

הפילוסופיה של המדע בשירות המורה



| גיא אשכנזי* |

את מסקנותיו ע"י רישום משוואה מתמטית המתארת יחס הופכי בין נפח הגז לבין הלחץ הפועל עליו:
 $V \propto 1/P$. הנוסחה מכלילה לא רק את כל התצפיות שערך המדען, אלא גם נושאת בחובה את הציפייה שגם ניסויים נוספים, שטרם נעשו, יניבו תוצאות דומות.

כאשר מתברר כי ההכללה אכן עומדת במבחן המציאות ומתארת היטב תצפיות רבות נוספות, היא זוכה לשם "חוק". בדוגמה שהזכרנו, החוק המתאר את הקשר בין נפח של גז ללחץ המופעל עליו, נקרא "חוק בויל", על-שם המדען האירי שניסח אותו לראשונה.

דוגמה נוספת, הפעם למציאת קשר איכותי בין תופעות, היא של מדען המזהה שישנם חומרים אחדים בעלי ברק, הניתנים לריקוע ומוליכים היטב חשמל. המדען מכנה קבוצה זו של חומרים בשם "מתכות". בכך הוא יוצר קטגוריה של חומרים על סמך העקביות בצירוף התכונות: ברק, רקיעות ומוליכות. הגדרת המושג "מתכת" מכלילה לא רק את אוסף החומרים שבחן המדען, אלא גם נושאת בחובה את הציפייה שאם יתגלה חומר חדש בעל ברק וניתן לריקוע, הרי שהוא גם יוליך חשמל היטב. ואכן, בשנת 1807 גילה סר המפרי ד'יוני, בזה אחר זה, מספר יסודות חדשים: נתרן, אשלגן, מגנזיום, סידן, סטרונציום ובריום. כל היסודות הללו הם בעלי ברק, רקיעים ומוליכים היטב חשמל.

המדע המודרני הוא אמפירי באופיו. התהליך המדעי שואב את משמעותו ואת מטרותיו מתוך הסתכלות על תופעות בעולם הטבע. ביצוע של ניסויים משמש את המדענים כמקור לידע על עולם הטבע, או כדרך לבחינת תיאוריות שמטרתן להסביר אותן. התצפית והמדידה הן מושגים מרכזיים בעיסוקו של כל מדען, אך כשלעצמן הן חסרות כל משמעות מדעית. תצפיות ומדידות מקבלות משמעות רק מתוך תהליכי החשיבה המדעיים המופעלים עליהן. כאשר בוחנים את עבודתם של מדענים, ניתן לאפיין שני סוגים שונים של חשיבה: אינדוקטיבית ודדוקטיבית.

חשיבה אינדוקטיבית (הכללה)

החשיבה האינדוקטיבית מתבססת על תצפיות ומדידות, ומטרתה לנסח הכללה המתארת באופן ממצה אוסף גדול של תופעות. מטרה זו מושגת ע"י מציאת קשר בין התופעות, וניסוח קשר זה בצורה של משוואה (קשר כמותי) או חלוקה לקטגוריות (קשר איכותי). לדוגמה, מדען מודד את הנפח של גז הכלוא בתוך צינור זכוכית ונלחץ ע"י עמודת כספית. הוא חוזר על הניסוי עבור לחצים שונים, שאותם הוא יוצר ע"י שינוי בגובה עמודת הכספית. הוא רואה כי נפח הגז (V) קטן ככל שהלחץ (P) גדל. המדען משרטט גרף של V כפונקציה של $1/P$, ומזהה שהנקודות שאותן מדד נמצאות על קו ישר אחד בקירוב. הוא מנסח

*ד"ר גיא אשכנזי, מפתח תכניות לימודים במרכז הישראלי למצוינות בחינוך, ומורה לכימיה בתיכון הישראלי למדעים ואמנויות, ירושלים.

חשיבה דדוקטיבית (מנגנון)

בעוד החשיבה האינדוקטיבית מבוססת על תצפיות, הרי החשיבה הדדוקטיבית מתבססת על עקרונות מופשטים, ומטרתה לתאר מגוון רחב של תופעות הנובעות מאוסף מצומצם של כללים (רדוקציה). מטרה זו מושגת ע"י בנייה של מודל מחשבתי, המתאר את התופעה כמנגנון: מערכת הבנויה ממרכיבים שביניהם קיימים יחסי גומלין (אינטראקציות). המודל נבנה על סמך מספר מצומצם של הנחות יסוד לגבי מרכיבי המערכת, ומתוך הנחות אלו ניתן להסיק כיצד תפעל המערכת כולה.

לדוגמה, את חוק בויל מקובל להסביר כיום על סמך ההנחה שגז מורכב ממספר עצום של חלקיקים זעירים הנמצאים בתנועה מתמדת, וכי הלחץ שהגז מפעיל על דופנות הכלי נובע מהתנגשויות תכופות של חלקיקי הגז עם הדפנות. אם נקטין את נפח הכלי, תגדל צפיפות החלקיקים באופן יחסי, ואתה מספר החלקיקים הנמצאים בסמיכות לדופן; מצב זה יביא לעלייה בקצב ההתנגשויות של החלקיקים עם הדופן, ולפיכך יגרום לעליית הלחץ. המשפט הראשון של ההסבר מתאר את ההנחות העומדות בבסיס המודל ואת הקשר בין מרכיבי המערכת; המשפט השני מתאר את תהליך ההסקה הלוגי המסתמך על המודל כדי להראות את הקשר הסיבתי-מנגנוני בין הקטנת הנפח לבין עליית הלחץ.

לכל תופעה ניתן להמציא מספר מנגנונים שונים שיביאו לאותה תוצאה. בדוגמה שהבאנו, בויל מנה שתי דרכים שונות שבהן אפשר להסביר את החוק שניסח: האחת מתארת את חלקיקי הגז כקפיצים קטנים הניתנים לדחיסה (מודל סטטי), והשנייה מתארת את החלקיקים כנמצאים בתנועה מתמדת ומתנגשים זה בזה (מודל דינמי)¹. בכל הנוגע לתופעה הנתונה, שני

המנגנונים מספקים הסבר הגיוני הנובע מתוך הנחות יסוד מוגדרות. כדי לקבוע איזה מההסברים טוב יותר, יש לבחון באיזו מידה הנחות היסוד של המודל יכולות לשמש אותנו להסביר תופעות אחרות. במקרה של הגזים, שני המנגנונים מסבירים את תופעת עליית הלחץ עם הקטנת הנפח, אולם רק המודל הדינמי מסביר את העובדה שגז מתפשט וממלא את כל נפח הכלי. חשוב לשים לב שלא ניתן להוכיח את נכונותו של מודל באמצעות ניסוי, אלא רק לפסול מודלים מתחרים. העובדה שפסלנו אפשרות אחת אינה הופכת את האפשרות השנייה לנכונה, שכן ייתכן שישנה גם אפשרות שלישית (ורביעית, וחמישית...) שטרם חשבנו עליה. למשל, לאחר הצעת המודל הסטטי על-ידי בויל, הוצע מודל סטטי אחר המניח קיום כוחות דחייה ארוכי טווח בין חלקיקי הגז, ובכך מסביר גם את תופעת ההתפשטות. המודל הסטטי המבוסס על כוחות דחייה היה המודל המועדף בקרב הקהילה המדעית במשך כמאתיים שנה, עד שהוחלף במודל הדינמי המודרני שתואר בפסקה הקודמת².

חשיבה המבוססת על בניית מודלים לתיאור מנגנוני של תופעות היא חשיבה היפותטית-דדוקטיבית. תהליך החשיבה מתחיל בניסוח השערה (היפותזה) המתארת את הנחות היסוד של המודל ("נניח שגז מורכב ממספר עצום של חלקיקים זעירים הנמצאים בתנועה מתמדת"); על-סמך הנחות היסוד בונים מנגנון המקשר בין מרכיבי המערכת ("הלחץ שהגז מפעיל על דופנות הכלי נובע מהתנגשויות תכופות של חלקיקי הגז עם הדפנות"); באמצעות המנגנון מסיקים באופן לוגי (דדוקטיבי) את התוצאה הניתנת לצפייה ("אם נקטין את נפח הכלי, צפיפות החלקיקים תגדל באופן יחסי... דבר שיגרום לעליית הלחץ"). אם התוצאה הלוגית אינה מתאימה לתופעה הנצפית,

1. המודל הדינמי שציין בויל קרוב יותר בעקרונותיו להסבר המודרני. בויל עצמו העדיף את המודל הסטטי.

2. רוברט בויל ניסח את החוק המקשר בין לחץ ונפח בגזים ב-1662. ב-1687 הציע סר אייזק ניוטון מודל מתמטי להסבר החוק שלפיו חלקיקי הגז נמצאים במנוחה ודוחים זה את זה ממרחק. ב-1783 הניח אנטואן לבואזיה כי החום (קלוריק) הוא המקור לדחייה בין חלקיקי הגז. רק במחצית השנייה של המאה ה-19 התבססה התיאוריה הקינטית של הגזים בצורתה המוכרת לנו כיום, בעקבות עבודותיהם של רודולף קלאוזיוס, גיימס קלארק מקסוול ולודוויג בולצמן. דניאל ברנולי הציע מודל דינמי להסבר חוק בויל כבר ב-1738, אך מודל זה לא זכה להכרה נרחבת באותה העת ונדחק במהרה בעקבות הצלחתה של תיאורית הקלוריק של לבואזיה.



המודל נפסל. חשוב לשים לב שמרכיבי המנגנון עצמם (החלקיקים) אינם ניתנים לצפייה ישירה, אלא רק המסקנות הנובעות מהנחת קיומם.

כאשר מתברר כי אוסף מצומצם של הנחות יסוד מאפשר בנייה של מנגנונים רבים ומגוונים המתאימים למגוון רחב של תצפיות, אוסף ההנחות זוכה לשם "תיאוריה". לדוגמה, אותן ההנחות שאפשרו לנו לבנות מודלים המסבירים את תכונות ההתפשטות והדחיסה של גז, יכולות לשמש לבניית מודלים המסבירים באופן כמותי תופעות כמו מהירות התפשטות של גזים אל תוך ריק (אפוזיה), קצב הערבוב של שני גזים (דיפוזיה) וקיבול החום של גזים. על כן זכו הנחות אלו לשם "התיאוריה הקינטית של הגזים".

אופני התייחסות בהסבר מדעי

ראינו, אם כן, כי המדע מתייחס אל תופעות הטבע בשלושה אופנים שונים:

- תצפית - התייחסות לדברים שאנו יכולים לראות, לחוש או למדוד.
 - הכללה - התייחסות לקשרים בין תצפיות שונות המבטאים חוקיות בתופעות הטבע.
 - מנגנון - התייחסות לרעיונות תיאורטיים שמהם ניתן להסיק על אודות הקשרים בין התצפיות. מכאן שהסבר של תופעה חייב להשתמש בשלושת אופני התייחסות השונים כדי לשקף את מלוא המורכבות של התהליך המדעי העומד מאחוריו. לדוגמה, נבחן את ההסבר לניסוי שבו בוחנים את התגובה של סידן, נתרן ואשלגן עם מים: **"שלוש המתכות מגיבות על-ידי מסירת אלקטרון למים, המתפרקים למימן ויון הידרוקסיד, תוך שחרור של אנרגיה תרמית**. האשלגן נמצא מתחת לנתרן ומשמאל לסידן בטבלה המחזורית, דבר המלמד שאנרגיית היינון שלו היא הנמוכה משלוש המתכות. **לכן, קל יותר לנתק את האלקטרון מהאשלגן, והתהליך מתרחש מהר יותר מאשר בשתי המתכות האחרות**. התוצאה היא שחרור מהיר של מימן גזי וחום, הגורם להתלקחות המימן ולפיצוץ" (הכתב המודגש מתייחס למנגנון, הקו התחתון מסמן את התייחסות הכללה, והכתב הנטוי מתייחס לתצפית).
- לצערנו, תלמידים רבים מסתפקים באופן התייחסות

אחד בלבד בהסבריהם. הנה מספר דוגמאות לתשובות של תלמידים לשאלה שבה נתבקשו להסביר את הפעילות היחסית של שלוש המתכות לעיל:

- "האשלגן מגיב הכי חזק. ראינו את זה במעבדה".
- "לאשלגן יש את אנרגיית היינון הכי נמוכה, ולכן הוא מגיב הכי מהר".
- "האשלגן הכי פעיל כי הכי קל לנתק את האלקטרון שלו".

אנחנו רואים כי כאשר תלמיד נדרש לספק הסבר לתשובתו, הוא יכול לבחור באחד מאופני התייחסות ולעמוד בדרישה הפורמאלית של מתן הסבר, גם אם ההסבר מותיר את השומע (או הקורא) בהרגשה שהתשובה אינה מספקת. תשובה כזו, גם אם אינה שגויה, אין להחשיבה ככונה. התשובה הראשונה מעידה על זיכרון, אך לא על הבנה. התשובה השנייה מעידה על הבנה של החוקיות בטבלה המחזורית, אך לא של התיאוריה העומדת מאחורי הטבלה. גם התשובה השלישית, הנראית כתשובה הטובה ביותר, היא תשובה חסרה מבחינה מדעית. חסרה בה הכללה המקשרת בין מיקום היסודות בטבלה לבין אנרגיית היינון שלהם, שמתוכה ניתן להסיק את הקביעה המופיעה בתשובה כי הכי קל לנתק את האלקטרון מהאשלגן. כמו כן חסרה התצפית המבהירה מה משמעות המונח "פעיל" בהקשר של התופעה הנתונה.

יישום בהוראה בכיתה

כדי למנוע את המצב של הסתפקות בהסבר חלקי יש לדרוש מהתלמידים באופן מפורש לכלול בתשובותיהם את שלושת אופני התייחסות. לשם כך יש להסביר לתלמידים את ההבדל בין שלושת אופני התייחסות, ולהשתמש במונחים "תצפית", "הכללה" ו"מנגנון" באופן תכוף במהלך ההוראה. למשל, כאשר מסבירים את הדרכים השונות לכתיבת נוסחאות של תמיסות יוניות, אפשר לומר שהכתיבה NaCl(aq) מתייחסת לתצפית של המסת מלח במים, ואילו הכתיבה $\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$ מתייחסת למנגנון הפירוק של הגביש ליונים נפרדים בתמיסה מימית. כאשר מדברים על מודל "ים האלקטרונים", כדאי



ויש להתייחס לכך בניסוח המטרה. לדוגמה: "מטרת הניסוי היא לעקוב אחר שינויי הטמפרטורה, כמדד לשינוי באנרגיה הכימית במהלך התגובה".

מקום נוסף שבו ההבחנה בין אופני ההתייחסות השונים יכולה לשפר באופן ניכר את רמת החשיבה המדעית של התלמידים הוא הדיון. ברוב המקרים הביקורת של התלמידים על הניסוי מתמקדת בדיוק מכשירי המדידה ובטעויות אנוש. אולם דיון המתייחס לתצפיות בלבד אינו מספק - חשיבה ביקורתית צריכה להתייחס גם להכללה ולמנגנון.

למשל: האם התייחסנו לכל המשתנים הרלוונטיים? מהו תחום התקפות של המסקנות שהסקנו? האם יש התאמה בין התיאוריה לבין התוצאות הניסויניות? אם ההתאמה אינה מלאה, האם ניתן להציע מנגנון שיסביר את חוסר ההתאמה?

יישום בכתיבת (ובדיקת) בחינות

כדי לתרגל את התלמידים בשימוש בשלושת אופני ההתייחסות ולתת להם משוב אינדיבידואלי וענייני, מומלץ לשלב בבחינות שאלות פתוחות הדורשות באופן מפורש שימוש בכל אופני ההתייחסות. לדוגמה:

ביום חורף קר, ילדים אוהבים לחקות את תנועותיהם של מעשנים ולנשוף מפייהם "עשן" מדומה. מה טיבו של "עשן" זה? התייחסו בתשובתכם לתצפית, להכללה, ולמנגנון (רמז: בימים חמים לא רואים את התופעה הזו).

תשובה מלאה לשאלה: האוויר הנפלט מהריאות מכיל אדי מים, כפי שאפשר לראות כאשר נושפים על משטח זכוכית קר (למשל כשמנקים את המשקפיים).

כאשר אוויר חם ולח פוגש באוויר קר, אדי המים הופכים מגז לנוזל (מתעבים) ויוצרים ערפל. **הסיבה להתעבות היא שכאשר הטמפרטורה גבוהה, חלקיקי המים נעים מהר וכוחות המשיכה ביניהם אינם חזקים דיים כדי להשאירם ביחד. אולם כשהאדים מתקררים, החלקיקים נעים לאט ואינם יכולים להתגבר על כוחות המשיכה.**

כמובן שאפשר לנסח תשובה מלאה גם בסדר אחר, כל עוד כל שלושת המרכיבים מופיעים בה: **הילדים**

להראות כיצד המנגנון התיאורטי של אלקטרונים חופשיים מסביר את ההכללה הניסוינית המקשרת את המוליכות החשמלית עם תכונת הרקיעות במתכות. כאשר מודדים במעבדה לחץ של גז כפונקציה של הטמפרטורה, יש להדגיש כי הנקודות על הגרף המתקבל הן התצפיות, ואילו קו המגמה הלינארי הוא ההכללה שלהן.

מקום נוסף שבו אפשר לשלב את אופני ההתייחסות בהוראה, הוא כאשר מדברים על ההיסטוריה של תגליות מדעיות. המונח "גילוי" משמש, לעתים שלא בצדק, לתיאור כל חידוש מדעי, אך מן הראוי להבחין בין סוגים שונים של חידושים, בהתאם לאופן ההתייחסות שהם מחדשים. המונח "גילוי" מתאים לתיאור תצפיות חדשות, למשל - דיווי **גילה** את הנתרן. כאשר מתייחסים להכללות חדשות, המונח "ניסוח" עדיף. למשל, במקום לומר כי בויל **ניסח** חוק שהכליל את תצפיותיו בנושא הקשר בין לחץ לבין נפח של גזים. ביחס למנגנונים חדשים, המונח המתאים הוא "הצעה" או "הנחה": ברנולי **הציע** מנגנון קינטי כדי להסביר את חוק בויל. העובדה כי המנגנון של ברנולי התקבל רק יותר ממאה שנה לאחר שהוצע מדגישה את ההבדל בין **הנחה** לבין **גילוי**...

יישום בבדיקת דו"חות מעבדה

במהלך הלימודים בביה"ס, אין מקום המשקף טוב יותר את עבודתו של מדען ממעבדת התלמידים. התלמידים נדרשים לערוך תצפיות, לנסח הכללות ולהסביר את ממצאיהם. ההבחנה בין אופני ההתייחסות השונים מאפשרת להנחות את התלמידים להפיק את המרב מהתנסות זו.

כאשר הם נדרשים לנסח את מטרת הניסוי, תלמידים רבים מסתפקים בהתייחסות לתצפית בלבד.

לדוגמה: "מטרת הניסוי היא למדוד את נפח הגז בטמפרטורות שונות". הם מחמיצים את העובדה שמטרתו של המדע היא לא רק לתאר תצפיות, אלא לנסח הכללות על סמך התצפיות. ניסוח טוב יותר של המטרה יהיה "למצוא את הקשר בין נפח הגז לבין הטמפרטורה".

ישנם גם ניסויים שמטרתם ללמד על מנגנון התגובה,



נושפים אוויר חם המכיל אדי מים; כאשר האוויר החם והלח מתקרר מחוץ לגוף, תנועת החלקיקים בו מואטת, וחלקיקי המים הגזיים מתקבצים יחד לטיפות זעירות של נוזל. אוסף של טיפות נוזל זעירות המרחפות באוויר נקרא "תרסיס". בעוד שאת אדי המים הגזיים לא ניתן לראות, הרי התרסיס נראה לעינינו כעשן לבן, בדומה לערפל או לעננים.

מעבר לחינוך התלמידים לחשיבות ניסוח תשובה מלאה (ולא רק "נכונה"), לדרישה המפורשת לשימוש בשלושת אופני ההתייחסות יש מספר יתרונות נוספים:

- בשעת המבחן, הדרישה נותנת לתלמידים הזדמנות לבחון את תשובתם ולגלות בעצמם טעויות בהבנתם. למשל, ללא הדרישה להתייחסויות מרובות, היו תלמידים רבים עונים לשאלה לעיל בתשובה: "אדי מים הנפלטים בתהליך הנשימה", ועוברים לשאלה הבאה. אולם הניסוח המפורש של השאלה דורש מהתלמידים לבחון את תשובתם ולהסבירה באופנים שונים, דבר שיוביל אותם לסתירה במקרה של תשובה לא

נכונה. למשל, התשובה "אדי מים" לא תאפשר להם לתאר מנגנון המסביר את התצפית כי העשן מופיע ביום קר אך נעדר ביום חם, דבר הרומז על טעות בתשובה הבסיסית. גם הניסיון למצוא הכללה המקשרת בין הימצאות אדי מים בנשימה לבין הטמפרטורה הנמוכה מחוץ לגוף יכול לרמוז לתלמיד כי מדובר בתהליך התעבות.

בזמן בדיקת המבחן, ניתן לציין ליד התשובה את המרכיבים החסרים, למשל: "חסרה התייחסות למנגנון". זהו משוב ענייני לתלמידים, שאינו מחייב את המורה להשלים עבור התלמיד את התשובה המלאה. הדבר מאפשר לדרוש מהתלמידים לתקן את תשובותיהם בעצמם באופן מושכל.

לטווח הארוך, התלמידים לומדים לנסח את דבריהם כטיעונים מדעיים ולא כאמירות סתמיות: ההתייחסות להכללה באה להראות כי האמירה היא מסקנה מחוק התקף גם במקרים אחרים; ההתייחסות למנגנון מספקת הסבר סיבתי לאמירה, המסתמכת על תיאוריה מקובלת המסבירה מספר רב של תופעות.

