

מאמרי העשרה כלליים למורים

מאפייני המחקר המדעי וההבדל בין תצפית לניסוי

מחקר מדעי מהו?

לפני כמה עשורים הגדיר החוקר, קרלינג, את המחקר מדעי באלה המילים: בדיקה שיטתית, מפוקחת, אמפירית ונתונה לביקורת, של תופעות טבעיות, המתבססת על תיאוריה והשערות על הקשר שבין תופעות טבעיות אלו. מטרת המחקר המדעי היא לגבש חוקים כלליים שימזגו ידע קיים, יסבירו את התופעות ויאפשרו לחזות אירועים שעדיין לא התרחשו. מהימנותו של מחקר מדעי נבחנת, בין השאר, ביכולת לחזור עליו. לכן אין ערך למחקר ללא פרסומו במדויק על כל פרטיו. המסקנות חייבות להתבסס על עובדות מתועדות שנמדדו בניסוי ובתצפית ועל נתונים שנותחו בהתאם לכללים מתמטיים בינלאומיים.

המחקר המדעי מנסה לגבש תיאוריה שהיא למעשה מערכת של מושגים הקשורים זה בזה. המושגים הם משתנים, שמנסים להסביר את התופעה הנבדקת באמצעות הקשרים ביניהם. כל מחקר מדעי אמין מחייב עמידה בכללי יסוד ברורים שהחשובים שבהם: הצבת בעיית (שאלת) מחקר, הבודקת קשר בין משתנים. כל שלבי היסוד של המחקר המדעי מבוססים על משתנים אלו: השערת המחקר, הבקרה, הגורמים הקבועים במחקר, אופן איסוף הנתונים במחקר, הצגתם וניתוחם. מחקר מדעי אמין מתייחס אך ורק למשתנים האמורים. על החוקר לבודד את השפעתם של משתנים נוספים העשויים להשפיע על התוצאות. אנחנו מכנים זאת בשם: בידוד משתנים. כאשר התיאוריה שהמחקר מתבסס עליה מורכבת, על החוקר לבצע מחקרי משנה אחדים שביחד הם יוצרים תמונה כוללת המאפשרת הבנה של התופעה הנבדקת. אם לדוגמה ננסה לחקור את תהליך גדילת צמח כלשהו באמצעות מעקב אחר התארכות הגבעול, אחר העלייה במסת הצמח או אחר מדד אחר שנבחר, נבצע כמה מחקרים שכל אחד מהם יבדוק את השפעתו של גורם אחר על תהליך הגדילה: השפעת עוצמת האור, השפעת הטמפרטורה או השפעת המים.

המשתנים במחקר המדעי

במערך מחקר של ניסוי מבחינים בין שני סוגים של משתנים: **משתנה בלתי תלוי** – גורם שהחוקר משנה או קובע אותו במחקר כדי לבדוק את השפעתו על התופעה הנחקרת. המשתנה הבלתי תלוי מכונה כך כיוון שהחוקר הוא שמבצע בו שינויים והם אינם נובעים מהתופעה הנבדקת. **משתנה תלוי** – השינויים בו עשויים להיות תלויים בגורם הנבדק במחקר, כלומר במשתנה הבלתי תלוי.

במחקר מדעי נעזרים החוקרים בשני כלי מחקר מרכזיים: תצפית וניסוי.

ההבדל בין תצפית לניסוי

תצפית:

צפייה בתופעה טבעית ומדידת משתנים הקשורים בה בלי להתערב ולנסות להשפיע על התוצאות. החוקר אינו משנה משתנים נבדקים ואינו משפיע על התוצאות המתקבלות. הוא רק קובע את מערך המשתנים שבהם תתמקד התצפית שלו.

החוקר יבחר לבצע תצפית במקרים שבהם אינו מכיר את כל המשתנים הקשורים בתופעה, או כאשר אינו יכול לשלוט בהם. עם זאת יכול החוקר לבדוק קשר בין משתנים וגם למדוד משתנים. כך למשל בבדיקת פעילות של נמלים יעקוב החוקר אחרי שעות הפעילות ביממה, אחרי המרחקים מהקן שהנמלים מגיעות אליהם או מסלולי תנועתן. הוא יכול למדוד גם טמפרטורה ולחות יחסית של האוויר כדי לראות אם יש קשר בין התנהגות הנמלים למשתנים אלה. אך הוא אינו יכול לשלוט בהשפעתם של כל הגורמים הפועלים בשטח ולכן הוא יכול לגלות רק מתאם בין משתנים ולא קשר סיבתי ביניהם.

ניסוי:

התערבות במהלך התופעה הטבעית כדי להוכיח את הקשר בין המשתנה התלוי למשתנה הבלתי תלוי. ההתערבות נעשית תוך כדי בידוד משתנים וביצוע בקרות מתאימות, או במילים אחרות, החוקר מבצע שינוי מתוכנן וידוע מראש של המשתנה הבלתי תלוי ובודק כיצד משפיע השינוי על המשתנה התלוי. אם נחזור למחקר הנמלים, יכול החוקר להוסיף מכשולים בדרך או מזון ולראות כיצד תשתנה התנהגות הנמלים. זהו ניסוי שדה כי החוקר אינו יכול לשלוט בו על כל המשתנים. כדי שיוכל לבודד משתנים על החוקר לבצע ניסוי מבוקר בתנאי מעבדה.

דוגמאות לתצפיות ולניסויים בספר הלימוד

כאשר בודקים את תכונת המסיסות של חומרים בנוזלים מבצעים תצפית ולא ניסוי. התלמידים בוחרים אילו חומרים יערבבו עם המים כדי לבדוק את מסיסותם במים, אך הם אינם מנסים להשפיע על תכונת המסיסות אלא רק צופים בה. לכן זו תצפית לכל דבר. כך גם בתצפית הבודקת הולכת חשמל והולכת חום במתכות ובחומרים אחרים. לעומת זאת, כאשר מוסיפים אנזימי עיכול וחומצה (הרכב חומרים המדמה את ההרכב הכימי של נוזלי העיכול בקיבה) ובודקים את השפעתם על פירוק חלבונים בהשוואה למבחנה בלי מרכיבים אלה, מבצעים ניסוי. הרכב החומרים במבחנה הוא המשתנה הבלתי תלוי שהתלמידים משנים בניסוי: הם חושפים חלבונים להרכב חומרים שונה (סביבה חומצית – במבחנה עם תוספת חומצה המלווה בתוספת של אנזימי עיכול; וסביבה ניטרלית – במבחנה בלי תוספת חומצה וללא תוספת אנזימי עיכול) ומשווים את מידת פירוק החלבונים בשתייהן.

גם כשבודקים השפעת מיצי מרה על פיזור שומנים במים מבצעים ניסוי: אנחנו מוסיפים לשתי מבחנות שומנים. לאחת מהמבחנות אנחנו מוסיפים גם מיץ מרה ומשווים את השפעתו על פיזור השומנים בהשוואה למבחנה שלא הוספנו בה מיץ מרה. תוספת מיץ המרה למבחנה הוא המשתנה הבלתי תלוי בניסוי (עם מיץ מרה ובלתי מיץ מרה). אנחנו מנסים לשנות את התכונה הנבדקת, מידת ההתפרקות של חלבונים או מידת הפיזור של השומנים במים, ולכן אלה הם **ניסויים**.

בהפניה למשימות בספר הקפדנו על ההבחנה בין תצפית לניסוי. כדי לא להקשות על התלמידים, כדאי לציין בפניהם שבניסוי אנחנו **מתערבים** ומשנים גורמים כדי לבדוק את השפעתם על תופעה נחקרת.

בתצפית אנחנו בודקים תכונות ולפעמים גם מבצעים מדידות מתאימות כדי לברר יותר במדויק את התכונות או המאפיינים של התופעה הנחקרת, אבל אנחנו לא משנים משתנים שיכולים להשפיע על התכונות האלה, כמו למשל שינוי הטמפרטורה כדי לבדוק מסיסות של חומרים במים, או כדי לבדוק את השפעתה על גדילתם של נבטים או של צמחים.

על מושג החיים

פרופסור ישעיהו ליבוביץ, מחשובי הוגי הדעות במאה ה-20, הניח את היסודות להגדרה העדכנית של מושג החיים. היותו פילוסוף, ביולוג ויהודי שומר מצוות הובילו את תפיסתו להגדרות יוצאות דופן בדייקנותן ובגישתן, הגדרות שיוצרות קשר מרתק בין הדת למדע.

פרופ' ליבוביץ אימץ במשנתו את קביעתו של הפיזיולוג הצרפתי קלוד ברנרד מהמאה ה-19 לפיה יש להבחין בין **מנגנוני החיים**, שאותם המדע מתאר ומנסה לפענח, לבין **מהות החיים** ותכליתם שאתם אין המדע יכול להתמודד, ושם מקומה של הדת והאמונה. בהבחנה זו יכול החוקר, גם אם הוא איש מאמין, לקבל תיאוריות אבולוציוניות, כיוון שאלו עוסקות במנגנונים ולא במהות.

פרופ' ליבוביץ לא קיבל כלשונה את ההבחנה הפשטנית הטוענת שהחיים הם היפוכו של המוות. לשם כך הוא הביא כדוגמה את תא החיידק שיכול תיאורטית (אם יספקו לו די מזון ותנאי קיום מתאימים) להתחלק ללא סוף ולא למות לעולם, התנהגות הסותרת את הטענה שחיים הם היפוכו של המוות. להלן פסקה שכתב פרופ' ליבוביץ בנושא ערך החיים, שמסכמת את גישתו:

תופעת החיים, ציון הגבול בין מכלול האירועים הפיסיקו-כימיים בדומם לבין החי, לא זכתה להגדרה מדעית וספק אם תוכל לזכות בהגדרה כזו. אין בידינו דבר זולת האמירה האינטואיטיבית שהחיים הם מה שעומד כנגד המוות. אין הביולוגיה חוקרת את החיים, אלא רק את המנגנונים הפועלים בהם. החיים עצמם אינם יכולים להיתפס בעין המדע משום מהותם האוטונומית המאופיינת בשאיפה ובמגמה, בהתכוונותם לעתיד; זאת לעומת מנגנוני החיים, הקיימים מכורח הסיבתיות. מכאן שההפרדה בין החיים לבין מנגנוני החיים מוחלטת, וכמוה ההפרדה הקרובה אליה, בין ההתפתחות – התכליתית, לבין התורשה – הסיבתית.

מנגנוני החיים הם תנאי לחיים, ואילו החיים עצמם מאופיינים בהתפתחות הכיוונית, שאין להסבירה אלא בקיומה של תכלית: ההתפתחות אינה מכוונת על ידי גורמים פיסיקו-כימיים קיימים מראש, אלא מכוונת את הפקתם, דהיינו קודמת להם. לכך מתקשרת ההבחנה בין האורגני לבין המכני – במכני מתקיימים יחסי גרימה הייררכיים וחד-כיווניים; באורגני מתקיימים יחסי גרימה הדדיים והפיכים.

פרופ' ליבוביץ כתב את ערך ה"חיים" באנציקלופדיה העברית ומשם נגזר המשך המאמר הזה. אנו מפנים את המורים אל ההגדרה הרחבה המופיעה במקור חשוב זה.

בהגדרתו נוגע ליבוביץ בהיבטים רבים המאפיינים יצור חי. למען הפשטות, נמנה שלושה מאפיינים עיקריים:

1. היכולת להפיק אנרגיה
 2. היכולת לייצר חומרים על בסיס תבנית ידע קיימת
 3. הומיאוסטאזיס – היכולת לשמור על סביבה פנימית קבועה השונה מהסביבה החיצונית
- כל יצור חי מקיים את כל שלושת המאפיינים האלה גם יחד.

לפני שנרחיב את הדיון בשלושה מאפיינים אלה חשוב להדגיש שפרופ' ליבוביץ התייחס בהגדרתו רק לצורות החיים כפי שהן מוכרות על פני כדור הארץ. כל צורות החיים על פני כדור הארץ מבוססות על שרשרות פחמן (חומרים אורגניים) ועל המים כממס. יחידת היסוד של קיומם של כל היצורים החיים על פני כדור הארץ היא התא. המדענים לא הגיעו לידי הכרעה בשאלה של מהות החיים של שתי צורות טפיליות המתקיימות בתאים של יצורים חיים (אם כי הם עצמם אינם בנויים מתאים):

נגיפים ופְּרִיוֹנִים (שהם חלבונים בעלי כושר שכפול עצמאי, ואשר עלו לכותרות עם גילויים כגורם למחלת "הפרה המשוגעת"). אם רוצים להתייחס לאפשרות קיומם של חיים גם מחוץ לכדור הארץ, נדרשת הגדרה רחבה יותר של מושג החיים.

מה משמעותם של המאפיינים בהגדרת ה"חיים" שקבע פרופ' ליבוביץ?

1. היכולת להפיק אנרגיה

כל היצורים החיים המוכרים לנו מפיקים אנרגיה כימית לשם קיום התהליכים הכימיים והפיזיולוגיים השונים בגופם. תהליך הפקת האנרגיה המוכר והנפוץ ביותר על פני כדור הארץ הוא תהליך הנשימה התאית, שבו מתפרקת מולקולה אורגנית (כמו למשל גלוקוז) למרכיביה. האנרגיה המתקבלת בתהליך הנשימה התאית מאפשרת את קיומם של תהליכים לבניית מרכיבים של תאי הגוף. תהליכים נוספים המשמשים להפקת אנרגיה הם תהליך התסיסה (פירוק חלקי של החומר האורגני ללא צורך בחמצן) או חמצון של תרכובות גופרית או חנקן על ידי חיידקים.

2. היכולת לייצר חומרים על פי תבנית ידע קיימת

כל היצורים החיים על פני כדור הארץ מכילים בגופם חומצת גרעין - החומר התורשתי הידוע בשם DNA. ה-DNA הוא מולקולה מורכבת האוצרת בתוכה את המידע הדרוש ליצירת מגוון החומרים הבונים את גופו של היצור החי. זאת ועוד, למולקולת ה-DNA מבנה דומה בכל היצורים החיים, מתא של מדוזה ועד לתא של האדם.

המאפיין המוגדר כ"יכולת לייצר חומרים על פי תבנית ידע קיימת" כולל בתוכו שני היבטים הקשורים לחומצת הגרעין:

- א. שכפול ה-DNA. תהליך זה הוא חלק בלתי נפרד מתהליך הרבייה בכל היצורים החיים. בכל תהליכי הרבייה המידע הגנטי משוכפל והעתקיו עוברים לצאצאים.
- ב. בניית חלבונים, המבוססת על המידע הגנטי השמור ב-DNA. בהיבט זה הקוד הגנטי מתורגם מתבנית אחת שבחומצת הגרעין לתבנית אחרת שמתבטאת במבנה של החלבונים. שינויים בהרכב ה-DNA יוצרים את המגוון העצום של יצורים חיים על פני כדור הארץ.

3. הומויאוסטאזיס - שמירה על סביבה פנימית קבועה השונה מן הסביבה החיצונית

קיום חיים פירושו שמירה על סביבה פנימית קבועה. ביצורים חיים שגופם בנוי רק תא אחד המוקף קרום, מבחינים בדרך כלל בהבדלים ניכרים משני צדי הקרום. ביצורים שגופם בנוי תאים רבים, מבחינים לא רק בתכונות שונות של הסביבה התוך-תאית, אלא גם בסביבה התוך-גופית שהיא שונה מהסביבה החיצונית. השוני עשוי להתבטא בחומרים המרכיבים כל סביבה, בצפיפותם ובריכוזיהם. כך לדוגמה, בגופם של כל היצורים החיים יש מים. כל יצור חי חייב לשמור בגופו מים בריכוז שהוא שונה בדרך כלל מזה שבסביבה החיצונית. בדומה למים, יש עוד חומרים רבים שהיצורים החיים קולטים מהסביבה ושומרים אותם בגופם בריכוזים שונים מאלה שבהם מוצאים אותם בסביבה (למשל מינרלים ומלחים).

אצל יצורים רבים (ובמיוחד אצל המורכבים שבהם) טמפרטורת הגוף שונה מזו של הסביבה החיצונית. בעלי חיים הנמנים עם המחלקת העופות או עם מחלקת היונקים יכולים לווסת את טמפרטורת גופם באמצעות תהליכים פיזיולוגיים או התנהגותיים ולשמור על הטמפרטורה תוך-גופית בטווח קבוע פחות או יותר, שהוא שונה מהטמפרטורה החיצונית. בעלי חיים ממחלקות אחרות חייבים גם הם לשמור על סביבה פנימית קבועה, אולם האמצעים העומדים לרשותם הם לרוב התנהגותיים ולא פיזיולוגיים. אך היכולת שלהם לשמור על סביבה פנימית קבועה היא מוגבלת. כשנוצרים בסביבה החיצונית תנאים קיצוניים, מעבר ליכולת הוויסות והשימור של היצורים החיים, מנגנוני ההומויאוסטאזיס עלולים לקרוס ולגרום למוות.