

**Προσδιορισμός των Μηχανικών Χαρακτηριστικών και Μελέτη
Υδαταπορροφητικότητας του Σκυροδέματος Ηλικίας 28 ημερών
και 45 ετών με Καταστροφικές Μεθόδους και με την Μη
Καταστροφική Μέθοδο των Υπερήχων.**



Γιανναράκης Ιωάννης

Τριμελής Επιτροπή

Επιβλέπων Καθηγητής: Πρασιανάκης Ιωάννης, Ομ. Καθηγητής
Σιδερίδης Αιμίλιος, Επ. Καθηγητής
Κυτόπουλος Βίκτωρας, Αν. Καθηγητής

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα: Εφαρμοσμένη Μηχανική,
Τομέας Μηχανικής, ΣΕΜΦΕ

Αθήνα, Μάιος 2018

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος Εφαρμοσμένη Μηχανική του τομέα Μηχανικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα μαζί τους και συνέλεξαν στην επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Πρώτον από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, Ομότιμο Καθηγητή Ιωάννη Πρασιανάκη για την πολύτιμη καθοδήγηση του και την εμπιστοσύνη και εκτίμηση που μου έδειξε. Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Πικράκη Άγγελο με τον οποίο συνεργάστηκα καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας. Αποτέλεσε θεμελιώδη λίθο τόσο στην εκπόνηση της πειραματικής διαδικασίας όσο και στην επιστημονική της προσέγγιση λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις παραμέτρους. Τις ευχαριστίες μου θα ήθελα να εκφράσω και στον καθηγητή Αιμίλιο Σιδερίδη για την συνεχή υποστήριξη και ενθάρρυνση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Abstract..... | 5 |
| Περίληψη..... | 6 |
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή..... | 7 |
| 1.1 Γενικά..... | 7 |
| Κεφάλαιο 2: Η Θεωρία της υπερηχητικής μεθόδου | 9 |
| 2.1 Η σημασία και η ιστορία των υπερήχων..... | 9 |
| 2.2 Η Θεωρία της Γραμμικής Ελαστικότητας και η Φυσική των υπερήχων | 13 |
| 2.2.1 Ο ορισμός και υποκατηγορίες του ήχου | 13 |
| 2.2.2 Η προσέγγιση του υπέρηχου από την οπτική γωνία της ακουστικής χρησιμοποιώντας την θεωρία της γραμμικής ελαστικότητας | 14 |
| 2.2.3 Χρήση των βασικών σχέσεων της γραμμικής ελαστικότητας για την περιγραφή του φαινομένου της διάδοσης των κυμάτων..... | 15 |
| 2.2.4 Τρόποι διάδοσης ενός κύματος στο ελαστικό μέσο..... | 18 |
| 2.2.5 Η επίδραση των ιδιοτήτων του υλικού στην ταχύτητα του ήχου-Απόδειξη της σχέσης της ταχύτητας των διαμήκων και των εγκάρσιων κυμάτων..... | 21 |
| 2.3 Απόσβεση υπερηχητικών κυμάτων (Attenuation)..... | 23 |
| 2.4 Ακουστική αντίσταση..... | 24 |
| 2.5 Αρχή παραγωγής των υπερήχων..... | 26 |
| 2.5.1 Γενικά..... | 26 |
| 2.5.2 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο..... | 27 |
| 2.5.3 Πιεζοηλεκτρικά υλικά..... | 31 |
| 2.5.4 Τύποι πιεζοηλεκτρικών κεφαλών..... | 32 |
| Κεφαλαίο 3: Σκυροδέμα ως υλικό κατασκευών..... | 35 |
| 3.1 Γενικά..... | 35 |
| 3.2 Κατηγορίες σκυροδέματος | 36 |
| 3.3 Η Δομή του σκυροδέματος..... | 37 |
| 3.4 Συστατικά του σκυροδέματος..... | 38 |
| 3.4.1 Αδρανή..... | 38 |
| 3.4.1 Τσιμέντο..... | 39 |
| 3.4.2 Το Νερό..... | 41 |
| 3.4.3 Πρόσμικτα-Πρόσθετα..... | 42 |
| 3.5 Γενικοί τύποι σκυροδέματος..... | 43 |
| 3.6 Συμπεριφορά του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη | 43 |

| | |
|---|----|
| 3.7 Συμπεριφορά του σκυροδέματος σε εφελκυσμό | 46 |
| 3.8 Τύποι μέτρων ελαστικότητας στο σκυρόδεμα..... | 47 |
| 3.8.1 Στατικό και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας..... | 47 |
| 3.9 Φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος..... | 48 |
| 3.9.1 Απορροφητικότητα, Διαπερατότητα, Υγροσκοπικότητα | 48 |
| 3.10 Φυσικά αίτια μείωσης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε διάρκεια | 50 |
| 3.10.1 Επιφανειακή Φθορά | 50 |
| 3.10.2 Ρηγμάτωση λόγω κρυστάλλωσης αλάτων στους πόρους..... | 51 |
| 3.10.3 Δράση παγετού..... | 51 |
| 3.10.4 Επίδραση Πυρκαϊάς..... | 51 |
| 3.11 Χημικές διεργασίες ως αίτιο μείωσης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε διάρκεια | 52 |
| 3.11.1 Υδρόλυση των συστατικών του τσιμεντοπολτού | 53 |
| 3.11.2 Αντιδράσεις ανταλλαγής μάζας..... | 53 |
| 3.11.3 Σχηματισμός Προϊόντων που Προκαλούν Διόγκωση..... | 54 |
| Κεφάλαιο 4: Βασικές εφαρμογές της μεθόδου των Υπερήχων στον έλεγχο του Σκυροδέματος (Βιβλιογραφική ανασκόπηση) | 55 |
| 4.1 Ιστορική αναδρομή της υπερηχητικής μεθόδου στο σκυρόδεμα..... | 55 |
| 4.2 Θεωρία διάδοσης κυμάτων στο σκυρόδεμα | 56 |
| 4.3 Ταχύτητα Υπερήχων στο σκυρόδεμα..... | 57 |
| 4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα των υπερήχων στο σκυρόδεμα | 60 |
| 4.4.1 Επίδραση της συχνότητας στην ταχύτητα των υπερήχων | 60 |
| 4.4.2 Επίδραση της μη ομοιογένειας του σκυροδέματος στη ταχύτητα των υπερήχων..... | 60 |
| 4.4.3 Μέγεθος αδρανών τύπος και περιεχόμενο..... | 61 |
| 4.4.4 Τύπος τσιμέντου | 62 |
| 4.4.5 Ηλικία σκυροδέματος..... | 63 |
| 4.4.6 Επαφή πιεζοηλεκτρικών μετατροπών..... | 64 |
| 4.4.7 Υγρασία του σκυροδέματος..... | 65 |
| 4.4.8 Θερμοκρασία του Σκυροδέματος..... | 65 |
| 4.4.9 Μήκος Διαδρομής..... | 67 |
| 4.4.10 Σχήμα και διαστάσεις δοκιμίου..... | 67 |
| 4.4.11 Ράβδοι Οπλισμού..... | 68 |
| 4.4.12 Εντατική κατάσταση του Σκυροδέματος | 68 |
| 4.5 Εφαρμογές της υπερηχητικής μεθόδου για τον προσδιορισμό θεμελιωδών παραμέτρων του σκυροδέματος..... | 69 |

| | |
|---|-----|
| 4.5.1 Προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας | 69 |
| 4.6 Προσδιορισμός της αντοχής του σκυροδέματος | 73 |
| Κεφάλαιο 5: Συσχέτιση της υδαταπορροφητικότητας και της ταχύτητας των υπερήχων στο σκυρόδεμα (Βιβλιογραφική ανασκόπηση) | 76 |
| Κεφάλαιο 6: Εργαστηριακές Δοκιμές-Προδιαγραφές..... | 79 |
| 6.1 Περίληψη..... | 79 |
| 6.2 Δοκίμια | 80 |
| 6.3 Υπερηχητική συσκευή USM 25..... | 82 |
| 6.4 Βαθμονόμηση..... | 83 |
| 6.5 Σημεία Μετρήσεων | 85 |
| 6.6 Δοκιμή και προδιαγραφή θλίψης..... | 86 |
| 6.7 Δοκιμή και προδιαγραφή αντιδιαμετρικής θλίψης..... | 88 |
| 6.8 Δοκιμή και προδιαγραφή υδαταπορρόφησης..... | 90 |
| Κεφάλαιο 7: Πειραματικά αποτελέσματα | 92 |
| 7.1 Πειραματικά αποτελέσματα καταστροφικών ελέγχων | 92 |
| Αντιδιαμετρική θλίψη..... | 92 |
| Θλίψη..... | 92 |
| 7.2 Πειραματικά αποτελέσματα μη καταστροφικού ελέγχου με υπερήχους..... | 94 |
| 7.3 Πειραματικά αποτελέσματα υδαταπορρόφησης και συσχέτισης με την ταχύτητα των υπερήχων στο σκυρόδεμα..... | 98 |
| Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα | 100 |
| Βιβλιογραφία..... | 101 |
| | |
| Εικόνα 1: Έλεγχος σωλήνα με υπερηχητική συσκευή το 1950 και σήμερα..... | 11 |
| Εικόνα 2: Εφαρμογή του Νόμου Snell σε 2 υλικά..... | 25 |
| Εικόνα 3: Απεικόνιση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου | 27 |
| Εικόνα 4: Επιβολή μηχανικής τάσης σε κυβικό κρύσταλλο με κέντρο συμμετρίας..... | 28 |
| Εικόνα 5: Επιβολή μηχανικής τάσης σε μοναδιαία εξαγωνική κυψελίδα σε δύο διευθύνσεις | 30 |
| Εικόνα 6: Πειραματική διάταξη της υπερηχητικής μεθόδου..... | 31 |
| Εικόνα 7: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης..... | 44 |
| Εικόνα 8: Απεικόνιση της δοκιμής θλίψης σε κυλινδρικό δοκίμιο σκυροδέματος..... | 45 |
| Εικόνα 9: Πειραματική διάταξη μονοαξονικού εφελκυσμού..... | 46 |
| Εικόνα 10: Τύποι μέτρου ελαστικότητας στο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων στο σκυρόδεμα..... | 48 |
| Εικόνα 11: Απεικόνιση πειραματικής διάταξης υπερηχητικής μεθόδου με την λειτουργία της άμεσης λήψης ηχητικού παλμού. | 59 |
| Εικόνα 12: Οι τρεις βασικές τοποθεσίες των πιεζοηλεκτρικών κεφαλών στο σκυρόδεμα για τη λήψη του υπερηχητικού παλμού. | 59 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 13: Διάγραμμα ταχύτητας υπερήχων συναρτήσει περιοχής μέτρησης πάνω στο δοκίμιο σκυροδέματος και αντίστοιχα στο τσιμεντοπολτό. | 61 |
| Εικόνα 14: Διάγραμμα ταχύτητας υπερήχων στο σκυρόδεμα συναρτήσει του είδους των αδρανών. | 62 |
| Εικόνα 15: Διακύμανση ταχύτητας διάδοσης διαμηκών κυμάτων στο σκυρόδεμα και στα υπόλοιπα υλικά συναρτήσει της ηλικίας τους..... | 63 |
| Εικόνα 16: Επίδραση της φόρτισης του σκυροδέματος στην ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων. | 69 |
| Εικόνα 17: Διακύμανση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_{cu} και του στατικού μέτρου ελαστικότητας E_c των Α και Β κατηγορίας δοκιμών συναρτήσει της διαδικασίας σύνθεσής τους Ν και S. | 71 |
| Εικόνα 18: Διακύμανση της ταχύτητας των υπερήχων με βάση το ποσοστό κορεσμού των πόρων του σκυροδέματος..... | 78 |
| Εικόνα 19: Διακύμανση του μέτρου ελαστικότητας με βάση το ποσοστό κορεσμού των πόρων του σκυροδέματος από ιπτάμενη τέφρα..... | 78 |
| Εικόνα 20: Τα δοκίμια προς εξέταση με την μέθοδο των υπερήχων. | 81 |
| Εικόνα 21: Συσκευή υπερήχων USM 25 της εταιρείας Krautkramer..... | 82 |
| Εικόνα 22: Πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς K1SM και K1S συνδεδεμένοι με την υπερηχητική συσκευή USM 25. | 83 |
| Εικόνα 23: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της V1A2 πλάκα βαθμονόμησης..... | 84 |
| Εικόνα 24: Πειραματική διάταξη για την βαθμονόμηση της υπερηχητικής συσκευής και απεικόνιση της θέσης των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων στις επιφάνειες των δοκιμών σκυροδέματος. | 85 |
| Εικόνα 25: Σημεία μέτρησης της ταχύτητας διαμηκών κυμάτων στις επιφάνειες των δοκιμών του σκυροδέματος..... | 86 |
| Εικόνα 26: Τα strain gages της πειραματικής διάταξης. | 87 |
| Εικόνα 27: Διαδικασία ζύγισης των δοκιμών πριν και μετά την εμφάνισή τους σε νερό. | 90 |
| | |
| Πίνακας 1: Περιγραφή της ταλάντωσης των σωματιδίων που αντιστοιχεί σε κάθε τύπο κύματος | 20 |
| Πίνακας 2: Ταχύτητες διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων σε διάφορα υλικά | 23 |
| Πίνακας 3: Κατηγορίες Σκυροδέματος σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος..... | 37 |
| Πίνακας 4: Κατηγορίες των αδρανών και το αντίστοιχο μέγεθος κόκκων που τα χαρακτηρίζει..... | 39 |
| Πίνακας 5: Τύποι τσιμέντου και η αντίστοιχη περιγραφή τους..... | 40 |
| Πίνακας 6: Συστατικά τσιμέντου και οι συμβολισμοί τους..... | 40 |
| Πίνακας 7: Φυσικά αίτια μείωσης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε διάρκεια..... | 50 |
| Πίνακας 8: Χημικές διεργασίες μείωσης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε διάρκεια..... | 52 |
| Πίνακας 9: Διορθωτικοί συντελεστές σύμφωνα με την συντήρηση του σκυροδέματος..... | 65 |
| Πίνακας 10: Διορθωτικοί συντελεστές σύμφωνα με την θερμοκρασία συντήρησης των δοκιμών σκυροδέματος..... | 66 |
| Πίνακας 11: Κατάλληλο εύρος συχνοτήτων ανάλογα με το μήκος διαδρομής του παλμού. | 67 |
| Πίνακας 12: Προσδιορισμός του δυναμικού και στατικού μέτρου ελαστικότητας με χρήση καθορισμένων τιμών της ταχύτητας των υπερήχων..... | 73 |
| Πίνακας 13: Προδιαγραφές προσδιορισμού του συστήματος μεταφοράς του σκυροδέματος..... | 76 |

Abstract

This work constitutes continuation of the research work started first in 1973 in order to study the behavior of concrete of 7, 28 and 90 days in multiaxial loading in order to construct the failure envelope of the materials by tracing the Mohr circles for each type of loading. The study mainly concerned the triaxial loading in longitudinal tension and the lateral hydrostatic compression of cylindrical specimens made of normal type of concrete. Then, in 2001 the concrete was tested in compression, axial compression and bending after 28 years of natural ageing. The latter was also investigated by means of the non-destructive method of ultrasounds. Finally in this study, the specimens aged 45 years old were tested in compression, axial compression and also submitted to non-destructive tests through ultrasounds. Furthermore, some of the specimens were submitted to water absorption for 1 to 9 months to study the effects on the mechanical properties of concrete as well as on the ultrasound pulse velocity. Special interest was given to the correlation of the compression strength and the dynamic modulus of elasticity with the propagation speed of the ultrasonic waves in the concrete. Significant and interesting conclusions were obtained about the mechanical properties of concrete.

Περίληψη

Η συγκεκριμένη έρευνα αποτελεί συνέχεια της ερευνητικής δραστηριότητας του 1973 που είχε σκοπό να μελετήσει τη συμπεριφορά του σκυροδέματος 7, 28 και 90 ημερών σε διάφορους τύπους μηχανικών καταπονήσεων. Η μελέτη αφορούσε κυρίως την πολυαξονική καταπόνηση με σκοπό την κατασκευή της περιβάλλουσας θραύσεως με τη χρήση του κύκλου του Mohr. Στη συνέχεια, το 2001 τα δοκίμια σκυροδέματος δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη, σε ανπδιαμετρική θλίψη και κάμψη μετά από 28 χρόνια φυσικής γήρανσης. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε η μη καταστροφική μέθοδος των υπερήχων για τον έλεγχο ποιότητας του σκυροδέματος. Στην παρούσα μελέτη, τα δείγματα σκυροδέματος ηλικίας πλέον 45 ετών δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική και ανπδιαμετρική θλίψη και υποβλήθηκαν σε μη καταστρεπτικές δοκιμές μέσω των υπερήχων. Επίσης ορισμένα από τα δείγματα εκτέθηκαν σε νερό από 1 έως 9 μήνες για την μελέτη της υδαταπορροφητικότητας και την επίδρασή της στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος και στην ταχύτητα των υπερήχων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον δόθηκε για τη συσχέτιση της αντοχής των δειγμάτων του σκυροδέματος και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας με την ταχύτητα διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Όπως είναι γνωστό, το σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό σύνθετο υλικό, που κατασκευάζεται από αδρανή υλικά, τσιμέντο και νερό σε κατάλληλες αναλογίες. Οι διαδικασίες μελέτης και παρασκευής του πρέπει να είναι τέτοιες, ώστε ως νωπό να έχει: (α) ομοιογένεια και (β) την απαραίτητη εργασιμότητα, ανάλογα με το είδος της κατασκευής, ώστε να μπορεί να διαστρωθεί και να συμπυκνωθεί με τα διαθέσιμα μέσα, και ως σκληρυμένο να έχει: (α) την απαιτούμενη αντοχή, (β) την απαιτούμενη ανθεκτικότητα και (γ) τις πρόσθετες μηχανικές ιδιότητες που απαιτούνται ανάλογα με το είδος της κατασκευής. Με την κατάλληλη επεξεργασία των υλικών, που αποτελούν το σκυρόδεμα, και τη συντήρησή του, κατασκευάζονται δομικά στοιχεία, η αντοχή των οποίων εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως η απόμειξη, η συμπύκνωση, η συντήρηση, η ηλικία, το είδος του δομικού στοιχείου, οι περιβαλλοντικές δράσεις κ.λπ. Ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων, που επηρεάζουν την επί τόπου αντοχή του σκυροδέματος, έχει ως συνέπεια τη διαφορά της επί τόπου αντοχής του σκυροδέματος από τη συμβατική. Επειδή το υλικό αυτό τοποθετείται στις κατασκευές, για την ανάληψη κυρίως των θλιπτικών φορτίων, λόγω της ιδιότητας του να εμφανίζει σε αυτά τα φορτία υψηλής αντίστασης, ελέγχεται συνήθως με τον προσδιορισμό της αντοχής του, μέσω της δοκιμής θλίψεως κυλινδρικών ή κυβικών δοκιμίων, ηλικίας 28 ημερών. Εκτός από τον έλεγχο της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη, εκτελούνται και δοκιμές, σπανιότερα όμως, του εφελκυσμού (Αντιδιαμετρικής θλίψεως ή άμεσου εφελκυσμού), της κάμψεως και της πολυαξονικής καταπόνησης.

Από το 1980 μέχρι σήμερα γίνεται έντονη προσπάθεια για τον έλεγχο κατασκευών από σκυρόδεμα με τις μη καταστροφικές μεθόδους (ΜΚΜ) όπως των υπερήχων (ultrasound) της βιομηχανικής ακτινογραφίας με ακτίνες x ή γ (industrial radiography), της ακουστικής εκπομπής (acoustic emission), όπως και με την κρουστική μέθοδο (rebound hammer test), τη μέθοδο της εξόλκευσης ήλου (pull-off test), τη διεισδυτική μέθοδο (penetration resistance methods) και τη μέθοδο της επιφανειακής σκληρότητας (surface hardness methods) [1] ώστε να είναι δυνατός ο επί τόπου έλεγχος μιας

κατασκευής και να αποφεύγεται η λήψη πυρήνων (καρότων) από αυτήν. Οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι (ή και έμμεσες μέθοδοι) είναι μέθοδοι έμμεσου προσδιορισμού της αντοχής του σκυροδέματος μιας κατασκευής. Με τις μεθόδους αυτές δεν μετρείται άμεσα η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, αλλά ένα άλλο χαρακτηριστικό του σκυροδέματος το οποίο σχετίζεται έμμεσα με την θλιπτική αντοχή. Ο έμμεσος αυτός προσδιορισμός της αντοχής του σκυροδέματος κρίνεται αναγκαίος στις περιπτώσεις κατά τις οποίες θέλουμε:

1. να εξετάσουμε την ομοιογένεια της αντοχής του σκυροδέματος σε μια κατασκευή.
2. να παρακολουθήσουμε την ανάπτυξη της αντοχής με την πάροδο του χρόνου.
3. να προσδιορίσουμε την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος επιτόπου σε ένα έργο.

Οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι είναι οικονομικές, εύκολες στη χρήση αλλά η αξιοπιστία τους εξαρτάται από το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Έτσι, εάν πρόκειται να ελέγξουμε την ομοιογένεια ή την εξέλιξη της αντοχής του σκυροδέματος οι έμμεσες μη καταστροφικές μέθοδοι δίνουν σχετικώς καλά αποτελέσματα, στις περιπτώσεις όμως κατά τις οποίες επιδιώκεται ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος τα αποτελέσματα είναι λιγότερο αξιόπιστα. Στις περιπτώσεις αυτές, οι έμμεσες μέθοδοι πρέπει να συνδυάζονται με πυρηνοληψίες και αντίστοιχη βαθμονόμηση των ερμηνευτικών καμπυλών [2].

Κεφάλαιο 2: Η Θεωρία της υπερηχητικής μεθόδου

2.1 Η σημασία και η ιστορία των υπερήχων

Ο έλεγχος των υλικών με τη μη καταστροφική μέθοδο των υπερήχων γίνεται με ελαστικά τασιακά κύματα, τα οποία παράγονται από εφελκυστικές, θλιπτικές, διατμητικές ή καμπτικές δυνάμεις πολύ μικρής έντασης. Τα υπερηχητικά κύματα είναι μηχανικά κύματα υψηλής συχνότητας, συνήθως μεγαλύτερης των 500 KHz. Τα κύματα αυτά διοχετεύονται μέσα στα ελεγχόμενα υλικά και από την ανάλυση των εξερχόμενων υπερηχητικών κυμάτων προσδιορίζονται τα διάφορα χαρακτηριστικά των υλικών. Η μέθοδος ελέγχου των υλικών με τη χρήση των υπερήχων (ultrasonic testing), είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος, με την οποία είναι δυνατό να ανιχνεύονται οι επιφανειακές ή οι εσωτερικές ατέλειες των υλικών και να προσδιορίζονται ορισμένες από τις μηχανικές ιδιότητες τους (μέτρο ελαστικότητας E , λόγος Poisson ν , μέτρο διάτμησης G , αντοχή σ , σκληρότητα κτλ.) χωρίς να απαιτείται η κατασκευή και η θραύση ειδικών δοκιμίων. Παράλληλα επιτυγχάνεται και η διαδικασία της μέτρησης του πάχους των κατασκευών με εξαιρετική ακρίβεια. Η τελευταία εφαρμογή είναι μεγάλης σημασίας και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για τη μέτρηση του πάχους κατασκευών μεγάλων διαστάσεων, το οποίο δε μπορεί να μετρηθεί με τα μηχανικά παχύμετρα όπως σε πλοία, σωλήνες λέβητες αντδραστήρες κτλ. Χρησιμοποιείται ακόμη για τον έλεγχο και τον προσδιορισμό της ποιότητας των συγκολλήσεων και βρίσκει ιδιαίτερη εφαρμογή στην κτηνοτροφία, την ιατρική, την ναυπηγική και στον έλεγχο του σκυροδέματος κτλ.

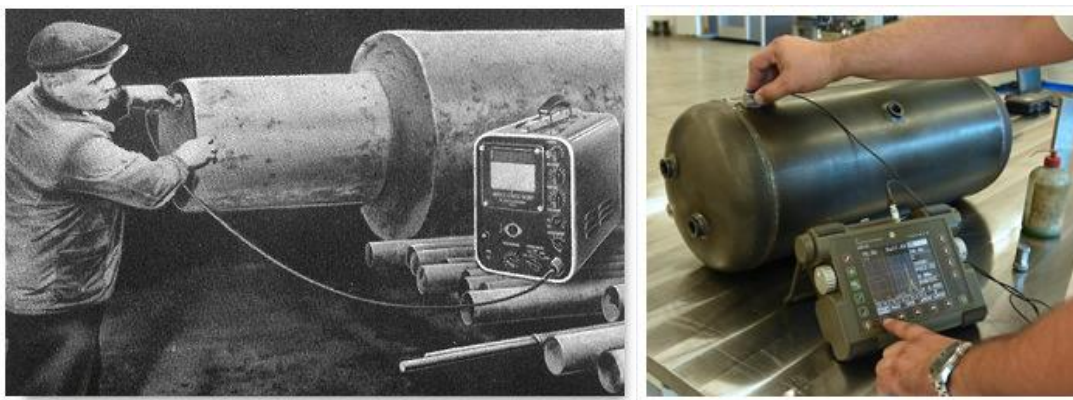
Το 1880 οι αδερφοί Curie ανακάλυψαν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και έτσι άνοιξε ο δρόμος για τη γέννηση και την ανίχνευση της υπερηχητικής ενέργειας. 40 χρόνια αργότερα, οι συνδυασμένες προσπάθειες της ανεύρεσης του βυθισμένου στο Β. Ατλαντικό Τιτανικού το 1912 και η απειλή των συμμαχικών δυνάμεων από τα υποβρύχια στον Α' παγκόσμιο πόλεμο δημιούργησαν την ανάγκη να βρεθούν τρόποι ανίχνευσης αντικειμένων μέσα στο νερό. Ο Langevin, μαθητής του Pierre Curie, εφάρμοσε τις υπερηχητικές τεχνικές στην ανίχνευση υποβρυχίων οι οποίες είχαν αναπτυχθεί σε εργαστηριακό επίπεδο. Το 1916 ανακάλυψε ότι ο κρύσταλλος χαλαζίου θα ήταν ένας ευαίσθητος ανιχνευτής και αργότερα ότι ένας όμοιος κρύσταλλος θα μπορούσε να

αποτελέσει τη γεννήτρια υπερηχητικών κυμάτων. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα η μικρή ανάπτυξη της τεχνολογίας επηρέασε σε μεγάλο βαθμό την ερευνητική δραστηριότητα ενός μεγάλου πρωτοπόρου στο πεδίο των Υπερήχων. Η μέθοδος των υπερήχων εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από τον Ρώσο φυσικό Sokolon το 1929 για την ανίχνευση ατελειών ενώ το 1935 εφαρμόστηκε για τον έλεγχο των μεταλλικών υλικών. Το 1931 ο Mulhauser χαρακτηρίστηκε ως ειδικός για τη χρήση υπερηχητικών κυμάτων χρησιμοποιώντας δύο πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς για την ανίχνευση ελαττωμάτων σε στερεά σώματα. Το 1940 ο Floyd Firestone και ο Simons το 1945 ανέπτυξαν ένα υπερηχητικό παλμικό test ελέγχου με τη πρώτη εφαρμογή της τεχνικής της παλμοχούς. Ο Firestone είχε κάνει τις ακόλουθες δημοσιεύσεις από το 1940 έως το 1951

- 1940: Flaw detecting device and measuring instrument
- 1943: Resonance inspection method; Surface and shear wave method and apparatus
- 1945: Supersonic reflectoscope, an instrument for inspecting the interior of solid parts by means of sound waves
- 1946: Refinements in supersonic reflectoscope, Polarized sound
- 1948: Tricks with supersonic reflectoscope
- 1951: Method and means for generating and utilizing vibrational wave in plate

Έπειτα ο Firestone έψαξε να βρει συνεργάτες για τη υλοποίηση των ιδεών του και έτσι συνάντησε τον Kelvin Hughes. Ο Kelvin-Hughes το 1952 κατάφερε να βγάλει στην παραγωγή και στην αγορά τη πρώτη του συσκευή υπερήχων. Παράλληλα στη Γερμανία οι Josef και Herbert Krautkramer από τη Κολωνία και ο Karl Deutsch από το Wuppertal μελέτησαν τις δημοσιεύσεις του Firestone και ξεκίνησαν να καινοτομούν στον υπέρηχο χωρίς να γνωρίζονται μεταξύ τους. Ο Karl Deutsch μηχανολόγος μηχανικός είχε την ανάγκη ενός συνεργάτη που να γνωρίζει από ηλεκτρονικά κι έτσι βρήκε τον Hans-Werner Branscheid όπου μαζί υλοποίησαν τις πρώτες τους συσκευές υπερήχων. Τα αδέρφια Krautkramer ήταν φυσικοί και δούλευαν περισσότερο με τους παλμογράφους και έτσι είχαν το υπόβαθρο να παράγουν από μόνοι τους συσκευές υπερήχων. Ύστερα από ένα χρόνο οι τρεις μικρές εταιρείες άρχιζαν να παρουσιάζουν τις παραγόμενες υπερηχητικές συσκευές τους και να ανταγωνίζονται στην τότε υπάρχουσα αγορά. Αργότερα εμφανίστηκαν και άλλες παραγωγικές μονάδες στη παγκόσμια αγορά. Η Siemens και η

Lehfeldt στη Γερμανία, η Kretztechnik στην Αυστρία, η Ultrasonique στη Γαλλία και η Kelvin-Hughes στη Μεγάλη Βρετανία. Οι περισσότερες όμως σταμάτησαν την παραγωγή πριν τη δεκαετία του 1970. Έτσι η Krautkramer είχε το μονοπώλιο στην αγορά στις αρχές του '60 το οποίο κατέχει μέχρι και σήμερα. Η εταιρεία του Karl Deutsch μετονομάστηκε σε Automation Industries Inc. και αργότερα εμφανίστηκαν εταιρείες όπως η Nukem στη Γερμανία, η Panametrics και η Staveland στην Αμερική, η Sonatest και η Sonomatic στη Μεγάλη Βρετανία, και η Gilardoni στην Ιταλία [3].



Εικόνα 1: Έλεγχος σωλήνα με την υπερηχητική συσκευή του 1950 και την υπερηχητική συσκευή του σήμερα.

Όσο αφορά την εξέλιξη της υπερηχητικής μεθόδου στην ανατολικές χώρες λίγο μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου πολέμου οι Ιάπωνες ερευνητές άρχισαν να διερευνούν τις ιατρικές διαγνωστικές δυνατότητες της υπερηχητικής μεθόδου. Τα πρώτα όργανα με υπερήχους χρησιμοποιούσαν την A-Mode απεικόνιση του σήματος σε μια οθόνη παλμογράφου. Έπειτα ακολούθησε η B-Mode δισδιάστατη απεικόνιση του σήματος. Το έργο της Ιαπωνίας στην υπερηχητική μέθοδο δεν ήταν γνώριμο στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και στην Ευρώπη μέχρι τη δεκαετία του 1950. Έπειτα όμως οι Ιάπωνες ερευνητές άρχισαν να παρουσιάζουν τα ευρήματά τους όσον αφορά τη χρήση του υπερήχου στην ανίχνευση όγκων στη περιοχή του μαστού και ήταν οι πρώτοι που υιοθέτησαν το υπερηχογράφημα Doppler μια εφαρμογή η οποία χρησιμοποιούταν για την ανίχνευση εσωτερικών κινούμενων στοιχείων όπως το αίμα που τροφοδοτεί το καρδιαγγειακό σύστημα. Το 1949, τέσσερις εταιρείες άρχισαν να παρασκευάζουν τις δικές τους υπερηχητικές συσκευές. Αυτές ήταν η Mitsubishi Electric Corporation, η Japan

Radio Company (αργότερα μετονομάστηκε σε Aloka Company), η Shimadzu Manufacturing Company και η Tokyo Ultrasonic Industrial Company. Μόνο η Mitsubishi συνέχισε να αναπτύσσεται στο χώρο του μη καταστροφικού ελέγχου ενώ οι άλλες εταιρείες αναπτύχθηκαν περισσότερο στον τομέας της Ιατρικής διαγνωστικής. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, οι πρωτοπόροι της υπερηχητικής μεθόδου συνέβαλαν σε πολλές καινοτομίες και σημαντικές εφευρέσεις όσο αναφορά την ανίχνευση του καρκίνου στην απεικόνιση μαλακών ιστών σε πραγματικό χρόνο με τη βοήθεια CRT οθόνης τη στιγμή της σάρωσης. Η εισαγωγή του φασματικού Doppler και αργότερα της διακριτικής και χρωματικής ικανότητας του φάσματος Doppler έδωσε τη δυνατότητα να απεικονιστεί η ταχύτητα και η κατεύθυνση της ροής του αίματος. Μετά από αυτά τα ραγδαία βήματα της πορείας του υπέρηχου, οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής παρήγαγαν το πρώτο χειροκίνητο σαρωτή "contact scanner" για κλινική χρήση και τη δεύτερη γενιά εξοπλισμού με αρχή λειτουργίας τη "B-Mode" και τέλος το πρώτο χειροκίνητο σαρωτή αρθρωτού βραχίονα με εικόνες 2-D [4]. Σήμερα εκτός από την Ιατρική η μέθοδος των υπερήχων βρίσκει ιδιαίτερη εφαρμογή στον έλεγχο των κατασκευών υψηλού κινδύνου, όπως στα αεροπλάνα, στους πυρηνικούς αντιδραστήρες, στις δεξαμενές καυσίμων και χημικών ουσιών κ.α. Είναι πλέον αναπόσπαστο κομμάτι του κλάδου της μη καταστροφικής αξιολόγησης των κατασκευών (Nondestructive Evaluation-NDE). Υπερέχει έναντι πολλών άλλων μη καταστροφικών μεθόδων ελέγχου, επειδή είναι αρκετά απλή, χρησιμοποιεί φορητές συσκευές προσιτού κόστους, έχει αρκετά υψηλή ευαισθησία, δεν επηρεάζει καμία από τις ιδιότητες των υπό έλεγχο υλικών και είναι εντελώς ακίνδυνη για την υγεία του ανθρώπου [5]. Ένα ακόμη πολύ σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να προσδιορίσει τις ιδιότητες μιας ατέλειας στο υλικό σε βάθος μέχρι και 15 m, βάθος το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μη καταστροφικές μεθόδους. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε πως με την αυξανόμενη απαίτηση για μη καταστρεπτικούς ελέγχους και την εφαρμογή της σύγχρονης τεχνολογίας οι συσκευές υπερήχων έχουν γίνει σήμερα από τα πλέον μοντέρνα και "ευφυή" εργαλεία ελέγχου των υλικών και ταυτόχρονα οικονομικώς προσιτά. Κλείνοντας πρέπει να επισημανθεί πως καμία συσκευή, όσο εξελιγμένη και αν είναι δεν μπορεί να υποκαταστήσει την εμπειρία και την κρίση του τεχνικού προσωπικού

που πρέπει να είναι σε θέση να αξιολογήσει τις ενδείξεις και να ανατρέξει στη βασική θεωρία της μεθόδου όταν αυτό χρειαστεί.

2.2 Η Θεωρία της Γραμμικής Ελαστικότητας και η Φυσική των υπερήχων

2.2.1 Ο ορισμός και υποκατηγορίες του ήχου

Ήχος ονομάζεται η περιοδική μεταβολή της πίεσης του αέρα, της οποίας η συχνότητα είναι ικανή να ερεθίσει το αισθητήριο όργανο της ακοής των οργανισμών. Γενικά σαν ήχους χαρακτηρίζουμε τα τασικά ελαστικά κύματα που σε αντίθεση με τα ηλεκτρομαγνητικά, θερμικά και οπτικά κύματα, η ύπαρξη της ύλης (στερεά-υγρά-αέρια) είναι απαίτηση για τη διάδοσή τους. Οι ήχοι διακρίνονται σε απλούς, όπου η μεταβολή της πίεσεως του αέρα είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου, και τους σύνθετους όπου η μεταβολή της πίεσεως είναι περιοδική αλλά όχι αρμονική και οι οποίοι αναλύονται κατά Fourier σε πολλούς απλούς ήχους, των οποίων οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας. Στο φάσμα των μηχανικών ελαστικών κυμάτων περιλαμβάνονται:

- Οι υπόηχοι με συχνότητες μικρότερες των 16 Hz
- Οι ακουστικοί ήχοι με συχνότητες 16 Hz μέχρι 20 KHz
- Οι υπέρηχοι με συχνότητες 20 KHz μέχρι 20 MHz
- Οι υπερυπερήχοι με συχνότητες μεγαλύτερες των 20 MHz

Οι υπέρηχοι είναι μια κατευθυνόμενη δέσμη μηχανικών ελαστικών κυμάτων υψηλής συχνότητας οι οποίοι εκπέμπονται από διάφορα μηχανικά μέσα κατά τη λειτουργία τους, όπως είναι οι μηχανές, ή κατά τη σφυρηλάτηση των μετάλλων. Οι υπέρηχοι διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την ισχύ τους και τα πεδία εφαρμογής τους. Οι υπέρηχοι μεγάλης ισχύος 1-100 W οι οποίοι χρησιμοποιούνται κυρίως στις συγκολλήσεις και τη θερμική κατεργασία των υλικών και οι υπέρηχοι μικρής ισχύος 1 mW-1 W, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα Sonar, στην Ιατρική, και ιδιαίτερα στους μη καταστροφικούς ελέγχους των υλικών.

2.2.2 Η προσέγγιση του υπέρηχου από την οπτική γωνία της ακουστικής χρησιμοποιώντας την θεωρία της γραμμικής ελαστικότητας

Ο υπερηχητικός έλεγχος εμπεριέχεται στον επιστημονικό κλάδο της ακουστικής όπου βασίζεται στις χρονικά μεταβαλλόμενες παραμορφώσεις των μορίων του υλικού, που προκαλούνται από τα εξωτερικά μηχανικά ερεθίσματα. Όλα τα υλικά αποτελούνται από άτομα τα οποία αποκρίνονται σε εξωτερικά ερεθίσματα με ταλαντώσεις γύρω από τη θέση ισορροπίας τους.. Είναι γνωστό ότι υπάρχουν πολλά κινητικά μοτίβα όπου η ακουστική δε τα λαμβάνει υπόψιν και ασχολείται μόνο με τα υλικά σωματίδια μικρών διαστάσεων που περιέχουν μεγάλο αριθμό ατόμων τα οποία κινούνται ή μετατοπίζονται με όμοιο τρόπο. Η ακουστική είναι γνωστό ότι χρησιμοποιεί τη θεωρία του συνεχούς μέσου και της γραμμικής ελαστικότητας για να περιγράψει τη μακροσκοπική πλευρά της διάδοσης κυμάτων στο υλικό μέσο. Όταν τα μόρια του υλικού μέσου μετατοπίζονται από τη θέση ισορροπίας τους, αναπτύσσονται εσωτερικές δυνάμεις αποκατάστασης ηλεκτροστατικής φύσεως όπου σε συνδυασμό με την αδρανειακή κατάσταση των μορίων προκαλούν ταλαντευτικά κινητικά μοτίβα. Στην περίπτωση της υπερηχητικής μεθόδου οι δονήσεις που προκαλούνται στο υλικό μέσο είναι οδηγούμενες από εξωτερική συσκευή με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται δύο είδη διεγερτικών δυνάμεων (οι καθολικές δυνάμεις και οι επιφανειακές δυνάμεις). Οι καθολικές δυνάμεις είναι μεγάλης εμβέλειας δυνάμεις (long range forces) που δρουν εσωτερικά στα μόρια σε όλο τον όγκο του υλικού. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του υλικού δεν αλληλοεπιδρούν άμεσα με το συνολικό όγκο του αντίθετα όμως διαδίδονται σε αυτό προκαλώντας την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων μεταξύ των μορίων και για αυτό τον λόγο ονομάζονται εσωτερικές ελαστικές δυνάμεις αποκατάστασης. Σύμφωνα με τον νόμο του Νεύτωνα η περιγραφή των δυνάμεων σε ένα υλικό μέσο είναι:

$$\int_{\delta S} T \cdot ndS + \int_{\delta V} B dV = \int_{\delta V} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dV \quad (2.1) \quad \text{όπου } \rho \text{ η πυκνότητα του μέσου. Η}$$

εξίσωση που περιγράφει την κίνηση σε ένα δονούμενο υλικό μέσο είναι η παρακάτω

$$\text{σχέση } \nabla \cdot T = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - B \quad (2.2). \text{ Σε ένα ελεύθερο δονούμενο σώμα οι αδρανειακές}$$

δυνάμεις και οι ελαστικές δυνάμεις αποκατάστασης επιδρούν σε κάθε ένα μόριο του

υλικού μέσου ξεχωριστά με παρόμοιο τρόπο όπως στις μακροσκοπικές θεωρήσεις που περιγράφουν το σύστημα μάζας ελατηρίου. Αλλαγές στον όγκο των σωματιδίων εξαιτίας της παραμόρφωσης έχουν ως αποτέλεσμα την αλλαγή στη πυκνότητα μάζας τους. Στη μη γραμμική ανάλυση αυτές οι αλλαγές θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν αντίθετα όμως στη γραμμική θεώρηση αγνοούνται. Επίσης λόγω απειροστού όγκου οι μαζικές δυνάμεις θεωρούνται μηδενικές. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της περιστροφικής κίνησης των απειροστών μαζών οι καθολικές δυνάμεις δεν λαμβάνονται υπόψιν διότι έχει αποδειχθεί ότι οι αδρανειακές δυνάμεις μειώνονται πιο γρήγορα από τις ροπές αδρανείας όταν ο στοιχειώδης όγκος του μορίου πλησιάζει το μηδέν. Κάτω από αυτές τις συνθήκες ο τανυστής των τάσεων που περιέχει τις ελαστικές δυνάμεις αποκατάστασης είναι πάντα συμμετρικός και έτσι οι στροφές των μορίων δεν λαμβάνονται υπόψιν στην γραμμική δυναμική των διαταραχών. Οπότε η εξίσωση κίνησης περιγράφεται από τη σχέση

$$\nabla \cdot T = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.3) \quad [6] \quad [7].$$

2.2.3 Χρήση των βασικών σχέσεων της γραμμικής ελαστικότητας για την περιγραφή του φαινομένου της διάδοσης των κυμάτων.

Τα υπερηχητικά κύματα μπορούν να απεικονιστούν ως ένας μη πεπερασμένος αριθμός μοριακών ταλαντώσεων που συνδέονται με ελαστικά ελατήρια (Μοντέλο αρμονικού ταλαντωτή). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό κάθε μόριο επηρεάζεται από την κίνηση του γειτονικού μορίου και κατ' επέκταση στο σύστημα των γειτονικών μορίων αναπτύσσονται αδρανειακές και ελαστικές δυνάμεις αποκατάστασης. Οι δυνάμεις αποκατάστασης μπορούν να περιγράφουν από τον νόμο του Hooke σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο $F = -kx$ (2.4) όπου F η δύναμη αποκατάστασης, k η σταθερά ελατηρίου και x η συνολική μετατόπιση των μορίων. Για μικρές παραμορφώσεις έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η παραμόρφωση είναι γραμμικά ανάλογη με την εφαρμοζόμενη τάση (ελαστική δύναμη αποκατάστασης). Όσο αυξάνει όμως η παραμόρφωση η σχέση τάσης παραμόρφωσης γίνεται μη γραμμική. Παρόλα αυτά τα μόρια επανέρχονται στην αρχική τους θέση όταν οι τάσεις πάψουν να ασκούνται. Στην περίπτωση αυτή μιλάμε για ένα εύρος γραμμικής μη γραμμικής ελαστικής παραμόρφωσης. Όταν όμως η παραμόρφωση

αυξηθεί πάνω από το όριο ελαστικότητας τότε γίνεται πλαστική και τα μόρια αδυνατούν να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση. Η θεωρία της ακουστικής ασχολείται μόνο με την ελαστική σχέση τάσης παραμόρφωσης για να καθορίσει τις μικροσκοπικές ελαστικές σταθερές. Έτσι σύμφωνα με τον νόμο του Hooke η παραμόρφωση είναι γραμμικά ανάλογη με τη τάση (ελαστική δύναμη αποκατάστασης) $T_{ij} = C_{ijkl} E_{kl}$ (2.5)

όπου T_{ij} : ο τανυστής των τάσεων που προκαλούνται από την ελαστική δύναμη αποκατάστασης, C_{ijkl} : ο τανυστής ελαστικών σταθερών ή μητρώο ακαμψίας, E_{kl} : τανυστής των παραμορφώσεων. Ο τανυστής που περιέχει τις ελαστικές σταθερές παίρνει μεγάλες τιμές για ψαθυρά υλικά και χαμηλές τιμές για όλκιμα υλικά. Οι θεμελιώδεις σχέσεις που χρησιμοποιούνται για το φαινόμενο της διάδοσης των κυμάτων σε ένα γραμμικά ελαστικό και ομογενές σώμα δίνονται συνοπτικά παρακάτω:

$$\nabla \cdot T + \rho B = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{Εξίσωση κίνησης – Cauchy equation of motion}) \quad (2.6)$$

$$T_{ij} = \lambda e \delta_{ij} + 2\mu E_{ij} \quad (\text{Καταστατική σχέση – Hooke's law}) \quad (2.7)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{Σχέσεις μετατοπίσεων παραμορφώσεων}) \quad (2.8)$$

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{Σχέσεις μετατοπίσεων στροφών}) \quad (2.9)$$

Έχει αποδειχθεί παραπάνω ότι ο τανυστής των τάσεων T_{ij} είναι συμμετρικός δηλαδή $T_{ij} = T_{ji}$. Οι καθολικές/μαζικές δυνάμεις για κάθε μονάδα μάζας του υλικού συμβολίζονται με B_i και η πυκνότητα μάζας δίδεται στη μονάδα του όγκου και συμβολίζεται με ρ . Αντίστοιχα οι τανυστές των παραμορφώσεων και των στροφών συμβολίζονται με E_{ij} και ω_{ij} . Οι ελαστικές σταθερές για το υλικό είναι το λ και το μ όπου ονομάζονται οι σταθερές του Lamé. Το μ είναι συνήθως το μέτρο διάτμησης G . Και οι δύο σταθερές μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των υπόλοιπων ελαστικών σταθερών όπως το μέτρο ελαστικότητας (Young modulus, E_Y) τον λόγο Poisson (ν Poisson ratio) και το μέτρο

διόγκωσης (Bulk modulus, K). Το μέτρο διόγκωσης K ορίζεται ως ο λόγος της εξωτερικά εφαρμοζόμενης υδροστατικής πίεσης p ως προς την διασταλτικότητα e_{kk} , Συνοπτικά καταγράφονται οι σχέσεις που συνδέουν τις σταθερές αυτές μεταξύ τους.

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{2G\nu}{1-2\nu} = \frac{G(E-2G)}{3G-E} = K - \frac{2}{3}G = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \frac{3K\nu}{1+\nu} = \frac{3K(3K-E)}{9K-E} \\ G &= \frac{\lambda(1-2\nu)}{2\nu} = \frac{3}{2}(K-\lambda) = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)} = \frac{3K(1-2\nu)}{9K-E} = \frac{3KE}{9K-E} \\ \nu &= \frac{\lambda}{2(\lambda+G)} = \frac{\lambda}{3(K-\lambda)} = \frac{E}{2G} - 1 = \frac{3K-2G}{2(3K+G)} = \frac{3K-E}{6K} \\ E &= \frac{G(3\lambda+2G)}{\lambda+G} = \frac{\lambda(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu} = \frac{9K(K-\lambda)}{3K-\lambda} = 2G(1+\nu) = \frac{9KG}{3K+G} = 3K(1-2\nu) \\ K &= \lambda + \frac{2}{3}G = \frac{\lambda(1+\nu)}{3\nu} = \frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)} = \frac{GE}{3(3G-E)} = \frac{E}{3(1-2\nu)}\end{aligned}\tag{2.11}$$

Και οι συνδυασμοί που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στη βιβλιογραφία είναι οι σχέσεις

$$\frac{G}{\lambda+G} = 1-2\nu \text{ και } \frac{\lambda}{\lambda+2G} = \frac{\nu}{1-\nu}$$

Συνδυάζοντας και τις τέσσερις θεμελιώδεις σχέσεις (2.7-2.10) της διάδοσης των κυμάτων σε ένα ελαστικό σώμα και εκφρασμένες ως προς τη μετατόπιση των υλικών σημείων του σώματος προκύπτουν οι εξισώσεις Navier (Navier's equations) που στην ουσία είναι οι εξισώσεις κίνησης σε όρους του πεδίου των μετατοπίσεων των υλικών σημείων.

$$(\lambda + \mu)\nabla^2 u + \mu\nabla^2 u + \rho B = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \text{ (εξισώσεις Navier)}\tag{2.12}$$

η οποία όταν ανοιχτεί σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων δίνει τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned}(\lambda + \mu)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x\partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x\partial z}\right) + \mu\nabla^2 u + \rho B_x &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ (\lambda + \mu)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y\partial z} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y\partial z}\right) + \mu\nabla^2 v + \rho B_y &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}\end{aligned}\tag{2.13}$$

$$(\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial x} + \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \mu \nabla^2 w + \rho B_z = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

Όπου u, v, w οι μετατοπίσεις των υλικών σημείων ως προς τις κατευθύνσεις x, y, z του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Από τις παραπάνω σχέσεις εκφράζεται η διασταλτικότητα του υλικού μέσου ως

$\Delta = \nabla \cdot u = e_x + e_y + e_z = e_{kk}$ οπότε η σχέση (2.12) μπορεί να εκφραστεί με όρους διασταλτικότητας όπως

$$(\lambda + \mu) \nabla \Delta + \mu \nabla^2 u + \rho B = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.14).$$
 Χρησιμοποιώντας την ταυτότητα

$\nabla^2 u = \nabla \nabla \cdot u - \nabla \times \nabla \times u$ η σχέση (2.14) μετασχηματίζεται ως

$$(\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot u - \mu \nabla \times \nabla \times u + \rho B = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.15).$$
 Γνωρίζοντας ότι $\omega = \frac{1}{2} \nabla \times u$

εξάγεται η τελευταία σχέση $(\lambda + 2\mu) \nabla \Delta - 2\mu \nabla \times \omega + \rho B = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.16)$ όπου

εκφράζει τη διάδοση δύο διαφορετικών τύπων κυμάτων στο ελαστικό μέσο.[8] [6]

2.2.4 Τρόποι διάδοσης ενός κύματος στο ελαστικό μέσο

Παραγωγίζοντας τη σχέση των εξισώσεων Navier θεωρώντας τις μαζικές δυνάμεις $B = 0$ ως προς όλες τις διευθύνσεις και χρησιμοποιώντας την ανιμεταθετική ιδιότητα των διανυσματικών τελεστών προκύπτει ότι

$$(\lambda + \mu) \nabla^2 u + \mu \nabla^2 u = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Rightarrow (\lambda + \mu) \nabla \cdot (\nabla \nabla \cdot u) + \mu \nabla (\nabla^2) u = \rho \nabla \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (2.17)$$

Εκφράζοντας τη σχέση αυτή με τον όρο της διασταλτικότητας προκύπτει η σχέση

$(\lambda + 2\mu)\nabla^2\Delta = \rho \frac{\partial^2\Delta}{\partial t^2}$ **(2.18)** η οποία δηλώνει μια εξίσωση κύματος όπου

$\nabla^2\Delta = \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2\Delta}{\partial t^2}$ **(2.19)** με ταχύτητα διάδοσης $c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ **(2.20)**. Όπως γίνεται

ανηλεπτό η διάδοση της διασταλτικότητας ή η αλλαγή όγκου του υλικού μέσου συνεπάγεται σε μια ταχύτητα διάδοσης c_1 . Χρησιμοποιώντας τον τελεστή της

στροφορμής στην σχέση **(2.17)** εξάγεται η σχέση $\mu\nabla^2\omega = \rho \frac{\partial^2\omega}{\partial t^2}$ **(2.21)** όπου

$\omega = \nabla \times \frac{u}{2}$ η οποία αντιστοιχεί στην εξίσωση κύματος $\nabla^2\omega = \frac{1}{c_2^2} \frac{\partial^2\omega}{\partial t^2}$ **(2.22)** με

ταχύτητα διάδοσης $c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ **(2.23)**. Κατά αυτόν τον τρόπο η διάδοση των στροφικών

κυμάτων γίνεται με την ταχύτητα διάδοσης c_2 .

Οπότε, συμπεραίνεται ότι στο εσωτερικό ενός ελαστικού υλικού μέσου τα κύματα διαδίδονται με δύο διαφορετικές ταχύτητες. Κύματα που δεν περιλαμβάνουν στροφή

διαδίδονται με ταχύτητα $c_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ όπου είναι τα διαμήκη κύματα ενώ τα κύματα

που δεν περιλαμβάνουν διασταλτικότητα διαδίδονται με ταχύτητα $c_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ όπου είναι

τα εγκάρσια κύματα [8].

Στα στερεά, τα ηχητικά κύματα μπορούν να διαδίδονται με τέσσερις τρόπους που βασίζονται στον τρόπο ταλάντωσης των μορίων. Έτσι λοιπόν ο ήχος διαδίδεται ως διαμήκη και εγκάρσια κύματα όπως εκτενώς αποδείχθηκε καθώς και ως επιφανειακά κύματα και ως κύματα πλάκας σε λεπτά υλικά. Η υπερηχητική μέθοδος χρησιμοποιεί κατά κόρων τα διαμήκη κύματα (ή κύματα συμπίεσης) και τα εγκάρσια κύματα ή (κύματα διάτμησης) για την διάδοση του ήχου. Στα διαμήκη κύματα η διεύθυνση ταλάντωσης των μορίων του υλικού μέσου είναι παράλληλη με την διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων.

Δεδομένου ότι κατά τη διάδοση των κυμάτων εμφανίζονται φαινόμενα διόγκωσης τα κύματα αυτά ονομάζονται και compressional waves ή density waves. Αντίθετα στα εγκάρσια κύματα η διεύθυνση ταλάντωσης των μορίων του υλικού μέσου είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η ένταση των εγκαρσίων κυμάτων είναι σχετικά μικρή συγκρίσει με τα διαμήκη κύματα. Συγκεκριμένα, στο σκυρόδεμα οι ταχύτητες των εγκαρσίων και των επιφανειακών κυμάτων είναι το 60% και 55% της ταχύτητας των διαμηκών κυμάτων. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα ενός κύματος είναι οι ελαστικές ιδιότητες και η πυκνότητα του μέσου.

Παρόλο αυτά, στις επιφάνειες και στις διεπιφάνειες των υλικών μπορούν να εμφανιστούν σύνθετες και ελλειπτικές δονήσεις των μορίων δημιουργώντας διαφορετικούς τύπους κυμάτων. Μερικά είδη κυμάτων όπως τα Rayleigh και Lamb κύματα είναι εξίσου χρήσιμα στην μέθοδο των υπερήχων. Έτσι, υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάδοσης ενός κύματος οποίοι αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα.

| Τύπος κύματος | Ταλάντωση σωματιδίων |
|----------------------|---------------------------------|
| Διαμήκη | Παράλληλα στη διεύθυνση κύματος |
| Εγκάρσια | Κάθετα στη διεύθυνση κύματος |
| Επιφανειακά | Ελλειπτική τροχιά |
| Κύματα Lamb | Κάθετα στη διεύθυνση επιφάνειας |

Πίνακας 1: Περιγραφή της ταλάντωσης των σωματιδίων που αντιστοιχεί σε κάθε τύπο κύματος.

Τα επιφανειακά (Rayleigh) κύματα διαδίδονται στην επιφάνεια ενός σχετικά λεπτού στερεού υλικού. Κοντά στην επιφάνεια ο μικρός ημιάξονας της έλλειψης είναι παράλληλος της διεύθυνσης της μετατόπισης και ο μεγάλος, κάθετα σε αυτήν και στην επιφάνεια του μέσου. Η φορά της ελλειπτικής τροχιάς είναι αντίστροφα από εκείνη της μετατόπισης. Τα πλάτη της ταλάντωσης μειώνονται με το βάθος ίσο με το μήκος κύματος λ όπου τα πλάτη σχεδόν μηδενίζονται. Τα κύματα Rayleigh είναι χρήσιμα διότι έχουν αυξημένη ευαισθησία στην ανίχνευση επιφανειακών ατελειών και μπορούν να διαδοθούν σε δύσκολα σημεία του σώματος όπως είναι τα καμπύλα σημεία του σώματος. Τα Plate ή Lamb κύματα πλακών μοιάζουν με τα επιφανειακά κύματα. Παράγονται όμως, σε πλάκες των οποίων

το πάχος είναι ίσο με μερικά μήκη κύματος και καταλαμβάνουν όλο το πάχος της πλάκας. Η διάδοση τους εξαρτάται από την πυκνότητα και τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού, ενώ παράλληλα επηρεάζεται από τη συχνότητα του κύματος και το πάχος της πλάκας. Υπάρχουν δύο τύποι κυμάτων πλακών, που ορίζονται από το είδος της κίνηση των δομικών σωματιδίων. Εάν τα δομικά σωματίδια κινούνται συμμετρικά, ως προς τον ουδέτερο άξονα της πλάκας, έχουμε τα διασταλτικά (dilatational) κύματα ενώ εάν κινούνται αντισυμμετρικά, έχουμε τα καμππικά (bending) κύματα.

2.2.5 Η επίδραση των ιδιοτήτων του υλικού στην ταχύτητα του ήχου-Απόδειξη της σχέσης της ταχύτητας των διαμήκων και των εγκάρσιων κυμάτων

Ο ήχος διαδίδεται με διαφορετικές ταχύτητες σε διαφορετικά υλικά αφού οι σταθερές ελατηρίου και η μάζα των ατόμων και των μορίων για κάθε σώμα είναι χαρακτηριστικά μοναδικά μεγέθη. Η μάζα των υλικών σημείων σχετίζεται με την πυκνότητα του υλικού και η σταθερά του ελατηρίου σχετίζεται με τις ελαστικές σταθερές του υλικού. Η γενική σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ήχου σε ένα στερεό και της πυκνότητάς του και των ελαστικών σταθερών δίνεται παρακάτω:

$$V = \sqrt{\frac{C_{ij}}{\rho}} \quad \text{όπου:}$$

V = ο ταχύτητα του ήχου

C_{ij} : ο τανυστής ελαστικών σταθερών

ρ : η πυκνότητα

Η μορφή της παραπάνω σχέσης εξαρτάται από το είδος του κύματος (διάμηκες ή εγκάρσιο) και από τις ελαστικές σταθερές που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση. Οι δείκτες ij υποδηλώνουν την κατεύθυνση των ελαστικών σταθερών. Στα ιστροπικά υλικά οι ελαστικές σταθερές έχουν την ίδια διεύθυνση σε όλα τα επίπεδα. Πάραυτα, τα περισσότερα υλικά είναι ανισοτροπικά συνεπώς οι ελαστικές σταθερές έχουν διαφορετική διεύθυνση σε κάθε επίπεδο. Για παράδειγμα σε μια πλάκα αλουμινίου που υφίσταται

εφελκυσμό στη μία διεύθυνση ταυτόχρονα δέχεται θλίψη στις άλλες διευθύνσεις συνεπώς οι ελαστικές σταθερές διαφέρουν κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση.[9]

Για τα διαμήκη κύματα η ταχύτητα του ήχου σε ένα στερεό υλικό είναι:

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{όπου:}$$

c_l : η ταχύτητα του ήχου στα διαμήκη κύματα

E : το μέτρο ελαστικότητας

ν : ο λόγος Poisson

Η σχέση αυτή προκύπτει από την αρχική εξίσωση για τη ταχύτητα διαμηκών κυμάτων

$$c_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{αντικαθιστώντας με } \lambda = \frac{2G\nu}{1-2\nu} = \frac{2\mu\nu}{1-2\nu} \text{ και } \mu = G = \frac{\lambda(1-2\nu)}{2\nu} \quad \text{(βλέπε$$

σχέσεις 2.13). Η σχέση που προκύπτει από τις δύο πρώτες αντικαταστάσεις είναι η

$$c_l = \sqrt{\frac{\lambda(1-2\nu)(1-\nu)}{\nu(1-2\nu)\rho}} \quad \text{Έπειτα γίνεται ξανά αντικατάσταση του } \lambda \text{ με το}$$

$$E = \frac{G(E\lambda + 2G)}{\lambda + G} = \frac{\lambda(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu} \Rightarrow \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

και τελικά προκύπτει η επιθυμητή σχέση ταχύτητας των διαμηκών κυμάτων που χρησιμοποιεί οι ακουστικές μέθοδοι όπως η υπερηχητική μέθοδος

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

Για τα εγκάρσια κύματα η ταχύτητα του ήχου είναι ίση με:

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{όπου:}$$

c_t : ταχύτητα του ήχου στα εγκάρσια κύματα

$$G : \text{μέτρο διάτμησης το οποίο προέρχεται από τη σχέση } G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα διαμήκη κύματα έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα από τα εγκάρσια περίπου τη διπλάσια ταχύτητα [10].

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ταχύτητες των διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων για διάφορα υλικά.

| Είδος υλικού | Ταχύτητα διαμηκών κυμάτων c_l (m/s) | Ταχύτητα εγκαρσίων κυμάτων c_t (m/s) |
|--------------|---------------------------------------|--|
| Aluminum | 6320 | 3130 |
| Steel(1020) | 5890 | 3240 |
| Cast iron | 4800 | 2400 |
| Copper | 4660 | 2330 |
| Titanium | 6070 | 3310 |

Πίνακας 2: Ταχύτητες διαμηκών και εγκαρσίων κυμάτων σε διάφορα υλικά.

2.3 Απόσβεση υπερηχητικών κυμάτων (Attenuation)

Η ένταση του υπερηχητικού κύματος που επιστρέφει στην πιεζοηλεκτρική κεφαλή, μετά τη διάδοση της στο εξεταζόμενο υλικό, είναι πολύ μικρότερη από την ένταση του αρχικά εκπεμπόμενου κύματος. Όλα τα υλικά παρουσιάζουν την τάση να εξασθενούν την ένταση των υπερηχητικών κυμάτων, άλλα περισσότερο και άλλα λιγότερο ανάλογα τη δομή τους. Η εξασθένηση αυτή, είναι αποτέλεσμα της διασποράς (scattering) και της απορρόφησης (absorption) που περιγράφονται συνολικά με τον όρο απόσβεση (attenuation). Απορρόφηση είναι η άμεση μετατροπή της μηχανικής ενέργειας των υπερηχητικών κυμάτων σε θερμότητα. Κατά την ελαστική κίνηση των στοιχειωδών σωματιδίων του μέσου, κάτω από την επίδραση του υπερηχητικού κύματος, θερμαίνονται τα σημεία, όπου σχηματίζονται πυκνώσεις και ψύχονται τα σημεία, όπου σχηματίζονται αραιώσεις. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση της ενέργειας του υπερηχητικού κύματος. Η απορρόφηση είναι πιο έντονη όταν οι ταλαντώσεις γίνονται με μεγαλύτερη ταχύτητα, δηλαδή με υψηλότερη συχνότητα. Στα περισσότερα υλικά η

απορρόφηση είναι ευθέως ανάλογη της συχνότητας των υπερηχητικών κυμάτων. Η διασπορά εμφανίζεται όταν η δέσμη των υπερήχων συναντά υπό γωνίες διάφορες διαχωριστικές επιφάνειες και ανακλάται ή διαθλάται ακανόνιστα ή μετατρέπεται σε άλλα είδη κυμάτων. Η απόσβεση γενικά είναι ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας του υπερήχου και γενικά του ήχου [11]. Η απόσβεση του πλάτους της έντασης του υπερηχητικού κύματος μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω σχέση:

$$P = P_0 e^{-\alpha d} \quad \text{όπου:}$$

P_0 : το αρχικό πλάτος της έντασης του υπερηχητικού κύματος

α : ο συντελεστής απόσβεσης

d : η απόσταση που έχει διανύσει το υπερηχητικό κύμα

Ο συντελεστής α καλείται συντελεστής απόσβεσης (*attenuation coefficient*) και εκφράζεται συνήθως σε dB/m ή σε dB/cm. Η συνολική απόσβεση σε μια απόσταση d του υλικού, προκύπτει από την παραπάνω

σχέση εάν πάρουμε το φυσικό λογάριθμο $\alpha d = \log \frac{P_0}{P}$. Εκφράζεται σε Nepers [Np] και ο συντελεστής

απόσβεσης α σε [Np/m]. Για πρακτικούς λόγους έχει καθιερωθεί σαν μονάδα απόσβεσης το decibel [dB] ή το [dB/m] το οποίο συνδέεται με το [Np] με τη σχέση $1[\text{dB/m}] = 868.6 [\text{Np/cm}]$. Η μονάδα decibel είναι το 1/10 του Bel, που είναι ο δεκαδικός λογάριθμος δύο ομοειδών μεγεθών.

Έτσι για δύο ομοειδή μεγέθη A_n, A_{n+1} ισχύει ότι η ένταση είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της ηχητικής

πίεσης [$J = f(P^2)$] συνεπώς η σχέση γίνεται $\alpha d = 10 \log \frac{J_0}{J} = 10 \log \frac{P_0^2}{P^2} = 20 \log \frac{P_0}{P} [\text{dB}]$

2.4 Ακουστική αντίσταση

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

$$Z = \rho \cdot c \quad \text{όπου:}$$

ρ : είναι η πυκνότητα του υλικού

c : η ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος στο υλικό

Στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών ο συντελεστής ανάκλασης R του κύματος θα ισούται με: $R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$ ενώ ο συντελεστής διάθλασης T θα ισούται με: $T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$.

Αυτές οι σχέσεις συνδέονται μεταξύ τους μέσω της $1 + R = T$ η οποία στηρίζεται στην συνέχεια της ηχητικής πίεσης. Εάν οι ακουστικές αντιστάσεις δύο υλικών είναι ίσες $Z_1 = Z_2$, τότε το κύμα δεν υφίσταται ανάκλαση και ισχύει $R = 0$, ενώ περνάει όλο στο δεύτερο υλικό οπότε $T = 1$. Σε περίπτωση που ένα διαμήκες κύμα προσπέσει υπό γωνία σε μια λεία επιφάνεια τότε, όπως ακριβώς ισχύει στην οπτική, θα υπάρξει ανάκλαση και διάθλαση. Με την μόνη διαφορά ότι θα δημιουργηθούν εγκάρσια και διαμήκη κύματα έχοντας τελικά τέσσερα συνολικά νέα κύματα. Στη περίπτωση υγρού ή αερίου τα εγκάρσια κύματα εξαφανίζονται. Οι γωνίες πρόσπτωσης, ανάκλασης και διάθλασης σχετίζονται μεταξύ τους μέσω του νόμου του Snell ως εξής. Κατά την πλάγια πρόσπτωση παράγονται τέσσερα είδη κυμάτων, δύο από ανάκλαση και δύο από διάθλαση. Όπως και στην οπτική ισχύει και εδώ ο νόμος του Snell:

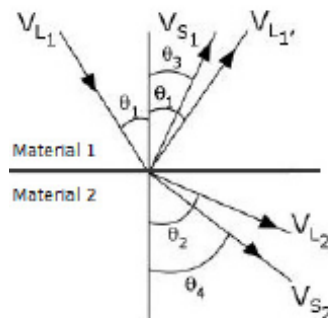
$$\frac{\sin \theta_1}{V_{L_1}} = \frac{\sin \theta_2}{V_{L_2}} = \frac{\sin \theta_3}{V_{S_1}} = \frac{\sin \theta_4}{V_{S_2}} \quad \text{όπου:}$$

V_{L_1}, V_{L_2} : ταχύτητες διαμηκών κυμάτων στο πρώτο και στο δεύτερο υλικό αντίστοιχα

V_{S_1}, V_{S_2} : ταχύτητες εγκαρσίων κυμάτων στο πρώτο και στο δεύτερο υλικό αντίστοιχα

θ_1, θ_2 : γωνίες των προσπιπτόντων και διαθλώμενων διαμηκών κυμάτων αντίστοιχα

θ_3, θ_4 : γωνίες των ανακλώμενων και διαθλώμενων εγκαρσίων κυμάτων αντίστοιχα



Εικόνα 2: Εφαρμογή του Νόμου Snell σε 2 υλικά.

Όταν ένα ηχητικό κύμα κατά την πορεία του μέσα σε ένα υλικό συναντήσει ένα εμπόδιο (ασυνέχεια, δευτερογενές σωματίδιο κ.α.), τότε ανάλογα με το μέγεθος του εμποδίου σε σχέση με το μήκος κύματος μπορεί να υποστεί σκέδαση, περίθλαση ή συμβολή. Έτσι προκύπτουν οι εξής περιπτώσεις: α) εάν $d \ll \lambda$, τότε το κύμα δεν επηρεάζεται από το εμπόδιο β) εάν $d = \lambda$, τότε το κύμα υφίσταται ανακλάσεις προς όλες τις κατευθύνσεις και παρατηρείται το φαινόμενο της σκέδασης. γ) εάν $d > \lambda$, τότε το κύμα παρακάμπτει το εμπόδιο και διαδίδεται πίσω από αυτό. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται περίθλαση. Τέλος παρατηρείται το φαινόμενο της συμβολής, όπου το ανακλώμενο κύμα υπερτίθεται στο αρχικό.

2.5 Αρχή παραγωγής των υπερήχων

2.5.1 Γενικά

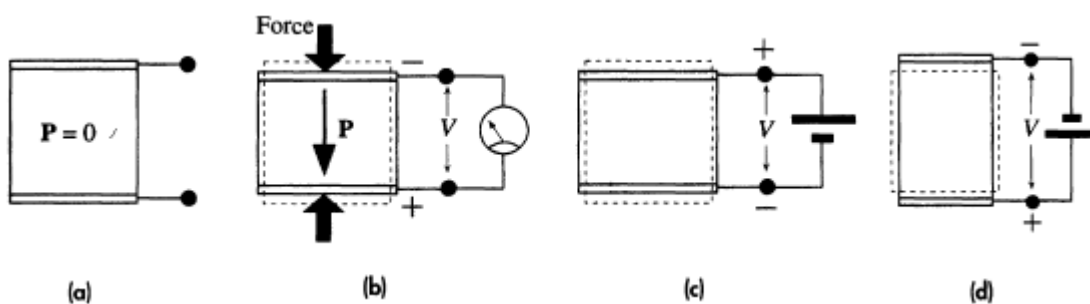
Υπάρχουν πολλοί τρόποι παραγωγής των υπερήχων. Πολλές φορές ίδιες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ακουστικών ήχων μπορεί να χρησιμοποιηθούν και για την παραγωγή των υπερήχων, εάν η φυσική συχνότητα του ταλαντωμένου στοιχείου είναι αρκετά υψηλή. Μεταξύ αυτών των μεθόδων είναι και η μηχανική μέθοδος ή άλλες που χρησιμοποιούν διάφορα φυσικά φαινόμενα, όπως είναι η μέθοδος της μαγνητοσυστολής (magnetostrictive) και του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου (piezo - electric effect). Εξ αυτών των μεθόδων, η μηχανική μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για το μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών, επειδή δε μπορεί να παράγει υπερήχους υψηλών συχνοτήτων. Στην παρούσα ερευνητική δραστηριότητα προσεγγίζεται η πιεζοηλεκτρική μέθοδος παραγωγής υπερήχων και παρουσιάζονται όλες οι αρχές μεθόδου και λειτουργίας που χρησιμοποιεί η μέθοδος αυτή.

Οι κεφαλές υπερήχων (ultrasonic transducers) αποτελούν το αισθητήριο όργανο των συστημάτων υπερήχων που χρησιμοποιούνται στο μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών. Από το είδος, τα χαρακτηριστικά και κατ'επέκταση, τις ιδιότητες μιας κεφαλής υπερήχων, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η αξιοπιστία και η εγκυρότητα ενός ελέγχου. Στο μη

καταστροφικό έλεγχο των υλικών χρησιμοποιούνται αποκλειστικά πιεζοηλεκτρικές κεφαλές, δηλαδή κεφαλές που για την παραγωγή των υπερήχων στηρίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η κατηγοριοποίηση των πιεζοηλεκτρικών κεφαλών είναι ένα θέμα που αλλάζει, ανάλογα με την ακολουθούμενη μέθοδο ελέγχου και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους. Κάθε τύπος κεφαλής λειτουργεί σύμφωνα με συγκεκριμένη μέθοδο ελέγχου και τα κατασκευαστικά της στοιχεία, της προσδίδουν συγκεκριμένες ιδιότητες, που την καθιστούν κατάλληλη να ανταπεξέλθει σε ορισμένες μόνο εφαρμογές. Γίνεται ανηλεπτό ότι δεν υπάρχουν κεφαλές, οι οποίες να ικανοποιούν όλα τα είδη ελέγχου και όλες τις εφαρμογές.

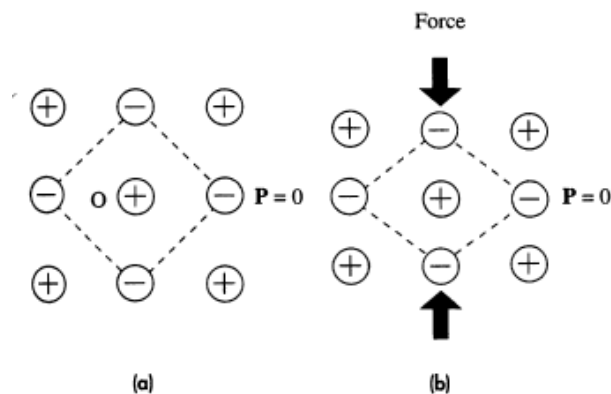
2.5.2 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Το φαινόμενο στο οποίο στηρίζουν τη λειτουργία τους οι κεφαλές παραγωγής υπερήχων είναι το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο το οποίο ανακαλύφθηκε από τον Pierre και Jacques Curie στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Ορισμένοι κρύσταλλοι όπως για παράδειγμα ο χαλαζίας (κρυσταλλικό SiO_2) και το BaTiO_3 πολώνονται δηλαδή δημιουργούνται φορτία όταν τους επιβάλλεται μηχανική τάση. Όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες η δημιουργία των επιφανειακών φορτίων συνεπάγεται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο επιφάνειες του κρυστάλλου. Οι ίδιοι κρύσταλλοι παραμορφώνονται μηχανικά όταν τους ασκείται ένα ηλεκτρικό πεδίο. Η διεύθυνση της μηχανικής παραμόρφωσης (συστολή ή διαστολή) εξαρτάται από τη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου ή αλλιώς από την πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης. Τα δύο αυτά φαινόμενα είναι συμπληρωματικά και αποδίδουν το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού.



Εικόνα 3: Απεικόνιση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.

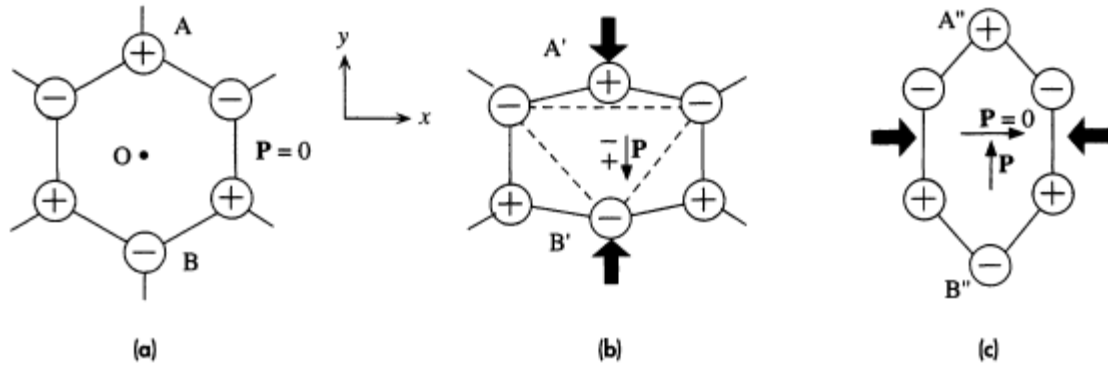
Μόνο συγκεκριμένοι κρύσταλλοι εμφανίζουν το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού αφού για την εμφάνιση του φαινομένου προϋποτίθεται η ύπαρξη μιας συγκεκριμένης κρυσταλλικής δομής χωρίς κέντρο συμμετρίας. Όταν μια κρυσταλλική δομή έχει κέντρο συμμετρίας σημαίνει ότι αν σχεδιαστεί ένα διάνυσμα από ένα σημείο προς οποιοδήποτε από τα φορτία και συνέχεια σχεδιαστεί το αντίθετο διάνυσμα τότε καταλήγουμε σένα όμοιο φορτίο. Κάθε σημείο που αντιστοιχεί σε ένα φορτίο είναι ένα κέντρο συμμετρίας. Πολλοί παρόμοιοι κρύσταλλοι κυβικοί έχουν κέντρο συμμετρίας. Όταν τους επιβάλλεται τάση το κέντρο μάζας των αρνητικών φορτίων που βρίσκονται στις γωνίες της μοναδιαίας κυψελίδας συμπίπτει με το θετικό φορτίο στο κέντρο της. Επομένως η μοναδιαία κυψελίδα δε θα είναι πολωμένη $\mathbf{P}=\mathbf{0}$. Όταν επιβάλλουμε μια τάση η μοναδιαία κυψελίδα παραμορφώνεται αλλά το κέντρο μάζας των αρνητικών φορτίων εξακολουθεί να συμπίπτει με το θετικό φορτίο και η συνολική πόλωση παραμένει μηδενική. Επομένως στον παραμορφωμένο κρύσταλλο εξακολουθεί να ισχύει $\mathbf{P}=\mathbf{0}$. Το δεδομένο αυτό ισχύει για όλους τους κρυστάλλους που έχουν κέντρο συμμετρίας. Τα κέντρα μάζας των αρνητικών και των θετικών φορτίων εξακολουθούν να συμπίπτουν ακόμα και όταν ο κρύσταλλος είναι παραμορφωμένος.



Εικόνα 4: Επιβολή μηχανικής τάσης σε κυβικό κρύσταλλο με κέντρο συμμετρίας.

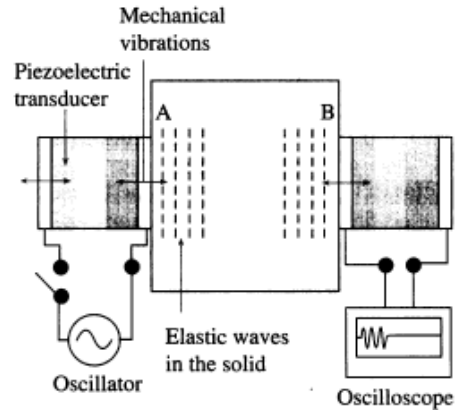
Οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι δεν έχουν κέντρο συμμετρίας. Η εξαγωνική μοναδιαία κυψελίδα δεν εμφανίζει κέντρο συμμετρίας. Αν σχεδιάσουμε ένα διάνυσμα από το σημείο Ο προς ένα από τα φορτία και στη συνέχεια σχεδιάσουμε το αντίθετο διάνυσμα τότε θα καταλήξουμε σε ένα αντίθετο φορτίο. Όταν δεν ασκείται τάση τότε το κέντρο μάζας των

αρνητικών φορτίων συμπίπτει με το κέντρο μάζας των θετικών φορτίων και βρίσκονται και τα δυο στο σημείο O . Όταν όμως ασκείται τάση στη μοναδιαία κυψελίδα τότε το θετικό φορτίο που βρίσκεται στο σημείο A και το αρνητικό φορτίο που βρίσκεται στο σημείο B μετατοπίζονται από τις αρχικές τους θέσεις και μεταβαίνουν στα σημεία A'' και B'' αντίστοιχα. Για το λόγο αυτό τα δυο κέντρα μάζας μετατοπίζονται και δημιουργείται μια συνολική πόλωση P . Επομένως η εφαρμογή μιας τάσης δημιουργεί μια συνολική πόλωση P στη μοναδιαία κυψελίδα η οποία στην περίπτωση που εξετάσαμε έχει την ίδια διεύθυνση με την εφαρμοζόμενη τάση. Η διεύθυνση της επαγόμενης πόλωσης εξαρτάται από τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης. Αν στην ίδια μοναδιαία κυψελίδα εφαρμόσουμε μια τάση κατά τη διεύθυνση x τότε δεν επάγεται διπολική ροπή σε αυτή τη διεύθυνση. Αφού δεν υπάρχει συνολικά καμία μετατόπιση των κέντρων μάζας στη διεύθυνση x . Η παραμόρφωση όμως προκαλεί τη μετατόπιση των ατόμων που βρίσκονται στα σημεία A και B προς τα έξω τα οποία μεταβαίνουν στα σημεία A'' και B'' αντίστοιχα. Έτσι τα κέντρα μάζας απομακρύνονται το ένα από το άλλο στη διεύθυνση y . Στην περίπτωση αυτή δηλαδή, η τάση που εφαρμόζεται στη διεύθυνση x επάγει μια πόλωση στη διεύθυνση y . Εν γένει μια τάση που ασκείται σε μία διεύθυνση μπορεί να δημιουργήσει επαγόμενη πόλωση σε άλλες κρυσταλλικές διευθύνσεις. Οπότε το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο περιγράφεται από τη παρακάτω γραμμική σχέση $P_j = d_{ij} T_j$ όπου d_{ij} είναι οι πιεζοηλεκτρικοί συντελεστές. Αντιστρέφοντας την τάση αντιστρέφουμε και την πόλωση. Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι αυτό που συνδέει την επαγόμενη παραμόρφωση S_j στη διεύθυνση j με το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο E_i στη διεύθυνση i το οποίο περιγράφεται από την παρακάτω εξίσου γραμμική σχέση $S_j = d_{ij} E_i$.



Εικόνα 5: Επιβολή μηχανικής τάσης σε μοναδιαία εξαγωνική κυψελίδα σε δύο διευθύνσεις.

Όπως φαίνεται οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι είναι ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς αφού μπορούν να μετατρέψουν ένα ηλεκτρικό σήμα δηλαδή ένα ηλεκτρικό πεδίο σε ένα μηχανικό σήμα δηλαδή σε παραμόρφωση και αναστρόφως. Οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς που χρησιμοποιούνται στις υπερηχητικές συσκευές είναι ουσιαστικά ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος ο οποίος έχει κατάλληλες διαστάσεις και στο οποίο έχουν συνδεθεί ηλεκτρόδια προκειμένου να δημιουργεί τους επιθυμητούς τύπους μηχανικών ταλαντώσεων (διαμήκεις ή εγκάρσιες ταλαντώσεις). Ο μετατροπέας διεγείρεται από μια AC πηγή πράγμα που τον αναγκάζει να ταλαντώνεται μηχανικά. Οι ταλαντώσεις αυτές μεταφέρονται στο στερεό μέσω ενός κατάλληλου συζευκτικού υλικού συνήθως γράσο. Έτσι δημιουργούνται τα υπερηχητικά μηχανικά ή ελαστικά κύματα τα οποία διαδίδονται στο υλικό. Όταν αυτά φτάσουν στην άλλη άκρη του υλικού τότε αυτά προκαλούν την μηχανική ταλάντωση του δεύτερου μετατροπέα που εφάπτεται στην επιφάνεια και οι ταλαντώσεις μετατρέπονται σε ένα ηλεκτρικό σήμα το οποίο μπορεί εύκολα να απεικονιστεί σε έναν παλμογράφο. Στην πράξη ο ίδιος κρύσταλλος χρησιμοποιείται και σαν πομπός και σαν δέκτης των υπερηχητικών ελαστικών κυμάτων [12].



Εικόνα 6: Πειραματική διάταξη της υπερηχητικής μεθόδου.

2.5.3 Πιεζοηλεκτρικά υλικά

Τα βασικά χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών μετατροπένων είναι η μεγάλη ευαισθησία τους καθώς και η καλή απόδοση μετατροπής της ενέργειας δηλαδή ο παράγοντας ηλεκτρομηχανικής σύζευξης. Φυσικής προέλευσης πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι ο χαλαζίας ο οποίος έχει το πλεονέκτημα ότι αντέχει στη φθορά αλλά έχει χαμηλές πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Τεχνικά παρασκευασμένοι μετατροπείς είναι το πτανικό βάριο BaTiO_3 το οποίο ανήκει στους κεραμικούς μετατροπείς, Είναι άριστος πομπός με καλές πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες και μπορεί να σχηματίσει εσπασμένη δέσμη. Έχει όμως το μειονέκτημα να είναι ευαίσθητος στην αύξηση της θερμοκρασίας. Ακόμα ο Ζirkοπιτανικός Μόλυβδος PZT έχει πολύ καλές πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Το PZT είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι πιεζοηλεκτρικό υλικό σήμερα. Διατηρεί καλές ιδιότητες εκπομπής αλλά είναι δύσκολη η επαργύρωση του. Επίσης έχει μεγάλη μηχανική αντοχή μπορεί να λάβει διάφορα σχήματα και μεγέθη μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες υψηλότερες των $100\text{ }^\circ\text{C}$ και είναι σταθερό για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι ιδιότητες του μπορούν να ρυθμιστούν με τη τροποποίηση της αναλογίας ζirkονίου πτανίου και την προσθήκη μικρής ποσότητας άλλων ουσιών.

2.5.4 Τύποι πιεζοηλεκτρικών κεφαλών

2.5.4.1 Κεφαλές καθέτου δέσμης

Οι κεφαλές εκείνες που εκπέμπουν και λαμβάνουν υπερηχητικούς παλμούς, κάθετα προς την επιφάνεια του δοκιμίου ονομάζονται κεφαλές καθέτου δέσμης (normal beam probes or straight beam probes). Εάν ο κρύσταλλος έχει κοπεί κατά τον άξονα x , τότε η κεφαλή αυτή είναι καθέτου δέσμης και παράγει διαμήκη κύματα, ενώ εάν ο κρύσταλλος έχει κοπεί κατά τον άξονα y τότε η κεφαλή είναι πάλι καθέτου δέσμης αλλά παράγει εγκάρσια κύματα. Οι κεφαλές καθέτου δέσμης χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε κάθε είδους εφαρμογή υπερηχητικού ελέγχου των υλικών, οι βασικότερες των οποίων είναι η ανίχνευση ατελειών προσανατολισμένων παράλληλα προς την επιφάνεια του δοκιμίου, στις παχυμετρήσεις για τον προσδιορισμό του πάχους των δοκιμίων, στον προσδιορισμό της άγνωστης ταχύτητας των ηχητικών κυμάτων, διαμηκών ή εγκάρσιων ανάλογα με το είδος του κρυστάλλου και τον προσδιορισμός της απόσβεσης τους κατά τη διέλευση τους μέσα από το ελεγχόμενο υλικό. Με τις ταχύτητες των διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων, στη συνέχεια προσδιορίζονται οι ελαστικές σταθερές των υλικών.

2.5.4.2 Κεφαλές γωνιακής δέσμης

Η κατασκευή και αυτών των, κεφαλών, είναι παρόμοια με την κατασκευή των κεφαλών καθέτου δέσμης. Η μόνη διαφορά είναι ότι η παραγόμενη ηχητική δέσμη διαμηκών κυμάτων συναντά υπό γωνία την επιφάνεια του δοκιμίου. Κατά την πρόσπτωση της ηχητικής δέσμης στη διαχωριστική επιφάνεια της κεφαλής του δοκιμίου και εφ' όσον το υλικό του δοκιμίου είναι διαφορετικό του υλικού της σφήνας της κεφαλής, η ηχητική δέσμη αναλύεται, σύμφωνα με το νόμο της ανακλάσεως του Snell, σε δύο δέσμες ανακλάσεως (διαμήκη και εγκάρσια) και δύο επίσης δέσμες διαθλάσεως (διαμήκη και εγκάρσια). Με κατάλληλη ρύθμιση της γωνιάς προσπτώσεως, η δέσμη των διαμηκών διαθλώμενων κυμάτων χάνεται και μένει μόνο η δέσμη των εγκάρσιων κυμάτων. Οι γωνιακές κεφαλές

χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση ατελειών κεκλιμένων ως προς την επιφάνεια του δοκιμίου, που δεν ανιχνεύεται εύκολα με κεφαλές καθέτου δέσμης. Ιδιαίτερα δε χρησιμοποιούνται σε προβλήματα συγκολλήσεων, όπως και για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων, η οποία χρειάζεται για τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών των υλικών. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στον προσδιορισμό του πάχους του δοκιμίου. Ο κρύσταλλος συνήθως έχει ορθογωνική γεωμετρία.

2.5.4.3 Κεφαλές διπλού κρυστάλλου

Σ' αυτού του είδους τις κεφαλές υπάρχουν δύο κρύσταλλοι, εκ των οποίων ο ένας χρησιμεύει για να παράγει τους υπερηχητικούς παλμούς (πομπός) και ο άλλος για να λαμβάνει (δέκτης). Αυτές οι κεφαλές ονομάζονται κεφαλές διπλού κρυστάλλου (twin crystal probes) ή κεφαλές TR (transmitter receiver probes). Σε πρακτικές εφαρμογές συναντώνται καταστάσεις όπου πρέπει να ελέγχονται λεπτά δοκίμια ή να ανιχνεύονται ατέλειες που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια τους. Σ' αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούμε τις κεφαλές διπλού κρυστάλλου. Οι δύο κρύσταλλοι σχηματίζουν μικρή γωνία, γνωστή σαν γωνία οροφής (roof angle) και είναι ηλεκτρικά και ακουστικά μονωμένοι μεταξύ τους. Όσο πιο μεγάλη είναι αυτή η γωνία τόσο πιο μικρή είναι η νεκρή ζώνη, αλλά επίσης μικρή θα είναι και η περιοχή μέγιστης ευαισθησίας. Ενώ όσο πιο μικρή είναι η γωνία οροφής, τόσο πιο μεγάλη είναι η νεκρή ζώνη αλλά μεγάλη είναι επίσης και η περιοχή μέγιστης ευαισθησίας.

2.5.4.4 Εμβαπτιζόμενες κεφαλές

Οι εμβαπτιζόμενες κεφαλές είναι μια ειδική κατηγορία υπερηχητικών κεφαλών και χρησιμοποιούνται κυρίως σε αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου όπως η σάρωση σημείου προς σημείου (C-Scan). Επειδή η λειτουργία των εμβαπτιζόμενων κεφαλών προϋποθέτει την παρουσία κάποιου ρευστού που παρεμβάλλεται ανάμεσα στην κεφαλή

και στο δοκίμιο, παράγονται μόνο διαμήκη κύματα καθώς τα υγρά δε μπορούν να μεταδώσουν εγκάρσια κύματα.

2.5.4.5 Κεφαλές μεταβλητής γωνίας

Οι κεφαλές μεταβλητής γωνίας είναι κεφαλές γωνιακής δέσμης, οι οποίες είναι εφοδιασμένες με κατάλληλο εξοπλισμό που μπορεί να μεταβάλλει τη γωνία διαθλάσεως μεταβάλλοντας τη γωνία προσπίπτουσας. Στις κεφαλές αυτές η σφήνα plexiglas έχει αντικατασταθεί από υγρό (ειδικό λάδι) κατάλληλου δείκτη διαθλάσεως. Έτσι εξασφαλίζεται η συνεχής επαφή του κρυστάλλου, ο οποίος περιστρέφεται γύρω από ένα άξονα κάθετο προς το επίπεδο της κεφαλής . κρυστάλλου είναι τέτοια ώστε η γωνία διαθλάσεως μεταβάλλεται από 30° έως 90° περίπου. Η περιστροφή του στο χάλυβα μεταβάλλεται από 30° έως 90° περίπου.

2.5.4.6 Ειδικού τύπου κεφαλές

Πέραν των παραπάνω κεφαλών υπάρχουν επίσης και κεφαλές ειδικού τύπου , που χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένες εφαρμογές. Τέτοιές είναι οι κεφαλές για δοκίμια υψηλών θερμοκρασιών που περιέχουν μια επαφή από κεραμικό υλικό , οι εσπιαζόμενες κεφαλές που κατασκευάζονται με ορισμένη καμπυλότητα οι κεφαλές που ελέγχουν δοκίμια πολύ μεγάλης απόσβεσης καθώς και οι κεφαλές που αποσκοπούν στον έλεγχο σωλήνων σιδηροτροχιών η ακόμα και ανθρώπων [13].

Κεφαλαίο 3: Σκυρόδεμα ως υλικό κατασκευών

3.1 Γενικά

Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο δομικό υλικό είναι το σκυρόδεμα το οποίο κατασκευάζεται με ανάμιξη τσιμέντου τύπου Portland με άμμο, θρυμματισμένη πέτρα και νερό. Σε πολλές χώρες η κατανάλωση σκυροδέματος υπερβαίνει την κατανάλωση του χάλυβα περίπου 10 φορές. Η συνολική παγκόσμια κατανάλωση εκτιμάται σε 5.5 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως [14]. Ο άνθρωπος δεν καταναλώνει κανένα υλικό σε τόσο μεγάλες ποσότητες εκτός από το νερό. Το σκυρόδεμα έχει χαμηλότερη αντοχή από τον χάλυβα, έτσι λοιπόν τίθεται το ερώτημα γιατί είναι το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στη μηχανική. Υπάρχουν τρεις τουλάχιστον βασικοί λόγοι: Αρχικά το σκυρόδεμα έχει εξαιρετική συμπεριφορά στο νερό σε αντίθεση με το ξύλο και τον απλό χάλυβα (ακόμα και σήμερα σώζονται υδραγωγεία από σκυρόδεμα της Ρωμαϊκής εποχής). Η μεγάλη ανθεκτικότητά του σε διάρκεια και στις περιβαλλοντικές επιδράσεις το καθιστούν ιδανικό υλικό για την κατασκευή δομών για την αποθήκευση και τη μεταφορά του νερού. Η χρήση απλού σκυροδέματος στην κατασκευή των φραγμάτων και στην επικάλυψη σκυροδέματος στα πεζοδρόμια είναι πλέον κοινό θέαμα σχεδόν παντού στον κόσμο. Επίσης χρησιμοποιείται σε δάπεδα δοκούς θεμέλια κπρίων στέγες και εξωτερικούς τοίχους. Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι σκυρόδεμα που συνήθως περιέχει χαλύβδινες ράβδους με σκοπό να αλληλοεπιδρούν τα δύο υλικά και να βελτιώνουν τις μηχανικές του ιδιότητες. Με την προένταση του οπλισμένου σκυροδέματος η υπάρχουσα τάση στις χαλύβδινες ράβδους προλαμβάνει τυχόν ρωγμές σε εφελκυστικά φορτία. Ο δεύτερος λόγος για την εκτεταμένη χρήση του σκυροδέματος στη μηχανική, είναι η ευκολία με την οποία τα δομικά στοιχεία του σκυροδέματος μπορούν να διαμορφωθούν σε ένα μεγάλο εύρος σχημάτων και μεγεθών. Ο τρίτος λόγος για τη δημοτικότητα του σκυροδέματος στους μηχανικούς είναι η χαμηλή του αξία, η άμεση διαθεσιμότητα των συστατικών του και η σχετικά χαμηλή ενέργεια που απαιτείται για την παρασκευή του.

Ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία ευνοούν την χρήση του σκυροδέματος έναντι του χάλυβα είναι:

1. Συντήρηση: Το σκυρόδεμα δεν διαβρώνει εύκολα δεν χρειάζεται επιφανειακή επεξεργασία και η αντοχή του αυξάνεται με το πέρασμα των χρόνων. Επομένως οι κατασκευές από σκυρόδεμα χρειάζονται λιγότερη συντήρηση έναντι των χαλύβδινων κατασκευών οι οποίες υφίστανται μεγάλη διάβρωση σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Απαιτούν δαπανηρή επιφανειακή επεξεργασία και άλλες μεθόδους προστασίας και συνεπάγεται μεγάλα έξοδα συντήρησης και επισκευής.
2. Αντοχή στη φωτιά: Το σκυρόδεμα έχει την ιδιότητα να μην διαβρώνεται ή να υποβαθμίζει τις ιδιότητες του σε μεγάλο βαθμό από αυξημένη θερμότητα όπως είναι η επίδραση της φωτιάς.
3. Αντοχή στις κυκλικές φορτίσεις: Η αντοχή στη κόπωση του οπλισμένου σκυροδέματος είναι αυξημένη και επηρεάζεται από τασικά πεδία που προκύπτουν στις συγκολλήσεις ή από ξαφνική διάβρωση της κατασκευής [15]

3.2 Κατηγορίες σκυροδέματος

Για τη μελέτη και κατασκευή των έργων χρησιμοποιούνται οι κατηγορίες σκυροδέματος του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-97), όπου ο πρώτος αριθμός κάθε κατηγορίας ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή εκφραζόμενη σε MPa που διαπιστώνεται όταν ο έλεγχος γίνεται με κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 15 cm και ύψους 30 cm. Ο δεύτερος αριθμός εκφράζει την χαρακτηριστική αντοχή όταν ο έλεγχος γίνεται με κυβικά δοκίμια ακμής 15 cm. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένες κατηγορίες σκυροδέματος όπου ο πρώτος αριθμός κάθε κατηγορίας ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή του κυλίνδρου, ενώ ο δεύτερος την χαρακτηριστική αντοχή του κύβου σε MPa, στις 28 ημέρες.

| Κατηγορία σκυροδέματος | $F_{cylinder}^c$ (MPa) | F_{cube}^c (MPa) |
|------------------------|------------------------|--------------------|
| C8/10 | 8 | 10 |
| C12/15 | 12 | 15 |
| C16/20 | 16 | 20 |
| C20/25 | 20 | 25 |
| C25/30 | 25 | 30 |
| C30/37 | 30 | 37 |
| C35/45 | 35 | 45 |
| C40/50 | 40 | 50 |
| C45/55 | 45 | 55 |
| C50/60 | 50 | 60 |

Πίνακας 3: Κατηγορίες Σκυροδέματος σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος.

3.3 Η Δομή του σκυροδέματος

Η δομή του σκυροδέματος (τύπος, ποσότητα, μέγεθος, σχήμα και κατανομή των διαφόρων φάσεων) είναι εξαιρετικά ανομοιογενής και περίπλοκη. Παρόλα αυτά, η κατανόηση των βασικών στοιχείων της δομής του σκυροδέματος θεωρείται ιδιαίτερα απαραίτητη για να εξηγηθούν οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τις σημαντικότερες ιδιότητές του (αντοχή, ελαστικότητα, συστολή, ερπυσμός, ρηγμάτωση, ανθεκτικότητα σε διάρκεια).

Τα κύρια συστατικά του σκυροδέματος είναι τα αδρανή (άμμος, χαλίκι, σκύρα) διαφόρων σχημάτων και μεγεθών τα οποία είναι συγκολλημένα μεταξύ τους μέσω του ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού, που είναι το προϊόν της αντίδρασης του νερού με το τσιμέντο. Η πολυπλοκότητα της δομής του σκυροδέματος αποκαλύπτεται σε μικροσκοπικό επίπεδο (δηλαδή με τη παρατήρηση μέσω ηλεκτρονικού οπτικού μικροσκοπίου, όπου παρατηρούνται τα παρακάτω φαινόμενα: Πρώτον, διακρίνεται μία τρίτη φάση, η μεταβατική ζώνη, η οποία ανιππροσωπεύει την περιοχή της διεπιφάνειας

μεταξύ των μεγάλων αδρανών και του τσιμεντοπολτού και έχει πάχος 10-50 μm περίπου. Η ζώνη αυτή είναι γενικά ασθενέστερη από τα προαναφερθέντα συστατικά του σκυροδέματος και επηρεάζει σημαντικότερα τη μηχανική συμπεριφορά του. Δεύτερον, η κάθε μία από τις παραπάνω τρεις φάσεις είναι από τη φύση της πολυφασική. Για παράδειγμα, τα αδρανή αποτελούνται από διάφορα ορυκτά, μικρορωγμές και κενά, ενώ ο τσιμεντοπολτός και η μεταβατική ζώνη αποτελούνται από διάφορα στερεά σωματίδια, πόρους και μικρορωγμές. Τρίτον, η δομή του σκυροδέματος δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται με το χρόνο, την υγρασία του περιβάλλοντος και τη θερμοκρασία.

3.4 Συστατικά του σκυροδέματος

3.4.1 Αδρανή

Γενικά τα αδρανή (που ονομάζονται έτσι γιατί είναι από χημική άποψη αδρανή προς το τσιμέντο) προέρχονται απευθείας από τη φύση ή με συλλογή από ρέματα κλπ. (φυσικά ή συλλεκτά) ή από θραύση πετρωμάτων (θραυστά). Για τα κοινά σκυροδέματα και τις ελληνικές συνθήκες, τα καλύτερα αδρανή προέρχονται από ασβεστολιθικά ή πυριπικά πετρώματα. Ιδιαίτερα σημαντικοί παράγοντες για τις ιδιότητες του σκυροδέματος είναι το πορώδες, το σχήμα και η υφή των αδρανών. Οι κόκκοι μπορεί να είναι στρογγυλοί, κυβόμορφοι, γωνιώδεις, πλακόμορφοι ή επιμήκεις (σχήμα). Από πλευράς εργασιμότητας καλύτεροι είναι οι στρογγυλοί ή κυβόμορφοι κόκκοι ενώ από πλευράς μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος, οι κόκκοι με ανώμαλη επιφάνεια. Δηλαδή συνολικά καλύτερα είναι τα θραυστά αδρανή με κόκκους που δεν είναι επιμήκεις και πλακοειδείς. Στα αδρανή υλικά ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες

| Κατηγορία αδρανών | Μέγεθος κόκκων |
|----------------------|---|
| α) Άμμος | μέχρι 2,5 mm |
| β) Λεπτόκοκκα σκύρα | ριζάκι 2,5-7 mm γαρμπίλι 7-14 mm σκύρα 14-30 mm |
| γ) Χονδρόκοκκα σκύρα | 30-70 mm |

Rounded



Spherical



Irregular



Highly irregular



Flat or oblate



Elongated (needle-like)

Angular



Cubical



Irregular (chunky)



Highly irregular



Flat or flaky



Elongated (prismatic)

Πίνακας 4: Κατηγορίες των αδρανών και το αντίστοιχο μέγεθος κόκκων που τα χαρακτηρίζει.

Με εξαίρεση τα περισσότερα ελαφρά αδρανή με κυψελωτή δομή (π.χ κίσηρη) τα αδρανή έχουν γενικά μεγαλύτερη αντοχή από τις άλλες φάσεις του σκυροδέματος, για αυτό και δεν επηρεάζουν την αντοχή του άμεσα αλλά έμμεσα, μέσω του σχήματος και του μεγέθους τους.

3.4.1 Τσιμέντο

Στο τσιμέντο που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος είναι βιομηχανικό κοκκώδες υλικό με υδραυλικές ιδιότητες. Δηλαδή σκληραίνει όταν αναμιγνύεται με το νερό σχηματίζοντας προϊόντα αδιάλυτα στο νερό. Είναι γνωστό ότι το τσιμέντο αποτελεί από αρχαιοτάτων χρόνων εξαίρετη υδραυλική κονία με εξαιρετικές ιδιότητες. Χρησιμοποιείται ευρύτατα και σήμερα σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, εκτός από την βιομηχανοποιημένη διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος, καθώς εκτός από την

υψηλή υδραυλικότητα συνδυάζει και υψηλές αντοχές. Σο τσιμέντο είναι τεχνητή λεπτόκοκκη κονία, η οποία παρασκευάζεται με λεπτή άλεση του κλίνκερ. Κλίνκερ ονομάζεται διεθνώς το προϊόν που προκύπτει από την όπτηση μίγματος ασβεστολιθικών και αργιλοπυριπικών πετρωμάτων. Το τσιμέντο, όταν αναμιχθεί με νερό, πήζει και σκληραίνει τόσο στον αέρα όσο και μέσα στο νερό. Μετά τη σκλήρυνση δεν διαλύεται στο νερό. συνδυάζει μεγάλη υδραυλική ικανότητα και υψηλές αντοχές, γι' αυτό έχει ευρεία χρήση στις δομικές κατασκευές, όπως επίσης και στα υδραυλικά έργα. Οι κύριοι τύποι τσιμέντου που εμφανίζονται παγκοσμίως αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα καθώς και οι συμβολισμοί τω συστατικών του τσιμέντου.

| Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|---------------------------|
| CEM I | Τσιμέντο Portland |
| CEM II | Σύνθετο Τσιμέντο Portland |
| CEM III | Σκωριοτσιμέντο |
| CEM IV | Ποζολανικό Τσιμέντο |
| CEM V | Σύνθετο Τσιμέντο |

Πίνακας 5: Τύποι τσιμέντου και η αντίστοιχη περιγραφή τους.

| Συστατικό | Συμβολισμός |
|----------------------------|--------------------|
| Κλίνκερ | K |
| Ποζολάνη φυσική | P |
| Ποζολάνη φυσική ψημένη | Q |
| Ιπτάμενη τέφρα πυριπική | V |
| Ιπτάμενη τέφρα ασβεστούχος | W |
| Ψημένος σχιστόλιθος | T |
| Ασβεστόλιθος | L |
| Σκωρία υψικαμλινου | S |
| Πυριπική παιπάλη | D |

Πίνακας 6: Συστατικά τσιμέντου και οι συμβολισμοί τους.

Τα προϊόντα πυριπικού ασβεστίου που σχηματίζονται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου Portland είναι κυρίως υπεύθυνα για την συγκολλητική του ιδιότητα και είναι σταθερό σε υγρά περιβάλλοντα.

3.4.2 Το Νερό

Ένα από τα κυριότερα συστατικά του σκυροδέματος είναι το νερό. Στο νερό που θα χρησιμοποιηθεί, τόσο για την παρασκευή όσο και για τη συνήρηση του σκυροδέματος, πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΣ-345 και του άρθρου 4.4 και ΚΤΣ-97, δηλαδή να μην περιέχει ελεύθερα οργανικά ή ανόργανα οξέα, οργανικές ουσίες και άργιλο εν αιωρήσεις, διαλυτά σάκχαρα σε περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 0.25%, θειικά και χλωριούχα άλατα κλπ. γιατί μπορούν να βλάψουν την ποιότητα του σκυροδέματος και να προκαλέσουν διάβρωση του οπλισμού. Το πόσιμο νερό είναι γενικώς κατάλληλο για την παρασκευή του συνήθους οπλισμένου ή αόπλου σκυροδέματος, χωρίς ιδιαίτερο έλεγχο. Θαλασσινό νερό δεν θα χρησιμοποιείται για παρασκευή οπλισμένου σκυροδέματος, εκτός αν αυτό καθίσταται αναπόφευκτο από την έλλειψη κατάλληλου νερού και επιτρέπεται από τη φύση του έργου. Απαγορεύεται η χρησιμοποίηση θαλασσινού νερού για την παρασκευή προεντεταμένου σκυροδέματος. Ο Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 97 (Ν.Κ.Τ.Σ. 97) επιτρέπει την χρήση θαλασσινού νερού μίξης σε άοπλο φέρων σκυροδέμα, αν η απαιτούμενη αντοχή αυξηθεί κατά 15%. Εάν το νερό ανάμιξης δεν είναι καθαρό όχι μόνο μπορεί να επηρεάσει τον καθορισμό του χρόνου και της αντοχής του σκυροδέματος, αλλά επίσης μπορεί να προκαλέσει διάβρωση του οπλισμού, αστάθεια όγκο, και μειωμένη διάρκεια ζωής. Ως εκ τούτου πρέπει να τεθούν όρια στις συγκεντρώσεις χλωριούχων, θειικών και στερεών στο νερό ανάμιξης ή κατάλληλες δοκιμές δύνανται να διενεργηθούν για να καθοριστεί τι επίπτωση έχει η κάθε πρόσμειξη στις διάφορες ιδιότητες [16]. Είναι γνωστό ότι στην αντοχή του σκυροδέματος παίζει σπουδαίο ρόλο ο λόγος κατά βάρους του νερού προς τσιμέντο w/z . Όσο μικρότερος είναι ο λόγος αυτός τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του σκυροδέματος. Έχει παρατηρηθεί ότι η άριστη αναλογία w/z κυμαίνεται μεταξύ 0.4 για σκυροδέματα υψηλής αντοχής και 0.5 για σκυροδέματα χαμηλότερης αντοχής. Επίσης

παρατηρείται ότι, ενώ μια απόκλιση προς τα επάνω από το άριστο ποσοστό κατά 10% συνεπάγεται μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 15% περίπου, μια ίση απόκλιση προς τα κάτω, συνεπάγεται μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 30% περίπου. Είναι επομένως φρόνιμο, κατά την επιδίωξη της βέλτιστης αναλογίας νερού να παραμένει κανείς πάντοτε για λόγους ασφαλείας προς τα επάνω, παρά να κινδυνεύει η ποσότητα νερού να είναι μικρότερη της βέλτιστης με συνέπεια να υποστεί αλματώδη πτώση η αντοχή του παραγόμενου σκυροδέματος. Τέλος η ποσότητα του νερού δεν πρέπει να είναι τόσο λίγη ώστε να παραβλάπτεται η καλή κατεργασία του όλου μίγματος.

3.4.3 Πρόσμικτα-Πρόσθετα

Εκτός από τα αδρανή το τσιμέντο και το νερό υπάρχουν ορισμένα υλικά τα οποία προστίθενται πριν ή κατά τη διάρκεια την ανάμιξης του σκυροδέματος τα οποία προσδίδουν στο τελικό προϊόν μεγάλα οφέλη. Ρευστοποιητικά ή υπερρευστοποιητικά πρόσμικτα, που έχουν σκοπό τη μείωση του νερού του αναμίγματος και την αύξηση της ρευστότητας, έχουν γενικά θετική επίδραση στο βαθμό ενυδάτωσης και στην ανάπτυξη αντοχής στα αρχικά στάδια της ενυδάτωσης. Επιταχυντικά ή επιβραδυντικά της πήξης πρόσμικτα επηρεάζουν σημαντικά τις αρχικές αντοχές (τις αυξάνουν ή τις μειώνουν, αντίστοιχα) όχι όμως και τις τελικές. Ορυκτά πρόσθετα, όπως οι φυσικές ποζολάνες, η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία υψικαμίνου, συνήθως επιβραδύνουν το ρυθμό ανάπτυξης της αντοχής αλλά επιφέρουν αύξηση της τελικής αντοχής (ιδιαίτερα της εφελκυστικής), γεγονός που οφείλεται στην ικανότητά τους να αντιδρούν με το ένυδρο υδροξείδιο του ασβεστίου του τσιμεντοπολτού σχηματίζοντας πρόσθετες ποσότητες C-S-H που ενδέχεται να μειώσουν το πορώδες τόσο του τσιμεντοπολτού όσο και της μεταβατικής ζώνης [17].

3.5 Γενικοί τύποι σκυροδέματος

Με κριτήριο τη μονάδα βάρους το σκυρόδεμα μπορεί να διακριθεί σε τρεις βασικές κατηγορίες. Σκυρόδεμα που περιέχει φυσική άμμο και χαλίκι ή θρυμματισμένη πέτρα ζυγίζει περίπου 2400 kg/m^3 το οποίο ονομάζεται σκυρόδεμα φυσιολογικού βάρους και πιο συχνά χρησιμοποιείται σε κατασκευές όπου η υψηλότερη αναλογία αντοχής προς το βάρος επιθυμείται. Σκυρόδεμα που ζυγίζει λιγότερο από 1800 kg/m^3 ονομάζεται ελαφρύ σκυρόδεμα. Το βαρύ σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται κυρίως για τη θωράκιση από την ακτινοβολία παράγεται από υψηλής πυκνότητας αδρανή υλικά και ζυγίζει παραπάνω από 3200 kg/m^3 .

Ταξινομώντας το σκυρόδεμα με βάση την αντοχή του προκύπτουν οι εξής κατηγορίες σκυροδέματος:

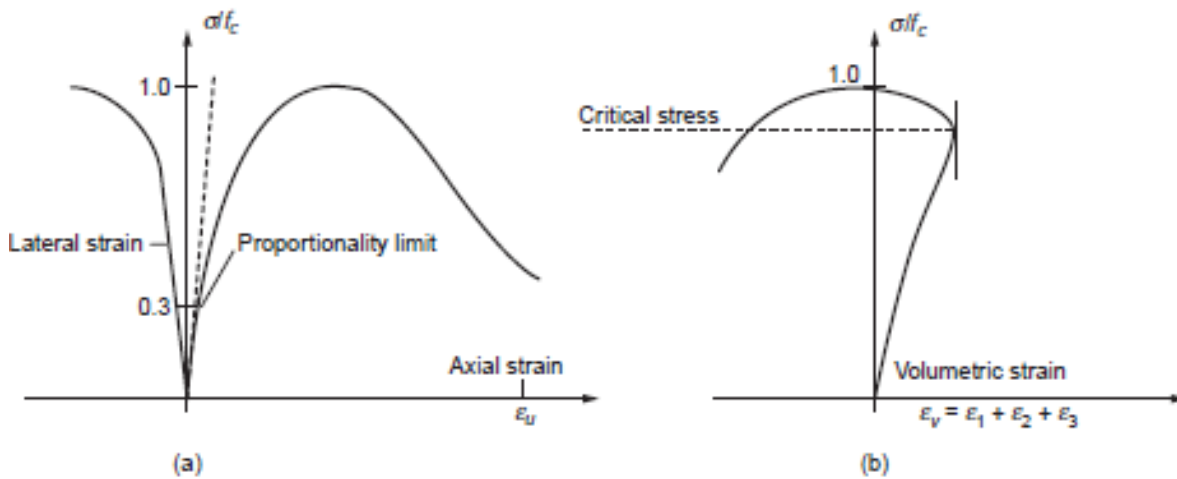
- Χαμηλής αντοχής σκυρόδεμα με αντοχή μικρότερη από 20 MPa
- Ενδιάμεσης αντοχής σκυρόδεμα με εύρος αντοχής 20-40 MPa
- Υψηλής αντοχής σκυρόδεμα με αντοχή μεγαλύτερη από 40 MPa.

Το σκυρόδεμα μεσαίας αντοχής ή διαφορετικά το αποκαλούμενο και καθημερινό σκυρόδεμα χρησιμοποιείται περισσότερο στον κόσμο των κατασκευών. Το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής βρίσκει εφαρμογή σε ειδικές περιπτώσεις.

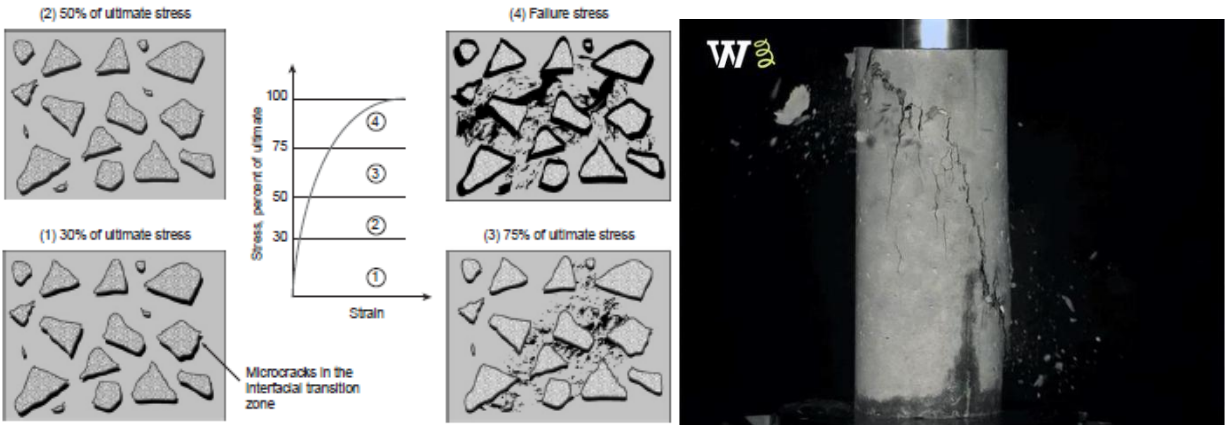
3.6 Συμπεριφορά του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη

Το σκυρόδεμα αστοχεί σε θλίψη λόγω ανάπτυξης και επέκτασης ρωγμών στη μάζα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Πολλές από τις ρωγμές αυτές προϋπάρχουν στη μεταβατική ζώνη (ο αριθμός και το πλάτος τους εξαρτώνται κυρίως από τη συντήρηση και από τα χαρακτηριστικά εξίδρωσης του σκυροδέματος, καθώς και από την αντοχή της μεταβατικής ζώνης) και ενώνονται με άλλες που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της φόρπισης. Η σχέση της τάσης-παραμόρφωσης του σκυροδέματος περιγράφει γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι το 30% περίπου της τελικής αντοχής όπου οι ρωγμές της μεταβατικής ζώνης σε αυτό το αρχικό στάδιο παραμένουν αμετάβλητες. Για εύρος τάσεων 30%-50% της τελικής αντοχής οι ρωγμές αυτές αυξάνονται σε αριθμό και διαδίδονται

μέσα στο υλικό χωρίς βέβαια να εισέρχονται στο σκληρυμένο τσιμεντοπολλτό. Αυτή η συμπεριφορά απεικονίζεται στο διάγραμμα της τάσης-παραμόρφωσης με την καμπύλη να γίνεται περισσότερο μη γραμμική. Για μεγαλύτερες τάσεις και μέχρι $0.75 f_c$ που ονομάζεται και κρίσιμη τάση, της τελικής αντοχής ο ρυθμός διάδοσης της ρηγμάτωσης στο τσιμεντοπολλτό αυξάνεται. Μετά τη κρίσιμη τάση το σύστημα γίνεται ασταθές, οι παραμορφώσεις αυξάνονται σχετικά απότομα και οι επιφάνειες της θραύσης τείνουν να γίνουν συνεχείς. Επομένως για τάσεις μεταξύ του 75%-90% της τελικής αντοχής η σχέση της τάσης-παραμόρφωσης εμφανίζει βαθμιαία καμπυλότητα, ενώ για μεγαλύτερες τάσεις γίνεται σχεδόν οριζόντια και ακολούθως αποκτά αρνητική κλίση μέχρι την τελική θραύση του δοκιμίου του σκυροδέματος. Η κρίσιμη τάση αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη παραμορφώσεων που σχετίζονται με την μεταβολή όγκου του σκυροδέματος. Όπως δείχνει και το σχήμα ο όγκος του υλικού μειώνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι την κρίσιμη τάση, πέρα από την οποία η μεταβολή του όγκου αλλάζει πρόσημο και αυξάνεται με γρήγορους ρυθμούς λαμβάνοντας την τιμή μηδέν όταν η τάση γίνει περίπου ίση με την μέγιστη αντοχή του σκυροδέματος. Η πρόοδος της ρηγμάτωσης του υλικού δίνεται παραστατικά στο σχήμα [14].



Εικόνα 7: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.



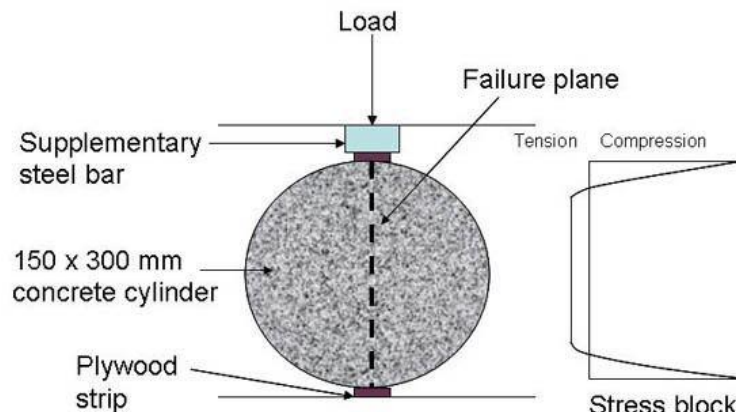
Εικόνα 8: Απεικόνιση της δοκιμής θλίψης σε κυλινδρικό δοκίμιο σκυροδέματος.

Συνοψίζοντας το σκυροδέμα μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι ένα επίπεδο φόρτισης και μη ελαστικά, με μη γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων για υψηλότερα επίπεδα φόρτισης. Συγκεκριμένα μπορούμε να διακρίνουμε τις ακόλουθες φάσεις.

- Την ελαστική φάση, μέχρι περίπου την επιβολή φορτίου μικρότερου από το 40% της αντοχής.
- Την φάση ανάπτυξης μικρορωγμών, όπου το μέτρο ελαστικότητας μικραίνει ενώ ο λόγος του Poisson παραμένει σχεδόν σταθερός.
- Την φάση της ρηγμάτωσης, όπου το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται σταδιακά μέχρι το μισό της αρχικής του τιμής και ο λόγος του Poisson αυξάνει σταδιακά μέχρι τρεις φορές της αρχικής τιμής του.
- Την τελική φάση στην οποία οι ρωγμές γίνονται ασταθείς και τελικά επέρχεται η θραύση.

3.7 Συμπεριφορά του σκυροδέματος σε εφελκυσμό

Η αστοχία δοκιμίων σκυροδέματος σε εφελκυσμό οφείλεται στην επέκταση ρωγμών κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης. Τέτοιες ρωγμές μειώνουν τη διατομή των δοκιμίων και επιφέρουν συγκεντρώσεις τάσεων. Τελικά η αστοχία του υλικού προκαλείται λόγω της απότομης επέκτασης λίγων σχετικά ρωγμών, έτσι ώστε να είναι αρκετά δύσκολο να καταγραφεί πειραματικά το τμήμα της καμπύλης τάσης- παραμόρφωσης μετά τη μέγιστη τάση. Ο λόγος εφελκυστικής προς θλιπτική αντοχή για το σκυρόδεμα είναι μόλις 0.07-0.13 κάτι που οδηγεί στο να θεωρείται συνήθως η εφελκυστική αντοχή πρακτικά ίση με μηδέν. Μερικές φορές όμως μία εκτίμηση του μεγέθους της είναι απαραίτητη, όπως π.χ. για τον υπολογισμό των φορτίων που προκαλούν ρηγματώση. Η πλέον συνηθισμένη δοκιμή της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό (η διεξαγωγή της οποίας γίνεται κατά EN 12390-6) είναι αυτή του έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη (λέγεται και "Βραζιλιάνικη δοκιμή"), κατά την οποία κυλινδρικό δοκίμιο μήκους $L = 300 \text{ mm}$ και διαμέτρου $D = 150 \text{ mm}$ υποβάλλεται σε θλίψη υπό ομοιόμορφα κατανεμημένες δυνάμεις P κατά μήκος δύο αντιδιαμετρικών γενέτειρων της παράπλευρης επιφάνειας (Εικόνα 9). Αποτέλεσμα των δυνάμεων αυτών είναι η ανάπτυξη ομοιόμορφα κατανεμημένων εφελκυστικών τάσεων κάθετα στο επίπεδο που ορίζεται από τις δύο γενέτειρες, μεγέθους
$$\sigma_h = \frac{2P}{\pi LD}$$
. Η τιμή της τάσης σ_h στη μέγιστη δύναμη P , δηλαδή κατά την αστοχία του δοκιμίου ονομάζεται αντοχή σε εφελκυσμό από διάρρηξη. Συγκριτικά με τη δοκιμή άμεσου εφελκυσμού, η δοκιμή διάρρηξης υπερεκτιμά την εφελκυστική αντοχή κατά 10-15% [14].

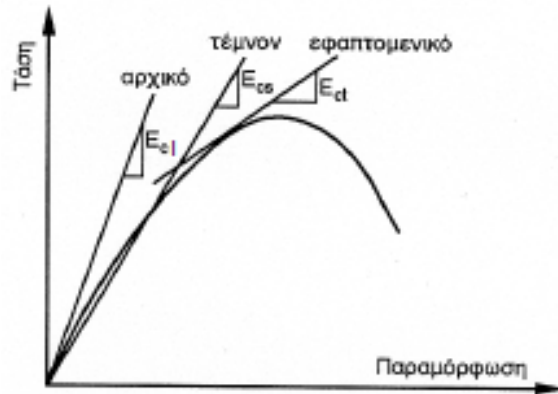


Εικόνα 9: Πειραματική διάταξη μονοαξονικού εφελκυσμού.

3.8 Τύποι μέτρων ελαστικότητας στο σκυρόδεμα

3.8.1 Στατικό και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα σε θλίψη έχει περιγράψει παραπάνω, όπου εξηγούνται οι λόγοι που οδηγούν σε ρηγμάτωση, αποτέλεσμα της οποίας είναι η μη γραμμικότητα της σχέσης σ - ϵ και η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας με τη φόρπιση. Στην τυπική καμπύλη του σχήματος δίνονται τρεις τρόποι ορισμού του στατικού μέτρου ελαστικότητας. Το αρχικό μέτρο ελαστικότητας E_{ci} δίνεται από την κλίση της καμπύλης στην αρχή των αξόνων, το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_{ct} δίνεται από την κλίση της εφαπτομένης της καμπύλης στο σημείο που αναφερόμαστε, και το επιβατικό (ή τέμνον) μέτρο ελαστικότητας E_{cs} δίνεται από την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος που ενώνει την αρχή των αξόνων με το σημείο αναφοράς, που για το σκυρόδεμα είναι το σημείο όπου η τάση είναι ίση με το 40% της μέγιστης τάσης). Τέλος ορίζεται και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας που είναι γενικά 20% 30% 40% υψηλότερο από το στατικό μέτρο ελαστικότητας και πιο συγκεκριμένα περίπου ίσο με το αρχικό μέτρο ελαστικότητας για υψηλής μεσαίας και χαμηλής αντοχής σκυροδέματα αντίστοιχα. Για την ανάλυση των τάσεων στις κατασκευές που υπόκεινται σε σεισμικά ή κρουσικά φορτία επιθυμείτε η προσέγγιση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας που γίνεται από την μέθοδο των υπερήχων μέσω κατάλληλης συσκευής [14]. Σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Οπλισμένου Σκυροδέματος (2000), στους υπολογισμούς χρησιμοποιείται η μέση τιμή του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας σε 28 ημέρες, E_{csm} που δίνεται συναρτήσει της χαρακτηριστικής αντοχής f_{ck} από την εμπειρική προσεγγιστική σχέση $E_{csm} = 9500\sqrt{f_{ck} + 8}$ [15].



Εικόνα 10: Τύποι μέτρου ελαστικότητας στο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων στο σκυρόδεμα.

3.9 Φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος

Κάθε δομικό υλικό χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες ιδιότητες μηχανικές και φυσικές. Έτσι και το σκυρόδεμα πέρα από τις μηχανικές του ιδιότητες εμφανίζει φυσικές ιδιότητες όπου ορίζονται ως οι εξής ιδιότητες: πυκνότητα, πορώδες, απορροφητικότητα, διαπερατότητα, υγροσκοπικότητα, θερμική διαστολή ή συστολή και θερμική αγωγιμότητα. Οι ιδιότητες αυτές έχουν ιδιαίτερη σπουδαιότητα για το μηχανικό, γιατί είναι καθοριστικές για την ποιότητα, την ασφάλεια και τη διάρκεια των τεχνικών έργων.

3.9.1 Απορροφητικότητα, Διαπερατότητα, Υγροσκοπικότητα

Οι ιδιότητες αυτές εμφανίζονται κυρίως στα πορώδη υλικά όπως το σκυρόδεμα και εξαρτώνται από την πυκνότητα, το πορώδες και το είδος, μέγεθος και βαθμό επικοινωνίας των πόρων. Απορροφητικότητα είναι η ιδιότητα που έχουν τα δομικά υλικά να απορροφούν (χωρίς εξωτερική πίεση) κάποιο ρευστό, το οποίο συνήθως είναι νερό (οπότε και η αντίστοιχη ιδιότητα λέγεται υδαταπορροφητικότητα) ιδιότητα αυτή μετράται συνήθως με τη μάζα επί τοις % που απορροφά η μονάδα μάζας του υλικού μετά από εμβάπτιση (έως ότου σταθεροποιηθεί το βάρος, π.χ. για 24 ώρες) σε νερό. Ορίζεται ως

$$Y = 100 \frac{m_f - m_i}{m_i}, \text{ όπου } m_f: \text{ μάζα μετά την εμβάπτιση του σκυροδέματος } m_i: \text{ ξηρή}$$

αρχική μάζα του σκυροδέματος.

