



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ**  
**ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**«ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕ  
ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ  
ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ»**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΑΓΓΕΛΟΥ Χ. ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΥ**  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ Ε.Κ.Π.Α.



**Ευρωπαϊκή Ένωση**  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:**

**Γ. ΤΣΑΜΑΣΦΥΡΟΣ**

Ομότ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Δεκέμβριος 2012**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ**  
**ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**«ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕ  
ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ  
ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ»**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΑΓΓΕΛΟΥ Χ. ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΥ**  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ Ε.Κ.Π.Α.



**Ευρωπαϊκή Ένωση**  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ  
ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

1. Γ.ΤΣΑΜΑΣΦΥΡΟΣ Ομοτ.Καθ. Ε.Μ.Π.
2. Ι.ΠΡΑΣΙΑΝΑΚΗΣ Ομοτ.Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Σ.ΚΟΥΡΚΟΥΛΗΣ Αν.Καθ. Ε.Μ.Π.

**ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ  
ΕΠΙΤΡΟΠΗ :**

1. Γ.ΤΣΑΜΑΣΦΥΡΟΣ Ομοτ.Καθ. Ε.Μ.Π.
2. Ι.ΠΡΑΣΙΑΝΑΚΗΣ Ομοτ.Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Σ.ΚΟΥΡΚΟΥΛΗΣ Αν.Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Ε.ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ Αν.Καθ. Ε.Μ.Π.
5. Ε.ΚΟΝΤΟΥ-ΔΡΟΥΓΚΑ Καθ. Ε.Μ.Π.
6. Γ.ΣΠΑΘΗΣ Καθ. Ε.Μ.Π.
7. Α.ΣΙΔΕΡΙΔΗΣ Επικ. Καθ. Ε.Μ.Π.

*Αφιερώνεται στην οικογένεια μου*

## Πρόλογος

---

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια τάση να τοποθετούνται συστήματα αισθητήρων και ενεργοποιητών (actuators) σε έργα υποδομής (γέφυρες, δικτύματα, φράγματα κ.λ.π.) και την αεροναυπηγική, με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης της κατασκευής και την παρακολούθηση της δομικής της ακεραιότητας. Πολλές φορές μια τέτοια κατασκευή χαρακτηρίζεται ως «έξυπνη» λόγω της ιδιότητας που έχει στο να αισθάνεται και να ανταποκρίνεται σε ερεθίσματα από το περιβάλλον. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να καταγράψουν φυσικά μεγέθη όπως παραμόρφωση, επιτάχυνση, κύματα ήχου, πίεση ή θερμοκρασία. Γενικά τα παραπάνω συστήματα μπορούν να διαχωριστούν σε παθητικά και ενεργητικά συστήματα δειγματοληψίας. Τα παθητικά συστήματα δειγματοληψίας είναι εκείνα που λειτουργούν ανιχνεύοντας την απόκριση της κατασκευής λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών χωρίς οποιαδήποτε εισαγόμενη τεχνητή ενέργεια, ενώ τα ενεργητικά συστήματα είναι εκείνα που απαιτούν εξωτερικά παρεχόμενη ενέργεια υπό μορφή πίεσης ή ηλεκτρομαγνητικού κύματος για να λειτουργήσουν κατάλληλα.

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας έχει ως στόχο να παρέχει, σε κάθε στιγμή κατά τη διάρκεια της ζωής μιας κατασκευής, μια διάγνωση της κατάστασης των υλικών των διαφόρων μερών της και των τμημάτων που την αποτελούν. Η κατάσταση κάθε κατασκευής πρέπει να παραμένει στα πλαίσια που προβλέπει η αρχική μελέτη, αν και μπορεί να μεταβληθεί από τη φυσιολογική πάροδο του χρόνου λόγω της χρήσης, με τη δράση του περιβάλλοντος, καθώς και από τυχαία γεγονότα. Η λήψη μετρήσεων ανά χρονικά διαστήματα καθιστά δυνατή την εξέταση του ιστορικού της κατασκευής ενώ παράλληλα με τη ταυτόχρονη παρακολούθηση κατά την χρήση, μπορεί να παρέχεται και πρόγνωση για το μέλλον της κατασκευής (εξέλιξη ρωγμών, υπολειπόμενη διάρκεια ζωής κλπ).

Ανάμεσα στα διάφορα φυσικά μεγέθη που καταγράφονται και παρακολουθούνται σε μια κατασκευή η παραμόρφωση είναι ίσως το πιο σημαντικό. Οι πληροφορίες που μπορούν να αντληθούν αν είναι γνωστό το παραμορφωσιακό πεδίο μιας κατασκευής αφορούν όχι μόνο τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας αλλά μπορούν να συμβάλλουν στην μείωση του βάρους της (μέσω της μείωσης των συντελεστών ασφαλείας) και τον αρχικό σχεδιασμό. Από την άλλη πλευρά όσο οι κατασκευές γίνονται μεγαλύτερες και περισσότερο σύνθετες, μερικές από τις τεχνικές μέτρησης της παραμόρφωσης γίνονται πρακτικά ανέφικτες και για το λόγο αυτό θα πρέπει να αναπτυχθούν περισσότερο κατάλληλες μέθοδοι. Έχει διαπιστωθεί ότι σε συμβατικούς αισθητήρες προβλήματα προκύπτουν από:

- Το μέγεθος του αισθητήρα ο οποίος είναι ογκώδης, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα σε μία συνήθη κατασκευή
- Το κόστος των αισθητήρων το οποίο περιορίζει τον αριθμό τους και έτσι δεν μπορεί να αναπτυχθεί μία γενική ολοκληρωμένη διαδικασία αλλά μόνο επαναλαμβανόμενος και τοπικός έλεγχος.

Το αντικείμενο αυτής της διδακτορικής έρευνας αναφέρεται στην ανάπτυξη νέων μεθόδων μέτρησης της παραμόρφωσης με μαγνητικές και ηλεκτρικές μεθόδους. Συγκεκριμένα αναπτύχθηκαν τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες μέτρησης της παραμόρφωσης με την χρήση α) κοκκώδους σύνθετου υλικού σιδήρου εξοξικής ρητίνης β) άμορφων μαγνητοελαστικών συρμάτων και γ) ηλεκτρικά αγώγιμης βαφής αργύρου. Παράλληλα αναπτύχθηκε πρωτότυπο σύστημα οπτικής παρακολούθησης της θέσης επαγωγικών αισθητήρων. Η διάρθρωση της διατριβής περιλαμβάνει τρία εισαγωγικά κεφάλαια και τέσσερα κεφάλαια όπου αναφέρεται η ερευνητική διαδικασία και τα αποτελέσματα κάθε μεθόδου που αναπτύχθηκε.

**Κεφάλαιο 1.** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη περιγραφή των βασικότερων μεθόδων έλεγχου που εφαρμόζονται στην βιομηχανία και τις κατασκευές. Όλες οι μέθοδοι διέπονται από την αρχή ότι δεν επεμβαίνουν και δεν επηρεάζουν τις ιδιότητες της κατασκευής και γι' αυτό ονομάζονται Μη Καταστρεπτικές. Παράλληλα παρουσιάζεται η φιλοσοφία της παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας και παρουσιάζονται οι βασικότεροι εκπρόσωποι των αισθητήρων που ενσωματώνονται σε διάφορες κατασκευές.

**Κεφάλαιο 2.** Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στα σύγχρονα υλικά που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές και την εξέλιξη της επιστήμης των υλικών από τα φυσικά στα σύνθετα και έξυπνα υλικά. Γίνεται μια σύντομη περιγραφή στις διάφορες κατηγορίες των σύνθετων υλικών, στις ιδιότητες τους και τους τρόπους κατεργασίας τους. Επίσης γίνεται αναφορά σε συγκεκριμένα έξυπνα υλικά που έχουν αναπτυχτεί τα τελευταία χρόνια.

**Κεφάλαιο 3.** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη αναφορά στην θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού καθώς όλες οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν σε αυτή την διατριβή έχουν ως βάση τους αυτή την θεωρία. Παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες των μαγνητικών υλικών και γίνεται αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά τους. Παράλληλα παραθέτονται διάφορες πειραματικές διατάξεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών.

**Κεφάλαιο 4.** Παρουσιάζεται η ερευνητική διαδικασία που αφορά την μελέτη της μεταβολής των μαγνητικών ιδιοτήτων κοκκώδους σύνθετου υλικού σιδήρου /εποξικής ρητίνης, όταν αυτό υπόκειται σε μηχανική καταπόνηση. Συγκεκριμένα η έρευνα επικεντρώθηκε στην μελέτη της μεταβολής της μαγνητικής αντίστασης (Reluctance) όταν το υλικό αυτό υπόκειται σε εφελκυσμό. Όπως αποδείχτηκε πειραματικά τα κοκκώδη σύνθετα υλικά με εγκλείσματα σιδήρου έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τις μαγνητικές τους ιδιότητες όταν παραμορφώνονται ενώ τα αποτελέσματα των πειραμάτων απέδειξαν πως υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ της μεταβολής της μαγνητικής αντίστασης και της παραμόρφωσης.

**Κεφάλαιο 5.** Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η ενσωμάτωση μαγνητοελαστικών συρμάτων σε πολυμερή και σύνθετα υλικά για την μέτρηση της παραμόρφωσης τους. Κατά την διάρκεια αυτής της μελέτης εξετάστηκαν διάφορα κράματα από άμορφα μαγνητοελαστικά σύρματα με δυο διαφορετικές μεθοδολογίες (με αγωγή και επαγωγή). Οι μικρές διαστάσεις και οι καλές μηχανικές ιδιότητες καθιστούν αυτά τα υλικά ιδανικά, καθώς δεν θα επηρεάσουν τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου ούτε θα προσθέσουν σημαντικό βάρος. Η πειραματική μελέτη έδειξε πως η ενσωμάτωση τέτοιων συρμάτων σε πολυμερή και σύνθετα υλικά μπορεί να αναβαθμίσει τις ιδιότητες τους επιτρέποντας την μέτρηση της παραμόρφωσης τους.

**Κεφάλαιο 6.** Παρουσιάζεται η μελέτη της μεταβολής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων ηλεκτρικά αγώγιμης βαφής σωματιδίων Αργύρου, όταν υπόκειται σε μηχανική καταπόνηση. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε αυτά τα υλικά επιτυγχάνεται μέσω ενός αγώγιμου δικτύου που σχηματίζεται από τις επαφές των σωματιδίων μέσα στο υλικό. Έτσι η παραμόρφωση αυτών των υλικών οδηγεί στην μεταβολή αυτού του δικτύου με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η συνολική τους αγωγιμότητα. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύουν πως η ηλεκτρικά αγώγιμη βαφή παρουσιάζει μεταβολή των ηλεκτρικών της ιδιοτήτων με την παραμόρφωση. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας παραμόρφωσης σαν εξωτερική επίστρωση σε υλικά και κατασκευές.

**Κεφάλαιο 7.** Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται ένα σύστημα για την παρακολούθηση της θέσης επαγωγικών αισθητήρων, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διατριβής. Το σύστημα αυτό είναι ιδανικό για την συλλογή και επεξεργασία μετρήσεων που προέρχονται από επίπεδες επιφάνειες. Η βασική λειτουργία του είναι να αντιστοιχίζει τις τιμές που λαμβάνονται από την έξοδο επαγωγικού αισθητήρα, με την σχετική θέση του πάνω στην υπό εξέταση επιφάνεια. Με αυτό τον τρόπο θα γίνεται πιο εύκολη η διαδικασία έλεγχου σε μεγάλες επιφάνειες ενώ παράλληλα βελτιώνεται σημαντικά και η αξιοπιστία. Επιπλέον το σύστημα αυτό απλοποιεί αρκετά την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων πράγμα που βοηθά τόσο τον επιθεωρητή όσο και τον τελικό χρήστη της κατασκευής στο να βγάλει συμπεράσματα για την δομική ακεραιότητα.

Τα σύμβολα τα οποία χρησιμοποιούνται, εξηγούνται στο σημείο της διατριβής όπου εμφανίζονται. Οι βιβλιογραφικές αναφορές παρατίθενται στο τέλος της διατριβής.

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II . Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

## **Ευχαριστίες**

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Τσαμασφόρο για την καθοδήγηση, υποστήριξη και εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Πρασιανάκη Ομοτ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. και τον κ. Σταύρο Κουρκουλή Αναπ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. για τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις καθώς και στην δημοσιοποίηση των αποτελεσμάτων αυτής της έρευνας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου Αναπ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης αυτής της διατριβής, σε θέματα υλοποίησης πρωτότυπων πειραματικών διατάξεων και χαρακτηρισμού υλικών. Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ευαγγελία Κοντού Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. την βοήθεια της και για την παραχώρηση του εργαστηρίου της για την διεξαγωγή διαφόρων πειραμάτων.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Δρ. Γ.Καντεράκη, Δρ. Θ.Παπαθανασίου, Δρ. Σ.Φιλόπουλο και τους Η.Κούλαλη, Π.Γεωργιόπουλο για την βοήθεια τους σε επιμέρους θέματα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω του γονείς μου, Χρήστο και Παναγιώτα, τόσο για την υλική, όσο και για την ηθική υποστήριξη που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια εκπόνησης αυτής της διατριβής αλλά και γενικότερα της μέχρι τώρα πορείας μου.

Χριστόπουλος Άγγελος  
Αθήνα, Δεκέμβριος 2012

## Περιεχόμενα

---

Πρόλογος .....	i
Περίληψη .....	ix
Περίληψη στα Αγγλικά (Abstract) .....	xiii
<b>Κεφάλαιο 1. Μη καταστροφικός έλεγχος και παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας.....</b>	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγή .....	1
1.2 Ραδιογραφία .....	3
1.3 Η μέθοδος των υπερήχων .....	7
1.4 Ακουστική εκπομπή .....	15
1.5 Θερμογραφία .....	19
1.6 Διεισδυτικά υγρά .....	24
1.7 Η μέθοδος των Δινορευμάτων .....	26
1.8 Μαγνητικές μέθοδοι ΜΚΕ .....	29
1.9 Παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας κατασκευών .....	33
<b>Κεφάλαιο 2. Σύνθετα και έξυπνα υλικά.....</b>	<b>41</b>
2.1 Εισαγωγή .....	41
2.2 Ινώδη σύνθετα υλικά .....	43
2.3 Κοκκώδη σύνθετα υλικά .....	49
2.4 Στρωματικά Σύνθετα Υλικά .....	50
2.5 Μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών .....	51



2.6 Αστοχίες σύνθετων υλικών .....	54
2.7 Εφαρμογές σύνθετων υλικών .....	55
2.8 Έξυπνα υλικά .....	59

### **Κεφάλαιο 3. Στοιχεία από την θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού.....71**

3.1 Εισαγωγή .....	71
3.2 Οι εξισώσεις του Maxwell .....	72
3.3 Η πυκνότητα μαγνητικής ροής B .....	73
3.4 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή .....	73
3.5 Ορισμός της μαγνήτισης M και σχέση ανάμεσα στο H, M και B .....	75
3.6 Ορισμός της διαπερατότητας και της επιδεκτικότητας .....	75
3.7 Ταξινόμηση μαγνητικών υλικών .....	76
3.8 Μαγνητικές ιδιότητες σιδηρομαγνητικών υλικών .....	77
3.9 Μαγνητικές περιοχές .....	80
3.10 Μεταβολές των μαγνητικών περιοχών κατά τη μαγνήτιση .....	83
3.11 Τεχνικές μέτρησης βρόχου υστέρησης .....	85
3.12 Ειδικά φαινόμενα μαγνητοελαστικότητας .....	92

### **Κεφάλαιο 4. Μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης με την παραμόρφωση σε κοκκώδη σύνθετα υλικά σιδήρου/εποξικής ρητίνης .....95**

4.1 Εισαγωγή .....	95
4.2 Προετοιμασία των πειραμάτων .....	96
4.3 Βασικές θεωρητικές έννοιες .....	100
4.4 Πειράματα εφελκυσμού .....	105
4.5 Συμπεράσματα – παρατηρήσεις .....	111

### **Κεφάλαιο 5. Μέτρηση της παραμόρφωσης με την χρήση άμορφων μαγνητοελαστικών συρμάτων σε πολυμερή και σύνθετα υλικά .....113**

5.1 Εισαγωγή .....	113
5.2 Βασικές θεωρητικές έννοιες .....	114
5.3 Πειραματική μελέτη του φαινομένου GMI σε σύρματα CoFeSiB .....	116
5.4 Επαγωγικές μέθοδοι μέτρησης της μεταβολής της μαγνήτισης M συρμάτων CoSiB και FeSiB .....	121
2.5 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις .....	130

<b>Κεφάλαιο 6. Μέτρηση της παραμόρφωσης με την χρήση ηλεκτρικά αγώγιμης βαφής Αργύρου.....</b>	<b>133</b>
6.1 Εισαγωγή .....	133
6.2 Βασικές θεωρητικές έννοιες .....	135
6.3 Μελέτη της μεταβολής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων ηλεκτρικά αγώγιμης βαφής με σχέση με την παραμόρφωση .....	137
6.4 Πειραματική διερεύνηση της επαναληψιμότητας των μετρήσεων .....	144
6.5 Ανίχνευση βλαβών με την βοήθεια ηλεκτρικά αγώγιμης βαφής. Αριθμητική προσομοίωση.....	146
6.6 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις .....	152
<b>Κεφάλαιο 7. Ανάπτυξη οπτικού συστήματος παρακολούθησης της θέσης επαγωγικών αισθητήρων.....</b>	<b>153</b>
7.1 Εισαγωγή .....	153
7.2 Περιγραφή του συστήματος .....	154
7.3 Περιγραφή της διαδικασίας απεικόνισης .....	155
7.4 Παραδείγματα και εφαρμογές .....	159
7.5 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις .....	165
<b>Κεφάλαιο 8. Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....</b>	<b>167</b>
<b>Βιβλιογραφία και αναφορές.....</b>	<b>171</b>
<b>Δημοσιεύσεις.....</b>	<b>175</b>
<b>Παράρτημα Α. Πίνακες μεγεθών στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I.).....</b>	<b>177</b>



## Περίληψη

---

Το αντικείμενο αυτής της διδακτορικής διατριβής αναφέρεται στην ανάπτυξη νέων μεθόδων μέτρησης της παραμόρφωσης με μαγνητικές και ηλεκτρικές μεθόδους. Συγκεκριμένα αναπτύχθηκαν τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες μέτρησης της παραμόρφωσης με την χρήση α) κοκκώδους σύνθετου υλικού σιδήρου εξοξικής ρητίνης β) άμορφων μαγνητοελαστικών συρμάτων και γ) ηλεκτρικά αγωγιμής βαφής αργύρου. Παράλληλα αναπτύχθηκε πρωτότυπο σύστημα οπτικής παρακολούθησης της θέσης επαγωγικών αισθητήρων. Με βάση αυτές τις μεθοδολογίες θα μπορούσε να είναι δυνατή μια σχετικά γρήγορη επιθεώρηση (σε σχέση με τις υφιστάμενες μεθόδους ΜΚΕ) ανά τακτά χρονικά διαστήματα, προκειμένου να ανακτηθεί το παραμορφωσιακό πεδίο της κατασκευής. Στη συνέχεια θα συγκρίνεται με προηγούμενες μετρήσεις, με σκοπό τον εντοπισμό πιθανών διαφορών οι οποίες θα υποδεικνύουν κάποια ενδεχόμενη ατέλεια στην κατασκευή. Η ανάπτυξη και εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας είναι ένα σημαντικό βήμα προς τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της απόδοσης των δομικών στοιχείων μιας κατασκευής. Η ικανότητα να παρακολουθείται το παραμορφωσιακό πεδίο κατά τη διάρκεια ή μετά την εφαρμογή εξωτερικών φορτίσεων, θα βοηθήσει σε μεγάλο βαθμό στην μείωση του βάρους (μέσω της μείωσης των συντελεστών ασφαλείας), τον αρχικό σχεδιασμό και την αύξηση της ταχύτητας ελέγχου.

Όπως αποδείχτηκε πειραματικά τα κοκκώδη σύνθετα υλικά με εγκλείσματα σιδήρου έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τις μαγνητικές τους ιδιότητες όταν παραμορφώνονται. Η έρευνα επικεντρώθηκε στην μελέτη της μεταβολής της μαγνητικής αντίστασης (Reluctance) όταν αυτά υπόκεινται σε εφελκυσμό. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων απέδειξαν πως υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ της μεταβολής της μαγνητικής αντίστασης και της παραμόρφωσης. Άρα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εξωτερικά στρώματα σε ένα υλικό ή μια κατασκευή και να καταγράφουν μεταβολές στο παραμορφωσιακό πεδίο τους. Το φαινόμενο μπορεί να γίνει αισθητό ακόμη και σε περιπτώσεις μικρής σχετικά συγκέντρωσης (κατά βάρος), οπότε αυτή η μεθοδολογία θα μπορούσε να

εφαρμοστεί απευθείας σε πολυμερή εμπλουτισμένα με σωματίδια σιδήρου. Τα πειραματικά αποτελέσματα δίνουν σαφείς ενδείξεις πως αν όλες οι παράμετροι διατηρηθούν σταθερές τότε μπορεί να επιτευχθεί επαναληψιμότητα στις μετρήσεις. Έτσι ένα τέτοιο υλικό μπορεί να βαθμονομηθεί ώστε να προκύψει μια πειραματική σχέση μεταξύ της παραμόρφωσης και της μεταβολής της πυκνότητας μαγνητικής ροής, η οποία να ισχύει για κάθε υλικό με τα ίδια χαρακτηριστικά.

Η πειραματική μελέτη έδειξε πως η ενσωμάτωση άμορφων μαγνητοελαστικών συρμάτων σε πολυμερή και σύνθετα υλικά μπορεί να αναβαθμίσει τις ιδιότητες τους επιτρέποντας την μέτρηση της παραμόρφωσης τους. Η μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας των εν λόγω συρμάτων επιδεικνύει εξαιρετική απόκριση σε σχέση με την παραμόρφωση και για τις δυο διαφορετικές μεθοδολογίες που δοκιμάστηκαν (με αγωγή και επαγωγή).

Στην περίπτωση όπου οι μετρήσεις λαμβάνονται με αγωγή (κλασσικό φαινόμενο GMI) παρατηρήθηκε καλύτερη απόκριση στα σύρματα τα οποία έχουν αρνητικό συντελεστή μαγνητοσυστολής, καθώς η απόκριση τους σε σχέση με την παραμόρφωση είναι μονότονη.

Αντίστοιχα στην περίπτωση όπου οι μετρήσεις λαμβάνονται με επαγωγικούς αισθητήρες παρατηρήθηκε πως τα σύρματα με αρνητικό συντελεστή μαγνητοσυστολής και σε αυτή την περίπτωση επιδεικνύουν καλύτερη συμπεριφορά καθώς η απόκριση τους σε σχέση με την παραμόρφωση είναι μονότονη.

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τύποι επαγωγικών αισθητήρων και αξιολογήθηκε η επίδραση του καθένα. Με βάση τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα :

- Οι μαγνητοστατικές μετρήσεις μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι καλύτερες σε σχέση με τις ηλεκτρομαγνητικές και λόγω απόκρισης αλλά κυρίως γιατί δεν παράγουν παρασιτικά φαινόμενα (δινορεύματα), ούτε επηρεάζονται από χαμηλής συχνότητας (~KHz) ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Η ένταση του εξωτερικού πεδίου διέγερσης είναι καλύτερα να ενισχύεται με την βοήθεια κάποιου σιδηρομαγνητικού πυρήνα, καθώς κάτι τέτοιο βελτιώνει την απόκριση του επαγωγικού αισθητήρα. Βέβαια αυτό ισχύει ως ένα βαθμό, γιατί η χρήση πολύ μεγάλου πεδίου διέγερσης θα προκαλούσε κορεσμό στην μαγνήτιση του σύρματος με αποτέλεσμα να μην υπάρχει καθόλου απόκριση.

Μελλοντικές χρήσεις αυτής της μεθοδολογίας περιλαμβάνει την ενσωμάτωση τέτοιων συρμάτων στο εσωτερικό ή στην εξωτερική επιφάνεια κατασκευών από σύνθετα υλικά. Βέβαια όπως παρατηρήθηκε, η απευθείας ενσωμάτωση των συρμάτων σε ένα σύνθετο υλικό μπορεί να προκαλέσει την δημιουργία ατελειών. Γι' αυτό κρίνεται σκόπιμο να υπάρχει κάποια χημική κατεργασία της επιφάνειας των συρμάτων ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη πρόσφυση με την μήτρα.

Τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύουν πως η ηλεκτρικά αγωγή βαφή με νιφάδες Αργύρου παρουσιάζει μεταβολή των ηλεκτρικών της ιδιοτήτων με την παραμόρφωση. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας παραμόρφωσης σαν εξωτερική επίστρωση σε υλικά και κατασκευές. Η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που μετρήθηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά για ένα μεγάλο εύρος παραμορφώσεων ενώ η απόκριση είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τα κλασσικά ηλεκτρικά μηχανομέτρα. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως αν διατηρηθούν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά σε ένα αποτύπωμα από

τέτοιου είδους βαφή, είναι δυνατή η επαναληψιμότητα των μετρήσεων ώστε να μπορεί να γίνει βαθμονόμηση. Για την βελτιστοποίηση των μετρήσεων, ίσως θα ήταν σκόπιμο η εφαρμογή να γίνεται με την μορφή λεπτού φιλμ από σύνθετο υλικό (νιφάδων Αργύρου/πολυμερούς) με προτυποποιημένες διαστάσεις και σύσταση. Η αριθμητική προσομοίωση έδειξε πως κάτω από προϋποθέσεις η χρήση αυτού του υλικού θα μπορούσε να βοηθήσει στην καταγραφή του παραμορφωσιακού πεδίου μιας κατασκευής και στην αναγνώριση ενδεχόμενων βλαβών.



## Abstract

---

The subject of this doctoral research concerns the development of new electrical and magnetic methods for Strain sensing. Specifically three different types of measuring strain were developed a) using iron/epoxy particulate composite material b) using magnetostrictive wires embedded in polymer and carbon/epoxy samples and c) using electrically conductive Silver paint. Alongside a prototype system was developed for tracking the position of inductive sensors. These methodologies could provide a relatively quick inspection (compared with existing methods of NDT) at regular intervals in order to recover structure's Strain field. This field will be compared with previous measurements in order to detect possible differences which would indicate possible structural defects. The development and application of this methodology is a significant step towards improving the reliability and performance of components of a structure. The ability to monitor the strain field during or after the application of external loads will contribute to the reduction of the structure's weight (by reducing safety factors), better initial design and faster inspection.

The experimental procedure proved that iron/epoxy particulate composites have the ability to alter their magnetic properties by deformation. The research focused on the alteration of magnetic resistance (Reluctance) under tension. The experimental results have shown that there is a linear correlation between the alteration of magnetic resistance and strain. Therefore these materials can be used as outer layers of a structure in order to measure the strain field. This phenomenon can be seen even at composites with low iron concentration (by weight), so this methodology could be applied directly to polymers enriched with iron particles. The experimental results provide clear evidence that if all parameters are kept constant, repeatability could be archived. Thus such a material can be calibrated to produce an experimental relationship between strain and magnetic flux density, which could be applied to any material having the same characteristics.



The experimental study showed that the incorporation of amorphous magnetoelastic wires in polymers and composites can upgrade their properties adding strain sensing capabilities. The alteration of the magnetostrictive wire's magnetic permeability exhibits excellent response, analogous to strain for both methodologies that were tested (conduction, induction).

In the case of conductive measurements (classical GMI effect), the negative magnetostrictive wires exhibit monotonous response to strain, unlike the positive magnetostrictive wires. Similarly in the case of inductive measurements, negative magnetostrictive wires again exhibit monotonous response to strain, unlike the positive magnetostrictive wires.

During the experiments four types of inductive transducers there were used and their response was evaluated. Based on the results we can draw some basic conclusions:

- The magnetostatic transducers can be considered to exhibit better response than the electromagnetic, while they don't produce spurious effects (eddy currents), nor affected by low frequency (~ kHz) electromagnetic radiation.
- The intensity of the external field excitation is better to enhanced by means of a ferromagnetic core, as this improves the response of the inductive transducer. Certainly this is true to some extent, because the use of very large field stimulation would result in saturation of the wire's magnetization, and this would lead the reduction of response.

A future use of this methodology involves the incorporation of such wires to the inner or the outer surface of composite structure. Of course as noted, the direct incorporation of the wires in a composite material can cause defects. So there should be some chemical treatment of the surface of the wires in order to achieve better adhesion to the polymer matrix.

The experimental results have showed that the electrically conductive silver paint exhibits great alteration of its electrical properties induced by strain. Thus it can be used as external coating on materials and structures in order to measure strain. The alteration of the electrical resistance and the electrical conductivity measured during the experiments exhibits linear response for a wide range of deformation while the sensitivity is much greater than the classical electric strain gauge.

The results indicate that if the geometric characteristics in a fingerprint from such dye are kept constant, it is possible to obtain repeatable measurements. In order to optimize the measurements, it might be appropriate to apply the material in the form of thin film (silver flakes / polymer) with standardized dimensions and texture. The numerical simulation showed that under conditions, this material could help in recording the strain field of a construction and lead to identification of potential defaults.

# Κεφάλαιο 1

---

## Μη καταστροφικός έλεγχος και παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας

### 1.1 Εισαγωγή

Μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ) ονομάζεται ο έλεγχος που δεν επιφέρει αλλοιώσεις στο εξεταζόμενο αντικείμενο. Οι μέθοδοι ΜΚΕ είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία και συντήρηση κάθε εξαρτήματος και κατασκευής καθώς και για την διατήρηση της πολιτισμικής κληρονομιάς και των αρχαιοτήτων.

Ο πρωταρχικός σκοπός των μεθόδων του ΜΚΕ είναι ο έλεγχος της δομικής ακεραιότητας ώστε να υπολογίζεται ο κίνδυνος αστοχίας υλικών και κατασκευών. Οι Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι χρησιμοποιούνται για να διαπιστώνεται η ύπαρξη και το μέγεθος ελαττωμάτων σε μια κατασκευή, χωρίς όμως να καταστρέφεται ούτε να επηρεάζεται η λειτουργικότητά της. Με τη συνδυασμένη χρήση των μεθόδων Μη Καταστροφικού Ελέγχου και της Μηχανικής των Θραύσεων, μπορούμε να είμαστε συνεχώς ενήμεροι για την καλή κατάσταση λειτουργίας μιας κατασκευής (Health Monitoring) και για τον προβλεπόμενο χρόνο ζωής της (Residual Lifetime).

Ο ΜΚΕ όμως δεν περιορίζεται στην ανίχνευση ρωγμών, αλλά σε ένα ευρύτερα αναπτυσσόμενο πεδίο που ασχολείται με τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών, όπως της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, τη μοριακή δομή, αλλά και με τα χαρακτηριστικά μικροδομής, όπως η σκληρότητα ή ο βαθμός πολυμερισμού ρητίνης κ.α. Παράλληλα η εφαρμογή ΜΚΕ σε έργα τέχνης και σε ιστορικά και αρχαιολογικά ευρήματα είναι επιβεβλημένη για προφανείς λόγους.

Πολλές κατασκευές, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, χρειάζονται περιοδικούς ελέγχους ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζημιές που δεν θα γίνονταν αντιληπτές με τους απλούς καθημερινούς τρόπους ελέγχου. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι: ο σκελετός ή η επένδυση των αεροσκαφών, οι υπόγειες σωληνώσεις, οι κατασκευές από σκυρόδεμα και ο οπλισμός τους, τα πιεστικά δοχεία χημικών αντιδραστηρίων, τα συρματόσχοινα γεφυρών, κ.ά. Οι εφαρμογές των ΜΚΕ, σήμερα, καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα κατασκευαστικών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων και τις συναντάμε σχεδόν παντού:

- Στην αυτοκινητοβιομηχανία (κινητήρα, πλαίσιο)
- Στην αεροδιαστημική (πλαίσια αεροπλάνων, διαστημοπλοίων, πυραύλων)
- στις κατασκευές (κτίρια, γέφυρες)
- Σε εγκαταστάσεις πετροχημικές, πυρηνικές, παραγωγής ρεύματος, ορυχεία (δεξαμενές, λέβητες, εναλλάκτες θερμότητας, τουρμπίνες, σωληνώσεις, συγκολλήσεις)
- Στο σιδηρόδρομο (σιδηροτροχιές, τροχοί και άξονες)
- Σε αγωγούς φυσικού αερίου και πετρελαίου
- Στα πάρκα αναψυχής (παιχνίδια και τραίνα μεγάλης ταχύτητας)
- Στην ιατρική (τομογραφίες, υπέρηχοι, ακτινογραφίες, καρδιογραφήματα, εγκεφαλογραφήματα, κλπ.).

Οι λόγοι οι οποίοι οδήγησαν σε τόσο ραγδαία ανάπτυξη τις τεχνικές ΜΚΕ συνοψίζονται στους εξής:

- Αυξημένη πολυπλοκότητα των σύγχρονων μηχανημάτων και εξαρτημάτων
- Αυξημένη ζήτηση κατασκευών
- Απαίτηση για ασφαλέστερες κατασκευές
- Υψηλό κόστος των αστοχιών σε κατασκευές και μηχανήματα

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



**Εικόνα 1.1.** Τυπική διαδικασία ΜΚΕ σε κατασκευές

Κάθε τέτοιος έλεγχος μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα στατιστικό δείγμα που έχει επιλεγεί, σύμφωνα με κάποιες προδιαγραφές ή στο 100% των προϊόντων μιας παραγωγικής διαδικασίας ή σε εξαρτήματα που ήδη χρησιμοποιούνται. Οι κυριότερες κατηγορίες μεθόδων και τεχνικές ΜΚΕ οι οποίες εφαρμόζονται στην βιομηχανία και τις κατασκευές είναι οι εξής :

- Ραδιογραφία
- Υπέρηχοι
- Ακουστική εκπομπή
- Θερμογραφία
- Διεσδυτικά υγρά
- Δινορέυματα
- Μαγνητικές και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι

## 1.2 Ραδιογραφία

### 1.2.1 Εισαγωγή

Ακτίνες X ανακαλύφθηκαν το 1895 από τον Βίλχελμ Ραίντγκεν (Wilhelm Conrad Roentgen 1845-1923) ο οποίος ήταν καθηγητής στο Πανεπιστήμιο του Βίρτσμπουργκ της Γερμανίας. Δουλεύοντας με ένα καθοδικό σωλήνα στο εργαστήριό του, ο Ραίντγκεν παρατήρησε μια φθορίζουσα λάμψη κρυστάλλων σε ένα τραπέζι κοντά στον καθοδικό σωλήνα του. Ο σωλήνας που δούλευε ο Ραίντγκεν αποτελούνταν από ένα γυάλινο περίβλημα (λάμπα) με θετικά και αρνητικά ηλεκτρόδια ενσωματωμένα σε αυτό. Με εκκένωση του αέρα από το σωλήνα και ταυτόχρονη εφαρμογή υψηλής τάσης παραγόταν μια φθορίζουσα λάμψη. Ο Ραίντγκεν περιέβαλε το σωλήνα με ένα βαρύ μαύρο χαρτί και ανακάλυψε πως παραγόταν ένα πράσινο φθορίζον φως από ένα άλλο υλικό που βρισκόταν λίγα μέτρα μακριά από το σωλήνα.

Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένα νέο είδος ακτινών εκπεμπόταν από το σωλήνα. Αυτές οι ακτίνες ήταν ικανές να διέρχονται από το βαρύ χαρτί και να διεγείρουν φωσφορίζοντα υλικά στο δωμάτιο. Βρήκε ότι η νέα ακτίνα θα μπορούσε να περάσει μέσα από τις περισσότερες ουσίες δημιουργώντας σκιές από στερεά αντικείμενα. Ο Ραίντγκεν ανακάλυψε επίσης ότι η ακτίνα θα μπορούσε να περάσει μέσω του ανθρώπινου ιστού, όχι όμως τα οστά και μεταλλικά αντικείμενα [1]. Ένα από τα πρώτα πειράματα του Ραίντγκεν στα τέλη του 1895 ήταν ένα φιλμ από το χέρι της συζύγου του, που εμφανίζεται στην εικόνα 1.2.



α)



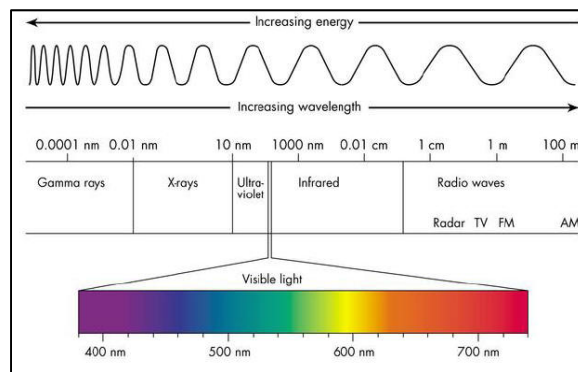
β)

**Εικόνα 1.2.** α) μια από τις πρώτες ακτινογραφίες η οποία απεικονίζει το χέρι της συζύγου του Ραίντγκεν β) το εργαστήριο όπου παράχθηκαν για πρώτη φορά οι ακτίνες X.

Πριν από το 1912, οι ακτίνες X χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στην ιατρική και την οδοντιατρική, αν και παρήχθησαν και μερικές εικόνες σε μέταλλα. Ο λόγος που οι ακτίνες X δεν χρησιμοποιήθηκαν σε βιομηχανική εφαρμογή πριν από την ημερομηνία αυτή ήταν επειδή οι λυχνίες ακτίνων X δεν μπορούσαν να λειτουργήσουν με τόσο υψηλές τάσεις που απαιτούνταν για ικανοποιητική διείσδυση σε βιομηχανικές εφαρμογές. Ωστόσο, αυτό άλλαξε το 1913 όταν οι σωλήνες υψηλού κενού που σχεδιάστηκαν από τον Coolidge έγιναν διαθέσιμοι. Οι σωλήνες υψηλού κενού ήταν μια έντονη και αξιόπιστη πηγή ακτίνων X, που λειτουργεί σε ενέργειες μέχρι 100,000 βολτ.

Το 1922, η βιομηχανική ακτινογραφία έκανε άλλο ένα βήμα προς τα εμπρός με την έλευση του σωλήνα ακτίνων X των 200.000 βολτ που επέτρεψε τις ακτινογραφίες σε χάλυβα. Το 1931, η General Electric Company ανέπτυξε γεννήτριες ακτίνων X των 1.000.000 βολτ, προσφέροντας ένα αποτελεσματικό εργαλείο για βιομηχανικές ακτινογραφίες. Την ίδια χρονιά, η American Society of Mechanical Engineers (ASME) επέτρεψε την χρήση ακτίνων X σε συγκολλήσεις σε δεξαμενές υψηλής πίεσης, πράγμα που άνοιξε περαιτέρω το δρόμο για βιομηχανική χρήση και αποδοχή.

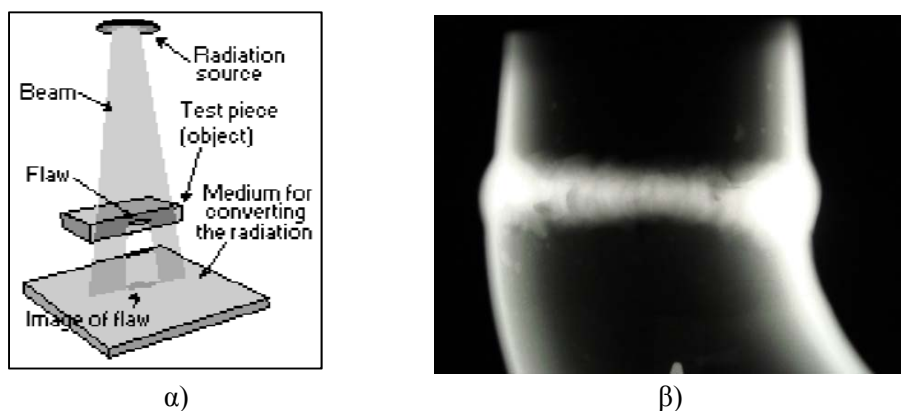
Από την ανακάλυψή τους το 1895 μέχρι σήμερα, οι ακτίνες-X χρησιμοποιούνται για τον ΜΚΕ ανθρώπων και υλικών. Οι ακτίνες-X έχουν τέτοιο μήκος κύματος που τους επιτρέπει να διαπερνούν όλα τα υλικά με κάποιο ποσοστό απορρόφησης που εξαρτάται από το υλικό. Το μήκος κύματος ποικίλει από τα 10nm (Grenz ή «απαλές» ακτίνες-X) έως τα 10-4nm («σκληρές» ακτίνες-X) που μπορούν να διαπεράσουν ακόμη και ατσάλι πάχους μισού μέτρου. Οι ακτίνες-Γάμα εκπέμπονται από ραδιενεργές πηγές σε παρόμοια μήκη κύματος, είναι και αυτές ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, έχουν τις ίδιες ιδιότητες με τις ακτίνες-X και χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανική ραδιογραφία. Οι ακτίνες-X και Γάμα ταξιδεύουν πάντα σε ευθείες γραμμές και δεν εστιάζονται γι' αυτό και η διάταξη λειτουργίας είναι πάντοτε: πηγή-εξεταζόμενο δείγμα- ραδιογραφική πλάκα όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.4.



**Εικόνα 1.3.** Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

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

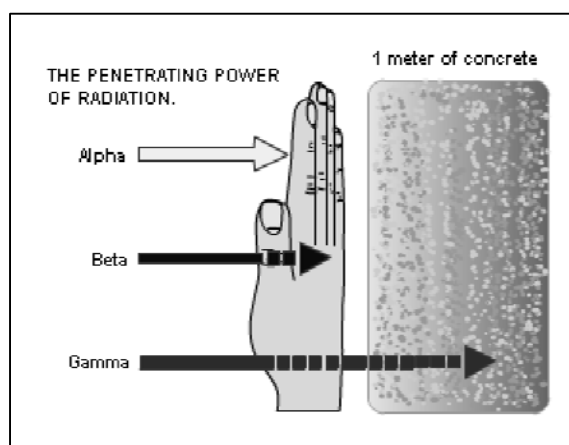
Όταν μελετάμε την παρουσία ατελειών σε ένα υλικό η μεγαλύτερη «ποιότητα» ή «ευαισθησία» μιας ραδιογραφικής μεθόδου σημαίνει την ικανότητα της να διακρίνει μια μικρότερων διαστάσεων ατέλεια. Για να μετρηθεί αυτή η ικανότητα της μεθόδου χρησιμοποιούνται κατάλληλοι δείκτες που είναι σύρματα ή ελάσματα,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



**Εικόνα 1.4.** α) Η διάταξη λειτουργίας της μεθόδου της ραδιογραφίας β) ακτινογραφία από συγκόλληση σε αγωγό.

### 1.2.2 Οι Ιονίζουσες ακτινοβολίες

Οι ακτίνες-Χ δημιουργούνται όταν ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας χτυπούν ένα μεταλλικό αντικείμενο. Οι ακτίνες-Γάμα προέρχονται από τον πυρήνα ραδιενεργών στοιχείων. Και οι δυο ακτινοβολίες ταξιδεύουν με ταχύτητα φωτός, σε ευθείες γραμμές και είναι αόρατες. Οι ηλεκτρομαγνητικές αυτές ακτινοβολίες δεν είναι συνεχείς (θεωρία Planck) αλλά εκπέμπονται σε μικρά πακέτα ενέργειας που ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα (quanta). Η ενέργεια ενός quantum μετριέται σε eV (electron-Volts). Η ενέργεια των ακτίνων-Χ και των ακτίνων-Γάμα εξαρτάται από το μήκος κύματος και αναφέρεται σε keV και MeV.

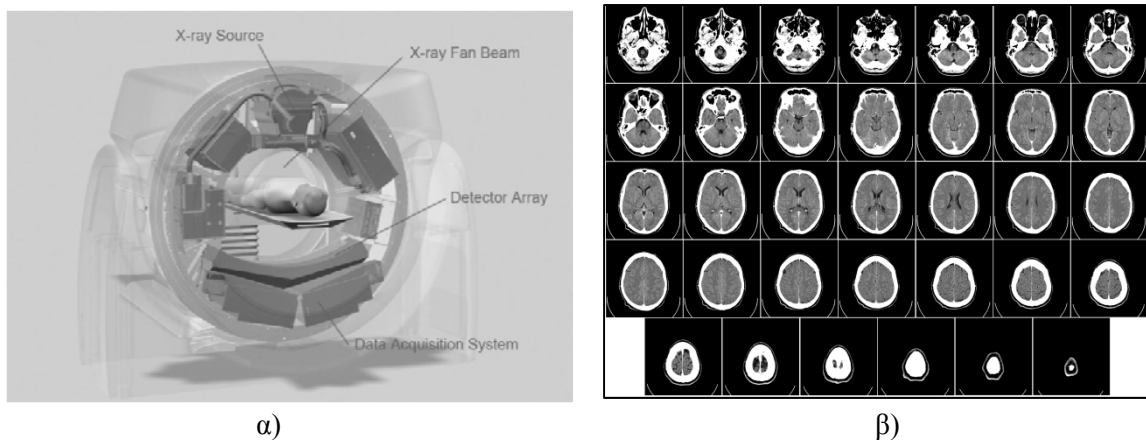


**Εικόνα 1.5.** Σχηματική αναπαράσταση της ικανότητας διείσδυσης των ακτίνων άλφα, βήτα και γάμα.

Οι πηγές των ακτίνων-Γάμα επιλέγονται μέσα από τα λίγα φυσικά ραδιενεργά υλικά και τις εκατοντάδες τεχνητά ραδιοϊσότοπα που εκπέμπουν συνδυασμούς από ακτίνες  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και νετρόνια. Ορισμένα στοιχεία υψηλής ατομικής μάζας (Ra226, U238, Pu239) όταν υποβάλλονται σε ραδιενεργό διάσπαση εκπέμπουν σωματίδια άλφα. Αυτά τα σωματίδια αποτελούνται από δύο νετρόνια και δύο πρωτόνια το καθένα (He4 πυρήνα) και να έχουν θετικό φορτίο. Η εκπομπή ενός σωματιδίου άλφα από ένα πυρήνα αντιστοιχεί σε μείωση δύο μονάδων του ατομικού αριθμού ( $Z$ ) και τεσσάρων μονάδων του μαζικού αριθμού ( $A$ ). Τα σωματίδια άλφα εκπέμπονται με διακριτές ενέργειες οι οποίες συνδέονται με υλικό από το οποίο εκπέμπονται. Ένας πυρήνας με ασταθή αναλογία νετρονίων και πρωτονίων μπορεί να διασπαστεί μέσω της εκπομπής ηλεκτρονίων υψηλής ταχύτητας που ονομάζονται σωματίδια βήτα. Γενικά οι ακτίνες άλφα και βήτα θεωρούνται σχετικά ασθενής και χρησιμοποιούνται σε πολύ συγκεκριμένες εφαρμογές. Στην εικόνα 1.5 παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση της ικανότητας διείσδυσης των ακτίνων αυτών.

Μέχρι το 1955 χρησιμοποιούσαν φυσικές πηγές όπως το Ράδιο και το Ραδόνιο τα οποία όμως ήταν επικίνδυνα και έχουν αντικατασταθεί σήμερα από ραδιοϊσότοπα όπως τα πλέον χρησιμοποιούμενα Cobalt-60, Iridium-192, ή, Ytterbium-169 και τα λιγότερο διαδεδομένα Caesium-137, Thulium-170, ή, Sodium-24 [2]. Ο αριθμός που ακολουθεί το όνομα είναι η ατομική μάζα του ισότοπου. Τα τεχνητά ραδιοϊσότοπα κατασκευάζονται σε ατομικούς αντιδραστήρες ή εξάγονται από τα χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα. Είναι σημαντικό να καταλάβουμε ότι όταν ένα τέτοιο υλικό αρχίσει να λειτουργεί δε μπορεί να σταματήσει ή να σβήσει. Το υλικό ακτινοβολεί συνέχεια μέχρι να εξαντληθεί. Τον ρυθμό εξάντλησης ενός ραδιενεργού υλικού τον μετράμε με το «χρόνο ημίσειας ζωής» που είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί στο μισό η ακτινοβολία του. Άλλα υλικά έχουν ημίσεια ζωή μερικές ώρες και άλλα μερικές εκατοντάδες χρόνια. Οι πηγές ακτίνων-Γάμα απαιτούν αυστηρά προσεκτικό και ασφαλή χειρισμό. Αφού ενεργοποιηθούν σφραγίζονται σε ειδικές κάψουλες, οι κάψουλες περιβάλλονται από απορροφητικό υλικό, τηρούνται αποστάσεις ασφαλείας, και, όλες οι ενέργειες πρέπει να είναι σύντομες και ταχύτατες.

### 1.2.3 Ψηφιακή Ραδιογραφία - Τομογραφία (Computed Tomography)



**Εικόνα 1.6.** α) Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης που χρησιμοποιείται στην τομογραφία β) διαδοχικές λήψεις που συνθέτουν μια τρισδιάστατη απεικόνιση.

Η τομογραφία είναι ένα σύνολο από ραδιογραφίες που αποτυπώνονται ψηφιακά και τις επεξεργαζόμαστε με Η/Υ. Αντί του ραδιογραφικού φιλμ, κάθε ραδιογραφία αποτυπώνεται σαν ψηφιακή πληροφορία μετατρέποντας τη φωτεινότητα κάθε κόκκου του φιλμ σε bytes. Για να δημιουργηθεί η 3-διάστατη τομογραφία συνθέτονται δεκάδες ψηφιακές ραδιογραφίες. Κάθε ραδιογραφία έχει ληφθεί από διαφορετικό σημείο, είτε περιστρέφοντας το αντικείμενο είτε περιστρέφοντας τη συσκευή ραδιογραφίας. Η σύνθεση γίνεται από τα πρόγραμμα του Η/Υ που ελέγχει τη συσκευή και γνωρίζει ακριβώς τις θέσεις και τις γωνίες λήψης των εικόνων.

#### 1.2.4 Κίνδυνοι και Προφύλαξη

Η ιονίζουσα ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη και καταστρέφει τους ζωντανούς ιστούς, γι' αυτό απαιτεί τη λήψη κατάλληλων μέτρων προφύλαξης και ειδικές εγκαταστάσεις [3]. Σήμερα συνυπάρχουν ακόμα το παλαιό με το μετρικό σύστημα μονάδων. Με το παλαιότερο σύστημα η ποσότητα ή «έκθεση» σε ακτινοβολία μετριέται σε Roentgens ή mR, η μονάδα «αποροφούμενης δόσης» είναι το rad, και η μονάδα «ισοδύναμης αποροφούμενης δόσης» το rem. Στο μετρικό σύστημα η «έκθεση» σε ακτινοβολία σαν ενέργεια που είναι, μετριέται σε Coulomb/kg ( $1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$ ), η μονάδα «αποροφούμενης δόσης» είναι το gray ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$ ), και η μονάδα «ισοδύναμης αποροφούμενης δόσης» το sievert ( $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ ). Στη πρακτική ραδιογραφία η έξοδος μιας συσκευής ακτίνων-X αναφέρεται σε mA και μιας ακτίνων-Γάμα σε curie (Ci). Στο μετρικό σύστημα το Ci θεωρήθηκε πολύ μεγάλο και αντικαταστάθηκε από το Becquerel (Bq) ( $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ ).

Η ετήσια δόση ακτινοβολίας σε ολόκληρο το σώμα δεν πρέπει να ξεπερνά τα 5 mSv (= 0.5 rem) για το κοινό και τα 15 mSv για τους εργαζόμενους σε σχετικές εγκαταστάσεις. Η κυριότερη αρχή που πρέπει να τηρείται είναι αυτή της ελάχιστης δυνατής έκθεσης (ALARP - As Low As Reasonably Possible). Οι οδηγίες προφύλαξης γίνονται όλο και πιο αυστηρές με τη πάροδο του χρόνου καθώς διαπιστώνεται το πραγματικό επίπεδο βλάβης που μπορούν να προξενήσουν οι ιονίζουσες ακτινοβολίες ακόμη και σε χαμηλές δόσεις.

### 1.3 Η μέθοδος των υπερήχων

#### 1.3.1 Εισαγωγή

Πριν από τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο το Σόναρ (η τεχνική της αποστολής ηχητικών κύματα μέσω του νερού παρατηρώντας την ηχώ για τον χαρακτηρισμό βυθισμένων αντικείμενων) ενέπνευσε αρκετούς ερευνητές στο να ασχοληθούν με αυτή την μέθοδο για ιατρικές εφαρμογές. Το 1929 και 1935, ο Sokolon μελέτησε τη χρήση υπερηχητικών κυμάτων για την ανίχνευση μεταλλικών αντικειμένων. Ο Mulhauser, το 1931, απέκτησε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για τη χρήση υπερηχητικών κυμάτων, χρησιμοποιώντας δύο αισθητήρες για την ανίχνευση ελαττωμάτων σε στερεά αντικείμενα. Ο Firestone (1940) και ο Simons (1945) ήταν από τους πρώτους ανέπτυξαν την τεχνική των υπερηχητικών παλμών (pulse-echo technique).

Λίγο μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, ερευνητές από την Ιαπωνία άρχισαν να διερευνούν την δυνατότητα των υπερήχων για ιατρική διάγνωση. Τα πρώτα όργανα υπερήχων χρησιμοποιούσαν ως



τρόπο παρουσίασης τις κυματομορφές σε μια οθόνη παλμογράφου (A-mode) ενώ έπειτα ακολούθησε η προβολή των αποτελεσμάτων σε μια διδιάστατη οθόνη (B-mode).

Τα επιτεύγματα της Ιαπωνίας στο υπερηχογράφημα ήταν σχετικά άγνωστα στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρώπη μέχρι το 1950. Οι ερευνητές στη συνέχεια παρουσίασαν τα συμπεράσματά τους σχετικά με τη χρήση των υπερήχων για την ανίχνευση πέτρας στη χολή, όγκων κ.α. στη διεθνή ιατρική κοινότητα. Η Ιαπωνία ήταν επίσης η πρώτη χώρα που εφάρμοσε το υπερηχογράφημα Doppler (μια εφαρμογή των υπερήχων που ανιχνεύει κινούμενα αντικείμενα στο εσωτερικό, όπως το αίμα που κυλά μέσα από την καρδιά).

Στις Ηνωμένες Πολιτείες οι πρωτοπόροι ερευνητές της μεθόδου των υπερήχων συνέβαλαν με πολλές καινοτομίες και σημαντικές ανακαλύψεις σε αυτόν τον τομέα. Οι ερευνητές έμαθαν να χρησιμοποιούν υπερήχους για την ανίχνευση του καρκίνου και να απεικονίζουν όγκους σε ασθενείς. Μια σημαντική επίσης καινοτομία ήταν και η απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο σε οθόνη CRT κατά τη στιγμή της σάρωσης. Η εισαγωγή των φασματικών Doppler και αργότερα του έγχρωμου Doppler επέτρεψε την απεικόνιση της ροής του αίματος σε διάφορα χρώματα ώστε να υποδεικνύεται η ταχύτητα και η κατεύθυνση της ροής.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, δύο γεγονότα προκάλεσαν μια σημαντική αλλαγή στον τομέα των ΜΚΕ. Πρώτον, η ανάπτυξη της τεχνολογίας οδήγησε στην ικανότητα να ανιχνευτούν αρκετά μικρές ρωγμές, πράγμα το οποίο οδήγησε στην απόρριψη μεγαλύτερου αριθμού εξαρτημάτων σε σχέση με παλιότερα. Δεύτερον, η εξέλιξη της Θραυστομηχανικής, η οποία επέτρεπε σε κάποιον να προβλέψει αν μια ρωγμή συγκεκριμένου μεγέθους θα διαδιδόταν ύπο την επιβολή συγκεκριμένου φορτίου. Παράλληλα άλλοι νόμοι αναπτύχθηκαν για την πρόβλεψη του ρυθμού διάδοσης των ρωγμών υπό κυκλική φόρτιση (κόπωση). Με την έλευση των εργαλείων αυτών, κατέστη δυνατό να γίνουν αποδεκτές κατασκευές που περιείχαν ελαττώματα (εάν τα μεγέθη των ελαττωμάτων αυτών ήταν γνωστά). Αυτό αποτέλεσε τη βάση για μια νέα φιλοσοφία «την σχεδίαση με αποδοχή αστοχιών» (Damage Tolerant design). Έτσι εξαρτήματα με γνωστά ελαττώματα μπορούσαν να συνεχίσουν την λειτουργία τους όσο θα μπορούσε να αποδειχθεί ότι τα ελαττώματα αυτά δεν θα έφταναν σε ένα κρίσιμο μέγεθος. Έτσι μια νέα πρόκληση παρουσιάστηκε στην κοινότητα του ΜΚΕ. Η ανίχνευση δεν ήταν αρκετή. Ήταν απαραίτητο να εξαχθούν και ποσοτικά αποτελέσματα σχετικά με το μέγεθος του ελαττώματος ώστε να χρησιμεύσουν ως δεδομένα με βάση τα οποία θα μπορούσαν να γίνουν προβλέψεις της υπολειπόμενης διάρκειας ζωής της κατασκευής. Η ανάγκη για ποσοτικά αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα έντονη στους κλάδους της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας και της στρατιωτικής βιομηχανίας και οδήγησε στην εμφάνιση της ποσοτικής μη καταστρεπτικής αξιολόγησης (quantitative nondestructive evaluation) [4].

Στις μέρες μας η εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των ρομποτικών συστημάτων έχουν συμβάλει στην πρόοδο της μεθόδου των υπερήχων. Τα συστήματα αυτά μπορούν να προγραμματιστούν ώστε να είναι δυνατή η επιθεώρηση σε μεγάλα και πολύπλοκα διαμορφωμένα εξαρτήματα. Τέτοιου είδους αυτοματοποιημένα συστήματα συνήθως αποτελούνταν από μια δεξαμενή εμφάπτισης, το σύστημα σάρωσης και το σύστημα καταγραφής. Το αποτέλεσμα αυτής της σάρωσης (C-scan) παρέχει την κάτοψη ενός εξαρτήματος. Έτσι ο έλεγχος εξαρτημάτων με αυτό τον τρόπο είναι σημαντικά πιο γρήγορος και πιο αξιόπιστος από την σάρωση με το χέρι.

### 1.3.2 Φυσικές αρχές

Οι μηχανικές δονήσεις διαδίδονται μέσα από στερεά, υγρά και αέρια καθώς η δόνηση μεταφέρεται από το ένα σωματίδιο της ύλης στο διπλανό του. Όταν τα σωματίδια της ύλης ταλαντώνουν και η κίνησή τους

είναι κανονική τότε μετριέται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο ( $\text{Hz} = \text{sec}^{-1}$ ). Όταν μάλιστα η συχνότητα της δόνησης είναι μεταξύ 10 και 20000 Hz, ο ήχος ακούγεται από το ανθρώπινο αυτί. Οι δονήσεις με συχνότητα πάνω από 20000 Hz οι «ήχοι» δεν ακούγονται και ονομάζονται υπέρηχοι (ultrasound ή ultrasonic). Τα ηχητικά κύματα δεν είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά είναι κύματα κίνησης παρόμοια με τα θαλάσσια κύματα. Τα κύματα των ήχων και των υπερήχων διαδίδονται μέσα στα υλικά, υφίστανται απόσβεση και ανακλώνται, διαθλώνται ή σκεδάζονται όταν συναντούν εμπόδια ή ασυνέχειες, ανάλογα με τη συχνότητά τους. Την ιδιότητα αυτή τη χρησιμοποιούμε για να εντοπίσουμε τυχόν ατέλειες στο εσωτερικό ενός σώματος χωρίς να το τεμαχίσουμε (ΜΚΕ) [5].

Οι διαγνωστικοί υπέρηχοι έχουν συχνότητες στην περιοχή 1-50MHz, ενώ η μικροσκοπία υπερήχων χρησιμοποιεί συχνότητες μέχρι 200MHz για την εξέταση δομών μέσα στα κύτταρα. Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου σ' ένα υλικό εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας του E και την πυκνότητα του d σύμφωνα με την σχέση:

$$c = \sqrt{E / d} \quad (1.1)$$

Το μήκος κύματος  $\lambda$  είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών χαμηλών ή υψηλών μετώπων πίεσης του ηχητικού κύματος και συνδέεται με την συχνότητα και την ταχύτητα διάδοσης μέσω της σχέσης:

$$f \cdot \lambda = c \quad (1.2)$$

Η ένταση του ηχητικού κύματος ορίζεται ως η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που διαδίδεται μέσα από μία μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στην διεύθυνση του κύματος και έχει μονάδες ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας (συνήθως  $\text{W}/\text{cm}^2$  ή  $\text{m W}/\text{cm}^2$  για ιατρικές εφαρμογές). Η ακουστική εμπέδηση ή διαπερατότητα Z ενός υλικού μέσου εξαρτάται μόνο από τις μηχανικές του ιδιότητες και όχι από τη συχνότητα του ηχητικού κύματος ενώ ως μονάδα μέτρησής της χρησιμοποιείται το Rayl ( $1 \text{ Rayl} = 1\text{kg}/\text{m}^2\text{sec}$ ). Η εμπέδηση Z περιγράφεται από την σχέση :

$$Z = d \cdot c \quad (1.3)$$

Όταν μία ηχητική δέσμη προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών μέσων διαφορετικής διαπερατότητας, τότε εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται. Η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_0$ , η γωνία ανάκλασης  $\theta_\alpha$  και η γωνία διάθλασης  $\theta_\delta$  συνδέονται μέσω των σχέσεων:

$$\theta_\alpha = \theta_0 \quad (1.4)$$

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_\delta} = \frac{c_1}{c_2} = n_{21} \quad (1.5)$$

όπου  $n_{21}$  είναι ο σχετικός δείκτης διάθλασης του μέσου 2 ως προς το μέσο 1. Ο συντελεστής ανάκλασης πλάτους  $R_A$  (ή ενέργειας  $R_T$ ) ορίζεται ως το ποσοστό του πλάτους (ή της ενέργειας) της προσπίπτουσας δέσμης που ανακλάται και εξαρτάται από το λόγο των ακουστικών εμπεδήσεων των δύο μέσων:

$$R_A = \frac{1 - Z_1 / Z_2}{1 + Z_1 / Z_2} \quad (1.6)$$

$$R_1 = \left( \frac{1 - Z_1 / Z_2}{1 + Z_1 / Z_2} \right)^2 \quad (1.7)$$

Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά της διαπερατότητας, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της ανακλώμενης δέσμης και τόσο μικρότερο το ποσοστό της δέσμης που διέρχεται στο δεύτερο μέσο. Στον πίνακα 1.1 που ακολουθεί, καταχωρούνται οι τιμές κάποιων χαρακτηριστικών παραμέτρων διαφόρων υλικών μέσων.

**Πίνακας 1.1.** Χαρακτηριστικές παράμετροι διαφόρων υλικών.

Υλικό	Διαμήκης ταχύτητα (cm/s)	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Ακουστική εμπέδιση (g/cm <sup>2</sup> -s)
Αέρας	0.33	0.0001	0.00033
Αλουμίνιο 250	6.35	2.71	17.2
Ορείχαλκος	4.43	8.10	35.9
Μπρούτζος	3.53	8.86	31.3
Χαλκός	4.66	8.90	41.5
Χρυσός	3.20	19.56	62.6
Πάγος	4.00	0.88	3.5
Σίδηρος	5.90	7.69	45.4
Μόλυβδος	2.16	11.40	24.6
Μαγνήσιο	5.79	1.74	10.1
Υδράργυρος	1.40	14.00	19.6
Νεοπρένιο	1.60	1.31	2.1
Νικέλιο	5.63	8.80	49.5
Νάιλον 66	2.60	1.11	2.9
Πλατίνα	3.30	21.15	69.8
Πλεξιγκλάς	2.70	1.15	3.1
Πολυαιθυλένιο	1.90	0.89	1.7
Πολυστιρένιο	2.40	1.04	2.5
Χαλαζίας	5.80	2.62	15.2
Καουτσούκ	1.80	1.11	2.0
Άργυρος	3.60	5.99	21.6
Χάλυβας	5.85	7.80	45.6
Τυφλόν	1.40	2.14	3.0
Κασσίτερος	3.30	7.33	24.2
Τιτάνιο	6.10	4.47	27.3
Νερό	1.49	1.00	1.49
Ψευδάργυρος	4.20	7.05	29.6

Η εξασθένιση μιας ηχητικής δέσμης οφείλεται σε τρεις παράγοντες: το εύρος της δέσμης, τη σκέδαση και την απορρόφηση. Όταν η ηχητική ενέργεια διαδίδεται μέσα σ' ένα μη σκεδαστικό και μη απορροφητικό μέσο, παραμένει σταθερή. Όμως, καθώς το μέτωπο της δέσμης (beam pattern) γίνεται ευρύτερο, η ενέργεια αυτή πρέπει να κατανομηθεί σε μια μεγαλύτερη περιοχή, με αποτέλεσμα τη μείωση της εντάσεως της δέσμης. Το αποτέλεσμα της σκέδασης της δέσμης από διάχυτους ή κατοπτρικούς ανακλαστές είναι η απώλεια ενός ποσοστού της ενέργειας από τη διαδιδόμενη δέσμη. Η απώλεια μέρους της ταλαντωτικής ενέργειας των σωματιδίων του υλικού μέσου λόγω φαινομένων τριβής ονομάζεται απορρόφηση και συνεπάγεται τη μετατροπή μέρους της ενέργειας του ηχητικού κύματος σε θερμότητα. Η εξασθένιση του διαδιδόμενου ηχητικού κύματος περιγράφεται από εκθετικό νόμο της μορφής:

$$A = A_0 e^{-ax} \quad (1.8)$$

$$I = I_0 e^{-ax} \quad (1.9)$$

όπου  $a$  είναι ο συντελεστής εξασθένισης πλάτους με μονάδες  $\text{cm}^{-1}$ . Η συνιστώσα της εξασθένισης που οφείλεται στη μεταβολή του εύρους της τηςσμης δεν περιλαμβάνεται σ' αυτές της εκφράσεις. Εξαιτίας της εκθετικής περιγραφής της εξασθένισης συνηθίζεται η έκφραση της σε decibel (dB):

$$\text{dB} = 10 \cdot \log_{10} (I_{\text{out}} / I_{\text{in}}) \quad (1.10)$$

### 1.3.3 Παραγωγή και ανίχνευση υπερήχων

Η παραγωγή και η ανίχνευση των υπερήχων στηρίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή στη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα, από ειδικούς κρυστάλλους. Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος τοποθετείται ανάμεσα σε δύο λεπτά επίπεδα ηλεκτρόδια. Η εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού σε αυτά προκαλεί τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου εντάσεως  $E$  και τη μεταβολή του πάχους  $z$  του κρυστάλλου:

$$dz / z = C_c \cdot E \quad (1.11)$$

όπου  $C_c$  η αντίστροφη πιεζοηλεκτρική σταθερά. Η εφαρμογή μηχανικής πίεσης (στη συγκεκριμένη περίπτωση υπερηχητικής πίεσης  $p$ ) στον κρύσταλλο δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο εντάσεως  $E$ , όπου  $C_d$  είναι η ευθεία πιεζοηλεκτρική σταθερά :

$$E = C_d \cdot p \quad (1.12)$$

Το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο πιεζοηλεκτρικό υλικό σήμερα είναι το PZT (lead – zirconate – titanate) λόγω της υψηλής απόδοσης ηλεκτρομηχανικής μετατροπής, των μικρών εγγενών απωλειών και των καλών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του, που προέρχονται από την υψηλή διηλεκτρική σταθερά του. Το PZT έχει μεγάλη μηχανική αντοχή, μπορεί να λάβει διάφορα σχήματα και μεγέθη, μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες υψηλότερες των  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  και είναι σταθερό για μεγάλα χρονικά

διαστήματα. Οι ιδιότητες του μπορούν να ρυθμιστούν με την τροποποίηση της αναλογίας zirconium / titanium και την προσθήκη μικρής ποσότητας άλλων ουσιών π.χ. lanthanum.

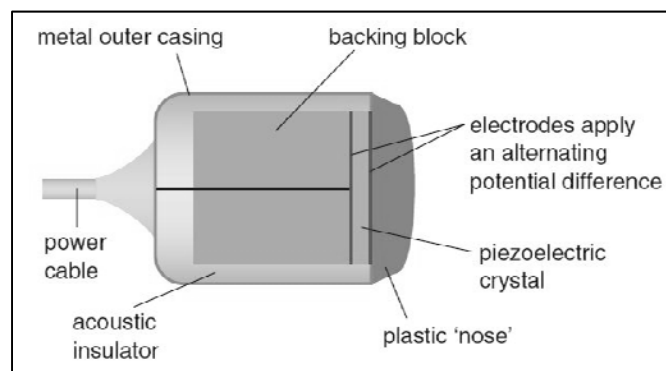
Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το BPT (barium lead titanate), το BPZ (barium lead zirconate), το PVDF (polyvinylidene difluoride) και το PMN (lead magnesium niobate). Η μία πλευρά του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου επικολλάται σ' ένα υλικό γνωστό ως backing material, με σκοπό την απόσβεση των ταλαντώσεων του στοιχείου για τη βελτίωση του εύρους συχνοτήτων (bandwidth) και τη μείωση της οπίσθιας διάδοσης του κύματος και των ανακλάσεων του από εσωτερικές δομές. Η συνθήκη ιδανικής απόσβεσης είναι:

$$Z_{\text{backing}} = Z_{\text{crystal}} \quad (1.13)$$

Η δυναμική απόσβεση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού εκτός φάσεως με τη διαφορά δυναμικού της διέγερσης αμέσως μετά το τέλος της τελευταίας και συνεπώς με την πρόκληση δονήσεων αντίθετης διεύθυνσης. Η πλευρά του στοιχείου αυτής το υλικό καλύπτεται από ένα ή περισσότερα στρώματα προσαρμογής (matching layers), με σκοπό τη σύζευξη των εμπεδήσεων του κρυστάλλου  $Z_c$  και του υλικού  $Z_t$  και τη μείωση της απώλειας ηχητικής ενέργειας στη διαχωριστική τους επιφάνεια. Η ακουστική τους εμπέδηση ίση με:

$$Z_1 = \sqrt[3]{Z_c \cdot Z_t^2} \quad (1.14)$$

Δεδομένου ότι η ακουστική εμπέδηση των υλικών διαφέρει πολύ από εκείνη του αέρα, η ύπαρξη αέρα ανάμεσα στον μετατροπέα (transducer) και του υλικού θα προκαλέσει μεγάλη απώλεια ενέργειας του ηχητικού κύματος. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου τοποθετείται ένα ειδικό υλικό ανάμεσα αυτής (gel ή coupling fluid).



**Εικόνα 1.7.** Σχηματική αναπαράσταση αυτής πιεζοηλεκτρικού υπερηχητικού μετατροπέα

Η σύζευξη αυτής ηλεκτρικής εμπέδησης του κρυστάλλου και αυτής εξόδου αυτής γεννήτριας αυτής διαφοράς δυναμικού διεγέρσεως γίνεται με την βοήθεια κυκλωμάτων πυκνωτών και πηνίων. Δεδομένου ότι η χωρητικότητα των καλωδίων σύνδεσης συνυπολογίζεται, δεν συνιστάται η αλλαγή του τύπου ή του μήκους αυτής. Η διάρκεια του παραγόμενου ηχητικού παλμού αυτής μετριέται σε αριθμό κύκλων μέχρι το αρχικό πλάτος να μειωθεί στο 10%, ενώ το χωρικό μήκος του παλμού είναι το γινόμενο του μήκους κύματος  $\lambda$  επί τον αριθμό των κύκλων. Καθώς ο παλμός δεν είναι καθαρά ημιτονικός, έχει ένα φάσμα

συχνότητων (bandwidth), το οποίο είναι τόσο πιο ευρύ, όσο πιο μικρή είναι η χρονική διάρκεια του παλμού.

Το σχέδιο μιας δέσμης υπερήχων (beam pattern) αποτελείται από δύο περιοχές: το εγγύς (Fresnel) πεδίο και το μακρινό (Fraunhofer) πεδίο. Στη ζώνη Fresnel, φαινόμενα περίθλασης λόγω των πεπερασμένων διαστάσεων του κρυστάλλου δημιουργούν φαινόμενα χωρικής συμβολής, με αυτήστελέεσμα η ένταση να μεταβάλλεται ακανόνιστα. Το μήκος  $L$  αυτής ζώνης αυτής εξαρτάται από το μήκος κύματος  $\lambda$  και τη διάμετρο του κρυστάλλου  $\rho$ :

$$L = \rho^2 / 4\lambda \quad (1.15)$$

Στη ζώνη Fraunhofer, ο πιεζοηλεκτρικός κρυστάλλος μπορεί να θεωρηθεί σημειακή πηγή, η ένταση της οποίας είναι χωρικά ομοιόμορφη. Το πεδίο Fraunhofer αποκλίνει συναρτήσει της απόστασης με μία γωνία  $\theta$ :

$$\theta = \arcsin(1,22 \cdot \lambda / \rho) \quad (1.16)$$

Αύξηση της συχνότητας συνεπάγεται αύξηση του μήκους  $L$  του πεδίου Fresnel και μείωση της γωνίας απόκλισης της ζώνης Fraunhofer, δηλαδή βελτίωση των χαρακτηριστικών της δέσμης.

#### 1.3.4 Η μέθοδος pulsed echo

Κάθε φορά που ένας διαδιδόμενος σε ένα υλικό, ηχητικός παλμός συναντάει δομές διαφορετικής ακουστικής εμπέδησης, ανακλάται μερικώς. Η μέτρηση της χρονικής διαφοράς  $t$  της εκπομπής του παλμού και της ανίχνευσης της ανακλασθείσας δέσμης (echo) προσδιορίζει το βάθος  $d$  της δομής που συνάντησε ο παλμός:

$$d = \frac{1}{2} t \cdot c \quad (1.17)$$

Η συχνότητα εκπομπής των ηχητικών παλμών (Pulse Repetition Frequency or PRF) εξαρτάται από το μέγιστο υπό εξέταση βάθος  $d_{\max}$ , δεδομένου ότι ένας παλμός δεν πρέπει να μεταδοθεί πριν τη συλλογή όλων των αντηχήσεων (echoes) του προηγούμενου παλμού από την περιοχή ενδιαφέροντος. Υπάρχει επομένως ένα ανώτατο όριο  $\text{PRF}_{\max}$ :

$$\text{PRF}_{\max} = \frac{c}{2d_{\max}} \quad (1.18)$$

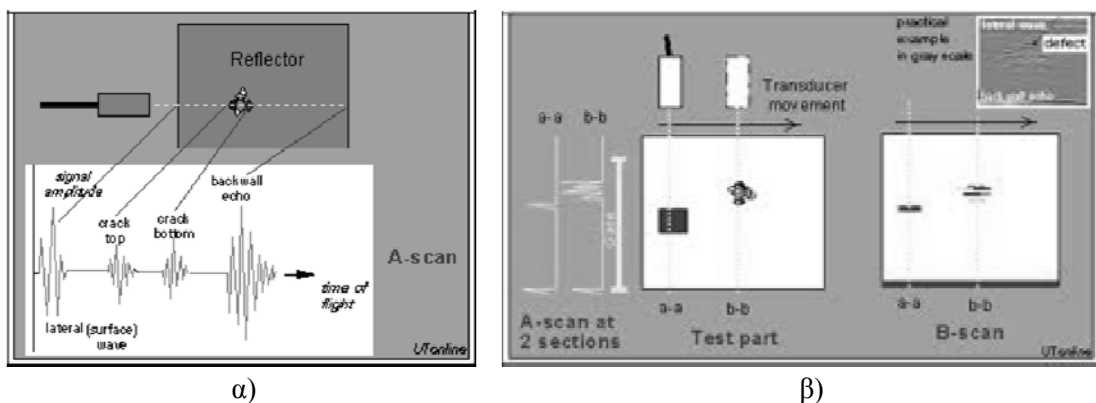
Οι αντηχήσεις μετατρέπονται σε κυματομορφές διαφοράς δυναμικού, διέρχονται από ένα κύκλωμα απόρριψης σημάτων υψηλού πλάτους (limiter), ενισχύονται από έναν λογαριθμικό ενισχυτή, ανορθώνονται και αποδιαμορφώνονται. Το σήμα εξόδου του αποδιαμορφωτή περιέχει τις επιθυμητές πληροφορίες (το πλάτος του ανακλασθέντος σήματος και τη χρονική καθυστέρηση από τη στιγμή

εκπομπής του ηχητικού παλμού) οι οποίες χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση των δομών που συνάντησε ο ηχητικός παλμός.

Καθώς η ηχητική ενέργεια ταξιδεύει από και προς τον μετατροπέα, η εξασθένιση της προκαλεί τη μείωση του σήματος συναρτήσει της απόστασης, με αποτέλεσμα ομογενείς δομές να παρουσιάζουν διαφορετική εικόνα ανάλογα με το βάθος στο οποίο βρίσκονται. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη μέθοδο TGC (Time Gain Compensation), που συνίσταται στην αύξηση της απολαβής του ενισχυτή σε χρονική συμφωνία με την άφιξη ασθενέστερων αντηχήσεων από βαθύτερες δομές στο υλικό.

Ο τρόπος παρουσίασης των αντηχήσεων ποικίλει. Στην απλούστερη μέθοδο A-mode (Amplitude mode) ο άξονας x ενός παλμογράφου αντιπροσωπεύει το βάθος μέσα στο υλικό και ο άξονας y το πλάτος των λαμβανομένων σημάτων [6]. Ο οριζόντιος άξονας είναι βαθμονομημένος σε μονάδες αποστάσεως, δηλαδή αν και το σύστημα κάνει πάντα μετρήσεις χρόνου, χρησιμοποιεί την σχέση (1,17) για να μετατρέψει τις χρονικές καθυστερήσεις σε βάθη μέσα στο υλικό.

Μία άλλη μέθοδος είναι η B-mode (Brightness mode), στην οποία το πλάτος μίας αντήχησης αντιπροσωπεύεται από ένα σημείο ανάλογης φωτεινότητας ή απόχρωσης του γκρι (gray scale display) στην αντίστοιχη γεωμετρική του θέση, με αποτέλεσμα την απεικόνιση μίας τομής του αντικειμένου [6]. Στην εικόνα 1.8 παρουσιάζονται σχηματικά οι δυο αυτές μέθοδοι.



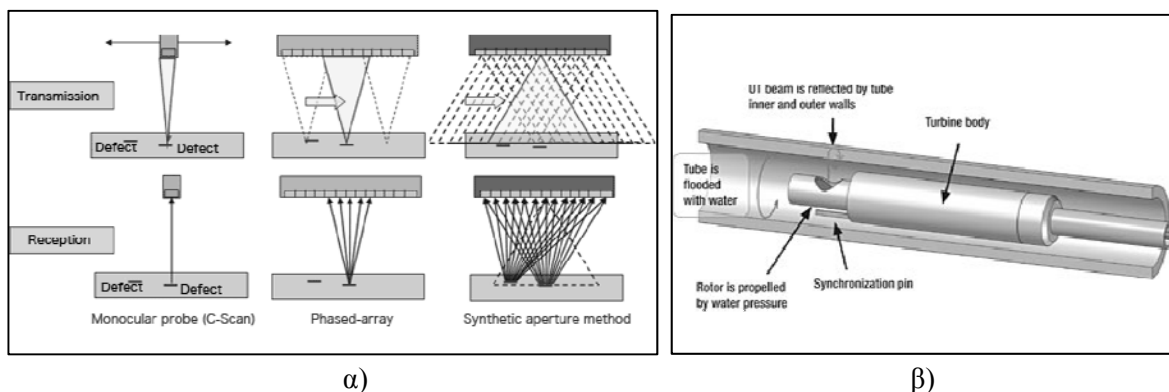
**Εικόνα 1.8.** Σχηματική απεικόνιση α) της μεθόδου A-mode β) της μεθόδου B-mode

Η τεχνική M-mode (Motion mode) αποτελεί συνδυασμό των δύο προηγούμενων μεθόδων. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται στην καρδιολογία για τη μελέτη της κίνησης των καρδιακών τοιχωμάτων και των βαλβίδων, στην εξέταση της κοιλιακής χώρας για την εκτίμηση της κατάστασης μεγάλων αγγείων όπως η κοιλιακή αορτή και οι νεφρικές αρτηρίες, στη γυναικολογία κ.ά. Η αποθήκευση των πληροφοριών που αφορούν τη θέση και το πλάτος των αντηχήσεων γίνεται σ' έναν scan converter, ο οποίος στις μέρες μας είναι ψηφιακής μορφής προσφέροντας αξιοπιστία, δυνατότητα εύκολης επεξεργασίας των δεδομένων και χαμηλό σχετικά κόστος.

