



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ»**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΥΛΑΚΟΣ**

**«ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ ΝΑΝΟ-ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ
ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΑΣΤΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ»**

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2017

Εσώφυλλο:

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην εξειδίκευση:

Υλικά Κατασκευών & Δομές – Σύνθετα Υλικά

που απονέμει το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε τηναπό την εξεταστική επιτροπή:

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ

ΒΑΘΜΙΑ

1. Θεόδωρος Ματίκας, Επιβλέπων

Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής
Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων

2. Κωνσταντίνος Δάσιος

Επίκουρος Καθηγητής του ΤΜΕΥ της
Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου
Ιωαννίνων

3. Νεκταρία Μαριάνθη Μπάρκουλα

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του ΤΜΕΥ της
Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου
Ιωαννίνων

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

"Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε κάτω από τους διεθνείς ηθικούς και ακαδημαϊκούς κανόνες δεοντολογίας και προστασίας της πνευματικής ιδιοκτησίας. Σύμφωνα με τους κανόνες αυτούς, δεν έχω προβεί σε ιδιοποίηση ξένου επιστημονικού έργου και έχω πλήρως αναφέρει τις πηγές που χρησιμοποίησα στην εργασία αυτή."

(Υπογραφή υποψηφίου)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών του ΤΜΕΥ «Προηγμένα Υλικά» και τα πειράματα διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Μηχανικής, Ευφών Αισθητήρων και Μη Καταστροφικής Αξιολόγησης Υλικών του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου κ. Θεόδωρο Ματίκα, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το θέμα, καθώς και για την πολύτιμη βοήθειά του και την άποψη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης το προσωπικό του Εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφών Αισθητήρων και Μη Καταστροφικής Αξιολόγησης Υλικών, του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, και ιδιαίτερα τον κ. Ηλία Τραγαζίκη, υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος, για την ανεκτίμητη βοήθεια και συμπαράσταση που μου προσέφεραν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, το ιδιαίτερα φιλικό κλίμα που καλλιεργήθηκε σε όλη τη διάρκεια της συνύπαρξής μας στους χώρους των εργαστηρίων και κυρίως για την πολύτιμη καθοδήγησή τους σε κάθε φάση της διπλωματικής εργασίας μου.

Τέλος, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην Υπηρεσία μου (Περιφέρεια Ηπείρου) καθώς και στην οικογένειά μου για τη διαρκή τους υποστήριξη και κατανόηση που μου προσέφεραν σε όλη την διάρκεια του προγράμματος των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Γεώργιος Συλάκος
Πολιτικός Μηχανικός

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή στοχεύει στην μελέτη της σκλήρυνσης νανο-τροποποιημένης τσιμεντόπαστας με χρήση υπερήχων. Η νανο-τροποποιημένη τσιμεντόπαστα αποτελείται από νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλού τοιχώματος, τσιμέντο και νερό.

Το κίνητρο αυτής της μελέτης είναι το όλο και αυξανόμενο ενδιαφέρον για έρευνα σχετικά με την νανο-ενίσχυση δομικών υλικών. Τελευταία, γίνεται προσπάθεια δημιουργίας σύνθετων τροποποιημένων υλικών με την προσθήκη νανο-υλικών που συντελούν στην αλλαγή των υπαρχουσών ιδιοτήτων τους, με στόχο τη βελτίωσή τους. Παράλληλα, ο ερευνητικός και επιστημονικός χώρος μελετούν την επίδραση της νανο-τεχνολογίας στον κόσμο των υλικών. Οι μελέτες για τα νανο-υλικά που χρησιμοποιούνται ως μέσο ενίσχυσης σε δομικά υλικά όπως σκυρόδεμα, κονίαμα ή τσιμεντόπαστα, βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο γι' αυτό τα πορίσματα της κάθε μελέτης που διενεργείται, τίθενται διαρκώς υπό αμφισβήτηση αλλά λαμβάνονται ως βάση για περεταίρω έρευνες.

Στην έρευνα πραγματοποιήθηκε μία σειρά πειραμάτων σε τσιμεντόπαστα στα οποία άλλαζε το ποσοστό της νανο-ενίσχυσης με το τσιμέντο καθώς και το ποσοστό νερού με το νανο-τροποποιημένο τσιμέντο. Οι μετρήσεις ξεκινούσαν αμέσως μετά την τοποθέτηση του δείγματος στον δειγματοφορέα και τα μεγέθη που μετρήθηκαν ήταν η ταχύτητα, το εύρος και το μέτρο ελαστικότητας μεγέθη ικανά να μας δώσουν σημαντικές πληροφορίες όσον αφορά την αποδοτικότητα της κατασκευής και τον καλύτερο δυνατό χρόνο στον οποίο αυτή επιτυγχάνεται.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο τσιμέντο, όπου δίνεται ο ορισμός του και γίνεται αναφορά στην διαδικασία παραγωγής, στην χημική σύσταση, στις κατηγορίες τσιμέντου, στις ιδιότητες του τσιμέντου και της τσιμεντόπαστας καθώς και στην ενυδάτωση του τσιμέντου. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται και η διεργασία ενυδάτωσης, μηχανισμός ο οποίος επιδρά σημαντικά στις τελικές ιδιότητες της τσιμεντόπαστας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην νανοτεχνολογία. Αρχικά αναφέρεται στην επίδραση της νανοτεχνολογίας στην κατασκευή, στα δομικά υλικά και στις αναμενόμενες

εξελίξεις. Στη συνέχεια, αναφέρεται στα νανουλικά, στις συνθετικές μεθόδους τους και στην ομοιομορφία τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους νανοσωλήνες άνθρακα. Αρχικά γίνεται αναφορά στην δομή, την μορφολογία και στις ιδιοτητές τους. Στη συνέχεια, αναφέρεται στις εφαρμογές, στους μεθόδους παραγωγής και στον χαρακτηρισμό τους. Τέλος, γίνεται αναφορά στην εφαρμογή των νανοσωλήνων άνθρακα σε τσιμεντοειδή υλικά.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους μη καταστροφικούς ελέγχους και στις μεθόδους που εφαρμόζουμε. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο μη καταστροφικός έλεγχος με χρήση Υπερήχων με αναφορά στην θεωρία των υπερήχων και την διαδικασία ελέγχου που ακολουθείται.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά το πειραματικό μέρος και συγκεκριμένα με εικόνες η παρασκευή αιωρήματος νανοσωλήνων άνθρακα, η πειραματική διαδικασία και η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με διαγράμματα της ταχύτητας διάδοσης στον χρόνο καθώς και του μέτρου ελαστικότητας στον χρόνο των δοκιμών και οι παρατηρήσεις – σχόλια σε αυτά.

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν έπειτα από τις παρατηρήσεις που έχουν γίνει κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Επίσης δίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο θέμα.

SUMMARY

This post-graduate thesis aims at studying the hardening of nano-modified cement paste using ultrasound. The nano- modified cement paste consists of multi-wall carbon fiber, cement and water.

The motivation of this study is the growing interest in research on nano-reinforcing building materials. Last, there is an effort to create composite materials modified by adding nano-materials contributing to changing their existing properties in order to improve them. Meanwhile, research and academia are studying the effect of nano-technology in the world of materials. Studies on nano-materials used to enforce building materials such as concrete, mortar or cement paste, are at an early stage so that the results of each study conducted constantly questioned but taken as a basis for further investigations.

In the research conducted a series of experiments in cement paste in which the percentage of nano-reinforcement with cement was changed as well as the water percentage of water with the nano- modified cement. The measurements were started immediately after placing the sample in sampler and the sizes we measured were the speed, range and modulus elasticity, sizes able to give us important information about the efficiency of the structure and the best time in which this is achieved.

In the first chapter, reference is made to cement, where its definition is given and reference is made to the production process, chemical composition, cement categories, cement and cement paste properties and cement hydration. In the same chapter is presented the hydration process, a mechanism which significantly influences the final properties of the cement paste.

In the second chapter, reference is made to nanotechnology. Initially refers to the impact of nanotechnology on construction, building materials and expected developments. They then refer to nano materials, their synthetic methods and their uniformity.

In the third chapter, reference is made to carbon nanotubes. Initially reference is made to their structure, morphology and their properties. Then refers to the applications, the

methods of production and their characterization. Finally, reference is made to the application of carbon nanotubes to cementitious materials.

In the fourth chapter, reference is made to non-destructive tests and their methods of application. In the same chapter is presented non-destructive testing using Ultrasound with reference to ultrasound theory and control procedure to be followed.

In the fifth chapter we describe the experimental part and in particular with pictures the preparation of carbon nanotubes suspension, the experimental procedure and the experimental device was used. Also, the results of the experiments are presented with diagrams of the propagation velocity in time as well as the elastic modulus in time of the specimens and the observations - comments on them.

Finally, in the sixth chapter are mentioned the conclusions that follow from the observations made during the analysis of the results. Suggestions for further research on this subject are also provided.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	σελ.3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	σελ.4-5
SUMMARY.....	σελ. 6-7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	σελ. 11-12
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	σελ. 13-14
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	σελ. 15
1. ΤΣΙΜΕΝΤΟ.....	σελ.16-27
1.1 Ορισμός.....	σελ.16
1.2 Διαδικασία παραγωγής.....	σελ.16-17
1.3 Χημική σύσταση.....	σελ.17
1.4 Κατηγορίες τσιμέντου.....	σελ.17-19
1.5 Ιδιότητες τσιμέντου.....	σελ.19-20
1.6 Ιδιότητες τσιμεντόπαστας.....	σελ.20-21
1.7 Ενυδάτωση τσιμέντου.....	σελ.21-27
2. NANOTEXNOΛΟΓΙΑ.....	σελ.28-37
2.1 Γενικά.....	σελ.28-29
2.2 Εφαρμογές νανοτεχνολογίας στην κατασκευή.....	σελ.29-30
2.3 Επίδραση στα δομικά υλικά.....	σελ.30-31
2.4 Αναμενόμενες εξελίξεις.....	σελ.31
2.5 Νανουλικά.....	σελ.32-35
2.5.1 Φυσικά νανουλικά.....	σελ.32
2.5.2 Συνθετικά νανουλικά.....	σελ.32-35
2.6 Συνθετικές μέθοδοι.....	σελ.35-36
2.7 Ομοιομορφία.....	σελ.36-37
3. NANOΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ	σελ.38-63
3.1 Εισαγωγή στους Νανოსωλήνες Άνθρακα	σελ.38-39
3.2 Δομή και Μορφολογία Νανοςωλήνα Άνθρακα.....	σελ.39-43
3.2.1 Μονοφλοιικοί νανοςωλήνες άνθρακα (SWCNT _s).....	σελ.39-42
3.2.2 Πολυφλοιικοί νανοςωλήνες άνθρακα (MWCNT _s).....	σελ.42-43
3.2.3 Ατέλειες στη δομή των νανοςωλήνων άνθρακα.....	σελ.43
3.3 Ιδιότητες CNTS	σελ.43-47
3.3.1 Μηχανικές ιδιότητες	σελ.43-44

3.3.2	Θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες	σελ.44-45
3.3.3	Κινητικές ιδιότητες	σελ.45
3.3.4	Τοξικότητα	σελ.45-46
3.4	Εφαρμογές Νανοσωλήνων Άνθρακα.....	σελ.47-48
3.5	Μέθοδοι παραγωγής Νανοσωλήνα Άνθρακα.....	σελ.48-54
3.5.1	Η Τεχνική Ηλεκτρικής Εκκένωσης (Arc-Discharge).....	σελ.49-50
3.5.2	Η Τεχνική Εξάχνωσης με Δέσμη Laser (Laser Ablation).....	σελ.50-51
3.5.3	Η Τεχνική της Μετατροπής CO υπό Υψηλή Πίεση (HiPco).....	σελ.51
3.5.4	Η Τεχνική της Χημικής Εναπόθεσης Ατμών (CVD).....	σελ.51-54
3.6	Χαρακτηρισμός Νανοσωλήνων Άνθρακα.....	σελ.54-55
3.7	Εφαρμογή νανοσωλήνων άνθρακα σε τσιμεντοειδή υλικά.....	σελ.55-63
3.7.1	Μηχανισμοί ενίσχυσης.....	σελ.55-58
3.7.2	Διασπορά νανοσωλήνων άνθρακα σε τσιμεντοειδή υλικά.....	σελ.58-63
3.7.2.1	Φυσικές Μεθόδους (Κατεργασία με υπερήχους).....	σελ.60
3.7.2.2	Χημικές Μεθόδους.....	σελ.60-63
4.	ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ.....	σελ.64-110
4.1	Εισαγωγή.....	σελ.64-68
4.2	Οι Μέθοδοι μη καταστροφικού Ελέγχου.....	σελ.68-80
4.3	Μη καταστροφικός έλεγχος με χρήση Υπερήχων.....	σελ.80-110
4.3.1	Ο Ήχος.....	σελ.80-81
4.3.2	Οι Υπέρηχοι.....	σελ.81-83
4.3.3	Βασική αρχή δοκιμής με Υπέρηχους.....	σελ.83-84
4.3.4	Μετάδοση των Υπερήχων.....	σελ.85-87
4.3.5	Παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάδοση των υπερήχων.....	σελ.87-88
4.3.6	Ανάκλαση – Διάθλαση – Νόμος του Snell.....	σελ.88-90
4.3.7	Κρίσιμες γωνίες.....	σελ.90-92
4.3.8	Σκέδαση – Περίθλαση – Συμβολή.....	σελ.92
4.3.9	Εξασθένιση.....	σελ.92-94
4.3.10	Παραγωγή Υπερήχων.....	σελ.94-95
4.3.11	Αισθητήρες Υπερήχων.....	σελ.95-96
4.3.12	Σύστημα ελέγχου με Υπερήχους.....	σελ.96-97
4.3.13	Διατάξεις πομπού-δέκτη.....	σελ.97-102
4.3.13.1	Μέθοδος παλμού-ηχούς (pulse-echo).....	σελ.97-99
4.3.13.2	Μέθοδος απ' ευθείας μετάδοσης (through-transmission).....	σελ.100-101

4.3.13.3 Μέθοδος γωνιώδους ανάκλασης (pitch-catch).....σελ.	101-102
4.3.14 Τεχνικές απεικόνισης των δεδομένων.....σελ.	102-107
4.3.14.1 A-scan.....σελ.	103
4.3.14.2 B-scan.....σελ.	104-105
4.3.14.3 C-scan.....σελ.	106-107
4.3.15 Εφαρμογές υπερήχων.....σελ.	108-109
4.3.16 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα της μεθόδου των υπερήχων.....σελ.	109-110
4.3.17 Έλεγχος τσιμεντόπαστας με χρήση υπερήχων (τασικά κύματα).....σελ.	110-111
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....σελ.	112-131
5.1 Παρασκευή αιωρήματος νανολωλήνων ανθρακα.....σελ.	112-114
5.2 Πειραματική διαδικασία.....σελ.	114-115
5.3 Πειραματική διάταξη.....σελ.	115-117
5.4 Αποτελέσματα.....σελ.	117-129
5.4.1 Διαγράμματα ταχύτητας.....σελ.	119-123
5.4.2 Διαγράμματα Μέτρου Ελαστικότητας.....σελ.	124-128
5.4.3 Συγκεντρωτικά διαγράμματα Ταχύτητας και Μέτρου Ελαστικότητας.....σελ.	129
5.5 Παρατηρήσεις – σχόλια.....σελ.	130-131
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....σελ.	132-133
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ.	134-135

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Πρώτες Ύλεις - Ενδιάμεσο προϊόν -τελικό προϊόν.

Σχήμα 1.2 Διάγραμμα ροής διεργασιών τσιμέντου.

Σχήμα 1.3 Τσιμέντο πριν την ενυδάτωση.

Σχήμα 1.4 Ταχύτητα ενυδάτωσης φάσεων.

Σχήμα 3.1 Γραφικό επίπεδο → τύλιγμα → SWCNT.

Σχήμα 3.2 Γραφικό πλέγμα και απεικόνιση διανύσματος chiral.

Σχήμα 3.3 Η διαφορά της δομής zig-zag και της armchair νανοσωλήνων.

Σχήμα 3.4 Zig-zag, armchair και chiral (ενδιάμεσοι) νανοσωλήνες ανάλογα με τον άξονα τυλίγματος του γραφικού επιπέδου.

Σχήμα 3.5 Πιθανές δομές μονοφλουικών νανοσωλήνων άνθρακα.

Σχήμα 3.6 Δομή πολυφλουικού νανοσωλήνα άνθρακα.

Σχήμα 3.7 Ατέλειες στη δομή των νανοσωλήνων α) Ατομικό κενό β) Υ-διακλάδωση.

Σχήμα 3.8 Τρανζίστορ από νανοσωλήνες άνθρακα.

Σχήμα 3.9 Σχηματική τεχνική Arc-Discharge.

Σχήμα 3.10 Σχηματικά η τεχνική Laser Ablation.

Σχήμα 3.11 Σχηματικά η τεχνική thermal CVD.

Σχήμα 3.12 Μικροφωτογραφία SEM (scanning electron microscopy) με την επίδραση της MPECVD στη δομή των νανοσωλήνων κατά την παραγωγή.

Σχήμα 3.13 Διαδικασία παρασκευής τσιμεντόπαστας ενισχυμένο με CNTs, με χρήση υπερήχων.

Σχήμα 4.1 Μήκος κύματος.

Σχήμα 4.2 Ακουστικό φάσμα.

Σχήμα 4.3 Το φάσμα του ήχου.

Σχήμα 4.4: Τρόπος λειτουργίας των υπερήχων.

Σχήμα 4.5 Διαμήκης ή Συμπιεστικό κύμα.

Σχήμα 4.6 Εγκάρσιο κύμα.

Σχήμα 4.7 Επιφανειακό κύμα.

Σχήμα 4.8 Κύματα Lamp: α) Διασταλτικά, β) Καμπικά.

Σχήμα 4.9 Κάθετη πρόσπτωση.

Σχήμα 4.10 Πλάγια πρόσπτωση.

Σχήμα 4.11 Κρίσιμες γωνίες.

- Σχήμα 4.12** Απώλειες υπερηχητικής δέσμης.
- Σχήμα 4.13** Το πεδίο ήχου ενός αισθητήρα υπερήχων με τις ζώνες εγγύς πεδίου και μακρινού πεδίου.
- Σχήμα 4.14** Σχηματικό διάγραμμα συστήματος μέτρησης και απεικόνισης δοκιμών υπερήχων.
- Σχήμα 4.15** Τρεις κοινές διατάξεις-τεχνικές πομπού-δέκτη: παλμού-ηχούς (pulse-echo), απ' ευθείας μετάδοσης (through- transmission), και γωνιώδους ανάκλασης (pitch-catch).
- Σχήμα 4.16** Σχηματική παράσταση επαναλαμβανόμενων αντηχήσεων (A-scan) μετά από συνεχείς ανακλάσεις του αρχικού παλμού από τις απέναντι επιφάνειες του δοκιμίου.
- Σχήμα 4.17** Σχηματική παράσταση της μεθόδου παλμού-ηχούς (pulse-echo) για τον έλεγχο των υλικών με υπερήχους: (α) Ανίχνευση αποκόλλησης στρώσης σε πολυστρωματικό σύνθετο υλικό, (β) ανίχνευση ρωγμής στο εσωτερικό δοκιμίου.
- Σχήμα 4.18** Σχηματική παράσταση της μεθόδου απ' ευθείας μετάδοσης (through-transmission) για τον έλεγχο των υλικών με υπερήχους.
- Σχήμα 4.19** Μέθοδος γωνιώδους ανάκλασης (pitch-catch).
- Σχήμα 4.20** Διάταξη pitch-catch με αισθητήρες σε εμβάπτιση για σάρωση με κύματα Lamb.
- Σχήμα 4.21** Απεικόνιση A-scan και τοποθέτηση θυρών χρόνου.
- Σχήμα 4.22** Απεικόνιση B-scan.
- Σχήμα 4.23** Σφαιρικά εστιασμένος αισθητήρας εστιάζει στο εσωτερικό δοκιμίου και παράγει κύμα Rayleigh στην επιφάνεια.
- Σχήμα 4.24** B-scan κύματος Rayleigh.
- Σχήμα 4.25** Σχηματική παρουσίαση συλλογής δεδομένων υπερήχων και απεικόνισης των δεδομένων σε C-scan. Η εικόνα δείχνει μια ατέλεια που βρίσκεται σε κάποιο βάθος στο εσωτερικό του δοκιμίου.
- Σχήμα 4.26** C-scan πλάκας πολυστρωματικού συνθέτου υλικού. Η εικόνα δείχνει αποκολλήσεις των στρώσεων του συνθέτου υλικού.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Πίνακας 3.1 Ιδιότητες των μορφών νανο-σωλήνων άνθρακα.

Πίνακας 3.2 Τι προσδιορίζει κάθε αναλυτική τεχνική.

Πίνακας 4.1 Οι 6 κύριες κατηγορίες των ΜΚΕ και οι εφαρμογές τους.

Πίνακας 4.2 Δυνατότητες συνήθων μεθόδων ΜΚΕ.

Πίνακας 5.1 Υπολογισμός πυκνότητας δοκιμίων.

Διάγραμμα 5.1 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου χωρίς CNT και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.2 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,2 και λόγο νερού τσιμέντου 0,4

Διάγραμμα 5.3 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,2 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.4 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,4 και λόγο νερού τσιμέντου 0,4

Διάγραμμα 5.5 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,4 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.6 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,6 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.7 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,8 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.8 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 1,0 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.9 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 1,2 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.10 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου χωρίς CNT και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.11 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,2 και λόγο νερού τσιμέντου 0,4

Διάγραμμα 5.12 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,2 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.13 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,4 και λόγο νερού τσιμέντου 0,4

Διάγραμμα 5.14 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,4 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.15 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,6 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.16 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,8 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.17 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 1,0 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.18 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 1,2 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

Διάγραμμα 5.20 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο όλων των δοκιμίων

Διάγραμμα 5.21 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο όλων των δοκιμίων

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.1 Μικροφωτογραφίες SEM νανοσωληνων από PECVD (δεξιά) και από MPECVD(αριστερά).

Εικόνα 3.2 Μικροφωτογραφία SEM κουβαριασμένων, σαν σπαγγέτι νανοσωλήνων, που παράχθηκαν από συμβατικές CVD τεχνικές

Εικόνα 3.3 Ανάπτυξη C-S-H γύρω από SWCNTs.

Εικόνα 3.4 CNTs γεφυρώνουν ρωγμές σε τσιμεντοειδές υλικό.

Εικόνα 3.5 Εξόλκευση των CNTs.

Εικόνα 3.6 Συσσωματώματα νανοσωλήνων άνθρακα σε τσιμεντοπολτό μετά την ενυδάτωση.

Εικόνα 3.7 Διασπορά MWCNTs σε νερό (α) χωρίς καμία επεξεργασία (β) με εφαρμογή πολυμερούς ακρυλικού οξέος και κατεργασία υπερήχων.

Εικόνα 3.8 Σχηματική απεικόνιση της ενσωμάτωσης νανουλικών σε τσιμεντοειδές υλικό μέσω της απευθείας ανάπτυξης τους στα σωματίδια του τσιμέντου

Εικόνα 4.1 Οπτικός έλεγχος.

Εικόνα 4.2 Μέθοδος των διεισδυτικών υγρών.

Εικόνα 4.3 Μέθοδος των υπερήχων.

Εικόνα 4.4 Μέθοδος των δινορευμάτων.

Εικόνα 4.5 Ραδιογραφική μέθοδος.

Εικόνα 4.6 Θερμογραφικός έλεγχος.

Εικόνα 4.7 Μέθοδος ακουστικής εκπομπής.

Εικόνα 4.8 Μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων.

Εικόνα 5.1 Πολυφλοιικοί Νανοσωλήνες Άνθρακα (MWCNT).

Εικόνα 5.2 Μέσο διασποράς υπερευστοποιητής Viscocrete 300

Εικόνα 5.3 Διαδικασία υπερήχησης με συσκευή Sonicator tip.

Εικόνα 5.4 Δοκίμια τσιμεντόπαστας.

Εικόνα 5.5 Καλούπι δοκιμίου.

Εικόνα 5.6 Πειραματική διάταξη εξοπλισμού.

Εικόνα 5.7 Συσκευή μέτρησης βάρους δοκιμίου.

1. ΤΣΙΜΕΝΤΟ

1.1 Ορισμός

Το τσιμέντο, ή σκυροκονίαμα, είναι ένα υδραυλικό συνδετικό υλικό. Δηλαδή είναι ένα λεπτά διαμερισμένο ανόργανο υλικό (σκόνη) που σε ανάμειξη με νερό σχηματίζει μια πάστα η οποία πήζει και σκληραίνει μέσω αντιδράσεων και διεργασιών ενυδάτωσης και μετά την σκλήρυνση επανακτά την αντοχή και την σταθερότητα ακόμα και μέσα στο νερό.

1.2 Διαδικασία παραγωγής

α)Εξόρυξη και προετοιμασία πρώτων υλών:

Οι πρώτες ύλες που απαιτούνται για την παραγωγή τσιμέντου εξορύσσονται από τα λατομεία (ασβεστολίθου, αργίλου, σχιστόλιθου, κλπ) μετά από γεωλογικές έρευνες και χημικές αναλύσεις, σε συγκεκριμένες ποσότητες και αναλογίες. Στη συνέχεια συνθλίβονται και μεταφέρονται για αποθήκευση.

β)Άλεση πρώτων υλών και έψηση:

Τα υλικά αλέθονται σε μια πολύ λεπτή πούδρα, ένα μείγμα φαρίνας όπως αποκαλείται.

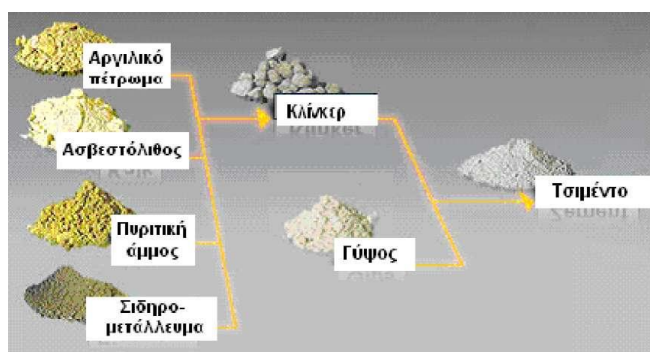
Το μίγμα υλικών ομογενοποιείται, προθερμαίνεται και στη συνέχεια οδηγείται στην κάμινο, η οποία θερμαίνεται με φλόγα που μπορεί να φθάσει τους 2.000°C. Το μείγμα ψήνεται σε θερμοκρασία 1.500°C. Σε αυτή τη θερμοκρασία και μετά από χημικές αντιδράσεις προκύπτει το κλίνκερ, η βάση για την παρασκευή κάθε είδους τσιμέντου.

Στη συνέχεια το κλίνκερ ψύχεται απότομα με ροή αέρα και αποθηκεύεται.

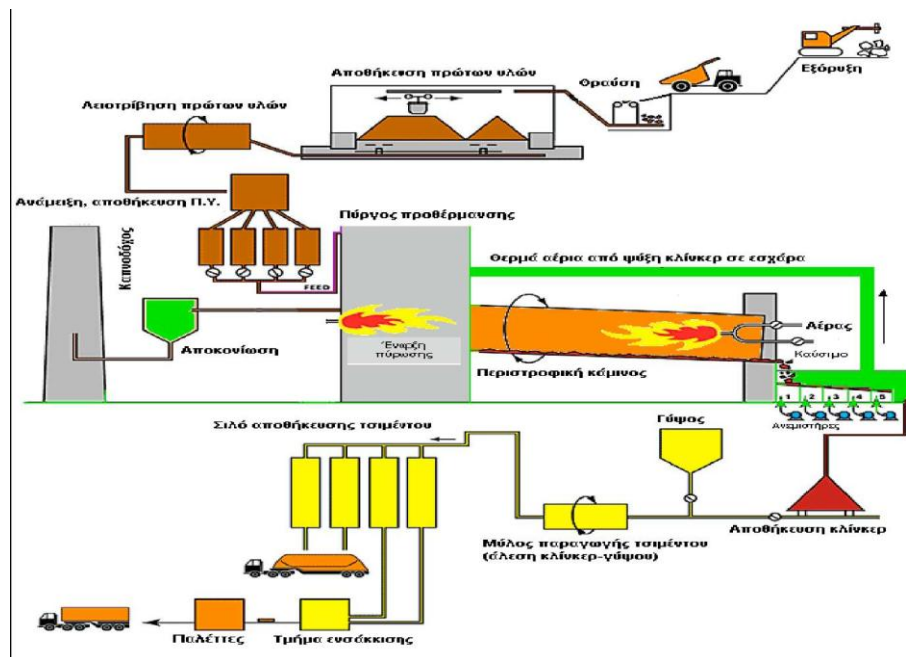
γ)Άλεση τσιμέντου και διανομή:

Κλίνκερ μαζί με γύψο αλέθονται σε πολύ λεπτή σκόνη, το γνωστό τσιμέντο. Σε αυτό το στάδιο μπορούν να προστεθούν μαζί με γύψο διάφορα άλλα υλικά, τα οποία λέγονται πρόσθετα. Χρησιμοποιώντας τα πρόσθετα σε διάφορες αναλογίες έχουμε συγκεκριμένους τύπους τσιμέντου.

Το τσιμέντο αποθηκεύεται σε σιλό χύδην ή σακευμένο μέχρι να αποσταλεί στους πελάτες.



Σχήμα 1.1 Πρώτες Ύλες - Ενδιάμεσο προϊόν -τελικό προϊόν.



Σχήμα 1.2 Διάγραμμα ροής διεργασιών τσιμέντου.

1.3 Χημική σύσταση

Τα κύρια συστατικά του τσιμέντου Πόρτλαντ είναι το πυριτικό τριασβέστιο (3CaO SiO_2) σε περιεκτικότητα 54% κ.β. περίπου, το πυριτικό διασβέστιο (2CaO SiO_2) σε περιεκτικότητα 17% κ.β., το αργλικό τριασβέστιο ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$) σε περιεκτικότητα 19% κ.β., το αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο ($4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$) σε περιεκτικότητα 9% κ.β. και κάποια δευτερεύοντα συστατικά σε μικρές ποσότητες.

1.4 Κατηγορίες τσιμέντου

Από την 17/07/01 με την Υπουργική Απόφαση που δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ/917/Β/17.7.01 τα κοινά τσιμέντα καλύπτονται από το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 197-1, και διακρίνονται σε 5 βασικούς τύπους και 3 κατηγορίες αντοχών:

ΤΥΠΟΙ:

- Τσιμέντο: CEM I Τσιμέντο Πόρτλαντ
- Τσιμέντο: CEM II Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ
- Τσιμέντο: CEM III Σκωριοτσιμέντο
- Τσιμέντο: CEM IV Ποζολανικό Τσιμέντο
- Τσιμέντο: CEM V Σύνθετο τσιμέντο

Τύπος I : Τσιμέντο Portland (καθαρό). Αποτελείται από κλίνκερ αλεσμένο με δευτερεύοντα συστατικά (σκωρία υψικαμίνων, φυσική ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα, πληρωτικά) σε ποσοστό μέχρι 5% κ. β. Χρησιμοποιείται σχετικά σπάνια στην χώρα μας και αρκετά συχνά στο εξωτερικό.

Τύπος II : Τσιμέντο Portland με ποζολάνη. Παράγεται με συνάλεση κλίνκερ (65-95% κ.β.), άλλων κύριων συστατικών (σκωρία υψικαμίνων, φυσική ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα, 0-25%) και δευτερευόντων συστατικών (0-5%). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένα τσιμέντο Τύπου II μπορεί να περιέχει θηραϊκή ή μηλαϊκή γη (συνηθίζεται περισσότερο τα τελευταία χρόνια και σε ποσοστά 10-15%), ιπτάμενη τέφρα (10-15%), άχνη ασβεστόλιθου (5%), σκωρίες υψικαμίνων (2-4%), φωσφογύψο (1-3%) και γύψο (2%). Το τσιμέντο αυτό είναι το φθηνότερο από το Τύπου I και χρησιμοποιείται συχνά για τα συνηθισμένα έργα στην Ελλάδα.

Τύπος III: Ποζολανικό Τσιμέντο Portland. Περιέχει ποζολάνη σε περιεκτικότητα 20-40%. Λόγω μικρότερης περιεκτικότητας σε C₃S και C₃A και μεγαλύτερης σε ποζολάνες χαρακτηρίζεται από μικρότερη θερμότητα ενυδάτωσης και δίνει μικρότερη αρχική αντοχή αλλά παρόμοια τελική. Χρησιμοποιείται σε έργα με στοιχεία μεγάλων διαστάσεων, για την αποφυγή ρηγματώσεων λόγω διαφορικών θερμοδιαστολών.

Τύπος IV : Τσιμέντο Portland με ανθεκτικότητα στα θειικά άλατα. Δεν περιέχει ποζολάνες αλλά έχει περιεκτικότητα σε C₃A μικρότερη από 3.5% και σε SO₃ το πολύ 2.5%. Χρησιμοποιείται για σκυρόδεμα σε πολύ διαβρωτικό περιβάλλον (π.χ. στοιχεία θεμελίωσης σε επαφή με διαβρωτικά υπόγεια νερά).

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΤΟΧΗΣ:

- 32.5 MPa,
- 42.5 MPa,
- 52.5 MPa (1MPa = 1N/mm² = 10,2 kp/cm²)

Με υποκατηγορία N(normal) ή R(rapid) πρώιμης αντοχής

Οι συνηθέστερες κατηγορίες οι οποίες χρησιμοποιούνται είναι:

1. Τσιμέντο τύπου CEM I /42.5 (το “καθαρό”)

Δηλαδή τύπου I, χωρίς ιπτάμενη τέφρα και κατηγορίας χαρακτηριστικής αντοχής σε θλίψη στις 28 ημέρες 42.5 MPa (425 kp/cm²), που σημαίνει ελάχιστη αντοχή 42.5 MPa και μέγιστη 62.5 MPa. Αυτά συνήθως έχουν μέσω όρο αντοχής στις 28 ημέρες 50 MPa έως 52 MPa.

2. Τσιμέντο τύπου CEM II /32.5 (το λεγόμενο ‘κοινό’)

Δηλαδή το τσιμέντο με ποζολάνη (ιπτάμενη τέφρα ΔΕΗ / Πτολεμαΐδας ή Μεγαλόπολης, Μηλαϊκή Γη, Σκυδραϊκή Γη κτλ.) και κατηγορίας αντοχής 32.5 MPa, δηλαδή ελάχιστη 32.5 MPa και μέγιστη 52.5 MPa. Το τσιμέντο αυτό υπάρχει και σε σάκους και χύμα (σε σιλοφόρα/ ‘αγελάδες’), ενώ τα υπόλοιπα είναι μόνο χύμα, δηλαδή μεταφέρονται με σιλοφόρα σε Εργοταξιακά Σιλό (Τύποι I, II, IV κτλ.). οι αντοχές του είναι συνήθως 36-38 MPa διαφέρουν προφανώς από εταιρεία σε εταιρεία αλλά και στην ίδια εταιρεία από εργοστάσιο σε εργοστάσιο.

1.5 Ιδιότητες τσιμέντου

A) ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ Η ΛΕΠΤΟΤΗΤΑ ΑΛΕΣΗΣ

Η λεπτότητα του τσιμέντου επιδρά στη θερμότητα που απελευθερώνεται όπως επίσης και στην ταχύτητα ενυδάτωσης. Η λεπτότητα του τσιμέντου εκφράζεται από την κοκκομετρική του ανάλυση και από τον αριθμό Blaine (ειδική επιφάνεια) σε μονάδες **m²/kg** ή **cm²/g** (**1 m²/kg = 10 cm²/g**) και αντιπροσωπεύει τη συνολική εξωτερική επιφάνεια των σωματιδίων που περιέχονται σε μάζα **1 kg** ή **1 g** τσιμέντου.

Όσο μεγαλύτερη λεπτότητα τσιμέντου τόσο μεγαλύτερη ποσότητα της ενέργειας που έχει καταναλωθεί για την παραγωγή του.

Η μεγαλύτερη λεπτότητα τσιμέντου αυξάνει την ταχύτητα ενυδάτωσης, λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας αντίδρασης με το νερό, και έτσι επιταχύνεται η ταχύτητα ανάπτυξης αντοχής, ιδιαίτερος τις πρώτες 7 ημέρες.

Η λεπτότητα του τσιμέντου προσδιορίζεται με τις παρακάτω μεθόδους:

α) Wagner turbidimeter σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C 115**.

β) Blaine air-permeability test (σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C 204**).

γ) Με προσδιορισμό μέσω κοσκίνισης του κλάσματος -45μm (325 mesh), [σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C 430**].

B) ΠΥΞΗ – ΣΚΛΗΡΗΝΣΗ

Αρχή πήξης: αρχή στερεοποίησης τσιμεντοπολτού.

Τέλος πήξης: τελευταίο στάδιο στερεοποίησης.

Σκλήρυνση: Το φαινόμενο της αύξησης της αντοχής λόγω σταδιακής πλήρωσης των πόρων του τσιμεντοπολτού με προϊόντα ενυδάτωσης.

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΠΗΞΗ

Η λεπτότητα του τσιμέντου, το % ποσοστό του αργλικού τριασβεστίου (C3A) το ποσοστό της ελεύθερης ασβέστου (% CaOfree) και οι μορφές του CaSO₄ που υπάρχουν στο τσιμέντο.

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΥ ΠΗΞΗΣ

Ο χρόνος πήξης προσδιορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C 150** και πρέπει να βρίσκεται μεταξύ των ορίων του προτύπου. Για τον προσδιορισμό χρησιμοποιούνται η συσκευή Vicat ή η «βελόνα» Gillmore (**ASTM C 266**).

Γ) ΟΓΚΟΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ

Μεταβολές όγκου (διογκώσεις - συστολές) που υφίσταται ο τσιμεντοπολτός και κατά συνέπεια το σκυρόδεμα.

Εκδηλώνεται ως ρωγμές, θραύση πλακών κλπ.

ΑΙΤΙΑ

- α. Φορτία που προκαλούν ερπυσμό.
- β. Προσμίξεις τσιμέντου.
- γ. Φαινόμενο εξίδρωσης.
- δ. Συστολή ξήρανσης - διαστολή από έκθεση σε νερό.

1.6 Ιδιότητες τσιμεντόπαστας

Μια πρώτη ιδιότητα της τσιμεντόπαστας που βρίσκεται σε πλαστική μορφή, η μείωση της ρευστότητας, σχετίζεται με το φαινόμενο μείωσης της κάθισης. Σημειώνεται ότι η πλαστικότητα του τσιμεντοπολτού οφείλεται σε ελεύθερο νερό, η σταδιακή απώλεια του οποίου, λόγω των αρχικών αντιδράσεων ενυδάτωσης, της προσρόφησης του στις επιφάνειες των ελάχιστα κρυσταλλικών προϊόντων ενυδάτωσης (όπως ο ετρινγκίτης και το C-H-S) και της εξάτμισης, προκαλεί μείωση της ρευστότητας και τελικά πήξη και σκλήρυνση. Μία δεύτερη ιδιότητα είναι η πήξη, που σημαίνει στερεοποίηση του πλαστικού τσιμεντοπολτού. Η αρχική στερεοποίηση ονομάζεται αρχική πήξη (ή αρχή πήξης) και συμπίπτει χρονικά με το σημείο που ο τσιμεντοπολτός παύει να είναι επεξεργάσιμος. Το τελευταίο στάδιο της στερεοποίησης ονομάζεται τελική πήξη. Οι χρόνοι αρχικής και τελικής πήξης είναι περίπου 2-4 ώρες και 5-8 ώρες, αντίστοιχα και προσδιορίζονται με τη συσκευή Vicat, σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-3. Η συσκευή αυτή μετράει την αντίσταση τσιμεντοπολτού ορισμένης ρευστότητας στη διείδυση

τυποποιημένης βελόνας που φέρει βάρος 300 g. Η αρχική πήξη θεωρείται (αυθαίρετα) ότι έχει επέλθει όταν η διείδυση σε στρώση τσιμεντοπολτού πάχους 40 mm φθάσει τα 35 mm. Η τελική πήξη ταυτίζεται με τη χρονική στιγμή κατά την οποία η βελόνα σημαδεύει την άνω επιφάνεια της στρώσης χωρίς όμως να διεισδύει. Μια τρίτη ιδιότητα είναι η σκλήρυνση, που σχετίζεται με το φαινόμενο της αύξησης της αντοχής με το χρόνο λόγω της σταδιακής πλήρωσης των πόρων του τσιμεντοπολτού με προϊόντα ενυδάτωσης.

1.7 Ενυδάτωση τσιμέντου

Η ένωση του τσιμέντου με το νερό ονομάζεται ενυδάτωση τσιμέντου και είναι υπεύθυνη για την πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος. Κατά τη διάρκειά της δημιουργείται μια γκριζοπράσινη πολτώδης μάζα, το πήγμα ή αλλιώς τσιμεντοκονία.

Για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, το μείγμα δεν φαίνεται να παρουσιάζει καμιά μεταβολή. Αργότερα όμως φαίνεται ότι αρχίζει να πήζει προοδευτικά εωσότου στερεοποιηθεί τελείως. Το φαινόμενο αυτό καλείται πήξη της τσιμεντοκονίας και οι χαρακτηριστικές στιγμές αλλαγής της φυσικής κατάστασης ονομάζονται αρχή και τέλος της πήξεως.

Ο ακριβής καθορισμός των χρονικών αυτών στιγμών γίνεται με τρόπο καθοριζόμενο συμβατικά στους κανονισμούς.

Κατά το χρονικό διάστημα ως την αρχή της πήξεως, ο τσιμεντοπολτός είναι ακόμη επιδεκτικός κατεργασίας και μεταφοράς. Γι' αυτό και ο κανονισμός ορίζει ότι η αρχή της πήξεως για τα κοινά τσιμέντα δεν πρέπει να εμφανίζεται νωρίτερα από μια ώρα από τη στιγμή αναμείξεως των δύο υλικών και το τέλος της πήξεως αργότερα από 8 ώρες.

Οι χημικές αντιδράσεις της ενυδάτωσης συνοδεύονται από έκλυση θερμότητας (θερμότητα ενυδάτωσης) και συστολή του όγκου των προϊόντων (συστολή ενυδάτωσης ή χημική συστολή). Η ενυδάτωση δε μπορεί να ακολουθεί βαθμιαία απευθείας παρά μόνο έμμεσα με την παρακολούθηση της εξέλιξης της αντοχής ή της ποσότητας του μη εξατμίσιμου νερού.

ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΣΥΝΟΔΕΥΟΥΝ ΤΗΝ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ

Η συστολή ενυδατώσεως ή χημική συστολή

Με τον όρο *συστολή ενυδατώσεως ή χημική συστολή* χαρακτηρίζεται η συστολή που δεν οφείλεται σε εξωτερικά αίτια (όπως είναι η αποβολή νερού, οι εξωτερικές δυνάμεις, η

μεταβολή θερμοκρασίας), αλλά αποκλειστικά και μόνο στις χημικές μεταβολές που συντελούνται μεταξύ τσιμέντου και νερού.

Κατά τη διάρκεια της χημικής αντιδράσεως μεταξύ των συστατικών του τσιμέντου και του νερού παρουσιάζεται ελάττωση του όγκου των προϊόντων της αντιδράσεως, ίση με $\frac{1}{4}$ περίπου του αρχικού όγκου του νερού.

Αν δεχτούμε π.χ. 100gr τσιμέντο τα οποία χρειάζονται 25gr (25cm^3) νερό, η συστολή του μείγματος, μετά την ολοκλήρωση της αντιδράσεως θα είναι $\frac{1}{4} * 25\text{cm}^3 = 6\text{cm}^3$ περίπου

Αν δεχτούμε ειδικό βάρος τσιμέντου $3,1 \text{ gr/cm}^3$, ο αρχικός όγκος του μείγματος είναι $100/3,1 + 25 = 57,3 \text{ cm}^3$, άρα η συστολή θα φτάσει τελικά (τελικά την ολοκλήρωση της χημικής αντιδράσεως) σε 10,5% περίπου του αρχικού όγκου.

Η συστολή αυτή ακολουθεί ποσοτικά την εξέλιξη της αντοχής, είναι δηλαδή γρήγορη στην αρχή και γίνεται βραδύτερη με την πάροδο του χρόνου.

Η συστολή ενυδατώσεως δεν είναι σταθερή για όλα τα σκυροδέματα, αλλά εξαρτάται

- α) από την ποσότητα του τσιμέντου, αφού ανάλογη είναι και η ποσότητα του νερού,
- β) από την ποιότητα του τσιμέντου, γιατί τα διάφορα συστατικά του τσιμέντου απαιτούν διαφορετική το καθένα ποσότητα νερού και επομένως μεταβολή στη σύνθεση του τσιμέντου μεταβάλλει και τη συνολική ποσότητα του νερού που χρειάζεται
- γ) από την ποσότητα του νερού αναμείξεως, δηλαδή από το λόγο νερού προς τσιμέντο. Όσο περισσότερο είναι το νερό, τόσο η δέσμευση του τσιμέντου γίνεται πληρέστερη, ενώ όταν η ποσότητα του νερού είναι περιορισμένη, μπορεί ορισμένη ποσότητα τσιμέντου να παραμείνει αδρανής, λόγω της οπωσδήποτε ανομοιόμορφης κατανομής και της δυσκολίας κυκλοφορίας του νερού μέσα στη μάζα του τσιμέντου. Γι' αυτό και εντονότερη παρουσιάζεται η διαφορά, όταν ο λόγος νερό/τσιμέντο πέφτει κάτω από την οριακή τιμή 0,40.

Με τον όρο συστολή κατά την πήξη ή συστολή του νωπού σκυροδέματος χαρακτηρίζεται η συνολική συστολή που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της πήξεως, δηλαδή κατά το χρονικό διάστημα που το σκυρόδεμα παραμένει ακόμα νωπό. Η συστολή αυτή σύνθετη και αποτελείται από το άθροισμα δυο κυρίως.

Με τον όρο *συστολή κατά την πήξη ή συστολή του νωπού σκυροδέματος* συστολών της συστολής ενυδατώσεως και της συστολής που οφείλεται στην εξάτμιση του ελεύθερου νερού.

Η συστολή κατά την πήξη έχει μεγαλύτερη πρακτική σημασία, εφόσον αυτή είναι η συνολική τιμή της συστολής στην οποία οφείλονται οι επιφανειακές ρηγματώσεις του σκυροδέματος, κατά τη διάρκεια των πρώτων ωρών. Λιγότερη σημασία έχει ποιο τμήμα της συστολής αυτής οφείλεται στην ενυδάτωση και πιο τμήμα στην εξάτμιση του νερού.

ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΠΟΥ ΕΚΛΥΕΤΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΗΞΕΩΣ Ή ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΕΝΥΔΑΤΩΣΕΩΣ

Οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ τσιμέντου και νερού πραγματοποιούνται με σύγχρονη έκλυση θερμότητας, (εξώθερμη αντίδραση).

