

סודות הבקרה – מסע אל תוך החקר

או: הסבר אפשרי, הסבר חלופי ומה שביניהם

מאת אורה הירש ושרה ורטהימר

בתוכנית הלימודים החדשה נוסחו שלושה היבטים הקשורים זה בזה, שראוי להדגיש אותם בהוראת הביולוגיה: המדע כחקר, מדע וחברה וההיסטוריה של הרעיונות הביולוגיים. הוראה בדרך החקר מאפשרת לתלמיד הלומד ביולוגיה להבין את תהליך יצירת הידע במדע, ואף לבנות באופן אקטיבי את הידע האישי שלו (דרך זו תואמת את הגישה הקונסטרוקטיביסטית להוראה וללמידה).

הוראה של מיומנויות החקר יכולה להתבצע בדרכים אחדות: עריכת ניסויים במעבדה, קריאת מאמרים וניתוחם, ניתוח אירועים מההיסטוריה של המדע וביצוע תצפיות בשדה. בלמידה בדרך החקר, תכנון מערך ניסוי, ביצועו וניתוח תוצאותיו הם מרכיבים מרכזיים.

מערך ניסוי חייב לכלול **בקורות המאפשרות לשלול הסברים חלופיים**, ואלה מקנות תוקף למסקנות מהניסוי.

החוקר ריצ'ארד פיינמן בספרו, "אתה בטח מתלוצץ מיסטר פיינמן", היטיב להסביר את החשיבות של ביצוע בקורות בניסוי:

"... אם אתם עושים ניסוי, אתם צריכים לדווח על כל מה שלדעתכם עלול לשלול ממנו את תוקפו – לא רק על מה שאתם חושבים שהיה בסדר אתו: סיבות אחרות שאולי יכולות להסביר את התוצאות שקיבלתם: דברים שחשבתם עליהם שסילקתם באמצעות איזה ניסוי אחר... אני מדבר על סוג ספציפי נוסף של יושר שאיננו 'לא לשקר' אלא לעשות שמיניות באוויר כדי להראות שאולי אתם טועים... זאת האחריות שלנו כמדענים..."

הבנת הצורך בתכנון בקורות לניסוי ובביצועו, וכן האופן שבו יש להשתמש בתוצאות בקרה מסוימת הם קשיים משמעותיים בעבור תלמידים רבים. במאמר נתייחס לסוגים אחדים של בקורות, נציע סיבות אפשריות לקשיי התלמידים וכן רעיונות לפעילויות העשויות לשפר את ההבנה.

חשיבות הבקרה במערך הניסוי

לשאלת מחקר/לתופעה ייתכנו בדרך כלל כמה תשובות אפשריות/הסברים אפשריים, המבוססים על ידע ביולוגי קודם. מתכנן הניסוי בוחר לבדוק בניסוי את אחד **ההסברים האפשריים**. הסבר זה הוא **ההשערה** שתיבדק בניסוי, שאר ההסברים הם **הסברים חלופיים**. תוצאות ניסוי עשויות לאשש את ההשערה הנבדקת בניסוי, אך בלי בקורות מתאימות ייתכן שתוצאות הניסוי **לא** יאפשרו להפריך את

ההסבר החלופי, השונה מההסבר האפשרי הנבדק. על כן רצוי לתכנן מראש בקרות, שתאפשרנה לשלול את ההסברים החלופיים.

דוגמה א':

שאלה: מה גורם לפירוק עמילן בפקעת תפוח אדמה?

השערה: פירוק עמילן בפקעת תפוח אדמה מזורז על ידי אנזים.

משתנה תלוי: פירוק עמילן.

משתנה בלתי תלוי: נוכחות אנזים עמילאז (או מפרק עמילן) במיצוי מפקעת תפוח אדמה.

מהלך ניסוי: הכנת מיצוי מפקעת תפוח אדמה והרחקת העמילן מהמיצוי. הוספת נפח מסוים של עמילן

למיצוי, הדגרת התערובת בטמפרטורה של 30°C ובדיקת פירוק העמילן שהוסף.

שיטת מדידה: הוצאת דגימות בפרקי זמן קצובים (עד חצי שעה), ובדיקתן עם יוד.

תוצאה: אחרי פרק זמן מסוים אין צבע כחול בהוספת יוד לדגימה,

לכאורה ניתן להסיק כי: עמילן התפרק על ידי אנזים שבמיצוי,

ואז ההשערה אוששה.

אך לתוצאות אלה ייתכנו גם הסברים חלופיים:

א. במיצוי יש חומר מפרק עמילן שאיננו אנזים;

ב. בתנאי הניסוי קיים פירוק עצמוני של עמילן.

מכאן, שלפני אישוש ההשערה על פי התוצאות, יש לבצע בקרות מתאימות, ורק בהתחשב בתוצאותיהן

ניתן יהיה לדחות את ההסברים החלופיים ולאשש את ההשערה (או לקבל אחד מהם ולהפריך את

ההשערה).

	הסבר חלופי	בקרה	מאפיין הבקרה
1	במיצוי יש חומר מפרק עמילן שאיננו אנזים	מיצוי מורתח + עמילן	בלי המשתנה הבלתי תלוי (המשתנה הבלתי תלוי לא הורחק אלא בוטלה פעילותו)
2	בתנאי הניסוי קיים פירוק עצמוני (ספונטני)	בדיקת עמילן בלי מיצוי, לאחר חצי שעה	בלי המשתנה הבלתי תלוי

אם בבדיקה של שני ההסברים החלופיים (א, ב) נמצא שאין פירוק עמילן לאחר 30 דקות, נוכל לאשש

את ההשערה.

בהתבסס על ידע קודם, מתכנן הניסוי יכול לנסח הנחה, שעל פיה עמילן אינו מתפרק באופן עצמוני

בתנאים כמו אלה שבהם בוצע הניסוי, ולוותר על הבקרה הבודקת את ההסבר החלופי שבסעיף ב'.

אילו תוצאות הניסוי היו אחרות, ולאחר 30 דקות לא היה פירוק של עמילן בנוכחות המיצוי, גם אז לא ניתן היה לקבוע בוודאות שאין אנזים במיצוי. ייתכן ששינוי אחד הגורמים הקבועים, כגון הארכת זמן הבדיקה, או הגדלת ריכוז המיצוי, היה גורם לתוצאות שונות ובעקבותיהן למסקנה שונה. מכאן, שאישוש ההשערה (או הפרכתה) מוגבל לתנאים שבהם התבצע הניסוי. ייתכן גם, שבמיצוי תפוח אדמה מתקיים תהליך של יצירת עמילן (בקצב דומה לתהליך הפירוק).

בניסויים שבהם אי אפשר להשמיט את המשתנה הבלתי תלוי, או בניסויים כמותיים, שבהם המשתנה הבלתי תלוי משתנה בהדרגה, במערך ניסויים אלה כלולה **בקרה פנימית** המאפשרת לשלול את ההסבר החלופי (ראו דוגמה ב').

דוגמה ב':

שאלה: מהי השפעת דרגת ה-pH על פעילות האנזים עמילאז במיצוי תפוח אדמה?

השערה: ככל שדרגת ה-pH של מיצוי תפוח האדמה גבוהה יותר, כך תגבר פעילות האנזים עמילאז, מעבר לדרגת pH מסוימת פעילות האנזים תרד.

משתנה תלוי: קצב פעילות העמילאז

משתנה בלתי תלוי: דרגת ה-pH

מהלך הניסוי: הכנת מיצוי מפקעת תפוח אדמה והרחקת העמילן מהמיצוי. הוספת תמיסת חומצה או בסיס למיצוי לקבלת מיצויים בדרגות pH שונות, והוספת נפח קבוע של עמילן לכל אחד מהמיצויים. הדגרת התערובת בטמפרטורה של 30°C ובדיקת פירוק העמילן שהוסף.

שיטת המדידה: קביעת הזמן הדרוש לפירוק העמילן על ידי הוצאת דגימות בפרקי זמן קצובים ובדיקתן עם יוד.

תוצאות: קצב פירוק עמילן מיטבי בדרגת pH = 7, בדרגות pH נמוכות או גבוהות יותר קצב הפירוק נמוך יותר.

בניסוי זה ייתכן שקיימת השפעה של המשתנה הבלתי תלוי על שיטת המדידה. ייתכן שתוצאות הניסוי נובעות מהשפעת דרגת ה-pH של התערובת על התגובה בין עמילן ליוד, ולכן, נוסף על **הבקרה הפנימית** נוסף **בקרה לשיטת המדידה**.

מאפיין הבקרה	בקרה	הסבר חלופי	
בקרה פנימית	השוואה בין הטיפולים השונים (מערך הניסוי)	דרגת ה-pH אינה משפיעה על קצב פעילות האנזים	3
השפעת המשתנה הבלתי תלוי על שיטת המדידה	בדיקת תרחיפים של עמילן (בלי מיצוי) בדרגות pH שונות + תמיסת יוד	שינוי ה-pH במיצוי משפיע על תגובת יוד + עמילן	4

על סמך ידע קודם, מתכנן הניסוי רשאי להניח שבמיצוי תפוח האדמה החומר המפרק עמילן הוא

אנזים, ובתנאי הניסוי אין פירוק עצמוני של עמילן, ולהסתפק בבקורות 3 ו-4. בחסרונו של ידע זה, יש לכלול במערך ניסוי זה (דוגמה ב') גם את הבקורות שנכללו בדוגמה א'.

בניסוי דומה, שבו נבדקת השפעת דרגת pH על פעילות האנזים פפסין, המזרז פירוק חלבון (ראו בגרות תשס"ג, שאלון 043005, בעיה 1), נמצא שדרגת ה-pH האופטימלית לפירוק החלבון בנוכחות האנזים היא 2. בניסוי זה יש להוסיף בקרה שתשלו את ההסבר החלופי שפירוק החלבון ב-pH 2, נובעת מהשפעת ה**חומצה** על החלבון (הידרוליזה חומצית). הבקרה שתאפשר שלילת ההסבר החלופי, היא הוספת תמיסת חומצה לחלבון, לקבלת תמיסות בדרגות pH שונות, בלי האנזים (גורם קבוע).

דוגמה ג':

בניסויים שבהם שיטת המדידה מבוססת על שינויים בצבע או בעכירות, הערכה של מידת השינוי מתקבלת מהשוואת צבע או עכירות התמיסות בטיפולים השונים, לטיפול שבו לא חל שינוי צבע. גם להשוואה זו ניתן לקרוא בקרה, אם כי מקובל לכנותה "בלנק" או "מבחנת ייחוס". בניסויים שתוארו לעיל יש להוסיף:

מאפיין	הסבר	בקרה
השוואת הצבע (בלנק)	זהו הצבע שיתקבל כשכל העמילן פורק	מיצוי + תמיסת יוד
השוואת הצבע (בלנק)	זהו הצבע ההתחלתי, לפני שהחל פירוק	תמיסת יוד + עמילן

לסיכום:

בדוגמאות שלעיל תוארו בקורות מטיפוסים שונים: בקרה בלי המשתנה הבלתי תלוי, בקרה פנימית, בקרה לשיטת המדידה, בקרה בלי גורם קבוע ובקרת צבע (בלנק).

קשיים ושגיאות נפוצות, מקורם המשוער והצעות לטיפול

א. קושי בהבנת חשיבות הבקרה למערך הניסוי

קושי זה נובע מחוסר ידע ומקושי בהבנת מהות הבקרה. במהלך ההוראה מומלץ לבסס את ההסבר של הבקרה כדרך לשלילת הסבר חלופי (ראו הדוגמאות לעיל). כדאי לזמן מצבים שבהם התלמיד יצטרך להציע הסברים חלופיים להשערה, גם אם אינו נדרש או שאינו יכול מסיבות טכניות ואחרות לבדקם בניסוי.

ב. "הסבר" שטחי ולא מדויק של טיפולי בקרה

שגיאות אלה נובעות משימוש במושגים "בקרה פנימית" ו"בקרה חיצונית", בלי שהתלמיד מבין את מהות הבקרה. כדי לסייע לתלמיד להגיע להבנה משמעותית של הבקרה, רצוי להימנע משימוש בסיסמאות המבוססות על שינון ולהעדיף דיון במציאת הסברים חלופיים להשערה. בנוסף, רצוי שהתלמידים יתרגלו מצבים (בניסוי או "בניסוי יבש"), שבהם בטיפול הבקרה התוצאה איננה 0, כלומר יש להתחשב בתוצאות המתקבלות בטיפול זה לצורך הסקת המסקנות מהניסוי (ראו בטבלה להלן, בחינת בגרות במעבדה תשנ"ו 2).

אמצעי נוסף העשוי לחשוף את קשיי התלמיד ולאפשר למורה לטפל בהם, הוא דיון בזיהוי מרכיבי הניסוי ובזיהוי סוג הבקרה או/ו מאפייניה. ראוי לציין, כי הניסויים בבחינות הבגרות והשאלות המלוות אותם לא נכתבו למטרות הוראה. לפיכך, כאשר אנו משתמשים בניסויים במהלך ההוראה, ראוי שנוסיף עליהם שאלות וננסה לברר מה מבין כל תלמיד בהקשר למערך הניסוי ולבקרה

ג. חוסר הבחנה בין בקרה לחזרות

כדאי להדגיש את ההבדל בין בקרה לחזרות. הבקרה מקנה למסקנות תוקף, ומאפשרת לאשש את ההשערה ולשלול את ההסברים החלופיים. חזרות על הניסוי וקבלת תוצאות דומות תומכות בכך שהתוצאות אינן מקריות, דבר שמגדיל את מהימנות המסקנה.

ד. קושי בתכנון בקרות המתאימות להשערה הנבדקת ולשיטת המדידה

קושי זה נובע מכך שתכנון בקרה מתאימה להשערה נבדקת (או הסבר בקרה) דורש הבנה של כל מערך הניסוי: המשתנים, שיטות המדידה והגורמים הקבועים. מומלץ להסביר לתלמיד את העיקרון (כימי, פיזיקלי) שעליו מבוססת שיטת המדידה, שכן במקרים רבים יש לתכנן בקרה לבדיקת שיטת המדידה. כדי לאפשר הזדמנויות לדיון בנושא בקרה, מומלץ לכלול שאלות הנוגעות לאפיון הבקרה.

בנספח הבא כלולות שאלות הקשורות להבנה של מערך הניסוי והבקרה, שאותן ליקטנו ממקורות למיניהם: בחינות בגרות במעבדה, אוגדן ניסויים בביולוגיה, בחינות בגרות עיוניות וניתוח מאמרים.