### 1.3.5 Εξελιγμένα συστήματα υπερηχητικού ελέγχου

Οι σύγχρονες τεχνικές που είχαν επιτυχία σε παρόμοιους επιστημονικούς κλάδους, εφαρμόζονται και στις μεθόδους υπερήχων. Η συστοιχία φάσης (Phased Array ultrasonics), γνωστή από τα ραντάρ και σόναρ, υλοποιείται και εδώ με μια συστοιχία από πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και μας δίνει τη δυνατότητα

να κατευθύνουμε τη δέσμη των παλμών με μεγάλη ακρίβεια χωρίς τη παρεμβολή μηχανικών ή άλλων μέσων. Για την εφαρμογή των μεθόδων σε ειδικές κατασκευές έχουν αναπτυχθεί επί μέρους τεχνικές. Ειδικά για το εσωτερικό των αγωγών έχουν αναπτυχθεί συστήματα όπως το περιστρεφόμενο σύστημα ελέγχου (Internal Rotary Inspection System - IRIS) που τοποθετείται μέσα στον αγωγό και τον σαρώνει κυκλικά και κατά μήκος για τον εντοπισμό ρωγμών και διαβρώσεων.



**Εικόνα 1.9.** Σχηματική απεικόνιση α) της μεθόδου της συστοιχίας φάσης β) του περιστρεφόμενου συστήματος ελέγχου

## 1.4 Ακουστική εκπομπή

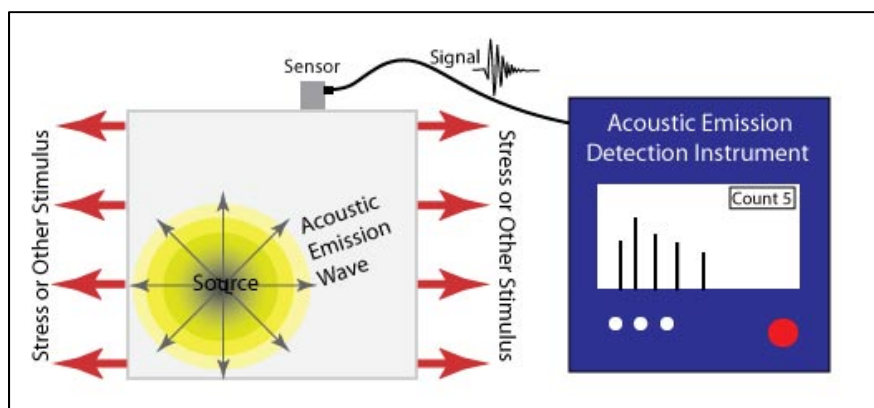
### 1.4.1 Εισαγωγή

Όταν ένα στερεό φορτίζεται με τάσεις αρκούντως υψηλές, τότε το υλικό παράγει ήχους με τη μορφή διακριτών παλμών. Το φαινόμενο αυτό το καλούμε Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission - AE) ή Εκπομπή Κυμάτων Τάσης (Stress-Wave Emission - SWE). Η Ακουστική Εκπομπή μπορεί να καλύπτει και το ακουστικό φάσμα αλλά κυρίως πρόκειται για υπερήχους με συχνότητες από 30 kHz έως 30 MHz. Παρόλο που η Ακουστική Εκπομπή (AE) συνήθως δημιουργείται σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον, μπορεί επίσης να συμβεί φυσικά. Ως εκ τούτου, η προέλευση της AE ως εργαλείο ελέγχου ποιότητας είναι δύσκολο να εντοπιστεί. Ήδη από το 6.500 π.Χ., είναι γνωστό ότι οι αγγειοπλάστες παρακολουθούσαν τους ήχους των αγγείων κατά τη διάρκεια της ψύξης τους, με βάση τους οποίους μπορούσαν να διακρίνουν δομικές αστοχίες. Στην μεταλλουργία, ηχητικές εκπομπές που παράγονταν από τη μηχανική κατεργασία καθαρού κασσίτερου έχουν παρατηρηθεί για πρώτη φορά περίπου το 3.700 π.Χ. Οι πρώτες τεκμηριωμένες παρατηρήσεις της Ακουστικής Εκπομπής φαίνεται να έχουν γίνει από τον 8ο αιώνα από τον Άραβα αλχημιστή Jabir ibn Hayyan. Σε ένα βιβλίο, ο Hayyan έγραψε ότι ο Δίας (κασσίτερος) εκπέμπει ένα «σκληρό ήχο», όταν κατεργαζόταν, ενώ ο Άρης (σίδηρος) "ακούγεται πολύ" κατά τη διάρκεια της σφυρηλάτησης. Σε πολλά κείμενα στα τέλη του 19ου αιώνα αναφέρεται να πραγματοποιούνται ακουστικές εκπομπές από υλικά όπως ο κασσίτερος, ο σίδηρος, το κάδμιο και ο ψευδάργυρος. Αργότερα, ο Albert Portevin και ο Francois Le Chatelier παρατήρησαν AE σε παραμορφωμένο κράμα Al-Cu-Mn (αλουμίνιο-χαλκός-μαγγάνιο) [7].

Τα επόμενα χρόνια οι εργασίες του Robert Anderson (δοκιμες εφελκυσμού κράματος αλουμινίου πέρα από το σημείο διαρροής), του Erich Scheil (συσχέτιση μεταξύ του σχηματισμού μαρτενσίτη σε χάλυβα



και της ακουστικής εκπομπής) και του Friedrich Forster και Scheil (συσχέτιση μεταξύ του σχηματισμού μαρτενσίτη σε σιδηρονικέλιο και της ακουστικής εκπομπής), επιβεβαίωσαν ακόμα περισσότερο την αρχή της μεθόδου. Ο πειραματισμός συνεχίστηκε μέχρι τα μέσα του 1900, με αποκορύφωμα την διδακτορική διατριβή του Joseph Kaiser με τίτλο «Αποτελέσματα και συμπεράσματα από μετρήσεις του ήχου Μεταλλικών Υλικών υπό την καταπόνηση εφελκυσμού». Με βάση την έρευνα του Kaiser ξεκίνησε το πρώτο ερευνητικό πρόγραμμα στις Ηνωμένες Πολιτείες με σκοπό την αξιολόγηση της μεθόδου. Η έρευνα του Kaiser αναγνωρίζεται ως η αρχή της σύγχρονης Ακουστικής Εκπομπής.



**Εικόνα 1.10.** Σχηματική περιγραφή της μεθόδου της ακουστικής εκπομπής

#### 1.4.2 Συνοπτική περιγραφή της μεθόδου

Η μέθοδος της Ακουστικής Εκπομπής (AE) αναφέρεται στην παραγωγή ελαστικών κυμάτων που παράγονται από μια ξαφνική ανακατανομή της τάσης, σε ένα υλικό. Όταν μια κατασκευή υποβάλλεται σε ένα εξωτερικό ερέθισμα (μεταβολή της πίεσης, του φορτίου ή της θερμοκρασίας), εντοπισμένες πηγές προκαλούν την απελευθέρωση της ενέργειας, με τη μορφή των κυμάτων, τα οποία διαδίδονται στην επιφάνεια και καταγράφονται από αισθητήρες. Με το σωστό εξοπλισμό μπορούν να μετρηθούν κινήσεις της τάξης των picometers ( $10^{-12}$  m). Οι πηγές της AE ποικίλουν και μπορεί να είναι φυσικά φαινόμενα, όπως οι σεισμοί και η διάρρηξη πετρώματων, η τήξη, οι μετασχηματισμοί φάσεων στα μέταλλα κ.α.. Στα σύνθετα υλικά, η θραύση της μήτρας, οι ρωγμές και αποκόλληση ινών συμβάλλουν στην ακουστική εκπομπή. Ακουστική εκπομπή έχει επίσης μετρηθεί και καταγραφεί στα πολυμερή, στο ξύλο και το σκυρόδεμα. Στην εικόνα 1.10 παρουσιάζεται σχηματικά η βασική αρχή της μεθόδου.

Η ανίχνευση και η ανάλυση σημάτων AE μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την προέλευση και τη σημασία μιας ασυνέχειας σε ένα υλικό. Λόγω της ευελιξία της μεθόδου έχει πολλές βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. εκτίμηση της δομικής ακεραιότητας, την ανίχνευση ελαττωμάτων, την ανίχνευση διαρροών, την παρακολούθηση της ποιότητας συγκόλλησης κ.α.) και χρησιμοποιείται ευρέως ως εργαλείο έρευνας.

Η Ακουστική Εκπομπή διαφέρει με τις περισσότερες άλλες μεθόδους μη καταστρεπτικού έλεγχου σε δύο σημεία. Το πρώτο, αφορά στην προέλευση του σήματος. Αντί της παροχής ενέργειας στην υπό εξέταση κατασκευή, η μέθοδος απλά «ακούει» την ενέργεια που απελευθερώνεται από το αντικείμενο. Οι δοκιμές της AE πραγματοποιούνται στις κατασκευές, ενώ αυτές είναι σε λειτουργία, καθώς κάτι τέτοιο παρέχει επαρκή φόρτιση ώστε να προκληθεί ακουστική εκπομπή.

Η δεύτερη διαφορά είναι ότι η μέθοδος ασχολείται με δυναμικές διαδικασίες ή αλλαγές, σε ένα υλικό. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, γιατί με αυτό τον τρόπο μετρούνται μόνο τα ενεργά χαρακτηριστικά (π.χ. ανάπτυξη ρωγμών). Η δυνατότητα να γίνεται διάκριση μεταξύ των αναπτυσσόμενων και στάσιμων ελαττώματα είναι σημαντική. Ωστόσο, υπάρχει περίπτωση κάποιο ελαττώματα να μην είναι ανιχνεύσιμο, εάν η φόρτιση δεν είναι αρκετά υψηλή για να προκαλέσει ένα ακουστικό συμβάν. Επιπλέον, η ΑΕ συνήθως παρέχει μια άμεση ένδειξη σχετικά τον κίνδυνο της αστοχίας ενός εξαρτήματος. Άλλα πλεονεκτήματα της ΑΕ περιλαμβάνουν τον γρήγορο ογκομετρικό έλεγχο με την χρήση πολλαπλών αισθητήρων και ότι δεν χρειάζεται η αποσυναρμολόγηση και ο καθαρισμός των υπό εξέταση εξαρτημάτων.

Δυστυχώς, η μέθοδος της Ακουστικής Εκπομπής μπορεί να δώσει μόνο ποιοτικά αποτελέσματα. Για την απόκτηση ποσοτικών αποτελεσμάτων όπως το μέγεθος, το βάθος το σχήμα κ.α., χρειάζεται να εφαρμοστούν άλλες μέθοδοι ΜΚΕ (συντά δοκιμή με υπέρηχους). Ένα άλλο μειονέκτημα της ΑΕ προέρχεται τον θόρυβο του περιβάλλοντα χώρου όπου συμβάλλονται εξωτερικοί θόρυβοι στα σήματα. Για επιτυχημένες εφαρμογές, είναι σκόπιμο να γίνεται μείωση του θορύβου του σήματος.

#### 1.4.3 Ανίχνευση και καταγραφή σημάτων ακουστικής εκπομπής

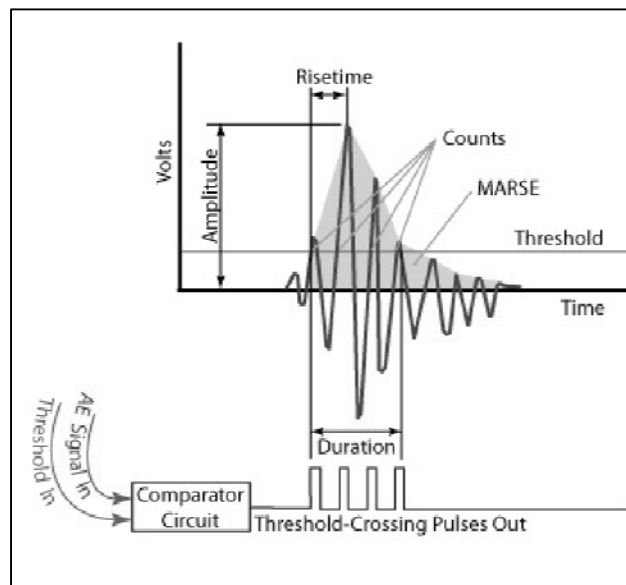
Η Ακουστική Εκπομπή μπορεί να εκτελεστεί σε εξωτερικούς χώρους με φορητά όργανα ή σε ένα στο περιβάλλον του εργαστηρίου. Συνήθως, τα συστήματα ΑΕ περιλαμβάνουν αισθητήρες, προενισχυτές, φίλτρα, και συσκευές απεικόνισης και αποθήκευσης των αποτελεσμάτων (π.χ. παλμογράφοι, βολτόμετρα, και ηλεκτρονικούς υπολογιστές). Οι ηχητικοί αισθητήρες διεγείρονται από την δυναμική κίνηση που προκαλείται από ένα συμβάν ΑΕ. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω αισθητήρων οι οποίοι μετατρέπουν τη μηχανική κίνηση σε ένα ηλεκτρικό σήμα διαφοράς δυναμικού. Το αισθητήριο στοιχείο στην ΑΕ είναι σχεδόν πάντα ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος, ο οποίος συνήθως κατασκευάζεται από κεραμικό υλικό (lead zirconate titanate -PZT). Οι αισθητήρες αυτοί επιλέγονται με βάση τη συχνότητα λειτουργίας, την ευαισθησία και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά. Η πλειοψηφία του εξοπλισμού ΑΕ αποκρίνεται στην κίνηση για τυπικό φάσμα συχνοτήτων από 30 kHz έως 1 MHz. Για υλικά με υψηλή εξασθένιση (π.χ. πλαστικά ή σύνθετα υλικά), μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαμηλότερες συχνότητες.

Ο αισθητήρας συνδέεται με την επιφάνεια δοκιμής και διατηρείται στη θέση του με ταινία ή κόλλα υψηλής αντοχής. Ένας χειριστής παρακολουθεί τα σήματα τα οποία διεγείρονται από τις επαγόμενες τάσεις στο αντικείμενο. Όταν ένα σήμα λαμβάνεται σωστά, οι παραμέτρους του όπως το πλάτος, ο αριθμός των αρμόνικων, η διάρκεια και ο χρόνος ανόδου μπορούν να καταγράφουν [8]. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό σήμα παρουσιάζεται στην εικόνα 1.11 ενώ οι βασικές παράμετροι περιγράφονται παρακάτω:

- Το πλάτος  $A$ : είναι η μεγαλύτερη μετρούμενη τάση σε μία κυματομορφή και μετρείται σε ντεσιμπέλ (dB). Αυτή είναι μια σημαντική παράμετρος επειδή προσδιορίζει την ανιχνευσιμότητα του σήματος. Σήματα με πλάτη κάτω από το ελάχιστο όριο, που ορίζεται από τον επιθεωρητή, δεν καταγράφονται.
- Ο χρόνος ανόδου  $R$ : είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της πρώτης διέλευσης κατωφλίου και της κορυφής του σήματος. Αυτή η παράμετρος σχετίζεται με την διάδοση του κύματος μεταξύ της

πηγής του ακουστικού γεγονότος και του αισθητήρα. Ως εκ τούτου, ο χρόνος ανόδου χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των σημάτων και ως κριτήριο για το φίλτρο θορύβου.

- Η διάρκεια  $D$ : είναι η χρονική διαφορά μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας διέλευσης κατωφλίου. Η διάρκεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτοποίηση διαφορετικών τύπων πηγών και να φιλτράρει το θόρυβο.
- Η παράμετρος MARSE  $E$ : είναι το μέτρο της περιοχής η οποία περικλείεται από τον οριζόντιο άξονα του χρόνου και των κορυφών της κυματομορφής. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως το σχετικό πλάτος σήματος και είναι χρήσιμο επειδή με βάση αυτό μπορεί να προσδιοριστεί η ενέργεια της εκπομπής. Η παράμετρος MARSE είναι επίσης ευαίσθητη στη διάρκεια και το πλάτος του σήματος.
- Η παράμετρος  $N$ : αναφέρεται στον αριθμό των παλμών που εκπέμπονται από το κύκλωμα μέτρησης, εάν το πλάτος του σήματος είναι μεγαλύτερο από την τιμή κατωφλίου. Ενώ είναι μια σχετικά εύκολο να προσδιοριστεί αυτή η παράμετρος, χρειάζεται συνήθως να συνδυάζεται με το πλάτος και / ή τη διάρκεια των μετρήσεων για να παρέχουν ποιοτικές πληροφορίες σχετικά με το σχήμα του σήματος.



**Εικόνα 1.11.** Χαρακτηριστικό σήμα Ακουστικής Εκπομπής

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

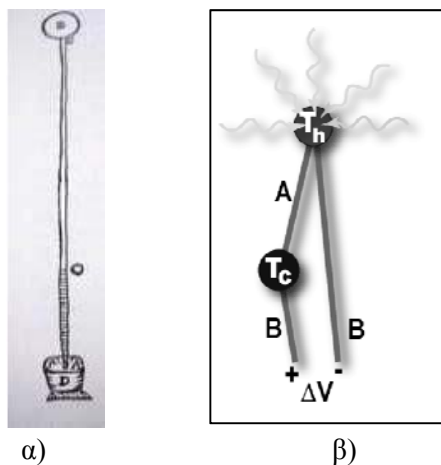
## 1.5 Θερμογραφία

### 1.5.1 Εισαγωγή

Η ανίχνευση της θερμικής ενέργειας δεν είναι ένα πρόβλημα για τον ανθρώπινο οργανισμό. Ερευνες έχουν δείξει ότι οι απολήξεις των νεύρων στο ανθρώπινο δέρμα ανταποκρίνονται σε αλλαγές της θερμοκρασίας μέχρι και  $0.009^{\circ}\text{C}$  ( $0.0162^{\circ}\text{F}$ ). Αν και οι άνθρωποι είχαν πάντα τη δυνατότητα να ανιχνεύουν την θερμική ενέργεια, δεν είχαν έναν τρόπο να ποσοτικοποιούν την θερμοκρασία μέχρι μερικές εκατοντάδες χρόνια πριν.

Οι αρχαίοι Έλληνες γνώριζαν ότι ο αέρας επεκτείνονταν με τη θερμότητα. Αυτή η γνώση τελικά χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του θερμοσκοπίου, το οποίο παγίδευε τον αέρα σε ένα γλόμπο έτσι ώστε το μέγεθος του να μεταβάλλεται καθώς ο αέρας διαστελλόταν ή συστελλόταν από αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας. Στην εικόνα 1.12 παρουσιάζεται το πρώτο σκίτσο του θερμοσκοπίου, το οποίο δόθηκε στη δημοσιότητα από τον Ιταλό εφευρέτη Santorio Santorii. Το επόμενο βήμα στην κατασκευή του θερμομέτρου ήταν να εφαρμόσει μια κλίμακα για να μετρηθεί η επέκταση και να συσχετιστεί με θερμότητα. Μερικές αναφορές λένε ότι ο Γαλιλαίος εφηύρε ένα θερμομόμετρο νερού το 1593, αλλά δεν υπάρχει κανένας επιζών που να τεκμηριώνει την ύπαρξη αυτού. Ως εκ τούτου, Santorii θεωρείται ως ο εφευρέτης του θερμομέτρου (1612), ενώ ο Gabriel Fahrenheit ως ο εφευρέτης του πρώτου θερμομέτρου υδραργύρου (1714).

Ο Sir William Herschel, αστρονόμος, πιστώνεται με την ανακάλυψη της υπέρυθρης ενέργειας το 1800. Γνωρίζοντας ότι το ηλιακό φως αποτελούνταν από όλα τα χρώματα του φάσματος, ο Herschel θέλησε να εξερευνήσει τα χρώματα και τη σχέση τους με τη θερμότητα. Επινόησε ένα πείραμα όπου χρησιμοποιώντας ένα πρίσμα διαχώρισε το φως στο φάσμα των χρωμάτων ενώ ταυτόχρονα μετρήσε τις θερμοκρασίες των διαφόρων χρωμάτων. Ο Herschel παρατήρησε μια αύξηση στη θερμοκρασία από το ιώδες στο κόκκινο χρώμα και παρατήρησε ότι η υψηλότερη θερμοκρασία ήταν πέρα από το κόκκινο. Ο Herschel ονόμασε την ακτινοβολία πέρα από το κόκκινο χρώμα ως «θερμιδικές ακτίνες». Σήμερα αυτή η ακτινοβολία ονομάζεται «υπέρυθρη» [9].



**Εικόνα 1.12.** α) Το πρώτο σκίτσο του θερμοσκοπίου από τον Ιταλό εφευρέτη Santorio Santorii β) σχηματική απεικόνιση του φαινομένου Seebeck.

Το 1821, ο Thomas Johann Seebeck διαπίστωσε ότι ένα κύκλωμα κατασκευασμένο από δύο διαφορετικά μέταλλα, με τους κόμβους του να βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, προκαλούσε εκτροπή της βελόνα των πυξίδων. Αρχικά πίστευε ότι αυτό οφείλεται στο μαγνητισμό που προκαλείται από την διαφορά θερμοκρασίας αλλά σύντομα συνειδητοποίησε ότι δημιουργούταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Πιο συγκεκριμένα, η διαφορά θερμοκρασίας παράγει ένα ηλεκτρικό δυναμικό (τάση) το οποίο μπορεί να οδηγηθεί μέσω ενός κλειστού κυκλώματος. Σήμερα, αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο Seebeck.

Η διαφορά τάσης,  $\Delta V$ , που παράγεται στους ακροδέκτες ενός ανοικτού κυκλώματος το οποίο δημιουργείται από ένα ζευγάρι διαφορετικών μετάλλων, A και B, των οποίων τα άκρα βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, είναι ευθέως ανάλογη προς τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του πιο θερμού και του πιο ψυχρού άκρου,  $T_h - T_c$ . Η τάση Seebeck δεν εξαρτάται από την κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος των μετάλλων μεταξύ των άκρων. Αυτή είναι η φυσική βάση για ένα θερμοστοιχείο, η οποία εφευρέθηκε από τον Nobili το 1829.

Ο Melloni χρησιμοποίησε την τεχνολογία του θερμοστοιχείου για την παραγωγή ενός θερμικού ανιχνευτή. Η συσκευή αυτή είναι κατασκευασμένη από θερμοστοιχεία τα οποία συνδέονται σε σειρά. Η απορρόφηση της θερμικής ακτινοβολίας από έναν από τα θερμοστοιχεία, το οποίο ονομάζεται ενεργός κόμβος, προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του. Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του ενεργού κόμβου και ενός κόμβου αναφοράς, ο οποίος διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία, παράγει μια ηλεκτρεγερτική δύναμη ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας που δημιουργήθηκε. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται θερμοηλεκτρική επίδραση. Ο Melloni ήταν σε θέση να αποδείξει ότι ένα άτομο 10 μέτρα μακριά μπορούσε να ανιχνευθεί με την εστίαση της θερμικής του ενέργειας στον ανιχνευτή.

Η τεχνολογία απεικόνισης υπέρυθρης ακτινοβολίας που αναπτύχθηκε και για στρατιωτική χρήση ενώ παράλληλα πέρασε σε εμπορικές εφαρμογές στη δεκαετία του 1960. Οι αρχικές εφαρμογές αφορούσαν έρευνα σε εργαστηριακό επίπεδο, συντήρηση καθώς και παρακολούθηση για λόγους ασφάλειας. Τα πρώτα φορητά συστήματα που ήταν κατάλληλα για εφαρμογές ΜΚΕ παρήχθησαν στη δεκαετία του 1970. Τα συστήματα αυτά είχαν κακή ποιότητα της εικόνας σε σχέση με τα σημερινά δεδομένα αλλά χρησιμοποιήθηκαν ευρέως σε διάφορες βιομηχανικές και ιατρικές εφαρμογές.

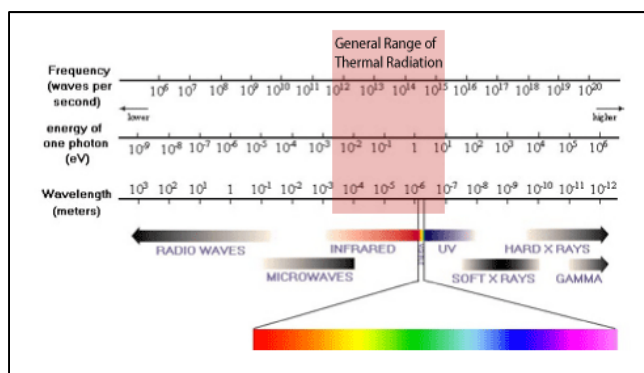
Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, ο αμερικανικός στρατός παραχώρησε μια νέα τεχνολογία (focal plane array -FPA) προς εμπορική εκμετάλλευση. Η μέθοδος FPA χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό από μικροσκοπικούς ημιαγωγούς οι οποίοι είναι πολύ ευαίσθητοι στην υπέρυθη ακτινοβολία. Αυτό οδήγησε στην δραματική εξέλιξη της ποιότητας της εικόνας. Παράλληλα, οι εξελίξεις στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των προγραμμάτων επεξεργασίας εικόνας βοήθησε να απλοποιηθεί η συλλογή και ερμηνεία των δεδομένων. Τέλος, το 1992, η Αμερικανική Εταιρεία Μη Καταστροφικού Ελέγχου ενέκρινε επίσημα την Θερμογραφία ως μια τυποποιημένη μέθοδο δοκιμής.

### 1.5.2 Φυσικές αρχές

Ενέργεια μπορεί να υπάρξει σε πολλές μορφές, και μπορεί να αλλάξει από τη μία μορφή στην άλλη, αλλά δεν μπορεί ποτέ να χαθεί. Αυτό διατυπώνεται από τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής. Ένα υποπροϊόν όλων σχεδόν των μετατροπών ενέργειας είναι θερμότητα ( η οποία είναι επίσης γνωστή ως θερμική ενέργεια). Όταν υπάρχει μία διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο αντικειμένων ή δύο περιοχών εντός του ίδιου αντικειμένου, λαμβάνει χώρα μεταφορά θερμότητας. Η μεταφορά θερμότητας συμβαίνει από τις θερμότερες περιοχές στις ψυχρότερες περιοχές μέχρι να επιτευχθεί θερμική ισορροπία. Αυτό διατυπώνεται από το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής.

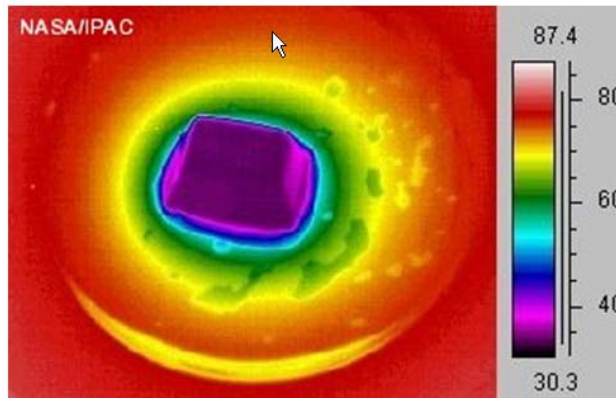
Η μεταφορά θερμικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω τριών μηχανισμών: αγωγή, μεταφορά (ή συναγωγή) και ακτινοβολία. Η αγωγή παρατηρείται κυρίως στα στερεά και σε μικρότερο βαθμό στα υγρά καθώς θερμότερα, πιο ενεργητικά μόρια μεταφέρουν την ενέργειά τους σε ψυχρότερα μόρια. Η θερμική συναγωγή λαμβάνει χώρα σε υγρά και αέρια και περιλαμβάνει την μαζική μετακίνηση των μορίων. Ο τρίτος τρόπος είναι μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία δεν χρειάζεται κάποιο μέσο να ρέει και ως εκ τούτου μπορεί να παρατηρηθεί ακόμα και στο κενό. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παράγεται όταν τα ηλεκτρόνια χάνουν την ενέργειά τους και πέφτουν σε χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση. Τόσο το μήκος κύματος όσο και η ένταση της ακτινοβολίας έχουν άμεση σχέση με τη θερμοκρασία των μορίων ή ατόμων.

Το μήκος κύματος της θερμικής ακτινοβολίας εκτείνεται από 0,1 έως αρκετές εκατοντάδες μμ. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.13, το σύνολο της θερμότητας που ακτινοβολείται από ένα αντικείμενο δεν είναι ορατό στο ανθρώπινο μάτι. Κατά την σταδιακή θέρμανση ενός κομματιού χάλυβα, η θερμότητα που ακτινοβολεί γίνεται αισθητή πολύ πριν από την αλλαγή στο χρώμα του. Αν η ένταση θερμότητας είναι αρκετά μεγάλη και εφαρμόζεται για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, το κομμάτι του χάλυβα θα πάρει σταδιακά κόκκινο χρώμα. Η θερμότητα που ήταν αισθητή πριν την αλλαγής χρώματος είναι η ακτινοβολία που βρίσκεται στο υπέρυθρο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η Υπέρυθηρη (IR) ακτινοβολία έχει μήκος κύματος μεγαλύτερο από το ορατό φως ή, με άλλα λόγια, μεγαλύτερο από 700 nm.



**Εικόνα 1.13.** Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και το φάσμα της θερμικής ακτινοβολίας

Μια υπέρυθη κάμερα έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει και να εμφανίζει την υπέρυθη ενέργεια. Στην εικόνα 1.14 παρουσιάζεται το υπέρυθρο φάσμα ενός κύβου πάγου ο οποίος λιώνει. Η κλίμακα θερμοκρασίας, δείχνει τις θερμές περιοχές με κόκκινο χρώμα και δροσερές περιοχές με μοβ χρώμα. Φαίνεται ότι ο κύβος πάγου είναι ψυχρότερος από τον περιβάλλοντα αέρα και απορροφά θερμότητα στην επιφάνειά του. Η βάση αρχή της υπέρυθρης τεχνολογίας απεικόνισης είναι ότι κάθε αντικείμενο του οποίου η θερμοκρασία είναι πάνω από 0 K εκπέμπει υπέρυθη ενέργεια. Ακόμα και τα πολύ κρύα αντικείμενα εκπέμπουν κάποια υπέρυθη ενέργεια. Ακόμα κι αν το αντικείμενο απορροφά θερμική ενέργεια για να θερμανθεί το ίδιο, θα εκπέμπει κάποια υπέρυθη ενέργεια που είναι ανιχνεύσιμη με αισθητήρες. Η ποσότητα της ακτινοβολουμένης ενέργειας είναι μία συνάρτηση της θερμοκρασίας του αντικειμένου και της σχετικής αποτελεσματικότητας της θερμικής ακτινοβολίας.



**Εικόνα 1.14.** Υπέρυθρη απεικόνιση ενός κύβου πάγου ο οποίος λιώνει.

Μια πολύ σημαντική παράμετρος στη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία είναι η ικανότητα εκπομπής του αντικειμένου. Η ικανότητα εκπομπής είναι ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας της επιφάνειας να μεταφέρει υπέρυθρη ενέργεια και ορίζεται ως ο λόγος της θερμικής ενέργειας που εκπέμπεται από μία επιφάνεια προς την ενέργεια που εκπέμπεται από ένα τέλειο μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία. Ένα τέλειο μέλαν σώμα υπάρχει μόνο στη θεωρία και είναι ένα αντικείμενο που απορροφά και εκπέμπει όλη την ενέργειά του. Το ανθρώπινο δέρμα είναι σχεδόν ένα τέλειο μέλαν σώμα, δεδομένου ότι έχει μια ικανότητα εκπομπής 0.98, ανεξάρτητα από το πραγματικό χρώμα του δέρματος [10].

Οι θερμικές μέθοδοι ΜΚΕ αφορούν τη μέτρηση και χαρτογράφηση των επιφανειακών θερμοκρασιών καθώς η θερμότητα ρέει από ή και διαμέσου ενός αντικειμένου. Οι απλούστερες θερμικές μετρήσεις αφορούν τις μετρήσεις σημείων με ένα θερμοστοιχείο. Αυτό το είδος μέτρησης μπορεί να είναι χρήσιμο στον εντοπισμό θερμών σημείων. Σε μια πιο προχωρημένη μορφή, η χρήση της θερμικής απεικόνισης συστημάτων επιτρέπει θερμικές πληροφορίες να συλλέγονται πολύ γρήγορα σε μια ευρεία περιοχή χωρίς την ανάγκη επαφής. Τα συστήματα θερμικής απεικόνισης είναι εργαλεία που δημιουργούν εικόνες θερμικής ροής και όχι φωτός. Η θερμική απεικόνιση είναι ένας γρήγορος, οικονομικός τρόπος υλοποίησης λεπτομερούς θερμικής ανάλυσης. Η βασική αρχή της θερμογραφίας ως μέθοδος ΜΚΕ είναι ότι η ροή της θερμότητας από την επιφάνεια ενός στερεού επηρεάζεται από εσωτερικές ασυνέχειες, όπως κενά, τρύπες και ρωγμές.

### 1.5.3 Τεχνικές που εφαρμόζονται στην Θερμογραφία

Η Θερμογραφία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο τεχνικές, την ενεργητική και την παθητική. Η παθητική θερμογραφία εξετάζει τα υλικά και τις δομές που σε φυσιολογικές συνθήκες παρουσιάζουν διαφορετική (συντά υψηλότερη) θερμοκρασία από το περιβάλλον, ενώ στην περίπτωση της ενεργητικής θερμογράφησης, ένα εξωτερικό ερέθισμα είναι απαραίτητο για να προκαλέσει τις σχετικές θερμικές διαφορές. Η παθητική θερμογραφία είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη σε πλήθος εφαρμογών της βιομηχανίας, της προληπτικής συντήρησης, ιατρικής, δασικής πυρανίχνευσης, γεωργίας, βιολογίας, ανίχνευσης αερίων και στη μη καταστρεπτική δοκιμή. Σε όλες αυτές τις εφαρμογές, εντοπίζονται

ασυνήθιστες θερμοκρασίες σε σχέση με το περιβάλλον και υποδεικνύουν σημεία που πιθανόν χρήζουν προσοχής.

Αντίθετα με την παθητική θερμογραφία, στην ενεργητική, ένα εξωτερικό ερέθισμα απαιτείται για να παράγει τις σχετικές διαφορές θερμοκρασίας που σε φυσιολογικές συνθήκες δεν υπάρχουν. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτού του εξωτερικού ερεθίσματος (π.χ. χρόνος  $t$  που εφαρμόζεται) επιτρέπουν ποσοτικούς χαρακτηρισμούς, όπως παραδείγματος χάριν το βάθος της μιας ατέλειας. Ανάλογα με το είδος του εξωτερικού ερεθίσματος έχουν αναπτυχθεί τα εξής είδη ενεργητικής θερμογραφίας:

- *θερμογραφία παλμού*, όπου το ερέθισμα είναι ένας παλμός (κυρίως για λεπτά υλικά-πρόσκαιρη θερμογράφηση)
- *θερμογραφία βήματος*, όπου το ερέθισμα είναι ένα τετραγωνικό κύμα είτε σε μορφή βήματος είτε σε περιοδική διαδικασία.
- *Lockin θερμογραφία*, όπου ένα κύμα χαμηλής συχνότητας παράγεται στην επιφάνεια του δείγματος χρησιμοποιώντας μια προσαρμοσμένη λάμπα, ώστε αυτό το κύμα να πολλαπλασιάζεται και να διαχέεται μέσα σε όλο το υλικό.
- *Viobrothermography*, όπου το ερέθισμα είναι μηχανικές δονήσεις που εφαρμόζονται πάνω στο σώμα σε σταθερές συχνότητες.

Γενικά η παθητική θερμογραφία είναι απλούστερη και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη, από την άλλη όμως, η ενεργητική θερμογραφία επεμβαίνει σε περιπτώσεις όπου η παθητική θερμογράφηση είναι αδύνατη, ενώ επίσης μας παρέχει τη δυνατότητα για ποσοτικούς προσδιορισμούς του σφάλματος.

#### 1.5.4 Εφαρμογές Θερμογραφίας

Στην ιατρική χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του καρκίνου του μαστού, αναπνευστικών ασθενειών (SARS) και της αρθρίτιδας. Εφαρμόζεται, επίσης, για τον εντοπισμό και την εκτίμηση τραυματισμών αθλητών καθώς και για την αποθεραπεία τους. Είναι επιπλέον χρήσιμη στην οδοντιατρική για τον έλεγχο της σωστής δομής και λειτουργίας των σαγονιών.

Βρίσκει εφαρμογή στην θερμική επιθεώρηση των κτιριακών εγκαταστάσεων προσδιορίζοντας την θερμική κατάστασή τους, τις διαρροές αέρα, τις απώλειες θερμότητας και ενέργειας. Επιπλέον, συμβάλει στον άμεσο και ακριβή εντοπισμό της ελλειπούς ή κατεστραμμένης μόνωσης, της υγρασίας, των διαρροών νερού, των ατελειών και πιθανών κοιλοτήτων στα τοιχώματα και τις οροφές των κτιρίων, παρέχοντάς μας την δυνατότητα να επισκευάσουμε το όποιο πρόβλημα προτού αυτό επεκταθεί. Χρησιμοποιείται ευρέως στον προσδιορισμό της ευστάθειας του σκυροδέματος, την ανίχνευση και τον εντοπισμό καλωδίων και σωληνώσεων θέρμανσης που εκπέμπουν ακτινοβολία

Η χρήση υπέρυθρης θερμοκάμερας σε περιβαλλοντικές επιθεωρήσεις συντελεί στον εντοπισμό των περιοχών διάθεσης αποβλήτων καθώς και των παλαιών θαμμένων δεξαμενών στις βιομηχανικές περιοχές. Χρησιμεύει στην θερμική καταγραφή των υγρών αποβλήτων και την καταγραφή ρύπανσης σε βιομηχανικές και αστικές περιοχές. Εντοπίζει και ελέγχει τις διαρροές πετρελαίου σε εργοστάσια και πλοία



Στην αεροπλοΐα χρησιμοποιείται στην ανίχνευση και τον εντοπισμό σημείων εισροής νερού ή αέρα στην καμπίνα του αεροσκάφους καθώς και πιθανών ρωγμών και διαβρώσεων στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνειά του. Χρησιμοποιείται, επίσης, στην επιθεώρηση της μηχανής, των φρένων και των άλλων μηχανολογικών και ηλεκτρονικών του αεροσκάφους.

Η υπέρυθρη θερμογραφία βρίσκει εφαρμογές και στα διυλιστήρια. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται για την αξιολόγηση των εγκαταστάσεων, της μόνωσης των καυστήρων και την ανίχνευση διαρροών. Επίσης, μας προσφέρει την δυνατότητα να επιθεωρήσουμε γρήγορα και με μεγάλη ακρίβεια τις σωληνώσεις, να αναλύσουμε και να αξιολογήσουμε την καύση, καθώς και την ποιότητα και την αποτελεσματικότητα των εναλλακτών θερμότητας.

Η υπέρυθρη θερμογράφιση σε συνδυασμό με την σωστή ερμηνεία των θερμογραφημάτων αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό όπλο στα χέρια έμπειρων θερμογράφων για την επιθεώρηση και την αξιολόγηση υβριδικών μικροκυκλωμάτων. Μας δίνει την δυνατότητα για την ηλεκτρική και θερμική επιθεώρηση των συγκολλήσεων και των ενώσεων των διάφορων στοιχείων πάνω σε ένα κύκλωμα, την αξιολόγησή τους και την ανίχνευση πιθανών σφαλμάτων.

## 1.6 Διεισδυτικά υγρά

### 1.6.1 Εισαγωγή

Ο ΜΚΕ έλεγχος με διεισδυτικά υγρά είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για να αποκαλύψει ατέλειες στην επιφάνεια σε μια κατασκευή ή σε ένα εξάρτημα. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην ικανότητα του υγρού να μπορεί να απορροφηθεί από μια ατέλεια η οποία ξεκινά από την επιφάνεια του εξαρτήματος. Μια πρώιμη τεχνική επιθεώρησης επιφανειών, αφορούσε την τριβή αιθάλης σε κεραμικά, η οποία συγκεντρωνόταν στις επιφανειακές ρωγμές καθιστώντας τες ορατές. Αργότερα, επεκτάθηκε στα εργαστήρια των σιδηροδρόμων με σκοπό την εξέταση σιδερένιων και χαλύβδινων εξαρτημάτων. Σε αυτή τη μέθοδο, πετρέλαιο αραιωνόταν με κηροζίνη σε μεγάλες δεξαμενές, έτσι ώστε τα μέρη της ατμομηχανής (όπως οι τροχοί) να μπορούσαν να βυθίζονται μέσα σε αυτές. Μετά την απομάκρυνση και τον προσεκτικό καθαρισμό, η επιφάνεια στην συνέχεια επικαλυπτόταν από ένα λεπτό εναιώρημα κιμωλίας /αλκοόλης, έτσι ώστε να σχηματιζόταν ένα λευκό επιφανειακό στρώμα μετά την εξάτμιση της αλκοόλης. Το αντικείμενο στη συνέχεια δονούταν με αποτέλεσμα το υπόλοιπο πετρέλαιο, από οποιαδήποτε επιφανειακή ατέλεια να διέρρεε και να άφηνε σημάδι στο λευκό επίχρισμα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιούταν από το τέλος του 19ου αιώνα μέχρι το 1940, όταν η εισήχθη η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων η οποία και ήταν πιο ευαίσθητη σε σιδηρομαγνητικά υλικά.

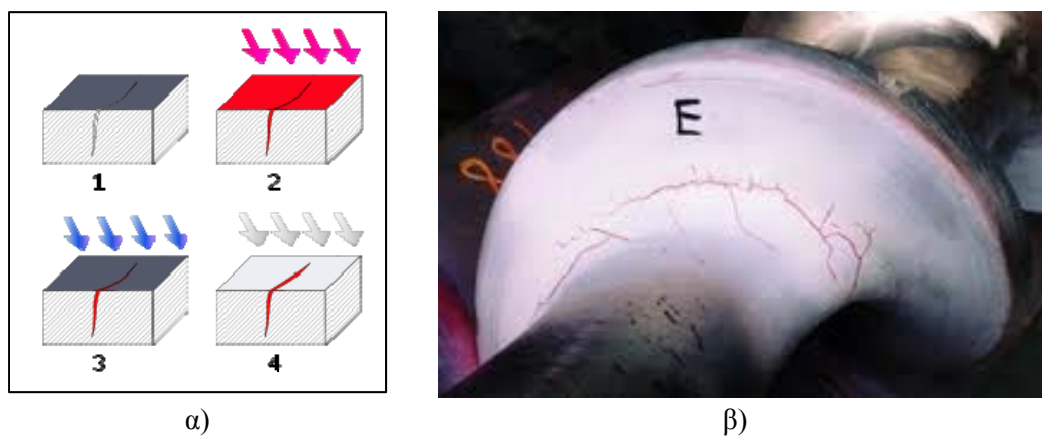
Μια διαφορετική (αν και παρόμοια) μέθοδος εισήχθη στη δεκαετία του 1940. Η υπό εξέταση επιφάνεια επικαλύπτεται με ένα βερνίκι, και μετά την ξήρανση, προκαλείται δόνηση με την χρήση ενός σφυριού. Η δόνηση προκαλεί το σπάσιμο του βερνικιού γύρω από ατέλειες στην επιφάνεια [11].

### 1.6.2 Συνοπτική περιγραφή της μεθόδου

Ο έλεγχος με διεισδυτικό υγρό ή χρωστική ουσία χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό επιφανειακών ρωγμών σε μη σιδηρούχα κράματα ή σε σιδηρούχα κράματα στα οποία δεν μπορεί να εφαρμοστεί κάποια αντίστοιχη ηλεκτρική ή μαγνητική μέθοδος [12]. Μερικές φορές εφαρμόζεται και σε μη μεταλλικά υλικά. Τα βασικά στάδια της μεθόδου είναι τα εξής:

1. Το υπό εξέταση υλικό, το οποίο περιέχει ρωγμές, μη ορατές με γυμνό οφθαλμό, καθαρίζεται επιμελώς.
2. Το διεισδυτικό υγρό απλώνεται στην επιφάνειά του υλικού ώστε να εισχωρήσει μέσα στις ρωγμές. Μικρότερα αντικείμενα βυθίζονται και ολόκληρα μέσα στο υγρό.
3. Στη συνέχεια το πλεονάζον υγρό αφαιρείται και η επιφάνεια καθαρίζεται ώστε στο υλικό να παραμείνει μόνο το υγρό που έχει εισχωρήσει στις ρωγμές.
4. Τέλος, στην επιφάνεια του υλικού απλώνεται ένα υγρό ή σκόνη «εμφάνισης» (developer), η οποία όταν έρχεται σε επαφή με το διεισδυτικό υγρό δημιουργεί έντονη χρωματική αντίθεση. Η έντονη αλλαγή στο χρώμα κάνει τις επιφανειακές ρωγμές ορατές.

Στην εικόνα 1.15 παρουσιάζονται σχηματικά τα βασικά βήματα της μεθόδου καθώς και μια χαρακτηριστική απεικόνιση ατελειών.



**Εικόνα 1.15.** α) Σχηματική απεικόνιση των βασικών βημάτων της μεθόδου των διεισδυτικών υγρών β) εμφάνιση επιφανειακών ατελειών μετά την εφαρμογή της μεθόδου.



**Εικόνα 1.16.** Χρήση χρωστικών που γίνονται εύκολα ορατές με την υπεριώδη ακτινοβολία.

Η επιλογή του κατάλληλου διεισδυτικού υγρού καθορίζεται από την ευκολία διείσδυσής του στις ρωγμές και φυσικά την ευκολία εξαγωγής του από αυτές μετά τον έλεγχο. Η απλούστερη και παλαιότερη μέθοδος χρησιμοποιεί για διεισδυτικό λεπτόρρευστο λάδι και για την εμφάνιση λευκή σκόνη ανθρακικού ασβεστίου, η οποία χρωματίζεται έντονα από το λάδι των ρωγμών. Παραλλαγές της μεθόδου περιλαμβάνουν φωσφορίζουσες χρωστικές που γίνονται εύκολα ορατές με τη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας (black light), όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.16.

### 1.6.3 Παραλλαγές της μεθόδου

Μια ενδιαφέρουσα παραλλαγή είναι ο συνδυασμός διεισδυτικού υγρού και ραδιογραφίας. Στις ραδιογραφίες δεν εντοπίζονται εύκολα οι επιφανειακές ρωγμές και τα διεισδυτικά υγρά δεν μας πληροφορούν για το τι γίνεται κάτω από την επιφάνεια. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων αφ' ενός αυξάνει την ποιότητα των ραδιογραφιών (contrast) με την επιλογή του κατάλληλου υγρού, και εφ' ετέρου μας πληροφορεί για το βάθος της επιφανειακής ρωγμής. Στη τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται οι διεισδυτικές ουσίες: νιτρικός άργυρος (silver nitrate), ιωδιούχος ψευδάργυρος (zinc iodide), χλωροφόρμιο (chloroform), και κυρίως, διωδιούχο μεθάνιο (diiodomethane).

Πολλές συσκευές σχεδιάζονται να λειτουργούν με υψηλή εσωτερική πίεση και κατά συνέπεια πρέπει να ελέγχονται για τυχόν διαρροές. Με τη μέθοδο εντοπισμού διαρροών διοχετεύεται αέριο ή υγρό υπό πίεση στη συσκευή και ελέγχουμε την παρουσία του στην άλλη πλευρά του τοιχώματος καθώς και τυχόν μειώσεις στη πίεση του.

Υπάρχουν πολλές τεχνικές, σε άλλες διοχετεύεται αέριο ενώ το σώμα είναι βυθισμένο σε υγρό οπότε δημιουργούνται φυσαλίδες (bubble testing), και σε άλλες διοχετεύεται χρωματιστό ή φωσφορίζον υγρό το οποίο εντοπίζεται στην άλλη πλευρά με ειδικό φωτισμό π.χ. υπέρυθρες λυχνίες. Το αέριο που χρησιμοποιείται σήμερα είναι το ήλιο, λόγω της αδρανούς του φύσης. Κάθε τεχνική έχει διαφορετικές προδιαγραφές, ευαισθησία αλλά και κόστος.

## 1.7 Η μέθοδος των Δινορευμάτων

### 1.7.1 Εισαγωγή

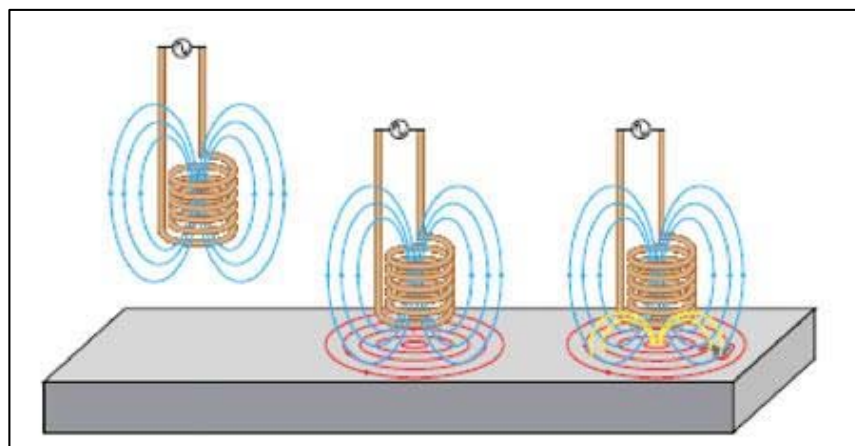
Ο έλεγχος με δινορεύματα έχει προέλευση από το 19<sup>ο</sup> αιώνα με την ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής από το Michael Faraday. Στην συνέχεια ο επιστήμονας Hughes το 1879 κατέγραψε αλλαγές στις ιδιότητες των πηνίων όταν έρχονται σε επαφή με μέταλλα διαφόρων αγωγιμοτήτων και μαγνητικής διαπερατότητας. Παρ' όλα αυτά οι δυνατότητες των αισθητήρων δεν αξιοποιήθηκαν μέχρι τον 2<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Πόλεμο. Μεγάλη έρευνα έγινε τις δεκαετίες του '50 και του '60 από την αεροπορική βιομηχανία και των σταθμών παραγωγής πυρηνικής ενέργειας [13].

Τα δινορεύματα δημιουργούνται μέσω της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Εφαρμόζοντας ένα εναλλασσόμενο ρεύμα σε ένα πηνίο, αυτό δημιουργεί ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο γύρω του. Αν εντός αυτού του μαγνητικού πεδίου βρεθεί κάποιο άλλο ηλεκτρικά αγωγίμο υλικό δημιουργούνται σε αυτό επαγόμενα ρεύματα τα οποία με την σειρά τους δημιουργούν ένα άλλο

επαγόμενο μαγνητικό πεδίο. Τα δινορεύματα ονομάζονται τα επαγόμενα ρεύματα τα οποία έχουν συνήθως κυκλική μορφή και παρουσιάζονται σχηματικά στην εικόνα 1.17.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των δινορευμάτων ως εργαλείο ΜΚΕ είναι το πλήθος των εφαρμογών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Υπό κατάλληλες συνθήκες η μέθοδος των δινορευμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την :

- Ανίχνευση ρωγμών
- Μετρήσεις πάχους
- Μετρήσεις πάχους επιστρώσεων
- Μετρήσεις αγωγιμότητας
- Προσδιορισμό υλικού
- Ανίχνευση θερμικής βλάβης
- Παρακολούθηση πολυμερισμού υλικών



**Εικόνα 1.17.** Σχηματική απεικόνιση της δημιουργίας δινορευμάτων σε ηλεκτρικά αγωγίμη επιφάνεια

Κάποια απ' τα υπόλοιπα πλεονεκτήματα του ελέγχου δινορευμάτων είναι:

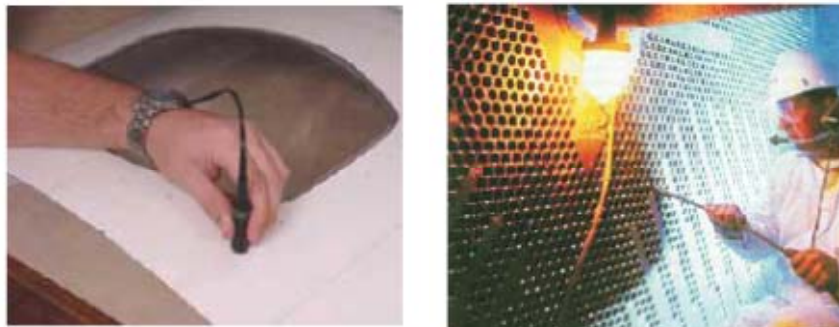
- Ευαισθησία σε μικρές ρωγμές και ελαττώματα
- Ανίχνευση επιφανειακών και μικρού βάθους ελαττωμάτων
- Άνετη φορητότητα του απαραίτητου εξοπλισμού
- Ο αισθητήρας δεν χρειάζεται να βρίσκεται σε άμεση επαφή με το μετρούμενο αντικείμενο
- Είναι δυνατός ο έλεγχος πολύπλοκων σχημάτων και μεγεθών

Παρ' όλα αυτά υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί

- Μόνο ηλεκτρικά αγωγίμα υλικά μπορούν να εξεταστούν
- Απαιτείται καλά εκπαιδευμένο προσωπικό
- Ατέλειες παράλληλες στο επίπεδο των περιελίξεων του πηνίου δεν είναι ανιχνεύσιμες

Πλέον ο έλεγχος μέσω δινορευμάτων είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος. Χρησιμοποιείται σε πολλές βιομηχανίες για την ανίχνευση ελαττωμάτων και διεξαγωγή μετρήσεων. Γενικότερα η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο μικρών επιφανειών και με μία εκ των προτέρων ποιοτική γνώση του ελαττώματος, ώστε να γίνει κατάλληλη επιλογή του αισθητήρα και των παραμέτρων, όπως η συχνότητα.

Σε λεπτά αντικείμενα τα δινορεύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση του πάχους τοιχώματος. Αυτή η δυνατότητα καθιστά τον έλεγχο κατάλληλο για ανίχνευση διάβρωσης και άλλων βλαβών που προκαλούν λέπτυνση των τοιχωμάτων. Αυτή η τεχνική έχει εφαρμογή στην αεροπορική βιομηχανία και στην μελέτη σωληνώσεων σε διάφορες κατασκευές όπως εναλλάκτες θερμότητας. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μετρήσεις πάχους βαφών και άλλων επιστρώσεων. Τα δινορεύματα επίσης επηρεάζονται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα και την μαγνητική διαπερατότητα των υλικών. Έτσι προσφέρεται η δυνατότητα για ταξινόμηση των υλικών και διάγνωση για πιθανή έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, κάτι που αλλάζει την αγωγιμότητα κάποιων υλικών.



**Εικόνα 1.18.** Παχymέτρηση επίστρωσης και έλεγχος κατάστασης σωληνώσεων

### 1.7.2 Διάταξη ανίχνευσης

Για την εφαρμογή της μεθόδου των δινορευμάτων υπάρχει μεγάλη ποικιλία διατάξεων. Συνήθως ταξινομείται ανάλογα με το είδος των δεδομένων που καταγράφονται και προβάλλονται στην οθόνη. Αυτές είναι οι οθόνες χωρίζονται σε αναλογικής ή ψηφιακής ανάγνωσης, επίπεδο εμπέδησης και έντασης σήματος. Η απλούστερη διάταξη αποτελείται από μία πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, ένα πηνίο και ένα βολτόμετρο ή αμπερόμετρο. Αν και είναι δυνατή η ανίχνευση ατελειών με αυτό τον εξοπλισμό, συνήθως οι διατάξεις δινορευμάτων είναι πιο εξελιγμένες.



**Εικόνα 1.19.** Διάφοροι τύποι πηνίων που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο με δινορεύματα.

Οι ανιχνευτές δινορευμάτων είναι διαθέσιμοι σε μία μεγάλη ποικιλία σχημάτων και μεγεθών. Μάλιστα αυτό είναι ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου με δινορεύματα μιας και οι αισθητήρες μπορούν να σχεδιαστούν για πολλά είδη εφαρμογών. Κατατάσσονται ανάλογα με την διάταξη του ή των πηνίων που περιέχει και ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους σε απόλυτους, διαφορικούς, ανακλαστικούς και υβριδικούς.

## 1.8 Μαγνητικές μέθοδοι ΜΚΕ

### 1.8.1 Εισαγωγή

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

### 1.8.2 Έλεγχος με Μαγνητικά σωματίδια (Magnetic Particles)

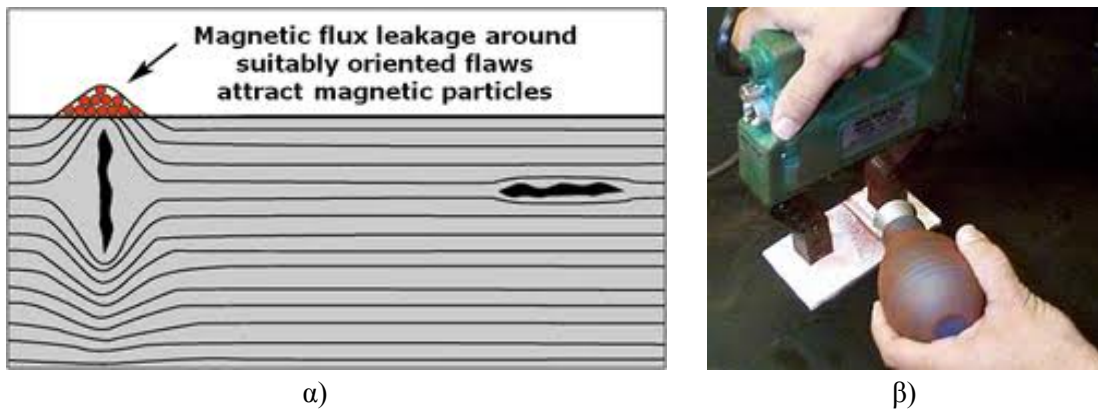
Ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια αναπτύχθηκε κατά τη δεκαετία του 1930 από την εταιρία Magnaflux. Η μέθοδος βασίστηκε στην τυχαία ανακάλυψη ότι τα σωματίδια έτειναν να συσσωρεύονται κοντά στις ασυνέχειες κατά τη διαδικασία της άλεσης. Η εταιρία Magnaflux μετέτρεψε αυτήν την παρατήρηση σε επιτυχή εμπορική μέθοδο ανίχνευσης ασυνεχειών στο χάλυβα. Ο έλεγχος με σωματίδια εξαρτάται από τη διαρροή της μαγνητικής ροής στην επιφάνεια σιδηρομαγνητικών υλικών σε περιοχές ασυνεχειών. Για να είναι αποτελεσματική η μέθοδος, το μαγνητικό υλικό πρέπει να μαγνητιστεί σε μια γειτονική περιοχή της ατέλειας.

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου των μαγνητικών σωματιδίων μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συνδυασμός δύο μεθόδων ΜΚΕ: της μεθόδου της μαγνητικής διαρροής και της οπτικής εξέτασης. Στην περίπτωση ενός μόνιμου μαγνήτη το πεδίο που παράγει κυκλοφορεί γύρω και εντός του. Κάθε σημείο όπου οι μαγνητικές γραμμές εξέρχονται ή εισέρχονται στο μαγνήτη καλείται πόλος. Ένας πόλος όπου οι μαγνητικές γραμμές εξέρχονται καλείται βόρειος ενώ όταν εισέρχονται καλείται νότιος.

Αν ένας μαγνήτης σπάσει στην μέση, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να σχηματιστούν δύο πλήρεις μαγνήτες με μαγνητικούς πόλους σε κάθε νέο άκρο. Αν ο μαγνήτης ραγίσει σε κάποιο σημείο αλλά δεν σπάσει εντελώς σε δύο κομμάτια, τότε σχηματίζονται δυο πόλοι σε κάθε άκρη της ρωγμής. Οι μαγνητικές γραμμές εξέρχονται από το βόρειο πόλο και ξαναπαίρνουν στο νότιο. Το μαγνητικό πεδίο απλώνεται όταν συναντά ένα μικρό διάκενο αέρα που δημιουργείται από τη ρωγμή, με αποτέλεσμα να διαρρέει έξω από το υλικό και, ως εκ τούτου να ονομάζεται πεδίο διαρροής [14].

Εάν διασκορπιστούν σωματίδια σιδήρου σε ένα ραγισμένο μαγνήτη, τα σωματίδια θα συγκεντρωθούν στους πόλους στα άκρα του μαγνήτη, αλλά επίσης και στους πόλους στα άκρα της ρωγμής. Έτσι το συσσωμάτωμα των σωματιδίων είναι πολύ πιο εύκολο να εντοπιστεί από την πραγματική ρωγμή. Το πρώτο στάδιο της μεθόδου περιλαμβάνει την μαγνήτιση του εξαρτήματος που πρόκειται να επιθεωρηθεί.

Εάν υπάρχει οποιαδήποτε ελαττώματα πάνω ή κοντά στην επιφάνεια, θα δημιουργήσει ένα πεδίο διαρροής. Στο δεύτερο στάδιο σωματίδια σιδήρου σε ξηρή ή υγρή μορφή, που διασπείρονται στην επιφάνεια του μαγνητισμένου εξαρτήματος. Τα σωματίδια θα συσσωρευτούν στο πεδίο διαρροής, σχηματίζοντας έτσι μια ορατή ένδειξη την οποία ο επιθεωρητής μπορεί να ανιχνεύσει.



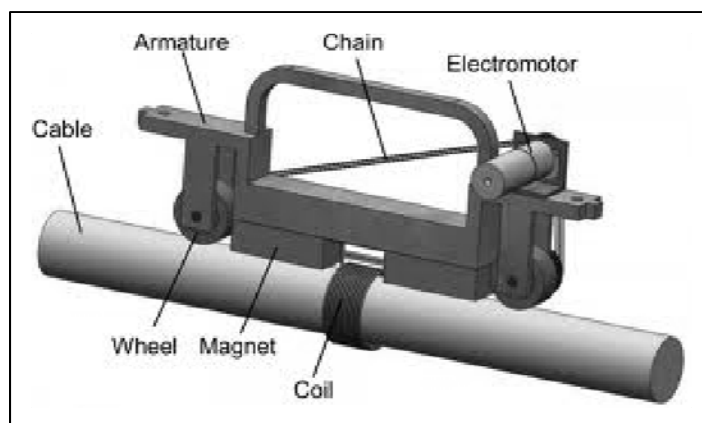
**Εικόνα 1.20** α) Σχηματική περιγραφή της μεθόδου των μαγνητικών σωματιδίων β) τυπική διάταξη που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο επίπεδων εξαρτημάτων

Ο έλεγχος με σωματίδια είναι αξιόπιστος, εάν χρησιμοποιηθεί σωστά, για την ανίχνευση επιφανειακών ατελειών, ή ατελειών οι οποίες βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του υλικού, επαρκούς μακροσκοπικού μεγέθους και δίνει μια ένδειξη της τοποθεσίας και του μήκους της ατέλειας. Το πεδίο πρέπει να είναι αρκετά ισχυρό ώστε να κρατάει τα σωματίδια. Σε αντίθετη περίπτωση οι πολύ ρηχές ρωγμές μπορεί να μην ανιχνευθούν. Η μέθοδος έχει και περιορισμούς. Για το βέλτιστο αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο πρέπει να βρίσκεται κάθετα στην κατεύθυνση της ασυνέχειας. Σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να μην ανιχνευθεί η ατέλεια. Επιπλέον ενώ είναι δυνατή η γνωστοποίηση του μήκους της ατέλειας, το βάθος αυτής πρέπει να υποτεθεί.

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

Όπως και με τη μέθοδο μαγνητικών σωματιδίων, η μέθοδος απωλειών της μαγνητικής ροής εξαρτάται από την διατάραξη της μαγνητικής ροής που προκαλείται από ατέλειες στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια. Η μέθοδος αυτή διαφέρει από τον έλεγχο με σωματίδια στο ότι χρησιμοποιεί μια συσκευή για την ανίχνευση των διαταραχών οι οποίες σχετίζονται με την ατέλεια.

Η μέθοδος MFL προσφέρει επιπλέον πληροφορίες, επειδή μπορεί να μετρήσει την πυκνότητα ροής σε τρεις κατευθύνσεις, παράλληλα και κάθετα προς την κατεύθυνση της ατέλειας και κάθετα προς την επιφάνεια. Η μέθοδος είναι ικανή να ανιχνεύσει επιφανειακές και εσωτερικές ατέλειες στην εσωτερική επιφάνεια χαλύβδινων σωλήνων. Πλέον η μέθοδος είναι ακόμα πιο αναπτυγμένη με την έννοια ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ανίχνευση ατελειών αλλά και για τον χαρακτηρισμό των ατελειών αυτών.



**Εικόνα 1.21.** Τυπική διάταξη που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση μαγνητικής διαρροής σε κυλινδρικούς αγωγούς.

Ο αισθητήρας απωλειών είναι συνήθως ένα πηνίο επαγωγής ή ένας αισθητήρας Hall. Ο αισθητήρας συνοδεύεται από έναν μαγνήτη ο οποίος μαγνητίζει το δείγμα σε μια γειτονική του περιοχή. Καθώς ο αισθητήρας διαπερνά την επιφάνεια του δείγματος, η ανίχνευση ανωμαλιών στην πυκνότητα της ροής υποδεικνύουν την τοποθεσία της ατέλειας. Μια τυπική διάταξη της μεθόδου παρουσιάζεται στην εικόνα 1.21. Το μειονέκτημα της μεθόδου απωλειών μαγνητικής ροής σε σύγκριση με αυτήν των μαγνητικών σωματιδίων, είναι ότι για την ανίχνευση απώλειας μαγνητικής ροής κατά μήκος ενός αντικειμένου απαιτείται πολύς χρόνος, σε αντίθεση με τη μέθοδο μαγνητικών σωματιδίων όπου μπορούν να ελεγχθούν μεγάλες επιφάνειες αντικειμένων πολύ γρήγορα.

#### 1.8.4 Έλεγχος Θορύβου Barkhausen (Barkhausen Noise)

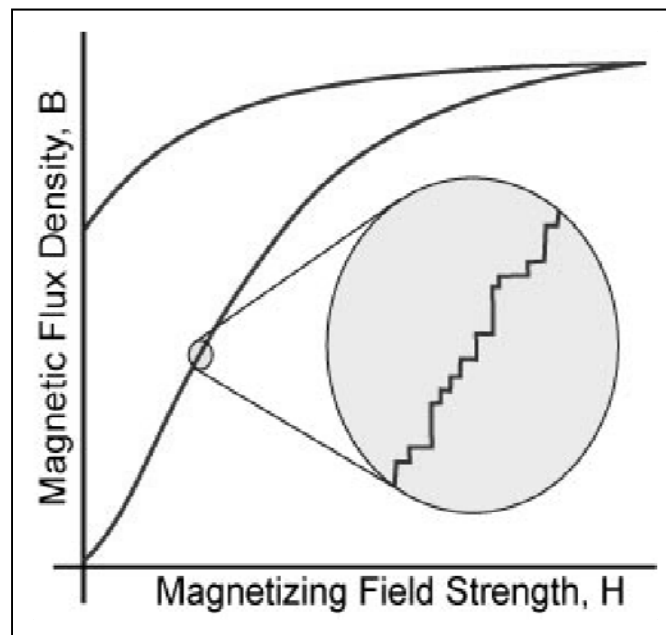
Μακροσκοπικά η μαγνήτιση είναι ένα φαινόμενο που οφείλεται στο εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο. Η θεωρία των μαγνητικών περιοχών εξηγεί πως μεταβάλλεται η μαγνήτιση μικροσκοπικά μέσα στο μαγνητικό υλικό. Κατά την απομαγνήτιση για παράδειγμα, χωρίς τη θεωρία των μαγνητικών περιοχών, δεν μπορούμε να απαντήσουμε στο ερώτημα αν η μαγνήτιση είναι παντού μηδέν ή αν υπάρχουν τοπικά μεγάλες τιμές μαγνητικών διπόλων οι οποίες αθροιζόμενες κάνουν μηδέν. Στις επόμενες παραγράφους θα δούμε πως τα μαγνητικά δίπολα συμπεριφέρονται κατά την έκθεσή τους σε μαγνητικό πεδίο.

Σύμφωνα με τη θεωρία που προτάθηκε από τον Weiss οι σιδηρομαγνήτες έχουν μαγνητικές περιοχές. Σε κάθε μία από τις περιοχές αυτές, τα μαγνητικά δίπολα είναι προσανατολισμένα παράλληλα, έτσι ώστε η μαγνήτιση μέσα σ' αυτήν να φτάνει μέχρι κορεσμό. Ωστόσο η διεύθυνση προσανατολισμού διαφέρει από περιοχή σε περιοχή με τυχαίο τρόπο, αν και τα δίπολα επιλέγουν να προσανατολιστούν σε διευθύνσεις κύριων κρυσταλλογραφικών αξόνων, όταν δεν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Τα άμεσα συμπεράσματα αυτής της θεωρίας είναι: α) Τα ατομικά μαγνητικά δίπολα υπάρχουν και δεν δημιουργούνται από το πεδίο, β) Τα δίπολα είναι μικροσκοπικώς παραλληλισμένα ακόμα και όταν το υλικό δεν έχει μαγνήτιση, γ) Οι μαγνητικές περιοχές είναι αυτές που έχουν τυχαίες διευθύνσεις, όταν το υλικό δεν έχει μαγνήτιση, δ) Κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης επαναπροσανατολίζονται οι μαγνητικές περιοχές, έτσι ώστε είτε περισσότερες μαγνητικές περιοχές προσανατολίζονται προς το μαγνητικό πεδίο,



είτε ο χώρος των μαγνητικών περιοχών που είναι προσανατολισμένες προς το πεδίο είναι μεγαλύτερος από τον χώρο των περιοχών που αντιτίθενται στο πεδίο.

Το φαινόμενο Barkhausen αναφέρεται στην αιφνίδια αλλαγή στο μέγεθος των μαγνητικών περιοχών που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μαγνήτισης ή απομαγνήτισης. Κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης, οι ευνοούμενες μαγνητικές περιοχές (οι περιοχές που έχουν διεύθυνση σχεδόν παράλληλη με το εξωτερικό πεδίο) προσανατολίζονται εις βάρος των λιγότερο ευνοούμενων περιοχών. Όταν ένα μαγνητικό υλικό (π.χ. σίδηρος) εκτίθεται σε ένα αυξανόμενο μαγνητικό πεδίο, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συμβαίνει ένα άλμα στην μαγνήτιση, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.22. Η κίνηση των μαγνητικών περιοχών καθορίζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η μικροδομή, τα όρια κόκκων, η ύπαρξη εγκλεισμάτων, καθώς και η παρουσία πλαστικής παραμόρφωσης [15].



**Εικόνα 1.22.** Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου Barkhausen

Αν συνδέσουμε το πηνίο μαγνητισμού με ένα μεγάφωνο, τα άλματα αυτά ακούγονται σαν μια σειρά από κλικ και συνθέτουν ένα θόρυβο (ένα ανάλογο φαινόμενο είναι η μαγνητοακουστική εκπομπή). Ο θόρυβος Barkhausen είναι ευαίσθητος στη παρουσία τάσεων, ρωγμών, μικρό-ατελειών, θερμικής κατεργασίας και πλαστικής παραμόρφωσης, και παρουσιάζει αιχμές και ακραίες τιμές που βοηθούν στον εντοπισμό τους. Έτσι το φαινόμενο Barkhausen είναι μια από τις πιο σημαντικές μαγνητικές μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου για την διερεύνηση των εγγενών ιδιοτήτων μαγνητικών υλικών. Το σήμα Barkhausen επηρεάζεται από τις συνθήκες διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού σήματος στο υλικό καθώς και από τις ιδιότητες του αισθητήρα.

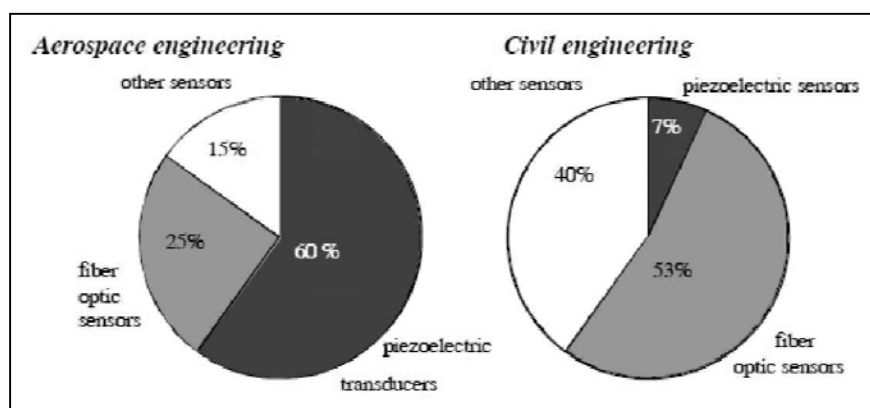
Το φαινόμενο Barkhausen και η μαγνητοακουστική εκπομπή έχουν εδραιωθεί ως μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου για αξιολόγηση αλλαγών μικροδομής αν και οι φυσικοί μηχανισμοί των μικροδομικών επιρροών στο φαινόμενο αυτό πρέπει να διευκρινιστούν περαιτέρω.

## 1.9 Παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας κατασκευών (Structural health monitoring)

### 1.9.1 Εισαγωγή

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας κατασκευών (Structural health monitoring) γεννήθηκε από το συνδυασμό διαφόρων τεχνικών και αποτελεί την εξέλιξη του Μη Καταστροφικού Ελέγχου. Στην πραγματικότητα πολλές μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου μπορούν πολύ εύκολα να μετατραπούν σε μεθόδους παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας, εισάγοντας αισθητήρες μέσα στις εξεταζόμενες κατασκευές. Για παράδειγμα η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής που αποτελεί μέθοδο ΜΚΕ μπορεί να μετατραπεί σε μέθοδο παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας αν στο στάδιο της υλοποίησης μιας κατασκευής εισάγουμε πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες.

Τα είδη αισθητήρων που εισάγονται για την παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας εξαρτώνται σημαντικά από το είδος της κατασκευής που προορίζονται να παρακολουθούν. Οι κυριότεροι τομείς που εισάγουν αισθητήρες σήμερα είναι η αεροναυπηγική και τα έργα υποδομής όπως γέφυρες, αυτοκινητόδρομοι κ.α..



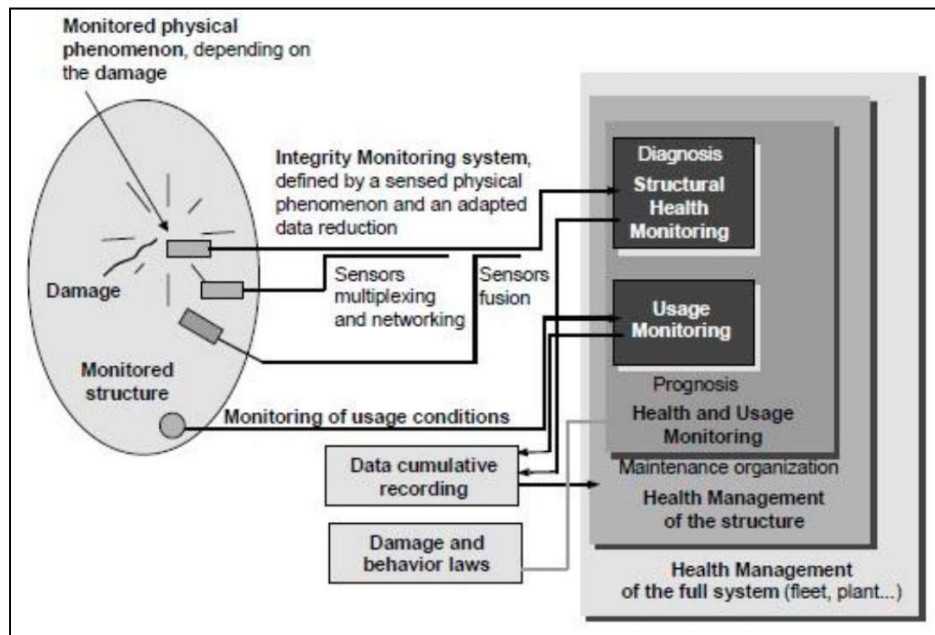
**Εικόνα 1.23.** Κατανομή αισθητήρων ανάλογα με την χρήση που προορίζονται.

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας έχει ως στόχο να παρέχει, σε κάθε στιγμή κατά τη διάρκεια της ζωής μιας κατασκευής, μια διάγνωση της κατάστασης των υλικών των διαφόρων μερών της και των τμημάτων που την αποτελούν. Η κατάσταση κάθε κατασκευής πρέπει να παραμένει στα πλαίσια που προβλέπει η αρχική μελέτη, αν και μπορεί να μεταβληθεί από τη φυσιολογική πάροδο του χρόνου λόγω της χρήσης, με τη δράση του περιβάλλοντος, καθώς και από τυχαία γεγονότα. Η λήψη μετρήσεων ανά χρονικά διαστήματα καθιστά δυνατή την εξέταση του ιστορικού της κατασκευής και με τη ταυτόχρονη παρακολούθηση κατά την χρήση, μπορεί να παρέχεται επίσης και πρόγνωση για το μέλλον της κατασκευής (εξέλιξη ρωγμών, υπολειπόμενη διάρκεια ζωής κλπ).

Αν λάβουμε υπόψη μόνο την πρώτη λειτουργία, τη διάγνωση, θα μπορούσε να θεωρήσουμε ότι η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας είναι ένας νέος βελτιωμένος τρόπος για μη καταστροφική έλεγχο κατασκευών. Αυτό είναι εν μέρει αλήθεια, αλλά η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας είναι κάτι πολύ περισσότερο. Περιλαμβάνει την ενσωμάτωση αισθητήρων, ενδεχομένως έξυπνων υλικών, τη μετάδοση δεδομένων και την επεξεργασία με σκοπό να αντληθούν χρήσιμες πληροφορίες. Με βάση αυτές τις πληροφορίες καθίσταται δυνατή η επανεξέταση του σχεδιασμού της κατασκευής αυτής εξ ολοκλήρου αλλά και εξαρτημάτων που θεωρούνται κομμάτια μεγαλύτερων συστημάτων [16].

Στην εικόνα 1.24 απεικονίζεται λεπτομερώς ο τρόπος με τον οποίο οργανώνεται ένα τυπικό σύστημα SHM. Το πρώτο μέρος του συστήματος, το οποίο αντιστοιχεί στην λειτουργία ελέγχου ακεραιότητας της δομής, ορίζεται από:

- το είδος του φυσικού φαινομένου, το οποίο συνδέεται με την ζημία και παρακολουθείται από τον αισθητήρα
- το είδος του φυσικού φαινομένου που χρησιμοποιείται από τον αισθητήρα παράγει ένα σήμα (συνήθως ηλεκτρικό) και αποστέλλεται στο υποσύστημα ανάκτησης και αποθήκευσης.



**Εικόνα 1.24.** Αρχές και οργάνωση ενός συστήματος παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας

Αρκετοί αισθητήρες του ίδιου τύπου, οι οποίοι αποτελούν ένα δίκτυο, μπορούν να διασταυρωθούν και τα δεδομένα τους συνενωθούν με αυτά από άλλους τύπους αισθητήρων. Το σήμα που λαμβάνεται από το υποσύστημα παρακολούθησης, παράλληλα με τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί προηγουμένως, χρησιμοποιείται από τον ελεγκτή για την εξαγωγή μιας διάγνωσης. Ο συνδυασμός των πληροφοριών του υποσυστήματος παρακολούθησης της ακεραιότητας και των γνώσεων μηχανικής και των νόμων συμπεριφοράς καθιστά δυνατή την πρόγνωση (εναπομένουσα ζωή της κατασκευής) και την διαχείριση της κατασκευής (οργάνωση των εργασιών συντήρησης, επισκευών, κ.λπ.).

### 1.9.2 Κίνητρο για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας

Το να γνωρίζουμε την ακεραιότητα των κατασκευών σε χρήση, σε συνεχή και πραγματικό χρόνο είναι ένας πολύ σημαντικός στόχος για τους κατασκευαστές, τους τελικούς χρήστες και τους συντηρητές. Ως αποτέλεσμα της παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας προκύπτουν:

1. Η βέλτιστη χρήση της κατασκευής, η ελαχιστοποίηση του χρόνου επιθεώρησης και η αποφυγή καταστροφικών αστοχιών.
2. Η δυνατότητα βελτίωσης των προϊόντων του κατασκευαστή
3. Η αλλαγή στην οργάνωση της εργασίας των υπηρεσιών συντήρησης:
  - στοχεύοντας στην αντικατάσταση τακτικών και περιοδικών ελέγχων συντήρησης με συντήρηση βάσει επιδόσεων καθώς και με τη μείωση του υπάρχοντος εργατικού δυναμικού συντήρησης και ιδίως με την αποφυγή αποσυναρμολόγησης μέρων όπου δεν έχουν κρυφές ασυνέχειες.
  - με δραστική ελαχιστοποίηση της ανθρώπινης συμμετοχής και κατά συνέπεια τη μείωση της εργασίας και τα ανθρώπινα λάθη και ως εκ τούτου τη βελτίωση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας.

Η βελτίωση της ασφάλειας φαίνεται να είναι ένα ισχυρό κίνητρο, ιδιαίτερα μετά κάποια θεαματικά ατυχήματα λόγω:

1. μη ικανοποιητικής συντήρησης (πχ. στον αεροναυπηγικό τομέα, το ατύχημα του Aloha Airlines ή στον τομέα της μηχανικής, την κατάρρευση της γέφυρας του ποταμού Mianus).
2. της κακώς ελεγχόμενης διαδικασίας κατασκευής,( πχ. την κατάρρευση γέφυρας Injak).

Για να επισημανθεί η σημασία του προβλήματος της κατασκευαστικής γήρανσης, υπενθυμίζεται η ακόλουθη στατιστική: επιθεώρηση γέφυρας στα τέλη της δεκαετίας του 1980 αποκάλυψε ότι στις ΗΠΑ από τις 576.000 γέφυρες εθνικών οδών, οι 236.000 κρίθηκαν ανεπαρκείς με βάση τους σημερινούς κανονισμούς [16]. Παρ' όλα αυτά, η ανάλυση των διαφόρων αιτιών των αεροπορικών ατυχημάτων επισημαίνει την σχετικά χαμηλή επίδραση της ανεπαρκούς συντήρησης. Είναι γενικώς αποδεκτό ότι η συντήρηση είναι υπεύθυνη μόνο για το 14% των απωλειών κύτους. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο το 4% του συνόλου των ατυχημάτων οφείλονται σε δομικές αδυναμίες. Συνεπώς μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι, χάρη στην εισαγωγή της παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας επιπλέον η βελτίωση των τεχνικών συντήρησης και μια μείωση ατυχημάτων που βασίζονται σε δομικά προβλήματα κατά δύο μονάδες θα οδηγούσε σε μια παγκόσμια μείωση των ατυχημάτων χαμηλότερη της τάξης του 10%.

Το οικονομικό κίνητρο είναι το ισχυρότερο, κυρίως για τους τελικούς χρήστες. Στην πραγματικότητα για τις κατασκευές με συστήματα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας, τα προβλεπόμενα οφέλη είναι το σταθερό κόστος συντήρησης και η αξιοπιστία, ενάντια στο αυξανόμενο κόστος συντήρησης και τη μειωμένη αξιοπιστία των κλασικών κατασκευών χωρίς τέτοια συστήματα.

### *1.9.3 Αισθητήρες που συνήθως χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας*

Προκειμένου να είναι δυνατή η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας κατασκευών, απαιτείται η ενσωμάτωση ειδικών αισθητήρων όπως π.χ. οι πιεζοηλεκτρικοί, τα Strain-gages, οι οπτικές ίνες κ.α. Οι παραπάνω αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να καταγράψουν φυσικά μεγέθη όπως παραμόρφωση, επιτάχυνση, κύματα ήχου, πίεση ή θερμοκρασία. Γενικά τα παραπάνω συστήματα μπορούν να διαχωριστούν σε παθητικά και ενεργητικά συστήματα δειγματοληψίας. Τα παθητικά συστήματα

δειγματοληψίας είναι εκείνα που λειτουργούν ανιχνεύοντας την απόκριση της κατασκευής λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών χωρίς οποιαδήποτε εισαγόμενη τεχνητή ενέργεια, ενώ τα ενεργητικά συστήματα είναι εκείνα που απαιτούν εξωτερικά παρεχόμενη ενέργεια υπό μορφή πίεσης ή ηλεκτρομαγνητικού κύματος για να λειτουργήσουν κατάλληλα. Τα ενεργά συστήματα που λειτουργούν με τη μηχανική ταλάντωση περιλαμβάνουν την μέθοδο συνάρτησης μετατροπής στην ανάλυση ιδιομορφών και τη διάδοση κυμάτων Lamb. Οι παθητικές τεχνικές τείνουν να είναι απλούστερες στην εφαρμογή και τη λειτουργία σε ένα σύστημα SHM και παρέχουν χρήσιμες γενικές ικανότητες ανίχνευσης βλάβης, εντούτοις γενικά οι μέθοδοι με ενεργά συστήματα είναι περισσότερο ακριβείς στην παροχή συγκεκριμένων πληροφοριών για μια περιοχή με βλάβη. Γι' αυτό τα τελευταία χρόνια οι τεχνικές διάγνωσης βλάβης που χρησιμοποιούν εξαναγκασμένες μηχανικές ταλαντώσεις εξελίσσονται συνεχώς. Όσο οι κατασκευές γίνονται μεγαλύτερες και περισσότερο σύνθετες, μερικές από τις παθητικές τεχνικές γίνονται πρακτικά ανέφικτες και για το λόγο αυτό θα πρέπει να αναπτυχθούν περισσότερο κατάλληλες μέθοδοι. Έχει διαπιστωθεί ότι σε συμβατικούς αισθητήρες προβλήματα προκύπτουν από:

- Το μέγεθος του αισθητήρα ο οποίος είναι ογκώδης, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα σε μία συνήθη κατασκευή
- Το κόστος των αισθητήρων το οποίο περιορίζει τον αριθμό τους και έτσι δεν μπορεί να αναπτυχθεί μία γενική ολοκληρωμένη διαδικασία αλλά μόνο επαναλαμβανόμενος και τοπικός έλεγχος.

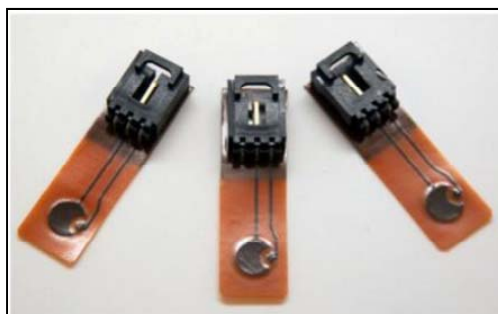
#### ❖ *Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες*

Τα τελευταία χρόνια ταυτόχρονα με την αύξηση των απαιτήσεων για βελτίωση της συμπεριφοράς και της αξιοπιστίας των ελέγχων δομικών συστημάτων η ανάπτυξη των τεχνικών των επιτόπιων δομικών ελέγχων με χρήση πιεζοηλεκτρικών διατάξεων έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον των ερευνητών. Προσπάθειες σε αυτό το πεδίο έρευνας με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών έχουν γίνει με τρεις γνωστές ερευνητικές μεθόδους: η μέθοδος των ελαστικών κυμάτων, η μέθοδος μετατροπής συνάρτησης απόκρισης στην ανάλυση ιδιομορφών και η Μέθοδος Ηλεκτρο-μηχανικής Σύνθετης Αγωγιμότητας (EMA, electro mechanical admittance method).

Συγκεκριμένα, η τεχνική ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας (EMA), που χρησιμοποιεί τα ευφυή πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά (PZT), έχει προκύψει ως ισχυρή τεχνική για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας. Λόγω των ξεχωριστών πλεονεκτημάτων της η EMA έχει εξελιχθεί σε ισχυρή τεχνική για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας των κατασκευών. Η μέθοδος αυτή αξιοποιεί την ιδιότητα της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Μία πιεζοηλεκτρική διάταξη επικολλάται στην κατασκευή και εξυπηρετεί διπλή λειτουργία, ταλαντώνει τοπικά σε υψηλές συχνότητες και ταυτόχρονα λαμβάνει την τοπική δυναμική απόκριση της κατασκευής [17].

Βασισόμενη σε ταλάντωση υψηλών συχνοτήτων η μέθοδος παρουσιάζει εξαιρετική ευαισθησία σε βλάβες. Για την ποσοτικοποίηση των αλλαγών στην απόκριση λόγω της παρουσίας βλάβης αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα βαθμιαίο δείκτη βλάβης (π.χ. απόκλιση ελαχίστων τετραγώνων, απόκλιση μέσης τετραγωνικής τιμής ή κάποια άλλη στατιστική ένδειξη) ενώ δεν απαιτεί λεπτομερείς γνώσεις των ευπαθών μερών και της μορφολογίας της κατασκευής και μπορεί να αντιμετωπίσει απρόβλεπτους τύπους αστοχίας. Επομένως η μέθοδος αυτή παρέχει περισσότερες δυνατότητες και πλεονεκτήματα συγκρινόμενη με άλλες παραμετρικές μεθόδους όπως οι μέθοδοι μηχανικής ταλάντωσης σε χαμηλές

συχνότητες. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να ελέγχεται διαρκώς σε πραγματικό χρόνο μία κατασκευή κατά την διάρκεια λειτουργίας της. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να γίνουν εμφανείς οι αστοχίες αλλά και ο ρυθμός με τον οποίο επεκτείνονται, ώστε να ληφθούν έγκαιρα τα κατάλληλα μέτρα για την ασφάλεια της κατασκευής που συνεπάγεται και της ανθρώπινης ζωής. Λόγω της διακριτικής εφαρμογής των υλικών αυτών η λειτουργία της κατασκευής συνεχίζεται κατά την διενέργεια του ελέγχου ενώ ταυτόχρονα ο έλεγχος μπορεί να είναι αυτοματοποιημένος. Επιπλέον η μάζα των πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι πολύ μικρή σχεδόν αμελητέα με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής στην οποία επικολλώνται. Στην εικόνα 1.25 παρουσιάζεται ένας τυπικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας (PZT) που χρησιμοποιείται για την ενσωμάτωση σε κατασκευές.



**Εικόνα 1.25.** Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την ενσωμάτωση σε κατασκευές

Η βασική αρχή της μεθόδου αυτής είναι η ηλεκτρομηχανική σύζευξη μεταξύ του πιεζοηλεκτρικού PZT - επιθέματος (PZT-patch) διεγέρτη/αισθητήρα και της κατασκευής. Βασική προϋπόθεση της μεθόδου είναι να χρησιμοποιηθούν υψηλής συχνότητας μηχανικές ταλαντώσεις που μόνο οι πιεζοηλεκτρικοί διεγέρτες μπορούν να προκαλέσουν. Η χρήση της στοχεύει στον έλεγχο της περιοχής μιας κατασκευής με γνώμονα τις αλλαγές στη δομική σύνθετη αντίσταση που θα προκαλούσε μια επικείμενη βλάβη.

Η βάση αυτής της αντίληψης ενεργού τεχνολογίας είναι η μεταφορά ενέργειας μεταξύ του διεγέρτη και του μηχανικού συστήματος της κατασκευής. Έχει αποδειχθεί ότι η ηλεκτρική σύνθετη αντίσταση του υλικού PZT επηρεάζεται άμεσα από τη μηχανική σύνθετη αντίσταση ενός δομικού τμήματος της κατασκευής όπου επικολλλάται το επίθεμα PZT.

Ένα τέτοιο επίθεμα μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα και να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει μακρινή, απρόσιτη θέση χωρίς να χρειάζεται αφαίρεση μετά το πέρας της διαδικασίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος και το βάρος του επιθέματος PZT θεωρούνται αμελητέα σε σχέση με τις κατασκευές έτσι ώστε η επικόλλησή τους στην κατασκευή δεν δημιουργεί καμία μεταβολή στα δυναμικά χαρακτηριστικά της [17].

#### ❖ Ηλεκτρικά μηχανοσίόμετρα (Strain gauge)

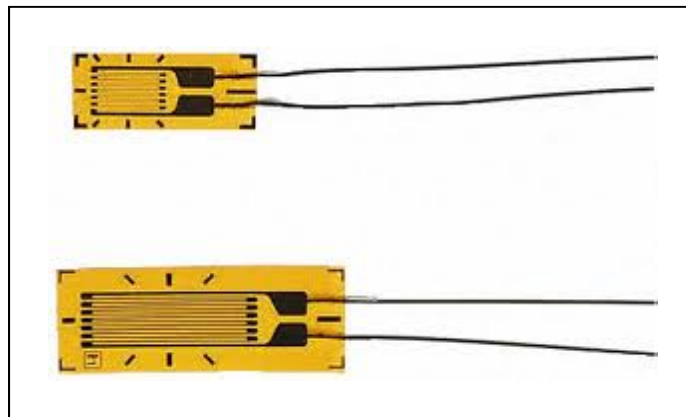
Ένα ηλεκτρικό μηχανοσίομετρο (strain gauge) είναι ένας αισθητήρας που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της παραμόρφωσης ενός αντικείμενου και εφευρέθηκε από τον Edward E. Simmons και Arthur C. Ruge το 1938. Ο πιο κοινός τύπος αποτελείται από ένα εύκαμπτο μονωτικό υπόστρωμα το οποίο υποστηρίζει ένα μεταλλικό σύρμα. Ο αισθητήρας συνδέεται με το αντικείμενο με κατάλληλη συγκολλητική ουσία, όπως η κυανοακρυλική κόλλα. Καθώς το αντικείμενο παραμορφώνεται, προκαλεί

αντίστοιχη παραμόρφωση στο μεταλλικό σύρμα, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η ηλεκτρική του αντίσταση [18]. Η μεταβολή αυτή καθώς είναι πολύ μικρή συνήθως μετριέται χρησιμοποιώντας μια γέφυρα Wheatstone, ενώ η παραμόρφωση του αντικείμενου υπολογίζεται από την σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R / R}{GF} \quad (1.19)$$

όπου  $\Delta R$  είναι η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης,  $R$  η αρχική ηλεκτρική αντίσταση και  $GF$  είναι ο συντελεστής μετατροπής και έχει να κάνει με τις ιδιότητες του σύρματος. Τα ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα πρέπει να έχουν μεγάλη τιμή  $GF$  για μεγαλύτερη ευαισθησία μετρήσεως και μεγάλη τιμή του  $R$  για μικρότερη επίδραση των αντιστάσεων που προκαλούνται από παρασιτικούς παράγοντες όπως αύξηση της θερμοκρασίας, μεταβολή της υγρασίας κλπ.

Η απλούστερη μορφή ενός ηλεκτρικού μηκυνσιόμετρου είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 1.26 και αποτελείται από ηλεκτρικό αγωγό που καταλήγει σε δύο ακροδέκτες για τη σύνδεση με την γέφυρα. Με αυτό τον τύπο μηκυνσιόμετρου, μπορεί να μετρηθεί η παραμόρφωση σ' ένα σημείο του αντικειμένου κατά μία ορισμένη μόνο διεύθυνση. Υπάρχουν όμως και μηκυνσιόμετρα που επιτρέπουν να προσδιοριστεί η παραμόρφωση κατά διάφορες διευθύνσεις του. Τα σύνθετα αυτά μηκυνσιόμετρα αποτελούνται από δύο ή περισσότερα απλά που είναι κολλημένα πάνω στην ίδια θήκη και καλούνται ροζέτες.



**Εικόνα 1.26.** Τυπικό ηλεκτρικό μηκυνσιόμετρο

#### ❖ *Οπτικές ίνες τύπου Bragg Grating*

Μια οπτική ίνα είναι μια γυάλινη ή πλαστική ίνα που μεταφέρει το φως κατά μήκος της. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα επικοινωνιών, και επιτρέπουν την μετάδοση σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερου εύρους ζώνης (ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων) σε σχέση με άλλες μορφές επικοινωνίας όπως ο χαλκός. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται αντί των μεταλλικών καλωδίων, διότι τα σήματα ταξιδεύουν μαζί τους με λιγότερη απώλεια, και δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται και για φωτισμό, οπότε είναι σε δέσμες, ενώ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά εικόνων, επιτρέποντας έτσι την

προβολή σε στενούς χώρους. Ειδικά σχεδιασμένες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται και για πολλές άλλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων. Το φως κατά την διέλευση του παραμένει στον πυρήνα της οπτικής λόγω του φαινομένου της ολικής ανάκλασης. Αυτό οδηγεί την ίνα να λειτουργήσει ως κυματοδηγός. Οι ίνες οι οποίες υποστηρίζουν πολλές συχνότητες διερχόμενου φωτός ονομάζονται πολύτροπες (multi-mode fibers, MMF), ενώ εκείνες που μπορούν να μεταφέρουν φως μιας μόνο συχνότητας ονομάζονται μονότροπες (single-mode fibers, SMF).

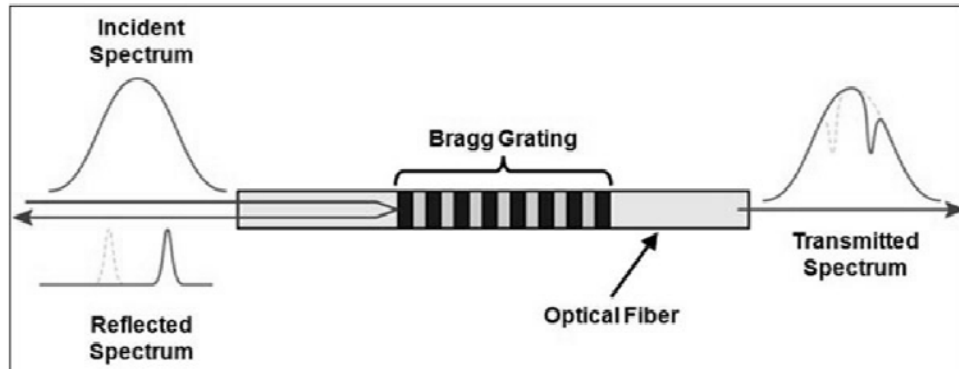
Προκειμένου να παρακολουθηθεί η δομική ακεραιότητα των κατασκευών χρησιμοποιούνται αισθητήρες οπτικών ινών και συγκεκριμένα οπτικοί FBG (Fibres Bragg Grating) αισθητήρες, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα μέτρησης θερμοκρασίας, παραμόρφωσης, κλπ. Το συγκριτικό τους πλεονέκτημα είναι ότι διαθέτουν δυνατότητα μεταξύ τους διασύνδεσης και πολυπλεξίας (multiplexing) δημιουργώντας οπτικά δίκτυα και καλύπτοντας μεγάλες και δυσπρόσιτες επιφάνειες. Τα δίκτυα των αισθητήρων, οι οποίοι μπορούν να είναι επικολημένοι ή και εμφυτευμένοι σε δομές διαφόρων ειδών, χρησιμοποιούνται για τη δυναμική και αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων και τη δημιουργία συστημάτων εποπτείας, ελέγχου και παρακολούθησης [19]. Ένας τέτοιος αισθητήρας παρουσιάζεται στην εικόνα 1.27.



**Εικόνα 1.27.** Αισθητήρες οπτικών ινών FBG (Fibres Bragg Grating), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας κατασκευών.

Αυτού του τύπου οι αισθητήρες είναι οπτικές ίνες στις οποίες έχουν δημιουργηθεί ανάγλυφα φράγματα περιθλάσεως (Bragg gratings), που είναι περιοδικές μεταβολές του δείκτη περίθλασης κατά μήκος της ίνας σε κλίμακα μήκους οπτικού κύματος. Η μεταβολή αυτή δημιουργείται με συμβολή δύο ισχυρών ακτινών laser, οι οποίες προσπίπτουν επάνω στην πλευρική επιφάνεια της ίνας σε αντίθετες γωνίες. Φως μήκους κύματος ίδιου με της περιόδου του φράγματος ανακλάται έντονα. Όταν ένα σήμα ευρέως φάσματος περνάει μέσα από την ίνα, τότε το συγκεκριμένο μήκος κύματος που αντιστοιχεί στην περίοδο μεταβολής του δείκτη διάθλασης, ανακλάται εντονότερα από τα άλλα μήκη κύματος, δίνοντας στην έξοδο και στη συγκεκριμένη συχνότητα εντονότερο σήμα. Όταν η ίνα επιμηκύνεται, οπότε αυξάνεται το βήμα των φραγμάτων περίθλασης και έτσι το μέγιστο στην έξοδο μετατοπίζεται σε μεγαλύτερο μήκος κύματος. Δημιουργώντας φράγματα περίθλασης με διαφορετικές περιόδους μεταβολής του δείκτη διάθλασης σε διαφορετικά σημεία της οπτικής ίνας μπορούν να εντοπίζονται τυχόν επιμηκύνσεις της ίνας, άρα και της κατασκευής, παρατηρώντας σε ποια μήκη κύματος υπάρχει μετατόπιση του μεγίστου. Στην εικόνα 1.27 παρουσιάζεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας της μέτρησης της παραμόρφωσης με την χρήση οπτικών ινών τύπου Bragg grating.





**Εικόνα 1.27.** Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της μέτρησης της παραμόρφωσης με την χρήση οπτικών ινών τύπου Bragg grating.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των Οπτικών Αισθητήρων αναφέρονται επιγραμματικά:

- Μικρό μέγεθος και βάρος
- Μεγάλη ευαισθησία
- Μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας
- Μεγάλη ταχύτητα μετρήσεων
- Δυνατότητα απομακρυσμένης επιτήρησης
- Αντοχή στη διάβρωση

## Κεφάλαιο 2

---

### Σύνθετα και έξυπνα υλικά

#### 2.1 Εισαγωγή

Για ένα σύστημα ο όρος «σύνθετο» σημαίνει ότι αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material). Πιο ειδικά, σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του [20].

Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τον άνθρωπο από αρχαιοτάτων χρόνων. Υλικά που εύκολα βρίσκουμε στη φύση (ξύλο, πέτρα, πηλός, κόκαλα) χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα από τον άνθρωπο, ο οποίος σύντομα έμαθε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους ενισχύοντας τα υλικά αυτά με πρόσθετα συστατικά. Για παράδειγμα, οι Αιγύπτιοι (5000 π.Χ.) χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων, με αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι πλάκες από βέργες ξύλου, παρουσίαζαν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από το φυσικό ξύλο έναντι στρέβλωσης που οφειλόταν στην απορρόφηση υγρασίας. Στη Μεσοποταμία (1000 π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών.

Η χρήση της σιδηρόβεργας για οπλισμένο σκυρόδεμα, που χρησιμοποιείται στις οικοδομές της σύγχρονης εποχής, δεν είναι παρά η μετεξέλιξη της τεχνικής της ανάμιξης γύψου με ζωικό τρίχωμα, η οποία ήταν μια πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής στους αναπτυσσόμενους

πολιτισμούς. Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και επρόκειτο για μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών υπήρξε ραγδαία κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών. Σε αυτό συνέβαλλε η ανάπτυξη ινών γυαλιού και ινών βορίου υψηλής αντοχής και δυσκαμψίας (1960), ενώ παράλληλα η τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων, αύξησε την εφαρμογή αυτών των υλικών.

Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι οποίες τελευταία αποτελούν και τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ενισχυτικές ίνες στις αεροδιαστημικές εφαρμογές. Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη των σύνθετων υλικών.

**Πίνακας 2.1.** Ιστορική Ανάπτυξη των Σύνθετων Υλικών

Χρονολογία	Υλικό
5000 π.Χ	Μίγμα παπύρου - πίσσας
1500 π.Χ	Επίστρωση ξύλου (καλαμιάς)
1909 π.Χ	Φαινολικά σύνθετα
1928 μ.Χ	Σύνθετα ουρίας-φορμαλδεΐδης
1938 μ.Χ	Σύνθετα μελαμίνης-φορμαλδεΐδης
1942 μ.Χ	Πολυεστέρας – ίνες υάλου
1946 μ.Χ	Σύνθετα εποξειδικής ρητίνης
1946 μ.Χ	Σύνθετα Nylon – ίνες υάλου
1951 μ.Χ	Σύνθετα πολυστυρενίου – υάλου
1956 π.Χ	Σύνθετα φαινόλης - αμιάντου
1964 μ.Χ	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα
1965 μ.Χ	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες βορίου
1969 μ.Χ	Υβριδικά σύνθετα άνθρακα – υάλου
1971 μ.Χ	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες αραμιδίου
1975 μ.Χ	Υβριδικά σύνθετα αραμιδίου/γραφίτη

Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών αυξάνονται συνεχώς τα τελευταία 30 χρόνια, π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου. Επιπλέον το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Μερικά μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών, όπως: τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, η ιδιαίτερη και πολλές φορές ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον, κλπ.) καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος, βαθμιαία αντιμετωπίζονται πιο αποτελεσματικά μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλλίτερων ινών, ρητινών και

εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής. Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- **Ινώδη σύνθετα** (fibrous composites): Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας.
- **Κοκκώδη σύνθετα** (particulate composites): Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας.
- **Στρωματικά σύνθετα** (laminated composites): Με επάλληλες στρώσεις υλικών.

## 2.2 Ινώδη σύνθετα υλικά

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρας. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.

Η ιδιότητα αυτή οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών συνθέτων στις ακόλουθες υποομάδες :

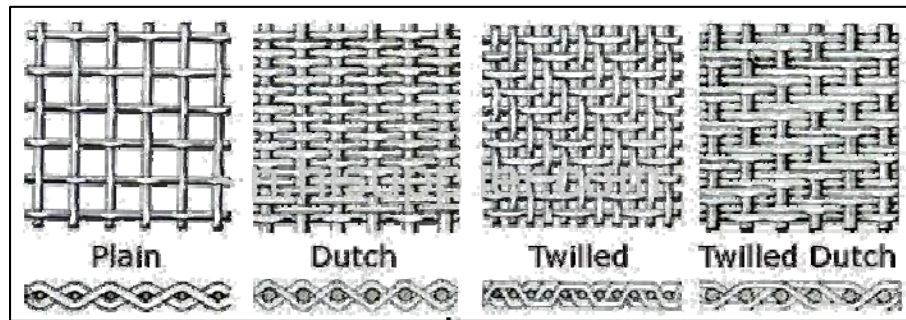
- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
- Σύνθετα με ίνες σε τρισροθώγνια ύφανση.

Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο ( $L/d$ ) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως:

- Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers), όταν είναι  $L/d \geq 100$ .
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers), όταν είναι  $L/d < 100$ .
- Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers): Με  $d < 1\mu\text{m}$  και  $L \approx 100\mu\text{m}$  (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).

### 2.2.1 Ταξινόμηση ινών

Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται, έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ), υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (UTS), μεγάλη ακαμψία (stiffness), χαμηλή δυσθραυστότητα (toughness) και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα ( $\rho$ ). Τα περισσότερα ενισχυτικά υλικά βασίζονται κυρίως σε στοιχεία που βρίσκονται στη 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> περίοδο του Περιοδικού Συστήματος [20]. Οι ίνες μπορεί να είναι προσανατολισμένες προς μια διεύθυνση ή να είναι πλεγμένες μεταξύ τους. Ο τρόπος πλέξης καθορίζει και τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού προς κάθε διεύθυνση. Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζονται οι πιο συνηθισμένοι τρόποι πλεξίματος των ινών.



**Εικόνα 2.1.** Σχηματική περιγραφή οι πιο συνηθισμένοι τρόποι πλεξίματος των ινών.

❖ *Ινες γυαλιού (glass fibers):*

Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα πρώτης γενιάς (1940) και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς μέχρι σήμερα. Είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Η δομική τους βάση είναι τα οξειδία πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου, κ.ά.. Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, C και S:

- **E-glass (E=electrical):** Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.
- **C-glass (C=corrosion):** Υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, από τις οποίες όμως είναι ακριβότερες.
- **S-glass (S=stiffness):** Ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία.

Όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά  $\text{SiO}_2$  (>99,5%) παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου. Γι' αυτό το λόγο, σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία. Τα βασικά πλεονεκτήματα των υαλονημάτων είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή, ενώ στα κύρια μειονεκτήματα τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς εκτριβής (λύση της συνέχειας της επιφάνειάς τους). Εγχαράξεις και εκδορές δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στην επιφάνεια της ίνας, με αποτέλεσμα την ταχεία υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων και της ικανότητας πρόσφυσης τους στην πολυμερική μήτρα.

❖ *Ινες άνθρακα (carbon fibers):*

Οι ίνες γραφίτη είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα. Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η

θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών.

Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους. Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Στη γραφιτική δομή τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου Van der Waals δεσμός που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε αυτή τη διεύθυνση.

#### ❖ *Ίνες πολυμερούς (polymer fibers):*

Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς είναι οι ίνες από Nylon, πολυαιθυλένιο και Kevlar. Τα νήματα Nylon και πολυεστέρα παράγονται με φυγοκεντρική περιδίνηση τήγματος, ενώ ακρυλικά και κυτταρινικά νήματα παρασκευάζονται με φυγοκεντρική περιδίνηση διαλύματος και συνακόλουθες τεχνικές καθίζησης ιζήματος. Η αντοχή τους δεν ξεπερνά τα 10 Pa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας πλησιάζει τα 1000 Pa. Παρόλο που από μηχανικής άποψης δεν κατατάσσονται στις ίνες υψηλής απόδοσης, εντούτοις το χαμηλό κόστος παραγωγής τους τις καθιστά δημοφιλείς στην αγορά.

Η πρώτη υψηλής απόδοσης οργανική ίνα αραμιδίου παρασκευάστηκε από την DuPont και έγινε γνωστή με την εμπορική ονομασία Kevlar και παράγεται σε τρεις τύπους:

- **Kevlar-29:** Με μέτρο ελαστικότητας 60 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- **Kevlar-49:** Με μέτρο ελαστικότητας 120 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- **Kevlar-149:** Με μέτρο ελαστικότητας 180 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.4 GPa.

Η πυκνότητα και των τριών τύπων είναι ίδια (1.45 g/cm<sup>3</sup>), ενώ η διαφορετική ελαστικότητα οφείλεται στο γεγονός της βελτιωμένης ευθυγράμμισης των μοριακών αλυσίδων, που αυξάνει την δυσκαμψία στη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Οι υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του Kevlar οφείλονται στο γεγονός ότι οι πολυμερικές δομικές αλυσίδες του υλικού είναι αυτές καθ' αυτές πιο ισχυρές και συντάσσονται έτσι, ώστε να δημιουργούν ένα σταθερότερο πλέγμα, σε μορφή επίπεδης ταινίας. Ο κυλινδρικός φλοιός της ίνας περικλείει και συγκρατεί το υλικό του πυρήνα αποδίδοντας στο προϊόν ιδιαίτερα υψηλές επιδόσεις κατά την αξονική διεύθυνση, αλλά φτωχή συμπεριφορά κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Επιπλέον, ενώ στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, η μεγάλη του αδυναμία εμφανίζεται στη θλίψη, όπου σε 0,3 % θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται πλαστικού τύπου αστοχία. Αξιοσημείωτο, όμως, είναι ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων (kink bands).

#### ❖ *Μεταλλικές ίνες:*

Διάφορα μέταλλα όπως το βόριο (B), το βηρύλλιο (Be) και το βολφράμιο (W) θα μπορούσαν να αποτελέσουν εξαιρετικά ενισχυτικά συνθέτων υλικών, αφού παρουσιάζουν υψηλή τιμή ακαμψίας σε

σχέση με το ειδικό βάρος τους (ειδική ακαμψία). Το βόριο είναι το περισσότερο υποσχόμενο υλικό για την κατασκευή ινών ενίσχυσης, ωστόσο οι τεχνικές παραγωγής μεταλλικών ινών ενίσχυσης εξακολουθούν να παραμένουν πολύ δαπανηρές.

Οι ίνες βορίου έχουν υψηλή μηχανική αντοχή ενώ οι τιμές των ιδιοτήτων τους διατηρούνται σταθερές ως τους 500° C. Για τη χρήση τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες, θα πρέπει να χρησιμοποιείται προστατευτικό επίστρωμα καρβιδίου του πυριτίου (ίνες Borsic) ή νιτριδίου του βορίου. Τα επιστρώματα αυτά αποτρέπουν την αντίδραση του υλικού ενίσχυσης με αυτό της μήτρας, δεδομένου ότι σε υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως σε σύνθετα με μεταλλική μήτρα τιτανίου ή αλουμινίου, ευνοούνται η διάχυση μέσω της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας και οι αντιδράσεις σε στερεά κατάσταση που οδηγούν στο σχηματισμό εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων και αστοχία του συνθέτου.

#### ❖ *Κεραμικές ίνες :*

Οι κεραμικές ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και θερμική ευστάθεια. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κεραμικές ίνες είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και αλούμινας (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ενώ σπανιότερα συναντώνται και ίνες Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, BeO, B<sub>4</sub>C και ZrO<sub>2</sub>. Το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό υλικό είτε με τη μορφή ινών είτε με τη μορφή κόκκων. Οι ίνες SiC παρουσιάζουν υψηλές τιμές αντοχής και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τους κόκκους.

Το SiC παρουσιάζει σταθερή μηχανική αντοχή ως τους 1400° C, ωστόσο η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρήσης του, περιορίζεται στους 900° C, λόγω της σημαντικής δραστηριότητάς του πάνω από τη θερμοκρασία αυτή. Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) διαμέτρου 250 μm έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Λόγω της ισχυρής φύσεως των χημικών δεσμών, η σταθερότητα των μηχανικών τους ιδιοτήτων διατηρείται ως τους 800° C. Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας είναι εξαιρετικά ευαίσθητες έναντι επιφανειακής φθοράς που οδηγεί ταχύτατα σε αστοχία.

#### ❖ *Ίνες φυσικών ορυκτών:*

Αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθινό ενισχυτικό υλικό, αλλά χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμιάντος και η μαρμαρυγία (mica). Οι ίνες αμιάντου αποτελούνται από 500 περίπου στοιχειώδη ινίδια, (διαμέτρου ~20 nm), και έχουν διάμετρο ~10 μm και μήκος αρκετά cm. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι θερμοκρασία 500° C, οπότε η μηχανική αντοχή του υλικού μειώνεται σημαντικά. Το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι της τάξης των 160 GPa, ενώ η μηχανική αντοχή μπορεί να φτάσει μέχρι 5500 GPa. Ο αμιάντος λόγω του χαμηλού του κόστους χρησιμοποιείται ευρύτατα. Οι μαρμαρυγίες ανήκουν στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών, χαρακτηρίζονται από τέλειο σχισμό και αποχωρίζονται εύκολα από το πέτρωμα με μορφή φυλλιδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως συστατικό ενίσχυσης του συνθέτου υλικού. Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φτάσει μέχρι 2500 MPa (τέλεια φυλλίδια), ενώ, λόγω ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι συνήθεις τιμές της αντοχής κυμαίνονται στην περιοχή 700-900 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας των μαρμαρυγιών είναι περίπου 220 GPa και η πυκνότητα τους 2.8 g/cm<sup>3</sup>.

### 2.2.2 Ταξινόμηση της μήτρας:

Ο ρόλος της μήτρας συνίσταται σε [20]:

- Συγκράτηση των ινών μεταξύ τους.
- Προστασία των ινών από περιβαλλοντικές φθορές και προσβολές.
- Μεταβίβαση των μηχανικών τάσεων που ασκούνται συνολικά στο σύνθετο υλικό προς τις ίνες.
- Ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών, που ξεκινούν από θραύση των ινών.

Για να ικανοποιεί το ρόλο, με τον οποίο είναι επιφορτισμένη η μήτρα, πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

- Ολκιμότητα.
- Ανθεκτικότητα.
- Σχετική ευκαμψία.
- Σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συνθέτου υλικού.

Οι ιδιότητες αυτές πρέπει επίσης να παρουσιάζουν «συμβατότητα» με τις αντίστοιχες ιδιότητες των ενισχυτικών ινών. Συνήθως, το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες. Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του συνθέτου υλικού, καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας – μήτρας. Ανάλογα με το υλικό της μήτρας διακρίνουμε τις ακόλουθες ομάδες υλικών μήτρας για σύνθετα υλικά:

- Οργανικές.
- Μεταλλικές.
- Κεραμικές.
- 

Η επιλογή κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του συνθέτου. Τα αντίστοιχα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται με τις ακόλουθες συντμήσεις:

- PMC: Polymer Matrix Composite
- MMC: Metal Matrix Composite
- CMC: Ceramic Matrix Composite

#### ❖ *Οργανικές μήτρες:*

Θερμοπλαστικές: Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Παρουσιάζουν δομή, όπου οι μοριακές αλυσίδες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω του χαμηλού τους κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστερενίου (PS). Ως ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος, μαρμαρυγίες, κ.α.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.



Θερμοσκληρυνόμενες: Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Τέτοιες μήτρες είναι:

- Πολυεστερικές ρητίνες που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.
- Εποξικές ρητίνες με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200° C, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες και χρήση στη αεροναυπηγική.
- Φαινολικές ρητίνες, οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400° C.

❖ *Μεταλλικές μήτρες:*

Μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά μήτρες προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μήτρων, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μήτρων είναι πολύ χαμηλή (~300° C), ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 500° C. Σε σχέση με τις οργανικές μήτρες, οι μεταλλικές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα, τα σπουδαιότερα των οποίων φαίνονται στον πίνακα 2.2.

**Πίνακας 2.2.** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι μεταλλικές μήτρες έναντι των οργανικών

<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.	Μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος της συνολικής κατασκευής.
Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτές του προσανατολισμού των ινών.	Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη μικρορωγμάτωση και τη θραύση των ινών.
Βελτίωση της ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου.	Φαινόμενα διάλυσης ινών στη μήτρα, σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. διάλυση ινών SiO <sub>2</sub> σε μήτρα Al).
Μείωση της ευαισθησίας του συνθέτου στην παρουσία διαλυτών και διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του συνθέτου.	Ασυνέχεια της καμπύλης εφελκυσμού των συνθέτων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας.
Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του συνθέτου για ειδικές εφαρμογές.	Δύσκολη παραγωγή συνθέτου υλικού και μεγαλύτερο κόστος.
Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του συνθέτου υλικού (συγκόλληση, κόλληση).	Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη μικρορωγμάτωση και τη θραύση των ινών.

❖ *Κεραμικές μήτρες:*

Τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και την χημική προσβολή. Στην περίπτωση της κεραμικής μήτρας, οι ίνες αποβλέπουν αφενός στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς και αφετέρου στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Η ολκιμότητα και το ποσοστό των ινών επιδρούν ευνοϊκά στη βελτίωση της αντοχής της μήτρας. Το σημαντικότερο πρόβλημα στη χρήση κεραμικών μητρών εντοπίζεται στη συνάφεια ινών- μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών. Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν, επίσης, οι μήτρες άνθρακα, ενώ ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο. Είναι γνωστές οι οικοδομικές κατασκευές τσιμέντου με ενίσχυση χάλυβα (οπλισμένο σκυρόδεμα), ινών αμιάντου (ελενίτ), ινών γυαλιού, καθώς επίσης και οι κατασκευές από γύψο με ενίσχυση ινών γυαλιού ή αμιάντου.

### 2.3 Κοκκώδη σύνθετα υλικά

Στα κοκκώδη σύνθετα υλικά (Particulates Composites) η ενίσχυσή τους αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια (σχήμα κόκκου), τα οποία είναι διεσπαρμένα σε μία μήτρα διαφορετικού ή του ίδιου υλικού. Τα κοκκώδη σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται αρκετά λόγω της ευκολίας κατασκευής τους και του χαμηλού τους κόστους και η προσθήκη κόκκων σε πολυμερικές ή άλλων τύπων μήτρες δημιουργεί μία μεγάλη ποικιλία νέων υλικών. Λόγοι χρήσης τέτοιων εγκλεισμάτων μπορεί να είναι:

- Η αύξηση της δυσκαμψίας της μήτρας
- Η ρύθμιση του συντελεστή θερμικής διαστολής του υλικού
- Βελτίωση της θερμικής αντίστασης
- Η μείωση του φαινομένου του ερπυσμού
- Η αύξηση της αντοχής του
- Η ρύθμιση της διαπερατότητας σε υγρά και αέρια
- Η βελτίωση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων
- Η ρύθμιση των ρεολογικών ιδιοτήτων
- Η βελτίωση της στιβαρότητας της μήτρας
- Η μείωση του κόστους

Παρά το γεγονός πως θεωρούμε τα κοκκώδη σύνθετα υλικά μακροσκοπικά ισότροπα και ομογενή, λόγω της πολύπλοκης δομής τους, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους είναι αρκετά δύσκολη. Οι κόκκοι μπορεί να είναι μεταλλικοί ή μη, όπως και η μήτρα. Έτσι διακρίνουμε τέσσερις δυνατούς συνδυασμούς:

❖ *Σύνθετα μη μεταλλικής ενίσχυσης σε μη μεταλλική μήτρα:*

Το πιο κοινό παράδειγμα είναι το σκυρόδεμα (όχι το οπλισμένο), που αποτελείται από κόκκους άμμου και πέτρας δεμένους με ένα μίγμα τσιμέντου με νερό. Η αντοχή του σκυροδέματος αποδίδεται κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη των κόκκων πέτρας.

❖ *Σύνθετα μεταλλικής ενίσχυσης σε μη μεταλλική μήτρα:*

Πολλά υλικά του είδους αυτού έχουν κατασκευαστεί με σκοπό την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, την μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής και τη μείωση της φθοράς της μήτρας. Έτσι, μεταλλική σκόνη σαν ενίσχυση μέσα σε μία θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία ενός σύνθετου υλικού, το οποίο είναι πιο σκληρό και ανθεκτικό και άγει πιο εύκολα τη θερμότητα και τον ηλεκτρισμό από την καθαρή ρητίνη.

❖ *Σύνθετα μεταλλικής ενίσχυσης σε μεταλλική μήτρα:*

Τα υλικά αυτού του τύπου δεν είναι κράματα. Η μεταλλική ενίσχυση έχει τη μορφή κόκκων μέσα στην μήτρα και δεν είναι διαλυμένη μέσα σ' αυτήν όπως είναι στα κράματα. Σαν παράδειγμα για αυτήν την κατηγορία μπορούμε ν' αναφέρουμε τους κόκκους του μολύβδου μέσα σε κράματα χαλκού και χάλυβα, οι οποίοι σκοπό έχουν τη βελτίωση της κατεργασιμότητας του κράματος στις εργαλειομηχανές.

❖ *Σύνθετα μη μεταλλικής ενίσχυσης σε μεταλλική μήτρα:*

Μη μεταλλικά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τη μορφή κοκκώδους ενίσχυσης μέσα σε μεταλλική μήτρα. Τα προκύπτοντα σύνθετα υλικά ονομάζονται κεραμομέταλλα. Τα κεραμομέταλλα μπορεί να είναι δύο ειδών, ανάλογα με την ενίσχυση. Τα πρώτα είναι κεραμομέταλλα με κόκκους οξειδίου ενός μετάλλου μέσα σε μεταλλική μήτρα, τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εργαλείων και σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας όπου η αντίσταση στη διάβρωση είναι σημαντική. Το άλλο είδος είναι τα κεραμομέταλλα με κόκκους καρβιδίου ενός μετάλλου μέσα σε μεταλλική μήτρα. Έτσι, το καρβίδιο του βολφραμίου μέσα σε μήτρα κοβαλτίου χρησιμοποιείται σε τμήματα μηχανών τα οποία απαιτούν πολύ υψηλή σκληρότητα, όπως σε μηχανές συρματοποίησης.

## 2.4 Στρωματικά Σύνθετα Υλικά

Σε αυτού του τύπου τα υλικά, η μήτρα και η ενίσχυση έχουν τη μορφή φύλλων. Έτσι, τα υλικά αυτά αποτελούνται από αλληπάλλληλες στρώσεις ομοίων ή και διαφορετικών υλικών, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.2. Ο συνδυασμός τους μπορεί να δώσει ένα σύνθετο με εξαιρετικές ιδιότητες που συνήθως είναι αντοχή, ακαμψία, ελαφρότερη κατασκευή, αντίσταση στη διάβρωση, αντίσταση στη φθορά, αισθητική, θερμική μόνωση, ακουστική μόνωση κ.τ.λ. Απ' τα κυριότερα είδη τέτοιων υλικών είναι:

❖ *Διμέταλλα*

Είναι συνδεδεμένα φύλλα δύο μετάλλων με σημαντικά διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής. Σύνθετα υλικά που βρίσκουν εφαρμογή σε εξαρτήματα μετρήσεως θερμοκρασίας, σε θερμοστάτες κ.λ.π.

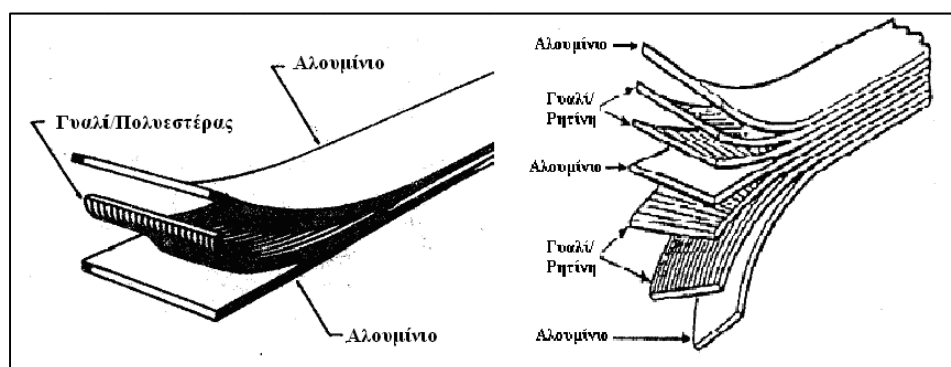
❖ *Μέταλλα επιμεταλλωμένα*

Η επιμετάλλωση ενός μετάλλου με ένα άλλο γίνεται για να δώσει τις καλύτερες ιδιότητες και των δύο. Έτσι ένα κράμα υψηλής αντοχής αργιλίου, το οποίο δεν έχει ανθεκτικότητα στη διάβρωση,

επιμεταλλωμένο με ένα κράμα αργιλίου ανθεκτικού στη διάβρωση, μας δίνει ένα σύνθετο με υψηλή αντοχή και καλή αντίσταση στη διάβρωση.

❖ *Υλικά με επίστρωση πλαστικού*

Πολλά υλικά μπορεί να εμποτιστούν με διάφορα πλαστικά και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς. Φύλλα γυαλιού και αμιάντου μπορούν να εμποτιστούν με σιλκόνες και να παραχθεί έτσι ένα υλικό με σημαντικές πυρίμαχες ιδιότητες. Επίσης, γυαλί ή νάυλον μπορούν να εμποτιστούν με διάφορες ρητίνες και να προκύψουν υλικά ανθεκτικά στην κρούση με σημαντική σκληρότητα και τα οποία, λόγω του μικρού βάρους τους, είναι κατάλληλα για θωρακίσεις.



Εικόνα 2.2. Σχηματική περιγραφή πολύστρωτων σύνθετων υλικών

## 2.5 Μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών

### 2.5.1 Μορφοποίηση συνθέτου οργανικής μήτρας

#### Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου:

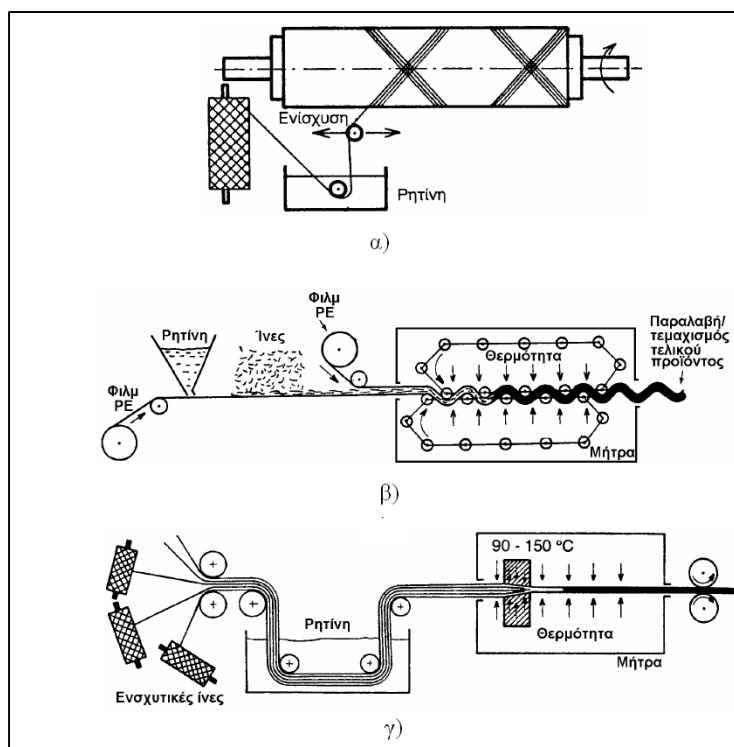
- Χειροποίητη στρώση (hand lay-up). Απλή τεχνική, αλλά αργή και επίπονη. Πλέγματα ινών τοποθετούνται κατά στρώσεις σε καλούπι. Η ρητίνη (μαζί με τους καταλύτες και επιταχυντές) απλώνεται στις ίνες (με έγχυση ή επάλειψη ή ψεκασμό). Ακολουθεί συμπίεση με ρολό προς μείωση πορώδους και εξασφάλιση καλής συνάφειας ινών-μήτρας. Η πλάκα συνθέτου υποβάλλεται σε ξήρανση.
- Χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag). Παραλλαγή της χειροποίητης στρώσης. Το πιεστικό μέσο της μήτρας είναι αέριο υπό πίεση.
- Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding). Η όλη διαδικασία μορφοποίησης του συνθέτου λαμβάνει χώρα μέσα σε διμερές καλούπι με την αντίστοιχη τεχνική χύτευσης.



**Εικόνα 2.3.** Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση θαλάμου πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι.

Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου:

- Περιέλιξη νήματος (filament winding) Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται κυρίως στην παραγωγή κοίλων κυλίνδρων, υψηλών προδιαγραφών. Οι ίνες εμβαπτίζονται αρχικά σε λουτρό ρητίνης και στη συνέχεια περιτυλίσσονται σε καλούπι επιθυμητού σχήματος. Ο εμποτισμός της στρώσης σε ρητίνη μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα ή να ακολουθεί. Το προϊόν που προκύπτει ξηραίνεται στον αέρα ή σε κλίβανο. Ο ισχυρός προσανατολισμός των ινών δίνει κελύφη με υψηλή μηχανική αντοχή. Η εφαρμογή τους κυρίως συναντάται στην κατασκευή δεξαμενών καυσίμου και χημικών, αγωγών υψηλών πιέσεων, κλπ.
- Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC). Πρόκειται για σχετικά νέα τεχνική, με ευρεία εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία. Συνεχείς ίνες γυαλιού τεμαχίζονται σε ίνες μικρού μήκους (5 cm) και αποτίθενται απευθείας σε στρώμα ρητίνης που κινείται σε λεπτό φιλμ πολυαιθυλενίου (PE). Δεύτερο στρώμα ρητίνης αποτίθεται με όμοιο τρόπο πάνω στο πρώτο, δημιουργώντας έτσι ένα sandwich υλικό με πυρήνα τις ενισχυτικές ίνες. Το σύνθετο υλικό που προκύπτει τυλίσσεται σε ρολούς και αφήνεται να στερεοποιηθεί επί 1-4 ημέρες, οπότε και επιτυγχάνεται καλή συνάφεια μεταξύ ινών-μήτρας. Μετά το πέρας της διαμόρφωσης, η πλάκα συνθέτου κόβεται σε επιθυμητό μέγεθος και γεωμετρία και τοποθετείται σε θερμό μεταλλικό καλούπι, σε θερμοκρασία  $\sim 150^{\circ}\text{C}$ , όπου εφαρμόζεται υδραυλική πίεση και το αρχικό έλασμα μορφοποιείται σε τελικό προϊόν. Τα προϊόντα της μεθόδου έχουν μεγάλες διαστάσεις και υψηλή ομοιογένεια.
- Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion). Η παρούσα τεχνική μορφοποίησης εφαρμόζεται όταν απαιτείται σταθερή διατομή προϊόντος (σωλήνες, αγωγοί, δοκοί, κλπ.). Ίνες μεγάλου μήκους, διευθετημένες παράλληλα μεταξύ τους εμβαπτίζονται κατά τρόπο συνεχή σε λουτρό ρητίνης και οδηγούνται σε θερμαινόμενη χαλύβδινη μήτρα, όπου το προϊόν λαμβάνει την τελική του διατομή. Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ινών και του ισχυρού προσανατολισμού τους παράλληλα προς τον επιμήκη άξονα του προϊόντος, παρατηρείται υψηλή μηχανική αντοχή κατά τη διεύθυνση αυτή.



**Εικόνα 2.4.** Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου α) περιέλιξη νήματος β) συνεχής μορφοποίηση ελάσματος γ) μορφοποίηση με εμφύπιση.

### 2.5.2 Μορφοποίηση συνθέτου μεταλλικής μήτρας

- Συνδιέλαση (co-extrusion). Πρόκειται για ταυτόχρονη διέλαση των συστατικών υλικών του συνθέτου και ενδείκνυται η εφαρμογή της στην περίπτωση παρόμοιας ολκιμότητας ιών και μήτρας. Όταν οι ίνες είναι ψαθυρές, η κατεργασία λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ενίσχυση της μήτρας με την τεχνική της συνδιέλασης δεν είναι θεαματική, εξασφαλίζεται όμως καλύτερη στιβαρότητα και χαμηλότερη πυκνότητα συνθέτου. Τέτοια παραδείγματα συναντάμε σε σύνθετο με μήτρα Nb ή Ta και ενίσχυση ιών μαγνησίας (MgO), οξειδίου του θορίου (ThO) ή (ZrO<sub>2</sub>).
- Μορφοποίηση με χύτευση (casting process). Η μήτρα εισάγεται ως τήγμα σε κατάλληλα διευθετημένο σύστημα ενίσχυσης. Η διαβροχή των ιών από το τήγμα επιτυγχάνεται με μηχανισμό τριχοειδών αγγείων (capillary rise) ή με πίεση λόγω βαρύτητας (pressure casting) ή με αναρρόφηση λόγω κενού (vacuum infiltration) ή με συνεχή χύτευση (continuous casting). Η τεχνική δεν εφαρμόζεται όταν η μήτρα-τήγμα αντιδρά με τις ίνες στη θερμοκρασία χύτευσης.
- Συμπύεση σε στερεή κατάσταση. Συνεχείς ίνες, υπό μορφή ταινιών, τοποθετούνται μεταξύ δύο μεταλλικών ελασμάτων και το σύστημα συμπιέζεται κατάλληλα (π.χ. με συν-έλαση), με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται συγκόλληση πίεσης και πολύ καλή πρόσφυση μεταξύ ιών και ελασμάτων. Προκύπτει sandwich σύνθετο υλικό.
- Απόθεση υλικού μήτρας. Η απόθεση υλικού μήτρας στις ενισχυτικές ίνες γίνεται με τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) ή με ηλεκτραπόθεση.

## 2.6 Αστοχίες σύνθετων υλικών

Η μελέτη των οριακών ιδιοτήτων των κατασκευαστικών υλικών κάτω από σύνθετες καταπονήσεις αποτελεί δυσεπίλυτο και ταυτόχρονα ένα μεγάλο διαχρονικό πρόβλημα. Η κύρια αιτία που οδηγεί σε αστοχία ένα υλικό εκτός από τη φθορά και τη διάβρωση είναι η παραμόρφωση με την οποία μεταβάλλεται το σχήμα ενός υλικού και αφορά κυρίως τις μηχανικές αστοχίες. Σαν αποτέλεσμα, όταν τα υλικά αυτά βρεθούν κάτω από κρίσιμο συνδυασμό εντατικών καταστάσεων να εγείρεται η διάρρηξη του δεσμού πρόσφυσής και κατά συνέπεια να αποτελούν εστίες εκκίνησης ρωγμών [21]. Στα σύνθετα υλικά οι κύριες αιτίες της αστοχίας των υλικών είναι:

- Σπάσιμο των ινών
- Αποκόλληση (δηλαδή διαχωρισμός των ινών και της μήτρας)
- Μικρορωγμές στη πολυμερή μήτρα
- Αποφλοιώση πολυστρωματικών υλικών

Οι τρόποι αστοχίας των σύνθετων υλικών μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικούς τύπους:

- Αστοχία εντός του στρώματος.
- Αστοχία μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων (στρωματική).
- Αστοχία που διατρέχει το μέγιστο μέρος ή το σύνολο των στρωμάτων (διαστρωματική).

Σπάσιμο των ινών: Αρχικά οι ίνες μπροστά στην ρωγμή είναι ανέπαφες. Εάν καταπονηθούν σημαντικά κοντά στην άκρη της ρωγμής οι ίνες θα σπάσουν. Αμέσως πίσω από τη ρωγμή οι ίνες θα βγουν έξω από τη μήτρα. Η πίεση κοντά στην άκρη της ρωγμής μπορεί να ωθήσει τις ίνες και να ξεκολλήσουν από τη μήτρα πριν σπάσουν. Σε μεταλλικά υποστρώματα η πλαστική παραμόρφωση απαιτεί σημαντική ενέργεια και έτσι είναι πραγματικά πάρα πολύ δύσκολο να επιτευχθεί.

Μικρορηγμάτωση πολυμερούς μήτρας: Οι μικρορωγμές της μήτρας είναι ένα πολύ συχνό φαινόμενο το οποίο υποβαθμίζει τις θερμομηχανικές ιδιότητες του υλικού συμπεριλαμβανομένου και των αλλαγών που υφίσταται σε όλες τις παραμέτρους του (πχ λόγος του poisson και συντελεστές θερμικής διαστολής). Μια ακόμα αρνητική επίπτωση των μικρορωγμών είναι η θραύση των ινών οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν οδούς για την είσοδο των διαβρωτικών υγρών μέσα στο υλικό.

Αποφλοιώση πολυστρωματικών υλικών: Η αποφλοιώση πολυστρωματικών υλικών βρίσκεται στην κορυφή των χειρότερων καταστάσεων για ένα σύνθετο υλικό γιατί μπορεί να υποβαθμίσει τόσο πολύ τις ιδιότητες του ώστε να το καταστήσει χωρίς καμία χρησιμότητα για τις εφαρμογές που προορίζεται. Ο διεπιφανειακός διαχωρισμός που προκαλείται από την αποκόλληση μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρο λυγισμό, κραδασμούς, διείδυση της υγρασίας, δυσκαμψία.

Αποκόλληση: Η αποκόλληση οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια υποστρώματος και οφείλεται κυρίως στη μικρή διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Οι τάσεις αυτές δεν μπορούν να μεταβιβαστούν από το ένα υλικό στο άλλο με αποτέλεσμα την αστοχία του δομικού στοιχείου. Η αστοχία αυτή είναι ψαθυρής μορφής. Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αναπτύξει το

σύνθετο υλικό εξαρτάται από το μήκος αγκύρωσης και τη μέση διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Η διεπιφάνεια μπορεί να είναι μεταξύ δύο στρώσεων σύνθετου υλικού ή μεταξύ του σύνθετου υλικού και της επιφάνειας του δομικού στοιχείου. Στην πρώτη περίπτωση, η αντοχή της διεπιφάνειας εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή της ρητίνης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, το μέγεθος της δύναμης που μπορεί να μεταβιβασθεί ανά μονάδα διεπιφάνειας εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή της εξισωτικής στρώσης με το δομικό στοιχείο.

Επίδραση ρωγμών στα σύνθετα υλικά: Τα κυριότερα μεγέθη που εξετάζονται για τη διάδοση μιας ρωγμής μέσα στο σύνθετο υλικό είναι η ενέργεια θραύσης καθώς και ο συντελεστής έντασης τάσεων. Τα μεγέθη αυτά δεν είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία των ρωγμών παρά μόνο για την διάδοσή τους. Στις εποξικές και πολυεστερικές ρητίνες η ενέργεια θραύσης και η αντίσταση στη διάδοση των ρωγμών είναι σε σχέση με άλλα υλικά σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Με την προσθήκη κόκκων λοιπόν σε αυτές τις μήτρες η αντίστασή τους στη διάδοση των ρωγμών αρχίζει και αυξάνεται. Αιτία των αυξήσεων αυτών είναι ότι οι κόκκοι παρεμβαίνουν στο μέτωπο της ρωγμής και δυσκολεύουν την διάδοση της όπως επίσης και η απορρόφηση ενέργειας από τα εγκλείσματα.

## 2.7 Εφαρμογές σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογή σ' ένα πλήθος κατασκευαστικών κλάδων, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, οι βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων καθημερινής χρήσης, καθώς επίσης και η κατασκευή τεχνικών έργων καθώς προσφέρουν υψηλή δυσκαμψία, υψηλή αντοχή, χαμηλή πυκνότητα και καλή θερμική σταθερότητα.

Αυτοκινητοβιομηχανία: Η χρήση των σύνθετων υλικών στην αυτοκινητοβιομηχανία οφείλεται στη μείωση κόστους κατασκευής και στη μείωση βάρους, δηλαδή στην εξοικονόμηση καυσίμων-ενέργειας. Ενισχυμένα πλαστικά πλαίσια χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αμαξωμάτων αγωνιστικών αυτοκινήτων επιτρέποντας ελαφρύτερες κατασκευές και εύκολες μεταβολές στο σχεδιασμό. Χρήση επίσης γίνεται στην κατασκευή καμπινών σε φορτηγά αυτοκίνητα, σε προφυλακτήρες και άλλα εξαρτήματα. Στην εικόνα 2.5 παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά ανταλλακτικά κατασκευασμένα από ινώδη σύνθετα υλικά (carbon fiber).



**Εικόνα 2.5.** Ανταλλακτικά αυτοκίνητου κατασκευασμένα από ινώδη σύνθετα υλικά (carbon fiber)



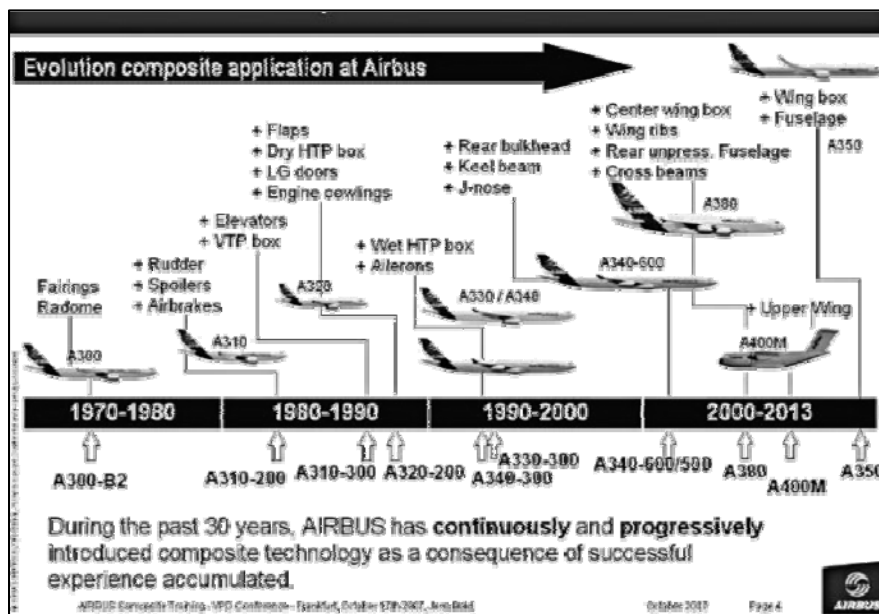
Αεροναυπηγική και αεροδιαστημική: Η εποχή μας χαρακτηρίζεται από τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας νέων υλικών. Το υλικό του μέλλοντος για την αεροναυπηγική θα είναι το "σύνθετο υλικό". Τα σύνθετα υλικά από τη μεταπολεμική, κιάλας, περίοδο έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική . Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη των εφαρμογών των σύνθετων υλικών στην αεροπορική βιομηχανία.

**Πίνακας 2.3.** Η ιστορική εξέλιξη των εφαρμογών των σύνθετων υλικών στην αεροπορική βιομηχανία.

Έτος	Εφαρμογή
1950	Δευτερεύουσες κατασκευές αεροπλάνων και ελικοπτέρων.
1960	Προωθητήρες ρουκετών.
1965	Εκτοξευτήρες πυραύλων.
1970	Πτερύγια ελικοπτέρων.
1974	Μηχανικά μέρη ελικοπτέρων
1980	Πηδάλια αεροσκαφών πολιτικής αεροπορίας και βασικές κατασκευές πολεμικών αεροσκαφών.

Το ενδιαφέρον των κατασκευαστών αεροσκαφών για τα σύνθετα υλικά εστιάζεται στα εξής σημεία :

- Ο συνδυασμός της μικρής πυκνότητας και των καλών μηχανικών ιδιοτήτων των συνθέτων, επιτρέπει το σχεδιασμό ελαφρύτερων κατασκευών.
- Αύξηση του ωφέλιμου φορτίου είτε μείωση του κόστους λειτουργίας για τη μεταφορά του ίδιου ωφέλιμου φορτίου.
- Η μορφοποίηση του τελικού τεμαχίου γίνεται ταυτόχρονα με την παραγωγή της "πρώτης ύλης", γεγονός που προσδίδει ευελιξία στο σχεδιασμό προϊόντων.



**Εικόνα 2.6.** Η εξέλιξη της χρήσης των σύνθετων υλικών στα αεροσκάφη της Airbus

Ναυπηγική: Τα παραδοσιακά υλικά, και ιδιαίτερα το ξύλο, έχουν σχεδόν πλήρως αντικατασταθεί από σύνθετα υλικά με πολυμερή μήτρα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GRP-glass reinforcement plastics). Η χρήση αυτών των υλικών επέτρεψε σε μικρές βιομηχανίες την κατασκευή σκαφών αναψυχής με χαμηλή πυκνότητα, μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση και παραγωγή ολόσωμων τμημάτων με χύτευση σε καλούπια αλλά και την επισκευή τους με χαμηλό κόστος. Ο μη μαγνητικός χαρακτήρας των σύνθετων GRP οδήγησε στη χρήση τους στη κατασκευή ναρκαλιευτικών.



**Εικόνα 2.7.** Εφαρμογές σύνθετων υλικών στη ναυπηγική

Ηλεκτρικά είδη: Ένας από τους διάφορους τύπους ινών γυαλιού, ο e-glass (πρόθεμα e: electrical ) έχει κατασκευαστεί ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές με απαίτηση σε ηλεκτρική μόνωση. Η ανάμειξη του με πολυμερή μήτρα δίνει τη δυνατότητα κατασκευής ηλεκτρικών εξαρτημάτων πολύπλοκου σχήματος και ηλεκτρικά μονωμένων, όπως είναι οι ηλεκτρικοί διακόπτες, οι ηλεκτρικοί διανομείς, οι υποδοχείς ηλεκτρικών λαμπτήρων. Καλωδιακοί αγωγοί για μονωμένους μετασχηματιστές κατασκευάζονται από GRP με τη μέθοδο με εμβάπτιση (Pultrusion).

Παραγωγή αντιδιαβρωτικών: Τα σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα βρίσκουν εφαρμογή στη γεωργία και στη βιομηχανία κατασκευής δεξαμενών και σωλήνων, λόγω του χαμηλού ειδικού βάρους και την αντίσταση σε διάβρωση του υλικού. Με χρήση σύνθετων υλικών γίνεται η κατασκευή εγκαταστάσεων παραγωγής χημικών ουσιών, δεξαμενών και αναρροφητήρων για την αποθήκευση τοξικών χημικών ουσιών, δεξαμενών νερού και κρασιού αλλά και σωλήνες για τη μεταφορά νερού και αποχευτικών λυμάτων. Τόσο το χαμηλό ειδικό βάρος όσο και η ευκολία μεταφοράς ελαχιστοποιούν το κόστος και διευκολύνουν τις οδεύσεις σε μεγάλες αποστάσεις και δύσβατες τοποθεσίες.



**Εικόνα 2.8.** Δεξαμενές αποθήκευσης τοξικών χημικών ουσιών.

Βιομηχανία αθλητικών ειδών: Με τις εφαρμογές των σύνθετων υλικών σε διάφορους κλάδους αποκτήθηκε εμπειρία και γνώση που χρησιμοποίησε και η βιομηχανία αθλητικών ειδών. Η χρήση σύνθετων υλικών τύπου sandwich και CFRP επεκτάθηκε στην κατασκευή πέδινων σκι, στα μαστούνια του golf, σε ρακέτες του τένις, σε καλάμια ψαρέματος, σε σκελετούς ποδηλάτων, με κύριο γνώμονα τη μείωση του βάρους, τη βελτίωση της συμπεριφοράς τους, την αύξηση της ταχύτητας, την αντοχή σε ιδιαίτερες συνθήκες.



**Εικόνα 2.9.** Εφαρμογές σύνθετων υλικών σε αθλητικά είδη

Ιατρική: Η ανάπτυξη της επιστήμης στα πολυμερή και στα σύνθετα υλικά βοήθησε και στην ανάπτυξη νέων βίο-υλικών και συνεπώς στην ανάπτυξη της ιατρικής και της οδοντιατρικής. Τεχνητή καρδιά, τεχνητές βαλβίδες, τεχνητό δέρμα, τεχνητά μέλη σώματος, αλλά και νέες κονίες, όπως οι υαλοϊνομερείς, και εφαρμογή σύνθετων υλικών στη νέα τεχνολογία των εμφυτευμάτων αποτελούν επανάσταση στις επιστήμες αυτές.



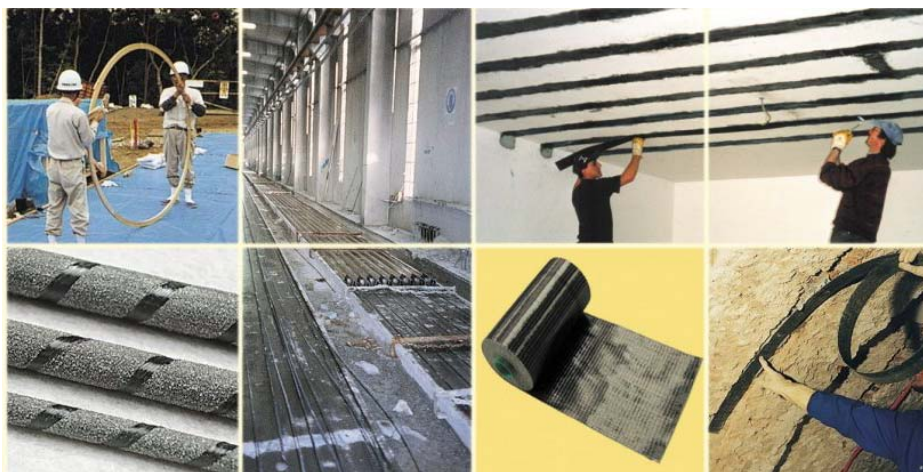
**Εικόνα 2.10.** Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην ιατρική

Κατασκευή τεχνικών έργων: Η χρήση των πολυμερών και των σύνθετων υλικών με μήτρα πολυμερή στην κατασκευή των τεχνικών έργων σε επεμβάσεις ενίσχυσης κατασκευών, αποτελούν σήμερα μια αποτελεσματική μέθοδο που προστέθηκε στην φαρέτρα του μηχανικού για την αντιμετώπιση πάσης φύσεως κατασκευαστικών ατελειών και βλαβών. Αποδεικνύει την εξελικτική πορεία της τεχνολογίας που προχωρά με ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή τους και έχει επιδείξει πραγματικά εντυπωσιακή ανάπτυξη και διάδοση, με πρώτες εφαρμογές των σύνθετων υλικών να αναφέρονται στις αρχές του 1990. Η εφαρμογή των πλαστικών από το 1977, προσφέρει ακόμη και σήμερα βασικές παραμέτρους για ανθεκτικότητα στις κατασκευές. Ωστόσο, η ηλικία και η ανθεκτικότητα σε μεγάλες περιόδους εξαρτάται

από την ικανότητα των πολυμερών να παραμείνουν σταθερά, από τη μακροχρόνια έκθεση σ' ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Ενώ, περιβαλλοντική διαταραχή μπορεί να προκαλέσει και διάλυση των πολυμερών.

Τα σύνθετα υλικά, αρχικά εφαρμόστηκαν για την ενίσχυση γεφυρών στις Η.Π.Α. και ακολούθως για την ενίσχυση κτιριακών κατασκευών. Σήμερα, τα σύνθετα υλικά έχουν εκτενώς εφαρμοστεί στις ενισχύσεις πάσης φύσεως τεχνικών έργων τόσο σε κράτη της Αμερικής, της Ασίας και της Ευρώπης συμπεριλαμβανομένης και της χώρας μας. Η χρήση των σύνθετων υλικών για την ενίσχυση κατασκευών μπορεί να θεωρηθεί ως η φυσική εξέλιξη των ενισχύσεων με μεταλλικά ελάσματα. Ενώ παλιότερα χρησιμοποιούσαν ίνες χάλυβα, σήμερα χρησιμοποιούν ίνες πολυμερών. Οι επεμβάσεις ενίσχυσης με σύνθετα υλικά αποτελούν σήμερα δοκιμασμένες εναλλακτικές λύσεις των παραδοσιακών μεθόδων έγχυτου σκυροδέματος, εκτοξευμένου σκυροδέματος, μεταλλικών ελασμάτων και μεταλλικών κλωβών.

Η χρήση των σύνθετων υλικών στην επισκευή και ενίσχυση των κατασκευών αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο με πολλές προοπτικές. Η τεχνολογία αναπτύσσεται με γοργούς ρυθμούς, παρέχοντας ολοένα και πιο βελτιωμένες μεθόδους αντιμετώπισης προβλημάτων σε οποιοσδήποτε τομέα.



**Εικόνα 2.11.** Περιοχές ενίσχυσης κτιρίου με σύνθετα υλικά

## 2.8 Έξυπνα υλικά

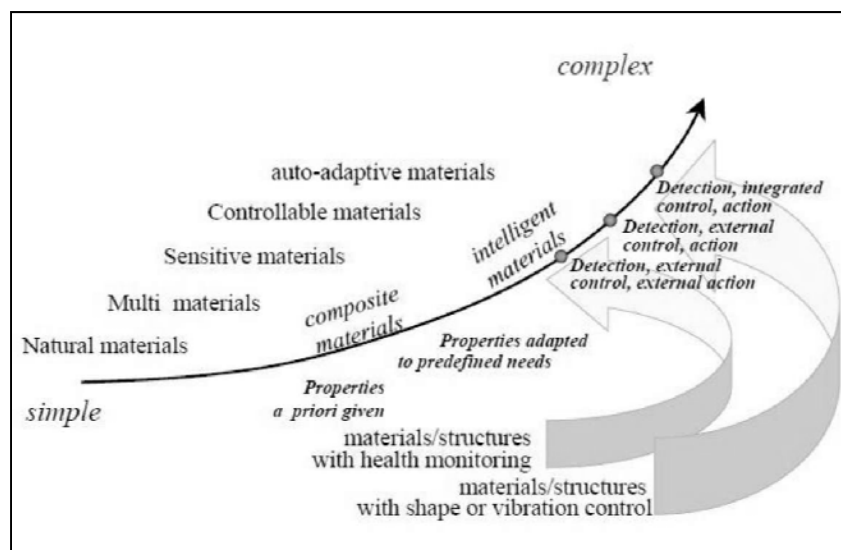
### 2.8.1 Εισαγωγή

Με το τέλος της δεκαετίας του '80, η ιδέα έξυπνων υλικών και κατασκευών έχει γίνει όλο και πιο αισθητή στο μυαλό των μηχανικών. Αυτή η νέα ιδέα έγινε εξαιρετικά καλοδεχούμενη στα πεδία της αεροναυπηγικής και των έργων υποδομών, ενώ την παρούσα χρονική στιγμή είναι ένας εκ των κινητήριων μοχλών της καινοτομίας και έρευνας της επιστήμης των υλικών και των επιστήμων του μηχανικού.

Ως «έξυπνα υλικά» αναφέρονται συστήματα που έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους ή ορισμένα χαρακτηριστικά τους (σχήμα, ιδιοσυχνότητα, συντελεστή απόσβεσης δονήσεων κ.α.) με

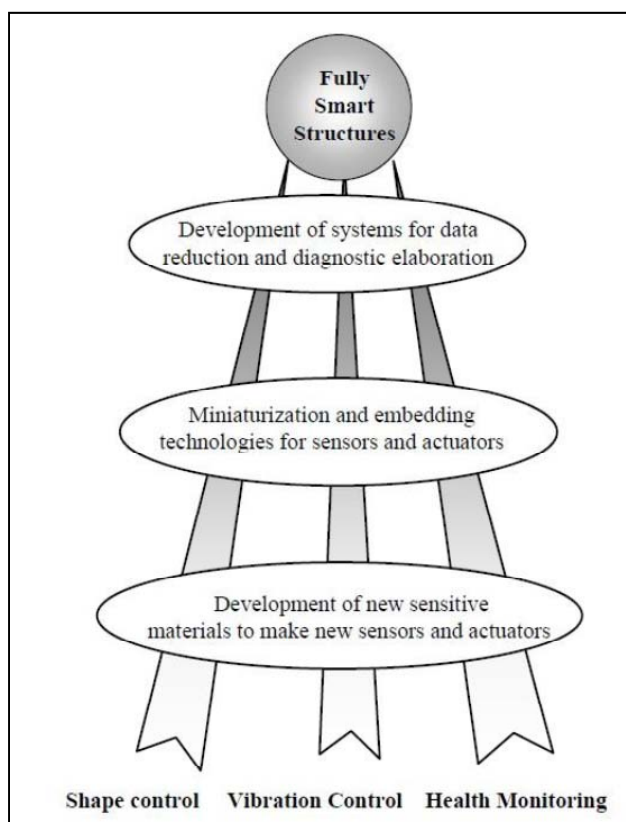
δεδομένο και ελεγχόμενο τρόπο. Τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν αισθητήρες και ενεργοποιητές (actuators), οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλο βρόχο ελέγχου. Έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν «έξυπνα» συγκεκριμένες λειτουργίες, αποκρινόμενα σε εξωτερικές διεγέρσεις. Με τους αισθητήρες αισθάνονται αλλαγές στο εξωτερικό περιβάλλον (π.χ. επιβαλλόμενη τάση ή αλλαγή θερμοκρασίας) ή στη δομή τους (π.χ. ανάπτυξη ατελειών ή μεταβολή της κρυσταλλικής δομής) και αποκρίνονται σε αυτές με τους ενεργοποιητές, αλλάζοντας κάποια ιδιότητά τους προς ορισμένη κατεύθυνση (π.χ. δυσκαμψία, σχήμα, ικανότητα απόσβεσης κ.α.).

Η ιδέα των έξυπνων υλικών και κατασκευών μπορεί να θεωρηθεί ως ένα βήμα προς τη γενικότερη εξέλιξη των αντικειμένων που έχουν κατασκευαστεί από τον άνθρωπο. Υπάρχει μια συνεχής έλξη από το απλό στο σύνθετο, ξεκινώντας από τη χρήση ομογενών υλικών, τα οποία παρέχονται από τη φύση και είναι αποδεκτά με τις φυσικές τους ιδιότητες, ακολουθούν τα πολύ-υλικά και συγκεκριμένα σύνθετα υλικά τα οποία μας επιτρέπουν να δημιουργήσουμε κατασκευές με ιδιότητες προσαρμοσμένες σε συγκεκριμένες χρήσεις. Στις μέρες μας τα σύνθετα υλικά αντικαθιστούν τα ομογενή υλικά σε όλο και περισσότερες κατασκευές. Αυτό παρατηρείται κυρίως στον τομέα της αεροναυπηγικής, όπου σύνθετα μέρη χρησιμοποιούνται πλέον, ή προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν, στα μοντέρνα αεροσκάφη. Στην εικόνα 2.12 παρουσιάζεται η γενικότερη εξέλιξη των υλικών και των κατασκευών που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο καθώς και η ένταξη και η θέση της παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας στις κατασκευές [16].



**Εικόνα 2.12.** Η γενικότερη εξέλιξη των υλικών και των κατασκευών

Το επόμενο βήμα είναι η μεταβολή των ιδιοτήτων των υλικών και των κατασκευών ώστε να μπορούν να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντολογικές συνθήκες. Αυτό απαιτεί να είναι «ευαίσθητα», «ελεγχόμενα» και «ενεργά». Τα διάφορα επίπεδα των "έξυπνων" υλικών και κατασκευών ανταποκρίνονται στην ύπαρξη της μιας, των δυο ή και των τριών αυτών ιδιοτήτων. Η ταξινόμηση των «έξυπνων» κατασκευών μπορεί να γίνει σε τρεις τύπους. Έτσι γίνεται προσπάθεια να υπάρξουν κατασκευές οι οποίες να μπορούν ελέγχουν το σχήμα τους, να μπορούν να αποσβένουν δονήσεις και να μπορούν να παρακολουθούν την δομική τους ακεραιότητα [16]. Στην εικόνα 2.13 παρουσιάζεται η φιλοσοφία των «έξυπνων» κατασκευών καθώς και διάφορα στάδια για να επιτευχτεί κάτι τέτοιο.



**Εικόνα 2.13.** Σχηματική απεικόνιση της φιλοσοφίας των «έξυπνων» κατασκευών καθώς και διάφορα στάδια για να επιτευχτεί κάτι τέτοιο.

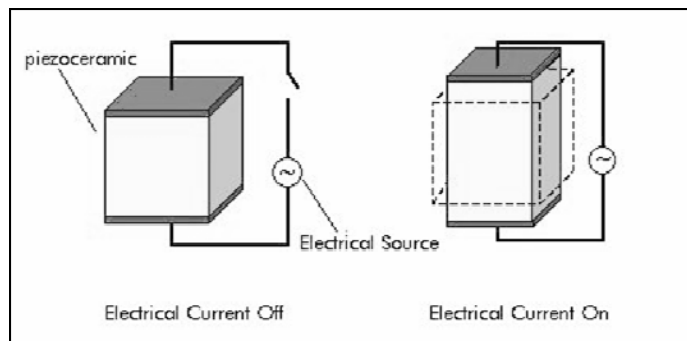
### 2.8.2 Χαρακτηριστικά παραδείγματα έξυπνων υλικών

#### Πιεζοηλεκτρικά υλικά:

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο παρατηρήθηκε από τους αδελφούς Pierre και Jacques Curie το 1880 όταν ήταν σε ηλικία 21 και 24 ετών αντίστοιχα. Παρατήρησαν ότι όταν εφαρμόζεται πίεση σε ένα πολωμένο κρύσταλλο, η μηχανική παραμόρφωση που επιφέρεται, είχε σαν αποτέλεσμα την ηλεκτρική φόρτιση. Το φαινόμενο βασίζεται σε μια αναστρέψιμη ενέργεια μετατροπής ανάμεσα στις ηλεκτρικές και μηχανικές μορφές που προκύπτουν φυσικά στα μόνιμα πολωμένα υλικά μέσα στα οποία κάποια μέρη των μορίων τους είναι θετικά φορτισμένα και άλλα μέρη είναι αρνητικά φορτισμένα. Πολλοί φυσικοί βρήκαν ότι οι κρύσταλλοι (π. χ. ο χαλαζίας) διακατέχονται από αυτήν την ιδιότητα [22]. Στην εικόνα 2.14 περιγράφεται σχηματικά ο μηχανισμός του φαινομένου.

Στα πιεζοηλεκτρικά υλικά, κάθε κέλυφος ή μόριο είναι ένα δίπολο με θετικές και αρνητικές φορτίσεις σε κάθε άκρη. Υπάρχει ευθυγράμμιση των εσωτερικών ηλεκτρικών δίπολων. Αυτή η ευθυγράμμιση μπορεί να καταλήξει σε μια επιφάνεια φόρτισης, όμως αυτή η φόρτιση ουδετεροποιείται από τις παρούσες ελεύθερες φορτίσεις στην ατμόσφαιρα που τα περιβάλλει. Εφαρμόζεται μια δύναμη στο

πιεζοηλεκτρικό υλικό που προξενεί τις παραμορφώσεις, που με τη σειρά του μεταβάλλει την ουδετεροποιημένη κατάσταση της επιφάνειας με την αλλαγή του προσανατολισμού των δίπολων. Μπορεί να επιτευχθεί και η αντιστροφή. Η εφαρμογή της τάσης προκαλεί την ευθυγράμμιση των πολωμένων μορίων με το ηλεκτρικό πεδίο, που με τη σειρά του προκαλεί την ανάπτυξη της παραμόρφωσης.



**Εικόνα 2.14.** Σχηματική περιγραφή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.

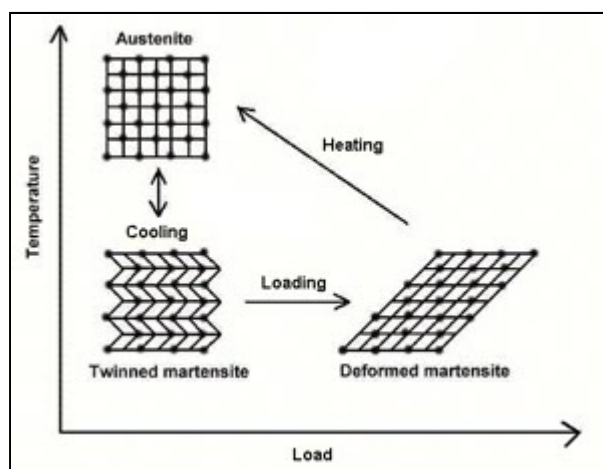
Η πιεζοηλεκτρική επίδραση έχει προ καιρού αξιοποιηθεί σε πολλές συσκευές. Η, προφανώς, επιθυμητή ιδιότητα όπου η πίεση παράγει ηλεκτρική τάση χρησιμοποιείται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Στα κουδούνια της πόρτας, μια εφαρμοσμένη δύναμη παράγει τάση, που με τη σειρά της χρησιμοποιείται για να ελέγξει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα προκαλώντας το εκνευριστικό στ' αυτιά κουδούνισμα ή το ευχάριστο βουητό. Στον λαμπτήρα άνθρακα, η εφαρμογή μιας δύναμης σε μια πιεζοηλεκτρική συσκευή προκαλεί μια ανάφλεξη. Είναι λιγότερο προφανές σε πολλούς ανθρώπους, όμως χρησιμοποιούνται ευρέως, μια πλειάδα πιεζοηλεκτρικών συσκευών με χρήση μικρών ενεργοποιητών που ελέγχονται με ηλεκτρισμό και χρησιμοποιούνται σε έναν μεγάλο αριθμό μηχανικών και βιομηχανικών περιπτώσεων όπου μια μικρή ηλεκτρική τάση προκαλεί και την κίνηση ενός μέρους το οποίο ελέγχει κάτι άλλο, όπως π.χ. η βαλβίδα. Η πιεζοηλεκτρική επίδραση είναι κυριολεκτικά στιγμιαία και οι πιεζοηλεκτρικές συσκευές μπορούν να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε μικρές πιέσεις ή ηλεκτρικές τάσεις. Πολλά μικρόφωνα που βασίζονται σε πιεζοηλεκτρικά υλικά μετατρέπουν μια ακουστική πίεση σε τάση. Εναλλακτικά, στα πιεζοηλεκτρικά ηχεία, η εφαρμογή ηλεκτρικής φόρτισης προκαλεί τη μηχανική παραμόρφωση, που με τη σειρά της δημιουργεί ακουστική πίεση.

### Κράματα με μνήμη σχήματος (Shape Memory Alloys)

Ο όρος κράματα με μνήμη σχήματος (Shape Memory Alloys) αναφέρεται στην ικανότητα ορισμένων κραμάτων (Ni-Ti, Cu-Al-Zn, κλπ.) να μπορούν να ανακτούν το αρχικό τους σχήμα όταν υπόκεινται σε μεγάλες παραμορφώσεις, χωρίς καμία παραμένουσα παραμόρφωση. Αυτή η ιδιότητα τους μπορεί να εκδηλωθεί είτε αυθόρμητα είτε με την επιβολή εξωτερικής θέρμανσης. Τέτοια κράματα υπάρχουν σε τελική μορφή προϊόντος σε δύο διαφορετικές κρυσταλλικές καταστάσεις ή φάσεις οι οποίες εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Η φάση της αρχικής και υψηλότερης θερμοκρασίας καλείται ωστενική κατάσταση. Η φάση της χαμηλότερης θερμοκρασίας καλείται μαρτενσική κατάσταση. Οι φυσικές ιδιότητες ενός

υλικού στην ωστενική και μαρτενσική κατάσταση είναι ιδιαίτερα διαφορετικές. Το υλικό στην ωστενική κατάσταση είναι δυνατό και σκληρό, ενώ στη μαρτενσική φάση είναι μαλακό και εύπλαστο. Η ωστενική κρυσταλλική δομή είναι μια απλή κυβική δομή, ενώ η μαρτενσική δομή παρουσιάζει μια πιο περίπλοκη ρομβική δομή [23].

Σε ότι αφορά την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, στην οστενική κατάσταση συμπεριφέρεται με παρεμφερή τρόπο στα περισσότερα υλικά, ενώ στην μαρτενσική κατάσταση συμπεριφέρεται σαν ελαστομερές. Το υλικό σε μαρτενσική κατάσταση χαμηλότερης θερμοκρασίας έχει «δίδυμη» κρυσταλλική δομή, που περιλαμβάνει μια πιστή αναπαράσταση συμμετρικής μετατόπισης ατόμων κατά μήκος ενός συγκεκριμένου επιπέδου.



**Εικόνα 2.15.** Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού που διέπει τα κράματα με ικανότητα μνήμης σχήματος.

Τα δίδυμα όρια είναι διαμορφωμένα έτσι ώστε να μπορούν να κινηθούν εύκολα. Αντίθετα με τα πολλά μέταλλα που υφίστανται παραμορφώσεις, η παραμόρφωση σε δίδυμη δομή προκύπτει μέσω των μεγάλων αλλαγών στον προσανατολισμό όλης της κρυσταλλικής δομής και σχετίζονται με τις κινήσεις των δίδυμων ορίων.

Η αντίδραση της μνήμης του σχήματος που προκαλείται θερμικά έχει σχέση με τις διαφορετικές φάσεις. Στο πρωταρχικό περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας, το υλικό είναι σε ωστενική φάση. Με την ψύξη το υλικό γίνεται μαρτενσικό. Όταν επέρχεται ψύξη δεν συμβαίνει καμία προφανής μεταβολή σχήματος, όμως τώρα το υλικό μπορεί να παραμορφωθεί μηχανικά. Θα παραμείνει παραμορφωμένο ενώ είναι παγωμένο. Όταν θερμαίνεται, η ωστενική δομή εμφανίζεται ξανά και το υλικό επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα.

Μπορεί επίσης να προκύψει ένα σχετιζόμενο φαινόμενο που προκαλείται μηχανικά και λέγεται *υπερελαστικότητα*. Η εφαρμογή έντασης σε ένα κράμα που έχει μνήμη σχήματος και έχει παραμορφωθεί προκαλεί μετατροπή φάσης, από την ωστενική στην μαρτενσική φάση, (κατά την οποία υπάρχει μεγάλη δυνατότητα παραμόρφωσης). Η ένταση κάνει το μαρτενσίτη να διαμορφώνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τις προγενέστερες και υπάρχει υψηλός βαθμός πλαστικότητας που συνδέεται με το μαρτενσίτη. Οι σχετιζόμενες διατάσεις ή παραμορφώσεις είναι αναστρέψιμες όταν το επίπεδο της εφαρμοσμένης έντασης φεύγει και το υλικό επιστρέφει στην ωστενική φάση. Μπορούν να επιτευχθούν υψηλές παραμορφώσεις της τάξεως του 5-8%.



Ο λόγος που προκύπτουν αυτά τα φαινόμενα είναι πρωταρχικά η ανάγκη του κρυσταλλικού πλέγματος προκειμένου να τοποθετηθεί στην ελάχιστη ενεργειακή κατάσταση σε μια δεδομένη θερμοκρασία. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές διατάξεις που μπορεί να πάρει ένα κρυσταλλικό πλέγμα στη μαρτενσική φάση, ενώ στον αντίποδα στην ωστενική φάση μπορεί να πάρει μόνο μία διάταξη ή προσανατολισμό, και όλες οι μαρτενσικές διατάξεις πρέπει τελικά να επιστρέψουν σ' ένα αρχικό σχήμα και δομή κατά τη διάρκεια της θέρμανσης μετά την κρίσιμη θερμοκρασία μετάβασης φάσης. Η διαδικασία που περιγράφηκε επαναλαμβάνεται για όσο διατηρούνται τα όρια που έχουν να κάνουν με τις φάσεις μετάβασης. Κάτω από επίπεδα υψηλής έντασης ή παραμόρφωσης, μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους, μπορεί να προκύψει μια μορφή ανεπάρκειας λόγω κόπωσης.

Τα τελευταία χρόνια η βασική χρήση των κραμάτων αυτών περιορίζεται κυρίως στις ιατρικές επιστήμες, στην ηλεκτρονική, στην αεροδιαστημική και μηχανολογία ενώ πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι μπορούν να ανοίξουν νέες εφαρμογές σε έργα υποδομών στην αντισεισμική προστασία κτιρίων. Οι βασικές ιδιότητες οι οποίες επιτρέπουν την χρήση κραμάτων νικελίου-τιτανίου σε κατασκευές, είναι οι εξής:

- Επαναλαμβανόμενη απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας όταν βρίσκονται υπό φόρτιση, χωρίς μόνιμη παραμόρφωση.
- Μεγάλο εύρος παραμόρφωσης ίσο με 70%
- Πολύ καλή αντοχή σε κόπωση μεγάλων φορτίσεων.

Έχει αναφερθεί ότι η συμπεριφορά κραμάτων Cu-Zn-Al σε κόπωση είναι συγκρίσιμη με αυτή του χάλυβα. Αν μπορούσαν να κατασκευαστούν βέργες μεγαλύτερης διαμέτρου τότε θα ήταν δυνατή η χρήση τους σε κτήρια και κατασκευές. Επιπλέον αντίστοιχη χρήση έχει αναφερθεί σε πειραματικές δοκιμές σε πολυμερή τα οποία έχουν ενισχυθεί με ίνες τέτοιων κραμάτων.

#### Μαγνητικά Υλικά Μνήμης Σχήματος:

Τα Μαγνητικά Υλικά Μνήμης Σχήματος ή Magnetic Shape Memory (MSM) υλικά είναι μεταλλικά κράματα μονού κρυστάλλου, τα οποία μετατρέπουν ηλεκτρική ισχύ (μαγνητικό πεδίο) σε μηχανική ισχύ και αντίστροφα. Αναπτύχθηκαν κυρίως για εφαρμογές ενεργοποιητών (actuator) και αισθητήρων (sensor), και αναμένεται στο μέλλον να αντικαταστήσουν ολόκληρα μηχανικά μέρη και παραδοσιακές τεχνολογίες [23].

Τα υλικά MSM συνδυάζουν τις μεγάλες και περίπλοκες αλλαγές σχήματος των κραμάτων με χαρακτηριστικά μνήμης σχήματος με την ταχύτατη και ακριβή απόκριση που δίνει ο μαγνητικός έλεγχος. Κάνουν δυνατή την απευθείας δημιουργία κίνησης και δύναμης σε μία μηχανή χωρίς τη χρήση κινητήρων, κιβωτίων ταχυτήτων μετατροπών και άλλων στοιχείων μηχανών. Οι αλλαγές σχήματος στα MSM υλικά μπορούν να σχετίζονται με έκταση ή επιμήκυνση, κάμψη, στρέψη κλπ. Εξ αιτίας των μοναδικών ιδιοτήτων των MSM υλικών, οι ηλεκτρομηχανικές συσκευές και μηχανές γίνονται απλούστερες, μικρότερες και περισσότερο αξιόπιστες αφού ένα μόνο στοιχείο υλοποιημένο από MSM υλικό μπορεί να αντικαταστήσει ολόκληρο μηχανισμό. Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο MSM υλικό είναι το TERFENOL-D. Είναι πιο ισχυρό και από άλλα ευφυή υλικά και αποδίδει αξιόπιστα ακόμα και σε υλοποιήσεις μικρού μεγέθους. Οι συσκευές που χρησιμοποιούν το TERFENOL-D ελέγχονται από ηλεκτρικό σήμα χαμηλής τάσης. Το TERFENOL-D αναπτύχθηκε για την κατασκευή ηχοβολιστικών

συσκευών (sonar) που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας και αυξημένη αξιοπιστία.

Ένα νέος τύπος MSM υλικού αναπτύχθηκε πρόσφατα από τη Φινλανδική εταιρεία AdaptaMat. Πρόκειται για νέα κράματα μονού κρυστάλλου (π.χ. Ni-Mn-Ga). Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των νέων υλικών σε σχέση με τα παλαιότερα είναι ότι αναπτύσσουν παραμορφώσεις μέχρι 6%, δηλαδή 50 φορές περισσότερο από τα καλύτερα σημερινά υλικά ενεργοποιητών. (Για παράδειγμα το Terfenol-D παράγει παραμορφώσεις μέχρι 0,12% ενώ τα πιεζοκεραμικά χαμηλότερες), Το φαινόμενο πραγματοποιείται και αντίστροφα, δηλαδή μηχανικές φορτίσεις ενός MSM υλικού προκαλούν αλλαγές στο περιβάλλον μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό είναι τεχνολογικά αξιοποιήσιμο σε εφαρμογές αισθητήρων. Οι κυριότερες εφαρμογές για τα MSM υλικά είναι στις ακόλουθες συσκευές:

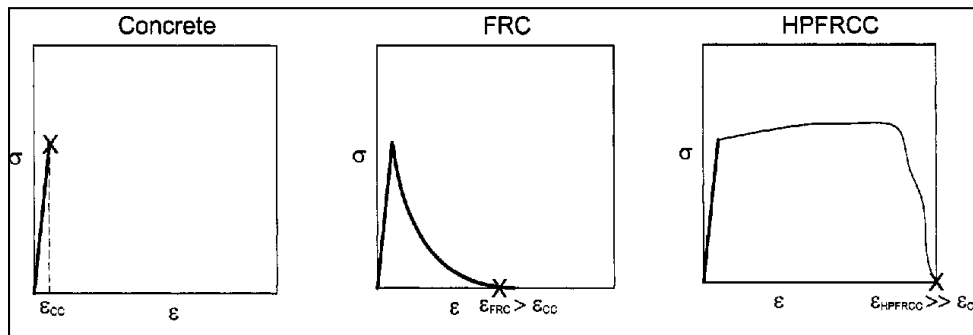
- Βαλβίδες ελέγχου υψηλής ταχύτητας (αναλογικές βαλβίδες, βαλβίδες εμβόλου κλπ.)
- Εγχυτήρες (καυσίμου, εκτυπωτικής μελάνης, βιοϊατρικοί, κ.τ.λ.), δοσολόγοι.
- Ρομποτικοί βραχίονες και χειριστές (robot manipulators), για τους οποίους απαιτείται ταχύτατη ανταπόκριση και υψηλή συχνότητα λειτουργίας.
- Γραμμικοί κινητήρες, εφαρμογές σε συσκευές τοποθέτησης (positioning) υψηλής ακρίβειας
- Αντλίες και μικροαντλίες (π.χ. αντλίες ψύξης για ηλεκτρονικές συσκευές)
- Ενεργή απόσβεση ταλαντώσεων, δονήσεων και κραδασμών.
- Μηχανικοί συζεύκτες (φρένα, δαγκάνες, συγκρατητήρες)
- Ηχοβολιστικές συσκευές (sonars), εφαρμογές υπερήχων, μεγάφωνα.
- Ηλεκτρικές συνδεσμολογίες (ηλεκτρονόμοι, διακόπτες κυκλώματος)
- Εφαρμογές αισθητήρων (αισθητήρες θέσης, χειριστήρια -joysticks, παρακολούθηση δονήσεων)
- Διάφορες εφαρμογές MEMS ενεργοποιητών (actuators)

Ο μηχανισμός MSM βασίζεται στην κίνηση των μαγνητικών περιοχών των κρυστάλλων υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, όταν το υλικό βρίσκεται σε πλήρη μαρτενσιτική κατάσταση (complete martensite state). Όταν το MSM υλικό υπόκειται σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο τα μαγνητικά δίπολα που είναι προσανατολισμένα σε ευνοϊκή κατεύθυνση (παράλληλη ή σχεδόν παράλληλη) σχετικά με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου αυξάνονται σε βάρος των άλλων διπλών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην αλλαγή του σχήματος του υλικού.

#### Τσιμεντοειδή σύνθετα (Engineered Cementitious Composites):

Η ανάγκη βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων του συμβατικού σκυροδέματος οδήγησαν την έρευνα σε ένα νέο είδος σκυροδέματος, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα (FRC). Το FRC μπορεί να περιέχει ίνες από χάλυβα (SFRC) και ίνες από πλαστικά υλικά, όπως αμίαντο (AFRP), γυαλί (GFRP), άνθρακα (CFRP). Οι ίνες αυτές είναι ομοιόμορφα διάσπαρτες με τυχαίο προσανατολισμό. Η ενσωμάτωση των ινών στο σκυρόδεμα του προσδίδει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, γι' αυτό και χρησιμοποιείται ευρέως στις επισκευές και ενισχύσεις των κατασκευών αλλά το πεδίο εφαρμογών διευρύνεται διαρκώς. Τα τσιμεντοειδή σύνθετα (Engineered Cementitious Composites) είναι υλικά κονιάματος ή σκυροδέματος τα οποία έχουν ενισχυθεί από κοντές ίνες. Τα εν λόγω σύνθετα υλικά έχουν σχεδιαστεί με τη χρήση των αρχών της μικρομηχανικής. Τα ECC παρουσιάζουν δυσκαμψία με μεγάλη επιδεκτικότητα σε παραμορφώσεις και διατμητική ολκιμότητα, ενώ παράλληλα επιδεικνύουν καλύτερη ανοχή σε αστοχίες.

Τα πιο συνηθισμένα υλικά ενίσχυσης του σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται είναι οι ίνες από υλικά όπως ο χάλυβας, ο άνθρακας ή οι ακόμα και αραμίδιο. Μια επιπλέον ιδιότητα αυτών των υλικών είναι η ικανότητα τους να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Μια προσθήκη 0,5% ειδικά επεξεργασμένων ινών άνθρακα, επιτρέπουν την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος και την μετάβαση του από μονωτή σε αγωγό του ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ επιπλέον η ηλεκτρική αγωγιμότητα τους μεταβάλλεται με μηχανική καταπόνηση. Η επιβολή ενός εξωτερικού μηχανικού φορτίου σε ένα τέτοιο υλικό μειώνει την επαφή μεταξύ των ινών, και συνεπώς μειώνει ελαφρώς αγωγιμότητα του. Με την αφαίρεση του φορτίου, το σκυρόδεμα ανακτά την αρχική αγωγιμότητα του. Εξαιτίας αυτής της ξεχωριστής ιδιότητας, το υλικό αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί ως «έξυπνο» σκυρόδεμα και να χρησιμεύσει τόσο ως δομικό υλικό όσο ως αισθητήρας. Μια υπονήφια εφαρμογή θα μπορούσε να είναι για την καταγραφή της κίνησης των οχημάτων ή ακόμη να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση σεισμών. Επιπλέον διαθέτει και την ικανότητα να αντανακλά τα ραδιοκύματα και συνεπώς είναι κατάλληλο για χρήση σε ηλεκτρομαγνητική θωράκιση.



**Εικόνα 2.16.** Συγκριτικά διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης μεταξύ του συμβατικού σκυροδέματος και διαφόρων τύπων τσιμεντοειδών σύνθετων.

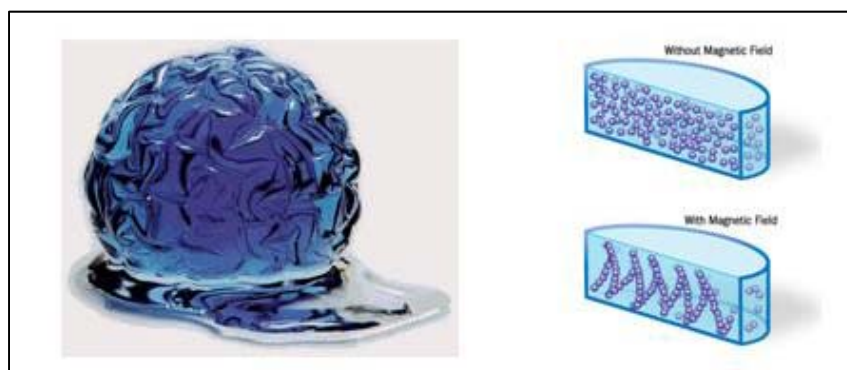
### Ηλεκτρο και Μαγνητο ρεολογικά (ER / MR) υγρά

Τα Ηλεκτρο και Μαγνητο ρεολογικά υγρά (Electro and Magnetorheological Fluids) είναι υλικά με την εγγενή ιδιότητα να μεταβαίνουν σε χλιοστά του δευτερολέπτου από την ρευστή φάση (παχύρρευστο υγρό) σε ημι-στερεά, όταν εκτεθούν σε εξωτερικό ηλεκτρικό/μαγνητικό πεδίο. Η πιο ενδιαφέρουσα μηχανική ιδιότητα που παρουσιάζουν τα παραπάνω υλικά είναι η ικανότητά τους να φέρουν διατμητικές τάσεις. Στην μηχανολογία ρευστά τέτοιου τύπου χρησιμοποιούνται σε μηχανισμούς που απαιτούν έλεγχο φορτίων και ροπών μεταξύ κινούμενων μερών [23]. Αυτό σημαίνει ότι κάθε συσκευή η οποία στηρίζεται σε υδραυλικά συστήματα και επιτελεί το παραπάνω έργο μπορεί να επωφεληθεί από τα ERF σε ότι αφορά την απόκρισή της και την μείωση των στοιχείων που την αποτελούν. Τέτοιες συσκευές είναι κυρίως οι αποσβεστήρες, οι συμπλέκτες και οι απτικές συσκευές. Η εξάπλωση των ηλεκτρομαγνητικών ρευστών στα μηχανολογικά συστήματα καθυστέρησε λόγω της πολυπλοκότητας του προσεγγιστικού τους μοντέλου το οποίο δεν είναι κάτι το συνηθισμένο. Το μοντέλο στο οποίο βασίζονται τα ηλεκτρομαγνητορεολογικά ρευστά είναι κοινό. Πρόκειται για το μοντέλο πλαστικής ροής του Bingham, το οποίο σημαίνει ότι συμπεριφέρονται σαν στερεά μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο ενδοτικότητας. Κύρια διαφορά στην μηχανική συμπεριφορά των ER και MR ρευστών είναι το μέγεθος της διατμητικής

τάσης που είναι ικανά να φέρουν. Τα πρώτα φέρουν διατμητικές τάσεις της τάξεως των 10kPa, ενώ τα μαγνητοροεολογικά δύνανται να φέρουν δεκαπλάσια τάση, της τάξεως δηλαδή των 100kPa. Μέχρι στιγμής μόνο ένα είδος ERF έχει καταφέρει να συναγωνιστεί τα MRF σε ότι αφορά την τάση που φέρει. Αποτελεί εφεύρεση ερευνητών του Hong Kong University of Science and Technology το 2004 και μπορεί να φέρει διατμητική τάση 130kPa.

Χωρίς ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο τα ηλεκτροροεολογικά ή τα μαγνητοροεολογικά ρευστά αντίστοιχα συμπεριφέρονται σαν Νευτώνεια ρευστά, με την διατμητική τάση ( $\tau$ ) να είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της διατμητικής παραμόρφωσης  $dy/dt$  και του ιξώδους  $\eta$  ( $\tau = dy/dt \cdot \eta$ ). Αυτό γενικά είναι μία προσέγγιση καθώς τα MERF ακόμα κι εκτός πεδίου δεν είναι Νευτώνεια εξ αιτίας των εναιωρημάτων και άλλων πρόσθετων σωματιδίων που περιέχουν. Σε συνθήκες μηδενικού πεδίου τα εναιωρήματα θεωρούνται σαν ομαλά κατανομημένα. Σε κάποιες άλλες εφαρμογές ακόμα και η ροή του ρευστού είναι ικανή να αποτρέψει την καθίζηση. Σε άλλες πάλι μία ελαφριά ανάδευση είναι απαραίτητη για την ανακατανομή των σωματιδίων. Όπως θα δούμε στη συνέχεια αποτελεί πλεονέκτημα το ιξώδες σε μηδενικό πεδίο να είναι όσο το δυνατό μικρότερο.

Αυτά τα υγρά είναι ιδανικοί διεκδικητές για την ανάπτυξη ελεγχόμενων κατασκευών. Σκοπός είναι η κατασκευή να ελέγχει την δυσκαμψία της και την απόσβεση των δονήσεων της, συμπεριφέροντας προσαρμοστικά σε σεισμούς ή δυνάμεις του αέρα. Μέχρι στιγμής έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί πειραματικά ένας μεγάλης κλίμακας MR αποσβεστήρας δυναμικότητας των 20 τόνων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής του MR αποσβεστήρα σε ημιαυτόματη λειτουργία ελέγχου σε πραγματικές εφαρμογές.



**Εικόνα 2.17.** Μαγνητοροεολογικό υγρό υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου

#### Υλικά με ικανότητα «Αυτό-ίασης»

Τα πολυμερή υλικά με ικανότητα «Αυτό-ίασης» έχουν την εγγενή ιδιότητα να μπορούν να επουλώνουν (επισκευάζουν) εσωτερικές ζημιές ενώ παράλληλα να επανακτούν την ικανότητα «μεταφοράς» μηχανικού φορτίου ακόμα και μετά από κάποια ενδεχόμενη αστοχία. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να συμβαίνει αυτόνομα ή μπορεί να ενεργοποιείται από ένα συγκεκριμένο εξωτερικό ερέθισμα (πχ θερμότητα, ακτινοβολία). Έτσι τα υλικά αυτά αναμένεται να συμβάλουν πολύ στην ασφάλεια και ανθεκτικότητα των πολυμερικών συστημάτων ενώ ταυτόχρονα μειώνουν το κόστος συντήρησης και ελέγχου. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές επιστημονικές θεωρίες και τεχνικές που

αναφέρονται σε αυτά τα υλικά [24]. Στον πίνακα 2.4 που ακολουθεί αναγράφονται διάφοροι τύποι τέτοιων υλικών καθώς και η ξεχωριστή ικανότητα του καθενός.

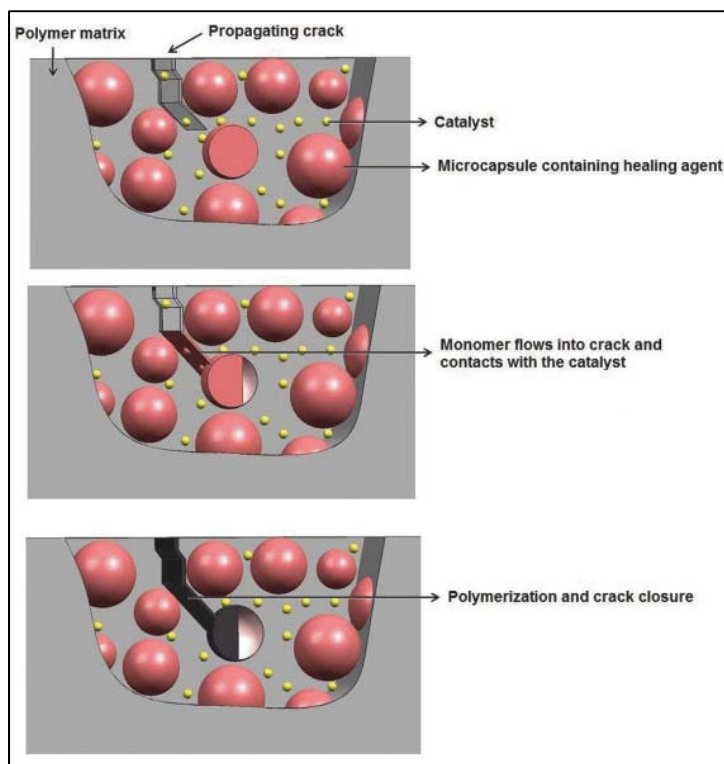
**Πίνακας 2.4.** Διάφοροι τύποι υλικών με ικανότητα αυτό-ίασης

Matrix	Healing type	Healing method	First report of method	Best efficiency achieved	Test method	Healing conditions
<b>Thermoplastic</b>	Molecular	Molecular interdiffusion (thermal)	1979	120%	Fracture toughness	7-8 min at 115 °C
		Molecular interdiffusion (solvent)	1990	100%	Fracture toughness	4-5 min at 60 °C
		Reversible bond formation	2001	100%	Puncture closure	< 1 min at -30 °C
		Recombination of chain ends	2001	98%	Tensile strength	600 h at Ambient
		Photo-induced healing	2004	26%	Flexure strength	10 min at 100 °C
	Living polymer	2005	-	-	-	
	Structural	Nanoparticle healing	2004	Impeded Crack Growth	Visual inspection	Ambient
<b>Thermoset</b>	Molecular	Chain re- arrangement	1969	100%	Visual inspection	10 min at ambient
		Thermally reversible crosslinks	2002	80%	Fracture toughness	30 min at 115 °C then 6h at 40 °C
		Ion-mediated healing	2006	75%	Tensile strength	12 h at ambient
	Structural	Microencapsulation approach	1997	213%	Fatigue resistance	Ambient
		Thermoplastic additives	2005	65%	Impact strength	1h at 160 °C

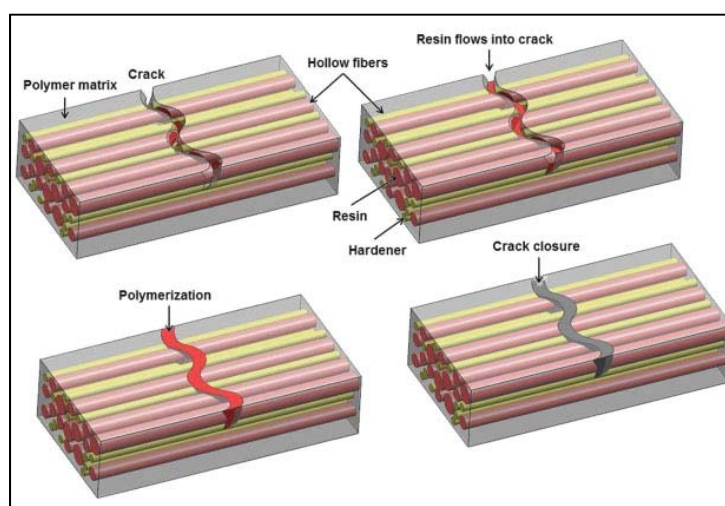
Μια βασική κατηγορία υλικών με ικανότητα Αυτό-ίασης, περιλαμβάνει πολυμερή στα οποία έχουν ενσωματωθεί μικροκάψουλες, ή κούφιας ίνες ή κανάλια. Σε αυτά περιέχονται μονομερή σε υγρή μορφή. Στην περίπτωση μιας ρωγμής, αυτές οι δεξαμενές διαρρηγνύονται και τα μονομερή χύνονται στις ρωγμές (υπό την επίδραση του τριχοειδούς φαινομένου). Έτσι όταν έρχονται σε επαφή δυο μονομερή (πχ. Ρητίνη –σκλυντής ή καταλύτης) στερεοποιούνται και θεραπεύουν την ρωγμή. Το βασικότερο κίνητρο είναι η παύση της διάδοσης της ρωγμής. Όμως ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι οι τάσεις στην περιοχή της ρωγμής παραμένουν και μετά την επισκευή. Καθώς η διαδικασία αυτή δεν χρειάζεται εξωτερική παρέμβαση, χαρακτηρίζεται ως αυτόνομη.

Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται μικροκάψουλες υπάρχει επιπλέον το μειονέκτημα της αβεβαιότητας στην επίτευξη πλήρους ή πολλαπλής επούλωση καθώς είναι περιορισμένη η ποσότητα παραγόντων επούλωσης και δεν είναι γνωστό το πότε οι παράγοντες αυτοί θα καταναλωθούν εντελώς. Η πολλαπλή επούλωση είναι εφικτή μόνο όταν υπάρχει περίσσεια παράγοντα επούλωσης μετά την πρώτη επούλωση. Έτσι, για την επίτευξη πολλαπλών επούλώσεων σε σύνθετα υλικά, αναπτύχθηκε ένα άλλο είδος «δεξαμενής» που μπορεί να είναι σε θέση να παραδώσει μεγαλύτερη ποσότητα υγρού παράγοντα επούλωσης. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει την χρήση κούφιας ινών (συνήθως γυαλιού) αλλά μέχρι

στιγμής δεν έχουν πραγματοποιηθεί πειράματα με μεγάλη επιτυχία, κυρίως λόγω του ότι δεν ήταν δυνατό να διαρρεύσει η ρητίνη εντός της ρωγμής λόγω του υψηλού ιξώδους. Στις εικόνες 2.18-2.19 παρουσιάζεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας των δυο αυτών μεθόδων.



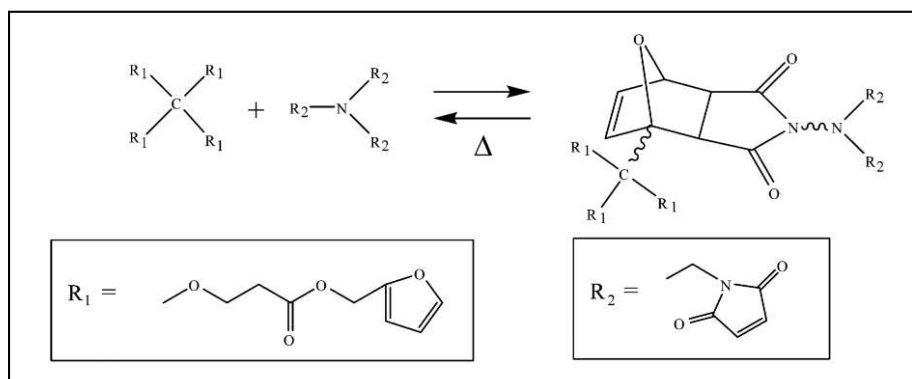
**Εικόνα 2.18.** Σχηματική περιγραφή του μηχανισμού επούλωσης με μικροκάψουλες



**Εικόνα 2.19.** Σχηματική περιγραφή του μηχανισμού επούλωσης με κούφιες ίνες

Η άλλη βασική κατηγορία περιλαμβάνει πολυμερή με θερμική ικανότητα Αυτο-ίασης. Η γενική ιδέα στην περίπτωση της θερμικής αυτό-ίασης πολυμερών αφορά μια νέα κλάση πολυμερών, με διασταυρούμενους δεσμούς, ικανά να επουλώνουν εσωτερικές ρωγμές μέσω θερμό-αναστρέψιμων ομοιοπολικών δεσμών. Οι μηχανικές ιδιότητες αυτού του τύπου πολυμερών είναι συγκρίσιμες με αυτές των εποξικών ρητινών και των άλλων θερμοπλαστικών ρητινών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σύνθετων υλικών. Η χρήση πολυμερών με αυτήν την ιδιότητα εξαλείφει την ανάγκη για ενσωμάτωση μικροκάψουλων ή κούφιων ινών, αν και πλέον η θερμότητα είναι απαραίτητη για την επούλωση.

Η διερεύνηση μιας θερμο-αναστρέψιμης χημικής αντίδρασης όπως η αντίδραση Diels–Alder (DA), με σκοπό την αυτό-ίαση σε πολυμερή πρωτοαναφέρθηκε από τον Chen. Μαζί με την ερευνητική του ομάδα περιέγραψαν ένα θερμο-αναστρέψιμο υλικό ικανό να επουλώνει ρωγμές επαναλαμβανόμενα. Η πρώτη υλοποίηση ενός υψηλά διασταυρούμενου και διαφανούς πολυμερούς έγινε με τον τρόπο που περιγράφεται στην εικόνα 2.20, μέσω της αντίδρασης DA και της κυκλικής προσθήκης Φουρανίου και τμημάτων Μηλεϊμίδιου, ενώ η θερμική αντιστρεψιμότητα των χημικών δεσμών επιτυγχάνεται μέσω της αντίστροφης αντίδρασης DA [24].



**Εικόνα 2.20.** Σχηματική αναπαράσταση της χημικής αντίδρασης η οποία προτάθηκε από τον Chen

## Κεφάλαιο 3

---

### Στοιχεία από την θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού

#### 3.1 Εισαγωγή

Μία από τις πιο στοιχειώδεις αρχές στον μαγνητισμό είναι η έννοια του μαγνητικού πεδίου. Όταν παράγεται ένα τέτοιο πεδίο σε έναν συγκεκριμένο χώρο, είναι προφανές ότι αλλάζει η ενέργεια στον χώρο αυτό, με αποτέλεσμα να παράγεται μία δύναμη. Η δύναμη αυτή εντοπίζεται στην επιτάχυνση ενός κινούμενου ηλεκτρικού φορτίου μέσα στο πεδίο, ή πάνω σε έναν ρευματοφόρο αγωγό, ή από τη ροπή πάνω σε ένα μαγνητικό δίπολο (π.χ. ραβδόμορφος μαγνήτης, βελόνα πυξίδας), ή ακόμα και με τον επαναπροσανατολισμό των spin των ηλεκτρονίων σε συγκεκριμένα είδη ατόμων.

Το μαγνητικό πεδίο παράγεται σε κάθε περίπτωση που υπάρχει κίνηση ηλεκτρικού φορτίου. Η κίνηση αυτή μπορεί να οφείλεται στο ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό, όπως ανακαλύφθηκε από τον Oersted το 1819. Ακόμα το μαγνητικό πεδίο παράγεται από έναν μόνιμο μαγνήτη. Στην περίπτωση αυτή το πεδίο δεν δημιουργείται από συμβατικό ηλεκτρικό ρεύμα, αλλά από τις τροχιακές κινήσεις και τα spin των ηλεκτρονίων, τα καλούμενα και Αμπεριανά ρεύματα, μέσα στον μόνιμο μαγνήτη. Οι κινήσεις αυτές των ηλεκτρονίων έχουν ως αποτέλεσμα την μαγνήτιση στο εσωτερικό του υλικού αυτού και τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου έξω απ' αυτό. Το πεδίο αυτό ασκεί δυνάμεις τόσο στους ρευματοφόρους αγωγούς, όσο και στους άλλους μόνιμους μαγνήτες [25].

Η μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$  είναι το *ampere / m*. Το *ampere / m* εκφράζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από ένα απείρως μακρύ σωληνοειδές που αποτελείται από  $n$  σπείρες ανά μέτρο και που διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $1 / n$  amperes.

Επειδή το σωληνοειδές απείρου μήκους έχει μόνο θεωρητική υπόσταση, ένας πιο πρακτικός τρόπος να οριστεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσω ενός ρευματοφόρου αγωγού πεπερασμένου μήκους. Συγκεκριμένα, όταν ρεύμα  $1 \text{ A}$  διαπερνά ευθύγραμμο αγωγό μήκους  $1 \text{ m}$ , τότε παράγεται μαγνητικό πεδίο με μορφή ομόκεντρων κύκλων κάθετων στον ρευματοφόρο αγωγό, έντασης  $1/4\pi \text{ amperes / m}$  σε ακτινική απόσταση  $1 \text{ m}$ .



### 3.2 Οι εξισώσεις του Maxwell

Οι τέσσερις εξισώσεις του Maxwell περιγράφουν πολύ περιεκτικά τη θεωρία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (μονάδες S.I.) και είναι οι ακόλουθες:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.4)$$

Στις παραπάνω σχέσεις  $\mathbf{E}$  και  $\mathbf{B}$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και η πυκνότητα μαγνητικής ροής αντίστοιχα, όπου η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι η απόκριση του μέσου στο οποίο εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο έντασης  $\mathbf{H}$ . Ακόμα  $\rho$  είναι η πυκνότητα φορτίου,  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού και  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Στην εξίσωση (3.4) ως  $\mathbf{J}$  ορίζεται η συνολική πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος.

Από την εξίσωση (3.1) προκύπτει ότι η πηγή του ηλεκτρικού πεδίου είναι τα ηλεκτρικά φορτία. Η εξίσωση (3.3) δείχνει ότι δεν υπάρχουν ισοδύναμα μαγνητικά φορτία με τα ηλεκτρικά. Από την εξίσωση (3.2) φαίνεται ότι όταν ένα μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται χρονικά, τότε συνοδεύεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο έντασης  $\mathbf{E}$ . Η εξίσωση (3.4) είναι το συμπλήρωμα της δεύτερης. Δηλαδή ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο συνεπάγεται την ταυτόχρονη ύπαρξη μαγνητικού πεδίου.

Ο Ampere ήταν ο πρώτος που κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το μαγνητικό πεδίο παράγεται από κινούμενα ηλεκτρικά φορτία. Μέχρι τότε τα μαγνητικά πεδία θεωρούνταν ότι παράγονταν μόνο από μόνιμους μαγνήτες. Σύμφωνα με τον Ampere το μαγνητικό πεδίο εξαρτάται από το σχήμα του ηλεκτρικού κυκλώματος που το προκαλεί και από την ένταση του ρεύματος. Αν υποθέσουμε ότι το κάθε κύκλωμα αποτελείται από άπειρο αριθμό στοιχειωδών ρευμάτων, το καθένα από τα οποία συμβάλλει στη δημιουργία του πεδίου, αθροίζοντάς τα ή ολοκληρώνοντάς τα ο Ampere κατέληξε στο εξής συμπέρασμα:

$$N_i = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (3.5)$$

Όπου  $N$  είναι το πλήθος των ρευματοφόρων αγωγών, καθένας από τους οποίους διαρρέεται από ρεύμα  $i$ . Οι αγωγοί αυτοί δημιουργούν το πεδίο έντασης  $\mathbf{H}$ . Το  $l$  είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα. Συνεπώς το ολικό ρεύμα  $N_i$  ισούται με το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του  $\mathbf{H}$  γύρω από κλειστό δρόμο που περιέχει το ρεύμα.

Όταν παράγεται ένα μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{H}$  (με τους τρόπους που περιγράφηκαν παραπάνω) μέσα σε ένα μέσο, τότε η απόκριση αυτού είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής  $\mathbf{B}$ . Κάθε μέσο έχει τη μαγνητική του πυκνότητα μαγνητικής ροής  $\mathbf{B}$ , όταν εκτεθεί σε πεδίο  $\mathbf{H}$  και τα δύο αυτά μεγέθη ( $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$ ) συνδέονται μεταξύ τους με μία ιδιότητα του υλικού, που λέγεται διαπερατότητα. Το κενό θεωρείται ότι είναι και αυτό μέσο, αφού για πεδίο έντασης  $\mathbf{H}$  παράγει πυκνότητα μαγνητικής ροής  $\mathbf{B}$ .

Όταν υπάρχει ένα μαγνητικό πεδίο στο κενό, τότε υπάρχει και μία μαγνητική ροή  $\Phi$ . Η μαγνητική ροή μετριέται σε webers. Ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής μπορεί να μετρηθεί, γιατί όταν αυτή μεταβάλλεται δημιουργείται μία Η.Ε.Δ. σε κλειστό κύκλωμα, μέσα από το οποίο διέρχεται η ροή. Το weber

είναι το ποσό της μαγνητικής ροής το οποίο όταν μειωθεί ομοιόμορφα στο μηδέν, μέσα σε χρόνο ενός δευτερολέπτου, παράγει μία Η.Ε.Δ. 1 V σε πηνίο μίας σπείρας μέσα από το οποίο διέρχεται η ροή.

Μικρά μαγνητικά σωματίδια, όπως ρινίσματα σιδήρου, προσανατολίζονται κατά μήκος της διεύθυνσης της μαγνητικής ροής. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η μαγνητική ροή δημιουργείται από την παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου μέσα σε ένα μέσο. Το ποσό μαγνητικής ροής που παράγεται για ορισμένο πεδίο έντασης  $H$ , εξαρτάται από το μέσο και διαφέρει από το ένα στο άλλο.

### 3.3 Η πυκνότητα μαγνητικής ροής $B$

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  μετριέται σε weber / m<sup>2</sup>. Δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$\Phi = \frac{B}{A} \quad (3.6)$$

Όπου  $A$  είναι η επιφάνεια που διαρρέεται από τη μαγνητική ροή  $\Phi$ . Ωστόσο η πυκνότητα μαγνητικής ροής περιγράφεται καλύτερα από τη δύναμη που παράγεται πάνω σε ένα κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο το οποίο προκαλεί ηλεκτρικό ρεύμα. Έτσι η πυκνότητα μαγνητικής ροής 1 Tesla παράγει μία δύναμη 1 N/m σε έναν αγωγό που διαρρέεται από 1 A κάθετο στη διεύθυνση της επαγωγής. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής δεν εξαρτάται μόνο από την ένταση του πεδίου  $H$  αλλά και από τη μαγνήτιση του μέσου  $M$ .

Η μαγνητική επαγωγή στο κενό συνδέεται γραμμικά με την ένταση του πεδίου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (3.7)$$

όπου  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$  είναι η διαπερατότητα του κενού που αποτελεί παγκόσμια σταθερά. Εντούτοις στα άλλα μέσα το  $B$  δεν είναι γραμμική συνάρτηση του  $H$  και κυρίως το  $B$  δεν είναι μόνο συνάρτηση του  $H$ . Η μέτρηση του βρόχου υστέρησης ( $B-H$ ) για τα υλικά αυτά δείχνει την εξάρτηση των δύο μεγεθών μεταξύ τους. Για τα υλικά αυτά ισχύει η σχέση:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.8)$$

όπου το  $\mu$  είναι μια ιδιότητα του υλικού του, που ονομάζεται μαγνητική διαπερατότητα. Η διαπερατότητα είναι ένα μέτρο του πόσο εύκολο μπορεί να επιτευχθεί η μαγνητική ροή σε ένα υλικό και είναι ίση με το γινόμενο του  $\mu_r$  (σχετική διαπερατότητα του υλικού) και του  $\mu_0$  (διαπερατότητα του κενού). Η σχετική διαπερατότητα του κενού είναι 1.

### 3.4 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

Όταν μεταβάλλεται η διερχόμενη μαγνητική ροή μέσα από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, παράγεται μία ηλεκτρεγερτική δύναμη (Η.Ε.Δ). Το φαινόμενο αυτό καλείται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και μελετήθηκε αρχικά από της Faraday και Lenz. Από της δύο της ερευνητές προέκυψαν οι παρακάτω δύο νόμοι που

διέπουν την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Σύμφωνα με τον κανόνα του Faraday η τάση που επάγεται σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα είναι ανάλογη της τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται μέσα απ' αυτό. Από τον κανόνα του Lenz προκύπτει ότι η επαγόμενη τάση αντιτίθεται με την φορά της στη μεταβολή της ροής που τη δημιουργήσε. Από το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μπορεί να προσδιορισθεί καλύτερα η μαγνητική ροή  $\Phi$ . Συγκεκριμένα, η μονάδα μέτρησης της ροής, δηλ. το weber, έχει επιλεγεί έτσι ώστε ο ρυθμός μεταβολής της ροής μέσα σε ένα κύκλωμα να ισούται με την επαγόμενη τάση σε Volts. Δηλαδή:

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.9)$$

Όπου  $\Phi$  είναι η μαγνητική ροή που διαπερνά ένα σωληνοειδές  $N$  σπειρών. Από τη σχέση που συνδέει την πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  με τη ροή  $\Phi$ , προκύπτει ότι:

$$V = -NA \frac{dB}{dt} \quad (3.10)$$

Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό αποτέλεσμα το οποίο μας λέει ότι ένα χρονικά εξαρτώμενο πεδίο, παράγει μία τάση και κατά συνέπεια ηλεκτρικό ρεύμα, όταν αυτή η τάση τροφοδοτήσει ένα ηλεκτρικό φορτίο.

Το ρεύμα που διαρρέει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα προκαλείται από ένα ηλεκτρικό πεδίο και παράγει ένα μαγνητικό πεδίο. Μία κυκλική σπείρα από έναν αγωγό είναι το πιο απλό ηλεκτρικό κύκλωμα που μπορεί να παραγάγει μαγνητικό πεδίο. Αυτή η ρευματοφόρος σπείρα μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι η πιο στοιχειώδης μονάδα του μαγνητισμού.

Αν η ρευματοφόρος σπείρα εκτείνεται σε επιφάνεια  $A$  και διαρρέεται από ρεύμα  $i$ , τότε η μαγνητική ροπή του διπόλου είναι  $m=iA$ . Η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροπής είναι  $\text{Amp}\cdot\text{m}^2$ . Η ροπή σε ένα μαγνητικό δίπολο  $m$  που βρίσκεται σε πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  είναι:

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B} \quad (3.11)$$

και στο κενό:

$$\vec{\tau} = \mu_0 \vec{m} \times \vec{H} \quad (3.12)$$

Δηλαδή η πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  προσπαθεί να επαναπροσανατολίσει το δίπολο έτσι ώστε η ροπή να είναι παράλληλη προς σ' αυτή. Η ενέργεια του διπόλου παρουσία πεδίου με επαγωγή  $B$  είναι:

$$\vec{E} = -\vec{m}\vec{B} \quad (3.13)$$

και στο κενό:

$$\vec{E} = -\mu_0 \vec{m} \cdot \vec{H} \quad (3.14)$$

### 3.5 Ορισμός της μαγνήτισης $\vec{M}$ και σχέση ανάμεσα στο $\vec{H}$ , $\vec{M}$ και $\vec{B}$

Η μαγνήτιση  $\vec{M}$  ορίζεται ως η μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου του υλικού. Δηλαδή:

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} \quad (3.15)$$

Η μαγνητική ροπή συνδέεται με τη μαγνητική ροή με τη σχέση:

$$\vec{m} = \frac{\Phi \cdot l}{\mu_0} \quad (3.16)$$

όπου  $l$  είναι το μήκος του μαγνητικού δίπολου. Από τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει η σχέση ανάμεσα στο  $\vec{M}$  και στο  $\vec{B}$ . Αν  $V=Al$  τότε:

$$\vec{M} = \frac{\vec{\Phi}}{\mu_0 A} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (3.17)$$

Από την παραπάνω σχέση βλέπουμε ότι η μαγνήτιση  $\vec{M}$  και η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $\vec{H}$  συνεισφέρουν στην πυκνότητα μαγνητικής ροής με παρόμοιο τρόπο. Αν υπάρχουν ταυτόχρονα μαγνήτιση και μαγνητικό πεδίο, τότε η συνεισφορά τους μπορεί να αθροιστεί. Συνεπώς η μαγνητική επαγωγή δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (3.18)$$

όπου το  $B$  μετριέται σε Tesla και τα  $H$ ,  $M$  σε ampere/m. Η παραπάνω εξίσωση ισχύει υπό οποιεσδήποτε συνθήκες. Το μαγνητικό πεδίο  $\vec{H}$  παράγεται από ηλεκτρικά ρεύματα που βρίσκονται έξω από το υλικό, όπως από σωληνοειδές ή ηλεκτρομαγνήτη, και από μόνιμο μαγνήτη. Η μαγνήτιση είναι το αποτέλεσμα του spin ή της τροχιακής περιστροφής των ηλεκτρονίων του υλικού. Αν το υλικό έχει  $n$  στοιχειώδη ατομικά μαγνητικά δίπολα στη μονάδα του όγκου, το καθένα με μαγνητική ροπή  $m$ , τότε η μαγνητική ροπή στη μονάδα του όγκου του υλικού όταν όλα τα δίπολα είναι ευθυγραμμισμένα, καλείται μαγνήτιση κορεσμού  $M_0$ .

Αξίζει να σημειωθεί η διαφορά ανάμεσα στην τεχνική μαγνήτιση κορεσμού  $M_s$  και στην ολική μαγνήτιση κορεσμού  $M_0$ . Η τεχνική μαγνήτιση ενός υλικού επιτυγχάνεται όταν αυτό μετατρέπεται εξ' ολοκλήρου σε μία μόνο μαγνητική περιοχή. Ωστόσο με την εφαρμογή υψηλότερων εξωτερικών πεδίων η μαγνήτιση αυξάνεται ακόμα περισσότερο πέρα από την τεχνητή μαγνήτιση, με τα μαγνητικά δίπολα να ευθυγραμμίζονται ακόμα περισσότερο στην μία υπάρχουσα μαγνητική περιοχή.

### 3.6 Ορισμός της διαπερατότητας και της επιδεκτικότητας

Τα μαγνητικά υλικά κατατάσσονται στους διάφορους τύπους μαγνητικών υλικών με βάση τη διαπερατότητα και την επιδεκτικότητά τους. Για τον λόγο αυτό πρέπει να ορίσουμε τις δύο αυτές ιδιότητες

των υλικών πριν προχωρήσουμε στις διαφορές που έχουν τα μαγνητικά υλικά μεταξύ τους. Η διαπερατότητα  $\mu$  ορίζεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} \quad (3.19)$$

Όμοια η επιδεκτικότητα  $\chi$  ορίζεται από τη σχέση:

$$\chi = \frac{\vec{M}}{\vec{H}} \quad (3.20)$$

Από τη στιγμή που το  $B$  και το  $M$  μπορεί να είναι γραμμικά ή όχι μεταξύ τους, ανάλογα με τον τύπο του υλικού του μέσου, συνεπάγεται ότι η διαπερατότητα και η επιδεκτικότητα μπορεί να είναι ή να μην είναι σταθερές ανάλογα με την περίπτωση. Μερικές φορές αντί της διαπερατότητας χρησιμοποιείται ο όρος της σχετικής διαπερατότητας. Η σχετική διαπερατότητα σχετίζεται άμεσα με την επιδεκτικότητα και η παρακάτω εξίσωση ισχύει πάντα:

$$\mu_r = \chi + 1 \quad (3.21)$$

### 3.7 Ταξινόμηση μαγνητικών υλικών

Τα διάφορα μαγνητικά υλικά ταξινομούνται με βάση την επιδεκτικότητά τους. Η πρώτη κατηγορία υλικών έχει μικρό και αρνητικό  $\chi \sim -10^{-5}$ . Τα υλικά αυτά καλούνται **διαμαγνητικά** και η μαγνητική τους ροπή εξαιτίας της τροχιακής κίνησης τείνει να αντιστεθεί στο εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι ο χαλκός, ο άργυρος, ο χρυσός, το βισμούθιο και το βηρύλλιο. Μία υποκατηγορία διαμαγνητικών υλικών είναι οι **υπεραγωγοί**, για τους οποίους το  $\chi \sim -1$ .

Μία δεύτερη κατηγορία υλικών, για τα οποία το  $\chi$  είναι μικρό αλλά θετικό με τιμές που κυμαίνονται  $10^{-5} < \chi < 10^{-3}$  είναι οι **παραμαγνήτες**. Η μαγνήτιση των υλικών αυτών είναι ασθενής και προσανατολίζεται προς την ίδια διεύθυνση με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι το αλουμίνιο, ο λευκόχρυσος και το μαγγάνιο.

Η πιο διαδεδομένη κατηγορία μαγνητικών υλικών είναι οι **σιδηρομαγνήτες**. Η επιδεκτικότητα των υλικών αυτών είναι θετική, πολύ μεγαλύτερη από 1 και οι τιμές της κυμαίνονται  $50 < \chi < 10000$ . Παραδείγματα αυτών των υλικών είναι ο σίδηρος, το κοβάλτιο, το νικέλιο και διάφορες σπάνιες γαίες καθώς και κράματά τους.

Υπάρχουν και άλλες κατηγορίες μαγνητικών υλικών εκτός από αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Πρόκειται για τους σιδηριμαγνήτες, τους αντισιδηρομαγνήτες, τους ελιμαγνήτες και τους υπερπαραμαγνήτες. Όλες αυτές οι κατηγορίες ανακαλύφθηκαν πολύ αργότερα από τις τρεις κλασσικές κατηγορίες των μαγνητικών υλικών που αναφέρονται παραπάνω. Σύμφωνα με τις μετρήσεις επιδεκτικότητας οι σιδηριμαγνήτες ξεχωρίζουν με μεγάλη δυσκολία από τους σιδηρομαγνήτες, ενώ οι αντισιδηρομαγνήτες και οι ελιμαγνήτες συγγέονταν για πολλά χρόνια με τους παραμαγνήτες.

Σε σταθερή θερμοκρασία και για σχετικά χαμηλές τιμές έντασης πεδίου  $H$ , οι μαγνητικές επιδεκτικότητες των διαμαγνητών και των παραμαγνητών είναι σταθερές. Υπό αυτές τις συνθήκες τα υλικά καλούνται «γραμμικά», δηλαδή το  $M$  είναι ανάλογο του  $H$ . Συνεπώς ισχύει η σχέση:

$$\begin{aligned}
 \vec{M} &= \chi \cdot \vec{H} \Rightarrow \\
 \vec{B} &= \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \\
 &= \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

Είναι προφανές ότι το  $\mu_r$  είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από 1 στους παραμαγνήτες και λίγο μικρότερο από 1 στους διαμαγνήτες. Συγχρόνως το  $\chi$  είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το 0 και λίγο μικρότερο από το 0 αντίστοιχα στα υλικά αυτά. Η γραμμικότητα που προέκυψε από την παραπάνω σχέση επιτρέπει τον υπολογισμό ανάμεσα στα  $B$  και  $H$  των υλικών για μικρές εντάσεις  $H$ . Για μεγαλύτερα  $H$  η γραμμικότητα παύει να ισχύει και εμφανίζεται ακόμα και μαγνήτιση κορεσμού. Στους σιδηρομαγνήτες ούτε το  $\chi$  ούτε το  $\mu_r$  έχουν σταθερή τιμή. Τόσο η διαπερατότητα, όσο και η επιδεκτικότητα στους σιδηρομαγνήτες επηρεάζεται ισχυρά από το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο  $H$ .

### 3.8 Μαγνητικές ιδιότητες σιδηρομαγνητικών υλικών

Μακράν η πιο σημαντική κατηγορία μαγνητικών υλικών είναι οι σιδηρομαγνήτες. Η διαπίστωση αυτή προκύπτει τόσο από τη θεωρία όσο και από πρακτικές εφαρμογές. Οι εφαρμογές που έχουν τα υλικά αυτά είναι πολλαπλές και παρουσιάζονται αναλυτικά στα βιβλία των Heck [26] και Wohlfarth [27]. Στις εφαρμογές στη μηχανική, οι σιδηρομαγνήτες χρησιμοποιούνται εξαιτίας των υψηλών τιμών διαπερατότητας, οι οποίες επιτρέπουν την επίτευξη υψηλών μαγνητικών επαγωγών από μέτρια μαγνητικά πεδία  $H$ . Εξαιτίας της ιδιότητάς τους να διατηρούν την μαγνήτισή τους και να δρουν ως πηγή μαγνητικού πεδίου και φυσικά εξαιτίας της ροπής μαγνητικού δίπολου που εμφανίζουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρικούς κινητήρες. Είναι πραγματικά εκπληκτικό πως τα λίγα αυτά στοιχεία (σίδηρος, νικέλιο, κοβάλτιο) είναι τόσο ζωτικής τεχνολογικής σημασίας.

#### 3.8.1 Διαπερατότητα

Η μεγάλη σχετική διαπερατότητα είναι με διαφορά η πιο σημαντική ιδιότητα που έχουν τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά. Η διαπερατότητα των σιδηρομαγνητών δεν είναι σταθερή ως συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου όπως η αντίστοιχη των παραμαγνητών. Αντίθετα για να προσδιοριστεί η διαπερατότητα είναι απαραίτητη η μέτρηση της πυκνότητας μαγνητικής ροής  $B$  συναρτήσει της έντασης  $H$  σε ένα μεγάλο εύρος τιμών της τελευταίας, για να προκύψει η καμπύλη υστέρησης. Εξαιτίας της υψηλής διαπερατότητας αυτών των υλικών, χρησιμοποιούνται ως συμπυκνωτές της διερχόμενης μαγνητικής ροής. Οι μόνιμοι μαγνήτες (σκληρά μαγνητικά υλικά) δεν έχουν τόσο υψηλές τιμές επιδεκτικότητας. Ωστόσο έχουν μεγάλη αντίσταση απομαγνήτισης που είναι η επόμενη πιο σημαντική ιδιότητα.

### 3.8.2 Παραμένουσα μαγνήτιση

Οι σιδηρομαγνήτες μπορούν να μαγνητιστούν σχετικά μόνιμα. Με άλλα λόγια διατηρούν την μαγνήτισή τους ακόμα και όταν απομακρυνθούν από το μαγνητικό πεδίο που τα μαγνήτισε. Ίσως αυτή να είναι η πιο εμφανής ιδιότητα των σιδηρομαγνητών. Η διατήρηση της μαγνήτισης είναι το στοιχείο που διακρίνει τους περισσότερους σιδηρομαγνήτες από τους παραμαγνήτες, οι οποίοι παρά το ότι προσανατολίζουν τα μαγνητικά τους δίπολα στη διεύθυνση ενός εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$ , δεν μπορούν να διατηρήσουν τη μαγνήτισή τους αφού απομακρυνθεί το πεδίο.

Έτσι λοιπόν όταν το εξωτερικό πεδίο μηδενιστεί, το σιδηρομαγνητικό υλικό παρουσιάζει μία παραμένουσα μαγνητική πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B_r$  που οφείλεται στην παραμένουσα μαγνήτιση  $M_r$ . Τα δύο μεγέθη συνδέονται με τη σχέση:

$$B_r = \mu_0 M_r \quad (3.23)$$

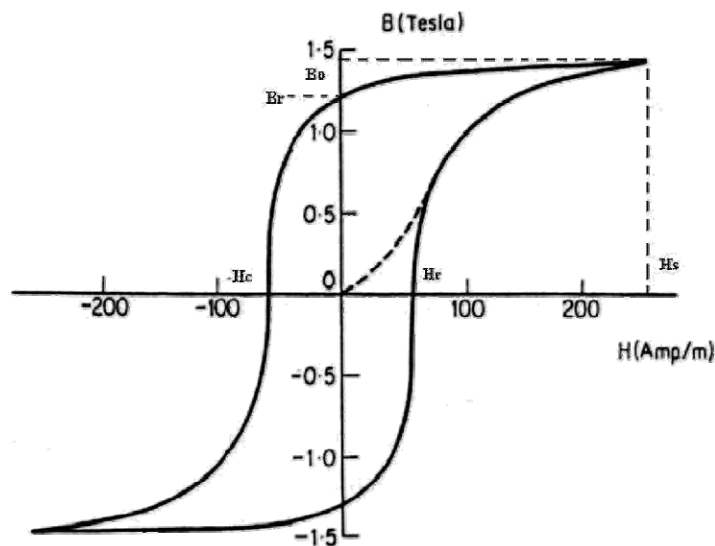
Ιδιαίτερη σημασία στις ιδιότητες έχει η παραμένουσα μαγνήτιση του υλικού, όταν κατά τη διάρκεια επιβολής του εξωτερικού πεδίου έχει ήδη επέλθει μαγνήτιση κορεσμού.

### 3.8.3 Υστέρηση

Ο πιο περιεκτικός και απλός τρόπος για να απεικονίσουμε τις μαγνητικές ιδιότητες των σιδηρομαγνητών, είναι με γραφική αποτύπωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής  $B$  για διάφορα μαγνητικά πεδία  $H$ . Εναλλακτικά, χρησιμοποιούνται διαγράμματα της μαγνήτισης  $M$  συναρτήσει του  $H$ , τα οποία παρέχουν ουσιαστικά τις ίδιες πληροφορίες, αφού  $B = \mu_0(H + M)$ . Η υστέρηση στον σίδηρο παρατηρήθηκε από τον Warburg [28]. Ο όρος υστέρηση, που σημαίνει αργοπορία υιοθετήθηκε από τον Ewing [29], ο οποίος ήταν ο πρώτος που την μελέτησε συστηματικά. Ένα τυπικό γράφημα βρόχου υστέρησης φαίνεται στην εικόνα 3.1.

Στο γράφημα αυτό φαίνονται όλες η μαγνητικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν ένα μαγνητικό υλικό. Η μαγνήτιση κορεσμού  $M_0$  ή η αντίστοιχη πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B_0$  ανάλογα με το βρόχο που χρησιμοποιείται, είναι το μέγιστο σημείο στον άξονα των  $M$  ή των  $B$  αντίστοιχα. Το πλάτος του βρόχου κατά μήκος του άξονα  $H$  είναι διπλάσιο της τιμής του συνεκτικού πεδίου  $H_0$ . Το σημείο τομής του βρόχου με τον άξονα των  $B$  είναι η παραμένουσα μαγνήτιση  $B_r$ .

Από τον βρόχο υστέρησης φαίνεται ότι ο σιδηρομαγνήτης στην αρχική του κατάσταση δεν είναι μαγνητισμένος. Η εφαρμογή ενός πεδίου  $H$  προκαλεί τη δημιουργία μαγνητικής επαγωγής προς την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Αν αυξηθεί η ένταση  $H$  τότε η μαγνήτιση φθάνει την τιμή κορεσμού  $M_0$ . Η τιμή αυτή εξαρτάται από το μέγεθος των ατομικών μαγνητικών ροπών  $m$  και των αριθμό των ατόμων στην μονάδα του όγκου  $n$ . Συνεπώς ισχύει:  $M_0 = nm$ . Δηλαδή η μαγνήτιση κορεσμού εξαρτάται μόνο από το υλικό που είναι κατασκευασμένο το δοκίμιο. Αν το πεδίο μειωθεί η παραμένουσα μαγνήτιση δεν αφήνει το  $B$  να μειωθεί. Αν εφαρμοσθεί πεδίο αντίθετης έντασης, τότε το υλικό αρχίζει να μαγνητίζεται αντίθετα, μέχρι την απομαγνήτισή του και παραπέρα μέχρι την αντίστοιχη τιμή μαγνήτισης κορεσμού.



**Εικόνα 3.1.** Τυπική καμπύλη του βρόγχου υστέρησης (B-H)

#### 3.8.4 Συνεκτικό πεδίο

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής όπως προαναφέρθηκε μπορεί να μειωθεί στο μηδέν εφαρμόζοντας πεδίο αντίθετης διεύθυνσης και έντασης  $H_0$ . Το πεδίο αυτό ονομάζεται συνεκτικό πεδίο. Είναι άμεσα εξαρτώμενο από την κατεργασία και τη μορφοποίηση που έχει υποστεί το υλικό. Όπως και με την παραμένουσα μαγνήτιση, ιδιαίτερη σημασία στις ιδιότητες του υλικού έχει το συνεκτικό πεδίο που απομαγνητίζει το υλικό από τη μαγνήτιση κορεσμού. Το συνεκτικό πεδίο μπορεί να μετρηθεί και στο σημείο όπου μηδενίζεται η μαγνήτιση  $M$  αντί της μαγνητικής επαγωγής  $B$ . Στην περίπτωση αυτή το συνεκτικό πεδίο ορίζεται συμβολίζεται  $H_{ci}$ .

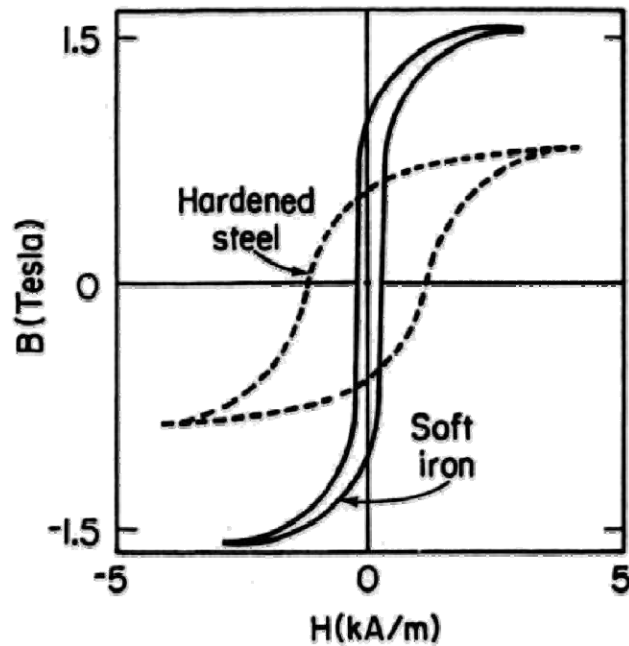
Με βάση το συνεκτικό πεδίο, μπορούμε να χωρίσουμε τα σιδηρομαγνητικά υλικά στα σκληρά και στα μαλακά μαγνητικά. Η ιδιότητα αυτή αλλάζει για το ίδιο υλικό με διαφορετική κατεργασία. Έχει παρατηρηθεί λοιπόν ότι υλικά από σίδηρο ή χάλυβα με μεγάλη σκληρότητα εμφανίζουν υψηλό συνεκτικό πεδίο και σχετικά χαμηλή σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$ , δηλαδή είναι σκληρά μαγνητικά υλικά. Αντίθετα τα μαλακά υλικά εμφανίζουν μικρό συνεκτικό πεδίο και σχετικά μεγάλη σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$ , και ονομάζονται μαλακά μαγνητικά υλικά όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2.

#### 3.8.5 Θερμοκρασία Curie

Όλοι οι σιδηρομαγνήτες σε κάποια υψηλή τιμή θερμοκρασίας αποκτούν παραμαγνητικές ιδιότητες. Η θερμοκρασία αλλαγής από τη σιδηρομαγνητική στην παραμαγνητική συμπεριφορά, ονομάζεται θερμοκρασία Curie. Στη θερμοκρασία αυτή η διαπερατότητα των υλικών πέφτει απότομα με αποτέλεσμα να μηδενίζονται η παραμένουσα μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο. Ο λόγος για την αλλαγή της



συμπεριφοράς των σιδηρομαγνητικών υλικών οφείλεται στον τυχαίο προσανατολισμό των μαγνητικών περιοχών τους. Οι μαγνητικές περιοχές αναπτύσσονται εκτενώς παρακάτω.



**Εικόνα 3.2.** Μεταβολή του βρόχου υστέρησης από τον σίδηρο στον χάλυβα (που είναι πιο σκληρό μαγνητικό υλικό) που προκαλείται από την προσθήκη του άνθρακα ή οποιουδήποτε άλλου μη μαγνητικού υλικού. Το ίδιο αποτέλεσμα επιφέρουν και οι ψυχρές μηχανουργικές κατεργασίες.

### 3.9 Μαγνητικές περιοχές

Μακροσκοπικά η μαγνήτιση είναι ένα φαινόμενο που οφείλεται στο εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο. Η θεωρία των μαγνητικών περιοχών εξηγεί πως μεταβάλλεται η μαγνήτιση μικροσκοπικά μέσα στο μαγνητικό υλικό. Κατά την απομαγνήτιση για παράδειγμα, χωρίς τη θεωρία των μαγνητικών περιοχών, δεν μπορούμε να απαντήσουμε στο ερώτημα αν η μαγνήτιση είναι παντού μηδέν ή αν υπάρχουν τοπικά μεγάλες τιμές μαγνητικών διπόλων οι οποίες αθροιζόμενες κάνουν μηδέν.

Αφού τα άτομα είναι οι στοιχειώδεις δομικές μονάδες των μαγνητικών υλικών, είναι φυσικό να υποθέσουμε ότι όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό μαγνητιστεί υπάρχει διπολική μαγνητική ροπή κατά άτομο. Υπάρχουν δύο πιθανές αιτίες για την ατομική μαγνητική ροπή των σιδηρομαγνητών. Κατά την πρώτη, το υλικό έχει από πριν μικρές μαγνητικές διπολικές ροπές τυχαία προσανατολισμένες εκτός πεδίου, που προσανατολίζονται υπό την επίδραση ενός πεδίου. Η θεωρία αυτή προτάθηκε από τον Weber [30]. Κατά τη δεύτερη θεωρία, εκτός μαγνητικού πεδίου δεν υπάρχουν καθόλου μαγνητικές διπολικές ροπές, οι οποίες δημιουργούνται με την επίδραση ενός πεδίου. Τη θεωρία αυτή διατύπωσε ο Poisson [31].

Η ύπαρξη της μαγνήτισης κορεσμού και της παραμένουσας μαγνήτισης, ενισχύουν την ύπαρξη της πρώτης θεωρίας. Μάλιστα έχει αποδειχθεί ότι στους σιδηρομαγνητές υπάρχουν μόνιμα μαγνητικά δίπολα

σε ατομική κλίμακα, των οποίων η παρουσία δεν εξαρτάται από την παρουσία εξωτερικού πεδίου. Η ύπαρξη των μαγνητικών ατομικών διπόλων ισχύει και στους παραμαγνήτες.

Ένα από τα προβλήματα στον μαγνητισμό που χρειαζόταν απάντηση, ήταν οι πολύ μεγάλες διαπερατότητες και επιδεκτικότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών. Χωρίς πεδίο η μαγνήτισή τους είναι ελάχιστη, ενώ με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου γίνονται μαγνητικά δίπολα και αποκτούν μαγνήτιση. Η μαγνήτισή τους όμως αυτή είναι σε τάξη μεγέθους πολύ μεγαλύτερη από την ένταση του εξωτερικού πεδίου που τη δημιουργεί.

Υπάρχουν δύο πιθανές εξηγήσεις για το φαινόμενο αυτό. Μπορεί οι ατομικές μαγνητικές ροπές να είναι προσανατολισμένες τυχαία στην ατομική κλίμακα και το πεδίο βαθμιαία τις προσανατολίζει, όπως στην περίπτωση των παραμαγνητών. Εναλλακτικά, οι μαγνητικές ροπές είναι ήδη προσανατολισμένες σε μικροσκοπική κλίμακα, αλλά σε μεγαλύτερη κλίμακα οι μαγνήτισεις των επιμέρους προσανατολισμένων περιοχών, γνωστών ως μαγνητικών περιοχών, είναι τυχαία προσανατολισμένες από τη μία περιοχή στην άλλη.

Οι ιδιότητες των σιδηρομαγνητών μπορούν να εξηγηθούν αν θεωρήσουμε υπαρκτή τη μαγνητική τάξη σε μεγαλύτερη κλίμακα μέσα στο στερεό, με τις περιοχές που περιέχουν τις μαγνητικές διπολικές ροπές να είναι τυχαία προσανατολισμένες, όταν δεν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Η μαγνήτιση είναι τότε η διαδικασία κατά την οποία αποκτούν τάξη οι περιοχές αυτές, έτσι ώστε οι επιμέρους μαγνήτισεις τους να προσανατολίζονται παράλληλα μεταξύ τους. Τους παραμαγνήτες, που και αυτοί έχουν μόνιμα ατομικά μαγνητικά δίπολα, μπορούμε να τους ξεχωρίσουμε από τους σιδηρομαγνήτες στο ότι τα δίπολά τους δεν παρουσιάζουν την τάξη αυτή στην μικροσκοπική κλίμακα των μαγνητικών περιοχών, όπως στους σιδηρομαγνήτες. Για την ακρίβεια τα ατομικά μαγνητικά δίπολα των παραμαγνητών είναι τυχαία προσανατολισμένα απουσία εξωτερικού πεδίου εξαιτίας της θερμικής ενέργειας.

Σύμφωνα με τη θεωρία που προτάθηκε από τον Weiss [32,33] οι σιδηρομαγνήτες έχουν μαγνητικές περιοχές. Σε κάθε μία από τις περιοχές αυτές, τα μαγνητικά δίπολα (πλήθους  $10^{12}$  ως  $10^{15}$ ) είναι προσανατολισμένα παράλληλα, έτσι ώστε η μαγνήτιση μέσα σ' αυτήν να φτάνει μέχρι κορεσμό. Ωστόσο η διεύθυνση προσανατολισμού διαφέρει από περιοχή σε περιοχή με τυχαίο τρόπο, αν και τα δίπολα επιλέγουν να προσανατολιστούν σε διευθύνσεις κύριων κρυσταλλογραφικών αξόνων, όταν δεν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Τα άμεσα συμπεράσματα αυτής της θεωρίας είναι:

- Τα ατομικά μαγνητικά δίπολα υπάρχουν και δεν δημιουργούνται από το πεδίο,
- Τα δίπολα είναι μικροσκοπικώς παραλληλισμένα ακόμα και όταν το υλικό δεν έχει μαγνήτιση,
- Οι μαγνητικές περιοχές είναι αυτές που έχουν τυχαίες διευθύνσεις, όταν το υλικό δεν έχει μαγνήτιση,
- Κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης επαναπροσανατολίζονται οι μαγνητικές περιοχές, έτσι ώστε είτε περισσότερες μαγνητικές περιοχές προσανατολίζονται προς το μαγνητικό πεδίο, είτε ο χώρος των μαγνητικών περιοχών που είναι προσανατολισμένες προς το πεδίο είναι μεγαλύτερος από τον χώρο των περιοχών που αντιτίθενται στο πεδίο.

Για να μπορέσει ο Weiss να εξηγήσει την τάξη των μαγνητικών διπόλων μέσα στις μαγνητικές περιοχές, εφάρμοσε τη στατιστική θερμοδυναμική θεωρία των Boltzmann και Langevin στα μαγνητικά υλικά. Μερικά χρόνια νωρίτερα ο Langevin [34] είχε αναπτύξει μία θεωρία παραμαγνητισμού βασισμένη στη

στατιστική του Boltzmann. Ο Weiss χρησιμοποίησε το μοντέλο του Langevin, προσθέτοντας έναν ακόμα όρο, το λεγόμενο μέσο πεδίο Weiss. Το μέσο πεδίο Weiss είναι μία ατομική αλληλεπίδραση, η οποία ωθεί τα γειτονικά ατομικά μαγνητικά δίπολα να προσανατολιστούν παράλληλα, γιατί μ' αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιούν την ενέργειά τους. Στην αρχική θεωρία του Weiss, το μέσο πεδίο είναι ανάλογο της μαγνήτισης  $M$ , έτσι ώστε να ισχύει:

$$H_e = \alpha \cdot M \quad (3.24)$$

όπου  $\alpha$  είναι η σταθερά του μέσου πεδίου. Η σχέση αυτή είναι ισοδύναμη με την υπόθεση ότι κάθε ατομική διπολική ροπή αλληλεπιδρά με ακριβώς τον ίδιο τρόπο με κάθε άλλη ατομική διπολική ροπή μέσα στο στερεό. Η υπόθεση αυτή αποδείχθηκε ότι είναι βάσιμη στον παραμαγνητισμό. Ο λόγος είναι ότι εξαιτίας της ομογενούς κατανομής των διευθύνσεων των ατομικών διπόλων, η τοπική τιμή της μαγνήτισης που λαμβάνεται από έναν μικρό χώρο του υλικού, ο οποίος περικυκλώνει ένα ατομικό μαγνητικό δίπολο, είναι ίσος με την ολική μαγνήτιση.

Αντίθετα στον σιδηρομαγνητισμό η μαγνήτιση είναι τοπικά ανομοιογενής σε μία κλίμακα μεγαλύτερη από την κλίμακα των μαγνητικών περιοχών, εξαιτίας της μεταβολής της μαγνήτισης από περιοχή σε περιοχή. Για τον λόγο αυτό η θεωρία του Weiss για το μέσο πεδίο εφαρμόστηκε μόνο στον εσωτερικό χώρο κάθε μαγνητικής περιοχής, θεωρώντας ότι η αλληλεπίδραση των ατομικών διπόλων εξασθενεί με την απόσταση και κατά συνέπεια η αλληλεπίδραση αυτή δεν μπορεί να επεκταθεί πέρα από μία μαγνητική περιοχή. Γενικά η θεωρία μέσου πεδίου του Weiss εκλαμβάνεται ως η ορθότερη προσέγγιση της πραγματικότητας για το τι συμβαίνει μέσα σε μία μαγνητική περιοχή, αφού σε κάθε μαγνητική περιοχή η μαγνήτιση είναι ομογενής και έχει μία γνωστή τιμή  $M_s$ . Το πεδίο αλληλεπιδράσεων, στο οποίο οφείλεται ο προσανατολισμός των διπόλων μέσα στις μαγνητικές περιοχές, μπορεί να εκφραστεί όπως προαναφέραμε ως  $H_e = \alpha M$ , όπου  $M_s$  είναι η εσωτερική μαγνήτιση μέσα στην μαγνητική περιοχή και η οποία ισούται με τη μαγνήτιση κορεσμού στους 0 K. Ωστόσο η τιμή του μέσου πεδίου μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται και μηδενίζεται στη θερμοκρασία Curie.

Νέα μοντέλα, όπως το μοντέλο Ising [35] εφαρμοσμένα στους σιδηρομαγνήτες, έχουν βασισθεί σε αλληλοεπιδρώμενα πεδία μόνο ανάμεσα στα πιο γειτονικά άτομα. Τα μοντέλα αυτά εξηγούν πως μπαίνουν σε τάξη οι ατομικές διπολικές ροπές μέσα σε μία μαγνητική περιοχή, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.3. Όταν το  $\alpha > 0$  οι ροπές προσανατολίζονται παράλληλα και οδηγούν στο φαινόμενο του σιδηρομαγνητισμού. Όταν το  $\alpha < 0$  οι ροπές προσανατολίζονται αντιπαράλληλα και οδηγούν στον αντισιδηρομαγνητισμό. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι μπορούν να υπάρξουν πολλές μορφές προσανατολισμού ατομικών μαγνητικών ροπών, εξαρτώμενες από την παράμετρο αλληλεπίδρασης  $\alpha$ . Μερικές από τις μορφές αυτές φαίνονται στην εικόνα 3.4.



**Εικόνα 3.3.** (α) Μαγνητικές διπολικές ροπές σε τάξη όταν  $\alpha > 0$  που οδηγούν στον σιδηρομαγνητισμό, (β) Το ίδιο με  $\alpha < 0$  που οδηγούν στον αντισιδηρομαγνητισμό.



**Εικόνα 3.4.** Παραδείγματα διαφόρων τύπων μαγνητικής τάξης γειτονικών ροπών. Φαίνονται ο σιδηρομαγνητισμός, ο απλός αντισιδηρομαγνητισμός, ο σιδηρομαγνητισμός και ο ελικοειδής αντισιδηρομαγνητισμός.

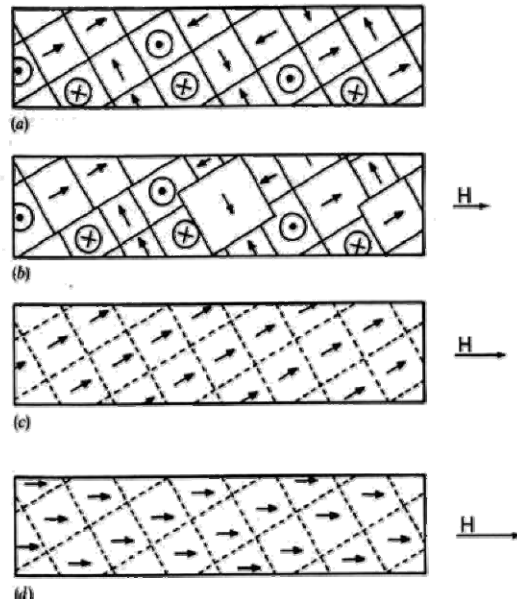
### 3.10 Μεταβολές των μαγνητικών περιοχών κατά τη μαγνήτιση

Αφού σύμφωνα με τη θεωρία των μαγνητικών περιοχών οι ατομικές μαγνητικές ροπές είναι ευθυγραμμισμένες στους σιδηρομαγνήτες ακόμα και κατά την απουσία μαγνητικού πεδίου, η διαφορά ανάμεσα στην κατάσταση μαγνήτισης και μη μαγνήτισης οφείλεται στη διάταξη των μαγνητικών περιοχών.

Όταν ένα μαγνητικό πεδίο εφαρμοστεί σε έναν μη μαγνητισμένο σιδηρομαγνήτη, η μεταβολή στη πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  εμφανίζεται ως μία καμπύλη αρχικής μαγνήτισης στο βρόχο υστέρησης. Σε «χαμηλά» πεδία η πρώτη διεργασία που συντελείται είναι η αύξηση του μεγέθους των μαγνητικών περιοχών, οι οποίες είναι ευθυγραμμισμένες παράλληλα ή σχετικά παράλληλα προς το πεδίο για να ικανοποιηθεί συνθήκη ελαχιστοποίησης της ενέργειας ( $E = -\mu_0 M_s H$ ) και η συνεπακόλουθη μείωση του μεγέθους των μαγνητικών περιοχών οι οποίες είναι αντιπαράλληλες ή αρκετά αντιπαράλληλες σε σχέση με το εφαρμοζόμενο πεδίο, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5.

Σε πεδία «μεσαίου» μεγέθους λειτουργεί ένας δεύτερος μηχανισμός, σύμφωνα με τον οποίο οι μαγνητικές περιοχές περιστρέφονται. Τα ατομικά μαγνητικά δίπολα των περιοχών που δεν είναι παράλληλα ή σχεδόν παράλληλα με το πεδίο, υπερνικούν την ενέργεια ανισοτροπίας και ξαφνικά περιστρέφονται από την αρχική τους διεύθυνση μαγνήτισης σε μία που αντιστοιχεί σε κρυσταλλογραφικό κύριο άξονα, ο οποίος είναι ο πλησιέστερος στη διεύθυνση του πεδίου.

Η τελική διεργασία λαμβάνει χώρα σε πεδία τεχνητής μαγνήτισης υψηλών εντάσεων. Σ' αυτήν οι μαγνητικές ροπές, οι οποίες είναι σχετικά ευθυγραμμισμένες κατά μήκος των κρυσταλλογραφικών κύριων αξόνων με διεύθυνση κοντά στη διεύθυνση του πεδίου, περιστρέφονται προς τη διεύθυνση του πεδίου καθώς το μέγεθος αυτού αυξάνει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας μονής μαγνητικής περιοχής στο υλικό. Αυτός ο προσανατολισμός των ροπών υφίσταται όσο διαρκεί το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο όταν αναιρείται, τα δίπολα προτιμούν την κατ' αρχήν επαναφορά τους στον προσανατολισμό που επιτυγχάνεται στη δεύτερη φάση, παρουσιάζοντας έτσι παραμένουσα μαγνήτιση.



**Εικόνα 3.5.** Οι διεργασίες μαγνητικών περιοχών που συμβαίνουν καθώς ένα υλικό μαγνητίζεται μέχρι κορεσμού. Φαίνονται τα στάδια από την κατάσταση απομαγνήτισης μέχρι: (α) μερική μαγνήτιση, (β) κίνηση μαγνητικών τοιχωμάτων. Από τη μερική μαγνήτιση μέχρι: (c) μη αντιστρεπτή περιστροφή των διπόλων των μαγνητικών περιοχών, (d) αντιστρεπτή περιστροφή των διπόλων.

Οι διαταραχές στον κρύσταλλο του υλικού δημιουργούν πεδία τοπικών τάσεων, τα οποία με τη σειρά τους αναπτύσσουν μία ανομοιογενή τάση μέσα στον όγκο του στερεού. Οι διαταραχές εμποδίζουν την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων και έτσι όσο περισσότερες είναι οι διαταραχές μέσα σε έναν σιδηρομαγνήτη τόσο περισσότερο εμποδίζεται η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Αυτό εξηγεί γιατί δοκίμια που έχουν υποστεί ψυχρή μηχανουργική κατεργασία εμφανίζουν υψηλότερο συνεκτικό πεδίο και μικρότερη αρχική επιδεκτικότητα σε σχέση με άλλα δοκίμια του ίδιου υλικού, τα οποία έχουν υποστεί ανόπτηση. Η παρατήρηση αυτή χρησιμοποιείται στους μη καταστροφικούς ελέγχους δοκιμών της μηχανικής κατάστασης των σιδηρομαγνητικών υλικών όπως είναι ο σίδηρος και ο χάλυβας με τη χρήση μαγνητικών μετρήσεων.

Τα απομονωμένα σημεία μέσα στο υλικό, που αποτελούνται από μία δεύτερη φάση με διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες, καλούνται εγκλείσματα. Τα εγκλείσματα μειώνουν την ενέργεια των μαγνητικών τοιχωμάτων όταν διασταυρώνονται μεταξύ τους και κατά συνέπεια φαίνεται μακροσκοπικά ότι τα τοιχώματα έλκονται από τα εγκλείσματα, τα οποία καταφέρνουν να εμποδίζουν την κίνηση των τοιχωμάτων.

Πρώτος ο Kersten ασχολήθηκε με την επίδραση των εγκλεισμάτων στην κίνηση των τοιχωμάτων. Ο Kersten υπέθεσε ότι τα τοιχώματα μετακινούνται με έναν επίπεδο τρόπο μέσα στο στερεό και ότι η ενέργεια των τοιχωμάτων μειώνεται όταν αυτά συναντούν εγκλείσματα. Τα εγκλείσματα αυτά μπορούν να είναι μία δεύτερη φάση αδιάλυτη, όπως οξειδίο ή καρβίδιο, ή μπορούν να είναι πόροι, κενά, ρωγμές ή άλλες μηχανικές ανομοιογένειες. Γνωστό παράδειγμα μαγνητικού εγκλείσματος είναι σωματίδια σεμεντίτη μέσα σε σίδηρο ή χάλυβα.

### 3.11 Τεχνικές μέτρησης βρόχου υστέρησης

Όλες οι τεχνικές μέτρησης του βρόχου υστέρησης βασίζονται στη μαγνητική επαγωγή που δημιουργείται στο πηνίο λήψης της συσκευής. Στις επόμενες παραγράφους παρατίθενται οι σημαντικότερες τεχνικές μέτρησης του βρόχου υστέρησης.

#### 3.11.1 Μαγνητόμετρο στατικού πηνίου λήψης και εναλλασσόμενης διέγερσης

Οι μέθοδοι επαγωγής μέτρησης της μαγνητικής ροής βασίζονται στον νόμο του Faraday για τη δημιουργία ΗΕΔ. Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday η μεταβολή της διερχόμενης μαγνητικής ροής σε ένα πηνίο δημιουργεί ΗΕΔ η οποία υπολογίζεται από την σχέση (3.9):

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.9)$$

Όπου N είναι ο αριθμός σπειρών του πηνίου. Αν A είναι η κάθετη επιφάνεια του πηνίου, απ' όπου διέρχεται η ροή, τότε η μαγνητική επαγωγή είναι  $B = \Phi/A$ . Οπότε:

$$V = -NA \frac{dB}{dt} \quad (3.10)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα μαγνητόμετρα που βασίζονται στον νόμο του Faraday μετρούν τη μεταβολή της μαγνητικής ροής και όχι την πυκνότητα μαγνητικής ροής. Γνωρίζοντας όμως την τιμή της επιφάνειας A μπορούμε να βρούμε την μεταβολή της μαγνητικής ροής. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) δημιουργείται εξαιτίας της μεταβολής του B λόγω του μεταβαλλόμενου πεδίου H. Στο κενό ισχύει  $B = \mu_0 H$ , οπότε:

$$V = -\mu_0 NA \frac{dH}{dt} \quad (3.25)$$

Στη μέθοδο του μαγνητόμετρου με στατικό πηνίο λήψης υπολογίζεται ο ρυθμός μεταβολής της πυκνότητας μαγνητικής ροής μετρώντας την ΗΕΔ που αυτός δημιουργεί. Για να υπολογισθεί η τιμή της μαγνητικής επαγωγής B, η έξοδος του πηνίου λήψης πρέπει να συνδέεται με μία συσκευή ηλεκτρονικής ολοκλήρωσης που θα ολοκληρώνει την ΗΕΔ ως προς τον χρόνο. Κατ' αυτόν τον τρόπο η τιμή του B δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$B = -\frac{1}{NA} \int V dt \quad (3.26)$$

Τα μηχανήματα αυτά έχουν πολύ μεγάλη ευαισθησία και χρησιμοποιούνται ευρέως για την λήψη διαγραμμάτων υστερήσεως και τη μέτρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων μαλακών μαγνητικών υλικών. Είναι

ιδιαίτερα αξιόπιστα, αλλά παρουσιάζουν ένα συνεχές σφάλμα που διορθώνεται με την προσθήκη μίας μετατοπισμένης τιμής της τάσης. Αν δεν γίνει αυτό, τότε το μαγνητόμετρο συνεχίζει να ολοκληρώνει ως προς τον χρόνο μικρά ποσά τάσης, που είναι θόρυβος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ψευδούς αίσθησης ότι η εξάρτηση της πυκνότητας μαγνητικής ροής από το πεδίο είναι γραμμική. Αυτό μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα, όταν απαιτούνται μετρήσεις υψηλής ευαισθησίας, με τη μαγνητική ροή να πρέπει να μετρηθεί με ακρίβεια μεγαλύτερη των  $10^{-10}$  webers.

Μία εφαρμογή αυτής της μεθόδου έχει αναπτυχθεί από τους Schmidt και Güldner [36]. Στην εικόνα 3.6 φαίνεται το κύκλωμα της συσκευής τους. Το δοκίμιο έχει τη μορφή δακτυλίου και διεγείρεται από μία πηγή μεταβλητής συχνότητας που εφαρμόζεται στο πρωτογενές πηνίο και το οποίο μεταβάλλει τη μαγνητική ροή μέσα στο πηνίο. Η επαγόμενη τάση μετριέται από ένα δεύτερο πηνίο. Στο πηνίο λήψης δεν κυκλοφορεί ηλεκτρικό ρεύμα με τη χρήση βολτόμετρου υψηλής αντίστασης (δηλαδή γίνεται μέτρηση ανοιχτού κυκλώματος). Το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον πηνίο είναι το ρεύμα που προκαλεί μαγνήτιση στο δοκίμιο. Το ρεύμα αυτό μετριέται με τη χρήση μίας αντίστασης  $R_n$  στο κύκλωμα του μαγνητόμετρου. Από τον νόμο του Ampere το μαγνητικό πεδίο  $H(t)$  είναι:

$$H(t) = \frac{I_p(t)N_p}{l_m} = \frac{v_{Rn}(t)N_p}{R_n I_m} \quad (3.27)$$

όπου  $I_p(t)$  είναι το πρωτεύον ρεύμα,  $N_p$  ο αριθμός των σπειρών στο πρωτεύον πηνίο,  $l_m$  το μήκος του μαγνητικού δρόμου και  $V_{Rn}$  η πτώση τάσης στην αντίσταση  $R_n$ . Το γράφημα του  $B(t)$  προς το  $H(t)$  σχηματίζει το δυναμικό βρόχο υστέρησης.

Η συσκευή αυτή συνδέεται με ψηφιακό παλμογράφο που χρησιμοποιείται για να ψηφιοποιεί τα δεδομένα της δευτερογενούς (επαγόμενης) τάσης και του πρωτογενούς ρεύματος από την πτώση τάσης της αντίστασης  $R_n$ . Όλοι οι υπόλοιποι ολοκληρωτικοί υπολογισμοί μπορούν να πραγματοποιηθούν στον υπολογιστή μετά τη μεταφορά τους από τον παλμογράφο. Επιπλέον ο υπολογιστής ελέγχει την τάση διέγερσης του πρωτογενούς πηνίου για να επιτευχθούν οι επιθυμητές μέγιστες τιμές της μαγνητικής επαγωγής ή της έντασης του πεδίου. Το μειονέκτημα της παραπάνω μεθόδου είναι ότι το δοκίμιο μπορεί να έχει μόνο δακτυλιοειδή μορφή.

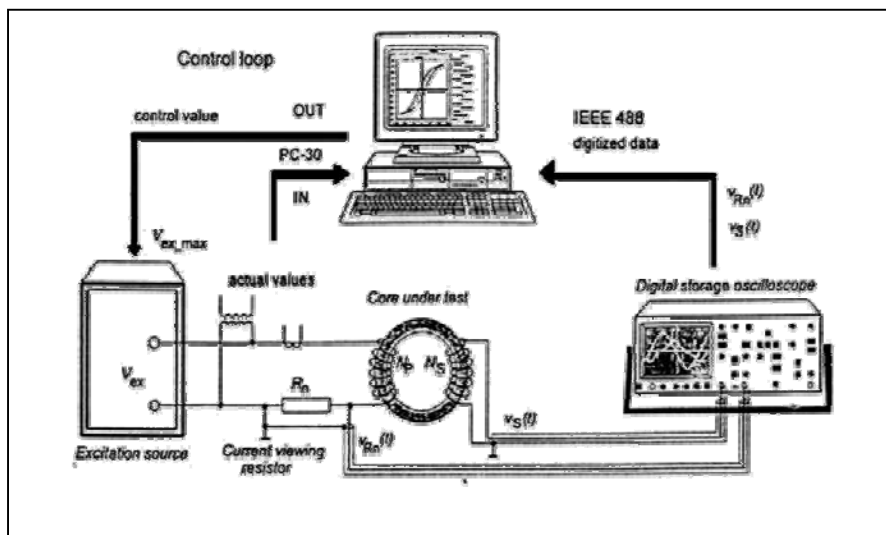
Αν και το δοκίμιο δακτυλιοειδούς μορφής έχει το πλεονέκτημα του ότι το πεδίο απομαγνήτισής του είναι μηδενικό, εντούτοις δεν παρέχει τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τα δείγματα με μορφή λεπτού σύρματος ή ράβδου. Τα πλεονεκτήματα των τελευταίων είναι τα ακόλουθα:

- Τα υλικά ψαθυρού χαρακτήρα δεν μπορούν να αποκτήσουν δακτυλιοειδή μορφή και συνήθως σπάνε.
- Τα ραβδοειδή δεν έχουν εσωτερικές τάσεις λόγω κάμψης που έχουν τα δακτυλιοειδή.
- Τα ραβδοειδή είναι πιο βολικά για θερμικές κατεργασίες, π.χ. ανοπτήσεις κ.λπ.

Η παρακάτω τεχνική εκμεταλλεύεται τα παραπάνω πλεονεκτήματα των δοκιμίων με τη μορφή ράβδου, ενώ αντιμετωπίζει με επιτυχία το μειονέκτημα της εμφάνισης πεδίου απομαγνήτισης σ' αυτά [37]. Συγκεκριμένα γίνεται υπολογισμός του πεδίου απομαγνήτισης και στη συνέχεια αυτό αφαιρείται από το εφαρμοζόμενο πεδίο για να βρεθεί το «καθαρό» πεδίο που μαγνητίζει το δοκίμιο. Αν αυτό είναι αρκετά μακρύ σε σχέση με τη διατομή του, τότε τα μετρούμενα αποτελέσματα προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις μετρήσεις των δακτυλιοειδών δοκιμίων.

Η διάταξη ευθύγραμμων - ραβδοειδών δοκιμίων έχει ως εξής: Ένα σωληνοειδές δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο που μαγνητίζει το ευθύγραμμο δοκίμιο. Το σύστημα λήψης αποτελείται από ένα πηνίο λήψης και ένα πηνίο αντιστάθμισης. Τα δύο πηνία είναι συνδεδεμένα σε σειρά με τέτοιο τρόπο ώστε η τάση εξόδου που δίνουν να είναι μηδέν όταν δεν υπάρχει δείγμα, παρά τη μεταβολή της μαγνητικής ροής του σωληνοειδούς. Το δοκίμιο τοποθετείται μέσα στο πηνίο λήψης και έξω από το πηνίο αντιστάθμισης. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής στο πηνίο λήψης δημιουργεί τάση που αποτελεί το σήμα εξόδου κατά τα γνωστά.

Γενικά με την τεχνική στατικού πηνίου λήψης εναλλασσόμενης διέγερσης μπορούν να κατασκευασθούν μαγνητόμετρα τα οποία να είναι κατάλληλα σε σχέση με το προς μέτρηση δείγμα. Η βασική παράμετρος που πρέπει να ικανοποιείται είναι ότι το πηνίο λήψης πρέπει να έχει διατομή όσο γίνεται πλησιέστερη στη διατομή του προς μέτρηση δείγματος.



Εικόνα 3.6. Σχηματική απεικόνιση του κυκλώματος της συσκευής των Schmidt και Güldner

### 3.11.2 Μαγνητόμετρο κινητού πηνίου λήψης και συνεχούς διέγερσης

Το πιο απλό μαγνητόμετρο αυτής της κατηγορίας είναι το μαγνητόμετρο κινητού πηνίου λήψης με χρήση βαλλιστικού γαλβανόμετρου. Στη μέθοδο αυτή δεν μεταβάλλεται η ένταση του εξωτερικού πεδίου  $H$ , όπως προηγουμένως, αλλά αλλάζει η θέση του πηνίου λήψης. Ολοκληρώνοντας τη σχέση  $V = -NA(dB/dt)$  προκύπτει η σχέση:

$$\int V dt = -NA(B_f - B_i) \quad (3.28)$$

όπου  $B_i$  είναι η αρχική πυκνότητα μαγνητικής ροής και  $B_f$  είναι η τελική. Συνεπώς αν ένα πηνίο λήψης κινηθεί από τη θέση που χρειάζεται το πεδίο να μετρηθεί (π.χ. για παράδειγμα ανάμεσα της πόλους της ηλεκτρομαγνήτη) σε μία περιοχή με μηδενικό πεδίο (π.χ. έξω από τον ηλεκτρομαγνήτη), τότε το ολοκλήρωμα του  $V$  ως της το χρόνο θα είναι ανάλογο της μαγνητικής επαγωγής.



Για τη μέτρηση της μαγνητικής επαγωγής χρησιμοποιείται ένα βαλλιστικό γαλβανόμετρο του οποίου η γωνιακή απόκλιση  $\varphi$  είναι ανάλογη με το ολοκλήρωμα του  $V$ . Η συσκευή χρειάζεται ρύθμιση για να προσδιοριστεί ακριβώς ο συντελεστής αναλογίας. Έτσι προκύπτει:

$$\varphi = c \times \int V dt = c \times NA(B_f - B_i) \quad (3.29)$$

όπου  $c$  είναι ο συντελεστής αναλογίας. Με αυτής απαραίτητες αυτές ρυθμίσεις η ακρίβεια αυτής μεθόδου αυτής είναι καλύτερη από 1%.

Εξίσου απλή μέθοδος κινητού πηνίου λήψης είναι αυτή του περιστρεφόμενου πηνίου λήψης. Στη μέθοδο αυτή το πηνίο περιστρέφεται με μία καθορισμένη γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ . Κατ' αυτόν τον τρόπο η μαγνητική ροή που περνά μέσα από το πηνίο είναι:

$$\Phi(t) = \Phi \cos \omega t \quad (3.30)$$

Η τάση που επάγεται από τη μεταβολή της ροής είναι :

$$\begin{aligned} V &= -N \frac{d\Phi}{dt} = -N\omega\Phi \cdot \sin \omega t = \\ &= -NA\omega B \cdot \sin \omega t = -\mu_0 NA\omega H \cdot \sin \omega t \end{aligned} \quad (3.31)$$

Το πλάτος στις τάσης που παράγεται από το περιστρεφόμενο πηνίο είναι ανάλογο στις μαγνητικής επαγωγής και κατά συνέπεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του  $B$  ή του  $H$  στο κενό. Το σήμα μπορεί να ληφθεί κατευθείαν ως εναλλασσόμενο ή να μετατραπεί σε συνεχές μετρώντας την ενεργό τιμή στις εναλλασσόμενης τάσης. Το όργανο αυτό μπορεί να πάρει μετρήσεις σε εύρος  $10$  με  $10^{-7}$  tesla. Οι ηλεκτρικές συνδέσεις στο περιστρεφόμενο πηνίο δημιουργούν θόρυβο όταν οι μετρήσεις γίνονται με μικρές τάσεις. Η ακρίβεια του οργάνου είναι στις τάξεις του  $10^{-4}$  weber.

Ένα άλλο μαγνητόμετρο στις κατηγορίας στις είναι το μαγνητόμετρο δονούμενου πηνίου λήψης (VCM), το οποίο βασίζεται στην ίδια τεχνική με το περιστρεφόμενο, αλλά χρησιμοποιείται κυρίως ως μέθοδος προσδιορισμού στις μαγνήτισης  $M$ . Το σχήμα στις τυπικού δονούμενου μαγνητόμετρου φαίνεται στην εικόνα 3.7. Το πηνίο δονείται ανάμεσα στο δοκίμιο και σε μία περιοχή ελεύθερου χώρου. Κατ' αυτόν τον τρόπο μετράει τη διαφορά στις μαγνητικής επαγωγής στις δύο αυτές θέσεις. Όταν το πηνίο περιβάλλει το δοκίμιο η μαγνητική επαγωγή είναι:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (3.18)$$

Όταν το πηνίο έχει απομακρυνθεί από το δοκίμιο η μαγνητική επαγωγή δίνεται από τη σχέση:

$$B_0 = \mu_0 H \quad (3.7)$$

Συνεπώς η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής της δύο αυτές περιπτώσεις είναι:

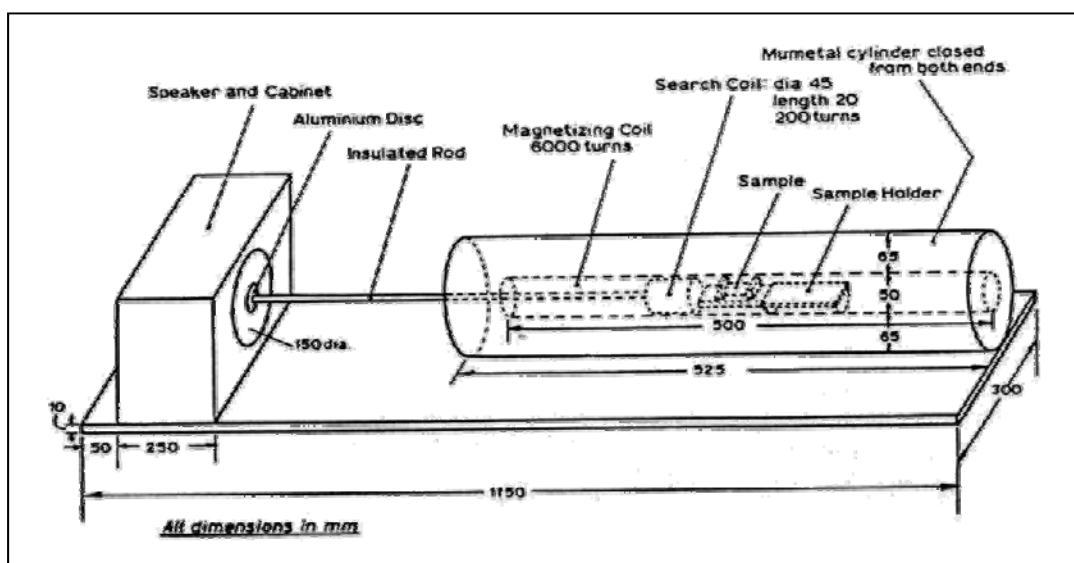
$$\Delta B = \mu_0 M \quad (3.32)$$

Η μέθοδος λοιπόν εξαρτάται από τη μεταβολή της ροής όταν το πηνίο απομακρύνεται από το δοκίμιο.

$$\int V dt = -NA\mu_0 M \quad (3.33)$$

Κατά συνέπεια η έξοδος στο σήμα εξόδου του πηνίου λήψης είναι ανεξάρτητο του  $H$ , και εξαρτάται μόνο από το  $M$ .

Μία σημαντική εφαρμογή του μαγνητόμετρου δονούμενου πηνίου λήψης είναι στον ποιοτικό έλεγχο κατασκευής επιστρωμάτων. Στα υλικά που χρησιμοποιούνται για επιστρώσεις, η πιο σημαντική μαγνητική ιδιότητά τους είναι το συνεκτικό πεδίο  $H_c$ . Η ιδιότητα αυτή εξαρτάται άμεσα από τη δομή του υλικού και επηρεάζει τις μη αντιστρεπτές μαγνητικές διαδικασίες, οι οποίες με τη σειρά τους διαμορφώνουν την καμπύλη μαγνήτισης και τις ενεργειακές απώλειες. Άλλωστε χωρίς την ιδιότητα αυτή δεν θα υπήρχε η καμπύλη υστέρησης. Στην κατασκευή επιστρωμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντικό το υλικό να παράγει πολύ υψηλή πυκνότητα μαγνητικής ροής. Τα υλικά αυτού του είδους έχουν χαμηλό συνεκτικό πεδίο, έτσι ώστε να μαγνητίζονται με μικρά ποσά ηλεκτρικού πεδίου. Συνδυάζουν δηλαδή την υψηλή διαπερατότητα με το χαμηλό συνεκτικό πεδίο.



Εικόνα 3.7. Σχηματική περιγραφή του μαγνητόμετρου δονούμενου πηνίου λήψης (VCM)

Στη μέθοδο αυτή υπολογίζεται το συνεκτικό πεδίο του υλικού και όχι η μαγνήτιση  $M$ . Ένα μακρύ σωληνοειδές δημιουργεί ένα ομοιογενές μαγνητικό πεδίο με διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα του σωληνοειδούς. Αν ένα πηνίο λήψης δονείται στο κέντρο του σωληνοειδούς με το επίπεδό του παράλληλο στον άξονα αυτού δεν παράγεται ΗΕΔ. Ωστόσο αν εισαχθεί οποιοδήποτε δοκίμιο φερρομαγνητικού υλικού, το πεδίο χάνει την ομοιομορφία του και το πηνίο λήψης παράγει σήμα εξαιτίας της ακτινικής συνιστώσας του πεδίου. Αν το δοκίμιο έχει μαγνητιστεί μέχρι σημείου κορεσμού και το πεδίο αυτού αυξάνεται σταδιακά από το μηδέν και με διεύθυνση αντίθετη απ' αυτή του δείγματος, τότε το παραγόμενο σήμα στο πηνίο λήψης μειώνεται συνεχώς μέχρι να μηδενιστεί. Η μαγνητική ροή τότε στον αέρα θα είναι

ίδια με αυτήν του δοκιμίου, ενώ η μαγνήτιση του τελευταίου θα είναι μηδέν. Συνεπώς η μέθοδος μετράει το συνεκτικό πεδίο της μαγνήτισης  $H_{ci}$ . Αυτό συνδέεται με το συνεκτικό πεδίο της μαγνητικής επαγωγής σύμφωνα με τη σχέση:

$$H_c = H_{ci} \left( 1 - \frac{1}{\mu'} \right) \quad (3.34)$$

όπου  $\mu'$  είναι η αρχική διαπερατότητα  $((1/\mu_0)(dB/dH))$  για  $B=0$ .

Το δοκίμιο τοποθετείται στο κέντρο του σωληνοειδούς, όπου υπάρχει μία ειδική πλαστική υποδοχή και πολύ κοντά στο πηνίο λήψης, με την επιμήκη πλευρά του παράλληλη στον άξονα του σωληνοειδούς. Για την αρχική μαγνήτιση του δοκιμίου, το σωληνοειδές διαρρέεται από συνεχές ρεύμα υψηλής έντασης. Για την εξασφάλιση μετρήσεων ακριβείας το δοκίμιο πριν μαγνητιστεί πρέπει να είναι πλήρως απομαγνητισμένο πριν μαγνητιστεί. Ταυτόχρονα το πηνίο λήψης ξεκινάει να δονείται με το πλάτος αυτής να ρυθμίζεται παραμετρικά. Κατ' αυτόν τον τρόπο το πηνίο λήψης αποκτά μία τάση. Το ρεύμα που διαρρέει το σωληνοειδές αυξάνει από το μηδέν μέχρι η τάση του πηνίου λήψης να μηδενιστεί. Το ρεύμα του σωληνοειδούς που αντιστοιχεί σε τάση μηδέν αντιστοιχεί στο συνεκτικό πεδίο. Έτσι για παράδειγμα αν το σωληνοειδές έχει 6000 σπείρες συνολικού μήκους 0.5 m τότε ισχύει:

$$H_{ci} = \frac{6000 \cdot I}{0.5} = 12000 \cdot I \quad (3.35)$$

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και προς τις δύο διευθύνσεις του δοκιμίου. Μερικές φορές τα αποτελέσματα και στις δύο διευθύνσεις είναι τα ίδια, ενώ άλλες φορές διαφέρουν κατά 3-5%.

### 3.11.3 Μαγνητόμετρο δονούμενου δείγματος (VSM)

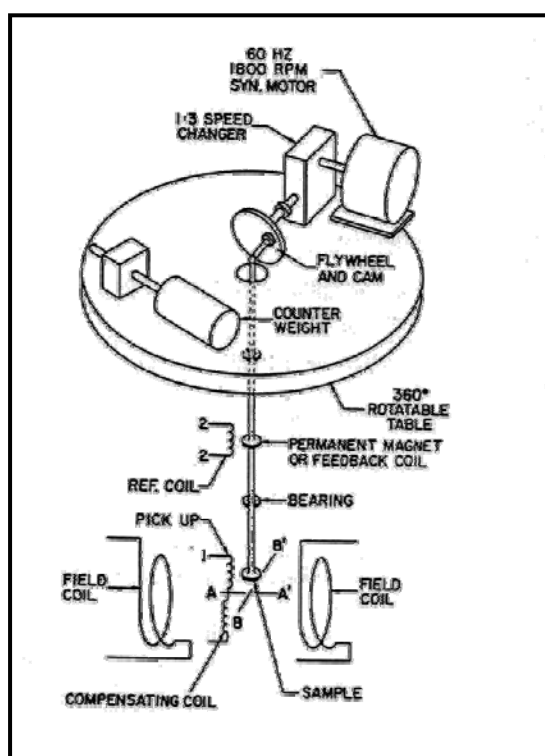
Το μαγνητόμετρο δονούμενου δείγματος ακολουθεί την ίδια αρχή λειτουργίας με το VCM, με τη διαφορά ότι αντί για το πηνίο λήψης δονείται το δείγμα. Το VSM προτάθηκε αρχικά από τον Foner [38] και έχει εκτοπίσει από τη χρήση το VCM. Το VSM μετράει τη διαφορά της μαγνητικής επαγωγής ανάμεσα σε μία περιοχή που περιέχει και που δεν περιέχει το δοκίμιο. Μ' αυτόν τον τρόπο παρέχει άμεση μέτρηση της μαγνήτισης  $M$ .

Μία σχηματική παράσταση του VSM φαίνεται στην εικόνα 3.8. Το δοκίμιο υποβάλλεται σε κίνηση κάθετη προς το εφαρμοζόμενο πεδίο μέσω ενός κινητήρα με στροφαλοφόρο άξονα. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ηχείο, η δόνηση του οποίου να μεταβιβάζεται μηχανικά στο δείγμα. Κατά τη δόνηση του δοκιμίου μεταβάλλεται η μαγνητική επαγωγή και επάγεται ΗΕΔ στο πηνίο λήψης. Το πηνίο λήψης παραμένει στη θέση του και δεν ταλαντώνεται όπως το δοκίμιο. Από τις μετρήσεις αυτής της τάσης εξάγονται οι μαγνητικές ιδιότητες του κάθε δοκιμίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι επάγεται και μία δεύτερη ΗΕΔ σε ένα παρόμοιο στατικό πηνίο αναφοράς, από ένα δοκίμιο αναφοράς που μπορεί να είναι ένας μικρός μόνιμος μαγνήτης ή ένας ηλεκτρομαγνήτης. Το δοκίμιο αναφοράς δονείται συγχρόνως με το

δείγμα. Για τον λόγο αυτό η φάση και το πλάτος των δύο τάσεων είναι άμεσα συνδεδεμένες μεταξύ τους. Η γνωστή τάση από το πηνίο αναφοράς, ρυθμίζεται έτσι ώστε να εξισορροπεί την τάση από το σημείο λήψης, όπου τη στιγμή αυτή αντιστοιχεί στην μαγνητική ροπή του δείγματος.

Το δείγμα σε γενικές γραμμές πρέπει να είναι σχετικά μικρό για να χωρά ανάμεσα στους πόλους του ηλεκτρομαγνήτη. Για τον λόγο αυτό η μέθοδος δεν είναι αποτελεσματική στην περίπτωση προσδιορισμού της καμπύλης μαγνήτισης ή του βρόχου υστέρησης, εξαιτίας της ύπαρξης απομαγνητιστικών φαινομένων που εμφανίζονται στα δοκίμια μικρού μεγέθους. Ωστόσο είναι ιδανική μέθοδος για τη μέτρηση της μαγνήτισης κορεσμού  $M_s$ .

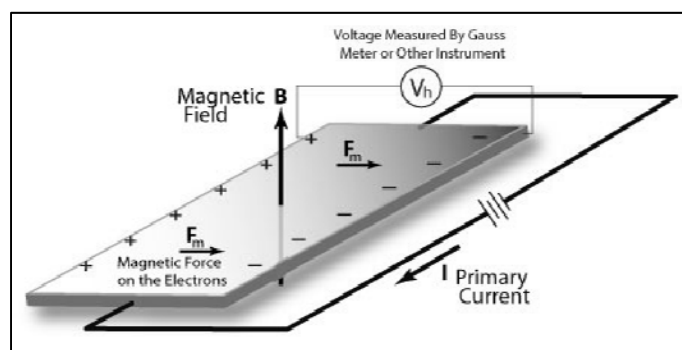
Το σήμα λήψης στο VSM είναι εναλλασσόμενο συγκεκριμένης συχνότητας και μετριέται μέσω ενισχυτή. Το VSM μπορεί να μετρήσει μαγνητικές ροπές τόσο μικρές όσο και  $5 \times 10^4 \text{ Am}^2$ . Η ακρίβειά του είναι καλύτερη από 2%.



**Εικόνα 3.8.** Σχηματικό διάγραμμα μαγνητόμετρου δονούμενου δοκιμίου (VSM)

#### 3.11.4 Το Φαινόμενο Hall

Ο τρόπος μέτρησης της πυκνότητας μαγνητικής ροής πεδίου μπορεί να γίνει με αισθητήρες οι οποίοι έχουν ως αρχή λειτουργίας το φαινόμενο Hall. Όταν ένας αγωγός, ο οποίος διαρρέετε από ρεύμα, τοποθετηθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο, θα αναπτυχθεί μια διαφορά δυναμικού κάθετη προς τα δυο πεδία. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως φαινόμενο Hall.



**Εικόνα 3.9.** Σχηματική περιγραφή της αρχής λειτουργίας ενός αισθητήρα Hall

Στην εικόνα 3.9 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα Hall. Ένας τέτοιος αισθητήρας αποτελείται από ένα λεπτό φύλλο ημιαγωγικού υλικού (Hall element) το οποίο διαρρέεται από ρεύμα. Τα ηλεκτρόδια εξόδου τοποθετούνται κάθετα προς την διεύθυνση του ρεύματος. Όταν δεν υπάρχει παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου η κατανομή του φορτίου είναι ομοιόμορφη και δεν εμφανίζεται διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια εξόδου. Όταν ένα κάθετο μαγνητικό πεδίο, προς στην επιφάνεια, είναι παρόν, τότε μια δύναμη Lorentz ασκείται στο ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή η δύναμη διαταράσσει την κατανομή του ρεύματος, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφοράς δυναμικού στα ηλεκτρόδια εξόδου, η οποία ονομάζεται τάση Hall ( $V_H \sim I \times B$ ).

### 3.12 Ειδικά φαινόμενα μαγνητοελαστικότητας

#### 3.12.1 Μαγνητοσυστολή

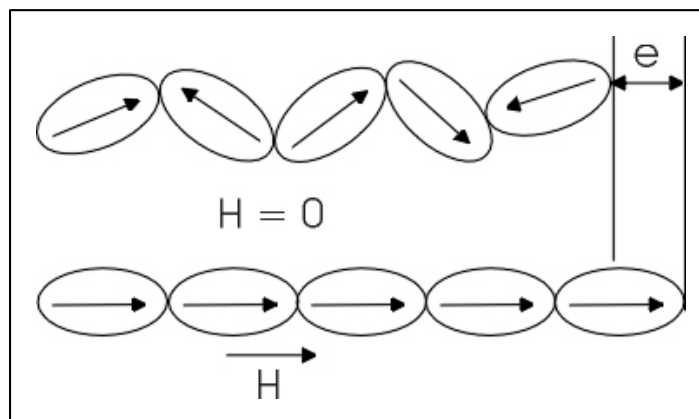
Η μαγνήτιση ενός σιδηρομαγνητικού υλικού συνοδεύεται πάντα από αλλαγή στις διαστάσεις. Αυτή η παρατηρούμενη διαστολή ή συστολή των μαγνητικών υλικών καλείται μαγνητοσυστολή  $\lambda$  (Joule magnetostriction). Υπάρχουν δύο τύποι μαγνητοσυστολής: Η αναπτυσσόμενη εσωτερικά ως αποτέλεσμα της διευσθέτησης των μαγνητικών διπόλων στις μαγνητικές περιοχές και η επαγόμενη από το εξωτερικό πεδίο. Και στις δύο περιπτώσεις η μαγνητοσυστολή  $\lambda$  ορίζεται ως η ανηγμένη μεταβολή του μήκους:

$$\lambda = \frac{dl}{l} \quad (3.36)$$

Η αναπτυσσόμενη εσωτερικά μαγνητοσυστολή εμφανίζεται κάτω από τη θερμοκρασία Curie, όπου δημιουργούνται μαγνητικές περιοχές με προσανατολισμένα δίπολα. Η επαγόμενη μαγνητοσυστολή δημιουργείται όταν μαγνητικές περιοχές με εσωτερική μαγνητοσυστολή επαναπροσανατολίζονται υπό τη δράση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου της περιγράφεται σχηματικά στην εικόνα 3.10. Το φαινόμενο Villari είναι ο αντίστροφο φαινόμενο όπου η παραμόρφωση του υλικού έχει επίπτωση στην μαγνήτιση του και συγκεκριμένα μεταβάλλει την ευκολία περιστροφής της μαγνήτισης σε συγκεκριμένο εξωτερικό πεδίο.

Ο όγκος του μαγνητικού υλικού που υφίσταται μαγνητοσυστολή παραμένει σταθερός (η αλλαγή του είναι αμελητέα). Για τον λόγο αυτό μεταβάλλονται και οι της δύο διαστάσεις του δοκιμίου. Το φαινόμενο της μεταβολής αυτών των διαστάσεων ονομάζεται κάθετη μαγνητοσυστολή, η οποία κατά κανόνα δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_t = -\frac{\lambda}{2} \quad (3.37)$$



**Εικόνα 3.10.** Σχηματική περιγραφή του φαινομένου της μαγνητοσυστολής

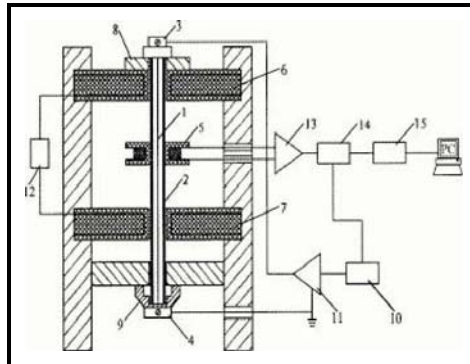
### 3.12.2 Το φαινόμενο Wiedeman και φαινόμενο Matteucci

Κατά το φαινόμενο Wiedeman ένα μαγνητοελαστικό υλικό (σύρμα) παθαίνει στρέψη όταν υποβάλλεται σε ελικοειδές εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, ενώ το αντίστροφο φαινόμενο, που ονομάζεται φαινόμενο Matteucci, προκαλεί ελικοειδή μαγνητική ανισορροπία στην μαγνητική επιδεκτικότητα του υλικού όταν αυτό υποβάλλεται σε στρέψη. Το φαινόμενο Wiedeman συνίσταται στην παρουσία της συνιστώσας της μαγνήτισης, που έχει τη διεύθυνση του άξονα του δοκιμίου - σύρματος. Το δοκίμιο έχει υποστεί στρέψη κατά μήκος του άξονά του και διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, που δημιουργεί κυκλικό πεδίο γύρω απ' αυτό. Η στρέψη την οποία έχει υποστεί το δοκίμιο δημιουργεί εσωτερικές τάσεις. Αυτές μαζί με το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής παίζουν σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό των μαγνητικών περιοχών.

Συγκεκριμένα στο σύρμα εσωτερικά και κατά μήκος του άξονά του οι μαγνητικές περιοχές έχουν μαγνήτιση παράλληλη μ' αυτόν. Αντίθετα στα πιο επιφανειακά στρώματα η μαγνήτιση είναι ακτινική. Η στρέψη εισάγει στο υλικό μία ελικοειδή ανισοτροπία. Σ' αυτήν την περίπτωση η μαγνήτιση περιστρέφεται τόσο στα εσωτερικά στρώματα κατά μήκος του άξονα, όσο και εξωτερικά. Η περιστροφή αυτή δημιουργεί μεταβολές στο μέγεθος του φαινομένου Wiedeman. Ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο εφαρμόζεται σε μία δεδομένη διεύθυνση πάνω στο σύρμα μεταβάλλει την κάθετη συνιστώσα της μαγνήτισης, στην περίπτωση που αυτή έχει συνιστώσες προσανατολισμένες κατά μήκος του πεδίου και κάθετα σ' αυτό. Όταν ο προσανατολισμός του εναλλασσόμενου ρεύματος αλλάξει, το πεδίο αντιστρέφεται και για μία κρίσιμη τιμή του πεδίου αλλάζει και η διεύθυνση της μαγνήτισης. Κατ' αυτόν τον τρόπο παράγεται ΗΕΔ στο πηνίο

λήψης της συσκευής. Η επαγόμενη τάση του πηνίου αποτελείται από κορυφές που οφείλονται στην αλλαγή προσανατολισμού, κατανεμημένες περιοδικά στον άξονα του χρόνου.

Στην εικόνα 3.11 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα της διάταξης μέτρησης του φαινομένου Wiedeman. Η διάταξη αυτή επιτρέπει την διαρροή εναλλασσόμενου ρεύματος μέσα από το δοκίμιο και διαθέτει μηχανισμό για τη στρέψη του. Η ανίχνευση του φαινομένου Wiedeman γίνεται από ένα πηνίο λήψης, που βρίσκεται στο κέντρο του πεδίου που δημιουργούν δύο πηνία Helmholtz.



**Εικόνα 3.11.** Η πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του φαινομένου Wiedeman.

## Κεφάλαιο 4

---

### Μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης με την παραμόρφωση σε κοκκώδη σύνθετα υλικά σιδήρου/εποξικής ρητίνης

#### 4.1 Εισαγωγή

Τα κοκκώδη σύνθετα υλικά αποτελούνται από σωματίδια, εγκλείσματα (συνήθως σφαιρικού σχήματος) ενός ή περισσοτέρων υλικών αναμεμιγμένα μέσα σε υλικό το οποίο αποτελεί την μήτρα. Γενικά υπάρχουν διάφοροι συνδυασμοί, μήτρας-εγκλεισμάτων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή τέτοιων υλικών. Στην περίπτωση μας θα ασχοληθούμε με σύνθετα υλικά σιδηρομαγνητικών μεταλλικών κόκκων σε μη μεταλλική μήτρα.

Τα περισσότερα υλικά τέτοιου είδους έχουν κατασκευαστεί με σκοπό την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας και μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής καθώς και τη μείωση της φθοράς της μήτρας [39]. Έτσι η μεταλλική σκόνη σαν εγκλείσμα μέσα σε μήτρα θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία ενός σύνθετου υλικού το οποίο είναι πιο ισχυρό και ανθεκτικό και επιπλέον άγει πιο εύκολα την θερμότητα και τον ηλεκτρισμό από ότι η ρητίνη από μόνη της, ενώ παράλληλα αναπτύσσει μαγνητικές ιδιότητες. Οι βασικές μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες αυτών των υλικών είναι ένα αντικείμενο το οποίο έχει μελετηθεί εκτενώς, παρόλα αυτά οι μαγνητικές ιδιότητες τέτοιων υλικών αποτελούν ακόμα ένα ανοιχτό πεδίο [40-41]. Η πιο συνηθισμένη χρήση σιδηρομαγνητικών εγκλεισμάτων συναντάται στην κατασκευή μαγνητών όπου η συγκέντρωσή τους είναι μεταξύ 85-90 % κ.β.

Οι μαγνητικές ιδιότητες σε αυτά τα υλικά, όπως η μαγνητική διαπερατότητα, το συνεκτικό πεδίο, η παραμένουσα μαγνήτιση κ.τ.λ είναι άμεσα εξαρτώμενες από την συγκέντρωση των σωματιδίων μέσα στο υλικό. Η συγκεκριμένη έρευνα εστιάζει κατ' αρχάς στην μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων τέτοιων υλικών και κατ' επέκταση στον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλονται με την μηχανική παραμόρφωση.



## 4.2 Προετοιμασία των πειραμάτων

### 4.2.1 Κατασκευή δοκιμίων

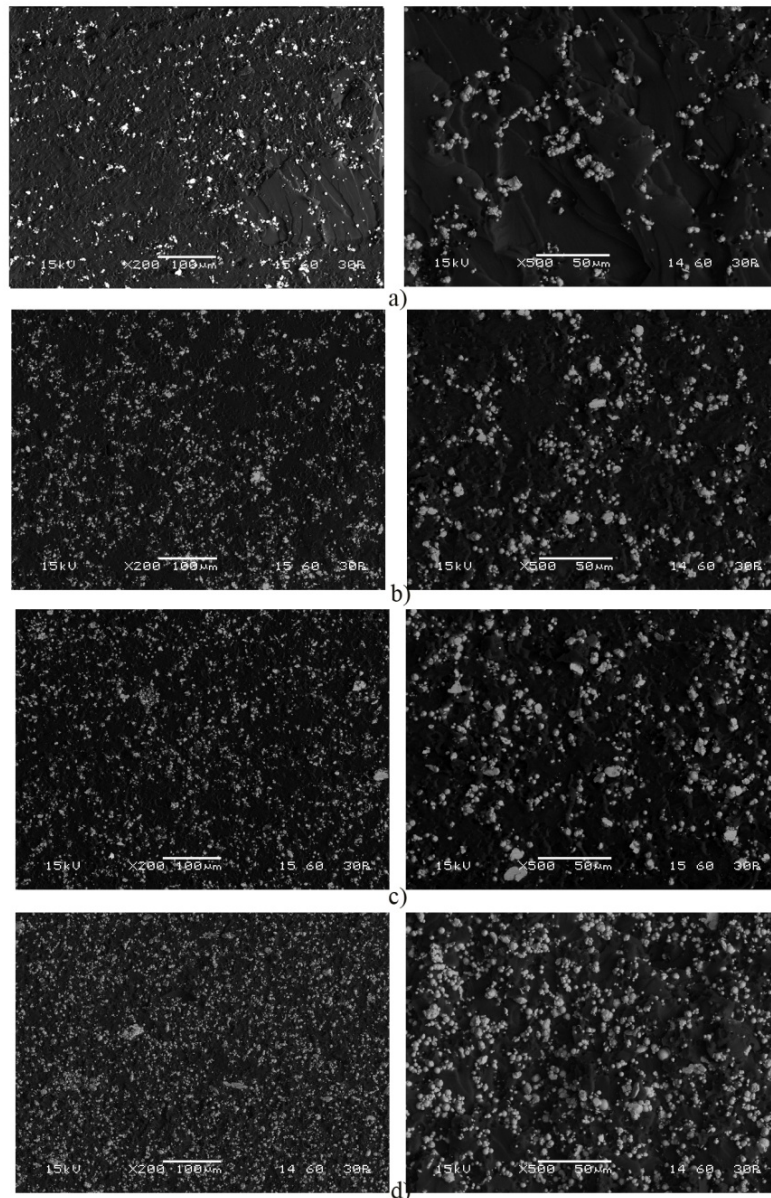
Κατά την προετοιμασία των πειραμάτων κατασκευάστηκαν διάφορα δοκίμια κοκκώδους σύνθετου υλικού. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν είναι εποξική ρητίνη (Bisphenol-A), σκληρυντής (Triethylenetetramine-TETA), πλαστικοποιητής (polysulfide polymer) και σκόνη σιδήρου (σφαιρική, μέσης διαμέτρου 10μm). Η προσθήκη του πλαστικοποιητή έγινε ώστε το υλικό να έχει μεγαλύτερη ελαστικότητα (σε σχέση με την καθαρή ρητίνη) με σκοπό να μελετηθεί η συμπεριφορά του σε ένα σχετικά μεγάλο εύρος παραμορφώσεων. Η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων συνοψίζεται σε 6 βασικά βήματα:

- βήμα 1. Ανάμιξη ρητίνης-πλαστικοποιητή σε ανοιχτό δοχείο κατά αναλογία 20%-40% κατά βάρος ως προς το συνολικό πολυμερές ρητίνης -σκληρυντή.
- βήμα 2. Προσθήκη σκληρυντή στο διάλυμα και εκ νέου ανάμιξη.
- βήμα 3. Προσθήκη σκόνης σιδήρου για διάφορες περιπτώσεις συγκέντρωσης (30, 40, 50, 60) % κατά βάρος. Λόγω της μικρής διάστασης της σκόνης (> 10μm) η ανάμιξη έγινε αρχικά μηχανικά και στην συνέχεια με την βοήθεια υπερηχητικού αναδευτήρα ώστε να περιοριστεί η εμφάνιση συσσωματωμάτων και να επιτευχθεί ένα πιο ομογενές υλικό.
- βήμα 4. Αφαίρεση φυσαλίδων από το μίγμα με την χρήση συσκευής αναρρόφησης και φιάλης κενού όπου τοποθετείται το μίγμα για περίπου 20 λεπτά.
- βήμα 5. Χύτευση του μίγματος σε καλούπι κλειστού τύπου, σχήματος “dog bone” σύμφωνα με τις προδιαγραφές D638-99 ASTM καθώς και ορθογωνίου σχήματος.
- βήμα 6. Πολυμερισμός του μίγματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 24 ώρες.



**Εικόνα 4.1.** α) Το καλούπι κλειστού τύπου που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμίων β) δοκίμια από σύνθετο υλικό σιδήρου εποξικής ρητίνης.

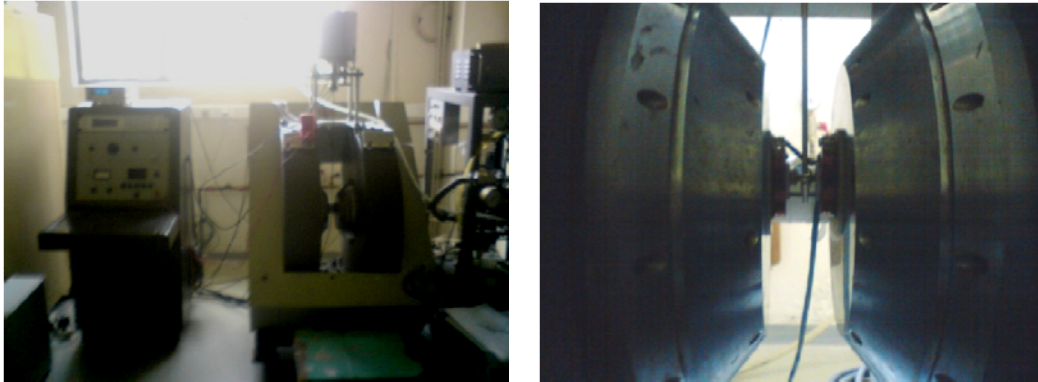
Μετά το πέρας αυτής της διαδικασίας τα δοκίμια είναι έτοιμα και δείγμα από το σύνθετο υλικό εξετάζεται στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) ώστε να είναι δυνατή η απεικόνιση της διασποράς των κόκκων. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται πως η διασπορά των κόκκων είναι ικανοποιητική αλλά παρόλα αυτά εμφανίζονται συσσωματώματα. Η εμφάνιση συσσωματωμάτων είναι κάτι το οποίο δεν μπορεί να εξαλειφτεί πλήρως καθώς οι κόκκοι διαθέτουν μια πολύ μικρή μαγνήτιση, πράγμα που οδηγεί στην εμφάνιση ελκτικών δυνάμεων μεταξύ τους.



**Εικόνα 4.2.** Απεικόνιση της διασποράς των κόκκων με την βοήθεια του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM) για διάφορες κατά βάρος περιεκτικότητες [α) 30% β) 40% γ) 50% δ) 60%].

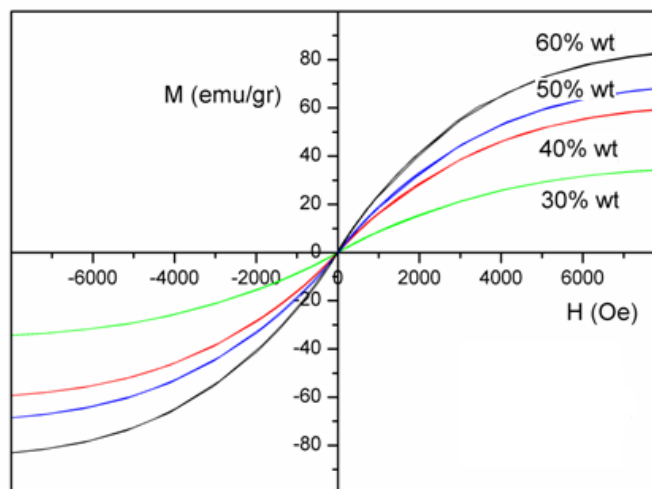
#### 4.2.2 Μαγνητικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού

Οι μαγνητικές ιδιότητες των συνθετών υλικών σιδήρου/εποξικής ρητίνης μελετήθηκαν με την βοήθεια ενός μαγνητόμετρου VSM (Vibrating Sample Magnetometer) σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτό είναι αναγκαίο διότι το υλικό αυτό παρουσιάζει πολύ ασθενή μαγνητική συμπεριφορά και οι ιδιότητες του δεν μπορούν να μετρηθούν με συμβατικές πειραματικές διατάξεις όπως αρχικά επιχειρήθηκε.



**Εικόνα 4.3.** Το μαγνητόμετρο VSM (Vibrating Sample Magnetometer) που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του μαγνητικού βρόχου υστέρησης των σύνθετων υλικών.

Σε ένα VSM μαγνητόμετρο το δείγμα τοποθετείται ανάμεσα από κατάλληλα πηνία λήψης, και υποβάλλεται σε ημιτονοειδής κίνηση, δηλαδή, δονείται. Οι προκύπτουσες αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο επάγουν μια τάση στα πηνία λήψης η οποία είναι ανάλογη προς τη μαγνητική ροπή του δείγματος. Το διάγραμμα 4.1 απεικονίζει τον Βρόχο Υστέρησης (Μαγνήτιση – Ένταση μαγνητικού πεδίου) του σύνθετου υλικού για διαφορετικές κατά βάρος συγκεντρώσεις σιδήρου.



**Διάγραμμα 4.1.** Η καμπύλη του βρόχου υστέρησης (Μαγνήτιση – Ένταση μαγνητικού πεδίου) εποξικής ρητίνης εμπλουτισμένης με σωματίδια σιδήρου για διάφορες συγκεντρώσεις.

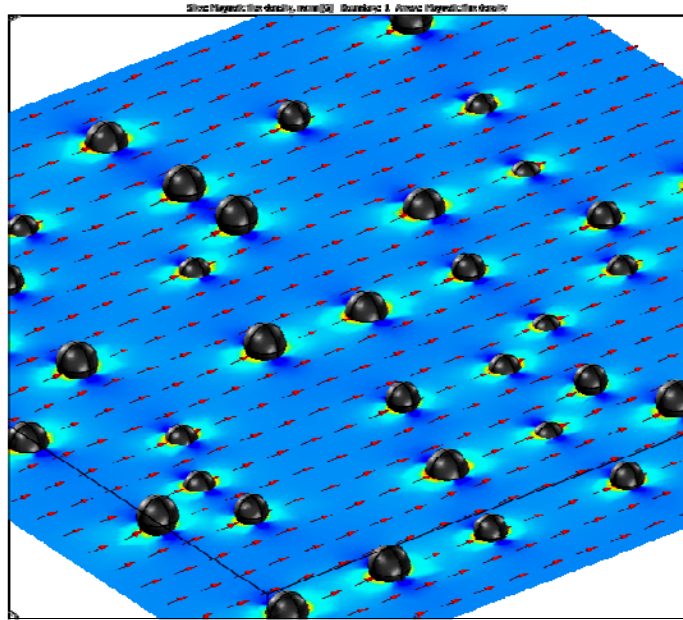
Από τις παραπάνω καμπύλες μπορούν να εξαχθούν οι βασικές μαγνητικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού καθώς και συμπεράσματα που αφορούν την συγκέντρωση των κόκκων στο υλικό. Επιγραμματικά παρατηρούμε :

- Τα δείγματα παρουσιάζουν μια πολύ στενή καμπύλη Υστέρησης και ουσιαστικά εμφανίζουν *Ανυστεριτική* συμπεριφορά, δηλαδή το υλικό δεν μπορεί να αποκτήσει «μαγνητική μνήμη».
- Επίσης έχουν πολύ χαμηλή Παραμένουσα Μαγνήτιση (*Retentivity*: η ικανότητα του υλικού να διατηρεί ένα ορισμένο ποσό της εναπομένουσας μαγνήτισης, όταν το μαγνητικό πεδίο αφαιρείται μετά την επίτευξη κορεσμού) η οποία αυξάνεται ανάλογα με το ποσοστό των σωματιδίων σιδήρου στο πολυμερές.
- Αποδεικνύεται, ότι με την αύξηση των σωματίδια σιδήρου στο πολυμερές, η Μαγνήτιση Κόρου ( $M_s$ ) αυξάνει, ενώ μειώνεται το Πεδίο Κορεσμού ( $H_s$ ). Η αύξηση των μαγνητικών σωματιδίων στο πολυμερές, έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί η απόσταση μεταξύ τους. Η μείωση της απόστασης οδηγεί σε μαγνητική σύζευξη μεταξύ των σωματιδίων. Αυτή η σύζευξη οδηγεί σε μείωση του πεδίου κορεσμού επειδή μόλις ένα σωματίδιο κορεστεί, τα άλλα σωματίδια μπορούν να κορεστούν πιο εύκολα λόγω της μαγνητικής αλληλεπίδρασης.
- Παράλληλα παρατηρούμε πως η μαγνητική αντίσταση (*reluctance*), παρουσιάζει σχέση αντιστρόφως ανάλογη με την συγκέντρωση των σωματιδίων, καθώς η μαγνητική ροή μέσα στο υλικό αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης.
- Τέλος η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  του σύνθετου υλικού είναι αρκετά χαμηλή σε σχέση με τον καθαρό σίδηρο, πράγμα που είναι αναμενόμενο.

**Πίνακας 4.1.** Βασικές μαγνητικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών σιδήρου εποξικής ρητίνης

% weight concentration of Fe particles	Relative magnetic permeability $\mu_r$	Retentivity (emu/gr)	Saturation Magnetization $M_s$ (emu/gr)	Saturation Field $H_s$ (Oe)
30	~1.2	0.14	37	11500
40	~1.4	0.39	63.5	10600
50	~1.6	0.46	72.5	9850
60	~1.9	0.74	87.5	9670

Σε μια προσπάθεια να κατανοηθεί η συμπεριφορά αυτού του σύνθετου υλικού όταν βρίσκεται σε στατικά μαγνητικά πεδία καθώς και η επίδραση της συγκέντρωσης της σκόνης σιδήρου, αναπτυχτήκαν διάφορα αριθμητικά μοντέλα με βάση και των εικόνων που εξήχθησαν από το Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Στην εικόνα 4.4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα κόκκων σιδήρου οι οποίοι είναι διασκορπισμένοι σε ένα μη μαγνητικό μέσο και υποβάλλονται σε ένα εξωτερικό ομογενές μαγνητικό πεδίο. Παρατηρούμε πως εκτός από το εξωτερικό πεδίο, εμφανίζεται και ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο οφείλεται σε κάθε κόκκο ξεχωριστά το οποίο οδηγεί στην μαγνητική σύζευξη των κόκκων.



**Εικόνα 4.4.** Απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται μέσα στο σύνθετο υλικό όταν αυτό υποβάλλεται σε εξωτερικό ομογενές μαγνητικό πεδίο. Τα βέλη αντιπροσωπεύουν το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο ενώ επιφάνεια αντιπροσωπεύει μια τομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής  $B$  μέσα στο υλικό.

### 4.3 Βασικές θεωρητικές έννοιες

#### 4.3.1 Μαγνητικά κυκλώματα

Σε αρκετές πρακτικές εφαρμογές του μαγνητισμού χρησιμοποιούνται μαγνητικές δομές για την καθοδήγηση και την διαμόρφωση των μαγνητικών πεδίων, παρέχοντας ένα καλά καθορισμένο δρόμο για την μαγνητική ροή. Τέτοιες δομές ονομάζονται μαγνητικά κυκλώματα. Τα μαγνητικά κυκλώματα βρίσκονται σε ηλεκτροκινητήρες, γεννήτριες, σκληρούς δίσκους ηλεκτρονικών υπολογιστών, μαγνητόφωνα, κα. Το ηλεκτρικό ρεύμα μέσω μιας σπείρας δημιουργεί μαγνητική ροή, κάθετη προς την επιφάνεια του. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του ρεύματος ή όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των σπειρών  $N$ , τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μαγνητική ροή. Αυτή δυνατότητα παραγωγής μαγνητικής ροής ονομάζεται Μαγνητεγερτική δύναμη της ( $MMF$ ). Η Μαγνητεγερτική δύναμη συνήθως συμβολίζεται με το γράμμα  $\mathcal{F}$  και ορίζεται ως εξής:

$$\mathcal{F} = NI \text{ (αριθμός σπειρών} \cdot \text{Ampere)} \quad (4.1)$$

Η μαγνητική ροή σε ένα μαγνητικό κύκλωμα εξαρτάται επίσης από την αντίσταση που παρουσιάζει το κύκλωμα σε αυτή. Μαγνητική αντίσταση  $\mathcal{R}$  (*reluctance*) εξαρτάται από τις διαστάσεις του πυρήνα όπου κυκλοφορεί η μαγνητική ροή και το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος. Όπως και η ηλεκτρική αντίσταση του σύρματος, έτσι και η μαγνητική αντίσταση είναι ευθέως ανάλογη προς το μήκος  $L$  και αντιστρόφως ανάλογη της διατομής  $A$  [42]. Σε μορφή εξίσωσης:

$$\mathcal{R} = \frac{L}{\mu A} \quad (\text{A/Weber}) \quad (4.2)$$

όπου το  $\mu$  είναι μια ιδιότητα του υλικού του πυρήνα, που ονομάζεται μαγνητική διαπερατότητα. Η διαπερατότητα είναι ένα μέτρο του πόσο εύκολο μπορεί να επιτευχθεί η μαγνητική ροή σε ένα υλικό και είναι ίση με το γινόμενο του  $\mu_r$  (σχετική διαπερατότητα του υλικού) και του  $\mu_0$  (διαπερατότητα του κενού). Τα Σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν υψηλή διαπερατότητα και κατά συνέπεια μικρή αντίσταση  $\mathcal{R}$  ενώ τα μη μαγνητικά υλικά έχουν χαμηλή διαπερατότητα και υψηλή  $\mathcal{R}$ .

Η μαγνητική ροή μέσα από τη διατομή  $S$  του πυρήνα εκφράζεται ως:

$$\Phi = B \cdot S \quad (\text{Weber}) \quad (4.3)$$

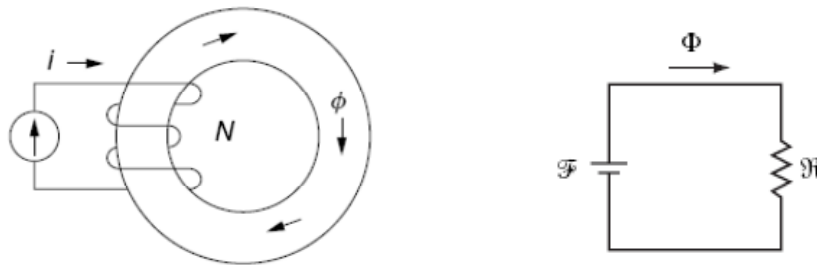
όπου  $B$  είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής στον πυρήνα. Η καταστατική εξίσωση του υλικού του πυρήνα είναι:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (\text{Tesla}) \quad (4.4)$$

Η μαγνητική ροή  $\Phi$ , συνδέεται με τη Μαγνητοεγερτική δύναμη ( $MMF$ ) και τη Μαγνητική αντίσταση (*reluctance*) μέσω της σχέσης :

$$\Phi = \mathcal{F} / \mathcal{R} \quad (\text{Weber}) \quad (4.5)$$

Η σχέση αυτή είναι παρόμοια με το νόμο του Ohm και απεικονίζεται συμβολικά στην εικόνα 4.5. Της στον πίνακα 4.2 αναφέρονται οι αναλογίες μεταξύ των μεγεθών στα ηλεκτρικά και μαγνητικά κυκλώματα :



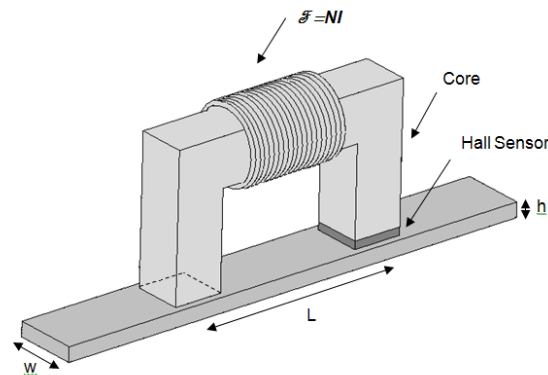
Εικόνα 4.5. Αναλογία μεταξύ μαγνητικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Πίνακας 4.2. Αναλογίες μεταξύ ηλεκτρικών και μαγνητικών μεγεθών

Electrical	Magnetic	Magnetic Units
Voltage $V$	Magnetomotive force $\mathcal{F}$	Ampere
Current $I$	Magnetic flux $\Phi$	Weber Wb
Resistance $R$	Reluctance $\mathcal{R}$	Ampere/Wb
Conductivity $1/\rho$	Permeability $\mu$	Wb/Ampere·m
Current density $J$	Magnetic flux density $B$	Wb/m <sup>2</sup> = Tesla T
Electric field $E$	Magnetic field intensity $H$	Ampere/m

Η μελέτη επικεντρώνεται στην μεταβολή που θα υποστεί η μαγνητική αντίσταση  $\mathcal{R}$  του σύνθετου υλικού όταν υποβληθεί σε μηχανική καταπόνηση. Προκειμένου να μετρηθεί η μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης των δοκιμίων, αυτά πρέπει να αποτελούν μέρος της μαγνητικού κυκλώματος. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι με την βοήθεια της ηλεκτρομαγνήτη. Η μέτρηση της μεταβολής της μαγνητικής αντίστασης μπορεί να γίνει έμμεσα παρεμβάλλοντας ένα αισθητήρα Hall (αισθητήρας πυκνότητας μαγνητικής ροής  $B$ ) μεταξύ του δοκιμίου και του ηλεκτρομαγνήτη. Στην εικόνα 4.6 παρουσιάζεται σχηματικά το μαγνητικό κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε.

- Η βασική ιδέα είναι πως αν μεταβληθεί η μαγνητική αντίσταση στο δοκίμιο αυτό θα επηρεάσει την μαγνητική ροή σε όλο το κύκλωμα.



**Εικόνα 4.6.** Το μαγνητικό κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της μεταβολής της μαγνητικής αντίστασης

Όταν το δοκίμιο υποβάλλεται σε εξωτερικές δυνάμεις αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του, καθώς την μεταβολή της μαγνητικής του διαπερατότητας  $\mu$ . Στην περίπτωση της μόνο η μεταβολή της διατομής γίνεται αντιληπτή καθώς το μήκος του ηλεκτρομαγνήτη παραμένει σταθερό. Θα πρέπει να σημειωθεί πως σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά κυκλώματα δεν χρειάζεται να υπάρξει συγκόλληση του δοκιμίου με το υπόλοιπο κύκλωμα, η μέτρηση είναι επαγωγική.

#### 4.3.2 Αριθμητική προσομοίωση του μαγνητικού κυκλώματος

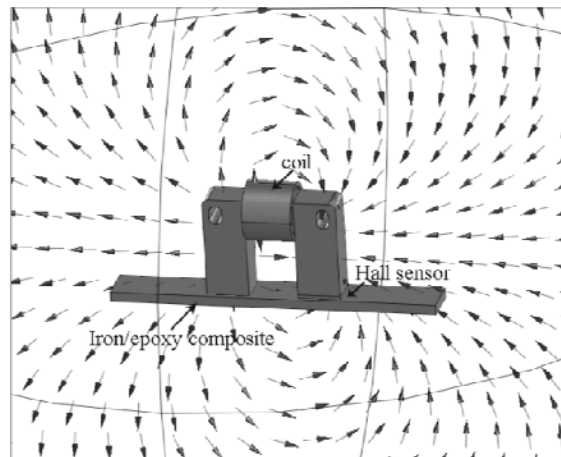
Στην περίπτωση που το ένα κομμάτι του κυκλώματος αποτελείται από σύνθετο υλικό σιδήρου εποξικής ρητίνης, το υλικό αυτό έχει την τάση να διαρρέει την μαγνητική ροή και έτσι η ανάλυση του κυκλώματος δεν μπορεί να γίνει με απλοποιημένες εξισώσεις (*Kirchhoff*). Έτσι προκειμένου να έχουμε καλύτερη αντίληψη του φαινομένου, αναπτύχθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο. Το μοντέλο χρησιμοποιεί την ίδια γεωμετρία και φυσικές ιδιότητες του πραγματικού ηλεκτρομαγνήτη ενώ το σύνθετο υλικό μοντελοποιείται σαν ένα ισότροπο υλικό με τις μαγνητικές ιδιότητες που υπολογιστήκαν πειραματικά.

Στην περίπτωση του ηλεκτρομαγνήτη οι περιελίξεις του πηνίου δεν έχουν συμπεριληφθεί αλλά μοντελοποιήθηκαν ως ομοιόμορφη κατανομή ηλεκτρικού ρεύματος γύρω από τον πυρήνα. Ο περιβάλλον αέρας σχεδιάστηκε ως σφαίρα πεπερασμένης ακτίνας, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από της διαστάσεις ηλεκτρομαγνήτη. Η λύση του Μαγνητοστατικού προβλήματος περιγράφεται από

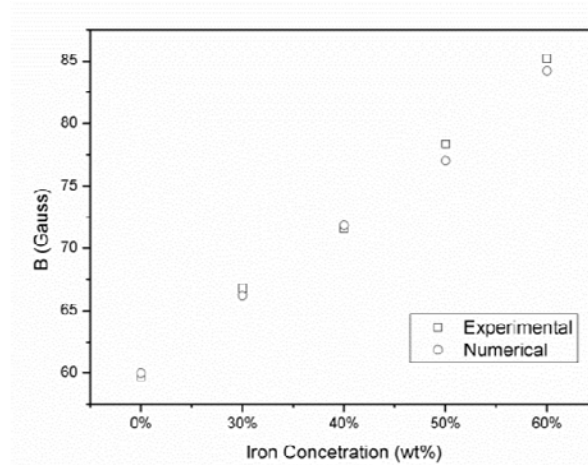
την ακόλουθη διαφορική εξίσωση, η οποία και λύνεται με την βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων :

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\mu_r} \cdot \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}^e \quad (4.7)$$

Όπου  $\mu_0$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού,  $\mu_r$  είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού,  $\mathbf{A}$  είναι το Ανυσματικό μαγνητικό δυναμικό και  $\mathbf{J}^e$  είναι η ηλεκτρική πυκνότητα ρεύματος του πηνίου. Στην εικόνα 4.7 παρουσιάζεται το αριθμητικό μοντέλο του ηλεκτρομαγνήτη.



**Εικόνα 4.7.** Αριθμητική προσομοίωση του ηλεκτρομαγνήτη πάνω από δοκίμιο από σύνθετο υλικό. Τα βέλη αντιπροσωπεύουν το μαγνητικό πεδίο που παράγεται.



**Διάγραμμα 4.2.** Πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα της πυκνότητας μαγνητικής ροής B, για δοκμία με διαφορετική συγκέντρωση σωματιδίων σιδήρου.



Η αριθμητική προσομοίωση επιβεβαιώνει ότι η μαγνητική ροή δεν περιορίζεται μέσα στο δοκίμιο, αλλά υπάρχει διαρροή προς τον περιβάλλοντα χώρο. Το διάγραμμα 4.2 δείχνει τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των πειραματικών και αριθμητικών τιμών της πυκνότητας μαγνητικής ροής για τις περιπτώσεις όπου ο ηλεκτρομαγνήτης είναι στον αέρα και πάνω από τα δοκίμιο με διαφορετική συγκέντρωση σωματιδίων σιδήρου. Οι αριθμητικές τιμές υπολογίστηκαν με την ίδια θέση με τον πραγματικό αισθητήρα Hall. Όπως μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει μια καλή συμφωνία μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών δεδομένων που δείχνει ότι το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αντιπροσωπεύει την πραγματική συμπεριφορά του μαγνητικού κυκλώματος.

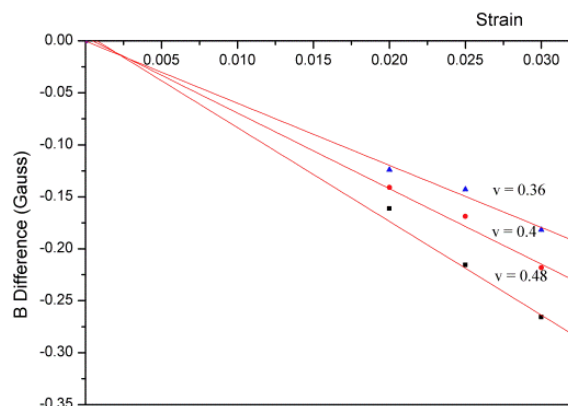
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αν μια εξωτερική δύναμη εφαρμοστεί στο δοκίμιο, αυτό θα έχει ως συνέπεια την μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του, που στην περίπτωσή μας μόνο η μεταβολή της διατομής θα επηρεάσει τη μαγνητική ροή καθώς το μήκος του ηλεκτρομαγνήτη παραμένει ίδιο. Επιπλέον, η επιμήκυνση του δείγματος θα έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της μέσης απόστασης μεταξύ των σωματιδίων και άρα τη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας του.

Οι δύο περιπτώσεις μελετήθηκαν αριθμητικά, ανεξάρτητα η μια από την άλλη, όταν το δοκίμιο υπόκειται σε εφελκυσμό. Η επίδραση της μεταβολής της διατομής του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε για τρεις τύπους υλικών, τύπος I (λόγος Poisson  $\nu = 0.36$ ) τύπος II (λόγος Poisson  $\nu = 0,4$ ) και τύπος III (λόγος Poisson  $\nu = 0,48$ ), για ένα ευρύ φάσμα επιμήκυνσης.

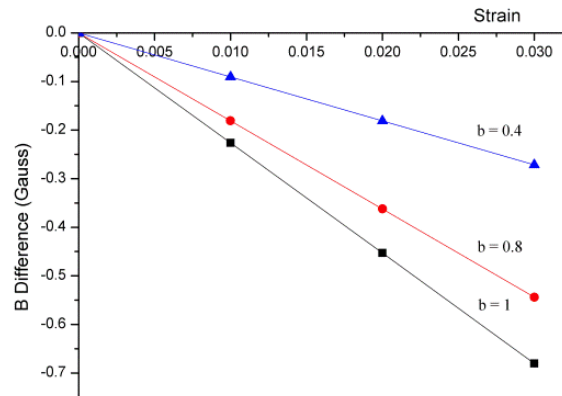
Η μεταβολή στην σχετική μαγνητική διαπερατότητα υλικού μπορεί να περιγραφεί από μια γραμμική μείωση ανάλογη με την παραμόρφωση και από την εξίσωση:

$$\mu_r' = \mu_r - b \cdot \varepsilon_{xx} \quad (4.8)$$

όπου  $\mu_r'$  είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα μετά την παραμόρφωση,  $\varepsilon_{xx}$  η παραμόρφωση κατά μήκος του δοκιμίου και  $b$  είναι ένας αυθαίρετος συντελεστής. Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις η πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  μεταξύ του ηλεκτρομαγνήτη και του δοκιμίου μειώνεται μονοτονικά. Τα αριθμητικά αποτελέσματα απεικονίζεται στο διάγραμμα 4.3 και μπορούμε να δούμε ότι η μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής αυξάνεται καθώς το σύνθετο υλικό γίνεται όλο και ελαστικό (όταν ο λόγος Poisson αυξάνεται). Επιπλέον από τα αριθμητικά αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4.4, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι μια μικρή μείωση στην σχετική μαγνητική διαπερατότητα του σύνθετου μπορεί να προκαλέσει σημαντικές εναλλαγές στην πυκνότητα μαγνητικής ροής.



**Διάγραμμα 4.3.** Αριθμητικά αποτελέσματα σχετικά με τη μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής  $B$  λόγω της μεταβολής της διατομής που προκαλείται από την παραμόρφωση.



**Διάγραμμα 4.4.** Αριθμητικά αποτελέσματα σχετικά με τη διαφορά της πυκνότητας μαγνητικής ροής λόγω της μεταβολής της μαγνητικής διαπερατότητας που προκαλείται από την παραμόρφωση.

#### 4.4 Πειράματα εφελκυσμού

##### 4.4.1 Πειράματα εφελκυσμού με ηλεκτρομαγνήτη

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό προκειμένου να παρατηρηθεί η μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης  $\mathcal{R}$  σε σχέση με την παραμόρφωση. Ο ηλεκτρομαγνήτης τοποθετείται πάνω από το δοκίμιο και συγκρατείται με λαστιχάκια. Το πηνίο τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα με αποτέλεσμα να προκαλεί κυκλοφορία μαγνητικής ροής μέσα στον πυρήνα και το δοκίμιο. Η παράμετρος η οποία μετράται είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  μεταξύ του ηλεκτρομαγνήτη και του δοκιμίου.



α)

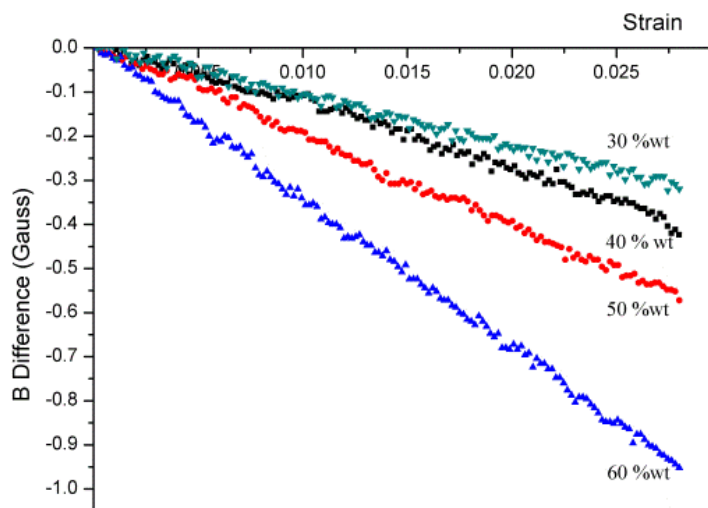


β)

**Εικόνα 4.8.** α) βαθμονόμηση του άξονα της παραμόρφωσης μέσω της έκτασης των αρπάγων της μηχανής εφελκυσμού με την χρήση οπτικού μηχανοσκόπου β) η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της μεταβολής της μαγνητικής αντίστασης  $\mathcal{R}$  των δοκιμίων

Κατά την διάρκεια του εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε ένα Οπτικό μηκυσιόμετρο, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.8. Πρώτα χρησιμοποιήθηκαν "δοκιμαστικά" δοκίμια (ίδια γεωμετρία και υλικό) για τη βαθμονόμηση του άξονα της παραμόρφωσης μέσω της έκτασης των αρπάγων της μηχανής εφελκυσμού. Όλα τα υπόλοιπα δοκίμια υπέστησαν εφελκυσμό χωρίς τη χρήση του οπτικού μηκυσιομέτρου.

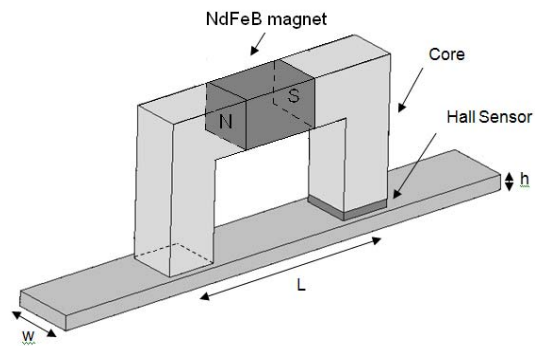
Στο διάγραμμα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταβολής της πυκνότητας μαγνητικής ροής  $B$  μεταξύ του ηλεκτρομαγνήτη και του δοκιμίου. Παρατηρείται πως σε όλες τις περιπτώσεις συγκέντρωσης παρουσιάζεται γραμμική μείωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής ανάλογα με την παραμόρφωση. Αυτό αποδεικνύει πως η μαγνητική ροή μέσα στο υλικό μειώνεται πράγμα που σημαίνει πως η μαγνητική αντίσταση αυξάνεται με τον εφελκυσμό. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζει γραμμική και μονοτονική συμπεριφορά για ένα αρκετά μεγάλο εύρος παραμορφώσεων και παρουσιάζει αυξητική συμπεριφορά καθώς η συγκέντρωση των σωματιδίων αυξάνεται. Επιπλέον παρατηρείται πως τα πειραματικά αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με τα αριθμητικά, πράγμα που ενισχύει την ορθότητα του μοντέλου.



**Διάγραμμα 4.5.** Η μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής  $B$  σε σχέση με την παραμόρφωση

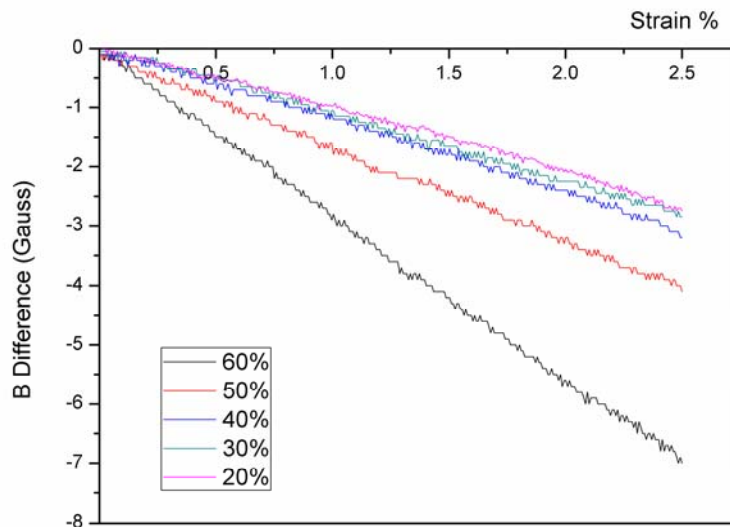
#### 4.4.2 πειράματα εφελκυσμού με μόνιμο μαγνήτη

Η πειραματική διαδικασία που περιγράφηκε σε προηγούμενες παραγράφους, επαναλήφθηκε αλλάζοντας την σύνθεση του μαγνητικού κύκλωματος. Η βασική αρχή λειτουργίας παραμένει ίδια απλά το νέο μαγνητικό κύκλωμα χρησιμοποιεί αντί για πηνίο ένα μόνιμο μαγνήτη (NdFeB) για την παράγωγη της μαγνητικής ροής, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.9. Σκοπός αυτής της παραλλαγής είναι να μελετηθεί το φαινόμενο για μεγαλύτερες τιμές του μαγνητικού πεδίου διέγερσης. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η μελέτη του φαινομένου σε δοκίμια όπου το ποσοστό συγκέντρωσης είναι κάτω από 30% κ.β. Ένα ισχυρότερο πεδίο διέγερσης αναμένεται να δημιουργεί μεγαλύτερο συζευγμένο πεδίο μεταξύ των σωματιδίων και άρα καλύτερη απόκριση. Όμως πρέπει να παρατηρηθεί πως οι αισθητήρες Hall που διατίθενται στο εμπόριο παρουσιάζουν μείωση της ευαισθησίας τους, όσο αυξάνεται το πεδίο λειτουργίας τους. Επιπλέον το νέο μαγνητικό κύκλωμα έχει αρκετά μικρότερες διαστάσεις με σκοπό να είναι όσο το δυνατόν πιο σημειακή η μέτρηση.



**Εικόνα 4.9** Το μαγνητικό κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της μεταβολής της μαγνητικής αντίστασης

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν εκ νεου σε εφελκυσμό προκειμένου να παρατηρηθεί η μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης  $\mathcal{R}$  σε σχέση με την παραμόρφωση. Η παράμετρος η οποία μετράται και αυτή τη φορά είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  μεταξύ του μαγνήτη και του δοκιμίου. Κατά την διάρκεια του εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε ένα Οπτικό μηκυνσιόμετρο με το οποίο μετράται η παραμορφωση ταυτόχρονα με την μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής.



**Διάγραμμα 4.6.** Η μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής  $B$  σε σχέση με την παραμόρφωση

Στο διάγραμμα 4.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταβολής της πυκνότητας μαγνητικής ροής  $B$  μεταξύ του μόνιμου μαγνήτη και του δοκιμίου. Όπως είναι αναμενόμενο παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά με τα προηγούμενα πειράματα. Αποδεικνύεται πως το φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί ακόμα και σε δοκίμια με συγκέντρωση 20% αλλά βέβαια η απόκριση είναι αρκετά ασθενείς.

#### 4.4.3 Χρήση του σύνθετου υλικού ως επίστρωση για την μέτρηση της παραμόρφωσης σε άλλα υλικά

Μετά την πειραματική απόδειξη πως ένα πολυμερές το οποίο είναι εμπλουτισμένο με σωματίδια σιδήρου μεταβάλλει τις μαγνητικές του ιδιότητες όταν υποβάλλεται σε μηχανική καταπόνηση, το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την χρήση του ως επίστρωση σε άλλα δομικά υλικά. Η επίστρωση αυτή έχει ως σκοπό να λειτουργεί ως ένα μέσο καταγραφής της παραμόρφωσης στην εξωτερική επιφάνεια άλλων υλικών.

Αρχικά κατασκευάστηκαν δοκίμια από αλουμίνιο και καθαρή εποξική ρητίνη λαμβάνοντας σχήμα “dog bone”. Η επιλογή των υλικών έγινε με γνώμονα την χρησιμότητα τους σε κατασκευές καθώς και τις μαγνητικές τους ιδιότητες. Στο σημείο αυτό πρέπει να υπογραμμιστεί πως η μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω έχει εφαρμογή μόνο σε μη μαγνητικά υλικά. Ο περιορισμός αυτός έγκειται στο γεγονός ότι ένα μη μαγνητικό υλικό δεν επηρεάζει καθόλου τις μετρήσεις σε αντίθεση με ένα μαγνητικό υλικό (πχ χάλυβας). Αυτό γιατί σε αυτή την περίπτωση οι μαγνητικές ροή θα προτιμήσει να περάσει από το μαγνητικό υλικό και όχι από την επίστρωση.

Η επίστρωση αποτελείται από ειδική βαφή (αστάρι) στην οποία έχουν προστεθεί σωματίδια σιδήρου σε συγκέντρωση 70% κ.β. Η προσθήκη στα δοκίμια έγινε με την βοήθεια πινέλου σε μια από τις εξωτερικές επιφάνειες, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.10.



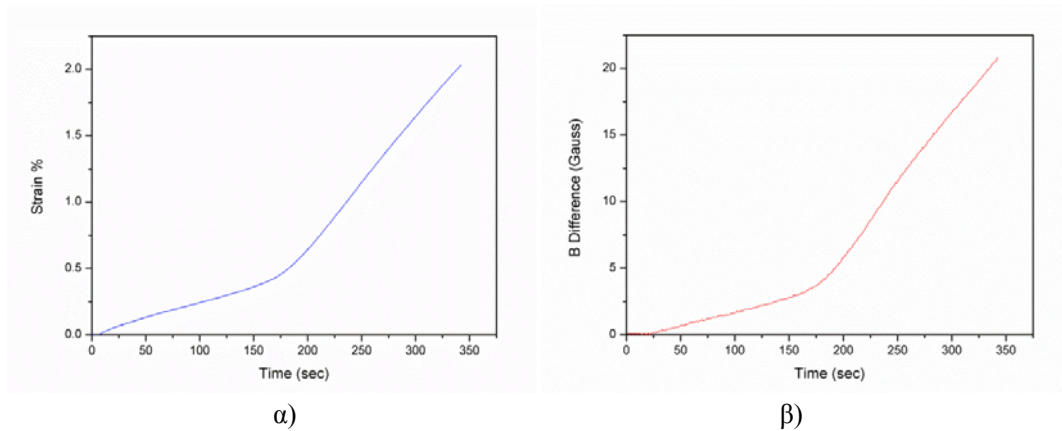
α)



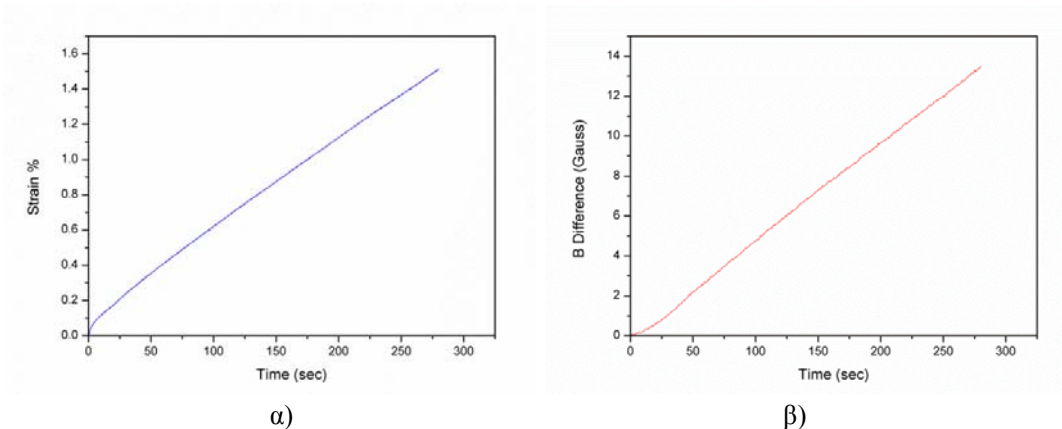
β)

**Εικόνα 4.10.** α) δοκίμιο αλουμινίου με επίστρωση από σωματίδια σιδήρου β) δοκίμιο εποξικής ρητίνης με επίστρωση από σωματίδια σιδήρου.

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό με σκοπό την παραμόρφωση τους. Το μέγεθος της παραμόρφωσης μετράται από την μια πλευρά του δοκιμίου με την βοήθεια ενός οπτικού μηκυσιόμετρου, ενώ από την άλλη πλευρά με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε. Στα διαγράμματα 4.7-4.8 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των δυο μεθόδων (οπτικό μηκυσιόμετρο – μαγνητική μέτρηση) και όπως είναι εμφανές, υπάρχει καλή ταύτιση μεταξύ τους.



**Διάγραμμα 4.7.** α) Η παραμόρφωση σε σχέση με το χρόνο σε δοκίμιο αλουμινίου μετρούμενη με οπτικό μηκυσιόμετρο β) η μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής B σε σχέση με το χρόνο.



**Διάγραμμα 4.8.** α) Η παραμόρφωση σε σχέση με το χρόνο σε δοκίμιο εποξικής ρητίνης μετρούμενη με οπτικό μηκυσιόμετρο β) η μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής B σε σχέση με το χρόνο.

Για τις παραπάνω περιπτώσεις μπορεί να υπολογιστεί και ο συντελεστής μετατροπής GF ο οποίος μπορεί να οριστεί από την σχέση:

$$GF = \frac{B_{\text{Diff}}}{\varepsilon}$$

Όπου  $\varepsilon$  είναι η επί τοις εκατό παραμόρφωση και  $B_{\text{Diff}}$  είναι η μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής B. Το μέγεθος του συντελεστή μετατροπής υπολογίζεται να είναι από  $\sim 8,75$  έως  $\sim 10$  για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις που μελετήθηκε και είναι σχετικά μεγαλύτερος σε σχέση με τα κλασσικά ηλεκτρικά μηκυσιόμετρα.

#### 4.4.4 Πειραματική διερεύνηση της επαναληψιμότητας της μεθόδου

Το πείραμα που περιγράφεται παρακάτω έγινε με σκοπό να εξακριβωθεί η επαναληψιμότητα της μεθόδου που αναπτύχθηκε. Συγκεκριμένα έγινε προσπάθεια να διατηρηθούν οι ίδιες παράμετροι σε μια σειρά από πειράματα και να αξιολογηθεί η ομοιομορφία στην απόκριση της μεθόδου. Έτσι κατασκευάστηκαν καινούργια δοκίμια διατηρώντας τα ίδια βασικά τους χαρακτηριστικά. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκε φύλλο από συμπαγές πολυβινυλοχλωρίδιο (polyvinyl chloride, PVC) του οποίου η μια επιφάνεια καλύφθηκε από βαφή στην οποία προστέθηκαν μικροσωματίδια σιδήρου 70% κατά βάρος. Στην συνέχεια αποσπάστηκαν 5 δοκίμια με την βοήθεια κατάλληλα διαμορφωμένης πρέσας.



**Εικόνα 4.11.** Τα δοκίμια τα οποία αποσπάστηκαν από συμπαγή πλάκα με μαγνητική επίστρωση, με την βοήθεια κατάλληλα διαμορφωμένης πρέσας.

Τα δοκίμια υποβάλλονται σε εφελκυσμό με το ίδιο τρόπο που αναφέρεται σε προηγούμενες παραγράφους. Το μέγεθος της παραμόρφωσης μετράται από την μια πλευρά του δοκιμίου με την βοήθεια ενός οπτικού μηκυσιόμετρου, ενώ από την άλλη πλευρά με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην εικόνα 4.12.



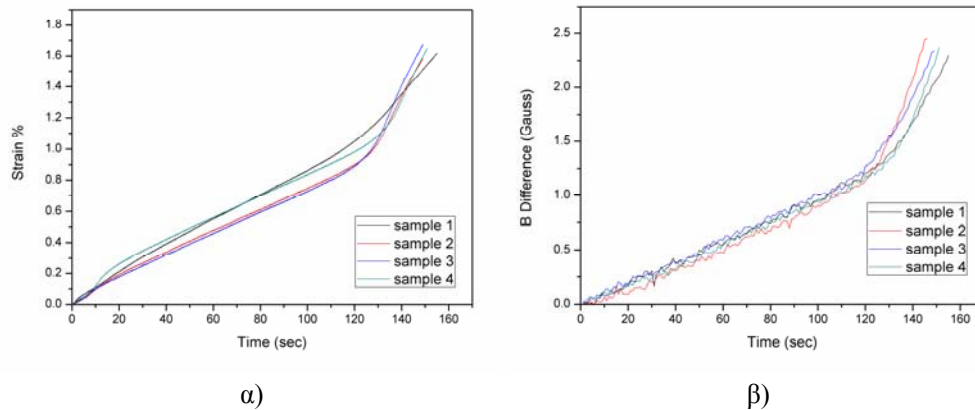
α)



β)

**Εικόνα 4.12.** Το μέγεθος της παραμόρφωσης μετράται από την μια πλευρά του δοκιμίου με την βοήθεια α) ενός οπτικού μηκυσιόμετρου, ενώ από την άλλη πλευρά β) με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε.

Στο διάγραμμα 4.9 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των δυο μεθόδων (οπτικό μηκυσιόμετρο – μαγνητική μέτρηση) για τα δοκίμια από PVC. Παρατηρώντας τις καμπύλες για τις δυο περιπτώσεις μέτρησης, μπορούμε να συμπεράνουμε πως υπάρχει μια σχετική επαναληψιμότητα. Θα πρέπει να σημειωθεί πως ένα οπτικό μηκυσιόμετρο είναι εξαιρετικά ακριβές και δεν μπορεί εκ των πραγμάτων να συγκριθεί με μια πρωτότυπη πειραματική διάταξη, καθιστώντας τις όποιες αποκλίσεις μέσα σε φυσιολογικά πλαίσια.



**Διάγραμμα 4.9.** α) Η παραμόρφωση σε σχέση με το χρόνο σε δοκίμια από PVC μετρούμενη με οπτικό μηκυσιόμετρο β) η μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής B σε σχέση με το χρόνο.

#### 4.5 Συμπεράσματα – παρατηρήσεις

Όπως αποδείχτηκε πειραματικά τα κοκκώδη σύνθετα υλικά με εγκλείσματα σιδήρου έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τις μαγνητικές τους ιδιότητες όταν παραμορφώνονται. Άρα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εξωτερικά στρώματα σε ένα υλικό ή μια κατασκευή και να καταγράφουν μεταβολές στο παραμορφωσιακό πεδίο τους. Το φαινόμενο μπορεί να γίνει αισθητό ακόμη και σε περιπτώσεις μικρής σχετικά συγκέντρωσης (κατά βάρος), οπότε αυτή η μεθοδολογία θα μπορούσε να εφαρμοστεί απευθείας σε πολυμερή εμπλουτισμένα με σωματίδια σιδήρου. Το φαινόμενο παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά, η οποία μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon = A \cdot M \cdot B_{\text{Diff}} \quad (4.9)$$

$$\text{με } A = f(T, C, d, v) \text{ και } M = g(S, B_{\text{MMF}})$$

όπου

$\varepsilon$  : Η παραμόρφωση κατά την διεύθυνση των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού κυκλώματος

$B_{\text{Diff}}$  : Η μεταβολή που παρατηρείται στην πυκνότητα μαγνητικής ροής του κυκλώματος

T : Το πάχος του σύνθετου υλικού σιδήρου/πολυμερούς

C : Η κατά βάρος συγκέντρωση σε σωματίδια σιδήρου

d : Η μέση διάμετρος των σωματιδίων σιδήρου



$\nu$  : Ο λόγος Poisson του σύνθετου υλικού σιδήρου/πολυμερούς

$S$  : Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μαγνητικού κυκλώματος

$B_{MMF}$  : Η πυκνότητα μαγνητικής ροής της μαγνητεγερτικής δύναμης (πηνίο, μόνιμος μαγνήτης)

Στην παραπάνω σχέση οι συντελεστές  $A$  και  $M$  επίτηδες εμφανίζονται χωριστά ώστε να είναι διακριτή η συνεισφορά των εγγενών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού σιδήρου/πολυμερούς και του μαγνητικού κυκλώματος. Είναι κατανοητό πως κάθε παράμετρος παίζει ξεχωριστό ρόλο ως προς την απόκριση και ευαισθησία της μεθόδου. Επίσης πρέπει να σημειωθεί η συνεισφορά του αισθητήρα Hall καθώς τα χαρακτηριστικά του μπορεί να μην επηρεάζουν το φαινόμενο αλλά σίγουρα είναι καθοριστικά στον τρόπο λήψης των μετρήσεων.

Τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.4.4 δίνουν σαφείς ενδείξεις πως αν όλες οι παράμετροι διατηρηθούν σταθερές τότε μπορεί να επιτευχτεί επαναληψιμότητα στις μετρήσεις. Έτσι ένα τέτοιο υλικό μπορεί να βαθμονομηθεί ώστε να προκύψει μια πειραματική σχέση μεταξύ της παραμόρφωσης και της μεταβολής της πυκνότητας μαγνητικής ροής, η οποία να ισχύει για κάθε υλικό με τα ίδια χαρακτηριστικά.

Σημαντική παράμετρος είναι επίσης και το μέγεθος των κόκκων σιδήρου καθώς και η ποιότητα διασποράς τους στην μήτρα. Η μείωση του μεγέθους των κόκκων ενδέχεται να βελτιώσει την απόκριση ενώ η βελτιστοποίηση της διασποράς θα συμβάλει καθοριστικά στην επαναληψιμότητα του φαινομένου.

Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου σε μη μαγνητικές κατασκευές και εξαρτήματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της δομικής τους ακεραιότητας. Με την σύγκριση διαδοχικών μετρήσεων ανά χρονικά διαστήματα από την επιφάνεια της κατασκευής μπορούν να αναγνωριστούν πιθανές βλάβες.

## Κεφάλαιο 5

---

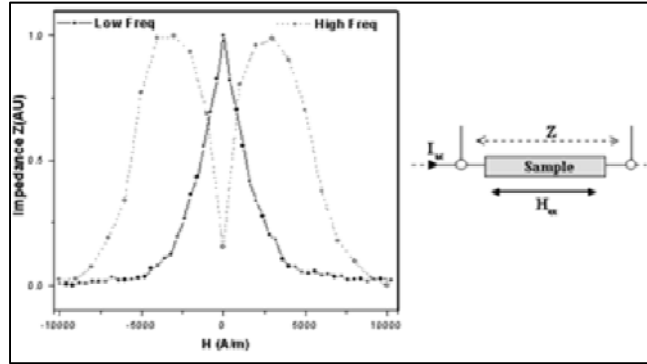
### Μέτρηση της παραμόρφωσης με την χρήση άμορφων μαγνητοελαστικών συρμάτων σε πολυμερή και σύνθετα υλικά

#### 5.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια διάφορα σύρματα, φτιαγμένα από ειδικά κράματα, έχουν μελετηθεί ευρέως και έχει προταθεί η εφαρμογή τους σε αισθητήρες για διάφορες εφαρμογές [43-45]. Αυτές οι εφαρμογές βασίζονται κυρίως στο φαινόμενο Barkhausen, το φαινόμενο Matteucci και το αντίστροφο φαινόμενο Wiedemann. Από την άλλη πλευρά, αντίστοιχοι μικρο-αισθητήρες, οι οποίοι βασίζονται στο φαινόμενο της γιγάντιας μαγνητό-εμπέδισης (Giant Magneto Impedance, GMI), έχουν αναπτυχθεί για βιομηχανικές εφαρμογές [46-47]. Όταν ένα τέτοιο μαγνητικό υλικό διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής έντασης και υψηλής συχνότητας υποβάλλεται σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, παρουσιάζει απότομη αλλαγή στην εμπέδισή του  $Z$ . Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως γιγάντια μαγνητό-εμπέδισή. Το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται γενικά κατά μήκος της κατεύθυνσης της ροής του ρεύματος. Οι αλλαγές στην εμπέδισή  $Z$  είναι μια συνέπεια των αλλαγών στην αλληλεπίδραση μεταξύ της μαγνήτισης  $M$  του υλικού και του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$  που παράγεται από το ρεύμα, και παριστάνεται σχηματικά στην εικόνα 5.1.

Αν και οι αρχικοί αισθητήρες GMI σχεδιάστηκαν για να ανιχνεύουν μαγνητικό πεδίο, παρατηρήθηκε πως κάποια κράματα κοβαλτίου (Co) είναι πολύ ευαίσθητα στην μηχανική καταπόνηση. Το κλειδί για την κατανόηση του φαινομένου GMI είναι η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  ή η μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi$  του μαγνητικού υλικού. Η εξάρτηση της εμπέδισης από το μαγνητικό πεδίο ελέγχεται από την ικανότητα της μαγνήτισης του υλικού να ανταποκρίνεται στο μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το ρεύμα. Αυτό ρυθμίζεται από την μαγνητική διαπερατότητα του υλικού στην κατεύθυνση του πεδίου που παράγεται από το ρεύμα. Η εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μεταβάλλει την διαπερατότητα, η οποία οδηγεί στην μεταβολή της εμπέδισης. Έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά ότι μια

εξωτερική μηχανική καταπόνηση (εφελκυσμός, στρέψη) μπορεί να αλλάξει την μαγνητική διαπερατότητα. Το αντίστροφο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής οδηγεί στην μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας αυτών των συρμάτων και έτσι μια εφαρμοζόμενη εξωτερική δύναμη μπορεί να προκαλέσει δραματική αλλαγή στην εμπέδιση τους. Ως αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού έχει παρατηρηθεί τιμή ως και 2000 στο συντελεστή μετατροπής (gauge factor), σε αισθητήρες παραμόρφωσης (μηκυσιόμετρα), αποτελούμενους από κράματα CoSiB και CoFeSiB [48].



**Εικόνα 5.1.** Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου της γιγάντιας μαγνητό-εμπέδισης (GMI)

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η ενσωμάτωση των συρμάτων αυτών σε πολυμερή και σύνθετα υλικά για την μέτρηση της παραμόρφωσης τους. Οι μικρές διαστάσεις και οι καλές μηχανικές ιδιότητες καθιστούν αυτά τα υλικά ιδανικά, καθώς δεν θα επηρεάσουν τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου ούτε θα προσθέσουν σημαντικό βάρος.

## 5.2 Βασικές θεωρητικές έννοιες

Εμπέδιση  $Z$  ονομάζεται η αντίσταση που προβάλλει ένα υλικό όταν διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα και περιγράφεται από την σχέση:

$$Z = R_{DC} + j \cdot X \quad (5.1)$$

όπου το  $R_{DC}$  περιγράφει την ωμική αντίσταση ενώ το  $jX$  περιγράφει την επαγωγική αντίσταση. Η εμπέδιση ενός μαγνητικού κυλινδρικού αγωγού ακτίνας  $r$  μπορεί να υπολογιστεί από την αναλυτική έκφραση [49]:

$$Z = R_{DC} \cdot k \cdot r \cdot \frac{J_0(k \cdot r)}{2 \cdot J_1(k \cdot r)} \quad (5.2)$$

$$k = (1 + j) / \delta \quad (5.3)$$

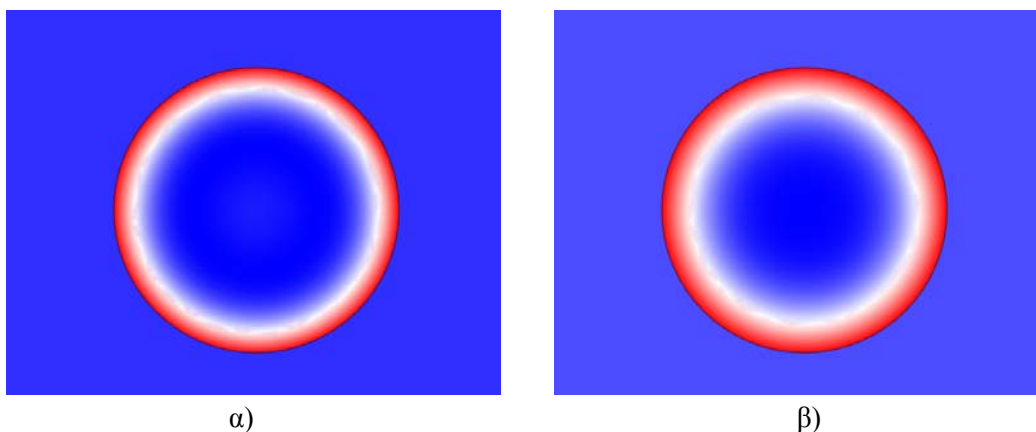
όπου  $J_0$  και  $J_1$  είναι οι συναρτήσεις Bessel πρώτου είδους και  $\delta$  το βάθος διείσδυσης, που δίνεται από την σχέση :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \sigma \cdot \mu_{\phi} \cdot f}} \quad (5.4)$$

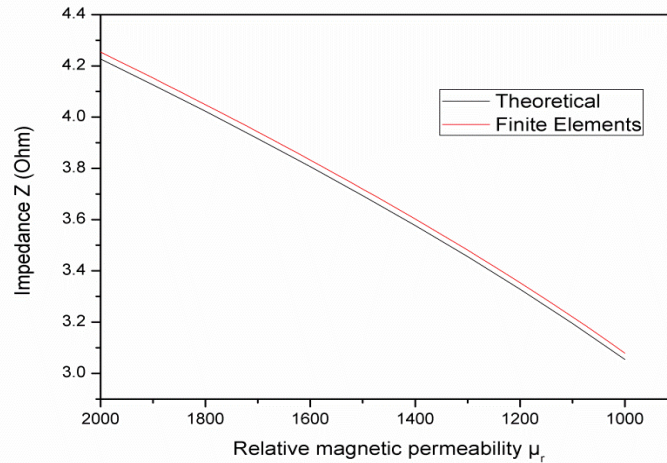
με  $\sigma$  να είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα,  $f$  η συχνότητα του ρεύματος κατά μήκος του σύρματος και  $\mu_{\phi}$  η περιφερειακή μαγνητική διαπερατότητα.

Όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, η κίνηση των ηλεκτρονίων δεν πραγματοποιείται σε όλο τον όγκο του υλικού αλλά περιορίζεται σε μια περιοχή γύρω από την επιφάνεια του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) και το μέγεθος αυτής της περιοχής καθορίζεται από το βάθος διείσδυσης  $\delta$ . Το φαινόμενο της μαγνητοεμπέδισης μπορεί να ερμηνευτεί με όρους του επιδερμικού φαινομένου σαν μια μεταβολή στο βάθος διείσδυσης του εναλλασσόμενου ρεύματος που προκαλείται από το εξωτερικό ερέθισμα (μαγνητικό πεδίο, μηχανική παραμόρφωση). Έτσι η μηχανική παραμόρφωση προκαλεί την μεταβολή της περιφερικής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_{\phi}$  επιβάλλοντας στο ηλεκτρικό ρεύμα να κινηθεί σε μια πιο στενή ή πιο πλατιά περιοχή πράγμα που τελικά συντελεί στην μεταβολή της εμπέδισης.

Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να παρασταθεί από ένα αριθμητικό μοντέλο. Στην εικόνα 5.2 παρουσιάζεται η μεταβολή στο βάθος διείσδυσης σε ένα υποθετικό μαγνητικό σύρμα, η οποία προκαλείται από την αλλαγή της περιφερικής μαγνητικής διαπερατότητας. Το μοντέλο αναφέρεται σε σύρμα διαμέτρου 0,1 mm και μήκους 10 cm, με σχετική μαγνητική διαπερατότητα ίση με 2000 και ηλεκτρική αγωγιμότητα ίση με  $10^7$  S/m, ενώ διαρρέεται από ρεύμα συχνότητας 100 KHz. Στο διάγραμμα 5.1 απεικονίζεται η εξάρτηση της εμπέδισης  $Z$  του σύρματος σε σχέση με την μαγνητική διαπερατότητα, όπως υπολογίστηκε αναλυτικά (σχέση 5.2) και αριθμητικά.



**Εικόνα 5.2.** Απεικόνιση του βάθους διείσδυσης σε μια τομή ενός μαγνητικού σύρματος α) με σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_r=2000$  και β) με σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_r=1200$ .



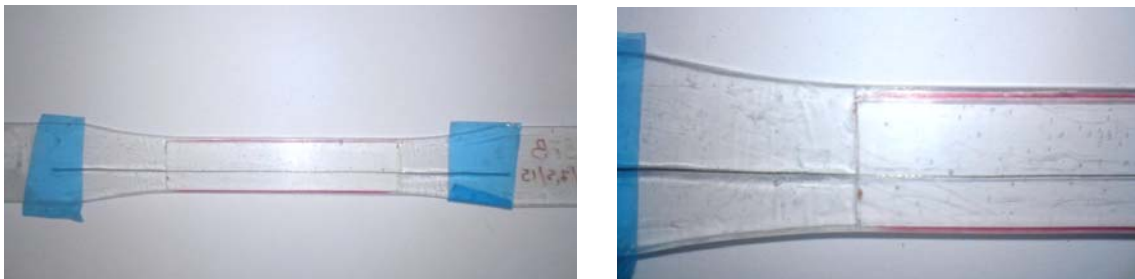
**Διάγραμμα 5.1.** Η εξάρτηση της εμπέδισης  $Z$  του σύρματος σε σχέση με την σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_r$ .

### 5.3 Πειραματική μελέτη του φαινομένου GMI σε σύρματα CoFeSiB

#### 5.3.1 Κατασκευή των δοκιμίων

Στα συγκεκριμένα πειράματα μελετήθηκαν δυο τύποι υλικών, σύρματα  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  (με θετικό συντελεστή μαγνητοσυστολής) και σύρματα  $\text{Co}_{68.25}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{12.25}\text{B}_{15}$  (με αρνητικό συντελεστή μαγνητοσυστολής) τα οποία προμηθεύτηκαν από το εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών του ΕΜΠ. Τα σύρματα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν κυλινδρικό σχήμα με μέση διάμετρο 0,125 mm.

Η ενσωμάτωση τους έγινε σε δοκίμια από εποξική ρητίνη δυο συστατικών τα οποία έλαβαν σχήμα ‘dog bone’ σε καλούπι κλειστού τύπου, όπως απεικονίζονται στην εικόνα 5.3. Τα σύρματα τοποθετήθηκαν κοντά σε μια από τις εξωτερικές επιφάνειες των δοκιμίων αφήνοντας τις άκρες τους ελεύθερες, ώστε να μπορούν να συνδεθούν με κατάλληλη πειραματική διάταξη.



**Εικόνα 5.3.** Δοκίμια από εποξική ρητίνη στα οποία ενσωματώθηκαν σύρματα CoFeSiB

### 5.3.2 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Δεδομένου της έλλειψης οργάνου για την απευθείας μέτρηση της εμπέδισης  $Z$  (LCR Meter, Impedance Analyzer), το φαινόμενο μελετήθηκε έμμεσα με την βοήθεια του βρόχου υστέρησης του υλικού. Από την καμπύλη του βρόχου υστέρησης μπορεί να κατανοηθεί η συμπεριφορά της μαγνήτισης  $M_\phi$  του σύρματος (και κατ' επέκταση της περιφερειακής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_\phi$ ).

Όταν ένα σιδηρομαγνητικό σύρμα ακτίνας  $r$  και μήκους  $L$ , διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα  $I_{ac}$  εμφανίζεται μια εναλλασσόμενη διαφορά δυναμικού  $V_w$  στα άκρα του [50]:

$$V_w = V_R + V_L \quad (5.5)$$

$$V_R = R \cdot I_{ac} \quad (5.6)$$

$$V_L = d\Phi/dt = \mu_0 \cdot r \cdot L \cdot (dM_\phi/dt) \quad (5.7)$$

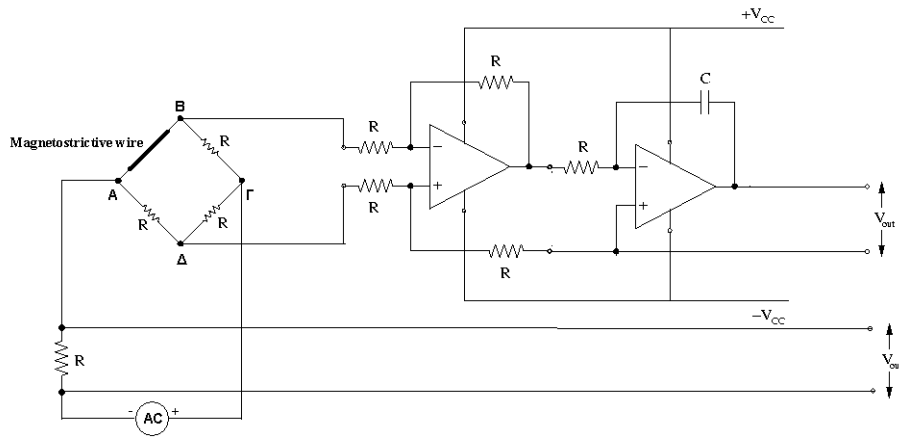
όπου  $V_R$  είναι η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από την ωμική αντίσταση  $R$  και  $V_L$  είναι η επαγωγική διαφορά δυναμικού η οποία προκαλείται από την μεταβολή της μαγνητικής ροής  $\Phi$ .

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$  που προκαλείται από το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το σύρμα δίνεται από την σχέση:

$$H = I_{ac} / 2 \cdot \pi \cdot r \quad (5.8)$$

Έτσι προκειμένου να μελετήσουμε τον βρόγχο υστέρησης του υλικού ( $M_\phi - H$ ), πρέπει να απομονώσουμε το σήμα της επαγωγικής διαφοράς δυναμικού  $V_L$  και να το ολοκληρώσουμε. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκε κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 5.4. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από μια γέφυρα Wheatstone και δυο τελεστικούς ενισχυτές. Το προς εξέταση σύρμα αποτελεί μέρος της γέφυρας και συνδέεται στους κόμβους AB. Η αντίσταση στους κόμβους AD είναι ίση με την ωμική αντίσταση του σύρματος ενώ οι αντιστάσεις στους κόμβους BG και ΔΓ είναι ίσες μεταξύ τους και αρκετά μεγαλύτερες από την αντίσταση του σύρματος. Σε αυτή την περίπτωση η γέφυρα ισορροπεί και η διαφορά δυναμικού στους κόμβους ΒΔ είναι ίση με μεταβολή της μαγνητικής ροής  $\Phi$  μέσα στο σύρμα. Η διαφορά δυναμικού ενισχύεται με την βοήθεια τελεστικού ενισχυτή διαφορών ενώ στην συνέχεια ολοκληρώνεται με την βοήθεια άλλου κατάλληλου τελεστικού ενισχυτή (ολοκληρωτής). Η τελική έξοδος που λαμβάνεται είναι ανάλογη με την περιφερειακή μαγνήτιση  $M_\phi$  του σύρματος. Παράλληλα συνδέονται ακροδέκτες στα άκρα αντίστασης ίσης με 1 Ohm η οποία είναι σε σειρά με την πηγή εναλλασσόμενης τάσης.

Η διαφορά δυναμικού στα άκρα των ακροδεκτών είναι ανάλογη με το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα και κατ' επέκταση το σύρμα. Η διαφορά δυναμικού από την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή προβάλλεται στην κάθετη συνιστώσα του παλμογράφου ενώ η διαφορά δυναμικού από την αντίσταση προβάλλεται στην οριζόντια. Με αυτόν το τρόπο εμφανίζεται στην οθόνη του παλμογράφου μια καμπύλη η οποία είναι ανάλογη με το βρόγχο υστέρησης του υλικού ( $M_\phi - H$ ).



α)

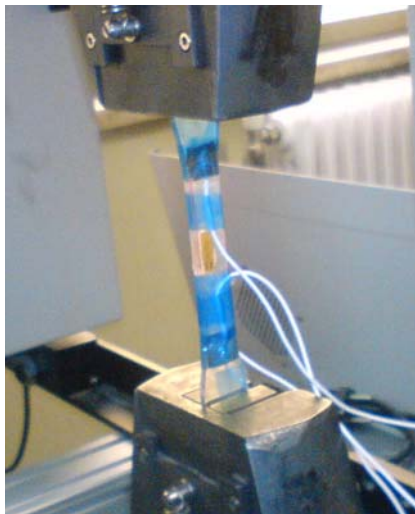


β)

**Εικόνα 5.4.** α) Σχηματική περιγραφή του κυκλώματος που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του βρόγχου υστέρησης ( $M_\phi - H$ ), β) η πειραματική διάταξη

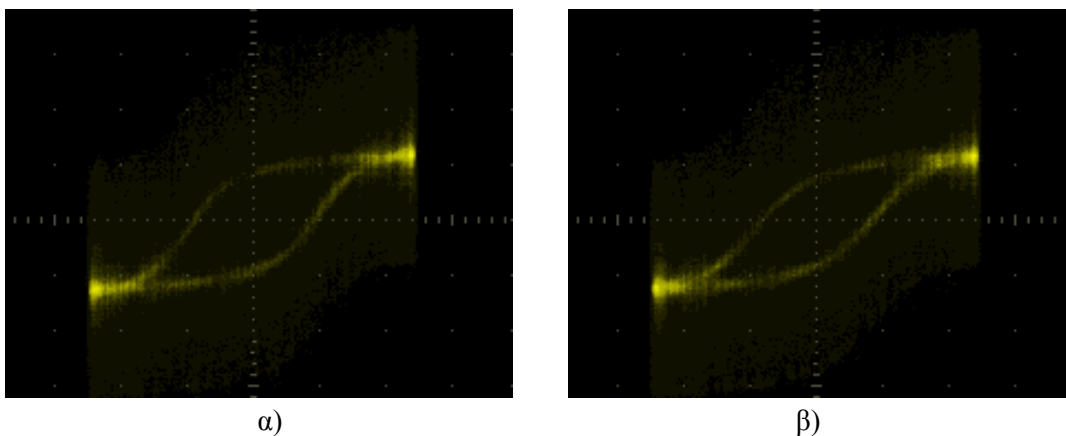
### 5.3.3 Πειράματα εφελκυσμού

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό προκειμένου να μελετηθεί η μεταβολή της μαγνήτισης  $M$  των συρμάτων σε σχέση με την παραμόρφωση. Έτσι καθώς τα δοκίμια υποβάλλονται σε μηχανική καταπόνηση ταυτόχρονα λαμβάνονται μετρήσεις από το ηλεκτρικό κύκλωμα. Κατά την διάρκεια του εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε ένα Οπτικό μηκυσιόμετρο. Πρώτα χρησιμοποιήθηκαν "δοκιμαστικά" δοκίμια (ίδια γεωμετρία και υλικό) για τη βαθμονόμηση του άξονα της παραμόρφωσης μέσω της έκτασης των αρπάγων της μηχανής εφελκυσμού. Όλα τα υπόλοιπα δοκίμια υπέστησαν εφελκυσμό χωρίς τη χρήση του οπτικού μηκυσιομέτρου.



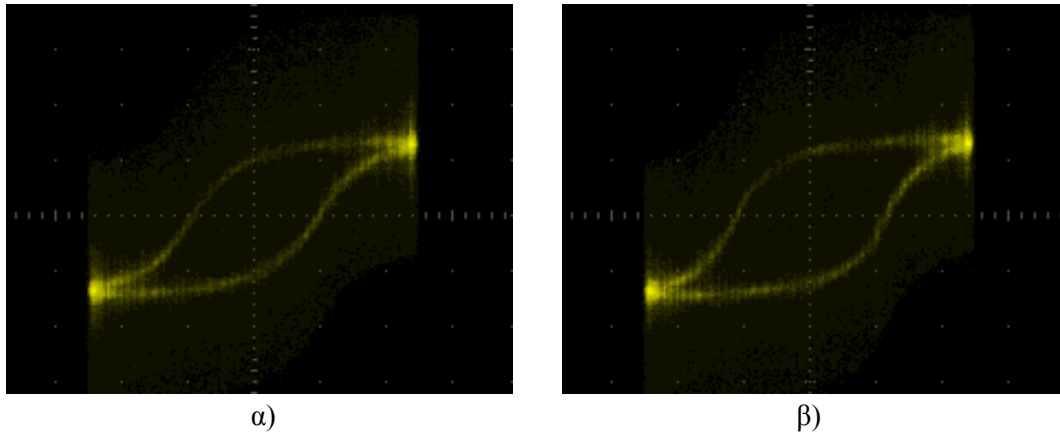
Εικόνα 5.4. Δοκίμιο με ενσωματωμένο σύρμα CoFeSiB στη μηχανή εφελκυσμού

Στις εικόνες 5.5-5.6 απεικονίζεται η μεταβολή του βρόγχου υστέρησης ( $M_\phi - H$ ), των συρμάτων που προκαλείται από την παραμόρφωση των δοκιμίων. Και στις δυο περιπτώσεις παρατηρούμε μεταβολή στο βρόγχο υστέρησης ακόμα και σε μικρές τιμές της παραμόρφωσης. Στην περίπτωση του σύρματος  $\text{Co}_{68.25}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{12.25}\text{B}_{15}$  παρατηρούμε πως η επίδραση της εξωτερικής δύναμης προκαλεί μείωση της περιφερικής μαγνήτισης  $M_\phi$  ενώ αντίθετα στην περίπτωση  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  η εξωτερική δύναμη προκαλεί αύξηση. Να σημειωθεί πως η συμπεριφορά αυτή είναι σε συμφωνία με τους αντίστοιχους συντελεστές μαγνητοσυστολής του κάθε σύρματος.



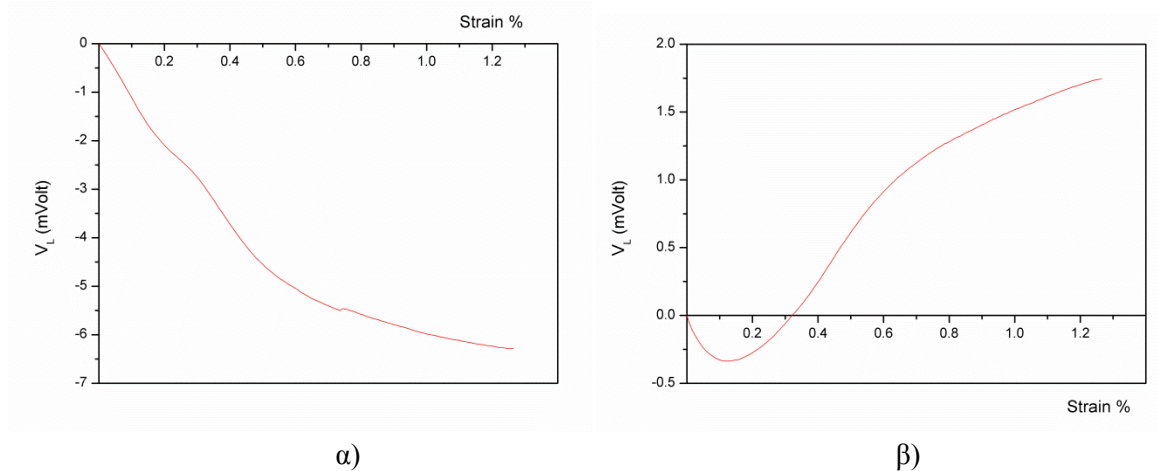
Εικόνα 5.5. Ο βρόγχος υστέρησης ( $M_\phi - H$ ) σύρματος  $\text{Co}_{68.25}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{12.25}\text{B}_{15}$  α) χωρίς παραμόρφωση β) με παραμόρφωση ίση με  $\sim 0,5\%$ .





**Εικόνα 5.6.** Ο βρόγχος υστέρησης ( $M_\phi$ -H) σύρματος  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  α) χωρίς παραμόρφωση β) με παραμόρφωση ίση με  $\sim 0,5\%$ .

Στο διάγραμμα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επαγωγικής διαφοράς δυναμικού  $E_L$  σε σχέση με την παραμόρφωση. Παρατηρούμε πως και στις δυο περιπτώσεις η απόκριση αν και μικρή, μπορεί να μετρηθεί χωρίς την βοήθεια κάποιου ενισχυτή. Στην περίπτωση του σύρματος  $\text{Co}_{68.25}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{12.25}\text{B}_{15}$  η μεταβολή της επαγωγικής διαφοράς δυναμικού  $V_L$  ακολουθεί μονότονη συμπεριφορά ενώ στην περίπτωση του  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  δεν ακολουθεί μονότονη συμπεριφορά.



**Διάγραμμα 5.2.** Η μεταβολή της επαγωγικής διαφοράς δυναμικού σε σχέση με την παραμόρφωση α) στην περίπτωση σύρματος  $\text{Co}_{68.25}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{12.25}\text{B}_{15}$  και β) στην περίπτωση σύρματος  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$

## 5.4 Επαγωγικές μέθοδοι μέτρησης της μεταβολής της μαγνήτισης M συρμάτων CoSiB και FeSiB

### 5.4.1 Πλεονεκτήματα επαγωγικών μεθόδων

Η μεθοδολογία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο καθώς και οι αντίστοιχες μέθοδοι που αναφέρονται στην βιβλιογραφία προϋποθέτουν την σύνδεση των εν λόγω συρμάτων με κάποιο ηλεκτρικό κύκλωμα προκειμένου να εξαχθούν οι μετρήσεις. Στην περίπτωση ενός μεμονωμένου μηκυνσιόμετρου (σημειακή μέτρηση), το οποίο αποτελείται από τέτοιου είδους κράματα, οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σχετική ευκολία.

Στην περίπτωση όμως που έχει ενσωματωθεί ένας μεγάλος αριθμός συρμάτων σε μια κατασκευή (επιφανειακή μέτρηση), αυτές οι μέθοδοι παρουσιάζουν πρακτικά προβλήματα και περιορισμούς. Ένα πρόβλημα προκύπτει από τον μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων που απαιτούνται ώστε να συνδεθούν τα εν λόγω σύρματα με την συσκευή λήψης. Το βασικότερο όμως μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι η έλλειψη τοπικής μέτρησης αφού οι μετρήσεις αναφέρονται σε όλο το μήκος του σύρματος δίνοντας μια μέση τιμή της παραμόρφωσης. Έτσι στην περίπτωση όπου τέτοια σύρματα έχουν ενσωματωθεί σε μια κατασκευή θα απαιτούταν ένα πολύπλοκο σύστημα συλλογής και επεξεργασίας των μετρήσεων προκειμένου να εξαχθεί η κατανομή της παραμόρφωσης στην επιφάνεια της.

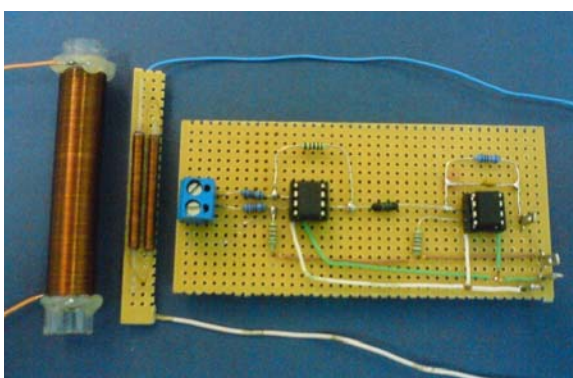
Τα πειράματα που περιγράφονται παρακάτω πραγματοποιήθηκαν ώστε να εξακριβωθεί το αν μπορούν να εξαχθούν επαγωγικές μετρήσεις που να συνδέουν την μεταβολή της μαγνήτισης των συρμάτων με την παραμόρφωση. Αν κάτι τέτοιο είναι εφικτό τότε απλοποιείται πολύ η διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας των μετρήσεων στις περιπτώσεις όπου έχουμε περισσότερα από ένα σύρματα και είναι αρκετά πιο εύκολη η εξαγωγή της κατανομής της παραμόρφωσης σε μια επιφάνεια.

### 5.4.2 Πειραματική μελέτη της μεταβολής της αξονικής μαγνητικής διαπερατότητας $\mu_L$ με την παραμόρφωση

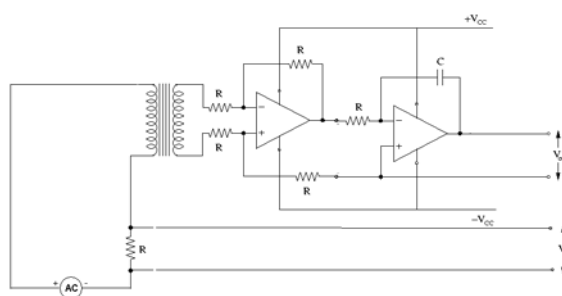
Στο κλασικό φαινόμενο της μαγνητοεμπέδισης η παράμετρος που παίζει το σημαντικότερο ρόλο είναι η περιφερειακή μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_p$ , καθώς η μαγνητική ροή  $\Phi$  έχει διεύθυνση περιφερικά του σύρματος. Στις επαγωγικές μεθόδους όμως το μαγνητικό πεδίο διέγερσης προέρχεται από κάποια εξωτερική πηγή και έτσι η μαγνητική ροή έχει διεύθυνση κατά τον άξονα του σύρματος. Άρα πρώτα πρέπει να μελετηθεί η συμπεριφορά της αξονικής μαγνήτισης M (κατ επέκταση της αξονικής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_L$ ).

Για την διεξαγωγή των επαγωγικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν σύρματα από κράματα  $Fe_{78}Si_7B_{15}$  (με θετικό συντελεστή μαγνητοσυστολής) και  $Co_{78}Si_7B_{15}$  (με αρνητικό συντελεστή μαγνητοσυστολής), τα οποία προμηθευτήκαμε από το Εθνικό Ινστιτούτο Έρευνας και Ανάπτυξης Τεχνικής Φυσικής, της Ρουμανίας. Αρχικά μελετήθηκε η καμπύλη του βρόχου υστέρησης (M-H). Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε κατάλληλη πειραματική διάταξη η οποία απεικονίζεται στην εικόνα 5.7. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα εξωτερικό πηνίο διέγερσης και δυο πηνία λήψης. Το πηνίο διέγερσης τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα με αποτέλεσμα να δημιουργεί ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Τα πηνία λήψης τοποθετούνται στο εσωτερικό του πηνίου διέγερσης με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται μια εναλλασσόμενη διαφορά δυναμικού στα άκρα τους, λόγω του φαινομένου της

ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Αυτή η διαφορά δυναμικού είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής  $\Phi$  μέσα στο πηνίο. Αν σε ένα από τα δυο πηνία λήψης τοποθετηθεί ένα μαγνητικό σύρμα τότε η διαφορά δυναμικού στα άκρα του θα είναι ανάλογη ως προς το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής  $\Phi$  συν το ρυθμό μεταβολής της μαγνήτισης  $M$  του σύρματος. Προκειμένου να απομονωθεί το κομμάτι που αφορά μόνο την μαγνήτιση  $M$ , συνδέονται αντίστροφα οι ακροδέκτες των δυο πηνίων λήψεως. Έτσι η διαφορά δυναμικού που λαμβάνεται τελικά από τα πηνία λήψης είναι ίση με μηδέν χωρίς την παρουσία κάποιου μαγνητικού υλικού, ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι ανάλογη με την ρυθμό μεταβολής της μαγνήτισης  $M$  κατά μήκος του σύρματος. Στην συνέχεια αυτή η διαφορά δυναμικού ενισχύεται και ολοκληρώνεται με την βοήθεια κατάλληλου κυκλώματος ώστε η τελική έξοδος του κυκλώματος να δίνει μια διαφορά δυναμικού η οποία να είναι ανάλογη με την μαγνήτιση του  $M$  σύρματος.



α)

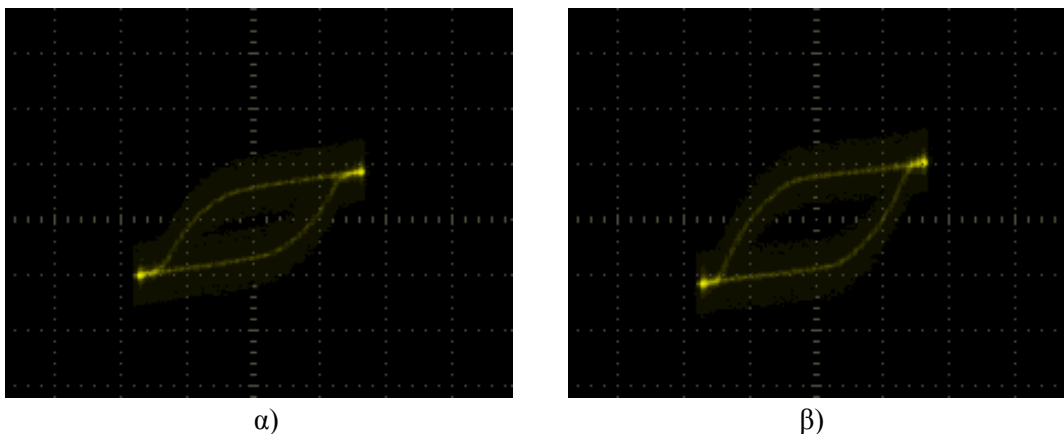


β)

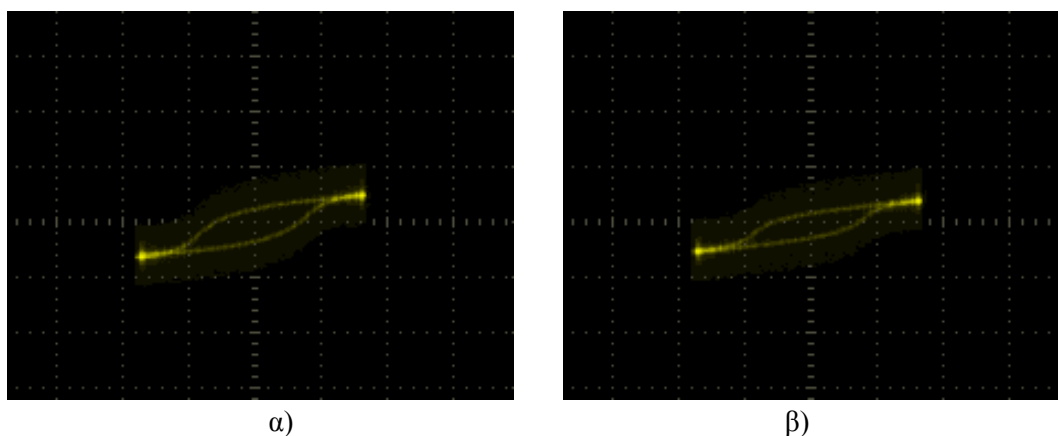
**Εικόνα 5.7.** α) Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του βρόγχου υστέρησης (M-H) σε σύρματα FeSiB, CoSiB β) σχηματική αναπαράσταση του κυκλώματος

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$  που δημιουργείται μέσα στο πηνίο διέγερσης είναι ανάλογη με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το πηνίο. Έτσι αν συνδεθεί σε σειρά μια αντίσταση (γνωστής τιμής) με το πηνίο διέγερσης, τότε η διαφορά δυναμικού στα άκρα της θα είναι ανάλογη με την ένταση του μαγνητικού πεδίου αφού διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα.

Για την εξαγωγή του βρόγχου υστέρησης (M-H), η έξοδος από το κύκλωμα προβάλλεται στην κατακόρυφη συνιστώσα του παλμογράφου ενώ στην οριζόντια προβάλλεται η διαφορά δυναμικού από την αντίσταση. Στις εικόνες 5.8-5.9 παρουσιάζεται ο βρόγχος υστέρησης συρμάτων CoSiB και FeSiB για την περίπτωση με και χωρίς την επιβολή εξωτερικής δύναμης. Είναι εμφανές ότι μια εξωτερική δύναμη μεταβάλλει την μαγνήτιση των συρμάτων και κατ' επέκταση μεταβάλλει την αξονική μαγνητική διαπερατότητα τους. Στα σύρματα τα οποία αποτελούνται από κράμα FeSiB παρατηρείται αύξηση της μαγνήτισης ενώ στα κράματα CoSiB μείωση.



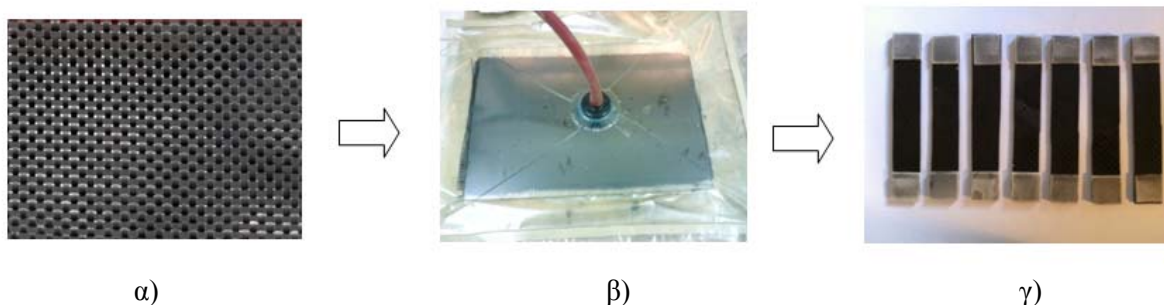
**Εικόνα 5.8.** Ο βρόγχος υστέρησης (M-H) συρμάτων FeSiB α) χωρίς την επιβολή εξωτερικής δύναμης β) με την επιβολή εξωτερικής δύναμης



**Εικόνα 5.9.** Ο βρόγχος υστέρησης (M-H) συρμάτων CoSiB α) χωρίς την επιβολή εξωτερικής δύναμης β) με την επιβολή εξωτερικής δύναμης

#### 5.4.3 Κατασκευή των δοκιμίων

Τα σύρματα ενσωματώθηκαν σε σύνθετο υλικό το οποίο αποτελείται από ίνες άνθρακα δυο διευθύνσεων και απλής ύφανσης. Αρχικά κατασκευάστηκε πλάκα με την τεχνική “Hand lay up” με χρήση εποξικής ρητίνης δυο συστατικών και ο πολυμερισμός έγινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 24 ώρες. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις στρώσεις ιών άνθρακα ενώ τα σύρματα/ταινίες τοποθετήθηκαν μεταξύ των ενδιάμεσων στρώσεων σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους πριν τον πολυμερισμό. Στην συνέχεια η πλάκα τοποθετήθηκε σε κατάλληλη σακούλα κενού όπου και παρέμεινε μέχρι το τέλος του πολυμερισμού. Μετά την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας αποσπάστηκαν λωρίδες, πλάτους 2 cm, από την πλάκα στις οποίες τα σύρματα βρίσκονται στο κέντρο τους. Προκειμένου να υποβληθούν τα δοκίμια σε εφελκυσμό επικολλήθηκαν τετραγωνικά ‘αυτιά’ (tabs) στα άκρα τους, τα οποία είχαν κατασκευαστεί από υαλόνημα (fiberglass). Στην εικόνα 5.10 παρουσιάζονται τα διάφορα στάδια αυτής της διαδικασίας και τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα εφελκυσμού.



**Εικόνα 5.10.** α) Φύλλο από ίνες άνθρακα δυο διευθύνσεων και απλής ύφανσης β) η πλάκα σύνθετου υλικού στην οποία ενσωματώθηκαν τα σύρματα, σε σακούλα κενού γ) τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα εφελκυσμού.

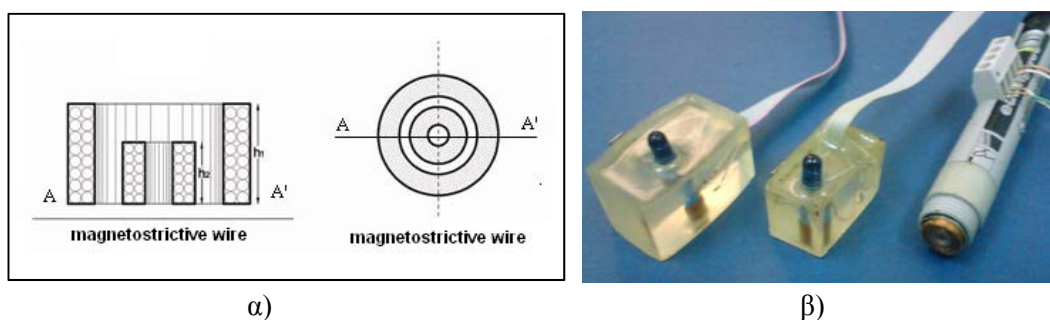
### 5.3.5 Κατασκευή επαγωγικών αισθητήρων

\* Όλοι οι επαγωγικοί αισθητήρες που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα είναι πρωτότυποι και κατασκευάστηκαν ειδικά για αυτή την εφαρμογή.

#### A. Ομοαξονικό πηνίο επιφανείας

Ένας από τους πιο κοινούς και απλούς στην λειτουργία επαγωγικός αισθητήρας είναι το ομοαξονικό πηνίο επιφανείας. Αποτελείται από δυο ομοαξονικά, ομόκεντρα κυλινδρικά πηνία όπου το εξωτερικό πηνίο διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα και παίζει τον ρόλο της διέγερσης ενώ το εσωτερικό παίζει τον ρόλο της λήψης. Λόγω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής στο εσωτερικό πηνίο θα αναπτυχτεί μια διαφορά δυναμικού η οποία θα είναι ανάλογη ως προς το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής  $\Phi$ .

Όταν το πηνίο βρίσκεται πάνω από ένα μεταλλικό αντικείμενο η μαγνητική ροή θα επηρεαστεί λόγω των δινορευμάτων που θα αναπτυχτούν στο αντικείμενο. Αν το αντικείμενο είναι και μαγνητικό τότε η μαγνητική ροή θα επηρεαστεί επιπλέον και από την μαγνήτιση  $M$  του υλικού. Έτσι όταν ο αισθητήρας τοποθετηθεί πάνω ακριβώς από τα μαγνητικά σύρματα η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στο πηνίο λήψης θα επηρεάζεται από μεταβολές στην μαγνήτιση του υλικού. Στην εικόνα 5.11 παρουσιάζεται η σχηματική περιγραφή της μεθόδου καθώς και τα ομοαξονικά πηνία επιφάνειας που κατασκευάστηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

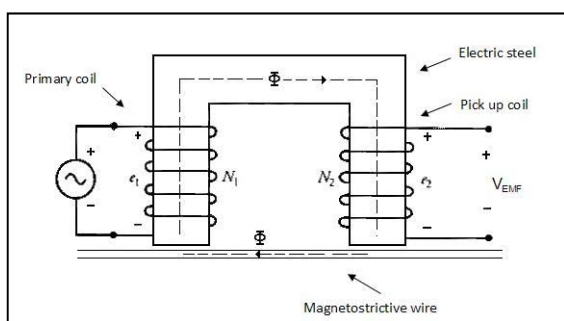


**Εικόνα 5.11.** α) Σχηματική περιγραφή ομοαξονικού πηνίου β) ομοαξονικά πηνία επιφάνειας που κατασκευάστηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

### B. Επαγωγικός αισθητήρας σιδηρομαγνητικού πυρήνα

Ο αισθητήρας αυτός αποτελείται από σιδηρομαγνητικό πυρήνα σχήματος Π όπου έχουν προστεθεί δυο πηνία στα άκρα του. Το ένα πηνίο διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα και παίζει τον ρόλο της διέγερσης ενώ το δεύτερο το ρόλο της λήψης. Όταν ο αισθητήρας αυτός βρίσκεται πάνω από κάποιο μαγνητικό αντικείμενο τότε αποκαθίσταται μαγνητικό κύκλωμα και το σύστημα αισθητήρα αντικείμενου λειτουργεί σαν ένας μετασχηματιστής τάσης. Και σε αυτή την περίπτωση λόγω επαγωγής στο πηνίο λήψης θα αναπτυχτεί μια διαφορά δυναμικού η οποία θα είναι ανάλογη ως προς το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής  $\Phi$ .

Οι βασικές διαφορές με τον προηγούμενο αισθητήρα είναι ότι η παρουσία του σιδηρομαγνητικού πυρήνα δημιουργεί μεγαλύτερη ένταση στο πεδίο διέγερσης ενώ παράλληλα οι δυναμικές γραμμές είναι προσανατολισμένες κατά το μήκος του σύρματος. Βέβαια αυτό εισάγει κάποιο σφάλμα στην περίπτωση που ο πυρήνας δεν είναι προσανατολισμένος παράλληλα με το σύρμα. Και σε αυτή την περίπτωση μια μεταβολή στην μαγνήτιση του σύρματος θα επηρεάσει την διαφορά δυναμικού στα άκρα του πηνίου λήψης. Στην εικόνα 5.12 παρουσιάζεται η σχηματική περιγραφή της μεθόδου καθώς και ο αισθητήρας που κατασκευάστηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων.



α)



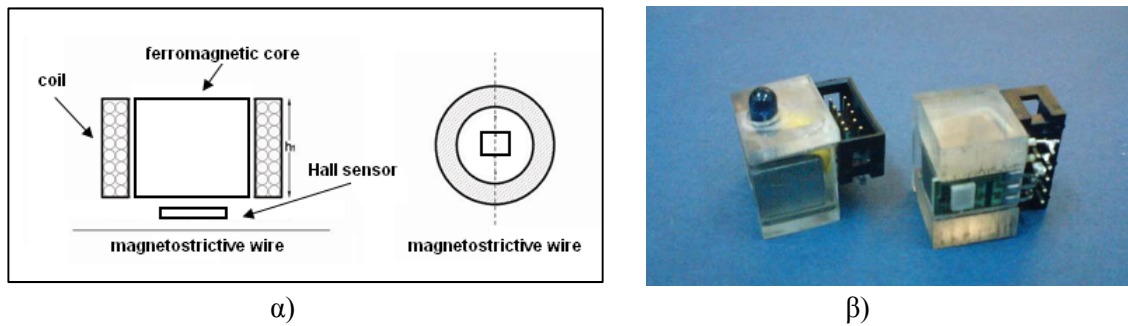
β)

**Εικόνα 5.12.** α) Σχηματική περιγραφή του επαγωγικού αισθητήρα σιδηρομαγνητικού πυρήνα β) ο αισθητήρας που κατασκευάστηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

### Γ. Πηνίο επιφανείας με σιδηρομαγνητικό πυρήνα και αισθητήρα Hall

Ο αισθητήρας αυτός αποτελείται από ένα πηνίο τυλιγμένο γύρω από ένα σιδηρομαγνητικό κύλινδρο. Το πηνίο τροφοδοτείται με συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα με αποτέλεσμα να παράγεται ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο, ενώ παρουσία του σιδηρομαγνητικού πυρήνα ενισχύει την ένταση αυτού του πεδίου αυτού. Η μαγνητική ροή που δημιουργείται από το σύστημα πηνίου-πυρήνα όπως είναι γνωστό δημιουργεί ένα κλειστό βρόγχο δυναμικών γραμμών και επηρεάζεται από την παρουσία άλλων μαγνητικών σωμάτων πλησίον του συστήματος. Έτσι όταν το πηνίο τοποθετείται πάνω από τα μαγνητικά σύρματα προκαλείται μια μεταβολή στην μαγνητική ροή η οποία εξαρτάται από την μαγνήτιση του υλικού, καθώς οι δυναμικές γραμμές εισέρχονται μέσα από το υλικό. Προκειμένου να μετρηθεί η μαγνητική ροή μεταξύ του σύρματος και του πηνίου, παρεμβάλλεται κατάλληλος αισθητήρας Hall (αισθητήρας πυκνότητας μαγνητικής ροής). Το πλεονέκτημα αυτού του αισθητήρα, έναντι των δυο προηγούμενων, είναι το ότι το μαγνητικό πεδίο που παράγει είναι σταθερό στο χρόνο και έτσι δεν εμφανίζονται παρασιτικά φαινόμενα όπως δινορεύματα, ενώ επιπλέον οι μικρές σχετικά διαστάσεις του καθιστούν την μέτρηση σημειακή.

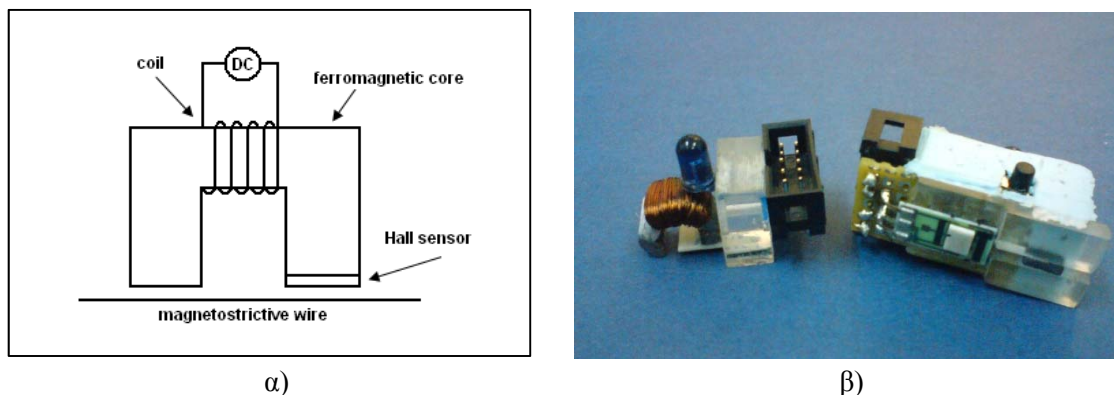
Στην εικόνα 5.13 παρουσιάζεται η σχηματική περιγραφή της μεθόδου καθώς και οι αισθητήρες που κατασκευάστηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων.



**Εικόνα 5.13.** α) Σχηματική περιγραφή του επαγωγικού αισθητήρα πηνίου επιφανείας με σιδηρομαγνητικό πυρήνα και αισθητήρα Hall β) οι αισθητήρες που κατασκευάστηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

#### Δ. Σιδηρομαγνητικός πυρήνας με αισθητήρα Hall

Η περίπτωση αυτή είναι μια παραλλαγή του επαγωγικού αισθητήρα σιδηρομαγνητικού πυρήνα που αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Αποτελείται από σιδηρομαγνητικό πυρήνα σε σχήμα Π (όπως σε προηγούμενη περίπτωση) αλλά φέρει μόνο ένα πηνίο διέγερσης το οποίο τροφοδοτείται με συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα. Όταν ο πυρήνας αυτός τοποθετείται πάνω από ένα μαγνητικό σύρμα τότε δημιουργείται ένα μαγνητικό κύκλωμα. Η μαγνητική ροή του κυκλώματος εξαρτάται από την μαγνήτιση των συστατικών μερών του. Έτσι αν μεταβληθεί η μαγνήτιση του σύρματος αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεαστεί η μαγνητική ροή σε όλο το κύκλωμα. Προκειμένου να μετρηθεί η μαγνητική ροή μεταξύ του σύρματος και του σιδηρομαγνητικού πυρήνα, παρεμβάλλεται κατάλληλος αισθητήρας Hall (αισθητήρας πυκνότητας μαγνητικής ροής). Και σε αυτή την περίπτωση αισθητήρα το βασικό πλεονέκτημα είναι η απώλεια παρασιτικών φαινομένων ενώ το βασικό του μειονέκτημα είναι η εισαγωγή σφάλματος στην περίπτωση που ο πυρήνας δεν είναι προσανατολισμένος κατά μήκος με το σύρμα. Στην εικόνα 5.14 παρουσιάζεται η σχηματική περιγραφή της μεθόδου καθώς και ο αισθητήρας που κατασκευάστηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων.



**Εικόνα 5.14.** α) Σχηματική περιγραφή του επαγωγικού αισθητήρα σιδηρομαγνητικού πυρήνα με αισθητήρα Hall β) οι αισθητήρες που κατασκευάστηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

### 5.3.6 Πειράματα εφελκυσμού

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό προκειμένου να μελετηθεί η μεταβολή της μαγνήτισης  $M$  των συρμάτων σε σχέση με την παραμόρφωση. Έτσι καθώς τα δοκίμια υποβάλλονται σε μηχανική καταπόνηση ταυτόχρονα λαμβάνονται μετρήσεις από τον αντίστοιχο επαγωγικό αισθητήρα. Κατά την διάρκεια του εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε ένα Οπτικό μηκυσιόμετρο. Πρώτα χρησιμοποιήθηκαν "δοκιμαστικά" δοκίμια (ίδια γεωμετρία και υλικό) για τη βαθμονόμηση του άξονα της παραμόρφωσης μέσω της έκτασης των αρπάγων της μηχανής εφελκυσμού. Όλα τα υπόλοιπα δοκίμια υπέστησαν εφελκυσμό χωρίς τη χρήση του οπτικού μηκυσιομέτρου.

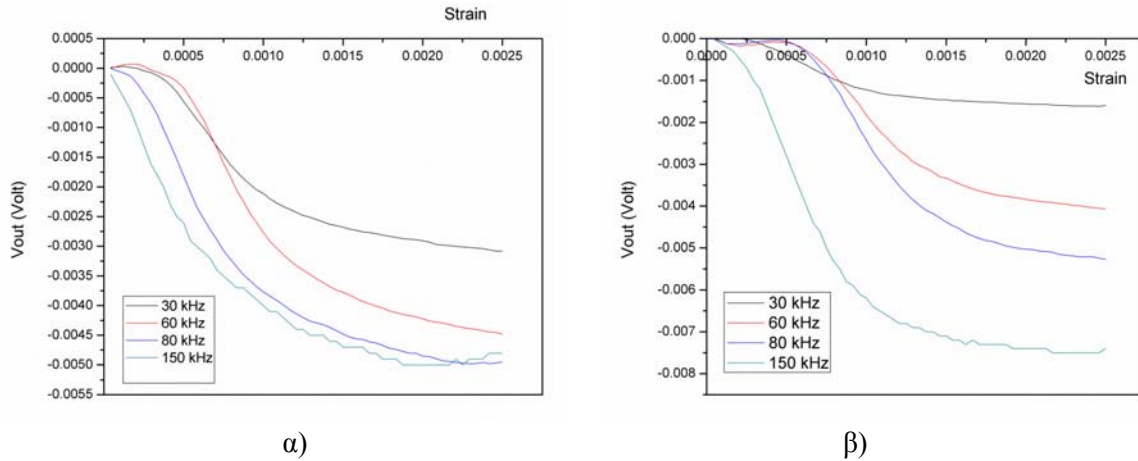
Στα διαγράμματα 5.3-5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ηλεκτρομαγνητικών επαγωγικών μετρήσεων με την χρήση ομοαξονικού πηνίου και σιδηρομαγνητικού πυρήνα. Το μετρούμενο μέγεθος είναι η διαφορά δυναμικού  $V$  που αναπτύσσεται στα άκρα του πηνίου λήψης σε σχέση με την παραμόρφωση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για διάφορες συχνότητες διέγερσης ώστε να συνεκτιμηθεί και αυτή η παράμετρος.



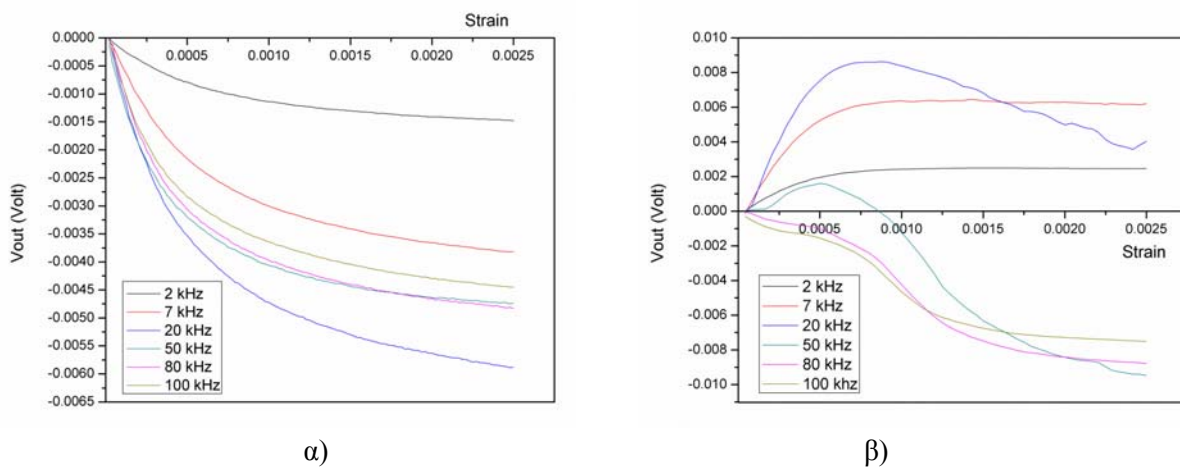
**Εικόνα 5.15.** Πειράματα εφελκυσμού και ταυτόχρονη καταγραφή του σήματος του επαγωγικού αισθητήρα.

Στην περίπτωση του ομοαξονικού πηνίου επιφανείας παρατηρείται πως και στα δυο είδη κραμάτων η απόκριση του αισθητήρα ακολουθεί μονότονη συμπεριφορά για όλο το εύρος των συχνοτήτων που επιλέχθηκαν. Τα σύρματα τα οποία αποτελούνται από κράμα  $CoSiB$  εμφανίζονται να παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας σε σχέση με τα σύρματα  $FeSiB$  καθώς φτάνουν στον κορεσμό σε μεγαλύτερη τιμή της παραμόρφωσης. Στην περίπτωση του αισθητήρα σιδηρομαγνητικού πυρήνα παρατηρείται πως τα σύρματα  $CoSiB$  παρουσιάζουν μονότονη συμπεριφορά σε όλες τις συχνότητες, ενώ τα σύρματα  $FeSiB$  παρουσιάζουν αντίστοιχη συμπεριφορά μόνο σε συγκεκριμένες συχνότητες. Επιπλέον τα σύρματα  $CoSiB$  παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας καθώς και σε αυτή την περίπτωση φτάνουν στον κορεσμό σε μεγαλύτερη τιμή της παραμόρφωσης.





**Διάγραμμα 5.3.** Αποτελέσματα επαγωγικών μετρήσεων με την χρήση ομοαξονικού πηνίου της διαφορά δυναμικού  $V$  που αναπτύσσεται στα άκρα του πηνίου λήψης σε σχέση με την παραμόρφωση α) για σύρματα CoSiB β) για σύρματα FeSiB

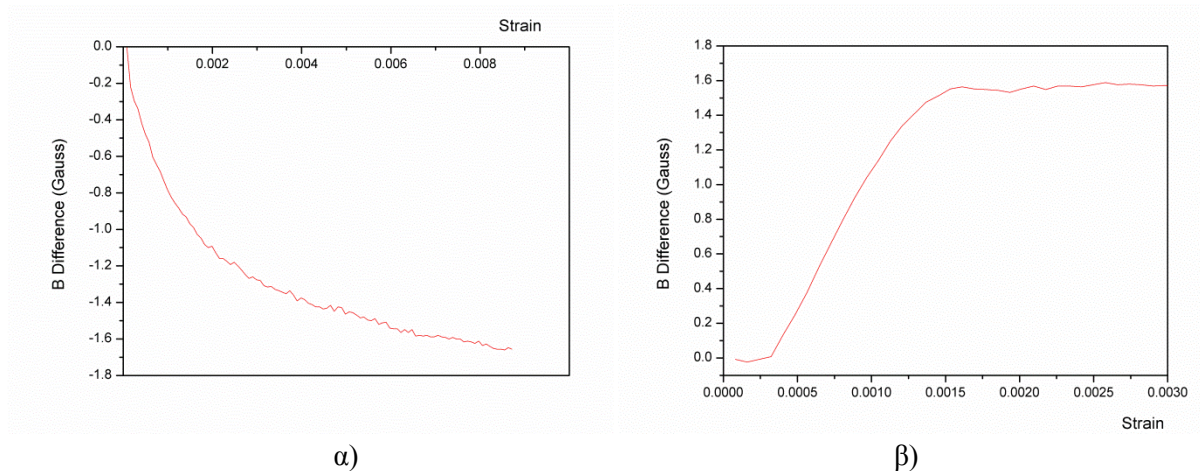


**Διάγραμμα 5.4.** Αποτελέσματα επαγωγικών μετρήσεων, με την χρήση αισθητήρα σιδηρομαγνητικού πυρήνα, της διαφορά δυναμικού  $V$  που αναπτύσσεται στα άκρα του πηνίου λήψης σε σχέση με την παραμόρφωση α) για σύρματα CoSiB β) για σύρματα FeSiB

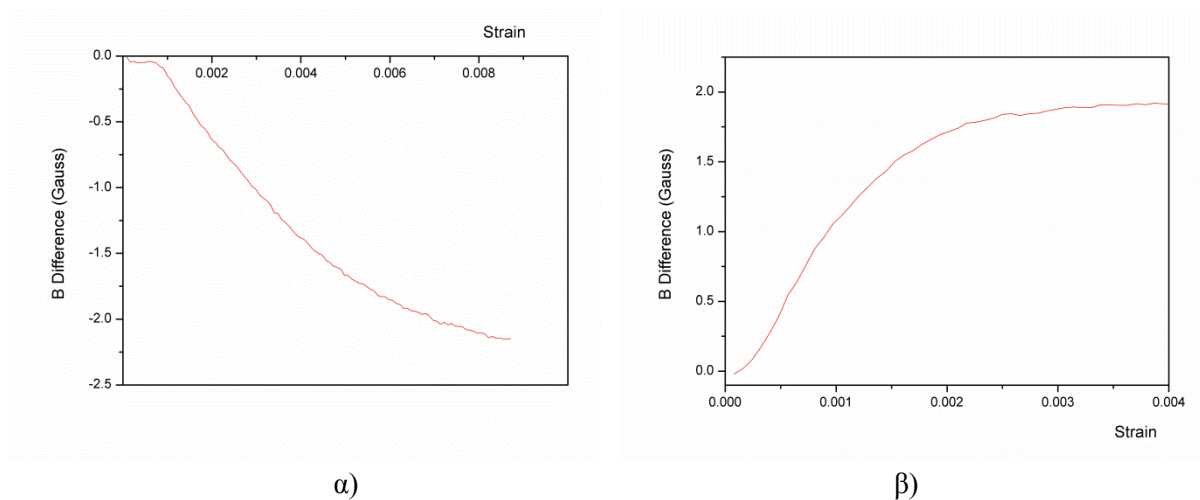
Στα διαγράμματα 5.5-5.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μαγνητοστατικών επαγωγικών μετρήσεων με την χρήση πηνίου και σιδηρομαγνητικού πυρήνα με αισθητήρα Hall. Το μετρούμενο μέγεθος είναι η διαφορά στην πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  μεταξύ του σύρματος και του αισθητήρα.

Στην περίπτωση του πηνίου επιφανείας παρατηρείται πως και στα δυο είδη κραμάτων η απόκριση του αισθητήρα ακολουθεί μονότονη συμπεριφορά. Τα σύρματα τα οποία αποτελούνται από κράμα CoSiB εμφανίζονται να παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας σε σχέση με τα σύρματα FeSiB καθώς φτάνουν στον κορεσμό σε μεγαλύτερη τιμή της παραμόρφωσης. Στην περίπτωση του αισθητήρα σιδηρομαγνητικού πυρήνα παρατηρείται πως τα δυο είδη κραμάτων παρουσιάζουν μονότονη συμπεριφορά. Επιπλέον και σε αυτή την περίπτωση τα σύρματα CoSiB παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος

λειτουργιάς καθώς και σε αυτή την περίπτωση φτάνουν στον κορεσμό σε μεγαλύτερη τιμή της παραμόρφωσης.



**Διάγραμμα 5.5.** Αποτελέσματα επαγωγικών μετρήσεων με την χρήση ομοαξονικού πηνίου της πυκνότητας μαγνητικής ροής B μεταξύ του σύρματος και του αισθητήρα, σε σχέση με την παραμόρφωση α) για σύρματα CoSiB β) για σύρματα FeSiB.

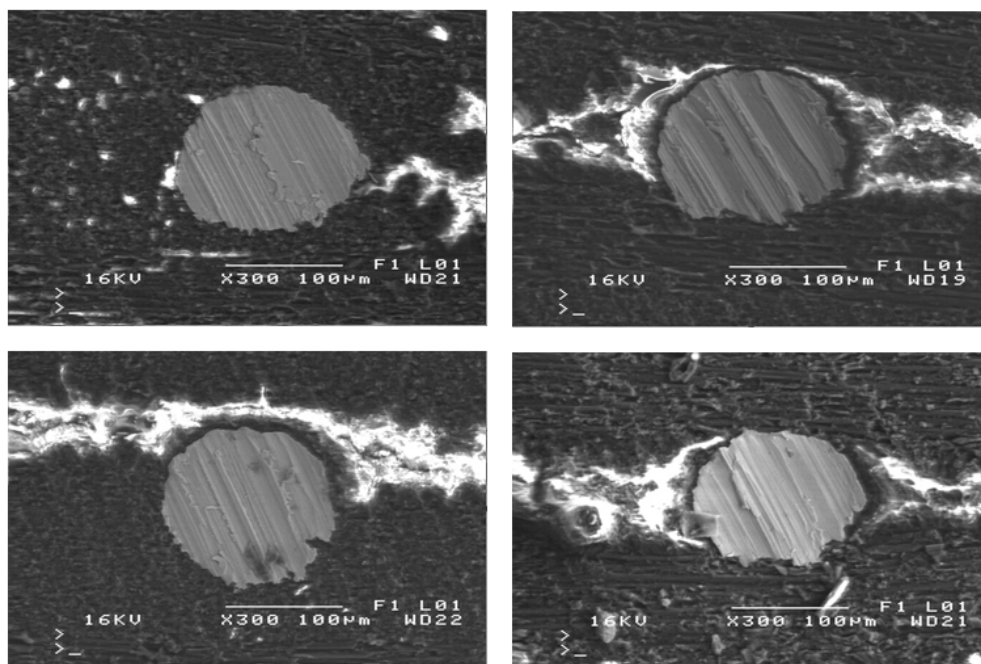


**Διάγραμμα 5.6.** Αποτελέσματα επαγωγικών μετρήσεων με την χρήση σιδηρομαγνητικού πυρήνα της πυκνότητας μαγνητικής ροής B μεταξύ του σύρματος και του αισθητήρα, σε σχέση με την παραμόρφωση α) για σύρματα CoSiB β) για σύρματα FeSiB

### 5.3.7 Παρατηρήσεις από το οπτικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM)

Μετά το τέλος των πειραμάτων εφελκυσμού στο τελικό στάδιο της πειραματικής διαδικασίας εξετάστηκαν τα δοκίμια στο οπτικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM). Μέσω αυτής της διαδικασίας μπορούν παρατηρηθούν τυχόν ατέλειες που διαμορφώθηκαν είτε κατά την κατασκευή των δοκιμίων, είτε εξαιτίας των διαταραχών που προήλθαν από την μηχανική καταπόνηση του εφελκυσμού και με αυτόν το τρόπο να αποτιμηθεί η εισαγωγή μικροατελειών στο σύνθετο υλικό λόγω του σύρματος.

Έτσι κάθε δοκίμιο κόπηκε σε πέντε κομμάτια, έτσι ώστε να υπάρχει μια πληρέστερη και αναλυτικότερη άποψη κατά το μήκος του δοκιμίου σχετικά με την έναρξης αποκολλήσεων ή γενικότερες ατέλειες. Θα πρέπει να σημειωθεί πως τα σύρματα εκτός από την απομάκρυνση ακαθαρσιών και οξειδίων από την επιφάνεια τους, δεν έχουν υποστεί κάποια άλλη χημική κατεργασία ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη ενσωμάτωση με την εποξική ρητίνη. Στην εικόνα 5.15 παρουσιάζονται φωτογραφίες από τομές σε δοκίμια στα οποία είναι εμφανής η παρουσία ατελειών στην περιοχή πλησίον του σύρματος, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων του σύνθετου υλικού.



**Εικόνα 5.15.** Φωτογραφίες με την χρήση οπτικού ηλεκτρονικού μικροσκόπιου (SEM), από τομές σε δοκίμια στα οποία παρουσιάζονται μικροατέλειες.

## 2.5 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

Η πειραματική μελέτη έδειξε πως η ενσωμάτωση άμορφων μαγνητοελαστικών συρμάτων σε πολυμερή και σύνθετα υλικά μπορεί να αναβαθμίσει τις ιδιότητες τους επιτρέποντας την μέτρηση της παραμόρφωσης τους. Η μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας των εν λόγω συρμάτων επιδεικνύει

εξαιρετική απόκριση σε σχέση με την παραμόρφωση και για τις δυο διαφορετικές μεθοδολογίες που δοκιμάστηκαν (με αγωγή και επαγωγή).

Στην περίπτωση όπου οι μετρήσεις λαμβάνονται με αγωγή (κλασσικό φαινόμενο GMI) παρατηρήθηκε καλύτερη απόκριση στα σύρματα τα οποία έχουν αρνητικό συντελεστή μαγνητοσυστολής, καθώς η απόκριση τους σε σχέση με την παραμόρφωση είναι μονότονη.

Αντίστοιχα στην περίπτωση όπου οι μετρήσεις λαμβάνονται με επαγωγικούς αισθητήρες παρατηρήθηκε πως τα σύρματα με αρνητικό συντελεστή μαγνητοσυστολής και σε αυτή την περίπτωση επιδεικνύουν καλύτερη συμπεριφορά καθώς η απόκριση τους σε σχέση με την παραμόρφωση είναι μονότονη.

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τύποι επαγωγικών αισθητήρων και αξιολογήθηκε η επίδραση του καθένα. Με βάση τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα :

- Οι μαγνητοστατικές μετρήσεις μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι καλύτερες σε σχέση με τις ηλεκτρομαγνητικές και λόγω απόκρισης αλλά κυρίως γιατί δεν παράγουν παρασιτικά φαινόμενα (δινορεύματα), ούτε επηρεάζονται από χαμηλής συχνότητας (~kHz) ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Η ένταση του εξωτερικού πεδίου διέγερσης είναι καλύτερα να ενισχύεται με την βοήθεια κάποιου σιδηρομαγνητικού πυρήνα, καθώς κάτι τέτοιο βελτιώνει την απόκριση του επαγωγικού αισθητήρα. Βέβαια αυτό ισχύει ως ένα βαθμό, γιατί η χρήση πολύ μεγάλου πεδίου διέγερσης θα προκαλούσε κορεσμό στην μαγνήτιση του σύρματος με αποτέλεσμα να μην υπάρχει καθόλου απόκριση.
- Ο επαγωγικός αισθητήρας με πηνίο επιφανείας διαθέτει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης χωρικής ανάλυσης λόγω των μικρών του διαστάσεων έναντι αυτών με σιδηρομαγνητικό πυρήνα σε σχήμα Π.

Μελλοντικές χρήσεις αυτής της μεθοδολογίας περιλαμβάνει την ενσωμάτωση τέτοιων συρμάτων στο εσωτερικό ή στην εξωτερική επιφάνεια κατασκευών από σύνθετα υλικά. Βέβαια όπως παρατηρήθηκε, η απευθείας ενσωμάτωση των συρμάτων σε ένα σύνθετο υλικό μπορεί να προκαλέσει την δημιουργία ατελειών. Γι' αυτό κρίνεται σκόπιμο να υπάρχει κάποια χημική κατεργασία της επιφάνειας των συρμάτων ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη πρόσφυση με την μήτρα.

Έτσι με την βοήθεια τους θα είναι δυνατή μια σχετικά γρήγορη επιθεώρηση (σε σχέση με τις υφιστάμενες μεθόδους ΜΚΕ) ανά τακτά χρονικά διαστήματα, προκειμένου να ανακτηθεί το παραμορφωτικό πεδίο της κατασκευής. Στη συνέχεια θα συγκρίνεται με προηγούμενες μετρήσεις, με σκοπό τον εντοπισμό πιθανών διαφορών οι οποίες θα υποδεικνύουν κάποια ενδεχόμενη ατέλεια στην κατασκευή. Η ανάπτυξη και εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας είναι ένα σημαντικό βήμα προς τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της απόδοσης των δομικών στοιχείων από σύνθετα υλικά. Η ικανότητα να παρακολουθείται το παραμορφωσιακό πεδίο κατά τη διάρκεια ή μετά την εφαρμογή εξωτερικών φορτίσεων, θα βοηθήσει σε μεγάλο βαθμό στην μείωση του βάρους, μέσω της μείωσης των συντελεστών ασφαλείας, τον αρχικό σχεδιασμό και την αύξηση της ταχύτητας ελέγχου.



## Κεφάλαιο 6

---

### Μέτρηση της παραμόρφωσης με την χρήση ηλεκτρικά αγώγιμης βαφής Αργύρου

#### 6.1 Εισαγωγή

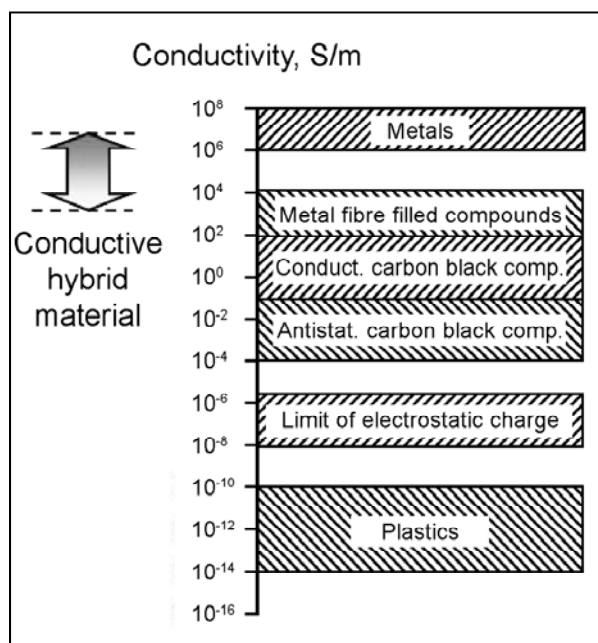
Τα πολυμερή είναι γενικά υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται ως μονωτές λόγω της εξαιρετικά χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητά τους. Τα τελευταία 60 χρόνια όμως, έχουν αναπτυχθεί διάφορα ηλεκτρικά αγώγιμα πολυμερή με την προσθήκη υλικών όπως η αιθάλη, οι μεταλλικές ίνες/νιφάδες, οι ίνες άνθρακα, ενώ πρόσφατα αντίστοιχα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με την χρήση νάνο-υλικών όπως οι νάνο-σωλήνες άνθρακα [51-53]. Στην εικόνα 6.1 παρουσιάζεται η αντιστοίχιση αγώγιμων υλικών σε σχέση με την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα. Η χρήση αγώγιμων πολυμερών έχει αυξηθεί λόγω των πλεονεκτικών ιδιοτήτων τους έναντι των μετάλλων, όπως το μικρό τους βάρος, η ευκολία στην κατεργασία, η ευκαμψία και η αντοχή σε χημικές ουσίες. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι προκειμένου να εξασφαλιστεί ένας υψηλός βαθμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε τέτοια υλικά, απαιτείται η συγκέντρωση των εγκλεισμάτων να είναι σχετικά μεγάλη, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει στην υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Τα υλικά αυτά εφαρμόζονται με επιτυχία σε αντιστατικές συσκευασίες, αγώγιμες βαφές-κόλλες και στην ηλεκτρομαγνητική θωράκιση.

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή με μεταλλικά εγκλείσματα αρχικά χρησιμοποιήθηκαν ως ηλεκτρικά αγώγιμα συγκολλητικά. Η εκτεταμένη χρήση τέτοιων υλικών, ιδιαίτερα για την συγκόλληση μικροσκοπικών συσκευών (π.χ. δίοδοι εκπομπής φωτός και ολοκληρωμένα κυκλώματα), έχει οδηγήσει σε μερική αντικατάσταση της παραδοσιακής συγκόλλησης με καλάνι και άλλων θερμικών τεχνικών.

Από την άλλη πλευρά η κακή αγωγιμότητα μπορεί να οδηγήσει στην τάση για συσσώρευση και διατήρηση στατικών ηλεκτρικών φορτίων. Η συσσώρευση αυτή μπορεί να φτάσει μέχρι αρκετές χιλιάδες βολτ και είναι ικανή να δημιουργήσει ηλεκτρική εκκένωση (σπινθήρα). Ενώ πολλοί τύποι αγώγιμων υλικών είναι ευρέως διαθέσιμοι (π.χ. μέταλλα), οι περισσότεροι από αυτούς δεν είναι εύκολο να κατεργαστούν με χαμηλό κόστος και σε πολύπλοκα σχήματα. Αντίθετα τα θερμοπλαστικά υλικά είναι

εύκολα κατεργάσιμα και χαμηλότερου κόστους. Ως αποτέλεσμα αυτού, τα πολυμερή με αντί-στατικές ιδιότητες είναι επιθυμητά για τέτοιου είδους εφαρμογές.

Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (Electromagnetic interference, EMI) συμβαίνει όταν ευαίσθητες συσκευές λαμβάνουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται – χωρίς να προορίζεται για αυτές – από άλλες ηλεκτρικές ή ηλεκτρονικές συσκευές, όπως πηγές μικροκυμάτων, ασύρματους υπολογιστές, ραδιόφωνα και κινητά τηλέφωνα. Ως αποτέλεσμα αυτού είναι να επηρεάζονται οι συσκευές που λαμβάνουν αυτή την ακτινοβολία με αποτέλεσμα να μην λειτουργούν σωστά. Στις μέρες μας η παρουσία ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής γίνεται όλο ένα και πιο έντονη, και προκαλείται από τη αύξηση της ζήτησης για υψηλής ταχύτητας ηλεκτρονικές συσκευές που λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες. Οι επιδράσεις των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών μπορούν να μειωθούν ή να ελαττωθούν με την τοποθέτηση ενός υλικού θωράκισης μεταξύ της πηγής του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και της συσκευής. Αυτή η προστασία μπορεί να επιτευχθεί με ένα ηλεκτρικά αγώγιμο περίβλημα γύρω από την συσκευή. Αυτό συμβαίνει γιατί τα ηλεκτρικά και μαγνητικά εναλλασσόμενα πεδία επάγουν ρεύματα στο αγώγιμο υλικό θωράκισης. Με τη σειρά τους, αυτά τα ρεύματα δημιουργούν αντίθετα πεδία που αποδυναμώνουν - ή στην ιδανική περίπτωση ακυρώνουν - τα αρχικά πεδία. Στην ιδανική περίπτωση, τα εξωτερικά πεδία παραμένουν έξω από το υλικό θωράκισης, ενώ τα εσωτερικά πεδία μένουν μέσα. Λόγω υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας τους τα μέταλλα είναι ιδιαίτερος κατάλληλα ως υλικά θωράκισης κατά της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Η εφαρμογή τους μπορεί να γίνει με συμπαγή υλικά αλλά επίσης μπορεί να γίνει με ηλεκτρικά αγώγιμες βαφές (π.χ. νικέλιο) σε ένα φέρον υλικό, όπως το πλαστικό. Μια άλλη επιλογή είναι η ενσωμάτωση σωματιδίων μετάλλου (σκόνης ή ινών) σε μία πλαστική μήτρα.



**Εικόνα 6.1.** Αντιστοίχιση υλικών σε σχέση με την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα

Τα τελευταία χρόνια μια άλλη εφαρμογή η οποία έχει προταθεί είναι η χρήση ηλεκτρικά αγώγιμων πολυμερών ως αισθητήρες παραμόρφωσης. Διάφοροι ερευνητές παρατήρησαν ότι τέτοιου είδους υλικά μεταβάλλουν την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα όταν υποβάλλονται σε μηχανική καταπόνηση. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι τα πολυμερή που έχουν εμπλουτιστεί με νάνο σωλήνες άνθρακα, αλλά αυτή η συμπεριφορά μπορεί να παρατηρηθεί σχεδόν σε όλα τα αγώγιμα πολυμερή. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε αυτά τα υλικά επιτυγχάνεται μέσω ενός αγώγιμου δικτύου που σχηματίζεται από τις επαφές των σωματιδίων/ινών μέσα στο υλικό. Έτσι η παραμόρφωση αυτών των υλικών οδηγεί στην μεταβολή αυτού του δικτύου με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η συνολική αγωγιμότητα.

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην μελέτη της μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε βαφή εμπλουτισμένη με σωματίδια αργύρου. Η επιλογή του υλικού έγινε με γνώμονα ότι γενικότερα δεν υπάρχουν αναφορές σχετικά με αυτή του την συμπεριφορά, παρότι η χρήση του είναι αρκετά διαδεδομένη.

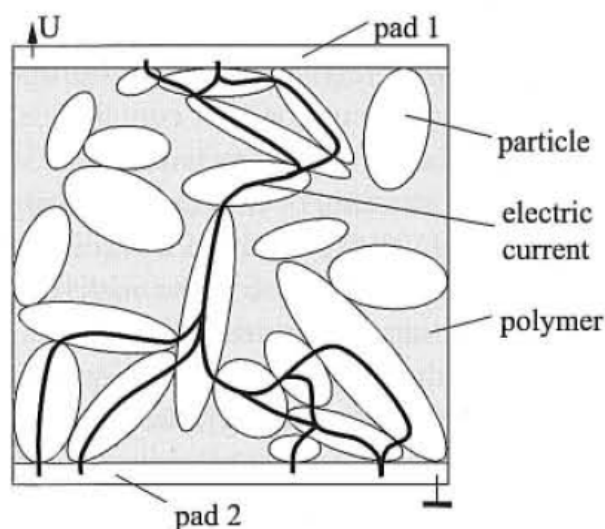
## 6.2 Βασικές θεωρητικές έννοιες

Η θεωρία διήθησης (Percolation theory) [54], η οποία αναφέρθηκε για πρώτη φορά από τον Broadbent και τον Hammersley [55], μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει το μηχανισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε πολυμερική μήτρα η οποία έχει εμπλουτιστεί από μεταλλικά σωματίδια. Η θεωρία αυτή είναι μια θεωρία που συμπληρώνει την θεωρία της διάχυσης. Ενώ στην πραγματικότητα και οι δύο θεωρίες περιγράφουν την τυχαία διέλευση ενός «ρευστού» μέσω ενός «μέσου», η θεωρία της διάχυσης επικεντρώνεται πάνω στις ιδιότητες του «ρευστού», ενώ η θεωρία διήθησης επικεντρώνεται στις ιδιότητες του «μέσου». Όσον αφορά την ηλεκτρική αγωγιμότητα, η θεωρία διήθησης προβλέπει μια κρίσιμη τιμή του όγκου  $V_c$ , του αγώγιμου υλικού το οποίο είναι τυχαία κατανεμημένο μέσα στο μονωτικό μέσο, κάτω από την οποία η συνολική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι μηδέν. Για  $V_{filler} < V_c$  δηλαδή για τιμές του όγκου των εγκλεισμάτων μικρότερο από το «κατώφλι διήθησης» [56], η πιθανότητα ότι έχει σχηματιστεί μία αγώγιμη δίοδος κατά μήκος του υλικού, είναι μηδέν. Η συγκρότηση τέτοιων αγώγιμων δικτύων απαιτεί αδιάλειπτη επαφή μεταξύ των μεταλλικών σωματιδίων, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 6.2. Ο Aharoni [57] απέδειξε θεωρητικά ότι έναρξη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας θα λάβει χώρα όταν ο αριθμός  $M$  (ο μέσος αριθμός επαφών ανά σωματίδιο) καθίσταται μεγαλύτερος της μονάδας. Σε αυτή περίπτωση για κάθε σωματίδιο με μηδενικές επαφές υπάρχει ένα άλλο με δύο επαφές, έτσι ώστε η πιθανότητα έναρξης αγώγιμων δικτύων καθίσταται μη μηδενική και η αντίσταση του σύνθετου υλικού αρχίζει να μειώνεται. Αυτό θα συνεχιστεί μέχρι ο μέσος αριθμός επαφών ανά σωματίδιο πάρει την τιμή δυο ( $M=2$ ). Όπου σε αυτό το στάδιο όλα τα σωματίδια έχουν επαρκή στατιστική πιθανότητα να συμμετέχουν σε άπειρες αλυσίδες. Η περαιτέρω αύξηση του αριθμού  $M$  πέραν του 2 δεν θα προκαλέσει καμία αισθητή μείωση της αντίστασης, αφού δύο επαφές ανά σωματίδιο αρκούν για να εξασφαλιστεί υψηλή αγωγιμότητα.

Είναι σαφές στην θεωρία διήθησης ότι ο πραγματικός μηχανισμός της αγωγιμότητας θεωρείται ότι είναι μεταλλικός, δηλαδή ότι τα ηλεκτρόνια θα ταξιδέψουν κατά μήκος μιας συνεχής αλυσίδας που σχηματίζεται από μεταλλικά σωματίδια σε επαφή και όχι με άλματα κατά μήκος του μονωτικού υλικού. Η επί της εκατό κατ' όγκο περιεκτικότητα αγώγιμων σωματιδίων που απαιτείται για να είναι ο αριθμός  $M$  μεταξύ του 1 και του 2 έχει καθοριστεί πειραματικά για μία ποικιλία υλικών και περιπτώσεων. Για την



περίπτωση σωματιδίων αργύρου σε βακελίτη έχει υπολογιστεί πειραματικά ότι η κρίσιμη τιμή του όγκου είναι περίπου 30%. Σε άλλη περίπτωση η κρίσιμη τιμή του όγκου σωματιδίων σιδηρού σε πολυμερές (poly[imide-amide]) υπολογίστηκε να είναι 20% ενώ στην περίπτωση αιθάλης σε καουτσούκ και στην περίπτωση σωματιδίων νικελίου σε εποξική ρητίνη υπολογίστηκε να είναι 18% και 30% αντίστοιχα.



**Εικόνα 6.2.** Σχηματική απεικόνιση των αγώγιμων δικτύων που δημιουργούνται πάνω από μια κρίσιμη τιμή του συνολικού όγκου των σωματιδίων στο πολυμερές.

Εκτός από την κύρια παράμετρο του όγκου των σωματιδίων, η ηλεκτρική αγωγιμότητα επηρεάζεται και από το μέγεθος των εγκλεισμάτων. Έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των σωματιδίων νικελίου σε πολυαιθυλένιο ή PVC, τόσο μικρότερη είναι η συγκέντρωση που απαιτείται για να εξασφαλιστεί αγωγιμότητα. Επιπλέον, έχει αποδειχτεί πειραματικά ότι η συνολική επιφάνεια των επαπτόμενων σωματιδίων έχει επίσης σημασία. Στην περίπτωση κόκκων αιθάλης ίσης συγκέντρωσης αλλά διαφορετικού σχήματος παρατηρείται υψηλότερη αγωγιμότητα όταν αυξάνεται η επιφάνεια επαφής. Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουν παρατηρηθεί στην περίπτωση όπου νιφάδες αργύρου και κόκκοι ακανόνιστων σχημάτων εξασφαλίζουν χαμηλότερο «κατώφλι διήθησης» από ό, τι τα σφαιρικά σωματίδια.

Η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης, σε ένα τέτοιο πολυμερές, που οφείλεται στην παραμόρφωση, προκύπτει από δύο ανεξάρτητα φαινόμενα. Το πρώτο έχει να κάνει με την μεταβολή στη γεωμετρία του υλικού ενώ το δεύτερο είναι ένα εγγενές φαινόμενο. Η πρώτη περίπτωση η παραμόρφωση σε μια διεύθυνση, θα μεταβάλλει το μήκος του υλικού ενώ παράλληλα θα μεταβληθεί και η διατομή του με αποτέλεσμα να αλλάξει η ηλεκτρική αντίσταση. Στη δεύτερη περίπτωση η ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται επειδή η παραμόρφωση προκαλεί μεταβολή στην μέση απόσταση των εγκλεισμάτων με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η επαφή μεταξύ τους. Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι η εξάρτηση των φυσικών ιδιοτήτων των εγκλεισμάτων από εξωτερικές παραμέτρους (πχ θερμοκρασία) μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες ολόκληρου του υλικού.

## 6.3 Μελέτη της μεταβολής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων ηλεκτρικά αγώγιμης βαφής με σχέση με την παραμόρφωση

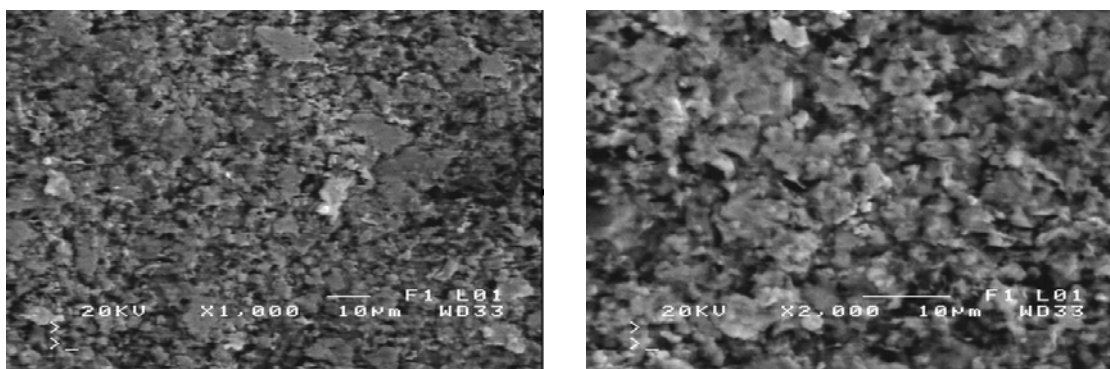
### 6.3.1 Κατασκευή των δοκιμίων

Στα συγκεκριμένα πειράματα επιλέχθηκε αγώγιμη βαφή με εγκλείσματα αργύρου. Η επιλογή έγινε με το σκεπτικό ότι το συγκεκριμένο υλικό παρότι χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές ως αγώγιμο μέσο, δεν έχει μελετηθεί εκτενώς ως προς την ικανότητα αξιοποίησης του ως αισθητήρας παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα το υλικό αυτό αποτελείται από νιφάδες αργύρου (μέσης διαμέτρου 10 $\mu$ m) μέσα σε βαφή (2-methoxy-1-methylethyl acetate) με συγκέντρωση 50% κατά βάρος, το οποίο αγοράστηκε από την εταιρία RS Components. Η βαφή αυτή χρησιμοποιήθηκε ως επικάλυψη στην επιφάνεια δοκιμίων τα οποία αποτελούνται από εποξική ρητίνη δυο συστατικών και έλαβαν σχήμα 'dog bone' σε καλούπι κλειστού τύπου. Ένα τέτοιο δοκίμιο παρουσιάζεται στην εικόνα 6.3, στο οποίο έχουν συγκολληθεί ηλεκτρόδια.



**Εικόνα 6.3.** Ηλεκτρικά αγώγιμη βαφή σε δοκίμιο από εποξική ρητίνη

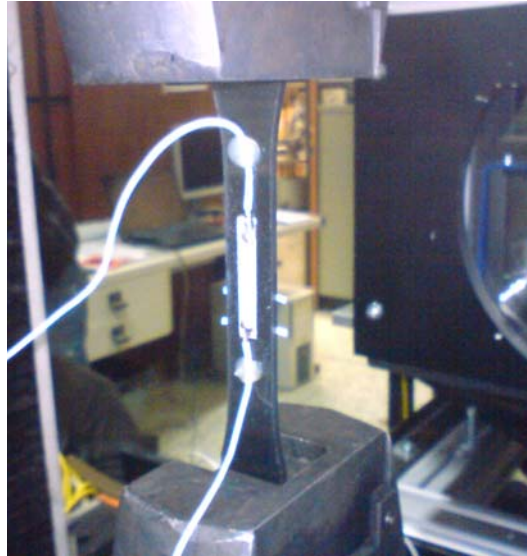
Η βαφή των δοκιμίων εξετάστηκε στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) με σκοπό την οπτικοποίηση της μικροδομής της. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.4 οι νιφάδες αργύρου σχηματίζουν ένα αγώγιμο δίκτυο μέσω του οποίου διέρχεται το ηλεκτρικό ρεύμα.



**Εικόνα 6.4.** Παρατηρήσεις στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο που αφορούν την διασπορά των σωματιδίων αργύρου μέσα στην βαφή.

### 6.3.2 Μέτρηση της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης $R$ κατά τον εφελκυσμό

Σκοπός αυτού του πειράματος είναι η μέτρηση της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης  $R$  της αγωγίμης βαφής όταν το δοκίμιο υποβάλλεται σε εφελκυσμό. Στα δοκίμια που κατασκευαστήκαν αρχικά συγκολλήθηκαν ηλεκτρόδια τα οποία καταλήγουν σε πολύμετρο ακριβείας και μηχανή καταγραφής δεδομένων. Ταυτόχρονα γίνεται μέτρηση της παραμόρφωσης του δοκιμίου με την βοήθεια ενός οπτικού μηκυσιόμετρου. Η πειραματική διάταξη εμφανίζεται στην εικόνα 6.5.

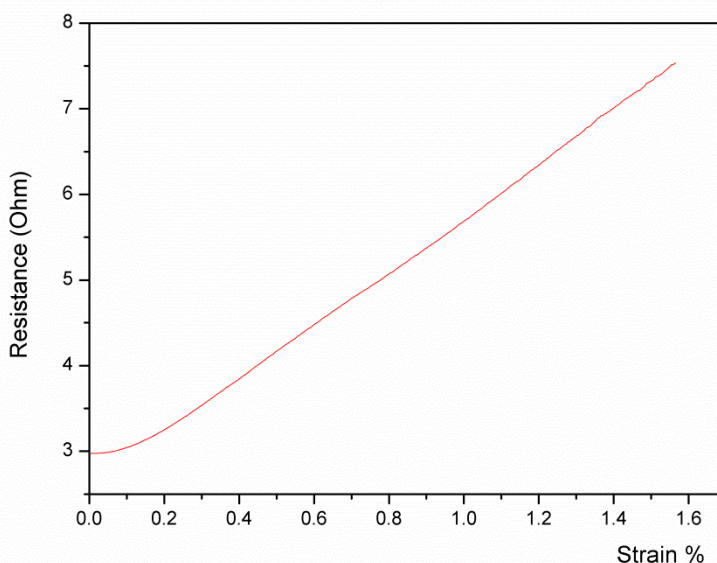


**Εικόνα 6.5.** Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης  $R$ , αγωγίμης βαφής, σε σχέση με την παραμόρφωση.

Τα αποτελέσματα από τα πειράματα εφελκυσμού που παρουσιάζονται στο διάγραμμα 6.1, αποδεικνύουν πως η ηλεκτρική αντίσταση  $R$  μεταβάλλεται ανάλογα με την παραμόρφωση με γραμμικό τρόπο. Ο συντελεστής μετατροπής  $GF$  (gauge factor) ο οποίος ορίζεται την σχέση 6.1, υπολογίστηκε να είναι περίπου ίσος με 100. Συγκρίνοντας την τιμή αυτή με την τιμή ενός κλασσικού ηλεκτρικού μηκυσιόμετρου ( $GF=2$ ), βγαίνει το συμπέρασμα ότι οι ηλεκτρικές ιδιότητες της βαφής είναι πολύ ευαίσθητες ως προς την παραμόρφωση.

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} \quad (6.1)$$

όπου  $R$  είναι η αρχική ηλεκτρική αντίσταση όπως βαφής,  $\Delta R$  είναι η διαφορά όπως και  $\varepsilon$  είναι η παραμόρφωση.



**Διάγραμμα 6.1.** Η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης  $R$ , αγωγικής βαφής σε σχέση με την παραμόρφωση

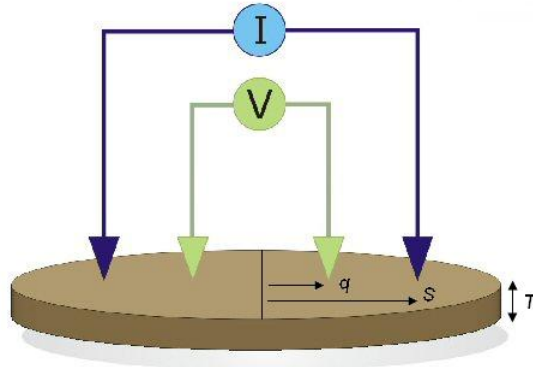
### 6.3.3 Μέτρηση της μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας $\sigma$ με την παραμόρφωση

Η ηλεκτρική αντίσταση  $R$  ενός αγωγού, όπως αναφέρθηκε είναι ένα μέγεθος το οποίο εξαρτάται από τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά (μήκος  $L$ , διατομή  $A$ ) καθώς και από την ηλεκτρική του αγωγιμότητα  $\sigma$ , και περιγράφεται από την σχέση :

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{A} \quad (6.2)$$

Η επιβολή μιας εξωτερικής δύναμης σε ένα ρευματοφόρο αγωγό έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή των γεωμετρών του χαρακτηριστικών και την μεταβολή της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας, πράγμα που αντανακλάται σε μεταβολή στην ηλεκτρική αντίσταση  $R$ . Στο συγκεκριμένο υλικό όμως, η αντίσταση του μεταβάλλεται κυρίως λόγω της μεταβολής της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας  $\sigma$  και δευτερευόντως λόγω της μεταβολής των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών. Έτσι είναι σκόπιμο να μετρηθεί η μεταβολή αυτή ξεχωριστά.

Οι κοινοί τρόποι μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ενός υλικού είναι χρησιμοποιώντας είτε τη μέθοδο των δινορευμάτων ή την μέθοδο των τεσσάρων σημείων. Η μέθοδος των δινορευμάτων ενδείκνυται κυρίως σε υλικά με υψηλή αγωγιμότητα (όπως μέταλλα) ενώ η μέθοδος των τεσσάρων σημείων ενδείκνυται κυρίως σε υλικά χαμηλής αγωγιμότητας (όπως ημιαγωγοί).

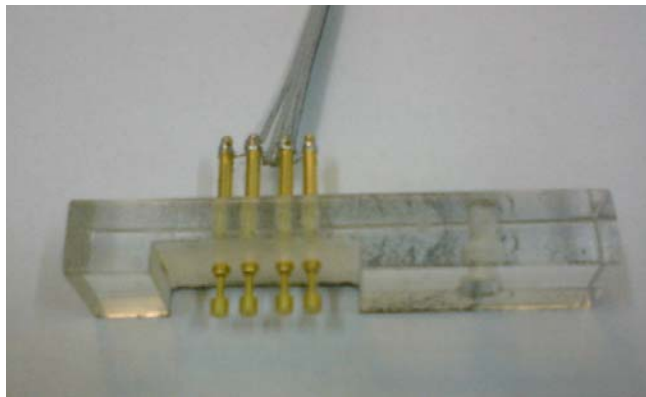


**Εικόνα 6.6.** Σχηματική περιγραφή της μεθόδου των τεσσάρων σημείων.

Στην περίπτωση ηλεκτρικά αγωγίμης βαφής είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των τεσσάρων σημείων προκειμένου να επιτευχτεί μεγαλύτερη ακρίβεια καθώς το υλικό αυτό έχει αρκετά μικρότερη αγωγιμότητα σε σχέση με κάποιο κοινό μέταλλο. Σε αυτή τη μέθοδο συνήθως χρησιμοποιούνται τέσσερις βελόνες γραμμικά ευθυγραμμισμένες οι οποίες εφάπτονται με το υπό εξέταση υλικό. Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.6, στις εξωτερικές βελόνες διαβιβάζεται συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα ενώ ταυτόχρονα μετράται η διαφορά δυναμικού στις εσωτερικές. Για την συγκεκριμένη περίπτωση όπου οι βελόνες είναι ευθυγραμμισμένες και το υπό εξέταση υλικό έχει πάχος  $T$  (κατά πολύ μικρότερο σε σχέση με την απόσταση των βελόνων), η αναλυτική έκφραση της διαφοράς δυναμικού  $V$  περιγράφεται από την σχέση [58]:

$$V = -\frac{I}{\pi \cdot \sigma \cdot T} \ln\left(\frac{S+q}{S-q}\right) \quad (6.3)$$

Όπου το  $I$  είναι η ένταση του ρεύματος που διαβιβάζεται στο υλικό, το  $\sigma$  είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού, και οι παράμετροι  $S, q$  εκφράζουν την απόσταση των εξωτερικών και εσωτερικών βελόνων αντίστοιχα.



**Εικόνα 6.7.** Η διάταξη της μεθόδου των τεσσάρων σημείων που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$ .

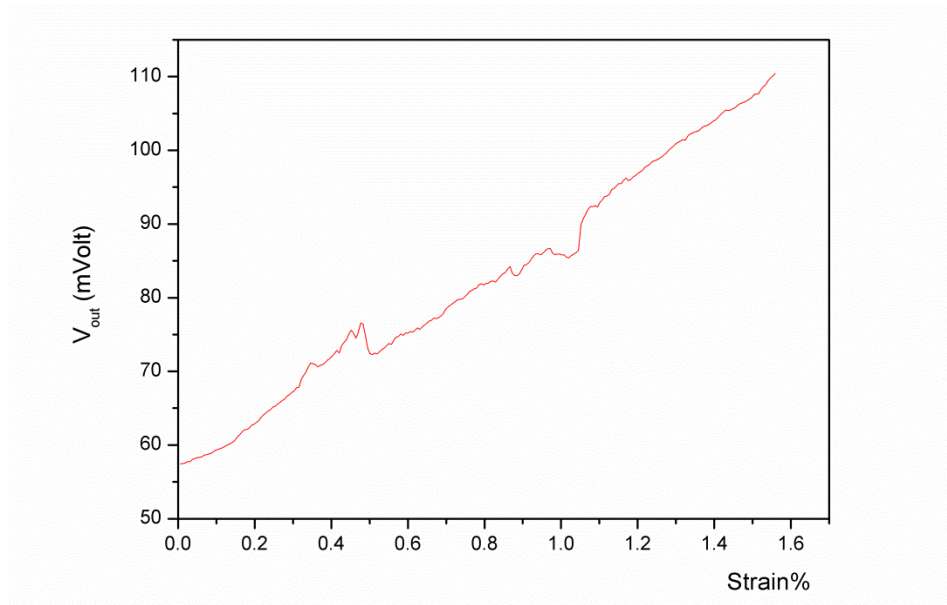
Για την συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε μια παραλλαγή της μεθόδου των τεσσάρων σημείων. Η βασική διαφορά είναι το ότι αντί για βελόνες χρησιμοποιήθηκαν ακίδες με κυλινδρική επιφάνεια. Η επιλογή αυτή έγινε προκειμένου να προστατευτεί η ακεραιότητα της βαφής καθώς οι μυτερές άκρες των βελόνων θα προκαλούσαν γρατζουνιές. Οι κυλινδρικές ακίδες στερεοποιήθηκαν σε τετραγωνική ακρυλική ράβδο (PMMA) σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Επιπλέον οι ακίδες φέρουν προσαρμοσμένα ελατήρια ώστε η πίεση που ασκούν στην επιφάνεια της βαφής να είναι ομοιόμορφη. Στην εικόνα 6.7 παρουσιάζεται η διάταξη της μεθόδου των τεσσάρων σημείων που χρησιμοποιήθηκε.

Στα δοκίμια που κατασκευαστήκαν αρχικά τοποθετείται η διάταξη τεσσάρων σημείων στην μια τους επιφάνεια και σταθεροποιείται με λαστιχάκια. Στις εξωτερικές ακίδες διαβιβάζεται συνεχές ρεύμα 0,1 A ενώ οι εσωτερικές ακίδες συνδέονται με βολτόμετρο ακριβείας και μηχανή καταγραφής δεδομένων. Τα δοκίμια υποβάλλονται σε εφελκυσμό ενώ μετράται η μεταβολή της διαφοράς δυναμικού. Ταυτόχρονα γίνεται μέτρηση της παραμόρφωσης του δοκιμίου με την βοήθεια ενός οπτικού μηκυνσιόμετρου. Η συνολική πειραματική διάταξη εμφανίζεται στην εικόνα 6.8.



**Εικόνα 6.8.** Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$ , αγωγιμης βαφής, σε σχέση με την παραμόρφωση.

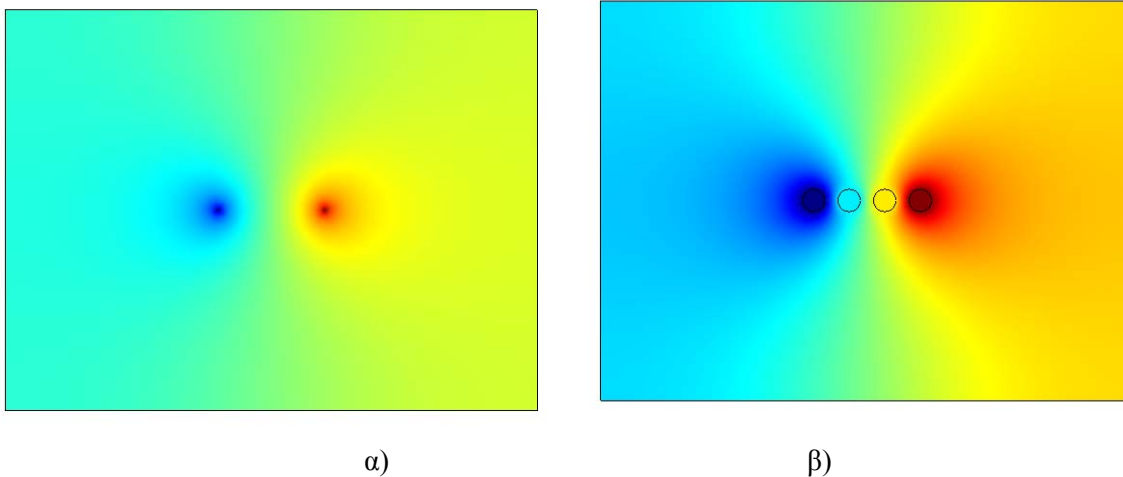
Τα αποτελέσματα από τα πειράματα εφελκυσμού που παρουσιάζονται στο διάγραμμα 6.2, δείχνουν πως η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακίδων μεγαλώνει ανάλογα με την παραμόρφωση με γραμμικό τρόπο. Αυτό είναι μια ένδειξη πως η ηλεκτρική αγωγιμότητα της βαφής μειώνεται ανάλογα με την παραμόρφωση. Οι ανωμαλίες στο γράφημα οφείλονται κυρίως στην κακή επιφάνεια της βαφής λόγω του ότι η επικάλυψη δεν είναι ομοιόμορφη. Στην περίπτωση που το πάχος της βαφής είναι γνωστό μπορεί να υπολογιστεί η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$  με την βοήθεια της σχέσης 6.3.



**Διάγραμμα 6.2.** Η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$ , της αγωγίμης βαφής σε σχέση με την παραμόρφωση

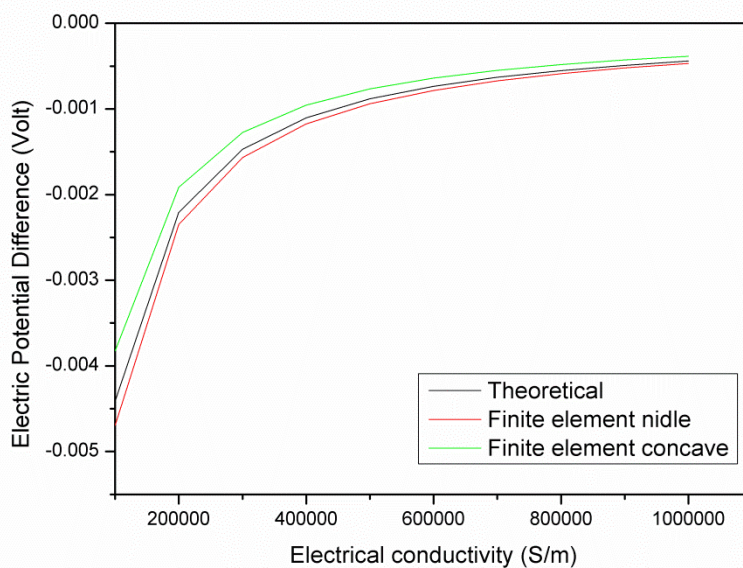
Όπως αναφέρθηκε στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την μέτρηση της μεταβολής της αγωγιμότητας  $\sigma$ , χρησιμοποιήθηκε μια παραλλαγή της μεθόδου των τεσσάρων σημείων. Αυτή η επιλογή εισάγει ένα σφάλμα στον υπολογισμό της αγωγιμότητας λόγω του σχήματος των ακίδων που χρησιμοποιήθηκαν. Έτσι υπάρχει ανάγκη να υπολογιστεί ένας διορθωτικός παράγοντας.

Προκειμένου να γίνει καλύτερα κατανοητή η επίδραση των κυλινδρικών ακίδων στο ηλεκτρικό δυναμικό που δημιουργείται, κατασκευάστηκαν δυο αριθμητικά μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά αναφέρονται σε πλάκα με πεπερασμένες διαστάσεις ( $60 \times 45 \times 0.05$  mm) και ηλεκτρική αγωγιμότητα  $10^5$  S/m. Στο ένα μοντέλο οι βελόνες αναπαριστώνται ως σημεία ενώ στο δεύτερο οι ακίδες μοντελοποιούνται ως προς την πραγματική τους γεωμετρία, όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 6.9.

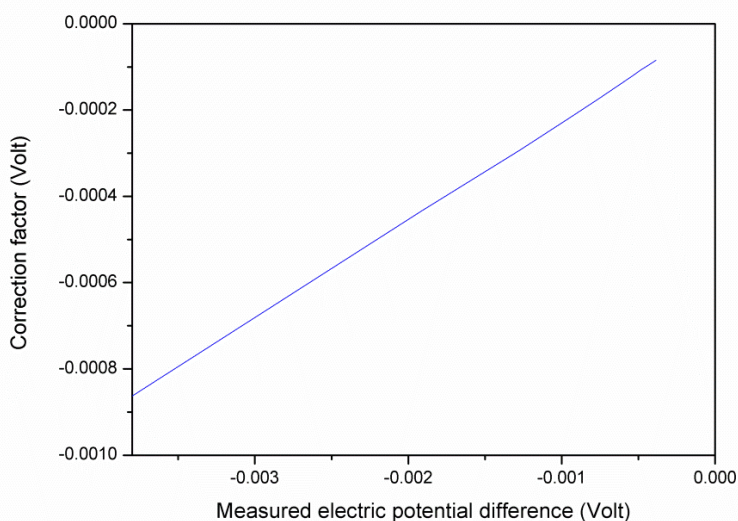


**Εικόνα 6.9.** Αριθμητικά αποτελέσματα του ηλεκτρικού δυναμικού σε αγωγή πλάκα α) με την κλασσική μέθοδο των τεσσάρων σημείων β) με την χρήση κυλινδρικών ακίδων.

Στο διάγραμμα 6.3 παρουσιάζονται οι συγκριτικές τιμές της διαφοράς δυναμικού  $V$  μεταξύ της θεωρητικής λύσης, της λύσης των πεπερασμένων στοιχείων και της λύσης των πεπερασμένων στοιχείων με ακίδες, για το εύρος ηλεκτρικής αγωγιμότητας από  $10^5$  μέχρι  $10^6$  S/m. Παρατηρείται πως η θεωρητική λύση (σχέση 6.3) με αυτή του αριθμητικού μοντέλου παρουσιάζουν σχετικά μικρό σφάλμα μεταξύ τους. Δεν ισχύει τους το ίδιο στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται κυλινδρικές ακίδες όπου εμφανίζεται σημαντικό σφάλμα.



**Διάγραμμα 6.3.** Συγκριτικές τιμές της διαφοράς δυναμικού  $V$  μεταξύ της θεωρητικής λύσης, της λύσης των πεπερασμένων στοιχείων και της λύσης των πεπερασμένων στοιχείων με ακίδες.



**Διάγραμμα 6.4.** Η εξάρτηση που παρουσιάζει ο διορθωτικός παράγοντας CF σε σχέση με την μετρούμενη διαφορά δυναμικού  $V_m$ .



Ο διορθωτικός παράγοντας CF μπορεί να συσχετιστεί με την μετρούμενη διαφορά δυναμικού  $V_m$ , για το εύρος αγωγιμότητας που μελετήθηκε. Τους φαίνεται και στο διάγραμμα 6.4, η εξάρτηση τους είναι γραμμική και μπορεί να περιγραφεί από την σχέση

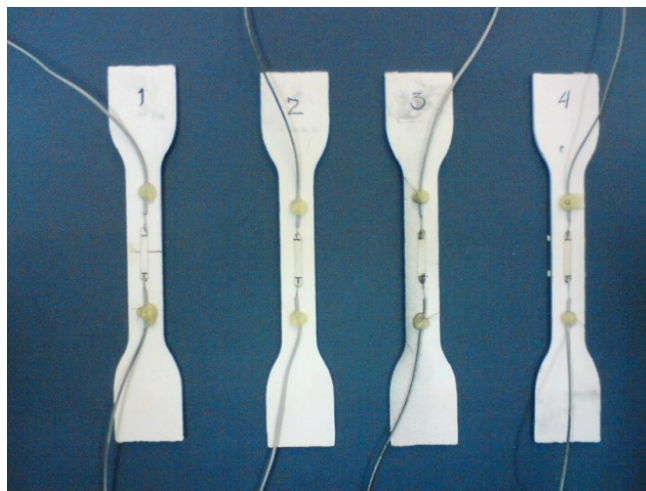
$$CF=0.227 \cdot V_m + 10^{-6} \text{ (Volt)} \quad (6.4)$$

Έτσι η πραγματική διαφορά δυναμικού  $V_{real}$  μπορεί να υπολογιστεί με την προσθήκη αυτού του παράγοντα, από την οποία στην συνέχεια υπολογίζεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$ .

$$V_{real} = V_m + CF \text{ (Volt)} \quad (6.5)$$

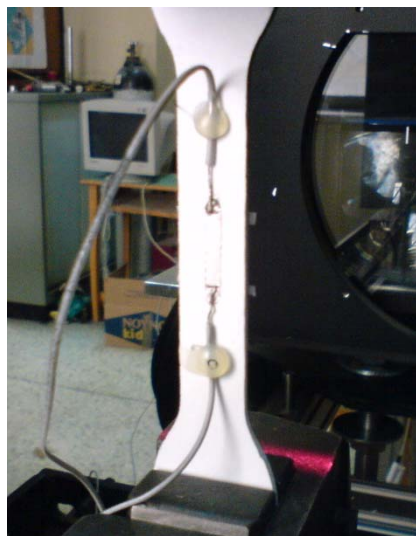
#### 6.4 Πειραματική διερεύνηση της επαναληψιμότητας των μετρήσεων

Το πείραμα που περιγράφεται παρακάτω έγινε με σκοπό να εξακριβωθεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης R, που οφείλεται στην παραμόρφωση. Συγκεκριμένα έγινε προσπάθεια να διατηρηθούν οι τις παράμετροι σε μια σειρά από πειράματα και να αξιολογηθεί η ομοιομορφία στην απόκριση τις μεθόδου. Έτσι κατασκευάστηκαν καινούργια δοκίμια διατηρώντας τα βασικά χαρακτηριστικά της βαφής (μήκος, πλάτος και πάχος). Για την κατασκευή τις χρησιμοποιήθηκε φύλλο από συμπαγές πολυβινυλοχλωρίδιο (polyvinyl chloride, PVC), από το οποίο αποσπάστηκαν 4 δοκίμια με την βοήθεια κατάλληλα διαμορφωμένης πρέσας. Στην συνέχεια η μια επιφάνεια επικαλύφτηκε από ηλεκτρικά αγώγιμη βαφή και συγκολλήθηκαν ηλεκτρόδια, όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 6.10.



**Εικόνα 6.10.** Ηλεκτρικά αγώγιμη βαφή σε δοκίμιο από συμπαγές πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό με το ίδιο τρόπο που αναφέρεται στην παράγραφο 6.3.2. Το μέγεθος της παραμόρφωσης μετράται από την μια πλευρά του δοκιμίου με την βοήθεια ενός οπτικού μηκυσιόμετρου, ενώ από την άλλη πλευρά τα ηλεκτρόδια είναι συνδεδεμένα με πολύμετρο ακριβείας και μηχανή καταγραφής δεδομένων. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην εικόνα 6.11.

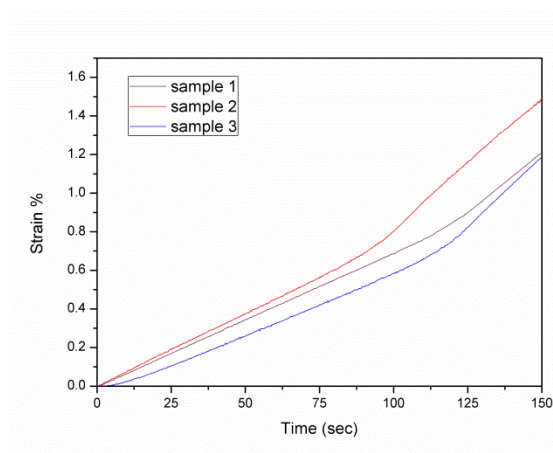


α)

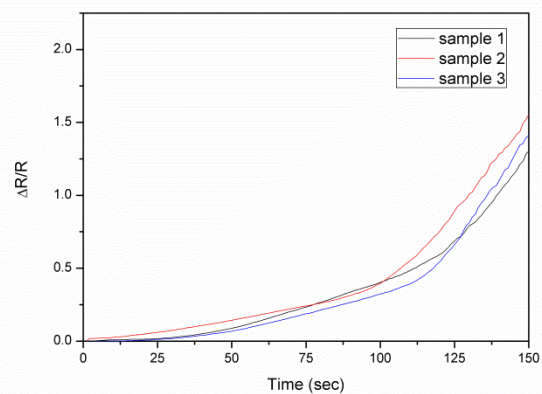


β)

**Εικόνα 6.11.** α) μέτρηση της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης  $R$  της αγωγίμης βαφής β) μέτρηση της παραμόρφωσης του δοκιμίου με την χρήση οπτικού μηκυσιόμετρου.



α)



β)

**Διάγραμμα 6.5.** α) Η παραμόρφωση σε σχέση με το χρόνο στα δοκίμια μετρούμενη με οπτικό μηκυσιόμετρο β) η ανηγμένη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης  $\Delta R/R$  σε σχέση με το χρόνο.

Στο διάγραμμα 6.5 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των δυο μεθόδων (οπτικό μηκυσιόμετρο – μεταβολή τις ηλεκτρικής αντίστασης R) για τα δοκίμια από PVC. Παρατηρώντας τις καμπύλες για τις δυο περιπτώσεις μέτρησης, μπορούμε να συμπεράνουμε πως υπάρχει μια σχετική επαναληψιμότητα. Θα πρέπει να σημειωθεί πως ένα οπτικό μηκυσιόμετρο είναι εξαιρετικά ακριβές και δεν μπορεί εκ των πραγμάτων να συγκριθεί με μια πρωτότυπη πειραματική διάταξη, καθιστώντας τις όποιες αποκλίσεις μέσα σε φυσιολογικά πλαίσια.

## 6.5 Ανίχνευση βλαβών με την βοήθεια ηλεκτρικά αγωγίμης βαφής. Αριθμητική προσομοίωση

### 6.5.1 Περιγραφή του φυσικού προβλήματος

Η περίπτωση αυτή αναφέρεται σε πλάκα πολυμερούς σε επιφάνεια της οποίας έχει επικολληθεί ηλεκτρικά αγωγή επιστρωση. Ο σκοπός είναι να μελετηθεί το συζευγμένο πρόβλημα Μηχανικής-Ηλεκτροστατικής στην περίπτωση ατελειών στο εσωτερικό της πλάκας. Όπως αποδείχτηκε πειραματικά η ηλεκτρική αγωγιμότητα της επιστρώσεως μπορεί να μεταβληθεί σε μεγάλο βαθμό υπό την επίδραση της παραμόρφωσης. Έτσι μια ατέλεια στο υλικό θα προκαλέσει κάποιου είδους ασυνέχεια στο παραμορφωσιακό της πεδίο όταν θα ασκηθεί μια εξωτερική δύναμη. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την συγκέντρωση τάσεων στο σημείο αυτό πράγμα που αντανακλάται στην τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της επιστρώσεως. Στην περίπτωση όπου διαβιβάζεται ηλεκτρικό ρεύμα σταθερής έντασης I, η ασυνέχεια αυτή θα προκαλέσει με την σειρά της μια διαταραχή στο ηλεκτρικό πεδίο E και το ηλεκτρικό δυναμικό V. Προκειμένου να μελετηθεί αυτό το φυσικό πρόβλημα, κατασκευάστηκε αριθμητικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιεί για την επίλυση την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

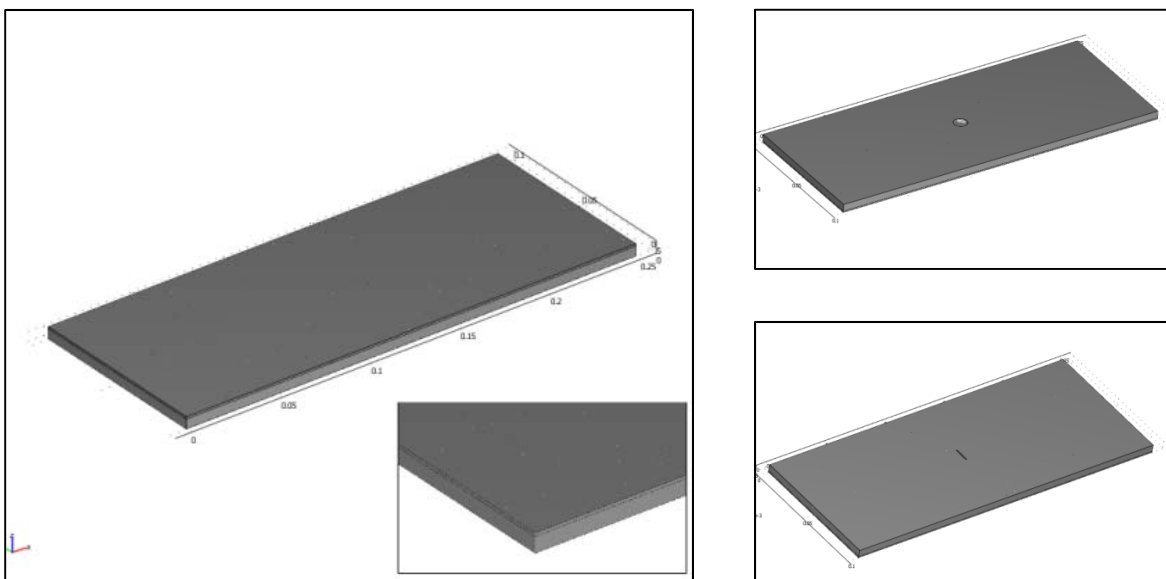
### 6.5.2 Ιδιότητες και γεωμετρία του αριθμητικού μοντέλου

Η πλάκα έχει ορθογώνιο σχήμα (250x100x5 mm), ενώ η επιστρωση βρίσκεται στην μια εξωτερική επιφάνεια και έχει πλάτος 1 mm. Ως ατέλειες εξετάστηκαν δυο περιπτώσεις. Η πρώτη αναφέρεται σε διάβρωση του υλικού και προσομοιώνεται ως απώλεια υλικού, κυλινδρικού σχήματος διαμέτρου 1cm και ύψους 2mm, στο κέντρο τις πλάκας και σε απόσταση 3 mm από την επιφάνεια που βρίσκεται η επιστρωση. Η δεύτερη περίπτωση αναφέρεται σε εγκοπή μήκους 1 cm και ύψους 2 mm και αυτή στο κέντρο τις πλάκας και σε απόσταση 3 mm από την επιφάνεια που βρίσκεται η επιστρωση. Στην εικόνα 6.12 παρουσιάζεται η γεωμετρία τις κάθε περίπτωσης.

Στις μηχανικές ιδιότητες τις πλάκας αποδόθηκαν τυπικές τιμές από την βιβλιογραφία (μέτρο ελαστικότητας 5 Gpa και λόγο Poisson 0,38), ενώ για την επιστρωση επιλέχτηκε το μέτρο ελαστικότητας να είναι μια τάξη μικρότερο από αυτό της πλάκας και ίδιος λόγος Poisson προκειμένου να μην την επηρεάζει σημαντικά. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα τις πλάκας έχει τιμή  $10^{-12}$  S/m (μονωτής) ενώ της επιστρώσεως ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_0 - \alpha \cdot \epsilon_{xx} \\ \sigma_y &= \sigma_0 - \alpha \cdot \epsilon_{yy} \\ \sigma_z &= \sigma_0 - \alpha \cdot \epsilon_{zz}\end{aligned}\tag{6.6}$$

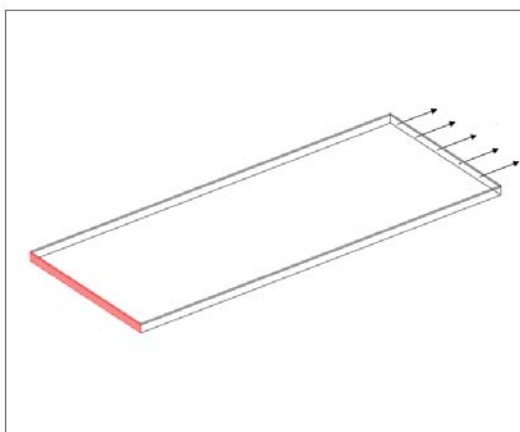
όπου  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε κάθε διεύθυνση,  $\sigma_0$  είναι η αρχική ηλεκτρική αγωγιμότητα της επίστρωσης ( $6 \cdot 10^6$  S/m),  $\alpha$  μια σταθερά και  $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$  είναι η παραμόρφωση στην αντίστοιχη διεύθυνση.



**Εικόνα 6.12.** Απεικόνιση τις γεωμετρίας του μοντέλου για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε.

### 6.5.3 Συνοριακές συνθήκες και διαδικασία επίλυσης

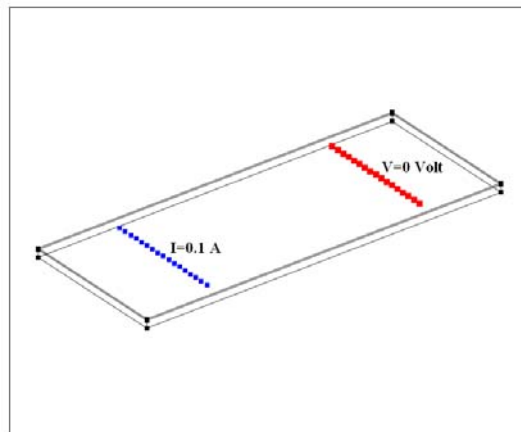
Όπως αναφέρθηκε το φυσικό πρόβλημα χωρίζεται σε δυο επιμέρους προβλήματα. Αρχικά γίνεται η επίλυση μόνο του προβλήματος του παραμορφώσιμου στερεού ώστε να υπολογιστούν οι παραμορφώσεις σε κάθε διεύθυνση. Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται σε αυτή την περίπτωση είναι πάκτωση σε μια από τις ακριανές επιφάνειες και καταναμημένη δύναμη 1KN στην άλλη, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 6.13.



**Εικόνα 6.13.** Συνοριακές συνθήκες του προβλήματος του παραμορφώσιμου στερεού

Η λύση που εξάγεται με την βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποθηκεύεται στην μνήμη του μοντέλου ώστε να υπολογιστεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα της επίστρωσης (με βάση τις τιμές της παραμόρφωσης).

Στην συνέχεια γίνεται επίλυση του ηλεκτροστατικού προβλήματος ώστε να υπολογιστεί το δυναμικό  $V$  σε κάθε σημείο πάνω στην πλάκα. Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται σε αυτή την περίπτωση είναι ηλεκτρική μόνωση σε όλες τις εξωτερικές επιφάνειες (η κάθετη πυκνότητα του ρεύματος να είναι μηδέν) ώστε να περιορίζεται το ηλεκτρικό πεδίο εντός της γεωμετρίας. Επιπλέον στην επιφάνεια της επίστρωσης επιβάλλεται σε ισαπέχουσα σημεία σταθερή ένταση ρεύματος  $I=0,1$  A ενώ στα αντιδιαμετρικά τους, σταθερό δυναμικό ίσο με μηδέν. Αυτές οι συνθήκες περιγράφουν τα ηλεκτρόδια μιας πηγής τροφοδοσίας (άνοδος  $I=0,1$  Ampere και κάθοδος  $V=0$  Volt), ενώ η διαμόρφωση έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται ομογενές ηλεκτρικό πεδίο. Στην εικόνα 6.14 παρουσιάζονται οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του ηλεκτροστατικού προβλήματος.

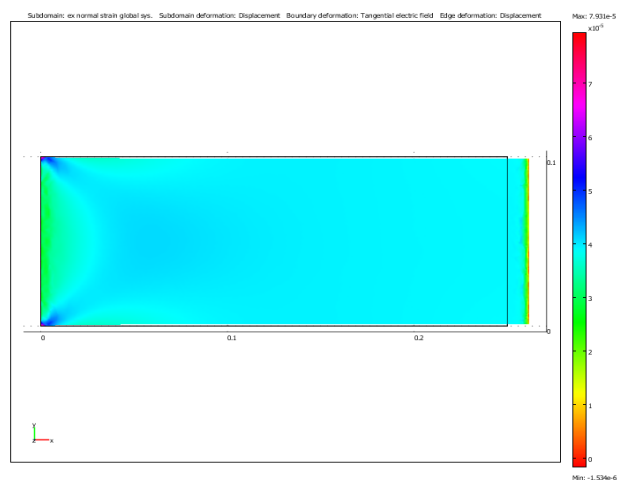


**Εικόνα 6.14.** συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του ηλεκτροστατικού προβλήματος

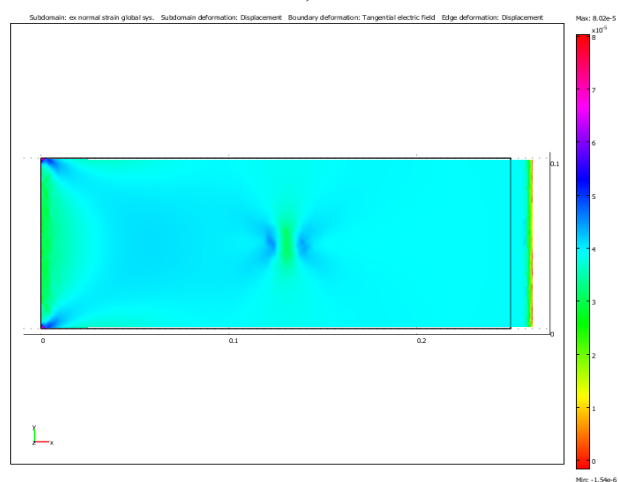
#### 6.5.4 Αποτελέσματα

Μετά την επίλυση και του ηλεκτροστατικού προβλήματος μπορούν να εξαχθούν συγκεντρωτικά αποτελέσματα του συνολικού προβλήματος. Όπως αναφέρθηκε εξετάστηκαν οι περιπτώσεις πλάκας χωρίς ατέλεια και πλάκας με ατέλεια (απώλεια υλικού, εγκοπή). Στην εικόνα 6.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμόρφωσης  $\epsilon_{xx}$  κατά τον άξονα του εφέλκυσμού καθώς και το παραμορφωμένο σχήμα της επιφάνειας της επίστρωσης για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε. Όπως είναι αναμενόμενο στα ακριανά σημεία όπου εφαρμόστηκαν οι συνοριακές συνθήκες παρατηρείται μια διαταραχή στο πεδίο των παραμορφώσεων ενώ αντίστοιχη διαταραχή παρατηρείται και πάνω από τις υποτιθέμενες ατέλειες λόγω συγκέντρωσης τάσεων.

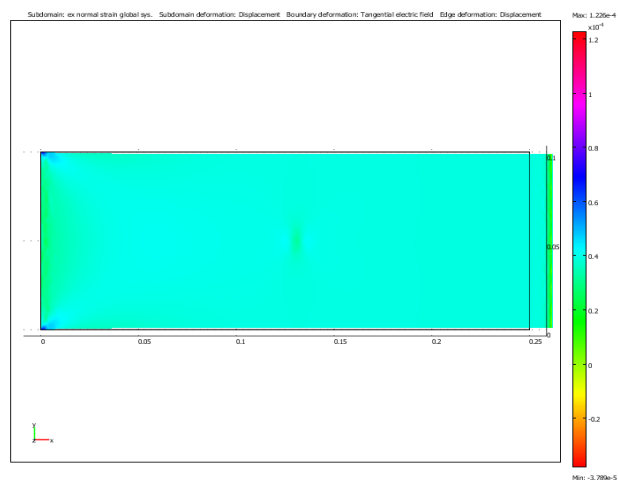
Όπως αναφέρθηκε αρχικά, η ηλεκτρική αγωγιμότητα της επίστρωσης είναι συνάρτηση της παραμόρφωσης. Στην εικόνα 6.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της επίστρωσης μετά την παραμόρφωση της πλάκας. Όπως είναι αναμενόμενο στις περιοχές όπου υπάρχει ατέλεια η ηλεκτρική αγωγιμότητα παρουσιάζει απότομη αλλαγή.



α)

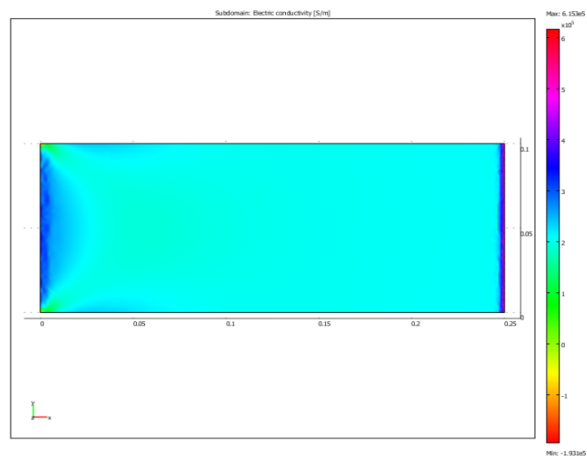


β)

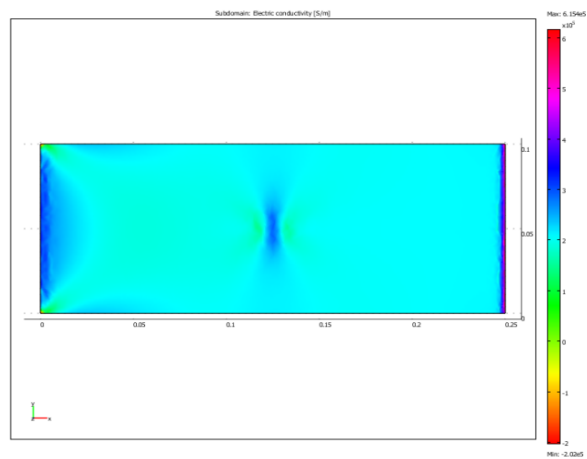


γ)

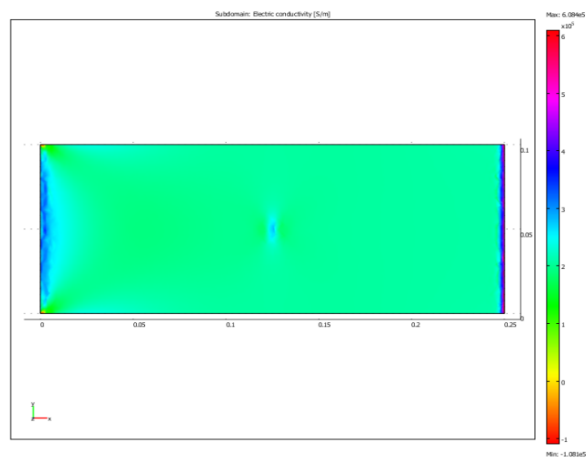
**Εικόνα 6.15.** Το πεδίο της παραμόρφωσης  $\epsilon_{xx}$  κατά τον άξονα του εφελκυσμού καθώς και το παραμορφωμένο σχήμα της επιφάνειας της επίστρωσης α) για την περίπτωση πλάκας χωρίς ατέλεια β) για την περίπτωση πλάκας με διάβρωση και γ) για την περίπτωση πλάκας με εγκοπή.



α)



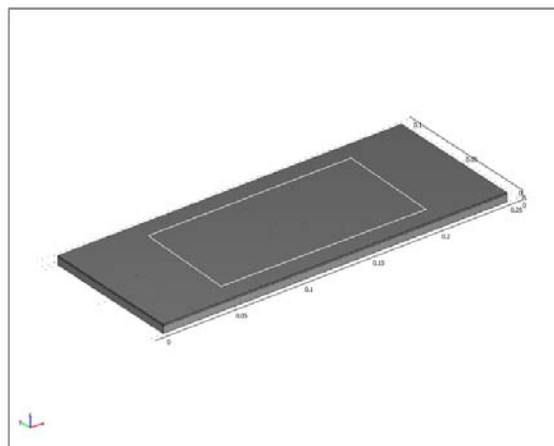
β)



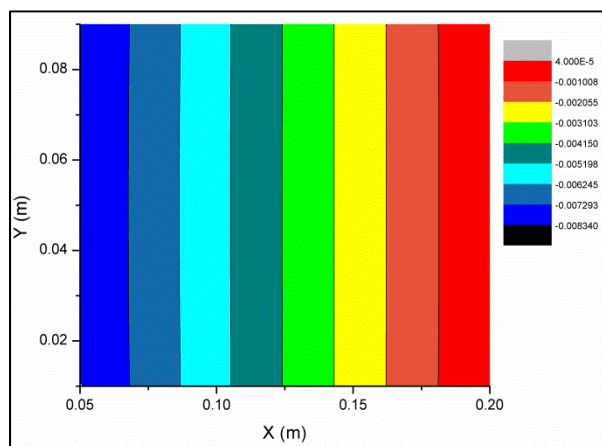
γ)

**Εικόνα 6.16.** Η ηλεκτρική αγωγιμότητα της επίστρωσης α) για την περίπτωση πλάκας χωρίς ατέλεια β) για την περίπτωση πλάκας με διάβρωση και γ) για την περίπτωση πλάκας με εγκοπή.

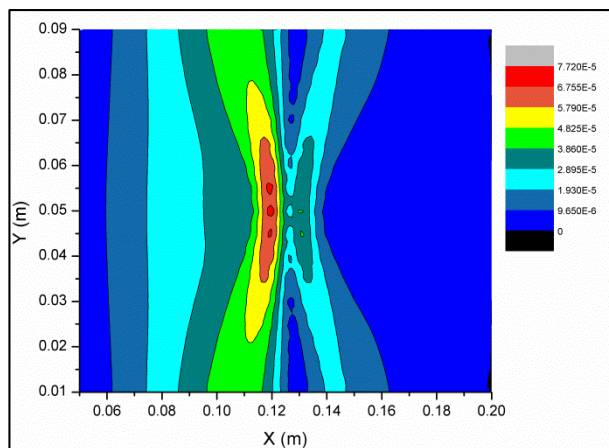
Η απότομη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας γύρω από την περιοχή όπου υπάρχει ατέλεια επηρεάζει το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  και κατά συνέπεια το ηλεκτρικό δυναμικό  $V$ . Το ηλεκτρικό δυναμικό  $V$  στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει ατέλεια χρησιμοποιείται ως πεδίο αναφοράς το οποίο μπορεί να συγκριθεί μετά με άλλες περιπτώσεις και να εξαχθούν συμπεράσματα για την ύπαρξη και το είδος ατελειών. Έτσι μια νέα μη καταστροφική μέθοδος εντοπισμού και αναγνώρισης ατελειών σε πολυμερή, μπορεί να πραγματοποιηθεί με αυτό τον τρόπο. Στην εικόνα 6.17 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα του ηλεκτρικού δυναμικού  $V$  για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.



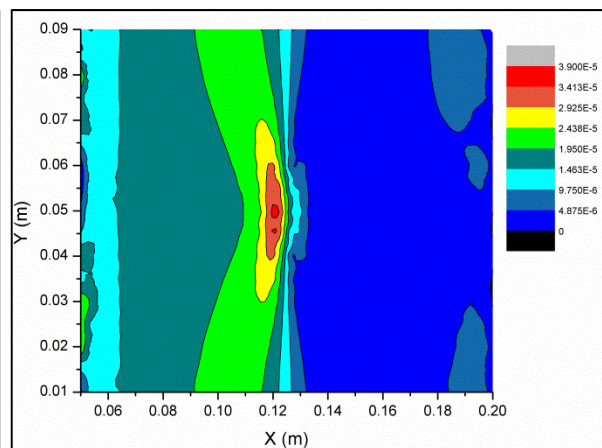
α)



β)



γ)



δ)

**Εικόνα 6.17.** α) η περιοχή αναφοράς των μετρήσεων β) η διαφορά του ηλεκτρικού δυναμικού  $V$  στην επιφάνεια της επίστρωσης μεταξύ πλάκας με παραμόρφωση και χωρίς παραμόρφωση γ) η διαφορά του ηλεκτρικού δυναμικού  $V$  μεταξύ της υγιούς πλάκας και πλάκας με διάβρωση και γ) η διαφορά του ηλεκτρικού δυναμικού  $V$  μεταξύ της υγιούς πλάκας και πλάκας με εγκοπή.



## 6.6 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

Τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύουν πως η ηλεκτρικά αγώγιμη βαφή με νιφάδες Αργύρου παρουσιάζει μεταβολή των ηλεκτρικών της ιδιοτήτων με την παραμόρφωση. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας παραμόρφωσης σαν εξωτερική επίστρωση σε υλικά και κατασκευές. Η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που μετρήθηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά για ένα μεγάλο εύρος παραμορφώσεων ενώ η απόκριση είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τα κλασικά ηλεκτρικά μηκυσιόμετρα. Στην περίπτωση που η παραμόρφωση υπολογίζεται μέσω της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης της βαφής, ισχύει η σχέση :

$$\varepsilon = \frac{\Delta R / R}{GF} \quad (6.7)$$

Όπου ο συντελεστής μετατροπής GF υπολογίζεται πειραματικά.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 6.4 δείχνουν πως αν διατηρηθούν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά σε ένα αποτύπωμα από τέτοιου είδους βαφή, είναι δυνατή η επαναληψιμότητα των μετρήσεων ώστε να μπορεί να γίνει βαθμονόμηση. Για την βελτιστοποίηση των μετρήσεων, ίσως θα ήταν σκόπιμο η εφαρμογή να γίνεται με την μορφή λεπτού φιλμ από σύνθετο υλικό (νιφάδων Αργύρου/πολυμερούς) με προτυποποιημένες διαστάσεις και σύσταση.

Η αριθμητική προσομοίωση έδειξε πως κάτω από προϋποθέσεις η χρήση αυτού του υλικού θα μπορούσε να βοηθήσει στην καταγραφή του παραμορφωσιακού πεδίου μιας κατασκευής. Έτσι συγκρίνοντας τις μετρήσεις ανά τακτά χρονικά διαστήματα θα ήταν δυνατή η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας, ενώ επιπλέον θα μπορούσαν να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες για τον σχεδιασμό μιας κατασκευής.

Ένα μειονέκτημα αυτού του υλικού είναι το υψηλό κόστος των νιφάδων Αργύρου, πράγμα που περιορίζει την εφαρμογή του σε πολύ μεγάλες επιφάνειες. Επίσης βασικό μειονέκτημα είναι και η εξάρτηση που παρουσιάζει η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυτού του υλικού από την εξωτερική θερμοκρασία, πράγμα που εισάγει μια επιπλέον παράμετρο στις μετρήσεις, φαινόμενο που βέβαια παρατηρείται σε όλους σχεδόν τους αισθητήρες παραμόρφωσης.

## Κεφάλαιο 7

---

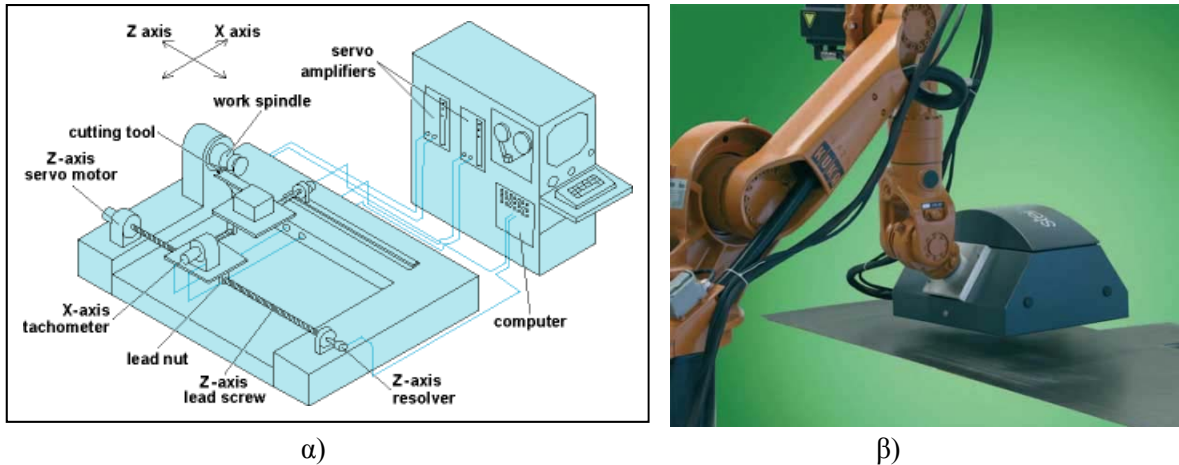
### Ανάπτυξη οπτικού συστήματος παρακολούθησης της θέσης επαγωγικών αισθητήρων

#### 7.1 Εισαγωγή

Σε πολλές εφαρμογές μη καταστρεπτικών ελέγχων χρησιμοποιούνται επαγωγικοί αισθητήρες (δινορευματα, μαγνητική διαρροή κ.α.) σε επιφάνειες κατασκευών ή εξαρτημάτων. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι σκόπιμο να είναι γνωστή η θέση του αισθητήρα ως προς την υπό εξέταση επιφάνεια ώστε να μπορεί να αντιστοιχηθεί με το σήμα που λαμβάνεται από αυτόν. Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων αυτών (θέση-απόκριση) μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και να δώσει μια σαφή εικόνα για την ύπαρξη ή όχι μιας ατέλειας καθώς και την θέση της. Επιπλέον ο συνδυασμός αυτός μπορεί να συνθέσει μια τρισδιάστατη εικόνα του αντικειμένου αν η μετρούμενη παράμετρος του αισθητήρα είναι το πάχος του. Συνήθως για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται κάποιος σερβομηχανισμός με τουλάχιστον δυο βαθμούς ελευθερίας ή ρομποτικοί βραχίονες, σαν αυτόν που εμφανίζεται στην εικόνα 7.1.

Τα συστήματα αυτά υποβοηθούνται από ένα Η/Υ και κατάλληλο λογισμικό, τα οποία ελέγχουν την κίνηση του αισθητήρα πάνω στην υπό εξέταση επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό η θέση του αισθητήρα είναι πάντα γνωστή και αντιστοιχίζεται με το σήμα που λαμβάνεται. Συνήθως οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται σε εργαστηριακό περιβάλλον ενώ υπάρχουν και περιορισμοί ως προς το μέγεθος της υπό εξέτασης επιφάνειας. Εναλλακτικά η τεχνική αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί και χειροκίνητα. Στην περίπτωση αυτή ο επιθεωρητής διακρίτοποιεί την επιφάνεια, με ένα κατάλληλο μολύβι, σε αριθμημένες υποεπιφάνειες. Στην συνέχεια ελέγχεται κάθε ένα μικρό κομμάτι ξεχωριστά ενώ στο τέλος της διαδικασίας συνθέτονται όλα τα αποτελέσματα ώστε να δώσουν μια συνολική εικόνα. Τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι ότι είναι σχετικά χρονοβόρα διαδικασία ενώ επιπλέον υπάρχει το στοιχείο της αβεβαιότητας ως προς το αν έχει ελεγχτεί ολόκληρη η επιφάνεια ή αν έχουν παραληφτεί κάποια κομμάτια.

Στα πλαίσια αυτής της διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε από κοινού με τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κούλαλη Ηλία, ένα οπτικό σύστημα παρακολούθησης της θέσης ενός επαγωγικού αισθητήρα. Το σύστημα δεν απαιτεί την χρήση πολύπλοκων μηχανισμών ενώ μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί και εκτός εργαστήριων χώρων.



**Εικόνα 7.1.** Σχηματική αναπαράσταση ενός σερβομηχανισμού πάνω στον οποίο προσαρμόζεται ο αισθητήρας β) ρομποτικός βραχίονας που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο επιφανειών.

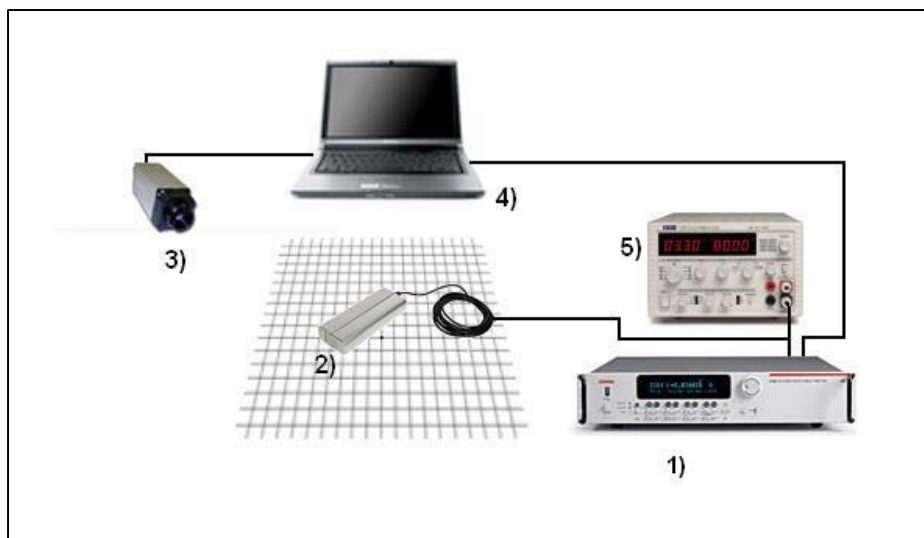
## 7.2 Περιγραφή του συστήματος

\* Η καινοτομία αυτού του συστήματος έγκειται στην οπτική καταγραφή της θέσης επαγωγικού αισθητήρα ενώ μετακινείται από τον επιθεωρητή με το χέρι.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας η οποία στοχεύει την υπό εξέταση επιφάνεια. Η κάμερα αυτή μπορεί να «βλέπει» την κίνηση μιας διόδου εκπομπής φωτός υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR LED) η οποία έχει τοποθετηθεί πάνω στον αισθητήρα. Με την χρήση κατάλληλου λογισμικού είναι δυνατή η καταγραφή της θέσης του αισθητήρα, κατά την κίνηση του, σε πραγματικό χρόνο. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία ελέγχου ο επιθεωρητής μπορεί να προχωρήσει στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων, χαρτογραφώντας ολόκληρη την επιφάνεια. Τα βασικά μέρη που αποτελούν το σύστημα εμφανίζονται σχηματικά στην εικόνα 7.2.

Επιγραμματικά τα μέρη τα οποία αποτελούν το σύστημα οπτικής καταγραφής της θέσης επαγωγικών αισθητήρων είναι :

1. Μηχανή καταγραφής δεδομένων
2. Επαγωγικός αισθητήρας με προσαρμοσμένη δίοδο εκπομπής φωτός υπέρυθρης ακτινοβολίας
3. Κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας
4. Η/Υ με κατάλληλο λογισμικό
5. Τροφοδοτικό



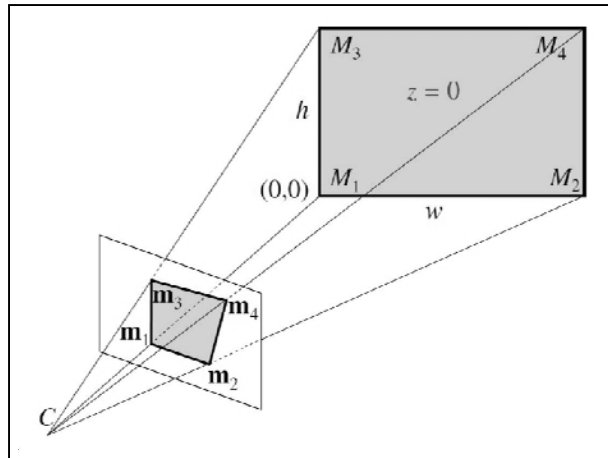
**Εικόνα 7.2.** Σχηματική περιγραφή του συστήματος οπτικής καταγραφής θέσης

Το σύστημα καταγραφής δεδομένων συνδέεται με τον επαγωγικό αισθητήρα ώστε να λαμβάνει και να καταγράφει τις τιμές που προέρχονται από αυτόν. Παράλληλα είναι συνδεδεμένο με τον Η/Υ στον οποίο στέλνει τα δεδομένα που καταγράφει. Στον επαγωγικό αισθητήρα έχει προσαρμοστεί ειδική δίοδος εκπομπής φωτός υπέρυθρης ακτινοβολίας ώστε να μπορεί να εντοπιστεί από την υπέρυθη κάμερα. Η κάμερα είναι συνδεδεμένη με τον Η/Υ, στον οποίο στέλνει τα δεδομένα από την θέση του αισθητήρα. Το φάσμα λειτουργίας της κάμερας έχει περιοριστεί στο υπέρυθρο πράγμα το οποίο εξασφαλίζει ότι λαμβάνει δεδομένα μόνο από τον αισθητήρα. Ο Η/Υ χρησιμοποιεί κατάλληλο λογισμικό το οποίο συνδέει όλα τα υπόλοιπα κομμάτια μεταξύ τους και διαχειρίζεται την όλη διαδικασία και την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των συσκευών.

### 7.3 Περιγραφή της διαδικασίας απεικόνισης

#### 7.3.1 Προβολή της επιφάνειας στην οθόνη του υπολογιστή

Το πρώτο βήμα αφορά την τοποθέτηση και εστίαση της κάμερας προς την υπό εξέταση περιοχή. Με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού γίνεται προβολή της επιφάνειας στην οθόνη του υπολογιστή. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει και την χρήση του IR LED του αισθητήρα. Η προβολή της επιφάνειας (καλιμπράρισμα) επιτυγχάνεται τοποθετώντας το IR LED στις τέσσερις γωνίες της υπό εξέτασης περιοχής, με σκοπό να καταγραφούν οι θέσεις τους. Με βάση αυτά τα δεδομένα και μέσω μιας αλγοριθμικής διαδικασίας συνθέεται ο «πίνακας μετασχηματισμού». Αυτό είναι και το βασικό αλευρικό εργαλείο το οποίο μετασχηματίζει την κίνηση του επαγωγικού αισθητήρα σε κίνηση του κέρσορα στην οθόνη του υπολογιστή.



**Εικόνα 7.3.** Σχηματική αναπαράσταση της προβολής της επιφάνειας στην οθόνη του υπολογιστή.

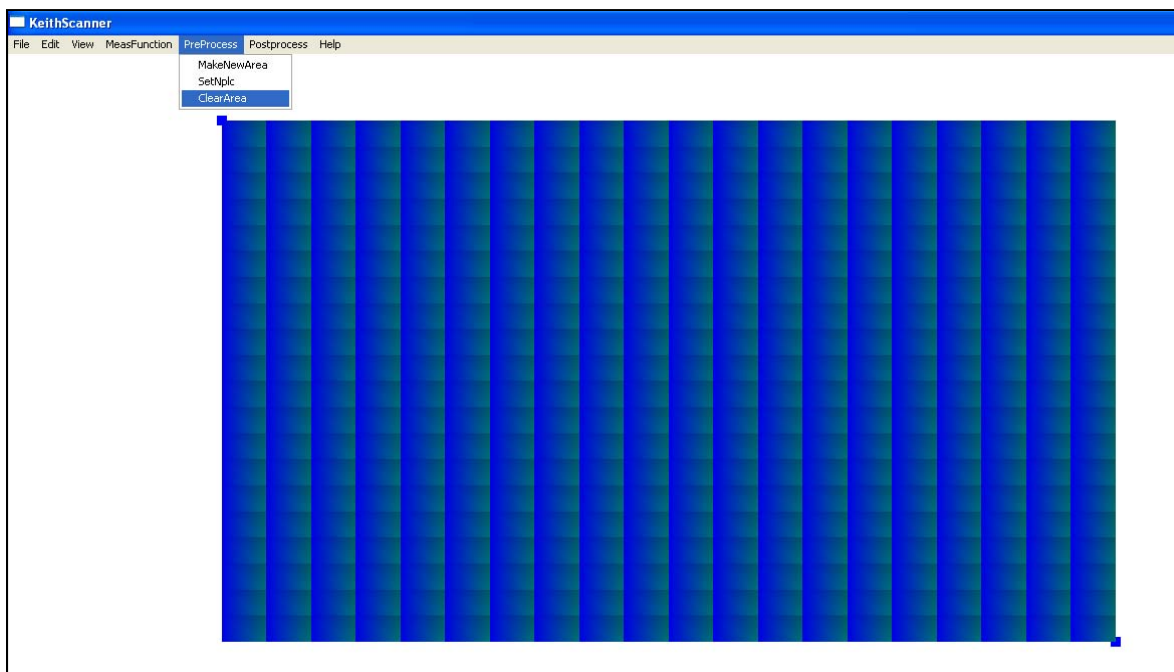
### 7.3.2 Περιγραφή της λειτουργίας του λογισμικού

Η λειτουργία του λογισμικού μπορεί να διαιρεθεί σε τρία βασικά κομμάτια :

1. Την προ-επεξεργασία
2. Την διαδικασία καταγραφής δεδομένων
3. Την επεξεργασία των αποτελεσμάτων

#### Προ-επεξεργασία

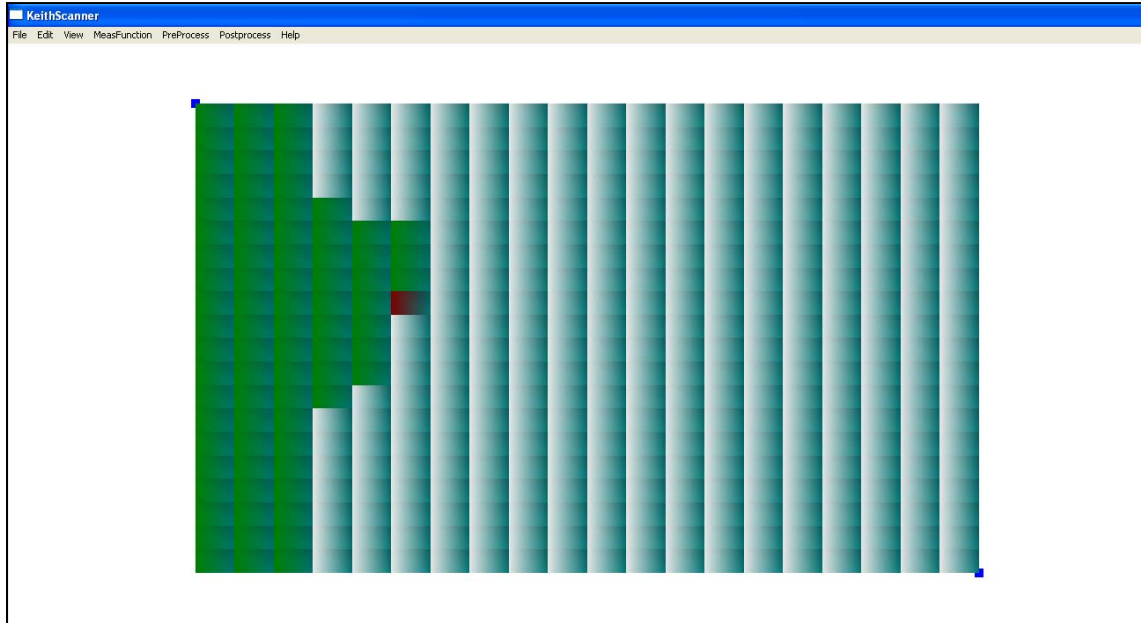
Σε αυτό το βήμα μπορούν να εκτελεστούν δυο εντολές. Η εντολή «φτιάξε καινούργια περιοχή» (MakeNewArea) και η εντολή «καθάρισε την περιοχή» (ClearArea). Η πρώτη εντολή χρησιμοποιείται για να οριστεί η περιοχή απ' όπου θα καταγράφουν οι μετρήσεις. Όταν χρησιμοποιείται αυτή η εντολή ζητείται από τον χρήστη να τοποθετήσει τον επαγωγικό αισθητήρα στην πάνω αριστερά και στην κάτω δεξιά γωνία. Μετά τον ορισμό της περιοχής ζητείται από τον χρήστη να ορίσει την διακριτοποίηση της περιοχής. Έτσι εμφανίζεται ένα υπό-παράθυρο στο οποίο ορίζεται ο αριθμός διακριτοποίησης κατά την οριζόντια και κατά την κάθετη διεύθυνση. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό υπό-περιοχών όπου σε κάθε μια θα αντιστοιχηθεί μια μέτρηση από τον επαγωγικό αισθητήρα. Στην εικόνα 7.4 παρουσιάζεται το κεντρικό παράθυρο του λογισμικού και οι εντολές που χρησιμοποιούνται για την προ-επεξεργασία. Η εντολή «καθάρισε την περιοχή» θα απαλείψει όλα τα δεδομένα που καταγράφηκαν αφήνοντας όμως την διακριτοποιημένη περιοχή ανέπαφη για την διεξαγωγή καινούργιας μέτρησης.



**Εικόνα 7.4.** Το κεντρικό παράθυρο του λογισμικού και οι εντολές που χρησιμοποιούνται για την προεπεξεργασία.

#### Διαδικασία καταγραφής δεδομένων

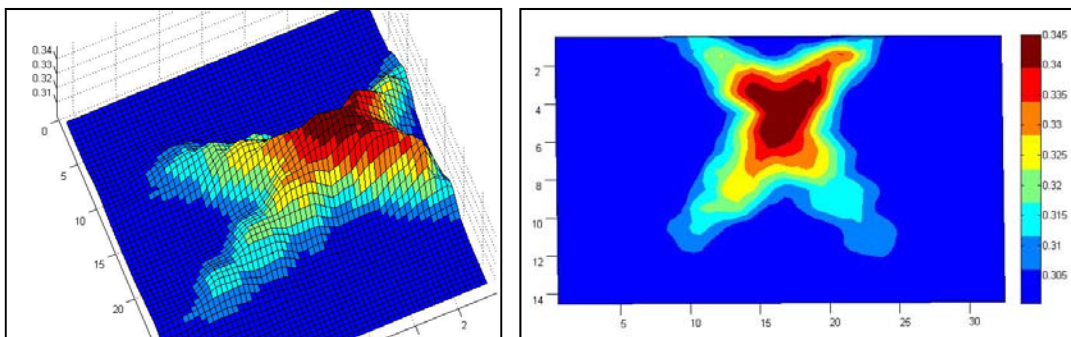
Καθώς ο επιθεωρητής μετακινεί τον επαγωγικό αισθητήρα πάνω από την υπό εξέταση περιοχή η κίνηση μεταφράζεται σε κίνηση του κέρσορα πάνω από την διακριτοποιημένη περιοχή στην οθόνη του υπολογιστή που ορίστηκε σε προηγούμενο βήμα. Με αυτό τον τρόπο καταγράφεται η θέση και η μέτρηση του αισθητήρα καθώς το λογισμικό επικοινωνεί με την συσκευή καταγραφής των δεδομένων. Για κάθε υπό-περιοχή συντελείται μια ταχεία στατιστική επεξεργασία την στιγμή που ο αισθητήρας περνά από πάνω της. Αν το στατιστικό σφάλμα είναι κάτω από αποδεκτά όρια η μέση τιμή των μετρήσεων αποδίδεται στην υπό-περιοχή και αποθηκεύεται, ενώ παράλληλα παίρνει πράσινο χρώμα υποδεικνύοντας ότι η μέτρηση είναι σωστή. Στην αντίθετη περίπτωση η υπό-περιοχή λαμβάνει κόκκινο χρώμα υποδεικνύοντας ότι κάτι δεν πήγε καλά με την μέτρηση. Όταν ολοκληρωθεί η σάρωση της περιοχής εμφανίζεται ένα μήνυμα στον χρήστη όπου του ζητείται να αποθηκεύσει τις μετρήσεις σε κάποιο ηλεκτρονικό αρχείο της μορφής .txt. Στο αρχείο αυτό αναγράφεται η σχετική θέση του αισθητήρα και η μέτρηση από αυτή την θέση. Στην εικόνα 7.5 παρουσιάζεται το κεντρικό παράθυρο του λογισμικού κατά την διάρκεια μιας τυπικής διαδικασίας συλλογής των δεδομένων.



**Εικόνα 7.5.** Το κεντρικό παράθυρο του λογισμικού κατά την διάρκεια μιας τυπικής διαδικασίας συλλογής των δεδομένων.

### Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Μετά την διαδικασία καταγραφής των δεδομένων υπάρχουν διάφοροι τρόποι επεξεργασίας τους. Από την στιγμή που όλα τα δεδομένα είναι αποθηκευμένα σε ηλεκτρονικό αρχείο μπορούν να επεξεργαστούν και να παρουσιαστούν με οποιοδήποτε πρόγραμμα γραφικής απεικόνισης (Excel, OriginPro, Matlab κ.α.). Παρόλα αυτά το λογισμικό παρέχει απευθείας αυτή την δυνατότητα αφού συνδέεται με το λογισμικό του Matlab εκτελώντας απευθείας κάποιες εντολές αναπαράστασης και στατικής επεξεργασίας. Στην εικόνα 7.6 παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα απεικόνισης αποτελεσμάτων.



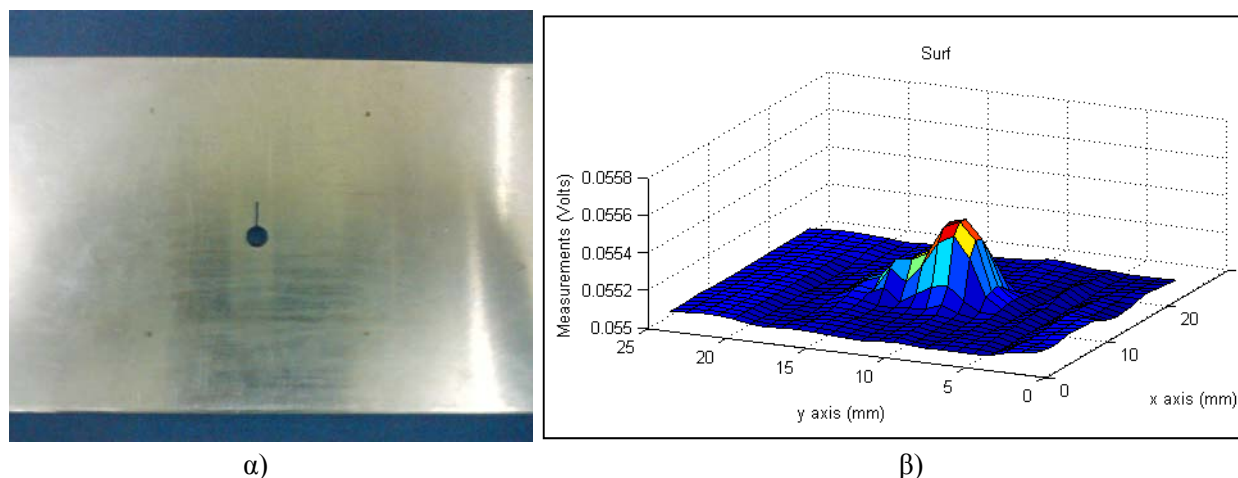
**Εικόνα 7.6.** Τυπικό παράδειγμα απεικόνισης αποτελεσμάτων όπου οι δυο άξονες αντιπροσωπεύουν την θέση ενώ ο τρίτος αντιπροσωπεύει την μέτρηση του επαγωγικού αισθητήρα.

## 7.4 Παραδείγματα και εφαρμογές

### 7.4.1 Απεικόνιση αποτελεσμάτων από επαγωγικό αισθητήρα δινορευμάτων

#### Πλάκα αλουμινίου με οπή και εγκοπή

Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται πλάκα αλουμινίου πάχους 3 mm, στην οποία υπάρχει μια οπή (διαμέτρου 4 mm) και εγκοπή (μήκους 5 mm) όπως εμφανίζεται στην εικόνα 7.7.α. Η ύπαρξη της οπής επηρεάζει την κατανομή των δινορευμάτων που δημιουργούνται από κατάλληλο επαγωγικό αισθητήρα (ομοαξονικά πηνία επιφανείας). Στην εικόνα 7.7.β παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, από μια περιοχή της επιφάνειας πλησίον της οπής. Όπως είναι εμφανές η παρουσία της ατέλειας υποδηλώνεται από την απότομη αλλαγή στο σήμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα.

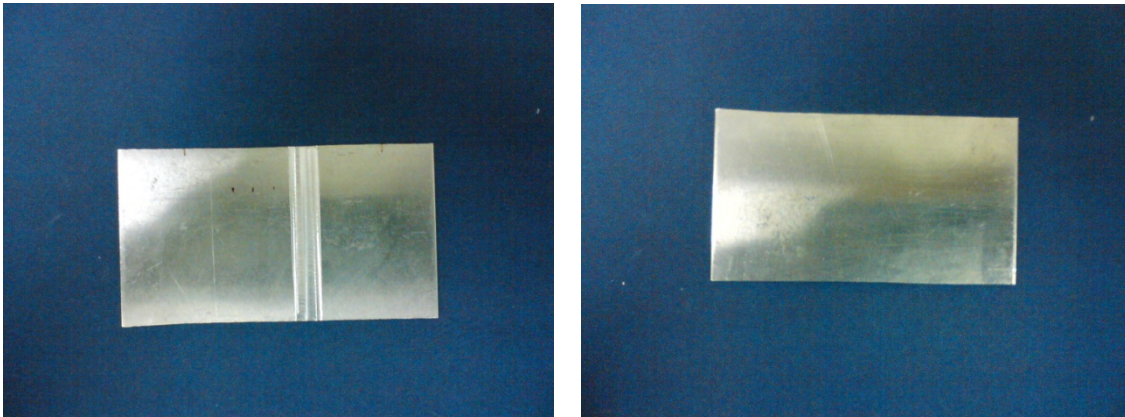


**Εικόνα 7.7.** α) πλάκα αλουμινίου με οπή και εγκοπή β) αποτελέσματα από μια περιοχή της επιφάνειας πλησίον της ατέλειας.

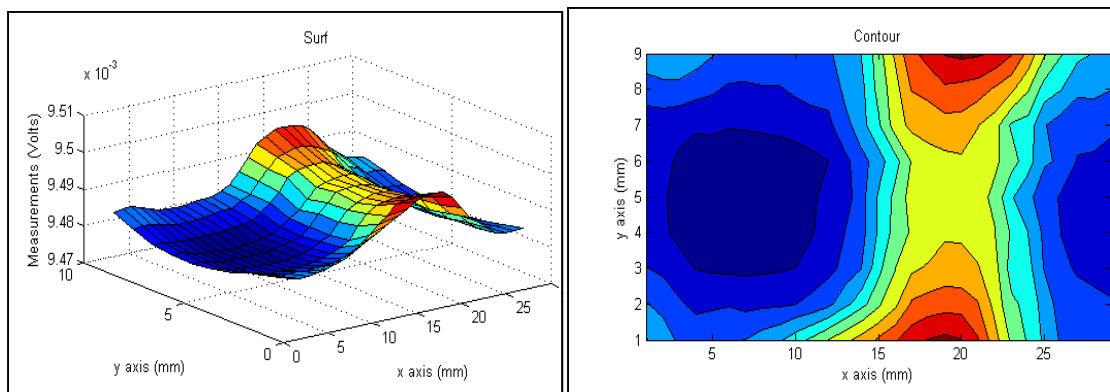
#### Πλάκα αλουμινίου με απώλεια υλικού στην μια πλευρά

Όπως αναφέρθηκε το σύστημα αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση του πάχους επιφανειών η μεταβολή του οποίου είναι μια ένδειξη ότι το υλικό έχει υποστεί κάποιου είδους διάβρωση. Ένα τέτοιο παράδειγμα παρουσιάζεται στην εικόνα 7.8, όπου σε μια πλάκα αλουμινίου πάχους 3 mm έχει αφαιρεθεί μια λωρίδα υλικού (πλάτους 6 mm και βάθους 0,4 mm) από την μια επιφάνεια του. Η πλάκα αυτή εξετάστηκε με κατάλληλο επαγωγικό αισθητήρα (ομοαξονικά πηνία επιφανείας) από την πλευρά όπου δεν υπάρχει απώλεια υλικού και οπτικά δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 7.9 όπου η μεταβολή του πάχους εμφανίζεται να ανταποκρίνεται τόσο ως προς την θέση όσο και ως το σχήμα, αν και παρατηρείται μια επιπλέον μεταβολή λόγω των πεπερασμένων διαστάσεων της πλάκας.





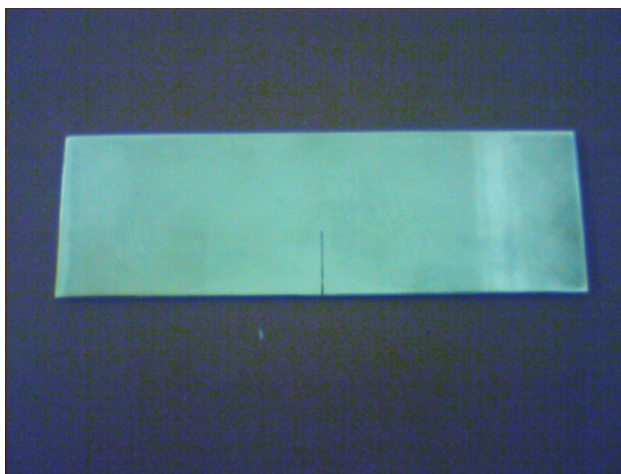
**Εικόνα 7.8.** Πλάκα αλουμινίου από την οποία έχει αφαιρεθεί μια λωρίδα υλικού από την μια επιφάνεια της.



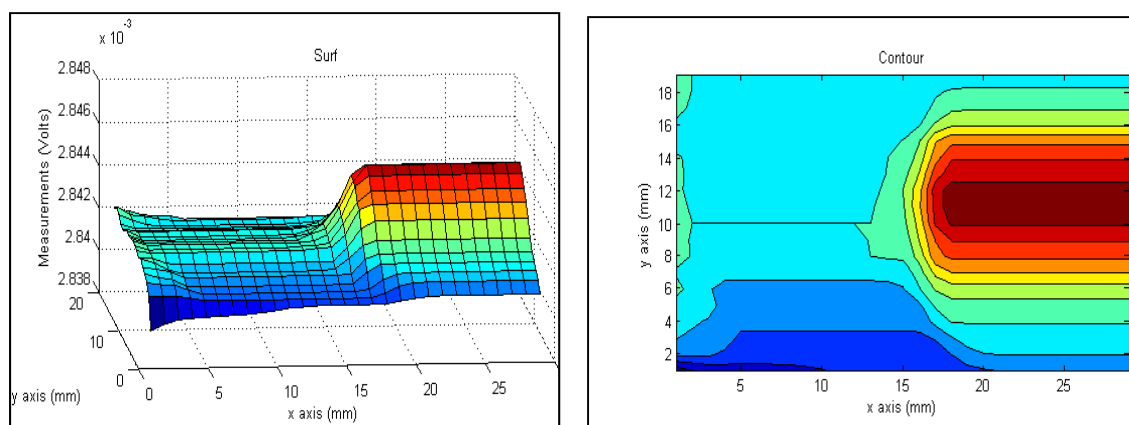
**Εικόνα 7.9.** Αποτελέσματα από την επιφάνεια της πλάκας από την πλευρά όπου δεν υπάρχει απώλεια υλικού.

### Παρακολούθηση της διάδοσης ρωγμής

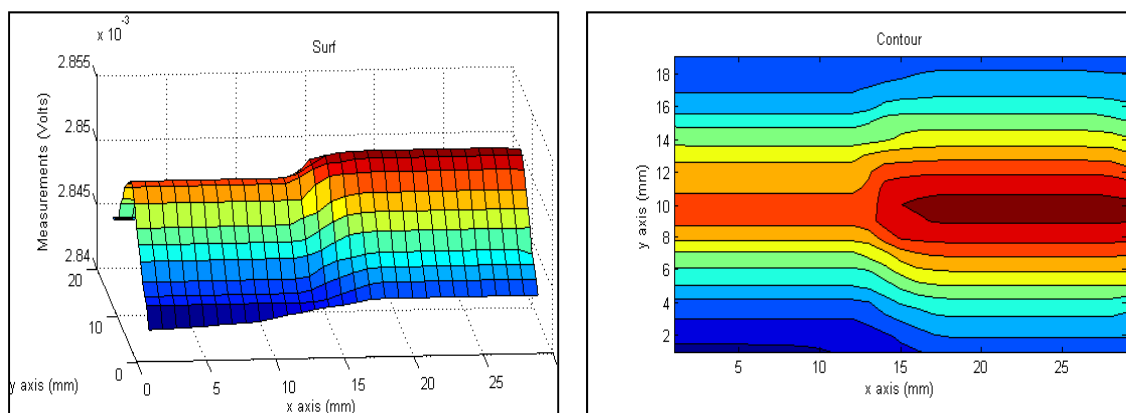
Μια άλλη εφαρμογή αυτού του συστήματος είναι η παρακολούθηση της εξέλιξης γνωστών ατελειών, που βρίσκονται σε μια κατασκευή. Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται μια πλάκα αλουμινίου πάχους 2 mm στην οποία υπάρχει μια προκατασκευασμένη εγκοπή (μήκους 2cm και πλάτους 1mm) όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 7.10. Αρχικά πραγματοποιούνται μετρήσεις στην περιοχή γύρω από την περιοχή του άκρου της εγκοπής, οι οποίες παρουσιάζονται στην εικόνα 7.11. Στην συνέχεια η πλάκα υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση (κόπωση) με σκοπό την διάδοση ρωγμής η οποία ξεκινά από το άκρο της εγκοπής και πραγματοποιούνται εκ νέου καινούργιες μετρήσεις. Τα αποτελέσματα μετά την μηχανική καταπόνηση, που παρουσιάζονται στην εικόνα 7.12, δίνουν μια σαφή ένδειξη της διάδοσης της ρωγμής.



**Εικόνα 7.10.** Πλάκα αλουμινίου με εγκοπή



**Εικόνα 7.11.** Αποτελέσματα από μια περιοχή γύρω από το άκρο της εγκοπής πριν την μηχανική καταπόνηση (κόπωση).



**Εικόνα 7.12.** Αποτελέσματα από μια περιοχή γύρω από το άκρο της εγκοπής μετά την μηχανική καταπόνηση (κόπωση).

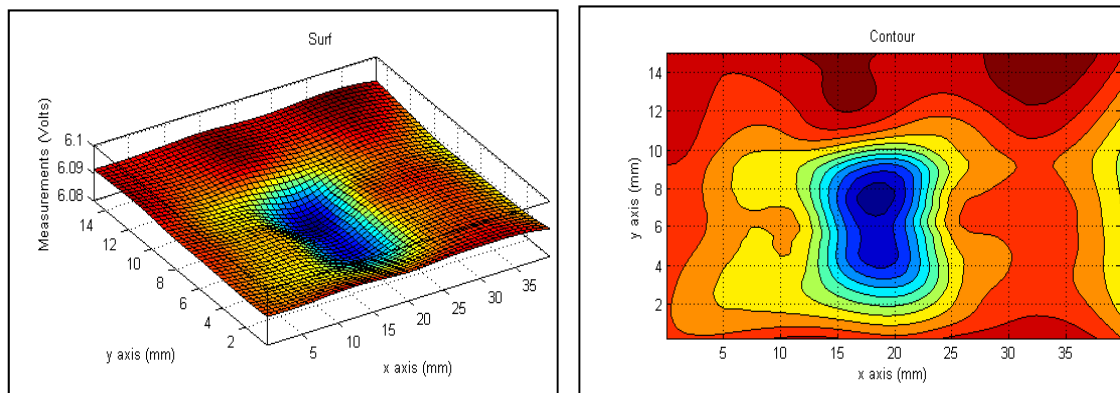
#### 7.4.2 Απεικόνιση αποτελεσμάτων από επαγωγικό αισθητήρα μαγνητικής διαρροής

##### Πλάκα χάλυβα με επιφανειακή ατέλεια

Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται πλάκα χάλυβα πάχους 5 mm η οποία φέρει μια προκατασκευασμένη επιφανειακή ατέλεια (πλάτους 1mm, μήκους 6 mm και βάθους 0,1 mm) όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 7.13. Η επιφάνεια του χάλυβα εξετάζεται από κατάλληλο επαγωγικό αισθητήρα (πηγίο επιφανείας με αισθητήρα Hall). Η επιφανειακή ατέλεια επηρεάζει την μαγνητική ροή με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια απότομη μεταβολή όταν ο αισθητήρας βρίσκεται από πάνω της. Στην εικόνα 7.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από μια περιοχή της επιφάνειας πλησίον της ατέλειας. Παρατηρείται πως η πυκνότητα μαγνητικής ροής μειώνεται καθώς ο αισθητήρας πλησιάζει την ατέλεια με αποτέλεσμα να μπορεί εύκολα να ανιχνευτεί.



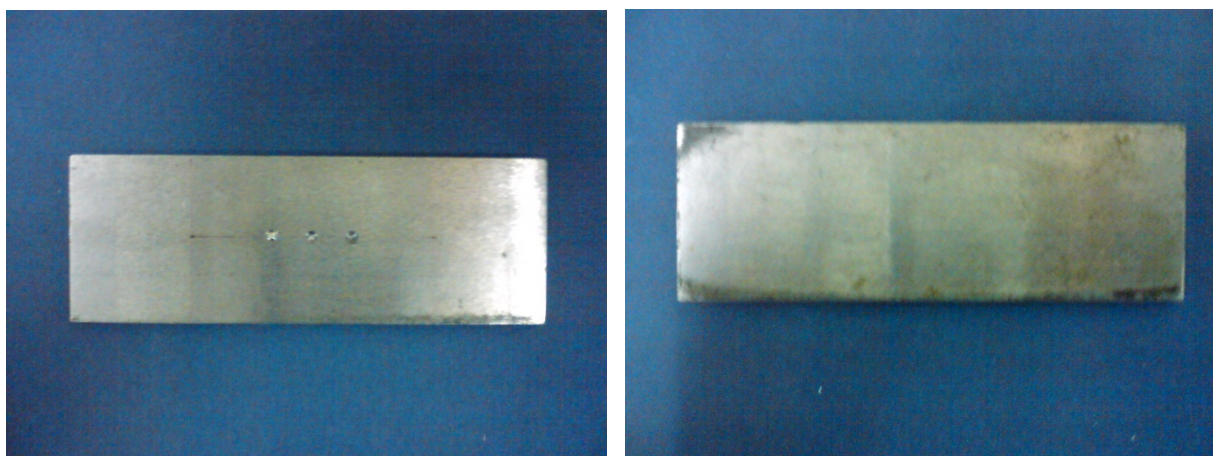
**Εικόνα 7.13.** Πλάκα χάλυβα πάχους 5 mm η οποία φέρει μια προκατασκευασμένη επιφανειακή ατέλεια



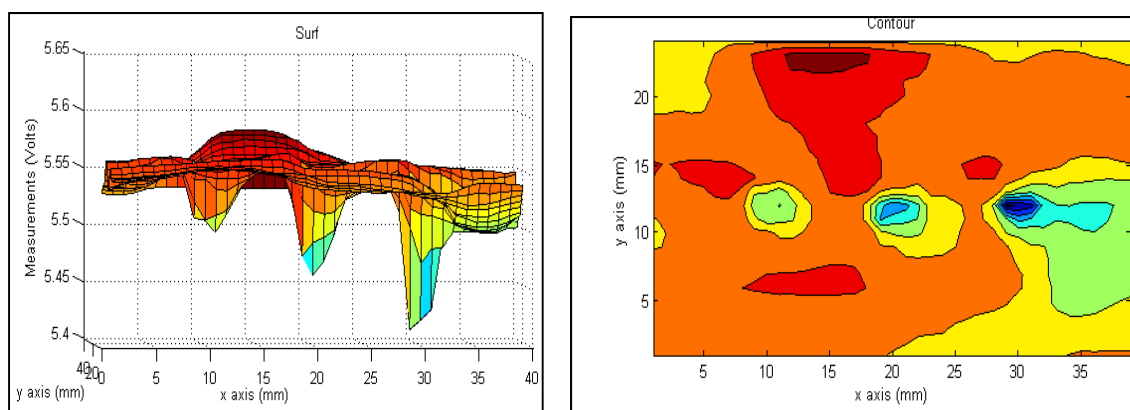
**Εικόνα 7.14.** Αποτελέσματα από μια περιοχή της επιφάνειας πλησίον της ατέλειας όπου παρατηρείται μείωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής.

Πλάκα χάλυβα με επιφανειακές οπές διαφορετικού βάθους

Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται πλάκα χάλυβα πάχους 5 mm η οποία φέρει επιφανειακές οπές (διαμέτρου 3mm) και διαφορετικού βάθους (0,4 mm, 1 mm και 1,5 mm αντίστοιχα) όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 7.15. Ο στόχος είναι να εκτιμηθεί το βάθος της κάθε ατέλειας με την βοήθεια κατάλληλου επαγωγικού αισθητήρα. (πηνίο επιφανείας με αισθητήρα Hall). Η απώλεια υλικού από την επιφάνεια της πλάκας του χάλυβα προκαλεί μια μεταβολή στην μαγνητική ροη που προκαλείται από τον αισθητήρα. Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος της ατέλειας τόσο αναμένεται να είναι και η μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής που λαμβάνει ο αισθητήρας. Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εικόνα 7.16 για μια περιοχή πλησίον των ατελειών, φαίνεται ξεκάθαρα η διάκριση μεταξύ τους.



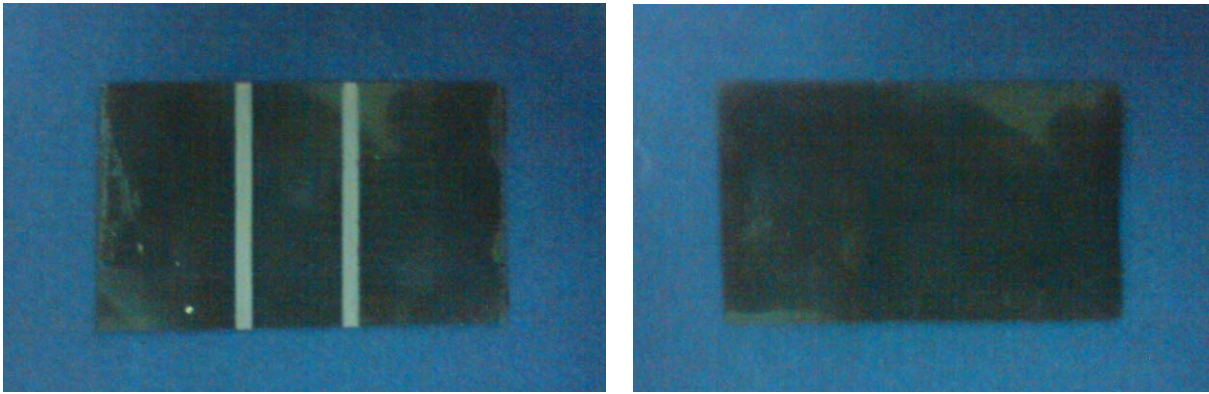
**Εικόνα 7.15.** Πλάκα χάλυβα η οποία φέρει επιφανειακές οπές διαφορετικού βάθους



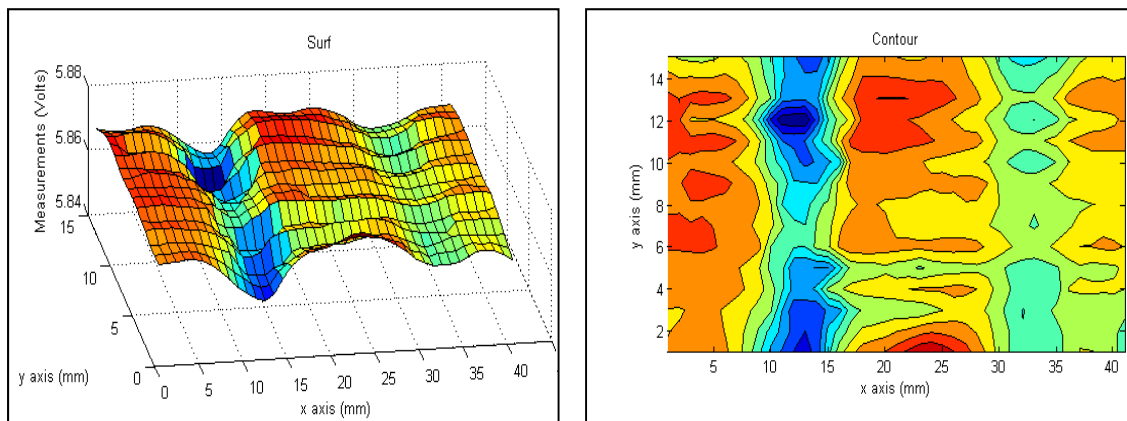
**Εικόνα 7.16.** Αποτελέσματα από μια περιοχή της επιφάνειας πλησίον των ατελειών όπου παρατηρείται μείωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής ανάλογα με το βάθος της ατέλειας.

Πλάκα σύνθετου υλικού σιδήρου εποξικής ρητίνης με απώλεια υλικού στην μια πλευρά

Αντίστοιχα εξετάζεται πλάκα σύνθετου υλικού σιδήρου εποξικής ρητίνης πάχους 1,5 mm από την οποία έχουν αφαιρεθεί δυο λωρίδες υλικού από την μια πλευρά. (πλάτους 3 mm και βάθους 0,2 mm και 0,4 mm), όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 7.17. Η πλάκα εξετάστηκε με κατάλληλο επαγωγικό αισθητήρα (πηνίο επιφανείας με αισθητήρα Hall) από την πλευρά όπου δεν υπάρχει απώλεια υλικού και οπτικά δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή. Η απώλεια υλικού και σε αυτή την περίπτωση προκαλεί μια μεταβολή στην μαγνητική ροη που προκαλείται από τον αισθητήρα. Η μεταβολή αυτή μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτή από τον αισθητήρα λόγω του μικρού πάχους και της σχετικά χαμηλής μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού. Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εικόνα 7.18 παρατηρείται πως υπάρχει σχετικά καλή αντιστοίχιση της θέσης, του σχήματος και του βάθους της ατέλειας σε σχέση με το πραγματικό αντικείμενο.



**Εικόνα 7.17.** Πλάκα σύνθετου υλικού σιδήρου εποξικής ρητίνης με απώλεια υλικού στην μια πλευρά.



**Εικόνα 7.18.** Αποτελέσματα από την επιφάνεια της πλάκας από την πλευρά όπου δεν υπάρχει απώλεια υλικού.

## 7.5 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκαν αποτελέσματα που πρόεκυψαν με την βοήθεια του πρωτότυπου συστήματος οπτικής παρακολούθησης της θέσης επαγωγικών αισθητήρων. Όπως παρουσιάστηκε το σύστημα αυτό είναι ιδανικό για την συλλογή και επεξεργασία μετρήσεων που προέρχονται από επίπεδες επιφάνειες. Σαν εργαλείο παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις τεχνικές που εφαρμόζονται αυτή την στιγμή στον τομέα του μη καταστρεπτικού έλεγχου. Το βασικότερο πλεονέκτημα είναι ότι δεν απαιτείται η χρήση πολύπλοκων ηλεκτο-μηχανικών συστημάτων, πράγμα το οποίο περιορίζει σημαντικά το κόστος του ελέγχου.

Κάθε τύπος επαγωγικού αισθητήρα που χρησιμοποιείται αυτή την στιγμή θα μπορούσε με κάποιες τροποποιήσεις να προσαρμοστεί στο σύστημα αυτό. Στην περίπτωση όπου ο επαγωγικός αισθητήρας αποδίδει αριθμητικές τιμές (πχ. διαφορά δυναμικού) η προσαρμογή του στο σύστημα μπορεί να γίνει ως έχει. Στην περίπτωση όμως που ο επαγωγικός αισθητήρας αποδίδει μια κυματομορφή θα πρέπει να παρεμβάλλεται κατάλληλος αλγόριθμος (νευρωνικά δίκτυα, γενετικοί αλγόριθμοι κ.α.) ώστε τελικά σε κάθε σημείο να αποδίδεται μια τιμή ή μια ιδιότητα (πχ. πάχος, ύπαρξη ατέλειας ή όχι). Με αυτό τον τρόπο θα ήταν πιο εύκολη η διαδικασία έλεγχου σε μεγάλες επιφάνειες ενώ παράλληλα θα βελτιωνόταν σημαντικά και η αξιοπιστία. Επιπλέον το σύστημα αυτό απλοποιεί αρκετά την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων πράγμα που βοηθά τόσο τον επιθεωρητή όσο και τον τελικό χρήστη της κατασκευής στο να βγάλει συμπεράσματα για την δομική ακεραιότητα.

Το σύστημα αυτό σε συνδυασμό με τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν σε αυτήν την διατριβή θα μπορούσαν να δώσουν πληροφορίες για το πεδίο των παραμορφώσεων σε επίπεδες ή μικρής καμπυλότητας επιφάνειες. Έτσι με την διεξαγωγή περιοδικών ελέγχων θα μπορούσε να φτιαχτεί ένα ιστορικό των παραμορφώσεων της κατασκευής. Η σύγκριση νέων δεδομένων με παλαιότερα θα μπορούσε να αποκαλύψει ενδεχόμενες ατέλειες ενώ παράλληλα θα μπορούσε να δώσει πληροφορίες για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της κατασκευής.



## Κεφάλαιο 8

---

### Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή αναπτύχθηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι μέτρησης της παραμόρφωσης, ενώ παράλληλα αναπτύχθηκε πρωτότυπο σύστημα οπτικής παρακολούθησης της θέσης επαγωγικών αισθητήρων.

Όπως αποδείχτηκε πειραματικά τα κοκκώδη σύνθετα υλικά με εγκλείσματα σιδήρου έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τις μαγνητικές τους ιδιότητες όταν παραμορφώνονται. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων απέδειξαν πως υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ της μεταβολής της μαγνητικής αντίστασης και της παραμόρφωσης. Άρα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εξωτερικά στρώματα σε ένα υλικό ή μια κατασκευή και να καταγράφουν μεταβολές στο παραμορφωσιακό πεδίο τους. Το φαινόμενο μπορεί να γίνει αισθητό ακόμη και σε περιπτώσεις μικρής σχετικά συγκέντρωσης (κατά βάρος), οπότε αυτή η μεθοδολογία θα μπορούσε να εφαρμοστεί απευθείας σε πολυμερή εμπλουτισμένα με σωματίδια σιδήρου. Τα πειραματικά αποτελέσματα δίνουν σαφείς ενδείξεις πως αν όλες οι παράμετροι διατηρηθούν σταθερές τότε μπορεί να επιτευχτεί επαναληψιμότητα στις μετρήσεις. Έτσι ένα τέτοιο υλικό μπορεί να βαθμονομηθεί ώστε να προκύψει μια πειραματική σχέση μεταξύ της παραμόρφωσης και της μεταβολής της πυκνότητας μαγνητικής ροής, η οποία να ισχύει για κάθε υλικό με τα ίδια χαρακτηριστικά.

Αντίστοιχα η πειραματική μελέτη έδειξε πως η ενσωμάτωση άμορφων μαγνητοελαστικών συρμάτων σε πολυμερή και σύνθετα υλικά μπορεί να αναβαθμίσει τις ιδιότητες τους επιτρέποντας την μέτρηση της παραμόρφωσης τους. Η μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας των εν λόγω συρμάτων επιδεικνύει εξαιρετική απόκριση σε σχέση με την παραμόρφωση και για τις δυο διαφορετικές μεθοδολογίες που δοκιμάστηκαν (με αγωγή και επαγωγή).

Τέλος τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύουν πως η ηλεκτρικά αγώγιμη βαφή με νιφάδες Αργύρου παρουσιάζει μεταβολή των ηλεκτρικών της ιδιοτήτων με την παραμόρφωση. Έτσι μπορεί να



χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας παραμόρφωσης σαν εξωτερική επίστρωση σε υλικά και κατασκευές. Η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που μετρήθηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά για ένα μεγάλο εύρος παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως αν διατηρηθούν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά σε ένα αποτύπωμα από τέτοιου είδους βαφή, είναι δυνατή η επαναληψιμότητα των μετρήσεων ώστε να μπορεί να γίνει βαθμονόμηση.

Από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν συμπεραίνουμε πως κάθε μέθοδος παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται αυτή την στιγμή. Ειδικά στις περιπτώσεις όπου η παραμόρφωση συνδέεται με την μεταβολή των μαγνητικών χαρακτηριστικών (κοκκώδη σύνθετα υλικά σιδήρου, μαγνητοελαστικά σύρματα), η μέτρηση πραγματοποιείται επαγωγικά. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί με αυτή την μεθοδολογία απαλείφεται το πρόβλημα ενσωμάτωσης του αισθητήρα (λόγω του μεγέθους), και το μειώνεται η πολυπλοκότητα στην συλλογή μεγάλου αριθμού μετρήσεων. Στην περίπτωση όπου η παραμόρφωση συνδέεται με την μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών (φαινόμενο GMI, ηλεκτρικά αγωγή βαφή Αργύρου) παρατηρείται πως η απόκριση των μεθόδων αυτών είναι πολύ καλύτερη σε σχέση με τα κλασσικά ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα ενώ παραλληλα είναι χαμηλότερου κόστους από τις οπτικές ίνες.

Με βάση αυτές τις μεθοδολογίες θα μπορούσε να είναι δυνατή μια σχετικά γρήγορη επιθεώρηση (σε σχέση με τις υφιστάμενες μεθόδους ΜΚΕ) ανά τακτά χρονικά διαστήματα, προκειμένου να ανακτηθεί το παραμορφωσιακό πεδίο της κατασκευής. Στη συνέχεια θα συγκρίνεται με προηγούμενες μετρήσεις, με σκοπό τον εντοπισμό πιθανών διαφορών οι οποίες θα υποδεικνύουν κάποια ενδεχόμενη ατέλεια στην κατασκευή. Η ανάπτυξη και εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας είναι ένα σημαντικό βήμα προς τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της απόδοσης των δομικών στοιχείων μιας κατασκευής. Η ικανότητα να παρακολουθείται το παραμορφωσιακό πεδίο κατά τη διάρκεια ή μετά την εφαρμογή εξωτερικών φορτίσεων, θα βοηθήσει σε μεγάλο βαθμό στην μείωση του βάρους (μέσω της μείωσης των συντελεστών ασφαλείας), τον αρχικό σχεδιασμό και την αύξηση της ταχύτητας ελέγχου.

Παρόλα αυτά η έρευνα αυτή βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί η κάθε μέθοδος θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί. Συγκεκριμένα για τις μεθοδολογίες μέτρησης της παραμόρφωσης με την χρήση:

A. Κοκκώδους σύνθετου υλικού σιδήρου εξοξικής ρητίνης, θα πρέπει:

- Να βελτιστοποιηθεί η διασπορά των κόκκων στο πολυμερές
- Να μειωθούν οι διαστάσεις του επαγωγικού αισθητήρα
- Να βαθμονομηθεί η απόκριση και να εξαχθεί πειραματική σχέση που να συνδέει την μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής με την παραμόρφωση.

B. Άμορφων μαγνητοελαστικών συρμάτων, χρειάζεται:

- Να γίνει κατάλληλη χημική επεξεργασία των συρμάτων ώστε να υπάρχει καλύτερη πρόσφυση με το πολυμερές
- Να μειωθούν οι διαστάσεις του επαγωγικού αισθητήρα
- Να βαθμονομηθεί η απόκριση και να εξαχθεί πειραματική σχέση που να συνδέει την μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής με την παραμόρφωση.

Γ. Ηλεκτρικά αγώγιμης βαφής αργύρου, χρειάζεται:

- Να προσωποποιηθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σύνθετου υλικού ώστε να υπάρχει επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων
- Να βαθμονομηθεί η απόκριση και να εξαχθεί πειραματική σχέση που να συνδέει την μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την παραμόρφωση

**Πίνακας 8.1** Συγκριτικά χαρακτηριστικά των μεθόδων που αναπτύχθηκαν

Μέθοδος	Εύρος λειτουργίας (εφέλκυσμός)	Γραμμική συμπεριφορά	Συντελεστής μετατροπής <sup>1</sup>	Επαγωγική μέτρηση	Εξάρτηση από την θερμοκρασία <sup>2</sup>	Περιορισμοί
Κοκκώδες σύνθετο υλικό σιδήρου	0-<3%	Ναι	GF≈10	Ναι	Μικρή	Εφαρμογή μόνο σε μη μαγνητικά υλικά
Άμορφα μαγνητοελαστικά σύρματα	0-1%	Όχι	-	Ναι	Μικρή	Εφαρμογή μόνο σε μη μαγνητικά υλικά
Ηλεκτρικά αγώγιμη βαφή αργύρου	0-<2%	Ναι	GF≈100	Όχι	Σημαντική	Δεν μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας σε μεταλλικά υλικά

<sup>1</sup> Στην περίπτωση των επαγωγικών μετρήσεων η απόκριση επηρεάζεται επιπλέον από την ευαισθησία του ίδιου του επαγωγικού αισθητήρα.

<sup>2</sup> Στις δυο πρώτες μεθόδους μετρήσεις, επηρεάζεται μόνο το ηλεκτρικό κύκλωμα του επαγωγικού αισθητήρα, ενώ στην τρίτη μέθοδο επηρεάζονται οι ηλεκτρικές ιδιότητες του ίδιου του υλικού.



## Βιβλιογραφία και αναφορές

---

- [1] [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/cc\\_rad\\_index.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/cc_rad_index.htm)
- [2] [Radiography in Modern Industry](#), Fourth Edition, Eastman Kodak Company, Rochester, New York, 1980
- [3] Introduction to Radiation, the Health Physics Society, The University of Michigan, <http://www.umich.edu/~radinfo/introduction/>
- [4] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Introduction/history.htm>
- [5] Cartz, Louis, Nondestructive Testing : Radiography, Ultrasonics, Liquid Penetrant, Magnetic Particle, Eddy Current, ASM Intl; ISBN: 0871705176
- [6] Diederichs, Rolf and Ginzl, Ed, [Nondestructive Testing Encyclopedia, UT Formulae, NDT net](#)
- [7] [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_History.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_History.htm)
- [8] [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_Signal%20Features.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Signal%20Features.htm)
- [9] [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/IRT/IR\\_History.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/IRT/IR_History.htm)
- [10] [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/IRT/IR\\_Science.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/IRT/IR_Science.htm)
- [11] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/Introduction/history.htm>
- [12] Liquid Penetrant Testing, Nondestructive Testing Handbook, Volume 2, Tracy, Noel (Tech. Ed.), Moore, Patrick (Ed.) American Society for Nondestructive Testing, Columbus, OH, 1999, ISBN 1-57117-028-6
- [13] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Introduction/historyofET.htm>
- [14] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Introduction/basicprinciples.htm>
- [15] [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_BarkhausenTechniques.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_BarkhausenTechniques.htm)
- [16] Structural health monitoring / edited by Daniel Balageas, Claus-Peter Fritzen, Alfredo Güemes. 1st ed. ISBN-13: 978-1-905209-01-9
- [17] Διδακτορική διατριβή : «Εντοπισμός και επιδιόρθωση βλάβης σε δομικά στοιχεία με τη χρήση ευφυών υλικών». Μαρία –Στυλιανή Βουτετάκη. 2009
- [18] [http://www.efunda.com/designstandards/sensors/strain\\_gages/strain\\_gage\\_theory.cfm](http://www.efunda.com/designstandards/sensors/strain_gages/strain_gage_theory.cfm)
- [19] Πτυχιακή εργασία : «Αρχές λειτουργίας και εφαρμογές αισθητήρων οπτικών ινών». Διαλεκτός Μιχαήλ Σάββας. 2012

- [20] [http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1\\_Sintheta\\_ilika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf)
- [21] Πτυχιακή εργασία : «Μελέτη φθοράς και υποβάθμιση των ιδιοτήτων σύνθετων πολυμερών». Σιούλα Βασιλική. 2011
- [22] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/piezotransducers.htm>
- [23] Πτυχιακή εργασία : «Εφαρμογές έξυπνων υλικών». Θεόδωρος Καλογερόπουλος. 2010
- [24] Dong Yang Wu, Sam Meure, David Solomon. Self-healing polymeric materials: A review of recent developments. *Prog. Polym. Sci.* 33 (2008) 479–522
- [25] Σημειώσεις ΔΠΜΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ: «Μαγνητικά και υπεραγωγία υλικά». Ευάγγελος Χριστοφόρου. 2007
- [26] C. Heck, *Magnetic Materials and their Applications*, Crane and Russak & Co., New York, 1974.
- [27] E.P. Wohlfarth, *Ferromagnetic Materials*, Three – volume series, North Holland, Amsterdam, 1982.
- [28] E. Warburg, *Ann. Physik*, No 13, 141, 1881.
- [29] J.A. Ewing, *Magnetic Induction in Iron and other Metals*, 3rd ed., The electrician Publishing Co., London, 1900.
- [30] W. Weber, *Proc. Ann.*, LXXXVII, p. 167, 1900.
- [31] S.D. Poisson, *Magnetic Induction in Iron and other Methods* (ed. J.A. Ewing), Electrician Publishing Company, London, p. 282, 1893.
- [32] P. Weiss, *Compt. Rend.*, No 143, p. 1136, 1906.
- [33] P. Weiss, *J. Phys.*, No 6, p. 661, 1907.
- [34] P. Langevin, *Ann. Chem. et Phys.*, No 5, p. 70, 1905.
- [35] E. Ising, *Z. Phys.*, No 20, p. 401, 1925
- [36] N. Schmidt and H. Güldner, *IEEE Transactions on Magnetics*, 32, No 2, p. 489-496, 1996.
- [37] T. Kulik, H.T. Savage and A. Hernando, *J. Appl. Phys.* 73 (10), p. 6855-6857, 1993.
- [38] S. Foner, *The Review of Scientific Instruments*, 30, No 7, p. 548-557, 1959.
- [39] Peters S T 1982 *Handbook of Composites* California, USA Chapman & Hall, p 250
- [40] Theocaris P S, Papanicolaou P G and E G Kontou 1982 The Effect of Filler-Volume Fraction and Strain Rate on the Tensile Properties of Iron/Epoxy Particulate Composites *Journal of Reinforced Plastics and Composites* vol. 1 pp 206-224.
- [41] Papanicolaou G C and Pappa A 1992 Water sorption and temperature effects on the dynamic mechanical behaviour of epoxy-matrix particulates *Journal of Materials Science* vol. 27 pp 3889-3896
- [42] Alex Van den Bossche and Vencislav Cekov Valchev 2005 *Inductors and Transformers for power electronics* 6000 Broken Sound Parkway NW CRC Press
- [43] E. Hristoforou and R.E. Reilly, Tensile Stress Distribution Sensors Based on Amorphous Alloys, *J. Magn. Magn. Mat.*, Vol. 119, p. 247-253, 1993.
- [44] E.Hristoforou, H.Chiriac, M.Neagu, I.Darie, A. Ovari, Torsion and Stress in Amorphous Positive Magnetostrictive Wires, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 32, p.4953-4955, 1996.
- [45] P. T. Squire, D. Atkinson, S. Atalay, *IEEE Trans. Magn.* 31, 1239 (1995).
- [46] K. Mohri, K. Bushida, M. Noda, L. V. Panina, T. Uchiyama, *IEEE Trans. Magn.* 31, 2455 (1995).
- [47] K. Mohri, T. Uchiyama, L. V. Panina, *Sensors Actuat.* A59, 1 (1997).
- [48] L. P. Shen, T. Uchiyama, K. Mohri, E. Kita, K. Bushida, *IEEE Trans. Magn.* 33, 3355 (1997).
- [49] L.V. Panina, K. Mohri, *Appl. Phys. Lett.* 65 (1994) 1189.
- [50] M. Vazquez A. Hernando. *J.Phys. D: Appl.Phys.* 29, 939-949 (1996)
- [51] H. Wolfson and G. Elliott, "Electrically Conducting Cements Containing Epoxy Resins and Silver," U.S. Patent 2,774,747 (1956).
- [52] K. R. Matz, "Electrically Conductive Cement and Brush Shunt Containing the Same," U.S. Patent 2,849,631 (1958).
- [53] D. P. Beck, "Printed Electrical Resistor," U.S. Patent 2,866, 057 (1958).
- [54] S. Kirkpatrick, *Rev. Mod. Phys.* 45, 574-588 (1973).

- [55] S. R. Broadbent and J. M. Hammersley, *Proc. Camb. Phil. Soc.* 53, 629-641 (1957).
- [56] H. T. Davis, L. R. Valencourt and C. E. Johnson, *J. Amer. Cer. Soc.* 58,446-452 (1975).
- [57] S. M. Aharoni, *J. Appl. Phys.* 43, 2463-2465 (1972).
- [58] N. Bowler, "Theory of four-point direct-current potential drop measurements on a metal plate", *Research in Nondestructive Evaluation*, 17:29-48 (2006)



## Δημοσιεύσεις

---

- **“Strain sensing capabilities of iron/epoxy composites”** (δημοσίευση αποτελεσμάτων στο διεθνές περιοδικό Smart Materials and Structures. IOP)
- **“Experimental confirmation of strain sensing capabilities of iron/epoxy composites”** (Στο 9<sup>ο</sup> διεθνές επιστημονικό συνέδριο στα σύνθετα υλικά DURACOSYS)
- **“Investigation of strain sensing capabilities of amorphous magnetostrictive wires embedded in epoxy resin”** (Στο ετήσιο διεθνές συνέδριο υλικών για χρήση σε αισθητήρες ICMASST)





## Παράρτημα Α

### Πίνακες μεγεθών στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I.)

Πίνακας 1.Βασικά μεγέθη στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI):

Ονομασία	Συντομογραφία	Ορισμός	Σύμβολο
<b>meter</b>	m	Το μέτρο είναι το μήκος της διαδρομής που διασχίζεται από το φως στο κενό κατά τη διάρκεια 1/299 792 458 κλάσματος του δευτερολέπτου.	L
<b>kilogram</b>	kg	Το Χιλιόγραμμα είναι η μάζα του πρότυπου χιλιόγραμμου, ενός κυλίνδρου από ιριδιούχο λευκόχρυσο που φυλάσσεται στο Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών των Σεβρών στη Γαλλία	M
<b>second</b>	s	Το Δευτερόλεπτο είναι η χρονική διάρκεια 9.192.631.770 περιόδων της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην μετάβαση δύο υπέρλεπτων ενεργειακών σταθμών της κατάστασης ελάχιστης ενέργειας του ατόμου του καυσίου-133 ( <sup>133</sup> Cs) σε θερμοκρασία 0 K.	T
<b>ampere</b>	A	Το Αμπέρ είναι το σταθερό ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο όταν διατηρείται σε δύο ευθύγραμμους παράλληλους αγωγούς απείρου μήκους και αμελητέας διατομής, τοποθετημένους σε απόσταση 1 μέτρου στο κενό, θα παρήγαγε μεταξύ αυτών των αγωγών μία δύναμη ίση με $2 \times 10^{-7}$ νιούτον ανά μέτρο μήκους.	I
<b>kelvin</b>	K	Το Κέλβιν είναι το κλάσμα 1/273,16 της απόλυτης θερμοκρασίας του τριπλού σημείου του νερού.	Θ
<b>mole</b>	mol	Το Μολ είναι η ποσότητα μίας ουσίας που περιέχει τόσες στοιχειώδεις οντότητες όσα είναι τα άτομα σε 0,012 χιλιόγραμμα καθαρού άνθρακα-12 ( <sup>12</sup> C).	N
<b>candela</b>	cd	Η Καντέλα είναι η φωτεινή ένταση, σε μία δεδομένη διεύθυνση, μίας πηγής που εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία με συχνότητα $540 \times 10^{12}$ Hz και έχει ένταση ακτινοβολίας στην κατεύθυνση αυτή ίση με 1/683 Watt ανά στερακτίνιο.	J

Πίνακας 2. Δεκαδικά προθέματα

Πρόθεμα	Αξία	Συντομογραφία	Πρόθεμα	Αξία	Συντομογραφία
yocto	$10^{-24}$	y	deca	$10^1$	da
zepto	$10^{-21}$	ζ	hecto	$10^2$	h
atto	$10^{-18}$	a	kilo	$10^3$	k
femto	$10^{-15}$	f	mega	$10^6$	M
pico	$10^{-12}$	P	giga	$10^9$	G
nano	$10^{-9}$	η	tera	$10^{12}$	T
micro	$10^{-6}$	μ	petta	$10^{15}$	P
milli	$10^{-3}$	m	exa	$10^{18}$	E
centi	$10^{-2}$	c	zetta	$10^{21}$	Z
deci	$10^{-1}$	d	yotta	$10^{24}$	Y

Πίνακας 3. Αγγλο-αμερικανικό σύστημα μονάδων

Μέγεθος	Μονάδα	Συντομογραφία	Μετατροπή στο SI
length	Inch	in	1 in = 0.0254 m
	Foot	ft	1 ft = 12 in = 0.3048 m
	yard	yd	1 yd = 3 ft = 0.9144 m
	statute mile	mile	1 mile = 1760 yd = 1609.34 m
	nautical mile	η mile	1 η mile = 1852 m
area	square inch	in <sup>2</sup>	1 in <sup>2</sup> = 6.452 · 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup>
	square foot	ft <sup>2</sup>	1 ft <sup>2</sup> = 144 in <sup>2</sup> = 0.0929 m <sup>2</sup>
	square yard	yd <sup>2</sup>	1 yd <sup>2</sup> = 9 ft <sup>2</sup> = 0.8361 m <sup>2</sup>
	square mile	mile <sup>2</sup>	1 mile <sup>2</sup> = 2.59 · 10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
	acre	a	1 a = 4046.86 m <sup>2</sup>
volume	cubic inch	in <sup>3</sup>	1 in <sup>3</sup> = 1.63871 · 10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup>
	cubic foot	ft <sup>3</sup>	1 ft <sup>3</sup> = 0.02832 m <sup>3</sup>
	cubic yard	yd <sup>3</sup>	1 yd <sup>3</sup> = 0.76456 m <sup>3</sup>
	gallon	gal	1 gal = 3.78541 · 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
	registerton	RT	1 RT = 100 ft <sup>3</sup> = 2.832 m <sup>3</sup>
velocity	mile per hour	mph	1 mph = 1.609 km/h = 0.447 m/s
mass	grain	gr	1 gr = 6.4799 · 10 <sup>-5</sup> kg
	dram	dram	1 dram = 1.77184 · 10 <sup>-3</sup> kg
	ounce	oz	1 oz = 2.83495 · 10 <sup>-2</sup> kg
	pound	lb	1 lb = 0.45359 kg
	long hundredweight	long cwt	1 long cwt = 50.8023 kg
	short hundredweight	sh cwt	1 sh cwt = 45.3592 kg
pressure	long ton	long tn	1 long tn = 1016.05 kg
	short ton	sh tn	1 sh tn = 907.185 kg
	pound-force per square inch	lbf/in <sup>2</sup>	1 lbf/in <sup>2</sup> = 6.8947 · 10 <sup>3</sup> Pa
	pound-force per square foot	lbf/ft <sup>2</sup>	1 lbf/ft <sup>2</sup> = 47.88 Pa
	ton-force per square foot	tonf/ft <sup>2</sup>	1 tonf/ft <sup>2</sup> = 107.252 · 10 <sup>3</sup> Pa
energy	foot pound-force	ftlbf	1 ft lbf = 1.3558 J
	British thermal unit	Btu	1 Btu = 1055.06 J
power	horsepower	hp	1 hp = 745.7 W

Πίνακας 4. Παράγωγα μεγέθη στο S.I.

Denotation	Symbol	Defining equation	Unit	Name of unit
<b>1. length</b>				
angle	$\alpha, \varphi,$		rad	radian
solid angle	$\Omega$		sr	steradian
length	$s, l,$		m	meter
area	A	$A = s^2$	$m^2$	
volume	V	$V = s^3$	$m^3$	
<b>2. time and velocity</b>				
time	t		s	second
vibrational period frequency	T		s	hertz
	f		Hz = 1/s	
velocity	v	$v = ds/dt$	$m s^{-1}$	
angular velocity	$\omega$	$\omega = da/dt$	Rad $s^{-1}$	
acceleration	a	$a = d^2s/dt^2$	$m s^{-2}$	
angular acceleration	a	$a = d^2\varphi/dt^2$	rad $s^{-2}$	
<b>3. mechanics</b>				
mass	m		kg	kilogram
density	$\rho$	$\rho = m/V$	$kg m^{-3}$	
force	F	$F = m \cdot a$	$N = kg ms^{-2}$	newton
moment of inertia	J	$J = \sum_i m_i r_i^2$	$kg m^2$	
torque	$\tau$	$\tau = r \times F$	Nm	
momentum	J	$J = mv$	$kgms^{-1}$	
pressure	p	$p = F/A$	$Pa = N m^{-2}$	pascal
work, energy	W	$W = \int F \cdot ds$	$J = Nm$	joule
power	P	$P = dW/dt$	$W = Nms^{-1}$	watt
elasticity modulus	E	$E = \sigma/\varepsilon$	$Nm^{-2}$	
compression modulus	K	$K = - Vdp/dV$	$Nm^{-2}$	
<b>4. electricity and magnetism</b>				
electric charge	Q	$Q = I \cdot t$	$C = As$	coulomb
electric voltage	V	$V = W/Q$	$V = JC^{-1}$	volt
electric field strength	E	$E = F/Q$	$NC^{-1} = V m^{-1}$	
electric resistance	R	$R = V/I$	$\Omega = VA^{-1}$	ohm
electric conductance	G	$G = 1/R$	$S = \Omega^{-1}$	siemens
spec. el. resistance	$\rho$	$\rho = RA/l$	$\Omega m$	
spec. el. conductance	$\kappa$	$\kappa = l/\rho$	$\Omega^{-1}m^{-1}$	
electric capacitance	C	$C = Q/V$	$F = CV^{-1}$	farad
permittivity	$\varepsilon$	$\varepsilon = D/E$	$F m^{-1}$	
magnetic flux	$\Phi$	$\Phi = \int V dt$	$Wb = V s$	weber
inductance	L	$L = \Phi/I$	$H = V s A^{-1}$	henry
magn. flux density	B	$B = d\Phi/dA$	$T = Wb m^{-2}$	tesla
magn. field strength	H	$H = dI/ds$	$A m^{-1}$	
permeability	$\mu$	$\mu = B/H$	$H m^{-1}$	

