, αλλά και με τη χρήση προηγμένων μεθόδων ανάλυσης σημάτων [30]. Αυτή η τάση έχει αρχίσει να υλοποιείται αφού πλέον η επίδραση της συχνότητας στην «φασική» ταχύτητα (διασπορά) μελετάται με την προοπτική της βελτίωσης της παρεχόμενης πληροφορίας σχετικά με τη σύσταση στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, αλλά και σχετικά με την υποβάθμιση λόγω κατανεμημένης βλάβης [31,32].

Στο πλαίσιο της διατριβής αυτής, μεταξύ των άλλων, παρουσιάζονται αποτελέσματα μιας πειραματικής σειράς μετρήσεων υπερήχων κατά το πάχος σε κυβικά δοκίμια 150mm, σκληρυμένου σκυροδέματος και κονιάματος, με ηλικίες μεταξύ 1 και 90 ημερών. Χαρακτηριστικά του παλμού όπως η ταχύτητα, το εύρος, οι υπερβάσεις κατωφλίου κ.α., μετρήθηκαν με τη βοήθεια πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων συντονισμού σε σχετικά χαμηλές συχνότητες (κάτω από 200kHz) σε διάφορες ηλικίες από 1 έως 90 μέρες και συσχετίζονται με την αντοχή που μετρήθηκε με καταστροφικές δοκιμές θλίψης στο Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου (EKET) σε δοκίμια από τα ίδια μείγματα με αυτά τα οποία εξετάστηκαν με μη καταστροφικό τρόπο. Ακόμα, η πορεία της ενυδάτωσης με το χρόνο αποτυπώνεται στην αύξηση των τιμών των παραμέτρων με τρόπο όμοιο με αυτό της αντοχής. Η σύσταση (w/c και a/c) επηρεάζει το διαδιδόμενο σήμα, με σαφέστερη και πιο επαναλήψιμη επίδραση στο κονίαμα απ' ό,τι στο σκυρόδεμα.. Ως προς το κύριο πρόβλημα χαρακτηρισμού της σύστασης, προτείνεται μεθοδολογία για την ταξινόμηση των διαφορετικών δοκιμίων ανάλογα με το w/c, βασισμένη σε χαρακτηριστικά στο πεδίο του χρόνου, αλλά και μετά το μετασχηματισμό του λαμβανόμενου σήματος στο πεδίο συχνοτήτων. Η μεθοδολογία αυτή τουλάχιστον για τον αριθμό δοκιμίων της παρούσας εργασίας οδήγησε σε σχεδόν απόλυτα επιτυχή αποτελέσματα αναγνώρισης σύστασης από τις πρώτες μέρες του σκυροδέματος.

Παρά την επιτυχή αναγνώριση της σύστασης, η παραπάνω μελέτη περιορίστηκε στην ανάλυση της εξόδου, χωρίς παράλληλη κατανόηση του ακριβούς μηχανισμού διάδοσης και του ρόλου των διαφόρων παραμέτρων της σύστασης σε αυτή. Πραγματοποιήθηκε λοιπόν, δεύτερη φάση μετρήσεων με άλλο εξοπλισμό, δηλαδή αισθητήρες υψηλότερης κεντρικής

συχνότητας και νέα γεννήτρια παλμών με δυνατότητα σάρωσης σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Η μελέτη αυτή σκοπό είχε τη διερεύνηση της πιθανότητας βελτίωσης των δυνατοτήτων Μη Καταστροφικού Ελέγχου με παραμέτρους διασποράς αλλά και την κατανόηση της κυματικής διάδοσης στο σύνθετο αυτό υλικό. Σε περιπτώσεις ελέγχου για την αποτίμηση βλάβης του ίδιου του υλικού αλλά και του υπάρχοντος οπλισμού, η γνώση της συμπεριφοράς σε υγιές σκυρόδεμα είναι πρωταρχικής σημασίας. Μετρήσεις έγιναν με σήματα διαφορετικών συχνοτήτων, από 20kHz έως 1MHz και η μελέτη της μεταβολής της ταχύτητας και της εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας, κατέδειξαν ενδιαφέρουσες επιδράσεις της ποσότητας και του μεγέθους των αδρανών αλλά και της ελαστικότητας της μήτρας, που ορίζεται κύρια από το λόγο w/c . Επίσης και καθώς το σκυρόδεμα λόγω φύσης μπορεί να χαρακτηριστεί υλικό με μικροδομή, χρησιμοποιήθηκε γενικευμένη θεωρία ελαστικότητας για να ερμηνευθεί η παρατηρούμενη διασπορά. Το σκυρόδεμα παρουσιάζει καμπύλες διασποράς που ερμηνεύονται πλήρως εφόσον ληφθεί υπ' όψη η μικροδομή στο πλαίσιο της θεωρίας Midlin [33], ενώ διερευνάται η συνεισφορά της σκέδασης αλλά εξετάζεται η διάδοση και από τη σκοπιά της ιξωδοελαστικότητας.

1.2 Έλεγχος νωπού σκυροδέματος

Λαμβάνοντας υπ' όψη τις επιθυμητές ιδιότητες του τελικού υλικού αλλά και τις συνθήκες σκυροδέτησης, ο προσεκτικός σχεδιασμός του μείγματος είναι αναγκαίος, αφού παράμετροι που επιδρούν θετικά σε κάποιες ιδιότητες πιθανώς έχουν αρνητική επίπτωση σε άλλες. Κλασικό παράδειγμα η περιεκτικότητα νερού (λόγος νερού/τσιμέντου, w/c) που ενώ σε υψηλές τιμές δρα ευεργετικά στην εργασιμότητα, μετά το τέλος της ενυδάτωσης οδηγεί, όπως προαναφέρθηκε σε χαμηλή αντοχή και ανθεκτικότητα λόγω του αυξημένου πορώδους.

Επιπλέον οι κατασκευαστικές απαιτήσεις στις μέρες μας αφορούν σε σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, ενισχυμένο με ίνες, ανθεκτικό σε ακραίες συνθήκες περιβάλλοντος αλλά ταυτόχρονα ικανοποιητικά εργάσιμο ή και αυτοσυμπυκνούμενο. Παρά την πρόοδο όμως που έχει επιτευχθεί στην τεχνολογία σκυροδέματος οι χρησιμοποιούμενες ακόμα και σήμερα τεχνικές ελέγχου του νωπού υλικού έχουν αναπτυχθεί πολλές δεκαετίες πριν [34], τη στιγμή

που η γνώση της συμπεριφοράς του νωπού σκυροδέματος θεωρείται ουσιαστική για την πρόβλεψη της απόδοσης του σε μεγαλύτερες ηλικίες [35, 36].

Συνήθως ο έλεγχος της καταλληλότητας γίνεται με τη δοκιμή κάθισης (ASTM C143-90) ενώ με τη συσκευή Vicat (EN 196-3:1987) εκτιμάται ο τελικός χρόνος πήξης κονιαμάτων [1]. Με αυτούς τους έλεγχους όμως εξάγεται μία μόνο παράμετρος, η σχέση της οποίας με τις φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος δεν είναι απόλυτα σαφής. Επιπλέον παρέχουν μόνο μία στιγμιαία εικόνα που δεν θεωρείται αντιπροσωπευτική της όλης διαδικασίας ενυδάτωσης ενώ παρουσιάζουν χαμηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα [37,38].

Μέχρι σήμερα λοιπόν, η πληροφορία για την αναμενόμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής είναι σε μεγάλο βαθμό εμπειρική και η εφαρμογή μη καταστροφικών μεθόδων φαίνεται να είναι ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί έλεγχος ποιότητας στην πράξη [39]. Γίνεται κατανοητό ότι καινούριες τεχνικές ελέγχου του νωπού σκυροδέματος είναι απαραίτητες για να αντικαταστήσουν ή να ενισχύσουν τις ήδη υπάρχουσες αφού πλέον και οι εφαρμογές απαιτούν καλύτερο έλεγχο της διαδικασίας, όπως αναπτύσσεται παρακάτω.

Συγκεκριμένα, εξαιρετικού ενδιαφέροντος είναι ο υπολογισμός του χρόνου τελικής πήξης του σκυροδέματος για διάφορες εφαρμογές. Όπως για την απόσυρση των καλουπιών στον κατάλληλο χρόνο [40] που ειδικά για την περίπτωση βιομηχανικής παραγωγής προκατασκευασμένων στοιχείων θα καθιστούσε την όλη παραγωγική διαδικασία πιο αποδοτική [41]. Επίσης καθότι η φθορά του σκυροδέματος σε νεαρή ηλικία συνδέεται με ανάπτυξη ανεπαρκούς αντοχής πριν την επιβολή φορτίων, η γνώση του χρόνου που το σκυρόδεμα αποκτά ικανή αντοχή επιτρέπει την ασφαλή φόρτιση της κατασκευής [42,43].

Χρήσιμη είναι η γνώση του χρόνου πήξης και στην κατασκευή φραγμάτων. Σε αυτή την περίπτωση η διεπιφάνεια μεταξύ των αλληπάλληλων στρωμάτων σκυροδέματος αποκτά μέγιστη διατμητική αντοχή όταν το νέο στρώμα τοποθετείται πάνω στο προηγούμενο πριν στο τελευταίο έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία πήξης. Άρα η γνώση του χρόνου πήξης διασφαλίζει την ποιότητα της κατασκευής [44].

Επιπλέον ο έλεγχος του χρόνου σκλήρυνσης βρίσκει εφαρμογή στις εγκαταστάσεις άντλησης πετρελαίου. Τσιμέντο τοποθετείται στα τοιχώματα του φρεατίου μετά τη διάνοιξη για μηχανική στήριξη αλλά και στεγανότητα ώστε να αποφευχθεί διείσδυση υγρών από τα γύρω πετρώματα. Έτσι το τσιμέντο πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή εργασιμότητα αρχικά ώστε να είναι αντλήσιμο και να καταλάβει τον επιθυμητό χώρο, αλλά κατόπιν να στερεοποιηθεί γρήγορα ώστε να προχωρήσουν οι εργασίες διάτρησης. Μελέτες σχετικά με την παρακολούθηση υλικών για τέτοιου είδους εφαρμογές έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία [45-47].

Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η συνεχής παρακολούθηση νωπού σκυροδέματος και για την εκτίμηση της αποδοτικότητας των προσθέτων. Η προσθήκη των ουσιών αυτών στο σκυρόδεμα έχει συνήθως σκοπό είτε την επιτάχυνση της πήξης (επιταχυντές, για σκυροδέτηση σε χαμηλή θερμοκρασία), είτε την επιβράδυνση της (επιβραδυντές, για υψηλές θερμοκρασίες) είτε την αύξηση της εργασιμότητας (ρευστοποιητές). Για την εξακρίβωση της αποτελεσματικότητας της χρήσης αυτών όπως και τσιμέντων ειδικής σύνθεσης για ταχεία ανάπτυξη αντοχών και ανθεκτικότητα σε ακραίες συνθήκες περιβάλλοντος (τσιμέντα αργλικού ασβεστίου, calcium aluminate cements), έχουν καταγραφεί μελέτες παρακολούθησης της διαδικασίας πήξης [35,36,43,48-50].

1.2.1 Ελέγχος νωπού σκυροδέματος με χρήση τασικών κυμάτων

Μέθοδοι ελέγχου νωπού σκυροδέματος με κυματική διάδοση έχουν αναφερθεί είτε μέσω ανάκλασης είτε με απ' ευθείας διάδοση. Οι μέθοδοι ανάκλασης βασίζονται στην μεταβαλλόμενη με το χρόνο ακουστική εμπέδηση (γινόμενο πυκνότητας και φασικής ταχύτητας) του σκυροδέματος. Στο πείραμα χρησιμοποιείται ένα υλικό αναφοράς ανάμεσα στον αισθητήρα και το νωπό σκυρόδεμα. Αρχικά λόγω χαμηλής διείσδυσης κύματος στο σκυρόδεμα, ο συντελεστής ανάκλασης προσεγγίζει τη μονάδα, αφού το μεγαλύτερο μέρος του σήματος ανακλάται στη διεπιφάνεια υλικού αναφοράς - σκυροδέματος. Με την πάροδο του χρόνου όμως η διαδιδόμενη στο σκυρόδεμα ενέργεια αυξάνεται και η τιμή του συντελεστή ανάκλασης μειώνεται. Ο συντελεστής ανάκλασης προσδιορίζεται είτε από το εύρος του παλμού στο πεδίο του χρόνου [36,40,48], είτε αφού πρώτα μετασχηματιστεί το

σήμα στο πεδίο συχνοτήτων [41-43]. Από την καμπύλη της μεταβολής του συντελεστή ανάκλασης με το χρόνο, μπορεί να υπολογισθεί ο χρόνος πήξης, όπως και να εκτιμηθεί η επίδραση των διαφόρων προσθέτων και τύπων τσιμέντου. Προσοχή δίνεται στην επιλογή του ενδιάμεσου υλικού, ώστε οι μεταβολές του συντελεστή ανάκλασης να είναι όσο το δυνατό πιο ευδιάκριτες [40]. Τα κύματα που χρησιμοποιούνται είναι διαμήκη [36] (ευρέως φάσματος με κεντρική συχνότητα 1 MHz), διαμήκη και διατμητικά [40], [41] (4-8 MHz για διαμήκη και 2-4 MHz για διατμητικά), ή μόνο διατμητικά [48] (17MHz).

Το πλεονέκτημα μετρήσεων ανάκλασης είναι η ανάγκη πρόσβασης μόνο σε μία πλευρά του υπό εξέταση αντικειμένου, προκύπτει όμως ένα πρόβλημα αντιπροσωπευτικότητας αφού η πληροφορία προέρχεται από τη διεπιφάνεια καλουπιού-σκυροδέματος και έτσι η εξέταση του υλικού είναι μόνο τοπική. Αυτό επιβεβαιώνεται αφού υπολογισμός της ταχύτητας τασικών κυμάτων μέσω εμπέδησης έρχεται σε συμφωνία με απ' ευθείας μετρήσεις ταχύτητας μόνο σε τσιμεντόπαστα, ενώ στην περίπτωση του σκυροδέματος όπου αδρανή βρίσκονται μακριά από την επιφάνεια παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις [41].

Εκτός από τις μεθόδους ανάκλασης, έχουν αναπτυχθεί και μέθοδοι που βασίζονται στην απ' ευθείας διάδοση του κύματος μέσα στο υλικό. Τα πιο συνήθη μετρούμενα χαρακτηριστικά του κύματος είναι η ταχύτητα διάδοσης [44-47,49-53], οι μεταβολές στο περιεχόμενο συχνοτήτων [44,46,47,49,51,53] το οποίο μετατοπίζεται σε υψηλότερες ζώνες όσο προχωρά η αντίδραση ενυδάτωσης, το εύρος ή ο συντελεστής εξασθένισης του παλμού [35,51,52]. Στις παραπάνω εργασίες γίνεται χρήση διαμήκων κυμάτων [51,45,44,47,52] ή ταυτόχρονα διαμήκων και εγκάρσιων [46,53,54]. Τα μεν πρώτα διαδίδονται από την πρόιμη φάση της ενυδάτωσης έστω και με μειωμένη ταχύτητα, όσο το υλικό είναι σε υγρή κατάσταση, αλλά η διαφοροποίηση στα χαρακτηριστικά των εγκάρσιων είναι σαφώς μεγαλύτερη από τη στιγμή που γίνεται δυνατή η ανίχνευσή τους μέχρι το πέρας της ενυδάτωσης, γεγονός που εξηγείται αφού αρχικά και πριν το δίκτυο των στερεών εγκλεισμάτων συνδεθεί, τα εγκάρσια κύματα δεν διαδίδονται καθόλου. Έτσι για τον χαρακτηρισμό της πήξης, τα εγκάρσια προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια.

Οι συχνότητες που έχουν εφαρμοστεί είναι από 54 kHz [55], 15-100 kHz [44], 20-300 kHz [51], 200 kHz [45], 500 kHz [47], [53] έως και 1MHz [46] ενώ για έλεγχο νωπού, αφρώδους σκυροδέματος έχουν χρησιμοποιηθεί χαμηλές συχνότητες (<1kHz) [52] αλλά και διέγερση από κρούσεις με μεταλλικά σφαιρίδια [50]

Ακόμα, έχουν χρησιμοποιηθεί και μετρήσεις ακουστικής εκπομπής η οποία πιθανολογείται ότι προέρχεται από το σχηματισμό των ενυδριτών και τη δημιουργία του πορώδους καθώς καταναλώνεται το ελεύθερο νερό [56].

Σε όλες τις παραπάνω εργασίες παρότι έχει διερευνηθεί η επίδραση διαφόρων παραγόντων στην ενυδάτωση του σκυροδέματος, τα αποτελέσματα είναι περισσότερο ποιοτικά. Ο αριθμός δοκιμών που εξετάζεται για κάθε υλικό είτε δεν αναφέρεται, είτε όπου έχει γίνει μελέτη επαναληψιμότητας δεν ξεπερνά τα 3 με εξαίρεση την εργασία [43] όπου τα δοκίμια ανά κατηγορία χημικού προσθέτου είναι 7. Κάτι αντίστοιχο δηλαδή με τον έλεγχο του σκληρυμένου σκυροδέματος όπου δεν είναι δυνατή η εξαγωγή απολύτως αξιόπιστης πληροφορίας.

Όπως προαναφέρθηκε η περιεκτικότητα σε νερό, ή ο λόγος νερού/τσιμέντου κατά βάρος w/c, είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας σύστασης για την καταλληλότητα του σκυροδέματος. Παρότι όμως για οποιαδήποτε κατασκευή, μπορεί να σχεδιαστεί σκυρόδεμα με κατάλληλο w/c, δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι το ίδιο υλικό θα παραχθεί και θα τοποθετηθεί στο έργο. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε λάθος ζύγιση των υλικών, απορρόφηση ποσότητας νερού στο πορώδες αδρανών ή και σκόπιμης πρόσθεσης νερού για να καταστεί το υλικό πιο εργάσιμο [1,57], αφού είναι δυστυχώς συχνό το φαινόμενο χειριστές που αγνοούν τη χημεία του τσιμέντου να αυξάνουν το λόγο w/c για να βελτιωθεί η εργασιμότητα [58]. Η αναγκαιότητα διασφάλισης της ποιότητας του νωπού σκυροδέματος, μέσω ελέγχου της σύστασης και συγκεκριμένα του w/c, έχει εκφραστεί σε αριθμό εργασιών [1,11,35,59-64], ενώ μια ευρεία ποικιλία προσεγγίσεων έχουν ακολουθηθεί.

1.2.2 Μέθοδοι προσδιορισμού w/c νωπού σκυροδέματος

Συγκεκριμένα μετρήσεις υπερήχων έχουν βρει εμπόδιο από την μεγάλη εξασθένιση του νωπού σκυροδέματος, ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί συχνότητες από 54kHz έως 1MHz σε

συνδυασμό με ταχεία πήξη του υλικού μέσω θέρμανσης, στερεοποίηση μέσω ψύξης ενώ εφαρμόστηκε και συσκευή λιθοτριψίας για μεγαλύτερη ισχύ σήματος [11] χωρίς αποτέλεσμα.

Χρησιμοποιώντας μικροκύματα συχνότητας 3GHz, μετρήσεις συντελεστή ανάκλασης έδειξαν ότι είναι δυνατός ο προσδιορισμός του w/c σε νωπή τσιμεντόπαστα με ακρίβεια ± 0.02 . Ωστόσο η παρουσία αδρανών φαίνεται ότι αυξάνει την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων. Παρότι η συγκεκριμένη μέθοδος μοιάζει ενθαρρυντική, ο αριθμός των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για να ελεγχθούν τα αποτελέσματα είναι εξαιρετικά μικρός ούτως ώστε να μην είναι εφικτή η εξαγωγή σαφών συμπερασμάτων [60].

Η επίδραση των μικροκυμάτων στα μόρια νερού, έχει χρησιμοποιηθεί και σε άλλη μέθοδο για τον προσδιορισμό του νερού του νωπού σκυροδέματος. Σύμφωνα με αυτή μετράται η μάζα του νερού νωπού σκυροδέματος αφαιρώντας με θέρμανση το ελεύθερο νερό και συγκρίνοντας το βάρος πριν και μετά [61,63]. Κατόπιν, με βάση την ποσότητα τσιμέντου όπως αυτή φαίνεται στην αναφορά του κατασκευαστή, υπολογίζεται ο λόγος w/c. Ωστόσο, η υγρασία που περιέχεται στο πορώδες των αδρανών περιπλέκει τη διαδικασία, με αποτέλεσμα το μέσο λάθος να ανέρχεται περίπου σε 0.037 σε w/c σε πραγματικές συνθήκες.

Άλλη μέθοδος χρησιμοποιεί εκπομπή νετρονίων και φωτονίων για τον προσδιορισμό της ποσότητας νερού και τσιμέντου χωριστά. Συγκεκριμένα, τα άτομα υδρογόνου είναι πολύ αποτελεσματικοί σκεδαστές νετρονίων. Ως εκ τούτου, επειδή κύρια πηγή υδρογόνου στο σκυρόδεμα είναι το νερό, η αντίχενση των χαμηλής ενέργειας νετρονίων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ποσότητας νερού. Αντίστοιχα, για την μέτρηση του τσιμέντου, χρησιμοποιούνται φωτόνια από ραδιενεργή πηγή. Ο αριθμός που απορροφάται είναι ανάλογος της τέταρτης δύναμης του ατομικού αριθμού των στοιχείων. Αφού το στοιχείο με το μεγαλύτερο ατομικό αριθμό και με μεγάλη περιεκτικότητα στο τσιμέντο είναι το ασβέστιο, ο μετρητής είναι ευαίσθητος στην ποσότητα του τσιμέντου του σκυροδέματος. Ωστόσο, διάφορες χημικές προσμίξεις μπορεί να περιέχουν υδρογόνο αλλά και διάφορα στοιχεία παρόντα στα αδρανή ή στο τσιμέντο, όπως βόριο και κάδμιο απορροφούν νετρόνια με συνέπεια την αύξηση της αβεβαιότητας στον προσδιορισμό νερού.

Η αβεβαιότητα αυξάνει, από την πλευρά της μέτρησης τσιμέντου, σε περιπτώσεις που ασβέστιο περιέχεται και σε αδρανή συμβάλλοντας στην απορρόφηση φωτονίων. [59]. Η μέθοδος αυτή αφού εφαρμόστηκε σε πολυάριθμά αναμείγματα, σε διαφορετικές περιοχές και περιπτώσεις σκυροδέτησης δεν προτείνεται για περαιτέρω διερεύνηση, λόγω χαμηλής ακρίβειας, αλλά και υψηλού βαθμού εκπαίδευσης και διαδικασίας πιστοποίησης που απαιτούνται για το χειριστή [63].

Άλλη έρευνα, εκμεταλλεύεται την αρχή της άνωσης. Η μέθοδος βασίζεται στον ακριβή προσδιορισμό της ποσότητας νερού που απαιτείται ώστε μαζί με συγκεκριμένη μάζα σκυροδέματος, να συμπληρωθεί συγκεκριμένος όγκος. Γνωρίζοντας λοιπόν την ποσότητα αυτή, την αρχική ποσότητα σκυροδέματος, το λόγο αδρανών/τσιμέντου, a/c καθώς και τις πυκνότητες των επιμέρους υλικών, μπορεί να προσδιοριστεί ο λόγος w/c. Είναι απαραίτητη υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις και προσεκτική τήρηση της διαδικασίας ώστε να μη αποβληθεί μέρος του υλικού κατά την ανάδευση για την απομάκρυνση φυσαλίδων [62]. Τα αποτελέσματα στην συγκεκριμένη εργασία δείχνουν ένα λάθος περίπου 0.031 σε w/c, που δεν είναι αποδεκτό. Σύμφωνα με την διεθνή πρακτική αποδεκτή θεωρείται μέγιστη απόκλιση 0.02 από τον πραγματικό λόγο w/c [63].

Επίσης, ερευνήθηκε μέθοδος φασματοσκοπίας κοντά στο υπέρυθρο (NIR spectroscopy) όπου συσχέτιστηκε το σχήμα του φάσματος με το λόγο w/c. Η συσχέτιση αποδεικνύεται θετική αλλά όχι ιδιαίτερα ισχυρή ενώ μετρήσεις έγιναν σε περιορισμένο εύρος τιμών w/c [64].

Έχουν προταθεί και χημικές μέθοδοι *τιτλοδότησης*, βασιζόμενες στη συγκέντρωση ιόντων ασβεστίου και ελεύθερου νερού με απαιτήσεις σε εξοπλισμό και εξειδίκευση υψηλότερες αυτών που συναντώνται στην πράξη [1,65].

Εκτός των άλλων δυσχερειών της κάθε μεθόδου, ο αριθμός των δειγμάτων σε ορισμένες δεν μπορεί να χαρακτηριστεί επαρκής για αξιόπιστο προσδιορισμό του λόγου w/c.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι δεν υπάρχει γενικά αποδεκτή και εφαρμόσιμη μέθοδος για την πρόβλεψη της ποιότητας του σκληρυμένου σκυροδέματος, όσο αυτό βρίσκεται σε νωπή μορφή.

1.2.3 Επίδραση w/c νωπού σκυροδέματος στην κυματική διάδοση

Ως προς την επίδραση της σύστασης στην κυματική διάδοση, έχει δειχθεί ότι υλικό με χαμηλότερο λόγο w/c παρουσιάζει υψηλότερη ταχύτητα παλμού και ενέργεια [34-37,48,53,66-68], χωρίς ωστόσο επαρκή πληροφορία σχετικά με την πιθανότητα αξιόπιστου προσδιορισμού, αφού γενικά οι παραπάνω έρευνες εστιάζονται στην παρακολούθηση της ενυδάτωσης υπό διάφορες συνθήκες. Επιπλέον, οι μετρήσεις δεν πραγματοποιούνται νωρίτερα από 15min από την ανάμειξη με την εξαίρεση της [49], ενώ η διαφορά σε w/c φαίνεται να έχει πιο σαφή επίδραση μετά τις πρώτες ώρες.

Σε οποιαδήποτε περίπτωση, η ανομοιογενής φύση του νωπού σκυροδέματος, το οποίο αποτελείται από κόκκους τσιμέντου, άμμου, μεγαλύτερα αδρανή (χαλίκια), ακόμα και φυσαλίδες αέρα καθιστούν το έργο του χαρακτηρισμού του υλικού πολύ δύσκολο. Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης του υπερήχου με τις υπάρχουσες φάσεις στο αιώρημα είναι το πρώτο απαραίτητο βήμα για να ερμηνευθούν σωστά τα πειραματικά αποτελέσματα.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διατριβής διεξήχθησαν πειράματα σε νωπή τσιμεντόπαστα και κονίαμα με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων σύστασης, όπως ο λόγος w/c, η περιεκτικότητα αδρανών αλλά και φυσαλίδων εγκλωβισμένου αέρα στο διαδιδόμενο κύμα με αντικειμενικό σκοπό τον χαρακτηρισμό του υλικού με βάση μετρούμενα μεγέθη του κύματος. Η μελέτη ξεκίνησε με χρήση χαμηλών συχνοτήτων και κρουστικής εισόδου, αντίστοιχα της πρώτης φάσης ελέγχου σκληρυμένου σκυροδέματος. Με τη χρήση όμοιας μεθοδολογίας για την ταξινόμηση ως προς το λόγο w/c, η επιτυχία στην ταξινόμηση των υπάρχόντων δοκιμίων ξεπερνά το 99%.

Στη συνέχεια, έγιναν μετρήσεις σε κονίαμα με χρήση μεταβλητής συχνότητας για την ανίχνευση της διασποράς και της εξασθένισης μέχρι τη συχνότητα του 1MHz. Με τη μελέτη αυτή εξετάστηκε η επίδραση των διαφορετικών φάσεων στην κυματική διάδοση με την

περιεκτικότητα και το μέγεθος της άμμου, να ορίζουν την εξασθένιση σε υψηλές συχνότητες, ενώ η αναλογία νερού/τσιμέντου αλλά και η παρουσία φυσαλίδων φαίνεται να επιδρούν σε χαμηλότερες συχνότητες. Παράλληλα γίνεται προσπάθεια χαρακτηρισμού της σύστασης χωρίς τη χρήση ταξινόμησης σε ήδη υπάρχουσες κατηγορίες, αλλά προσδιορισμού της ακριβούς περιεκτικότητας σε άμμο και νερό.

Τα πειραματικά αποτελέσματα ερμηνεύονται απόλυτα με εφαρμογή της θεωρίας σκέδασης στους κόκκους άμμου και στις φυσαλίδες αέρα και στο σύνολο της η διερεύνηση αυτή χαρακτηρίζεται από πρωτοτυπία αφού η επίδραση των παραμέτρων σύστασης στην διασπορά και την εξασθένιση κύματος σε νωπό σκυρόδεμα δεν έχει μελετηθεί μέχρι τώρα.

Οι πειραματικές λεπτομέρειες μαζί με τα αποτελέσματα και συμπεράσματα θα παρουσιάζονται μαζί για κάθε μία από τις βασικές ενότητες της διατριβής που καθορίζονται από το υλικό (σκληρυμένο ή νωπό) και από τη διέγερση (κρουστικός παλμός ή μεταβλητή συχνότητα).

Βιβλιογραφία

- [1] A. M. Neville, Properties of Concrete. London: Longman, 1995
- [2] Θ. Τριανταφύλλου, Δομικά Υλικά, Πανεπιστήμιο Πατρών, 1997
- [3] D. A. Abrams, Design of concrete mixtures, Bulletin No.1, Structural Materials Laboratory, Lewis Institute, Chicago (1918) 1-20
- [4] M. F. Kaplan, The effects of age and water/cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength, Mag Con Res 11 (32) (1959) 85-92
- [5] H. J. Al-Gahtani, A. G. F. Abbasi, O. S. B. Al-Amoudi, Concrete mixture design for hot weather: experimental and statistical analysis, Magazine of Concrete Research, 50 (2) 1998 95-105
- [6] M. Rößler, I. Odler, Investigations on the relationships between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes, I. effect of porosity, Cement and Concrete Research 15 (1985) 320-330
- [7] P. J. M. Monteiro, P. R. L. Helene, S. H. Kang, Designing concrete mixtures for strength, elastic modulus and fracture energy, Materials and Structures, 26 (1993) 443-452
- [8] H. Uchikawa, S. Hanehara, H. Hirao, Influence of microstructural change under stress on the strength-related properties of hardened cement mortar and paste, Advanced Cement Based Materials, 6 (1997) 87-98
- [9] M. G. Hernández, M. A. G. Izquierdo, A. Ibañez, J. J. Anaya, L. G. Ullate, Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE, Ultrasonics 38 (2000) 531-533
- [10] B. Mather, How Soon is Soon Enough?, ACI J 1976; 73 (3): 147-150
- [11] S. Popovics, J. S. Popovics, Ultrasonic Testing to Determine Water-Cement Ratio for Freshly Mixed Concrete, Cement Concrete Aggr 1998; 20 (2): 262-268
- [12] S. Popovics, Analysis of the Concrete Strength versus Ultrasonic Pulse Velocity Relationship, Materials Evaluation 59 (2) (2001) 123
- [13] M. F. Kaplan, The relation between ultrasonic pulse velocity and the compressive strength of concretes having the same workability but different mix proportions, Magazine of Concrete Research, 12 (34) 1960 3-8
- [14] R. Jones, Testing of concrete by ultrasonic-pulse technique, Proceedings of the thirty-second annual meeting, Highway Research Board, Washington, 13-16 Jan 1953
- [15] D. A. Anderson, R. K. Seals, Pulse Velocity as a Predictor of 28- and 90- Day Strength, ACI

J 78-9 (1981) 116-122

- [16] V. M. Malhotra, N. J. Carino (Eds.), CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, Florida, 1991
- [17] H. Y. Qasrawi, Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted, Cement and Concrete Research, 30 (2000) 739-746
- [18] T. Gudra, B. Stawinski, Non-destructive characterization of concrete using surface waves, NDT&E INT 33 (2000) 1-6
- [19] Reynolds, W. N., Wilkinson, S. J., Spooner, D. C., Ultrasonic wave velocity in concrete. Magazine of Concrete Research 30 (104), (1978) 139-144.
- [20] Wu, T. T., Liu P. L., Advancement on the nondestructive evaluation of concrete using transient elastic waves, Ultrasonics 36 (1998) 197-204.
- [21] E. Ohdaira, N. Masuzawa, Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete-the possibility of NDE, Ultrasonics 38 (2000) 546-552
- [22] J. S. Popovics, W. Song, J. D. Achenbach, J. H. Lee, R. F. Andre, One-sided stress wave velocity measurement in concrete, Journal of Engineering Mechanics 124 (12) (1998) 1346-1353
- [23] P. J. Monteiro, M. S. King, Experimental studies of elastic wave propagation in high – strength mortar, Cement Concrete and Aggregates, 10 (2) (1988) 68-74
- [24] L. Vergara, R. Miralles, J. Gosalbez, F. J. Juanes, L. G. Ullate, J. J. Anaya, M. G. Hernandez, M. A. G. Izquierdo, NDE ultrasonic methods to characterise the porosity of mortar, NDT&E INT 34 (2001) 557-562
- [25] S. P. Shah, J. S. Popovics, K. V. Subramanian, C. M. Aldea, New directions in concrete health monitoring technology, J. Eng. Mech.-ASCE 126 (7) (2000) 754-760
- [26] S. F. Selleck, E. N. Landis, M. L. Peterson, S. P. Shah, J. D. Achenbach, Ultrasonic investigation of concrete with distributed damage, ACI Materials Journal 95 (1)
- [27] W. Suaris, V. Fernando, Detection of crack growth in concrete from ultrasonic intensity measurements, Materials and Structures, 20 (1987) 214-220
- [28] Α. Τσιμόγιαννης, Α. Αναστασόπουλος, Β. Γεωργαλή, Β. Καλοϊδάς, Συνδυαστική εφαρμογή ακουστικής εκπομπής και ακουστο-υπερήχων για την ανίχνευση μικροσκοπικής βλάβης σε δοκίμια κονιάματος, 1ο Ελληνικό Συνέδριο Συνθέτων Υλικών Σκυροδέματος, Ξάνθη, 9-10 Νοεμβρίου 2000

- [29] S. K. Niyogi, P. K. Das Roy, M. Roychaudhuri, Acousto-ultrasonic study on hydration of portland cement, *Ceramic Transactions*, 16, 137-145, 1991
- [30] K. Komlos, S. Popovics, T. Nurnbergerova, B. Babal, J. S. Popovics, Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards, *Cement and Concrete Composites* 18 (1996) 357-364
- [31] V. Garnier, J. F. Chaix, G. Corneloup, Applying waves' propagation modelling to the study of concrete damage, *International Symposium, Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003*, 16-19 Sept. 2003
- [32] M. Goueygou, Z. Lafhaj, M. Kaczmarek, Relationship between porosity, permeability and ultrason parameters in sound and damaged mortar, *International Symposium, Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003*, 16-19 Sept. 2003
- [33] R.D. Midlin, *Micro-Structure in Linear Elasticity. Arch. Ration. Mech. An.*, 16, (1964) 51-78
- [34] H. V. Reinhardt, C. U. Grosse, A. T. Herb, Ultrasonic monitoring of setting and hardening of cement mortar – A new device, *Materials and Structures* 2000; 33: 580-583
- [35] C. U. Grosse, H. W. Reinhardt, Continuous Ultrasound Measurement During Setting and Hardening of Concrete, *Otto Graf Journal* 1994; 5: 76-98
- [36] T. Chotard, N. Gimet-Breart, A. Smith, D. Fargeot, J.P. Bonnet, C. Gault, Application of ultrasonic testing to describe the hydration of calcium aluminate cement at the early age, *Cem Con Res* 2001; 31: 405-412
- [37] C. U. Grosse, Overview of the IWB activities on the field of non-destructive testing, *Otto Graf Journal*, 12 (2001) 21-32
- [38] Objectives of the RILEM technical committee 185-ATC: Advanced testing of cement based materials during setting and hardening, http://www.rilem.org/tc_atc.php#a1
- [39] N. Han, Role of NDE in quality control during construction of concrete infrastructures on the basis of service life design, *Construction and Building Materials* 18 (2004) 163-172
- [40] S. Labouret, I. Looten-Baquet, C. Bruneel, J. Frohly, Ultrasound method for monitoring rheology properties evolution of cement, *Ultrasonics* 36 (1998) 205-208
- [41] T. Ozturk, J. Rapoport, J. S. Popovics, S. P. Shah, Monitoring the setting and hardening of cement-based materials with ultrasound, *Concrete Science and Engineering* 1 (1999) 83-91
- [42] V. K. Subramanian, J. R. Rapoport, S. P. Shah, Nondestructive technique for monitoring strength gain in concrete structures, *Cementing the future*, 12 1 (2000) 4-5

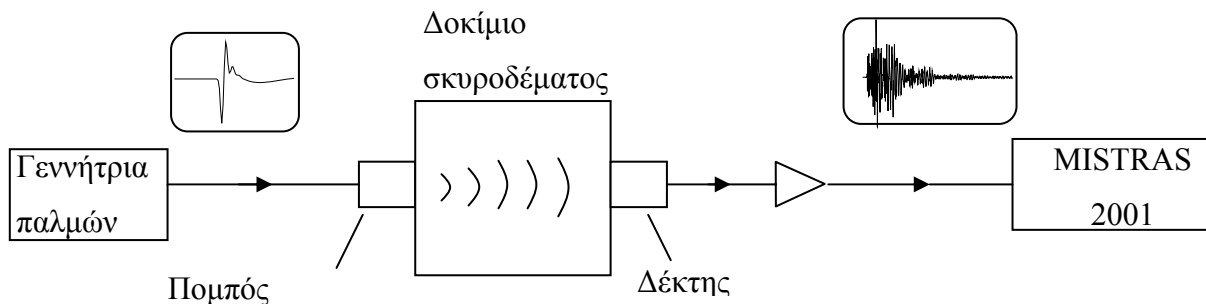
- [43] J. R. Rapoport, J. S. Popovics, S. V. Kolluru, S. P. Shah, Using ultrasound to monitor stiffening process of concrete with admixtures, *ACI Materials J* 97 6 (2000) 675-683
- [44] V. Garnier, G. Corneloup, J. M. Sprauel, J. C. Perfumo, Setting time study of roller compacted concrete by spectral analysis of transmitted ultrasonic signals, *NDT&E INT* 28 1 (1995) 15-22
- [45] J. Keating, D. J. Hannant, A. P. Hibbert, Correlation between cube strength, ultrasonic pulse velocity and volume change for oil well cement slurries, *Cem Con Res*, 19 5 (1989) 715-726
- [46] R. D'Angelo, T. J. Plona, L. M. Schwartz, P. Coveney, Ultrasonic Measurements on Hydrating Cement Slurries, *Adv Cem Bas Mat*, 2 (1995) 8-14
- [47] C.M. Sayers, A. Dahlin, Propagation of ultrasound through hydrating cement pastes at early times, *Advn Cem Bas Mat* 1 (1993) 12-21
- [48] M. I. Valic, Hydration of cementitious materials by pulse echo USWR Method, apparatus and application examples, *Cem Con Res* 30 (2000) 1633-1640
- [49] C. U. Grosse, H. W. Reinhardt, Fresh concrete monitored by ultrasound methods, *Otto Graf Journal* 12 (2001) 157-168
- [50] C. U. Grosse, About the improvement of US measurement techniques for the quality control of fresh concrete, *Otto Graf Journal* 13 (2002) 93-109
- [51] A. T. Herb, C. U. Grosse, H. W. Reinhardt, Ultrasonic testing device for mortar, *Otto Graf Journal* 10 (1999) 144-155
- [52] C. Boutin, L. Arnaud, Mechanical characterization of heterogeneous materials during setting, *Eur J Mech.A/Solids* 14 (4) (1995) 633-656
- [53] A. Boumiz, C. Vernet, F. Cohen Tenoudji, Mechanical Properties of Cement Pastes and Mortars at Early Ages, *Adv Cem Bas Mat*, 3 (1996) 94-106
- [54] L. Arnaud, S. Thinet, A Device to Monitor Continuously the Setting of Concrete , 15th WCNDT, Roma 2000, <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn530/idn530.htm>
- [55] R. B. Casson, P. I. J. Domone, Ultrasonic monitoring of the early age properties of concrete, *Proc. Rilem Int. Conf. Concrete of Early Ages, ECNP, Paris, V.I.* (1982) 129-135
- [56] T. J. Chotard, J. Barthelemy, A. Smith, N. Gimet-Breat, M. Huger, D. Fargeot, C. Gault, Acoustic emission monitoring of calcium aluminate cement setting at the early age, *J Mater Sci Lett*, 20 (2001) 667-669
- [57] Ν. Μαρσέλλος, Έλεγχοι ποιότητας έτοιμου σκυροδέματος, Σκυρόδεμα, οδηγός 1999, Άνωση

- [58] E. Bescher, M. Sambol, E. K. Rice, J. D. Mackenzie, Determination of water-to-cement ration in freshly mixed rapid-setting calcium sulfoaluminate concrete using 2.45GHz microwave radiation, (article in press) *Cement and Concrete Research*, 2004, in press
- [59] D. Whiting, M. Nagi, Laboratory Evaluation of Nuclear Gage for Measurement of Water and Cement Content of Fresh Concrete, *ACI MATER J* 1999; 96 (1): 101-108
- [60] K. Mubarak, K. J. Bois, R. Zoughi, A simple, robust, and on-site microwave technique for determining water-to-cement ratio (w/c) of fresh Portland cement-based materials *IEEE T INSTRUM MEAS* 2001; 50 (5): 1255-1263
- [61] T. E. Nantung, Determination of Water-to-Cement Ratio In Fresh Concrete Using Microwave Oven, Evaluation of SHRP Product, Indiana Department of Transportation, 1998
- [62] T. R. Naik, B. W. Ramme, Determination of the Water-Cement Ratio of Concrete by the Buoyancy Principle, *ACI Mater J* 1989; 86 (1): 3-9
- [63] A. Dowell, S. Cramer, Field Measurement of Water-Cement Ratio, Final Report, Wisconsin Highway Research Program #0092-45-16, Wisconsin Department of Transportation, 2002
- [64] W. G. Fateley, N. Chaffin, Development of a field-portable near-infrared water-cement ratio meter phase I: investigation of spectral feasibility, Final Report to the Kansas Department of Transportation, 1999
- [65] W. J. Head, H. M. Phillipi, P. A. Howdysshell, D. Lawrence, Evaluation of selected procedures for the rapid analysis of fresh concrete, *Cement Concrete and Aggregates*, CCAGDP, 5 (2) 1983 88-102
- [66] L. Arnaud, S. Thinet, Mechanical evolution of concrete during setting, *Materials and Structures*, 36 (2003) 355-364
- [67] Y. Akkaya, T. Voigt, K. V. Subramaniam, S. P. Shah, Nondestructive measurement of concrete strength gain by an ultrasonic wave reflection method, *Materials and Structures* 36 (2003) 507-514
- [68] G. Ye, K. van Breugel, A.L.A. Fraij, Experimental study and numerical simulation on the formation of microstructure in cementitious materials at early age, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 233-239

2. Έλεγχος σκληρυμένου σκυροδέματος

2.1 Πειραματική διάταξη

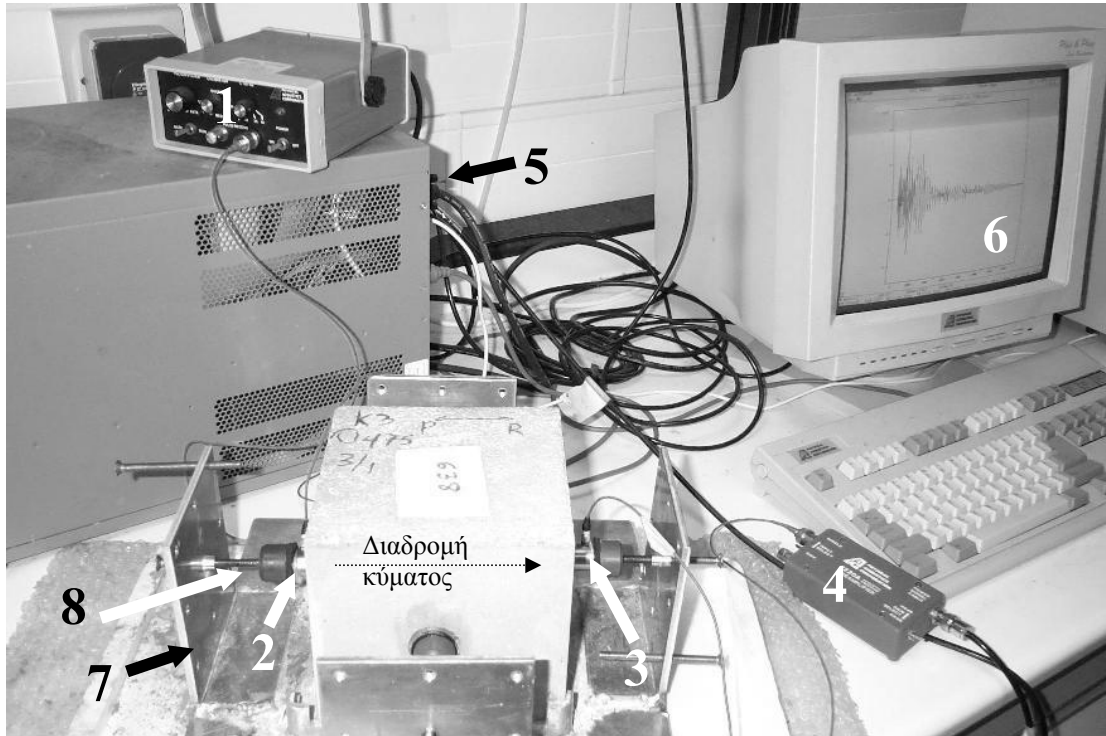
Οι πειραματικές μετρήσεις της παρούσας διατριβής έγιναν με απ' ευθείας διάδοση κύματος (through transmission). Σχηματικά η απεικόνιση της μεθόδου φαίνεται στο Σχ.2.1. Η γεννήτρια παλμών τροφοδοτεί τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα (πομπό) ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος στο κέντρο μιας έδρας του δοκιμίου και σε άμεση επαφή με αυτή.



Σχ.2.1. Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης

Το ηλεκτρικό σήμα, που έχει μορφή κρουστικού παλμού, μετατρέπεται σε τασικό και διαδίδεται στο υλικό μέχρι την απέναντι έδρα όπου βρίσκεται τοποθετημένος στο αντίστοιχο σημείο όμοιος πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας ο οποίος μετατρέπει και πάλι την μεταβατική απόκριση σε ηλεκτρικό σήμα. Αυτό οδηγείται στην κάρτα καταγραφής όπου ψηφιοποιείται και αποθηκεύεται. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια παλμών Physical Acoustics Corporation, PAC, C101-HV, που δημιουργεί ηλεκτρική διέγερση μικρής διάρκειας και επίπεδης απόκρισης τουλάχιστον μέχρι τα 500kHz, 2 πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες συντονισμού PAC R6, συχνότητας συντονισμού κάτω από 200kHz, προενισχυτής PAC 1220A και ένα σύστημα MISTRAS 2001 με δυνατότητα ταυτόχρονης καταγραφής δεδομένων τεσσάρων καναλιών. Η κάρτα ψηφιοποίησης 16-bit παρέχει ακρίβεια καταγραφής 0.305mV εύρος $\pm 10V$. Ο ρυθμός δειγματοληψίας ορίστηκε σε 2MHz, που θεωρείται κατάλληλος για τις συχνότητες των αισθητήρων. Μια μεταλλική βάση χρησιμοποιείται ώστε να ασκείται σταθερή πίεση στους αισθητήρες μέσω κοχλιών ενώ ένα στρώμα γράσου εδράνων ολίσθησης εφαρμόζεται ανάμεσα στις επιφάνειες του δοκιμίου και

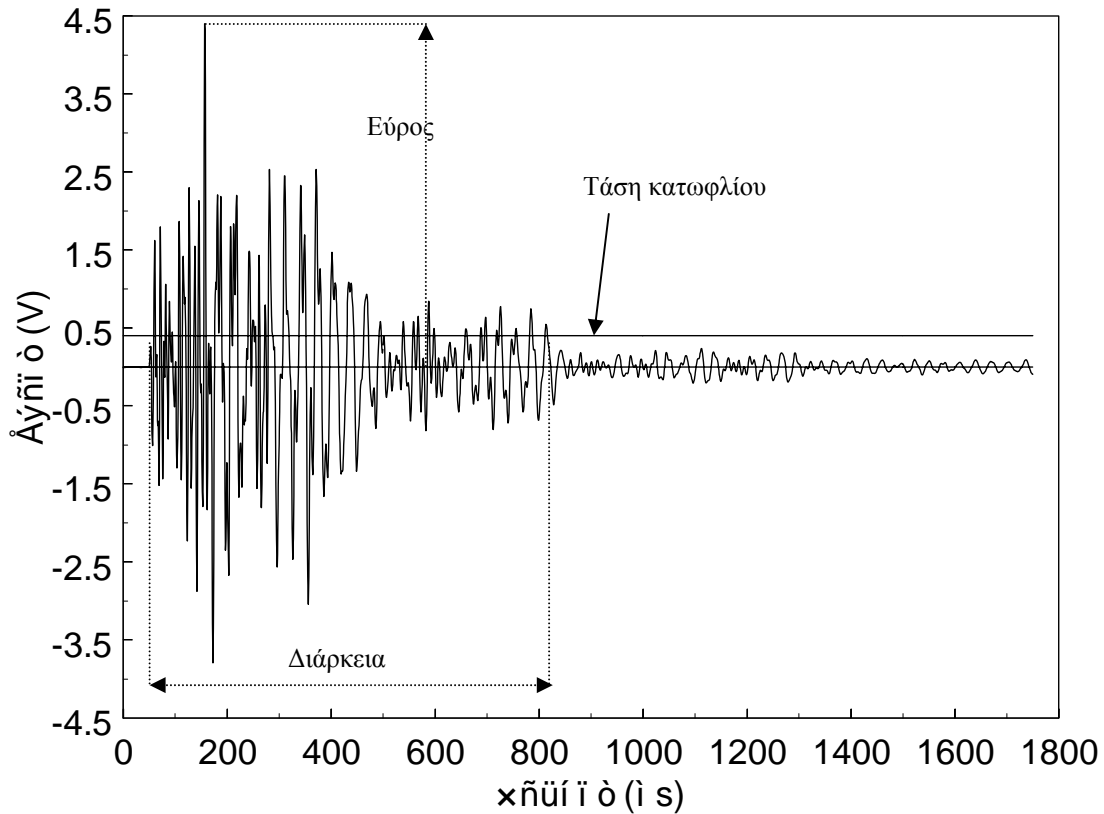
του αισθητήρα για να εξασφαλιστεί ακουστική σύζευξη. Φωτογραφία της διάταξης παρουσιάζεται στο Σχ.2.2.



Σχ.2.2. Φωτογραφική απεικόνιση της διάταξης. (1) Γεννήτρια παλμών, (2) πομπός, (3) δέκτης, (4) προενισχυτής, (5) κάρτα δειγματοληψίας, (6) καταγεγραμμένη κυματομορφή, (7) μεταλλική βάση, (8) κοιλίας με ελαστική βάση επαφής με τον αισθητήρα.

Στο Σχ.2.3 φαίνεται μια τυπική κυματομορφή. Σημασία έχει η τιμή της τάσης κατωφλίου, η οποία ορίζεται έτσι ώστε η καταγραφή να ενεργοποιείται από την πραγματική διαταραχή και όχι από θόρυβο του περιβάλλοντος. Τα κυριότερα μεγέθη της κυματομορφής είναι το εύρος (μέγιστη τιμή σε V ή dB), ο αριθμός υπερβάσεων κατωφλίου που για συντομία θα αναφέρεται ως «counts», η διάρκεια που ορίζεται από την πρώτη υπέρβαση και την τελευταία πτώση της κυματομορφής σε σχέση με το κατώφλι, η ενέργεια (αδιαστατοποιημένο μέγεθος ανάλογο του εμβαδού της περιβάλλουσας της ανορθωμένης κυματομορφής) ο χρόνος ανύψωσης, δηλαδή η χρονική διαφορά του μέγιστου από την πρώτη υπέρβαση κατωφλίου κ.α. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά μετρώνται σε πραγματικό χρόνο από το εξειδικευμένο λογισμικό. Επιπλέον, οδηγώντας το ηλεκτρικό σήμα από τη γεννήτρια απ' ευθείας σε άλλο κανάλι καταγραφής, η διαφορά χρόνου μεταξύ της εισαγωγής

του ηλεκτρικού παλμού και του λαμβανόμενου από τον δέκτη σήματος οδήγησε σε εκτίμηση της ταχύτητας παλμού.



Σχ.2.3. Τυπική κυματομορφή με τα κυριότερα χαρακτηριστικά της.

2.2 Υλικά

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυβικού σχήματος, ακμής 150mm και παρασκευάστηκαν στο Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου (EKET). Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο υψηλής αντοχής I45, ενώ τα αδρανή ήταν ασβεστολιθικής προέλευσης μέγιστου μεγέθους 37.5mm.. Η παρασκευή των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με τον νέο ελληνικό κανονισμό τεχνολογίας σκυροδέματος 97 (ΣΚ 303). Συνολικά εξετάστηκαν μη καταστροφικά 130 δοκίμια εκ των οποίων 48 κονιάματος με μέγιστο μέγεθος αδρανών 4.5mm. Η ακριβής κοκομετρία των αδρανών παρουσιάζεται στο πίνακα A2.1 στο τέλος του κεφαλαίου. Δοκίμια από κάθε σύσταση φυλάσσονταν για τη διενέργεια καταστροφικών

δοκιμών θλίψης και μικροσκοπίας στο ΕΚΕΤ ενώ αρχικά οι διαθέσιμοι κύβοι για μετρήσεις υπερήχων ήταν τέσσερις ανά σύσταση.

Οι λόγοι w/c (από 0.375 έως και 0.65) και a/c (3/1 και 4/1) που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην πράξη και φαίνονται στον Πίνακα 2.1. Μετρήσεις υπερήχων έγιναν σε 10 διαφορετικές ηλικίες όσον αφορά στα κονιάματα και συγκεκριμένα 1, 2, 3, 4, 5, 7, 14, 28, 63 και 90 ημέρες μετά την παρασκευή τους ενώ σε 7 για το σκυρόδεμα, δηλαδή 2, 4, 7, 14, 28, 60 και 90 ημέρες.

Η παρασκευή και ο έλεγχος των δοκιμών έγιναν σε τρία βασικά στάδια. Αρχικά παρασκευάστηκαν οκτώ συστάσεις κονιάματος ως πρώτο βήμα αφού εκτός των εφαρμογών του ίδιου του υλικού, το κονίαμα μπορεί να θεωρηθεί ως μητρικό υλικό του σκυροδέματος. Κατόπιν ακολούθησε η παρασκευή σκυροδέματος σε δώδεκα συστάσεις που ήταν και ο κύριος όγκος ενώ το πρόγραμμα έκλεισε με επανάληψη κάποιων συστάσεων σκυροδέματος για αύξηση του πληθυσμού κάθε κλάσης από τέσσερα δοκίμια σε δεκαπέντε, με σκοπό εφαρμογή μεθόδου ταξινόμησης, όπως και παρασκευή επίσης κάποιων κονιαμάτων με για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ελαστικότητα του μητρικού υλικού του σκυροδέματος. Το πρόγραμμα δοκιμών σε σκληρυμένο σκυρόδεμα/κονίαμα ξεκίνησε το έτος 1999 και το πειραματικό του μέρος ολοκληρώθηκε το έτος 2001, με την εξέταση 90 ημερών στην τελευταία χρονολογικά σύσταση.

Πίνακας 2.1. Συστάσεις κονιάματος και σκυροδέματος που ελέγχθηκαν

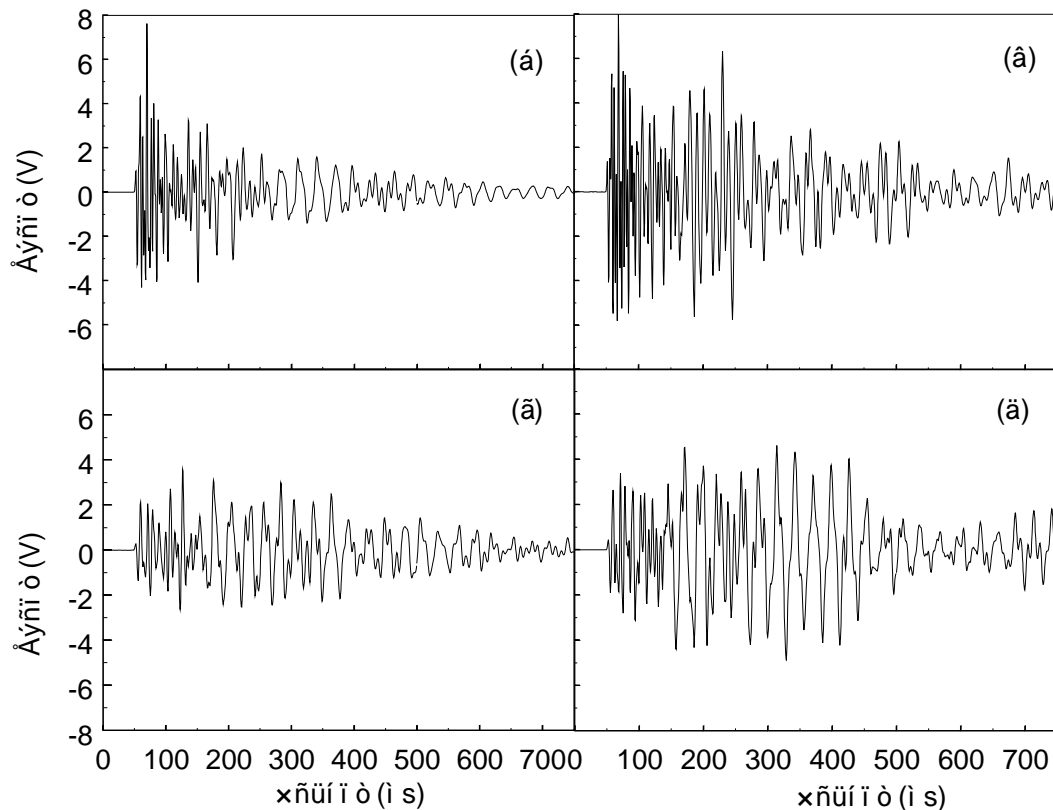
Κονίαμα								
w/c \ a/c	0.375	0.40	0.425	0.50	0.55	0.60	0.65	
1.5	♦		♦					
3		♦	♦	♦	♦	♦	♦	
4				♦	♦	♦	♦	
Σκυρόδεμα								
w/c \ a/c	0.375	0.40	0.425	0.45	0.475	0.50	0.525	0.55
3	♦	♦	♦	♦	♦	♦		
4			♦	♦	♦	♦	♦	♦

Τα αποτελέσματα παρακολούθησης του υλικού συγχρόνως με υπερήχους αλλά και θλιπτικές δοκιμές κατέδειξαν ότι παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή έχουν παρόμοια επίδραση και στην κυματική διάδοση, αφού ο ρυθμός ανάπτυξης χαρακτηριστικών του κύματος, π.χ. ταχύτητα, αριθμός υπερβάσεων είναι όμοιος με αυτόν της θλιπτικής αντοχής οδηγώντας σε γραμμική συσχέτιση με αυτή όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

2.3 Συσχέτιση κυματικών χαρακτηριστικών με ρυθμό ενυδάτωσης και αντοχή.

Με την πάροδο του χρόνου προχωρά η αντίδραση ενυδάτωσης με τα εναπομείναντα αποθέματα ελεύθερου νερού και αυξάνονται οι ποσότητες των στερεών προϊόντων. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της δυσκαμψίας και της αντοχής. Ως εκ τούτου και οι μετρήσεις ταχύτητας παλμού αλλά και διαφόρων άλλων χαρακτηριστικών του κύματος καταγράφουν αυξητική τάση με την ηλικία του σκυροδέματος.

Στα Σχ.2.4(α) και (β), παρουσιάζονται δύο κυματομορφές από το ίδιο δοκίμιο κονιάματος με $w/c=0.65$ και $a/c=3$. Η μία καταγράφηκε σε ηλικία 1 ημέρας (α) και η δεύτερη σε ηλικία 90ημερών (β). Αντίστοιχα, στα Σχ.2.4(γ) και (δ) παρατίθενται κυματομορφές ενός δοκιμίου σκυροδέματος $w/c=0.50$ και $a/c=4$ σε ηλικίες 2 και 28 ημερών αντίστοιχα. Η αύξηση του εύρους είναι εμφανής και για τις δύο περιπτώσεις. Η σκλήρυνση του μητρικού υλικού οδηγεί σε αύξηση της διαδιδόμενης ενέργειας.

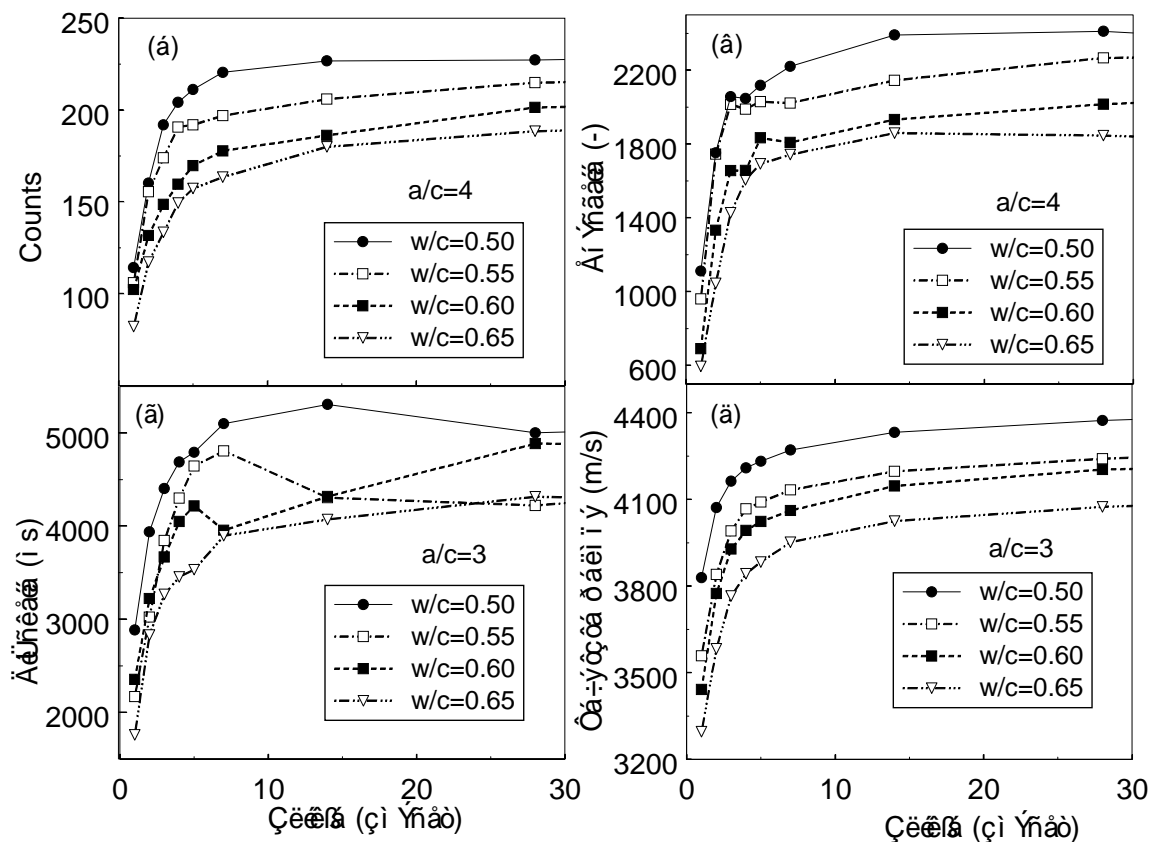


Σχ.2.4. Επίδραση της ηλικίας στις κυματομορφές δοκιμίου κονιάματος $w/c=0.65$ και $a/c=3$ (α) 1 και (β) 90 ημερών και δοκιμίου σκυροδέματος $w/c=0.50$ και $a/c=4$ (γ) 2 και (δ) 28 ημερών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η μεγάλη διάρκεια των σημάτων οφείλεται σε συνδυασμό φαινομένων διασποράς, πιθανών ανακλάσεων και της συμπεριφοράς των συγκεκριμένων αισθητήρων. Οι αισθητήρες αυτοί είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι σε μετρήσεις ακουστικής εκπομπής στην πράξη λόγω της υψηλής ευαισθησίας τους, απόρροια της κατασκευής τους με χαμηλή εξασθένιση, σε αντίθεση με αισθητήρες υψηλής εξασθένισης που κλασσική τους χρήση είναι ο εντοπισμός ρωγμών. Η έλλειψη εξασθένισης σχετίζεται με την μεγάλη διάρκεια του σήματος, όπως φαίνεται και στην σχετική με την απόκριση των αισθητήρων παράγραφο (4.1).

Η ανάπτυξη των κυματικών χαρακτηριστικών φαίνεται και στα Σχ.2.5 όπου παρουσιάζονται η ανάπτυξη του αριθμού υπερβάσεων κατωφλίου, counts (α) και της ενέργειας (β) για

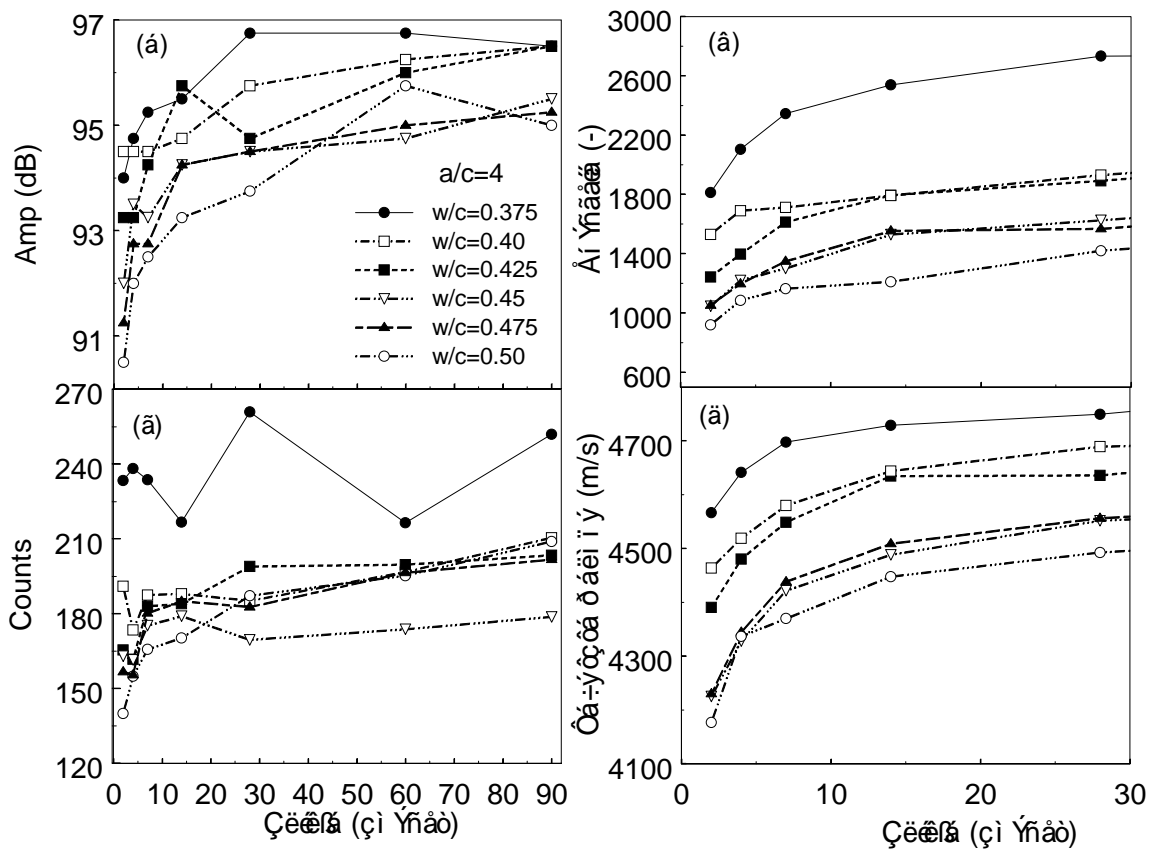
κονιάμα με $a/c=4$ και w/c από 0.50 έως 0.65. Επίσης παρουσιάζεται η διάρκεια (Σχ.2.5(γ)) και η ταχύτητα παλμού (δ) σε σχέση με την ηλικία για τέσσερις αναλογίες w/c κονιάματος και $a/c=3$. Είναι σαφές ότι όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά ακολουθούν περίπου τον ίδιο ρυθμό ανάπτυξης με έντονες μεταβολές την πρώτη εβδομάδα και σταδιακή σταθεροποίηση έως περίπου τις 28 ημέρες μετά τις οποίες δεν παρουσιάζονται αξιόλογες μεταβολές. Σημειώνεται ότι στα διαγράμματα παρουσιάζονται οι μέσες τιμές από τα τέσσερα διαθέσιμα δοκίμια για κάθε σύσταση. Επίσης, όπως θα αναλυθεί αργότερα, στο σχήμα αυτό φαίνεται η επίδραση του λόγου w/c , αφού τα δοκίμια με χαμηλό w/c παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές, γεγονός σχετιζόμενο με την επίδραση της σύστασης στις ελαστικές ιδιότητες όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.



Σχ.2.5. Ανάπτυξη κυματικών χαρακτηριστικών για διάφορες συστάσεις κονιάματος

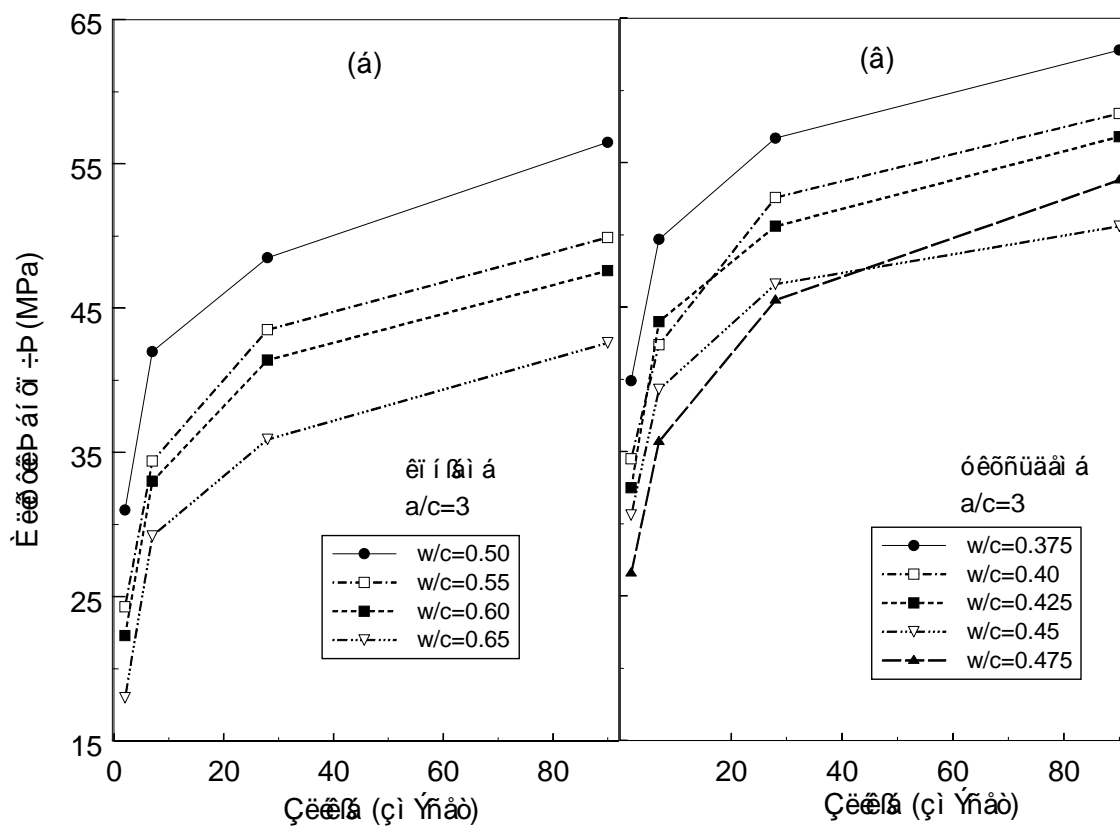
Σημειώνεται ότι κάθε σημείο των διαγραμμάτων προκύπτει από το μέσο όρο όλων των δοκιμίων της συγκεκριμένης σύστασης.

Ίδια είναι η τάση και για το σκυρόδεμα, όπως φαίνεται στο Σχ.2.6 και για το εύρος (α), ενέργεια (β), counts (γ) και ταχύτητα παλμού (δ). Ωστόσο, σ' αυτήν την περίπτωση η επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό δεν είναι τόσο σαφής αφού υπάρχουν περιπτώσεις που σύσταση υψηλότερου w/c παρουσιάζει και υψηλότερες τιμές χαρακτηριστικών, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην αυξημένη ανομοιογένεια του σκυροδέματος που αυξάνει την πειραματική διασπορά. Η ανομοιογένεια αυτή είναι πιθανώς και η αιτία που τα counts της σύστασης 0.375 δεν φαίνεται καν να ακολουθούν την πορεία ενυδάτωσης. Πιο ομαλή πορεία φαίνεται να ακολουθούν η ενέργεια και η ταχύτητα.



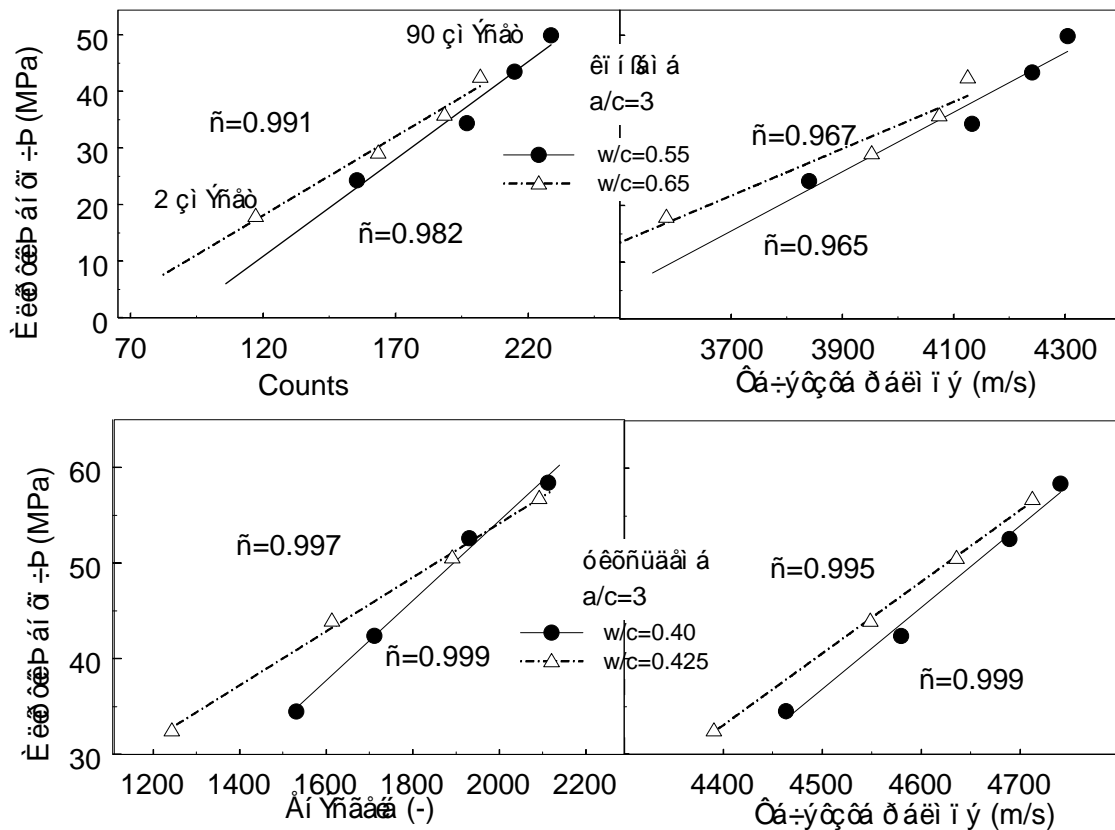
Σχ.2.6. Ανάπτυξη κυματικών χαρακτηριστικών για διάφορες συστάσεις σκυροδέματος

Από τις θλιπτικές δοκιμές των ίδιων συστάσεων, που διενεργήθησαν στο ΕΚΕΤ αναδεικνύονται όμοιες τάσεις, όπως φαίνεται στα Σχ.2.7(α) και (β), όπου παρουσιάζονται οι μετρηθείσες αντοχές για τις ίδιες συστάσεις κονιάματος και σκυροδέματος αντίστοιχα. Οι αντοχές των 2 ημερών είναι για το κονίαμα χαμηλότερες από 35MPa ενώ στις 90ημέρες έχουν αυξηθεί και πάνω από 100% σε σχέση με την πρώτη μέτρηση. Οι καμπύλες αντοχής του σκυροδέματος είναι τοποθετημένες ψηλότερα, αφού άλλωστε και οι λόγοι w/c που χρησιμοποιήθηκαν είναι χαμηλότεροι. Γενικά, πλην μιας περίπτωσης σκυροδέματος, η αντοχή λαμβάνει θέση αντίστροφα με το περιεχόμενο σε νερό. Σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται λοιπόν καθαρά η επίδραση του w/c στην αντοχή και η σημασία ελέγχου της παραμέτρου αυτής αφού μια διαφορά στην ποσότητα νερού της τάξης των 100g για ένα κυβικό δοκίμιο ακμής 150mm προκαλεί διαφορά σε αντοχή 90 ημερών περίπου 15MPa ή 25%.



Σχ.2.7. Ανάπτυξη αντοχής για διάφορες συστάσεις κονιάματος και σκυροδέματος

Όπως αναμένεται, αφού κυματικά χαρακτηριστικά και αντοχή παρουσιάζουν περίπου όμοια καμπύλη μεταβολής με το χρόνο, μεταξύ τους είναι γραμμικά συσχετισμένα. Στο Σχ.2.8 φαίνονται οι καμπύλες συσχέτισης των counts (α) και της ταχύτητας (β) με την αντοχή για δύο συστάσεις κονιάματος, ενώ στα (γ) και (δ) παρουσιάζονται οι συσχετίσεις ενέργειας και ταχύτητας αντίστοιχα για δύο περιπτώσεις σκυροδέματος. Παρότι το πλήθος των σημείων δεν επιτρέπει σαφή και αξιόπιστα συμπεράσματα, φαίνεται ότι τουλάχιστον μέχρι τις 90 ημέρες οι κυματικές παράμετροι μπορούν να χαρακτηριστούν ανάλογες της αντοχής. Μια παρατήρηση είναι ότι η αντοχή εμφανίζει σαφή, έστω και περιορισμένη, αύξηση από τις 28 στις 90 ημέρες, κάτι που δεν συμβαίνει για τα κυματικά χαρακτηριστικά, τα οποία εμφανίζουν μόνο ανεπαίσθητη αύξηση κατά την ίδια περίοδο, σε γενικές γραμμές. Αυτός είναι και ο λόγος που σε κάποιες περιπτώσεις το σημείο των 90 ημερών φαίνεται να αποκλίνει από την ευθεία.