Το φαινόμενο αυτό είναι συνηθισμένο σε πολλές χημικές αντιδράσεις, όπως π.χ. στην περίπτωση του σβησίματος της άνυδρης ασβέστου. Στην τελευταία αυτή περίπτωση όμως, το φαινόμενο γίνεται έντονα αντιληπτό, επειδή, η αντίδραση ολοκληρώνεται μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα, ενώ αντίθετα στην περίπτωση του τσιμέντου η εξέλιξη της αντιδράσεως είναι πολύ αργή και η θερμότητα που εκλύεται έχει το χρόνο ν' απομακρυνθεί.

Η θερμότητα που εκλύεται φτάνει συνολικά, κατά μέσο όρο, τις 12cal περίπου για κάθε gr τσιμέντου. Είναι όμως διαφορετική για τα διάφορα συστατικά του τσιμέντου και γι' αυτό εξαρτάται από τη σύνθεσή του.

Η συνολική θερμότητα που εκλύεται από το καθένα από τα τέσσερα συστατικά του τσιμέντου είναι περίπου

Πυριτικό τριασβέστιο C_3S	120 cal/gr
Πυριτικό διασβέστιο C_2S	62 cal/gr
Αργιλικό τριασβέστιο C_3A	207 cal/gr
Αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο C_4AF	100 cal/gr

Είναι φανερό, επομένως ότι μπορούμε με κατάλληλη σύνθεση του τσιμέντου (περιορισμός του αργιλικού τριασβεστίου) να ελαττώσουμε τη θερμότητα που εκλύεται, όταν αυτό είναι απαραίτητο για την κατασκευή.

Η συνολική αυτή θερμότητα εκλύεται μέσα σ' όλη την διάρκεια της αντιδράσεως. Η έκλυση γίνεται γρήγορη στην αρχή και όλο πιο αργά με την πάροδο του χρόνου, όπως ακριβώς συμβαίνει με την αντοχή και με όλα τα άλλα φαινόμενα που συνοδεύουν την ενυδάτωση.

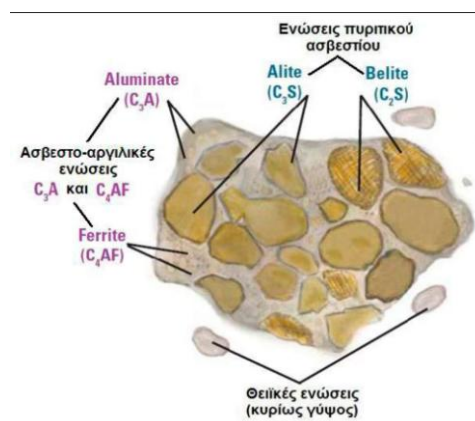
Σημασία όμως για την κατασκευή, όπως είναι φανερό, έχει η ταχύτητα εκλύσεως της θερμότητας, δηλαδή η ποσότητα της θερμότητας κατά την διάρκεια των πρώτων ημερών.

Ενδεικτικά η θερμότητα αυτή κυμαίνεται μέσα στα παρακάτω όρια

Χρόνοι από την παρασκευή	[cal/gr]
3 ημέρες	40-90
7 ημέρες	45-100
28 ημέρες	60-110
90 ημέρες	70-115

Η θερμότητα ενυδατώσεως γίνεται αισθητή, όταν πρόκειται για ογκώδες έργο, από τη μάζα του οποίου δεν μπορεί εύκολα να απομακρυνθεί (φράγματα) με κίνδυνο αναπτύξεως εφελκυστικών τάσεων ή και ρηγματώσεων από την ανομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας και τις ανομοιόμορφες συστοδιαστολές. Στις περιπτώσεις αυτές είναι ανάγκη να χρησιμοποιηθεί τσιμέντο με χαμηλή έκλυση θερμότητας ή να παρθούν ειδικά μέτρα απομακρύνσεως της από τη μάζα του έργου.

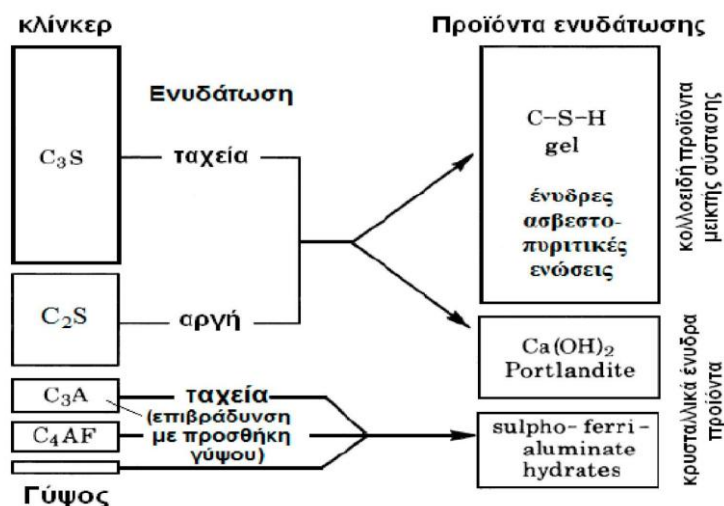
Αντίθετα, στην περίπτωση σκυροδετήσεως σε χαμηλές θερμοκρασίες η θερμότητα αυτή που εκλύεται κατά τη διάρκεια της ενυδατώσεως μπορεί να χρησιμοποιηθεί (με κατάλληλη μόνωση) για την προστασία του έργου από τον παγετό, τις πρώτες ώρες της πήξεως.



Σχήμα 1.3 Τσιμέντο πριν την ενυδάτωση.

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ

- Οι ταχύτητες ενυδάτωσης των ενώσεων (φάσεων) του τσιμέντου κατατάσσονται ως εξής: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$
- Η θερμότητα που εκλύεται κατά την ενυδάτωση οφείλεται στη δημιουργία και καταστροφή χημικών δεσμών που λαμβάνουν χώρα με την επίδραση του νερού.
- Το αργλικό τριασβέστιο (C_3A) και οι θειικές φάσεις (π.χ. γύψος), μετά την προσθήκη νερού, δίστανται και αντιδρούν πολύ γρήγορα μεταξύ τους και με μεγάλη έκλυση θερμότητας, σχηματίζοντας ενώσεις τύπου γέλης - gel), που είναι οι πρόδρομες ενώσεις σχηματισμού στερεής φάσης βελονοειδούς μορφής (εττρινγκίτης).
- Οι ενώσεις τύπου γέλης μετατρέπονται σε εττρινγκίτη (στερεή φάση βελονοειδούς μορφής) και συμβάλλουν ελάχιστα στην πρώιμη αντοχή.



Σχήμα 1.4 Ταχύτητα ενυδάτωσης φάσεων.

- Σχεδόν αμέσως μετά τη λήξη της περιόδου ωρίμανσης, το C_3S αντιδρά πολύ γρήγορα με το νερό, απελευθερώνοντας ιόντα Ca^{+} και $(OH)^{-}$, σύμφωνα με την αντίδραση υδρόλυσης. Η απελευθέρωση ιόντων Ca^{+} και $(OH)^{-}$ από το πυριτικό τριασβέστιο επιταχύνει την αντίδραση της υδρόλυσης, σύμφωνα με την αρχή του Le Chatelier, με ταυτόχρονη πολύ μεγάλη απελευθέρωση θερμότητας.
- Το pH του περιβάλλοντος γίνεται, λόγω της παρουσίας των ιόντων $(OH)^{-}$ περίπου 12. Όμως, αυτή η αρχική υδρόλυση επιβραδύνεται γρήγορα μετά την έναρξη της ενυδάτωσης.

- Ο ρυθμός της αντίδρασης μειώνεται σχετικώς σύντομα και συνοδεύεται από μείωση της εκλυόμενης ποσότητας θερμότητας. Η παραγωγή ιόντων Ca^{+} και $(\text{OH})^{-}$ (υδρόλυση) συνεχίζεται με χαμηλότερο ρυθμό μέχρι κορεσμού του συστήματος.
- Αφού συμβεί αυτό, δηλαδή αφού το διάλυμα γίνει υπέρκορο σε ιόντα ασβεστίου, οδηγείται στην παραγωγή νέων φάσεων, όπως:
Κρυστάλλων υδροξειδίου του ασβεστίου και
Ένυδρων ασβεστοπυριτικών φάσεων ινώδους μορφής, οι οποίες προσκολλώνται πάνω στα αδρανή και προσδίδουν αντοχή στο σκυρόδεμα.
- Ο σχηματισμός κρυστάλλων υδροξειδίου του ασβεστίου και ένυδρου πυριτικού ασβεστίου δημιουργούν τους «πυρήνες» γύρω από τους οποίους αρχίζει να συσσωρεύεται μεγαλύτερη ποσότητα ένυδρου πυριτικού ασβεστίου.
- Οι κρύσταλλοι του ένυδρου πυριτικού ασβεστίου διαρκώς μεγαλώνουν εμποδίζοντας τα μόρια του νερού να προσεγγίσουν το μη ενυδατωμένο πυριτικό τριασβέστιο. Ο ρυθμός της αντίδρασης ρυθμίζεται τώρα πλέον από το ρυθμό διάχυσης των μορίων του νερού διαμέσου της επικάλυψης του ένυδρου πυριτικού ασβεστίου.
- Το πάχος της επικάλυψης διαρκώς μεγαλώνει προκαλώντας μείωση του ρυθμού παραγωγής ένυδρου πυριτικού ασβεστίου.
- Ο σχηματισμός των φάσεων αυτών παράγει θερμότητα και μικρή διόγκωση, ενώ η έναρξη συνένωσης των παραπάνω ενώσεων προσδίδει αρχικά στο μίγμα μικρή συνοχή και η φάση αντιστοιχεί στο σημείο έναρξης πήξης.
- Όσο συνεχίζεται η συνένωση αυτών των φάσεων, το σκυρόδεμα αποκτά σημαντική αντοχή ώστε κάποια χρονική στιγμή γίνεται «βατό». Αυτό χαρακτηρίζεται ως σημείο τελικής πήξης.

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ ΕΠΙΓΡΑΜΜΑΤΙΚΑ

- Υδρόλυση του C_3S (πυριτικό τριασβέστιο) και παραγωγή ιόντων Ca^{+} και $(\text{OH})^{-}$.
- Κρυστάλλωση των ελεύθερων ιόντων Ca^{+} και $(\text{OH})^{-}$ σε $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (υδροξύδιο του ασβεστίου).
- Μετατροπή του C_3S (πυριτικό τριασβέστιο) σε ένυδρο πυριτικό ασβέστιο ($\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- Τα $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ αποτελούν τους «πυρήνες» ανάπτυξης, που αρχίζουν/ να καλύπτονται από στρώματα $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

- Οι κρύσταλλοι (διαδοχικές στρώσεις) του $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ διαρκώς διευρύνονται, καλύπτουν το χώρο μεταξύ τους και εμποδίζουν το νερό να προσεγγίσει το μη ενυδατωμένο C_3S .
- Ο ρυθμός της αντίδρασης ενυδάτωσης ρυθμίζεται πλέον από την ταχύτητα (δυνατότητα) διάχυσης του νερού μέσα από τους κρυστάλλους του $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.
- Επειδή λοιπόν ο χώρος αυτός μικραίνει, μειώνεται και η ταχύτητα ενυδάτωσης των μη ενυδατωμένων τεμαχίων C_3S (πυριτικό τριασβέστιο).

2. NANOTΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

2.1 Γενικά

Νανοτεχνολογία είναι ένας όρος ο οποίος χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη δημιουργία και χρήση λειτουργικών δομών μεγέθους μεταξύ 1 και 100 νανομέτρων(nm), της τάξεως δηλαδή του 10^{-9} μέτρων. Οι διαστάσεις γίνονται ευκολότερα αντιληπτές αναφέροντας πως ένα νανόμετρο ισούται περίπου με το 1/80000 μιας ανθρώπινης τρίχας ή με το μήκος 10 ατόμων υδρογόνων σε σειρά. Κατά παρόμοιο τρόπο ορίζεται και ο όρος νανοεπιστήμη αναφερόμενος σε επιστήμες οι οποίες μελετούν φαινόμενα στην κλίμακα αυτή.

Αν και το πεδίο της νανοτεχνολογίας μόλις πρόσφατα άρχισε να αναπτύσσεται ουσιαστικά, οι δυνατότητες της είχαν αρχίσει να γίνονται εμφανείς ήδη από την εποχή που ο φυσικός Richard Feynman έδωσε το λόγο με τίτλο "There's Plenty of Room at the Bottom" μιλώντας για τα μεγάλα περιθώρια που αφήνουν οι νόμοι της φύσης για τον έλεγχο της ύλης σε ατομικό επίπεδο.

Στη μέχρι τώρα ανάπτυξη της σημαντικό ρόλο έπαιξαν η σημαντική βελτίωση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ενώ σταθμοί μπορούν να θεωρηθούν οι ανακαλύψεις δομών άνθρακα σε μορφή σφαίρας γνωστές ως φουλερένια καθώς και σε μορφή σωλήνα γνωστές ως νανοσωλήνες άνθρακα με ιδιαίτερες ιδιότητες το καθένα.

Ο όρος νανοτεχνολογία χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευρύτητα όντας πολύ γενικός για να περιγράψει οτιδήποτε συμβαίνει στις διαστάσεις του νανομέτρου. Κατά συνέπεια, μπορεί να χωρισθεί σε πιο ειδικά θέματα όπως αυτό της νανοηλεκτρονικής, των νανοϋλικών καθώς και άλλων. Οι εφαρμογές της είναι αναρίθμητες ενώ οι επιπτώσεις γίνονται αντιληπτές σε πολλαπλά επίπεδα κατά κύριο λόγο στον οικονομικό τομέα επηρεάζοντας παγκόσμιες βιομηχανίες και οικονομίες, αλλά και στο κοινωνικό βελτιώνοντας το επίπεδο ζωής μας.

Δε θα πρέπει ωστόσο να φανταστεί κάποιος πως η νανοτεχνολογία πρόκειται για επιστημονική επανάσταση. Τα περισσότερα θέματα όπου αυτή περικλείει προκύπτουν σαν λογική συνέπεια της εξέλιξης της ικανότητας της επιστήμης και της τεχνολογίας να ερευνά και να εργάζεται σε όλο και μικρότερη κλίμακα. Εξάλλου, η κατάλυση, ένα φαινόμενο που ανέκαθεν χαρακτηριζόταν από νανομετρικές διαστάσεις αποτελεί επιστημονικό κλάδο ο οποίος αναπτύσσεται πολλές δεκαετίες. Επιπλέον, ολόκληρα επιστημονικά πεδία όπως η χημεία ή η βιολογία ανέκαθεν

δούλευαν σε τέτοιες διαστάσεις παρόλο που ο όρος νανοεπιστήμη εισήχθη μόλις πρόσφατα.

2.2 Εφαρμογές νανοτεχνολογίας στην κατασκευή

Η νανοτεχνολογία έχει να κάνει με την ανάγκη για κατανόηση των φαινομένων στη νανοκλίμακα και με την ταυτόχρονη βελτίωση της ικανότητάς μας να ελέγχουμε τη νανοδομή των υλικών. Έτσι, οι ιδιότητες των υλικών μπορούν να βελτιωθούν ελέγχοντας τις διεργασίες και τις δομές της νανοκλίμακας.

Οι επιθυμητοί λοιπόν στόχοι που μπορούν να επιτευχθούν μέσω της νανοτεχνολογίας, όσον αφορά στις κατασκευές, είναι η ανάπτυξη υλικών υπερ-υψηλής επίδοσης για κατασκευαστικές εφαρμογές και η βελτίωση της γνώσης για τη συσχέτιση μεταξύ της νάνο/μίκρο-δομής των υλικών και των συνεπακόλουθων μακροσκοπικών ιδιοτήτων των υλικών.

Η νανοτεχνολογία λοιπόν μπορεί να φανεί χρήσιμη στην ανάπτυξη:

- Υλικών με αυξημένη ανθεκτικότητα και παρατεταμένη ή βελτιωμένη συμπεριφορά
- Πολυλειτουργικών υλικών με μηχανική απόδοση συνδυασμένη με ιδιότητες θερμικής, ηλεκτρικής ή μαγνητικής αγωγιμότητας/μόνωσης
- Ενεργών προσαρμοστικών υλικών με προγραμματιζόμενα χαρακτηριστικά (αυτό-επισκευαζόμενα, με αισθητήρες, κ.τ.λ)
- Υβριδικών οργανικών-ανόργανων υλικών, που συνδυάζουν τις συγκεκριμένες ιδιότητες κάθε συνιστώσας, με αποτέλεσμα νέα, ή ανώτερη συμπεριφορά.

Η κατασκευαστική βιομηχανία αναπόφευκτα θα ωφεληθεί από την νανοτεχνολογία στην πραγματικότητα ήδη έχουμε πολύ ενθαρρυντικές εξελίξεις στους τομείς του σκυροδέματος, του χάλυβα και του γυαλιού. Το σκυρόδεμα γίνεται ισχυρότερο, πιο ανθεκτικό και διαστρώνεται ευκολότερα, ο χάλυβας σκληρότερος και το γυαλί αυτοκαθαρίζεται.

Πολλές όμως από τις προοπτικές της νανοτεχνολογίας στον κατασκευαστικό τομέα περιορίζονται από το κόστος και το σχετικά μικρό μέχρι τώρα αριθμό πρακτικών εφαρμογών. Πολλές από τις εφαρμογές αυτές βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο, βέβαια με πολύ ενθαρρυντικά ως τώρα αποτελέσματα, και άλλες έχουν κόστος απαγορευτικό για την μαζική παραγωγή και διάθεσή τους.

Και αυτό γιατί η κατασκευή τείνει να είναι ένας συντηρητικός κλάδος, προσανατολισμένος σε χαμηλή ερευνητική δραστηριότητα, πράγμα που βαραίνει εναντίον της υιοθέτησης νέων τεχνολογιών, ειδικά αυτών που φαντάζουν απομακρυσμένες από τον πυρήνα της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Τα υλικά όμως, είναι ο πυρήνας της κατασκευαστικής βιομηχανίας και οι προοπτικές για καινοτομίες στο όχι και τόσο μακρινό μέλλον είναι πολύ σημαντικές, ακόμα και ζωτικής σημασίας για την κατασκευαστική βιομηχανία. Ερευνητές που ερωτήθηκαν, προέβλεψαν ότι μεγάλη πρόοδος θα σημειωθεί ακόμα και μέσα στα επόμενα 5 χρόνια. Το μέγεθος και η έκταση της κατασκευαστικής βιομηχανίας προμηνύει ότι και το συνεπακόλουθο οικονομικό αντίκτυπο θα είναι τεράστιο.

2.3 Επίδραση στα δομικά υλικά

Η νανοτεχνολογία έχει αλλάξει και θα συνεχίζει να αλλάζει το όραμα, τις προσδοκίες και τις δυνατότητές μας να ελέγξουμε τον κόσμο των υλικών. Αυτές οι εξελίξεις έχουν σίγουρα επιπτώσεις στην κατασκευή και επίσης στον τομέα των δομικών υλικών. Τα κυριότερα επιτεύγματα σε αυτόν τον τομέα περιλαμβάνουν: τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε τη δομή ενός υλικού σε ατομικό επίπεδο και τη δυνατότητα μέτρησης της αντοχής και της σκληρότητας σε μικρο- και νανοσκοπικές φάσεις σύνθετων υλικών. Μεταξύ των νέων νανο-κατασκευασμένων πολυμερών υπάρχουν ιδιαίτερα αποδοτικοί ρευστοποιητές για κονίαμα υψηλής αντοχής και υψηλής αντοχής ίνες με εξαιρετική ενέργεια απορρόφησης. Νανოსωματίδια, όπως το διοξείδιο του πυριτίου, είναι πολύ αποτελεσματικά πρόσθετα υλικά στα πολυμερή, όπως επίσης και στο σκυρόδεμα, υψηλής απόδοσης και αυτοσυμπυκνούμενο με βελτιωμένη εργασιμότητα και δύναμη.

Το τσιμέντο Portland, ένα από τα προϊόντα με τη μεγαλύτερη κατανάλωση από την ανθρωπότητα, είναι φανερά προϊόν με σπουδαίες δυνατότητες, αλλά ταυτόχρονα, όχι εντελώς εξερευνημένες. Με τη βοήθεια της εφαρμοσμένης μηχανικής, θα μπορέσει να γίνει κατανοητή μια εξαιρετικά συνθέτη δομή τσιμέντου, η οποία θα βασίζεται σε υλικά στη νανοκλίμακα. Αυτό θα οδηγήσει προφανώς στην ύπαρξη μιας νέας γενιάς σκυροδέματος, μεγαλύτερης αντοχής, ανθεκτικότητας που θα παρουσιάζει επιθυμητές τιμές τάσης-παραμόρφωσης και πιθανών να κατέχει μια σειρά «έξυπνων» ιδιοτήτων, όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα και οι δυνατότητες αίσθησης θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης. Την ίδια ώρα, αυτό το νέο σκυρόδεμα πρέπει να είναι βιώσιμο, με χαμηλό κόστος και ενέργεια, και να βοηθά στην πλήρωση των

σύγχρονων απαιτήσεων. Οι νανο-σύνδεσμοι ή το νανο-κατασκευασμένο σκυρόδεμα, που βασίζεται σε υλικά με νανο-δομημένο τσιμεντένιο συστατικό ή άλλα νανο-δομημένα κομμάτια, είναι η επόμενη επαναστατική ανάπτυξη.

Όταν νανოსωματίδια ενσωματώνονται στα συμβατικά οικοδομικά υλικά, αυτά τα υλικά μπορούν να κατέχουν προηγμένες ή έξυπνες ιδιότητες που απαιτούνται για την οικοδόμηση ενός πολυόροφου κτιρίου, ή των 'έξυπνων' αστικών συστημάτων κατασκευής.

Για δεκαετίες, σημαντικές εξελίξεις στη απόδοση του τσιμέντου επιτεύχθηκαν με την εφαρμογή των εξαιρετών μορίων: ιπτάμενη τέφρα, σιδηροπυρίτιο, νανوسίλικα και τώρα νανοςωλήνων άνθρακα.

2.4 Αναμενόμενες εξελίξεις

Αναμένεται ραγδαία πρόοδος στην επιστήμη του σκυροδέματος στα επόμενα χρόνια λόγω της προσαρμογής της επιστήμης στη νέα γνώση στην περιοχή της νανοτεχνολογίας, έναν τομέα γρήγορα αυξανόμενο. Νανοπροϊόντα, σχετικά με τσιμέντο, που μπορούν να αναμένονται:

- Βασισμένα στο τσιμέντο σύνθετα που ενισχύονται με νέες ίνες που περιέχουν νανοςωλήνες, καθώς επίσης και με ίνες που καλύπτονται από νανο-στρώματα (για να ενισχύσουν το δεσμό, την αντίσταση διάβρωσης, ή την εισαγωγή των νέων ιδιοτήτων, όπως την ηλεκτρική αγωγιμότητα κ.λπ.).
- Βασισμένα στο τσιμέντο υλικά με ανώτατη αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη, ολκιμότητα και αντοχή σε θραύση.
- Βασισμένα στο τσιμέντο υλικά κατασκευασμένα με νανο και μικρο δομές που εκθέτουν ανώτατη αντοχή.
- Eco-σύνδεσμοι που τροποποιούνται από νανοςωματίδια και παράγονται ουσιαστικά με μειωμένο όγκο του τσιμέντου Πόρτλαντ (κάτω από σε 10-15%) ή σύνδεσμοι βασισμένοι στα εναλλακτικά συστήματα (MgO , φωσφορικό άλας, γεωπολυμερή, γύψος).
- Αυθόρμητα υλικά και τεχνολογίες επισκευής που χρησιμοποιούν νανοςωλήνες και χημικές μίξεις.
- Υλικά με ελεγχόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα και με χαμηλή θερμική εξάπλωση.
- Έξυπνα υλικά, όπως αυτά με ανταπόκριση σε θερμοκρασία, υγρασία και πίεση.

2.5 Νανουλικά

Τα **νανοϋλικά** περιγράφουν, γενικά, υλικά των οποίων μια μονάδα έχει μέγεθος (σε τουλάχιστον μια διάσταση) μεταξύ 1 και 1000 **νανομέτρων** (10^{-9} μέτρων), αλλά είναι συνήθως μεταξύ 1—100 nm (ο συνήθης ορισμός της νανοκλίμακας).

Η αναζήτηση νανοϋλικών παίρνει μια προσέγγιση με βάση την επιστήμη των υλικών προς τη νανοτεχνολογία, αξιοποιεί τις προόδους στη μετρολογία των υλικών και τη σύνθεση που έχουν αναπτυχθεί με υποστήριξη της έρευνας της μικροκατασκευαστικής. Τα υλικά με δομή στη νανοκλίμακα έχουν συχνά μοναδικές οπτικές, ηλεκτρονικές ή μηχανικές ιδιότητες.

2.5.1 Φυσικά νανοϋλικά

Τα βιολογικά συστήματα χαρακτηρίζονται συχνά από φυσικά, λειτουργικά νανοϋλικά. Η δομή των τρηματοφόρων και των καψιδίων ιών, οι κρύσταλλοι κεριού που καλύπτουν έναν λωτό ή ένα φύλλο τροπαίολου, αράχνης και μεταξιού του τετράνυχου (spider-mite silk), η "σπαθίδα" στον πυθμένα των ποδιών των σαυρών γκέκο (gecko), κάποια φτερά σε πεταλούδες, φυσικά κολλοειδή (γάλα, αίμα), υλικά όπως (δέρμα, νύχια, ράμφη, φτερά, κέρατα, τρίχα), χαρτί, βαμβάκι, μάργαρο, κοράλλια κι ακόμα οι δικοί μας οστεώνες είναι όλοι φυσικά *οργανικά* νανοϋλικά.

Φυσικά *ανόργανα* νανοϋλικά υπάρχουν μέσα από την κρυσταλλική ανάπτυξη σε διάφορες χημικές συνθήκες του φλοιού της γης. Παραδείγματος χάρη, οι άργιλοι εμφανίζουν σύμπλοκες νανοδομές λόγω της ανισοτροπίας της υποκείμενης κρυσταλλικής τους δομής και η ηφαιστειακή δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει τα οπάλια, που είναι ένα στιγμιότυπο μιας φυσικής εμφάνισης φωτονικών κρυστάλλων λόγω της δομής τους σε νανοκλίμακα. Οι πυρκαγιές αντιπροσωπεύουν ιδιαίτερα σύνθετες αντιδράσεις και μπορούν να παράξουν χρωστικές, τσιμέντο, ατμίζον διοξείδιο του πυριτίου (fumed silica) κλπ.

2.5.2 Συνθετικά νανοϋλικά

Το πεδίο των νανοϋλικών είναι οργανωμένο χαλαρά, όπως το παραδοσιακό πεδίο της χημείας, σε οργανικά νανοϋλικά (με βάση τον άνθρακα) όπως τα φουλερένια και ανόργανα νανοϋλικά με βάση άλλα στοιχεία, όπως το πυρίτιο.

Φουλερένια (Fullerenes)

Τα φουλερένια είναι μια τάξη από αλλότροπα του άνθρακα που εννοιολογικά είναι φύλλα γραφενίου τυλιγμένα σε σωληνάρια ή σφαίρες. Αυτά περιλαμβάνουν νανοσωλήνες άνθρακα (ή νανοσωλήνες πυριτίου) που είναι ενδιαφέροντες και λόγω της μηχανικής τους αντοχής και λόγω των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων.

Οι χημικές και φυσικές ιδιότητες των φουλερενίων έχουν γίνει ένα καυτό θέμα στο πεδίο της έρευνας και της ανάπτυξης και είναι πιθανό να εξακολουθήσουν να είναι για πολύ καιρό ακόμα. Τον Απρίλιο του 2003, τα φουλερένια μελετήθηκαν για τη δυνητική ιατρική χρήση: σύνδεση ειδικών αντιβιοτικών με τη δομή ανθεκτικών βακτηρίων και ακόμα στόχοι συγκεκριμένων τύπων καρκίνου κυττάρων όπως το μελάνωμα. Τον Οκτώβριο του 2005 περιγράφεται σε ένα άρθρο η χρήση των φουλερενίων ως αντιμικροβιακών παραγόντων που ενεργοποιούνται από το φως. Στο πεδίο της νανοτεχνολογίας, η θερμική αντίσταση και η υπεραγωγιμότητα είναι μεταξύ των ιδιοτήτων που προσελκύουν έντονη έρευνα.

Μια συνήθης μέθοδος που χρησιμοποιείται στην παραγωγή φουλερενίων είναι η αποστολή μεγάλου ρεύματος μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων γραφίτη σε αδρανή ατμόσφαιρα. Το τελικό τόξο πλάσματος άνθρακα μεταξύ των ηλεκτροδίων ψύχεται σε καπνισμένο υπόλειμμα από το οποίο πολλά φουλερένια μπορούν να απομονωθούν.

Νανοσωματίδια

Τα σωματίδια που κατασκευάζονται με χρήση των δυνατοτήτων της νανοτεχνολογίας, και είναι φορείς καινοφανών και πρωτοποριακών ιδιοτήτων, ονομάζονται νανοσωματίδια.

Τα νανοσωματίδια μπορεί να είναι μεγέθους μερικών μόνο νανομέτρων ή και μπορούν να περιέχουν λίγα έως και αρκετές χιλιάδες άτομα. Το υλικό από το οποίο αποτελούνται τα νανοσωματίδια δεν είναι διαφορετικό από το συνηθισμένο. Το βασικό υλικό των νανοσωματιδίων μπορεί να είναι οργανικό ή ανόργανο, για παράδειγμα ασήμι ή άργιλος. Μπορεί να είναι ένα στοιχείο όπως ο άνθρακας ή ενώσεις όπως οξεία, ή μπορεί να είναι συνδυασμός διαφόρων στοιχείων και ενώσεων. Το συστατικό «κλειδί» δεν είναι το ίδιο το υλικό, αλλά το μέγεθος των σωματιδίων. Στα πολυκρυσταλλικά νανοδομημένα υλικά ή αλλιώς νανοκρυσταλλικά υλικά (nanocrystalline materials) αναφερόμαστε στο μέγεθος ενός κρυσταλλίτη ή αλλιώς κόκκου (grain), ο οποίος αποτελείται από ένα μικρό αριθμό ατόμων. Συνέπεια

αυτού είναι ένα μεγάλο ποσοστό (τα μισά ή περισσότερα) αυτών των ατόμων να βρίσκονται στην επιφάνεια του. Από άποψη φυσικής, αυτό κάνει τα φαινόμενα επιφάνειας (φαινόμενα μεταφοράς μάζας, διαμόρφωση επιφανειακών ενεργειακών σταθμών κτλ) να παίζουν πρωταρχικό ρόλο στις ιδιότητες των νανοσωματιδίων και κατ' επέκταση του υλικού.

Σε σύγκριση λοιπόν με το μέγεθός τους τα νανοσωματίδια έχουν τεράστια επιφάνεια. Σε αυτά τα μεγέθη, ένα σχετικά αδρανές υλικό μπορεί να γίνει πολύ ενεργό και γι' αυτό το λόγο δυνητικά ενδιαφέρον για πολλές διαφορετικές χρήσεις. Επιπρόσθετα, τα νανοσωματίδια έχουν την τάση να σχηματίζουν συσσωματώματα.

Υβριδικά (hybrids) λέγονται τα νανοσωματίδια με πυρήνα ανόργανης φάσης και τροποποιημένης επιφάνειας (π.χ. με οργανικά μόρια). Αμφίφυλα μπλοκ συμπολυμερή (amphiphile block copolymers) σε κατάλληλες συνθήκες pH σχηματίζουν μικέλλες (micelles) και επομένως μπορούν επίσης να χαρακτηριστούν ως νανοσωματίδια. Μεταλλικά ή ημιαγώγιμα κρυσταλλικά νανοσωματίδια μπορούν να βρεθούν σε καταλύτες. Το μέσο μέγεθος ενός μεταλλικού καταλυτικού σωματιδίου μπορεί να ανήκει στην τάξη του νανομέτρου. Τα νανοσωματίδια αυτά συνήθως είναι μεμονωμένοι κρύσταλλοι παρόμοιους με αυτούς που ανήκουν στο εσωτερικό ενός πολυκρυσταλλικού υλικού.

Τα νανοσωματίδια παρουσιάζουν μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον επειδή είναι μια γέφυρα μεταξύ χύμα υλικών και ατομικών ή μοριακών δομών. Ένα χύμα υλικό πρέπει να έχει σταθερές φυσικές ιδιότητες ανεξάρτητα από το μέγεθός του, αλλά στην νανοκλίμακα αυτό συχνά δεν συμβαίνει. Παρατηρούνται ιδιότητες που εξαρτώνται από το μέγεθος όπως κβαντικοί περιορισμοί σε σωματίδια ημιαγωγού, διέγερση επιφανειακών πλασμονίων σε κάποια μεταλλικά σωματίδια και υπερπαραμαγνητισμός σε μαγνητικά υλικά.

Νανοσωματίδια μπορούν να παρασκευαστούν με πολλές τεχνικές όπως η sol - gel, η ball milling ή άλλες χημικές μεθόδους. Καθώς οι παράμετροι κάθε τεχνικής καθορίζουν τη τελική μορφή του νανοσωματιδίου μπορούμε να παρασκευάσουμε νανοσωματίδια βελτιστοποιημένα για κάποια συγκεκριμένη χρήση. Όσον αφορά την ενέργεια υδρογόνου, το ενδιαφέρον για τα νανοσωματίδια έγκειται κυρίως στις καταλυτικές τους ιδιότητες για τη χρήση τους σε κυψέλες καυσίμου αλλά και γενικότερα.

Εκτός από τη συνθετική παρασκευή τους, νανοσωματίδια υπάρχουν και σε φυσικά υλικά, π.χ. στην άργιλο, η οποία περιέχει μεγάλο μερίδιο φυσικών νανοσωματιδίων.

Αυτά και ευθύνονται για τις ιδιότητές της όπως αντοχή στον παγετό, ανθεκτικότητα και μηχανική αντοχή. Ένα άλλο φυσικό παράδειγμα είναι το σεντέφι του οποίου η υψηλή ανθεκτικότητα αποδίδεται στις νανοδομή του.

2.6 Συνθετικές μέθοδοι

Ο σκοπός οποιασδήποτε συνθετικής μεθόδου για τα νανοϋλικά είναι να δώσει ένα υλικό που εμφανίζει ιδιότητες που είναι αποτέλεσμα της χαρακτηριστικής κλίμακας μεγέθους τους που είναι στην περιοχή του νανομέτρου ($\sim 1 - 100$ nm). Συνεπώς, η συνθετική μέθοδος πρέπει να παρουσιάζει έλεγχο του μεγέθους σε αυτήν την περιοχή, έτσι ώστε να επιτευχθεί μια αντίστοιχη ιδιότητα. Συχνά οι μέθοδοι διαίρουνται σε δύο κύριους τύπους "επαγωγικούς (Bottom Up)" και "απαγωγικούς ή παραγωγικούς (Top Down)."

ΕΠΑΓΩΓΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ (BOTTOM UP METHODS)

Οι επαγωγικές μέθοδοι (από κάτω προς τα πάνω) περιλαμβάνουν τη συγκέντρωση των ατόμων ή μορίων σε νανοδομικές διατάξεις. Σε αυτές τις μεθόδους οι πρώτες ύλες μπορεί να είναι στη μορφή αέριων, υγρών ή στερεών. Απαιτείται, επίσης, κάποιο είδος αποδιοργάνωσης πριν την ενσωμάτωσή τους σε μια νανοδομή. Αυτές οι μέθοδοι εμπίπτουν γενικά σε δύο κατηγορίες: χαοτικές και ελεγχόμενες.

Χαοτικές διεργασίες

Οι χαοτικές διεργασίες εμπεριέχουν την ανύψωση των συστατικών ατόμων ή μορίων σε μια χαοτική κατάσταση και έπειτα ξαφνικά αλλαγή των συνθηκών, έτσι ώστε να γίνει αυτή η κατάσταση ασταθής. Μέσα από την έξυπνη διαχείριση οποιουδήποτε αριθμού παραμέτρων σχηματίζονται εκτενώς προϊόντα, ως αποτέλεσμα της ασφαλούς κινητικής. Η μετάβαση από την χαοτική κατάσταση μπορεί να είναι δύσκολο ή αδύνατο να ελεγχθεί και έτσι η συνολική στατιστική, συχνά, διέπει την τελική κατανομή μεγέθους και το μέσο μέγεθος. Συνεπώς, ο έλεγχος του σχηματισμού νανοσωματιδίων ελέγχεται μέσα από τη διαχείριση της τελικής κατάστασης των προϊόντων.

Παραδείγματα χαοτικών διεργασιών είναι: αφαίρεση με λέιζερ (Laser ablation), εκρηγνυόμενο σύρμα (Exploding wire), τόξο, πυρόλυση φλόγας (Flame pyrolysis), καύση, τεχνικές σύνθεσης με καθίζηση.

Ελεγχόμενες διεργασίες

Οι ελεγχόμενες διεργασίες περιέχουν την ελεγχόμενη μετάβαση των συστατικών ατόμων ή μορίων στις θέσεις του σχηματισμού νανοσωματιδίων, έτσι ώστε τα

νανοσωματίδια να μπορούν να αναπτυχθούν στα προκαθορισμένα μεγέθη με ελεγχόμενο τρόπο. Γενικά, η κατάσταση των συστατικών ατόμων ή μορίων δεν είναι ποτέ μακριά από την απαιτούμενη για τον σχηματισμό νανοσωματιδίων. Άρα, ο σχηματισμός νανοσωματιδίων ελέγχεται μέσω του ελέγχου της κατάστασης των αντιδρώντων.

Παραδείγματα ελεγχόμενων διεργασιών είναι: αυτοπεριοριζόμενο διάλυμα ανάπτυξης (Self-limiting growth solution), αυτοπεριοριζόμενη χημική κατακρήμνιση ατμού (Self-limiting chemical vapor precipitation), τεχνικές λέιζερ φεμτοδευτερολέπτου μορφοποιημένου παλμού (Shaped pulse femtosecond laser techniques), επιταξία μοριακής δέσμης (Molecular beam epitaxy).

ΑΠΑΓΩΓΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ (TOP DOWN METHODS)

Η γνώση των διεργασιών για επαγωγική οργάνωση των δομών παραμένει σε αρχικά στάδια συγκριτικά με τις παραδοσιακές κατασκευαστικές τεχνικές. Ως αποτέλεσμα, τα πιο ώριμα προϊόντα της νανοτεχνολογίας (όπως τα σύγχρονα CPUs) βασίζονται πολύ σε απαγωγικές διεργασίες για τον καθορισμό των δομών. Ένα παραδοσιακό παράδειγμα μιας απαγωγικής τεχνικής για την κατασκευή είναι η λιθογραφία, στην οποία χρησιμοποιούνται όργανα (όπως ένα σύγχρονος αποτυπωτής (stepper)) για να κλιμακώσουν ένα μακροσκοπικό σχέδιο στη νανοκλίμακα.

2.7 Ομοιομορφία

Η χημική διεργασία και σύνθεση των υψηλής απόδοσης τεχνολογικών συστατικών για τον ιδιωτικό, βιομηχανικό και στρατιωτικό τομέα απαιτεί τη χρήση υψηλής καθαρότητας κεραμικών υλικών, πολυμερών, υαλοκεραμικών (glass-ceramic) και σύνθετων υλικών. Σε συμπυκνωμένα σώματα που σχηματίζονται από λεπτές σκόνες, τα ακανόνιστα μεγέθη και σχήματα των νανοσωματιδίων σε μια τυπική σκόνη οδηγεί συχνά σε μη ομοιόμορφες μορφολογίες συσκευασίας που καταλήγουν σε διακυμάνσεις της πυκνότητας συσκευασίας στη συμπαγή σκόνη.

Μη ελεγχόμενη συσσωμάτωση από σκόνες λόγω των ελκτικών δυνάμεων Βαν ντερ Βάαλς μπορεί επίσης να αυξήσει τις μικροδομικές ανομοιογένειες. Διαφορετικές τάσεις που αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα ανομοιόμορφης συστολής ξήρανσης συσχετίζονται άμεσα με τον λόγο στον οποίο μπορεί να αφαιρεθεί ο διαλύτης και συνεπώς εξαρτώνται πολύ από την κατανομή του πορώδους. Τέτοιες τάσεις έχουν

συσχετιστεί με μετάπτωση από πλαστικό σε εύθρυπτο για συμπαγή σώματα και μπορούν να προκαλέσουν διάδοση ρωγμών στο σώμα αν δεν εκτονωθούν.

Επιπλέον, οποιεσδήποτε διακυμάνσεις στην πυκνότητα συσκευασίας του συμπαγούς υλικού καθώς παρασκευάζεται για την κάμινο, ενισχύονται συχνά κατά τη διάρκεια της διεργασίας πυροσυσσωμάτωσης, παράγοντας ανομοιογενή πύκνωση. Μερικοί πόροι και άλλα δομικά ελαττώματα συσχετίζονται με διακυμάνσεις πυκνότητας και φαίνεται να παίζουν έναν επιζήμιο ρόλο στην διεργασία πυροσυσσωμάτωσης αυξάνοντας και συνεπώς περιορίζοντας τις πυκνότητες τελικού σημείου

Φαίνεται, λοιπόν, ότι είναι επιθυμητό να επεξεργάζεται ένα υλικό κατά τέτοιο τρόπο που να είναι φυσικώς ομοιόμορφο ως προς την κατανομή των συστατικών και του πορώδους, αντί να χρησιμοποιούνται κατανομές μεγέθους σωματιδίου που θα μεγιστοποιήσουν την πράσινη πυκνότητα. Ο περιορισμός μιας ομοιόμορφα διεσπαρμένης συγκέντρωσης των ισχυρά αλληλεπιδρώντων σωματιδίων σε αιώρηση απαιτεί πλήρη έλεγχο στις αλληλεπιδράσεις σωματιδίου-σωματιδίου. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι ο αριθμός των διασκορπιστών (dispersants) όπως το κιτρικό αμμώνιο (υδατικό) και της ιμιδαζολίνης ή της ελαϊκής αλκοόλης (μη υδατικά) είναι ελπιδοφόρα διαλύματα ως πιθανά πρόσθετα για βελτιωμένη διασπορά και αποσυσσωμάτωση (deagglomeration). Μονοδιεσπαρμένα νανοσωματίδια και κολλοειδή δίνουν αυτό το ενδεχόμενο.

3. NANOΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

3.1 Εισαγωγή στους Νανοςωλήνες Άνθρακα

Στα μέσα της δεκαετίας του '80, ο Smalley και οι συνάδελφοι του στο Rise University, ανέπτυξαν την χημεία των φουλερενίων (fullerenes). Τα φουλερένια είναι γεωμετρικά σχήματα σαν κλειστά κελία από άτομα άνθρακα που συνθέτονται σε εξαγωνική ή πενταγωνική διάταξη. Το όνομα τους προερχόταν από τον αρχιτέκτονα R. Buckminster Fuller, ο οποίος έγινε γνωστός για το σχεδιασμό γεωδαιτικών θόλων αποτελούμενων από πεντάγωνα και εξάγωνα. Το πρώτο τέτοιο μόριο που διαμορφώθηκε και μελετήθηκε είναι το C_{60} (γνωστό και ως buckminsterfullerene), ένα μόριο 60 ατόμων άνθρακα στο οποίο κάθε πλευρά πενταγώνου είναι παρακείμενη πλευρά ενός εξαγώνου που παρομοιάζεται σαν μπάλα ποδοσφαίρου (αναφέρεται και ως Bucky ball). Μερικά χρόνια αργότερα, η ανακάλυψη αυτή, οδήγησε στην σύνθεση των νανοςωλήνων άνθρακα (CNT). Οι νανοςωλήνες αυτοί, είναι επιμήκη μόρια φουλερενίων στα οποία τα τοιχεία αποτελούνται από εξαγωνικές διατάξεις και συχνά είναι κλειστά σε κάθε άκρο με ημισφαίρια φουλερενίων.

Αυτοί οι τύποι δικτυώματος από άτομα άνθρακα φαίνεται να παρουσιάζουν εκπληκτικές ιδιότητες, σαν αποτέλεσμα της συμμετρικής τους δομής. Παρά τις διαφορές στις βιβλιογραφικές αναφορές πάνω στις ιδιότητες των νανοςωλήνων, θεωρητικά μοντέλα αλλά και πειραματικά δεδομένα δείχνουν εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας που ξεπερνά το 1TPa (το μέτρο ελαστικότητας του διαμαντιού είναι 1,2 TPa) και οι καταγεγραμμένες αντοχές είναι κατά 10-100 φορές μεγαλύτερες από το ισχυρότερο χάλυβα. Με δεδομένα αυτές τις τιμές, οι νανοςωλήνες δείχνουν να είναι ικανοί να δημιουργήσουν μια ολόκληρη νέα κατηγορία προηγμένων υλικών. Επιπλέον, στις πολύ ενδιαφέρουσες μηχανικές ιδιότητες που διαθέτουν οι νανοςωλήνες άνθρακα πρέπει να αναφερθούν οι εκπληκτικές θερμικές και οι ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Τα CNT είναι θερμικά σταθεροί μέχρι τους 2800°C υπό κενό, ενώ η θερμική τους αγωγιμότητα είναι περίπου διπλάσια από αυτή του διαμαντιού. Επίσης, η ηλεκτρική τους χωρητικότητα είναι περίπου 1000 φορές μεγαλύτερη από αυτή του χαλκού.

Οι νανοςωλήνες άνθρακα είναι νέα καινοτόμα υλικά τα οποία μπορούν να έχουν διάμετρο μικρότερη από 1 nm – ένας νανοςωλήνας άνθρακα μπορεί να είναι 10,000 φορές μικρότερος από μια ανθρώπινη τρίχα! Το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα

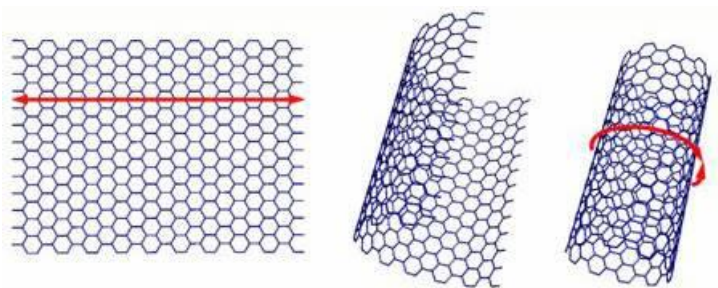
αρκετά μικρόμετρα ($1\mu\text{m} = 10000\text{nm}$) και συνεπώς ο λόγος μήκος προς διάμετρο, είναι τυπικά πολύ μεγάλος και συνήθως στην τάξη των χιλιάδων.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν στεφθεί βασιλιάς της νάνο-τεχνολογίας εξαιτίας των μοναδικών και εκπληκτικών τους ιδιοτήτων. Εκτός από τη μοναδική τους μικροδομή, οι νανοσωλήνες άνθρακα επιδεικνύουν εξαιρετικά χρήσιμες δομικές, ηλεκτρικές, θερμικές και χημικές ιδιότητες και έτσι επιτρέπουν σε πολλά υλικά να γίνουν πιο ελαφρά, πιο ανθεκτικά, φθηνότερα, καθαρότερα και πιο αποδοτικά. Με απλά λόγια, υπάρχουν δυο τύποι λεκτικής αγωγιμότητας στους CNTs, ανάλογα με τη διεύθυνση των εξάγωνων του γραφιτικού επιπέδου που τους αποτελούν. Όμως η τοξικότητα των νανοσωλήνων άνθρακα είναι ένα σημαντικό ζήτημα στο τομέα της νάνο-τεχνολογίας. Παράμετροι όπως η δομή, η κατανομή μεγέθους, το εμβαδόν επιφανείας, η χημεία της επιφάνειας, η επιφάνεια φορτίο, και η κατάσταση πολεοδομικό συγκρότημα, καθώς η καθαρότητα των δειγμάτων, έχουν σημαντική επίπτωση στην αντιδραστικότητα του νανοσωλήνα άνθρακα.

3.2 Δομή και Μορφολογία Νανοσωλήνα Άνθρακα

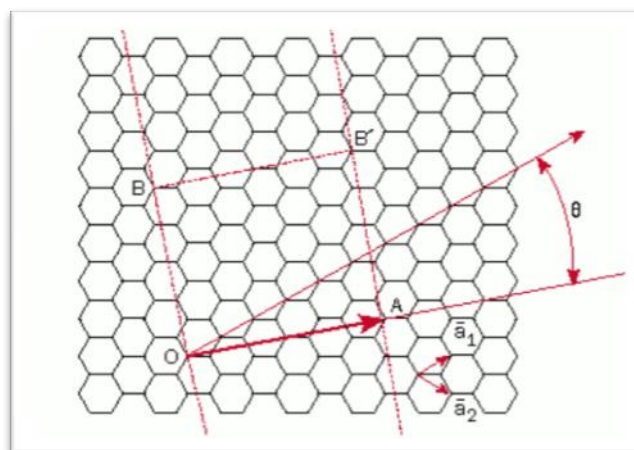
3.2.1 Μονοφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα (SWCNTs)

Οι μονοφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα αποτελούνται από ένα γραφιτικό φύλλο τυλιγμένο σε καθορισμένη διεύθυνση σε κυλινδρικό σχήμα. Οι SWCNTs μπορεί να είναι κλειστοί στα άκρα τους από ‘καπάκια’ με ημισφαιρική δομή, όπως αυτή των φουλερινών. Συνεπώς, περιέχουν και πεντάγωνα στα άκρα τους εκτός από εξάγωνα.



Σχήμα 3.1 Γραφιτικό επίπεδο → τύλιγμα → SWCNT.

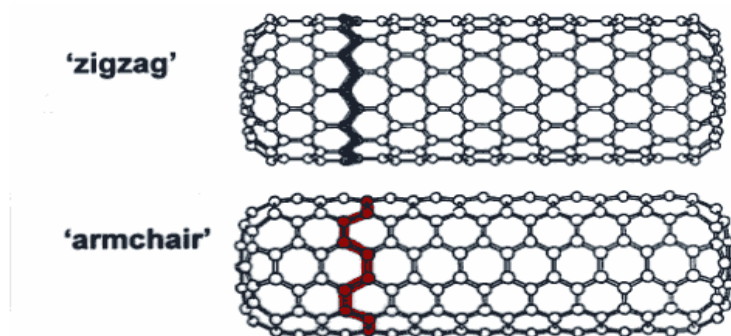
Η διάμετρός τους δεν ξεπερνάει τα 2 nm, ενώ το μήκος τους πολλές φορές φτάνει και τα 5 μm . Ο τρόπος ή η διεύθυνση κατά την οποία τυλίγεται το εξαγωνικό γραφιτικό φύλλο καθορίζεται από το διάνυσμα chiral, όπως φαίνεται και στο σχήμα.



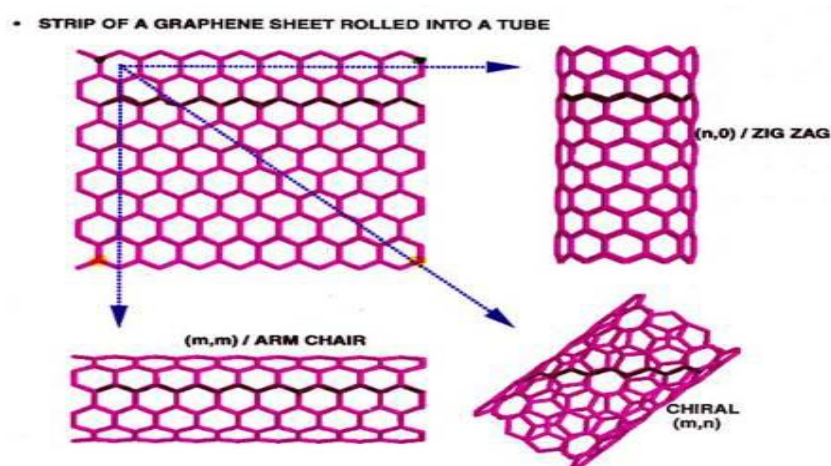
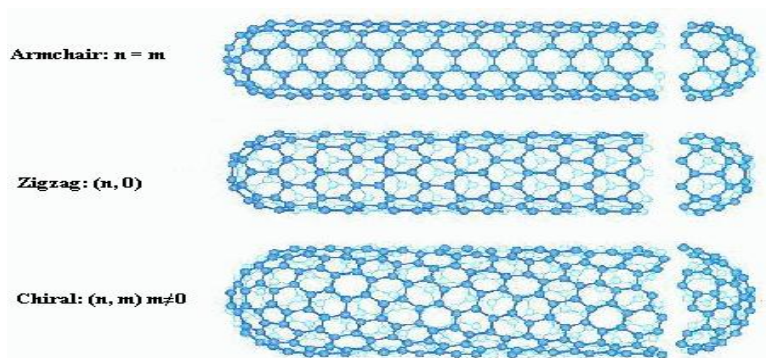
Σχήμα 3.2 Γραφικό πλέγμα και απεικόνιση διανύσματος chiral.

Επιλέγονται δύο άτομα στο γραφικό πλέγμα, O και A. Έπειτα τυλίγεται το φύλλο, ώστε το O να συμπέσει με το A και το B με το B'. Το διάνυσμα chiral έχει αρχή το O, πέρας το A και το μήκος του ισούται με την περιφέρεια του νανοσωλήνα. Η διεύθυνση του νανοσωλήνα είναι πάντα κάθετη με το διάνυσμα chiral (C_h), το οποίο καθορίζεται από τα μοναδιαία διανύσματα του διδιάστατου γραφικού πλέγματος, a_1 και a_2 , ως $C_h = n a_1 + m a_2$, όπου n και m ακέραιοι. Η γωνία θ είναι η γωνία του διανύσματος C_h με το διάνυσμα a_1 .

Για $m=0$ ($\theta = 0^\circ$) ο αντίστοιχος νανοσωλήνας ονομάζεται 'zigzag'. Αν $m=n$ ($\theta=30^\circ$), τότε προκύπτει ο 'armchair' νανοσωλήνας, ενώ για $m \neq n$ ($0 < \theta < 30^\circ$) έχουμε τον 'chiral νανοσωλήνα'. Ένας από τους κύριους σκοπούς των ερευνητών είναι να συνθέσουν μονοφλοιικούς νανοσωλήνες άνθρακα με προκαθορισμένους δείκτες m και n . Στο σχήμα φαίνονται οι τρεις δομές των μονοφλοιικών νανοσωλήνων άνθρακα.

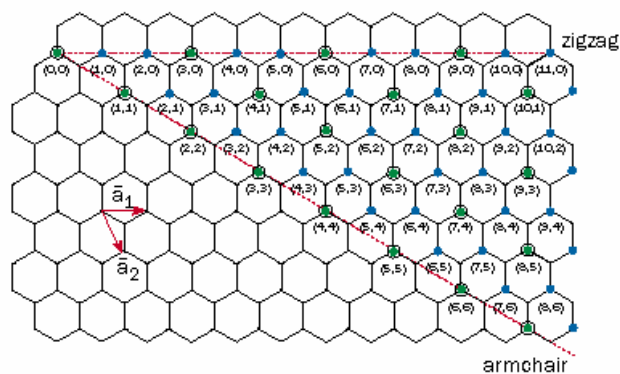


Σχήμα 3.3 Η διαφορά της δομής zig-zag και της armchair νανοσωλήνων.



Σχήμα 3.4 Zig-zag, armchair και chiral (ενδιάμεσοι) νανοσωλήνες ανάλογα με τον άξονα τυλίγματος του γραφιτικού επιπέδου.

Όλες οι πιθανές δομές των μονοφλουικών νανοσωλήνων άνθρακα απεικονίζονται στο σχήμα. Ο περιορισμός αφορά στην γωνία του διανύσματος chiral ($\theta \leq 300$ ή $m \leq n$)



Σχήμα 3.5 Πιθανές δομές μονοφλουικών νανοσωλήνων άνθρακα.

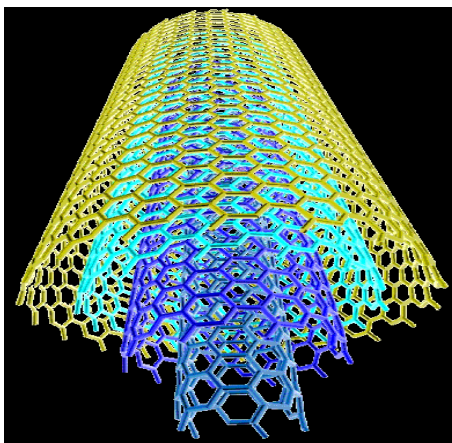
Οι ακέραιοι αριθμοί m και n (ή αλλιώς δείκτες χειρομορφίας) εκτός από την δομή και τη διάμετρο του νανοσωλήνα άνθρακα υποδηλώνουν και τις ηλεκτρονιακές του

ιδιότητες. Ο γραφίτης λαμβάνεται ως ημι-μέταλλο, όμως οι νανοσωλήνες μπορούν να έχουν μεταλλική ή ημιαγωγίμη συμπεριφορά, ανάλογα με το είδος χειρομορφίας τους. Όταν το πηλίκο $(n-m)/3$ είναι ακέραιος αριθμός, ο νανοσωλήνας παρουσιάζει μεταλλική συμπεριφορά ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση είναι ημιαγωγίμος. Έτσι, οι “armchair” CNTs έχουν τα χαρακτηριστικά του μέταλλου στην ηλεκτρική αγωγή, οι τύπου “zig-zag” έχουν ιδιότητες που εξαρτώνται από τη διάμετρο τους - εν γενεί μπορούμε να πούμε πως το $1/3$ αυτών είναι μεταλλικοί και τα $2/3$ συμπεριφέρονται ως ημιαγωγοί, οι “spiral” ή αλλιώς “chiral” CNTs έχουν κι αυτοί ιδιότητες που εξαρτώνται από τη διάμετρο τους καθώς και από τη διεύθυνση τυλίγματος.

3.2.2 Πολυφλουικοί νανοσωλήνες άνθρακα (MWCNTs)

Οι πολυφλουικοί νανοσωλήνες άνθρακα αποτελούνται από μια σειρά από γραφιτικά φύλλα, τα οποία είναι τυλιγμένα ομοκεντρικά το ένα μέσα στο άλλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Η διάμετρός τους συνήθως κυμαίνεται μεταξύ των 3 και των 250 νανομέτρων. Η απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων τους προσεγγίζει την απόσταση μεταξύ δύο γραφιτικών φύλλων (0.335 nm).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν προσελκύσει τα τελευταία χρόνια οι πολυφλουικοί νανοσωλήνες άνθρακα που περιλαμβάνουν δυο γραφιτικά φύλλα (Double-Walled Carbon Nano-Tubes, DWCNTs). Οι ιδιότητες τους είναι παρόμοιες με αυτές των μονοφλουικών.



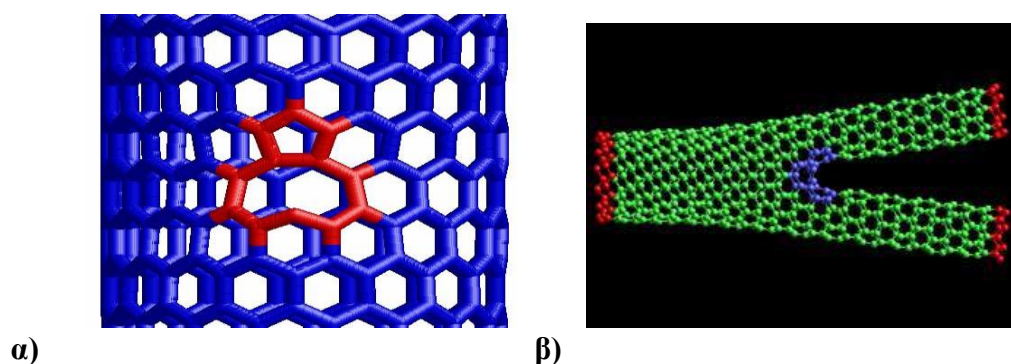
Σχήμα 3.6 Δομή πολυφλουικού νανοσωλήνα άνθρακα.

Οι πολυφλουικοί παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι τροποποιούνται χημικά πιο εύκολα από τους μονοφλουικούς, στους οποίους για να προστεθεί χημικά μια ομάδα χρειάζεται να σπάσουν ορισμένοι διπλοί δεσμοί. Με αυτόν τον τρόπο προκαλούνται κενά στη δομή των SWCNTs και συνεπώς μεταβάλλονται οι ηλεκτρικές και οι

μηχανικές τους ιδιότητες. Σε αντίθεση, στους DWCNTs τροποποιείται μόνο το εξωτερικό τοίχωμα.

3.2.3 Ατέλειες στη δομή των νανοσωλήνων άνθρακα

Όπως και σε κάθε άλλο υλικό, έτσι και στους νανοσωλήνες άνθρακα εντοπίζονται πληθώρα από ατέλειες, οι οποίες μπορούν να υφίστανται με τη μορφή των ατομικών κενών, όπως δείχνει το Σχήμα 3.7α. Επίσης, μπορούν να παρατηρηθούν νέες δομές όπως Y- ή T- διακλαδώσεις (Σχήμα 3.7β) καθώς και αλλοίωση του κυλινδρικού σχήματός τους, όταν αντικαθίστανται εξάγωνα με επτάγωνα ή πεντάγωνα στο πλέγμα των νανοσωλήνων. Άλλη κατηγορία ατελειών προκαλείται από ακαθαρσίες που ενσωματώνονται στη δομή τους κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των νανοσωλήνων, όπως είναι τα καταλυτικά σωματίδια. Επίσης, μια άλλη βασική μορφή ατελειών αποτελεί η παρουσία άμορφου άνθρακα στα τοιχώματα των νανοσωλήνων.



Σχήμα 3.7 Ατέλειες στη δομή των νανοσωλήνων α) Ατομικό κενό β) Y-διακλάδωση.

3.3 Ιδιότητες CNTS

3.3.1 Μηχανικές Ιδιότητες

Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι τα πιο δύσκαμπτα και υψηλότερης αντοχής υλικά που έχουν ανακαλυφθεί μέχρι σήμερα. Συγκεκριμένα, οι νανοσωλήνες θεωρούνται ως οι πιο δύσκαμπτες ίνες, με μέτρο ελαστικότητας περίπου 1.4 TPa και παραμόρφωση αστοχίας 20-30%, η οποία αντιστοιχεί σε εφελκυστική αντοχή μεγαλύτερη των 100 GPa, η μεγαλύτερη γνωστή μέχρι σήμερα. Για λόγους σύγκρισης, αναφέρεται ότι το μέτρο ελαστικότητας χάλυβα υψηλής αντοχής ισούται περίπου με 200 GPa και η εφελκυστική του αντοχή με 1-2 GPa. Ακόμη, οι νανοσωλήνες έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν μεγάλη ελαστική παραμόρφωση χωρίς να αστοχούν.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, αν και η εφελκυστική αντοχή ενός μεμονωμένου νανοσωλήνα άνθρακα είναι εξαιρετικά υψηλή, η πραγματική αντοχή των MWCNTs και γενικότερα ομάδων νανοσωλήνων άνθρακα περιορίζεται σε μόνο λίγα GPa. Αυτό οφείλεται σε ασθενείς διατμητικές διασωματιδιακές αλληλεπιδράσεις, οδηγώντας σε σημαντική μείωση της αντοχής τους. Το φαινόμενο αυτό πρόσφατα αντιμετωπίστηκε με την εφαρμογή ακτινοβολίας ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας, με αποτέλεσμα την εγκάρσια σύνδεση των εσωτερικών κελυφών και σωλήνων, αυξάνοντας την αντοχή στα 60 GPa για τα MWCNTs και στα 17 GPa για νανοσωλήνες άνθρακα διπλού φλοιού.

3.3.2 Θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες

Οι μοναδικές ηλεκτρικές ιδιότητες των νανοσωλήνων άνθρακα οφείλονται κατά κύριο λόγο στη μονοδιάστατη γεωμετρία τους και στην ιδιόμορφη ηλεκτρονική δομή του γραφίτη. Παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλή αντίσταση. Αντίσταση στην κυκλοφορία του ρεύματος προκαλείται όταν ένα ηλεκτρόνιο συγκρούεται με κάποια ανωμαλία στην κρυσταλλική δομή του υλικού, μέσα από το οποίο διέρχεται. Τέτοιου είδους συγκρούσεις εκτρέπουν το ηλεκτρόνιο από την πορεία του. Σε έναν αγωγό τριών διαστάσεων, τα ηλεκτρόνια μπορούν να διασκορπισθούν σε μεγάλο βαθμό, καθώς μπορούν να κινηθούν προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Αντίθετα, τα ηλεκτρόνια μέσα σε έναν νανοσωλήνα άνθρακα δεν μπορούν τόσο εύκολα να διασπαρύν. Δεδομένου ότι πρόκειται για αγωγό μίας διάστασης με πολύ μικρή διάμετρο και μεγάλο μήκος, τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν μόνο ως προς μία διεύθυνση, κατά μήκος του σωλήνα. Σε αυτή την μειωμένη δυνατότητα διασποράς των ηλεκτρονίων οφείλεται η τόσο χαμηλή αντίσταση των CNTs.

Επίσης, όταν τα CNTs υποβάλλονται σε εξωτερικές δυνάμεις, όπως ο εφελκυσμός, η θλίψη και η στρέψη, παραμορφώνονται. Οι παραμορφώσεις αυτές των δομών των CNTs επηρεάζουν την κατάσταση μεταφοράς ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν εξαιρετικές πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Τέλος, μπορούν να μεταφέρουν την υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο γνωστό υλικό, η οποία ισούται περίπου με 10^9 A / cm^2 .

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των νανοσωλήνων επηρεάζονται από την ύπαρξη ατελειών. Ένα σύνηθες αποτέλεσμα είναι η μειωμένη αγωγιμότητα δια μέσω της ελαττωματικής περιοχής του νανοσωλήνα.

Ακόμη, τα CNTs παρουσιάζουν εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα, περίπου 6000 W/mK, δηλαδή τουλάχιστον διπλάσια από αυτή του διαμαντιού, το οποίο μέχρι την ανακάλυψη των νανοσωλήνων θεωρούνταν ο καλύτερος αγωγός θερμότητας. Επίσης, τα CNTs μπορούν να βελτιώσουν τη θερμική σταθερότητα των τσιμεντοειδών υλικών. Τσιμεντοειδή υλικά που περιέχουν CNTs παρουσιάζουν θερμική αγωγιμότητα μεγαλύτερη κατά 85% και 35%, σε σύγκριση με τσιμεντοειδή που δεν περιέχουν κάποιο είδος ενίσχυσης και εκείνα που περιέχουν νανοϊνες άνθρακα αντίστοιχα.

3.3.3 Κινητικές ιδιότητες

Τα MWCNTs, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι πολλαπλοί ομόκεντροι νανοσωλήνες τοποθετημένοι με ακρίβεια ο ένας μέσα στον άλλον. Αυτό παρουσιάζει μια τηλεσκοπική ιδιότητα, όπου ο εσωτερικός νανοσωλήνας μπορεί να ολισθαίνει, σχεδόν με αμελητέα τριβή, ως προς τον εξωτερικό του νανοσωλήνα, αποτελώντας ένα τέλεια γραμμικό ή στροφικό ελατήριο. Αυτό αποτελεί ένα από τα πρώτα παραδείγματα μοριακής νανοτεχνολογίας, δηλαδή της ακριβούς τοποθέτησης ατόμων για τη δημιουργία χρήσιμων μηχανών. Ήδη, αυτή η ιδιότητα έχει χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία του μικρότερου στον κόσμο στροφικού κινητήρα.

3.3.4 Τοξικότητα

Η τοξικότητα των νανοσωλήνων άνθρακα αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα στον τομέα της νανοτεχνολογίας. Υπάρχουν δυσκολίες στην προσπάθεια εκτίμησης του βαθμού τοξικότητας αυτού του ετερογενούς υλικού. Παράμετροι όπως η δομή, η κατανομή μεγέθους, η επιφάνεια, το επιφανειακό φορτίο, το επίπεδο συσσωμάτωσης και η καθαρότητα των δειγμάτων, έχουν σημαντική επίδραση στη δραστηριότητα των νανοσωλήνων άνθρακα. Ωστόσο, διαθέσιμα δεδομένα δείχνουν ξεκάθαρα ότι, κάτω από ορισμένες συνθήκες, οι νανοσωλήνες μπορούν να διαπεράσουν φράγματα μεμβρανών, το οποίο σημαίνει πως αν ακατέργαστα υλικά φτάσουν σε όργανα, μπορούν να προκαλέσουν επιβλαβείς επιδράσεις όπως φλεγμονώδεις και ινωτικές αντιδράσεις. Επίσης, υπό την επίδραση συγκεκριμένων συνθηκών, τα CNTs έχουν τη δυνατότητα να εισέλθουν στα ανθρώπινα κύτταρα και να συγκεντρωθούν στο κυτταρόπλασμα, οδηγώντας σε κυτταρικό θάνατο. Έρευνες έχουν δείξει πως τα CNTs είναι ικανά να προκαλέσουν φλεγμονή, επιθηλιοειδή κοκκιώματα (μικροσκοπικά οζίδια), ίνωση και βιοχημικές/τοξικολογικές αλλαγές στους

πνεύμονες. Για να γίνει αντιληπτή η επικινδυνότητα τους, σημειώνεται ότι συγκριτικές μελέτες έχουν δείξει ότι τα SWCNTs είναι πιο τοξικά από το χαλαζία, ο οποίος θεωρείται βασικός επαγγελματικός κίνδυνος υγείας, αν εισπνέεται χρονίως.

Αρκετά σημεία στα οποία υπερέχουν οι νανοσωλήνες άνθρακα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και συγκρίνονται με άλλα υλικά. Είναι εμφανές πως οι CNTs είναι ανώτεροι για πολλές χρήσεις.

Ιδιότητες	Νανοςωλήνες Άνθρακα		Σε Σύγκριση	
Διάμετρος	SWCNT : 0.6-1.8 nm (1.4 nm τυπικά) MWCNT : 20-50 nm		Η λιθογραφία ακτινών ηλεκτρονίων μπορεί να δημιουργήσει γραμμές πλάτους 50 nm, και πάχους μερικών nm.	
Δυνατότητα Μεταφοράς Ηλεκτρικού Ρεύματος	Εκτιμάται στο 1 δις. Amperes ανά τετραγωνικό εκατοστό για MWCNT: 20-50 nm		Τα χάλκινα καλώδια καίγονται περίπου στο 1 εκατομμύριο A/cm ² .	
Εκπομπή Πεδίου	Μπορούν να ενεργοποιήσουν φωσφόρο στα 1–3 volts αν τα ηλεκτρόδια έχουν απόσταση 1 μm.		Ηλεκτρόδια από Μολυβδαίνιο χρειάζονται πεδία 50 – 100 V/μm και έχουν πολύ περιορισμένο εύρος ζωής.	
Διάδοση Θερμότητας	Προβλέπεται μέχρι και 6000 watts ανά μέτρο ανά Kelvin σε θερμοκρασία δωματίου.		Το καθαρό διαμάντι φτάνει τα 3,320 W/m*K .	
Θερμική Σταθερότητα	Σταθεροί μέχρι τους 2800 °C υπό κενό και τους 750°C στον αέρα.		Τα μεταλλικά καλώδια στα μικροτσίπ λιώνουν στους 600 – 1000 °C .	
Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Παραμόρφωση (%)	Αντοχή σε Εφελκυσμό (GPa)	Πυκνότητα (gr/cm³)
SWCNT	1210	4	65.0	1.4
MWCNT	1260	1.5	2.7	1.4
IM-7/977-3 (ίνα γραφίτη)	152	1.2	2.1	1.6

Τιτάνιο	103	15	0.9	4.5
Αλουμίνιο 2024)	69	16	0.5	2.7
Ατσάλι (1050)	207	9	0.8	7.8

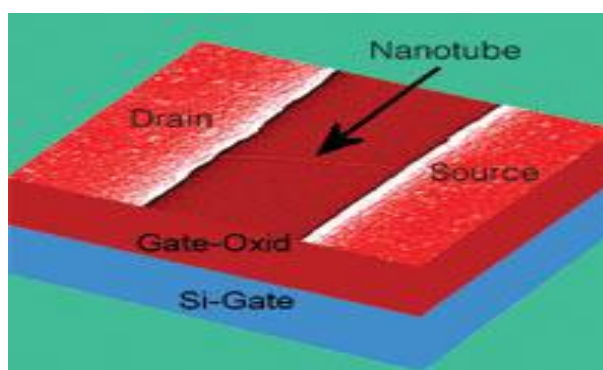
Πίνακας 3.1 Ιδιότητες των μορφών νανο-σωλήνων άνθρακα.

Ως αποτέλεσμα αυτών των ιδιοτήτων, οι νανოსωλήνες άνθρακα υπόσχονται μια μικρή επανάσταση σε πολλούς τομείς.

3.4 Εφαρμογές Νανοςωλήνων Άνθρακα

Οι νανοςωλήνες άνθρακα με διάμετρο λίγων νανομέτρων, αποτελούν μόρια που μπορούν να κατεργαστούν είτε με φυσικό είτε με χημικό τρόπο. Οι ιδιαίτερες ιδιότητες τους, τους επιτρέπουν να χρησιμοποιούνται σε μεγάλο φάσμα εφαρμογών, καθώς είναι πιο ισχυροί από ατσάλι, γρηγορότεροι από το πυρίτιο και πολύ ελαφρύτεροι από το αλουμίνιο:

- Έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετα σε άλλα υλικά βελτιώνοντας την αντοχή τους, μειώνοντας παράλληλα το βάρος τους.
- Μηχανικές, αεροναυπηγικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές (δομικά στοιχεία).
- Ηλεκτρονικές εφαρμογές, όπως τρανζίστορ, λογικές πύλες, μικρό-ηλεκτρονικά κτλ.



Σχήμα 3.8 Τρανζίστορ από νανοςωλήνες άνθρακα.

- Οι νανοςωλήνες παρουσιάζουν μεγάλη ειδική επιφάνεια (έως και 1000 m²/g), λεία επιφάνεια, καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, μεγάλη χημική σταθερότητα και κυρίως η γραμμική τους γεωμετρία καθιστά την επιφάνειά τους προσιτή

σε μεγάλο βαθμό στον ηλεκτρολύτη, οπότε έχουν σημαντικές ηλεκτροχημικές εφαρμογές (επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και fuel cells).

- Επίσης, τα CNTs χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αερίων και κυρίως υδρογόνου.
- Λόγω της ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας και της δυνατότητας της χημικής τροποποίησής τους με λειτουργικές ομάδες, οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μοριακοί αισθητήρες ανίχνευσης ή ‘εξερευνητές’ με πιθανές εφαρμογές στη χημεία, τη βιολογία και την ιατρική. Έχουν χρησιμοποιηθεί ακόμα και ως ‘νανοοχήματα’ για την μεταφορά αντικαρκινικών ουσιών σε κακοήγη κύτταρα (νανο-σένσορες και Nano probes).
- Λόγω της μεγάλης ειδικής τους επιφάνειας και της ικανότητάς τους να προσκολλούν σχεδόν κάθε χημικό είδος στα τοιχώματά τους, χρησιμοποιούνται ευρέως ως καταλυτικά υποστρώματα.
- Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για την μεταφορά και την απαγωγή θερμότητας στην ηλεκτρονική και ειδικά στα μικροκυκλώματα.

3.5 Μέθοδοι Παρασκευής Νανοσωλήνα Άνθρακα

Μια από τις πιο δύσκολες πλευρές της τεχνολογίας των νανοσωλήνων είναι αυτή της παρασκευής τους. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 που ανακαλύφθηκαν τα φουλλερένια και οι νανοσωλήνες άνθρακα, έχουν γίνει σημαντικά βήματα στον τομέα της σύνθεσης και μέχρι τώρα έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές για το σκοπό αυτό. Ο Iijima ήταν ο πρώτος που παρατήρησε νανοσωλήνες πολλαπλών τοιχίων και λίγα χρόνια αργότερα οι Iijima et al. και ανεξάρτητα οι Bethune et al. ανέφεραν την σύνθεση νανοσωληνων μονού τοιχίου.

Οι μέθοδοι σύνθεσης νανοσωλήνα άνθρακα μονού και πολλαπλών τοιχίων περιλαμβάνουν:

- Την τεχνική Ηλεκτρικής Εκκένωσης (Arc-Discharge).
- Την τεχνική Εξάχνωσης με Δέσμη Laser (Laser Ablation).
- Την τεχνική Μετατροπής Μονοξειδίου του Άνθρακα (υπό υψηλή πίεση) – (High Pressure Carbon Monoxide Conversion- HiPco).
- Την τεχνική Χημική Εναπόθεσης Ατμών (Chemical Vapor Deposition).

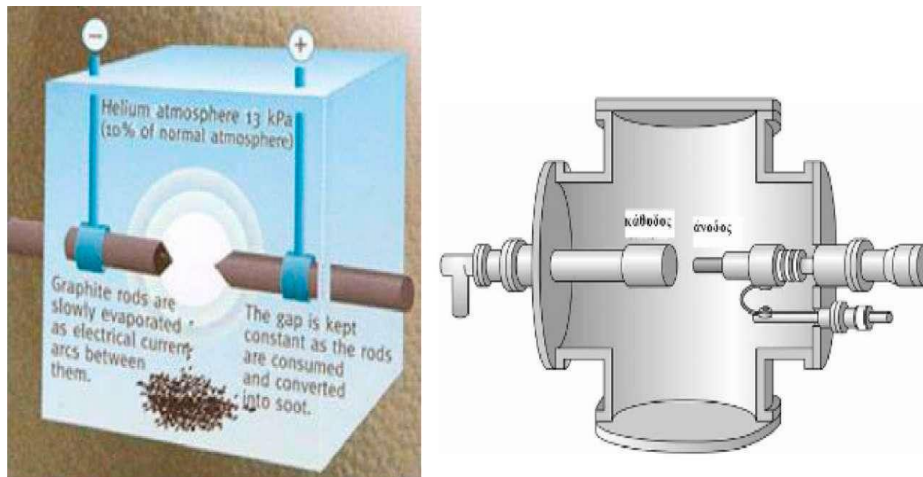
Ανάλογα με την ποσότητα, με τη χρήση που προορίζονται οι παραγόμενοι νανοσωλήνες και ανάλογα με το είδος που απαιτείται (μονού ή πολλαπλών τοιγίων), επιλέγεται διαφορετική τεχνική. Έτσι για παράδειγμα, οι μεγάλες ποσότητες που απαιτούνται για σύνθετα υλικά με ενίσχυση νανοσωλήνων άνθρακα, καθιστούν τις τεχνικές arc-discharge και laser ablation απαγορευτικές από οικονομικής άποψης.

Κατά τη διάρκεια της σύνθεσης, με τη βοήθεια προσμίξεων, χρήσης και ανάλογα με τη μορφή του καταλύτη, καθώς και με τη αλλαγή διάφορων παραμέτρων, επιτυγχάνεται η παραγωγή άμορφου άνθρακα, σφαιρικών ή επιμηκών φουλλερενίων και φυσικά νανοσωλήνων διάφορων διαστάσεων, διατομής, μήκους, χειρομορφίας κτλ και αναλόγως απαιτούνται επιπλέον βήματα μετά τη σύνθεση για τον καθαρισμό και απομάκρυνση των άχρηστων παραπροϊόντων και το διαχωρισμό των νανοσωλήνων που μας ενδιαφέρουν.

Εδώ αξίζει να αναφέρουμε πως οι τεχνικές αέριας φάσης, όπως η CVD, τείνουν να παράγουν νανοσωλήνες με λιγότερα παραπροϊόντα και προτιμώνται περισσότερο για παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων, που απαιτούνται για παράδειγμα, για τη χρήση σε νάνο-σύνθετα υλικά.

3.5.1 Η Τεχνική Ηλεκτρικής Εκκένωσης (Arc-Discharge)

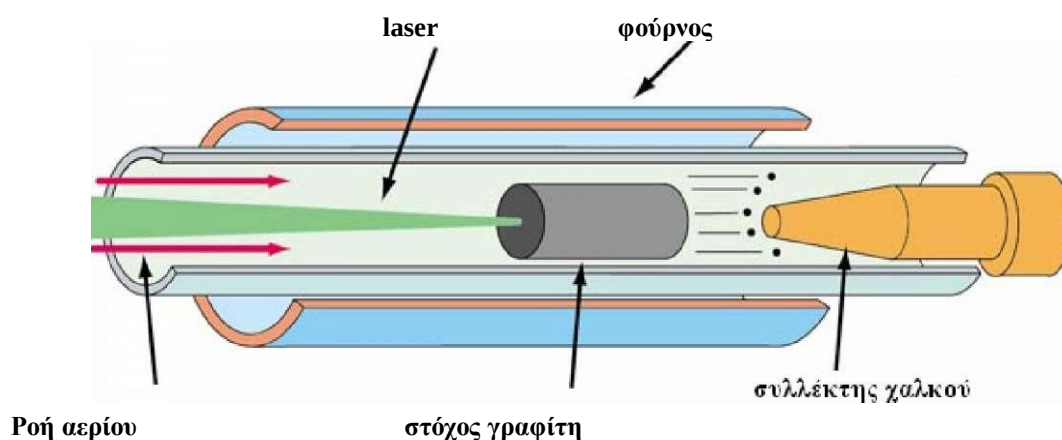
Ο *Iijima* ήταν ο πρώτος που παρατήρησε νανοσωλήνες που παράγονται από την τεχνική εκκένωσης ηλεκτρικού τόξου. Η τεχνική αυτή βασίζεται στη χρήση δυο υψηλής καθαρότητας ηλεκτροδίων από γραφίτη, οι οποίοι έρχονται κοντά σε ατμόσφαιρα χαμηλής πίεσης αδρανούς αερίου (συνήθως ηλίου) και με την εφαρμογή τάσης, επιτυγχάνεται σταθερό ηλεκτρικό τόξο (electric arc). Καθώς καταναλώνεται η άνοδος, η κάθοδος κινείται ανάλογα ώστε να διατηρείται σταθερή η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Το υλικό εναποτίθεται στην κάθοδο και σχηματίζει διάταξη με τηγμένο κέλυφος και μαλακό ινώδη πυρήνα, ο οποίος περιέχει νανοσωληνες άνθρακα και άλλα σωματίδια άνθρακα. Για την παραγωγή νανοσωληνων, τα ηλεκτρόδια συνήθως ντοπάρονται με σωματίδια μεταλλικού καταλύτη. Η ακριβής διαδικασία ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος των γραφιτικών ηλεκτροδίων.



Σχήμα 3.9 Σχηματική τεχνική Arc-Discharge.

3.5.2 Η Τεχνική Εξάχνωσης με Δέσμη Laser (Laser Ablation)

Η τεχνική αυτή αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή φουλλερενίων, αλλά έχει βελτιωθεί ώστε να επιτρέπει την παραγωγή νανοσωληνων άνθρακα μονού τοιχίου. Στην τεχνική αυτή γίνεται χρήση μιας δέσμης laser η οποία εξαχνώνει ένα στόχο γραφίτη ο οποίος είναι σταθερός μέσα σε ένα, συνήθως κυλινδρικό, φούρνο με ελεγχόμενη ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασίες κοντά στους 1200°C . Η γενική ιδέα της διάταξης φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Για να παραχθούν νανοσωλήνες μονού τοιχίου, ο γραφιτικός στόχος ντοπάρεται με κοβάλτιο και νικέλιο τα οποία λειτουργούν ως καταλύτες. Με τη ροή αερίου που υπάρχει μέσα στο φούρνο, ο εξαχνωμένος γραφίτης παρασύρεται και προσκολλάται πάνω σε έναν υδρόψυκτο συλλέκτη χαλκού.



Σχήμα 3.10 Σχηματικά η τεχνική Laser Ablation.

Είναι προφανές πως οι τεχνικές που μόλις αναφέρθηκαν, υπόκεινται στους περιορισμούς του όγκου του γραφιτικού στόχου, έτσι δεν μπορούν να παράγουν πολύ μεγάλες ποσότητες νανοσωληνων και δεν προσφέρονται για συνεχή παραγωγή νανοσωληνων που απαιτείται από τη βιομηχανία. Επιπροσθέτως, οι παραγόμενοι νανοσωληνες χρειάζονται πάντα επιπλέον βήματα επεξεργασίας, καθώς είναι απαραίτητος ο καθαρισμός τους από τα παραπροϊόντα που παράγονται, κάτι που αυξάνει το κόστος και το χρόνο παραγωγής.

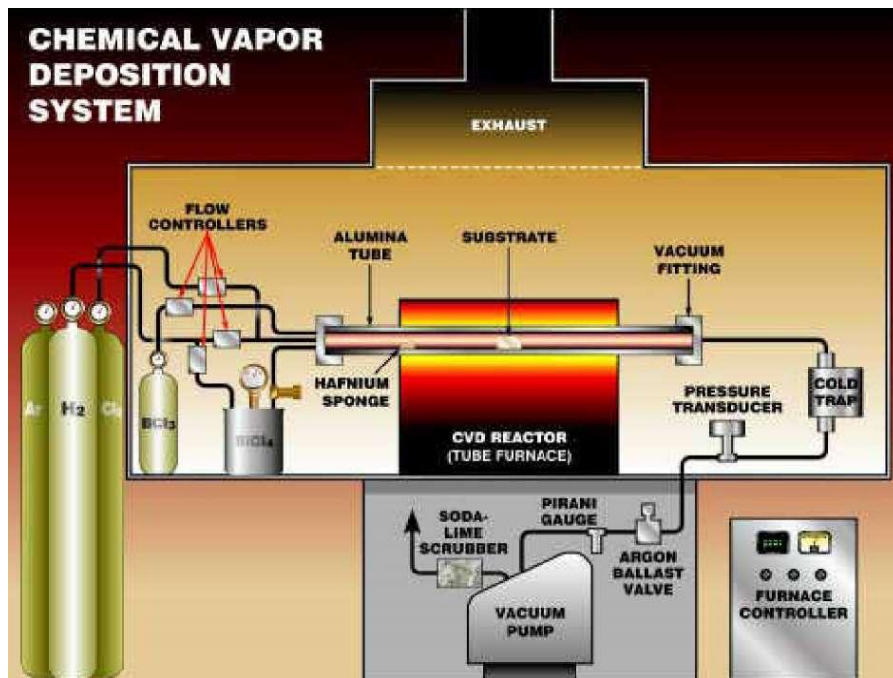
Από τους παραπάνω λόγους υποκινήθηκε η δημιουργία πιο «καθαρών» τεχνικών, με λιγότερα παραπροϊόντα και με δυνατότητα για μεγαλύτερο όγκο π-αραγωγής. Αυτές οι τεχνικές βασίζονται στη δημιουργία νανοσωληνων από την αποσύνθεση αέριων που περιέχουν άνθρακα. Οι τεχνικές αέριας φάσης είναι κατάλληλες για συνεχή παραγωγή, αφού η πηγή άνθρακα είναι ένα ρέον αέριο που μπορεί να ανανεώνεται. Επίσης η ποιότητα των νανοσωληνων που παράγονται είναι υψηλή καθώς επίσης και η καθαρότητα τους, αφού τα παραπροϊόντα είναι λίγα και τα προσθετά βήματα καθαρισμού που απαιτούνται είναι ελάχιστα.

3.5.3 Η Τεχνική της Μετατροπής CO υπό Υψηλή Πίεση (HiPco)

Οι *Nikolaev et al.* περιέγραψαν την παραγωγή νανοσωληνων μονού τοιχίου από αέρια φάση με μονοξειδίο άνθρακα ως πηγή άνθρακα και μάλιστα αναφέρουν την υψηλότερη επιτρεπτή θερμοκρασία και πίεση για τη διαδικασία αυτή (1200°C και 10atm). Έκτοτε η διαδικασία έχει επανακαθοριστεί για παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων και υψηλής καθαρότητας νανοσωληνων άνθρακα μονού τοιχίου και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς μεγάλο ποσοστό του τελικού προϊόντος της διαδικασίας είναι μικρής διαμέτρου νανοσωληνες. Οι αποκαλούμενοι HiPco νανοσωληνες (high pressure carbon monoxide conversion) έχουν εμπορευματοποιηθεί και συνεπώς έχουν φτάσει σε σημείο πολύ καλής ποιότητας και υψηλής καθαρότητας.

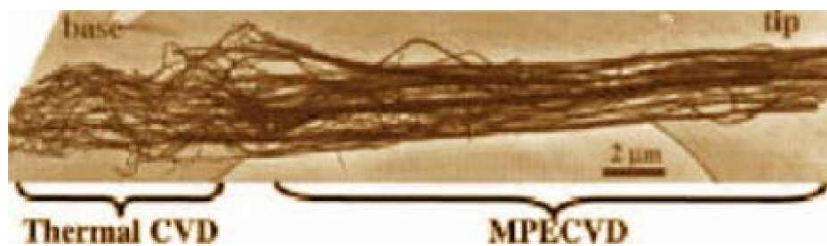
3.5.4 Η Τεχνική της Χημικής Εναπόθεσης Ατμών (CVD)

Στη μέθοδο της Χημικής Εναπόθεσης Ατμών (Chemical Vapor Deposition - CVD), χρησιμοποιούνται αέρια υδρογονανθράκων ως πηγή άνθρακα για την παραγωγή νανοσωληνων μονού και πολλαπλών τοιχίων. Το μείγμα αερίων διέρχεται ενός κυλινδρικού φούρνου με ελεγχόμενη θερμοκρασία και πίεση, πυρολύεται και σχηματίζει νανοσωληνες σε κατάλληλο υπόστρωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11.



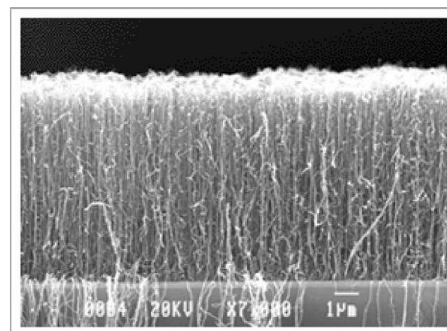
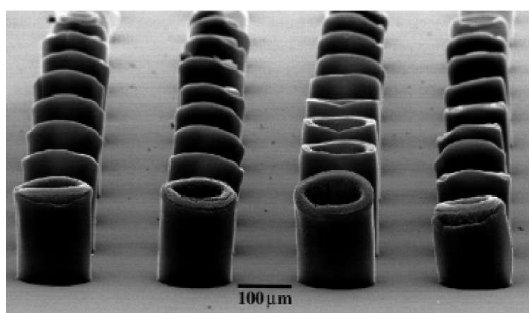
Σχήμα 3.11 Σχηματικά η τεχνική thermal CVD.

Έχει παρατηρηθεί ότι οι υδρογονάνθρακες είναι εύκολο να πυρολυθούν πάνω σε επιφάνειες σε θερμοκρασίες στη γειτονία των 600 - 700°C, αν και υπάρχουν αναφορές παραγωγής νανοσωληνων και σε θερμοκρασίες μικρότερες των 300°C, ακόμα και σε θερμοκρασίες δωματίου). Σαν συνέπεια αυτών των χαμηλότερων θερμοκρασιών, οι νανοσωληνες που παράγονται με αυτόν τον τρόπο, έχουν μια «επίστρωση» άμορφου άνθρακα στην επιφάνεια τους και συνεπώς απαιτούν επιπλέον βήματα καθαρισμού. Παρά το γεγονός αυτό, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες βοηθούν σε έναν άλλο τομέα: επιτρέπουν την ανάπτυξη νανοσωληνων σε περισσότερα είδη επιφανειών και υποστρωμάτων, όπως το γυαλί. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της τεχνικής CVD είναι η ικανότητα της να αναπτύσσει νανοσωληνες σε προσανατολισμένες διατάξεις και με μεγάλο έλεγχο στη διάμετρο και το μήκος τους.



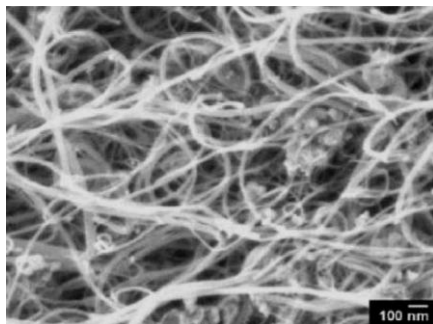
Σχήμα 3.12 Μικροφωτογραφία SEM (scanning electron microscopy) με την επίδραση της MPECVD στη δομή των νανοσωληνων κατά την παραγωγή.

Παραλλαγή της απλής τεχνικής CVD (πολλές φορές αναφέρεται και ως thermal CVD), αποτελεί η PECVD (Plasma Enhanced CVD), στην οποία πλάσμα διεγείρεται από πηγή συνεχούς ρεύματος (DC) ή πηγή μικροκυμάτων (microwave plasma enhanced CVD - MPECVD) και επιτρέπει την ανάπτυξη ευθειών και καλώς προσανατολισμένων νανοσωληνων με εξαιρετική ομοιογένεια στη διάμετρο, το μήκος, την ευθύτητα και την επιφανειακή πυκνότητα. Η χρήση πλάσματος επιταχύνει δραματικά την ανάπτυξη των νανοσωληνων (μέχρι και 40 φορές γρηγορότερα, από ότι χωρίς τη χρήση πλάσματος) και επιδρά πολύ έντονα στη ευθύτητα τους - οι νανοσωληνες που παράγονται με της απλή θερμική CVD τεχνική (thermal CVD), παρουσιάζονται «κατσαρωμένοι» και μοιάζουν με μάζα από μακαρόνια, ενώ αυτοί που προέρχονται από PECVD είναι πολύ πιο ευθείς



Εικόνα 3.1 Μικροφωτογραφίες SEM νανοσωληνων από PECVD (δεξιά) και από MPECVD(αριστερά).

Ωστόσο η τεχνική PECVD απαιτεί ειδικό εξοπλισμό πλάσματος. Από την άλλη πλευρά, οι απλοί - σαν σπαγγέτι - νανοσωληνες που δεν παράγονται από PECVD τεχνικές, είναι αρκετά πιο φθηνοί και εύκολοι στην παρασκευή αλλά υπάρχει μικρότερος έλεγχος της διαμέτρου, του μήκους και της δομής τους. Με ρύθμιση στο πάχος του υποστρώματος, το οποίο δρα καταλυτικά, με χρήση ή όχι επιστρώσεων σε αυτό ελέγχουμε τη διάμετρο και τη δομή των νανοσωληνων.



Εικόνα 3.2 Μικροφωτογραφία SEM κουβαριασμένων, σαν σπαγγέτι νανοσωλήνων, που παράχθηκαν από συμβατικές CVD τεχνικές.

