

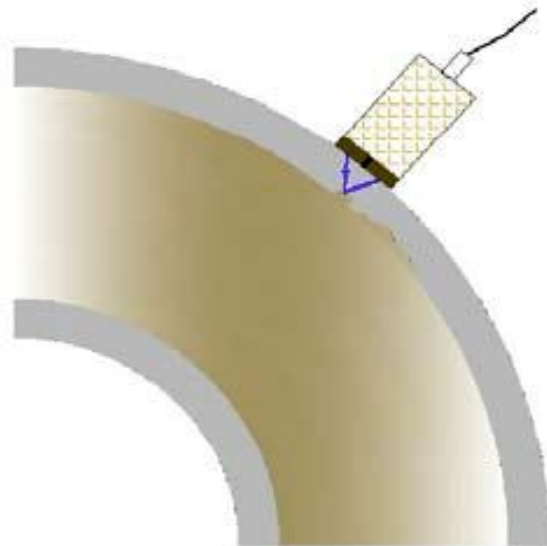
Τ.Ε.Ι ΠΑΤΡΑΣ

---

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ:ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΜΕ  
ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ  
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟΝ ΠΟΙΟΤΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:** Χρήστος Φαρμάκης  
Νίκος Σταματόπουλος

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:** Στέφανος Τσινόπουλος  
Επίκουρος Καθηγητής

**ΠΑΤΡΑ 2011**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στον έλεγχο και τη μέτρηση απόστασης με μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, σε συνδυασμό με την ανάλυση της συμπεριφοράς ενός κύματος σε πειραματικούς σωλήνες διαφόρων παχών, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.

Ασφαλώς το θέμα αυτό είναι τεράστιο και δεν καλύπτεται μέσα σε λίγες σελίδες, όμως πιστεύουμε ότι είναι ένα δείγμα της προσπάθειας μας, στο χρόνο εκπόνησης της πτυχιακής μας εργασίας το έτος 2010-2011. Βέβαια μεγάλο ρόλο συνέβαλαν και οι γνώσεις που αποκομίσαμε από το Α.Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΑΣ.

Κατά την διάρκεια και ως την αποπεράτωση της εργασίας μας μεγάλο ρόλο έπαιξε η βοήθεια που είχαμε από τον καθηγητή μας κ. Στέφανο Τσινόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολογίας που χωρίς προκατάληψη ήταν πρόθυμος στην μετάδοση της γνώσης.

Έτσι θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον ίδιο και όλους τους Καθηγητές που συνέβαλαν στην διεξαγωγή της εργασίας μας.

Μετά τιμής  
Χρήστος Φαρμάκης  
Νίκος Σταματόπουλος

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στον έλεγχο και τη μέτρηση απόστασης με μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, σε συνδυασμό με την ανάλυση της συμπεριφοράς ενός κύματος σε πειραματικούς σωλήνες διαφόρων παχών, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Σκοπός της πτυχιακής είναι η κατανόηση του ποιοτικού ελέγχου μέσα από το μη καταστροφικό έλεγχο καθώς και η αξιοποίησή του με τη μέθοδο των υπερήχων στη βιομηχανία. Επίσης η συμπεριφορά ενός υπέρηχου – κύματος - σε ένα δοκίμιο αναλύοντας τα χαρακτηριστικά του κύματος και εξάγοντας πολύτιμα συμπεράσματα.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε πέντε Κεφάλαια. Στο πρώτο Κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στον ποιοτικό έλεγχο, στον ορισμό της ποιότητας και τους όρους που τη διέπουν. Στη συνέχεια αναφερόμαστε στη διαχείριση ολικής ποιότητας και τη σχέση της με την παραγωγή, την βιομηχανία, την βελτίωση προϊόντων, την επιχειρηματικότητα, τις διαδικασίες και τις υπηρεσίες. Το πρώτο κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια σύντομη αναφορά στο παρελθόν και τη σημασία του ποιοτικού ελέγχου από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο δίνεται αρχικά ο ορισμός του Μη Καταστροφικού Ελέγχου. Ακολουθώντας γίνεται εκτενής αναφορά στον ορισμό του μη καταστροφικού ελέγχου καθώς και στις εφαρμογές του σε μεγάλο φάσμα εφαρμογών. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού αναπτύσσονται διεξοδικά οι κυριότερες μεθοδολογίες και τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια σύντομη αξιολόγηση των μεθόδων που ανεπτύχθησαν παραπάνω καθώς και με μια ιστορική επισκόπηση για τη χρησιμότητα των μη καταστροφικών ελέγχων στο παρελθόν.

Στο τρίτο Κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στα ηχητικά κύματα και ιδιαίτερα στους υπερήχους. Μελετάται η φύση των υπερήχων, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους καθώς και οι ιδιότητές τους. Στη συνέχεια αναφερόμαστε στον τρόπο παραγωγής δέσμης υπερήχων για χρήση σε μη καταστροφικό έλεγχο, οι ιδιαιτερότητες της δέσμης αυτής και το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τις εφαρμογές των υπερήχων γενικότερα στην καθημερινότητα του σύγχρονου ανθρώπου όσο και με τη χρήση τους στον ποιοτικό έλεγχο κατά τη παραγωγική διαδικασία.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο μελετώνται οι τεχνικές μέτρησης απόστασης. Αυτές χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: εξ' αποστάσεως και εξ' επαφής. Για την επίτευξη των στόχων της εργασίας μας παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον οι εξ' αποστάσεως τεχνικές μέτρησης απόστασης και ειδικότερα η μέτρηση της απόστασης χρησιμοποιώντας την μέθοδο των υπερήχων. Στο τέλος του κεφαλαίου περιλαμβάνονται παραδείγματα που παρουσιάζουν αναλυτικά πρακτικές εφαρμογές που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιομηχανία γενικότερα και ειδικότερα από την εταιρία SigmaHellas, από την οποία αποκτήσαμε γνώσεις και εμπειρία κατά τη διάρκεια της επισκέψεώς μας.

Αξιοποιώντας το θεωρητικό υπόβαθρο των παραπάνω κεφαλαίων κλείνουμε την παρούσα εργασία με το πέμπτο Κεφάλαιο που αποτελεί το πειραματικό μέρος της Πτυχιακής Εργασίας. Αρχικά περιγράφονται οι βασικές λειτουργίες του προγράμματος για υπολογιστή ANSYS και η χρησιμότητα του στη μελέτη περιπτώσεων. Ακολουθεί η πειραματική διαδικασία και τα διαγράμματα και το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την ανάλυση και τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Τα σπουδαιότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα Εργασία είναι : (α) όσον αφορά το θεωρητικό μέρος της πτυχιακής η χρησιμότητα των υπερήχων στις τεχνικές Μη Καταστροφικού Ελέγχου και (β) όσον αφορά το πειραματικό μέρος τα αποτελέσματα από τη συμπεριφορά ενός κύματος και τα χαρακτηριστικά που προκύπτουν μέσα από διαγράμματα.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### 1. ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

1.1 Γενικά.....	01
1.2 Εισαγωγή στη ποιότητα .....	02
1.3 Ολική Ποιότητα .....	04
1.3.1 Ποιότητα για κέρδος.....	04
1.3.2 Η επιτυχία της πρώτης φοράς .....	05
1.3.3 Αποδεκτά επίπεδα ποιότητας .....	06
1.3.4 Το κόστος της ποιότητας .....	06
1.4 Ιστορική Αναδρομή .....	07

### 2. ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

2.1 Γενικά .....	10
2.2 Μέθοδοι Μη - Καταστροφικού Ελέγχου .....	13
2.2.1 Οπτικές Μέθοδοι.....	13
2.2.1.1 Οπτικός Έλεγχος (Visual Inspection) .....	13
2.2.1.2 Οπτικός Έλεγχος με Μικροσκόπιο .....	13
2.2.1.3 Οπτικός Έλεγχος με Βιντεοσκόπηση (Video Inspection) .....	13
2.2.1.4 Ολογραφία (Holography).....	14
2.2.1.5 Συμβολομετρία (ESP Interferometry) .....	15
2.2.1.6 Δυναμικός Έλεγχος Επιφανείας (Dynamic Surface-Inspection).....	16
2.2.2 Ραδιογραφικές Μέθοδοι .....	17

2.2.2.1	Ακτίνες Χ (X-rays) και Ακτίνες Γάμα (Gamma rays) .....	17
2.2.2.2	Ψηφιακή Ραδιογραφία – Τομογραφία (Computed Tomography).....	21
2.2.2.3	Υποατομικά Σωματίδια (Neutron radiography).....	22
2.2.3	Μέθοδοι Υπερήχων .....	23
2.2.3.1	Τεχνικές Ανάκλασης.....	23
2.2.3.2	Χρόνος Περίθλασης .....	24
2.2.3.3	Συστοιχία Φάσης με Υπερήχους .....	25
2.2.3.4	Περιστρεφόμενο σύστημα για αγωγούς .....	25
2.2.4	Μέθοδος ακουστικών εκπομπών .....	25
2.2.4.1	Εντοπισμός μιας πηγής ΑΕ.....	27
2.2.4.2	Υπέρ και Κατά της Μεθόδου ΑΕ.....	27
2.2.5	Μέθοδος Θερμικών Εκπομπών (Thermal Emission) .....	27
2.2.6	Θερμογραφική Μέθοδος (Thermographic Methods) .....	27
2.2.7	Ηλεκτρικές μέθοδοι .....	28
2.2.7.1	Μέθοδος της Πτώσης Δυναμικού (Potential Drop) .....	28
2.2.7.2	Ρεύματα Eddy (Eddy-Current).....	29
2.2.7.3	Μακρινόπεδιο Ρευμάτων Eddy (Remote field testing - RFT) .....	30
2.2.8	Μαγνητικές μέθοδοι .....	30
2.2.8.1	Έλεγχος με Μαγνητικά Ρινίδια (Magnetic Particles).....	30
2.2.8.2	Μαγνητογραφία (Magnetography).....	31
2.2.8.3	Εντοπισμός Απωλειών Μαγνητικής Ροής .....	31
2.2.8.4	Έλεγχος Θορύβου Barkhausen.....	31
2.2.9	Μηχανικοί Έλεγχοι .....	32
2.2.10	Έλεγχοι Διαρροής (Leak Detection).....	32
2.3	Αξιολόγηση ΜΚΕ .....	32
2.4	Ιστορική αναδρομή .....	33

### **3. ΥΠΕΡΗΧΟΙ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

3.1	Γενικά.....	36
3.2	Τύποι Κυμάτων.....	38
3.2.1	Υπολογισμός Ταχύτητας Διάδοσης.....	39
3.2.2	Ένταση του ήχου .....	40
3.3	Ανάκλαση και Διάθλαση του Ήχου .....	41
3.3.1	Ανάκλαση και διάθλαση του ηχητικού κύματος. Νόμος του Snell .....	41
3.3.2	Εφαρμογές του Νόμου του Snell .....	41
3.3.3	Ακουστική αντίσταση (Acoustic Impedance).....	42

3.4 Κεφαλές και Συσκευές Υπέρηχων.....	42
3.4.1 Παραγωγή Υπέρηχων.....	42
3.4.2 Κεφαλές Υπέρηχων .....	43
3.4.3 Κεφαλές τύπου μωσαϊκού .....	43
3.4.4 Συσσκευή Υπερήχων .....	44
3.4.5 Υλικό Σύζευξης (Couplant).....	44
3.4.6 Μέθοδοι Σάρωσης (Απεικόνισης) .....	45
3.5 Χαρακτηριστικά της Δέσμης Υπερήχων.....	46
3.5.1 Γεωμετρία δέσμης υπερήχων .....	46
3.5.2 Αποδυνάμωση του ήχου (Attenuation) .....	47
3.5.3 Σημείο Εξόδου και Γωνία Δέσμης Γωνιακών Κεφαλών.....	47
3.5.4 Νεκρή Ζώνη.....	48
3.5.5 Χάραξη του σχεδίου απόκλισης της δέσμης.....	48
3.6 Ευαισθησία και Διακριτική Ικανότητα .....	48
3.6.1 Ευαισθησία και Συχνότητα.....	48
3.6.2 Διάρκεια Παλμού.....	49
3.6.3 Απόκριση Δέκτη.....	49
3.6.4 Σύνοψη σχέσης χαρακτηριστικών κεφαλής και καταλληλότητας.....	50
3.7 Μέθοδοι και Τεχνικές .....	50
3.7.1 Μέθοδοι Ελέγχου.....	50
3.7.2 Τεχνικές Ελέγχου.....	51
3.8 Εφαρμογές των Υπερήχων.....	51

#### **4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ & ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΘΕΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ**

4.1 Τεχνικές μέτρησης απόστασης .....	55
4.1.2 Τεχνική μέτρησης απόστασης βασιζόμενη στην επαφή.....	55
4.1.3 Τεχνικές στην εξ' αποστάσεως μέτρηση απόστασης .....	56
4.1.4 Τεχνικές χρόνου πτήσης, τριγωνομέτρησης & πεδίου .....	56
4.1.4.1 Τεχνική του Χρόνου πτήσης (time of flight).....	57
4.1.4.2 Τεχνική της Τριγωνομέτρησης (triangulation) .....	58
4.1.4.3 Τεχνική Βασιζόμενης σε πεδίο (field based) .....	60
4.1.5 Μορφές ενέργειας και αποτελεσματικότητα .....	61
4.1.5.1 Ήχος .....	61
4.1.5.2 Στάσιμα μαγνητικά πεδία .....	62
4.1.5.3 Ραδιοσυχνότητες.....	62

4.1.5.4 Συχνότητες στην περιοχή του ορατού .....	62
4.1.6 Σύμφωνη και Μη σύμφωνη Ανίχνευση .....	63
4.1.7 Συσκευές Μέτρηση Απόστασης .....	63
4.1.8 Όρια Απόδοσης των Συστημάτων Μέτρησης Απόστασης .....	64
4.1.8.1 Ακρίβεια Απόστασης.....	65
4.1.8.2 Μέγιστη Απόσταση Μέτρησης .....	65
4.1.8.3 Πλευρική Ανάλυση.....	65
4.1.8.4 Χρόνος Λήψης Μετρήσεων .....	65
4.2 Ο Ακουστικός ανιχνευτής θέσης .....	66
4.2.1 Τρόποι Λειτουργίας.....	66
4.2.2 Κλασσικές Μέθοδοι Εντοπισμού Πηγής Ακουστικής Εκπομπής.....	68
4.2.3 Μέθοδος Εξασθένησης.....	68
4.2.4 Μέθοδος Εντοπισμού Ζώνης.....	68
4.2.5 Μέθοδος Μέτρησης Πλάτους Σήματος .....	69
4.2.6 Μέθοδος Διαφορών Χρόνου Άφιξης .....	69
4.3 Παραδείγματα εφαρμογών.....	70
4.3.1 Έλεγχος στάθμης.....	70
4.3.2 Ποιοτικός Έλεγχος .....	70
4.3.3 Ανίχνευση με υπέρηχους 2 φύλλων.....	71
4.3.4 Ανίχνευση παρουσίας ανθρώπων .....	71
4.3.5 Προσδιορισμός θέσης.....	72
4.3.6 Ανίχνευση θραύσης καλωδίων .....	72
4.3.7 Ανίχνευση ομαλότητας υλικού.....	73
4.3.8 Ανίχνευση βρόγχων .....	73
4.3.9 Μετρήσεις ύψους και πλάτους .....	74
4.3.10 Ανίχνευση παρουσίας .....	74
4.3.11 Έλεγχος στάθμης υπό πίεση .....	75
4.3.12 Ανίχνευση Φράγματος μέσω υπερήχων .....	75
4.3.13 Ανακλαστήρας ήχου.....	76
4.3.14 Έλεγχος γεμίσματος .....	76
4.3.15 Έλεγχος των διαμέτρων.....	77
4.3.16 Συσσώρευση του ελέγχου ύψους .....	77
4.3.17 Εγκατάσταση για έναν εξωθητή.....	78
4.3.18 Επιτήρηση δίσκων προϊόντων .....	78



## **5.ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ANSYS**

5.1 Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS .....	79
5.1.1 Βήματα για την κατασκευή ενός μοντέλου ANSYS .....	81
5.2 Διάδοση Υπερήχων σε σωλήνες με χρήση του ANSYS .....	84
5.3 Συμπεράσματα .....	99

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>100</b>
--------------------------	------------

# 1. ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

## 1.1 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Αντικειμενικός σκοπός και στόχος της ζωής μας είναι η ποιότητα. Ετυμολογικά η λέξη ποιότητα προέρχεται από την αρχαία ελληνική λέξη ποιότης (ποιός τι λογής), που σημαίνει: η φύση, η εσωτερική κατάσταση ή η υπόσταση προσώπου ή πράγματος, σε σχέση με την αξία του. Η ποιότητα, όπως και η ομορφιά, είναι υποκειμενικοί όροι και εξαρτώνται κατά μεγάλο μέρος από τον κριτή. Στο πλαίσιο όμως της διασφάλισης της ποιότητας, η έννοια αυτή έχει ακριβή ορισμό. Κατά το Ευρωπαϊκό Πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 8402: ποιότητα είναι το σύνολο των χαρακτηριστικών μιας οντότητας (ενός προϊόντος ή υπηρεσίας), που της αποδίδουν την ικανότητα να ικανοποιεί εκφρασμένες και συνεπαγόμενες ανάγκες του χρήστη (π.χ. του καταναλωτή).

Με τον όρο προϊόν δεν εννοούμε μόνο κάτι υλικό. Προϊόν μπορεί να είναι ένα έργο, μια υπηρεσία ή και ένα δικαίωμα (διανόημα). Γι' αυτό η έννοια της ποιότητας δεν περιορίζεται μόνο στην τεχνολογία και την επιστήμη, αλλά μπορεί να τη συναντήσει κάποιος σε κάθε βήμα της ζωής μας, από τον προσωπικό βίο, μέχρι και την τελευταία έκφανση της ζωής. Στην καθημερινή μας ζωή αντιλαμβανόμαστε ευκολότερα την ποιότητα από την απουσία της, παρά από την ύπαρξή της. Με τη σημερινή αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας και ανάπτυξη της παραγωγής, τη διεθνοποίηση των αγορών και εμπορικών συναλλαγών, κατέστη αναγκαία η καθιέρωση κοινά αποδεκτών προτύπων όχι μόνο με την εναρμόνιση των υπαρχόντων, αλλά και με την ανάπτυξη νέων ενιαίων, στον ευρωπαϊκό και διεθνή χώρο, καθώς τόσο η διαχείριση όσο και η διασφάλιση της ποιότητας σε ενιαία μορφή, αποτελούν απαραίτητα εργαλεία για τη διαχείριση κοινά αποδεκτών προτύπων. Στις τεχνολογικά προηγμένες χώρες, έχει γίνει δεκτό ότι ποιότητα σημαίνει επιβίωση για κάθε επιχείρηση, είτε αυτή ανήκει στον κατασκευαστικό και παραγωγικό τομέα είτε αφορά στην παροχή υπηρεσιών. Όλοι γνωρίζουν σήμερα ότι η διάθεση χρημάτων για την ποιότητα συνιστά μια από τις πλέον επικερδείς επενδύσεις. Η άποψη ότι η ποιότητα στοιχίζει στην επιχείρηση έχει πλέον καταρριφθεί. Ουσιαστικά δεν είναι η ποιότητα που κοστίζει αλλά η έλλειψη της ποιότητας. Τα ελαττωματικά υλικά, προϊόντα και κατασκευές κοστίζουν περισσότερο από ότι τα καλά. Πίσω από τη λέξη ποιότητα κρύβεται ένας ολόκληρος μηχανισμός, μια φιλοσοφία και μια σειρά διαδικασιών.

## 1.2ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ

Η κατανόηση του όρου της ποιότητας δε βασίζεται στη γνώση κάποιου ή κάποιων από τους ορισμούς που κατά καιρούς έχουν δοθεί σ' αυτήν, αλλά στη σταδιακή και πλήρη διερεύνηση και αποσαφήνιση του τι κάνει τον πελάτη ευτυχισμένο. Η εστίαση της σημασίας της ποιότητας είναι και θα παραμείνει ο πελάτης. Θα πρέπει εδώ να σημειώσουμε ότι οι πρώτες προσπάθειες για παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας δεν προήλθαν από την ανάγκη ικανοποίησης απαιτητικών πελατών αλλά από την απαίτηση για υψηλή ασφάλεια και αξιοπιστία που χρειάζονται σε προϊόντα όπως διαστημικά σκάφη, στρατιωτικό υλικό και τα διάφορα συστήματα ασφαλείας.

Ποιότητα ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας μπορούμε να ονομάσουμε :

- Τα χαρακτηριστικά του προϊόντος ή της υπηρεσίας που ικανοποιούν πλήρως ή και ξεπερνούν τις προσδοκίες του πελάτη.
- Τα χαρακτηριστικά του προϊόντος ή της υπηρεσίας που ικανοποιούν δεδομένες προδιαγραφές.
- Το σύνολο των ιδιοτήτων και στοιχείων του μάρκετινγκ, της κατασκευής, της παραγωγής και της συντήρησης, μέσω των οποίων ένα προϊόν ή υπηρεσία συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του πελάτη.
- Ο βαθμός στον οποίο ένα συγκεκριμένο προϊόν συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές του σχεδίου του.

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικοί κύριοι όροι που σχετίζονται με την ποιότητα:

- **Οντότητα:** Αυτό που μπορεί να περιγραφεί και να θεωρηθεί εξατομικευμένα. Μία οντότητα μπορεί να είναι π.χ. μία δραστηριότητα ή μία διεργασία, ένα προϊόν, ένας οργανισμός, ένα σύστημα ή ένα πρόσωπο ή οποιοσδήποτε συνδυασμός των παραπάνω.
- **Διεργασία:** Σύνολο αλληλοσχετιζόμενων μέσων και δραστηριοτήτων, που μετασχηματίζουν εισερχόμενα στοιχεία σε εξερχόμενα στοιχεία.
- **Διαδικασία:** Προδιαγεγραμμένος τρόπος για την επιτέλεση μιας δραστηριότητας. Σε πολλές περιπτώσεις οι διαδικασίες τεκμηριώνονται (π.χ. διαδικασίες του συστήματος για την ποιότητα όπως αναφέρονται στο ISO 9001). Όταν μια διαδικασία τεκμηριώνεται, χρησιμοποιείται συχνά ο όρος «γραπτή διαδικασία» ή «τεκμηριωμένη διαδικασία». Μια γραπτή ή τεκμηριωμένη διαδικασία περιλαμβάνει συνήθως το σκοπό και το πεδίο εφαρμογής μιας δραστηριότητας, τι πρέπει να γίνει και από ποιόν, πότε, πού και πώς πρέπει να γίνει αυτό, ποια υλικά, εξοπλισμός και έγγραφα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και το πώς αυτή πρέπει να ελέγχεται και να καταγράφεται.
- **Προϊόν:** Αποτέλεσμα δραστηριοτήτων ή διεργασιών. Ο όρος προϊόν μπορεί να περιλαμβάνει υπηρεσίες, υλικό από διεργασίες συνεχούς χαρακτήρα, λογισμικό ή συνδυασμό αυτών. Ένα προϊόν μπορεί να είναι υλικό (π.χ. συναρμολογήματα ή υλικά από διεργασίες συνεχούς χαρακτήρα) ή άυλο (π.χ. γνώσεις ή διανοήματα) ή συνδυασμός αυτών. Ένα προϊόν μπορεί να παρέχεται εκούσια (π.χ. να προσφέρεται στους πελάτες ή να προκύπτει ακούσια (π.χ. ένας ρύπος ή ανεπιθύμητες επιπτώσεις).
- **Υπηρεσία:** Αποτέλεσμα που προκύπτει από δραστηριότητες στο σημείο επαφής του προμηθευτή και του πελάτη και από δραστηριότητες του προμηθευτή, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανάγκες του πελάτη.

- **Οργανισμός:** Εταιρεία, νομικό πρόσωπο, οίκος, επιχείρηση ή ίδρυμα ή μέρος αυτών, περιορισμένης ευθύνης άλλου νομικού καθεστώτος, δημοσίου ή ιδιωτικού δικαίου, που έχει την δική του λειτουργική και διοικητική δομή.
- **Πελάτης:** Παραλήπτης ενός προϊόντος που παρέχεται από ένα προμηθευτή. Ο πελάτης μπορεί να είναι π.χ. ο τελικός καταναλωτής, ο χρήστης, ο δικαιούχος ή ο αγοραστής. Ο πελάτης σε σχέση με τον οργανισμό, μπορεί να είναι είτε εξωτερικός είτε εσωτερικός.
- **Σχετική ποιότητα:** όπου οι οντότητες κατατάσσονται ανάλογα με το βαθμό υπεροχής ή με κάποιο συγκριτικό τρόπο.
- **Στάθμη ποιότητας:** Υπό την έννοια της ποσότητας (όπως χρησιμοποιείται στο δειγματοληπτικό έλεγχο) και το μέτρο της ποιότητας, όταν διενεργούνται ακριβείς τεχνικές αξιολογήσεις.
- **Κλάση:** Κατηγορία ή βαθμός αποδιδόμενος σε οντότητες, που έχουν την ίδια λειτουργία χρήσεως αλλά υπόκεινται σε διαφορετικές απαιτήσεις για την ποιότητα.
- **Απαιτήσεις για την ποιότητα:** Έκφραση των αναγκών ή της μετάφρασης τους υπό τη μορφή ενός συνόλου απαιτήσεων δηλωμένων με ποιοτικούς ή ποσοτικούς όρους μιας οντότητας ώστε να είναι δυνατή η πραγματοποίηση και εξέταση της.
- **Έλεγχος:** Δραστηριότητες όπως η μέτρηση, ή εξέταση ή δοκιμή ή σύγκριση με ελεγκτήρες (καλίμπρες) ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών μιας οντότητας και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με προδιαγραμμένες απαιτήσεις, προκειμένου να καθοριστεί εάν επιτυγχάνεται συμμόρφωση για κάθε ένα από τα χαρακτηριστικά αυτά.
- **Πολιτική ποιότητας:** Το σύνολο των στόχων και κατευθύνσεων ενός οργανισμού σε σχέση με την ποιότητα όπως αυτά εκφράζονται επίσημα από το ανώτατο επίπεδο διοίκησης.
- **Διαχείριση ποιότητας:** Το σύνολο των δραστηριοτήτων της γενικότερης λειτουργίας της διοίκησης, οι οποίες προσδιορίζουν την πολιτική για την ποιότητα, τους στόχους και τις ευθύνες και μέσα στα πλαίσια του συστήματος ποιότητας, τα θέτουν σε εφαρμογή με μέσα όπως ο σχεδιασμός ποιότητας, ο έλεγχος της ποιότητας, η διασφάλιση της ποιότητας και η βελτίωση της ποιότητας.
- **Σχεδιασμός ποιότητας:** Δραστηριότητες οι οποίες καθορίζουν τους στόχους και τις απαιτήσεις για την ποιότητα, καθώς και τις απαιτήσεις για την εφαρμογή στοιχείων του συστήματος για την ποιότητα. Ο σχεδιασμός της ποιότητας καλύπτει τον σχεδιασμό του προϊόντος (αναγνώριση ταυτότητας, ταξινόμηση και στάθμιση των σχετικών με την ποιότητα, χαρακτηριστικών καθώς και καθορισμός των στόχων, των απαιτήσεων για την ποιότητα και των περιορισμών), τον σχεδιασμό της διαχείρισης και της λειτουργίας (προετοιμασία της εφαρμογής του συστήματος για την ποιότητα συμπεριλαμβανομένων των ενεργειών οργάνωσης και χρονικού προγραμματισμού), την εκπόνηση προγραμμάτων για την ποιότητα και την μέριμνα για βελτίωση της ποιότητας.
- **Έλεγχος ποιότητας:** Τεχνικές και δραστηριότητες λειτουργικού χαρακτήρα, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για την ποιότητα.
- **Διασφάλιση ποιότητας:** Όλες οι σχεδιασμένες και συστηματικές δραστηριότητες, που εκφράζονται μέσα στο πλαίσιο του συστήματος για την ποιότητα, και αποδεικνύονται, στο βαθμό που απαιτείται, προκειμένου

να παρέχεται επαρκής εμπιστοσύνη ότι μία οντότητα θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις για την ποιότητα. Η διασφάλιση της ποιότητας αποσκοπεί τόσο σε εσωτερικούς όσο και εξωτερικούς στόχους. Η εσωτερική διασφάλιση της ποιότητας μέσα στα πλαίσια ενός οργανισμού παρέχει εμπιστοσύνη στην διοίκηση. Η εξωτερική διασφάλιση της ποιότητας σε συμβασιακές ή άλλες καταστάσεις παρέχει εμπιστοσύνη στους πελάτες ή σε τρίτους. Μερικές ενέργειες ελέγχου της ποιότητας και διασφάλιση της ποιότητας είναι αλληλένδετες.

- **Βελτίωση ποιότητας:** Οι ενέργειες που αναλαμβάνονται μέσα σ' όλο τον οργανισμό για να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα και απόδοση των δραστηριοτήτων και διεργασιών προκειμένου να επιτευχθούν πρόσθετα οφέλη τόσο για τον οργανισμό όσο και για τους πελάτες.
- **Σύστημα ποιότητας:** Η οργανωτική δομή, οι διαδικασίες, οι διεργασίες και τα μέσα που απαιτούνται για την υλοποίηση της διαχείρισης της ποιότητας. Το σύστημα για την ποιότητα πρέπει να είναι όσο ευρύ χρειάζεται, προκειμένου να επιτυγχάνει τους σχετικούς με την ποιότητα στόχους.
- **Ολική διαχείριση ποιότητας:** Τρόπος διοίκησης ενός οργανισμού, εστιαζόμενος στην ποιότητα, ο οποίος βασίζεται στην συμμετοχή όλων των μελών του και στοχεύει στην μακροπρόθεσμη επιτυχία μέσω της ικανοποίησης του πελάτη και στην παροχή οφελών σε όλα τα μέλη του οργανισμού και στην κοινωνία.

Από την προσεκτική μελέτη των παραπάνω όρων διαπιστώνεται ότι οι παραπάνω ορισμοί στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 8402 περιέχουν μια σαφή ερμηνεία της ποιότητας και των σχετιζόμενων όρων που αποτελούν την βάση για την ετοιμασία και χρήση των προτύπων που απαιτούνται για συμβατικές ή νομικές δεσμεύσεις.

## 1.3 ΟΛΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ

### 1.3.1 Ποιότητα για κέρδος

Μπορεί να υπάρξει μεγάλο κέρδος από βελτιώσεις στην ποιότητα των προϊόντων και των υπηρεσιών, των επιχειρηματικών διαδικασιών και του προσωπικού. Παραδείγματος χάριν, εσωτερικοί αναλυτές της IBM υπολόγισαν ότι το κόστος της μη ανταπόκρισης ή της αδυναμίας να ικανοποιηθούν οι ποιοτικές προδιαγραφές των προϊόντων και των υπηρεσιών της ανήλθε το 1986 σε 5.6 δις δολάρια. Στο νούμερο αυτό μπορεί να προστεθεί το κόστος που προκύπτει από κακές επιχειρηματικές διαδικασίες. Η εξοικονόμηση του κόστους του ανθρώπινου δυναμικού αποτελεί ακόμη ένα τομέα που μπορεί να συμβάλλει στα περιθώρια κέρδους. Το χρηματικό ποσό που δαπανάται στη διαδικασία ανεύρεσης και πρόσληψης μηχανικών λογισμικού στις εταιρίες υψηλής τεχνολογίας είναι υπέρογκο. Το περιθώριο εξοικονόμησης στην περίπτωση αυτή είναι εντυπωσιακό. Το συμπέρασμα ότι η ποιοτική βελτίωση προϊόντων και υπηρεσιών, επιχειρηματικών διαδικασιών και εργατικού προσωπικού είναι επικερδής, είναι αναμφισβήτητο. Κατά τα λεγόμενα, η ποιότητα ή η έλλειψή της είναι ο μοναδικός και σημαντικότερος

παράγοντας για την επιτυχία οποιασδήποτε εταιρίας στην αγορά και επομένως πρέπει να αποτελεί ζήτημα υψίστης σημασίας για τη διοίκηση. Οι περισσότερες μεγάλες εταιρίες έχουν ξεκινήσει ολοκληρωμένα προγράμματα ποιότητας. Μερικά από αυτά είναι τα εξής:

- Πρωτιά μέσω της ποιότητας (Xerox)
- Η ποιότητα με τον τρόπο της ICL (ICL)
- Πρόγραμμα ποιοτικών υπηρεσιών (NatWest)
- Πολιτισμός ολικής ποιότητας (Texas Instruments)
- Υπεροχή ολικής ποιότητας (Ford)
- Επίκεντρο η ποιότητα της επιχειρηματικής διαδικασίας (IBM)
- Στρατηγική ενίσχυσης της ποιότητας (National Semiconductors)

Στις εταιρίες αυτές και σε χιλιάδες άλλες επιτυγχάνεται επιπλέον κέρδος από τη βελτίωση της ποιότητας. Από το να στηρίζεται κανείς αποκλειστικά στην αύξηση των πωλήσεων για την επίτευξη του κέρδους, το οποίο βέβαια αυξάνει το λειτουργικό κόστος, η βελτίωση της ποιότητας είναι μια γρήγορη οδός προς τη βελτίωση των κερδών. Για να επιτευχθεί αύξηση του κέρδους μέσω της αύξησης των πωλήσεων θα πρέπει να υπάρξει σημαντική αύξηση στα λειτουργικά κόστη (προσωπικό πωλήσεων, προώθηση, διαφήμιση, απογραφές, κλπ). Η ίδια η βελτίωση της ποιότητας αυξάνει επίσης τις πωλήσεις καθώς επιφέρει αύξηση της ζήτησης, γεγονός που έχει τη δική του δυναμική στην αγορά. Όσο περισσότερο βελτιώνεται η ποιότητα, τόσο γρηγορότερα αυξάνονται οι πωλήσεις, επειδή η ικανοποίηση του πελάτη αυξάνεται με τους δικούς της ρυθμούς. Καθώς αυξάνεται η «ποιοτική φήμη», το μάρκετινγκ μπορεί να επικεντρωθεί στην αύξηση της ικανοποίησης του πελάτη ως βασικού στοιχείου στη διαφήμιση και την προώθηση. Τα μακροπρόθεσμα είναι η μείωση της διαφημιστικής δαπάνης για την διατήρηση της ανταγωνιστικής θέσης.

### 1.3.2 Η επιτυχία της πρώτης φοράς

Στην καρδιά της Διοίκησης Ολικής Ποιότητας (ΔΟΠ) βρίσκεται η πεποίθηση ότι είναι δυνατό να επιτευχθεί εργασία χωρίς λάθη τις περισσότερες φορές. Η άποψη αυτή δηλώνεται πολλές φορές ως επιτυχία της πρώτης φοράς, έξυπνη εργασία ή μηδενικά ελαττώματα. Η ιδέα είναι το κυνήγι της τελειότητας στη δουλειά, όπως ένας τοξότης στοχεύει στο κέντρο του στόχου. Η επιτυχία της πρώτης φοράς ή τα μηδενικά ελαττώματα είναι αποτέλεσμα της έμφασης στην πρόληψη, την επιμελή χρήση ελέγχων μέτρησης και διαδικασιών και την εξάλειψη της σπατάλης και των λαθών με βάση τα δεδομένα. Χρησιμεύει ως στόχος για τη διαρκή βελτίωση. Η πρόληψη είναι ο σκοπός κάθε εξασφάλισης ποιότητας. Μέσω προσεκτικά σχεδιασμένης και συστηματικής δράσης, όπως η τεκμηρίωση των διαδικασιών της εργασίας ή του κόστους των ελέγχων ποιότητας, η εξασφάλιση της ποιότητας προλαμβάνει τα προβλήματα ποιότητας. Η ιδέα της πρόληψης είναι δύσκολο να βρει πρακτική υποστήριξη. Εν τούτοις είναι κομβική για ένα πρόγραμμα Διοίκησης Ολικής Ποιότητας. Γιατί θα πρέπει κανείς να σπαταλήσει χρόνο για να λύσει περίπλοκα προβλήματα ποιότητας, όταν θα μπορούσε να το αποφύγει; Εν τούτοις, παρόλο που οι περισσότεροι άνθρωποι ασπάζονται την πρόληψη ως επιθυμητή, για τους περισσότερους παραμένει φαντασίωση, μη πρακτική ή απλώς ανέφικτη. Το ότι τα λάθη είναι ανθρώπινα γίνεται μια οικουμενική "ρήτρα απαλλαγής" από την κακή απόδοση. Η επιτυχία της πρώτης φοράς ή τα μηδενικά ελαττώματα είναι απλώς πρότυπα απόδοσης που αντιπαρατίθενται στις συμβατικές πρακτικές εργασίας, που φαίνεται ότι έχουν ενσωματώσει την αποτυχία ως αναμενόμενη. Για πολλούς

διευθυντές και υπαλλήλους, επομένως η φροντίδα της ΔΟΠ για την πρόληψη συνεπάγεται στροφή 360 μοιρών από την κανονική τους αντιμετώπιση σχετικά με τη δουλειά και την απόδοσή της. Συνεπάγεται τη ρήξη από το διπλό πρότυπο που συνήθως είχαν: ένα πρότυπο για την προσωπική τους ζωή, όπου περιμένουν ποιοτική εξυπηρέτηση και καλά προϊόντα και ένα για τη δουλειά τους όπου περιμένουν δίχτυα ασφαλείας για να καλυφθούν τα λάθη και η ελλιπής εργασία τους.

### **1.3.3 Αποδεκτά επίπεδα ποιότητας**

Τα αποδεκτά επίπεδα ποιότητας που έχουν προκύψει στη βιομηχανία μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου πολέμου αντανακλούν μια νοοτροπία διαμετρικά αντίθετη με την ολική ποιότητα. Αντί να πετυχαίνει την πρώτη φορά ή να εστιάζει σε μηδενικά ελαττώματα, η εταιρία ενθαρρύνει τα ελαττώματα θέτοντας αποδεκτά επίπεδα ποιότητας. Στην πραγματικότητα καθώς βελτιώνεται η ποιότητα, τα ελαττώματα και το κόστος μειώνονται. Αν κάποιος θέσει ένα αποδεκτό επίπεδο ποιότητας στο 99% τα αποτελέσματα είναι: τουλάχιστον 200.000 λανθασμένες συνταγές φαρμάκων το χρόνο, πάνω από 30.000 νεογέννητα που πέφτουν κατά λάθος από τα χέρια γιατρών και νοσοκόμων κάθε χρόνο, διακοπή ηλεκτρικού, νερού και θέρμανσης για 15 λεπτά κάθε μέρα, περίπου 15 λεπτά χωρίς τηλέφωνο ή τηλεόραση κάθε μέρα, εφημερίδες που δεν παραδίδονται τέσσερις φορές το χρόνο, τουλάχιστον ένα τυπογραφικό λάθος σε κάθε σελίδα ενός βιβλίου. Ο ιατρικός κόσμος γνωρίζει τη σημασία της πρόληψης εδώ και δεκαετίες και εν τούτοις χρειάζεται να υπενθυμίζει τόσο στον εαυτό της όσο και στους άλλους μέτρα γενόμενα από προτίμηση. Ας χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα τη φυματίωση. Το 1995 τρία εκατομμύρια άνθρωποι- αριθμός ρεκόρ - πέθαναν σε όλο τον κόσμο από φυματίωση, μια ασθένεια που οι περισσότεροι Δυτικοί θεωρούν ότι η ιατρική έχει νικήσει. Εν τούτοις αν οι κυβερνήσεις και η φαρμακευτική βιομηχανία δεν αυξήσουν τις δαπάνες τους για την πρόληψη και την έρευνα, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας προειδοποιεί ότι η φυματίωση θα στοιχίσει τη ζωή περισσότερων από 30 εκατομμυρίων ανθρώπων την επόμενη δεκαετία. Στον επιχειρηματικό κόσμο η πρόληψη είναι μια ιδέα που συχνά είναι δύσκολο να γίνει αποδεκτή παρά τον κεντρικό της ρόλο στη διοίκηση ολικής ποιότητας. Πολύ συχνά δεν υπάρχει μεγάλη φήμη για τη σχεδίαση συστημάτων πρόληψης ή ακριβών μηχανισμών ασφαλείας που δεν έχουν άμεσο αντίκτυπο στα κέρδη.

### **1.3.4 Το κόστος της ποιότητας**

Το κόστος της ποιότητας είναι ένας σύντομος τρόπος υπολογισμού όλου του κόστους που έχει να κάνει με την επίτευξη ενός ποιοτικού προϊόντος ή μιας ποιοτικής υπηρεσίας. Σε αυτό περιλαμβάνονται το κόστος πρόληψης, το κόστος εκτίμησης, το κόστος εσωτερικής αποτυχίας, το κόστος υπερβολής των απαιτήσεων του πελάτη και τέλος το κόστος των χαμένων ευκαιριών. Όλα μαζί τα κόστη αυτά μπορούν να αποσπαστούν από μια εταιρία το 20-30% των εσόδων ή του κύκλου εργασιών της. Κομβικά στοιχεία σπατάλης σε μια εταιρία περιλαμβάνουν τα υλικά, το κεφάλαιο και το χρόνο, εκ των οποίων ο χρόνος είναι μάλλον το στοιχείο με το μεγαλύτερο κόστος. Το ζήτημα που προκύπτει εδώ έχει να κάνει με την ορολογία και αφορά το αν το κόστος αυτό θα πρέπει να ονομάζεται "κόστος χαμηλής ποιότητας" ή κόστος μη συμμόρφωσης. Λογικά το κόστος ποιότητας περιλαμβάνει την "πρόληψη" που δεν

είναι κόστος χαμηλής ποιότητας. Αντίθετα το κόστος πρόληψης προκύπτει στην επιτυχία της πρώτης φοράς και στη δημιουργία ενός προγράμματος ολικής ποιότητας. Το πιο σημαντικό είναι ότι στη βιβλιογραφία σχετικά με την ποιότητα τα τελευταία 50 χρόνια, ο όρος κόστος ποιότητας χρησιμοποιείται με το πολύ συγκεκριμένο περιεχόμενο που αναφέρθηκε, ως το συνολικό κόστος για την επίτευξη της ποιότητας, συνυπολογίζοντας την πρόληψη, την εκτίμηση την εσωτερική και εξωτερική αποτυχία, την υπερβολή των απαιτήσεων και τις χαμένες ευκαιρίες.

#### **1.4 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**

Πριν τη βιομηχανική επανάσταση, η Βιομηχανική παραγωγή στηριζόταν αποκλειστικά σε ανεξάρτητες ομάδες τεχνιτών που ήταν υπεύθυνοι τόσο για την παραγωγή όσο και για μια πρωτόγονη μορφή ποιοτικού ελέγχου. Με την είσοδο του 20ου αιώνα άρχισε να εμφανίζεται μια ομαδοποίηση των τεχνιτών ή εργατών που είχαν παρόμοια καθήκοντα και η επίβλεψη των ομάδων ανατέθηκε σε εργοδηγούς οι οποίοι ήταν υπεύθυνοι για την ποιότητα των προϊόντων.

Η έναρξη της Βιομηχανικής Επανάστασης έχει σαν επακόλουθο τη δημιουργία μεγάλων βιομηχανικών συγκροτημάτων, με μεγάλο αριθμό ομάδων παραγωγής, για τον έλεγχο των οποίων ήταν υπεύθυνοι οι λεγόμενοι επιθεωρητές παραγωγής που είχαν υποχρέωση να αναφέρονται στους αντίστοιχους εργοδηγούς. Η τεχνολογική πρόοδος και η ανάπτυξη νέων υλικών και μεθόδων παραγωγής έκανε δύσκολο αν όχι αδύνατο τον έλεγχο από τους παραδοσιακούς εργοδηγούς και έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη σύστασης ενός νέου σώματος ελέγχου: τους πλήρως απασχολούμενους Εργοδηγούς Επιθεώρησης. Η πρωταρχική μορφή λοιπόν ελέγχου της ποιότητας, η Επιθεώρηση δεν ήταν τίποτε περισσότερο από την απλή σύγκριση των παραγόμενων προϊόντων ή υπηρεσιών με τις δεδομένες πρωτογενείς μορφές προδιαγραφών.

Στη συνέχεια η ανάπτυξη της στατιστικής επιστήμης ήρθε να δώσει ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στο υπάρχον σύστημα ποιοτικού ελέγχου. Ο Έλεγχος Ποιότητας, όπως εμφανίστηκε και εφαρμόστηκε ή εφαρμόζεται ακόμη και σήμερα σε ορισμένες βιομηχανίες, είναι το σύνολο των λειτουργικών τεχνικών διαδικασιών, που επιβεβαιώνουν την ποιότητα ενός προϊόντος ή υπηρεσίας βάσει συγκεκριμένων προδιαγραφών. Η αδυναμία του ποιοτικού ελέγχου που έγκειται στο γεγονός ότι εντοπίζει ελαττώματα κατασκευής ή σχεδιασμού μετά την κατασκευή του προϊόντος, οδήγησε σε πρώτη φάση τους μεγάλους οργανισμούς στην υιοθέτηση και εγκαθίδρυση συστημάτων Διασφάλισης της Ποιότητας. Διασφάλιση Ποιότητας λοιπόν, είναι το σύνολο των προγραμματισθέντων ή συστηματικών ενεργειών και διαδικασιών, που είναι απαραίτητες για να εξασφαλίσουν ότι ένα προϊόν ή υπηρεσία θα πληροί ορισμένες προδιαγραφές. Τα στοιχεία που εκλείπουν από τα παραπάνω συστήματα αποτελούν το βασικό κορμό του Συστήματος Διοίκησης Ολικής Ποιότητας. Η έννοια της ολικής ποιότητας προϋποθέτει τη συμμετοχή όλου του προσωπικού του οργανισμού, σε μια αλυσίδα διαδικασιών και ανθρώπων που απαρτίζεται από εσωτερικούς και εξωτερικούς πελάτες και προμηθευτές, με μόνο στόχο τη διατήρηση και βελτίωση του επιπέδου ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων ή υπηρεσιών. Διοίκηση Ολικής Ποιότητας λοιπόν, είναι το σύνολο των δραστηριοτήτων και μεθόδων που εφαρμόζονται από τον οργανισμό, με στόχο την



ικανοποίηση του πελάτη και την ταυτόχρονη ενεργοποίηση όλου του δυναμικού (έμφυχου και άφυχου) του οργανισμού με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Η τυποποίηση, η πιστοποίηση, ο έλεγχος ποιότητας των προϊόντων και η προστασία του καταναλωτή δεν αποτελούν σύγχρονη ανακάλυψη του τεχνικού μας πολιτισμού, όσο και αν φαίνεται τούτο περίεργο. Οι εργασίες πολλών ερευνητών και αρχαιολόγων, στον τομέα αυτό δείχνουν ότι οι ρίζες των εννοιών αυτών φθάνουν στην πολύ μακρινή αρχαιότητα και αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα κοινωνιών με υψηλό πολιτιστικό επίπεδο. Η έρευνα γύρω από την αρχαία αλλά και τη σύγχρονη τεχνολογία οδηγεί στο ενδιαφέρον συμπέρασμα ότι στις οργανωμένες κοινωνίες κάθε εποχής από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, όταν υπάρχει υψηλή πολιτισμική στάθμη, αυτή συνοδεύεται πάντα από μια αναπτυγμένη τεχνολογία. Και το πιο σημαντικό, η τελευταία λειτουργεί στη βάση ενός μηχανισμού, που διασφαλίζει τον έλεγχο της ποιότητας και την προστασία του καταναλωτή. Χωρίς αναπτυγμένη τεχνολογία δεν κτίζονται Παρθενώνες και δε νοείται ανάπτυξη χωρίς εφαρμογή κανονισμών, που να διασφαλίζουν την υψηλή ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται, των καταναλωτικών αγαθών που παράγονται και των υπηρεσιών που παρέχονται. Οι πρόγονοί μας μεγαλούργησαν όχι μόνο στους τομείς της φιλολογίας, της τέχνης, της φιλοσοφίας και του πολιτισμού γενικά, αλλά και στον τομέα της τεχνολογίας και ιδιαίτερα σε εκείνον της τυποποίησης, του ελέγχου και της πιστοποίησης της ποιότητας. Ο αρχαίος ελληνικός πολιτισμός όρισε το θεσμικό πλαίσιο για την ποιότητα, βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη και εξέλιξη των ανθρωπίνων κοινωνιών. Για κάθε εμπορεύσιμο αγαθό, όπως και για τα τεχνολογικά προϊόντα των αρχαίων Ελλήνων, την παραγωγή ακολουθούσε ο ποιοτικός έλεγχος. Αξίζει να αναφερθεί ότι αυτά ίσχυαν ακόμα και στους προϊστορικούς χρόνους και όχι μόνο στον ελλαδικό χώρο, αλλά και σε άλλες χώρες όπως π.χ. στη Βαβυλώνα και στην αρχαία Αίγυπτο. Για παράδειγμα, στην αρχαία Βαβυλώνα (την πρωτεύουσα της Μεσοποταμίας), ανάμεσα στους νόμους του ξακουστού βασιλιά της, του Χαμουραμπί (1792-1750 π.Χ.), υπάρχει και ένας πολύ σημαντικός, που μπορεί να θεωρηθεί ως ο αρχαιότερος κανονισμός στον κόσμο, σχετικός με την οικοδομή, ο οποίος λέει, σε κάποιο σημείο: "... Εάν ένας εργολάβος κτίσει μια κατοικία για κάποιον, αλλά δεν πραγματοποιήσει την εργασία του σύμφωνα με τους κανονισμούς (ή τα ισχύοντα πρότυπα) σε τρόπο που ένας τοίχος παρουσιάσει κάποια κλίση, τότε ο εργολάβος αυτός οφείλει να τον ενισχύσει με δικά του έξοδα...". Ο νόμος αυτός είναι χαραγμένος σε μια πέτρινη στήλη από βασάλτη, ανακαλύφθηκε το 1901 στα Σούσα της Περσίας, και εκτίθεται σήμερα στο Μουσείο του Λούβρου, στο Παρίσι. Στην κλασική πάλι Ελλάδα, όπως προκύπτει από πληθώρα σωζόμενων επιγραφών, λειτουργούσε ένας μηχανισμός ελέγχου της ποιότητας και της πιστοποίησης όλων των τότε παραγόμενων και προσφερόμενων προϊόντων στον τόπο παραγωγής, αλλά και στην αγορά. Τα εφαρμοζόμενα τότε πρότυπα περιείχαν πολύ αυστηρές προδιαγραφές και οι επιβαλλόμενες ποινές σε όποιον τολμούσε να μην τις σεβαστεί ήταν πολύ σκληρές.

Ενδιαφέρον αποτελεί το γεγονός ότι τα χρησιμοποιούμενα υπό των Αρχαίων Ελλήνων πρότυπα, κάλυπταν όλο το φάσμα των τότε παραγόμενων προϊόντων, από τα μέταλλα και τα κράματά τους μέχρι και τα γεωργικά προϊόντα, τρόφιμα και ποτά, όπως ο άκρατος οίνος, το ελαιόλαδο, το σιτάρι, το κριθάρι κ.ά. Αξίζει να σημειώσουμε ότι ο Αριστοτέλης στο έργο του η "Αθηναίων Πολιτεία" αναφέρει ότι η Πολιτεία όριζε με κλήρο δέκα αγορανόμους, που έπρεπε να επιβλέπουν τα διακινούμενα στην αγορά αγαθά ώστε να είναι "καθαρά και ακίβδηλα", δηλαδή να τηρούν τους όρους της υγιεινής και να είναι ανόθευτα. Στις περιπτώσεις νοθείας επέβαλλαν αυστηρά

πρόστιμα τόσο στον παραγωγό όσο και στον έμπορο. Έτσι, και το δημόσιο αλλά και ο καταναλωτής προστατεύονταν από κάθε πιθανή νοθεία.

Παράδειγμα εφαρμογής του ποιοτικού ελέγχου στα τρόφιμα, αποτελούν οι σωζόμενες τρεις επιγραφές της Θάσου του 4ου π.Χ. αιώνα (420-400), χαραγμένες σε μαρμάρινες πλάκες, οι οποίες αποτελούσαν νόμους - οδηγίες και πρότυπα τα οποία καθόριζαν το εμπόριο και τη διακίνηση του οίνου και έκαναν λόγο για την ύπαρξη του ελέγχου και της πιστοποίησης της ποιότητάς του. Σε μια απ' αυτές αναφέρεται, μεταξύ άλλων: για όποιον αγοράζει κρασί (εννοεί τον άκρατο, δηλαδή τον ανόθευτον οίνο) σε πιθάρια, η αγορά θα είναι έγκυρη μόνον εάν τα πιθάρια έχουν σημανθεί, δηλαδή μόνον εάν φέρουν κατάλληλο σήμα (πιθανόν σφραγίδα) που να δηλώνει την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά του περιεχομένου σ' αυτά κρασιού.

Στην αρχαία Ελλάδα, οι μετρονόμοι ευθύνονταν για όλα τα μέτρα και τα σταθμά που χρησιμοποιούσαν στην αγορά και όφειλαν να μεριμνούν ώστε να ανταποκρίνονται στα πρότυπα μέτρα και σταθμά, που φυλάσσονταν στην Θόλο, ένα όμορφο κτίριο της Αρχαίας Αγοράς. Ο Αριστοτέλης επίσης αναφέρει ότι οι σιτοφύλακες, δεκαπέντε στον Πειραιά και είκοσι στην Αθήνα, διορισμένοι πάντα από την πολιτεία με κλήρο, έπρεπε να ελέγχουν το σιτάρι και το κριθάρι πριν σταλούν για άλεσμα. Όφειλαν επίσης να ελέγχουν τους αρτοπώλες ώστε ο πωλούμενος άρτος να έχει το προβλεπόμενο από το νόμο βάρος. Με άλλα λόγια, θεωρούσαν ως νοθεία τον ελλιποβαρή άρτο. Άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο έλεγχος της ποιότητας των αττικών αργυρών νομισμάτων από τους "δοκιμαστές" (αρχαία λέξη), οι οποίοι σε περίπτωση διαπίστωσης νοθείας προέβαιναν στην κατάσχεση, τη χάραξη και τελικά την αφιέρωσή τους στο ναό της μητέρας των θεών, της Κυβέλης.

Χαρακτηριστική επίσης περίπτωση τυποποίησης στην αρχαιότητα αποτελεί η επιγραφή της Ελευσίνας του 4ου π.Χ. αιώνα, που είναι ένα πρότυπο χαραγμένο σε μια μαρμάρινη πλάκα, η οποία εκτίθεται στο μουσείο της Ελευσίνας. Το κείμενό της περιέχει μια παραγγελία για την κατασκευή των μπρούντζινων συνδέσμων, πόλων και εμπολίων, που θα ετοποθετούντο ανάμεσα στους σπονδύλους των κιόνων της Φιλώνειας στοάς, ενός ωραίου κτίσματος που θα αναγειρόταν μπροστά στο Τελεστήριο της πόλης αυτής. Εντύπωση προκαλεί η αναφορά στη σύνθεση του μπρούντζου που θα αποτελούσε την πρώτη ύλη για την κατασκευή των συνδέσμων, καθώς και οι πολύ αυστηρές τεχνικές προδιαγραφές, με τις οποίες θα έπρεπε να συμμορφωθεί ο κατασκευαστής. Η επιγραφή αυτή αποτελεί το αρχαιότερο ευρωπαϊκό πρότυπο, με τις αυστηρότερες τεχνικές και χημικές προδιαγραφές που έχουν ποτέ βρεθεί. Αποδεικνύει δε εκτός από το προχωρημένο επίπεδο ανάπτυξης της μεταλλουργίας και της οικοδομικής στην κλασική Ελλάδα και την ιδιαίτερη σπουδαιότητα για την Τυποποίηση,

Όλα αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στην αρχαία Ελλάδα η ποιότητα και ο ποιοτικός έλεγχος στην παραγωγική διαδικασία αλλά και σε κάθε εμπορική συναλλαγή, όπως και η προστασία του καταναλωτή αποτελούσαν ύψιστη φροντίδα και ευθύνη της Αθηναϊκής Πολιτείας και πραγματοποιούνταν κάτω από έναν πολύ καλά οργανωμένο και αυστηρό κρατικό μηχανισμό.

## 2. ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Μη-Καταστροφικές Δοκιμές (NDT – Non Destructive Testing), ή, Μη-Καταστροφικοί Έλεγχοι (NDI – Non Destructive Inspection), ή, Μη-Καταστροφικές Αξιολογήσεις (NDE – Non Destructive Evaluation) ονομάζονται οι έλεγχοι που δεν καταστρέφουν το εξεταζόμενο αντικείμενο. Οι μέθοδοι ΜΚΕ είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία και συντήρηση κάθε εξαρτήματος και κατασκευής. Ο αντικειμενικός σκοπός είναι να συνδυάσουμε τα αποτελέσματα των ΜΚΕ με τη θεωρία της Θραυστομηχανικής ώστε να προβλέψουμε τη επέκταση τυχόν ρωγμών και να υπολογίσουμε τον κίνδυνο αστοχίας του υλικού. Οι Μη-Καταστροφικοί Έλεγχοι θα χρησιμοποιηθούν για να διαπιστωθεί η ύπαρξη και το μέγεθος των ελαττωμάτων σε μια κατασκευή, χωρίς όμως να τη καταστρέψουν ούτε να επηρεάσουν τη λειτουργικότητά της. Με τη συνδυασμένη χρήση των μεθόδων Μη-Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ) και της Θραυστομηχανικής, μπορούμε να είμαστε συνεχώς ενήμεροι για την καλή «υγεία» μιας κατασκευής (Health Monitoring) και για τον προβλεπόμενο χρόνο ζωής και καλής λειτουργίας της (Residual Lifetime). Κάθε μέθοδος ΜΚΕ έχει διαφορετικό βαθμό ακριβείας που όμως ποτέ δεν φτάνει την απόλυτη ακρίβεια ενός Καταστροφικού Ελέγχου. Όμως, οι ΜΚΕ είναι πολύ οικονομικότερες από τον καταστροφικό έλεγχο καθώς αφήνουν την κατασκευή άθικτη και διαθέσιμη για περαιτέρω έλεγχο ή λειτουργία.

Καταστροφικοί και Μη έλεγχοι εφαρμόζονται σε συνδυασμό κατά τον έλεγχο της αξιοπιστίας μιας μεθόδου, οπότε τυχαία δείγματα ή δοκίμια ελέγχονται πρώτα με ΜΚΕ και στη συνέχεια με ΚΕ ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα τους και να οριστεί ή να ρυθμιστεί καλύτερα η ακρίβεια της μεθόδου.

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 πετρελαιοαγωγούς
- στα πάρκα αναψυχής (παιχνίδια και τραίνα μεγάλης ταχύτητας)
- στην ιατρική (τομογραφίες, υπέρηχοι, ακτινογραφίες, καρδιογραφήματα, εγκεφαλογραφήματα, κλπ).

Οι μέθοδοι ΜΚΕ αναπτύχθηκαν τα τελευταία 100 χρόνια. Μερικά αξιοσημείωτα γεγονότα που άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξή τους ήταν:

- 1854: Δυστύχημα από αστοχία πιεστικού δοχείου με 21 θύματα και 50 τραυματίες στο Hartford του Connecticut. 10 χρόνια μετά ψηφίζεται νόμος για υποχρεωτικούς ετήσιους ελέγχους.

- 1895: Ο Wilhelm Conrad Röntgen ανακαλύπτει τις γνωστές πλέον Ακτίνες-Χ και στην ανακοίνωσή του αναφέρει τη δυνατότητα εντοπισμού ελαττωμάτων.

- 1880 – 1920: Εφαρμόζεται ο πρόδρομος της μεθόδου ελέγχου με Διεισδυτικό Υγρό με τη χρήση λαδιού και λευκού χρώματος (το εξάρτημα βυθίζεται σε λεπτόρρευστο λάδι και μετά βάφεται με λευκό χρώμα το οποίο μετατρέπεται σε καφέ όταν το λάδι που παράμεινε σε τυχόν ρωγμές βγαίνει προς τα έξω).

- 1920: Ο Δρ. H. H. Lester αναπτύσσει τη βιομηχανική Ραδιογραφία των μετάλλων.

- 1926: Διατίθεται το πρώτο όργανο Ρευμάτων Eddy που μετρά το πάχος υλικού.

- 1927 – 1928: Το πρώτο σύστημα Μαγνητικής Επαγωγής εφαρμόζεται σε σιδηροδρομικές γραμμές.

- 1940 – 1944: Αναπτύσσεται η μέθοδος Υπερήχων από τον Δρ. Floyd Firestone.

- 1950: Ο J. Kaiser εισάγει την μέθοδο ΜΚΕ των Ακουστικών Εκπομπών.

Ο ΜΚΕ χρησιμοποιεί διάφορες μεθόδους, κάθε μια από τις οποίες βασίζεται σε συγκεκριμένη επιστημονική παραδοχή ή αρχή λειτουργίας και επίσης μπορεί να διακρίνεται σε περισσότερες από μια τεχνικές. Η αξία κάθε μεθόδου εξαρτάται από το είδος του προβλήματος. Μια μέθοδος ή τεχνική, λόγω της φύσης και της λειτουργίας της, μπορεί να είναι από ιδανική έως και εντελώς άχρηστη για την εφαρμογή που έχουμε υπ' όψιν μας. Για το λόγο αυτό η σωστή επιλογή είναι σημαντική για την τελική απόδοση του ΜΚΕ. Οι κυριότερες κατηγορίες μεθόδων και τεχνικές ΜΚΕ αναφορικά ακολουθούν παρακάτω:

### 1) Οπτικές Μέθοδοι

- Οπτικός έλεγχος (Visual Inspection)
- Οπτικός έλεγχος με μικροσκόπιο
- Οπτικός έλεγχος με Βιντεοσκόπηση (Video Inspection)
- Οπτικές μέθοδοι με Laser:
- Ολογραφία (Holography)
- Συμβολομετρία (ESPI Interferometry)
- Δυναμικός Έλεγχος Επιφανείας (Dynamic Surface Inspection)

### 2) Ραδιογραφικές μέθοδοι (Radiographic testing) όπως:

- Ακτίνες Χ (X-rays) και Ακτίνες Γάμα (Gamma rays)
- Ψηφιακή Τομογραφία (Computed Tomography)
- Υποατομικά Σωματίδια (νετρόνια, πρωτόνια) (Neutron Radiography)

### 3) Μέθοδοι Υπερήχων (Ultrasonic inspection)

- Τεχνικές Ανάκλασης
- Τεχνικές Περίθλασης (Time of Flight Diffraction ultrasonics — TOFD)
- Συστοιχίες Φάσης Υπερήχων (Phased Array ultrasonics)

- iv. Περιστρεφόμενα συστήματα (Internal Rotary Inspection System - IRIS)
- 4) Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά (Liquid Penetrant Flaw testing)
- 5) Μέθοδοι Ακουστικών Εκπομπών (Acoustic Emission, AE) — (φάσμα υπερήχων)
- 6) Μέθοδος Θερμικών Εκπομπών (Thermal Emission)
- 7) Ηλεκτρικές μέθοδοι
  - i. Ρεύματα Eddy (Eddy-Current & Remote field testing - RFT)
  - ii. Μέθοδος Πτώσης Δυναμικού (Potential Drop)
- 8) Μαγνητικές μέθοδοι
  - i. Έλεγχος Μαγνητικό Μελάνι/Σκόνη (Magnetic Ink/Powder)
  - ii. Έλεγχος με Μαγνητικά σωματίδια (Magnetic Particles)
  - iii. Μαγνητογραφία (Magnetography)
  - iv. Απώλεια Μαγνητικής Ροής (Magnetic flux leakage - MFL)
  - v. Έλεγχος θορύβου Barkhausen.
- 9) Μηχανικοί Έλεγχοι
  - i. Μέθοδος Ακουστικής Πρόσκρουσης (Acoustic-Impact) — (ηχητικό φάσμα)
  - ii. Θερμογραφικός Έλεγχος (Thermographic inspection) (υπέρυθροι έλεγχοι)
  - iii. Μέθοδοι Μηχανικής Αντίστασης (Mechanical Impedance)
  - iv. Έλεγχοι Ταλαντώσεων (Vibration Monitoring)
- 10) Έλεγχοι Διαρροής (Leak Detection & testing)
- 11) Μικροκυματικές μέθοδοι (Microwave)

Η αξιοπιστία κάθε μεθόδου ΜΚΕ εξαρτάται από τις πιθανότητες σωστής ή λάθους διάγνωσης που έχει η μέθοδος. Κάθε εξεταζόμενο εξάρτημα μπορεί να έχει πραγματικά ελάττωμα (Ναι) ή να είναι χωρίς ελαττώματα (Όχι). Επίσης κάθε μέθοδος ΜΚΕ αποφαινεται αν βρήκε ελάττωμα (Ναι) ή αν δεν βρήκε τίποτα (Όχι). Όλες οι δυνατές περιπτώσεις που προκύπτουν από τον συνδυασμό των παραπάνω απαντήσεων είναι 4. Συγκεκριμένα έχουμε:

1. Σωστή Κατάφαση: Είναι ελαττωματικό (Ν) και ο ΜΚΕ το θεωρεί (Ν).
2. Λάθος Κατάφαση: Δεν είναι ελαττωματικό (Ο) αλλά ο ΜΚΕ το θεωρεί (Ν).
3. Λάθος Άρνηση: Είναι ελαττωματικό (Ν) αλλά ο ΜΚΕ δεν το θεωρεί (Ο).
4. Σωστή Άρνηση: Δεν είναι ελαττωματικό (Ο) και ο ΜΚΕ δεν το θεωρεί (Ο).

Δύο ποσότητες που χρησιμοποιούνται συχνά είναι η «πιθανότητα εντοπισμού» και η «πιθανότητα λάθους συναγερμού» κάθε μεθόδου ή τεχνικής. Η «πιθανότητα εντοπισμού» αντιστοιχεί στη πιθανότητα να είναι πραγματικά ελαττωματικό υπό τη συνθήκη ότι η μέθοδος μας δίνει είτε σωστή κατάφαση ή (OR) λάθος κατάφαση. Η «πιθανότητα λάθους συναγερμού» αντιστοιχεί στη πιθανότητα να μην είναι ελαττωματικό υπό τη συνθήκη ότι η μέθοδος μας δίνει είτε λάθος κατάφαση ή (OR) σωστή άρνηση.

## **2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗ - ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ**

### **2.2.1 Οπτικές Μέθοδοι**

#### **2.2.1.1 Οπτικός Έλεγχος (*Visual Inspection*)**

Ο πιο απλός τρόπος ελέγχου που δεν καταστρέφει μια κατασκευή είναι ο οπτικός έλεγχος. Ο οπτικός έλεγχος καταδεικνύει τα εμφανή ελαττώματα μιας κατασκευής, δηλαδή αυτά που βρίσκονται στην επιφάνεια του υλικού και έχουν ορατό μέγεθος. Ο οπτικός έλεγχος μπορεί να γίνει και με το μάτι αλλά συχνότερα γίνεται με μεγεθύνσεις x2-x4. Βέβαια στις περισσότερες περιπτώσεις, όταν ένα ελάττωμα είναι ορατό με γυμνό οφθαλμό είναι πολύ αργά.

#### **2.2.1.2 Οπτικός Έλεγχος με Μικροσκόπιο**

Σήμερα, χάρις στην κατασκευή ισχυρών μικροσκοπίων, μπορούμε να παρατηρήσουμε ακόμη και τη δημιουργία των μικρορωγμών σε κρυσταλλικό επίπεδο. Με την προϋπόθεση λοιπόν ότι μια ρωγμή βρίσκεται στην επιφάνεια του υλικού και χρησιμοποιώντας την κατάλληλη οπτική συσκευή μπορούμε να την παρατηρήσουμε με μεγάλη ακρίβεια και να παρακολουθήσουμε τη διάδοσή της. Σε εργαστηριακό επίπεδο, ο οπτικός έλεγχος αποτελεί τη κύρια μέθοδο αναφοράς για όλες τις άλλες μεθόδους ΜΚΕ. Τα εργαστηριακά δοκίμια σχεδιάζονται έτσι ώστε η ρωγμή να είναι ορατή από το μικροσκόπιο του οποίου οι μετρήσεις θεωρούνται ακριβέστερες των άλλων μεθόδων. Με τη μέθοδο αυτή αξιολογούνται και ρυθμίζονται όλες οι άλλες μέθοδοι ΜΚΕ πριν εφαρμοστούν

#### **2.2.1.3 Οπτικός Έλεγχος με Βιντεοσκόπηση (*Video Inspection*)**

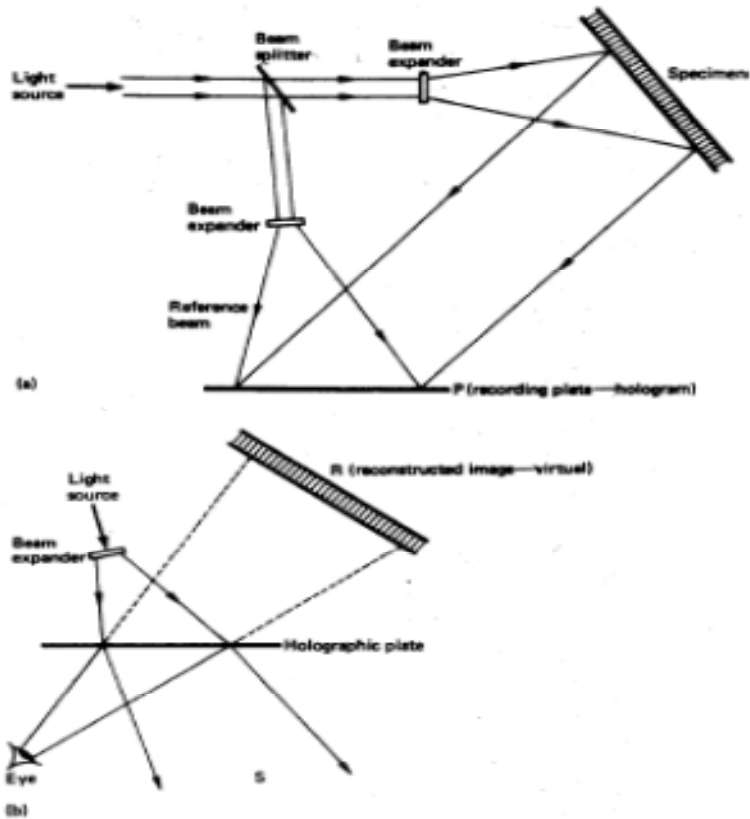
Αγωγοί υγρών και αερίων, αποχετεύσεις και αγωγοί όμβριων υδάτων μπορούν να εξεταστούν οπτικά στο εσωτερικό τους με τη χρήση βιντεοκάμερας η οποία εισάγεται και μετακινείται μέσα στον αγωγό, όπως φαίνεται στην Εικ. 1. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται η κατάστασή τους χωρίς να χρειαστούν εκσκαφές ή διακοπή της παροχής.



**Εικόνα 1 :** Η κάμερα με τους προβολείς («rig») και η οθόνη παρατήρησης.

#### **2.2.1.4 Ολογραφία (Holography)**

Όταν ένα αντικείμενο φωτίζεται με ακτίνες φωτός, η επιφάνειά του το αντανακλά παράγοντας κύματα διαφορετικού πλάτους και φάσης από το προσπίπτον φως. Τα κανονικά φιλμ καταγράφουν την ένταση του φωτός που ανακλάται αλλά δεν χρησιμοποιούν πληροφορίες από τη μεταβολή της φάσης του. Στην ολογραφία χρησιμοποιούμε το Laser ώστε το φως να έχει σταθερή φάση. Το ανακλώμενο φως και ένα μέρος της αρχικής ακτίνας συναντώνται και συνδυάζονται έτσι ώστε η μεταβολές της φάσης να μετατραπούν σε μεταβολές έντασης και μαζί με το πλάτος να αποτυπωθούν σε φιλμ (ολογράφημα). Όταν περάσει ξανά η αρχική ακτίνα μέσα από το ολογράφημα διαθλάται και δημιουργεί μια 3-διάστατη εικόνα του αντικειμένου. Όταν το αντικείμενο παραμένει στη θέση του η ξαναδημιουργούμενη εικόνα και το αντικείμενο συμπίπτουν ακριβώς. Αν όμως το αντικείμενο έχει μετακινηθεί ελάχιστα ή καταπονείται και έχει τοπικά παραμορφωθεί, τότε ο παρατηρητής βλέπει στην επιφάνεια κροσσούς συμβολής των οποίων το πλήθος και η απόσταση εξαρτώνται από τις μεταβολές στο αντικείμενο. Σε αυτό το φαινόμενο βασίζεται η ολογραφική Συμβολομετρία, όπως φαίνεται στην Εικ. 2.

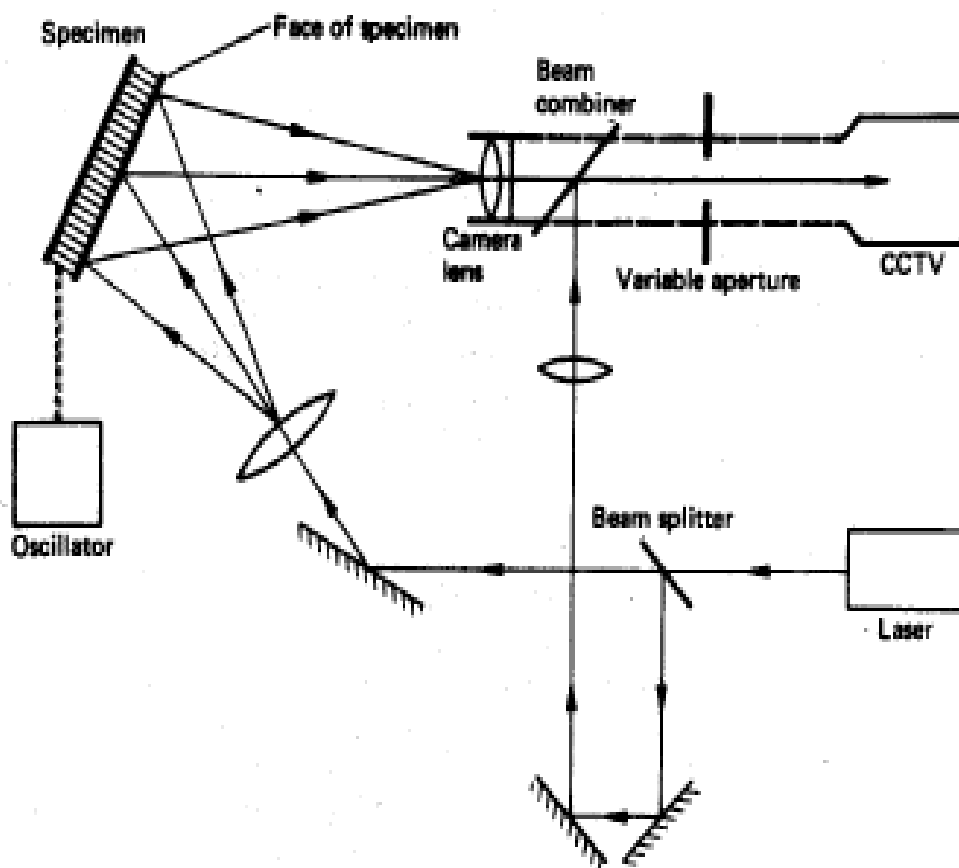


**Εικόνα 2:** Ολογραφία. (α) Δημιουργία ολογράμματος. (β) Ανακατασκευή εικόνας.

### 2.2.1.5 Συμβολομετρία (ESP Interferometry)

Η ολογραφική συμβολομετρία απαιτεί πολύ υψηλή ανάλυση που να φτάνει τις 1000 γραμμές ανά mm και πολύ υψηλή ένταση ώστε να έχει λογικούς χρόνους έκθεσης. Η τεχνική βασίζεται στη διπλή απεικόνιση του αντικειμένου πριν και μετά τη φόρτιση του. Στην Εικ. 3 απεικονίζεται μια διαγραμματική αναπαράσταση της μεθόδου. Αφού σχηματίσουμε το ολόγραμμα του αντικειμένου, το προβάλλουμε επάνω του και στη συνέχεια παρατηρούμε τους κροσσούς συμβολής που σχηματίζονται καθώς το αντικείμενο καταπονείται ή δονείται. Αυτό λέγεται και φαινόμενο «ζωντανών κροσσών». Χρησιμοποιώντας επιπλέον ένα είδος στροβοσκοπίου μπορούμε να απομονώσουμε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή του κύκλου καταπόνησης την οποία θέλουμε να παρατηρήσουμε. Για την αποτύπωση της τελικής εικόνας, εκθέτουμε αρχικά το αντικείμενο στην ολογραφική πλάκα αφόρτιστο για το μισό του χρόνου έκθεσης και στη συνέχεια εφαρμόζουμε την τάση και το εκθέτουμε για τον υπόλοιπο χρόνο έκθεσης. Όλες οι τοπικές παραμορφώσεις θα εμφανιστούν στην τελική εικόνα σαν κροσσοί. Η ολογραφική συμβολομετρία είναι κατάλληλη για το εντοπισμό παραμορφώσεων με τη μορφή εξογκωμάτων περισσότερο παρά τεντωμάτων. Χρησιμοποιώντας μάλιστα μια τηλεοπτική κάμερα και ψηφιακή εγγραφή οι αποτυπώσεις γίνονται σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Η σύνθετη αυτή τεχνική ονομάζεται και «ηλεκτροπτική ολογραφία».

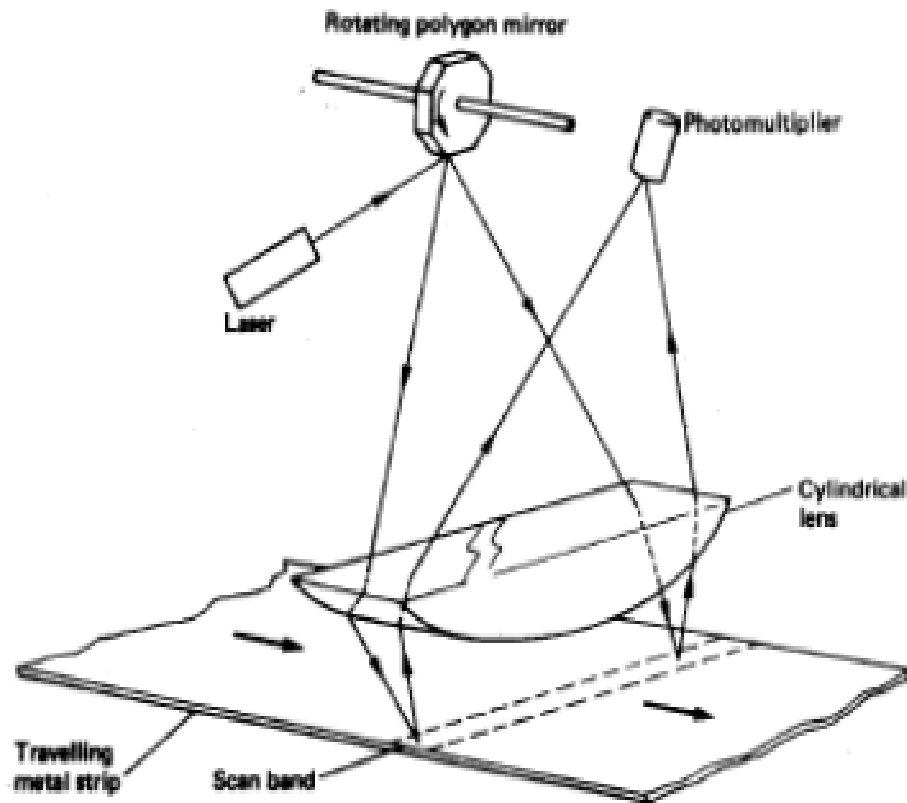




Εικόνα 3 : Ολογραφική Συμβολομετρία

#### 2.2.1.6 Δυναμικός Έλεγχος Επιφανείας (Dynamic Surface-Inspection)

Σε πολλά εξαρτήματα η παρουσία επιφανειακών ανωμαλιών, ρωγμών ακόμα και σκόνης μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στη λειτουργία τους. Ο χειρωνακτικός έλεγχος παρόμοιων ελαττωμάτων παρουσιάζει σοβαρά μειονεκτήματα καθώς είναι υποκειμενικός, πολύ αργός και πολύ ακριβός. Ο δυναμικός έλεγχος επιφανείας χρησιμοποιεί τηλεοπτική κάμερα για να καταγράψει τη σάρωση της επιφάνειας από μια ακτίνα Laser σε πολύ υψηλές ταχύτητες, όπως φαίνεται στην Εικ. 4. Το σήμα ψηφιοποιείται και οδηγείται σε κατάλληλο πρόγραμμα σε Η/Υ για επεξεργασία. Το πρόγραμμα ελέγχει το ψηφιακό τηλεοπτικό σήμα για «ανωμαλίες» που θα οφείλονται στα επιφανειακά ελαττώματα του υλικού.



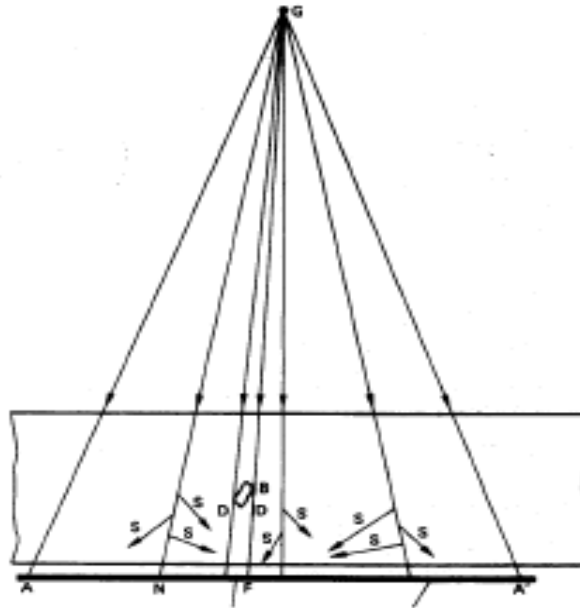
**Εικόνα 4 :** Δυναμικός έλεγχος επιφανείας σε μεταλλική πλάκα.

Σε ειδικές περιπτώσεις, για μέγιστη ανάλυση και ταχύτητα, αντί της κάμερας χρησιμοποιούνται συστοιχίες φωτοδιόδων με οπτικές ίνες (π.χ. με 800x800 στοιχεία και διάκενο 25μm) και επιτυγχάνονται ταχύτητες έως και 60000 τεμάχια την ώρα.

## 2.2.2 Ραδιογραφικές Μέθοδοι

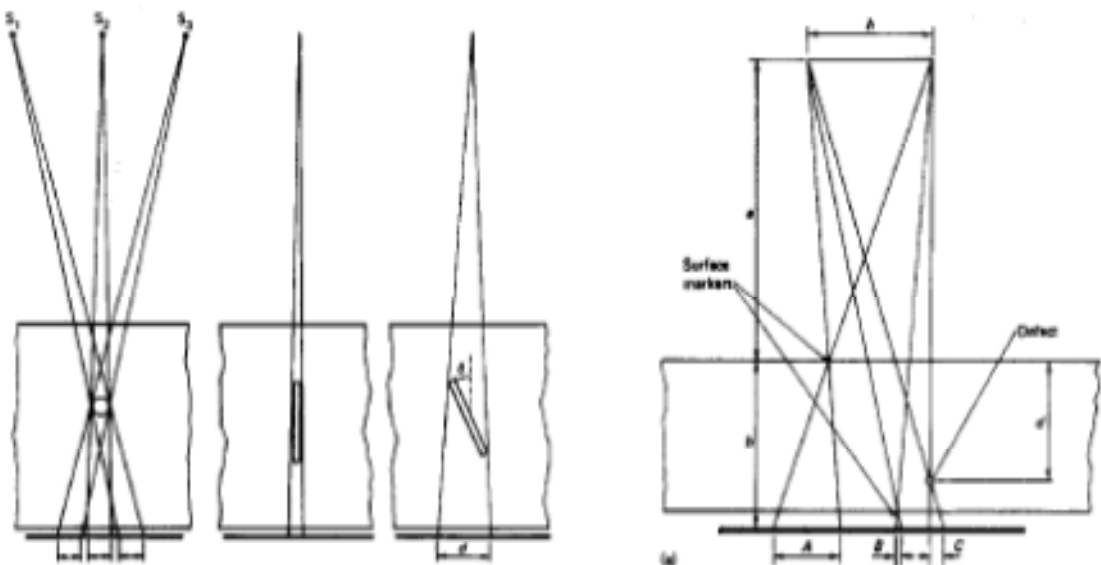
### 2.2.2.1 Ακτίνες Χ (X-rays) και Ακτίνες Γάμα (Gamma rays)

Από την ανακάλυψή τους το 1895 μέχρι σήμερα, οι ακτίνες-Χ χρησιμοποιούνται για τον ΜΚΕ ανθρώπων και υλικών. Οι ακτίνες-Χ έχουν τέτοιο μήκος κύματος που τους επιτρέπει να διαπερνούν όλα τα υλικά με κάποιο ποσοστό απορρόφησης που εξαρτάται από το υλικό. Το μήκος κύματος ποικίλει από τα 10nm (Grenz ή «απαλές» ακτίνες-Χ) έως τα  $10^{-4}$ nm («σκληρές» ακτίνες-Χ) που μπορούν να διαπεράσουν ακόμη και ασάλι πάχους μισού μέτρου. Οι ακτίνες-Γάμα εκπέμπονται από ραδιενεργές πηγές σε παρόμοια μήκη κύματος, είναι και αυτές ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, έχουν τις ίδιες ιδιότητες με τις ακτίνες-Χ και χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανική ραδιογραφία. Οι ακτίνες-Χ και Γάμα ταξιδεύουν πάντα σε ευθείες γραμμές και δεν εστιάζονται γι' αυτό και η διάταξη λειτουργίας είναι πάντοτε: πηγή – εξεταζόμενο δείγμα – ραδιογραφική πλάκα. Τα παραπάνω απεικονίζονται στην Εικ. 5 που ακολουθεί:



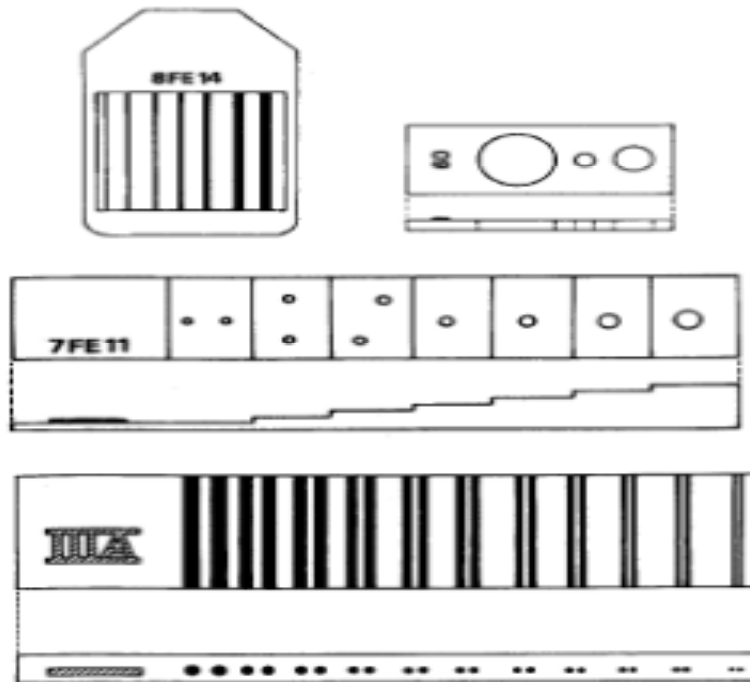
**Εικόνα 5 :** Βασική διάταξη Ραδιογραφικής απεικόνισης σε φιλμ.

Μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν είναι ότι η πηγή της ακτινοβολίας αν και μικρή δεν είναι σημειακή. Το αποτέλεσμα είναι μια ελαφρά θολή εικόνα στα όρια των ελαττωμάτων και ιδιαίτερα αυτών που είναι μικρότερα σε μέγεθος από την πηγή. Το τελικό αποτέλεσμα μπορεί συχνά να βελτιωθεί με την ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων. Οι ραδιογραφικές μέθοδοι, όπως και όλες οι αποτυπώσεις σε φιλμ, αποτελούν την 2-διάστατη προβολή 3-διάστατων αντικειμένων (Εικ. 6). Αυτό σημαίνει ότι το σχήμα που προκύπτει εξαρτάται από τη κατεύθυνση των ακτίνων και την θέση του ελαττώματος στο υλικό. Για να μπορέσουμε να έχουμε δεδομένα σχετικά με τη 3η διάσταση απαιτούνται δυο αποτυπώσεις από διαφορετική γωνία για να δημιουργηθεί μια στερεοσκοπική εικόνα του υλικού.



**Εικόνα 6 :** Απλή και στερεοσκοπική προβολή σε ραδιογραφία.

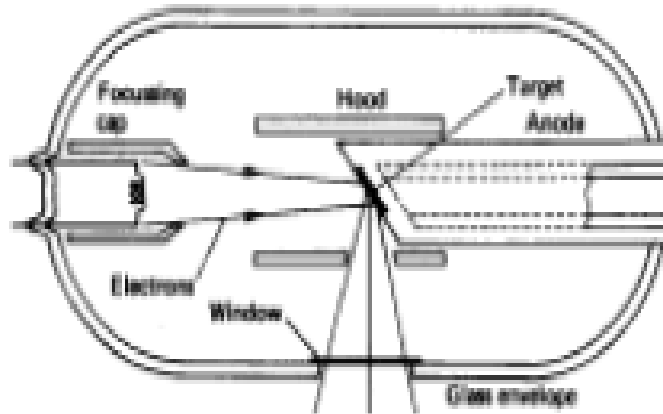
Όταν μελετάμε την παρουσία ατελειών σε ένα υλικό η μεγαλύτερη «ποιότητα» ή «ευαισθησία» μιας ραδιογραφικής μεθόδου σημαίνει την ικανότητα της να διακρίνει μια μικρότερων διαστάσεων ατέλεια. Για να μετρηθεί αυτή η ικανότητα της μεθόδου χρησιμοποιούνται κατάλληλοι δείκτες (Εικ. 7) πού είναι σύρματα ή ελάσματα, διαφορετικού πάχους και διαμέτρου, με συγκεκριμένη βαθμονόμηση και τυποποίηση. Η ραδιογραφίες αυτών των δεικτών μας δείχνει απ' ευθείας την ικανότητα κάθε μεθόδου ή συσκευής.



**Εικόνα 7 :** Δείκτες μέτρησης της ευαισθησίας των Ραδιογραφικών μεθόδων.

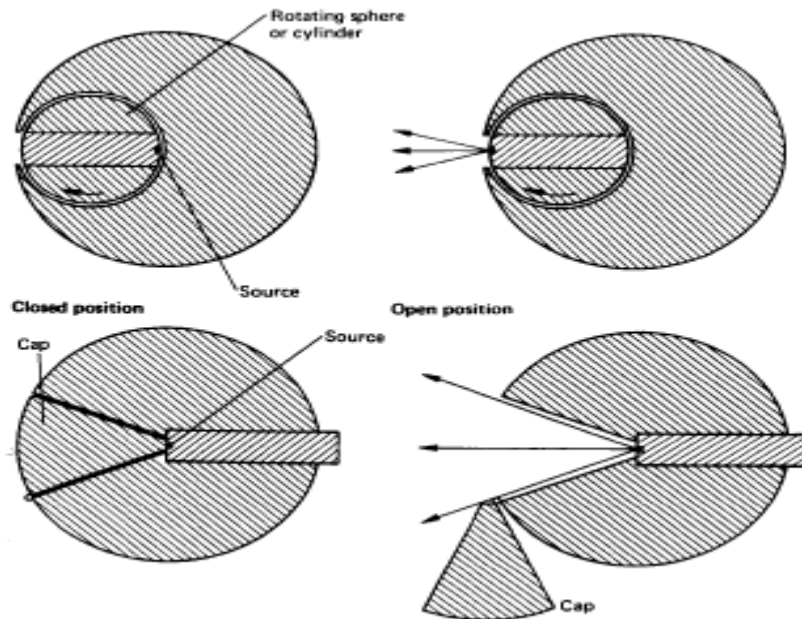
Οι ακτίνες-Χ δημιουργούνται όταν ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας χτυπούν ένα μεταλλικό αντικείμενο. Οι ακτίνες-Γάμα προέρχονται από τον πυρήνα ραδιενεργών στοιχείων. Και οι δυο ακτινοβολίες ταξιδεύουν με ταχύτητα φωτός, σε ευθείες γραμμές και είναι αόρατες. Οι ηλεκτρομαγνητικές αυτές ακτινοβολίες δεν είναι συνεχείς (θεωρία Planck) αλλά εκπέμπονται σε μικρά πακέτα ενέργειας που ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα (quanta). Η ενέργεια ενός quantum μετριέται σε eV (electron-Volts). Η ενέργεια των ακτίνων-Χ και των ακτίνων-Γάμα εξαρτάται από το μήκος κύματος και αναφέρεται σε keV και MeV. Σήμερα συνυπάρχουν ακόμα το παλαιό με το μετρικό σύστημα μονάδων. Με το παλαιότερο σύστημα η ποσότητα ή «έκθεση» σε ακτινοβολία μετριέται σε Roentgens ή mR, η μονάδα «αποροφούμενης δόσης» είναι το rad, και η μονάδα «ισοδύναμης αποροφούμενης δόσης» το rem. Στο μετρικό σύστημα η «έκθεση» σε ακτινοβολία σαν ενέργεια που είναι μετριέται σε Coulomb/kg ( $1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$ ), η μονάδα «αποροφούμενης δόσης» είναι το gray ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$ ), και η μονάδα «ισοδύναμης αποροφούμενης δόσης» το sievert ( $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ ). Στη πρακτική ραδιογραφία η έξοδος μιας συσκευής ακτίνων-Χ αναφέρεται σε mA και μιας ακτίνων-Γάμα σε curie (Ci). Στο μετρικό σύστημα το Ci θεωρήθηκε πολύ μεγάλο και αντικαταστάθηκε από το Becquerel (Bq) ( $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ ).

Οι ακτίνες-Χ δημιουργούνται όταν ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας χτυπούν ένα μεταλλικό αντικείμενο. Οι λυχνίες ακτίνων-Χ (Εικ. 8) περιέχουν τη κάθοδο που παράγει τα ηλεκτρόνια και την μεταλλική άνοδο στην οποία προσπίπτουν τοποθετημένες μέσα σε κενό αέρος και τροφοδοτούνται με υψηλή τάση (kV-MV).



**Εικόνα 8 :** Λυχνία ακτίνων-Χ.

Οι πηγές των ακτίνων-Γάμα επιλέγονται μέσα από τα λίγα φυσικά ραδιενεργά υλικά και τις εκατοντάδες τεχνητά ραδιοϊσότοπα που εκπέμπουν συνδυασμούς από ακτίνες α, β, γ και νετρόνια. Μόνο λίγα από αυτά έχουν ιδιότητες που να τα κάνουν κατάλληλα για βιομηχανικές ραδιογραφικές εφαρμογές. Μέχρι το 1955 χρησιμοποιούσαν φυσικές πηγές όπως το Ράδιο και το Ράδον τα οποία όμως ήταν επικίνδυνα και έχουν αντικατασταθεί σήμερα από ραδιοϊσότοπα όπως τα πλέον χρησιμοποιούμενα Cobalt-60, Iridium-192, ή, Ytterbium-169 και τα λιγότερο διαδεδομένα Caesium-137, Thulium-170, ή, Sodium-24. Ο αριθμός που ακολουθεί το όνομα είναι η ατομική μάζα του ισότοπου. Τα τεχνητά ραδιοϊσότοπα κατασκευάζονται σε ατομικούς αντιδραστήρες ή εξάγονται από τα χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα. Είναι σημαντικό να καταλάβουμε ότι όταν ένα τέτοιο υλικό αρχίσει να λειτουργεί δε μπορεί να σταματήσει ή να σβήσει. Το υλικό ακτινοβολεί συνέχεια μέχρι να εξαντληθεί. Τον ρυθμό εξάντλησης ενός ραδιενεργού υλικού τον μετράμε με το «χρόνο ημιζωής» που είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί στο μισό η ακτινοβολία του. Άλλα υλικά έχουν ημιζωή μερικές ώρες και άλλα μερικές εκατοντάδες χρόνια. Οι πηγές ακτίνων-Γάμα απαιτούν αυστηρά προσεκτικό και ασφαλή χειρισμό. Αφού ενεργοποιηθούν σφραγίζονται σε ειδικές κάψουλες, οι κάψουλες περιβάλλονται από απορροφητικό υλικό, τηρούνται αποστάσεις ασφαλείας, και, όλες οι ενέργειες πρέπει να είναι σύντομες και ταχύτατες. Οι ειδικές αυτές κάψουλες αναπαρίστανται στην Εικ. 9 που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα.

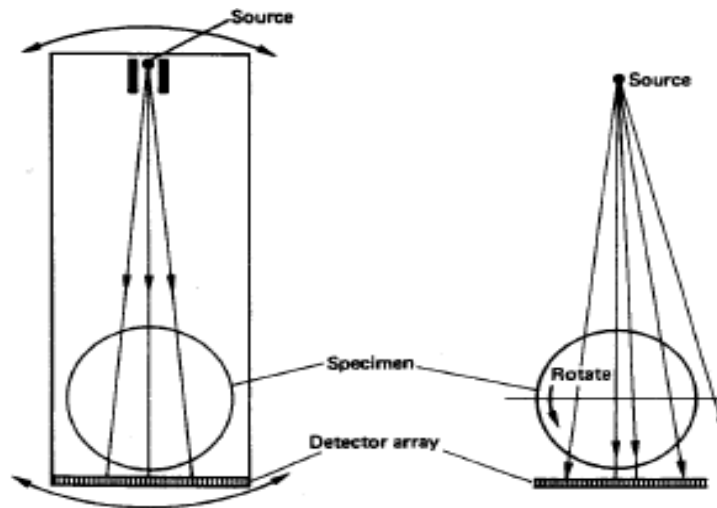


**Εικόνα 9 :** Κάψουλες φύλαξης ραδιενεργών πηγών.

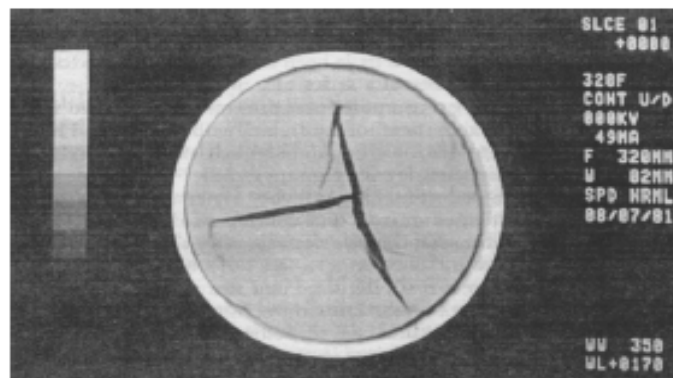
Η ιονίζουσα ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη και καταστρέφει τους ζωντανούς ιστούς, γι' αυτό απαιτεί τη λήψη κατάλληλων μέτρων προφύλαξης και ειδικές εγκαταστάσεις. Η ετήσια δόση ακτινοβολίας σε ολόκληρο το σώμα δεν πρέπει να ξεπερνά τα 5 mSv (= 0.5 rem) για το κοινό και τα 15 mSv για τους εργαζόμενους σε σχετικές εγκαταστάσεις. Η κυριότερη αρχή που πρέπει να τηρείται είναι αυτή της ελάχιστης δυνατής έκθεσης (ALARP – AsLowAsReasonablyPossible). Οι οδηγίες προφύλαξης γίνονται όλο και πιο αυστηρές με τη πάροδο του χρόνου καθώς διαπιστώνεται το πραγματικό επίπεδο βλάβης που μπορούν να προξενήσουν οι ιονίζουσες ακτινοβολίες ακόμη και σε χαμηλές δόσεις.

### **2.2.2.2 Ψηφιακή Ραδιογραφία – Τομογραφία (Computed Tomography)**

Η τομογραφία είναι ένα σύνολο από ραδιογραφίες που αποτυπώνονται ψηφιακά και τις επεξεργαζόμαστε με Η/Υ. Αντί του ραδιογραφικού φιλμ, κάθε ραδιογραφία αποτυπώνεται σαν ψηφιακή πληροφορία μετατρέποντας τη φωτεινότητα κάθε κόκκου του φιλμ σε Bytes. Για να δημιουργηθεί η 3-διάστατη τομογραφία συνθέτουμε δεκάδες ψηφιακές ραδιογραφίες. Κάθε ραδιογραφία έχει ληφθεί από διαφορετικό σημείο, είτε περιστρέφοντας το αντικείμενο είτε περιστρέφοντας τη συσκευή ραδιογραφίας, όπως φαίνεται στην Εικ. 10. Η σύνθεση γίνεται από τα πρόγραμμα του Η/Υ που ελέγχει τη συσκευή και γνωρίζει ακριβώς τις θέσεις και τις γωνίες λήψης των εικόνων. Στην Εικ. 11 παρουσιάζεται ένα δείγμα τομογραφίας μεταλλικού υλικού με σοβαρή ρωγμή στο εσωτερικό του.



**Εικόνα 10 :** Τομογραφία με περιστροφή (αρ.) της πηγής και (δεξ.) του αντικειμένου.



**Εικόνα 11 :** Δείγμα τομογραφίας μεταλλικού υλικού με σοβαρή ρωγμή στο εσωτερικό

### 2.2.2.3 Υποατομικά Σωματίδια (νετρόνια, πρωτόνια, κλπ.) (Neutron radiography)

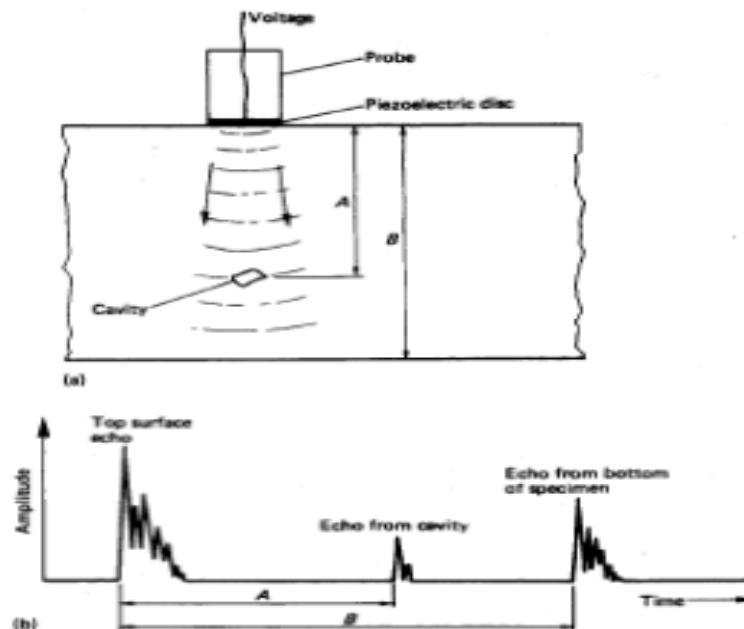
Νετρόνια κατάλληλης ενέργειας παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες απορρόφησης από τα υλικά, παρ' όλο που είναι ατομικά σωματίδια και όχι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η χρήση υποατομικών σωματιδίων (νετρονίων ή πρωτονίων) έχει καθιερωθεί ευρέως σαν τεχνική και συνήθως αναφέρεται με το όνομα «νετρονική ραδιογραφία». Η αξία της μεθόδου οφείλεται στο ότι η απορρόφηση των νετρονίων από τα υλικά δεν είναι ίδια με την απορρόφηση των ακτίνων-Χ που αυξάνει ομαλά με τον ατομικό αριθμό του στοιχείου. Υλικά όπως το Υδρογόνο και το Λίθιο έχουν πολύ μεγάλο συντελεστή απορρόφησης ενώ υλικά όπως το Αλουμίνιο και ο Σίδηρος έχουν 500-2000 φορές μικρότερο συντελεστή απορρόφησης. Η ιδιότητα αυτή κάνει τη μέθοδο πολύ αποτελεσματική στον εντοπισμό ατελειών, ειδικά όσων περιέχουν υδρογόνο όπως το νερό, λάδι, πλαστικό, κλπ., ακόμα και σε πολύ παχιές πλάκες μετάλλου ή άλλων υλικών. Στη πράξη οι κύρια πηγή νετρονίων είναι ο πυρηνικός αντιδραστήρας. Άλλες πηγές που χρησιμοποιούνται είναι το ραδιοϊσότοπο Californium-252 ή συνδυασμός ακτίνων-Χ με Uranium ή Beryllium.

### 2.2.3 Μέθοδοι Υπερήχων

Οι μηχανικές δονήσεις διαδίδονται μέσα από στερεά, υγρά και αέρια καθώς η δόνηση μεταφέρεται από το ένα σωματίδιο της ύλης στο διπλανό του. Όταν τα σωματίδια της ύλης ταλαντώνουν και η κίνησή τους είναι κανονική τότε μετρείται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο ( $\text{Hz} = \text{sec}^{-1}$ ). Όταν μάλιστα η συχνότητα της δόνησης είναι μεταξύ 10 και 20.000 Hz, ο ήχος ακούγεται από το ανθρώπινο αυτί. Οι δονήσεις με συχνότητα πάνω από 20.000 Hz οι «ήχοι» δεν ακούγονται και ονομάζονται υπέρηχοι (ultrasound ή ultrasonic). Τα ηχητικά κύματα δεν είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά είναι κύματα κίνησης παρόμοια με τα θαλάσσια κύματα. Τα κύματα των ήχων και υπερήχων διαδίδονται μέσα στα υλικά, υφίστανται απόσβεση και ανακλώνται, διαθλώνται ή σκεδάζονται όταν συναντούν εμπόδια ή ασυνέχειες, ανάλογα με τη συχνότητά τους. Την ιδιότητα αυτή τη χρησιμοποιούμε για να εντοπίσουμε τυχόν ατέλειες στο εσωτερικό ενός σώματος χωρίς να το τεμαχίσουμε (ΜΚΕ).

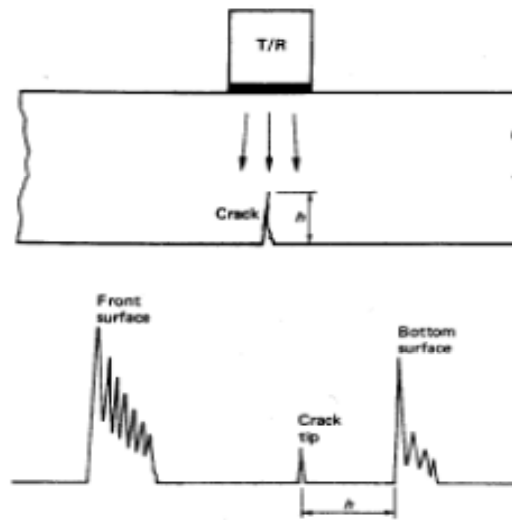
#### 2.2.3.1 Τεχνικές Ανάκλασης

Η λειτουργία της μεθόδου βασίζεται στην εκπομπή ενός παλμού υπερήχων μέσα στο υλικό και την καταγραφή των ανακλάσεων που επιστρέφουν, όπως φαίνεται στην Εικ. 12. Ο παλμός υπερήχων δημιουργείται με την εφαρμογή ενός παλμού υψηλής τάσης σε ένα πιεζοηλεκτρικό δίσκο. Οι ανακλάσεις δονούν τον ίδιο ή άλλο πιεζοηλεκτρικό δίσκο ο οποίος τις μετατρέπει πάλι σε τάσεις. Κάθε επιφάνεια ανακλά μια ηχώ του παλμού, με πρώτη απ' όλες την επιφάνεια στην οποία εφάπτεται ο δίσκος και τελευταία την απέναντι επιφάνεια του υλικού. Ανάμεσα στις δύο ανακλάσεις θα βρισκεται η ηχώ από οποιοδήποτε ατέλεια (Εικ. 13) υπάρχει μέσα στο υλικό και με εύρος που εξαρτάται από το μέγεθος κάθε ατέλειας.



Εικόνα 12 : Βασική αρχή λειτουργίας των ελέγχων με Υπερήχους.

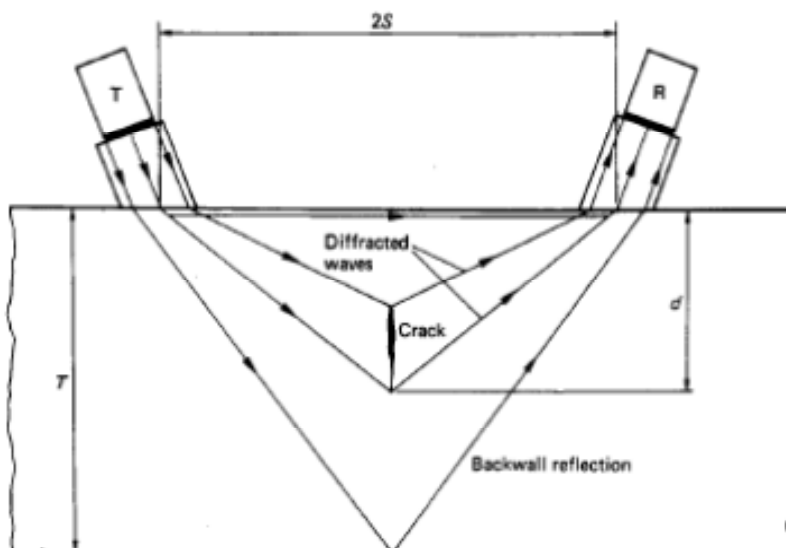




**Εικόνα 13 :** Μέτρηση βάθους ρωγμής (h) με την ανάκλαση των υπερήχων.

### 2.2.3.2 ΧρόνοςΠερίθλασης (Time of Flight Diffraction Ultrasonics – TOFD)

Μια παραλλαγή της κλασικής μεθόδου που μετρά το χρόνο ανάκλασης είναι η μέτρηση του χρόνου διάθλασης του παλμού υπερήχων. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τα κύματα που διαθλούνται στα χείλη των ρωγμών και βάσει της γεωμετρίας του δοκιμίου και των θέσεων του πομπού και του δέκτη υπολογίζει το βάθος και μήκος των ατελειών, όπως φαίνεται στην Εικ. 14.



**Εικόνα 14 :** Μέτρηση ρωγμής με την διάθλαση των υπερήχων (TOFD)

### 2.2.3.3 Συστοιχία Φάσης με Υπερήχους (Phased Array ultrasonics)

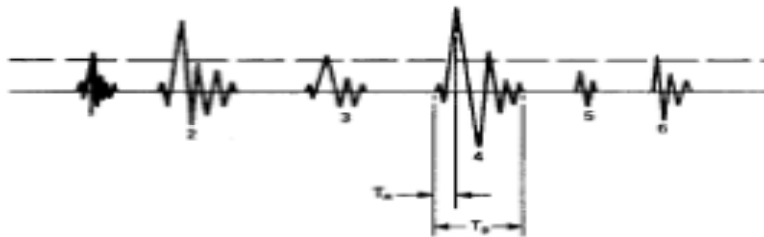
Οι σύγχρονες τεχνικές που είχαν επιτυχία σε παρόμοιους επιστημονικούς κλάδους, εφαρμόζονται και στις μεθόδους υπερήχων. Η συστοιχία φάσης, γνωστή από τα ραντάρ και σόναρ, υλοποιείται και εδώ με μια συστοιχία από πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και μας δίνει τη δυνατότητα να κατευθύνουμε τη δέσμη των παλμών με μεγάλη ακρίβεια χωρίς τη παρεμβολή μηχανικών ή άλλων μέσων.

### 2.2.3.4 Περιστρεφόμενο σύστημα για αγωγούς (Internal Rotary Inspection System - IRIS)

Για την εφαρμογή των μεθόδων σε ειδικές κατασκευές έχουν αναπτυχθεί επί μέρους τεχνικές. Ειδικά για το εσωτερικό των αγωγών έχουν αναπτυχθεί συστήματα όπως το περιστρεφόμενο σύστημα ελέγχου (IRIS) που τοποθετείται μέσα στον αγωγό και τον σαρώνει κυκλικά και κατά μήκος για τον εντοπισμό ρωγμών και διαβρώσεων.

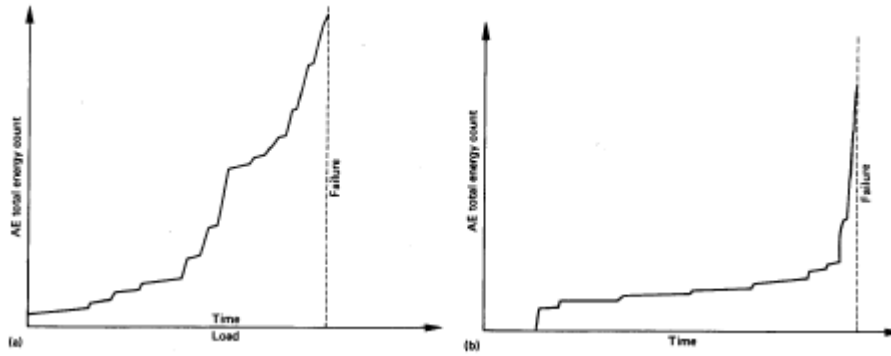
### 2.2.4 Μέθοδος ακουστικών εκπομπών

Όταν ένα στερεό φορτίζεται με τάσεις αρκούντως υψηλές, τότε το υλικό παράγει ήχους με τη μορφή διακριτών παλμών. Το φαινόμενο αυτό το καλούμε Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission – AE) ή Εκπομπή Κυμάτων Τάσης (Stress-Wave Emission – SWE). Η Ακουστική Εκπομπή μπορεί να καλύπτει και το ακουστικό φάσμα αλλά κυρίως πρόκειται για υπερήχους με συχνότητες από 30 kHz έως 30 MHz. Κύρια χαρακτηριστικά των παλμών Ακουστικής Εκπομπής είναι ο χρόνος ανόδου TR, η συνολική διάρκεια TD και το πλάτος τους όταν ξεπερνά ένα ελάχιστο όριο (threshold). Η ρύθμιση του ελάχιστου ορίου είναι σημαντική για την επιλογή ή απόρριψη των παλμών (π.χ. στην Εικ. 15, ο παλμός 5 αγνοείται ενώ ο 4 υπολογίζεται δυο φορές).



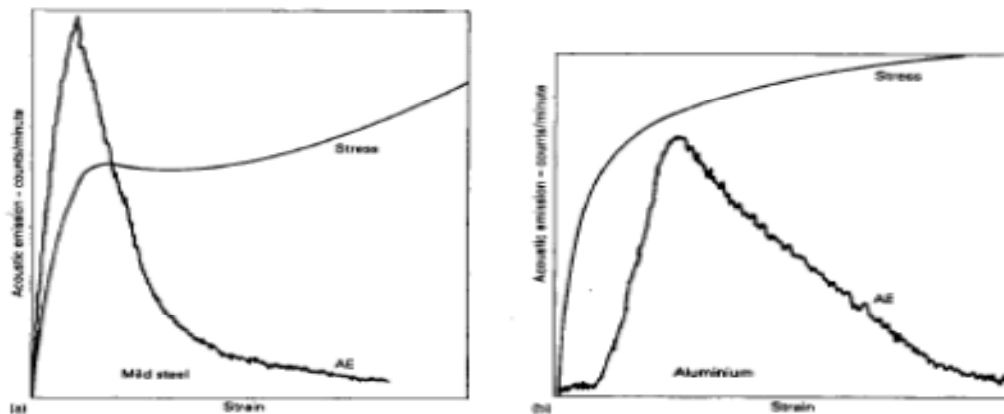
Εικόνα 15 : Σειρά παλμών Ακουστικής Εκπομπής.

Η τελική επιλογή της παρουσίας ή όχι ενός παλμού είναι πιο πολύπλοκη διαδικασία και στην οποία συμμετέχουν εκτός από ειδικά κυκλώματα φίλτρων και προγράμματα Η/Υ που υλοποιούν τεχνικές Θεωρίας Αποφάσεων και Αναγνώρισης Προτύπων. Οι πιο βασικές παράμετροι που μελετώνται γραφικά είναι η συνολική ενέργεια των παλμών και το πλήθος των αφικνούμενων παλμών στη μονάδα του χρόνου. Οι παράμετροι αυτοί της AE συγκρίνονται και συνδυάζονται με άλλες παραμέτρους της κόπωσης ώστε να προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα. Συσχετίζοντας π.χ., την συνολική ενέργεια των παλμών με τον χρόνο ή τους κύκλους φόρτισης προκύπτουν διαγράμματα (Εικ. 16) τα οποία μπορούν αν συγκριθούν με τα διαγράμματα της μορφής α-N(μήκους ρωγμής – κύκλων φόρτισης).



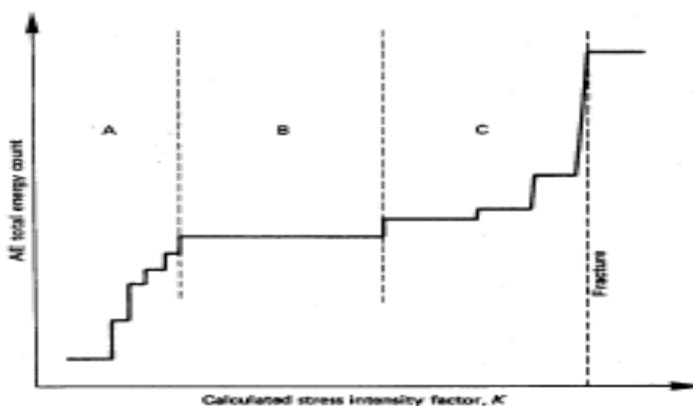
**Εικόνα 16 :** Διάγραμμα ενέργειας AE προς χρόνο φόρτισης (α) για «θορυβώδη» υλικά και (β) για «ήσυχα» υλικά.

Αντίστοιχα, συσχετίζοντας το πλήθος των αφικνούμενων παλμών ανά λεπτό με τη παραμόρφωση του υλικού, μπορούμε να σχεδιάσουμε το διάγραμμα τους μαζί με το διάγραμμα  $\sigma$ - $\epsilon$  (τάσης-παραμόρφωσης) όπως φαίνεται παρακάτω στην Εικ. 17:



**Εικόνα 17 :** Διάγραμμα πλήθους παλμών AE προς ανηγμένη παραμόρφωση  $\epsilon$  : (α) για ασάλι και (β) για αλουμίνιο.

Τέλος, αν σχεδιάσουμε τη συνολική ενέργεια των παλμών AE ως προς τον συντελεστή έντασης τάσεων Κπροκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα (Εικ. 18), όπου φαίνεται ότι υπάρχει μια αύξηση των εκπομπών AE όταν το Κπλησιάζει τη δυσθραυστότητα (fracture toughness  $K_{IC}$ ).



**Εικόνα 18 :** Διάγραμμα ενέργειας AE προς συντελεστή  $K$ .

### **2.2.4.1 Εντοπισμός μιας πηγής ΑΕ**

Μια από τις ευρύτερα διαδεδομένες εφαρμογές της ΑΕ είναι ο εντοπισμός της θέσης του ελαττώματος ή της ατέλειας που παράγει τους παλμούς ΑΕ. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί πολλούς αισθητήρες υπερήχων (10-20). Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην επιφάνεια του υπό εξέταση αντικείμενου σε απόσταση μεταξύ τους ώστε να καλύπτουν όλο το αντικείμενο. Η χρονική συσχέτιση των σημάτων τους επιτρέπει τον γεωμετρικό προσδιορισμό της θέσης της πηγής κάθε παλμού ΑΕ. Για ατέλειες που βρίσκονται σε ακτίνα περίπου 1m από τους αισθητήρες, μπορεί να εντοπιστεί η θέση τους με ακρίβεια εκατοστού (1 cm).

### **2.2.4.2 Υπέρ και Κατά της Μεθόδου ΑΕ**

Η μέθοδος των ΑΕ είναι μια από τις νεότερες μεθόδους ΜΚΕ. Έχει ήδη περάσει τα βασικά στάδια ανάπτυξης και ήδη έχουν δοθεί οι πρώτες τυποποιήσεις από την ASTM με πιο σημαντικό το ASTM.E.750.

Τα κυριότερα προτερήματα της μεθόδου είναι ότι:

- μπορεί να καλύψει μεγάλες επιφάνειες και κατασκευές,
- μας δείχνει ότι υπάρχουν ατέλειες που επεκτείνονται,
- εντοπίζει τις ατέλειες, τις εντοπίζει ακόμη και σε απρόσιτα σημεία,
- μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενώ η κατασκευή μας λειτουργεί (on-line).

Η μέθοδος έχει φυσικά και μειονεκτήματα όπως:

- δεν εκπέμπονται παλμοί ΑΕ από όλες τις ατέλειες του υλικού,
- η απόδοσή της εξαρτάται από τη μέθοδο φόρτισης της κατασκευής και από την ύπαρξη θορύβου,
- δεν καθορίζει το μέγεθος της ατέλειας
- δεν είναι ακόμη πλήρως τυποποιημένη.

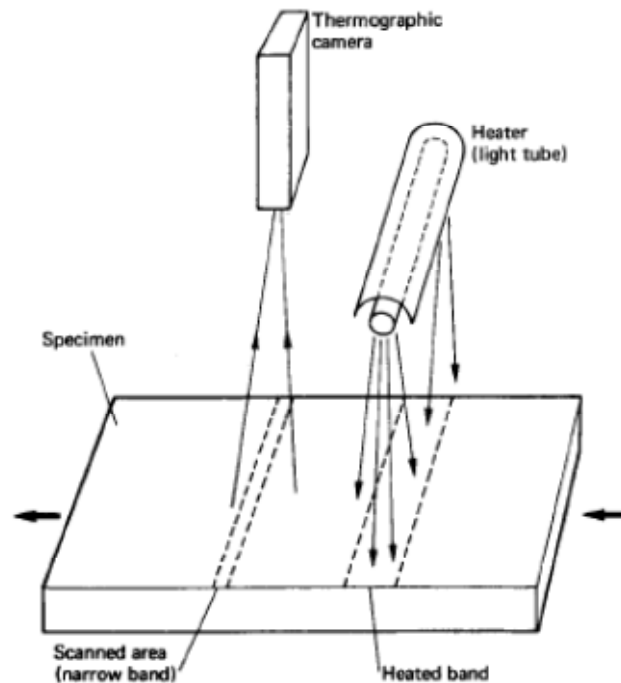
### **2.2.5 Μέθοδος Θερμικών Εκπομπών (Thermal Emission)**

Όταν ένα στερεό φορτίζεται με τάσεις αρκούντως υψηλές, ένα μέρος της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια που εκλύεται στο περιβάλλον. Το φαινόμενο αυτό το καλούμε Θερμική Εκπομπή (Thermal Emission). Η θερμική εκπομπή στην περιοχή γύρω από μια ρωγμή μπορεί να μετρηθεί με ειδικούς θερμικούς αισθητήρες (thermistors). Οι θερμικοί αισθητήρες παρουσιάζουν αντίσταση 30- 100 kΩ στους 25° C και είναι τόσο ευαίσθητοι που επηρεάζονται ακόμη και από την παρουσία ανθρώπων ή άλλων συσκευών. Για το λόγο αυτό η όλη διάταξη πρέπει να είναι απομονωμένη από το περιβάλλον και τις πιθανές εξωτερικές αλλαγές θερμοκρασίας.

### **2.2.6 Θερμογραφική Μέθοδος (Thermographic Methods)**

Η θερμογραφική μέθοδος χρησιμοποιεί κάμερα υπερύθρων ακτίνων για τη μέτρηση της κατανομής της θερμοκρασίας σε μια επιφάνεια, όπως φαίνεται στην Εικ. 19. Μπορεί να λειτουργήσει σαν παθητική τεχνική όπως η μέθοδος της θερμικής εκπομπής ή σαν ενεργητική τεχνική χρησιμοποιώντας θερμικούς παλμούς (Laser) για τη θέρμανση της επιφάνειας. Η βασική ιδέα είναι ότι εφόσον το υλικό είναι

ομοιογενές, η θερμότητα θα διαδοθεί ομοιόμορφα, ενώ αν υπάρχουν ελαττώματα η



διάχυση της θερμότητας θα αλλοιωθεί.

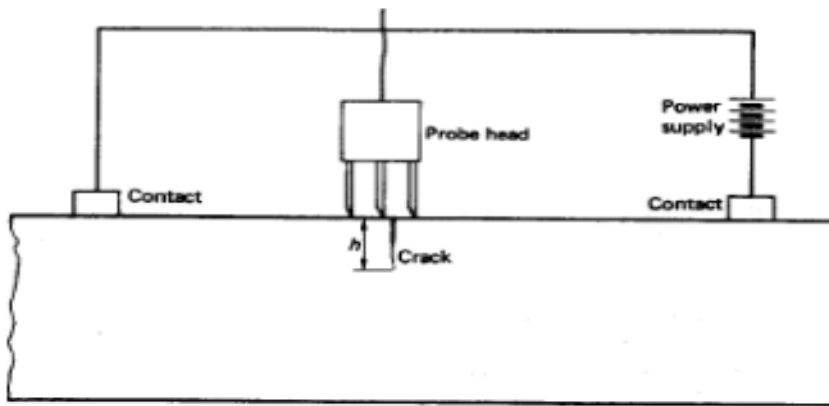
**Εικόνα 19 :** Θερμογραφικός έλεγχος επιφανείας.

## 2.2.7 Ηλεκτρικές μέθοδοι

Υπάρχουν πολλές ηλεκτρικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στον ΜΚΕ όπως για παράδειγμα, η μέτρηση της αντίστασης του υλικού, η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, και η χρήση του τριβοηλεκτρικού, του θερμοηλεκτρικού ή του εξωηλεκτρονίου φαινομένου. Όμως, οι δύο κύριες κατηγορίες μεθόδων είναι η μέθοδος πτώσης δυναμικού για εντοπισμό ρωγμών, και, ο έλεγχος ρευμάτων eddy (Foucault).

### 2.2.7.1 Μέθοδος της Πτώσης Δυναμικού (*Potential Drop*)

Η μέθοδος λειτουργεί με τη μέτρηση της τάσης στην επιφάνεια του μετάλλου, το οποίο διαρρέεται από σταθερό DC ή εναλλασσόμενο AC ρεύμα. Η παρουσία ρωγμών, ή άλλων ατελειών, προκαλεί μεταβολές στη αγωγιμότητα του υλικού και αντίστοιχα στη μετρούμενη τάση.

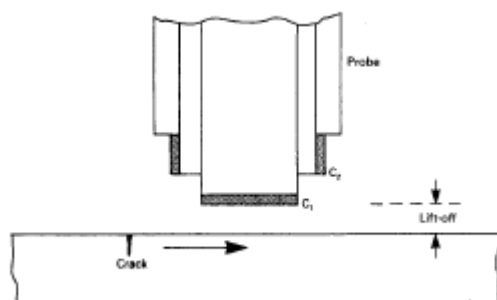


**Εικόνα 20 :** Μέθοδος Πτώσης Δυναμικού

Η ίδια συσκευή που χρησιμοποιείται για την παροχή του ρεύματος και τη μέτρηση της τάσης μπορεί να μετατρέψει τις μεταβολές της πτώσης δυναμικού σε μεταβολές του μήκους της ρωγμής, εφόσον φυσικά έχει προηγηθεί η κατάλληλη ρύθμιση. Η χρήση DC ρεύματος προσφέρει ευκολότερη τοποθέτηση και ρύθμιση, καθώς και μεγαλύτερη συσχέτιση τάσης και μήκους ρωγμής. Από την άλλη η χρήση AC ρεύματος απαιτεί πολύ μικρότερη ισχύ, διότι χάρις στο επιδερμικό φαινόμενο το ρεύμα κυκλοφορεί μόνο στην επιφάνεια του μετάλλου, έτσι δεν επηρεάζει την θερμοκρασία του δοκιμίου και επιπλέον επιτρέπει τη χρήση μιας πληθώρας τεχνικών για τη μείωση του θορύβου. Οι δύο τεχνικές των DC και AC ρευμάτων μπορούν επίσης να εφαρμοστούν ταυτόχρονα ώστε να συνδυάζονται τα προτερήματά τους και να βελτιώνονται τα αποτελέσματα. Η τεχνική λειτουργίας απεικονίζεται στην Εικ. 20.

### 2.2.7.2 Ρεύματα Eddy (Eddy-Current)

Στην μέθοδο ρευμάτων eddy χρησιμοποιείται ένα ζεύγος πηνίων που τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα συγκεκριμένης συχνότητας (Εικ. 21). Όταν αυτά βρεθούν κοντά στην επιφάνεια του μεταλλικού υλικού παράγουν σε αυτήν ρεύματα eddy τα οποία με τη σειρά τους δημιουργούν πεδίο που επιδρά στα πηνία και επηρεάζει το ρεύμα που τα διαρρέει. Οι αλλαγές αυτές μας πληροφορούν για την κατάσταση της επιφανείας του υλικού.



**Εικόνα 21 :** Μέθοδος ρευμάτων eddy.

Η βασική τεχνική είναι να μετακινείται η κεφαλή με τα πηνία πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου και να καταγράφεται κάθε αλλαγή στο ρεύμα και τη τάση των

πηνίων. Όταν στην επιφάνεια υπάρχουν ατέλειες, τα πεδία των ρευμάτων eddy αλλοιώνονται και επηρεάζουν διαφορετικά το ρεύμα των πηνίων.

### 2.2.7.3 Μακρινόπεδίο Ρευμάτων Eddy (Remote field testing - RFT)

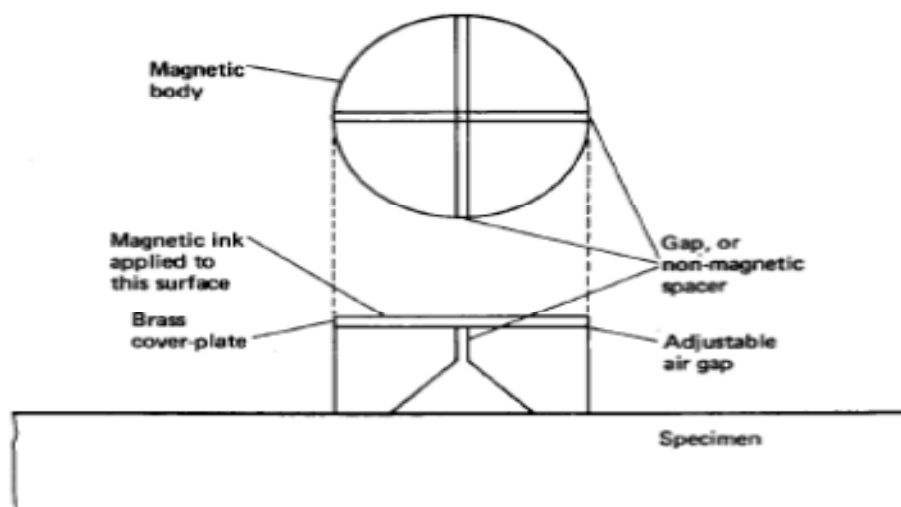
Μια παραλλαγή της μεθόδου είναι η μέτρηση του μακρινού πεδίου των ρευμάτων eddy που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο μικρών μεταλλικών σωλήνων με εσωτερικό καθετήρα. Η τεχνική παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα καθώς εντοπίζει με την ίδια ευαισθησία εσωτερικά και εξωτερικά ελαττώματα του τοιχώματος του σωλήνα. Χαρακτηριστικό της τεχνικής είναι ότι τα δύο πηνία είναι απομακρυσμένα, και το ένα χρησιμοποιείται σαν πομπός και το άλλο σαν δέκτης.

### 2.2.8 Μαγνητικές μέθοδοι

Οι μαγνητικές μέθοδοι ΜΚΕ βασίζονται στον εντοπισμό των απωλειών της μαγνητικής ροής λόγω ατελειών του υλικού. Όταν ένα δοκίμιο μαγνητίζεται και περιέχει μια ασυνέχεια στην επιφάνειά του ή κάτω από αυτήν, δημιουργείται μια παραμόρφωση στη μαγνητική ροή η οποία προκαλεί ένα τοπικό πεδίο απώλειας μαγνητικής ροής. Οι μέθοδοι βασίζονται στους νόμους του Maxwell (1873) και χρησιμοποιούν σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και πολύ ισχυρούς υπολογιστές. Οι μαγνητικές μέθοδοι ΜΚΕ μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε υλικά που μαγνητίζονται. Η πλέον χρησιμοποιούμενη μαγνητική μέθοδος ελέγχου είναι η τεχνική των μαγνητικών ρινιδίων σε μελάνι ή σκόνη.

#### 2.2.8.1 Έλεγχος με Μαγνητικά Ρινίδια (Magnetic Particles)

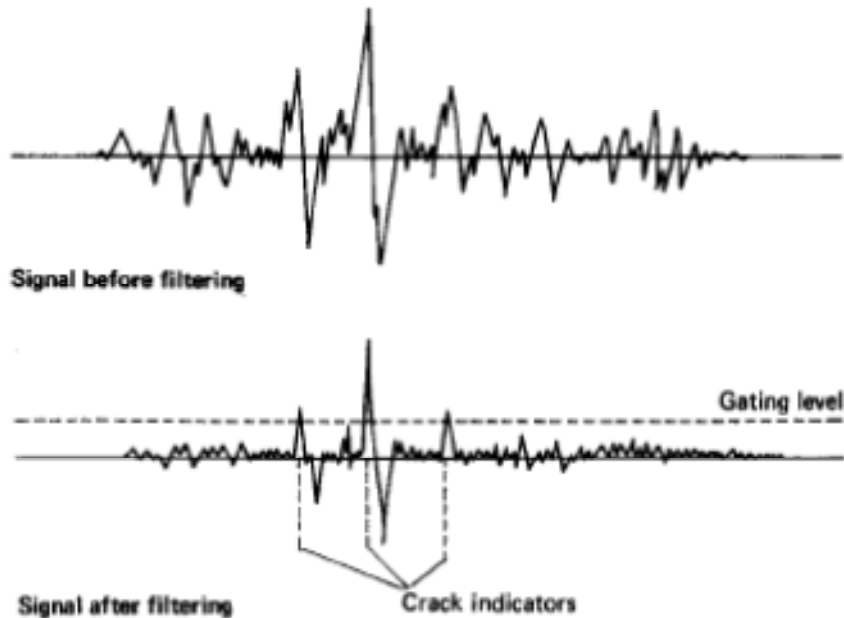
Τα υπό έλεγχο δοκίμια μαγνητίζονται κατάλληλα και στην επιφάνειά τους τοποθετούνται σιδηρομαγνητικά ρινίδια. Τα ρινίδια έλκονται και συγκεντρώνονται στα σημεία απώλειας της ροής, κάνοντας τις ατέλειες ορατές με γυμνό μάτι. Τα ρινίδια τοποθετούνται στην επιφάνεια ελέγχου είτε σαν χρωματιστό μαγνητικό μελάνι (magnetic ink) ή σαν μαγνητική σκόνη (magnetic particles).



Εικόνα 22 : Έλεγχος με Μαγνητικά Ρινίδια

### 2.2.8.2 Μαγνητογραφία (Magnetography)

Εναλλακτικά η μέτρηση της μαγνητικής ροής μπορεί να γίνει με ένα είδος μαγνητοταινίας η οποία πιέζεται στην επιφάνεια του μαγνητισμένου υλικού. Στη συνέχεια η ταινία αφαιρείται για επεξεργασία και ανάλυση των ενδείξεων. Η διαδικασία αυτή λέγεται μαγνητογραφία αλλά δεν είναι ακόμα ιδιαίτερα διαδεδομένη.



Εικόνα 23 : Μαγνητογραφικά σήματα πριν και μετά το φιλτράρισμά τους.

### 2.2.8.3 Εντοπισμός Απωλειών Μαγνητικής Ροής (Magnetic flux leakage - MFL)

Οι απώλειες μαγνητικής ροής μπορούν να καταγραφούν και με αισθητήρες που φέρουν πηνία ή μαγνητοδιόδους. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για σωλήνες, αγωγούς, δεξαμενές και συρματόσχοινα.

### 2.2.8.4 Έλεγχος Θορύβου Barkhausen (Barkhausen Noise)

Οι ατέλειες στη κρυσταλλική δομή ενός υλικού, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τις μηχανικές ιδιότητές του, είναι οι ίδιες που επηρεάζουν και τις μαγνητικές του ιδιότητες. Η μεταξύ τους σχέση δεν έχει γίνει ακόμη πλήρως κατανοητή αλλά διαπιστώθηκε ότι οι μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και των βημάτων Barkhausen παρέχουν πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες. Ο μαγνητισμός των υλικών συμβαίνει με μια σειρά μικρών βημάτων από τον ένα κόκκο στον άλλο. Αν συνδέσουμε το πηνίο μαγνητισμού με ένα μεγάφωνο, τα βήματα αυτά ακούγονται σαν μια σειρά από κλικ και συνθέτουν ένα θόρυβο (ένα ανάλογο φαινόμενο είναι η μαγνητοακουστική εκπομπή). Ο θόρυβος Barkhausen είναι ευαίσθητος στη παρουσία τάσεων, ρωγμών, μικρο-ατελειών, θερμικής κατεργασίας και πλαστικής παραμόρφωσης, και παρουσιάζει αιχμές και ακραίες τιμές που βοηθούν στον εντοπισμό τους.



### **2.2.9 Μηχανικοί Έλεγχοι**

Η μέθοδος Ακουστικής Πρόσκρουσης (Acoustic Impact) έρχεται από τα πρώτα χρόνια του σιδηροδρόμου όταν, οι ελεγκτές των οχημάτων, χτυπούσαν με σφυριά τους τροχούς του τραίνου για να διαπιστώσουν από τον ήχο τυχόν βλάβες. Σήμερα το «χτύπημα» έχει τυποποιηθεί και αυτοματοποιηθεί και ο ήχος αναλύεται ηλεκτρονικά ώστε να εξαχθούν οι χρήσιμες πληροφορίες. Υπάρχει μια σειρά τεχνικών που βασίζονται στην ίδια αρχή όπως είναι: η ηχητική μέθοδος (sonic), η ακουστική μέθοδος (acoustic), η μέθοδος μηχανικής εμπέδησης (mechanical impedence), και, η μέθοδος των δονήσεων (vibration).

### **2.2.10 Έλεγχοι Διαρροής (Leak Detection)**

Πολλές συσκευές σχεδιάζονται να λειτουργούν με υψηλή εσωτερική πίεση και κατά συνέπεια πρέπει να ελέγχονται για τυχόν διαρροές. Με τη μέθοδο εντοπισμού διαρροών διοχετεύεται αέριο ή υγρό υπό πίεση στη συσκευή και ελέγχουμε την παρουσία του στην άλλη πλευρά του τοιχώματος καθώς και τυχόν μειώσεις στη πίεση του. Υπάρχουν πολλές τεχνικές, σε άλλες διοχετεύεται αέριο ενώ το σώμα είναι βυθισμένο σε υγρό οπότε δημιουργούνται φυσαλίδες (bubble testing), και σε άλλες διοχετεύεται χρωματιστό ή φωσφορίζον υγρό το οποίο εντοπίζεται στην άλλη πλευρά με ειδικό φωτισμό π.χ. υπέρυθρες λυχνίες. Το αέριο που χρησιμοποιείται σήμερα είναι το ήλιο, λόγω της αδρανούς του φύσης. Κάθε τεχνική έχει διαφορετικές προδιαγραφές, ευαισθησία αλλά και κόστος.

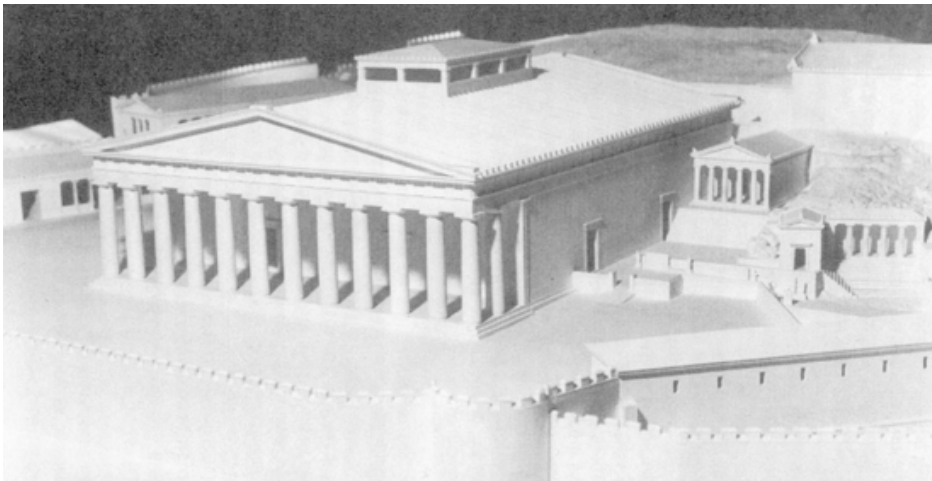
## **2.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΚΕ**

Τα αποτελέσματα οποιασδήποτε μεθόδου ΜΚΕ θα πρέπει, σε τελική ανάλυση, να ερμηνευτούν σωστά ώστε να αποφασιστεί η καταλληλότητα ή μη της κατασκευής που ελέγχθηκε. Παρόλο που η απόφαση αυτή πρέπει να βασιστεί και σε πολλές άλλες πληροφορίες που αφορούν τη σχεδίασή της, τα υλικά, την ηλικία, κλπ, τα οποία είναι αρμοδιότητα του σχεδιαστή, με τα χρόνια διαπιστώθηκε ότι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των ΜΚΕ είναι αρμοδιότητα των ειδικών της κάθε μεθόδου ΜΚΕ.

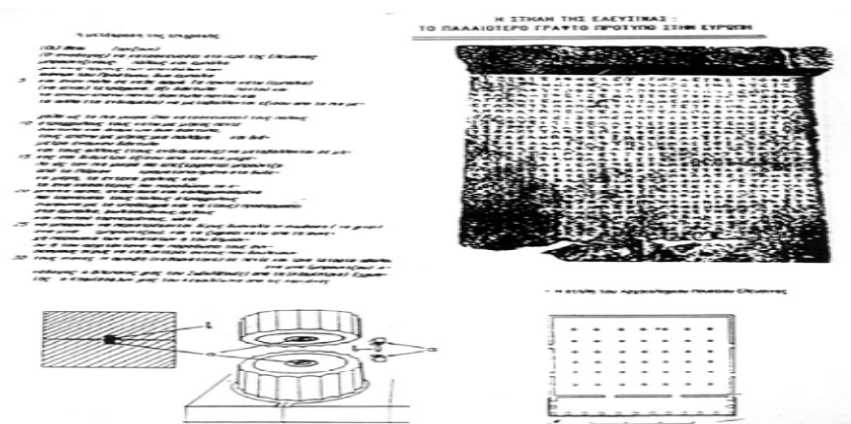
Σε κάθε τεχνική ΜΚΕ υπάρχουν τυχαία και συστηματικά σφάλματα. Τα συστηματικά σφάλματα είναι τα κυριότερα και οφείλονται κυρίως στους περιορισμούς της κάθε μεθόδου σε αντίθεση με τα τυχαία σφάλματα που είναι οι μικροδιαφορές που παρατηρούνται όταν μετρηθεί πολλές φορές η ίδια ατέλεια. Για παράδειγμα, η εμπειρία και τα εργαστηριακά πειράματα με υπερήχους έδειξαν ότι ενώ η παραδοσιακή μέθοδος παρουσίαζε σφάλμα 3-5mm, η εφαρμογή μιας καλά ρυθμισμένης TOFD μεθόδου μείωνε το σφάλμα στα 0.5-0.7mm, και η εφαρμογή της μεθόδου πτώσης δυναμικού στα 1-2mm. Οι βασικές αιτίες των συστηματικών σφαλμάτων κάθε μεθόδου και οι τρόποι βελτίωσής τους αποτελούν αντικείμενο σημαντικής έρευνας στο τομέα των ΜΚΕ.

## 2.4 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Οι αρχαίοι λαοί, Βαβυλώνιοι, Αιγύπτιοι, Έλληνες, Ρωμαίοι, Βυζαντινοί κ.λπ., μεγαλούργησαν στον τομέα των κατασκευών και μας άφησαν θαυμαστά και μεγαλειώδη δείγματα του πολιτισμού τους, μέσω των σωζόμενων μέχρι σήμερα μνημείων, όπως π.χ. είναι, οι Πυραμίδες της Αιγύπτου, τα Ανάκτορα της Κνωσού, ο Παρθενώνας της Αθήνας, το Κολοσσαίο και το Πάνθεο της Ρώμης, γέφυρες, υδραγωγεία κ.ά. Όμως λόγω της αγνείας των αρχών της Μηχανικής, της Αντοχής των Υλικών και των Μηχανικών ιδιοτήτων των Υλικών, από τους επιστήμονες της εποχής εκείνης, οι κατασκευές αυτές είναι ογκώδεις και μεγάλου βάρους. Τα μνημεία αυτά δε θα εσώζοντο μέχρι σήμερα εάν οι κατασκευαστές εκείνοι δεν εφήρμοζαν τον ποιοτικό έλεγχο, που ελλείπει των καταστροφικών ελέγχων διεξήγοντο μόνο με ΜΚΕ. Γνωρίζουμε ότι οι πρόγονοί μας εφήρμοζαν τους ΜΚΕ, με υποκειμενικό τρόπο, σε πολλές περιπτώσεις, όπως π.χ. για τον έλεγχο των νομισμάτων (κίβδηλα νομίσματα), του οίνου (άκρατος οίνος), ή των μπρούτζινων συνδέσμων (πόλων και εμπολίων), των μαρμαρίνων κίωνων της Φιλώνειας Στοάς του ναού της Ελευσίνας (Εικ. 24), σύμφωνα με το αρχαιότερο πρότυπο που περιέχεται στη μαρμαρίνη επιγραφή της Ελευσίνας, του 4ου π.χ. αιώνα (Εικ. 25).

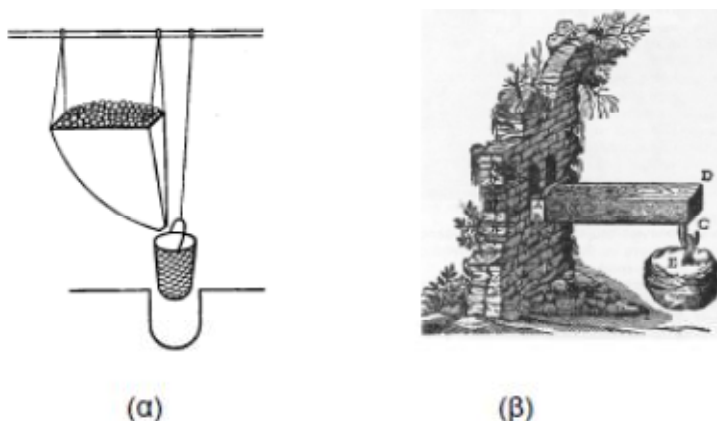


**Εικόνα 24:** Το τελεστήριο με τη Φιλώνεια Στοά μπροστά όπως φαίνεται στο υπόδειγμα (κατά Ι.Ν.Τραυλό) που εκτίθεται στο Μουσείο της Ελευσίνας.



**Εικόνα 25:** Η μαρμαρίνη στήλη της Ελευσίνας. Σύνδεσμοι σπονδύλων: (α) εμπόλια, (β) πόλοι και η κάτοψη του τελεστηρίου της Ελευσίνας με τους 14 κίονες της Φιλώνειας στοάς

Η πρόοδος αυτή σταματά στο Μεσαίωνα και αναζωογονείται πάλι κατά τη διάρκεια της Αναγεννήσεως. Ο πρώτος που ασχολήθηκε με την Αντοχή των Υλικών πειραματικά, είναι ο διάσημος Leonardo da Vinci το 15ο αιώνα (1452-1519), ο οποίος για τον εφελκυστικό έλεγχο μεταλλικών συρμάτων επινόησε το πείραμα της Εικ. 26 (α), το πρώτο στην ιστορία της αντοχής υλικών. Ενώ τον επόμενο αιώνα η αντοχή και ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών προωθούνται περαιτέρω με τη συμβολή του G. L. Galileo (1564-1642). Στην Εικ. 26 (β) βλέπουμε τον τρόπο διεξαγωγής ενός πειράματος κάμψεως δοκού υπό του Galileo.



**Εικόνα 26:** Το πείραμα του εφελκυσμού μεταλλικών συρμάτων του Leonardo da Vinci (1452-1519) (α) και το πείραμα της κάμψεως του G. L. Galileo (1564-1642) (β)

Από τότε μέχρι σήμερα πληθώρα μεγάλων επιστημόνων, κυρίως της Μηχανικής, συνέβαλαν στην εξέλιξη της Αντοχής των Υλικών με την ανάπτυξη των Καταστροφικών Μεθόδων, με τις οποίες προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών με αφαίρεση δείγματος από την κατασκευή και την καταπόνηση του σε κατάλληλο εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου, μέχρι την πλήρη καταστροφή του. Με τις καταστροφικές μεθόδους όμως, δε μπορεί να ελεγχθεί όλη η κατασκευή, γιατί ότι ελέγχεται, επειδή καταστρέφεται, δε ξαναχρησιμοποιείται. Οι Καταστροφικοί Έλεγχοι (ΚΕ) δε μπορούν να εφαρμοστούν επομένως για τον έλεγχο ολοκλήρου της κατασκευής, ή όλων των προϊόντων, ή για τον έλεγχο κατασκευών που βρίσκονται σε λειτουργία. Συνεπώς δε μπορούν να εφαρμοσθούν σύμφωνα με τις αρχές της ολικής ποιότητας για τον ποιοτικό έλεγχο των υλικών. Επίσης οι ΚΕ είναι ακατάλληλοι για τον έλεγχο κατασκευών υψηλού κινδύνου, ή μεγάλης αρχαιολογικής αξίας, όπως είναι τα μνημεία, τα αγάλματα, οι πίνακες ζωγραφικής κ.ά. αρχαιολογικά ευρήματα. Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται σήμερα με επιτυχία, με την εφαρμογή των ΜΚΕ.

Ο άνθρωπος εφήρμοζε τους ΜΚΕ με υποκειμενικό όμως τρόπο, χωρίς δηλαδή τις σύγχρονες τεχνολογίες, από αρχαιοτάτων χρόνων και τις εφαρμόζει ακόμη και σήμερα με παρόμοιο τρόπο χρησιμοποιώντας τις πέντε αισθήσεις που η μητέρα φύση του χάρισε, δηλαδή την ακοή, την όραση, την όσφρηση, τη γεύση και την αφή. Οι ΜΚΕ δε θα είχαν αναπτυχθεί εάν προηγουμένως δεν είχε σημειωθεί πρόοδος σε άλλες συγγενείς επιστήμες, όπως τη Φυσική, τη Μηχανική, την Πληροφορική, την Ηλεκτρονική κ.ά. επιστήμες. Δε θα είχε αναπτυχθεί, π. χ., η μέθοδος των υπερήχων, εάν προηγουμένως δεν είχε ανακαλυφθεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο το 1880, από τα παιδιά της Μαρίας Curie. Θεωρείται ότι οι ΜΚΕ, με τη σύγχρονη μορφή τους εμφανίζονται για πρώτη φορά στις 8 Νοεμβρίου του 1895, όταν ο Γουλιέλμος

Roentgen, που φαίνεται στην επόμενη Εικ. 27 (α), ανακάλυψε τις ακτίνες Χ. Στην ίδια επίσης Εικ. 27 (β) φαίνεται η πρώτη ακτινογραφία στον κόσμο, που παριστά το χέρι της συζύγου του Roentgen, της Bertha, την οποία ο ίδιος τράβηξε στις 2-12-1895.



(α)



(β)

**Εικόνα 27:** Ο Γουλιέλμος Roentgen 1845-1923 (α) και η πρώτη ακτινογραφία (2-12-1895), το χέρι της συζύγου του Bertha (β)

### 3. ΥΠΕΡΗΧΟΙ - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

#### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το φαινόμενο που εμείς συλλαμβάνουμε σαν ήχο είναι μία περιοδική αλλαγή της πίεσης του αέρα πάνω στο τύμπανο του αυτιού μας, που συμβαίνει σε ορισμένες συχνότητες. Το αυτί μας φυσιολογικά μπορεί να συλλάβει ήχους στις συχνότητες μεταξύ 16 και 20.000Hz. Οι ήχοι πέρα από τα 20.000Hz δεν είναι ακουστοί από το ανθρώπινο αυτί και αποτελούν το φάσμα των υπερήχων (Ultrasound). Η διαίρεση αυτή είναι αυθαίρετη από φυσική και βιολογική σκοπιά. Ο ήχος στις συχνότητες μεταξύ 100KHz και 20MHz αποκτά ιδιότητες που πλησιάζουν περισσότερο τις ιδιότητες του φωτός παρά του συνήθους ήχου. Στις συχνότητες αυτές οι ήχοι μπορούν να περιορισθούν σε στενές δέσμες, να εστιασθούν με υπερηχητικούς φακούς για δημιουργία ισχυρών εστιακών φαινομένων ή να προβληθούν σε μικρές δεσμίδες για διαγνωστικούς σκοπούς.

Ο ήχος είναι μια οργανωμένη κίνηση σωματιδίων ή μορίων που προκαλείται από ένα σώμα που πάλλεται μέσα σε κάποιο υλικό. Αντίθετα από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, όπως ακτίνες Χ, ακτίνες γ, φως κ.λπ., ο ήχος δεν μπορεί να διαδοθεί μέσα από κενό. Για τη διάδοση του ήχου πρέπει να υπάρχει ύλη (αέρια, υγρά ή στερεά). Τα μόρια από τα οποία αποτελείται η ύλη από την οποία περνάει ο ήχος, αρχίζουν να κάνουν μια κίνηση προς την κατεύθυνση του ήχου. Για να αντιληφθούμε το φαινόμενο αυτό θα πρέπει να φανταστούμε ότι η ύλη αποτελείται από σωματίδια ή μόρια που το ένα συνδέεται με τα γειτονικά με ελαστικό δεσμό, έτσι ώστε, αν ένα σωματίδιο μετακινηθεί προς τα αριστερά, ο ελαστικός δεσμός του με το δεξιό σωματίδιο τεντώνεται και το σωματίδιο αποκτά δυναμική ενέργεια και θέλει να γυρίσει στην προηγούμενη θέση του. Λόγω όμως αδράνειας, περνάει αποκτώντας όλο και μεγαλύτερη κινητική ενέργεια πέρα από την αρχική θέση του προς τα δεξιά ώσπου να σταματήσει από το τέντωμα του ελαστικού δεσμού του με το αριστερό σωματίδιο. Έτσι το σωματίδιο θα κινηθεί προς τα αριστερά και μετά πάλι προς τα δεξιά, κάνοντας δονήσεις δεξιά - αριστερά της θέσης ηρεμίας χωρίς να φεύγει από τη θέση του. Η δόνηση θα συνεχιζόταν επ' άπειρο αν δεν υπήρχαν οι δυνάμεις τριβής, που ελαττώνουν βαθμιαία το εύρος κάθε δόνησης ή κύκλου. Η ενέργεια που καταναλίσκεται για υπερνίκηση της τριβής μετατρέπεται σε θερμότητα. Η ταχύτητα του σωματιδίου φτάνει το μέγιστο στη μέση μεταξύ των ακραίων θέσεων και μηδενίζεται στα ακραία σημεία. Όταν ένα σωματίδιο τεθεί σε δόνηση επηρεάζει τα διπλανά του με τις συνδέσεις με τους ελαστικούς δεσμούς. Ένα σωματίδιο που μετακινείται προς τα αριστερά παρασύρει το δεξιό του επίσης προς τα αριστερά και εκείνο το δεξιό του επίσης προς τα αριστερά και εκείνο το δεξιό του κ.ο.κ. και η κίνηση προχωρεί από όλα τα σωματίδια στην κατεύθυνση της κίνησης. Λόγω της ελαστικότητας των δεσμών, τα σωματίδια δεν κινούνται συγχρόνως, αλλά με κάποια καθυστέρηση και όσο πιο στερεοί είναι οι δεσμοί τόσο πιο λίγη η καθυστέρηση και γρηγορότερη η διάδοση της δόνησης.

Η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες, την ελαστικότητα και την πυκνότητα του μέσου. Ελαστικότητα είναι το μέτρο της στερρότητας των ελαστικών δεσμών μεταξύ των σωματιδίων του υλικού. Όσο μεγαλύτερη η στερρότητα αυτή τόσο η ελαστικότητα είναι μεγαλύτερη. Σε υλικό που μπορεί να συμπιεσθεί πολύ, όπως στον αέρα, ένα συγκεκριμένο μόριο πρέπει να κινηθεί σε αρκετή απόσταση πριν αρχίσει να επηρεάζει τα διπλανά του μόρια. Η ταχύτητα του κύματος σε τέτοιο υλικό θα είναι σχετικά μικρή. Επίσης, σε υλικό που αποτελείται από πυκνή διάταξη σωματιδίων (ψηλής πυκνότητας), τα σωματίδια και το κύμα θα κινούνται σχετικά αργά. Η ταχύτητα του ήχου στα αέρια είναι ελάχιστη λόγω της μεγάλης συμπιεστότητας τους. Στα υγρά η αύξηση της πυκνότητας συνοδεύεται συνήθως από ανάλογη ελάττωση της συμπιεστότητας. Για το λόγο αυτό, η ταχύτητα του κύματος στα υγρά, παρά τις μεγάλες διαφορές πυκνότητας, δεν ποικίλλει πάρα πολύ π.χ. ο υδράργυρος είναι 14 φορές πυκνότερος αλλά 13 φορές λιγότερο συμπιεστός από το νερό, έτσι ώστε η ταχύτητα του ήχου να είναι σχεδόν η ίδια στα δύο υγρά. Τα στερεά δεν είναι μόνο μη συμπιεστά αλλά παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση στη μετακίνηση των σωματιδίων τους. Γι' αυτό τα μόρια των στερεών δεν είναι ελεύθερα να κάνουν μεγάλες κινήσεις. Αποτέλεσμα αυτού είναι να απαιτείται μικρότερος χρόνος γι' αυτά τα μόρια να συμπληρώσουν τις περιορισμένες κινήσεις τους κι' έτσι η πρόοδος του κύματος στα στερεά είναι κατ' ακολουθία γρηγορότερη. Στα βιολογικά υλικά, οι ταχύτητες του ήχου στα μαλακά μόρια βρίσκονται πολύ κοντά στο νερό και διαφέρουν λίγο μεταξύ τους, ενώ τα οστά συμπεριφέρονται σαν στερεά, με αποτέλεσμα ταχύτητες τρεις φορές μεγαλύτερες των μαλακών μορίων.

Με την κίνηση που αναφέραμε, τα σωματίδια πλησιάζουν τα διπλανά τους που είναι ακίνητα, δημιουργείται δηλαδή ένα «πύκνωμα», ενώ στο άλλο πλάι τους που απομακρύνθηκαν από τα γειτονικά σωματίδια δημιουργείται ένα «αραίωμα». Στο πύκνωμα η τοπική πίεση είναι μεγαλύτερη ενώ στο αραίωμα μικρότερη από την πίεση ηρεμίας του μέσου. Με τη διαδοχική κίνηση αυτών των πυκνωμάτων-αραιωμάτων δημιουργούνται τα «ηχητικά κύματα» που διαδίδονται μέσα στην ύλη. Αν παραστήσουμε τη διάδοση του ήχου σαν κυματοειδή γραμμή, οι κορυφές αντιστοιχούν στα πυκνώματα του μέσου, ενώ οι κοιλάδες στα αραιώματα. Οι αποστάσεις μεταξύ πυκνωμάτων και αραιωμάτων, δηλαδή μεταξύ των κορυφών ή των κοιλάδων, μένουν σταθερές και ομαλές.

Συχνότητα είναι ο αριθμός των κυμάτων αυτών (πυκνωμάτων-αραιωμάτων) στο 1sec και εκφράζεται σε Hertz. Η συχνότητα έχει σημαντική επίδραση στο σχήμα της ηχητικής δέσμης. Η διεύρυνση της ηχητικής δέσμης καθώς προχωρεί ονομάζεται απόκλιση. Για μια συγκεκριμένη πηγή, όσο ψηλότερη είναι η συχνότητα τόσο μικρότερη είναι η απόκλιση. Η απόκλιση εξαρτάται και από τη διάμετρο της πηγής. Η ιδανική δέσμη θα ήταν να ξεκινάει από μικρή πηγή και να μην έχει απόκλιση.

Μήκος ηχητικού κύματος είναι η απόσταση μεταξύ των κορυφών δύο διαδοχικών κυμάτων. Στην Ιατρική για παράδειγμα τα μήκη των χρησιμοποιούμενων ηχητικών παλμών κυμαίνονται από 0,1 ως 1,5mm.

Ταχύτητα του κύματος είναι η ταχύτητα με την οποία οι κορυφές των πυκνωμάτων ή κυμάτων κινούνται στο υλικό. Ταχύτητα, συχνότητα και μήκος κύματος είναι τρεις βασικές ιδιότητες του ήχου και συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:  $v = f * \lambda$ , όπου  $v$  = ταχύτητα,  $f$  = συχνότητα και  $\lambda$  = μήκος κύματος. Η κατανόηση της εξίσωσης αυτής είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την κατανόηση της φυσικής των υπερήχων. Με τον τύπο αυτό μπορούμε να προσδιορίσουμε το μήκος κύματος σε ένα υλικό, ενός ηχητικού κύματος συγκεκριμένης ταχύτητας. Σε ένα μέσο, όπου η ταχύτητα του ήχου είναι 1540m/sec, η εξίσωση δείχνει ότι μόνο στις συχνότητες πάνω από 1MHz, το μήκος κύματος θα είναι 1mm και κάτω. Είναι γνωστό όμως ότι μόνο σε μήκος

κύματος κάτω του 1mm η ηχητική δέσμη είναι αρκετά στενή και μπορεί να κατευθυνθεί ώστε να απεικονίζει στόχους με επαρκή σαφήνεια για διαγνωστικούς σκοπούς.

Ένταση ήχου είναι η δύναμη ενός ήχου, που μετράται συνήθως με το ύψος του κύματος του (ύψος του ήχου).

### 3.2 ΤΥΠΟΙ ΚΥΜΑΤΩΝ (WAVEMODES)

1. Διαμήκη κύματα ή κύματα συμπίεσης (longitudinal/compression waves). Η διεύθυνση της ταλάντωσης είναι η ίδια με τη διεύθυνση της μετάδοσης του κύματος. Μεταδίδονται σε στερεά, υγρά και αέρια σώματα. Η ταχύτητα μετάδοσης δίνεται από τον τύπο:

$$C_L \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.1)$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και ρ η πυκνότητά του. Έχουν τη μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης από όλους τους τύπους κυμάτων. Άρα, για δεδομένη συχνότητα και υλικά διάδοσης προκύπτει από τον τύπο  $c = \lambda \times f$  ότι έχουν το μεγαλύτερο μήκος κύματος, και επομένως τη μικρότερη αποδυνάμωση του ήχου αλλά και τη μικρότερη (χειρότερη) ευαισθησία. Παρουσιάζουν επίσης την μικρότερη εγγύς ζώνη N και τη μεγαλύτερη γωνία απόκλισης δέσμης για δεδομένη διάμετρο κρυστάλλου, υλικό και συχνότητα διάδοσης.

2. Εγκάρσια ή διατμητικά κύματα (transverse/shear waves). Η διεύθυνση της ταλάντωσης είναι κάθετη προς τη διεύθυνση της μετάδοσης του κύματος. Μεταδίδονται μόνο σε στερεά σώματα, διότι τα υγρά και αέρια δεν παρουσιάζουν ελαστικότητα σε εγκάρσια φόρτιση. Έχουν ταχύτητα διάδοσης περίπου τη μισή των διαμηκών (στο ίδιο υλικό) και επομένως, για την ίδια συχνότητα, έχουν τη διπλάσια περίπου ευαισθησία και πολύ μεγαλύτερη αποδυνάμωση. Για την ίδια διάμετρο κρυστάλλου, έχουν μεγαλύτερη εγγύς ζώνη N και μικρότερη γωνία απόκλισης δέσμης.

Η ταχύτητα μετάδοσης δίνεται από τον τύπο:

$$C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.2)$$

όπου G το εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας του υλικού και ρ η πυκνότητά του.

3. Επιφανειακά κύματα (surface) ή κύματα Rayleigh. Πρόκειται για κύματα που μεταδίδονται μόνο στην επιφάνεια των στερεών, σε βάθος ενός περίπου μήκους κύματος. Τα επιφανειακά κύματα μπορούν να αποσβεστούν (dampen) θέτοντας νερό, ορυκτέλαιο ή απλώς ένα δάκτυλο πάνω στην επιφάνεια που μεταδίδονται. Παραγωγή επιφανειακών κυμάτων γίνεται με κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης ( $2^{\text{η}}$  κρίσιμη γωνία), ώστε το διαθλώμενο εγκάρσιο κύμα να σχηματίζει γωνία  $90^\circ$  με τον κάθετο στη διεπιφάνεια άξονα. Τα επιφανειακά κύματα ταξιδεύουν στην επιφάνεια ακόμη και αν αυτή παρουσιάζει ελαφρά καμπυλότητα και ανακλώνται όπου συναντούν ακμές ή γωνίες. Τα δονούμενα σωματίδια που μεταδίδουν επιφανειακά κύματα κινούνται σε ελλειπτική τροχιά. Η

ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων είναι περίπου ίση με το ενενήντα τοις εκατό (0.9) της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων στο ίδιο υλικό.

4. Κύματα ελασμάτων (Plate) ή κύματα Lamb, δημιουργούνται όταν υπερηχητικές δονήσεις μεταδίδονται σε σχετικά λεπτά ελάσματα (πάχους μερικών μόνο μηκών κύματος), η μετάδοση ενέργειας παίρνει τη μορφή κυμάτων "ελασμάτων". Η τροχιά των μορίων ομοιάζει κάπως με την ελλειπτική τροχιά των επιφανειακών κυμάτων αλλά είναι αρκετά πιο πολύπλοκη. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι κυμάτων (συμμετρικά - symmetrical και ασύμμετρα -asymmetrical) και πολλοί δευτερεύοντες (1<sup>ος</sup>, 2<sup>ος</sup>, 3<sup>ος</sup> κλπ.). Χαρακτηριστικό των κυμάτων Lamb είναι ότι όλο το λεπτό έλασμα δονείται σαν ένα σώμα. Η ταχύτητα τους εξαρτάται και από τη συχνότητα.

### 3.2.1 Υπολογισμός ταχύτητας διάδοσης

Η ταχύτητα διάδοσης εξαρτάται από την πυκνότητα  $\rho$  του μέσου διάδοσης (σε  $\text{kg/m}^3$ ) και το μέτρο ελαστικότητας  $E$  του υλικού (σε  $\text{N/m}^2$ ), σύμφωνα με τη σχέση.

$$C_L \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.3)$$

Για τον χάλυβα ( $E=210 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $\rho=7,85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) προκύπτει ταχύτητα διάδοσης πρακτικά ίση με  $6000 \text{ m/sec}$ , για τα διαμήκη κύματα, ενώ για το αλουμίνιο περίπου  $6.400 \text{ m/sec}$ . Ο ανωτέρω τύπος είναι προσεγγιστικός και όχι ακριβής, διότι δεν έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος του Poisson  $\mu$ .

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας εγκάρσιων κυμάτων, ο τύπος γίνεται:

$$C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.4)$$

όπου  $G$  το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση.

Ο χάλυβας παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων ( $3,230 \text{ m/sec}$ ), ενώ στο αλουμίνιο η αντίστοιχη ταχύτητα είναι  $3.130 \text{ m/sec}$ . Πρακτικά, η ταχύτητα του εγκάρσιου κύματος θεωρείται περίπου η μισή του διαμήκους στο αυτό μέσο. Επειδή τα υγρά και τα αέρια δεν παρουσιάζουν ελαστικότητα σε διάτμηση, μεταδίδουν μόνο διαμήκη κύματα. Η ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων πρακτικά θεωρείται ίση με το 90% της ταχύτητας των εγκάρσιων. Η ταχύτητα κυμάτων Lamb (ή platewaves) εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (υλικό διάδοσης, συχνότητα, γωνία πρόσπτωσης, πάχος ελάσματος).

Το γινόμενο της πυκνότητας  $\rho$  επί την ταχύτητα διάδοσης ο καλείται ακουστική αντίσταση (acoustic impedance), μετράται σε  $\text{kg/m}^2/\text{sec}$  και συμβολίζεται με  $Z (= \rho \times c)$ .



**Πίνακας 3.1 Πυκνότητα, ταχύτητα διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων. Ακουστική αντίσταση διαφόρων υλικών**

Υλικό	Πυκνότητα $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Ταχύτητα $C_L$ (m/sec)	Ταχύτητα $C_T$ (m/sec)	Ακουστική Αντίσταση $Z$ (Kg/m <sup>2</sup> /sec)
Αλουμίνιο (2SO)	2710	6350	3130	17,2×10 <sup>6</sup>
Χαλκός	8900	4660	2260	41,8×10 <sup>6</sup>
Μόλυβδος	11400	2160	700	24,6×10 <sup>6</sup>
Χάλυβας	7850	5920	3230	45,6×10 <sup>6</sup>
Quartz (χαλαζίας)	2650	5760	2200	15,3×10 <sup>6</sup>
Perspex-Plexiglas	1180	2730	1430	3,2×10 <sup>6</sup>
Νερό (20° C)	1000	1480	-	1,5×10 <sup>6</sup>
Αέρας	1,3	330	-	330
Λάδι λιπάνσεως	870	1740	-	1,5×10 <sup>6</sup>

### 3.2.2 Ένταση του ήχου

Ο ήχος (και ο υπέρηχος), εφόσον προσδιορίστηκε σαν κύμα που μεταφέρει ενέργεια πίεσεως, έχει σαν χαρακτηριστικό και την ένταση. Για τη σύγκριση της ηχητικής έντασης (ή ηχητικής πίεσης) δύο ήχων, χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα με βάση το 10 και σαν μονάδα το Bell. Στην πράξη, σαν μονάδα χρησιμοποιείται το ένα δέκατο (0,1) του Bell, δηλαδή το 1 dB (ντεσιμπέλ).

Η σχέση σε dB μεταξύ δύο ήχων πίεσης  $P_1$  και  $P_2$  δίνεται από τον τύπο:

$$I = 10 \log(P_2^2 / P_1^2) \quad (3.5)$$

$$\text{ή απλούστερα } I = 20 \log(P_2 / P_1) \quad (3.6)$$

Ο λόγος  $P_2/P_1$  καλείται και συντελεστής αύξησης (gainfactor).

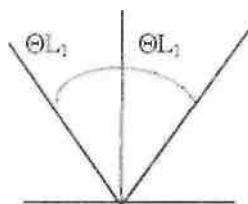
Επειδή στην οθόνη της συσκευής υπερήχων η πίεση (πλάτος του κύματος) μεταφράζεται σε ύψος του σήματος, προκύπτει ότι διπλασιασμός του ύψους σήματος σημαίνει αύξηση (gain) 6 dB και δεκαπλασιασμός του αύξηση 20 dB. Λόγω των μαθηματικών ιδιοτήτων των λογαρίθμων, ισχύει επίσης ότι υποδιπλασιασμός του σήματος σημαίνει -6dB και υποδεκαπλασιασμός -20dB.

### 3.3 ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

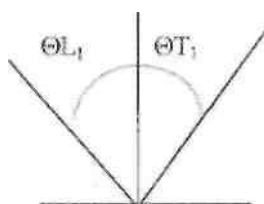
#### 3.3.1 Ανάκλαση και διάθλαση του ηχητικού κύματος. Νόμος του Snell

Όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μία επιφάνεια διαφορετικής ακουστικής αντίστασης, τότε συμβαίνουν ταυτόχρονα ανάκλαση, διάθλαση και μετατροπή τύπου. Οι σχετικές γωνίες πρόσπτωσης, ανάκλασης και διάθλασης συσχετίζονται σύμφωνα με το νόμο του Snell, όπου:

- $L$  : για διαμήκη κύματα,
- $T$  : για εγκάρσια κύματα,
- 1 και 2 : για τα μέσα διάδοσης 1 και 2.
- $C$  : η ταχύτητα μετάδοσης του κύματος (στο μέσο 1 ή 2 με δείκτη  $L$  για διάμηκες και  $T$  για εγκάρσιο κύμα).



Σχήμα 3.1 : Ανάκλαση διαμήκους σε διάμηκες κύμα.



Σχήμα 3.2 : Ανάκλαση διαμήκους σε εγκάρσιο κύμα.

$$\frac{hm\eta L_1}{CL_1} = \frac{hm\eta T_1}{CT_1} \quad (3.7)$$

Η γωνία ανάκλασης είναι πάντα ίση με τη γωνία πρόσπτωσης. Αν λάβουμε υπόψη μας ότι  $CL_1 \approx 2CT_1$ , προκύπτει ότι  $\eta m\theta_{L_1} \approx 2\eta m\theta_{T_1}$  και άρα  $\theta_{T_1} < \theta_{L_1}$ .

#### 3.3.2 Εφαρμογές του Νόμου Snell

Με αξιοποίηση του Νόμου του Snell παράγονται και διαδίδονται μόνο εγκάρσια κύματα σε ένα υλικό, με συγκεκριμένη γωνία διάθλασης, παρότι από τον κρύσταλλο εκπέμπονται μόνο διαμήκη κύματα. Τα εγκάρσια κύματα παράγονται στο χάλυβα σε γωνίες μεταξύ  $38^\circ$  και  $80^\circ$  και συνήθως σε τυποποιημένες τιμές  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  και  $70^\circ$ . Ο νόμος του Snell έχει εφαρμογή όχι μόνο στην περίπτωση ηχητικών κυμάτων αλλά και γενικότερα (π.χ. σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα).

### 3.3.3 Ακουστική αντίσταση (Acoustic Impedance)

Ακουστική αντίσταση  $Z$  (Acoustic Impedance) καλείται το γινόμενο της πυκνότητας  $\rho$  και της ταχύτητας διάδοσης του κύματος  $c$ .

$$Z = \rho \times c \quad (3.8)$$

Σε μία διεπιφάνεια (δηλ. μεταξύ μέσων διαφορετικής ακουστικής αντίστασης), ένα μέρος της συνολικής ενέργειας ( $R_o$ ) ανακλάται και επιστρέφει στο μέσον 1 ( $R$ ) και ένα μέρος συνεχίζει τη μετάδοση του στο μέσον 2 ( $R_t$ ). Ισχύει η σχέση:

$$\frac{R}{R_o} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (3.9)$$

Ο λόγος  $R/R_o$  καλείται και δείκτης ανάκλασης (Reflection factor). Το ποσοστό λοιπόν της μεταδιδόμενης ενέργειας είναι:

$$\frac{R_t}{R_o} = 1 - \frac{R}{R_o} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3.10)$$

Ο λόγος  $R_t/R_o$  καλείται και δείκτης μετάδοσης.

## 3.4 ΚΕΦΑΛΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

### 3.4.1 Παραγωγή Υπερήχων

Υπέρηχοι παράγονται:

- Με το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (Curie, 1880)
- Με το φαινόμενο μαγνητο-συστολής (Magnetic-strictive, Joule 1847)

Στη μέθοδο υπερήχων χρησιμοποιείται σχεδόν πάντα το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο: Όταν εφαρμόζεται (εναλλασσόμενη) ηλεκτρική τάση σε ένα στοιχείο (κρύσταλλο) τότε αυτό διαστέλλεται και συστέλλεται, παράγοντας δόνηση υψηλής συχνότητας (άρα λειτουργεί ως πομπός υπερήχων). Όταν, αντίστροφα, το στοιχείο δέχεται κύματα πίεσης (υπέρηχο), παράγεται ηλεκτρική τάση (άρα το στοιχείο λειτουργεί σαν δέκτης). Μία κεφαλή υπερήχων μπορεί να έχει ένα μόνο στοιχείο (πομπό + δέκτη) είτε δύο (δίδυμη κεφαλή). Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία (συνήθως αποκαλούμενα "κρύσταλλοι") είναι σήμερα 3 ειδών κυρίως:

α. Κρύσταλλοι χαλαζία (quartz). Πρόκειται για κρυσταλλικό Οξειδίο του Πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ). Το "κλασσικό" πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, με υψηλή χημική, ηλεκτρική και θερμική σταθερότητα, αδιάλυτο, σκληρό και υψηλής αντίστασης σε φθορά. Είναι όμως πομπός πολύ μικρής απόδοσης αλλά και δέκτης χωρίς ιδιαίτερα ικανοποιητικά χαρακτηριστικά. Οι κρύσταλλοι χαλαζία μπορούν να κοπούν κάθετα προς τον άξονα  $-X$ , οπότε παράγουν διαμήκη κύματα, είτε κάθετα προς τον άξονα  $-Y$ , οπότε παράγουν εγκάρσια κύματα. Αυτό όμως δεν είναι τόσο σημαντικό, διότι τα εγκάρσια κύματα παράγονται με μετατροπή τύπου μέσω κατάλληλης γωνίας πρόσπτωσης διαμήκους κύματος (μεγαλύτερη από την  $1^\circ$  και

μικρότερη από την 2<sup>η</sup> κρίσιμη). Το πάχος του κρυστάλλου επιδρά άμεσα στο παραγόμενο μήκος κύματος ( $T = \lambda/2$ ) και γι' αυτό λεπτοί κρύσταλλοι μεγάλων συχνοτήτων (π.χ. 10-15MHz) χρησιμοποιούνται μόνο στη μέθοδο βύθισης, διότι στη μέθοδο επαφής είναι εύκολο να σπάσουν.

β. Πολωμένα κεραμικά (polarized ceramics). Πρόκειται για προϊόντα πυροσυσσωμάτωσης, που παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες πομπού (πολύ μεγάλη απόδοση). Είναι αδιάλυτα αλλά γηράσκουν γρήγορα και γίνονται ψαθυρά. Αντικαθιστούν ολοένα και περισσότερο τους κρυστάλλους χαλαζία. Τα κοινότερα κεραμικά για υπέρηχους είναι: Bariumtitanate, Leadmetaniobate, Leadzirconate και Leadzirconatetitanate.

γ. Στοιχεία από LithiumSulphate. Είναι οι αποτελεσματικότεροι δέκτες και μέτριοι ως πομποί, αλλά δυστυχώς διαλυτοί στο νερό και θραύονται εύκολα.

### 3.4.2. Κεφαλές Υπερήχων

Ο κρύσταλλος τοποθετείται σε κατάλληλο περίβλημα και σε απόλυτη επαφή με υλικό υποστήριξης, για να επιτυγχάνεται μικρή διάρκεια παλμού. Το υλικό υποστήριξης είναι συνήθως epoxy (πλαστικό με ισχυρή απορρόφηση). Μπροστά από τον κρύσταλλο υπάρχει ακρυλικό υλικό (perspex), προκειμένου να διαφυλάσσεται ο κρύσταλλος από τριβή/φθορά είτε σπάσιμο. Αυτό το ακρυλικό υλικό μπορεί να έχει και μορφή "σφήνας", ώστε να δίνεται η κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης στη διεπιφάνεια perspex-δοκιμίου (γωνιακές κεφαλές). Προκειμένου να έχουμε καλύτερη επαφή κεφαλής-δοκιμίου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ειδικά "παπουτσάκια" από ακρυλικό, με καμπυλότητα ίδια με αυτή του δοκιμίου. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε επίσης στοιχεία από ακρυλικό σαν "φακούς εστίασης" (focuslenses), κυλινδρικούς ή σφαιρικούς (γραμμική εστίαση και σημειακή εστίαση αντίστοιχα).

Στην περίπτωση της μεθόδου βύθισης, εκτός από τις κλασσικές κεφαλές βύθισης, έχουμε και τις περιπτώσεις συνδυασμού κεφαλής-στήλης νερού (bubbler) ή κεφαλής-ακροφυσίου (squitter/waterjet) ή ακόμη και κεφαλής-ελαστικής ρόδας (wheeltransducer). Το ηλεκτρικό σήμα από και προς τον κρύσταλλο οδηγείται μέσω ομοαξονικού καλωδίου (coaxialcable), για αποφυγή παρεμβολών και ηλεκτρικών θορύβων.

### 3.4.3 Κεφαλές τύπου μωσαϊκού και τύπου βούρτσας

Προκειμένου για ταυτόχρονη σάρωση μεγαλύτερης σχετικά επιφάνειας, κατασκευάζονται κεφαλές με κρυστάλλους είτε τύπου μωσαϊκού είτε τύπου βούρτσας. Οι κρύσταλλοι τύπου μωσαϊκού (mosaictransducer) αποτελούνται από πολλαπλά στοιχεία, τα οποία διεγείρονται είτε ταυτόχρονα είτε με συγκεκριμένη χρονική απόσταση (οπότε και μπορούν να λειτουργήσουν σαν γραμμικό άνωσμα-lineararray είτε με διαφορετική εστιακή απόσταση).

Αντίθετα, κρύσταλλοι τύπου βούρτσας (paintbrushtransducer) αποτελούνται συνήθως από ένα μόνο στοιχείο με μεγάλο λόγο μήκους προς πλάτος. Μπορούν να κάνουν ταυτόχρονα σάρωση σε μεγάλο σχετικά μήκος του δοκιμίου, αλλά βεβαίως δεν παρέχουν την ίδια ευαισθησία και διακριτική ικανότητα όπως μικρότεροι κρύσταλλοι.

### 3.4.4 Συσσκευή Υπερήχων

Η σκανδάλη δίνει το έναυσμα για κάθε παλμό σε μία γεννήτρια παλμών, ο οποίος με τη σειρά του ενεργοποιεί για ελάχιστο χρόνο σε κάθε παλμό, τον πομπό ραδιοσυχνοτήτων που προκαλεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο κρύσταλλο της κεφαλής στο και άρα έχουμε εκπομπή υπερήχων. Ταυτόχρονα η σκανδάλη ενεργοποιεί τη ρύθμιση χρονικής βάσης του Παλμογράφου Καθοδικών ακτινών (CRT) αλλά και προξενεί την εμφάνιση του αρχικού παλμού (initialpulse) στην οθόνη του παλμογράφου.

Εάν επιστρέφει ήχος στην κεφαλή, μετατρέπεται από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο σε ηλεκτρική τάση, η οποία ενισχύεται και οδηγείται στις πλάκες Y του παλμογράφου (οπότε εμφανίζεται ύψος σήματος ανάλογα με την ένταση του επιστρέφοντος ήχου). Το χρονικό διάστημα που παρήλθε από το έναυσμα ως την επιστροφή του ήχου, μέσω των πλακών X, τοποθετεί το σήμα στην οριζόντια κλίμακα.

Η ταχύτητα του ήχου στο δοκίμιο λαμβάνεται υπόψη μέσω της βαθμονόμησης της χρονικής βάσης (οριζόντια κλίμακα της οθόνης), ώστε να απεικονίζονται πάχη υλικού παρά χρόνος. Το σήμα στην οθόνη μπορεί να είναι υπό μορφή ραδιοσυχνότητας (οπότε και διατηρεί περισσότερες πληροφορίες από το επιστρέφον ακουστικό σήμα) ή ανορθωμένο μορφής video (ημι- είτε πλήρως ανορθωμένο). Το ηλεκτρικό σήμα πριν τον ενισχυτή είναι της τάξεως χιλιοστών του Volt και η ενίσχυση είναι λογαριθμική. Ο ηλεκτρικός παλμός είναι της τάξεως μερικών εκατοντάδων Volts. Η συχνότητα επανάληψης παλμών (pulseretitionrate) πρέπει να είναι μεγάλη, για να έχουμε ενισχυμένα (φωτεινά) σήματα στον παλμογράφο αλλά και δυνατότητα μεγάλης ταχύτητας σάρωσης ( $V \leq D \times PRR$ ). Εξαιρετικά μεγάλη συχνότητα επανάληψης όμως μπορεί να δημιουργήσει μη σχετικές ή ψευδείς ενδείξεις.

### 3.4.5 Υλικό Σύζευξης (Couplant)

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η διάδοση του υπέρηχου από την κεφαλή στο εξεταζόμενο δοκίμιο, πρέπει να παρεμβληθεί ένα Υλικό Σύζευξης (Couplant), για τους εξής λόγους:

1. Ο κυριότερος λόγος είναι η απομάκρυνση του αέρα ακόμα και σε μορφή μικρών φυσαλίδων, ο οποίος έχει χαμηλή ακουστική αντίσταση. Μία διεπιφάνεια με αέρα ανακλά παρά επιτρέπει τη συνέχιση της διάδοσης του υπέρηχου.

2. Το υλικό σύζευξης πρέπει να "γεμίζει" όλες τις επιφανειακές ανωμαλίες ή τραχύτητες και έτσι να επιτρέπει το ομαλό "γλίστρημα" της κεφαλής πάνω στο δοκίμιο στην μέθοδο με επαφή (contacttest) και επιπλέον να μη προκαλείται γρήγορα φθορά στην κεφαλή. Άρα το υλικό, στη μέθοδο επαφής, πρέπει να έχει και κάποιες "λιπαντικές ιδιότητες". Οι κυριότερες ιδιότητες ενός καλού υλικού σύζευξης είναι οι εξής:

α. Ακουστική αντίσταση ενδιάμεση εκείνη της κεφαλής και του δοκιμίου και μάλλον πιο κοντά προς το δοκίμιο.

β. Εύκολη εφαρμογή του πάνω στο δοκίμιο, χωρίς να φεύγει ή να "τρέχει" πολύ εύκολα, αλλά επιπλέον να είναι σχετικά εύκολη η απομάκρυνση του.

γ. Να μην είναι διαβρωτικό.

δ. Να μην είναι τοξικό ή επικίνδυνο για την υγεία, γενικά.

ε. Να διαβρέχει καλά όλες τις επιφάνειες του δοκιμίου και της κεφαλής και να μην επιτρέπει τη δημιουργία ακόμα και πολύ μικρών φυσαλίδων.

Στη μέθοδο με βύθιση (immersionmethod) χρησιμοποιείται νερό σαν μέσο σύζευξης (ενδεχόμενα με διαβρεκτικό παράγοντα/ wettingagent και αντιδιαβρωτικό). Στην μέθοδο με επαφή (contactmethod) χρησιμοποιείται λάδι, λίπος, γλυκερίνη, νερό μαζί με διαβρεκτικό παράγοντα. Ενδεχόμενα χρησιμοποιούνται άλλα υλικά, για την επιλογή των οποίων

μεγάλο ρόλο παίζει η κατάσταση της επιφάνειας του δοκιμίου. Όσο πιο ανώμαλη ή τραχιά είναι η επιφάνεια του δοκιμίου, τόσο πιο παχύρρευστο (ή μεγαλύτερου ιξώδους) πρέπει να είναι το υλικό σύζευξης.

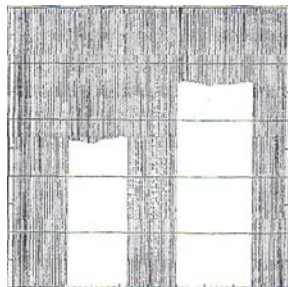
Υλικό σύζευξης υπάρχει ακόμα σε μορφή γέλης (gel) ή πάστας αλλά, για πολύ τραχιές επιφάνειες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και λεπτό φύλλο ελαστικού. Οποιοδήποτε και αν είναι το υλικό σύζευξης κατά τη μέθοδο με επαφή, το στρώμα του υλικού σύζευξης πρέπει να είναι λεπτό και ομοιόμορφου πάχους, για να αποφεύγεται απώλεια ηχητικής ενέργειας ή παραμόρφωση του σήματος και δημιουργία "μη σχετικών" (conrelevant) ενδείξεων.

### 3.4.6 Μέθοδοι Σάρωσης (Απεικόνισης)

Η πιο συχνή είναι η A σάρωση (A scan), όπου στην οριζόντια κλίμακα της οθόνης (πλάκες X) απεικονίζεται η θέση του ανακλαστήρα και το ύψος του σήματος (πλάκες Y) απεικονίζει τη σχετική ένταση της ηχούς.

Η B σάρωση (απεικόνιση, Εικ. 3.1) δίνει μία τομή του δοκιμίου (πλάκες X για θέση μήκους ή πλάτους, πλάκες Y για θέση βάθους).

Η C σάρωση δίνει κάτοψη του δοκιμίου (πλάκες X και Y για τις δύο διευθύνσεις του επιπέδου του δοκιμίου). Η σάρωση C εκτελείται συνήθως με ηλεκτρική/αυτόματη διάταξη και μέθοδο βύθισης. Το στήριγμα της κεφαλής επιτρέπει την αλλαγή γωνίας αλλά και τη μετατόπιση της κεφαλής καθ' ύψος. Το στήριγμα αυτό τοποθετείται πάνω σε φορείο, που επιτρέπει τη μετακίνηση του (άρα και της κεφαλής) κατά πλάτος του δοκιμίου. Το φορείο στηρίζεται σε γέφυρα, που μετακινείται κατά μήκος του δοκιμίου. Άρα, με αλληπάλληλες σαρώσεις κατά πλάτος του δοκιμίου και σε διαφορετικές θέσεις του μήκους του, επιτυγχάνεται (μέσω "απομνημόνευσης" των σημάτων από τη συσκευή) η αποτύπωση της κάτοψης της ασυνέχειας.



**Εικόνα 3.1** : Εικόνα B-σάρωσης

### 3.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

#### 3.5.1 Γεωμετρία δέσμης υπερήχων

Η δέσμη υπερήχων που παράγεται από κάθε παλμό (pulse), έχει συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όσον αφορά την ένταση της. Κοντά στον κρύσταλλο η μέγιστη ένταση παρουσιάζεται στον οριζόντιο άξονα και ελαττώνεται απότομα με την απομάκρυνση από αυτόν. Παράλληλα όμως παρουσιάζονται και τοπικά μέγιστα και ελάχιστα πιέσεως, που καλούνται πλευρικοί λωβοί (sidelobes). Η ανομοιομορφία στην κατανομή της εντάσεως (άρα και πιέσεως) εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κρυστάλλου και το υλικό υποστήριξης πίσω από τον κρύσταλλο. Ολόκληρη αυτή η ζώνη καλείται "εγγύς ζώνη" ή ζώνη Fresnel (Fresnel zone). Οι διακυμάνσεις της πίεσης οφείλονται σε φαινόμενα αλληλεπίδρασης (περίθλαση και συμβολή) των δονούμενων σωματιδίων του κρυστάλλου. Για κυκλικό κρύσταλλο, το μήκος της εγγύς ζώνης  $N$  δίνεται (σε mm) από τον τύπο:

$$N = \frac{D^2 \cdot f}{4 \cdot c} \quad (3.11)$$

όπου  $D$  η ενεργός διάμετρος του κρυστάλλου σε mm,  $f$  συχνότητα διέγερσης (σε MHz) και  $c$  η ταχύτητα διάδοσης (σε km/sec). Για τετράγωνο κρύσταλλο έχουμε:

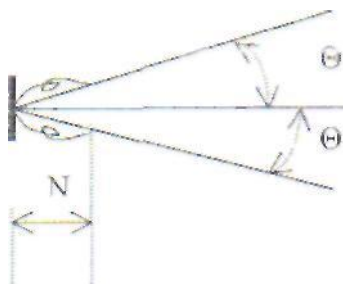
$$N = \frac{1,3 \cdot Q^2 \cdot f}{4c} \quad (3.12)$$

όπου  $Q$  η λειτουργική πλευρά του κρυστάλλου σε mm.

Η επόμενη σημαντική ζώνη είναι η ζώνη διάβασης (transitionzone), όπου η πίεση του ήχου παραμένει περίπου σταθερή στον άξονα, αλλά μειώνεται κατά την απομάκρυνση του από αυτόν, κατά την εξίσωση:

$$hm\theta = K \cdot \frac{c}{D \cdot f} \quad (3.13)$$

όπου  $\theta$  η ημιγωνία (Σχήμα 2.3) και  $K$  συντελεστής ίσος με 0,7 για πίεση 50% της αρχικής (-6dB), 1,08 για 10% της αρχικής (-20dB) και 1,22 για μηδενισμό της πίεσης.



Σχήμα 3.3 : Πολικό διάγραμμα

Η ημιγωνία  $\theta$  καλείται γωνία απόκλισης (ενίοτε και ημιγωνία απόκλισης) (divergence angle) και είναι χαρακτηριστική για κάθε κρύσταλλο (συχνότητα και διάμετρο) και υλικό μετάδοσης.

Σε απόσταση μεγαλύτερη ή ίση από  $3N$ , η πίεση στην κεντρική ακτίνα (δηλ. πάνω στον άξονα της δέσμης) μεταβάλλεται αντίστροφως ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της απόστασης, για τα κυλινδρικά κύματα, ενώ για τα σφαιρικά μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση. Η πίεση ελαττώνεται επίσης, καθώς απομακρυνόμαστε από τον άξονα της δέσμης, σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση. Η ζώνη αυτή καλείται "απώτατη ζώνη" ή ζώνη Fraunhofer (farzone/Fraunhoferzone). Η απεικόνιση της πίεσης ηχητικής δέσμης, κατά τη διάδοση της, καλείται "πολικό διάγραμμα".

$$\frac{p_2}{p_1} = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \quad \text{είτε} \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{a_1}{a_2} \quad (\text{Κυλινδρικό κύμα}) \quad (3.14)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{a_1}{a_2} \quad \text{είτε} \quad \frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2 \quad (\text{Σφαιρικό κύμα}) \quad (3.15)$$

### 3.5.2 Αποδυνάμωση του ήχου (Attenuation)

Η αποδυνάμωση της έντασης του ήχου οφείλεται σε:

- α) λόγους γεωμετρίας (απόκλιση της δέσμης)
- β) ανάκλαση-σκέδαση στους κόκκους του υλικού και
- γ) απόσβεση μέσα στο υλικό.

Για μήκη κύματος μικρότερα του  $1/3$  του μεγέθους των κόκκων του υλικού, η αποδυνάμωση είναι μεγάλη και οφείλεται κυρίως σε ανακλάσεις του ήχου (φαινόμενο σκέδασης, scatter) στα όρια των κόκκων είτε στα όρια μικρο-ασυνεχειών.

Όταν το μήκος κύματος είναι μεγαλύτερο, η αποδυνάμωση οφείλεται κυρίως σε απόσβεση (damping) του ήχου, λόγω μετατροπής σε θερμότητα τριβής και το φαινόμενο της αποδυνάμωσης της ενέργειας του ήχου είναι λιγότερο έντονο.

Και στις δύο όμως περιπτώσεις, εξακολουθεί να υπάρχει αποδυνάμωση, κατά τον άξονα της δέσμης, για λόγους γεωμετρίας, διότι η αρχική ενέργεια "κατανέμεται" σε μεγαλύτερη επιφάνεια, άρα η ένταση και η πίεση του ήχου ελαττώνονται, όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκπομπής.

### 3.5.3 Σημείο Εξόδου και Γωνία Δέσμης Γωνιακών Κεφαλών

Πριν από τη χρήση μιας γωνιακής κεφαλής υπερήχων, είναι απαραίτητο να βρεθεί το σημείο εξόδου του κεντρικού άξονα της δέσμης από την κεφαλή (indexpoint), καθώς και η γωνία αυτού του άξονα με την κάθετο στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Οι έλεγχοι αυτοί πρέπει να γίνονται τακτικά, διότι με τη φθορά του ακρυλικού στη βάση της κεφαλής, μπορεί να αλλάξει τόσο το σημείο εξόδου όσο και η γωνία της δέσμης. Είναι βέβαια προφανές (λόγω του Νόμου του Snell) ότι η γωνία της δέσμης εξαρτάται και από το εξεταζόμενο υλικό. Έτσι, μια εγκάρσια κεφαλή με ονομαστική γωνία  $60^\circ$ , έχει σχεδιαστεί ώστε να δίνει γωνία διάθλασης του εγκαρσίου κύματος στο χάλυβα ίση με  $60^\circ$ .



### 3.5.4 Νεκρή ζώνη (DeadZone)

Κατά τη μέθοδο εξέτασης με επαφή (contact method), η περιοχή του υλικού πολύ κοντά στον κρύσταλλο δεν μπορεί να εξεταστεί, λόγω του ότι τα σήματα από ασυνέχειες κοντά στην επιφάνεια βρίσκονται στην οθόνη μέσα στο εύρος του αρχικού παλμού (initial pulse). Με την μέθοδο βύθισης (immersion method), ο αρχικός παλμός (που παράγεται από την ίδια τη συσκευή) μπορεί να απομακρυνθεί από τα σήματα της ελεύθερης επιφάνειας του εξεταζόμενου υλικού, με ανάλογο πάχος νερού. Το φαινόμενο της νεκρής ζώνης μπορεί επίσης να εξουδετερωθεί με χρήση διπλών (δίδυμων) κεφαλών (dual/twin probes), οπότε η νεκρή ζώνη είναι μηδενική.

### 3.5.5 Χάραξη του σχεδίου απόκλισης της δέσμης (Beam Spread Pattern)

Για κάθε κεφαλή (probe) και υλικό διάδοσης, είναι δυνατόν, τόσο θεωρητικά όσο και κυρίως πρακτικά, να χαράξουμε το σχέδιο (διάγραμμα) απόκλισης της δέσμης (Beam Spread Pattern), για 50% ή 10% (συνήθως) της πίεσης σε σχέση με την πίεση πάνω στον κεντρικό άξονα. Θεωρητικά, τούτο γίνεται με τον υπολογισμό του μήκους  $N$  της εγγύς ζώνης και της γωνίας  $\theta$  (γωνία απόκλισης). Πρακτικά, γίνεται με ελάττωση του σήματος κατά 50% (-6dB) ή 90% (-20 dB) και χάραξη των χαρακτηριστικών σημείων. Το σχέδιο απόκλισης δέσμης είναι πολύ χρήσιμο, κυρίως για την οριοθέτηση των σφαλμάτων συγκολλήσεων με χρήση γωνιακής κεφαλής.

## 3.6 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

### 3.6.1 Ευαισθησία και Συχνότητα

Η ευαισθησία (sensitivity) μιας κεφαλής υπερήχων χαρακτηρίζεται από τη μικρότερη ασυνέχεια (ανακλαστήρα) που μπορεί να ανιχνεύσει. Η διακριτική ικανότητα (resolution) είναι η ικανότητα διάκρισης μεταξύ δύο πολύ κοντινών ασυνεχειών (ανακλαστήρων).

Από τη σχέση

$$N = \frac{D^2 \cdot f}{4c} \quad (3.16)$$

προκύπτει ότι όσο μεγαλώνει η διάμετρος (για συχνότητα σταθερή), τόσο μεγαλώνει η εγγύς ζώνη, άρα η ευαισθησία και η διακριτική ικανότητα για ασυνέχειες κοντά στην επιφάνεια περιορίζονται. Η ευαισθησία και η διακριτική ικανότητα για περιοχές μετά την εγγύς ζώνη είναι μεγαλύτερες, όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος.

Από τη σχέση

$$hm\eta = \frac{k \cdot c}{D \cdot f} \quad (3.17)$$

προκύπτει ότι όσο μεγαλώνει η διάμετρος είτε η συχνότητα, τόσο μικραίνει η γωνία απόκλισης και επομένως η δέσμη είναι στενότερη, προσφέροντας καλύτερη ευαισθησία και διακριτική ικανότητα. Το φαινόμενο όμως αυτό αντίκειται στο ότι η αποδυνάμωση του ήχου (attenuation) είναι μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι ή συχνότητα (ή όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος), λόγω της σκέδασης (scatter). Πάντως, για υλικά που παρουσιάζουν έντονο πρόβλημα αποδυνάμωσης του ήχου (π.χ. χονδρόκοκκα υλικά όπως ανοξειδωτος χάλυβας και χυτό αλουμίνιο), προτιμούμε μεγάλη διάμετρο κεφαλής και χαμηλή συχνότητα.

Για εξέταση κοντά στην επιφάνεια του υλικού προτιμούμε μικρή διάμετρο (για μικρή εγγύς ζώνη), δίδυμη κεφαλή (για μηδενική νεκρή ζώνη) και μεγάλη συχνότητα (για μεγάλη ευαισθησία). Όσο μεγαλώνει το πάχος του υλικού, προτιμούμε μικρότερη συχνότητα, για μικρή γεωμετρική αποδυνάμωση του ήχου και μεγαλύτερη κεφαλή (για στενότερη δέσμη). Γενικά, όποτε είναι δυνατό, προτιμούμε μεγάλη συχνότητα, για καλύτερη ευαισθησία και διακριτική ικανότητα.

Όσον αφορά τις γωνιακές κεφαλές, συνήθως χρησιμοποιούμε εγκάρσια κύματα (μέσα στο εξεταζόμενο υλικό), για μεγαλύτερη ευαισθησία και διακριτική ικανότητα (μικρότερο μήκος κύματος, μικρότερη γωνία απόκλισης-γεωμετρική αποδυνάμωση). Όταν όμως η αποδυνάμωση λόγω σκέδασης γίνει πολύ μεγάλη (λόγω χονδρόκοκκου υλικού), τότε χρησιμοποιούμε γωνιακή δέσμη διαμηκών κυμάτων (μέσα στο υλικό).

### 3.6.2 Διάρκεια παλμού

Ο παλμός πρέπει να αποσβένεται (dampen) γρήγορα, τόσο στο ηλεκτρικό κύκλωμα όσο και στον πομπό, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα, ιδιαίτερα κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου. Πάντως, παλμός μεγαλύτερης διάρκειας παρουσιάζει μικρότερη αποδυνάμωση και άρα διείσδυση σε μεγαλύτερο βάθος.

### 3.6.3 Απόκριση Δέκτη

Σε σχέση με την ιδιοσυχνότητά του (που καθορίζεται από το πάχος του,  $T=\lambda/2$ ), ένας κρύσταλλος αποκρίνεται (πάλλεται) και σε άλλες συχνότητες, γύρω από την κεντρική. Ένα χαρακτηριστικό του συστήματος υπερήχων είναι το εύρος των συχνοτήτων που μεταδίδονται στην οθόνη του παλμογράφου, χωρίς σημαντική μεταβολή. Ένα σύστημα χαρακτηρίζεται σαν μεγάλο εύρους (broad-banded), όταν αυτό το πεδίο συχνοτήτων είναι μεγάλο, οπότε και έχουμε πιστή αναπαράσταση του ανακλώμενου ήχου, υψηλή διακριτική ικανότητα (σε βάθος) αλλά και υψηλό θόρυβο. Μικρή διάρκεια παλμού δίνει μεγάλο εύρος απόκρισης. Αντίθετα, όταν η απόκριση είναι σημαντική μόνο πολύ κοντά στην ιδιοσυχνότητά, τότε μιλάμε για στενό εύρος (narrow-banded) και υπάρχει σημαντική παραμόρφωση σημάτων αλλά μεγαλύτερη διείσδυση στο υλικό. Ο δείκτης ποιότητας  $Q$  ενός κρυστάλλου ορίζεται σαν:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (3.18)$$

όπου  $f_0$  η ιδιοσυχνότητα και  $f_2, f_1$  οι συχνότητες που δίνουν ένταση σήματος ίση με το 70% της εντάσεως που δίνει η ιδιοσυχνότητα.

Το μέγεθος  $f_2-f_1$  ονομάζεται "εύρος συχνοτήτων" (bandwidth). Όσο γρηγορότερα αποσβένεται ο παλμός, τόσο μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων έχουμε, τόσο μεγαλύτερη

είναι η διακριτική ικανότητα (σε βάθος) αλλά και μικρότερη η διάβαση στο υλικό. Επίσης, συστήματα με μεγάλο εύρος συχνοτήτων παρουσιάζουν μεγάλο θόρυβο και επομένως πρακτικά μικρότερη ευαισθησία. Συστήματα μικρού εύρους συχνοτήτων παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία, μεγαλύτερη διάβαση, μικρότερο θόρυβο αλλά και μεγαλύτερη παραμόρφωση του σήματος, που οδηγεί σε χειρότερη διακριτική ικανότητα σε βάθος, ιδιαίτερα κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Μάλιστα, στις περιπτώσεις μικρού εύρους συχνοτήτων, ενίοτε ο παλμός, λόγω της μεγάλης διάρκειας του, μπορεί και να αποκρύψει είτε να αλλοιώσει τελείως σήματα από ασυνέχειες κοντά στην επιφάνεια.

Όμως, συστήματα μικρού εύρους συχνοτήτων παρουσιάζουν καλή διακριτική ικανότητα, όταν οι ασυνέχειες βρίσκονται περίπου στο ίδιο επίπεδο (lateral resolution).

### 3.6.4 Σύνοψη σχέσης χαρακτηριστικών κεφαλής και καταλληλότητας

#### -Μεγάλη συχνότητα

- Καλή ευαισθησία και διακριτική ικανότητα
- Στενή δέσμη (μικρή γωνία απόκλισης)
- Μεγάλη εγγύς ζώνη
- Μικρή διείδυση / μεγάλη αποδυνάμωση λόγω σκέδασης

#### - Μεγάλη διάμετρος κεφαλής

- Μεγάλη διείδυση / ισχυρότερο σήμα
- Αρχικά φαρδιά δέσμη αλλά κατόπιν στενότερη (μικρή γωνία απόκλισης άρα καλή ευαισθησία και διακριτική ικανότητα σε σχέση με μικρή κεφαλή και μεγάλα βάθη, αλλά κακή κοντά στην επιφάνεια)
- Μεγάλη εγγύς ζώνη

#### - Δίδυμη κεφαλή

- Μηδενική νεκρή ζώνη, ιδανική για έλεγχο κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου

#### - Κεφαλές μεγάλου εύρους (broadbanded)

- Σύντομος παλμός και άρα μικρή νεκρή ζώνη, υψηλή διακριτική ικανότητα κοντά στην επιφάνεια
- Μικρός συντελεστής Q, υψηλή ευαισθησία σε βάθος και πιστή απόκριση σήματος
- Μικρή διείδυση
- Υψηλός θόρυβος

## 3.7 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

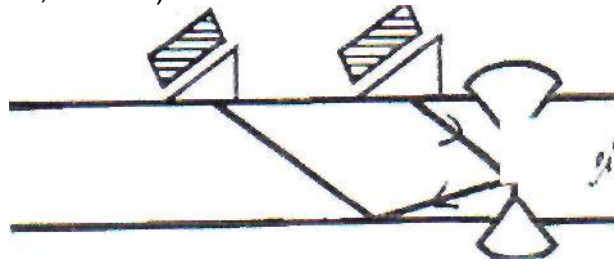
### 3.7.1 Μέθοδοι Ελέγχου

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η μέθοδος επαφής, με άμεση επαφή της κεφαλής πάνω στο δοκίμιο αφού παρεμβληθεί λεπτό και ομοιόμορφο στρώμα υλικού σύζευξης. Σε αντιδιαστολή, υπάρχει η μέθοδος βύθισης, όπου τόσο η κεφαλή όσο και το δοκίμιο βρίσκονται μέσα στο υλικό σύζευξης (νερό με ενδεχόμενους διαβρεκτικούς και αντισκωριακούς παράγοντες). Παραλλαγές της μεθόδου βύθισης είναι της στήλης νερού (bubbler), ακροφυσίου (squirter, Εικ. 2.3) και ελαστικής ρόδας (wheel). Η μέθοδος βύθισης

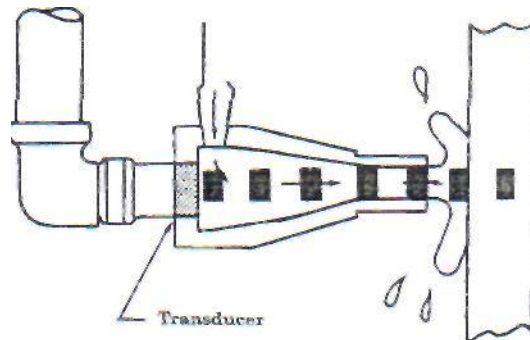
είναι ιδανική για μικρού μεγέθους και συμμετρικά δοκίμια, ιδιαίτερα μάλιστα σε αυτοματοποιημένες διατάξεις ελέγχου και Β ή C σάρωση.

### 3.7.2 Τεχνικές Ελέγχου

Η μέθοδος παλμού-ηχούς χρησιμοποιεί την επιστρεφόμενη ηχώ (πίσω ηχώ είτε ηχώ από ασυνέχεια στο δοκίμιο). Η μέθοδος διάβασης χρησιμοποιεί τον ήχο που διαπερνά το δοκίμιο (απουσία σήματος σημαίνει ύπαρξη ασυνέχειας σε άγνωστο βάθος μέσα στο δοκίμιο). Όταν χρησιμοποιείται άλλη κεφαλή ως πομπός και άλλη ως δέκτης αλλά από την ίδια πλευρά του δοκιμίου, η μέθοδος λέγεται pitch-catch (π.χ. tandem για κεντρική περιοχή υλικών ή συγκολλήσεων, Εικ. 3.2).



Εικόνα 3.2 : Τεχνική pitch-catch (tandem)



Εικόνα 3.3 : Τεχνική ακροφυσίου

### 3.8 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Οι ίδιοι υπέρηχοι που προκάλεσαν το σφύριγμα, που μόνο οι σκύλοι μπορούσαν να ακούσουν, απεδείχθησαν και πολύ χρήσιμοι στην έρευνα για πολύ μικρά ψάρια στην θάλασσα. Αυτή η πρώτη σύγχρονη πρακτική εφαρμογή των υπερήχων είναι μια συσκευή που ονομάστηκε «σόναρ» από τα αρχικά των λέξεων Sound Navigation and Ranging, που σημαίνουν «πλοήγηση και εξερεύνηση δια του ήχου». Το σόναρ έχει ζωτική σημασία για οποιοδήποτε ναυτικό σκοπό. Το βυθόμετρο είναι ίσως η περισσότερο χρησιμοποιημένη σήμερα συσκευή σόναρ, και τόσο μάλιστα ανέξοδη που και τα μικρότερα πλοία αναψυχής μπορούν να την έχουν. Απλή είναι και η λειτουργία του. Μια συσκευή που μπορεί να μετατρέψει μια μορφή ενέργειας σε άλλη, παράγει ένα παλμό, ο οποίος μεταδίδεται δια μέσου του

νερού έως ότου φθάσει στον βυθό ή σε μια ομάδα διερχόμενων ψαριών. Μέρος του παλμού ανακλάτε και γυρίζοντας πίσω συλλέγεται από το όργανο. Αφού η ταχύτητα του ήχου στο νερό είναι γνωστή, είναι πια εύκολο να μετρηθεί το βάθος από τη χρονική διάρκεια που έκανε ο παλμός να επανέλθει στο πλοίο.

Η συμπεριφορά των υπερήχων στη θάλασσα οδήγησε και στην ανακάλυψη, ότι τα δελφίνια συνεννοούνται μεταξύ τους με υπερήχους. Έτσι οι επιστήμονες σήμερα προσπαθούν να μάθουν να επικοινωνούν με τα έξυπνα αυτά θαλάσσια θηλαστικά στην ίδια τους τη γλώσσα.

Η αρχή των ανακλάσεων εφαρμόζεται με τους υπερήχους τόσο στην ξηρά όσο και στην θάλασσα. Μερικές πόρτες γκαράζ αυτοκινήτων ανοίγουν με το σφύριγμα που κάνει μια συσκευή υπερήχων προσαρμοσμένη στην πολλαπλή του αυτοκινήτου. Τα τεχνητά μάτια των τυφλών χρησιμοποιούν τους παλμούς υπερήχων για να εντοπίσουν τα διάφορα αντικείμενα που βρίσκονται μπροστά τους, και μεγάλη ποικιλία συστημάτων συναγερμού που λειτουργούν με υπερήχους ερευνά και εντοπίζει οτιδήποτε από ελαττωματικά προϊόντα πάνω στην γραμμή συναρμολογήσεως των εργοστασίων μέχρι ακόμα και ποντίκια και διαρρήκτες.

Η ιδέα αυτή τελειοποιήθηκε και εφαρμόστηκε σε πολλούς τομείς. Υπάρχει π.χ. η υπέρηχη «επιβραδυντική γραμμή» που συγκρατεί το ηχητικό κύμα για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, προκαλώντας την προς τα εμπρός ανάκλαση του ακουστικού σήματος δια μέσου ενός σώματος όπως ο υδράργυρος. Τέτοιες επιβραδυντικές γραμμές χρησιμοποιήθηκαν σε συσκευές μνήμης Η/Υ. Άλλες εφαρμογές πάλι περιλαμβάνουν παραγωγή ηχούς σε αίθουσες συναυλιών, φαινόμενο αρκετά γνωστό στους παραγωγούς δίσκων υψηλής ποιότητας.

Η ανακάλυψη των ανωμαλιών και των ελαττωμάτων σε μεταλλικά μέρη συγκρίνεται με την εντόπιση των εχθρικών υποβρυχίων στη θάλασσα, και κατά την διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου όταν χρησιμοποιήθηκε το σόναρ, η βιομηχανία ανακάλυπτε τα πλεονεκτήματα των υπερήχων. Το αποτέλεσμα της έρευνας αυτής ήταν το «ανακλαστοσκόπιο», συσκευή ελέγχου που χρησιμοποίησε υπερήχους για να εντοπίζει ελαττώματα στα διάφορα μεταλλικά, γυάλινα η ακόμα και ελαστικά εξαρτήματα ενός συνόλου. Τέτοιες συσκευές μπορούν να επιθεωρήσουν τμήματα αρκετών μέτρων μήκους, ενώ με τον ίδιο τρόπο μπορεί να μετρηθεί και το πάχος, έστω και όταν υπάρχουν περιθώρια μόνο από την μια μεριά του εξαρτήματος. Οι συσκευές υπερήχων μετρούν επίσης τις διαρροές των υγρών σε κλειστές σωληνώσεις. Μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι ένας ερευνητής διαρροών που εξαρτάται από την διαφορετική ταχύτητα του ήχου στον αέρα και στο νερό.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των ερευνών με υπερήχους είναι ότι δεν προκαλούν καμία ζημία στο τμήμα, που ελέγχουν. Με άλλα λόγια το υπό έλεγχων τμήμα δεν υφίσταται καμία μόνιμη αλλαγή της δομής του λόγω των ηχητικών ταλαντώσεων. Φυσικά είναι εύκολο να πραγματοποιήσει κανείς «καταστροφικούς» ελέγχους για να δοκιμαστούν οι κινητήρες των αεριωθούμενων που υπόκεινται στην επίδραση καταστροφικών δονήσεων. Η ιδέα αυτή προήλθε από το ότι μπορεί να δημιουργηθεί μια τέτοια ταλάντευση υπερήχων για αλλαγή της δομής ενός υλικού, σκοπίμως και συγχρόνως και επωφελώς. Η συχνότητα και η ένταση της ταλαντώσεως αυξήθηκαν σκοπίμως μέχρι του σημείου όπου τα μόρια του υλικού που δέχονταν αυτών των βομβαρδισμό των υπερήχων άρχισαν να συναθροίζονται σφιχτά το ένα με το άλλο, το αποτέλεσμα ήταν ένα καλύτερο υλικό. Μπορεί ακόμη να σχηματισθούν και νέα είδη μεταλλικών κραμάτων, ακριβώς διότι οι υψίσυχνες ταλαντώσεις επιτρέπουν στα διάφορα μόρια να συντεθούνε καλύτερα μεταξύ τους. Βρήκαν ακόμη ότι οι υπέρηχοι βελτιώνουν κατά πολύ της διάφορες συγκολλήσεις των υλικών. Κοπτικά και λειαντικά εργαλεία που εργάζονται με υπέρηχους αποδεικνύουν καθημερινώς τα πλεονεκτήματα τους,

ενώ τώρα πιώ έχουμε γεωτρύπανα τα οποία δεν τρυπούν με μεταλλικά εξαρτήματα αλλά με υπερήχους.

Διάφορα σκληρά και δυσκολοχειριζόμενα υλικά γενικώς, κόβονται τώρα και λειαίνονται με μεγάλη επιτυχία με την τεχνική των υπερήχων, δίνοντας αποτελέσματα που ήταν ανέφικτα προηγουμένως. Οι ταλαντώσεις των υπερήχων παράγουν καλύτερα φωτογραφικά γαλακτώματα και χρησιμοποιούνται ακόμα και στην βελτίωση των υφάνσιμων υλών. Στην τελευταία αυτή εφαρμογή ο υπέρηχος δρα σαν ένα είδος καταλύτη η επιταχυντή. Σε μια άλλη εφαρμογή οι υπέρηχοι σκοτώνουν τα βακτηρίδια με αποτέλεσμα να αποστειρώνουν το γάλα. Ο σιωπηλός αυτός ήχος όχι μόνο προκαλεί ομογενοποίηση του γάλακτος δίνοντας καλύτερο βούτυρο, αλλά βελτιώνοντας και το κρέας καθώς και καταψύχοντας τις τροφές. Στις Η.Π.Α υπάρχουν φορητές συσκευές υπερήχων οι οποίες ελέγχουν τις σπλές των βοδιών και υπολογίζουν την περιεκτικότητα του ζώου σε λίπος και πάχος. Στην Αγγλία τέτοιες δοκιμές γίνονται σε χοίρους για την εκλογή των καλύτερα αναπτυγμένων ζώων για την παραγωγή του μπέικον. Ο καφές κατεργάζεται με υπερήχους πριν αλεστή καθώς και τα αλκοολούχα ποτά όταν είναι αρκετών ετών.

Οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται επίσης σε συσκευές καθαρισμού. Αν ρίξουμε ένα σκουριασμένο κέρμα στην δεξαμενή ενός καθαριστή με υπερήχους, τότε μέσα σε ένα λεπτό θα το ξαναπάρουμε να γυαλίζει σαν να είναι καινούργιο. Έτσι καθαρίζονται πολλά είδη με κολλώδες και λιπαρές ουσίες επάνω τους. Οι απλές όμως αυτές εφαρμογές δεν καλύπτουν παρά ελάχιστες από τις ικανότητες της καθοριστικής αυτής συσκευής. Αποδείχτηκε ότι τα μεγάλα ρολόγια που υπάρχουν στους δρόμους είναι ευκολότερο να καθαριστούν έτσι παρά να λυθούν. Οι κατασκευαστές λεπτεπίλεπτων αντικειμένων έχουν αρχίσει και αυτοί να εφαρμόζουν τους υπερήχους. Οτιδήποτε από μικροσκοπικά ρουλεμάν για διαστημόπλοια μέχρι τα ευαίσθητα εξαρτήματα των ηλεκτρονικών εγκεφάλων, μπορούν να καθαριστούν με τις συσκευές αυτές. Ακόμη και η πλαστική μαγνητοταινία των ηλεκτρονικών εγκεφάλων καθαρίζεται χωρίς να πειραχτούν τα μαγνητικά σημάδια που είναι τυπωμένα επάνω της. Η αποδοτικότητα της νέας αυτής μεθόδου καθαρισμού απεδείχθη ωφέλιμη και στην Ιατρική. Οι βελόνες των υποδερμικών ενέσεων καθαρίστηκαν κατά θαυμάσιο τρόπο, ενώ τα χειρουργικά εργαλεία βγαίνουν από την συσκευή υπερήχων καθαρότερα και πιο αποστειρωμένα από άλλοτε. Παρ' όλο του ότι η τιμή δεν ήταν από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, εν τούτοις οι συσκευές αυτές δεν αποδείχθηκαν μόνο καλύτερες, αλλά αναλογικά και φθηνότερες. Με τέτοια επιτυχία δεν ήταν έκπληξη ότι δοκιμάστηκαν και πλυστικές μηχανές πιάτων για τις νοικοκυρές. Αρκετές βιομηχανίες κατασκεύασαν τέτοια πρότυπα συσκευών οι οποίες αποδείχθηκαν αποδοτικές, οι διάφοροι λεκέδες και τα υπολείμματα των φαγητών που δυσκόλευαν τις νοικοκυρές στο πλύσιμο των πιάτων μέχρι τώρα, απομακρύνονται αμέσως με το φαινόμενο της σπηλαίωσης, και οι συσκευές αυτές κάνουν την ίδια δουλειά των παλαιών πλυντηρίων γρηγορότερα όμως. Η τιμή φυσικά είναι ένα μεγάλο μειονέκτημα, και μέχρις ότου αποκτήσουμε φθηνότερες πηγές ενέργειας και κόστος παραγωγής, οι πλυστικές αυτές συσκευές δεν μπορούν να συναγωνιστούν ακόμη τον παλιό τρόπο πλυσίματος με νερό και σαπούνι. Το ίδιο ισχύει και για τον καθαρισμό και το πλύσιμο των ρούχων. Το να πλυθεί ένας σημαντικός όγκος ρούχων χρειάζεται αρκετή ενέργεια υπερήχων η οποία όμως σήμερα κοστίζει ακριβά, εξακολουθούν όμως να γίνονται πειράματα με σκοπό να κατορθώσουν να επιτύχουν την εφαρμογή αυτή με υπερήχους γύρω στους 15 κύκλους το δευτερόλεπτο προτάθηκε μάλιστα και πλυστική μηχανή για τον ίδιο των άνθρωπο αλλά όχι με μεγάλη σοβαρότητα φυσικά.

Η Ιατρική έχει αρχίσει να εφαρμόζει τους υπερήχους και σε άλλες χρήσεις εκτός του καθαρισμού και της απολύμανσης των χειρουργικών εργαλείων. Μία έκθεση το 1962, έδειχνε ότι στα διάφορα Νοσοκομεία των Η.Π.Α υπήρχαν εν χρήσει κάπου 35000 μηχανήματα υπερήχων για θεραπεία αρθρικών, ισχιαλγίων και παρόμοιων παθήσεων. Ακόμα πιο σπουδαία εφαρμογή είναι η σε περίπτωση σοβαρών εγκαυμάτων, όπου έχουν προσβληθεί σοβαρά οι ιστοί. Μετά την θεραπεία ο ιστός μαλακώνει σε σημείο που γίνεται η επανακόληση ακόμα και στα χέρια. Το υπερηχογράφημα δηλαδή το ηχητικό κύμα το ισοδύναμο με τις ακτίνες Χ, είναι πολύ χρήσιμο όργανο στην διαγνωστική και παρουσιάζει και αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των ακτίνων Χ, καθώς δεν υπάρχουν κίνδυνοι από ηχητικές «εικόνες», οι οποίες υπολογίζονται χιλιάδες φορές πιο ασφαλείς από τις «εικόνες» της ραδιενεργού μεθόδου. Επίσης τους λεπτούς ιστούς του σώματος οι υπέρηχοι τους βλέπουν, ενώ οι ακτίνες Χ τους διαπερνούν. Η καθαρότητα φυσικά των υπερηχογραφημάτων ούτε καν συγκρίνεται με την αντίστοιχη των ακτινογραφίσεων, αλλά γίνονται συνεχώς προσπάθειες βελτιώσεων και πιθανότατα κάποτε τα μικροσκόπια με υπερήχους να μας δίνουν εικόνες με τέτοια καθαρότητα που θα ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθεί με άλλα μέσα.

Η χειρουργική με τους υπερήχους είναι και αυτή ένα από τα τελευταία επιτεύγματα της επιστήμης και έχει επιτύχει θεραπείες διαφόρων νευροφυτικών παθήσεων, συμπεριλαμβανομένης και της ασθένειας του Πάρκινσον. Έχουν γίνει επεμβάσεις στο εσωτερικό του αυτιού σε περιπτώσεις ιλίγγων με πολύ καλύτερα αποτελέσματα από τις χειρουργικές μεθόδους. Κατασκευάστηκε επίσης ειδική συσκευή υπερήχων, που καταγράφει τους σφυγμούς, και το ρυθμό τους στο σώμα μας. Έχουν ακόμα προταθεί και ειδικοί καθετήρες με κοπτικά εξαρτήματα, που λειτουργούν με υπερήχους, για την αφαίρεση χολόλιθων καθώς και για παρόμοιες περιπτώσεις.

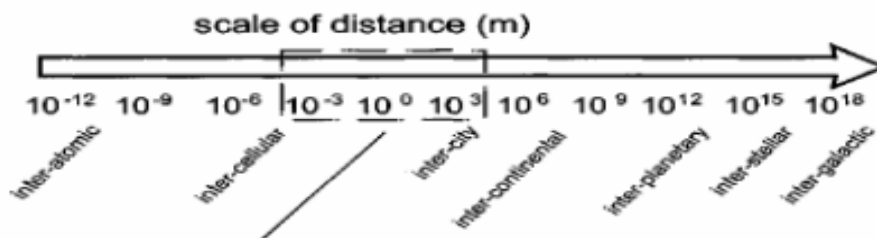
Η χρήση των υπερήχων σαν αποστειρωτικό μέσο, τούτο γίνεται γιατί η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα στα κύτταρα με αποτέλεσμα να σκοτώνουν τα βακτηρίδια. Η επίδραση των υπερήχων σε ζώντα κύτταρα είναι ακόμα πεδίο περαιτέρω έρευνας. Διαπιστώθηκε π.χ. ότι η υψίσυχνος και υψηλής εντάσεως ήχος μπορεί να τρελάνει τα ποντίκια, ενώ είναι αποδεδειγμένο ότι δεν έχει καμία βλαβερή επίδραση στον άνθρωπο. Σήμερα μάλιστα γίνονται έρευνες για την επίδραση των υπερήχων στα νευρικά κύτταρα.

Η επιστήμη συνεχίζει να χρησιμοποιεί τις συσκευές των υπερήχων. Αναφέραμε το υπέρηχο μικροσκόπιο και τηλεσκόπιο, τα οποία μπορούν να προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες στην επιστήμη. Για τις θερμοκρασίες γύρω από το απόλυτο μηδέν έχουν χρησιμοποιηθεί υπέρηχα θερμόμετρα. Οι διάφορες εργασίες με τα Laser και τα συναφή όργανα, δε δείχνουν παρά την αλληλεπίδραση των ηχητικών κυμάτων με τα κύματα του φωτός και τα ίδια τα ηλεκτρόνια. Οι ερευνητές έχουν παράγει και συχνότητες υπερήχων μέχρι και 25000MHz. Οι συχνότητες αυτές χρησιμοποιούνται από τους φυσικούς για παρατηρήσεις των κινήσεων των ηλεκτρονίων. Σε συχνότητες 1.000.000MHz ίσως μπορέσουμε να μελετήσουμε και το κβάντα της ηχητικής ενέργειας απ' ευθείας και όχι με υποθέσεις.

## 4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ & ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΘΕΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

### 4.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Τα εργαλεία και οι τεχνικές μέτρησης απόστασης είναι ενδεχομένως μια από τις παλαιότερες και συνεχιζόμενες εφευρετικές αναζητήσεις της επιστήμης. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται η τεράστια σειρά των αποστάσεων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για μέτρηση από την επιστήμη και η εφαρμοσμένη μηχανική.



**Σχήμα 4.1** Η κλίμακα των μετρούμενων αποστάσεων

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με τις μεθόδους για την μέτρηση ενός σχετικά μικρού τμήματος της παραπάνω κλίμακας (από εκατοστόμετρα μέχρι χιλιόμετρα). Ακόμη και μέσα σε αυτό το περιορισμένο τμήμα, είναι πολύ δύσκολο να κάνεις να απαριθμήσει όλες τις μεθόδους μέτρησης απόστασης που έχουν επινοηθεί. Η μέτρηση απόστασης, γενικά ασχολείται για τον καθορισμό του μήκους μιας γραμμής που ενώνει δύο σημεία στο τρισδιάστατο χώρο. Ανάλογα με το σκοπό που γίνεται η μέτρηση αυτή τα διάφορα συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες:

1. "Ranging Systems": αναφέρεται στα συστήματα που εκτελούν τις απλές μετρήσεις αισθητήρα από το στόχο.
2. "Range-Imaging Systems" : είναι συστήματα που συλλέγουν πολλές μετρήσεις αποστάσεων στο χώρο και τις καταγράφουν σε πίνακες με στόχο την σχεδίαση του χώρου.
3. "Position Tracking Systems": είναι συστήματα που καταγράφουν τη χρονική ιστορία της μέτρησης απόστασης σε έναν ή περισσότερους στόχους με στόχο τον υπολογισμό ταχύτητας κ.τ.λ

#### 4.1.2 Τεχνική μέτρησης απόστασης βασιζόμενη στην επαφή

Μια κοινή μέθοδος στη μέτρηση της απόστασης γίνεται μέσω μιας βαθμολογημένης μηχανικής συσκευής (π.χ. χάρακας) που συνδέει ταυτόχρονα το επιλεγμένο σημείο με μια θέση αναφοράς. Οι μηχανικές ή βασιζόμενες στην επαφή μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία και μπορούν να είναι εξαιρετικά ακριβείς, παραδείγματος χάριν, μπορούν να επιτύχουν ακρίβεια μέχρι 1μm. Το κύριο μειονέκτημα των μηχανικών μεθόδων είναι ότι για μέτρηση μεγαλύτερων αποστάσεων αυξάνεται η μάζα τους γεγονός που τις καθιστά μη πρακτικές. Οι



τεχνικές εξ' αποστάσεως είναι πολλές και ποικίλες και αναγκαίες για μετρήσεις μεγάλων αποστάσεων.

#### **4.1.3 Τεχνικές στην εξ' αποστάσεως μέτρηση απόστασης**

Η μέτρηση απόστασης εξ' αποστάσεως μπορεί να διαιρεθεί σε Παθητικές ή Ενεργητικές τεχνικές. Οι ενεργητικές τεχνικές χρησιμοποιούν κάποια μορφή ενέργειας (πεδίο ή κύμα) που συνδέει τη θέση αναφοράς με την θέση του στόχου. Οι παθητικές τεχνικές στηρίζονται σε μια εξωτερικά εμφανιζόμενη πηγή ενέργειας (π.χ. φως του ήλιου ή αντίθεση θερμοκρασίας υποβάθρου-στόχου) για να καταστήσουν το στόχο ανιχνεύσιμο. Η ενεργητική προσέγγιση μπορεί συχνά να απλοποιήσει το πρόβλημα μέτρησης απόστασης επειδή επιτρέπει έναν μεγαλύτερο βαθμό ελέγχου των πολλών παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν μια μέτρηση. Παραδείγματος χάριν, η επιλογή της μορφής ενέργειας μπορεί να ελαχιστοποιήσει την επίδραση των ανεξέλεγκτων μεταβλητών όπως ο φωτισμός του περιβάλλοντος, ο καιρός, και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες. Επιπλέον, μια ενεργητική μέθοδος παρέχει μια ευκαιρία να εντοπιστεί επιλεκτικά στο χώρο ο στόχος.

Μια κοινή χρήση των ενεργητικών τεχνικών είναι η λήψη μετρήσεων απόστασης μέσω υλικών που είναι μηχανικά ή οπτικά αδιαπέραστα. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν την ιατρική απεικόνιση, όπου οι διάφορες μορφές κατευθυνόμενης ενέργειας (υπέρηχος, ακτίνες X) χρησιμοποιούνται για να χτίσουν την επιφάνεια οργάνων ή των οστών, το sonar, που διαπερνά το νερό καλύτερα από το φως κ.α. Οι παθητικές μέθοδοι, μην προσφέροντας την ίδια σειρά του ελέγχου και την ευελιξία των ενεργών προσεγγίσεων, προσφέρουν ορισμένα πλεονεκτήματα. Κατ' αρχάς, επειδή δεν εκπέμπουν καμία ενέργεια, η ύπαρξή τους δεν μπορεί να ανιχνευθεί από ένα άλλο μακρινό σύστημα ανίχνευσης. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι πολύ σημαντικό στις στρατιωτικές εφαρμογές. Δεύτερον, τα παθητικά συστήματα μπορούν συχνά να συλλέξουν τις πολλαπλάσιες μετρήσεις αποστάσεων γρηγορότερα επειδή δεν περιορίζονται από το ποσοστό στο οποίο μπορούν να κατευθύνουν μια πηγή ενέργειας προς ένα σημείο στόχων, όπως συμβαίνουν με τα περισσότερα ενεργά συστήματα. Τέλος, η απουσία μιας κατευθυνόμενης πηγής ενέργειας είναι μια απλοποίηση που μπορεί σημαντικά να μειώσει το μέγεθος, το κόστος, και την πολυπλοκότητα υλικού μιας συσκευής (όμως αυξάνεται η πολυπλοκότητα της επεξεργασίας σήματος).

#### **4.1.4 Τεχνικές χρόνου πτήσης, τριγωνομέτρησης & βασιζόμενης σε πεδίο**

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές κατηγορίες και περιπτώσεις οργάνων μέτρησης μη επαφής, οι οποίες, με πολύ λίγες εξαιρέσεις, βασίζονται σε μια από τις ακόλουθες τρεις αρχές:

1. Η ενέργεια διαδίδει με μια γνωστή, πεπερασμένη, ταχύτητα (π.χ. η ταχύτητα του φωτός, η ταχύτητα του ήχου στον αέρα).
2. Η ενέργεια διαδίδει στις ευθείες γραμμές μέσω ενός ομοιογενούς μέσου.
3. Το πεδίο αλλάζει κατά έναν συνεχή, μονοτονικό τρόπο προβλέσιμο με την απόσταση από την πηγή του.

Οι τεχνικές που συνδέονται με αυτά τα βασικά φαινόμενα αναφέρονται ως Χρόνου πτήσης (time of flight), Τριγωνομέτρησης (triangulation) ή βασιζόμενης σε πεδίο (field based) αντίστοιχα.

#### 4.1.4.1 Τεχνική του Χρόνου πτήσης (time of flight)

Το πρόβλημα της μέτρησης απόστασης είναι ένα από τα παλαιότερα προβλήματα της επιστήμης και έχουν αναπτυχθεί αρκετές εφαρμογές για την μέτρηση αποστάσεων. Τις τελευταίες δεκαετίες οι διάφορες εφαρμογές σχεδιάζονται με στόχο την μείωση των διαστάσεων, την ασύρματη λειτουργία και την αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική μέτρησης απόστασης είναι η τεχνική του χρόνου πτήσης ToF. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή μετρείται ο χρόνος πτήσης ενός παλμού από την στιγμή της εκπομπής μέχρι την στιγμή της επιστροφής της ηχούς στο σύστημα μετά από ανάκλαση στο αντικείμενο μέτρησης. Η απόσταση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$d = c * t \quad (4.1)$$

όπου  $c$  η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων (π.χ. 343 m/sec για τα ηχητικά κύματα) και  $t$  είναι ο χρόνος ToF μεταξύ της εκπομπής και της λήψης του σήματος. Συνήθως χρησιμοποιούνται ηχητικά κύματα και οι εφαρμογές που αναπτύσσονται είναι πολύ φθηνές σε σχέση με συστήματα ToF που κάνουν χρήση κυμάτων φωτός (laser). Λόγω της μεγάλης ταχύτητας του φωτός απαιτούνται πολύ γρήγορα συστήματα μέτρησης χρόνου (με ακρίβεια της τάξης του picosecond). Η σχεδίαση ενός συστήματος μέτρησης απόστασης ToF με χρήση υπερήχων έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως η απλότητα της μεθόδου, η χαμηλή τιμή και οι μικρές διαστάσεις, ενώ μερικά μειονεκτήματα είναι η μεταβολή της ταχύτητας του ήχου με την θερμοκρασία, προβλήματα crosstalk καθώς και προβλήματα που οφείλονται στο χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο SNR. Ένα από τα πρώτα εμπορικά συστήματα μέτρησης απόστασης με χρήση υπερήχων αναπτύχθηκε από την εταιρία Polaroid το 1980, με στόχο την αυτόματη εστίαση φωτογραφικών μηχανών. Μια άλλη εταιρία που αναπτύσσει συστήματα μέτρησης αποστάσεων είναι η Massa Products Corp. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται δυο εμπορικά συστήματα μέτρησης απόστασης με υπερήχους των πιο πάνω εταιριών.

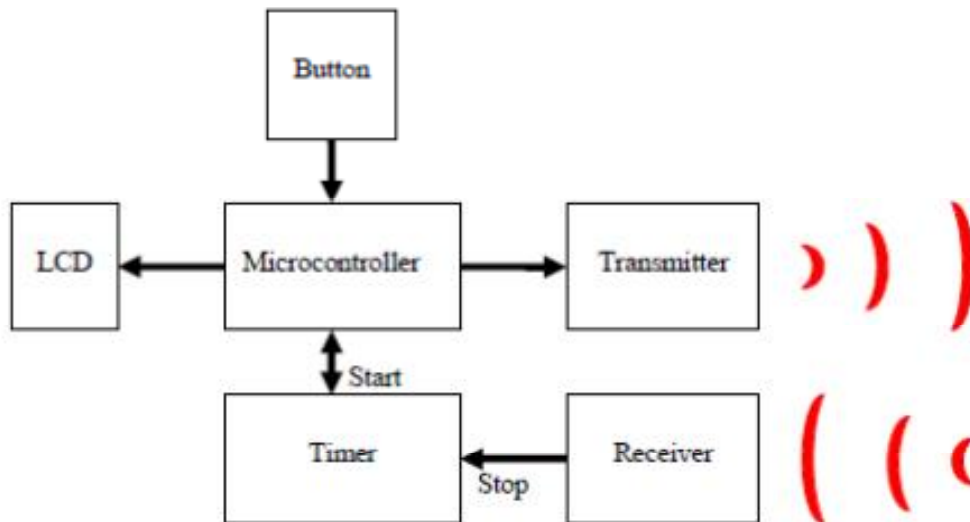
**Πίνακας 4.1** Εμπορικά συστήματα μέτρησης απόστασης με υπερήχους.

Specifications for commercially available ultrasonic ranging systems		
Producer	Polaroid	Massa Products
Model	6500	E-220B/26
Range (cm)	40-1050	61-914
Beamwidth	-	35
Frequency	49.1KHz	26KHz
Resolution	1%	1cm
Power	5V/100mA	8-15VDC

Για την σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος απαιτούνται κυρίως τέσσερα υποσυστήματα:

1. Ένας μικροελεγκτής με μια οθόνη.
2. Ένας μετρητής χρόνου ακριβείας.
3. Ένας πομπός υπερήχων.
4. Ένας δέκτης υπερήχων.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ένα μπλοκ διάγραμμα της αρχιτεκτονικής ενός υπερηχητικού συστήματος μέτρησης απόστασης ToF



**Σχήμα 4.2** Μπλοκ διάγραμμα της αρχιτεκτονικής συστήματος μέτρησης απόστασης ToF

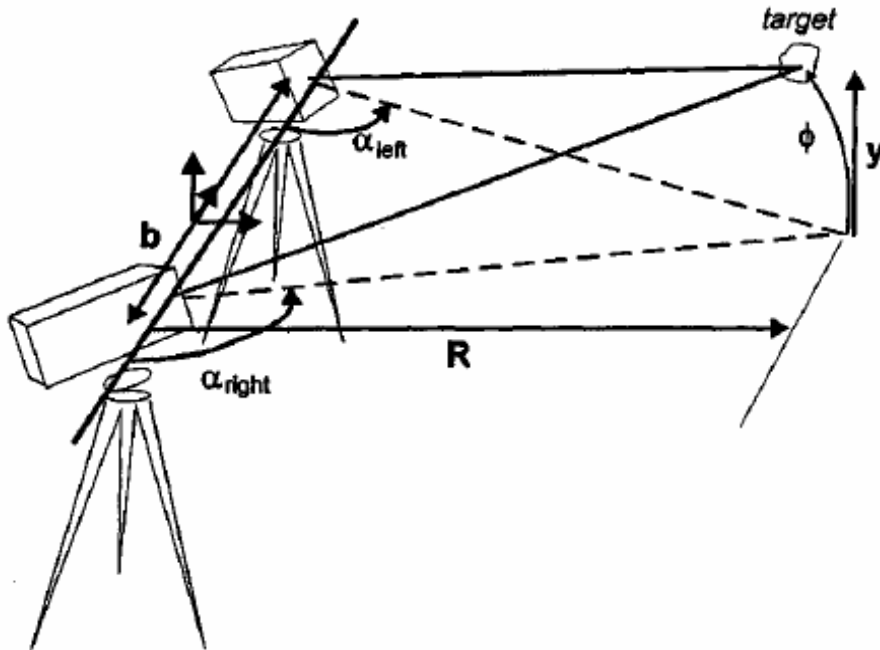
Τα συστήματα χρόνου πτήσης (time of flight) μπορούν να είναι τυπού αντανάκλασης (δηλ., ηχώ, αντανάκλαση κυμάτων) ή του "μονόδρομου" τύπου (δηλ., ενεργός στόχος). Τα τυπού αντανάκλασης συστήματα μετρούν αποτελεσματικά το συνολικό χρόνο που χρειάζεται ένα εκπεμπόμενο κύμα να ταξιδέψει από μια πηγή αναφοράς σε μία μερικώς αντανακλαστική επιφάνεια του στόχο και να φθάσει ξανά πίσω στην πηγή. Ανάλογα με το είδος των κυμάτων που χρησιμοποιούνται π.χ. ραδιοσυχνότητες, συχνότητες φωτός, ή ηχητικά κύματα οι συσκευές αυτές παίρνουν ονόματα όπως ραντάρ, ραντάρ με ακτίνες laser (lidar), και sonar. Το χαρακτηριστικό πολλών συστημάτων χρόνου πτήσης είναι ότι η ακρίβεια της μέτρησης τους είναι βασίζεται στο πιο σύντομο χρονικό διάστημα που μπορούν να μετρήσουν. Δηλαδή εάν ένα αντικείμενο είναι κοντινό ή μακρινό, το λάθος στη μέτρηση είναι βασικά σταθερό.

#### 4.1.4.2 Τεχνική της Τριγωνομέτρησης (triangulation)

Η τριγωνομετρία ήταν γνωστή από την αρχαιότητα. Η τριγωνομέτρηση είναι βασίζεται στην ιδέα ότι εάν κάποιος γνωρίζει το μήκος μιας πλευράς ενός τριγώνου και δύο από τις γωνίες του, το μήκος των άλλων πλευρών μπορεί να υπολογιστεί. Η γνωστή πλευρά καλείται βάση. Στο σχήμα 4.3 οι δυο πλευρές του τριγώνου

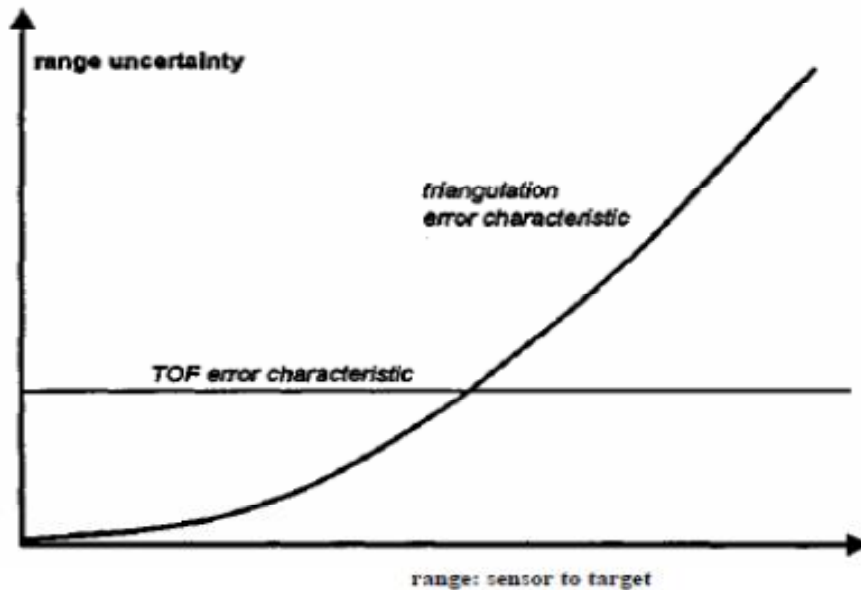
εκτείνονται από κορυφές της βάσης στο σημείο που βρίσκεται ο στόχος. Εάν οι γωνίες που διαμορφώνονται μεταξύ αυτών των γραμμών και της γραμμής της βάσης μπορούν να καθοριστούν, η απόσταση υπολογίζεται με το παρακάτω τύπο:

$$R = \frac{b \sin a_{left} \sin a_{right}}{\sin (a_{right} - a_{left})} \quad (4.2)$$



**Σχήμα 4.3** Γεωμετρία της μεθόδου τριγωνομέτρησης για υπολογισμό της απόστασης απομακρυσμένου στόχου

Η κλασική παθητική τεχνική τηλεμέτρησης βασισμένη στον ανωτέρω τύπο. Ένας παρατηρητής χρησιμοποιεί ένα όργανο ακριβείας (για μέτρηση γωνίας) και σημαδεύει έναν στόχο από δύο θέσεις που χωρίζονται από μια γνωστή γραμμή βάσης. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός της απόστασης από το άνθρωπο (όραση) βασίζεται εν μέρη στην τεχνική της τριγωνομέτρησης. Οι ενεργητικές τεχνικές τριγωνομέτρησης χρησιμοποιούν μια πηγή φωτός, συχνά λέιζερ, για να δημιουργήσουν την μια πλευρά του τριγώνου, και τον άξονα εξέτασης οπτικών μέσων ανίχνευσης του φωτός για να δημιουργηθεί η δεύτερη πλευρά. Ο χωρισμός μεταξύ της πηγής και του ανιχνευτή είναι η βασική γραμμή. Η ακρίβεια της μέτρησης απόστασης που βασίζεται στην τριγωνομέτρηση μικραίνει με το τετράγωνο την απόστασης του στόχου από το όργανο. Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η αβεβαιότητα (το λάθος στην μέτρηση) ανάλογα με την μετρούμενη απόσταση για τις τεχνικές του χρόνου πτήσης (time of flight) και της τριγωνομέτρησης (triangulation)



**Σχήμα 4.4** Το λάθος στην μέτρηση απόστασης των μεθόδων του χρόνου πτήσης (time of flight) και της τριγωνομέτρησης (triangulation) το οποίο οφείλεται στις αρχές λειτουργίας της κάθε μεθόδου.

#### 4.1.4.3 Τεχνική Βασιζόμενης σε πεδίο (field based)

Ενώ οι μέθοδοι του χρόνου πτήσης και της τριγωνομέτρησης χρησιμοποιούν τα φαινόμενα διάδοσης κυμάτων μιας συγκεκριμένης μορφής ενέργειας για την μέτρηση της απόστασης, οι τεχνικές βασισμένες στο πεδίο χρησιμοποιούν τη κατανομή μιας μορφής ενέργειας στο χώρο. Η ένταση οποιουδήποτε ενεργειακού πεδίου αλλάζει ως την απόσταση από την πηγή του. Επιπλέον, τα πεδία περιγράφονται συχνά από διανυσματικά μεγέθη (π.χ. κατευθυντικότητα). Επομένως, εάν η θέση μιας γεννήτριας πεδίου είναι γνωστή και αν και τα χαρακτηριστικά του πεδίου που παράγει στο χώρο είναι προβλέψιμα, οι μετρήσεις σ' ένα σημείο του πεδίου μακριά από την πηγή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συμπεράνουν την απόσταση του σημείου από την πηγή.

Μια ενδιαφέρουσα διάκριση μεταξύ των τεχνικών βασισμένων στο πεδίο και των τεχνικών που βασίζονται στα κύματα είναι ότι οι πρώτες, αν και χρησιμοποιούν τα ενεργειακά πεδία (δηλ. κύματα), δεν στηρίζονται στη διάδοση και τη μετατροπή ενέργειας. Δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιήσουν και στάσιμα πεδία, όπως εκείνα που παράγονται από έναν μαγνήτη ή ένα στατικό φορτίο. Τα ηχητικά κύματα ή τα κύματα φωτός μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο όπως και τα στατικά πεδία αφού η έντασή τους εξαρτάται από την απόσταση.

Οι τεχνικές βασισμένες στο πεδίο αντιμετωπίζουν μερικά βασικά ζητήματα που περιορίζουν την εφαρμογή τους. Κατ' αρχάς, τα χαρακτηριστικά των περισσότερων πεδίων που χρησιμοποιούνται επηρεάζονται από τα αντικείμενα ή τα υλικά στην γύρω περιοχή, και δεν είναι πάντα δυνατό να εξασφαλιστεί ότι αυτές οι επιρροές θα παραμείνουν σταθερές. Δεύτερον, η μεταβολή των πεδίων σε σχέση με την απόσταση είναι ιδιαίτερα μη γραμμική (αντίστροφος ανάλογη του τετραγώνου ή κύβου), υπονοώντας ότι η ευαισθησία μιας μέτρησης επηρεάζεται έντονα από την απόσταση από την πηγή. Παρόλα αυτά, οι συσκευές που έχουν αναπτυχθεί και είναι διαθέσιμες κάνουν αρκετά καλές μετρήσεις.

#### 4.1.5 Μορφές ενέργειας και αποτελεσματικότητα

Όπως έχει ειπωθεί όλες οι συσκευές μέτρησης απόστασης χρησιμοποιούν κάποια μορφή ενέργειας ανεξάρτητα με την αρχή λειτουργίας (Χρόνου πτήσης (time of flight), Τριγωνομέτρησης (triangulation) ή βασιζόμενης σε πεδίο (field based)). Στην συνέχεια θα περιγράψουν οι διάφορες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται και μερικές γενικεύσεις για την αποτελεσματικότητα κάθε μιας από αυτές.

##### 4.1.5.1 Ήχος

Τα συστήματα μέτρησης απόστασης βασισμένα στην ακουστική ενέργεια είναι συνήθως χρόνου πτήσης παλμικού τύπου (pulsed-echo ToF) και χρησιμοποιούν συχνότητες φέροντος στο υπερηχητικό (>20kHz) φάσμα των συχνοτήτων. Άρα ένα προφανές όφελος είναι το γεγονός ότι δεν ακούγονται. Επιπλέον στις υπερηχητικές συχνότητες τα κύματα εστιάζονται εύκολα σε κατευθύνθηκες δέσμες και είναι επίσης εύκολο να παραχθούν και να ανιχνευτούν με χρήση πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων (piezoelectric transducers). Τα υπερηχητικά σήματα διαδίδονται μέσω του αέρα, αλλά η μετάδοση σε μακρινές αποστάσεις είναι αποτελεσματικότερη στα ρευστά, όπως το νερό, όπου η αναλογία πυκνότητας ιξώδους οδηγεί σε μεγαλύτερη ταχύτητα κυμάτων και τη μικρότερη εξασθένιση ανά μονάδα μήκους. Οι υπερηχητικές τεχνικές μέτρησης απόστασης (ή αλλιώς SONAR = SOund NAvigation and Ranging) αναπτύχθηκαν αρχικά για τις υποθαλάσσιες εφαρμογές, όπου ο ήχος υπερέχει σε σχέση με την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια (συμπεριλαμβανομένου και του φωτός) όσον αφορά την απόσταση διάδοσης.

Οι συχνότητες που τυπικά χρησιμοποιούνται στις υπερηχητικές τεχνικές μέτρησης απόστασης είναι από μερικές δεκάδες kHz μέχρι μερικές εκατοντάδες kHz. Για την επιλογή της υπερηχητικής συχνότητας πρέπει κανείς να έχει υπόψιν ότι ενώ οι υψηλές συχνότητες μπορούν να διαμορφωθούν σε στενότερες δέσμες, και επομένως να επιτύχουν υψηλότερη πλευρική ακρίβεια, εντούτοις τείνουν να εξασθενίσουν γρηγορότερα με την απόσταση. Μπορεί να διαπιστωθεί ότι μια πολύ στενή δέσμη ήχου σε ένα ρευστό μέσο μπορεί να έχει πλάτος λιγότερο από 10° αλλά μειώνεται πάρα πολύ γρήγορα για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές στον αέρα. Όμως αν και η υπερηχητική ενέργεια μειώνεται γρηγορότερα στον αέρα απ' ό,τι στο νερό, χρήσιμα περιορισμένης εμβέλειας υπερηχητικά σήματα μπορούν να παραχθούν στον αέρα με τα σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας επειδή η χαμηλότερη πυκνότητα του αέρα απαιτεί μικρότερες δυνάμεις στο μετατροπέα για ένα δεδομένο πλάτος κύματος.

Συγκρίνοντας κανείς τα ηχητικά κύματα με τα ηλεκτρομαγνητικά για τεχνικές χρόνου πτήσης (ToF) πρέπει να αναλογιστεί ότι ο ήχος, αντίθετα από το φως, όχι μόνο διαδίδεται με πολύ μικρές ταχύτητες, αλλά η ταχύτητα διάδοσης των ηχητικών κυμάτων αλλάζει ανάλογα με τον είδος και την κατάσταση του μέσου διάδοσης. Επομένως παράγοντες όπως η υγρασία του αέρα, η θερμοκρασία και η πίεση έχουν επιπτώσεις στην ακρίβεια μιας συσκευής χρόνου πτήσης (ToF) για την μέτρηση της απόστασης. Για τις υποβρύχιες εφαρμογές, η αλμυρότητα και το βάθος επηρεάζουν τη μέτρηση. Η μικρή ταχύτητα του ήχου επιδρά επίσης και στο μέγιστο αριθμό μετρήσεων που μπορούν να συλλεχθούν ανά μονάδα χρόνου. Παραδείγματος χάριν, αν ένας στόχος βρίσκεται στα 10m χρειάζονται τουλάχιστον 60ms για να παρθεί μια μέτρηση στον αέρα. Τα 60ms φαίνεται να μην είναι πάρα πολύς χρόνος για λήψη

μίας απλής μέτρησης, αλλά δημιουργείται πρόβλημα εάν η εφαρμογή πρέπει να κάνει πολλαπλές μετρήσεις, όπως είναι εφαρμογές παρακολούθησης κινήσεων (π.χ. υπολογισμός ταχύτητας) ή αποφυγής σύγκρουσης.

#### **4.1.5.2 Στάσιμα μαγνητικά πεδία**

Τα στατικά ή ψευδοστατικά (δηλ. χαμηλής συχνότητας) μαγνητικά πεδία χρησιμοποιούνται μόνο στις τεχνικές βασισμένες στο πεδίο. Ένα πλεονέκτημα τέτοιων πεδίων είναι ότι παράγονται εύκολα και φτηνά είτε από έναν μόνιμο μαγνήτη είτε από ένα πηνίο. Δεδομένου ότι τα στάσιμα πεδία δεν διαβιβάζουν ενέργεια, οι στόχοι δεν πρέπει να είναι παθητικοί δηλαδή πρέπει ενεργά να αισθανθούν τις ιδιότητες του πεδίου στην θέση τους. Πολλές τεχνολογίες αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κάνουν μετρήσεις της κατευθυντικότητας και της έντασης ενός μαγνητικού πεδίου, συμπεριλαμβανομένων του φαινομένου Hall και των μαγνητόμετρων τύπου μαγνητοσυστολής.

#### **4.1.5.3 Ραδιοσυχνότητες**

Τα συστήματα χρόνου πτήσης (ToF) που βασίζονται στην ανίχνευση της ηχούς τα οποία βρίσκονται στην περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και συγκεκριμένα χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά μήκη κύματος στην περιοχή από 1m – 1mm είναι γνωστά ως ραντάρ (RADAR = RAdioDetectionAndRanging). Τα ραδιοκύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ανίχνευση στόχων μεγάλης απόστασης σε ποικίλες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Όπως στην περίπτωση των ηχητικών κυμάτων, υπάρχουν προβλήματα διάδοσης που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή της συχνότητας. Τα μεγάλα μήκη κύματος διαδίδονται καλύτερα σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ τα μικρά μήκη κύματος μπορούν να εστιασθούν σε στενές δέσμες επιτυγχάνοντας καλύτερη ανάλυση (διάκριση). Μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή του ραντάρ που χρησιμοποιεί μικρά μήκη κύματος είναι ότι διαπερνά το έδαφος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εντοπίσει και να απεικονίσει αντικείμενα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Πρέπει λοιπόν η συχνότητα να επιλέγει με τέτοιο τρόπο ώστε να ισορροπηθεί η ικανότητα απεικόνισης (μικρό μήκος κύματος) με την καλή εμβέλεια (μεγάλο μήκος κύματος).

Ένα παράδειγμα ενός μονόδρομου συστήματος ToF (ενεργός δέκτης) που χρησιμοποιεί τις ραδιοσυχνότητες είναι το global positioning system (GPS). Η απόσταση του δέκτη στο έδαφος καθορίζεται από κάθε έναν από τους επί μέρους δορυφόρους που είναι εξοπλισμένοι με μια συσκευή αποστολής σημάτων και ένα πολύ ακριβές ρολόι καισίου για συγχρονισμό.

#### **4.1.5.4 Συχνότητες στην περιοχή του ορατού.**

Στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα πέρα από την περιοχή των ραδιοκυμάτων βρίσκονται οι υπέρυθρες, οι ορατές, και υπεριώδεις συχνότητες. Αυτές οι συχνότητες μπορούν να παραχθούν από τα λέιζερ και να ανιχνευθούν από φωτοευαίσθητες συσκευές (π.χ. φωτοδιόδους) και είναι χρήσιμες για μεθόδους μέτρησης απόστασης τόσο για τις τεχνικές του χρόνου πτήσης (time of flight) όσο και για τις τεχνικές τριγωνομέτρησης (triangulation). Τα συστήματα χρόνου πτήσης (time of flight) τυπού

αντανάκλασης (echo-type) είναι γνωστά και ως ραντάρ με ακτίνες laser (LIDAR= Light Detection And Ranging). Ενώ οι συχνότητες στην περιοχή του ορατού εξασθενούν περισσότερο μέσω σύννεφων και ομίχλης από τις ραδιοσυχνότητες εντούτοις μπορούν να διαδοθούν σε πάρα πολύ στενές δέσμες ακτίνων (λείζερ) , που επιτρέπουν την καλύτερη πλευρική ανάλυση και επιλογή στόχων.

#### 4.1.6 Σύμφωνη και Μη σύμφωνη Ανίχνευση

Τα συστήματα χρόνου πτήσης (time of flight) τυπού αντανάκλασης (echo-type) είτε είναι sonar, radar, ή lidar, μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω ως εξής:

α) η ανίχνευση γίνεται μετρώντας άμεσα το χρόνο πτήσης (Μη σύμφωνη)

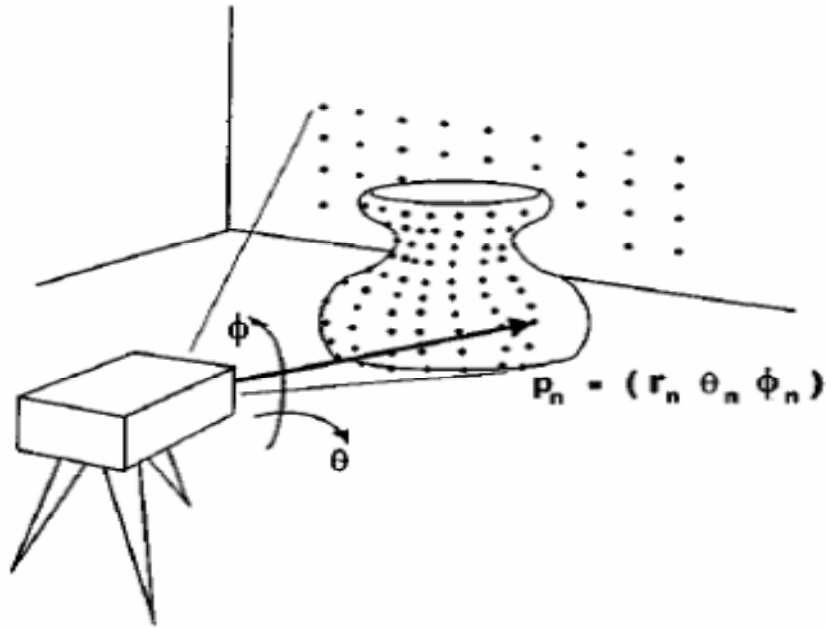
β) γίνεται αξιοποιώντας μια περιοδικότητα στην εκπεμπόμενη ενέργεια για εξακρίβωση της απόστασης (Σύμφωνη).

Οι μη σύμφωνες τεχνικές αντιμετωπίζουν το πρόβλημα των σύντομων διαστημάτων συγχρονισμού. Αυτό δεν είναι μια σοβαρή πρόκληση στην περίπτωση των ηχητικών κυμάτων, όπου μία μετρούμενη απόσταση 1m αντιστοιχεί σε 6ms, αλλά στην περίπτωση των κυμάτων φωτός και των ραδιοκυμάτων (δηλαδή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων), η απόσταση του 1m αντιστοιχεί σε μόνο 6ns. Η ακρίβεια των μη σύμφωνων τεχνικών ανίχνευσης απόστασης στηρίζεται υπολογισμό του μέσου όρου των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων. Η σύμφωνη ανίχνευση επιτυγχάνεται με το συνδυασμό ενός μέρους του εκπεμπόμενου σήματος με το ανακλώμενο σήμα για να παραχθεί ένα τρίτο σήμα που δείχνει την καθυστέρηση φάσης. Τα σήματα είναι συνεχή κύματα (CW) σε αντίθεση με τα παλμικά. Οι σύμφωνες τεχνικές ανίχνευσης είναι ταξινομημένες σε τεχνικές διαμόρφωσης πλάτους (AMCW) ή διαμόρφωσης συχνότητας (FMCW). Ένα βασικό πρόβλημα στις σύμφωνες τεχνικές ανίχνευσης απόστασης είναι η ανικανότητά τους να κάνουν διάκριση μεταξύ των ακέραιων πολλαπλασίων του βασικού μήκους κύματος διαμόρφωσης. Οποιοδήποτε σύμφωνο σύστημα ανίχνευσης πρέπει να χρησιμοποιεί τεχνικές για να επιλυθεί το αποκαλούμενο "διάστημα αβεβαιότητας". Οι μη σύμφωνες τεχνικές δεν αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα.

#### 4.1.7 Συσκευές Μέτρηση Απόστασης

Οι συσκευές μέτρησης απόστασης τυπικά στοχεύουν έναν στόχο για να παραγάγουν μία απλή μέτρηση απόστασης. Ένα κοινό παράδειγμα της απλής μέτρησης απόστασης είναι ο αισθητήρας ανάδρασης που χρησιμοποιείται στις φωτογραφικές μηχανές για αυτόματη εστίαση. Οι συσκευές απεικόνισης χρησιμοποιούν τις ίδιες αρχές με τις απλές συσκευές μέτρησης απόστασης, με τη διαφορά ότι συλλέγουν πολλές μετρήσεις αποστάσεων στο χώρο και τις καταγράφουν σε πίνακες με στόχο την σχεδίαση του χώρου. Μερικές φορές, η διαδικασία σάρωσης εκτελείται με βοηθητικά μέσα (π.χ., καθρέφτες περιστροφής και κλίσης) έτσι ώστε η θέση αναφοράς να παραμένει σταθερή. Σε αυτήν την περίπτωση τα δεδομένα καταγράφονται σε σφαιρικές συντεταγμένες (r,θ,φ) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5





**Σχήμα 4.5** Η εικόνα μίας απεικόνισης ουσιαστικά είναι ένας πίνακας που περιέχει όλες τις μετρήσεις απόστασης των δειγματοληπτούμενων σημείων του χώρου

Σε άλλες περιπτώσεις, ο αισθητήρας μπορεί να κάνει σάρωση μόνο κατά έναν άξονα ενώ η δεύτερη διάσταση σάρωσης πραγματοποιείται με την κίνηση της θέσης των αισθητήρων. Συνήθως καταγράφεται η "ένταση" ή η επιστρεφόμενη ενέργεια που συνδέεται με μία μέτρηση. Ο πίνακας έντασης μπορεί να παρουσιαστεί ως εικόνα "διαβάθμισης του γκρι" και να πρόκυψη μια ασπρόμαυρη φωτογραφία. Οι απεικονίσεις της απόστασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παραγάγουν τρισδιάστατες γραφικές παραστάσεις τοπίων και αντικειμένων. Μια κοινή χρήση της απεικόνισης απόστασης είναι η εναέρια χαρτογράφηση εκτάσεων. Οι συσκευές παρακολούθησης θέσης (Position tracking) χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν την αλλαγή στη θέση και τον προσανατολισμό ενός αντικειμένου κατά τη διάρκεια του χρόνου. Τα βασικά ζητήματα στην παρακολούθηση θέσης είναι ο εντοπισμός και το κλείδωμα συγκεκριμένων σημείων των στόχων. Αυτά τα ζητήματα μπορούν να αποφευχθούν με τη χρησιμοποίηση των ενεργών στόχων, και τα περισσότερα διαθέσιμα συστήματα σήμερα είναι αυτού του τύπου.

#### 4.1.8 Όρια Απόδοσης των Συστημάτων Μέτρησης Απόστασης.

Τα χαρακτηριστικά απόδοσης των διαθέσιμων συστημάτων μέτρησης ποικίλλουν, όπως και οι απαιτήσεις των εφαρμογών για τις οποίες σχεδιάζονται. Στις ακόλουθες υποενότητες θα εξεταστούν οι επιδόσεις των πιο βασικών κατηγοριών των συστημάτων αυτών καθώς και θέματα που αφορούν τα όρια των αποδόσεών τους.

#### **4.1.8.1 Ακρίβεια Απόστασης**

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3, οι TOF και ενεργές triangulation τεχνικές διαφέρουν πάρα πολύ στο λάθος τους ως προς την μετρούμενη απόσταση. Τα διαθέσιμα σήμερα συστήματα βασισμένα ενεργό triangulation έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια μόνο για αποστάσεις μέτρησης μικρότερες του 1m. Επίσης σε συστήματα ραντάρ οι παλμοί επιστροφής έχουν μεγαλύτερη διάρκεια από την διάρκεια εκπομπής  $T_{\pi}$  επειδή οι διάφοροι στόχοι πεπερασμένες και ποίκιλτες διαστάσεις έτσι η ακρίβεια μέτρησης της απόστασης σε συστήματα ραντάρ θα είναι της τάξης :

$$\Delta R = \frac{cT_{\pi}}{2}(4.3)$$

#### **4.1.8.2 Μέγιστη Απόσταση Μέτρησης**

Οποιοδήποτε σύστημα το οποίο βασίζεται στην εκπομπή κυμάτων για το υπολογισμό της απόστασης θα πρέπει να έχει και μια μέγιστη απόσταση που μπορεί να μετρήσει. Αυτό συμβαίνει γιατί η εκπεμπόμενη ενέργεια που διαδίδεται στο μέσο διάδοσης εξασθενεί ,απορροφάται και σκεδάζεται και έτσι θα πρέπει η ενέργεια που επιστρέφει στον ανιχνευτή να υπερβαίνει ένα ορισμένο ελάχιστο ποσό κατωφλίου (κατώφλι θορύβου) για να μπορεί να ανιχνευτεί.

#### **4.1.8.3 Πλευρική Ανάλυση**

Στις εφαρμογές απεικόνισης είναι γενικά επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί το στενότερο δυνατό εύρος δέσμης για να επιτευχθεί καλή πλευρική διάκριση των διαφόρων αντικειμένων. Τα λέιζερ, λόγω του μικρού μήκους κύματός τους, μπορούν να εστιασθούν οπτικά και να παράγουν τα πολύ στενές δέσμες ακτίνων που είναι αδύνατο να παραχθούν με ραδιοκύματα.

#### **4.1.8.4 Χρόνος Λήψης Μετρήσεων**

Η ταχύτητα με την οποία ένας αισθητήρας μπορεί να πάρει μία μέτρηση έχει σημασία όταν το αντικείμενο αλλάζει θέση ή μορφή, ή και όταν η πυκνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι πολύ υψηλή. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που περιορίζουν τη ταχύτητα λήψης μετρήσεων όπως το χρονικό διάστημα που απαιτείται από τον μετατροπέα για να μετατρέψει σήμα επιστροφής, ο χρόνος οποιουδήποτε φιλτραρίσματος ή του υπολογισμού μέσου όρου ή ενίσχυσης που πρέπει να εκτελεσθούν για να πάρουμε το κατάλληλο σήμα, τα όρια ταχύτητας των μηχανικών μερών της συσκευής ανίχνευσης, η ταχύτητα του υπολογιστικού συστήματος κ.α.

## 4.2 Ο ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΘΕΣΗΣ

Ο ακουστικός ανιχνευτής θέσης, ο οποίος είναι και αυτός ο οποίος επιλέξαμε να εξετάσουμε σε βάθος και τελικά να υλοποιήσουμε, είναι αυτός που χρησιμοποιεί ηχητικά κύματα για να πραγματοποιήσει μετρήσεις απόστασης. Στην περίπτωση μάλιστα που θα εξετάσουμε, λειτουργεί με υπερήχους, σε συχνότητες μεγαλύτερες από αυτές που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο αυτί, δηλαδή πάνω από 20kHz.

### 4.2.1 Τρόποι Λειτουργίας

Οι ακουστικοί trackers, προκειμένου να γίνει δυνατή η μέτρηση, εκμεταλλεύονται την καθυστέρηση του σήματος καθώς αυτό ταξιδεύει από τον πομπό στον δέκτη με την ταχύτητα του ήχου. Έτσι, από την στιγμή που η ταχύτητα του ήχου μπορεί να μετρηθεί ή να υπολογιστεί, μας είναι εύκολο, έχοντας μόνον το δεδομένο της χρονικής καθυστέρησης να εξαγάγουμε και την ζητούμενη απόσταση.

Οι ακουστικοί trackers γενικά χρησιμοποιούν μια από τις παρακάτω δυο τεχνικές μέτρησης θέσης και προσανατολισμού:

α) Μέτρηση του Time of Flight (TOF)

β) Διαφορά φάσης

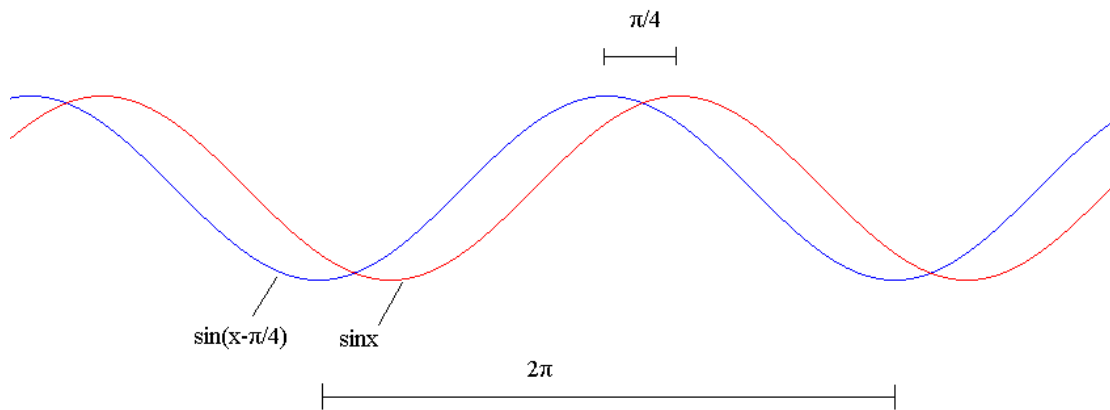
Και οι δυο τεχνικές βασίζονται στην καθυστέρηση του σήματος καθώς αυτό ταξιδεύει στον αέρα από τον πομπό στον δέκτη. Το σήμα ταξιδεύει με σταθερή (για κάθε μέτρηση, παραμένει προσεγγιστικά σταθερή) ταχύτητα, οπότε γνωρίζοντας χρονικές στιγμές έναρξης και άφιξης, μπορούμε να συμπεράνουμε την απόσταση την οποία διένυσε το κύμα.

Η μέτρηση του Time of flight είναι η άμεση εφαρμογή της παραπάνω αρχής. Με ένα χρονόμετρο ακριβείας μετράμε το ακριβές χρονικό διάστημα για το οποίο ταξίδεψε το κύμα μέχρι να φθάσει στον δέκτη. Γνωρίζοντας και την ταχύτητα του ήχου για τις δεδομένες συνθήκες υγρασίας, θερμοκρασίας, κτλ. από την απλή εξίσωση  $s = u \cdot t$ , υπολογίζουμε την απόσταση. Καθίσταται σαφές ότι για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας ή μετρήσεις μικρού χώρου πρέπει να γνωρίζουμε με μεγάλη ακρίβεια την ταχύτητα του ήχου και τον χρόνο, καθώς το σφάλμα τους πολλαπλασιάζεται, οπότε τα αποτελέσματα που θα λάβουμε θα μας είναι άχρηστα.

Για παράδειγμα, και για να δώσουμε μια εντύπωση των μεγεθών που υπεισέρχονται στις μετρήσεις, θα παραθέσουμε αριθμητικά μεγέθη για μια τυχαία μέτρηση. Έστω λοιπόν μια μέτρηση η οποία αναμένουμε να δώσει για αποτέλεσμα μια απόσταση π.χ. 2m. Για μια τιμή της ταχύτητας του ήχου 340 m/sec, θα έπρεπε να μετρήσουμε χρόνο περίπου 5.88 msec. Διαφορές της τάξης του 0,1msec δίνουν σφάλμα 3.7 εκατοστών, το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Αντίστοιχα λάθη μπορούν να προκύψουν και από λαθος υπολογισμό της ταχύτητας του ήχου στην περιοχή της μέτρησης.

Παραλλαγή του παραπάνω είναι η μέτρηση της διαφοράς φάσης. Με την μέθοδο αυτή μετράμε την διαφορά φάσης των ηχητικών κυμάτων στον πομπό και στον δέκτη, εξαγοντας τελικά συμπεράσματα για την μεταξύ τους απόσταση. Όλα τα ηχητικά σήματα μπορούν να παρασταθούν ως αθροίσματα ημιτόνων της μορφής  $A \sin(\omega t - \phi)$ , όπου  $\phi$  η μετρώμενη διαφορά φάσης (για  $\theta = 2\pi$  έχουμε πλήρη περίοδο) και  $A$  το πλάτος του κύματος. Μέσω του  $\phi$  μπορούμε να υπολογίσουμε την

απόσταση για κύματα με γνωστή συχνότητα. Τα κύματα παριστάνονται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 4.6** Ηχητικά κύματα ως αθροίσματα ημιτόνων

Η συχνότητα του ακουστικού σήματος  $f$  εξαρτάται από την ταχύτητά του ( $c$ ) και το μήκος κύματός του ( $\lambda$ ), όπως βλέπουμε στην σχέση  $c = \lambda f$ . Στην μετρώμενη διαφορά φάσης αντιστοιχεί ένα τμήμα του μήκους κύματος που ισούται με

$$d = \lambda \cdot \frac{f}{2p} \quad \text{ή} \quad d = \frac{c}{f} \cdot \frac{f}{2p}$$

Έτσι, για παράδειγμα έστω ότι βρίσκουμε διαφορά φάσης  $\pi/4$  μεταξύ εκκίνησης και τερματισμού σε ένα σήμα 40kHz (τιμή συνηθισμένη για συστήματα υπερήχων), εύκολα υπολογίζουμε από την παραπάνω σχέση (για  $c=340\text{m/s}$ ) ότι  $\delta = 1,06\text{mm}$ .

Το κύριο ελάττωμα της μεθόδου όμως είναι η αβεβαιότητα για το ποια ακριβώς είναι η διαφορά φάσης λόγω της περιοδικότητας των ημιτονικών σημάτων. Η μετρώμενη φάση  $\varphi$  είναι οποιαδήποτε από την οικογένεια των γωνιών  $\varphi + (n \cdot 2\pi)$ . Έτσι, στο παραπάνω παράδειγμα, αφού το κύμα 40 kHz έχει μήκος κύματος 8,5mm, έχοντας μετρήσει  $\varphi = \pi/4$ , η πραγματική απόσταση μπορεί να είναι είτε 1,06mm ή 9,56mm ή τέλος πάντων  $(n \cdot 8,5 + 1,06)\text{mm}$ ,  $n=0,1,2,\dots$

Για την αντιμετώπιση της παραπάνω δυσκολίας γίνεται χρήση είτε κάποιας διαμόρφωσης στο σήμα (πράγμα δύσκολο, λόγω του μικρού εύρους ζώνης της ζεύξης που θα έχουμε), η οποία καθιστά σαφή τα σημεία έναρξης και άφιξης είτε με τη χρήση κάποιου προβλεπτικού αλγόριθμου. Λέγοντας αυτό εννοούμε ότι από το σύνολο των πιθανών τιμών που έχουμε μετρήσει, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την προηγούμενη μέτρηση ώστε να αποκτήσουμε μια ιδέα για το σε ποια θέση όντως βρίσκεται ο στόχος. Έτσι, πχ, βάσει των προηγούμενων μετρήσεων (οι οποίες ξεκινάνε από κάποιο σταθερό σημείο αναφοράς – ένα είδος calibration δηλαδή) μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η τιμή είναι αυτή η οποία είναι πλησιέστερη στην προηγούμενη μέτρηση θα είναι και πιθανότατα η πραγματική.

#### 4.2.2 Κλασσικές Μέθοδοι Εντοπισμού Πηγής Ακουστικής Εκπομπής

Ο ΜΚΕ με την χρήση μεθόδου ΑΕ αποτελεί μια πολύ χρήσιμη μέθοδο για την ανίχνευση και τον εντοπισμό αστοχιών (σπασίματα, ρωγμές κ.α) σε υλικά και κατασκευές. Η ανίχνευση σημάτων ΑΕ χρησιμοποιείται συχνά στην παρακολούθηση έναρξης αστοχίας καθώς και στον έλεγχο της κατάστασης της κατασκευής. Σε αυτό το πλαίσιο, η αναγνώριση του τύπου της αστοχίας και η ανίχνευση της θέσης της, αποτελούν σήμερα μερικά από τα πιο σημαντικά προβλήματα που ασχολείται η μέθοδος της ΑΕ. Ο Εντοπισμός Θέσης Πηγής (ΕΘΠ) ΑΕ μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με την γεωμετρία της υπό έλεγχο κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, όταν η μια διάσταση είναι πολύ μεγαλύτερη έναντι των άλλων δύο, π.χ σε πολύ μακριούς σωλήνες, η μέθοδος ΕΘΠ ονομάζεται γραμμική (1-διαστατή). Όταν εξετάζονται επίπεδες κατασκευές, π.χ πλάκες, γέφυρες, δεξαμενές κ.α, τότε η μέθοδος ΕΘΠ καλείται επίπεδη (2-διαστατή) ενώ 3- διαστατή ΕΘΠ σε μετασχηματιστές και σε συγκεκριμένες δομές.

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι ΕΘΠ ΑΕ που στηρίζονται στην ψηφιακή επεξεργασία του σήματος (σήματα αισθητήρων):

- α) Μέθοδος εξασθένησης
- β) Διαφορών χρόνου άφιξης.

Η κάθε μία από αυτές τις μεθόδους βασίζεται σε διαφορετικά φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την διάδοση του σήματος από την πηγή στους αισθητήρες και εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα αυτών των φαινομένων.

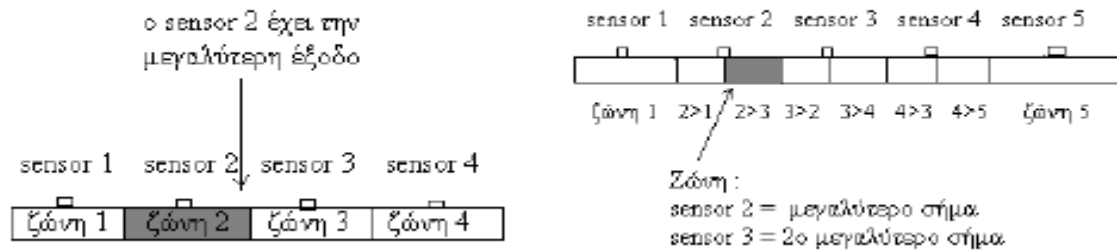
#### 4.2.3 Μέθοδος Εξασθένησης

Τα ακουστικά κύματα τα οποία διαδίδονται μακριά από τις πηγές τους, λόγω της εξάπλωσης σε μεγαλύτερες επιφάνειες ή χώρους, λόγω της επίδρασης των ανακλάσεων, της αλλαγής του τρόπου μετάδοσης κ.α., χάνουν σημαντικό μέρος της ενέργειάς τους. Ο όρος εξασθένηση (attenuation) αναφέρεται στην επίδραση όλων αυτών των αθροιστικών διαδικασιών, υποδηλώνοντας ότι η ισχύς του σήματος μειώνεται καθώς η απόσταση ανάμεσα στην πηγή και στο σημείο της μέτρησης αυξάνεται. Αυτή η γενική αρχή διαφοροποιείται σε περιπτώσεις όπου παρατηρούνται ανακλάσεις ή προκαλούνται συντονισμοί στην δομή του υλικού αυξάνοντας τα στάσιμα κύματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις ακόμα συμβαίνει εξασθένηση αλλά το πλάτος του μετρημένου σήματος μπορεί να μην ακολουθήσει την αναμενόμενη χαρακτηριστική συνάρτηση απόστασης-πλάτους. Ο τρόπος εξασθένησης του σήματος έχει μελετηθεί τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.

#### 4.2.4 Μέθοδος Εντοπισμού Ζώνης

Εάν ένα σήμα ΑΕ διαδίδεται πάνω στην κατασκευή στην οποία είναι τοποθετημένοι αισθητήρες (sensor array), τότε συνήθως ο αισθητήρας με την μεγαλύτερη ενέργεια σήματος θα είναι πιο κοντά στην πηγή (θεωρώντας αισθητήρες με ίδια ευαισθησία). Αυτό συμβαίνει, διότι το σήμα που έχει εντοπίσει ο πλησιέστερος αισθητήρας είναι λιγότερο εξασθενημένο από ότι σε οποιονδήποτε άλλον αισθητήρα

(σχήμα 4.7.α). Αυτή η ευρύτερη ζώνη μέσα στην οποία βρίσκεται η πηγή ΑΕ μπορεί να περιοριστεί σημαντικά με την βοήθεια του αισθητήρα με την δεύτερη μεγαλύτερη έξοδο. Αφού εντοπιστεί ο πρώτος αισθητήρας μελετούνται τα σήματα που παίρνονται από τους δύο γειτονικούς αισθητήρες. Βρίσκεται αυτός που έχει την μεγαλύτερη έξοδο και έτσι είναι δυνατόν να μειωθεί αρκετά η ζώνη εντοπισμού (σχήμα 4.7.β).



**Σχήμα 4.6.α,β.** Μέθοδος εντοπισμού ευρύτερης ζώνης και στενότερης ζώνης.

#### 4.2.5 Μέθοδος Μέτρησης Πλάτους Σήματος

Με την μέθοδο εντοπισμού ζώνης είναι απαραίτητο να βρεθεί μόνο ο αισθητήρας με την μεγαλύτερη ενέργεια σήματος και ίσως ο αισθητήρας με την αμέσως χαμηλότερη ενέργεια σήματος. Το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου εντοπισμού ζώνης είναι ότι η ζώνη πιθανών θέσεων της πηγής ΑΕ είναι πολύ μεγάλη. Μετρώντας τις εξόδους των αισθητήρων είναι δυνατόν να υπάρξει μεγαλύτερος βαθμός ακρίβειας, με δεδομένο ότι είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά εξασθένησης της κατασκευής. Για να χρησιμοποιηθεί η τεχνική μέτρησης πλάτους είναι απαραίτητο να καταγραφεί λεπτομερειακά η εξασθένηση του σήματος για την εκάστοτε εφαρμογή. Μέσα από αυτές τις μετρήσεις μπορεί να κατασκευαστεί η χαρακτηριστική καμπύλη (απόστασης-πλάτος). Συγκρίνοντας το πραγματικό σήμα με την χαρακτηριστική καμπύλη είναι δυνατόν να εντοπιστεί η θέση της πηγής ΑΕ. Η μέθοδος εξασθένησης έχει πολλά μειονεκτήματα στην εφαρμογή της και δεν χρησιμοποιείται παρά μόνο σε ελάχιστες περιπτώσεις. Συνήθως η μέθοδος εξασθένησης χρησιμοποιείται σε συνεχή σήματα ΑΕ (διαρροή) κατά τα οποία πρέπει να λαμβάνονται πολλές μετρήσεις ώστε να δημιουργηθεί η καμπύλη ακουστικής εξασθένησης. Η καμπύλη εξασθένησης αλλάζει σε κάθε κατασκευή και η δημιουργία της είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο που σχετίζεται με τα διάφορα είδη διάδοσης κυμάτων, την σκέδαση, την γεωμετρία της κατασκευής, το υλικό κ.α.

#### 4.2.6 Μέθοδος Διαφορών Χρόνου Άφιξης

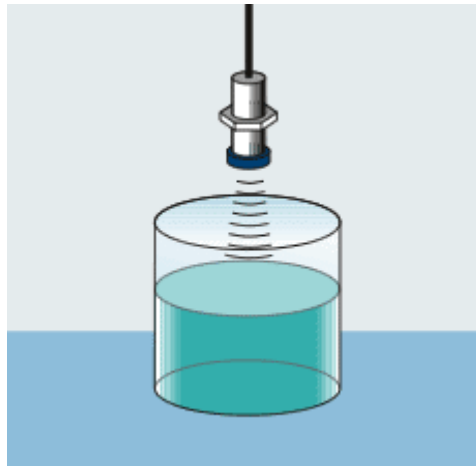
Η μέθοδος Διαφορών Χρόνου Άφιξης (ΔΧΑ) χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές όπως ανίχνευση στόχων για ραντάρ, σόναρ, σεισμικά σήματα κ.α. Η μέθοδος ΔΧΑ εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι τα δύο σήματα που εκπέμπονται από την πηγή ΑΕ συλλέγονται από τους αισθητήρες και παρουσιάζουν μια χρονική μετατόπιση το ένα ως προς το άλλο και σε συνδυασμό με τριγωνικές τεχνικές αποτελεί την πιο γνωστή μέθοδος ΕΘΠ ΑΕ. Σε αυτές τις μεθόδους τα σήματα πρέπει

να είναι εκρηκτικού τύπου, και όχι συνεχής. Η θέση της πηγής ΑΕ βρίσκεται στην τομή των γεωμετρικών τόπων οι οποίοι ορίζονται από την σταθερή διαφορά των αποστάσεων μεταξύ των αισθητήρων και του κάθε σημείου του γεωμετρικού τόπου (υπερβολή). Σχεδόν όλες οι μέθοδοι εντοπισμού υποθέτουν ότι το κύμα διαδίδεται κατά μήκος της επιφάνειας της κατασκευής και φτάνει στον κάθε αισθητήρα διανύοντας την συντομότερη διαδρομή (geodesic path).

## 4.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

### 4.3.1 Έλεγχος στάθμης

Ανίχνευση στάθμης από μερικά χιλιοστά μέχρι 6 μέτρα. Αισθητήρες υπερήχων με 1 ή 2 επαφές για ανώτατο /κατώτατο όριο ή και έξοδο 0-10V και 4-20mA



Εικόνα 4.1

### 4.3.2 Ποιοτικός έλεγχος

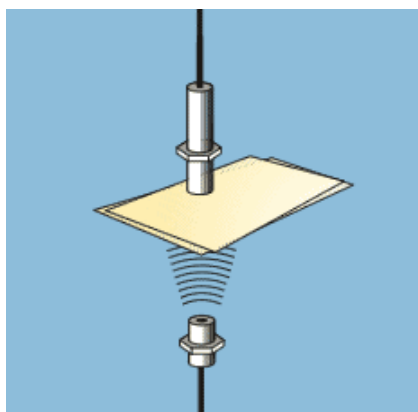
Άμεσα στον ταινιόδρομο. Ειδικά αισθητήρια που ανιχνεύουν τα μπουκάλια που είναι πάρα πολύ ψηλά ή πάρα πολύ κοντά, ή έχουν πέσει



Εικόνα 4.2

### 4.3.3 Ανίχνευση με υπέρηχους 2 φύλλων

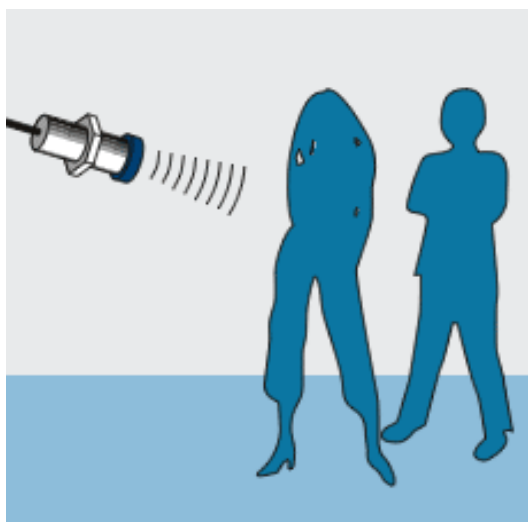
Προσδιορίζει δύο ή περισσότερα φύλλα του υλικού το ένα πάνω στο άλλο. Υπάρχουν αισθητήρες για χαρτιά εκτυπωτών, φωτοτυπικών αλλά και για παχύτερα υλικά όπως τα πλαστικά φύλλα



Εικόνα 4.3

### 4.3.4 Ανίχνευση παρουσίας ανθρώπων

Εάν ο στόχος είναι να ανιχνευθεί η παρουσία ανθρώπων, πρέπει να επιλεγεί αισθητήρας με απόσταση ανίχνευσης παραπάνω από την αναγκαία

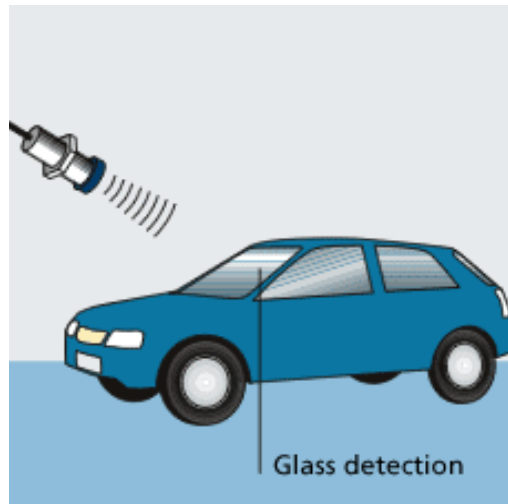


Εικόνα 4.4



#### 4.3.5 Προσδιορισμός θέσης

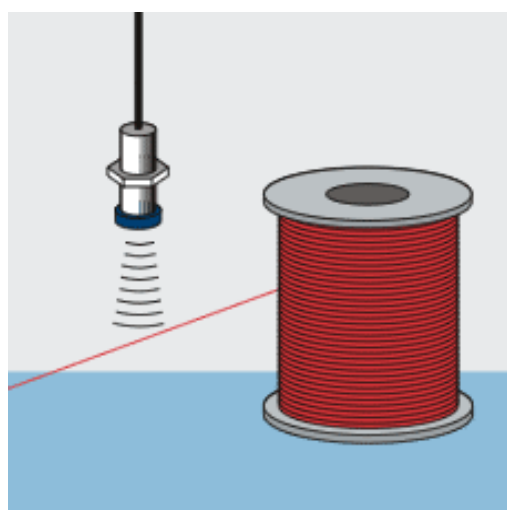
Κατά την ανίχνευση επιφάνειας γυαλιού ή άλλων ομαλών επίπεδων επιφανειών, προσοχή πρέπει να ληφθεί έτσι ώστε ο αισθητήρας υπερήχων να ανιχνεύει την κάθετο στην επιφάνεια.



Εικόνα 4.5

#### 4.3.6 Ανίχνευση θραύσης καλωδίων

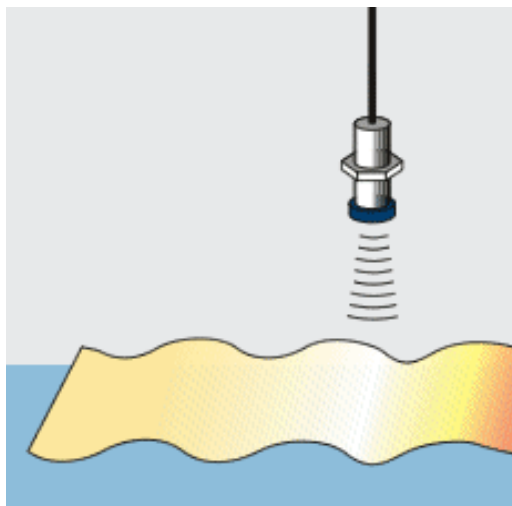
Κατά την διάρκεια τυλίγματος-ξετυλίγματος. Μοντέλα με αναλογική έξοδο για την ανίχνευση θέσης καλωδίου.



Εικόνα 4.6

#### 4.3.7 Ανίχνευση ομαλότητας υλικού

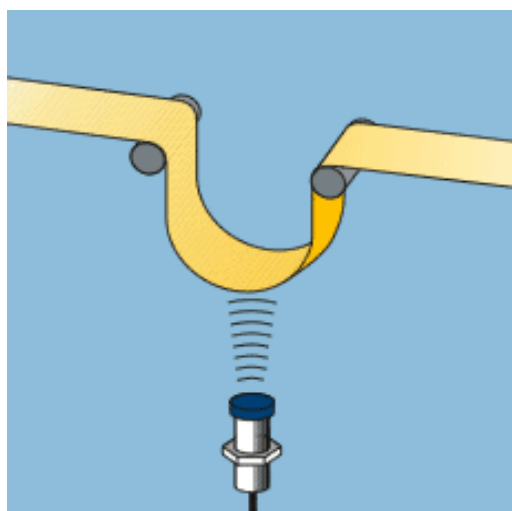
Η ταινία και το φύλλο αλουμινίου στις μηχανές συσκευασίας ελέγχονται πολύ εύκολα με έναν αισθητήρα υπερήχων. Εάν το υλικό δεν βρίσκεται επίπεδο, είναι ενδεικτικό να χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας ως διπλής κατεύθυνσης ή φράγματος ανάκλασης



Εικόνα 4.7

#### 4.3.8 Ανίχνευση βρόγχων

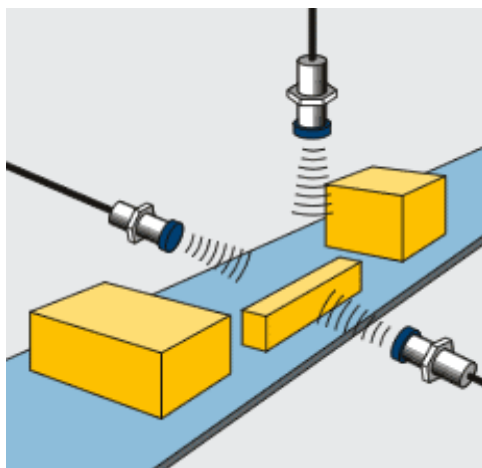
Σε αυτήν την περίπτωση ένας αισθητήρας με αναλογική έξοδο ανιχνεύει την απόσταση του βρόγχου και ρυθμίζει την έξοδο ανάλογα με το μέγεθος του βρόγχου.



Εικόνα 4.8

### 4.3.9 Μετρήσεις ύψους και πλάτους

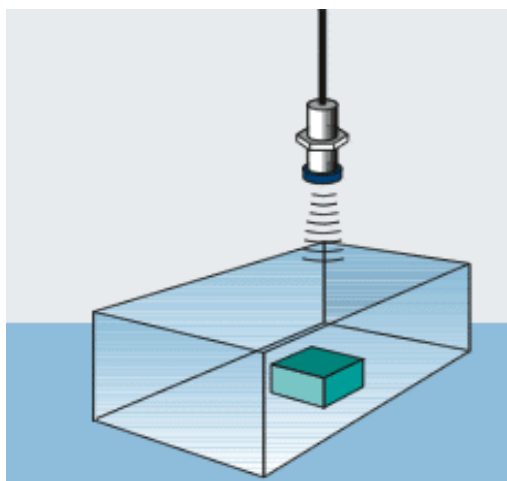
Διατίθεται μοντέλο ελεγκτή για σύνδεση μέχρι και τεσσάρων αισθητήρων με διαφορετικές κλίμακες ανίχνευσης για την τρισδιάσταση σάρωση οποιουδήποτε μεγέθους κιβωτίου.



Εικόνα 4.9

### 4.3.10 Ανίχνευση παρουσίας

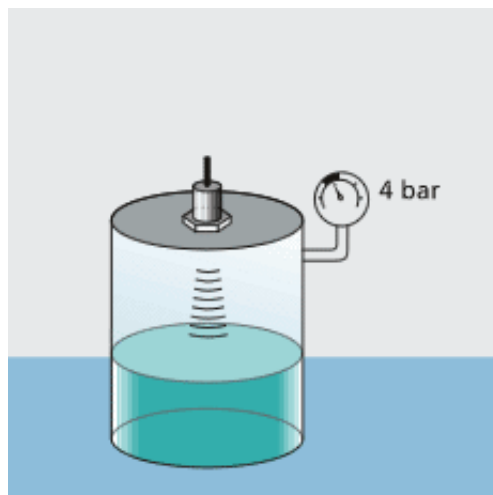
Αισθητήρες προσέγγισης υπερήχων με έξοδο επαφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρά κιβώτια και μεγάλα κιβώτια. Όταν το κιβώτιο πρόκειται να σαρωθεί από διάφορους αισθητήρες συστήνεται η χρήση ξεχωριστού ελεγκτή.



Εικόνα 4.10

#### 4.3.11 Έλεγχος στάθμης υπό πίεση

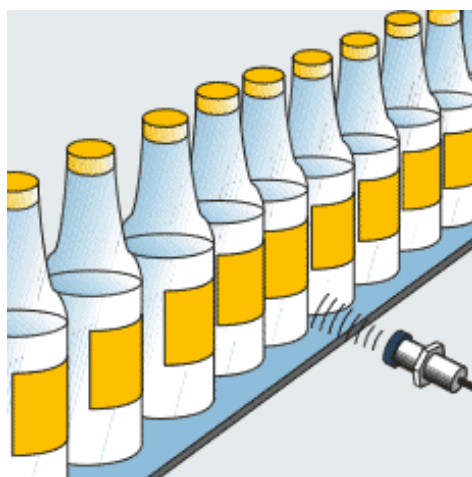
Για πιέσεις μέχρι 4 bar και ειδική κεφαλή για τους αισθητήρες.



Εικόνα 4.11

#### 4.3.12 Ανίχνευση Φράγματος μέσω υπερήχων

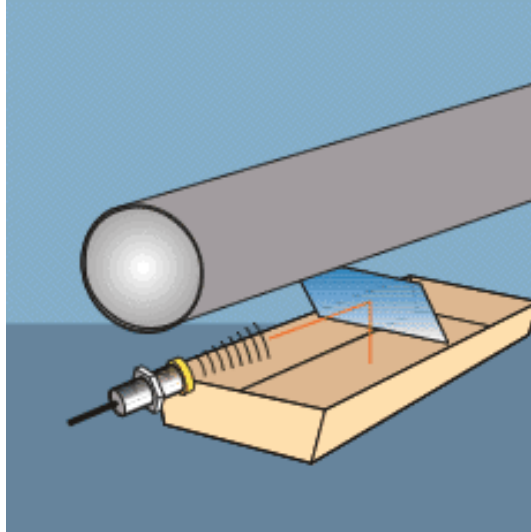
Είναι εύκολο να χρησιμοποιηθεί ένας αισθητήρας υπερήχων αμφίδρομης κατεύθυνσης ή φράγμα ανάκλασης. Για να γίνει αυτό, ένας μόνιμος ανακλαστήρας τοποθετείται πίσω από τα αντικείμενα ανίχνευσης



Εικόνα 4.12

#### 4.3.13 Ανακλαστήρας ήχου

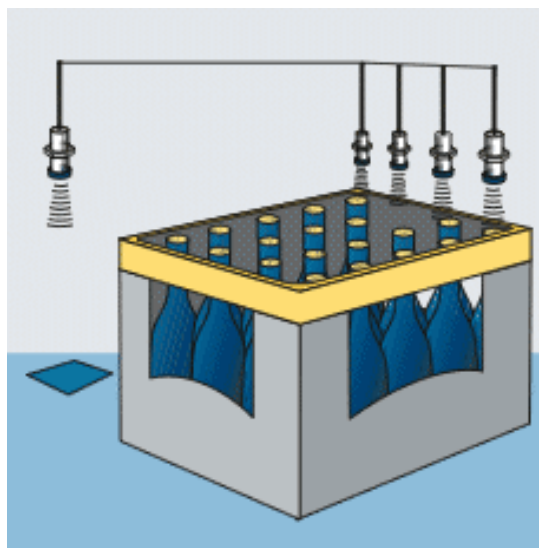
Σε εγκαταστάσεις με περιορισμένο χώρο ή για προστασία του αισθητήρα, η ηχητική δέσμη μπορεί να γυρίσει κατά 90° με την χρήση ηχητικού ανακλαστήρα.



Εικόνα 4.13

#### 4.3.14 Έλεγχος γεμίσματος

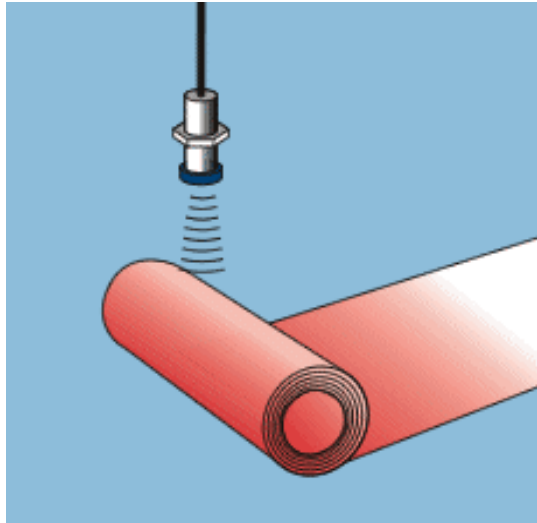
Ειδικός αισθητήρας για εφαρμογές όπως ο έλεγχος εάν τα κιβώτια είναι γεμάτα ή άδεια, ή για σάρωση άδειων πλαστικών μπουκαλιών σε ένα ταινιόδρομο. Ένας αισθητήρας μπορεί να διακρίνει ύψος φιαλών ή πεσμένες φιάλες.



Εικόνα 4.14

#### 4.3.15 Έλεγχος των διαμέτρων

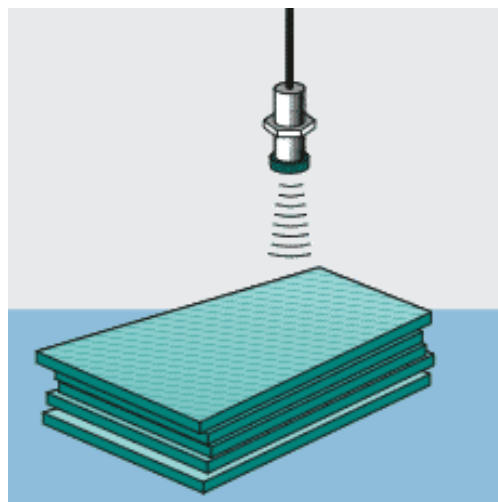
Η διάμετρος ενός ρολού ή μιας σπείρας του υλικού μπορεί να ανιχνευθεί από έναν αισθητήρα με αναλογική έξοδο και να ρυθμιστεί η κίνηση ή το φρένο ανάλογα.



Εικόνα 4.15

#### 4.3.16 Συσσώρευση του ελέγχου ύψους

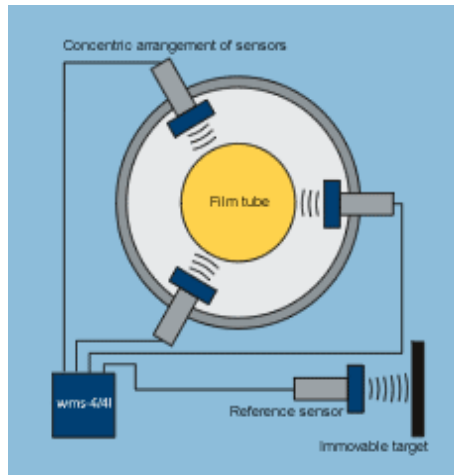
Για ξύλινες πλάκες, υαλοπίνακες, φύλλα χάρτου ή φύλλα πλαστικών, οι αισθητήρες υπερήχων είναι ιδανικοί για την ανίχνευση του ύψους σώρευσης του υλικού με μεγάλη ακρίβεια.



Εικόνα 4.16

#### 4.3.17 Εγκατάσταση για έναν εξωθητή

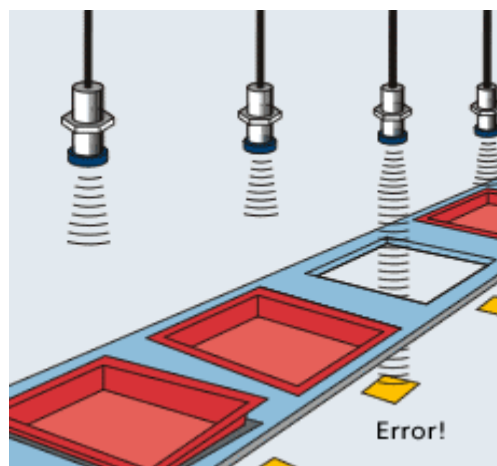
Ειδικός ελεγκτής με τέσσερις αναλογικές εξόδους ιδανικός για τον έλεγχο της διαμέτρου σε έναν εξωθητή φύλλων αλουμινίου.



Εικόνα 4.17

#### 4.3.18 Επιτήρηση δίσκων προϊόντων

Μια λύση με τον αισθητήρα που λειτουργεί ως διπλής κατεύθυνσης ή με φράγμα ανάκλασης πρέπει πάντα να προτιμηθεί όταν το υπό σάρωση αντικείμενο απορροφάει ή εκτρέπει τα ηχητικά κύματα.



Εικόνα 4.18

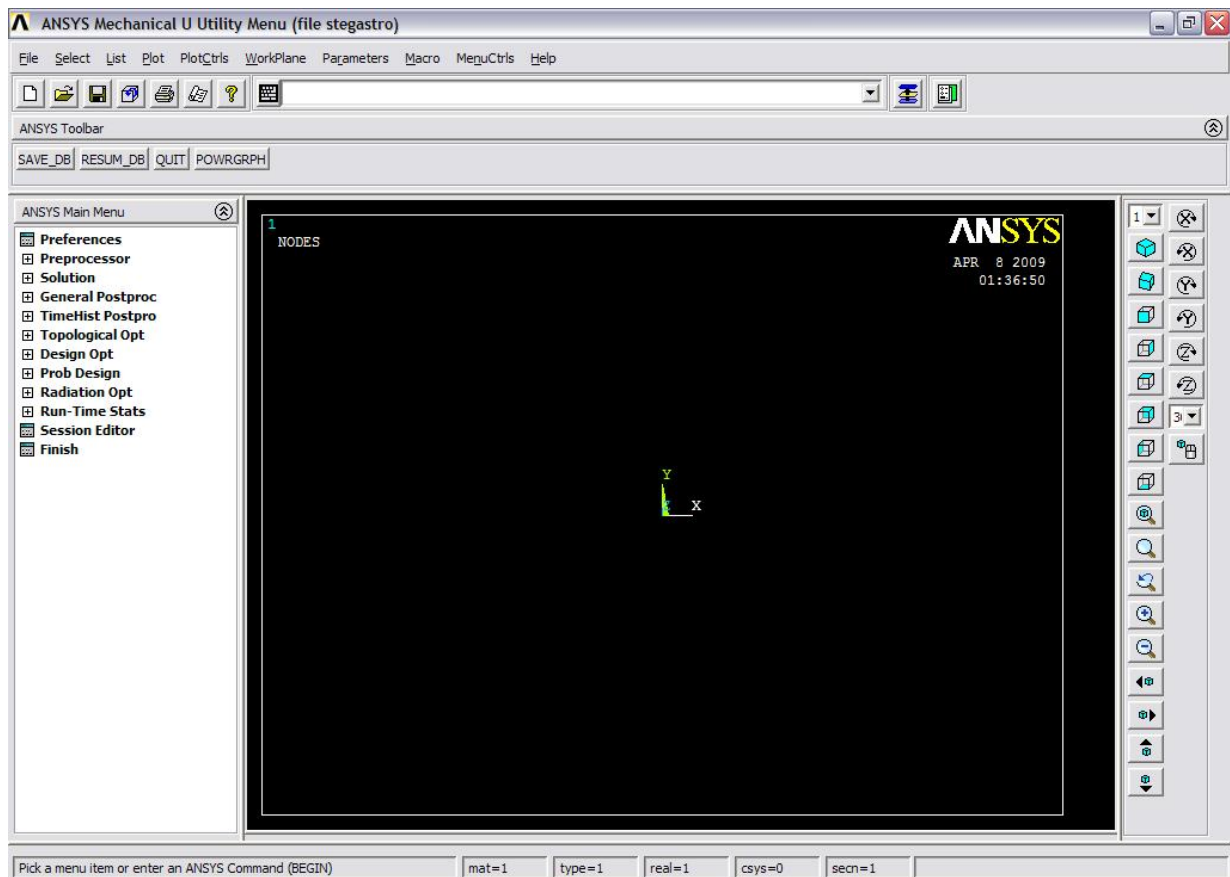
## **5. ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΕ ΣΩΛΗΝΕΣ**

Με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου των υπερήχων, η οποία αποτελεί μια από τις κυριότερες μεθόδους ΜΚΕ, στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια μελέτη κυματικής διάδοσης υπερήχων σε σωλήνες. Η μελέτη γίνεται αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και με χρήση του εμπορικού λογισμικού ANSYS.

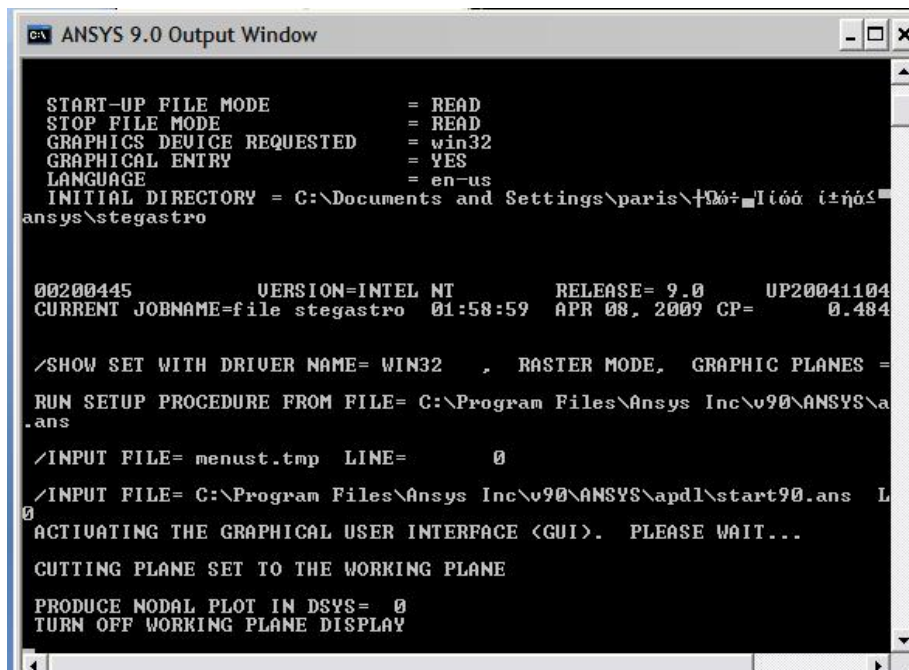
### **5.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ANSYS**

Το ANSYS είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων γενικού σκοπού και θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα εμπορικά πακέτα πεπερασμένων στοιχείων. Έχει την δυνατότητα επίλυσης στατικών και δυναμικών προβλημάτων ροής ρευστών, ανάλυσης κατασκευών, μετάδοσης θερμότητας, ακουστικής, ηλεκτρισμού και ηλεκτρομαγνητισμού. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση ANSYS 11.0, το περιβάλλον της έκδοσης οποίας παρουσιάζεται στις εικόνες 5.1 (κύριο παράθυρο) και 5.2 (παράθυρο πληροφοριών).





Εικόνα 5.1: Κύριο παράθυρο εργασίας



Εικόνα 5.2: Παράθυρο πληροφοριών

### 5.1.1 ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ ANSYS

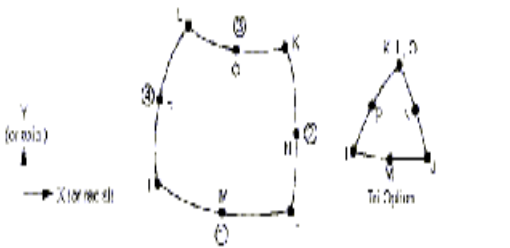
Για την ανάλυση ενός προβλήματος με το ANSYS ακολουθούμε τα εξής βασικά βήματα :

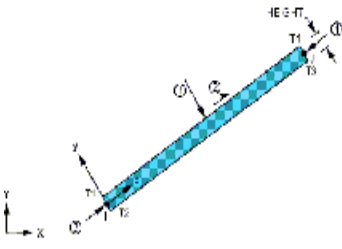
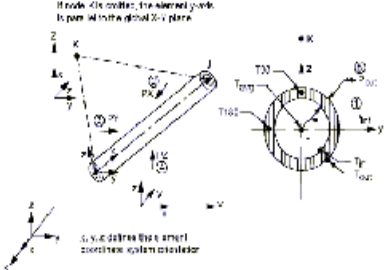
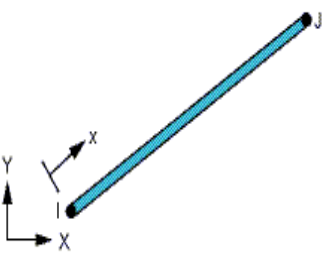
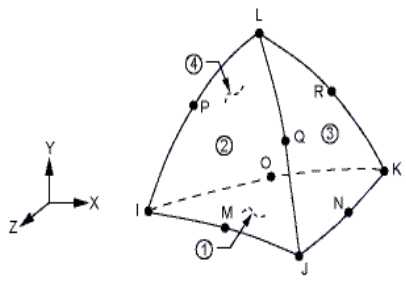
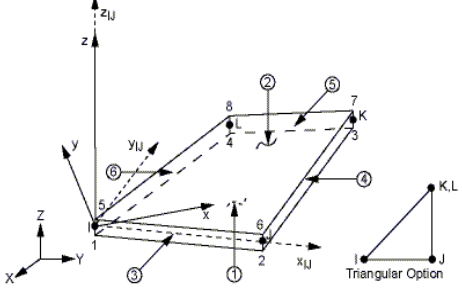
#### α) Κατασκευή του μοντέλου με χρήση των εντολών του Preprocessor

Οι σημαντικότερες εργασίες που γίνονται για την κατασκευή ενός μοντέλου είναι οι εξής:

- Ø Ορισμός του τύπου στοιχείων(element type): Το ANSYS ανάλογα με τη γεωμετρία, το φυσικό χαρακτήρα του προβλήματος (στατικό, θερμικό, ροή ρευστού, ηλεκτρομαγνητικό) και την μηχανική συμπεριφορά των υλικών της κατασκευής (γραμμικά, μη-γραμμικά, ισότροπα, ανισότροπα) και των συναρτήσεων που θα χρησιμοποιηθούν για την προσέγγιση των αγνώστων πεδίων του προβλήματος, διαθέτει περισσότερα από 150 στοιχεία για την ανάλυση όλων των ειδών προβλημάτων. Είναι εύκολα κατανοητό ότι η επιλογή του κατάλληλου είδους στοιχείου είναι πολύ σημαντική για τη διαδικασία της ανάλυσης. Κάθε ένα από τα στοιχεία προσδιορίζεται από την ονομασία μιας κατηγορίας και ακολουθείται από έναν χαρακτηριστικό αριθμό, π.χ. link10, beam3, solid45. Οι βασικές κατηγορίες των διαθέσιμων δομικών στοιχείων, όπου οι βαθμοί ελευθερίας δύναται να είναι οι μετατοπίσεις και οι στροφές, είναι τα επίπεδα στοιχεία (plane elements), τα ραβδωτά στοιχεία (link elements), τα στοιχεία δοκού (beam elements), τα στερεά στοιχεία (solid elements), ή/και κελυφωτά στοιχεία (shell elements). Όλα αυτά τα στοιχεία περιέχουν ένα πλήθος υποκατηγοριών στοιχείων με διαφορετικούς κόμβους ο αριθμός των οποίων καθορίζεται από το είδος και το βαθμό των συναρτήσεων προσέγγισης των αγνώστων πεδίων. Για παράδειγμα τα δισδιάστατα επιφανειακά στοιχεία ορίζονται από την κατηγορία plane. Επιπλέον το στοιχείο plane42 είναι ένα τετράπλευρο στοιχείο τεσσάρων κόμβων με δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, μεταφορά σε  $x$  και  $y$  κατευθύνσεις. Στο πίνακα 5.1 απεικονίζονται μερικά αντιπροσωπευτικά δομικά στοιχεία.

**Πίνακα 5.1:** Αντιπροσωπευτικά δομικά στοιχεία του ANSYS

	<p>Το στοιχείο (PLANE82) καθορίζεται από 8 κόμβους, με δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (τις μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X και Y)</p>
---	---

	<p>Αξονικά δισδιάστατα στοιχεία (BEAM 3), τα οποία καθορίζονται από τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X και Y και περιστροφή για τον κομβικό Z άξονα)</p>
	<p>Το στοιχείο PIPES 16 είναι ένα αξονικό στοιχείο και καθορίζεται από έξι βαθμούς ελευθερίας σε δύο κόμβους (μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X, Y και Z και τις περιστροφές περί τους κομβικούς άξονες X, Y, και Z)</p>
	<p>Ραβδωτά στοιχεία (LINK), τα οποία είναι τρισδιάστατα στοιχεία γραμμής με δύο κόμβους και τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπίσεις σε κάθε άξονα)</p>
	<p>Το στοιχείο SOLID 187 έχει 10 κόμβους με τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο: τις μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X, Y, και Z. Το στοιχείο έχει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων πλαστικότητας, υπερ-ελαστικότητας, ερπυσμού και προβλημάτων με μεγάλες μετατοπίσεις.</p>
	<p>Το στοιχείο (SHELL63) έχει έξι βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο: μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X, Y και Z και τις περιστροφές περί τους κομβικούς άξονες X, Y, και Z.</p>

**Ø Καθορισμός των ιδιοτήτων των υλικών (Material Properties).**  
 Ανάλογα με τον τύπο της ανάλυσης που θα διεξαχθεί, απαιτείται ο ορισμός κάποιων συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών της κατασκευής, όπως είναι για παράδειγμα το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson, η πυκνότητα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής, κ.α. Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών μπορεί να είναι:

- i. Γραμμική ή μη γραμμική καθώς
  - ii. Ισότροπη ή ανισότροπη.
- ∅ Σχεδιασμός της πρότυπης γεωμετρίας της κατασκευής. Αποτελεί το σχεδιαστικό μέρος της κατασκευής του μοντέλου, όπου με τις κατάλληλες εντολές τύπου CAD, δημιουργούμε την γεωμετρία της κατασκευής που θέλουμε να αναλύσουμε. Έχουμε τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε σημεία, γραμμές, επιφάνειες και όγκους. Επίσης υπάρχει η πολύ σημαντική δυνατότητα για την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών (booleans), της δημιουργίας σύνθετων γραμμών, επιφανειών και όγκων που προκύπτουν από την ένωση ή/και τομή πολλών απλών επιφανειών.
- ∅ Διακριτοποίηση (meshing). Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας της υπό ανάλυση κατασκευής γίνεται αποκλειστικά και μόνο για να δημιουργηθεί το πλέγμα της γεωμετρίας, όσο δυνατόν πιο εύχρηστα και αποτελεσματικά. Μόλις ολοκληρωθεί το στερεό πρότυπο, ο χρήστης προβαίνει στην διακριτοποίηση του μοντέλου, αφού πρώτα έχει ορίσει το τύπο των στοιχείων και τις πραγματικές σταθερές (realconstants) αν αυτές χρειάζονται καθώς επίσης και το υλικό του υπό διακριτοποίηση τμήματος της κατασκευής. Το ANSYS προσφέρει διάφορες επιλογές για να επιτευχθεί η ιδανικότερη διακριτοποίηση. Αυτές είναι η ελεύθερη (freemeshing) και προκαθορισμένη (mapped) διακριτοποίηση. Επίσης παρέχονται στον χρήστη πολλές δυνατότητες για την ρύθμιση του μεγέθους του πλέγματος. Γενικά, ένας μεγάλος αριθμός στοιχείων παρέχει μια καλύτερη προσέγγιση της λύσης. Είναι σημαντικό το μέγεθος του πλέγματος να είναι επαρκώς αραιό ή πυκνό στις κατάλληλες περιοχές ώστε να επιτευχθεί η σύγκλιση της λύσης. Πόσο αραιό ή πυκνό πρέπει να είναι το πλέγμα σε αυτές τις περιοχές είναι μια σημαντική ερώτηση. Δυστυχώς, δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη απάντηση για τον καθορισμό εξ' αρχής του κατάλληλου πλέγματος, δεδομένου ότι εξαρτάται από το συγκεκριμένο φυσικό πρόβλημα που αναλύεται κάθε φορά. Εντούτοις, υπάρχουν μερικές τεχνικές που να είναι χρήσιμες για τον καθορισμό του κατάλληλου μεγέθους του πλέγματος. Μια από αυτές τις τεχνικές είναι η εξής: Το μοντέλο αναλύεται με ένα αρχικό μέγεθος πλέγματος και κατόπιν αναλύεται ξανά με ένα διαφορετικό μέγεθος πλέγματος (συνήθως μιάμιση έως δύο φορές πιο πυκνό). Οι δύο λύσεις συγκρίνονται και εάν τα αποτελέσματα συγκλίνουν μεταξύ τους, η αρχική διαμόρφωση πλέγματος θεωρείται επαρκής. Εάν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των δύο, η ανάλυση πρέπει να συνεχιστεί με πιο πυκνά μεγέθη πλεγμάτων και να συγκρίνονται τα αποτελέσματα μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση.

## **β) Ορισμός της ανάλυσης και επίλυση του προβλήματος με χρήση των εντολών του επεξεργαστή Solution**

Οι σημαντικότερες εργασίες που γίνονται στο στάδιο αυτό είναι οι εξής:

Ø Ορισμός του είδους της ανάλυσης (analysistype) που θα διεξαχθεί. Το ANSYS ως πρόγραμμα γενικού σκοπού έχει τη δυνατότητα να επιλύσει ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων εφαρμοσμένης μηχανικής. Με έμφαση τα προβλήματα του ενδιαφέροντος ενός Μηχανολόγου Μηχανικού εστιάζουμε στα παρακάτω είδη ανάλυσης:

1) Δομική ανάλυση: Στις αναλύσεις αυτές ζητούμενο είναι η εύρεση της κατανομής των τάσεων, παραμορφώσεων, πιέσεων επιφανείας, καθώς επίσης και των δυνάμεων αντίδρασης σε ένα στερεό σώμα. Μερικές υποκατηγορίες διαθέσιμων αναλύσεων είναι οι εξής.

- *Στατική ανάλυση:* Τα εφαρμοσμένα φορτία και οι συνθήκες στήριξης του στερεού σώματος δεν αλλάζουν με το χρόνο.

- *Ιδιομορφική ανάλυση:* Με αυτό τον τύπο ανάλυσης υπολογίζονται οι φυσικές συχνότητες της ελεύθερης ταλάντωσης της κατασκευής καθώς επίσης και οι αντίστοιχες ιδιομορφές.

- *Αρμονική ανάλυση:* Με την ανάλυση αυτή μελετούμε τη συμπεριφορά μόνιμης κατάστασης μιας κατασκευής που υποβάλλεται σε φορτία αρμονικά σε σχέση με το χρόνο.

- *Μεταβατική ανάλυση:* Τα εφαρμοσμένα φορτία ή/και οι συνθήκες στήριξης του στερεού σώματος αλλάζουν ως συναρτήσεις του χρόνου. Αυτός ο τύπος των αναλύσεων είναι συνήθως και ο πιο χρονοβόρος μιας η λύση προκύπτει κατόπιν ολοκλήρωσης σε όλο το χρόνο εξέλιξης του φαινομένου του προβλήματος.

Ø **Ορισμός συνοριακών συνθηκών (Boundaryconditions).** Το ANSYS έχει τη δυνατότητα να ορίσει σε ένα πρόβλημα φορτία, πιέσεις, στηρίξεις και αντιδράσεις, ανάλογα με το είδος της ανάλυσης. Όλα αυτά για λόγους ευχρηστίας μπορούν να οριστούν πάνω σε σημεία, γραμμές, επιφάνειες, κόμβους και σε στοιχεία και να μεταφερθούν αυτόματα τελικά στους κόμβους του πλέγματος, όπως απαιτείται από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Ø **Επίλυση του προβλήματος.** Το ANSYS επιλύει το πρότυπο πεπερασμένο μοντέλο. Ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος εξαρτάται κάθε φορά από το είδος της ανάλυσης, την ιδιαιτερότητα της γεωμετρίας του μοντέλου, το μέγεθος του πλέγματος και από τη πολυπλοκότητα των οριακών συνθηκών.

γ) **Επεξεργασία των αποτελεσμάτων με χρήση των εντολών του επεξεργαστή Postprocessor:** Σε αυτόν τον επεξεργαστή παρατίθενται τα αποτελέσματα τα οποία μπορεί να είναι διανυσματικές επιδείξεις, λίστες αποτελεσμάτων, το παραμορφωμένο σώμα, κατανομή μετατοπίσεων και τάσεων.

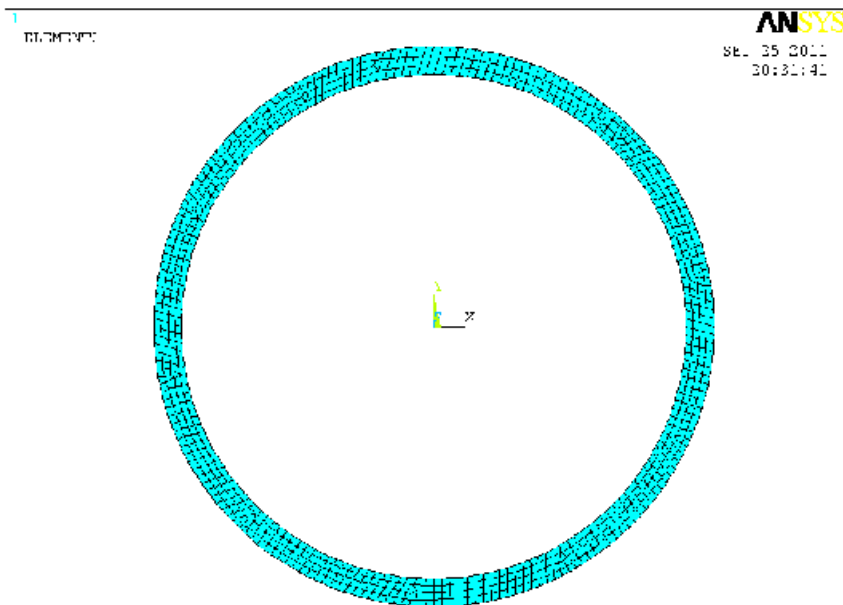
## 5.2 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΕ ΣΩΛΗΝΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ANSYS

Οι σωλήνες που μελετήθηκαν θεωρήθηκαν απείρου μήκους και ουσιαστικά μελετήθηκε η κυματική διάδοση των υπερήχων σε μια διατομή αυτών, δηλαδή επιλύθηκε πρόβλημα δυο διαστάσεων, υιοθετώντας συνθήκες επίπεδης κατάστασης παραμόρφωσης (planestrain).

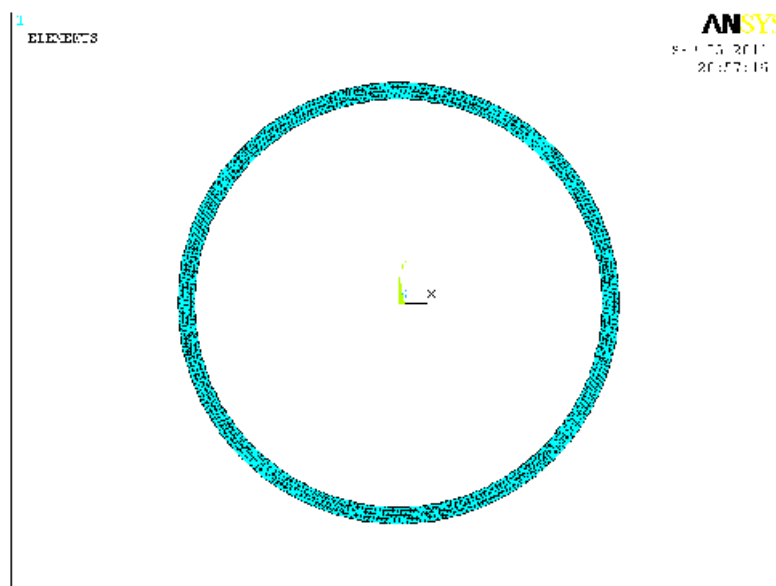
Συνολικά μελετήθηκαν τέσσερις σωλήνες με ίδιο υλικό και εξωτερική διάμετρο και διαφορετικά πάχη. Το υλικό των σωλήνων είναι χάλυβας, με μηχανικές ιδιότητες υλικού: Μέτρο ελαστικότητας  $E = 2.07 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ , λόγος Poisson  $\nu = 0.3$  και πυκνότητα  $\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$  και η εξωτερική διάμετρος τους ισούται με  $D = 2 \text{ m}$ . Τα τέσσερα πάχη των σωλήνων είναι:  $t_1 = 10 \text{ cm}$ ,  $t_2 = 7.5 \text{ cm}$ ,  $t_3 = 5 \text{ cm}$  και  $t_4 = 2.5 \text{ cm}$ .

Για τη μοντελοποίηση των σωλήνων χρησιμοποιήθηκε το δισδιάστατο επιφανειακό στοιχείο επίπεδης κατάστασης παραμόρφωσης PLANE82, το οποίο, όπως ήδη αναφέρθηκε, καθορίζεται από 8 κόμβους, με δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (τις μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X και Y).

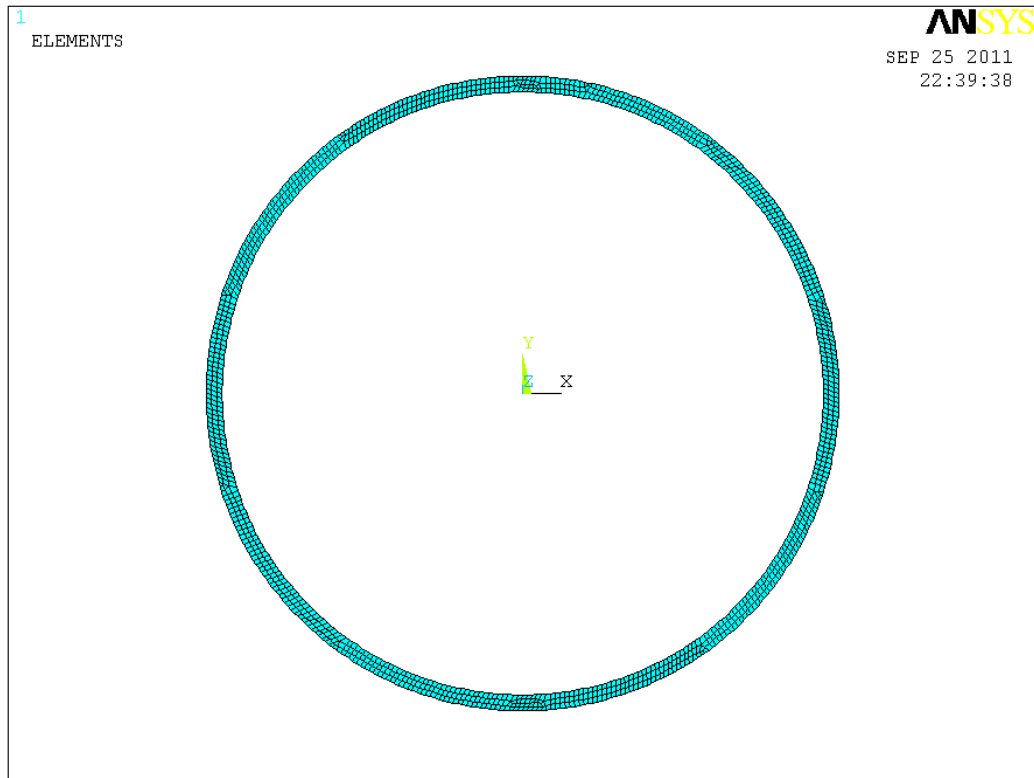
Τα τεσσάρα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που κατασκευάστηκαν φαίνονται στις εικόνες 5.3 έως 5.6, ενώ ο αριθμός των κόμβων και των στοιχείων των μοντέλων δίνονται στο πίνακα 5.2.



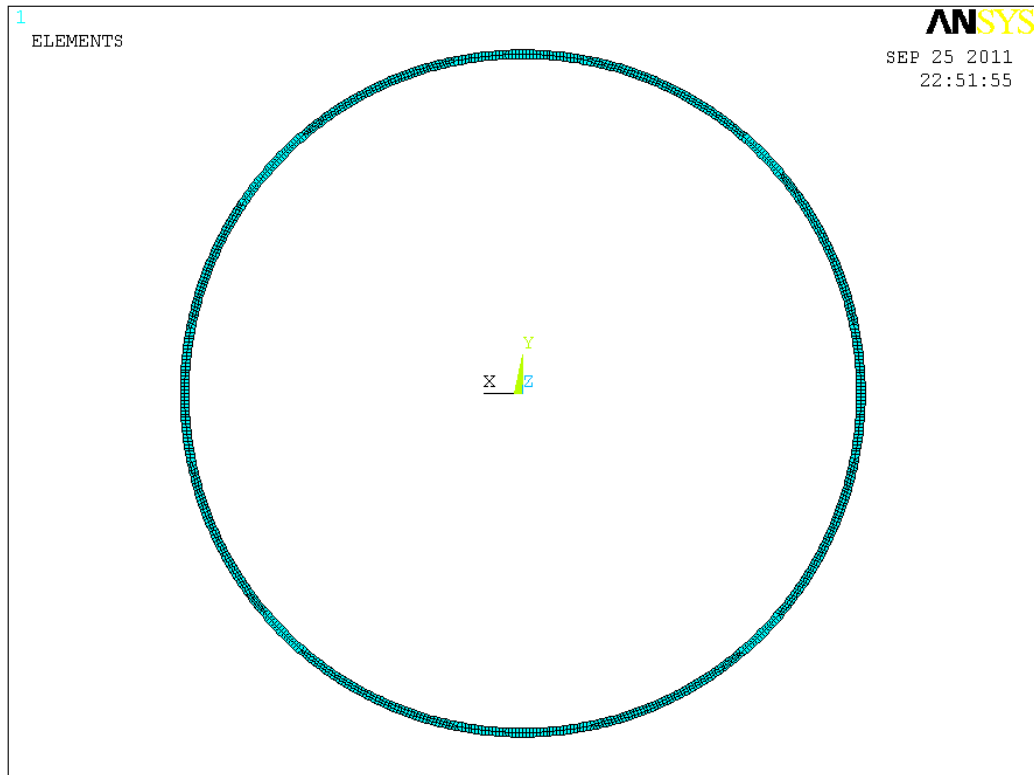
**Εικόνα 5.3:** Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων διατομής σωλήνα απείρου μήκους, εξωτερικής διαμέτρου  $D=2 \text{ m}$  και πάχους  $t_1 = 10 \text{ cm}$ .



**Εικόνα 5.4:** Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων διατομής σωλήνα απείρου μήκους, εξωτερικής διαμέτρου  $D=2 \text{ m}$  και πάχους  $t_1 = 7.5 \text{ cm}$ .



**Εικόνα 5.5:** Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων διατομής σωλήνα απείρου μήκους, εξωτερικής διαμέτρου  $D=2$  m και πάχους  $t_1 = 5$  cm.

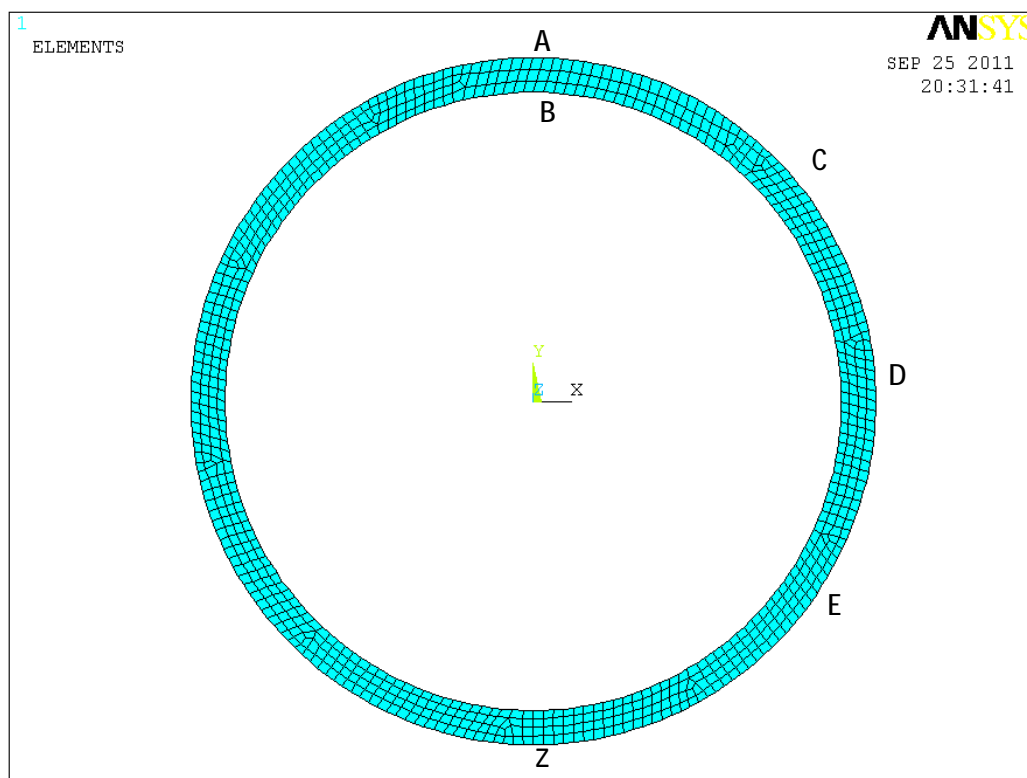


**Εικόνα 5.6:** Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων διατομής σωλήνα απείρου μήκους, εξωτερικής διαμέτρου  $D=2$  m και πάχους  $t_1 = 2.5$  cm.

**Πίνακα 5.2:** Αριθμός κόμβων και στοιχείων των τεσσάρων μοντέλων για πάχη  $t_1 = 10$  cm,  $t_2 = 7.5$  cm,  $t_3 = 5$  cm και  $t_4 = 2.5$  cm.

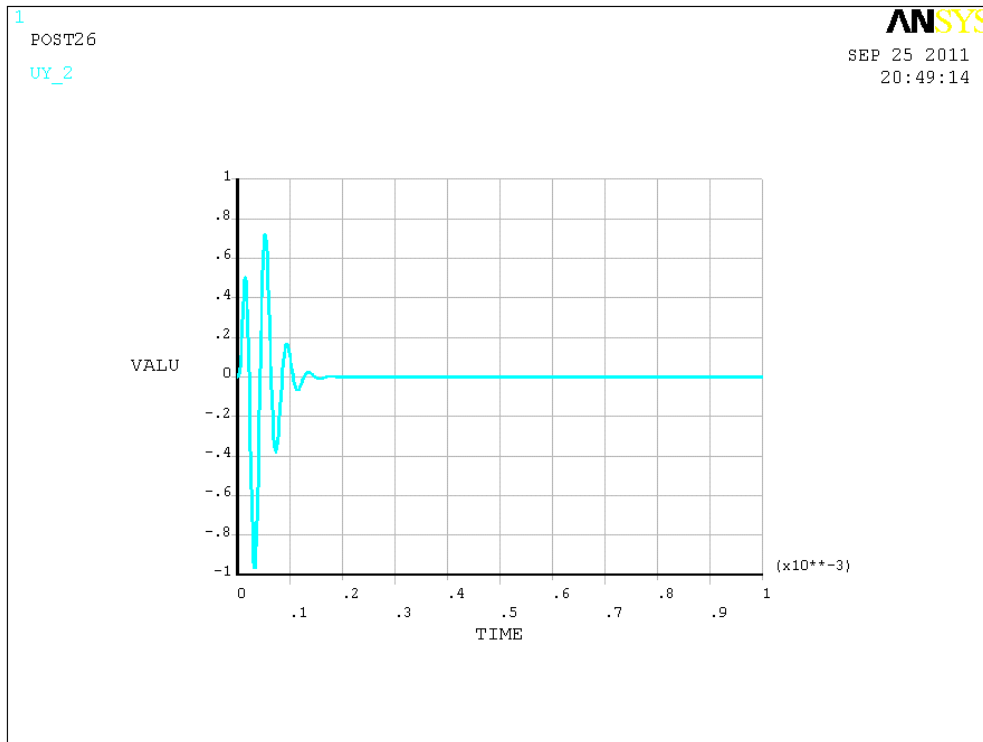
Πάχος σωλήνα (cm)	Αριθμός Κόμβων	Αριθμός στοιχείων
10	2774	792
7.5	4292	1228
5	4552	1244
2.5	6240	1664

Για τη μελέτη της κυματικής διάδοσης των υπερήχων θεωρούμε ότι σε όλους σωλήνες τοποθετείται στο σημείο A (βλέπε εικόνα 5.7), ένας αισθητήρας εκπομπής υπερήχων με κυρίαρχη συχνότητα εκπομπής τα 24 KHz. Η κυματομορφή του υπέρηχου που διαδίδει στον σωλήνα ο αισθητήρας εκπομπής καθώς επίσης και οι συχνότητες που περιέχονται σε αυτή, όπως προκύπτουν από την ανάλυση της κατά Fourier, παρουσιάζονται στις εικόνα 5.8 και 5.9, αντίστοιχα.

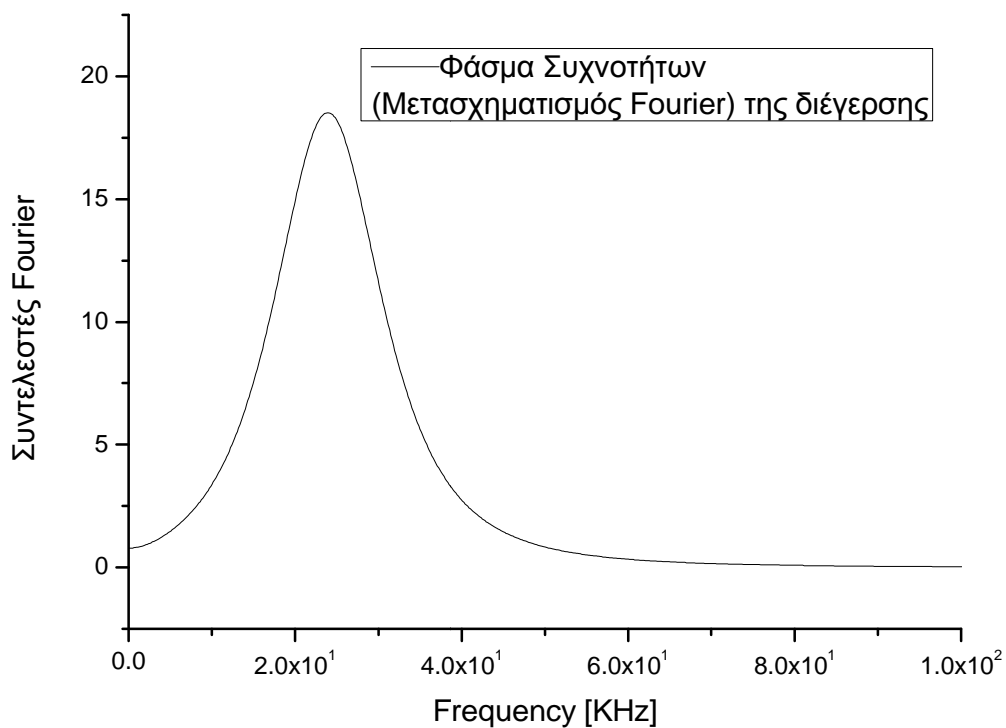


**Εικόνα 5.7:** Θέσεις αισθητήρα εκπομπής (σημείο A) και αισθητήρων λήψης (σημεία B έως E)





**Εικόνα 5.8:** Η κυματομορφή του υπέρηχου που διαδίδει στο σωλήνα ο αισθητήρας εκπομπής



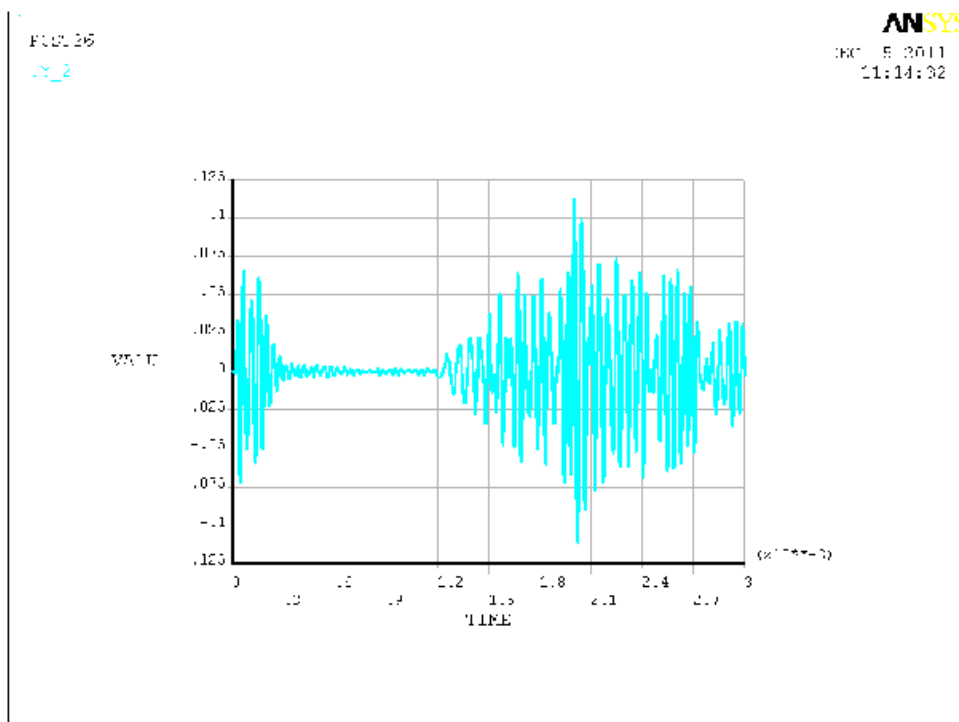
**Εικόνα 5.9:** Φάσμα συχνοτήτων της κυματομορφής του υπέρηχου του αισθητήρα εκπομπής, όπως προκύπτει από την ανάλυση της κατά Fourier: Κυρίαρχη συχνότητα διέγερσης: 24 KHz.

Η κυματομορφή της εικόνας 5.8, επιβάλλεται ως συνοριακή συνθήκη γνωστών μετατοπίσεων σε μια μικρή περιοχή γύρω από το σημείο *A* (σε 2 πεπερασμένα δεξιά και αριστερά του *A*). Επιπλέον για να επιτευχθεί η στήριξη της κατασκευής στη γειτονιά του σημείου *Z* (σε 2 πεπερασμένα δεξιά και αριστερά του *Z*) θεωρήθηκε πλήρη δέσμευση των μεταφορικών βαθμών ελευθερίας (*X* και *Y*).

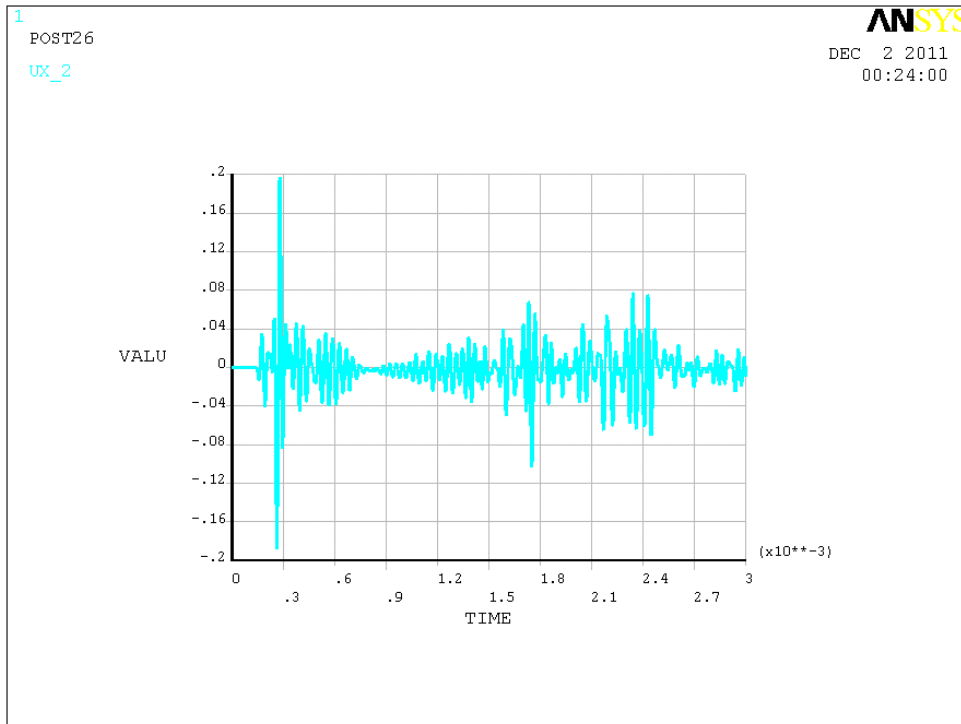
Η επίλυση του προβλήματος έγινε στο πεδίο του χρόνου, χωρίζοντας στην κυματομορφή της εικόνας 5.8 σε 4096 χρονικά βήματα.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αφορούν τις κυματομορφές που λαμβάνουν οι αισθητήρες λήψης *B*, *C*, *D* και *E* (βλέπε εικόνα 5.7), δηλαδή τις ακτινικές μετατοπίσεις σε πολικό σύστημα συντεταγμένων. Ο αισθητήρας *B* έχει τοποθετηθεί κάτω από το σημείο *A*, για λόγους αριθμητικού ελέγχου του μοντέλου, ο *C* και ο *E* έχουν τοποθετηθεί σε γωνίες  $\pm 45^\circ$  από την οριζόντιο και ο *D* στην οριζόντιο.

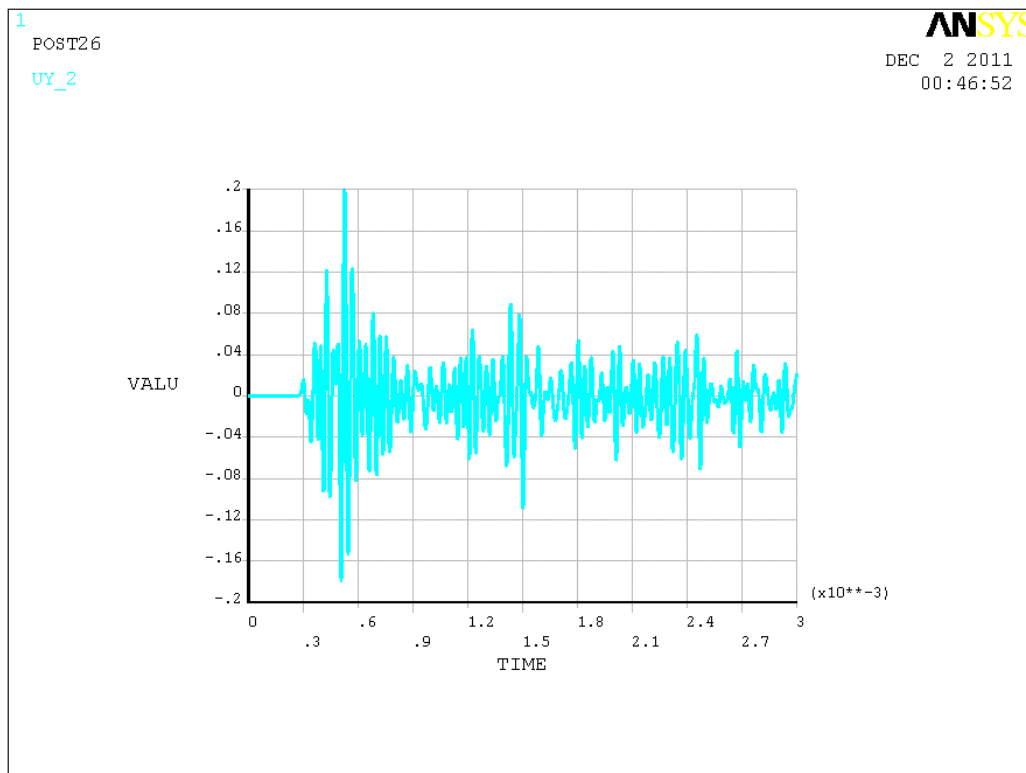
Στις εικόνες 5.10 έως 5.13, παρουσιάζονται οι κυματομορφές που λαμβάνουν οι αισθητήρες στα σημεία *B* έως *E*, αντίστοιχα, για πάχος σωλήνα  $t_1=10\text{cm}$ . Στις εικόνες 5.14 έως 5.17, παρουσιάζονται οι κυματομορφές που λαμβάνουν οι αισθητήρες στα σημεία *B* έως *E*, αντίστοιχα, για πάχος σωλήνα  $t_2=7.5\text{cm}$ . Στις εικόνες 5.18 έως 5.21, παρουσιάζονται οι κυματομορφές που λαμβάνουν οι αισθητήρες στα σημεία *B* έως *E*, αντίστοιχα, για πάχος σωλήνα  $t_3=5\text{cm}$ . Στις εικόνες 5.22 έως 5.25, παρουσιάζονται οι κυματομορφές που λαμβάνουν οι αισθητήρες στα σημεία *B* έως *E*, αντίστοιχα, για πάχος σωλήνα  $t_4=2.5\text{cm}$ .



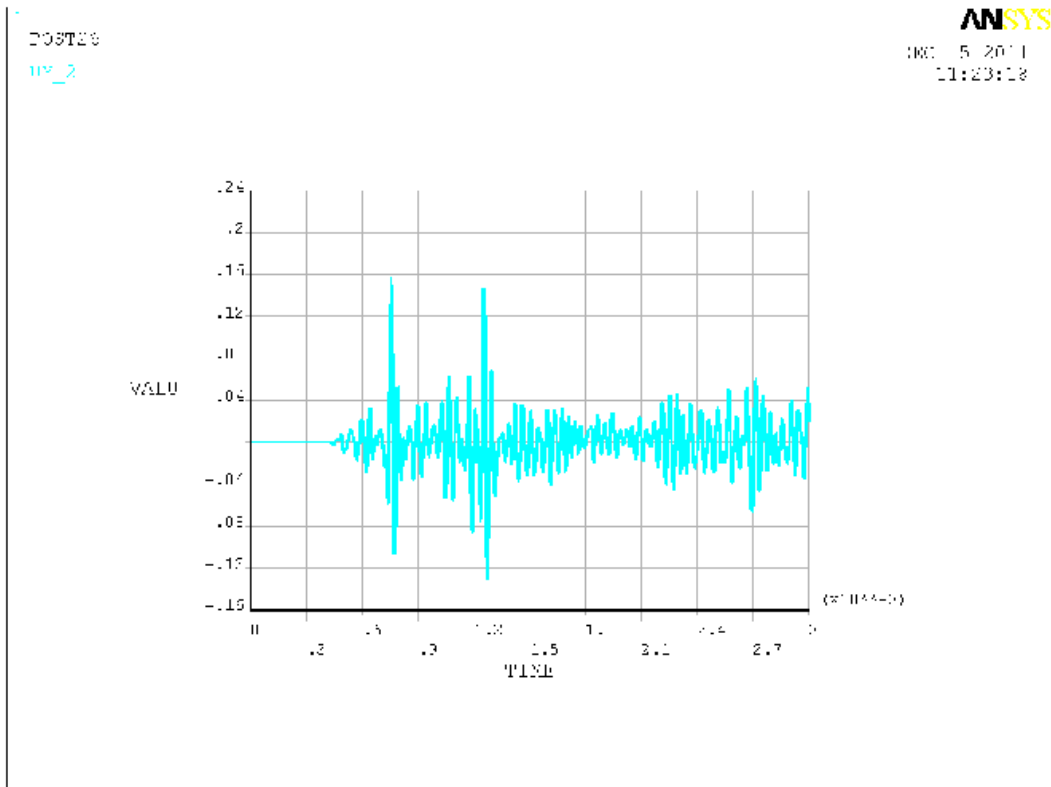
**Εικόνα 5.10:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο *B*, για πάχος σωλήνα  $t_1=10\text{cm}$ .



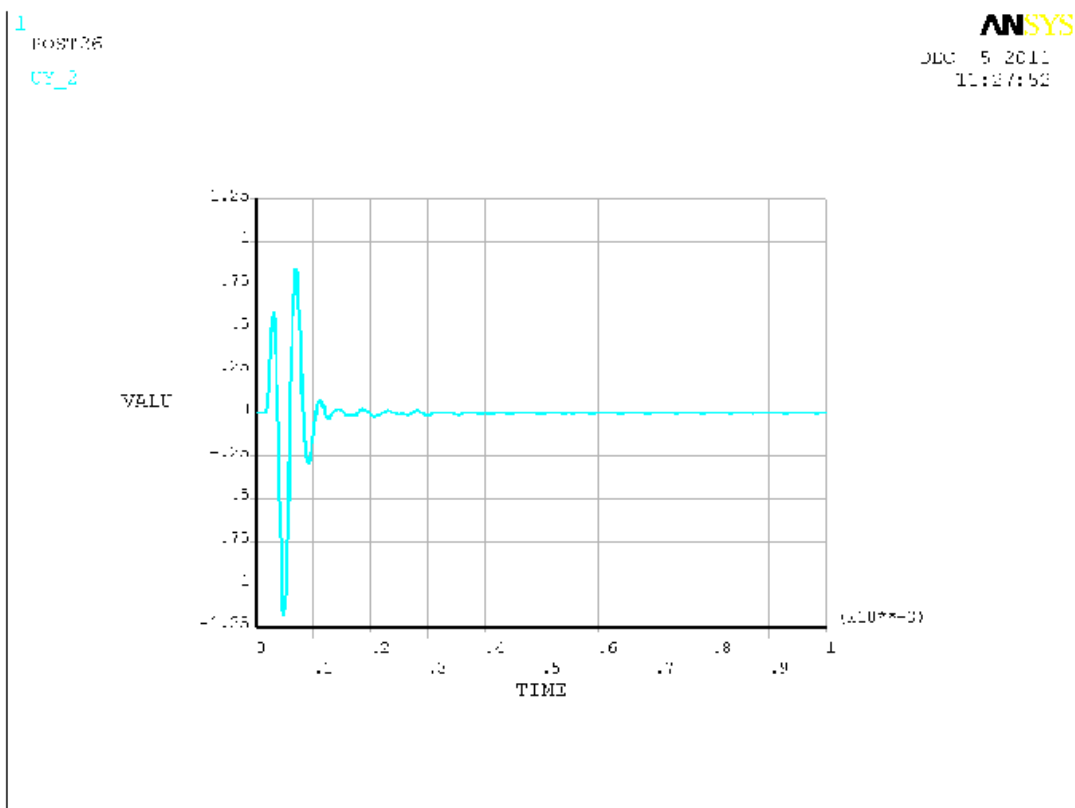
**Εικόνα 5.11:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση)στο σημείο C, για πάχος σωλήνα  $t_1=10\text{cm}$ .



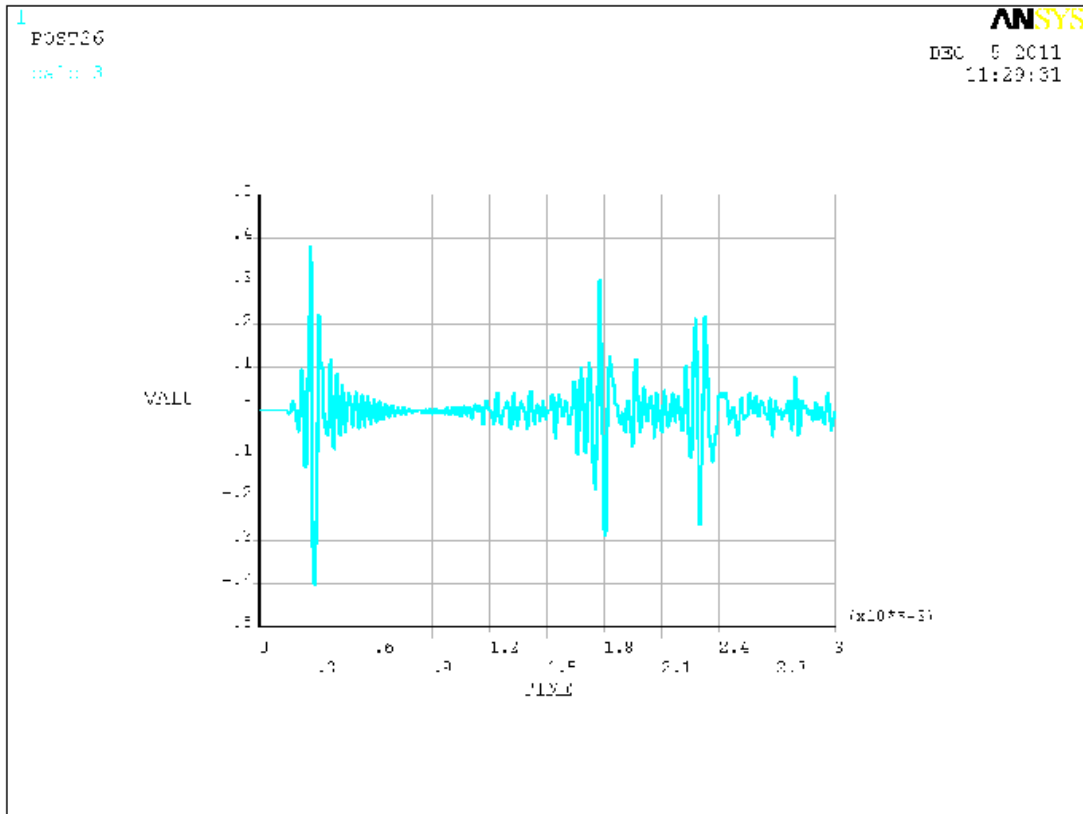
**Εικόνα 5.12:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο D, για πάχος σωλήνα  $t_1=10\text{cm}$ .



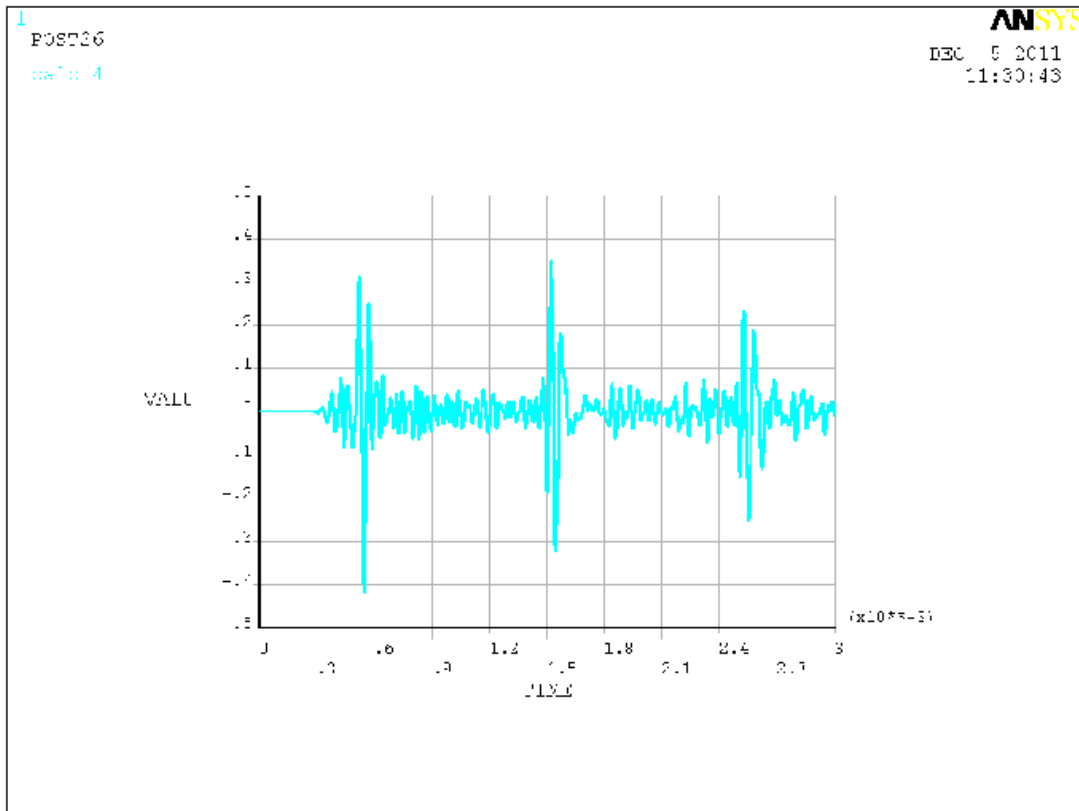
**Εικόνα 5.13:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο Ε, για πάχος σωλήνα  $t_1=10\text{cm}$ .



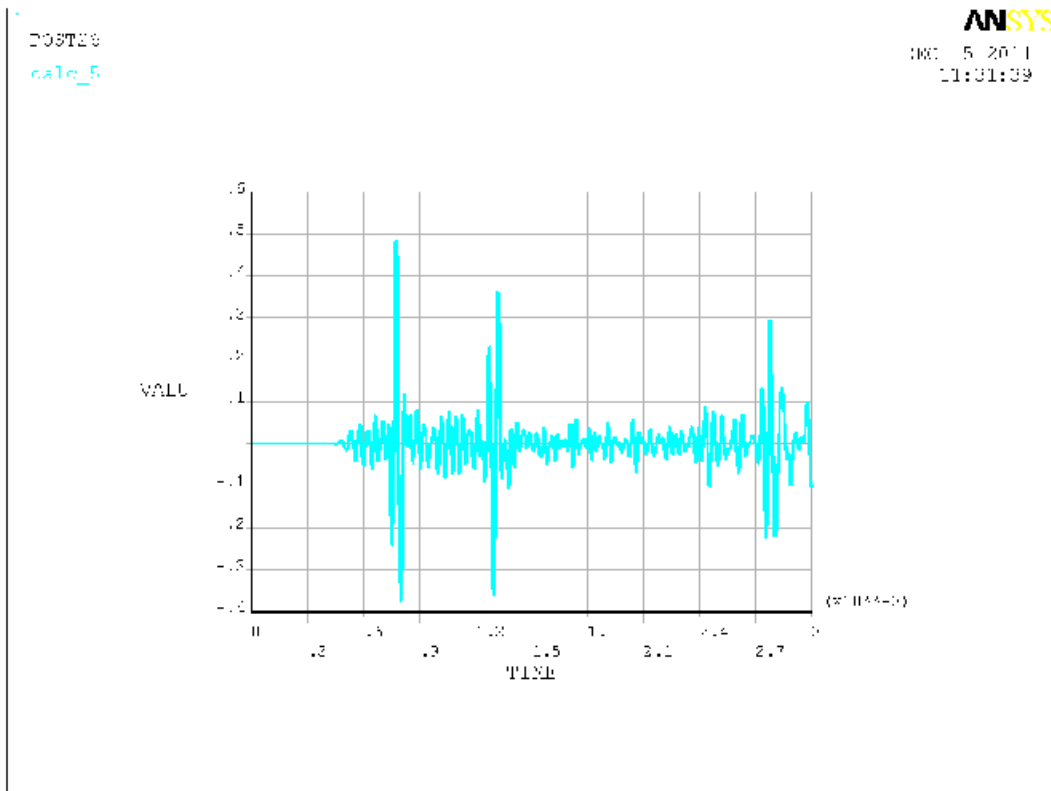
**Εικόνα 5.14:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο Β, για πάχος σωλήνα  $t_2=7.5\text{cm}$ .



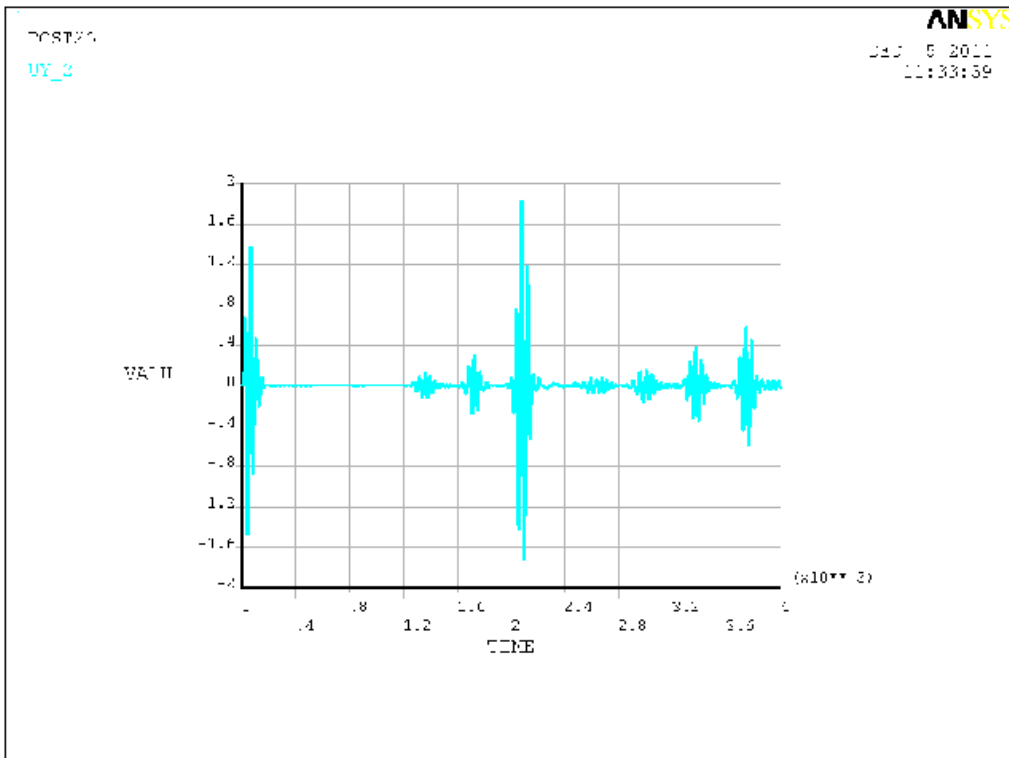
**Εικόνα 5.15:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο C, για πάχος σωλήνα  $t_2=7.5\text{cm}$ .



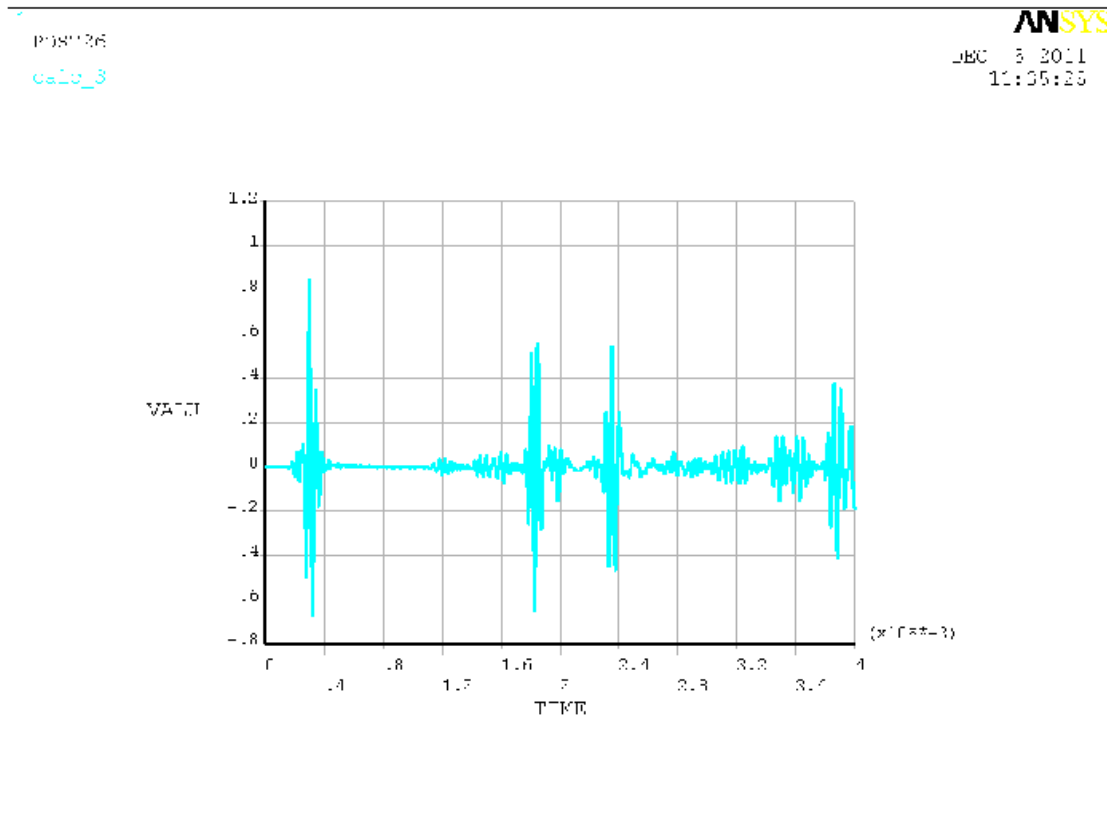
**Εικόνα 5.16:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο D, για πάχος σωλήνα  $t_2=7.5\text{cm}$ .



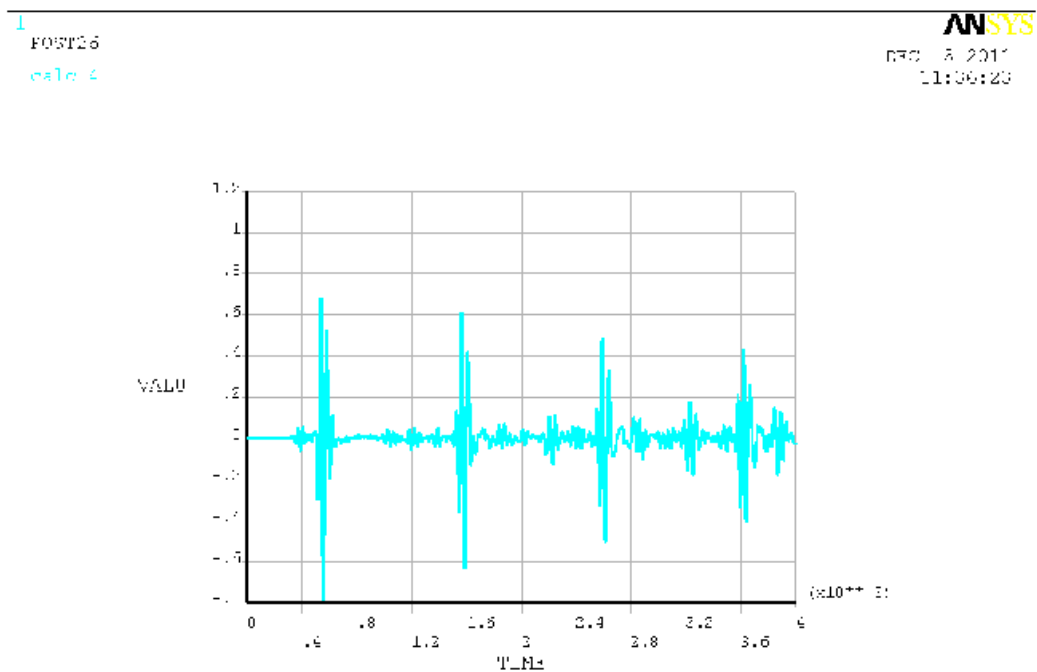
**Εικόνα 5.17:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο E, για πάχος σωλήνα  $t_2=7.5\text{cm}$ .



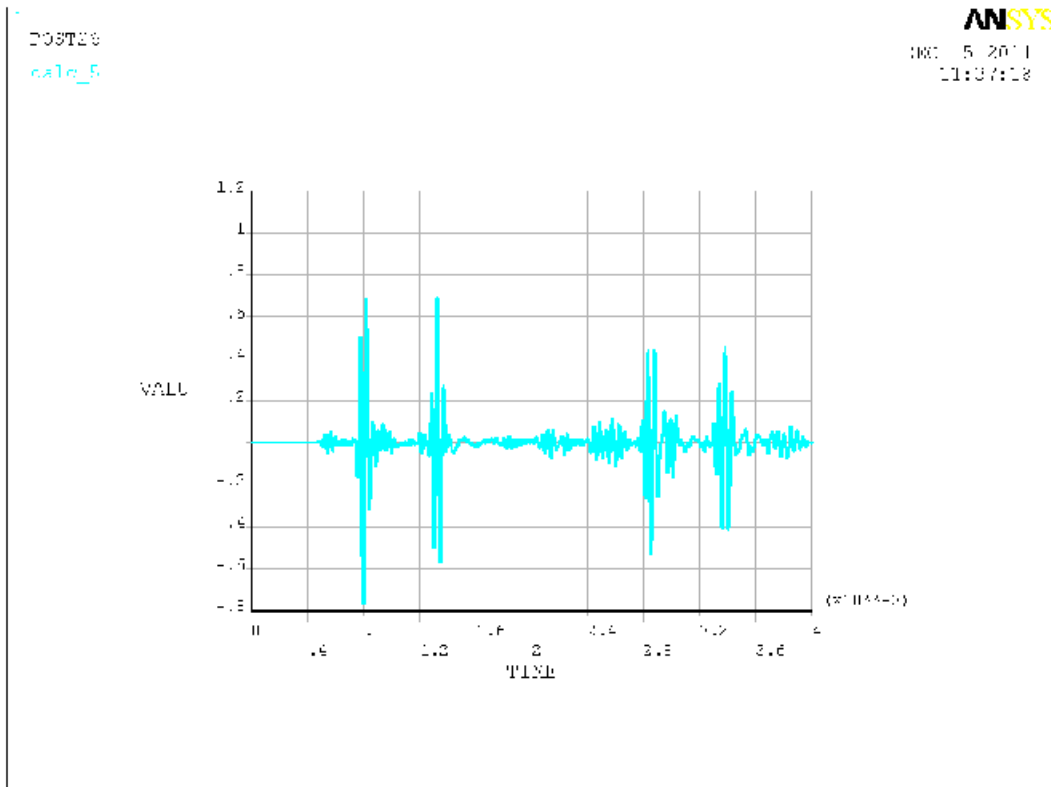
**Εικόνα 5.18:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο B, για πάχος σωλήνα  $t_3=5\text{cm}$ .



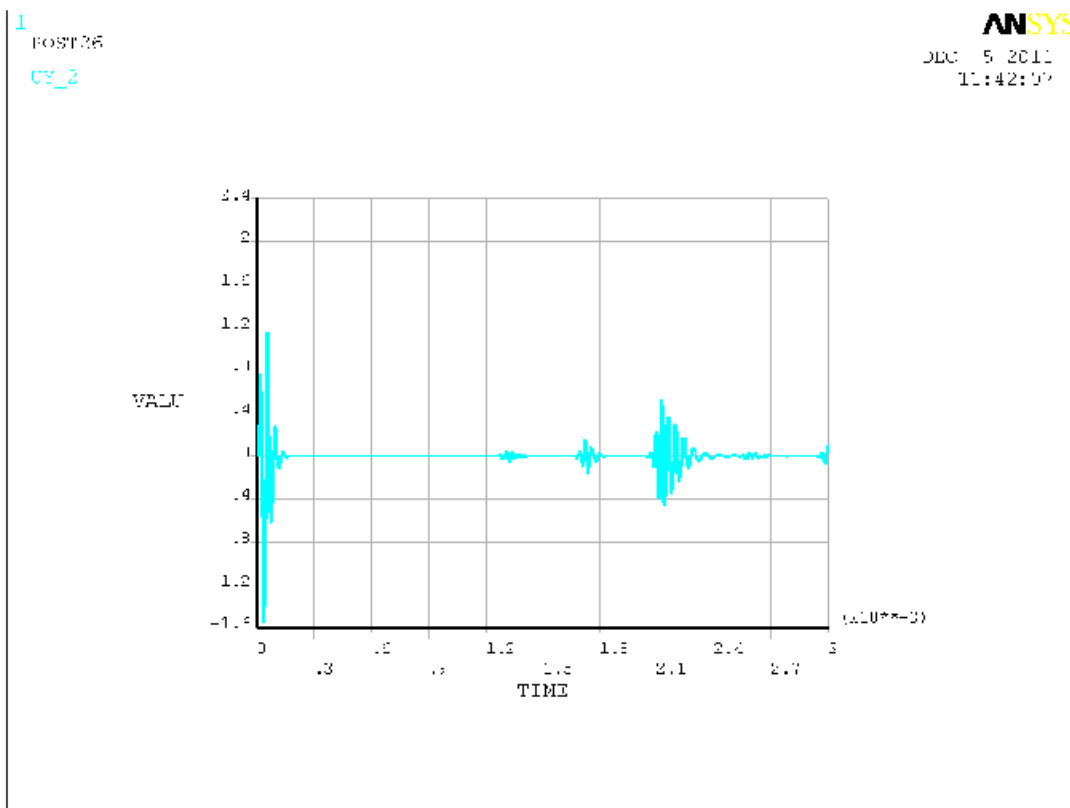
**Εικόνα 5.19:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο C, για πάχος σωλήνα  $t_3=5\text{cm}$ .



**Εικόνα 5.20:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο D, για πάχος σωλήνα  $t_3=5\text{cm}$ .

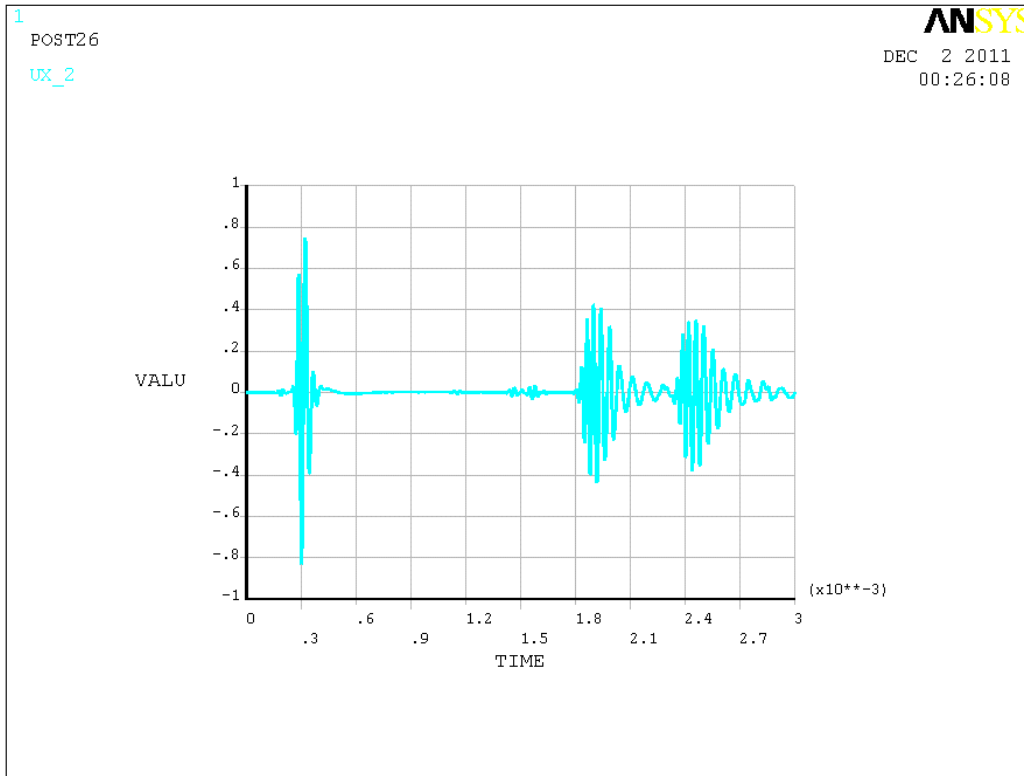


**Εικόνα 5.21:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο E, για πάχος σωλήνα  $t_3=5\text{cm}$ .

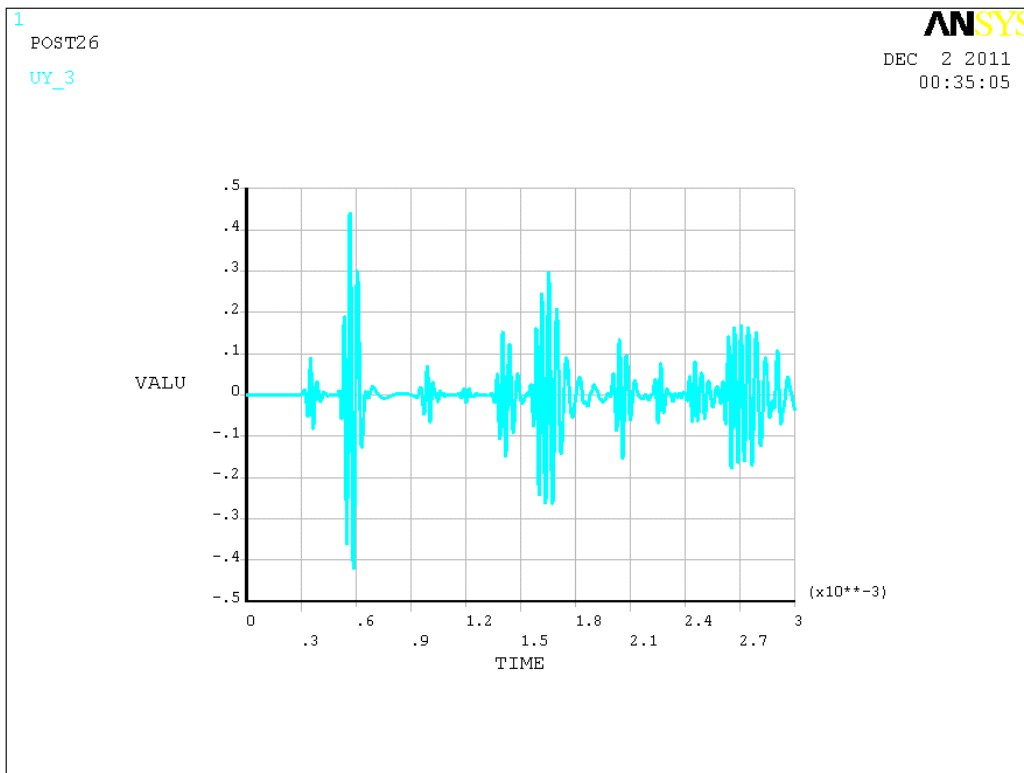


**Εικόνα 5.22:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο B, για πάχος σωλήνα  $t_4=2.5\text{cm}$ .

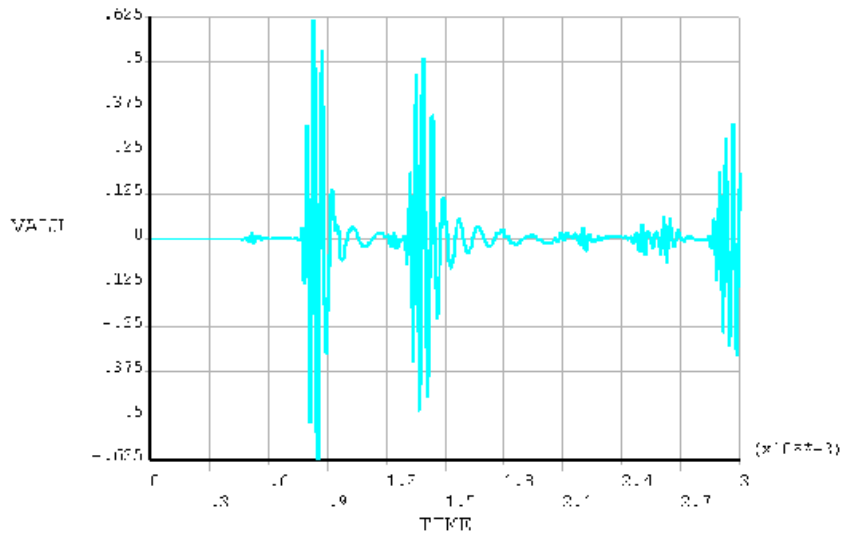




**Εικόνα 5.23:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης στο σημείο C, για πάχος σωλήνα  $t_4=2.5$  cm.



**Εικόνα 5.24:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο D, για πάχος σωλήνα  $t_4=2.5$  cm.



**Εικόνα 5.25:**Κυματομορφή υπέρηχου στον αισθητήρα λήψης (ακτινική μετατόπιση) στο σημείο E, για πάχος σωλήνα  $t_4=2.5$  cm.

Στους πίνακες 5.3 έως 5.6 παρουσιάζονται οι χρόνοι άφιξης των κυματομορφών που λαμβάνουν οι αισθητήρες λήψης στα σημεία C, D και E, για κάθε ένα από τα πάχη  $t_1$  έως  $t_4$ , αντίστοιχα. Ως χρόνος άφιξης λαμβάνεται ο χρόνος που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της κυματομορφής. Οι καμπύλες των χρόνων άφιξης των κυματομορφών ως συνάρτηση της διανυθείσας απόστασης, για τα πάχη  $t_1$  έως  $t_4$ , παρουσιάζονται στην εικόνα 5.26.

**Πίνακας 5.3:**Χρόνοι άφιξης των κυματομορφών που λαμβάνουν οι αισθητήρες λήψης στα σημεία C, D και E, για κάθε στο σωλήνα πάχους  $t_1 = 10$  cm.

Σημείο	Μήκος τόξου από το σημείο A στο τρέχον σημείο (m)	Χρόνος άφιξης (msec)
C	0.746	0.29
D	1.492	0.49
E	2.238	0.75

**Πίνακας 5.4:**Χρόνοι άφιξης των κυματομορφών που λαμβάνουν οι αισθητήρες λήψης στα σημεία C, D και E, για κάθε στο σωλήνα πάχους  $t_1 = 7.5$  cm.

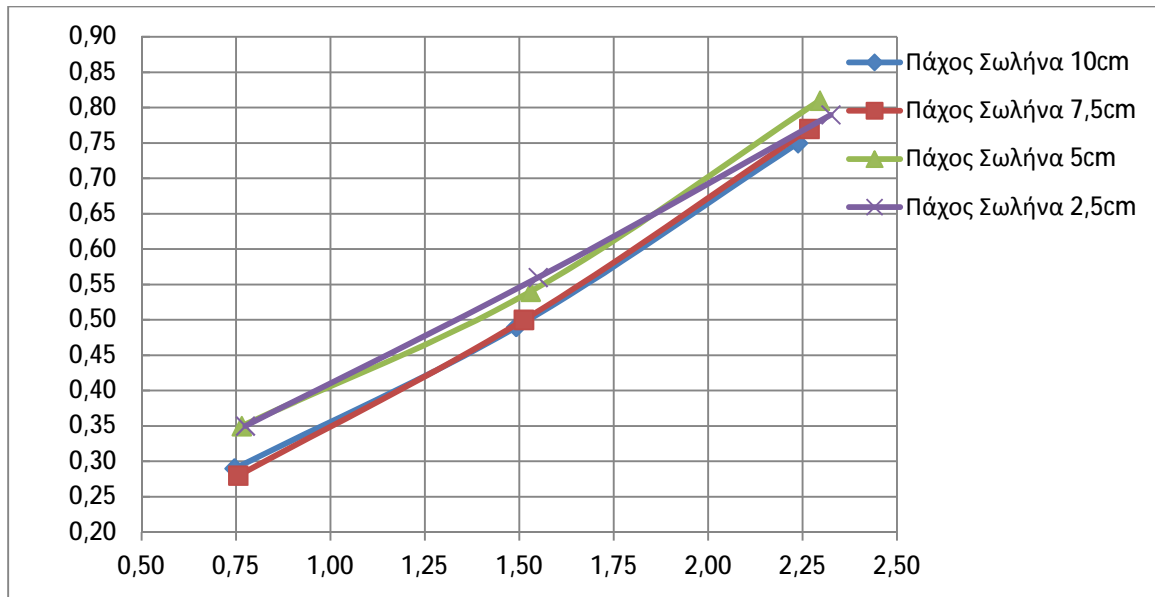
Σημείο	Μήκος τόξου από το σημείο A στο τρέχον σημείο (m)	Χρόνος άφιξης (msec)
C	0.756	0.28
D	1.512	0.50
E	2.268	0.77

**Πίνακας 5.5:**Χρόνοι άφιξης των κυματομορφών που λαμβάνουν οι αισθητήρες λήψης στα σημεία C, D και E, για κάθε στο σωλήνα πάχους  $t_1 = 5$  cm.

Σημείο	Μήκος τόξου από το σημείο A στο τρέχον σημείο (m)	Χρόνος άφιξης (msec)
C	0.765	0.35
D	1.530	0.54
E	2.296	0.82

**Πίνακας 5.6:**Χρόνοι άφιξης των κυματομορφών που λαμβάνουν οι αισθητήρες λήψης στα σημεία C, D και E, για κάθε στο σωλήνα πάχους  $t_1 = 2.5$  cm.

Σημείο	Μήκος τόξου από το σημείο A στο τρέχον σημείο (m)	Χρόνος άφιξης (msec)
C	0.775	0.35
D	1.550	0.56
E	2.325	0.79



**Εικόνα 5.26:** Χρόνοι άφιξης των κυματομορφών ως συνάρτηση της διανυθείσας απόστασης, για τα πάχη  $t_1$  έως  $t_4$ .

### 5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις εικόνες 5.10 έως 5.26 και από τους πίνακες 5.3 έως 5.6, παρατηρούμε τα εξής:

- Όσο μειώνεται το πάχος του σωλήνα τόσο μειώνονται οι πολλαπλές ανακλάσεις στις κυματομορφές που λαμβάνονται από τους αισθητήρες και επομένως όσο μικραίνει το πάχος οι σωλήνες δρουν ως κυματοδηγοί.
- Το προηγούμενο συμπέρασμα είναι σε συμφωνία με την παρατήρηση ότι το μέγιστο πλάτος των κυματομορφών για συγκεκριμένο σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα μεγαλώνει όσο το πάχος μικραίνει.
- Οι χρόνοι άφιξης για το ίδιο σημείο είναι περίπου οι ίδιοι για όλα τα πάχη και δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια καθαρή συσχέτιση πάχους χρόνου άφιξης, παρόλο που από το διάγραμμα της εικόνας 5.26 φαίνεται οι χρόνοι άφιξης των 2.5 cm και 5 cm να είναι μικρότερη από αυτούς που παρατηρούνται στα μεγαλύτερα πάχη των 7.5 cm και 10 cm.
- Ο χρόνος άφιξης είναι περίπου ανάλογος της διανυθείσας απόστασης για όλα τα πάχη, επισημαίνοντας μια μικρή απόκλιση από τη ευθεία όσο το πάχος αυξάνει.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ανασασόπουλος, "Μηκαταστροφικός έλεγχος με υπερήχους", Internal Report, Applied Mechanics Laboratory, Mech. Eng. Dept., University of Patras, 1991
2. Β. Δερματάς, "Αναγνώριση προτύπων Ι", 2001.
3. Β. Δερματάς, "Αναγνώριση προτύπων ΙΙ", 2001.
4. Β. Κατπάτος, Ε. Λυμπερτός και Ε. Δερματάς. "Προσδιορισμός του βέλτιστου αριθμού και θέσεων αισθητήρων για τον εντοπισμό της θέσης ακουστικής εκπομπής". Πανελλήνιο Συνέδριο Ακουστικής, Θεσσαλονίκη, 2004.
5. Γ. Βαρουφάκης, "Έλεγχος Υλικών στην Κλασική Αρχαιότητα", ΕΛΟΤ, Αθήνα 1987.
6. Γ. Βαρουφάκης, "Αρχαία Ελλάδα και Ποιότητα, Αίολος", Αθήνα 1996.
7. Ι.Ν. Πρασιανάκης, "Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι των Υλικών - Η Μέθοδος των Υπερήχων", ΕΜΠ, Αθήνα, 1993
8. Π. Δρακάτος, "Τεχνική Διαγνωστική - Προγνωστική", 1992.
9. M.A.Portis & H. D Young, "Acoustics & Fluids", McGraw-Hill Co., New York, 1971
10. D. Halliday & R. Resnick, "Φυσική", Τόμοι Α&Β, 1976.
11. Grabec A. and W. Sachse, "Automatic Modelling of Physical Phenomena: Application to Ultrasonic Data", Journal Appl. Phys., Vol. 69 (9), 1991.

12. K. Graff, "Wave Motion in Elastic Solids", Dover Publications, Inc., New York, 1975.
13. V. Kappatos, E. Lympertos and E. Dermatas, "Estimation of the best sensors position for minimum error location of acoustic emission sources on spherical surfaces", 3rd International Conference on Non Destructive Testing of the Hellenic Society for NDT, Crete Hellas, October 15-17, 2003.
14. <http://www.wikipedia.org/>
15. <http://www.sigmahellas.gr/>
16. <http://www.elot.gr>
17. <http://www.pacndt.com/>