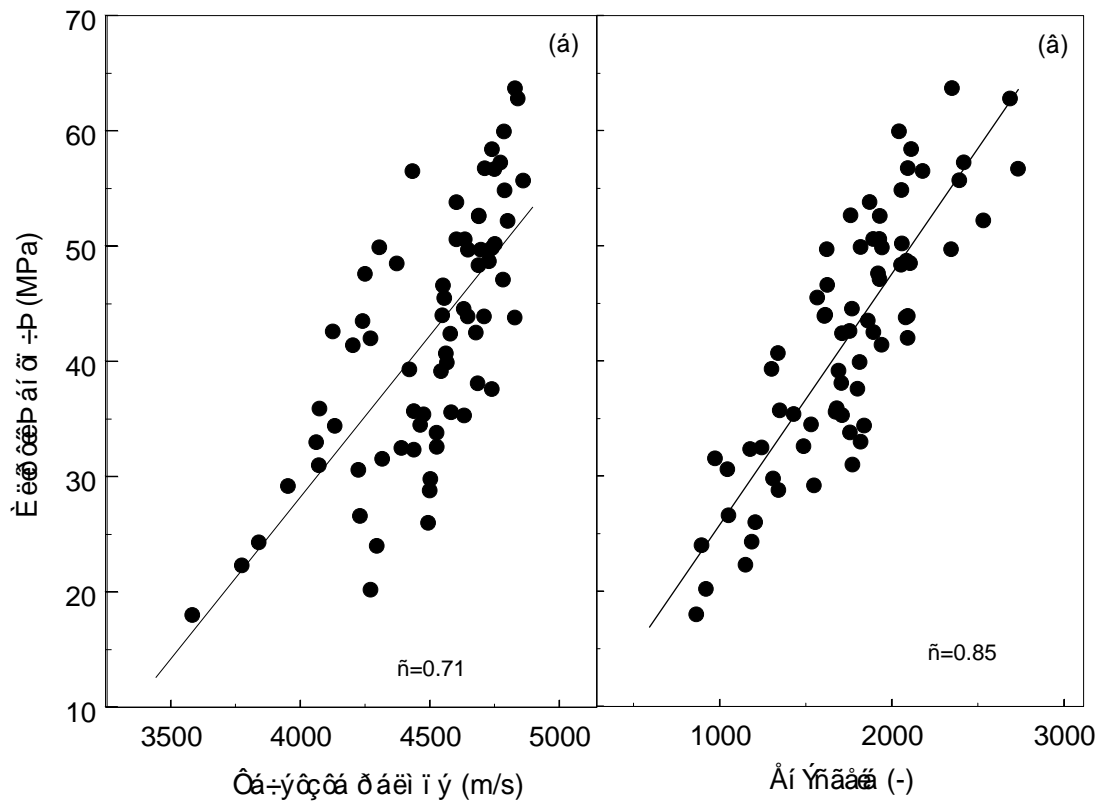
Σχ.2.8. Συσχέτιση αντοχής με κυματικά χαρακτηριστικά για διάφορες συστάσεις κονιάματος και σκυροδέματος

Τα παραπάνω καταδεικνύουν μια σχέση μεταξύ αντοχής και υπερήχων για κάθε συγκεκριμένη σύσταση. Στο παραπάνω σχήμα, ρ είναι ο συντελεστής συσχέτισης που ορίζεται ως εξής:

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad -1 \leq \rho_{xy} \leq 1 \quad (2.1)$$

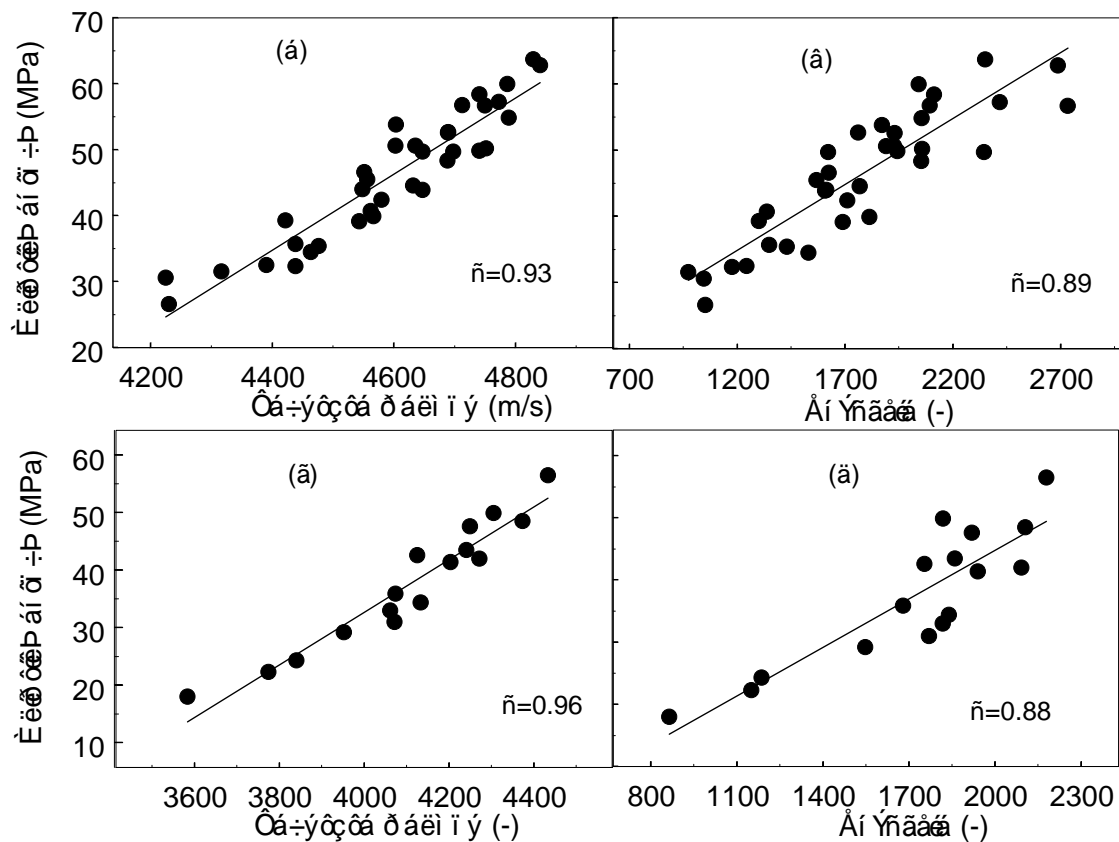
όπου σ_{xy} είναι η συνδιασπορά, covariance, των συναρτήσεων $X(t)$ και $Y(t)$, έστω αντοχή και ταχύτητα παλμού αντίστοιχα και σ_x , σ_y είναι η τυπική απόκλιση των $X(t)$ και $Y(t)$ αντίστοιχα.

Με την προϋπόθεση ότι η γραμμική σχέση συνεχίζεται σε όλη τη διάρκεια ζωής, τάση που δεν διερευνήθηκε στην παρούσα διατριβή, είναι δυνατή η εκτίμηση της αντοχής σε οποιαδήποτε ηλικία για συγκεκριμένη σύσταση. Εφόσον όμως η σύσταση δεν είναι γνωστή, η εκτίμηση της αντοχής δεν είναι σαφής. Αυτό φαίνεται στο Σχ.2.9(α) όπου τα ζευγάρια τιμών αντοχής-ταχύτητας υπερήχων που μετρήθηκαν σε όλες της ηλικίες και για όλες τις συστάσεις σκυροδέματος και κονιάματος δημιουργούν ένα νέφος σημείων το οποίο δείχνει μεν μια τάση γραμμικής συσχέτισης, αλλά χωρίς άλλη πληροφόρηση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αντοχής για τον πληθυσμό δοκιμίων του πειραματικού προγράμματος της διατριβής. Στο Σχ.2.9(β) παρατίθεται η αντίστοιχη συσχέτιση αντοχής με την ενέργεια, όπου το συμπέρασμα παραμένει όμοιο, με ελαφρώς αυξημένο τον συντελεστή συσχέτισης (0.85 έναντι 0.71 της προηγούμενης περίπτωσης).



Σχ.2.9. Συσχέτιση αντοχής με ταχύτητα παλμού (α) και ενέργεια (β) για όλες τις συστάσεις και ηλικίες κονιάματος και σκυροδέματος

Η κατάσταση φαίνεται να είναι πιο σαφής εφόσον είναι δεδομένος ο τύπος του υλικού (σκυρόδεμα/κονίαμα) και ο λόγος a/c. Στο Σχ.2.10(α) φαίνεται το νέφος σημείων αντοχής – ταχύτητας υπερήχων μόνο για τα δοκίμια σκυροδέματος a/c=3. Η απόκλιση από την ευθεία είναι πολύ μικρότερη σε αυτήν την περίπτωση ($\rho=0.93$) και επιτρέπει μικρότερο λάθος στην εκτίμηση χωρίς όμως και πάλι απόλυτη ακρίβεια. Βελτίωση στη συσχέτιση υπάρχει και για την ενέργεια κυματομορφής αν περιοριστούμε σε ένα λόγο a/c σκυροδέματος ($\rho=0.89$), βλ.Σχ.2.10(β). Όμοια είναι η βελτίωση της συσχέτισης κυματικών χαρακτηριστικών για ένα λόγο a/c κονιάματος, όπως φαίνεται στα Σχ.2.10(γ) και (δ) για κονίαμα με a/c=3.

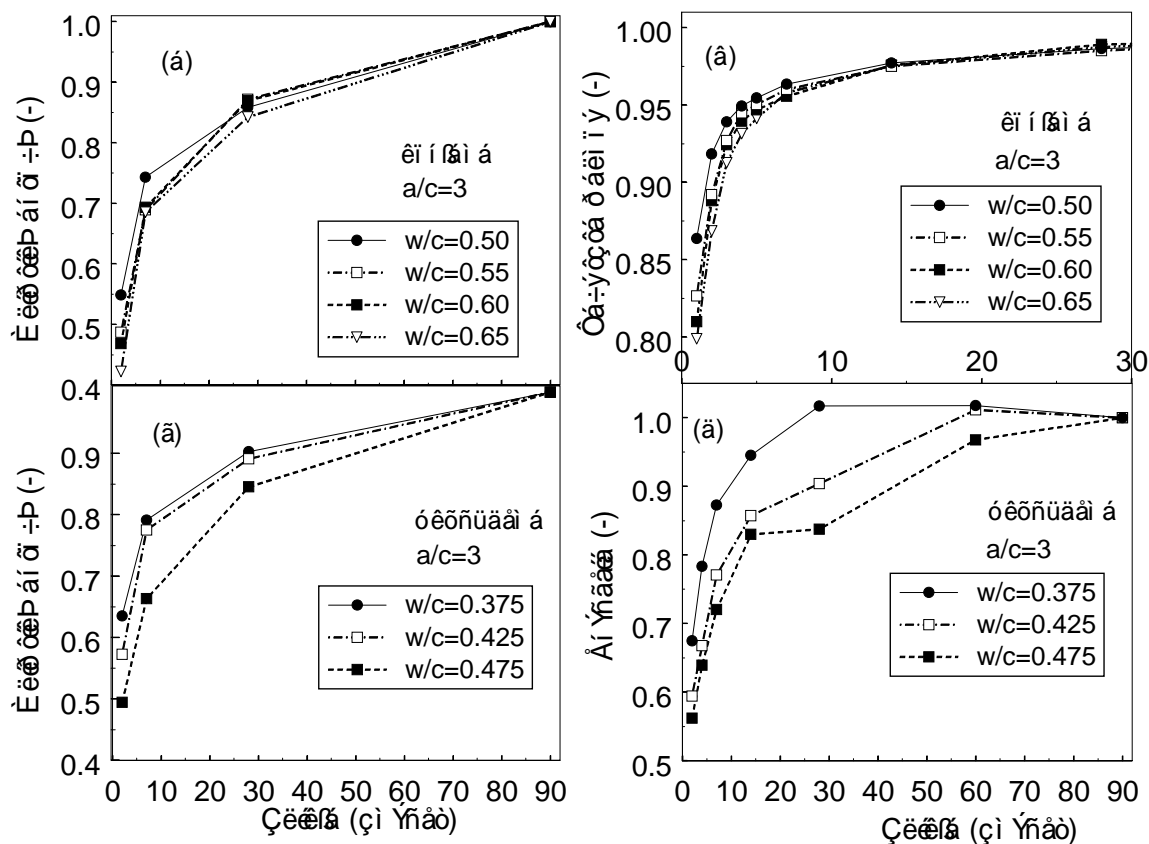


Σχ.2.10. Συσχέτιση αντοχής με ταχύτητα παλμού (α) και ενέργεια (β) για σκυρόδεμα με $a/c=3$ και αντίστοιχα (γ) και (δ) για κονίαμα με $a/c=3$.

Είναι χαρακτηριστικό ότι ενώ άλλα κυματικά χαρακτηριστικά προσφέρουν καλύτερη συσχέτιση από την ταχύτητα για το σύνολο των μετρήσεων, δεδομένων κάποιων στοιχείων σύστασης, όπως δηλαδή η περιεκτικότητα και το μέγεθος αδρανών η ταχύτητα παλμού περιορίζει το σφάλμα σε πιθανή εκτίμηση μέσω του υψηλότερου συντελεστή συσχέτισης.

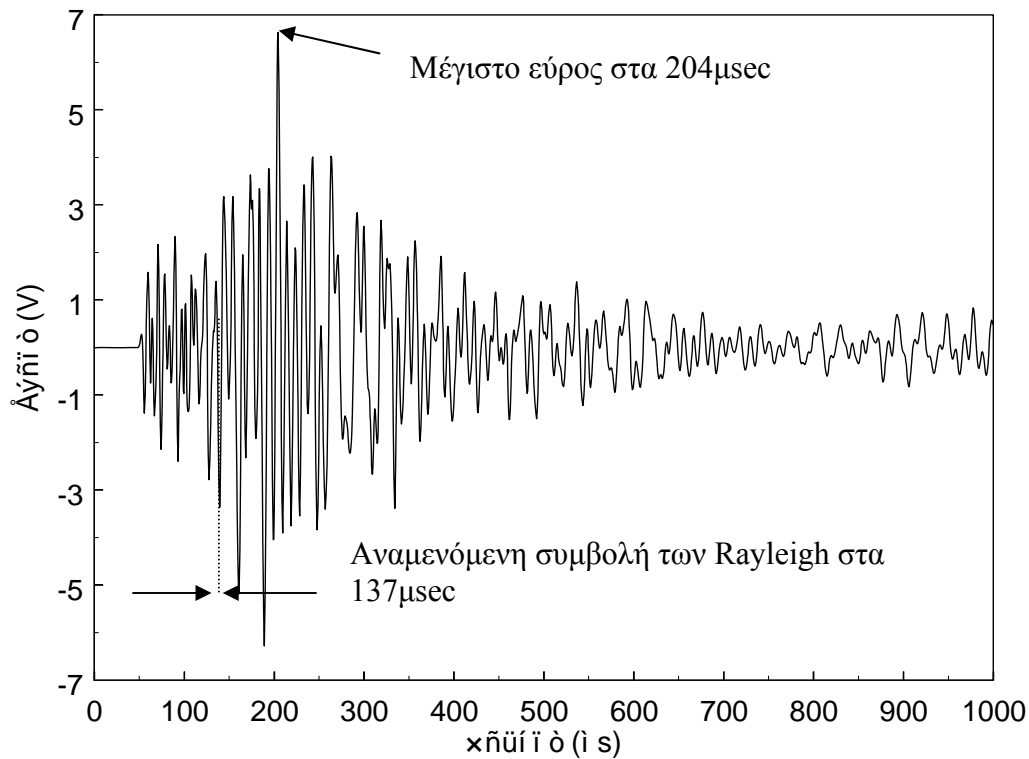
Από τα παραπάνω, καταδεικνύεται η εκπεφρασμένη [1,2] αβεβαιότητα σχετικά με τον προσδιορισμό της αντοχής σκυροδέματος με τη μέτρηση ενός και μόνο κυματικού χαρακτηριστικού. Η χρήση και άλλων παραμέτρων, κυρίως σύστασης θα ήταν βοηθητική εφόσον βέβαια τέτοιου είδους πληροφορία είναι διαθέσιμη. Επίσης και άλλα κυματικά χαρακτηριστικά θα ήταν πολύ χρήσιμα σε μια ανάλυση, όπως π.χ. η ενέργεια, που όπως φάνηκε παρουσιάζει μικρότερη διασπορά σημείων για τις συνολικές μετρήσεις.

Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα μετά από προσεκτική παρατήρηση των καμπυλών ανάπτυξης αντοχής και χαρακτηριστικών υπερήχων με την ηλικία είναι ότι χαμηλός λόγος w/c οδηγεί σε ταχύτερη ενυδάτωση. Αυτό γίνεται σαφές από το Σχ.2.11(α) όπου φαίνεται η καμπύλη αντοχής-ηλικίας για τέσσερις διαφορετικούς λόγους w/c κονιάματος με a/c=3, όπου οι τιμές αντοχής κάθε ηλικίας έχουν διαιρεθεί με την αντοχή των 90ημερών της αντίστοιχης κλάσης. Από το σχήμα είναι σαφές ότι το κονίαμα με χαμηλό λόγο w/c, από τις δύο μέρες έχει αναπτύξει αντοχή 55% της τελικής (90 ημερών), ενώ το κονίαμα με w/c=0.65 μόλις το 42%. Οι ενδιάμεσες συστάσεις έχουν και ενδιάμεσο ποσοστό. Όμοιες είναι και οι τάσεις στα διάφορα κυματικά χαρακτηριστικά, όπως οι ταχύτητες παλμού για τα ίδια κονιάματα, βλ. Σχ.2.11(β). Ενώ στις 15 μέρες όλες οι συστάσεις παρουσιάζουν περίπου το 97% της τελικής ταχύτητας, την πρώτη μέρα εμφανίζουν ποσοστό από 86% έως και 79% ανάλογα με το λόγο w/c. Αντίστοιχα συμπεράσματα εξάγονται από την παρατήρηση σκυροδέματος. Στο Σχ.2.11(γ) παρατηρείται η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής για τρεις συστάσεις σκυροδέματος, ενώ είναι σαφές ότι από αυτές η υψηλότερου w/c προσεγγίζει πιο αργά την τελική τιμή, που θεωρείται αυτή των 90 ημερών. Ίδια η τάση και για τα κυματικά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα για την ενέργεια που παρουσιάζεται στο Σχ.2.11(δ), όπου το σκυρόδεμα με w/c=0.375, έχει προσεγγίσει την τελική τιμή ενέργειας από τις 28 μέρες, ενώ στην ίδια ηλικία σκυρόδεμα με w/c=0.475 παρουσιάζει μόλις 83% της ενέργειας των 90 ημερών. Η τάση αυτή συνδέεται σύμφωνα με το Neville [2] με την αρχική απόσταση μεταξύ των κόκκων. Σε υλικό με χαμηλό w/c η περιεκτικότητα της τσιμεντόπαστας σε κόκκους τσιμέντου είναι μεγαλύτερη με συνέπεια η απόσταση μεταξύ τους να είναι μικρότερη και ως εκ τούτου ένα συνεχές δίκτυο στερεών προϊόντων δημιουργείται ταχύτερα.



Σχ.2.11. Επίδραση w/c στην ανάπτυξη: (α) αντοχής, (β) ταχύτητας παλμού σε κονίαμα και (γ) αντοχής και (δ) ενέργειας σε σκυρόδεμα

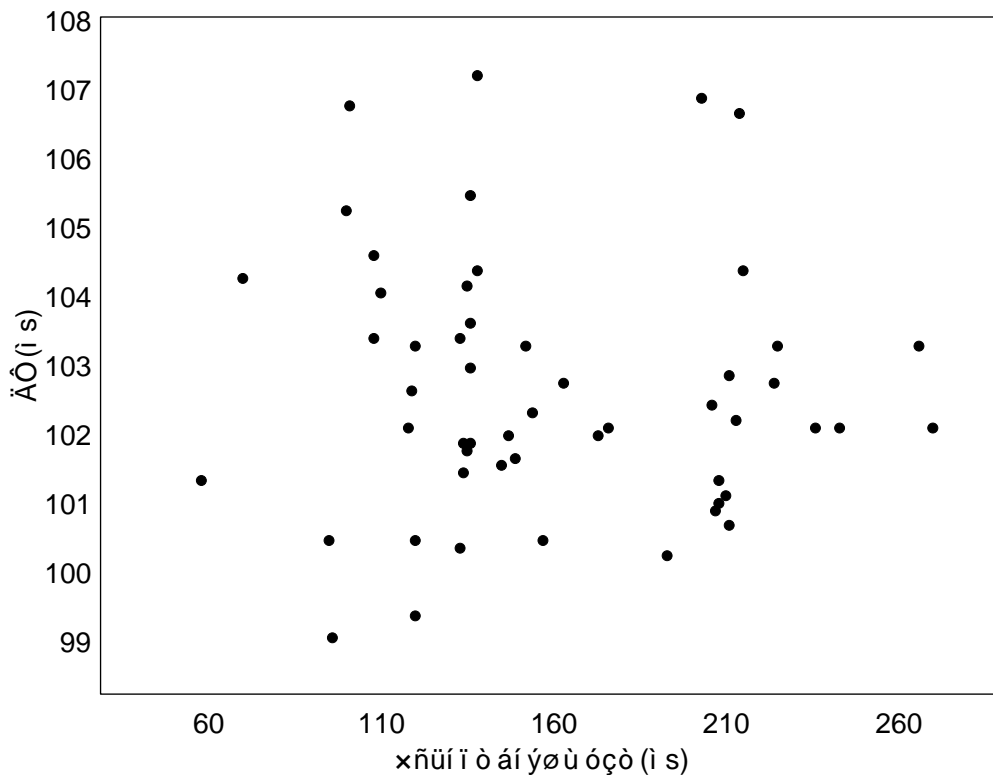
Όπως αναφέρθηκε η μεγάλη διάρκεια των κυματομορφών δεν οφείλεται αποκλειστικά στο υλικό αλλά και στην ευαισθησία των αισθητήρων, όπως και σε πιθανές ανακλάσεις. Οι συμβολές των ανακλάσεων αυτών βέβαια δεν είναι εμφανείς στις κυματομορφές. Για παράδειγμα η διαδρομή των επιφανειακών κυμάτων από αισθητήρα σε αισθητήρα είναι 300mm. Έτσι με ταχύτητα περίπου 2000-2300m/s θα έπρεπε να συμβάλουν στο σήμα περίπου 100-120μs μετά την πρώτη άφιξη. Ωστόσο η συμβολή αυτή δεν είναι εμφανής. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχ.2.12 παρουσιάζεται κυματομορφή από δοκίμιο σκυροδέματος $w/c=0.45$ στην ηλικία των 90 ημερών, με ταχύτητα παλμού 4649m/s. Με θλιπτική αντοχή 52.65MPa το μέτρο ελαστικότητας εκτιμάται μέσω εμπειρικών σχέσεων περίπου σε 34GPa [1], και ο λόγος poisson, μέσω της ταχύτητας παλμού στην τιμή 0.33. Κατά συνέπεια η ταχύτητα Rayleigh υπολογίζεται σε 2180m/s, με χρόνο άφιξης τα 137μs.



Σχ.2.12. Κυματομορφή 90 ημερών δοκιμίου w/c=0.45

Αντίστοιχα, ο χρόνος στον οποίο αναμένεται ανάκλαση διαμήκων κυμάτων από την πλάγια επιφάνεια είναι περίπου 45μs, με διαδρομή 212mm. Παρότι η τελική κυματομορφή πιθανότατα εμπεριέχει κάποια τέτοιου είδους επίδραση, δεν είναι δυνατή η ανίχνευσή της και σίγουρα δεν οφείλεται σε αυτήν το μέγιστο εύρος του παλμού.

Ενδεικτικά στο Σχ.2.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα συσχέτισης της διαφοράς χρόνου άφιξης απ'ευθείας κύματος και επιφανειακού, ΔT , με το «χρόνο ανύψωσης» για όλα τα δοκίμια στην ηλικία των 90 ημερών, όπου δεν παρατηρείται καμία συσχέτιση.

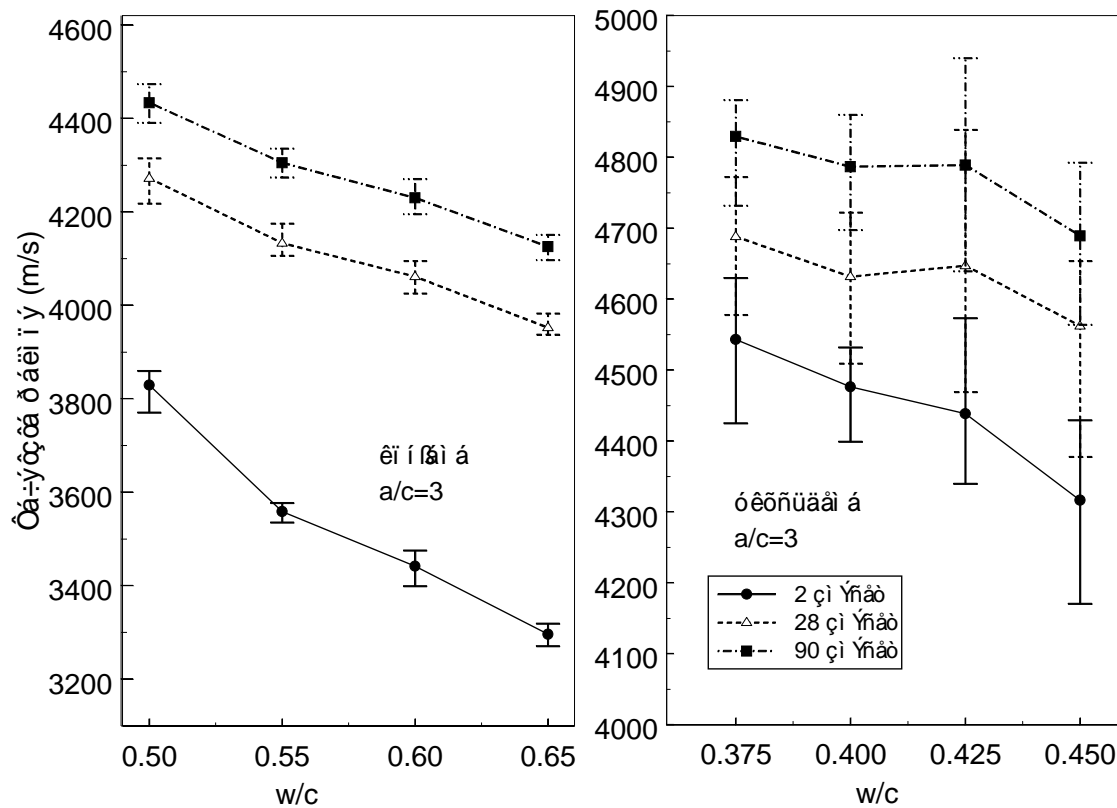


Σχ.2.13. Χρονική καθυστέρηση μεταξύ επιφανειακών και διαμήκων κυμάτων σε σχέση με το χρόνο ανύψωσης.

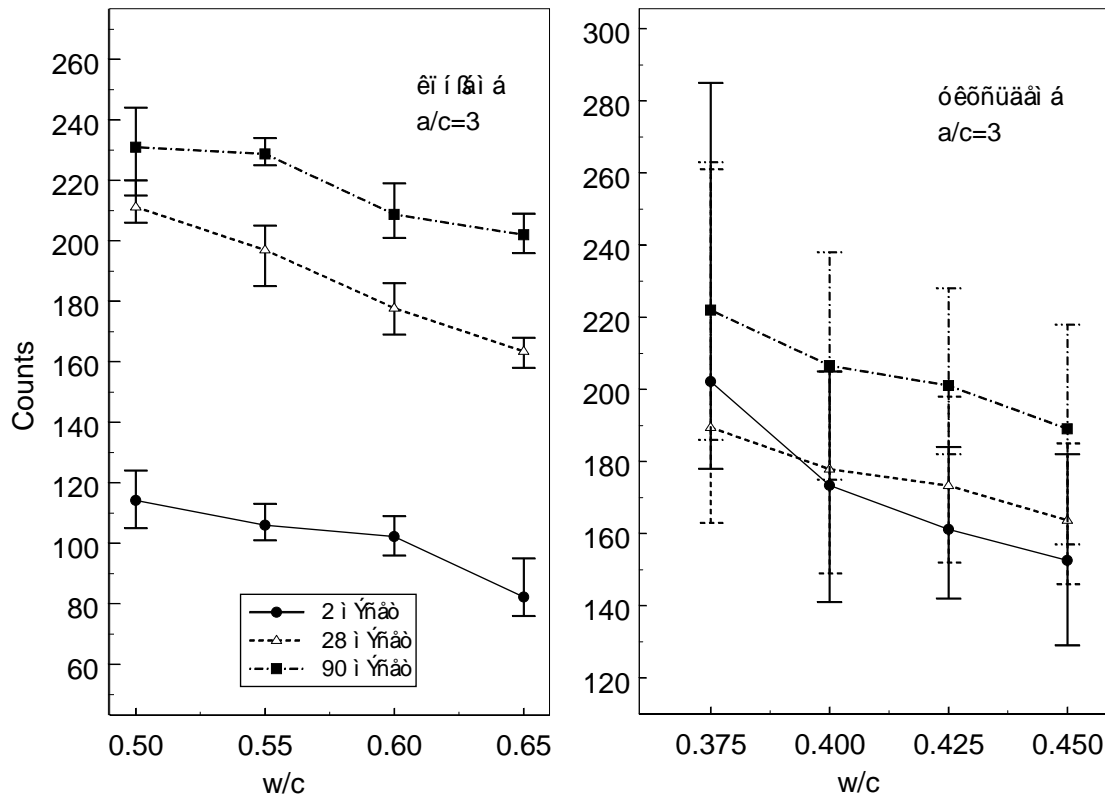
2.4 Συσχέτιση κυματικών χαρακτηριστικών με σύσταση

Όπως φάνηκε από τις καμπύλες των Σχ.2.5, 2.6 και είναι γνωστό από παλιά [3-5] υλικό με μικρότερη περιεκτικότητα σε νερό, w/c, παρουσιάζει εν γένει υψηλότερη ενέργεια και ταχύτητα παλμού. Αυτό ήταν αναμενόμενο αφού η μεταβολή του w/c επιφέρει αλλαγές στην ελαστικότητα και το πορώδες της τσιμεντόπαστας. Η επίδραση αυτή είναι σαφής για το κονίαμα, όπου με χρήση ενός και μόνο χαρακτηριστικού και συγκεκριμένα της ταχύτητας παλμού μπορεί να γίνει ακριβής χαρακτηρισμός αφού οι τιμές για δοκίμια όμοιου υλικού δεν παρουσιάζουν παρά ελάχιστη διασπορά. Στο Σχ.2.14(α) παρατίθενται οι συσχετίσεις της ταχύτητας με το λόγο w/c για τρεις διαφορετικές ηλικίες κονιάματος. Όπως φαίνεται, η πειραματική διασπορά των μετρήσεων μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής είναι μικρή για κάθε κλάση, επιτρέποντας για κάθε ηλικία τον ακριβή χαρακτηρισμό ενός δοκιμίου, βάσει

της τιμής της ταχύτητας παλμού. Αυτό δεν ισχύει στο ίδιο βαθμό για σκυρόδεμα, όπου σε όλες τις ηλικίες, διαδοχικές κλάσεις επικαλύπτονται, Σχ.2.14(β). Ως εκ τούτου η ταχύτητα δεν μπορεί να θεωρηθεί ικανό κυματικό χαρακτηριστικό για τη διάκριση ανάμεσα σε δοκίμια σκυροδέματος που διαφέρουν κατά 0.025 σε w/c, σε αντίθεση με το κονίαμα όπου κλάσεις που διαφέρουν κατά 0.05 είναι πλήρως διαχωρισμένες. Άλλα χαρακτηριστικά, όπως τα counts παρέχουν ακόμα λιγότερη αποδοτικότητα εφόσον χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα, βλ.Σχ.2.15(α) και (β) για κονίαμα και σκυρόδεμα αντίστοιχα.

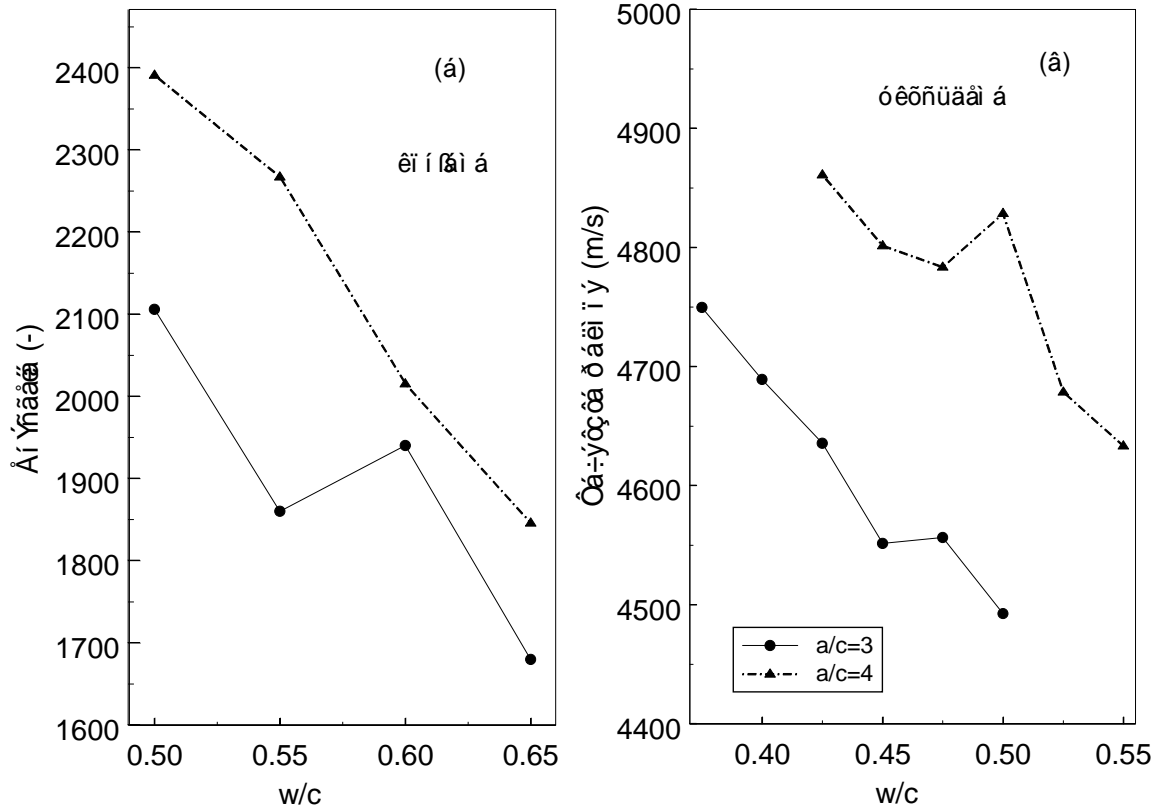


Σχ.2.14. Επίδραση w/c στην ταχύτητα παλμού κονιάματος και σκυροδέματος για διάφορες ηλικίες.



Σχ.2.15. Επίδραση w/c στον αριθμό υπερβάσεων κατωφλίου σημάτων κονιάματος και σκυροδέματος για διάφορες ηλικίες

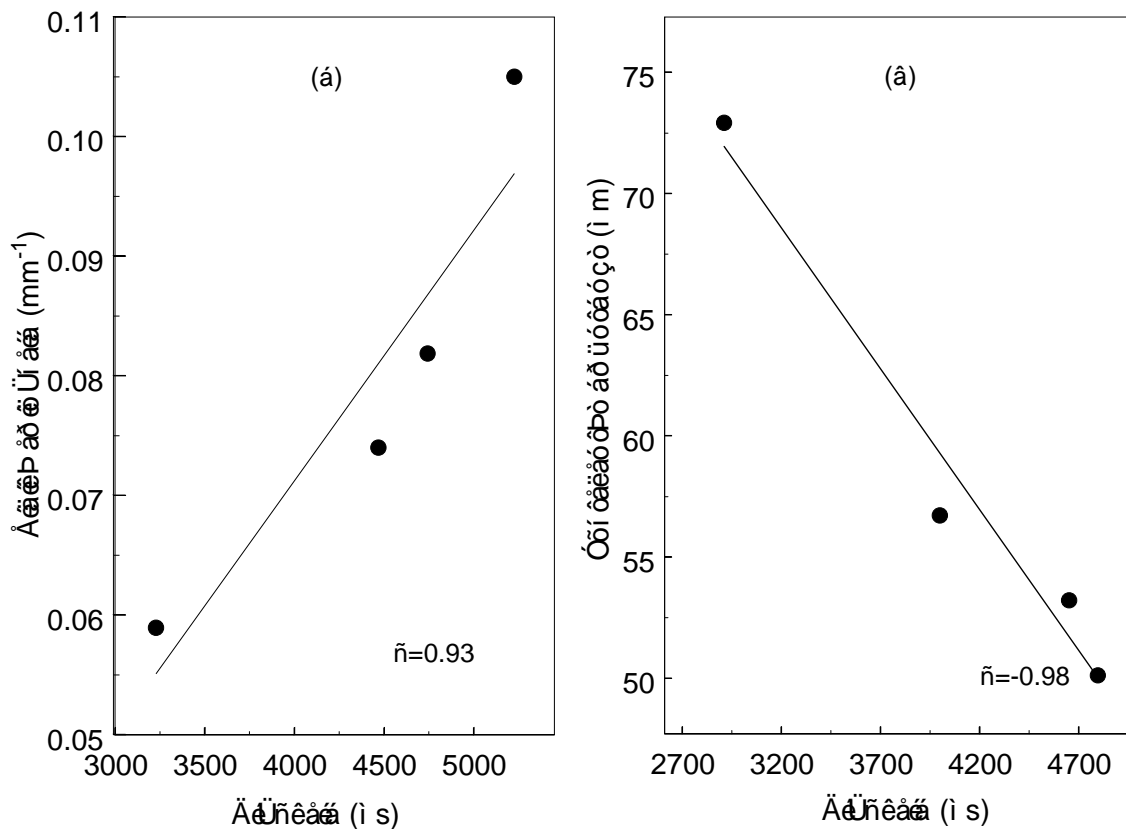
Η επίδραση της ποσότητας των αδρανών είναι επίσης εμφανής στο πλαίσιο της παρούσας πειραματικής μελέτης. Η μεταβολή του λόγου a/c από 3 σε 4 αποτυπώνεται στην αύξηση της ταχύτητα παλμού αλλά και την ενέργεια τόσο σημάτων κονιάματος όσο και σκυροδέματος, βλ.Σχ.2.16. Αυτή η αύξηση εν γένει συνδέεται με τις υψηλότερες τιμές μέτρου ελαστικότητας των αδρανών σε σχέση με την τιμμεντόπαστα, γεγονός που οδηγεί στην ενίσχυση των ιδιοτήτων του τελικού υλικού όσο αυξάνεται η ποσότητά τους. Στο Σχ.2.16(α) φαίνεται η επίδραση του a/c στην ενέργεια του σήματος κονιάματος για την ηλικία 28ημερών και στο 2.16(β) η επίδραση του λόγου a/c στην ταχύτητα σκυροδέματος με διάφορους w/c. Η διαφορά αυτή μεταφράζεται περίπου σε αύξηση κατά 7% κατ' όγκον σε αδρανή (από 60% σε 67%).



Σχ.2.16. Επίδραση a/c στην ενέργεια σημάτων κονιάματος (α) και ταχύτητας παλμού σκυροδέματος (β) για την ηλικία των 28 ημερών

Ως υποπερίπτωση μπορεί να αναφερθεί και η συσχέτιση με χαρακτηριστικά του πορώδους. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος πορώδες χρησιμοποιείται καταχρηστικά για τις εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα και δεν εμπεριέχει χαρακτηριστικά του διασυνδεδεμένου δικτύου που δημιουργείται από την απορρόφηση του νερού. Χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν με μικροσκοπία στο EKET και ακολουθώντας τα πρότυπα ASTM C-457, είναι η εκατοστιαία περιεκτικότητα σε πόρους (φυσαλίδες) αέρα, A(%), ο συντελεστής απόστασης L (spacing factor), ως έκφραση της μέσης απόστασης τυχαίου σημείου πάστας από πόρο και η ειδική επιφάνεια πόρων που είναι έκφραση του μεγέθους αυτού. Ορισμένες συσχετίσεις αυτών των παραμέτρων με χαρακτηριστικά των κυματομορφών ακολουθούν. Ενδεικτικά μπορεί να σημειωθεί ότι το ποσοστό αέρα A(%) επιβεβαιώνεται ότι παραμένει σταθερό σε όλες τις ηλικίες. Η ειδική επιφάνεια ωστόσο, μειώνεται γεγονός που μάλλον οφείλεται σε στερεά προϊόντα της ενυδάτωσης που παρεισφύουν και διαχωρίζουν τους υπάρχοντες

πόρους σε περισσότερους και μικρότερους. Ως εκ τούτου επέρχεται και μείωση του συντελεστή απόστασης με την ηλικία. Οι μεταβολές αυτές συντελούνται στο πλαίσιο της ενυδάτωσης και ως εκ τούτου, ο ρυθμός τους είναι υψηλότερος την πρώτη εβδομάδα, όπως άλλωστε συμβαίνει και με την αντοχή. Κατ' αυτόν τον τρόπο συνοδεύονται από αντίστοιχες μεταβολές των κυματικών χαρακτηριστικών, χωρίς η μορφή της συσχέτισης να είναι απολύτως σαφής αφού άλλωστε και το πλήθος των σημείων (μικροσκοπία σε 4 ηλικίες) δεν είναι διαφωτιστικό. Ενδεικτικά στο Σχ.2.17(α) παρουσιάζεται η συσχέτιση διάρκειας κυματομορφής κονιάματος με $w/c=0.60$ και $a/c=4$ με την ειδική επιφάνεια πόρων, ενώ στο (β) παρουσιάζεται συσχέτιση διάρκειας κυματομορφής με συντελεστή απόστασης για κονίαμα με $w/c=0.65$ και $a/c=4$.



Σχ.2.17. Συσχέτιση (α) ειδικής επιφάνειας πόρων και (β) συντελεστή απόστασης με διάρκεια κυματομορφής για κονίαμα $w/c=0.6$, $a/c=4$ και $w/c=0.65$, $a/c=4$ αντίστοιχα.

Για τις περιπτώσεις αυτές, και χωρίς να παρουσιάζει μικρό σφάλμα, γενικά πιο κατάλληλη μορφή συσχέτισης φαίνεται η γραμμική αφού ο συντελεστής συσχέτισης ρ λαμβάνει τιμές

σταθερά πάνω από 0.9. Το αν οι παράμετροι αυτές της μικροδομής είναι η κύρια αιτία για την διαφοροποίηση του κύματος ή αν απλώς συνοδεύουν την ανάπτυξη της ελαστικότητας που ίσως έχει πρωταρχικό ρόλο στην κυματική διάδοση δεν είναι σαφές. Μια γενικότερη θεωρητική προσέγγιση αναφορικά με τη εξάρτηση της κυματικής διάδοσης από τη μικροδομή του σκληρυμένου σκυροδέματος θα ακολουθήσει σε σχέση και με τη συμπεριφορά διασποράς του υλικού.

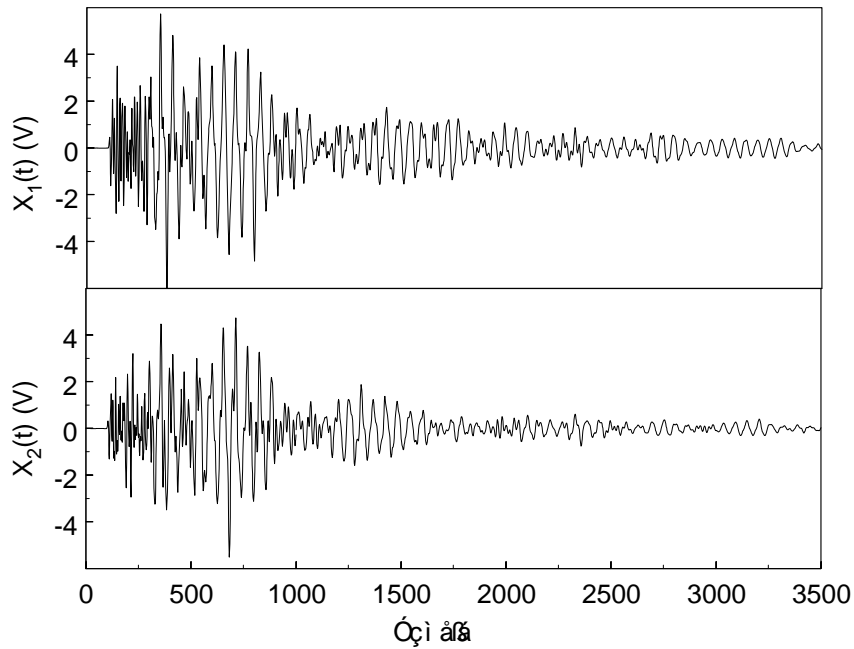
2.5 Χαρακτηρισμός σκυροδέματος ως προς το λόγο w/c

Για το αρχικό πρόβλημα, δηλαδή το διαχωρισμό μεταξύ δοκιμών διαφορετικής σύστασης (w/c), όπως διαπιστώθηκε παραπάνω, η χρήση μιας παραμέτρου της κυματομορφής, όπως π.χ. τα counts, δεν αποδείχθηκε αποτελεσματική όπως σε άλλες περιπτώσεις [6]. Ωστόσο, εφόσον κάθε δοκίμιο μπορεί να παρασταθεί ως ένα διάλυμα με n συνιστώσες οι οποίες είναι τα κυματικά του χαρακτηριστικά, πιο εξεζητημένη πολυπαραμετρική ανάλυση είναι πιθανόν να οδηγήσει σε βελτιωμένα αποτελέσματα σε σχέση με την ταξινόμηση. Υπό αυτές τις συνθήκες είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν τόσα χαρακτηριστικά όσα εξασφαλίζουν την επιτυχή ταξινόμηση. Αυτή η διαδικασία εμπεριέχει την εξαγωγή χαρακτηριστικών όχι μόνο από το πεδίο του χρόνου, αλλά και από μετασχηματισμούς όπως το πεδίο συχνοτήτων και η ετεροσυσχέτιση. Η συγκεκριμένη παράμετρος που έγινε αντικείμενο παρατήρησης και τελικά οδήγησε στην μεθοδολογία που αναπτύσσεται παρακάτω, είναι η, σε πολλές, περιπτώσεις, ομοιότητα των κυματομορφών που προέρχονται από δοκίμια όμοιας σύστασης.

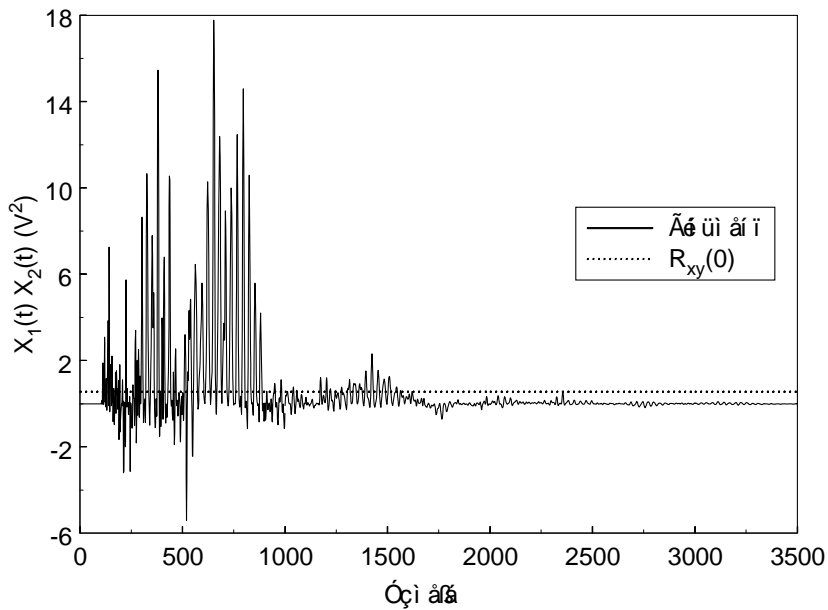
2.5.1 Χρήση «ετεροσυσχέτισης»

Στο Σχ.2.18 παρατίθενται δύο κυματομορφές, έστω $X_1(t)$ και $X_2(t)$, από δυο διαφορετικά δοκίμια που όμως έχουν τις ίδιες αναλογίες $w/c=0.375$ και $a/c=3$ για την ηλικία των 2 ημερών. Η ομοιότητα των δύο αυτών σημάτων είναι εμφανής. Το γινόμενο τους σημείο προς σημείο έχει το σχήμα της καμπύλης που φαίνεται στο Σχ.2.19. Υπενθυμίζεται ότι η μέση τιμή της καμπύλης είναι η τιμή της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης για μηδενική καθυστέρηση, $R_{xy}(0)$. Παρατηρείται ένα μεγάλο μέρος θετικού εμβαδού κάτω από την καμπύλη και ένα μικρότερο, αρνητικού. Αν, σε άλλη περίπτωση, οι κυματομορφές ανήκουν σε δοκίμια διαφορετικών κλάσεων, το γινόμενο τους οδηγεί σε σχετικά μειωμένο θετικό

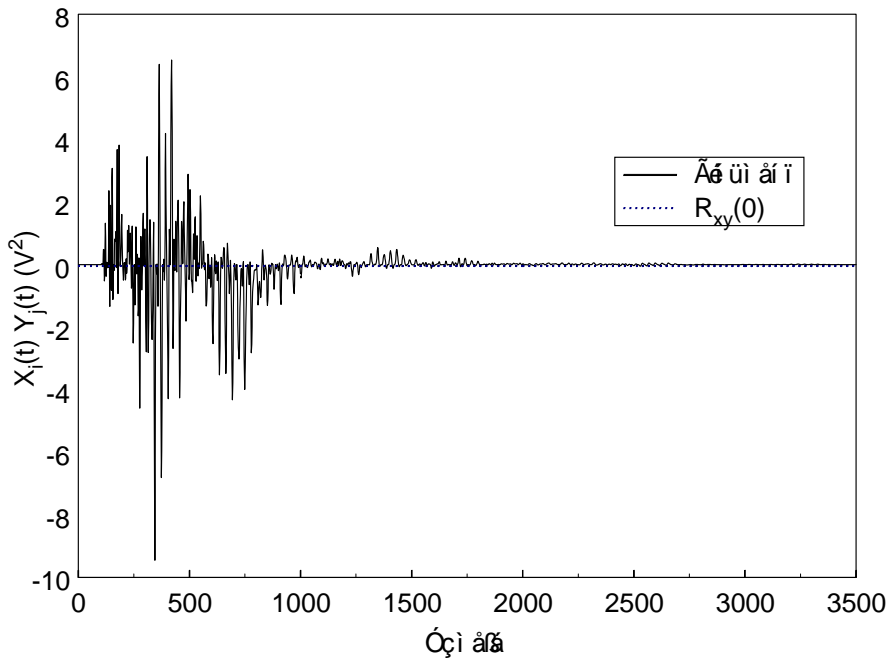
εμβαδό και αυξημένο αρνητικό, βλ. Σχ.2.20 όπου το γινόμενο προέρχεται από κυματομορφές δοκιμίων $w/c=0.45$ και 0.40 σε ηλικία 2 ημερών.



Σχ.2.18. Κυματομορφές από δύο δοκίμια σκυροδέματος με $w/c=0.375$ σε ηλικία 2 ημερών



Σχ.2.19. Γινόμενο των κυματομορφών του Σχ.2.18



Σχ.2.20. Γινόμενο κυματομορφών δοκιμίων w/c=0.40 και 0.45 ηλικίας 2 ημερών.

Αυτό δείχνει ότι κυματομορφές από το ίδιο υλικό βρίσκονται σε «φάση», με τις θετικές κορυφές της μιας να συμπίπτουν χρονικά με της άλλης, όπως το ίδιο συμβαίνει με τις αρνητικές. Έτσι το γινόμενό τους οδηγεί σε υψηλές θετικές τιμές, σε αντίθεση με το γινόμενο κυματομορφών διαφορετικής σύστασης που δεν παρατηρείται πάντα αυτός ο «συγχρονισμός». Για την «ποσοτικοποίηση» της πληροφορίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν η μέση τιμή $R_{xy}(0)$ και οι απόλυτες τιμές του θετικού και αρνητικού εμβαδού οι οποίες όμως επηρεάζονται από το εύρος των κυματομορφών. Συγκεκριμένα, αν κυματομορφή δοκιμίου w/c=0.375 που, όπως έχει αναπτυχθεί, παρουσιάζει υψηλότερο εύρος και ενέργεια από των άλλων κλάσεων, πολλαπλασιαστεί με κυματομορφή 0.45, μπορεί ακόμα και με μέτριο συγχρονισμό να οδηγήσει σε υψηλές τιμές θετικού εμβαδού που είναι συγκρίσιμες με το θετικό εμβαδό γινομένου δύο κυματομορφών w/c=0.45. Κατ' αυτόν τον τρόπο, πιο αντιπροσωπευτική και εν τέλει πιο επιτυχής αποδείχτηκε η εφαρμογή του απόλυτου λόγου θετικού προς αρνητικό εμβαδό, R_{pn} (Ratio of Positive to Negative area). Στις περιπτώσεις των Σχ.2.19 και 2.20 ο λόγος αυτός λαμβάνει τιμές 9.19 και 0.69 αντίστοιχα, δείχνοντας

καθαρά ότι η πρώτη περίπτωση αφορά σε δοκίμια ίδιας σύστασης και η άλλη σε διαφορετικής.

Για μια συγκεκριμένη ηλικία, π.χ. 2 ημερών και όταν μία άγνωστη κυματομορφή παρουσιάζεται προς ταξινόμηση, αυτή πολλαπλασιάζεται με την «τυπική» κυματομορφή κάθε κλάσης και υπολογίζεται ο λόγος R_{pn} . Ο λόγος αυτός λαμβάνει συνήθως τιμές πάνω από 10 έως και 100 για όμοια σύσταση, ενώ για κυματομορφές από άλλη σύσταση πολλές φορές πέφτει κάτω από τη μονάδα. Η κυματομορφή κατατάσσεται στην κλάση με την τυπική κυματομορφή της οποίας παρουσιάζει το μέγιστο R_{pn} . Η επιτυχία ορίζεται ως το ποσοστό των επιτυχώς ταξινομημένων κυματομορφών από το πλήθος των 53..

Η τυπική κυματομορφή κάθε κλάσης δημιουργείται από όλες τις ξεχωριστές κυματομορφές αυτής ως ο μέσος όρος αυτών, περιέχει δηλαδή πληροφορία από όλες. Π.χ. η τυπική κυματομορφή της κλάσης $w/c=0.375$ για την ηλικία των 2 ημερών είναι ο μαθηματικός μέσος όρος των 14 κυματομορφών που καταγράφηκαν από τα δοκίμια αυτής της σύστασης σε αυτήν την ηλικία. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε σε 4 συστάσεις σκυροδέματος (w/c 0.375, 0.40, 0.425, 0.45) που ο αριθμός κυματομορφών ήταν τουλάχιστον 12 ανά κλάση. Με αυτό τον τρόπο κατά μια έννοια «συμπιέζεται» η πληροφορία από όλα τα δοκίμια μιας κλάσης και η τελική κυματομορφή διαμορφώνεται από το εύρος και τη φάση όλων των επιμέρους κυματομορφών.

Η εφαρμογή της διαδικασίας αυτής σε όλες τις ηλικίες οδήγησε γενικά σε μεγάλα ποσοστά αναγνώρισης, όπως φαίνεται στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 2.2. Το υψηλότερο ποσοστό παρουσιάζεται την 7η μέρα ενώ το μικρότερο την 28η. Πάντως η αναγνώριση σύστασης κατά τη διάρκεια της πρώτης εβδομάδας, αγγίζει το 95%.

Πίνακας2.2. Ποσοστό (%) επιτυχίας ανά κριτήριο και ηλικία

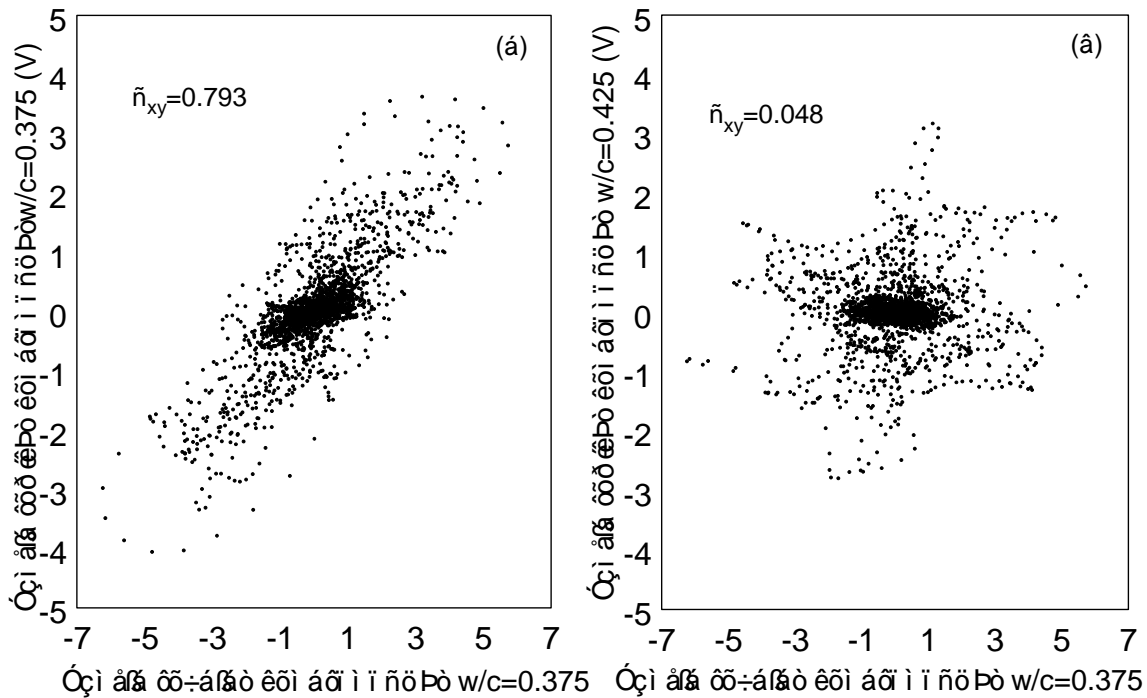
Age	R_{pn}	ρ_{xy}	γ_{xy}^2
2	92.5	94.3	98.1
4	94.3	94.3	96.2
7	96.2	96.2	94.3
14	90.6	94.3	92.4
28	84.9	86.7	96.2
60	90.6	94.3	96.2
90	92.5	92.5	100

Σημειώνεται ότι από το πλήθος των 15360 σημείων κάθε κυματομορφής χρησιμοποιήθηκαν τα πρώτα 3500, που αντιστοιχούν σε 1.75ms, καθώς για χρόνους μεγαλύτερους το σήμα παρουσιάζει πολύ μικρό εύρος και δεν επηρεάζει την τιμή R_{pn} .

2.5.2 Χρήση του συντελεστή συσχέτισης

Η επιτυχία του R_{pn} , αποδίδεται όπως αναφέρθηκε στο λεγόμενο «συγχρονισμό» των κυματομορφών που προέρχονται από την ίδια σύσταση. Είναι γνωστό όμως ότι τέτοιου είδους ομοιότητες ανάμεσα σε δύο συναρτήσεις $X(t)$ και $Y(t)$ οδηγούν και σε υψηλές τιμές του «συντελεστή συσχέτισης» μεταξύ των δύο συναρτήσεων. Ο συντελεστής συσχέτισης, όπως ορίζεται στην (1) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση του «συγχρονισμού» δύο κυματομορφών και ως εκ τούτου εναλλακτικά του λόγου R_{pn} , στη μεθοδολογία ταξινόμησης. Όπως φαίνεται στο Σχ.2.21, ισχυρότερη συσχέτιση παρατηρείται μεταξύ σημείων κυματομορφών όμοιας σύστασης (α) με $\rho_{xy}=0.79$ συγκριτικά με το συντελεστή συσχέτισης ανάμεσα σε κυματομορφές διαφορετικής σύστασης (β) όπου $\rho_{xy}=0.048$

Κατ' αυτόν τον τρόπο, υπολογίζοντας το ρ_{xy} , ανάμεσα σε μια τυχαία κυματομορφή και τις τυπικές κάθε κλάσης, η κυματομορφή κατατάσσεται στην κλάση με την τυπική της οποίας εμφανίζει τη μεγαλύτερη συσχέτιση, όπως ανάλογα περιγράφηκε προηγουμένως για το λόγο θετικού/αρνητικού εμβαδού. Το ποσοστό επιτυχίας του συντελεστή συσχέτισης ρ_{xy} αν και εφάμιλλο του λόγου R_{pn} , εμφανίζεται ελαφρώς αυξημένο, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα2.2.



Σχ.2.21. Διάγραμμα συσχέτισης κυματομορφής w/c=0.375 με τις τυπικές των κλάσεων (α) w/c=0.375 και (β) w/c=0.425

2.5.3 Χρήση της συνάρτησης συνοχής (coherence)

Οι ως άνω προσεγγίσεις ταξινόμησης βασίζονται σε χαρακτηριστικά του πεδίου του χρόνου. Με σκοπό την άντληση πληροφορίας από το πεδίο συχνοτήτων εξετάστηκε η καταλληλότητα της χρήσης της συνάρτησης συνοχής γ_{xy} (coherence) ως κριτήριο για την ταξινόμηση κυματομορφών. Αντίστοιχη προσέγγιση έχει ακολουθηθεί σε προβλήματα ταξινόμησης σημάτων ακουστικής εκπομπής ως προς το μηχανισμό θραύσης σε δοκιμές εξόλκωσης ήλου σε δοκίμια σκυροδέματος [7], αλλά και για την εξακρίβωση της αξιοπιστίας σημάτων επιφανειακών κυμάτων σε σκυρόδεμα [8] αφού υψηλές τιμές γ_{xy} μεταξύ της εισόδου και εξόδου καταδεικνύουν την ομοιότητα αυτών, με ασήμαντη συνεισφορά θορύβου.

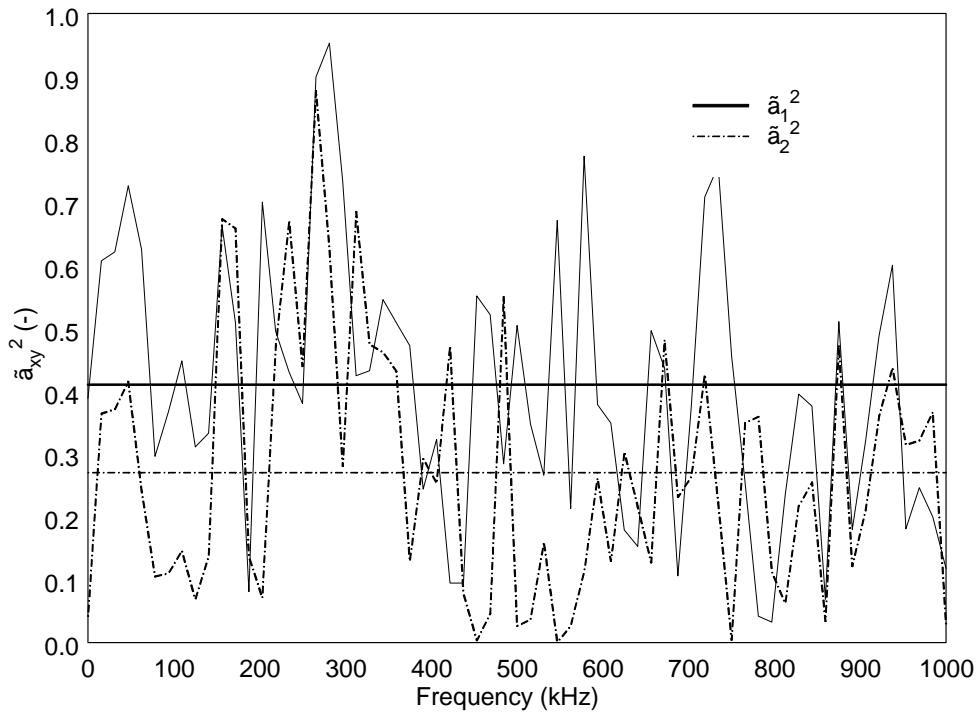
Η συνάρτηση συνοχής, γ_{xy} ορίζεται ως εξής:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)} \quad 0 \leq \gamma_{xy}^2(f) \leq 1 \quad (2.2)$$

όπου $G_{xy}(f)$ είναι το φάσμα της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης δύο συναρτήσεων $X(t)$ και $Y(t)$ και $G_{xx}(f)$, $G_{yy}(f)$ είναι τα φάσματα των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης των $X(t)$ and $Y(t)$ αντίστοιχα και γενικά θεωρείται πιο ισχυρό εργαλείο από το συντελεστή συσχέτισης σε διάφορες εφαρμογές [9]. Η συνάρτηση συνοχής είναι ενδεικτική της ομοιότητας του περιεχομένου συχνοτήτων δύο σημάτων με αποτέλεσμα να αποδειχθεί ακόμα πιο ισχυρό εργαλείο στην ταξινόμηση σκυροδέματος. Στο Σχ.2.22 παρουσιάζεται η συνάρτηση συνοχής μεταξύ μιας κυματομορφής 0.375 με την τυπική της ίδιας κλάσης αλλά και με την τυπική της κλάσης 0.40. Η μέση τιμή των συναρτήσεων σε όλο το εύρος του φάσματος (0-1MHz) είναι σαφώς υψηλότερη για τις κυματομορφές ίδιας σύστασης, συγκεκριμένα 0.407 και 0.274 για όμοιες και διαφορετικές συστάσεις.

Ως εκ τούτου, οι μέσες τιμές των συναρτήσεων συνοχής, μιας τυχαίας κυματομορφής με τις τυπικές κάθε κλάσης υπολογισμένες μέσω εντολής σε περιβάλλον MATLAB οδήγησε στην επιτυχία ταξινόμησης που φαίνεται στον Πίνακα2.2 (τελευταία στήλη).

Όπως φαίνεται η συνάρτηση συνοχής οδήγησε σε πιο επιτυχή αποτελέσματα από τα άλλα κριτήρια, με ποσοστό επιτυχίας 100% για την ηλικία των 90 ημερών και πάνω από 96% για την πρώτη εβδομάδα.



Σχ.2.22. Συνάρτηση συνοχής κυματομορφών ίδιας (γ_1^2) και διαφορετικής σύστασης (γ_2^2)

Τα δοκίμια σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν για την ταξινόμηση αυτή, παρασκευάστηκαν σε δύο περιόδους. Την πρώτη, το έτος 2000, παρασκευάστηκαν από 4 δοκίμια για κάθε σύσταση. Κατόπιν, το έτος 2001, παρασκευάστηκαν τα υπόλοιπα με σκοπό την αύξηση της βάσης δεδομένων και συγκεκριμένα δόθηκε έμφαση στις κλάσεις w/c από 0.375 έως 0.45. Έτσι ο συνολικός πληθυσμός ανήλθε σε 13 δοκίμια για την κλάση 0.375, 12 για τις κλάσεις 0.40 και 0.425 και 16 για την κλάση 0.45. Η κατάρτιση κάθε κλάσης από δύο υποπληθυσμούς οδήγησε σε διαφοροποίηση αντοχής ανάμεσα σε αυτούς ακόμα και αν περιείχαν την ίδια σύσταση έως και 12% στην ηλικία των 28 ημερών και σε ακόμα μεγαλύτερη διακύμανση σε κλασσικά χαρακτηριστικά AU. Παρότι αυτό θα ήταν λογικό να δυσχεράνει την ταξινόμηση, τα κριτήρια που περιγράφηκαν παραπάνω αποδείχθηκε ότι δεν επηρεάστηκαν από τη διακύμανση αυτή.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, με σταθερές άλλες παραμέτρους σύστασης του σκυροδέματος, όπως λόγος a/c, μέγεθος και είδος αδρανών, τύπος τσιμέντου, ο λόγος w/c μπορεί να προσδιοριστεί αξιόπιστα, παρά την ύπαρξη ακόμα και παρασκευαστικών διαφοροποιήσεων.

Συνάγεται λοιπόν, ότι η χρήση της παραπάνω μεθοδολογίας με τα συγκεκριμένα κριτήρια, είναι απολύτως ενθαρρυντική, παρότι ο πληθυσμός των δοκιμών είναι στατιστικά μικρός για την υιοθέτηση πρακτικών διαδικασιών για τον προσδιορισμό του λόγου w/c. Ωστόσο αυτά ήταν τα πιο αποδοτικά χαρακτηριστικά για την σωστή ταξινόμηση των δοκιμών σκυροδέματος των συγκεκριμένων πειραματικών φάσεων. Σημασία έχει η διαδικασία σύμφωνα με την οποία ο έλεγχος ενός μικρού αλλά ικανοποιητικού πληθυσμού δοκιμών γνωστής σύστασης θα αποτελέσει οδηγό για τον χαρακτηρισμό δοκιμών άγνωστης σύστασης. Πιστεύεται ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία θα μπορούσε να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο στην εκτίμηση ποιότητας του σκυροδέματος εφόσον αυξηθεί η βάση γνωστών δεδομένων τόσο σε πληθυσμό όσο και σε όλο το εφαρμόσιμο στην πράξη εύρος τιμών w/c.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επειδή τα δοκίμια παρασκευάζονταν μακριά από τον τόπο μη καταστροφικών δοκιμών και μεσολαβούσε η μεταφορά τους δεν ήταν εφικτός έλεγχος νωρίτερα από την πρώτη μέρα. Ωστόσο ο συγκεκριμένος έλεγχος θεωρητικά μπορεί να γίνει μόλις το υλικό έχει αποκτήσει την απαιτούμενη δυσκαμψία για τη στερέωση των αισθητήρων, δηλαδή ακόμα και στις 12 ώρες μετά την ανάμειξη ή και νωρίτερα.

Βιβλιογραφία

- [1] S. Popovics, Analysis of the Concrete Strength versus Ultrasonic Pulse Velocity Relationship, *Materials Evaluation* 59 (2) (2001) 123
- [2] A. M. Neville, *Properties of concrete*. London: Longman, 1995
- [3] M. F. Kaplan, The effects of age and water/cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength, *Mag Con Res* 11 (32) (1959) 85-92
- [4] D. A. Anderson, R. K. Seals, Pulse Velocity as a Predictor of 28- and 90- Day Strength, *ACI J* 78-9 (1981) 116-122
- [5] R. Jones, Testing of concrete by ultrasonic-pulse technique, *Proceedings of the thirty-second annual meeting, Highway Research Board, Washington, 13-16 Jan 1953*
- [6] A. Vary, The Acousto-Ultrasonic Approach, in: J. C. Duke (Ed.), *Acousto-Ultrasonics: Theory and Application*, Plenum Pub Corp, 1988
- [7] C. Grosse, H. Reinhardt, T. Dahm, Localization and classification of fracture types in concrete with quantitative acoustic emission measurement techniques, *NDT&E INT*, 30 (4) 1997 223-230
- [8] L. J. Jacobs, J. O. Owino, Effect of aggregate size on attenuation of Rayleigh surface waves in cement-based materials, *J. Eng. Mech.-ASCE*. 126 (11) (2000) 1124-1130
- [9] J. S. Bendat, A. G. Piersol, *Engineering applications of correlation and spectral analysis*, 2nd edition, Wiley, New York, 1993

Παράρτημα Α

Πίνακας Α2.1 Κοκομετρία των αδρανών (αθροιστικό ποσοστό % διερχόμενα μέσω του ανοίγματος).

ASTM E11-87	Μέγεθος (mm)	Άμμος	Λεπτά αδρανή	Χονδρά αδρανή
1 ½"	37.5	100.0	100.0	100.0
1"	25.0	100.0	100.0	98.5
½"	12.5	100.0	93.3	8.9
3/8"	9.5	100.0	69.4	1.4
No4	4.75	99.9	8.0	0.7
No8	2.36	83.2	1.3	0.0
No16	1.18	56.1	1.1	0.0
No30	.6	38.5	0.0	0.0
No50	.3	27.6	0.0	0.0
No60	.25	25.1	0.0	0.0
No200	.075	14.2	0.0	0.0

3. Έλεγχος νωπού υλικού

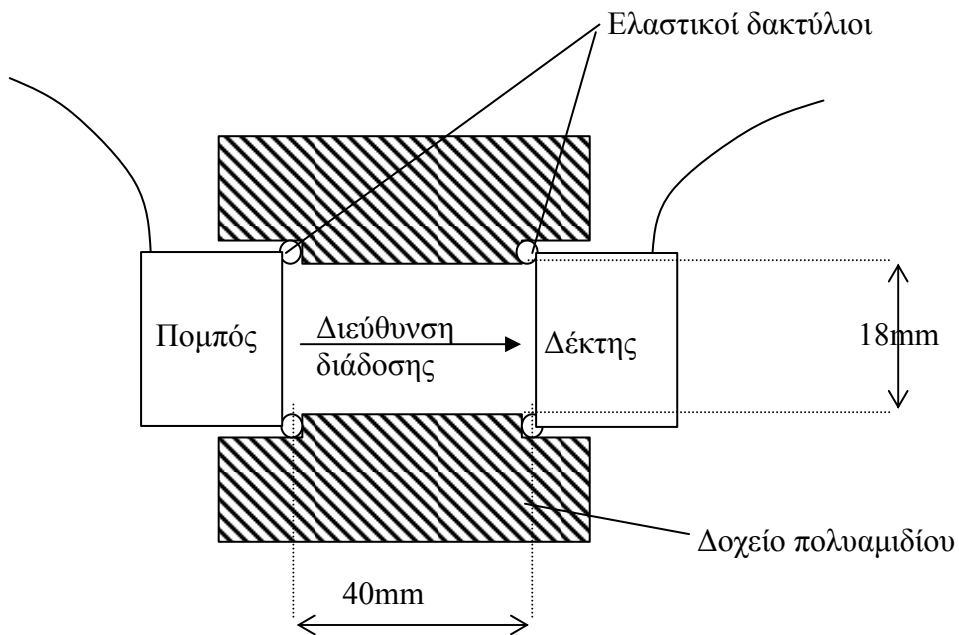
Όπως αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η χρήση συγκεκριμένων παραμέτρων καταδεικνύει την ομοιότητα σημάτων ίδιας κλάσης και οδηγεί σε επιτυχή ταξινόμηση κυματομορφών σκληρυμένου σκυροδέματος. Με βάση την αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας, σχεδιάστηκε σειρά πειραμάτων για το χαρακτηρισμό νωπού υλικού, αρχικά τσιμεντόπαστας και κατόπιν κονιάματος, αφού άλλωστε, όπως αναπτύχθηκε, ο έλεγχος του υλικού στη νωπή μορφή του είναι μεγίστης σημασίας [1-3].

3.1 Τσιμεντόπαστα

Η νέα διάταξη παρουσιάζει ομοιότητες με αυτή του ελέγχου του στερεού υλικού, αφού χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι αισθητήρες και κάρτα δειγματοληψίας. Ωστόσο, ο ρυθμός δειγματοληψίας ορίστηκε σε 10MHz, αφού σε προκαταρκτική φάση διερευνήθηκε η χρήση αισθητήρα ευρέως φάσματος, που όμως δεν αποδείχτηκε αρκετά ευαίσθητος για την καταγραφή σήματος μέσω της τσιμεντόπαστας. Επιπλέον, συμπεριελήφθη στην πειραματική διάταξη ένα διάφανο δοχείο πολυαμιδίου με κυλινδρική κοιλότητα μέσα στην οποία τοποθετείται το υλικό προς εξέταση, βλ. Σχ.3.1. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στις δύο εξόδους και σε άμεση επαφή με το υλικό. Ένας απλώς σφικτήρας και δύο ελαστικοί δακτύλιοι (O-rings) εξασφαλίζουν τη στεγανότητα κατά τη διάρκεια του πειράματος και ελαχιστοποιούν τις απώλειες ενέργειας κύματος μέσω της μάζας του πολυαμιδίου. Αυτό επιβεβαιώνεται καθώς με τη συσκευή κενή, ο χρόνος άφιξης των σημάτων αντιστοιχεί στην ταχύτητα ήχου στον αέρα.

Του σχεδιασμού της συγκεκριμένης διάταξης, προηγήθηκαν μετρήσεις σε τσιμεντόπαστα, όπου στη θέση της κοιλότητας πολυαμιδίου χρησιμοποιήθηκε ποτιστικό λάστιχο. Οι αισθητήρες τοποθετούνταν σφιχτά στις ελεύθερες άκρες του ελαστικού ενώ έγιναν μετρήσεις με διάφορα μήκη που παρουσίαζαν μειωμένη ενέργεια, όπως είναι φυσικό, όσο οι αισθητήρες απομακρύνονταν μεταξύ τους. Η απόσταση που επελέγη ήταν αυτή των 40mm. Πρέπει να σημειωθεί ότι μετρήσεις σε τσιμεντόπαστα με τους συγκεκριμένους ή άλλους αισθητήρες ακουστικής εκπομπής δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθούν σε διάταξη ανοιχτού τύπου, όπως αυτή του κονιάματος που παρουσιάζεται παρακάτω. Από τη

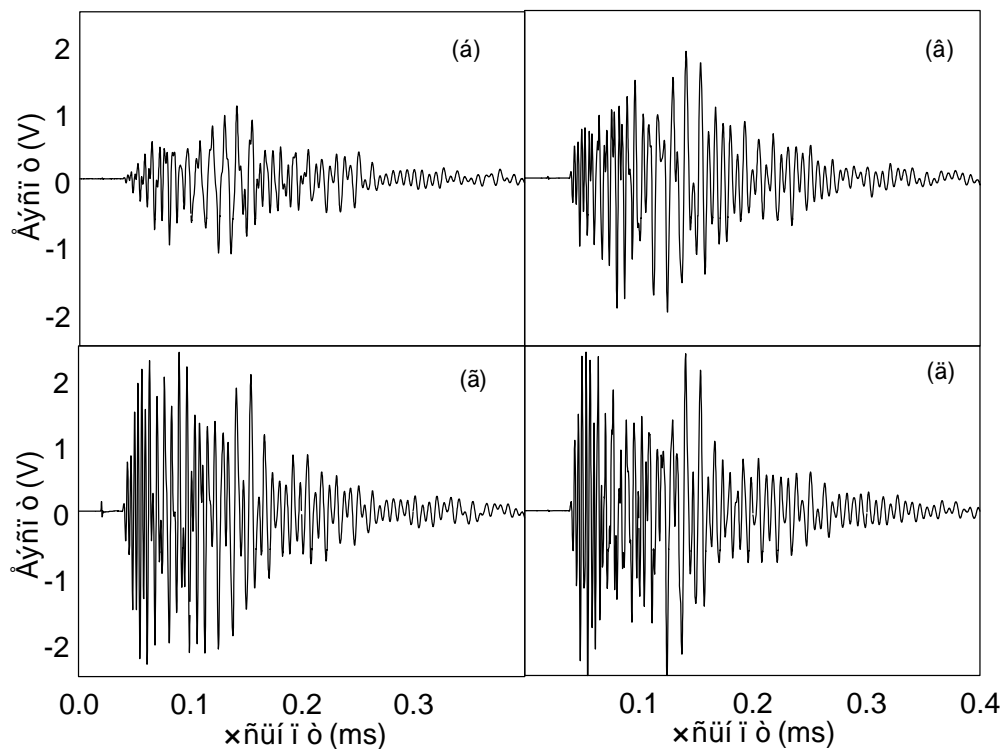
διερεύνηση που έγινε, καταδείχτηκε η ανάγκη επιβολής κάποιας εξωτερικής πίεσης που για τη διάταξη του Σχ.3.1 επιτυγχάνεται μέσω των ελαστικών δακτυλίων και του σφιγκτήρα.



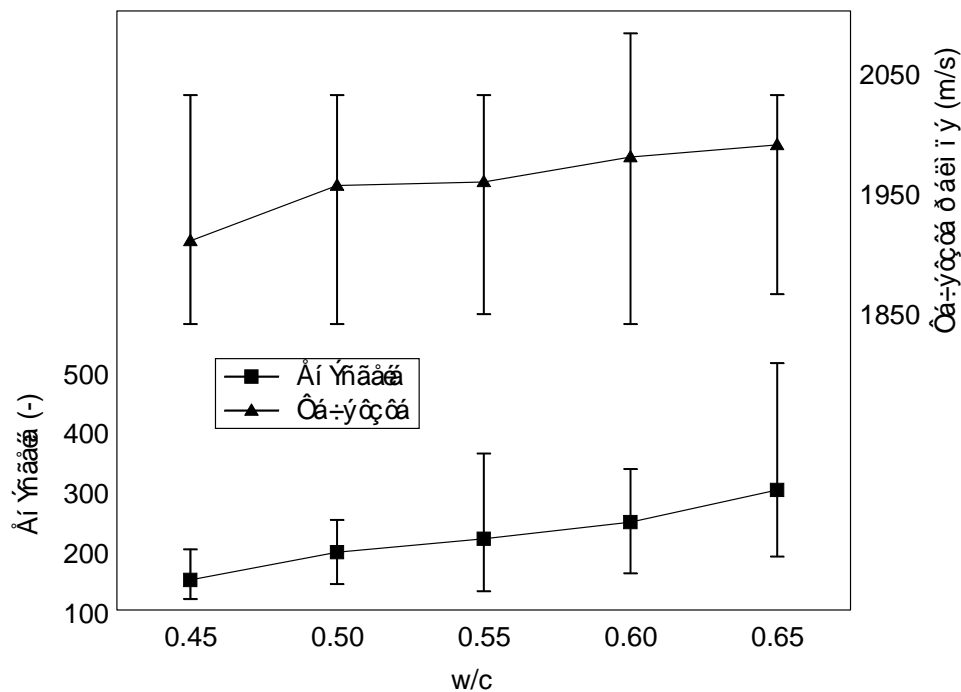
Σχ.3.1 Διάταξη ελέγχου τσιμεντόπαστας

Τα αναμείγματα περιείχαν τσιμέντο υψηλής αντοχής και νερό σε αναλογίες w/c από 0.45 έως 0.65 ανά 0.05. Τα υλικά ζυγίζονται χωριστά με ακρίβεια 0.1mg αναμειγνύονται και ανακατεύονται για περίπου 1 λεπτό. Κατόπιν, η τσιμεντόπαστα τοποθετείται στην κοιλότητα και δονείται περίπου για 1min με αποτέλεσμα την εμφάνιση φυσαλίδων στο πάνω μέρος της διάφανης κοιλότητας και οι μετρήσεις αρχίζουν άμεσα. Κάθε κλάση περιείχε 10 δοκίμια και μετρήσεις κατεγράφησαν σε χρόνο 3.5 και 5.5min μετά την ανάμειξη. Οι κυματομορφές και για τις δύο χρονικές στιγμές δεν παρουσιάζουν αξιόλογες διαφορές και ως εκ τούτου για το χαρακτηρισμό χρησιμοποιήθηκαν αυτές των 3.5min.

Οι παράμετροι που μετρήθηκαν είναι ίδιες με αυτές που αναφέρονται και στον έλεγχο του στερεού υλικού. Τυπικές κυματομορφές φαίνονται στο Σχ.3.2 για τέσσερις διαφορετικούς λόγους w/c. Σε γενικές γραμμές η ενέργεια του παλμού φαίνεται να αυξάνει με την αύξηση του w/c, ενώ αντιθέτως ο χρόνος διάδοσης μειώνεται, όπως φαίνεται στο Σχ.3.3.



Σχ.3.2. Κυματομορφές τσιμεντόπαστας με w/c (α) 0.45, (β) 0.55, (γ) 0.60, (δ) 0.65



Σχ.3.3. Επίδραση λόγου w/c στην ενέργεια και ταχύτητα παλμού νωπής τσιμεντόπαστας.

Οι τάσεις αυτές όμως παρουσιάζουν μεγάλη πειραματική διασπορά και μικρή ισχύ ταξινόμησης μια και όπως φαίνεται όχι μόνο γειτονικές αλλά και απομακρυσμένες κλάσεις αλληλοκαλύπτονται αφού υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής μέσα σε κάθε κλάση. Λόγω προβληματικής επαναληψιμότητας λοιπόν, συμπεράσματα για την επίδραση της σύστασης στην κυματική διάδοση αλλά και εξήγηση οποιασδήποτε συμπεριφοράς δεν επιχειρούνται από τα αποτελέσματα αυτά αλλά δίνονται σε επόμενο κεφάλαιο με πιο κατάλληλες μετρήσεις μεταβλητής συχνότητας.

Ωστόσο, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ταξινόμηση του στερεού υλικού ως προς το λόγο w/c, παρέχει αποτελέσματα που μπορούν να χαρακτηριστούν ενθαρρυντικά, οδηγώντας σε επιτυχή ταξινόμηση της τάξης του 80%. Και σε αυτήν την περίπτωση η τυπική κυματομορφή υπολογίζεται ως ο μέσος όρος όλων των κυματομορφών κάθε σύστασης. Για κάθε «άγνωστη» προς ταξινόμηση κυματομορφή, υπολογίζονται οι τιμές R_{pn} , ρ και γ . Η επιτυχία της ταξινόμησης είναι ενθαρρυντική αν και όχι συγκρίσιμη με του στερεού. Το

ποσοστό (%) της επιτυχίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1 ανά κλάση και κριτήριο. Είναι φανερό ότι η συνάρτηση συνοχής εξασφαλίζει τα καλύτερα αποτελέσματα, ούσα πιο ευαίσθητη σε κυματικά χαρακτηριστικά τυπικά κάθε κλάσης. Είναι επίσης σαφές ότι δοκίμια με $w/c=0.45$ αναγνωρίζονται πιο εύκολα (έως και 100% με τη συνάρτηση συνοχής) από άλλα που με χρήση οποιουδήποτε κριτηρίου εμφανίζουν αναγνώριση κάτω του 80%. Ωστόσο, το ποσοστό επιτυχίας, αφήνει σαφή περιθώρια για βελτίωση αναγνώρισης τσιμεντόπαστας με αύξηση του πληθυσμού. Το επόμενο βήμα είναι λογικά η ταξινόμηση υλικού που περιέχει και αδρανή (σε πρώτο στάδιο άμμο).

Πίνακας 3.1. Συστάσεις κονιάματος και σκυροδέματος που ελέγχθηκαν

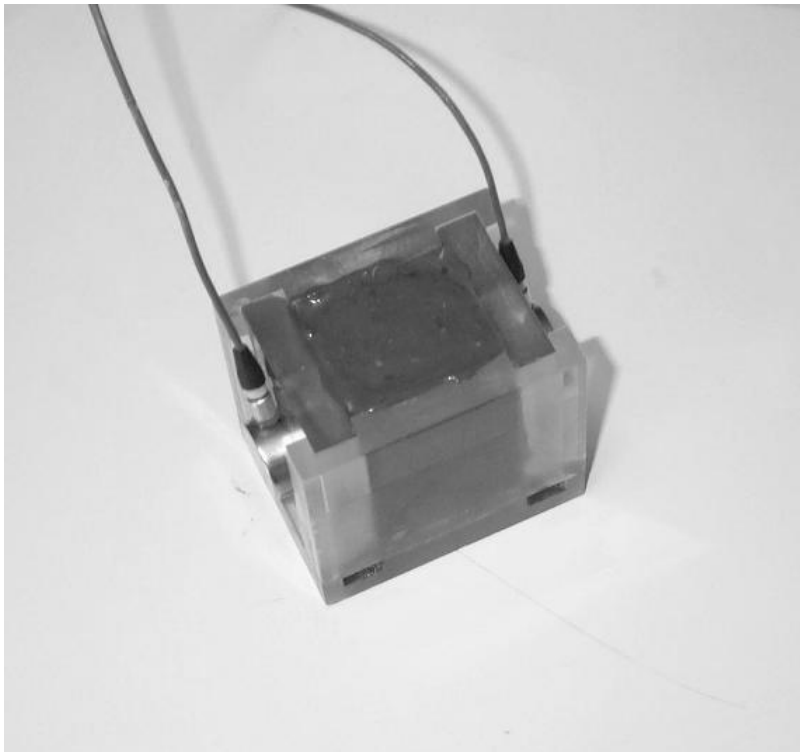
w/c	R_{pn}	ρ_{xy}	γ_{xy}^2
0.45	90	80	100
0.50	70	60	70
0.55	80	50	80
0.60	60	50	70
0.65	60	60	80
Σύνολο	72	60	80

3.2 Κονίαμα

Ο έλεγχος του κονιάματος έγινε με τη βοήθεια της διάταξης του Σχ.3.4. Οι ίδιοι αισθητήρες (PAC R6) χρησιμοποιήθηκαν με είσοδο κρουστικού παλμού ενώ ο ρυθμός δειγματοληψίας ορίστηκε στα 8MHz. Το δοχείο αποτελείται από plexi-glass ενώ η απόσταση των αισθητήρων είναι 28mm. Οι αισθητήρες τοποθετούνται σφιχτά στις οπές και είναι σε απ' ευθείας επαφή με το υλικό. Απουσία του υλικού ο χρόνος άφιξης του σήματος αντιστοιχεί στην ταχύτητα διάδοσης του αέρα, γεγονός που δείχνει όπως και πριν ότι η όποια ενέργεια διαρρέει και διαδίδεται μέσω των τοιχωμάτων δεν είναι αρκετή για να αλλοιώσει το αποτέλεσμα (μικρότερη της τάσης κατωφλίου).

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Π 32.5 και η άμμος ασβεστολιθική. Τα υλικά ζυγίζονται χωριστά, αναμειγνύονται και αναδεύονται για 1min. Κατόπιν το υλικό τοποθετείται στο δοχείο και δονείται για άλλο ένα λεπτό με μικρή ράβδο ώστε να εμφανιστούν φυσαλίδες στην επιφάνεια του κονιάματος. Σε αυτό το σημείο πρέπει να

αναφερθεί ότι οι κανονισμοί παρασκευής και χύτευσης σκυροδέματος προβλέπουν τη διαδικασία «δόνησης» που γίνεται είτε σε δονητική τράπεζα, εφόσον πρόκειται για δοκίμια, είτε με ειδική συσκευή που διεισδύει στον όγκο του σκυροδέματος στο έργο. Σκοπός της ενέργειας αυτής είναι αφενός μεν το παχύρρευστο υλικό να καταλάβει όλο τον όγκο της μήτρας (ξύλοτυπου) ώστε να μην υπάρξουν κενοί θύλακες, αφετέρου δε η διευκόλυνση της ανάδυσης των φυσαλίδων στην ελεύθερη επιφάνεια. Μετρήσεις έγιναν 3.5min μετά την ανάμειξη των υλικών.

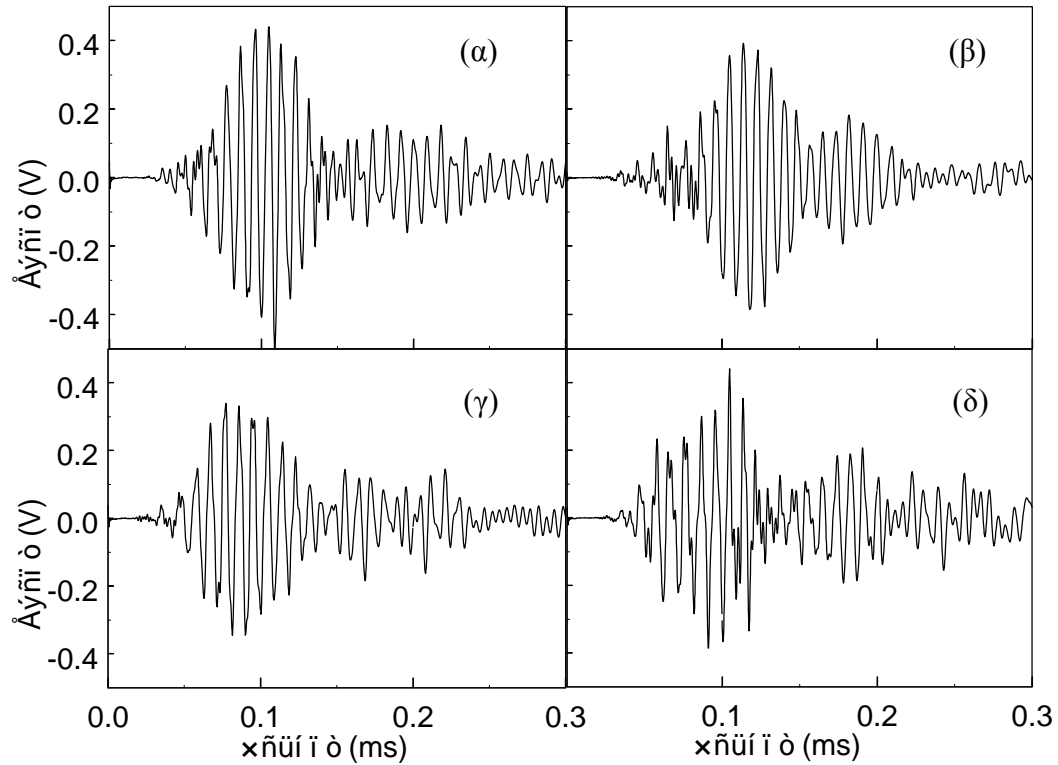


Σχ.3.4. Διάταξη ελέγχου νωπού κονιάματος

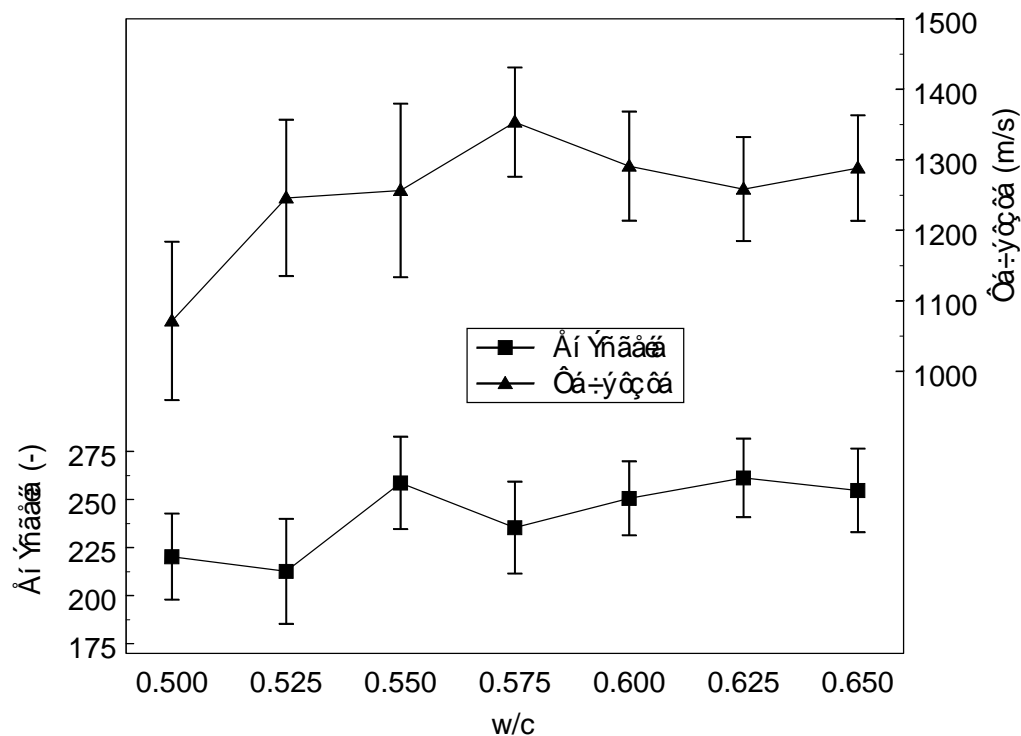
Ο λόγος άμμου/τσιμέντου, a/c , κρατήθηκε σταθερός στην τιμή 2, ενώ 7 διαφορετικές κλάσεις w/c παρήχθησαν από 0.50 έως 0.65 με βήμα 0.025. Αυτό το βήμα εφαρμόστηκε για να εξεταστεί η επιτυχία της μεθόδου με ακρίβεια μεγαλύτερη ή ίση ήδη υπάρχουσών προσεγγίσεων. Συνολικά 130 δοκίμια ελέγχθηκαν, δηλαδή σχεδόν 20 από κάθε κλάση.

Τυπικές κυματομορφές διαφορετικού w/c φαίνονται στο Σχ.3.5. Δεν παρατηρείται συστηματική μεταβολή ενέργειας ή ταχύτητας για διαφορετικές συστάσεις. Στο Σχ.3.6 παρατίθενται η ενέργεια και η ταχύτητα παλμών σε σχέση με το λόγο w/c . Η ταχύτητα, όπως

προηγουμένως, υπολογίστηκε από τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ της πρώτης υπέρβασης κατωφλίου του ηλεκτρικού και του λαμβανόμενου παλμού. Είναι και πάλι φανερό ότι οι τιμές των χαρακτηριστικών ξεχωριστών κλάσεων αλληλοκαλύπτονται.



Σχ.3.5. Κυματομορφές νωπού κονιάματος με w/c (α) 0.50, (β) 0.55, (γ) 0.60, (δ) 0.65.

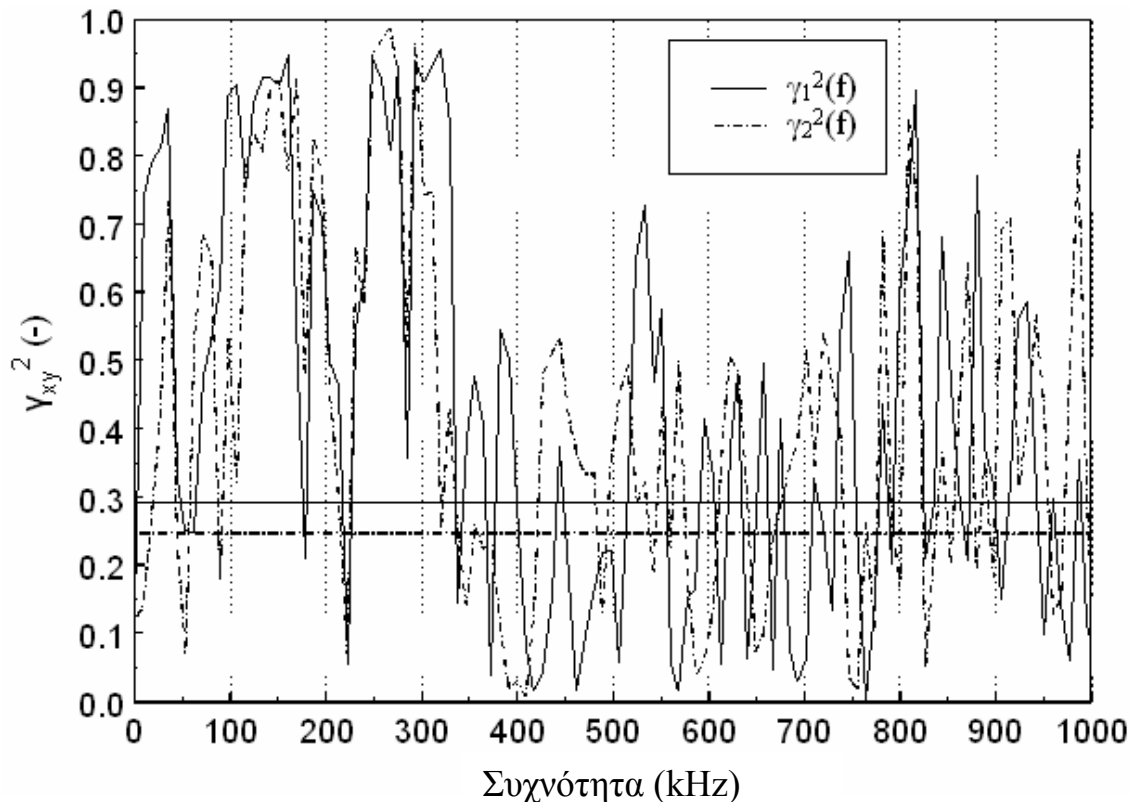


Σχ.3.6. Επίδραση λόγου w/c στην ενέργεια και ταχύτητα παλμού νωπής κονιάματος.

Η ταχύτητα του παλμού θα παρουσιαστεί εκτενέστερα σε παρακάτω κεφάλαιο· ωστόσο από τη βιβλιογραφία, τυπικές τιμές ταχύτητας διαμήκων κυμάτων σε νωπό υλικό είναι 1000-1500m/s [3,4], ενώ έχουν παρατηρηθεί και χαμηλότερες [5,6] αποδιδόμενες στο ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα.

Παρά ταύτα, η συνάρτηση συνοχής και σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνει υψηλότερες τιμές για κυματομορφές όμοιου w/c, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχ.3.7, όπου παρουσιάζεται η συνάρτηση συνοχής μεταξύ δύο κυματομορφών w/c=0.50 στη μία περίπτωση και 0.50 και 0.525 στην άλλη. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως παραπάνω, με την τυπική κυματομορφή κάθε κλάσης να υπολογίζεται από τον μέσο όρο όλων των ίδιας προέλευσης (w/c) κυματομορφών. Κάθε άγνωστη κυματομορφής η συνοχή, υπολογίζεται με όλες τις τυπικές κυματομορφές (συνολικά 7). Η μέση τιμή της συνάρτησης αυτής στη ζώνη 0-1MHz, είναι το κριτήριο για την κατάταξη της κυματομορφής στην κλάση με την τυπική της οποίας εμφανίζει τη μέγιστη μέση τιμή συνοχής. Για τον υπολογισμό της συνάρτησης

συνοχής, χρησιμοποιήθηκαν 5000 σημεία της αρχικής κυματομορφής. Ακολουθώντας τη διαδικασία αναγνώρισης αυτή, το ποσοστό επιτυχούς αναγνώρισης είναι 99.2% (129 από 130 κυματομορφές αναγνωρίζονται σωστά). Η μόνη ανεπιτυχής περίπτωση αφορά σε κυματομορφή $w/c=0.65$ που ταξινομείται στη γειτονική κλάση 0.625.

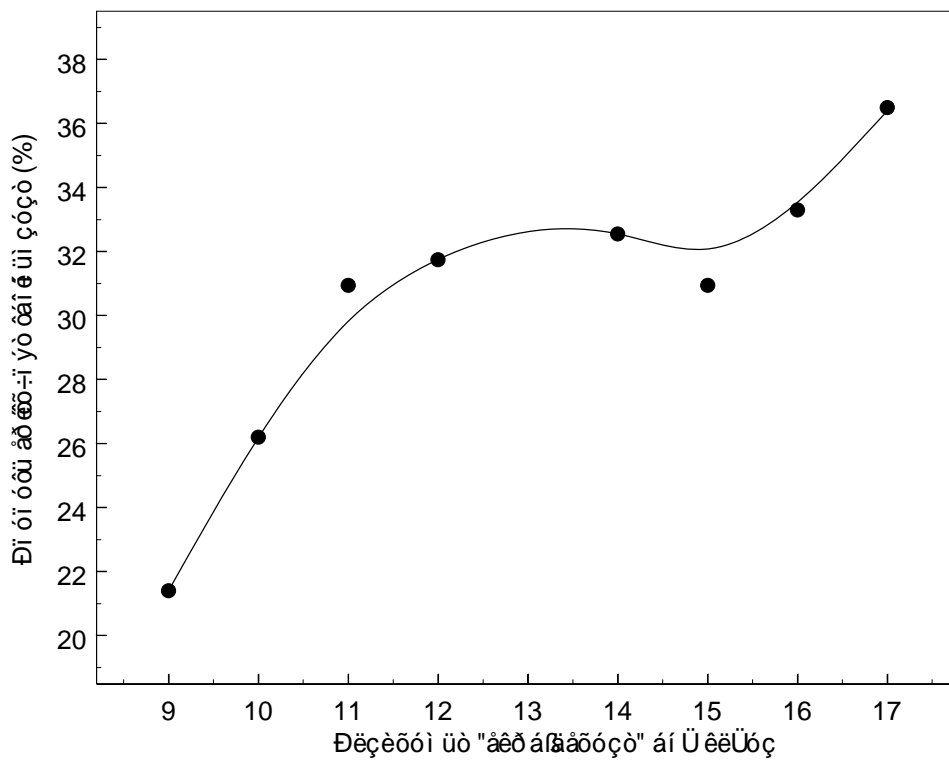


Σχ.3.7. Συνάρτηση συνοχής για δοκίμια κονιάματος ίδιας (συνεχής γραμμή) και διαφορετικής σύστασης (αξονική)

Φαίνεται λοιπόν ότι παρότι χρησιμοποιούνται αισθητήρες συντονισμού, μικρές μεταβολές στο περιεχόμενο συχνοτήτων ανιχνεύονται και αναδεικνύονται από τη συνάρτηση συνοχής.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη βέβαια, ότι στον σχηματισμό των μέσων κυματομορφών κάθε κλάσης, συμμετέχουν όλες οι αντίστοιχες κυματομορφές, δηλαδή και αυτή που πρόκειται να ελεγχθεί. Σε περίπτωση που η προς έλεγχο κυματομορφή εξαιρεθεί, τότε το ποσοστό επιτυχίας ελαττώνεται αισθητά. Ενδεικτικά, έγινε μελέτη της επίδρασης του μεγέθους του πληθυσμού στην επιτυχία της ταξινόμησης. Το μέγεθος του πληθυσμού φαίνεται να έχει σαφή επίπτωση στην αναγνώριση, αφού όταν χρησιμοποιούνται 63 κυματομορφές για τον

υπολογισμό των τυπικών (εκπαίδευση), δηλαδή οι μέσες κυματομορφές υπολογίζονται ως ο μέσος όρος 9 κυματομορφών από κάθε κλάση και ελέγχονται οι υπόλοιπες το ποσοστό επιτυχίας ανέρχεται περίπου σε 21%, βλ. Σχ.3.8. Όσο αυξάνει το πλήθος «εκπαίδευσης», το ποσοστό επιτυχίας επίσης αυξάνεται μέχρι σχεδόν 37%, ενώ όταν στην κατάρτιση των τυπικών κυματομορφών συμμετέχει το σύνολο του πληθυσμού, τότε η αναγνώριση, όπως προαναφέρθηκε, προσεγγίζει το 100%. Αυτή η εξάρτηση του ποσοστού επιτυχίας από τον πληθυσμό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αύξηση των δοκιμίων αναφοράς θα οδηγούσε με τη σειρά της σε αύξηση της αποδοτικότητας της μεθόδου.



Σχ.3.8. Επίδραση του μεγέθους του πληθυσμού στο ποσοστό ταξινόμησης ξένου δείγματος

Συνοπτικά, στο κεφάλαιο αυτό αναπτύχθηκε η αντιμετώπιση του προβλήματος του χαρακτηρισμού σύστασης νωπού κονιάματος και τσιμεντόπαστας, με μεθοδολογία όμοια με αυτή που εφαρμόστηκε στην περίπτωση του σκληρυμένου σκυροδέματος. Η επιτυχία της ταξινόμησης παρότι ενθαρρυντική, είναι εξαιρετικά εξαρτημένη από το πλήθος των ανεξάρτητων δεδομένων και μόνο σημαντική αύξηση αυτών θα μπορούσε να επιφέρει πιο αξιόπιστα συμπεράσματα.

Βιβλιογραφία

- [1] A. M. Neville, Properties of Concrete. London: Longman, 1995
- [2] B. Mather, How Soon is Soon Enough?, ACI J 1976; 73 (3): 147-150
- [3] S. Popovics, J. S. Popovics, Ultrasonic Testing to Determine Water-Cement Ratio for Freshly Mixed Concrete, Cement Concrete Aggr 1998; 20 (2): 262-268
- [4] A. Boumiz, C. Vernet, F. Cohen Tenoudji, Mechanical Properties of Cement Pastes and Mortars at Early Ages, Adv Cem Bas Mat, 3 (1996) 94-106
- [5] C. U. Grosse, H. W. Reinhardt, Fresh concrete monitored by ultrasound methods, Otto Graf Journal 12 (2001) 157-168
- [6] C. Boutin, L. Arnaud, Mechanical characterization of heterogeneous materials during setting, Eur J Mech.A/Solids 14 (4) (1995) 633-656

4. Απόκριση αισθητήρων, διασπορά και εξασθένιση

Τα αποτελέσματα του προσδιορισμού σύστασης νωπού κονιάματος κατέδειξαν ότι το πρόβλημα χαρακτηρισμού είναι πιο πολύπλοκο σε αυτό το στάδιο του υλικού απ' ό,τι στο στερεό. Άλλωστε είναι σαφές ότι οι και συνθήκες κυματικής διάδοσης διαφέρουν πολύ σε ένα ανομοιογενές πορώδες στερεό, όπως το σκληρυμένο σκυρόδεμα, σε σχέση με ένα αιώρημα κόκκων τσιμέντου, άμμου και φυσαλίδων μέσα σε νερό. Για να γίνει κατανοητή η αλληλεπίδραση των στοιχείων της σύστασης που προαναφέρθηκαν με το διαδιδόμενο κύμα, είναι απαραίτητος ο έλεγχος σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων, αφού λόγω διαφορετικών χαρακτηριστικών (μεγέθους και ιδιοτήτων) κάθε υπάρχουσα φάση αναμένεται να έχει εμφανέστερη επίδραση σε διαφορετικές ζώνες συχνότητας. Ως εκ τούτου και με γεννήτρια παλμών ικανή για παραγωγή μεγάλης ποικιλίας κυματομορφών διαφόρων συχνοτήτων, ακολούθησε νέα πειραματική φάση. Εκτός από τον έλεγχο του νωπού υλικού επαναλήφθηκε ο έλεγχος κυβικών δοκιμίων όλων των συστάσεων σκυροδέματος και κονιάματος με σκοπό κυρίως την κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν την κυματική διάδοση και σε αυτό το υλικό παρότι το πρόβλημα αναγνώρισης σύστασης είχε αντιμετωπιστεί επιτυχώς. Έτσι έγιναν υπολογισμοί ταχύτητας και εξασθένισης όπως θα αναλυθεί παρακάτω αλλά και άλλες παρατηρήσεις σχετικά με τη διασπορά του παλμού. Άλλωστε, οι μηχανισμοί διάδοσης και εξασθένισης ειδικά σε νωπό σκυρόδεμα ή κονίαμα δεν έχουν περιγραφεί επαρκώς στη βιβλιογραφία. Για το σκοπό αυτό διερευνήθηκε η χρήση αισθητήρων ευρέως φάσματος ώστε να ανταποκρίνονται αξιόπιστα στις απαιτήσεις ελέγχου σε συχνότητες μέχρι περίπου 1MHz, όσο περίπου επιτρέπει η κάρτα δειγματοληψίας (με μέγιστο ρυθμό 10MHz) εκτός των αισθητήρων συντονισμού των οποίων η χρήση περιγράφηκε στα παραπάνω κεφάλαια.

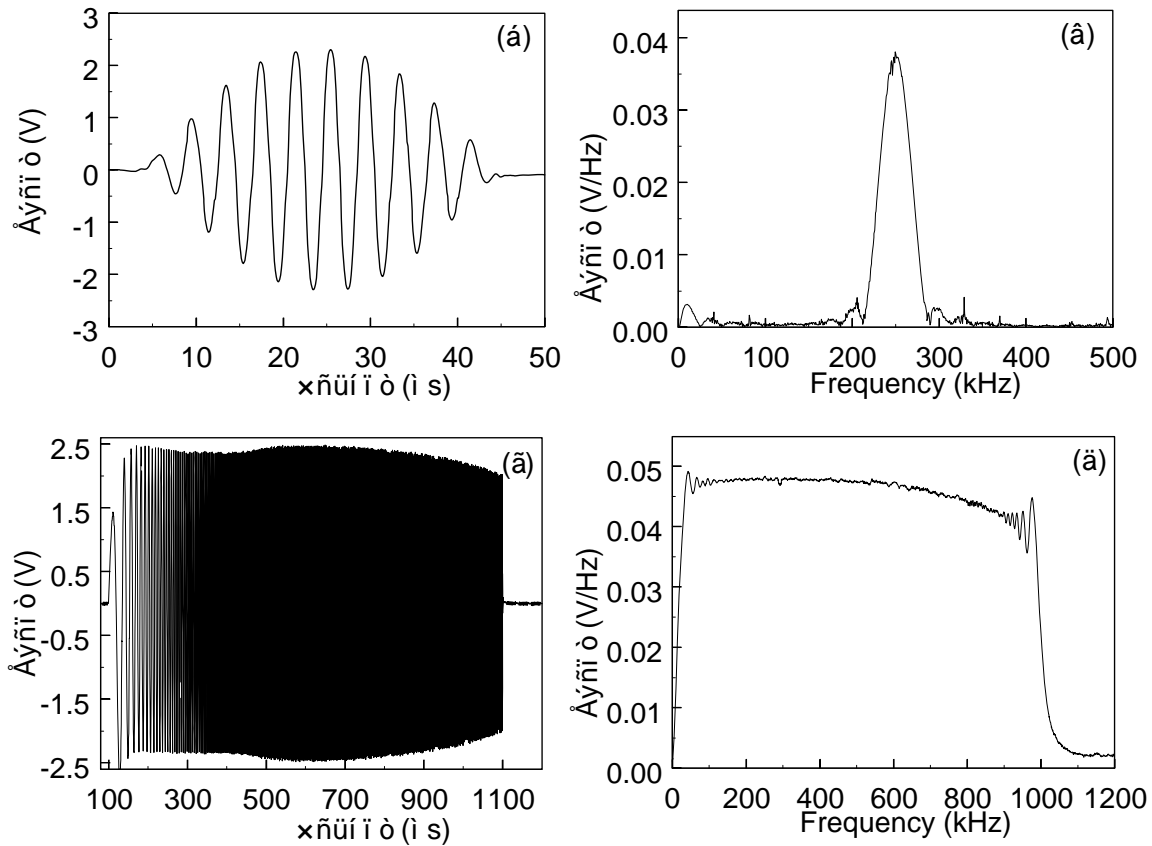
4.1 Απόκριση αισθητήρων

Η αρχική πειραματική φάση έγινε, όπως αναφέρθηκε, με αισθητήρες συντονισμού που παρουσιάζουν ευαισθησία σε σχετικά χαμηλές συχνότητες. Με σκοπό τη μελέτη της διασποράς και εξασθένισης των υλικών και σε υψηλότερες συχνότητες, διερευνήθηκε η χρήση, μεταξύ άλλων, αισθητήρων που παρουσιάζουν ονομαστικά μέγιστη ευαισθησία στα 500kHz και 2.25MHz, Panametrics V413 και V133 αντίστοιχα. Σκοπός ήταν να γίνει σαφές αν η ευαισθησία των αισθητήρων επέτρεπε την ικανοποιητική διάδοση του κύματος στο

υλικό (με δεδομένη και την ανομοιογενή φύση του σκυροδέματος και την αναμενόμενη εξασθένιση) για κάθε συχνότητα και φυσικά αν το σήμα μεταφερόταν πιστά χωρίς να «διαστρεβλώνεται» από τις προτιμήσεις του αισθητήρα.

Η απόκριση ελέγχθηκε με εφαρμογή των παλμών που χρησιμοποιήθηκαν και στον έλεγχο των υλικών. Παραγωγή τασικών κυμάτων για έλεγχο σκυροδέματος έχει γίνει με ποικίλους τρόπους. Ο πιο διαδεδομένος είναι μέσω εμπορικών μετρητών ταχύτητας (V-meters ή PUNDIT). Στην περίπτωση αυτή, ο έλεγχος του παλμού εξωτερικά (από το χρήστη) είναι περιορισμένος και γίνεται μόνο με την εφαρμογή κατάλληλων αισθητήρων. Η παραγόμενη κυματομορφή παρουσιάζει μεγάλη διάρκεια (ringing), γεγονός που δυσχεραίνει οποιαδήποτε ανάλυση, αφού ειδικά σε μετρήσεις ανάκλασης, το σήμα της ανάκλασης δεν μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα μέσα στο σύνολο του παλμού. Έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης κρούσεις από σφαίρα όπου το περιεχόμενο συχνοτήτων ορίζεται κυρίως από το μέγεθος αυτής [1]. Βέβαια, σε περιπτώσεις όπου η εξασθένιση του παλμού το απαιτεί, έχει μελετηθεί η χρήση γεννήτριας παλμών λιθοτριψίας, με τη συνδρομή της οποίας παλμοί εστιασμένης δέσμης και υψηλής ενέργειας εισάγονται στο υλικό. Μετρήσεις που έγιναν με σήματα που περιείχαν συγκεκριμένο αριθμό κύκλων σταθερού εύρους παρότι μετέφεραν την επιθυμητή κεντρική συχνότητα, παρουσίαζαν μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων από αντίστοιχα σήματα σε ημιτονοειδή περιβάλλουσα. Έτσι η διέγερση που επελέγη ως είσοδος είναι της μορφής του Σχ.4.1(α). Το ημιτονοειδές κύμα σε ημιτονοειδή περιβάλλουσα, εισάγει μια διαταραχή με σχετικά στενή ζώνη συχνοτήτων, όπως φαίνεται στο Σχ.4.1(β), όπου φαίνεται ο μετασχηματισμός Fourier του παραπάνω σήματος. Όμοια σήματα διαφορετικής συχνότητας χρησιμοποιήθηκαν, από 20kHz έως 1MHz. Λόγω υψηλής εξασθένισης του υλικού (νωπού ή στερεού), σε πολλές περιπτώσεις, αξιόπιστο σήμα λαμβάνεται μέχρι τα 800kHz. Εκτός της παραπάνω μορφής, χρησιμοποιήθηκαν και κυματομορφές ευρέως φάσματος με τη μορφή σάρωσης, Σχ.4.1(γ). Με αυτόν τον τρόπο, το ηλεκτρικό σήμα παρουσιάζει περίπου το ίδιο εύρος σε όλο το φάσμα 10kHz - 1MHz, όπως φαίνεται στο Σχ.4.1(δ) και σε συνάρτηση με την απόκριση του αισθητήρα, ένα εξίσου ευρύ φάσμα εισάγεται στο υλικό. Το σαφές πλεονέκτημα είναι ότι εισάγουν μια ζώνη συχνοτήτων σταθερής τάσης, βλ. Σχ.4.1(γ), (δ) η οποία καθορίζεται από το χρήστη (10kHz-1MHz στην συγκεκριμένη περίπτωση) και έτσι είναι δυνατό με ένα μόνο σήμα να εξεταστεί η συνολική συμπεριφορά του υλικού (ή του

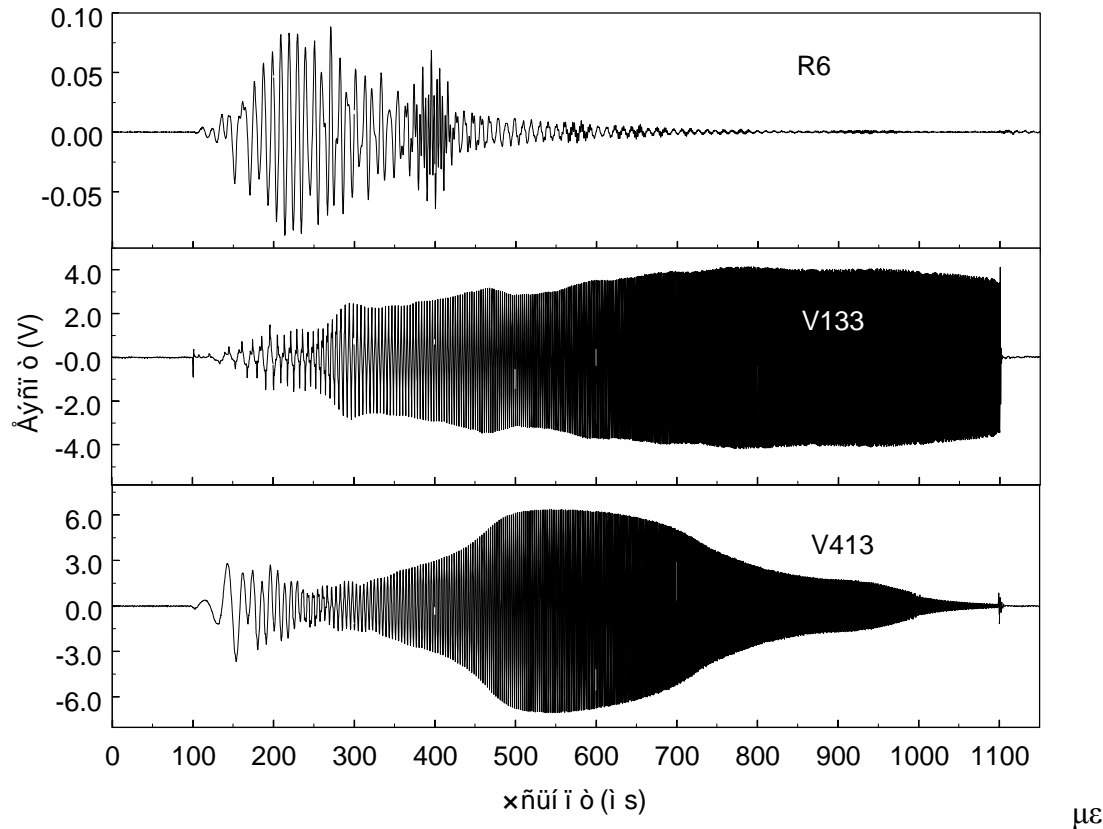
αισθητήρα σε άλλη περίπτωση). Από την άλλη, η εξέταση της διάδοσης συγκεκριμένων ζωνών συχνοτήτων γίνεται επιτυχώς με διεγέρσεις του τύπου του Σχ.4.1(α).



Σχ.4.1. (α) και (β) ηλεκτρικό σήμα 10 κύκλων και κεντρικής συχνότητας 250kHz στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας αντίστοιχα, (γ) και (δ) αντίστοιχα για ηλεκτρικό σήμα σάρωσης 10kHz-1MHz.

Τα ζευγάρια των αισθητήρων τοποθετήθηκαν σε διάταξη πρόσωπο με πρόσωπο με την προσθήκη μικρής ποσότητας γράσου. Η απόκριση των διαφορετικών αισθητήρων στο σήμα σάρωσης φαίνεται στο Σχ.4.2 ενώ στο Σχ.4.3 φαίνεται ο FFT των αντίστοιχων σημάτων. Είναι σαφές, όπως και αναμενόμενο ότι ο αισθητήρας συντονισμού παρουσιάζεται ευαίσθητος επιλεκτικά σε χαμηλές συχνότητες, ενώ δεν διαδίδει καθόλου ενέργεια πάνω από 400kHz. Οι άλλοι δύο αισθητήρες λόγω υψηλότερης κεντρικής συχνότητας έχουν αρκετά διαφορετική συμπεριφορά. Ο V133 εμφανίζει σχετικά επίπεδη συμπεριφορά στις συχνότητες 500-1000kHz ενώ η ευαισθησία του μειώνεται προοδευτικά στις χαμηλότερες αφού άλλωστε

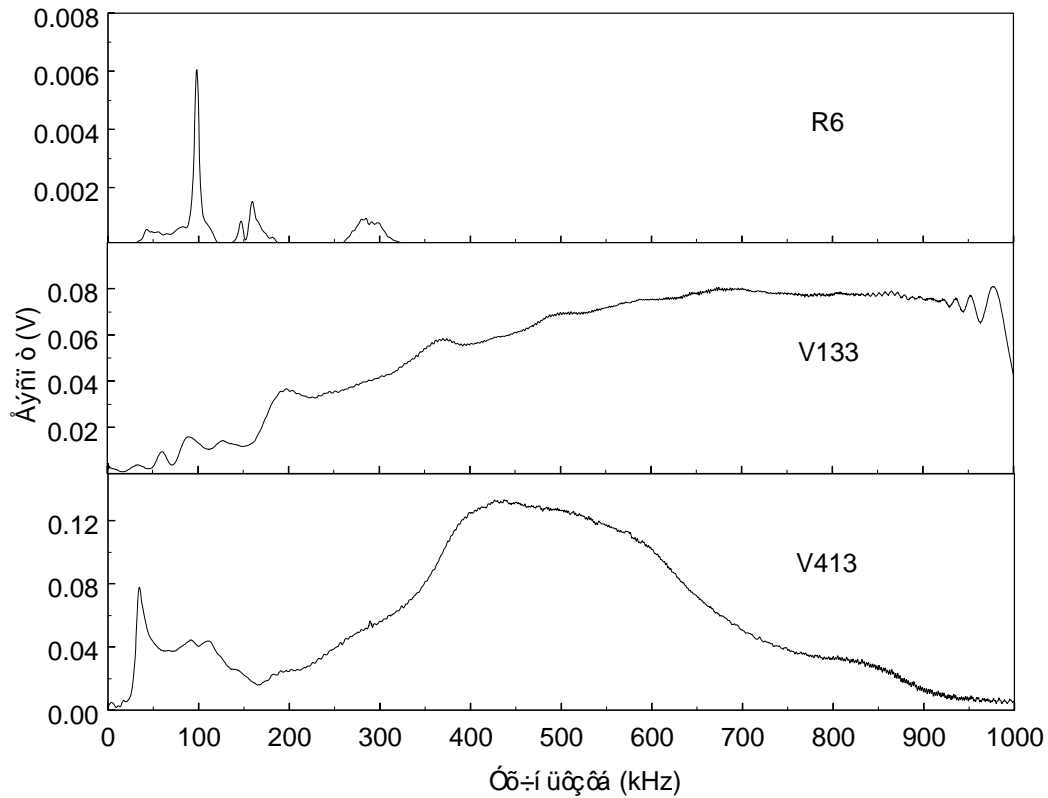
τοποθετούνται πολύ μακριά από την κεντρική του συχνότητα. Στην τελευταία περίπτωση παρότι είναι εμφανείς οι προτιμήσεις (500kHz) του V413, είναι επίσης εμφανές ότι έστω και μειωμένο εύρος για κάποιες συχνότητες, μπορεί να διαδοθεί σχεδόν όλη η ζώνη του πρώτου MHz.



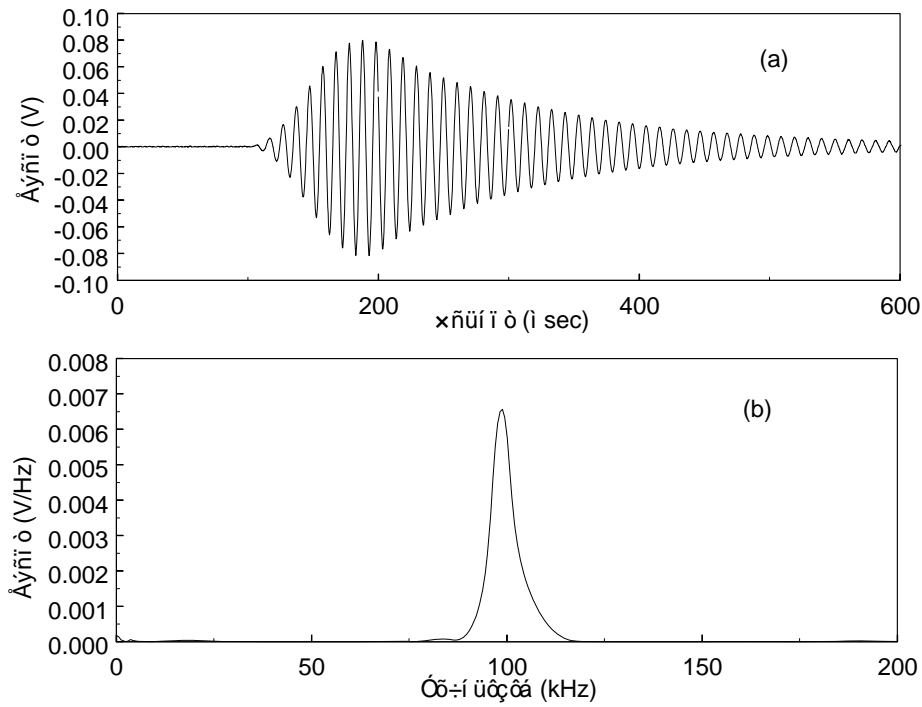
Σχ.4.2. Απόκριση διαφορετικών αισθητήρων σε σήμα σάρωσης στο πεδίο του χρόνου.

Όσον αφορά σε ημιτονοειδή σήματα με συγκεκριμένη κεντρική συχνότητα (tone-burst) εφαρμόστηκαν 30 παλμοί διαφόρων κεντρικών συχνοτήτων από 20kHz έως 1MHz. Στα Σχ.4.4(α) και (β) παρουσιάζεται η απόκριση του R6 σε διέγερση 10 κύκλων 100kHz στο πεδίο χρόνου και συχνότητας αντίστοιχα. Είναι σαφές ότι παρότι η κεντρική συχνότητα μεταφέρεται σωστά, ο αισθητήρας εμφανίζει χαμηλή εξασθένιση με συνέπεια την τεράστια «ουρά» που σχετίζεται και με τη μεγάλη διάρκεια κυματομορφών που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Αντιθέτως, ο V133 αποδίδει πιστά το σήμα σε συχνότητες πάνω από 150kHz, όπως φαίνεται στο Σχ.4.5(α) και (β) για σήμα 550kHz. Η απόκριση του V413 είναι εξίσου καλή ενώ προεκτείνεται και σε συχνότητες πολύ χαμηλές, όπως των 20kHz, βλ. Σχ.4.6(α) και (β) αλλά και υψηλές όπως φαίνεται στο Σχ.4.6(γ) και (δ).

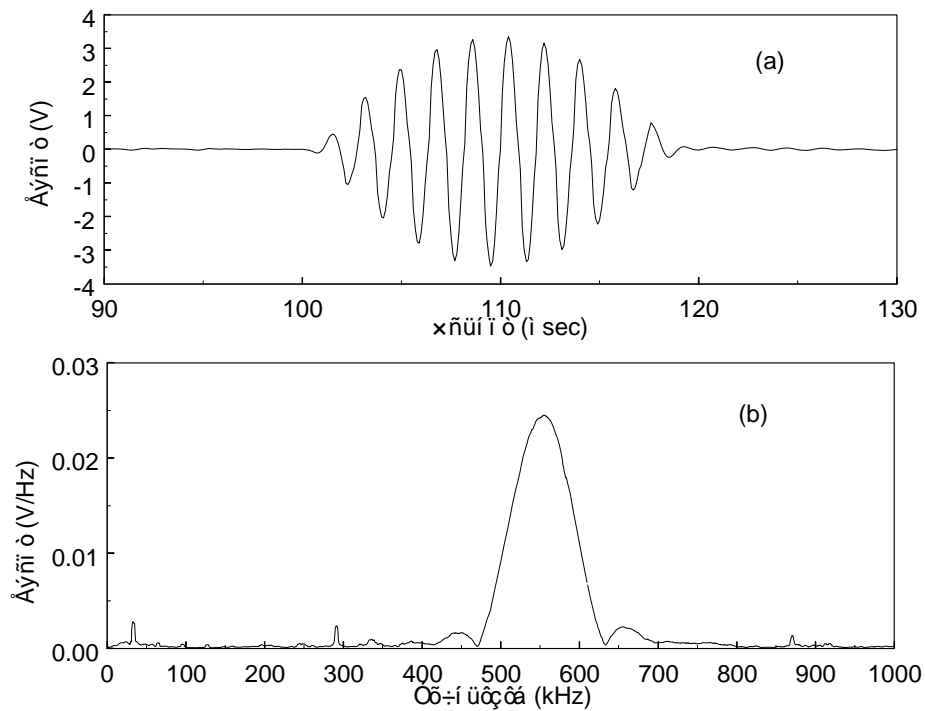
Πρέπει να σημειωθεί ότι το εύρος που παρουσιάζουν οι αποκρίσεις του αισθητήρα R6 δεν είναι συγκρίσιμο με των άλλων δύο. Αυτό γιατί κατά τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε μικρότερη ενέργεια διέγερσης αφού σε άλλη περίπτωση το σήμα ξεπερνά το όριο των 10V στην είσοδο της κάρτας και παρουσιάζεται παραμορφωμένο.



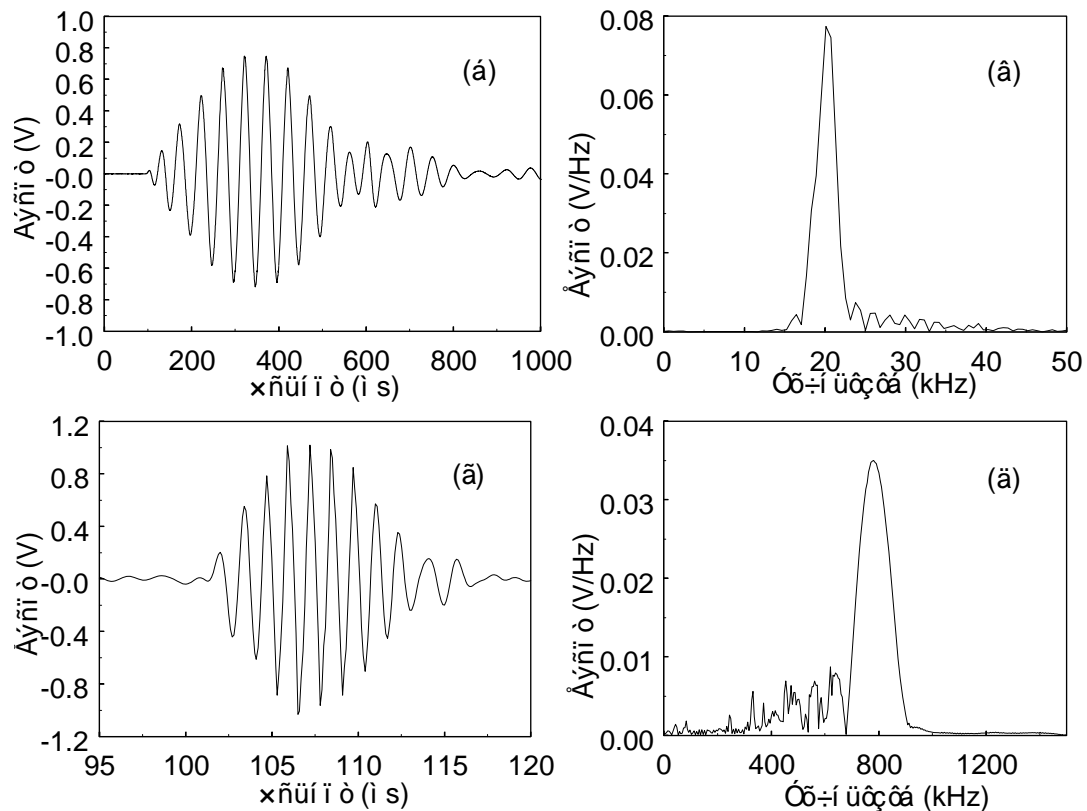
Σχ.4.3. Απόκριση διαφορετικών αισθητήρων σε σήμα σάρωσης στο πεδίο της συχνότητας.



Σχ.4.4. Απόκριση αισθητήρα R6 σε διέγερση 10 κύκλων 100kHz στο πεδίο του χρόνου (α) και της συχνότητας (β).



Σχ.4.5. Απόκριση αισθητήρα V133 σε διέγερση 10 κύκλων 550kHz στο πεδίο του χρόνου (α) και συχνότητας (β)



Σχ.4.6. Απόκριση αισθητήρα V413 σε διέγερση 10 κύκλων 20kHz στο πεδίο του χρόνου (α) και της συχνότητας (β) και αντίστοιχα για διέγερση 750kHz.

Υπό το φως της παραπάνω διερεύνησης, θεωρήθηκε ότι πλέον κατάλληλος για τις συγκεκριμένες εφαρμογές, που αφορούν στο πρώτο MHz, είναι ο V413, ο οποίος αν και με διαφορετικό εύρος, μεταφέρει σήματα όλων των συχνοτήτων χωρίς να «παρεμβαίνει» στο περιεχόμενό τους.

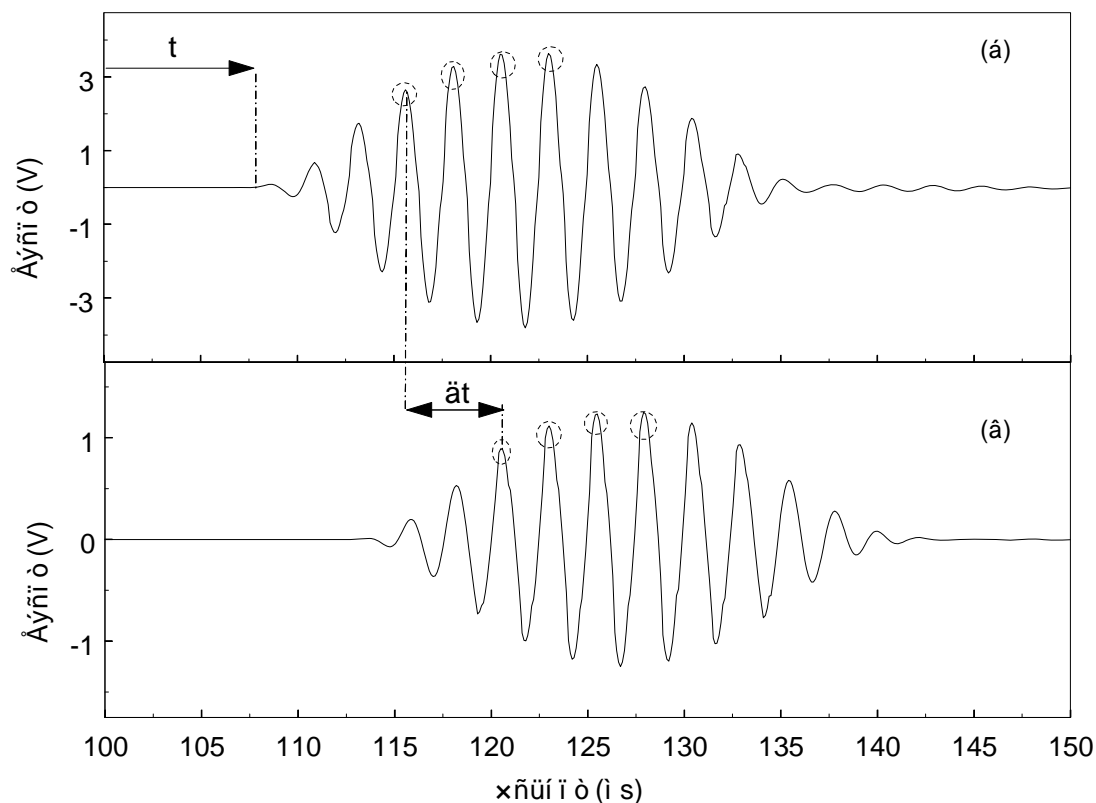
4.2 Μετρήσεις διασποράς

Ο παλμός που χρησιμοποιήθηκε, όπως έχει αναφερθεί, είναι της μορφής του Σχ.4.1(α). Καθώς ένας τέτοιος παλμός διαδίδεται σε μέσο, που δεν παρουσιάζει διασπορά, δεν υφίσταται καμία αλλαγή σχήματος. Όσον αφορά όμως διάδοση σε διασκορπίζον μέσο, οι συγκεκριμένες κορυφές μέσα στην περιβάλλουσα θα μετακινηθούν σε σχέση με το κέντρο βάρους αυτού [2].

Προς αποφυγή σύγχυσης μεταξύ όρων κυματικής διάδοσης είναι σκόπιμο να γίνει ο διαχωρισμός μεταξύ ταχύτητας παλμού (pulse velocity), φασικής ταχύτητας (phase velocity) και ταχύτητας ομάδας (group velocity).

Η ταχύτητα παλμού γενικά ορίζεται ως η απόσταση των αισθητήρων προς το χρόνο μετάβασης της διαταραχής ανάμεσα στις δύο θέσεις, βλ. Σχ.4.7(α). Αυτός ο χρόνος εξαρτάται από μία τάση κατωφλίου η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση ορίστηκε ως το μέγιστο εύρος του θορύβου πριν την έλευση του σήματος. Γι' αυτό το λόγο η καταγραφή των κυματομορφών αρχίζει 100μs πριν την έλευση του κύματος (pre-trigger time).

Η φασική ταχύτητα, προσδιορίζεται από τη θέση συγκεκριμένων «φασικών» σημείων της κυματομορφής σε σήματα που καταγράφηκαν σε διαφορετικά σημεία του υλικού. Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της φασικής ταχύτητας νωπού κονιάματος, δύο δοκίμια ετοιμάστηκαν για κάθε σύσταση με πάχος 10.25mm και 18.55mm. Αυτά τα δοκίμια εξετάστηκαν με ημιτονοειδή σήματα 10 κύκλων σε 30 διαφορετικές κεντρικές συχνότητες, όπως έχει αναφερθεί. Η φασική ταχύτητα, μετρήθηκε ως ο λόγος της διαφοράς πάχους των δοκιμίων (8.3mm), προς το χρόνο διάδοσης των αντίστοιχων «φασικών» σημείων [2,3]. Ως τέτοια επελέγησαν οι κορυφές από την 4η έως και την 7η, βλ. Σχ.4.7, όπου κυματομορφές της ίδιας κεντρικής συχνότητας φαίνονται μετά από διάδοση 10.25mm και 18.55mm σε νωπή τσιμεντόπαστα. Για μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τεσσάρων τιμών.



Σχ. 4.7. Διαταραχή σε δύο σημεία του υλικού

Άλλος τρόπος μέτρησης της φασικής ταχύτητας χρησιμοποιώντας ένα μόνο σήμα ευρέως φάσματος βασίζεται στη διαφορά φάσης του εισαγόμενου και λαμβανόμενου παλμού όπως αυτή υπολογίζεται μέσω του μετασχηματισμού Fourier των δύο σημάτων. Εφαρμόστηκε στα δοκίμια σκληρυμένου σκυροδέματος αφού δεν ήταν δυνατή η μέτρηση σε δύο σημεία λόγω γεωμετρίας. Ο εισαγόμενος παλμός μετρήθηκε από την πρόσωπο με πρόσωπο απόκριση των αισθητήρων. Εφόσον x η απόσταση των αισθητήρων και φ η διαφορά φάσης του κύματος μεταξύ των δύο θέσεων, A και B , βλ. Σχ.4.8, (θεωρείται αρχικά μονοχρωματικός παλμός, συχνότητας f και μήκους κύματος λ) ισχύει η:

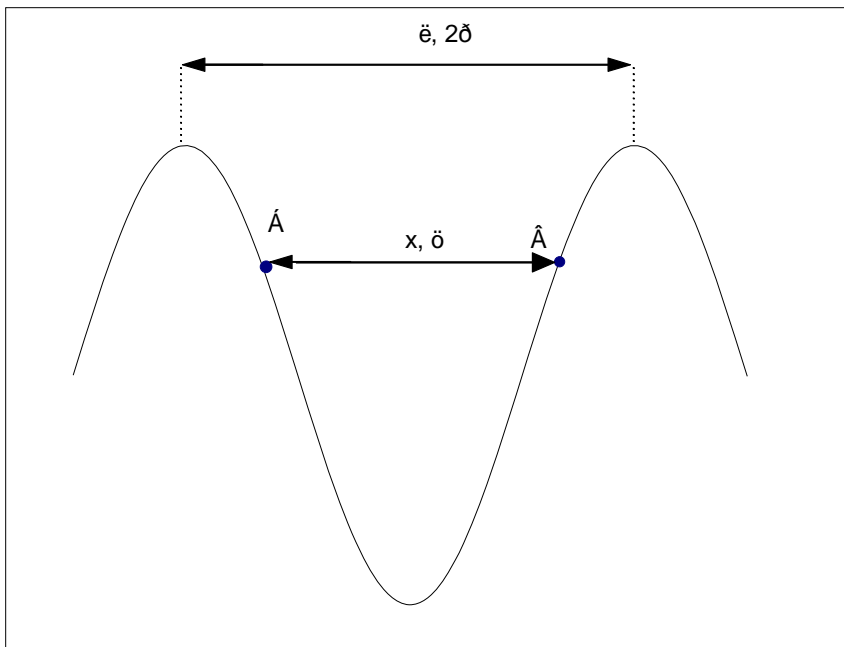
$$x = \frac{\varphi}{2\pi} \lambda = \frac{\varphi}{2\pi f} C_p = \varphi \cdot k \quad (4.1)$$

Αυτό διότι η διαφορά φάσης που αντιστοιχεί σε απόσταση ενός μήκους κύματος είναι 2π , ενώ σε απόσταση x (απόσταση μεταξύ σημείων μέτρησης) αντιστοιχεί διαφορά φάσης φ .

Εφόσον η διαφορά αυτή γίνει γνωστή των σημάτων στα δύο σημεία, όπως θα φανεί παρακάτω, τότε ο κυματάριθος k , υπολογίζεται μέσω της (4.1) και κατόπιν η φασική ταχύτητα C_p για τη συγκεκριμένη γωνιακή συχνότητα ω :

$$C_p = \omega/k \quad (4.2)$$

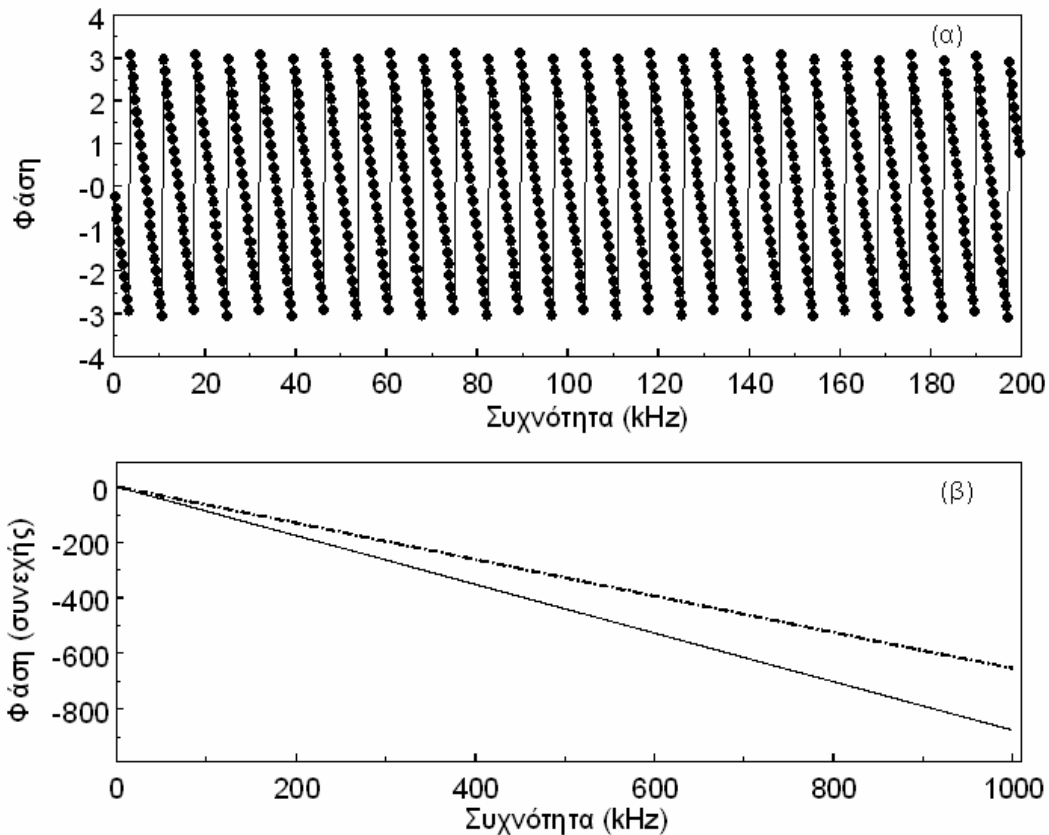
Με την εφαρμογή για όλες τις συχνότητες του συγκεκριμένου παλμού, προκύπτει η καμπύλη διασποράς, δηλαδή φασικής ταχύτητας-συχνότητας. Η ακριβής μεθοδολογία περιγράφεται στην [4].



Σχ.4.8. Ορισμός της διαφοράς φάσης μεταξύ δύο σημείων μέτρησης

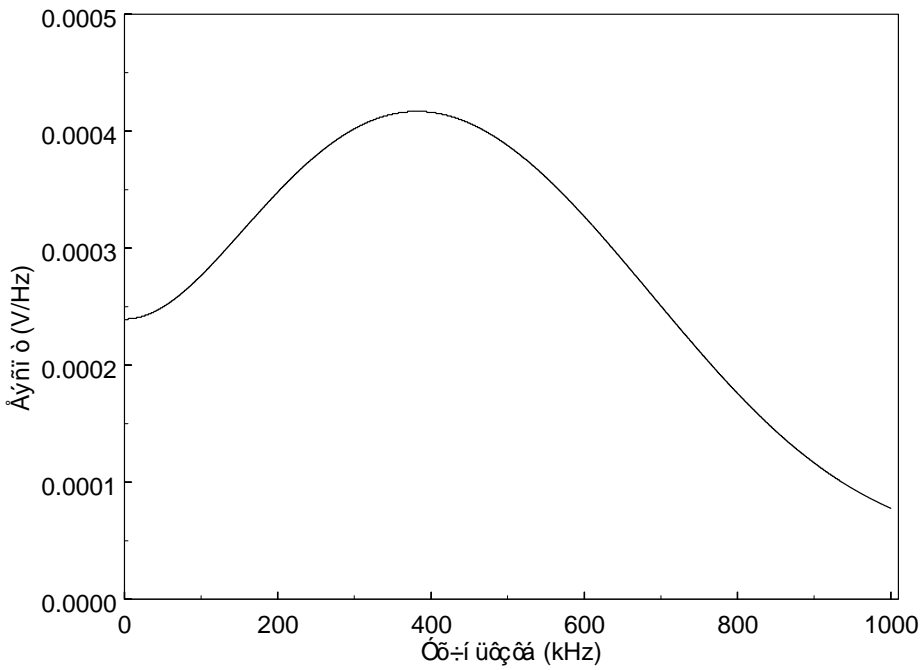
Η φάση των δύο σημάτων όπως αναφέρθηκε υπολογίζεται με μετασχηματισμό Fourier. Προσοχή δίνεται στο λεγόμενο «ξεδίπλωμα» της φάσης (unwrapping). Οι αλγόριθμοι FFT περιορίζουν την φάση στο πεδίο $-\pi$ έως π , όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχ.4.9(α). Αυτό διορθώνεται εφόσον προστεθεί στο κατάλληλο σημείο φάση 2π , ώστε το φάσμα να γίνει συνεχές. Στο Σχ.4.9(β) φαίνεται η φάση απόκρισης σκυροδέματος όπως και της απόκρισης

των αισθητήρων. Η διαφορά των δύο καμπυλών για κάθε συχνότητα είναι αυτή που χρησιμοποιείται στην (4.1).

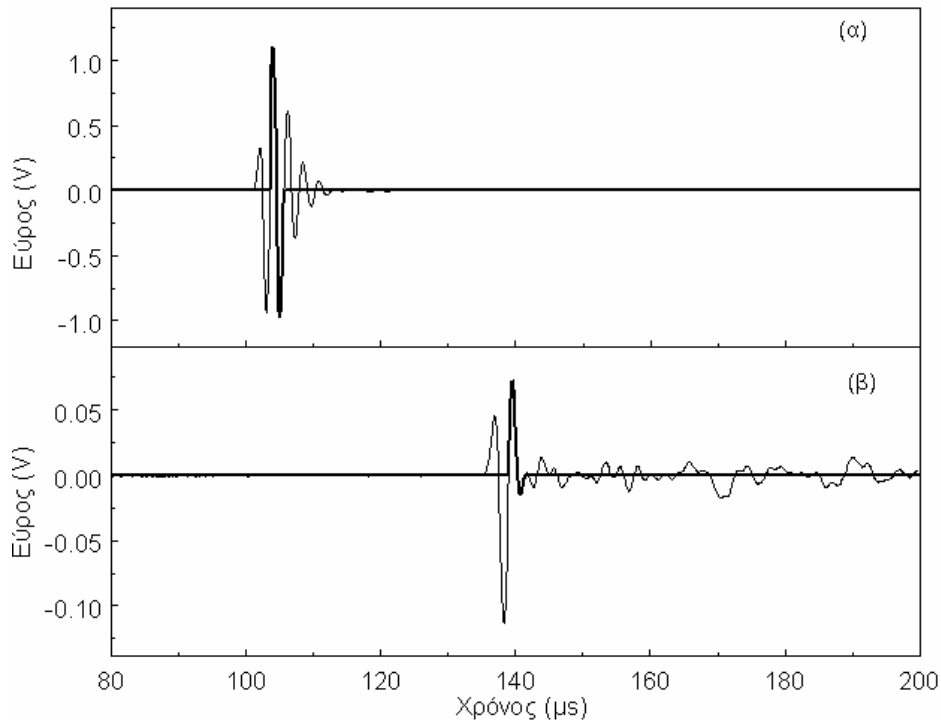


Σχ.4.9.(α) Φάση σήματος υπολογισμένη με εμπορικό αλγόριθμο (Matlab) και (β) φάση συνεχής για σήμα σκυροδέματος και αισθητήρων.

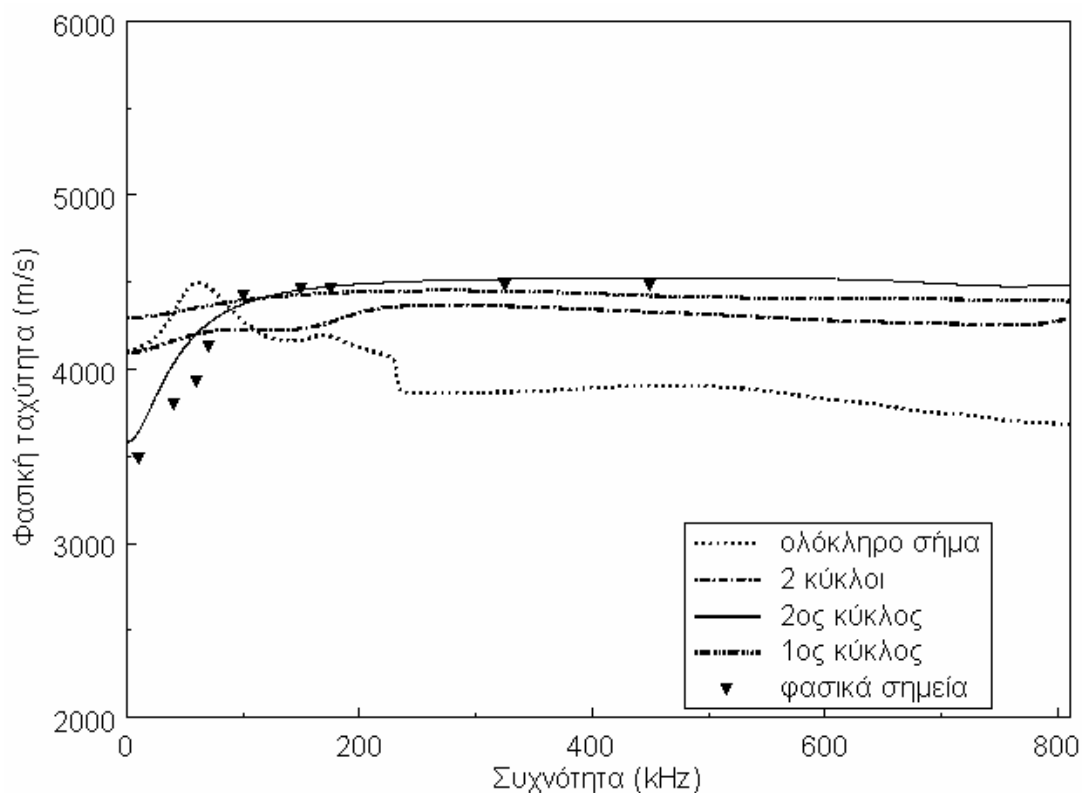
Το σήμα που χρησιμοποιήθηκε στην παραπάνω μεθοδολογία ήταν ένας κύκλος 450kHz, ή διάρκειας 2.22μs, με φάσμα συχνοτήτων που καλύπτει όλο το πρώτο MHz όπως φαίνεται στο Σχ.4.10. Η πρόσωπο με πρόσωπο απόκριση των αισθητήρων V413 όπως και αυτή δοκιμίου σκυροδέματος, στο παραπάνω σήμα φαίνονται στο σχ4.11(α) και (β) αντίστοιχα. Παρότι το ηλεκτρικό σήμα αποτελείται από έναν μόνο κύκλο, είναι σαφές ότι η απόκριση των αισθητήρων αλλά και του δοκιμίου έχουν μεγαλύτερη διάρκεια γεγονός που μειώνει το εύρος συχνοτήτων του σήματος. Εφαρμογή της τεχνικής μέτρησης της φάσης, σε όλο το κυρίως σήμα (εξαιρουμένου του αρχικού τμήματος «pre-trigger» και ανακλάσεων) οδηγεί σε καμπύλη φασικής ταχύτητας όπως του Σχ.4.12.



Σχ.4.10. Μετασχηματισμός Fourier σήματος 1 κύκλου 450kHz.



Σχ.4.11. Απόκριση (α) αισθητήρων και (β) δοκιμίου κονιάματος σε ηλεκτρική διέγερση 1 κύκλου 450kHz.

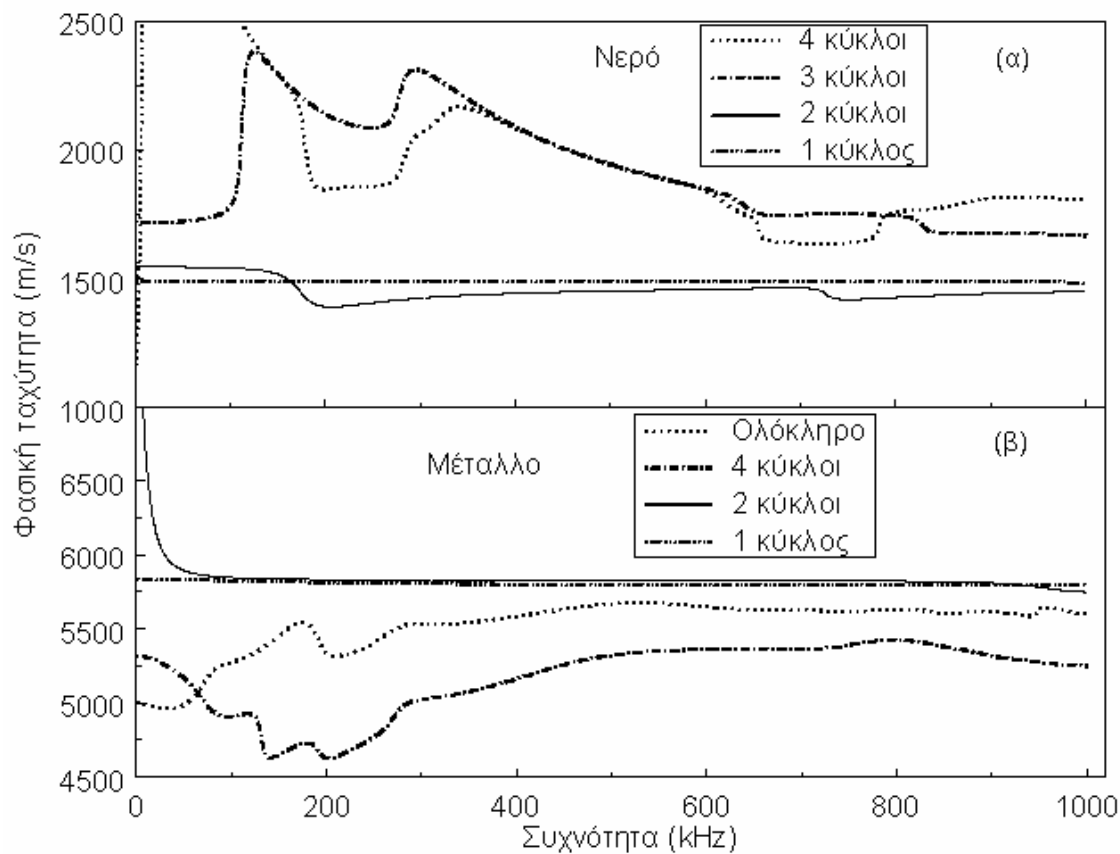


Σχ.4.12. Φασική ταχύτητα σκυροδέματος υπολογισμένη χρησιμοποιώντας διαφορετικά τμήματα του σήματος.

Για το συγκεκριμένο δοκίμιο σκυροδέματος που κόπηκε σε δύο μέρη, η φασική ταχύτητα για διάφορες συχνότητες μετρήθηκε επίσης από τη χρονική καθυστέρηση συγκεκριμένης κορυφής (2ης) κυματοπακέτου που μετρήθηκε σε ολόκληρο (πάχος 150mm) και μισό (73mm) δοκίμιο. Οι φασικές ταχύτητες που μετρήθηκαν από τα φασικά σημεία για διαφορετικές κεντρικές συχνότητες φαίνονται επίσης στο Σχ.4.12. Από σχετική διερεύνηση φαίνεται ότι απομονώνοντας κομμάτια (κύκλους) του σήματος και συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας το δεύτερο μόνο κύκλο και των δύο σημάτων, βλ. έντονες γραμμές στο Σχ.4.11, οι καμπύλες που προκύπτουν ακολουθούν από κοντά τις τιμές φασικής ταχύτητας που μετρήθηκαν από φασικά σημεία σε σήματα από δύο θέσεις του υλικού.

