

עדכון: 6.12.16

סודות הבקרה – מסע אל תוך החקר ⁽¹⁾

או: הסבר אפשרי, הסבר חלופי ומה שביניהם

מאת: אורה הירש ושרה ורטהימר

"במהלך ההוראה של התכנים בביולוגיה יש לשים דגש על הבנת המדע כתהליך מחקרי, על התפתחות הרעיונות הביולוגיים ועל הבנת הקשרים שבין מדע, טכנולוגיה וחברה..... במדע אין מקבלים שום הסבר כמובן מאליו, אלא שואלים שאלות ובוחנים כל שאלה בשיטות מבוקרות. זהו תהליך של מחקר מתמשך בו הידע שנבנה מתפתח ומשתנה כל הזמן. תהליך זה מעודד בין השאר דיון, מתן פרשנויות שונות והסברים נוספים למסקנות של המחקרים הקודמים" ([תכנית הלימודים בביולוגיה 2015](#)).

הוראה בדרך החקר מאפשרת לתלמיד הלומד ביולוגיה להבין את תהליך יצירת הידע במדע, ולבנות באופן אקטיבי את הידע האישי שלו (דרך זו תואמת את הגישה הקונסטרוקטיביסטית להוראה וללמידה).

הוראה מפורשת של אסטרטגיות חשיבה מסדר גבוה המשולבת בתכני הלמידה 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 נכון 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

¹ גרסה ראשונה התפרסמה בעלון מורי ביולוגיה מס' 169 (2004) ובחוברת "הוראת ביולוגיה במעבדה ובשדה"

בקרות, נציע סיבות אפשריות לקשיי התלמידים וכן רעיונות לפעילויות העשויות לשפר את הבנה.

חשיבות הבקרה במערך הניסוי

לשאלת מחקר או לתופעה ייתכנו בדרך כלל כמה תשובות או 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 הניסוי יכולות לאשש את ההשערה הנבדקת בניסוי, אך בלי בקרות מתאימות ייתכן שתוצאות אלו **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 בלתי תלוי: נוכחות אנזים עמילאז (מפרק עמילן) במיצוי מפקעת תפוח אדמה.

משתנה תלוי: קצב פירוק עמילן.

שיטת מדידה: קביעת הזמן הדרוש לפירוק כל העמילן על ידי הוצאת דגימות בפרקי זמן קצובים (עד חצי שעה), ובדיקתן עם יוד.

מהלך ניסוי: הכנת מיצוי מפקעת תפוח אדמה והרחקת העמילן מהמיצוי. הוספת נפח מסוים של עמילן למיצוי, הדגרת התערובת בטמפרטורה של כ- 30°C ובדיקת דגימות.

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

לכאורה ניתן להסיק כי: עמילן התפרק על ידי אנזים שבמיצוי - **וההשערה אוששה**.

אך לתוצאות אלה ייתכנו גם הסברים חלופיים:

א. במיצוי יש חומר מפרק עמילן **שאיננו אנזים**.

ב. בתנאי הניסוי קיים פירוק עצמוני (ספונטני) 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 מההסברים ולהפריך את ההשערה).

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

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, שעל פיה עמילן אינו מתפרק באופן עצמוני בתנאים כמו אלה שבהם בוצע הניסוי, ולוותר על הבקרה הבודקת את ההסבר החלופי בסעיף 2 בטבלה.

אילו תוצאות הניסוי היו אחרות, ולאחר 30 דקות לא היה כלל פירוק של עמילן בנוכחות המיצוי, גם אז לא ניתן היה לקבוע בוודאות שאין אנזים במיצוי. ייתכן ששינוי אחד הגורמים הקבועים (כגון הארכת זמן הבדיקה, הגדלת ריכוז המיצוי, הורדה או העלאה של הטמפרטורה) יכול לגרום לתוצאות שונות ובעקבותיהן למסקנה שונה. מכאן, שאישוש ההשערה (או הפרכתה) מוגבל לתנאים שבהם התבצע הניסוי. ייתכן גם שבו זמנית מתקיים במיצוי תפוח אדמה 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, 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 בלתי תלוי: דרגת ה-pH.
משתנה תלוי: קצב פעילות האנזים עמילאז.
שיטת מדידה: קביעת הזמן הדרוש לפירוק כל העמילן על ידי הוצאת דגימות בפרקי זמן קצובים (עד חצי שעה), ובדיקתן עם יוד.
מהלך הניסוי: הכנת מיצוי מפקעת תפוח אדמה והרחקת העמילן מהמיצוי. הוספת תמיסת

חומצה או בסיס למיצי לקבלת מיצויים בדרגות pH שונות, והוספת נפח קבוע של עמילן לכל אחד מהמיצויים. הדגרת כל אחת מהתערובות בטמפרטורה של 30°C ובדיקת הדגימות.

תוצאות:

אחרי פרק זמן מסוים אין צבע כחול בהוספת יוד לדגימה שבה $\text{pH}=7$.
באותו פרק זמן, בדרגות pH נמוכות או גבוהות יותר לא כל העמילן פורק.
לכאורה ניתן להסיק כי: דרגת ה-pH האופטימלית לפירוק אנזימטי של עמילן היא 7 -
וההשערה אוששה.

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	תיאור הבקרה	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 צבע תרחיפים של עמילן (בלי מיצוי) בדרגות pH שונות + תמיסת יוד	שינוי ה-pH במיצי 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 דוגמה 15 בקובץ "[לקט שאלות בנושא בקרה](#)") בגרות 5 יח"ל תשס"ג, 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 $\text{pH}=2$, נובע מהשפעת החומצה על החלבון (הידרוליזה חומצית). הבקרה שתאפשר שלילת ההסבר החלופי, היא הוספת תמיסת חומצה לחלבון, לקבלת תמיסות בדרגות pH כמו אלה שהוכנו בניסוי, בלי האנזים (גורם קבוע) ובדיקה של הצטללות התרחיף.

... / המשך בעמ' 5

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 הבקרה	הסבר הבקרה	תאור הבקרה
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 בקרות מטיפוסים שונים: בקרה בלי המשתנה הבלתי תלוי, בקרה פנימית, בקרה לבדיקת ההתאמה של שיטת המדידה למשתנה הבלתי תלוי, 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 שבקובץ "[לקט שאלות בנושא בקרה](#)", בחינת בגרות במעבדה תשנ"ו בעיה 2, דוגמה 7).

אמצעי נוסף העשוי לחשוף את קשיי התלמיד ולאפשר למורה לטפל בהם, הוא דיון בזיהוי מרכיבי הניסוי, בזיהוי סוג הבקרה או/ו מאפייניה ובחשיבותה של כל בקרה למערך הניסוי. ראוי לציין, כי הניסויים בבחינות הבגרות והשאלות המלוות אותם לא נכתבו למטרות הוראה, ובשל הזמן המוגבל לביצוע ניסוי בבחינה, חלק מהבקרות כלל לא נכללו במערך הניסוי. לפיכך, כאשר אנו משתמשים בניסויים במהלך ההוראה, ראוי שנוסיף עליהם שאלות וננסה לברר מה מבין כל תלמיד בהקשר למערך הניסוי ולבקרה. במסגרת הכנת עבודת ביוחקר חשוב לתכנן את כל הבקרות הנדרשות, לדון בחשיבות של כל אחת מהן ואף לבצען, כך שהמסקנה שסיקו התלמידים מהניסוי תהיה תקפה.

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. אין צורך (אולי אפילו רצוי לא) להשתמש במהלך ההוראה במונחים "תוקף" ו"מהימנות". תלמידים נוטים להתבלבל בין שני המושגים. עם זאת, חשוב מאד לקיים דיון שבו תובהר חשיבות הבקרות והחזרות.

ד. קושי בתכנון בקרות המתאימות להשערה הנבדקת ולשיטת המדידה

קושי זה נובע מכך שתכנון בקרה מתאימה להשערה נבדקת (או הסבר חשיבות הבקרה) 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 גם בקרה לבדיקת שיטת המדידה. כדי לאפשר הזדמנויות לדיון בנושא בקרה, מומלץ לכלול שאלות הנוגעות לאפיון הבקרה בכל ניסוי שמבצעים.

בקובץ "[לקט שאלות בנושא בקרה](#)" כלולות שאלות הקשורות להבנה של מערך הניסוי והבקרה, שאותן ליקטנו ממקורות שונים: בחינות בגרות במעבדה, אוגדן ניסויים בביולוגיה, בחינות בגרות עיוניות וניתוח מאמרים.