



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

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ  
Τζούμας Αλέξιος**

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ  
ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ**

**ΙΩΑΝΝΙΝΑ, 2019**



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

## **Υλικά Κατασκευών & Δομές – Σύνθετα Υλικά**

που απομένει το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε την ..... από την εξεταστική επιτροπή:

### **ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ**

### **ΒΑΘΜΙΔΑ**

**1. Συμεών Αγαθόπουλος**

Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων,  
**Επιβλέπων**

**2. Θεόδωρος Ματίκας**

Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων,  
Εξεταστική Επιτροπή

**3. Κωνσταντίνος Δάσιος**

Επίκουρος Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων, Εξεταστική Επιτροπή

### **ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ**

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



*Στη μητέρα μου...*



## Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Μελέτη ελαστικών ιδιοτήτων πορώδους αλουμίνας» εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2017-2019. Η εργασία σχεδιάστηκε για να ερευνηθούν οι ελαστικές ιδιότητες της αλουμίνας μέσω της ταχύτητας υπερήχων. Αυτές οι ιδιότητες εμπλέκουν το πορώδες (porosity), το μέτρο του Young (Young's modulus) και το λόγο Poisson (Poisson's ratio) της αλουμίνας. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η ταχύτητα ενός υπερηχητικού κύματος στην αλουμίνα μειώθηκε με την αύξηση του πορώδους. Το μέτρο του Young και ο λόγος Poisson, που ο υπολογισμός τους έγινε από την ταχύτητα των διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων, βρέθηκαν να εξαρτώνται από το ποσοστό του πορώδους στο υλικό.

Ολοκληρώνοντας την εργασία αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Συμεών Αγαθόπουλο, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών και μέλος του εργαστηρίου Κεραμικών & Σύνθετων Υλικών, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή τη διπλωματική εργασία, με την οποία ολοκληρώνονται οι μεταπτυχιακές σπουδές μου στο τμήμα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Θεόδωρο Ματίκα, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών και διεθυντή του εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφύων Αισθητήρων και Μη-Καταστροφικής Αξιολόγησης Υλικών και Δομών, για τη δυνατότητα που μου παρείχε να χρησιμοποιήσω μέρος του εργαστηριακού εξοπλισμού του ώστε να εκπονηθεί η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος κ. Ηλία Τραγαζίκη, καθώς και το υπόλοιπο προσωπικό του εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφύων Αισθητήρων και Μη-Καταστροφικής Αξιολόγησης Υλικών και Δομών, για την πολύτιμη βοήθειά τους, την καθοδήγηση και τις συμβουλές που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των πειραματικών διαδικασιών και της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αλέξιος Τζούμας

Μάρτιος 2019





# Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	ix
Abstract .....	x

## 1. Εισαγωγή

1.1 Οξείδιο του Αλουμινίου ( $Al_2O_3$ ) .....	01
1.1.1 Γενικές Πληροφορίες .....	01
1.1.2 Κρυσταλλικές Δομές .....	04
1.1.3 Τύποι $Al_2O_3$ και Ιδιότητες .....	05
1.1.3.1 $\alpha$ -Αλουμίνα .....	05
1.1.3.2 $\beta$ -Αλουμίνα .....	06
1.1.3.3 $\gamma$ -Αλουμίνα .....	07
1.1.4 Προέλευση και Μέθοδοι Παρασκευής .....	08
1.1.4.1 Διεργασία Bayer .....	09
1.1.4.2 Πυρο-γενετική Διεργασία .....	10
1.1.4.3 Μέθοδος Renshaw .....	10
1.1.4.4 Μέθοδος Επεξεργασίας Αργίλων .....	10
1.1.4.5 Χημική Διεργασία .....	11
1.1.4.6 Ενοποίηση Αμύλου .....	11
1.1.5 Εμπορικοί Τύποι Αλουμίνας .....	11
1.1.5.1 Χυτή ή Μεταλλουργική Αλουμίνα (Smelter Grade) .....	12
1.1.5.2 Άνυδρη Αλουμίνα (Calcined) .....	12
1.1.5.3 Στρωματοποιημένη Αλουμίνα (Tabular) .....	12
1.1.5.4 Ενεργός Αλουμίνα (Reactive) .....	13
1.1.5.5 Αλουμίνα χαμηλής περιεκτικότητας σε $Na_2CO_3$ (Low Soda).....	13
1.1.5.6 Τηγμένη Αλουμίνα (Fused) .....	13
1.1.5.7 Αλουμίνα Υψηλής Καθαρότητας (High Purity) .....	13
1.1.6 Εφαρμογές της Αλουμίνας .....	14
1.1.6.1 Εφαρμογές Βασισμένες στη Σκληρότητα .....	14
1.1.6.2 Εφαρμογές Βασισμένες στη Θερμική Αντοχή .....	15
1.1.6.3 Εφαρμογές Βασισμένες στις Μονωτικές και Διηλεκτρικές Ιδιότητες .....	15
1.1.6.4 Χημικές Εφαρμογές .....	16
1.1.6.5 Εφαρμογές στη Βιοϊατρική .....	16
1.1.6.6 Εφαρμογές σε Ακτίνες Laser .....	16
1.1.6.7 Διάφορες Εφαρμογές .....	17
1.2 Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι .....	18
1.2.1 Τι είναι οι Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι .....	18
1.2.2 Ιστορική Ανασκόπηση των ΜΚΕ .....	19
1.2.3 Κατηγορίες Μεθόδων ΜΚΕ .....	20
1.2.4 Πότε Χρησιμοποιούμε ΜΚΕ .....	23
1.2.5 Εφαρμογές των Μεθόδων του Μη Καταστροφικού Ελέγχου .....	23
1.2.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των ΜΚΕ .....	24
1.2.7 Γενικά για τους Υπερήχους .....	26
1.2.8 Ιστορική Αναδρομή των Υπερήχων .....	28
1.2.9 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Μηχανικών Κυμάτων .....	28

1.2.10 Παραγωγή και Ανίχνευση Ηχητικών Κυμάτων .....	29
1.2.10.1 EMATS .....	30
1.2.10.2 Μαγνητοσυστολή .....	30
1.2.10.3 Laser.....	31
1.2.10.4 Πιεζοηλεκτρισμός .....	31
1.2.10.4.1 Πρακτικές Μορφές Πιεζοηλεκτρικών Μετατροπών .....	33
1.2.10.4.2 Κεφαλές Υπερήχων .....	33
1.2.10.4.3 Επιλογή υπερηχητικού αισθητήρα .....	37
1.2.10.4.4 Άλλα είδη υπερηχητικών μετατροπών .....	38
1.2.11 Διάδοση Υπερήχων .....	38
1.2.11.1 Διαμήκη ή Συμπιεστικά κύματα .....	39
1.2.11.2 Ημι-διαμήκη κύματα σε ράβδο .....	39
1.2.11.3 Εγκάρσια ή διατμητικά κύματα .....	40
1.2.11.4 Επιφανειακά κύματα ή κύματα Rayleigh .....	41
1.2.11.5 Κύματα πλακών ή κύματα Lamb .....	41
1.2.11.6 Άλλα καθοδηγούμενα κύματα .....	42
1.2.11.7 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάδοση των υπερήχων .....	43
1.2.11.8 Διασπορά και Εξασθένηση ελαστικού κύματος.....	45
1.2.12 Εφαρμογές των υπερήχων στον ΜΚΕ των υλικών .....	46
1.2.12.1 Εύρεση των ελαστικών σταθερών E, G, ν των υλικών .....	46
1.2.12.2 Προσδιορισμός σκληρότητας .....	47
1.2.12.3 Παχυμέτρηση .....	47
1.2.12.4 Εφαρμογή των υπερήχων σε ελάσματα .....	48
1.2.12.5 Υπερηχητικός έλεγχος συγκολλήσεων .....	48
1.2.12.6 Άλλες εφαρμογές υπερήχων .....	48
1.2.13 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου των υπερήχων .....	49
1.3 Σκοπός της Εργασίας .....	51
<b>2. Υλικά, Πειραματικός Εξοπλισμός και Πειραματική Διαδικασία .....</b>	<b>53</b>
2.1 Δοκίμια Πορώδους Αλούμινας .....	53
2.1.1 Κατασκευή πορωδών κεραμικών δοκιμίων αλούμινας.....	53
2.1.2 Προσδιορισμός φαινόμενης πυκνότητας πορωδών δοκιμίων .....	55
2.2 Μέθοδος Through Transmission .....	57
2.2.1 Καταγραφή της ταχύτητας των κυμάτων με την μέθοδο Through Transmission	59
2.2.2 Τα βασικά μέρη της διάταξης Through Transmission .....	60
2.2.2.1 Παλμογεννήτρια υψηλών συχνοτήτων .....	60
2.2.2.2 Συλλέκτης δεδομένων .....	61
2.2.2.3 Σύστημα φραγής αντανάκλασεων σήματος .....	62
2.2.2.4 Σύστημα καταγραφής αποτελεσμάτων .....	62
2.2.2.5 Αισθητήρες .....	63
2.3 Μέθοδος παλμού-ηχούς (Pulse-echo).....	64
2.3.1 Καταγραφή της ταχύτητας των κυμάτων με την μέθοδο Pulse echo.....	66
2.4 Υπολογισμός του λόγου Poisson και του Μέτρου Ελαστικότητας .....	67
<b>3. Πειραματικά Αποτελέσματα και Συζήτηση .....</b>	<b>69</b>
3.1 Φαινόμενη Πυκνότητα Πορωδών Δοκιμίων Αλούμινας.....	69

3.2 Ταχύτητες Διαμηκών και Εγκάρσιων Κυμάτων.....	71
3.3 Λόγος Poisson και Μέτρο Ελαστικότητας Δοκιμίων Αλούμινας .....	75
3.3.1 Λόγος Poisson.....	77
3.3.2 Μέτρο ελαστικότητας .....	78
<b>4. Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....</b>	<b>81</b>
Παράρτημα .....	83
Βιβλιογραφία .....	93

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Κρυσταλλική δομή αλουμίνας .....	04
Εικόνα 1.2: Βασικός σχηματισμός της $\alpha$ -αλουμίνας .....	06
Εικόνα 1.3:Εικόνα μικροσκοπίου ατομικής δύναμης της εξαγωνικής δομής της αλουμίνας .....	07
Εικόνα 1.4: Μετατροπή του βωξίτη σε αλουμίνα μέσω της διεργασίας Bayer .....	09
Εικόνα 1.5: Προϊόντα διαφόρων εφαρμογών κατασκευασμένα από αλουμίνα .....	14
Εικόνα 1.6: Παράσταση των ενεργειακών σταθμών του χρωμίου ( $Cr^{3+}$ ) .....	17
Εικόνα 1.7: Το ηχητικό φάσμα και οι υποδιαίρεσεις του.....	26
Εικόνα 1.8: Αναπαράσταση λειτουργίας υπερήχων.....	27
Εικόνα 1.9: Στιγμιότυπο κύματος που αναπαριστά το εύρος της ταλάντωσης των μορίων.....	29
Εικόνα 1.10: Μετατόπιση των σωματιδίων για ένα δεδομένο υπερηχητικό κύμα.....	30
Εικόνα 1.11: Πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος κατά τη συστολή και διαστολή του .....	31
Εικόνα 1.12: Διάφορες μορφές ταλαντώσεων που δημιουργούνται σε πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους.....	33
Εικόνα 1.13: Πιεζοηλεκτρική κεφαλή .....	34
Εικόνα 1.14: Κάθετες κεφαλές υπερήχων μονού κρυστάλλου .....	34
Εικόνα 1.15: Δίδυμες κεφαλές υπερήχων .....	35
Εικόνα 1.16: Γωνιακές κεφαλές υπερήχων.....	35
Εικόνα 1.17: Υπερηχητική κεφαλή πέλματος καθυστέρησης .....	36
Εικόνα 1.18: Ενισχυμένες κεφαλές υπερήχων.....	36
Εικόνα 1.19: Υπερηχητικές κεφαλές εμβάπτισης .....	37
Εικόνα 1.20: Υπερηχητική κεφαλή υψηλής συχνότητας .....	37
Εικόνα 1.21:Πιεζοηλεκτρικός και ηλεκτροστατικός μετατροπέας.....	38
Εικόνα 1.22: Αρμονική κίνηση κατά τη διάδοση διαμηκών κυμάτων που προσομοιάζει στην αρμονική κίνηση ελατηρίου σε ταλάντωση.....	39
Εικόνα 1.23:Μεταβολή της εγκάρσιας τομής της ράβδου κατά τη διάδοση διαμήκους κύματος σε ράβδο.....	40
Εικόνα 1.24: Διαμήκη και Εγκάρσια κύματα .....	40
Εικόνα 1.25: Κίνηση των σωματιδίων κύματος επιφάνειας Rayleigh .....	41
Εικόνα 1.26: Συμμετρικός τύπος διάδοσης κύματος πλάκας (κύμα Lamb) .....	41
Εικόνα 1.27: Διάδοση ελαστικού κύματος .....	44
Εικόνα 1.28: Η κόκκινη τελεία κινείται με την ταχύτητα φάσης και η πράσινη τελεία με την ταχύτητα ομάδας.....	45
Εικόνα 2.1: Δοκίμια αλουμίνας.....	53
Εικόνα 2.2 Δοκίμια αλουμίνας με διαφορετικό πορώδες ( $\alpha$ ) 0%, ( $\beta$ ) 6%, ( $\gamma$ ) 12%, ( $\delta$ ) 24%, ( $\epsilon$ ) 36%, ( $\sigma$ ) 48%.....	55
Εικόνα 2.3: Ζυγός ακριβείας μαζί με εξοπλισμό για εύρεση της πυκνότητας.....	56
Εικόνα 2.4: Σχηματική παράσταση της μεθόδου απ' ευθείας μετάδοσης (through-transmission) για τον έλεγχο των υλικών με υπερήχους .....	57
Εικόνα 2.5: Η πειραματική διάταξη για through transmission που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία.....	58
Εικόνα 2.6: Πειραματική διάταξη κατά την διεξαγωγή του πειράματος .....	59
Εικόνα 2.7: Παλμογεννήτρια υψηλών παλμών Ritec (RPR-4000 PULSER RECEIVER) .....	60
Εικόνα 2.8: Συλλέκτης δεδομένων PXI (NI PXIe-1071).....	61
Εικόνα 2.9: Συσκευή φραγής αντανάκλασεων σήματος .....	62

Εικόνα 2.10:Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες Olympus 1MHz και 5MHz, διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων.....	63
Εικόνα 2.11: Σχηματική παράσταση επαναλαμβανόμενων αντηχήσεων (A-scan) μετά από συνεχείς ανακλάσεις του αρχικού παλμού από τις απέναντι επιφάνειες του δοκιμίου .....	64
Εικόνα 2.12: Σχηματική παράσταση της μεθόδου παλμού-ηχούς (pulse-echo) για τον έλεγχο των υλικών με υπερήχους .....	65
Εικόνα 2.13: Πειραματική διάταξη κατά την διεξαγωγή του πειράματος (pulse-echo)...	63
Εικόνα 2.13: Πειραματική διάταξη κατά την διεξαγωγή του πειράματος .....	66
Εικόνα 3.1: Επίδραση του πορώδους των δοκιμίων της αλούμινας στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων, μετρημένων με τις μεθόδους Through Transmission (TT) και Pulse Echo (PT) σε συχνότητες 1 και 5 MHz .....	73
Εικόνα 3.2: Επίδραση του πορώδους των δοκιμίων της αλούμινας στην ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων, μετρημένων με τις μεθόδους Through Transmission (TT) και Pulse Echo (PT) σε συχνότητες 1 και 5 MHz .....	73
Εικόνα 3.3: Επίδραση του πορώδους των δοκιμίων της αλούμινας στο λόγο Poisson, που υπολογίστηκε από τις μετρήσεις με τις μεθόδους Through Transmission (TT) και Pulse Echo (PT) σε συχνότητες 1 και 5 MHz .....	77
Εικόνα 3.4: Επίδραση του πορώδους των δοκιμίων της αλούμινας στο μέτρο ελαστικότητας, που υπολογίστηκε από τις μετρήσεις με τις μεθόδους Through Transmission (TT) και Pulse Echo (PT) σε συχνότητες 1 και 5 MHz, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος .....	78

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Φυσικές ιδιότητες της Αλούμινας ( $Al_2O_3$ ) .....	02
Πίνακας 1.2: Ιδιότητες των κεραμικών με βάση της περιεκτικότητάς τους σε αλούμινα .	03
Πίνακας 1.3: Κρυσταλλογραφικά δεδομένα για διάφορους τύπους αλουμίνας .....	08
Πίνακας 1.4: Μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου και τυπικές εφαρμογές.....	21
Πίνακας 1.5: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για κάθε μέθοδο ΜΚΕ.....	25
Πίνακας 3.1: Μέση τιμή πυκνότητας (και σταθερή απόκλιση) δοκιμίων αλούμινας για κάθε τιμή πορώδους.....	69
Πίνακας 3.2: Ταχύτητα διαμηκών (longitudinal waves) και εγκάρσιων κυμάτων (shear waves) για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Through Transmission .....	71
Πίνακας 3.3: Ταχύτητα διαμηκών (longitudinal waves) και εγκάρσιων κυμάτων (shear waves) για αισθητήρα 5 MHz με τη μέθοδο Through Transmission .....	71
Πίνακας 3.4: Ταχύτητα διαμηκών (longitudinal waves) και εγκάρσιων κυμάτων (shear waves) για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Pulse Echo.....	72
Πίνακας 3.5: Ταχύτητα διαμηκών (longitudinal waves) και εγκάρσιων κυμάτων (shear waves) για αισθητήρα 5 MHz με τη μέθοδο Pulse Echo.....	72
Πίνακας 3.6: Τιμές λόγου Poisson ( $\nu$ ) και Μέτρου Ελαστικότητας (E) για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Through Transmission .....	75
Πίνακας 3.7: Τιμές λόγου Poisson ( $\nu$ ) και Μέτρου Ελαστικότητας (E) για αισθητήρα 5 MHz με τη μέθοδο Through Transmission .....	75
Πίνακας 3.8: Τιμές λόγου Poisson ( $\nu$ ) και Μέτρου Ελαστικότητας (E) για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Pulse Echo.....	76
Πίνακας 3.9: Τιμές λόγου Poisson ( $\nu$ ) και Μέτρου Ελαστικότητας (E) για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Pulse Echo.....	76

## Περίληψη

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη, την καταγραφή και τη σύγκριση της συμπεριφοράς κεραμικών δοκιμίων αλουμίνας έξι διαφορετικών τιμών πορώδους, μέσω της παρατήρησης και ανάλυσης δεδομένων που προέκυψαν από τη μέθοδο των υπερήχων, με τελικό στόχο την κατανόηση των ελαστικών ιδιοτήτων της αλουμίνας σε άμεση εξάρτηση με το πορώδες.

Το πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την αλουμίνα, όπως η περιγραφή των ιδιοτήτων της, οι μέθοδοι προέλευσης και παρασκευής της, καθώς και η αναφορά της σε τεχνολογικές εφαρμογές. Επίσης, αναφέρεται στις τεχνικές Μη Καταστροφικού Ελέγχου, αναλύοντας διεξοδικά τη μέθοδο των υπερήχων με βάση το θεωρητικό της υπόβαθρο, τις εφαρμογές και τον εξοπλισμό της. Τέλος περιγράφει το σκοπό της εργασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιγράφει τα υλικά, τον πειραματικό εξοπλισμό και διαδικασία των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας, αναφέροντας τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων και παρουσιάζοντας τα αναλυτικά δεδομένα που ελήφθησαν μέσω της μεθόδου των υπερήχων για την ορθή κατανόηση και αποτίμηση των τελικών αποτελεσμάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, και στο τέταρτο εξάγονται τα συμπεράσματα από τη διπλωματική εργασία και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα.

### Λέξεις κλειδιά

Αλουμίνα ( $Al_2O_3$ ), πορώδης αλουμίνα, μηχανικές ιδιότητες κεραμικών, μη καταστροφικός έλεγχος, υπέρηχοι, εφαρμογές υπερήχων, διάδοση υπερήχων, πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας, λόγος Poisson, μέτρο ελαστικότητας.

# Study of Elastic properties of porous alumina

Alexios Tzoumas

MSc Thesis

*Laboratory of Ceramics and Composite Materials, Laboratory of Mechanics, Smart Sensors and Nondestructive Evaluation, Department of Materials Science and Engineering of Ioannina, Greece*

## Abstract

This Master Thesis aims at recording and comparison of the behavior of ceramic alumina samples of various (six) porosity values through the observation and analysis of data obtained from the ultrasonic method, with the ultimate goal of the understanding of the elastic properties of alumina in a direct dependence on porosity.

The first chapter of this thesis aims to present information on alumina, such as its properties, the methods of origin and manufacture, and a reference to technological applications. It also presents the non-destructive testing techniques, analyze in detail the ultrasonic method and the theoretical background, the applications and the equipment. Finally, it describes the aim of the Thesis.

The second chapter describes the materials, the experimental equipment and the procedure of the experiments carried out during the diploma thesis. The properties evaluated by the tests, the analytical data obtained with the ultraviolet method, as well as issues related to the correct understanding and the evaluation of the final results are thoroughly presented.

In the third chapter, the results of the experiments are presented. The fourth chapter summarizes the conclusions of the Thesis and proposes topics for future research.

## Keywords

Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), porous alumina, mechanical properties of ceramics, non-destructive testing, ultrasound, ultrasound applications, ultrasound propagation, piezoelectric sensor, Poisson ratio, modulus of elasticity.



# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Οξείδιο του Αλουμινίου ( $Al_2O_3$ )

### 1.1.1 Γενικές Πληροφορίες

Ο όρος αλούμινα περιλαμβάνει τις διάφορες μορφές του οξειδίου του αλουμινίου με γενικό τύπο  $Al_2O_3$ . Η ένωση αυτή είναι η πιο διαδεδομένη ένωση των οξειδίων του αλουμινίου. Κοινώς αναφέρεται με την ονομασία αλούμινα αλλά μπορεί επίσης να ονομαστεί aloxite, ή alundum ανάλογα με τις μορφές ή τις εφαρμογές της. Η αλούμινα χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές είτε σε ένυδρη είτε σε άνυδρη μορφή. Η άνυδρη ή αλλιώς μεταλλουργική αλούμινα είναι προϊόν της ένυδρης μετά από ψήσιμο και ενώ έχει αφαιρεθεί η περιεχόμενη ποσότητα νερού. Η άνυδρη αλούμινα έχει χημικό τύπο  $Al_2O_3$  και ηλεκτρονιακό τύπο  $O = Al - O - Al = O$ . [1],[2],[3],[4],[5],[6],[7]

Η αλούμινα όταν βρίσκεται στη φύση σε ελεύθερη μορφή κατατάσσεται ως το τρίτο σε σκληρότητα ορυκτό, ονόματι κορούνδιο ενώ οι προσμίξεις των κρυστάλλων δίνουν διαφορετικό χρώμα στο υλικό, επομένως και διαφορετική ονομασία. Τα ρουμπίνια και τα ζαφείρια είναι πολύτιμες μορφές κορούνδιού, που οφείλουν τα χαρακτηριστικά τους χρώματα στην παρουσία ακαθαρσιών. Χαρακτηριστικά το ρουμπίνι οφείλει το χρώμα του στα ιόντα του χρωμίου ( $Cr^{3+}$ ), ενώ το γαλάζιο χρώμα είναι αποτέλεσμα των ατόμων του τιτανίου ή του σιδήρου και οι κρύσταλλοι με αυτό το χρώμα αναφέρονται ως ζαφείρια. Οι χημικές ενώσεις της αλούμινας αποτελούν το 25% του στερεού φλοιού της γης, σπάνια όμως βρίσκονται στην καθαρή μορφή του  $Al_2O_3$ . Λόγω του μικρού μεγέθους των ιόντων του Al και του Si και του υψηλού φορτίου τους έχουμε το σχηματισμό κρυσταλλικών ενώσεων σε συνδυασμό με αρνητικά ιόντα οξυγόνου σε διάφορες αναλογίες και τα προϊόντα που προκύπτουν είναι γνωστά ως αργιλοπυριτικά υλικά. [1],[4],[7] Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται ορισμένες φυσικές ιδιότητες της αλούμινας.



**Πίνακας 1.2:** Ιδιότητες των κεραμικών με βάση της περιεκτικότητάς τους σε αλούμινα. [8]

Ιδιότητα	Αλούμινα (%)			
	75	86-94	94-98	>98
Πυκνότητα ( $\text{Kg/m}^3 \times 10^{-3}$ )	3.2	3.3	3.5	3.7
Σκληρότητα (στην κλίμακα Mohs)	8.5	9	9	9
Αντοχή σε συμπίεση ( $\text{MN/m}^2$ )	1250	1750	1750	
Αντοχή σε κάμψη ( $\text{MN/m}^2$ )	270	290	350	380
Μέγιστη θερμοκρασία εφαρμογής	800	1100	1500	

Η αλούμινα αποτελεί ένα από τα πιο αποδοτικά και ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά στην οικογένεια των κεραμικών, καθώς επίσης αποτελεί απαραίτητο στάδιο και για την υλοποίηση και την παρασκευή του μετάλλου αλουμινίου. Όταν τα κεραμικά έχουν σαν βάση την αλούμινα έχουν υψηλή διηλεκτρική αντοχή και χαμηλές απώλειες ισχύος. Χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα σε ηλεκτρονικές συσκευές λόγω των χαμηλών διηλεκτρικών απωλειών και της λείας επιφάνειας που διαθέτουν. Επίσης, λόγω των χαμηλών απωλειών ισχύος χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτείται μεταφορά ενέργειας μέσω κάποιου κεραμικού όπως σε κεραίες ραντάρ (radomes). Υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις ιδιότητες της αλούμινας λόγω διαφόρων τύπων κεραμικής αλούμινας που μπορεί να προκύψουν. Η κονία αλουμίνης έχει μικρό κόστος παραγωγής και δυνατότητα παρασκευής μεγάλων ποσοτήτων. Μπορεί να ληφθεί σε μεγάλα κομμάτια μέσω πύρωσης, είτε σε κόκκους οι οποίοι λειαίνονται με μηχανική περιστροφή, ή σε κolloειδή διαλύματα ή ακόμη και σε κονίες διαφόρων μεγεθών της τάξης των nm. Η αλούμινα επίσης δεν είναι δυνατό να διαλυθεί στο νερό ή σε οργανικούς διαλύτες, μπορεί όμως να διαλυθεί κατά ένα ποσοστό σε αλκαλικά διαλύματα. Η υψηλή σκληρότητα, οι εξαιρετικές διηλεκτρικές ιδιότητες της αλούμινας, καθώς επίσης και η ανθεκτικότητα και οι καλές θερμικές ιδιότητες την καθιστούν το υλικό επιλογής για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Κάποιες από τις κυριότερες ιδιότητες της αλούμινας είναι οι εξής:

- Χημική σταθερότητα σε μεγάλο αριθμό χημικών ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Υψηλή ηλεκτρική αντίσταση ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Αντοχή στις απότομες μεταβολές θερμοκρασίας (θερμικό σοκ).
- Μεγάλη αντοχή στη συμπίεση (high compression strength).
- Χαμηλή ενεργός διατομή δέσμησης νετρονίων.
- Διαπερατότητα σε μικροκυματικές συχνότητες.

- Μεγάλη σκληρότητα και ακαμψία.
- Εύκολα διαθέσιμη πρώτη ύλη.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα.
- Μεγάλη διηλεκτρική αντοχή.
- Αντοχή στις εκδορές.
- Υψηλό σημείο τήξης.

Διατίθεται σε καθαρότητα που κυμαίνεται από 94% έως 99,8% για τις πιο απαιτητικές εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας. [4],[7],[9]

### 1.1.2 Κρυσταλλικές Δομές

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την παρασκευή της αλούμινας με αποτέλεσμα να προκύπτουν και διαφορετικοί τύποι, οι οποίοι είναι άμεσα εξαρτώμενοι από τη θερμοκρασία πύρωσης. Οι διαφορετικοί τύποι της αλούμινας οφείλονται σε προσμίξεις τριαδικών οξειδίων αλλά και σε μερικώς αφυδατωμένους τύπους της. Κατά συνέπεια αποτελούνται από μια μερικώς άτακτη κρυσταλλική δομή βασισμένη σε μια συμπαγή (closed-packed) δομή οξυγόνου με τοποθετημένα άτομα αργιλίου σε θέσεις περιμετρικά της δομής. Καθώς το σύστημα τείνει να βρεθεί σε κατάσταση ισορροπίας, η δομή χάνει την αταξία στην οποία βρίσκεται καθώς γίνεται όλο και πιο οργανωμένη.

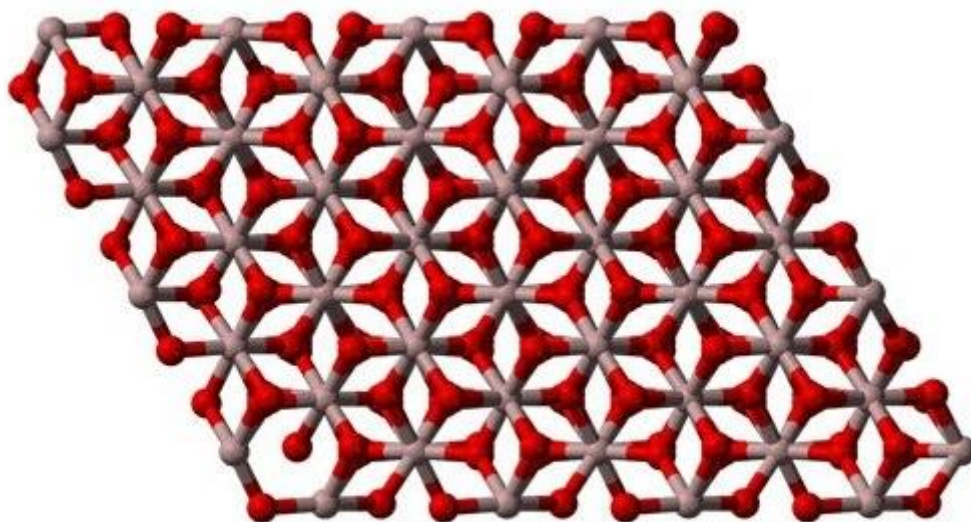


Image courtesy of Werner Schellmann

The chemical structure of the aluminium oxide or alumina.

