

## בחינות הבגרות בפיזיקה כמכשיר לשיפור ההוראה

הדגמה מתוך בחינות הבגרות בפיזיקה מורחבת (5 י"ל) קיץ תש"ס, פרקי בחירה  
תורת האור והגלים

פרופיל שגיאות התלמידים בשאלת הספקטרומטר

דוד סלע, משרד החינוך, ירושלים

### מבוא

ניתוח שגיאות תלמידים במבחני בגרות מאפשר לעמוד על מאפיינים שונים בדרכי ההוראה, בדפוסי החשיבה של המורים והתלמידים ועל הדגשים שמן הראוי להתייחס אליהם במהלך הקניית הנושא הן בהיבט העיוני והן בהיבטים המעבדתיים, הטכנולוגיים והמעשיים.

שתי השאלות שהופיעו השנה בפרק "תורת האור והגלים" וכן דגם התשובות שלהן (לפעמים משתמשים לדגם זה במונח: מחוון) מופיעים בחוברת זו (בעמ' 61). מומלץ לעיין בהן במקביל עם המשך קריאת מאמר זה.

השאלה הראשונה עסקה בעדשות (אופטיקה גיאומטרית) והכילה ארבעה סעיפים (מתוכם שניים שהתחלקו לסעיפי משנה נוספים). כמחצית מסעיפי השאלה היו איכותיים ואילו באחרים נדרש התלמיד לחישובים המבוססים על נוסחאות ידועות, המופיעות גם בנספח המצורף לשאלון הבחינה.

השאלה השנייה עסקה בסריג עקיפה (אופטיקה פיזיקלית) והתבססה על ניסוי ידוע בשימוש בספקטרומטר סריג. היא הכילה חמישה סעיפים (מתוכם אחד המחולק לסעיפי משנה), כאשר רק הסעיף הראשון היה כמותי ואילו כל שאר הסעיפים דרשו הסברים המבוססים על הבנת התופעה ויכולת להתמודד עם מצבים חדשים. לתלמידים אשר ביצעו במעבדה את הניסוי הידוע בספקטרומטר זה, היה יתרון בולט על חבריהם אשר ראו אותו לראשונה בתרשים שבשאלון המבחן.

מפתח הניקוד, שהופיע גם בשאלון המבחן, נתן בשאלה הראשונה כ-50% מהציון לפתרונות הכמותיים וכ-50% לסעיפים האיכותיים. בשאלה השנייה רק כ-30% מהציון ניתן לסעיף הכמותי ושאר ה-70% לארבעת הסעיפים האיכותיים.

תלמיד שבחר בפרק זה נדרש כידוע לענות על אחת משתי השאלות בלבד.

לאחר בדיקת כ-500 מחברות בחינה התברר כי כ-2/3 מהנבחנים בחרו בשאלת האופטיקה הגיאומטרית ורק כ-1/3 מהם ענו על השאלה באופטיקה הפיזיקלית.

נציין כאן כי חלוקה כזו מתקבלת לעיתים קרובות ומצביעה על כך כי למרבית התלמידים קל יותר להתמודד עם עדשות ומראות מאשר עם ספקטרומטר ותופעת העקיפה. עם זאת ציוני הבחינה לאורך השנים אינם מצדיקים בהכרח בחירה זו. ניתן להצביע על דוגמאות מהשנים האחרונות בהן שיעור ההצלחה היה גבוה יותר באופטיקה הפיזיקלית, למרות שרק מיעוט הנבחנים בחר בה.

להלן כמה הערות לגבי דגם התשובות אותו מקבלים מעריכי הבחינות. דגם התשובות הוכן על ידי הועדה שחיברה את השאלה וסוכם סופית רק לאחר בדיקת מדגם מחברות. הוא מכיל את מרכיבי הפתרון המצופה, את הניקוד לכל סעיף או תת סעיף וכן הערות על הורדת נקודות על מרכיבים שגויים. כמובן שגם דרכים אלטרנטיביות, שאינן מופיעות בו, מזכות במלוא הנקודות, בתנאי שאינן שגויות. (כל מחברת מוערכת על ידי שני בודקים בלתי תלויים והציון הניתן הנו ממוצע הציונים שלהם. אם ההפרש בין ציוניהם לשאלון עולה על 11 נקודות, מתוך 100, מועברת המחברת להערכה שלישית על-ידי מעריך בכיר).

בתדרוך, אותו מקבלים המעריכים לפני תחילת בדיקת המחברות, ניתנו הערות נוספות לגבי המחוון, אשר תפקידן בין השאר להקטין פערים בין שני המעריכים. כמו כן נקבע מעריך בכיר לכל נושא, העומד לרשות המעריכים (טלפונית) גם בשעות עבודתם בבית ואשר ניתן להתייעץ אתו בכל בעיה בלתי צפויה המתעוררת בשעת הבדיקה. אם בעיה זו בעלת משמעות כללית, יידע מעריך זה (רכז הנושא), מוקדם ככל הניתן, גם את שאר המעריכים, כדי למנוע, עד כמה שאפשר, פערים בלתי מוצדקים בין שתי ההערכות.

## השגיאות הנפוצות

במאמר זה בחרתי לעסוק באופן מפורט דווקא **בשאלה השנייה**. נראה כי שאלה זו הייתה קשה יותר מהשאלה הראשונה, וזאת מהסיבות הבאות:

א. הקדמת השאלה, לפני שמגיעים לסעיף הראשון, הייתה ארוכה למדי ודרשה הבנת המבנה של מערכת הניסוי.  
ב. המרכיב האיכותי בשאלה זו גדול בהרבה מאשר המרכיב הכמותי, דבר שהצריך הבנה וכושר ניסוח מעבר ליכולת הצבה בנוסחאות. במיוחד בא הדבר לידי ביטוי בסעיפים האחרונים של השאלה, בהם המילה "הסבר" הופיעה שלוש פעמים.

ג. בשאלה זו נשאל התלמיד גם על מצבים חדשים, כאלו שלא תוארו במערך הניסוי הבסיסי. כאן נדרשה מהתלמיד גם הבנת הטכניקה של שינוי במערכת הניסוי וגם הבנה של התופעה הפיזיקלית שנצפתה בעקבות השינוי.

בעקבות תחושה זו של קושי השאלה, אשר התגלתה כמוצדקת גם בבדיקה המדגמית שלה, ניתנו בתדרוך שניתן לפני תחילת הבדיקה כמה הנחיות אשר תפקידן היה "לרכך" את האמור בדגם התשובות, במיוחד בסעיפים שהתגלו כ"בעייתיים":

**לסעיף ב'**: יש לתת מחצית מהנקודות גם עבור נימוק חלקי. **לסעיף ה'(1)**: אם התלמיד גרר שגיאה **בהסבר** מסעיף ב', והוא שומר על עקביות, אין להוריד מהניקוד פעם שנייה (בתנאי שהוא משיב נכון לסעיף ה'(2)).

כאשר באים לנתח את השגיאות הנפוצות אצל התלמידים מתקבלת התמונה הבאה:

### בסעיף א'

השגיאה הנפוצה היחידה בסעיף זה היא הבלבול של תלמידים לא מעטים בין סדרים שונים של קווים ספקטרליים שונים. תלמידים אלו הציבו בנוסחת הסריג:  $\sin \theta_n = n \lambda$ . עבור **הקו** הראשון  $n=1$ , עבור **הקו** השני  $n=2$ , וכו'. (זאת בנוסף להצבת זוויות הסטייה השונות לכל קו).

כנראה שתלמידים אלו עבדו בצורה טכנית עם הנוסחה שהופיעה בנספח, ללא הבנה יתרה של משמעות הקווים הספקטרליים בסדר הראשון.

### בסעיף ב'

1. פרט לתשובה הנכונה בסעיף זה, שהיא כצפוי סגול, היו תלמידים בודדים שהשיבו: לבן. (הסיבה לכך היא כנראה ששכחו כי המדובר במנורת כספית והחליפו אותה עם מנורת להט, שאכן נזכרת בבעיה אולם רק בסעיף ה'). לפחות הסתמנה אצל תלמידים אלו ידיעת העיקרון כי בסדר אפס אין האור מופרד למרכיביו.

2. תשובה שגויה שלא הביאה בחשבון שיקולים פיזיקליים כלשהם אלא טכניקה מתמטית בלבד, הייתה הצבה בנוסחת הסריג של  $n = 0$  ו- $\theta = 0$ , מה שהביא לתלמידים אלו לתשובה: "כל  $\lambda$  הוא פתרון למשוואה". אם אכן חשבו שכל אורך גל יכול להתקבל אזי מצביע הדבר גם כאן **שלא קראו בעיון** את הבעיה הדנה במנורת כספית הנותנת צבע סגול.

3. אחת הוריאציות של השגיאה הנפוצה ביותר בסעיף זה הייתה:

"התלמיד לא ראה אור בסדר אפס" או:  
"לא יראה שום אורך גל".

תשובות אלו אקוילנטיות כמובן לסוג התשובות: "יהיה חושך" או "ייראה צבע שחור" או "אין אור" שהיו נפוצות ביותר בסעיף זה.

הנימוק שניתן בדרך כלל לתשובות אלו היה שאורך הגל המתאים ל  $\theta = 0$  הוא אפס. גם כאן השיקול הוא מתמטי (ומוטעה) ללא כל ניסיון לחשיבה או התמודדות פיזיקלית עם הבעיה.

(קשה להניח כי תלמידים אלו חשבו כי בפס המרכזי, בזווית  $\theta = 0$  ישנה דווקא התאבכות הורסת).

### בסעיף ג'

בסעיף זה תלמידים בודדים בלבד "קלעו" לתשובה של מחברי דגם התשובות (שצביעת הספקטרומטר בשחור נעשית כדי לבלוע את האור הפוגע בו, ועל ידי כך למנוע החזרת אור כלפי הסריג). מרבית התשובות התייחסו לעיקרון, הנכון כשלעצמו, כי הצבע השחור, הבולע את כל אורכי הגל הפוגעים בו, מאפשר צפייה בקווים ספקטרליים בעלי אורך גל כלשהו. אחד התלמידים ניסח זאת באופן ברור בדרך השלילה:

"כל צבע אחר שהיו צובעים את הספקטרומטר היה יכול להסתיר אורך גל כלשהו שיכול היה להתקבל". ובניסוח של תלמיד אחר:

"אם הספקטרומטר היה בצבע סגול למשל אז כל הפסים הסגולים היו נבלעים ואי אפשר היה לראות אותם".

ניסוחים שקולים היו למשל:

"כיוון שהצבע השחור אינו צבע של אף אורך גל היכול ליצור קו ספקטרלי לכן ניתן להבחין על הצבע השחור בכל הקווים הספקטרליים". או:

"הספקטרומטר נצבע בשחור על מנת שיתאפשר לראות את הצבעים בברור, כי ביניהם יש חושך". או: "כדי לאפשר ראייה של הצבעים שהופיעו על התדריג".

כמובן שניסוחים כאלו זיכו את כותביהם בחלק ניכר מהניקוד

של הסעיף, אם כי ציונם הופחת מאחר שלא הזכירו את מניעת החזרת האור כלפי הסריג.

### בסעיף ד'

סעיף זה היה כנראה הקשה ביותר בשאלה.

1. מספר רב של תלמידים לא הבין כלל את משמעות הרחקת לוחות הספקטרומטר וחשב כי המדובר על הרחקת הלוחות מהסריג ולא על הגדלת המירווח בין הלוחות על ידי הרחקתם זה מזה. כנראה שמרבית תלמידים אלו לא ראו מימיהם את המכשיר וכמובן שגם לא ביצעו בו ניסויים. דוגמה לתשובותיהם של תלמידים אלו הייתה:

"רוחב פסי האור הוא ביחס ישר למרחק בין סריג העקיפה והמסך, ולכן כשמרחיקים את המסך, או במקרה זה את הלוחות, רוחב הפסים גדל".

הניתוח של התלמיד נכון ועל כן לא כתובה כאן שגיאה פיזיקלית, אולם כל מה שכתב אין לו ולא כלום עם המצב שלפנינו. תלמיד זה השתמש בנוסחת יאנג באופן איכותי. רבים אחרים השתמשו בה אף בצורתה המפורשת:

$\Delta x = \lambda L N^*$  והסבירו כי כאשר  $L$  (המרחק) גדל גם  $\Delta x$  (רוחב הקו הספקטרולי) גדל. כמובן שכל השוגים בהבנה הבסיסית של הבעיה לא קיבלו נקודות על סעיף זה.

2. גם מבין אלו שהבינו נכונה את המתואר בבעיה, רק בודדים כיוונו לתשובה המלאה המצופה מהם (צירוף של מקורות נקודתיים רבים). בדרך כלל השיבו תשובות חלקיות בגישה של אופטיקה גיאומטרית כגון:

"כאשר המרווח בין הלוחות גדל עוברת אלומה רחבה יותר של אור ולכן נוצרים פסים רחבים יותר". בהתאם לכך גם הניקוד שקיבלו היה חלקי.

3. סוג נוסף של שגיאות מצאנו אצל כמה מהתלמידים שהבינו כי הרחקת הלוחות מאפשרת "ליותר אורכי גל" להיכנס וזהו לדעתם הגורם להרחבת הקווים הספקטרוליים. (הם לא נתנו את דעתם לכך שלו תשובתם הייתה נכונה, גם צבע הקווים צריך היה להשתנות).

### בסעיף ה'

מספר תלמידים כתבו בתשובתם לחלקו הראשון של סעיף זה כי לא חל שינוי בסדר אפס. במקרים אלו חזרנו ובדקנו שנית את תשובתם לסעיף ב'. אם תשובתם שם הייתה שצבע האור לבן (וכמובן לא קיבלו ניקוד עבור תשובה שגויה זו), הם זכו כאן למלוא הניקוד, בתנאי שהנימוק אותו נתנו היה נכון (למשל: "בסדר אפס האור אינו מופרד למרכיביו" או: "קיימת כאן התאבכות בונה"). זאת בהתחשב בכלל שאין

אנו "מענישים" פעמיים על אותה שגיאה. לתלמידים אלו היו שיקולים פיזיקליים נכונים אלא שבראשית השאלה לא נתנו את דעתם על כך שהמדובר במנורת כספית.

אכן היו תלמידים שגם בחלקו השני של סעיף ה' כתבו כי לא חל שינוי בסדר הראשון. כמובן שלכך לא נמצאה כל הצדקה ולפיכך לא קיבלו כל ניקוד על תשובה שגויה זו. לקבלת מלוא הנקודות הכרחי היה להתייחס לספקטרום הרציף המתקבל במקרה זה. גם תלמידים שהשיבו כי הסדר הראשון יהיה עתה קרוב יותר לזווית 0 (מאשר במקרה של מנורת הכספית) לא זכו בנקודות כי תשובתם לא הייתה לעניין.

### הפקת לקחים לצורך שיפור ההוראה

1. תנאי בסיסי לפתרון טוב הוא קריאה בעיון של השאלה, תוך הפנמת הנתונים. זאת עוד לפני שניגשים לצעד כלשהו בפתרון.
2. יש קשר בין ניסויי המעבדה לבין הבחינה בכתב. אי ביצוע ניסויי מפתח במעבדה עלול להיות לרועץ בשאלות מסוימות שבבחינה בכתב.
3. יש לחזק את הבנת תופעות האופטיקה הפיזיקלית. לתלמידים רבים קשה להינתק מהגישה של האופטיקה הגיאומטרית והם משליכים אותה גם על בעיות של אופטיקה פיזיקלית.
4. תלמידים רבים עדיין מתקשים להתמודד עם בעיות איכותיות ומעדיפים בעיות כמותיות. לפיכך יש לטפח את ההתייחסות בכתב לבעיות איכותיות.
5. חינוך פיזיקלי טוב חייב להתייחס להבנת התופעה ולא רק לשימוש הטכני בנוסחאות המתארות אותה. שליטה בטכניקות המתמטיות בלבד עלולה להיות מקור לטעויות.
6. חלק מהתלמידים אינו מודע להבחנה הבסיסית בין מנורת להט למנורת כספית. חשוב להבהיר זאת בהיבט הספקטרולי שלו.

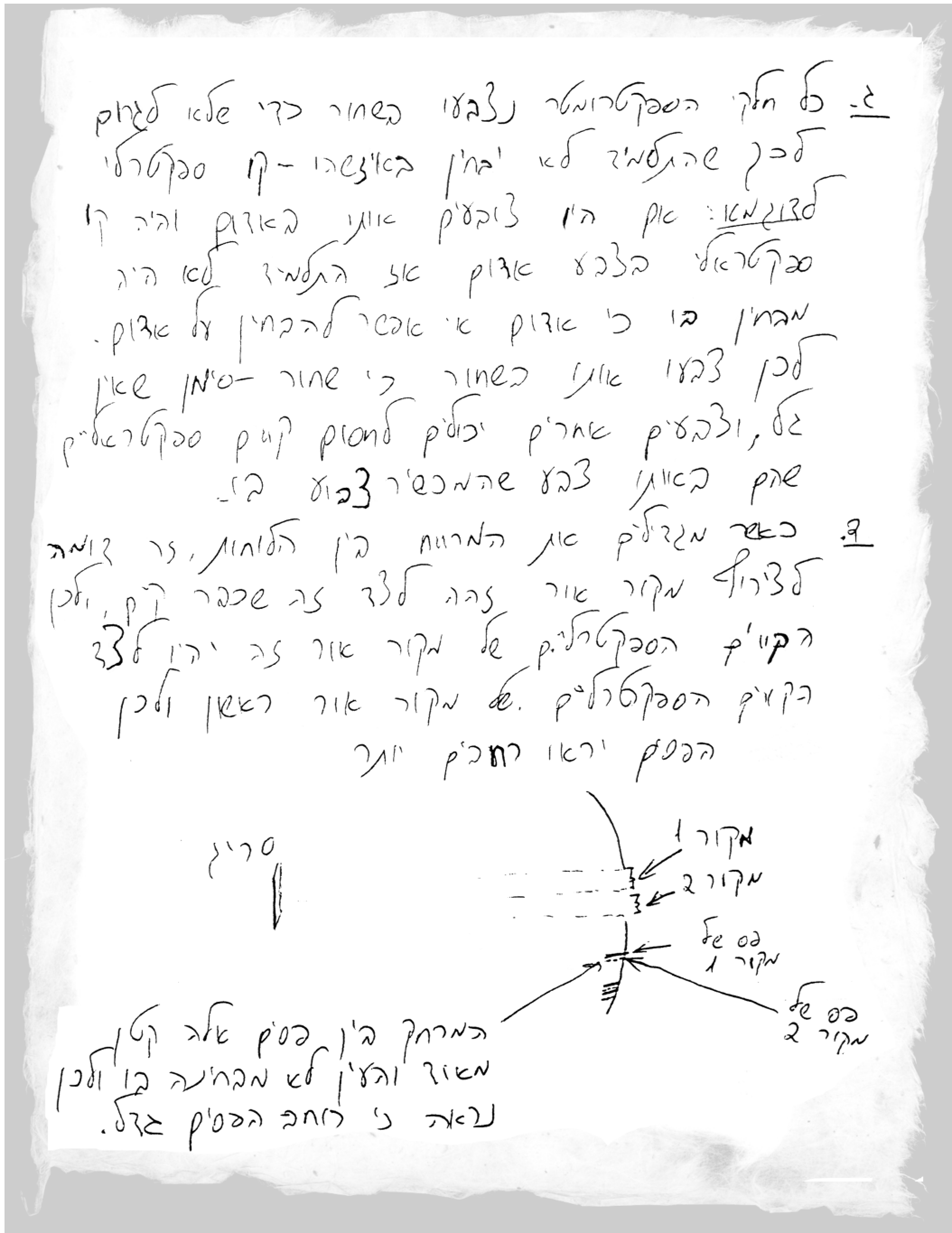
### נספח:

להלן חלק אותנטי מתשובתו של אחד התלמידים לסעיפים ג' ו-ד' של השאלה. התשובה מצביעה על כך כי התלמיד מבין את הנושא הבנה פיזיקלית טובה.

ג. כל חלקי הספקטרומטר נצבעו בשחור כדי שלא לגרום לכך שהתלמיד לא יבחין באיזשהו קו ספקטרולי. לדוגמא: אם היו צובעים אותו באדום והיה קו ספקטרואלי בצבע אדום אז התלמיד לא היה מבחין בו כי אדום אי אפשר להבחין על אדום. לכן צבעו אותו בשחור כי שחור - סימן שאין גל, וצבעים אחרים יכולים לחסום קווים ספקטרואליים שהם באותו צבע שהמכשיר צבוע בו.

ד. כאשר מגדילים את המרווח בין הלוחות, זה דומה לצירוף מקור אור זהה לצד זה שבכבר קיים, ולכן הקווים הספקטרליים של מקור אור זה יהיו לצד הקווים הספקטראליים של מקור אור ראשון ולכן הפסים יראו רחבים יותר.

**בסעיף ג'** נותן התלמיד תשובה אלטרנטיבית לזו שבדגם התשובות (אם כי אינו מתייחס לנושא מניעת ההחזרה). **בסעיף ד'** אכן ניתנה התשובה (הנדירה) המתבקשת במלואה. חשוב לציין כי אורך התשובה אינו מהווה אינדיקציה לנכונותה. תשובות קצרות ותמציתיות יכולות בהחלט להיות מלאות.



תחנה

תצלום הדף הרלוונטי ממחברת התלמיד