Παρόμοια τάση έχει παρατηρηθεί και σε υλικά αναφοράς όπως νερό και μέταλλο που θεωρούνται μη διασκορπίζοντα υλικά. Εφαρμόζοντας την τεχνική υπολογισμού φασικής

ταχύτητας μέσω μέτρησης φάσης σε όλο το σήμα, οι καμπύλες φασικής ταχύτητας παρουσιάζουν έντονες μεταβολές με τη συχνότητα, βλ. Σχ.4.13, γεγονός μη αναμενόμενο για τέτοια υλικά. Απομονώνοντας όμως ένα κύκλο του σήματος, και εφαρμόζοντας την τεχνική Sachse και Pao, η φασική ταχύτητα που προκύπτει είναι σταθερή και πολύ κοντά σε γνωστές τιμές για τα υλικά αυτά, δηλαδή 1500m/s για το νερό και περίπου 6000m/s για μέταλλο. Παραδείγματα παρατίθενται στα Σχ.4.13(α) και (β). Είναι φανερό ότι περιορίζοντας τη διάρκεια του σήματος που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό η ταχύτητα προσδιορίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ως εκ τούτου οι φασικές ταχύτητες που παρουσιάζονται στη διατριβή βασίζονται στο δεύτερο κύκλο των σημάτων αφού όλα τα υπόλοιπα σημεία μηδενιστούν, βλ. Σχ.4.11.



Σχ.4.13. Φασική ταχύτητα (α) νερού και (β) μετάλλου χρησιμοποιώντας διαφορετικά τμήματα του σήματος.

Σε αντιστοιχία με τα παραπάνω, με βάση τον ορισμό της ταχύτητας ομάδας (group velocity, C_g) [4] έχουμε:

$$C_g = d\omega/dk \quad (4.3)$$

Η ταχύτητα ομάδας ως εκ τούτου μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας τον ορισμό αυτό με γνωστή την εξάρτηση της γωνιακής συχνότητας $\omega (=2\pi f)$ από τον κυματάριθμο k μέσω της (4.1).

Απ' ευθείας από πειραματικές μετρήσεις, η ταχύτητα ομάδας υπολογίζεται από το χρόνο διάδοσης του κέντρου βάρους της περιβάλλουσας της κυματομορφής ανάμεσα σε δύο διαφορετικά σημεία του υλικού. Η διαφορά δηλαδή με τη φασική είναι στην επιλογή του σημείου αναφοράς. Ωστόσο, προκύπτει αμφιβολία για τον ακριβή προσδιορισμό της αρχής και του τέλους της κυματομορφής, λόγω διασποράς ή άλλων επιδράσεων (π.χ. ανακλάσεις) [5], με αποτέλεσμα την χαμηλή επαναληψιμότητα των υπολογισμών. Προσεγγιστικοί υπολογισμοί ταχύτητας ομάδας βασίζονται στην χρονική καθυστέρηση των μέγιστων κορυφών των κυματομορφών [5] ενώ έχει χρησιμοποιηθεί και η τεχνική της ετεροσυσχέτισης για την εύρεση της χρονικής αυτής καθυστέρησης [6]. Στην παρούσα διατριβή αξιόπιστες απ' ευθείας πειραματικές μετρήσεις σχετικά με ταχύτητες ομάδας δεν προέκυψαν. Υπολογισμοί βασισμένοι στη μέγιστη κορυφή αλλά και στην ετεροσυσχέτιση κυματομορφών δεν απέδωσαν επαναλήψιμες τιμές. Η διασπορά του παλμού δεν επέτρεπε σε μια συγκεκριμένη κορυφή να είναι μονίμως η μέγιστη (π.χ. η πέμπτη ή η έκτη) και ως εκ τούτου παρουσιάζονται ασυνέχειες στην καμπύλη ταχύτητας-συχνότητας. Στο αντίστοιχο κεφάλαιο παρουσιάζονται ενδεικτικές ταχύτητες ομάδας υπολογισμένες μέσω της τεχνικής διαφοράς φάσης.

4.2.1 Επίδραση καθυστέρησης συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση μέτρησης ταχύτητας παλμού σκληρυμένου σκυροδέματος, αυτή μετράται από τη χρονική διαφορά του λαμβανομένου και του ηλεκτρικού σήματος. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως και λόγω του μικρού πάχους των δοκιμίων νωπού κονιάματος, ο χρόνος διάδοσης είναι επίσης μικρός, καθιστώντας αναγκαίο τον υπολογισμό και την εκ των υστέρων αφαίρεση της χρονικής καθυστέρησης του συστήματος (delay time) από τη χρονική διαφορά λαμβανομένου και ηλεκτρικού για να υπολογισθούν πραγματικές τιμές ταχύτητας. Η καθυστέρηση αυτή αποδίδεται στη διάδοση

του κύματος μέσω της πλάκας προστασίας του αισθητήρα (wearplate), στο χρόνο μετατροπής ενέργειας στον πιεζοκρύσταλλο αλλά και στην απόκριση καλωδίων [7], με αποτέλεσμα η διαταραχή με μορφή πίεσης να εισέρχεται στο δοκίμιο, με χρονική καθυστέρηση σε σχέση με την εισαγωγή του ηλεκτρικού παλμού από το χρήστη.

Για τον προσδιορισμό της καθυστέρησης του συστήματος, δt , έγιναν μετρήσεις σε υλικά αναφοράς. Η απόσταση των αισθητήρων πήρε διάφορες τιμές για κάθε μέτρηση. Ωστόσο, αφού η ταχύτητα του υλικού αναφοράς C_{ref} , είναι σταθερή ανεξάρτητα από την απόσταση μέτρησης, η καθυστέρηση δt μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως: Για δύο διαφορετικές αποστάσεις (S_1 και S_2) και ένα συγκεκριμένο παλμό, η χρονική διαφορά μεταξύ της εισαγωγής του ηλεκτρικού και της άφιξης του λαμβανόμενου σήματος, μετράται ως t_1 και t_2 αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές περιέχουν το δt :

$$\delta t = \frac{S_2 t_1 - S_1 t_2}{S_2 - S_1} \quad (4.4)$$

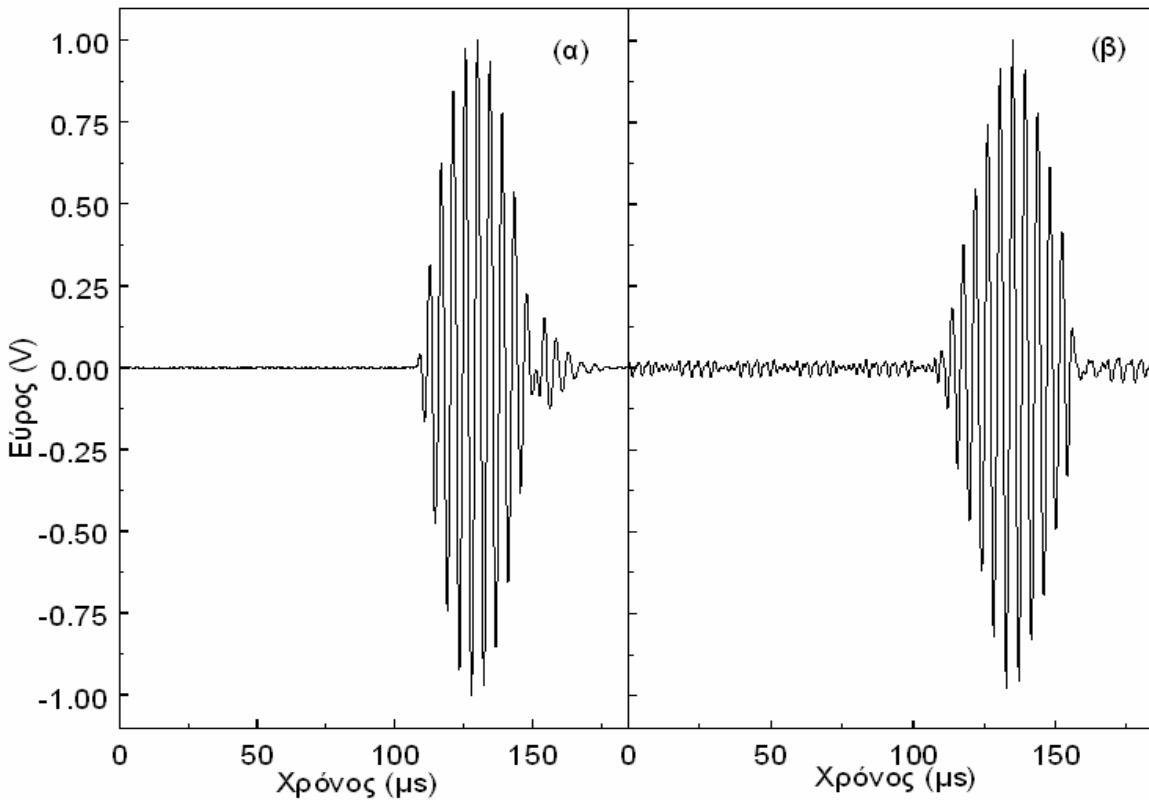
Για να βελτιωθεί η ακρίβεια, η καθυστέρηση αυτή μετρήθηκε σε διαφορετικά υλικά και συγκεκριμένα νερό, νωπή τσιμεντόπαστα, δοκίμιο χάλυβα και δοκίμια σκληρυμένου σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά κοντά, ενώ ταυτόχρονα δεν κατεδείκνυαν αξιόλογη εξάρτηση από τη συχνότητα. Έτσι, η καθυστέρηση του συστήματος υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος, όλων των επιμέρους μετρήσεων σε όλες τα υλικά, συγκεκριμένα στην τιμή $1.575\mu s$. Αυτή η τιμή αφαιρέθηκε από τη χρονική διαφορά μεταξύ του ηλεκτρικού και λαμβανόμενου σήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι αφαιρώντας την παραπάνω τιμή από μετρήσεις σε δοκίμια νερού, για σήματα κεντρικών συχνοτήτων από 20kHz έως 1MHz η ταχύτητα διάδοσης παρουσιάζει σχεδόν σταθερή τιμή $1501m/s$ ανεξάρτητα της συχνότητας με τυπική απόκλιση $7.8m/s$. Η αναγκαιότητα της αφαίρεσης της χρονικής αυτής καθυστέρησης μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή αφού για παράδειγμα και όπως θα φανεί σε επόμενο κεφάλαιο, ο χρόνος διάδοσης παλμού 500kHz μέσω δοκιμίου τσιμεντόπαστας είναι $6.52\mu s$ ενώ με τη χρονική καθυστέρηση μετράται σε $8.09\mu s$. Έτσι η ταχύτητα ($1580m/s$), χωρίς την εξαίρεση της καθυστέρησης θα υπολογιζόταν σε 1275, περίπου 19% χαμηλότερη. Για δοκίμια κονιάματος με υψηλό ποσοστό άμμου, καθώς ο χρόνος διάδοσης, όπως επίσης

θα φανεί, είναι χαμηλότερος (περίπου 4 μ s), αγνοώντας την καθυστέρηση θα προέκυπταν ακόμα μεγαλύτερα σφάλματα (πάνω από 25%). Παρότι το σφάλμα αυτό δεν αποτρέπει τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών υλικών, είναι σημαντικό για τη μέτρηση ρεαλιστικών τιμών ταχύτητας παλμού.

Υπενθυμίζεται ότι η καθυστέρηση αυτή ελήφθη υπόψη μόνο στον υπολογισμό της ταχύτητας παλμού, λόγω του ότι αυτή πραγματοποιήθηκε από τη διάδοση του κύματος ανάμεσα σε πομπό και δέκτη. Σε περίπτωση όπου χρησιμοποιείται διάταξη με δύο δέκτες σε συγκεκριμένη απόσταση, τότε προφανώς η καθυστέρηση είναι ίδια και στις δύο μετρήσεις και ως εκ τούτου ακυρώνεται και δεν επηρεάζει τις μετρήσεις. Ωστόσο, στην περίπτωση του σκληρυμένου σκυροδέματος λόγω γεωμετρίας (κυβικά δοκίμια) δεν ήταν δυνατή η μέτρηση σε άλλη απόσταση από τα 150mm (πλην μιας ενδεικτικής), ενώ στην περίπτωση του νωπού κονιάματος, παρότι ελέγχθηκαν όπως θα περιγραφεί δοκίμια διαφορετικού πάχους, σε αποστάσεις πάνω από περίπου 10mm υπήρχε πρόβλημα ανιχνευσιμότητας της αρχής της κυματομορφής (leading edge) για σήματα σε κάποιες ζώνες συχνοτήτων λόγω εξασθένησης του υλικού. Έτσι χρησιμοποιήθηκε ο χρόνος διάδοσης ανάμεσα σε πομπό και δέκτη, αφού πρώτα υπολογίστηκε με ακρίβεια και αφαιρέθηκε η καθυστέρηση του συστήματος. Και σε αυτή την περίπτωση βέβαια, των 10mm, είναι ουσιώδες ο θόρυβος να μην είναι συγκρίσιμος με το εύρος του πρώτου κύκλου της κυματομορφής ούτως ώστε να μπορεί να γίνει αξιόπιστη καταγραφή του χρόνου μετάβασης. Η σημασία αυτή και πως επιδρά ο θόρυβος στην τιμή της ταχύτητας παλμού θα αναφερθεί αργότερα.

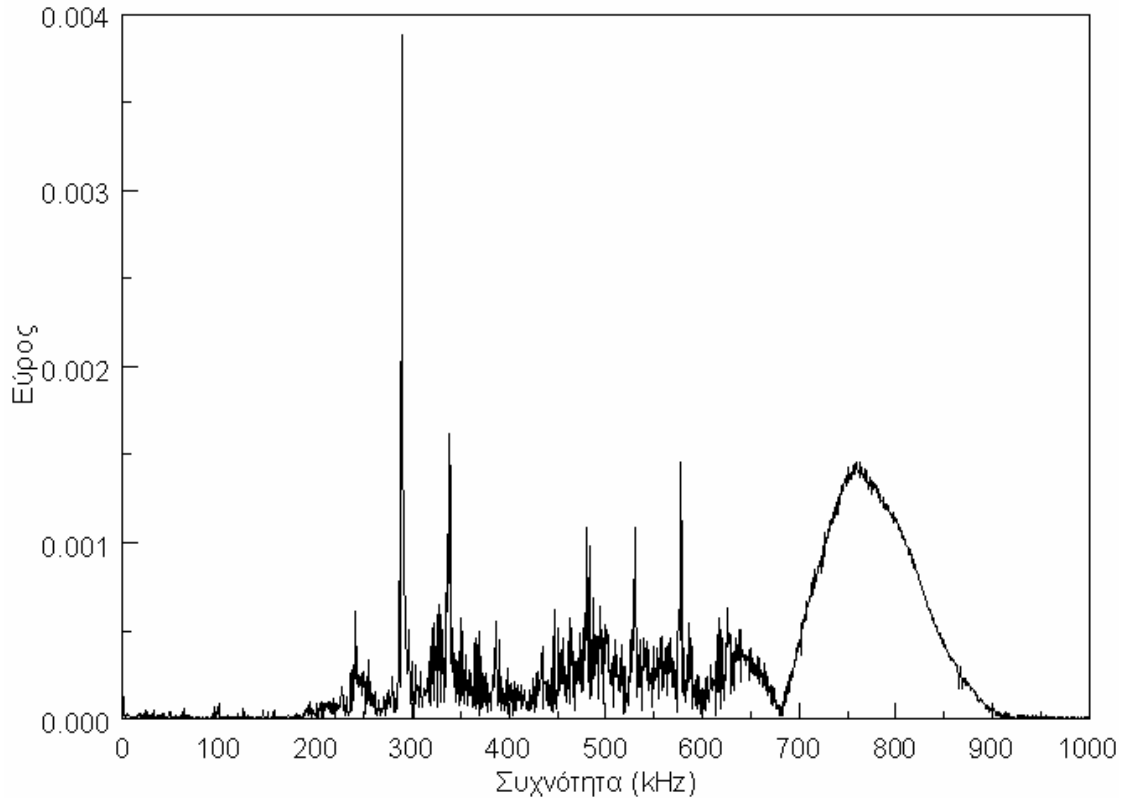
Αξίζει ωστόσο, στο σημείο αυτό, να σημειωθεί ότι παρότι για τον σημαντικό όγκο των μετρήσεων ο θόρυβος ήταν χαμηλού επιπέδου με χρήση της νέας έκδοσης της γεννήτριας παλμών, ένα μεγάλο μέρος πειραμάτων έγινε με την πρώτη έκδοση της γεννήτριας, που δεν παρουσίαζε ικανοποιητικά υψηλό λόγο σήματος/θόρυβο. Στα Σχ.4.14(α) και (β), περιέχονται δύο παραδείγματα κυματομορφών 225kHz σε τσιμεντόπαστα από πειράματα με τη νέα και την προηγούμενη έκδοση της γεννήτριας αντίστοιχα. Είναι σαφές γιατί η τάση κατωφλίου για τη μέτρηση χρόνου είναι αυξημένη στη δεύτερη περίπτωση, γεγονός που επιδρά αρνητικά αφού κατ' αυτόν τον τρόπο, πιθανόν η πρώτη ή οι πρώτες κορυφές του σήματος

χάνονται με συνέπεια τον υπολογισμό χρόνου μετάβασης υψηλότερου από τον πραγματικό [8].



Σχ.4.14. Κυματομορφές 225kHz σε τσιμεντόπαστα με (α) χαμηλό και (β) υψηλό επίπεδο θορύβου.

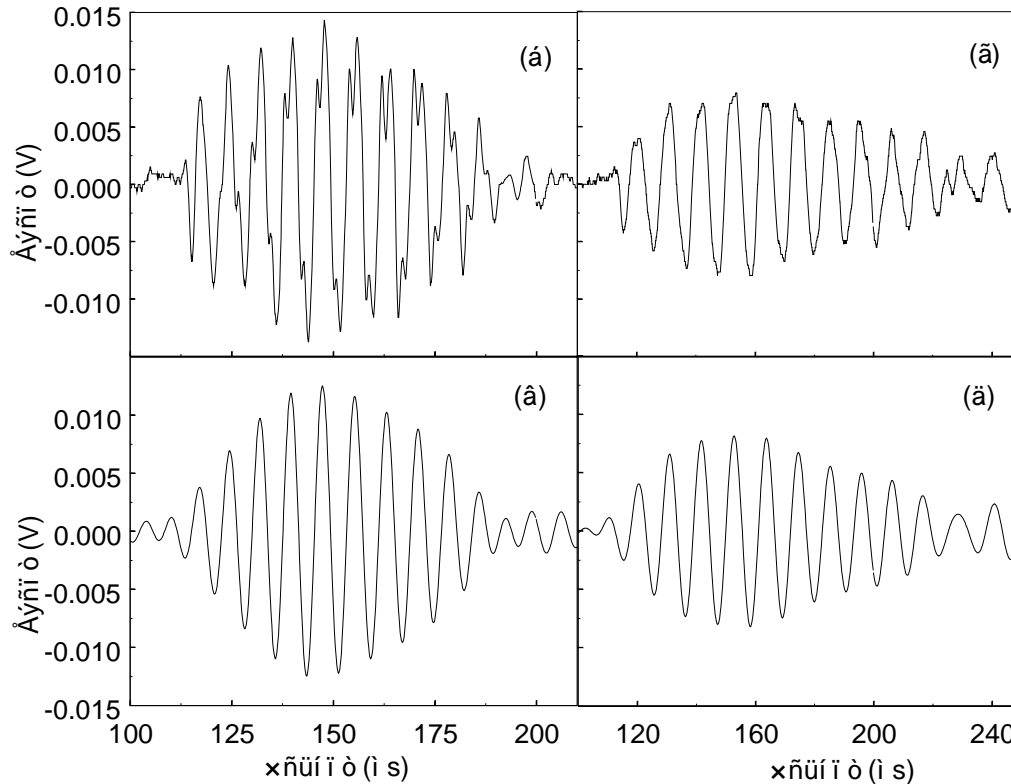
Ο ηλεκτρικός θόρυβος, όπως παρουσιάζεται στο Σχ.4.14(β) αποτελείτο από διαδοχικά κυματοπακέτα 4-5 κύκλων. Το περιεχόμενο συχνοτήτων αυτού φαίνεται στο Σχ.4.15. όπου παρουσιάζεται ο μετασχηματισμός Fourier, σήματος τσιμεντόπαστας καταγεγραμμένο με την αρχική γεννήτρια. Ενώ υπάρχει περιεχόμενο κοντά στα 800kHz που οφείλεται στη συχνότητα διέγερσης, οι υψηλότερες κορυφές είναι τοποθετημένες πολύ μακριά λόγω έντονου ηλεκτρικού θορύβου με συνέπεια να δυσχεραίνεται η ανάλυση, ιδίως σημάτων σε συχνότητες 250-350kHz. Σημειώνεται ότι μετασχηματισμοί Fourier για τις ανάγκες τις παρούσας διατριβής έγιναν μέσω εντολών (FFT) του προγράμματος Microcal Origin, του Matlab άλλα και νέας ρουτίνας (Discrete FT) που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε σε γλώσσα Visual Basic, χωρίς οι παραπάνω τρόποι να παρουσιάζουν διαφορές στο αποτέλεσμα.



Σχ.4.15. Μετασχηματισμός Fourier σήματος τσιμεντόπαστας, με υψηλό επίπεδο θορύβου.

Η φασική ταχύτητα λόγω της επιλογής σημείων αναφοράς στο κέντρο του παλμού (4η έως 7η κορυφή), όπου το εύρος είναι σαφώς μεγαλύτερο από τα άκρα μετρήθηκε από το χρόνο διάδοσης, στην ουσία, μεταξύ δύο δεκτών (απόσταση 8.3mm μεταξύ τους) με συνέπεια να μην επηρεάζεται από την καθυστέρηση που αναφέρθηκε παραπάνω. Σε περιορισμένες περιπτώσεις όπου το χαμηλό εύρος δημιουργούσε αβεβαιότητα ως προς την ακρίβεια τοποθέτησης και αυτών ακόμα των φασικών σημείων, βλ. Σχ.4.16 η εφαρμογή ζωνοπερατού φίλτρου $[f-30\text{kHz}, f+30\text{kHz}]$, όπου f η κεντρική συχνότητα του σήματος, αποδείχθηκε πολύ χρήσιμη αφού διευκόλυνε την επιλογή των σημείων αυτών. Οι περιπτώσεις Σχ.4.16(α) και (β) αφορούν σε κυματομορφή από τσιμεντόπαστα $w/c=0.525$ κεντρικής συχνότητας 125kHz όπως καταγράφηκε σε απόσταση 18.55mm και κατόπιν εφαρμογής του φίλτρου. Ομοίως στις περιπτώσεις του Σχ.4.16(γ) και (δ) φαίνεται η επίδραση της εφαρμογής του φίλτρου σε κυματομορφή ίδιας απόστασης και κεντρικής συχνότητας 90kHz σε κονίαμα $w/c=0.525$ και $s=30\%$. Είναι σαφές ότι η εφαρμογή του φίλτρου χωρίς να αλλάζει τη μορφή του παλμού,

απλώς καθιστά πιο ευδιάκριτα τα σημεία αναφοράς (κορύφες). Η εφαρμογή του φίλτρου έγινε μέσω του εργαλείου FFT του λογισμικού Microcal Origin.



Σχ. 4.16. (α) και (β) κυματομορφή 125kHz μετά από 18.55mm τσιμεντόπαστας πριν και μετά την εφαρμογή φίλτρου. (γ) και (δ) αντίστοιχα για κυματομορφή 90kHz σε κονίαμα

4.3 Μετρήσεις εξασθένισης

Εφόσον οι ίδιοι αισθητήρες και το ίδιο ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια όλων των μετρήσεων σε κάθε υλικό, αλλαγές στο λαμβανόμενο εύρος από σύσταση σε σύσταση, μπορούν να αποδοθούν απ' ευθείας στην εξασθένιση που οφείλεται του υλικού. Στην έννοια αυτή εμπεριέχονται όλοι οι μηχανισμοί είτε αφορούν σε απορρόφηση (μετατροπή σε θερμότητα) είτε σε σκέδαση (εκτροπή από την αρχική διεύθυνση διάδοσης της ενέργειας) που δεν είναι εύκολο να διαχωριστούν οι επί μέρους συνεισφορές τους. Η γεωμετρική εξασθένιση, που οφείλεται στο άνοιγμα της δέσμης και στη μείωση του εύρους ταλάντωσης, έχει σε κάθε περίπτωση την ίδια επίδραση αφού τα δοκίμια είναι ίδιου μεγέθους (κύβοι 150mm για την περίπτωση του σκληρυμένου και δοκίμια πάχους 10.6mm για νωπό

κονίαμα). Η εξασθένιση (σε dB/mm) υπολογίζεται από τη μείωση του εύρους του παλμού, ο οποίος διαδόθηκε σε μια γνωστή απόσταση μέσα στο υλικό:

$$\alpha = -\frac{20}{x} \log\left(\frac{A_x}{A_0}\right) \quad (4.5)$$

όπου A_0 είναι το αρχικό εύρος του παλμού και A_x είναι το εύρος αφού έχει διαδοθεί σε απόσταση x .

Το εύρος της εξόδου (A_x) είναι η απόλυτη μέγιστη τιμή της τάσης του λαμβανομένου σήματος, ενώ το εύρος του παλμού που εισάγεται στο δοκίμιο μετρήθηκε χωριστά. Στην περίπτωση μετρήσεων σε σκληρυμένο σκυρόδεμα καταγράφηκε με τους αισθητήρες σε μία διάταξη πρόσωπο με πρόσωπο με την παρουσία μικρής ποσότητας γράσου ενδιάμεσα. Από την άλλη για τον έλεγχο του νωπού, το σήμα εισόδου μετρήθηκε σε δοκίμιο νερού που θεωρείται, και δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα όπως θα δούμε λόγω χαμηλής εξασθένισης, ιδανικό.

Η διαφορά εύρους ανάμεσα στον εισαγόμενο στο δοκίμιο παλμό και τον λαμβανόμενο παρότι δεν μπορεί να χαρακτηριστεί απόλυτη μέτρηση του συντελεστή εξασθένισης, είναι μία ένδειξη της εξασθένισης που χρησιμοποιείται αφού μέτρηση σε άλλη απόσταση δεν επιτρέπεται από την γεωμετρία του δοκιμίου και τη φύση του παρατηρούμενο κύματος. Μία πηγή απωλειών, κυρίως σχετικά με τις μετρήσεις σε δοκίμια σκληρυμένου υλικού, είναι η ακουστική σύζευξη μεταξύ δοκιμίου και αισθητήρα [9]. Ωστόσο, στην [9], οι απώλειες θεωρούνται ανεξάρτητες της συχνότητας και εξαιρούνται από τη διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή εξασθένισης, ενώ στην [10] ο συντελεστής απωλειών σύζευξης ποικίλει με την τραχύτητα της επιφάνειας του δοκιμίου. Παρότι η σύζευξη δεν μπορεί να είναι ίδια σε κάθε πείραμα, οι μετρήσεις έγιναν όλες από τον ίδιο χειριστή ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τυχαίες επιδράσεις. Έτσι, διαφορές στο μετρούμενο σήμα διαφορετικών υλικών αποδίδονται στη φύση του υλικού, αφού και η διαδικασία παρασκευής (σύμφωνη με τον κανονισμό ΣΚ303, αντίστοιχο του ASTM C192) που περιλαμβάνει χρήση μεταλλικής μήτρας για χύτευση, οδηγεί στην ίδια καλή ποιότητα επιφάνειας για όλα τα δοκίμια. Εκτός αυτών, πριν ξεκινήσουν οι μετρήσεις σε κάθε δοκίμιο και αφού οι αισθητήρες ήταν τοποθετημένοι στις απέναντι έδρες, ελεγχόταν η διάδοση των

χαμηλότερων συχνοτήτων, οι οποίες απέχουν περισσότερο από την κεντρική ευαισθησία του αισθητήρα (500kHz). Εφόσον η διάδοση ήταν ικανοποιητική, το πείραμα συνεχιζόταν και αυτό ήταν η εγγύηση ότι και οι υπόλοιπες συχνότητες διαδίδονταν με ικανοποιητικό τρόπο.

Βιβλιογραφία

- [1] J. S. Popovics, J. L. Rose, S. Popovics, V. L. Newhouse, P. Lewin, N. Bilgutay, Approaches for the generation of stress waves in concrete, *Experimental Mechanics* 35(1) (1995) 36-41
- [2] B. J. Tucker, Ultrasonic plate waves in wood-based composite panels, PhD thesis, Washington University, 2001
- [3] V. K. Kinra, M. S. Petraitis, S. K. Datta, Ultrasonic wave propagation in a random particulate composite, *Int. J. Solids Structures* (16) (1980) 301-312
- [4] W. Sachse, Y.-H. Pao, On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids, *J. Appl. Phys.* 49 (8) (1978) 4320-4327
- [5] G. A. Washer, R. E. Green, R. B. Pond Jr, Velocity constants for ultrasonic stress measurement in prestressing tendons, *Res. Nondestr. Eval.* (14) (2002) 81-94
- [6] Y. H. Kim, S. J. Song, S. D. Kwon, Measurement of phase velocity dispersion curves and group velocities in a plate using leaky Lamb waves, NDE2002, National Seminar of ISNT, Chennai, 5-7 Dec 2002
- [7] K. A. Fowler, G. M. Elfbaum, K. A. Smith, T. J. Nelligan, Theory and Application of Precision Ultrasonic Thickness Gaging, *NDTnet*, 10 (2) (1997)
- [8] E. G. Nesvijski, T. E. Nesvijski, On the uncertainty of time-frequency domain resolution for ultrasonic velocity evaluation of surface elastic waves, 15th World Conference on Nondestructive Testing (WCNDT), Roma, 15-21 Oct 2000
- [9] P. J. Monteiro, M. S. King, Experimental studies of elastic wave propagation in high – strength mortar, *Cement Concrete and Aggregates*, 10 (2) (1988) 68-74
- [10] K. Tharmaratnam, B. S. Tan, Attenuation of ultrasonic pulse in cement mortar, *Cement Concrete Res* (20) (1990) 335-345

5. Μετρήσεις μεταβλητής συχνότητας σε σκληρυμένο σκυρόδεμα

Όπως προαναφέρθηκε οι μετρήσεις αυτές είχαν σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων χαρακτηριστικών, όπως σύστασης, ποσότητας και μεγέθους αδρανών στην κυματική διάδοση σε συχνότητες έως και 1MHz.

5.1 Έρευνες σχετικά με διασπορά και εξασθένιση σκυροδέματος

Σε μέχρι τώρα έρευνες έχει δειχθεί ότι το σκυρόδεμα εμφανίζει διασπορά όπως προέκυψε από την ανάλυση σημάτων επιφανειακών κυμάτων που καταγράφηκαν σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας δοκιμίου κονιάματος [1]. Η διασπορά έχει σχετισθεί με το μέγεθος των αδρανών [2], καθώς η υπολογισμένη φασική ταχύτητα μέχρι συχνότητα 10MHz, παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση από την ταχύτητα που μετρήθηκε πειραματικά με διέγερση 500kHz σε σκυρόδεμα απ' ότι σε κονίαμα ή σε τσιμεντόπαστα. Ως προς την εξασθένιση, το αυξανόμενο μέγεθος των αδρανών έχει θεωρηθεί υπεύθυνο για υψηλότερη εξασθένιση σκυροδέματος για συχνότητες μέχρι 1MHz μέσω σκέδασης [3]. Ωστόσο, σε άλλες εργασίες [2,4,5] η εξασθένιση δεν αυξάνει με το μέγεθος αδρανών. Αυτή η συμπεριφορά έχει αποδοθεί στην παρουσία εγκλωβισμένων φυσαλίδων [2], ή στην παρουσία των χαλικιών που λόγω μεγέθους και ομοιογένειας διευκολύνουν την διάδοση υψηλών συχνοτήτων [4]. Επίσης στην [5], μετά από εξέταση σκυροδέματος με διαφορετικά μεγέθη αδρανών με χρήση επιφανειακών κυμάτων συμπεραίνεται ότι οι απώλειες λόγω σκέδασης είναι αμελητέες σε σχέση με απώλειες απορρόφησης. Ως εκ τούτου, μια καθαρή σχέση μεταξύ κοκκομετρίας αδρανών και εξασθένισης σήματος από σκυρόδεμα δεν έχει γίνει ευρέως αποδεκτή. Επίσης, και όσον αφορά στην ταχύτητα παλμού, έχει δειχθεί ότι αύξηση σε περιεκτικότητα αδρανών με μεγαλύτερη ακουστική εμπέδηση από την τσιμεντόπαστα έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη ταχύτητα και μείωση του περιεχομένου υψηλών συχνοτήτων του διαδιδόμενου σήματος, ενώ η διάμετρος των εγκλεισμάτων δεν επιδρά καίρια στην ταχύτητα [6].

Τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής καταδεικνύουν την επίδραση του ποσοστού άμμου και αδρανών, στα κυματικά χαρακτηριστικά, δηλαδή την ταχύτητα παλμού και το εύρος, ενώ η συνεισφορά της ελαστικότητας της μήτρας, που ελέγχεται κυρίως από το λόγο

w/c είναι επίσης ανιχνεύσιμη. Παράλληλα, σύγκριση δεδομένων από σκυρόδεμα, κονίαμα και τσιμεντόπαστα καθιστά σαφή τον ρόλο των αδρανών στην κυματική διάδοση σε τέτοια υλικά. Ως προς την ερμηνεία των αποτελεσμάτων εξετάζεται η σκέδαση σε αδρανή που όμως δεν φαίνεται να προβλέπει την παρατηρούμενη διασπορά. Η προσέγγιση με ιξωδοελαστικό μοντέλο παρέχει καλύτερη ερμηνεία, ενώ για πρώτη φορά το σκυρόδεμα μελετάται ως υλικό με μικροδομή, η σχετική κίνηση της οποίας ως προς τη μακροδομή έχει ως αποτέλεσμα συμπεριφορά διασποράς. Συγκεκριμένα, η θεωρία Mindlin [7], με παραμέτρους άμεσα σχετιζόμενες με την κοκομετρία του σκυροδέματος επιτυγχάνει πολύ καλές προβλέψεις όσον αφορά στη διασπορά του υλικού.

5.2 Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διάταξη για τον έλεγχο των δοκιμών σκυροδέματος και κονιάματος με μεταβλητή συχνότητα παρουσιάζει ομοιότητες με αυτή που προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, με τη διαφορά ότι οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν, είχαν υψηλότερη συχνότητα και μεγαλύτερο εύρος ευαισθησίας. Συγκεκριμένα πρόκειται για τους Panametrics V413 με κεντρική συχνότητα 500kHz. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια παλμών PAC Wavegen 1410, Version 2.0 με δυνατότητα παραγωγής ποικίλων μορφών διέγερσης. Επίσης ο ρυθμός δειγματοληψίας ορίστηκε στα 10MHz για να καταγράφει αξιόπιστα και τις υψηλότερες συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν (1MHz). Οι παραλληλόγραμμοι σχήματος αισθητήρες τοποθετήθηκαν στο κέντρο δύο απέναντι εδρών του κύβου. Η ακουστική σύζευξη που επετεύχθη με το γράσο, δεν απαιτούσε την άσκηση επιπλέον πίεσης.

Οι κυματομορφές που επελέγησαν ως διέγερση είναι της μορφής του Σχ.4.1(α). Διαφορετικής συχνότητας όμοια σήματα χρησιμοποιήθηκαν, με κεντρική συχνότητα από 15kHz έως 1MHz. Λόγω υψηλής εξασθένησης του υλικού, σε πολλές περιπτώσεις, αξιόπιστο σήμα λαμβάνεται μέχρι τα 800kHz.

Η μελέτη αυτή έγινε στην προσπάθεια κατανόησης της κυματικής διάδοσης στο υλικό χωρίς να είναι άμεσα προσανατολισμένη στον προσδιορισμό του w/c. Έτσι δοκιμάστηκε ενδεικτικά ένας κύβος από κάθε υπάρχουσα σύσταση σκυροδέματος και κονιάματος για την ποιοτική επίδραση της σύστασης στην παρατηρούμενη διασπορά και εξασθένηση, δηλαδή συνολικά

24 δοκίμια. Επιπλέον παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο του ΕΙΧΗΜΥΘ/ΙΤΕ πέντε δοκίμια τσιμεντόπαστας διαστάσεων 50x30x40mm³ (πάχος μέτρησης 30mm) και λόγους w/c 0.375, 0.425, 0.45, 0.50 and 0.55 για την εκτίμηση της διασποράς και εξασθένησης στο μητρικό υλικό του κονιάματος/σκυροδέματος.

5.3 Μετρήσεις εξασθένησης

Η εξέταση του εύρους των σημάτων σε διαφορετικές συχνότητες κατέδειξε ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά σχετιζόμενα με την περιεκτικότητα και το μέγεθος των αδρανών. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι μετρήσεις αυτές αφορούν στο σύνολο της εξασθένησης που οφείλεται στη συνδυασμένη επίδραση τόσο της απορρόφησης, όσο και της σκέδασης, ενώ η γεωμετρική εξασθένηση λόγω ανοίγματος της δέσμης έχει την ίδια επίδραση εφόσον και το μέγεθος των δοκιμίων είναι σταθερό. Η εξασθένηση υπολογίζεται από τη μείωση του εύρους του παλμού, ο οποίος διαδόθηκε σε μια γνωστή απόσταση μέσα στο υλικό:

$$\alpha = -\frac{20}{x} \log\left(\frac{A_x}{A_0}\right) \quad (5.1)$$

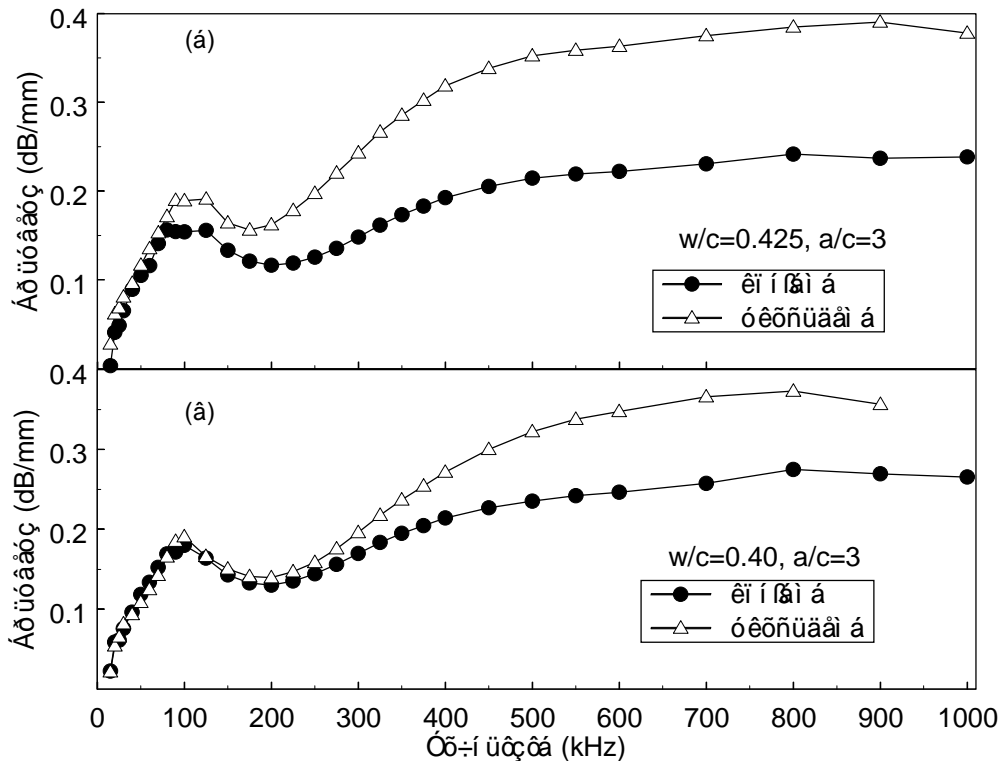
όπου A_0 είναι το αρχικό εύρος του παλμού και A_x είναι το εύρος αφού έχει διαδοθεί σε απόσταση x .

Το εύρος της εξόδου (A_x) είναι η απόλυτη τιμή της τάσης του λαμβανομένου σήματος, ενώ το εύρος του παλμού που εισάγεται στο δοκίμιο μετρήθηκε χωριστά με τους αισθητήρες σε μία διάταξη πρόσωπο με πρόσωπο με την παρουσία μικρής ποσότητας γράσου ενδιάμεσα. Η διαφορά εύρους ανάμεσα στον εισαγόμενο στο δοκίμιο παλμό και το λαμβανόμενο παρότι δεν μπορεί να χαρακτηριστεί απόλυτη μέτρηση του συντελεστή εξασθένησης, είναι μία ένδειξη της εξασθένησης που χρησιμοποιείται αφού μέτρηση σε άλλη απόσταση δεν επιτρέπεται από την γεωμετρία του δοκιμίου και τη φύση του παρατηρούμενο κύματος. Ωστόσο είναι κατάλληλη για τη μελέτη της επίδρασης της διαφορετικής σύστασης, αφού η διέγερση διατηρείται σταθερή σε όλες τις μετρήσεις, καθιστώντας υπεύθυνο για οποιαδήποτε μεταβολή του σήματος το υλικό του δοκιμίου.

Είναι σαφές ότι το εύρος δοκιμίων τσιμεντόπαστας δεν μπορεί απ' ευθείας να συγκριθεί με κονιάματος ή σκυροδέματος, λόγω διαφορετικού μεγέθους δοκιμίου και γι' αυτό το λόγο παρουσιάζεται χωριστά.

5.3.1 Αποτελέσματα εξασθένισης

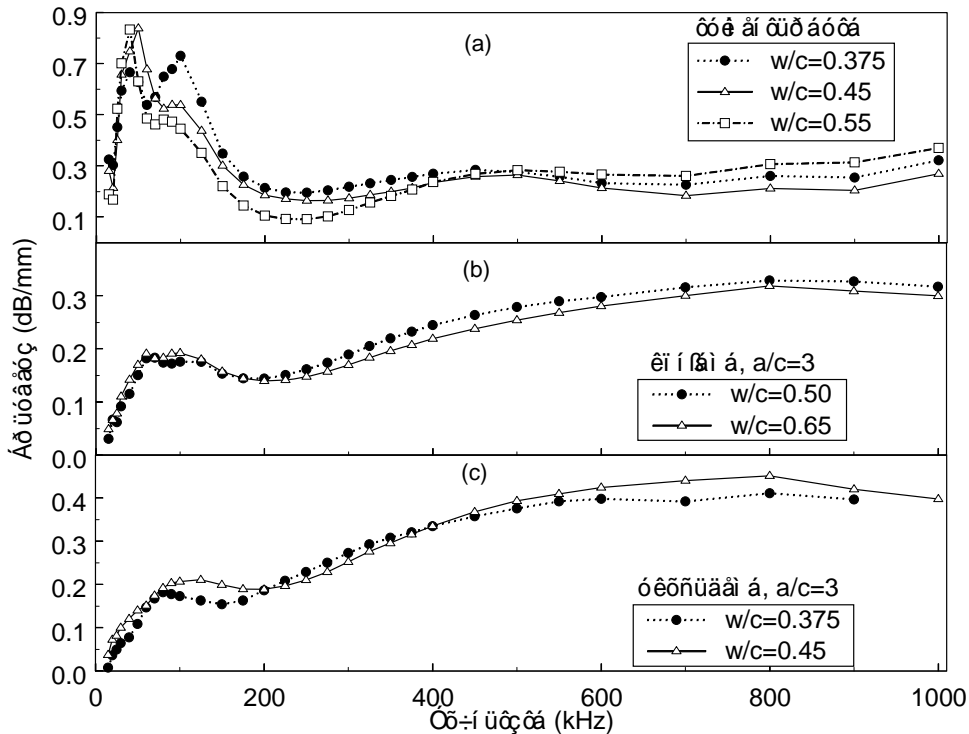
Η εξέταση κυματομορφών των τριών διαφορετικών υλικών κατέδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Ο βαθμός ανομοιογένειας αυξάνει από την τσιμεντόπαστα στο κονίαμα λόγω της ύπαρξης της άμμου και ακόμα περισσότερο στο σκυρόδεμα λόγω της ύπαρξης χαλικιών διαστάσεων ακόμα και μερικών εκατοστών. Γι' αυτό η επίδραση της δομής του υλικού στο διαδιδόμενο κύμα είναι μεγάλου ενδιαφέροντος. Σύγκριση μεταξύ σκυροδέματος και κονιάματος με τους ίδιους λόγους w/c και a/c δείχνει ότι το σκυρόδεμα παρουσιάζει υψηλότερη εξασθένιση, συμπεριφορά πιο καθαρή πάνω από τα 100kHz, όπως φαίνεται στο Σχ.5.1. Και στις δύο περιπτώσεις του σχήματος ο λόγος a/c είναι 3 ενώ ο λόγος w/c είναι 0.425 στην περίπτωση του Σχ.5.1(α) και 0.40 για το (β). Κατά συνέπεια αυτή η διαφορά σε εξασθένιση μπορεί να αποδοθεί στο διαφορετικό μέγεθος των αδρανών με την άμμο του κονιάματος να φτάνει σε μέγιστη τιμή 4.75mm ενώ στο σκυρόδεμα ο μέγιστος κόκκος είναι 37.5mm. Εκτός αυτού, η γνωστή τάση αύξησης της εξασθένισης με τη συχνότητα για τέτοιου είδους υλικά [2-5,8] μπορεί να επιβεβαιωθεί για τη ζώνη 200-700kHz.



Σχ.5.1. Σύγκριση εξασθένισης συχνότητας κονιάματος και σκυροδέματος με $a/c=3$ και (α) $w/c=0.425$, (β) $=0.40$

Επιπλέον, η εξασθένιση της τσιμεντόπαστας φαίνεται στο Σχ.5.2(α). Η τσιμεντόπαστα φαίνεται να ευνοεί τη διάδοση συχνοτήτων πάνω από 200kHz ενώ αντιθέτως με το σκυρόδεμα και το κονίαμα, παρουσιάζει μεγάλη εξασθένιση σε χαμηλές συχνότητες. Αυτή είναι μια συμπεριφορά που παρατηρείται και στη νωπή τσιμεντόπαστα, όπως θα αναλυθεί αργότερα και πιθανώς να έχει την ίδια πηγή (εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα). Είναι ενδεικτικό ότι, παρά το ελαττωμένο μέγεθος δοκιμίου, για αρκετές συχνότητες κάτω από τα 100kHz, τα δοκίμια τσιμεντόπαστας παρουσιάζουν μικρότερο εύρος από τα δοκίμια κονιάματος ή σκυροδέματος των οποίων το πάχος κατά τη μέτρηση είναι 5 φορές μεγαλύτερο. Η υψηλότερη εξασθένιση της τσιμεντόπαστας για χαμηλές συχνότητες, σε σχέση με υλικό που περιέχει αδρανή έχει αναφερθεί και σε άλλες εργασίες [2,4]. Μια άλλη σημαντική διαφορά ανάμεσα στην τσιμεντόπαστα και το κονίαμα/σκυρόδεμα, είναι η περίπου σταθερή εξασθένιση της για συχνότητες πάνω από 200kHz, ενώ η εξασθένιση των

άλλων υλικών αυξάνει συνεχώς τουλάχιστον μέχρι τα 800kHz, όπως φαίνεται στα Σχ.5.2(β) και (γ) αντίστοιχα.



Σχ.5.2. Επίδραση w/c στην εξασθένιση (α) τσιμεντόπαστας, (β) κονιάματος και (γ) σκυροδέματος.

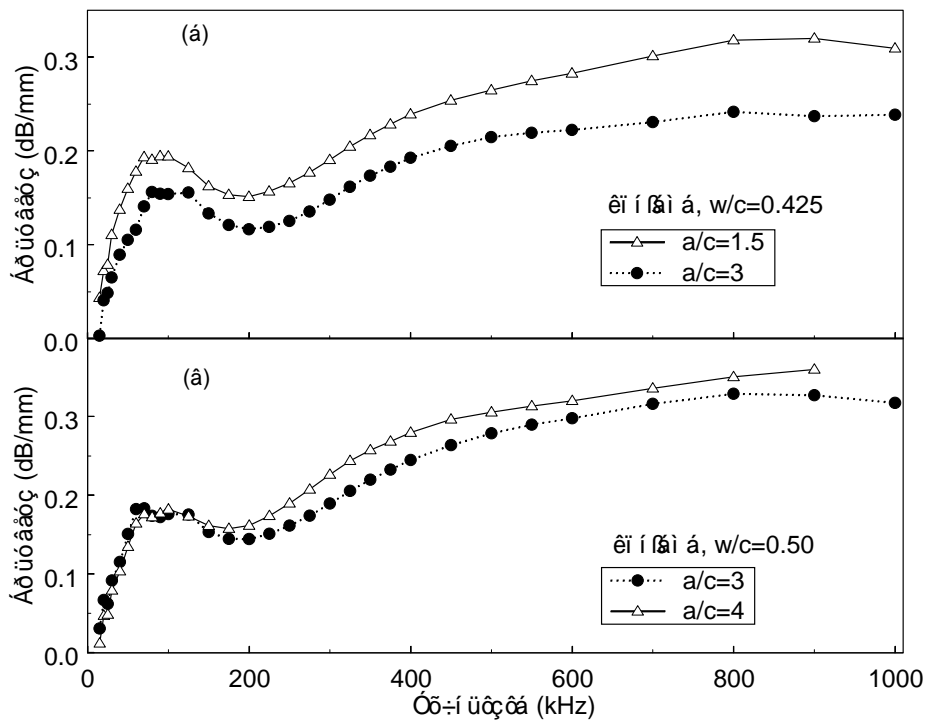
Ως εκ τούτου, συνάγεται ότι η παρουσία και το μέγεθος των εγκλεισμάτων, ασκεί σαφή επιρροή στην εξασθένιση του κύματος. Η επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό ή του λόγου w/c στην εξασθένιση, δεν είναι το ίδιο εμφανής. Αυτό ισχύει και για τους τρεις τύπους του υλικού (τσιμεντόπαστα, κονίαμα, σκυρόδεμα), όπως φαίνεται στα Σχ.5.2(α), (β), (γ) αντίστοιχα. Όσον αφορά σε κονίαμα, παρά το γεγονός ότι δοκίμιο κονιάματος με w/c=0.50 εμφάνισε, όπως θα φανεί παρακάτω, σαφώς υψηλότερες τιμές ταχύτητας παλμού από αντίστοιχο 0.65, η εξασθένιση των δύο δεν επηρεάζεται, ακολουθώντας περίπου την ίδια καμπύλη με τη συχνότητα, βλ. σχ5.2(β).

Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για το σκυρόδεμα. Στο Σχ.5.2(γ) φαίνονται οι καμπύλες εξασθένισης για δύο δοκίμια διαφορετικού w/c. Το σκυρόδεμα με w/c=0.45 δεν παρουσιάζει

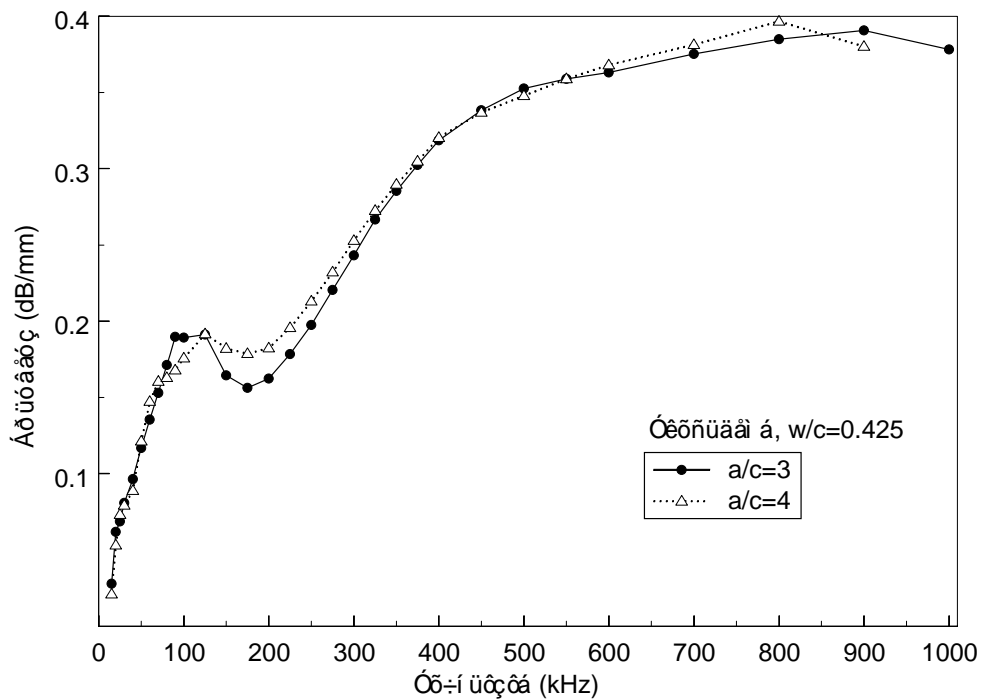
μονίμως υψηλότερη εξασθένιση, παρά το ότι για τις περισσότερες συχνότητες το εύρος του είναι χαμηλότερο. Η διαφορά του w/c των δύο κλάσεων υλικού ήταν, αντιθέτως, εμφανής στις θλιπτικές δοκιμές όπου για παράδειγμα στη ηλικία 2 ημερών το σκυρόδεμα 0.375 εμφάνισε αντοχή 39.2MPa, 8MPa υψηλότερη από του σκυροδέματος με $w/c=0.45$.

Έλεγχος κονιάματος με διαφορετική περιεκτικότητα σε άμμο έδειξε ότι αύξηση του a/c από 1.5 σε 3 (που αντιστοιχεί σε κατ' όγκο περιεκτικότητες περίπου 43.4% και 60.6%) διευκολύνει την κυματική διάδοση πιθανόν λόγω της αύξησης των μακροσκοπικών ελαστικών σταθερών του υλικού, βλ. σχ5.3(α). Επιπλέον αύξηση του a/c από 3 σε 4 (που για κονίαμα με $w/c=0.50$ αντιστοιχεί σε 57.7 και 64.5% κ.ο.) δεν δείχνει να επηρεάζει το ίδιο κρίσιμα το λαμβανόμενο σήμα, παρότι για συχνότητες υψηλότερες των 150kHz η τάση αντιστρέφεται και το κονίαμα με περισσότερη άμμο φαίνεται να έχει ελαφρώς υψηλότερη εξασθένιση. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στο ότι αυξανόμενης της περιεκτικότητας άμμου ταυτόχρονα με την ενίσχυση των ισοδύναμων ελαστικών σταθερών ενισχύονται και μηχανισμοί σκέδασης, που εξαρτώνται από την περιεκτικότητα εγκλεισμάτων.

Στο σκυρόδεμα δεν παρατηρείται ωστόσο κάποια αξιόλογη διαφοροποίηση αφού όπως φαίνεται στο Σχ.5.4, σκυρόδεμα με $a/c=3$ (περίπου 60% κ.ο.) δεν παρουσιάζει συστηματική διαφοροποίηση από το $a/c=4$. (66.5%κ.ο.)



Σχ.5.3. Επίδραση a/c στην εξασθένιση κονιάματος (α) με w/c=0.425 και (β) w/c=0.50.



Σχ.5.4. Επίδραση a/c στην εξασθένιση σκυροδέματος με w/c=0.425.

Ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα των παραπάνω μετρήσεων είναι η διαφορετική συμπεριφορά εξασθένησης μεταξύ τσιμεντόπαστας, κονιάματος και σκυροδέματος που σχετίζεται με την ανομοιογένειά τους. Η εξασθένηση για κονίαμα και σκυρόδεμα αυξάνει με τη συχνότητα παρουσιάζοντας ένα τοπικό ελάχιστο γύρω στα 200kHz. Όμοια συμπεριφορά εξασθένησης για τη ζώνη 200-1100kHz μετρημένη με επιφανειακά κύματα έχει αναφερθεί στις [1,5] ενώ στην [9] ο συντελεστής εξασθένησης μετρημένος μέσω ανακλώμενου σήματος σε δοκίμιο κονιάματος, παρουσιάζει γραμμική αύξηση για τη ζώνη περίπου 340-760kHz. Επίσης στην [10] η εξασθένηση κονιάματος, μετρημένη με απ' ευθείας διάδοση σε εμβαπτισμένα δοκίμια, αυξάνει μέχρι συχνότητες 1.5MHz.

Το μέγεθος αδρανών φαίνεται να επηρεάζει την ολική εξασθένηση· ωστόσο ο ακριβής μηχανισμός δεν είναι σαφής. Μια λογική εξήγηση που διερευνάται παρακάτω είναι η σκέδαση. Άλλη πιθανή σχέση του μεγέθους των αδρανών με την εξασθένηση είναι μέσω απωλειών στην διεπιφάνεια αδρανών-τσιμεντόπαστας. Παρότι δεν είναι σαφής, έχει θεωρηθεί υπεύθυνη για την διαφοροποίηση στην εξασθένηση ανάμεσα σε σκυροδέματα με διαφορετικά μεγέθη αδρανών [3,5].

5.4 Μετρήσεις διασποράς

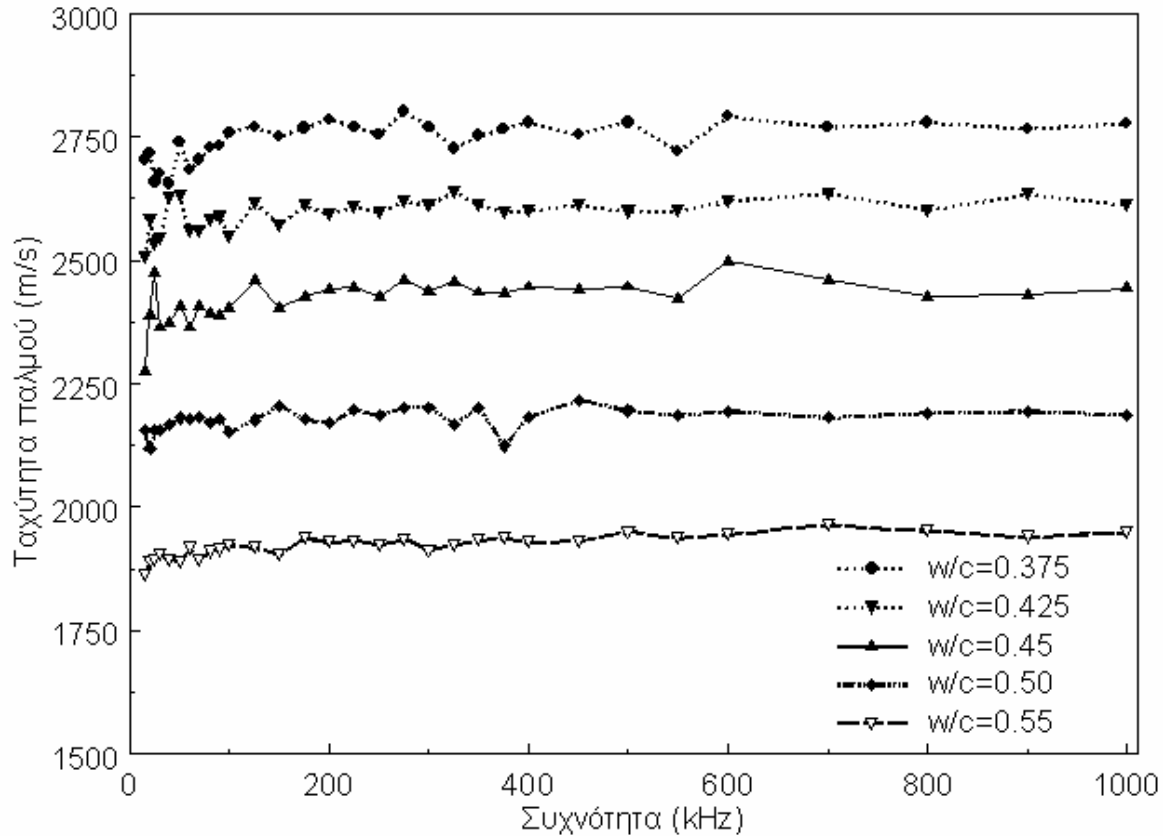
Το σκυρόδεμα, ως ένα πορώδες σύνθετο υλικό αποτελούμενο από άμμο και χονδρά αδρανή μέσα σε τσιμεντόπαστα, δεν μπορεί εκ των προτέρων να θεωρηθεί μη διασκορπίζον, όπως οποιοδήποτε ομογενές ελαστικό υλικό. Η συμπεριφορά του εξετάστηκε μέσω της φασικής ταχύτητας αλλά και της ταχύτητας παλμού που ορίζεται από τη χρονική διαφορά μεταξύ διέγερσης και απόκρισης. Σε μη διασκορπίζον υλικό οι δύο έννοιες αυτές παρουσιάζουν την ίδια τιμή. Στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην διατριβή αυτή, παρουσιάζονται ελαφρές διαφοροποιήσεις.

5.4.1 Αποτελέσματα ταχύτητας παλμού.

Το σκυρόδεμα και το κονίαμα έχουν αναφερθεί ως υλικά με μεγαλύτερη διασπορά από μέταλλο σε απ' ευθείας διάδοση διαμήκων κυμάτων [2] και κυμάτων Rayleigh [1]. Αποτελέσματα της παρούσας έρευνας φανερώνουν μια ανάλογη τάση σε χαμηλές

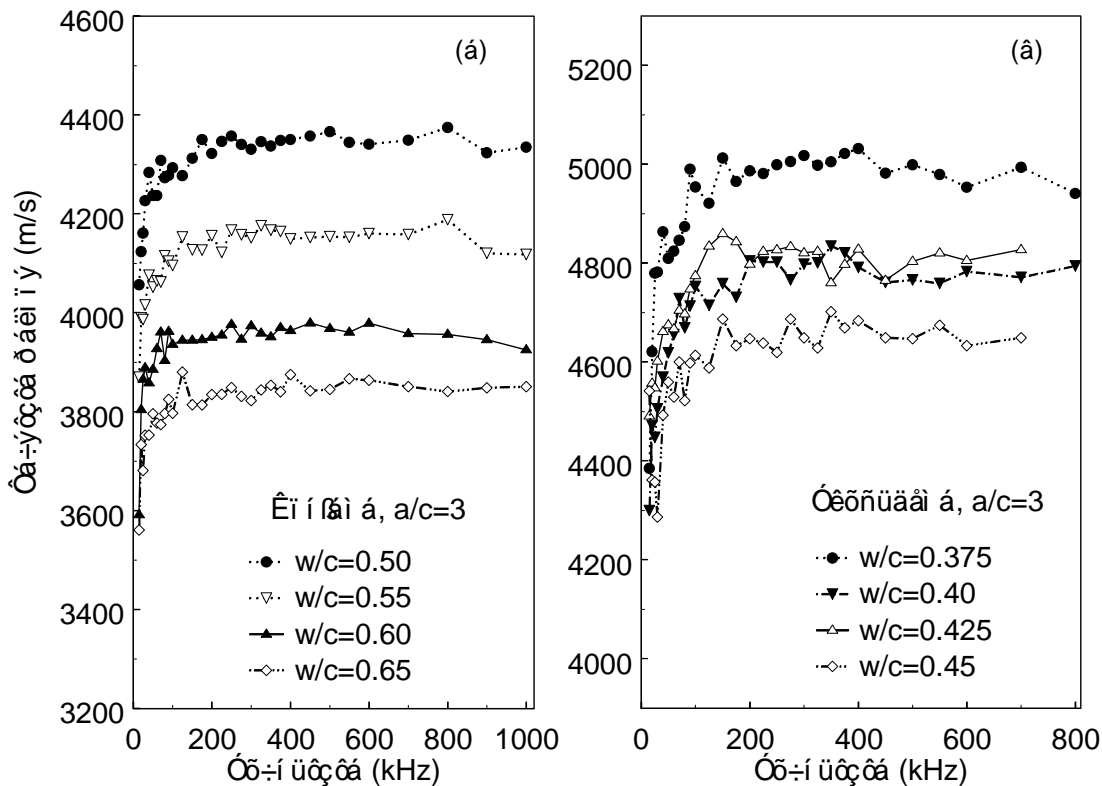
συχνότητες. Παρότι για τις χαμηλότερες συχνότητες που εξετάστηκαν, δηλαδή 15 και 20kHz ο εξοπλισμός λειτουργεί στα όρια του υπάρχοντος φίλτρου της κάρτας καταγραφής, εφόσον οι κυματομορφές δεν καταδεικνύουν διαστρέβλωση του κύματος ή μεταβολή του περιεχομένου συχνοτήτων, θεωρήθηκαν αποδεκτές και περιλαμβάνονται στην ανάλυση.

Στο Σχ.5.5, φαίνεται η ταχύτητα των παλμών από 15kHz έως 1MHz σε τσιμεντόπαστα. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι διαφορετικές καμπύλες είναι πλήρως διακριτές μεταξύ τους, δείχνοντας την καθαρή επίδραση του λόγου w/c στο διαδιδόμενο κύμα κυρίως μέσω της επίδρασης στην ελαστικότητα και το πορώδες. Αυτή η τάση μείωσης της ταχύτητας διαμήκων παλμών με το λόγο w/c, είναι γνωστή και ισχύει επίσης για κονίαμα και σκυρόδεμα όπως φάνηκε στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διατριβής και αλλού [11]. Τα αποτελέσματα δεν δείχνουν αξιοσημείωτη διασπορά αφού οι τιμές της ταχύτητας για κάθε καμπύλη δεν διαφέρουν παραπάνω από $\pm 50\text{m/s}$ από τη μέση τιμή.



Σχ.5.5. Επίδραση w/c στην καμπύλη ταχύτητας παλμού-συχνότητας τσιμεντόπαστας.

Μια ελαφρώς διαφορετική τάση όσον αφορά στην εξάρτηση ταχύτητας-συχνότητας παρατηρείται για το κονίαμα, βλ. Σχ.5.6(α) και για σκυρόδεμα Σχ.5.6(β). Φαίνεται ότι η ταχύτητα παλμού αυξάνεται περίπου έως τα 200kHz, παραμένοντας σταθερή μέχρι και τις υψηλότερες συχνότητες του πειράματος. Η επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό, είναι και εδώ εμφανής, κυρίως στην περίπτωση του κονιάματος. Οι καμπύλες του κονιάματος είναι πιο «ομαλές», πιθανόν λόγω της μεγαλύτερης ανομοιογένειας του σκυροδέματος που οδηγεί σε μεγαλύτερη πειραματική διασπορά. Παρότι ο λόγος w/c επηρεάζει και το σκυρόδεμα, δοκίμια γειτονικής σύστασης και συγκεκριμένα w/c=0.40 και 0.425, δεν διαχωρίζονται καθαρά, όπως φαίνεται στο Σχ.5.6(β). Αυτός είναι ο λόγος που η ταχύτητα έχει χαρακτηριστεί, ασθενής παράμετρος για τον χαρακτηρισμό του υλικού αυτού ενώ θεωρείται πιο ισχυρή για τον χαρακτηρισμό του κονιάματος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην εξέταση των υλικών με χαμηλές συχνότητες. Ούτως ή άλλως οι όποιες διαφορές πρέπει να αναζητηθούν πάνω από τα 100kHz.



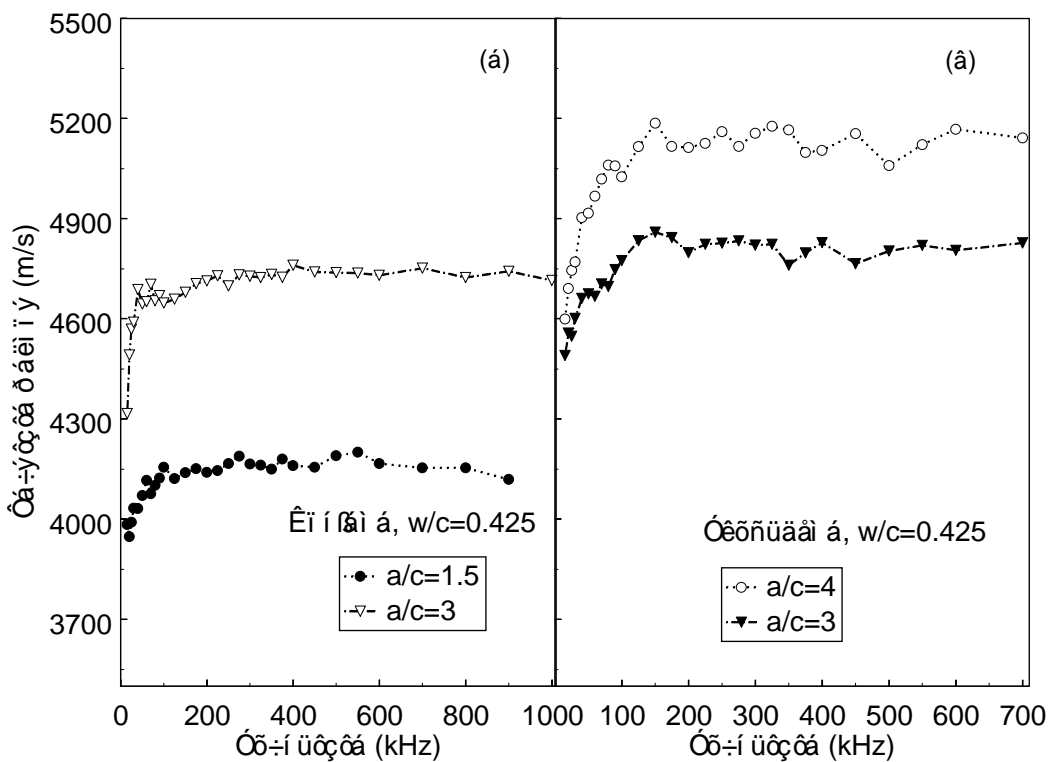
Σχ.5.6. Επίδραση w/c στην καμπύλη ταχύτητας παλμού-συχνότητας (α) κονιάματος και (β) σκυροδέματος.

Σημειώνεται ότι σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, υψηλής συχνότητας σήματα υφίστανται μεγάλη εξασθένηση, όπως έχει δειχθεί, και δεν προσφέρονται για ανάλυση. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο κάποιες καμπύλες δεν παρουσιάζονται μέχρι το 1MHz.

Η ενίσχυση του υλικού με πιο σκληρά εγκλείσματα (αδρανή) φαίνεται έχει πιο ευδιάκριτη επίδραση στην ταχύτητα λόγω βελτίωσης των ελαστικών σταθερών του τελικού υλικού. Στο Σχ.5.7(α) φαίνεται η διαφορά που προκαλεί στην ταχύτητα παλμού του κονιάματος, μια αύξηση κατά 17% κ.ο. σε άμμο, δηλαδή αύξηση του λόγου a/c από 1.5 σε 3. Αύξηση της ταχύτητας παρατηρείται και στο σκυρόδεμα με μεταβολή του a/c από 3 σε 4 που αντιστοιχεί σε κ.ο. περιεκτικότητα αδρανών 60.5% και 67.2% αντίστοιχα, βλ. Σχ.5.7(β). Προσεκτική παρατήρηση των καμπυλών, αναδεικνύει ότι η αύξηση του ποσοστού εγκλεισμάτων, επηρεάζει και τη διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής της κάθε καμπύλης, καθώς

κονίαμα με $a/c=1.5$ παρουσιάζει αύξηση περίπου 6% από την ταχύτητα των 15kHz έως τη μέγιστη ταχύτητα, ενώ η αντίστοιχη αύξηση για κονίαμα $a/c=3$ είναι 9%. Ομοίως η ταχύτητα παλμού σκυροδέματος $a/c=3$ υφίσταται αύξηση 7.5% ενώ σκυρόδεμα με $a/c=4$ αύξηση 11%.

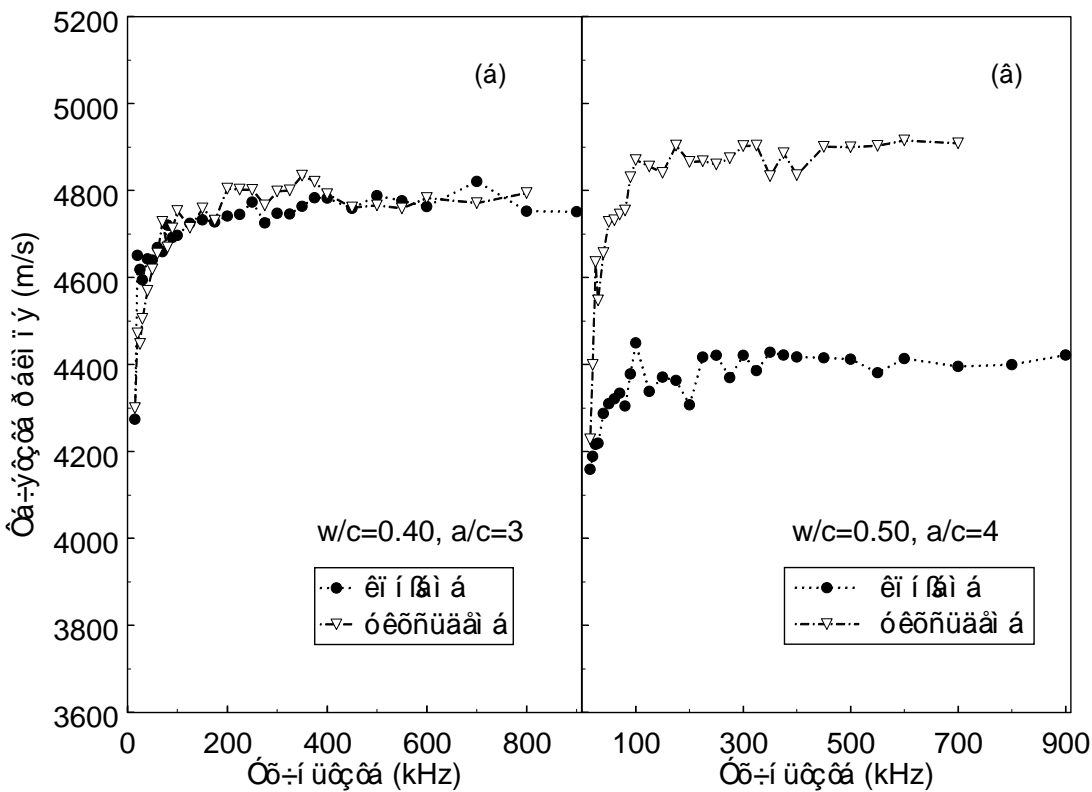
Ένα γενικό σχόλιο από την εξέταση όλων των διαθέσιμων δοκιμών είναι ότι η αύξηση της ταχύτητας στη ζώνη 15-200kHz είναι λιγότερο από 5% για τσιμεντόπαστα, 8.5% για κονίαμα και 11% για σκυρόδεμα ποσοστό που αυξάνεται με το βαθμό ανομοιογένειας των υλικών.



Σχ.5.7. Επίδραση a/c στην καμπύλη ταχύτητας παλμού-συχνότητας (α) κονιάματος και (β) σκυροδέματος.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα σύγκριση είναι αυτή μεταξύ κονιάματος και σκυροδέματος, που φυσικά περιέχουν την ίδια σύσταση (w/c και a/c). Ως εκ τούτου οι συνολικές ελαστικές σταθερές και πυκνότητα μπορούν να θεωρηθούν όμοιες και οποιαδήποτε διαφοροποίηση στην τελική συμπεριφορά, αποδίδεται στο διαφορετικό μέγεθος αδρανών. Υπενθυμίζεται ότι

ο μέγιστος κόκκος άμμου για το κονίαμα είναι 4.75mm, ενώ για το σκυρόδεμα ο μέγιστος κόκκος χαλικιού είναι 37.5mm. Παρότι το μεγαλύτερο μέγεθος εγκλεισμάτων οδηγεί σε ελαφρώς υψηλότερες τιμές ταχύτητας δεν θεωρείται καθοριστικός παράγοντας [6]. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας κινούνται στο ίδιο πλαίσιο καθώς δεν δείχνουν καθαρή τάση ως προς την ταχύτητα παλμού. Σε κάποιες περιπτώσεις η ταχύτητα κονιάματος είναι συγκρίσιμη με του σκυροδέματος, Σχ.5.8(α), ενώ σε άλλες, βλ. Σχ.5.8(β) η ταχύτητα του σκυροδέματος υπερτερεί.



Σχ.5.8. Επίδραση μεγέθους αδρανών στην καμπύλη ταχύτητας παλμού-συχνότητας για υλικό με (α) $w/c=0.40$, $a/c=3$ και (β) $w/c=0.50$, $a/c=4$.

Η μικρή αυτή διαφοροποίηση έχει αποδοθεί στην διεπιφάνεια μεταξύ αδρανών και τσιμεντόπαστας, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλό πορώδες [6]. Αφού η συνολική επιφάνεια των αδρανών αυξάνει αντιστρόφως ανάλογα με τη διάμετρο, είναι αναμενόμενο

ότι η συνολική ποσότητα του υλικού διεπιφάνειας είναι αυξημένη στο κονίαμα, οδηγώντας σε χαμηλότερη ελαστικότητα και ταχύτητα παλμού.

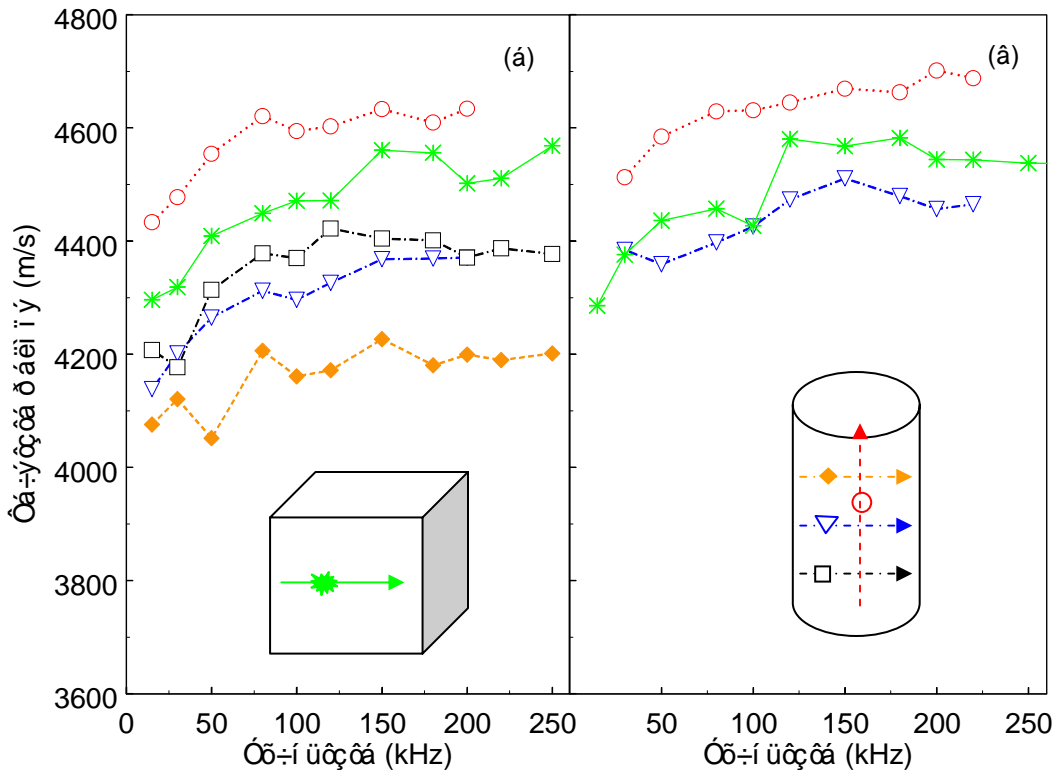
5.4.2 Επίδραση γεωμετρίας στην ταχύτητα παλμου

Παλαιότερες μελέτες έχουν δείξει ότι δοκίμια σκυροδέματος και τσιμεντόπαστας παρουσιάζουν συμπεριφορά διασποράς για συχνότητες 24-120kHz [12]. Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω της ανομοιογενούς φύσης του υλικού. Ωστόσο, ένα μέρος της διασποράς αποδόθηκε και σε επίδραση της γεωμετρίας, αφού η ταχύτητα κατά μήκος κυλινδρικών δοκιμίων (100x200mm²) απείχε από την ταχύτητα κατά την εγκάρσια διεύθυνση, ειδικά στις χαμηλότερες συχνότητες. Το γεγονός αυτό σύμφωνα με την [12] υποδεικνύει την πιθανότητα ανάπτυξης φαινομένων κυματοδηγού, λόγω του μειωμένου μεγέθους του δοκιμίου σε σχέση με το μήκος κύματος που επηρεάζει τις μετρήσεις ταχύτητας.

Παράλληλα, ο κανονισμός μέτρησης ταχύτητας παλμών σε σκυρόδεμα, ASTM C597, αναφέρει ότι το πάχος του προς εξέταση δοκιμίου πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μήκος κύματος του παλμού. Καθώς για τα δοκίμια σκυροδέματος της συγκεκριμένης διατριβής, παλμοί χαμηλής συχνότητας μέχρι περίπου 30kHz παρουσιάζουν μεγαλύτερο μήκος κύματος από το πάχος δοκιμίου (150mm) έγινε διερεύνηση της επίδρασης της γεωμετρίας δοκιμίου στην μέτρηση ταχύτητας.

Συγκεκριμένα μετρήθηκαν κύλινδροι σκυροδέματος 150x300mm² και κύβοι ακμής 150mm της ίδιας σύστασης. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν με τους αισθητήρες συντονισμού PAC R6 που επιδεικνύουν υψηλή ευαισθησία σε συχνότητες κάτω από 200kHz, περιοχή που παρουσιάζεται και η διασπορά και ενδιαφέρει η διερεύνηση. Στο Σχ.5.9(α) παρουσιάζονται οι καμπύλες ταχύτητας-συχνότητας, παλμών με κεντρική συχνότητα από 15kHz μέχρι 250kHz. Είναι σαφές ότι η κατά μήκος διεύθυνση του κυλίνδρου (μήκος 300mm) οδηγεί στις υψηλότερες ταχύτητες. Η καμπύλη ταχύτητας μετρημένη κατά το πάχος του κύβου (μήκος 150mm) τοποθετείται περίπου 150m/s χαμηλότερα, ενώ μέτρηση κατά τη διατομή του κυλίνδρου (εγκάρσια), απόσταση επίσης 150mm, παρουσιάζει τη χαμηλότερη καμπύλη. Το ύψος κυλίνδρου που γίνεται η εγκάρσια μέτρηση είναι επίσης σημαντικό, όπως φαίνεται στο Σχ.5.9(α) λόγω καθίζησης των βαρύτερων από την τσιμεντόπαστα αδρανών κατά τη χύτευση

και δόνηση, αλλά και στο ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα που αναδύομενο αυξάνεται στο πάνω μέρος του κυλίνδρου. Παρόλα αυτά ακόμα και η μέτρηση στο κάτω μέρος του κυλίνδρου (απόσταση 4cm από τη βάση) που με βάση τα παραπάνω αφορά σε υλικό με αυξημένες ελαστικές ιδιότητες παρουσιάζει τιμές μικρότερες αυτές της κατά μήκος μέτρησης όπου ο παλμός διέρχεται από όλες τις διαφορετικές «στρώσεις» του υλικού.



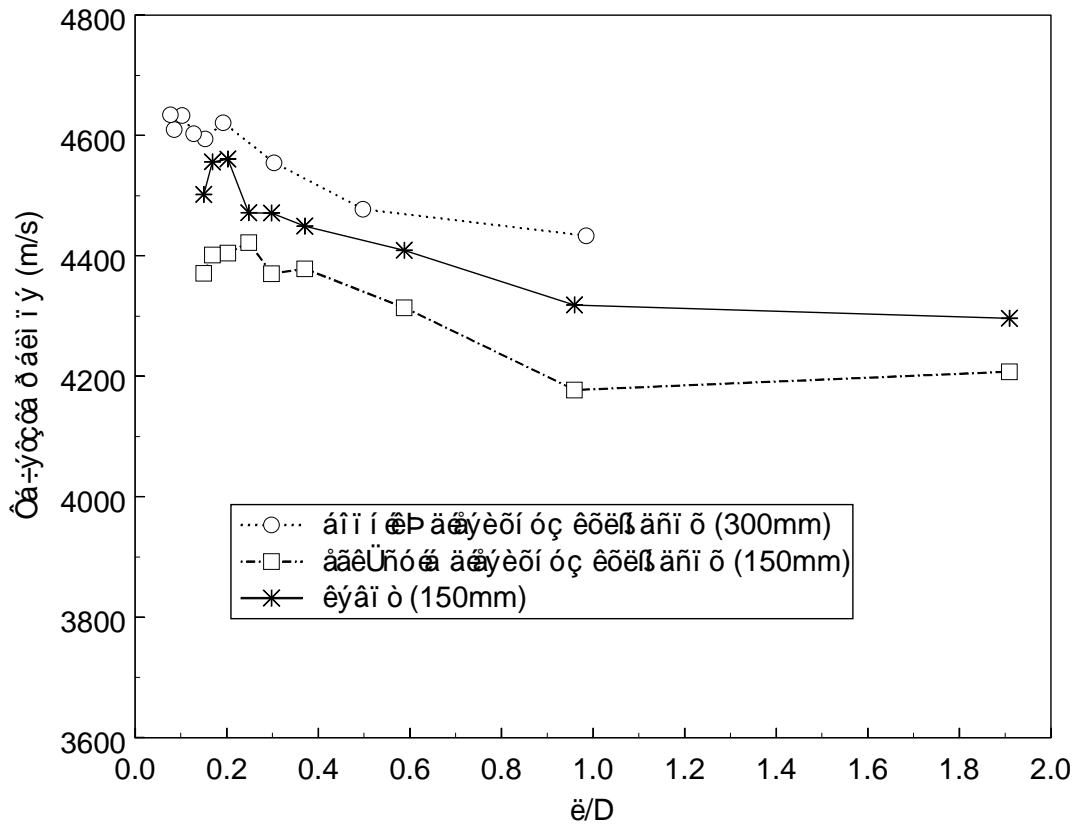
Σχ.5.9. Επίδραση γεωμετρίας στην μέτρηση ταχύτητας παλμού με (α) αισθητήρα συντονισμού και (β) αισθητήρα ευρέως φάσματος.

Η μέτρηση κατά τη διάμετρο του κυλίνδρου παρουσιάζει το πρόβλημα της καμπυλότητας της επιφάνειας και ως εκ τούτου τη μειωμένη επιφάνεια επαφής του αισθητήρα με το δοκίμιο. Ωστόσο παρά το ότι το εύρος του σήματος απείχε από το εύρος αντίστοιχου σήματος σε κύβο, αυτό δεν δημιούργησε πρόβλημα στον υπολογισμό της ταχύτητας. Μπορεί επίσης να σημειωθεί ότι η μία βάση των κυλίνδρων (ελεύθερη επιφάνεια κατά τη χύτευση) υπέστη κατεργασία λείανσης ώστε να διευκολυνθεί η ακουστική σύζευξη σκυροδέματος-αισθητήρα.

Με σκοπό τη διεύρυνση του πεδίου συχνοτήτων προς τα πάνω και όσο η εξασθένιση του υλικού επιτρέπει, χρησιμοποιήθηκαν και οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες ευρέως φάσματος Panametrics V413 με κεντρική συχνότητα 500kHz. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχ.5.9(β), χωρίς να παρουσιάζουν πολύ διαφορετική τάση, εκτός από ελαφρώς αυξημένες τιμές. Αυτοί οι αισθητήρες όπως έχει αναφερθεί χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της υπόλοιπης πειραματικής σειράς.

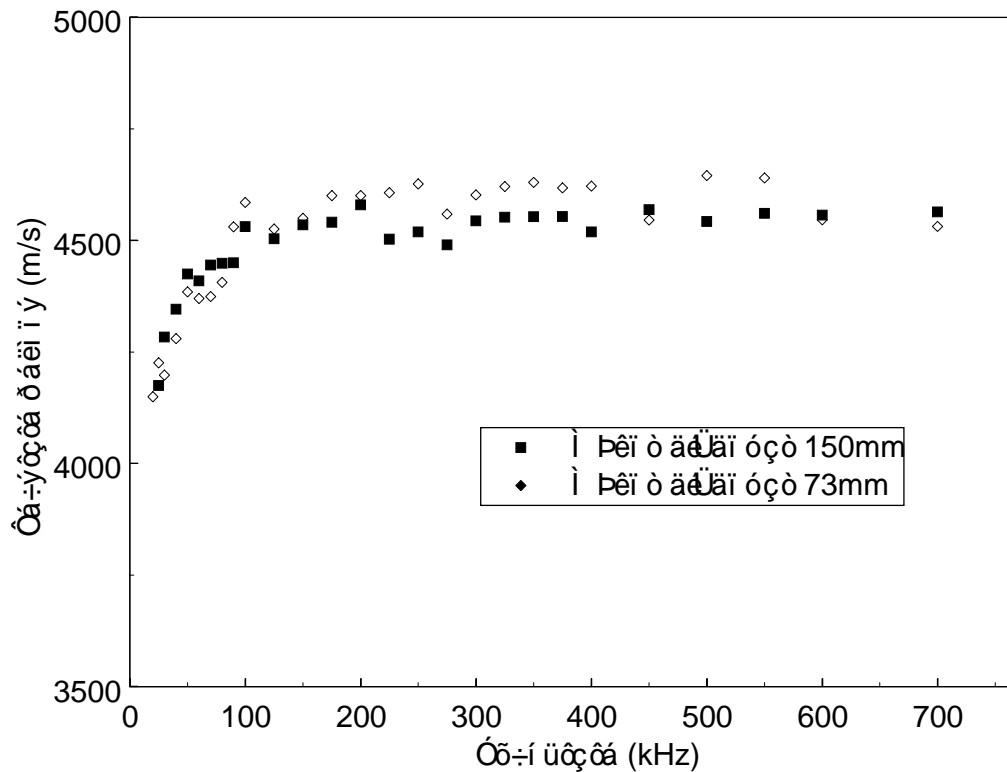
Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι διαφορετικές γεωμετρίες οδηγούν σε διαφορετικές καμπύλες ταχύτητας-συχνότητας, ενώ παρουσιάζουν την ίδια διασπορά, αφού η αύξηση της ταχύτητας από τα 15kHz μέχρι τη μέγιστη τιμή είναι περίπου 5% για όλες τις καμπύλες.

Όσον αφορά στην επίδραση του μήκους κύματος σε σύγκριση με το μέγεθος του δοκιμίου, σημειώνεται ότι στις κατά τον άξονα του κυλίνδρου μετρήσεις τηρείται ο κανονισμός ASTM C597, αφού ακόμα και για τη συχνότητα 15kHz, το ύψος του κυλίνδρου είναι μεγαλύτερο από το εκπεμπόμενο μήκος κύματος. Ωστόσο, η σχέση ταχύτητας- λ/d (μήκος κύματος/πάχος) δεν είναι μοναδική όπως φαίνεται στο Σχ.5.10. Για τις τρεις διαφορετικές γεωμετρίες, ακόμα και όταν ο λόγος λ/d είναι ίσος, οι ταχύτητες διαφέρουν αρκετά, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι και άλλοι παράγοντες της γεωμετρίας ή του όγκου παίζουν σημαντικό ρόλο, με το πάχος να είναι πολύ σημαντικό αφού π.χ. για $\lambda/d \approx 0.3$ στην εγκάρσια διεύθυνση του κυλίνδρου μετράται ταχύτητα 4370m/s (αντίστοιχη συχνότητα 100kHz), ενώ για την αξονική διεύθυνση η ταχύτητα μετράται 4554m/s σε συχνότητα 50kHz. Η επίδραση της γεωμετρίας τονίζεται καθώς στην παραπάνω σύγκριση χρησιμοποιήθηκε η εγκάρσια ταχύτητα κοντά στη βάση του κυλίνδρου, στην οποία περιοχή, όπως προαναφέρθηκε, είναι αναμενόμενες υψηλότερες τιμές ελαστικών σταθερών από το σύνολό του όγκου.



Σχ.5.10. Επίδραση της γεωμετρίας στην καμπύλη ταχύτητας – λόγου μήκους κύματος/πάχους δοκιμίου.

Άλλη περίπτωση διερεύνησης αφορά σε ταχύτητα παλμού, κατά το πάχος κυβικού δοκιμίου πριν και μετά κοπεί σε δύο τμήματα, με αντίστοιχα πάχη 150mm και 73mm. Όπως φαίνεται στο Σχ.5.11 οι ταχύτητες διαφέρουν περίπου κατά 1% για συχνότητες πάνω από 200kHz, ενώ η διασπορά δεν επηρεάζεται εμφανώς, παρότι ο λόγος λ/d για κάθε συχνότητα είναι περίπου διπλάσιος για το «μισό» δοκίμιο σε σχέση με το ολόκληρο.

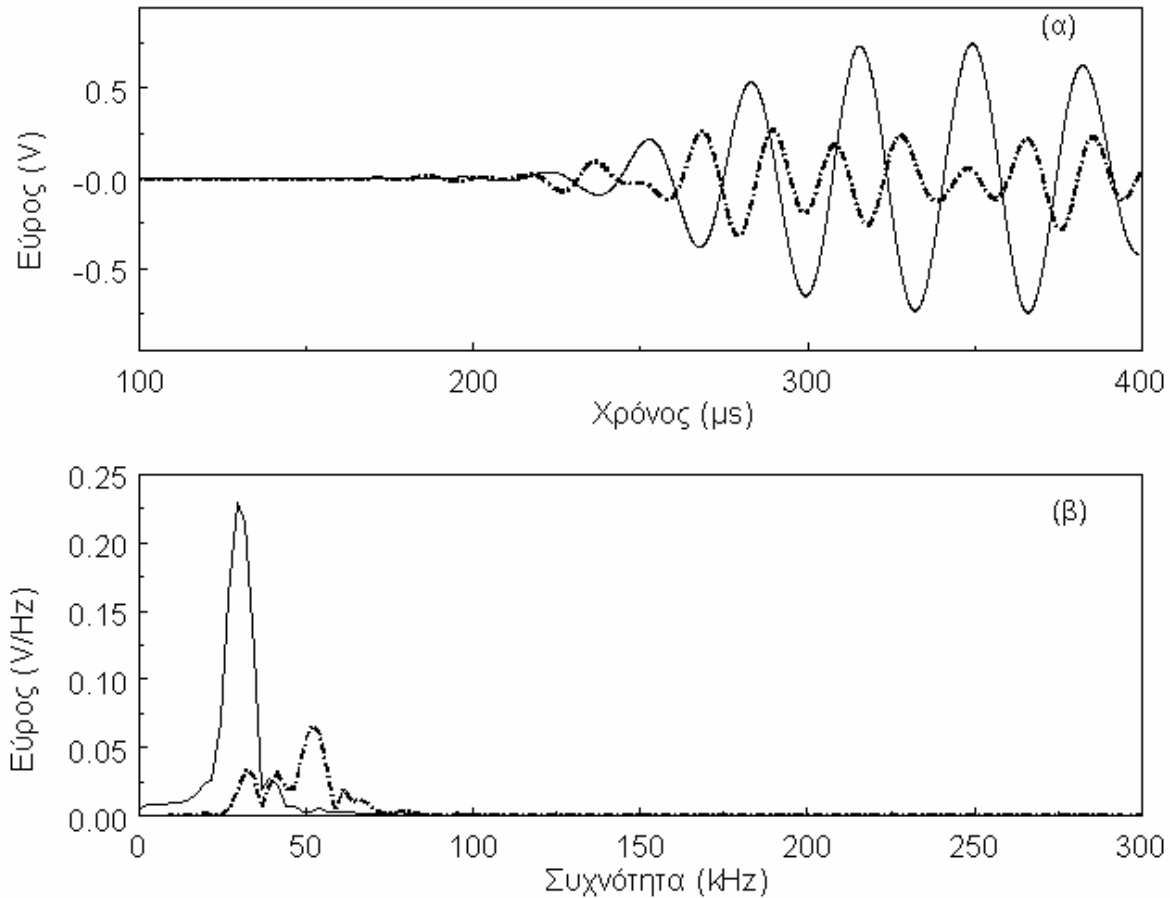


Σχ.5.11. Επίδραση πάχους δοκιμίου στην μέτρηση ταχύτητας παλμού

Από τις παραπάνω διερευνήσεις δύο είναι τα γενικά συμπεράσματα σχετικά με μετρήσεις υπερήχων σε σκυρόδεμα: πρώτον ότι σύγκριση μεταξύ ταχυτήτων διαφορετικών υλικών έχουν νόημα μόνο όταν αναφέρονται σε ίδια γεωμετρία δοκιμίου. Σε άλλη περίπτωση η γεωμετρία οδήγησε σε διαφορές ταχύτητας έως και 5% για το ίδιο υλικό. Ένα άλλο σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η διασπορά που παρατηρείται σε χαμηλές συχνότητες ισχύει ανεξαρτήτως πάχους, σχέσης μήκους κύματος με το πάχος και εν γένει της γεωμετρίας. Έτσι έπεται ότι οφείλεται στην ανομοιογενή φύση του υλικού.

Όπως έδειξε η διερεύνηση της απόκρισης των αισθητήρων στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι αισθητήρες V413 παρουσιάζουν πολύ καλή απόκριση σε όλο το πρώτο MHz χωρίς να παραμορφώνουν ή να μεταβάλλουν έντονα το περιεχόμενο συχνότητων ακόμα και για συχνότητες μακριά από τη μέγιστη ευαισθησία τους. Στο Σχ.5.12(α) παρατίθενται παραδείγματα σημάτων 30 και 50kHz μετά τη διάδοσή τους στην κατά το ύψος διεύθυνση

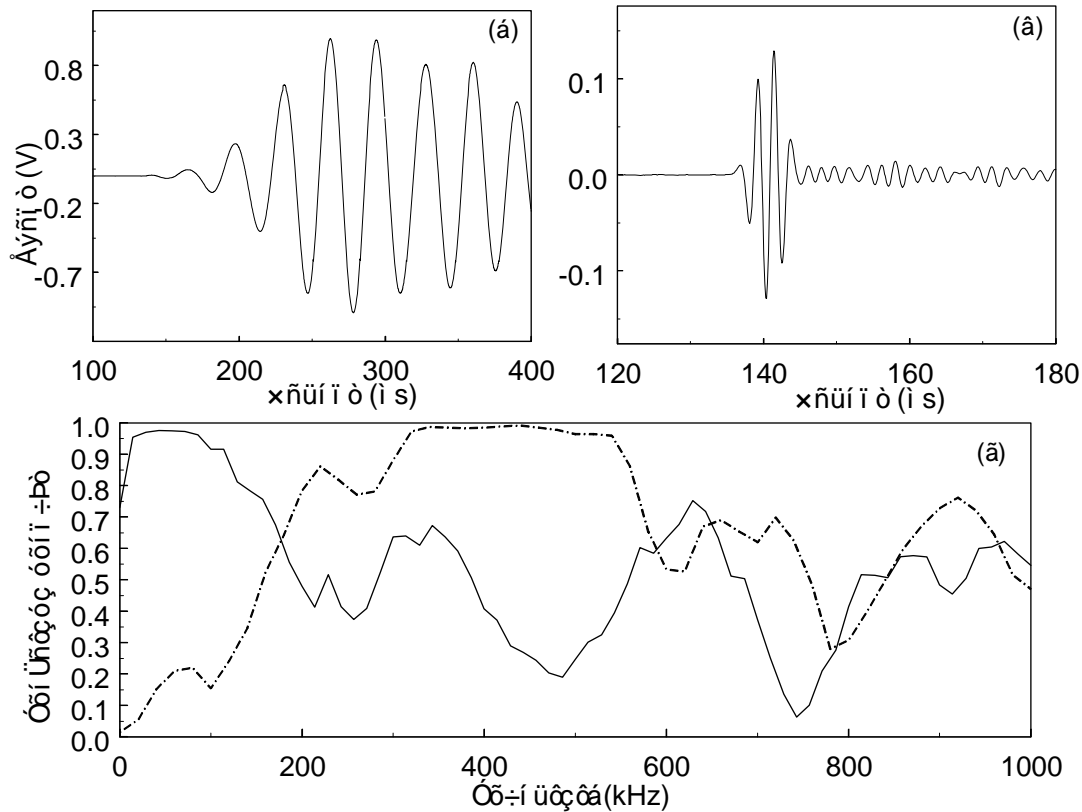
κυλίνδρου 300mm, ενώ στο Σχ.5.12(β) φαίνονται οι αντίστοιχοι μετασχηματισμοί Fourier που δείχνουν ότι η διάδοση αφορά όντως στην περιοχή συχνοτήτων που ηθελημένα εισάγεται στο υλικό.



Σχ.5.12. (α) Κυματομορφές 30kHz (συνεχής γραμμή) και 50kHz (dash-dot) μετά από διάδοση σε κύβο σκυροδέματος, (β) οι αντίστοιχοι μετασχηματισμοί Fourier.

Επιπλέον, ένα μέτρο της απόδοσης του όλου συστήματος (γεννήτρια παλμών, αισθητήρες, μέσο σύζευξης, κάρτα δειγματοληψίας) αφορά στη συνάρτηση συνοχής (coherence). Σε προηγούμενο κεφάλαιο η συνάρτηση συνοχής μεταξύ δύο κυματομορφών χρησιμοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό του υλικού αφού αποκτά υψηλές τιμές σε πεδία συχνοτήτων όπου υπάρχει ομοιότητα των σημάτων. Η εφαρμογή της συνάρτησης αυτής στο ηλεκτρικό σήμα που τροφοδοτείται στον αισθητήρα και στο τελικό σήμα που λαμβάνεται από το δοκίμιο καταδεικνύει ποιο μέρος της εξόδου οφείλεται στην είσοδο. Στα Σχ.5.13(α) και (β) φαίνεται η απόκριση δοκιμίου σκυροδέματος σε είσοδο 30kHz και 450kHz αντίστοιχα. Στο

Σχ.5.13(γ) παρουσιάζεται η συνάρτηση συνοχής ανάμεσα στα σήματα αυτά και στο αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα. Είναι σαφές ότι η τιμή της συνοχής προσεγγίζει τη μονάδα στις περιοχές ενδιαφέροντος δείχνοντας ότι το όλο σύστημα είναι κατάλληλο για τη διάδοση ακόμα και χαμηλών συχνοτήτων παρά την κεντρική ευαισθησία των αισθητήρων.

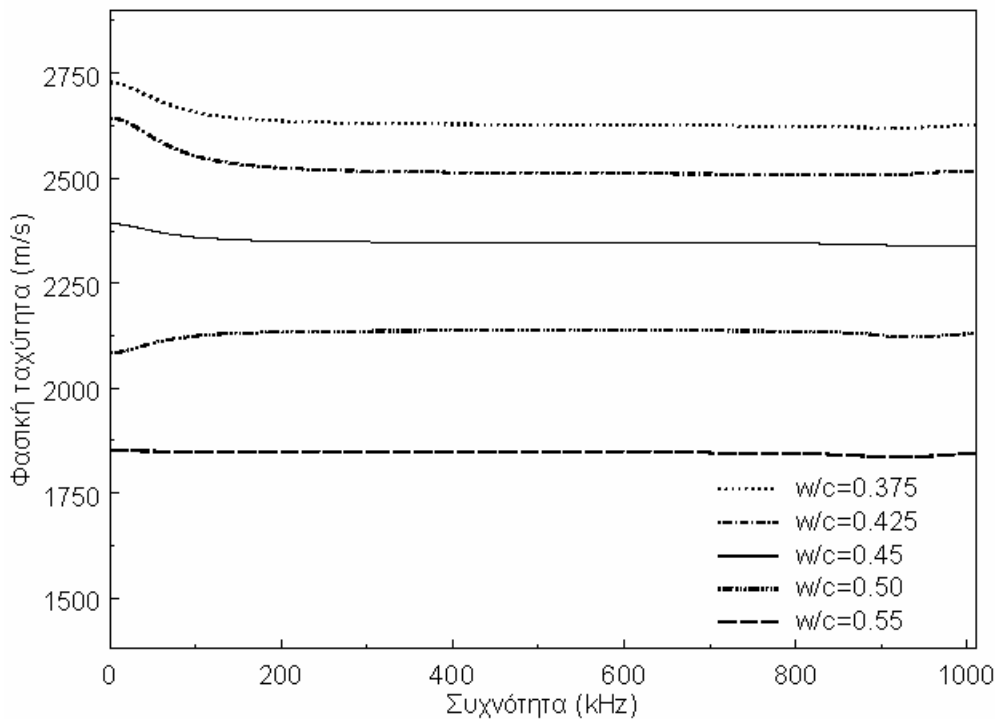


Σχ.5.13. (α) και (β) κυματομορφές 30kHz και 450kHz αντίστοιχα, (γ) συνάρτηση συνοχής ανάμεσα σε αυτές και στα αντίστοιχα ηλεκτρικά σήματα (30kHz συνεχής γραμμή, 450kHz dash-dot).

5.4.3 Αποτελέσματα φασικής ταχύτητας.

Ο υπολογισμός της φασικής ταχύτητας συναρτήσει της συχνότητας περιγράφεται στην παράγραφο 4.2. Συνοπτικά από τη διαφορά φάσης δύο σημάτων (πρόσωπο με πρόσωπο αισθητήρα που θεωρείται η είσοδος και απόκρισης δοκιμίου αφού απομονωθεί ο δεύτερος κύκλος), όπως προκύπτει από μετασχηματισμό Fourier και μέσω της (4.1) υπολογίζεται ο κυματάρηθος. Κατόπιν από την (4.2) υπολογίζεται η φασική ταχύτητα για κάθε συχνότητα.

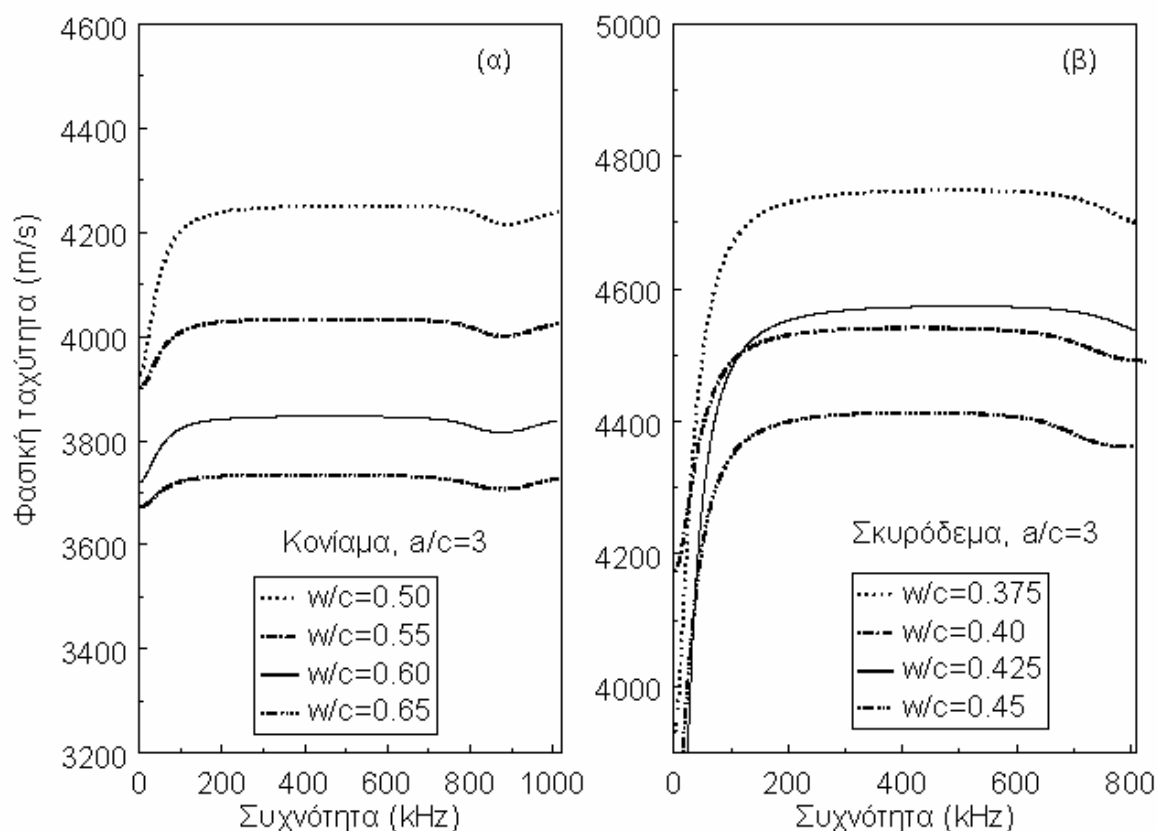
Η εξέταση της φασικής ταχύτητας για όλα τα υλικά δεν κατέδειξε ποιοτικές διαφορές με την ταχύτητα παλμών. Συγκεκριμένα η φασική ταχύτητα δοκιμίων τσιμεντόπαστας έδειξε την ίδια πτωτική τάση με το w/c , ενώ είναι ανεξάρτητη της συχνότητας πάνω από τα 100kHz, όπως φαίνεται στο Σχ.5.14. Η ίδια τάση ισχύει και για



Σχ.5.14. Φασική ταχύτητα τσιμεντόπαστας με διαφορετικό λόγο w/c

κονίαμα και σκυρόδεμα όπως φαίνεται στα Σχ.5.15(α) και (β) αντίστοιχα. Ωστόσο η φασική ταχύτητα στο σκυρόδεμα υφίσταται, μεγαλύτερη αύξηση απ' ότι στο κονίαμα, ξεκινώντας για όλες τις συστάσεις από τιμές μεταξύ 3000 και 4000m/s υποδηλώνοντας ότι μπορεί να αποδοθεί στην αυξημένη ανομοιογένεια λόγω μεγάλων σκύρων. Επίσης, σημειώνεται ότι οι

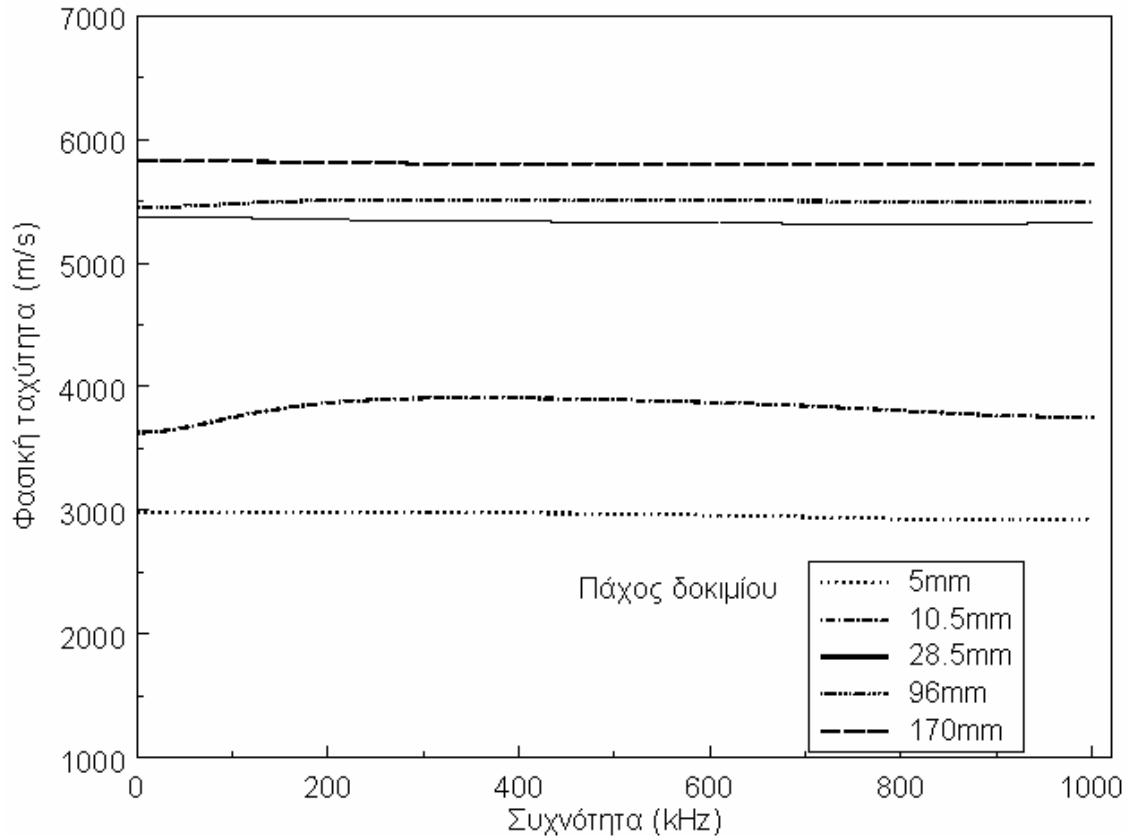
κλάσεις $w/c=0.40$ και 0.425 παρουσιάζουν μικρή διαφοροποίηση και στις φασικές ταχύτητες όπως συμβαίνει και με τις ταχύτητες παλμού των αντίστοιχων συστάσεων. Για την πλειοψηφία των συχνοτήτων, οι φασικές ταχύτητες παρουσιάζουν μικρότερες τιμές από τις ταχύτητες παλμών. Συγκεκριμένα για τσιμεντόπαστα, η διαφοροποίηση μεταξύ φασικής και ταχύτητας παλμού είναι κατά μέσο όρο χαμηλότερη από 100m/s , για κονίαμα περίπου 150m/s και για σκυρόδεμα προσεγγίζει τα 250m/s . Αυτή η διαφοροποίηση μπορεί επίσης να ερμηνευτεί ως ένδειξη διασποράς σχετιζόμενης με το επίπεδο της ανομοιογένειας των υλικών.



Σχ.5.15. Επίδραση w/c στην καμπύλη φασικής ταχύτητας-συχνότητας (α) κονιάματος, (β) σκυροδέματος

Αξίζει να σημειωθεί ότι μετρήσεις ταχύτητας παλμού και φασικής ταχύτητας με τον ίδιο εξοπλισμό έγιναν και σε μεταλλικά δοκίμια διαφορετικού πάχους. Στο Σχ.5.16 φαίνεται η καμπύλη φασικής ταχύτητας-συχνότητας για τα διάφορα δοκίμια με βάση το πάχος τους. Οι καμπύλες παρουσιάζονται σχεδόν σταθερές ενώ είναι εμφανής η επίδραση της γεωμετρίας αφού αυξανόμενου του πάχους μετρώνται υψηλότερες ταχύτητες που προσεγγίζουν όλο και

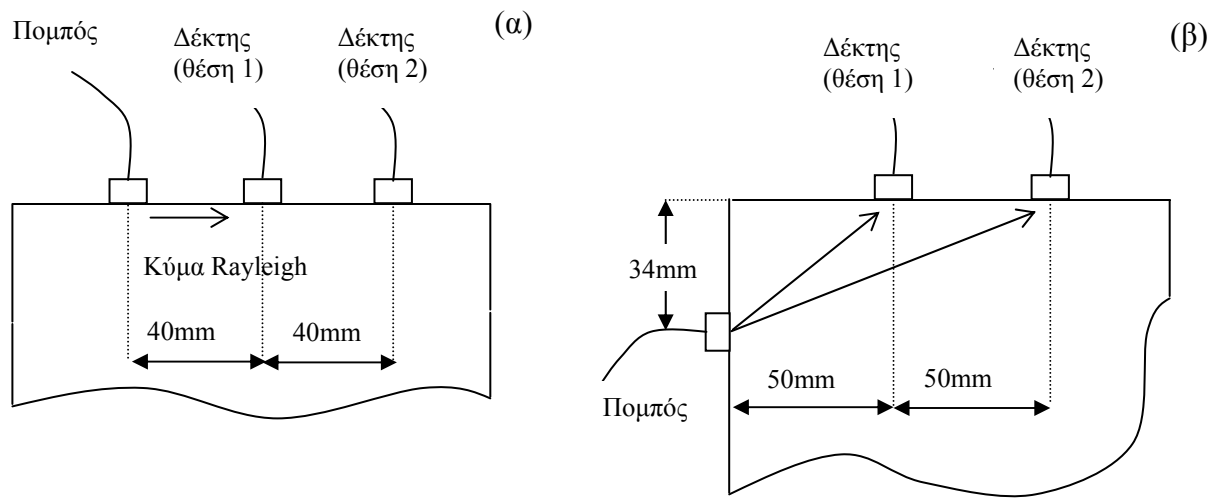
περισσότερο μια τελική τιμή. Είναι σαφές ότι όσο η γεωμετρία μικραίνει, η μέτρηση ταχύτητας καθίσταται πιο ανακριβής και το αντίστροφο.



Σχ.5.16. Επίδραση πάχους στη φασική ταχύτητα μεταλλικών δοκιμίων.

5.4.4 Μετρήσεις επιφανειακών κυμάτων και διαμήκων υπό γωνία

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και μετρήσεις επιφανειακών κυμάτων που έγιναν διερευνητικά σε κύβο κονιάματος ($w/c=0.5$, $a/c=3$) αλλά και μετρήσεις διαμήκων κυμάτων υπό γωνία, δηλαδή, όχι σε απέναντι έδρες αλλά σε έδρες με κοινή ακμή, όπως φαίνεται στο Σχ.5.17(α) και (β) αντίστοιχα.

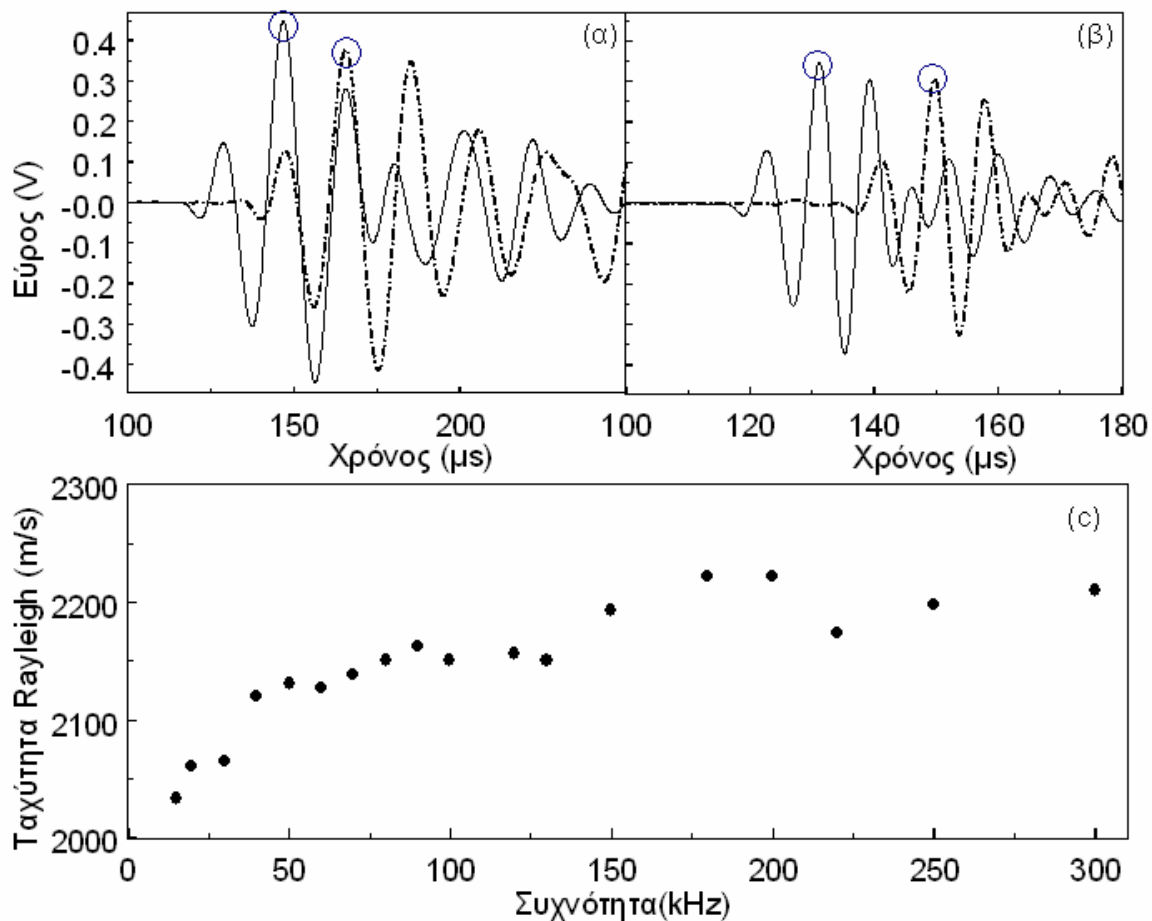


Σχ.5.17. Απεικόνιση μετρήσεων κυμάτων (α) επιφανειακών (Rayleigh) και (β) διαμήκων υπό γωνία.

Οι μετρήσεις σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν κατά τη φάση της διερεύνησης της επίδρασης της γεωμετρίας στη διασπορά για να ελεγχθεί αν τα διαμήκη κύματα υπό άλλες συνθήκες διάδοσης εξακολουθούν να παρουσιάζουν όμοιες τιμές ταχύτητας και στην ουσία, μαζί με τα επιφανειακά, να επιβεβαιώσουν την συμπεριφορά διασποράς σε χαμηλές συχνότητες.

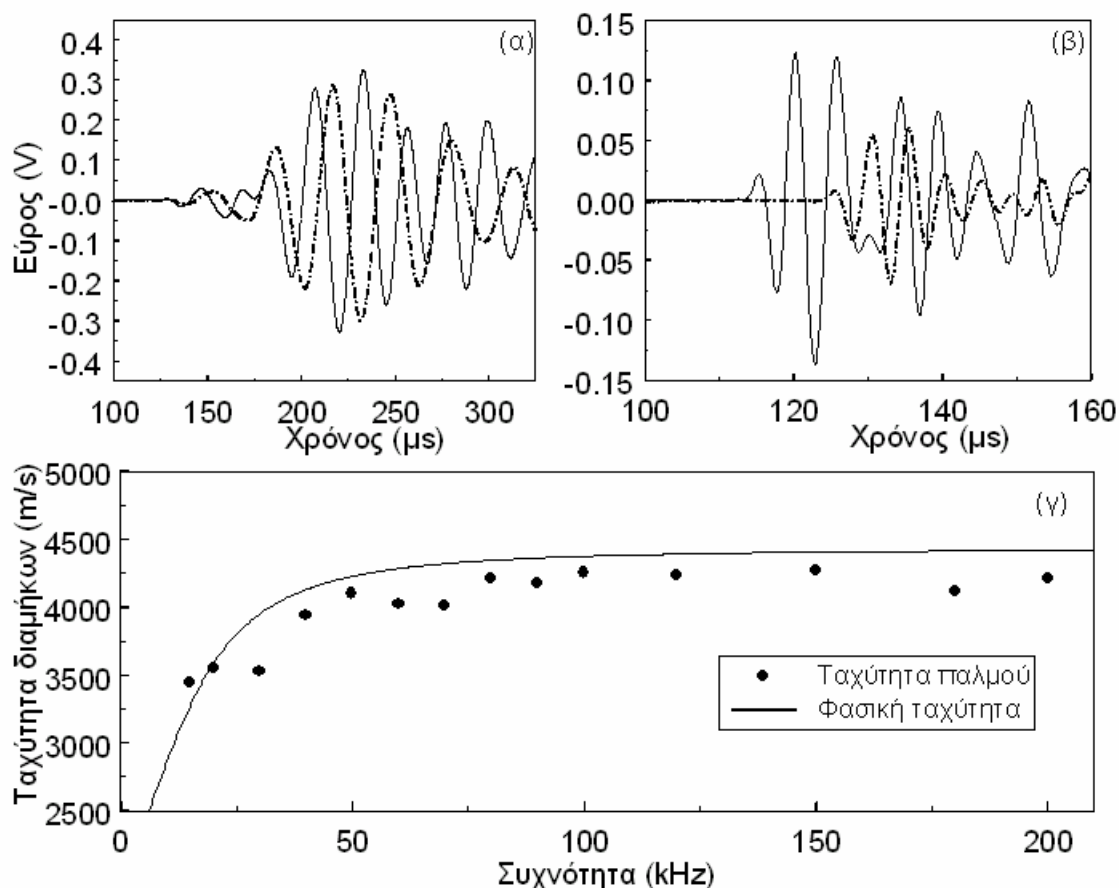
Για την πρώτη περίπτωση, του Σχ.5.17, με τους αισθητήρες τοποθετημένους στην ίδια έδρα του δοκιμίου, ο χρόνος απόκρισης του δέκτη δεν αντιστοιχεί σε διαμήκη κύματα παρά σε επιφανειακά, με βάση ταχύτητες από τη βιβλιογραφία [1,13]. Από την εν γένει παρατήρηση των σημάτων, επισημαίνεται ότι κατά τις μετρήσεις αυτές δεν ανιχνεύτηκε ανάκλαση από διαμήκη κύματα, που διέτρεξαν το πάχος του δοκιμίου, ανακλάστηκαν στην κάτω επιφάνεια και οδηγήθηκαν στον δέκτη. Αυτό βέβαια οφείλεται στην εξασθένιση του υλικού, αλλά πιθανότατα και στις απώλειες κατά την ανάκλαση στην κάτω επιφάνεια. Για την περίπτωση αυτή, η φασική ταχύτητα επιφανειακών κυμάτων μετρήθηκε με την εφαρμογή κυματοπακέτων (tone-bursts) διαφόρων κεντρικών συχνοτήτων από 15kHz έως 300kHz από τη χρονική διαφορά συγκεκριμένων φασικών σημείων (κορυφών), βλ. Σχ.4.7. Δύο

παραδείγματα φαίνονται στο Σχ.5.18. Η περίπτωση (α) αφορά σε κυματομορφές 50kHz και η (β) 130kHz μετρημένες στις θέσεις 1 και 2. Είναι σαφές ότι το σήμα στη θέση 2 υπολείπεται χρονικά, ενώ το σχήμα του παραμένει σχεδόν αναλλοίωτο. Από τη χρονική διαφορά λοιπόν, συγκεκριμένων κορυφών, βλ. Σχ.5.18(α) και (β) για κάθε συχνότητα προκύπτει η καμπύλη φασικής ταχύτητας επιφανειακών κυμάτων – συχνότητας του Σχ.5.18(γ). Οι τιμές αυτές, όπως προαναφέρθηκε, είναι τυπικές για κονίαμα και σκυρόδεμα όπως προκύπτουν από μετρήσεις σε κυβικά δοκίμια ίδιων διαστάσεων [1] αλλά και μεγαλύτερα [13] ενώ εμφανίζουν την ίδια τάση διασποράς σε χαμηλές συχνότητες. Πράγματι με εφαρμογή λόγου poisson 0.2, υπολογίζονται ταχύτητες διαμήκων κυμάτων μέχρι 4000m/s, πολύ κοντά στις τιμές που μετρήθηκαν με κατά το πάχος μέτρηση.



Σχ.5.18. Κυματομορφές επιφανειακών κυμάτων σε απόσταση 40mm (α) 50kHz, (β) 130kHz και φασική ταχύτητα επιφανειακών κυμάτων.

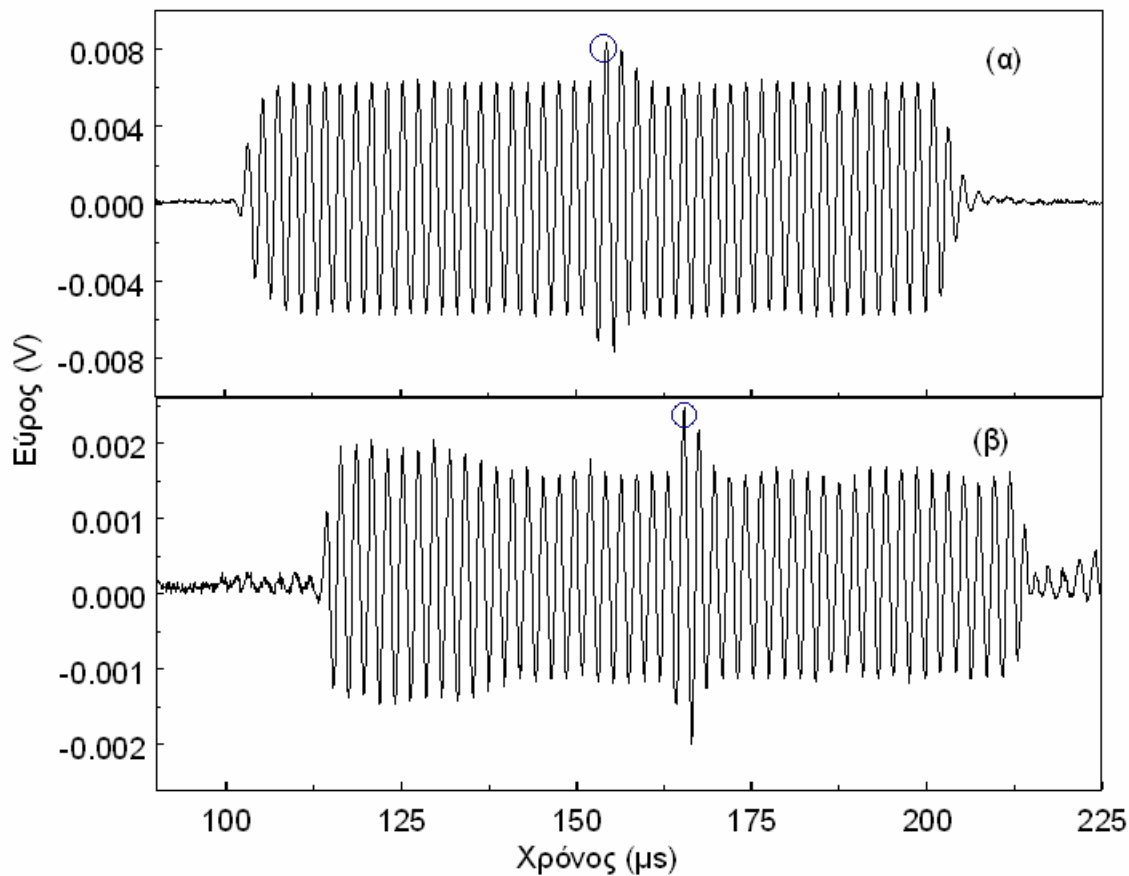
Όσον αφορά στις μετρήσεις που έγιναν σύμφωνα με τη γεωμετρία του Σχ.5.17(β), παραδείγματα κυματομορφών φαίνονται στο Σχ.5.19(α) και (β) με κεντρικές συχνότητες 30kHz και 200kHz. Η απόσταση μεταξύ του κέντρου του πομπού και του δέκτη στις δύο θέσεις είναι 60.5mm και 105.6mm, δηλαδή ο παλμός για να καταγραφεί στη θέση 2, διένυσε απόσταση 45.1mm μεγαλύτερη απ' ό,τι στη θέση 1. Η ταχύτητα παλμού, μετρημένη από τη χρονική διαφορά της πρώτης υπέρβασης καταφλίου των δύο κυματομορφών και την απόσταση των 45.1mm φαίνεται για τις διαφορετικές συχνότητες στο Σχ.5.19(γ). Επίσης εκεί παρουσιάζεται και η φασική ταχύτητα υπολογισμένη από τη διαφορά φάσης των σημάτων 200kHz, Σχ.5.19(β), εφόσον απομονωθεί ο δεύτερος κύκλος των σημάτων, βλ. παράγραφο 4.2. Βεβαίως, λόγω της περιορισμένης ζώνης συχνοτήτων του σήματος αυτού, παρουσιάζονται αποτελέσματα μέχρι τα 200kHz.



Σχ.5.19. Κυματομορφές διαμήκων κυμάτων με διαφορά 45.1mm στη διαδρομή κύματος κεντρικής συχνότητας (α) 30kHz, (β) 200kHz και (γ) ταχύτητα διαμήκων κυμάτων.

Από τα αποτελέσματα των διατάξεων του Σχ.5.17, επιβεβαιώνεται η συμπεριφορά διασποράς που μετρήθηκε σε πειράματα κατά το πάχος. Φαίνεται λοιπόν ότι σε οποιαδήποτε γεωμετρία η διάδοση παρουσιάζει όμοια διασπορά καταδεικνύοντας, ότι όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.4.2, η γεωμετρία έχει ελάχιστη ή καθόλου συνεισφορά στη σχέση ταχύτητας – συχνότητας.

Μετρήσεις φασικής ταχύτητας έγιναν και με χρήση μεγάλης διάρκειας κυματοπακέτων σταθερού εύρους, όπως περιγράφεται στην [14]. Η χρονική καθυστέρηση συγκεκριμένης κορυφής ανάμεσα σε δύο σημεία μέτρησης (είσοδο και έξοδο) χρησιμοποιείται κατ' αντιστοιχία με τα παραπάνω για τον υπολογισμό της φασικής ταχύτητας. Η διαφορά έγκειται στο ότι εφόσον το σήμα είναι πολύ μεγάλο σε διάρκεια (μπορεί να θεωρηθεί συνεχές για κλίμακα χρόνου μερικών μs), ένα οποιοδήποτε στοιχειώδες σωματίδιο του μέσου, εκτελεί συνεχώς την ίδια ταλάντωση (απαραίτητη για τη διάδοση) υπό τον εξαναγκασμό του εκπεμπόμενου κύματος. Έτσι η χρονική διαφορά μεταξύ της εμφάνισης ενός συγκεκριμένου φασικού σημείου (κορυφής) ανάμεσα σε δύο τόπους μέτρησης αντιστοιχεί ακριβώς στη φασική ταχύτητα του μονοχρωματικού παλμού και δεν εισάγεται σύμβαση λόγω περιεχομένου συχνοτήτων εκατέρωθεν της κεντρικής. Στην περίπτωση της παρούσας διερεύνησης χρησιμοποιήθηκαν 50κύκλοι ημίτονου σταθερού εύρους εκτός του κεντρικού, όπου στο τροφοδοτούμενο ηλεκτρικό σήμα είχε εύρος διπλάσιο από τους υπόλοιπους. Αυτό συνέβη για να διευκολύνει την αναγνώριση του σημείου αναφοράς ανάμεσα στις πολυάριθμες κορυφές. Στο Σχ.5.20(α) φαίνεται η πρόσωπο με πρόσωπο απόκριση των αισθητήρων (Panametrics V413) σε τέτοια είσοδο, συχνότητας 450kHz, ενώ στο (β) φαίνεται η απόκριση δοκιμίου τσιμεντόπαστας $w/c=0.375$ στο ίδιο σήμα. Οι αισθητήρες παρουσιάζουν συμπεριφορά που επιτρέπει την αρκετά αξιόπιστη μετάδοση του σήματος, ενώ το χαρακτηριστικό υψηλότερο εύρος των κεντρικών κορυφών, επιβιώνει και μετά τη διάδοση μέσω του δοκιμίου. Από τη χρονική διαφορά των επιλεγμένων σημείων, όπως φαίνεται στο Σχ.5.20 προκύπτει φασική ταχύτητα 2750m/s, που είναι πολύ κοντά στην μετρούμενη με την τεχνική Sachse και Pao [15] για τη συχνότητα αυτή. Η εφαρμογή των κυματοπακέτων αυτών σε χαμηλότερες συχνότητες με τους συγκεκριμένους αισθητήρες ήταν προβληματική αλλά και με χρήση αισθητήρων συντονισμού (PAC R6), τα συγκεκριμένα σήματα δεν μεταφέρονταν με αξιόπιστο τρόπο.



Σχ.5.20. Απόκριση σε διέγερση 50 κύκλων ημιτόνου 450kHz (α) πρόσωπο με πρόσωπο αισθητήρων, (β) δοκιμίου τσιμεντόπαστας w/c 0.375

Συμπερασματικά, οι πιο πάνω πειραματικές μετρήσεις καταδεικνύουν εν γένει την διασκορπίζουσα φύση του σκυροδέματος, η οποία φαίνεται να εξαρτάται από την ύπαρξη κόκκων αδρανών, αφού η τσιμεντόπαστα παρουσιάζεται σχεδόν μη διασκορπίζουσα, αλλά και από το μέγεθος και την ποσότητα των αδρανών, αφού το σκυρόδεμα παρουσιάζει εντονότερη διασπορά από κονίαμα. Η συμπεριφορά αυτή δεν ερμηνεύεται βάσει της κλασικής θεωρίας ελαστικότητας, όπου εφαρμόζεται με την προϋπόθεση του ομογενούς γραμμικά ελαστικού μέσου.

5.5 Θεωρητική ερμηνεία της συμπεριφοράς διασποράς σκυροδέματος.

Όπως φάνηκε στις παραπάνω παραγράφους, το σκυρόδεμα και το κονίαμα παρουσιάζουν συμπεριφορά διασποράς σε χαμηλές συχνότητες. Μέχρι περίπου τα 200kHz η φασική ταχύτητα και η ταχύτητα παλμού αυξάνει σε ποσοστό περίπου 10% για το πρώτο και ελαφρώς λιγότερο για το δεύτερο. Αυτή η συμπεριφορά δεν μπορεί να ερμηνευθεί βάσει της υπόθεσης γραμμικά ελαστικού ισότροπου μέσου, αφού η κλασική θεωρία ελαστικότητας προβλέπει ταχύτητα ανεξάρτητη της συχνότητας.

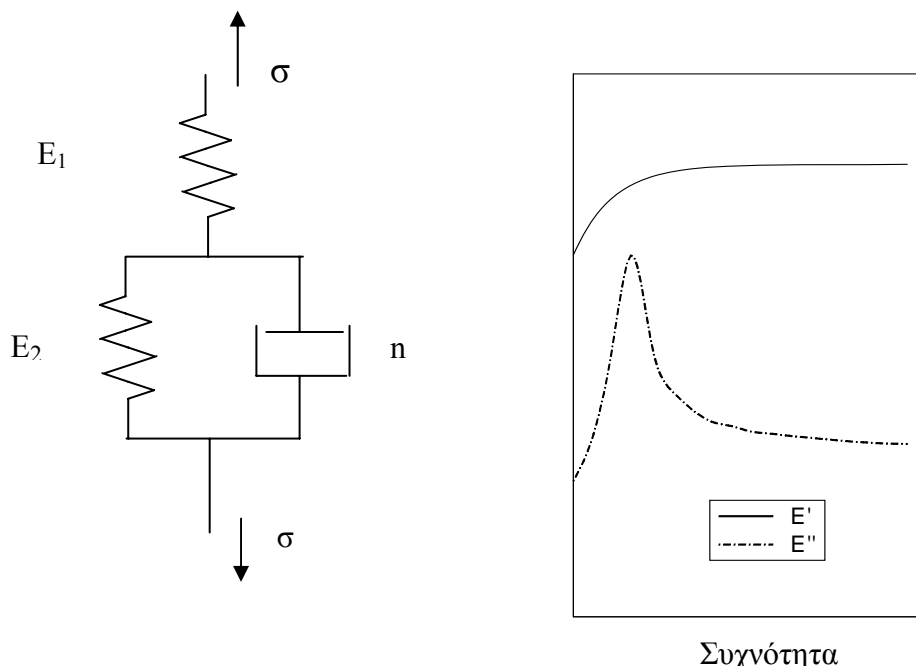
Συμπεριφορά διασποράς είναι κοινή σε σύνθετα κοκκώδη υλικά και αποδίδεται συχνά σε σκέδαση. Άλλη πιθανή ερμηνεία είναι μέσω εξάρτησης των ελαστικών σταθερών από τη συχνότητα λόγω ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς της τσιμεντόπαστας. Οι παραπάνω προσεγγίσεις εξετάζονται στις επόμενες παραγράφους, όπως επίσης για πρώτη φορά θεωρείται το σκυρόδεμα υλικό με μικροδομή, οι κινήσεις και η συσχέτιση της οποίας με τη μακροδομή οδηγούν σε μεταβλητή ταχύτητα με τη συχνότητα.

5.5.1 Το σκυρόδεμα ως ιξωδοελαστικό υλικό.

Το σκυρόδεμα είναι, ως γνωστόν, πολύπλοκο υλικό με πολλά διαφορετικά επίπεδα ανομοιογένειας από το μέγεθος των nm (νανοπόροι) έως cm (αδρανή). Σε πολλές περιπτώσεις ωστόσο και χωρίς μεγάλο σφάλμα, θεωρείται μακροσκοπικά ομογενές, γραμμικά ελαστικό μέσο κυρίως για τον υπολογισμό ελαστικών σταθερών [3,13,16-20]. Βέβαια, οι κατασκευές από σκυρόδεμα υφίστανται παραμορφώσεις ερπυσμού, γεγονός που υποδεικνύει ότι η παρατηρούμενη διασπορά μπορεί να ερμηνευθεί μέσω εξάρτησης από τη συχνότητα των ιξωδοελαστικών σταθερών του υλικού. Εκτός του ερπυσμού, άλλη εκδήλωση τέτοιου είδους συμπεριφοράς είναι οι υψηλότερες τιμές «δυναμικού» μέτρου ελαστικότητας που προκύπτουν μέσω μετρήσεων υπερήχων ή ταλαντώσεων σε σύγκριση με το «στατικό» που μετράται σε μηχανικές δοκιμές [20-22]. Πειράματα σε όμοια υλικά όπως άσφαλτος ή σκυρόδεμα εμπλουτισμένο με ελαστικό έδειξαν ότι το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με τη συχνότητα. [23,24]. Διαφορετικά πρότυπα (μοντέλα) έχουν χρησιμοποιηθεί [22,25,26] για την προσέγγιση πειραματικών δεδομένων κυρίως ερπυσμού. Στην περίπτωση της διατριβής το πρότυπο που επελέγη είναι το «Pounting-Thompson» (ordinary Pounting-Thompson model) [27] του οποίου η σχηματική αναπαράσταση φαίνεται στο σχήμα Σχ.5.21, όπως

επίσης και ποιοτικά η συνάρτηση του πραγματικού (storage) και φανταστικού (loss) μέτρου με τη συχνότητα. Αποτελείται από ένα στοιχείο ελατηρίου συνδεδεμένο σε σειρά με στοιχείο Kelvin-Voigt. Το μιγαδικό μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει της γωνιακής συχνότητας ω , της δυσκαμψίας των στοιχείων ελατηρίου E_1, E_2 και του ιξώδους του αποσβεστήρα n δίνεται ως ακολούθως:

$$E^* = E'(\omega) + iE''(\omega) = \frac{E_2(E_1^2 + E_1E_2 + \omega^2n^2)}{(E_1 + E_2)^2 + \omega^2n^2} + i \frac{\omega n E_2^2}{(E_1 + E_2)^2 + \omega^2n^2} \quad (5.2)$$



Σχ.5.21. Σχηματική αναπαράσταση του ιξωδοελαστικού μοντέλου Pounding-Thompson και ποιοτική συμπεριφορά του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας.

Άλλα απλούστερα μοντέλα που εξετάστηκαν (Maxwell, Kelvin-Voigt), δεν είναι κατάλληλα για το υλικό αυτό καθώς είτε προβλέπουν E' ανεξάρτητο της συχνότητας, είτε $E'(0)=0$, γεγονός που θα σήμαινε φασική ταχύτητα για χαμηλές συχνότητες ίση με μηδέν.

Ως προς τις οριακές περιπτώσεις πολύ χαμηλής και πολύ υψηλής συχνότητας ($\omega \rightarrow 0$ και $\omega \rightarrow \infty$) το πραγματικό μέρος (E') με βάση το επιλεγμένο μοντέλο λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

$$E'(0) = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \text{ και } E'_\infty = E_2 \quad (5.3)$$

Οι τιμές στο κάτω όριο (στατικό μέτρο ελαστικότητας) ελήφθησαν μέσω των μηχανικών δοκιμών. Έχουν διατυπωθεί διαφορετικές εμπειρικές σχέσεις που επιτρέπουν τον αρκετά ακριβή προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας με γνώση της θλιπτικής αντοχής [21,22]. Οι τιμές αυτές του $E'(0)$ που εκτιμώνται από οποιαδήποτε όμοια σχέση δεν διαφέρουν πάνω από 3GPa μεταξύ τους. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση:

$$E'(0) = 3.32 \cdot \sqrt{f_c} + 6.9 \quad (5.4)$$

όπου f_c η θλιπτική αντοχή σε MPa και το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται σε GPa.

Το πάνω όριο του E' , υπολογίστηκε από πειραματική μέτρηση φασικής ταχύτητας C_p σε υψηλή συχνότητα μέσω της:

$$C_p = \sqrt{\frac{E'_\infty(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5.5)$$

όπου ν είναι ο λόγος poisson ίσος με 0.2 που είναι τυπική τιμή για σκυρόδεμα και ρ η πυκνότητα. Το ιξώδες του στοιχείου αποσβεστήρα έλαβε τιμές γύρω στα 10^6 Pa για την καλύτερη προσέγγιση των καμπυλών, όπως φαίνεται στον Πίνακα5.1.

Για τις περιπτώσεις κονιάματος και σκυροδέματος που παρουσιάζονται, οι τιμές της θλιπτικής αντοχής (f_c), του στατικού μέτρου ελαστικότητας ($E'(0)$) όπως υπολογίστηκε από την (5.4) μέσω του f_c , η φασική ταχύτητα, C_p , στα 500kHz, το αντίστοιχο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, E'_∞ , υπολογισμένο μέσω της (5.5) και η τιμή ιξώδους, η , που χρησιμοποιήθηκε, παρουσιάζονται στον Πίνακα5.1.

Πίνακας5.1. Ιδιότητες υλικών για την ιξώδοελαστική ανάλυση

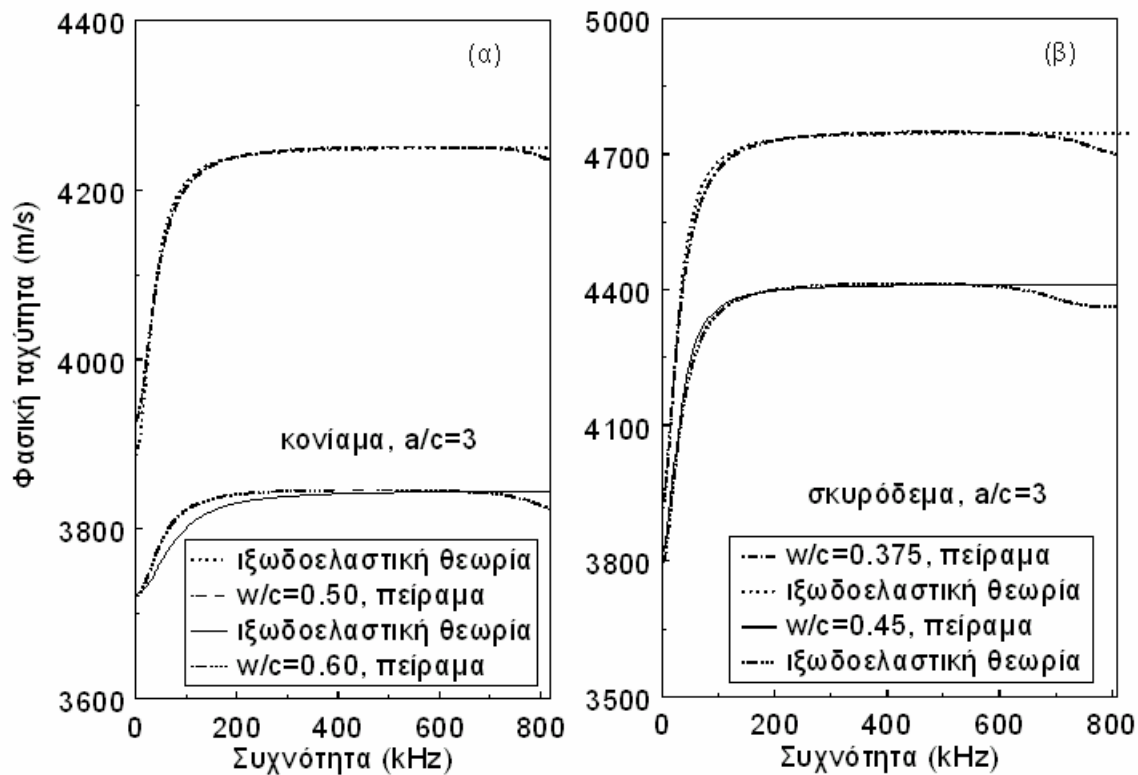
w/c	f_c (MPa)	$E'(0)$ (GPa)	C_p (m/s) (στα 500kHz)	E'_∞ (GPa)	η (MPa)
Κονίαμα					
0.50	56.5	31.7	4251	37.9	1
0.60	47.6	28.2	3846	30.1	1
Σκυρόδεμα					
0.375	63.7	33.4	4748	49.1	0.8
0.45	52.65	31.0	4412	41.4	0.8

Αντίστοιχες ισοδύναμες τιμές ιξώδους για μοντελοποίηση σκυροδέματος δεν εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία. Το συγκεκριμένο μοντέλο επελέγη μεταξύ άλλων που εξετάστηκαν και με το κριτήριο, η τιμή του ιξώδους με τη χρήση της οποίας προσεγγίζονται οι καμπύλες διασποράς να είναι ανώτερη αντίστοιχων τιμών πολυμερών.

Χρησιμοποιώντας τις τιμές $E'(0)$ και E'_{∞} αυτές υπολογίζονται τα E_1 και E_2 μέσω της (5.3) και κατόπιν το πραγματικό μέρος, E' , μέσω της (5.2) και εφαρμόζοντας την τιμή αυτή στην

$$C_p = \sqrt{E'(\omega) \frac{(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{E_2(E_1^2 + E_1E_2 + \omega^2n^2)}{(E_1 + E_2)^2 + \omega^2n^2} \frac{(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5.6)$$

οι καμπύλες διασποράς προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις πειραματικές. Στο Σχ.5.22(α), φαίνονται οι πειραματικές και θεωρητικές καμπύλες φασικής ταχύτητας-συχνότητας για δύο περιπτώσεις κονιάματος, ενώ στο Σχ.5.22(β) παρουσιάζονται δύο αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις σκυροδέματος. Φαίνεται ότι οι θεωρητικές προβλέψεις ακολουθούν τις πειραματικές τάσεις, περιγράφοντας την αύξηση της ταχύτητας σε χαμηλές συχνότητες μέχρι περίπου τα 200kHz. Από την περιοχή αυτή και μετά το E' παύει να αναπτύσσεται όπως συμβαίνει και με τη φασική ταχύτητα. Το στατικό μέτρο λοιπόν που εκτιμάται από την αντοχή φαίνεται να είναι μια καλή αρχή και όταν εισάγεται στη (5.5), παρέχει τιμές φασικής ταχύτητας πολύ κοντά στις πειραματικές για συχνότητες κοντά στο μηδέν.



Σχ.5.22. Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής φασικής ταχύτητας για (α) κονίαμα και (β) σκυρόδεμα.

Είναι λοιπόν σαφές ότι η παραπάνω προσέγγιση μέσω ιξωδοελαστικότητας ερμηνεύει την παρατηρούμενη διασπορά σκυροδέματος και κονιάματος. Ωστόσο, οι μετρήσεις ταχύτητας στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής έδειξαν ότι η κατεξοχήν ιξωδοελαστική μήτρα (τσιμεντόπαστα) δεν παρουσιάζει σημαντική διασπορά, όπως φάνηκε στα Σχ.5.5 και 5.14. γεγονός που οδήγησε στην εμπλοκή και άλλων παραμέτρων (μικροδομή) στην ανάλυση όπως αναπτύσσεται παρακάτω.

5.5.2 Διάδοση τασικών κυμάτων σε ομογενές και ισότροπο υλικό

Οι υπερηχητικές διαταραχές διαδίδονται σε ένα μέσο ως τασικά κύματα που προκαλούν ταλάντωση των μεμονωμένων σωματιδίων περί της θέσης ισορροπίας τους. Σε ισότροπα και ομογενή υλικά οι ταλαντώσεις μπορούν να συμβούν είτε παράλληλα (διαμήκη κύματα) είτε κάθετα (διατμητικά) προς τη διεύθυνση διάδοσης της διαταραχής. Η ταχύτητα διάδοσης του

κύματος εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες και την πυκνότητα του μέσου. Ιδεατά, ένα τέτοιο κύμα μπορεί να θεωρηθεί ως μια σφαιρική διαταραχή που ξεκινά από σημειακή πηγή και διαδίδεται σε άπειρο μέσο.

Για ένα ελαστικό πρόβλημα έχουμε ότι η ελαστική ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα ελαστικό μέσο όγκου, V , είναι:

$$U = \int_V \tau_{ij} e_{ij} dV \quad (5.7)$$

όπου τ_{ij} , e_{ij} οι τανυστές τάσεων και παραμορφώσεων αντίστοιχα, ενώ η κινητική του ενέργεια είναι:

$$K = \int_V \frac{1}{2} \rho \dot{u}_i^2 dV \quad (5.8)$$

όπου ρ η πυκνότητα και \dot{u}_i η ταχύτητα

Χρησιμοποιώντας την αρχή Hamilton [7], προκύπτει ότι η εξίσωση ισορροπίας είναι:

$$\nabla \cdot \tilde{\tau} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad \text{ή} \quad \tau_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i \quad (5.9)$$

Με εφαρμογή του νόμου του Hooke,

$$\begin{aligned} \tilde{\tau} &= 2\mu \tilde{\mathbf{e}} + \lambda (\nabla \cdot \mathbf{u}) \tilde{\mathbf{I}} \\ \tilde{\mathbf{e}} &= \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + \mathbf{u} \nabla) \end{aligned} \quad (5.10)$$

όπου $\tilde{\mathbf{I}}$, ο μοναδιαίος πίνακας, η εξίσωση κίνησης σε ελαστικό μέσο, απουσία πεδιακής δύναμης εκφράζεται ως:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (5.11)$$

όπου \mathbf{u} είναι το διάνυσμα της μετατόπισης, λ και μ είναι οι ελαστικές σταθερές Lamé και ρ η πυκνότητα [28].

Το διάνυσμα \mathbf{u} μπορεί να γραφεί ως άθροισμα ενός αστρόβιλου και ενός σωληνοειδούς πεδίου [29]:

$$\mathbf{u} = \nabla\phi + \nabla \times \mathbf{A} \quad (5.12)$$

με $\nabla\phi$, $\nabla \times \mathbf{A}$, να δηλώνουν μεταβολές όγκου και σχήματος αντίστοιχα. Ως προς την κυματική διάδοση αυτό σημαίνει ότι το $\nabla\phi$ αντιστοιχεί σε διαμήκη κύματα, ενώ $\nabla \times \mathbf{A}$, αντιπροσωπεύει διατμητικά. Αν αναλύσουμε κάθε διαμήκη και διατμητική διαταραχή κατά Fourier, τότε κάθε συνιστώσα του αναπτύγματος αντιστοιχεί σε επίπεδο κύμα της μορφής:

$$\begin{aligned} (\nabla\phi)_n &= P\hat{\mathbf{k}}e^{i(k_p^{(n)}\hat{\mathbf{k}}\cdot\mathbf{r}-\omega_n t)} \\ (\nabla \times \mathbf{A})_n &= S\hat{\mathbf{b}}e^{i(k_s^{(n)}\hat{\mathbf{k}}\cdot\mathbf{r}-\omega_n t)} \end{aligned} \quad (5.13)$$

όπου $\hat{\mathbf{k}}$ η διεύθυνση πρόσπτωσης, $\hat{\mathbf{b}}$ το διάνυσμα πόλωσης του διατμητικού κύματος, \mathbf{r} το διάνυσμα θέσης, $(P, k_p), (S, k_s)$ είναι το εύρος και ο κυματικός αριθμός της διαμήκους και διατμητικής συνιστώσας αντίστοιχα και ω_n είναι η αντίστοιχη συχνότητα του αναπτύγματος Fourier.

Εφαρμογή της (5.13) στις (5.12) και (5.11), δίνει:

$$\omega = C_p k_p, \quad C_p^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \quad (5.14)$$

$$\omega = C_s k_s, \quad C_s^2 = \frac{\mu}{\rho}$$

που δείχνει τη γραμμική σχέση του κυματάριθμου με την κυκλική συχνότητα για διαμήκη και διατμητικά κύματα. Είναι λοιπόν σαφές ότι σε ομογενές ελαστικό μέσο η ταχύτητα είναι σταθερή και δεν επηρεάζεται από τη συχνότητα.

5.5.3 Κυματική διάδοση σε υλικό με μικροδομή

Όπως διαπιστώθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, διαμήκη κύματα στο σκυρόδεμα και στο κονίαμα υφίστανται διασπορά σε χαμηλές συχνότητες, όπου η μικροδομή του υλικού (π.χ κόκκος αδρανών ή πορώδες) είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος. Σε αντίθεση, οι

παλμοί σε τσιμεντόπαστα παρουσιάζουν πολύ μικρή έως ανεπαίσθητη διασπορά. Ο σκοπός λοιπόν αυτής της διερεύνησης που ακολουθεί είναι να δοθεί εξήγηση στην παρατηρούμενη διασπορά μέσω μιας γενικευμένης θεωρίας ελαστικότητας, που λαμβάνει υπ' όψη επιδράσεις της μικροδομής καθώς η σκέδαση παρότι μελετήθηκε, δεν φαίνεται να είναι η αιτία της συμπεριφοράς αυτής, όπως θα αναπτυχθεί αργότερα.

Θεωρώντας το σκυρόδεμα ως ένα γραμμικό ελαστικό υλικό με μικροδομή, η δυναμική του συμπεριφορά δεν μπορεί να περιγραφεί κατάλληλα με την κλασική θεωρία ελαστικότητας, η οποία συνδέεται με τις έννοιες της ομοιογένειας και τοπικότητας των τάσεων. Όταν το υλικό επιδεικνύει διασκορπίζουσα συμπεριφορά, επιδράσεις της μικροδομής πιθανότατα καθίστανται σημαντικές και η τασική κατάσταση πρέπει να ορισθεί με τρόπο μη τοπικό. Παράδειγμα είναι η αύξηση της αντοχής κοκκωδών συνθέτων υλικών με τη μείωση της διαμέτρου των εγκλεισμάτων [30]. Όμοιο φαινόμενο μπορεί να χαρακτηριστεί και το ότι, στην παρούσα διατριβή η ταχύτητα υπερήχων στο σκυρόδεμα εμφανίζεται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις μεγαλύτερη από του κονιάματος χωρίς άλλες μεταβολές στη σύσταση, παρά μόνο στο μέγεθος αδρανών. Τέτοιου είδους επιδράσεις μικροδομής μπορούν να προσεγγιστούν επιτυχώς με τη χρήση βαθμωτών ελαστικών θεωριών υψηλότερης τάξης με πιο αντιπροσωπευτικές και γενικές αυτών τις: «Couple stresses theory» που προτάθηκε από τους αδερφούς Cosserat, τη θεωρία του Mindlin (General higher order gradient elastic theory) και του Eringen (Non-local elastic theory). Για βιβλιογραφική ανασκόπηση των θεωριών αυτών μπορεί κανείς να συμβουλευτεί τα παρακάτω [31-35].

Η σχετική διερεύνηση έγινε στο πλαίσιο της διατριβής με τη θεωρία του Mindlin [7]. Ο Mindlin πρότεινε ότι η δυναμική ενέργεια δεν εξαρτάται μόνο από την παραμόρφωση, αλλά και από την παράγωγό της:

$$U = \int_V (\tau_{ij} e_{ij} + \mu_{ijk} \partial_i e_{jk}) dV \quad (5.15)$$

όπου μ_{ijk} , οι «διπλές τάσεις», οι οποίες στην απλούστερή τους μορφή συνδέονται με τον τανυστή τάσεων, για ισότροπο και ομογενές μέσο με:

$$\tilde{\mu} = g^2 \nabla \tilde{\tau} \quad (5.16)$$

g^2 είναι ο συντελεστής που συνδέει την ελαστική μικροδομή με τη μακροδομή.

Αντίστοιχα, ο Mindlin θεώρησε ότι η κινητική ενέργεια δεν είναι μόνο συνάρτηση της ταχύτητας αλλά και των χωρικών παραγώγων της. Με βάση τη θεώρηση αυτή η κινητική ενέργεια δίνεται:

$$K = \int_V \left(\frac{1}{2} \rho \dot{u}_i \dot{u}_i + \frac{\rho h^2}{6} \partial_i \dot{u}_j \partial_i \dot{u}_j \right) dV \quad (5.17)$$

όπου h^2 είναι συντελεστής μικρότερος του g^2 και ουσιαστικά περιγράφει πώς η αδράνεια της μικροδομής επηρεάζει την αδράνεια της μακροδομής.

Αφού εφαρμοστεί η αρχή του Hamilton [7] προκύπτει η εξίσωση ισορροπίας:

$$\nabla \cdot \left(\tilde{\tau} + \frac{\rho h^2}{3} \nabla \ddot{\mathbf{u}} - \nabla \cdot \hat{\mu} \right) = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (5.18)$$

Μέσω της (5.16) και με εφαρμογή της (5.10) καταλήγουμε στην

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} - g^2 \nabla^2 (\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u}) = \rho \ddot{\mathbf{u}} - \frac{\rho h^2}{3} \nabla^2 \ddot{\mathbf{u}} \quad (5.19)$$

Συνεχίζοντας με όμοιο τρόπο με παραπάνω, αναλύεται το διάνυσμα \mathbf{u} σε άθροισμα αστρόβιλου και σωληνοειδούς πεδίου (5.12). Τελικά η σχέση διασποράς που προκύπτει είναι για διάμηκες κύμα:

$$\omega^2 = C_p^2 \frac{k_p^2 (1 + g^2 k_p^2)}{1 + \bar{h}^2 k_p^2}, \quad C_p^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}, \quad \bar{h} = \frac{h}{\sqrt{3}} \quad (5.20)$$

Η εξίσωση (5.20) δείχνει ότι τα διαμήκη κύματα, όπως αντίστοιχα και τα εγκάρσια, υφίστανται διασπορά όταν διαδίδονται σε στερεά με μικροδομή. Η διασπορά αυτή επιβάλλεται από την παρουσία των δύο παραμέτρων της μικροδομής g^2 και h^2 . Όπως μπορεί να δειχθεί, με μηδενισμό των σταθερών αυτών οδηγούμαστε στη γραμμική σχέση μεταξύ συχνότητας και κυματάρθμου που χαρακτηρίζει κλασικά ελαστικά υλικά.

Επιλύοντας την εξίσωση ως προς τον κυματάρθμο, προκύπτει η σχέση:

$$k_p^2 = \frac{-(C_p^2 - \omega^2 h^2) + \sqrt{(C_p^2 - \omega^2 h^2)^2 + 4 \cdot C_p^2 g^2 \omega^2}}{2C_p^2 g^2} \quad (5.21)$$

Οι φασική ταχύτητα και η ταχύτητα ομάδας V_p and $V_g^{(p)}$ αντίστοιχα, δίνονται από τις σχέσεις:

$$V_p = \frac{\omega}{k_p} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{-(C_p^2 - \omega^2 h^2) + \sqrt{(C_p^2 - \omega^2 h^2)^2 + 4 \cdot C_p^2 g^2 \omega^2}}{2C_p^2 g^2}}} \quad (5.22)$$

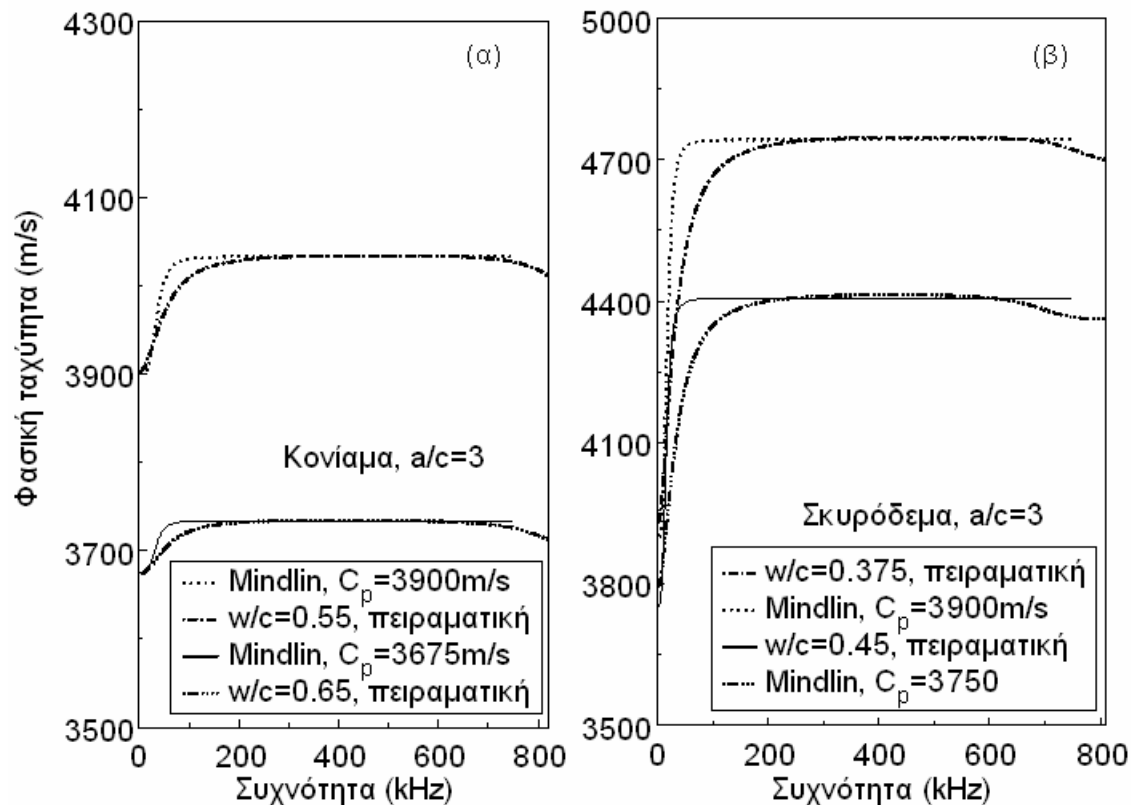
$$V_g^{(p)} = \frac{d\omega}{dk_p} = C_p \left[\sqrt{\frac{1 + g^2 k_p^2}{1 + h^2 k_p^2}} + k_p^2 \left(\frac{g^2}{\sqrt{(1 + k_p^2 g^2)} \cdot (1 + k_p^2 h^2)} - \frac{h^2 \sqrt{(1 + k_p^2 g^2)}}{\sqrt{(1 + k_p^2 h^2)^3}} \right) \right] \quad (5.23)$$

5.5.4 Αποτελέσματα θεωρίας Mindlin και σύγκριση με πειραματικές καμπύλες

Στην παράγραφο αυτή συγκρίνονται θεωρητικές προβλέψεις χρησιμοποιώντας τη θεωρία Mindlin με πειραματικές καμπύλες φασικής ταχύτητας. Σημασία έχει ο ορισμός της τιμής των παραμέτρων g και h . Αυτές χρησιμοποιούνται ως σύνδεσμος της μικροδομής με τη μακροδομή. Εφόσον το σκυρόδεμα είναι κοκκώδες σύνθετο υλικό αδρανών μέσα σε μήτρα τσιμεντόπαστας, είναι λογικό, παρότι όχι απαραίτητως ακριβές, να θεωρηθούν τα αδρανή ως η μικροδομή. Κατ' αυτόν τον τρόπο η παράμετρος g αρχικά τέθηκε ίση με το λόγο του

μεγέθους του αδρανούς προς το μήκος κύματος. Το μέσο μέγεθος κόκκου άμμου για κονίαμα είναι περίπου 2mm αφού το μέγιστο μέγεθος άμμου είναι 4.75mm. Το αντίστοιχο μέσο μέγεθος για σκυρόδεμα είναι περίπου 10mm, αφού εκτός της άμμου περιέχει επίσης και χονδρά αδρανή μεγέθους μέχρι 37.5mm. Το μήκος κύματος μεταβάλλεται έντονα στο φάσμα συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις της παρούσας διατριβής, αφού για παράδειγμα είναι της τάξης των 15cm για συχνότητα 30kHz ενώ πέφτει κάτω από 1cm για συχνότητες πάνω από 500kHz. Έτσι, η ογκομετρική παράμετρος g είναι γραμμική με τη συχνότητα και λαμβάνει τιμές μέχρι 0.35 για κονίαμα και 1.8 για σκυρόδεμα για συχνότητες γύρω στα 800kHz.

Στο Σχ.5.23 παρουσιάζονται καμπύλες διασποράς φασικής ταχύτητας κονιάματος με λόγο άμμου/τσιμέντου, $a/c=3$ και $w/c=0.55$ και 0.65 αντίστοιχα. Ως γνωστό, αυξημένος w/c οδηγεί σε μειωμένο μέτρο ελαστικότητας. Αυτό επιβάλλει και χαμηλότερη τιμή C_p που για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις κονιάματος, λαμβάνει τις τιμές 3900m/s και 3675m/s αντίστοιχα. Ομοίως, οι τιμές των C_p για σκυρόδεμα $w/c=0.375$ και 0.45 ήταν 3900m/s και 3750m/s αντίστοιχα.

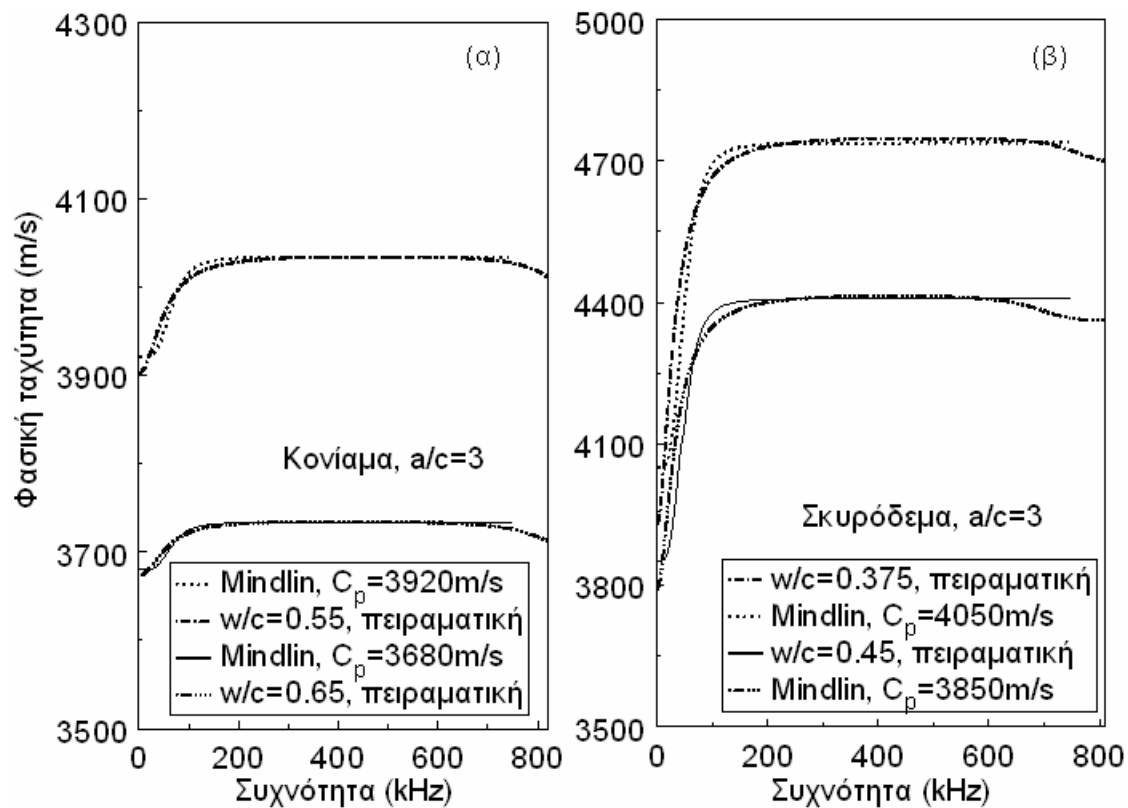


Σχ.5.23. Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής φασικής ταχύτητας για (α) κονίαμα και (β) σκυρόδεμα. Οι θεωρητικές παράμετροι εξαρτώνται από το μέγεθος αδρανούς.

Από τη σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών καμπυλών φαίνεται ότι παρά την αύξηση φασικής ταχύτητας που παρουσιάζουν και οι δύο, η τάση αυτή είναι πολύ πιο έντονη στις θεωρητικές καμπύλες, αφού ειδικά για σκυρόδεμα η μέγιστη τιμή προσεγγίζεται περί τα 50kHz, ενώ στις πειραματικές αυτό συμβαίνει γύρω στα 200kHz. Η παράμετρος h καθορίζει κυρίως το ποσοστό διασποράς, δηλαδή τη διαφορά μεταξύ αρχικής και τελικής τιμής της καμπύλης. Το κονίαμα παρουσιάζει αύξηση περίπου 5% στη φασική ταχύτητα μέχρι τα 200kHz, ενώ η αύξηση για σκυρόδεμα είναι περίπου 10%. Αυτό οδηγεί και σε διαφορετικές τιμές h . Επίσης φάνηκε ότι γραμμική σχέση των δύο παραμέτρων διευκολύνει την προσέγγιση των καμπυλών. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι τιμές του h ετέθησαν ίσες με $g/1.034$, $g/1.016$ για τις περιπτώσεις κονιάματος και $g/1.216$ $g/1.175$ για το σκυρόδεμα.

Αυτή η διαφοροποίηση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών καμπυλών, τουλάχιστον για την περιοχή κάτω από 200kHz, υποδεικνύει ότι η αναγνώριση της μικροδομής του

σκυροδέματος δεν είναι απλή. Πράγματι, αφού η ανομοιογένεια του υλικού εκτείνεται σε πολλές τάξεις μεγέθους, θεωρήθηκε σκόπιμο να προσαρμοστεί το μέγεθος της μικροδομής που εφαρμόστηκε σε τιμές κατάλληλες για την προσέγγιση των καμπυλών. Άλλωστε, το χαρακτηριστικό μήκος της μικροδομής ως προς την κυματική διάδοση, είναι πιθανό να επηρεάζεται και από διάφορα άλλα μεγέθη όπως πορώδες, εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα, αποστάσεις μεταξύ τους, καθιστώντας τον προσδιορισμό του εξαιρετικά δύσκολο. Το μέγεθος της μικροδομής, που σε αναλογία με το μήκος κύματος, οδηγεί σε μείωση της διαφοράς θεωρητικών-πειραματικών τιμών είναι περίπου 600μm για κονίαμα και 1.3mm για σκυρόδεμα. Αυτό φαίνεται στα Σχ.5.24(α) και (β) για κονίαμα και σκυρόδεμα αντίστοιχα.



Σχ.5.24. Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής φασικής ταχύτητας για (α) κονίαμα και (β) σκυρόδεμα. Οι θεωρητικές παράμετροι εξαρτώνται από «χαρακτηριστικό» μέγεθος της μικροδομής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι θεωρώντας ως στοιχειώδες μέρος του κονιάματος σφαιρικό κόκκο άμμου μέσα σε σφαίρα τσιμεντόπαστας και για κ.ο. περιεκτικότητα 60%, που είναι τυπική

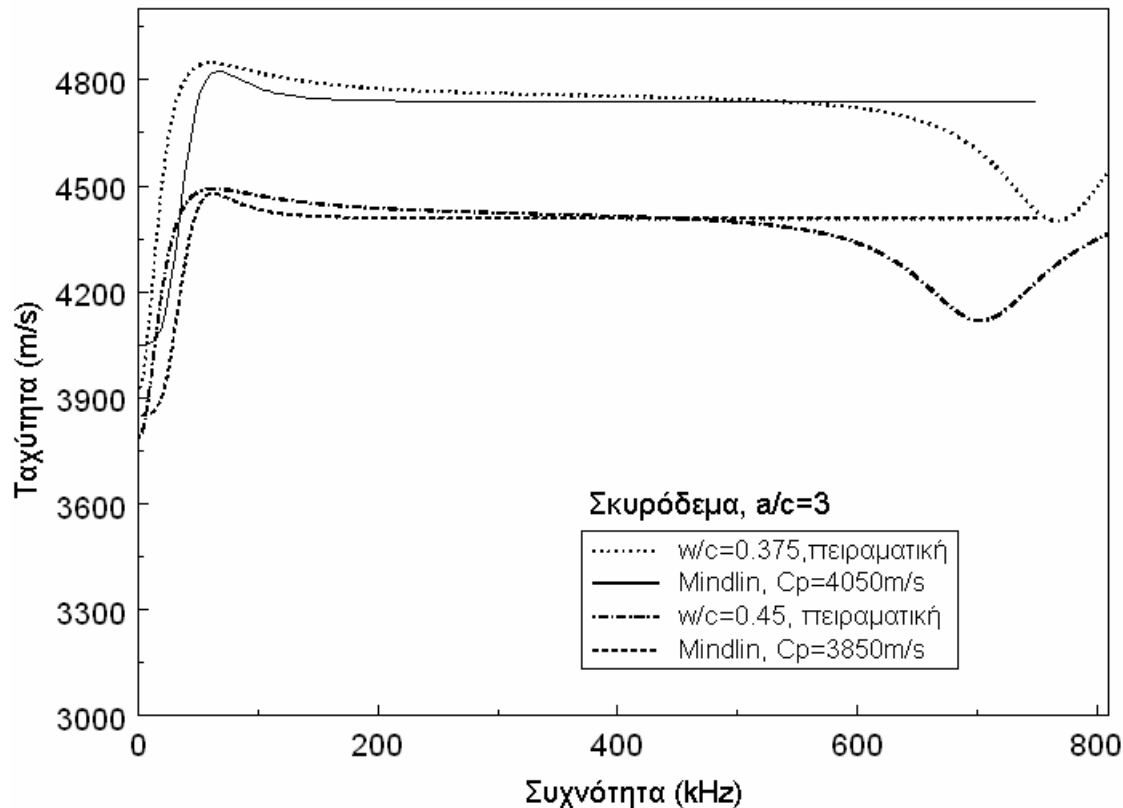
για τέτοια υλικά, η απόσταση μεταξύ κόκκων υπολογίζεται περίπου σε 640 μm . Η τιμή αυτή προσεγγίζει αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στην παραπάνω ανάλυση, υποδεικνύοντας ότι στο πλαίσιο ερμηνείας της συμπεριφοράς του κονιάματος βάσει της μικροδομής, οι αποστάσεις μεταξύ των αδρανών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην εκτίμηση του χαρακτηριστικού μεγέθους της μικροδομής. Αντίστοιχη απόσταση μεταξύ χαλικιών, που αφορούν σε σκυρόδεμα, υπολογίζεται περίπου σε 5mm. Βεβαίως τα αδρανή του σκυροδέματος είναι κατά το ήμισυ άμμος και κατά το υπόλοιπο ήμισυ μεγαλύτερα αδρανή. Άρα είναι λογικό το χαρακτηριστικό μέγεθος να λαμβάνει τιμή ανάμεσα σε 640 μm και 5mm, όπως είναι η τιμή 1.3mm που χρησιμοποιήθηκε στη θεωρητική ανάλυση. Οι τιμές του h δεν διαφέρουν πολύ από την πρώτη περίπτωση, δηλαδή είναι g/1.029, g/1.0145 για κονίαμα και g/1.17, g/1.145 για σκυρόδεμα.

Ωστόσο, τέλεια συμφωνία μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών καμπυλών είναι εφικτή διατηρώντας την ογκομετρική παράμετρο σταθερή και ανεξάρτητη της συχνότητας. Οι καταλληλότερες τιμές είναι 0.012 για κονίαμα και 0.022 για σκυρόδεμα. Οι αντίστοιχες τιμές του h είναι g/1.035 και g/1.015 για κονίαμα με $w/c=0.55$ και 0.65 ενώ είναι χαμηλότερες ως προς το g (g/1.205 και g/1.1625) για τις περιπτώσεις σκυροδέματος ($w/c=0.375$ και 0.45). Στην περίπτωση αυτή δεν παρουσιάζεται σχήμα αφού οι πειραματικές και θεωρητικές καμπύλες συμπίπτουν πλήρως.

Γενικά, η διασπορά διαφέρει ελαφρώς για κάθε τύπο υλικού. Ενώ τα δοκίμια τσιμεντόπαστας παρουσιάζονται μη διασκορπίζοντα, το κονίαμα υφίσταται αύξηση της φασικής ταχύτητας μέχρι τα 200kHz. Η αύξηση αυτή είναι ακόμα μεγαλύτερη για το σκυρόδεμα. Αυτός είναι και ο λόγος που η παράμετρος h βρίσκεται μεταξύ g/1.035 - g/1.015 για κονίαμα, ενώ για σκυρόδεμα που είναι πιο ανομοιογενές και διασκορπίζον κυμαίνεται μεταξύ g/1.21 - g/1.14.

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της ταχύτητας ομάδας V_g ($V_g=d\omega/dk$), ότι δηλαδή η ταχύτητα παλμού κεντρικής συχνότητας (γωνιακής ταχύτητας) ω , με περιεχόμενο $\omega \pm d\omega/2$, εκφράζεται από την κλίση της εφαπτομένης της καμπύλης διασποράς, στο σημείο (ω, β) , βλ. [28], έγιναν υπολογισμοί της ταχύτητας αυτής αντίστοιχα με της φασικής ταχύτητας με την τεχνική Sache και Pao [15] από τη διαφορά φάσης εισόδου-εξόδου. Επίσης από την

θεωρητική καμπύλη διασποράς μέσω Mindlin, υπολογίζεται ομοίως και θεωρητική καμπύλη ταχύτητας ομάδας – συχνότητας. Δύο παραδείγματα σύγκρισης πειραματικής και θεωρητικής ταχύτητας ομάδας φαίνονται στο Σχ.5.25 για δύο συστάσεις σκυροδέματος. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι πειραματικές καμπύλες παρουσιάζουν τοπικό μέγιστο πριν τα 100kHz τάση που ακολουθείται και από τις θεωρητικές.



Σχ.5.25. Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής ταχύτητας ομάδας (group velocity) για δύο συστάσεις κονιάματος.

5.5.5 Διερεύνηση μέσω σκέδασης

Στην επιστημονική περιοχή της κυματικής διάδοσης, είναι γνωστό ότι ένα τασικό κύμα που διαδίδεται μέσω ενός συνθέτου (κοκκώδους ή ινώδους), υφίσταται διασπορά λόγω πολλαπλής σκέδασης που οφείλεται στις τυχαία κατανομημένες ανομοιογένειες του υλικού [36-37]. Συγκεκριμένα για υλικά με βάση το τσιμέντο η σκέδαση θεωρείται ένας βασικός μηχανισμός που επηρεάζει την κυματική διάδοση [2,3,38] παρότι η εφαρμογή συγκεκριμένων μοντέλων σκέδασης είναι περιορισμένη [39]. Ωστόσο οι ελαστικές ιδιότητες

μήτρας και εγκλεισμάτων και ιδιαίτερα οι πυκνότητες δεν διαφέρουν δραματικά. Ως εκ τούτου, δεν είναι απαραίτητο να αποδίδεται η όποια μετρούμενη διασπορά σε σκέδαση χωρίς διερεύνηση. Άλλωστε μελέτες υποστηρίζουν ότι παράμετροι διαφορετικές της σκέδασης είναι επίσης υψηλής σημασίας (όπως η ποσότητα της ζώνης διεπιφάνειας μεταξύ αδρανών και μήτρας [3,5,6]).

Ο σκοπός της παρούσας παραγράφου είναι η διερεύνηση σχετικά με την επίδραση της σκέδασης στη συμπεριφορά διασποράς του διαδιδόμενου κύματος στο σκυρόδεμα. Εκτενέστερη χρήση και ερμηνεία αποτελεσμάτων μέσω σκέδασης γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο. Ως εκ τούτου, εκεί περιέχονται οι βασικές αρχές και η μεθοδολογία. Σε αυτή την παράγραφο αναφέρονται μόνο τα αποτελέσματα από ενδεικτικές περιπτώσεις. Εν συντομία σημειώνεται ότι αντιμετωπίζεται το πρόβλημα πρόσπτωσης διαμήκους κύματος σε σφαιρικό σκεδαστή σύμφωνα με την προσέγγιση Ying & Truell [40], υπολογίζεται το ενεργειακό πλάτος σκέδασης του σκεδασμένου διαμήκους κύματος με χρήση συνοριακών συνθηκών και μέσω της σχέσης διασποράς υπολογίζεται ο μιγαδικός κυματάριθμος του μέσου και ως εκ τούτου η ταχύτητα και η εξασθένιση συναρτήσει της συχνότητας.

Η διερεύνηση σχετίζεται με την περίπτωση κονιάματος ($w/c=0.375$, $a/c=1.5$) και σκυροδέματος ($w/c=0.375$, $a/c=3$). Οι συγκεκριμένες συστάσεις επελέγησαν διότι το κονίαμα αυτό στην ουσία είναι η μήτρα του σκυροδέματος με την προσθήκη χαλκικών έως ότου ο λόγος a/c γίνει 3. Δύο διαφορετικά προβλήματα αντιμετωπίστηκαν. Στο πρώτο, το κονίαμα θεωρείται σύνθετο σφαιρικών κόκκων άμμου 2.5mm που περιέχονται σε μήτρα αποτελούμενη από τσιμεντόπαστα και ψιλή άμμο (μικρότερη του 1mm). Στην περίπτωση αυτή η κ.ο. περιεκτικότητα σε άμμο (2.5mm) είναι περίπου 20%, ενώ οι πυκνότητες της άμμου και της μήτρας θεωρήθηκαν ίσες με 2700kg/m^3 και 2200kg/m^3 αντίστοιχα. Τα μέτρα ελαστικότητας άμμου και μήτρας θεωρήθηκαν 70GPa και 30GPa αντίστοιχα.

Στο δεύτερο πρόβλημα αντιμετωπίστηκε η σκέδαση σε μεγάλα αδρανή τοποθετημένα σε μήτρα όμοια με το κονίαμα που εξετάστηκε παραπάνω. Ο αυξημένος λόγος a/c είναι το αποτέλεσμα της πρόσθεσης χονδρών αδρανών στο παραπάνω υλικό σε ποσοστό περίπου 20% κ.ο. Οι ελαστικές ιδιότητες και πυκνότητα των χαλκικών είναι ίδιες με της άμμου αφού

είναι ίδιας (ασβεστολιθικής) προέλευσης. Οι ιδιότητες της μήτρας σε αυτή την περίπτωση, δηλαδή του παραπάνω κονιάματος, υπολογίστηκαν βάσει του στατικού μοντέλου Christensen [41]:

$$K^{\text{eff}} = K_2 + \frac{\varphi(K_1 - K_2) \left(K_2 + \frac{4}{3} \mu_2 \right)}{\left(K_2 + \frac{4}{3} \mu_2 \right) + (1 - \varphi)(K_1 - K_2)} \quad (5.24)$$

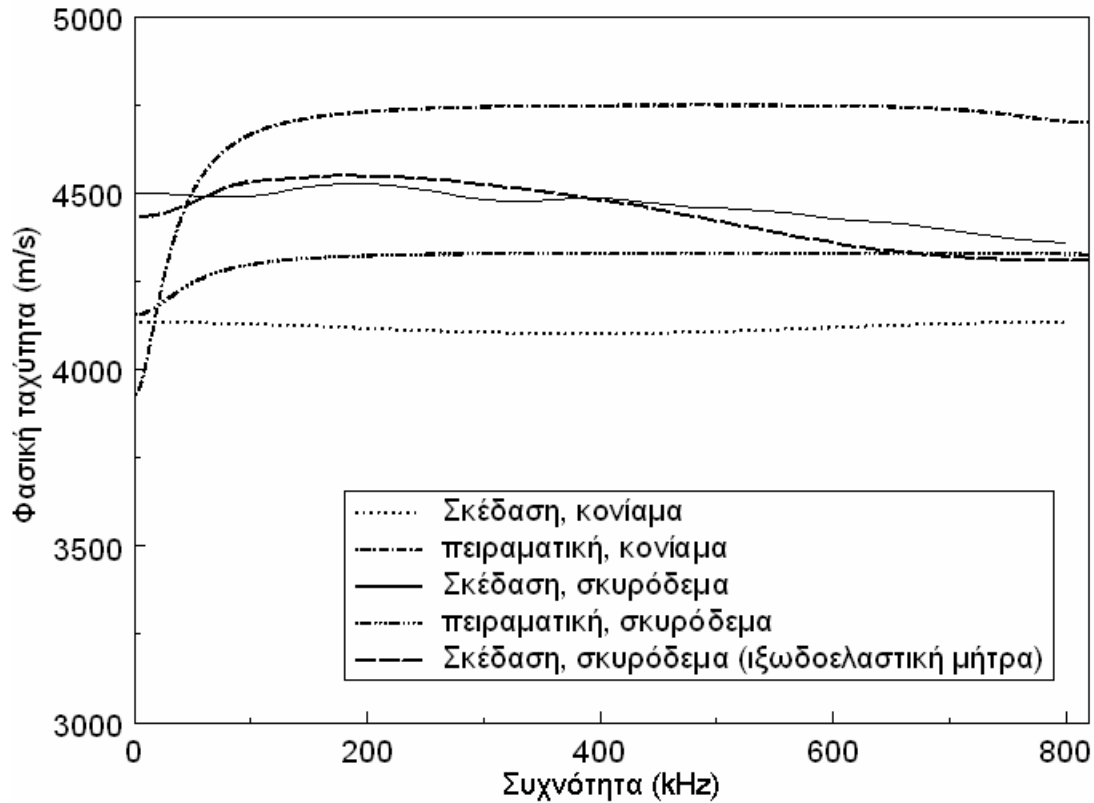
$$A \left(\frac{\mu^{\text{eff}}}{\mu_2} \right)^2 + 2B \left(\frac{\mu^{\text{eff}}}{\mu_2} \right) + C = 0$$

όπου K_{eff} και μ_{eff} τα ισοδύναμα μέτρα διόγκωσης και διάτμησης, φ η κ.ο. περιεκτικότητα και οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στο σκεδαστή και τη μήτρα αντίστοιχα. Οι σταθερές A, B, C δίνονται στην εργασία του Christensen [41].

Με όμοιο τρόπο το πρόβλημα αυτό λύθηκε και στο Σχ.5.26 παρουσιάζονται οι καμπύλες φασικής ταχύτητας – συχνότητας και για τις δύο περιπτώσεις. Φαίνεται ότι παρότι το σκυρόδεμα εμφανίζει υψηλότερες τιμές σε όλο το φάσμα συχνοτήτων από το κονίαμα, όπως συμβαίνει και στις πειραματικές μετρήσεις, δεν παρατηρείται η αυξητική τάση σε χαμηλές συχνότητες ενώ χρησιμοποιώντας λογικές (και μάλλον υψηλές) τιμές ελαστικών ιδιοτήτων, οι τιμές της ταχύτητας προβλέπονται χαμηλότερες από τις πειραματικές. Συνάγεται λοιπόν ότι η συνεισφορά της σκέδασης δεν είναι αρκετή για την ερμηνεία της διασποράς σκυροδέματος και κονιάματος.

Για να περιληφθεί και η δυναμική συμπεριφορά της μήτρας στο μοντέλο σκέδασης, αντί του νόμου Christensen για τον υπολογισμό των ελαστικών της ιδιοτήτων, χρησιμοποιήθηκε μιγαδικό μέτρο ελαστικότητας κατά τα πρότυπα της παραγράφου 5.5.1 για το κονίαμα $w/c=0.375$ και $a/c=1.5$. Με βάση τη θλιπτική αντοχή και τη φασική ταχύτητα αυτού οι οριακές τιμές είναι $E'(0)=34.8\text{GPa}$ και $E'(\infty)=38.4\text{GPa}$. Συνεπώς το πρόβλημα μετατράπηκε σε σκέδαση κύματος σε ελαστικό έγκλεισμα τοποθετημένο σε ιξωδοελαστική μήτρα. Η

αύξηση του δυναμικού μέτρου με τη συχνότητα φαίνεται να μην επηρεάζει αισθητά τις προβλέψεις, όπως παρουσιάζεται στο Σχ.5.26.



Σχ.5.26. Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής φασικής ταχύτητας κονιάματος και σκυροδέματος.

5.5.6 Πρόβλεψη εξασθένησης

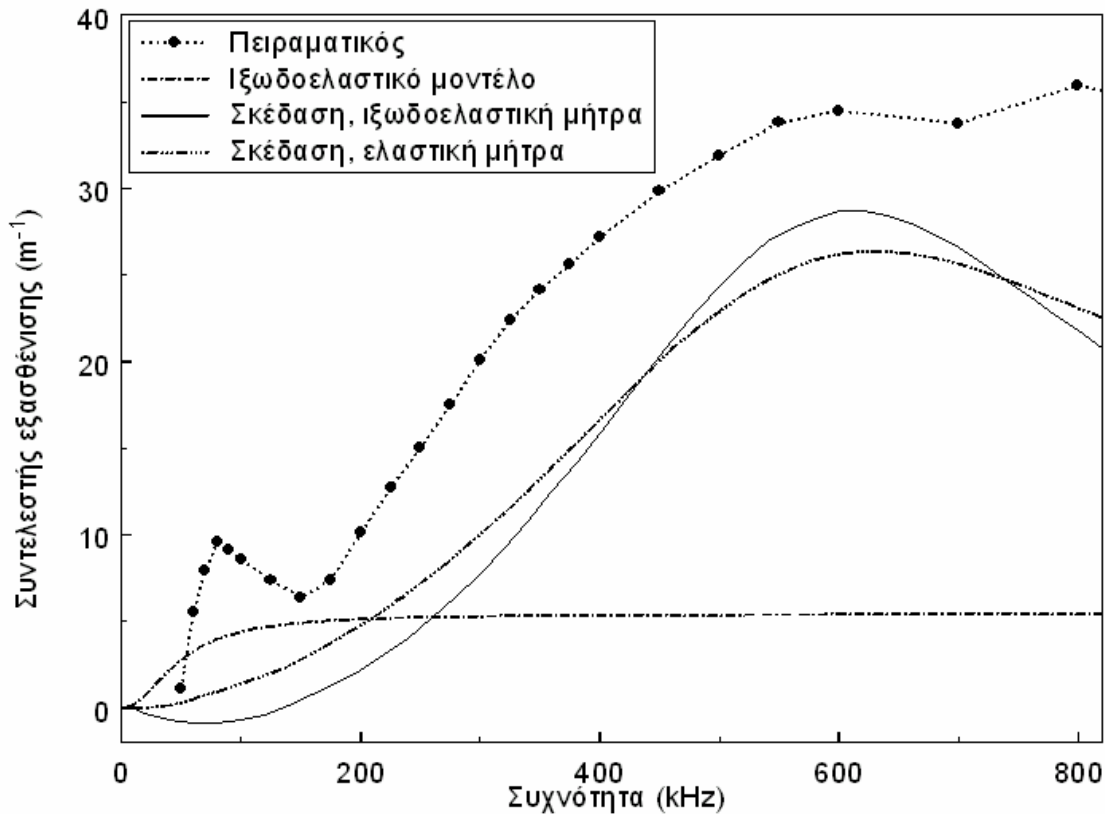
Το μειονέκτημα της θεωρίας Mindlin είναι η αδυναμία πρόβλεψης της εξασθένησης. Ωστόσο, μοντέλα σκέδασης και ιξωδοελαστικότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό, όπως αναπτύσσεται παρακάτω. Ο πειραματικός συντελεστής εξασθένησης για σκυρόδεμα $w/c=0.375$ και $a/c=3$, συναρτήσει της συχνότητας παρουσιάζεται στο Σχ.5.27. Φαίνεται ότι μετά τη συχνότητα των 200kHz, ακολουθεί μια γραμμική, αυξητική τροχιά, που είναι τυπική για τέτοιου είδους υλικά [5]. Ο συντελεστής απορρόφησης, α , ιξωδοελαστικών υλικών μπορεί να υπολογισθεί από τις τιμές του πραγματικού και φανταστικού μέρους του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας [42]:

$$\alpha = \frac{-1 + \sqrt{1 + \delta^2}}{\frac{\lambda \delta}{2\pi}} \quad (5.25)$$

όπου λ , το μήκος κύματος και $\delta = E''/E'$.

Για τη συγκεκριμένη περίπτωση του σκυροδέματος με τις παραπάνω ιδιότητες, ο θεωρητικός συντελεστής απορρόφησης, παρουσιάζεται στο Σχ.5.27. Μετά την αρχική άνοδο, παραμένει σταθερός για συχνότητες πάνω από 150kHz.

Αποτελέσματα συντελεστή εξασθένησης χρησιμοποιώντας τη θεωρία σκέδασης, όπως αναφέρθηκε και στον υπολογισμό της φασικής ταχύτητας, παρατίθενται επίσης στο Σχ.5.27.



Σχ.5.27. Σύγκριση πειραματικού και θεωρητικού συντελεστή εξασθένησης για σκυρόδεμα.

Παρότι σύγκριση τιμών μεταξύ των καμπυλών είναι παρακινδυνευμένη, η ποιοτική ομοιότητα είναι ικανοποιητική, υποδεικνύοντας ότι η εκτροπή της διεύθυνσης διάδοσης

ενέργειας του κύματος στα αδρανή μπορεί να είναι βασική αιτία που συντελεί στην μετρούμενη εξασθένιση, η οποία με την προσθήκη της απορρόφησης συντελούν στη συνολική εξασθένιση του σκυροδέματος. Πράγματι, γενικά και οι δύο μηχανισμοί (σκέδαση στη μικροδομή και απορρόφηση κυρίως στην τσιμεντόπαστα) θεωρείται ότι συνεισφέρουν στην παρατηρούμενη εξασθένιση [38,43]. Λύνοντας το πρόβλημα σκέδασης σε ιξωδοελαστική μήτρα, αντίστοιχα με παραπάνω, τα αποτελέσματα του συντελεστή εξασθένισης δεν μεταβάλλονται αρκετά και συγκεκριμένα δεν προβλέπουν καθαρή αύξηση της συνολικής εξασθένισης.

Από τις παραπάνω διερευνήσεις συνάγεται ότι θεωρώντας το σκυρόδεμα και το κονίαμα ως στερεά με χαρακτηριστικά μικροδομής, θεωρητικές προβλέψεις βάσει της διπολικής βαθμωτής θεωρίας ελαστικότητας του Mindlin, είναι πολύ κοντά στις πειραματικές μετρήσεις φασικής ταχύτητας. Οι συσχετίσεις μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών ταχυτήτων έδειξε ότι η αδρανειακή παράμετρος, h , λαμβάνει τιμή μικρότερη της ογκομετρικής, g , ενώ και οι δύο εξαρτώνται από το μέγεθος των κόκκων. Αυτό φαίνεται αφού οι παράμετροι αυτές έχουν παρόμοια τιμή για την προσέγγιση της συμπεριφοράς κονιάματος, ανεξαρτήτως σύστασης, ενώ διαφορετικές αλλά παρόμοιες μεταξύ τους και πάλι τιμές απαιτούνται για τη μοντελοποίηση του σκυροδέματος.

Βιβλιογραφία

- [1] J. O. Owino, L. J. Jacobs, Attenuation measurements in cement-based materials using laser ultrasonics, *J. Eng. Mech.-ASCE*. 125 (6) (1999) 637-647
- [2] Y. H. Kim, S. Lee, H. C. Kim, Attenuation and dispersion of elastic waves in multi-phase materials, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 24 (1991) 1722-1728
- [3] E. N. Landis, S. P. Shah, Frequency-dependent stress wave attenuation in cement-based materials, *J. Eng. Mech.-ASCE* 121 (6) (1995) 737-743
- [4] P. A. Gaydecki, F. M. Burdekin, W. Damaj, D. G. John, P. A. Payne, The propagation and attenuation of medium-frequency ultrasonic waves in concrete: a signal analytical approach, *Meas. Sci. Technol.* 3 (1992) 126-134
- [5] L. J. Jacobs, J. O. Owino, Effect of aggregate size on attenuation of Rayleigh surface waves in cement-based materials, *J. Eng. Mech.-ASCE*. 126 (11) (2000) 1124-1130
- [6] N. Otsuki, M. Iwanami, S. Miyazato, N. Hara, Influence of aggregates on ultrasonic elastic wave propagation in concrete, in: T. Uomoto (Ed.), *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Elsevier, Amsterdam, 2000, pp. 313-322
- [7] R.D. Mindlin, *Micro-Structure in Linear Elasticity*. *Arch. Ration. Mech. An.*, 16, (1964) 51-78
- [8] D. G Aggelis, S. V. Tsinopoulos, J. T. Verbis, T. P. Philippidis, D. Polyzos, On the wave propagation in concrete, in: D. Fotiadis, C. Massalas (eds), *Scattering and Biomedical Engineering Modeling and Applications*, World Scientific, Singapore, 2002, 175-184
- [9] M. Goueygou, B. Piwakowski, S. Ould Naffa, F. Buyle-Bodin, Assessment of broadband ultrasonic attenuation measurements in inhomogeneous media, *Ultrasonics* 40 (2002) 77-82
- [10] L. Vergara, R. Miralles, J. Gosalbez, F. J. Juanes, L. G. Ullate, J. J. Anaya, M. G. Hernandez, M. A. G. Izquierdo, NDE ultrasonic methods to characterise the porosity of mortar, *NDT&E INT* 34 (2001) 557-562
- [11] M. F. Kaplan, The effects of age and water/cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength, *Mag Con Res* 11 (32) (1959) 85-92
- [12] S. Popovics, J. L. Rose, J. S. Popovics, The behavior of ultrasonic pulses in concrete, *Cement Concrete Res* (20) (1990) 259-270

- [13] J. Rhazi, M. Hassaim, G. Ballivy, O. Hunaidi, Effects of concrete non-homogeneity on Rayleigh waves dispersion, Magazine of Concrete Research 54 (3) (2002) 193-201
- [14] V. K. Kinra, M. S. Petraitis, S. K. Datta, Ultrasonic wave propagation in a random particulate composite, Int. J. Solids Structures (16) (1980) 301-312
- [15] W. Sachse, Y.-H. Pao, On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids, J. Appl. Phys. 49 (8) (1978) 4320-4327
- [16] Reynolds, W. N., Wilkinson, S. J., Spooner, D. C., Ultrasonic wave velocity in concrete. Magazine of Concrete Research 30 (104), (1978) 139-144.
- [17] Hernandez, M. G., Izquierdo, M. A. G., Ibanez, A., Anaya, J. J., Ullate, L. G., Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE, Ultrasonics 38, (2000) 531-533.
- [18] Wu, T. T., Liu P. L., Advancement on the nondestructive evaluation of concrete using transient elastic waves, Ultrasonics 36 (1998) 197-204.
- [19] Popovics J. S., Song, W., Achenbach, J. D., Lee, J. H., Andre, R. F., One-sided stress wave velocity measurement in concrete, Journal of Engineering Mechanics-ASCE 124 (12), (1998) 1346-1353.
- [20] Malhotra, V. M., Carino, N. J.,(Eds.), CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. (1991) CRC Press, Florida.
- [21] Neville, A.M., Properties of Concrete. 1995. Longman, London.
- [22] Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M., Concrete, Structure, Properties and Materials, 2001 Prentice Hall, New Jersey.
- [23] Hernandez-Olivares, F., Barluenga, G., Bollati, M., Witoszek, B., Static and dynamic behavior of recycled tyre rubber-filled concrete. Cement and Concrete Research 32 (2002) 1587-1596
- [24] Hochuli, A. S., Sayir, M. B., Poulidakos, L. D., Partl M. N., Measuring the complex modulus of asphalt mixtures by structural wave propagation, 26th Annual Meeting of the AAPT (Association of Asphalt Paving Technologists), (2001) Clearwater Beach Florida, USA
- [25] Hildebrand, G., Verification of flexible pavement response from a field test. Report 121, (2002) Road Directorate, Danish Road Institute.
- [26] Panneerselvam, D., Panoskaltsis, V. P., A nonlinear viscoelastic model for concrete's creep and creep failure, 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, June 2-5,

(2002) Columbia University.

- [27] Schiessel, H., Metzler, R., Blumen, A., Nonnenmacher, T. F., 1995. Generalized viscoelastic models: their fractional equations with solutions. *J. Phys. A: Math. Gen.* 28 6567-6584.
- [28] K. F. Graff, *Wave motion in elastic solids*, Dover publications (1991) New York
- [29] Dassios G., Lindell IV, On the Helmholtz decomposition for polyadics, *Quarterly of Applied Mathematics* LIX 4 787-796, 2001
- [30] D. J. Lloyd, Particle-reinforced aluminium and magnesium matrix composites, *Int. Mater. Rev.* 39, 1-23, (1994)
- [31] Tiersten, H.F., Bleustein, J.L., Generalized elastic continua. In: R.D. Mindlin and *Applied Mechanics*, (Hermann, G., ed.). Pergamon Press, New York, (1974) 67-103
- [32] Eringen, A.C., *Vistas of Nonlocal Continuum Physics*. *International Journal of Engineering Science* 30 (10) (1992) 1551-1565.
- [33] Exadaktylos, G.E., Vardoulakis, I., Microstructure in linear elasticity and scale effects: a reconsideration of basic rock mechanics and rock fracture mechanics. *Tectonophysics* 335 (1-2), (2001) 81-109.
- [34] Tsepoura, K.G, Papargyri-Beskou, S., Polyzos, D., A boundary element method for solving 3D static gradient elastic problems with surface energy. *Computational Mechanics* 29 (4-5) (2002) 361-381.
- [35] Vardoulakis, I., Sulem, J., *Bifurcation Analysis in Geomechanics*. Blackie/Chapman and Hall, (1995) London
- [36] Tsinopoulos, S. V., Verbis, J. T., Polyzos, D., An iterative medium approximation for wave dispersion and attenuation predictions in particulate composites. *Advanced Composite Letters* 9 (3), (2000) 193-200.
- [37] Verbis, J.T., Kattis, S.E., Tsinopoulos, S.V., Polyzos, D., Wave dispersion and attenuation in fiber composites. *Computational Mechanics* 27 (3) (2001) 244-252.
- [38] Anugonda, P., Wiehn, J. S., Turner J. A., Diffusion of ultrasound in concrete, *Ultrasonics* 39 (2001) 429-435.
- [39] Garnier, V., Chaix, J. F., Corneloup G., Applying waves' propagation modeling to the study of concrete damage, *International Symposium (NDT-CE 2003) Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 16-19 September (2003) Berlin

- [40] Ying, C.F., Truell, R., Scattering of a plane longitudinal wave by a spherical obstacle in an isotropically elastic solid, *Journal of Applied Physics* 27 (9) (1956) 1086-1097.
- [41] Christensen, R.M., 1990. A critical evaluation for a class of micromechanics models, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 38 (3), 379-404.
- [42] Perepechko, I., *Acoustic methods of investigating polymers*, Mir Publishers, (1975) Moscow.
- [43] Becker J., Jacobs, L. J., Qu, J., Characterization of cement-based material using diffuse ultrasound. *Journal of Engineering Mechanics*, 129 (12) (2003) 1478-1484

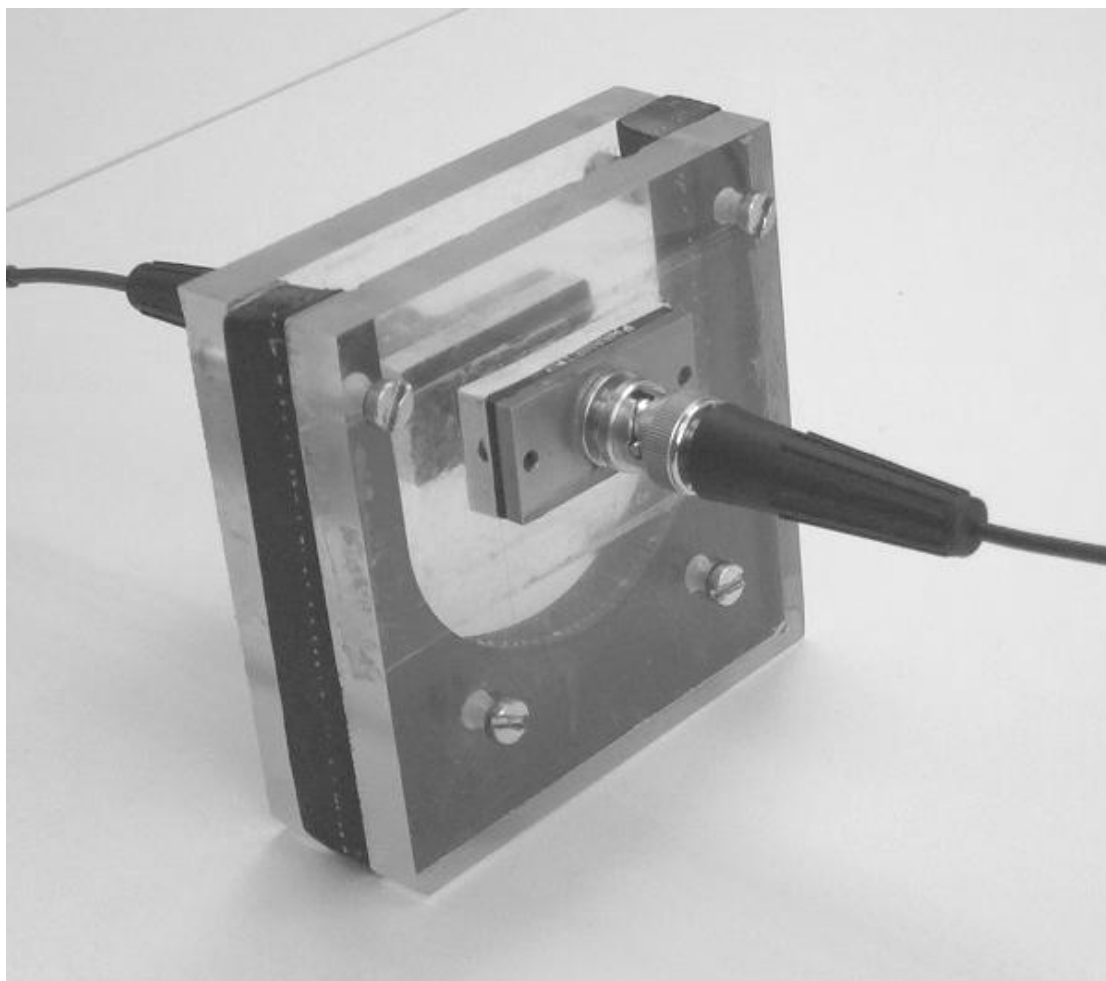
6. Έλεγχος νωπού κονιάματος με μεταβλητή συχνότητα

6.1 Πειραματική διάταξη και μετρήσεις

Η πειραματική διάταξη για τον έλεγχο του νωπού κονιάματος παρουσιάζει ομοιότητες με αυτή που προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5 σχετικά με τον έλεγχο του σκληρυμένου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες Panametrics V413 με κεντρική συχνότητα 500kHz. Επίσης ο ρυθμός δειγματοληψίας ορίστηκε στα 10MHz για να καταγράφει αξιόπιστα και τις υψηλότερες συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν (1MHz). Οι παραλληλόγραμμοι σχήματος αισθητήρες προσαρμίζονται στις οπές που δημιουργήθηκαν σε δύο πλάκες plexi-glass, ενώ μία λαστιχένια πλάκα σχήματος U τοποθετείται ενδιάμεσα, ορίζοντας τον όγκο που θα καταλάβει το δοκίμιο, Σχ.6.1. Το πάχος του ελαστικού είναι 10.6mm και η συσκευή ασφαρίζεται με τη χρήση κοχλιών. Το πάχος αυτό επελέγη διότι χαμηλότερες τιμές δημιουργούν πρόβλημα εργασιμότητας του κονιάματος, ειδικά για τις περιπτώσεις υψηλής συγκέντρωσης σε άμμο, ενώ υψηλότερες αποστάσεις έως 25mm που δοκιμάστηκαν, κατέδειξαν ότι συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων δεν είναι ανιχνεύσιμες και συγκεκριμένα κάτω από 150kHz και πάνω από 500kHz.

Της επιλογής και του σχεδιασμού της διάταξης αυτής, προηγήθηκαν πολυάριθμες δοκιμές σε άλλου είδους διατάξεις. Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη που περιγράφηκε στο Κεφ.3 για τον έλεγχο νωπού κονιάματος. Προσαρμόστηκαν κατάλληλα εκτός του ζεύγους αισθητήρων R6 και διάταξη με R6 ως πομπό και τον ευρέως φάσματος αισθητήρα PAC S9208 ως δέκτη. Λόγω του μεγέθους του, η απόσταση διάδοσης του κύματος ήταν πολύ μικρότερη. Παρά όμως την μειωμένη απόσταση και την ομοιομορφία απόκρισής του σε μεγάλο φάσμα συχνοτήτων, η ευαισθησία του δεν επέτρεπε καταγραφή αξιόπιστου σήματος μέσα από νωπό κονίαμα. Ακολούθησαν διερευνητικές μετρήσεις με διάφορους αισθητήρες, είτε συντονισμού (PAC R15) είτε ευρέως φάσματος (Panametrics V133) και η τελική επιλογή αισθητήρα και σε αυτήν την περίπτωση είναι ο V413, ο οποίος σε πάχη δοκιμίων κάτω από 20mm έδειξε ευαισθησία κατάλληλη που επιτρέπει την αξιόπιστη μελέτη των σημάτων. Για την αποφυγή πιθανών ανακλάσεων επελέγη πλάκα ελαστικού για το περιβάλλοντα χώρο του δοκιμίου, ενώ οι διαστάσεις του δοκιμίου έπρεπε να είναι τέτοιες ώστε να μην παρουσιάζεται πρόβλημα αντιπροσωπευτικότητας. Πράγματι, σε πρώιμη διερευνητική φάση, όπου οι

διαστάσεις του δοκιμίου ορίζονταν από το μέγεθος του αισθητήρα (απέναντι έδρες ήταν οι επιφάνειες του αισθητήρα), ο συνολικός όγκος δοκιμίου ήταν περίπου 7500mm^3 για πάχος 10mm . Θεωρώντας μέσο μέγεθος άμμου 3mm , ο όγκος του σφαιρικού κόκκου υπολογίζεται περίπου σε 15mm^3 . Για μία περιεκτικότητα 30% κ.ο. το δοκίμιο περιέχει περίπου 160κόκκους. Σε περίπτωση που υπάρχει απόκλιση ενός μικρού αριθμού κόκκων, έστω 5-10 περισσότεροι στο δοκίμιο, αυτό οδηγεί σε σημαντική απόκλιση από τη σχεδιαζόμενη τιμή (31.5%), που οπωσδήποτε αυξάνει την πειραματική διασπορά. Με τη διάταξη του Σχ.6.1, ο όγκος του δοκιμίου είναι περίπου 47100mm^3 , και αντίστοιχη απόκλιση σε κόκκους προκαλεί μόνο 0.15% μεταβολή από τη σχεδιαζόμενη τιμή. Επιπλέον και με χρήση των τιμών των ποσοτήτων των υλικών των πρώτων πειραμάτων, η συνολική ποσότητα υλικού που ζυγίζοταν, υπολογιζόταν ώστε να καλύπτει ακριβώς τον όγκο του δοκιμίου, χωρίς να παραμένει περίσσεια αφού τότε και πάλι θα προέκυπτε θέμα αντιπροσωπευτικότητας.



Σχ.6.1. Διάταξη ελέγχου νωπού κονιάματος.

Οι κυματομορφές που επελέγησαν ως είσοδοι είναι, όπως αναφέρθηκε στο Κεφ.4, της μορφής του Σχ.4.1.(α). Το ημιτονοειδές κύμα σε ημιτονοειδή περιβάλλουσα, εισάγει μια σχετικά στενή διαταραχή με σχετικά μικρό εύρος συχνοτήτων, όπως έχει αναπτυχθεί. Χρησιμοποιήθηκαν όμοια σήματα διαφορετικής κεντρικής συχνότητας, από 20kHz έως 1MHz. Λόγω υψηλής εξασθένισης του υλικού, σε πολλές περιπτώσεις, αξιόπιστο σήμα λαμβάνεται μέχρι τα 800kHz. Εκτός της παραπάνω μορφής, χρησιμοποιήθηκαν και κυματομορφές ευρέως φάσματος με τη μορφή σάρωσης, Σχ.4.1(γ).

Οι συστάσεις κονιάματος που ελέγχθηκαν φαίνονται στον Πίνακα6.1. Κονίαμα με διάφορες περιεκτικότητες σε άμμο από 0%, που είναι απλώς τσιμεντόπαστα, έως και 47.5% και διαφορετικούς λόγους w/c από 0.45 έως 0.55 που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην πράξη παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν.

Πίνακας 6.1. Συστάσεις κονιάματος που παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν

S% W/C	0	10	20	25	27.5	30	32.5	35	37.5	40	42.5	45	47.5
0.45	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦			
0.475						♦	♦	♦	♦	♦			
0.49					♦	♦	♦	♦	♦	♦			
0.50	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦			
0.51					♦	♦	♦	♦	♦	♦			
0.525	♦		♦		♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	
0.54		♦		♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦			
0.55	♦+	♦	♦	♦	♦	♦+	♦	♦	♦*	♦**	♦	♦	♦

Σύσταση που επαναλήφθηκε με (*) τρία διαφορετικά μεγέθη κόκκων, (***) δύο διαφορετικά μεγέθη κόκκων και (+) διαφορετικό αισθητήρα.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή των δοκιμών κονιάματος (τσιμέντο τύπου Π 32.5, ασβεστολιθική άμμος και νερό) ζυγίζονται με ακρίβεια 0.1mg ανακατεύονται και αναδεύονται για 5min. Κατόπιν, το υλικό τοποθετείται στη διάταξη, στο χώρο μεταξύ των αισθητήρων και δονείται με χρήση μικρής ράβδου, ενέργεια που οδηγεί στην απελευθέρωση ορατών φυσαλίδων στην επιφάνεια. Οι μετρήσεις ξεκινούν περίπου 7min από τη στιγμή της ανάμειξης.

Η κυματική διάδοση σε τέτοια μέσα, είναι τόσο περίπλοκη όσο και το έργο του διαχωρισμού της συνεισφοράς των διαφορετικών μηχανισμών στη συνολική εξασθένιση. Στη συγκεκριμένη εργασία, η ολική εξασθένιση υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το φάσμα των παλμών σάρωσης. Τα φάσματα αυτά διαιρέθηκαν σημείο προς σημείο με ένα φάσμα αναφοράς, το οποίο προήλθε από δοκίμιο νερού, όπως έχει αναφερθεί:

$$\alpha(f) = -\frac{20}{x} \cdot \log\left(\frac{A(f)}{A_w(f)}\right) \quad (6.1)$$

όπου $\alpha(f)$ είναι η εξασθένιση συναρτήσει της συχνότητας, f , x είναι η απόσταση ανάμεσα στους αισθητήρες (10.6mm), $A(f)$ και $A_w(f)$ είναι οι μετασχηματισμοί Fourier των σημάτων του κονιάματος και του νερού αντίστοιχα.

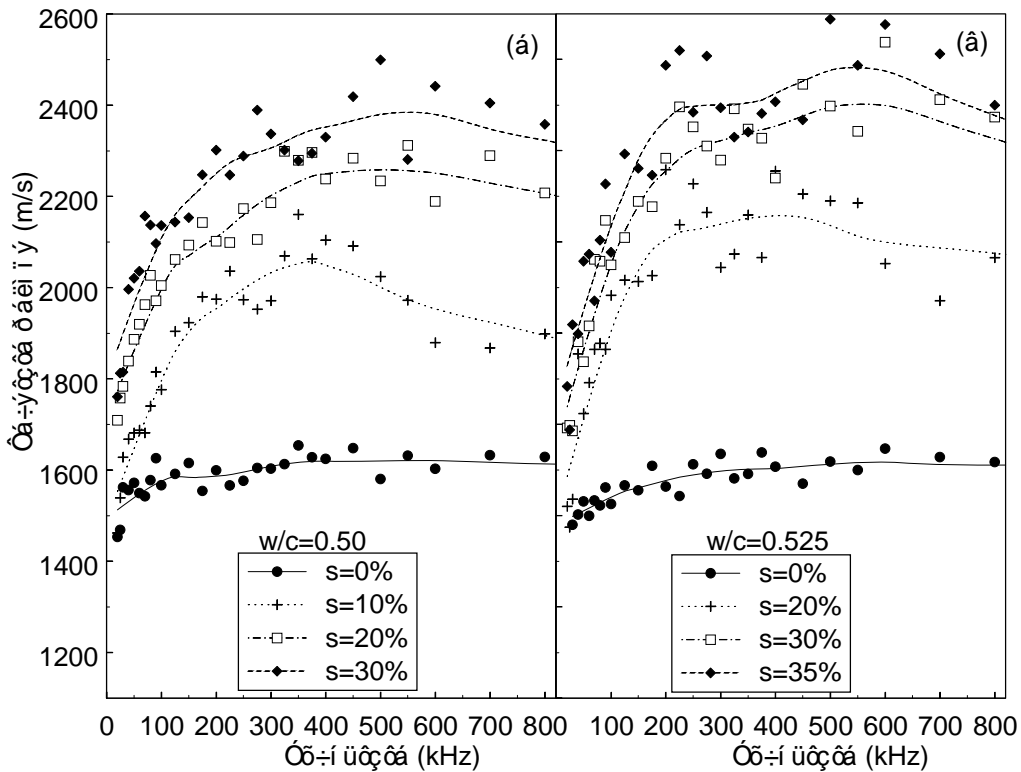
Το νωπό κονίαμα, όντας αιώρημα διαφόρων σωματιδίων σε νερό αναμένεται να παρουσιάζει ταχύτητα εξαρτημένη από τη συχνότητα. Αυτό όμως δεν είναι η μοναδική ένδειξη διασποράς που παρατηρήθηκε στη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται αποτελέσματα σε σχέση με τη διασπορά του παλμού. Τα πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με εξασθένιση και φασική ταχύτητα παρουσιάζονται αργότερα μαζί με την ερμηνεία και τις θεωρητικές προβλέψεις.

6.2 Ταχύτητα παλμού

Η ταχύτητα παλμού που, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, ορίζεται από την χρονική στιγμή της πρώτης ανιχνεύσιμης διαταραχής, είναι αυτή που ως επί το πλείστον μετράται στο σκυρόδεμα. Η μέτρηση της έγινε με τρόπο εντελώς αντίστοιχο αυτού για την μέτρηση σε σκληρυμένο σκυρόδεμα.

6.2.1 Επίδραση άμμου στην ταχύτητα παλμού

Στο Σχ.6.2 παρουσιάζεται η καμπύλη ταχύτητας – συχνότητας για υλικό με διαφορετική περιεκτικότητα σε άμμο, s . Και στις δύο περιπτώσεις η τσιμεντόπαστα ακολουθεί μια ομαλή



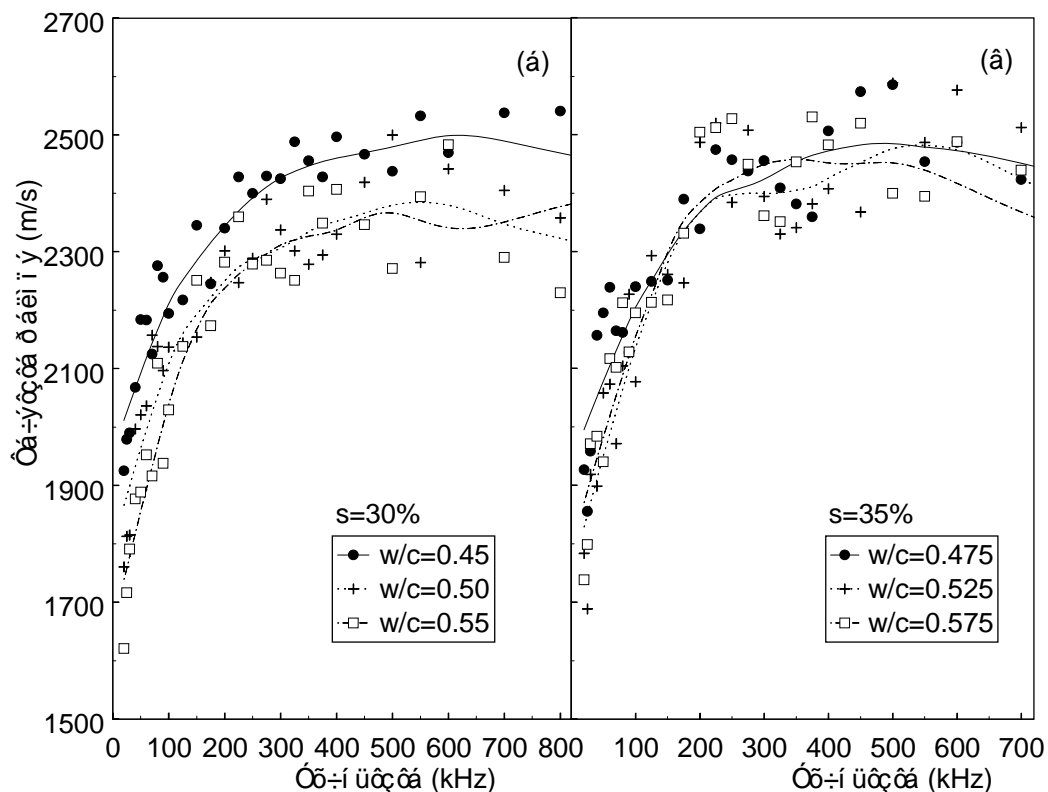
Σχ.6.2. Επίδραση περιεκτικότητας άμμου, s , στη διασπορά ταχύτητας παλμού κονιάματος με w/c (α) 0.50 και (β) 0.525

καμπύλη ξεκινώντας περίπου από τα 1500m/s, ανεβαίνοντας προς τα 1600m/s γύρω στα 100kHz και παραμένοντας στο επίπεδο αυτό μέχρι τις υψηλότερες συχνότητες που εξετάστηκαν. Η προσθήκη άμμου, έως 30% ή 35% κ.ο. αυξάνει τις τιμές της ταχύτητας σε όλες τις ζώνες συχνοτήτων, καθώς τα πλούσια σε άμμο μείγματα παρουσιάζουν και τις υψηλότερες ταχύτητες και στις δύο περιπτώσεις. Επίσης φαίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού άμμου μετατοπίζει το μέγιστο της ταχύτητας σε υψηλότερες συχνότητες. Ωστόσο, η ταχύτητα παλμού των δοκιμίων κονιάματος έχει την τάση να μειώνεται για τις υψηλότερες συχνότητες. Επομένως, φαίνεται ότι τα αδρανή επιδρούν άμεσα στην ταχύτητα παλμού επηρεάζοντας και το ύψος της καμπύλης αλλά και το ρυθμό ανόδου της σε χαμηλές συχνότητες. Ταχύτητες υψηλότερες του νερού, ήταν αναμενόμενες αφού η προσθήκη τσιμέντου και άμμου στο νερό μειώνουν την συνολική συμπιεστότητα οδηγώντας σε υψηλότερες ταχύτητες.

Σημειώνεται ότι εκτός από τα σύμβολα που είναι οι υπολογισμένες τιμές μέσω του αλγορίθμου υπέρβασης κατωφλίου που δημιουργήθηκε, παρουσιάζονται και οι καμπύλες μέγιστης προσέγγισης (best fit) στο Σχ.6.2 καθώς η πειραματική διασπορά είναι σε πολλές περιπτώσεις μεγάλη.

6.2.2 *Επίδραση w/c*

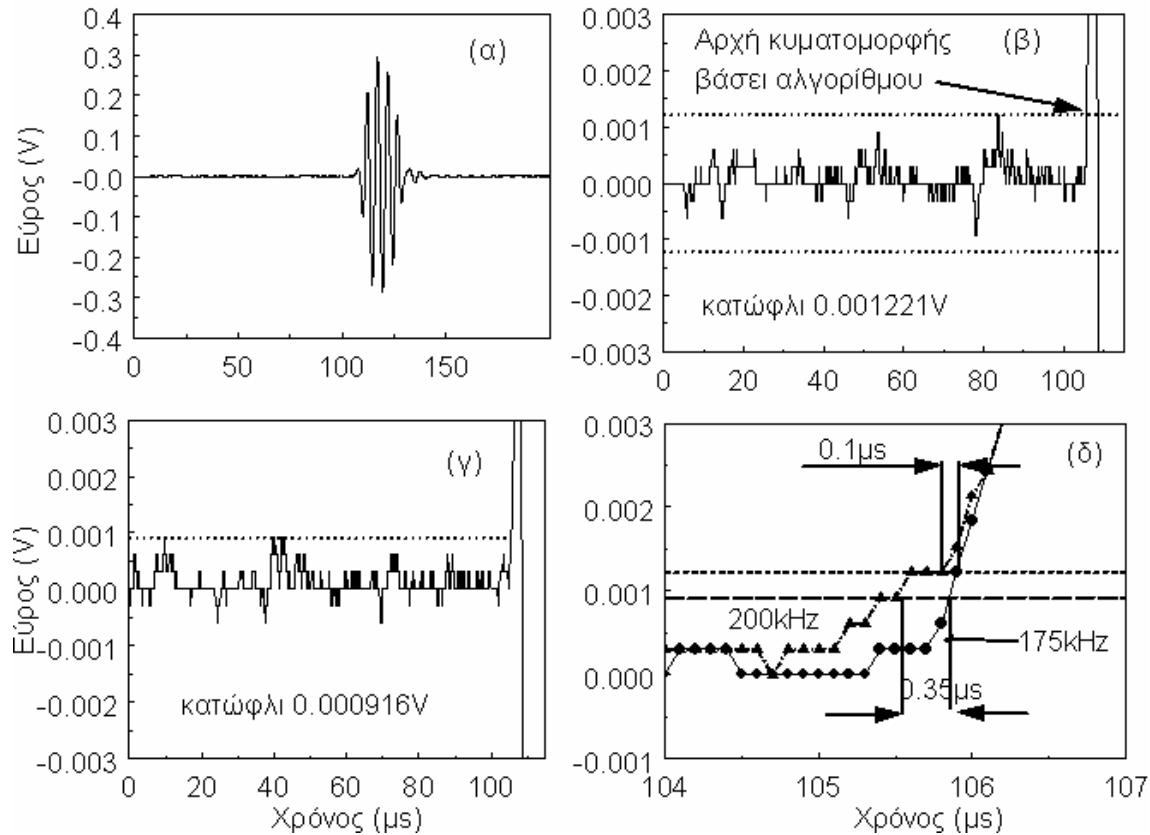
Η αντίδραση ενυδάτωσης μεταξύ νερού και κόκκων τσιμέντου ουσιαστικά αρχίζει μετά από μία περίοδο κάποιων ωρών. Αυτό έχει δειχθεί σε διάφορες εργασίες [1-6] όπου παράμετροι του κύματος που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ενυδάτωσης υφίστανται μεταβολή μετά από περίοδο κάποιων ωρών από την ανάμειξη ενώ σίγουρα δεν παρατηρείται μεταβολή για τα πρώτα λεπτά. Συνεπώς, για τα πρώτα αυτά λεπτά, ο λόγος w/c επηρεάζει μόνο την πυκνότητα του μέσου καθώς χαμηλός w/c σημαίνει υψηλή πυκνότητα και το αντίστροφο. Μεταβολές σε αυτή την παράμετρο, φαίνεται να έχουν λίγη έως καμία επίδραση στην καμπύλη διασποράς όπως φαίνεται στο Σχ.6.3. Για την περίπτωση (α) η περιεκτικότητα σε άμμο είναι 30% για όλα τα δοκίμια και για την (β) είναι 35%, ενώ μεταβάλλεται μόνο ο λόγος w/c. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να υποστηριχθεί ότι δοκίμια με χαμηλό w/c εμφανίζουν υψηλότερη ταχύτητα, βλ. Σχ.6.3(α) χωρίς ωστόσο αυτή να είναι μια σαφής και επαναλήψιμη τάση, βλ. Σχ.6.3(β).



Σχ.6.3. Επίδραση w/c στη διασπορά ταχύτητας παλμού για υλικό με s (α) 30% και (β) 35%

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να τονιστεί η σημασία, σε τέτοιου είδους μετρήσεις, το επίπεδο του θορύβου να μην καλύπτει την πρώτη άφιξη της διαταραχής. Στο Σχ.6.4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του πώς ο ηλεκτρονικός θόρυβος και η επιλογή της τάσης κατώφλιου επηρεάζει τη μέτρηση ταχύτητας παλμού. Στο Σχ.6.4(α) φαίνεται κυματομορφή 175kHz κονιάματος με w/c=0.525 and s=35%. Στο Σχ.6.4(β) εστιάζονται τα πρώτα 115μs, ενώ φαίνεται και το κατώφλι που ορίστηκε ίσο με τη μέγιστη τιμή του θορύβου πριν αρχίσει η καταγραφή του σήματος (1.221V). Ωστόσο, λόγω τυχαιότητας, ο θόρυβος παρουσιάζει μικρές διαφοροποιήσεις από κυματομορφή σε κυματομορφή, όπως φαίνεται στο Σχ.6.4(γ) όπου της κυματομορφής των 200kHz στο ίδιο δοκίμιο προηγείται μέγιστος θόρυβος 0.916V. Αυτή η μικρή διαφορά στο μετρούμενο θόρυβο επηρεάζει μέχρι ενός σημείου την μέτρηση ταχύτητας παλμού, όπως φαίνεται στο Σχ.6.4(δ). Εκεί περιέχονται τα 4 μs, όπου το σήμα αναμφίβολα ξεκινά και στις δύο περιπτώσεις. Εφαρμόζοντας το χαμηλό κατώφλι, οδηγούμαστε σε διαφορές άφιξης μεταξύ των σημάτων 0.35μs (με γραμμική παρεμβολή στην περίπτωση του σήματος 175kHz), ενώ με το υψηλότερο η διαφορά είναι 0.1μs. Οι

αντίστοιχες διαφορές στην ταχύτητα παλμού είναι 169m/s και 26m/s αντίστοιχα. Αυτό το παράδειγμα δείχνει τη βασική αιτία της πειραματικής διασποράς που φάνηκε στις προηγούμενες καμπύλες.



Σχ.6.4. (α) Κυματομορφή 175kHz σε κονίαμα, (β) τα πρώτα 115 μ s της κυματομορφής αυτής, (γ) τα πρώτα 115 μ s κυματομορφής 200kHz και (δ) η επίδραση του κατωφλίου στον προσδιορισμό της αρχής της κυματομορφής.

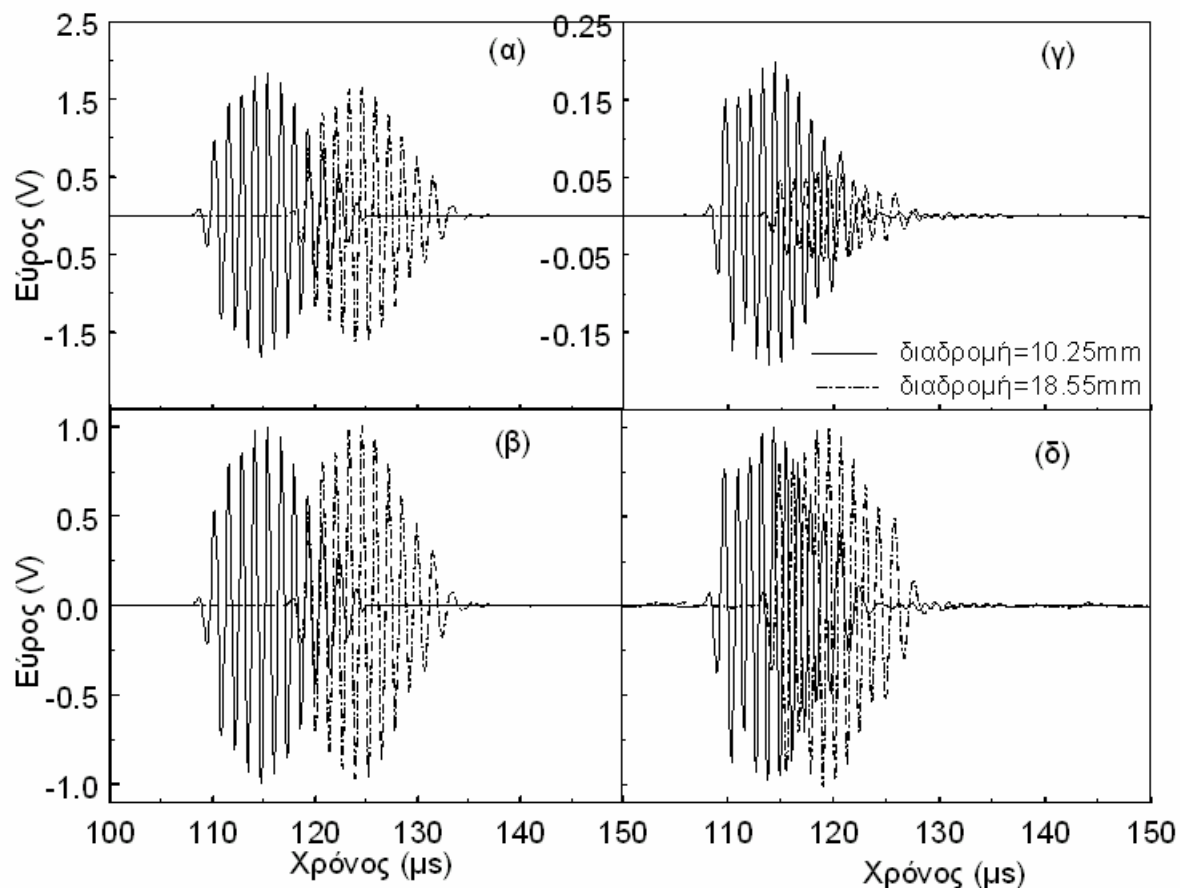
Παρότι απότομες μεταβολές της ταχύτητας παλμού δεν είναι αναμενόμενες, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, είναι σίγουρο ότι η κυματομορφή των 200kHz προηγείται χρονικά της αντίστοιχης των 175kHz, γεγονός που ανιχνεύεται από τον αλγόριθμο υπέρβασης κατωφλίου. Πράγματι, η εφαρμογή ενός απλού αλγορίθμου μεταβλητού κατωφλίου με βάση το θόρυβο, ο οποίος σχεδιάστηκε σε περιβάλλον Visual Basic ήταν η πιο συμφέρουσα λύση για την αντιμετώπιση του αριθμού των κυματομορφών (για κάθε δοκίμιο 30 κυματομορφές που αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες από 20kHz έως 1MHz) με την επίβλεψη και παρατήρηση των κυματομορφών να είναι αναγκαία μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις χαμηλού λόγου σήματος/θορύβου. Πρέπει να σημειωθεί ότι το επίπεδο θορύβου

της συγκεκριμένης διάταξης είναι ελάχιστο, καθιστώντας δυνατή την ανάλυση χωρίς εφαρμογή φίλτρων ή άλλων τεχνικών για την ενίσχυση του λόγου σήματος/θορύβου, όπως παρατηρείται σε άλλες περιπτώσεις.

6.3 Αλλαγή σχήματος κυματομορφής

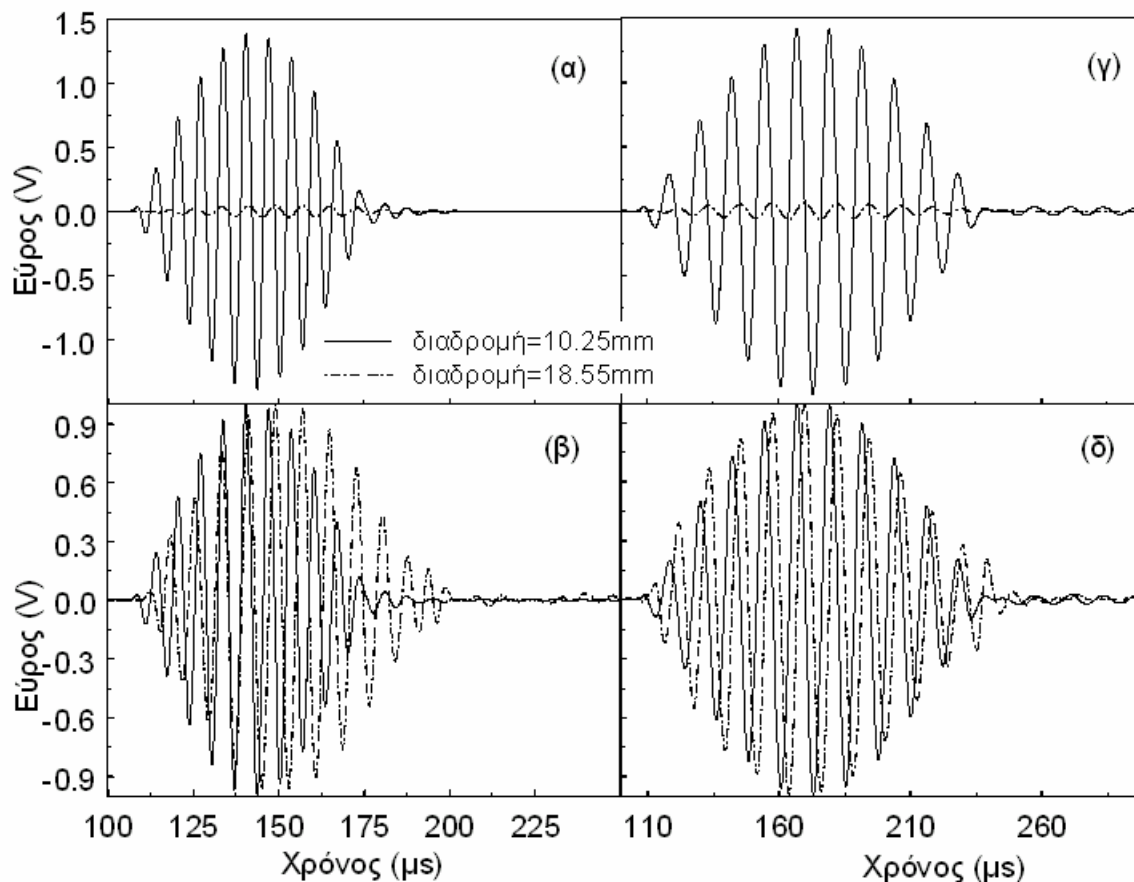
Η διασπορά σε ανομοιογενή μέσα εκφράζεται μέσω της εξάρτησης της φασικής ταχύτητας από τη συχνότητα. Εφόσον ένα κυματοπακέτο σαν αυτά που εφαρμόστηκαν στην πειραματική διαδικασία, περιέχει μία ζώνη συχνοτήτων καθεμιά από τις οποίες πιθανώς έχει διαφορετική ταχύτητα διάδοσης, είναι αναμενόμενο να δημιουργηθούν και αλλαγές σχήματος στον αρχικό παλμό. Η προσεκτική ανάλυση φανέρωσε τέτοια χαρακτηριστικά σχετιζόμενα κυρίως με την ανομοιογένεια, χωρίς ωστόσο να είναι τόσο ισχυρά ώστε να χαρακτηρίζουν με σαφήνεια το υλικό ως προς τη σύσταση. Τα χαρακτηριστικά αυτά παρουσιάζονται παρακάτω.

