

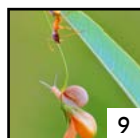
גיליון מספר 192 | יוני 2016 תשע"ו

שמורת טבע

עלון מורי הביולוגיה ומורי מדעי הסביבה

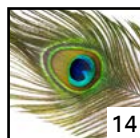


ביומימיקרי: הטבע כמרחב למציאת פתרונות
ד"ר יעל הלפמן-כהן



ביומימיקרי זה בטבע שלנו
עינת מקוב, בית ספר אורט בנימינה

מותר להוציא ניידים
אפליקציות ואתרים שגורמים לנו להמציא



פרפראות ביומימטיות
דוגמאות לפיתוחים בתהליכים ביומימטיים

בקטריה להצלה
מורן פרבר, מקיף ז' רביבים, ראשון לציון



הוראה לשם הבנת הקשר בין מבנה לתפקוד באמצעות חקר ביומימטי
מאמר מעובד מאת ענבל פלאש-גווילי

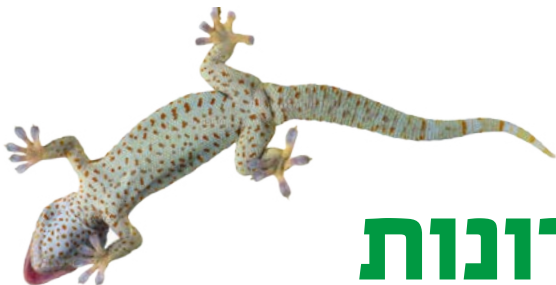


מה בין קיפודיים למערכות אבטחה מתקדמות?
תכנית לימודים בנושא ביומימיקרי לתלמידים מחוננים
יריב גרשטיין, ביולוג ימי ומדריך בארגון הביומימיקרי הישראלי

תוכן העניינים







ביומימיקרי: הטבע כמרחב למציאת פתרונות

חיקוי תכונות של יצורים חיים פותח עולם שלם של חדשנות ויזמות, יחד עם ערכי שמירה על הטבע וקיימות. בעיניים ביומימטיות מקבלים הערכים הללו משמעות מעשית, אפילו דרך חיים. ההטמעה של ענף הביומימיקרי בחינוך והוראה נראית מבטיחה. ד"ר יעל הלפמן-כהן היא מהנדסת שרואה בענף זה פתח של עידן חדש. בריאיון היא פורשת את החזון של ארגון הביומימיקרי שהיא מנהלת, ומשאירה הרבה מקום לאופטימיות.

דיוקן



ד"ר יעל הלפמן-כהן

ד"ר יעל הלפמן-כהן בעלת תואר ראשון בהנדסה, תואר שני במנהל עסקים ותואר שלישי בתכנון ביומימטי. יחד עם ד"ר דפנה חיים לנגפורד הקימה את ארגון הביומימיקרי הישראלי ומנהלת אותו.

מראיינת: גילת בריל

מה זה ביומימיקרי?

לסביבה. בטבע, זבל הוא מזון. מהנדס יכול לתכנן מראש מוצרים שבסוף חייהם יתפרקו לרכיבים שיתווספו למעגל הטכנולוגי או למעגל הביולוגי ויזינו את הטכנולוגיה או את הטבע. נוסף על כך, תהליכי הייצור בטבע מתקיימים בסביבת החיים. בסביבה כזאת אין שימוש ברעלים, בטמפרטורות גבוהות במיוחד, או בלחצים גבוהים כמו בתעשייה, כי החיים לא ישרדו אותם. ולכן שווה ללכת וללמוד מהעכביש, למשל, איך הוא מייצר חומר החזק פי שישה מפלדה, בלי להכניס את החומר לתנור ולחמם אותו באלפי מעלות, כפי שמתבצע היום בתהליך ייצור פלדה; או ללמוד מהצדפה הכחולה איך היא מייצרת דבק שמאפשר לה להידבק לסלעים מתחת למים בלי להשתמש ברעלים שאנחנו משתמשים בהם בתעשיית הדבקים; או ללמוד מצדף האבלון איך מייצרים חומר קרמי החזק יותר מקרמיקות, בלי להכניס אותו למכבשים בתהליך הייצור.

איך נוצר רעיון ביומימטי?

בשנים האחרונות מושקעת הרבה עבודה בקידום המתודולוגיה של הענף, בגלל שזו דיסציפלינה בהתהוות, והמתודולוגיה חסרה. מטרת הכלים והשיטות המפותחים היא לאפשר תהליך ביומימטי שיטתי: איך אנחנו גורמים לכך שהמהנדס שראה שלדג צולל למים בלי להתיז טיפות לכל עבר, והפך את מבנה המקור שלו למודל מבני של קטב, יגיע לשלדג בצורה שיטתית ולא במקרה? אנחנו לא יכולים לסמוך על המזל, לצאת לטבע ובמקרה לראות משהו. בדיוק בזה מתעסק היום העולם האקדמי של הביומימיקרי: פיתוח שיטות לניהול התהליך שיאפשרו

ביומימיקרי, או ביומימטיקה, הוא ענף העוסק בחקר של מערכות ביולוגיות ואקולוגיות על מנת להעביר את הידע על המנגנונים במערכות אלה לעולם הטכנולוגי. הרעיון העיקרי בענף הוא שבטבע יש פתרונות מדהימים לצרכים שונים, ולכן כדאי מאוד לבדוק אותו כמקור ידע, כמרחב למציאת פתרונות - לפני שממשיכים הלאה בתהליך פיתוח מוצרים.

אחד היתרונות השמונים בביומימיקרי הוא הרב-תחומיות. כל חיבור בין ידע ביולוגי לידע הנדסי יכול להוליד שאלת מחקר כלשהי בהתאם ליישום שבו מתעניינים. למשל, בהקשר של חומרים חכמים, של תנועה ומודלים של תנועה, וכן: טקסטיל, אנרגיה, מכניקה, אופטיקה, אדריכלות - במגוון נרחב של תחומים. מה שיפה בענף הזה הוא שהחדשנות היא רב-תחומית, חוצת תעשיות ומגיעה לכל תחומי החיים. זה מה שהופך את התחום למושך בעיני כל כך הרבה אנשים, כי כל אחד מוצא בו ענין מנקודת מבטו. תני לי תחום ואספר לך על החדשנות הביומימטית בתחום הזה.

מה הקשר בין ביומימיקרי לשמירה על הסביבה?

יש מחקרים ביומימטיים שבהם מפתחים כלים ושיטות שיאפשרו להשתמש בעקרונות הקיימות בטבע כדי לנהל תהליכים של קיימות בתעשייה. כך למשל, מערכות בטבע מבוססות על עיקרון "מעריסה לעריסה", לפיו, חומרים בטבע זורמים בצורה מעגלית, מזינים מערכות ביולוגיות אחרות או מתפרקים וחוזרים כמשאב

זהו תהליך של מחקר ופיתוח הנדסי כמו כל תהליך מחקר ופיתוח, רק שהביולוגיה נמצאת בתמונה ומספקת תשובות אפשריות. תפקיד הביולוג להביא את המידע הנוגע למנגנון מסוים בטבע. תפקיד המהנדס ליישם את המנגנון, להעלות את מגבלות היישום, ולהציע מה לעשות כדי ליישם אותו. לפעמים יש מנגנון שעובד בטבע אבל במרחב ההנדסי הוא לא יעבוד. תפקיד המהנדס הוא לבחון את התהליך בעיניים הנדסיות טכנולוגיות ולראות מה אפשר להעביר ואיך, ומה אי אפשר להעביר.

מיהי לדעתך דמות ראויה להערכה בתחום הביומימיקרי?

גינין בניס, המובילה את ארגון הביומימיקרי האמריקאי, היא הגורו של התחום. היא מתמחה ביעוץ ולא הגיעה מהאקדמיה. בשנות התשעים יצא לאור ספרה, "biomimicry innovation inspired by nature", ובעקבותיו חלה עלייה משמעותית במודעות לביומימיקרי. הארגון האמריקאי פועל "להביא את הביולוגים לשולחן התכנון". זאת אומרת שבכל תכנון מוצר, בכל חברה, ישב בולוג, מתוך מחשבה שבכל אתגר טכנוני שעוסקים בו כדאי לבדוק איך עושים זאת בטבע.

היום זו ממש אקוסיסטמה: יש בכל העולם ארגוני ביומימיקרי שמאורגנים ברשת עולמית, בדרום אפריקה, ביפן, בכמה מקומות באירופה, בארצות הברית, כמובן, ובקנדה.



מה תפקידו של ארגון ביומימיקרי?

את הארגונים האלה ברחבי העולם הקימו אנשים שרוצים להביא את הבשורה של התחום המרתק הזה - כל אחד במקום שבו הוא נמצא.

זה גם מה שאנחנו עושים בארגון הביומימיקרי הישראלי שהקמנו. המטרה שלנו היא לקדם את תחום הביומימיקרי בארץ כמנוף לחדשנות בכלל ולחדשנות סביבתית בפרט. הארגון הוקם ב-2009 על ידי ד"ר דפנה חן-לנגפורד ועל ידי, לאחר שנחשפנו לתחום דרך פרויקט יזמי שהיינו מעורבות בו. מעט מאוד מידע היה קיים אז בארגון האמריקאי, ובעברית לא היה מידע. אבל גילינו תחום מעניין שהתאים למה שעשינו באותה תקופה, זיהינו את הפוטנציאל שגלום בו והתחלנו לעקוב אחריו.

המטרה הראשונה שלנו הייתה להפיץ כמה שאפשר את ענף הביומימיקרי כצורת חשיבה אחרת, אופטימית, סביבתית,

למצוא אורגניזם אחד בין מיליונים של אורגניזמים, המדגים פתרון מתאים לבעיה מסוימת. לאחר שכבר נמצא פתרון אפשרי - חשוב לפתח שיטות שיסייעו לזקק את הידע הרלבנטי לפתרון הטכנולוגי, ההנדסי.

מכיוון שיש כאן שתי דיסציפלינות שונות האתגר המרכזי הוא לגשר על הפער בין הביולוגיה להנדסה ולמצוא שפה משותפת בעלת משמעות בשתי הדיסציפלינות. כך למשל, לחשיבה מערכתית-פונקציונאלית יש משמעות בביולוגיה ובהנדסה. בשתי הדיסציפלינות יש מערכות ולכן פונקציות. דוגמה נוספת היא חשיבת תכנון (design thinking) ותהליכים שמתרחשים בתכנון. כמו כן, יש לפתח תהליך שיטתי של העברת ידע מביולוגיה להנדסה, הנתמך בשיטות למידול והפשטה, שיטות חיפוש חכם במאגרי מידע ביולוגיים להפקת מידע (data mining) **ומאגרי מידע ביומימטיים** במיוחד למטרות האלה.



איך נראה סדר יום של מי שעוסק בביומימיקרי?

חברת פסטו הגרמנית עוסקת בפיתוח רובוטים והיא מעניינת במיוחד משום שיש לה מחלקה קבועה שעוסקת בביומימיקרי, שנקראת רשת למידה ביונית. צוות המחלקה מורכב מביולוגים, מהנדסים מתחומי הנדסה שונים, מעצב, איש שיווק/כלכלן. מדי שנה הם משיקים שניים או שלושה פרויקטים ביומימטיים, אחרי שהצוות חקר, למד, והעביר את המידע הביולוגי לעולם האוטומציה והרובוטיקה.

בעבר, ראינו את הביולוגיה שמועסקת בחברה, כי אני חושבת שזה מודל מאוד ייחודי של צוות שיושב בתעשייה העוסק בפיתוח ביומימטי באופן קבוע. זה בדיוק מה ששאלתי אותה: איך אתם עובדים? מה אתם עושים כל היום? כמו כל תהליך של מחקר ופיתוח, יש תהליך של חקר: איסוף מידע, אולי ניסוי אם יש צורך. מה שייחודי בצוות הזה בחברת פסטו הוא שיש ממשק עם ביולוגיה וחקר של פתרונות ביולוגיים שבדרך כלל ביולוג מביא לשולחן התכנון. במהלך העבודה יש המון אינטראקציות בין האנשים: הביולוג מציע כיוון מסוים, המהנדס בודק אותו, שואל את הביולוג שאלה, הביולוג חוזר לחפש תשובה, תוך כדי ניסוי רוצים לברר עוד משהו, אז חוזרים לברר. הצוות בחברה הגרמנית חקר את מנגנון התנועה של השפירית ופיתח רובוט קטן שעף בדרך דומה. הכנפיים הראשונות לא נעו ביציבות כמו בטבע, והם חזרו לבדוק את מנגנון התנועה של כנפי השפירית על מנת לשפר את היציבות.

ובתוך 30 שניות הסוללה טעונה. בעקבות זאת הוקמה חברת סטורדוט, שהציגה כבר הוכחת היתכנות ומעוררת הרבה מאוד עניין בעולם. טכנולוגיית טעינה מהירה יכולה למשל לחולל מהפכה בתעשיית כלי הרכב החשמליים. זוהי דוגמא לפיתוח ביומימטי שהגיע מהשטח: תחילה זוהו הפפטידים הייחודיים האלה, בהמשך תורגם ויושם הידע בפתרון הטכנולוגי.

איך מגיעים למסלול באוניברסיטה המוביל לביומימיקרי?

בעולם נפתחו אפשרויות חדשות ללמוד תואר ראשון ותואר שני בביומימיקרי: בגרמניה יש היום תואר ראשון בשתי אוניברסיטאות. מסלולים לתואר שני קיימים בגרמניה וגם בארצות הברית, חלקם נפתחו רק לפני כשנה. תואר שלישי בביומימיקרי תמיד אפשר ללמוד במסלול אישי, כמו שאני עשיתי.

אילו נושאים ביומימטיים קיימים בהקשרים לא הנדסיים?

ככל שהשנים עוברות היישומים מתרחבים. הרעיון הוא שאם יש פתרונות בטבע, אפשר להעביר אותם למגוון תחומים, לא רק להנדסה. היום יש יישומים בתחום הניהול, במדעי החברה. במסגרת ארגון הביומימיקרי העברנו במרכז הבין-תחומי בהרצליה קורס בניהול במסלול מנהל עסקים לתואר שני, שנקרא ביומימיקרי בסביבת הארגון. בקורס נתנו למנהלים תובנות וכלים להסתכל על הארגון העסקי שלהם דרך הטבע. לדוגמה, תהליכי תפעול בארגונים יכולים לקבל השראה מתפעול תהליכים בטבע: ארגון עצמי, אלגוריתמים שנלמדים מנמלים או מדבורים. יש היום תחום שנקרא business ecosystems, כלומר, הסתכלות על הארגון כחלק מהאקוסיסטמה שלו. זו אמנם תפיסה אקולוגית ביולוגית, אבל יש לה משמעות רבה גם בהקשר העסקי מפני שגם בעסקים יש מי שמוביל את האקוסיסטמה ויש אינטראקציה עם גופים נוספים.

הקשר אחר הוא של ביומימיקרי ופסיכולוגיה. למשל, נחקר איך ציפורים נודדות מתמודדות עם העקה שנוצרת בעקבות מסע של אלפי קילומטר בתנאים קשים. את העקרונות שנלמדו יישמו בניהול מצבי לחץ באנשים ויצרו מודל פסיכולוגי למצבים של לחץ ועקה.



חדשנית, יזמית וטכנולוגית. אני חושבת שכבר הגענו למודעות יפה מאוד לעומת מה שהיה לפני 2009. אנחנו עושים את זה באמצעות הידעון שאנחנו מפיצים ומגיע לאלפי אנשים, ובאמצעות כנסים, קורסים ותכניות לימודים.

יש לנו מיפוי של הפרויקטים הביומימטיים המתקיימים בארץ. יש הרבה מאוד פרויקטים, גם באוניברסיטת תל אביב וגם במכון ויצמן. לפעמים יזמים ומחפשי פתרונות בתעשייה ובאקדמיה לא מודעים למונח ביומימיקרי, אך עושים זאת בצורה טבעית.

המטרה השנייה הייתה ליצור למידה מסודרת של התחום. צריך להביא לארץ ידע מחו"ל, ולהנגיש כלים, מתודולוגיות ושיטות לאנשים שרוצים לבצע את התהליך. אנחנו מנסים לגבש קהילה מקומית העוסקת בכך, שנפגשת בכנס ביומימיקרי פעם בשנה. בכנס נערכים מושבים בעלי אופי אקדמי ומושבים בעלי אופי תעשייתי. המטרה היא להיות גורם מחבר בין הידע האקדמי שיש בעיקר בביולוגיה ובין צרכים הקיימים בתעשייה, כל זאת כדי להוות מנוף לחדשנות.

ברמת החזון הלאומי אנחנו באמת מאמינים שלמדינת ישראל יש יכולת להוביל את התחום הזה, גם ברמה עולמית. 50% מבוגרי תואר שלישי בארץ הם מתחום מדעי החיים. זהו הון אנושי אדיר, ויש הזדמנות לקחת את ההון הזה ולהפוך אותו למנוע חדשנות, שמקדם את התעשייה המקומית. יש פה ידע עצום בביולוגיה ברמה מאוד גבוהה, יש פה הנדסה חזקה, ויש פה רוח יזמית. וזה מה שצריך בשביל לקדם את התחום הזה.

מה באמת קיים בתחום הביומימיקרי בתעשייה בארץ?

באתר שלנו יש כבר מעל עשרה תיאורי חברות, ובכל העולם מדובר על כמה מאות יישומים ביומימטיים. דוגמה לכך היא חברת אמורפיקל הישראלית המתבססת על חיקוי מבנה הסידן האמורפי בשלד של מין אוסטרלי של סרטנים. הסרטנים משילים את השלד שלהם ובונים אותו שוב בתוך שלושה עד ארבעה ימים. לשם כך דרוש הרבה מאוד סידן, אולם הסרטנים האלה אינם חיים בסביבה עתירת סידן. נשאלת השאלה, מאיפה מגיע הסידן? מתברר שהסרטנים בולעים סידן ואוגרים אותו במעין גסטרוליט, ומשתמשים בו בתהליך בניית השלד. כשחקרו את הסידן שבגסטרוליט גילו מבנה של סידן אמורפי, שיש לו הרבה מאוד יתרונות ביכולת הספיגה בגוף. היום מפתחים בחברה זו תוספי סידן המבוססים על הסידן האמורפי של הסרטן. דוגמה אחרת, בתחום הרפואי, היא חברת ננוסייט, שחקרה את מנגנון הצריבה של שושנת הים, שיורה מיקרו-מזרקים כדי לתפוס את טרפה. בחברה זו פיתחו פלטפורמה להחדרה תת-עורית של חומרים לצרכים רפואיים ואסתטיים.

כמו כן קיימות שתי חברות שעשו אקזיט. האחת, חברת סייברה. בהשראת המנגנון שמשמש את הגוף להתמודדות עם התקפות של וירוסים, פיתחה החברה טכנולוגיית אבטחה לסייבר. חברה זו עשתה ב-2014 אקזיט של 220 מיליון דולר. דוגמה אחרת היא חברת סטורדוט. פרופ' אודי גזית מאוניברסיטת תל אביב חקר פפטידים מסוימים במחקר על אלצהיימר. גזית גילה פפטיד בעל תכונות חשמליות ואופטיות מיוחדות שאפשר לנצלן לטעינה מהירה; כלומר, אפשר להניח את הטלפון הנייד בעמדת טעינה

¹ Science Technology Engineering and Math (STEM) היא מדיניות של קידום פרויקטים בחינוך המשלבים את ארבע הדיסציפלינות: מדעים, טכנולוגיה, הנדסה ומתמטיקה, מתוך מחשבה ששילוב בין התחומים האלה הוא מנוע לקידום ולחדשנות.



המבנה הזה הוא פיתח שיטה שבה חום של תנורים מפזרי-חום יגיע אל האדם שיושב לצדם ולא יתפזר בכל החדר. זה מאוד יפה, אבל יותר יפה היה איך הוא מתאר את מה שהוביל אותו לעיסוק הזה. הוא מספר על ילדותו בדרום אמריקה, באמזונס, ביערות, וכמה אהב כבר אז להסתובב בשבע, להתבונן ולחקור. כילד תמיד שאל את עצמו איך דברים מנצצים ובורקים. כשגדל ולמד הנדסה חזר למקומות האלה.

ביומימיקרי, מעבר להיותו תחום דעת בפני עצמו, יכול לקדם משמעותית מיומנויות בתחומי ה- (Science, Technology, Engineering and Math) STEM. בתחום הביומימיקרי יש מיומנויות הנדרשות בעולם הטכנולוגי-מדעי: חשיבת חקר, חשיבה אנלוגית, חשיבה מערכתית, חשיבה פונקציונלית. אפשר להבנות את הכישורים האלה בצורה מושכלת, באמצעות למידה חווייתית מהטבע.

נוסף לתכנים מדעיים ולמיומנויות חשיבה וחקר, טמון בביומימיקרי ערך מוסף של ערכים סביבתיים וחברתיים הנלווים ללמידה מהטבע.

האם יש פרויקטים בביומימיקרי שמורים יכולים לבצע עם תלמידים?

יש לנו פרויקט לכיתות ט' בבית ספר אורט בנימינה, בשיתוף עם רמת הנדיב. מדובר בתכנית מובנית שבה התלמידים לומדים ביומימיקרי, אבל הייחוד של התכנית הוא בכך שחוקרים מהשטח מאמצים את התלמידים. התלמידים מתחילים ביום חשיפה, שבו חושפים אותם לאורגניזמים מעניינים, בעלי חיים וצמחים שאפשר למצוא ברמת הנדיב, וגם למחקרים שמתבצעים שם. לאחר מכן הם חוזרים לכיתות ומציעים רעיון לפיתוח. כדי לעזור להם בתהליך החדשנות מתקיים יום של יועצים ביומימטיים משעם הארגון שלנו שבאים לבית הספר ועוזרים לתלמידים. לסיום התוצרים שלהם מוצגים ביום שיא מיוחד. בשנה הבאה אנחנו רוצים להפעיל את המודל הזה בבתי ספר נוספים ובמקומות נוספים בארץ: למשל, חוקרים באוניברסיטת תל אביב יאמצו תלמידים באזור המרכז, וחוקרים מאוניברסיטת בן-גוריון יאמצו תלמידים באזור באר שבע. במפגש עם החוקר יש הזדמנות להכיר את החוקר, להבין מה הוא עושה באוניברסיטה, לשמוע על המחקר שלו. בדומה לתכנית הזאת אנחנו רוצים לקדם תכנית של תעשייה מאמצת. תהליך הלמידה יתחיל מביקור של קבוצת תלמידים בתעשייה. התהליך ימשיך באתגר מעשי כלשהו שהתעשייה מעלה בפני התלמידים, ואלה יציעו לבעיה בתעשייה פתרון בהשראת הטבע.

תכנית אחרת, ותיקה יותר, היא תוכנית לגילאי ד-ו: ביומימיקרי-טכנולוגיה וחדשנות. במסגרת התכנית תלמידים לומדים בצורה מובנית את התחום, תוך תרגול חשיבה ביומימטית והתנסות בפרויקט מעשי, המוצג בסוף השנה בכנס חגיגי.

החזון שלנו הוא לייצר פלטפורמה פדגוגית רב גילאית, הנקראת Bio-X, לגילאי א-י, לקידום מיומנויות STEM, לצד ערכים סביבתיים וחברתיים, באמצעות למידה מהטבע (ביומימיקרי). בפלטפורמה הזו יהיה דגש תוכני שונה לכל שכבת גיל, בהתאם לתוכנית הלימודים הנלמדת בבית הספר.

כל הפרויקטים האלה מוצעים בשלב זה למערכת החינוך כהעשרה, ואולי יוצעו בעתיד כחלק מתוכנית הלימודים המובנית.

מה למדת בתיכון?

למדתי במגמה ריאליט 5 יחידות פיזיקה, כימיה ומתמטיקה. מאוד הצטערתי שלא למדתי ביולוגיה. הייתי לומדת אם היו מאשרים לי, אבל באותה תקופה אם בחרתי במגמות פיזיקה וכימיה - אי אפשר היה לבחור גם את מגמת הביולוגיה. זה פספוס גדול מבחינתי. ללא ספק בביומימיקרי חסר לי ידע ביולוגי. אני קוראת המון, על כל נושא חדש, אני לומדת הרבה, אבל זה לא אותו דבר כמו ללמוד את היסודות.

יש משהו שאת זוכרת מלימודי התיכון?

אני זוכרת את הניסויים בפיזיקה. כנראה בסופו של דבר זוכרים את הדברים החווייתיים: לבנות, לעשות, להזיז, לראות בעיניים; ואת המורה שאמר בשיעור הראשון: אני באתי ללמד. לא באתי להתעסק עם בעיות משמעת. כל מי שלא רוצה שלא יהיה פה. פשוט היה שקט מופתי בשיעורים שלו. הוא לימד טוב.

אנשים מגיעים לביומימיקרי משני תחומים עיקריים: מדעי החיים והנדסה. קיימת עדיפות כלשהי להנדסה מכנית, מפני שטווח הפתרונות בטבע הקשור לאלמנטים מכניים, כנראה נגיש יותר ליישום. כמובן, הטוב ביותר הוא ללמוד את שני התחומים. יש ויכוח בעולם הביומימיקרי מה מוטב להיות: ביולוג או מהנדס. מובן שלביולוג אין הידע ההנדסי, למהנדס אין הידע הביולוגי, ועליהם לעבוד יחד, בצוותים. לכן, כדי להגיע לעיסוק בתחום אפשר ללמוד תואר ראשון בהנדסה, בעדיפות להנדסת מכונות, ובתואר השני להתמחות בביומימיקרי; או ללמוד ביולוגיה ובתואר השני ללמוד את ההשלמות.

היית רוצה שיפתח כאן מסלול ביומימיקרי באוניברסיטה?

אנחנו מאוד רוצים שיפתח כאן מסלול כזה! זה חלק מהחזון של ארגון הביומימיקרי בארץ. זה יקרה, אבל בעוד כמה שנים. אנחנו רואים את המגמות בעולם: בכל העולם קמים מרכזי מחקר ביומימטיים באוניברסיטאות מובילות, ומתחילות תכניות לימודים לתארים ראשון ושני; חל גידול במספר הפוסטגרים בתחום; יש יותר ויותר מענקי מחקר שמושקעים בו, אפילו קיים מענק מחקר ייחודי של האיחוד האירופי. יש המון עניין, המון התפתחות, הכול פונקציה של בשלות ושל משאבים, ואני בטוחה שגם בארץ זה יקרה. היום, למשל, באוניברסיטת תל אביב התחום מתפתח: יש מעבדה לביומימיקרי בבית הספר ללימודי סביבה, מוצעים קורסים אקדמיים גם באוניברסיטת תל אביב וגם במרכז הבין-תחומי בהרצליה. כדי להגיע לרמה של מכון מחקר או מסלול לתואר ידרש עוד זמן.

איך אתם מנסים לפתח את תחום הביומימיקרי בארץ?

כדי לממש את החזון אנחנו מאמינים שצריך להתחיל במערכת החינוך ולזרוע את הזרעים שם. להקנות לילדים את צורת החשיבה האופיינית לתחום, לפתח את הסקרנות המדעית הזאת - של החקר, של ההתבוננות. אלה תהליכים שיש לילדים באופן טבעי, ואולי הטכנולוגיה של היום קצת מרחיקה אותם מהם.

יש דוגמאות רבות לפיתוחים ביומימטיים שנזרעו עוד בשלבי הילדות של המפתחים. לאחרונה כתבתי לידיעון שלנו על פיתוח מאוד מעניין: חוקר (לא ישראלי) שגילה שבתוך עין של חסילון (לובסטר) יש מבנה של עדשות, קצת בדומה לעין של זבוב, שמכוונות קרינה אינפרה-אדומה וגם מרכזות אותה. על פי





מה עשויה להיות המטרה בהוראת ביומימיקרי בבתי ספר?

יש כמה מטרות. קודם כל זה תחום מצוין להקנות באמצעות מיומנויות STEM, לחזק ולתרגל אותן. מהתגובות שאנחנו רואים בשטח אנחנו יודעים שזו סביבה מאוד אטרקטיבית לתלמידים: לחקור, להמציא (הם נורא אוהבים להמציא) באמצעות חשיבה חדשנית ויזמית. מטרה אחרת היא ערכית: ערכים של טבע וסביבה מתחברים מאוד לעשייה שלנו. לדוגמה, חיזוק השמירה על מגוון המינים. בתחום שלנו נהוג לומר ש"כל מין שנכחד הוא מורה שאבד". כבוד לטבע, התבוננות בטבע, הסתכלות אחרת על הטבע: הטבע הוא לא רק מחסן של חומרים אלא גם מחסן של ידע ותובנות. מבחינה ערכית יש לתחום המון מה לתת לתלמידים. נוסף על כך טמונה בתחום זה גישה אופטימית בהקשר הסביבתי: במקום להפחיד תלמידים (חסכו במים כי ייגמרו המים בכנרת; או חסכו באנרגיה כי ייגמרו לנו מקורות האנרגיה) - אפשר להסביר להם שיש פתרונות בטבע, בואו נלך ונלמד ממנו. יש בתחום הרבה יותר אופטימיות בהתמודדות מול הנושא הסביבתי.

איזה מסר היית רוצה להעביר למורים?

הייתי רוצה להציע לכל מורה לבילוגיה או למדעי הסביבה לחשוף את התלמידים לתחום הזה לפחות פעם אחת. לדוגמה, לפתוח שיעור בהמצאה כלשהי מהטבע. יש חומרים רבים מאוד ברשת (גם באתר שלנו) שיכולים לחשוף את התלמידים ולעניין אותם, לעודד אותם להסתכל אחרת על הטבע, או להביא דברים מעניינים לכיתה. זה ברמה החווייתית והערכית.

מעבר לזה, חשוב שתלמידים ידעו כשהם לומדים מדעים בתיכון ואולי אחר כך באוניברסיטה, שיש עוד אפשרויות תעסוקתיות ולימודיות שקשורות בבילוגיה ובמדעי הסביבה. זה צוהר חדש שנפתח בפניהם שרק ילך ויתפתח. חשוב שהם ידעו שהוא קיים. זו עוד מוטיבציה ללמוד בילוגיה ומדעי הסביבה ברמה גבוהה. יש היום מגמה שנקראת התכנסות (convergence) שעוסקת בחיבור בין בסיסי ידע ביולוגיים לבסיסי ידע טכנולוגיים. תחת המגמה הזאת יש תחומים כמו ביוטכנולוגיה, ביוהנדסה, ביורפואה, ביומכניקה וביומימיקרי. החיבור הזה זהה כמקור החדשנות של המאה העשרים ואחת על ידי אנשים רבים, והמפורסם שבהם הוא סטיב ג'ובס. העידן שבו אנחנו חיים הוא עידן הביו וההנדסה יחד.



קצת היסטוריה

מאז ומעולם התבונן האדם בטבע, אבל בערך משנות השבעים של המאה העשרים נכנסה עדנה לתחום. עם השנים התפתחו טכנולוגיות כמו מיקרוסקופיה אלקטרונית המאפשרת זיהוי מבנים ביולוגיים גם ברמת הננו; התפתחו יכולות מידול ממוחשב שמאפשר לחקור אורגניזמים ולהבין טוב יותר את פועלם, וגם להעביר את הידע לתחום היישומי. כך למשל בדוגמה המפורסמת של [מקור השלדג שהיה מודל לעיצוב קטר](#) הרכבת היפנית המהירה, שבה ללא יכולות מידול אי אפשר היה להעתיק את צורת המקור על כל הפרמטרים שלה ולמדל קטר. בדומה לכך, בלי יכולת לרדת לרמת הננו מבחינה מיקרוסקופית לא היו מבינים את [מבנה העלה של הלוטוס](#) שהוא מודל לייצור משטחים דוחים מים ולכלוך, וגם לא היו מכירים את מבנה [עור הכריש שהיה השראה לפיתוח חליפות לשחינים](#).

בהתפתחות תחום הביומימיקרי לאורך השנים מזהות מספר מגמות: המגמה הראשונה היא חיקוי צורות ומבנים והפונקציות הקשורות אליהם, לרוב ברמת המקור, והעתקה שלהם למקומות אחרים. לדוגמה, הסקוטש שכולם מכירים: מבנה של זיזים (שמקורם בזרעי צמחים) מצד אחד, שמתחבר ללולאות (שהן מבנה הפרווה של בעלי חיים) מצד שני. הרכבת היפנית היא דוגמה נוספת, כמוכן. המגמה השנייה קשורה לפיתוחים רובוטיים המבוססים למשל על מנגנוני תנועה בטבע. דוגמא לכך היא חברת פסטו הגרמנית, העוסקת בפיתוח רובוטים, ויש לה מחלקה קבועה שעוסקת בביומימיקרי. המגמה השלישית בהתפתחות הביומימיתית מתרחש בתקופה האחרונה, והיא כוללת פיתוחים ברמת הננו: חיקוי עור הכריש, עלי הלוטוס, [כף הרגל של השממית](#). מה שמאפשר לחקור היום ברמת הננו הוא הטכנולוגיות המתפתחות מצד אחד, והידע הביולוגי ההולך ומצטבר מהצד האחר.

רוצים ללמד ביומימיקרי? איפה מתחילים?

ב- www.biox.org.il.

בקרב תושק הפלטפורמה הפדגוגית המקוונת - **BIOX**, של ארגון הביומימיקרי הישראלי לטיפול חשיבה חדשנית טכנולוגית והקניית מיומנויות STEM*, לצד ערכים סביבתיים וחברתיים.

הטבע הוא מעבדת מחקר ולימוד חווייתית, מעוררת השראה, ומזמנת תהליכי למידה משמעותיים.

הפלטפורמה תכיל תכניות חינוך מובנות ברמת מצגות ואמצעי עזר לתמיכה בהוראת תחום הביומימיקרי לרבות מאגרי מידע, סרטונים, תרגילים ועוד.

לפרטים ומידע: Info@biomimicry.org.il

*STEM-Science, Technology, Engineering, Mathematics



ביומימיקרי זה בטבע שלנו

בקריית החינוך אורט בנימינה לומדים ביומימיקרי בשכבת ט' כתכנית מסודרת ומובנית. התכנית היא פרי עבודה מאומצת, שכללה שלבי הכנה ממושכים, והנה אבן דרך במסלול לתכניות העתידיות של בית הספר

עינת מקוב, בית ספר אורט בנימינה

וסביבתיות. קריית החינוך אורט בנימינה ממוקמת צמוד לפארק הטבע רמת הנדיב. שולי הפארק נושקים לחצר בית הספר והיציאה אל הפארק היא דבר שבשגרה. אנשי רמת הנדיב עושים מאמצים רבים לטפח את נושא הביומימיקרי, ובתיאום עם בית הספר עורכים סיורים ופעילויות חוץ בתחומי הפארק.

פיתוח כישורי עבודות חקר

עבודת החקר מושמעת בתוך תכנית הביומימיקרי ומאפשרת לעבות את נושא החקר, ולתת לו משמעות. במהלך עבודת החקר הביומימית עובדים עם התלמידים חוקרים מהאקדמיה, המבצעים את מחקריהם ברמת הנדיב ומשמים יעצים לתלמידים בעת הצורך. כמו כן מתקיימות פגישות עם מומחים מטעם ארגון הביומימיקרי הישראלי, המתבים יחד עם המורות למדעים את כיווני המחקר ואיתור הפתרונות.

עידוד ליזמות

התלמידים שלנו גדלים לתוך עולם של יזמות ויוזמות. עבודת הסיכום בתום התכנית כוללת תכנון מוצר טכנולוגי/הנדסי המבוסס על אורגניזם ששימש מקור להשראה ולחיקוי. בתוך כך לתלמידים מזדמנת אפשרות להיפגש עם עולם היזמות והתעשייה. הם מתכננים מוצרים יצירתיים וחדשניים, ובהחלט קיימת אפשרות במקרים מסוימים לממש את אב הטיפוס לכדי מוצר מסחרי בשוק.

פיתוח יצירתיות

מציאת הפתרונות הביומימטיים ובניית אב-טיפוס דורשות יצירתיות רבה ודמיון מפותח. נפתחת הזדמנות לתלמידים יצירתיים "לחשוב מחוץ לקופסה" במשמעות האמיתית ובכוונה מלאה. היצירתיות באה לידי ביטוי גם בשלב מציאת הפתרון ברמה התאורטית, גם בשלב התכנון וגם בשלב הביצוע ועיצוב המוצר.



ביומימיקרי הוא נושא שבו תהליכים, מבנים ופתרונות הקיימים בטבע משמשים השראה לפיתוח מוצרים לתועלת האדם. כפועל יוצא, זהו נושא רב-תחומי המשלב ידע ביולוגי וסביבתי, ידע הנדסי וידע עסקי, החושף בפני התלמידים עולם מרתק וחדשני. היוזמה לתכנית הביומימיקרי הגיעה מהמרכז למו"פ ולהכשרה של רשת אורט ישראל לפני כשנה וחצי. בית הספר אורט בנימינה נבחר להשתתף בפרויקט הנקרא "בתי ספר מובילי שינוי", ותכנית הביומימיקרי על כל היבטיה השתלבה בחזון בית הספר וביעדי השינוי שהציב לעצמו: היא מהווה הזדמנות לערוך שינוי בדפוסי חשיבה, בתכני הלימוד, באופן הלימוד ובשפה המיוחדת שהיא מנחילה לעוסקים בַּתחום.

למה ביומימיקרי?

תכנית הביומימיקרי היא תכנית לימוד חדשנית בטכנולוגיה ובמדעים. היא מטפחת בקרב התלמידות והתלמידים חינוך ערכי והשכלה טכנולוגית-מדעית ותקשובית. המאפיינים הערכיים והתרבותיים של התכנית הם רבים:

חזרה ל"בראשית" ולטבע

אחד מעמודי התווך של הביומימיקרי הוא למידה והתנסות חווייתית מהטבע על כל רבדיו. כל הפתרונות נמצאים כבר שם. צריך רק ללמוד לחזור אליהם.

ההזדמנות שלנו לחשוף את התלמיד אל הטבע הבראשית והבתולי היא בעלת ערך חינוכי אדיר. ההתלהבות של התלמידים לאסוף עלים, ללכוד עכביש (ולשחרר אותו אחר כך...) או לבחון מקרוב פרח פורח מפגישה אותם עם חוויות שונות מאוד מהחוויות מעולמם הדיגיטלי והטכנולוגי, שעבורנו המבוגרים היו יומיומיות בילדותנו. לדוגמה, תרגיל הקשבה לטבע שבו התלמידים פשוט יושבים בחורשה, באחו או על שפת המעיין, ומקשיבים בדממה ובתשומת לב לקולות ולרחשים שמסביבם, מותיר רושם עמוק בחוויה שהתלמידים עוברים.

יחס של כבוד לטבע

הפיתוחים הביומימטיים מבוססים על כבוד לטבע. בשונה מתוצרי המהפכה התעשייתית, המנצלים את משאבי הטבע ופולטים מזהמים לסביבה, הביומימיקרי מחנך להתייחס לטבע בענווה ובצניעות, תוך שמירה עליו ויישום עקרונות של קיימות. עיסוק ביחס המכבד את הטבע מתקשר גם לערך הכבוד, שהוא אחד מהערכים המרכזיים שבית הספר חרט על דגלו, ומציג בפני התלמידים את הערך על כל גווניו - החל מכבוד לסביבה ולטבע ועד כבוד לאנשים שמסביבנו.

חיבור לסביבה

התכנית מבוססת על יציאה לטבע והתבוננות בתופעות ביולוגיות

כבית ספר השייך לרשת הטכנולוגית אורט, ביומימיקרי משתלב גם בחזון הרשת, המשלב אמונה בטיפוח חינוך ערכי והשכלה טכנולוגית-מדעית ותקשורת.

הערכים החינוכיים האלה קסמו להנהלת קריית החינוך אורט בנימינה. עינת מקוב, מנהלת אשכול הפיס, מובילה את השינוי ואחראית להכנסת תחום דעת זה ולשילובו בתכנית הלימודים. לאורך התהליך חברו לפרויקט שני גופים חשובים נוספים, מחלקת החינוך של רמת הנדיב וארגון הבינומיקרי הישראלי, ונוצרו שיתופי עבודה שהרחיבו את הפרויקט המקורי.

לאחר יצירת שיתוף פעולה עם ארגון הביומימיקרי הישראלי לבניית תכנית פעולה ותכנון שלבי העבודה, הוצג עולם הביומימיקרי בפני כלל המורים בקריית החינוך והם הוזמנו להצטרף לעבודה המשותפת. את ההרצאה המרתקת העבירה יו"ר איגוד הביומימיקרי הישראלי, ד"ר דפנה חיים לנגפורד. המורים גילו עניין והתלהבות.

בעקבות החשיפה לתחום קיימנו השתלמות למורים מתחומי דעת שונים בבית הספר. את ההשתלמות פיתחה והעבירה ד"ר יעל הלפמן-כהן, מייסדת ומנכ"לית ארגון הביומימיקרי הישראלי, ובחלק מהמפגשים השתתפה גם האדריכלית מלאני סמסון, שקידמה חדשנות פדגוגית בחינוך ההנדסי באקדמיה ובבתי ספר. ההשתלמות נערכה באשכול הפיס, והשתתפו בה מורים למדעים, אך גם מורים מתחום החינוך המיוחד, אנגלית, גיאוגרפיה, סוציולוגיה ועוד. בתוך כך התגבשה קבוצת מורים מתחומי הלימוד השונים שיוכלו בעתיד לשמש יועצים לתלמידים במהלך עבודת החקר שלהם.

ההשתלמות הוכתרה בהצלחה יוצאת דופן. שביעות הרצון של המורים המשתתפים הייתה גבוהה ביותר. במהלך ההשתלמות המורים ניתחו דוגמאות של פיתוחים ביומימיטיים ולמדו את שלבי הפיתוח הביומימיטי. חלק ניכר מהקורס היה בדגש סדנאי וכלל התנסות מרובה, לצד פרקים תאורטיים מרתקים.

כשלושה חודשים לאחר ההשתלמות החלה אחת מכיתות ט' ללמוד את הנושא ככיתת פיילוט. התלמידים למדו את הנושא באופן תאורטי ואחר כך תיכננו מוצרים שהטבע שימש להם השראה. הפתרונות שהתלמידים הציגו היו יצירתיים מאוד: אחת הקבוצות התמקדה בתכונה אופיינית של הפרעוש - קפיצה לגבהים. פרעוש יכול לקפוץ פי 350 לערך מאורך גופו! התלמידים תיכננו רובוט שיוכל לקפוץ לגובה למטרות הצלה, כמו בשריפה, או שישמש למטרות ריגול. קבוצה אחרת עקבה אחר היכולת של הצב להגן על אבריו הרגישים באמצעות השריון שלו והכנסת איבריו בעת סכנה. תלמידי הקבוצה הציגו כלי רכב שבעת התקפה וסכנה כל חלקיו הפגיעים מתקפלים כלפי פנים ומוגנים עד יחלוף הזעם.

נפתחת הזדמנות לתלמידים יצירתיים
 "לחשוב מחוץ לקופסה" במשמעות
 האמיתית ובכוונה מלאה



יציאה לפארק הטבע רמת הנדיב להיכרות
עם חוקרים ולעבודה בשטח

עבודת החקר מתקיימת בצוותים של מספר תלמידים ומחייבת את חברי הצוות לשיתוף פעולה ואחריות הדדית. ברוב המקרים העבודה מחולקת בין התלמידים ומחייבת התמחות בתחומי ידע שונים.

מציאת הרעיונות דורשת עין סקרנית וערנות לסביבה. העיסוק ביוזימימיקרי משנה את ה"עדשה" שדרכה אנו מתבוננים בסובב אותנו ומחדד את היכולת לעצור לרגע ולשאול שאלות. התבוננות אחרת והצגת שאלות הן מיומנויות שישרתו את התלמידים גם בעתיד ובתחומים אחרים. לימוד הנושא מעורר סקרנות רבה ועניין בקרב התלמידים. הוא מאפשר גם לתלמידים מתקשים להציג את החוזקות שלהם; הלמידה היא רב-תחומית ומעמידה בפני התלמידים את האתגר ליצור הקשרים בין פיסות מידע מתחומי תוכן שונים.

האתגר המרכזי היום הוא נושא הקיימות - להפסיק להזיק לטבע, לתכנן מראש את כל המהלכים ולנבא את ההשלכות של פגיעה בטבע. ביומימיקרי פועל בדגש על קיימות.



משחק קלפים לעידוד החשיבה הביומימטית והיכרות עם דוגמאות



קבוצה נוספת חקרה את המבנה המיוחד של צוואר הנמלה המאפשר לה להרים משקל של עד פי כ-5,000 (!) ממשקל גופה. על בסיס עובדה מופלאה זו ניסו תלמידי הקבוצה לפתח רובוט משא המחקר את המנגנון הנמלי.

בסיום אותה שנת לימודים נערך יום שיא לכיתה ט' - סיור בספארי בדגש ביומימיקרי. התלמידים ראו במו עיניהם את בעלי החיים והתכונות המיוחדות ששימשו השראה לפיתוחים ביומימטיים: חדק הפיל שעל פי אופן תנועתו פיתחה חברת FESTO הגרמנית זרוע ביונית המשמשת להעברת חפצים; קוצי דרבן שחדירתם חד-כיוונית ושימשו השראה לפיתוח חוטי תפירה כירורגיים מיוחדים, שאיחוי פציעות וחתכי ניתוח באמצעותם מגביר את קצב ההגלדה ויוצר צלקת מזערית; תנועת הנחשים שסיקרה את אנשי המעבדה לביו-מכניקה וביו-רובוטיקה בטכניון ופותח רובוט זוחל דמוי נחש, שבראשו מצלמה משדרת. הרובוט יכול להשתחל במעברים צרים במטרה לספק מידע לפני פריצה או השתלטות, או במקרים של הריסות כתוצאה מרעידות אדמה או הפצצה וקריסה של מבנים. שפע הדוגמאות אדיר וכמעט ליד כל בעל חיים בספארי אפשר לספר על דוגמה והשראה ביומימטית.

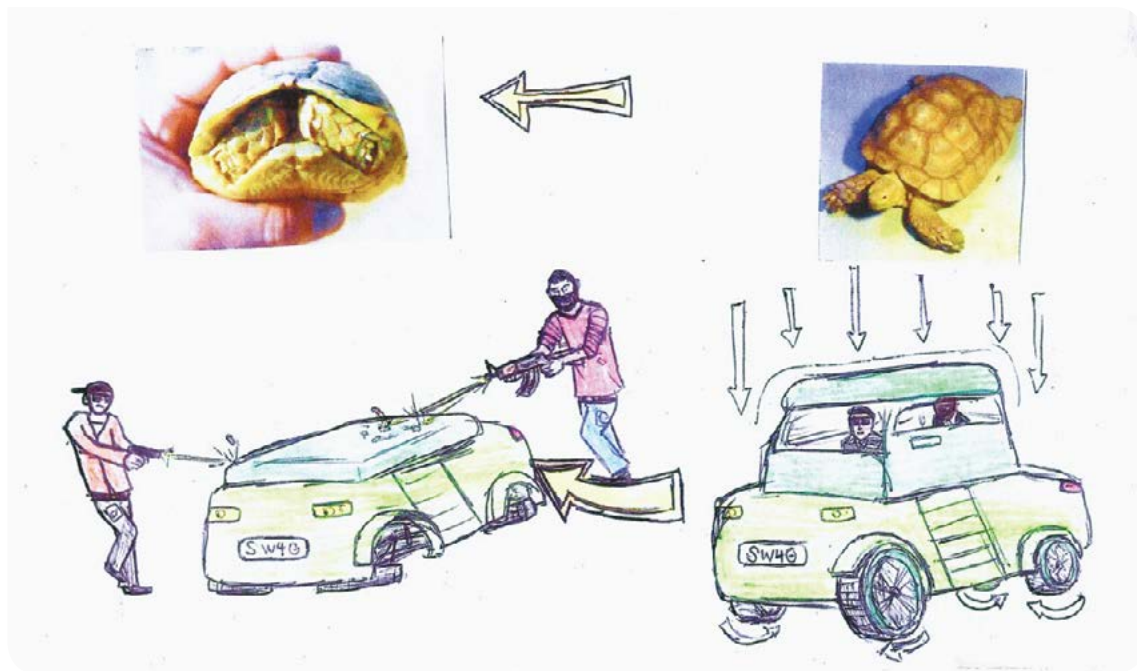
נכתבה תכנית מסודרת ומפורטת ונבנה צוות תמיכה למורים ולתלמידים, המורכב מאנשי החינוך של רמת הנדיב, חוקרים המבצעים את מחקריהם ברמת הנדיב ויועצים מטעם ארגון הביומימיקרי הישראלי.

התכנית כיום

בשנת הלימודים הנוכחית החלה כל שכבת ט', כ-230 תלמידים, ללמוד ביומימיקרי. התכנית נפתחה בכינוס חגיגי, שבמהלכו שמעו התלמידים הרצאת מבוא לנושא, וזו חשפה בפניהם עולם זה. בכיתות התלמידים לומדים על משמעות הביומימיקרי, באילו תחומים מוצאים פתרונות ביומימטיים, אופן החשיבה הביומימטית וכיצד ניגשים לבעיה ומוצאים לה פתרון ביומימטי. הלמידה נעשית בדרך חווייתית וכוללת פעילויות רבות, סרטונים, מצגות מרתקות ויציאה לפארק רמת הנדיב ללמוד כיצד מסתכלים על העולם ב"משקפיים ביומימטיים".

במהלך חודשי הקיץ התקיימו קשרי פעולה בין שלושה גופים לעבודה משותפת: קריית החינוך אורט בנימינה, מחלקת החינוך ברמת הנדיב וארגון הביומימיקרי הישראלי. קריית החינוך רמת הנדיב וארגון הביומימיקרי לקחו על עצמם לפתח את תכנית הלימודים ואת תכנית הליווי המקצועי לבית הספר.

התלמידים מתכננים מוצרים יצירתיים וחדשניים, ובהחלט קיימת אפשרות במקרים מסוימים לממש את אב הטיפוס לכדי מוצר מסחרי בשוק



תכנון ראשוני - רכב בשחון ממוגן, המקפל את החלקים החיוניים כלפי פנים בעת סכנה, בהשראת הצב.

- בכנס "ביומימיקרי - אקדמיה ותעשייה" שייערך ב-2016 תוצג תערוכת עבודות נבחרות של תלמידי שכבת ט' באורט בנימינה. הכנס מתקיים ביוזמת ארגון הביומימיקרי הישראלי ולשכת המהנדסים ובשיתוף המעבדה לביומימיקרי בבית הספר ללימודי הסביבה ע"ש פורטר, אוניברסיטת תל אביב, והוא מהווה מפגש שנתי לחוקרים ולתעשיינים בתחום הביומימיקרי.

- שפת הביומימיקרי - עקרונות הביומימיקרי יבואו לידי ביטוי גם ביתר המקצועות וברוח בית הספר; בחזון - ביומימיקרי חובק בתוכו שפה מיוחדת (פדגוגית, ערכית וארגונית) שתהפוך להיות שפת בית הספר ותכלול יצירתיות, זימות, רב-תחומיות, אחריות, עבודת צוות, כבוד, ערכים, מרחב של דעת, הנאה והנעה, פנים אל העתיד ועוד ועוד...

