

## חוק סנל בלי "סינוסים"

מאת: שלמה גובר ז"ל  
בית-ספר תיכון מקיף, קרית-חיים

במאמר זה ברצוני להתייחס לבעיה מתודית הקשורה בהוראת חוק שבירת האור של סנל לתלמיד כיתות יוד בבתי-ספר תיכוניים.

תחילה אשתדל לסקור בקצרה את הגישה המקובלת לפי תכניות הלימוד של קבוצת רחובות ושל PSSC. לימוד הנושא מתחיל מהדגמת שבירת האור בעברו מתוך שקוף אחד למשנהו והגדרת המושגים קרו פוגעת, קרן נשברת, זווית פגיעה, זווית שבירה וכו'. הדגמות אלה הן בעלות אופי איכותי בלבד ובסיכומן התלמידים מגיעים להבנת החוק הראשון של שבירת האור (הקרן הפוגעת, הקרן הנשברת ואנך הפגיעה מונחים במישור אחד). כמובן, כבר בשלב זה, התלמידים נוכחים לדעת, שזווית השבירה אינה שווה לזווית הפגיעה, ז.א. שהקרן הנשברת עשויה להתקרב לאנך הפגיעה או להתרחק ממנו, ועובדה זו נקבעת על ידי מקדם השבירה היחסי של החומרים.

ברור שאבחנה איכותית זו אינה מספיקה ועוברים למציאת קשר פונקציונלי בין זווית הפגיעה לבין זווית השבירה המתאימות. באמצעות הציוד המקובל (מנסרות חצי-עגולות, מלאות וחלולות, לוח אופטי, פנס מתאים וסיכות) אנו מציעים לתלמידינו למדוד את זווית הפגיעה ואת זווית השבירה המתאימות להן; וע"י סרטוט גרפים לנסות ולמצוא את התלות הפונקציונלית ביניהן. חשוב מאוד להדגיש, שמדידת הזוויות בכל הניסויים הללו מתבצעת על נייר פולרי (נייר בצורת מלבן או דיסקה, שחולק למעלות).

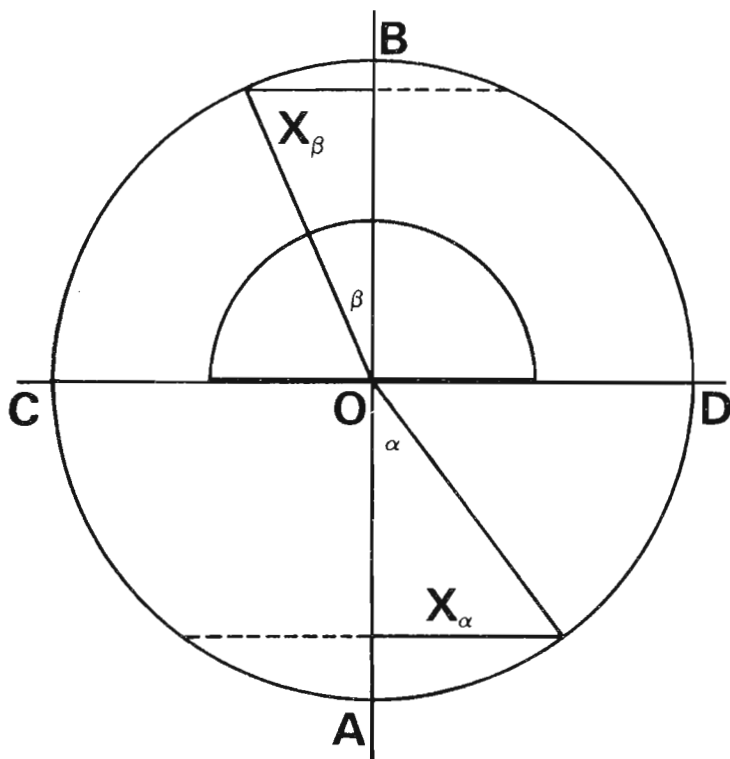
תלמידינו מבצעים מדידות אלה בלי קושי, ונהנים מעצם ביצוע העבודה, אולם בסיימה נוחלים אכזבה, כי מתברר להם שבעצם לא מצאו כל קשר פשוט בין זווית השבירה לבין זווית הפגיעה. ברגע זה של "משבר" ניתן להמשיך במספר דרכים.

אחת הדרכים היא להציע לתלמידים את חוק סנל בצורה המקובלת ברוב ספרי הלימוד, והכוונה למשפט המנוסח באמצעות יחס הסינוסים של זווית הפגיעה ושל זווית השבירה. יוצא מכאן, שלשם הבנת החוק נדרשת מתלמידי כיתות יוד ידיעת מושג הפונקציה הטריגונומטרית, או לפחות, של סינוס הזווית. היות שברוב בתי הספר התיכוניים, עדיין חסרות לתלמידי כיתות יוד ידיעות אלה, חייבים המורים לפסיקה (במסגרת השעורים במקצוע זה) להדריך את תלמידיהם במושגי היסוד של הטריגונומטריה (במשולש-ישר זווית) ובשימוש בלוח הסינוסים.

קיימת גם דרך אחרת, המעודדת את התלמידים, שלא הצליחו להגיע בכוחות עצמם לחוק שבירת האור, לנצל את "כשלונם" לצורך חישול "רוח המחקר" שלהם.

על התלמידים לדעת, שגם עבודות מחקר, שהוכתרו בהצלחה, היו מלוות כשלונות אין ספור ורק הודות לעקשנותם הרבה ואמונתם של החוקרים הן זכו לסיום מוצלח. פה המקום להזכיר את הפרטים הקטנים או הקשיים הגדולים, שערכו במשך שנים רבות את פרסומם של חוקי קפלר, חוק הגרביטציה של ניוטון, חוק ההשראה האלקטרומגנטית של פרדאי ועוד\*.

בכל המקרים האלה, הקשיים לא הירפו את ידי העוסקים בדבר. הם המשיכו תוך כדי שיפור או שינוי בשיטה ובאמצעים. וכך, אנו מציעים לתלמידים להמשיך במאמצייהם למצוא את חוקי שבירת האור, מתוך וויתור על השימוש בנייר פולרי למדידת זוויות. במקום זאת על התלמידים לחזור על הניסויים באמצעות קופסאות חצי-עגולות מזכוכית או פרספקס חלולות, מלאות מים או נוזל שקוף אחר. הפעם, אין צורך בפנס כמקור אור. להיפך, רצוי לערוך את הניסויים לאור היום ולהיעזר בסיכות (רצוי בעלות ראש צבעוני). הנייר הפולרי מוחלף בגליון נייר משובץ בגודל של 20 ס"מ x 30 ס"מ. על כל גליון מעבירים דרך נקודת האמצע שני ישרים מאונכים זה לזה. קוו הרוחב ישמש קו-גבול בין התווכים וקוו האורך כאנך אמצעי לקו-הגבול. לבסוף, חגים מנקודת החיתוך של הישרים במרכז, מעגל ברדיוס של 10 ס"מ.



תרשים 1: מציאת חוק השבירה על-פי יחס חצאי מיתרים.

\*ראה: פרופ' אריק מנדוזה - ניסויים והסבריהם. גליונות כרך 3, חוברת 1. המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות.

נתאר לדוגמא את מהלך הניסוי העוסק בשבירת אור מאויר לזכוכית או פרספקס. במרכז הנייר מניחים קופסה חצי עגולה העשויה מזכוכית או פרספקס, כך שהדופן השטוח של הקופסה יתלכד עם קו הרוחב, ובמרכז דופן זה (רצוי שיסומן בסריטה אנכית) ימצא מרכז המעגל. על קשת המעגל הפונה אל הדופן השטוח יש לנעוץ סיכה במרחק 3 משבצות מהאנך (ראה תרשים 1). עתה יש להתבונן בעין אחת על הסיכה דרך הקופסה מצד הדופן העגול ולהניע את הראש עד שהסיכה תראה בקוו ראייה אחד עם הסריטה האנכית שעל הדופן השטוח. קוו הראייה יסומן בנעיצת סיכה שניה על קשת המעגל הפונה אל הדופן העגול; יתברר שסיכה זו יש לנעוץ במרחק 2 משבצות מהאנך. חוזרים על הניסוי כאשר הסיכה הראשונה ננעצת במרחקים של 6, 9, 12 משבצות מהאנך ושוב מוצאים את המקומות בהם יש לנעוץ את הסיכה השניה המסמנת את קו הראייה. יתברר שמרחקי הסיכה השניה הם 4, 6, 8 משבצות מהאנך. מתברר לתלמידים שיחס המרחקים הנ"ל בשתי הסדרות של הזוויות הוא מספר קבוע ופשוט. בניסוי, שנערך עם מנסרת הזכוכית, המנה הקבועה היא, כמובן,  $3/2$ .

לאחר שמחליפים מנסרה זו במנסרה חלולה מלאה במים, כדאי לומר לתלמידים להעמיד את סיכת העצם במרחקים של 4, 8, 12 וכו' משבצות מהאנך. כל התלמידים, ללא יוצא מן הכלל, מוצאים את המרחקים המתאימים של סיכת הדמות ומייד לאחר זאת, הם מציעים את היחס הקבוע שערכו כמובן,  $4/3$ . דרך אגב, אין כל הכרח לומר לתלמידים את המרחקים מראש. מרחקים כלשהם בשביל זוויות פגיעה ושבירה יתנו את אותן המנות הקבועות. הכוונה פשוט היתה להימנע משימוש בסרגל לצורך מדידת מרחקים ולהסתמך על קווי המשבצות בלבד.

עכשיו, נשאר לסכם יחד את הגילוי ולנסחו בצורה פשוטה ותמציתית. קל מאוד "לסחוט" מהתלמידים את ההצעה לכנות את המרחקים מהאנך "חצאי-מיתרים" ולנסח את חוק שבירת האור כך: **יחס חצאי-המיתרים של זוויות הפגיעה לאלה של זוויות השבירה הוא גודל קבוע לגבי כל שני תווכים ונקרא בשם מקדם השבירה של התווך בו האור נשבר ביחס לתווך ממנו האור הגיע.** חוק זה ידוע כחוק שבירת האור של סנל: התלמידים "גילו" אותו בכוחות עצמם ולסיפוקם המלא. את נוסחת החוק ניתן לרשום, לדוגמה, בצורה הבאה:

$$n = \frac{x_\alpha}{x_\beta}$$

$x_\alpha$  - חצאי המיתרים של זוויות הפגיעה  
 $x_\beta$  - חצאי המיתרים של זוויות השבירה  
 $n$  - מקדם השבירה

איך לעבוד עם הנוסחה? לפני התלמיד פתוחות שתי אפשרויות:

א. שיטת ההתרה הגרפית. שיטה זו, עד כמה שידוע לי, לא זכתה ברוב בתי-הספר להכרה המגיעה לה וזאת, למרות שהומלצה כאופציה במדריך למורה לפיסיקה, אור וגלים, חלק א', בהוצאת המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע. גם לפי דעתי, שיטה זו ראויה לכל עידוד. הצלחתה של שיטה זו תלויה בתנאי אחד ויחיד והוא, שלכל תלמיד יהיו מד-זווית, סרגל ומחוגה בזמן העבודה בכיתה ובמעבדה. במיוחד גזי סיפוק התלמידים כאשר הם מוצאים בשיטה זו את זוויות הגבול מתוך ידיעת מקדמי השבירה של חומרים שונים. בבניות אלה הם חשים ממש את משמעותה של האופטיקה הגיאומטרית.

ב. התרה ע"י חישוב. לאחר שהתלמידים מצאו בעצמם את חוק שבירת האור וניסחו אותו בעזרת יחס חצאי המיתרים של הזוויות, רושמים את נוסחת החוק מחדש:

$$n = \frac{x_\alpha}{x_\beta} = \frac{\frac{x_\alpha}{R}}{\frac{x_\beta}{R}}$$

היחס שבין מחצית המיתר לרדיוס המעגל נקבע אך ורק על ידי הזווית והוא נקרא בטריגונומטריה בשם סינוס הזווית. לצורך ביצוע חישובים נערך לוח מיוחד, הנקרא לוח הסינוסים. היות ויחס הסינוסים של שתי זוויות שקול כנגד חצאי-המיתרים שלהן, מותר לנו להיעזר בלוח הסינוסים לצורך עריכת חישובים, ולרשום את הנוסחה בצורה הבאה:

$$n = \frac{x_\alpha}{x_\beta} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$$

(אין לפרש, בשום אופן, את ההסבר האחרון כהגנבת סינוס הזווית בדלת האחורית).

## ס פ ר ו ת:

1. פיסיקה, אור וגלים, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות.
2. פיסיקה, אור וגלים, מדריך למורה, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות.
3. פיסיקה, PSSC, כרך ב', אופטיקה וגלים, הוצאת יחדיו.
4. E. Nightingale; Heat, Light and Sound; G. Bell and Sons, Ltd, London.
5. E.D. Hobbs; Discovering Snell's Law, The Physics Teacher, Vol. 16, p.41, 1978.

בעת הבאת חוברת זו לדפוס נפטר שלמה גובר.  
המערכת וציבור מורי הפיסיקה אבלים על מותו  
ללא עת ומשתתפים בצערה של המשפחה