Γενικά, ένα κυματοπακέτο, μετρημένο σε δύο σημεία ενός ομογενούς μέσου, αναμένεται να υποστεί μια μείωση σε εύρος, λόγω εξασθένισης αλλά όχι αλλαγή σχήματος. Αυτό συμβαίνει στο νερό, για το οποίο ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχ.6.5(α), όπου παρουσιάζονται οι κυματομορφές που καταγράφηκαν σε αποστάσεις 10.25 και 18.55mm από τον πομπό (δηλαδή σε δύο δοκίμια με αυτά τα πάχη) για ένα σήμα κεντρικής συχνότητας 80kHz. Οι κυματομορφές των 18.55mm, όπως είναι φυσιολογικό υπολείπονται χρονικά παρουσιάζοντας επίσης μια ανεπαίσθητη μείωση σε εύρος. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο Σχ.6.5(β) όπου οι ίδιες κυματομορφές είναι ανηγμένες στη μονάδα, δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές. Το ίδιο ισχύει και για δοκίμιο τσιμεντόπαστας, όπως φαίνεται στο Σχ.6.5(γ), όπου φαίνονται κυματομορφές 350kHz καταγεγραμμένες στις δύο παραπάνω αποστάσεις και στο (δ) όπου αυτές οι κυματομορφές παρουσιάζονται διαιρεμένες με το μέγιστό τους.



Σχ.6.5. Κυματομορφές 800kHz σε νερό (α) σε φυσικό μέγεθος, (β) αδιαστατοποιημένες και αντίστοιχα σε τσιμεντόπαστα (γ), (δ)

Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο με το κονίαμα. Στο Σχ.6.6 παρουσιάζονται δύο αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις. Το (α) περιέχει απόκριση ενός κονιάματος με $w/c=0.525$ και $s=30\%$ μετά από 10.25 και 18.55mm διάδοσης για σήμα 150kHz, ενώ για την περίπτωση του (γ), το w/c είναι 0.475 και η κεντρική συχνότητα είναι 80kHz. Η διαφορά σε εύρος κυματομορφής είναι εμφανής και αναμενόμενη αφού η φύση του υλικού είναι σαφώς ανομοιογενής. Ωστόσο τα Σχ.6.6(β) και (δ) όπου τα ίδια σήματα παρουσιάζονται ανηγμένα στη μονάδα, φανερώνει και μια διαφοροποίηση του παλμού. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι ένας αριθμός επιπλέον ενός ή δύο κύκλων προστίθεται στο τέλος του σήματος. Αυτό το ελαφρύ «άνοιγμα» του παλμού έχει παρατηρηθεί και ερμηνευθεί ως ένδειξη διασποράς σε υψηλής πυκνότητας αιωρήματα σφαιριδίων γυαλιού σε διάλυμα νερού-γλυκερόλης [7].

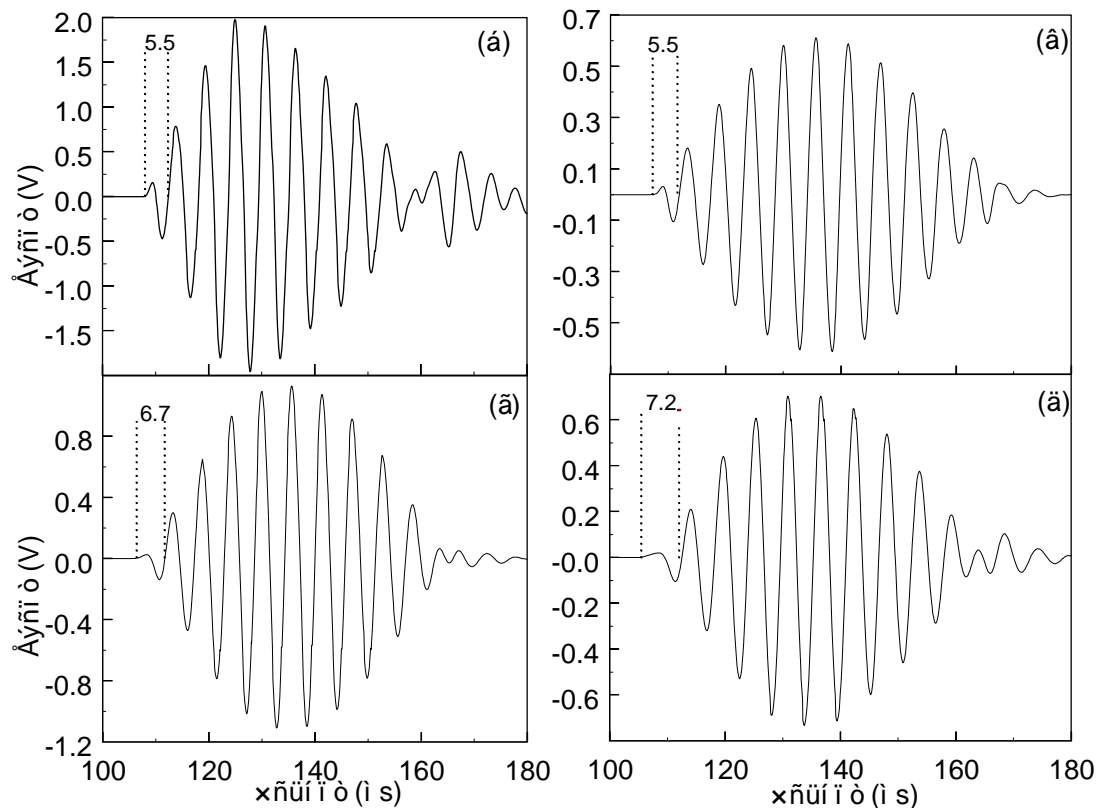


Σχ.6.6. Κυματομορφές 150kHz σε κονίαμα $w/c=0.525$ (α) σε φυσικό μέγεθος, (β) αδιαστατοποιημένες, αντίστοιχα για 80kHz σε κονίαμα $w/c=0.475$ (γ), (δ).

Εκτός αυτού, στα διαγράμματα με τις ανηγμένες κυματομορφές, παρατηρείται ότι η πρώτη κορυφή της μετρημένης σε μεγαλύτερη απόσταση κυματομορφής, είναι υψηλότερη από την πρώτη της προπορευόμενης, υποδηλώνοντας ότι ο πρώτος κύκλος δεν υφίσταται την ίδια μείωση με το μέγιστο εύρος. Συγκεκριμένα, η διάδοση μέσω των επιπλέον 8.3mm του κονιάματος με $w/c=0.525$ (περίπτωση του Σχ.6.6(α)) μειώνει το μέγιστο εύρος του σήματος κατά 29.5 φορές, ενώ η πρώτη κορυφή μειώνεται μόνο κατά 7 φορές. Για την περίπτωση $w/c=0.475$, Σχ.6.6(γ), το μέγιστο εύρος γίνεται 22 φορές μικρότερο, αλλά η πρώτη κορυφή είναι μόνο 6.2 φορές μικρότερη από αυτή των 10.25mm. Αυτή η μεταβολή του σχήματος φαίνεται να σχετίζεται με την ανομοιογένεια του υλικού καθώς σήματα νερού και τσιμεντόπαστας που εξετάστηκαν σε διαφορετικές αποστάσεις δεν παρουσιάζουν τέτοια τάση και όλες οι κορυφές υφίστανται την ίδια περίπου μείωση.

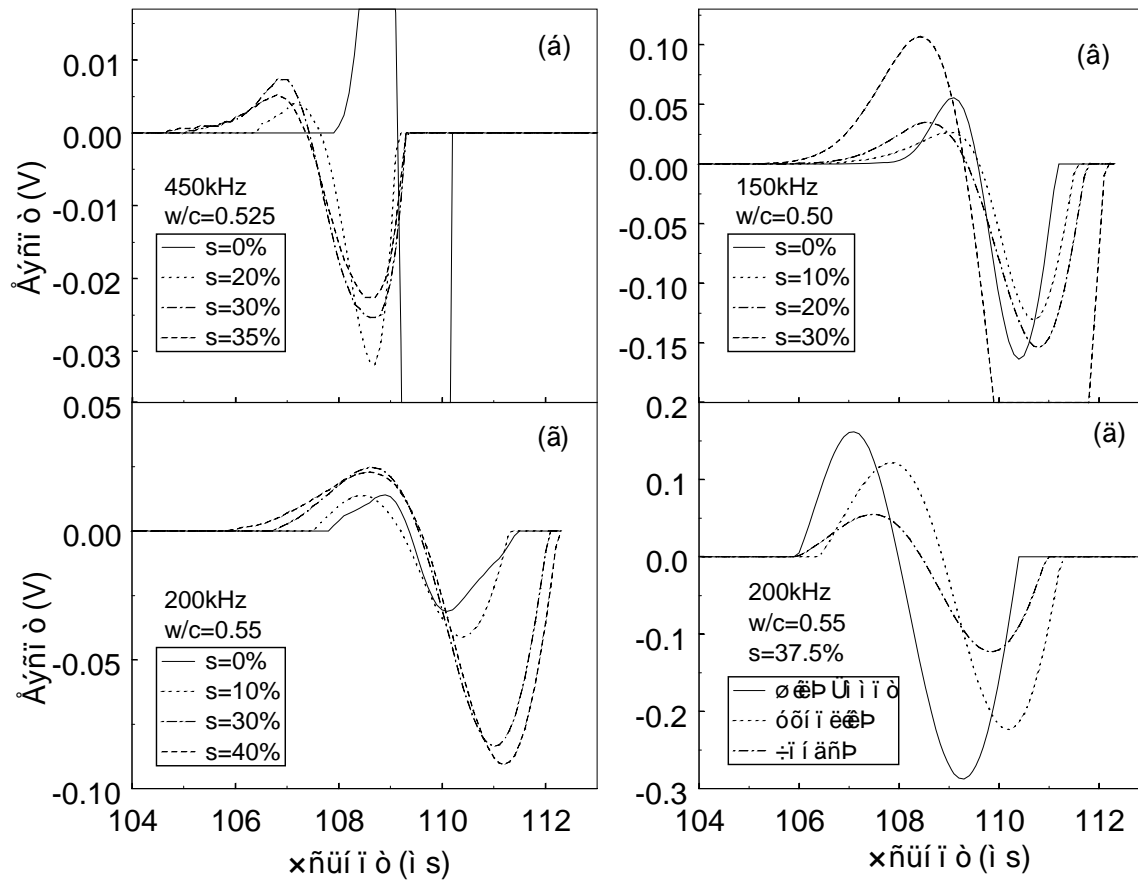
Ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό μεταβολής του παλμού προκύπτει από την παρατήρηση της διάρκειας του πρώτου κύκλου. Στους ηλεκτρικούς παλμούς που χρησιμοποιήθηκαν ως διεγέρσεις, όλοι οι κύκλοι από τον 1ο έως τον 10ο έχουν την ίδια διάρκεια. Αυτό ισχύει και για σήματα μετά από διάδοση μέσα σε νερό ή τσιμεντόπαστα όπως φαίνεται στο Σχ.6.7(α) και (β) αντίστοιχα για απόκριση σε παλμό 175kHz. Η διάρκεια όλων των κύκλων είναι όμοια και καθορίζεται από την κεντρική συχνότητα του παλμού, στην περίπτωση αυτή $T=175000^{-1} \approx 5.7\mu\text{s}$. Είναι ενδιαφέρουσα η παρατήρηση ότι η διάρκεια του πρώτου κύκλου αλλάζει σύμφωνα με την περιεκτικότητα σε άμμο του δοκιμίου. Αυτό φαίνεται στα Σχ.6.7(γ) και (δ) όπου παρουσιάζεται η απόκριση σε παλμό 175kHz σε κονίαμα με $s=30\%$ και $s=42.5\%$ αντίστοιχα. Ο w/c όλων των δοκιμίων είναι 0.55 (εκτός φυσικά της περίπτωσης Σχ.6.7(α)). Όπως φαίνεται η διάρκεια του πρώτου κύκλου αυξάνει σε $6.7\mu\text{s}$ για 30% άμμο και σε $7.2\mu\text{s}$ για 42.5% .

Αυτή η τάση φαίνεται καλύτερα στο Σχ.6.8, όπου ο πρώτος κύκλος απομονώνεται. Στην περίπτωση (α) ο κύκλος ανήκει σε κυματομορφές 450kHz κονιάματος $w/c=0.525$ με άμμο από 0% έως 35% . Η διάρκεια αυξάνεται από 2.2 σε $4.6\mu\text{s}$ σύμφωνα με το ποσοστό άμμου. Όμοια είναι η περίπτωση του Σχ.6.8(β). Εκεί, ο λόγος w/c είναι 0.50 και το s μεταβάλλεται από 0 σε 30% ενώ η κεντρική συχνότητα είναι 150kHz . Η διάρκεια του πρώτου κύκλου αλλάζει από $4.2\mu\text{s}$ για τσιμεντόπαστα σε $7.4\mu\text{s}$ για κονίαμα με $s=30\%$. Αντίστοιχα φαινόμενα παρατηρούνται στο Σχ.6.8(γ) για σήματα 200kHz . Η τελευταία περίπτωση (δ) αφορά στη διασπορά του πρώτου κύκλου σε συνάρτηση με το μέγεθος της άμμου. Φαίνεται ότι όσο αυξάνει το μέγεθος, το ίδιο συμβαίνει και με τη διάρκεια του πρώτου κύκλου υποδηλώνοντας ότι το επίπεδο της ανομοιογένειας πιθανόν μέσω σκέδασης είναι υπεύθυνο για τη συμπεριφορά αυτή. Η διάρκεια του πρώτου κύκλου για λεπτόκοκκο κονίαμα ($<1\text{mm}$) είναι $44\mu\text{s}$, αυξανόμενη στα $48\mu\text{s}$ για μέσο μέγεθος άμμου και στα $50\mu\text{s}$ για χοντρή άμμο (κόκκος $>1\text{mm}$).

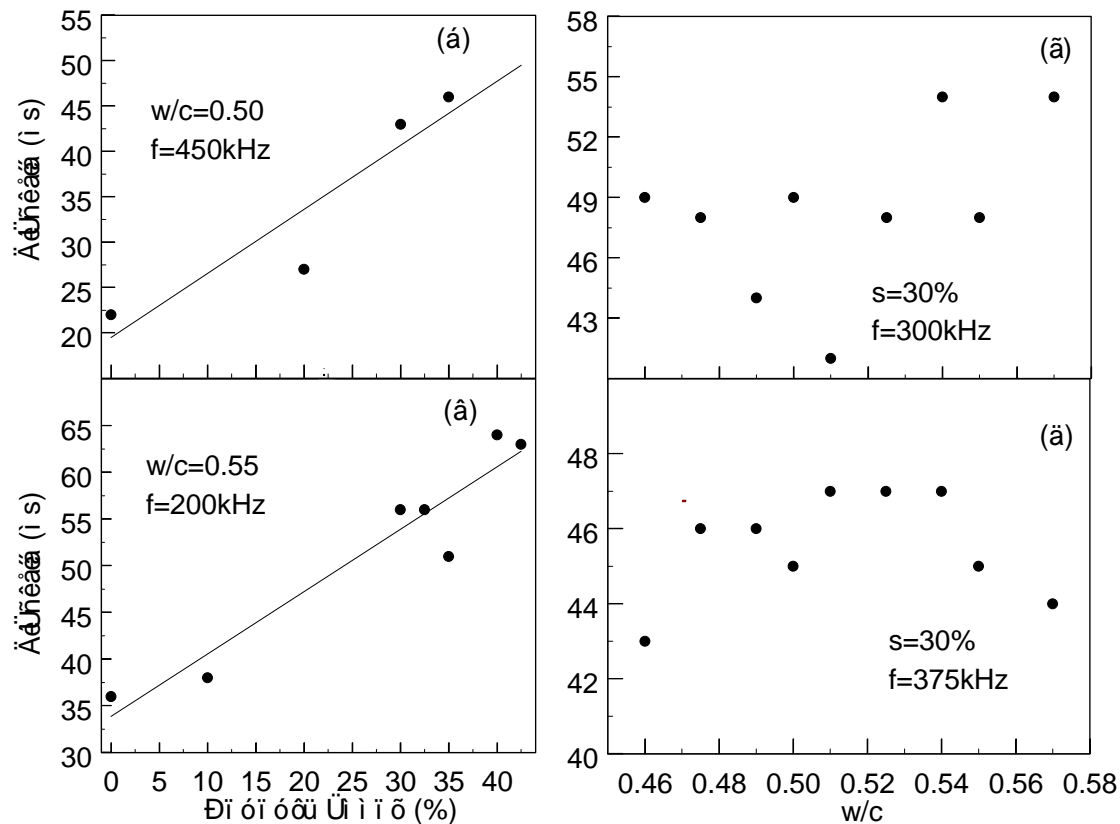


Σχ.6.7. Κυματομορφές 175kHz σε (α) νερό, (β) τσιμεντόπαστα και κονίαμα με s (γ) 30% και (δ) 42.5%

Άλλα χαρακτηριστικά του πρώτου κύκλου όπως το εύρος σε (V) ή η ενέργεια δεν παρουσιάζουν συσχέτιση με παραμέτρους της σύστασης. Η διάρκεια ωστόσο, βρίσκεται σε σχέση με το ποσοστό άμμου, αυξανόμενη μάλλον ανάλογα με αυτό, όπως φαίνεται στα δύο παραδείγματα του Σχ.6.9(α) και (β), όπου η κεντρική συχνότητα f των αρχικών παλμών είναι 450 και 200kHz αντίστοιχα. Σε αντίθεση, η διάρκεια του πρώτου κύκλου δεν παρουσιάζει καμία συσχέτιση με την αναλογία w/c όπως φαίνεται στα Σχ.6.9(γ) και (δ) για υλικό με $s=30\%$ και f 300 και 375kHz αντίστοιχα. Η εξάρτηση του πρώτου κύκλου από το ποσοστό άμμου, μπορεί να σχετισθεί με την αυξητική τάση της ταχύτητα με την άμμο, που παρουσιάστηκε στο Σχ.6.2. Πράγματι, αφού η ταχύτητα παλμού μετράται από την υπέρβαση κατωφλίου του πρώτου κύκλου, είναι πολύ πιθανό να επηρεάζεται από την διάρκεια του.



Σχ.6.8. Ο πρώτος κύκλος κυματομορφών για διάφορες συστάσεις.



Σχ.6.9. Συσχέτιση διάρκεια πρώτου κύκλου κυματομορφής με ποσοστό άμμου (α), (β) και w/c (γ) (δ).

Οι παραπάνω παρατηρήσεις αφορούν σε αλλαγή σχήματος του παλμού, δηλαδή σε διασπορά επιβαλλόμενη από τη φύση του υλικού. Η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων σύστασης που ορίζουν μια τέτοια συμπεριφορά, μελετώνται στο πλαίσιο της θεωρίας σκέδασης που όπως θα φανεί δίνει εξήγηση στις παρατηρήσεις μέσω πολύ καλής συμφωνίας προβλέψεων και πειραματικών μετρήσεων φασικής ταχύτητας και εξασθένισης.

6.4 Θεωρητική προσέγγιση μέσω σκέδασης

6.4.1 Κυματική διάδοση σε υγρά

Λόγω μηδενικής διατμητικής δυσκαμψίας, τα υγρά υποστηρίζουν μόνο διαμήκη κύματα. Στην ιδεατή περίπτωση ενός μη ιξώδους ρευστού, οι μεταβολές της πίεσης P είναι ανάλογες με τις μεταβολές όγκου (διόγκωση Θ):

$$P = -K \cdot \Theta \quad (6.2)$$

όπου K η σταθερά αναλογίας (μέτρο διόγκωσης) και $\Theta = \nabla \cdot \mathbf{u}$

Έτσι η καταστατική εξίσωση κίνησης στη διεύθυνση x σε έναν όγκο ελέγχου ρευστού έχει ως εξής:

$$K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (6.3)$$

Με εφαρμογή και σε αυτήν την περίπτωση επίπεδου κύματος, όπως και στην αντίστοιχη περίπτωση του Κεφαλαίου 5 για ελαστικό μέσο, καταλήγουμε στη σχέση:

$$\frac{\omega}{k} = C_p = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (6.4)$$

Φαίνεται λοιπόν ότι η κυματική διάδοση σε ιδανικό ρευστό, όπως και σε ομογενές ελαστικό υλικό, χαρακτηρίζεται από σταθερή ταχύτητα [8].

6.4.2 Κυματική διάδοση σε αιωρήματα

Εφόσον το υγρό παρουσιάζει ιξώδες ή ανομοιογένεια (αιώρημα σωματιδίων) η κατάσταση διαφοροποιείται. Στην δεύτερη περίπτωση υπεισέρχονται και μηχανισμοί σκέδασης. Άρα η σχέση διασποράς (6.4) που για το υγρό είναι γραμμική, πρέπει να υπολογιστεί με πιο πολύπλοκο τρόπο λαμβάνοντας υπόψη την ανάκλαση του κύματος στην επιφάνεια των σωματιδίων.

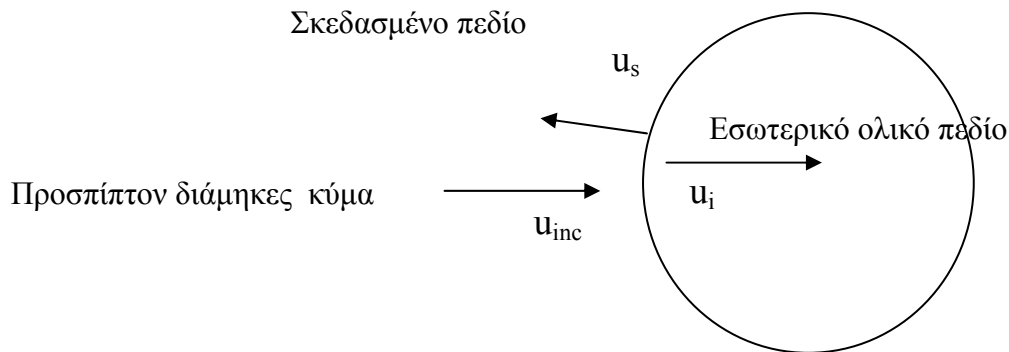
Τα υγρά αιωρήματα εν γένει παρουσιάζουν συμπεριφορά διασκόρπισης με την ταχύτητα και την εξασθένιση να εξαρτώνται από τη συχνότητα, το μέγεθος των σωματιδίων και τις φυσικές ιδιότητες των διαφορετικών φάσεων, ενώ έχει μελετηθεί πλήθος περιπτώσεων κυματικής διάδοσης σε τέτοια υλικά π.χ. [9-11].

Από μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, προέκυψαν κάποιες ενδείξεις ότι η κυματική διάδοση στο νωπό κονίαμα, διέπεται κυρίως από μηχανισμούς σκέδασης. Τέτοιες είναι η σαφής εξάρτηση της μετρούμενης εξασθένισης από την περιεκτικότητα σε κόκκους άμμου, αλλά επίσης και από το μέγεθος των κόκκων, όπως θα αναπτυχθεί. Για να διερευνηθεί η επίδραση των σωματιδίων άμμου και των φυσαλίδων, εγκλωβισμένων σε κάθε περίπτωση στο κονίαμα, στο διαδιδόμενο κύμα, χρησιμοποιήθηκε η θεωρία πολλαπλής σκέδασης και το πρότυπο Ying και Truell [12]. Το πρότυπο αυτό έχει περιγραφεί επαρκώς στη βιβλιογραφία [12,13] όπως και άλλες προσεγγίσεις στην κυματική διάδοση σε αιωρήματα [14,15] και η χρήση του στην παρούσα διατριβή έχει ως σκοπό την ερμηνεία των πειραματικών τάσεων που παρουσιάστηκαν στο νωπό κονίαμα. Γι' αυτό και γίνεται σύντομη αναφορά στα βασικά βήματα που οδήγησαν στην εξαγωγή θεωρητικών προβλέψεων και κατόπιν δίνεται σημασία στον τρόπο με τον οποίο έγινε η μοντελοποίηση και συγκεκριμένα στην συσχέτιση της σύστασης με τις φυσικές ιδιότητες του τελικού υλικού.

Στην περίπτωση πρόσπτωσης ενός κύματος σε σφαιρικό ελαστικό σκεδαστή, ένα μέρος της ενέργειας του προσπίπτοντος κύματος, σκεδάζεται προς όλες τις κατευθύνσεις ενώ ένα άλλο εισέρχεται στην ελαστική σφαίρα, όπως φαίνεται στο Σχ.6.10. Χρησιμοποιώντας για το εξωτερικό και εσωτερικό της σφαίρας πεδίο σφαιρικές αρμονικές συναρτήσεις, οι Ying και Truell έλυσαν το πρόβλημα αλληλεπίδρασης επιπέδου κύματος με σφαιρικό σκεδαστή, υιοθετώντας τις ακόλουθες συνοριακές συνθήκες σε σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων:

$$\begin{aligned}
\mathbf{u}_r^{(inc)} + \mathbf{u}_r^{(s)} &= \mathbf{u}_r^{(i)} \\
\mathbf{u}_\theta^{(inc)} + \mathbf{u}_\theta^{(s)} &= \mathbf{u}_\theta^{(i)} \\
\tau_{rr}^{(inc)} + \tau_{rr}^{(s)} &= \tau_{rr}^{(i)} \\
\tau_{r\theta}^{(inc)} + \tau_{r\theta}^{(s)} &= \tau_{r\theta}^{(i)}
\end{aligned} \tag{6.5}$$

όπου u η μετατόπιση, τ_{rr} , $\tau_{r\theta}$ η ορθή και διατμητική τάση στην επιφάνεια της σφαίρας. Οι εκθέτες inc (incident), s (scattered) και i (internal) αντιστοιχούν σε προσπίπτον, ανακλώμενο κύμα και ολικό πεδίο εσωτερικά της σφαίρας, ενώ οι δείκτες r και θ , δηλώνουν διεύθυνση ακτινική και εφαπτομενική.



Σχ.6.10. Σχηματική αναπαράσταση της σκέδασης σε σφαιρικό έγκλεισμα

Η καλή τοποθέτηση του προβλήματος των Ying και Truell ολοκληρώνεται με την ικανοποίηση των συνθηκών ακτινοβολίας Sommerfeld [16] για το σκεδασμένο πεδίο:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \mathbf{u}_d^s = \mathbf{O}, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} r \left(\frac{\partial \mathbf{u}_d^s}{\partial r} - ik_d \mathbf{u}_d^s \right) = \mathbf{O} \tag{6.6}$$

όπου ο δείκτης d δηλώνει τύπο κύματος (p για διάμηκες και s για διατμητικό).

Ικανοποιώντας τις παραπάνω συνθήκες υπολογίζονται όλα τα εμπλεκόμενα πεδία μέσα και έξω από το σκεδαστή. Χρησιμοποιώντας ασυμπτωτική ανάλυση για το σκεδασμένο πεδίο βρίσκουν ότι το ενεργειακό πλάτος σκέδασης, το οποίο εκφράζει ένα μέτρο της ενέργειας που σκεδάζεται σε δεδομένη διεύθυνση, δίνεται από την σχέση:

$$f(0) = \frac{1}{ik} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)A_n \quad (6.7)$$

$$f(\pi) = \frac{1}{ik} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1)A_n$$

όπου οι συντελεστές A_n υπολογίζονται από το σύστημα:

$$A_n k_1 a h_{n+1}(k_1 a) + B_n n \kappa_1 a h_{n+1}(\kappa_1 a) - C k_2 a j_{m+1}(k_2 a) - D_n n \kappa_2 a j_{m+1}(\kappa_2 a) =$$

$$= (-i)^{n-1} (2n+1) \frac{1}{k_1} [k_1 a j_{m+1}(k_1 a)] \quad (6.8)$$

$$A_n a h_n(k_1 a) - B_n [(n+1)h_n(\kappa_1 a) - \kappa_1 a h_{n+1}(\kappa_1 a)] -$$

$$- C_n j_m(k_2 a) + D_n [(n+1)j_n(\kappa_2 a) - \kappa_2 a j_{n+1}(\kappa_2 a)] =$$

$$= (-i)^{n-1} (2n+1) \frac{1}{k_1} j_m(k_1 a) \quad (6.9)$$

$$A_n [(k_1 a)^2 h_n(k_1 a) - 2(n+2)k_1 a h_{n+1}(k_1 a)] +$$

$$+ B_n n [(k_1 a)^2 h_n(\kappa_1 a) - 2(n+2)\kappa_1 a h_{n+1}(\kappa_1 a)] -$$

$$- C_n n [(k_2 a)^2 j_n(k_2 a) - 2(n+2)k_2 a j_{n+1}(k_2 a)] -$$

$$- D_n n [(k_2 a)^2 j_n(\kappa_2 a) - 2(n+2)\kappa_2 a j_{n+1}(\kappa_2 a)] =$$

$$= (-i)^{n-1} (2n+1) \frac{1}{k_1} [(k_1 a)^2 j_m(k_1 a) - 2(n+2)k_1 a j_{m+1}(k_1 a)] \quad (6.10)$$

$$\begin{aligned}
& A_n [(n-1)h_n(k_1 a) - k_1 a h_{n+1}(k_1 a)] - \\
& - B_n \left[\left(n^2 - 1 - \frac{\kappa_1^2 a^2}{2} \right) h_n(k_1 a) - \kappa_1 a h_{n+1}(k_1 a) \right] - \\
& - C_n p [(n-1)j_n(k_2 a) - k_2 a j_{n+1}(k_2 a)] - \\
& + D_n p \left[\left(n^2 - 1 - \frac{\kappa_2^2 a^2}{2} \right) j_n(k_2 a) - \kappa_2 a j_{n+1}(k_2 a) \right] \\
& = (-i)^{n-1} (2n+1) \frac{1}{k_1} [(n-1)j_n(k_1 a) - k_1 a j_{n+1}(k_1 a)]
\end{aligned} \tag{6.11}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις h_n και j_n είναι οι σφαιρικές συναρτήσεις Hankel και Bessel n τάξης, πρώτου είδους. Επίσης $p = \mu_2/\mu_1$ (λόγος μέτρου διάτμησης σκεδαστή προς μήτρας), k_1 , k_2 είναι οι διαμήκεις κυματαριθμοί μήτρας και σκεδαστή αντίστοιχα ενώ όμοια κ_1 , κ_2 οι εγκάρσιοι κυματαριθμοί μήτρας και σκεδαστή. Τέλος, a , είναι η ακτίνα της σφαίρας. Οι εξισώσεις (6.8-6.11) προκύπτουν από την ικανοποίηση των συνοριακών συνθηκών (6.5)

Στην περίπτωση υγρού αιωρήματος, ενδιαφέρουν οι συντελεστές « A_n » του σκεδασμένου διαμήκους κύματος το οποίο μπορεί και να μετρηθεί με τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες. Αυτό το σύστημα εξισώσεων, σε μητρωϊκή μορφή, λύνεται σε περιβάλλον MATLAB με συγκεκριμένη συνάρτηση αντιστροφής μητρώων. Οι τιμές των συναρτήσεων Hankel και Bessel δίνονται από έτοιμες συναρτήσεις του Matlab.

Σημειώνεται ότι το αρχικό μοντέλο Ying και Truell αφορά σε σκέδαση σε ελαστική σφαίρα τοποθετημένη σε ελαστική μήτρα. Σε περίπτωση όπου ενδιαφέρει προσέγγιση σκέδασης σε σωματίδιο αιωρούμενο σε υγρό, οι αντίστοιχες εξισώσεις προκύπτουν εφόσον το μέτρο διάτμησης του μητρικού υλικού λάβει απειροστά μικρή τιμή ($\mu \rightarrow 0$) [17]. Η καταλληλότητα αυτής της διαδικασίας ενισχύθηκε από την εφαρμογή της σε πλήθος βιβλιογραφικών περιπτώσεων αιωρημάτων όλων των φάσεων σε υγρά, όπου αποδείχτηκε ότι η πειραματική συμπεριφορά της ταχύτητας ή εξασθένισης με τη συχνότητα και την κ.ο. περιεκτικότητα, προβλέπεται πολύ καλά [18]. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το μοντέλο Ying και Truell με τις κατάλληλες τροποποιήσεις στις ιδιότητες των υλικών προβλέπει τη συμπεριφορά όχι μόνο

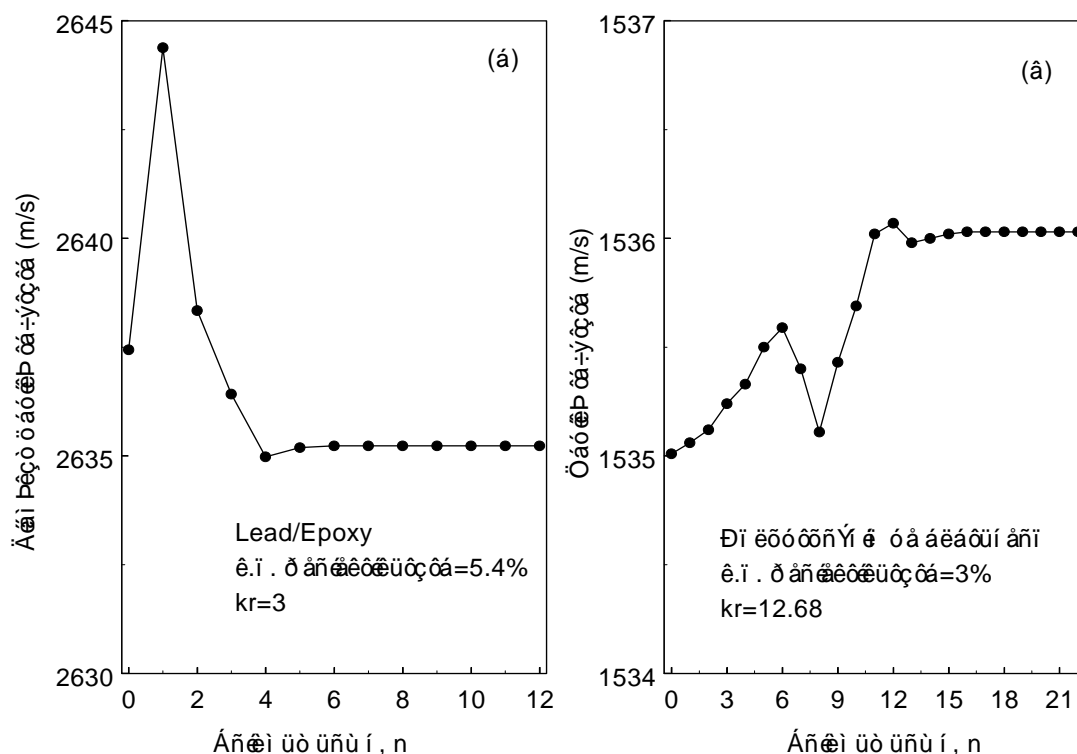
συστημάτων ελαστικών φάσεων αλλά και ρευστών-ελαστικών. Το πρόβλημα σκέδασης στις εγκλωβισμένες φυσαλίδες, που αντιμετωπίστηκε επίσης, λύθηκε με την προσέγγιση Ying και Truell σχετικά με σκέδαση σε κοιλότητα [12].

Άλλες γνωστές προσεγγίσεις στο πρόβλημα σκέδασης διαμήκους κύματος σε σκεδαστή [14-15] περιέχουν δύο επιπλέον εξισώσεις, προκύπτουσες από τη συνέχεια της θερμοκρασίας και ροής θερμότητας. Ωστόσο, θερμοκοί μηχανισμοί γενικά παρατηρούνται και είναι ισχυροί σε αιωρήματα όπου οι πυκνότητες της συνεχούς και της διασπαρμένης φάσης είναι περίπου ίσες [19,20]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η άμμος με πυκνότητα 2.65g/cm^3 και η τσιμεντόπαστα με περίπου 1.8g/cm^3 θεωρούνται ότι απέχουν αρκετά, ενώ η διαφορά πυκνότητας της τσιμεντόπαστας με τις φυσαλίδες αέρα δεν χρειάζεται να τονιστεί. Επιπλέον γενικά η σκέδαση είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός όταν πρόκειται για σωματίδια μεγάλων διαστάσεων [21], δηλαδή συγκρίσιμα με το μήκος κύματος όπως συμβαίνει στην περίπτωση της διατριβής αυτής. Τελικά βέβαια η συμφωνία μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και θεωρητικών προβλέψεων είναι αυτή που καθιστά κατάλληλη τη συγκεκριμένη προσέγγιση. Σημειώνεται επίσης ότι η προσέγγιση Ying Truell είναι ισοδύναμη με τις προαναφερθείσες [14-15] σε περίπτωση που παραλειφθούν οι δύο εξισώσεις με τους θερμικούς όρους [13].

Για περιπτώσεις χαμηλής συχνότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο οι αρχικοί όροι, A_0 , έως A_2 , στην (6.7) για τους οποίους υπάρχουν προσεγγιστικές εκφράσεις [9,12] και καταλήγουν σε καλές προβλέψεις της συμπεριφοράς. Γενικά, το πλήθος των απαραίτητων για σύγκλιση όρων έχει δειχθεί ότι είναι περίπου ίσο με το γινόμενο κυματαριθμού – μεγέθους σκεδαστή ($k*a$) [22], γεγονός που σημαίνει ότι όσο αυξάνει η συχνότητα και το μέγεθος του σωματιδίου σε σχέση με το μήκος κύματος, περισσότεροι όροι είναι αναγκαίοι να αθροιστούν στις (6.7).

Αυτό παρατηρήθηκε και στο πλαίσιο της εργασίας αυτής. Συγκεκριμένα, η τιμή του n που οδηγεί σε σύγκλιση, δηλαδή σταθερή τιμή μέτρων σκέδασης και ως εκ τούτου φασικής ταχύτητας και εξασθένησης όσοι όροι και αν προστεθούν επί πλέον, είναι της τάξης του k_c*a+3 . Αυτό φαίνεται στο Σχ.6.11 για δύο περιπτώσεις αιωρημάτων. Στο Σχ.6.11(α) φαίνεται ότι η φασική ταχύτητα, (η περιγραφή του τρόπου υπολογισμού της οποίας είναι εν εξελίξει) κοκκώδους συνθέτου υλικού Lead/Epoxy παύει να μεταβάλλεται έντονα

(συγκλίνει) όταν αθροιστούν 5 όροι, ενώ στο περίπτωση του Σχ6.11(β) η σύγκλιση επέρχεται περίπου στον 15ο όρο για περίπτωση αιωρήματος σφαιριδίων πολυστυρενίου σε αλατόνερο. Και στις δύο περιπτώσεις η τάξη σύγκλισης είναι κατά τι αυξημένη σε σχέση με το γινόμενο $k_c \cdot a$. Έτσι σε όλες τις περιπτώσεις και για αυξημένη ακρίβεια, η επαναληπτική διαδικασία ορίστηκε να περιέχει όρους $k_c \cdot a + 7$.



Σχ.6.11. Επίδραση τάξης αθροιζόμενων όρων στην τιμή φασικής ταχύτητας

Με τα παραπάνω έχει λυθεί το πρόβλημα της σκέδασης κύματος σε ένα σκεδαστή. Από τη λύση του επιμέρους αυτού προβλήματος προκύπτει η συμπεριφορά του όλου συνθέτου (αιωρήματος) μέσω σχέσεων διασποράς. Αν οι σκεδαστές αντιστοιχούν σε κατ' όγκο περιεκτικότητα, ϕ , τότε ο μιγαδικός κυματαριθμός του μέσου, k , μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του κυματάριθμου της μήτρας k_c , που θεωρείται μη διασκορπίζουσα. Η πιο απλή περίπτωση διατυπώθηκε από τον Foldy [23]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αφού το αιώρημα που εξετάζεται παρουσιάζει υψηλή συγκέντρωση (έως και 40% κ.ο. σε άμμο) και αφού υπό τέτοιες συνθήκες ενοείται πολλαπλή σκέδαση του κύματος, θεωρήθηκε σωστό να

χρησιμοποιηθεί η σχέση των Waterman και Truell [24], που περιέχει πληροφορία και για την σκέδαση στην αντίθετη διεύθυνση:

$$\left(\frac{k}{k_c}\right)^2 = 1 + \frac{3\varphi}{k_c^2 R^3} f(0) + \frac{9\varphi^2}{4k_c^4 R^6} [f^2(0) - f^2(\pi)] \quad (6.12)$$

όπου k_c είναι ο πραγματικός κυματάριθμος της μήτρας (που θεωρείται μη διασκορπίζουσα), φ η κ.ο. περιεκτικότητα σε εγκλείσματα και R η ακτίνα αυτών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι μετά από αριθμό δοκιμών οι σχέσεις Foldy και Waterman Truell δεν καταλήγουν σε αξιοσημείωτη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Η φασική ταχύτητα συναρτήσει της συχνότητας $c(\omega)$ και ο συντελεστής εξασθένησης $\alpha(\omega)$, υπολογίζονται ως ακολούθως:

$$k(\omega) = \frac{\omega}{C(\omega)} + i\alpha(\omega) \quad (6.13)$$

όπου ω είναι η κυκλική συχνότητα.

Η εξίσωση (6.12) χρησιμοποιείται στην απλή περίπτωση όπου παρών στο αιώρημα είναι ένας μοναδικός πληθυσμός όμοιων σκεδαστών, δηλαδή ίδιου σχήματος και ιδιοτήτων. Το κονίαμα ωστόσο, περιέχει εξ' ορισμού κόκκους άμμου και φυσαλίδες αέρα, οπότε είναι υποχρεωτική η ταυτόχρονη λύση δύο προβλημάτων. Το ένα αφορά στη σκέδαση σε κόκκο άμμου που αιωρείται μέσα σε τσιμεντόπαστα, ενώ το δεύτερο στη σκέδαση στις φυσαλίδες που αιωρούνται σε κονίαμα. Οι τιμές του πλάτους σκέδασης που προκύπτει από την (6.7) για τις δύο ξεχωριστές περιπτώσεις εφαρμόζονται στη σχέση διασποράς με συντελεστή βαρύτητας την κ.ο. περιεκτικότητα της αντίστοιχης φάσης όπως φαίνεται παρακάτω για τη γενική περίπτωση i διαφορετικών πληθυσμών σκεδαστών [25]:

$$\left(\frac{k}{k_c}\right)^2 = 1 + \frac{3}{k_c^2} \sum_i \frac{\varphi_i f_i(0)}{R_i^3} + \frac{9}{4k_c^4} \sum_i \frac{\varphi_i^6}{R_i^6} [f_i^2(0) - f_i^2(\pi)] \quad (6.14)$$

Στην πραγματικότητα, για την πλειοψηφία των περιπτώσεων που παρουσιάζονται, 5 διαφορετικοί πληθυσμοί φυσαλίδων αέρα και ένας πληθυσμός κόκκων άμμου θεωρήθηκαν παρόντες, όπως θα αναπτυχθεί.

Επίσης παρακάτω θα δειχθεί ότι η συνεισφορά των κόκκων τσιμέντου στη σκέδαση, λόγω μικρού μεγέθους, είναι αμελητέα. Αυτός είναι και ο λόγος που η τσιμεντόπαστα θεωρήθηκε ομογενής ως μητρικό υλικό σε αυτές τις συχνότητες.

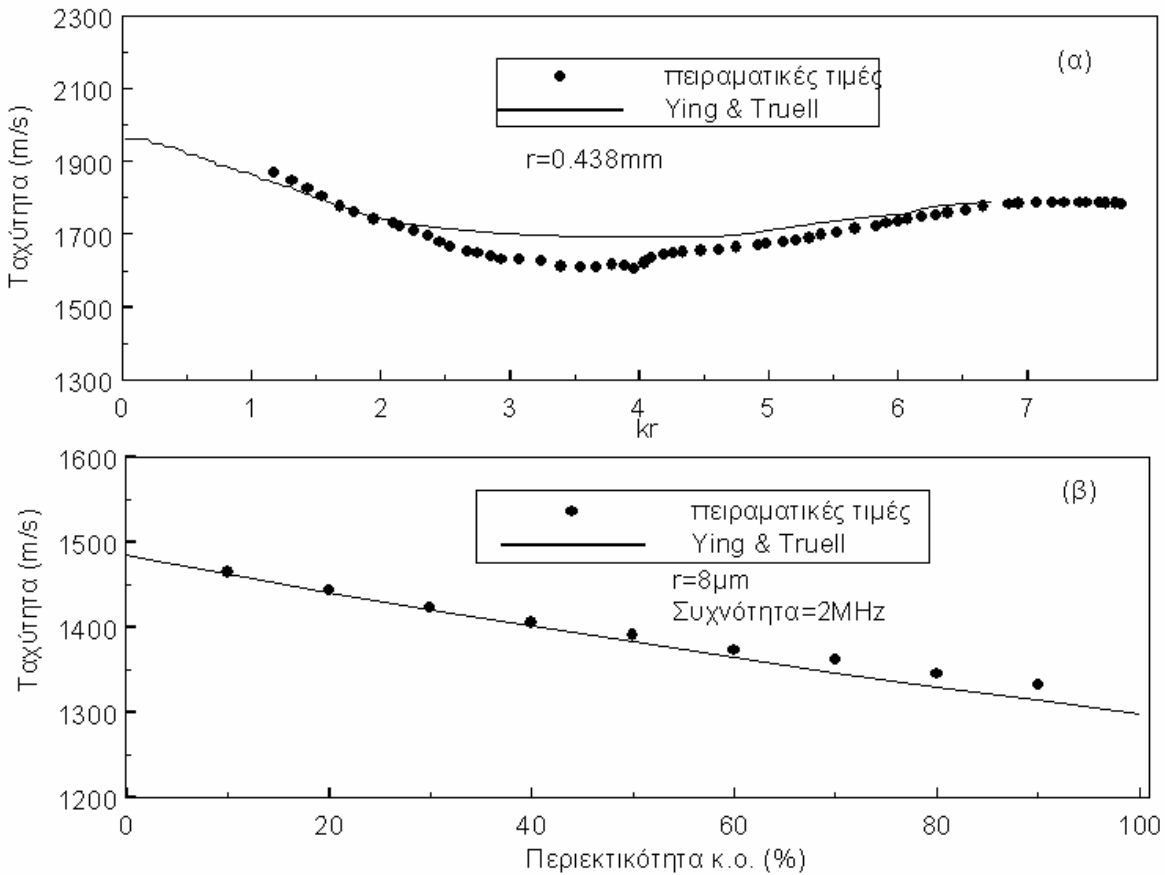
Συνοπτικά ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα για τον υπολογισμό φασικής ταχύτητας και εξασθένισης σε ένα αιώρημα:

1. Επιλέγονται οι κατάλληλες παράμετροι (φυσικές ιδιότητες, μεγέθη σκεδαστών)
2. Επιλέγεται η τάξη του n ($k_1 \cdot a + 7$) των συντελεστών σκέδασης
3. Για κάθε συχνότητα, f , επιλύεται το σύστημα εξισώσεων (6.8-6.11) ως προς τους συντελεστές A_n
4. Υπολογίζονται τα ενεργειακά πλάτη σκέδασης $f(0)$ και $f(\pi)$ από την (6.7)
5. Από τη σχέση διασποράς (6.12), (εναλλακτικά 6.14 για διάφορους πληθυσμούς), υπολογίζεται ο κυματάρθρωτος του αιωρήματος
6. Η φασική ταχύτητα και εξασθένιση συναρτήσει της συχνότητας υπολογίζεται μέσω της (6.13)

Τα παραπάνω βήματα προγραμματίστηκαν σε ένα αρχείο Matlab (Scattering.mat), μέσω του οποίου πολύ εύκολα εισάγονται από το χρήστη οι ιδιότητες, τα μεγέθη και το πεδίο συχνοτήτων (input) και με την εφαρμογή του (run) προκύπτουν και αποθηκεύονται οι καμπύλες φασικής ταχύτητας και εξασθένισης.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, όπως αναφέρθηκε, οι προβλέψεις σχετικά με ταχύτητα και εξασθένιση είναι πολύ κοντά σε πειραματικές τιμές. Δύο παραδείγματα περιέχονται στα Σχ.6.12(α) και (β). Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται σε αιώρημα σφαιριδίων γυαλιού σε διάλυμα γλυκερόλης-νερού, όπου πειραματικά αποτελέσματα φασικής ταχύτητας ελήφθησαν από την [7]. Το ποσοστό κατ' όγκο περιεκτικότητας των σωματιδίων είναι 45% και οι μετρήσεις φασικής ταχύτητας αφορούν στο πεδίο 1 μέχρι 5MHz. Αποτελέσματα

φασικής ταχύτητας χρησιμοποιώντας την ως άνω αναφερόμενη θεωρία και με βάση τιμές φυσικών ιδιοτήτων από την ίδια αναφορά [7], δίνουν μια πολύ καλή πρόβλεψη όπως φαίνεται. Επίσης στο Σχ.6.12(β) παρουσιάζεται η σύγκριση πειραματικών τιμών από την [26] και θεωρητικών προβλέψεων για αιώρημα βενζίνης σε νερό για διάφορες περιεκτικότητες και συχνότητα 2MHz. Και σε αυτήν την περίπτωση, οι θεωρητικές προβλέψεις είναι κοντά στις πειραματικές τιμές. Είναι σαφές ότι ακόμα και για μεγάλες συγκεντρώσεις και υψηλές συχνότητες, οι προβλέψεις δεν απέχουν πολύ από τα πειραματικά δεδομένα. Οι προβλέψεις αυτές έγιναν θεωρώντας το μέτρο διάτμησης, μ , του υγρού σε κάθε περίπτωση ίσο με 100Pa, τιμή αμελητέα, αλλά απαραίτητη για να μην απειρίζεται ο διατμητικός κυματαριθμός και να είναι δυνατή η αντιστροφή των μητρώων.



Σχ.6.12. Σύγκριση πειραματικών τιμών με θεωρητικές προβλέψεις φασικής ταχύτητας για (α) αιώρημα σφαιριδίων γυαλιού σε διάλυμα νερού-γλυκερόλης και (β) για αιώρημα σταγονιδίων βενζίνης σε νερό.

6.5 Ανάπτυξη του θεωρητικού μοντέλου

Η μεγάλη εξασθένιση τασικών κυμάτων σε νωπό σκυρόδεμα και κονίαμα είναι γνωστή [27]. Αυτό επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις της παρούσας διατριβής, αφού χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο εξοπλισμό, αξιόπιστα σήματα δεν κατεγράφησαν για πάχος δοκιμίου μεγαλύτερο των 20mm, σε αντίθεση με το νερό του οποίου το σήμα εξασθενεί ελάχιστα ακόμα και για 45mm. Η παρατηρούμενη εξασθένιση ποικίλει ευρέως με την συχνότητα και τη σύσταση του κονιάματος όπως θα παρουσιασθεί.

Μια πρώτη παρατήρηση σχετικά με τον έλεγχο των υλικών αυτών είναι ότι η τσιμεντόπαστα παρουσιάζει υψηλή εξασθένιση σε χαμηλές συχνότητες, ενώ καθώς το υλικό ενισχύεται με

άμμο αυτή ελαχιστοποιείται και αντιθέτως παρουσιάζεται εξασθένιση σε υψηλές συχνότητες. Άρα η συνδυασμένη δράση των κόκκων άμμου και των φυσαλίδων αέρα θα μπορούσε να θεωρηθεί υπεύθυνη για την παρατηρούμενη συμπεριφορά. Πράγματι, ασχέτως με την συμπύκνωση που υφίσταται, το κονίαμα περιέχει εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα σε ποσοστό ακόμα και 10% (για ανεπαρκή συμπύκνωση). Γενικά τα υγρά αιωρήματα παρουσιάζουν έντονα σκεδαστικά φαινόμενα ιδίως σε περίπτωση υψηλής συγκέντρωσης. [7,28]. Από την άλλη πλευρά, οι φυσαλίδες σε υγρό, σε συγκεντρώσεις χαμηλές έως και 10^{-4} , έχουν αναφερθεί ότι οδηγούν σε ισχυρή εξασθένιση και εντυπωσιακή διασπορά για μεσαίες συχνότητες (φασική ταχύτητα άνω των 10000m/s) [29], ενώ η παρουσία τους οδηγεί σε υψηλή εξασθένιση ζωνών συχνοτήτων σε νωπή τσιμεντόπαστα λόγω φαινομένων συντονισμού [30] και χαμηλή ταχύτητα παλμών σε σκυρόδεμα με χρήση πολύ χαμηλών συχνοτήτων (1kHz) [31].

Η προσθήκη άμμου στην τσιμεντόπαστα οδηγεί στην ενίσχυση όλων των φυσικών ιδιοτήτων του κονιάματος, συμπεριλαμβανομένων της πυκνότητας και των μέτρων διόγκωσης και διάτμησης. Άλλωστε είναι εύκολα κατανοητή η διαφορά ανάμεσα στη λεπτόρρευστη τσιμεντόπαστα και το σχεδόν στερεό κονίαμα με μεγάλη ποσότητα άμμου. Ως εκ τούτου, για εισαγωγή στο πρότυπο σκέδασης, αυτές οι ιδιότητες πρέπει να διαμορφωθούν σύμφωνα με τη σύσταση του κονιάματος, λαμβάνοντας υπ' όψη το λόγο w/c και το περιεχόμενο άμμου. Η πυκνότητα του κονιάματος ρ_m , υπολογίζεται εύκολα και με ακρίβεια, δεδομένων των αναλογιών του υλικού ως εξής:

$$\rho_m = \frac{c + a + w}{V_c + V_a + V_w} = \frac{c + a + w}{\frac{c}{\rho_c} + \frac{a}{\rho_a} + \frac{w}{1}} = \frac{1/c}{\frac{w}{c} + 1 + \frac{a}{c}} \rightarrow$$

$$\rho_m = \frac{\frac{w}{c} + 1 + \frac{a}{c}}{\frac{w}{c} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{a}{c \rho_s}} \quad (6.15)$$

όπου c, a, w οι μάζες των τσιμέντου, άμμου και νερού αντίστοιχα, V_c , V_a , V_w , οι όγκοι αυτών και ρ_c , ρ_a , οι αντίστοιχες πυκνότητες. Η πυκνότητα του νερού θεωρήθηκε ίση με 1000kg/m^3 .

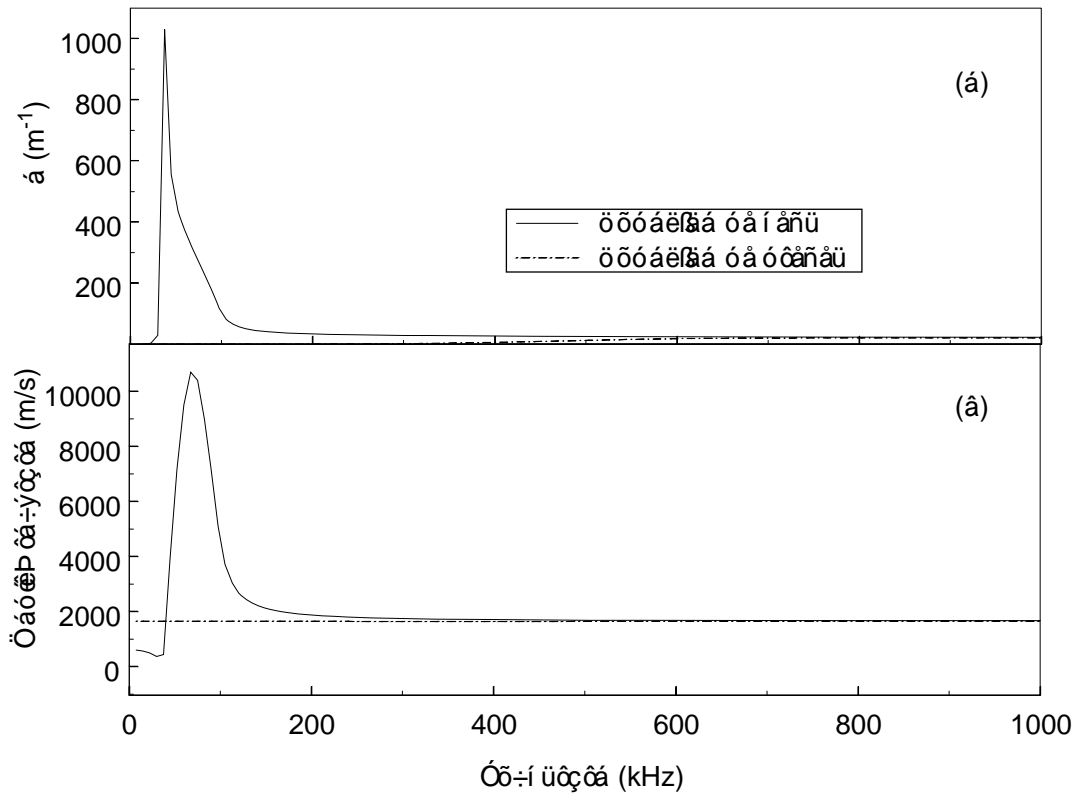
Η τιμή του μέτρου διόγκωσης, που είναι το αντίστροφο της συμπιεστότητας, υπολογίστηκε από την πυκνότητα και την φασική ταχύτητα σε υψηλές συχνότητες. Όπως θα φανεί αργότερα, η φασική ταχύτητα για οποιοδήποτε μείγμα, καταλήγει στην ίδια τιμή (περίπου 1650m/s) ανεξαρτήτως της αναλογίας w/c και s για υψηλές συχνότητες.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, το μέτρο διόγκωσης υπολογίστηκε ως:

$$K = \rho_m C_p^2 \quad (6.16)$$

με τελικές τιμές περίπου της τάξεως των 5GPa.

Η τιμή του μέτρου διάτμησης του κονιάματος και η σύνδεσή του με τη σύσταση ωστόσο, μπορεί να θεωρηθεί «κλειδί» στην ανάλυση. Όπως αναφέρθηκε, η τσιμεντόπαστα παρουσιάζει έντονη εξασθένιση σε χαμηλές συχνότητες. Αφού δεν περιέχει άμμο, μια πρώτη προσέγγιση είναι ότι υπεύθυνες γι' αυτό είναι οι φυσαλίδες. Οι φυσαλίδες ωστόσο, είναι παρούσες και στο κονίαμα, που όμως δεν παρουσιάζει εξασθένιση σε χαμηλές συχνότητες. Η εξήγηση φαίνεται ότι βρίσκεται στη διαφορά του μέτρου διάτμησης ανάμεσα στην τσιμεντόπαστα και το κονίαμα. Θεωρητικά αποτελέσματα σκεδαστικής εξασθένισης στο πλαίσιο της διατριβής, δείχνουν ότι παρότι φυσαλίδες αέρα είναι υπεύθυνες για υψηλή εξασθένιση αιωρούμενες σε ρευστό, δεν παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά όταν περιβάλλονται από ελαστική μήτρα. Αυτό φαίνεται καθαρά στο Σχ.6.13(α) όπου παρουσιάζονται ο συντελεστής εξασθένισης για νερό με 1% κ.ο. φυσαλίδες διαμέτρου 1mm και ο αντίστοιχος συντελεστής για ελαστικό μέσο που περιέχει 1% κοιλότητες ίδιου μεγέθους για συχνότητες έως 1MHz. Το μέτρο διάτμησης στην περίπτωση του νερού σχεδόν μηδενίστηκε (τέθηκε στα 100Pa) ενώ του ελαστικού μέσου τέθηκε ίσο με 1.5GPa. Στο Σχ.6.11(β) φαίνεται η αντίστοιχη διασπορά. Είναι σαφές ότι οι φυσαλίδες, ακόμα και σε μικρή περιεκτικότητα, αιωρούμενες σε υγρή φάση (δηλαδή μέσο με χαμηλό μέτρο διάτμησης) επηρεάζουν άμεσα την κυματική διάδοση για μια ζώνη συχνοτήτων, ενώ έχουν συγκριτικά αμελητέα επίδραση σε στερεά μήτρα.



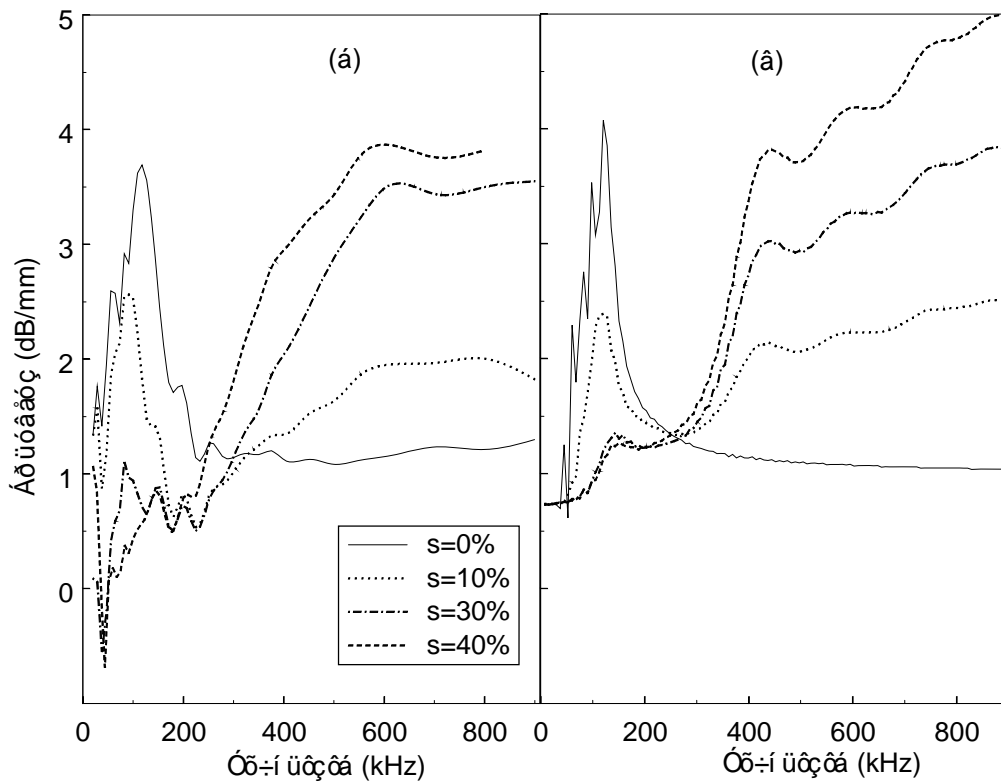
Σχ.6.13. Θεωρητικές καμπύλες (α) συντελεστή εξασθένισης, α και (β) φασικής ταχύτητας για νερό και υγρό και στερεό με 1% κ.ο. φυσαλίδες 1mm.

Η πειραματική εξασθένιση υπολογίστηκε, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από το πηλίκο του εύρους του σήματος κονιάματος προς το εύρος δοκιμίου νερού. Θεωρώντας επίπεδο διάμηκες κύμα διαδιδόμενο σε κονίαμα και νερό, ο λόγος των τιμών του εύρους αυτών είναι:

$$Att(f) = -\frac{20}{x} \log \left| \frac{e^{i\left(\frac{\omega}{c(f)} - \alpha(f)\right)x}}{e^{i\left(\frac{\omega}{c_w} - \alpha_w\right)x}} \right| \quad (6.17)$$

όπου $c(f)$ και $\alpha(f)$ είναι η φασική ταχύτητα και συντελεστής εξασθένισης του κονιάματος αντίστοιχα, ενώ c_w and α_w είναι η φασική ταχύτητα και ο συντελεστής εξασθένισης στο νερό. Αυτό θεωρείται χωρίς διασπορά με $c_w=1500\text{m/s}$ ενώ ο α_w έλαβε μια μικρή σταθερή τιμή (5.4m^{-1})για να προσεγγιστούν καλύτερα οι πειραματικές καμπύλες τις τσιμεντόπαστας που σε υψηλές συχνότητες παρουσιάζουν σταθερή αλλά μικρή εξασθένιση.

Για την επιλογή κατάλληλων τιμών του μέτρου διάτμησης του κονιάματος, χρησιμοποιήθηκαν ως οδηγοί παραδείγματα από την πειραματική βάση, βλ. Σχ.6.14(α). Στο σχήμα αυτό, φαίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας σε άμμο στην καμπύλη εξασθένησης κονιάματος – συχνότητας. Είναι σαφής η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς εξασθένησης με το ποσοστό άμμου, τόσο σε χαμηλές συχνότητες όπου η αύξηση της άμμου ελαττώνει την εξασθένηση, όσο και σε υψηλές που συμβαίνει το αντίθετο. Χρησιμοποιώντας τις τιμές πυκνότητας κονιάματος ρ_m και μέτρου διόγκωσης K από τις (6.15) και (6.16) και φυσικές ιδιότητες και μεγέθη σκεδαστών (κόκκων άμμου και φυσαλίδων αέρα) όπως φαίνεται στον Πίνακα6.2, προσαρμόστηκε η τιμή του μέτρου διάτμησης ώστε οι θεωρητικές καμπύλες που παρουσιάζονται στο Σχ.6.14(β) να προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις πειραματικές καμπύλες εξασθένησης.



Σχ.6.14. Θεωρητικές (α) και πειραματικές (β) καμπύλες εξασθένησης για διάφορα ποσοστά άμμου κονιάματος και $w/c=0.50$.

Πίνακας 6.2. Τιμές ιδιοτήτων που εφαρμόστηκαν στο πρότυπο σκέδασης

Ακτίνα, $R_{\text{άμμου}}$ (mm)	1.4			
$E_{\text{άμμου}}$ (GPa)	30			
Poisson, $\nu_{\text{άμμου}}$	0.2			
$\rho_{\text{άμμου}}$ (Kg/m^3)	2690			
			τσιμεντόπαστα	κονίαμα
$\Phi_{\text{αέρα1}}$ (%)	.55	R_{air1} (mm)	1.0	1.4
$\Phi_{\text{αέρα2}}$ (%)	.25	R_{air2} (mm)	.88	1.2
$\Phi_{\text{αέρα3}}$ (%)	.45	R_{air3} (mm)	.75	1.1
$\Phi_{\text{αέρα4}}$ (%)	.45	R_{air4} (mm)	.62	1.1
$\Phi_{\text{αέρα5}}$ (%)	.45	R_{air5} (mm)	.50	1
$\Phi_{\text{αέρα Σολ}}$ (%)	2.15			

Οι τιμές του μέτρου διάτμησης, μ , που χρησιμοποιήθηκαν για τη θεωρητική προσομοίωση των πειραματικών περιπτώσεων, είναι σε γραμμική σχέση με το μέτρο διόγκωσης. Συγκεκριμένα, για τις περιπτώσεις του Σχ.6.14 με $w/c=0.50$, για τσιμεντόπαστα ($s=0\%$), κονίαμα με $s=10\%$, $s=30\%$ και $s=40\%$, οι εφαρμοζόμενες τιμές του μ είναι 60, 150, 400 και 500MPa, οδηγώντας στην ακόλουθη σχέση μεταξύ μ και ρ_m :

$$\mu = 1.3185 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_m - 2.367 \quad (6.18)$$

όπου το μ σε GPa.

Με αυτόν τον τρόπο το ισοδύναμο μέτρο διάτμησης λαμβάνει τιμές άμεσα εξαρτημένες από τη σύσταση και συγκεκριμένα, μέσω της πυκνότητας, από το λόγο w/c και την ποσότητα άμμου η οποία θεωρείται ότι αποτελεί την ουσιαστική ενίσχυση του υλικού.

Έτσι, χρησιμοποιώντας την παραπάνω συσχέτιση για οποιοδήποτε άλλο μείγμα, οι τιμές των φυσικών του ιδιοτήτων μπορούν να υπολογισθούν από τις σχέσεις (6.15, 6.16, 6.18) γνωρίζοντας τις αναλογίες και τις πυκνότητες των επιμέρους υλικών. Χωρίς σημαντικές διακυμάνσεις η πυκνότητα του νερού θεωρείται 1000kg/m^3 , της άμμου 2690kg/m^3 , ενώ του

αέρα 1.23kg/m^3 . Το σύστημα εξισώσεων (6.8-6.11), λύνεται ως προς τους συντελεστές A_n , υπολογίζονται τα πλάτη σκέδασης από τις (6.7) και κατόπιν μέσω της σχέσης διασποράς Waterman & Truell (6.12) και της (6.13) υπολογίζονται οι φασική ταχύτητα και εξασθένιση του κύματος. Με αυτό τον τρόπο προέκυψαν οι ανεξάρτητες πλέον προβλέψεις οι οποίες στην παρακάτω παράγραφο συγκρίνονται με τις πειραματικές τιμές

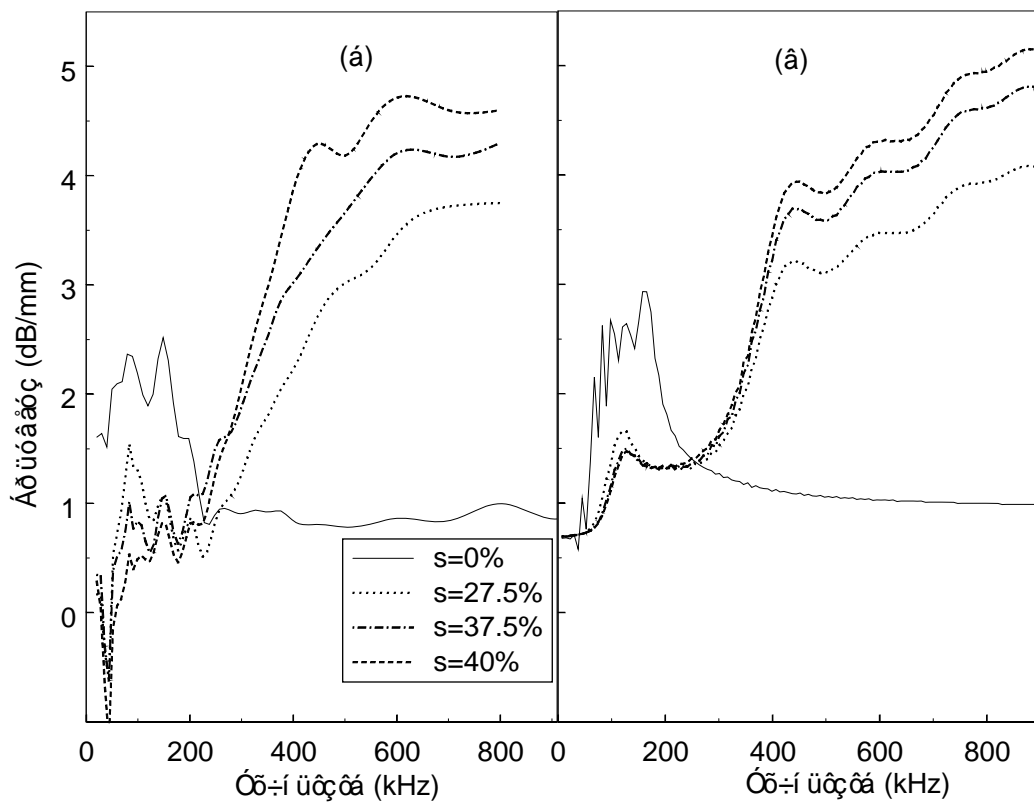
6.6 Σύγκριση μεταξύ θεωρητικής και πειραματικής εξασθένισης

Γενικά, οι πιο σημαντικοί μηχανισμοί εξασθένισης σε αιωρήματα, είναι [25,32]: (i) εσωτερική τριβή η οποία συμβαίνει σε κάθε φάση χωριστά με αποτέλεσμα την άμεση μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε θερμότητα. (ii) ιξωδο-αδρανειακές απώλειες λόγω διαφοράς πυκνότητας των επιμέρους υλικών. Αυτή η διαφορά έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση (ταλάντωση) των σωματιδίων σε σχέση με το περιβάλλον υγρό η οποία αποσβέννεται από το ιξώδες του υγρού και προκαλεί επίσης απώλειες προς θερμότητα. (iii) Επίσης παρατηρούνται θερμικές απώλειες εφόσον υπάρχει διαφορά στις θερμικές ιδιότητες των φάσεων. Συγκεκριμένα παρουσία τασικού κύματος, η θερμοκρασία των σωματιδίων αυξομειώνεται σε σχέση με του υγρού λόγω αυτών των διαφορών. Η μεταβολή θερμοκρασίας προκαλεί ροή θερμότητας από το σωματίδιο προς το περιβάλλον του με αποτέλεσμα τη μείωση του εύρους του παλμού. (iv) Τέλος, άλλος σημαντικός μηχανισμός εξασθένισης είναι η σκέδαση κατά την οποία, μετά την πρόσκρουση του κύματος στο σωματίδιο, ένα μέρος της ενέργειας εκτρέπεται από την αρχική διεύθυνση και άρα δεν ανιχνεύεται από τον αισθητήρα-δέκτη (σε μετρήσεις απ' ευθείας διάδοσης, through transmission). Η σκέδαση έχει μικρή συνεισφορά όταν το μήκος κύματος είναι μεγάλο σε σχέση με το σκεδαστή, αλλά είναι η κύρια πηγή απωλειών όσο αυτός αυξάνει και γίνεται συγκρίσιμος με το μήκος κύματος.

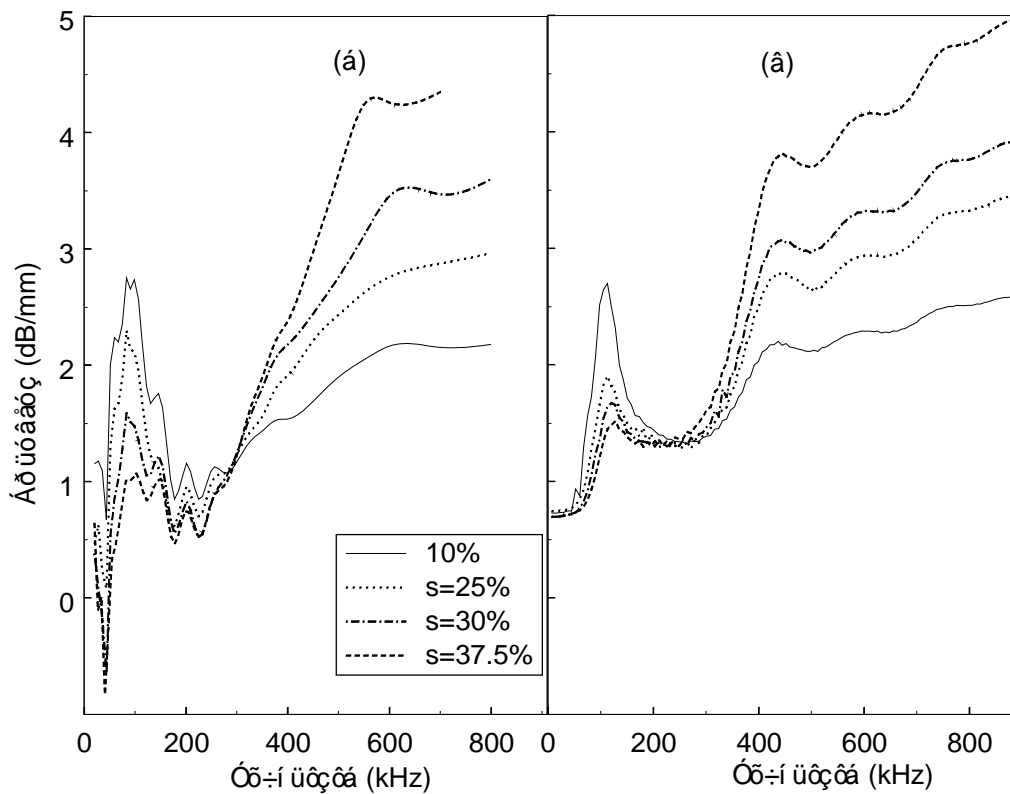
6.6.1 Επίδραση περιεκτικότητας άμμου

Ακολουθώντας την ως άνω διαδικασία και τις σχέσεις (6.7-6.14) προκύπτουν καμπύλες εξασθένισης – συχνότητας εφόσον είναι γνωστή η σύσταση και μόνο του κονιάματος. Τυπικές περιπτώσεις παρατίθενται στα Σχ.6.15 και 6.16 όπου γίνεται σύγκριση με αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες. Στο πρώτο (Σχ.615(α)), παρουσιάζεται η πειραματική

εξασθένηση συναρτήσει της συχνότητας, για κονίαμα $w/c=0.525$ και διάφορα ποσοστά άμμου. Οι αντίστοιχες θεωρητικές προβλέψεις φαίνονται στο Σχ.6.15(β). Το Σχ.6.16 αφορά στην περίπτωση κονιάματος με $w/c=0.54$ και όπως φαίνεται η συμφωνία πειραματικών και θεωρητικών καμπυλών είναι πολύ καλή.



Σχ.6.15. Επίδραση ποσοστού άμμου στην εξασθένηση σε υλικό με $w/c=0.525$, (α) πειραματικές και (β) θεωρητικές καμπύλες.



Σχ.6.16. Επίδραση ποσοστού άμμου στην εξασθένηση σε υλικό με $w/c=0.54$, (α) πειραματικές και (β) θεωρητικές καμπύλες.

Όπως φαίνεται, το ποσοστό εγκλεισμάτων κυριαρχεί στη συμπεριφορά εξασθένησης για υψηλές συχνότητες μέσω σκέδασης, ενώ σε χαμηλότερες μέσω της διατμητικής ενίσχυσης που προσδίδει αποδυναμώνει τη σκεδαστική επίδραση των φυσαλίδων και ως εκ τούτου μειώνει την εξασθένηση.

