

## אופטיקה גיאומטרית

### מילות מפתח:

קרן אור, שבירה, החזרה, מקדם שבירה, מנסרה, קיטוב, חוק ברוסטר, עדשה מרכזת, עדשה מפזרת, מוקד העדשה, דיופטר.

**ציוד הדגוש:** עדשות שונות (מרכזות ומפזרות), מנורת ליבון, שקופית, מסך, סרגל אופטי, סרגל 1 מ', ספקטרומטר פריזמה, פילטר אדום, פריזמה, מקטב, גוף פרספקס למדידת שבירת קרני האור.

### מטרות הניסוי:

- להכיר מושגים באופטיקה גיאומטרית.
- למדוד את מקדם השבירה של תווך באמצעות: חוק סנל, חוק ברוסטר, זווית הסחה מינימאלית של מנסרה.
- למדוד את מרחק מוקד של עדשות מרכזות ומפזרות.

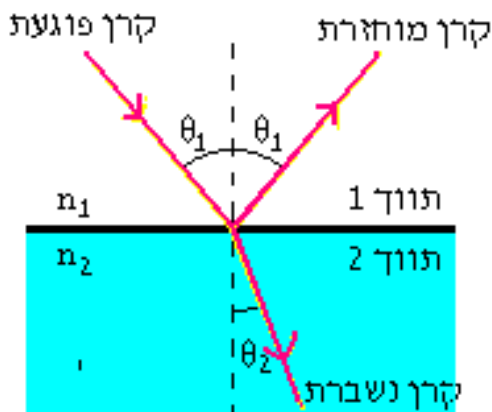
### 1. תיאוריה

במסגרת האופטיקה הגיאומטרית מתייחסים לאור כאל קרניים הנעים בקווים ישרים. כאשר קרן האור מתקדמת בתווך אחיד, מהירות האור קבועה והקרן נעה בקו ישר, מהירות האור בריק היא קבועה ומסומנת ע"י  $c$  ( $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$ ). בכל תווך אחר מהירות התקדמות קרן האור היא  $V=c/n$  כאשר  $n$  נקרא מקדם השבירה של התווך (index of refraction). עבור ריק  $n=1$  ולכל תווך אחר  $n>1$ .

לדוגמא: מקדם השבירה של זכוכית  $n=1.5$ , מקדם השבירה של פרספקס  $n=1.4914$

#### 1.1 חוק סנל

כאשר קרן אור מתקדמת בתווך 1 (המאופיין ע"י  $n_1$ ) ומגיעה למשטח המפריד בין תווך 1 לתווך 2 (המאופיין ע"י  $n_2$ ), הקרן מוחזרת בחלקה ובחלקה נשברת ועוברת לתווך 2. ראו איור 1.



איור 1: חוק סנל.

## -אופטיקה גיאומטרית-

חוק סנל קובע את הקשרים הבאים :

הקרן הפוגעת, הקרן המוחזרת, הקרן הנשברת והאנך למשטח בנקודת הפגיעה נמצאים כולם במישור אחד, זהו מישור הדרך באיור 1.

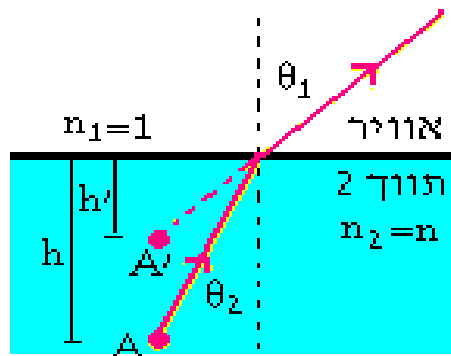
זווית הפגיעה שווה לזווית ההחזרה (הזוויות נמדדות בין הקרן לאנך למשטח בנקודת הפגיעה).

זווית השבירה וזווית הפגיעה מקיימות את הקשר הבא הידוע בשם חוק סנל :

$$(1) \quad n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

ממשוואה (1) ברור שכאשר קרן האור עוברת מתווך אחד לתווך צפוף יותר (מקדם שבירה גדול יותר), זווית השבירה קטנה מזווית הפגיעה, ולהיפך.

לדוגמא, באיור 2 מתואר עצם (מקור אור) נקודתי המונח בנקודה A בתווך צפוף במרחק h מפני התווך. המסתכל על העצם מבחוץ יראה את דמותו בנקודה A' במרחק h' מפתח התווך. כלומר קרוב יותר.



איור 2 : עצם בתווך צפוף, הדמות נראית קרובה יותר

עבור זוויות קטנות ניתן לרשום  $\sin \theta = \tan \theta$ , ולכן

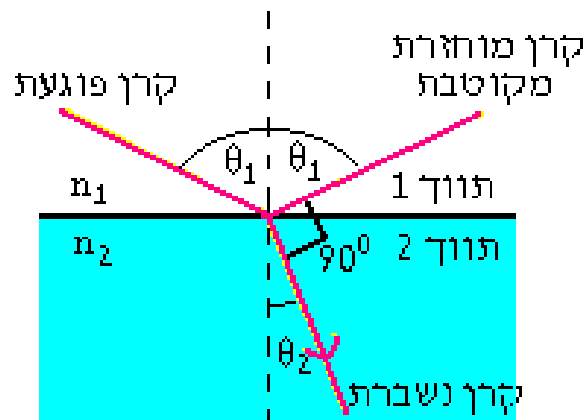
$$(2) \quad n = \frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{\tan(\theta_1)}{\tan(\theta_2)} = \frac{h}{h'}$$

### 1.2 חוק ברוסטר

למעשה, קרן האור היא גל אלקטרומגנטי, הגל מתקדם בכיוון הקרן כאשר וקטור השדה החשמלי (והמגנטי) מונח במישור הניצב לכיוון התקדמות הקרן. בדרך כלל קרן אור מורכבת ממספר גלים המתקדמים באותו כיוון אך לכל אחד מהם השדה החשמלי בכיוון אחר (בתוך המישור הניצב לקרן). כאשר הקרן מכילה רק גלים בהם

השדה החשמלי באותו כוון, אנו אומרים שהקרן מקוטבת. ניתן לזהות קרן מקוטבת באמצעות מסנן הנקרא מקטב, המקטב חוסם מעבר של גלים שבהם השדה החשמלי מכוון בכוון מסוים, ומעביר גלים בהם השדה החשמלי מכוון בכוון ניצב. כאשר מסתכלים על קרן מקוטבת דרך מקטב ומסובבים את המקטב ניתן להגיע למצב של חושך מוחלט.

חוק ברוסטר מתייחס למצב שבו קרן מוחזרת מתווך צפוף והזווית בין הקרן המוחזרת לקרן הנשברת היא זווית ישרה. כמתואר באיור 3.



איור 3: הזווית בין הקרן המוחזרת לנשברת היא זווית ישרה.

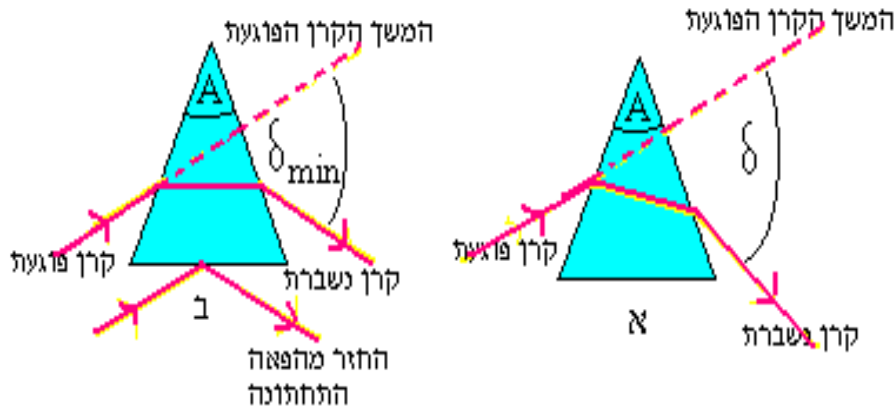
חוק ברוסטר קובע כי במצב זה הקרן המוחזרת מקוטבת באופן מלא כך שוקטור השדה החשמלי ניצב למישור הפגיעה (מישור הדף באיור 3). במצב זה מתקיים  $\theta_1 + \theta_2 = \pi/2$ , כלומר  $\sin \theta_2 = \cos \theta_1$ . ולכן עפ"י חוק סנל (1) נקבל

$$(3) \quad n = \frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \tan(\theta_1)$$

זווית פגיעה המקיימת את משוואה (3) נקראת זווית ברוסטר.

### 1.3 זווית הסחה מינימלית של מנסרה

באיור 4 א מתוארת קרן הפוגעת במנסרה משולשת. הקרן נשברת פעמיים, פעם אחת בכניסה למנסרה ופעם אחת ביציאה. לאחר המעבר במנסרה הקרן היוצאת מוסחת יחסית להמשך הקרן הפוגעת בזווית  $\delta$  הנקראת זווית ההסחה.



איור 4 : א. קרן עוברת דרך מנסרה משולשת ומוסחת בזווית  $\delta$ .  
 ב. הקרן במצב של הסחה מינימלית.

ניתן להראות שישנו מצב של הסחה מינימלית, במצב זה מעבר הקרן דרך המנסרה הוא סימטרי ומתקיים הקשר הבא

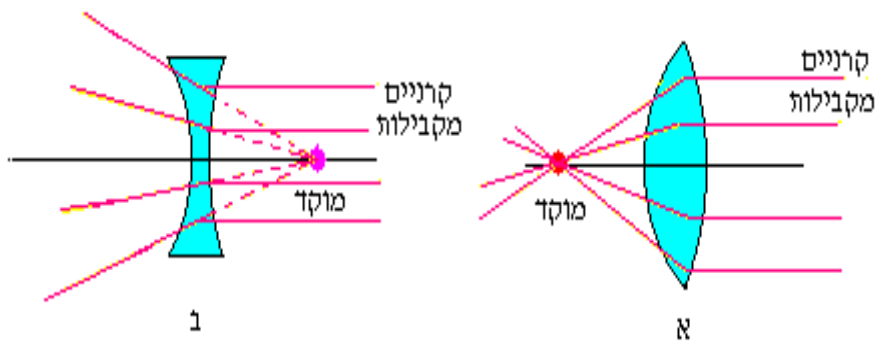
$$(4) \quad \sin\left(\frac{\delta_{\min} + A}{2}\right) = n \cdot \sin\left(\frac{A}{2}\right)$$

במידה והמנסרה שוות שוקיים, דמות הקרן השבורה מתלכדת עם הדמות המוחזרת מהפאה התחתונה של המנסרה, ראו איור 4 ב.

#### **1.4 עדשות**

עדשה היא תווך שקוף המוגבל ע"י שני משטחים עקומים (בדרך כלל כדוריים או גליליים). עדשה מרכזת עשויה כך שאלומת קרניים מקבילות העוברות דרך העדשה מתכנסת לנקודה אחת (ראה איור 5 א), נקודה זאת קרויה מוקד העדשה. מרחק המוקד מהעדשה מסומן ב  $f$ . העדשה היא סימטרית, כלומר, משני צידיה נמצאים מוקדים במרחק  $f$  מהמרכז האופטי.

-אופטיקה גיאומטרית-



איור 5: א. עדשה מרכזת. ב. עדשה מפזרת.

עדשה מפזרת עשויה כך שאלומת קרניים מקבילות העוברת דרך העדשה מתפזרת כך שנראה כאילו כל הקרניים יוצאים מנקודה אחת בה נמצא המוקד. בעדשה מפזרת המוקד נמצא בצד ההפוך מהמוקד של עדשה מרכזת ולכן מרחק המוקד ממרכז העדשה הינו שלילי. ראו איור 5 ב.

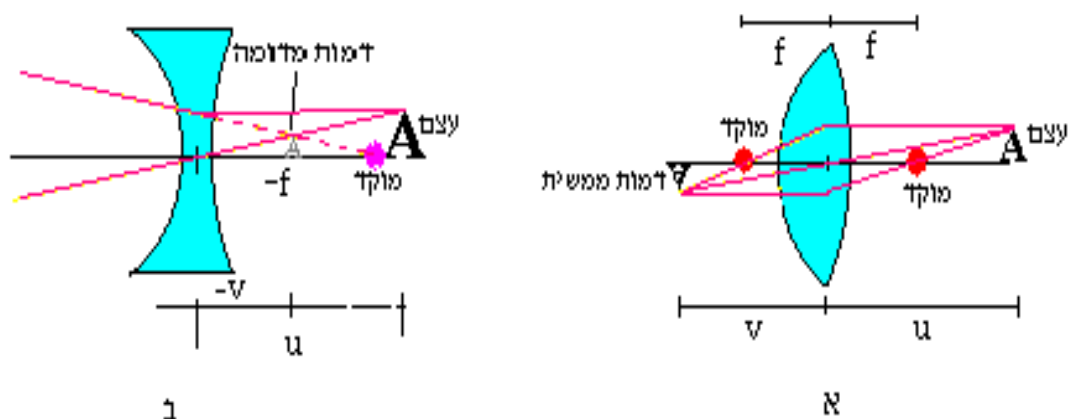
כאשר עצם נמצא במרחק  $u$  מהעדשה, דמותו מתקבלת במרחק  $v$  ממנה. כללי הבנייה הגיאומטרית של הדמות הם:

- קרן העוברת דרך המרכז האופטי אינה נשברת.
  - כאשר הקרן הפוגעת מקבילה לציר האופטי של העדשה, הקרן עוברת דרך המוקד.
  - כאשר הקרן הפוגעת עוברת דרך המוקד, הקרן העוברת מקבילה לציר האופטי של העדשה.
- מוסכמת הסימנים היא:

- עבור עדשה מרכזת  $f$  חיובי, עבור עדשה מפזרת  $f$  שלילי.
- כאשר הקרניים הפוגעות יוצאות מנקודה אחת, העצם ממשי ולכן  $u$  חיובי. כאשר הקרניים הפוגעות מתכנסות לנקודה בהמשך התקדמותן העצם מדומה,  $u$  שלילי.
- כאשר הקרניים היוצאות מתכנסות לנקודה אחת, הדמות ממשית ולכן  $v$  חיובי. כאשר הקרניים היוצאות מתפזרות כאילו יצאו מנקודה אחת הדמות מדומה,  $v$  שלילי.

לדוגמא ראו איור 6

-אופטיקה גיאומטרית-



איור 6: א. עדשה מרכזת הדמות ממשית. ב. עדשה מפזרת הדמות מדומה.

עבור עדשות דקות ניתן להוכיח את הקשר הבא אשר תקף לשני סוגי העדשות בהתאם למוסכמת הסימנים.

$$(5) \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$$

כמוכן, כאשר מצמידים שתי עדשות דקות בעלות מרחק מוקד  $f_1$ ,  $f_2$  מתקבלת עדשה "שקולה" בעלת מרחק מוקד  $f$ .

$$(6) \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

הגודל  $1/f$  נקרא הדיופטר של העדשה כאשר  $f$  נמדד במטרים. את הסימולציה של העדשות ניתן לראות באתר:

[http://phet.colorado.edu/sims/geometric-optics/geometric-optics\\_en.html](http://phet.colorado.edu/sims/geometric-optics/geometric-optics_en.html)

**1.5 עבודת הכנה**

1. במדידת זווית ברוסטר התקבלה התוצאה  $\theta = 60^\circ \pm 1^\circ$ . חישובו את מקדם השבירה והשגיאה.
2. הציעו דרך למדידת מרחק מוקד של עדשה מפזרת.
3. הסבירו כיצד תשתמשו בעדשה מרכזת כזכוכית מגדלת.
4. סטודנט ביצע מספר מדידות למציאת מרחק עצם ומרחק דמות בעדשה מרכזת. בכל פעם שינה את מרחק העצם ומצא את מרחק הדמות. לבסוף חישב את מרחק

## -אופטיקה גיאומטרית-

העצם הממוצע ואת מרחק הדמות הממוצע ובאמצעותם חישב את מרחק המוקד. הסבירו מהי טעותו.

5. חישבו בעזרת נוסחה 4 את מקדם השבירה  $n$  עבור  $\delta_{\min} = 60^\circ \pm 1^\circ$  זווית ראש

$A = 60^\circ$ . מהי השגיאה  $\Delta n$ ?

ב. מהי תהיה השגיאה  $\Delta n$  אם נתון שגם במדידת זווית הראש ישנה שגיאה

$A = 60^\circ \pm 1^\circ$ ? (שימו לב ליחידות! עבור השגיאות יש להמיר מעלות לרדיאנים).

6. נתון:  $u = 6\text{cm}$ ,  $f_1 = 150\text{mm}$ , כאשר  $f_1$  עדשה דקה.

מהו המרחק  $v$  של הדמות מהמרכז האופטי?

כעת מצמידים עוד עדשה דקה  $f_2 = 50\text{mm}$  לעדשה  $f_1$ . מהו המרחק  $v$  של הדמות

מהמרכז האופטי?

ב. מה היה קורה אילו  $f_2 = -50\text{mm}$ ?

7. קרן אור הנעה באוויר פוגעת בשמן ( $n=1.6$ ), אם נתונה זווית הפגיעה כ-  $\theta = 30^\circ$ ,

מה תהיה זווית השבירה?

ב. אם מודדים זווית פגיעה של  $45^\circ$  עבור קרן שנעה בשמן ועוברת לאוויר, מה

צריכה להיות זווית השבירה? מה יקרה לקרן?

8. הסבירו מהו המקטב ומהו אופן פעולתו.

## 2. המדידות בניסוי

### 2.1 מדידת מקדם שבירה של זכוכית

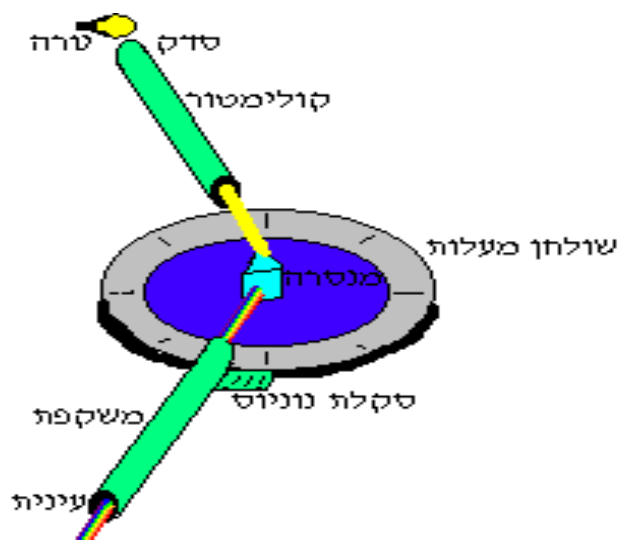
על מנת למדוד את מקדם השבירה של זכוכית נשתמש בשתי שיטות: באמצעות זווית הסחה מינימלית של מנסרה ובאמצעות חוק ברוסטר.

המדידות נעשות על שולחן מסתובב ועליו מד מעלות. לשולחן מחובר קולימטור עם סדק, הסדק נמצא במישור המוקד של עדשת הקולימטור (מרכזת) ולכן כאשר מאירים את הסדק יוצאת מהקולימטור אלומה של קרניים מקבילות. בנוסף מחוברת לשולחן משקפת אשר ניתן לסובבה סביב השולחן ובאמצעותה צופים באלומת האור. למשקפת מחוברת סקלת נוניוס המאפשרת קריאה מדויקת של הזווית. מערכת המדידה מתוארת באיור 7.

המדידה נעשית כאשר המנסרה המונחת במרכז השולחן מובאת למצב של הסחה מינימלית, במצב זה ניתן לזהות את דמות הסדק המוחזרת מהפאה התחתונה מתלכדת עם דמות הסדק הנשברת דרך המנסרה. נמדוד את זווית ההסחה

המינימלית ונשתמש במשוואה (4) לחישוב מקדם השבירה. יש לשים לב לכך שלמעשה מקדם השבירה שונה עבור צבעים שונים, ובמעבר דרך המנסרה ישנה נפיצה של האור לצבעים. על מנת לדייק במדידה, נשתמש במסנן אדום ונבצע את המדידה עבור הצבע האדום בלבד.

למדידת זווית ברוסטר נרכיב מקטב על עינית המשקפת ונגיע למצב שבו האור המוחזר מהפאה התחתונה מקוטב לחלוטין. נשתמש במשוואה (3) לחישוב מקדם השבירה.



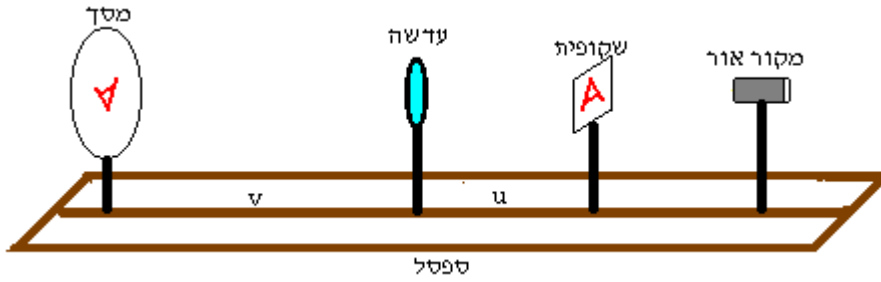
איור 7: שולחן מסתובב המשמש למדידת זוויות שבירה של אור.

## 2.2 מדידת מרחק מוקד של עדשות

למדידת מרחק מוקד של עדשות נשתמש בספסל אופטי, בתור עצם נשתמש בשקופית מוארת ואת הדמות הממשית נראה על מסך. המערכת מתוארת באיור 8. את המרכיבים השונים ניתן להסיע על גבי הספסל וכך להגיע למצב שבו הדמות נראית ברורה על המסך. ממדידת מרחק העצם  $u$  ומרחק הדמות  $v$  נוכל לחשב את מרחק המוקד  $f$  ע"י משוואה (5). ע"י הצבת שתי עדשות צמודות נבחן גם את נוסחה (6).



## -אופטיקה גיאומטרית-



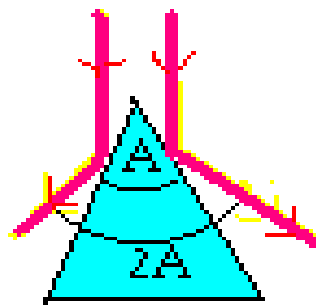
איור 8 : ספסל אופטי.

### 3. הנחיות ביצוע

#### 3.1 מדידת מקדם שבירה של זכוכית

##### א. הכנת המערכת:

- הדליקו את הנורה, כווננו את המשקפת אל מול הקולימטור, כווננו את העינית עד שתראו דמות ברורה של סדק הקולימטור. סובבו את השולחן כך שבמצב זה הקריאה תהיה אפס.
- **הערה:** בררו עם המדריך אם יש צורך למדוד את זווית הראש של הפריזמה. המידה ולא קבל את ערכה מהמדריך ועברו לסעיף הבא. למדידת זווית הראש של המנסרה: הרחיבו את הסדק והניחו את המנסרה כך שקודקוד המנסרה יהיה במרכז השולחן ואלומת האור תפגע בשתי הפאות. תמדדו את הזווית בין שתי הקרניים הנשברות, זווית זו כפולה מזווית הראש של המנסרה. ראו איור 9.



איור 9 : מדידת זווית הראש של מנסרה.

**הערה:** זווית הראש בניסוי שלנו הינה:  $60^\circ$

**ב. מדידת זווית ההסחה המינימלית:**

- ❖ **סרטון** המציג את מהלך הניסוי למציאת זווית הסחה מינימלית.
- ❖ **כיוול המערכת**: הצרו את הסדק ככל האפשר. מקמו את המשקפת מול הקולימטור (ללא מנסרה), כך שהאור היוצא מהמנורה יעבור דרך הקולימטור והמשקפת בקו ישר. כווננו את הסקלה של מד הזווית ל-0 מעלות.
- הניחו את המנסרה על הבמה המסתובבת ודאגו שקרן האור תעבור דרך המנסרה.
- ניתן לראות דרך המשקפת את ספקטרום הצבעים הכולל את כל צבעי הקשת. הערה: האור שעובר דרך המנסרה, יוצא בעוצמה גבוהה, לכן בכדי למנוע סנוור, תחילה צפו בספקטרום המתקבל על הקיר או דף נייר.
- כעת סובבו את המנסרה באיטיות תוך עקיבה אחר קרן האור המוסחת עד למצב של הסחה מינימלית. במצב זה הספקטרום הולך ומצטמצם עד שדמות הספקטרום נעצרת ומשנה כיוון. כעת הקרניים שעוברות דרך המנסרה מוסחות בזווית הקטנה ביותר והזווית נקראת זווית הסחה מינימלית.
- הזיזו את המשקפת לזווית זו והביטו לתוכה (למניעת סנוור היעזר בפילטר אדום), ברגע שתראו במשקפת את הספקטרום ודמות הסדק מתלכדים, תמדדו את זווית ההסחה והעריכו את השגיאה.
- ניתן לראות את מהלך הקרניים באיור 10:

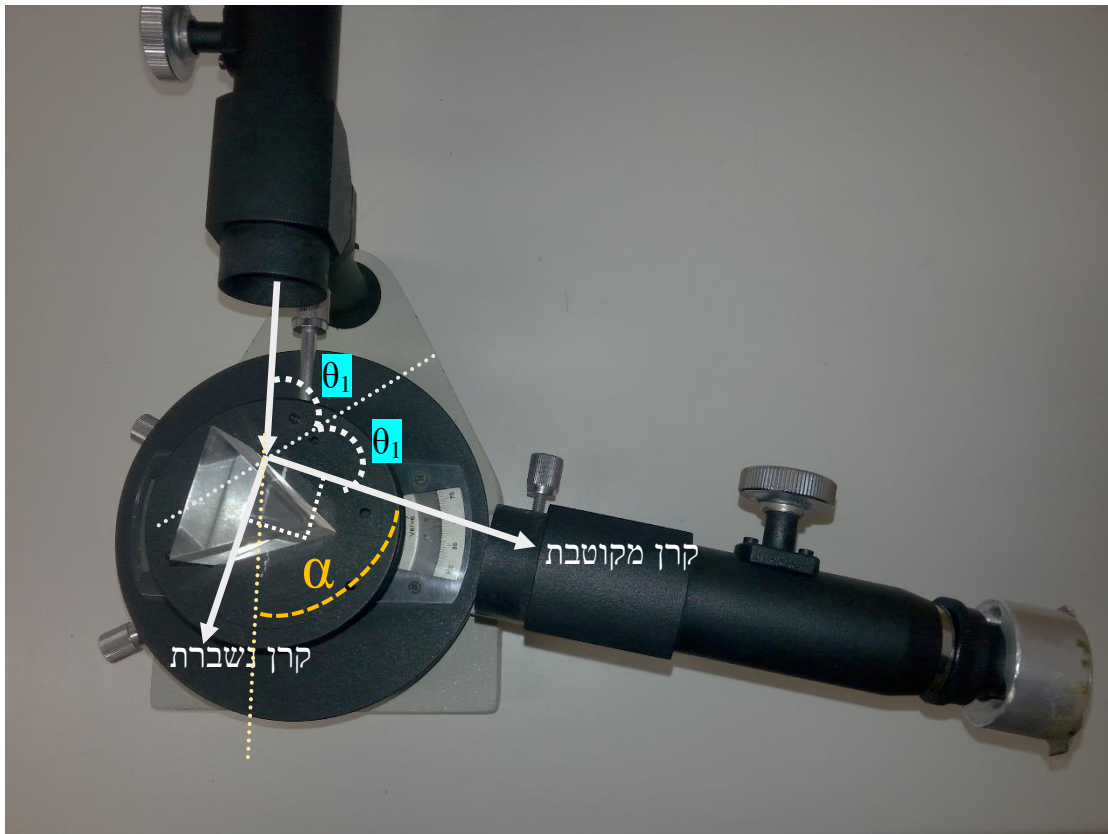


**איור 10**: מהלך הקרניים בזווית הסחה מינימלית.

- חישבו בעזרת משוואה (4) את מקדם השבירה ואת השגיאה.

ג. זווית ברוסטר ויצירת קרן אור מקוטבת ע"י החזרה.

- ❖ **סרטון** המציג את מהלך הניסוי.
- ❖ **כיוול המערכת**: הצרו את הסדק ככל האפשר. מקמו את המשקפת מול הקולימטור (ללא מנסרה), כך שהאור היוצא מהמנורה יעבור דרך הקולימטור והמשקפת בקו ישר. כוונו את הסקלה של מד הזווית ל-0 מעלות.
- ❖ בחלק זה של הניסוי ניצור קרן אור מקוטבת ע"י החזרה ממשטח זכוכית:
  - הניחו את המנסרה על הבמה המסתובבת, דאגו שקרן האור תפגע **בדופן** המנסרה ותוחזר ממנה (ראה איור 11).
  - **הערה**: ידוע שמקדם השבירה של זכוכית הוא  $n \approx 1.5$ . ניתן לחשב את זווית ברוסטר  $\theta_1$  בעזרת משוואה 3 ( $n = \tan \theta_1 \Rightarrow \theta_1 = 56.3^\circ$ ).
  - זווית הזזת המשקפת ממצב הכיוול למצב, בו הקרן הנכנסת למשקפת מקוטבת מחושבת באופן הבא:  $\alpha = 180 - 2\theta_1$ . **הסבירו מדוע**.

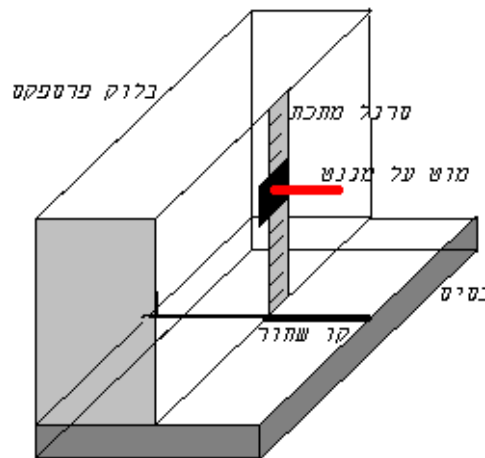


- איור 11**: מהלך הקרניים בניסוי מדידת זווית ברוסטר (החצים מייצגים את קרני האור)
- הזיזו את המשקפת בזווית  $\alpha = 67.4^\circ$  ממצב, בו המערכת מכוילת ל-0 מעלות.

- כווננו את הקרן שמוחזרת מדופן המנסרה אל תוך המשקפת ע"י סיבוב הבמה המסתובבת יחד עם המנסרה, כפי שמתואר באיור 11.
- ברגע שהקרן עוברת דרך המשקפת ניתן לראות את הדמות המוגדלת של הסדק/חריץ על הקיר או על דף נייר הניצב מול העינית.
- **הערה:** העין האנושית לא מסוגלת להבדיל בין אור מקוטב ללא מקוטב, לכן נשתמש במקטב, כדי לבדוק האם האור שעובר דרך המשקפת באמת מקוטב.
- הרכיבו את המקטב על עינית של המשקפת וסובבו את המקטב סיבוב שלם. התבוננו בדמות החריץ על הקיר או על דף נייר. במצב, בו על ידי סיבוב המקטב ניתן לראות/לא-לראות את דמות החריץ הקרן מקוטבת לחלוטין.
- **כיצד ניתן להשתמש בחוק ברוסטר למדידת מקדם השבירה של חומר שקוף לא ידוע? (יש לתת תשובה מפורטת בדו"ח)**

### 3.2 מדידת מקדם שבירה של פרספקס

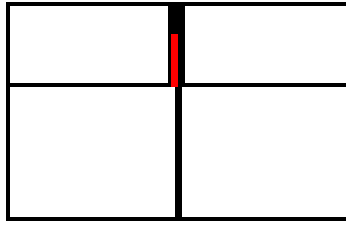
נתון לך בלוק העשוי פרספקס אשר בתחתיתו מצויר קו שחור ועל פאתו הצדדית מודבק סרגל. כמתואר באיור 12.



איור 12 : בלוק פרספקס

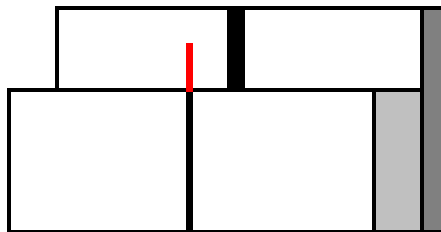
- על הסרגל המתכת ניתן להצמיד מוט אופקי באמצעות סרט הדבקה. בניסוי זה נמדוד את הגובה המדומה בו נראית הדמות של הקו השחור כאשר מסתכלים דרך הבלוק במבט על.
- התבוננו בבלוק במבט על כך שתוכל לראות את המשך הקו השחור מתלכד עם דמותו בתוך הבלוק. הצמידו את המוט דק לסרגל בחלקו העליון של הבלוק מעל הקו השחור (איור 13).

-אופטיקה גיאומטרית-



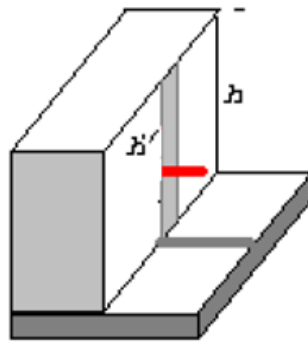
איור 13 : מבט על - הקו, הדמות והמוט מתלכדים

- הסיטו מעט את ראשכם כך שדמות הקו השחור תוסט מהמשך הקו. הזיזו את המוט כלפי מטה עד אשר יתלכד עם דמות הקו (איור 14).



איור 14 : מבט על בזווית קטנה - המוט נמצא בהמשך הדמות.

- קראו מהסרגל את מיקום הדמות  $h'$  ואת גובה הבלוק  $h$  (איור 15), תשתמשו במשוואה (2) לחישוב מקדם השבירה של פרספקס.



איור 15 : מיקום הדמות  $h'$  גובה הבלוק  $h$

**3.3 מדידת מרחק מוקד של עדשות**

- הרכיבו את הספסל האופטי כמתואר באיור 8, שימו עדשה מרכזת וכוונו את המרחקים לקבלת תמונה ברורה על המסך.
- תמדדו את מרחק העצם ומרחק הדמות באמצעות סרגל, הערכו את השגיאה במדידות. חישבו את מרחק המוקד בעזרת משוואה (5).
- חזרו על המדידות עבור כל העדשות המרכזות הנתונות.
- הרכיבו שתי עדשות מרכזות ותמדדו את מרחק המוקד המשותף, וודאו את הקשר המופיע במשוואה (6).
- תמדדו את מרחק המוקד של העדשה המפזרת לפי השיטה של הצמדת עדשה מרכזת מספיק חזקה אל העדשה המפזרת ומדידת המוקד המשותף.