3.6 Χαρακτηρισμός νανοσωλήνων άνθρακα

Για το χαρακτηρισμό των νανοσωληνων άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές τεχνικές. Για παράδειγμα, υψηλής ανάλυση/ς ηλεκτρονική μικροσκοπία φαινομένου σήραγγος (high resolution tunneling electron microscopy - HR-TEM) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποκομίσουμε πολύτιμες πληροφορίες για τη δομή των νανοσωληνων όπως τη διάμετρο, αν έχει ανοικτά ή κλειστά άκρα, αν υπάρχει παρουσία άμορφου υλικού, ατέλειες στη δομή και την ποιότητα του νανοσωλήνα. Στους νανοσωληνες πολλαπλών τοιχίων, η απόσταση των στρωμάτων είναι μόλις 0,34nm και συνεπώς είναι σημαντικό να γνωρίζουμε με ακρίβεια το πλήθος των ομόκεντρων νανοσωληνων, καθώς βοηθάει πολύ στον υπολογισμό της διαμέτρου. Επίσης, καθώς η φύση του καταλύτη και ιδιαίτερα η επιφάνεια του είναι αποφασιστικής σημασίας για την ανάπτυξη των νανοσωληνων σε αυτήν, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν διάφορες τεχνικές, συμπεριλαμβανομένων της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σήραγγος (TEM) και της μικροσκοπίας ατομικών δυνάμεων (atomic force microscopy - AFM) για να χαρακτηρίσουν την επιφάνεια αυτή, πριν τη χρήση στη σύνθεση. Αυτές οι τεχνικές συνεργάζονται για να προσφέρουν πληροφορίες για τη δομή και τη χημική σύσταση της επιφάνειας.

Εκτός από την TEM, η φασματοσκοπία Raman είναι ίσως η πιο διαδεδομένη τεχνική χαρακτηρισμού για τη μελέτη νανοσωλήνων. Η φασματοσκοπία Raman των νανοσωλήνων άνθρακα μονού τοιχίου είναι ένα σημαντικό εργαλείο στον καθορισμό της διαμέτρου των νανοσωλήνων καθώς και της μεταλλικής ή ημιαγώγιμη φύσης τους, καθώς τα δυο αυτά χαρακτηριστικά καθορίζουν τις ενέργειες των επιτρεπτών μεταβάσεων που συμβαίνουν κατά τη φασματοσκοπία Raman.

Χονδρικά μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις ιδιότητες των νανοσωλήνων που κάθε τεχνική μας βοηθάει να μετρήσουμε στον παρακάτω πίνακα 3.2, που ακολουθεί:

Αναλυτική Τεχνική	Προσδιοριζόμενη Ιδιότητα ΝΣΑ
Θερμοκρασία προγραμματισμένης εκρόφησης, φασματοσκοπία υπερύθρου (IR)	Όγκος μοριακής σύνθεσης, εκτίμηση μοριακής δομής
Σκέδαση Raman	Ο βαθμός τάξης των CNT, η κατανομή των sp^2 και sp^3 δεσμών, το μέγεθος των γραφιτικών κρυσταλλιτών του χύμα υλικού, χειρομορφία, μηχανική καταπόνηση, μετρήσεις μεγέθους
Ηλεκτρονικός συντονισμός στροφορμής (ESR), Συντονισμός αγωγιμότητας στροφορμής ηλεκτρονίων (CESR)	Ηλεκτρονικές ιδιότητες
Σάρωση μικροσκοπίας σήμανσης και φασματοσκοπίας (STM & STS)	Έρευνα άνοιγματος δεσμού
Μετρήσεις γωνίας επαφής	Υγρασία νανοσωλήνων
Ηλεκτρονική μικροσκοπία διέλευσης (TEM) και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)	Κατασκευή τοιχώματος
Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης (AFM)	Μηχανικές ιδιότητες, ηλεκτρικές ιδιότητες και χειρισμός

Πίνακας 3.2 Τι προσδιορίζει κάθε αναλυτική τεχνική.

3.7 Εφαρμογή νανοσωλήνων άνθρακα σε τσιμεντοειδή υλικά

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.3.2 οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Διαθέτουν μέτρο ελαστικότητας περίπου ίσο με 1000 GPa, η εφελκυστική τους αντοχή αγγίζει τα 63 GPa και έχουν πολύ μεγάλο λόγο πλευρών. Χάρη στις ιδιότητες αυτές, σε συνδυασμό με το χαμηλό τους βάρος και την υψηλή χημική και θερμική τους σταθερότητα, η χρήση των CNTs μπορεί να συμβάλει στην παραγωγή τσιμεντοειδών υλικών με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, σε σύγκριση με άλλες παραδοσιακές μεθόδους ενίσχυσης, όπως η εφαρμογή ινών γυαλιού και άνθρακα.

3.7.1 Μηχανισμοί ενίσχυσης

Το πώς οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των CNTs μπορούν να επηρεάσουν τις μηχανικές ιδιότητες των νανοςύνθετων υλικών, οφείλεται τόσο σε παραδοσιακούς

μηχανισμούς ενίσχυσης όσο και σε μηχανισμούς ενίσχυσης σε επίπεδο νανοκλίμακας, οι οποίοι παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

1. Δημιουργία εκτεταμένου δικτύου ενίσχυσης από CNTs, στη δομή του νανοδομημένου υλικού.

Η διάμετρος και ο λόγος πλευρών των CNTs επιτρέπει την καλύτερη διασπορά τους μέσα στο υλικό, σε σύγκριση με τις κοινές ίνες, που χρησιμοποιούνται για λόγους ενίσχυσης. Ως εκ τούτου, τα CNTs σχηματίζουν ένα εκτεταμένο πλέγμα ενίσχυσης μέσα στο μητρικό υλικό, το οποίο βελτιώνει τη σύσταση του τελικού υλικού.

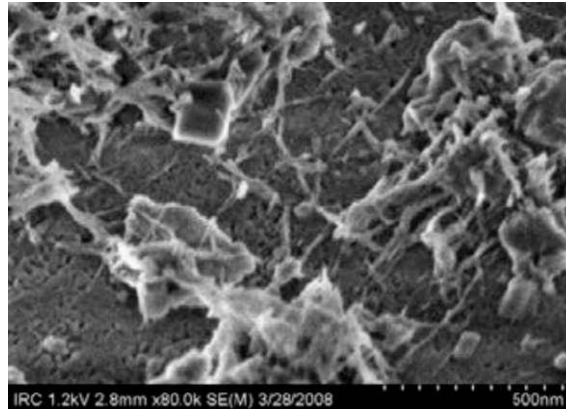
2. Βελτίωση των μικροδομών του νανοδομημένου υλικού.

Τα νανοδομημένα υλικά παρουσιάζουν μία τροποποιημένη νανοδομή, με τη μέση τιμή της δυσκαμψίας και της σκληρότητας του C-S-H να είναι υψηλότερη από εκείνη του αντίστοιχου τσιμεντοειδούς υλικού, το οποίο όμως δεν έχει ενισχυθεί με CNTs. Επιπλέον, χάρη στην προσθήκη των CNTs, παρατηρείται μείωση των ατελειών του υλικού, σε επίπεδο νανοκλίμακας, με αποτέλεσμα την απουσία ρωγμών. Αναφέρεται ότι, σύμφωνα με τους Shah et al. (2009), η αυτογενής συστολή στα νανοδομημένα υλικά μειώνεται κατά 30%, 96 ώρες μετά την παρασκευή τους, συγκρινόμενα με το αντίστοιχο κοινό τσιμεντοειδές υλικό.

Επίσης, με την προσθήκη των CNTs βελτιώνεται η κατανομή του μεγέθους των πόρων και μειώνεται το πορώδες του νανοδομημένου υλικού. Τα νανουλικά γεμίζουν τα κενά (πόρους) μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης, όπως το C-S-H, διαμορφώνοντας μια πιο πυκνή και συμπαγή δομή. Αντιθέτως, ινοπλισμένα τσιμεντοειδή υλικά παρουσίασαν πολύ υψηλότερο πορώδες σε σύγκριση με δείγματα κοινού τσιμέντου Portland.

3. Ισχυρός δεσμός μεταξύ μήτρας και CNTs

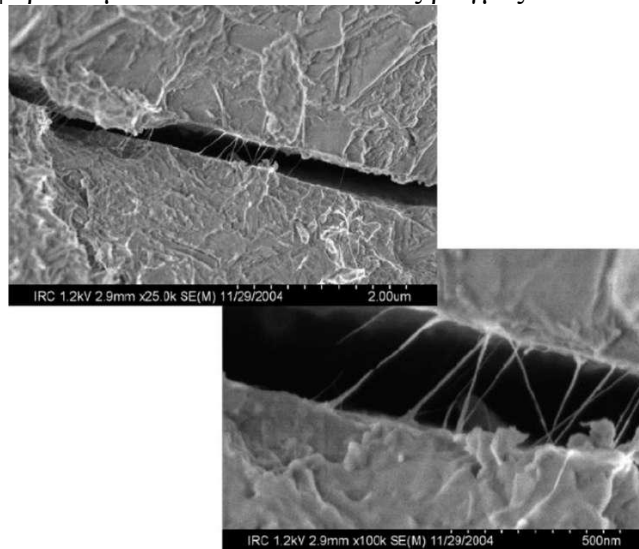
Οι νανοσωλήνες άνθρακα λειτουργούν ως παράγοντες εμπυρήνωσης για το ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (C-S-H), το οποίο έχει την τάση να σχηματίζεται πάνω στην επιφάνεια των CNTs και όχι στην επιφάνεια των γειτονικών μη ενυδατωμένων κόκκων τσιμέντου. Αυτή η εμπυρήνωση εντοπίζεται σε όλο το μήκος του CNT και όχι σε μεμονωμένα σημεία, γεγονός που σχετίζεται με χημικούς παράγοντες. Η συμπεριφορά αυτή οδηγεί σε πυκνό σχηματισμό του C-S-H, το οποίο φαίνεται να είναι στενά συνδεδεμένο με τους νανοσωλήνες, προσδίδοντας χαρακτήρα ενίσχυσης στο υλικό, με αποτελεσματική μεταφορά των φορτίων από την ενισχυμένη τσιμεντοειδή μήτρα.



Εικόνα 3.3 Ανάπτυξη C-S-H γύρω από SWCNTs.

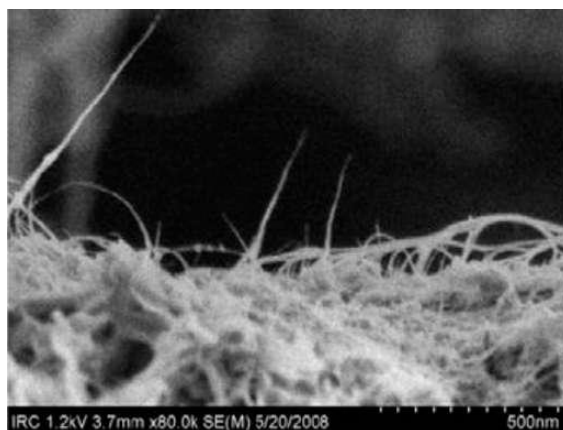
4. Γεφύρωση ρωγμών, δράση βλήτρου, εξόλκευση ινών, εκτροπή ρωγμών, αποκόλληση ινών και θραύση ινών.

Τα CNTs βρίσκονται καλά αγκυρωμένα ανάμεσα στα προϊόντα της ενυδάτωσης. Συνεπώς, όταν οι ρωγμές συναντούν καλά διεσπαρμένους νανοσωλήνες η δράση βλήτρου και η γεφύρωση των ρωγμών μπορεί να εμποδίσει τη διεύρυνση των ρωγμών, στο πολύ πρώιμο στάδιο της εξάπλωσης τους. Ακόμη, τα CNTs σχηματίζοντας μία γέφυρα εγκάρσια στην επιφάνεια θραύσης, εκτρέπουν την ενέργεια της ρηγμάτωσης προς το μητρικό υλικό, ενώ ταυτόχρονα εγγυώνται τη μεταφορά του φορτίου μέσα από τα κενά και τις ρωγμές.



Εικόνα 3.4 CNTs γεφυρώνουν ρωγμές σε τσιμεντοειδές υλικό.

Επιπλέον μηχανισμοί ενίσχυσης, όπως εξόλκευση ινών (pull-out), η εκτροπή ρωγμών και η αποκόλληση και η θραύση ινών, μπορούν να συνεισφέρουν στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού, συμβάλλοντας στην απελευθέρωση ενέργειας.

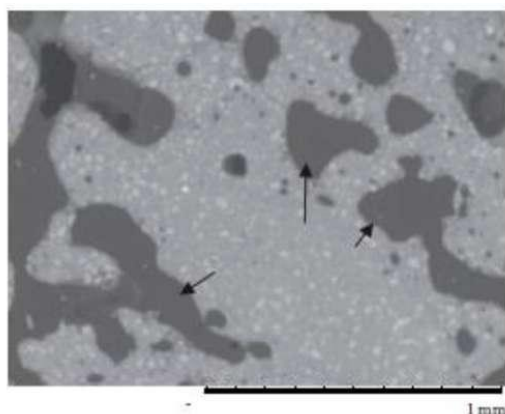


Εικόνα 3.5 Εξόλκευση των CNTs.

3.7.2 Διασπορά νανοςωλήνων άνθρακα σε τσιμεντοειδή υλικά

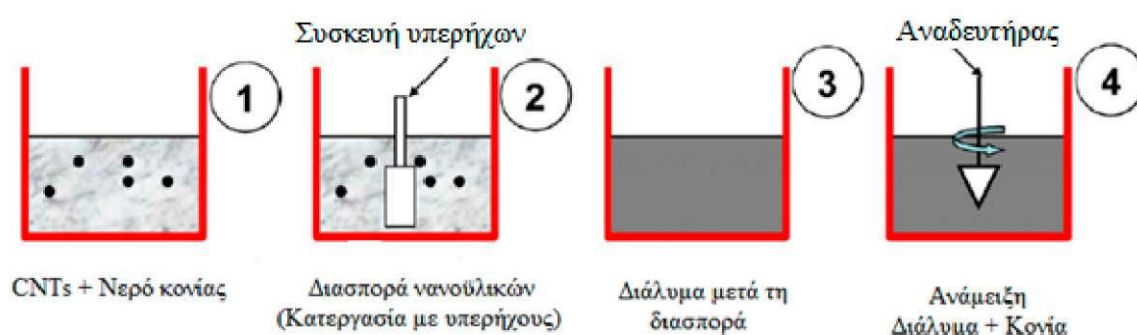
Η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος και των τσιμεντοειδών υλικών με την προσθήκη νανουλικών δε βασίζεται μόνο στις εξαιρετικές ιδιότητες που παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα υλικά. Οι ιδιότητες των νανοδομημένων υλικών επηρεάζονται από δύο ακόμη σημαντικούς παράγοντες: α) την ομοιόμορφη διασπορά των CNTs στο υλικό και β) την καλή συνάφεια μεταξύ της επιφάνειας των νανουλικών και της μήτρας που ενισχύεται.

Στο σημείο αυτό, σημειώνεται ότι η απευθείας διασπορά των CNTs στον τσιμεντοπολτό δεν είναι εφικτή, καθώς η ενυδάτωση του τσιμέντου ξεκινά σχεδόν άμεσα μετά την προσθήκη του νερού. Επομένως, η κλασσική διαδικασία ανάμειξης για την προετοιμασία του κονιάματος, με τη χρήση ενός μίξερ τύπου Hobart, δεν μπορεί να εξασφαλίσει τη σωστή διασπορά των CNTs μέσα στο υλικό, δημιουργώντας συσσωματώματα (Εικ. 3.6) και γενικά αποφεύγεται.



Εικόνα 3.6 Συσσωματώματα νανοςωλήνων άνθρακα σε τσιμεντοπολτό μετά την ενυδάτωση.

Αντιθέτως, η συνήθης διαδικασία που ακολουθείται είναι αρχικά η διασπορά των εν λόγω νανουλικών στο νερό και, έπειτα, η ανάμειξη του διαλύματος αυτού (νερό-νανουλικά) με την τσιμεντόπαστα, χρησιμοποιώντας έναν συμβατικό αναδευτήρα, όπως φαίνεται στην Σχήμα 3.13. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι, οι μέθοδοι διασποράς των νανουλικών στο νερό θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά, έτσι ώστε να μην παρεμβαίνουν στη μετέπειτα διαδικασία της ενυδάτωσης του τσιμεντοπολτού ή να παγιδεύουν αέρα ή να αντιδρούν με άλλα πρόσμικτα.



Σχήμα 3.13 Διαδικασία παρασκευής τσιμεντόπαστας ενισχυμένο με CNTs, με χρήση υπερήχων.

Αναφέρεται ότι, είναι πιο δύσκολο να επιτευχθεί ομοιόμορφη διασπορά των νανοσωλήνων σε τσιμεντοειδή υλικά, σε σύγκριση με τις πολυμερικές μήτρες. Το γεγονός αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο μέγεθος των κόκκων του τσιμέντου. Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι τα νανουλικά διαχωρίζονται μεταξύ τους από τους κόκκους του τσιμέντου, η παρουσία κόκκων μεγέθους μεγαλύτερου από το μέσο όρο, οδηγεί σε ανομοιόμορφη διασπορά τους. Παρατηρούνται δηλαδή περιοχές που χαρακτηρίζονται από απουσία νανοσωλήνων και ταυτόχρονα άλλες με υψηλή συγκέντρωση. Ωστόσο, η μείωση του μεγέθους των κόκκων του τσιμέντου δεν συνίσταται, καθώς, αν και μπορεί να βελτιώσει την διασπορά των νανουλικών, το λεπτόκοκκο τσιμέντο έχει πολλά άλλα μειονεκτήματα, όπως η μεγάλη απαίτηση σε νερό ανάμειξης.

Παρακάτω αναλύονται οι φυσικές και οι χημικές τεχνικές που ακολουθούνται για να επιτευχθεί η διασπορά των νανουλικών άνθρακα. Τονίζεται ότι οι διάφορες χημικές μέθοδοι δεν μπορούν να διασπείρουν άμεσα τα CNTs στο νερό. Ωστόσο,

συμβάλλουν στη διαδικασία της διασποράς διαβρέχοντας τα νανουλικά και προσδίδοντας σε αυτά την απαιτούμενη σταθερότητα προκειμένου να επιτευχθεί ένα καλό αποτέλεσμα. Επομένως, οι χημικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται πάντα σε συνδυασμό με τις φυσικές μεθόδους, οι οποίες μπορούν να διασπείρουν άμεσα τα νανουλικά.

3.7.2.1 Φυσικές Μέθοδοι (Κατεργασία με υπερήχους)

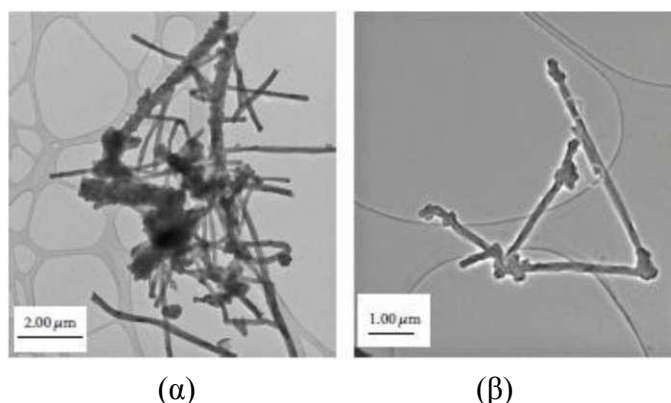
Σε μία συσκευή υπερήχων η ηλεκτρική τάση μετατρέπεται σε μηχανικές δονήσεις, οι οποίες μεταφέρονται στο υγρό μέσο (νερό ή διαλύτης), με αποτέλεσμα το σχηματισμό και τη διάσπαση μικροσκοπικών φυσαλίδων. Κατά τη διάρκεια αυτού του φαινομένου, που ονομάζεται σπηλαίωση, δημιουργούνται εκατομμύρια κύματα και απελευθερώνεται μια μεγάλη ποσότητα ενέργειας, με αποτέλεσμα τη διασπορά των νανουλικών στο υγρό.

Ωστόσο, αυτή η τεχνική δε μπορεί να εξασφαλίσει την ομοιόμορφη κατανομή των CNTs στο τσιμέντο. Αυτό σημαίνει ότι η επίτευξη ομοιόμορφης διασποράς των νανουλικών στο νερό δεν εγγυάται από μόνη της επιτυχημένη διασπορά στο νανοσύνθετο υλικό. Για το λόγο, αυτό κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή διαφόρων χημικών μεθόδων σε συνδυασμό με τους υπερήχους, οι οποίες σταθεροποιούν τη διασπορά των CNTs, εξασφαλίζοντας τη διατήρηση και τη μεταφορά της από το νερό στο κονίαμα πλέον.

3.7.2.2 Χημικές Μέθοδοι

1. Χρήση επιφανειοδραστικού

Οι επιφανειοδραστικές ουσίες (surfactants) μπορούν να βελτιώσουν τη διασπορά των νανουλικών σε υδατικό διάλυμα, μειώνοντας την επιφανειακή τάση του νερού. Επίσης, χάρη στις ηλεκτροστατικές απωθήσεις μεταξύ των μορίων του επιφανειοδραστικού, που έχουν προσκολληθεί στην επιφάνεια των νανουλικών, αποτρέπεται η δημιουργία συσσωματωμάτων. Παραδείγματα επιφανειοδραστικών είναι τα: SDS, NaDC, Triton X - 100, NaDDBS καθώς και πολυμερή, όπως το πολυμερές ακρυλικού οξέος.



Εικόνα 3.7 Διασπορά MWCNTs σε νερό (α) χωρίς καμία επεξεργασία (β) με εφαρμογή πολυμερούς ακρυλικού οξέος και κατεργασία υπερήχων.

Ένας καθοριστικός παράγοντας στη διασπορά των νανουλικών άνθρακα στο νερό και επομένως και στο τσιμεντοειδές υλικό, αποτελεί ο τύπος και η δομή του επιφανειοδραστικού που χρησιμοποιείται. Έχει παρατηρηθεί ότι η μέγιστη αύξηση καμπτικής και θλιπτικής αντοχής επετεύχθη με τη χρήση του NaDC για τη διασπορά 0.2% κ.β. του τσιμέντου MWCNTs, και ήταν της τάξεως του 35.45% και 29.5% αντίστοιχα, σε σύγκριση με τον κοινό τσιμεντοπολτό. Αντίθετα, επιφανειοδραστικά όπως το NaDDBS και το SDS επηρεάζουν αρνητικά την ενυδάτωση του τσιμέντου και εγκλωβίζουν αέρα στο εσωτερικό της μήτρας. Σημειώνεται ότι ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα της χρήσης επιφανειοδραστικών είναι η έλλειψη σύνδεσης των νανουλικών μέσα στην τσιμεντοειδή μήτρα, λόγω των απωθητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του επιφανειοδραστικού, γεγονός που επηρεάζει την ηλεκτρική και πιεζοηλεκτρική ιδιότητα του νανοσύνθετου υλικού.

2. Χρήση πρόσμικτων τσιμέντου

Λαμβάνοντας υπόψη τη φύση των τσιμεντοειδών υλικών, έρευνες έχουν επικεντρωθεί σε μεθόδους διασποράς των νανουλικών, οι οποίες είναι συμβατές με τη χημεία του τσιμέντου. Τέτοιου είδους τεχνικές είναι η χρήση διάφορων πρόσμικτων (πρόσμικτα μείωσης νερού, ρευστοποιητές και υπερρευστοποιητές) σε ρόλο επιφανειοδραστικών των CNTs. Με αυτές τις μεθόδους διευκολύνεται η διαδικασία της διασποράς των νανοσωλήνων, με τρόπο ανάλογο με τα παραπάνω, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνεται η ομοιομορφία και η εργασιμότητα των νανοσύνθετων υλικών.

Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι με τη χρήση πολυκαρβοξυλικών ουσιών, οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως ως υπερρρευστοποιητές σε τσιμεντοειδή υλικά, μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματική διασπορά των CNTs τόσο μέσα σε υδατικό διάλυμα όσο και σε τσιμεντοπολτό. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση πυριτικής παιπάλης βελτιώνει τη διασπορά των νανοϊνών σε τσιμεντοειδές υλικό, καθώς λόγω του πολύ μικρού μεγέθους των σωματιδίων της, μπορεί να διαταράξει τις Van der Waals δυνάμεις μεταξύ των νανουλικών.

3. Ομοιοπολική Τροποποίηση

Η πιο κοινή τεχνική για τη βελτίωση της ικανότητας διασποράς των νανοσωλήνων άνθρακα σε νερό ή σε πολυμερική μήτρα, είναι η ομοιοπολική τροποποίηση. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την επεξεργασία της επιφάνειας των νανουλικών με ισχυρά οξέα όπως θειικό ή νιτρικό οξύ ή ακόμα και με συνδυασμό τους, με σκοπό να βελτιωθεί η χημική τους συμβατότητα με το μέσο στο οποίο θα αναμειχθούν, δηλαδή να βελτιωθεί η ικανότητα διαβροχής τους και να περιοριστεί η τάση τους για δημιουργία συσσωματωμάτων.

Έχει παρατηρηθεί ότι η μέθοδος αυτή ήταν ιδιαίτερα επιτυχής ως προς τη διασπορά των CNTs σε μήτρα τσιμέντου. Ωστόσο, η επιθετική χημική τροποποίηση, με τη χρήση οξέων σε υψηλές θερμοκρασίες, θα μπορούσε να οδηγήσει σε υποβάθμιση των ιδιοτήτων των νανοσωλήνων (π.χ. μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων, των ηλεκτρικών ιδιοτήτων και του λόγου πλευρών). Ακόμη, αν και τα CNTs διασπείρονται ομοιόμορφα στο τσιμεντοειδές υλικό, δεν μπορούν να διαμορφώσουν ένα καλά συνδεδεμένο τρισδιάστατο δίκτυο, μειώνοντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τις πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες του νανοδομημένου υλικού.

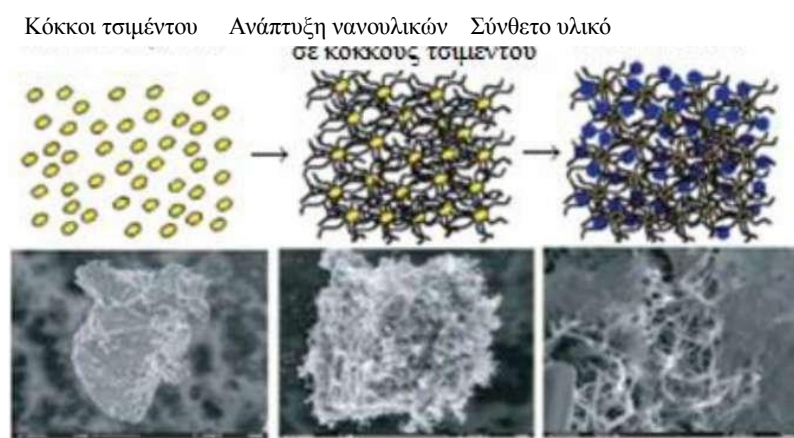
4. Συνδυασμός χημικών μεθόδων

Σε πολλές περιπτώσεις, για την επίτευξη καλύτερης διασποράς των νανουλικών εφαρμόζονται ταυτόχρονα παραπάνω από μία από τις προαναφερθείσες χημικές μεθόδους. Για παράδειγμα, με το συνδυασμό της επιφανειακής τροποποίησης των νανουλικών και της χρήσης πολυμερών επιτυγχάνεται πιο σταθερή διασπορά των CNTs σε υδατικό διάλυμα, σε σύγκριση με την μεμονωμένη εφαρμογή της κάθε μεθόδου. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η διασπορά, μη τροποποιημένων MWCNTs με χρήση πολυμερούς ακρυλικού οξέος, παρέμεινε σταθερή μόνο για δύο ώρες και μετέπειτα παρατηρήθηκε καθίζηση. Αντίθετα, με το συνδυασμό των

δύο μεθόδων η διασπορά παρουσίασε σταθερότητα για περισσότερο από δύο μήνες. Τα πολυμερή ακρυλικού οξέος προσκολλώνται στην επιφάνεια των τροποποιημένων νανοσωλήνων, εμποδίζοντας σε μεγαλύτερο βαθμό τη συσσωμάτωσή τους. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν παρατηρηθεί και με το συνδυασμό τροποποιημένων MWCNTs με πολυκαρβοξυλικές ουσίες, με τη διασπορά τους μέσα σε τσιμεντοειδή μήτρα να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική.

5. Νέες μέθοδοι διασποράς των CNTs

Προκειμένου να αποφευχθεί η προβληματική και χρονοβόρα διαδικασία της διασποράς των CNTs μέσα σε τσιμεντοειδή μήτρα, έχει αναφερθεί μια καινοτόμος μέθοδος παρασκευής νανοδομημένων τσιμεντοειδών υλικών, μέσω της απευθείας ανάπτυξης των CNTs πάνω στους κόκκους του τσιμέντου. Αυτό επιτυγχάνεται με έναν αντιδραστήρα χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD), ο οποίος τροφοδοτείται συνεχώς με σκόνη τσιμέντου και ως κύρια πηγή άνθρακα χρησιμοποιείται μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα. Η ιδέα της μεθόδου αυτής γίνεται περισσότερο κατανοητή με την παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8 Σχηματική απεικόνιση της ενσωμάτωσης νανουλικών σε τσιμεντοειδές υλικό μέσω της απευθείας ανάπτυξης τους στα σωματίδια του τσιμέντου.

4. ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ

4.1 Εισαγωγή

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι είναι το σύνολο των διαδικασιών που σκοπό έχουν την εκτίμηση της δομικής ακεραιότητας υλικών ή κατασκευών οι οποίες δεν επηρεάζουν τη δομική κατάσταση του υπό εξέταση δοκιμίου. Οι συμβατικές μέθοδοι προσδιορίζουν την αντοχή (κυρίως του υλικού με ταυτόχρονη καταστροφή του δοκιμίου. Οι μέθοδοι ΜΚΕ εκτιμούν την αντοχή (κυρίως) του υλικού χωρίς να επηρεάζουν τη λειτουργία του κατασκευαστικού στοιχείου.

Οι κυριότερες μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον έλεγχο των υλικών είναι: ο οπτικός έλεγχος, οι υπέρηχοι (τασικά κύματα) , η θερμογραφία, η ακουστική εκπομπή, η ραδιογραφία, τα διεισδυτικά υγρά κ.α

Η μεγάλη αξία των μη καταστροφικών μεθόδων οφείλεται στο ότι, μπορούν να εφαρμόζονται σε όλες τις φάσεις, δηλαδή του σχεδιασμού, της κατασκευής, του ποιοτικού ελέγχου, της εγκατάστασης και της συντήρησης μιας κατασκευής.

Μπορούν να ανιχνεύουν και να προσδιορίζουν τα ελαττώματα που υπάρχουν στο εσωτερικό ή την επιφάνεια όλων των υλικών, τα οποία αποτελούν τις αιτίες της αστοχίας τους, να υπολογίζουν τις διαστάσεις των κατασκευών και σε πολλές περιπτώσεις, τις μηχανικές, τις ακουστικές, τις ηλεκτρικές, τις μαγνητικές, κ.ά. ιδιότητες τους. Το σημαντικό με τις μεθόδους αυτές είναι ότι οι περισσότερες είναι ακίνδυνες και για τον άνθρωπο εκτός των υλικών.

Ο χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων των υλικών είναι σημαντικός για την κατανόηση της συμπεριφοράς τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και αποτελεί τη βάση για τον σχεδιασμό προϊόντων. Η ανάγκη για αξιόπιστο χαρακτηρισμό υλικών και δομών που χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών (π.χ. αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία, θαλάσσιες κατασκευές, πυρηνική βιομηχανία, κατασκευές πολιτικού μηχανικού, μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς, κλπ.) έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνικών και οργανολογίας. Δυστυχώς πολλές από τις μεθόδους αυτές χαρακτηρισμού απαιτούν κοπή η οποία καταστρέφει την υπό εξέταση δομή. Επίσης, πολλές τεχνικές χαρακτηρισμού δεν παρέχουν βασικές πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες του υλικού στο λειτουργικό του περιβάλλον. Μια ιδανική μέθοδος χαρακτηρισμού θα πρέπει να παρέχει στοιχεία σχετικά με τις ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με τη μικροδομή και τη μακροδομή του χωρίς την ανάγκη

τεμαχισμού της δομής. Τέτοιου είδους δεδομένα μπορούν να ληφθούν μόνο χρησιμοποιώντας τις μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ). Οι όροι μη καταστροφικός έλεγχος (nondestructive inspection - NDI), μη καταστροφική δοκιμή (nondestructive testing - NDT) ή μη καταστροφική αξιολόγηση (nondestructive evaluation - NDE) αναφέρονται στη χρήση των ΜΚΕ, μιας κατηγορίας δηλαδή φυσικών δοκιμών που επιτρέπουν την ανίχνευση ή/και μέτρηση ιδιοτήτων του υλικού ή ατελειών χωρίς όμως να εμποδίζεται η λειτουργική χρήση της δομής.

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι είναι απαραίτητοι για σχεδόν οποιοδήποτε βιομηχανικό προϊόν. Ο ΜΚΕ έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος της μελέτης των υλικών διότι επιτρέπει τον προσδιορισμό των παραμέτρων του υλικού (όπως η μικροδομή και η μακροδομή, η μηχανική τάση, οι φυσικές ιδιότητες, και τα ελαττώματα/βλάβες) σε σχεδόν οποιοδήποτε σημείο, γραμμή, επιφάνεια, ή όγκο ενδιαφέροντος και σε σχεδόν οποιαδήποτε κατάσταση κατά τη διάρκεια ζωής του υλικού. Ο μη καταστροφικός έλεγχος αναφέρεται σε πολλές διαφορετικές μεθόδους που βασίζονται σε ελαστικά κύματα, διεισδύουσες ακτινοβολίες, φως, ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, χημικά αισθητήρια, κλπ. Η κάθε μέθοδος μπορεί να χωρίζεται σε διαφορετικές τεχνικές, οι οποίες έχουν κοινή φυσική βάση (π.χ. ακουστική, οπτική, μαγνητισμός, κλπ.), όμως διαφοροποιούνται ως προς την εφαρμογή τους σε εργαστηριακό επίπεδο ή στο πεδίο σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή κατά τη λειτουργία του εξαρτήματος ή της κατασκευής. Λόγω του μεγάλου αριθμού πιθανών μεθόδων και τεχνικών μη καταστροφικού χαρακτηρισμού και αξιολόγησης υλικών και δομών, οι ΜΚΕ δεν είναι ένα μεμονωμένο πεδίο, αλλά μια συνέργεια πολλών επιστημονικών και τεχνικών ειδικοτήτων.

Ο ρόλος της οργανολογίας μη καταστροφικού ελέγχου είναι σημαντικός για την αποτελεσματικότητα των μεθόδων. Η οργανολογία θα πρέπει να διαθέτει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά προκειμένου να απολαμβάνει ευρείας αποδοχής στην επιστημονική και τεχνική κοινότητα:

- Ακρίβεια: Το όργανο θα πρέπει να πραγματοποιεί μετρήσεις με ακρίβεια για τον προσδιορισμό είτε των ιδιοτήτων του υλικού ή της παρουσίας ατελειών/βλάβης σ' αυτό.
- Αξιοπιστία: Το όργανο θα πρέπει να ανιχνεύει συνεχώς και να ποσοτικοποιεί ατέλειες/βλάβη ή ιδιότητες του υλικού με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας. Αν ένα όργανο δεν είναι αξιόπιστο, τότε δεν μπορεί να ανιχνεύσει τη βλάβη που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του εξαρτήματος, ή μπορεί να υποδεικνύει

την παρουσία μιας ατέλειες εκεί που δεν υπάρχει. Η ανίχνευση μιας πλασματικής ατέλειας (phantom flaw) μπορεί να σημαίνει ότι ένα κατάλληλο εξάρτημα απορρίπτεται, το οποίο είναι ένα δαπανηρό λάθος.

- Απλότητα: Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα όργανα στο πεδίο είναι εκείνα που χρησιμοποιούνται από τεχνικούς στο εργοστάσιο ή για επισκευές, και όχι από εξειδικευμένους χειριστές.
- Χαμηλό Κόστος: Ένα όργανο δεν χρειάζεται να είναι χαμηλού κόστους με την απόλυτη έννοια του όρου. Όμως, θα πρέπει να είναι φθηνό σε σχέση είτε με την αξία του υπό έλεγχο εξαρτήματος ή σε σχέση με το κόστος της αποτυχίας ή της κρισιμότητας της εφαρμογής. Για παράδειγμα, στον τομέα της αεροναυπηγικής, έως και το 12 % της αξίας του εξαρτήματος μπορεί να δαπανηθεί για την επιθεώρηση ενός εξαρτήματος που κρίνεται ως κρίσιμο για την ασφαλή πτήση του αεροσκάφους.

Ο ρόλος του ΜΚΕ βασίζεται σε δύο κύριους άξονες. Ο πρώτος είναι προφανώς η αποτροπή της καταστροφικής αστοχίας των κατασκευών. Είναι πολλά τα παραδείγματα αστοχιών στην ιστορία του τεχνικού πολιτισμού τα οποία συνέβησαν λόγω αδυναμίας ανίχνευσης βλάβης σε αρχικό στάδιο. Λόγω καταπόνησης κατά τη λειτουργία η βλάβη αυξάνεται εκθετικά (όπως μία ρωγμή κατά την κόπωση) και ως εκ τούτου μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφική αστοχία με ανθρώπινα θύματα και δευτερευόντως απώλεια κεφαλαίου. Τυπικό παράδειγμα από την αεροναυπηγική το αεροσκάφος "Comet", όπου οι ρωγμές ξεκινούσαν από τις ακμές των παραθύρων. Δυστυχώς τη δεκαετία του 1950 όταν κυκλοφόρησε το συγκεκριμένο αεροσκάφος, δεν υπήρχαν μέθοδοι πλήρους πεδίου για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων με συνέπεια να μην είναι εμφανής η συγκέντρωση τάσεων στις ακμές που οδήγησε αρκετά από τα αεροπλάνα σε αστοχία εν πτήση μετά από περίπου 1000 κύκλους συμπίεσης-αποσυμπίεσης. Στο πεδίο των σιδηροδρόμων, τα ατυχήματα (πολλές φορές θανατηφόρα) ήταν εβδομαδιαίο φαινόμενο στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Οι ανθρώπινες απώλειες έφταναν τις διακόσιες ζωές ανά έτος! Ρωγμές στους άξονες και σε άλλα δομικά στοιχεία του τρένου περνούσαν απαρατήρητες μέχρι να φτάσουν στο σημείο καταστροφικής αστοχίας. Ο μεγάλος αριθμός των αστοχιών ανάγκασε την επιστημονική και τεχνική κοινότητα να λάβει μέριμνα για την εύρεση των λόγων αστοχίας και την αποφυγή αυτής στα διάφορα πεδία. Έτσι υπήρξε ανάπτυξη κλάδων όπως η θραυστομηχανική, για καλύτερο σχεδιασμό των κατασκευών (αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων κλπ.), η επιστήμη των υλικών για ανάπτυξη πιο ανθεκτικών

υλικών και φυσικά των ΜΚΕ για τον εντοπισμό της βλάβης πριν αυτή αποκτήσει κρίσιμο μέγεθος και οδηγήσει σε καταστροφική αστοχία. Ο δεύτερος άξονας που στις ημέρες μας λαμβάνει όλο και μεγαλύτερη σημασία είναι η ασφαλής και οικονομική διαχείριση των κατασκευών. Στην επικράτεια μιας χώρας λειτουργούν χιλιάδες κατασκευές που υποστηρίζουν την ανθρώπινη δραστηριότητα και ανάπτυξη (π.χ. εθνικές οδοί, γέφυρες, σιδηρόδρομοι). Όλες οι κατασκευές χρήζουν συντήρησης. Δυστυχώς όμως τα διαθέσιμα κονδύλια είναι πάντα περιορισμένα. Άρα θα πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στις κατασκευές που έχουν πραγματική ανάγκη ή αλλιώς έχουν φτάσει κοντά στο όριο ασφαλούς ζωής τους. Γίνεται κατανοητή λοιπόν η αναγκαιότητα εφαρμογής μεθόδων ΜΚΕ οι οποίες με γρήγορο, αξιόπιστο και οικονομικό τρόπο θα επιτρέψουν την κατάστρωση σχεδίου συντήρησης των κατασκευών βάσει της φθοράς που έχει υποστεί η ακεραιότητά τους και της επικινδυνότητας της λειτουργίας τους.

Ο έλεγχος των υλικών στο πεδίο πραγματοποιείται συχνά συγκρίνοντας τα δεδομένα της επιθεώρησης με τα αποτελέσματα από ένα πρότυπο δοκίμιο, επισημαίνοντας τυχόν σημαντικές αποκλίσεις. Αυτό σημαίνει ότι καλά καθορισμένα πρότυπα δοκίμια θα πρέπει να είναι διαθέσιμα για τη βαθμονόμηση της οργανολογίας ελέγχου. Για την αποφυγή εσφαλμένων αποτελεσμάτων, τα πρότυπα δοκίμια θα πρέπει να εμπεριέχουν ενσωματωμένες ατέλειες που να προσομοιάζουν εκείνες που εμφανίζονται φυσικά στο υπό έλεγχο υλικό ή δομή. Για παράδειγμα, για τον υπολογισμό με τη μέθοδο των υπερήχων του ποσοστού του πορώδους σε ένα υλικό, απαιτούνται πρότυπα δοκίμια με βαθμονομημένα επίπεδα πορώδους.

Η διαδικασία του ελέγχου συχνά περιπλέκεται από το γεγονός ότι πολλά υλικά είναι από τη φύση τους ανισότροπα (πχ. σύνθετα υλικά), ενώ οι περισσότερες τεχνικές ΜΚΕ αναπτύχθηκαν για ισότροπα υλικά, όπως τα μέταλλα. Η ανάπτυξη νέων τεχνικών ΜΚΕ για την αξιολόγηση ανισότροπων υλικών και δομών αποτελεί σημαντικό ερευνητικό αντικείμενο.

Η περιοχή της συγχώνευσης δεδομένων (data fusion) είναι ένα ακόμα αναδυόμενο πεδίο έρευνας στο τομέα των ΜΚΕ. Τα δεδομένα που συλλέγονται με μία τεχνική μπορούν με βάση το data fusion να συνδυαστούν με τα δεδομένα από μια διαφορετική τεχνική με σκοπό την ανίχνευση ατέλειας/βλάβης, η οποία δεν είναι ανιχνεύσιμη από μια μόνο τεχνική όταν αυτή χρησιμοποιείται ανεξάρτητα. Δεδομένα από διάφορες τεχνικές μπορούν λοιπόν να συγχωνευτούν για να παρέχουν μια

πληρέστερη περιγραφή των λεπτομερειών της μικροδομής ενός υλικού από ότι είναι δυνατό με τη χρήση μεμονωμένων κλασσικών μεθόδων.

Η ανάπτυξη νέων, καινοτόμων τεχνολογιών επιτρέπουν την πραγματοποίηση πιο αποδοτικών προληπτικών ελέγχων. Νέες εξελίξεις στους ανιχνευτές στερεάς κατάστασης, στους ενσωματωμένους στη δομή αισθητήρες, καθώς και στη μετάδοση των αποτελεσμάτων ελέγχου με ασύρματη επικοινωνία επηρεάζουν τόσο την ικανότητα και αποτελεσματικότητα του ελέγχου όσο και το κόστος. Για παράδειγμα, νέου τύπου αισθητήρες θερμογραφίας υπερύθρου, ανιχνευτές ακτίνων-X, και αισθητήρες υπερήχων δίνουν τώρα τη δυνατότητα ταχείας σάρωσης μεγάλων περιοχών των δομών για ελαττώματα. Αρκετές νέες εξελίξεις στους τομείς αυτούς επωφελήθηκαν από τη θεαματική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια της μη επεμβατικής ιατρικής απεικόνισης.

Η ανάπτυξη μικρο-ηλεκτο-μηχανικών συστημάτων (MicroElectroMechanical Systems - MEMS) με βάση νέες συσκευές ημιαγωγών και ταυτοποίησης ραδιοσυχνοτήτων (Radio-Frequency Identification - RFI), καθώς και των ενσωματωμένων πλεγμάτων ινών Bragg, επιτρέπει την εμφύτευση συσκευών ελέγχου και παρακολούθησης σε ένα υλικό κατά τη στιγμή της κατασκευής του, ώστε να καταστεί δυνατή η παρακολούθηση της υγιούς λειτουργίας (Structural Health Monitoring -SHM) της δομής σε πραγματικό χρόνο. Το SHM αναφέρεται στη διαδικασία εφαρμογής μιας στρατηγικής για την απομακρυσμένη ανίχνευση βλάβης και την παρακολούθηση της υποβάθμισης του υλικού σε τεχνολογικές δομές και κατασκευές. Συσκευές και μέθοδοι SHM επιτρέπουν την εξ αποστάσεως ανίχνευση και ποσοτικοποίηση της υποβάθμισης της δομικής ακεραιότητας του υλικού, καθιστώντας δυνατή τη διαχείριση των εξαρτημάτων μιας κατασκευής για τη βέλτιστη χρήση τους κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής τους.

4.2 Οι Μέθοδοι μη καταστροφικού Ελέγχου

Η επιτροπή για τη μη καταστροφική αξιολόγηση του National Materials Advisory Board (NMAB) υιοθέτησε ένα σύστημα για την κατηγοριοποίηση των ΜΚΕ σε έξι κύριες κατηγορίες (βλ. Πίνακα 4.1). Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Οπτικός έλεγχος
- Έλεγχος με διεισδυτικές ακτινοβολίες (penetrating radiation)
- Μαγνητικός-ηλεκτρικός έλεγχος

- Έλεγχος με μηχανικές δονήσεις
- Θερμικοί έλεγχοι
- Χημικοί και ηλεκτροχημικοί έλεγχοι

Κατηγορίες	Εφαρμογές	
Μηχανικές και Οπτικές	Χρώμα Ρωγμές Διαστάσεις Πάχος	Επιφανειακή τραχύτητα Συντελεστής ανάκλασης κ.ά.
Διεισδύουσες ακτινοβολίες	Ρωγμές Διαφοροποίηση στην πυκνότητα Εγκλείσματα Πάχος	Μικροπορώδες Διαχωρισμός κ.ά.
Ηλεκτρομαγνητισμός	Ανισοτροπία Κοιλότητες Τοπικές παραμορφώσεις Σκληρότητα	Θερμική επεξεργασία Κρυσταλλική δομή Συγκέντρωση ιόντων κ.ά.
Υπέρηχοι	Έναρξη & διάδοση ρωγμής Αποκολλήσεις Πυκνότητα Μέτρο ελαστικότητας	Μηχανική υποβάθμιση Επιφανειακές τάσεις κ.ά.
Υπέρυθρη ακτινοβολία	Έναρξη & διάδοση ρωγμής Θερμική αγωγιμότητα Πάχος Ρωγμές Υγρασία	Διάβρωση Αποκολλήσεις Εγκλείσματα Πορώδες κ.ά.
Χημική ανάλυση	Σύσταση Στοιχειακή ανάλυση Μέγεθος κόκκου Εγκλείσματα	Επιφανειακές ατέλειες Πορώδες Αναγνώριση κραμάτων κ.ά.