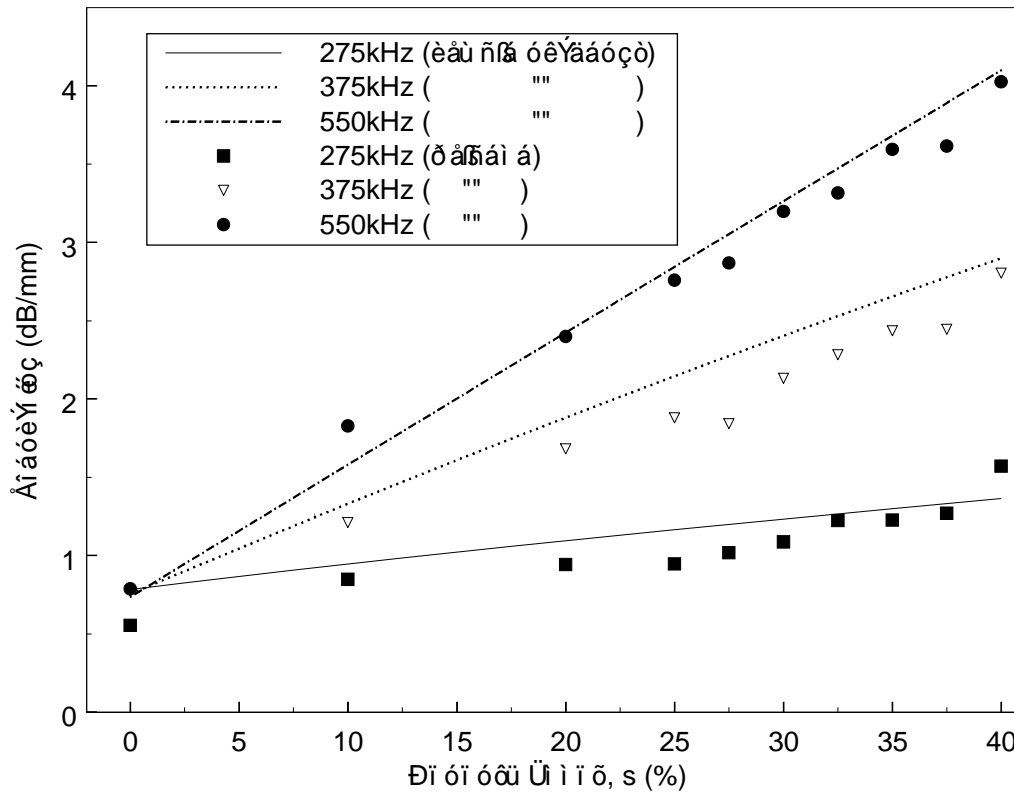
Γενικά το μέτρο διάτμησης του συνολικού υλικού που απαιτείται για τη σωστή προσέγγιση των πειραμάτων, ξεκινά από μια τιμή περίπου 50MPa για τσιμεντόπαστα και καταλήγει περίπου μια τάξη μεγέθους υψηλότερο για κονίαμα υψηλής περιεκτικότητας σε άμμο. Παρότι η τιμή του μέτρου διάτμησης της μήτρας δεν έχει ουσιαστική επίδραση στην εξασθένηση του κύματος στην άμμο (υψηλές συχνότητες), ορίζει την εξασθένηση στις φυσαλίδες (χαμηλές συχνότητες) με τρόπο που προσεγγίζει ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές.

Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι αφού δεν υπήρχε πληροφορία για την περιεκτικότητα αέρα των νωπών κονιαμάτων που εξετάστηκαν, το συνολικό ποσοστό φυσαλίδων που εφαρμόστηκε παρέμεινε σταθερό σε όλες τις περιπτώσεις. Ωστόσο, με την κατάλληλη τροποποίηση του μέτρου διάτμησης η επίδρασή του γίνεται αμελητέα, όπως φαίνεται, για υψηλής συγκέντρωσης άμμου κονίαμα. Η παραδοχή ότι το μέτρο διάτμησης νωπού κονιάματος είναι αρκετά χαμηλότερο από το μέτρο διόγκωσης έχει εκφραστεί πρόσφατα [32]. Στην ίδια δουλειά, βάσει πειραματικών τιμών ταχύτητας παλμού και εξασθένησης προκύπτουν τιμές ισοδύναμου μέτρου διάτμησης μεταξύ 10^7 (για υψηλό w/c) και 10^8 Pa (χαμηλό w/c), που βρίσκονται σε συμφωνία με τις τιμές που εφαρμόζονται στο μοντέλο που αναπτύσσεται σε αυτή τη διατριβή.

Η διάμετρος του κόκκου άμμου που εφαρμόζεται (2.8mm) είναι μία μέση τιμή και επελέγη για την κατάλληλη προσέγγιση των καμπυλών εξασθένησης, ούσα αποδεκτή αφού οι κόκκοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μεγέθους από 1mm έως 4mm. Σχετικά με τις φυσαλίδες, δεν εφαρμόστηκε μόνο μία μέση τιμή. Γενικά το μέγεθος των μη σκόπιμα εγκλωβισμένων φυσαλίδων καθορίζεται από το μέγεθος των αδρανών [34]. Γι' αυτό και το μέγεθος προσαρμόστηκε από τσιμεντόπαστα σε κονίαμα όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2. Όπως φαίνεται στα Σχ.6.14, 6.15 και 6.16 οι πειραματικές καμπύλες εξασθένησης παρουσιάζουν πολλαπλές κορυφές σε χαμηλές συχνότητες. Ως εκ τούτου, πολλαπλές κατανομές φυσαλίδων θεωρήθηκαν ώστε η προβλεπόμενη εξασθένηση του κονιάματος να παρουσιάζει ποιοτικά όμοια συμπεριφορά σε χαμηλές συχνότητες, χωρίς βεβαίως οι συγκεκριμένες κατανομές να είναι οι μόνες κατάλληλες.

Το μέγεθος των φυσαλίδων θεωρείται ότι έχει άμεση σχέση με τη συχνότητα συντονισμού, όπου παρατηρείται μέγιστη εξασθένηση [30]. Βεβαίως στα Σχ.6.14, 6.15 και 6.16 λόγω προφανώς και της ποικιλίας μεγεθών εγκλωβισμένων φυσαλίδων, δεν είναι δυνατός ο εντοπισμός πολύ συγκεκριμένης περιοχής συχνοτήτων συντονισμού, όπως συμβαίνει στο Σχ.6.13(α), όπου παρουσιάζεται θεωρητική καμπύλη εξασθένησης για φυσαλίδες μεγέθους 1mm σε υγρό.

Από τα παραπάνω σχήματα, καταδεικνύεται ότι η εξασθένιση υψηλών συχνοτήτων αυξάνει καθαρά σε σχέση με το ποσοστό άμμου. Αυτή η σχέση δεν απέχει πολύ από τη γραμμικότητα. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχ.6.17. Εκεί παρουσιάζεται η εξασθένιση σε σχέση με την περιεκτικότητα άμμου για υλικό με $w/c=0.45$ και διάφορες συχνότητες, άνω των 250kHz.

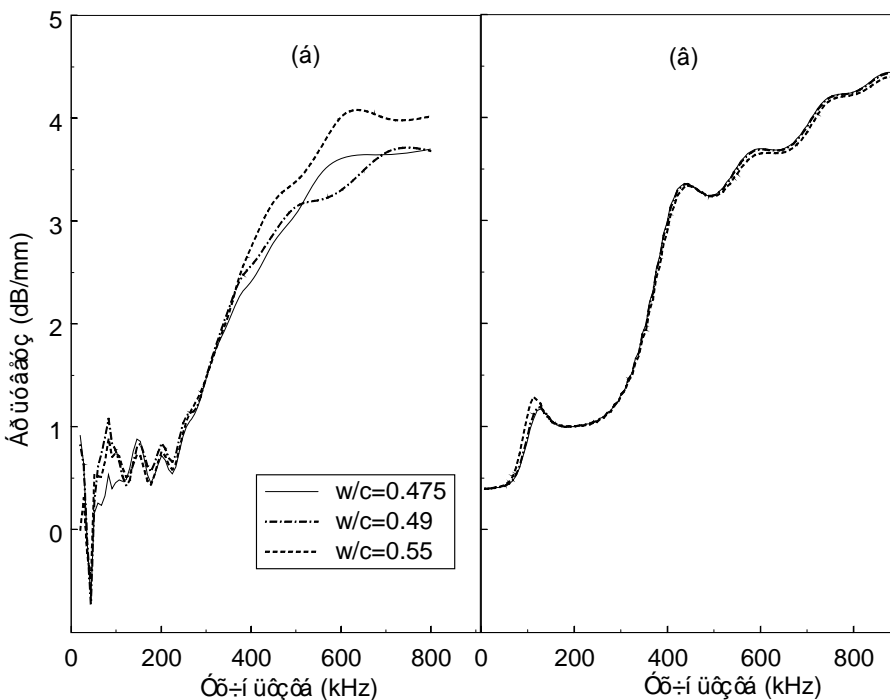


Σχ.6.17. Επίδραση ποσοστού άμμου κονιάματος $w/c=0.45$ στην εξασθένιση για διάφορες συχνότητες

Τα σημεία ανήκουν σε πειραματικές μετρήσεις εξασθένισης σε 10 διαφορετικές συστάσεις κονιάματος. Φαίνεται ότι αύξηση στην ποσότητα της άμμου έχει ως αποτέλεσμα περίπου ανάλογη αύξηση της εξασθένισης ακόμα και για περιεκτικότητα 40%. Αυτό είναι χαρακτηριστικό μηχανισμών απλής σκέδασης και όχι πολλαπλής που είναι συνήθως τυπική περίπτωση για αιωρήματα νερού, όπου παρατηρείται απόκλιση από την γραμμική συμπεριφορά ακόμα και σε συγκεντρώσεις χαμηλότερες του 10% [35,36]. Οι θεωρητικές καμπύλες προβλέπουν την γραμμική αυτή αύξηση υπερβάλλοντας ελαφρώς στις τιμές.

6.6.2 Επίδραση λόγου w/c

Το ποσοστό νερού δεν φαίνεται να είναι σημαντική παράμετρος για την εξασθένηση, καθώς οι καμπύλες εξασθένησης από δοκίμια με διαφορετικό w/c αλλά ίδιο ποσοστό άμμου είναι πολύ κοντά. Αυτό φαίνεται στο Σχ.6.18(α), όπου καμπύλες από υλικά με διαφορετικό w/c είναι σχεδόν ταυτόσημες, γεγονός που προβλέπεται και από τη θεωρία όπως φαίνεται στο Σχ.6.18(β). Οι τρεις καμπύλες του σχήματος, προέκυψαν προσαρμόζοντας τις τιμές της πυκνότητας, και των μέτρων διόγκωσης και διάτμησης βάσει των (6.15, 6.16, 6.18). Συγκεκριμένα η πυκνότητα του κονιάματος $w/c=0.475$ υπολογίστηκε σε 2151kg/m^3 ενώ του $w/c=0.55$ σε 2103kg/m^3 και οι αντίστοιχες τιμές του μέτρου διάτμησης είναι 469MPa και 406MPa . Αυτές οι μεταβολές ωστόσο, είναι ασήμαντες για να προκαλέσουν αξιόλογες μεταβολές στην εξασθένηση.

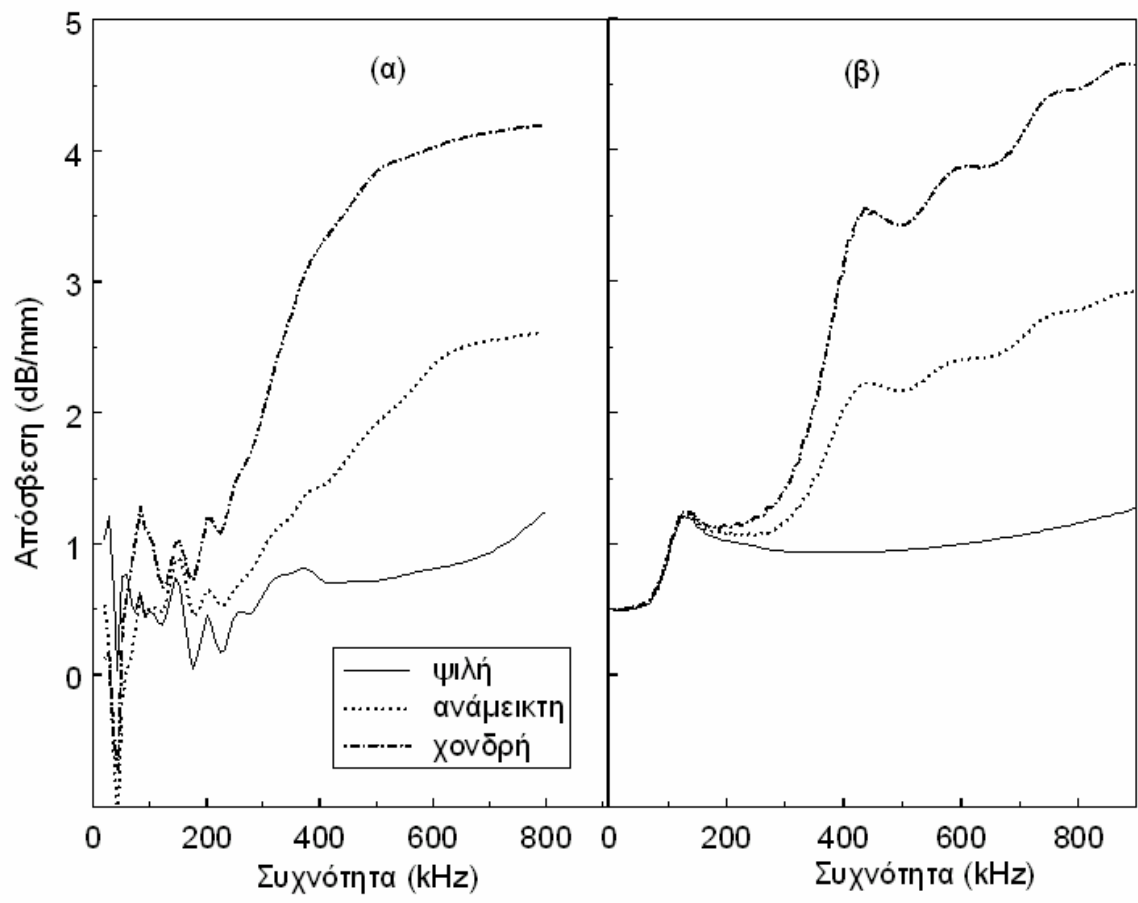


Σχ.6.18. Επίδραση w/c σε εξασθένηση κονιάματος με ποσοστό άμμου 35%. (α) πειραματικές και (β) θεωρητικές καμπύλες.

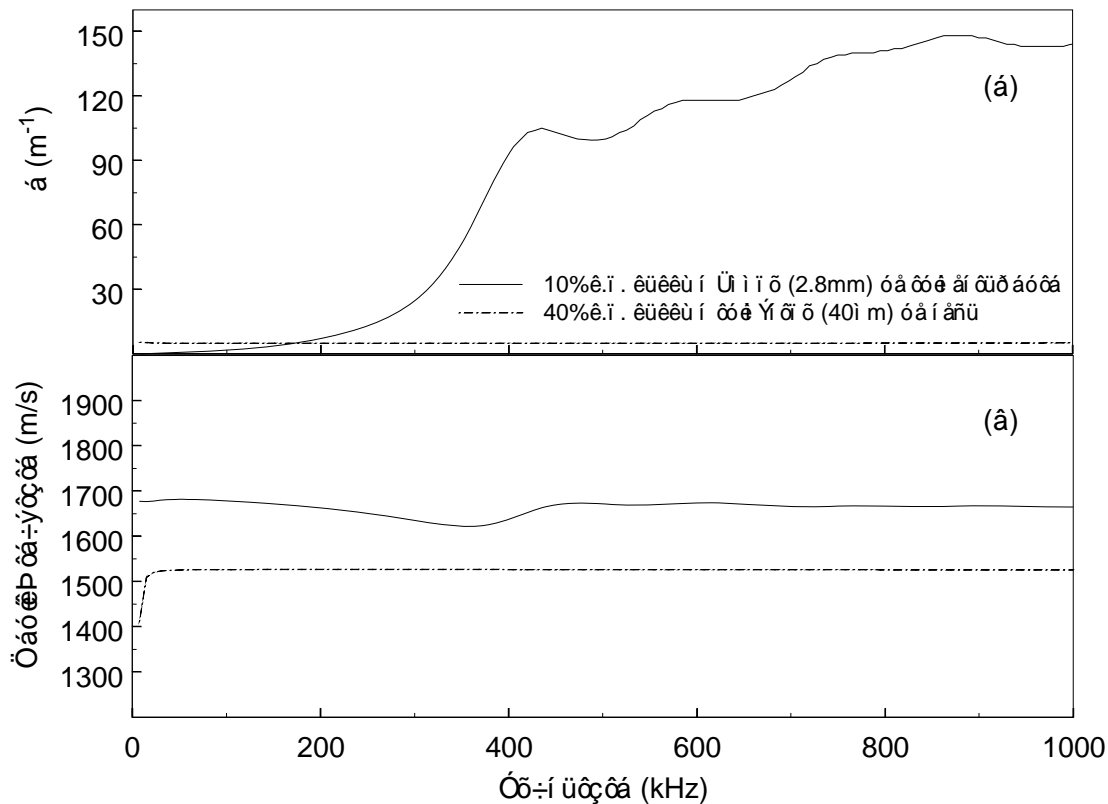
6.6.3 Επίδραση μεγέθους κόκκου άμμου

Η επίδραση του μεγέθους της άμμου φαίνεται στο Σχ.6.19(α) για πειραματικά και (β) για θεωρητικά αποτελέσματα. Χρησιμοποιώντας τούλι με άνοιγμα 1mm, δημιουργήθηκαν δύο κλάσματα άμμου εκατέρωθεν της τιμής 1mm. Το μέσο μέγεθος της χοντρόκοκκης άμμου, όπως αναφέρθηκε καθορίστηκε σε 2.8mm, με όμοιο τρόπο της ψιλής 0.4mm, ενώ για το αρχικό κλάσμα θεωρήθηκαν δύο ίσοι πληθυσμοί των παραπάνω μεγεθών. Ο λόγος w/c του υλικού είναι 0.55 ενώ το ποσοστό άμμου 37.5%. Είναι σαφές πόσο δραματικά επηρεάζει το μέγεθος την εξασθένηση, ειδικά για συχνότητες πάνω από 200kHz. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού η συμπεριφορά του μέσου ερμηνεύεται μέσω σκέδασης. Γι' αυτό, παρότι οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων για τις τρεις περιπτώσεις του Σχ.6.19 είναι ίδιες (αφού οι αναλογίες w/c και s είναι αμετάβλητες) το υλικό δεν συμπεριφέρεται ως ομογενές, με το μέγεθος κόκκου να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια της υπόλοιπης πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε το κλάσμα χονδρής άμμου για την πιο έντονη εκδήλωση των φαινομένων.

Όπως φάνηκε λοιπόν το μέγεθος των εγκλεισμάτων είναι πρωτεύουσας σημασίας στη σκέδαση. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η τσιμεντόπαστα θεωρήθηκε στο πλαίσιο της ανάλυσης αυτής το ομογενές μητρικό υλικό της άμμου. Το μέγεθος των κόκκων τσιμέντου είναι γενικά μικρότερο από 50μm. [34]. Άρα δεν μπορεί να θεωρηθεί υπεύθυνο για ισχυρή σκεδαστική δράση λόγω του ότι ακόμα και για την υψηλότερη συχνότητα που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή 1MHz, το μήκος κύματος (περίπου 1.5mm) είναι περίπου 30 φορές μεγαλύτερο από το μέγεθος του κόκκου. Ωστόσο, για του λόγου το αληθές, αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα σκέδασης σε αιώρημα 40% κ.ο. κόκκων τσιμέντου διαμέτρου 40μm σε νερό, που αντιστοιχεί σε τσιμεντόπαστα με w/c=0.50. Οι καμπύλες εξασθένησης και διασποράς φαίνονται στο Σχ.6.20(α) και (β) αντίστοιχα.



Σχ.6.19. Επίδραση μεγέθους κόκκου άμμου στην εξασθένηση κονιάματος, $w/c=0.55$, $s=37.5\%$



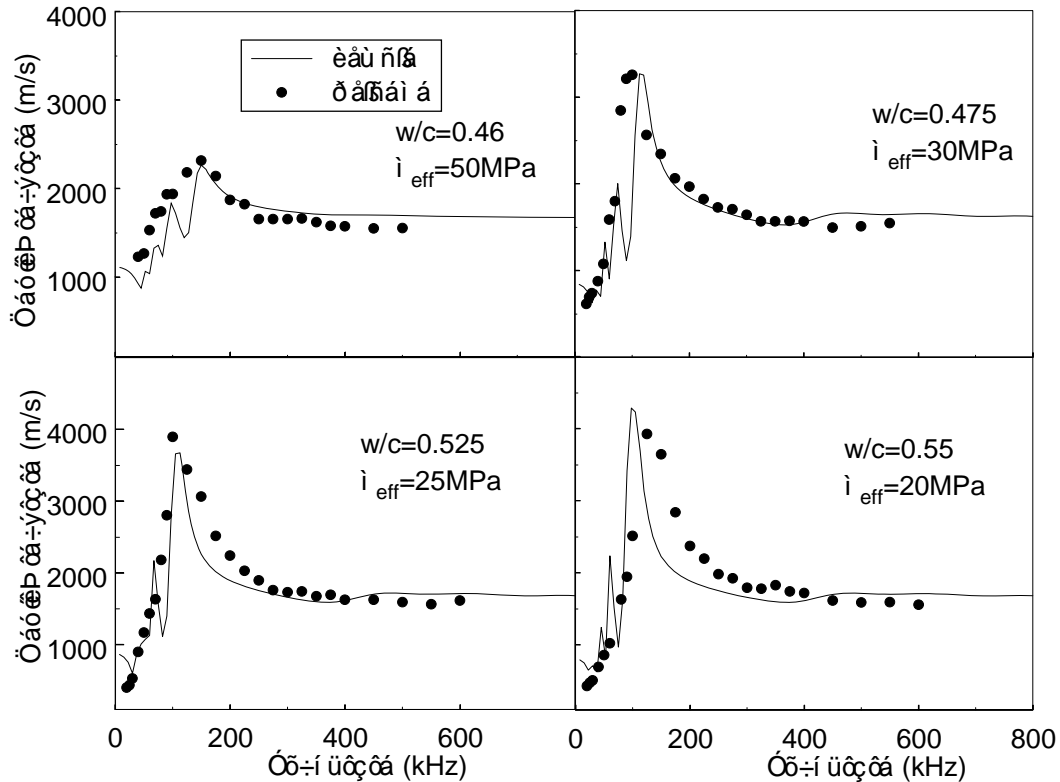
Σχ.6.20. Θεωρητικές καμπύλες σκεδαστικής εξασθένισης (α) και φασικής ταχύτητας (β) για κονίαμα και τσιμεντόπαστα

Ο συντελεστής εξασθένισης είναι αμελητέος σε σύγκριση με το συντελεστή εξασθένισης που παρουσιάζει αιώρημα μόλις 10% κ.ο. άμμου διαμέτρου 2.8mm σε τσιμεντόπαστα και για τις συχνότητες κάτω του 1MHz, που επίσης φαίνεται στο Σχ.6.20(α) ενώ ούτε η άμμος ούτε το τσιμέντο επιβάλλουν ισχυρή διασπορά σε σύγκριση με τη διασπορά όταν είναι παρούσες φυσαλίδες. Επομένως, οι κόκκοι τσιμέντου είναι ανεπαρκείς για ισχυρή σκεδαστική αλληλεπίδραση σε αυτές τις συχνότητες. Μία βέβαιη επίδρασή τους σχετίζεται με την πυκνότητα και λαμβάνεται υπ' όψη καθώς η πυκνότητα του τσιμέντου είναι $3150kg/m^3$ και η αναλογία νερού/τσιμέντου μεταβάλλει ως ένα βαθμό την πυκνότητα του κονιάματος.

6.7 Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής φασικής ταχύτητας

Πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με τη διασπορά φασικής ταχύτητας νωπού κονιάματος παρουσιάζονται στο Σχ.6.21. Οι τέσσερις περιπτώσεις αφορούν σε κονίαμα με ποσοστό άμμου 30% και w/c που ποικίλει από 0.46 έως 0.55. Η τιμή της φασικής ταχύτητας ξεκινά κάτω από 1000m/s για τα 20kHz φτάνοντας σε μέγιστο για συχνότητες ανάμεσα στα 100 και 200kHz το οποίο είναι περίπου 2300m/s για κονίαμα w/c=0.46 και σχεδόν 4000m/s για w/c=0.55. Για υψηλότερες συχνότητες, πάνω από 300kHz, δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις μεταξύ των καμπυλών και όλα τα κονιάματα, ανεξαρτήτως w/c παρουσιάζουν φασικές ταχύτητες περίπου 1650m/s μέχρι την υψηλότερη συχνότητα που ελέγχθηκε. Επομένως, από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η περιεκτικότητα σε νερό έχει σαφή επίδραση σε μεσαίες συχνότητες, γύρω στα 150kHz, όπου υψηλός w/c οδηγεί σε υψηλή φασική ταχύτητα. Όπως έχει αναφερθεί, υψηλός λόγος w/c έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη πυκνότητα και υποβάθμιση των φυσικών ιδιοτήτων του κονιάματος που από σκεδαστικής άποψης είναι το μητρικό υλικό των φουσαλίδων. Η αύξηση του ποσοστού νερού, συνοδεύεται από αύξηση της πειραματικής φασικής ταχύτητας στην περιοχή των 150kHz, βλ. Σχ.6.21.

Οι θεωρητικές προβλέψεις διασποράς προκύπτουν με τρόπο αντίστοιχο αυτών της εξασθένισης, λύνοντας το ίδιο πρόβλημα και ακολουθώντας την αλληλουχία των σχέσεων (6.7-6.14). Η μόνη διαφορά έγκειται στην επιλογή του ισοδύναμου μέτρου διάτμησης. Στην περίπτωση της φασικής ταχύτητας δεν χρησιμοποιήθηκε η σχέση (6.19) αφού για την προσέγγιση των πειραματικών καμπυλών είναι γενικά απαραίτητες χαμηλότερες τιμές του μ . Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχ.6.21, οι τιμές που εφαρμόζονται είναι από 50MPa για w/c=0.46 μέχρι 20MPa για w/c=0.55.



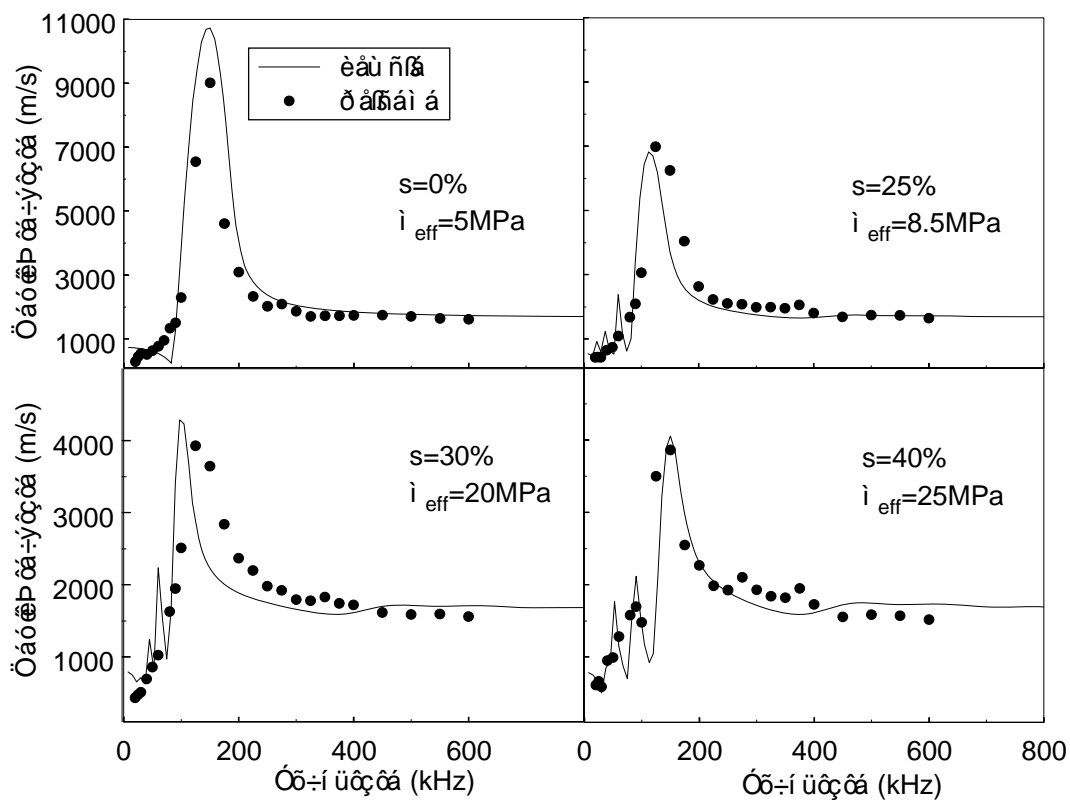
Σχ.6.21. Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών καμπυλών διασποράς φασικής ταχύτητας κονιάματος για διάφορους w/c και $s=30\%$.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ο λόγος w/c επηρεάζει την τιμή της φασικής ταχύτητας κυρίως στην περιοχή γύρω από τα 150kHz, όπου όσο υψηλότερος είναι, λόγω χαμηλότερης ενίσχυσης του υλικού, η επίδραση των φυσαλίδων παρουσιάζεται αυξημένη στην κυματική διάδοση οδηγώντας σε υψηλές τιμές φασικής ταχύτητας.

Η επίδραση του ποσοστού άμμου είναι επίσης σημαντική, βλ. Σχ.6.22. Για όλα τα δοκίμια του σχήματος $w/c=0.55$, ενώ το ποσοστό άμμου μεταβάλλεται από 0% έως 40%. Διαπιστώνεται ότι η αύξηση του ποσοστού άμμου έχει το αντίστροφο αποτέλεσμα της προσθήκης νερού. Όσο πιο ενισχυμένο το κονίαμα, λόγω αύξησης της άμμου, τόσο μικρότερη διασπορά παρουσιάζει, αφού η μέγιστη φασική ταχύτητα της τσιμεντόπαστας μετράται στα 150kHz πάνω από 9000m/s, ενώ για πλούσια σε άμμο μείγματα (30% and 40% κ.ο.) και την ίδια συχνότητα, πέφτει κάτω από 4000m/s. Το μέτρο διάτμησης που

εφαρμόστηκε για τα θεωρητικά αποτελέσματα, μειώνεται από 25MPa για 40% άμμου σε 5MPa για τσιμεντόπαστα.

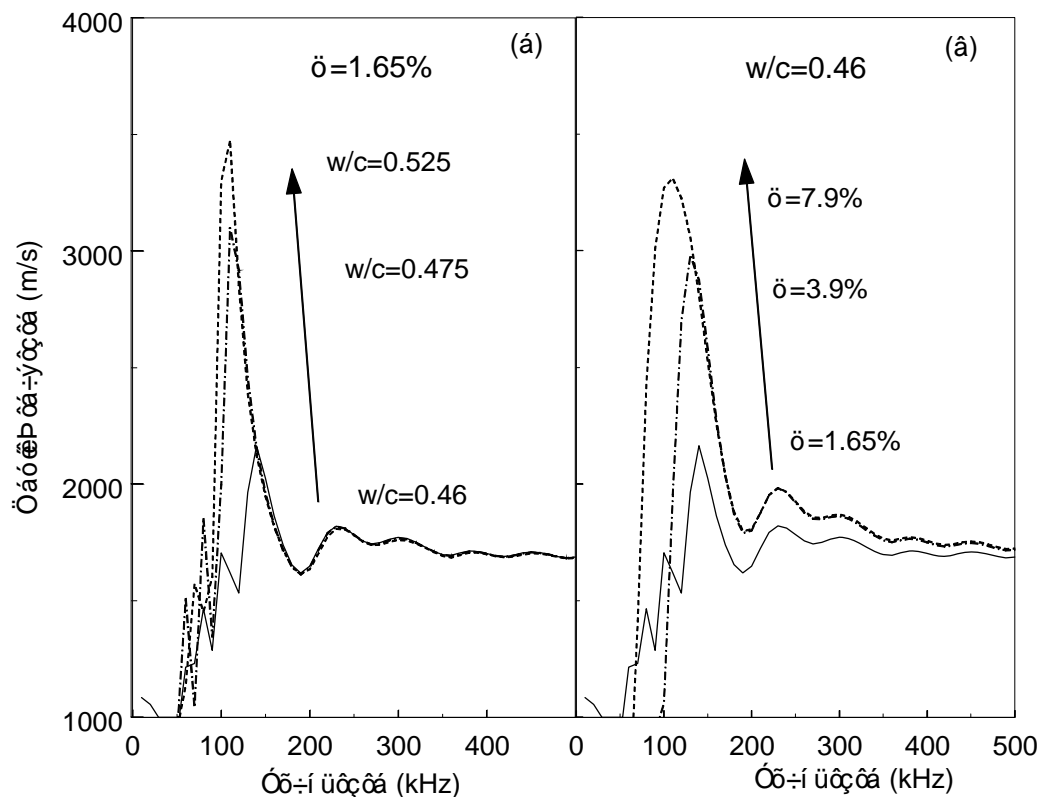
Παρότι στην περίπτωση της προσέγγισης της φασικής ταχύτητας η σύνδεση μεταξύ του μέτρου διάτμησης και της σύστασης δεν είναι γραμμική, όπως για την προσέγγιση της εξασθένισης, εξακολουθεί να υπάρχει εξάρτηση από την πυκνότητα με πιο απότομη μεταβολή ενώ οι τιμές που απαιτούνται είναι χαμηλότερες.



Σχ.6.22. Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών καμπυλών διασποράς φασικής ταχύτητας κονιάματος $w/c=0.55$ για διάφορα ποσοστά άμμου.

Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2, το ποσοστό αέρα θεωρήθηκε σταθερό και ίσο με 2.15% ελλείπει μετρήσεων της πραγματικής τιμής. Η σημασία της παράλληλης αυτής μέτρησης είναι μεγάλη καθώς θα επέτρεπε πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια σε ενδεχόμενη πρόβλεψη. Στο παρακάτω σχήμα (Σχ.6.23) παρατίθενται παραδείγματα θεωρητικών καμπυλών φασικής ταχύτητας για διαφορετικούς λόγους w/c , Σχ.6.23(a), και διαφορετικά

ποσοστά εγκλωβισμένου αέρα, ϕ , Σχ.6.23(β). Είναι σαφές ότι σε σχέση με την περίπτωση κονιάματος $w/c=0.46$ και $\phi=1.65\%$ που είναι σταθερή για τα δύο διαγράμματα, αύξηση της φασικής ταχύτητας στην περιοχή 100-200kHz, μπορεί να συμβεί είτε με αύξηση του λόγου w/c (μείωση πυκνότητας και διατμητικής δυσκαμψίας) είτε με αύξηση του ποσοστού αέρα, ϕ , που περιέχεται στο υλικό. Αυτό δεν επιτρέπει με ασφάλεια την εξαγωγή συμπερασμάτων για την τιμή του w/c από μέτρηση της φασικής ταχύτητας αφού η όποια διαφοροποίηση μπορεί να οφείλεται και σε διαφορετικό ποσοστό αέρα. Με συγκεκριμένη όμως τιμή περιεχόμενου αέρα, που μπορεί να παρέχεται από μέτρηση σε λίγα λεπτά, οι όποιες μεταβολές στην ταχύτητα αποδίδονται μόνο στο w/c , όπως φαίνεται στο Σχ.6.23(α).

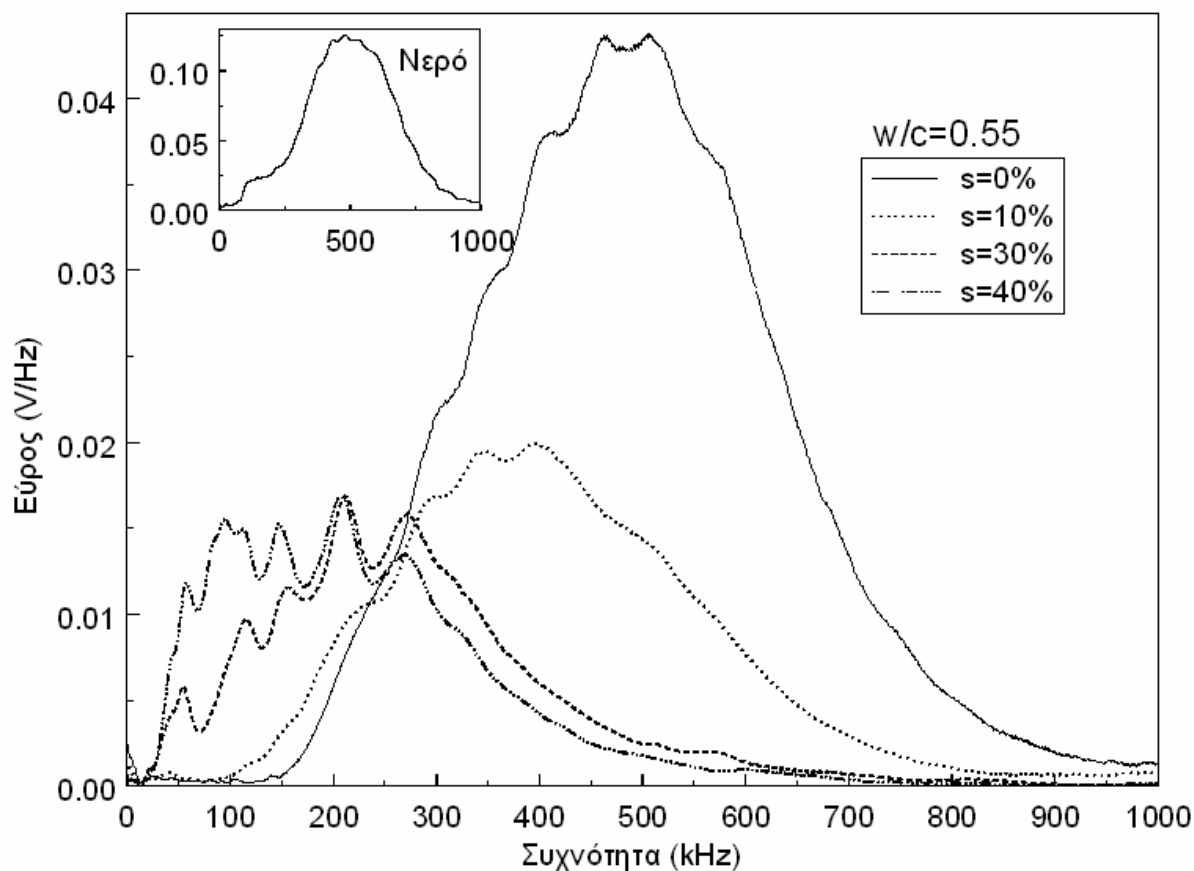


Σχ.6.23. Θεωρητικές καμπύλες φασικής ταχύτητας κονιάματος για διαφορετικό (α) λόγο w/c και (β) ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα.

6.8 Χρήση διέγερσης σάρωσης

Σε προηγούμενη παράγραφο περιγράφηκαν πειραματικά αποτελέσματα εξασθένισης. Αυτά προέκυψαν από την τον μετασχηματισμό Fourier απόκρισης του υλικού σε σήμα σάρωσης

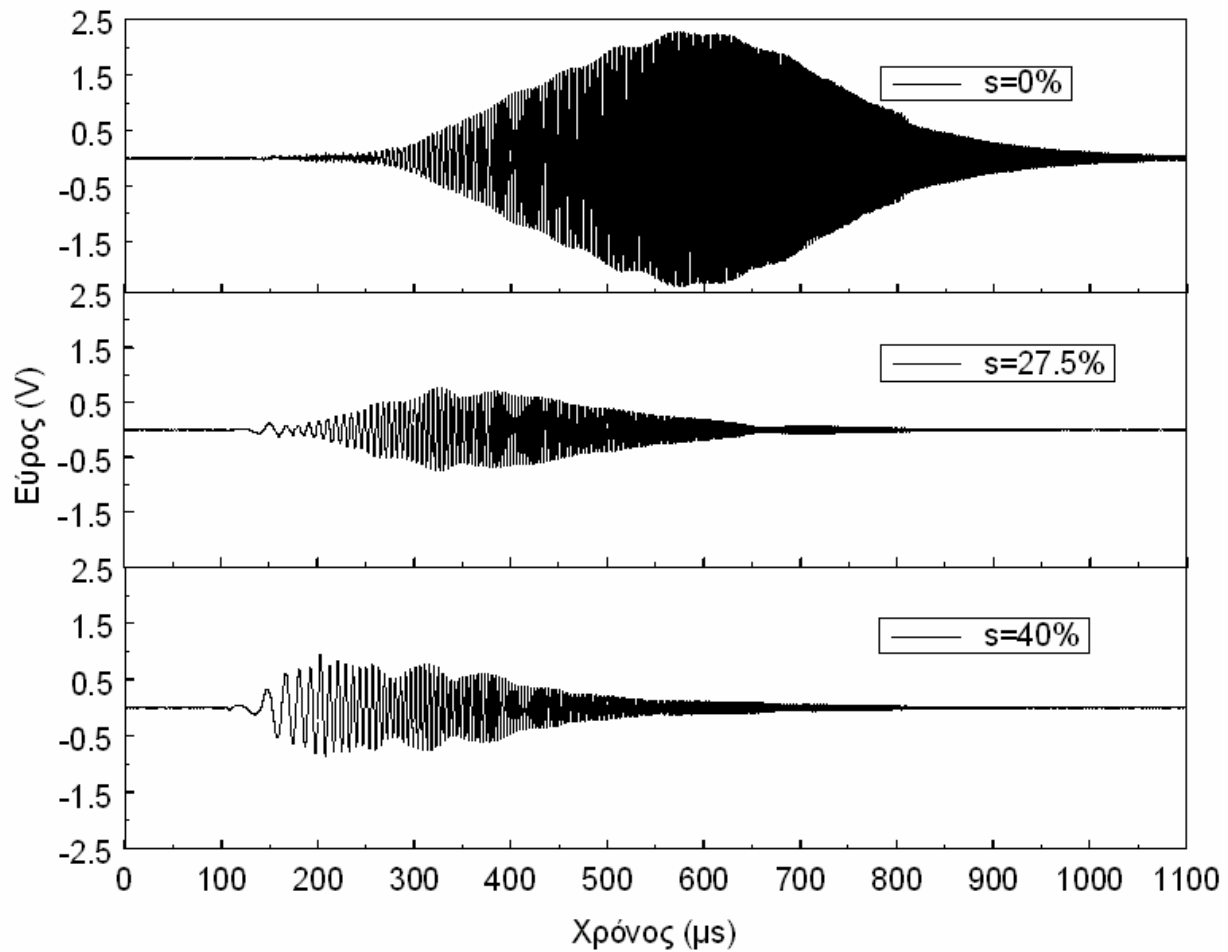
10kHz-1MHz σε σχέση με αντίστοιχη απόκριση νερού. Τυπικά φάσματα αυτών των αποκρίσεων φαίνονται στο Σχ.6.24, από υλικά με μεταβαλλόμενο ποσοστό άμμου. Είναι εμφανής η μετατόπιση προς τις χαμηλές συχνότητες με αύξηση του ποσοστού άμμου, η οποία είναι και ο λόγος για τις διαφορετικές καμπύλες εξασθένισης που παρατηρήθηκαν. Επίσης, γενικά υπάρχει μείωση στην συνολική ενέργεια. Μπορεί να λεχθεί ότι η άμμος δρα ως φίλτρο αποκόπτοντας συχνότητες άνω των 300kHz, ενώ διευκολύνει τη διάδοση χαμηλότερων συχνοτήτων, κάτω από 200kHz. Στο μικρό εμπεριεχόμενο διάγραμμα του Σχ.6.24 παρατίθεται η απόκριση του νερού που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της εξασθένισης.



Σχ.6.24. Επίδραση ποσοστού άμμου στο μετασχηματισμό Fourier αποκρίσεων σημάτων σάρωσης σε κονίαμα.

Η ισχυρή επίδραση της άμμου είναι εξίσου εμφανής και στο πεδίο του χρόνου, όπως φαίνεται στο Σχ.6.25. Εκεί παρουσιάζονται 3 κυματομορφές υλικού με $w/c=0.55$ και

διαφορετικό s . Είναι σαφές και σε αυτήν την περίπτωση η μετατόπιση του όγκου της κυματομορφής σε μικρότερους χρόνους, αφού το σήμα αναπτύσσεται αλλά και αποσβεννύεται ταχύτερα όσο αυξάνει η άμμος.



Σχ.6.25. Επίδραση ποσοστού άμμου στην απόκριση σε σήμα σάρωσης σε κονίαμα $w/c=0.55$.

Είναι ενδιαφέρον ότι αντίστοιχα φαινόμενα μεταβολής του περιεχομένου του σήματος, ορατά τόσο στο πεδίο συχνοτήτων όσο και σε αυτό του χρόνου, έχουν παρατηρηθεί έντονα και σε σκληρυμένο υλικό [37] έχοντας ως πηγή τη σκέδαση στην ανομοιογενή φύση του υλικού.

Με σκοπό το χαρακτηρισμό του υλικού, σκόπιμο είναι να προσδιορισθεί η σχέση ορισμένων παραμέτρων των σημάτων που εκφράζουν τη μετατόπιση του περιεχομένου συχνοτήτων ή

αλλιώς την αποδυνάμωση των υψηλών και ενδυνάμωση των χαμηλών συχνοτήτων με παραμέτρους της σύστασης. Υπάρχουν διάφορα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν άμεση εξάρτηση από την περιεκτικότητα σε άμμο. Μετά από εξέταση μεγάλου αριθμού σημάτων επελέγησαν πέντε. Συγκεκριμένα:

(i) Η κεντρική συχνότητα A_f που ορίζεται ως

$$A_f = \frac{\int f \cdot A(f)df}{\int A(f)df} \quad (6.19)$$

όπου f είναι η συχνότητα και $A(f)$ είναι ο μετασχηματισμός Fourier του σήματος. (ii) Η κεντρική συχνότητα από 0-1MHz, A_{f1} , εστιάζοντας στο σκοπίμως εισαγόμενο σήμα με όμοιο ορισμό. Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι παρά την κεντρική συχνότητα των αισθητήρων και των φίλτρων του καταγραφικού, υπάρχει ένα ποσοστό ενέργειας που κατανέμεται σε συχνότητες έως και 2MHz για τσιμεντόπαστα, ενώ αυτό μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού άμμου. Για να ληφθεί υπ' όψη και αυτή η πληροφορία χρησιμοποιήθηκε παραπάνω και το κέντρο βάρους όλου του φάσματος.

(iii) Ο κεντρικός χρόνος A_t :

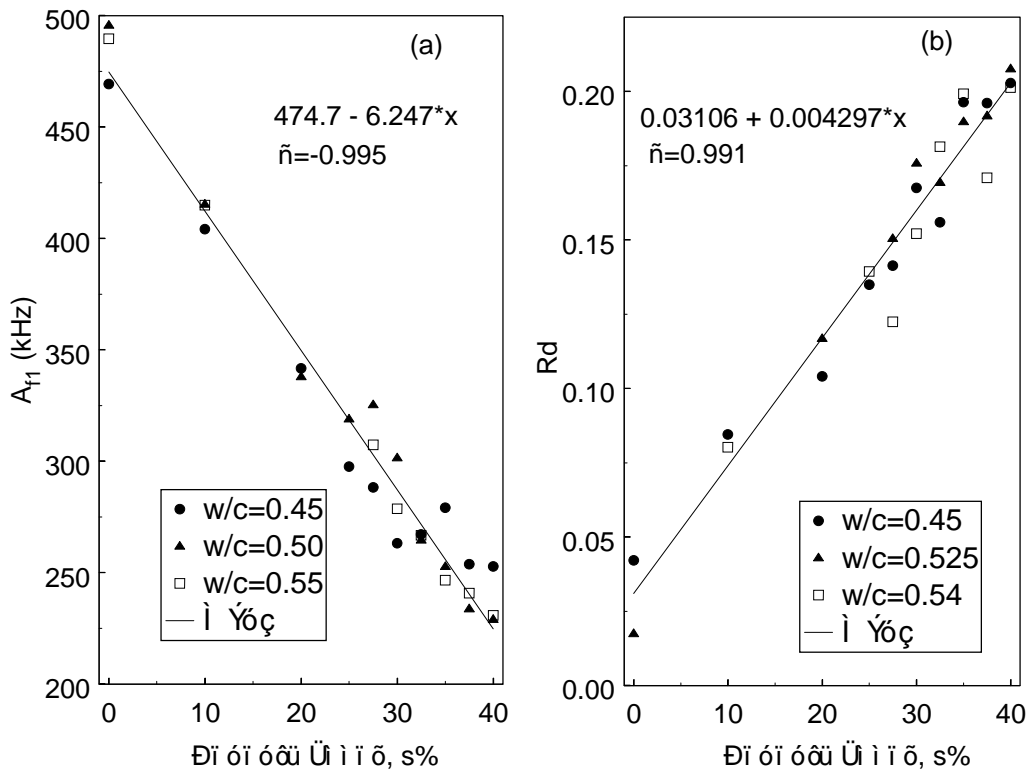
$$A_t = \frac{\int t \cdot T(t)dt}{\int T(t)dt} \quad (6.20)$$

όπου t είναι ο χρόνος και $T(t)$ το ανορθωμένο σήμα.

Τέλος, (iv) ο λόγος της ενέργειας της ζώνης 130-170kHz και (v) 170-230kHz προς τη συνολική ενέργεια μέχρι το 1MHz, όπως αυτή ορίζεται από το εμβαδό κάτω από την καμπύλη, και συμβολίζονται R_c και R_d αντίστοιχα. Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά παρουσιάζουν ισχυρή γραμμική συσχέτιση με το s και επελέγησαν μεταξύ άλλων που εμφανίζουν περίπου την ίδια συμπεριφορά λόγω της πιο ισχυρής αυτής συσχέτισης.

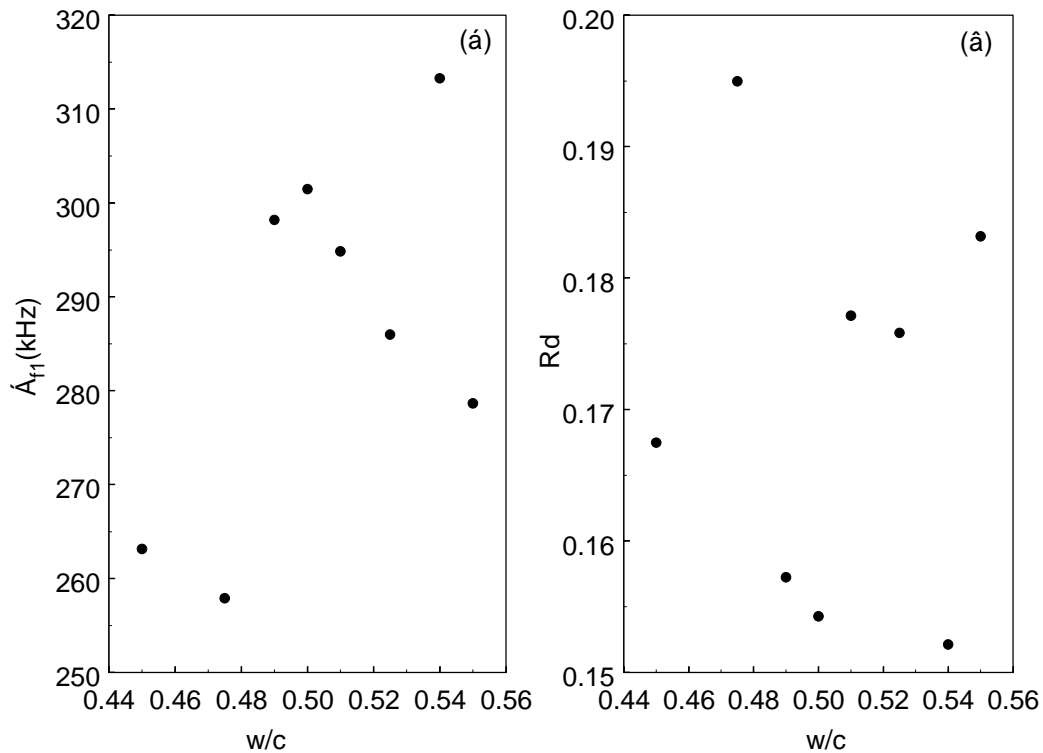
Εξετάστηκαν οι ενέργειες και άλλων ζωνών χαμηλής συχνότητας που έδειξαν όμοια συμπεριφορά.

Στο Σχ.6.26(α) παρουσιάζεται η συσχέτιση του A_{fl} με την κ.ο. περιεκτικότητα σε άμμο. Φαίνεται ότι ανεξάρτητα από το λόγο w/c των δοκιμών η κεντρική συχνότητα ακολουθεί την ίδια τάση μείωσης με το s . Όμοια, είναι η περίπτωση του Σχ.6.26(β) όπου φαίνεται η μεταβολή του R_d σε σχέση με το ποσοστό άμμου. Κατά συνέπεια, κάθε χαρακτηριστικό ακολουθεί μια καμπύλη, γραμμικά, θετικά ή αρνητικά συσχετισμένη με το s και ανεξάρτητη του w/c .



Σχ.6.26. Συσχέτιση χαρακτηριστικού A_{fl} (α) και R_d (β) με το ποσοστό άμμου.

Πράγματι στο Σχ.6.27, οι ίδιες παράμετροι παρουσιάζονται ως προς το w/c . Και στις δύο περιπτώσεις (α) και (β) A_{fl} και R_d αντίστοιχα δεν παρουσιάζουν καμία συσχέτιση με το w/c .



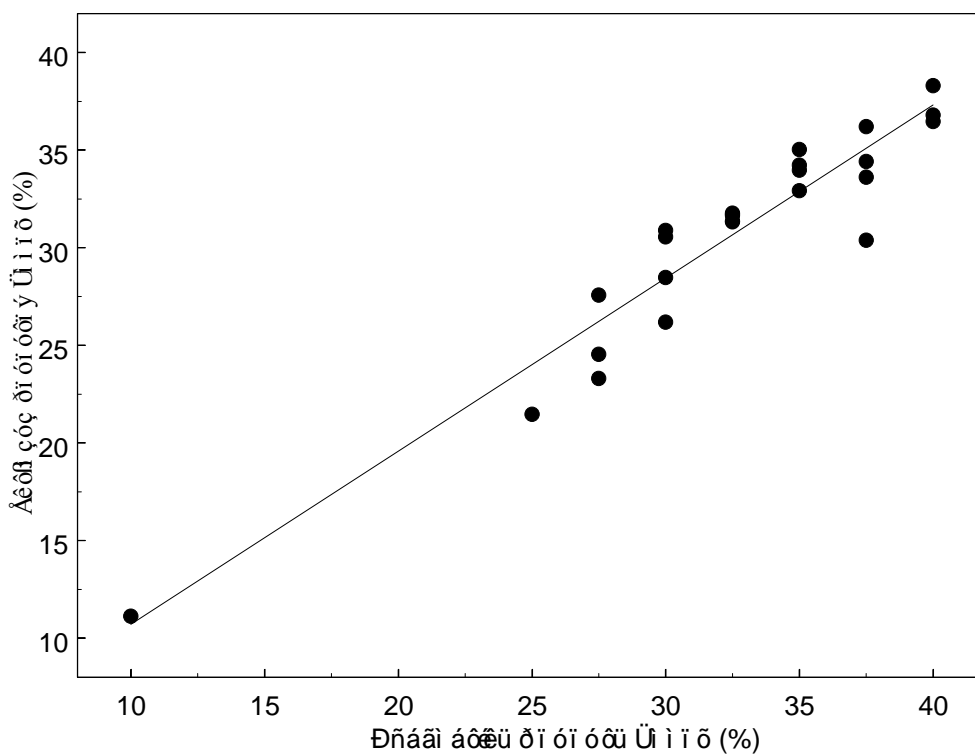
Σχ.6.27. Συσχέτιση χαρακτηριστικών A_{f1} (α) και R_d (β) με w/c για κονίαμα με $s=30\%$.

6.8.1 Χαρακτηρισμός του υλικού ως προς το ποσοστό άμμου και w/c

Χρησιμοποιώντας τις γραμμικές σχέσεις μεταξύ παραμέτρων των σημάτων και s , η ανάλυση ενός σήματος και ο υπολογισμός των επιλεγμένων παραμέτρων του, θεωρήθηκε ότι μπορεί να οδηγήσει σε αξιόπιστο προσδιορισμό του ποσοστού άμμου. Οι συσχετίσεις των παραπάνω χαρακτηριστικών με το s έγιναν με βάση τα πρώτα 40 δοκίμια. Για να ελεγχθεί η επιτυχία του χαρακτηρισμού αυτών των παραμέτρων εφαρμόστηκε σε ένα αριθμό άλλων δοκιμίων, για την ακρίβεια 23 και ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

Για κάθε δοκίμιο τρεις παλμοί σάρωσης καταγράφηκαν αφού ενδιάμεσα αναδευόταν το υλικό. Μετά τον υπολογισμό των πέντε παραμέτρων για κάθε σήμα και μέσω της γραμμικής σχέσης με το ποσοστό άμμου, υπολογίστηκε και το τελευταίο. Επομένως συνολικά προέκυψαν 15 τιμές για το s . Από αυτές, αρχικά όσες απείχαν πάνω από μία τυπική απόκλιση από το μέσο όρο απορρίφθηκαν και ο μέσος όρος των υπολοίπων θεωρείται το ποσοστό

άμμου. Ωστόσο, προσεκτική εξέταση φανέρωσε ότι για τον πληθυσμό της παρούσας έρευνας, το μέσο λάθος μειώνεται αν απορριφθούν οι δύο μέγιστες και οι δύο ελάχιστες τιμές, ανεξαρτήτως τοποθέτησής τους σε σχέση με το μέσο όρο των 15. Κατά συνέπεια, το προβλεπόμενο ποσοστό άμμου υπολογίστηκε ως η μέση τιμή των 11 ενδιάμεσων τιμών του s , που προκύπτουν από ξεχωριστό υπολογισμό των παραμέτρων των τριών σημάτων. Στο Σχ.6.28, μπορεί κανείς να δει τη συσχέτιση μεταξύ των προβλέψεων και των πραγματικών τιμών του s , χρησιμοποιώντας την παραπάνω προσέγγιση. Οι αποκλίσεις δεν είναι μεγάλες οδηγώντας σε ένα μέσο λάθος 3.69% σε απόλυτη τιμή, δηλαδή για παράδειγμα ένα πραγματικό ποσοστό 30%, τυπικά θα προβλεφθεί ως 31.1% ή 28.9%. Η παραπάνω ακρίβεια μπορεί να χαρακτηριστεί ικανοποιητική για την εκτίμηση της άμμου.



Σχ.6.28. Συσχέτιση προβλέψεων περιεκτικότητας άμμου με την πραγματική.

Καθώς, όπως έχει αναφερθεί, δεν παρατηρείται άμεση σχέση μεταξύ του λόγου w/c και κυματικών χαρακτηριστικών, θεωρήθηκε ότι το περιεχόμενο νερού μπορεί να υπολογιστεί βάσει της γνώσης των υπολοίπων συστατικών. Πράγματι, χρησιμοποιώντας την τιμή του

ποσοστού άμμου όπως υπολογίστηκε παραπάνω και δεδομένου του λόγου αδρανών/τσιμέντου, a/c , που είναι αναλογία του μείγματος που παρέχεται από τον παρασκευαστή, ο λόγος w/c μπορεί να υπολογισθεί. Η ακόλουθη σχέση μπορεί να εξαχθεί εύκολα θεωρώντας την κ.ο. περιεκτικότητα άμμου, s , ως τον όγκο αυτής, V_a , διαιρεμένο με το συνολικό όγκο, άθροισμα των όγκων άμμου, τσιμέντου, V_c , και νερού, V_w . Αφού εκφραστούν οι όγκοι συναρτήσει πυκνότητας και μάζας η σχέση διαιρείται με τη μάζα του τσιμέντου c , οπότε έχουμε:

$$s = \frac{V_a}{V_c + V_a + V_w} = \frac{\frac{a}{\rho_a}}{\frac{c}{\rho_c} + \frac{a}{\rho_a} + w} \xrightarrow{1/c} \quad (6.21)$$

$$s = \frac{\frac{a}{c \cdot \rho_a}}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a}{c \cdot \rho_a} + \frac{w}{c}} \Rightarrow \frac{w}{c} = \frac{a}{c \cdot \rho_a} \cdot \left(\frac{1}{s} - 1 \right) - \frac{1}{\rho_c}$$

Οι πυκνότητες των συστατικών μπορούν να είναι γνωστές σε κάθε περίπτωση: οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τους εδώ υπολογισμούς είναι $\rho_a=2690\text{kg/m}^3$ (άμμος) και $\rho_c=3150\text{kg/m}^3$ (τσιμέντο). Η πυκνότητα του νερού θεωρείται 1000kg/m^3 . Χρησιμοποιώντας την (6.21), προκύπτουν προβλέψεις w/c για τα δοκίμια ελέγχου, με βάση τα υπόλοιπα συστατικά και τις πυκνότητες των επιμέρους υλικών.

Ο Πίνακας 6.3 περιέχει τα αποτελέσματα με την εξαίρεση κάποιων περιπτώσεων για τις οποίες υπήρχαν αμφιβολίες για την αξιοπιστία του σήματος. Από τα αποτελέσματα αυτά φαίνεται ότι ο λόγος w/c των μισών δοκιμίων προβλέπεται με λάθος 5% ή μικρότερο. Ωστόσο, υπάρχει και αριθμός περιπτώσεων οι οποίες παρουσιάζουν σφάλμα έως και 20%, αυξάνοντας το μέσο λάθος στον προσδιορισμό του w/c σε 7.57%. Θλιπτικές δοκιμές σε δοκίμια κονιάματος στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, δείχνουν μια μείωση αντοχής 28 ημερών από 47MPa σε 35MPa για αύξηση του w/c από 0.50 σε 0.65. Έχοντας το παραπάνω

υπ' όψη, το παρατηρούμενο σφάλμα, που σε απόλυτο λόγο w/c είναι 0.038 έχει περίπου μια επίδραση 3MPa στην αναμενόμενη αντοχή (7%). Στην πράξη μια απόκλιση 0.03 από τον επιθυμητό w/c, θα οδηγούσε σε σοβαρές σκέψεις σχετικά με την απόδοση και ακεραιότητα μιας κατασκευής [38] ενώ σύγχρονες μέθοδοι δεν εγγυώνται τυπικό λάθος μικρότερο του 0.037 [39]. Ως εκ τούτου, η παραπάνω μεθοδολογία, παρότι ενθαρρυντική, απαιτεί περαιτέρω βελτίωση για να αποκτήσει πρακτική σημασία.

Πίνακας 6.3. Αποτελέσματα της μεθοδολογίας πρόβλεψης w/c

Προβλεπόμενο w/c	Πραγματικό w/c	Σφάλμα %
0.541	0.54	0.22%
0.524	0.54	3.03%
0.625	0.54	15.77%
0.510	0.49	4.17%
0.480	0.49	1.98%
0.523	0.49	6.81%
0.491	0.49	0.17%
0.558	0.49	13.78%
0.604	0.51	18.41%
0.449	0.51	12.01%
0.495	0.51	2.87%
0.504	0.51	1.19%
0.580	0.51	13.65%
0.522	0.51	2.39%
0.482	0.525	8.14%
0.450	0.525	14.21%
0.527	0.525	0.45%
0.463	0.475	2.52%
0.433	0.475	8.92%
0.574	0.475	20.76%
Μέσο σφάλμα		7.57%

Κάτι που αναμένεται να βελτιώσει το ποσοστό επιτυχίας είναι ο συνυπολογισμός του ποσοστού εγκλωβισμένου αέρα, που οπωσδήποτε μεταβάλλει τις σχεδιασμένες αναλογίες. Αυτό είναι σίγουρα μια παράμετρος που ευθύνεται για μέρους του λάθους, καθώς το λάθος στον προσδιορισμό του w/c μπορεί να εξαιρεθεί εισάγοντας ένα συγκεκριμένο ποσοστό αέρα διαφορετικό για κάθε δοκίμιο στην (6.21). Αυτό έγινε με σκοπό την εκτίμηση της

συνεισφοράς του αέρα στην ακρίβεια της μεθοδολογίας. Η τιμή της κ.ο. περιεκτικότητας αέρα που χρειάζεται για να υπολογισθούν χωρίς λάθος οι λόγοι w/c όλων των δοκιμίων είναι κατά μέσο όρο 7%, που είναι λογική τιμή για το κονίαμα που παρασκευάστηκε στο εργαστήριο. Ωστόσο, μπορεί να θεωρηθεί ότι εφαρμόζοντας ικανοποιητική συμπύκνωση το ποσοστό αέρα θα ήταν ελάχιστο και οι προβλέψεις θα ήταν πιο ακριβείς. Μια εναλλακτική θα ήταν η χρήση μετρητών αέρα για ναπό σκυρόδεμα, που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Μια ακόμα παρατήρηση αφορά στην ακρίβεια της δεδομένης από τον παρασκευαστή τιμής του a/c. Σε οποιαδήποτε περίπτωση όμως, η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στην ακρίβεια πρέπει να εξεταστεί στην πράξη.

Βιβλιογραφία

- [1] M. I. Valic, Hydration of cementitious materials by pulse echo USWR Method, apparatus and application examples, *Cem Con Res* 2000; 30: 1633-1640
- [2] A. Boumiz, C. Vernet, F. Cohen Tenoudji, Mechanical Properties of Cement Pastes and Mortars at Early Ages, *Adv Cem Bas Mat* 1996; 3: 94-106
- [3] H. V. Reinhardt, C. U. Grosse, A. T. Herb, Ultrasonic monitoring of setting and hardening of cement mortar – A new device, *Materials and Structures* 2000; 33: 580-583
- [4] T. Chotard, N. Gimet-Breart, A. Smith, D. Fargeot, J.P. Bonnet, C. Gault, Application of ultrasonic testing to describe the hydration of calcium aluminate cement at the early age, *Cem Con Res* 2001; 31: 405-412
- [5] C.U. Grosse, H.W. Reinhardt, Fresh concrete monitored by ultrasound methods, *Otto Graf Journal* 2001; 12: 157-168
- [6] L. Arnaud, S. Thinet, Mechanical evolution of concrete during setting, *Materials and Structures* 2003; 36: 355-364
- [7] Cowan M. L., Beaty K., Page J. H., Zhengyou L., Sheng P., Group velocity of acoustic waves in strongly scattering media: Dependence on the volume fraction of scatterers, *Physical Review E*, 58 (5) 1998, 6626-6636
- [8] F. T. Schultz, Ultrasonic propagation in viscous liquid suspensions, M.S. Thesis, University of Virginia, 1995
- [9] L. W. Anson, R. C. Chivers, Ultrasonic propagation in suspensions-a comparison of a multiple scattering and effective medium approach, *J. Acoust. Soc. Am.* 85 (2) 1989
- [10] Mobley J., Waters K. R., Hall C. H., Marsh J. N., Hughes M. S., Brandenburger G. H., Miller J. G., Measurements and predictions of phase velocity and attenuation coefficient in suspensions of elastic microspheres, *J. Acoust. Soc. Am.*, 106 (2) 1999
- [11] A. H. Harker, J. A. G. Temple, Velocity and attenuation of ultrasound in suspensions of particles in fluids, *J Phys D: Appl Phys* 1988; 21:1576-1588
- [12] C. F. Ying, R. Truell, Scattering of a plane longitudinal wave by a spherical obstacle in an isotropically elastic solid, *Journal of Applied Physics*, 27 (9) (1956) 1086-1097
- [13] R. E. Challis, J. S. Tebbutt, A. K. Holmes, Equivalence between three scattering formulations for ultrasonic propagation in particulate mixtures, *J Phys D: Appl Phys* 31 (1998) 3481-3497

- [14] P. S. Epstein, R. R. Carhart, The absorption of sound in suspensions and emulsions. I. Water for in air, *J Acoust Soc Am* 1953; 25 (3): 553-565
- [15] J. R. Allegra, S. A. Hawley, Attenuation of Sound in Suspensions and Emulsions: Theory and Experiments, *J Acoust Soc Am* 1972; 51 (5): 1545-1564
- [16] Kupradze, Three dimensional problem of the mathematical theory of elasticity and thermoelasticity, North-Holland (1979)
- [17] Y. H. Pao, C. C. Mow, Scattering of plane compressional waves by a spherical obstacle, *Journal of Applied Physics*, 34 (3) 1963 493-499
- [18] D. G. Aggelis, D. Polyzos, An Iterative Effective Medium Approximation (IEMA) for Wave Dispersion and Attenuation Predictions in Particulate Composites, Suspensions and Emulsions, submitted, 2004
- [19] Holmes A. K., Challis R. E., Wedlock D. J., A wide bandwidth study of ultrasound velocity and attenuation in suspensions: Comparison of theory with experimental measurements, *Journal of Colloid and Interface Science*, 156, 1993, 261-268
- [20] A. S. Dukhin, P. J. Goetz, Acoustic spectroscopy for concentrated polydisperse colloids with low density contrast, *Langmuir* 1996, 12, 4998-5003
- [21] A. K. Hipp., G. Storti, M. Morbidelli, On multiple-particle effects in the acoustic characterization of colloidal dispersions, *J Phys D: Appl Phys* 32 (1999) 568-576
- [22] T. J. O'Neill, J. S. Tebbutt and R. E. Challis, Convergence criteria for scattering models of ultrasonic wave propagation in suspensions of particles, *IEEE T. Ultrason. Ferr.* 48(2) 419-424 (2001)
- [23] L. L. Foldy, The multiple scattering of waves, *Phys. Rev.* 67, 1945, 107-119
- [24] P. C. Waterman, R. Truell, Multiple scattering of waves, *J. Math. Phys.* 2, 1961, 512-537
- [25] D. J. McClements, Ultrasonic measurements in particle size analysis. In R. A. Meyers, editor. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2000
- [26] McClements D. J., Povey M. J. W., Ultrasonic velocity as a probe of emulsions and suspensions, *Advances in Colloid and Interface Science*, 27, 1987, 285-316
- [27] S. Popovics, J. S. Popovics, Ultrasonic Testing to Determine Water-Cement Ratio for Freshly Mixed Concrete, *Cement Concrete Aggr* 1998; 20 (2): 262-268
- [28] F. Peters, L. Petit, Propagation of ultrasound waves in concentrated suspensions, *Acustica-acta acustica*, 86 (2000) 838-846

- [29] S. Temkin, Attenuation and dispersion of sound in dilute suspensions of spherical particles, *J Acoust Soc Am* 2000; 108 (1): 126-146
- [30] C.M. Sayers, A. Dahlin, Propagation of ultrasound through hydrating cement pastes at early times, *Advn Cem Bas Mat* 1 (1993) 12-21
- [31] C. Boutin, L. Arnaud, Mechanical characterization of heterogeneous materials during setting, *Eur J Mech.A/Solids* 14 (4) (1995) 633-656
- [32] H. K. Kytömaa, Theory of sound propagation in suspensions: a guide to particle size and concentration characterization. *Powder Technology* 82 (1995) 115-121
- [33] L. Arnaud, S. Thinet, Mechanical evolution of concrete during setting, *Materials and Structures*, 36 (2003) 355-364
- [34] A.M. Neville, *Properties of concrete*, Longman, London, 1995
- [35] C. A Farrow, L. W. Anson, R. C. Chivers, Multiple scattering of ultrasound in suspensions, *Acustica* 81 (1995)
- [36] T. E. Gomez Alvarez-Arenas, L. Elvira Segura, E. Riera Franco de Sarabia, Characterization of suspensions of particles in water by an ultrasonic resonant cell, *Ultrasonics* 39 (2002) 715-727
- [37] M. Schickert, Ultrasonic NDE of concrete. In 2002 IEEE Ultrasonics symposium. New York: IEEE, 2002; 739-748
- [38] T. E. Nantung, Determination of Water-to-Cement Ratio In Fresh Concrete Using Microwave Oven, Evaluation of SHRP Product, Indiana Department of Transportation, 1998
- [39] A. Dowell, S. Cramer, Field Measurement of Water-Cement Ratio, Final Report, Wisconsin Highway Research Program #0092-45-16, Wisconsin Department of Transportation, 2002

7. Συμπεράσματα – προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η βασική ιδέα της διατριβής σχετίζεται με την ανάγκη βελτίωσης των υπαρχουσών μεθόδων ελέγχου του σκυροδέματος. Παρότι έλεγχοι διενεργούνται εδώ και πολλές δεκαετίες, μέχρι τώρα προσφέρουν μόνο ποιοτική εκτίμηση παραμέτρων που ενδιαφέρουν σχετικά με την απόδοση του υλικού. Αυτό συμβαίνει και στη στερεή φάση του υλικού, όπου η σύσταση και η αντοχή εκτιμώνται μόνο με σχετική ακρίβεια, αλλά και στη νωπή όπου μέχρι τώρα τα κριτήρια για την αποδοχή ή όχι του υλικού είναι κυρίως εμπειρικά. Η συμπεριφορά κυματικής διάδοσης σε τέτοιου είδους υλικά δεν έχει γίνει πλήρως κατανοητή. Είναι αναμενόμενο ότι η κατανόηση της αλληλεπίδρασης των διαφόρων φάσεων με το διαδιδόμενο κύμα μπορεί να προσφέρει στην κατεύθυνση της αναγνώρισης σύστασης και εν τέλει στην εκτίμηση περί της καταλληλότητας του υλικού, αφού η σύσταση (κυρίως λόγος w/c) είναι βασικό στοιχείο της απόδοσης του σκυροδέματος.

Η διατριβή βασίζεται σε πολυάριθμα πειράματα διάδοσης τασικών κυμάτων σε διάφορους τύπους υλικών (σκυρόδεμα, κονίαμα και τσιμεντόπαστα σκληρυμένα και νωπά). Τα αποτελέσματα όσον αφορά στο σκληρυμένο υλικό αρχικά κατέδειξαν εν γένει την ισχύ των αναφερομένων στη βιβλιογραφία συσχετίσεων αντοχής και σύστασης με παραμέτρους κυματικής διάδοσης. Ωστόσο, βασισμένη σε χαρακτηριστικά των πεδίων του χρόνου και της συχνότητας, στη διατριβή αυτή εισάγεται πρωτότυπη μεθοδολογία ταξινόμησης δοκιμίων σκυροδέματος με σχεδόν απόλυτη επιτυχία στο σύνολο των δοκιμίων που ελέγχθηκαν. Η μεθοδολογία ταξινόμησης δοκιμίων σε προϋπάρχουσες κλάσεις παρέχει αποτελέσματα από τη δεύτερη μέρα και η εφαρμογή της στην πράξη θα επέτρεπε εξαγωγή συμπερασμάτων πολύ νωρίτερα από τη δοκιμή θλιπτικής αντοχής που διεξάγεται σε ηλικία 28 ημερών. Βεβαίως, χωρίς τροποποιήσεις, μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα νωρίτερα, εφόσον το υλικό έχει αποκτήσει την απαιτούμενη δυσκαμψία που να επιτρέπει την προσαρμογή των αισθητήρων (πιθανόν και πριν τις 12 ώρες μετά την ανάμειξη). Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση σε κλάσεις (συστάσεις w/c) που απείχαν κατά 0.025, τιμή που αποτελεί και την ευκρίνεια των μέχρι τώρα καταλληλότερων μεθόδων για τον προσδιορισμό του w/c. Για πρακτική εφαρμογή σκόπιμη θα είναι η επέκταση και σε άλλες κλάσεις ώστε να καλυφθεί όλο το εύρος των χρησιμοποιούμενων τιμών αλλά και η αύξηση της πυκνότητας

των κλάσεων (μικρότερη απόσταση μεταξύ γειτονικών) που θα βελτιώναν την ακρίβεια του προσδιορισμού.

Αντίστοιχη μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε δοκίμια νωπού κονιάματος όπου τα αποτελέσματα παρότι ενθαρρυντικά, δεν προσεγγίζουν την επιτυχία της εφαρμογής σε σκληρυμένο. Αυτός ήταν και ο λόγος της μελέτης σε βάθος της κυματικής διάδοσης σε νωπό κονίαμα που ακολούθησε. Ωστόσο, θεωρείται ότι η εφαρμογή προηγμένων τεχνικών αναγνώρισης προτύπων στις υπάρχουσες κυματομορφές θα βελτιώνει πολύ τις προϋποθέσεις προσδιορισμού της σύστασης.

Η κατανόηση χαρακτηριστικών διάδοσης προϋποθέτει την πειραματική παρατήρηση σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων αφού λόγω ανομοιογένειας, οι διάφορες φάσεις έχουν εντονότερη επίδραση σε διαφορετικές συχνότητες ανάλογα με το μέγεθος και τις εν γένει ιδιότητές τους. Η πειραματική διαδικασία βασίστηκε σε συχνότητες μέχρι 1MHz, πολύ πάνω από τις συνήθως εφαρμοζόμενες συχνότητες στο έλεγχο του σκυροδέματος, φάσμα όπως αποδείχτηκε ικανό για την ανάδειξη αξιόλογων, όσο και πρωτότυπων, στοιχείων της συμπεριφοράς του υλικού.

Αποτέλεσμα που προέκυψε από την πειραματική φάση σε σκληρυμένο σκυρόδεμα, είναι η διασκορπίζουσα συμπεριφορά σε χαμηλές συχνότητες. Παρότι σε συγκεκριμένες περιπτώσεις μέχρι τώρα έχει παρατηρηθεί τέτοιου είδους συμπεριφορά, οι ερμηνείες είναι πολύ γενικές βασιζόμενες στην ανομοιογένεια του υλικού. Στη διατριβή αυτή, διερευνάται η συνεισφορά της σκέδασης και της ιξωδοελαστικής φύσης της τσιμεντόπαστας, ενώ για πρώτη φορά ερμηνεύεται η διασπορά θεωρώντας το σκυρόδεμα ως υλικό με μικροδομή μέσω γενικευμένης θεωρίας ελαστικότητας. Χαρακτηριστικά της κοκκομετρίας των αδρανών (μέγεθος κόκκου αλλά και αποστάσεις μεταξύ αυτών) φαίνεται ότι επιδρούν καιρεια, μέσω σχετικής κίνησης ως προς τη μακροδομή, όπως θεωρείται από τη συγκεκριμένη προσέγγιση. Αυτές οι παράμετροι πιθανότατα επηρεάζονται με την ανάπτυξη φθοράς διαφοροποιώντας την συμπεριφορά του υλικού σε κυματική διάδοση, γεγονός που μπορεί να ανιχνευθεί με μετρήσεις υπερήχων.

Στο τελευταίο μέρος της διατριβής περιγράφεται η μελέτη διάδοσης σε νωπό κονίαμα. Η διασκορπίζουσα φύση του υλικού που φανερώνεται από έντονες μεταβολές της ταχύτητας διάδοσης, μέχρι πρότινος δεν είχε μελετηθεί. Το ίδιο ισχύει και για την εξασθένηση όπου μεταβάλλεται έντονα με τη συχνότητα, ενώ επηρεάζεται σαφώς από τη σύσταση, κυρίως περιεκτικότητα και μέγεθος άμμου αλλά και ποσοστό εγκλωβισμένων φυσαλίδων. Η επίδραση των παραπάνω, παρότι στη βιβλιογραφία πιθανολογείται, δεν έχει ερμηνευθεί μέσω συγκεκριμένου μηχανισμού. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται η θεωρία σκέδασης για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα πρόσπτωσης κύματος σε κοιλότητα (φυσαλίδα) και σφαιρικό σκεδαστή (κόκκος άμμου), ενώ τα αποτελέσματα όσον αφορά στη διασπορά φασικής ταχύτητας και εξασθένηση έρχονται σε κοντινή συμφωνία με τα πειραματικά. Φαίνεται ότι η ύπαρξη των εγκλωβισμένων φυσαλίδων έχει άμεση σχέση με τη διασπορά σε χαμηλές συχνότητες, ενώ η επίδραση τους αυτή εξαρτάται από την πυκνότητα της τσιμεντόπαστας που ορίζεται από το λόγο w/c . Προτάσεις μελλοντικής έρευνας σχετικά με τον προσδιορισμό του w/c , αφορούν σε λεπτομερέστερη εξέταση της φασικής ταχύτητας στο πεδίο 100-200kHz, όπου παρουσιάζεται η μέγιστη μεταβολή με τη σύσταση. Εξαιρετικής σημασίας είναι και η μέτρηση του ποσοστού εγκλωβισμένου αέρα που εφόσον διεξαχθεί παράλληλα σε νωπό υλικό μπορεί να αποδώσει ακριβέστερες προβλέψεις με την εισαγωγή της πραγματικής τιμής στο θεωρητικό μοντέλο σκέδασης.

Επίσης, σε μελλοντική φάση και για την επέκταση των αποτελεσμάτων σε νωπό σκυρόδεμα, θα είναι σημαντική η διερεύνηση χρήσης νέας διάταξης ισχυρότερης ενέργειας, αφού το υλικό αυτό περιέχει αδρανή σε μεγαλύτερα μεγέθη από αυτό της άμμου. Έτσι για τον έλεγχο αντιπροσωπευτικής ποσότητας, αναγκαίες είναι μεγαλύτερες διαστάσεις δοκιμίου με παράλληλη αύξηση της ισχύος ώστε να ισοσταθμίζεται η αυξημένη εξασθένηση.