

ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
“Αντισεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατασκευών και Αειφόρος
Ανάπτυξη”

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ – ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΕ
ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ ΥΠΟ ΑΝΑΠΑΛΑΙΩΣΗ (ΜΟΥΣΕΙΟ
ΜΙΚΡΑΣΙΑΤΙΚΟΥ ΕΛΛΗΝΙΣΜΟΥ) ΜΕ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥΣ
ΕΛΕΓΧΟΥΣ»**

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Νικόλαου Πρ. Ενωτιάδη

Επιβλέπων

Δρ. Κωνσταντίνος Καλκάνης, Phd

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**«Διερεύνηση – επαλήθευση δομικής ακεραιότητας
σε δομικά στοιχεία κτιρίου υπό αναπαλαίωση
(Μουσείο Μικρασιατικού Ελληνισμού)
με μη καταστροφικούς ελέγχους»**

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:

Νικόλαος Πρ. Ενωτιάδης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Δρ. Κωνσταντίνος Καλκάνης, PhD

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:

2017 – 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και η επαλήθευση της δομικής ακεραιότητας φερόντων στοιχείων παλαιού κτιρίου, το οποίο βρίσκεται σε στάδιο αναπαλαίωσης και ενίσχυσης με σκοπό την αξιοποίηση του ως Μουσείου Μικρασιατικού Ελληνισμού με τη χρήση Μη Καταστροφικών Ελέγχων (ΜΚΕ) με περισσότερη έμφαση στην Μέθοδο των Υπερήχων.

Η μέθοδος των Υπερήχων χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο της ομοιομορφίας ενός στοιχείου, τον εντοπισμό ραγμών – επιφανειακών ή εσωτερικών, την ύπαρξη κοιλοτήτων εντός του υλικού, την εκτίμηση του πάχους του στρώματος του υλικού που δύναται να έχει υποστεί φθορά, την αποτίμηση του μέτρου ελαστικότητας αλλά και την εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος. Η μέθοδος βασίζεται στη μετάδοση τασικών (υπερηχητικών) κυμάτων δια μέσου της μάζας του στοιχείου που τίθεται υπό εξέταση. Η ταχύτητα διάδοσης των τασικών κυμάτων σε ένα στερεό συναρτάται του μέτρου ελαστικότητας, του λόγου Poisson, της πυκνότητας και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του στοιχείου. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τα χαρακτηριστικά του υπό εξέταση στοιχείου και του υλικού που το αποτελεί παρακολουθώντας τη διάδοση των τασικών κυμάτων δια μέσου του στερεού.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην υπολογιστική και πειραματική διερεύνηση της αποτελεσματικότητας και της αξιοπιστίας της Μεθόδου των Υπερήχων ως ΜΚΕ σε φέροντα στοιχεία από σκυρόδεμα. Αφού πραγματοποιηθεί αναλυτική περιγραφή του μοντέλου με το οποίο προσεγγίζονται οι Υπερήχοι και τα τασικά κύματα, διερευνάται η σημασία και η σπουδαιότητα ενός μεγάλου πλήθους παραμέτρων που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου των υπερήχων με απώτερο στόχο την βελτιστοποίηση της. Στην συνέχεια, ακολουθεί πειραματική επαλήθευση των αριθμητικών αποτελεσμάτων στην οποία επιβεβαιώνεται η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ΜΚΕ.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η μέθοδος των υπερήχων αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο για τους ΜΚΕ φερόντων υλικών κατασκευών, όπως το σκυρόδεμα, με μεγάλο εύρος εφαρμογών.

DIPLOMA THESIS:

**"Investigation – verification of structural integrity
in building elements under restoration
(Museum of Asia Minor Hellenism)
with non – destructive tests"**

STUDENT:

Nikolaos P. Enotiadis

SUPERVISOR:

Dr. Konstantinos Kalkanis, PhD

ACADEMIC YEAR:

2017 – 2018

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to investigate and verify the structural integrity of the elements of an old building that is being restored and reinforced in order to be used as Museum of Asia Minor Hellenism using Non Destructive Tests (NDT) with more emphasis on Ultrasound Method.

The Ultrasound method is widely used to control the uniformity of an element, to detect cracks - surface or internal, to localize cavities within the material, to estimate the thickness of the layer of material that may have been damaged, to measure the modulus of elasticity, but also the estimation of the strength of the concrete. The method is based on the transmission of tangential (ultrasonic) waves through the mass of the element under consideration. The velocity of propagation of the tangent waves in a solid depends on the modulus of elasticity, the Poisson's ratio, the density and the geometric characteristics of the element. This method allows conclusions to be drawn about the characteristics of the test element and the material constituting it by monitoring the propagation of the spread waves through the solid.

This diploma thesis focuses on the computational and experimental investigation of the efficiency and reliability of the Ultrasound Method as an NDT in concrete bearing elements. After a detailed description of the model approaching the Ultrasound and Task Waves is investigated, the significance and importance of a large number of parameters influencing the efficiency of the ultrasound method is investigated with a view to optimizing it. Subsequently, an experimental verification of the numerical results confirming the reliability and effectiveness of the NDT method is followed.

The overall conclusion is that the Ultrasound method is a reliable method for NDT bearing structural materials, such as concrete, with a wide range of applications.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	6
Κεφάλαιο 1 ^ο	7
1.1. Περιγραφή.....	7
1.2. Εισαγωγή.....	7
1.2.1. Εισαγωγή στην παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας.....	7
1.2.2. Εισαγωγή στους μη καταστροφικούς ελέγχους	8
1.3. Σκοποί	9
1.4. Στόχοι	9
1.5. Στρατηγική Έρευνας Σχεδιασμού	9
1.5.1. Εργασία Πρώτη: Βιβλιογραφική Έρευνα.....	9
1.5.2. Εργασία Δεύτερη: Σχεδιασμός Ελέγχων – Μετρήσεων	10
1.5.3. Εργασία Τρίτη: Ανάλυση της μορφολογίας της δομής	10
1.5.4. Εργασία Τέταρτη: Διενέργεια Δοκιμών – Μετρήσεων	10
1.5.5. Εργασία Πέμπτη: Ανάλυση και Σύγκριση των αποτελεσμάτων	10
1.5.6. Εργασία Έκτη: Συγγραφή της διατριβής	10
1.6. Περίγραμμα Διατριβής.....	10
Κεφάλαιο 2 ^ο : Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας.....	12
2.1. Παρουσίαση - Διάκριση μεθόδων μη καταστροφικών ελέγχων	12
2.1.1. Οπτικός Έλεγχος.....	12
2.1.2. Διεισδυτικά Υγρά.....	12
2.1.3. Μαγνητικά σωματίδια.....	13
2.1.4. Ραδιογραφία – ακτινογραφικός έλεγχος.....	13
2.1.5. Δινορρεύματα	15
2.1.6. Θερμικές μέθοδοι.....	16
2.1.7. Ακουστική εκπομπή.....	18
2.1.8. Μέθοδος Υπερήχων	19
2.2. Βασικές Αρχές Λειτουργίας Υπερήχων	21
2.2.1. Φυσική των υπερήχων.....	21
2.2.2. Γενικά χαρακτηριστικά των υπερηχητικών κυμάτων	22
2.2.3. Αναλογία με τα κύματα στο νερό.....	23
2.2.4. Διάδοση κύματος	24
2.2.5. Διαμήκη κύματα	25
2.2.6. Εγκάρσια κύματα.....	25
2.2.7. Επιφανειακά κύματα	25
2.2.8. Κύματα Lamb	26
2.3. Εφαρμογές.....	26

2.3.1.	Εφαρμογές στο Σκυρόδεμα	26
2.3.2.	Βασικές Αρχές	27
2.3.3.	Χρήση Λιπαντικών Ουσιών	28
Κεφάλαιο 3^ο: Φύση των Υλικών – Σκυρόδεμα		29
3.1.	Εισαγωγή.....	29
3.1.1.	Δομή του Σκυροδέματος.....	30
3.2.	Εφαρμογή ΜΚΕ – Προσδιορισμός Χαρακτηριστικών του Σκυροδέματος.....	31
3.2.1.	Οπτική Επιθεώρηση στο Σκυρόδεμα.....	31
3.2.2.	Ηχητικός έλεγχος στο Σκυρόδεμα	31
3.2.3.	Έλεγχος κρούσης	32
3.2.3.1	Κρουσίμετρο στο Σκυρόδεμα.....	32
3.2.4.	Εξόλκευση ήλου	33
3.2.5.	Φασματική ανάλυση επιφανειακών κυμάτων	33
3.2.6.	Χρήση Radar	34
3.2.7.	Ραδιογραφία	34
3.2.8.	Χρήση Υπερήχων.....	34
3.3.	Πειραματική διάταξη	37
3.3.1.	Διατάξεις Πομπού – Δέκτη.....	38
3.3.2.	Μέθοδος Παλμούς – ηχούς (pulse – echo)	39
3.3.3.	Μέθοδος απ’ ευθείας μετάδοσης (through – transmission)	39
3.4.	Συνάφεια Οπλισμού – Σκυροδέματος	40
3.4.1.	Γενικά	40
3.4.2.	Παράγοντες που επηρεάζουν τη συνάφεια	40
3.5.	Επίδραση των ράβδων οπλισμού.....	40
3.5.1.	Γενικά	40
3.5.2.	Άξονας ενίσχυσης της ράβδου παράλληλος προς την κατεύθυνση της διάδοσης.....	41
3.5.3.	Άξονας ενίσχυσης της ράβδου κάθετα προς την κατεύθυνση της διάδοσης.....	44
3.6.	Μέθοδοι Προσδιορισμού Χαρακτηριστικών Χάλυβα Οπλισμού	45
3.6.1.	Μαγνητικός ανιχνευτής.....	45
Κεφάλαιο 4^ο: Σχεδιασμός – Διενέργεια Ελέγχων		46
4.1.	Κτίριο υπό εξέταση.....	46
4.2.	Ιστορικά στοιχεία κτιρίου.....	46
4.3.	Κατασκευαστικά στοιχεία.....	48
4.4.	Αναλυτική Περιγραφή Συστήματος Φέροντος οργανισμού	49
4.4.1.	Υπόγειο	49
4.4.2.	Ισόγειο	50
4.4.3.	Όροφος	51

4.5.	Πειραματική διάταξη	52
4.5.1.	Γενικά	52
4.5.2.	Πλεονεκτήματα	53
4.5.3.	Περιορισμοί.....	53
4.5.4.	Κύριες Εφαρμογές	53
4.5.5	Ελάχιστο μήκος δείγματος	55
4.5.6	Συσκευές – Μέσα	55
4.5.7	Βαθμονόμηση – Προετοιμασία	56
4.6.	Συσχέτιση της ταχύτητας παλμού και της αντοχής.....	58
4.6.1	Συσχέτιση με χυτά δείγματα	59
4.6.2	Συσχέτιση με δοκιμές σε πυρήνες.....	60
4.6.3	Συσχέτιση με την αντοχή των μονάδων προκατασκευής.....	60
4.6.4	Συνδυασμός ταχύτητας παλμού με άλλες μετρήσεις	61
4.7.	Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας και δυναμικής αναλογίας Poisson	61
Κεφάλαιο 5 ^ο : Παρουσίαση Αποτελεσμάτων – Ανάλυση – Σύγκριση		64
5.1.	Περιγραφή Κεφαλαίου.....	64
Κεφάλαιο 6 ^ο : Συμπεράσματα και αναφορές για μελλοντική έρευνα		68
6.1.	Συμπεράσματα	68
6.2.	Προσδιορισμός αντοχής με υπέρηχους.....	68
6.3.	Αναφορές για μελλοντική έρευνα	69
Βιβλιογραφία		70
Παράρτημα		76
	Φωτογραφικό υλικό	76
	Manual συσκευής	78

Ευχαριστίες

Είναι υποχρέωση μου να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που κατέστησαν την διατριβή αυτή δυνατή. Αυτό το έργο δεν θα ήταν εφικτό χωρίς την υποστήριξη του Δρ Κωνσταντίνου Καλκάνη υπό την καθοδήγηση του οποίου επέλεξα αυτό το θέμα. Θα ήθελα να του απευθύνω την αμέριστη ευγνωμοσύνη μου, αφού οι συμβουλές του και η κατεύθυνση που μου παρείχε ήταν άκρως χρήσιμες και με βοήθησε με πολλούς τρόπους. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την απεριόριστη υπομονή του και την βοήθεια με το ερευνητικό υλικό.

Θα ήθελα, ακόμα, να ευχαριστήσω τον Δρ. Κωνσταντίνο Δημάκο, καθώς και όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. για την υποστήριξη και την παραχώρηση της συσκευής υπερήχων για τις ανάγκες των μετρήσεων της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ όλο το προσωπικό του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. για όλη τη βοήθεια και την υποστήριξη που παρείχαν.

Είμαι πολύ ευγνώμων στους γονείς μου Πρόδρομο και Βασιλική για τη συνεχή και πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξή τους σε μένα.

Δεν μπορώ να παραλείψω τις ευχαριστίες στην αδελφή μου Ελένη για την φιλολογική επιμέλεια της παρούσας διατριβής καθώς και τις αδελφές μου Ιωάννα και Στυλιανή για όλη τους την στήριξη.

Κεφάλαιο 1^ο

1.1. Περιγραφή

Στο κεφάλαιο αυτό της παρούσας εργασίας γίνεται αναφορά στη γενική κατανόηση της διαδικασίας διερεύνησης και παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας και παρουσιάζονται οι μέθοδοι εκτίμησης της αντοχής των κατασκευών από σκυρόδεμα μέσω των μη καταστροφικών ελέγχων. Επιπροσθέτως, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εισαγωγή στις μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου και παράλληλα παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των επιμέρους μεθοδολογιών, συμπεριλαμβανομένης και της μεθόδου των υπερήχων. Τέλος, περιλαμβάνονται οι στόχοι, οι σκοποί και ο σχεδιασμός της έρευνας.

1.2. Εισαγωγή

1.2.1. Εισαγωγή στην παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας

Από αρχαιοτάτων χρόνων η επιστήμη του μηχανικού αναδεικνύεται μέσα από την έννοια της πρόβλεψης. Οι μελετητές θέλοντας να λάβουν υπόψη τους όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την καλή λειτουργία και την διάρκεια ζωής των κατασκευών, επιχείρησαν να μελετήσουν τις δομές και το περιβάλλον, με σκοπό να λάβουν την απαραίτητη γνώση για την συμπεριφορά που μπορεί να έχει μια κατασκευή κατά τη λειτουργία της πριν αυτή σχεδιαστεί.

Οι κατασκευές ανά τα χρόνια δεν έπρεπε μόνο να είναι καλαίσθητες και δημιουργικές ως προς την κάλυψη των λειτουργικών απαιτήσεων του ανθρώπινου παράγοντα, αλλά κατά κύριο λόγο, έπρεπε να είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο, ώστε να πληρούν τα κριτήρια αντοχής και λειτουργίας τους, συνυπολογιζόμενων και των εξωτερικών και περιβαλλοντικών συνθηκών, καθώς και των ποικίλων τυχηματικών παραγόντων, όπως είναι ο σεισμός, η φωτιά κλπ.. Η απαίτηση για γνώση των παραγόντων αυτών που θα μπορούσαν να επηρεάσουν στο έπακρο την ακεραιότητα μιας κατασκευής, οι χιλιάδες αστοχίες που έχουν συμβεί μέχρι και σήμερα, καθώς και η ανάγκη της παράτασης του χρόνου ζωής πολλών κτιρίων, οδήγησε στην έρευνα της δομικής κατάστασης των κατασκευών, όχι πλέον σε βάση πρόβλεψης και θεωρητικής υπόστασης, αλλά στην πράξη, σύμφωνα με μετρήσιμα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

Σε αυτό το πλαίσιο εισάγονται οι μη καταστροφικοί έλεγχοι (ΜΚΕ) των κατασκευών, διότι το εγχείρημα της πρόληψης δεν μπορούσε να είναι πάντα αποτελεσματικό, ενώ αύξανε κατακόρυφα και το κόστος της κατασκευής.

1.2.2. Εισαγωγή στους μη καταστροφικούς ελέγχους

Ως μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ) ορίζεται η εξέταση του υλικού ενός στοιχείου ή αντικειμένου, με γνώμονα τον εντοπισμό αστοχιών και τον έλεγχο της ποιότητας του υλικού με τρόπο που δεν έχει επιπτώσεις στην εντατική κατάσταση του και με τεχνολογίες οι οποίες δεν επηρεάζουν τη μελλοντική χρησιμότητά του (1). Κατά κύριο λόγο, στόχος του ΜΚΕ είναι ο εντοπισμός τυχόν ατελειών στη δομή των επιμέρους υλικών μιας κατασκευής, οι οποίες δύνανται να οδηγήσουν την κατασκευή σε αστοχία και κατά συνέπεια σε περαιτέρω βλάβη. Τέτοιες ατέλειες είναι οι ρωγμές, η ύπαρξη πόρων και φυσαλίδων στο εσωτερικό του υλικού, η διάβρωση και η αποκόλληση των επιμέρους στρώσεων σε σύνθετα υλικά. Επιπλέον, οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται ευρέως για την διερεύνηση της δομής και της σύνθεσης των υλικών, καθώς και για τον προσδιορισμό πολλών εκ των μηχανικών ιδιοτήτων τους, όπως η ελαστικότητα, η σκληρότητα, η αντοχή και η αγωγιμότητα (1). Χρησιμοποιούνται, επίσης, για τον υπολογισμό και την μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των διατομών, των στοιχείων και των υλικών, ενώ, πληθαίνουν και οι εφαρμογές στον κλάδο της ιατρικής. Ο όρος ΜΚΕ περιλαμβάνει ένα εκτενές πλήθος μεθόδων διάγνωσης της παθολογίας των δομών, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα και συνεχίζουν να αναπτύσσονται με τη βοήθεια της σύγχρονης τεχνολογίας και τεχνολογίας για την εξυπηρέτηση των σκοπών του ανθρώπινου παράγοντα, ο οποίος όλο και πιο επίμονα επιθυμεί τη διερεύνηση υφιστάμενων αλλά και νέων κατασκευών στον τομέα του ελέγχου της δομικής ακεραιότητας και της βελτιστοποίησης της ζωής των κτιρίων. Οι περισσότερο διαδεδομένες μέθοδοι ΜΚΕ είναι ο οπτικός έλεγχος, τα διεισδυτικά υγρά, τα μαγνητικά σωματίδια, τα δινορρέυματα, η ραδιογραφία, οι υπέρηχοι, η θερμογραφία, η ακουστική εκπομπή και οι έλεγχοι διαρροής (1–3).

Εκτός όμως από την διερεύνηση των δομών των κατασκευών οι μη καταστροφικοί έλεγχοι έχουν μεγάλη απήχηση και εφαρμογή σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας και εφαρμόζονται σε όλες τις φάσεις του σχεδιασμού, της κατασκευής και της συντήρησης ενός προϊόντος, σύμφωνα με συστήματα και οδηγίες ποιοτικού ελέγχου (4–5). Αποτελούν δε, απαραίτητο εργαλείο για τον ποιοτικό έλεγχο και τη διασφάλιση της ποιότητας των προϊόντων. Τα Υλικά, τα Τρόφιμα, η Αεροναυπηγική, η Ναυπηγική, η Αυτοκινητοβιομηχανία, η Ιατρική και η Πληροφορική, είναι τεχνολογικοί κλάδοι στους οποίους χρησιμοποιούνται κατά κόρων οι ΜΚΕ (2). Οι βιομηχανικοί τομείς στους οποίους εφαρμόζονται οι τεχνολογίες των ΜΚΕ, είναι η ναυτική – αεροναυπηγική βιομηχανία, τα διυλιστήρια και οι χημικές βιομηχανίες, οι βιομηχανίες τροφίμων, οι μεταφορές, η παραγωγή και διανομή ενέργειας, καθώς και οι βιομηχανίες κατασκευής εξοπλισμού και συστημάτων ελέγχου ποιότητας (2).

1.3. Σκοποί

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η διερεύνηση και η επαλήθευση της δομικής ακεραιότητας και η εκτίμηση της αντοχής με χρήση μη καταστροφικού ελέγχου, φερόντων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, σε υφιστάμενο παλαιό κτίριο το οποίο έπειτα από αναπαλαίωση, αποκατάσταση των ζημιών και των βλαβών του και κατάλληλη ενίσχυση του φέροντος οργανισμού, θα μετατραπεί σε Μουσείο Μικρασιατικού Ελληνισμού.

1.4. Στόχοι

Η μελέτη αυτή είναι κατά κύριο λόγο αφιερωμένη στην πειραματική διερεύνηση και επαλήθευση της αποτελεσματικότητας και της αξιοπιστίας της μεθόδου των Υπερήχων, ως μεθόδου μη καταστροφικού ελέγχου δομών για να διερευνηθεί και να εκτιμηθεί η αντοχή του σκυροδέματος σε υφιστάμενα φέροντα στοιχεία κτιρίου.

Ειδικότερα, οι στόχοι της παρούσας μελέτης είναι οι ακόλουθοι:

- Να συγκεντρωθεί και να διαδοθεί η σχετική βιβλιογραφία.
- Να σχηματιστεί εικόνα για τον έλεγχο με υπέρηχους και τους παράγοντες που επηρεάζουν την διερεύνηση των δομών με τη μέθοδο αυτή.
- Να επαληθευθεί παλαιότερος έλεγχος με την ίδια μέθοδο και να προσδιοριστούν οι παράγοντες απόκλισης των δύο ελέγχων.
- Να υπάρξει εξοικείωση και διάδοση της πειραματικής διαδικασίας στη χρήση συσκευής εκπομπής υπέρηχων στον τομέα της προσέγγισης της αντοχής και τον προσδιορισμό μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος ως δομικό υλικό.

1.5. Στρατηγική Έρευνας Σχεδιασμού

Προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι της παρούσας διατριβής, έγιναν οι ακόλουθες εργασίες:

1.5.1. Εργασία Πρώτη: Βιβλιογραφική Έρευνα

Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας είναι η βασική υποδομή της διατριβής. Η μελέτη της βιβλιογραφίας ωφελεί τον ερευνητή και τον αναγνώστη να κατανοήσει το γενικό θέμα και εξασφαλίζει την πρόοδο της έρευνας. Στην παρούσα έρευνα, παρέχεται εκτεταμένη βιβλιογραφία σχετικά με τον μη – καταστρεπτικό έλεγχο με υπέρηχους σε οπλισμένο σκυρόδεμα αλλά και τους υπέρηχους σαν μορφή κυμάτων γενικότερα. Επίσης, παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν.

1.5.2. Εργασία Δεύτερη: Σχεδιασμός Ελέγχων – Μετρήσεων

Για την εκτέλεση των μετρήσεων με τη μέθοδο των Υπερήχων υπήρξε η ανάγκη σχεδιασμού και προγραμματισμού των ελέγχων στο κτίριο, πραγματοποιώντας οπτικό έλεγχο για τα διαθέσιμα σημεία που μπορούν να δώσουν ακριβή αποτελέσματα και τα οποία βοήθησαν στην τελική εξαγωγή συμπερασμάτων. Αφού εντοπίστηκαν τα προσφερόμενα για μέτρηση σημεία, πραγματοποιήθηκαν οι έλεγχοι με τη συσκευή των υπερήχων του Εργαστηρίου Σκυροδέματος του Ανώτατου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά, Τεχνολογικού Τομέα (ΑΕΙ Πειραιά, ΤΤ).

1.5.3. Εργασία Τρίτη: Ανάλυση της μορφολογίας της δομής

Η μορφολογία των δομών που εξετάστηκαν καθώς και τα υλικά που τις αποτελούν, διερευνήθηκαν με οπτικά μέσα καθώς δεν υπήρχαν αναφορές, σχέδια και ξυλότυποι που να μαρτυρούν τον οπλισμό και τις κατασκευαστικές διατάξεις των δομών και των φερόντων στοιχείων του κτιρίου.

1.5.4. Εργασία Τέταρτη: Διενέργεια Δοκιμών – Μετρήσεων

Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής διενεργήθηκαν δοκιμές επιτόπου στο κτίριο υπό εξέταση και όχι σε δοκίμια ή καρότα. Οι επιφάνειες μετρήθηκαν, αφού λειάνθηκαν, καθαρίστηκαν και τοποθετήθηκε σε αυτές η λιπαντική ουσία.

1.5.5. Εργασία Πέμπτη: Ανάλυση και Σύγκριση των αποτελεσμάτων

Παρουσιάζονται αναλυτικές περιγραφές της μορφολογίας της κατασκευής των υλικών και της δομής που τίθεται υπό εξέταση.

1.5.6. Εργασία Έκτη: Συγγραφή της διατριβής

Η εργασία αυτή είναι η τελευταία και συνδυάζει όλες τις παραπάνω εργασίες μαζί. Το κάθε κεφάλαιο θα είναι συνδεδεμένο με όλα τα άλλα.

1.6. Περίγραμμα Διατριβής

Η διατριβή αυτή παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα για την κατανόηση των υπερήχων στον τομέα των μη καταστροφικών ελέγχων σε σκυρόδεμα υφιστάμενων κτιρίων και δομών. Τα περιεχόμενα της έρευνας χωρίζονται σε 5 κεφάλαια και παρουσιάζονται παρακάτω:

Κεφάλαιο πρώτο: Παρουσιάζεται μια γενική εισαγωγή για τις διαφορετικές ορολογίες και μεθόδους που χρησιμοποιούνται. Επίσης, περιλαμβάνονται οι σκοποί και οι στόχοι της έρευνας και ο σχεδιασμός αυτής.

Κεφάλαιο δεύτερο: Περιέχεται περιεκτική ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας η οποία περιλαμβάνει τους μη καταστροφικούς ελέγχους και συγκεκριμένα το θεωρητικό υπόβαθρο των υπερήχων, το πρακτικό μέρος του ελέγχου και την παρουσίαση της συσκευής υπερήχων.

Κεφάλαιο τρίτο: Γίνεται εκτενής αναφορά στο σκυρόδεμα που είναι το υλικό το οποίο αποτελεί τις δομές του κτιρίου που ελέγχεται στην παρούσα διατριβή, σύμφωνα με την αντίστοιχη βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο τέταρτο: Ασχολείται με την μορφολογία του κτιρίου στο οποίο θα διενεργηθεί η πειραματική διάταξη, την παλαιότητα, καθώς και με τα ιστορικά στοιχεία του. Επίσης, ασχολείται με τον σχεδιασμό των ελέγχων και την διενέργεια της δοκιμής για τον έλεγχο με υπέρηχους στα δομικά στοιχεία του κτιρίου, και τέλος και με τους παράγοντες που το επηρεάζουν.

Κεφάλαιο πέμπτο: Παρουσιάζονται, αναλύονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα του παρόντος ελέγχου με προγενέστερες μετρήσεις που έλαβαν χώρα στο ίδιο κτίριο με την μέθοδο των υπερήχων. Επίσης, συνοψίζεται η τρέχουσα μελέτη.

Κεφάλαιο έκτο: Περιλαμβάνονται οι αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Κεφάλαιο 2^ο: Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου που έχουν πρακτικό ενδιαφέρον και αναφέρονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και οι εφαρμογές της κάθε μεθόδου.

2.1. Παρουσίαση - Διάκριση μεθόδων μη καταστροφικών ελέγχων

2.1.1. Οπτικός Έλεγχος

Η πιο γρήγορη και άμεση μέθοδος ΜΚΕ είναι ο οπτικός έλεγχος (1). Ο οπτικός έλεγχος είναι πολύ αποδοτικός, καθώς ελέγχει οπτικά τα υπό εξέταση σημεία για την ύπαρξη βλαβών στην επιφάνειά τους και έτσι μπορεί να εντοπίσει προβληματικές περιοχές. Η εφαρμογή της μεθόδου οπτικού ελέγχου είναι απλή και τις περισσότερες φορές μικρού κόστους. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί και ρομποτικές συσκευές που φέρουν ενσωματωμένες κάμερες που επιτρέπουν τη διεξόδου σε στενές και επικίνδυνες για τον άνθρωπο περιοχές, όπως οι αεραγωγοί, οι σωληνώσεις, οι δεξαμενές και οι αντιδραστήρες.

Στα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου ΜΚΕ συγκαταλέγονται το γεγονός ότι μπορούν να ανιχνευτούν κατά κύριο λόγο μόνο επιφανειακές βλάβες, καθώς και το ότι απαιτείται σχολαστική εξέταση της επιφάνειας του αντικειμένου, ενώ σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν ενδείξεις για κάποια βλάβη, η διαδικασία ελέγχου είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα.

2.1.2. Διεισδυτικά Υγρά

Τα διεισδυτικά υγρά χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό επιφανειακών ρωγμών και βλαβών στα υλικά όπως το σκυρόδεμα, το μέταλλο, το γυαλί, τα κεραμικά υλικά, τα πλαστικά και το καουτσούκ. Το υπό εξέταση αντικείμενο αφού καθαριστεί πολύ καλά για την απομάκρυνση ξένων ουσιών που βρίσκονται στην επιφάνεια της περιοχής που θέλουμε να εξετάσουμε καλύπτεται με έγχρωμο υγρό με μεγάλη επιφανειακή τάση. Σε χρονικό διάστημα 5 – 60min το υγρό εισχωρεί στις επιφανειακές ρωγμές του υλικού. Στη συνέχεια, το επιπλέον υγρό αφαιρείται από την υπόλοιπη επιφάνεια του αντικειμένου με προσοχή, έτσι ώστε να μην αφαιρεθεί και το υγρό που έχει εισχωρήσει στη ρωγμή. Με τη χρήση κατάλληλων ουσιών, το διεισδυτικό υγρό που έχει εισχωρήσει στις ρωγμές βγαίνει στην επιφάνεια και έτσι οι ρωγμές γίνονται εμφανείς δια γυμνού οφθαλμού. Επίσης, με τη χρήση κατάλληλων υγρών τα οποία φωσφορίζουν υπό την επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας, ο έλεγχος του αντικειμένου γίνεται περισσότερο αξιόπιστος και συνάμα ταχύτερος από την απλή οπτική μέθοδο. Η διαδικασία είναι αρκετά οικονομική και δεν

απαιτεί ιδιαίτερο εξοπλισμό, ενώ σημαντικά μειονεκτήματά της είναι ότι η εν λόγω μέθοδος εντοπίζει μόνο επιφανειακές ασυνέχειες και ότι έχει πιθανότητα λανθασμένης ένδειξης σε τραχιές επιφάνειες (1–9).

2.1.3. Μαγνητικά σωματίδια

Η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων είναι και αυτή μία μέθοδος ΜΚΕ η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τον εντοπισμό ρωγμών σε αντικείμενα τα οποία αποτελούνται ή είναι κατασκευασμένα από σιδηρομαγνητικά υλικά (1–7). Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου στηρίζεται στο ότι οι γραμμές της μαγνητικής ροής διαπερνούν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό και διαρρέονται από το εσωτερικό του προς το περιβάλλον στα σημεία που αλλάζει η συνέχειά του, δηλαδή στις ρωγμές. Αυτό το φαινόμενο που είναι γνωστό ως διαρροή της μαγνητικής ροής, οφείλεται στο γεγονός ότι η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα είναι διαφορετική από αυτή των σιδηρομαγνητικών υλικών. Αποτέλεσμα του φαινομένου είναι να εξαναγκάζεται το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται να απλωθεί σε μία μεγαλύτερη περιοχή για να διαπεράσει κάποια ασυνέχεια και εν ολίγοις να αναγκάζεται να διαρρεύσει από το εσωτερικό του υλικού στο περιβάλλον. Με τη χρήση των μαγνητικών σωματιδίων είναι δυνατόν να γίνει εμφανής η ύπαρξη διαρροής καθώς δημιουργείται έλξη από το μαγνητικό πεδίο η οποία αναγκάζει τα σωματίδια να συγκεντρωθούν στις περιοχές όπου υπάρχουν ρωγμές και ασυνέχειες καθιστώντας τες εμφανείς. Επιπροσθέτως, η χρήση φωσφοριζόντων μαγνητικών σωματιδίων σε συνδυασμό με τη χρήση υπεριώδους φωτός, δύναται να συμβάλει στην αξιοπιστία και την ταχύτητα της μεθόδου.

Η ανωτέρω μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων χρησιμοποιείται κατά κόρον σε όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά, καθώς είναι ταχύτερη, εύχρηστη και μπορεί να εντοπίσει με ευκολία τις επιφανειακές ρωγμές, αν και απαιτεί ιδιαίτερη προεργασία του αντικειμένου. Προκειμένου να υποβληθούν στον ανώτερο έλεγχο, οι επιφάνειές του πρέπει να καθαριστούν, ενώ απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή καθώς η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων δεν δύναται να εντοπίσει ρωγμές με προσανατολισμό παράλληλο στην κατεύθυνση της μαγνητικής ροής.

2.1.4. Ραδιογραφία – ακτινογραφικός έλεγχος

Η ραδιογραφία ή αλλιώς ακτινογραφικός έλεγχος αποτελεί μία μορφή ΜΚΕ με την οποία επιθεωρείται η εσωτερική δομή ενός αντικειμένου ή ενός υλικού ακόμα και αν αυτό περιέχει κυψελοειδές σύνθετο υλικό, με χρήση ακτινών X και Gamma (1–7, 12). Η μέθοδος στηρίζεται στην εξασθένιση της έντασης της ακτινοβολίας X και Gamma, ανάλογα με τη δομή και τη σύσταση του υλικού που τη διαπερνά. Το φαινόμενο αυτό της εξασθένισης, αρχικά, αποτυπωνόταν σε αρνητικό φιλμ και γινόταν αντιληπτό με την αλλαγή της φωτεινότητας σε

κάποιο σημείο του φιλμ που βρισκόταν εκτεθειμένο στην ακτινοβολία. Όταν υπήρχε μεγάλη εξασθένιση της ακτινοβολίας, η εικόνα στο φιλμ παρουσιάζόταν φωτεινή, ενώ από την άλλη, όπου η ακτινοβολία διερχόταν εύκολα η εικόνα του φιλμ παρουσιάζόταν σκοτεινή. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, όμως, το φιλμ αντικαταστάθηκε από κάμερες με ειδικούς αισθητήρες, οι οποίοι συλλέγουν την ακτινοβολία και δημιουργούν εικόνες παρόμοιες με του φιλμ. Πάντως το φιλμ βρίσκει χρήση ακόμα και σήμερα, ειδικά σε περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλη ευαισθησία και ανάλυση σε σχέση με τα χαρακτηριστικά των σύγχρονων ψηφιακών αισθητήρων, όπως για παράδειγμα οι ακτινογραφίες που χρησιμοποιούνται στην ιατρική.

Οι ακτίνες παράγονται με τη βοήθεια ενός καθοδικού σωλήνα παραγωγής ακτινών X και στη συνέχεια, διαπερνούν το αντικείμενο και δημιουργούν στο φιλμ ή σε οθόνη μια ακτινογραφία με αλλαγές στη σύσταση του αντικειμένου. Παρόμοια είναι και η διαδικασία ελέγχου που ακολουθείται με τη χρήση ακτινών Gamma που εκπέμπονται από ραδιενεργά υλικά. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που τα αντικείμενα που τίθενται υπό εξέταση έχουν μεγάλο συντελεστή απορρόφησης της ακτινοβολίας, καθώς και σε σημεία που δυσχεραίνουν τη χρήση του καθοδικού σωλήνα. Κατά κύριο λόγο, οι έλεγχοι με ακτινοβολία Gamma συνήθως αποφεύγονται, καθώς η εκπομπή της ισχυρής αυτής ακτινοβολίας από ραδιενεργά υλικά είναι συνεχής. Αντιθέτως, η ακτινοβολία X υπάρχει για όσο λειτουργεί η διαδικασία του καθοδικού σωλήνα και κατά συνέπεια η χρήση της ενέχει λιγότερους κινδύνους σε σχέση με την χρήση ακτινοβολίας Gamma. Και στις δύο περιπτώσεις εφαρμογής της ραδιογραφίας πάντως τα μέτρα προφύλαξης είναι ιδιαίτερα αυστηρά και καθορισμένα καθώς η έκθεση του ανθρώπινου παράγοντα σε τόσο ισχυρή ακτινοβολία μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα επιβλαβής για την υγεία του.

Η χρήση της μεθόδου της ραδιογραφίας επιτρέπει τον εντοπισμό ρωγμών, ασυνεχειών και αλλαγών στη δομή και τη σύνθεση ενός αντικειμένου, όταν αυτές επηρεάζουν το συντελεστή απορρόφησης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Με αυτό τον τρόπο η παρουσία ρωγμής στο εσωτερικό ενός αντικειμένου γίνεται εμφανής στο φιλμ ως μαύρη γραμμή, καθώς το κενό δεν προκαλεί καμία εξασθένιση στην ακτινοβολία. Αντιθέτως, η μέθοδος δεν δύναται να εντοπίσει την αποκόλληση δυο επιφανειών ενός σύνθετου υλικού, καθώς η εξασθένιση της ακτινοβολίας σε όλο το υλικό θα είναι ίδια. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού η μέθοδος είχε αρχικά αποκλειστική εφαρμογή στον έλεγχο συγκολλήσεων, χυτών και άλλων μεταλλικών αντικειμένων με στόχο τον εντοπισμό ρωγμών και πόρων στη δομή των υλικών.

Το γεγονός ότι το φιλμ αντικαταστάθηκε από νέες τεχνολογίες, όπως η χρήση καμερών, έδωσε μεγάλη ώθηση στη μέθοδο, καθώς η εμφάνιση της ραδιογραφίας μπόρεσε να αυτοματοποιηθεί και να γίνει πιο ασφαλής για τον χειριστή. Χαρακτηριστική εφαρμογή της μεθόδου αυτής αποτελεί

ο έλεγχος των αποσκευών και των οχημάτων που πραγματοποιείται στα αεροδρόμια και στα τελωνεία αντίστοιχα.

2.1.5. Δινορρεύματα

Τα δινορρεύματα είναι μια από τις πιο εύχρηστες και ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους (1–7) για τον έλεγχο αγώγιμων υλικών και αντικειμένων, ενώ βασίζεται εξ ολοκλήρου στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Κατά τη μέθοδο αυτή, ένα πηνίο δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο προκαλεί το φαινόμενο της επαγωγής δινορρευμάτων στο υπό εξέταση αγώγιμο υλικό. Η κυκλοφορία των δινορρευμάτων στο υλικό σχηματίζει εκ νέου ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο αντιτίθεται στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο σύμφωνα με το νόμο του Lenz. Τα δινορρεύματα που επάγονται στο αντικείμενο κυκλοφορούν σε κλειστούς βρόγχους στο εσωτερικό του υλικού. Παράλληλα, η έντασή τους επηρεάζεται από την ένταση και τη συχνότητα του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, το σχήμα του πηνίου και την απόστασή του από την επιφάνεια του αντικειμένου, την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού, την μαγνητική διαπερατότητα, το σχήμα του, καθώς και από την παρουσία ασυνεχειών και αλλαγών στη δομή του υλικού. Το φαινόμενο της μεταβολής της έντασης των δινορρευμάτων που μπορεί να οφείλεται στους παράγοντες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, οδηγεί σε μεταβολή του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου, το οποίο επηρεάζει το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Η επίδραση αυτή μπορεί να προσδιοριστεί και να μετρηθεί, αν προσδιοριστεί και μετρηθεί η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης του πηνίου που χρησιμοποιείται για την ηλεκτρομαγνητική διέγερση του υλικού. Με αυτόν τον τρόπο μετρώντας τη μεταβολή της σύνθετης αντίστασης του πηνίου, καθώς αυτό περνάει πάνω από κάποια ατέλεια του αντικειμένου, μπορούμε να λάβουμε χρήσιμες πληροφορίες για τη μορφή της ατέλειας και το βάθος στο οποίο βρίσκεται.

Από τη φύση τους τα δινορρεύματα έχουν την τάση να συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του υλικού. Αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της μεθόδου να εντοπίζει μόνο επιφανειακές και υπό – επιφανειακές ατέλειες και ρωγμές οι οποίες βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του υλικού. Από την άλλη μεριά, το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου των δινορρευμάτων είναι η μεγάλη ευαισθησία της μεθόδου σε μικρές ρωγμές και ατέλειες. Έτσι, έχει συμβάλει αρκετά στον επιφανειακό έλεγχο γεωμετρικά περίπλοκων αντικειμένων από αγώγιμα υλικά, καθώς και σε περαιτέρω προσδιορισμό του βάθους ατελειών και του μεγέθους αυτών, εκμεταλλευόμενη το φαινόμενο της υστέρησης φάσης.

Εκτός από τον προσδιορισμό και τη μέτρηση επιφανειακών ασυνεχειών, τα δινορρεύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση του πάχους λεπτών υλικών, όπως σωλήνων και μεταλλικών φύλλων. Η ιδιότητά τους αυτή καθιστά τη μέθοδο των δινορρευμάτων ιδανική για

τον εντοπισμό περιοχών που έχουν υποστεί διάβρωση και οδηγούν σε λέπτυνση του υλικού καθώς και για τον υπολογισμό της προστατευτικής επιφάνειας με την οποία έχει επικαλυφθεί ένα μεταλλικό υλικό. Σημαντική είναι και η εφαρμογή της μεθόδου στον έλεγχο των συγκολλήσεων μεταλλικών επιφανειών. Επιπλέον, τα δινορρέυματα χρησιμοποιούνται και για τη μέτρηση της αγωγιμότητας ενός υλικού με στόχο την αναγνώρισή του, καθώς και για τον προσδιορισμό της θερμικής κατεργασίας που έχει υποστεί το υπό εξέταση υλικό.

Αλλα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η άμεση εμφάνιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, η ελάχιστη προετοιμασία του αντικειμένου, καθώς και η απουσία επαφής του πηνίου με το υλικό. Το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου εντοπίζεται στον χρόνο που απαιτείται για τον έλεγχο μεγάλων επιφανειών, καθώς το πηνίο διαθέτει μικρή κεφαλή η οποία πρέπει να σαρώσει την επιφάνεια του αντικειμένου σημείο προς σημείο. Εκτός αυτού, το ενδεχόμενο μια ρωγμή να είναι παράλληλη στην κίνηση του πηνίου έχει ως αποτέλεσμα να μην εντοπιστεί. Αυτός είναι και ο λόγος που απαιτείται από τον χειριστή του πηνίου να σαρώσει την υπό εξέταση επιφάνεια σε δύο διευθύνσεις, κάθετες μεταξύ τους. Εντέλει, απαιτείται μεγάλη εμπειρία από τον χρήστη σε σχέση με άλλες μεθόδους ΜΚΕ, για τη σωστή διάγνωση των ατελειών που εντοπίζει.

2.1.6. Θερμικές μέθοδοι

Οι θερμικές μέθοδοι ΜΚΕ βασίζονται στη μέτρηση της θερμοκρασίας ενός αντικειμένου σημειακά ή και επιφανειακά, καθώς η θερμότητα διαχέεται εντός του αντικειμένου με αγωγή και προς το περιβάλλον με μεταφορά και ακτινοβολία. Συχνά αυτή η μορφή ΜΚΕ αναφέρεται ως θερμοκρασιακός έλεγχος ή θερμογραφία, ή υπέρυθρη θερμογραφία ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας (1–4). Οι θερμικές μέθοδοι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται κατά κόρων για τον εντοπισμό επιφανειακών και υπό – επιφανειακών ασυνεχειών και ρωγμών που βρίσκονται σε μικρό βάθος από την υπό εξέταση επιφάνεια του αντικειμένου.

Για την περίπτωση της σημειακής μέτρησης της θερμοκρασίας ενός αντικειμένου γίνεται χρήση ενός θερμοζεύγους. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που γίνεται απαραίτητη η γνώση της θερμοκρασίας που αναπτύσσει ένα αντικείμενο κατά τη διάρκεια της ζωής του με απώτερο σκοπό την εκτίμηση και τον έλεγχο της σωστής συμπεριφοράς και λειτουργίας του. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι έλεγχοι σε κινητήρες, σε ρουλεμάν κτλ.. Εκτός από τη μέτρηση της θερμοκρασίας με θερμοζεύγη, έχουν αναπτυχθεί και άλλα συστήματα ελέγχου μέτρησης της θερμοκρασίας, όπως είναι τα θερμίστορ που χρησιμοποιούνται σε ψηφιακά κυκλώματα και οι συσκευές για μέτρηση θερμοκρασίας από απόσταση, όπως τα πυρόμετρα / βολόμετρα.

Σε περιπτώσεις, όμως, που είναι επιθυμητός ο ταυτόχρονος έλεγχος της θερμοκρασίας σε όλη την επιφάνεια ενός αντικειμένου, χρησιμοποιούμε πιο εξελιγμένες τεχνικές που βασίζονται στην υπέρυθρη ακτινοβολία και αναφέρονται ως υπέρυθρη θερμογραφία. Οι συσκευές αυτές μπορούν να μετρήσουν την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο, το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός και τη μετασχηματίζουν σε μία θερμοκρασιακή κατανομή με απόλυτη ακρίβεια της τάξης $\pm 2\%$. Η υπέρυθρη θερμογραφία έχει ως πλεονέκτημα ότι μπορούμε να εξετάσουμε οπτικά και με μεγάλη ταχύτητα μεγάλες επιφάνειες καθώς και να καταγράψουμε την επιφανειακή διακύμανση της θερμοκρασιακής κατάστασης του αντικειμένου με ρυθμό μέχρι και 400 εικόνων ανά δευτερόλεπτο. Η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί επαφή με την επιφάνεια, παρά μόνο οπτική επαφή του αισθητήρα με το αντικείμενο. Τέλος, μπορεί να εντοπίσει διαφορές θερμοκρασίας έως 0.02°C σε ιδανικές συνθήκες και σε ελεγχόμενο περιβάλλον.

Η υπέρυθρη θερμογραφία δεν αποτελεί μόνο μια τεχνική στο φάσμα των ΜΚΕ και των θερμικών μεθόδων, αλλά καλύπτει ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών και χρήσεων σε άλλους τομείς. Χρησιμοποιείται τόσο για στρατιωτικούς, όσο και για βιομηχανικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Ακόμα, χρησιμοποιείται από την αστυνομία και το στρατό για τον εντοπισμό και την αναγνώριση ατόμων κατά τη διάρκεια της νύκτας, ενώ από τους πυροσβέστες τυγχάνει χρήσης κατά τη διάρκεια διάσωσης ή κατάσβεσης πυρκαγιών. Στη βιομηχανία χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και τη συντήρηση εγκαταστάσεων και για τον εντοπισμό συσκευών που αναπτύσσουν μεγάλη θερμοκρασία λόγω υπερφόρτωσης ή μη κανονικής λειτουργίας. Στον τομέα των κατασκευών χρησιμοποιείται για τον έλεγχο μονώσεων τόσο σε βιομηχανικά προϊόντα όσο και σε κατοικίες. Στο μη – καταστροφικό έλεγχο, η μέθοδος χρησιμοποιείται για τη μελέτη της θερμοκρασιακής κατανομής σε επιφάνειες αντικειμένων με στόχο τον εντοπισμό ρωγμών, ασυνεχειών και άλλων ατελειών στην επιφάνεια αυτών (1–4). Η ύπαρξη ρωγμής στην επιφάνεια που εξετάζεται με προσανατολισμό κάθετο ή με κλίση προς την κατεύθυνση της θερμότητας, επηρεάζει τη ροή της θερμότητας και έχει ως αποτέλεσμα, στο συγκεκριμένο σημείο της ανωμαλία να παρατηρείται απόκλιση στη ροή της θερμότητας από την αναμενόμενη, κάτι το οποίο μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί μέσω της θερμοκρασιακής κατανομής στην επιφάνεια του αντικειμένου.

Στην περίπτωση του ελέγχου της επιφανειακής θερμοκρασίας ενός αντικειμένου χωρίς την απαίτηση για ακριβή γνώση της θερμοκρασίας, υπάρχει ακόμη μία μέθοδος η οποία στηρίζεται σε ειδικές βαφές οι οποίες αλλάζουν χρώμα ανάλογα με τη θερμοκρασία που αναπτύσσει το αντικείμενο. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θερμοκρασιακή κλίμακα από -40°C μέχρι και 1600°C . Οι βαφές αυτές έχουν σχετικά μικρό κόστος και ενδείκνυνται για τη συνεχή παρακολούθηση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σε ένα αντικείμενο χωρίς την ανάγκη

ύπαρξης μετρητικής συσκευής. Η μόνη απαίτηση της μεθόδου είναι η γνώση του χρώματος που λαμβάνει η βαφή σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Κατά αυτό τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του αντικειμένου με ακρίβεια της τάξης $\pm 15^{\circ}\text{C}$. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι για την παρατήρηση αλλαγών στο χρώμα της βαφής, η μεταβολή της θερμοκρασίας θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη.

2.1.7. Ακουστική εκπομπή

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής στηρίζεται στην καταγραφή και την ανάλυση των ελαστικών κυμάτων που παράγονται μέσα σε ένα υλικό από την απότομη απελευθέρωση ενέργειας (2–3). Η ύπαρξη ρωγμών στο υλικό, η πλαστική παραμόρφωση του υλικού, λόγω εξωτερικής φόρτισης ή λόγω θερμικών τάσεων, καθώς και η τήξη ή η αλλαγή φύσης του υλικού, μπορεί να είναι παράγοντες οι οποίοι αποτελούν και την πηγή των κυμάτων. Σε άλλες κατηγορίες υλικών όπως είναι τα σύνθετα υλικά, το φαινόμενο της ακουστικής εκπομπής εμφανίζεται κατά τη θραύση των ινών του υλικού και την αποκόλληση των επιμέρους επιφανειών από τις οποίες αποτελείται το υλικό.

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής, ως μέθοδος μη – καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) βασίζεται στη μετατροπή των ελαστικών κυμάτων σε ηλεκτρικά σήματα. Για την επίτευξη αυτής της μετατροπής γίνεται χρήση κατάλληλων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων που διεγείρονται σε συχνότητες υπερήχων 25–1200kHz. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην επιφάνεια του υπό εξέταση αντικειμένου και το ηλεκτρικό σήμα κάθε αισθητήρα, αφού πρώτα ενισχυθεί και φιλτραρισθεί μέσα από κατάλληλες συσκευές, αναλύεται για τον εντοπισμό βλάβης και της θέσης της εντός του αντικειμένου. Η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών μπορεί επίσης να προειδοποιήσει για επικείμενη αστοχία της κατασκευής, παρέχοντας και τον παράγοντα του χρόνου στον άνθρωπο, ώστε με τις κατάλληλες ενέργειες να επιδιορθώσει το πρόβλημα ή την αστοχία.

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής είναι διαφορετική από τις υπόλοιπες μεθόδους ΜΚΕ καθώς δεν απαιτεί την παροχή ενέργειας από εξωτερικό παράγοντα. Στη μέθοδο αυτή απλώς παρακολουθούμε και καταγράφουμε την ενέργεια που απελευθερώνεται σε μορφή ήχου εν ώρα λειτουργίας της κατασκευής. Με αυτό τον τρόπο παρέχεται άμεσος έλεγχος και άμεση γνώση για την κατάσταση της κατασκευής μας, όταν αυτή φορτίζεται πλήρως με τα κατάλληλα φορτία που θα οδηγήσουν στην εμφάνιση και τη διάδοση των ρωγμών και κατ' επέκταση στην παραγωγή των ακουστικών εκπομπών. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή διαφέρει στο γεγονός ότι με την ακουστική εκπομπή καταγράφονται οι αλλαγές που πραγματοποιούνται στη δομή του υλικού σε πραγματικό χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι με την μέθοδο των ακουστικών εκπομπών γίνεται δυνατός ο εντοπισμός

μιας ρωγμής τη στιγμή που αναπτύσσεται και όχι εφόσον έχει ήδη δημιουργηθεί ή είναι στάσιμη. Αυτό αποτελεί ταυτόχρονα πλεονέκτημα και μειονέκτημα της μεθόδου, καθώς μπορεί να υποδείξει μία ρωγή που δημιουργείται ή βρίσκεται σε φάση διάδοσης, αλλά παράλληλα δεν δύναται να υποδείξει την ύπαρξη άλλων ρωγμών στη δομή του υλικού που μπορεί να ενεργοποιηθούν με κάποια ενδεχόμενη μεγαλύτερη φόρτιση. Με τη χρήση πολλών αισθητήρων σε πολλαπλά σημεία μιας κατασκευής, η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την συνεχή παρακολούθηση της κατασκευής αυτής. Το γεγονός της συνεχούς παρακολούθησης αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου, αφού προσφέρει μία γρήγορη και ποιοτική εκτίμηση της δομικής ακεραιότητας και της ασφάλειας της κατασκευής.

Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου της ακουστικής εκπομπής αποτελεί το γεγονός ότι μπορεί να υποδείξει μόνο ένα εύρος περιοχής στο οποίο έχει υποστεί βλάβες η κατασκευή. Για περαιτέρω και περισσότερο ακριβή εντοπισμό βλαβών καθώς και για το μέγεθος αυτών, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τις ακουστικές εκπομπές και άλλες μέθοδοι ΜΚΕ. Επιπροσθέτως, η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής δεν μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα σε περιβάλλον με συνθήκες εξωτερικού θορύβου διότι υπερκαλύπτεται το σήμα. Παράδειγμα τέτοιων θορύβων είναι οι δονήσεις που παράγουν οι μηχανές κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους, η τριβή μεταλλικών επιφανειών, ακόμα και η βροχή. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν ειδικές τεχνικές μείωσης του θορύβου για τη βελτίωση του σήματος που λαμβάνουν οι αισθητήρες.

Οι εφαρμογές των ακουστικών εκπομπών είναι ποικίλες τόσο στην έρευνα όσο και στη βιομηχανία καθώς και στα επίπεδα έρευνας για την επιθεώρηση υλικών και τη μελέτη των μηχανισμών πλαστικής παραμόρφωσης και θραύσης. Η μέθοδος παρέχει άμεσες πληροφορίες σχετικά με την απόκριση και τη συμπεριφορά ενός υλικού υπό τάση, που σχετίζεται με την αντοχή του, την συσσώρευση βλάβης και την έναρξη αστοχίας του. Σε επίπεδο βιομηχανίας χρησιμοποιείται για τον συνεχή έλεγχο μορφών καταπονήσεων ή τον έλεγχο γήρανσης αεροσκαφών, κτλ.. Τέλος, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο πολυμερών υλικών και κατασκευών από ξύλο και σκυρόδεμα.

2.1.8. Μέθοδος Υπερήχων

Η μέθοδος των υπερήχων χρησιμοποιεί υψηλής συχνότητας ελαστικά κύματα (>500KHz) για την πραγματοποίηση ελέγχων και μετρήσεων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό ασυνεχειών εντός του υπό εξέταση στοιχείου ή υλικού καθώς και για την πραγματοποίηση μετρήσεων επί των γεωμετρικών διαστάσεων, της αντοχής και των μηχανικών ιδιοτήτων ενός αντικειμένου. Η πλέον διαδεδομένη και συνήθης τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η τεχνική

παλμού – ηχούς (pulse eco). Τα υψηλής συχνότητας ελαστικά κύματα που παράγονται από τον πομποδέκτη εισάγονται στο εξεταζόμενο αντικείμενο και ανακλώνται πίσω στον δέκτη, είτε εξαιτίας ατελειών, είτε λόγω της γεωμετρίας του αντικειμένου. Η ενέργεια του σήματος που αντιλαμβάνεται ο δέκτης με την πάροδο του χρόνου, απεικονίζεται σε δισδιάστατο γράφημα. Δεδομένου ότι χρόνος που απαιτείται για να ταξιδέψει ο παλμός από τον πομπό στο δέκτη είναι ανάλογος της απόστασης που έχει διανύσει, είναι εφικτός ο υπολογισμός του βάθους στο οποίο βρίσκεται η ατέλεια. Με αυτό τον τρόπο αποκτάται η πληροφορία, για μια τομή του υλικού σε βάθος, για κάθε ατέλεια που υπάρχει συναρτήσει του βάθους της (A-Scan).

Η μέθοδος των υπερήχων είναι μια από τις πιο εύχρηστες και ευπροσάρμοστες μεθόδους ΜΚΕ και έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σημεία που οι υπόλοιπες μέθοδοι υστερούν. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των υπερήχων είναι το γεγονός ότι μπορούν να εντοπίσουν τόσο επιφανειακές όσο και εσωτερικές ασυνέχειες, ρωγμές και ατέλειες, παρέχοντας αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας για το βάθος στο οποίο βρίσκονται, σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Στην περίπτωση της τεχνικής παλμού – ηχούς είναι απαραίτητη η πρόσβαση τουλάχιστον μιας πλευράς του αντικειμένου. Η μέθοδος είναι εξαιρετικά ακριβής στον προσδιορισμό της θέσης, του μεγέθους και της γεωμετρίας των ατελειών, καθώς με τη χρήση αυτοματοποιημένων συστημάτων μπορεί να παράγει ψηφιακές εικόνες με μεγάλη χωρική διακριτικότητα, τόσο σε επίπεδο κάθετο στην επιφάνεια του αντικειμένου (B-Scan), όσο και σε επίπεδο παράλληλο στην επιφάνεια του αντικειμένου (C-Scan), καθώς και σε ολόκληρο τον όγκο του αντικειμένου (D-Scan). Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση μετρήσεων πάχους καθώς και στον προσδιορισμό μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού (1–7, 10–11).

Όπως όλες οι μέθοδοι ΜΚΕ έτσι και η μέθοδος των υπερήχων έχει αρκετούς περιορισμούς. Αρχικά, η χρήση της απαιτεί πρόσβαση στην επιφάνεια που θέλουμε να εξετάσουμε. Συνήθως απαιτείται και ένα κατάλληλο ενδιάμεσο συζευκτικό υλικό για να μεταδοθούν τα κύματα από τον πομπό στην εξεταζόμενη επιφάνεια. Αντικείμενα με τραχείες επιφάνειες, ακανόνιστης γεωμετρίας, εξαιρετικά λεπτά και ανομοιογενή είναι δύσκολο να ελεγχθούν, γιατί έχουν την τάση να διαχέουν το σήμα και να παράγουν μικρό λόγο σήματος προς τον θόρυβο. Επιπλέον, δεν εντοπίζονται ασυνέχειες παράλληλες στον άξονα διάδοσης του κύματος καθώς δεν προβάλλουν εμπόδιο στην διέλευση των ελαστικών κυμάτων.

2.2. Βασικές Αρχές Λειτουργίας Υπερήχων

2.2.1. Φυσική των υπερήχων

Σύμφωνα με τη φυσική, υπέρηχος είναι μια μηχανική ταλάντωση – δόνηση της ύλης η οποία έχει συχνότητα από 20Hz έως και το ακουστικό όριο των 20kHz (βλ. Σχήμα 2.1). Είναι παρόμοιας φύσης με τον ακουστικό ήχο, έχει όμως, πολύ μικρότερα μήκη κύματος και είναι καταλληλότερος για την ανίχνευση ατελειών στα υλικά. Αυτά τα μικρότερα μήκη κύματος είναι που κάνουν τον υπέρηχο εξαιρετικά χρήσιμο για τον μη καταστροφικό έλεγχο και τον χαρακτηρισμό των υλικών και των δομών. Ο χαρακτηρισμός των υλικών με τη μέθοδο των υπερήχων χρησιμοποιεί, λοιπόν, ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας για την ανίχνευση εσωτερικών ατελειών ή βλαβών. Τα κύματα υπερήχων που χρησιμοποιούνται στον μη καταστροφικό έλεγχο ποικίλουν και η συχνότητά τους είναι πάνω από μερικές εκατοντάδες kHz.



Σχήμα 2.1: Το φάσμα του ήχου

Κατά τη διάρκεια της διάδοσης ενός υπερηχητικού κύματος τα σωματίδια ταλαντεύονται γύρω από τη θέση τους. Η ταλάντωση γίνεται κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος, δηλαδή το κύμα χαρακτηρίζεται ως διάμηκες. Το υπερηχητικό κύμα επιδρά ως απλή διαταραχή στο μέσο χωρίς να υφίσταται συνολική μετατόπιση των σωματιδίων και μεταφορά μάζας. Η ταχύτητα διάδοσης αυτής της διαταραχής εξαρτάται από το μέσο διάδοσης και δίνεται από τη σχέση:

$$C = \sqrt{\frac{1}{\rho_0 \kappa}} \quad (2.2)$$

όπου ρ_0 είναι η μέση πυκνότητα του μέσου και κ είναι η αδιαβατική συμπίεστικότητα του κενού.

Η μέθοδος των υπερήχων, στον τομέα των μη καταστροφικών ελέγχων, αποτελεί μια εξαιρετικά υψηλής αξιοπιστίας και αποτελεσματικότητας μέθοδος. Κατά την μέθοδο αυτή, ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας εισέρχονται στο υλικό για την ανίχνευση ρωγμών, ασυνεχειών και ατελειών τόσο στην επιφάνειά του όσο και στο εσωτερικό του. Τα ηχητικά κύματα καθώς διαχέονται και ταξιδεύουν στο υλικό, χάνουν ποσά ενέργειας, η οποία προσπίπτει στις διεπιφάνειες και είτε

διαχέεται είτε ανακλάται. Η ανακλώμενη ακτίνα συλλέγεται μελετάται και αναλύεται ώστε να προσδιοριστεί η ύπαρξη και η θέση μίας ατέλειας ή ασυνέχειας.

Ο βαθμός ανάκλασης που προκύπτει εξαρτάται κυρίως από τη φύση της διεπιφάνειας του υλικού καθώς και από τις φυσικές του ιδιότητες. Για παράδειγμα, τα ηχητικά κύματα ανακλώνται σχεδόν πλήρως σε διεπιφάνειες μετάλλου – αερίου και μερικώς σε διεπιφάνειες μετάλλου – υγρού ή μετάλλου – στερεού. Με αυτό τον τρόπο, ρωγμές, πολύ λεπτά στρώματα, ασυνέχειες και ατέλειες που εμπεριέχονται εντός του όγκου του υλικού και αποτελούν επιφάνειες όπου τα κύματα ή τα μικροκύματα ανακλώνται, μπορούν εύκολα να ανιχνευτούν.

Υπάρχουν πολλές κατηγορίες συσκευών υπερήχων, οι οποίες χωρίζονται με γνώμονα την τεχνολογία που χρησιμοποιούν για να φτάσουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα της ανίχνευσης βλαβών καθώς και στην εκτίμηση ιδιοτήτων του υλικού. Οι περισσότερες συσκευές υπερήχων, έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τη μέτρηση ενός ή περισσότερων παραγόντων με τους οποίους παρέχεται και η περαιτέρω γνώση και ανίχνευση των αιτιών που επηρεάζουν το σήμα εντός του υλικού. Έτσι έχουμε συσκευές οι οποίες μετρούν την ανάκλαση των κυμάτων από διεπιφάνειες που εφάπτονται σε άλλο υλικό ή τις ασυνέχειες μέσα στο υλικό και αποτελούν την πρώτη κατηγορία συσκευών ελέγχων με τη μέθοδο των υπερήχων. Η δεύτερη κατηγορία συσκευών υπερήχων βασίζεται στη μέτρηση του χρόνου διάβασης του κύματος του αντικειμένου από το σημείο εισόδου του κύματος έως το σημείο εξόδου του από το υλικό. Η επόμενη κατηγορία συσκευών αντιλαμβάνεται μέσω αισθητήρων την εξασθένηση των κυμάτων λόγω απορρόφησης ή σκέδασης στο εσωτερικό του υλικού, ενώ η τέταρτη και τελευταία κατηγορία έχει την ιδιότητα να μετρά τα χαρακτηριστικά της φασματικής εκπομπής για το εκπεμπόμενο και το ανακλώμενο σήμα.

Οι περισσότερες μετρήσεις με υπέρηχους πραγματοποιούνται σε περιοχή συχνοτήτων η οποία υπερβαίνει τη συχνότητα της ανθρώπινης ακοής (20Hz – 20KHz) και η οποία βρίσκεται μεταξύ 0,1 – 25MHz. Τα υπερηχητικά κύματα αποτελούν μηχανικές ταλαντώσεις στα μεταλλικά μέρη, τα πλάτη των οποίων, επιβάλλουν τάσεις μικρότερες κατά πολύ του ορίου ελαστικότητας, αποκλείοντας έτσι μόνιμες επιπτώσεις στη φύση και τις ιδιότητες του υλικού. Οι υπέρηχοι εκτός όμως από τον εντοπισμό ατελειών, χρησιμοποιούνται στην μέτρηση του πάχους και της διάβρωσης, στον προσδιορισμό χαρακτηριστικών δεσμού και στην εκτίμηση των φυσικών ιδιοτήτων δομής, μεγέθους, κόκκων και ελαστικών σταθερών.

2.2.2. Γενικά χαρακτηριστικά των υπερηχητικών κυμάτων

Τα κύματα των υπερήχων διαδίδονται σε ένα ρευστό ή στερεό μέσο ως μια ακολουθία από μηχανικές δονήσεις. Πρόκειται για μηχανικά ή τασικά κύματα, στην ουσία για ελαστικά κύματα

μιας και οι μετατοπίσεις που παράγουν στο υλικό είναι πολύ μικρές και βρίσκονται στην ελαστική περιοχή. Η κίνηση των σωματιδίων (δηλαδή των μορίων του υλικού) σε κάποια δεδομένη θέση x στο μέσο, είναι ταλαντωτική. Παρόλο που η γενική κυματική εξίσωση δεν περιορίζεται από γραμμικές συνθήκες και από αρμονική κίνηση σωματιδίων, καθώς η λύση της περιέχει μη γραμμικούς όρους, η κοινή χρήση των υπερήχων ως μια μη καταστροφική τεχνική περιλαμβάνει αρμονική κίνηση.

Ένα ακουστικό κύμα μέσα από κάθε δύναμη που παράγει σε ένα συνεχές μέσο, δημιουργεί δονήσεις ταλάντωσης. Οι δονήσεις αυτές διαδίδονται από το ένα σημείο στο άλλο, λόγω των ελαστικών του ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων αδράνειας, με την ταχύτητα ήχου του μέσου. Η μάζα του υλικού στοιχείου ορίζεται από τον όγκο και την πυκνότητα του μέσου. Το πλάτος της κίνησης του στοιχείου καθορίζεται από τις δυνάμεις που εφαρμόζονται σ' αυτό, τη μάζα του και τις ελαστικές συνθήκες που το περιβάλλουν. Αυτές οι αρχές είναι θεμελιώδεις και βασίζονται στις εξισώσεις της κυματικής κίνησης.

Οι τεχνικές των υπερήχων χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των ελαστικών ιδιοτήτων των υλικών και της κατάστασης της μικροδομής, εισάγοντας στο υπό έλεγχο υλικό τασικά κύματα χαμηλής έντασης και υψηλής συχνότητας. Τα κύματα υπερήχων διαδίδονται στο υλικό, αλληλοεπιδρούν με τη μικροδομή του και στη συνέχεια, ανιχνεύονται από κατάλληλους αισθητήρες. Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων υπερήχων τροποποιούνται, ενώ διασχίζουν το υλικό, εξαιτίας ανάκλασης, διάθλασης, σκέδασης και εξασθένησης. Το σήμα που ανιχνεύεται εμφανίζεται σε οθόνη, επεξεργάζεται και στη συνέχεια ερμηνεύεται σε όρους κατάστασης της εσωτερικής δομής του υλικού που ελέγχεται, με βάση την σχέση του με το αρχικό εισαγόμενο κύμα.

Παρόλο που οι τεχνικές των υπερήχων χρησιμοποιούνται εδώ και πολλές δεκαετίες για τον χαρακτηρισμό των υλικών, οι πρόσφατες εξελίξεις στα ηλεκτρονικά και τους Η/Υ έχουν καταστήσει δυνατή την απεικόνιση με υψηλή ανάλυση, καθώς και την δυνατότητα ποσοτικού προσδιορισμού των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού. Ο συνδυασμός των υπερήχων με άλλες μεθόδους ελέγχου, οδηγεί το πεδίο της μη καταστροφικής αξιολόγησης των υλικών σε εντυπωσιακές νέες δυνατότητες.

2.2.3. Αναλογία με τα κύματα στο νερό

Οι υπέρηχοι συμβατικά μπορούν να προσομοιωθούν με την συμπεριφορά των κυμάτων που δημιουργούνται στην επιφάνεια του νερού όταν κάποιο αντικείμενο πέσει πάνω σε αυτή. Τα κύματα που δημιουργούνται διαδίδονται ακτινικά και εμφανίζουν μέγιστα και ελάχιστα (όρη και κοιλάδες). Τα μόρια του νερού παραμένουν στη θέση τους και ταλαντώνονται γύρω από τη θέση

ισορροπίας τους. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών και κοιλάδων είναι το λεγόμενο μήκος κύματος, το οποίο είναι σημαντικό χαρακτηριστικό για τον προσδιορισμό του εκάστοτε κύματος. Ο αριθμός των κύκλων ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή η μετάβαση από μία κορυφή σε μία κοιλάδα και ξανά στην επόμενη κορυφή, είναι η συχνότητα του κύματος. Η ταχύτητα του κύματος και ο ρυθμός που προκαλεί μείωση στο πλάτος του κύματος καθώς και η ενέργειά του, όσο αυτό διαδίδεται, εξαρτώνται μόνο από το υλικό στο οποίο διαδίδεται. Αν, λοιπόν, αυξήσουμε την ενέργεια του αντικειμένου που ρίχνουμε στο νερό, τότε θα έχουμε ως αποτέλεσμα τα κύματα που θα παραχθούν να έχουν μεγαλύτερο πλάτος, μήκος κύματος και ενέργεια αλλά να διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα.

2.2.4. Διάδοση κύματος

Το ποσοστό διάδοσης των υπερήχων σε ένα ελαστικό μέσο είναι αρκετά υψηλό. Κατά τη διάρκεια της διάδοσης, όταν τα ατομικά ή τα μοριακά μέρη ενός μέσου απομακρυνθούν από τη θέση ισορροπίας τους, τότε αναπτύσσονται εσωτερικές τάσεις οι οποίες επιδρούν στα σωματίδια και με αυτόν τον τρόπο αποκαθίσταται η ισορροπία. Λόγω αυτής της αλλαγής των ενδοατομικών δυνάμεων μεταξύ γειτονικών μονάδων, κάθε διαφοροποίηση ή αλλαγή της θέσης προκαλεί ένα μηχανικό κύμα. Το πλάτος και η ταχύτητα διαφέρουν για τα υγρά, τα στερεά και τα αέρια, λόγω της διαφορετικής μικροσωματιδιακής δομής και κατάστασης την οποία υφίστανται. Η απόσταση των σωματιδίων επίσης, προκαλεί την επίδραση με διαφορετικό μέτρο στην έλξη μεταξύ τους και τελικά στην ελαστική συμπεριφορά των υλικών.

Η σχέση ταχύτητας και συχνότητας είναι:

$$C = f * \lambda \quad (2.3)$$

Όπου:

- c είναι η ταχύτητα (m/s)
- f είναι η συχνότητα (Hz)
- λ είναι το μήκος κύματος (m)

Οι υπέρηχοι κατηγοριοποιούνται, σύμφωνα με τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδονται με βάση την απομάκρυνση των ατόμων από τη θέση ισορροπίας τους, σε διαμήκη κύματα και σε εγκάρσια κύματα, ενώ συσχετίζοντας το μήκος κύματος και το μέσο διάδοσης κατηγοριοποιούνται σε επιφανειακά κύματα και σε κύματα Lamb.

Ένα διαδιδόμενο κύμα όταν συναντήσει ένα μέσο με διαφορετικές μέσες τιμές ακουστικών ιδιοτήτων θα ανακλαστεί μερικώς, ενώ ένα μέρος του κύματος θα συνεχίσει να διαδίδεται μέσα στο δεύτερο μέσο, πιθανώς σε μια νέα κατεύθυνση.

Κατά τη διάδοσή του μέσα στο μέσο, η ενέργειά του μειώνεται ως συνάρτηση της απόστασης. Η ενέργεια μπορεί να μεταβάλλεται λόγω ανάκλασης, σκέδασης ή απορρόφησης της από το μέσο και την μετατροπή της σε θερμότητα. Η πίεση ενός επίπεδου κύματος στη θέση z , που διαδίδεται κατά τη διεύθυνση z , μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P_z = P_{z_0} \cdot e^{-b \cdot z} \quad (2.4)$$

όπου P_{z_0} είναι η πίεση στη θέση $z = 0$ και b ο συντελεστής εξασθένησης της πίεσης.

2.2.5. Διαμήκη κύματα

Κατά τη διάδοση των διαμηκών κυμάτων στα υλικά αναπτύσσονται διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα και τα ατομικά μέρη που μεταδίδουν το κύμα δονούνται προς τα εμπρός και προς τα πίσω ακολουθώντας τη διεύθυνση με την οποία διαδίδεται το κύμα. Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται με ευκολία τόσο στα υγρά και στα αέρια, όσο και στα ελαστικά στερεά. Ενδεικτικές ταχύτητες είναι 6000m/s στον χάλυβα, 4500m/s στο σκυρόδεμα, 1500m/s στο νερό και 330m/s στον αέρα.

2.2.6. Εγκάρσια κύματα

Σε αντίθεση με τα διαμήκη, τα εγκάρσια κύματα δεν μπορούν να υποστηριχθούν από τις ελαστικές συγκρούσεις των μικροσωματιδίων εντός του υλικού. Για την διάδοσή τους είναι απαραίτητο να ασκηθεί σημαντική ελκτική δύναμη. Η ταχύτητα που διαδίδονται τα εγκάρσια κύματα για το ίδιο υλικό είναι περίπου η μισή από την ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων. Επίσης, τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο σε στερεά υλικά, ενώ ο συντονισμός διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων προκαλεί ψευτο-διαμήκη και ψευτο-εγκάρσια κύματα.

2.2.7. Επιφανειακά κύματα

Αυτά τα κύματα ταξιδεύουν κατά μήκος μιας επίπεδης επιφάνειας σε στερεά μέρη τα οποία έχουν σχετικά μεγάλο πάχος. Για την διάδοση αυτού του τύπου κύματος θα πρέπει αυτό να οδεύει κατά μήκος της επιφάνειας του κυματοδηγού, που θα χαρακτηρίζεται στην μια μεριά από τις ισχυρές ελαστικές δυνάμεις ενός στερεού και στην άλλη μεριά από τις πρακτικά αμελητέες ελαστικές δυνάμεις μεταξύ μορίων αερίου. Στην περίπτωση αυτή, το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου υπερήχου είναι πολύ μικρότερο των διαστάσεων (κυρίως του πάχους) του ακουστικού

κυματοδηγού. Η ταχύτητά τους στο ίδιο υλικό φθάνει το 90% των διαμηκών κυμάτων, ενώ και τα ίδια υφίστανται εξασθένιση μέσα στο υλικό. Η περιοχή που τα επιφανειακά κύματα διαδίδονται με αρκετή ενέργεια δεν είναι μεγαλύτερη από ένα μήκος κύματος κάτω από την επιφάνεια του μετάλλου. Σε αυτό το βάθος η ενέργεια του κύματος φθάνει το 4% της ενέργειας της επιφανείας και το πλάτος των ταλαντώσεων μειώνεται απότομα σε πολύ μικρές τιμές για μεγαλύτερο βάθος. Τα επιφανειακά κύματα ακολουθούν περιμετρικές επιφάνειες και εμποδίζονται από απότομα σύνορα όπως π.χ. τα όρια των πλευρών ενός κύβου. Αν όμως αυτά είναι στρογγυλοποιημένα τότε η διάδοσή τους συνεχίζεται κανονικά. Τέλος, τα επιφανειακά κύματα χρησιμοποιούνται για την επιθεώρηση αντικειμένων με πολύπλοκες καμπύλες.

2.2.8. Κύματα Lamb

Γνωστά και ως κύματα πλάκας, τα κύματα Lamb διαδίδονται σε πλάκες με πάχος μόνο μερικά μήκη κύματος. Το κύμα Lamb αποτελείται από μια σύνθετη ταλάντωση που λαμβάνει χώρα σε ολόκληρο το πάχος του υλικού. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του είναι η πυκνότητα, οι ελαστικές ιδιότητες, η δομή και το πάχος του δοκιμίου, καθώς επίσης και η συχνότητα. Η συμπεριφορά τους γενικότερα ομοιάζει με εκείνη που παρατηρείται στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσα από κυματοδηγούς.

Υπάρχουν δύο τύποι κυμάτων Lamb: α) τα συμμετρικά και β) τα ασύμμετρα κύματα. Η κατηγοριοποίηση εξαρτάται από το αν η κίνηση είναι συμμετρική ή ασύμμετρη ως προς τον ουδέτερο άξονα του δοκιμίου.

2.3. Εφαρμογές

2.3.1. Εφαρμογές στο Σκυρόδεμα

Η μη καταστροφική μέθοδος των υπερήχων έχει πληθώρα εφαρμογών στον τομέα των τεχνικών έργων και ειδικότερα στον έλεγχο του φάσματος των φερουσών δομών και των στοιχείων που αποτελούνται από σκυρόδεμα είτε άοπλο είτε οπλισμένο. Εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή γίνεται δυνατή η διαπίστωση της ομοιομορφίας του σκυροδέματος της κατασκευής, παράγοντας ο οποίος παίζει καθοριστικό ρόλο στην καλή λειτουργία του φέροντος οργανισμού της. Παράλληλα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εξέταση της δομής για την ύπαρξη ρωγμών, πόρων ή άλλων ανωμαλιών, στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος. Επιπροσθέτως, μπορεί να παρατηρηθούν οι αλλαγές των ιδιοτήτων του σκυροδέματος των κατασκευών με την πάροδο του χρόνου, ενώ μπορεί να υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας και η σταθερά του Poisson των δομών του σκυροδέματος,

μερικών δηλαδή εκ των μηχανικών ιδιοτήτων οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν στην εκτίμηση της αντοχής του υλικού.

2.3.2. Βασικές Αρχές

Η συσκευή των υπερήχων αποτελείται από μια γεννήτρια παραγωγής υπερηχητικών κυμάτων, δύο κρυστάλλους (ένα πομπό και ένα δέκτη) και από ένα μετρητή του χρόνου τον οποίο χρειάζεται ο υπέρηχος για να διανύσει το προς εξέταση δοκίμιο σκυροδέματος. Αν το πάχος του δοκιμίου είναι ίσο με L και ο χρόνος που χρειάζεται το υπερηχητικό κύμα για να το διανύσει, ισούται με T , τότε η ταχύτητα των υπερήχων V (σε km/sec) δίνεται από τον τύπο:

$$V = L/T \quad (2.7.)$$

Το υπερηχητικό κύμα δημιουργείται από έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο ο οποίος είναι σε επαφή με την επιφάνεια του στοιχείου που εξετάζεται. Για την επίτευξη της επαφής του κρύσταλλου και της επιφάνειας, χρησιμοποιείται κάποιο μέσο το οποίο παίζει τον ρόλο του υλικού σύζευξης των δύο επιφανειών. Κατά την διάδοση του παλμού στο υλικό, εκτελούνται πολλαπλές διαθλάσεις στα σύνορα των διαφόρων φάσεων των επιμέρους υλικών, δηλαδή στα σημεία που συναντώνται αλλαγές της ομοιομορφίας του υλικού.

Αποτέλεσμα των διαθλάσεων αυτών είναι η ανάπτυξη ενός σύνθετου συστήματος κυμάτων έντασης από διαμήκη και εγκάρσια κύματα. Τα πρώτα κύματα που φτάνουν στο δεύτερο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο του δέκτη μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μέτρηση του χρόνου που χρειάστηκε ο παλμός για να επιστρέψει.

Οι μετρήσεις με τη μέθοδο των υπερήχων στο σκυρόδεμα μπορούν να πραγματοποιηθούν με τρεις επιμέρους μεθόδους εφαρμογής, σε αναλογία με τις συνθήκες που παρουσιάζονται και το αποτέλεσμα το οποίο θέλουμε να εξάγουμε.

Η πρώτη μέθοδος εφαρμογής των υπερήχων είναι η τοποθέτηση των δύο κρυστάλλων σε δύο αντικριστές πλευρές του προς εξέταση δοκιμίου (direct or through transmission). Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται και ως περισσότερο ακριβής από τις άλλες δύο μεθόδους στη μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων, διότι τοποθετώντας τους κρυστάλλους αντικριστά επιτυγχάνεται η μεταφορά μέγιστης ενέργειας από τον πομπό στον δέκτη, ενώ ταυτόχρονα η πορεία που διανύει το κύμα περιλαμβάνει όλο το μήκος του δομικού στοιχείου.

Ο δεύτερος τρόπος εφαρμογής των υπερήχων περιλαμβάνει την τοποθέτηση των δύο κρυστάλλων σε δύο κάθετες μεταξύ τους πλευρές (semi – direct transmission). Η ακρίβεια των μετρήσεων με αυτόν τον τρόπο, παρουσιάζεται μειωμένη, καθώς είναι δύσκολο να προσδιοριστεί επακριβώς η

πορεία που διατρέχει το ηχητικό κύμα εντός της μάζας του σκυροδέματος, πράγμα που καθιστά δύσκολο και τον προσδιορισμό του μήκους L . Για απλούστευση λοιπόν της διαδικασίας θεωρείται ότι το μήκος L που διανύει το κύμα είναι ίσο με την απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο κρυστάλλων.

Αν οι προαναφερθέντες τρόποι μέτρησης δεν μπορούν να εφαρμοστούν για οποιονδήποτε λόγο, τότε οι κρύσταλλοι τοποθετούνται στην μοναδική προσιτή πλευρά του δομικού στοιχείου (indirect or surface transmission). Αυτός ο τρίτος τρόπος χρησιμοποιείται όταν είναι προσιτή η μια μόνο πλευρά του προς εξέταση στοιχείου ή όταν αναζητείται το βάθος μιας επιφανειακής ρωγμής, καθώς και όταν υπάρχουν υποψίες για διαφοροποίηση της ποιότητας του σκυροδέματος από την επιφάνεια προς το κέντρο του στοιχείου.

2.3.3. Χρήση Λιπαντικών Ουσιών

Για να βεβαιωθούμε ότι τα υπερηχητικά κύματα που διοχετεύονται από τον κρύσταλλο πομπό, περνούν στο σύνολό τους μέσα στην μάζα του σκυροδέματος, τοποθετούμε μεταξύ των κρυστάλλων και του σκυροδέματος μια λιπαντική ουσία, η οποία καλύπτει τις ατέλειες της εξωτερικής επιφάνειας του στοιχείου (16-19). 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 ό,τι 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 καθαρισμός και λείανση των επιφανειών με την χρήση ηλεκτρικού περιστροφικού σμυριδόπανου.

Κεφάλαιο 3^ο: Φύση των Υλικών – Σκυρόδεμα

3.1. Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό παγκοσμίως (20) και αυτό οφείλεται σε ευμενείς παράγοντες που το χαρακτηρίζουν. Το σκυρόδεμα είναι ένα εύπλαστο υλικό με το οποίο παρέχεται η δυνατότητα κατασκευής ποικίλων σχημάτων, μορφών και μεγεθών, με χαμηλό κόστος παραγωγής. Πλεονέκτημα του σκυροδέματος, έναντι άλλων κατασκευαστικών υλικών, είναι η υψηλή διαθεσιμότητά του και οι μηχανικές του ιδιότητες. Το σκυρόδεμα διακατέχεται από εξαιρετικά ανομοιογενή και πολύπλοκη δομή καθώς αποτελείται από τσιμέντο, αδρανή υλικά (χαλίκι, γαρμπίλι, άμμος) και νερό, τα οποία αναμιγνύονται μεταξύ τους. Αμέσως μετά την ανάμειξη, το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται σαν μια πάστα, ένα παχύρευστο, δηλαδή, υγρό με αιωρούμενους κόκκους υλικών που με την πάροδο του χρόνου, με κατάλληλη ενυδάτωση και χημική αντίδραση στο εσωτερικό του, μετατρέπεται σε πορώδες στερεό υλικό.

Κατά τη διαδικασία της σκλήρυνσης του σκυροδέματος δημιουργούνται στο εσωτερικό του κρύσταλλοι ένυδρων ενώσεων που γεμίζουν το χώρο που καλυπτόταν από νερό και από κόκκους τσιμέντου (20, 21). Οι αναλογίες των συστατικών που το αποτελούν είναι αυτές που προσδίδουν στο σκυρόδεμα τις τελικές ιδιότητές του και χαρακτηρίζουν την απόδοση του ως φέρον υλικό. Το νερό και οι αναλογίες του προς το τσιμέντο κατά μάζα (w/c περίπου 0.23) είναι στοιχειομετρικά απαραίτητα για την αντίδραση της ενυδάτωσης. Οι κρύσταλλοι που δημιουργούνται από αυτή την διαδικασία, καθώς αυξάνονται, μετατρέπονται σε ενιαίο δίκτυο, προσδίδοντας δυσκαμψία στο υλικό.

Το νερό κατά τη διάρκεια της αντίδρασης της ενυδάτωσης δεσμεύεται χημικά και αφήνει κενό δίκτυο πορώδους. Όπως γίνεται αντιληπτό, η περίσσεια νερού στο νωπό σκυρόδεμα οδηγεί σε αυξημένο πορώδες με δυσμενείς συνθήκες στην αντοχή αλλά και την ανθεκτικότητά του μακροπρόθεσμα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας διαβρωτικών παραγόντων οι οποίοι διεισδύουν και υποβαθμίζουν τις ιδιότητες του ίδιου του σκυροδέματος αλλά και του μεταλλικού οπλισμού.

Η σχέση επίδρασης της αναλογίας νερού προς τσιμέντο (w/c) στην αντοχή του σκυροδέματος είναι αντικείμενο μελέτης πολλών δεκαετιών καθότι θεωρούνται αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη (20, 22). Αποτελέσματα πολλών πειραματικών μελετών καταδεικνύουν ότι ένα σκυρόδεμα με υψηλό w/c , έχοντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους του, εμφανίζει χαμηλότερη θλιπτική αντοχή (23–26). Επιπροσθέτως, είναι πιθανό να επηρεαστούν δυσμενώς η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, η επιφάνεια σκληρότητας και η ενέργεια θραύσης του σκυροδέματος (25–26).

Παρόλο που η αντοχή του σκυροδέματος αναπτύσσεται με το χρόνο, δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί η τελική του αντοχή και η εν γένει απόδοσή του σε μια κατασκευή. Η αντοχή του σκυροδέματος μπορεί να μετρηθεί με θλιπτικές δοκιμές σε δείγματα (δοκίμια) με υλικό το οποίο λήφθηκε την μέρα της σκυροδέτησης μιας κατασκευής και το οποίο πρέπει να φυλαχθεί σε κατάλληλες συνθήκες για 28 μέρες. Με την λήψη και την μέτρηση της θλιπτικής αντοχής, τα δοκίμια αυτά μπορούν να δώσουν πολύτιμες πληροφορίες για την ποιότητα του σκυροδέματος της κατασκευής, με το μειονέκτημα ότι ο έλεγχος αυτός γίνεται 28 μέρες αφού σκυροδετήθηκε η κατασκευή και κατά συνέπεια είναι πλέον αργά σε περιπτώσεις που έχει συμβεί σφάλμα στο σκυρόδεμα να διορθωθεί. Εφόσον εξασφαλιστεί ότι το υλικό περιέχει τη σωστή αναλογία των επιμέρους συστατικών και τηρηθούν οι απαιτούμενες διαδικασίες δεν υπάρχει σοβαρή πιθανότητα οι τελικές ιδιότητες να μην είναι ικανοποιητικές (29–30). Στην πραγματικότητα, η αποδοχή ή όχι του νωπού υλικού στο εργοτάξιο στηρίζεται στη δοκιμή κάθισης (ASTM C143). Η κάθιση συσχετίζεται με την περιεκτικότητα σε νερό (24), χωρίς η σχέση αυτή να είναι σαφής και αξιόπιστη, αποτελώντας απλά και μόνο μία ένδειξη καταλληλότητας.

3.1.1. Δομή του Σκυροδέματος

Η δομή του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά ανομοιογενής και περίπλοκη, γι' αυτό και χρειάστηκαν πολλά χρόνια μελετών και πειραματικών διατάξεων, ώστε να γίνει αντιληπτή και κατανοητή η σχέση δομής και ιδιοτήτων του υλικού. Η κατανόηση των βασικών στοιχείων της δομής του σκυροδέματος θεωρείται ιδιαίτερα απαραίτητη για να εντοπισθούν και να εξηγηθούν οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τις σημαντικότερες ιδιότητες του (αντοχή, ελαστικότητα, συστολή, ερπυσμός, ρηγμάτωση, ανθεκτικότητα σε διάρκεια).

Μια απλή οπτική εξέταση του υλικού δείχνει ότι το σκυρόδεμα αποτελείται από αδρανή υλικά (άμμο, χαλίκι, σκύρα) διαφόρων σχημάτων και μεγεθών, που είναι συγκολλημένα μεταξύ τους και που περιβάλλονται από ενυδατωμένο τσιμεντοπολτό¹. Η πολυπλοκότητα της δομής του σκυροδέματος αποκαλύπτεται σε μικροσκοπικό επίπεδο, μέσω παρατήρησης από ηλεκτρονικό οπτικό μικροσκόπιο, καθώς επιτυγχάνεται η απαραίτητη μεγέθυνση. Μέσω της παρατήρησης σε μικροσκοπικό επίπεδο, διακρίνεται και μια τρίτη φάση, η μεταβατική ζώνη, η οποία αντιπροσωπεύει την περιοχή της διεπιφάνειας μεταξύ των μεγάλων αδρανών υλικών και του τσιμεντοπολτού και έχει πάχος 10 – 50μm περίπου. Η ζώνη αυτή είναι γενικά ασθενέστερη από τα προαναφερθέντα συστατικά του σκυροδέματος και επηρεάζει σημαντικότερα την μηχανική συμπεριφορά του.

¹ Τσιμεντοπολτός είναι το προϊόν της αντίδρασης του νερού με το τσιμέντο.

Επιπλέον, η κάθε μια από τις παραπάνω τρεις φάσεις είναι από την φύση της πολυφασική. Για παράδειγμα, τα αδρανή υλικά αποτελούνται από διάφορα ορυκτά, μικρορωγμές και κενά, ενώ ο τσιμεντοπολτός αλλά και η μεταβατική ζώνη αποτελούνται από διάφορα στερεά σωματίδια, πόρους και μικρορωγμές. Τέλος, η δομή του σκυροδέματος δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται με το χρόνο, την υγρασία του περιβάλλοντος και την θερμοκρασία. Οι διάφορες φάσεις της δομής του σκυροδέματος περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω, ενώ περισσότερες λεπτομέρειες ειδικά για τα αδρανή και το τσιμέντο δίνονται σε επόμενες ενότητες.

3.2. Εφαρμογή ΜΚΕ – Προσδιορισμός Χαρακτηριστικών του Σκυροδέματος

3.2.1. Οπτική Επιθεώρηση στο Σκυρόδεμα

Ο οπτικός έλεγχος και η οπτική επιθεώρηση είναι από τις πιο χρήσιμες διαδικασίες διερεύνησης και εκτίμησης ζημιών της υφιστάμενης κατάστασης φερόντων και μη στοιχείων από σκυρόδεμα. Οι φθορές που προκαλεί ο σεισμός (ρωγμές, θραύση και εμφάνιση των επιμέρους στρωμάτων του σκυροδέματος, μόνιμες πλευρικές μετατοπίσεις και λυγισμός ή και θραύση του οπλισμού του μέλους,) στο σκυρόδεμα και στην τοιχοποιία τις περισσότερες φορές είναι ορατές στην επιφάνεια του. Η οπτική επιθεώρηση λοιπόν είναι ιδιαίτερος χρήσιμη και στην εκτίμηση της κλίσης λαμβάνοντας ως σημείο αναφοράς το υφιστάμενο κτίριο.

Η οπτική επιθεώρηση είναι συνήθως ο πρώτος έλεγχος που εφαρμόζεται στη καθημερινότητα για την εκτίμηση ζημιών, όμως συνοδεύεται πάντα από άλλες περισσότερο αξιόπιστες μεθόδους ελέγχου. Τα στοιχεία που προκύπτουν από την οπτική επιθεώρηση κάποιου στοιχείου χρησιμοποιούνται ως βάση για τον καθορισμό των θέσεων που ευνοούν την διεξαγωγή περαιτέρω ελέγχων. Τα αποτελέσματα του οπτικού ελέγχου μπορούν να αποτυπωθούν και να δώσουν χρήσιμα στοιχεία για τον τύπο μιας φθοράς. Έτσι μπορεί να εκτιμηθεί τι επίδραση είχε η δράση στο στοιχείο και πως αυτό συμπεριφέρθηκε κατά τη διάρκεια της καταπόνησής του.

Παρά την ευκολία που παρέχει η οπτική επιθεώρηση στην επίβλεψη ζημιών και ατελειών υπάρχουν περιπτώσεις που η μορφολογία μερών και στοιχείων υπό εξέταση εμποδίζει την ακριβή εκτίμηση κάποιας ζημιάς.

3.2.2. Ηχητικός έλεγχος στο Σκυρόδεμα

Ο ηχητικός έλεγχος επιτυγχάνεται μελετώντας τον τρόπο με τον οποίο διαδίδεται ένα ηχητικό κύμα υπό μορφή δόνησης – παλμού στο μέσο που εξετάζεται. Η διαδικασία αυτή φανερώνει κενά και αλλαγές στα στρώματα των επιμέρους υλικών του σκυροδέματος. Ο ηχητικός έλεγχος

βασίζεται στην παραδοχή ότι ο ήχος που παράγεται από ένα συμπαγές στοιχείο διαφέρει από τον ήχο ενός στοιχείου με κενά και στρωματώσεις.

Η μέθοδος του ηχητικού ελέγχου περιορίζεται στα αποτελέσματα καθώς αυτά επηρεάζονται από τις ιδιότητες του δομικού στοιχείου όπως είναι η γεωμετρία και η πυκνότητά του. Για καλύτερα αποτελέσματα απαιτείται ομοιομορφία του στοιχείου που εξετάζεται. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την ικανότητα του τεχνικού που διεξάγει τον έλεγχο και το μέγεθος της ζημιάς του στοιχείου. Η ύπαρξη ρωγμών σε μεγάλο βάθος απαιτεί τη χρήση άλλων μη καταστροφικών ελέγχων. Ο ηχητικός έλεγχος δεν μπορεί να καθορίσει το βάθος των θραύσεων ή των στρωματώσεων.

3.2.3. Έλεγχος κρούσης

Ο ήχος που παράγεται από την κρούση ενός αντικειμένου πάνω σε μια επιφάνεια σκυροδέματος είναι ικανός να ανιχνεύσει τις ασυνέχειες της μάζας του. Η κρούση αυτή εισάγει έναν ενεργειακό παλμό στο υλικό, ενώ ο παλμός αυτός ανακλάται πίσω, λόγω κάποιας ασυνέχειας του υλικού, με την ταχύτητα του κύματος. Μια συσκευή μετατροπής του σήματος, τοποθετημένη στην επιφάνεια που κρούεται, καταγράφει τις ανακλάσεις της ενέργειας και το σήμα της συσκευής μετατρέπεται σε συχνότητα. Από τις μετρήσεις της συχνότητας εκτιμάται η πυκνότητα του υλικού, το μέγεθος και η θέση της ασυνέχειας στο στοιχείο. Η ακρίβεια του ελέγχου καθορίζεται εν μέρει από τον τύπο, την ευαισθησία και την συχνότητα της συσκευής μετατροπής σήματος (κρουσίμετρο). Η τεχνική της μεθόδου αυτής εφαρμόζεται εκτεταμένα στο σκυρόδεμα.

3.2.3.1 Κρουσίμετρο στο Σκυρόδεμα

Το κρουσίμετρο αποτελεί συσκευή εκτίμησης της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος με πρόσκρουση της συσκευής του κρουσίμετρου στην επιφάνεια, η οποία λειτουργεί σαν ένα βαθμονομημένο σφυρί. Το μέγεθος της αναπήδησης του σφυριού μετράται και είναι αυτό που προσδιορίζει την αντοχή του σκυροδέματος.

Το κρουσίμετρο, παρόλο που δεν μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια την αντοχή, είναι χρήσιμο, καθώς προσδιορίζει την ομοιομορφία των υλικών. Απαραίτητο, βέβαια, είναι να γίνονται αρκετές βαθμονομήσεις σε αυτό. Η αντοχή του σκυροδέματος προσδιορίζεται από τους πίνακες των κατασκευαστών, όμως, με την λήψη και τον έλεγχο των πυρήνων σε κρίσιμες επιλεγμένες θέσεις, επακολουθούν καλύτερα αποτελέσματα. Τα δείγματα, ή αλλιώς δοκίμια, υποβάλλονται σε συνεχή διαδικασία θλίψης. Έτσι, λοιπόν, οι μετρήσεις που έχουν προκύψει από τις άλλες θέσεις του κρουσίμετρου τίθενται σε συσχέτισμό με αυτές της θέσης λήψης των πυρήνων.

Η ποιότητα του σκυροδέματος στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ορθότητα των αποτελεσμάτων του ελέγχου του κρουσίμετρου. Οι μετρήσεις οφείλουν να γίνονται σε λείες επιφάνειες σκυροδέματος και όχι σε επιφάνειες με τελειώματα και σε κατάλληλες συνθήκες υγρασίας. Το κρουσίμετρο μπορεί να προκαλέσει μια επιφανειακή παραμόρφωση στο στοιχείο, γι' αυτό είναι σημαντικό οι μετρήσεις να μην γίνονται στο ίδιο σημείο καθώς η πρώτη κρούση είναι πιθανόν να επηρεάσει την επιφάνεια του στοιχείου και άρα και τα αποτελέσματα των επομένων.

Στην περίπτωση χρήσης του κρουσίμετρου σε τοιχοποιία, θα πρέπει αυτό να τοποθετείται στο κέντρο του στοιχείου. Οι εκτιμήσεις των ελέγχων στην τοιχοποιία οφείλουν να λαμβάνουν υπόψη τις τιμές αντοχής του στοιχείου, συμπεριλαμβανομένου και του ασβεστοκονιάματος (σοβάς). Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι πολύ χρήσιμη για την εκτίμηση της αντοχής του εξωτερικού φλοιού ενός στοιχείου, αποτελούμενου από πολλά στρώματα.

3.2.4. Εξόλκευση ήλου

Για την εφαρμογή της μεθόδου της εξόλκευσης ήλου, χρησιμοποιείται μια συσκευή η οποία καρφώνει έναν ήλο ή πιο απλά ένα ειδικό καρφί μήκους 4cm και διαμέτρου 4mm στο σκυρόδεμα. Με το πέρας χρόνου 10min, ο ήλος εξολκεύεται με εξολκέα, ο οποίος λειτουργεί σαν δυναμόμετρο. Έτσι μετριέται η μέγιστη δύναμη που απαιτείται για την έξοδο του καρφιού από το σκυρόδεμα. Έπειτα, με τη βοήθεια ειδικών διαγραμμάτων προσδιορίζεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Η μέθοδος αυτή έχει μεγάλη εφαρμογή στην Ελλάδα.

3.2.5. Φασματική ανάλυση επιφανειακών κυμάτων

Η φασματική ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων είναι μια μέθοδος μέτρησης των κυμάτων που αναπαράγονται στην επιφάνεια ενός στοιχείου σε ένα μεγάλο εύρος μήκους κύματος. Ειδικοί μετρητές (επιταχυνσιογράφοι) μετρούν τις ταχύτητες των κυμάτων και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται αξιολογούνται. Έτσι εκτιμάται η πυκνότητα του υλικού και ο προσδιορισμός του μεγέθους και της θέσης των ασυνεχειών, όπως είναι οι ρωγμές, τα κενά και στρωματώσεις εντός του στοιχείου. Η μέθοδος της φασματικής ανάλυσης απαιτεί πολύπλοκο εξοπλισμό και βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε πεζοδρόμια, πλακάκια και άλλες οριζόντιες επιφάνειες.

3.2.6. Χρήση Radar

Η συσκευή του ραντάρ χρησιμοποιεί ένα πομπό ο οποίος εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαπερνούν το υλικό και στη συνέχεια λαμβάνονται από μία κεραία. Καθώς τα κύματα διαπερνούν το υλικό, επηρεάζονται από την διηλεκτρική σταθερά και την αγωγιμότητα του υλικού. Έτσι, ανιχνεύονται διαφοροποιήσεις και ασυνέχειες. Επίσης, αυτή η μέθοδος δύναται να ανιχνεύσει τη θέση των ράβδων οπλισμού.

3.2.7. Ραδιογραφία

Η μέθοδος της ραδιογραφίας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης του μεταλλικού οπλισμού στο εσωτερικό του σκυροδέματος και της τοιχοποιίας. Για την εφαρμογή της μεθόδου εκπέμπεται ακτινοβολία διαμέσου του υλικού. Με την βοήθεια ενός ραδιογραφικού φιλμ το οποίο τοποθετείται απέναντι από την πλευρά από την οποία εκπέμπεται η ακτινοβολία, καταγράφεται η πυκνότητα των ακτινών που εξέρχονται από το στοιχείο. Έτσι αποτυπώνεται στο φιλμ η θέση των ράβδων του οπλισμού καθώς και άλλων ασυνεχειών.

Η μέθοδος της ραδιογραφίας βασίζεται στην απελευθέρωση ραδιενέργειας. Για τον λόγο αυτό στον χώρο εφαρμογής της μεθόδου πρέπει να βρίσκεται μόνο το εξειδικευμένο προσωπικό που διεξάγει τον έλεγχο. Η ύπαρξη ραδιενέργειας απαιτεί, λοιπόν, την εκκένωση του χώρου, αλλά πολλές φορές απαιτεί και την εκκένωση μεγαλύτερης έκτασης, η οποία εξαρτάται από τον τύπο του ραδιενεργού ισότοπου που χρησιμοποιείται και από το πάχος του στοιχείου. Παχύτερα στοιχεία απαιτούν μεγαλύτερη διάρκεια έκθεσης στην ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να ελευθερώνεται μεγαλύτερη ποσότητα ραδιενέργειας.

Ο εξοπλισμός των ακτινών είναι ακριβός και οι διαθέσιμοι στο εμπόριο μπορούν να διαπεράσουν στοιχεία με πάχος 305mm ή 12in. Η παρουσία του χάλυβα στο σκυρόδεμα δημιουργεί μια σκιά στο φιλμ, δίνοντας έτσι την θέση του οπλισμού. Το εύρος της σκιάς εξαρτάται από την απόσταση της ράβδου οπλισμού από την πρόσοψη που έχει τοποθετηθεί η πηγή της ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό προσδιορίζεται η θέση αλλά όχι το μέγεθος των ράβδων οπλισμού.

3.2.8. Χρήση Υπερήχων

Με την μέθοδο των υπερήχων μετράται ο χρόνος μεταφοράς ενός υπερηχητικού παλμού διαμέσου της συνοχής (πυκνότητας) του στοιχείου. Η ποιότητα και η συνέχεια του υλικού ή ακόμα και η παρουσία ρωγμής ή ζημιάς, επηρεάζουν την ταχύτητα μεταφοράς του κύματος διαμέσου του στοιχείου. Για την εκτίμηση της σχετικής αντοχής του σκυροδέματος ή της τοιχοποιίας συγκρίνεται ο σχετικός χρόνος μεταφοράς σε διαφορετικά τμήματα γνωστής πυκνότητας.

Η τοποθέτηση των ακροδεκτών εκατέρωθεν του στοιχείου αποτελεί προϋπόθεση για την μέτρηση της ταχύτητάς του. Γενικά, οι επιφάνειες του στοιχείου πρέπει να είναι σχετικά λείες και οι τραχιές πρέπει να λειαίνονται ώστε να λειτουργούν οι ακροδέκτες. Στην περίπτωση ύπαρξης κενών αέρος μεταξύ του ακροδέκτη και της επιφάνειας του στοιχείου, ο χρόνος που ο παλμός εκτελεί τη διαδρομή εντός του στοιχείου αυξάνεται, με αποτέλεσμα να έχουμε διαφορές στις τιμές των ενδείξεων.

Τα αποτελέσματα, επίσης, επηρεάζονται από την ύπαρξη μεταλλικών ράβδων οπλισμού εντός του σκυροδέματος, οι οποίες έχουν προσανατολισμό στην διεύθυνση κίνησης των παλμών. Αυτό συμβαίνει διότι οι υπέρηχοι κινούνται διαμέσου του χάλυβα με μεγαλύτερη ταχύτητα απ' ό,τι στο σκυρόδεμα.

Η χρήση της μεθόδου των υπερήχων εφαρμόζεται κατά κόρων στο σκυρόδεμα με υψηλά ποσοστά επιτυχίας στον προσδιορισμό αντοχής και βλαβών. Η προσπάθεια αυτή είναι αποτέλεσμα της ανάγκης για εκτίμηση της καταλληλότητας των κατασκευών και του ελέγχου των υλικών που την αποτελούν ώστε να διαπιστωθεί η εντατική τους κατάσταση, αφού η υποβάθμιση των φερόντων στοιχείων μιας κατασκευής είναι πιθανό να οδηγήσει σε εκτεταμένες βλάβες, ακόμα και σε κατάρρευση με συνέπεια την ύπαρξη ανθρώπινων απωλειών. Εκτός αυτού μια γερασμένη κατασκευή με μειωμένες αντοχές είναι σε πολλές περιπτώσεις ασύμφορη λόγω του υψηλού οικονομικού κόστους συντήρησης και επισκευής της. Εφόσον, όμως, εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα για την κατάστασή της, τότε είναι δυνατή η επιλογή των οικονομικά και τεχνικά κατάλληλων ενεργειών σχετικά με την επιδιόρθωσή της (31). Παρόλο που το σκυρόδεμα είναι αξιόπιστο υλικό και ευρέως διαδεδομένο, η ίδια η φύση του υλικού, δεν επιτρέπει σαφείς προβλέψεις για την μετέπειτα απόδοσή του. Συνήθως συνοδεύεται με ενίσχυση χάλυβα που βελτιώνει και αυξάνει κυρίως την χαμηλή εφελκυστική και καμπτική αντοχή του σκυροδέματος. Η παραγωγή του χάλυβα, όμως, γίνεται σε προσεκτικά ελεγμένες συνθήκες και οι ιδιότητές του είναι εγγυημένες από πιστοποιητικό της βιομηχανίας. Η ποιότητα του τσιμέντου εξασφαλίζεται με τον ίδιο τρόπο και σπάνια αυτό το συστατικό αποτελεί πρόβλημα της κατασκευής. Ωστόσο το σκυρόδεμα, και όχι το τσιμέντο, είναι το δομικό υλικό. Τα δομικά στοιχεία συνήθως κατασκευάζονται στο εργοτάξιο και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την διαδικασία της παρασκευής σκυροδέματος και της σκυροδέτησης (20). Είναι, λοιπόν, κατανοητό γιατί ο έλεγχος του σκυροδέματος είναι αναγκαίος και έχει υιοθετηθεί εδώ και πολλές δεκαετίες.

Η κυματική διάδοση είναι άμεσα επηρεαζόμενη από τις ελαστικές ιδιότητες, την πυκνότητα και την γενική κατάσταση του υλικού στο οποίο γίνεται η διάδοση. Ως εκ τούτου, η σχέση της ταχύτητας διάδοσης υπερηχητικού παλμού με την αντοχή σκυροδέματος έχει μελετηθεί εκτενώς

(23, 32–36). Εκτός από τα διαμήκη κύματα, σε περιπτώσεις που η πρόσβαση σε δύο απέναντι πλευρές του δοκιμίου ή του στοιχείου για μέτρηση κατά το πάχος δεν είναι εφικτή, μπορεί να γίνει χρήση επιφανειακών κυμάτων (37). Επιπλέον, γίνεται εκτίμηση των ελαστικών ιδιοτήτων, δηλαδή του μέτρου ελαστικότητας, της πυκνότητας και του λόγου Poisson (35, 38–39), αφού οι ιδιότητες αυτές συνδέονται άμεσα με την ταχύτητα διάδοσης στο μέσο.

Ανιχνεύσιμη επίδραση έχει και το ποσοστό υγρασίας αφού η ταχύτητα διάδοσης μετριέται ανάλογα με αυτή, λόγω πιθανότατα της πλήρωσης των κενών πόρων που διευκολύνουν την κυματική διάδοση (40, 41). Το πορώδες έχει και αυτό σημαντική επίδραση στην τιμή της ταχύτητας υπερήχων (42) μειώνοντας αισθητά την τιμή της έως και 500m/s για διαφορά πορώδους περίπου 7% (28, 43).

Κατά τον ίδιο τρόπο επιδρά και η κατανεμημένη βλάβη στην κυματική διάδοση περιορίζοντας την ταχύτητα και το εύρος του σήματος αφού ο παλμός δεν διαδίδεται μέσω του κενού των ρωγμών. Έχει διαπιστωθεί ότι η αυξανόμενη βλάβη, επηρεάζει αρνητικά το μέτρο ελαστικότητας και την ταχύτητα παλμού. Ωστόσο, η μείωση του εύρους του σήματος είναι πολύ πιο σημαντική από αυτήν της ταχύτητας όπως έχει δείχθει από μετρήσεις μετά από κύκλους ψύξης – απόψυξης (29, 30) ενώ το ίδιο ισχύει και κατά τη διάρκεια φόρτισης του υλικού, λόγω της ανάπτυξης μικρορωγμών (27, 33). Η πτώση του εύρους του παλμού είναι ανιχνεύσιμη αρκετά πριν από το τελικό στάδιο φόρτισης σε αντίθεση με την ταχύτητα (46, 47) και ως εκ τούτου η χρήση του υπόσχεται περισσότερα όσον αφορά στην έγκαιρη διάγνωση βλάβης.

Εφαρμογή της μεθόδου των υπερήχων είναι και η παρακολούθηση της ενυδάτωσης του σκυροδέματος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο ρυθμός με τον οποίο το σκυρόδεμα αναπτύσσει την αντοχή του ακόμα και μετά την πήξη. Συγκεκριμένα η ταχύτητα διάδοσης του παλμού στο υλικό, αυξάνεται με την ηλικία (23), όπως περίπου και η αντοχή (33–35), ενώ η παρατήρηση έχει γίνει με την χρήση κυρίως διαμηκών αλλά και διατμητικών κυμάτων (42). Εκτός από την ταχύτητα, και τα άλλα χαρακτηριστικά του κύματος, όπως ο αριθμός υπερβάσεων κατωφλίου (48) το εύρος και η ενέργεια του παλμού δείχνουν αντίστοιχη συμπεριφορά.

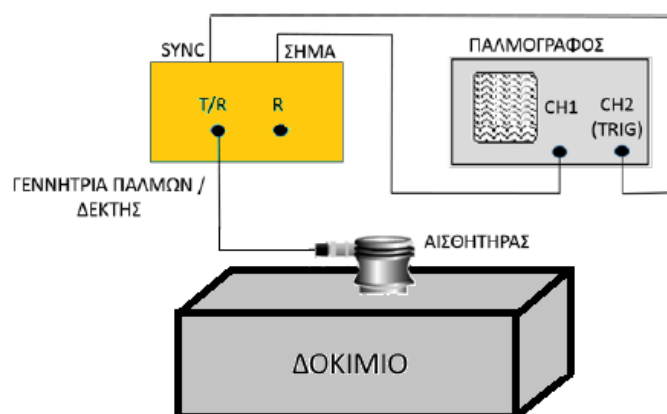
Σε όλες τις παραπάνω εργασίες, υφίσταται συσχέτιση των παραμέτρων τασικού παλμού με τις διάφορες ιδιότητες του σκυροδέματος. Αυτό οφείλεται στο ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή έχουν παρόμοια επίδραση και στην κυματική διάδοση. Αυτή η σχέση, όμως, δεν είναι απολύτως συγκεκριμένη καθιστώντας τα τελικά αποτελέσματα ποιοτικά και όχι ποσοτικά. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι με βάση τον κανονισμό μετρήσεων υπερήχων σε σκυρόδεμα κατά ASTM (C 597) η εκτίμηση της αντοχής γίνεται με ακρίβεια 20% σε εργαστηριακές συνθήκες, ενώ η ακρίβεια σε συνθήκες εργοταξίου είναι ακόμα χαμηλότερη (31). Έτσι, λοιπόν,

παρά την ύπαρξη πολυάριθμων κανονισμών για τον έλεγχο σκυροδέματος με υπερήχους (π.χ. ASTM C597, DIN/ ISO 8047, BS 1881, RILEM 1 1972) πρέπει να διατηρείται σοβαρή επιφύλαξη για τον υπολογισμό της αντοχής. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιείται ο όρος εκτίμηση της αντοχής και όχι μέτρηση. Είναι, λοιπόν, επιτακτική η ανάγκη να ενισχυθεί ο έλεγχος του σκυροδέματος, με χαρακτηριστικά εκτός της «ταχύτητας παλμού», η οποία υπολογίζεται με βάση την απόσταση μεταξύ των αισθητήρων και του ηλεκτρονικά μετρούμενου χρόνου διάδοσης, αλλά και με τη χρήση προηγμένων μεθόδων ανάλυσης σημάτων (49). Επιπρόσθετα, είναι εύλογος ο συνδυασμός της μεθόδου των υπερήχων με κάποια άλλη μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου ή ημί – καταστροφικού ελέγχου όπως η λήψη πυρήνων και η εξώλκευση ήλου.

Στο πλαίσιο της διατριβής αυτής, μεταξύ των άλλων, παρουσιάζονται αποτελέσματα μιας πειραματικής σειράς μετρήσεων υπερήχων κατά το πάχος σε κυβικές διατομές υποστρωμάτων 300mm, σκληρυσμένου σκυροδέματος σε υφιστάμενο κτίριο του έτους 1955. Επιχειρείται να προσδιοριστεί και να εκτιμηθεί η αντοχή του σκυροδέματος των φερόντων στοιχείων του κτιρίου ώστε να καταστεί δυνατή η ενίσχυση τους και η αλλαγή χρήσης του κτιρίου από παλαιό ξενώνα του Ιερού Προσκυνηματος του Ευαγούς Ιδρύματος του Οσίου Ιωάννου του Ρώσου στο Νέο Προκόπιο της Εύβοιας σε Μουσείο Μικρασιατικού Πολιτισμού. Παράλληλα, με την πειραματική διάταξη του ελέγχου των υπερήχων επιχειρείται η διερεύνηση και η επαλήθευση παλαιότερης σειράς ελέγχου στο παρόν κτίριο με μη καταστροφικούς και ημί – καταστροφικούς ελέγχους τους οποίους πραγματοποίησε πιστοποιημένο συνεργείο μελετητών. Οι δύο σειρές αποτελεσμάτων με τη μέθοδο των υπερήχων συγκρίνονται και αναλύονται για τον προσδιορισμό παραγόντων των τυχών αποκλίσεων των αποτελεσμάτων των δύο σειρών ελέγχων.

3.3. Πειραματική διάταξη

Το βασικό διάγραμμα ενός συστήματος ελέγχου με υπέρηχους εικονίζεται στο Σχήμα 3.1:



Σχήμα 3.1: Σχηματικό Διάγραμμα συστήματος μέτρησης και απεικόνισης δοκιμών υπερήχων

Το σύστημα αποτελείται από τέσσερα κύρια τμήματα τα οποία είναι:

- Γεννήτρια παλμών / δέκτης υπερήχων, η οποία συνήθως συνδέεται με σύστημα Η/Υ. Στη γεννήτρια συνήθως περιλαμβάνεται ένας χρονοστάθμης που ελέγχει το ρυθμό δημιουργίας παλμών υπερήχων, δηλαδή τη συχνότητα επανάληψης παλμών και ο οποίος εξασφαλίζει το συγχρονισμό του συστήματος.
- Παλμογράφος ή κατάλληλο λογισμικό για την παραγωγή και ανάλυση παλμών.
- Αισθητήρας εμβάπτισης ή επαφής (έναν ή περισσότερους).
- Μέσο σύζευξης το οποίο τοποθετείται ανάμεσα στον αισθητήρα και το υπό εξέταση δοκίμιο και μπορεί να είναι νερό ή άλλο υγρό, ειδικό ζελέ ή γλυκερίνη.

3.3.1. Διατάξεις Πομπού – Δέκτη

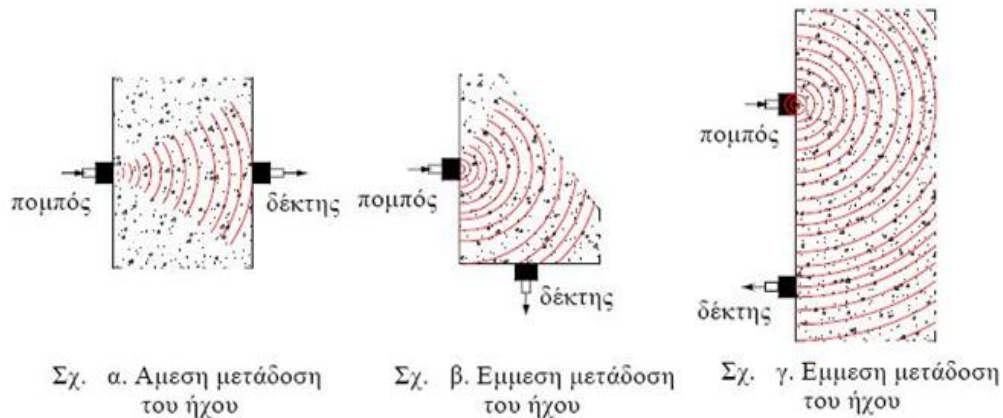
Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 3.1) παρουσιάζεται ένα σχηματικό παράδειγμα ενός διαγράμματος πειραματικής διάταξης σε διαμόρφωση πομπού / δέκτη με χρήση ενός μόνο αισθητήρα ο οποίος παράγει αλλά και λαμβάνει ταυτόχρονα υπερήχους. Σε πολλές εφαρμογές όμως, κρίνεται σκόπιμη η διαμόρφωση πομπού / δέκτη, χρησιμοποιώντας δύο αισθητήρες, ενός για παραγωγή παλμών και ενός άλλου για την λήψη τους, συνδέοντας τον αισθητήρα αυτόν με την έξοδο R της γεννήτριας υπερήχων.

A. Με την τοποθέτηση των κρυστάλλων στις απέναντι πλευρές του δοκιμίου έχουμε ως αποτέλεσμα τη μεταφορά της μέγιστης ενέργειας από τον πομπό στον δέκτη. Η μέτρηση του μήκους που διανύει το υπερηχητικό κύμα μέσα στο δομικό στοιχείο γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια και κατά συνέπεια έχουμε συνολικά μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα.

B. Η τοποθέτηση των δύο κρυστάλλων στις δύο κάθετες πλευρές ενός δομικού στοιχείου ή ενός δοκιμίου προκαλεί έμμεση μετάδοση του ήχου από τον πομπό στο δέκτη και άρα η ακρίβεια των μετρήσεων είναι μειωμένη, διότι είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ακριβώς η πορεία που διατρέχει το ηχητικό κύμα μέσα στην μάζα του σκυροδέματος. Επίσης, άλλος ένας παράγοντας είναι η δυσκολία της μέτρησης του μήκους L. Συνήθως θεωρούμε ότι το μήκος L που διανύει το κύμα ισούται με την απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο κρυστάλλων.

Γ. Η διάταξη της τοποθέτησης των δύο κρυστάλλων στη μοναδική προσιτή πλευρά του δομικού στοιχείου, χρησιμοποιείται κυρίως όταν αναζητείται το βάθος μιας επιφανειακής ρωγμής, ή υπάρχουν υποψίες για διαφοροποίηση της ποιότητας του σκυροδέματος από την επιφάνεια προς το κέντρο του δομικού στοιχείου.

Για τον έλεγχο υλικών με χρήση δύο αισθητήρων και για την ανίχνευση του σήματος χρησιμοποιούνται τρεις διατάξεις – τεχνικές ελέγχου (Σχήμα 3.2):



Σχήμα 3.2: Τρεις διατάξεις – τεχνικές πομπού / δέκτη

3.3.2. Μέθοδος Παλμούς – ηχούς (pulse – echo)

Στην τεχνική pulse – echo, ένας αισθητήρας υπερήχων παράγει παλμό και στην συνέχεια λαμβάνει την ηχώ του. Οι περισσότεροι αισθητήρες λειτουργούν χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρονικό παλμό με βάση το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Για το λόγο αυτό οι συγκεκριμένοι αισθητήρες ονομάζονται πιεζοηλεκτρικοί. Ένας βραχύς, διάρκειας λιγότερο από 20ns, ηλεκτρικός παλμός με υψηλή τάση (πλάτους 100 – 200V) διεγείρει έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο για να παράγει ένα παλμό υπερήχων. Ο αισθητήρας εκπέμπει τον παλμό κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου πάχους d . Ο παλμός διαδίδεται μέσω του υλικού και αφού διανύσει την απόσταση του πάχους του δοκιμίου ανακλάται από την απέναντι πλευρά του. Οι ανακλώμενες αντηχήσεις του παλμού εν συνεχεία ανιχνεύονται από τον αισθητήρα, έως ότου με την πάροδο του χρόνου να εξασθενίσουν.

3.3.3. Μέθοδος απ' ευθείας μετάδοσης (through – transmission)

Σχηματικά η απεικόνιση της μεθόδου φαίνεται στο Σχήμα 3.2.(α). Η γεννήτρια παλμών τροφοδοτεί τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα (πομπό) ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος στο κέντρο μιας έδρας του δοκιμίου και είναι σε άμεση επαφή με αυτή.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου through – transmission χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικοί αισθητήρες για τον έλεγχο των υλικών, που ο ένας λειτουργεί ως πομπός παλμών υπερήχων και ο άλλος τοποθετείται στην αντίθετη πλευρά του δοκιμίου ως δέκτης, για να λάβει τα μεταδιδόμενα σήματα αφού διασχίσουν το υπό έλεγχο δοκίμιο. Η τεχνική αυτή ονομάζεται μέθοδος απ' ευθείας μετάδοσης. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αυτή, η ταχύτητα των υπερήχων στο δοκίμιο μπορεί

εύκολα να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση (μετρώντας το χρόνο διέλευσης του παλμού, Δt , μέσω του δοκιμίου πάχους d):

$$C = \frac{d}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Το ηλεκτρικό σήμα, που έχει μορφή κρουστικού παλμού, μετατρέπεται σε τασικό και διαδίδεται στο υλικό μέχρι την απέναντι έδρα όπου βρίσκεται τοποθετημένος στο αντίστοιχο σημείο ένας όμοιος πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας ο οποίος μετατρέπει και πάλι την μεταβατική απόκριση σε ηλεκτρικό σήμα. Έτσι το σήμα οδηγείται στην κάρτα καταγραφής όπου ψηφιοποιείται και αποθηκεύεται.

3.4. Συνάφεια Οπλισμού – Σκυροδέματος

3.4.1. Γενικά

Ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη μεταφορά δυνάμεων από το σκυρόδεμα προς το χάλυβα και αντιστρόφως είναι η συνάφεια. Η συνάφεια μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος αποτελεί σημαντικό παράγοντα και κυρίαρχης σημασίας μηχανισμό για τη συνολική εντατική απόκριση των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

3.4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν τη συνάφεια

Η συνάφεια σκυροδέματος και οπλισμού επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες οι οποίοι διερευνώνται ακόμα. Η θέση των ράβδων ως προς τη διεύθυνση σκυροδέτησης (οριζόντια ή κατακόρυφα), η περίσφιγξη στην περιοχή της αγκύρωσης, η αντοχή του σκυροδέματος, η διάρκεια των δράσεων (βραχείας ή μακράς, στιγμιαίες, κρουστικές κ.α.), η επικάλυψη του σκυροδέματος, η γεωμετρία των νευρώσεων του χάλυβα, η δράση βλήτρου, ο τύπος των δράσεων (μονότονες, επαναλαμβανόμενες ή ανακυκλιζόμενες) και η διάβρωση είναι καταστάσεις που δύνανται να επηρεάσουν τη συνάφεια σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού.

3.5. Επίδραση των ράβδων οπλισμού

3.5.1. Γενικά

Η ταχύτητα παλμού που μετράται σε οπλισμένο σκυρόδεμα κοντά στις ράβδους ενίσχυσης είναι συνήθως υψηλότερη από την ταχύτητα που μετράται σε άοπλο σκυρόδεμα της ίδιας σύνθεσης. Αυτό συμβαίνει επειδή ο παλμική ταχύτητα στον χάλυβα μπορεί να είναι μέχρι και διπλάσια από την ταχύτητα σε άοπλο σκυρόδεμα. Η φαινομενική αύξηση της ταχύτητας παλμού εξαρτάται από

την εγγύτητα των μετρήσεων προς την ράβδο, την διάμετρο και τον αριθμό των ράβδων και τον προσανατολισμό τους σε σχέση με την διαδρομή διάδοσης (31–50).

Η συχνότητα των παλμών και οι επιφανειακές συνθήκες της ράβδου μπορούν αμφότερες να επηρεάσουν τον βαθμό στον οποίο ο χάλυβας επηρεάζει τις μετρήσεις ταχύτητας. Οι διορθώσεις στις μετρούμενες τιμές που επιτρέπουν την ενίσχυση θα μειώσουν την ακρίβεια της εκτιμώμενης ταχύτητας παλμού στο σκυρόδεμα έτσι ώστε, όπου είναι δυνατόν, οι μετρήσεις να πραγματοποιούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο χάλυβας να μην βρίσκεται μέσα ή κοντά στην άμεση διαδρομή μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων. Επομένως, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί συσκευή μέτρησης ηλεκτρομαγνητικής επικάλυψης (BS 1881: Μέρος 204) για να βοηθήσει στον εντοπισμό χάλυβα.

3.5.2. Άξονας ενίσχυσης της ράβδου παράλληλος προς την κατεύθυνση της διάδοσης

Η θέση των διαδρομών κατά μήκος των οποίων πολλαπλασιάζονται οι παλμοί θα πρέπει να επιλέγεται, όποτε είναι δυνατόν, έτσι ώστε να αποφεύγεται η γειτνίαση των ενισχυτικών ράβδων παράλληλα με αυτές τις διαδρομές. Αν αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί, οι μετρούμενες τιμές της ταχύτητας παλμού πρέπει να διορθωθούν για να ληφθεί υπόψη η παρουσία του χάλυβα. Η διόρθωση θα εξαρτηθεί από την απόσταση μεταξύ της γραμμής της διαδρομής και της ακμής της πλησιέστερης ράβδου, της διαμέτρου της ράβδου και της ταχύτητας παλμού στο περιβάλλον σκυρόδεμα.

Η ταχύτητα παλμού στο σκυρόδεμα v_c (km/s) δίνεται από:

$$v_c = \frac{2av}{\sqrt{(4a^2 + (Tv-L)^2)}} \quad (3.4)$$

με την προϋπόθεση ότι $v_s > v_c$

όπου:

- v_s είναι η ταχύτητα παλμού στη ράβδο χάλυβα (km / s).
- a είναι η μετατόπιση, μετρούμενη ως η απόσταση από την επιφάνεια της ράβδου μέχρι τη γραμμή που συνδέει το πλησιέστερο σημείο των δύο μετατροπέων (mm).
- T είναι ο χρόνος διέλευσης (μs).
- L είναι το μήκος της άμεσης διαδρομής μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων (mm).

Η επίδραση του χάλυβα εξαφανίζεται όταν

$$\frac{a}{L} > 1/2 \sqrt{\frac{(v_s - v_c)}{(v_s + v_c)}} \quad (3.5)$$

και η εξίσωση 3.4 δεν ισχύει πλέον. Η ζώνη μέσα στην οποία ο χάλυβας μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις εξαρτάται έτσι από τις σχετικές τιμές της ταχύτητας παλμού εντός του χάλυβα και του σκυροδέματος, αλλά ένα ανώτερο όριο a/L περίπου 0,25 μπορεί να αναμένεται για ράβδους μεγάλης διαμέτρου σε σκυρόδεμα χαμηλής ποιότητας. Για το σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας, η οριακή τιμή του a/L είναι απίθανο να είναι μεγαλύτερη από 0,15 αλλά μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερη για διαμέτρους ράβδων 12mm ή μικρότερες. Οι ράβδοι με διάμετρο 6mm ή λιγότερο θα είναι σχεδόν αδύνατο να εντοπιστούν σε πρακτικές καταστάσεις και μπορεί να αγνοηθούν.

Η κύρια δυσκολία στην εφαρμογή της εξίσωσης 3.4 έγκειται στην απόφαση για την τιμή του v , καθώς αυτό επηρεάζεται τόσο από τη διάμετρο της ράβδου όσο και από την ταχύτητα παλμού στο περιβάλλον σκυρόδεμα. Μια μέτρηση αυτού μπορεί γενικά να επιτευχθεί με την διάδοση ενός παλμού κατά μήκος του άξονα της ενσωματωμένης ράβδου, λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη οποιοδήποτε επικάλυψη σκυροδέματος σε κάθε άκρο.

Η εξίσωση 3.4 μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί για να δώσει τα ακόλουθα

$$V_c = k * V_m \quad (3.6)$$

όπου

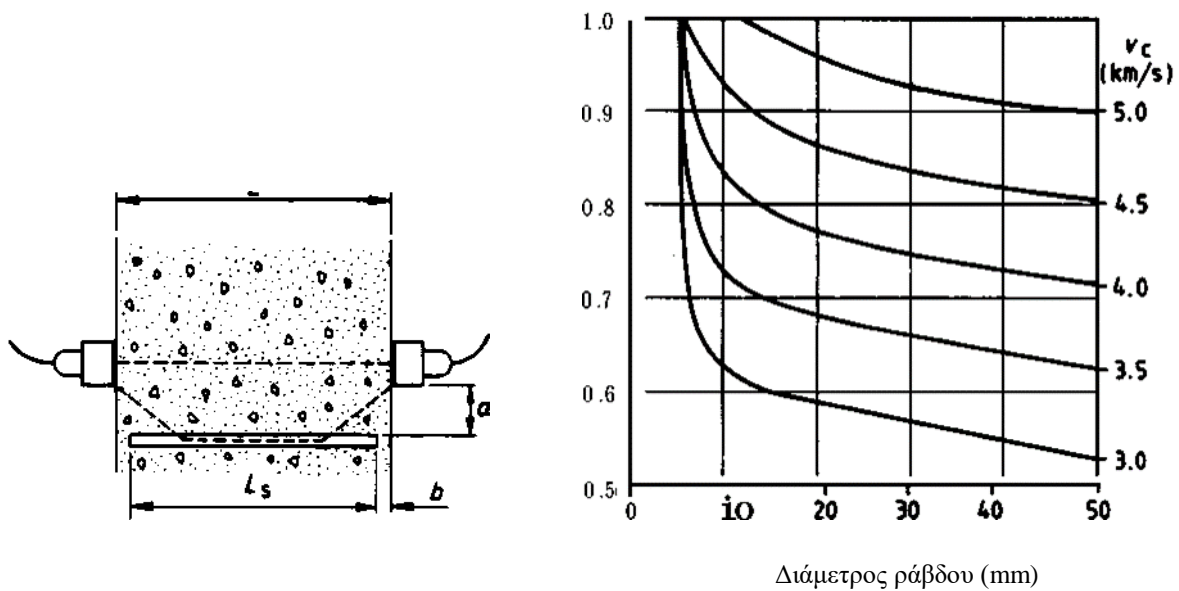
- V_m είναι η μετρηθείσα φαινόμενη ταχύτητα παλμού (L/T) (km / s).
- k είναι ο συντελεστής διόρθωσης που δίδεται από το

$$\gamma + 2 \left(\frac{a}{L} \right) \sqrt{(1-\gamma^2)} \quad (3.7)$$

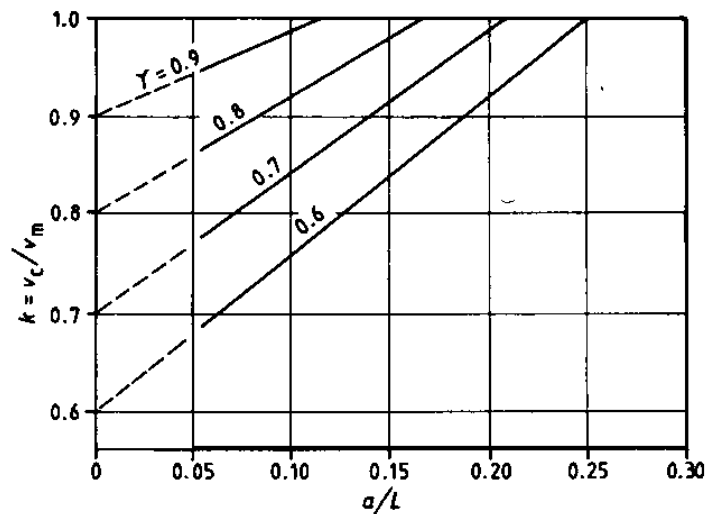
όπου:

$$\gamma = \frac{V_c}{V_s} \quad (3.8)$$

Τυπικές τιμές του γ παρίστανται γραφικά στο σχήμα 3.10 για ένα εύρος κοινώς εμφανιζόμενων τιμών της v_c και της διαμέτρου ράβδων για μία συχνότητα παλμών της τάξης των 54kHz. Η τιμή του γ που λαμβάνεται από αυτό το σχήμα, για υποτιθέμενη v_c , μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το σχήμα 3.11 για να παρέχει μια εκτίμηση του k για χρήση στην εξίσωση 3.6. Για να επιτευχθεί μια αξιόπιστη εκτίμηση του v μπορεί να είναι απαραίτητη μια επαναληπτική διαδικασία.



Σχήμα 3.10: Επίδραση του οπλισμού χάλυβα στην παλμική ταχύτητα



Σχήμα 3.11: Επιρροή του παράλληλου οπλισμού χάλυβα επί των διορθωτικών συντελεστών ταχύτητας παλμού

Αυτές οι εξισώσεις θα ισχύουν μόνο για μετατοπίσεις a που υπερβαίνουν κατά προσέγγιση το διπλάσιο της τελικής επικάλυψης της ράβδου. Για μικρότερες αντισταθμίσεις ο παλμός είναι πιθανό να περάσει από το πλήρες μήκος της ράβδου. Για τις ράβδους που ευρίσκονται ευθέως σε ευθεία με τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, ο διορθωτικός συντελεστής δίδεται από

$$k = 1 - L_s/L - (1-\gamma) \quad (3.13)$$

όπου

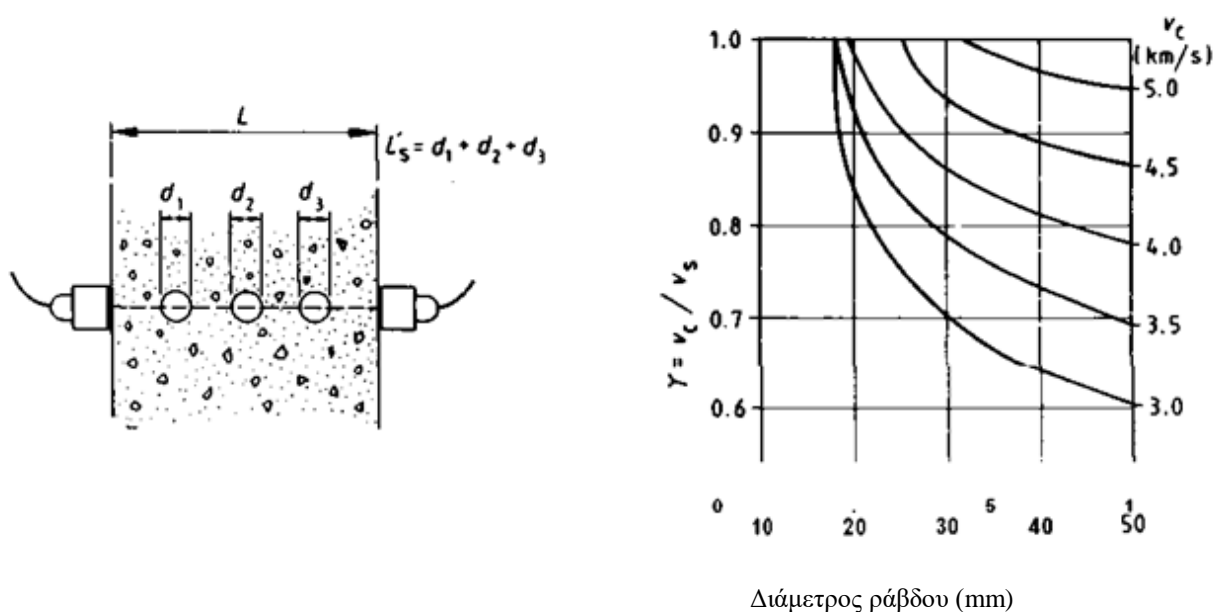
- L , είναι το μήκος της ράβδου (mm).

Μια εκτίμηση του v_c είναι πιθανό να είναι ακριβής $\pm 3\%$ υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει καλή σύνδεση μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος και ότι δεν υπάρχουν ρωγμές του σκυροδέματος στη ζώνη δοκιμής.

Οι διορθωμένες μετρήσεις της ταχύτητας παλμών πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή, καθώς αφορούν μόνο το σκυρόδεμα που βρίσκεται σε άμεση γειτνίαση με τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και τη ράβδο ενίσχυσης και δεν αντιπροσωπεύουν το σκυρόδεμα κατά μήκος της γραμμής που συνδέει τα κέντρα των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων.

3.5.3. Άξονας ενίσχυσης της ράβδου κάθετα προς την κατεύθυνση της διάδοσης

Η μέγιστη επιρροή της παρουσίας των ενισχυτικών ράβδων μπορεί θεωρητικά να υπολογιστεί υποθέτοντας ότι ο παλμός διασχίζει την πλήρη διάμετρο d κάθε ράβδου κατά τη διάρκεια της διέλευσής του. Αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 3.14. Η επίδραση των ράβδων στον παλμό είναι περίπλοκη και η φαινομενική παλμική ταχύτητα στον χάλυβα θα μειωθεί κάτω από την αναμενόμενη κατά μήκος του άξονα των ράβδων παρόμοιου μεγέθους.



Σχήμα 3.14: Επιρροή του κάθετου οπλισμού χάλυβα στην ταχύτητα παλμού

Για πρακτικούς σκοπούς, όπου χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες 54kHz, οι ράβδοι με διάμετρο μικρότερη από 20mm μπορούν να αγνοηθούν, επειδή η επιρροή τους θα είναι αμελητέα. Η εκτίμηση της μέσης επιρροής του χάλυβα μπορεί να επιτευχθεί για καλά συνδεδεμένες ράβδους διαμέτρου μεταξύ 20mm και 50mm θεωρώντας τις ως ισοδύναμες διαμήκεις ράβδους του συνολικού μήκους διαδρομής L'_s .

Η μέθοδος που περιγράφεται στο σημείο 3.5.2 για ράβδους που ευρίσκονται σε ευθεία με τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σκοπό αυτό σε συνδυασμό με την τιμή του $-γ$ που προσδιορίζεται από το σχήμα 3.14, η οποία λαμβάνει υπόψη τη μειωμένη ταχύτητα του χάλυβα. Η επίδραση του εγκάρσιου χάλυβα θα μειωθεί λόγω ελλείψεων δεσμών και είναι δύσκολο να εκτιμηθεί με οποιονδήποτε βαθμό ακρίβειας εάν οι ράβδοι δεν ευρίσκονται ευθέως ευθυγραμμισμένες με τη διαδρομή μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων.

3.6. Μέθοδοι Προσδιορισμού Χαρακτηριστικών Χάλυβα Οπλισμού

Εκτός από τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν παραπάνω οι οποίες προσδιορίζουν τα διάφορα χαρακτηριστικά κυρίως του σκυροδέματος και δευτερευόντως του χάλυβα υπάρχουν και μέθοδοι οι οποίοι προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά του οπλισμού.

3.6.1. Μαγνητικός ανιχνευτής

Ο μαγνητικός ανιχνευτής χρησιμοποιείται για να καθοριστεί το μέγεθος και η θέση του οπλισμού στο σκυρόδεμα. Οι μαγνητικοί ανιχνευτές έχουν ως βασική αρχή την αλληλεπίδραση της μεταλλικής ράβδου οπλισμού και ενός χαμηλής συχνότητας μαγνητικού πεδίου. Με την χρήση κατάλληλων μαγνητικών ανιχνευτών μπορεί να προσδιοριστεί και το ποσό της κάλυψης της ράβδου και το μέγεθός της.

Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν υπάρχουν περισσότερες από μία στρώσεις οπλισμού. Είναι ικανή, όμως, να ανιχνεύσει τις ράβδους οπλισμού που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια εφαρμογής της ανίχνευσης. Η συσκευή απαιτείται να χρησιμοποιηθεί και στις δυο επιφάνειες του στοιχείου για να εντοπισθούν οι ράβδοι οπλισμού. Όταν ο οπλισμός είναι σε δύο στρώσεις, η απομακρυσμένη στρώση επηρεάζει τις ενδείξεις του ανιχνευτή.

Κεφάλαιο 4^ο: Σχεδιασμός – Διενέργεια Ελέγχων

4.1. Κτίριο υπό εξέταση

Στο πλαίσιο της διατριβής αυτής, μεταξύ των άλλων, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας σειράς πειραματικών μετρήσεων με την μέθοδο των υπερήχων σε υποστυλώματα με διατομή 300 x 300mm, σκληρυσμένου σκυροδέματος σε υφιστάμενο κτίριο που χρονολογείται σύμφωνα με μαρτυρίες το έτος 1955.

Επιχειρείται παράλληλα να προσδιοριστεί και να εκτιμηθεί η αντοχή του σκυροδέματος των υποστυλωμάτων του κτιρίου, ώστε να διερευνηθεί και να επαληθευτεί η παλαιότερη σειρά μετρήσεων στα δομικά στοιχεία του με μη καταστροφικούς και ημι – καταστροφικούς ελέγχους τους οποίους πραγματοποίησε πιστοποιημένο εργαστήριο στα πλαίσια της μελέτης ενίσχυσης του κτιρίου για αλλαγή χρήσης του, από παλαιό ξενώνα του Ιερού Προσκυνηματος του Οσίου Ιωάννου του Ρώσου στο Νέο Προκόπιο της Εύβοιας, σε Μουσείο Μικρασιατικού Πολιτισμού. Οι δύο σειρές αποτελεσμάτων της μεθόδου των υπερήχων συγκρίνονται και αναλύονται για τον προσδιορισμό παραγόντων των τυχών αποκλίσεων στα αποτελέσματα των δύο σειρών ελέγχων.

4.2. Ιστορικά στοιχεία κτιρίου

Το έτος 1924 με την ανταλλαγή των πληθυσμών οι κάτοικοι του Προκοπίου της Καπαδοκίας μετέφεραν μαζί τους στο τότε Αχμέτ Αγά και νυν Νέο Προκόπιο της Εύβοιας το Ιερό Άφθαρτο Λείψανο του Οσίου Ιωάννου του Ρώσου το οποίο τοποθετήθηκε το έτος 1951 εντός του μεγάλοπρεπου Ιερού Ναού τον οποίο κατασκεύασαν ντόπιοι και πρόσφυγες, προσφέροντας προσωπική εργασία. Παράλληλα με τον Ιερό Ναό του Οσίου Ιωάννου κατασκευάστηκε κατά τον ίδιο τρόπο και ο ξενώνας της εκκλησίας.

Μετά από έρευνα στο αρχείο του Ιερού Προσκυνηματος «Όσιος Ιωάννης ο Ρώσος» διαπιστώθηκε ότι ο χρόνος κατασκευής του κτιρίου του Ξενώνα προσδιορίζεται στις αρχές του έτους 1954 με την εκσκαφή των θεμελίων η οποία πραγματοποιήθηκε από ντόπιους και πρόσφυγες κατοίκους του Νέου Προκοπίου με χειρωνακτική εργασία. Μηχανικοί του έργου ήταν οι Παναγιώτης Μίχας και Αντώνιος Μάτσας. Οι εργολάβοι που κατασκεύασαν την πέτρινη τοιχοποιία ήταν οι Νικόλαος, Ανδρέας Τσαλκιτζής και Χρήστος Τζοβάνας. Τα φέροντα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα κατασκεύασαν οι Στέλιος Ηλιάδης και Τοκπασίδης.

Από μαρτυρίες κατοίκων τα χαλίκια και η άμμος που αποτελούσαν το σκυρόδεμα που τοποθετήθηκε στο κτίριο αντλήθηκαν από το ποτάμι που διασχίζει το Νέο Προκόπιο και που ονομάζεται Κηρέας, μετά από πλύσιμο και κοσκίνισμα.



Εικόνα 4.1: Φωτογραφία του Ιερού Προσκυνηματος Οσίου Ιωάννου του Ρώσου. Στα αριστερά ο νέο – ανεγερθείς Ξενώνας στον οποίο έλαβαν χώρα οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας. Έτος 1951.



Εικόνα 4.2: Φωτογραφία του Χατζή – Παύλου Μελιτόπουλου. Πίσω ο νέο – ανεγερθείς Ξενώνας στον οποίο έλαβαν χώρα οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας. Έτος 1939

4.3. Κατασκευαστικά στοιχεία

Παρόλο που δεν ήταν δυνατή η εύρεση των αρχικών σχεδίων και των ξυλοτύπων ή των λοιπών αρχιτεκτονικών και στατικών μελετών που θα ήταν πολύτιμα στην κατανόηση της στατικής λειτουργίας του κτιρίου, με μια πρώτη ματιά στο κτίριο είναι εμφανές το δομικό σύστημα του φέροντος οργανισμού του, το οποίο είναι ένα μεικτό σύστημα στήριξης βασισμένο σε φέρουσα τοιχοποιία και φέροντα στοιχεία (κολώνες και δοκούς) από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Επίσης, το κτίριο αποτελείται από οριζόντια περιμετρικά διαφραγματικά στοιχεία (σενάζ). Οι πλάκες του κτιρίου είναι οι λεγόμενες πλάκες zoellner (τσέλνερ), οι οποίες εφαρμόζονταν κατά κόρων σε κατασκευές εκείνης της εποχής και οι οποίες αποτελούνταν από νευρώνες οπλισμένου σκυροδέματος με σώματα πλήρωσης από κεραμικούς οπτόπλινθους.



Εικόνα 4.3: Φωτογραφία της κάτω επιφάνειας της πλάκας zoellner

Το κτίριο είναι διώροφο μετά υπογείου (υπόγειο, ισόγειο και α' όροφος) ενώ μετά από οπτικό πρωτοβάθμιο έλεγχο παρατηρήθηκαν εμφανείς αλλά μη εκτενείς βλάβες οι οποίες καθιστούσαν το κτίριο μη λειτουργικό.

Ο κάθε όροφος του κτιρίου έχει εμβαδόν $308,24 \text{ cm}^2$. Στο ισόγειο υπάρχει Η.Χ. $45,21 \text{ cm}^2$. Το συνολικό εμβαδόν του είναι: $308,24 \text{ cm}^2 \times 3 \text{ ορόφους} = 924,72 \text{ cm}^2 + 45,21 \text{ cm}^2 = 969,93 \text{ cm}^2$

4.4. Αναλυτική Περιγραφή Συστήματος Φέροντος οργανισμού

4.4.1. Υπόγειο

Η στάθμη θεμελίωσης του κτιρίου είναι η στάθμη του υπογείου (-2.25m.) το οποίο εδράζεται στο έδαφος με σύστημα μεμονωμένων πεδίων συνδεδεμένα με την πλάκα του δαπέδου η οποία αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα και έχει πάχος 30cm.

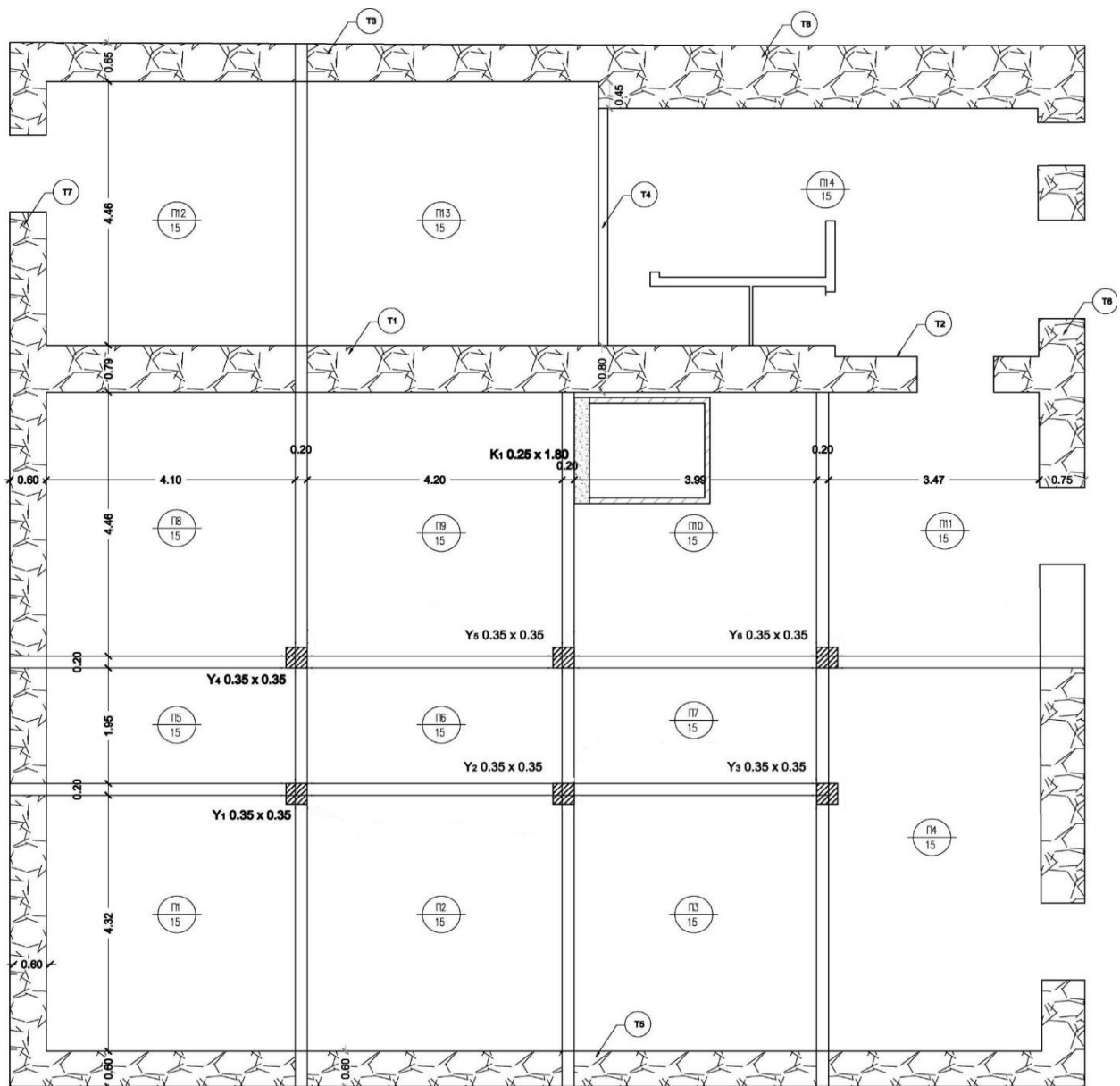


Εικόνα 4.4: Φωτογραφία υπογείου

Οι εξωτερικοί τοίχοι του υπογείου αποτελούνται από φέρουσα τοιχοποιία από λιθοδομή μη σταθερού πάχους τοίχων η οποία έχει ελάχιστο πάχος 75cm και φτάνει σε ορισμένα σημεία έως και 107cm. Εντός του υπογείου υπάρχουν 6 υποστυλώματα διαστάσεων 35x35cm και ένα τοίχωμα 25x180cm από οπλισμένο σκυρόδεμα τα οποία διατρέχουν συνολικά 5 συνεχόμενες δοκοί από οπλισμένο σκυρόδεμα οι οποίες αγκυρώνονται εντός της τοιχοποιίας.

Η πλάκα του υπογείου είναι τύπου zoellner με νευρώσεις με εξάοπους οπτόπλινθους πλήρωσης. Το μεγαλύτερο μέρος του υπογείου είχε χρήση κηροπλαστείου ενώ υπήρχαν σε αυτό τέσσερις αποθηκευτικοί χώροι και το λεβητοστάσιο του κτιρίου.

Το υπόγειο έχει συνολικό εμβαδό 308,24 m².



Εικόνα 4.5: Κάτοψη υπογείου

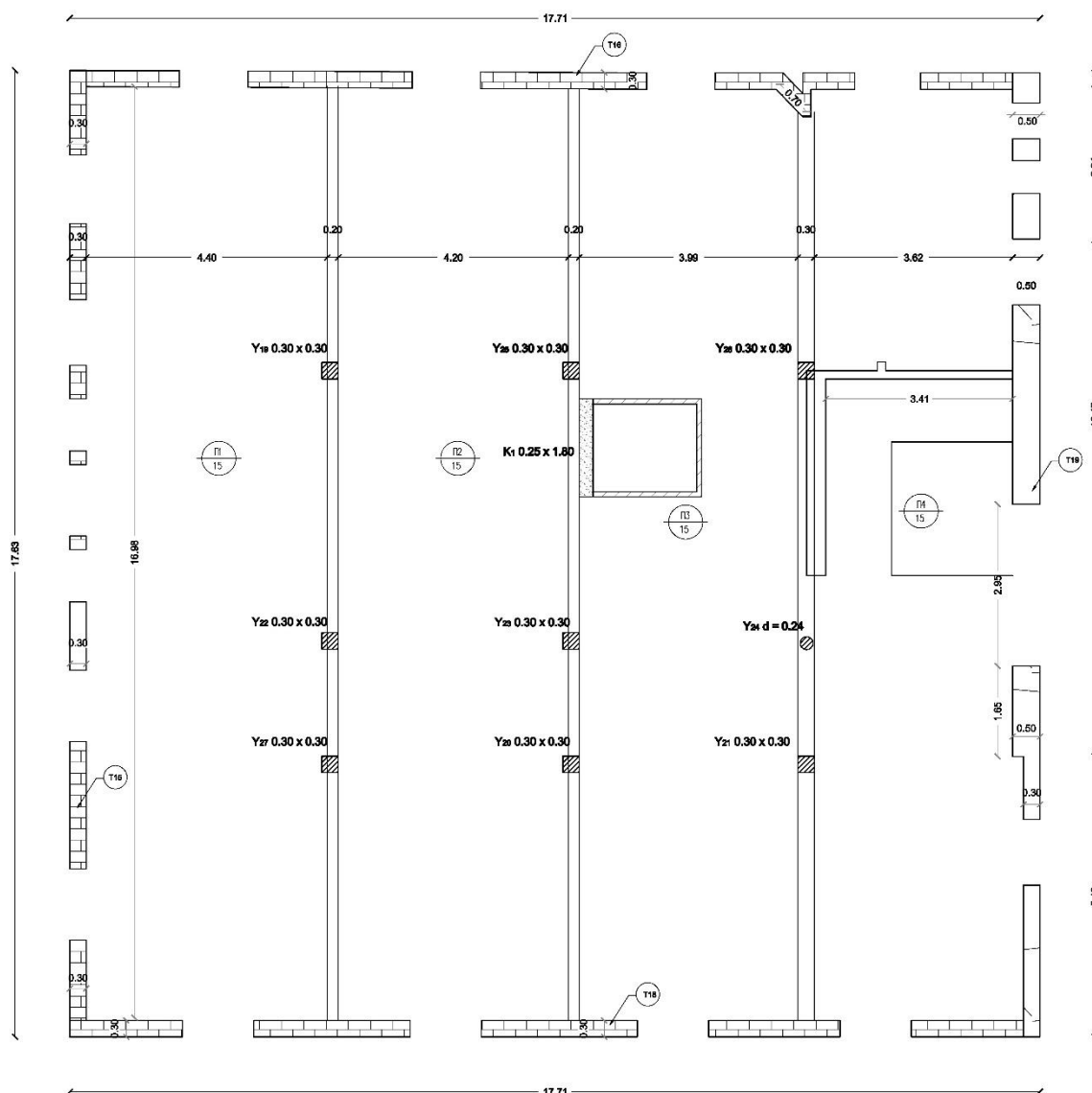
4.4.2. Ισόγειο

Στο ισόγειο οι εξωτερικοί τοίχοι είναι επίσης από φέρουσα τοιχοποιία λιθοδομής, όπως ακριβώς στο υπόγειο. Οι τοίχοι έχουν πάχος 60cm εκτός από τον πλάγιο δεξιά τοίχο ο οποίος είναι 75cm, σε συνέχεια δηλαδή από τον τοίχο του υπογείου.

Εσωτερικά υπάρχουν 7 υποστυλώματα, ένα παραπάνω δηλαδή από τα υποστυλώματα του υπογείου, το οποίο εδράζεται πάνω σε δοκό η οποία με την σειρά της εδράζεται πάνω σε φέροντα τοίχο του υπογείου από λιθοδομή πάχους 60cm. Επιπροσθέτως, κατά μήκος της πρόσοψης του κτιρίου υπάρχει ένα στέγαστρο (ημ/ υπαίθριος χώρος) πλάτους 3,15m αποτελούμενος από 5 κυλινδροειδή υποστυλώματα και μια περιμετρική δοκό από οπλισμένο σκυρόδεμα.

εδράζεται σε πέτρινο τοίχο του ισογείου. Η πλάκα της οροφής, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, του υπογείου και του ισογείου, είναι πλάκα τύπου zoellner.

Το εμβαδό του ορόφου είναι $308,24 \text{ cm}^2$.



Εικόνα 4.7: Κάτοψη ορόφου

4.5. Πειραματική διάταξη

4.5.1. Γενικά

Ο εξοπλισμός μέτρησης παλμικής ταχύτητας των υπερήχων μετρά το χρόνο διέλευσης ενός παλμού μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων που τοποθετούνται στην επιφάνεια ενός σώματος σκυροδέματος. Η ταχύτητα παλμού μπορεί στη συνέχεια να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το μετρημένο μήκος διαδρομής δια μέσου του σκυροδέματος. Η ταχύτητα

παλμού εξαρτάται από το δυναμικό μέτρο του Young, τον δυναμικό λόγο Poisson και την πυκνότητα του μέσου.

4.5.2. Πλεονεκτήματα

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μέτρησης της παλμικής ταχύτητας των υπερήχων είναι ότι είναι τελείως μη καταστροφική μέθοδος, γρήγορη στη χρήση και μας δίνει στοιχεία των ιδιοτήτων του εσωτερικού ενός σώματος αποτελούμενο από σκυροδέμα. Ακόμα, είναι ιδιαίτερα πολύτιμη στις περιπτώσεις που απαιτείται η γνώση πολλών στοιχείων για την αξιολόγηση της ομοιομορφίας του σκληρυσμένου σκυροδέματος.

4.5.3. Περιορισμοί

Αν και δεν είναι καταστρεπτική μέθοδος, στις περιοχές που τοποθετούνται οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι απαραίτητος ο καθαρισμός και η λείανση της επιφάνειας καθώς και η λίπανση της, ώστε να είναι ομοιόμορφη η σύζευξή τους με την επιφάνεια. Οι ταχύτητες των παλμών για τα περισσότερα μείγματα σκυροδέματος βρίσκονται μέσα σε ένα στενό εύρος και είναι συνεπώς είναι απαραίτητο να μετρηθεί τόσο ο χρόνος διαμετακόμισης όσο και το μήκος της διαδρομής με ακρίβεια της τάξης του $\pm 1\%$ αν τα αποτελέσματα είναι μεγαλύτερης τιμής. Οι τιμές που μετρήθηκαν μπορεί να επηρεαστούν από την υφή της επιφάνειας, την περιεκτικότητα σε υγρασία, την θερμοκρασία, το μέγεθος του δείγματος, την ενίσχυση και την πίεση. Οι συσχετίσεις με την αντοχή είναι δύσκολο να γίνουν και θα επηρεαστούν σημαντικά από τους τύπους και τις αναλογίες συστατικών του μείγματος καθώς και την ωριμότητά του. Για την εύρεση της ακρίβειας και την σύγκριση των τιμών μπορούν να γίνουν δοκιμές με τους δύο πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες τοποθετημένους στην ίδια επιφάνεια, αλλά στην περίπτωση που απαιτείται η μέτρηση με ακρίβεια της ταχύτητας του παλμού, παραδείγματος χάρη για την εκτίμηση της αντοχής, θα πρέπει να τοποθετηθούν οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες σε αντίθετες επιφάνειες των όψεων του στοιχείου σκυροδέματος.

4.5.4. Κύριες Εφαρμογές

Οι κυριότερες εφαρμογές είναι οι ακόλουθες.

(α) Προσδιορισμός της ομοιογένειας του σκυροδέματος, ο οποίος επιτυγχάνεται με την λήψη μετρήσεων σε ένα συμμετρικό πλέγμα ενός μέλους ή σε κοινές θέσεις σε παρόμοια μέλη.

(β) Ανίχνευση ρωγμών και κηλίδων, οι οποίες θα αυξήσουν το πραγματικό μήκος διαδρομής του παλμού με αποτέλεσμα τον υψηλό μετρούμενο χρόνο διέλευσής του από το μέσο. Βέβαια αν αυτές οι ανομοιογένειες, οι ρωγμές και τα κενά που βρίσκονται μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών

αισθητήρων γεμίσουν με νερό ή συμπληρωθούν με κάποια ρητίνη ενίσχυσης, δεν θα προκύψει απαραίτητα υψηλότερος χρόνος διέλευσης του παλμού στις μετρήσεις. Το βάθος μια ρωγμής εκτιμάται εάν τοποθετηθούν οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες σε κάθε πλευρά. Οι κηλίδες και τα κενά μπορούν να αναγνωριστούν με την λήψη μιας σειράς μετρήσεων σε ένα νοητό πλέγμα ενός μέλους. Το ελάχιστο μέγεθος ενός ανιχνεύσιμου ελαττώματος εξαρτάται από το μέγεθος των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων και την απόσταση μεταξύ τους.

(γ) Οι επί τόπου εκτιμήσεις της αντοχής, κατά 95% έχουν όριο εμπιστοσύνης άνω των $\pm 7\text{MPa}$. Επίσης, είναι δύσκολο να έχουν ιδανικές συνθήκες δοκιμής και διάγραμμα βαθμονόμησης για το μείγμα σκυροδέματος. Μπορεί να γίνει δυνατή η βελτίωση αυτής της τιμής εάν η πυκνότητα είναι γνωστή.

(δ) Παρακολούθηση της ανάπτυξης της αντοχής, η οποία είναι δυνατή εάν μπορούν να ληφθούν τα κατάλληλα διαγράμματα βαθμονόμησης. Όπου τα αποτελέσματα μπορούν να συγκριθούν με προκαθορισμένα όρια αποδοχής, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ποιοτικό έλεγχο, την απομάκρυνση του ξυλότυπου, τις εργασίες καταπονήσεως κλπ..

(ε) Εκτίμηση της υποβάθμισης του σκυροδέματος, χρησιμοποιώντας μια γενική συγκριτική έρευνα για τον εντοπισμό υπόπτων περιοχών. Υπάρχουν, επίσης, διαθέσιμες τεχνικές για την εκτίμηση του βάθους της επιφανειακής ζημίας ή της χημικής επίθεσης. Η μακροπρόθεσμη απόδοση του σκυροδέματος μπορεί να παρακολουθείται με την διεξαγωγή επαναληπτικών δοκιμών σε μια θέση².

(στ) Εκτίμηση του πάχους της στοιβάδας, η οποία μπορεί να είναι δυνατή όταν υπάρχει στρώμα επιφανείας κατώτερης ποιότητας στο σώμα του σκυροδέματος λόγω κατασκευής, καιρικών συνθηκών ή άλλων ζημιών, όπως πυρκαγιάς.

Οι πειραματικές μετρήσεις της παρούσας διατριβής έγιναν με απ' ευθείας διάδοση κύματος (through transmission). Ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας (πομπός), που τροφοδοτείται από την γεννήτρια παλμών, είναι τοποθετημένος στο κέντρο μιας πλευράς του δομικού στοιχείου με την οποία βρίσκεται σε άμεση επαφή.

Το ηλεκτρικό σήμα, το οποίο έχει μορφή κρουστικού παλμού, μετατρέπεται σε τασικό και διαδίδεται στο υλικό μέχρι την απέναντι έδρα όπου βρίσκεται τοποθετημένος στο αντίστοιχο σημείο ο δεύτερος πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας. Ο τελευταίος μετατρέπει και πάλι την

² ΣΗΜΕΙΩΣΗ. Παρόλο που αυτή η μέθοδος δοκιμής μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε επί τόπου σκυρόδεμα όσο και σε εργαστηριακά δείγματα, οι καθαρά εργαστηριακές έρευνες οι δοκιμές συντονισμού μπορεί να είναι πιο κατάλληλες λόγω της μεγαλύτερης ακρίβειας τους. Μια δοκιμή αυτού του τύπου περιγράφεται στην ενότητα 2.1.

μεταβατική απόκριση σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο οδηγείται στην κάρτα καταγραφής όπου ψηφιοποιείται και αποθηκεύεται.

4.5.5 Ελάχιστο μήκος δείγματος

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας παλμού στο σκυρόδεμα, της συχνότητας του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα και της ελάχιστης επιτρεπόμενης πλευρικής διάστασης του δείγματος. Εάν η ελάχιστη πλάγια διάσταση είναι μικρότερη ή εάν χρησιμοποιείται η διάταξη έμμεσης μετάδοσης, ο τρόπος μεταβολής μεταβάλλεται και κατά συνέπεια η ταχύτητα μέτρησης θα είναι διαφορετική. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις σύγκρισης συγκεκριμένων στοιχείων με σημαντικά διαφορετικά μεγέθη.

Συχνότητα Αισθητήρα	Ταχύτητα Παλμού στο Σκυρόδεμα (km/s)		
	$v_c = 3.5$	$v_c = 4.0$	$v_c = 4.5$
	Ελάχιστη επιτρεπόμενη διάσταση πλευρικού δείγματος		
kHz	mm	mm	mm
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

Πίνακας 4.8: Ταχύτητα παλμού, συχνότητα πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα και ελάχιστη επιτρεπόμενη πλευρική διάσταση δείγματος

4.5.6 Συσκευές – Μέσα

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από μια γεννήτρια παραγωγής υπερηχητικών κυμάτων, από δύο κρυστάλλους και από ένα μετρητή ο οποίος δίνει τον χρόνο που χρειάζεται ο υπέρηχος για να διανύσει το προς εξέταση δοκίμιο σκυροδέματος. Συγκεκριμένα έγινε χρήση γεννήτριας παλμών μάρκας TICO. Αυτή δημιουργεί ηλεκτρική διέγερση μικρής διάρκειας με 2 πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες (έναν πομπό και έναν δέκτη), συχνότητας συντονισμού 54Khz. Η οθόνη της συσκευής δείχνει τον χρόνο t (μsec) που χρειάζεται η δέσμη ηχητικών κυμάτων για να διαπεράσει το υλικό, την απόσταση (m), την οποία εισάγει ο χρήστης, καθώς και την εκτιμώμενη ταχύτητα διέλευσης v (m/sec).



Εικόνα 4.9: Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε

Οι κεφαλές που παράγουν υπερήχους βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή με την επιβολή κατάλληλου ρεύματος ο κρυστάλλος – πομπός πάλλεται με συχνότητα ίδια με εκείνη του ηλεκτρικού ρεύματος εκπέμποντας ηχητικό κύμα. Η ταλάντωση του κρυστάλλου παράγει τασικά κύματα τα οποία διαδίδονται μέσα στο σκυρόδεμα. Όταν ο παλμός φθάσει στον δέκτη παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Η συσκευή περιέχει και ένα ηλεκτρονικό χρονόμετρο ακριβείας το οποίο καταγράφει το χρόνο που διανύει το υπερηχητικό κύμα μέσα στο δομικό στοιχείο σκυροδέματος.

4.5.7 Βαθμονόμηση – Προετοιμασία

Πριν από κάθε μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων είναι απαραίτητο να ελέγχεται πάντα η ένδειξη του οργάνου. Για άμεση επαφή των δύο κρυστάλλων η ένδειξη πρέπει να είναι μηδέν, ενώ όταν χρησιμοποιείται όργανο βαθμονομήσεως η ένδειξη πρέπει να είναι τόση όση αναγράφεται στην ράβδο του οργάνου.

Για τις ανάγκες της επαλήθευσης των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής, συγκρίνοντάς τα με αποτελέσματα τα οποία έχουν ήδη παρθεί από τα δομικά μέλη του κτιρίου που εξετάζει η παρούσα διπλωματική εργασία, από πιστοποιημένο εργαστήριο, έπρεπε να εντοπιστούν τα δομικά στοιχεία στα οποία έγιναν οι εργαστηριακές μετρήσεις με υπέρηχους.



Εικόνα 4.9: Φωτογραφία υποστυλώματος

Εν συνεχεία, τα ίδια αυτά σημεία έπρεπε να προετοιμαστούν με κατάλληλο καθαρισμό από το παλιό συζευκτικό μέσο και να γίνει εκ νέου η απαραίτητη προετοιμασία της επιφάνειας (λείανση κτλ.) που θα έρθει σε επαφή με τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα. Τοποθετήθηκε εκ νέου συζευκτικό μέσο (βαζελίνη). Σε αυτό το σημείο πρέπει να λάβουμε υπόψιν ότι δεν είναι γνωστό ποιο συζευκτικό μέσο χρησιμοποιήθηκε κατά την αρχική μέτρηση των δομικών στοιχείων από το εργαστήριο. Έπειτα πάρθηκε μέτρηση σε κάθε δομικό στοιχείο που υποβλήθηκε σε δοκιμή.

Το γεγονός ότι δεν ελήφθησαν πολλαπλές μετρήσεις σε όλη την επιφάνεια των στοιχείων επιλέχθηκε να γίνει διότι στην προκειμένη περίπτωση η εφαρμογή της μεθόδου του ελέγχου με υπέρηχους είχε ως σκοπό την διερεύνηση της αντοχής του σκυροδέματος και όχι τον εντοπισμό ατελειών και ύπαρξη ρωγμών. Σε μία τέτοια περίπτωση θα ήταν απαραίτητη η διενέργεια μετρήσεων σε πολλαπλά σημεία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου ώστε να εντοπιστούν διαφορές στις τιμές των αποτελεσμάτων οι οποίες θα μαρτυρούσαν την ύπαρξη ρωγμών.



Εικόνα 4.10: Φωτογραφία μέτρησης ταχύτητας υπερήχων σε υποστώλωμα του β ορόφου

4.6. Συσχέτιση της ταχύτητας παλμού και της αντοχής

Η ποιότητα του σκυροδέματος συνήθως καθορίζεται από την άποψη της αντοχής και επομένως είναι μερικές φορές χρήσιμη η χρήση μετρήσεων ταχύτητας παλμών υπερήχων για την εκτίμηση της αντοχής.

Η σχέση μεταξύ της ταχύτητας παλμού υπερήχων και της αντοχής επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η ηλικία, οι συνθήκες σκλήρυνσης, η κατάσταση υγρασίας, οι αναλογίες των μειγμάτων, ο τύπος του αδρανούς και ο τύπος του τσιμέντου. Εάν απαιτείται εκτίμηση της αντοχής, είναι απαραίτητο να καθορισθεί η συσχέτιση μεταξύ αντοχής και ταχύτητας για τον συγκεκριμένο τύπο σκυροδέματος που εξετάζεται. Αυτή η συσχέτιση πρέπει να καθορισθεί

πειραματικά με δοκιμή επαρκούς αριθμού δειγμάτων για να καλυφθεί το εύρος των αναμενόμενων δυνάμεων και να εξασφαλιστεί στατιστική αξιοπιστία. Η εμπιστοσύνη που μπορεί να αποδοθεί στα αποτελέσματα θα εξαρτηθεί από τον αριθμό των δοκιμασμένων δειγμάτων. Είναι δυνατόν να διαπιστωθεί μια συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας παλμού και της αντοχής υπερήχων είτε μετρούμενη σύμφωνα με οποιαδήποτε από τις μεθόδους δοκιμής που περιγράφονται στο BS 1881: Μέρη 116 και 119 είτε με την διεξαγωγή δοκιμών σε μια πλήρη δομή ή μονάδα.

Η αξιοπιστία της συσχέτισης θα εξαρτηθεί από τον βαθμό στον οποίο τα δείγματα συσχετισμού αντιπροσωπεύουν τη δομή που πρόκειται να διερευνηθεί. Η καταλληλότερη συσχέτιση θα ληφθεί από δοκιμές στις οποίες η ταχύτητα παλμού και η ισχύς μετριοούνται σε μια πλήρη δομή ή μονάδα. Είναι μερικές φορές πιο βολικό να προετοιμάζουμε μια συσχέτιση χρησιμοποιώντας δοκιμές σε μορφοποιημένα δείγματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η εμπειρία έχει δείξει ότι οι συσχετισμοί που βασίζονται σε μορφοποιημένα δείγματα γενικά δίνουν χαμηλότερες εκτιμήσεις της αντοχής από αυτές που θα προκύψουν με την κοπή και τον έλεγχο πυρήνων.

4.6.1 Συσχέτιση με χυτά δείγματα

Οι δυνάμεις ενός συγκεκριμένου μείγματος τσιμέντου και αδρανών υλικών μπορεί να μεταβάλλονται και έτσι αλλάζει;

α) η αναλογία ύδατος – τσιμέντου, ή

β) η ηλικία κατά την δοκιμή.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την μεταβολή της αντοχής των δειγμάτων επηρεάζει τη συσχέτιση. Είναι επομένως απαραίτητο να χρησιμοποιείται μόνο μια μέθοδος διακύμανσης της αντοχής για μια συγκεκριμένη συσχέτιση και η οποία είναι κατάλληλη για την απαιτούμενη εφαρμογή. Η συσχέτιση της ταχύτητας παλμού με την ισχύ είναι λιγότερο αξιόπιστη καθώς αυξάνεται η αντοχή του σκυροδέματος. Μια συσχέτιση που επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας την ηλικία του σκυροδέματος είναι κατάλληλη όταν παρακολουθείται η ανάπτυξη της αντοχής, αλλά για λόγους ελέγχου της ποιότητας είναι προτιμότερη η συσχέτιση που επιτυγχάνεται με τη μεταβολή του λόγου του υδατοδιαπερατότητας.

Τα κατάλληλα δείγματα δοκιμής πρέπει να κατασκευάζονται σύμφωνα με τις μεθόδους που περιγράφονται στο BS 1881: Μέρη 108, 109 και 110. Από κάθε παρτίδα πρέπει να λαμβάνονται τουλάχιστον τρία δείγματα. Η ταχύτητα παλμού πρέπει να μετράται σε ένα δείγμα μεταξύ των μορφοποιημένων επιφανειών. Στην περίπτωση δοκών, είναι προτιμότερο να μετρηθεί η ταχύτητα παλμού κατά μήκος του μήκους τους για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια. Για κάθε δείγμα θα

πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον τρεις μετρήσεις μεταξύ της κορυφής και του πυθμένα Η διακύμανση μεταξύ των μετρημένων χρόνων διέλευσης σε μεμονωμένα δείγματα δοκιμής πρέπει να είναι εντός $\pm 5\%$ της μέσης τιμής αυτών των τριών μετρήσεων, διαφορετικά το δείγμα πρέπει να απορριφθεί ως μη φυσιολογικό. Τα δείγματα πρέπει στη συνέχεια να δοκιμαστούν για αντοχή σύμφωνα με τις μεθόδους που περιγράφονται στο BS 1881: Μέρη 116 και 119.

Η μέση ταχύτητα παλμού και η μέση ισχύς που λαμβάνεται από κάθε ομάδα τριών πανομοιότυπων δειγμάτων δοκιμής παρέχουν τα δεδομένα για να κατασκευαστεί μια καμπύλη συσχέτισης. Μια καμπύλη συσχέτισης που παράγεται με αυτόν τον τρόπο αφορά μόνο δείγματα που παράγονται, σκληρύνονται και δοκιμάζονται με παρόμοιο τρόπο. Εάν η ωρίμανση με αέρα αντικαταστήσει την επεξεργασία με νερό, θα ληφθούν διαφορετικές καμπύλες συσχέτισης για τα ίδια μείγματα.

4.6.2 Συσχέτιση με δοκιμές σε πυρήνες

Όταν γίνεται συσχέτιση με τις δοκιμές στους πυρήνες, δεν είναι γενικά δυνατή η σκόπιμη μεταβολή της αντοχής του σκυροδέματος. Επομένως, οι δοκιμές ταχύτητας παλμού θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό περιοχών διαφορετικής ποιότητας και έτσι οι πυρήνες που λαμβάνονται από αυτές τις περιοχές θα πρέπει να προσφέρουν μια σειρά δυνατοτήτων. Η ταχύτητα παλμού μέσω του σκυροδέματος στις προτεινόμενες θέσεις του πυρήνα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την προετοιμασία της συσχέτισης. Οι ταχύτητες παλμού που λαμβάνονται από τους πυρήνες μετά την κοπή και την εμβάπτιση θα είναι γενικά υψηλότερες από αυτές της δομής και δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για άμεση συσχέτιση.

4.6.3 Συσχέτιση με την αντοχή των μονάδων προκατασκευής

Όταν τα προκατασκευασμένα μέλη συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις αντοχής, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν συσχετισμοί μεταξύ των μετρήσεων της ταχύτητας των παλμών και των συγκεκριμένων τύπων δοκιμών αντοχής. Αυτό πρέπει να γίνει με την πραγματοποίηση μετρήσεων ταχύτητας παλμού στα μέλη σε κατάλληλες περιοχές όπου το σκυρόδεμα θα αναμένεται να αποτύχει κάτω από τις συνθήκες φόρτωσης δοκιμής.

4.6.4 Συνδυασμός ταχύτητας παλμού με άλλες μετρήσεις

Ορισμένες βελτιώσεις στην ακρίβεια των εκτιμήσεων αντοχής μπορούν να επιτευχθούν συνδυάζοντας τις μετρήσεις υπερηχητικής ταχύτητας παλμών με μετρήσεις κρουσημέτρησης όπως περιγράφεται στο BS 1881: Μέρος 202 (βλέπε [19], [20] και BS 1881: Μέρος 201). Μεγαλύτερη βελτίωση μπορεί να γίνει με το συνδυασμό υπερηχητικής ταχύτητας παλμού με μετρήσεις πυκνότητας. Σε μια δομή οι μετρήσεις της πυκνότητας πρέπει ιδανικά να γίνονται κατά μήκος της ίδιας οπτικής επαφής με τις μετρήσεις της ταχύτητας παλμών. Η πυκνότητα θα πρέπει να μετράται είτε με τις μεθόδους που περιγράφονται στο BS 1881: Μέρος 114 είτε με την τεχνική εξασθένησης ακτινών γάμμα, υπό τον όρο ότι μπορεί να αποφευχθεί η επίδραση του ενισχυτικού χάλυβα. Μια ξεχωριστή καμπύλη συσχέτισης μπορεί τότε να κατασκευαστεί για κάθε τιμή πυκνότητας στην απαιτούμενη περιοχή.

4.7. Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας και δυναμικής αναλογίας Poisson

Η σχέση μεταξύ των ελαστικών σταθερών και της ταχύτητας ενός υπερηχητικού παλμού που ταξιδεύει σε ένα ισότροπο ελαστικό το μέσο άπειρων διαστάσεων δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Ed = \rho v^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (4.11)$$

Όπου:

- Ed είναι το δυναμικό ελαστικό μέτρο (MN/m²)
- ν είναι η δυναμική αναλογία του Poisson.
- ρ είναι η πυκνότητα (kg/m³).
- v είναι η ταχύτητα παλμού (km/s).

Η ταχύτητα παλμού δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις διαστάσεις του δοκιμαστικού δείγματος, εκτός εάν μία ή περισσότερες πλευρικές διαστάσεις είναι μικρές σε σχέση με το μήκος κύματος του παλμού.

Αν λοιπόν οι τιμές των ρ και ν είναι γνωστές, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 4.11 για να προσδιοριστεί η τιμή των Ed σε δείγματα σκυροδέματος για ένα ευρύ φάσμα σχήματος ή μεγέθους. Ομοίως το ν θα μπορούσε να προσδιοριστεί εάν οι τιμές των ρ και Ed είναι γνωστές.

Για εργαστηριακά δείγματα ο λόγος Ed/ρ μπορεί να ληφθεί από τα αποτελέσματα μιας δοκιμής επιμήκους συντονισμού όπως περιγράφεται στο BS 1881: Μέρος 5. Σε αυτή τη δοκιμασία

προσδιορίζεται η τιμή της βασικής συχνότητας της διαμήκουσ δόνησης ενός πρίσματος. Η αναλογία Ed/ρ δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{Ed}{\rho} = 4n^2L^210^{-6} \quad (4.12)$$

όπου:

- n είναι η συχνότητα συντονισμού (Hz).
- L είναι το μήκος του δείγματος δοκιμής (m).

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 4.11 και 4.12 λαμβάνουμε τον τύπο

$$\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} = \frac{4n^2L^210^{-6}}{\nu^2} \quad (4.13)$$

Η τιμή του ν μπορεί να προσδιοριστεί από τον πίνακα:

Τιμές του δυναμικού λόγου Poisson	
$\frac{nL}{\nu}$	ν
0,257	0,45
0,342	0,40
0,395	0,35
0,431	0,30
0,456	0,25
0,474	0,20
0,487	0,15
0,494	0,10
0,499	0,05

Πίνακας 4.14: Τιμές δυναμικού λόγου Poisson

Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας (δυναμικές και στατικές), η αναλογία και η πυκνότητα του Poisson ποικίλλουν από σημείο σε σημείο σε μια συγκεκριμένη δομή.

Δεν είναι συχνά δυνατό να διεξάγονται δοκιμές συντονισμού στα δομικά μέλη προκειμένου να προσδιοριστούν οι τιμές αυτών των ιδιοτήτων. Είναι, ωστόσο, δυνατή η χρήση εμπειρικών σχέσεων για την εκτίμηση των τιμών του στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας από τις μετρήσεις ταχύτητας παλμού που γίνονται σε οποιοδήποτε σημείο της δομής. Αυτές οι σχέσεις δίνονται στον πίνακα 4 και ισχύουν για το σκυρόδεμα που κατασκευάζεται με τους συνηθέστερα

χρησιμοποιούμενους τύπους φυσικών αδρανών. Η εκτίμηση του συντελεστή ελαστικότητας που προκύπτει από τον πίνακα αυτό θα έχει ακρίβεια καλύτερη από $\pm 10\%$.

Εμπειρική σχέση μεταξύ στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας και ταχύτητας παλμού		
Ταχύτητα παλμού	Μέτρο Ελαστικότητας	
	Δυναμικό	Στατικό
m/s	GPa	GPa
3600	24,00	13,00
3800	26,00	15,00
4000	29,00	18,00
4200	32,00	22,00
4400	36,00	27,00
4600	42,00	34,00
4800	49,00	43,00
5000	58,00	52,00

Πίνακας 4.15: Συντελεστής ελαστικότητας

Κεφάλαιο 5^ο: Παρουσίαση Αποτελεσμάτων – Ανάλυση – Σύγκριση

5.1. Περιγραφή Κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των δύο μετρήσεων που έλαβαν χώρα στο κτίριο που εξετάζουμε. Σκοπός της σύγκρισης αυτής είναι η αξιολόγηση της μεθόδου των υπερήχων ως μεθόδου αξιολόγησης της αντοχής μιας διατομής καθώς και των παραγόντων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής. Από το σημείο αυτό οι μετρήσεις που έγιναν από τον συντάκτη της εργασίας αυτής θα αναγράφονται ως **σειρά 1** ενώ οι μετρήσεις που είχαν γίνει παλαιότερα στο κτίριο ως **σειρά 2**.

5.2. Αποτελέσματα μετρήσεων (Σειρά 1 & 2)

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα στον οποίο αναγράφεται το δομικό στοιχείο που έγινε η μέτρηση της δειγματοληψίας, ο χρόνος που έκανε ο υπερηχητικός παλμός να φτάσει από τον πομπό στο δέκτη διαμέσου της διατομής, η διάσταση της δομής η οποία είναι και η απόσταση των δύο πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων και η ταχύτητα του υπερήχου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕΙΡΑΣ 1

ΘΕΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ: ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ ΙΣΟΓΕΙΟΥ, Α ΟΡΟΦΟΥ, ΥΠΟΓΕΙΟΥ

A/A	ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΕΙΓΜ/ΨΙΑΣ	ΧΡΟΝΟΣ μsec	ΑΠΟΣΤΑΣΗ m	ΤΑΧΥΤΗΤΑ m/sec
1	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ4 (ΙΣΟΓΕΙΟ)	101.5	0.30	2955.67
2	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ7 (ΙΣΟΓΕΙΟ)	102.7	0.30	2921.13
3	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ4 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	99.5	0.30	3015.08
4	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ7 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	111.6	0.30	2688.17
5	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ9 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	96.7	0.30	3102.38
6	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ1 (ΥΠΟΓΕΙΟ)	101.1	0.40	3956.48

Από τα παραπάνω προκύπτει ο επόμενος πίνακας. Η εκτίμηση της αντοχής είναι αποτέλεσμα εμπειρικών σχέσεων από τις μετρήσεις ταχύτητας παλμού που γίνονται σε οποιοδήποτε σημείο της δομής.

ΑΝΤΟΧΕΣ ΘΡΑΥΣΕΩΣ ΣΕ ΜΕΛΗ

ΘΕΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ: ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ ΙΣΟΓΕΙΟΥ, Α ΟΡΟΦΟΥ, ΥΠΟΓΕΙΟΥ

A/A	ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΕΙΓΜ/ΨΙΑΣ	ΑΝΤΟΧΗ ΘΡΑΥΣΕΩΣ (MPa)
1	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ4 (ΙΣΟΓΕΙΟ)	10,67
2	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ7 (ΙΣΟΓΕΙΟ)	10,55
3	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ4 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	10,89
4	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ7 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	9,70
5	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ9 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	11,20
6	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ1 (ΥΠΟΓΕΙΟ)	18,74

Εκτός από τον έλεγχο των δομικών στοιχείων και τον προσδιορισμό της αντοχής τους, άλλος ένας από τους στόχους της παρούσας διατριβής είναι και η σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με παλαιότερες μετρήσεις που έλαβαν χώρα στο ίδιο κτίριο.

A/A	ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΕΙΓΜ/ΨΙΑΣ	ΑΝΤΟΧΗ ΘΡΑΥΣΕΩΣ ΣΕΙΡΑ 2 (MPa)
1	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ4 (ΙΣΟΓΕΙΟ)	11,35
2	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ7 (ΙΣΟΓΕΙΟ)	11,02
3	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ4 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	11,60
4	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ7 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	10,20
5	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ9 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	12,30
6	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ1 (ΥΠΟΓΕΙΟ)	18,50

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της ΣΕΙΡΑΣ 1 με τη ΣΕΙΡΑ 2 παρουσιάζονται στο πίνακα που ακολουθεί. Η στήλη ΣΕΙΡΑ 1 περιέχει τα αποτελέσματα που εξήχθησαν για τις ανάγκες της εργασίας μετά από προσωπική εργασία, ενώ η στήλη ΣΕΙΡΑ 2 περιέχει τις αντοχές θραύσης που μετά από έλεγχο στα ίδια ακριβώς σημεία σε έκαστο δομικό στοιχείο πραγματοποίησε παλαιότερος εργαστηριακός έλεγχος.

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕΙΡΑΣ 1 & 2

A/A	ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΕΙΓΜ/ΨΙΑΣ	ΑΝΤΟΧΗ ΘΡΑΥΣΕΩΣ ΣΕΙΡΑ 1 (MPa)	ΑΝΤΟΧΗ ΘΡΑΥΣΕΩΣ ΣΕΙΡΑ 2 (MPa)
1	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ4 (ΙΣΟΓΕΙΟ)	10,67	11,35
2	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ7 (ΙΣΟΓΕΙΟ)	10,55	11,02
3	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ4 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	10.89	11,60
4	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ7 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	9.70	10,20
5	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ9 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	11.20	12,30
6	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ1 (ΥΠΟΓΕΙΟ)	18,74	18,50

Οι διαφορές που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του πίνακα φανερώνονται στον παρακάτω πίνακα:

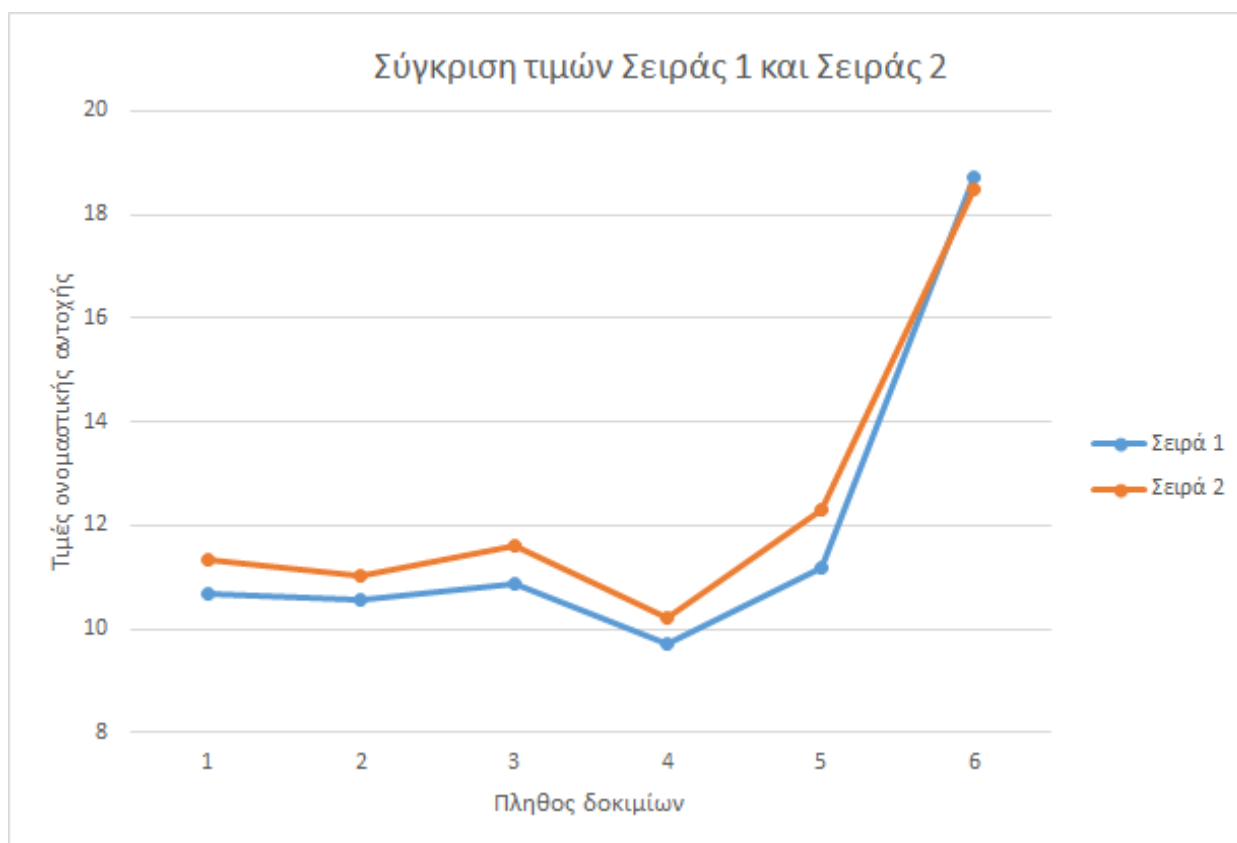
A/A	ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΕΙΓΜ/ΨΙΑΣ	ΑΝΤΟΧΗ ΘΡΑΥΣΕΩΣ ΣΕΙΡΑ 1 (MPa)	ΑΝΤΟΧΗ ΘΡΑΥΣΕΩΣ ΣΕΙΡΑ 2 (MPa)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
1	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ4 (ΙΣΟΓΕΙΟ)	10,67	11,35	-0,68
2	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ7 (ΙΣΟΓΕΙΟ)	10,55	11,02	-0,45
3	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ4 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	10.89	11,60	-0,71
4	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ7 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	9.70	10,20	-0,50
5	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ9 (Α ΟΡΟΦΟΣ)	11.20	12,30	-1,1
6	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ1 (ΥΠΟΓΕΙΟ)	18,74	18,50	+0,24

Οι τιμές αυτές των αποκλίσεων είναι αποτέλεσμα της αφαίρεσης των δύο τιμών των αντοχών των Σειρών 1 και 2 των μετρήσεων. Οι αποκλίσεις αυτές ήταν αρχικά βέβαιο ότι θα προκύψουν.

Αφενός είναι εξαιρετικά απίθανο να υπάρξουν κοινά αποτελέσματα μετρήσεων, αφετέρου οι συνθήκες μέτρησης επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Επίσης, άλλος ένας παράγοντας που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο είναι η εμπειρία του χειριστή της συσκευής των Υπερήχων.

Στην προκειμένη ο χειριστής που έλαβε τις μετρήσεις της Σειράς 1 δεν είχε την απαραίτητη εμπειρία. Βεβαίως υπήρχε η εξοικείωση αλλά όχι σε καθολικά μεγάλο βαθμό. Αντιθέτως, η Σειρά 2 των μετρήσεων έγινε από χειριστή εργαστηρίου ο οποίος είναι πολύ λογικό ότι έχει καλύτερη αντίληψη και εμπειρία στην λήψη μετρήσεων δομικών στοιχείων.

Οι δύο σειρές μετρήσεων αποτυπώνονται γραφικά στο σχήμα που ακολουθεί:



Γράφημα τιμών Σειράς 1 & 2

Όπως φαίνεται στο γράφημα οι μετρήσεις δεν έχουν μεγάλες διαφορές. Οι αντοχές που μετρήθηκαν δε αλλάζουν δραστικά την ονομαστική αντοχή του μέλους όπου μετρήθηκε. Παρόλα αυτά οι μετρήσεις της σειράς 1 είναι ελάχιστα μικρότερες από τις αντίστοιχες της σειράς 2 εκτός από το υποστύλωμα του υπογείου στο οποίο είναι κατά τι αυξημένη.

Κεφάλαιο 6^ο: Συμπεράσματα και αναφορές για μελλοντική έρευνα

6.1. Συμπεράσματα

Ως μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου, ορίζεται η διαδικασία που απαιτείται για τη διεύρυνση της ποιότητας, των ιδιοτήτων, των διαστάσεων και την ανίχνευση ελαττωμάτων των υλικών, χωρίς να προκαλείται καταστροφή ή ανεπανόρθωτη βλάβη στη δομή που εκτίθεται στον έλεγχο γεγονός που θα την καθιστούσε ανεπαρκής και με αδυναμία περαιτέρω ελέγχου.

Η μέθοδος των υπερήχων είναι ευρέως διαδεδομένη στον τομέα των κατασκευών και του ποιοτικού ελέγχου αυτών και θεωρείται μια από τις σημαντικότερες μεθόδους ΜΚΕ. Ο μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους, παρέχει αξιόπιστο και ακριβή έλεγχο των δομικών στοιχείων και δοκιμίων σε εργαστηριακούς αλλά και σε επιτόπου ελέγχους και είναι μια μέθοδος με ευρύ φάσμα εφαρμογών σε σύγκριση με άλλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου.

Ο σωστός και ακριβής έλεγχος απαιτεί τον κατάλληλο εξοπλισμό, δηλαδή τη σωστή συσκευή καθώς και τις κεφαλές παραγωγής υπερήχων, τα καλώδια σύνδεσής τους, τα πρότυπα βαθμονόμησης και το υγρό σύζευξης. Απαιτεί επίσης και υψηλά επίπεδα γνώσης, εξοικείωσης, εμπειρίας και χειρισμού της συσκευής από τον χειριστή της.

Η μέθοδος του μη καταστροφικού ελέγχου των υπερήχων αποτελεί μία αυτοτελή επιστήμη, που εξελίσσεται διαρκώς στο πέρασμα του χρόνου, δρώντας καταλυτικά στον αξιόπιστο έλεγχο κατασκευών, ο οποίος αποτέλεσε και αντικείμενο μελέτης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

6.2. Προσδιορισμός αντοχής με υπέρηχους

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο υπέρηχος αποτελεί μια εύκολη, γρήγορη και κυρίως αξιόπιστη μέθοδο εκτίμησης της αντοχής των δομικών στοιχείων που αποτελούνται από σκυρόδεμα ακόμα και κάτω από δύσκολες συνθήκες. Επίσης, εφαρμόζεται για να εντοπιστούν ατέλειες και βλάβες στη δομή. Το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κατασκευές με πολύπλοκη γεωμετρία λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων που υφίσταται η δέσμη των υπερήχων.

Επιπροσθέτως, εάν η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό αντοχής επί τόπου σε δομικά μέλη κατασκευών παρέχει εκτίμηση και όχι ολοκληρωτικό υπολογισμό αποτελεσμάτων. Άρα, προσεγγίζει μεν σε ικανοποιητικό βαθμό τις τιμές της αντοχής αλλά προτιμάται να συνδυάζεται με κάποια άλλη μέθοδο ελέγχου η οποία παρέχει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα (για παράδειγμα η λήψη πυρήνων). Εντούτοις παρέχει υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας.

6.3. Αναφορές για μελλοντική έρευνα

Η μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου με Υπερήχους θα μπορούσε να αποτελέσει σημαντικό κριτήριο ελέγχου όχι μόνο στον τομέα του ελέγχου υφιστάμενων κατασκευών και στον εντοπισμό ρωγμών και κοιλοτήτων εντός του σκυροδέματος, αλλά και σε νέες κατασκευές για την διερεύνηση της ποιότητας του σκυροδέματος καθώς και της συνάφειας του οπλισμού εντός του. Η μέθοδος δεν είναι ακριβής στην εφαρμογή της και είναι μια πολύ διαδεδομένη και ακριβής λύση για εφαρμογές σε κατασκευές.

Τα αποτελέσματα που μπορεί να παράξει ποικίλουν με αποτυπώσεις (A, B, C Scans). Ένα κτίριο μετά από καταπονήσεις (σεισμούς, πυρκαγιές κλπ.) μπορεί να παρουσιάσει ρωγμές στα δομικά του στοιχεία και κατά συνέπεια να μειωθεί η αντοχή των μελών αυτών. Θα ήταν επομένως, ιδανικό το κάθε κτίριο και η κάθε κατασκευή να έχουν τα δικά τους συστήματα ελέγχου ώστε να μπορούν οι μηχανικοί να ελέγχουν με ακρίβεια την τρωτότητα των κατασκευών. Ένα μεικτό σύστημα αισθητήρων το οποίο θα μπορεί να καταγράφει σε πραγματικό χρόνο αντοχές μελών, ρωγμές και κοιλότητες, μετακινήσεις και παραμορφώσεις είναι το μέλλον στον έλεγχο των δομικών έργων.

Βιβλιογραφία

1. The Nondestructive Testing Handbooks, 2nd ed., American Society for Nondestructive Testing, Columbus, OH: Vol. 1, Leak Testing, McMaster, R. C. (ed.); Vol. 2, Liquid Penetrant Testing, Mc Master, R. C. (ed.); Vol. 3, Radiography and Radiation Testing, Bryant, L. E. (ed.); Vol. 4, Electromagnetic Testing, Mester, M. L. (ed.); Vol. 5, Acoustic Emission, Miller, R. K. (ed.); Vol. 6, Magnetic Particle Testing, Schmidt, J. T. and Skeie, K. (eds.); Vol. 7, Ultrasonic Testing, Birks, A.S. and Green, R.E. (eds.); Vol. 8, Visual and Optical Testing, Allgaier, M. W. and Ness S. (eds.); Vol. 9, Special Nondestructive Testing Methods, Stanley, R. K. (ed.); Vol. 10, Nondestructive Testing Overview, Ness, S. and Cherlock, C. N. (eds.).
2. Shull, P. J. (2002). Non Destructive Evaluation, Theory, Techniques and Application. Marcel Dekker Ink, New York.
3. Hellier, C. J. (2001). Handbook of Nondestructive Evaluation. McGraw-Hill.
4. Halmshaw, R. (1993). Nondestructive Testing. Edward Arnold, London.
5. Bray, D. E., Stanley, R.K. (1997) Nondestructive Evaluation, A Tool in Design, Manufacturing and Service. Revised edition, CRC Press Inc., Florida.
6. Kutz, M. (1998). Mechanical Engineer's handbook. John Wiley and Sons, Inc., New York.
7. Cartz, L. (1995). Nondestructive Testing. ASM Int1, Metals Park, OH.
8. Borovikov, A.S. (Ed.), (1998). Introduction to Capillary Testing Theory. Minsk, Nauka i Tekhnika Publishing.
9. Larson, B. F. (2002). Study of the Factors Affecting the Sensivity of Liquid Penetrant Inspections: Review of Literature Published from 1970 to 1998. FAA Technical Report Number DOT/FAA/AR-01/95, Office of Aviation Research, Washington, DC.
10. Krautkramer, J. and Krautkramer, H. (1995). Ultrasonic Testing of Materials. 4th ed., Springer-Verlag, New York.
11. Auld, B. A. (1990). Acoustic Fields and Waves in Solids. Vol I & II, 2nd edition Krieger Publishing Company.
12. Quinn, R. A. (1980). Industrial Radiology – Theory and Practice. Eastman Kodak, Rochester, NY.
13. Τσόπελας, Ν., Σιακαβέλας, Ν. Ι. (2007). Ανάπτυξη Ηλεκτρομαγνητο - Θερμικής Μεθόδου για μη Καταστροφικό Έλεγχο σε Αγωγίμα Υλικά. Πανεπιστήμιο Πατρών.
14. Σπανός, Χ., Σπιθάκης, Μ. & Τρέζος, Κ. (2006). Μέθοδοι για την επί Τόπου Αποτίμηση Χαρακτηριστικών των Υλικών. Αθήνα.
15. Neville, A. M. (1995). Properties of Concrete. Longman, London.
16. ISO/ DIS8047. (1982). Concrete hardened – determination of ultrasonic pulse velocity.
17. ASTM C597. (1983). Standard test method for pulse velocity through concrete.

18. RILEM NDT1. (1972). Testing of concrete by the ultrasonic pulse method.
19. BSI 1881/203 (1986). Testing concrete: Pulse velocity.
20. A. M. Neville, (1995). Properties of Concrete. London: Longman.
21. Θ. Τριανταφύλλου, (1997). Δομικά Υλικά, Πανεπιστήμιο Πατρών.
22. D. A. Abrams, (1918). Design of concrete mixtures, Bulletin No.1, Structural Materials Laboratory, Lewis Institute, Chicago 1-20.
23. M. F. Kaplan, (1959). The effects of age and water/cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength, Mag Con Res 11 (32) 85-92.
24. H. J. Al-Gahtani, A. G. F. Abbasi, O. S. B. Al-Amoudi, (1998). Concrete mixture design for hot weather: experimental and statistical analysis, Magazine of Concrete Research, 95 – 105.
25. M. Rler, I. Odler, (1985). Investigations on the relationships between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes, I. effect of porosity, Cement and Concrete Research 15, 320 – 330.
26. P. J. M. Monteiro, P. R. L. Helene, S. H. Kang, (1993). Designing concrete mixtures for strength, elastic modulus and fracture energy, Materials and Structures, 26, 443-452.
27. H. Uchikawa, S. Hanehara, H. Hirao, (1997). Influence of microstructural change under stress on the strength-related properties of hardened cement mortar and paste, Advanced Cement Based Materials, 6, 87 – 98.
28. M. G. Hernandez, M. A. G. Izquierdo, A. Ibannez, J. J. Anaya, L. G. Ullate, (2000). Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE, Ultrasonics 38, 531 – 533.
29. B. Mather, How Soon is Soon Enough, ACI J 1976; 73 (3): 147 – 150.
30. S. Popovics, J. S. Popovics, Ultrasonic Testing to Determine Water-Cement Ratio for Freshly Mixed Concrete, Cement Concrete Aggr 1998; 20 (2): 262 – 268.
31. S. Popovics, (2001). Analysis of the Concrete Strength versus Ultrasonic Pulse Velocity Relationship, Materials Evaluation 59 (2), 123.
32. M. F. Kaplan, (1960). The relation between ultrasonic pulse velocity and the compressive strength of concretes having the same workability but different mix proportions, Magazine of Concrete Research, 12 (34) 3 – 8.
33. R. Jones, Testing of concrete by ultrasonic-pulse technique, Proceedings of the thirty-second annual meeting, Highway Research Board, Washington, 13-16 Jan 1953.
34. D. A. Anderson, R. K. Seals, (1981). Pulse Velocity as a Predictor of 28- and 90- Day Strength, ACI J 78-9 116-122.
35. V. M. Malhotra, N. J. Carino (Eds.), CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, Florida, 1991.

36. H. Y. Qasrawi, Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted, *Cement and Concrete Research*, 30 (2000) 739-746.
37. T. Gudra, B. Stawinski, Non-destructive characterization of concrete using surface waves, *NDT&E INT* 33 (2000) 1-6.
38. Reynolds, W. N., Wilkinson, S. J., Spooner, D. C., Ultrasonic wave velocity in concrete. *Magazine of Concrete Research* 30 (104), (1978) 139 – 144.
39. Wu, T. T., Liu P. L., Advancement on the nondestructive evaluation of concrete using transient elastic waves, *Ultrasonics* 36 (1998) 197 – 204.
40. E. Ohdaira, N. Masuzawa, (2000). Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete-the possibility of NDE, *Ultrasonics* 38, 546 – 552.
41. J. S. Popovics, W. Song, J. D. Achenbach, J. H. Lee, R. F. Andre, (1998). One-sided stress wave velocity measurement in concrete, *Journal of Engineering Mechanics* 124 (12), 1346-1353.
42. P. J. Monteiro, M. S. King, (1988). Experimental studies of elastic wave propagation in high –strength mortar, *Cement Concrete and Aggregates*, 10 (2) 68 – 74.
43. L. Vergara, R. Miralles, J. Gosalbez, F. J. Juanes, L. G. Ullate, J. J. Anaya, M. G. Hernandez, M. A. G. Izquierdo, NDE ultrasonic methods to characterise the porosity of mortar, *NDT&E INT* 34 (2001) 557-562.
44. S. P. Shah, J. S. Popovics, K. V. Subramanian, C. M. Aldea, New directions in concrete health monitoring technology, *J. Eng. Mech.-ASCE* 126 (7) (2000) 754-760.
45. S. F. Selleck, E. N. Landis, M. L. Peterson, S. P. Shah, J. D. Achenbach, Ultrasonic investigation of concrete with distributed damage, *ACI Materials Journal* 95 (1)
46. W. Suaris, V. Fernando, Detection of crack growth in concrete from ultrasonic intensity measurements, *Materials and Structures*, 20 (1987) 214–220.
47. Α. Τσιμόγιαννης, Α. Αναστασόπουλος, Β. Γεωργαλή, Β. Καλοϊδάς, Συνδυαστική εφαρμογή ακουστικής εκπομπής και ακουστο-υπερήχων για την ανίχνευση μικροσκοπικής βλάβης σε δοκίμια κονιάματος, 1ο Ελληνικό Συνέδριο Συνθέτων Υλικών Σκυροδέματος, Ξάνθη, 9-10 Νοεμβρίου 2000.
48. S. K. Niyogi, P. K. Das Roy, M. Roychaudhuri, Acousto-ultrasonic study on hydration of portland cement, *Ceramic Transactions*, 16, 137-145, 1991.
49. K. Komlos, S. Popovics, T. Nurnbergerova, B. Babal, J. S. Popovics, Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards, *Cement and Concrete Composites* 18 (1996) 357-364.
50. Bungey, J.H. The influence of reinforcement on ultrasonic pulse velocity testing. In: *ACI In situ/Non- destructive testing of concrete*, SP-82, 1984.

51. Jones, R. Non-destructive testing of concrete, London: Cambridge University Press, 1962.
52. Jones, R. & Facaoaru, I. Recommendation for testing concrete by the ultrasonic pulse method. In: Rilem Materials and Structures, Paris, 1969, 2, No. 10.
53. Drysdale, R.C. Variation of concrete strength in existing buildings. In: Mag. of Concrete Res., 1973, 25, No. 85.
54. Davis, S.G. & Martin, S.J. The quality of concrete and its variation in structures. C & C A Publication No. 42.487, 1973.
55. Davis, S.G. Further investigations into the strength of concrete in structures. C & C A Publication No.42.514, 1976.
56. Knab, L.I., Blessing, G.V. & Clifton, J.R. Laboratory evaluation of ultrasonic for crack detection in concrete. In: AC/ Journal, Jan./Feb. 1983.
57. Chung, H.W. An appraisal of ultrasonic pulse technique for detecting voids in concrete. In: Concrete, 1978, 12, No. 11.
58. Vold, R.C. & Hope, B.R. Ultrasonic testing of deep foundations. In: Brit. J. of Non-destructive Testing, 1978, 20, No. 5.
59. Elvery, R.H. & Ibrahim, L.R.M. Ultrasonic assessment of concrete at early ages. In: Mag. of Concrete Res., 1976, 28, No. 97.
60. Logothetis, L. & Economou, C. The influence of high temperatures on calibration of non-destructive testing of concrete. In: Rilem Materials and Structures, 1981, 14, No.79.
61. Anderson, D.A. & Seals, R.K. Pulse velocity as a predictor of 28 and 90 day strength. In: ACI Journal, March/April 1981.
62. Tomsett, H.N. The practical use of ultrasonic pulse velocity measurements in the assessment of concrete quality. In: Mag. of Concrete Res., 1980, 32, No. 110.
63. Facaoaru, I. Non-destructive testing of concrete in Romania. In: Symp on Non-destructive testing of Concrete and Timber, June 1969, London: I.C.E., 1970.
64. Elvery, R.H. & Vale, D.W. Development in the measurement of ultrasonic pulse velocity in concrete. In: Proc. Seventh Int. Conf. Nondestructive Testing, Warsaw, June 1973.
65. Nwokoye, D.N. Prediction and assessment of concrete properties from pulse velocity test. In: Mag. of Concrete Res., 1973, 25, No. 82.
66. Muller – Rockholz, J. Determination of the elastic properties of lightweight aggregate by ultrasonic pulse velocity measurement. In: The international Journal of Lightweight Concrete, 1979, 1, No.2.
67. Bungey, J.H. The influence of reinforcement on ultrasonic pulse velocity testing. In: ACI In situ/Non- destructive testing of concrete, SP-82, 1984.

68. Chung, H.W. & Law, K.S. Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique. In: Concrete International Design and Construction, 1983, 5, No. 10.
69. Reynolds, W.N., Wilkinson, S.S. & Spooner, DC. Ultrasonic wave velocities in concrete. In: Mag. of Concrete Res., 1978, 20, No. 104.
70. Rothing, H. Measuring ultrasonic attenuation in concrete. In: Building Research and Practice, Jan. /Feb. 1975.
71. Zoidis, N., E. Tatsis, C. Vlachopoulos, A. Gotzamanis, J. S. Clausen, D. Aggelis, T. E. Matikas, "Inspection, Evaluation and Repair Monitoring of Cracked Concrete Floor Using NDT Methods", Construction and Building Materials, vol. 48, pp. 1302-1308, (2013).
72. Baaklini, G., N. Meyendorf, T. E. Matikas, R. S. Gilmore, eds., "Nondestructive Methods for Materials Characterization", vol. 591, (Materials Research Society, 2000).
73. Osmont, D., M. Dupont, R. Gouyon, M. Lemistre, D. Baalageas, "Damage and Damaging Impact Monitoring by PZT Sensors-Based HUMS", SPIE, vol. 3986, pp. 85-92.
74. Aggelis, D. G., E. Z. Kordatos, D. V. Soulioti, T. E. Matikas, "Combined Use of Thermography and Ultrasound for the Characterization of Subsurface Cracks in Concrete", Construction and Building Materials, vol. 24(10), pp. 1888-1897, (2010).
75. Culshaw, B., S. G. Pierce, N. J. Staszekski, "Condition Monitoring in Composite Materials: An Integrated System Approach", Proc. of Institute of Mechanical Engineers, vol. 212, Part I, pp. 189-202, (1998).
76. Karpur, P., T. E. Matikas, S. Krishnamurthy, R. L. Crane, L. L. Shaw, "Assessment of Fracture Strength of the Fiber/Matrix Interfaces in Titanium-Based Metal Matrix Composites", Proc. of Trends in NDE Science & Technology; Proceedings of the 14th World Conference on Non-Destructive Testing, vol. 1, pp. 149 - 152, (New Delhi, India, 8-13 December 1996).
77. Karpur, P., T. E. Matikas, S. Shamasundar, R. L. Crane, "Ultrasonic Verification of the Densification and Measurement of Elastic Properties of Porous Metallurgical Compacts", Proc. of First US-Japan Symposium on Advances in NDT, pp. 453-455, (American Society for Nondestructive Testing, 1996).
78. Karpur, P., D. A. Stubbs, T. E. Matikas, M. P. Blodgett, S. Krishnamurthy, "Ultrasonic Nondestructive Characterization Methods for the Development and Life Prediction of Titanium Matrix Composites", Proc. of 77th NATO/AGARD (Advisory Group for Aerospace Research and Development) Meeting of the Structures and Materials Panel on the Characterisation of Fiber Reinforced Titanium Matrix Composites, vol. AGARD Report 796, pp. 13-1 to 13-12, (North Atlantic Treaty Organization, Bordeaux, France, 1993).
79. Kent, R. M., P. Karpur, T. E. Matikas, P. D. Jero, "Ultrasonic Analysis of Interfacial Debond in Ceramic Matrix Composites", Proc. of Nondestructive Characterization of Materials VI, pp.

- 707-713, (Plenum Press, New York, Oahu, Hawaii, 1994).
80. Achenbach, J. D., *Wave Propagation in Elastic Solids*, Amsterdam: North-Holland, 1984.
 81. Ensminger, D., *Ultrasonics: Fundamentals, Technology, Applications*, New York: Marcel Dekker, 1988.
 82. Krautkramer, J., H. Krautkramer, *Ultrasonic Testing of Materials*, New York: Springer-Verlag, 1983.
 83. Rose, J. L., *Ultrasonic Waves in Solid Media*: Cambridge University Press, 1999.
 84. Warnemuende, K., H. C. Wu, "Actively Modulated Acoustic Non-Destructive Evaluation of Concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 34(4), pp. 563-570, (2003).
 85. Warnemuende, K., H. C. Wu, "High Sensitivity NDE in Concrete: Enhancement of Energy Dispersion Using Acoustic Perturbation", *Proc. of SPIE 9th International Symposium on Advanced NDE for Structural and Biological Health Monitoring*, (San Diego, CA, 2004).
 86. Jones, R. B., D. E. W. Stone, "Toward an Ultrasonic-Attenuation Technique to Measure Void Content in Carbon-Fibre Composites", *Nondestructive Testing*, vol. 9(3), pp. 71-79, (1976).
 87. Krautkramer, J., "Emerging Technology - Guided Wave Ultrasonic", *NDTnet*, vol. 3(6), (1998).
 88. Rose, J. L., "A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential", *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 124(3), pp. 273-282, (2002).
 89. Dalton, R. P., P. Cawley, M. J. Lowe, "The Potential of Guided Waves for Monitoring Large Areas of Metallic Aircraft Structure", *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 20, pp. 29-46, (2001).

Παράρτημα

Φωτογραφικό υλικό



Φωτογραφία εξωτερικής άποψης κτιρίου



Φωτογραφία εξωτερικής άποψης κτιρίου

tico

Operating Instructions Ultrasonic Testing Instrument



proceq

Made in Switzerland

... more than 50 years of know-how you can measure!

Proceq SA

Ringstrasse 2

Postfach 336

CH-8603 Schwerzenbach

Switzerland

Tel.: +41 (0)43 355 38 00 /

Fax: +41 (0)43 355 38 12

E-Mail: info-europe@proceq.com

Proceq USA, Inc.

117 Corporation Drive

Aliquippa, PA 15001

Phone +1 724 512 0330 /

Fax +1 724 512 0331

E-Mail: info-usa@proceq.com

Proceq Asia Pte Ltd

12 New Industrial Road

#02-02A Moringstar Centre

Singapore 536202

Phone +65-6382-3966 /

Fax +65-6382-3307

E-Mail: info-asia@proceq.com

Proceq Asia Pte Ltd Shanghai Rep Office

Room 1402 , Uricom International Tower

No. 547 , Tian Mu Road West

Shanghai, P.R.C 200070

Tel: +86 21 6317 7479 /

Fax: +86 21 6317 5015

E-Mail: info-china@proceq.com

Proceq Rus LLC

Ul. Kompozitorov, 10

lit.A, pom.345-N

194356 St. Petersburg

Russia

Phone: + 7 812 335 92 34 /

Fax: + 7 812 335 92 34

E-Mail: info-russia@proceq.com

Proceq Middle East

P.O. Box: 262419

Jebel Ali Free Zone

Dubai, United Arab Emirates

Phone: +971 50 482 9510

E-Mail: info-middleeast@proceq.com

Proceq SAO Ltd.

South American Operations

Rua Haddock Lobo, 746 - 5 andar

Cerqueira Cesar, São Paulo - SP, Brasil

Cep. 01414-000

Phone: +55 11 3083 38 89

E-Mail: info-southamerica@proceq.com

www.proceq.com

Subject to change without notice.

© 2008 by Proceq SA, Schwerzenbach

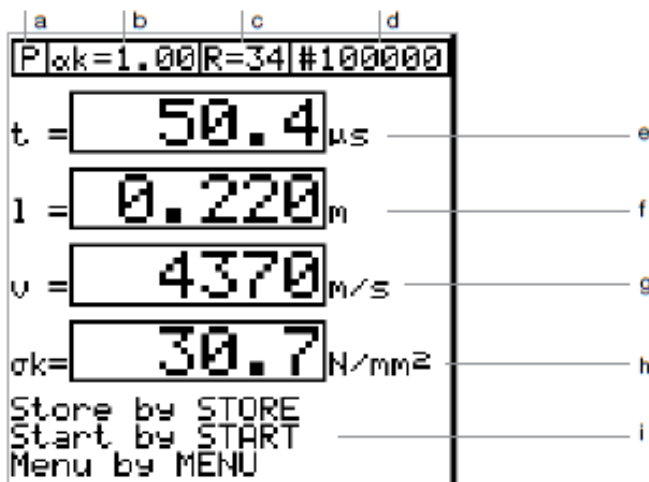
2

820 32 001E ver 04 2008

© 2008 by Proceq SA

Table of Contents

A	Putting into operation	5
B	Setting into the MENU	6
1.	Distance	7
2.	Rebound value R (concrete strength)	7
3.	Correction Factor	7
4.	Measurement No	7
5.	Basic settings	7
5.2	Calibration	7
6.	Automatic storing	8
7.	Measuring limits	8
C	Measurement process	9
1.	Direct and semi-direct measurement	9
1.1	Measurement with "Automatic storing" on	9
1.2	Measurement with "Automatic storing" off	9
2.	Surface velocity	9
3.	Crack depths	10
D	Data Output	11
1.	Data display	11
2.	Data to PC	11
E	Elasticity module	11
F	Function test	11

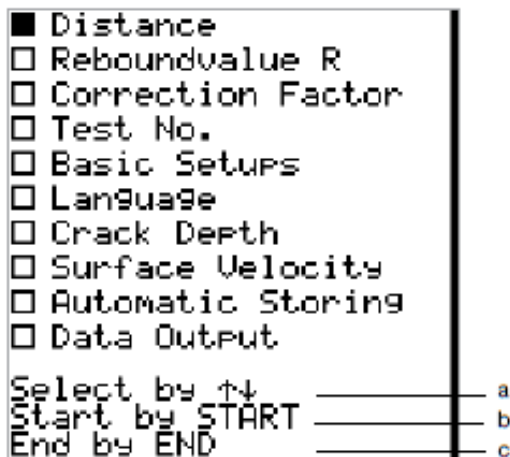


- a: Cement type: P for Portland cement
B for blast furnace cement
- b: Correction factor for moisture or other influences
- c: Rebound value is input on the keyboard
- d: Measurement number
- e: Transmission time of the sound waves between the transducers
- f: Distance between the transducers unit pre-selectable: (m, ft.)
- g: Pulse velocity $v = l/t$
- h: Concrete strength Tico-Schmidt unit pre-selectable: (N/mm², MPa, kg/cm², psi)
- i: Instruction for operation

B Setting into the MENU

The indicator unit has a menu system with user guidance. Please follow the instructions in the respective display field.

The "Menu" key displays the following:



- a: choose menu line
- b: call up chosen line
- c: call up measurement image

Operating Instructions

The Proceq Tico ultrasonic instrument is used for the non-destructive testing of concrete. In particular, the following properties can be determined:

- Uniformity of the concrete
- Cavities, cracks, defects due to fire and frost
- Modulus of elasticity (indirectly through user calculations)
- Concrete strength

Form Supplied



Display Unit

With nonvolatile memory for up to 250 measured values, 128 x 128 graphic LCD.

RS 232 c interface

Integrated software for transmission of the measured values to PC.

Measuring range: approx. 15 to 6550 μ s

Resolution: 0.1 μ s

Voltage pulse: 1kV

Impedance at input: 1 M Ω

Temperature range -10 to + 60 C

Battery operation with six LR 6 batteries, 1.5 V for 30 hours.

2 Transducers 54 kHz

2 Cables BNC, L= 1.5m

Calibration rod

Coupling past can with 150 ml

Carrying case 325 x 295 x 105 mm, total weight 3.4 kg.

Accessories

Transducers with other frequencies, BNC cable length 10 m, and data transfer cable are available. Contact Proceq for complete details.

A Putting into operation

Connect to BNC cables to transducers and display unit. If cables of different lengths are used, the longer cable should be connected to the transmitter socket (transmit)



The transducers must be connected before the unit is switched on and must be disconnected only after switching off. Electrical shock may occur if interior of BNC plug of the transmitter cable (transmit) is touched.

Press the "ON" key. The following is displayed briefly

- The number of the display unit
- The installed software version
- The remaining life of the batteries

If no display appears, the batteries should be replaced. The following measurement display then appears:

Notice to chapter B2

The strengths determined with diagram A or B respectively displayed by the Tico correspond to strengths of sample cubes of 200 mm side lengths.

If different sample forms are used, the strengths must be converted with the corresponding form factor (refer to the special Info-sheet).

1. Distance

For automatic display of the pulse velocity in the measurement screen, the distance between the transducers must be input with an accuracy of 1 % using the $\uparrow \downarrow \leftarrow \rightarrow$ keys. Input in m or ft (see under 5.1)

2. Rebound value R (concrete strength)

Test report CUR 69 of the TNO (The Netherlands) describes the method with which the concrete strength can be calculated using a combination of the rebound value of a Schmidt hammer type N and the pulse velocity. This mathematical relationship was derived from the test results of more than 700 test samples. After the mean rebound value R has been input at the appropriate test point, the cement type Portland or blast furnace must be chosen. Applicability: A calculation of the concrete strength is displayed in the measurement image under ok= only when the measured pulse velocity is in the range of the curve shown (e.g. in Diagram A, v must be between 3.900 m/s and 4.450 m/s at R30). If this is not the case, no strength is displayed. In this case, the minimum strength can be determined with the measured speed of the sound waves and diagram A, respectively diagram B (e.g. for R=30 and v=3.800 m/s f=12 N/mm²)

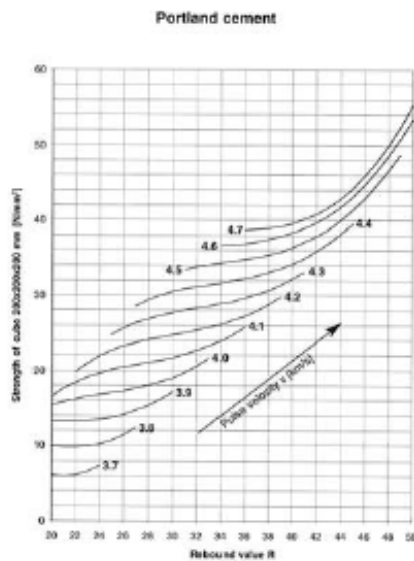


Diagram A Concrete strengths f_{ck}

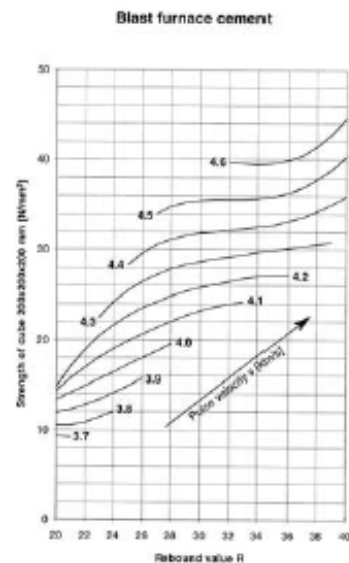


Diagram B Concrete strengths f_{ck}

3. Correction Factor

The pulse velocity depends not only on the concrete quality but also further factors, such as temperature, humidity, arrangement of the rebars, etc. These influences are described in the standards (e.g. BS 1881 Part 203) and can be included here as a correction factor. Input factor using the keys $\leftarrow \rightarrow \uparrow \downarrow$. The factor set multiplies the measured time. This corrected time is displayed and is used for further calculations.

Example: At a temperature of -4 C and moist concrete, the pulse velocity increases by 7 %. A correction factor of 0.93 should therefore be set.

4. Measurement No

The number is automatically incremented after each measurement

5. Basic settings

5.1. Choice of unit for length and strength

The keys $\uparrow \downarrow \leftarrow \rightarrow$ can be used to select the length unit m or ft and the strength unit N/mm², MPa, psi or kg/cm².

5.2 Calibration

The standard 54 kHz transducers are calibrated for the display unit. The calibration value is marked on the calibration rod and must have the value entered here. If other transducers are used (transducers with other frequencies or exponential transducers), these must be calibrated as follows:



- Correction factor 1.0 set.
- Select basic setups
- Switch to calibration with X key and then press the "Start" key.
- Connect transducers to display unit with BNC cable.
- Apply coupling paste thinly
- Input calibration value from the calibration rod or check that the stored value corresponds to the value on the rod.
- Press the "Start" key.
- Press transducers against calibration rod.
- After 5 seconds, a beep is heard and the calibration value is automatically stored.
- Continue to press the transducers against the calibration rod: The unit now switches to the measurement image and forms a check measurement.

The calibration is thus completed.

Before the standard transducers are used again, they must be calibrated as described above.

For the use of other transducers (depending on size and cross-section of the object to be tested, on the concrete composition and on the method of measurement) refer to the standards and the literature.

6. Automatic storing

Selecting Automatic storing on or off determines the type of measuring process (see Section C, Parts 1.1 and 1.2)

7. Measuring limits

Depending on the type and quality of the concrete, the measuring range (distance between the transducers) is limited (for details refer to chapter C1).

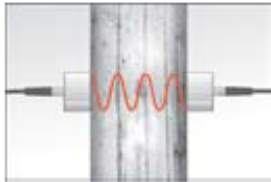
The minimum measuring distance depends on the minimum measuring time remaining of 15 microseconds (refer to chapter Form supplied, Display unit). For concrete with wave speeds of 3'600 to 4'800 m/s this corresponds to a minimum distance of 54 mm to 72 mm.

The required minimum lateral distances according to table 2, chapter 7.5 of BS 1881, part 203 must also be taken into consideration when measuring with Tico (e.g. with a measuring frequency of 54 kHz and a wave speed of 4'500 m/s, 83 mm are required.)

C Measurement process

1. Direct and semi-direct measurement

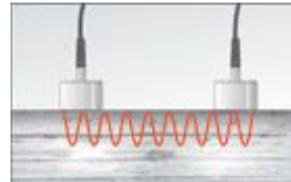
- Determine the measuring points.
- Measure the distance between the measurement points accurately to 1% of the length, max. cable length at direct measurement 1.5 m, distance at indirect measurement 0.1 to 0.5 m, but for semi-direct measurement 0.2 to 0.6 m.



Direct transmission



Semi-direct transmission



Indirect or surface transmission

- Input settings in the Menu and then press the "End" key.
 - Apply coupling paste to contact surfaces of the transducers and to the points on the object to be measured (thin coat for fine concrete surface, thicker coat for rough surface).
 - Press "Start" key.
 - Position transducers exactly on the measurement points and press down.
- Methods for measuring the transmission time with transducers acting as transmitter and receiver, for calculating the pulse velocity.

1.1 Measurement with "Automatic storing" on

During the measuring time, only t is displayed. As soon as the measured value is stable for 3 seconds, a beep is heard and the pulse velocity is displayed under v . If the R-value was input under rebound value in the Menu, the strength is displayed under σ_k .

The values displayed can be stored by pressing the "store" key. If there is uncertainty about the measurement,

press the "start" key instead of "store" and repeat the measurement.

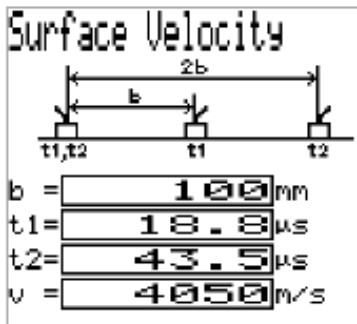
1.2 Measurement with "Automatic storing" off

During the measuring time, v and, if R was input, also k are also displayed in addition to t . The values can be stored at any time, it being necessary to continue pressing down the transducers. The "store" key would therefore have to be pressed by a third hand.

2. Surface velocity

For indirect (surface) measurements, a multiple measurement according to the standards (BA 1881 Part 203, NBN B 15.229) is recommended. In the Menu, select "surface velocity" with the "Start" key.

The following measurement image appears:



Measurement process

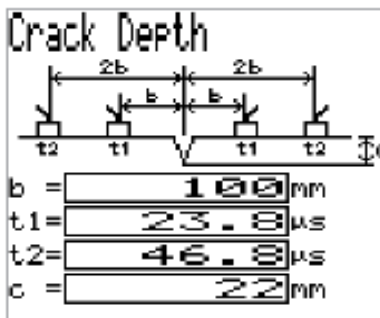
- Connect the transducers to the unit and apply coupling paste.
- Measure distances b and $2b$ on the test object and identify them (b may not be greater than 250 mm)
- Input distance b in the unit with the keys $\uparrow \downarrow \leftarrow \rightarrow$.
- Press the "Start" key: the distance is displayed under b in the measurement image and at the same time the sound pulses are emitted.
- Press transducers against the object and measure b . As soon as the measured value is stable for 3 seconds, a beep is heard and the transmission time is displayed at t_1 .
- By pressing "store" key, the value is stored and the unit is switched to t_2 for measurement.
- Press transducers over distance $2b$. After a stable display for 3 seconds, a beep is heard, after which the "Store" key can be pressed.
- The surface velocity is now displayed at v .



In the event of uncertainties, press the "Start" key instead of "Store" and repeat the measurement.

3. Crack depths

The following measurement image appears:



Measurement process

Connect transducers to the unit and apply coupling paste.

Measure distances b and $2b$ on the test object and identify.

Input distance b on the unit with keys $\uparrow \downarrow \leftarrow \rightarrow$.

Press the "Start" key: the distance is displayed under b in the measurement image, at the same time the sound pulses are emitted.

Press transducers on the object and carry out measurement b to b : as soon as the measurement value is stable for 3 seconds, a beep is heard and the transmission time is displayed as $t1$.

By pressing the "Store" key, the value is stored and the unit is switched to $t2$ for the measurement.

Press transducers to distance $2b$. After a stable display for 3 seconds, a beep is heard after which the "Store" key is pressed. The crack depth is now displayed at c .



- The distance b may not be chosen greater than 125 mm.
- The transmission time $t2$ must be less than twice $t1$, otherwise no crack depth calculation is performed.
- If there is uncertainty as to whether the measurement has been correctly performed, the "Start" key should be pressed again instead of the "Store" key and the measurement repeated.
- The crack depth can be measured only in cracks at right angles to the surface.

D Data Output

Data format of the RS 232 C: 9600, n, 8, 1. When the memory is full, the oldest values are overwritten.

1. Data display

The measured values can be called up from the memory by means of the cursor keys $\Rightarrow \Leftarrow$ and can be shown on the display.

2. Data to PC

Under WINDOWS, the data are transmitted in EXCEL format to a PC with the aid of the terminal program.

		a	b				
TICO Ultrasonic Instrument: SN0010.0059 1.10							
100000	50.4 us	0.22 m	4300 m/s	30.7 N/mm ²	1	34 P	
100001	53.7 us	0.22 m	4100 m/s	26.0 N/mm ²	1	35 P	
100002	51.9 us	0.22 m	4240 m/s	30.3 N/mm ²	1	38 P	
100003	56.0 us	0.22 m	3850 m/s	25.8 N/mm ²	1	33 P	
100004	52.2 us	0.22 m	4210 m/s	26.5 N/mm ²	1	34 P	
100005	49.9 us	0.22 m	4410 m/s	34.0 N/mm ²	1	36 P	
100006	50.0 us	0.22 m	4320 m/s	31.5 N/mm ²	1	37 P	
100007	52.5 us	0.22 m	4190 m/s	28.0 N/mm ²	1	34 P	
100008	54.7 us	0.22 m	4020 m/s	21.8 N/mm ²	1	32 P	k
c	d	e	f	g	h	i	

- a Number of display unit
- b Software version
- c Measurement number
- d Transmission time
- e Distance
- f Pulse velocity
- g Concrete strength
- h Correction factor
- i Rebound value
- k Cement type

For data transmission to PC, also see NFO 96 04 509 E.

E Elasticity module

Dynamic and static elasticity modules can only be determined indirect by measuring the sound waves and conversion using table 4 in chapter 12 of BS 1881, part 203. They are only regarded as general indications for "normal" Portland cement.

F Function test

A control measurement should be carried out from time to time with the calibration rod (refer to chapter B5.2).