



הוראה לשם הבנת הקשר בין מבנה לתפקוד באמצעות חקר ביומימטי

כיצד אפשר להיעזר בתחום הביומימיקרי על מנת ללמד עיקרון ביולוגי באופן משמעותי? חומרי למידה והערכה שפותחו במסגרת קורס ביומימיקרי אוניברסיטאי מאפשרים הצצה לתהליך למידה באמצעות חקר ביומימטי. הדרך שבה הסטודנטים התבקשו לתאר תופעות ביולוגיות ולחקור אותן כך שיוזנו גם בתחום ההנדסה יכולה לסייע בהוראת העיקרון הביולוגי של התאמה בין מבנה ותפקוד. המעוניינים לאמץ רעיון זה יכולים למצוא כמה המלצות להתאמת תהליך הלמידה לתלמידי תיכון.

מבוסס על המאמר:

Inbal E. Flash Gvili, Marc J. Weissburg and Jeannette Yen (2016): Development of Scoring Rubric for Evaluating Integrated Understanding in an Undergraduate Biologically-Inspired Design Course. International Journal of Engineering Education: Vol. 32, No. 1(A), pp. 123–135.

עיבוד: ד"ר ענבל פלאש-גווילי

מבוא

1.1 קורס תכנון מוצרים בהשראת חקר ביולוגי

הקורס "תכנון מוצרים בהשראת חקר ביולוגי" (biologically inspired design) נועד ללמד עקרונות בסיסיים בתחום זה, ולפתח בקרב סטודנטים הבנה איך לשלב ידע מתחומי הביולוגיה וההנדסה. הקורס מתקיים זה תשע שנים (2005-2014) במכון ג'ורג'יה לטכנולוגיה בארצות הברית, ואורכו 15 שבועות, שבהם נפגשים 40 סטודנטים בשלבים שונים של התואר הראשון פעמיים בשבוע למשך שעה וחצי. הסטודנטים מגיעים מחוגים מגוונים: ביולוגיה, הנדסה מכנית, הנדסה ביו-רפואית, הנדסת מערכות והנדסת חומרים. את הקורס מעבירים ארבעה מרצים, אף הם מתחומים מגוונים: שני ביולוגים, מהנדס מערכות וחוקר מדעי המחשב. לכל המרצים ניסיון בפיתוח מוצרים בהשראת הטבע.

הסטודנטים בקורס מתבקשים לפתח פתרון או מוצר טכנולוגי בהשראת חקר המנגנונים שבהם מערכות ביולוגיות מוציאות לפועל את תפקודיהן. המוצר מפותח על ידי צוותים המורכבים מסטודנטים מתחומי ידע שונים, וכך מתרגלים שיתוף פעולה בין התחומים. הקורס מורכב משתי משימות למידה מרכזיות. הראשונה, שנציג כאן, מתמקדת בחקר מבנה ביולוגי בדגש של ניתוח מערכות, והשנייה מתמקדת בתכנון מוצר טכנולוגי בהשראת חקר זה, ואותה לא נציג במאמר זה.

תהליך החשיבה הביומימטי מורכב משני שלבים: שלב ראשון, שבו מבני היצורים החיים מדומים לרכיבי מערכת טכנולוגית ונחקרים מתוך כוונה לפתח הבנה מעמיקה של האופן שבו הם פועלים בסביבה טבעית מסוימת ומוציאים לפועל תפקוד מסוים; ושלב שני, שבו הבנה זו משמשת לתכנון מוצר טכנולוגי הפותר בעיה הנדסית באופן חדשני. דוגמה לכך היא הבנת הדרך שבה רכיבי המבנה של קורי עכביש פועלים ומאפשרים למערכת להיות עמידה בפני קריעה על ידי חרקים מעופפים שנתקלים בה, ועם זאת בעלת משקל קל; הבנה זו יכולה לסייע בפיתוח חומר שישולב באפוד מגן למניעת כניסה של קליעים מחד גיסא ואשר יחסוך נשיאת משקל מיותר בפעילות מבצעית מאידך גיסא.

בהמשך נציג את משימת הלמידה אשר הייתה חלק מקורס אוניברסיטאי בביומימיקרי. המשימה מתבססת על יישום תבנית חשיבה מתחום ניתוח המערכות לחקר מבנים ביולוגיים, וכוללת רצף של פעילויות וקריטריונים להערכה של הבנה. בתוך כך נציג גם הצעות להתאמת חלקים ממשמת הלמידה להוראת הביולוגיה בחטיבה העליונה. שימוש יצירתי בחלקים שונים של המשימה יכול להוות דרך להוראת עקרון ההתאמה בין מבנה לתפקוד ומחובר למציאות של עולם התעשייה.

1.2 שימוש בתבנית החשיבה מבנה-מנגנון-תפקוד

תבנית החשיבה מבנה-מנגנון-תפקוד (Structure-Mechanism-Function או בקיצור SMF) היא גרסה של תבנית ה-SBF הנמצאת בלב תחום ניתוח המערכות. על פי תבנית זו, מערכת טכנולוגית מוגדרת לא רק על פי מכלול רכיביה (מבנה), אלא גם על פי הדינמיות הייחודית (המנגנונים) בה רכיבים אלו פועלים עם הסביבה על מנת להשיג את התפקודים הרצויים. במסגרת הקורס הונחו הסטודנטים להשתמש בתבנית החשיבה מבנה-מנגנון-תפקוד כדרך לאחד ידע מתחום הביולוגיה עם ידע מתחום ההנדסה (Gibbons et al., 1994): בשלב ראשון התבנית תסייע לחקור מבנים ביולוגיים בעיניים הנדסיות (Vaatam et al., 2011); ובשלב השני של הקורס היא תסייע לזהות יצורים חיים בעלי התאמות או פתרונות רלבנטיים לבעיה ההנדסית שרוצים לפתור.

בתבנית זו מבנה מתאר את הצורה והגודל של רכיבי המערכת המתפקדים (למשל גופי היצורים החיים, איבריהם, רקמותיהם, תאיהם ועוד); מנגנון מתאר תהליך שבו רכיבי המערכת מגיבים לשינויים בסביבה ומשנים את מצבם המרחבי; ותפקוד מתאר את תוצאת הפעלת המנגנון. להגדרת התפקוד הרצוי חשיבות מרובה בהנדסה, שכן זו משפיעה על המנגנון שיש לבנות לשם השגת התפקוד.

על מנת להמחיש כיצד משתמשים בתבנית מבנה-מנגנון-תפקוד כדי לחקור מבנים ביולוגיים בעיניים הנדסיות נדגים מתכנית הלימודים בביולוגיה. לדוב הקוטב פרווה סמיכה ורקמת שומן עבה תחת עורו. אלו הן שתי דוגמאות למבנים המאפשרים לדוב להתקיים בסביבתו הקרה. אך מהו התפקוד שמבנים אלו מאפשרים? האם בידוד, או אולי כליאת אוויר? אם התפקוד מוגדר כבידוד, המנגנון הוא גם האוויר שנכנס בין שערות הפרווה ונכלא שם (לאוויר מוליכות חום נמוכה שאינה מאפשרת מעבר יעיל של חום מהגוף החוצה) וגם רקמת השומן המונעת מגע ישיר בין החום הפנימי והסביבה החיצונית. לעומת זאת, אם התפקוד הוא כליאת האוויר בתוך השערות, המנגנון הוא שערות צפופות בעלות תכונות אלסטיות מסוימות וצורה מסוימת. בכל אחת מדוגמאות אלו המבנים המשתתפים במנגנון הם שונים.

בשלב השני של הקורס, התבנית סייעה לסטודנטים לזהות יצורים חיים בעלי התאמות או פתרונות רלבנטיים לבעיה ההנדסית שהם רצו לפתור. למשל, נניח שהם היו מעוניינים לפתח קרמיקה עמידה יותר מפני היסדקות. מתברר שבועלם

בשלב הראשון התבקשו הסטודנטים לצאת לחצר, להתבונן באורגניזם מסוים או בחלק של אורגניזם בסביבתו הטבעית, ולתאר תכונה מיוחדת או מפתיעה של היצור

הביולוגיה התפתחו פתרונות לבעיה זו. אבלון היא סוג של רכיכה החיה באזור שיש בו פגיעות מכניות רבות העלולות לגרום לסדקים בצדפה. תפקוד רלבנטי לצדף האבלון הוא אפוא מבנה שאיננו נסדק בנקל, בעל יכולת עמידות בפני מכה חיצונית, בגודל ובכיוון מסוים. בהתאמה לכך, המנגנון הוא מניעת התפשטות של סדקים על ידי ארגון מרחבי לא חופף של לוחיות סידן פחמתי וחלבונים הנמצאים ביניהן המרכיבים את הצדף (תמונה 1) וגם החלקה של לוחיות הסידן זו על זו כך שהלחץ מתפזר והופך לשינויים מבניים מקומיים ולא משמעותיים.

2. משימת הלמידה: חקר מבנים ביולוגיים באמצעות ניתוח מערכות

אחת ממשימות הלמידה המרכזיות בקורס הייתה: חקר מבנים ביולוגיים באמצעות ניתוח מערכות. המשימה התפרסה על פני שבעה שבועות וכללה כמה שלבים עוקבים המאפיינים תהליך חקר: (1) תצפית; (2) השערת מחקר; (3) הוספת ידע חדש (חיפוש בספרות); (4) בחינת ההשערה באמצעות ניסוי; (5) ניתוח תוצאות; (6) מסקנות ודיון. בסיום נדרשו הסטודנטים לכתוב דו"ח מחקר הכולל את כל שלבי התהליך. מטרת המשימה הייתה ללמד את הסטודנטים לעשות שימוש בתבנית מבנה-מנגנון-תפקוד על מנת להגיע להבנה מעמיקה של מערכת ביולוגית - הבנה שתאפשר בהמשך הקורס הפשטה של עקרונות תכנון הנדסיים וחקירתם לצורך יישום במערכות טכנולוגיות. על מנת לסייע לסטודנטים לכתוב דו"ח מחקר רלבנטי פורקה המשימה לשלבים.

2.1 שלב ראשון: תצפית

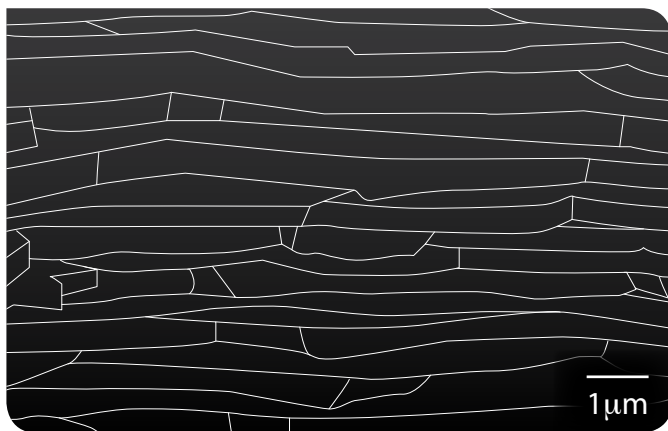
בשלב הראשון התבקשו הסטודנטים לצאת לחצר, להתבונן באורגניזם מסוים או בחלק של אורגניזם בסביבתו הטבעית, ולתאר תכונה מיוחדת או מפתיעה של היצור. תכונה יכולה להיות צורנית: מבנה ייחודי ומעניין כמו הציפוי החיצוני של פטרייה, או התנהגות מכנית ייחודית כמו נמלה הנושאת משא כבד במיוחד. מעניין לציין שסטודנטים להנדסה נוטים לתאר התנהגויות או תהליכים ברמת האורגניזם השלם (כגון נשיאת משקל), בעוד שסטודנטים לביולוגיה נוטים לתאר מבנים ייחודיים של מערכות ביולוגיות (כגון קוצים על צמח המלפפון). הבדל זה דווקא יצר הזדמנות לגשר על הפער ביולוגיה-הנדסה.

בהמשך נשאלו הסטודנטים שתיארו מבנה איך הוא פועל כדי לאפשר לאורגניזם לתפקד בסביבה מסוימת; סטודנטים שתיארו התנהגות נשאלו איך המבנים של החיה יוצרים את ההתנהגות. כמו כן נשאלו הסטודנטים מהם לדעתם היתרונות ההישרדותיים שתכונה זו מעניקה לאורגניזם החי בסביבה מסוימת. לסיום, הסטודנטים התבקשו לייצג באופן חזותי (תמונה, ציור) את רכיבי המבנה שהם תיארו ולהסביר איך לדעתם מתקבל התפקוד על ידי המבנה (תיאור ראשוני של מנגנון).

2.2 שלב שני: השערת מחקר

בשלב השני הונחו הסטודנטים להעלות השערה (הסבר מנגנוני אפשרי) לדרך שבה המבנה משיג את התפקוד שתיארו

¹ תבנית מבנה-התנהגות-תפקוד (Structure-Behavior-Function, Goel et al, 2009) או בקיצור SBF). בקורס הביומימיקרי העדפנו את השימוש במונח "מנגנון" על פני המונח "התנהגות" משום שלמונח התנהגות יש משמעות אחרת בביולוגיה.



איור 1: איור סכמטי של שכבות סידן פחמתי היוצרות את קונכיית האבולון

תהליך החשיבה הביומימטי מתחיל מחקר מעמיק של האופן שבו פועלים אורגניזמים בסביבה טבעית מסוימת ומוציאים לפועל תפקוד מסוים; חקר זה משמש לתכנון מוצר טכנולוגי הפותר בעיה הנדסית באופן חדשני

לכוננות השערת המחקר שלהם, על סמך תוצאות הניסוי שערכו. היה עליהם לתאר את המסקנה לאור יתרונות התכונה ותרומתה להתאמה של האורגניזם. נוסף על כך, הם התבקשו להציע שאלת מחקר חדשה נוכח מסקנותיהם מהניסוי, שתעמיק את הבנת המנגנון הביולוגי, או תבדוק איך אפשר להעבירו לתחום הטכנולוגי.

2.6 הערכת המשימה

על מנת להעריך את משימת החקר נקבעו רמות ביצוע לכל שלב (טבלה 1);

קודם לכן, בהתבסס על תצפיותיהם ועל ידע קודם. בהעלאת ההשערה היה על הסטודנטים להסתמך באופן מפורש על שלושה רעיונות מרכזיים (ביולוגיים והנדסיים) שלמדו בקורס זה או בקורסים קודמים ולציין אותם. דוגמה לרעיון ביולוגי היא השוואה ממוקדת בין אורגניזמים בני אותו מין (כגון שמירת יציבות על ידי כלבים בעלי גודל גוף שונה). דוגמה לרעיון הנדסי היא המשגת מבנה ביולוגי כמנגנון מכני (כגון צוואר הנמלה כציר הרמה). הסטודנטים הונחו לנסח את ההשערה כקשר סיבתי בין משתנים כך שאפשר יהיה להציע ניסוי מתאים שיוכיח או יפריך את ההשערה.

2.3 שלב שלישי: חיפוש מושכל בספרות

בשלב השלישי הונחו הסטודנטים לערוך חיפוש של מידע רלבנטי (שני מאמרים) שיכול לסייע להבנת הקשר בין מבנה לתפקוד. על מנת שיוכלו לערוך חיפוש מושכל בספרות מתחומי דעת שונים למדו הסטודנטים להשתמש בטכניקות חיפוש שיאפשרו להם למצוא מידע נוסף על הידע הקודם שלהם ועל התצפית שערכו: חיפוש בספרות בתחום הביולוגיה של (1) הקשר בין מבנה לתפקוד ביצורים בעלי קרבה פילוגנטית ליצור שבו הם צפו; (2) מבנים או התנהגויות דומים שהופיעו בקבוצות פילוגנטיות רחוקות (אבולוציה מתכנסת) או שנוצרו ממבנים ותהליכים שהיה להם תפקוד אחר; או חיפוש בספרות בהנדסה של (3) תרגום טכנולוגי שנעשה למבנים או להתנהגות שבהם הם צפו. הסטודנטים הונחו למצוא לפחות שני מאמרים המתקשרים לתכונה שבה התמקדו בתצפית ולתאר אותם באמצעות תבנית מבנה-מנגנון-תפקוד.

2.4 שלב רביעי: תכנון וביצוע ניסוי וכתיבת תוצאותיו

על בסיס הקריאה בספרות, בשלב הרביעי התבקשו הסטודנטים לנסח מחדש את השערתם ולהציע ניסוי פשוט, שאפשר לבצע אפילו בבית, הבודק היבט מסוים אחד של המנגנון שהציעו. לאחר מכן הונחו הסטודנטים לבצע את הניסוי לבדיקת השערתם ולתאר את תוצאותיו באמצעות גרף, ציור או תמונה.

2.5 שלב חמישי: מסקנות ודיון

בשלב החמישי התבקשו הסטודנטים להסיק מסקנה הנוגעת

המשימה	מעולה (4 נקודות)	טוב מאוד (3 נקודות)	טוב (2 נקודות)	חלש (1 נקודה)	חלש מאוד (0 נקודות)
תצפית	תיאורים מילוליים וחזותיים מפורטים של הקשרים בין המבנה, התפקוד והמנגנון, לרבות יתרון לאורגניזם. התיאורים מצויים בהלימה זה לזה.	תיאורים מילוליים וחזותיים מפורטים של הקשרים בין המבנה למנגנון ולתפקוד או היתרון לאורגניזם. התיאורים אינם בהלימה זה לזה.	תיאור מילולי קצר של מבנה המצוי בקשר עם תפקוד אך ללא הצעת מנגנון; או שאחד הקשרים בין מבנה, מנגנון ותפקוד אינו נכון. תיאור חזותי חלקי או לא מדויק של הקשר בין מבנה למנגנון ולתפקוד. לא מצוין בבירור היתרון לאורגניזם.	תיאור מילולי קצר של מבנה, ללא קישור לתפקוד או הצעת מנגנון. תיאור חזותי ללא הסברים. לא מוזכר היתרון לאורגניזם.	ללא תיאור או ייצוג חזותי כלשהו.

השערת מחקר	ההשערה עוסקת בשלושה רעיונות מרכזיים, מקושרת לתפקוד שנצפה ומנוסחת כקשר סיבתי (מנגנון), בדרך שמאפשרת להבין איך אפשר לבדוק קשר כזה.	ההשערה עוסקת בשני רעיונות מרכזיים, מקושרת לתפקוד שנצפה ומנוסחת כקשר סיבתי (מנגנון), בדרך שמאפשרת להבין איך אפשר לבדוק קשר כזה.	ההשערה עוסקת ברעיון מרכזי, מקושרת לתפקוד שנצפה אך אינה מנוסחת כקשר סיבתי (מנגנון).	ההשערה עוסקת ברעיון מרכזי, אך אינה מקושרת לתפקוד שנצפה ואינה מנוסחת כקשר סיבתי (מנגנון).	ההשערה אינה מסתמכת על רעיון מרכזי כלשהו, אינה מקושרת לתפקוד שנצפה ואינה מנוסחת כקשר סיבתי (מנגנון).
חיפוש מושכל בספרות	שני המאמרים המתוארים מדגימים את הקשר מבנה-מנגנון-תפקוד במערכת הביולוגית. מוצגות שתי דרכים שונות לחיפוש בספרות.	שני המאמרים המתוארים מדגימים את הקשר מבנה-מנגנון-תפקוד במערכת הביולוגית. מוצגת דרך אחת לחיפוש בספרות.	שני המאמרים המתוארים עוסקים בתפקוד, אך תיאור הקשר מבנה-מנגנון-תפקוד במערכת הביולוגית חלקי או לא מדויק. מוצגת דרך אחת לחיפוש בספרות.	מאמר אחד בלבד עוסק בתפקוד, גם אם המערכת הביולוגית תוארה באמצעות הקשר מבנה-מנגנון-תפקוד. מוצגת דרך אחת לחיפוש בספרות.	אף אחד מהמאמרים אינו עוסק בתפקוד.
תכנון וביצוע ניסוי וכתבת תוצאותיו	ההשערה מסתמכת על הספרות, מנוסחת מחדש על פיה וכקשר סיבתי (מנגנון) בין משתנים הקשורים למבנה לבין משתנים הקשורים לתפקוד. הניסוי שהוצע בודק את המנגנון באמצעות מניפולציה או השוואה מתאימה. התוצאות מתוארות בבירור באמצעות קשר מבנה-מנגנון-תפקוד ובאמצעות גרף, טבלה, תמונה או טקסט.	ההשערה מסתמכת על הספרות, מנוסחת מחדש על פיה וכקשר סיבתי (מנגנון) בין משתנים הקשורים למבנה לבין משתנים הקשורים לתפקוד. הניסוי שהוצע בודק את המנגנון באמצעות מניפולציה או השוואה מתאימה אך התוצאות אינן מתוארות בבירור.	ההשערה מסתמכת על הספרות ומנוסחת מחדש על פיה אך אינה מנוסחת כקשר סיבתי (מנגנון) בין משתנים הקשורים למבנה לבין משתנים הקשורים לתפקוד, או שהניסוי ותוצאותיו אינם מתוארים בבירור.	ההשערה על מסתמכת על הספרות ואינה מנוסחת כקשר סיבתי (מנגנון) בין משתנים הקשורים למבנה לבין משתנים הקשורים לתפקוד.	ההשערה על מסתמכת על הספרות ואין תיאור של ניסוי.
מסקנות ודיון	התוצאות מנותחות בצורה נכונה נוכח ההשערה החדשה ו/או מועלות אפשרויות נוספות לניתוחן. הממצאים מקושרים ליתרון האפשרי לאורגניזם. מועלות שאלות חדשות שעשויות להוסיף מידע על התופעה.	התוצאות מנותחות בצורה נכונה נוכח ההשערה החדשה. הממצאים אינם מקושרים ליתרון האפשרי לאורגניזם. מועלות שאלות חדשות שעשויות להוסיף מידע על התופעה.	התוצאות מנותחות בצורה נכונה נוכח ההשערה החדשה. הממצאים אינם מקושרים ליתרון האפשרי לאורגניזם. לא מועלות שאלות חדשות שעשויות להוסיף מידע על התופעה.	התוצאות מנותחות בצורה לא נכונה נוכח ההשערה החדשה. הממצאים אינם מקושרים ליתרון האפשרי לאורגניזם. לא מועלות שאלות חדשות שעשויות להוסיף מידע על התופעה.	אין תיאור של תוצאות.

טבלה 1: רמות ביצוע לשלבים השונים

מצוין-טוב מאוד:

סטודנט תיאר תצפית שערך על צדפות הדבוקות זו לזו:

“נראה כאילו קונכיית הצדפה מייצרת חומר דמוי מלט מצד אחד שלה, שמאפשר לה להידבק למשטחים שונים וגם לצדפות אחרות. המלט הזה מאפשר לה להידבק זו לזו וליצור מושבות גדולות בשוניות של מים רדודים שמסננות מים, מהוות הגנה מפני סערה ויוצרות בית גידול למינים אחרים... כנראה שיש מנגנון הפרשה שמאפשר את התארגנות המלט הזה בצד אחד.”

הסטודנט הגדיר בבירור את התפקוד כהידבקות, והתייחס לרכיב שאחראי לתפקוד (חומר דמוי מלט). הוא ציין במפורש את היתרון בעבור האורגניזם ואפילו פירט כיצד התכונה משפיעה על אורגניזמים אחרים.

בדוגמה אחרת, סטודנט שצפה בנמלים שנושאות מטען גדול במיוחד שם לב לכך שתמיד נמצאות על הקרקע שתי רגליים בצד אחד ורגל שלישית בצד שני וכך הנמלים יכולות לאזן את המשקל. הוא הציע שהתנועה הזאת תוך כדי נשיאת המטען מסייעת לליקוט מזון בצורה יעילה יותר ולכן תורמת להישרדות הנמלים.

2.6.2 השערת המחקר:

חלש מאוד:

סטודנט העלה את ההשערה הבאה לגבי קליפת הבננה:

“סיבי האורך של קליפת הבננה מאפשרים הגנה טובה יותר מפני זיהום.”

בהשערה זו אין צידוק הגיוני למנגנון מסוג זה. כלומר, המבנה אינו רלבנטי לתפקוד המוצע. נוסף על כך, הסטודנט מציע את הבדיקה הבאה:

“החתך יהיה נקי אם הסיבים יהיו בכיוון אחד.”

הבדיקה המוצעת אינה יכולה לאמת דבר לגבי הגנה או כיוון הסיבים.

טוב-חלש:

בעקבות תצפית על התנהגות של גפן העלה סטודנט היפותזה שכוללת סיבה אבל אינה מנוסחת כקשר סיבתי:

“חלקים מסוימים של הגפן יכולים לחוש צל וחושך כדי לדעת שהם צריכים תמיכה כדי לקבל מספיק אור שמש.”

במקרה זה, הרעיון המרכזי היה שהתנהגות הגפן מונחית על ידי משוב תחושתי, אף על פי שאפשר היה לשער שגם הרעיון של ההתנהגות כמוגבלת על ידי שימוש באנרגיה נמצא באופן בלתי מפורש בהיפותזה.

טוב מאוד-מעולה:

סטודנט שצפה בכלבים ציין שאף על פי שיש כלבים בצורות ובגדלים שונים מאוד זה מזה, כל הכלבים שומרים על שיווי משקל ונמנעים מנפילות, כלומר, שומרים על תנוחה יציבה. בהמשך ציין הסטודנט שלכלבים גדולים ולכלבים קטנים יש תנוחה יציבה שונה:

“כלבים קטנים נוטים יותר להיות כפופים לעומת כלבים גדולים שנוטים לכך פחות.”



על פי תבנית החשיבה מבנה-מנגנון-תפקוד מוגדרת מערכת טכנולוגית לא רק על פי רכיביה (מבנה), אלא גם על פי המנגנונים בהם רכיבים אלו פועלים עם הסביבה על מנת להשיג את התפקודים הרצויים

על פי הרמות שנקבעו אפשר היה לסווג את תשובות הסטודנטים בכל שלב. דוגמאות לרמות ביצוע שונות מובאות להלן:

2.6.1 תצפית:

טוב עד חלש מאוד:

התיאור הבא נכתב על ידי סטודנט שבחר לחקור עצמות של עופות.

“בניתוח הגס שעשיתי מצאתי שתי עצמות, שהבנתי שהן עצם החישור (רדיוס) ועצם הגומד (אולנה). שתיהן היו מעוקלות, למרות שעצם הגומד הייתה מעוקלת יותר. בנוסף, לשתי העצמות היה עובי שונה (החישור הייתה עבה יותר מהגומד).”

התצפית שערך הסטודנט התמקדה במבנה בלבד. נוסף על כך, לא נעשה קישור בין המבנה לתפקוד, לא הוצע מנגנון, והתיאור לא כלל יתרון כלשהו עבור הציפור. הניקוד שנקבע לתיאור תצפית זה היה 1.5 נקודות (מתוך 4 נקודות).

ההיפותזה שהעלה סטודנט זה מציעה מנגנון אפשרי:
"אני מציע שכדי לשמור על יציבות, כלבים גדולים אימצו לעצמם תנוחות שונות מהתנוחות שאימצו לעצמם כלבים קטנים."

היפותזה זו מציעה מנגנון סיבתי (שיווי משקל נוצר באמצעות תנוחה), וכן השוואה המאפשרת לבחון את ההיפותזה: תנוחות שונות יוצרות שיווי משקל בכלבים גדולים ולא בכלבים קטנים. בניסוח ההיפותזה משתמש הסטודנט ברעיונות מתחום הביומכניקה: יציבות, קינטיקה של תנועה, וכן בהשוואה בתוך המין.

מטרת המשימה הייתה ללמד את הסטודנטים לעשות שימוש בתבנית מבנה-מנגנון-תפקוד מתחום ניתוח מערכות על מנת להגיע להבנה מעמיקה של מערכת ביולוגית

2.6.3 חיפוש מושכל בספרות

חלש-טוב:

סטודנט שעסק בתכונות ההידרופוביות של עלי צמחים המאפשרות להם להיות בלתי חדירים למים ציטט מאמר שתיאר תכונות של שני מינים קרובים של צמחים. התיאור לא השווה את התכונות של שני המינים ולא היה ברור אם בחיפוש המאמר נעשה שימוש בעיקרון של קרבה פילוגנטית או של אבולוציה מתכנסת. עם זאת, בתיאור השתמש הסטודנט בעקרון המבנה-מנגנון-תפקוד:

"התכונות ההידרופוביות של העלה מאפשרות לו לדחות מים באמצעות שילוב של בליטות זעירות ושכבה דקה של שעווה (Burton and Bhushan, 2006). שני אלה עוזרים להפחית חיכוך (friction) והידבקות לעלה."

טוב מאוד-מעולה:

בדוגמה זו בדק הסטודנט כיצד פטריות מגנות על עצמן מפני טמפרטורות קיצוניות. בחיפוש במגוון מאמרים הוא מצא שהגנה מפני קיפאון נעשית על ידי חלבונים נוגדי קיפאון שהגם:
"דוגמה מצוינת לאבולוציה מתכנסת."



הוא הוסיף מאמרים המתארים את התופעה בצמחים ובחיות, וכלל ספרות המתארת יישומים טכנולוגיים של חלבונים נוגדי קיפאון, כך שהיו לו כמה וכמה קריטריונים לחיפוש בספרות. להלן תיאור של אחד המאמרים:

"המאמר מתאר את יכולתן של פטריות מסוימות למנוע היווצרות של קרח עליהן. חלבונים בפטריות אינוקי ושיטאקי נקשרים לגבישי קרח וכך מונעים את המשך ההתגבשות. החלבונים מונעים פגיעה בתאים כתוצאה מקרח או ממים שמחוץ לתאים. הם מונעים את המשך התגבשות הקרח על ידי הורדת טמפרטורת הקיפאון של המים אך לא של נקודת ההתכה בתהליך הנקרא היסטריזיס תרמי."

בתיאורו השתמש הסטודנט בתבנית המבנה-מנגנון-תפקוד, שכן הוא זיהה את התפקוד כעיכוב התגבשות הקרח; את המנגנון כהורדת טמפרטורת הקיפאון; ואת המבנה כחלבונים נוגדי קיפאון.

2.6.4 תכנון וביצוע ניסוי וכתבת תוצאות

חלש-טוב:

סטודנט שבדק את הדרך שבה שורשי הצמח מנווטים לכיוון משאבים בקרקע, כתב:

"האם השורשים מנווטים ראשוניים? החלטתי לבדוק זאת על ידי ניתוק הצמח מהאדמה והפרדת השורשים שלו לשתי קבוצות בתנאים שונים: קבוצה אחת אניח בכלי שבו מים ומזון לצמחים; השנייה בכלי עם מים בלבד שמייצגים אזורים עניים בנוטריינטים. אם השורשים בכלי עם הנוטריינטים יישארו חזקים יותר או רבים יותר..."

מהכתוב לא ברור המנגנון: מדוע השורשים ינווטו באופן שונה, אלא אם כן עצם גדילתם מושפע מנוכחות נוטריינטים. התוצאה הצפויה אינה מתייחסת למהירות הגדילה אלא לעצם הגדילה או ההישרדות של השורשים. לכן המדידה אינה קשורה למנגנון של גדילה מואצת. בתיאור התוצאות כתב הסטודנט:

"אמנם ראיתי צמח אחד שבאופן מועדף גידל שורשים בכלי עם הנוטריינטים, אך יתכן שזה רק בשל חלוקת משאבים (הוא יכול היה לגדול לצד אחד או לצד שני באותה מידה)."

במקרה זה הנתונים שנאספו אפילו לא בוחנים את הניווט או את התוצאה הצפויה (חוזק השורשים או מספרם). תיאור התוצאות אינו ברור, אין תמונה או איור, או כימות המדגים את התוצאות. הניסוח "יתכן שזה רק בשל..." הוא חסר היגיון או מנוסח ברמה נמוכה ולכן קשה להבין למה הכוונה.

טוב מאוד-מעולה:

הסטודנט התעניין בבקרה על מאזן המים בפטריות, והציע סדרה של ניסויים הבודקים ספיגת מים על ידי פטריות במספר תנאים. על פי הספרות שתיאר הציע הסטודנט שהציפוי של הפטרייה הוא גבול בלתי חדיר למים (הידרופובי) המונע איבוד מים, או שהפטרייה סופגת מים מסביבתה:

"על מנת להבין אילו חלקים של הפטרייה מגיבים ביותר ללחות, או סופגים לחות, נערכו ניסויים החושפים אזורים שונים של הפטרייה. ספיגה כללית: אם הלחות של הפטרייה יורדת, כלל הספיגה של הפטרייה תתגבר בהשוואה לפטרייה שאיננה יבשה על מנת לחזור למאזן המים הרצוי. ספיגה דרך קטעי ממברנה



שונים: אם במקטעים שונים של הממברנה ההידרופובית יש חדירות שונה למים, רמת הספיגה במקטעים חדירים יותר תעלה בהשוואה לפטריה שבממברנה שלה אין מקטעים כאלה.

אף על פי ש הניסוח מעט משונה לעתים, אלה יחסי סיבה-תוצאה ברורים המובאים כהשוואה ומאפשרים לבחון את ההיפותזה. התשובה מכילה היפותזה נוספת, חבוייה, שלפיה יש לפטרייה חלקים בעלי חדירות שונה של מים בשל הבדלים בחומרים המרכיבים את הממברנה. את תיאור הניסוי ליווה איור המדגים את חלקי הפטרייה השונים ואת תנאי הניסוי. תוצאות הניסוי הובאו בתמונות (ולא באופן כמותי) והוסברו היטב. הן הראו כיצד מים צבעוניים נספגו בחלקים השונים של הפטרייה לאורך זמן.

2.6.5 מסקנות ודיון

חלש-טוב:

הדוגמה הבאה נלקחה מהדו"ח שהוזכר לעיל העוסק בגדילת שורשי הצמח:

"בעוד צמחים נוטים לגדול טוב יותר בסביבות עשירות בנוטריינטים, נראה שהם אינם יכולים לחוש נוטריינטים, או לבחור אזורים טובים יותר לגדילה. אמנם ראיתי צמח אחד שבאופן מועדף גידל שורשים בכלי עם הנוטריינטים, אך יתכן שזה רק בשל חלוקת משאבים (הוא יכול היה לגדול לצד אחד או לצד שני באותה מידה), ואין בכך להצביע על כך שחלה נדידה שכן לרוב אין באדמה אזורים עם הבדלים כל כך משמעותיים."

הניסוי לא כלל בחירה של צמח, ולכן כל מסקנה הנוגעת לבחירה אינה משקפת את הנתונים. נוסף על כך, אף על פי שהסטודנט ציין כי הניסוי אינו בודק את ההיפותזה הראשונה הנוגעת לבחירה (נדידה של הצמח), הוא מסביר זאת משום שהניסוי אינו בודק תנאים טבעיים, ולא משום שהניסוי אינו בנוי לבדיקת בחירה.

טוב מאוד-מצוין:

סטודנט התעניין בתכונה של עלים לכוון מים, והעלה היפותזה שלפיה המים מכוונים לבסיס הצמח, ובעקבותיה העלה שתי שאלות נגזרות: (א) האם העלה הבלתי-חדיר למים מכוון את המים לחריץ המרכזי של העלה? (ב) כיצד העלה מתנגד לכוחות (שנוצרים על ידי מי הגשמים) ושומר על החריץ הזה גם כשיורד גשם? הסטודנט טיפל בכל שאלה בנפרד. לגבי הכוונת המים לחריץ המרכזי הוא כתב:

"על פי התוצאה הראשונה, ההשערה שלי לגבי הכוונת המים לחריץ של העלה ולמרכז הצמח הייתה נכונה. הצמח עשה זאת כל כך בקלילות עם שכבת השעווה. התוצאות האלה מראות שהעלה בנוי כך שמים מכוונים בצורה קלה יותר לשורשים מבלי לפגוע בשטח פני העלה שכן זה עלול לפגוע ביכולתו לבצע פוטוסינתזה."

הסטודנטים בקורס מתבקשים לפתח פתרון או מוצר טכנולוגי בהשראת חקר המנגנונים שבהם מערכות ביולוגיות מוציאות לפועל את תפקודיהן

זוהי מסקנה ברורה על פי תוצאות הניסוי, והיא מפרשת את התוצאות לאור היתרון לצמח (שמירה על פוטוסינתזה). לגבי ההיפותזה השנייה, הסטודנט הבחין כי העלה מכוון נפח קטן של מים, אבל מכופף כאשר נפחים גדולים של מים נשפכים עליו. הוא כתב:

"למרות זאת, הבחנתי שמרכז העלה תומך רק בכמויות קטנות של מים. אני חושב שמנגנון זה נועד להגביל את כמויות המים שנשפכות על העלה כשיורד גשם... התמיכה המבנית של העלה לא רק עוזרת להגביל את כמויות המים המכוונות לשורשים, אלא היא גם מערכת מונעת טעויות שנועדה למזער נזק מבני לעלה כאשר הוא בעומס יתר."

במקרה זה, ההיפותזה הראשונית לא כללה תנאים שונים. הסטודנט הבין שאין זה נכון לגמרי, והציע הסבר הגיוני. הוא העלה יתרונות אפשריים הנוגעים לשתי ההיפותזות, במקרה זה הובלת מים לכיוון השורשים ומניעת נזק לעלה. על סמך תוצאות אלה העלה הסטודנט כמה שאלות:

"מדוע צמחים מסוימים הם בעלי צורה כזאת, ואחרים לא? מהם היתרונות של צורת V לעומת צורות אחרות של עלים? כיצד המבנה של העלה ברמת המיקרו מאפשר לו להוציא לפועל מטלות תומכות אלה?"

מענה לשתי השאלות הראשונות יעסוק ביתרונות האפשריים של תכונות אלה כפונקציה של הסביבה, אף על פי שאפשר היה לנסח אותן באופן יעיל יותר, כמו על ידי התאמה לסביבות שונות (למשל, סביבה לחה לעומת סביבה יבשה). השאלה השלישית בודקת מבנים ייחודיים שיכולים לתרום להבנת התופעה.

3. התאמות לתיכון

משימת הלמידה שהוצגה כאן או רעיונות ממנה יכולים להוות בסיס להוראת עקרון ההתאמה בין מבנה לתפקוד בהקשר ביומימטי המרחיב את יישום העיקרון ומדגים כיצד מערכות ביולוגיות מתפקדות.

יציאה לשדה עם התלמידים ואיתור צמחים בעלי מבנים ייחודיים (כגון מבנה מיוחד של פרחים, חרצנים משוננים או זרעים בעלי כנף) יכולים להיות התחלה טובה לתהליך חקר ביומימטי. אפשר לחזור לכיתה עם הממצאים ולהמשיך את התצפית על ידי הדגמת ההבדל בתנועה של טיפת מים על עלה חלק לעומת תנועתה על עלה שעיר (עלה חלקים: לוטוס או היביסקוס, עלים שעירים: עכנאי או לשון הפר); או על ידי מדידת זמן נפילתם של

זרעים בעלי צורות שונות בכיתה, המרחק שאליו יגיעו במעופם או הצורה שבה יעופו (למשל זרע של סביון מול זרע של תלתן ארץ ישראלי: בחודשים אפריל-מאי). אחר כך אפשר לבקש מהתלמידים להסביר מה יכול להיות היתרון של מבנים אלו, בהסתכלות על הסביבה שבה הצמחים גדלים.

את הניסוי אפשר לבצע באמצעות בניית דגמים פשוטים של המבנים המעניינים שנמצאו בשדה, ליצור בהם וריאציות קלות ולבדוק כיצד הווריאציות משפיעות על התפקוד. למשל, בניית דגמים של זרעים בעלי כנפיים במגוון גדלים וחקר השפעת השינויים במבנה על תפקוד, כגון זמן תעופה.

אפשר ליצור קשר עם אשכול פיס ולתכנן ניסויים מורכבים יותר. כמו כן, אפשר לתכנן פרויקט חקר עם מורי מגמת הרובוטיקה שבו יתכננו התלמידים רובוטים פשוטים בהשראת חקר מסוג זה. אפשרות נוספת היא להשתמש בביוחקר שערכו תלמידים כנקודת יציאה לפרויקט ביומימטי. נוסף על כך, בעלון המקצועי של ארגון הביומימיקרי הישראלי אפשר למצוא רעיונות לנושאי חקר ואפשר ליצור עם אנשי הארגון קשר ולעבור השתלמות בנושא.

סטודנט שצפה בנמלים שנושאות מטען גדול במיוחד שם לב לכך שתמיד נמצאות על הקרקע שתי רגליים בצד אחד ורגל שלישית בצד שני וכך הנמלים יכולות לאזן את המשקל



L. Whitten. and L. Bentley. (2005): Systems analysis and design methods. McGraw-Hill,

M. Gibbons, C. Limoges, H. Nowotny, S. Schwartzman, P. Scott and M. Trow. (1994) The new production of Knowledge, Sage, London.

A. K. Goel, S. Rugaber, and S. Vattam (2009). "Structure, behavior, and function of complex systems: The structure, behavior, and function modeling language". Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 23(01), 23-35.

S. S. Vattam, A. K. Goel, S. Rugaber, C. E. Hmelo-Silver, R. Jordan, S. Gray and S. Sinha (2011): "Understanding complex natural systems by articulating structure-behavior-function models". Journal of Educational Technology & Society, 14(1), pp. 66-81.

J. S. Brown, A. Collins, and P. Duguid. (1989): "Situated Cognition and the Culture of Learning". Educational Researcher, Vol. 18, No. 1, pp. 32-42.

National Research Council (2012). A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas. Washington, DC: National Academies Press

