

Διάθλαση φωτεινής δέσμης σε διαφανές υλικό (Επιβεβαίωση, αξιοποίηση του νόμου Snell)

1. Σκοπός

Αξιοποιώντας τις μετρήσεις των γωνιών πρόσπτωσης, διάθλασης α και δ αντίστοιχα μίας πολύ στενής φωτεινής δέσμης που προσπίπτει σε διαφανές σώμα συγκεκριμένου γεωμετρικού σχήματος αρχικά επιβεβαιώνεται ο νόμος του Snell και στην συνέχεια υπολογίζεται ο δείκτης διάθλασης (n) του διαφανούς σώματος. Επίσης από την απ' ευθείας μέτρηση της οριζικής γωνίας σε μία διαχωριστική επιφάνεια προσδιορίζεται ο άγνωστος δείκτης διάθλασης (n) του υλικού από την σχέση

2. Θεωρία

2.1 Διάθλαση

Η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται μια μονοχρωματική ακτινοβολία σε ένα διαφανές μέσο εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και από τις οπτικές ιδιότητες του μέσου. Η οπτική επιφάνεια που διαχωρίζει δυο οπτικά μέσα καλείται διαθλαστική επιφάνεια. Όταν το φως (ή γενικότερα μια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) διαδίδεται στο κενό, ανεξάρτητα του μήκους κύματος αυτού, έχει ταχύτητα ίση με:

Οι οπτικές ιδιότητες ενός διαφανούς μέσου χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα διάδοσης του φωτός μέσα σε αυτό.

Απόλυτος δείκτης διάθλασης (n) ενός οπτικού μέσου για συγκεκριμένη μονοχρωματική ακτινοβολία καλείται το πηλίκο της ταχύτητας (με την οποία διαδίδεται το φως στο κενό προς την ταχύτητα () με την οποία διαδίδεται αυτό μέσα στο οπτικό μέσο, δηλαδή ισχύει:

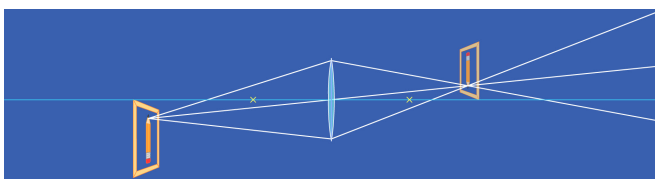
—

Η ταχύτητα του φωτός σε οποιοδήποτε οπτικό μέσο είναι μικρότερη της ταχύτητας του φωτός στο κενό και άρα ο απόλυτος δείκτης διάθλασης σε όλα τα οπτικά, διαφανή μέσα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος της μονάδος. Ο απόλυτος δείκτης διάθλασης του αέρα για θερμοκρασία 18°C και για το κίτρινο φως της φασματικής γραμμής του Νατρίου ($\lambda = 589.6 \text{ nm}$) είναι:

Η τιμή αυτή με πολύ καλή προσέγγιση λαμβάνεται ίση με την μονάδα

Ένα οπτικό μέσο B θα θεωρείται διαθλαστικότερο (ή οπτικώς πυκνότερο) ενός άλλου οπτικού μέσου A όταν ο απόλυτος δείκτης διάθλασης του B είναι μεγαλύτερος του A ή ισοδύναμα όταν η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο B είναι μικρότερη από ότι στο μέσο A. Συνήθως τα μηχανικώς πυκνότερα σώματα είναι και οπτικώς πυκνότερα με εξαίρεση το οινόπνευμα και τον αιθέρα.

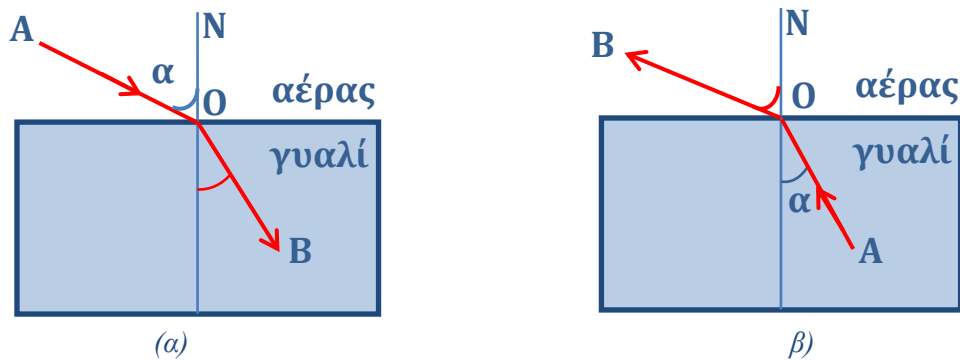
Στον πίνακα I που ακολουθεί δίνονται οι τιμές του απόλυτου δείκτη διάθλασης για διάφορα οπτικά μέσα και μάλιστα σε θερμοκρασία αναφοράς



ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

Διαφανές μέσον	Δείκτης διάθλασης	Διαφανές μέσον	Δείκτης διάθλασης
Αέρας	1,00	Διαμάντι	2,41
Νερό	1,33	Χλωριούχο νάτριο	1,53
Αιθυλική αλκοόλη	1,36	Διθειάνθρακας	1,62
Πυριτύαλος	1,63	Πολυαιθυλένιο	1,52
Στεφανύαλος	1,51	Βάλσαμο του Καναδά	1,53
Γλυκερίνη	1,47	Ρουμπίνι	1,57

Όταν μια φωτεινή μονοχρωματική ακτίνα προσπέσει πλάγια σε επίπεδη επιφάνεια που διαχωρίζει δυο οπτικά διαφανή μέσα με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης τότε παρατηρείται αλλαγή στη διεύθυνση διάδοσης του φωτός στο δεύτερο μέσο σε σχέση με την διεύθυνση διάδοσης του φωτός στο πρώτο μέσο. Το φαινόμενο αυτό καλείται **διάθλαση**.



Σχήμα 1.

(α) Πορεία μονοχρωματικής φωτεινής ακτίνας από αραιότερο σε πυκνότερο μέσο και
(β) Πορεία μονοχρωματικής φωτεινής ακτίνας από πυκνότερο σε αραιότερο μέσο.

Εάν μία φωτεινή ακτίνα προσπίπτει κάθετα στη διαθλαστική επιφάνεια τότε και στο δεύτερο μέσο διαδίδεται κατά την ίδια ακριβώς διεύθυνση. Όταν μια φωτεινή ακτίνα προσπίπτει πλάγια σε μια διαθλαστική επιφάνεια τότε εάν η μετάβαση γίνεται από οπτικώς αραιότερο σε οπτικώς πυκνότερο μέσο στο δεύτερο μέσο η φωτεινή ακτίνα πλησιάζει την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια (Σχήμα 1.α).

Αντίστροφα εάν η μετάβαση γίνεται από οπτικώς πυκνότερο σε οπτικώς αραιότερο μέσο τότε στο δεύτερο μέσο απομακρύνεται της καθέτου στη διαχωριστική επιφάνεια (Σχήμα 1.β).

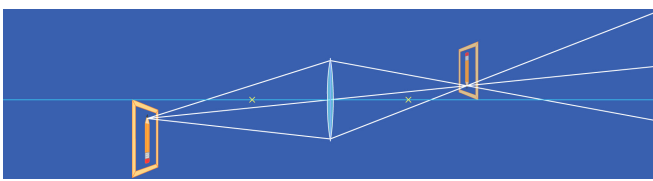
Η αρχή της αντιστροφής του φωτός ισχύει προφανώς και στη περίπτωση της διάθλασης. Οι προηγούμενες διαπιστώσεις είναι το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης αρχής.Ι

2.2 Νόμοι της Διάθλασης

Έστω μονοχρωματική φωτεινή ακτίνα ΑΟ η οποία προσπίπτει στην διαχωριστική επιφάνεια δύο διαφορετικών οπτικών μέσων με (Σχήμα 1.α). Η ΝΝ' είναι η κάθετος στη διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο Ο όπου η προσπίπτουσα ακτίνα την συναντά. Η γωνία α είναι η γωνία πρόσπτωσης ενώ η γωνία δ καλείται γωνία διάθλασης. Η ΟΒ δείχνει ακριβώς την πορεία της φωτεινής ακτίνας στο δεύτερο οπτικό μέσο.

Το φαινόμενο της διάθλασης του φωτός ικανοποιεί τους εξής δυο νόμους:

1. Νόμος του Snell: Το ημίτονο του ημιτόνου της γωνίας πρόσπτωσης προς το ημίτονο της γωνίας διάθλασης ισούται με το λόγο του απόλυτου δείκτη διάθλασης του δεύτερου μέσου προς το δείκτη διάθλασης του πρώτου δηλαδή ισχύει:

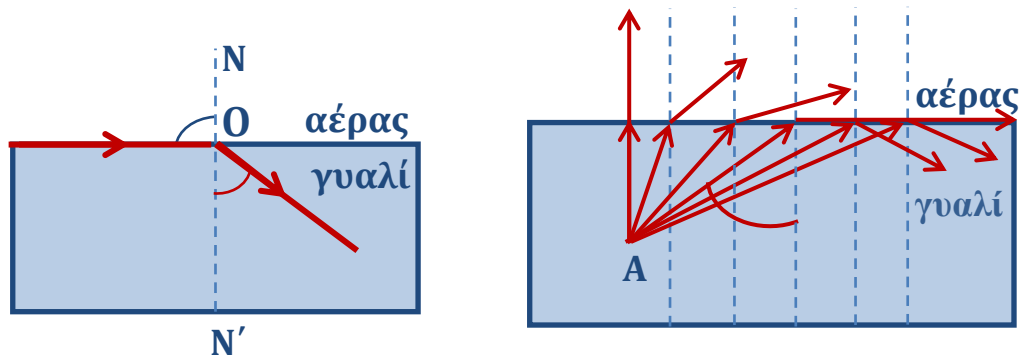


2. Η προσπίπτουσα ακτίνα, η διαθλώμενη ακτίνα και η κάθετος στη διαθλαστική επιφάνεια των δύο μέσων βρίσκονται στο ίδιο ακριβώς επίπεδο που είναι μάλιστα κάθετο στη διαθλαστική επιφάνεια.

2.3 Ορική γωνία - Ολική ανάκλαση

Όταν μονοχρωματική φωτεινή ακτίνα μεταβαίνει από οπτικώς αραιότερο σε οπτικώς πυκνότερο μέσο παρατηρείται ότι εάν αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης α θα αυξάνεται αντίστοιχα και η γωνία διάθλασης δ . Στην περίπτωση κατά την οποία η γωνία πρόσπτωσης γίνει 90° (δηλαδή: $\alpha = 90^\circ$) τότε από το νόμο του Snell προκύπτει:

Η τιμή της γωνίας διάθλασης σε αυτή την περίπτωση καλείται **ορική γωνία** (δ_{op}).



Σχήμα 2.

- (α) Ορική γωνία κατά την μετάβαση φωτεινής ακτίνας από αραιότερο σε πυκνότερο μέσο.
(β) Ορική γωνία που σχηματίζεται κατά την μετάβαση από πυκνότερο σε αραιότερο μέσο.
Φαινόμενο ολικής ανάκλασης.

Επομένως **ορική γωνία** καλείται η μέγιστη δυνατή γωνία διάθλασης που πραγματοποιείται όταν η γωνία πρόσπτωσης λάβει την τιμή $\alpha = 90^\circ$ στη περίπτωση που η μονοχρωματική φωτεινή ακτίνα μεταβαίνει από οπτικώς αραιότερο σε οπτικώς πυκνότερο μέσο (Σχήμα 2.α).

Όταν αντίστροφα μονοχρωματική, φωτεινή ακτίνα μεταβαίνει από οπτικώς πυκνότερο σε οπτικώς αραιότερο μέσο ορική γωνία καλείται η μέγιστη δυνατή γωνία πρόσπτωσης στην οποία και αντιστοιχεί γωνία διάθλασης $\alpha = 90^\circ$ (Σχήμα 2.β).

Όταν μονοχρωματική φωτεινή ακτίνα τείνει να μεταβεί από οπτικώς πυκνότερο σε οπτικώς αραιότερο μέσο και η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της ορικής τότε η φωτεινή αυτή ακτίνα παθαίνει ανάκλαση στη διαχωριστική επιφάνεια και επιστρέφει ολόκληρη στο ίδιο οπτικό μέσο. Το φαινόμενο αυτό καλείται **ολική ανάκλαση** (Σχήμα 2.β).

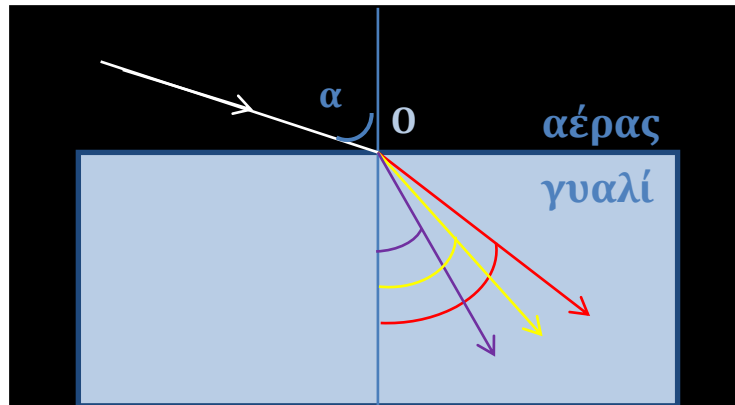
Στον πίνακα II που ακολουθεί παρουσιάζεται ο απόλυτος δείκτης διάθλασης καθώς και η αντίστοιχη ορική γωνία για διάφορα οπτικά μέσα.

ΠΙΝΑΚΑΣ II

Οπτικό μέσο	Νερό	Crown	Flint	Τιτάνιο	Διαμάντι
Δείκτης διάθλασης (n)	1,33	1,52	1,60	1,70	2,41
Ορική γωνία (δ_{op})	48,75°	41,14°	38,68°	36,03°	24,09°

2.4 Διασπορά (ή ανάλυση)

Όταν λεπτή δέσμη λευκού φωτός προσπέσει στη διαχωριστική επιφάνεια ενός οπτικού μέσου τότε δίνει πολλές διαθλωμένες ακτίνες διαφορετικών χρωμάτων (ένα πραγματικό συνεχές φάσμα). Στην κάθε ακτίνα αντιστοιχεί μια διαφορετική τιμή γωνίας διάθλασης δ (Σχήμα 3). Το φαινόμενο αυτό καλείται **διασπορά**. Συνήθως από τα διάφορα χρώματα μελετάται ο δείκτης διάθλασης εκείνων που αντιστοιχούν στις σκοτεινές γραμμές του φάσματος απορρόφησης του λιακού φωτός. Αυτές οι φασματικές γραμμές καλούνται γραμμές Fraunhofer και συμβολίζονται με τα γράμματα: A, B, C, D και F.



Σχήμα 3. Διασπορά από τη διάθλαση λεπτής δέσμης λευκού φωτός.

Από τις γραμμές αυτές επιλέγονται τρεις οι: C, D, F που αντιστοιχούν σε κόκκινο, κίτρινο και κυανούν χρώμα με αντίστοιχα μήκη κύματος τα C: 656.3 nm, D: 589.2 nm, F: 486.0 nm και με αυτά εξετάζεται το φαινόμενο της διασποράς. Η γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους οι ακτίνες των γραμμών F και C υπολογίζει την διασπορά της δέσμης, ενώ η μέση αλλαγή της κατεύθυνσης της δέσμης σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτίνα καθορίζεται από την γωνία της ακτίνας της D γραμμής (Σχήμα 3).

Για σχετικά μικρές τιμές της γωνίας πρόσπτωσης α προσδιορίζεται το μέγεθος:

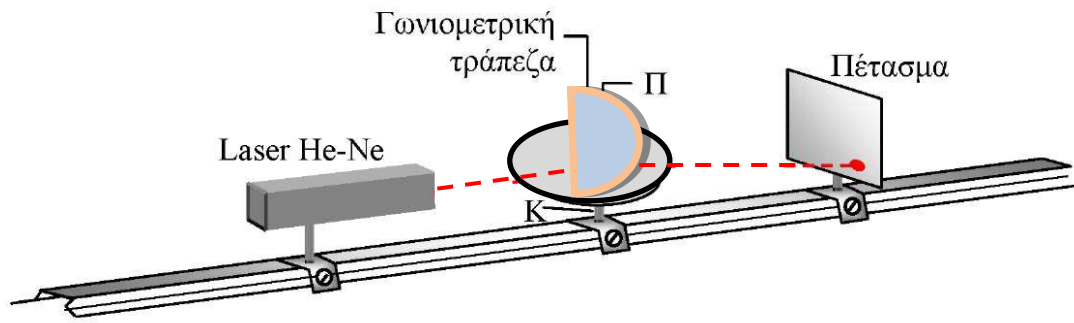
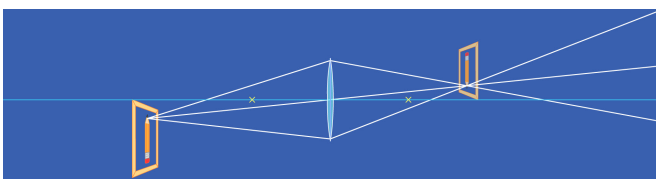
που καλείται **συντελεστής διασποράς** (ή **αριθμός του Abbe**) και λαμβάνει τιμές για τα διάφορα διαθλαστικά οπτικά μέσα από 20 έως 60. Το πηλίκο αυτό είναι χαρακτηριστικό για κάθε οπτική επιφάνεια. Το αντίστροφο του συντελεστή v καλείται διασκορπιστική ισχύς και προφανώς είναι ίσο με:

Οι δείκτες διάθλασης που αναφέρονται στα διάφορα οπτικά μέσα ορίζονται συνήθως για την κίτρινη (D) γραμμή (589.2 nm) του φάσματος εκπομπής των ατμών Na.

3. Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από μια οπτική τράπεζα επάνω στην οποία βρίσκονται η πηγή μονοχρωματικού φωτός (συσκευή δέσμης Laser), ο γωνιομετρικός κύκλος Γ στο κέντρο του οποίου βρίσκεται το διαφανές ημικυλινδρικό αντικείμενο καθώς και η κατακόρυφη οθόνη O (αδιαφανές επίπεδο πέτασμα).

Στην άσκηση αυτή χρησιμοποιείται μονοχρωματικό φως διότι διαφορετικά θα συνέβαινε και ανάλυση του φωτός.



Σχήμα 4. Πειραματική διάταξη για την επαλήθευση του νόμου του Snell.

Ως πηγή μονοχρωματικού φωτός χρησιμοποιείται Laser He - Ne ή Ar που εκπέμπουν χαρακτηριστικό κόκκινο ή πράσινο φως αντίστοιχα με μήκος κύματος περίπου 633 ή 520 nm. Η συσκευή Laser τροφοδοτείται από ειδική μονάδα τροφοδοσίας με κατάλληλο ομοαξονικό καλώδιο.

Για την ασφάλεια των ασκουμένων προσοχή στα εξής :

1. Μην επεμβαίνετε καθόλου στη διάταξη του Laser. Για κάθε πιθανή ανωμαλία που διαπιστώνετε απευθυνθείτε άμεσα στο προσωπικό του εργαστηρίου.
2. Απαγορεύεται αυστηρά η έκθεση του οφθαλμού στην οπτική διαδρομή της δέσμης Laser είτε απ' ευθείας είτε μέσω ανακλάσεων.

Για να μεταβάλλετε επιλεκτικά την γωνία πρόσπτωσης ξεσφίγγετε λιγάκι τον κοχλία K που στηρίζει οριζόντια τον γωνιομετρικό κύκλο με το διαφανές ημικυλινδρικό αντικείμενο χωρίς να πειραχθεί καθόλου η συσκευή Laser.

Η θέση της ακτίνας που προσπίπτει στο ημικυλινδρικό αντικείμενο όπως άλλωστε και η τελικά εξερχόμενη διαβάζονται εύκολα επάνω στον γωνιομετρικό κύκλο στην περιφέρεια του οποίου υπάρχει η κατάλληλη χάραξη με ακρίβεια μοίρας.

4. Εργασίες

1. Τοποθείστε οριζόντια την επίπεδη, γωνιομετρική τράπεζα και στο κέντρο αυτής το διαφανές ημικυλινδρικό αντικείμενο (σχήμα 5) ώστε η μονοχρωματική δέσμη φωτός να προσπίπτει πρώτα στην επίπεδη επιφάνειά του όπου και εκτρέπεται.

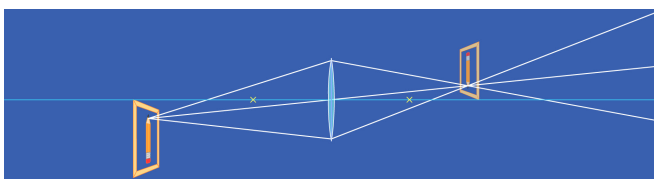
2. Τίθεται σε λειτουργία η συσκευή της μονοχρωματικής δέσμης την οποία και κατευθύνετε (με προσοχή) προς το κέντρο του γωνιομετρικού κύκλου.

Δοκιμάζετε να ανακαλύψετε την οριζόντια πορεία της δέσμης παρεμβάλλοντας κατακόρυφο πέτασμα και παρατηρώντας το έντονο μικροσκοπικό ίχνος της.

3. Μεταβάλλετε την γωνία πρόσπτωσης α περιστρέφοντας ομαλά την γωνιομετρική τράπεζα από 10° έως και 70° . Το βήμα της μεταβολής να είναι οι 10° . Κάθε φορά παρατηρείται η εξερχόμενη δέσμη και έτσι καταμετράτε σχολαστικά την διαθλώμενη γωνία δ . Συμπληρώνετε τον πίνακα 1 που ακολουθεί.



Σχήμα 5. Διαφανές ημικυλινδρικό αντικείμενο.



Πίνακας 1

a/a	α	δ	$\eta_{μα}$	$\eta_{μδ}$
1	10°			
2	20°			
3	30°			
4	40°			
5	50°			
6	60°			
7	70°			

4. Δημιουργείτε την γραφική παράσταση Βρίσκονται τα πειραματικά σημεία σε ευθεία διάταξη; Επιβεβαιώνεται ή όχι ο νόμος του Snell;
5. Χαράσσεται η καλύτερη δυνατή πειραματική ευθεία και από την κλίση της υπολογίζεται ο δείκτης διάθλασης n του διαφανούς υλικού.
6. Τοποθετείτε οριζόντια την επίπεδη, γωνιομετρική τράπεζα και στο κέντρο αυτής το διαφανές ημικυλινδρικό αντικείμενο ώστε η μονοχρωματική δέσμη φωτός να προσπίπτει πρώτα στην κυλινδρική του επιφάνεια. Είναι προφανές ότι σε κάθε περιστροφή η δέσμη δεν εκτρέπεται κατά την είσοδο αλλά μόνο κατά την έξοδο της από την επίπεδη επιφάνεια του αντικειμένου.
7. Τίθεται σε λειτουργία η συσκευή της μονοχρωματικής δέσμης την οποία και κατευθύνετε (με προσοχή) προς το κέντρο του γωνιομετρικού κύκλου. Δοκιμάζετε να ανακαλύψετε την οριζόντια πορεία της δέσμης παρεμβάλλοντας κατακόρυφο πέτασμα και παρατηρώντας το έντονο μικροσκοπικό ίχνος της.
8. Μεταβάλλετε την γωνία πρόσπτωσης α περιστρέφοντας ομαλά και με συνεχή τρόπο την γωνιομετρική τράπεζα έως ότου δεν παρατηρείται το φαινόμενο της ανάδυσης. Στην θέση αυτή σταματάτε την περιστροφή και μετράτε επακριβώς την γωνία πρόσπτωσης. Πρόκειται για την περίπτωση όπου η εξερχόμενη δέσμη εφάπτεται της επίπεδης πίσω επιφάνειας. Η τιμή της γωνίας α ακριβώς στην θέση αυτή είναι η ζητούμενη ορική
9. Από την τιμή της υπολογίζεται ο δείκτης διάθλασης n σύμφωνα με την σχέση:

—

Επαναλαμβάνετε σχολαστικά την προηγούμενη διαδικασία για ακόμη έξι (6) ανεξάρτητες φορές.

10. Συμπληρώνετε τον πίνακα 2 που ακολουθεί καταλήγοντας στην εύρεση της μέσης τιμής του άγνωστου δείκτη διάθλασης.

Πίνακας 2

i	$\eta_{μ}$	Δn	
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

11. Δίνεται η μέση τιμή του δείκτη διάθλασης με το τυπικό σφάλμα: