

# ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΝΑ ΕΙΣΑΓΑΓΕΙ ΤΟΥΣ ΦΟΙΤΗΤΕΣ ΣΤΗ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τσιγουρίδης Χαρίλαος<sup>1</sup> και Πολάτογλου Χαρίτων<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
<sup>2</sup>ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
e-mail: htsihour@physics.auth.gr, hariton@auth.gr

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε μια απλή πειραματική διάταξη πολύ μικρού κόστους, με σκοπό την εκτέλεση μετρήσεων από μέρους των σπουδαστών/φοιτητών αλλά και μαθητών επαγγελματικών Λυκείων και τον πειραματικό προσδιορισμό μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρηση σκληρότητας, μέτρο ελαστικότητας κ.λ.π.) στερεών υλικών με τη μέθοδο της εγχάραξης. Στην διάταξη αυτή η δύναμη δοκιμής παράγεται μέσω ενός συνόλου τυποποιημένων βαρών και ένας μηχανικός μοχλός πολλαπλασιάζει την εφαρμοζόμενη δύναμη σε συγκεκριμένο σημείο. Η μετατόπιση (βύθισμα) υπολογίζεται με ένα ηλεκτρονικό μικρόμετρο (μετρήσεις με αβεβαιότητα 10μm). Η διάταξη επιτρέπει στους εκπαιδευόμενους να ακολουθήσουν μετρητικά πρωτόκολλα για να καθορίσουν τις μηχανικές ιδιότητες των στερεών. Πραγματοποιήθηκε αρχικά επίδειξη της πειραματικής διάταξης μέτρησης σε φοιτητές του τμήματος Φυσικής του ΑΠΘ και ακολούθησε η χρήση της από μαθητές Επαγγελματικού Λυκείου που πραγματοποίησαν μετρήσεις υπολογισμού της τιμής της σκληρότητας των θερμομονωτικών υλικών ευρείας χρήσης και την συγκριτική μελέτη αυτών, με πάρα πολύ καλά αποτελέσματα. Επίσης δόθηκε η ευκαιρία να μελετηθούν οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, η εναπομένουσα παραμόρφωση και η μη γραμμική συμπεριφορά. Οι διαπιστώσεις των ίδιων των φοιτητών και μαθητών για όλη τη πειραματική διαδικασία μέτρησης και από παιδαγωγική-εκπαιδευτική άποψη (ενεργός συμμετοχή, πρόκληση ενδιαφέροντος, ευκολία μετρήσεων, ευκολία επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων) και από επιστημονική άποψη (αβεβαιότητα μετρήσεων) ήταν πολύ θετικές και καταγράφονται στο τέλος της εργασίας.

*Λέξεις-Κλειδιά: Πειραματική διάταξη, μηχανικές ιδιότητες, σκληρότητα, πειραματική μέτρηση, αβεβαιότητα μέτρησης*

## 1. Εισαγωγή

Πολλές φορές λόγω κόστους του εξοπλισμού η εργαστηριακή άσκηση των σπουδαστών/φοιτητών είναι περιορισμένη σε απλές μετρήσεις και η χρησιμοποίηση υλικών και μετρήσεων δεν είναι κοντά στα πρότυπα της μετρολογίας. Οι πρόσφατες πρόοδοι στη μετρολογία επιτρέπουν την προσιτή μέτρηση των βασικών ποσοτήτων από την άποψη κόστους και δυνατότητας χρησιμοποίησης. Επομένως προκύπτει ανάγκη για πραγματικά πειράματα με μικρό κόστος πειραματικής διάταξης και μετρολογικές μεθοδολογίες.

Οι μηχανικές ιδιότητες των θερμομονωτικών υλικών είναι πολύ σημαντικές, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κτηρίων και συνήθως δεν μελετώνται ή μελετώνται στατικά. Μεγάλη προσοχή δίνεται στην μελέτη της μηχανικής αντοχής των θερμομονωτικών υλικών η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.

Η μηχανική αντοχή που απαιτείται για μια κατασκευή προσδιορίζει το σύστημα θερμομόνωσης που θα χρησιμοποιηθεί. Έτσι, υλικά με μεγάλη μηχανική αντοχή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αυτοφερόμενα, αλλά με μικρότερη αντοχή μπορούν να μπουν σε ένα φέρον πλέγμα και άλλα με πολύ μικρή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά πλήρωσης. Η αντοχή σε συμπίεση είναι ένα καθοριστικό μέγεθος στις θερμομονώσεις δαπέδων. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις είναι χρήσιμη και η γνώση των ενδιάμεσων παραμορφώσεων μέχρι τη θραύση από μερικές φορτίσεις, που δεν καταστρέφουν το υλικό αλλά μπορούν να δημιουργήσουν υπερβολικές καταπονήσεις σε φέροντα στοιχεία ή επενδύσεις. Σε πολλές περιπτώσεις χρειάζονται πληροφορίες για την αντοχή των υλικών σε κάμψη ή σε εφελκυσμό. Αυτό απαιτείται ιδιαίτερα σε εσωτερικές θερμομονώσεις ορόφων με μεγάλα ανοίγματα ή σε αυτοφερόμενες κατασκευές που καταπονούνται από τις καιρικές συνθήκες [2],[3].

Για την δυναμική μελέτη του φαινομένου απαιτείται ακριβός και πολύπλοκος μηχανισμός. Όμως με τη δυνατότητα μέτρησης με ψηφιακό τρόπο των βασικών μεγεθών (μήκος, χρόνος) μπορούν να κατασκευαστούν συσκευές που να επιτρέπουν την μέτρηση αυτών των ιδιοτήτων.

Σκοπός την εργασίας ήταν να κατασκευαστεί μια συσκευή για την μέτρηση της σκληρότητας υλικών με πολύ μικρό κόστος ώστε να μπορεί να γίνει εκτός του υπολογισμού της τιμής της σκληρότητας, η μελέτη και η κατανόηση της όλης διαδικασίας σε απλό σχολικό εργαστήριο.

Η σκληρότητα ενός υλικού εξαρτάται από τη φύση του, τη συνοχή του, όπως και από τη μορφή του κρυσταλλικού πλέγματος. Επειδή τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων διαφέρουν από μέθοδο σε μέθοδο, κάθε ένδειξη της σκληρότητας πρέπει να συνοδεύεται από τα χαρακτηριστικά της δοκιμής. Οι διάφορες μέθοδοι σκληρομέτρησης χωρίζονται σε τρεις γενικές κατηγορίες: α) τις μεθόδους στατικής δοκιμής β) τις μεθόδους δυναμικής δοκιμής γ) τη μέτρηση της σκληρότητας με εγχάραξη [3],[4],[9].

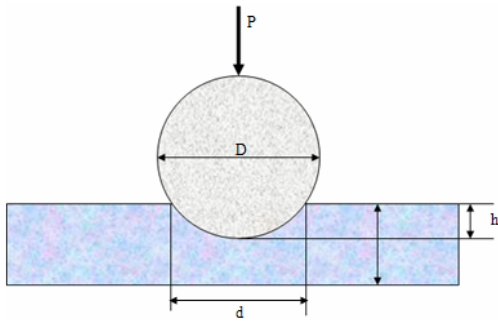
Διαφορετικές μέθοδοι προσδιορισμού της σκληρότητας δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα, γιατί μετρούν διαφορετικές ποσότητες με διαφορετικούς διεισδυτές και με διαφορετικό τρόπο. Δεν υπάρχει απόλυτη κλίμακα για τη σκληρότητα. Κάθε τύπος δοκιμής έχει τη δική του κλίμακα προσδιορισμού της σκληρότητας [3].

## **2. Στατικές δοκιμές σκληρομέτρησης**

Οι πιο συνηθισμένες στατικές δοκιμές σκληρομέτρησης είναι τρεις. α) Η μέθοδος Brinell, β) η μέθοδος Vickers και γ) η μέθοδος Rockwell.

### **2.1 Μέθοδος Brinell.**

Είναι η στατική μέθοδος προσδιορισμού της σκληρότητας, που χρησιμοποιείται περισσότερο. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο σφαιρικός διεισδυτής από πολύ σκληρό χάλυβα με διάμετρο  $D$  και με σταθερό φορτίο  $P$  διεισδύει κάθετα προς την επιφάνεια του δοκιμίου. Η σφαίρα πιέζεται ομαλά και κάθετα με φορτίο  $P$  στη λειασμένη επιφάνεια του δοκιμίου. Μετά την αποφόρτιση και εφόσον ελήφθη η πρόνοια ώστε η φόρτιση να διαρκέσει αρκετά ώστε να δημιουργηθεί πλαστική παραμόρφωση στο δοκίμιο, περίπου 15 δευτερόλεπτα, μετρείται η διάμετρος  $d$  του αποτυπώματος που σχηματίστηκε. Ως αριθμός σκληρότητας κατά Brinell (BHN= Brinell Hardness Number) ορίζεται ο λόγος του φορτίου  $P$  προς το εμβαδόν του σφαιρικού τμήματος της επιφανείας της ουλής [1],[3],[5].



Η σκληρότητα σύμφωνα με την μέθοδο Brinell συμβολίζεται ως BHN ή ως  $H_B$  και δίδεται από την σχέση :

$$BHN = H_B = \frac{P}{S} \text{ (Kg/mm}^2\text{)} \text{ ή (Kp/mm}^2\text{)} \text{ ή (Kgf/mm}^2\text{)}$$

Kilogram-force  $\rightarrow$  (Kilopond)

1 kp = 9.80665 N = 980665 dyn  $\equiv g_n \cdot (1 \text{ kg})$  όπου S είναι η επιφάνεια του αποτυώματος, και η

**Σχήμα 1:** Μέθοδος Brinell

οποία προσδιορίζεται από τη σχέση :

$S = \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})$  όπου : **D**: η διάμετρος της σφαίρας **d**: η διάμετρος του αποτυώματος (ουλής) Και τελικά:

$$BHN = H_B = \frac{P}{\pi Dh} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1) \text{ όπου } h$$

είναι το μέγιστο βάθος της ουλής, δηλαδή το βέλος του σφαιρικού τμήματος. Δεχόμαστε για την αξιοπιστία των μετρήσεων ότι θα πρέπει να ισχύει η σχέση.  $\frac{d}{D} = 0,2$  έως  $0,7$  (2) ή η

ισοδύναμή της  $\frac{h}{D} = 0,01$  ως  $0,15$  (3) Η δοκιμή Brinell είναι η περισσότερο διαδεδομένη στις

εφαρμογές, εφόσον βεβαίως δοκιμάζονται υλικά με σχετικά σημαντικό πάχος (δεδομένου ότι οι ουλές που δημιουργούνται έχουν σημαντικές διαστάσεις) και τα υλικά δεν είναι πολύ σκληρά. Τελειώνοντας την αναφορά στη μέθοδο σκληρομέτρησης αυτή θα πρέπει να πούμε ότι οι συνηθισμένες συσκευές που χρησιμοποιούνται στα εργαστήρια για τον υπολογισμό της σκληρότητας κατά Brinell έχουν σύστημα μοχλών μέσω των οποίων επιβάλλεται το φορτίο στο δοκίμιο, ενσωματωμένο χρονόμετρο καθώς και σύστημα φακών που μας επιτρέπουν τον υπολογισμό των διαστάσεων με ακρίβεια εκατοστού του χιλιοστού. Τις διαστάσεις της διαμέτρου της ουλής τις μετρούμε κατά δύο (ή και περισσότερες) κάθετες διευθύνσεις και παίρνουμε το μέσο όρο των ενδείξεων, ενώ για ένα τυπικό πείραμα σκληρομέτρησης κάνουμε τουλάχιστον τρεις διαδοχικές σκληρομετρήσεις στο υπό εξέταση δοκίμιο σε πολύ απομακρυσμένη θέση κάθε φορά [1],[3],[5],[7],[8],[9].

## 2.2.Μέθοδος Vickers.

Εάν τα δοκίμια είναι λεπτά και από σκληρό υλικό τότε χρησιμοποιείται η μέθοδος Vickers. Αυτή χρησιμοποιεί διεισδυτή σχήματος κανονικής τετραγωνικής πυραμίδας με γωνία απέναντι εδρών ίση με  $136^\circ$ , κατασκευασμένο από διαμάντι. Κατά Vickers, ο αριθμός σκληρότητας θα είναι ο λόγος του επιβαλλόμενου φορτίου προς το εμβαδόν της παράπλευρης επιφάνειας του κοίλου αποτυώματος της ουλής και όπως προκύπτει από την στοιχειώδη στερεομετρία, θα ισχύει η σχέση:  $VHN = \frac{P}{S} = \frac{P}{\frac{d^2}{2 \cos 22}} = 1.8544 \frac{P}{d^2}$  όπου d η διαγώνιος της

βάσης του αποτυώματος της ουλής. Η γεωμετρία του διεισδυτή, η επιλογή δηλαδή της γωνίας των  $136^\circ$  έγινε έτσι ώστε να αντιστοιχεί σε δοκιμή Brinell με λόγο  $d/D=3/8=0.375$ . Τα μικρά βάθη διεισδύσεως που οφείλονται στην αμβλεία γωνία των  $136^\circ$  επιτρέπουν την

σκληρομέτρηση λεπτών δοκιμίων. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό οποιασδήποτε σκληρότητας, πολύ χαμηλής έως πολύ υψηλής και για πολύ μικρά και πολύ λεπτά δοκίμια. Οι τυποποιημένες εργαστηριακές συσκευές για τον υπολογισμό της σκληρότητας Vickers έχουν σύστημα επιβολής του εκλεγόμενου κάθε φορά φορτίου με τη βοήθεια μοχλού και δίσκων συγκεκριμένου βάρους, ενώ ταυτόχρονα έχουν σύστημα φωτισμού του αποτυπώματος και μεγεθυντική διόπτρα παρατήρησης με σταυρόνημα έτσι ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί το μήκος  $d$  των διαγωνίων της βάσης του αποτυπώματος με μεγάλη ακρίβεια. Και εδώ, όπως και στη μέθοδο Brinell, για την εκτίμηση της σκληρότητας ενός υλικού γίνονται συνήθως τρεις σκληρομετρήσεις και λαμβάνεται ο μέσος όρος τους, ενώ και αυτές θα πρέπει να γίνονται σε θέσεις που απέχουν μεταξύ τους περισσότερο από το διπλάσιο των διαστάσεων της βάσης του διεισδυτή [1],[3],[5],[7],[8].

### 2.3. Μέθοδος Rockwell.

Η μέθοδος Rockwell στηρίζεται και αυτή στη μέτρηση της διείσδυσης ενός διεισδυτή κάτω από την επίδραση ενός φορτίου. Η διαφοροποίηση της μεθόδου από τη μέθοδο Brinell συνίσταται στο ότι η μέθοδος Brinell βασίζεται στη μέτρηση της επιφάνειας του αποτυπώματος, ενώ η μέθοδος Rockwell στη μέτρηση της προσαύξησης του βάθους του αποτυπώματος που προκύπτει από την εφαρμογή ενός προκαταρκτικού και ενός κυρίως φορτίου. Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου Rockwell είναι το ότι φέρει ωρολογιακή κλίμακα ανάγνωσης που δίνει απευθείας τη μέτρηση της προσαύξησης του βάθους του αποτυπώματος σε μονάδες σκληρότητας Rockwell.

Οι συνήθεις εργαστηριακές συσκευές για την σκληρομέτρηση Rockwell είναι έτσι κατασκευασμένες, ώστε η τελική ανάγνωση στην κλίμακα του οργάνου, μετά την αφαίρεση του δεύτερου φορτίου, να δίνει κατευθείαν την σκληρότητα κατά Rockwell χωρίς ο παρατηρητής να χρειάζεται να κάνει καμιά αφαίρεση [1],[3],[5],[7],[8],[9],[9].

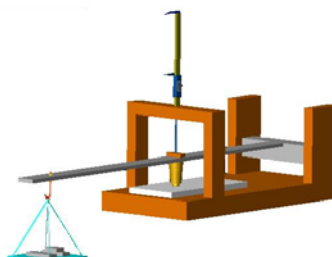
### 2.4 Θερμομονωτικά υλικά

Καταρχάς, ως θερμομονωτικά υλικά με βάση το Εθνικό Σύστημα Διαπίστευσης, χαρακτηρίζονται τα υλικά που έχουν θερμική αντίσταση μεγαλύτερη από  $0.1 \text{ m}^2 \text{ K/w}$  και πρακτικά έχουν μικρή θερμική αγωγιμότητα. Θερμομονωτικά υλικά που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι: α) Isocoat TX, β) Isoplak BT γ) Isoplak TX δ) Neopor ε) Isoltetto στ) Εξηλασμένη Πολυστερίνη ζ) Διογκωμένη Πολυστερίνη (felizol)

## 3. Η πειραματική συσκευή

### 3.1. Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της σκληρότητας των θερμομονωτικών υλικών δείχνεται στην παρακάτω εικόνα:



*Εικόνα 1 : Φωτογραφία και σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης μελέτης της σκληρότητας των θερμομονωτικών υλικών*

### 3.2. Σύντομη επεξήγηση της λειτουργίας της διάταξης

Η πειραματική μας διάταξη βασίζεται στη μέθοδο της στατικής εγγάραξης όπου έχουμε διείσδυση χαλύβδινης σφαίρας ορισμένης διαμέτρου, υπό την επίδραση φορτίου  $P$ , στο προς δοκιμή υλικό. Το εφαρμοζόμενο φορτίο (kg) προς την επιφάνεια του κυκλικού αποτυπώματος ( $\text{mm}^2$ ) δίνει το μέτρο της σκληρότητας του υλικού.

Αρχικά τοποθετούμε το δείγμα στην πειραματική διάταξη και μετράμε την αρχική απόσταση του δείγματος από το μικρόμετρο που βρίσκεται πάνω στον σταθεροποιητή μέτρησης σε ορθή γωνία. Αυτό πετυχαίνεται με την σταθεροποίηση του μικρόμετρου σε ορθογώνια κομμένο ξύλο όπως φαίνεται στην εικόνα 1.

Πρέπει να τονιστεί εδώ, η σημασία του πολλαπλασιαστή δύναμης του μοχλού. Το βάρος της μάζας του βαριδίου αυξάνει ανάλογα με τον κανόνα του μοχλού. Έτσι μπορεί να επιτευχθεί αντίστοιχη αύξηση της εφαρμοζόμενης δύναμης στον διεισδυτή, δεν απαιτούνται βαρίδια μεγάλης μάζας και η όλη διαδικασία γίνεται ευκολότερη και πιο αποτελεσματική. Επίσης για την καθετότητα του διεισδυτή στο υπό μελέτη δοκίμιο χρησιμοποιείται ένα απλό διπλό «αλφάδι» που σταθεροποιείται πάνω στο σύστημα του μοχλού του οποίου το ακίνητο άκρο μπορεί να ανεβοκατεβαίνει και να σταθεροποιείται στο επιθυμητό σημείο με ένα απλό σύστημα σφιγκτικών βιδών όπως φαίνεται στην φωτογραφία της διάταξης.

Μετά τοποθετούμε τα βαρίδια και μετρούμε εκ νέου την απόσταση του δείγματος από το μικρόμετρο. Από την διαφορά των δυο τιμών υπολογίζουμε πόσο βυθίστηκε στο δείγμα η χαλύβδινη σφαίρα. Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία για διαφορετικά βάρη παίρνουμε την καμπύλη δύναμης-φορτίο  $P$  (N) vs βυθίσματος αποτυπώματος  $h$  (mm). Κατόπιν γίνεται γραμμική προσέγγιση της παραπάνω καμπύλης και καταγραφή της κλίσης της προκύπτουσας ευθείας. Βασικός στόχος επομένως στην πειραματική μας μελέτη της σκληρότητας των δειγμάτων είναι αρχικά ο συσχετισμός της κλίσης της ευθείας της γραμμικής πρόσεγγισης της καμπύλης φορτίο  $P$  (N) vs βυθίσματος αποτυπώματος  $h$  (mm) με την σκληρότητα του υλικού καθώς και ο υπολογισμός για κάθε ζεύγος ( $P$  (N) , βυθίσματος αποτυπώματος  $h$  (mm)) της τιμής BHN. Τέλος μπορεί να γίνει η συσχέτιση των τιμών της κλίσης των ανωτέρω ευθειών με τις αντίστοιχες τιμές BHN των υλικών.

### 4. Μετρήσεις

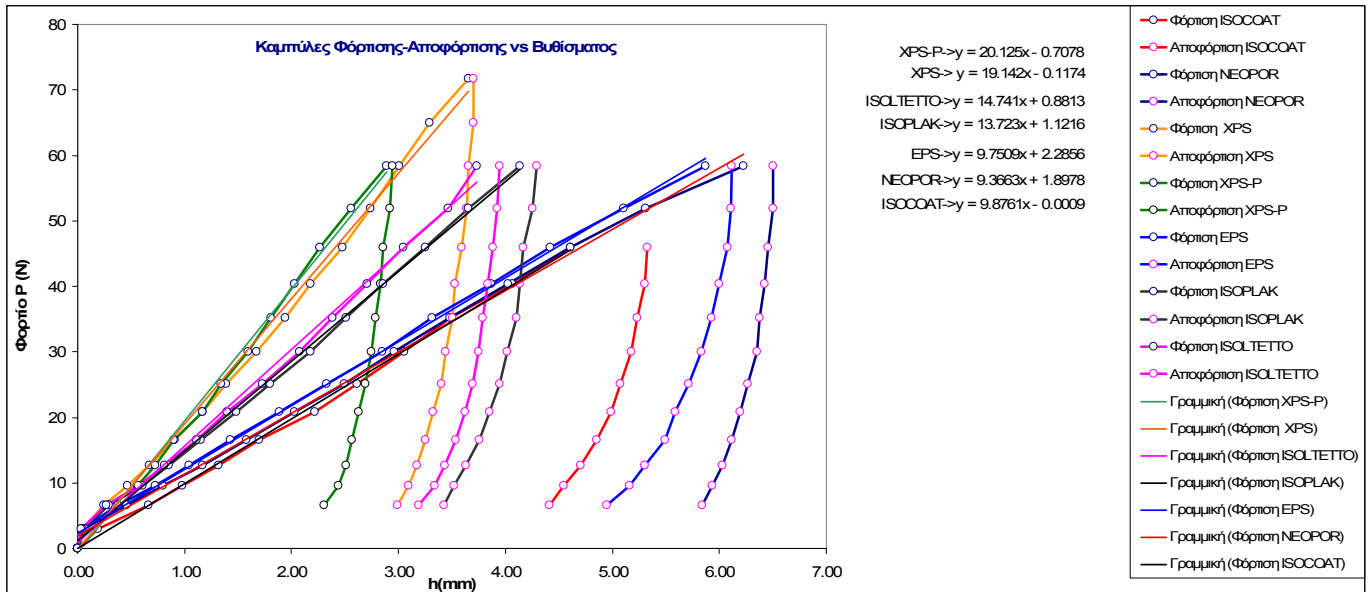
Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας θα αναφερθεί η χρήση της κατασκευασθείσας πειραματικής διάταξης στη μελέτη της σκληρότητας μόνο για ένα θερμομονωτικό υλικό και η παρουσίαση σε πίνακα των αντίστοιχων τιμών για τα υπόλοιπα θερμομονωτικά υλικά.

Η διάμετρος της χαλύβδινης διεισδυόμενης σφαίρας είναι 18.99mm. Τα πειραματικά αποτελέσματα που λήφθηκαν καθώς και η επεξεργασία τους με βάση την ανωτέρω θεωρητική ανάλυση καταγράφονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα. Πρέπει να αναφέρουμε εδώ ότι οι μετρήσεις λήφθηκαν σε διαφορετικά σημεία του δοκιμίου που απείχαν μεταξύ τους τουλάχιστον 2cm με βάση αυτά που αναφέρθηκαν στην θεωρητική εισαγωγή. Επίσης πρέπει να επισημάνουμε τις αβεβαιότητες που εισέρχονται αναγκαστικά στην όλη διαδικασία (μέτρηση βυθίσματος με ηλεκτρονικό μικρόμετρο αβεβαιότητας 10 $\mu\text{m}$ , μέτρηση χρόνου παραμονής του βαριδίου στο ζυγό της διάταξης 30 sec με ηλεκτρονικό χρονόμετρο κινητού τηλεφώνου, μέτρηση της μάζας με ηλεκτρονικό ζυγό αβεβαιότητας της τάξης του gr και η αντιστοίχισή του με βάρος σε N μέσω της σχέσης του με την επιτάχυνση της βαρύτητας  $g = 9,81\text{m/s}^2$ , η μέτρηση του μήκους του μοχλού σε cm και το αντίστοιχο σημείο εφαρμογής της δύναμης στον διεισδυτή, καθώς και η αβεβαιότητα στην καθετότητα του διεισδυτή στο δοκίμιο).

**Πίνακας 1 : Πειραματικές μετρήσεις και υπολογισμός της σκληρότητας BHN ( Brinell) για το 1<sup>ο</sup> δοκίμιο ISOCOAT TX**

a/a	Μάζα βαριδίου (gr)	Συνολική μάζα (gr)	Συνολικό Φορτίο (N)	Δύναμη P(N)	Προσθήκη βαριδίου Βύθισμα (mm)	Αφαίρεση βαριδίου Βύθισμα (mm)	BHN	Διάμετρος αποτυπώματος d(mm)	Λόγος d/D	P/D
1	0	0	0.00	0.00	0.00					
2	230	230	2.26	3.01	0.09		0.56	4.74	0.25	0.006
3	275	505	4.95	6.61	0.38	0.56	0.29	7.81	0.41	0.014
4	230	735	7.21	9.61	0.87	1.13	0.19	9.38	0.49	0.020
5	230	965	9.47	12.62	1.03	0.88	0.21	10.49	0.55	0.026
6	305	1270	12.46	16.61	1.46	1.35	0.19	11.63	0.61	0.035
7	320	1590	15.60	20.80	2.06	1.27	0.17	12.99	0.68	0.043
8	330	1920	18.84	25.11	2.29	1.56	0.18	13.54	0.71	0.052
9	375	2295	22.51	30.02	2.48	1.81	0.20	14.56	0.77	0.062
10	395	2690	26.39	35.19	3.22	2.04	0.18	15.18	0.80	0.073
11	400	3090	30.31	40.42	3.72	2.43	0.18	15.95	0.84	0.084
12	420	3510	34.43	45.91	4.21	2.64	0.18	16.71	0.88	0.095

Με βάση τα στοιχεία των ανωτέρω πινάκων κατασκευάζουμε τα παρακάτω γραφήματα φόρτισης και αποφόρτισης vs h(mm). Με το ίδιο σκεπτικό κατασκευάζουμε και τις αντίστοιχες καμπύλες για τα υπόλοιπα δοκίμια. Το συγκεντρωτικό γράφημα δίνεται παρακάτω.



**Διάγραμμα 1: Διάγραμμα φόρτισης και αποφόρτισης vs βύθισματος για όλα τα δοκίμια**

Παρατηρούμε ότι το μικρότερο βύθισμα της χαλύβδινης σφαίρας για το ίδιο φορτίο P της πειραματικής μας διάταξης παρουσιάζεται στο δοκίμιο της παλιάς εξηλασμένης πολυστερίνης και άρα πρόκειται για το πιο «σκληρό» από τα θερμομονωτικά δοκίμια που

μελετήσαμε και αντίστοιχα, το μεγαλύτερο βύθισμα άρα και το πιο «μαλακό», παρατηρείται στο δοκίμιο του ISOCOAT και του NEOPOR.

Επίσης σε κάθε ζεύγος πειραματικών τιμών (P(N), h(mm)) μπορούμε να αντιστοιχίσουμε και μια τιμή με βάση τη σχέση (1):  $BHN = H_B = \frac{P}{\pi Dh}$ . Αν πάρουμε την γραμμική περιοχή της καμπύλης P(N) vs h(mm) που αντιστοιχεί σε λόγο  $\frac{d}{D} = 0,2$  έως 0,7 ή

με την ισοδύναμή της  $\frac{h}{D} = 0,01$  ως 0,15 και το μέσο όρο των τιμών BHN που αντιστοιχεί

στην περιοχή αυτή για όλα τα υλικά που μελετήθηκαν προκύπτει ο παρακάτω πίνακας που συσχετίζει την κλίση της γραμμική περιοχής του διαγράμματος φόρτισης P(N) και βυθίσματος h(mm) με τις ανωτέρω υπολογισθείσες μέσες πειραματικές τιμές με βάση τη σχέση Brinell για τη σκληρότητα BHN.

**Πίνακας 2 :** Οι κλίσεις των γραμμικών προσεγγίσεων των καμπυλών P-h σε αντιστοιχία με τις τιμές της σκληρότητας BHN ( Brinell) για όλα τα δοκίμια

A/A	ΥΛΙΚΟ	Κλίση γραμμικής περιοχής διαγράμματος φόρτισης P(N) και βυθίσματος h(mm)	Υπολογισθείσες μέσες πειραματικές τιμές με βάση τη σχέση Brinell για τη σκληρότητα BHN
1	XPS-Παλιά	20.125	0.335
2	XPS	19.142	0.314
3	ISOLTETTO	14.741	0.256
4	ISOPLAK	13.723	0.252
5	ISOCOAT	9.876	0.185
6	EPS-Λευκή	9.751	0.183
7	NEOPOR	9.366	0.176

Πρέπει να επισημάνουμε (και με βάση τη προηγηθείσα θεωρητική ανάλυση) ότι για τη λήψη των μέσων τιμών BHN και στις δυο περιπτώσεις λήφθηκε μέριμνα ώστε να βρισκόμαστε στην περιοχή του λόγου d/D (διάμετρος αποτυπώματος / σφαίρας) από 0.3 -0.8.

Με βάση τα ανωτέρω γραφήματα και το συγκριτικό πίνακα, την μεγαλύτερη τιμή BHN παρουσιάζουν τα δοκίμια της παλιάς εξηλασμένης πολυστερίνης και τη μικρότερη το NEOPOR.

## 5. Διδακτική παρέμβαση-Αξιολόγηση

Στο στάδιο αυτό σχεδιάστηκε και πραγματοποιήθηκε διδακτική παρέμβαση με χρήση της διάταξης σε μια ομάδα φοιτητών και σε δυο ομάδες μαθητών με σκοπό να τους εισαγάγει στις έννοιες της μετρολογίας των μηχανικών ιδιοτήτων. Η όλη διαδικασία αξιολογήθηκε τελικά αφ' ενός μεν από διδακτική και παιδαγωγική άποψη (ενεργός συμμετοχή, πρόκληση ενδιαφέροντος, ευκολία μετρήσεων, ευκολία επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων, επίτευξη στόχων) και αφετέρου από επιστημονική άποψη (αβεβαιότητα μετρήσεων).

Σε πρώτη φάση η παρέμβαση έγινε σε ομάδα φοιτητών του Φυσικού τμήματος του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης με επίδειξη και ανάλυση της πειραματικής διάταξης και του τρόπου λειτουργίας της καθώς και πραγματοποίηση μετρήσεων. Ακολούθησε ανοιχτή συζήτηση και καταγραφή των απόψεών τους σχετικά με την όλη διαδικασία καθώς και αξιολόγηση της συσκευής. Αξίζει να αναφερθεί ότι η παρέμβαση στη ομάδα των φοιτητών ήταν μιας ώρας λόγω της άμεσης εξοικείωσης τους με τη διάταξη και την ευκολία λήψης και επεξεργασίας των μετρήσεων.

Σε δεύτερη φάση ακολούθησε παρέμβαση σε δυο ομάδες -των τεσσάρων μαθητών η κάθε μια- της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης (Α΄ τάξη 2<sup>ος</sup> Κύκλος) στις οποίες δόθηκαν διαφορετικά θερμομονωτικά υλικά προς μελέτη και αξιολόγηση. Η 1<sup>η</sup> ομάδα ήταν του μηχανολογικού τομέα με σχετική γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών (είχαν διδαχθεί σε προηγούμενα έτη σχετικά θέματα) και η άλλη του ηλεκτρονικού τομέα, με καμία γνώση (παρά μόνο των εμπειρικών) ως προς τις μηχανικές ιδιότητες των σωμάτων.

Για τις ομάδες αυτές η παρέμβαση έγινε με βάση σχέδιο μαθήματος σε διάρκεια τριών διδακτικών ωρών. Την πρώτη διδακτική ώρα έγινε η παρουσίαση των απαιτούμενων θεωρητικών γνώσεων, ώστε να εισαγάγει τους μαθητές στις έννοιες των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών καθώς και επίδειξη, επεξήγηση της λειτουργίας της όλης διάταξης και ο τρόπος λήψης και επεξεργασίας των μετρήσεων. Την δεύτερη διδακτική ώρα πραγματοποιήθηκε η λήψη των μετρήσεων από κάθε ομάδα, όπου ο ρόλος του κάθε εμπλεκόμενου μαθητή ήταν διακριτός (χρονομέτρης, λήπτες μετρήσεων, καταγραφέας μετρήσεων). Ακολούθησε επεξεργασία των μετρήσεων με το πρόγραμμα EXCEL και η λήψη των πειραματικών καμπυλών για το αντίστοιχο υλικό. Στην τρίτη διδακτική ώρα έγινε η παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών του υλικού της κάθε ομάδας, η συγκριτική μελέτη των καμπυλών και δόθηκε το σχετικό συμπέρασμα για το πιο υλικό παρουσιάζει την μεγαλύτερη σκληρότητα. Τέλος ακολούθησε ημιδομημένη ατομική συνέντευξη με κάθε μαθητή και καταγραφή των απόψεών τους σχετικά με την όλη διαδικασία και την τελική αξιολόγησή της από μέρος τους.

## **6. Συζήτηση και συμπεράσματα**

Η ανάλυση των σχολίων των φοιτητών και μαθητών έδειξε καταρχήν ότι υπήρξε άμεση εξοικείωσή τους με την όλη διάταξη, λόγω της ευκολίας χρήσης της (προσθήκη βαριδίων και μέτρηση του βυθίσματος με το ηλεκτρονικό μικρόμετρο), ευκολίας επεξεργασίας των μετρήσεων (γραφική παράσταση της καμπύλης  $P(N)$  vs  $h(\text{mm})$  και γραμμική της προσέγγιση με το excel).

Επίσης οι ομάδες των φοιτητών και μαθητών σχολίασαν θετικά την όλη διαδικασία λόγω της επανάληψης των μετρήσεων, δηλ., για την γραφική παράσταση απαιτούνται κατά μέσο όρο 13 μετρήσεις και για κάθε ζεύγος μετρήσεων χρήση της σχέσης σύμφωνα με την μέθοδο Brinell για τον υπολογισμό της τιμής BHN που σχετιζόταν με την σκληρότητα. Με την επανάληψη της όλης διαδικασίας μέτρησης γινόταν άμεση συσχέτιση του βάθους του αποτυπώματος με την αντίστοιχη δύναμη φόρτισης και την σκληρότητα του υλικού (μικρό βάθος βυθίσματος σε σκληρότερα υλικά) και τελικά πιο εύκολη κατανόηση της έννοιας της σκληρότητας του υλικού. Τέλος θεωρούμε, ότι και από παιδαγωγική άποψη, η συσκευή πέτυχε τον στόχο της αφού υπήρξε ενεργός συμμετοχή όλων των μελών της ομάδας καθώς για την επίτευξη των μετρήσεων ήταν απαραίτητη η αρμονική συνεργασία όλων των συμμετεχόντων λόγω του διακριτού ρόλου του καθενός όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω.



Οι μαθητές θεώρησαν επίσης απλή και κατανοητή τη συσχέτιση της κλίσης της γραμμικής προσέγγισης της καμπύλης  $P(N)$  vs  $h(\text{mm})$  με τη σκληρότητα του μετρούμενου υλικού. Υλικά με διαφορετική σκληρότητα παρουσίαζαν διαφορετική κλίση και επομένως ο συγκριτικός χαρακτηρισμός του σκληρότερου υλικού μπορεί να γίνει με την σύγκριση των κλίσεων των γραμμικών προσεγγίσεων των καμπυλών  $P(N)$  vs  $h(\text{mm})$ .

Πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα το γεγονός ότι δεν υπήρξε διαφοροποίηση στην κατανόηση της έννοιας της σκληρότητας στις δυο διαφορετικές ομάδες μαθητών (μηχανολογικού και ηλεκτρονικού τομέα) και τα πειραματικά αποτελέσματα ήταν απολύτως συγκρίσιμα μεταξύ τους. Οι μαθητές πραγματοποίησαν με ευκολία τις πειραματικές μετρήσεις και την επεξεργασία τους και τελικά συνέκριναν ως προς την σκληρότητα τα δυο διαφορετικά υλικά. Ιδιαίτερα, οι μαθητές του ηλεκτρονικού τομέα που είχαν μόνο προσωπικές εμπειρίες ως προς την σκληρότητα των υλικών τόνισαν την ευκολία της όλης διάταξης στην κατανόηση της έννοιας. Επομένως θα μπορούσε κανείς να πει, πως ο αρχικός στόχος της εν λόγω κατασκευής επιτεύχθηκε, τουλάχιστον σε αυτό το στάδιο.

Ο δεύτερος στόχος της όλης διάταξης ήταν να εισαγάγει τους εκπαιδευόμενους μαθητές και φοιτητές στην μετρολογία των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Για τον στόχο αυτό δόθηκαν αρχικά επεξηγήσεις για την έννοια της αβεβαιότητας και επισημάνθηκαν οι προφανείς αβεβαιότητες που εισέρχονται αναγκαστικά στην όλη διαδικασία. Στη μέτρηση βυθίσματος, στη μέτρηση χρόνου παραμονής του βαριδίου στο ζυγό της διάταξης, στη μέτρηση της μάζας με ηλεκτρονικό ζυγό και στην αντιστοίχσή του με βάρος σε N, στην επιτάχυνση της βαρύτητας, στη μέτρηση του μήκους του μοχλού στο αντίστοιχο σημείο εφαρμογής της δύναμης στον διεισδυτή, στην αβεβαιότητα της καθετότητας του διεισδυτή στο δοκίμιο.

Οι φοιτητές κατά κύριο λόγο έδειξαν ότι κατανοούν την έννοια της αβεβαιότητας και τον ρόλο της στις μετρήσεις ενώ υπήρξε δυσκολία για τους μαθητές της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης.

Συμπερασματικά, πρέπει να αναφερθεί ότι ο αρχικός στόχος ήταν να κατασκευαστεί μια συσκευή-πειραματική διάταξη με ιδιαίτερα χαμηλό κόστος (δεν υπερβαίνει τα 100€) που να παρουσιάζει ευκολία χρήσης βοηθώντας κυρίως τους μαθητές να κατανοήσουν τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών (σκληρότητα, ελαστικότητα) καθώς επίσης και να τους εισαγάγει στην μετρολογία των ανωτέρω μηχανικών ιδιοτήτων. Τα αποτελέσματα των σχετικών διδακτικών παρεμβάσεων αλλά και απόψεων των εκπαιδευόμενων που εκφράστηκαν μέσω των συνεντεύξεων έδειξαν ότι οι φοιτητές/μαθητές αντέδρασαν θετικά στη χρήση της πειραματικής διάταξης δίνοντάς τους την ευκαιρία να πειραματιστούν με τη μέτρηση της σκληρότητας διαφόρων υλικών και μέσα από την πράξη να κατανοήσουν περισσότερο το σχετικό φαινόμενο της Φυσικής και ταυτόχρονα να έχουν μια πρώτη επαφή με την μετρολογία που είναι η επιστήμη που έχει ως αντικείμενο τη «μέτρηση, τη μελέτη της αξιοπιστίας των μετρήσεων και την εφαρμογή των αρχών της στους τομείς της καθημερινής ζωής, στις συναλλαγές, στη βιομηχανική παραγωγή, στο εργαστήριο, στον έλεγχο ποιότητας, στην ασφάλεια και στην υγεία» [10].

## Βιβλιογραφία

- [1] Ν. Ανδριανόπουλος, Κ. Κυριαζή, και Κ. Λιακόπουλος, Πειραματική Αντοχή των Υλικών, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1988.
- [2] Π. Α Βουθούνης, Τεχνητή Μηχανική. Αντοχή των Υλικών, Γ΄ Έκδοση, Αθήνα 1997.
- [3] Ε. Γδούτου, Αντοχή των Υλικών, Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη Α.Ε., Θεσσαλονίκη 1993.
- [4] Θ. Κερμανίδης, Αντοχή Υλικών, Τόμος 2, Πάτρα 2000.
- [5] Ι. Ν. Πρασιανάκης, Μηχανική ΙΙΙ. Μηχανική Παραμορφώσιμων Σωμάτων. Αντοχή των Υλικών, ΑΘΗΝΑ 1986.
- [6] Ι. Ν. Πρασιανάκης και Ι. Γ. Μήλιος, Εργαστήρια Πειραματικής Αντοχής Υλικών, ΑΘΗΝΑ 1987.
- [7] Α. Τζιόλα, Ασκήσεις Αντοχής Υλικών και Μηχανικής Παραμορφώσιμων Σωμάτων, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 1992.
- [8] Γ. Φούντας, Αντοχή Υλικών, Τόμος 1, Εκδόσεις Πλαίσιο.
- [9] W. A. Nash, ANTOXH TΩN YΛIKΩN, Mc Graw-Hill, New York, ΕΣΠΙ, ΑΘΗΝΑ 1977.
- [10] <http://www.eim.org.gr>