**Εικόνα 1.1:** Κρυσταλλική δομή αλούμινας. [1]

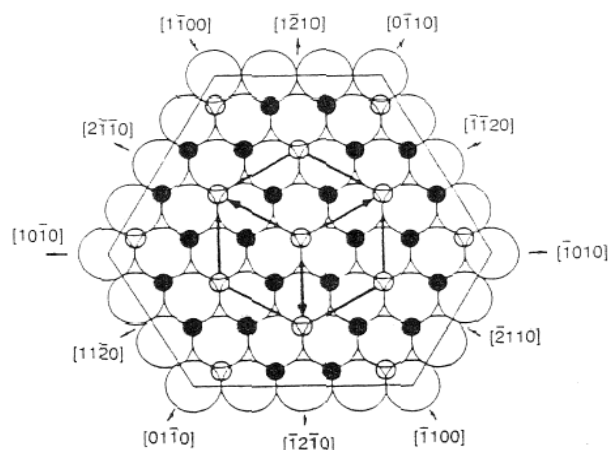
Μια πιο γενική δομή της αλούμινας θα μπορούσε να προκύψει εάν κάθε ιόν  $Al^{3+}$  τοποθετούνταν έτσι ώστε να έχει έξι γειτονικά ιόντα οξυγόνου και κάθε ιόν οξυγόνου να είχε τέσσερα ιόντα  $Al^{3+}$  κατανεμημένα στις τέσσερις κορυφές του τριγωνικού πρίσματος. Εάν θεωρήσουμε τις μονάδες  $Al_2O_3$  σαν τρία ιόντα οξυγόνου τα οποία σχηματίζουν ένα ισοσκελές τρίγωνο με τα ιόντα του αργιλίου πάνω και κάτω από το κέντρο του τριγώνου τότε θα προέκυπτε ένα πιο αξιόπιστο πρότυπο δομής. Για να προκύψουν οι δύο μοριακοί τύποι θα πρέπει η μια από τις δύο ομάδες να τοποθετηθεί σε κάθε κορυφή του κύβου ενώ η άλλη στο κέντρο του. [1],[2],[4],[7]

### 1.1.3 Τύποι $Al_2O_3$ και Ιδιότητες

Το οξείδιο του αλουμινίου έχει τη δυνατότητα να παρουσιάζει διάφορους τύπους αλούμινας ανάλογα με τη διαδικασία παρασκευής την οποία έχει ακολουθηθεί αλλά και των διαφορετικών θερμοκρασιών πύρωσης που έχουν χρησιμοποιηθεί. Οι τύποι αυτοί χαρακτηρίζονται με ελληνικά γράμματα ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\chi$ ,  $\delta$ , κ.α.). Συνήθως δεν παρατηρούμε κάποιο είδος πολυμορφισμού το οποίο θα οφειλόταν σε διαφορετικές κρυσταλλώσεις με την ίδια χημική σύσταση. Η πιο σταθερή θερμοδυναμικά φάση με κρυσταλλική δομή είναι η  $\alpha$ - $Al_2O_3$  καθώς οι υπόλοιποι τύποι αποκλίνουν αρκετά από την ιδανική στοιχειομετρία  $Al_2O_3$ . [2],[4]

#### 1.1.3.1 $\alpha$ -Αλούμινα

Η  $\alpha$ -αλούμινα αποτελεί την καθαρότερη μορφή αλούμινας προσφέροντάς της σκληρότητα και ακαμψία μεγαλύτερη από κάθε άλλο κεραμικό οξείδιο. Η  $\alpha$ -αλούμινα αποτελεί υλικό πρώτης επιλογής σε ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών λόγω των εξαιρετικών dielectricών και θερμικών ιδιοτήτων που έχει. Η καθαρή  $\alpha$ -αλούμινα αποτελείται από την πιο σταθερή θερμοδυναμική φάση λόγω της εξαγωνικής δομής της, με 2 άτομα Al και 6 άτομα O σε κάθε μοναδιαία κυψελίδα. Η εξαγωνική αυτή κυψελίδα χαρακτηρίζει την  $\alpha$ -αλούμινα. Αν και ο κρύσταλλός είναι ρομβοεδρικός, η δομή του κρυστάλλου της αποτελείται από ανιόντα  $O^{2-}$  σε σχεδόν εξαγωνική συμπαγή διάταξη με κατιόντα  $Al^{3+}$  να καταλαμβάνουν τα δύο τρίτα των διάκενων του οκταέδρου. [10],[11],[12]



**Εικόνα 1.2:** Βασικός σχηματισμός της α-αλούμινας

- Μεγάλοι λευκοί κύκλοι: συμπαγές υπόστρωμα ανιόντων,
- Μαύροι κύκλοι: κατιόντα που καταλαμβάνουν τα δύο τρίτα των διάκενων του οκταέδρου,
- Μικροί λευκοί κύκλοι: κενά.

### 1.1.3.2 β-Αλούμινα

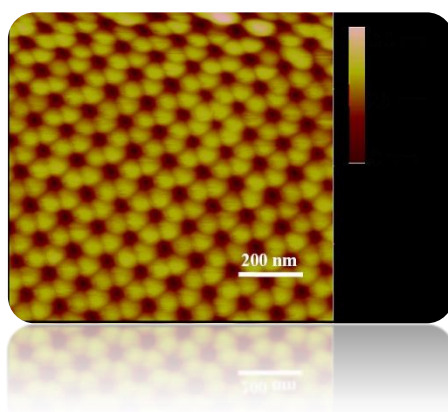
Σύμφωνα με παλαιότερες απόψεις η β-αλούμινα δεν ήταν τίποτα άλλο εκτός από μια μεταβολή στη δομή της α-αλούμινας μέσω διαφόρων θερμοκρασιακών μετασχηματισμών. Στη συνέχεια όμως και με τη βοήθεια πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν ανακαλύφθηκε ότι ο όρος β-αλούμινα αναφέρεται σε μια σειρά δυαδικών οξειδίων με γενικό τύπο  $M_2O \cdot 11Al_2O_3$ , με τη θέση M να καταλαμβάνεται συνήθως από νάτριο (Na) ή από κάποιο άλλο μονοσθενές στοιχείο (π.χ. Li, Ag, K).

Η β-αλούμινα πρακτικά είναι το αποτέλεσμα της αντίδρασης του  $Al_2O_3$  με  $Na_2CO_3$  σε θερμοκρασία  $1100^\circ C$  αντιπροσωπεύοντας τις αντιδράσεις κατιοντικών προσμίξεων στη βασική εξαγωνική δομή της αλουμίνας, στην οποία κάθε μοναδιαία κυψελίδα έχει δύο κατοπτρικά επίπεδα ιόντων  $O^{2-}$  και  $M^{n+}$  κάθετα στον άξονα c, τα οποία διαχωρίζονται από ένα «συγκρότημα επιπέδων» σπινελίου, χωρίς την ύπαρξη ηλεκτρικής αγωγιμότητας μεταξύ των στρωμάτων.

Για την παρασκευή β-αλούμινας με νάτριο θα χρειαστεί ανάμιξη στερεού ανθρακικού νατρίου και α-αλούμινας, και έπειτα έψηση του μίγματος σε θερμοκρασία  $1100^\circ C$ . Η παρασκευή αυτή αποτελεί πρόδρομο για την παρασκευή διαφόρων τύπων β-αλούμινας για διαφορετικά ιόντα. Στις σύγχρονες μεθόδους παρασκευής περιλαμβάνονται και οργανικές διεργασίες. [2],[4]

### 1.3.3.3 γ-Αλούμινα

Η γ-αλούμινα περιλαμβάνει στο κρυσταλλικό της πλέγμα μόρια νερού και συνήθως αποτελεί το ενδιάμεσο στάδιο που σχηματίζεται κατά την πύρωση του γυψίτη.[4]. Το όνομα γ-αλούμινα δίνεται για να προσδιορίσει έναν αριθμό φάσεων που προκύπτουν κατά τη διάρκεια αποσύνθεσης του ζελατινώδους  $\text{Al}(\text{OH})_3$  και του βοημίτη,  $\text{AlO}(\text{OH})$ . Στο στάδιο της πυροσυσσωμάτωσης πραγματοποιείται η μετατροπή της φάσης γ σε φάση α, λόγω της μικροδομής που σχηματίζεται η οποία αποτελείται από α-κόκκους της τάξης των nm και ενός μεγάλου αριθμού αλληλοσυνδεδεμένων πόρων. Αν η διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης της λεπτής γ-αλούμινας πραγματοποιηθεί με μεγάλη ταχύτητα τότε είναι πιθανόν να μην υπάρξει βελτίωση των προϊόντων που θα προκύψουν.



**Εικόνα 1.3:** Εικόνα μικροσκοπίου ατομικής δύναμης της εξαγωνικής δομής της αλουμίνας.

[13]

Μια άποψη η οποία επικρατεί για το μετασχηματισμό της γ-αλούμινας σε α, είναι ότι το  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας ατελής σπινέλιος με τα πρωτόνια να έχουν σταθεροποιητικό ρόλο και ενδιάμεσα προϊόντα με τις πολύ κοντινές δομές να εμφανίζουν την τεχνολογικά ενδιαφέρουσα αντίδραση, όπου ο καολίνιτης μετατρέπεται σε μουλίτη. Για να πραγματοποιηθούν ικανοποιητικά κρυσταλλωμένα δείγματα  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  θα πρέπει να υπάρξει προσθήκη διαλύματος  $\text{NH}_3$  σε διάλυμα  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  με συνεχή ανάδευση, διήθηση του ιζήματος, έκπλυση, ξήρανση στους  $80^\circ\text{C}$  και θέρμανση στους  $915^\circ\text{C}$  για μία ώρα. [7]

Ο Πίνακας 1.3 δείχνει ορισμένα κρυσταλλογραφικά δεδομένα για τους διάφορους τύπους αλούμινας, όπως προκύπτουν από εξέταση XRD σε μονοκρυστάλλους.

**Πίνακας 1.3:** Κρυσταλλογραφικά δεδομένα για διάφορους τύπους αλούμινας. [4]

	A	γ	η	X	δ	θ	κ	ι	ε
<b>Κρυσταλλικό σύστημα</b>	Ρομβοεδρικό	κυβικό	κυβικό	εξαγωνικό	τετραγωνικό	μονοκλινές	ορθορομβικό		εξαγωνικό
<b>Ομάδα χώρου</b>	R3c	Fd3m				A2/m			P63m
<b>Παράμετροι πλέγματος(E)</b>									
a	4.7389	7.9	7.94		7.943	5.62			5.544
b						2.906			
c	12.991				23.5	11.79			9.024
α									
β						103.74			
γ									
<b>Αριθμός JCPDS*</b>	10-173	10-425	4-875	34-4930	16-394	37-1462	4-878	12-539	26-31

\*Joint Committee on Powder Diffraction Standards. Πρόκειται για την κωδική ονομασία των κρυσταλλικών δομών που καταγράφεται στις βάσεις δεδομένων XRD.

#### 1.1.4 Προέλευση και Μέθοδοι Παρασκευής

Υπάρχουν 2 κατηγορίες βιομηχανικής αλούμινας ανάλογα από τα μεταλλεύματα από τα οποία προέρχεται.

Η πρώτη κατηγορία από την οποία εξαγεται αλουμίνα με χημικό τύπο  $Al_2O(OH)_4$  είναι αποτέλεσμα του βωξιτη (bauxite), ο οποίος θεωρείται το βασικότερο ορυκτό. Συχνά όμως η αλουμίνα δεν αποτελείται από μόνο ένα ορυκτό αλλά από ένα συνονθύλευμα διαφόρων ορυκτών, με συνηθέστερα τον υδραργιλιτή ή κοινώς γυψίτη (gibbsite,  $Al(OH)_3$ ), τον βοημίτη (bohemite,  $AlO(OH)$ ) και το διάσπορο (diaspora,  $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ), τα οποία αναφέρονται στα διάφορα στάδια της ενυδάτωσης. Σαφώς όμως δεν είναι τα μόνα ορυκτά τα οποία υπάρχουν στο μέταλλευμα καθώς υπάρχουν και προσμίξεις διαφόρων υλικών όπως ο καολινίτης και διάφορα οξείδια του σιδήρου ή του τιτανίου.

Η δεύτερη κατηγορία μεταλλευμάτων αποτελείται από αργιλοπυριτικά υλικά, με βασικότερο τον καολινίτη (kaolinite,  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ). [4]

Η πρώτη ύλη η οποία θα χρησιμοποιηθεί καθώς και οι τεχνικές των χημικών διαδικασιών και των πηγών ενέργειας κάθε χώρας αποτελούν το σημαντικότερο παράγοντα και είναι άμεσα εξαρτώμενα με τις διαδικασίες τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε για την παρασκευή της αλούμινας, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.



### 1.1.4.1 Διεργασία Bayer

Ο Κ.Ι. Bayer περιγράψε αυτή τη διεργασία το 1888 και είναι η πλέον γνωστή διαδικασία παραγωγής φθηνής αλουμίνας από βωξίτη.

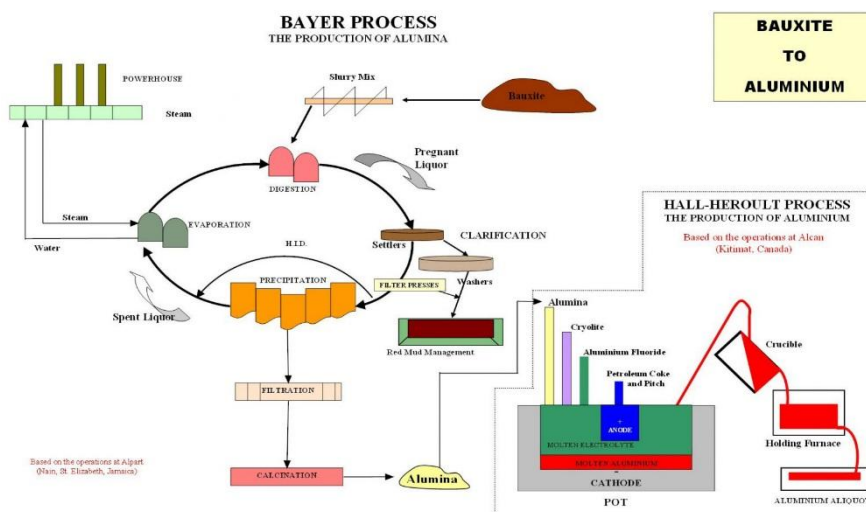
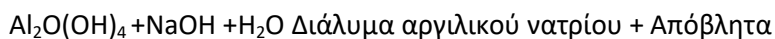
Κατά τη διεργασία αυτή για τη παραγωγή χ τόνων αλουμίνας απαιτούνται διπλάσιοι τόνοι βωξίτη.

Η παραγωγή φθηνής αλουμίνας οφείλεται στις κοντινές εγκαταστάσεις παραγωγής μειώνοντας το κόστος, το οποίο είναι άμεσα εξαρτώμενο από την κοκκομετρική διαβάθμιση και το βαθμό καθαρότητας που απαιτεί ο καταναλωτής.

Η διεργασία Bayer αποτελείται από 4 βασικά στάδια:

1. Προετοιμασία της πρώτης ύλης και του βωξίτη: Ο βωξίτης θραύεται και αλέθεται για να γίνει σκόνη.
2. Εκχύλιση υπό πίεση με διάλυμα καυστικού νατρίου: Ο βωξίτης αναμιγνύεται με διάλυμα καυστικής σόδας και θερμαίνεται σε αυτόκλειστα δοχεία.
3. Καταβύθιση: Καταβύθιση της ένυδρης αλουμίνας από το υπέρκορο αργλικό διάλυμα.
4. Θερμική διάσπαση: Στο στάδιο αυτό γίνεται η θερμική διάσπαση της ένυδρης αλουμίνας με σκοπό τη παραγωγή αλουμίνας που ικανοποιεί τις προδιαγραφές για μεταλλουργική χρήση.

Η αντίδραση η οποία πραγματοποιείται σε περιβάλλον 4 atm είναι η εξής:



Εικόνα 1.4: Μετατροπή του βωξίτη σε αλουμίνα μέσω της διεργασίας Bayer.

Από το διάλυμα του αργλικού νατρίου, και έπειτα από τη συμπύκνωσή του, μέχρι να προκληθεί κορεσμός με συνεχή έλεγχο των συνθηκών γήρανσης όπως η θερμοκρασία, η ανάδευση και ο χρόνος κατά τη διάρκεια της καθίζησης, δημιουργείται λεπτόκοκκος γυψίτης, με καθορισμένο μέγεθος κόκκων, υφή και καθαρότητα.

Κατά τη διαδικασία της πέψης λαμβάνει χώρα η απομάκρυνση προσμίξεων σιδήρου, πυριτίου και τιτανίου υπό τη μορφή ερυθράς ιλύος, ενώ πριν το στάδιο της θερμικής διάσπασης προηγείται η διαδικασία της υδρόλυσης στην οποία έχουμε τη δημιουργία ιζήματος  $Al(OH)_3$ . Η θερμική διάσπαση αποτελεί το τέταρτο και τελευταίο στάδιο της διεργασίας Bayer το οποίο πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από  $1200^{\circ}C$  για να προκύψει η σχεδόν ολική μετατροπή του γυψίτη σε αλουμίνα. Με τη μέθοδο Bayer η αλουμίνα μπορεί να αγγίξει ποσοστό καθαρότητας ακόμη και 90%. [4],[14]

#### **1.1.4.2 Πυρο-γενετική Διεργασία**

Η πυρο-γενετική μέθοδος πρακτικά αποτελεί μια παραλλαγή της μεθόδου Bayer στην οποία αρχικά γίνεται κατεργασία του βωξίτη σε θερμοκρασία  $1200^{\circ}C$ , και έπειτα ακολουθούν κανονικά τα στάδια της αρχικής μεθόδου, όπου το ορυκτό μετατρέπεται σε μια σειρά αλάτων νατρίου και ελκύεται  $CO_2$ . Κατά τη διάρκεια της πέψης έχουμε την απομάκρυνση των προσμίξεων, αλλά και τη δημιουργία ιζήματος στο στάδιο της υδρόλυσης.

Η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιείται συχνά λόγω της αυξημένης ενεργειακής απαίτησης αλλά και του υψηλού κόστους των αντιδραστήρων. [4]

#### **1.1.4.3 Μέθοδος Peniakoff**

Η μέθοδος Peniakoff είναι ακόμη μία παραλλαγή της μεθόδου Bayer στην οποία έχουμε μείωση του ενεργειακού κόστους χάρη σε μια εξώθερμη αντίδραση, με αποτέλεσμα να λαμβάνουμε αλουμίνα χαμηλής καθαρότητας. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει το στάδιο της κατεργασίας του βωξίτη ο οποίος εν συνεχεία αναμειγνύεται με  $Na_2SO_4$  και έπειτα θερμαίνεται στους  $900-1000^{\circ}C$ , όπου λαμβάνει χώρα εξώθερμη αντίδραση και παραγωγή  $SO_2$ ,  $CO_2$  και αλάτων νατρίου. [4]

#### **1.1.4.4 Μέθοδος Επεξεργασίας Αργίλων**

Για τη παραγωγή βιομηχανικής αλούμινας μέσω της μεθόδου επεξεργασίας αργίλων χρησιμοποιούμε μεταλλεύματα τα οποία αποτελούνται από αργιλοπυριτικά υλικά, με βασικότερο τον καολινίτη τον οποίο θερμαίνουμε στους  $500^{\circ}C$  και αφού αφυδατωθεί μετατρέπεται σε μετακαολίνη, εν συνεχεία συνενώνεται με ισχυρό οξύ  $HCl$  ή  $H_2SO_4$  για να δημιουργηθεί η αλούμινα η οποία λαμβάνεται μέσω της συμπύκνωσης και της κατεργασίας

του υγρού, ενώ το παραπροϊόν που λαμβάνουμε αποτελείται από 2 μόρια πυριτίας τα οποία δημιουργήθηκαν από ένα μόριο αλουμίνας. [4]

#### **1.1.4.5 Χημική Διεργασία**

Η χημική διεργασία μπορεί να παράγει αλούμινα πολύ υψηλής καθαρότητας, καθώς περιλαμβάνει αργλικό διάλυμα το οποίο αντιδράει όταν έρθει σε επαφή με αμμωνία για το σχηματισμό γυψίτη. Στη διεργασία αυτή ο γυψίτης αφού εκπλυθεί, πυρώνεται για να σχηματιστεί αλούμινα υψηλής καθαρότητας. [4]

#### **1.1.4.6 Ενοποίηση Αμύλου**

Η τεχνική αυτή βασίζεται στη ζελατινοποίηση των κόκκων αμύλου οι οποίοι θερμαίνονται σε υδατικό περιβάλλον. Η ιδιότητα του αμύλου να υπόκειται σε πυκνωματοποίηση όταν έρθει σε επαφή με ζεστό νερό ελέγχεται από την απορρόφηση και τη διόγκωση των σωματιδίων του αμύλου στο νερό. Επομένως όταν οι διασκορπισμένοι κόκκοι του αμύλου στο υδατικό αιώρημα του κεραμικού θερμανθούν σε θερμοκρασίες 60-80°C αλλάζει η κατάσταση του ρευστού και μετατρέπεται σε ένα άκαμπτο σώμα χωρίς να υπάρξει απομάκρυνση του υγρού, ανάλογα με το εάν η ποσότητα του αμύλου είναι αρκετή για την πρόσληψη της περίσσειας ποσότητας νερού.

Κατά το 1<sup>ο</sup> στάδιο έχουμε καύση των κόκκων του αμύλου σε θερμοκρασία 400°C, έπειτα ακολουθεί το στάδιο της πυροσυσσωμάτωσης στο οποίο μερικοί πόροι, ειδικά οι μικρότεροι, τείνουν να εξαφανιστούν λόγω της διαδικασίας συμπύκνωσης. Για να επιτευχθεί υψηλή φόρτωση στερεών, τα κεραμικά σωματίδια πρέπει να είναι καλά διεσπαρμένα και σταθεροποιημένα με ένα κατάλληλο μέσο διασποράς.

#### **1.1.5 Εμπορικοί Τύποι Αλούμινας**

Η αλούμινα αποτελεί ένα από τα πιο ευρέως διαδεδομένα υλικά στην κατηγορία των κεραμικών με ποικίλες εφαρμογές. Η ταξινόμησή της πραγματοποιείται με βάση τη μακροσκοπική δομή της και το βαθμό καθαρότητας. Έτσι προκύπτουν διάφοροι τύποι εμπορικής αλούμινας.

#### **1.1.5.1 Χυτή ή Μεταλλουργική Αλουμίνα (Smelter Grade)**

Η χυτή ή μεταλλουργική αλουμίνα αποτελείται από οξείδια του αλουμινίου τα οποία εκμεταλλευόμαστε για την παραγωγή του μετάλλου αλουμινίου. Πρακτικά παρασκευάζεται από υδροξείδιο του αλουμινίου (γυψίτη) μέσω περιστρεφόμενων καμίνων ή μέσω ειδικών ρευστοποιητών με επεξεργασία διαπύρωσης. Εισέρχοντας σε ένα ρεύμα ζεστού αέρα λόγω του φλεγόμενου καυσίμου που χρησιμοποιείται για την ταυτόχρονη απομάκρυνση του νερού. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνουμε την άνυδρη αλουμίνα σε θερμοκρασίες από 180°C έως 600°C. Εάν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 1100°C (calcination) τότε θα έχουμε τη δημιουργία μιας πιο σταθερής α-δομής. [4]

#### **1.1.5.2 Άνυδρη Αλουμίνα (Calcined)**

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω αν η θερμοκρασία έκθεσης του υδροξειδίου του αλουμινίου ξεπεράσει τους 1100°C κατά το στάδιο της πύρωσης μέσα στους ρευστοποιητές, τότε θα έχουμε τη δημιουργία άνυδρης α-αλούμινας. Για να κρατήσουμε τη θερμοκρασία σε χαμηλά επίπεδα χρησιμοποιούμε ως καταλύτες διάφορους μεταλλοποιητές (metalisers) με πιο διαδεδομένους τα φθοριούχα άλατα. Τα προϊόντα της άνυδρης αλούμινας που προκύπτουν χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε κεραμικές και πυρίμαχες εφαρμογές. [4]

#### **1.1.5.3 Στρωματοποιημένη Αλούμινα (Tabular)**

Η στρωματοποιημένη αλούμινα είναι προϊόν της α-αλούμινας το οποίο είτε έχει υποστεί τήξη και εν συνεχεία πυροσυσσωμάτωση είτε έχει υποστεί τη διαδικασία της επανακρυστάλλωσης. Η συγκεκριμένη αλούμινα έχει πάρει το όνομά της λόγω του ιδιαίτερου μορφολογικού της χαρακτήρα καθώς αποτελείται από πολλά επίπεδα σχηματισμένων κρυστάλλων κορουνδίου. Η διαδικασία παραγωγής στρωματοποιημένης αλούμινας πραγματοποιείται μέσω συμπίεσης άνυδρης αλούμινας σε καλούπια με θέρμανση στους 1700°C με 1850°C σε αξονικούς κλιβάνους. Όταν η αλουμίνα εξέρχεται από τα καλούπια μπορούμε μέσω των διαδικασιών θραύσης, κοσκινίσματος ή άλεσης να παράγουμε διάφορα μεγέθη κόκκων. Η στρωματοποιημένη αλούμινα μέσω της διαδικασίας της πυροσυσσωμάτωσης που έχει υποστεί χάνει κατά ένα μεγάλο βαθμό την πορώδη υφή της καθώς αποκτά μεγαλύτερη πυκνότητα και γίνεται ιδιαίτερα δύστηκτη. [4]

#### **1.1.5.4 Ενεργός Αλούμινα (Reactive)**

Η ενεργός αλούμινα είναι αποτέλεσμα της πυρρωσυσσωμάτωσής της σε πλήρως πυκνό σώμα και σε θερμοκρασίες μικρότερες από αυτές της low ή medium soda αλουμίνας. Η ξήρανση που ακολουθεί δημιουργεί συσσωματώματα τα οποία και διαλύονται κατά τη διαδικασία της τριβής, με αποτέλεσμα η ενεργός αλούμινα που προκύπτει να αποτελείται από μικρό μέγεθος κόκκων (<1μm) και υψηλή καθαρότητα. Η ενεργός αλούμινα προτιμάται σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή μηχανική αντοχή, θερμική και χημική σταθερότητα. [4]

#### **1.1.5.5 Αλούμινα χαμηλής περιεκτικότητας σε ανθρακικό νάτριο (Low Soda)**

Πολλές είναι οι βιομηχανικές εφαρμογές οι οποίες απαιτούν αλούμινα με χαμηλή περιεκτικότητα σε ανθρακικό νάτριο, κυρίως όταν αφορούν σε ηλεκτρολογικές ή ηλεκτρονικές χρήσεις. Η low soda αλούμινα εμπεριέχει ανθρακικό νάτριο σε περιεκτικότητα μικρότερη του 0.1% κ.β. Η χρήση διαφόρων οξέων και η χρήση του χλωρίου βοηθάει να περιορίσουμε την ποσότητα του  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  στην αλούμινα. [4]

#### **1.1.5.6 Τηγμένη Αλούμινα (Fused)**

Η τηγμένη αλούμινα παρασκευάζεται σε φούρνους ηλεκτρικών τόξων με το ρεύμα να διαρρέει κατακόρυφα ηλεκτρόδια άνθρακα και να προσελκύει μεγάλες ποσότητες άνθρακα. Ο φούρνος εμπεριέχει χαλύβδινο κελί το οποίο ψύχεται με τη βοήθεια νερού καθώς η αλούμινα λιώνει λόγω της μεγάλης θερμότητας που έχει παραχθεί. Η τηγμένη αλούμινα αποτελείται από μια πυκνή δομή που δεν επιτρέπει την υψηλή διαπερατότητα και το μεγάλο πορώδες με αποτέλεσμα ένα αρκετά υψηλό σημείο τήξης. Η fused αλούμινα συχνά χρησιμοποιείται για την κατασκευή λειαντικών προϊόντων. [4]

#### **1.1.5.7 Αλούμινα Υψηλής Καθαρότητας (High Purity)**

Για να χαρακτηριστεί μία αλούμινα high purity θα πρέπει να έχει 99.99% καθαρότητα. Οι μέθοδοι οι οποίες ακολουθούνται για να επιτευχθεί υψηλή καθαρότητα είναι, είτε ο μετέπειτα καθαρισμός της διαδικασίας Bayer, είτε μέσω χλωρίωσης, αλλά η πιο αποτελεσματική μέθοδος είναι μέσω θέρμανσης υψηλών θερμοκρασιών θειικού άλατος αλουμινίου αμμωνίου ( $\text{AlNH}_4(\text{SO}_4)_2$ ) λόγω διαδοχικών επανακρυσταλλώσεων, ή μετάλλου αλουμινίου όπου το μέταλλο αντιδρά με μια αλκοόλη καθαρίζοντας το αλκοοξείδιο του αλουμινίου μέσω απόσταξης, υδρόλυσης, και θέρμανσης. [4]

### 1.1.6 Εφαρμογές της Αλούμινας

Η αλούμινα αποτελεί ένα από τα βασικότερα υλικά στην κατηγορία των κεραμικών λόγω της ταχείας ανάπτυξής της. Λόγω των ποικίλων μορφών και ιδιοτήτων της αποτελεί υλικό πρώτης επιλογής για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών διαφορετικών κατηγοριών. Χαρακτηριστικά, σε μια ετήσια παραγωγή 60 εκατομμυρίων τόνων, το 90% χρησιμοποιείται στην κατασκευή μετάλλου αλουμινίου, ενώ οι υπόλοιπες ποσότητες κατανέμονται για την παραγωγή διαφόρων προϊόντων, με τη δεύτερη θέση να καταλαμβάνουν τα πυρίμαχα με ποσοστό 50%, στην τρίτη θέση βρίσκονται τα στιλβωτικά με 20%, ενώ τα πυρότουβλα και τα μπουζί με 15%. Την τελευταία θέση καταλαμβάνουν τα κεραμικά με ηλεκτρονική χρήση με ποσοστό μόλις 10%. [4]



**Εικόνα 1.5:** Προϊόντα διαφόρων εφαρμογών κατασκευασμένα από αλούμινα.

Τα παραπάνω προϊόντα αποτελούν ένα μικρό δείγμα των διαφορετικών χρήσεων της αλουμίνης και των διαφορετικών τρόπων επεξεργασίας της. Για παράδειγμα το μέγεθος των κόκκων της μπορεί ποικίλει από cm έως μm ανάλογα με την εφαρμογή, η οποία μπορεί να είναι από μια κατασκευή κτιρίων έως την κατασκευή πυρίμαχων μονολιθικών. Αν θέλαμε να ταξινομήσουμε τις εφαρμογές της αλουμίνης θα μπορούσαμε να ορίσουμε τις ακόλουθες κατηγορίες.

#### 1.1.6.1 Εφαρμογές Βασισμένες στη Σκληρότητα

Η αλούμινα συμπεριλαμβάνεται στα υλικά υψηλής σκληρότητας και αντοχής με αποτέλεσμα να εμφανίζει υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, στις εκδορές και γενικά σε μηχανικές φθορές. Η ιδιότητά της αυτή την κατατάσσει στην κατάλληλη κατηγορία για χρήση

εσωτερικής επένδυσης σε σωλήνες και διαφόρων σκευών, καθώς και σε στεγανωτικούς δακτύλιους και στρόφιγγες ασφαλείας.

Η κρυσταλλική μορφή της αλούμινας ονομαζόμενη κορούνδιο αποτελεί την πιο συμπαγή δομή της, η οποία έχει και τη μεγαλύτερη σκληρότητα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται συχνά ως βοηθητικό εργαλείο κοπής μετάλλων ή ως εξάρτημα αλεστικών μηχανών όπως είναι στον τόρνο (Milling Media). Αντίστοιχα, η κονία του οξειδίου του αλουμινίου χρησιμοποιείται συχνά ως γυαλιστικό, λειαντικό, στιλβωτικό κ.α. Ενώ για την κατασκευή δοχείων τήξης μετάλλων, πυρότουβλων και μπουζί μηχανών εσωτερικής καύσης θα πρέπει η αλούμινα να βρίσκεται υπό τη μορφή λεπτών σωματιδίων συνδεδεμένων με πυριτικό γυαλί. Μια ακόμη χρήση της αλούμινας που οφείλεται στη μεγάλη σκληρότητα που έχει είναι η αντικατάσταση του γυαλιού, που χρησιμεύει ως προστατευτικό επίστρωμα σε λάμπες φθορίου και ηλεκτρονικές συσκευές, από πολυκρυσταλλική μορφή αλουμίνιας, ενώ λεπτό στρώμα  $Al_2O_3$  παράγεται ηλεκτροχημικά πάνω στο αλουμίνιο για να προστατεύει το μεταλλικό υπόστρωμα από διάβρωση. [4]

#### **1.1.6.2 Εφαρμογές Βασισμένες στη Θερμική Αντοχή**

Η αλουμίνα αποτελεί υλικό με υψηλή αντοχή σε θερμικούς αιφνιδιασμούς και μεγάλη χημική σταθερότητα λόγω της μεγάλης ελεύθερης ενέργειας που περικλύεται στη δομή της. Επομένως αποτελεί κατάλληλο συστατικό για υλικά τα οποία είναι εκτεθειμένα σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως τα πυρίμαχα σκεύη, οι σωλήνες σκαφιδίων των φούρνων και των εργαστηριακών οργάνων, καθώς και οι λαβίδες δειγμάτων, ενώ συχνή είναι και η χρήση της αλούμινας σε αισθητήρες θερμοκρασίας και σε άλλα βασικά μέρη οργάνων θερμικών δοκιμών. [4]

#### **1.1.6.3 Εφαρμογές Βασισμένες στις Μονωτικές και Διηλεκτρικές Ιδιότητες**

Η αλουμίνα έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως μονωτήρας υψηλού δυναμικού, σαν υπόστρωμα σε τρανζίστορ, ως αντίσταση σε μπουζί τροχοφόρων, αλλά και ως υλικό διασύνδεσης, λόγω της ιδιαιτερότητάς της να αποτελεί εξαιρετικό ηλεκτρικό μονωτή ακόμη και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες εξαιτίας της υψηλής ειδικής αντίστασης και της διηλεκτρικής αντοχής που έχει. [15],[16],[17]

Οι μικρές διηλεκτρικές απώλειες στις υψηλές συχνότητες σε συνδυασμό με την υψηλή διηλεκτρική σταθερά οδηγούν σε μία ακόμη χρήση της αλούμινας, η οποία τη θέλει να αποτελεί βασικό συστατικό σε συσκευές μικροκυμάτων (microwave components), όπως π.χ. οι κυματοδηγοί αλλά και σε εφαρμογές που απαιτούν από το υλικό υψηλή ανθεκτικότητα ακόμα και σε καταστάσεις διηλεκτρικής κατάρρευσης (dielectric breakdown). [18]

#### 1.1.6.4 Χημικές Εφαρμογές

Η αλούμινα είναι ένα υλικό το οποίο κατέχει θέση ακόμη και στη χημική βιομηχανία καθώς αποτελεί ένα εξαιρετικά προσροφητικό υλικό με ποικίλες εφαρμογές όπως η απομάκρυνση ιόντων φθορίου από το νερό. Αποτελεί επίσης βασικό συστατικό για την παρασκευή διαφόρων χημικών καθαριστικών όπως το θειικό άλας αλουμινίου (aluminium sulphate), το πολυχλωριούχο αλουμίνιο και το αργλικό νάτριο, ενώ μπορεί να αντικαταστήσει ικανοποιητικά την ισοπροπυλική αλκοόλη που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό των CD/DVD.

Η πρόσμιξη της αλούμινας με χρώμιο, μαγγάνιο και κοβάλτιο μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία ροζ χρώματος.

Ένα μικρό ποσοστό της αλούμινας χρησιμοποιείται για τη δημιουργία φαρμάκων και οδοντόκρεμας, όμως το μεγαλύτερο μέρος της το εκμεταλλευόμαστε για τη παρασκευή ζεόλιθων (zeolites), πηγμάτων επίστρωσης με τιτανία και επιβραδυντών πυρκαγιάς. Η χρωματογραφία αποτελεί μία ακόμη εφαρμογή της αλούμινας φερόμενη από τρεις διαφορετικούς τύπους (Brockmann types) οι οποίοι αναφέρονται σε διαφορετικό pH, βασικό (9,5), ουδέτερο και όξινο (4,5) σε διάλυμα νερού. [19],[4]

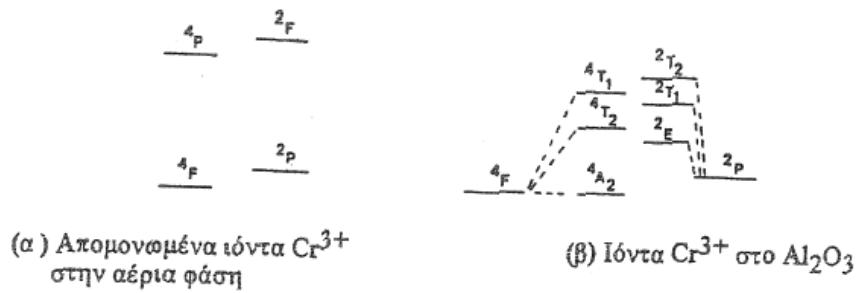
#### 1.1.6.5 Εφαρμογές στη Βιοϊατρική

Η υψηλής καθαρότητας αλούμινα μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς και σε εφαρμογές της βιοϊατρικής και συγκεκριμένα στον τομέα της οδοντιατρικής και της ορθοπαιδικής, ως υλικό πρόσμιξης σε ρητίνη αλλά και υπό τη μορφή εμφυτεύματος σε εγχειρήσεις αντικατάστασης ισχίου αντίστοιχα. [20]

#### 1.1.6.6 Εφαρμογές σε Ακτίνες Laser

Μια ακόμη χρήση του οξειδίου του αλουμινίου οφείλεται στην παραμόρφωση της δομής όταν περιέχει σε αυτή μικρή ποσότητα  $Cr^{3+}$  η οποία είναι στοιχείο μετάπτωσης. Ο εκφυλισμός αυτός οφείλεται στην παρουσία ιόντων  $O^{2-}$ . Στην πραγματικότητα, όμως, στη διεγερμένη κατάσταση βρίσκονται λιγότερα ιόντα. Το πρόβλημα αυτό έρχεται να λύσει η αλούμινα. Λόγω της δομής της, υπάρχει μηχανισμός όπου η αλληλεπίδραση των ιόντων  $Cr^{3+}$  με το πλέγμα, μέσω των πλησιέστερων ιόντων οξυγόνου στη σφαίρα ένταξης, απορροφά ενέργεια για να γίνει η 2E κατάσταση με αναστροφή πληθυσμού.





**Εικόνα 1.6:** Παράσταση των ενεργειακών σταθμών του χρωμίου ( $\text{Cr}^{3+}$ ).

Το ενεργειακό φράγμα  ${}^2\text{E}$  προς  ${}^4\text{A}_2$  αντιστοιχεί σε μήκος κύματος 694,3 nm στο κόκκινο τμήμα του φάσματος. Η πρόσπτωση ακτινοβολίας με αυτό το μήκος κύματος προάγει τη διαδικασία εξαναγκασμένης εκπομπής και τα ιόντα  ${}^2\text{E}$  του  $\text{Cr}^{3+}$  επιστρέφουν στην  ${}^4\text{A}_2$  κατάσταση, ενισχύοντας το διεγείρον κύμα (694,3 nm). Αυτή είναι μία δράση laser (ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας) με την οποία λειτουργούσε και η πρώτη διάταξη laser που κατασκευάστηκε το 1960. [21]

#### 1.1.6.7 Διάφορες Εφαρμογές

Η αλούμινα λόγω της υψηλής ποιότητας κρυστάλλων  $\text{Al}_2\text{O}_3$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη δημιουργία κοσμημάτων αποτελούμενα από ρουμπίνια και ζαφείρια τα οποία οφείλουν το χρώμα τους στη μικρή ποσότητα οξειδίων του χρωμίου και του τιτανίου αντίστοιχα. Μια ακόμη εφαρμογή του οξειδίου του αλουμινίου είναι υπό τη μορφή νιφάδας στις αυτοκινητοβιομηχανίες και στις βαφές που προκαλούν διακοσμητικά εφέ μέσω αντανάκλασης. Τέλος η αλούμινα χρησιμοποιείται ευρύτατα σε μηχανισμούς ρολογιών, σε βαλλιστικές θωρακίσεις, σε σωλήνες laser αερίου και συγκολλητικά υλικά. [1],[22]

## 1.2 Μη καταστροφικοί έλεγχοι

### 1.2.1 Τι είναι οι Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι

Οι έλεγχοι που πραγματοποιούνται για την αξιολόγηση των υλικών διακρίνονται σε 2 κατηγορίες: τους καταστροφικούς ελέγχους (ΚΕ) και τους μη καταστροφικούς ελέγχους (ΜΚΕ). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι εκείνες που καταστρέφουν το υλικό όταν αυτό υπόκειται στον έλεγχο (π.χ. θλίψη). Ενώ η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μεθόδους που δεν καταστρέφουν το υλικό κατά την εφαρμογή τους. [23]

Σύμφωνα με την American Society for NDT (ASNT), Μη Καταστροφικός Έλεγχος Υλικών λέγεται κάθε έλεγχος αντικειμένου που δεν αλλάζει τη μελλοντική του χρήση. Αποτελείται από ένα σύνολο διαδικασιών που σκοπό έχουν την εκτίμηση της δομικής ακεραιότητας υλικών ή κατασκευών ή ποσοτικοποίηση χαρακτηριστικών αντικειμένου οι οποίες δεν επηρεάζουν τη δομική κατάσταση του υπό εξέταση δοκιμίου. [25] Τα τελευταία χρόνια οι μη καταστροφικοί έλεγχοι αναπτύχθηκαν ραγδαία και χρησιμοποιούνται στον έλεγχο κατασκευών και εγκαταστάσεων, όσο και στον ποιοτικό έλεγχο κομματιών που παράγονται σε σειρά παραγωγής. Με τους μη καταστροφικούς ελέγχους των δομικών υλικών αποτιμάται και η δράση των περιβαλλοντικών φορτίων στις κατασκευές. Η δυνατότητα που παρέχεται με τους ΜΚΕ για επί τόπου εξέταση των δομικών υλικών, καθιστά τη χρήση τους ιδιαίτερα αποτελεσματική και επομένως αποτελούν ένα καινοτόμο εργαλείο για την παρακολούθηση και τη διατήρηση των κατασκευών, καθώς και για τον έλεγχο της ποιότητάς τους. [23]

Ο κύριος στόχος του ΜΚΕ είναι ο εντοπισμός ατελειών στη δομή του υλικού που οδηγούν στην αστοχία του και σε βλάβη της κατασκευής στην οποία ανήκει. Τέτοιες ατέλειες είναι οι ρωγμές, η ύπαρξη πόρων και φυσαλίδων στο εσωτερικό του υλικού, η διάβρωση, η αποκόλληση των διαφόρων επιφανειών σε σύνθετα υλικά. Η γνώση τέτοιων δεδομένων, μπορεί να αποβεί καταλυτική στη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη συνολική αποδοτικότητα των δομών. Επιπλέον οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται και για τον προσδιορισμό της δομής και της σύνθεσης του υλικού, καθώς και για τον προσδιορισμό αρκετών εκ των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού όπως ελαστικότητα, σκληρότητα, αντοχή και αγωγιμότητα. Τέλος χρησιμοποιούνται και για τον υπολογισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των υλικών, ενώ πλήθος εφαρμογών παρατηρούνται και για ιατρικούς σκοπούς με τη μορφή υπέρηχων, ακτίνων Χ και ενδοσκοπήσεων. [24]

### 1.2.2 Ιστορική Ανασκόπηση των ΜΚΕ

Οι μέθοδοι των μη καταστροφικών ελέγχων είναι ευρέως γνωστές εδώ και μερικές δεκαετίες. Με τη πάροδο των ετών η τεχνολογική πρόοδος οδήγησε στη ραγδαία ανάπτυξη των διαφόρων τεχνικών καθώς και της οργανολογίας.

Το 1854 ένα δυστύχημα από αστοχία λέβητα με 21 θύματα και 50 τραυματίες στο Hartford του Connecticut, οδήγησε 10 χρόνια μετά, στην ψήφιση του νόμου για υποχρεωτικό ετήσιο έλεγχο των λεβήτων.

Ο ΜΚΕ ξεκίνησε να αναγνωρίζεται σαν μια ανεξάρτητη τεχνολογία κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, κυρίως λόγω της ίδρυσης του οργανισμού American Industrial Radium και X-Ray το 1941, ο οποίος σήμερα είναι γνωστός ως Αμερικανικός Οργανισμός για ΜΚΕ (American Society for Nondestructive Testing, Inc. -ASNT).

Ο πρωτεύων στόχος ήταν μόνο ο εντοπισμός ασυνεχειών, χωρίς έμφαση στη διαστασιολόγησή τους. Ο πόλεμος, όμως, επιτάχυνε την ανάγκη για υψηλότερη ακρίβεια στην εκτίμηση των διαστάσεων των ασυνεχειών. Στις αρχές του 1970, μια σημαντική αλλαγή συντελέστηκε στον τομέα των ΜΚΕ. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία του, οδήγησαν στη δυνατότητα εντοπισμού ακόμη μικρότερων ασυνεχειών, γεγονός που έκανε επιτακτική την ανάγκη θέσπισης κωδικών αποδοχής βασισμένων στις διαστάσεις τους και στον κίνδυνο αστοχίας του τμήματος στο οποίο εντοπιζόταν. Επιπλέον, η θραυστομηχανική, έδωσε τη δυνατότητα πρόβλεψης της πιθανότητας αστοχίας μιας ρωγμής προσδιορισμένου μεγέθους κάτω από συγκεκριμένα φορτία, όταν οι ιδιότητες της σκληρότητας του υλικού κατασκευής ήταν γνωστές. Πλέον υλικά με γνωστές ασυνέχειες μπορούσαν να συνεχίσουν τη λειτουργία τους μέχρι ένα όριο μεγέθους πάνω από το οποίο εμφανιζόταν ο κίνδυνος αστοχίας.

Η ανάγκη για ποσοτική πληροφορία σχετικά με το μέγεθος της ασυνέχειας ήταν ιδιαίτερως σημαντική στις βιομηχανίες άμυνας και πυρηνικής ενέργειας που οδήγησε στην εισαγωγή μιας καινούριας αρχής μηχανικής και έρευνας, της Ποσοτικής Μη Καταστροφικής Αξιολόγησης ή (Quantitative Nondestructive Evaluation-QNDE). Παράλληλα ξεκίνησαν παγκοσμίως μια σειρά ερευνητικών προγραμμάτων, όπως το Ινστιτούτο Έρευνας στο Charlotte στη Νότια Καρολίνα, το Ινστιτούτο Fraunhofer για ΜΚΕ στο Saarbrucken στη Γερμανία και το κέντρο ΜΚΕ στο Harwell στην Αγγλία.

Σήμερα ο ΜΚΕ γνωρίζει εκθετική πρόοδο. Η εξέλιξή του είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ασφάλεια, την ανάπτυξη νέων υλικών και τη ζήτηση για μεγαλύτερη αξιοπιστία προϊόντων. Οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στην κατασκευή, την αεροδιαστημική βιομηχανία, τις πυρηνικές εφαρμογές, στη βιομηχανία και την εξερεύνηση του διαστήματος δεν θα ήταν δυνατές χωρίς την εφαρμογή των ΜΚΕ. [27]

### 1.2.3 Κατηγορίες Μεθόδων ΜΚΕ

Οι μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογής. Ο όρος *μέθοδος* αναφέρεται στο σύνολο των εξειδικευμένων διαδικασιών, τεχνικών και πειραματικού εξοπλισμού που σχετίζεται με κάθε τεστ μη καταστροφικού ελέγχου. Συνήθως υπάρχουν διάφορες τεχνικές ή διαδικασίες σχετιζόμενες με κάθε μέθοδο. [26]

Ο οργανισμός The National Materials Advisory Board (NMAB) Ad Hoc Committee on Nondestructive Evaluation έχει υιοθετήσει ένα σύστημα το οποίο κατατάσσει τις μεθόδους σε έξι κύριες κατηγορίες:

- Οπτικός έλεγχος (visual),
- Έλεγχος με διεισδυτικές ακτινοβολίες (penetrating radiation),
- Μαγνητικός- ηλεκτρικός έλεγχος (magnetic-electrical),
- Έλεγχος με μηχανικές δονήσεις (mechanical vibration),
- Θερμικοί έλεγχοι (thermal),
- Χημικοί – Ηλεκτροχημικοί έλεγχοι (chemical-electrochemical). [28]

Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε όλες τις μεθόδους ΜΚΕ στις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται και τις βλάβες που εντοπίζουν.

**Πίνακας 1.4:** Μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου και τυπικές εφαρμογές. [24]

Μέθοδος ΜΚΕ	Βλάβες που εντοπίζονται	Τυπικές Εφαρμογές
<b>Οπτικός Έλεγχος</b>	Επιφανειακές βλάβες ορατές δια γυμνού οφθαλμού ή μέσω μεγεθυντικών φακών και καμερών.	Έλεγχος αεραγωγών σωληνώσεων, δεξαμενών, αντιδραστήρων.
<b>Διεισδυτικά υγρά</b>	Επιφανειακές ρωγμές.	Χρησιμοποιείται σε στερεά και μη πορώδη υλικά από μέταλλο, γυαλί, κεραμικά υλικά, πολυμερή και καουτσούκ.
<b>Υπέρηχοι</b>	Επιφανειακές και εσωτερικές ρωγμές, πόροι, αποκολλήσεις σύνθετων υλικών, μη συνοχή με ανόμοια υλικά.	Εφαρμογή σε μεταλλικά και μη μεταλλικά, σύνθετα υλικά. Έλεγχος συγκολλήσεων, χυτών και πρεσσαριστών εξαρτημάτων, αξόνων. Προσδιορισμός πάχους και μηχανικών ιδιοτήτων εξαρτημάτων.
<b>Μαγνητικά σωματίδια</b>	Επιφανειακές και υποεπιφανειακές ρωγμές σε μικρό βάθος.	Εφαρμογή σε εξαρτήματα από σιδηρομαγνητικό υλικό όπως σωληνώσεις, συγκολλήσεις, άξονες, γρανάζια, μέρη μηχανών.
<b>Ραδιογραφία</b>	Πόροι, ρωγμές.	Εφαρμογή σε μεταλλικά και μη μεταλλικά, σύνθετα υλικά. Έλεγχος συγκολλήσεων, χυτών και πρεσσαριστών εξαρτημάτων.
<b>Δινορρεύματα</b>	Επιφανειακές και υποεπιφανειακές ρωγμές σε μικρό βάθος, πόροι, διάβρωση, αλλαγές στη σύσταση του υλικού.	Εφαρμογές σε αγωγίμα υλικά, επιφανειακός έλεγχος σωληνώσεων, μεταλλικών φύλλων και άλλων εξαρτημάτων καθώς και μέτρηση αγωγιμότητας και πάχους.
<b>Θερμογραφία</b>	Επιφανειακές ρωγμές, πόροι, αποκολλήσεις σύνθετων υλικών.	Εφαρμογές σε μεταλλικά, σύνθετα και κεραμικά υλικά. Έλεγχος σωστής λειτουργίας συσκευών και μονώσεων σε κατασκευές και κτήρια.
<b>Ακουστική Εκπομπή</b>	Επιφανειακές και εσωτερικές ρωγμές, διάβρωση, αποκολλήσεις σύνθετων υλικών.	Εφαρμογές σε μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά, σύνθετα, κεραμικά, πολυμερή, ξύλο, μπετόν. Έλεγχος υλικών, δεξαμενών, δοχείων πίεσεως, μεταλλικών κατασκευών, αεροσκαφών.

Κάθε μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί από πέντε βασικούς παράγοντες:

1. Την πηγή ενέργειας ή το μέσο για τη διερεύνηση του υλικού (π.χ. ακτίνες Χ, κύματα υπερήχων και θερμική ακτινοβολία).
2. Τη φύση των σημάτων και την εικόνα ή υπογραφή που προκύπτει από την αλληλεπίδραση με το αντικείμενο (εξασθένιση των ακτίνων Χ, ανάκλαση των υπερήχων).
3. Το μέσο ανίχνευσης ή απεικόνισης των παραγόμενων σημάτων (π.χ. πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι).
4. Τις μεθόδους καταγραφής των σημάτων (ραδιογράφος, παλμογράφος, κάμερα υπερύθρου).
5. Την ερμηνεία των αποτελεσμάτων (ποσοτική ή ποιοτική).

Κάθε μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου μπορεί να μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις παρακάτω παραμέτρους των υλικών:

- Ασυνέχειες και διαχωρισμοί (ρωγμές, αποκολλήσεις, εγκλείσματα κ.ά.).
- Δομή (κρυσταλλικό πλέγμα, μέγεθος κόκκου, κ.ά.).
- Διαστάσεις και μετρολογία (πάχος, διάμετρος, κ.ά.).
- Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες (αγωγιμότητα, μέτρο ελαστικότητας, κ.ά.).
- Σύνθεση και χημική ανάλυση (ταυτοποίηση κράματος, προσμείξεις κ.ά.).
- Στατική και δυναμική απόκριση (εναπομένουσες τάσεις, ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής, φθορά από τριβή κ.ά.).
- Ανάλυση υπογραφής «signature analysis» (συχνότητα φάσματος, περιεχόμενο εικόνας κ.ά.).
- Μη φυσιολογικές κατανομές θερμοκρασίας. **[28]**

Μια μέθοδος ή τεχνική, λόγω της φύσης και της λειτουργίας της, μπορεί να είναι από ιδανική έως άχρηστη για την εφαρμογή που έχουμε υπόψη μας. Η αξία κάθε μεθόδου εξαρτάται από το είδος του προβλήματος. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι δεν μπορούμε να εντοπίσουμε μία και μοναδική μέθοδο ΜΚΕ που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις εφαρμογές, ανεξάρτητα από την υπό εξέταση κατασκευή και τον τύπο της βλάβης. Αρκετές φορές είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί παραπάνω από μία μέθοδος ώστε να έχουμε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για τον έλεγχο διάφορων τύπων ατελειών. **[29]**

#### 1.2.4 Πότε Χρησιμοποιούμε ΜΚΕ

Οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται σε όλα τα στάδια της ζωής ενός στοιχείου. [37]

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

Οι σύγχρονες μέθοδοι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται από τους κατασκευαστές για να

- εξασφαλίσουν την ακεραιότητα των προϊόντων και κατά συνέπεια την αξιοπιστία τους,
- αποφύγουν βλάβες και να αποτρέψουν ατυχήματα διασφαλίζοντας την ανθρώπινη ζωή,
- διασφαλίζουν κέρδος για τον κατασκευαστή,
- διασφαλίζουν την ικανοποίηση του καταναλωτή και την αξιοπιστία του κατασκευαστή,
- βοηθούν στη σχεδίαση βελτιωμένων προϊόντων,
- ελέγχουν την παραγωγική / κατασκευαστική διαδικασία,
- μειώνουν τα κατασκευαστικά κόστη,
- εξασφαλίζουν το ποιοτικό επίπεδο, και
- εξασφαλίζουν τη λειτουργική ικανότητα της παραγωγικής διαδικασίας. [26]

#### 1.2.5 Εφαρμογές των Μεθόδων του Μη Καταστροφικού Ελέγχου

Η μέθοδος των μη καταστροφικών ελέγχων αποτελεί πολλές φορές αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας παραγωγής και της διάρκειας λειτουργίας μιας κατασκευής καθώς επιτρέπει την αποτροπή ζημιών και τον έλεγχο “τυφλών” ατελειών που δεν θα μπορούσαν να εντοπισθούν ειδάλλως. Κατασκευές οι οποίες υπόκεινται σε τέτοιους ελέγχους είναι ο σκελετός ή η επένδυση των αεροσκαφών, οι υπόγειες σωληνώσεις, οι κατασκευές από σκυρόδεμα και ο σπλισμός τους, τα πιεστικά δοχεία χημικών αντιδραστηρίων, τα συρματόσχοινα γεφυρών, κ.ά.

Οι ΜΚΕ περιλαμβάνονται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών εφαρμογών καταλαμβάνοντας θέσεις σε διάφορους τομείς, όπως

- στην αυτοκινητοβιομηχανία (μηχανή, πλαίσιο),
- στην αεροδιαστημική (πλαίσια αεροπλάνων & διαστημοπλοίων, πύραυλοι, κινητήρες τζετ),

- στις κατασκευές (κτίρια, γέφυρες),
- στη βιομηχανία (μηχανικά εξαρτήματα, καλούπια, πρέσες),
- σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας (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 κλπ.).[31]

### 1.2.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των ΜΚΕ

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

1. Δυνατότητα εξέτασης επί τόπου.
2. Διάφοροι έλεγχοι μπορούν να διεξάγονται ταυτόχρονα ή εν σειρά.
3. Διατήρηση της ακεραιότητας της εξεταζόμενης δομής.
4. Εφαρμόζονται στο 100% της παραγωγής ή σε δείγμα.
5. Προσαρμόζονται εύκολα.
6. Παρέχουν τη δυνατότητα επανάληψης.
7. Εφαρμόζονται σε εξαρτήματα και κατασκευές που βρίσκονται σε λειτουργία.
8. Μέτρηση συσσώρευσης ελαττωμάτων σε υλικά εν χρήσει.
9. Εξακρίβωση μηχανισμού κόπωσης.
10. Φορητά μηχανήματα ελέγχου.
11. Χαμηλό εργατικό κόστος σε εφαρμογές επαναληπτικού χαρακτήρα.
12. Γρήγορη καταγραφή των αποτελεσμάτων.
13. Παροχή ποιοτικών και ποσοτικών αποτελεσμάτων. [23],[32]

Οι ΜΚΕ όμως παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα, εκ των οποίων τα βασικότερα είναι τα εξής:

1. Ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού.
2. Αδυναμίες σε εφαρμογές με πολύπλοκη δομή και χρήση διάφορων υλικών.
3. Έλλειψη σχετικών προτύπων για την εφαρμογή τους που καθιστά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων δύσκολη.
4. Μερικές από τις μεθόδους απαιτούν υψηλό κόστος επενδύσεως σε ειδικά μηχανήματα.
5. Λήψη μέτρων ακτινοπροστασίας σε ορισμένες περιπτώσεις. [23],[32]



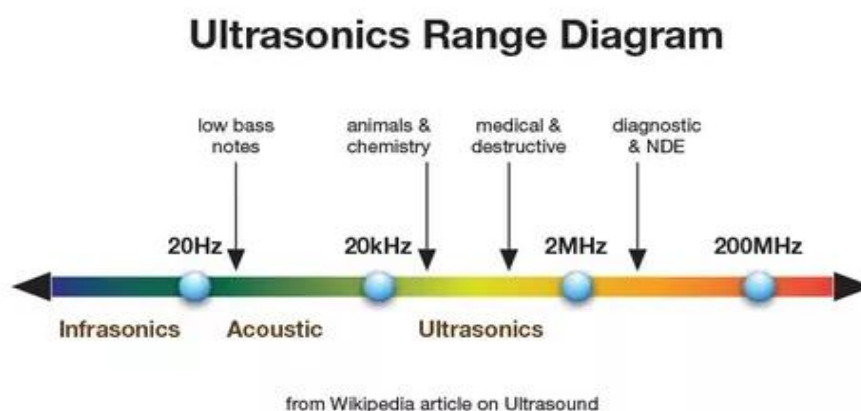
Στον παρακάτω πίνακα αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου ξεχωριστά.

**Πίνακας 1.5:** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για κάθε μέθοδο ΜΚΕ. [28]

<b>Μέθοδος ΜΚΕ</b>	<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
<b>Ραδιογραφία</b>	Ανιχνεύει εσωτερικές ατέλειες, εφαρμόσιμη για μεγάλο εύρος γεωμετρικών σχημάτων, μόνιμο αρχείο των αποτελεσμάτων	Υψηλό κόστος, χαμηλή ευαισθησία σε λεπτές στρωματικές ατέλειες, όπως κλειστές ρωγμές κόπωσης και αποκολλήσεις, πιθανός κίνδυνος για την υγεία
<b>Διεισδυτικά υγρά</b>	Χαμηλό κόστος, εύκολη εφαρμογή, φορητότητα, εύκολη ερμηνεία των αποτελεσμάτων	Το ελάττωμα πρέπει να είναι ανοικτό σε μια προσιτή επιφάνεια, το επίπεδο ανιχνευσιμότητας εξαρτάται από το χειριστή
<b>Δινορεύματα</b>	Μέτριο κόστος, αυτοματοποίηση, φορητότητα	Ανιχνεύει ατέλειες που μεταβάλουν την αγωγιμότητα των μετάλλων, μικρό βάθος διείσδυσης, ευαίσθητη στη γεωμετρία του δοκιμίου
<b>Μαγνητικά σωματίδια</b>	Απλή, χαμηλό κόστος, ανιχνεύει επιφανειακές και υποεπιφανειακές ατέλειες	Εφαρμόσιμη μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά, απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας, συχνά παρατηρούνται άσχετες ενδείξεις, εξαρτάται από το χειριστή
<b>Θερμογραφία</b>	Πλήρους πεδίου, σε πραγματικό χρόνο, θερμική απεικόνιση που ερμηνεύεται εύκολα	Δυσκολία ελέγχου της εκπεμπτικότητας της επιφάνειας, μικρή διακριτική ικανότητα ανάμεσα σε ατέλειες διαφορετικών τύπων
<b>Υπέρηχοι</b>	Εξαιρετικό βάθος διείσδυσης, καλή ευαισθησία και ανάλυση, μόνιμο αρχείο των αποτελεσμάτων	Απαιτεί ακουστικό μέσο σύζευξης με το εξάρτημα, χαμηλής ταχύτητας, η ερμηνεία των δεδομένων είναι συχνά δύσκολη

### 1.2.7 Γενικά για τους Υπερήχους

Ηχητικά κύματα με συχνότητες μεγαλύτερες από τις τιμές του φάσματος της ανθρώπινης ακοής (που βρίσκεται μεταξύ 20 Hz και 20 kHz) ονομάζονται υπέρηχοι. Ήχοι με συχνότητα μικρότερη από 20Hz χαρακτηρίζονται ως υπόηχοι ενώ ήχοι με συχνότητα μεγαλύτερη από 20kHz χαρακτηρίζονται ως υπέρηχοι. Από τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής ( $\lambda = c / f$ ) και με δεδομένο ότι στον αέρα η ταχύτητα διάδοσης των ηχητικών κυμάτων είναι περίπου 330 m /s προκύπτει ότι η ακουστική περιοχή περιλαμβάνει μήκη κύματος από 16.5 m έως 16.5 mm. Οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται στην ιατρική και κτηνιατρική για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς, στη βιομηχανία για συγκόλληση πλαστικών, καθαρισμό αντικειμένων και μη καταστροφικό έλεγχο υλικών και αντικειμένων. [33]



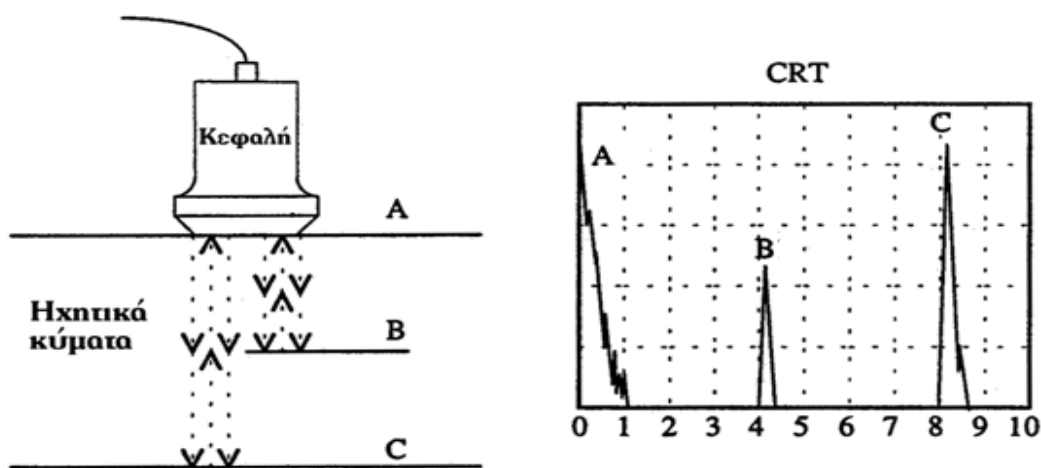
Εικόνα 1.7: Το ηχητικό φάσμα και οι περιοχές του.

Η ενέργεια των υπερήχων είναι ακουστική ενέργεια. Έτσι, οι αρχές της ακουστικής εφαρμόζονται όταν μελετούμε τους υπερήχους. Ο υπέρηχος είναι λοιπόν παρόμοιος φύσης με τον ακουστό ήχο, έχει όμως πολύ μικρότερα μήκη κύματος και έτσι είναι πιο κατάλληλος για την ανίχνευση ατελειών στα υλικά. Αυτά τα μικρότερα μήκη κύματος είναι που κάνουν τον υπέρηχο εξαιρετικά χρήσιμο για τον μη καταστροφικό έλεγχο και χαρακτηρισμό υλικών και δομών. Ο μη καταστροφικός χαρακτηρισμός των υλικών με τη μέθοδο των υπερήχων χρησιμοποιεί ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας για την ανίχνευση εσωτερικών ατελειών ή βλάβης. Τα κύματα υπερήχων που χρησιμοποιούνται στον μη καταστροφικό έλεγχο ποικίλουν και η συχνότητά τους είναι μεγαλύτερη από μερικές εκατοντάδες kHz. [28]

Πρακτικά στη μέθοδο των υπερήχων χρησιμοποιούμε μια κεφαλή με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, για εκπομπή και λήψη παλμών υπερήχων, «υπερηχητικός μεταλλάκτης». Ο μηχανισμός έχει ως εξής: ο υπέρηχος εκπέμπεται από την κεφαλή και μεταδίδεται μέσα στο εξεταζόμενο υλικό μέχρι που προσκρούει σε επιφάνεια αέρα ή διαχωριστική επι-

φάνεια υλικών διαφορετικής πυκνότητας κάθετων στη δέσμη υπερήχων, ανακλάται και επιστρέφοντας απεικονίζεται στην οθόνη της συσκευής. Η ένδειξη έχει σχέση με το χρόνο που κάνουν οι παλμοί, από την πρόσκρουση επί του ελαττώματος έως την επιστροφή τους, δηλαδή όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο παλμών, τόσο περισσότερο απέχει το εμπόδιο (οριζόντιος άξονας). Επίσης έχει σχέση και με το μέγεθος του ελαττώματος, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του ελαττώματος τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ισχύς ή ένταση του σήματος που θα λάβουμε ως ένδειξη (κάθετος άξονας).

Για να μπορέσει ο υπέρηχος να διαδοθεί στο υλικό, ανάμεσα στην κεφαλή και στο δοκίμιο παρεμβάλλεται ένα συνδετικό υλικό, π.χ. γράσο, βαζελίνη, λάδι, γλυκερίνη ή και νερό, επειδή ο υπέρηχος δυσκολεύεται να μεταδοθεί μέσω του αέρα.



**Εικόνα 1.8:** Αναπαράσταση λειτουργίας υπερήχων.

Το παραπάνω σχήμα αναπαριστά τη βασική λειτουργία των υπερήχων. Η ηχητική ενέργεια εκπέμπεται από την κεφαλή στο δοκίμιο στην περιοχή "Α" παράγοντας μία ηχώ που απεικονίζεται στην οθόνη σαν σημείο Α, αρχικός παλμός (initial pulse – I.P.). Μία ποσότητα ήχου ανακλάται από το σφάλμα στο "Β" και το αποτέλεσμα απεικονίζεται στο Β. Ο εναπομένον ήχος συνεχίζει μέσα από το δοκίμιο και ανακλάται από το οπίσθιο τοίχωμα "C" και η ηχώ εμφανίζεται στο σημείο C της οθόνης (backwall-echo – BW.E.). [31]

### 1.2.8 Ιστορική Αναδρομή της Χρήσης των Υπερήχων

Ο έλεγχος των υλικών με τη βοήθεια του ήχου είναι μια από τις παλαιότερες μη καταστροφικές μεθόδους δοκιμής.

Όλοι γνωρίζουμε ότι οι αγγειοπλάστες και οι κεραμοποιοί δοκιμάζουν τα προϊόντα τους χτυπώντας τα ελαφρά και ακούγοντας τον ήχο που παράγεται. Για παράδειγμα, η παρουσία σχετικά μεγάλων ατελειών σε χυτά αντικείμενα ή η σημαντική ελάττωση του πάχους των τοιχωμάτων των σωληνώσεων, λόγω διάβρωσης, αλλοιώνουν τον ήχο που θα παρήγαγαν εάν ήταν τέλεια. Αυτή η μέθοδος ελέγχου είναι πολύ πρωτόγονη και για αυτό έγιναν προσπάθειες να αντικατασταθεί ο ανθρώπινος παράγοντας, από όργανα, ακριβέστερα και πιο αξιόπιστα.

Οι πρώτες απόπειρες παραγωγής υπερήχων έγιναν με διατάξεις ακροφυσίων πεπιεσμένου αέρα καθώς και με υψίσυχνες ηλεκτρικές εκκενώσεις. Το 1915 ο Paul Langevin έδωσε οριστική λύση στο πρόβλημα της παραγωγής και της ανίχνευσης των υπερήχων κάνοντας χρήση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου που ανακαλύφθηκε από τους Pierre & Jacques Currie. Την περίοδο 1929-1935 ο Ρώσος Sokolon ασχολήθηκε με την ανίχνευση ελαττωμάτων σε μεταλλικές πλάκες προσβάλλοντάς τες με μια δέσμη υπερήχων και μετρώντας την ένταση που μεταδίδεται σε κάθε σημείο τους και συγκρίνοντάς την με αυτή που μεταδίδεται από μια περιοχή χωρίς ελαττώματα. Το 1931 ο Milhauser απέκτησε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, όπου χρησιμοποιώντας ζεύγος κεφαλών υπερήχων κατάφερε να ανιχνεύσει ατέλειες σε στερεά αντικείμενα με τη μέθοδο (Pitch-Catch). Λίγο αργότερα το 1942 ο Firestone και 1945 ο Simons εφάρμοσαν τη μέθοδο παλμού-ήχου (Pulse-Echo) για τη μέτρηση του πάχους μεταλλικών υλικών.

Από τότε, έχουν γίνει πολλές βελτιώσεις στις συσκευές παραγωγής υπερήχων, με αποτέλεσμα το ευρύ πεδίο εφαρμογών τους, όπως στον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών, στη μεταλλουργία, στις υποβρύχιες τηλεπικοινωνίες, στη βιολογία, στην ιατρική κλπ.  
[31]

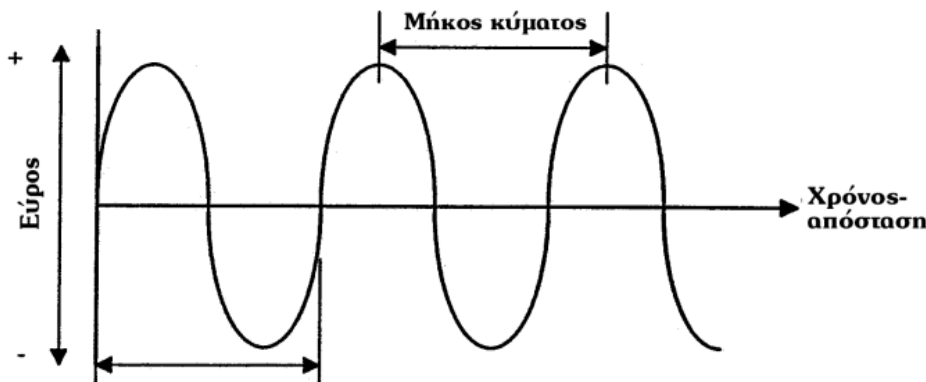
### 1.2.9 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Μηχανικών Κυμάτων

Τα κύματα στην επιφάνεια της θάλασσας, τα σεισμικά και τα ηχητικά κύματα αποτελούν καθημερινά παραδείγματα μηχανικών κυμάτων που όλοι μας έχουμε παρατηρήσει. Γενικά κύμα είναι η διάδοση των περιοδικών κινήσεων (ταλαντώσεων) που κάνουν τα στοιχειώδη σωματίδια ενός υλικού γύρω από τη θέση ισορροπίας τους και που έχουν σαν αποτέλεσμα να μεταδίδουν την ταλάντωσή τους αυτή από σημείο σε σημείο με ορισμένη ταχύτητα. Επομένως κατά τη διάδοση ενός κύματος μεταφέρεται ενέργεια και ορμή από το ένα σημείο του μέσου στο άλλο και όχι ύλη. Για τη δημιουργία μηχανικού κύματος χρειάζονται μια πηγή που δημιουργεί τη διαταραχή και ένα μέσο για τη διάδοση αυτής.

Ο υπέρηχος ως κύμα ελαστικότητας έχει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- Την ταχύτητα διάδοσής του,  $c$ , (m/s) .
- Το μήκος κύματος, δηλαδή την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ενός κύματος,  $\lambda$ , (m).
- Τη συχνότητα του κύματος, δηλαδή τον αριθμό των κύκλων ανά δευτερόλεπτο,  $f$ , (Hz) .
- Την περίοδο του κύματος, δηλαδή το χρόνο που απαιτείται για ένα πλήρη κύκλο,  $T$ , (s).

Από τα παραπάνω καταλήγουμε στη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής. Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος ισούται με το γινόμενο του μήκους κύματος επί της συχνότητας του κύματος:  $c = \lambda * f$  .



**Εικόνα 1.9:** Στιγμιότυπο κύματος που αναπαριστά το εύρος της ταλάντωσης των μορίων.

Η συχνότητα μετράται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο (cps) ή σε Hz.

1 Hz = 1 κύκλος / δευτερόλεπτο

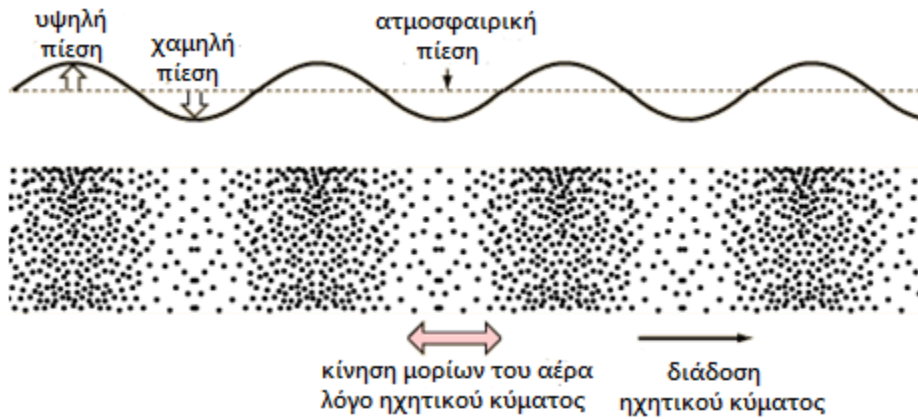
1 KHz = 1000 κύκλοι / δευτερόλεπτο =  $10^3$  Hz

1 MHz = 1000000 κύκλοι / δευτερόλεπτο =  $10^3$  KHz =  $10^6$  Hz. [27]

### 1.2.10 Παραγωγή και Ανίχνευση Ηχητικών Κυμάτων

Ο ήχος ή αλλιώς ηχητικό κύμα προκαλείται από μηχανικές δονήσεις. Για να μεταδοθεί ο ήχος, πρέπει να υπάρχει κάποιο μέσο που θα διατηρήσει τις μηχανικές δονήσεις. Άρα, ο ήχος είναι ένα μηχανικό κύμα που μεταδίδεται σε στερεά, σε υγρά και σε αέρια αλλά δεν μπορεί να μεταδοθεί στο κενό.

Ο ήχος μεταδίδεται υπό μορφή ζωνών συμπίεσης (compression zone) και υποπίεσης (rarefied zone) των μορίων του σώματος που τον φέρει όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. [31]



**Εικόνα 1.10:** Μετατόπιση των σωματιδίων για ένα δεδομένο υπερηχητικό κύμα.

Η ανίχνευση των υπερήχων βασίζεται στη μετατροπή της ενέργειας του ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου σε μηχανική ενέργεια (ηχητικά κύματα) και αντίστροφα. [33]

Συγκεκριμένα η παραγωγή και ανίχνευση των υπερήχων γίνεται με διάφορες μεθόδους μετατρέποντας μια μορφή ενέργειας σε μηχανική. Οι πιο γνωστές είναι οι διατάξεις παραγωγής υπερήχων χρησιμοποιώντας ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα (Electromagnetic-Acoustic Transducer, EMATS), οι διατάξεις με παλμικά laser και οι διατάξεις με υλικά που εμφανίζουν το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού (Piezo-electric effect, Currie 1980). Εξ' αυτών, η μηχανική μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για μη καταστροφικούς ελέγχους, επειδή δεν μπορεί να δώσει υπερήχους υψηλών συχνοτήτων. [31],[35]

### 1.2.10.1 EMATS

Από την ηλεκτροδυναμική είναι γνωστό ότι μπορούμε να παράγουμε δύναμη από ένα ρευματοφόρο αγωγό όταν αυτός βρίσκεται σε μαγνητικό πεδίο. Αυτό το φαινόμενο μπορούμε να το εκμεταλλευτούμε ώστε να δημιουργήσουμε ελαστικά κύματα σε ένα δοκίμιο. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορες διατάξεις πηνίων διαφόρων μορφών σε κατάλληλο μαγνητικό πεδίο ώστε να παράγουμε ελαστικά κύματα, είτε διαμήκη είτε εγκάρσια. Για την ανίχνευση αυτών των κυμάτων χρησιμοποιείται το αντίστροφο φαινόμενο, δηλαδή το ελαστικό θέτει σε κίνηση τον αγωγό οπότε εμφανίζεται ηλεκτροδυναμική δύναμη στα άκρα του αγωγού. Η μέθοδος της μαγνητοσυστολής δεν έχει ευρεία εφαρμογή στην πράξη λόγω περιορισμών στην τεχνολογία. [31],[35]

### 1.2.10.2 Μαγνητοσυστολή

Τα υλικά που εμφανίζουν το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής μετατρέπουν μαγνητική ενέργεια σε μηχανική και αντίστροφα. Καθώς ένα υλικό που εμφανίζει το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής μαγνητίζεται, μεταβάλλει τις διαστάσεις του, παρατηρείται δη-

λαδή μια αλλαγή του μήκους του ανά μονάδα μήκους. Αντιθέτως αν μια εξωτερική δύναμη παράγει μια πίεση σε υλικό που εμφανίζει το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, η μαγνητική κατάσταση του υλικού θα αλλάξει. Αυτή η αμφίδρομη σχέση μεταξύ των μαγνητικών και μηχανικών καταστάσεων ενός υλικού που εμφανίζει το φαινόμενο αυτό παρέχει μια ικανότητα μεταγωγής που χρησιμοποιείται για την κατασκευή πομπών και δεκτών υπερήχων. [35]

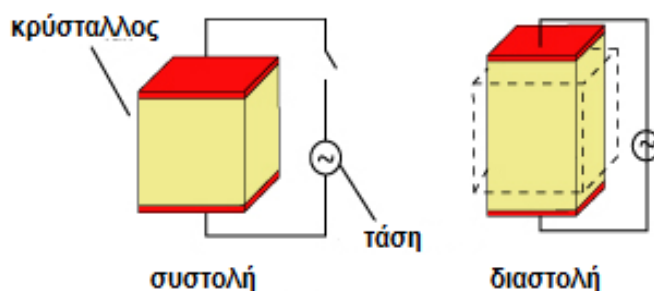
### 1.2.10.3 Laser

Γενικά υπάρχουν 2 τρόποι δημιουργίας ελαστικών κυμάτων με Laser. Με τον πρώτο τρόπο προκαλούμε θερμική εκτόνωση στην περιοχή εστίασης του Laser, οπότε αυτή η θερμική διαταραχή διαδίδεται σαν ελαστικό κύμα μέσα στο υλικό. Με το δεύτερο τρόπο χρησιμοποιώντας ένα πιο ισχυρό laser προκαλούμε επιφανειακή εξάχνωση στο υλικό οπότε έχουμε μεταβολή στην επιφανειακή τάση. Για τη λήψη του σήματος χρησιμοποιούνται οπτικές τεχνικές με συμβολόμετρα. [35]

### 1.2.10.4 Πιεζοηλεκτρισμός

Τέλος, η βασικότερη μέθοδος παραγωγής υπερήχων, για το μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών, στηρίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο όπου η εκπομπή και η λήψη υπερήχων οφείλονται στη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αντίστροφα από ειδικούς κρυστάλλους .

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μια βασική ιδιότητα ορισμένων φυσικών ή συνθετικών κρυστάλλων, οι οποίοι όταν καταπονούνται εμφανίζουν ηλεκτρικά φορτία αντίθετου προσήμου στις απέναντι επιφάνειές τους δηλαδή τάση (δέκτης) και αντίστροφα, δηλαδή, όταν εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση (συνήθως εναλλασσόμενη) σε ένα κρύσταλλο τότε αυτός διαστέλλεται και συστέλλεται, παράγοντας δόνηση υψηλής συχνότητας (πομπός), όπως παρουσιάζεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.11: Πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος κατά τη συστολή και τη διαστολή του.

Η συχνότητα δόνησης ενός κρυστάλλου (ιδιοσυχνότητα) καθορίζεται από το πάχος του και την ταχύτητα που μεταδίδεται ο ήχος μέσα σε αυτόν και δίνεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{c}{2t} \quad (1)$$

όπου:  $f_0$  = ιδιοσυχνότητα υλικού,

$c$  = ταχύτητα διάδοσης ήχου στον κρύσταλλο, και

$t$  = πάχος κρυστάλλου (στον τύπο  $2t$  γιατί για  $t = \lambda/2$  έχουμε μέγιστη ταλάντωση).

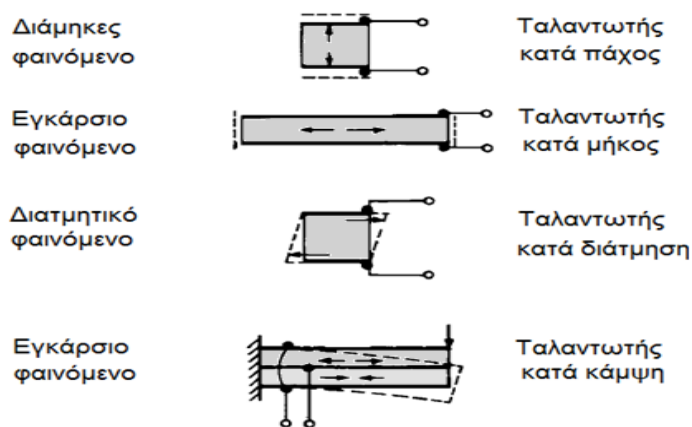
Οι γεννήτριες υπερήχων είναι ουσιαστικά πιεζοηλεκτρικά στοιχεία (κρύσταλλοι). Τα στοιχεία αυτά διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Φυσικής προέλευσης: Χαλαζίας  $\text{SiO}_2$ , Τουρμαλίνης.
2. Πολωμένα κεραμικά: Τιτανικό Βάριο  $\text{BaTiO}_3$ , Ζirkονικός Μόλυβδος  $\text{PbZrO}_3$ , Ζirkονιοκοιτιτανικός Μόλυβδος PZT, Μετανιοβικός Μόλυβδος  $\text{PbNb}_2\text{O}_6$ .
3. Τεχνητά παρασκευασμένοι κρύσταλλοι: Θεϊκό Λίθιο  $\text{LiSO}_4$ . **[31]**



#### 1.2.10.4.1 Μορφές Πιεζοηλεκτρικών Μετατροπέων

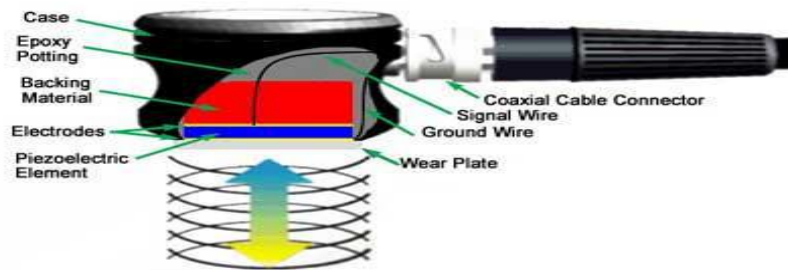
Οι πιεζοηλεκτρικοί εκπομποί και δέκτες ήχου έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και είναι δυνατόν να λειτουργούν είτε στον αέρα, είτε στο νερό, είτε σε στερεά. Η μορφή που έχουν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Στο παρακάτω σχήμα υπάρχει μία επισκόπηση των σημαντικότερων μορφών δονήσεων. [33]



**Εικόνα 1.12:** Διάφορες μορφές ταλαντώσεων που δημιουργούνται σε πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους.

#### 1.2.10.4.2 Κεφαλές Υπερήχων

Η λειτουργία των κεφαλών των υπερηχητικών (probes) στηρίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, εξού και το όνομα πιεζοηλεκτρικές κεφαλές. Στην πράξη οι κεφαλές κατασκευάζονται ως εξής: Ο κρύσταλλος τοποθετείται σε κατάλληλο περίβλημα-κέλυφος (case) ώστε να προστατεύεται και είναι σε απόλυτη επαφή με υλικό υποστήριξης-αποσβεστήρας (backing material), για να αποσβένονται ταχύτατα οι παλμοί του υπέρηχου. Ο αποσβεστήρας συνήθως είναι πλαστικό (epoxy). Η επιφάνεια εκπομπής του κρυστάλλου καλύπτεται από λεπτή πλάκα (wear plate) ακρυλικού υλικού (perspex), προκειμένου να διαφυλάσσεται ο κρύσταλλος από φθορά λόγω της τριβής των επιφανειών. Η ακρυλική πλάκα μπορεί να έχει και μορφή σφήνας εκτός από επίπεδη, και έτσι επιτυγχάνεται γωνιακή δέσμη υπερήχων. Επίσης έχουμε τους μεταλλικούς σπλισμούς (electrodes) που εφάπτονται με τον κρύσταλλο για να του μεταδίδουν την απαραίτητη τάση. Τέλος το ηλεκτρικό σήμα από και προς τον κρύσταλλο οδηγείται μέσω ομοαξονικού καλωδίου (coaxial cable), για αποφυγή παρεμβολών και ηλεκτρικών θορύβων όπως φαίνεται παρακάτω.



**Εικόνα 1.13:** Πιεζοηλεκτρική κεφαλή.

Οι κεφαλές υπερήχων κατασκευάζονται για μια ποικιλία εφαρμογών, και ανάλογα με την εφαρμογή χρησιμοποιείται διαφορετική φιλοσοφία στην κατασκευή της. Όπως είδαμε και σε προηγούμενη παράγραφο, το ζητούμενο όταν κάνουμε έναν έλεγχο για ατέλειες σε ένα υλικό, είναι να έχουμε καλή ευαισθησία και διακριτική ικανότητα. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατάλληλη επιλογή ιδιοτήτων της κεφαλής, όπως η συχνότητά της, το εύρος συχνοτήτων της και η εστιακή της ικανότητα (πλάτος δέσμης). [31]

Κάποιες από τις βασικότερες κατηγορίες κεφαλών είναι οι ακόλουθες.

#### ➤ Κάθετες κεφαλές μονού κρυστάλλου

Οι κάθετες κεφαλές (straight beam probes) αποτελούνται από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο που παράγει συνήθως ένα διάμηκες κύμα το οποίο προορίζεται για την άμεση επαφή με το προς έλεγχο υλικό. Όλες οι κάθετες κεφαλές είναι εξοπλισμένες με κάλυμμα που προσφέρει άριστη αντοχή για μακροχρόνια χρήση. Παρέχουν επίσης άριστη σύνθετη ακουστική αντίσταση που ταιριάζει στα περισσότερα μέταλλα.

[31]



**Εικόνα 1.14:** Κάθετες κεφαλές υπερήχων μονού κρυστάλλου.

### ➤ **Κεφαλές διπλού κρυστάλλου**

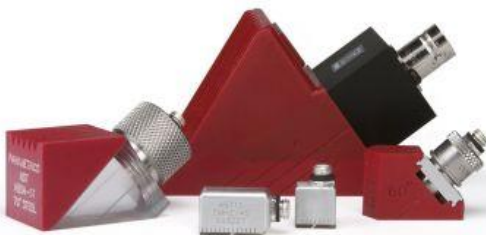
Μια κεφαλή διπλού κρυστάλλου ή δίδυμη κεφαλή (dual element transducer – TR probe) υπερήχων αποτελείται από δύο πιεζοηλεκτρικά στοιχεία διαμηκών κυμάτων (ένας πομπός και ένας δέκτης κυμάτων) που απομονώνονται μεταξύ τους από ένα ακουστικό εμπόδιο. Τα στοιχεία ενώνονται ελαφρώς μεταξύ τους για να μεταδώσουν ένα σήμα σε σχήμα V. Οι δίδυμες κεφαλές προσφέρουν πολύ καλές μετρήσεις σε έντονα διαβρωμένα μέρη και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλον. [31]



**Εικόνα 1.15:** Δίδυμες κεφαλές υπερήχων.

### ➤ **Γωνιακές κεφαλές**

Οι γωνιακές κεφαλές (angle beam transducers) αποτελούνται από ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο και συνδυάζονται με ένα ειδικό γωνιακό "παπουτσάκι" για να εισάγουν διαμήκη ή εγκάρσια κύματα σε ένα υλικό σε συγκεκριμένη γωνία. Επιτρέπουν ελέγχους σε περιοχές που δεν είναι εύκολο να προσεγγιστούν από το μονοπάτι του υπερήχου μιας κάθετης κεφαλής. [31]



**Εικόνα 1.16:** Γωνιακές κεφαλές υπερήχων.

### ➤ **Κεφαλές πέλματος καθυστέρησης**

Οι κεφαλές πέλματος καθυστέρησης (delay line transducers) αποτελούνται από ένα ευρυζωνικό πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και έχουν ενσωματωμένο ένα μικρό κομμάτι πλαστικού ή εποξικού υλικού στην άκρη τους. Προσφέρουν καλύτερη εικόνα των ατελειών που βρίσκονται πολύ κοντά στην επιφάνεια του προς εξέταση κομματιού. Οι κεφαλές καθυστέρησης μπορούν να καμπυλωθούν για να ταιριάζουν με τη

γεωμετρία της επιφάνειας και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε υψηλές θερμοκρασίες. [31]



**Εικόνα 1.17:** Υπερηχητική κεφαλή πέλματος καθυστέρησης.

#### ➤ **Ενισχυμένες κεφαλές**

Οι ενισχυμένες κεφαλές (protected face transducers) υπερήχων έχουν ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο διαμηκών κυμάτων με ειδικό κάλυμμα. Είναι εξαιρετικά ευπροσάρμοστες και ικανές να καλύψουν ένα πολύ ευρύ φάσμα εφαρμογών. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως κάθετες κεφαλές σε υλικά με χαμηλότερη σύνθετη αντίσταση, όπως το λάστιχο ή το πλαστικό. [31]



**Εικόνα 1.18:** Ενισχυμένες κεφαλές υπερήχων.

#### ➤ **Κεφαλές εμβάπτισης**

Οι κεφαλές εμβάπτισης (immersion transducers) αποτελούνται από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο διαμηκών κυμάτων και το κάλυμμα τους είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να συμφωνεί με τη σύνθετη αντίσταση του νερού. Οι κεφαλές αυτές είναι σφραγισμένες και μπορούν να βυθιστούν στο νερό όταν χρησιμοποιούνται με αδιάβροχο καλώδιο. Με τη χρήση του νερού ως υλικού σύζευξης, οι κεφαλές αυτές είναι ιδανικές για εφαρμογές ανίχνευσης ατελειών όπου η καλή σύζευξη είναι ουσιαστική. Σαν πρόσθετη επιλογή, οι μετατροπείς βύθισης μπορούν επίσης να εστιαστούν για να αυξήσουν την ένταση του κύματος σε μια συγκεκριμένη περιοχή και να μειώσουν το μέγεθος του σημείου που ανακλά στο προς εξέταση υλικό. [31]



**Εικόνα 1.19:** Υπερηχητικές κεφαλές εμβάπτισης.

#### ➤ **Κεφαλές υψηλής συχνότητας**

Οι κεφαλές υψηλών συχνοτήτων (high frequency transducers) διατίθενται είτε σαν καθυστέρησης, είτε σαν εμβάπτισης και είναι διαθέσιμες στις συχνότητες από 20 MHz έως 225 MHz. Οι κεφαλές καθυστέρησης αυτού του είδους είναι σε θέση να μετρήσουν λεπτά πάχη (π.χ. 0,010 mm, εξαρτώμενο πάντα από το υλικό, την κεφαλή, τη θερμοκρασία κλπ.), ενώ οι κεφαλές εμβάπτισης υψηλών συχνοτήτων είναι ιδανικές για την υψηλής ανάλυσης απεικόνιση και ανίχνευση ατελειών σε πολύ λεπτά και χαμηλής εξασθένησης κομμάτια όπως είναι τα μικροτσιπ πυριτίου. [31]



**Εικόνα 1.20:** Υπερηχητική κεφαλή υψηλής συχνότητας.

#### **1.2.10.4.3 Επιλογή υπερηχητικού αισθητήρα**

Για να μπορέσουμε να επιλέξουμε τον κατάλληλο αισθητήρα για κάθε εφαρμογή θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας τους παρακάτω βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν το σύστημα μέτρησης απόστασης σε σχέση με το περιβάλλον:

1. Την ταχύτητα του ήχου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.
2. Την εξασθένηση του ήχου σε συνάρτηση με την συχνότητα λειτουργίας και την υγρασία.
3. Την παρουσία θορύβου περιβάλλοντος.
4. Την ισχύ της πίεσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα και την απόσταση από τον πομπό.
5. Την ισχύ της πίεσης επιστροφής λόγω ανάκλασης από το στόχο – Επίπεδα ηχούς.
6. Τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των υπερηχητικών μετατροπέων. [34]

#### 1.2.10.4.4 Άλλα είδη υπερηχητικών μετατροπέων

Έκτος από τους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς άλλοι είδη ultrasonic transducers είναι:

1. Μηχανικός.
2. Ηλεκτρομαγνητικός.
3. Magnetostrictive.
4. Ηλεκτροστατικός (Ουσιαστικά είναι ένας πυκνωτής με τη μία πλάκα σταθερή και την άλλη ελεύθερη ώστε να μπορεί να ταλαντώνεται). [34]



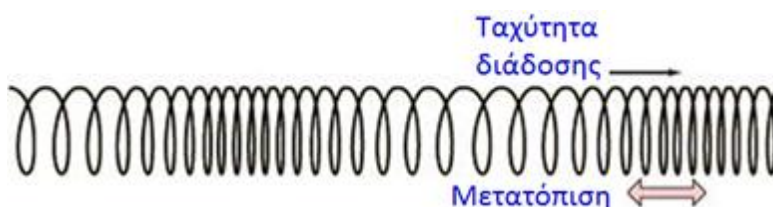
Εικόνα 1.21: Πιεζοηλεκτρικός (αριστερά) και ηλεκτροστατικός (δεξιά) μετατροπέας.

#### 1.2.11 Διάδοση Υπερήχων

Όπως σε όλα τα κύματα έτσι και για τα ηχητικά κύματα υπάρχουν δύο βασικές διευθύνσεις. Η διεύθυνση της ταλάντωσης των μορίων και η διεύθυνση διαδόσεως των κυμάτων. Στα υγρά και στα αέρια διαδίδονται μόνο διαμήκη κύματα (επιμήκη ή συμπιεστικά). Ενώ στα αέρια σώματα διαδίδονται όλα τα είδη των κυμάτων (διαμήκη, εγκάρσια ή συνδυασμός αυτών). Τα μόρια του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται γύρω από μία θέση ισορροπίας και μεταφέρουν τη δόνησή τους σε άλλα γειτονικά, κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. [35]

### 1.2.11.1 Διαμήκη ή συμπιεστικά κύματα

Τα διαμήκη (επιμήκη) ή συμπιεστικά υπερηχητικά κύματα είναι ο τύπος των κυμάτων που χρησιμοποιούνται ευρέως στην εξέταση των υλικών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι διαδίδονται και στις τρεις μορφές της ύλης. Στα διαμήκη κύματα, η διεύθυνση διάδοσης του κύματος και η διεύθυνση ταλάντωσης των μορίων συμπίπτουν. [35]



**Εικόνα 1.22:** Αρμονική κίνηση κατά τη διάδοση διαμηκών κυμάτων που προσομοιάζει στην αρμονική κίνηση ελατηρίου σε ταλάντωση.

Η ταχύτητα διάδοσης στα διαμήκη κύματα δίνεται από τον τύπο:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \left(\frac{m}{sec}\right) \quad (2)$$

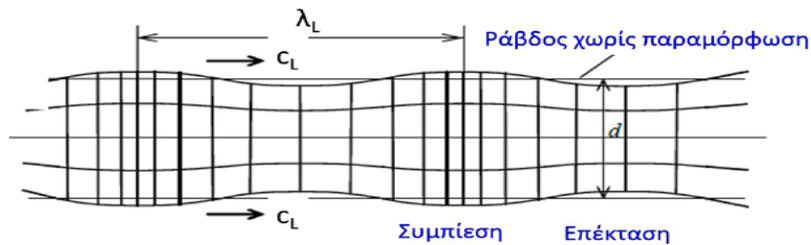
όπου : E = μέτρο ελαστικότητας υλικού (N/m<sup>2</sup>)

ρ = πυκνότητα του υλικού (kg/m<sup>3</sup>)

Τα διαμήκη κύματα έχουν τη μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης από όλους τους τύπους κυμάτων (σχεδόν διπλάσια από τα εγκάρσια) και κατά συνέπεια το μεγαλύτερο μήκος κύματος λ και τη μικρότερη αποδυνάμωση του ήχου. Οι κεφαλές που παράγουν συμπιεστικά κύματα έχουν συνήθως γωνία προσπτώσεως και διαθλάσεως περίπου 0°. [27], [35]

### 1.2.11.2 Ημι-διαμήκη κύματα σε ράβδο

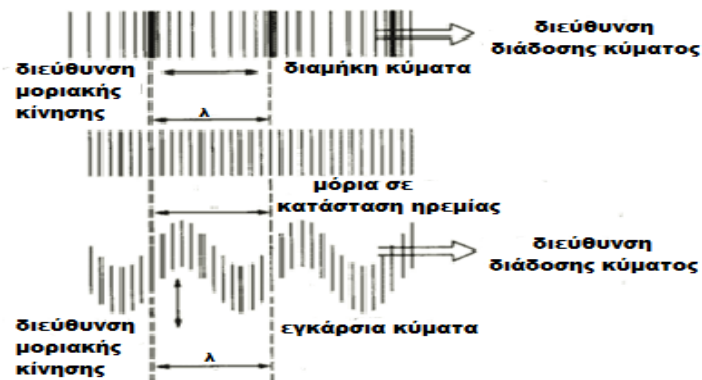
Όταν ένα διαμήκες κύμα διαδίδεται σε ράβδο, η οποία ενεργεί ως κυματοδηγός, η εγκάρσια τομή της ράβδου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της διάδοσης του κύματος. Τα κύματα αυτά ονομάζονται ημι-διαμήκη (quasilongitudinal) κύματα ή κύματα ράβδου (bar waves). Στην περιοχή όπου η ράβδος συμπιέζεται κατά τον άξονά της αυξάνει η εγκάρσια τομή της, και αντίστροφα, δηλαδή εκεί όπου η ράβδος επεκτείνεται κατά τον άξονά της μειώνεται η εγκάρσια τομή της. [28] Η ταχύτητα του κύματος της ράβδου δίνεται από τον τύπο 2.



Εικόνα 1.23: Μεταβολή της εγκάρσιας τομής ράβδου κατά τη διάδοση διαμήκους κύματος.

### 1.2.11.3 Εγκάρσια ή διατμητικά κύματα

Στα εγκάρσια κύματα η διεύθυνση ταλάντωσης των στοιχειωδών σωματιδίων είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Διαδίδονται μόνο σε υλικά που μπορούν να αναλάβουν διατμητικές τάσεις όπως τα στερεά και χαρακτηριστικά ο χάλυβας, γι' αυτό ονομάζονται και διατμητικά κύματα. [35]



Εικόνα 1.24: Διαμήκη και εγκάρσια κύματα.

Έχουν ταχύτητα διάδοσης περίπου τη μισή των διαμηκών (στο ίδιο υλικό) και επομένως για την ίδια συχνότητα πολύ μεγαλύτερη αποδυνάμωση. Η ταχύτητα διάδοσης δίνεται από τον τύπο :

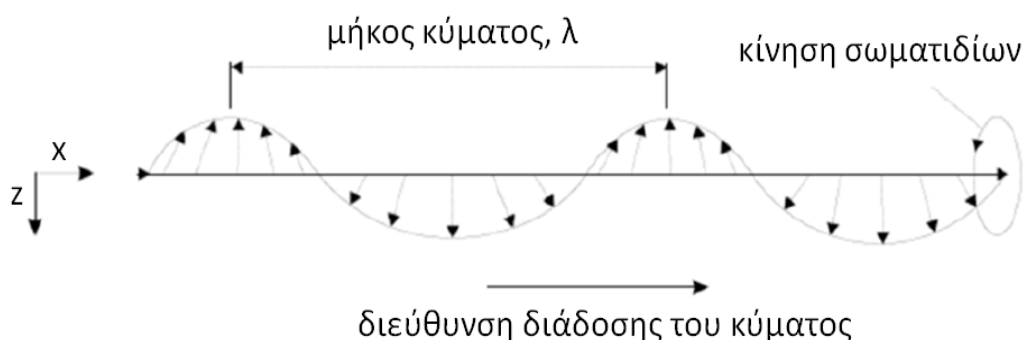
$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3)$$

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



#### 1.2.11.4 Επιφανειακά κύματα ή κύματα Rayleigh

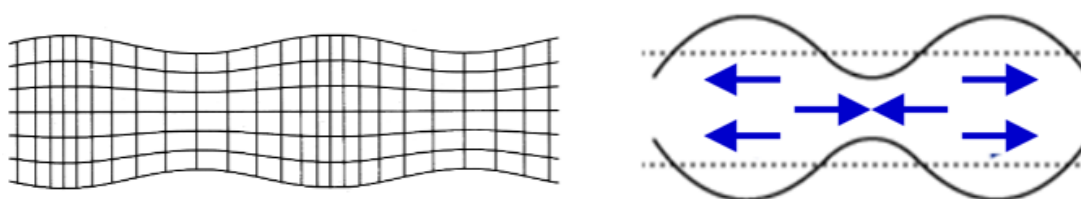
Τα επιφανειακά κύματα (surface waves) αναπτύσσονται μόνο στην επιφάνεια των σωμάτων και έχουν βάθος διείσδυσης ενός περίπου μήκους κύματος. Δημιουργούνται όταν τα εγκάρσια κύματα διαθλώνται στις  $90^\circ$  (2η κρίσιμη γωνία). Ο τρόπος μετάδοσής τους είναι ελλειπτικός, κατά μήκος της επιφάνειας του υλικού. Ακολουθούν το περίγραμμα της επιφάνειας και ανακλώνται όπου συναντούν ακμές ή γωνίες. Η ταχύτητα μετάδοσής τους είναι περίπου 90% αυτής των εγκαρσίων κυμάτων ( $C_R \approx 0.9C_T$ ). [31]



Εικόνα 1.25: Κίνηση των σωματιδίων κύματος επιφάνειας Rayleigh.

#### 1.2.11.5 Κύματα πλακών ή κύματα Lamb

Τα κύματα πλακών (plate waves) σχηματίζονται με τη μετάδοση επιφανειακών κυμάτων, σε σχετικά λεπτά ελάσματα, πάχους μερικά μήκη κύματος. Είναι συνδυασμός συμπίεστικών και επιφανειακών, ή εγκαρσίων και επιφανειακών κυμάτων, προκαλώντας ελαστικές ταλαντώσεις στην πλάκα, διαπερνώντας τελείως το υλικό. [31]



Εικόνα 1.26: Συμμετρικός τύπος διάδοσης κύματος πλάκας (κύμα Lamb).

Η διάδοσή τους εξαρτάται από την πυκνότητα και τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού, ενώ παράλληλα επηρεάζεται από τη συχνότητα του κύματος και το πάχος της πλάκας. Υπάρχουν δύο τύποι κυμάτων πλακών, που ορίζονται από το είδος της κίνησης των δομικών σωματιδίων. Εάν τα δομικά σωματίδια κινούνται συμμετρικά, ως προς τον ουδέτερο άξονα

της πλάκας, έχουμε τα διασταλτικά κύματα, ενώ αν κινούνται ασύμμετρα, έχουμε τα καμπτικά. [35]

### 1.2.11.6 Άλλα καθοδηγούμενα κύματα

Υπάρχουν καθοδηγούμενα κύματα πολλών άλλων τύπων τα οποία έχουν ενδιαφέρον για τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών. Τα κύματα αυτά κατατάσσονται ανάλογα με τη δομή στην οποία διαδίδονται, η οποία ονομάζεται κυματοδηγός (waveguide). Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά μερικοί από αυτούς τους τύπους καθοδηγούμενων κυμάτων.

Τα κύματα Sezawa είναι κύματα Rayleigh υψηλότερης τάξης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπως ο έλεγχος βλάβης αμέσως κάτω από την επιφάνεια σιδηροδρομικής γραμμής.

Τα κύματα Love είναι οριζόντια πολωμένα εγκάρσια κύματα (κύματα SH) τα οποία καθοδηγούνται από ένα ελαστικό στρώμα, το οποίο είναι πακτωμένο σε έναν ελαστικό ημι-χώρο από τη μια πλευρά, ενώ συνορεύει με κενό από την άλλη πλευρά. Τα κύματα Love διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα από τα διαμήκη και τα εγκάρσια κύματα, αλλά είναι ταχύτερα από τα κύματα Rayleigh.

Τα κύματα Stoneley (ή κύματα διεπιφάνειας) περιορίζονται στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο στερεών.

Τα κύματα Scholte είναι επίσης κύματα διεπιφάνειας όπως τα κύματα Stoneley, με τη διαφορά ότι αυτά διαδίδονται στη διεπιφάνεια μεταξύ ρευστού και στερεού.

Τα γενικευμένα κύματα Rayleigh-Lamb διαδίδονται παράλληλα προς την ελεύθερη επιφάνεια ενός πολυστρωματικού στερεού ημι-χώρου.

Τα κύματα Floquet είναι ακουστικά κύματα που διαδίδονται σε υλικά με στρώσεις, όπως για παράδειγμα τα σύνθετα υλικά με ίνες. Παρόλο που τα κύματα Floquet δεν είναι από τη φύση τους επίπεδα κύματα, συμπεριφέρονται ως επίπεδα κύματα στην περίπτωση ενός άπειρου περιοδικού πολυστρωματικού μέσου. [28]

### 1.2.11.7 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάδοση των υπερήχων

Η μετάδοση των υπερήχων σε ένα υλικό εξαρτάται από την πυκνότητα και τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού καθώς και από τον τύπο του μεταδιδόμενου κύματος. Πολύ σημαντικό ρόλο επίσης παίζουν:

- Το μέγεθος κόκκων του εξεταζόμενου υλικού.
- Η απόσβεση/εξασθένιση (αποτέλεσμα απορρόφησης και διασκορπισμού).
- Η ακουστική αντίσταση του υλικού.
- Η χαρακτηριστική αντίσταση των εγκλεισμάτων.
- Η περίθλαση.
- Η έλλειψη ομοιογένειας.
- Η ανισοτροπία του υλικού δηλαδή οι κόκκοι να είναι τυχαίου προσανατολισμού και να έχουν διαφορετικές ελαστικές ιδιότητες κατά τις διαφορετικές διευθύνσεις.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάδοση είναι η ακουστική αντίσταση και η απόσβεση των ηχητικών κυμάτων. [31]

#### ➤ **Ακουστική αντίσταση** (Acoustic impedance)

Ακουστική αντίσταση  $Z$  είναι η αντίσταση ενός υλικού στη μετάδοση του ήχου. Είναι το γινόμενο της πυκνότητας  $\rho$  του υλικού και της ταχύτητας του ήχου  $c$ .

$$Z = \rho * c \text{ (Kg /m}^2\text{/sec)}$$

Η διαφορά της ακουστικής αντίστασης δύο διαφορετικών υλικών καθορίζει την ένταση του υπερήχου που ανακλάται από τη διαχωριστική τους επιφάνεια. Με άλλα λόγια, η ποσότητα του υπερήχου που μεταδίδεται από το ένα υλικό στο άλλο εξαρτάται από αυτή τη διαφορά μεταξύ τους. Η διαφορά αυτή ονομάζεται λόγος ακουστικής αντίστασης.

- Μεγάλος λόγος ακουστικής αντίστασης συνεπάγεται περισσότερη ανακλώμενη ενέργεια
- Μικρός λόγος ακουστικής αντίστασης συνεπάγεται περισσότερη μεταδιδόμενη ενέργεια
- Η ποσότητα ενέργειας που ανακλάται είναι ανεξάρτητη από τη διεύθυνση μετάδοσης του ήχου κατά μήκος της διαχωριστικής επιφάνειας

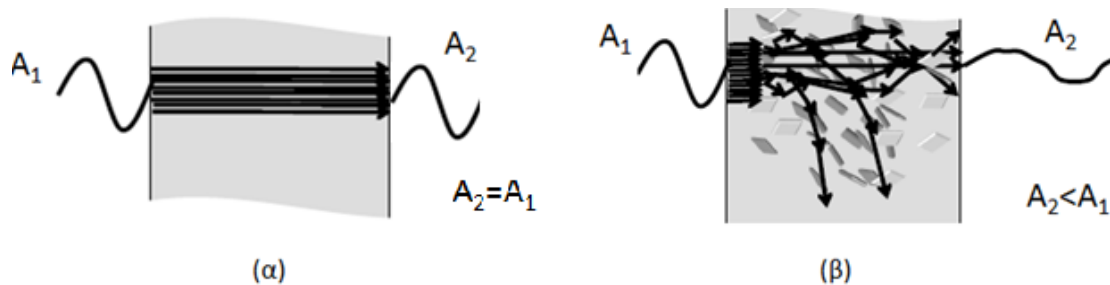
#### ➤ **Απόσβεση**

Τα περισσότερα μέσα έχουν ιξώδες και συνεπώς δεν είναι ιδανικά μέσα. Όταν ο υπέρηχος διαδίδεται σε τέτοια μέσα, υπάρχει πάντα μετατροπή σε θερμική ενέργεια λόγω εσωτερικών τριβών που προκαλούνται από το ιξώδες. Στα ομογενή ιξώδοελαστικά στερεά, και αντίστοιχα στα υγρά, οι δυνάμεις μεταξύ γειτονικών σωματιδίων που κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες είναι σημαντικές πηγές απορρόφησης του ακουστικού

κύματος. Για παράδειγμα, οι απώλειες της ακουστικής ενέργειας λόγω ιξώδους εξηγούν την απόσβεση του ηχητικού κύματος στο νερό, όπου η εξασθένηση αυξάνει ανάλογα με το τετράγωνο της συχνότητας. [28]

### ➤ Σκέδαση

Στα ανομοιογενή μέσα, εκτός από την απορρόφηση, η σκέδαση είναι ο κύριος μηχανισμός απώλειας της ακουστικής ενέργειας. Το ηχητικό κύμα δηλαδή σκεδάζεται όταν τα κινούμενα σωματίδια του υλικού αναγκάζονται να αποκλίνουν από μια ευθεία διάδοση με μία ή περισσότερες διαδρομές επειδή συναντούν ανομοιογένειες στο υλικό μέσω του οποίου διέρχονται, όπως παρατηρούμε και στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 1.27:** Διάδοση ελαστικού κύματος: (α) σε ιδανικό μέσο (δεν υπάρχει εξασθένηση ή διασπορά), (β) σε ανομοιογενές υλικό με σκέδαση από τη βλάβη ή τη μικροδομή (εξασθένηση και διασπορά).

Στην περίπτωση της σκέδασης η ενέργεια αλλάζει διεύθυνση αλλά όχι μορφή. Τέτοιες ανομοιογένειες είναι τα όρια κόκκων, οι προσμίξεις σε κράματα, το πορώδες, η παρουσία ατελειών στο υλικό, η βλάβη κλπ. [28]

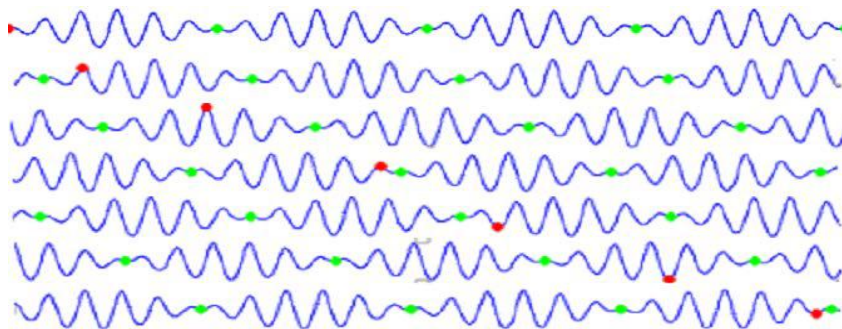
### ➤ Γεωμετρία δέσμης

Κατά τη γεωμετρική απόσβεση το πλάτος μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από την πηγή στις τρεις διαστάσεις και αντιστρόφως ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της απόστασης στις δυο διαστάσεις. Η επίδραση αυτή είναι πιο ισχυρή κοντά στην πηγή. Σε γενικές γραμμές, η εξασθένηση του ήχου σε ένα μέσο αυξάνεται με τη συχνότητα. [28]

### 1.2.11.8 Διασπορά και εξασθένηση ελαστικού κύματος

#### ➤ Διασπορά

Η διασπορά του κύματος σε ορισμένα μέσα οφείλεται στο ότι η φασική ταχύτητα του κύματος μεταβάλλεται συναρτήσει της συχνότητας. Τα κύματα παλμού τα οποία έχουν πολλές συχνότητες παραμορφώνονται ανάλογα, καθώς τα συστατικά τους έχουν διαφορετικούς κυματικούς αριθμούς και συνεπώς το καθένα από αυτά διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα.



**Εικόνα 1.28:** Η κόκκινη τελεία κινείται με την ταχύτητα φάσης και η πράσινη τελεία με την ταχύτητα ομάδας.

Τα αίτια της διασποράς μπορεί να είναι:

- Το ιξώδες, λόγω της εξάρτησης των ελαστικών σταθερών του υλικού από τη συχνότητα.
- Η σκέδαση, λόγω της επίδρασης της ανομοιογένειας στο διαδιδόμενο κύμα.
- Η γεωμετρία του μέσου.

Γενικά, κύματα σε άπειρο/ημιάπειρο χώρο δεν παρουσιάζουν διασπορά και συνεπώς η ταχύτητά τους δεν εξαρτάται από τη συχνότητα. Τα κύματα αυτά εμφανίζουν όμως διασπορά όταν διαδίδονται σε ανομοιογενή μέσα. Αντίθετα, καμπτικά κύματα σε δοκούς ή κύματα σε ελάσματα ή σε πλάκες εμφανίζουν διασπορά ακόμα και αν το υλικό είναι ομογενές. [28]

#### ➤ Εξασθένηση

Ένα ελαστικό κύμα που διαδίδεται σε ένα μέσο χάνει συνεχώς μέρος της ενέργειάς του. Εξασθένηση (attenuation) είναι ο ρυθμός απώλειας της ενέργειας του κύματος καθώς αυτό διαδίδεται στο μέσο. Τρεις βασικοί μηχανισμοί συμβάλλουν στην εξασθένηση των υπερήχων:

- η απορρόφηση (absorption),
- η σκέδαση (scattering), και
- η γεωμετρία της δέσμης (άνοιγμα της δέσμης με την απόσταση διάδοσης).

Οι δύο πρώτοι μηχανισμοί εξασθένησης εξαρτώνται από το μέσο διάδοσης, ενώ ο τρίτος σχετίζεται με τη δέσμη των υπερήχων. [28]

### **1.2.12 Εφαρμογές των υπερήχων στο ΜΚΕ των υλικών**

Ο πρωταρχικός ρόλος των δοκιμών με υπερήχους, όπως αναφέραμε στα πιο πάνω κεφάλαια, ήταν η ανίχνευση και ο προσδιορισμός ατελειών μέσα σε ένα υλικό. Όμως με την εξέλιξη της μεθόδου αναπτύχθηκαν μέθοδοι για τη μη καταστροφική μελέτη συμπεριφοράς των υλικών, καθώς και τον προσδιορισμό ορισμένων εκ των μηχανικών τους συμπεριφορών.

Η μη καταστροφική μέθοδος των υπερήχων, πέρα από την ανίχνευση των ατελειών, εφαρμόζεται σήμερα και σε πολλές άλλες περιπτώσεις. Διάφορες εφαρμογές των υπερήχων αναφέρονται παρακάτω.

#### **1.2.12.1 Εύρεση των ελαστικών σταθερών $E$ , $G$ , $\nu$ των υλικών**

Επειδή οι ελαστικές ιδιότητες περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών, η μελέτη τους είναι σημαντική σε περιπτώσεις μηχανολογικού σχεδιασμού. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού για μια συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτεί τη γνώση της μηχανικής του συμπεριφοράς.

Όταν σε ένα υλικό επιδρούν εξωτερικές δυνάμεις, τότε αυτό παραμορφώνεται. Δηλαδή, εάν εφαρμόσουμε σε αυτό εξωτερικές δυνάμεις, μπορούμε να μεταβάλλουμε το σχήμα και το μέγεθός του. Για τη μελέτη των ελαστικών ιδιοτήτων των στερεών χρησιμοποιούνται οι έννοιες της τάσης και της παραμόρφωσης. Η τάση είναι ποσότητα ανάλογη προς τη δύναμη στην οποία οφείλεται η παραμόρφωση, και είναι η εξωτερική δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας διατομής.

Παραμόρφωση είναι το μέτρο της μεταβολής του αρχικού σχήματος και μεγέθους. Γνωρίζουμε πειραματικά ότι για μικρές τάσεις, η τάση είναι ανάλογη προς τη παραμόρφωση. Ελαστικές είναι οι ιδιότητες αυτές που διέπουν τη συμπεριφορά ενός υλικού που υπόκειται σε εξωτερικές δυνάμεις μέσα σε ένα πεδίο τάσης όπου το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά. Για να υπολογίσουμε τις ελαστικές σταθερές πρέπει να γνωρίζουμε την πυκνότητα ( $\rho$ ) του υλικού και την ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων ( $c_t$ ) και των διαμηκών ( $c_l$ ) υπερηχητικών κυμάτων. [35]

### 1.2.12.2 Προσδιορισμός σκληρότητας

Η μέθοδος των υπερήχων εφαρμόζεται και για τον προσδιορισμό της σκληρότητας κατά Vickers. Η σκληρότητα αυτή μετριέται με την εφαρμογή πολύ μικρών φορτίων τα οποία δημιουργούν αντίστοιχα πολύ μικρές αποτυπώσεις - διεισδύσεις χωρίς να απαιτείται λείανση της ελεγχόμενης επιφάνειας. Οι ενδείξεις της σκληρότητας λαμβάνονται απ' ευθείας με τη βοήθεια κατάλληλου μετρητή, χωρίς να είναι απαραίτητο να μετρηθούν οι διαστάσεις των αποτυπωμάτων με οπτικές διατάξεις όπως γίνεται στις συμβατικές σκληρομετρήσεις κατά Vickers. Με τη βοήθεια αυτή ο αδαμάντινος διεισδυτής προσαρμόζεται στην άκρη μιας ράβδου, η οποία διεγείρεται σε ταλάντωση με μια αρχική συχνότητα. Η ταλάντωση της ράβδου επιτυγχάνεται με βάση το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Καθώς η διείσδυση προχωράει στο ελεγχόμενο υλικό η συχνότητα της ταλάντωσης μεταβάλλεται. Το μέγεθος της διείσδυσης και η μεταβολή της συχνότητας εξαρτώνται από τη σκληρότητα του ελεγχόμενου υλικού. Έτσι μετρώντας τη συχνότητα ταλάντωσης της ράβδου προσδιορίζουμε την επιφανειακή σκληρότητα. Η συσκευή είναι εφοδιασμένη με κατάλληλο μετατροπέα, ώστε με την κίνηση ενός διακόπτη η σκληρότητα Vickers να μετατρέπεται σε σκληρότητα Rockwell.

Τα πλεονεκτήματα του προσδιορισμού της σκληρότητας με τη μέθοδο των υπερήχων (Ultra Contact Impedance -USI) έγκειται στο ότι χρησιμοποιείται μια εύχρηστη ελαφριά φορητή συσκευή, οι ενδείξεις της οποίας δίνουν αμέσως σε μια ψηφιακή οθόνη τη σκληρότητα Vickers ή Rockwell. Επίσης η μέθοδος προσφέρεται για πολύ μικρές επιφάνειες και για όλα τα είδη των μετάλλων. [35]

### 1.2.12.3 Παχυμέτρηση

Είναι πολύ δύσκολο και δαπανηρό να γίνει έλεγχος μεγάλων επιφανειών και κατασκευών μεγάλων διαστάσεων, όπως π.χ. σε λαμαρίνες, σωλήνες, λέβητες, δεξαμενές, πλοία κ.λ.π. Για τον έλεγχο π.χ. του πάχους πλοίων με μηχανικά παχύμετρα, πρέπει πρώτα το πλοίο αφού τεθεί εκτός λειτουργίας, να βγει σε δεξαμενή, να ανοιχθούν τρύπες στα σημεία της επιφάνειάς του όπου θα ελεγχθεί το πάχος, για να περάσει το παχύμετρο, και στη συνέχεια να κλείσουν αυτές οι τρύπες με ηλεκτροσυγκόλληση. Είναι προφανές το μεγάλο κόστος, όπως και η επίδραση στη στερεότητα της κατασκευής, αφού μια τέτοια επέμβαση θα δημιουργήσει πολλά ελαττώματα στην κατασκευή και θα απαιτήσει χρόνο. Ανάλογη διαδικασία ακολουθείται και για τις παχυμετρήσεις άλλων κατασκευών όπως π.χ. εκείνες που προαναφέρθηκαν.

Όλες αυτές οι δυσκολίες αντιμετωπίζονται με τη χρήση του υπερηχητικού παχυμέτρου, μιας σύγχρονης συσκευής προηγμένης τεχνολογίας, που παρέχει τη δυνατότητα της εύκολης, ταχείας και με υψηλή ακρίβεια μέτρησης. [35]

#### **1.2.12.4 Εφαρμογή των υπερήχων σε ελάσματα**

Όταν θέλουμε να ελέγξουμε για σφάλματα σε κατεργασμένα ελάσματα πρέπει να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του δοκιμίου και την επιφάνεια που θα ελέγξουμε. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να γίνει σε ολόκληρη την επιφάνεια του δοκιμίου ή μόνο σε μερικά τμήματα. Τα σφάλματα που θα βρεθούν αξιολογούνται ώστε να καθοριστεί αν το κομμάτι που ελέγχθηκε είναι κατάλληλο προς χρήση. [35]

#### **1.2.12.5 Υπερηχητικός έλεγχος συγκολλήσεων**

Οι περισσότερες ατέλειες των συγκολλήσεων έχουν την ικανότητα να ανακλούν τα υπερηχητικά κύματα. Πριν από κάθε έλεγχο πρέπει να ελέγχεται το μέταλλο γύρω από τη συγκόλληση για τυχόν εγκλείσματα και αναδιπλώσεις, να μετριέται το πάχος του μετάλλου καθώς και η απόσβεση των υπερηχητικών κυμάτων. Η τεχνική που θα εφαρμοστεί σε έναν έλεγχο εξαρτάται από το είδος της συγκόλλησης, τις διαστάσεις της και την κατασκευή της. Η ευαισθησία του ελέγχου εξαρτάται κυρίως από την ανίχνευση της μικρότερης επιτρεπόμενης ατέλειας και τον προσδιορισμό της θέσης της μέσα στη συγκόλληση. Όλες οι ενδείξεις πρέπει να αντιμετωπίζονται σαν να είναι πραγματικά σφάλματα, με την απαραίτητη αλλαγή κεφαλών.

Για να βρεθούν όλες οι ατέλειες η συγκόλληση πρέπει να εξετάζεται σε όλο της το μήκος και τη διατομή. Ένας έλεγχος θεωρείται πλήρης όταν προσδιοριστεί η ακριβής θέση της ατέλειας, ο προσανατολισμός της μέσα στο μέταλλο, η μορφή της ανακλάσεώς της στη CRT-οθόνη και η συμπεριφορά της ανακλάσεως κατά την κίνηση της κεφαλής. Όταν η ατέλεια είναι μικρή υπάρχει καλή ανάκλαση ενώ όταν η ατέλεια είναι μεγάλη ίσως να παρουσιάζει πολλές ανακλώμενες επιφάνειες άρα και πολλές ηχώ στην οθόνη οι οποίες κάνουν πιο δύσκολο τον έλεγχο. [35]

#### **1.2.12.6 Άλλες εφαρμογές υπερήχων**

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

- Δοκιμές σφυρήλατων με υπερήχους.
- Δοκιμές χυτών με υπερήχους.
- Προσδιορισμός τάσεων .
- Ποιοτικός έλεγχος σκυροδέματος.
- Έλεγχος της δομής υλικού.
- Έλεγχος ψαθυρότητας υλικών.



- Υπερηχητικός καθαρισμός υλικών.
- Υπερηχητική συγκόλληση αλουμινίου.
- Αποραφίνωση πετρελαίου.
- Εξαέρωση τηγμένων μετάλλων και άλλων υγρών.
- Έλεγχος ξύλινων κατασκευών.
- Εφαρμογές υπερήχων στην Ιατρική και την Κτηνοτροφία. [35]

### **1.2.13 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου των υπερήχων**

#### **➤ Πλεονεκτήματα:**

- Μεγάλη διεισδυτική ικανότητα που επιτρέπει την ανίχνευση ατελειών σε μεγάλο βάθος (μπορούν να ελεγχθούν αντικείμενα με μήκος και πάχος αρκετών μέτρων).
- Ακριβής προσδιορισμός της θέσης και μεγέθους εσωτερικών ατελειών και χαρακτηρισμός του προσανατολισμού, μορφής και τύπου τους.
- Τεχνική ευαίσθητη σε επιφανειακές και υπο-επιφανειακές ασυνέχειες.
- Απαιτείται πρόσβαση σε μία μόνο επιφάνεια του υπό έλεγχο αντικειμένου.
- Απαιτείται ελάχιστη προετοιμασία του αντικειμένου προς έλεγχο.
- Τα σύγχρονα συστήματα παρέχουν πλήρη αυτοματοποίηση με δυνατότητα απεικόνισης υψηλής ευαισθησίας, παρέχοντας άμεσα αποτελέσματα.
- Η υψηλή ευαισθησία της μεθόδου επιτρέπει την ανίχνευση πολύ μικρών ατελειών.
- Δυνατότητα ογκομετρικής ανίχνευσης, που επιτρέπει τον έλεγχο του συνολικού όγκου του αντικειμένου, που εκτείνεται από την εμπρός επιφάνεια ως την πίσω επιφάνειά του.
- Παρέχει αποτελέσματα σε μορφή ώστε να υπάρχει δυνατότητα ψηφιακής επεξεργασίας για το χαρακτηρισμό ελαττωμάτων και βλάβης και τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών.
- Φορητότητα.
- Κανένας κίνδυνος για την υγεία των χειριστών από τη χρήση της μεθόδου.
- Δεν απαιτούνται αναλώσιμα. [28]

#### **➤ Περιορισμοί-Μειονεκτήματα:**

- Δεν υπάρχει μόνιμη καταγραφή των δεδομένων, παρά μόνο όταν χρησιμοποιούνται προηγμένα συστήματα ελέγχου.
- Τα αποτελέσματα του ελέγχου απαιτούν ερμηνεία (εξαιρούνται οι ψηφιακοί μετρητές πάχους τοιχώματος).

- Ο χειριστής της μεθόδου πρέπει να είναι ιδιαίτερα έμπειρος για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του ελέγχου.
- Η ανάπτυξη διαδικασιών ελέγχου απαιτεί εκτεταμένες τεχνικές γνώσεις. Αντικείμενα που έχουν τραχεία επιφάνεια, ακανόνιστο σχήμα, ή είναι πολύ μικρά σε μέγεθος ή έχουν πολύ λεπτή διατομή ή μη ομοιογενή, είναι δύσκολο να ελεγχθούν.
- Η επιφάνεια του δοκιμίου πρέπει να είναι προσπελάσιμη για μετάδοση υπερήχων.
- Ασυνέχειες που υπάρχουν σε μικρό βάθος αμέσως κάτω από την επιφάνεια είναι δύσκολο να ανιχνευθούν.
- Είναι δύσκολος ο έλεγχος χονδροκόκκων υλικών, όπως για παράδειγμα ο χυτοσίδηρος, εξαιτίας της μεγάλης εξασθένησης των υπερήχων και του υψηλού σήματος θορύβου στα υλικά αυτά.
- Γραμμικές ατέλειες προσανατολισμένες παράλληλα με τη δέσμη των υπερήχων μπορεί να μην ανιχνευτούν.
- Απαιτείται μέσο σύζευξης για την αποτελεσματική μεταφορά της ηχητικής ενέργειας στο δοκίμιο.
- Απαιτούνται πρότυπα αναφοράς τόσο για τη βαθμονόμηση του εξοπλισμού όσο και για το χαρακτηρισμό των ατελειών. [28]

### 1.3 Σκοπός Εργασίας

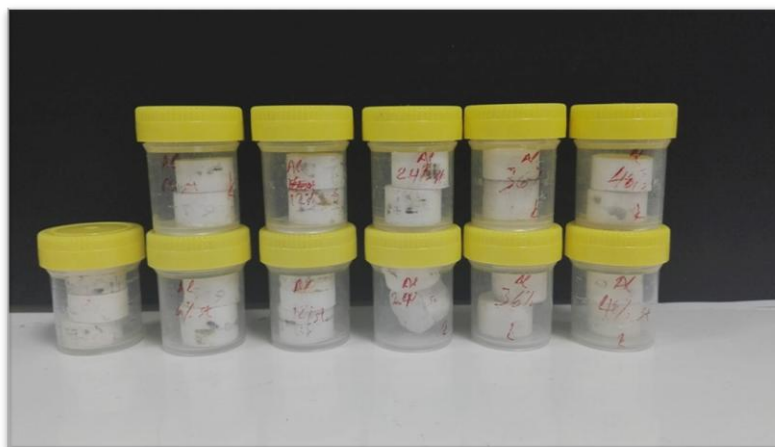
Πρόσφατα, τα εκλεπτυσμένα κεραμικά, όπως η αλουμίνα, έχουν ερευνηθεί ευρέως, επειδή θεωρούνται σημαντικά τεχνολογικά υλικά α) λόγω των αυξημένων σημείων τήξης τους, β) τις υψηλές αναλογίες αντοχής/πυκνότητας τους και γ) την εξαιρετική αντοχή τους στη διάβρωση. Ωστόσο, η συνολική αξιολόγηση των ιδιοτήτων και των μικροδομών τους είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, ειδικά όταν εμπλέκονται καταστροφικές μέθοδοι δοκιμών. Αυτό συμβαίνει λόγω της σύστασης και της μικροδομής του υλικού των κεραμικών, το οποίο συχνά οδηγεί σε έλλειψη επαναληψιμότητας στα αποτελέσματα των μετρήσεων με συμβατικές μηχανικές δοκιμές. Λόγω της έλλειψης επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων, δηλαδή χαμηλό συντελεστή κατανομής Weibull, θα πρέπει να κατασκευαστεί ένας μεγάλος αριθμός δειγμάτων προκειμένου να μειωθεί η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων. Σε αντίθεση, οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι δοκιμής αποτελούν μια χρήσιμη λύση σε αυτά τα προβλήματα έτσι ώστε να μπορεί ένα δείγμα να εξετάζεται επανειλημμένα έως ότου η δοκιμή να ικανοποιηθεί πλήρως. Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως στόχο τη καταγραφή και τη σύγκριση της συμπεριφοράς κεραμικών δοκιμών αλουμίνας έξι διαφορετικών τιμών πορώδους, μέσω της παρατήρησης και ανάλυσης δεδομένων που προέκυψαν από τη μέθοδο των υπερήχων, η οποία είναι μία μη καταστρεπτική μέθοδος, με τελικό στόχο την κατανόηση των ελαστικών ιδιοτήτων, όπως το μέτρο Young και ο λόγος Poisson, της αλουμίνας σε άμεση εξάρτηση με το πορώδες.



## 2. Υλικά, Πειραματικός Εξοπλισμός και Πειραματική Διαδικασία

### 2.1 Δοκίμια Πορώδους Αλούμινας

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν πορώδη δοκίμια αλούμινας που είχαν έξι διαφορετικές τιμές πορώδους (εικόνα 2.1), στα οποία μετρήθηκε η ταχύτητα των υπερηχητικών κυμάτων, διαμηκών και εγκάρσιων, με σκοπό να υπολογιστούν το μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ) και ο λόγος Poisson ( $\nu$ ) και να γίνει έτσι η συσχέτιση του πορώδους με τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού.



Εικόνα 2.1 Τα δοκίμια αλούμινας.

#### 2.1.1 Κατασκευή πορωδών κεραμικών δοκιμών αλούμινας

Για την κατασκευή των πορωδών κεραμικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε μία νέα μέθοδος η οποία έχει αναπτυχθεί για να παράγονται κεραμικά υλικά με ελεγχόμενο πορώδες. Στα Αγγλικά αναφέρεται με τον όρο starch consolidation, δηλαδή η μέσω του αμύλου συμπύκνωση του υλικού, και βασίζεται στο γεγονός ότι οι κόκκοι του αμύλου σχηματίζουν gel (πήκτωμα) όταν θερμανθούν σε υδατικό περιβάλλον. Με απλά λόγια, η νέα αυτή μέθοδος βασίζεται σε μία πολύ ειδική ιδιότητα του αμύλου, η οποία είναι η ικανότητα του αμύλου να σχηματίζει gel στο ζεστό νερό, η οποία (ικανότητα) ελέγχεται από την πρόσληψη του νερού και τη διόγκωση των σωματιδίων του αμύλου. Έτσι, όταν σωματίδια αμύλου διασπείρονται μέσα σε υδατικό περιβάλλον ενός αιωρήματος κεραμικής (ή μεταλλικής) σκόνης και ακολουθήσει θέρμανση στο εύρος των 60-80°C, τότε λαμβάνει χώρα αλλαγή από την υγρή κατάσταση σε μία πιο άκαμπτη στερεά κατάσταση, χωρίς όμως την αποβολή υγρού, ασφαλώς ανάλογα με την ποσότητα του αμύλου που έχει χρησιμοποιηθεί ώστε να μπορεί αυτό να απορροφήσει όλη την περίσσεια του νερού. Όταν το αιώρημα έχει μεγάλη φόρτωση (δηλαδή συγκέντρωση σε κεραμική σκόνη), τότε η απαιτούμενη ποσότητα του αμύλου είναι πιο μικρή, και έτσι μπορούν να επιτευχθούν μικρές τιμές πορώδους (κάτι που είναι ιδιαίτε-

ρα δύσκολο, σε σχέση με μεγάλες τιμές πορώδους). Μετά την καύση των κόκκων του αμύλου στο πρώτο στάδιο της θέρμανσης (δηλαδή μέχρι τους 400°C), το κλάσμα των πόρων αντιστοιχεί στην ποσότητα (αλλά και στη μορφολογία) των κόκκων του αμύλου που απομακρύνθηκαν. Ασφαλώς, όταν λαμβάνει χώρα η πυροσυσσωμάτωση, ιδιαίτερα οι μικροί πόροι θα κλείσουν, γεγονός που οδηγεί σε μια διαφορά μεταξύ του σχεδιαζόμενου και του τελικού πορώδους του τελικού πυροσυσσωματωμένου υλικού.

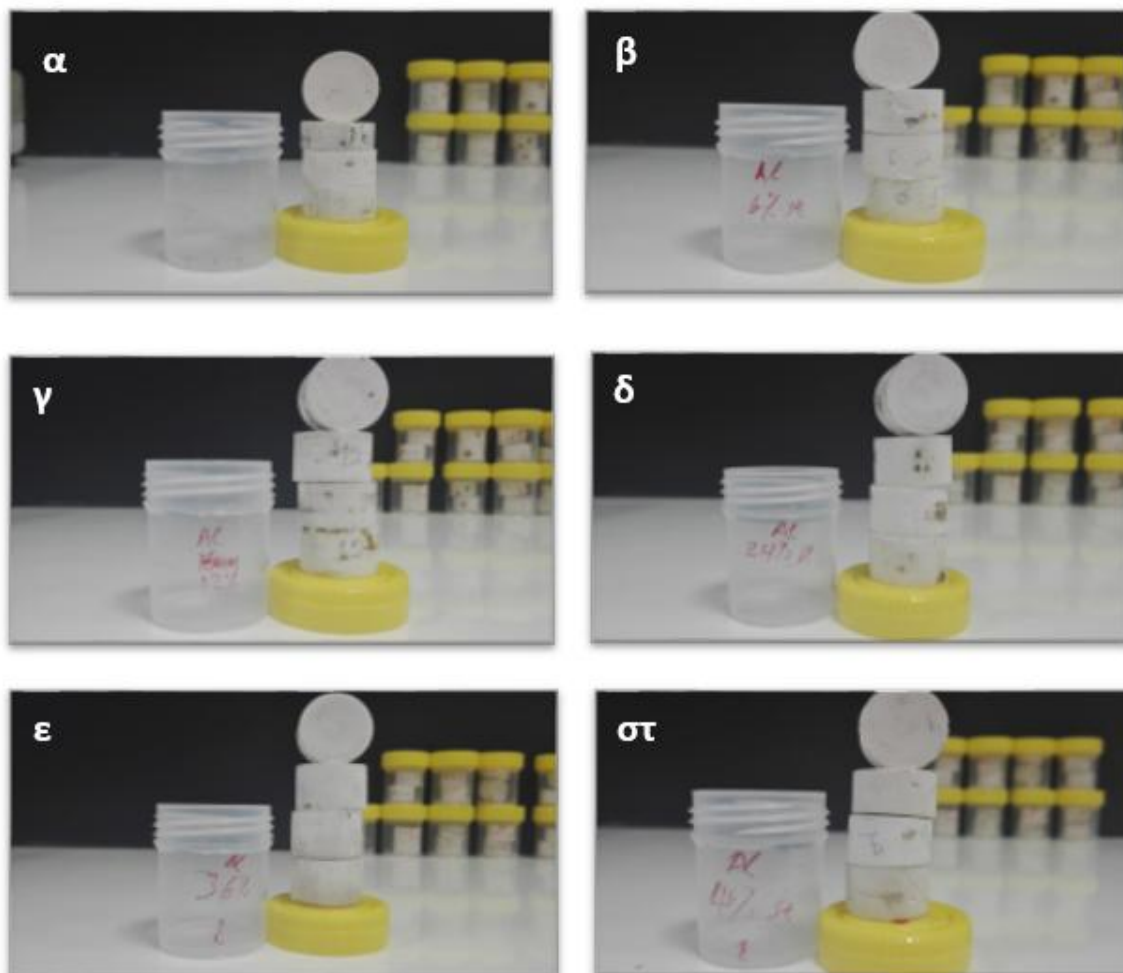
Για να επιτευχθεί υψηλή φόρτωση, τα σωματίδια της κεραμικής σκόνης, που έχουν συνήθως μέγεθος μικρότερο του 1 μικρομέτρου, πρέπει να διασπαρθούν πολύ καλά και να σταθεροποιηθούν μέσα στο αιώρημα. Έτσι, στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε λεπτόκοκκη σκόνης αλούμινας (CT 3000 SG, Alcoa, Germany) με μέσο μέγεθος κόκκων ( $D_{50}$ ) 0.7  $\mu\text{m}$ . Ως διασπορέας (dispersant) χρησιμοποιήθηκε το Dolapix CE 64 (Zschimmer & Schwarz, Germany), που είναι ένας καρβοξυλικός πολυηλεκτρολύτης και έχει αποδειχτεί ότι είναι πολύ αποτελεσματικός διασπορέας στο να σταθεροποιεί αιωρήματα αλούμινας υψηλής φόρτωσης, με συγκέντρωση διασπορέα 0.4% κ.β. αναφορικά με τη στερεά κεραμική σκόνη. Το άμυλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν από πατάτα (potato starch), το Trecomex (AET1, Lyckeby Starkelsen AB, Sweden), με μέσο μέγεθος κόκκων 55  $\mu\text{m}$ .

Παρασκευάστηκαν έξι διαφορετικά αιωρήματα με σκοπό το επαγόμενο, από το κλάσμα του όγκου του αμύλου, πορώδες να είναι 0, 6, 12, 24, 36 και 48%. Σε κάθε αιώρημα, πρώτα έγινε αποσυσσωματώπιση (deagglomeration) των κόκκων της σκόνης της αλούμινας σε σφαιρόμυλο (ball milling) και μετά προστέθηκε το άμυλο και έγινε ομογενοποίηση του αιωρήματος. Το αιώρημα αυτό τοποθετήθηκε μετά σε δοχείο υπό συνεχή ανάδευση για 2 ώρες με σκοπό να απελευθερωθούν όλες οι φυσαλίδες του αέρα από αυτό. Το αιώρημα αποχύθηκε σε ειδικά κατασκευασμένα ελαστικά καλούπια από σιλικόνη (silicone rubber moulds), που είχαν το σχήμα των δοκιμίων που θέλαμε να πάρουμε, τα οποία γέμισαν μέχρι επάνω. Τα καλούπια σκεπάστηκαν με αλουμινόχαρτο ώστε να μην γίνει εξάτμιση του νερού. Τα καλούπια, τα οποία ήταν ήδη προθερμασμένα (πριν την πλήρωσή τους με το αιώρημα), με τη βοήθεια μεταλλικών επίπεδων πλακών, στους 80°C, μεταφέρθηκαν αμέσως σε φούρνο στους 80°C και παρέμειναν για 1 ώρα, ώστε να συνεχίσει και να ολοκληρωθεί η διαδικασία της «ενοποίησης» του αμύλου (starch consolidation). Μετά, τα δοκίμια βγήκαν από το καλούπι, με πολύ προσοχή, και αφέθηκαν για ξήρανση, στην αρχή στους 40°C για 12 ώρες και μετά στους 110°C. Όπου κρίθηκε απαραίτητο, έγινε ήπια μορφοποίηση (με ρεκτιφιέ) στις επιφάνειές τους στο στάδιο αυτό.

Η καύση του αμύλου έγινε με θερμική κατεργασία με άνοδο της θερμοκρασίας από τους 100 στους 400°C με αργό βήμα θέρμανσης 1.3°C/min και παραμονή τους 400°C για 1 ώρα. Μετά, η θερμοκρασία ανέβηκε με βήμα 5°C/min μέχρι τους 1000°C, όπου παρέμεινε για 30 λεπτά (pre-sintering), και στη συνέχεια, με το ίδιο βήμα (5°C/min), η θερμοκ-

ρασία ανέβηκε στους 1600°C, όπου παρέμεινε για 2 ώρες για να ολοκληρωθεί η πυροσυσσωμάτωση των κεραμικών δοκιμίων. Η ψύξη έγινε μέσα στο φούρνο με ρυθμό ψύξης 5°C/min. Όλη η θερμική διεργασία έλαβε χώρα σε ηλεκτρικό φούρνο σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα.

Με ήπιο ρεκτιφιέ, τα δοκίμια απέκτησαν λείες, επίπεδες και παράλληλες επιφάνειες, ώστε να είναι κατάλληλες για τα πειράματα της παρούσας εργασίας. Οι διαστάσεις των δοκιμίων μετρήθηκαν με ακρίβεια με τη βοήθεια παχύμετρου (εικόνα 2.2).



**Εικόνα 2.2** Δοκίμια αλουμίνας με διαφορετικό πορώδες (α) 0%, (β) 6%, (γ) 12%, (δ) 24%, (ε) 36%, (στ) 48%.

### 2.1.2. Προσδιορισμός φαινόμενης πυκνότητας πορωδών δοκιμίων

Φαινόμενη πυκνότητα είναι το κλάσμα της μάζας του δοκιμίου προς τον όγκο του. Σε ένα πορώδες δοκίμιο, όπως αυτά που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, ο όγκος είναι το άθροισμα του όγκου του στερεού κεραμικού σκελετού και του όγκου των πόρων του.

Στην εργασία αυτή, η φαινόμενη πυκνότητα των δοκιμίων μετρήθηκε πειραματικά με τη μέθοδο του Αρχιμήδη, η οποία παρέχει αποτελέσματα με πολύ μεγάλη ακρίβεια.

Συγκεκριμένα, τα δοκίμια καλύφθηκαν με μία λεπτή μεμβράνη (parafilm), η οποία δεν επιτρέπει τη διείσδυση νερού στους πόρους του υλικού (η αλούμινα έχει μικρή γωνία διαβροχής με το νερό,  $<90^\circ$ , και έτσι ευνοείται, θερμοδυναμικά η διείσδυση νερού μέσα στους πόρους των δοκιμίων της αλούμινας). Στη συνέχεια, με τη βοήθεια ζυγού υψηλής ακρίβειας (KERN), μετρήθηκε το βάρος των δοκιμίων αυτών πρώτα στον αέρα και μετά στο νερό σε θερμοκρασία δωματίου,  $\sim 20^\circ\text{C}$ , (το πιο μικρό βάρος στο νερό οφείλεται στην άνωση του δοκιμίου, που εξαρτάται από τον όγκο του υλικού και τη φαινόμενη πυκνότητά του). Η πειραματική διάταξη φαίνεται στην εικόνα 2.3. Ο υπολογισμός της φαινόμενης πυκνότητας έγινε με τη βοήθεια της εξίσωσης

$$\rho = \frac{A}{A-B} \rho_0 \quad (4)$$

όπου  $\rho$  είναι η φαινόμενη πυκνότητα,  
 $A$  είναι η μάζα του δοκιμίου στον αέρα,  
 $B$  είναι η μάζα του δοκιμίου στο νερό, και  
 $\rho_0$  είναι πυκνότητα του νερού ( $\approx 1 \text{ g/cm}^3$ )



**Εικόνα 2.3** Πειραματική διάταξη με το ζυγό ακριβείας και τον εξοπλισμό για την εύρεση της φαινόμενης πυκνότητας.

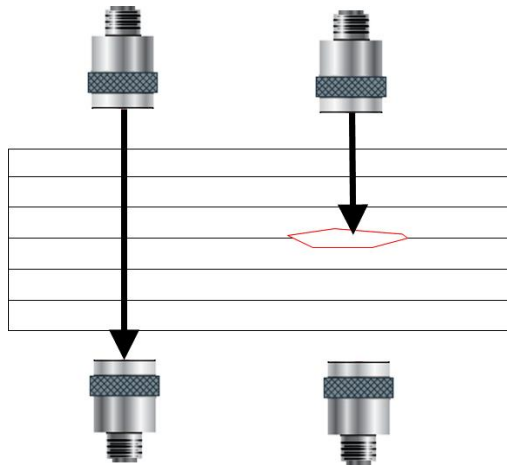
Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της φαινόμενης πυκνότητας των δοκιμίων για κάθε τιμή πορώδους με τις αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις, ενώ όλες οι τιμές που μετρήθηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράτημα.



## 2.2 Μέθοδος Through Transmission

Όπως είδαμε στην εισαγωγή, ο έλεγχος των υλικών με υπερήχους γινόταν με τη χρήση ενός μοναδικού αισθητήρα που αποστέλλει ένα σήμα στο δοκίμιο και επίσης λαμβάνει τις αντηχήσεις που επιστρέφουν. Συχνά όμως χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικοί αισθητήρες για τον έλεγχο των υλικών, όπου ο ένας λειτουργεί ως πομπός παλμών υπερήχων και ο άλλος τοποθετείται στην αντίθετη πλευρά του δοκιμίου ως δέκτης, για να λαμβάνει τα μεταδιδόμενα σήματα αφού διασχίσουν το υπό έλεγχο δοκίμιο (βλ. εικόνα 2.4). Η τεχνική αυτή ονομάζεται μέθοδος απ' ευθείας μετάδοσης. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αυτή, η ταχύτητα των υπερήχων στο δοκίμιο μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση (μετρώντας το χρόνο διέλευσης του παλμού,  $\Delta t$ , μέσω του δοκιμίου πάχους  $d$ ):

$$c = \frac{d}{\Delta t} \quad (5)$$



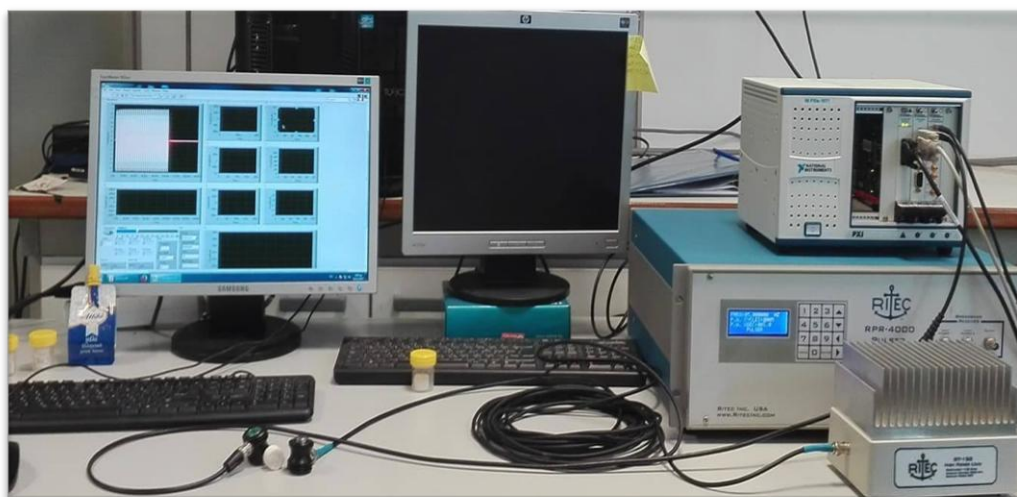
**Εικόνα 2.4** Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου απ' ευθείας μετάδοσης (through-transmission) για τον έλεγχο των υλικών με υπερήχους.

Στην περίπτωση ελέγχου συνθέτων πολύστρωματικών υλικών με τη μέθοδο της απ' ευθείας μετάδοσης, ένας μεγάλος αριθμός ανακλάσεων (άρα και σημάτων) δημιουργείται από τα διάφορα μεμονωμένα στρώματα του συνθέτου υλικού, οι οποίες μπορούν να επισκιάσουν μικρές ανακλάσεις από εγκλείσματα των οποίων η ανακλαστικότητα είναι παρόμοια με εκείνη των υλικών των στρώσεων. Ένα εγκλείσμα με ακουστική εμπέδηση πολύ κοντά σ' αυτή του δοκιμίου (για παράδειγμα εγκλείσμα χαρτιού ή ξεφλούδισμα σε σύνθετο υλικό με μήτρα πολυμερική) είναι πολύ δύσκολο να ανιχνευτεί με τη μέθοδο της απ' ευθείας μετάδοσης. Η χρήση της μεθόδου παλμού-ηχούς είναι πιο ενδεδειγμένη για την ανίχνευση τέτοιου είδους ατελειών. Όμως, οι ανακλάσεις από καλά κατανεμημένες ατέλειες στο υλικό, όπως το πορώδες, μπορούν να καλυφθούν από το γενικό υπόβαθρο θορύβου σε ένα

ακουστικό σήμα. Συνεπώς, η απώλεια της έντασης του μεταδιδόμενου μέσω του υλικού σήματος, είναι εκείνη που συχνά χρησιμοποιείται στη μέθοδο της απ' ευθείας μετάδοσης για την ανίχνευση τέτοιου είδους ατελειών. Παρ' όλο που ο βαθμός του πορώδους μπορεί να αξιολογηθεί μ' αυτόν τον τρόπο, δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί η ακριβής θέση του πορώδους.

Οι πειραματικές μετρήσεις της παρούσας εργασίας έγιναν με απ' ευθείας διάδοση κύματος (through transmission) καθώς και με διάδοση κύματος μέσω της τεχνικής pulse echo που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα. Για την τεχνική through transmission, η γεννήτρια παλμών τροφοδοτεί τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα (πομπό) ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος στο κέντρο μιας έδρας του δοκιμίου με άμεση επαφή με αυτή.

Το ηλεκτρικό σήμα, που έχει μορφή κρουστικού παλμού, μετατρέπεται σε τασικό και διαδίδεται στο υλικό μέχρι την απέναντι έδρα όπου βρίσκεται τοποθετημένος στο αντίστοιχο σημείο όμοιος πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας ο οποίος μετατρέπει τη μεταβατική απόκριση σε ηλεκτρικό σήμα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο εργαστηριακός εξοπλισμός και ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η καταγραφή του σήματος.



**Εικόνα 2.5** Η πειραματική διάταξη για through transmission που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία.

### 2.2.1. Καταγραφή της ταχύτητας των κυμάτων με την μέθοδο Through Transmission.

Τα δοκίμια της αλουμίνας τοποθετήθηκαν στο σύστημα της πειραματικής διάταξης, το οποίο αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά μέλη:

- παλμογεννήτρια υψηλών συχνοτήτων,
- συλλέκτη δεδομένων,
- σύστημα φραγής φορτίου μέγιστης ισχύος,
- πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, και
- σύστημα καταγραφής δεδομένων.



**Εικόνα 2.6** Πειραματική διάταξη κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.

Για να πραγματοποιηθεί η λήψη και η καταγραφή των εγκάρσιων και διαμηκών κυμάτων με τη βοήθεια υπερήχων για κάθε τιμή διαφορετικού πορώδους χρησιμοποιήθηκαν δύο αισθητήρες, ένας ως πομπός και ένας ως δέκτης. Ως μέσο ακουστικής σύζευξης χρησιμοποιήθηκε ιώδες ρευστό (μέλι) το οποίο εφαρμόστηκε ανάμεσα στους αισθητήρες και στο δοκίμιο. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στους αισθητήρες ασκείται μικρή πίεση έτσι ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη επαφή των δύο επιφανειών για μέγιστη πρόσφυση και ελάχιστη απώλεια υπερηχητικού κύματος για πιο ακριβή αποτελέσματα.

Το κύμα που διαδίδεται στο υλικό καταγράφεται από τους αισθητήρες με μία χρονική καθυστέρηση. Η χρονική διαφορά έναρξης του σήματος αντιστοιχεί στην καθορισμένη απόσταση μεταξύ των δύο αισθητήρων. Με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$D=c*t \quad (6)$$

όπου, **D**: η απόσταση των δύο αισθητήρων,

**C**: η ταχύτητα του κύματος,

**t**: η χρονική διαφορά μεταξύ των δύο σημάτων,

λαμβάνουμε την τιμή της ταχύτητας των διαμηκών και των εγκάρσιων κυμάτων.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέσες τιμές όροι για τις ταχύτητες των διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων για τα διαφορετικά ποσοστά πορώδους που καταγράφηκαν κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Οι τιμές για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά δίνονται στο Παράρτημα.

### 2.2.2 Τα βασικά μέρη της διάταξης Through Transmission

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά όλα τα μέρη της πειραματικής διάταξης καθώς και οι ρυθμίσεις που χρειάστηκαν σε κάθε συσκευή για την καταγραφή των αποτελεσμάτων.

#### 2.2.2.1 Παλμογεννήτρια υψηλών συχνοτήτων



**Εικόνα 2.7** Παλμογεννήτρια υψηλών παλμών Ritec (RPR-4000 PULSER RECEIVER).

Χρησιμοποιήθηκε παλμογεννήτρια υψηλών συχνοτήτων Ritec (RPR-4000 PULSER RECEIVER) η οποία διαθέτει έναν παλμοδότη σήματος, μέγιστης ισχύος 8 kW με κύκλωμα λειτουργίας έως και 1%.

Τα τυπικά εύρη συχνοτήτων υψηλής ισχύος (8kW) είναι από 200 kHz έως 20 MHz. Η υψηλή ισχύς είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν χρησιμοποιούμε ηλεκτρομαγνητικούς ακουστικούς μορφοτροπείς (EMAT) ή αισθητήρες πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων.

Οι ρυθμίσεις των παραμέτρων της γεννήτριας έγιναν ως εξής:

- Σήμα → Burst
- Περίοδος → 4
- Εύρος → 250 Volt
- Συχνότητα → 5MHz

### 2.2.2.2 Συλλέκτης δεδομένων

Ο συλλέκτης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο PXI (NI PXIe-1071) ο οποίος εμπεριέχει μια κάρτα PXI-5105 υψηλής ακρίβειας oscilloscope, και με τεχνικά χαρακτηριστικά:

- 3 περιφερειακούς υποδοχείς (δέχεται 3U PXI Express και CompactPCI Express, PXI και Μονάδες CompactPCI σε κάθε υποδοχή).
- Μέγιστο εύρος ζώνης έως 1 GB ανά δευτερόλεπτο (x4 PCI Express), συνολικό εύρος ζώνης συστήματος 3 GB / s.
- Ρολόγια αναφοράς χαμηλού θορύβου 10 MHz και 100 MHz με σταθερότητα 25 ppm.
- Συνολική ισχύς 230 W για εύρος θερμοκρασιών από 0 έως 50 ° C.
- Δοκιμή HALT για αυξημένη αξιοπιστία.



**Εικόνα 2.8** Συλλέκτης δεδομένων PXI (NI PXIe-1071).

### 2.2.2.3 Σύστημα φραγής αντανάκλασεων σήματος

Ο τερματισμός RT-150 προορίζεται για χρήση με τον παλμοδέκτη υψηλών συχνοτήτων RPR-4000. Όταν ο μορφοτροπέας (αισθητήρας) έχει μεγάλη σύνθετη αντίσταση εισόδου, οι αντανάκλασεις μπορούν να επηρεάσουν το σήμα. Η τοποθέτηση του RT-150 στην έξοδο του RPR-4000 θα μειώσει τις αντανάκλασεις. Επίσης μειώνοντας την εμπέδηση του σήματος, δίνεται η δυνατότητα ελαφρώς περισσότερης ισχύος από την υψηλή ισχύ εξόδου του RPR-4000, επιτρέποντας μεγαλύτερο έλεγχο του εύρους τάσης της υψηλής τάσης.

Η συσκευή φραγής μέγιστης ισχύος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Ritec RT-150 με τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Αντίσταση: ~ 150 ohms,
- Μέγιστη τάση: 2500 Vp-p, και
- Μέγιστη ισχύς: 50w.



Εικόνα 2.9 Συσκευή φραγής αντανάκλασεων σήματος.

### 2.2.2.4 Σύστημα καταγραφής αποτελεσμάτων

Για την καταγραφή του σήματος χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα καταγραφής PXIe-1071 (PXI Chassis) το οποίο ενσωματώνει τρεις (3) κάρτες. Μία κάρτα PXI-8360 (PXI Remote Control Module) η οποία επιτρέπει τον έλεγχο του συστήματος PXIe από τον υπολογιστή μέσω κατάλληλου προγράμματος. Μια κάρτα υψηλής απόδοσης PXI-8430 (PXI Serial Interface Module) η οποία επιτρέπει την επικοινωνία με υψηλές ταχύτητες για συσκευές RS232. Τέλος το σύστημα καταγραφής περιλάμβανε και μία κάρτα-οσιλοσκόπιο PXI-5105 (60 MHz sample rate, 8-Channel, 12-Bit PXI Oscilloscope) η οποία ήταν υπεύθυνη για την καταγραφή των κυματομορφών/σημάτων. Η συγκεκριμένη κάρτα διαθέτει οκτώ κανάλια δειγματοληψίας τα οποία μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα. Αφού συλλέγονταν τα δεδομένα η επεξεργασία τους γινόταν μέσω ενός κώδικα, σε γλώσσα προγραμματισμού LabView, ο οποίος αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο.

### 2.2.2.5 Αισθητήρες

Για την ανίχνευση των σημάτων της ακουστικής εκπομπής χρησιμοποιήθηκαν πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες της εταιρίας Olympus, συγκεκριμένα οι PANAMETRICS-NDT OLYMPUS, V103-RM 1MHz/0.5" και V109-RB 5MHz/0.5" διαμηκών κυμάτων, καθώς επίσης και οι V153-RM 1MHz/0.5" και V155-RB 5MHz/0.5" εγκάρσιων κυμάτων. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δοκιμές πολλών διαφορετικών υλικών, παρέχουν επίσης ευθεία ανίχνευση ελαττωμάτων δέσμης και ομαδοποίηση πάχους, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες έως και 50° C.



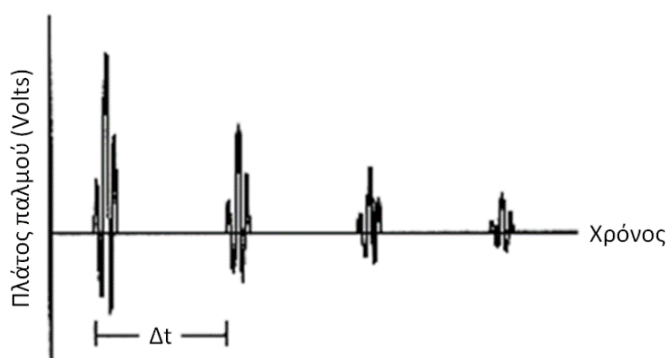
**Εικόνα 2.10** Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες Olympus 1MHz και 5MHz, διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων.



## 2.3 Μέθοδος παλμού-ηχούς (pulse-echo)

Στην τεχνική ελέγχου υπερήχων pulse-echo, ένας μοναδικός αισθητήρας υπερήχων παράγει παλμό υπερήχων και επίσης λαμβάνει την ηχώ του (T/R). Οι περισσότεροι αισθητήρες υπερήχων χρησιμοποιούν ένα ηλεκτρονικό παλμό για να παράγουν ένα αντίστοιχο ηχητικό παλμό με βάση το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Ένας βραχύς (διάρκειας λιγότερο από 20 ns) ηλεκτρικός παλμός υψηλής τάσης (πλάτους 100-200V) διεγείρει ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο για να παράγει ένα παλμό υπερήχων.

Ο αισθητήρας εκπέμπει τον παλμό υπερήχων κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου πάχους  $d$ . Ο παλμός υπερήχων διαδίδεται μέσω του υλικού και ανακλάται από την απέναντι πλευρά. Ο αισθητήρας στη συνέχεια ανιχνεύει τις ανακλώμενες αντηχήσεις. Ο παλμός υπερήχων συνεχίζει να ανακλάται από τις απέναντι επιφάνειες του δοκιμίου και εξασθενεί με την πάροδο του χρόνου. Η χρονική διάρκεια ανάμεσα σε δυο αντηχήσεις ( $\Delta t$ ) ισούται με το χρόνο που απαιτείται ώστε ο παλμός να ταξιδέψει μέσω του δοκιμίου και να επιστρέψει πίσω στον αισθητήρα. Η εξασθένηση του πλάτους του σήματος είναι εκθετική συνάρτηση του χρόνου.



**Εικόνα 2.11** Σχηματική παράσταση επαναλαμβανόμενων αντηχήσεων (A-scan) μετά από συνεχείς ανακλάσεις του αρχικού παλμού από τις απέναντι επιφάνειες του δοκιμίου.

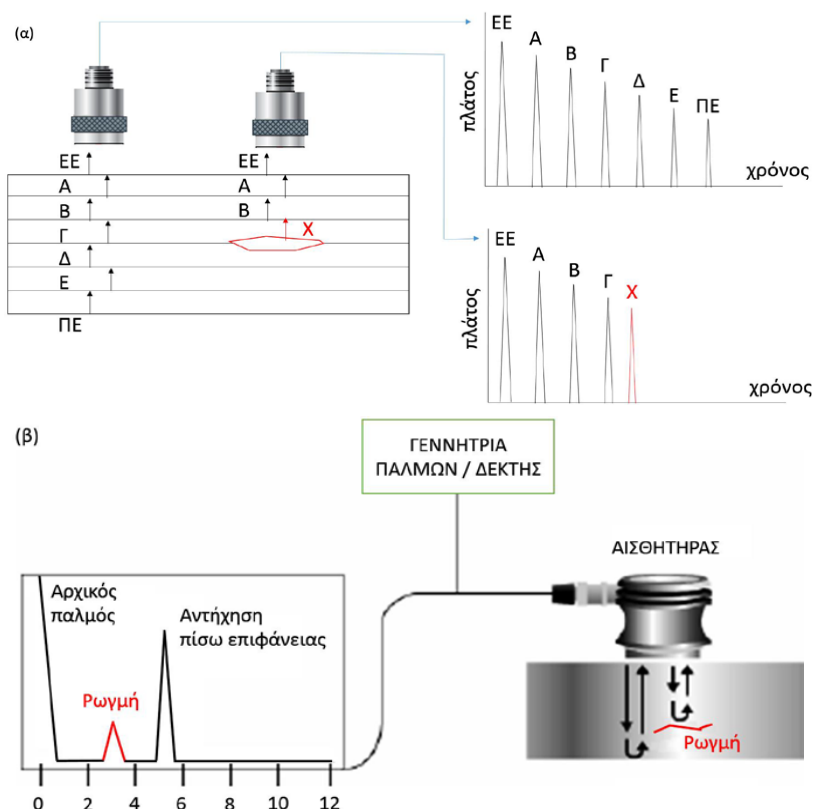
Η ταχύτητα των υπερήχων στο δοκίμιο μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση, μετρώντας το χρόνο διέλευσης και επιστροφής του παλμού,  $\Delta t$ , και το πάχος  $d$  του δοκιμίου:

$$c = \frac{2d}{\Delta t} \quad (7)$$

Για τον προσδιορισμό της θέσης μιας ατέλειας, όπως για παράδειγμα η διάβρωση στο εσωτερικό του δοκιμίου, η χρήση της μεθόδου παλμού-ηχούς ενδείκνυται επειδή η απόσταση της ατέλειας από την εμπρός ή την πίσω επιφάνεια του δοκιμίου μπορεί να



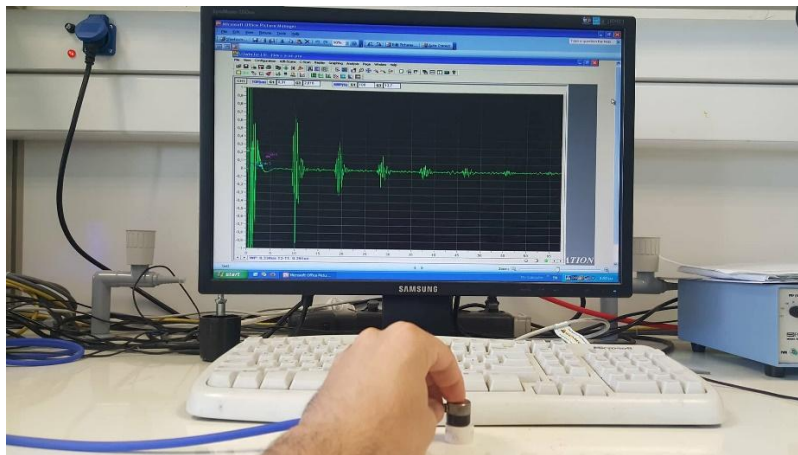
προσδιοριστεί από τη σχετική θέση των ανακλάσεων της ατέλειας (π.χ. αποκόλληση στρώσης σε πολυστρωματικά σύνθετα υλικά) σε σχέση με την ανάκλαση από την επιφάνεια του δοκιμίου. Το πλάτος του παλμού είναι ευθέως ανάλογο προς το μέγεθος της επιφάνειας που ανακλά, αλλά ταυτόχρονα εξασθενεί με την απόσταση που διανύει το κύμα μέσα στο δοκίμιο. Η γραμμική θέση του παλμού είναι ανάλογη της απόστασης της ανακλώσας επιφάνειας από τον αισθητήρα (ο χρόνος εξαρτάται από την κυματική ταχύτητα). Στην Εικόνα 2.12α παρατηρούμε ότι χρονικά πρώτη λαμβάνεται από τον αισθητήρα η ανάκλαση του σήματος από την εμπρός επιφάνεια (ΕΕ), στη συνέχεια και σε σχέση με το βάθος της κάθε στρώσης, λαμβάνονται διαδοχικά οι ανακλάσεις από τις στρώσεις Α, Β, Γ, Δ και Ε, τελευταία δε λαμβάνεται η ανάκλαση από την πίσω επιφάνεια (ΠΕ). Στην περίπτωση αποκόλλησης μιας στρώσης (στο παράδειγμα ανάμεσα στις στρώσεις Β και Γ) το τελευταίο σήμα, Χ, που λαμβάνεται αντιστοιχεί στην αποκόλληση και δεν υπάρχουν άλλα σήματα έπειτα από αυτό. Μπορεί λοιπόν να γίνει προσδιορισμός του βάθους της ατέλειας. Στην Εικόνα 2.12β, βλέπουμε το παράδειγμα ανίχνευσης ρωγμής με αισθητήρα επαφής με τη μέθοδο παλμού-ηχούς.



**Εικόνα 2.12** Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου παλμού-ηχούς (pulse-echo) για τον έλεγχο των υλικών με υπερήχους: (α) Ανίχνευση αποκόλλησης στρώσης σε πολυστρωματικό σύνθετο υλικό, (β) ανίχνευση ρωγμής στο εσωτερικό δοκιμίου.

### 2.3.1 Καταγραφή της ταχύτητας των κυμάτων με την μέθοδο Pulse-echo.

Για να πραγματοποιηθεί η λήψη και η καταγραφή των εγκάρσιων και διαμηκών κυμάτων με τη βοήθεια υπερήχων για κάθε τιμή διαφορετικού πορώδους χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας, ο οποίος λειτουργούσε σαν πομπός και σαν δέκτης. Ως μέσο ακουστικής σύζευξης χρησιμοποιήθηκε ιώδες ρευστό (μέλι) το οποίο εφαρμόστηκε ανάμεσα στον αισθητήρα και στο δοκίμιο. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στον αισθητήρα ασκείται μικρή πίεση έτσι ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη επαφή των δύο επιφανειών για μέγιστη πρόσφυση και ελάχιστη απώλεια υπερηχητικού κύματος για πιο ακριβή αποτελέσματα.



Εικόνα 2.13: Πειραματική διάταξη κατά τη διεξαγωγή του πειράματος Pulse echo.

Τα δοκίμια της αλούμινας τοποθετήθηκαν στο σύστημα της πειραματικής διάταξης, το οποίο αποτελείται από έναν υπολογιστή ο οποίος περιέχει τον ακόλουθο εξοπλισμό:

- μία κάρτα AD\_IPR-1210 (integrated analog to digital Converter with pulser/receiver),
- μία κάρτα AD-8Xg,
- το ειδικό λογισμικό UTWin, και
- πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες.

Το κύμα που διαδίδεται στο υλικό καταγράφεται από τον αισθητήρα με μία χρονική καθυστέρηση. Η χρονική διαφορά έναρξης του σήματος αντιστοιχεί στη διπλάσια απόσταση του πάχους του δοκιμίου. Με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$2d=c/t \quad (8)$$

όπου, **D**: η απόσταση των δύο αισθητήρων,

**C**: η ταχύτητα του κύματος, και

**t:** η χρονική διαφορά μεταξύ των δύο σημάτων,

λαμβάνουμε την τιμή ταχύτητας των διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέσες τιμές για τις ταχύτητες των διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων για τα διαφορετικά ποσοστά πορώδους που καταγράφηκαν κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Οι τιμές για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά δίνονται στο παράρτημα.

## 2.4 Υπολογισμός λόγου Poisson και Μέτρου Ελαστικότητας

Από τις τιμές της ταχύτητας των διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων υπολογίστηκε η τιμή του λόγου Poisson ( $\nu$ ) για κάθε δοκίμιο αλούμινας σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\nu = \frac{1 - 2\left(\frac{C_s^2}{C_l^2}\right)}{2 - 2\left(\frac{C_s^2}{C_l^2}\right)} \quad (9)$$

όπου :  $\nu$  ο λόγος του Poisson (αδιάστατο μέγεθος),

$C_s$  η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων, και

$C_l$  η ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων.

Από τη φαινόμενη πυκνότητα, που έχει υπολογιστεί σε προηγούμενο στάδιο, από το λόγο Poisson αλλά και τις τιμές της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων μπορεί να υπολογιστεί το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ) των δοκιμίων της αλούμινας σύμφωνα με την εξίσωση:

$$E = C_s^2 * 2\rho * (1 + \nu) \quad (10)$$

όπου :  $C$  είναι η ταχύτητα υπερήχων σε m/s,

$E$ : είναι το μέτρο ελαστικότητας,

$\rho$ : είναι η φαινόμενη πυκνότητα του δοκιμίου, και

$\nu$ : ο λόγος Poisson.

### 3. Πειραματικά Αποτελέσματα και Συζήτηση

#### 3.1 Φαινόμενη Πυκνότητα Πορώδων Δοκιμίων Αλούμινας

Στην παρούσα εργασία οι τιμές της φαινόμενης πυκνότητας μετρήθηκαν και υπολογίστηκαν με τη μέθοδο εμβάπτισης (σε νερό) του Αρχιμήδη, όπως περιγράφηκε λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι μέσες τιμές της φαινόμενης πυκνότητας με τις αντίστοιχες τιμές της σταθεράς απόκλισης (standard deviation) παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, ενώ όλες τιμές που μετρήθηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα.

**Πίνακας 3.1.** Μέση τιμή πυκνότητας (και σταθερή απόκλιση) δοκιμίων αλούμινας για κάθε τιμή πορώδους.

Πορώδες (%)	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )
0	3,845 ± 0,013
6	3,043 ± 0,005
12	2,875 ± 0,008
24	2,562 ± 0,022
36	2,496 ± 0,060
48	2,210 ± 0,030

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει η ακόλουθη σημείωση. Στην εργασία αυτή, οι τιμές του πορώδους, που αναφέρονται στον Πίνακα 3.1 αλλά και σε όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο, αναφέρονται στις τιμές του πορώδους που υπολογίστηκαν από το κλάσμα του όγκου του αμύλου που προστέθηκε σε κάθε ένα από τα έξι διαφορετικά αιωρήματα που παρασκευάστηκαν. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αυτό, λόγω της ιδιότητας του αμύλου να κατακρατάει το νερό που έχει προσροφήσει όταν γίνεται άκαμπτο στερεό, δεν είναι λάθος, με το σκεπτικό ότι σε μεγάλες τιμές πορώδους, σαν αυτές που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία (>6%), η πυροσυσσωμάτωση δεν πρέπει να έχει δραματική επίδραση στους πόρους που θα αφήσει το άμυλο που θα καεί. Επίσης, στην τεχνολογία των κεραμικών και των υάλων, πολλά γνωστά υλικά χαρακτηρίζονται, στο όνομά τους, από τις αρχικές συστάσεις παρά από τις τελικές που προκύπτουν μετά τη θερμική κατεργασία, ίσως και από το γεγονός ότι η ακρίβεια στις αρχικές συστάσεις μπορεί να είναι πολύ πιο μεγάλη από ότι οι συστάσεις στο τελικό προϊόν. Αυτό ακριβώς υιοθετείται και στην ονοματολογία των δοκιμίων που εξετάστηκαν στην παρούσα ερ-

γασία, και έτσι οι τιμές του πορώδους που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή αναφέρονται στο αρχικό κλάσμα όγκου του αμύλου.

Πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι κατά την κατασκευή των δοκιμίων, έγινε, από τις γεωμετρικές τους διαστάσεις υπολογισμός του πορώδους τους, θεωρώντας τη θεωρητική πυκνότητα της αλούμινας ίσης με  $3,98 \text{ g/cm}^3$ . Από τους υπολογισμούς αυτούς, προκύπτει ότι οι τιμές του πορώδους που αναφέρονται στην εργασία αυτή δεν διαφέρουν ουσιαστικά από τις πραγματικές τιμές του πορώδους των τελικών πυροσυσσωματωμένων δοκιμίων, επιβεβαιώνοντας ότι σωστά υιοθετήθηκε η τεχνική του starch consolidation, όπως αναφέρθηκε λεπτομερώς και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτό, όμως (δηλαδή η παράθεση των τιμών του πορώδους που υπολογίστηκαν με τον τρόπο αυτό) δεν αναφέρεται στην παρούσα εργασία γιατί είναι έξω από το ερευνητικό ενδιαφέρον της παρούσας εργασίας.

Γενικά, πάντως, ο ακριβής υπολογισμός του πορώδους γίνεται με βάση το πρότυπο ISO 10545-3, 1995. Σύμφωνα με αυτό το πρότυπο, το πορώδες δοκίμιο εμβαπτίζεται για 2 ώρες σε ζέον ύδωρ με σκοπό να πληρωθούν όλοι οι πόροι του με νερό. Μετά, αφήνεται το δοκίμιο για 3 ώρες μέσα στο νερό για να επανέρθει σιγά-σιγά στη θερμοκρασία δωματίου. Μετά το βγάζουμε από νερό και σκουπίζονται όλες η επιφάνειες του δοκιμίου με μία υγρή πετσέτα και τότε ζυγίζεται το δοκίμιο για να υπολογιστεί πόσο νερό έχει μπει στους πόρους του και έτσι να υπολογιστεί το ανοιχτό πορώδες του. Όμως, εδώ πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι, εκτός από το ανοιχτό πορώδες, στο οποίο μπορεί να διεισδύσει το νερό (το υγρό, εν γένει), υπάρχει και το κλειστό πορώδες, το οποίο συνεισφέρει στη φαινόμενη πυκνότητα, και μάλιστα εκλαμβάνεται ως μέρος της πυκνότητας του κεραμικού σκελετού.

Τα παραπάνω συνοψίζονται στο παράδειγμα από τον στον Πίνακα 3.1, όπου φαίνεται ότι η πυκνότητα των δοκιμίων με 0% πορώδες είναι μικρότερη από τη θεωρητική πυκνότητα της αλούμινας ( $3,845$  και  $3,98 \text{ g/cm}^3$ , αντίστοιχα), αλλά οι μετρήσεις που έγιναν δεν μπορούν να καταστήσουν σαφές εάν αυτό οφείλεται σε ανοιχτό ή/και σε κλειστό πορώδες. Πάντως από τον Πίνακα 3.1 φαίνεται ότι η αύξηση της ποσότητας του αμύλου έχει οδηγήσει στην ελάττωση της πυκνότητας των δοκιμίων, και άρα στην αύξηση του πορώδους τους. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, οι μετρήσεων αυτές δεν επιτρέπουν εκτίμηση του κλειστού πορώδους των δοκιμίων (δηλαδή την ύπαρξη πόρων μη-συνδεδεμένων μεταξύ τους), το οποίο, όμως, από το παράδειγμα των δοκιμίων με 0% πορώδες, φαίνεται να υπάρχει.

### 3.2 Ταχύτητες Διαμηκών και Εγκάρσιων Κυμάτων

Στους Πίνακες 3.2-3.5 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές (με τις αντίστοιχες τιμές της σταθερής απόκλισης) των ταχυτήτων διάδοσης των διαμηκών και των εγκάρσιων κυμάτων για κάθε ποσοστό πορώδους, ανάλογα με τη μέθοδο μέτρησης υπερήχων και τη συχνότητα του αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε. Όλες οι τιμές που μετρήθηκαν για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά παρουσιάζονται στο Παράρτημα. Ο υπολογισμός των τιμών έγινε με βάση τα όσα αναφέρθηκαν λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο.

**Πίνακας 3.2.** Ταχύτητα διαμηκών (longitudinal waves) και εγκάρσιων κυμάτων (shear waves) για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Through Transmission.

Πορώδες (%)	Ταχύτητα κυμάτων (m/s)	
	Διαμήκη	Εγκάρσια
0	10365 ± 275	6102 ± 25
6	8300 ± 114	4951 ± 33
12	8158 ± 29	4904 ± 71
24	7531 ± 86	4585 ± 36
36	6777 ± 50	4341 ± 34
48	4969 ± 88	3299 ± 54

**Πίνακας 3.3.** Ταχύτητα διαμηκών (longitudinal waves) και εγκάρσιων κυμάτων (shear waves) για αισθητήρα 5 MHz με τη μέθοδο Through Transmission.

Πορώδες (%)	Ταχύτητα κυμάτων (m/s)	
	Διαμήκη	Εγκάρσια
0	10375 ± 275	6108 ± 25
6	8309 ± 114	4956 ± 33
12	8166 ± 29	4908 ± 71
24	7539 ± 86	4590 ± 36
36	6784 ± 50	4345 ± 34
48	4974 ± 88	3302 ± 54

**Πίνακας 3.4.** Ταχύτητα διαμηκών (longitudinal waves) και εγκάρσιων κυμάτων (shear waves) για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Pulse Echo.

Πορώδες (%)	Ταχύτητα κυμάτων (m/s)	
	Διαμήκη	Εγκάρσια
0	10262 ± 272	6041 ± 25
6	8218 ± 113	4901 ± 33
12	7832 ± 28	4707 ± 68
24	7230 ± 83	4402 ± 34
36	6303 ± 47	4038 ± 31
48	4621 ± 82	-

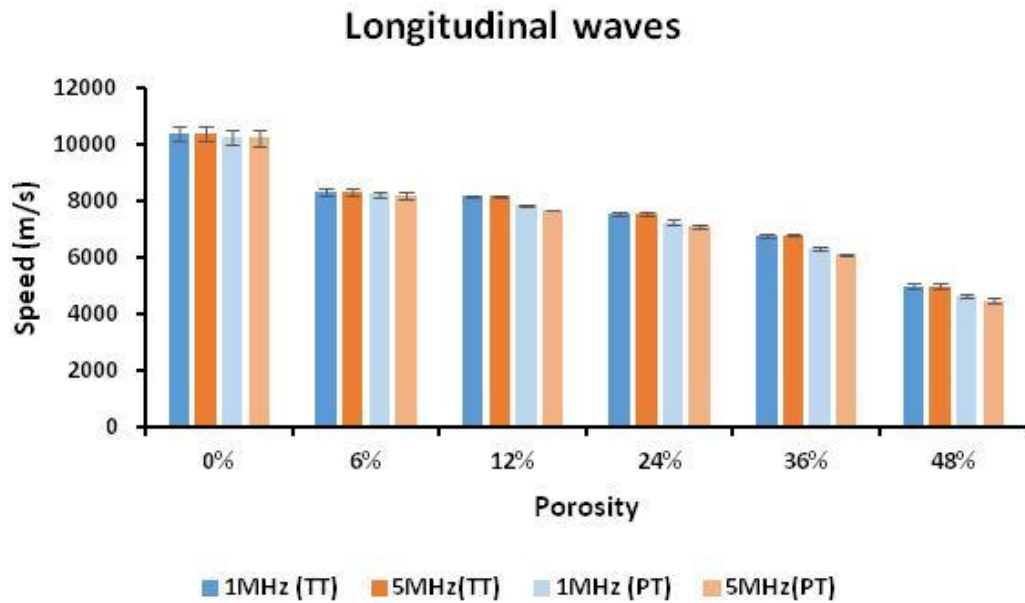
**Πίνακας 3.5.** Ταχύτητα διαμηκών (longitudinal waves) και εγκάρσιων κυμάτων (shear waves) για αισθητήρα 5 MHz με τη μέθοδο Pulse Echo.

Πορώδες (%)	Ταχύτητα κυμάτων (m/s)	
	Διαμήκη	Εγκάρσια
0	10220 ± 271	6017 ± 25
6	8184 ± 112	4882 ± 33
12	7669 ± 27	4609 ± 67
24	7080 ± 81	-
36	6099 ± 45	-
48	4472 ± 79	-

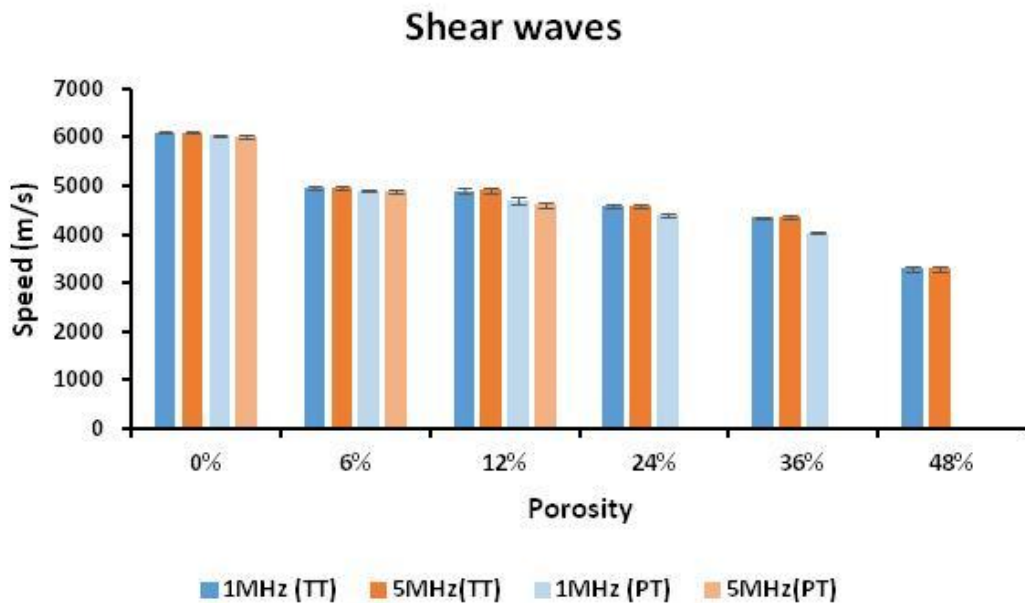
Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στα διαγράμματα των εικόνων 3.1 και 3.2. Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζονται οι μέσες τιμές, με τις σχετικές τιμές της σταθερής απόκλισης, της ταχύτητας διάδοσης των διαμηκών κυμάτων ως συνάρτηση της τιμής του πορώδους των δοκιμίων της αλούμινας, και στο δεύτερο διάγραμμα οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων.

Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρούμε ότι η ταχύτητα των υπερήχων των διαμηκών και των εγκάρσιων κυμάτων μειώνεται με την αύξηση του πορώδους των κεραμικών δοκιμίων της αλούμινας. Η μεγαλύτερη ταχύτητα καταγράφηκε στα δοκίμια με 0% πορώδες. Δηλαδή, η ταχύτερη διάδοση του υπερηχητικού κύματος οφείλεται στην έλλειψη πορώδους.





**Εικόνα 3.1 :** Επίδραση του πορώδους των δοκιμίων της αλούμινας στην ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων, μετρημένων με τις μεθόδους Through Transmission (TT) και Pulse Echo (PT) σε συχνότητες 1 και 5 MHz.



**Εικόνα 3.2 :** Επίδραση του πορώδους των δοκιμίων της αλούμινας στην ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων, μετρημένων με τις μεθόδους Through Transmission (TT) και Pulse Echo (PT) σε συχνότητες 1 και 5 MHz.

Πέρα από την αποτίμηση της σχέσης μεταξύ της ταχύτητας διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων και του πορώδους ενός κεραμικού υλικού, που είναι και ο σκοπός της εργασίας αυτής, η αύξηση του πορώδους επιτρέπει και την εξαγωγή συμπερασμάτων και για τις μεθόδους μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, σε μία πρώτη ανάγνωση, από αυτά τα διαγράμματα διαπιστώνεται ότι η μέθοδος μέτρησης καθώς και η συχνότητα έχουν σχετικά μικρή επίδραση στις τιμές της ταχύτητας που μετρώνται, ιδιαίτερα στα δοκίμια με μικρό πορώδες, τουλάχιστον σε σχέση με τη μεγάλη επίδραση που έχει το πορώδες στις τιμές αυτές των ταχυτήτων. Με άλλα λόγια, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι όλες οι μέθοδοι και οι συχνότητες που δοκιμάστηκαν παρέχουν σχετικά υψηλή αξιοπιστία. Όμως, λόγω της μεθόδου κατασκευής των κεραμικών γενικά, αλλά και ειδικά στη συγκεκριμένη εργασία, με δεδομένο ότι το πορώδες είναι ένας παράγων πιο αστάθμητος από ότι το κεραμικό υλικό αυτό καθαυτό, μπορεί να γίνει, σε μία επόμενη εργασία, μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν την κάθε μέθοδο (όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια).

Από την παρούσα, όμως, εργασία, αναφορικά με το ζήτημα αυτό, μπορούν να εξαχθούν κάποια πρώτα συμπεράσματα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι στη μέθοδο Through Transmission, μεταξύ των δύο αισθητήρων (1MHz και 5MHz) δεν υπάρχουν διαφορές στις ταχύτητες των διαμηκών και των εγκάρσιων κυμάτων. Αντίθετα, στη μέθοδος Pulse Echo, αν και αυτή δίνει πιο ακριβείς μετρήσεις, παρατηρούνται διαφορές στις ταχύτητες των διαμηκών αλλά και των εγκάρσιων κυμάτων. Μάλιστα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τα εγκάρσια κύματα, σε μερικές περιπτώσεις υψηλών τιμών πορώδους δεν κατέστη δυνατόν να καταγραφούν οι ταχύτητες καθόλου. Για τον αισθητήρα 1MHz δεν κατέστη δυνατόν να καταγραφεί η εγκάρσια ταχύτητα για τα δοκίμια με πορώδες 48%, ενώ για τον αισθητήρα 5MHz για τα δοκίμια με πορώδες 24, 36 και 48%. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το αυξημένο πορώδες των δοκιμίων δημιουργεί πολλές αντανάκλασεις και επιπλέον εξασθενεί πολύ τον παλμό, και υπενθυμίζεται ότι στην τεχνική Pulse Echo το κύμα διανύει τη διπλάσια απόσταση σε σχέση με την τεχνική Through Transmission. Έτσι, δεν αποτελεί έκπληξη γιατί σε χαμηλές τιμές πορώδους, 0% και 6%, οι ταχύτητες διάδοσης των διαμηκών και των εγκάρσιων κυμάτων είναι παρόμοιες και για τις δύο μεθόδους.

### 3.3 Λόγος Poisson και Μέτρο Ελαστικότητας Δοκιμίων Αλούμινας

Στους Πίνακες 3.6-3.9 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι σχετικές τιμές της σταθερής απόκλισης του λόγου Poisson και του μέτρο ελαστικότητας (E) για κάθε τιμή πορώδους των δοκιμίων της αλούμινας, ανάλογα με τη μέθοδο μέτρησης υπερήχων αλλά και τη συχνότητα του αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε. Οι τιμές και των δύο μεγεθών για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά παρουσιάζονται στο Παράρτημα. Οι τιμές του λόγου Poisson και του μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκαν με βάση τα όσα αναφέρθηκαν λεπτομερώς στα προηγούμενα κεφάλαια.

**Πίνακας 3.6.** Τιμές λόγου Poisson ( $\nu$ ) και Μέτρου Ελαστικότητας (E) για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Through Transmission.

Πορώδες (%)	Λόγος Poisson ( $\nu$ )	E (GPa)
0	$0.234 \pm 0.018$	$353.359 \pm 8.719$
6	$0.223 \pm 0.015$	$182.494 \pm 1.824$
12	$0.217 \pm 0.013$	$212.236 \pm 76.199$
24	$0.205 \pm 0.014$	$129.817 \pm 1.988$
36	$0.152 \pm 0.008$	$108.369 \pm 3.298$
48	$0.105 \pm 0.021$	$53.156 \pm 1.814$

**Πίνακας 3.7.** Τιμές λόγου Poisson ( $\nu$ ) και Μέτρου Ελαστικότητας (E) για αισθητήρα 5 MHz με τη μέθοδο Through Transmission.

Πορώδες (%)	Λόγος Poisson ( $\nu$ )	E (GPa)
0	$0.233 \pm 0.020$	$353.958 \pm 7.499$
6	$0.223 \pm 0.015$	$182.857 \pm 1.825$
12	$0.217 \pm 0.013$	$168.559 \pm 3.446$
24	$0.205 \pm 0.014$	$130.094 \pm 1.995$
36	$0.152 \pm 0.008$	$108.581 \pm 3.304$
48	$0.105 \pm 0.021$	$53.260 \pm 1.815$

**Πίνακας 3.8.** Τιμές λόγου Poisson ( $\nu$ ) και Μέτρου Ελαστικότητας (E) για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Pulse Echo.

Πορώδες (%)	Λόγος Poisson ( $\nu$ )	E (GPa)
0	$0.234 \pm 0.017$	$346.333 \pm 8.568$
6	$0.223 \pm 0.015$	$178.863 \pm 1.783$
12	$0.217 \pm 0.013$	$155.028 \pm 3.190$
24	$0.205 \pm 0.014$	$119.636 \pm 1.829$
36	$0.152 \pm 0.008$	$93.724 \pm 2.850$
48	-	-

**Πίνακας 3.9.** Τιμές λόγου Poisson ( $\nu$ ) και Μέτρου Ελαστικότητας (E) για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Pulse Echo.

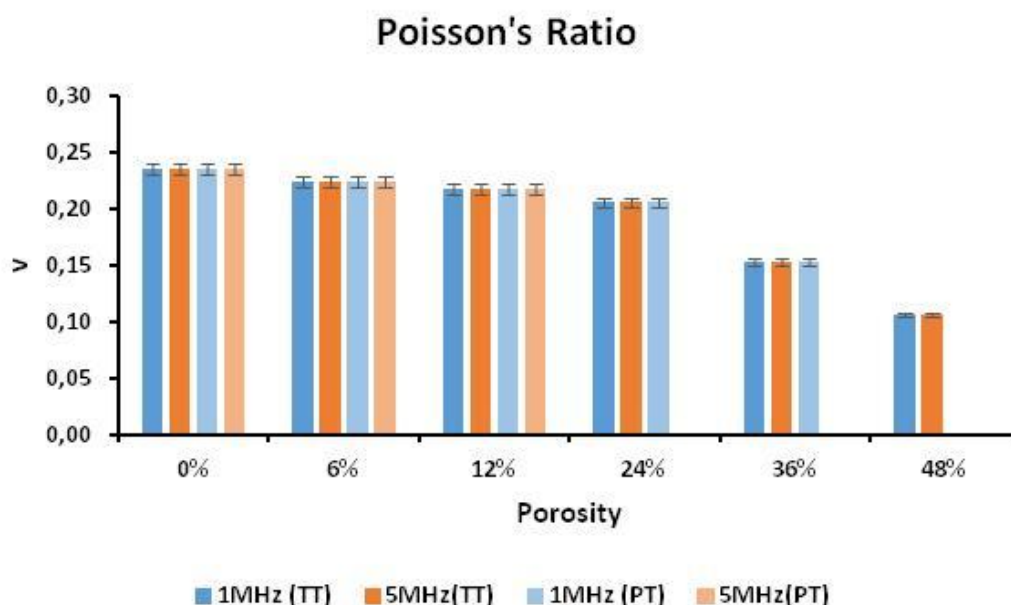
Πορώδες (%)	Λόγος Poisson ( $\nu$ )	E (GPa)
0	$0.233 \pm 0.017$	$343.531 \pm 8.468$
6	$0.223 \pm 0.015$	$177.406 \pm 1.770$
12	$0.216 \pm 0.012$	$148.645 \pm 3.032$
24	-	-
36	-	-
48	-	-

### 3.3.1 Λόγος Poisson

Ο λόγος Poisson αποτελεί βασικό κριτήριο για την εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, των δοκιμών της αλουμίνας στην παρούσα εργασία, καθώς προβάλλει τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού σε εφελκυστική τάση. Είναι αδιάστατο μέγεθος που παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 0,5. Για ένα τέλεια ισότροπο στερεό υλικό, ο λόγος Poisson ισούται θεωρητικά με 0,25. Η μέγιστη τιμή ισχύει για τα ρευστά ενώ για υλικά με τιμές πολύ κοντά στο 0 υποδηλώνει άπειρη αντίσταση σε διάτμηση. Ο λόγος Poisson μπορεί να προβλεφθεί από τις ταχύτητες διάδοσης των διαμηκών και των εγκάρσιων κυμάτων, οι οποίες είναι συνάρτηση του πορώδους του υλικού μέσα στο οποίο διαδίδονται.

Οι τιμές τις οποίες λαμβάνουμε από τα πειράματα της εργασίας αυτής έρχονται σε συμφωνία με τις θεωρητικές τιμές. Συγκεκριμένα ο λόγος Poisson κυμαίνεται από 0,11 έως 0,24, με ελάχιστη και μέγιστη τιμή για τα δοκίμια με πορώδες 48% και 0%, αντίστοιχα.

Στο διάγραμμα της εικόνας 3.3, στο οποίο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μέσες τιμές, με τις σχετικές τιμές της σταθερής απόκλισης, του λόγου Poisson ως συνάρτηση της τιμής του πορώδους των δοκιμών της αλουμίνας, δεν παρατηρείται κάποια γραμμική σχέση του λόγου Poisson με το πορώδες. Η απόκλιση των τιμών για κάθε τιμή πορώδους είναι μικρή (κυμαίνονται μέσα σε ένα στενό, σχετικά, εύρος τιμών). Αυτό αποδίδεται στην τυχαία κατανομή και διεύθυνση των πόρων, καθώς τα δοκίμια δεν έχουν υποστεί καμία αξονική συμπίεση για να πραγματοποιηθεί ευθυγράμμιση των πόρων προς μία διεύθυνση, κάτι που θα είχε ως αποτέλεσμα μικρότερες τιμές κατά τη διεύθυνση της συμπίεσης.

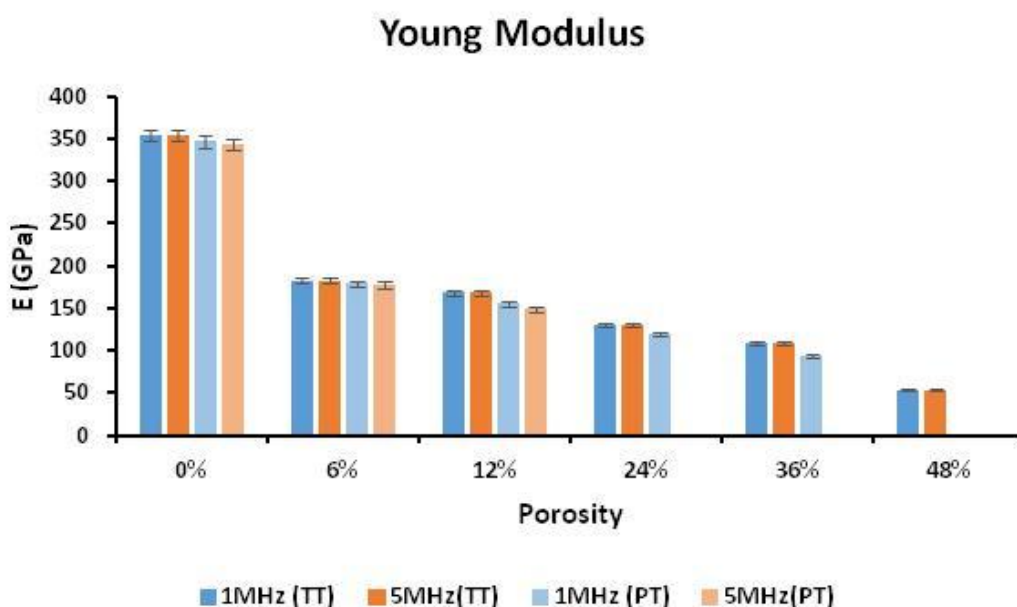


**Εικόνα 3.3 :** Επίδραση του πορώδους των δοκιμών της αλουμίνας στο λόγο Poisson, που υπολογίστηκε από τις μετρήσεις με τις μεθόδους Through Transmission (TT) και Pulse Echo (PT) σε συχνότητες 1 και 5 MHz.

### 3.3.2 Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας (elasticity modulus) ή αλλιώς μέτρο Young (Young's modulus) είναι μία από τις πιο σημαντικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών, σε εφελκυσμό και θλίψη. Το μέτρο ελαστικότητας ενός υλικού εκφράζει την αντίσταση που προβάλλει το υλικό σε ελαστική παραμόρφωση και εξαρτάται άμεσα από την ισχύ των χημικών δεσμών μεταξύ των ατόμων του υλικού. Έτσι, υλικά που σχηματίζουν ισχυρούς χημικούς δεσμούς, όπως τα κεραμικά (ομοιοπολικοί ή ετεροπολικοί δεσμοί), έχουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αυτό σημαίνει ότι απαιτούνται σχετικά μεγάλες τάσεις για να παραχθεί σχετικά μικρή ελαστική παραμόρφωση, σε αντίθεση με τα πολυμερή και τα ελαστομερή, που χαρακτηρίζονται από ασθενείς χημικούς δεσμούς. Το μέτρο ελαστικότητας ενός υλικού εξαρτάται επίσης από τη θερμοκρασία. Επειδή όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τα άτομα των υλικών γίνονται πιο κινητικά, αυτό έχει σα συνέπεια τη χαλάρωση της ισχύος των χημικών δεσμών που συγκρατούν στις θέσεις ισορροπίας τους, με αποτέλεσμα να μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Το διάγραμμα της εικόνας 3.4, στο οποίο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μέσες τιμές, με τις σχετικές τιμές της σταθερής απόκλισης, του μέτρου ελαστικότητας ως συνάρτηση της τιμής του πορώδους των δοκιμίων της αλούμινας, το οποίο έχει προκύψει από τις μετρήσεις που έγιναν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, δείχνει ότι το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται καθώς αυξάνεται το πορώδες των δοκιμίων της αλούμινας.



**Εικόνα 3.4 :** Επίδραση του πορώδους των δοκιμίων της αλούμινας στο μέτρο ελαστικότητας, που υπολογίστηκε από τις μετρήσεις με τις μεθόδους Through Transmission (TT) και Pulse Echo (PT) σε συχνότητες 1 και 5 MHz, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας, τόσο μεγαλύτερη ψαθυρή συμπεριφορά παρουσιάζουν τα δοκίμια της αλούμινας. Έτσι, συμπεραίνεται ότι κάποια δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερη ελαστικότητα από άλλα, κάτι που εξαρτάται από το πορώδες των δοκιμίων της αλούμινας. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι για πορώδες 0% και 48%, δηλαδή για το ελάχιστο και το μέγιστο πορώδες που είχαμε στην εργασία αυτή, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζει τις δύο ακραίες τιμές, σε αντίθεση με τις ενδιάμεσες τιμές πορώδους (6%, 12%, 24%, 36%), όπου το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται σταδιακά καθώς πλησιάζει προς την ελάχιστη τιμή. Αυτό σημαίνει ότι η ψαθυρή συμπεριφορά της αλούμινας αυξάνεται αισθητά καθώς μειώνεται το πορώδες (που είναι αποτέλεσμα του μεγέθους και της συχνότητας των πόρων μέσα στο δοκίμιο).





#### 4. Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική έρευνα

Συνοψίζοντας παρατηρούμε ότι οι ταχύτητες των διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων στα δοκίμια αλουμίνας μειώνονται με την αύξηση του πορώδους. Ο λόγος Poisson εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από το πορώδες και αυτό φαίνεται από το ότι όσο αυξάνεται το πορώδες η τιμή του λόγου Poisson μειώνεται. Επίσης, ανάλογη συμπεριφορά με το λόγο Poisson έχει και το μέτρο Young, το οποίο παρατηρήθηκε να μειώνεται σε δοκίμια με μεγαλύτερο πορώδες. Τέλος, το μέτρο Young, καθώς και ο λόγος Poisson, μπορούν να προβλεφθούν από τις ταχύτητες των διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων, που είναι συνάρτηση του πορώδους.

Προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη διαδικασία των υπερήχων, κυρίως στην τεχνική pulse echo, οφείλονται στην ανομοιόμορφη κατανομή αλλά και γεωμετρία/μέγεθος των πόρων μέσα στα δοκίμια αλουμίνας. Η δυσκολία στην καταγραφή των αποτελεσμάτων θα μπορούσε να ξεπεραστεί είτε χρησιμοποιώντας αισθητήρες χαμηλότερης συχνότητας, είτε κατασκευάζοντας δοκίμια με πόρους ίδιου μεγέθους και ομοιόμορφα κατανεμημένους.

Για τη συνέχιση αυτής της εργασίας θα μπορούσε να προταθεί, ως μελλοντική έρευνα, η κατασκευή δοκιμίων με διαφορετικές διεργασίες κατασκευής δοκιμίων αλουμίνας ώστε να εξεταστεί πώς επηρεάζει η μικροδομή και η κατανομή του πορώδους τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού. Επίσης, θα μπορούσαν να γίνουν μετρήσεις και σε άλλα υλικά (π.χ. κράμα αλουμίνιου) στα οποία θα δημιουργούσαμε πορώδες και θα συγκρίναμε την συμπεριφορά τους με τα δοκίμια της αλουμίνας. Τέλος, μια ενδιαφέρουσα πρόταση, η οποία θα μπορούσε να γίνει, είναι η σύγκριση των ήδη υπαρχόντων αποτελεσμάτων με αποτελέσματα υπερήχων αλλά με non contact αισθητήρες (π.χ. Laser vibrometer).



## Παράρτημα

### Πειραματικές τιμές και μέσες τιμές με τις σταθερές αποκλίσεις

Πίνακας Π-1. Τιμές πυκνότητας για κάθε δοκίμιο.

Πορώδες (%)	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )
0	3.825
	3.853
	3.862
	3.841
	3.845 ± 0.013
6	3.039
	3.041
	3.051
	3.042
	3.043 ± 0.005
12	2.885
	2.863
	2.877
	2.874
	2.875 ± 0.008
24	2.58
	2.527
	2.581
	2.561
	2.562 ± 0.022
36	2.572
	2.506
	2.405
	2.499
	2.496 ± 0.060
48	2.246
	2.197
	2.229
	2.167
	2.210 ± 0.030

**Πίνακας Π-2.** Ταχύτητες διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Through Transmission.

Πορώδες (%)	Ταχύτητα κυμάτων (m/s)			
	Διαμήκη		Εγκάρσια	
0	10176	10365 ± 275	6073	6102 ± 25
	10221		6112	
	10840		6139	
	10224		6085	
6	8396	8300 ± 114	4987	4951 ± 33
	8400		4916	
	8119		4981	
	8288		4920	
12	8182	8158 ± 29	5012	4904 ± 71
	8132		4923	
	8127		4839	
	8192		4840	
24	7546	7531 ± 86	4644	4585 ± 36
	7661		4547	
	7494		4575	
	7425		4574	
36	6737	6777 ± 50	4339	4341 ± 34
	6862		4385	
	6766		4291	
	6743		4351	
48	4897	4969 ± 88	3234	3299 ± 54
	5032		3383	
	5078		3297	
	4869		3283	

**Πίνακας Π-3.** Τιμές λόγου Poisson ( $\nu$ ) και Μέτρου Young (E) για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Through Transmission.

Πορώδες (%)	Λόγος Poisson ( $\nu$ )		E (GPa)	
0	0.223	$0.234 \pm 0.018$	345.173	$353.359 \pm 8.719$
	0.222		351.686	
	0.264		367.923	
	0.226		348.652	
6	0.227	$0.223 \pm 0.015$	185.540	$182.494 \pm 1.824$
	0.240		182.193	
	0.198		181.403	
	0.228		180.838	
12	0.200	$0.217 \pm 0.013$	173.888	$212.236 \pm 76.199$
	0.211		344.082	
	0.225		165.101	
	0.232		165.872	
24	0.195	$0.205 \pm 0.014$	133.004	$129.817 \pm 1.988$
	0.228		128.324	
	0.203		129.970	
	0.194		127.972	
36	0.146	$0.152 \pm 0.008$	110.945	$108.369 \pm 3.298$
	0.155		111.300	
	0.164		103.053	
	0.143		108.177	
48	0.113	$0.105 \pm 0.021$	52.302	$53.156 \pm 1.814$
	0.088		54.694	
	0.136		55.031	
	0.083		50.598	

**Πίνακας Π-4.** Ταχύτητες διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων για αισθητήρα 5 MHz με τη μέθοδο Through Transmission.

Πορώδες (%)	Ταχύτητα κυμάτων (m/s)			
	Διαμήκη		Εγκάρσια	
0	10186	10375 ± 275	6091	6108 ± 25
	10231		6079	
	10851		6118	
	10234		6145	
6	8404	8309 ± 114	4992	4956 ± 33
	8408		4921	
	8127		4986	
	8296		4925	
12	8190	8166 ± 29	5017	4908 ± 71
	8140		4928	
	8135		4844	
	8200		4845	
24	7554	7539 ± 86	4649	4590 ± 36
	7669		4552	
	7502		4580	
	7432		4579	
36	6744	6784 ± 50	4343	4345 ± 34
	6869		4389	
	6773		4295	
	6750		4355	
48	4902	4974 ± 88	3237	3302 ± 54
	5037		3386	
	5083		3300	
	4874		3286	

**Πίνακας Π-5.** Τιμές λόγου Poisson ( $\nu$ ) και Μέτρου Young (E) για αισθητήρα 5 MHz με τη μέθοδο Through Transmission.

Πορώδες (%)	Λόγος Poisson ( $\nu$ )		E (GPa)	
0	0.222	$0.233 \pm 0.020$	346.738	$353.958 \pm 7.499$
	0.227		349.455	
	0.267		366.295	
	0.218		353.344	
6	0.227	$0.223 \pm 0.015$	185.906	$182.857 \pm 1.825$
	0.239		182.556	
	0.198		181.765	
	0.228		181.200	
12	0.200	$0.217 \pm 0.013$	174.233	$168.559 \pm 3.446$
	0.211		168.358	
	0.225		165.437	
	0.232		166.208	
24	0.195	$0.205 \pm 0.014$	133.289	$130.094 \pm 1.995$
	0.228		128.602	
	0.203		130.252	
	0.194		128.236	
36	0.146	$0.152 \pm 0.008$	111.163	$108.581 \pm 3.304$
	0.155		111.515	
	0.164		103.255	
	0.143		108.390	
48	0.113	$0.105 \pm 0.021$	52.405	$53.260 \pm 1.815$
	0.088		54.799	
	0.136		55.136	
	0.083		50.699	

**Πίνακας Π-6.** Ταχύτητες διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Pulse-Echo.

Πορώδες (%)	Ταχύτητα κυμάτων (m/s)			
	Διαμήκη		Εγκάρσια	
0	10074	10262 ± 272	6012	6041 ± 25
	10119		6051	
	10732		6078	
	10122		6024	
6	8312	8218 ± 113	4937	4901 ± 33
	8316		4867	
	8038		4931	
	8205		4871	
12	7855	7832 ± 28	4812	4707 ± 68
	7807		4726	
	7802		4645	
	7864		4646	
24	7244	7230 ± 83	4458	4402 ± 34
	7355		4365	
	7194		4392	
	7128		4391	
36	6265	6303 ± 47	4035	4038 ± 31
	6382		4078	
	6292		3991	
	6271		4046	
48	4554	4621 ± 82	-	-
	4680		-	
	4723		-	
	4528		-	



**Πίνακας Π-7.** Τιμές λόγου Poisson ( $\nu$ ) και Μέτρου Young (E) για αισθητήρα 1 MHz με τη μέθοδο Pulse-Echo.

Πορώδες (%)	Λόγος Poisson ( $\nu$ )		E (GPa)	
0	0.223	$0.234 \pm 0.017$	338.279	$346.333 \pm 8.568$
	0.222		344.702	
	0.264		360.642	
	0.226		341.709	
6	0.227	$0.223 \pm 0.015$	181.841	$178.863 \pm 1.783$
	0.240		178.575	
	0.198		177.788	
	0.228		177.248	
12	0.200	$0.217 \pm 0.013$	160.279	$155.028 \pm 3.190$
	0.211		154.849	
	0.225		152.139	
	0.232		152.846	
24	0.195	$0.205 \pm 0.014$	122.567	$119.636 \pm 1.829$
	0.228		118.264	
	0.203		119.777	
	0.194		117.937	
36	0.146	$0.152 \pm 0.008$	95.943	$93.724 \pm 2.850$
	0.155		96.267	
	0.163		89.134	
	0.143		93.553	
48	-	-	-	-
	-		-	
	-		-	
	-		-	

**Πίνακας Π-8.** Ταχύτητες διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων για αισθητήρα 5 MHz με τη μέθοδο Pulse-Echo.

Πορώδες (%)	Ταχύτητα κυμάτων (m/s)			
	Διαμήκη		Εγκάρσια	
0	10034	10220 ± 271	5988	6017 ± 25
	10078		6026	
	10688		6053	
	10081		6000	
6	8278	8184 ± 112	4917	4882 ± 33
	8282		4847	
	8005		4911	
	8172		4851	
12	7691	7669 ± 27	4711	4609 ± 67
	7644		4628	
	7639		4549	
	7700		4550	
24	7093	7080 ± 81	-	-
	7201		-	
	7044		-	
	6980		-	
36	6063	6099 ± 45	-	-
	6176		-	
	6089		-	
	6069		-	
48	4407	4472 ± 79	-	-
	4529		-	
	4570		-	
	4382		-	

**Πίνακας Π-9.** Τιμές λόγου Poisson ( $\nu$ ) και Μέρου Young (E) για αισθητήρα 5 MHz με τη μέθοδο Pulse-Echo.

Πορώδες (%)	Λόγος Poisson ( $\nu$ )		E (GPa)	
0	0.223	$0.233 \pm 0.017$	335.5887	$343.531 \pm 8.468$
	0.221		341.8786	
	0.263		357.6838	
	0.225		338.9755	
6	0.227	$0.223 \pm 0.015$	180.366	$177.406 \pm 1.770$
	0.239		177.1126	
	0.198		176.3421	
	0.227		175.8051	
12	0.199	$0.216 \pm 0.012$	153.6355	$148.645 \pm 3.032$
	0.210		148.4772	
	0.225		145.8923	
	0.231		146.5753	
24	-	-	-	-
	-		-	
	-		-	
	-		-	
36	-	-	-	-
	-		-	
	-		-	
	-		-	
48	-	-	-	-
	-		-	
	-		-	
	-		-	

**Πίνακας Π-10.** Πάχη δοκιμών για κάθε πορώδες.

Πορώδες (%)	Πάχος δοκιμίου (mm)	
0	10.2	9.25 ± 0.76
	9.7	
	8.2	
	8.9	
6	12.1	12.27 ± 0.83
	12.1	
	11.3	
	13.6	
12	12.7	12.80 ± 0.34
	12.3	
	13.0	
	13.2	
24	13.3	13.37 ± 0.08
	13.5	
	13.4	
	13.3	
36	14.2	14.07 ± 0.64
	14.7	
	13.0	
	14.4	
48	12.7	12.42 ± 0.43
	12.5	
	11.7	
	12.8	

## Βιβλιογραφία

- [1] "Wikipedia, the free Encyclopedia", Wikimedia Foundation (<http://en.wikipedia.org>) (ελήφθη από το διαδίκτυο το Φεβρουάριο 2018).
- [2] Π. Βασιλείου, Α. Ανδρεόπουλος, *Υλικά: Ξύλο, Κεραμικά, Πολυμερή, Μέταλλα*, Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2004.
- [3] A.M. Alper, *High Temperature Oxides*, Academic Press, 1970.
- [4] Ι.Α. Μέργος, *Διηλεκτρικά Υλικά και Περιβάλλον*, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2007.
- [5] L.L. Hench, J.K. West, *Chemical Processing of Advanced Materials*, Wiley, 1992.
- [6] "Alumina Powder", Reade Advanced Materials. [www.reade.com/Products/Oxides/alumina.html](http://www.reade.com/Products/Oxides/alumina.html) (ελήφθη από το διαδίκτυο το Φεβρουάριο 2018).
- [7] Ο.Π. Κοντοπούλου, *Κατασκευή και Χαρακτηρισμός Σύνθετων Διηλεκτρικών Υλικών: Εφαρμογή σε Εποξειδική Ρητίνη με Προσθήκη Μικρο-σωματιδίων  $Al_2O_3$* , Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, 2014.
- [8] Μ. Καρακασίδης, *Σημειώσεις Μαθήματος Κεραμικά Υλικά*, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα, 2009.
- [9] <http://accuratus.com/alumox.html> (ελήφθη από το διαδίκτυο τον Απρίλιο 2018)
- [10] A. E. Ellakwa, M. A. Morsy, A. M. El-Sheikh, Effect of aluminum oxide addition on the flexural strength and thermal diffusivity of heat-polymerized acrylic resin, *Journal of Prosthodontics*, **17** [6] 2008) 439-444.
- [11] A.A. Grant, E.H. Greener, Whisker reinforcement of polymethyl methacrylate denture base resins, *Aust Dent Journal*, (1967) 29-33.
- [12] P. Auerkari, *Mechanical and Physical Properties of Engineering Alumina Ceramics'*, VTT Manufacturing Technology, 1996.
- [13] National Science Foundation (NSF) Workshop Highlights Future of Organic Electronics and Photonics, NSF PA/M 03-03, USA, 2003. ([http://www.nsf.gov/od/lpa/news/03/ma0303\\_images.htm](http://www.nsf.gov/od/lpa/news/03/ma0303_images.htm)) (ελήφθη από το διαδίκτυο τον Απρίλιο 2018).
- [14] [http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/1\\_eisagogi\\_Bayer\\_Hall\\_Heroult.pdf](http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/1_eisagogi_Bayer_Hall_Heroult.pdf) (ελήφθη από το διαδίκτυο τον Απρίλιο 2018).
- [15] E.C. Thirios, D. Kaklamani, N.K. Uzunoglu, Pulse progression using a periodically dielectric loaded dispersive waveguide, *Progress in Electromagnetics Research (PIER)*, **48** (2004) 301-333.

- [16] Ε. Θήριος, *Ανάπτυξη Μεθόδων Παραγωγής Υψηλής Έντασης Μικροκυματικών Παλμών με Τεχνικές Χρονικής Συμπίεσης*, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2005.
- [17] A.C. Geiculescu. T.F. Strange, Aluminum oxide thin dielectric film formation under elevated gravity conditions, *Thin Solid Films*, **503** [1-2] (2006) 45-54.
- [18] K.P. Donnelly, B.R. Varlow, Non-linear dc and ac conductivity in electrically insulating composites, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **10** [4] (2003) 610-614.
- [19] M. Karthikeyan, K.K. Satheesh Kumar, K.P. Elango, Conducting polymer/alumina composites as viable adsorbents for the removal of fluoride ions from aqueous solution, *Journal of Fluorine Chemistry*, **130** (2009) 894–901.
- [20] S. O. Alsharif, H. Bin Md Akil, N. Abbas Abd El-Aziz, Z. Arifin Bin Ahmad, Effect of alumina particles loading on the mechanical properties of light-cured dental resin composites, *Materials and Design*, **54** (2014) 430–435.
- [21] O. Svelto, *Principles of Lasers*, Second Edition (translated from Italian), Plenum Press, 1982.
- [22] Α.Α. Σεραφετινιδης, *Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική*, Συμμετρία, Αθήνα, 1989.
- [23] <https://e-class.teilar.gr> (ελήφθη από το διαδίκτυο τον Ιούλιο 2018).
- [24] Ν. Τσοπελάς, *Ανάπτυξη Ηλεκτομαγνητο-Θερμικής Μεθόδου για Μη Καταστροφικό Έλεγχο σε Αγωγή Υλικά*, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρας, 2009.
- [25] Ε. Γατσέλου, *Ακουστική Εκπομπή σε Δοκίμια Ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό Δοκιμή Κάμψη Τεσσάρων Σημείων*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα, 2011.
- [26] Ι. Παππούς, *Εντοπισμός Θέσης Ακουστικής Εκπομπής με Συστοιχία Πιεζοηλεκτρικών Αισθητήρων*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2012.
- [27] Α. Φουσιανή, *Προχωρημένες Τεχνικές Υπερήχου για τον Μη Καταστροφικό Έλεγχο Δοχείων Πίεσεως*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη. 2015.
- [28] Θ. Ματίκας, Δ. Αγγέλης, *Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι*, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Συγγράμματα και Βοηθήματα, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Ε.Μ.Π., 2015.
- [29] Β. Τζιάρας, Ι. Χατζηνικολάου, *Μη Καταστροφικός Έλεγχος με την Χρήση Μη Γραμμικών Ακουστικών Τεχνικών*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2011.
- [30] Θ. Ματίκας, Α. Παϊπέτης, *Σημειώσεις Μαθήματος Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι*, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα, 2013.

- [31] Σ. Κουσίδης, *Μη Καταστροφικός Έλεγχος Μέθοδος Υπερήχων*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 2013.
- [32] Π. Γιανουλάτου, *Ακουστική Εκπομπή σε Δοκίμια Άοπλου και Ινοπλισμένου Σκυροδέματος μέσω της Δοκιμής Κάμψης και Διάτμησης*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα, 2013.
- [33] Γ. Κοντογεώργος, *Μέτρηση Απόστασης με Υπερήχους*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2012.
- [34] Θ. Λάμπρου, *Σχεδίαση και Κατασκευή Συστήματος Μέτρησης Απόστασης με Χρήση Υπερήχων*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004.
- [35] Γ. Μαρτίνος, *Η Χρήση των Υπερήχων στο Μη Καταστροφικό Έλεγχο των Υλικών και Κατασκευών*, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολογίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδος, Πάτρα, 2014.