

סודות הבקרה - מסע אל תוך החקר

או: הסבר אפשרי, הסבר חלופי ומה שביניהם

אורה הירש ושרה ורטהימר*

בתכנית הלימודים החדשה נוסחו שלושה היבטים הקשורים זה בזה אשר אותם ראוי להדגיש 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 מהווים מרכיב מרכזי.

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

החוקר ריצ'ארד פיינמן בספרו "אתה בטח מתלוצץ מיסטר פיינמן" הטיב 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 בו יש להשתמש בתוצאות בקרה מסוימת מהווים קושי משמעותי לתלמידים רבים. במאמר נתייחס לסוגים אחדים של בקורות, נציע סיבות אפשריות לקשיי התלמידים והצעות לפעילויות העשויות לשפר את ההבנה.

חשיבות הבקרה במערך הניסוי

לשאלת מחקר/לתופעה יתכנו בדרך כלל מספר 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 ללא בקורות מתאימות יתכן שתוצאות אותו ניסוי **לא** יאפשרו להפריך את ההסבר חלופי, השונה מההסבר האפשרי הנבדק. על כן רצוי לתכנן מראש בקורות 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.

* אורה הירש (03-3485546), כיו"ס אחד הצט"ת.
שרה ורטהימר (03-6189023), תיכון דתי ר"ד.

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.

אם - התוצאה: אחרי פרק זמן מסוים אין צבע כחול בהוספת יוד לדגימה,

לכאורה ניתן להסיק ש: עמילן התפרק על-ידי אנזים שבמיצוי

ואז ההשערה אוששה.

אך לתוצאות אלו יתכנו גם הסברים חלופיים:

1. במיצוי יש חומר מפרק עמילן שאיננו אנזים
 2. 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 ללא מיצוי, לאחר חצי שעה	בלי המשתנה הבלתי תלוי

אם בבדיקה של שני ההסברים החלופיים (1, 2) נמצא שאין פירוק עמילן לאחר 30 דקות, נוכל לאשש את ההשערה.

בהתבסס על ידע קודם, מתכנן הניסוי יכול לנסח **הנחה** על פיה עמילן אינו מתפרק באופן עצמוני בתנאים כמו אלה שבהם בוצע הניסוי, ולוותר על הבקרה הבודקת את ההסבר החלופי שבסעיף 2.

אילו תוצאות הניסוי היו אחרות, ולאחר 30 דקות **לא** היה פירוק של עמילן בנוכחות המיצוי, גם אז לא ניתן לקבוע בוודאות שאין אנזים במיצוי. יתכן 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 בהם התבצע הניסוי. יתכן גם שבמיצוי תפוח אדמה מתקיים תהליך של יצירת עמילן (בקצב דומה לתהליך הפירוק). בניסויים בהם אי אפשר להשמיט את המשתנה הבלתי תלוי, או בניסויים כמותיים בהם 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 אנזים עמילאז במיצוי תפוח אדמה?

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

משתנה תלוי: קצב פעילות עמילאז

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 $\text{pH} = 7$, בדרגות pH נמוכות או גבוהות יותר קצב הפירוק נמוך יותר.

בניסוי זה יתכן שקיימת השפעה של המשתנה הבלתי תלוי על שיטת המדידה. יתכן שתוצאות הניסוי נובעות מהשפעת דרגת ה- pH של התערובת על התגובה בין עמילן ויוד, ולכן בנוסף

לבקרה הפנימית נוסיף 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 (ללא 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 אדמה החומר המפרק עמילן הוא אנזים, ובתנאי הניסוי אין פירוק עצמוני של עמילן, ולהסתפק בבקורות 3, 4. בחסרוננו 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 אנזים 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 שתשלול את ההסבר החלופי שפירוק החלבון ב- $\text{pH}=2$, נובעת מהשפעת החומצה על החלבון (הידרוליזה חומצית). הבקרה שתאפשר שלילת ההסבר החלופי, היא הוספת תמיסת חומצה לחלבון, לקבלת תמיסות בדרגות pH שונות, ללא האנזים (גורם קבוע).

דוגמה ג':



בניסויים בהם שיטת המדידה מבוססת על שינויים בצבע או בעכירות, הערכה של מידת השינוי מתקבלת מהשוואת צבע או עכירות התמיסות בטיפולים השונים לטיפול אשר בו 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



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

קשיים ושגיאות נפוצות, מקורם המשוער והצעות לטיפול

א. קושי בהבנת חשיבות הבקרה למערך הניסוי

קושי זה נובע מחוסר ידע וקושי בהבנת מהות הבקרה. במהלך ההוראה מומלץ לבסס את ההסבר של הבקרה כדרך לשלילת הסבר חלופי (ראו הדוגמאות לעיל). כדאי לזמן מצבים בהם 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 ובקרה "חיצונית" מבלי שלתלמיד יש הבנה של 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") בהם 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: 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. אי 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 המגדיל את מהימנות המסקנה.

ד. קושי בתכנון בקורות 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) עליו מבוססת שיטת המדידה שכן במקרים רבים יש לתכנן בקרה לבדיקת שיטת המדידה.

כדי לאפשר הזדמנויות לדיון בנושא בקרה, מומלץ לכלול שאלות הנוגעות לאפיון הבקרה. בהמשך כלולות שאלות הקשורות להבנה של מערך ניסוי ובקרה אותן ליקטנו ממקורות שונים: בחינות בגרות במעבדה, אוגדן ניסויים בביוכימיה, בחינות בגרות עיוניות וניתוח מאמרים.

לקט שאלות בנושא בקרה



להלן מובאות שאלות הנוגעות לבקרה אותן לקטנו ממקורות אחדים (בחינות בגרות, אוגדן ניסויים בביוגיה ועוד). מראה מקום של כל אחת מהשאלות יאפשר לקורא לברר את ההקשר בו נשאלו, ולשנותן על פי הבנתו.

ההערות הדידקטיות המצורפות יסייעו לקורא להבחין בין שאלות שבהן ניתן להסתפק בתשובה כללית ושטחית לבין אלה בהן נדרש הסבר מהות הבקרה וחשיבותה. בהכללה ניתן לומר שהבקרה מאפשרת הסקת מסקנות או מקנה תוקף למסקנה. **אין** להסתפק בתשובה כללית זו ובכל אחת מהדוגמאות רצוי לברר האם נדרש שינוי בשאלה, כך שהתלמיד יידרש להסביר מדוע אי אפשר לאשש את ההשערה ללא טיפול הבקרה, או מהו ההסבר החלופי שבקרה זו מאפשרת לשלול.

מקור השאלה ומספרה	נושא	שאלות הנוגעות לבקרה	הערות דידקטיות
מעבדה, תשל"ט, בעיה 90 * שאלה 13 חלק א	דיפוסיה ושטח פנים בגזר	מה תפקידה של מבחנה מס' 3?	התשובה "בקרה" אינה מעידה כמובן על הבנת חשיבותה של הבקרה. כדאי להימנע משאלה זו. "תשובה אפשרית": תפקיד המבחנה להחזיק את הנוזל בתוכה.....
מעבדה, תשל"ן (5), בעיה 135 * שאלה 14 חלק ב	חיידקים בחלב	איזה מידע על הניסוי ניתן לקבל מבדיקת מבחנה 5? מבדיקת מבחנה 6?	מבחנה 5 מכילה חלב מעוקר עם מתילן כחול ומבחנה 6 מכילה מתילן כחול ללא חלב. תלמיד יכול לזהות שאלו טיפולי בקרה, ולתאר את התוצאה הצפויה במבחנות אלו (אין שינוי בצבע מתילן כחול בחלב מעוקר, אין שינוי צבע ללא חלב טרי). השאלה אינה מכוונת להסבר על חשיבות הבקרות.
מעבדה, תשל"ב (1), בעיה 143 * שאלה 8 חלק א	בופר בתפוח אדמה	ציין מרכיבי ניסוי חשובים נוספים למערך שהצעת.	תלמידים יודעים שבכל ניסוי צריכה להיות בקרה, על כן עשויים להשיב לשאלה: בקרה, חזרות, גורמים קבועים. מבלי להבין את חשיבותו של כל מרכיב.
מעבדה, תשל"ב (3), בעיה 145 * שאלה 13 חלק ב	פוטוסינתזה	האם יש בניסוי זה בקרה? נמק.	"תשובה אפשרית": כן, כי לכל ניסוי צריך שתהיה בקרה
מעבדה,	אוסמוזה	מה הייתה הבקרה בניסוי	התלמיד מזהה בדרך כלל את טיפול

תשנ"ה (2) בעיה 153* שאלה 13 חלק ב		שערכת? הסבר.	הבקרה, בין כל הטיפולים. ההסבר יכול להתייחס לזיהוי הבקרה, לא בהכרח לחשיבותה.
בחינת בגרות עיונית, תשנ"ה (שאלון 920331) שאלה 17 פרק ג	השפעת חומרי דיגיטליס על תהליכים בתא	הועלתה גם השערה כי החומר דמוי הדיגיטליס המצוי בבע"ח מקורו במזון הצמחי שהם אוכלים. באחד הניסויים הושוותה רמת החומר דמוי הדיגיטליס בדמם של אוגרים, שמונם הצמחי מכיל כמות גדולה של דיגיטליס, לרמת החומר בדמן של חולדות שמונן הצמחי מכיל כמות קטנה של חומר זה. האם תוכל להסיק מניסוי זה שהחומרים דמויי הדיגיטליס בדמם של אוגרים וחולדות מקורם במזון הצמחי? הסבר	בניסוי המתואר יש שני משתנים בלתי תלויים ואי אפשר להסיק מסקנות ללא בקרות מתאימות. עיינו במאמר של ר. מנדלוביץ "החשיבה המדעית ומיומנויות החקר" בעלון למורי הביולוגיה, 1996, 147
מעבדה, תשנ"ו (2) בעיה 155* שאלה 12 חלק ב	פעילות האנזים קטלז	מה תורמת התוצאה במבחנה 1 להבנת תוצאות הניסוי?	מבחנה 1 היא ללא מי חמצן, והיא בקרה לשיטת המדידה, את התוצאה במבחנה זו צריך להחסיר מכל אחת מהתוצאות האחרות בניסוי
מעבדה, תשנ"ז (1) שאלה 10 חלק ב	פעילות עמילאז בנבטים שהונבטו בתמיסת מלח	מה חשיבות בדיקת העמילן במבחנה 3 בתחילת הניסוי ובסופו?	הבקרות הן חלק ממערך הניסוי שהתלמיד ביצע. התלמיד נדרש לנסח את "ההסבר החלופי".
מעבדה, ניסוי 3 נושא גלגולי אנרגיה עמ' 27 אוגדן ניסויים שאלה 11,12 חלק ב'	נשימת זרעים נובטים	בניסוי שביצעת חסרה בקרה. מהי לדעתך הבקרה המתאימה לניסוי? הסבר כיצד תוכל להשתמש בתוצאות של מבחנת הבקרה שהצעת, כדי לשפר את מהימנות הניסוי?	התלמיד נדרש לתכנן את הבקרה המתאימה ולהסביר את השימוש בתוצאות בקרה

מעבדה, תשנ"ח (1) שאלה 13 חלק ב	פעילות האנזים אינברטאז בשמרים	במערך הניסוי כלולות מבחנות בקרה. בטבלה שלפניך מוסברת החשיבות של כל אחת ממבחנות הבקרה. ... רשום את המספר של המבחנה המתאימה לכל אחד מההסברים. הבקרה מאפשרת לבדוק ש..... לא כל החומרים שבתסנין שמרים גורמים להיעלמות הצבע של $KMnO_4$. לא הסוכרוז גורם להיעלמות הצבע של $KMnO_4$.	בטבלה נתונים ההסברים החלופיים, התלמיד נדרש לשייך את טיפולי הבקרה להסבר החלופי שאותו שוללים.
מעבדה, תשנ"ח (4) שאלה 61 חלק ב	נשימה בבננה בוסר	איזו בקרה היית מציע להוסיף למערך הניסוי? הסבר.	בגלל אילוצי הבחינה לא נכללה בקרה במערך הניסוי. התלמיד יכול להציע בקרות שונות ולהסביר מדוע יש צורך בבקרה.
מעבדה, תשנ"ט, בעיה 5, חלק ב שאלה 75	השפעת אור וחושך על תהליכים המתרחשים בעלים ירוקים	האם נכון היה לערוך את הניסוי בלי מבחנה 3? נמק	מבחנה 3 היתה טיפול ללא גורם קבוע (עלים). תלמידים מזהים שטיפול זה הוא בקרה, ומתארים את תכולתה, במקרים רבים לא מסבירים את חשיבות הבדיקה. דרישה לנסח את ההסבר החלופי שניתן לשלול בעזרת בקרה זו, מונעת שימוש בסיסמאות.
מאמר מחקר: איך מזהים נמלה באורך... / א. דנין** שאלה 7	יחסי גומלין בין נמלים וצמחים (גדילן וברקן)	א. האם כלולות בקרות בניסוי? פרט. ב. האם נערכו חזרות בניסוי? פרט.	שאלות המאפשרות להבחין בין בקרה לחזרות.
מאמר מחקר: אולימפיאדה תשנ"ט לקט מאמרים באקולוגיה תשס"ג 2002	שונית האלמוגים באילת בסכנה	בהתייחס למחקר שנעשה באלמוגים בים התיכון: א. הצע בקרה נוספת למחקר. ב. במה הבקרה תסייע לביסוס המסקנות מהמחקר?	הצעות לבקרות שונות והבנת תרומת הבקרה לאישוש ההשערה או לביסוס המסקנה

מאמר מחקר: אולימפיאדה תשס"ב לקט מאמרים באקולוגיה תשס"ג 2002 שאלה ד	חידקים מדברים	בניסוי 1 תוארו שתי בקורות. ציין מה היו הבקורות, והסבר מדוע היה חשוב לכלול כל אחת מהן במערך הניסוי	נדרש ניסוח הסברים חלופיים להשערה הנבדקת, הסברים אותם ניתן לשלול באמצעות הבקורות המתוארות במאמר
מעבדה, תשס"ג, בעיה 1 שלב ב (שאלון 043005) שאלות 4, 5	השפעת דרגת pH על פעילות אנזים פפסין	הסתמך על מערך הניסוי והסבר מדוע בניסוי אין לשלול את האפשרות שהחלבון התפרק בהשפעת חומצה בלבד (ללא אנזים) הצע בדיקה שבאמצעותה תוכל לשלול את האפשרות....	בגלל אילוצי הבחינה חסרה בניסוי בקרה. עיין במאמר לעיל דוגמה ב'.
מעבדה, תשס"ג בעיה 1, 3 יח"ל (שאלון 920604) שאלה 4	בדיקת תהליך נשימה בתפוח אדמה	מבחנה 2 היא מבחנת בקרה. מדוע חשוב לכלול אותה במערך הניסוי?	

* הדוגמאות לקוחות מלקט בעיות למעבדה החוקרת בביווגיה (5 יח"ל).

** מתוך "איך לקרוא מאמר מדעי" מאת ל. פלד, ח. ברנהולץ