Πίνακας 4.1 Οι 6 κύριες κατηγορίες των ΜΚΕ και οι εφαρμογές τους.

Κάθε μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί από πέντε βασικούς παράγοντες: α) πηγή ενέργειας ή μέσο για τη διερεύνηση του υλικού (π.χ. ακτίνες X, κύματα υπερήχων και θερμική ακτινοβολία), β) φύση των σημάτων και η εικόνα ή υπογραφή που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση με το αντικείμενο (εξασθένιση των ακτίνων X, ανάκλαση των υπερήχων), γ) μέσο ανίχνευσης ή απεικόνισης των παραγόμενων σημάτων (π.χ. πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι), δ) μέθοδοι καταγραφής των σημάτων (ραδιογράφος, παλμογράφος, κάμερα υπέρυθρου), ε) ερμηνεία των αποτελεσμάτων

(ποσοτική ή ποιοτική). Αντικείμενο της κάθε μεθόδου είναι να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις παρακάτω παραμέτρους των υλικών:

- Ασυνέχειες και διαχωρισμοί (ρωγμές, αποκολλήσεις, εγκλείσματα κ.ά.)
- Δομή (κρυσταλλικό πλέγμα, μέγεθος κόκκου, κ.ά.)
- Διαστάσεις και μετρολογία (πάχος, διάμετρος, κ.ά.)
- Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες (αγωγιμότητα, μέτρο ελαστικότητας, κ.ά.)
- Σύνθεση και χημική ανάλυση (ταυτοποίηση κράματος, προσμείξεις κ.ά.)
- Στατική και δυναμική απόκριση (εναπομένουσες τάσεις, ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής, φθορά από τριβή κ.ά.)
- Ανάλυση υπογραφής «signature analysis» (συχνότητα φάσματος, περιεχόμενο εικόνας κ.ά.)
- Μη φυσιολογικές κατανομές θερμοκρασίας

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση των μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου που χρησιμοποιούνται συνήθως, μαζί με τους τύπους των ατελειών που η κάθε μέθοδος ανιχνεύει, καθώς και τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνικών.

Μέθοδος ΜΚΕ	Τυπικές ατέλειες που ανιχνεύει	Εφαρμογές	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ραδιογραφία	Κενά, πορώδες, εγκλείσματα, ρωγμές	Χύτευση, σφυρηλασία, συγκολήσεις, δομικές κατασκευές	Ανιχνεύει εσωτερικές ατέλειες, εφαρμόσιμη για μεγάλο εύρος γεωμετρικών σχημάτων, μόνιμο αρχείο των αποτελεσμάτων	Υψηλό κόστος, χαμηλή ευαισθησία σε λεπτές στρωματικές ατέλειες, όπως κλειστές ρωγμές κόπωσης και αποκολλήσεις, πιθανός κίνδυνος για την υγεία

Μέθοδος ΜΚΕ	Τυπικές ατέλειες που ανιχνεύει	Εφαρμογές	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Διεισδυτικά υγρά	Ρωγμές, σχισμές, πορώδεις, επικαλύψεις, ραφές στην επιφάνεια	Χύτευση, σφυρηλασία, συγκολήσεις, εξαρτήματα που υπόκεινται σε κόπωση ή ρηγμάτωση λόγω καταπόνησης και διάβρωσης	Χαμηλό κόστος, εύκολη εφαρμογή, φορητότητα, εύκολη ερμηνεία των αποτελεσμάτων	Το ελάττωμα πρέπει να είναι ανοικτό σε μια προσιτή επιφάνεια, το επίπεδο ανιχνευσιμότητας εξαρτάται από τον χειριστή
Δινορεύματα	Ρωγμές, σύνθεση ή θερμική επεξεργασία κράματος, πάχος τοιχώματος, διαστάσεις	Σωληνώσεις, μεταλλικά ελάσματα, διαλογή κράματος, μέτρηση πάχους επικάλυψης	Μέτριο κόστος, αυτοματοποίηση, φορητότητα	Ανιχνεύει ατέλειες που μεταβάλουν την αγωγιμότητα των μετάλλων, μικρό βάθος διείσδυσης, ευαίσθητη στη γεωμετρία του δοκιμίου
Μαγνητικά σωματίδια	Ρωγμές, επικαλύψεις, κενά, πορώδεις, εγκλείσματα	Χύτευση, σφυρηλασία, διέλαση	Απλή, χαμηλό κόστος, ανιχνεύει επιφανειακές και υποεπιφανειακές ατέλειες	Εφαρμόσιμη μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά, απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας, συχνά παρατηρούνται άσχετες ενδείξεις, εξαρτάται από τον χειριστή
Θερμογραφία	Κενά ή αποκολλήσεις σε μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά, θέση ζεστών ή ψυχρών περιοχών σε θερμικά ενεργές δομές	Πολυ-στρωματικές δομές, κυψελοειδείς δομές, ηλεκτρονικά κυκλώματα	Πλήρους πεδίου, σε πραγματικό χρόνο, θερμική απεικόνιση που ερμηνεύεται εύκολα	Δυσκολία ελέγχου της εκπνευσιμότητας της επιφάνειας, μικρή διακριτική ικανότητα ανάμεσα σε ατέλειες διαφορετικών τύπων

Μέθοδος ΜΚΕ	Τυπικές ατέλειες που ανιχνεύει	Εφαρμογές	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Υπέρηχοι	Ρωγμές, κενά, πορώδεις, εγκλείσματα, αποκολλήσεις, έλλειψη συγκόλλησης μεταξύ ανόμοιων υλικών	Σύνθετα υλικά, σφυρηλασία, χύτευση, συγκολλήσεις σωλήνες	Εξαιρετικό βάθος διείσδυσης, καλή ευαισθησία και ανάλυση, μόνιμο αρχείο των αποτελεσμάτων	Απαιτεί ακουστικό μέσο σύζευξης με το εξάρτημα, χαμηλής ταχύτητας, η ερμηνεία των δεδομένων είναι συχνά δύσκολη

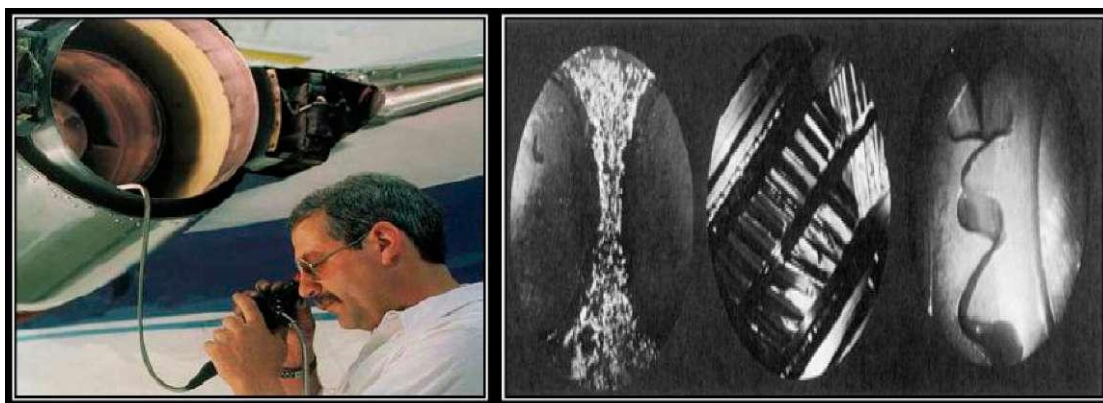
Πίνακας 4.2 Δυνατότητες συνήθων μεθόδων ΜΚΕ.

Οι ΜΚΕ χρησιμοποιούν διάφορες μεθόδους, κάθε μια από τις οποίες βασίζεται σε συγκεκριμένη επιστημονική παραδοχή ή αρχή λειτουργίας. Οι σημαντικότερες και οι πιο ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ΜΚΕ για τον έλεγχο υλικών και κατασκευών είναι οι ακόλουθες :

- Οπτική Έλεγχος (Visual Testing)
- Διεισδυτικά Υγρά (Liquid Penetrant)
- Υπέρηχοι (Ultrasonic)
- Δινορεύματα (Eddy Current)
- Ραδιογραφία (Radiography Testing)
- Θερμογραφία (Thermographic)
- Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission)
- Μαγνητικά Σωματίδια (Magnetic Particle)

Οπτικός Έλεγχος

Η πιο βασική μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου, που προηγείται και συνοδεύει όλες τις άλλες μεθόδους είναι ο οπτικός έλεγχος. Ο οπτικός έλεγχος βασίζεται στον εντοπισμό επιφανειακών ατελειών οι οποίες είναι ορατές με γυμνό μάτι. Για την βελτίωση της αποτελεσματικότητας του πολλές φορές εφαρμόζεται με την χρήση οργάνων όπως μεγεθυντικοί φακοί, μικροσκόπια, ενδοσκόπια κλπ.



Εικόνα 4.1 Οπτικός έλεγχος.

Διεισδυτικά Υγρά

Η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών βασίζεται στην τριχοειδή δράση των υγρών και εφαρμόζεται για την ανίχνευση μικρών ρωγμών ή ασυνεχειών της ελεύθερης επιφάνειας του δοκιμίου.

Στη μέθοδο αυτή η επιφάνεια που βρίσκεται υπό έλεγχο ψεκάζεται με υγρό διάλυμα το οποίο αφήνεται να εμποτίσει τις διάφορες ατέλειες που καταλήγουν στην επιφάνεια. Στη συνέχεια, η επιφάνεια ψεκάζεται με υγρό ή στερεό εμφανιστή, με την ιδιότητα να εμφανίσει το διεισδυτικό υγρό που έχει εισχωρήσει στις ατέλειες. Η οπτική επιθεώρηση είναι το τελικό βήμα, ώστε να ολοκληρωθεί η εξέταση. Για καλύτερα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται φθορίζοντα διεισδυτικά υγρά και η επιθεώρηση γίνεται σε υπεριώδες φως.



Εικόνα 4.2 Μέθοδος των διεισδυτικών υγρών.

Υπέρηχοι

Πρόκειται ίσως για την δημοφιλέστερη μέθοδο Μη-καταστροφικού ελέγχου υλικών, που βασίζεται στους νόμους της διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων.

Η μέθοδος των υπερήχων χρησιμοποιεί παλμούς (ήχους) υψηλής συχνότητας (υψηλότερους από 20kHz, το όριο της ανθρώπινης ακοής), για τον έλεγχο υλικών με σκοπό την ανίχνευση ρωγμών, κενών, αποκολλήσεων, πορώδους, τον προσδιορισμό του πάχους τεμαχίων, του πάχους συγκόλλησης καθώς και τον υπολογισμό ελαστικών ιδιοτήτων.



Εικόνα 4.3 Μέθοδος των υπερήχων.

Δινορεύματα

Η αρχή λειτουργίας των δινορευμάτων βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση επιφανειακών ή κοντά στην επιφάνεια ρωγμών και ατελειών σε αγωγίμα υλικά (μέταλλα).

Κατά τον έλεγχο με δινορεύματα, εναλλασσόμενο ρεύμα επιλεγμένης συχνότητας εφαρμόζεται σε ένα πηνίο. Το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο παράγει μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο στο πηνίο. Έτσι, όταν το πηνίο έρθει σε επαφή με το αγωγίμο εξάρτημα, το μαγνητικό του πεδίο διαπερνά το υλικό και δημιουργεί μαγνητικό πεδίο ίδιας συχνότητας μέσα στο εξάρτημα, προκαλώντας ροή δινορευμάτων σε αυτό. Η ροή αυτή των δινορευμάτων στο εξάρτημα παράγει το δικό της μαγνητικό πεδίο, το οποίο επηρεάζει με τη σειρά του το αρχικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του πηνίου. Το επακόλουθο μαγνητικό πεδίο αποτελεί την πηγή πληροφοριών που αναλύεται ηλεκτρονικά για να δώσει το ζητούμενο αποτέλεσμα. Μια ασυνέχεια στο υλικό διαταράσσει τη συνεχή ροή των δινορευμάτων και το σχετικό μαγνητικό πεδίο. Αυτή η διαταραχή αναλύεται ηλεκτρονικά και αποτυπώνεται στο μετρητή του οργάνου ή στην καθοδική λυχνία.

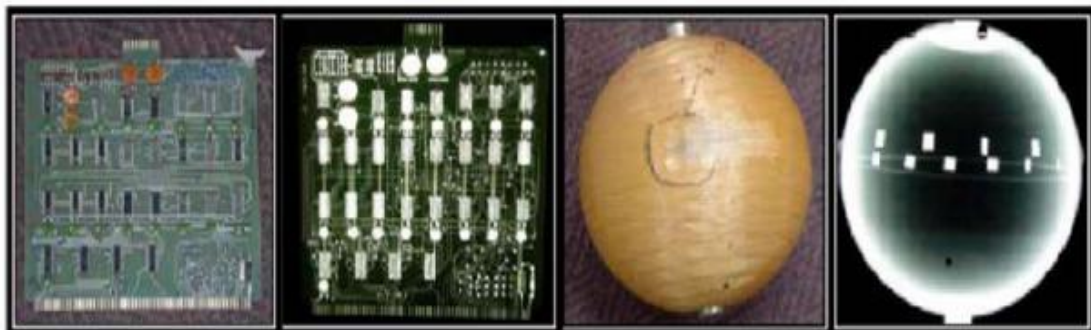
Η επιφάνεια που πρόκειται να ελεγχθεί πρέπει να είναι προσβάσιμη από τον αισθητήρα-κεφαλή.



Εικόνα 4.4 Μέθοδος των δινορευμάτων.

Ραδιογραφία

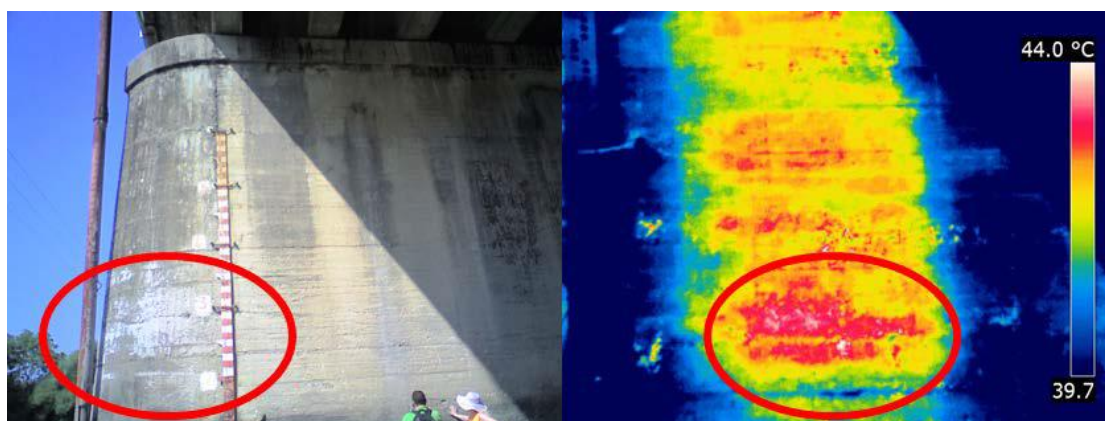
Ο ραδιογραφικός έλεγχος είναι μια μέθοδος μη καταστροφικής επιθεώρησης που βασίζεται στην χρήση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος, στη μορφή ακτίνων X ή Γ. Με αυτό τον έλεγχο είναι δυνατή η εμφάνιση εσωτερικών και εξωτερικών λεπτομερειών της δομής όλων των τύπων υλικών και κατασκευών οι οποίες αποτυπώνονται σε ειδικό φιλμ. Οι πηγές της ακτινοβολίας είναι συσκευές παραγωγής ακτίνων X ή ραδιενεργά ισότοπα. Μικρές διαφορές στο πάχος του υλικού ή στην πυκνότητά του επιδρούν σημαντικά στην ένταση της εξερχόμενης ακτινοβολίας και έχουν αποτέλεσμα διαφορετικής αμαύρωσης στο φιλμ. Το υπό εξέταση υλικό τοποθετείται μεταξύ της πηγής ακτινοβολίας και του μέσου αποτύπωσης.



Εικόνα 4.5 Ραδιογραφική μέθοδος.

Θερμογραφία

Η Θερμογραφία στηρίζεται στην σημειακή ή επιφανειακή της θερμοκρασίας ενός αντικειμένου καθώς η θερμότητα διαχέεται εντός του αντικειμένου με αγωγή και προς το περιβάλλον με μεταφορά και ακτινοβολία. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για την ανίχνευση επιφανειακών και υπό-επιφανειακών ατελειών σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του αντικειμένου. Οι μετρήσεις γίνονται με ειδικές κάμερες, που ανιχνεύουν την υπέρυθη ακτινοβολία, χωρίς να έρθουν σε επαφή με το αντικείμενο.



Εικόνα 4.6 Θερμογραφικός έλεγχος.

Ακουστική Εκπομπή

Η επιθεώρηση με ακουστική εκπομπή στηρίζεται στην καταγραφή και ανάλυση των ελαστικών κυμάτων που παράγονται μέσα σε ένα υλικό από την απότομη απελευθέρωση ενέργειας. Εφαρμόζεται σε υλικά που δυνατόν να παρουσιάσουν επιφανειακές και εσωτερικές ατέλειες.

Η τεχνική αυτή βασίζεται στο ότι όλα τα υλικά και ιδιαίτερα τα μέταλλα και τα κράματα τους, εκπέμπουν ήχο όταν συμβαίνει κάποια μεταβολή στο εσωτερικό τους. Έτσι, για να ελέγξουμε ένα υλικό με την μέθοδο της ακουστικής εκπομπής, το υποβάλλουμε είτε σε πίεση είτε σε άλλου είδους κόπωση και με ειδικά αισθητήρια (κυρίως πιεζοηλεκτρικές κεφαλές) εντοπίζουμε τα ηχητικά κύματα.

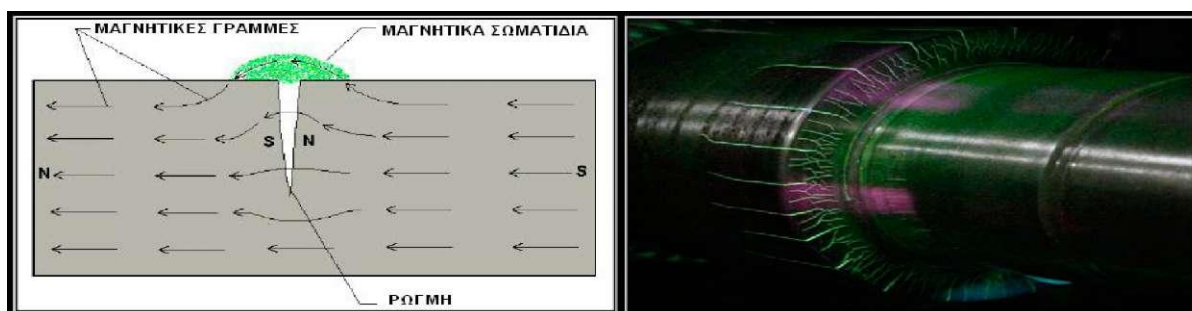
Ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα της ακουστικής μεθόδου είναι πως μας παρέχει την δυνατότητα να παρακολουθούμε ένα υλικό σε βάθος χρόνου, κάτι που δεν είναι εύκολο να γίνει με τις υπόλοιπες μη-καταστροφικές μεθόδους.



Εικόνα 4.7 Μέθοδος ακουστικής εκπομπής.

Μαγνητικά Σωματίδια

Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό επιφανειακών ατελειών ή ατελειών που εμφανίζονται σε περιοχές κοντά στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου. Η διαδικασία απαιτεί την άσκηση μαγνητικού πεδίου στην υπό-εξέταση επιφάνεια, για τον παραπάνω λόγο εφαρμόζεται σε υλικά που μπορούν να μαγνητιστούν, όπως είναι τα σιδηρομαγνητικά υλικά.



Εικόνα 4.8 Μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων.

Ο λόγος για τον οποίο εφαρμόζονται οι παραπάνω τεχνικές Μη Καταστροφικού Ελέγχου οφείλεται στο γεγονός μέσω αυτών δίδεται η δυνατότητα:

- να ανιχνεύονται εσωτερικά ή εξωτερικά ελαττώματα των υλικών, που είναι και οι κύριες αιτίες αστοχίας τους (όπως ρωγμές, κενά κλπ.).
- να ανιχνεύονται οι διαρροές.
- να προσδιορίζονται η δομή, η σύνθεση ή οι ιδιότητες των υλικών.

- να προσδιορίζονται αρκετές εκ των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών (βαθμός ανάκλασης, αγωγιμότητα, μέτρο ελαστικότητας, ταχύτητα ήχου κ.ά.).
- να υπολογίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υλικών.
- Μετρήσεις παραμόρφωσης.

Μια μέθοδος ή τεχνική, λόγω της φύσης και της λειτουργίας της, μπορεί να είναι από ιδανική έως άχρηστη για την εφαρμογή που έχουμε υπόψη μας. Η αξία κάθε μεθόδου εξαρτάται από το είδος του προβλήματος. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι δεν μπορούμε να εντοπίσουμε μία και μοναδική μέθοδο ΜΚΕ που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις εφαρμογές, ανεξάρτητα από την υπό εξέταση κατασκευή και τον τύπο της βλάβης. Αρκετές φορές είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί παραπάνω από μία μέθοδος ώστε να έχουμε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για τον έλεγχο διάφορων τύπων ατελειών.

Πότε χρησιμοποιούμε ΜΚΕ

Οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται σε όλα τα στάδια της ζωής ενός στοιχείου.

- Στο σχεδιασμό, στην κατασκευή και στην ανάπτυξη.
- Στη διαλογή και την ταξινόμηση των υλικών.
- Στην παρακολούθηση, βελτίωση και έλεγχο διεργασιών παραγωγής.
- Στην πιστοποίηση κατεργασιών και της συναρμολόγησης.
- Στην διακρίβωση βλαβών και συντήρηση κατά την λειτουργία.

Εφαρμογές των Μεθόδων Μη Καταστροφικών Έλεγχων

Πολλές κατασκευές, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, χρειάζονται περιοδικούς Μη Καταστροφικούς Ελέγχους ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζημιές που δεν θα γίνονταν αντιληπτές με τις απλές καθημερινές μεθόδους. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι: ο σκελετός ή η επένδυση των αεροσκαφών, οι υπόγειες σωληνώσεις, οι κατασκευές από σκυρόδεμα και στον οπλισμό τους, τα πιεστικά δοχεία χημικών αντιδραστηρίων, τα συρματόσχοινα γεφυρών, κ.ά.

Οι εφαρμογές των ΜΚΕ, σήμερα, καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και τις συναντάμε σχεδόν παντού:

- Στην αυτοκινητοβιομηχανία (μηχανή, πλαίσιο).

- στην αεροδιαστημική (Πλαίσια αεροπλάνων & διαστημοπλοίων, πύραυλοι, κινητήρες τζετ).
- Στις κατασκευές (κτίρια, γέφυρες).
- Στη βιομηχανία (μηχανικά εξαρτήματα, καλούπια, πρέσες).
- Σε εγκαταστάσεις πετροχημικές, πυρηνικές, παραγωγής ρεύματος, ορυχεία (πιεστικά δοχεία, δεξαμενές, λέβητες, εναλλάκτες, τουρμπίνες, σωληνώσεις, συγκολλήσεις).
- Στο σιδηρόδρομο (σιδηροτροχιές, τροχοί και άξονες).
- Σε αγωγούς αερίου και πετρελαιαγωγούς.
- Στα πάρκα αναψυχής (παιχνίδια και τραίνα μεγάλης ταχύτητας).
- Στην ιατρική (τομογραφίες, υπέρηχοι, ακτινογραφίες, καρδιογραφήματα, εγκεφαλογραφήματα, κλπ.).

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα ΜΚΕ

Οι ΜΚΕ χαρακτηρίζονται από αρκετά πλεονεκτήματα, τα οποία καθιστούν τις μεθόδους ΜΚΕ ιδιαίτερα σημαντικές. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ΜΚΕ είναι τα εξής:

1. Άμεση εφαρμογή στη διαδικασία παραγωγής χωρίς κατεστραμμένα εξαρτήματα, εκτός από αυτά που βρίσκονται ελαττωματικά.
2. Εφαρμόζονται στο 100% της παραγωγής ή σε δείγμα.
3. Προσαρμόζονται εύκολα.
4. Διάφοροι έλεγχοι μπορούν να διεξάγονται ταυτόχρονα ή εν σειρά.
5. Παρέχουν τη δυνατότητα επανάληψης.
6. Εφαρμόζονται σε εξαρτήματα και κατασκευές που βρίσκονται σε λειτουργία .
7. Μέτρηση συσσώρευσης ελαττωμάτων σε υλικά εν χρήσει.
8. Εξακρίβωση μηχανισμού κόπωσης.
9. Φορητά μηχανήματα ελέγχου.
10. Χαμηλό εργατικό κόστος σε εφαρμογές επαναληπτικού χαρακτήρα.

Παρά τα πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα τους οι ΜΚΕ παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα:

1. Ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού.
2. Χωρίς τη χρήση δείγματος, η ανάλυση των αποτελεσμάτων υπόκειται σε υποκείμενη ερμηνεία από τον τεχνικό.

3. Μερικές από τις μεθόδους απαιτούν υψηλό κόστος επενδύσεως σε ειδικά μηχανήματα.
4. Λήψη μέτρων ακτινοπροστασίας σε ορισμένες περιπτώσεις.

4.3 Μη καταστροφικός έλεγχος με χρήση Υπερήχων

4.3.1 Ο Ήχος

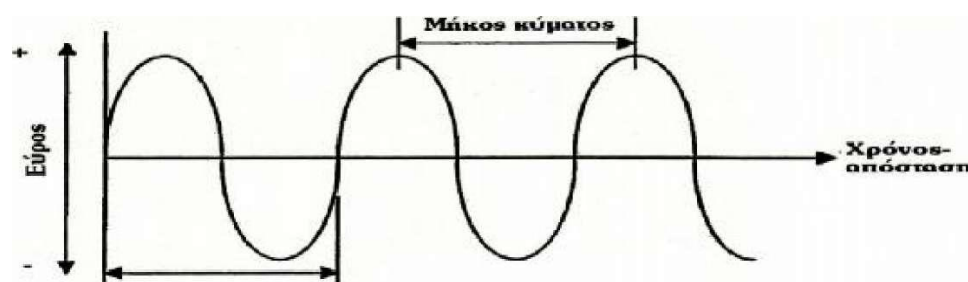
Πριν ασχοληθούμε με τους υπέρηχους ας μιλήσουμε λίγο για τον ήχο και με τον οποίο είμαστε εξοικειωμένοι. Οι υπέρηχοι βασίζονται στις ίδιες αρχές με τους ήχους που ακούμε.

- Ήχος ονομάζεται η περιοδική μεταβολή της πίεσης του αέρα, η συχνότητα της οποίας είναι ικανή να ερεθίσει το αυτί και να προκαλέσει το άκουσμα του.

Δηλαδή ο ήχος προκαλείται από μηχανικές δονήσεις και για να μεταδοθεί χρειάζεται κάποιο υλικό (στερεό-υγρό-αέριο) το οποίο θα διατηρήσει τις δονήσεις αυτές. Συμπεραίνουμε ότι ο ήχος δεν μπορεί να μεταδοθεί στο κενό.

Καθώς τα μόρια ενός υλικού δονούνται, η ενέργεια μεταδίδεται από το ένα στο άλλο και έτσι ο ήχος διατρέχει το υλικό. Η ικανότητα διατήρησης του ήχου εξαρτάται από την πυκνότητα και από την ελαστικότητα ενός υλικού (αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν και την ταχύτητα του). Η επιστήμη που εξετάζει τα φαινόμενα σχετικά με τους ήχους είναι η ακουστική.

- Μήκος κύματος: είναι η συνάρτηση της συχνότητας και της ταχύτητας.



Σχήμα 4.1 Μήκος κύματος.

- **Μήκος κύματος (λ):** η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ενός κύματος.
- **Ταχύτητα (c):** η απόσταση που διανύεται στη μονάδα του χρόνου.
- **Περίοδος (T):** ο χρόνος που απαιτείται για ένα πλήρη κύκλο.

- **Συχνότητα (f):** ο αριθμός των κύκλων ανά δευτερόλεπτο.

Η σχέση που συνδέει τα παραπάνω στοιχεία είναι:

Μήκος κύματος = Ταχύτητα / Συχνότητα ή $\lambda = c / f$ όπου $f = 1 / T$

Μονάδα μέτρησης του ήχου είναι το **Hertz (Hz)**:

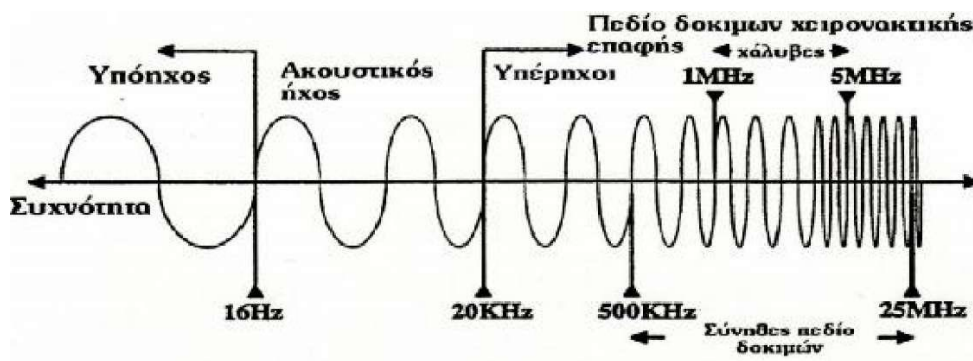
1 Hertz = 1 κύκλος ανά δευτερόλεπτο (cycle/sec)

1 Kilohertz (KHz) = 1000 Hz και 1 Megahertz (MHz) = 1.000.000 (Hz)

- Ακουστικό Φάσμα

Το φάσμα των μηχανικών ελαστικών κυμάτων περιλαμβάνει:

- Τους *υπόηχους* με συχνότητες $f < 16$ Hz.
- Τους *ακουστικούς ήχους* με συχνότητες $16 \text{ Hz} < f < 20 \text{ KHz}$.
- Τους *υπερήχους* με συχνότητες $f > 20 \text{ KHz}$

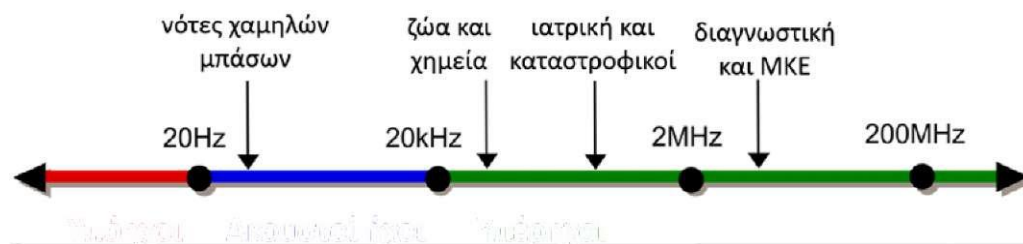


Σχήμα 4.2 Ακουστικό φάσμα.

4.3.2 Οι Υπερήχοι

Οι υπέρηχοι παρουσιάζουν σοβαρά πλεονεκτήματα έναντι των γνωστών συμβατικών δοκιμών, αλλά και έναντι των καταστροφικών μεθόδων. Χρησιμοποιούνται για παχυμέτρηση των υλικών αλλά και για τον εντοπισμό ατελειών ή μικρορωγμών. Επίσης με την χρήση των υπερήχων είναι δυνατός ο προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών όπως: το μέτρο ελαστικότητας (E), το μέτρο διάτμησης (G), ο λόγος Poisson (ν), των υλικών χωρίς την θραύση τους. Η μέθοδος είναι γρήγορη και πολύ αξιόπιστη για τον εντοπισμό εσωτερικών ατελειών σε όλα τα υλικά.

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι με υπέρηχους, χρησιμοποιούν μηχανικά κύματα συχνότητας πάνω από 20 KHz και απαιτούν την ύπαρξη συνεχούς μέσου για την διάδοσή τους. Η διαταραχή ή το κύμα μεταδίδεται στο ελαστικό μέσο από το ένα σημείο στο άλλο. Για τον χαρακτηρισμό του κύματος πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ της διεύθυνσης μετάδοσης του κύματος και της διεύθυνσης κίνησης των σωματιδίων του ελαστικού μέσου.



Σχήμα 4.3 Το φάσμα του ήχου.

Ηχητικά κύματα με συχνότητες πάνω από το επίπεδο του φάσματος της ανθρώπινης ακοής (που βρίσκεται μεταξύ 20 Hz και 20 kHz) ονομάζονται υπέρηχοι (βλ. Σχήμα 4.3). Η ενέργεια των υπερήχων είναι ακουστική ενέργεια και οι αρχές της ακουστικής εφαρμόζονται, όταν μελετούμε τους υπερήχους. Ο υπέρηχος είναι λοιπόν παρόμοιος φύσης με τον ακουστό ήχο, έχει όμως πολύ μικρότερα μήκη κύματος και είναι πιο κατάλληλος για την ανίχνευση ατελειών στα υλικά. Αυτά τα μικρότερα μήκη κύματος είναι που κάνουν τον υπέρηχο εξαιρετικά χρήσιμο για τον μη καταστροφικό έλεγχο και χαρακτηρισμό των υλικών και δομών. Ο μη καταστροφικός χαρακτηρισμός των υλικών με τη μέθοδο των υπερήχων χρησιμοποιεί, λοιπόν, ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας για την ανίχνευση εσωτερικών ατελειών ή βλάβης. Τα κύματα υπερήχων που χρησιμοποιούνται στον μη καταστροφικό έλεγχο ποικίλουν και η συχνότητά τους είναι πάνω από μερικές εκατοντάδες kHz.

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 μια και οι μετατοπίσεις που παράγουν στο υλικό είναι πολύ μικρές και βρίσκονται στην ελαστική περιοχή. Η κίνηση των σωματιδίων (μορίων του υλικού) σε κάποια δεδομένη θέση x στο μέσο είναι ταλαντωτική. Παρόλο που η γενική κυματική εξίσωση δεν περιορίζεται από γραμμικές συνθήκες και 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 δημιουργείται από κάθε δύναμη που παράγει σε ένα συνεχές μέσο δονήσεις ταλάντωσης. Οι δονήσεις αυτές διαδίδονται από σημείο σε σημείο του μέσου, λόγω των ελαστικών του ιδιοτήτων και 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 το 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, γίνεται επεξεργασία και στη συνέχεια ερμηνεύεται σε όρους της κατάστασης της εσωτερικής δομής του υπό έλεγχο υλικού, με βάση τη 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 τη 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

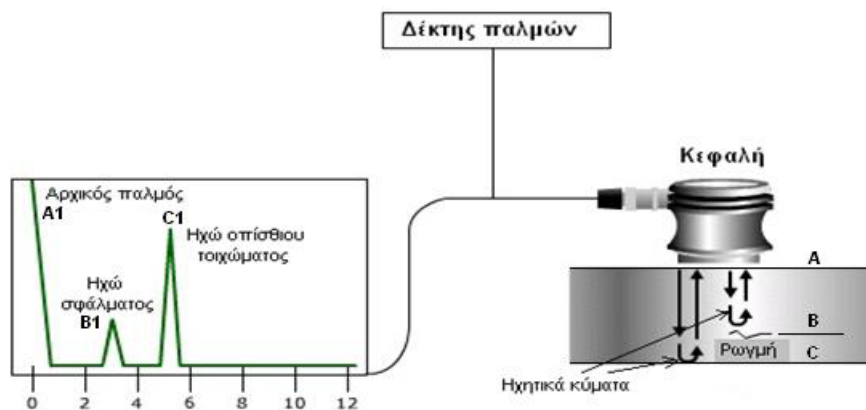
4.3.3 Βασική αρχή δοκιμής με Υπερήχους

Η συνηθέστερη τεχνική που εφαρμόζεται στη μέθοδο των υπερήχων, είναι η **τεχνική των ηχητικών παλμών**. Εδώ εφαρμόζεται η ιδιότητα των ηχητικών παλμών που μεταδίδονται απ' ευθείας και ανακλώνται όταν κάποιο εμπόδιο βρεθεί στο δρόμο τους.

Ο μηχανισμός είναι εντελώς ίδιος με αυτόν, των ακουστικών κυμάτων που προσπίπτουν σε τοίχο και επιστρέφουν με τη μορφή αντήχησης. Η ισχύς της

αντήχησης καθορίζεται από το μέγεθος του τοίχου. Επίσης είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης από τον τοίχο, εάν μετρηθεί το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ εκπομπής του ήχου και λήψεως της αντήχησης.

Με κατάλληλα όργανα μπορούμε να στείλουμε ηχητικά κύματα μέσα σε στερεά υλικά και να παραλάβουμε ηχώ από την οπίσθια επιφάνεια του υλικού. Εάν ένα ελάττωμα βρίσκεται μέσα στο υλικό, τότε η ηχητική ενέργεια θα ανακλαστεί δίνοντας μια ηχώ που επειδή έχει διανύσει μικρότερο διάστημα θα επιστρέψει νωρίτερα. Η ισχύς ή η ένταση αυτού του ήχου θα είναι ανάλογη του μεγέθους του σφάλματος, ενώ το διάστημα που διανύθηκε από τον ήχο, θα μας δώσει το βάθος σφάλματος. Αυτή ακριβώς είναι η βασική αρχή της δοκιμής με υπερήχους.



Σχήμα 4.4: Τρόπος λειτουργίας των υπερήχων.

Το όργανο που παράγει την ενέργεια του ήχου ονομάζεται κεφαλή (υπερηχητικός μεταλλάκτης) και η ηχώ απεικονίζεται σε οθόνη καθοδικών ακτίνων (C.R.T. Cathode Ray Tube), ενός ανιχνευτή σφαλμάτων.

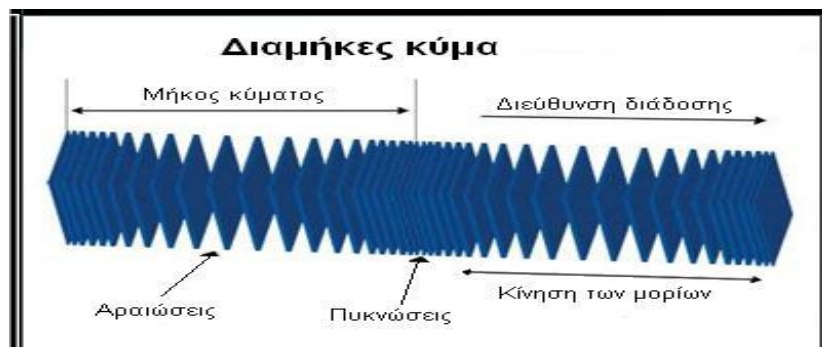
Η ηχητική ενέργεια μεταβιβάζεται από την κεφαλή στο δοκίμιο στην περιοχή "Α" παράγοντας μια ηχώ που απεικονίζεται στην οθόνη σαν σημείο **A1**. Μια ποσότητα ήχου ανακλάται από το σφάλμα (ρωγμή) "Β" και το αποτέλεσμα εμφανίζεται την οθόνη σαν σημείο **B1** (ηχώ σφάλματος). Ο ήχος που απομένει συνεχίζει μέσα στο δοκίμιο και ανακλάται από το οπίσθιο τοίχωμα "C": και η ηχώ εμφανίζεται σαν σημείο **C1** στην οθόνη (Σχήμα 4.4).

4.3.4 Μετάδοση των Υπερήχων

Όπως σε όλα τα κύματα έτσι και για τα ηχητικά κύματα υπάρχουν δύο βασικές διευθύνσεις. Η διεύθυνση της ταλάντωσης των μορίων και η διεύθυνση διαδόσεως των κυμάτων. Στα υγρά και τα αέρια διαδίδονται μόνο διαμήκη (επιμήκη ή συμπίεστικά). Ενώ στα στερεά σώματα διαδίδονται όλα τα είδη των κυμάτων (διαμήκη, εγκάρσια ή συνδυασμός αυτών). Τα μόρια του ελαστικού μέσου, ταλαντώνονται γύρω από μια θέση ισορροπίας και μεταφέρουν τη δόνηση τους σε άλλα γειτονικά, κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Διαμήκη ή Συμπίεστικά κύματα

Τα διαμήκη (επιμήκη) ή συμπίεστικά κύματα υπερηχητικά κύματα, είναι ο τύπος κυμάτων που χρησιμοποιούνται ευρέως στην εξέταση των υλικών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι διαδίδονται και στις τρεις μορφές ύλης. Στα διαμήκη κύματα, η διεύθυνση διάδοσης του κύματος και η διεύθυνση ταλάντωσης των μορίων συμπίπτουν.

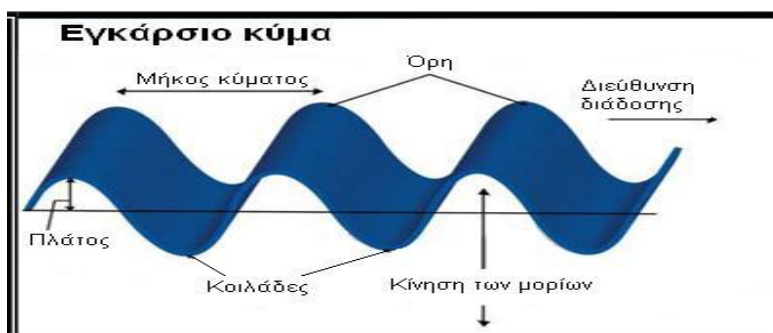


Σχήμα 4.5 Διαμήκης ή Συμπίεστικό κύμα.

Οι κεφαλές που παράγουν συμπίεστικά κύματα έχουν συνήθως γωνία προσπτώσεως και διαθλάσεως περίπου ή ακριβώς 0° . Το χαρακτηριστικό των διαμηκών κυμάτων είναι ότι δημιουργούνται στα μόρια του μέσου διάδοσης, πυκνώσεις (compressions) και αραιώσεις (rarefactions) (Σχήμα 4.5). Στο χάλυβα δημιουργούνται εάν η γωνία προσπτώσεως της δέσμης στην μεμβράνη είναι μικρότερη από $27,4^\circ$. Συμπίεστική ταχύτητα χάλυβα = 5960 m/sec.

Εγκάρσια ή διατμητικά κύματα

Στα εγκάρσια κύματα, η διεύθυνση ταλάντωσης των στοιχειωδών σωματιδίων είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Σχήμα 4.6). Διαδίδονται μόνο σε υλικά που μπορούν να αναλάβουν διατμητικές τάσεις όπως ο χάλυβας, γι' αυτό ονομάζονται και διατμητικά κύματα.

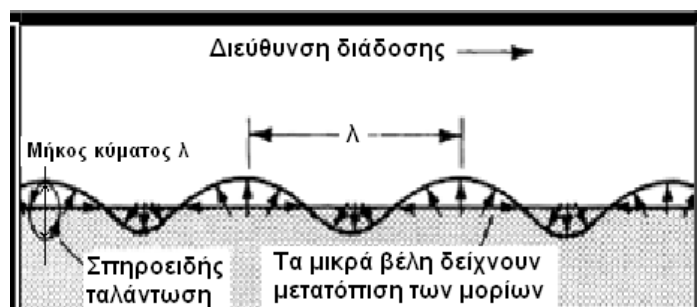


Σχήμα 4.6 Εγκάρσιο κύμα.

Το χαρακτηριστικό των εγκαρσίων κυμάτων είναι η δημιουργία ορέων (crests) και κοιλάδων (trough) στα μόρια του μέσου διάδοσης. Ως μήκος κύματος ορίζεται η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ορέων ή κοιλάδων. Τα εγκάρσια κύματα εφαρμόζονται σε πολλές περιπτώσεις στο μη καταστροφικό έλεγχο και είναι απαραίτητα, κατά τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών ενός υλικού με τη μέθοδο των υπερήχων.

Επιφανειακά κύματα ή κύματα Rayleigh

Τα επιφανειακά κύματα δημιουργούνται όταν τα εγκάρσια κύματα διαθλώνται στις 90° . Τα μόρια συνδυάζουν την εγκάρσια και τη διαμήκη κίνηση, με αποτέλεσμα να κινούνται σε ελλειπτική τροχιά. Παράγονται, όταν τα διαμήκη προσπίπτουν σε μια επιφάνεια υπό γωνία, που η τιμή της είναι ίση ή μεγαλύτερη της δεύτερης κρίσιμης γωνίας.

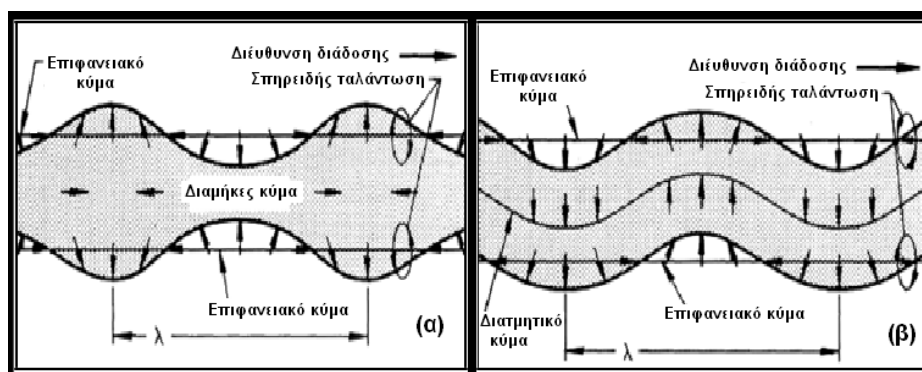


Σχήμα 4.7 Επιφανειακό κύμα.

Διεισδύουν μέσα στο στερεό υλικό, σε βάθος που είναι ίσο με ένα μήκος κύματος και έχουν την ιδιότητα να ακολουθούν το προφίλ της επιφάνειας στην οποία διαδίδονται. Διαδίδονται με ταχύτητα που είναι περίπου ίση με το 90% αυτής των εγκαρσίων κυμάτων στο ίδιο υλικό. Τα κύματα Rayleigh είναι πολύ χρήσιμα στο μη καταστροφικό έλεγχο καθώς είναι πολύ ευαίσθητα στις επιφανειακές ατέλειες και ανακλώνται από απότομες αλλαγές στο προφίλ, όπως είναι οι ρωγμές. Τέλος, μπορούν να φτάσουν σε περιοχές που άλλα είδη κυμάτων συναντούν δυσκολία.

Κύματα πλακών ή κύματα Lamb

Παράγονται, όμως, σε πλάκες, των οποίων το πάχος είναι ίσο με μερικά μήκη κύματος και καταλαμβάνουν όλο το πάχος της πλάκας (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8 Κύματα Lamb: α) Διασταλτικά, β) Καμπτικά.

Η διάδοση τους εξαρτάται από την πυκνότητα και τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού, ενώ παράλληλα επηρεάζεται από τη συχνότητα του κύματος και το πάχος της πλάκας. Υπάρχουν δύο τύποι κυμάτων πλακών, που ορίζονται από το είδος της κίνηση των δομικών σωματιδίων. Εάν τα δομικά σωματίδια κινούνται συμμετρικά, ως προς τον ουδέτερο άξονα της πλάκας, έχουμε τα διασταλτικά κύματα (Σχήμα 4.8 α), ενώ εάν κινούνται ασύμμετρα, έχουμε τα καμπτικά (Σχήμα 4.8 β).

4.3.5 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάδοση των υπερήχων

Η μετάδοση των υπερήχων σε ένα υλικό εξαρτάται από την πυκνότητα και τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού καθώς και από τον τύπο του μεταδιδόμενου κύματος.

Οι μεταβλητές που επηρεάζουν στη μετάδοση είναι:

- Το μέγεθος των κόκκων του υλικού προς δοκιμή.

- Η εξασθένιση, αποτέλεσμα απορρόφησης και διασκορπισμού.
- Η ακουστική αντίσταση του υλικού προς δοκιμή.
- Η χαρακτηριστική αντίσταση των εγκλεισμάτων.
- Η παράθλαση.
- Η έλλειψη ομοιογένειας.
- Η ανισοτροπία του υλικού, όταν οι κόκκοι είναι προσανατολισμένοι τυχαία στο υλικό και έχουν διαφορετικές ελαστικές ιδιότητες σε διαφορετικές κατευθύνσεις.

4.3.6 Ανάκλαση - Διάθλαση - Νόμος του Snell

Ανάκλαση: Τα κύματα των υπερήχων ανακλώνται από αντικείμενα ή διαχωριστικές επιφάνειες που παρεμβάλλονται στο πέρασμά τους. Όταν προσπέσουν σε λείο και επίπεδο ανακλαστήρα, η γωνία υπό την οποία γίνεται η ανάκλαση, καθορίζεται από τον νόμο της ανάκλασης.

γωνία προσπτώσεως = γωνία ανακλάσεως

Διάθλαση: Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, μια δέσμη υπερήχων που διέρχεται διαδοχικά από δύο υλικά διαφορετικών ακουστικών ταχυτήτων, αλλάζει την κατεύθυνση της ως προς το κατακόρυφο επίπεδο.

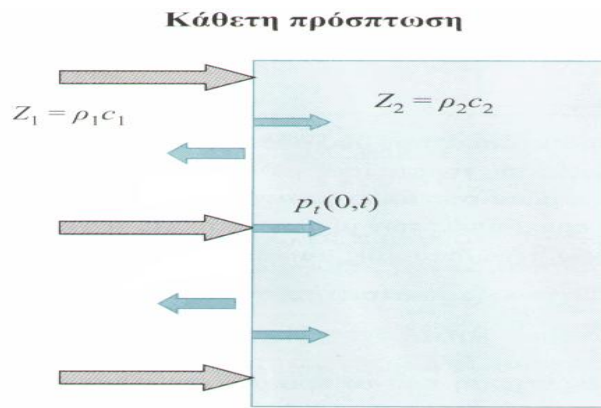
Κάθετη πρόσπτωση - Συντελεστής ανάκλασης:

Όταν ένα ηχητικό κύμα διαδίδεται σ' ένα υλικό ακουστικής αντίστασης Z_1 και συναντήσει κάθετα τη διαχωριστική επιφάνεια με ένα άλλο υλικό ακουστικής αντίστασης Z_2 . Η γωνία ανάκλασης και διάδοσης σύμφωνα με την κυματική θεωρία για κάθετη πρόσπτωση θα είναι 90° . Από την παρακάτω σχέση ορίζεται ο συντελεστής ανάκλασης (Reflection coefficient) R :

$$R = Z_2 - Z_1 / Z_1 + Z_2 \text{ (\%)}$$

Ο συντελεστής διάδοσης (Transmission coefficient) T εκφράζει το ποσοστό της ακουστικής πίεσης που εισέρχεται στο εξεταζόμενο υλικό:

$$T = 2Z_2 / Z_1 + Z_2 \text{ (\%)}$$



Σχήμα 4.9 Κάθετη πρόσπτωση.

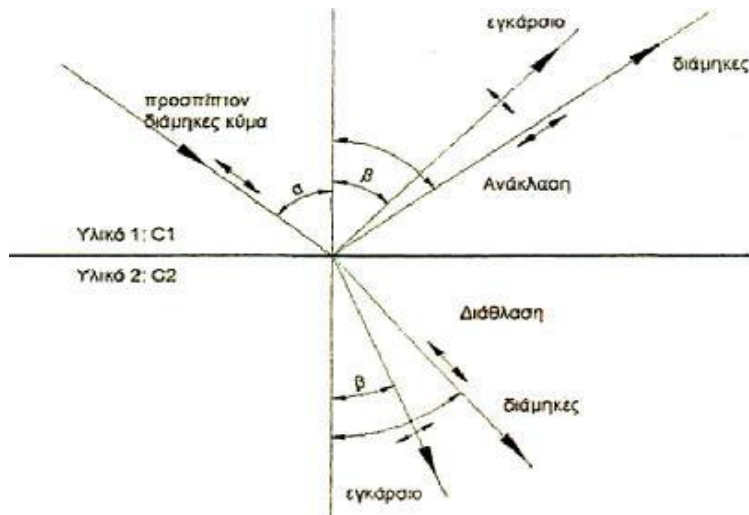
Οι συντελεστές ανάκλασης και διάθλασης δίνουν το ποσοστό της ηχητικής πίεσης που ανακλάται ή διαθλάται στο δεύτερο υλικό. Εάν οι ακουστικές αντιστάσεις δύο υλικών είναι ίσες ($Z_1 = Z_2$), τότε δεν υπάρχει ανάκλαση ($R = 0$), ενώ όλος ο ήχος περνά ανεμπόδιστα μέσα από τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών ($T = 1$).

Έτσι, προκύπτει ότι κατά τη μετάβαση των υπερηχητικών κυμάτων από το χάλυβα στο αέρα ανακλάται το 99.96% της ενέργειάς τους, ενώ από χάλυβα σε Plexiglas το 68%, από αλουμίνιο σε νερό το 70% και τέλος από χαλαζία σε αλουμίνιο το 0.64% της ενέργειάς τους.

Για λόγους ακουστικής επαφής κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη κάποιου υγρού στην επιφάνεια μεταξύ κεφαλής - εξεταζόμενου υλικού, το οποίο θα εξουδετερώνει το στρώμα αέρα που κανονικά θα υπήρχε μεταξύ των δύο υλικών. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται διάφορες πάστες, γράσο ή λάδι μηχανής.

Πλάγια πρόσπτωση - Νόμος του Snell:

Στην περίπτωση αυτή δεν έχουμε μόνο διάδοση και ανάκλαση, πράγμα που συμβαίνει στην κάθετη πρόσπτωση, αλλά έχουμε αλλαγή στη διεύθυνση και στο είδος των κυμάτων που διαδίδονται, τόσο στο ανακλώμενο μέρος του υπερηχητικού κύματος όσο και στο διαθλώμενο. Τα φαινόμενα αυτά επηρεάζουν ολόκληρη την ηχητική δέσμη, ή μέρος της, και το συνολικό αποτέλεσμα των αλλαγών που παρατηρούνται εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης και από την ταχύτητα των υπερηχητικών κυμάτων, που συναντούν τη διαχωριστική επιφάνεια.



Σχήμα 4.10 Πλάγια πρόσπτωση.

Η σχέση μεταξύ γωνίας προσπτώσεως (α) και γωνίας ανακλάσεως (β) ορίζεται από το νόμο του Snell:

$$\eta_{\mu\alpha} / \eta_{\mu\beta} = c_1 / c_2 \text{ (} c_1, c_2: \text{ταχύτητα στο μέσο 1,2)}$$

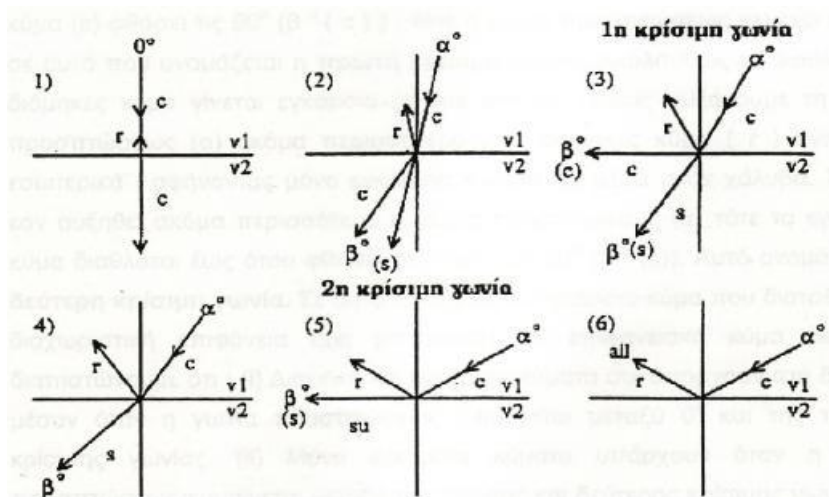
Μετατροπή του είδους κύματος

Όταν έχουμε αλλαγή της κυματομορφής έχουμε και αλλαγή της ταχύτητας, λόγο ανάκλασης και διάθλασης επάνω σε μια διαχωριστική επιφάνεια. π.χ. όταν το διαμήκης κύμα, που παράγεται από τον κρύσταλλο μιας γωνιακής κεφαλής, τέμνει τη διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στο πέλμα της κεφαλής και στο δοκίμιο και μετατρέπεται σε εγκάρσιο κύμα.

Μια δεύτερη περίπτωση αλλαγής της κυματομορφής, είναι η μετατροπή εγκάρσιων κυμάτων σε συμπίεστικά.

4.3.7 Κρίσιμες γωνίες.

Είναι οι γωνίες προσπτώσεως από το πρώτο μέσον, κατά τις οποίες τα προσπίπτοντα κύματα μέσα στο δεύτερο μέσον, διαθλώνται και συγχρόνως αλλάζουν κυματομορφή. Η πρώτη κρίσιμη γωνία είναι εκείνη που το διαθλώμενο διαμήκης κύμα εξαφανίζεται αφήνοντας μόνο εγκάρσια κύματα στο δεύτερο μέσον. Η δεύτερη κρίσιμη γωνία είναι εκείνη όπου το διαθλώμενο εγκάρσιο κύμα μετατρέπεται σε επιφανειακό. Οι κρίσιμες γωνίες υπολογίζονται με το νόμο του Snell.



Σχήμα 4.11 Κρίσιμες γωνίες.

Παράδειγμα πλεξιγκλάς-χάλυβας (Σχήμα 4.11):

Διάγραμμα 1: ένα διαμήκες κύμα (c) προσπίπτει στο όριο πλεξιγκλάς - χάλυβα υπό γωνία 0° (κάθετα). Στην διαχωριστική επιφάνεια ένα μέρος της ενέργειας (r) ανακλάται και ένα άλλο μέρος (c) διαπερνά το χάλυβα, συνεχίζοντας την πορεία του κάθετα

Διάγραμμα 2: Καθώς αυξάνουμε την γωνία (α) του προσπίπτοντος κύματος (c) μέσα στο πλεξιγκλάς (πρέπει $\alpha^0 <$ πρώτη κρίσιμη γωνία) το κύμα στο χάλυβα (c) διαθλάται κατά γωνία β^0 , λόγω της διαφοράς των ταχυτήτων μετάδοσης στο πλεξιγκλάς (V_1) και στο χάλυβα (V_2). Όμως μαζί με το διαθλωμένο διαμήκης κύμα θα υπάρχει και ένα αδύναμο εγκάρσιο κύμα (s).

Διάγραμμα 3: Εάν αυξήσουμε ακόμα την γωνία προσπτώσεως μέχρι το διαθλωμένο κύμα (c) φτάσει τις 90° ($\beta^0 = c$), τότε η γωνία προσπτώσεως (α) έχει φτάσει στο σημείο που ονομάζεται **πρώτη κρίσιμη γωνία**.

Διάγραμμα 4: καθώς συνεχίζουμε να αυξάνουμε την γωνία προσπτώσεως (α), το διαμήκες κύμα (r) ανακλάται εσωτερικά, αφήνοντας μέσα στο χάλυβα μόνο εγκάρσια κύματα (s).

Διάγραμμα 5: αυξάνοντας ακόμα περισσότερο την γωνία προσπτώσεως (α), το εγκάρσιο κύμα διαθλάται μέχρι να φτάσει την τιμή των 90° ($\beta^0 = s$). Το σημείο αυτό ονομάζεται **δεύτερη κρίσιμη γωνία**. Στο σημείο αυτό το εγκάρσιο κύμα έχει μετατραπεί σε επιφανειακό (su).

Διάγραμμα 6: από την τιμή της δεύτερης κρίσιμης γωνίας και πάνω, όλες οι συμβατικές μορφές μετάδοσης ανακλώνται εσωτερικά.

Συμπέρασμα: - **Διαμήκη** και εγκάρσια κύματα συνυπάρχουν στο δεύτερο μέσον όταν η γωνία προσπτώσεως κυμαίνεται μεταξύ 0^0 και της πρώτης κρίσιμης γωνίας - **Εγκάρσια** κύματα υπάρχουν μόνο όταν η γωνία προσπτώσεως κυμαίνεται μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης κρίσιμης γωνίας - **Επιφανειακά** κύματα υπάρχουν μόνο στη δεύτερη κρίσιμη γωνία.

4.3.8 Σκέδαση – Περίθλαση - Συμβολή

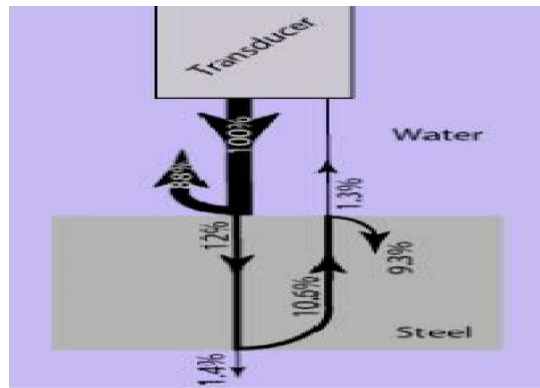
Όταν ένα ηχητικό κύμα, συναντά ένα εμπόδιο, τότε ανάλογα με το μέγεθός του εμποδίου σε σχέση με το μήκος κύματος του ήχου, το ηχητικό κύμα μπορεί να υποστεί σκέδαση, περίθλαση ή συμβολή.

- Εάν η διάμετρος (d) του εμποδίου είναι μικρότερη από το μήκος κύματος (λ) του ηχητικού κύματος ($d < \lambda$), τότε το εμπόδιο δεν επηρεάζει τη διάδοση του κύματος.
- Εάν $d = \lambda$, τότε το εμπόδιο επηρεάζει έντονα τη διάδοση του κύματος. Ανάλογα με τον προσανατολισμό των εμποδίων, το κύμα υφίσταται ανακλάσεις και διαδίδεται προς διάφορες κατευθύνσεις με αποτέλεσμα την εξασθένηση του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σκέδαση.
- Εάν $d > \lambda$ (και όχι $d \gg \lambda$), τότε το ηχητικό κύμα παρακάμπτει το εμπόδιο και διαδίδεται μέσα στο υλικό. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται περίθλαση.

Στην περίπτωση που το εζ' ανακλάσεως ηχητικό κύμα υπερτίθεται στο αρχικό, έχουμε το φαινόμενο της συμβολής δύο κυμάτων. Αναλόγως με την διαφορά φάσης και συχνότητας των δύο κυμάτων, μπορούμε να έχουμε ενίσχυση ή εξασθένηση του τελικού κύματος.

4.3.9 Εξασθένηση

Η ένταση της υπερηχητικής δέσμης που επιστρέφει στην πιεζοηλεκτρική κεφαλή, μετά τη διάδοση της στο εξεταζόμενο υλικό, είναι πολύ μικρότερη από την ένταση της αρχικά εκπεμπόμενης δέσμης. Όλα τα υλικά παρουσιάζουν την τάση να εξασθενούν την ένταση των υπερηχητικών κυμάτων, άλλα περισσότερο και άλλα λιγότερο. Στο σχήμα 4.12 φαίνεται η ακουστική πίεση, η οποία τελικά φτάνει στην υπερηχητική κεφαλή, κατά τον έλεγχο με εμβάπτιση ενός μεταλλικού δοκιμίου.



Σχήμα 4.12 Απώλειες υπερηχητικής δέσμης.

Η εξασθένηση αυτή, είναι αποτέλεσμα της **διασποράς** (scattering) και της **απορρόφησης** (absorption) που περιγράφονται συνολικά με τον όρο **απόσβεση** (attenuation).

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

- i. Καθώς το υπερηχητικό κύμα εισχωρεί στο υλικό που είναι συνήθως πορώδες, το μέσο διάδοσης (συνήθως ο αέρας) κατά την εκτέλεση των ταλαντώσεων λόγω τριβών με το υλικό χάνει ενέργεια. Έχουμε δηλαδή μετατροπή ηχητικής ενέργειας σε θερμική.
- ii. Το υπερηχητικό κύμα διεγείρει προς ταλάντωση (και συνεπώς προσφέρει ενέργεια) τα μόρια του απορροφητικού υλικού, οπότε η ενέργεια του υπερηχητικού κύματος μειώνεται. Τα απορροφητικά υλικά μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: τα πορώδη, τα απορροφητικά τύπου μεμβράνης και οι συντονιστές. Τέλος να επισημάνουμε ότι ο συντελεστής απορρόφησης που εκφράζει την απορρόφηση, εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης

- Ο **διασκορπισμός**, οφείλεται στην ανομοιογένεια και την ανισοτροπία κάποιων υλικών, όταν αυτά περιέχουν εγκλείσματα, κόκκους ή πόρους. Ο διασκορπισμός συμβαίνει όταν το μήκος κύματος του υπερήχου πλησιάζει το μέγεθος ενός κόκκου ή ενός πόρου μέσα στο υλικό διάδοσης. Ουσιαστικά πρόκειται για μια ακανόνιστη ανάκλαση και διάθλαση των κυμάτων, που οδηγεί στην εξασθένηση του αρχικού ήχου.

Και η απορρόφηση και ο διασκορπισμός, δυσκολεύουν το έργο ενός υπερηχητικού ελέγχου. Για τον λόγο αυτό, χρειάζεται προσοχή κατά την επιλογή της

καταλληλότερης δυνατής συχνότητας του υπερηχητικού κύματος κατά την διάρκεια μιας διαδικασίας υπερηχητικού M.K.E. Μια ατέλεια μπορεί να ανιχνευθεί όταν το μέγεθος της είναι μεγαλύτερο ή ίσο προς το $1/5$ του μήκους κύματος λ του υπερηχητικού κύματος. Τρεις βασικές κατηγορίες υλικών υπάρχουν, όσον αφορά το κατά πόσον εξασθενεί ένα υπερηχητικό κύμα:

- Υλικά με **χαμηλή απόσβεση**, μικρότερη των 10 dB/m. Πρόκειται για τον χάλυβα και τα χαμηλά κράματα του, τον σφυρήλατο σίδηρο, το γυαλί, την πορσελάνη κα.
- Υλικά με **μέση απόσβεση** μέχρι 100 dB/m, όπως τα υψηλά κράματα χάλυβα, ο χυτοσίδηρος, ο ορείχαλκος, ο μόλυβδος κα.
- Υλικά με **υψηλή απόσβεση**, πάνω από 100 dB/m. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα πλαστικά, το λάστιχο, το σκυρόδεμα, το ξύλο κλπ. Αυτά τα υλικά είναι και τα πλέον δύσκολα για να εξεταστούν. Συνήθως χρησιμοποιούμε πολύ λεπτά δοκίμια αυτών των υλικών, έτσι ώστε η συνολική απόσβεση να είναι περιορισμένη και να μπορούμε να προβούμε σε ασφαλή συμπεράσματα.

4.3.10 Παραγωγή Υπερήχων

Έχοντας βρει την σχέση κυματικών και ελαστικών μεγεθών είναι εύκολο πλέον να χαρακτηρίσουμε ένα υλικό μετρώντας την ταχύτητα διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων σε ένα δοκίμιο. Οι **τρόποι παραγωγής υπερήχων** διαφοροποιούνται ανάλογα με τα φαινόμενα στα οποία βασίζονται (μαγνητοσυστολή, πιεζοηλεκτρισμός, ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα) καθώς και από τις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται. Κατ' αυτό τον τρόπο, η επιλογή της πλέον κατάλληλης μεθόδου παραγωγής υπερήχων για μια συγκεκριμένη εφαρμογή είναι συνάρτηση της αξιοπιστίας, της ακρίβειας, του κόστους αλλά και της αντοχή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και των εκλεπτυσμένων ηλεκτρονικών διατάξεων που απαιτούνται σε ορισμένους τρόπους παραγωγής υπερήχων (μέθοδος παραγωγής υπερήχων με laser).

Για την παραγωγή υπερήχων χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις οι οποίες μετατρέπουν μια μορφή ενέργειας σε μηχανική. Γενικότερα οι πιο γνωστές είναι οι διατάξεις παραγωγής υπερήχων χρησιμοποιώντας **ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα** (Electromagnetic-Acoustic Transducer, EMATS), διατάξεις με υλικά που εμφανίζουν

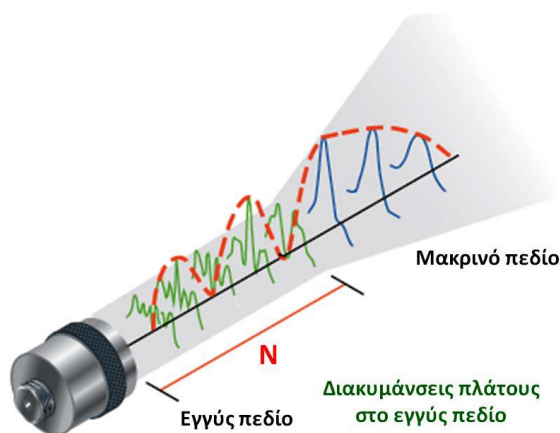
φαινόμενα **μαγνητοσυστολής** (magneto restrictive elements) , διατάξεις με **παλμικά Laser** και φυσικά διατάξεις με υλικά που εμφανίζουν το φαινόμενο του **πιεζοηλεκτρισμού** (piezoelectric elements).

4.3.11 Αισθητήρες Υπερήχων

Για την παραγωγή και λήψη κυμάτων υπερήχων, χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας (transducer) για τη μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων σε ηχητικά κύματα και το αντίστροφο. Ένας τέτοιος αισθητήρας υπερήχων είναι μια συσκευή ικανή να παράγει και να λαμβάνει τις υπερηχητικές δονήσεις. Ο αισθητήρας αποτελείται από ένα ενεργό στοιχείο που συνήθως είναι ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος, στερεωμένος σε μια κατάλληλη θήκη που είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένη με ένα πομπό και έναν δέκτη.

Η λειτουργία του αισθητήρα ως πομπού βασίζεται στην εφαρμογή στον κρύσταλλο μιας υψηλής τάσης και ηλεκτρικής εκκένωσης μικρής διάρκειας, προκαλώντας ραγδαία αλλαγή του σχήματός του με αποτέλεσμα να εκπέμπει έναν ακουστικό παλμό. Κατά τη λειτουργία του αισθητήρα ως δέκτη, ηχητικά κύματα ή αντηχήσεις (echoes) που επιστρέφουν συμπίεζουν τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, παράγοντας ένα ηλεκτρικό σήμα που ενισχύεται και υπόκειται σε επεξεργασία από το δέκτη.

Το πεδίο ήχου ενός αισθητήρα έχει δύο διακεκριμένες ζώνες, τη ζώνη εγγύς πεδίου (near field) ή περιοχή Fresnel, που βρίσκεται ακριβώς μπροστά από τον αισθητήρα, και μακρινού πεδίου (far field) ή περιοχή Fraunhofer, που βρίσκεται πέρα από την απόσταση του εγγύς πεδίου, N , όπου η πίεση του ηχητικού πεδίου μειώνεται σταδιακά έως ότου μηδενιστεί (βλ. Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13 Το πεδίο ήχου ενός αισθητήρα υπερήχων με τις ζώνες εγγύς πεδίου και μακρινού πεδίου.

Μέσα σύζευξης:

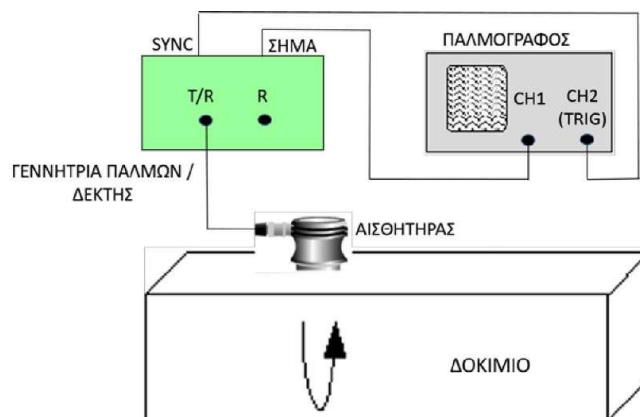
Ανάμεσα στον αισθητήρα υπερήχων και στο υπό έλεγχο υλικό παρεμβάλλεται ένα μέσο σύζευξης (coupling medium) ώστε να διευκολύνει τη μετάδοση της ηχητικής ενέργειας από τον αισθητήρα στο στερεό.

Ένα υγρό μέσο σύζευξης έχει προφανή πλεονεκτήματα για τον μη καταστροφικό έλεγχο δομών σύνθετης γεωμετρίας, και το νερό είναι το μέσο εκείνο που τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται για τη σύζευξη. Στην περίπτωση αυτή το υλικό είναι εμβαπτισμένο στο νερό και χρησιμοποιούνται αισθητήρες εμβάπτισης για τον έλεγχο με υπερήχους.

Εναλλακτικά, για εξαρτήματα με απλούστερες γεωμετρίες ή όταν δεν μπορούμε να τα εμβαπτίσουμε στο νερό (π.χ. έλεγχος σωληνώσεων, τμημάτων αεροσκαφών στο πεδίο, κλπ.) χρησιμοποιούνται αισθητήρες επαφής και το υλικό σύζευξης είναι ένα ειδικό ζελέ (προπυλενογλυκόλη, κλπ.). Σε δύσκολες εφαρμογές, όπου απαιτείται η μέγιστη μεταφορά ακουστικής ενέργειας στο υπό έλεγχο υλικό (όπως για παράδειγμα στον έλεγχο με εγκάρσια κύματα), χρησιμοποιείται γλυκερίνη ή ακόμα και μέλι. Ωστόσο, σε ορισμένα μέταλλα η γλυκερίνη μπορεί να προκαλέσει διάβρωση μέσω της απορρόφησης του νερού και έτσι η χρήση της μπορεί να είναι ανεπιθύμητη. Άλλα μέσα σύζευξης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ελέγχους σε κανονικές θερμοκρασίες είναι διάφορα έλαια, γράσα, και σιλικονούχα υγρά.

4.3.12 Σύστημα ελέγχου με Υπερήχους

Το βασικό διάγραμμα ενός συστήματος ελέγχου υλικών με υπερήχους εικονίζεται στο Σχήμα 4.14.



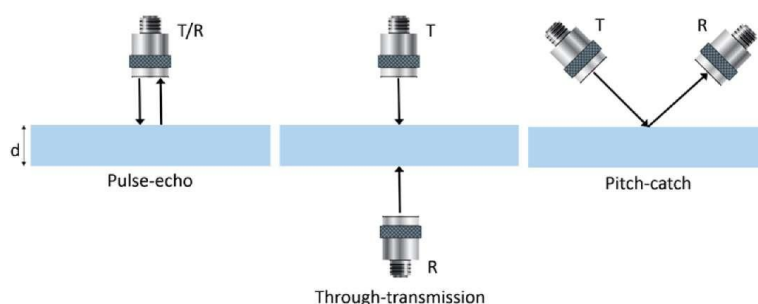
Σχήμα 4.14 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος μέτρησης και απεικόνισης δοκιμών υπερήχων.

Τα κύρια τμήματα του συστήματος είναι:

- Γεννήτρια παλμών/δέκτη υπερήχων (συνήθως συνδέεται με σύστημα H/Y) στην οποία περιλαμβάνεται ένας χρονιστής που ελέγχει το ρυθμό δημιουργίας παλμών υπερήχων, δηλαδή τη συχνότητα επανάληψης παλμών, και εξασφαλίζει το συγχρονισμό του σήματος (TRIGGER).
- Παλμογράφος (ή κατάλληλο λογισμικό για την παραγωγή και ανάλυση των παλμών, όταν το σύστημα είναι συνδεδεμένο με H/Y).
- Αισθητήρας (εμβάπτισης ή επαφής).
- Μέσο σύζευξης ανάμεσα στον αισθητήρα και στο υπό έλεγχο δοκίμιο (νερό ή ειδικό ζελέ για διαμήκη κύματα, γλυκερίνη ή μέλι για εγκάρσια κύματα).

4.3.13 Διατάξεις πομπού-δέκτη

Για τον έλεγχο υλικών με χρήση δυο αισθητήρων, όπου ο ένας δρα ως πομπός (T) για την παραγωγή παλμών και ο άλλος ως δέκτης (R) για την ανίχνευση του σήματος, χρησιμοποιούνται τρεις κοινές διατάξεις - τεχνικές ελέγχου (βλ. Σχήμα 4.15).

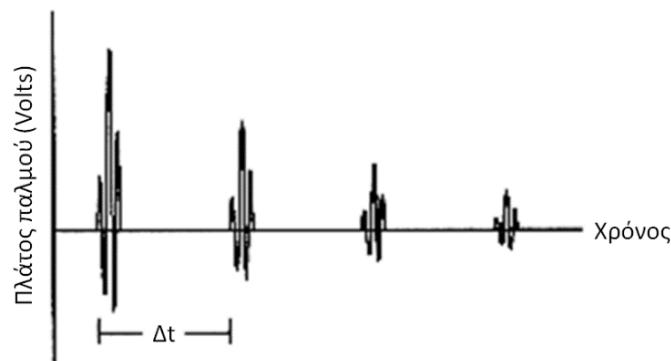


Σχήμα 4.15 Τρεις κοινές διατάξεις-τεχνικές πομπού-δέκτη: παλμού-ηχούς (pulse-echo), απ' ευθείας μετάδοσης (through- transmission), και γωνιώδους ανάκλασης (pitch-catch).

4.3.13.1 Μέθοδος παλμού-ηχούς (pulse-echo)

Στην τεχνική ελέγχου υπερήχων pulse-echo, ένας μοναδικός αισθητήρας υπερήχων παράγει παλμό υπερήχων και επίσης λαμβάνει την «ηχώ» του (T/R). Οι περισσότεροι αισθητήρες υπερήχων χρησιμοποιούν ένα ηλεκτρονικό παλμό για να παράγουν ένα αντίστοιχο ηχητικό παλμό με βάση το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Ένας βραχύς

(διάρκειας λιγότερο από 20 ns), ηλεκτρικός παλμός υψηλής τάσης (πλάτους 100-200V) διεγείρει ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο για να παράγει ένα παλμό υπερήχων. Ο αισθητήρας εκπέμπει τον παλμό υπερήχων κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου πάχους d . Ο παλμός υπερήχων διαδίδεται μέσω του υλικού και ανακλάται από την απέναντι πλευρά. Ο αισθητήρας στη συνέχεια ανιχνεύει τις ανακλώμενες αντηχήσεις. Ο παλμός υπερήχων συνεχίζει να ανακλάται από τις απέναντι επιφάνειες του δοκιμίου και εξασθενεί με την πάροδο του χρόνου (βλ. Σχήμα 4.16). Ο χρονική διάρκεια ανάμεσα σε δυο αντηχήσεις (Δt) ισούται με το χρόνο που απαιτείται ώστε ο παλμός να ταξιδέψει μέσω του δοκιμίου και να επιστρέψει πίσω στον αισθητήρα. Η εξασθένηση του πλάτους του σήματος είναι εκθετική συνάρτηση του χρόνου.



Σχήμα 4.16 Σχηματική παράσταση επαναλαμβανόμενων αντηχήσεων (A-scan) μετά από συνεχείς ανακλάσεις του αρχικού παλμού από τις απέναντι επιφάνειες του δοκιμίου.

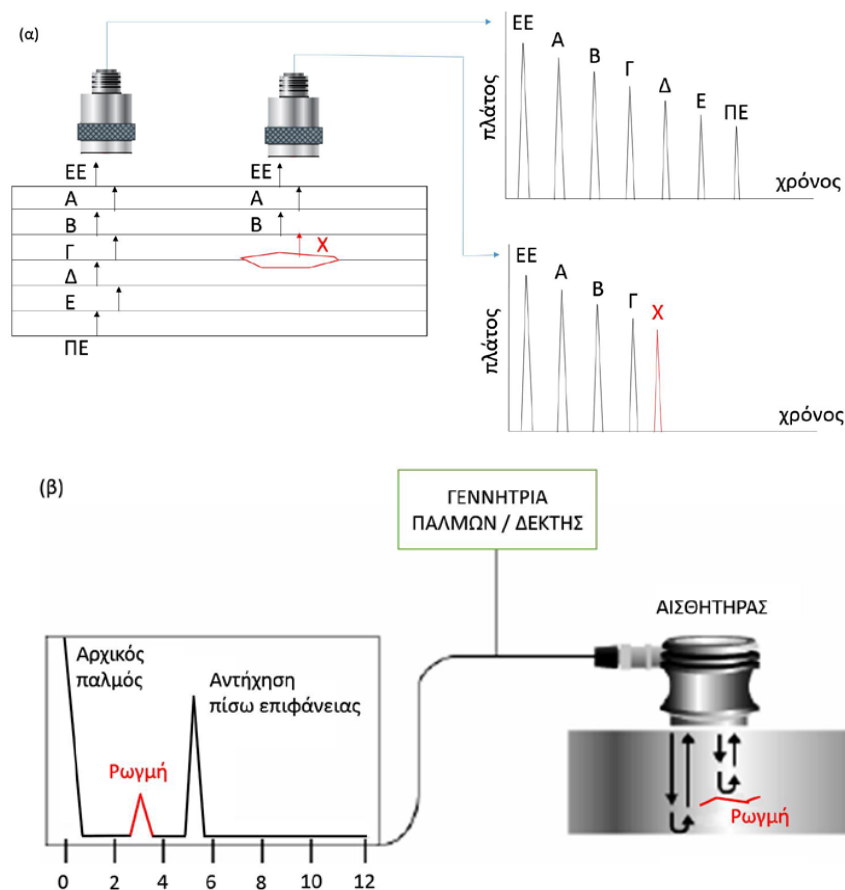
Η ταχύτητα των υπερήχων στο δοκίμιο μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση, μετρώντας το χρόνο διέλευσης και επιστροφής του παλμού, Δt , και το πάχος d του δοκιμίου:

$$c = 2d / \Delta t$$

Με δεδομένο ότι οι τιμές της ταχύτητας των υπερήχων στα στερεά κυμαίνονται από 1 έως 8 k m/sec, ο χρόνος Δt είναι της τάξης μερικών μsec , για δοκίμια πάχους μερικών χιλιοστών έως λίγων εκατοστών.

Για τον προσδιορισμό της θέσης μιας ατέλειας, όπως για παράδειγμα η διάβρωση στο εσωτερικό του δοκιμίου, η χρήση της μεθόδου παλμού-ηχούς ενδείκνυται επειδή η απόσταση της ατέλειας από την εμπρός ή την πίσω επιφάνεια του δοκιμίου μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχετική θέση των ανακλάσεων της ατέλειας (π.χ. αποκόλληση στρώσης σε πολυστρωματικά σύνθετα υλικά) σε σχέση με την ανάκλαση από την επιφάνεια του δοκιμίου (βλ. Σχήμα. 4.17). Το πλάτος του παλμού είναι

ευθέως ανάλογο προς το μέγεθος της επιφάνειας που ανακλά, αλλά ταυτόχρονα εξασθενεί με την απόσταση που διανύει το κύμα μέσα στο δοκίμιο. Η γραμμική θέση του παλμού είναι ανάλογη της απόστασης της ανακλώσας επιφάνειας από τον αισθητήρα (ο χρόνος εξαρτάται από την κυματική ταχύτητα). Στο Σχήμα 4.17α παρατηρούμε ότι χρονικά πρώτη λαμβάνεται από τον αισθητήρα η ανάκλαση του σήματος από την εμπρός επιφάνεια (ΕΕ), στη συνέχεια και σε σχέση με το βάθος της κάθε στρώσης, λαμβάνονται διαδοχικά οι ανακλάσεις από τις στρώσεις Α, Β, Γ, Δ και Ε, τελευταία δε λαμβάνεται η ανάκλαση από την πίσω επιφάνεια (ΠΕ). Στην περίπτωση αποκόλλησης μιας στρώσης (στο παράδειγμα ανάμεσα στις στρώσεις Β και Γ) το τελευταίο σήμα, Χ, που λαμβάνεται αντιστοιχεί στην αποκόλληση και δεν υπάρχουν άλλα σήματα έπειτα από αυτό. Μπορεί λοιπόν να γίνει προσδιορισμός του βάθους της ατέλειας. Στο Σχήμα 4.17β, βλέπουμε το παράδειγμα ανίχνευσης ρωγμής με αισθητήρα επαφής με τη μέθοδο παλμού-ηχούς.

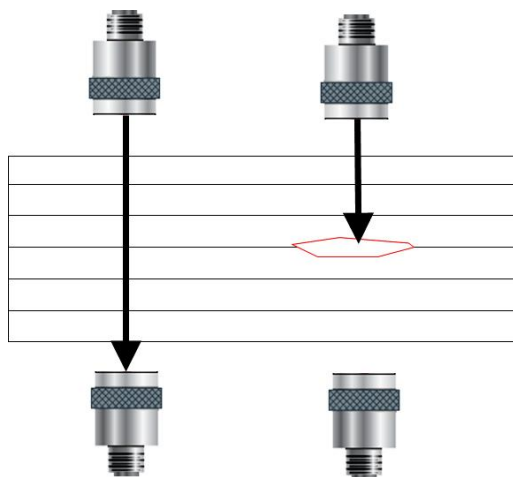


Σχήμα 4.17 Σχηματική παράσταση της μεθόδου παλμού-ηχούς (pulse-echo) για τον έλεγχο των υλικών με υπερήχους: (α) Ανίχνευση αποκόλλησης στρώσης σε πολυστρωματικό σύνθετο υλικό, (β) ανίχνευση ρωγμής στο εσωτερικό δοκιμίου.

4.3.13.2 Μέθοδος απ' ευθείας μετάδοσης (through-transmission)

Όπως είδαμε έως τώρα, ο έλεγχος των υλικών με υπερήχους αφορούσε τη χρήση ενός μοναδικού αισθητήρα που αποστέλλει ένα σήμα στο δοκίμιο και επίσης λαμβάνει τις αντηχήσεις που επιστρέφουν. Συχνά όμως χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικοί αισθητήρες για τον έλεγχο των υλικών, όπου ο ένας λειτουργεί ως πομπός παλμών υπερήχων και ο άλλος τοποθετείται στην αντίθετη πλευρά του δοκιμίου ως δέκτης, για να λαμβάνει τα μεταδιδόμενα σήματα αφού διασχίσουν το υπό έλεγχο δοκίμιο (βλ. Σχήμα 4.18). 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):

$$c = d / \Delta t$$



Σχήμα 4.18 Σχηματική παράσταση της μεθόδου απ' ευθείας μετάδοσης (through-transmission) για τον έλεγχο των υλικών με υπερήχους.

Στην περίπτωση ελέγχου συνθέτων πολύστρωματικών υλικών με τη μέθοδο της απ' ευθείας μετάδοσης, ένας μεγάλος αριθμός ανακλάσεων (άρα και σημάτων) δημιουργείται από τα διάφορα μεμονωμένα στρώματα του συνθέτου υλικού, οι οποίες μπορούν να επισκιάσουν μικρές ανακλάσεις από εγκλείσματα των οποίων η ανακλαστικότητα είναι παρόμοια με εκείνη των υλικών των στρώσεων. Ένα εγκλείσμα με ακουστική εμπέδηση πολύ κοντά σ' αυτή του δοκιμίου (για παράδειγμα εγκλείσμα χαρτιού ή ξεφλούδισμα σε σύνθετο υλικό με μήτρα πολυμερική) είναι πολύ δύσκολο να ανιχνευτεί με τη μέθοδο της απ' ευθείας μετάδοσης. Η χρήση της

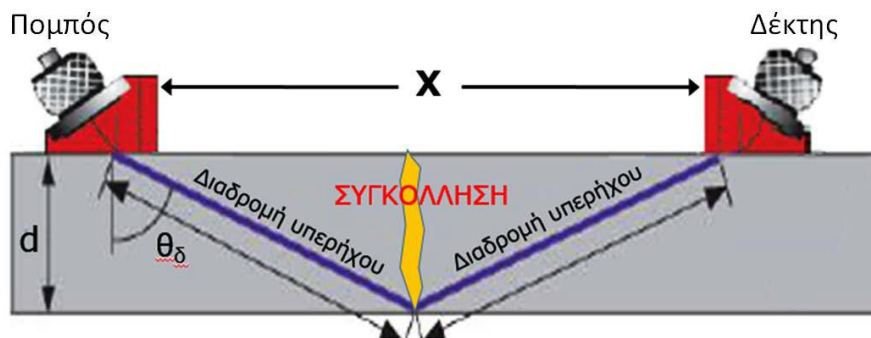
μεθόδου παλμού-ηχούς είναι πιο ενδεδειγμένη για την ανίχνευση τέτοιου είδους ατελειών. Όμως, οι ανακλάσεις από καλά κατανεμημένες ατέλειες στο υλικό, όπως το πορώδες, μπορούν να καλυφθούν από το γενικό υπόβαθρο θορύβου σε ένα ακουστικό σήμα. Συνεπώς, η απώλεια της έντασης του μεταδιδόμενου μέσω του υλικού σήματος, είναι εκείνη που συχνά χρησιμοποιείται στη μέθοδο της απ' ευθείας μετάδοσης για την ανίχνευση τέτοιου είδους ατελειών. Παρ' όλο που ο βαθμός του πορώδους μπορεί να αξιολογηθεί μ' αυτόν τον τρόπο, δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί η ακριβής θέση του πορώδους.

4.3.13.3 Μέθοδος γωνιώδους ανάκλασης (pitch-catch)

Υπάρχουν συγκεκριμένες περιπτώσεις ελέγχου, όπου δεν υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης ενός αισθητήρα κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου, και ως μόνη λύση προσφέρεται η χρήση δυο αισθητήρων υπό γωνία. Επιπλέον, η τεχνική αυτή σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα ελέγχου. Ένα παράδειγμα, όπου η χρήση της τεχνικής αυτή ενδείκνυται, είναι ο έλεγχος της ζώνης συγκόλλησης σε παράλληλες πλάκες. Οι δύο αισθητήρες τοποθετούνται υπό γωνία όπως στο Σχήμα 4.19. Αν υπάρχει ελάττωμα στην περιοχή της συγκόλλησης, θα προκληθεί μείωση του πλάτους του σήματος που λαμβάνεται. Η απόσταση X μεταξύ των δυο αισθητήρων είναι γνωστή σαν απόσταση «skip» και ορίζεται από τη γεωμετρία του δοκιμίου:

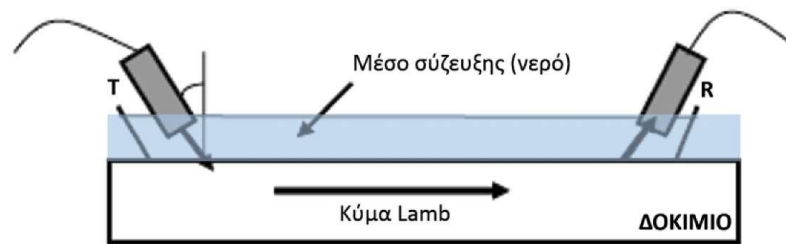
$$X = 2d \tan(\theta_\delta)$$

Για τη σάρωση της ζώνης συγκόλλησης οι αισθητήρες μετακινούνται παράλληλα με την επιφάνεια του δοκιμίου, ενώ η μεταξύ τους απόσταση παραμένει σταθερή κατά την κίνησή τους.



Σχήμα 4.19 Μέθοδος γωνιώδους ανάκλασης (pitch-catch).

Ένα άλλο παράδειγμα τεχνικής πομπού-δέκτη σε διάταξη pitch-catch είναι το L-scan σάρωση με κύματα Lamb (Lamb wave scanning). Στην περίπτωση αυτή, οι δυο αισθητήρες βρίσκονται σε κατάλληλη γωνία ως προς την επιφάνεια του δοκιμίου ώστε να παράγουν συγκεκριμένο τύπο κυμάτων Lamb στο δοκίμιο (βλ. Σχ. 4.20). Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον έλεγχο βλάβης σε παλυστρωματικά υλικά, όπως για παράδειγμα τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών σε στρώματα, επειδή διαφορετικοί τύποι κυμάτων Lamb παράγουν διαφορετικά επίπεδα διέγερσης σε διάφορα στρώματα σε πολυεπίπεδη πλάκα



Σχήμα 4.20 Διάταξη pitch-catch με αισθητήρες σε εμβάπτιση για σάρωση με κύματα Lamb.

Μια αναδύομενη τεχνολογία μη καταστροφικής αξιολόγησης βασίζεται στη χρήση ενσωματωμένων αισθητήρων (embedded sensors) που είναι σε θέση να ανιχνεύουν την παρουσία βλάβης στη δομή καθώς αυτή δημιουργείται και επεκτείνεται. Τεχνολογίες με ενσωματωμένα συστήματα παρακολούθησης επιτρέπουν τη μετάβαση από τις συμβατικές μεθόδους υπερήχων σε συστήματα παρακολούθησης της υγείας μιας δομής (structural health monitoring - SHM). Εφαρμογές αφορούν στην αεροπορική βιομηχανία, όπου κύματα Lamb μεταδίδονται και λαμβάνονται για την ανίχνευση ρωγμών σε αεροσκάφη σε πραγματικό χρόνο.

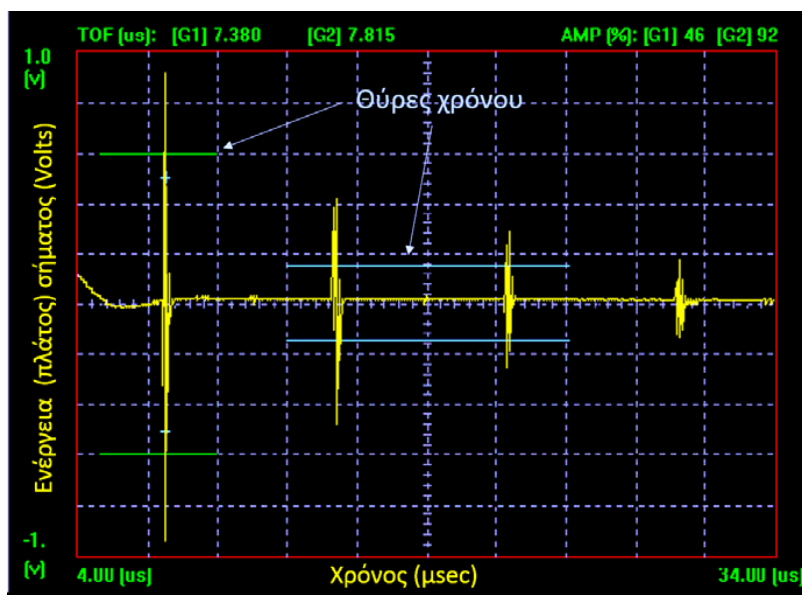
4.3.14 Τεχνικές απεικόνισης των δεδομένων

Οι τρεις πιο κοινοί τρόποι απεικόνισης των δεδομένων που συλλέγονται κατά τη διάρκεια μη καταστροφικού ελέγχου με υπερήχους είναι γνωστοί ως A-scan (απεικόνιση σάρωσης τύπου A), B-scan (απεικόνιση σάρωσης τύπου B) και C-scan (απεικόνιση σάρωσης τύπου C).

4.3.14.1 A-scan

Το A-scan παρουσιάζει το ποσό της ενέργειας των υπερήχων που λαμβάνεται (πλάτος του παλμού που επιστρέφει σε Volts) ως συνάρτηση του χρόνου ή του βάθους (εάν είναι γνωστή η ακουστική ταχύτητα) σε ένα σημείο του υπό έλεγχο δοκιμίου. Τα περισσότερα όργανα με δυνατότητα προβολής του A-scan επιτρέπουν το σήμα να εμφανίζεται στη φυσική του ραδιοσυχνότητα (RF), είτε ως πλήρως ανορθωμένο σήμα RF, ή ως θετικό ή αρνητικό ήμισυ του σήματος RF (βλ. Σχήμα 4.21). Σε ένα A-scan, το σχετικό μέγεθος μιας ασυνέχειας στη δομή του υλικού μπορεί να υπολογιστεί συγκρίνοντας το πλάτος του σήματος που λαμβάνεται από την ασυνέχεια με εκείνο που λαμβάνεται από ένα γνωστό βαθμονομημένο ανακλαστήρα. Το βάθος που βρίσκεται η ασυνέχεια εντός του δοκιμίου μπορεί να προσδιοριστεί από τη θέση του σήματος στον οριζόντιο άξονα του χρόνου.

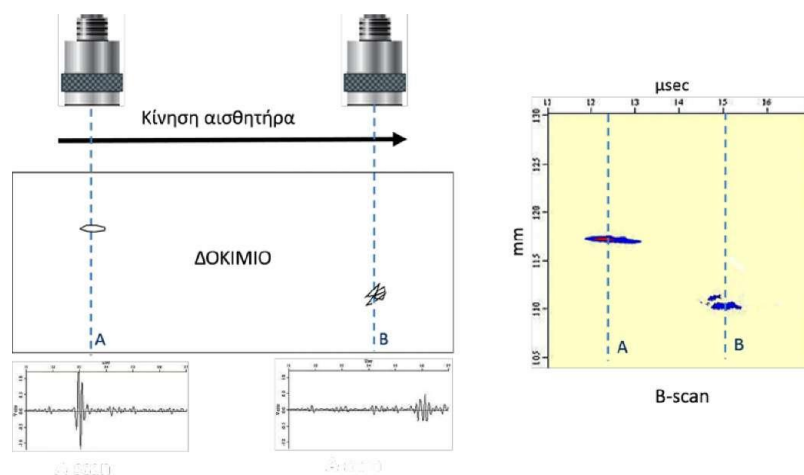
Ο δέκτης ενισχύει τις αντηχήσεις που επιστρέφουν, ανάμεσα στην εμπρός και την πίσω πλευρά του δοκιμίου, και θέτει θύρες χρόνου (time gates). Με τον τρόπο αυτό, κάθε μη αναμενόμενη ηχώ που παρατηρείται εμφανίζεται χωριστά ή χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση συναγερμού, υποδηλώνοντας ανίχνευση ατέλειας ή βλάβης. Στο Σχήμα 4.21, το πρώτο σήμα αντιστοιχεί στην ανάκλαση από την εμπρός επιφάνεια του δοκιμίου και το τελευταίο σήμα αντιστοιχεί στην ανάκλαση από την πίσω επιφάνεια. Σήματα ανάμεσα στο πρώτο και το τελευταίο προέρχονται από ατέλειες ή βλάβη στο εσωτερικό του δοκιμίου.



Σχήμα 4.21 Απεικόνιση A-scan και τοποθέτηση θυρών χρόνου.

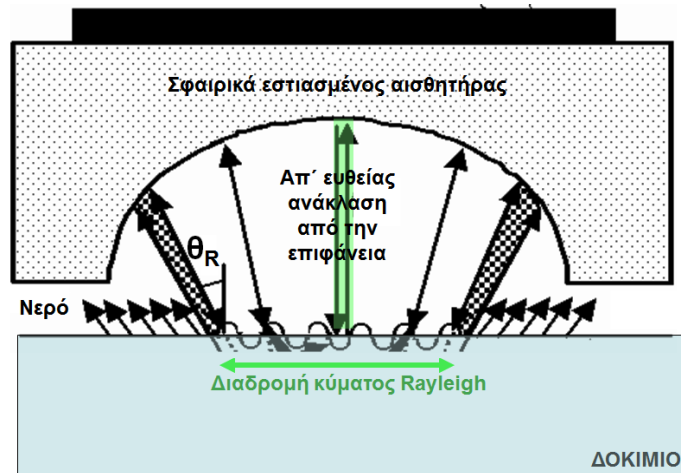
4.3.14.2 B-scan

Μια σειρά από A-scan που λαμβάνεται με σάρωση του αισθητήρα σε μια γραμμή κατά μήκος του δοκιμίου και η απεικόνιση των δεδομένων ως απόσταση συναρτήσει του χρόνου (ή του βάθους) ονομάζεται B-scan (βλ. Σχ. 4.22). Το B-scan παρουσιάζει το προφίλ μιας διατομής του υπό έλεγχο δοκιμίου. Στη απεικόνιση B-scan, ο χρόνος διάδοσης (time-of-flight) της ακουστικής ενέργειας απεικονίζεται στον κάθετο άξονα και η γραμμική θέση του αισθητήρα αναφορικά με το δοκίμιο απεικονίζεται στον οριζόντιο άξονα. Το βάθος ενός ανακλαστήρα, καθώς και οι γραμμικές του διαστάσεις στην κατεύθυνση σάρωσης μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα στην απεικόνιση B- scan.



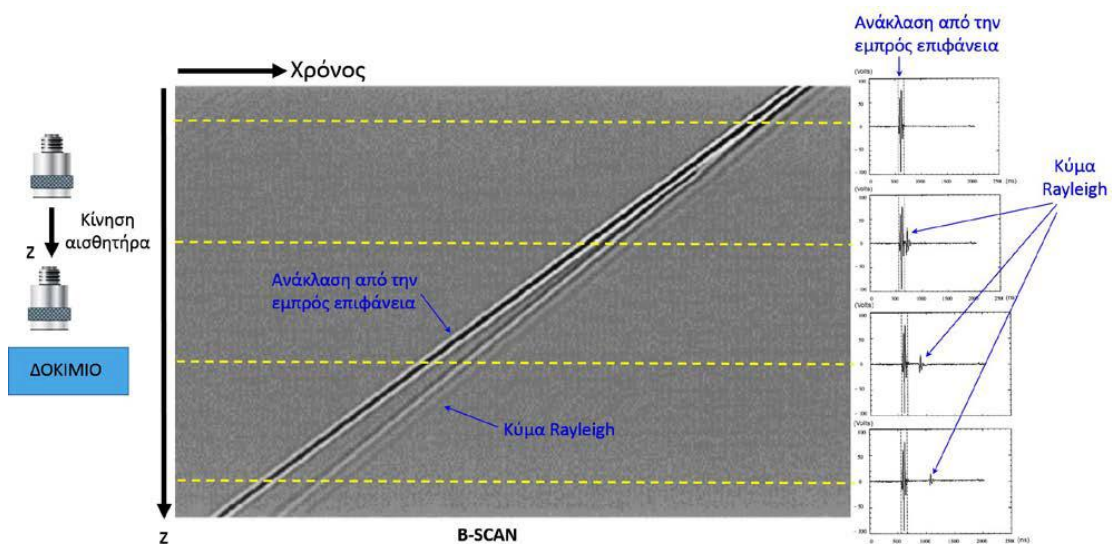
Σχήμα 4.22 Απεικόνιση B-scan.

Ένα άλλο παράδειγμα B-scan παρουσιάζεται παρακάτω. Στην περίπτωση αυτή ένας σφαιρικός αισθητήρας είναι αρχικά εστιασμένος στην εμπρός επιφάνεια δοκιμίου. Στη συνέχεια ο αισθητήρας κινείται κάθετα προς το δοκίμιο πλησιάζοντας την επιφάνεια του δοκιμίου. Επειδή υπάρχει κάποια γωνία του αισθητήρα (βλ. Σχήμα 4.23) που στέλνει κύμα στην επιφάνεια του δοκιμίου με γωνία πρόσπτωσης τη γωνία Rayleigh του υλικού, ένα κύμα Rayleigh παράγεται και στη συνέχεια διαδίδεται στην επιφάνεια του δοκιμίου. Δυο σήματα λαμβάνονται λοιπόν από τον αισθητήρα: Το πρώτο αντιστοιχεί στην απ' ευθείας ανάκλαση από την εμπρός επιφάνεια του δοκιμίου και το δεύτερο στο κύμα Rayleigh.



Σχήμα 4.23 Σφαιρικά εστιασμένος αισθητήρας εστιάζει στο εσωτερικό δοκίμιου και παράγει κύμα Rayleigh στην επιφάνεια.

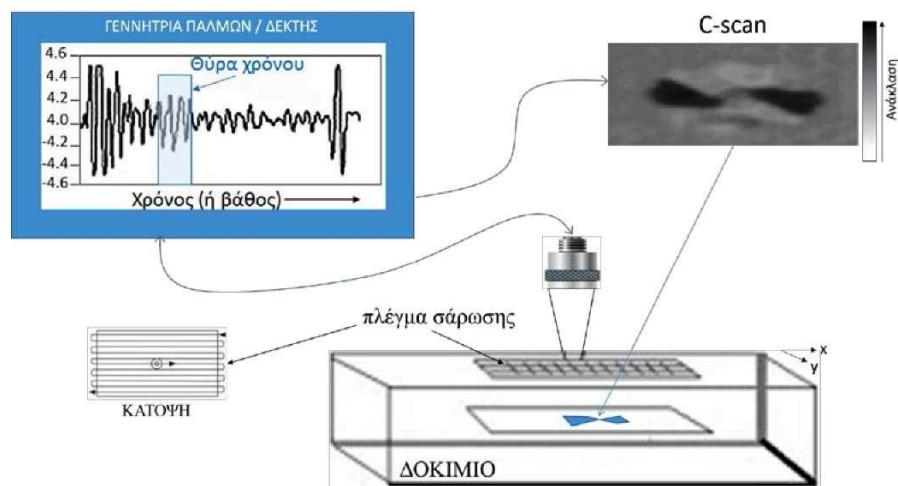
Είναι προφανές ότι η διαδρομή του κύματος Rayleigh αυξάνει με την κάθετη κίνηση του αισθητήρα προς το δοκίμιο καθώς το εστιακό σημείο του αισθητήρα ολοένα και περισσότερο βυθίζεται στο δοκίμιο (αποεστίαση - defocus). Συνεπώς, το κύμα Rayleigh χρειάζεται ολοένα και περισσότερο χρόνο για να ληφθεί από τον αισθητήρα, ο οποίος είναι σε διάταξη πομπού-δέκτη. Το Σχήμα 4.24 παρουσιάζει την κίνηση του αισθητήρα ως προς το δοκίμιο, τα A- scan για τέσσερις αντίστοιχες θέσεις του αισθητήρα κατά την κίνηση αυτή, καθώς και τη σχετική απεικόνιση B-scan.



Σχήμα 4.24 B-scan κύματος Rayleigh.

4.3.14.3 C-scan

Όταν ο αισθητήρας κινείται σε ένα επίπεδο παράλληλο με την επιφάνεια του δοκιμίου και η μέγιστη τιμή του λαμβανόμενου σήματος σχεδιάζεται συναρτήσει της θέσης του αισθητήρα, τότε παράγεται μια εικόνα που ονομάζεται C-scan. Η παρουσίαση των δεδομένων με απεικόνιση C-scan παρέχει μια κάτοψη της κατάστασης της επιφάνειας του δοκιμίου, καθώς και της θέσης και του μεγέθους των εσωτερικών ασυνεχειών (οι οποίες ανακλούν ή σκεδάζουν τον υπέρηχο) σε ένα επίπεδο παράλληλο με το πλέγμα σάρωσης του αισθητήρα.



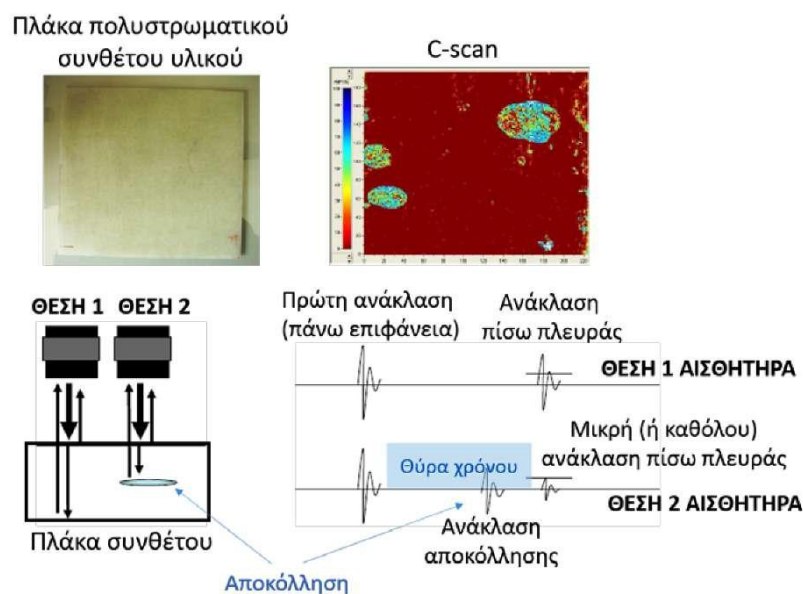
Σχήμα 4.25 Σχηματική παρουσίαση συλλογής δεδομένων υπερήχων και απεικόνισης των δεδομένων σε C-scan. Η εικόνα δείχνει μια ατέλεια που βρίσκεται σε κάποιο βάθος στο εσωτερικό του δοκιμίου.

Απεικονίσεις C-scan παράγονται με αυτοματοποιημένο σύστημα λήψης δεδομένων, όπως είναι ένα σύστημα σάρωσης σε εμβάπτιση ελεγχόμενο από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Συνήθως, τοποθετούνται θύρες χρόνου στο A-scan για τη συλλογή δεδομένων που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα βάθη του δοκιμίου και το πλάτος ή ο χρόνος διάδοσης (time-of-flight) του σήματος καταγράφονται σε τακτά χρονικά διαστήματα καθώς ο αισθητήρας σαρώνει το δοκίμιο. Το πλάτος του σήματος (ή ο χρόνος διάδοσης) απεικονίζεται με αποχρώσεις του γκρι ή έγχρωμα σε συνάρτηση της θέσης του αισθητήρα.

Το Σχήμα 4.25 δείχνει το πλέγμα σάρωσης του αισθητήρα για παραγωγή C-scan, σε επίπεδο παράλληλο με την επιφάνεια του δοκιμίου, στις κατευθύνσεις x και y. Το C-scan που φαίνεται στο σχήμα, παράγεται καταγράφοντας το μεσαίο τμήμα του

σήματος (θέτοντας θύρα χρόνου στα αντίστοιχα A-scan) και απεικονίζοντας σε κλίμακα του γκρι τη μέγιστη τιμή του τμήματος αυτού του σήματος συναρτήσει της θέσης του αισθητήρα. Η σκούρα περιοχή στο κέντρο του C-scan αντιστοιχεί σε σήματα που ανακλώνται από κάποια ασυνέχεια (π.χ. περιοχή με ρωγμές, αποκόλληση, ατέλειες) η οποία βρίσκεται σε συγκεκριμένο επίπεδο στο εσωτερικό του δοκιμίου. Σε περιοχές του δοκιμίου χωρίς ασυνέχειες δεν παρατηρείται ανάκλαση από το συγκεκριμένο βάθος του δοκιμίου και συνεπώς η απεικόνιση εμφανίζει τις περιοχές αυτές με χρώμα πιο ανοιχτό γκρι (αντιστοιχεί σε θόρυβο του σήματος) συγκριτικά με την κεντρική περιοχή του C-scan.

Στο επόμενο παράδειγμα φαίνεται έγχρωμη απεικόνιση C-scan πλάκας πολυστρωματικού συνθέτου υλικού (Σχήμα 4.26). Το Σχήμα δείχνει παραδείγματα A-scan από δυο διαφορετικές θέσεις του αισθητήρα, η μια (θέση 1) πάνω από περιοχή, όπου δεν υπάρχει αποκόλληση και η δεύτερη (θέση 2) πάνω από περιοχή αποκόλλησης. Το C-scan έχει ληφθεί καταγράφοντας τις μέγιστες τιμές πλάτους του σήματος που περιέχεται εντός ευρείας θύρας χρόνου (από την επιφάνεια έως την πίσω πλευρά) που τοποθετήθηκε στο A-scan και αντιστοιχεί στο εσωτερικό του δοκιμίου. Οι αποκολλήσεις των στρώσεων του συνθέτου υλικού εμφανίζονται ως περιοχές υψηλής ανακλαστικότητας.



Σχήμα 4.26 C-scan πλάκας πολυστρωματικού συνθέτου υλικού. Η εικόνα δείχνει αποκολλήσεις των στρώσεων του συνθέτου υλικού.

4.3.15 Εφαρμογές υπερήχων

Η κύρια εφαρμογή των υπερήχων είναι η διάγνωση ασθενειών στον ανθρώπινο οργανισμό. Το γνωστό υπερηχογράφημα χρησιμεύει στη διάγνωση κύησης, ασθενειών στο συκώτι, το πάγκρεας, το στήθος, ενώ παρέχει πληροφορίες για την ταχύτητα του αίματος στα αγγεία του εγκεφάλου.

Στον βιομηχανικό τομέα η εφαρμογή των υπερήχων ταξινομείται ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής. Οι υπέρηχοι στον έλεγχο συγκολλήσεων, εφαρμόζονται στο σημείο της συγκόλλησης. Αν παρατηρηθούν μεταβολές στο πλάτος του σήματος, τότε συσχετίζονται με την ύπαρξη ατελειών.

Στις μετρήσεις πάχους, μετράται ο χρόνος διάδοσης και υπολογίζεται η απόσταση των δύο σημείων. Άμεση εφαρμογή γίνεται στη μέτρηση του πάχους πλακών και λωρίδων κατά τη εξέλαση. Σε αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιούνται χαμηλές συχνότητες 50 - 250 kHz, καθώς δεν υπάρχει επαφή του αισθητήρα με το υπό εξέταση αντικείμενο, αλλά μεσολαβεί αέρας, που λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς, γεγονός που προκαλεί μεγάλη εξασθένηση του σήματος.

Στον ποιοτικό έλεγχο πολύστρωτων υλικών, όπου συνήθως μορφή αστοχίας είναι η αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων, χρησιμοποιούνται ειδικοί αισθητήρες που διοχετεύουν υπερήχους στο υπό εξέταση αντικείμενο μέσω ελαστικού τροχού. Παράλληλα μπορούν να εφαρμοστούν και για τον έλεγχο βιομηχανικών μονάδων, κυρίως σε μονάδες παραγωγής υγρών καυσίμων και γενικότερα όπου υπάρχουν δοχεία πίεσεως και μεγάλου μήκους σωληνώσεις.

Η μέθοδος των υπερήχων εφαρμόζεται, επίσης για τον περιοδικό έλεγχο αεροσκαφών στα περισσότερα τμήματα του αεροσκάφους, όπου μπορεί να προκληθεί βλάβη, λόγω κόπωσης (περιβαλλοντικές συνθήκες, πιθανές υπερφορτώσεις) και λόγω κρούσεων (π.χ. πέτρες χτυπούν στα φτερά κατά την διάρκεια απογείωσης – προσγείωσης) .

Εκτός από τις παραπάνω εφαρμογές που περιγράψαμε υπάρχουν πάρα πολλές ακόμα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των υπερήχων και συνεχώς λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας εμφανίζονται και νέες. Χωρίς να μπούμε σε λεπτομέρειες ονομαστικά θα αναφέρουμε τις εξής:

- Δοκιμές σφυρήλατων με υπερήχους.
- Δοκιμές χυτών με υπερήχους.
- Προσδιορισμός των τάσεων.

- Ποιοτικός έλεγχος σκυροδέματος.
- Έλεγχος της δομής του υλικού.
- Έλεγχος της ψαθυρότητας των υλικών.
- Υπερηχητικός καθαρισμός των υλικών.
- Υπερηχητική συγκόλληση αλουμινίου.
- Αποραφίνωση του πετρελαίου.
- Εξάερση λιωμένων μετάλλων και άλλων υγρών.
- Έλεγχος ξύλινων κατασκευών.
- Εφαρμογές υπερήχων στην Ιατρική και την Κτηνοτροφία.

4.3.16 Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα της μεθόδου των υπερήχων

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα καθώς και οι περιορισμοί-μειονεκτήματα της μεθόδου των υπερήχων για τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών περιγράφονται παρακάτω:

Πλεονεκτήματα

- Μεγάλη διεισδυτική ικανότητα που επιτρέπει την ανίχνευση ατελειών σε μεγάλο βάθος (μπορούν να ελεγχθούν αντικείμενα με μήκος και πάχος αρκετών μέτρων).
- Ακριβής προσδιορισμός της θέσης και μεγέθους εσωτερικών ατελειών και χαρακτηρισμός του προσανατολισμού, μορφής και τύπου τους.
- Τεχνική ευαίσθητη σε επιφανειακές και υπο-επιφανειακές ασυνέχειες.
- Απαιτείται πρόσβαση σε μία μόνο επιφάνεια του υπό έλεγχο αντικειμένου.
- Απαιτείται ελάχιστη προετοιμασία του αντικειμένου προς έλεγχο.
- Τα σύγχρονα συστήματα παρέχουν πλήρη αυτοματοποίηση με δυνατότητα απεικόνισης υψηλής ευαισθησίας, παρέχοντας άμεσα αποτελέσματα.
- Η υψηλή ευαισθησία της μεθόδου επιτρέπει την ανίχνευση πολύ μικρών ατελειών.
- Δυνατότητα ογκομετρικής ανίχνευσης, που επιτρέπει τον έλεγχο του συνολικού όγκου του αντικειμένου, που εκτείνεται από την εμπρός επιφάνεια ως την πίσω επιφάνειά του.

- Παρέχει τα αποτελέσματα σε μορφή ώστε να υπάρχει δυνατότητα ψηφιακής επεξεργασίας για το χαρακτηρισμό ελαττωμάτων και βλάβης και τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών.
- Φορητότητα.
- Κανένας κίνδυνος για την υγεία των χειριστών από τη χρήση της μεθόδου.
- Δεν απαιτούνται αναλώσιμα.

Περιορισμοί-Μειονεκτήματα

- Δεν υπάρχει μόνιμη καταγραφή των δεδομένων, παρά μόνο όταν χρησιμοποιούνται προηγμένα συστήματα ελέγχου.
- Τα αποτελέσματα του ελέγχου απαιτούν ερμηνεία (εξαιρούνται οι ψηφιακοί μετρητές πάχους τοιχώματος)
- Ο χειριστής της μεθόδου πρέπει να είναι ιδιαίτερα έμπειρος για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του ελέγχου.
- Η ανάπτυξη διαδικασιών ελέγχου απαιτεί εκτεταμένες τεχνικές γνώσεις.
- Αντικείμενα που έχουν τραχεία επιφάνεια, ακανόνιστο σχήμα, ή είναι πολύ μικρά σε μέγεθος ή έχουν πολύ λεπτή διατομή ή μη ομοιογενή, είναι δύσκολο να ελεγχθούν.
- Η επιφάνεια του δοκιμίου πρέπει να είναι προσπελάσιμη για μετάδοση υπερήχων.
- Ασυνέχειες που υπάρχουν σε μικρό βάθος αμέσως κάτω από την επιφάνεια, είναι δύσκολο να ανιχνευθούν.

4.3.17 Έλεγχος τσιμεντόπαστας με χρήση υπερήχων (τασικά κύματα)

Ο έλεγχος της τσιμεντόπαστας με κυματική διάδοση γίνεται είτε μέσω ανάκλασης είτε με απ' ευθείας διάδοση. Οι μέθοδοι ανάκλασης βασίζονται στην μεταβαλλόμενη με το χρόνο ακουστική εμπίδηση (γινόμενο πυκνότητας και φασικής ταχύτητας) του σκυροδέματος. Με την πάροδο του χρόνου η διαδιδόμενη στο κονίαμα ενέργεια αυξάνεται και η τιμή του συντελεστή ανάκλασης μειώνεται. Ο συντελεστής ανάκλασης προσδιορίζεται είτε από το εύρος του παλμού στο πεδίο του χρόνου, είτε αφού πρώτα μετασχηματιστεί το σήμα στο πεδίο συχνοτήτων.

Εκτός από τις μεθόδους ανάκλασης, υπάρχουν και οι μέθοδοι που βασίζονται στην απ' ευθείας διάδοση του κύματος μέσα στο υλικό. Τα πιο συνήθη μετρούμενα

χαρακτηριστικά του κύματος είναι η ταχύτητα διάδοσης, οι μεταβολές στο περιεχόμενο συχνότητας το οποίο μετατοπίζεται σε υψηλότερες ζώνες όσο προχωρά η αντίδραση ενυδάτωσης, το εύρος ή ο συντελεστής εξασθένησης του παλμού. Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή μετρήθηκε η ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Σε αυτές τις εργασίες γίνεται χρήση διαμήκων κυμάτων ή ταυτόχρονα διαμήκων και εγκάρσιων. Τα μεν πρώτα διαδίδονται από την πρώτη φάση της ενυδάτωσης έστω και με μειωμένη ταχύτητα, όσο το υλικό είναι σε υγρή κατάσταση, αλλά η διαφοροποίηση στα χαρακτηριστικά των εγκάρσιων είναι σαφώς μεγαλύτερη από τη στιγμή που γίνεται δυνατή η ανίχνευσή τους μέχρι το πέρας της ενυδάτωσης, γεγονός που εξηγείται αφού αρχικά και πριν το δίκτυο των στερεών εγκλεισμάτων συνδεθεί, τα εγκάρσια κύματα δεν διαδίδονται καθόλου. Έτσι για τον χαρακτηρισμό της πήξης, τα εγκάρσια προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια.

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5.1 Παρασκευή αιωρήματος νανοσωλήνων άνθρακα

Τα αιωρήματα νανοσωλήνων άνθρακα παρασκευάστηκαν αναμειγνύοντας τους νανοσωλήνες (Multi Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs) (Εικόνα 5.1) με το νερό της μίξης και το μέσο διασποράς. Πιο αναλυτικά, σε φιάλη ζέσεως χωρητικότητας 1 λίτρου, αρχικά πραγματοποιήθηκε μαγνητική ανάδευση 500 ml νερού βρύσης με την αντίστοιχη ποσότητα πλαστικοποιητή (εικόνα 5.2), που χρησιμοποιείται ως μέσο διασποράς των νανοσωλήνων άνθρακα, για 2 λεπτά.



Εικόνα 5.1 Πολυφλοικοί Νανοσωλήνες Άνθρακα (MWCNT).



Εικόνα 5.2 Μέσο διασποράς υπερευστοποιητής Viscocrete 300

Στην συνέχεια προστέθηκε στο διάλυμα, σταδιακά, η προϋπολογισμένη ποσότητα νανοσωλήνων άνθρακα, η οποία στην περίπτωσή μας ήταν 12 γρ., και ξεκίνησε η διαδικασία υπερήχησης με την χρήση ενός Sonicator tip (Εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.3 Διαδικασία υπερήχησης με συσκευή Sonicator tip.

Η εφαρμογή υπερήχων στο αιώρημα πραγματοποιήθηκε για 90 λεπτά με μέσο διασποράς τον υπερευστοποιητή Viscocrete 300. Η αναλογία του Viscocrete 300 ως προς τους νανοσωλήνες άνθρακα ήταν 1.5:1. Η παραπάνω αναλογία απευθύνεται για το ποσοστό 1.2% wt τσιμέντου.

Για τα υπόλοιπα ποσοστά πραγματοποιήθηκε αραίωση με προσθήκη νερού στο αρχικό διάλυμα, και έπειτα μαγνητική ανάδευση για 20 λεπτά. Η ποσότητα νερού που προστέθηκε για την πραγματοποίηση του κάθε ποσοστού φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Ποσοστό CNTs κατά βάρους τσιμέντου	Νερό που προστέθηκε (gr)
CNT 1.2 % wt cement	-
CNT 1.0 % wt cement	80.8
CNT 0.8 % wt cement	97.51
CNT 0.6 % wt cement	130.7
CNT 0.4 % wt cement	212.53
CNT 0.2 % wt cement	460.2

Πίνακας 5.1 Ποσότητα νερού για αραιώση ποσοστού CNT στο τσιμέντο.

5.2 Πειραματική διαδικασία

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας παρήχθησαν 7 διαφορετικά αναμίγματα τσιμεντόπαστας με διαφορετικά ποσοστά νανοσωλήνων άνθρακα (0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2% κ.β. τσιμέντου) και λόγο νερού - τσιμέντου 0.5 ενώ για τα ποσοστά 0.2% και 0.4% παρήχθησαν και δοκίμια με διαφορετικό λόγο νερού - τσιμέντου (w/c 0.4) (Εικόνα 5.4) .

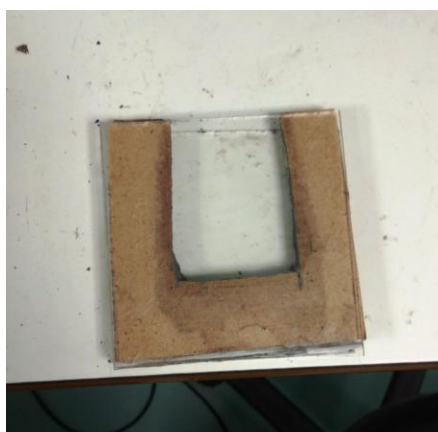


Εικόνα 5.4 Δοκίμια τσιμεντόπαστας.

Το πείραμα για κάθε δοκίμιο διαρκούσε 24 ώρες. Μετά την ζύγιση των ποσοτήτων οι οποίες ήταν πολύ μικρές (75-130 g), η ανάμιξη γινόταν σε μεταλλικό μπόλ με τη βοήθεια μεταλλικής ράβδου. Η ανάμιξη γινόταν χειροκίνητα με όσο το δυνατόν πιο σταθερό ρυθμό για 4 λεπτά. Κατά την τοποθέτηση του υλικού στο καλούπι γινόταν προσεχτική συμπύκνωση ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία αέρα.

5.3 Πειραματική διάταξη

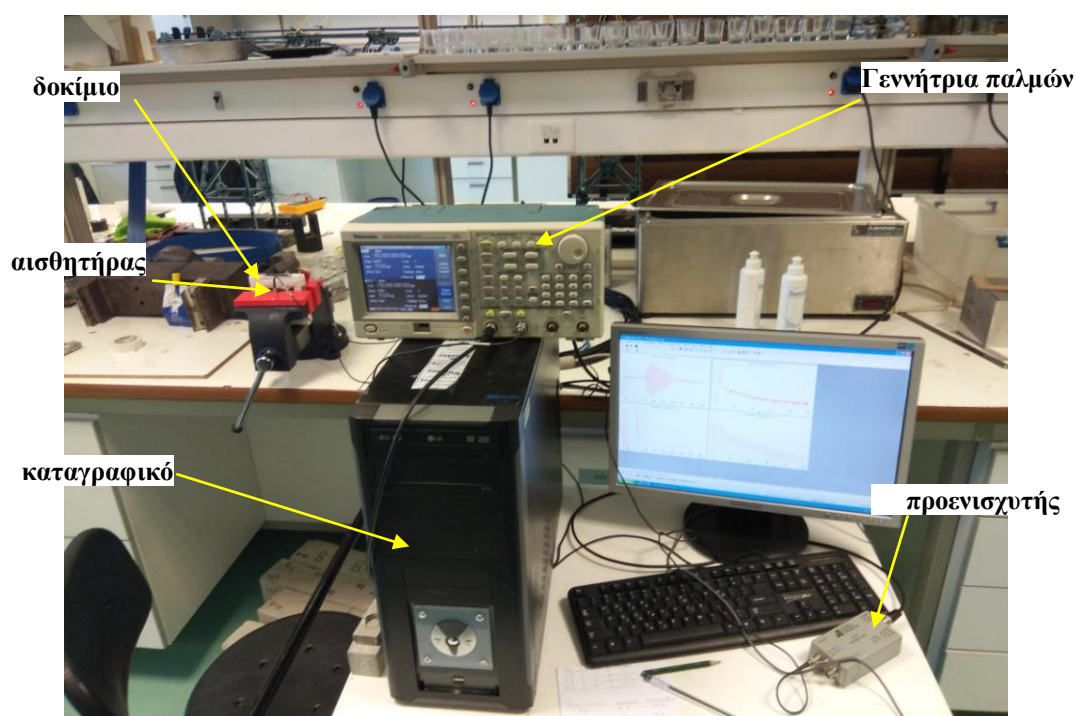
Το καλούπι στο οποίο τοποθετήθηκαν τα δοκίμια αποτελούνταν από 2 φύλλα plexiglass και ένα κομμάτι hardbox πάχους 4mm. Τα εσωτερικό μέρος του plexi-glass καλυπτόταν με λάδι το οποίο είχε δύο χρήσεις. Η μία ήταν η αποφυγή του φαινομένου συγκόλλησης του τσιμέντου με το plexi-glass και η άλλη η στεγανοποίηση της συσκευής στα σημεία επαφής των φύλλων με την πλάκα σχήματος U (Εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.5 Καλούπι δοκιμίου.

Κατά την εξέλιξη των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι το λάδι δρούσε ως ένα στρώμα μεταξύ του plexi-glass και του τσιμέντου το οποίο δημιουργώντας μεγάλη απόσβεση του ηλεκτρικού σήματος οδηγούσε σε πολύ μικρές ταχύτητες διάδοσης και απώλεια σήματος. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού σκουπίστηκε προσεκτικά το λάδι από την εσωτερική επιφάνεια του plexi-glass έτσι ώστε να παραμείνει ένα πολύ λεπτό στρώμα. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι η ιδιοσυσκευή κλεινόταν όσο το δυνατόν καλύτερα αεροστεγώς με parafilm για την αποφυγή εξάτμισης του νερού διότι η εξάτμιση του νερού είναι υπεύθυνη για το φαινόμενο της αποκόλλησης του υλικού

και για αυτό το λόγο παρατηρούνταν πτώση της ταχύτητας διάδοσης του κύματος αντί για αύξηση.



Εικόνα 5.6 Πειραματική διάταξη εξοπλισμού.

Για την παρακολούθηση της πήξης των δοκιμίων τσιμεντόπαστας με νανοσωλήνες με υπέρηχους χρησιμοποιήθηκε ένα 2-καναλο σύστημα ακουστικής εκπομπής . Ο εξοπλισμός για την παρακολούθηση αποτελούνταν από ένα υπολογιστή εξοπλισμένο με κατάλληλη κάρτα καταγραφής υπερήχων, PCI-2 (PhysicalAcousticsCorp, Princeton, NewJersey, USA), καθώς και το κατάλληλο λογισμικό, AEWin. Οι αισθητήρες καταγραφής ήταν οι R15a, με ευρυζωνική απόκριση που κυμαίνεται από 50 έως 400 kHz και μέγιστη ευαισθησία στα 150 kHz, προσαρτημένη στο κατώτερο τμήμα του δείγματος. Οι R15a είναι αισθητήρες υπερήχων στενής ζώνης και υψηλής ευαισθησίας με διάμετρο 15 mm. Επίσης χρησιμοποιήθηκε ένας προ-ενισχυτής ο οποίος ρυθμίστηκε στα 40dB για την ενίσχυση του σήματος ενώ το κατώφλι καθορίστηκε στα 45 dB για την αποφυγή καταγραφής θορύβου. Ως μέσο σύζευξης στους αισθητήρες χρησιμοποιήθηκε μέλι έτσι ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη επαφή των δύο επιφανειών. Κατόπιν οι αισθητήρες σταθεροποιούνταν περιμετρικά της συσκευής με σφικτήρα και όλη η συσκευή παρέμενε κλειστή με τη

βοήθεια μονωτικής ταινίας. Τέλος χρησιμοποιήθηκε και μία γεννήτρια παλμών (Tektronix AFG3102) η οποία ήταν και η πηγή του ηλεκτρικού σήματος με μέγιστη τάση εξόδου 10 Volt. (Εικόνα 5.5). Οι ρυθμίσεις της γεννήτριας για την συγκεκριμένη εργασία ήταν οι εξής:

- σήμα → Burst
- περίοδος → 1 κύκλος
- εύρος → 10 Volt
- συχνότητα → 150 kHz
- επανάληψη σήματος → 300 sec

5.4 Αποτελέσματα

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων ταχύτητας και μέτρου ελαστικότητας τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποθηκευόταν στον υπολογιστή μέσω του προγράμματος AE win της εταιρίας MistrasGroup. Μετά το πέρας των πειραμάτων τα αρχεία των μετρήσεων επεξεργάστηκαν με κώδικα του προγράμματος Matlab. Για την εξαγωγή της ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε ο τύπος $c = \frac{\Delta d}{\Delta t}$. Έτσι λοιπόν αφού γινόταν εισαγωγή των κυματομορφών στο πρόγραμμα γινόταν ρύθμιση των παραμέτρων όπως το κατώφλι και το πάχος του υλικού. Το κατώφλι οριζόταν για την αποφυγή του θορύβου έτσι ώστε στις τελικές κυματομορφές να μην έχουμε μεγάλη απόκλιση στην ταχύτητα από σημείο σε σημείο. Κατόπιν με τον τύπο που προαναφέρθηκε υπολογιζόταν η ταχύτητα η οποία παρουσιαζόταν και σε διάγραμμα.



Εικόνα 5.7 Συσκευή μέτρησης βάρους δοκιμίου.

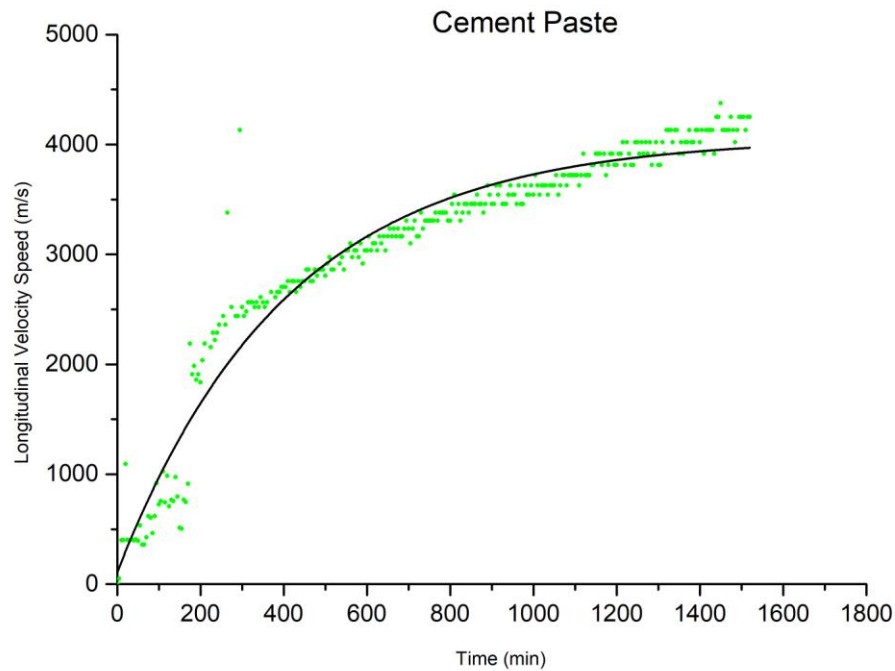
Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκε ο τύπος $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, όπου c η ταχύτητα διάδοσης του κύματος που υπολογίζουμε, E το μέτρο ελαστικότητας και ρ η πυκνότητα του υλικού η οποία υπολογίστηκε με την μέθοδο του Αρχιμήδη για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε για την πυκνότητα ήταν ο $\rho = \frac{A}{A-B} \rho_o$, όπου ρ η πυκνότητα του δοκιμίου, A το βάρος του δοκιμίου στον αέρα, B το βάρος του δοκιμίου μέσα στο νερό και ρ_o η πυκνότητα του νερού (Εικόνα 5.,6).

Ονομασία δοκιμίου	Βάρος δοκιμίου στον αέρα (gr)	Βάρος δοκιμίου στο νερό (gr)	Πυκνότητα δοκιμίου (gr/cm ³)
CP	58	24,37	1,724651
CNT 0.2 cw04	47,55	19,58	1,700036
CNT 0.2 cw05	38	15,84	1,714801
CNT 0.4 cw04	45,37	19,83	1,776429
CNT 0.4 cw05	36,16	15,67	1,764763
CNT 0.6	35,40	13,84	1,641929
CNT 0.8	38,27	12,10	1,462361
CNT 1.0	38,51	12,16	1,461480
CNT 1.2	59,69	18,32	1,442833

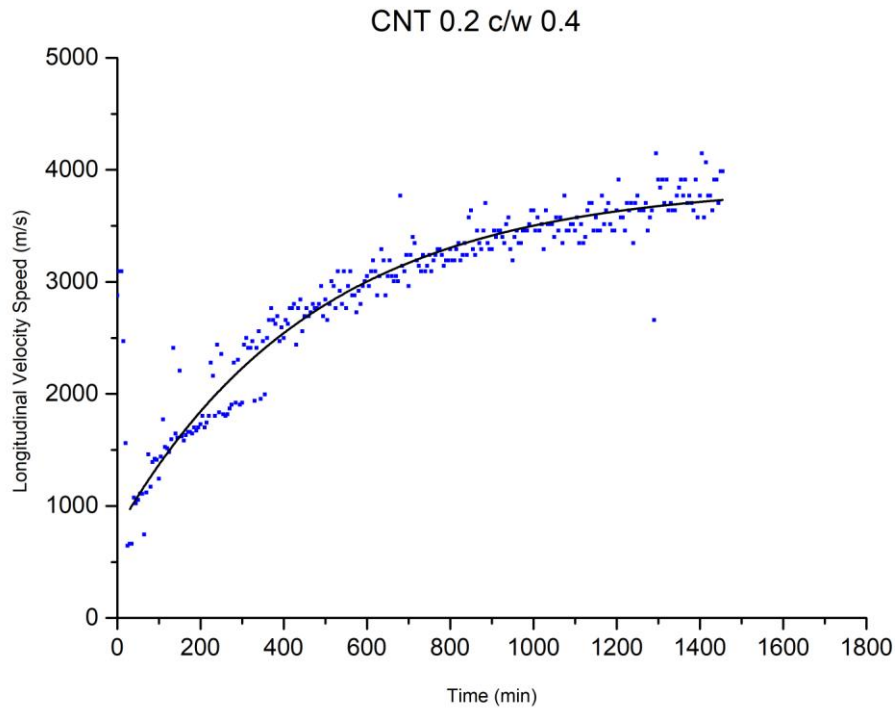
Πίνακας 5.1 Υπολογισμός πυκνότητας δοκιμίων.

5.4.1 Διαγράμματα ταχύτητας

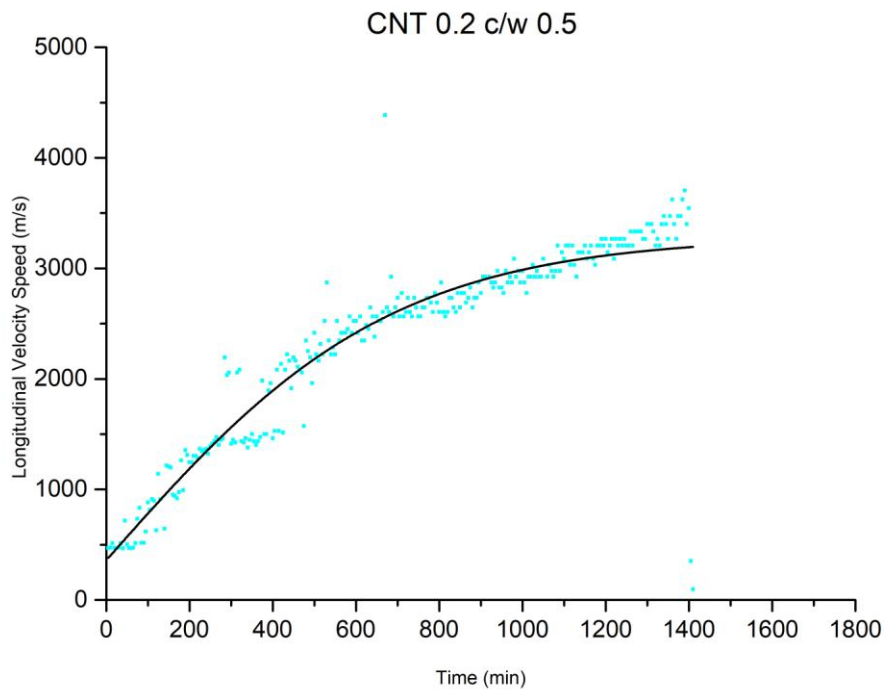
Παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων στα δοκίμια στην διάρκεια του χρόνου της ενυδατώσής τους βάση των πειραματικών μετρήσεων.



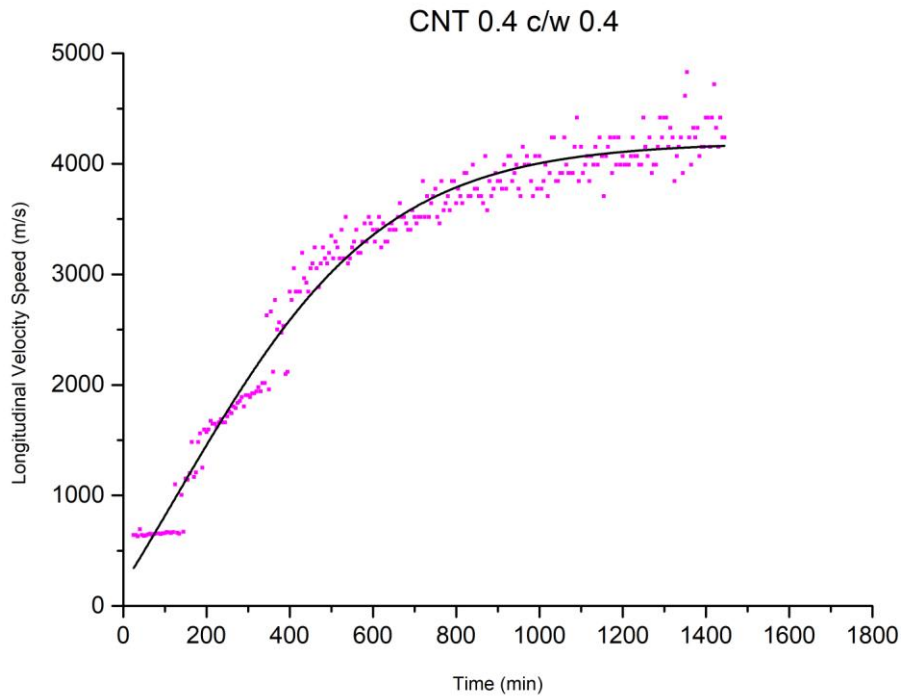
Διάγραμμα 5.1 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου χωρίς CNT και λόγο νερού τσιμέντου 0,5



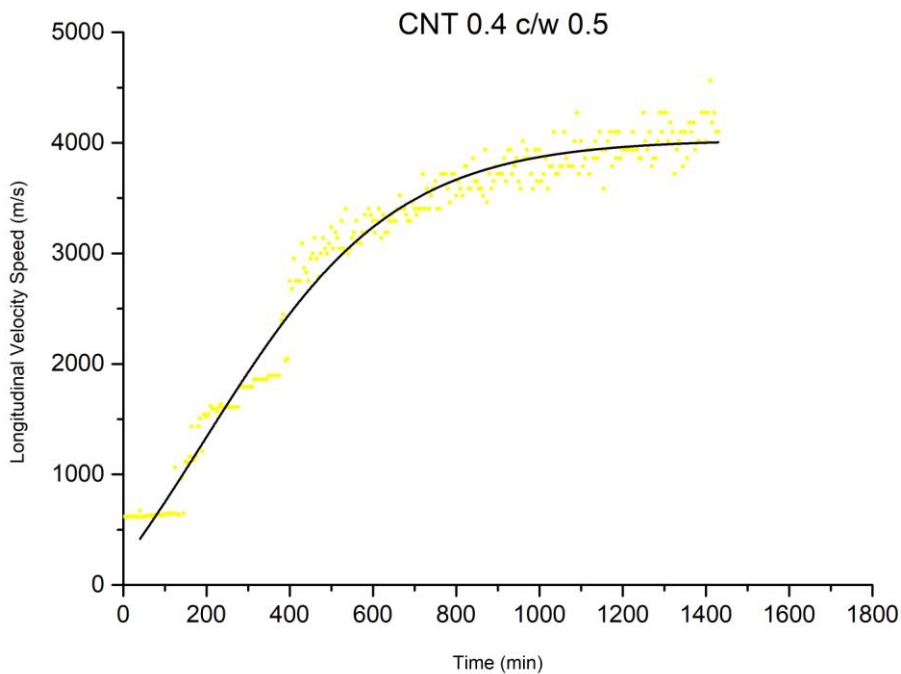
Διάγραμμα 5.2 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,2 και λόγο νερού τσιμέντου 0,4



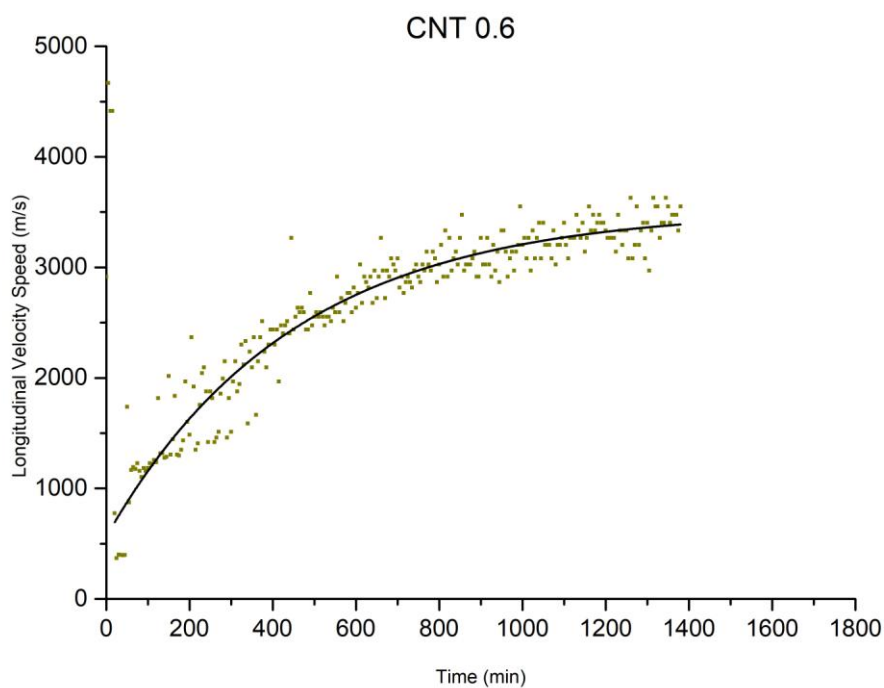
Διάγραμμα 5.3 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,2 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5



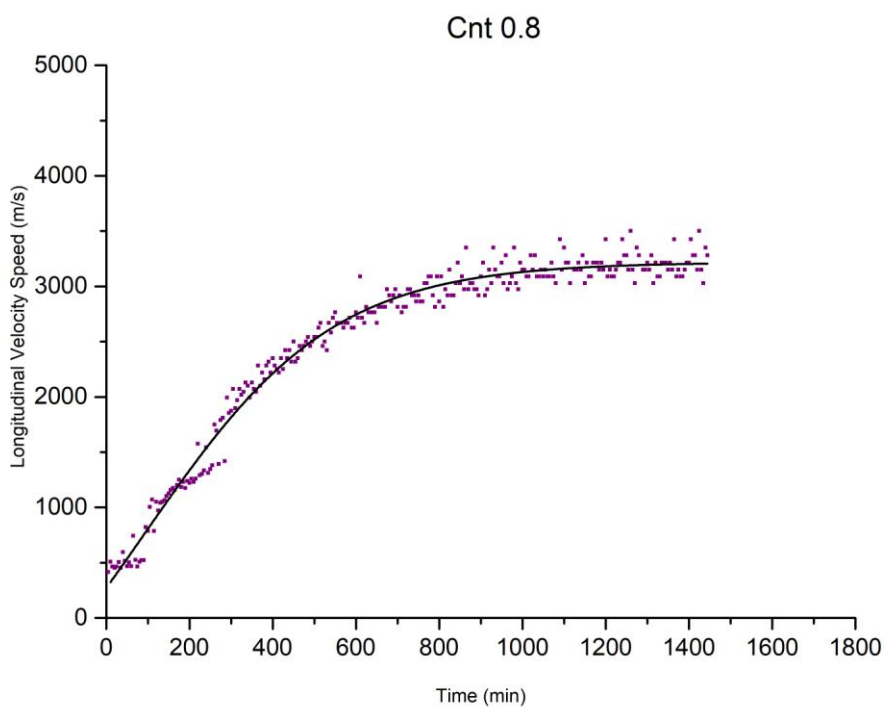
Διάγραμμα 5.4 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,4 και λόγο νερού τσιμέντου 0,4



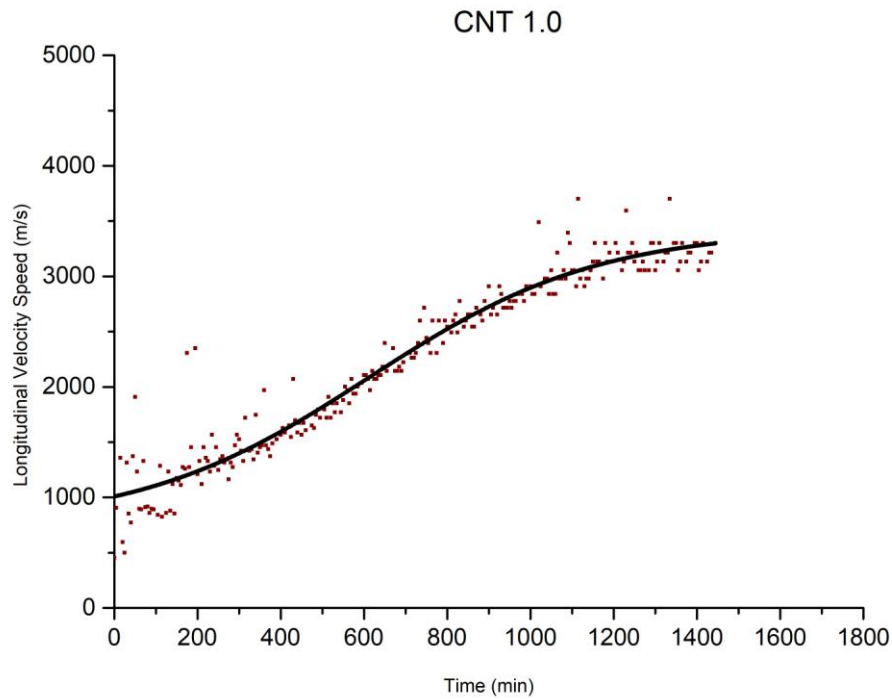
Διάγραμμα 5.5 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,4 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5



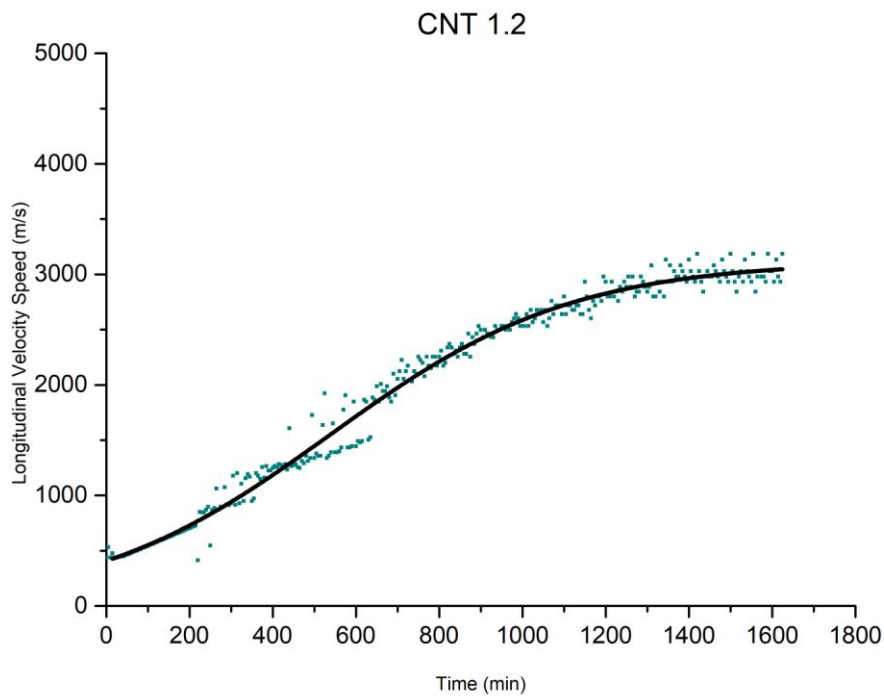
Διάγραμμα 5.6 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,6 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5



Διάγραμμα 5.7 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,8 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5



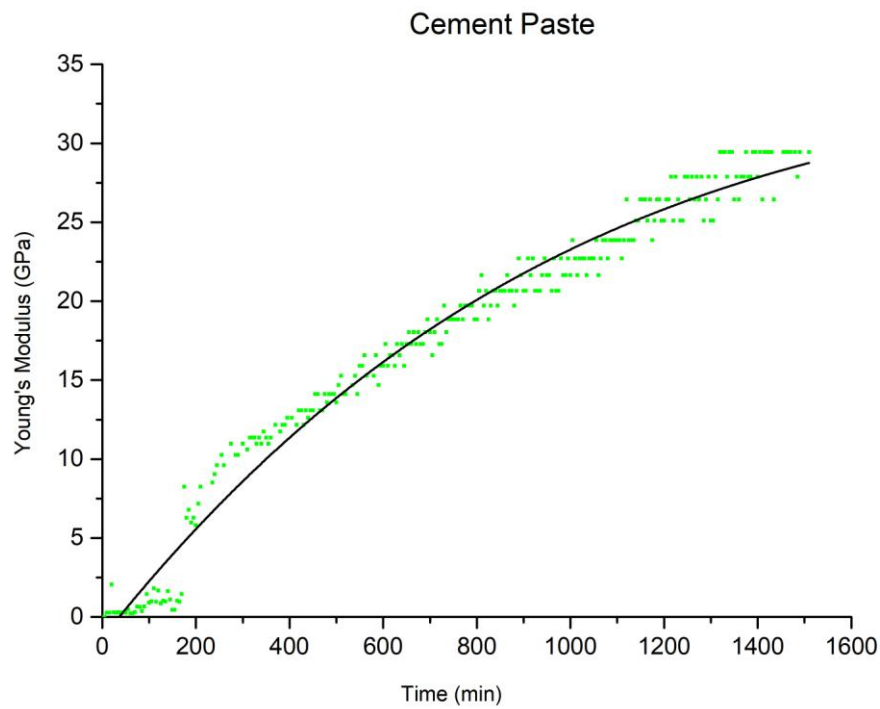
Διάγραμμα 5.8 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 1,0 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5



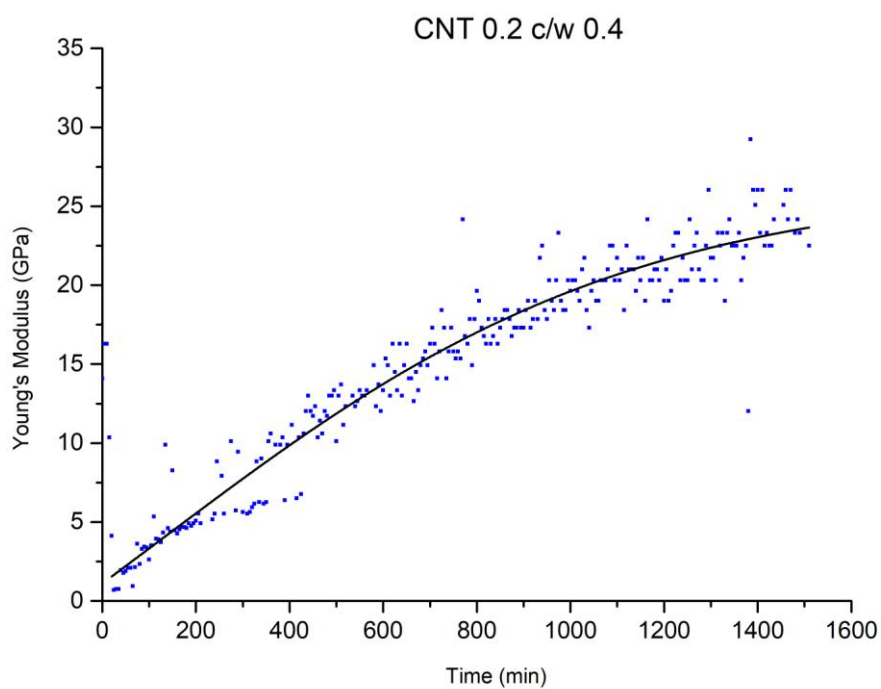
Διάγραμμα 5.9 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 1,2 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

5.4.2 Διαγράμματα Μέτρου Ελαστικότητας

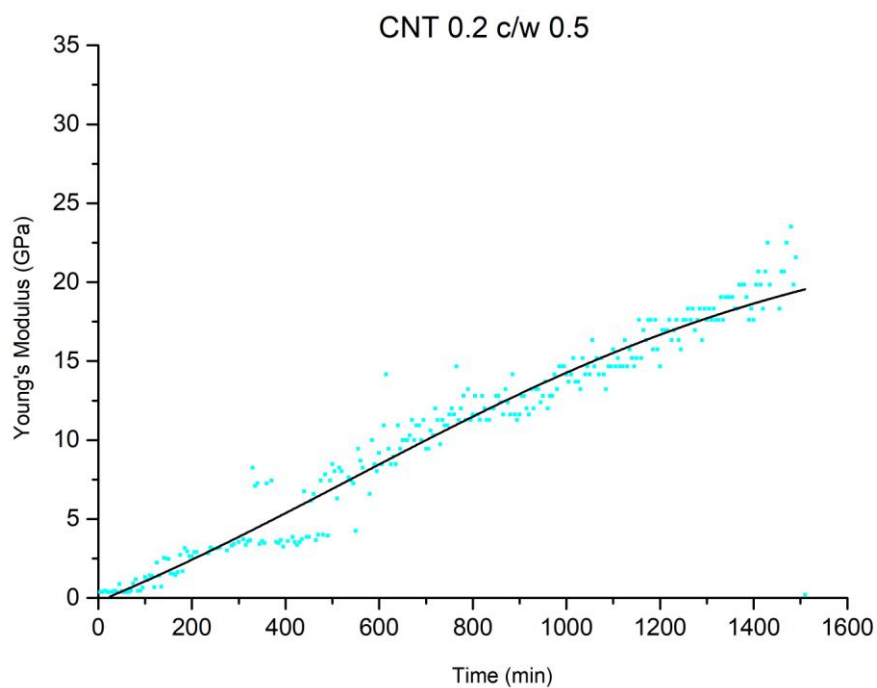
Παρουσιάζονται τα διαγράμματα του Μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων στην διάρκεια του χρόνου της ενυδατώσής τους βάσει των πειραματικών μετρήσεων.



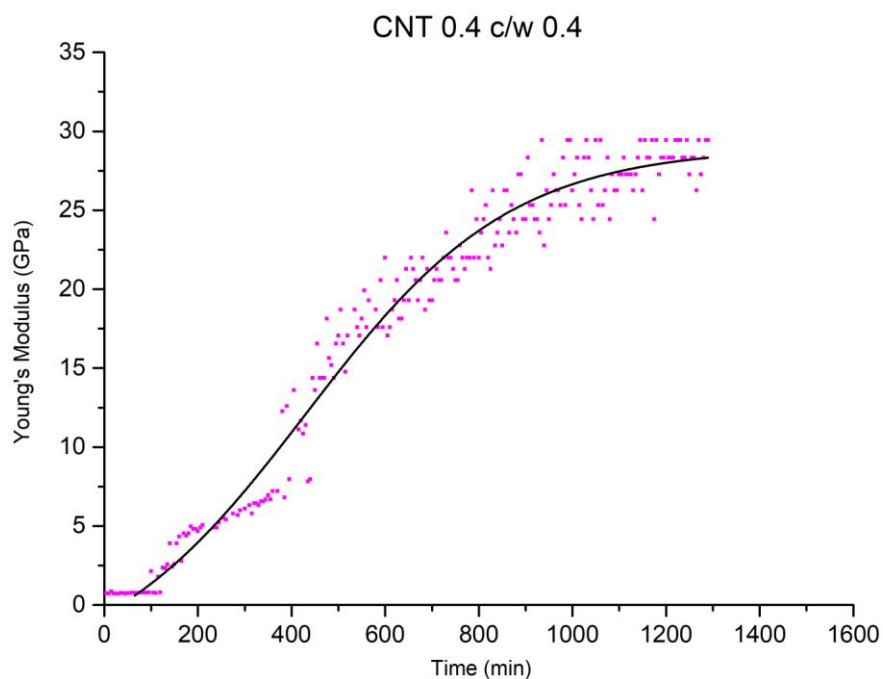
Διάγραμμα 5.10 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου χωρίς CNT και λόγο νερού τσιμέντου 0,5



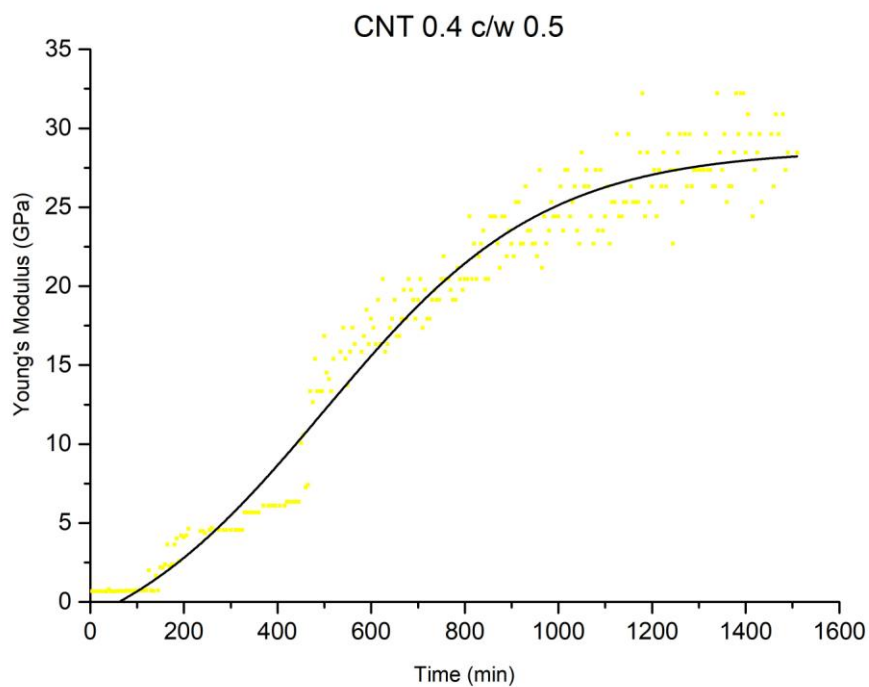
Διάγραμμα 5.11 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,2 και λόγο νερού τσιμέντου 0,4



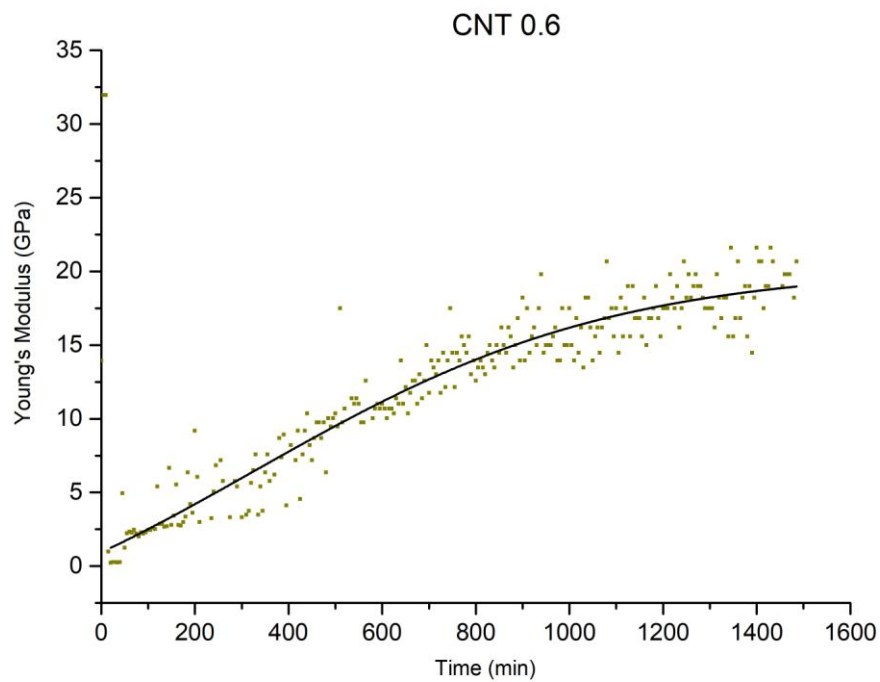
Διάγραμμα 5.12 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,2 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5



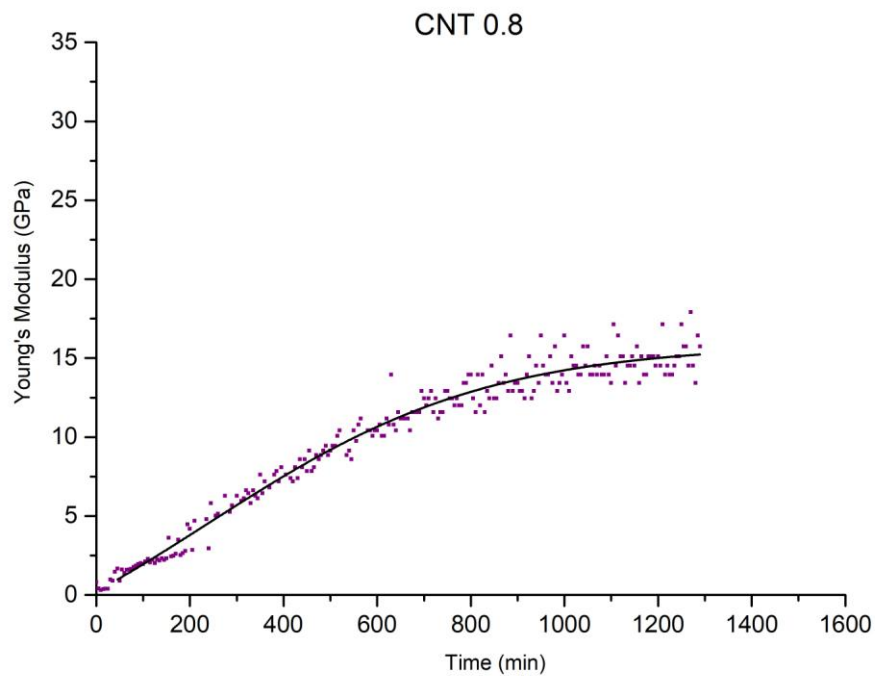
Διάγραμμα 5.13 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,4 και λόγο νερού τσιμέντου 0,4



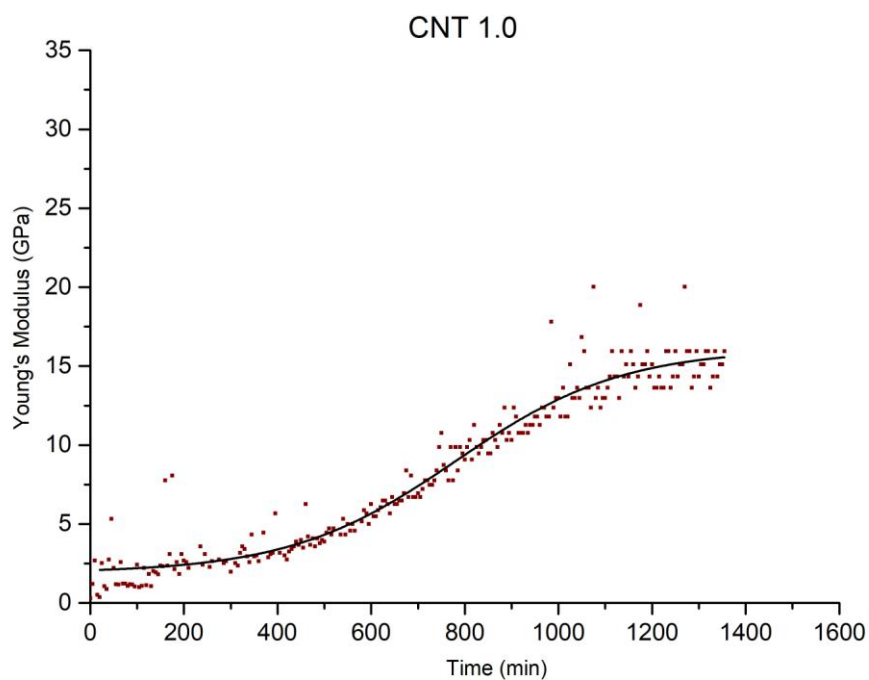
Διάγραμμα 5.14 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,4 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5



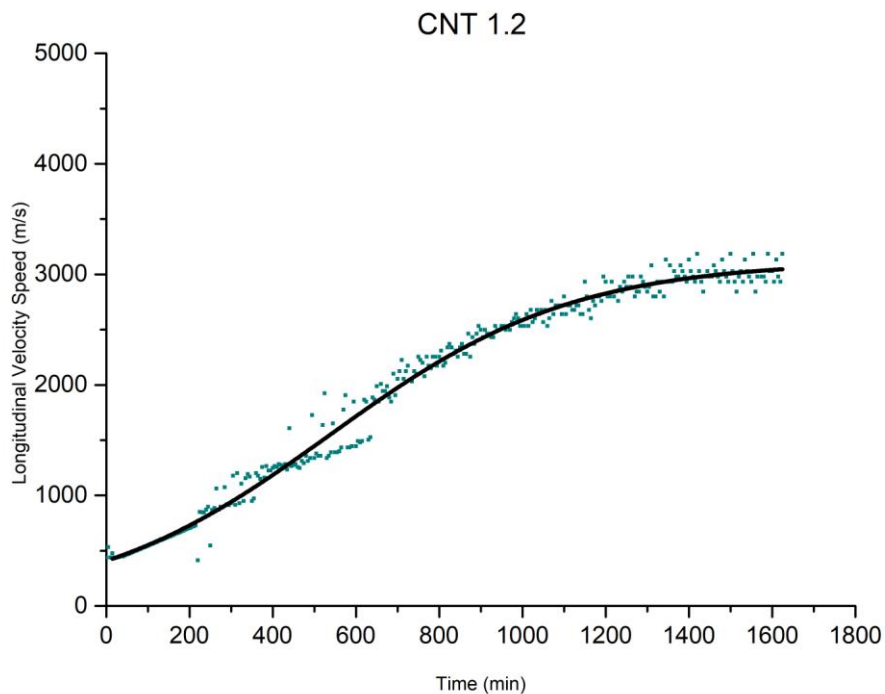
Διάγραμμα 5.15 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,6 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5



Διάγραμμα 5.16 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 0,8 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5



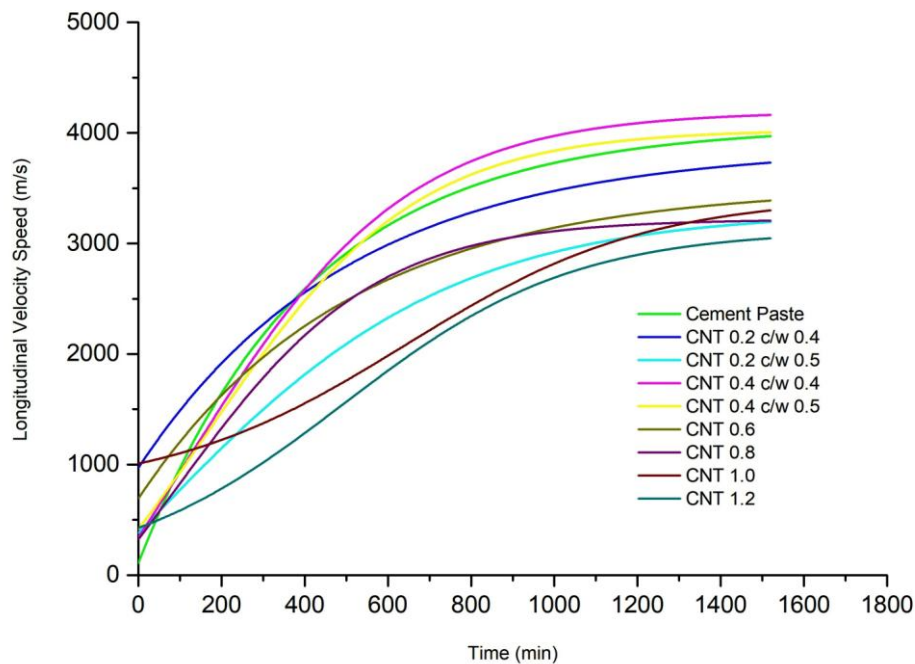
Διάγραμμα 5.17 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 1,0 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5



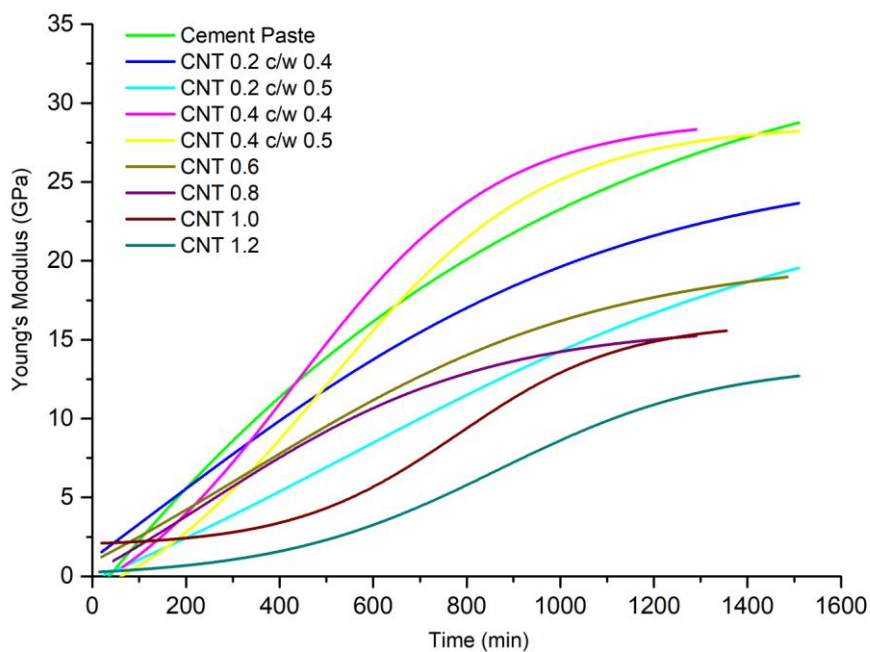
Διάγραμμα 5.18 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο δοκιμίου με λόγο CNT τσιμέντου 1,2 και λόγο νερού τσιμέντου 0,5

5.4.3 Συγκεντρωτικά διαγράμματα Ταχύτητας και Μέρου Ελαστικότητας

Παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα διαγράμματα της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων καθώς και του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμών στην διάρκεια του χρόνου της σκλήρυνσης τους βάση των πειραματικών μετρήσεων.



Διάγραμμα 5.20 Απεικόνιση ταχύτητας διάδοσης στο χρόνο όλων των δοκιμών



Διάγραμμα 5.21 Απεικόνιση μέτρου ελαστικότητας στο χρόνο όλων των δοκιμών

5.5 Παρατηρήσεις - Σχόλια

Η ταχύτητα διάδοσης του κύμματος στην τσιμεντόπαστα με διαφορετικά ποσοστά νανοσωλήνων άνθρακα (MWCNTs) παρατηρήθηκε στο χρόνο, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση τους στην σκλήρυνση της τσιμεντόπαστας.

Από τα διαγράμματα ταχύτητας είναι εμφανές ότι η ταχύτητα που χρειάζεται για να διανύσει το δοκίμιο ο υπέρηχος αυξάνεται καθώς προχωράει η πήξη και η σκλήρυνση του τσιμέντου λόγω συνεκτικότητας του υλικού.

Όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν παρόμοια εξέλιξη στην ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων και συγκεκριμένα στην αρχή ένας πολύ μικρός χρόνος αδράνειας (μηδενική ταχύτητα), στην συνέχεια ένας χρόνος επιτάχυνσης (αυξανόμενη ταχύτητα) όπου ο κύριος όγκος της αντίδρασης της σκλήρυνσης λαμβάνει χώρα και στο τέλος ένας χρόνος διάχυσης (σταθερή ταχύτητα) όπου και επιβραδύνεται η αντίδραση.

Είναι προφανές ότι σε όλες τις συνθέσεις οι χρονικοί περίοδοι αυτές είναι σχεδόν ίδιες και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σκληρύνεται το τσιμέντο το οποίο σε αυτές τις συνθέσεις είναι σταθερό.

Όμως, κάποιες συνθέσεις παρουσιάζουν διαφορετικές ταχύτητες μετάδοσης κύματος στην διάρκεια του χρόνου σκλήρυνσης από άλλες, κάτι που εξαρτάται από το ποσοστό των νανοσωλήνων άνθρακα που προστίθεται.

Φαίνεται ότι ταχύτητα διάδοσης του κύματος υπερήχων των δοκιμίων μειώνεται με αύξηση του ποσοστού των CNTs στο τσιμέντο εκτός της περίπτωσης των δοκιμίων με ποσοστό 0,4 % CNTs στο τσιμέντο που παρουσιάζουν αυξημένη ταχύτητα διάδοσης.

Στα δοκίμια με ίδιο ποσοστό 0,4 % CNTs στο τσιμέντο αλλά διαφορετική αναλογία ποσοστού νερού τσιμέντου (w/c 0,40 και w/c 0,50) παρουσιάζεται αύξηση της ταχύτητας διάδοσης στο χαμηλότερο ποσοστό w/c.

Οι πιθανές αιτίες είναι ότι μετά την επίτευξη της βέλτιστης δοσολογίας νανοσωλήνων άνθρακα στο τσιμέντο που φαίνεται παραπάνω να είναι το ποσοστό

0,40%, η ταχύτητα διάδοσης του κύματος μειώνεται ενδεχομένως λόγω συσσωμάτωσης του CNT που προκαλεί ανοιομορφία του υλικού δεδομένου ότι ο λόγος των νανοσωλήνων άνθρακα είναι πολύ μεγάλος και ως εκ τούτου δεν είναι εύκολο να διασκορπιστούν στην τσιμεντόπαστα.

Από τα διαγράμματα του μέτρου ελαστικότητας φαίνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας αυξάνει καθώς σκληρώνει το τσιμέντο και ότι κινούνται αναλόγως με αυτά της ταχύτητας διάδοσης καθώς ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας βασίζεται στη σχέση $c=\sqrt{E/\rho}$.

Όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν παρόμοια εξέλιξη στο μέτρο ελαστικότητας αλλά ο ρυθμός ανάπτυξης είναι διαφορετικός και εξαρτάται από τα ποσοστά των νανοσωλήνων άνθρακα στο τσιμέντο.

Είναι γνωστό ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας, το κονίαμαμα έχει ψαθυρή συμπεριφορά. Έτσι, κάποιες συνθέσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη ελαστικότητα στη διάρκεια του χρόνου σκλήρυνσης από άλλες κάτι που εξαρτάται από το ποσοστό των νανοσωλήνων άνθρακα που προστίθεται.

Φαίνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων μειώνεται με αύξηση του ποσοστού των CNTs στο τσιμέντο εκτός της περίπτωσης των δοκιμίων με ποσοστό 0,4 % CNTs στο τσιμέντο που παρουσιάζουν αυξημένο μέτρο ελαστικότητας.

Στα δοκίμια με ίδιο ποσοστό 0,4 % CNTs στο τσιμέντο αλλά διαφορετική αναλογία ποσοστού νερού τσιμέντου (w/c 0,40 και w/c 0,50) παρουσιάζεται αύξηση του μέτρου ελαστικότητας στο χαμηλότερο ποσοστό w/c.

Τα παραπάνω αποτελέσματα των μετρήσεων των ταχυτήτων καθώς και των μέτρων ελαστικότητας των δοκιμίων, σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις, αφορούν την παρακολούθηση σκλήρυνσης για χρονικό διάστημα μίας (1) ημέρας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων υπερήχων αυξάνεται στην τσιμεντόπαστα, καθώς προχωράει η πήξη και η σκλήρυνση του τσιμέντου. Αυτό συμβαίνει γιατί τα κύματα διαδίδονται γρηγορότερα όσο πιο συνεκτική είναι η δομή του υλικού στο οποίο διαδίδονται και τελικά αυτό που μελετάται με τη μέθοδο των υπερήχων είναι η εξέλιξη της εσωτερικής δομής της τσιμεντόπαστας. Η δομή αυτή διαμορφώνεται είτε από την εξέλιξη της σκλήρυνσης, είτε είναι αποτέλεσμα της πληρωτικής ικανότητας των υλικών που καθώς το τσιμέντο πήζει λαμβάνουν μια συγκεκριμένη θέση είτε τέλος από την ποζολανική αντίδραση που και αυτή επηρεάζει την δομή του υλικού.

Η ταχύτητα αυξάνεται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου ως ένα σημείο όπου σταθεροποιείται.

Τα δοκίμια με χαμηλότερο ποσοστό w/c λαμβάνουν υψηλότερες ταχύτητες άρα και υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η ενσωμάτωση των CNTs στην τσιμεντόπαστα επιτάχυνε την σκλήρυνση μέχρι το βέλτιστο ποσοστό 0,4%. Περαιτέρω αύξηση του ποσοστού CNTs στο τσιμέντο, ενώ η αναλογία ύδατος / τσιμέντου της μήτρας διατηρείται σταθερή, λόγω της παρουσίας υδρόφιλων ομάδων στις επιφάνειες CNT και κατά συνέπεια απορρόφηση μη αμελητέας ποσότητας νερού, προκάλεσε παρεμπόδιση της ενυδάτωσης – σκλήρυνσης της τσιμεντόπαστας και συσσωμάτωση MWCNTs στην μορφή σβώλων, με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση της ταχύτητας διάδοσης του κύματος υπερήχου και συνεπώς και μείωση του αντίστοιχου μέτρου ελαστικότητας.

Με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι δυνατός ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας, που μας δίνει πληροφορίες για την αντοχή του υλικού κάθε χρονική στιγμή.

Το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται, καθώς προχωράει η πήξη και η σκλήρυνση της τσιμεντόπαστας και ο ρυθμός αύξησης ακολουθεί τον ρυθμό αύξησης της ταχύτητας διάδοσης του κύματος υπερήχων.

Η προσθήκη CNTs στην τσιμεντόπαστα οδηγεί σε πυκνή μικροδομή και βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος, δεδομένου ότι τα CNTs μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά ως γέφυρες για την ελαχιστοποίηση και τον περιορισμό της διάδοσης μικροσυστοιχιών μέσω της μήτρας.

Ωστόσο, για να επιτευχθούν τα καλύτερα αποτελέσματα, οι CNTs πρέπει να είναι καλά διασκορπισμένες εντός της μήτρας για να παρέχουν καλή συγκόλληση μεταξύ αυτών και της περιβάλλουσας ενυδατωμένης μήτρας τσιμέντου,

Συνεπώς αν και η χρήση υπερεισχυρισμένης με χρήση υπερήχων θεωρείται από τις καλύτερες μεθόδους διασποράς νανοσωλήνων άνθρακα σε νερό, θα πρέπει να μελετηθούν και άλλοι μέθοδοι διασποράς, καθώς η διασπορά είναι ο κύριος παράγοντας που ελέγχει τη μικροδομή σκυροδέματος των σύνθετων τσιμέντων

Μιά καινοτόμος μέθοδος διασποράς για μελλοντικά πειράματα είναι η μέθοδος παρασκευής νανοδομημένων τσιμεντοειδών υλικών, μέσω της απευθείας ανάπτυξης των CNTs πάνω στους κόκκους του τσιμέντου. Αυτό επιτυγχάνεται με έναν αντιδραστήρα χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD), ο οποίος τροφοδοτείται συνεχώς με σκόνη τσιμέντου και ως κύρια πηγή άνθρακα χρησιμοποιείται μονοξειδίο και διοξείδιο του άνθρακα.

Ένας από τους σημαντικότερους τομείς της έρευνας στη νανοτεχνολογία περιλαμβάνει νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) σε εμπορικές εφαρμογές. Κύριος στόχος της ανάπτυξης της νανοτεχνολογίας που σχετίζεται με το τσιμέντο είναι η παραγωγή ισχυρότερων, σκληρότερων, ελαφρύτερων και πιο ανθεκτικών προϊόντων. Υπάρχει μεγάλη δυνατότητα για χρήση CNTs στο σκυρόδεμα που με την βοήθεια της εφαρμοσμένης μηχανικής θα οδηγήσει προφανώς στην ύπαρξη μιας νέας γενιάς σκυροδέματος, μεγαλύτερης αντοχής, ανθεκτικότητας που θα παρουσιάζει επιθυμητές τιμές τάσης-παραμόρφωσης και πιθανών να κατέχει μια σειρά «έξυπνων» ιδιοτήτων, όπως η ελεγχόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα, η χαμηλή θερμική εξάπλωση, η αντίσταση στην διάβρωση και οι δυνατότητες αίσθησης θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης.

Προοπτική είναι συμβατικά οικοδομικά υλικά που θα ενσωματώνουν νανοσωματίδια να μπορούν να κατέχουν προηγμένες ή έξυπνες ιδιότητες που απαιτούνται στην κατασκευή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <https://el.wikipedia.org/wiki/Τσιμέντο>
- [2] [https://e-class.teilar.gr/modules/document/file.php/GT8E116/Κεφάλαιο 5 Τσιμέντο](https://e-class.teilar.gr/modules/document/file.php/GT8E116/Κεφάλαιο_5_Τσιμέντο)
- [3] http://www.lafarge.gr/wps/portal/gr/el/2_2_1-Manufacturing_process
- [4] <https://e-class.teilar.gr/modules/document/file.php/EY106/Τσιμέντο>
- [5] Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Nanotechnology>
- [6] “Nanotechnology of concrete”, Konstantin Sobolev, Ismael Flores Vivian, and Miguel Ferrada-Gutiérrez, Universidad Autonoma de Nuevo Leon, Mexico
- [7] <https://www.nanoforum.org>: European Nanotechnology gateway. Nanotechnology and Construction. November 2006
- [8] <https://el.wikipedia.org/wiki/Νανουλικά>
- [9] Leydecker Sylvia, (2008). "Nanomaterials in Architecture, Interior Architecture and Design". Birhauser.
- [10] Lekhnitskii, S. G. (1986). Anisotropic Plates (translates from the second Russian edition by S. W. Tsai and T. Cheron). New York, NY: Gordon and Breach.
- [11] Σωτηριάδης Γ. Μ. (2009). Μη Καταστροφικός Έλεγχος για την μελέτη της Συσσώρευσης Βλάβης σε Σύνθετα Υλικά Ενισχυμένα με Ίνες Γυαλιού, με και χωρίς την παρουσία Νανοσωληνίσκων Άνθρακα. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [12] Εμμανουήλ Κ. (2007). Μελέτη των Μηχανικών Ιδιοτήτων Νανοσωληνίων Άνθρακα και Άλλων Γραφιτικών Υλικών. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [13] X.E.E. Reynhout and J.C. Reijenga (2003). The Wondrous World of Carbon Nanotubes. Eindhoven University of Technology.
- [14] R.H. Baughman, A.A.Zakhiidov and W.A. de Heer, Science 297 (2002) 787.
- [15] K.S. Triantafyllidis, S.A. Karakoulia, D. Gournis, A.Delimitis, L. Nalbandian, E.Maccallini, P. Rudolf, Micropor. Mesopor. Mat. 110 (2008) 128-140.
- [16] <http://www.pa.msu.edu/cmp/csc/ntproperties>

- [17] Rafat Siddique, Ankur Mehta (2014). Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars. *Construction and Building Materials*, pp.116-129.
- [18] Al Rub R.K.A., Ashour A.I., Tyson B.M. (2012), " On the aspect ratio effect of multi-walled carbon nanotube reinforcements on the mechanical properties of cementitious nanocomposites", *Construction and Building Materials* 35, pp. 647655.
- [19] Μη καταστροφικοί έλεγχοι Θεόδωρος Ματίκας, δημήτριος Αγγέλης, ΣΕΑΒ 2015
- [20] "Nondestructive Evaluation and Quality Control", *Metals Handbook*, (ASM International, Metals Park, OH,1989).
- [21] Wenk, S. A., R. C. McMaster, P. McIntire, *Choosing NDT: Applications, Costs, and Benefits of Nondestructive Testing in Your Quality Assurance Program*, Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, 1987.
- [22] Crane, R. L., T. E. Matikas, "Non-Destructive Testing", *The Mechanical Engineers' Handbook*, (John Wiley& Sons, New York, 1996).
- [23] ASM International. *Nondestructive Evaluation and Quality Control*. 1992. Τόμ. 17.
- [24] Ματίκας Θ. (2012). Σημειώσεις μαθήματος Εργαστήριο Ποιητικού Ελέγχου. Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα.
- [25] Ματίκας Θ., Παϊπέτης Α. (2013). Σημειώσεις μαθήματος Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι. Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα