

פינת הפיקוח

בחירת הבגרות בפיזיקה כמכשיר לשיפור ההוראה (ב)

ניתוח שגיאות תלמידים באופטיקה גיאומטרית תוך אפיון דפוסי חשיבה שגויים

דוד סלע, משרד החינוך, ירושלים

מבוא

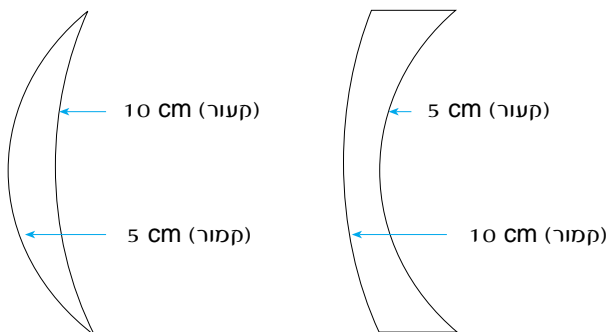
בחוברת הקודמת של "תהודה" (כרך 21 חוברת 2) התייחסנו לשאלת הספקטרומטר שהופיעה בפרק הבחירה באור וגלים בקיץ תש"ס. במאמר זה נתייחס לשאלה באופטיקה גיאומטרית שהופיעה באותו השאלון. פתרון מפורט של השאלה, כולל עיקרי המחווון (דגם התשובות) ומפתח ההערכה הובאו על ידי עדי רוזן בחוברת הקודמת. מומלץ לעיין שם במקביל עם המשך קריאת המאמר. לנוחות הקורא הבאנו כאן שוב את השאלה עצמה. השאלה באופטיקה גיאומטרית נבחרה על ידי מרבית התלמידים (3900 לעומת 600 שבחרו באופטיקה פיזיקלית, הלא היא שאלת הספקטרומטר). מצב זה שכיח במרבית השנים ומצביע על כך כי התלמידים מרגישים את עצמם "בטוחים" להתמודד עם מראות ועדשות יותר מאשר עם תופעות העקיפה וההתאבכות. ייתכן והדבר נובע מהיקף השעות הרחב הניתן לאופטיקה גיאומטרית, החל מכיתה י', ולא תמיד בהצדקה מלאה. מספרן הגדול של השגיאות, הן הכמותיות (בשימוש בנוסחאות) והן האיכותיות (בהבנת תופעות ריכוז ופיזור האור) מצביע על כך שלא תמיד נמצאת קורלציה גבוהה בין מספר השעות המוקדש לנושא לבין דפוסי החשיבה הפיזיקלית הנכונה המוקנים לתלמידים בשעות אלו. על כך נרחיב בהמשך.

פרופיל השגיאות

לכאורה השאלה "שגרתית" אך יש בה כמה מכשולים שגרמו ללא מעט שגיאות. מכשולים אלו יכולים להיות טעויות בהבנה (של המושגים קעורה-קמורה), או טעויות חשיבה (כמו מקום הימצאה של הדמות אצל אדם שאינו רואה מקרוב). היכרות עם מכשולים אלו הנה התנאי המוקדם למציאת דרכים לשיפור הוראת האופטיקה הגיאומטרית כך שפחות שגיאות יבואו לידי ביטוי בעתיד. חשוב גם לציין כי האופטיקה הגיאומטרית נלמדת בדרך כלל כבר בכיתה י' ולכן גם דרכי ההוראה צריכות להתאים לכיתה זו (הן מבחינת הדרישות המתמטיות והן בהתחשב באופייה ההטרוגני של הכיתה בה לומדים גם תלמידים שלא ימשיכו להתמחות בפיזיקה).

פרק ראשון – תורת האור והגלים

1. מציבים עצם לפני עדשת משקפיים במרחק 30cm ממנה. על מסך מתקבלת דמות הפוכה של העצם המוגדלת פי 2.
- א. האם העדשה מרכזת או מפזרת? **נמק.** (5 נקודות)
- ב. (1) חשב את מרחק המוקד של העדשה.
(2) חשב את עוצמת העדשה בדיופטרים. (15 נקודות)
- ג. לעדשת משקפיים זו משטח אחד קמור ומשטח אחד קעור. למשטח אחד רדיוס עקמומיות של 5cm, ולמשטח האחר רדיוס עקמומיות של 10 cm.
(1) איזה משני התרשימים, א או ב, מתאים לעדשת משקפיים זו?