Διαπερατότητα είναι η ιδιότητα που χαρακτηρίζει την αντίσταση που προβάλλει ένα υλικό στη δίοδο ενός ρευστού όταν βρίσκεται σε επαφή με αυτό υπό ορισμένη πίεση. Στην περίπτωση που το ρευστό είναι νερό η παραπάνω ιδιότητα ονομάζεται υδατοπερατότητα, και μετράται συνήθως με τη μάζα του νερού που διαπερνά στη μονάδα του χρόνου, υπό ατμοσφαιρική πίεση, μοναδιαία επιφάνεια μίας πλάκας μοναδιαίου πάχους από το εξεταζόμενο υλικό. Την υδατοπερατότητα επί το πάχος του υλικού ονομάζουμε συντελεστή υδραγωγιμότητας. Συχνά στην πράξη χρησιμοποιείται το αντίστροφο της υδατοπερατότητας, που ονομάζεται υδατοστεγανότητα. Η διαπερατότητα γενικά ποσοτικοποιείται με το συντελεστή διαπερατότητας k , βάσει του νόμου του Darcy:

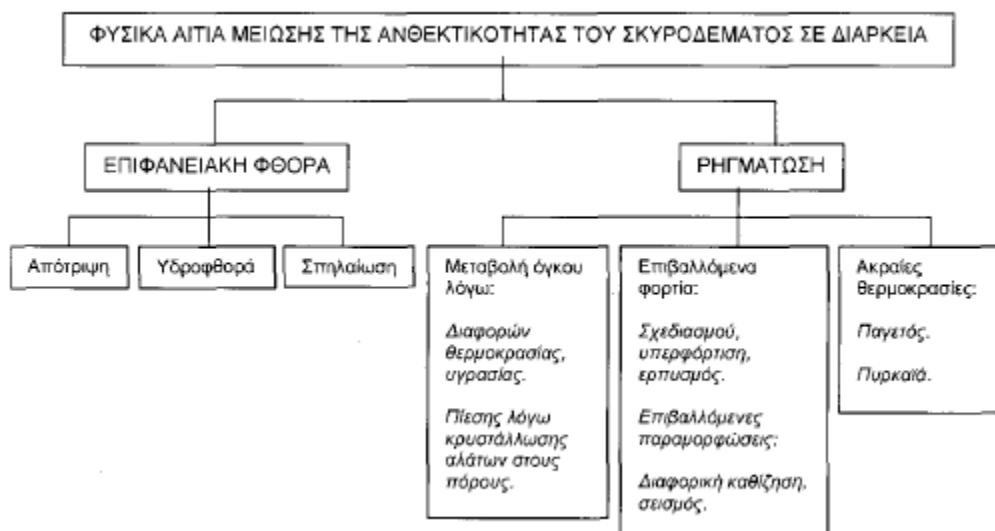
$$\frac{dq}{dt} = k \frac{\Delta h A}{L \mu} \text{ όπου } \frac{dq}{dt}: \text{ ο ρυθμός ροής του ρευστού } \mu: \text{ το ιξώδες, } \Delta h: \text{ η διαφορά}$$

πίεσης, A : η επιφάνεια και L : το πάχος του δοκιμίου.

Υγροσκοπικότητα είναι η ιδιότητα που έχουν τα δομικά υλικά να απορροφούν υγρασία από την ατμόσφαιρα, όταν η σχετική υγρασία αυτής είναι δεδομένη, και μετράται με τρόπο ανάλογο προς αυτόν της υδαταπορροφητικότητας. Η παραμένουσα υγρασία σε ένα υλικό μετά την εξισορρόπηση με την υγρασία του περιβάλλοντος λέγεται υγρασία ισορροπίας.

3.10 Φυσικά αίτια μείωσης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε διάρκεια

Τα φυσικά αίτια που μπορεί να μειώσουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε διάρκεια κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες που σχετίζονται με την επιφανειακή φθορά και τη ρηγματώση.



Πίνακας 7: Φυσικά αίτια μείωσης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε διάρκεια.

3.10.1 Επιφανειακή Φθορά

Η επιφανειακή (ή μηχανική) φθορά του σκυροδέματος μπορεί να προκληθεί λόγω απότριψης, υδροφθοράς και σπηλαιώσης.. Η απότριψη προκαλείται από την κυκλοφορία πεζών ή οχημάτων (π.χ. σε βιομηχανικά δάπεδα) η υδροφθορά οφείλεται στη δράση του νερού που συνήθως περιέχει αιωρούμενα σωματίδια (π.χ. σε βάρθα γεφυρών, φράγματα, υπερχειλιστές) και η σπηλαιώση εμφανίζεται όταν νερό κινείται με μεγάλη ταχύτητα παράλληλα σε επιφάνεια της οποίας η γεωμετρία αλλάζει ξαφνικά (π.χ.συμβολή αγωγών), με αποτέλεσμα το σχηματισμό και την καταστροφή φυσαλίδων, φαινόμενο που επιφέρει κρουστικά κύματα προκαλώντας κοιλότητες και ανωμαλίες.

3.10.2 Ρηγμάτωση λόγω κρυστάλλωσης αλάτων στους πόρους

Κάτω από ορισμένες συνθήκες, τα άλατα που πιθανόν να βρίσκονται στους πόρους του σκυροδέματος κρυσταλλώνονται προκαλώντας ρηγμάτωση λόγω ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων. Το φαινόμενο είναι συχνό όταν η μία πλευρά δομικών στοιχείων, όπως οι τοίχοι αντιστήριξης, από σκυρόδεμα σχετικά μεγάλης διαπερατότητας είναι σε επαφή με διαλύματα αλάτων, ενώ η άλλη πλευρά "αναπνέει", είναι δηλαδή ελεύθερη, επιτρέποντας την εξάτμιση νερού από τους πόρους. Ο μηχανισμός αυτός είναι σχετικός και με τη φθορά άλλων κατασκευών, όπως οι τοιχοποιίες και τα λιθόκλιπα μνημεία.

3.10.3 Δράση παγετού

Παρότι η επίδραση του παγετού στο σκυρόδεμα αφορά κυρίως στις χώρες με ψυχρά κλίματα, το φαινόμενο παρουσιάζει ενδιαφέρον και για τη χώρα μας, ιδιαίτερα στις βόρειες ηπειρωτικές περιοχές. Η φθορά λόγω επίδρασης παγετού εμφανίζεται σε διάφορες μορφές, με πιο συνηθισμένες τη ρηγμάτωση σε όλη την επιφάνεια του σκυροδέματος, με εύρος και πλάτος ρωγμών μέχρι 0.25 mm και 35 mm, αντίστοιχα, την αποφλοίωση, που χαρακτηρίζεται από την αφαίρεση μεγάλων κομματιών από την επιφάνεια, και την απολέπιση, που διακρίνεται από την αφαίρεση επιφανειακά μικρών κομματιών μορφής λεπίδων δημιουργώντας μικρές κοιλότητες. Όταν ο παγετός επιδράσει σε σκυρόδεμα μικρής ηλικίας το τελευταίο έχει υγρή εμφάνιση, είναι σκουρόχρωμο και έχει πολύ μικρή αντοχή.

3.10.4 Επίδραση Πυρκαϊάς

Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε πυρκαϊά είναι γενικά εξαιρετική. Εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι σχετίζονται με την ποιότητα του τσιμεντοπολτού και των αδρανών, που αποσυντίθενται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Βασικά χαρακτηριστικά των αδρανών που επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους σε υψηλές θερμοκρασίες είναι το πορώδες και η ορυκτολογική τους σύσταση. Ανάλογα με το βαθμό θέρμανσης, το μέγεθος κόκκου, τη διαπερατότητα και την υγρασία τους, αδρανή με μεγάλο πορώδες μπορεί να

ρηγματωθούν όπως κατά τη δράση παγετού, ενώ αδρανή μικρού πορώδους είναι ανθεκτικότερα. Επιπλέον, η ορυκτολογική σύσταση των αδρανών είναι καθοριστική για διαφορικές διογκώσεις μεταξύ αυτών και του τσιμεντοπολτού (λόγω αύξησης της θερμοκρασίας), για την αντοχή της μεταβατικής ζώνης και, τέλος, για τυχόν μετασχηματισμούς φάσεων που συνεπάγονται ξαφνικές διογκώσεις.

3.11 Χημικές διεργασίες ως αίτιο μείωσης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε διάρκεια

Η φθορά του σκυροδέματος λόγω χημικών διεργασιών οφείλεται κυρίως σε αντιδράσεις μεταξύ των χημικών ενεργών συστατικών του ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού και των διαφόρων ουσιών του περιβάλλοντος. Εξάιρεση αποτελούν οι αντιδράσεις αλκαλίων-αδρανών, που γίνονται μεταξύ των αλκαλίων του τσιμεντοπολτού και μερικών ουσιών που βρίσκονται σε ορισμένους τύπους αδρανών όπως η καθυστερημένη ενυδάτωση των κρυσταλλικών CaO και MgO, όταν βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες στο τσιμέντο, και η ηλεκτροχημική διάβρωση των οπλισμών.



Πίνακας 8: Χημικές διεργασίες μείωσης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε διάρκεια.

3.11.1 Υδρόλυση των συστατικών του τσιμεντοπολτού

Το νερό της βροχής, των λιμνών, των ποταμών και αυτό που προέρχεται από την πήξη πάγου ή χιονιού περιέχει ελάχιστα ή καθόλου ιόντα ασβεστίου, και χαρακτηρίζεται ως μαλακό. Σε επαφή με το σκυρόδεμα, το μαλακό νερό διαλύει τα προϊόντα του ασβεστίου (όπως είναι το υδροξείδιο του ασβεστίου) που περιέχονται στον ενυδατωμένο τσιμεντοπολτό, με αποτέλεσμα να διασπώνται και τα λιγότερο σταθερά ενυδατωμένα προϊόντα του τσιμέντου (ώστε να εξισορροπηθεί η απώλεια ασβεστίου), προκαλώντας έτσι τη χαλάρωση του ιστού του σκυροδέματος [15]. Εκτός από τη μείωση της αντοχής, η απόπλυση του υδροξειδίου του ασβεστίου επιφέρει και προβλήματα αισθητικής. Το προϊόν της απόπλυσης αντιδρά μερικές φορές με το CO₂ της ατμόσφαιρας δημιουργώντας λευκές κηλίδες ανθρακικού ασβεστίου, γνωστές ως εξανθήματα. Ο βαθμός απόπλυσης εξαρτάται από τη σκληρότητα του νερού, την ταχύτητα ροής του, τη θερμοκρασία του και την πίεσή του (σε περιπτώσεις διείσδυσης στο σκυρόδεμα), από την ποιότητα του σκυροδέματος, την κατάσταση της επιφάνειας του και την ηλικία του, καθώς και από το είδος τσιμέντου.

3.11.2 Αντιδράσεις ανταλλαγής μάζας

Σχηματισμός διαλυτών αλάτων ασβεστίου: Η ανταλλαγή κατόντων μεταξύ όξινων διαλυμάτων και των συστατικών του τσιμεντοπολτού δίνει ευδιάλυτα άλατα ασβεστίου τα οποία αποπλένονται. Τα όξινα διαλύματα μπορεί να προέρχονται, για παράδειγμα, από υδροχλωρικό, θειικό ή νιτρικό οξύ της χημικής βιομηχανίας, από οξικό ή γαλακτικό οξύ των τροφίμων και από ανθρακικό οξύ (υδάπινο διάλυμα διοξειδίου του άνθρακα) που περιέχεται σε επιφανειακά ή υπόγεια εδαφικά νερά (ακόμα και το νερό της βροχής που έχει απορροφήσει CO₂ από την ατμόσφαιρα είναι ελαφρώς όξινο).

Σχηματισμός αδιάλυτων αλάτων ασβεστίου: Τα προϊόντα της αντίδρασης ορισμένων διαλυμάτων οξέων (π.χ. οξαλικό, ταννικό, υδροφθορικό, φωσφορικό, χουμικό) με συστατικά του τσιμεντοπολτού περιέχουν αδιάλυτα άλατα ασβεστίου τα οποία δεν

προσβάλλουν το σκυρόδεμα, εκτός αν ο όγκος τους αυξάνεται ή αν απομακρύνονται λόγω επιφανειακής φθοράς.

Επίδραση διαλυμάτων μαγνησίου. Τα χλωριούχα, θειικά ή δισανθρακικά άλατα του μαγνησίου, που βρίσκονται σε εδαφικά ή θαλασσινά νερά, αντιδρούν με το υδροξείδιο του ασβεστίου του τσιμεντοπολτού σχηματίζοντας ευδιάλυτα άλατα ασβεστίου που αποπλένονται. Χαρακτηριστικό των ιόντων μαγνησίου είναι ότι η επίδραση τους επεκτείνεται και στο C-S-H, το βασικότερο συστατικό του τσιμεντοπολτού, στο οποίο γίνεται βαθμιαία ανικατάσταση ιόντων ασβεστίου με ιόντα μαγνησίου, με αποτέλεσμα τη φθορά λόγω αλλοίωσης βασικών χαρακτηριστικών του τσιμεντοπολτού.

3.11.3 Σχηματισμός Προϊόντων που Προκαλούν Διόγκωση

Παρακάτω περιγράφονται τα φαινόμενα που οδηγούν στο σχηματισμό προϊόντων που προκαλούν διόγκωση στο σκυρόδεμα, αποτέλεσμα της οποίας είναι η ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και παραμορφώσεων.

Επίδραση θειικών αλάτων. Τα θειικά άλατα (νατρίου, ασβεστίου, αμμωνίου και μαγνησίου) είναι τα πλέον επικίνδυνα για τη φθορά του σκυροδέματος. Το θειικό ασβέστιο (γύψος) μπορεί να βρεθεί στο σκυρόδεμα διαλυμένο σε νερό που μεταφέρεται από το έδαφος ή να σχηματιστεί υπό την επίδραση θειικού άλατος στο υδροξείδιο του ασβεστίου του τσιμέντου. Η βλαβερή επίδραση της γύψου οφείλεται στο ότι καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο από τα συστατικά που τη δημιούργησαν, κυρίως όμως αντιδρά με το αργιλικό τριασβέστιο του τσιμέντου σχηματίζοντας ετρινγκίτη που καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο, δημιουργώντας ρωγμές.

Αντίδραση αλκαλίων-αδρανών. Υπό ορισμένες συνθήκες υγρασίας, πάνω από 75% περίπου, τα αλκάλια (άλατα νατρίου, καλίου κ.τ.λ.), που περιέχονται στο τσιμέντο ή προέρχονται από τα αδρανή (π.χ. αδρανή κοντά σε παραλίες) ή μεταφέρονται στο σκυρόδεμα (π.χ. από διαλύματα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, από θαλασσινό νερό, από ανιπαγωγικά άλατα κ.τ.λ.), αντιδρούν με ορισμένους τύπους αδρανών σχηματίζοντας προϊόντα που διογκώνονται, προκαλώντας έτσι ρηγμάτωση.

Κεφάλαιο 4: Βασικές εφαρμογές της μεθόδου των Υπερήχων στον έλεγχο του Σκυροδέματος (Βιβλιογραφική ανασκόπηση)

4.1 Ιστορική αναδρομή της υπερηχητικής μεθόδου στο σκυρόδεμα

Η μέθοδος των υπερήχων έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την αξιολόγηση της ποιότητας του σκυροδέματος εδώ και 60 χρόνια. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση εσωτερικών αστοχιών και πιθανών μεταβολών στη μικροδομή του όχι μόνο λόγω μηχανικών φορτίων αλλά και λόγω έκθεσης σε έντονο χημικό και θερμοκρασιακό περιβάλλον. Η μέθοδος των υπερήχων στο σκυρόδεμα αναπτύχθηκε το 1945 στον Καναδά και στην Αγγλία την ίδια χρονική περίοδο από τους Leslie και Cheesman και αντίστοιχα τον Jones. Στον Καναδά η έρευνα διεξήχθη στο Τορόντο από την επιτροπή υδροηλεκτρικής ενέργειας του Οντάριο η οποία είχε σαν στόχο να αναπτύξει μια μη καταστροφική μέθοδο για την εξέταση του σκυροδέματος με πάχος μέχρι 15.2 m. Αυτή η προσπάθεια είχε ως αποτέλεσμα την εφεύρεση του επιστημονικού οργάνου Soniscrope. Από τότε σημαντικός όγκος ερευνητικής δραστηριότητας επιτεύχθηκε στον Καναδά καθώς και στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Στον Καναδά έγιναν πρωτοποριακές έρευνες για εκείνη την εποχή από τους Leslie, Cheesman, Parker και Sturup. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, αυτοί που συνέφεραν έντονα στην υπερηχητική μέθοδο στο σκυρόδεμα ήταν οι Philleo, Batcelder, Lewis, Whitehurst, Klieger, Mather, Meyer και τέλος ο Breeuning με τον Bone. Στην Αγγλία αντίστοιχα η ερευνητική δραστηριότητα διεξήχθη στο εργαστήριο Οδοποιίας της Αγγλίας για την μελέτη εργαστηριακών δοκιμών σκυροδέματος. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη του επιστημονικού οργάνου Ultrasonic concrete tester. Η χρήση και η περιγραφή του οργάνου γίνεται από τους Jones, Gatfield, Kaplan, Malhotra και Zoldners. Αρκετά άρθρα δημοσιεύτηκαν στην Ρωσία και στην Ανατολική Ευρώπη. Ο Whitehurst αναφέρει σε ένα από τα άρθρα του για την χρήση της υπερηχητικής μεθόδου στην κατασκευή του Moscow Ring Road. Αντίστοιχα ο Facsoaru περιγράφει εκτενέστερα την υπερηχητική αξιολόγηση του σκυροδέματος στη Ρουμανία [18]. Όπως γίνεται αντιληπτό η υπερηχητική μέθοδος

πέραν από τα μεταλλικά υλικά δεν άργησε να καθιερωθεί και στον έλεγχο ποιότητας του σκυροδέματος. Στην περίπτωση όμως των μεταλλικών υλικών η υπερηχητική μέθοδος χρησιμοποιεί πολύ μεγαλύτερες συχνότητες και υλοποιείται με τη μέθοδο της παλμοχούς. Αντίθετα, στο σκυρόδεμα εμφανίζεται μεγάλη σκέδαση λόγω της σύνθεσής του οπότε οι συχνότητες των υπερηχητικών κυμάτων απαιτείται να είναι χαμηλές και η μέθοδος που συχνά χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος της διέλευσης. Κάτω από αυτούς τους περιορισμούς η μέθοδος έγινε κοινά αποδεκτή σε όλο τον κόσμο και μέχρι σήμερα υπάρχουν στην αγορά επιστημονικά όργανα υπερήχων που καλύπτουν κάθε προδιαγραφή και απαίτηση για τη χρήση της υπερηχητικής μεθόδου στο σκυρόδεμα.

4.2 Θεωρία διάδοσης κυμάτων στο σκυρόδεμα

Όπως προαναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο όταν η επιφάνεια ενός ελαστικού στερεού σώματος δέχεται ένα εξωτερικό ερέθισμα τότε αναπτύσσονται μηχανικά ελαστικά κύματα τα οποία μπορεί να είναι είτε διαμήκη (longitudinal waves compressional waves ή P waves), και εγκάρσια (shear waves ή S-waves) είτε επιφανειακά κύματα (surface waves ή Rayleigh waves). Κάθε είδος κύματος διαδίδεται με χαρακτηριστική ταχύτητα σε κάθε υλικό. Στα στερεά, τα διαμήκη κύματα διαδίδονται με τη μεγαλύτερη ταχύτητα ενώ τα εγκάρσια με τη μικρότερη. Συγκεκριμένα για το σκυρόδεμα οι ταχύτητες των εγκαρσίων και των επιφανειακών κυμάτων είναι περίπου το 55-60% της ταχύτητας των διαμηκών κυμάτων.

Η ταχύτητα των υπερήχων (UPV) ενός ομογενούς στερεού σώματος μπορεί εύκολα να συσχεπιστεί με τις φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες βασισμένη στη θεωρία ελαστικότητας για ομογενή και ιστροπικά υλικά. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η ταχύτητα των υπερηχητικών διαμηκών κυμάτων σε ένα ομογενές ισότροπο υλικό εξαρτάται από τις ελαστικές του ιδιότητες, ακριβέστερα είναι ανάλογη με το τετράγωνο του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_d και αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της πυκνότητας του μέσου σύμφωνα με τη σχέση

$$c_l = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu_d)}{\rho(1+\nu_d)(1-2\nu_d)}} \text{ όπου } \nu_d \text{ ο δυναμικός λόγος του Poisson. Το σκυρόδεμα όμως}$$

είναι ανομοιογενές υλικό οπότε αυτή η θεωρία αντιμετωπίζει διάφορες δυσκολίες στη πράξη. Παρόλα αυτά λόγω υψηλής απόσβεσης στο σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται χαμηλές συχνότητες που σημαίνει ότι τα διαμήκη κύματα δεν αλληλοεπιδρούν με τις περισσότερες ανομοιογένειες στο εσωτερικό του σκυροδέματος και επιπλέον η τυχαιότητα στην κατανομή των αδρανών στο εσωτερικό του σκυροδέματος το καθιστά ομογενές ισότροπο υλικό [19], [20], [21]. Συγκεκριμένα όταν το μήκος κύματος του διερχόμενου κύματος είναι ίσο ή μικρότερο από το μέγεθος των αδρανών τότε προκαλείται έντονη σκέδαση και εξασθένηση της έντασης του κύματος. Στο σκυρόδεμα το ανώτερο όριο συχνότητας είναι τα 500kHz με σχετικό μήκος κύματος τα 10mm το οποίο είναι για σκυρόδεμα με χονδρόκοκκο αδρανές. Μεγαλύτερα μήκη κυμάτων μπορούν επιτευχθούν χρησιμοποιώντας μικρότερη συχνότητα. Για παράδειγμα με 20kHz συχνότητα το κύμα μπορεί να διανύσει απόσταση έως και 10m σκυροδέματος [1].

4.3 Ταχύτητα Υπερήχων στο σκυρόδεμα

Η χρονική διάρκεια που κάνει το διάμηκες κύμα από την εκπομπή μέχρι την λήψη του παλμού υπολογίζονται ηλεκτρονικά με κατάλληλη συσκευή. Ο εξοπλισμός είναι φορητός και εξασφαλίζει την άμεση λήψη των μετρήσεων σε κάθε είδους κατασκευή από σκυρόδεμα. Η συσκευή αποτελείται από ένα ζευγάρι αισθητήρων έναν για την εκπομπή και έναν για την λήψη του παλμού. Η καλή ακουστική σύζευξη μεταξύ της επιφάνειας του σκυροδέματος και των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων είναι απαίτηση για την αξιοπιστία των μετρήσεων. Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των ελαστικών κυμάτων στο σκυρόδεμα απαιτείται ο υπολογισμός του μήκους διαδρομής μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων το οποίο διαιρείται με τον χρόνο υπολογίζοντας τη μέση ταχύτητα διάδοσης του κύματος. (Εκτενέστερα στο πρότυπο με αριθμό ASTM C 597) [22]. Αρχικά γίνεται η βαθμονόμηση της υπερηχητικής συσκευής σε πρότυπη χαλύβδινη πλάκα βαθμονόμησης V_1 . Η ιδανική βαθμονόμηση για τη μέτρηση της ταχύτητας των ελαστικών κυμάτων στο σκυρόδεμα είναι η χρήση πρότυπου δοκιμίου βαθμονόμησης

από σκυρόδεμα. Ανάλογα με την διάταξη των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων που έχει αποφασιστεί να χρησιμοποιηθεί στο σκυρόδεμα ανίστοιχη θα πρέπει να είναι και η διάταξη που χρησιμοποιείται κατά τη βαθμονόμηση στη χαλύβδινη πλάκα. Εξετάζεται ότι οι δύο επιφάνειες του προς εξέταση δοκιμίου είναι παράλληλες και έπειτα μετρίεται με μηχανικό παχύμετρο το πάχος του d_x . Χρησιμοποιώντας μετά την υπερηχητική συσκευή λαμβάνεται η ένδειξη της οθόνης d_g , που αντιστοιχεί στην πρώτη ηχώ από την ανάκλαση στην πίσω επιφάνεια του σκυροδέματος. Η θέση της ηχώ από την πίσω επιφάνεια του σκυροδέματος, δείχνει το πάχος στην οποία ο χρόνος διέλευσης είναι ανάλογος με αυτόν της χαλύβδινης πλάκας. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος διέλευσης t προσδιορίζεται από την ένδειξη της οθόνης d_g και από την γνωστή ταχύτητα διαμηκών κυμάτων του ήχου στο

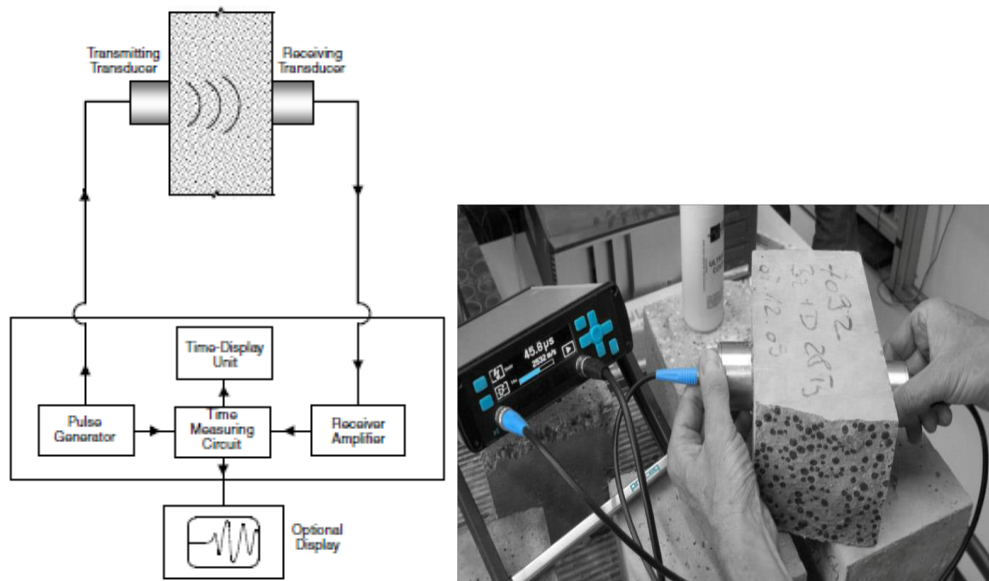
χάλυβα $c_l = 5920$ m/s από τη σχέση $t = \frac{2d_g}{c_l}$. Ο ανίστοιχος πολλαπλάσιος χρόνος

διέλευσης του ήχου t προσδιορίζεται στο δοκίμιο σκυροδέματος από το πραγματικό του πάχος d_x και την άγνωστη ταχύτητα του ήχου c_{lx} από τη σχέση $t = \frac{2d_x}{c_{lx}}$. Από τις δύο

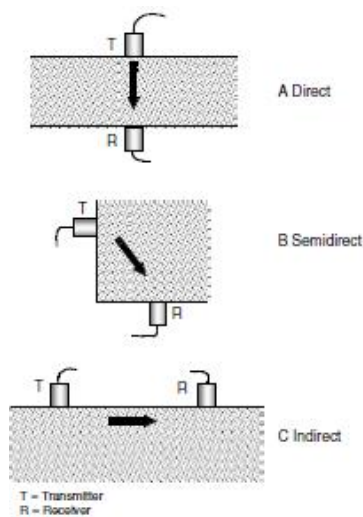
παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι $\frac{d_x}{c_{lx}} = \frac{d_g}{c_l} \Leftrightarrow c_{lx} = c_l \frac{d_x}{d_g}$ [5].

Οι πμές ταχύτητας των διαμηκών κυμάτων στο σκυροδέματος κυμαίνονται μεταξύ 3000–5000 m/s και συγκεκριμένα για ένα τυπικό σκυρόδεμα η ταχύτητα των υπερηχητικών κυμάτων κυμαίνεται από 3700 μέχρι 4200m/s [1]. Υπάρχουν τρεις πιθανές διατάξεις για την τοποθέτηση των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων πάνω στο σκυρόδεμα. Η άμεση (direct) μετάδοση, η έμμεση (Semidirect) μετάδοση και η επιφανειακή (Indirect) μετάδοση. Η μέθοδος άμεσης μετάδοσης είναι περισσότερο αποτελεσματική διότι μεταδίδεται και λαμβάνεται περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. Η έμμεση μέθοδος μπορεί να είναι ικανοποιητική όταν η γωνία και η απόσταση που πρέπει να διανύσει το σήμα μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων είναι μικρή. Αν δεν ικανοποιούνται αυτές οι συνθήκες δε θα λαμβάνεται καθαρό σήμα καθώς θα υπάρχει έντονη απόσβεση. Η επιφανειακή μετάδοση είναι αδιαμφησβήτητα λιγότερο

ικανοποιητική και το πλάτος της έντασης του σήματος είναι 3% μικρότερο από π στην άμεση μετάδοση [23]. Μια κοινή συσκευή υπερηχητικών κυμάτων παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται στις υπερηχητικές συσκευές παράγουν κυρίως διαμήκη κύματα με το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας των κυμάτων να κατευθύνεται κατά μήκος του άξονα κάθετα προς την επιφάνεια του μετατροπέα.



Εικόνα 11: Απεικόνιση πειραματικής διάταξης υπερηχητικής μεθόδου με την λειτουργία της άμεσης λήψης ηχητικού παλμού.



Εικόνα 12: Οι τρεις βασικές τοποθεσίες των πιεζοηλεκτρικών κεφαλών στο σκυρόδεμα για τη λήψη του υπερηχητικού παλμού.

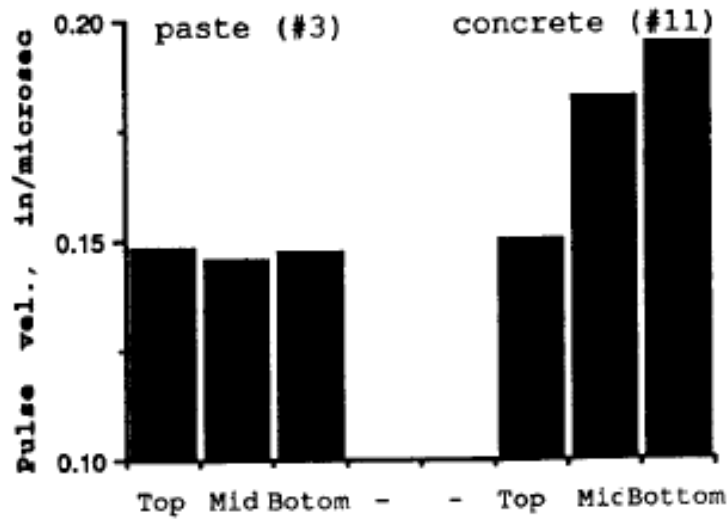
4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα των υπερήχων στο σκυρόδεμα

4.4.1 Επίδραση της συχνότητας στην ταχύτητα των υπερήχων

Είναι γνωστό ότι σε μεγάλες συχνότητες υπάρχει μεγαλύτερη απόσβεση στο σήμα που λαμβάνεται στο σκυρόδεμα. Ο Sandor Poronics στην δημοσίευση του το 1990 μελέτησε το φαινόμενο αυτό εξετάζοντας δοκίμια σκυροδέματος με διαφορετικές συχνότητες στην διαμήκη και στην εγκάρσια διεύθυνση των δειγμάτων. Δύο κατηγορίες αποτελεσμάτων προέκυψαν όπου στη πρώτη κατηγορία οι ταχύτητες διέφεραν κατά την εγκάρσια και διαμήκη διεύθυνση. Συγκεκριμένα στη περίπτωση των χαμηλών συχνοτήτων, οι ταχύτητες κατά τη διαμήκη διεύθυνση είχαν μεγαλύτερες τιμές από ότι στην εγκάρσια. Αντίθετα στην περίπτωση μεγάλων συχνοτήτων οι ταχύτητες κατά τη διαμήκη διεύθυνση είχαν μικρότερες τιμές από ότι στην εγκάρσια διεύθυνση. Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται στη συχνότητα που επιλέγεται κάθε φορά όπου παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα των υπερήχων αυξάνεται όσο εφαρμόζονται μεγαλύτερες συχνότητες και στις δύο διευθύνσεις [24].

4.4.2 Επίδραση της μη ομοιογένειας του σκυροδέματος στη ταχύτητα των υπερήχων

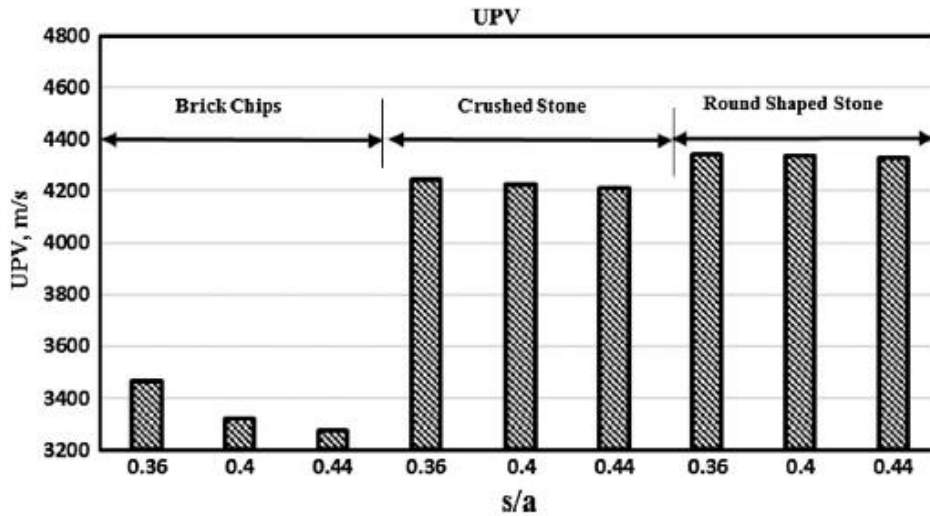
Εξαιτίας της ανομοιογένειας στη σύνθεση του σκυροδέματος, τα αδρανή με μεγαλύτερη πυκνότητα τείνουν να εγκαθίστανται στη κάτω περιοχή του καλουπιού κατά τη σύνθεση του σκυροδέματος. Αυτό συμβαίνει διότι τα αδρανή έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από τη κονία που έχει ως αποτέλεσμα η κάτω περιοχή του σκυροδέματος να περιέχει περισσότερα αδρανή από τη μέση και στη πάνω περιοχή. Οι δοκιμές που διεξήχθησαν έδειξαν ότι και στις τρεις περιοχές του δοκιμίου η ταχύτητα των υπερήχων ήταν μεγαλύτερη στη κάτω περιοχή του δείγματος [24].



Εικόνα 13: Διάγραμμα ταχύτητας υπερήχων συναρτήσει περιοχής μέτρησης στο σκυρόδεμα και αντίστοιχα στο τσιμεντοπολτό.

4.4.3 Μέγεθος αδρανών τύπος και περιεχόμενο

Πολλοί ερευνητές με πρωτεργάτη τον Sandor Poronics έχουν διαπιστώσει ότι η ταχύτητα των υπερήχων στο σκυρόδεμα επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την ποσότητα των αδρανών που το περιέχει. Γενικά, η ταχύτητα στο τσιμέντο είναι χαμηλότερη από αυτήν στο σκυρόδεμα που περιέχει αδρανή [24]. Επιπλέον ερευνητές διαπίστωσαν ότι το είδος και το σχήμα των αδρανών επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ταχύτητα των υπερήχων. Ο Tarrek Uddin Mohammed et al. μελέτησε τη διακύμανση της υπερηχητικής ταχύτητας στο σκυρόδεμα συναρτήσει διάφορων τύπων αδρανών όπως θρυμματισμένη πέτρα, κυκλικό χαλίκι, πλίνθους και μαύρη πέτρα και διαπίστωσε ότι η ταχύτητα για την ίδια αντοχή σκυροδέματος ήταν μεγαλύτερη στα δοκίμια με την μαύρη πέτρα. Ακολουθούσαν τα δοκίμια με τη θρυμματισμένη πέτρα και τέλος με τη μικρότερη ταχύτητα ήταν τα δοκίμια με τους πλίνθους [25].



Εικόνα 14: Διάγραμμα ταχύτητας υπερήχων στο σκυρόδεμα συναρτήσει του είδους των αδρανών.

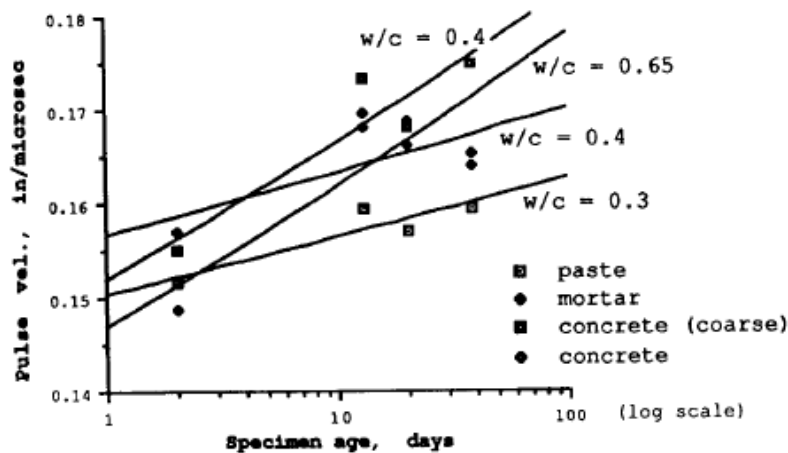
Ο Romel Solis-Carcano et al. μελέτησε 100 δοκίμια σκυροδέματος τα οποία περιείχαν θρυμματισμένο χαλίκι από 10 διαφορετικά ορυχεία τα οποία βρισκόντουσαν στην χερσόνησο Yucatan του Μεξικό. Παρατηρήθηκε ότι για της ίδιας αντοχής σκυρόδεμα τα δοκίμια που είχαν καλύτερης ποιότητας αδρανή (καλύτερες φυσικές ιδιότητες) είχαν ταχύτητα υπερήχων 400 m/s υψηλότερα συγκρίσει των δοκιμίων που συντέθηκαν με χαμηλής ποιότητας αδρανή [26].

4.4.4 Τύπος τσιμέντου

Ο Jones ανέφερε ότι ο τύπος του τσιμέντου δεν έχει σημαντική επίδραση στην ταχύτητα του υπερηχητικού κύματος. Ωστόσο, ο ρυθμός ενυδάτωσης είναι διαφορετικός για κάθε τύπο τσιμέντου και αναπόφευκτα θα επηρεάσει την ταχύτητα. Όσο ο ρυθμός της ενυδάτωσης του τσιμέντου αυξάνεται, αυξάνεται και το μέτρο ελαστικότητας. Εξίσου όμως αυξάνεται και η ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων. Οπότε, γίνεται κατανοητό ότι η χρήση τσιμέντων ταχείας σκλήρυνσης έχει ως αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται υψηλότερες τιμές αντοχής για μια δεδομένη πμή ταχύτητας [27], [24].

4.4.5 Ηλικία σκυροδέματος

Η επίδραση της ηλικίας του σκυροδέματος στην υπερηχητική ταχύτητα είναι παρόμοια με την επίδραση της στην ανάπτυξη της αντοχής του σκυροδέματος. Ο Alexandre Bogas et al. αναφέρει ότι η ταχύτητα των υπερήχων και η αντοχή στο σκυρόδεμα αυξάνονται κατά τη διαδικασία σύνθεσης του σκυροδέματος δηλαδή συναρτήσει του χρόνου από 0 έως 28 ημέρες. Αυτό εξηγείται στο γεγονός ότι η ταχύτητα είναι μικρότερη στα μικροκενά που υπάρχουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος σε σχέση με τη στερεά του μάζα οπότε όσο μεγαλύτερη γίνεται η ενυδάτωση κατά τη διάρκεια της σύνθεσης του, κλείνουν οι πόροι σταδιακά με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων. Αυτό αντικατοπτρίζει μια ανάλογη συμπεριφορά ταχύτητας αντοχής συναρτήσει του χρόνου σύνθεσης [19]. Ο Poronics εξέτασε δοκίμια σκυροδέματος σε διαφορετικά στάδια σύνθεσης για να προσδιορίσει τη συμπεριφορά της ταχύτητας διάδοσης συναρτήσει της διαδικασίας σύνθεσης όπου παρατήρησε ότι η ταχύτητα αυξάνεται με την ηλικία και ότι έχει παρόμοια συμπεριφορά με την αντοχή συναρτήσει της ηλικίας. Ακολουθώντας, συμπέρανε ότι η ταχύτητα διάδοσης στο σκυρόδεμα αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό σε σύγκριση με το τσιμέντο ή την τσιμεντοκονία όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα [24].



Εικόνα 15: Διακύμανση ταχύτητας διάδοσης διαμηκών κυμάτων στο σκυρόδεμα και στα υπόλοιπα υλικά συναρτήσει της ηλικίας τους.

Ο Jones σημείωσε την σχέση που ισχύει μεταξύ της ταχύτητας υπερήχων στο σκυρόδεμα με την ηλικία του σκυροδέματος. Έδειξε ότι η ταχύτητα υπερήχων αυξάνεται ραγδαία στο αρχικό στάδιο και ύστερα ομαλοποιείται. Αυτή η καμπύλη είναι παρόμοια με τη σχέση της αντοχής και της ηλικίας του σκυροδέματος. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι ότι στην περίπτωση της ταχύτητας- ηλικίας η ταχύτητα του παλμού φτάνει μια οριακή τιμή πιο σύντομα από ότι η αντοχή του σκυροδέματος. Επίσης κατέληξε στο συμπέρασμα ότι μόλις η καμπύλη ταχύτητας του υπερηχητικού παλμού στο σκυρόδεμα σταθεροποιηθεί τα πειραματικά σφάλματα καθιστούν αδύνατη την εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος με ακρίβεια [28].

4.4.6 Επαφή πιεζοηλεκτρικών μετατροπών

Για να εξασφαλιστεί ότι τα υπερηχητικά κύματα, που διοχετεύονται από τον κρύσταλλο πομπό, περνούν στο σύνολό τους μέσα στην μάζα του σκυροδέματος, τοποθετείται μεταξύ των κρυστάλλων και του σκυροδέματος μια λιπαντική ουσία, η οποία καλύπτει τις ατέλειες της εξωτερικής επιφάνειας του στοιχείου [29], [22]. Η λιπαντική ουσία, η οποία μπορεί να είναι γράσο βαζελίνη ή γενικά κάποιο παράγωγο του πετρελαίου, πρέπει να τοποθετείται σε μικρή ποσότητα, γιατί διαφορετικά προκαλεί αθέλητες διαφοροποιήσεις στην μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι η ταχύτητα διαδόσεως των υπερήχων είναι διαφορετική στο σκυρόδεμα από ότι στην χρησιμοποιούμενη λιπαντική ουσία. Παράλληλα με την χρήση των ανωτέρω λιπαντικών ουσιών, κατά την διάρκεια της δοκιμής, για να επιτύχουμε την μέτρηση του σωστού χρόνου διαδόσεως των υπερηχητικών κυμάτων, θα πρέπει οι κρύσταλλοι να πιέζονται με μεγάλη δύναμη πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Στην περίπτωση που οι εξωτερικές επιφάνειες του σκυροδέματος είναι πολύ ανώμαλες θα πρέπει, πριν την τοποθέτηση της λιπαντικής ουσίας, να γίνεται επιπέδωση των επιφανειών με την χρήση ηλεκτρικού περιστροφικού σμυριδόπανου.

4.4.7 Υγρασία του σκυροδέματος

Όταν στο δοκιμαζόμενο στοιχείο το ποσοστό υγρασίας είναι υψηλό παρατηρείται μια αύξηση της μετρούμενης ταχύτητας των υπερήχων. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος συνιστάται η χρήση των διορθωτικών συντελεστών που φαίνονται παρακάτω [30].

| Συντήρηση Σκυροδέματος | Διορθωτικός Συντελεστής (πολλαπλασιάζεται η μετρηθείσα ταχύτητα) |
|-------------------------------|---|
| Σε ξηρό αέρα | 1.03 |
| Συμβατική | 1.00 |
| Στο νερό | 0.97 |

Πίνακας 9: Διορθωτικοί συντελεστές σύμφωνα με την συντήρηση του σκυροδέματος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι είναι δυνατή η χρήση ενδιάμεσων πμών, κατ' εκτίμηση του βαθμού ξηράνσεως ή του βαθμού κορεσμού της υπό τον έλεγχο μάζας σκυροδέματος.

4.4.8 Θερμοκρασία του Σκυροδέματος

Έχει παρατηρηθεί μέσα από μία σειρά πειραμάτων ότι όταν η θερμοκρασία κυμαίνεται από +5 °C έως +30 °C δεν παρατηρείται καμία σημαντική διαφοροποίηση στην μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων. Αντίθετα, όταν η θερμοκρασία είναι μικρότερη από +5 °C ή υψηλότερη από +30 °C, τότε διαπιστώνονται σημαντικές μεταβολές στην ταχύτητα των υπερήχων, για σκυροδέματα συντηρημένα τόσο σε ξηρές, όσο και σε υγρές συνθήκες. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι διορθωτικοί συντελεστές, με τους

οποίους προσαυξάνεται (ή μειώνεται) η μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων, όταν η θερμοκρασία βρίσκεται εκτός του διαστήματος +5 °C έως +30 °C.

| Θερμοκρασία °C | Διόρθωση της μετρούμενης ταχύτητας των υπερήχων-Ξηρές συνθήκες (%) | Διόρθωση της μετρούμενης ταχύτητας των υπερήχων-Υγρές συνθήκες (%) |
|----------------|--|--|
| 60 | 5.0 | 4.0 |
| 40 | 2.0 | 1.7 |
| 20 | 0.0 | 0.0 |
| 0 | -0.5 | -1.0 |
| -4 | -1.5 | -7.5 |

Πίνακας 10: Διορθωτικοί συντελεστές σύμφωνα με την θερμοκρασία συντήρησης των δοκιμίων σκυροδέματος.

Για θερμοκρασίες μεταξύ των τιμών που δίνονται στον παραπάνω πίνακα μπορεί να γίνεται γραμμική παρεμβολή, για τον προσδιορισμό του σωστού διορθωτικού συντελεστή. Η μείωση που παρατηρείται στην ταχύτητα των υπερήχων στις θερμοκρασίες 40 °C και 60°C είναι πιθανό να προέρχεται από τις εσωτερικές μικρορηγματώσεις που σημειώνονται στην μάζα του σκυροδέματος σ' αυτές τις θερμοκρασίες. Επειδή δεν υπάρχει αντίστοιχη μείωση στην αντοχή του σκυροδέματος, οι συντελεστές του πίνακα βοηθούν στην σωστή συσχέτιση της ταχύτητας των υπερήχων με την αντοχή του σκυροδέματος της κατασκευής. Αντίθετα η αύξηση της ταχύτητας των υπερήχων σε θερμοκρασίες μικρότερες των -4 °C οφείλεται στην μετατροπή του νερού των πόρων σε πάγο [31].

4.4.9 Μήκος Διαδρομής

Τα [31] και [1] παρουσιάζουν ότι το ελάχιστο μήκος διαδρομής πρέπει να είναι ίσο με 100 mm για σκυροδέματα με μέγιστο μέγεθος αδρανούς 20 mm και 150 mm και για μέγιστο μέγεθος αδρανούς μεταξύ 20 mm και 40 mm. Στο ISO DIS 8047 (1982) αναφέρεται ότι το ελάχιστο μήκος διαδρομής θα πρέπει να είναι πενταπλάσιο του μέγιστου κόκκου αδρανών, και σε καμία περίπτωση μικρότερο των 150mm. Είναι όμως δυνατό, όπως αναφέρεται στο [22], το μήκος διαδρομής να κυμαίνεται από 50mm έως 15m. Το ανώτερο όριο του μήκους διαδρομής εξαρτάται απ' την κατάσταση της εξωτερικής επιφάνειας του στοιχείου, όπως επίσης και από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, από το οποίο είναι κατασκευασμένο. Πρέπει να τονιστεί ότι για μεγάλα μήκη απαιτούνται συχνότητες της τάξεως των 20 kHz, ενώ αντίθετα για μικρά μήκη οι συχνότητες μπορούν να φτάσουν και τα 200 kHz. Στην δημοσίευση της RILEM για τις μη καταστρεπτικές μεθόδους, δίνεται ο κατωτέρω πίνακας για την επιλογή της συχνότητας ανάλογα με το μήκος διαδρομής [30].

| Μήκος διαδρομής (mm) | Συχνότητα (kHz) | Ελάχιστη εγκάρσια απόσταση (mm) |
|-----------------------------|------------------------|--|
| 100-700 | >60 | 70 |
| 200-1500 | >40 | 150 |
| >1500 | >20 | 300 |

Πίνακας 11: Κατάλληλο εύρος συχνοτήτων ανάλογα με το μήκος διαδρομής του παλμού.

4.4.10 Σχήμα και διαστάσεις δοκιμίου

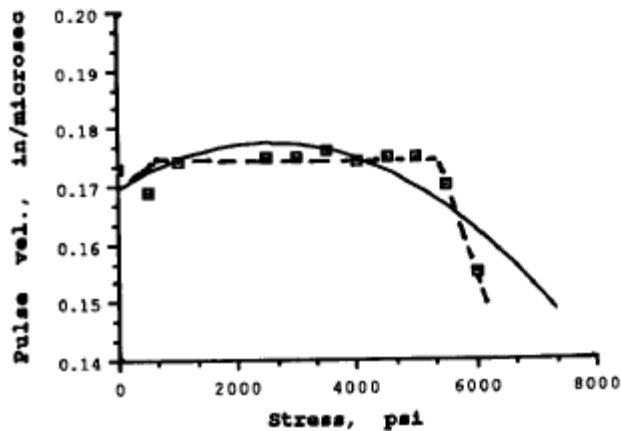
Η ταχύτητα των υπερήχων δεν εξαρτάται από το σχήμα και τις διαστάσεις των δοκιμαζόμενων στοιχείων, εκτός και αν η διάσταση είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη. Όταν η διάσταση του δοκιμίου είναι μικρή, τότε έχουμε μία μείωση και στην ταχύτητα των υπερήχων. Η μείωση αυτή εξαρτάται κυρίως από τον λόγο του μήκους κύματος προς την ελάχιστη διάσταση του δοκιμίου.

4.4.11 Ράβδοι Οπλισμού

Η μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων, στις περιοχές των δομικών στοιχείων που περιέχουν ράβδους οπλισμού, είναι συνήθως υψηλότερη σε σχέση με την ταχύτητα που μετρείται σε περιοχές ελεύθερες από οπλισμό. Η αύξηση αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι στον χάλυβα η ταχύτητα των υπερήχων είναι από 1.2 έως 2.0 φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα στο σκυρόδεμα. Η παρατηρούμενη αύξηση εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των ράβδων οπλισμού, την διάμετρό τους και την απόσταση του κέντρου των κρυστάλλων από τον διαμήκη άξονα των ράβδων [31]. Άλλοι παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν στην αύξηση της ταχύτητας των υπερήχων είναι ακόμη η συχνότητα των υπερήχων και η κατάσταση της εξωτερικής επιφάνειας των ράβδων του οπλισμού.

4.4.12 Εντατική κατάσταση του Σκυροδέματος

Για την επίδραση της εντατικής καταστάσεως στην ταχύτητα διαδόσεως των υπερήχων ο Ρορονίς αναφέρει ότι η ταχύτητα των υπερήχων αυξάνει ελαφρά όταν το σκυρόδεμα φορτίζεται προοδευτικά, αλλά μειώνεται απότομα όταν η εξωτερική τάση γίνει ίση με το 70% της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Το φαινόμενο αυτό δικαιολογείται απ' το γεγονός ότι όσο η τάση αυξάνεται προοδευτικά τόσο τα μικροκενά στη μάζα του σκυροδέματος καλύπτονται, με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερους χρόνους διαδόσεως των υπερήχων. Αντίθετα όταν η τάση είναι μεγάλη και εφαρμοστεί απότομα, τότε δημιουργούνται ρωγμές στη μάζα του σκυροδέματος, με συνέπεια να έχουμε αύξηση του χρόνου διαδόσεως των υπερηχητικών κυμάτων που προκαλεί μείωση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων [24].



Εικόνα 16: Επίδραση της φόρτισης του σκυροδέματος στην ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων.

4.5 Εφαρμογές της υπερηχητικής μεθόδου για τον προσδιορισμό θεμελιωδών παραμέτρων του σκυροδέματος.

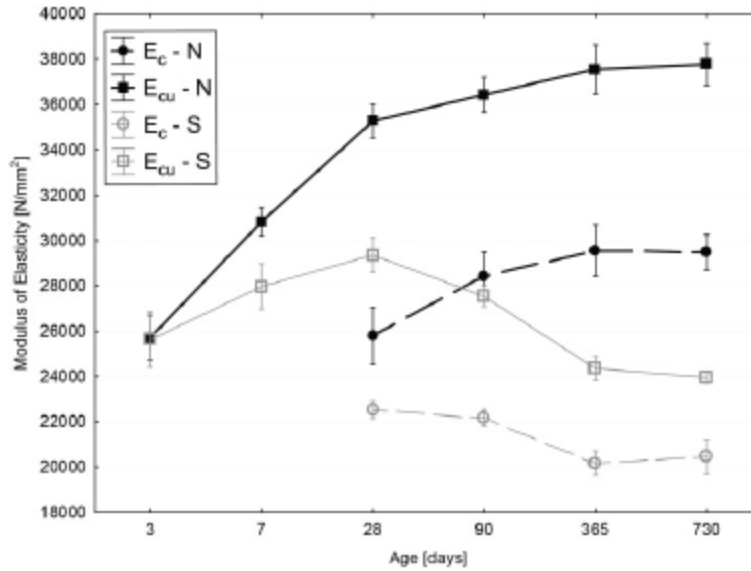
4.5.1 Προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας

Με την υπερηχητική μέθοδο, όταν διοχετεύεται ένας υπερηχητικός παλμός στο δοκίμιο (με την ελαφρά κρουστική ταλάντωση των κρυστάλλων του υπερηχοσκοπίου) η εφαρμοζόμενη τάση είναι σχεδόν μηδενική ($\sigma = 0$). Επομένως το προσδιοριζόμενο με αυτή τη μέθοδο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_d είναι πολύ μεγάλο και ασφαλώς ίσο με το αρχικό E_a ($E_d = E_a > E_s$). Ο προσδιορισμός επομένως του μέτρου ελαστικότητας με την υπερηχητική μέθοδο, παρέχει το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_d που είναι ίσο με το αρχικό μέτρο ελαστικότητας E_a και συνήθως είναι μεγαλύτερο του προσδιοριζόμενου στατικού μέτρου ελαστικότητας E_s . Συνήθως προσδιορίζεται η μέση τιμή του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας που δίνει το ονομαζόμενο στατικό μέτρο

ελαστικότητας E_s το οποίο είναι μικρότερο του αρχικού μέτρου ελαστικότητας. Όσο στερεότερο είναι ένα υλικό τόσο περισσότερο ευθύγραμμος είναι ο αρχικός κλάδος του διαγράμματος $\sigma = f(\epsilon)$ και τόσο το στατικό μέτρο ελαστικότητας E_s πλησιάζει το αρχικό μέτρο ελαστικότητας E_a [5]. Η ταχύτητα ενός διαμήκους κύματος που διέρχεται σε ένα ελαστικό υλικό καθορίζεται με μοναδικό τρόπο από τις ελαστικές σταθερές και την πυκνότητα του υλικού σύμφωνα με τη θεωρία διάδοσης κυμάτων σύμφωνα με την

προαναφερθείσα σχέση
$$c_l = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}.$$
 Επομένως είναι δυνατόν να

υπολογισθεί το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ενός υλικού και κατ' επέκταση η αντοχή του σκυροδέματος εάν μετρηθεί η ταχύτητα των υπερηχητικών διαμηκών κυμάτων και ο λόγος του Poisson είναι γνωστός ή υποτιθέμενος. Αυτή η προσέγγιση πλεονεκτεί συγκρίσει των άλλων δυναμικών μεθόδων διότι δεν προϋποθέτει ειδική μορφοποίηση των δειγμάτων η εξοπλισμένο κατάλληλα εργαστήριο. Παρόλα αυτά ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας στο σκυρόδεμα από την υπερηχητική μέθοδο αντιμετωπίζει δύο σημαντικά προβλήματα. Ανακριβείς υπολογισμοί του λόγου Poisson του σκυροδέματος μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα και δεύτερον η παραπάνω εξίσωση προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας είναι λειτουργική για ομοιογενή υλικά αφήνοντας αμφιβολίες για την επίδοση της σε ανομοιογενή υλικά όπως στα σύνθετα υλικά και κατ'επέκταση στο σκυρόδεμα [17]. Αρκετοί ερευνητές αναφέρουν τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας από την υπερηχητική μέθοδο στο σκυρόδεμα. Ο Dalibor kocab et al. μελέτησαν το στατικό και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας κατά τη διάρκεια σύνθεσης των δοκιμίων σκυροδέματος με μηχανικές δοκιμές και αντίστοιχα με την μέθοδο των υπερήχων. Η πρώτη κατηγορία δοκιμίων σκυροδέματος Α χαρακτηριζόντουσαν ως αερακτικά ενώ η δεύτερη κατηγορία Β ως μη αερακτικά. Επιπρόσθετα υπήρχαν και δύο υποκατηγορίες αυτών όπου Ν ήταν τα δοκίμια τα οποία είχαν εμβαπτιστεί σε νερό με αποτέλεσμα τον κορεσμό τους και S ήταν τα μη κορεσμένα δοκίμια που βρισκόντουσαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η διακύμανση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συγκρίσει το στατικό μέτρο ελαστικότητας από 3 έως 730 ημέρες.



Εικόνα 17: Διακύμανση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_{cu} και του στατικού μέτρου ελαστικότητας E_c των A και B κατηγορίας δοκιμών συναρτήσει της διαδικασίας σύνθεσής τους N και S.

Πριν την εμβάπτιση των δοκιμών στο νερό και στις δύο κατηγορίες το δυναμικό και το στατικό μέτρο ελαστικότητας αυξάνονταν. Μετά τις 7 ημέρες όμως, τα δοκίμια που ήταν εκτεθειμένα σε ξηρές συνθήκες δείχνουν μια πτωτική τάση του δυναμικού και του στατικού μέτρου ελαστικότητας σε σύγκριση με τα εμβαπτισμένα δοκίμια σε νερό όπου φαίνεται ξεκάθαρα η αύξηση του δυναμικού καθώς και του στατικού μέτρου ελαστικότητας. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η έντονη εξάτμιση του νερού από τα μη εμβαπτιζόμενα δοκίμια προκάλεσε μείωση της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό τους όπου είχε ως συνέπεια την αρνητική επίδραση στην ενυδάτωση του τσιμέντου. Αυτές οι συνθήκες αναπόφευκτα οδηγούν σε υποβάθμιση των μηχανικών του ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Καταλήγοντας το σημαντικό συμπέρασμα από την δημοσίευση αυτή, είναι ότι κατά τη διαδικασία σύνθεσης του σκυροδέματος το στατικό μέτρο ελαστικότητας έχει ίδια συμπεριφορά με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας και παρατηρείται ότι το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας είναι μεγαλύτερο από το στατικό μέτρο ελαστικότητας [32].

Ο Vladimir G. Haach χρησιμοποίησε την μέθοδο των υπερήχων για να προσδιορίσει τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος με πολύ υψηλής σκληρότητας τσιμέντο. Οι υπέρηχοι πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια παρασκευής των δοκιμών και μετά από

28 ημέρες. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια καλή σχέση μεταξύ δυναμικού μέτρου ελαστικότητας και αντοχής στη θλίψη καθώς και ότι το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ήταν 39,1% μεγαλύτερο από το στατικό μετρό ελαστικότητας [33]. Οι I.N Prassianakis και ο P. Giokas το 2002 μελέτησαν την εξέλιξη των χαρακτηριστικών μιας συγκεκριμένης ποιότητας σκυροδέματος ηλικίας 28 ετών σύνθεσης του 1973 του οποίου οι ιδιότητες σε ηλικίες 7, 28 και 90 ημερών ήταν γνωστές. Εκτός από τις καταστροφικές δοκιμές το σκυρόδεμα αυτό ελέγχθηκε και με τη μέθοδο των υπερήχων με πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς συχνότητας 500 kHz. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν ότι το στατικό μέτρο ελαστικότητας παρέμεινε περίπου ίσο μετά από 28 έτη, το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας προέκυψε 7,9% μεγαλύτερο από το μετρούμενο στατικό και οι συγγραφείς αναφέρουν ότι το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας προκύπτει μεγαλύτερο έως και 16,5% από το αντίστοιχο στατικό, ενώ η διαφορά μεταξύ των δύο αυξάνει, όσο η ταχύτητα των υπερήχων αυξάνει [34]. Ο I.N. Prassianakis, μαζί με τον N.I. Prassianakis το 2004 εν συνέχεια της ερευνητικής του δραστηριότητας στην μέθοδο των υπερήχων ερεύνησαν την ικανότητα της υπερηχητικής μεθόδου στην αξιολόγηση της ακεραιότητας των μη μεταλλικών υλικών όπως το σκυρόδεμα και το μάρμαρο. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα δοκίμια σκυροδέματος που είχαν χρησιμοποιηθεί στη προηγούμενη μελέτη του συγγραφέα σύνθεσης 1973 και ηλικίας 30 ετών. Οι μετρήσεις έγιναν με συχνότητα 1MHz όπου προσδιόρισαν την ταχύτητα των υπερήχων και έπειτα το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας όπου αποδείχθηκε ότι ήταν 8% μεγαλύτερο από το μετρό ελαστικότητας που υπολογίστηκε από τις καταστροφικούς ελέγχους [35].

Το πρότυπο BS-1881-203 αναφέρει ότι η ταχύτητα των υπερήχων δεν επηρεάζεται από τις διαστάσεις του δοκιμίου σκυροδέματος όταν μία ή περισσότερες από τις διαστάσεις είναι σχετικά μικρότερη από το μήκος κύματος του παλμού. Επομένως από τη σχέση

$$E_d = \rho c_l^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

είναι κατανοητό ότι εάν είναι γνωστές οι τιμές της πυκνότητας

και του λόγου Poisson μπορεί να προσδιοριστεί το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας στο σκυρόδεμα για ένα μεγάλο εύρος σχημάτων και μεγεθών. Συνήθως δεν είναι εφικτός ο προσδιορισμός του λόγου Poisson σε in situ μετρήσεις για αυτό το λόγο μέσω εμπειρικών σχέσεων που αναφέρονται στο σκυρόδεμα με φυσιολογικό μέγεθος αδρανών έχει

δημιουργηθεί ένας πίνακας προσδιορισμού του δυναμικού και στατικού μέτρου ελαστικότητας με χρήση της ταχύτητας υπερήχων [31].

| Ταχύτητα Υπερήχων (km/s) | Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (MPa) | Στατικό μέτρο ελαστικότητας (MPa) |
|-------------------------------------|---|--|
| 3.6 | 24000 | 13000 |
| 3.8 | 26000 | 15000 |
| 4.0 | 29000 | 18000 |
| 4.2 | 32000 | 22000 |
| 4.4 | 36000 | 27000 |
| 4.6 | 42000 | 34000 |
| 4.8 | 49000 | 43000 |
| 5.0 | 58000 | 52000 |

Πίνακας 12: Προσδιορισμός του δυναμικού και στατικού μέτρου ελαστικότητας με χρήση καθορισμένων τιμών της ταχύτητας των υπερήχων.

Συνήθως το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας που υπολογίζεται από τη μέθοδο των υπερήχων έχει μεγαλύτερη τιμή από αυτό που προκύπτει από τις καταστροφικές μεθόδους.

4.6 Προσδιορισμός της αντοχής του σκυροδέματος

Η μέθοδος των υπερήχων μπορεί να παρέχει ένα μέσο εκτίμησης της αντοχής του σκυροδέματος και σε *in situ* μετρήσεις αλλά και προκατασκευαστικά. Ωστόσο, δεν υπάρχει φυσική σχέση που να συνδέει την αντοχή του σκυροδέματος με την ταχύτητα. Η σχέση μεταξύ της αντοχής και της ταχύτητας του σκυροδέματος δεν είναι μοναδική και επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως το μέγεθος των αδρανών τον τύπο του τσιμέντου τον λόγο νερού προς τσιμέντου και τα φαινόμενα υγρασίας. Η επίδραση τέτοιων

παραγόντων έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές. Έχουν σαφώς υποδείξει ότι δεν πρέπει να γίνονται προσπάθειες εκτίμησης της αντοχής του σκυροδέματος από τις πιμές της υπερηχητικής ταχύτητας εκτός μόνον αν υπάρχει βάση δεδομένων για κάθε είδος σκυροδέματος ξεχωριστά.

Ο Jones στη δημοσίευση του το 1950 υποστηρίζει ότι το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας υπολογιζόμενο από την ταχύτητα των υπερήχων στο σκυρόδεμα δεν μπορεί να συσχετιστεί με την αντοχή του σκυροδέματος εκτός από την περίπτωση που μελετάται μόνο μία συγκεκριμένη σύνθεση σκυροδέματος. Ιδανική περίπτωση για την χρήση της υπερηχητικής μεθόδου για την εκτίμηση της αντοχής είναι όταν μεγάλες ποσότητες σκυροδέματος πρόκειται να εγκατασταθούν και είναι ελεγχόμενη η σύνθεση τους. Επίσης πολύ καλή συσχέτιση μπορεί να γίνει όταν στην περίπτωση της προπαρασκευής των δοκιμών σκυροδέματος όπου ελέγχονται μεγάλες ποσότητες δειγμάτων με αποτέλεσμα αποφεύγεται η εξαγωγή δοκιμών με μη αποδεκτές συνθήκες σκλήρυνσης η οποιαδήποτε περίπτωση σφαλμάτων κατά την διεργασία παραγωγής [27]. Ο J. Alexandre Bogas et al. εξέτασε 84 διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος σε χρονικό διάστημα 3 μέχρι 180 ημερών με εύρος αντοχής από 30 μέχρι 80 MPa όπου μελέτησε την επίδραση των διάφορων παραμέτρων στη σχέση ταχύτητας υπερήχων και αντοχής σκυροδέματος. Αυτοί οι παράμετροι ήταν το είδος τσιμέντου το ποσοστό του νερού το είδος και η πυκνότητα των αδρανών οι αρχικές συνθήκες ενυδάτωσης. Διαπίστωσε ότι η σχέση ταχύτητας υπερήχων και αντοχής επηρεάζεται λιγότερο από τη πυκνότητα των αδρανών στα light weight concretes από τι στα normal weight concretes. Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο στα lightweight concrete η ταχύτητα των υπερήχων και η αντοχή αυξάνονταν με την πάροδο του χρόνου και μειώνονταν από τον λόγο νερού τσιμέντου (w/c ratio) και την πυκνότητα των αδρανών. Παρόλα αυτά, ο λόγος νερού τσιμέντου δεν έχει τόσο μεγάλη επιρροή στην αντοχή του σκυροδέματος όσο στην ταχύτητα των υπερήχων όπου επιπρόσθετες διακυμάνσεις παρατηρούνται και στην αναλογία σύνθεσης της τσιμεντοκονίας. Ακόμα, διαπίστωσε ότι η σχέση ταχύτητας αντοχής επηρεάζεται σε μικρό βαθμό από τον τύπο τσιμέντου. Τέλος παρουσίασε μια γενική σχέση μεταξύ αντοχής και ταχύτητας υπερήχων που δεν επηρεάζεται από τον τύπο σκυροδέματος και από τα συνθετικά του στοιχεία η οποία είχε υψηλή συσχέτιση 0.85 στην περίπτωση των normal και lightweight σκυροδεμάτων με μέτρο ελαστικότητας από 30

μέχρι 80 MPa όπου περιείχαν αδρανή πυκνότητας 1000 kg/m^3 . Η σχέση αυτή ήταν λειτουργική σε 200 δείγματα σκυροδέματος με διαφορετικούς τύπους αδρανών ηλικίες και διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος [19]. Ο Neville επισημαίνει ότι η ταχύτητα των υπερήχων προκύπτει από το χρόνο που κάνει η διαταραχή να περάσει από τα αδρανή και από τον τσιμεντοπολτό κτλ. Έτσι το μέτρο ελαστικότητας διαφέρει σημαντικά που σημαίνει ότι η ταχύτητα των υπερήχων εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών και των άλλων δομικών στοιχείων. Αντίθετα η αντοχή του σκυροδέματος δεν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών όποτε δεν υπάρχει καμία συσχέτιση της ταχύτητας των υπερήχων με την αντοχή του σκυροδέματος. Επίσης υποστηρίζει ότι υπάρχει ένας περιορισμός στο γεγονός ότι η επίδραση της υγρασίας στο σκυρόδεμα επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα του υπέρηχου όχι όμως την αντοχή του [17].

Κεφάλαιο 5: Συσχέτιση της υδαταπορροφητικότητας και της ταχύτητας των υπερήχων στο σκυρόδεμα (Βιβλιογραφική ανασκόπηση)

Η αντοχή στο σκυρόδεμα συσχετίζεται με την ικανότητά του να αντιστέκεται στη διάβρωση συγκεκριμένα στη χημική μηχανική και φυσική διάβρωση όπως τις τριβές τη χημική προσβολή από διάφορα ιόντα τις καιρικές συνθήκες κτλ. Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σύστημα των πόρων σε όλο τον όγκο του. Επομένως ο βαθμός ικανότητας μεταφοράς ουσιών στο εσωτερικό του σκυροδέματος παίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα και κατ' επέκταση στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Πολλές μέθοδοι και τεχνικές ελέγχου έχουν αναπτυχθεί από την επιστημονική κοινότητα όπου με άμεσο ή έμμεσο τρόπο προσδιορίζουν τους μηχανισμούς μεταφοράς στο σκυρόδεμα. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται μερικά από τα πρωτόκολλα που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα.

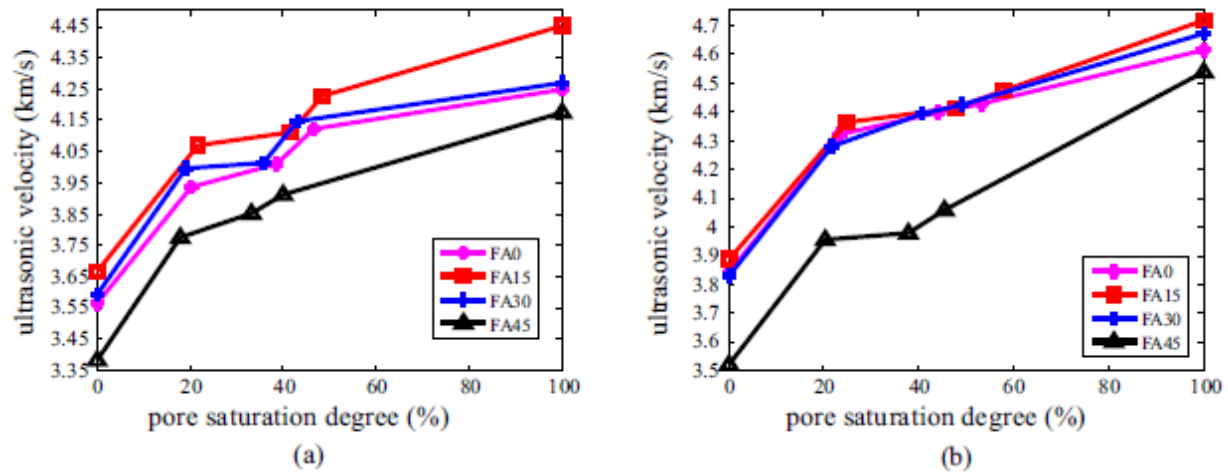
| | | |
|---------------|--------------------------------|---|
| 1. ASTM C1202 | Chloride resistance | Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride penetration |
| 2. ASTM C1585 | Water absorption | Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes |
| 3. ASTM C642 | Water absorption | Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete |
| 4. ASTM C1760 | Electrical resistivity | Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete |
| 5. ASTM C666 | Frost & freeze-thaw resistance | Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing |
| 6. ASTM C672 | Resistance to de-icing salts | Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to De-icing Chemicals |
| 7. ASTM C1543 | Ponding | Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding |

Πίνακας 13: Προδιαγραφές προσδιορισμού του συστήματος μεταφοράς του σκυροδέματος.

Ένα από τα πιο σημαντικά μέρη του συστήματος μεταφοράς του σκυροδέματος είναι η υδαταπορροφητικότητα. Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο τρία η υδαταπορροφητικότητα εμφανίζεται κυρίως στα πορώδη υλικά όπως το σκυρόδεμα και εξαρτάται από την πυκνότητα, το πορώδες, το είδος, το μέγεθος και τον βαθμό επικοινωνίας των πόρων. Απορροφητικότητα είναι η ιδιότητα που έχουν τα δομικά υλικά να απορροφούν (χωρίς εξωτερική πίεση) κάποιο ρευστό, το οποίο συνήθως είναι νερό (οπότε και η αντίστοιχη ιδιότητα λέγεται υδαταπορροφητικότητα) ιδιότητα αυτή μετρείται συνήθως με τη μάζα επί τοις % που απορροφά η μονάδα μάζας του υλικού μετά από εμβάπτιση (έως ότου σταθεροποιηθεί το βάρος, π.χ. για 24 ώρες) σε νερό. Ορίζεται ως

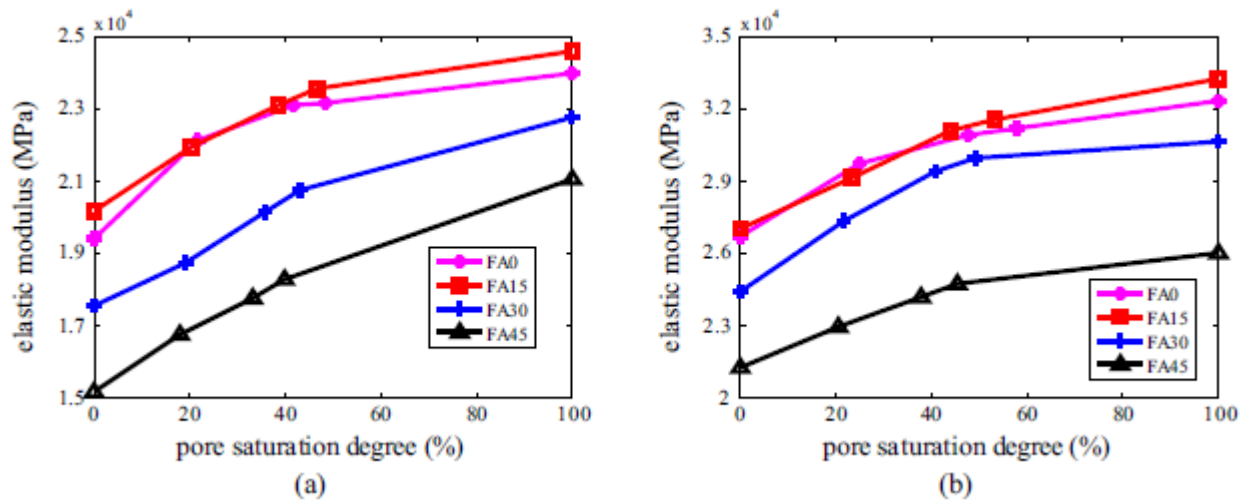
$$Y = 100 \frac{m_f - m_i}{m_i}, \text{ όπου } m_f: \text{ μάζα μετά την εμβάπτιση του σκυροδέματος } m_i: \text{ ξηρή}$$

αρχική μάζα του σκυροδέματος [36], [37]. Στην δημοσίευση της A. Alena Sicakova, Martina Draganovskaa και Marek Kovaca μελετήθηκε η απορρόφηση δοκιμίων σκυροδέματος διάφορων τύπων ηλικίας 28 ημερών και 730 ημερών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο ρυθμός απορρόφησης των δοκιμίων των 730 ημερών ήταν σχετικά χαμηλότερος σε σχέση με τα δοκίμια των 28 ημερών [38]. Ο Wei Wang et al. διερεύνησε την επίδραση του κορεσμού των πόρων στην ταχύτητα των υπερήχων στο μέτρο ελαστικότητας καθώς και στην αντοχή του σκυροδέματος αποτελούμενο από ιπτάμενη τέφρα. Διαπίστωσε ότι η ταχύτητα των υπερήχων αυξήθηκε καθώς αυξανόταν ο κορεσμός των πόρων εσωτερικά του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, η μετάβαση μέχρι το 20% αύξησε απότομα την ταχύτητα των υπερήχων. Αντίθετα η μετάβαση από το 20% μέχρι το 60% αύξησε την ταχύτητα των υπερήχων με αργό ρυθμό. Πάνω από το 60% κορεσμού παρατηρήθηκε απότομη αύξηση πάλι της ταχύτητας υπερήχων.



Εικόνα 18: Διακύμανση της ταχύτητας των υπερήχων με βάση το ποσοστό κορεσμού των πόρων του σκυροδέματος.

Επίσης παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του ποσοστού κορεσμού του σκυροδέματος προκαλεί απότομη αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και όταν το ποσοστό κορεσμού ξεπερνούσε το 60% ο ρυθμός αύξησης του μέτρου ελαστικότητας μειωνόταν. Αντίθετα η ανοχή στη θλίψη στο σκυρόδεμα από ιπτάμενη τέφρα είχε πτωτική τάση καθώς αυξανόταν ο ρυθμός κορεσμού από 0-100% [39].



Εικόνα 19: Διακύμανση του μέτρου ελαστικότητας με βάση το ποσοστό κορεσμού των πόρων του σκυροδέματος από ιπτάμενη τέφρα.

Κεφάλαιο 6: Εργαστηριακές Δοκιμές-Προδιαγραφές

6.1 Περίληψη

Στο 1^ο στάδιο του Πειραματικού πρωτοκόλλου χρησιμοποιήθηκαν και τα εννέα κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος για τη μέτρηση των διαμηκών κυμάτων κάθετα και παράλληλα στον άξονα σκυροδέτησης με τη χρήση ειδικής υπερηχητικής συσκευής ώστε να υπολογιστεί η ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων και κατά επέκταση το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας. Έπειτα επιλέχθηκαν τρία δοκίμια για το καταστροφικό έλεγχο με τη δοκιμή της θλίψης με σκοπό να εξαχθεί το στατικό μέτρο ελαστικότητας (το αρχικό εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας) ο λόγος του Poisson καθώς και η αντοχή του. Παράλληλα επιλέχθηκαν τρία δοκίμια για την εξαγωγή της αντοχής του σκυροδέματος σύμφωνα με τη δοκιμή της ανπδιαμετρικής θλίψης. Το 1^ο στάδιο είχε σκοπό να εξετάσει την κατάσταση των δοκιμίων σε σύγκριση με τα προηγούμενα έτη όπου είχαν διεξαχθεί αντίστοιχες μετρήσεις

Το 2^ο στάδιο του ερευνητικού πρωτοκόλλου είχε σαν στόχο να μελετήσει την υδαταπορροφητικότητα των δοκιμίων του σκυροδέματος και πώς επηρεάζει την ταχύτητα των υπερηχητικών κυμάτων και κατά επέκταση τις μηχανικές του ιδιότητες. Έτσι επιλέχθηκαν τρία δοκίμια στα οποία έγινε εμβάπτιση με νερό σύμφωνα με το C642-13 [36] πρότυπο για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Μετά το πέρας της καθορισμένου χρόνου εμβάπτισης τα δοκίμια ελέγχθηκαν με την υπερηχητική μέθοδο με σκοπό τον εντοπισμό διαφορών στην ταχύτητα υπερήχων και τέλος οδηγήθηκαν στη μηχανή θλίψεως για τη λήψη της αντοχής και των ελαστικών σταθερών.

6.2 Δοκίμια

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είχαν κατασκευαστεί πριν από 45 χρόνια και σημαντικός αριθμός από αυτά είχε ελεγχθεί σε μορφές καταπόνησεως από τους αρχικούς συγγραφείς της αρχικής επιστημονικής έρευνας και είχαν προσδιοριστεί τόσο το αρχικό εφαπτόμενο (στατικό) μέτρο ελαστικότητας όσο και ο λόγος του Poisson. Όλα τα δοκίμια είχαν κατασκευαστεί από την ίδια παραλαβή τσιμέντου Portland ελληνικού τύπου με ασβεστολιθική άμμο και ασβεστολιθικά χαλίκια, διαμέτρου από 7 έως 30 mm. Ο λόγος αδρανών – τσιμέντου ήταν 6,46 κατά βάρος, ο λόγος νερού – τσιμέντου ήταν 0,53 κατά βάρος και οι αναλογίες ανάμειξης ήταν 1:3,23:3,23 κατά βάρος. Η αντοχή του χρησιμοποιούμενου τσιμέντου σε ηλικία 7 ημερών ήταν 300 k_p/cm². Η ανάμειξη του μίγματος των αδρανών γινόταν εντός μηχανικού αναμεικτήρα και για χρόνο ανάμειξης 2 λεπτών. Ο χρόνος συμπύκνωσης του σκυροδέματος, με τη χρήση δονητή, ήταν 20 δευτερόλεπτα και με τη δονητική τράπεζα 50 δευτερόλεπτα. Όλα τα δοκίμια παρέμεναν σε χαλύβδινες μήτρες για τις πρώτες 24 ώρες και στη συνέχεια τοποθετούνταν εντός δεξαμενής με νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος πάνω σε ξύλινη εσχάρα για 6 ημέρες. Στη συνέχεια, τα δοκίμια τοποθετούνταν εντός υγρού θαλάμου, με μέση σχετική υγρασία 80% και μέση θερμοκρασία 20 °C και εκεί παρέμεναν μέχρι την ημέρα της δοκιμής. Το αρχικό εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας προέκυψε από τα κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 15 cm και ύψους 30 cm, ίσο με 4,08·10⁵ k_p/cm² (40 GPa) [34]. Όλα τα δοκίμια, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, είχαν φυλαχτεί μέσα σε θάλαμο σταθερής θερμοκρασίας όπου κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας μετρήθηκε η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του θαλάμου φύλαξης με ειδικό επιστημονικό θερμόμετρο ίση περίπου 11 °C και αντίστοιχα 72.1% ποσοστό σχετικής υγρασίας. Όπως γίνεται αντιληπτό τα δοκίμια ήταν απαλλαγμένα από κάθε είδους εξωτερική επίδραση (αέρας, ήλιος, κ.λπ.), η οποία ενδεχομένως θα διαφοροποιούσε τις ιδιότητες όπως και θα καθιστούσε αδύνατη τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα που είχαν προκύψει πριν από 28 και 45 χρόνια.



Εικόνα 20: Τα προς εξέταση δοκίμια με την μέθοδο των υπερήχων.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται όλα τα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων που εξετάστηκαν με τη χρήση μηχανικού παχύμετρου 40 cm και ζυγαριάς με ακρίβεια ± 10 gr.

| Δοκίμια | Ημερομηνία παραγωγής | Διάμετρος (mm) | Ύψος (mm) | Μάζα (gr) | Όγκος (cm ³) | Πυκνότητα (gr/cm ³) |
|---------|----------------------|----------------|-----------|-----------|--------------------------|---------------------------------|
| 1 | 22/4/1973 | 152.5 | 353 | 13320 | 6444.2 | 2.07 |
| 2 | 8/5/1973 | 154.5 | 320 | 13440 | 5999.61 | 2.24 |
| 3 | 14/5/1973 | 153.5 | 330 | 13400 | 6103.7 | 2.19 |
| 4 | 8/5/1973 | 154.4 | 327.2 | 13510 | 6123 | 2.20 |
| 5 | 8/5/1973 | 154.5 | 335 | 13550 | 6277.1 | 2.16 |
| 6 | 29/5/1973 | 152.4 | 338 | 12800 | 6162.2 | 2.08 |
| 7 | 14/5/1973 | 152.6 | 337 | 13300 | 6160 | 2.16 |
| 8 | 14/5/1973 | 152.5 | 366 | 13390 | 6681.6 | 2.00 |
| 9 | 8/5/1973 | 154.1 | 332 | 13460 | 6188.6 | 2.17 |

Πίνακας 14: Φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων σκυροδέματος.



Εικόνα 21: Επιστημονικά όργανα προσδιορισμού των φυσικών παραμέτρων των δοκιμών σκυροδέματος.

6.3 Υπερηχητική συσκευή USM 25

Στη παρούσα ερευνητική μελέτη για την μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων στα δοκίμια σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε η υπερηχητική συσκευή USM 25 της εταιρείας Krautkramer που λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων από 0.5-20 MHz. Λόγω υψηλής αποσβέσεως των υπερηχητικών κυμάτων στο σκυρόδεμα, απαιτούνται χαμηλές συχνότητες συχνοτήτων 0.5-4MHz. Οι δυο πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς που χρησιμοποιήθηκαν ήταν συχνότητας 1 MHz της ίδιας εταιρείας με κωδικό K1S και K1SM.



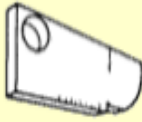
Εικόνα 22: Συσκευή υπερήχων USM 25 της εταιρείας Krautkramer.

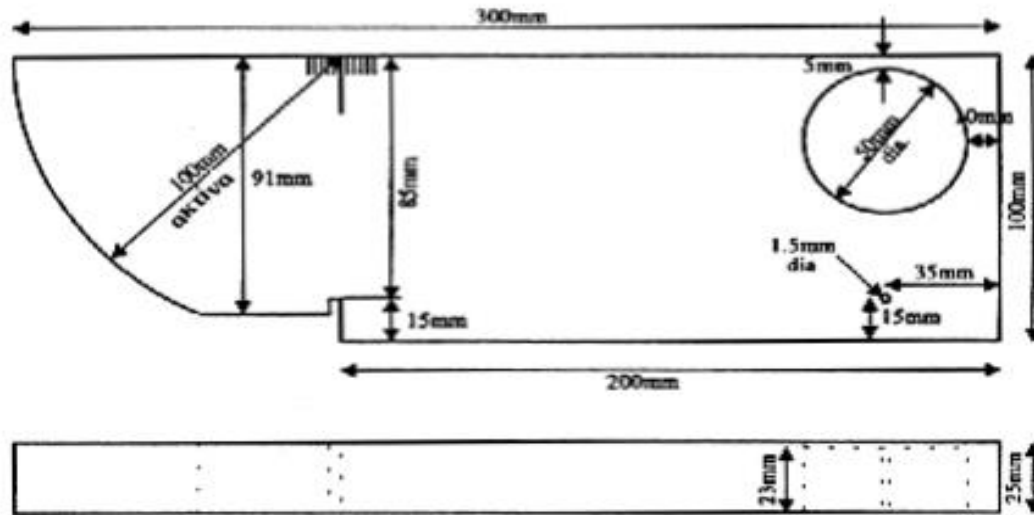


Εικόνα 23: Πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς K1SM και K1S συνδεδεμένοι με την υπερηχητική συσκευή USM 25.

6.4 Βαθμονόμηση

Για τη διαδικασία όπως βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκε πλάκα βαθμονόμησης V1 (reference block V1) η οποία είναι κατασκευασμένη από μαλακό χάλυβα σύμφωνα με την προδιαγραφή DIN 54120. Το σχήμα και τα γεωμετρικά στοιχεία φαίνονται αναλυτικά στην παρακάτω εικόνα. Αυτή η πλάκα βαθμονόμησης χρησιμοποιείται περισσότερο από κάθε άλλη στους υπέρηχους, για τη βαθμονόμηση συσκευών και ιδιαίτερα κεφαλών καθέτου και γωνιακής δέσμης. Είναι κατασκευασμένη από λεπτόκοκκο μαλακό χάλυβα, στον οποίο η ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων είναι $c_l = 5920$ m/s των δε εγκάρσιων $c_t = 3250$ m/s.

| Όνομασία DE/BS | Δοκίμια | Περιγραφή /Εφαρμογές | Προδιαγραφές /Πρότυπα | Διαστάσεις |
|-------------------|---|---|---|-------------------------|
| V1 A2 |  | Βαθμονόμηση κάθετων και γωνιακών κεφαλών. Εύρεση σημείου εξόδου δέσμης και γωνία διάθλασης για γωνιακές κεφαλές. Ρύθμιση ευαισθησίας. | ASTM E164 B.S. 2704 DIN 54120 IIW (International Institute of Welding) | Χάλυβας 25x100x300mm |



Εικόνα 24: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της V1A2 πλάκα βαθμονόμησης.

Ο προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων στο σκυρόδεμα

έγινε με τη χρήση της σχέσης $c_x = c \cdot \frac{d_x}{d_g}$. Το c_x εκφράζει την άγνωστη ταχύτητα

υπερηχητικών κυμάτων, το d_x αντιστοιχεί στο πάχος του δοκιμίου που εξετάζουμε, το d_g

είναι η ένδειξη της οθόνης, που αντιστοιχεί στην πρώτη ηχώ από την ανάκλαση στην

πίσω επιφάνεια του δοκιμίου και τέλος το c αναφέρεται στην ταχύτητα των υπερήχων

του υλικού βαθμονόμησης της συσκευής και των υπερηχητικών κεφαλών, που στη

συγκεκριμένη περίπτωση είναι η χαλύβδινη πλάκα βαθμονόμησης V1A2. Η

χρησιμοποιούμενη μέθοδος ήταν η άμεση μετάδοση όπου οι δύο υπερηχητικές κεφαλές

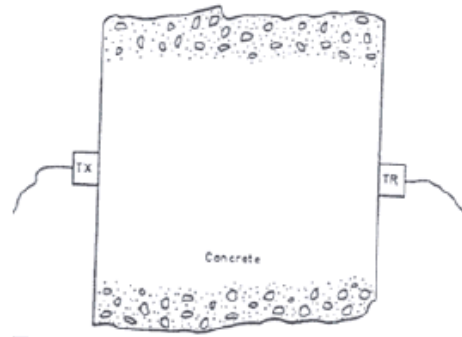
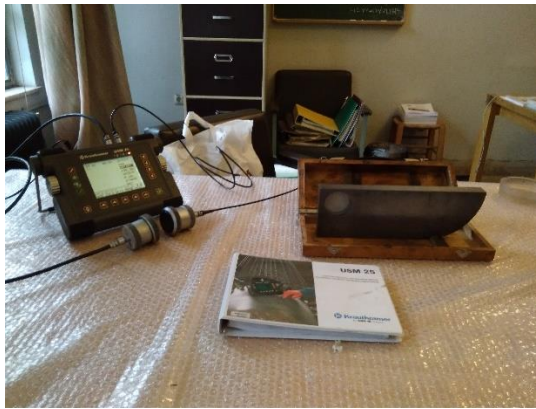
τοποθετήθηκαν σε δύο απέναντι πλευρές του δοκιμίου. Ο αισθητήρας K1S λειτουργούσε

ως πομπός υπερηχητικών κυμάτων ενώ ο αισθητήρας K1SM ως δέκτης κατόπιν

συγκεκριμένων ρυθμίσεων της υπερηχητικής συσκευής USM 25 συγκεκριμένα τέθηκε σε

εφαρμογή η λειτουργία του DUAL (Pulse receiver separation) η οποία αυτόματα

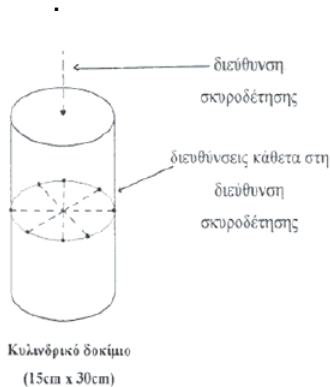
χρήση του ήταν απαραίτητη, γιατί διαφορετικά οι υπερηχητικοί παλμοί δεν θα μπορούσαν να εισέλθουν και να εξέλθουν από τη μάζα του σκυροδέματος.



Εικόνα 25: Πειραματική διάταξη για την βαθμονόμηση της υπερηχητικής συσκευής και απεικόνιση της θέσης των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων στις επιφάνειες των δοκιμών σκυροδέματος.

6.5 Σημεία Μετρήσεων

Η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων σε κάθε κυλινδρικό δοκίμιο σκυροδέματος προσδιορίστηκε σε 4 περιμετρικές θέσεις, σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις στο μέσο του ύψους του δοκιμίου, δηλαδή κάθετα στη διεύθυνση σκυροδέτησης όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Ακόμα προσδιορίστηκε και η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων παράλληλα στον άξονα σκυροδέτησης. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν εννέα κυλινδρικά δοκίμια.



Εικόνα 26: Σημεία μέτρησης της ταχύτητας διαμηκών κυμάτων στις επιφάνειες των δοκιμίων του σκυροδέματος.

Τέλος μελετήθηκε η ταχύτητα διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων στο εσωτερικό του σκυροδέματος σε διαφορετικά μέρη. Για τις ανάγκες αυτού του πειραματικού μέρους το δοκίμιο υπό αριθμό 6 κόπηκε σε τρία κομμάτια με τη χρήση μηχανικού τροχού και μετρήθηκε η ταχύτητα των διαμηκών υπερηχητικών κυμάτων στην διαμήκη διεύθυνση παράλληλα στον άξονα σκυροδέτησης.



Εικόνα 27: Κοπή σκυροδέματος με αριθμό 3 με τη χρήση μηχανικού τροχού.

6.6 Δοκιμή και προδιαγραφή θλίψης

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών θλίψεως των κυλινδρικών δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η μηχανή υδραυλικής πίεσης Instron τύπου UTM-HYD μοντέλο 300 DX 30 τόνων και AMSLER 100 τόνων, που διαθέτει το Ε.Α.Υ του Ε.Μ.Π. Σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM C469 – 02 για τον προσδιορισμό του αρχικού στατικού μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος τοποθετήθηκαν περιμετρικά στα κυλινδρικά δοκίμια 3 strain gages τόσο για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων όσο και για τον ακριβή προσδιορισμό του λόγου Poisson, και την αποφυγή των καμπτικών φαινομένων κατά τη μηχανική δοκιμή (bending effect) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 28:Τα strain gages της πειραματικής διάταξης.

Το στατικό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος προκύπτει από τον παρακάτω τύπο

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.000050} \quad \text{όπου}$$

E_c : chord modulus of elasticity (στατικό εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας)

S_2 : η πιμή της τάσης που αντιστοιχεί στο 40% του τελικού φορτίου κατά την δοκιμή

S_1 : η πιμή της τάσης που αντιστοιχεί στην διαμήκη παραμόρφωση όπου το φορτίο είναι κοντά στα 344.74 MPa/50,000 psi

ε_2 : διαμήκης παραμόρφωση που προέρχεται από την τάση S_2 [40].

Το αρχικό εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης τάσης παραμόρφωσης από την αρχή του διαγράμματος και είναι περίπου ίσο με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας το οποίο υπολογίζεται με την μέθοδο των υπερήχων. Υπολογίζεται ότι το αρχικό εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας είναι 20-40% μεγαλύτερο από το στατικό μέτρο ελαστικότητας [14]. Η πιμή του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος αυξάνει με την αύξηση της θλιπτικής του αντοχής χωρίς όμως να υπάρχει σαφής τρόπος που να εκφράζει αυτή τη σχέση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών καθώς και από την ογκομετρική αναλογία τους στο σκυρόδεμα. Επίσης ο ρυθμός αύξησης του μέτρου ελαστικότητας είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο ρυθμό αύξησης της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και σύμφωνα με

τον A.M Neville [17] έχει βρεθεί ότι δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες συντήρησης, εκτός από την περίπτωση που όταν αυτές έχουν επίδραση στην αντοχή του σκυροδέματος. Για ένα γραμμικά ελαστικό και ισότροπο υλικό ο λόγος του Poisson είναι σταθερός. Παρόλα αυτά στη περίπτωση του σκυροδέματος επηρεάζεται από συγκεκριμένες συνθήκες. Σύμφωνα με την προδιαγραφή C-469 ο τύπος προσδιορισμού του λόγου Poisson είναι η παρακάτω σχέση:

$$\nu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - 0.000050} \quad \text{όπου}$$

ν : λόγος Poisson

ε_{t2} : εγκάρσια παραμόρφωση στο μέσο του ύψους του δοκιμίου που προέρχεται από την τάση S_2 (40% του τελικού φορτίου)

ε_{t1} : εγκάρσια παραμόρφωση στο μέσο του ύψους του δοκιμίου που προέρχεται από την τάση S_1

ε_2 : διαμήκης παραμόρφωση που προέρχεται από την τάση S_2

Στο στάδιο όμως της γραμμικής σχέσης τάσεων-διαμηκών παραμορφώσεων η τιμή του λόγου Poisson είναι περίπου σταθερή. Ο λόγος του Poisson εξαρτάται από τις ιδιότητες των αδρανών και γενικά κυμαίνεται από 0.15 έως 0.25 [40].

6.7 Δοκιμή και προδιαγραφή αντιδιαμετρικής θλίψης

Σύμφωνα με την προδιαγραφή BS EN 13390-6:2000 τα δοκίμια με κωδικό αριθμό 6,7 και 3 δοκιμάστηκαν σε αντιδιαμετρική θλίψη (έμμεσο εφελκυσμό). Τα δοκίμια οδηγήθηκαν στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος του ΕΑΥ όπου χρησιμοποιήθηκε τροχός κοπής σκυροδέματος για την ομοιογένεια και την επαλληλία των αντιδιαμετρικών τους επιφανειών. Το δοκίμιο υπό αριθμό 6 κόπηκε σε τρία μέρη για τη μελέτη της επίδρασης του φαινομένου size effect στο σκυρόδεμα στη αντιδιαμετρική θλίψη (καθώς και για τη παρατήρηση του ίδιου φαινομένου στην ταχύτητα των υπερήχων). Μεταξύ του κυλινδρικού δοκιμίου και των πλακών φόρπισης της μηχανής τοποθετήθηκαν

αντιδιαμετρικά ελάσματα αλουμινίου πάχους 3 mm και μήκους όσο το αντίστοιχο ύψος των προς εξέταση δοκιμίων. Οι μηχανές θλίψης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρείας Instron τύπου UTM-HYD μοντέλο 300 DX με μέγιστο φορτίο (πίεση) 30 τόνους και της εταιρείας AMSLER 500 με μέγιστο φορτίο 100 τόνους. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τριών δοκιμίων μετά την κοπή τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

| Δοκίμια | Ύψος (mm) | Διάμετρος (mm) |
|---------|-----------|----------------|
| 6 | 184.8 | 152.4 |
| 3 | 269.7 | 153.5 |
| 7 | 269.7 | 152.6 |

Πίνακας 15: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για την αντιδιαμετρική θλίψη.

Με χρήση του τύπου που αναγράφεται στην προδιαγραφή υπολογίστηκε η αντοχή του σκυροδέματος σε αντιδιαμετρική θλίψη

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \text{ όπου}$$

f_{ct} : Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη , σε mega pascals ή newtons ανά square millimeter

F : Μέγιστο φορτίο, σε newtons

L : Μήκος δοκιμίου σκυροδέματος, σε millimeters

d : Η διάμετρος του δοκιμίου σκυροδέματος, σε millimeters [41].



Εικόνα 29: Τοποθέτηση των δοκιμών στις μηχανές φόρτισης τύπου Instron 30 τόνων και τύπου Amsler 100 τόνων για την εκτέλεση της Αντιδιαμετρικής θλίψης.

6.8 Δοκιμή και προδιαγραφή υδαταπορρόφησης

Σύμφωνα με το πρότυπο C642-13 τα επιλεγθέντα κυλινδρικά δοκίμια (1,8 και 9) σκυροδέματος διαστάσεων 15x30 cm τοποθετήθηκαν σε ειδικό φούρνο για 24 h στους 110 °C ώστε να αποβάλλουν την όποια υγρασία είχαν απορροφήσει ύστερα από 47 χρόνια. Έπειτα τοποθετήθηκαν σε ειδικό θάλαμο ξηρού αέρα ώστε να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασιακή τους κατάσταση στους 20-25 °C. Μετά από την παραπάνω διαδικασία μετρήθηκε το βάρος τους με ζυγαριά ακριβείας ± 10 gr όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 30: Διαδικασία ζύγισης των δοκιμών πριν και μετά την εμβάπτισή τους σε νερό.

Εν συνεχεία, έγινε η εμβάπτιση των δοκιμίων σε νερό σε ειδικά χωρία με σταθερή θερμοκρασία 12⁰C ανά 24 ώρες για ένα 36 ημέρες. Μετά το πέρας των προκαθορισμένων χρόνων εμβάπτισης γινόταν επανάληψη της μέτρησης του βάρους των δοκιμίων και με τη χρήση του παρακάτω τύπου προσδιορίστηκε το ποσοστό υδατοαπορρόφησης των δοκιμίων του σκυροδέματος.

Υδατοαπορρόφηση μετά την εμβάπτιση $\% = \left[\frac{B - A}{A} \right] \times 100$ όπου

B: Μάζα του δοκιμίου μετά την εμβάπτιση, (g)

A: Μάζα του δοκιμίου πριν την εμβάπτιση, (g)

Κεφάλαιο 7: Πειραματικά αποτελέσματα

7.1 Πειραματικά αποτελέσματα καταστροφικών ελέγχων

Αντιδιαμετρική θλίψη

| α/α | Μέγιστο φορτίο (kN) | Αντοχή σε θραύση- f_c (kpc/cm ²) |
|-----|---------------------|--|
| 3 | 152.4 | 23.9 |
| 6 | 107 | 24.67 |
| 7 | 169.3 | 26.7 |

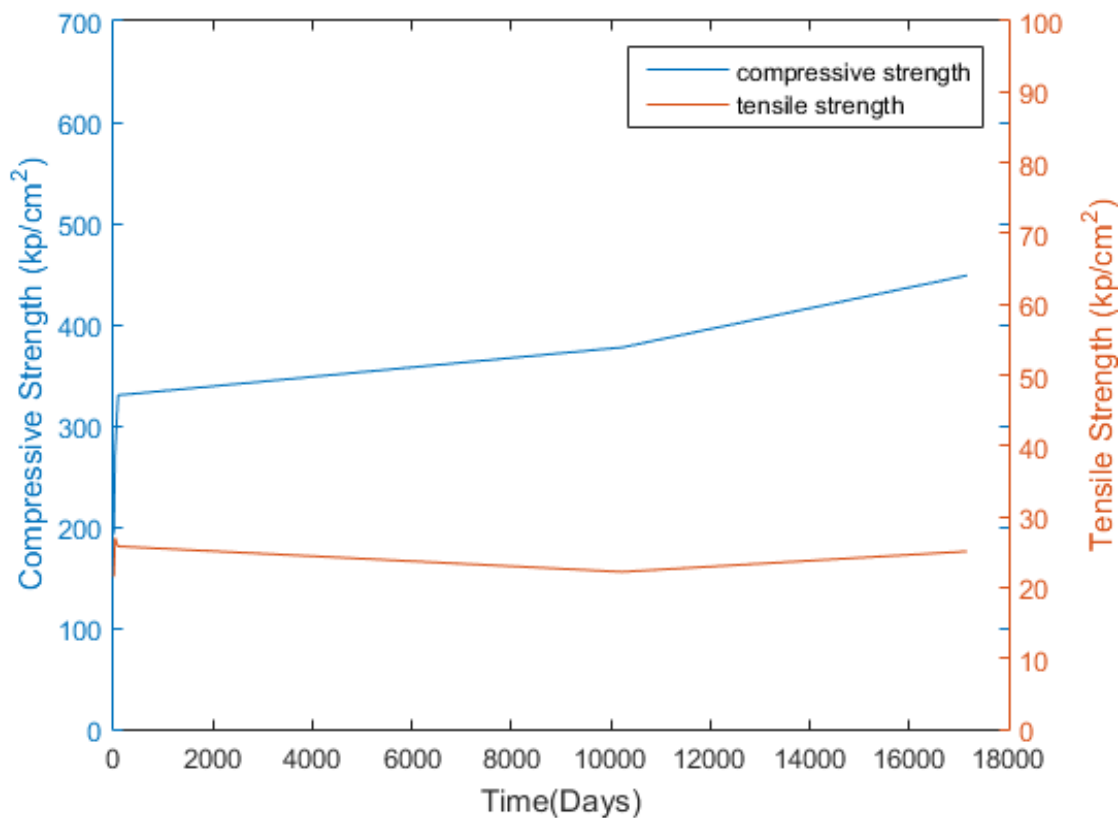
Θλίψη

| α/α | Λόγος Poisson ν | Ea (GPa) | Αντοχή σε θραύση- f_c (kpc/cm ²) |
|-----|---------------------|----------|--|
| 2 | 0.252 | 34.4 | 460.87 |
| 4 | 0.218 | 44.1 | 422.40 |
| 5 | 0.24 | 39.2 | 462.01 |

Τα αποτελέσματα (τάση θραύσεως) από την πραγματοποίηση των δοκιμών της θλίψης παρουσιάζονται στον πίνακα 1, μαζί με τα αντίστοιχα αποτελέσματα σε ηλικίες 7, 28, 90 ημερών και 28 ετών.

| Ηλικία Σκυροδέματος | Αντοχή σε Θλίψη (kpc/cm ²) | Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη kpc/cm ²) |
|---------------------|--|--|
| 7 | 192.5 | 21.5 |
| 28 | 271.2 | 27.0 |
| 90 | 330.0 | 25.8 |
| 10227 – (28 χρόνια) | 377.3 | 22.2 |
| 17162 – (45 χρόνια) | 448.4 | 25.09 |

Στο σχήμα 1 απεικονίζεται η εξέλιξη της αντοχής θραύσεως σ_f του σκυροδέματος συναρτήσει της ηλικίας του έως τα 45 έτη για τις δοκιμές της θλίψης και ανπδιαμετρικής θλίψης.



Σχήμα 1: Μεταβολή της τάσεως θραύσεως σ_f του σκυροδέματος συναρτήσει της ηλικίας του για τη δοκιμή της θλίψης και του έμμεσου εφελκυσμού (έως 45 χρόνια).

7.2 Πειραματικά αποτελέσματα μη καταστροφικού ελέγχου με υπερήχους

Η ταχύτητα διαδόσεως των υπερήχων στα κυλινδρικά δοκίμια υπολογίστηκε σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.3. Επίσης, λόγω της συμβατικής συνήρησης των δοκιμίων η μετρούμενη ταχύτητα δεν επηρεαζόταν από την υγρασία και κατά επέκταση δεν ήταν απαραίτητη η διόρθωση της μετρούμενης ταχύτητας. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 16. Από τις μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι παρατηρούνται συνολικά μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας από τις προηγούμενες μελέτες διότι στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς υψηλής συχνότητας 1 MHz. Επίσης η ταχύτητα διαδόσεως των υπερήχων είναι μεγαλύτερη, όταν το μήκος διαδρομής είναι παράλληλα στη διεύθυνση σκυροδέτησης. Αρκετοί ερευνητές θεωρούν ότι στην εγκάρσια διεύθυνση παρατηρούνται υψηλότερες ταχύτητες και το αποδίδουν στο μεγαλύτερο βαθμό ομοιογένειας που εμφανίζει το δοκίμιο κατά τη συγκεκριμένη διεύθυνση σε σχέση με τη διεύθυνση κάθετα στον άξονα σκυροδέτησης. Όμως, εξαιτίας της ανομοιογένειας στη σύνθεση του σκυροδέματος, τα αδρανή με μεγαλύτερη πυκνότητα τείνουν να εγκαθίστανται στη κάτω περιοχή του καλουπιού κατά τη σύνθεση του σκυροδέματος. Αυτό συμβαίνει διότι τα αδρανή έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από τη κονία που έχει ως αποτέλεσμα η κάτω περιοχή του σκυροδέματος να περιέχει περισσότερα αδρανή από τη μέση και στη πάνω περιοχή. Κατά αυτόν τον τρόπο γίνεται ανηλεπτό ότι το σκυρόδεμα είναι ένα πλήρως ανομοιογενές υλικό με και οι τιμές της ταχύτητας επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από την επιλογή της συχνότητας των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων. Οι δοκιμές που διεξήχθησαν και στις τρεις περιοχές του δοκιμίου 6 παρουσιάζονται στον πίνακα και έδειξαν ότι η ταχύτητα των υπερήχων ήταν μεγαλύτερη στη κάτω περιοχή του δείγματος.

| Περιοχές | Ταχύτητα υπερήχων (m/s) |
|----------|-------------------------|
| 1 | 4762 |
| 2 | 4463 |
| 3 | 3772 |

Πίνακας 16: Ταχύτητα υπερήχων στις διάφορες περιοχές του δοκιμίου σκυροδέματος.



| α/α | Ταχύτητα κάθετα στη διεύθυνση σκυροδέτησης (m/s) | Ταχύτητα κατά τη διεύθυνση σκυροδέτησης (m/s) | Συνολική μέση ταχύτητα (m/s) |
|-------------|--|---|------------------------------|
| 1 | 4460.5 | 4191.7 | 4326.1 |
| 2 | 4546.2 | 4764.6 | 4655.4 |
| 3 | 4486.4 | 4515.3 | 4500.8 |
| 4 | 4503 | 4907.2 | 4705.1 |
| 5 | 4385.7 | 4710.7 | 4548.2 |
| 6 | 4462 | 4464.4 | 4463.2 |
| 7 | 4352.7 | 4455.2 | 4404.0 |
| 8 | 4303.1 | 4696 | 4499.6 |
| 9 | 4458.8 | 4298.9 | 4378.8 |
| M.T. | 4439.8 | 4556.0 | 4498 |

Πίνακας 17: Μέσες ταχύτητες διαδόσεως διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων στα κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος.

| α/α | Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας κάθετα στη διεύθυνση σκυροδέτησης (GPa) | Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση σκυροδέτησης (GPa) | Συνολικό Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (GPa) |
|-------------|--|---|---|
| 1 | 35.13 | 31.46 | 42.04 |
| 2 | 38.46 | 42.24 | 40.35 |
| 3 | 37.74 | 38.23 | 37.98 |
| 4 | 39.31 | 46.68 | 42.99 |
| 5 | 35.23 | 40.64 | 37.93 |
| 6 | 35.32 | 35.36 | 36.89 |
| 7 | 34.94 | 36.61 | 38.27 |
| 8 | 31.70 | 37.75 | 37.14 |
| 9 | 36.94 | 34.33 | 40.72 |
| M.T. | 36.09 | 38.14 | 37.11 |

Πίνακας 18: Μέσες τιμές δυναμικών μέτρων ελαστικότητας στα κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος.

Ο λόγος του δυναμικού προς το αρχικό στατικό μέτρο ελαστικότητας είναι πάντοτε μεγαλύτερος της μονάδας και είναι τόσο μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του σκυροδέματος.

| α/α | Λόγος Poisson ν | Eα (GPa) | Ed (GPa) | Ed/Eα |
|------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| 2 | 0.252 | 34.4 | 42.24 | 1.22 |
| 4 | 0.218 | 44.1 | 46.68 | 1.05 |
| 5 | 0.24 | 39.2 | 40.64 | 1.03 |

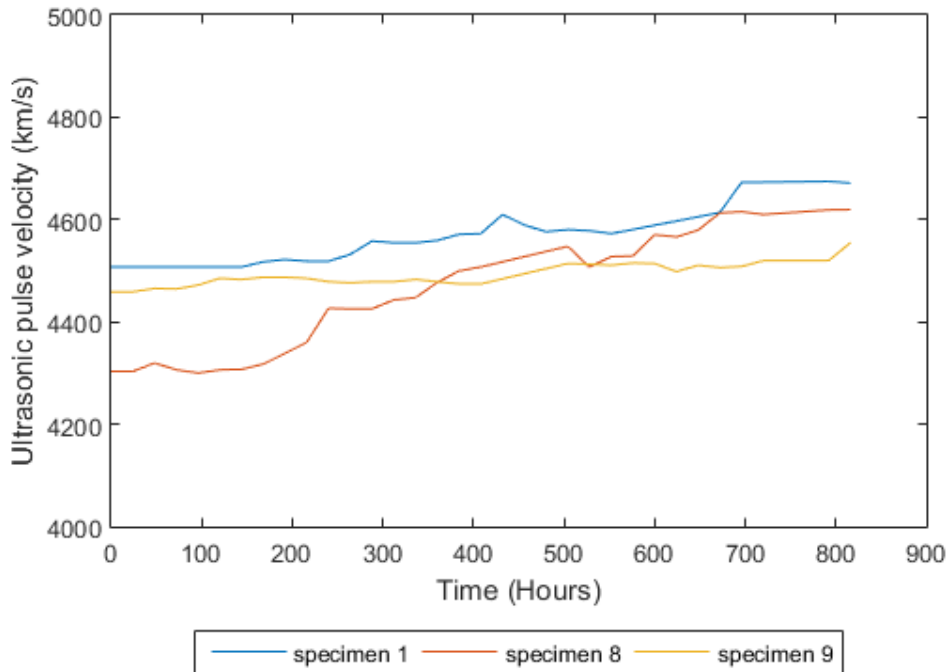
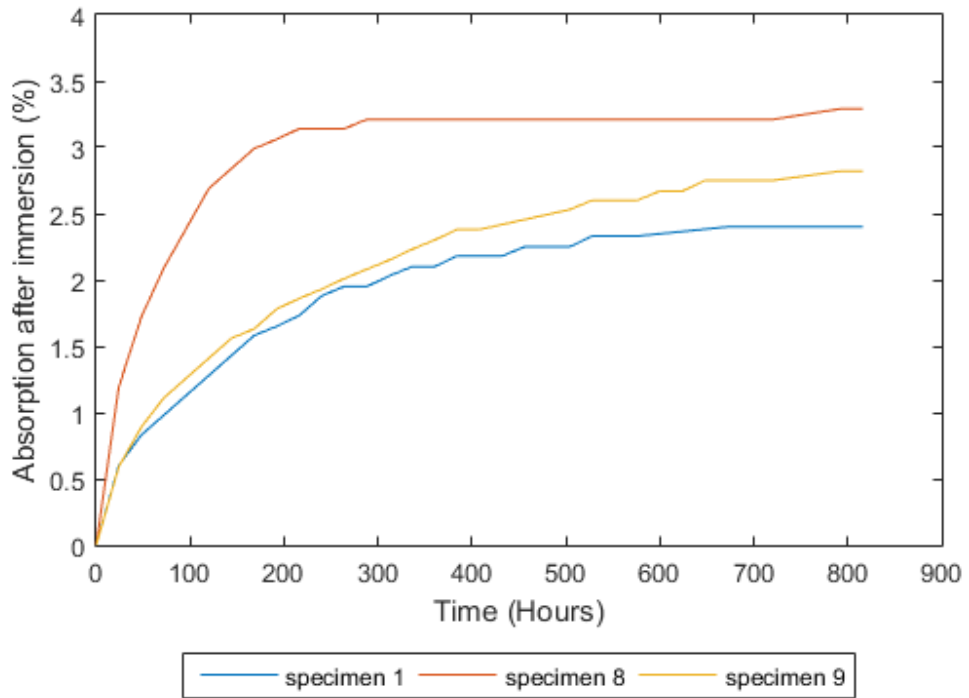
Πίνακας 19: Δυναμικά και στατικά μέτρα ελαστικότητας για κάθε κυλινδρικό δοκίμιο σκυροδέματος.

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

7.3 Πειραματικά αποτελέσματα υδαταπορρόφησης και συσχέτισης με την ταχύτητα των υπερήχων στο σκυρόδεμα

| Χρόνος (ώρες) | Βάρος (gr) | | | Απορρόφηση (%) | | | Εγκάρσια ταχύτητα υπερήχων (km/s) | | |
|---------------|------------|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------|
| | Δοκίμιο 1 | Δοκίμιο 8 | Δοκίμιο 9 | Δοκίμιο 1 | Δοκίμιο 8 | Δοκίμιο 9 | Δοκίμιο 1 | Δοκίμιο 8 | Δοκίμιο 9 |
| 0 | 13320 | 13390 | 13460 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4507.3 | 4303.1 | 4458.8 |
| 24 | 13400 | 13550 | 13540 | 0.60 | 1.19 | 0.59 | 4507.3 | 4303.1 | 4458.8 |
| 48 | 13430 | 13620 | 13580 | 0.83 | 1.72 | 0.89 | 4507.3 | 4319.6 | 4465.4 |
| 72 | 13450 | 13670 | 13610 | 2.98 | 2.09 | 1.11 | 4507.3 | 4306.2 | 4464.2 |
| 96 | 13470 | 13710 | 13630 | 1.13 | 2.39 | 1.26 | 4507.3 | 4300 | 4471.9 |
| 120 | 13490 | 13750 | 13650 | 1.28 | 2.69 | 1.41 | 4507.3 | 4306.2 | 4485.1 |
| 144 | 13510 | 13770 | 13670 | 1.43 | 2.84 | 1.56 | 4507.3 | 4307.2 | 4482.9 |
| 168 | 13530 | 13790 | 13680 | 1.58 | 2.99 | 1.63 | 4517.3 | 4317.5 | 4487.3 |
| 192 | 13540 | 13800 | 13700 | 1.65 | 3.06 | 1.78 | 4521.9 | 4338.3 | 4487.3 |
| 216 | 13550 | 13810 | 13710 | 1.73 | 3.14 | 1.86 | 4518.6 | 4360.3 | 4485.1 |
| 240 | 13570 | 13810 | 13720 | 1.88 | 3.14 | 1.93 | 4518.5 | 4426.5 | 4478.5 |
| 264 | 13580 | 13810 | 13730 | 1.95 | 3.14 | 2.01 | 4531.9 | 4425.5 | 4476.3 |
| 288 | 13580 | 13820 | 13740 | 1.95 | 3.21 | 2.06 | 4557.9 | 4425.5 | 4478.5 |
| 312 | 13590 | 13820 | 13750 | 2.03 | 3.21 | 2.15 | 4554.5 | 4442.9 | 4478.5 |
| 336 | 13600 | 13820 | 13760 | 2.10 | 3.21 | 2.23 | 4554.5 | 4447.3 | 4482.9 |
| 360 | 13600 | 13820 | 13770 | 2.10 | 3.21 | 2.30 | 4559.1 | 4477 | 4478.5 |
| 384 | 13610 | 13820 | 13780 | 2.18 | 3.21 | 2.36 | 4571.1 | 4499.3 | 4474.1 |
| 408 | 13610 | 13820 | 13780 | 2.18 | 3.21 | 2.38 | 4572.4 | 4507.2 | 4474.1 |
| 432 | 13610 | 13820 | 13790 | 2.18 | 3.21 | 2.45 | 4609.7 | 4547.5 | 4513.9 |
| 456 | 13620 | 13820 | 13790 | 2.25 | 3.21 | 2.45 | 4589.6 | 4507.2 | 4512.8 |
| 480 | 13620 | 13820 | 13790 | 2.25 | 3.21 | 2.45 | 4576.1 | 4527.5 | 4510.6 |
| 504 | 13620 | 13820 | 13800 | 2.25 | 3.21 | 2.53 | 4580.4 | 4528.8 | 4515 |
| 528 | 13630 | 13820 | 13810 | 2.33 | 3.21 | 2.60 | 4578.1 | 4570.2 | 4513.9 |
| 552 | 13630 | 13820 | 13810 | 2.33 | 3.21 | 2.60 | 4572.6 | 4566 | 4498.3 |
| 576 | 13630 | 13820 | 13810 | 2.33 | 3.21 | 2.60 | 4580.5 | 4579.4 | 4510.6 |
| 672 | 13640 | 13820 | 13830 | 2.40 | 3.21 | 2.75 | 4613.7 | 4612.9 | 4506.1 |
| 696 | 13640 | 13820 | 13830 | 2.40 | 3.21 | 2.75 | 4672.7 | 4615.3 | 4508.3 |
| 720 | 13640 | 13820 | 13830 | 2.40 | 3.21 | 2.75 | 4673 | 4609.8 | 4519.5 |
| 792 | 13650 | 13830 | 13840 | 2.40 | 3.29 | 2.82 | 4674.5 | 4618.7 | 4519.5 |
| 816 | 13650 | 13830 | 13840 | 2.40 | 3.29 | 2.82 | 4671.5 | 4619.3 | 4554.5 |

Πίνακας 20: Η μεταβολή της ταχύτητας των υπερήχων των εμβαπτιζόμενων δοκιμών και το ποσοστό απορρόφησης νερού στο χρονικό διάστημα των 34 ημερών.



Σχήμα 2: Το ποσοστό απορρόφησης του νερού κατά το χρονικό διάστημα των 34 ημερών στα δοκίμια σκυροδέματος 1,2 και 3 καθώς και η αντίστοιχες διακυμάνσεις της ταχύτητας των υπερήχων σε αυτά.

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία είναι τα ακόλουθα:

A) Η θλιπτική αντοχή των κυλινδρικών δοκιμίων μετά από 45 χρόνια προκύπτει κατά 18.8% μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε μετά από 28 χρόνια.

B) Η εφελκυστική αντοχή, η οποία προσδιορίστηκε από τη δοκιμή ανπδιαμετρικής θλίψεως σε κυλινδρικά δοκίμια μετά από 45 χρόνια προκύπτει 13% μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε στα 28 χρόνια.

Επομένως διαπιστώθηκε ότι η αντοχή του σκυροδέματος συνεχίζεται να εξελίσσεται σε όλη τη χρονική περίοδο έως τα 45 χρόνια. Αυτό σημαίνει ότι ένα μέρος των ανπδράσεων, που συντελούνται μεταξύ των υλικών παρασκευής του, συνεχίζει να πραγματοποιείται ακόμα και μετά από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα από την παρασκευή του υλικού.

Γ) Ο λόγος του Poisson (στατικός) που μετρήθηκε με τη χρήση strain gauges περιμετρικά των δοκιμίων μέσω της δοκιμής της θλίψης και βρέθηκε ίσος με 0.24. Η τιμή αυτή είναι εντός των ορίων και περίπου ίση με την αντίστοιχη τιμή των προηγούμενων μελετών (0.25).

Δ) Το αρχικό εφαιπτόμενο μέτρο ελαστικότητας μετρήθηκε ίσο με 39.23 (GPa) δηλαδή παρέμεινε περίπου ίδιο για την συγκεκριμένη ποιότητα σκυροδέματος με αυτό που είχε υπολογιστεί πριν από 45 χρόνια (40 GPa).

Ε) Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας προκύπτει ίσο με 42.65 GPa.

Βιβλιογραφία

- [1] V. M. Malhotra and N. J. Carino, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. .
- [2] Τρέζος Κων/νος Γ., *Εκτίμηση της επι τόπου αντοχής του σκυροδέματος*. .
- [3] Dr. Joseph Woo, "<https://www.bmus.org/about-ultrasound/history-of-ultrasound/>." .
- [4] J. William D. O'Brien, "Assessing the Risks for Modern Diagnostic Ultrasound Imaging," pp. 1–32.
- [5] Ιωάννης Ν. Πρασιανάκης, *Μη καταστροφικοί έλεγχοι. Η μέθοδος των Υπερήχων*. 2007.
- [6] Δ. Ευταξιόπουλος, "Διάδοση Κυμάτων στα Υλικά," 2012.
- [7] B. A. AULD, *Acoustic fields and waves in solids*. .
- [8] K. . . Graff, *Wave motion in Elastic Solids*. .
- [9] "<https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/elasticssolids.htm>." .
- [10] Y.C. Fung, *Foundations of Solid Mechanics*. .
- [11] Χασιώτης Θεόδωρος, "Μη καταστροφικός έλεγχος πολύστρωτων σύνθετων υλικών ναυπηγικών εφαρμογών με τη χρήση αυτοματοποιημένης διάταξης υπερήχων εμβαπτιζόμενου ελέγχου," 2012.
- [12] S. O. Kasap, "Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices," *Prentice Hall, 1st edition*. p. 340, 2001.
- [13] Κ. Φλέντζερης, "Μηχανικές Ιδιότητες και Έλεγχος Εξαρτημάτων με Μη Καταστροφικές και Καταστροφικές Μεθόδους." .
- [14] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 2006.
- [15] Α. Χ. Τριανταφύλλου, "Δομικά Υλικά." .
- [16] and W. C. P. Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, *Design and Control of Concrete Mixtures*. .
- [17] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, vol. Fourth. 1996.
- [18] V. M. Malhotra, "Testing Hardened Concrete, Nondestructive Methods."

- [19] J. A. Bogas, M. G. Gomes, and A. Gomes, “Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method,” *Ultrasonics*, vol. 53, no. 5, pp. 962–972, 2013.
- [20] P. Anugonda, J. S. Wiehn, and J. A. Turner, “Diffusion of ultrasound in concrete,” *Ultrasonics*, vol. 39, no. 6, pp. 429–435, 2001.
- [21] I. Lillamand, J. F. Chaix, M. A. Ploix, and V. Garnier, “Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading,” *NDTE Int.*, vol. 43, no. 8, pp. 655–660, 2010.
- [22] ASTM, *ASTM C 597 - 02: Pulse Velocity Through Concrete*. 1989, pp. 4–7.
- [23] S. G. M. G. G. John H. Bungey, *Testing of Concrete in Structures, 4th Edition*. .
- [24] S. Popovics, J. L. Rose, and J. S. Popovics, “The behaviour of ultrasonic pulses in concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 20, no. 2, pp. 259–270, 1990.
- [25] T. U. Mohammed and M. N. Rahman, “Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 832–841, 2016.
- [26] R. Solís-Carcaño and E. I. Moreno, “Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 1225–1231, 2008.
- [27] R. Jones, “The ultrasonic testing of concrete,” *Ultrasonics*, vol. 1, no. 2, pp. 78–82, 1963.
- [28] R. Wheen, “Non-destructive testing of concrete,” *Build. Sci.*, vol. 9, no. 3, pp. 157–166, 1974.
- [29] British Standards BS 1881 Part 203, “Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete,” *BSI, London*, no. 1, 1986.
- [30] S. Hannachi and M. N. Guetteche, “Review of the Rebound Hammer Method Estimating Concrete Compressive Strength on Site,” in *International Conference on Architecture and Civil Engineering*, 2014, pp. 118–127.
- [31] “BS 1881-203:1986.” .
- [32] D. Kocab, B. Kucharczykova, P. Misak, P. Zitt, and M. Kralikova, “Development of the Elastic Modulus of Concrete under Different Curing Conditions,” in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 195, pp. 96–101.

- [33] V. G. Haach, L. M. Juliani, and M. R. Da Roz, "Ultrasonic evaluation of mechanical properties of concretes produced with high early strength cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 96, pp. 1–10, 2015.
- [34] I. N. P. P. Giokas, "Determination of Mechanical Properties of 28-day and 28-year-old Concrete Using Destructive Testing and Ultrasound," 2002.
- [35] I. N. Prassianakis and N. I. Prassianakis, "Ultrasonic testing of non-metallic materials: Concrete and marble," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 42, no. 2, pp. 191–198, 2004.
- [36] ASTM International, "ASTM C642-13 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete," 2013.
- [37] B. C. U. Mohammadi, "Development of Concrete Water Absorption Testing for Quality Control."
- [38] A. Sicakova, M. Draganovska, and M. Kovac, "Water Absorption Coefficient as a Performance Characteristic of Building Mixes Containing Fine Particles of Selected Recycled Materials," in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 180, pp. 1256–1265.
- [39] W. Wang, C. Lu, G. Yuan, and Y. Zhang, "Effects of pore water saturation on the mechanical properties of fly ash concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 130, pp. 54–63, 2017.
- [40] ASTM, "ASTM C469/C469M-14 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression," *ASTM Int.*, pp. 1–5, 2014.
- [41] "BS EN 12390-6:2000 Testing hardened concrete Part 6: Tensile splitting strength of test specimens." .