תרשים ב

תרשים א

- (2) חשב את מקדם השבירה של החומר שממנו עשויה העדשה. (15 נקודות)
- ד. עדשה זו היא של משקפיים השייכים לאדם רחוק-רואי. הסבר כיצד עדשה זו מתקנת את ליקוי הראייה של אדם זה. (15 נקודות)

להלן ריכוז השגיאות הנפוצות, כפי שבאו לידי ביטוי בבדיקתן של למעלה מ- 500 מחברות שנבחרו באופן מיקרי.

בסעיף א:

לפעמים השיבו תלמידים כי העדשה מפזרת וזאת מהנימוקים הבאים:

- דמות העצם נראית על מסך
- נוצרת דמות מוגדלת פי שניים מהעצם
- בעדשה מרכזת הדמות ישרה ולא הפוכה
- כאשר נוצרת דמות מוגדלת בעדשה מרכזת זה כתוצאה מהמשכי קרניים ואז הדמות מדומה (או ישרה).

כל התשובות הללו הן נכונות לגבי עדשה מרכזת ולכן אין לדעת אם המילה 'מרכזת' הוחלפה בטעות במילה 'מפזרת' או שהמינוח עצמו שגוי אצלם. היו גם תלמידים שהשיבו 'מפזרת' ללא נימוק כלשהו. גם אצלם יתכן וההחלפה הייתה רק פליטת קולמוס בעוד שהם מודעים להבדלים שבין שני סוגי העדשות.

נימוק נוסף להיות העדשה 'מפזרת' היה: "משום שקרני האור עוברים דרך המוקד המדומה שלה וכך יוצרים דמות הפוכה"

כנראה שכאן הטעות עמוקה יותר ומצביעה על הבנה לקויה של המושג 'מוקד מדומה'.

בסעיף ב(1):

- אחת השגיאות הנפוצות הייתה שימוש לא תקין בנוסחת ההגדלה הזוויתית, אם מהסיבה ש"הפכו אותה" (u/v במקום v/u) או שהבינו מתוך השאלה כי הנתון היה v ולא u . (ואכן זו הייתה ההבנה השגויה במרבית המקרים). שגיאה זו הביאה לכך שהתקבל $v = 15\text{cm}$ (במקום $v = 60\text{cm}$ שזו התשובה הנכונה) והצבת מספר זה בנוסחת העדשות הביאה לתשובה השגויה $f = 10\text{cm}$.
- שגיאה נפוצה נוספת הייתה שימוש לא נכון בצורתה הגאוסית של נוסחת ההגדלה הקווית:

$$m = \frac{f}{s_0} = \frac{s_1}{f}$$

כאשר זיהו באופן שגוי את s_0 עם u דבר שהביא לתוצאה השגויה של $f = 0.6\text{cm}$.

- היו גם כאלו שזיהו את s_1 עם u וקיבלו את התוצאה השגויה $f = 15\text{cm}$.

מאחר והנוסחאות הנדרשות לתרגיל הופיעו בדפי הנוסחאות, קשה לתלות את השגיאות האחרונות באי ידיעת הנוסחאות, מה שמביא למסקנה כי הבעיה טמונה בזיהוי אותיות הנוסחה עם נתוני השאלה. המשפט הפותח את השאלה: "מציבים

עצם לפני עדשת משקפים במרחק 30 ס"מ ממנה" אינו מאפשר הבנה אחרת מאשר: העצם נמצא במרחק 30 ס"מ מהעדשה. לכן הסיבה למרבית השגיאות היא כנראה התאמה לא נכונה של v עם מרחק העצם.

בסעיף ב(2):

מחברי המחווון נתנו משקל רב יחסית לתשובה הנומריית בדיופטרים וזה מתוך ידיעתם, כנראה, את המכשלה המקובלת שבה אין עונים על הצורך לבטא את מרחק המוקד במטרים. ואכן שגיאה זו הייתה בין הנפוצות ביותר בסעיף זה, כאשר תלמידים רבים הגיעו לעוצמת עדשה של: $C = 1/20 = 0.05\text{D}$. במקרה זה אכן הוכיחו ידיעה של היחס ההפוך בין מרחק המוקד לעוצמת העדשה (ולזכותם) יאמר כי קשר זה אינו מופיע בדף הנוסחאות) אך משום מה לא נדלקה אצלם כל נורה אדומה כשקיבלו מספר כה נמוך לעצמתה של עדשה. מעניין שגם מרכיבי המשקפים שביניהם לא שמו לב לסדר הגודל של התוצאה.

סוג שני של שגיאות בסעיף זה נבע מאי הכרות או משכחה של המושג "עוצמת עדשה". בין השוגים בכך השגיאה הנפוצה ביותר הייתה החלפת מושג "עוצמת העדשה" ב"הגדלת העדשה", מה שהביא לתוצאה: $C = H_f/H_o = 2\text{D}$. לפעמים זכרו תלמידים כי עוצמת העדשה הפוכה "למשהו" כאשר "משהו" זה הוחלף בהגדלה, במקום במרחק המוקד, ואז נתקבלה התוצאה השגויה: $C = 1/m = 1/2\text{D}$.

שגיאה נוספת, שהופיעה מספר פעמים, ואשר גם היא שייכת לקטגוריה זו של חוסר היכרות עם המושג "עוצמת העדשה", הביאה את השוגים להחליף את "עוצמת העדשה" עם "עוצמת הארה" (אשר הקשר בינה לבין מקור האור ניתן דווקא בדפי הנוסחאות באופן $I \propto 1/R^2$) ולכתוב $I = 1/R^2$ (בדרך כלל "נעצרו" כאן כי לא ידעו מה להציב במקום R).

בסעיף ג(1):

מאחר ובסעיף זה לא נדרש נימוק, לא ניתן היה לעמוד על המקור לשגיאה אצל רבים מהשוגים (שכתבו 'תרשים א' לפי הסימון המופיע בשאלת הבגרות). לא מעט תלמידים כתבו כאן תשובה שגויה על אף שבסעיפים הקודמים היו להם תשובות נכונות, מה שיכול ללמד, אולי, כי חשבו ששני התרשימים מתארים עדשות מרכזות, השונות זו מזו בעוצמתן. יתכן גם כי חלק מהתלמידים פשוט אינם מעבירים מידע מחלק אחד לשני של אותה שאלה. היו אף כאלו שפתרו נכון את סעיף ג2 ובכל זאת כתבו שתרשים א' הוא המתאים. כמה אף הגדילו לעשות ונתנו הסבר נכון גם לסעיף ד', המבוסס על עדשה מרכזת, ובכל זאת ציינו ב-1g את תרשים א' (המייצג

בסעיף ג(2):

הטעות הנפוצה (אצל אחוז ניכר של התלמידים) הייתה בכך שהציבו בנוסחת לוטשי העדשות **ערכים חיוביים לשני הרדיוסים**. במצב זה מתקבל $n = 1.166$ כך שגם התשובה, ההגיונית, לא הדליקה אצלם נורה אדומה.

שגיאה נפוצה נוספת הייתה ההצבה של מקדם השבירה של העדשה במכנה ושל האוויר במונה. הגורם המתאים בנוסחה התקבל אצל תלמידים אלו בצורה: $(1/n - 1)$ מה שהביא לקבלת $n = 2/3$ (אם הצבת הרדיוסים הייתה נכונה) או $n = 2/3$ (אם הציבו שני רדיוסים חיוביים) או ערכים אחרים כאשר שגו גם במרחק המוקד. מעניין כי קבלת $n < 1$ לא הטרידה כמעט אף אחד מבין תלמידים אלו.

שגיאה נפוצה נוספת הייתה ההחלפה של הרדיוס הקמור והקעור. כלומר, בנוסחה הופיע הביטוי: $[(1/0.1) - (1/0.05)]$ וזה הביא לקבלת $n = 1/2$ אם האיבר הראשון היה $(n-1)$ או $n = 2$ אם הייתה שגיאה גם באיבר הראשון ונכתב בו $[(1/n) - 1]$.

היו תלמידים שכאשר קיבלו $n < 1$ הסיקו שזו לא יכולה להיות עדשה מרכזת ולכן לא יתכן שתשרים ב' הוא המתאים. זה הביא אותם ל"החלפת ה-R ים" בנוסחה ואז, כשקיבלו $n=2$ "נרגעו" ונשארו בכך (זאת כמובן בגלל השגיאה הקודמת בנוסחה, שנכתבה עם: $[(1/n) - 1]$).

מעניין כי היו תלמידים שלא הפריע להם גם לקבל **n שלילי**. כנראה שאלו לא הפנימו את מובנו הפיזיקלי של מקדם השבירה (כיחס בין מהירות האור בריק לבין מהירותו בתוך העדשה).

בסעיף ד':

חלק ניכר מהשגיאות בסעיף זה נבע מהבנה לא נכונה של המושג "רחק רואי". כל אלו שחשבו (והיו לא מעט כאלה) כי רחוק רואי הוא זה שאינו רואה טוב מרחוק, אינו רואה רחוק וכד' הסתבכו בהמשך תשובתם וניסו להסביר כי העדשה **מקרבת** את הדמות לעין ובכך מתקנת את רוחק הראייה (או בגרסה דומה: יוצרת דמות מדומה קרוב יותר לעין, בתחום היעיל של הראייה). ובגירסה פשטנית יותר: מקרבת עצמים רחוקים. חלק מהתלמידים ליוו את הסברם בסרטוט ואצל רבים מהשוגים מתבטא הליקוי בכך שהתמונה מתקבלת **לפני** הרשתית והוספת העדשה מרחיקה אותה אל הרשתית.

אצל אלו שהתאימו, בסעיף הקודם, עדשה מפזרת לליקוי זה, הייתה לפחות עקביות מחשבתית תוך הבנת הפעולה של הוספת עדשה מפזרת לעדשת העין, אולם רבים בחרו דווקא את העדשה המרכזת לתיקון רוחק הראייה ובכל זאת לא

עדשה מפזרת) כתרשים המתאים. מבין אלו שהסתמכו בתשובתם על סעיף ג2 היו שנימקו את בחירת תרשים א' בכך ש- $n < 1$ (n הוא מקדם השבירה של החומר ממנו עשויה העדשה). לתשובה זו הגיעו על-ידי הצבה שגויה של הנתונים בנוסחת לוטשי העדשות (כפי שנראה להלן) אבל במסקנתם טמונות **שתי טעויות חשיבה אופייניות**:

1. מקדם השבירה תלוי בסוג העדשה, מרכזת או מפזרת, ולא רק בחומר ממנו היא עשויה (ובתוכם בו היא נמצאת).
2. לעדשה מרכזת מקדם שבירה גדול מ-1 ואילו למפזרת $n < 1$.

שגיאות נוספות שבאו לידי ביטוי בתשובות התלמידים נבעו למשל מבלבול בין המונחים 'קעורה' ו'קמורה'. ברוח זו כתבו מספר תלמידים:

"תרשים א' מתאים לעדשה מרכזת כי הרדיוס של הקמורה צריך להיות גדול יותר". או באופן הבא:
"המתאים הוא תרשים א' מכיוון שהיותר מעוגל רדיוסו קטן יותר ובתרשים א' המעוגל יותר הוא הפנימי..."
על אותו עקרון ניתן ניתוח שגוי נוסף, הפעם של תלמיד מצטיין, המסיק כי:

$R_2 = 10\text{cm}$ ו- $R_1 = 5\text{cm}$ ולכן להיות חיובי ולכן מתאים לתרשים א'.

תלמיד מצטיין אחר כותב כי:

"תרשים א' הוא המתאים כי הוא מתאר עדשה מרכזת בעלת מוקד חיובי".

לפעמים הבלבול בין הקעור לקמור נבע מכיוון העדשה. ברור שתלמידים שטעו כאן אינם מודעים לכך שעדשה אינה משתנה אם מסובבים אותה ב- 180° (סביב ציר העובר במישור העדשה). הם עוד טרחו לסרטט את שני התרשימים ולסמן אילו משטחים הם הקמורים ואילו הקעורים:

ומכאן הסיקו כי א' הוא התרשים המתאים.

נציין במקום זה כי תלמידים רבים **לא שגו** בבחירת התרשים המתאים מאחר והיה בידם הכלל הבא:

"כאשר עובי מרכז העדשה קטן מעובי הצדדים העדשה היא מפזרת". כלל פשוט זה (שכנראה לא נלמד במקומות רבים) מאפשר באופן מיידי להבחין בעדשה קמורה-קעורה האם היא מרכזת או מפזרת.

שגיאה נוספת שהופיעה אצל מספר תלמידים הייתה: "שני התרשימים מתאימים". תלמידים אלו אולי הניחו כי עדשות בעלות משטח קעור ומשטח קמור הן מרכזות, ללא תלות ברדיוס המשטחים שלהם.

הפריע להם מיקומה של התמונה לפני הרשתית. כמה מהם, שחשו כנראה בסתירה שבדברים, העירו שלעדת משקפים זו יש תכונות כמו לעדשה מפזרת. יתכן גם שהערה זו נוספה בגלל ידיעתם (החלקית) כי עדשת משקפים זו יוצרת תמונה מדומה וזה הרי דומה לתמונה הנוצרת בעדשה מפזרת.

כמה וכמה תלמידים אכן זכרו קטעים מלימודיהם בנושא ליקויי הראייה, אבל לא היה בידם מידע מושלם. למשל, היו כאלו שזכרו נכונה כי הדמות אצל אדם רחוק רואי נוצרת אחרי הרשתית, אבל הסבירו זאת בכך שיעדשת העין אינה די חזקה כדי לרכז על הרשתית את דמויות העצמים הנמצאים באינסוף. (ולא המשיכו צעד נוסף בשיקול הדעת כי העדשה צריכה להיות עוד יותר חזקה כדי שעצמים קרובים יפלו על הרשתית ולא מאחוריה).

בין התשובות השגויות אשר התייחסו אמנם למבנה העין אצל רחוק-רואי אולם לא התייחסו לגמישות העדשה, היו כאלו שאמרו למשל: 'רחק רואי הוא אדם אשר מרחק המוקד שלו גדול יותר' (מאשר של אדם בעל ראייה תקינה). במקרה זה קשה לדעת אם תשובה כזו נובעת משיקולים נכונים, שהרי התמונה מתקבלת אחרי הרשתית, או שהאמירה אינה יותר מאשר סיסמה בלבד. כך גם לגבי תשובה סתמית כמו: 'העדשה מרכזת את הקרניים במוקד וממקדת את הראייה'.

הפקת לקחים לצורך שיפור ההוראה

1. תנאי בסיסי לפתרון טוב הוא קריאה בעיון של השאלה,

- על כל מרכיביה. הפנמת נתוני השאלה חייבת להיעשות לפני שניגשים לפתרונה.
2. יש לוודא במהלך ההוראה כי התלמידים הפנימו את מושגי המפתח שנלמדו. תרגול יעיל של מושגים כמו: משטח קעור ומשטח קמור, עדשה מרכזת ועדשה מפזרת, מקדם שבירה של עדשה ושל התווך בו היא נתונה, בסיטואציות **שוונות**, יוריד את הסיכוי לתפישה מוטעית של מבנה העדשה והתלות בסביבתה.
3. ביצוע ניסויי מפתח במעבדה עשוי לחזק את הבנת המושגים בדרך הנכונה ולעקור תפישות שגויות.
4. יש לעמוד, הן באופן מתמטי והן באופן פיזיקלי, על סימני הערכים של רדיוסי עדשות שונות. זאת, בשילוב תרגול הפעולות האלגבריות בשימוש בנוסחאות העדשה, יקטינו את הסיכוי לטעויות מתמטיות הנפוצות בסוג זה של בעיות.
5. נושא ליקויי הראייה חייב להילמד באופן מעמיק יותר, תוך הבלטת הדמיון בין העין לבין מערכות אופטיות שתורגלו בכיתה ובמעבדה. ידיעה פורמלית של הליקויים אינה מספקת במקרים בהם נדרשת הבנה עמוקה יותר של התופעה.
- להלן תצלום אותנטי של **חלק מתשובה מלאה** מתוך מחברת הבחינה של אחד התלמידים. לגבי הסדר והצורה האסתטית של הכתיבה יש מקום לשיפור אולם הפתרון וההסברים הנלווים הקנו לתלמיד את מלוא הניקוד לשאלה.