- בתכנון לעתיד - תחום הביומימיקרי ילך ויתרחב, ויעלה גם לחטיבה העליונה. רשת אורט תפתח בשיתוף עם קריית החינוך תכנית לימודים לחטיבה העליונה בהיקף של 5 י"ל.

- לסיכום, תכנית הלימודים בביומימיקרי היא תכנית רב-תחומית בהיבט הרחב ביותר. ביומימיקרי הוא מנוע חדשנות מעורר סקרנות ומעודד ליצירתיות.

התלמידים של היום הם אזרחי המחר שלנו. תפקיד מערכת החינוך ללמד את התלמידים להיות לומדים עצמאיים, להכין אותם לחיים האמיתיים ולדאוג שהיו אזרחים אחראים. וזאת בניגוד להתייחסות למשאבי הטבע בחמדות חסרת אחריות, שבה אנו מכלכלים ומזהמים את כדור הארץ העדין שלנו, ופוגעים באיזון השברי שלו - תחום הביומימיקרי מאפשר חינוך לרגישות כלפי הטבע, התייחסות לאפשרויות המדהימות הטמונות בו ולפתרונות שהתפתחו במהלך האבולוציה - חינוך דור חדש שלא מנצל את הטבע ופוגע בו, אלא דואג לטבע, מכבד אותו ולומד את צפונותיו.



לאחר הלמידה התאורטית נכנסים התלמידים לשלב השני של התכנית והוא השלב המעשי. במהלכו הם לומדים לנתח מערכות, לזהות תכונות מיוחדות ביצורים מעניינים, לחקור ו"לזקק" את הפונקציות שממלאות התכונות האלה. זיקוק ודיוק הפונקציה מאפשר לתלמידים להפעיל את היצירתיות והדמיון שלהם ולחשוב היכן בעולמנו ההנדסי והטכנולוגי אפשר לממש את התכונה, ואיזה מכשיר אפשר לייצר שמחקה את התכונה. התלמידים עובדים בקבוצות, וכל קבוצה מתמודדת עם פתרון בדרך ביומימטית.

לתכנית שנבנתה התווספו חומרי למידה שפותחו בבית הספר, כמו משחק קלפים להיכרות עם פיתוחים ביומימטיים.

כל תלמידי השכבה עוסקים בעבודת חקר. תוצר העבודה הוא אב טיפוס של המוצר הביומימטי ופוסטר מדעי למוצר שהוא מימוש ביומימטי המבוסס על יצור כלשהו כמקור השראה.

במאי השנה, נחנך בחצר בית הספר מתחם ביומימיקרי, שכולל גן מדע ובו תחנות פעילות המבוססות על פיתוחים ביומימטיים. כל תחנה כוללת אורגניזם בעל תכונה מרתקת, ששימש השראה להמצאה כלשהי. בין התחנות אפשר למצוא איצטרובלי אורן ששימשו השראה לפיתוח בדים נדיפים, לוח סולארי מתכוונן ולידו צמחי חמניות (בתמונה משמאל), בריכת לוטוסים לחקר "אפקט הלוטוס" (בתמונה למעלה) ועוד. במבואת אשכול הפיס עמדת מולטימדיה ובה מידע, סרטונים, משחקים וגלריית עבודות תלמידים - כולם סביב נושא הביומימיקרי. בכל תחנה מתבצעת פעילות חקר התואמת את שלבי החקר המדעי. ליד כל מוצג הוצב שלט הסבר הכולל תיאור האורגניזם, התכונה מעוררת ההשראה והפיתוחים הביומימטיים שיוצרו בעקבותיה. המתחם יהיה המוקד שבו יילמדו שלבי החקר המדעי. התלמידים יצאו במהלך השיעורים לתחנות העבודה ויתנסו בצורה מוחשית בתהליך החקר בנושא. בטקס הסרת הלוח הוצגה תערוכת התוצרים של תלמידי שכבת ט'.

מה הלאה?

- מרכז המו"פ של אורט וקריית החינוך אורט בנימינה ישמשו מרכז פיתוח, ייעוץ והטמעה לבתי ספר שירצו להפעיל את התכנית.

- למתחם הביומימיקרי יתווספו תחנות נוספות בשיתוף עם התלמידים. התלמידים יהיו גם אלה שיציעו ויתכננו מדי שנה תחנות נוספות למתחם.



מותר להוציא ניידים

אפליקציות ואתרים שגורמים לנו להמציא

אתרים

דוגמאות להמצאות ועיצובים ביומימטיים (אנגלית)

<http://inhabitat.com/finding-design-inspiration-in-nature-biomimicry-for-a-better-planet/?newgallery=false>

דוגמאות לבניינים ביומימטיים (אנגלית)

<http://buildipedia.com/aec-pros/design-news/biomimicry-taking-cues-from-nature>

סרטון על יצירת משטח הסוואה בהשראת דיונונים (אנגלית)

https://www.youtube.com/watch?v=a_Q8dYZC9JU

כתבה ב-Y-net על חידושים ביומימטיים (עברית)

<http://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-4300071,00.html>

אתר ארגון הביומימיקרי הישראלי (עברית)

מידע על תחום הביומימיקרי, כולל מידע על תופעות ביולוגיות ששימשו השראה להמצאות ושיפורים לתועלת האדם

<http://www.biomimicry.org.il/>

אתר ארגון הביומימיקרי העולמי (אנגלית)

מכיל מידע לימודי, מאגר תמונות על המצאות ביומימטיות, הנחיות למעצבים וממציאים

<http://challenge.biomimicry.org/en/>

הרצאת TED: ג'נין בניוס על ביומימיקרי

https://www.ted.com/talks/janine_benyus_biomimicry_in_action

מאגר מידע על מוצרים בהשראת תהליכים בטבע (אנגלית)

<http://www.asknature.org/>

ד"ר יעל הלפמן-כהן, הרצאה על תהליכי יזמות ביומימטיים (עברית)

<https://www.youtube.com/watch?v=Z4MPTXigVG0>

ביומימיקרי בספארי (עברית)

<http://www.safari.co.il/article.php?id=563>





פרפראות ביומימטיות

המקום שבו נפגשים ביולוגים
ומהנדסים יוצר מפגש יצירתי בלתי רגיל.
לפניכם כמה דוגמאות, רובן מוזכרות בכתבות שבעלון.

סקוטש

שנה: 1941

ממציא: ג'ורג' דה מיסטרל, מהנדס

ארץ: שווייץ



בתום טיול עם כלבו, דה מיסטרל הוציא מפרוות הכלב זרעים שנדבקו אליה. הוא החליט להתבונן מקרוב יותר ולגלות מה במבנה הזרעים גורם להם להידבק לפרוות הכלב. דה מיסטרל גילה שלזרעים יש בליטות ארוכות המסתיימות במבנים דמויי ווים מעוקלים. אלה נתפסים בלולאות של שיער הפרווה.

תעלות במקום מזגנים

שנה: 1996

ארץ: זימבבואה

ממציא: מיק פירס, אדריכל

מערכת הקירור של בניין משרדים גדול שהוקם בזימבבואה בעיר הרארה מחקה את תעלות האוויר המאפיינות תלי טרמיטים. הארכיטקטורה של תעלות אלה יוצרת תנועה של אוויר במעלה התל המקררת אותו. מערכת תעלות הקירור שנבנתה בבניין מאפשרת לוותר כמעט לחלוטין על מיזוג אוויר בעזרת מזגנים.



ניקוי עצמי

שנה: 1999

ארץ: גרמניה



ממציא: וילהלם ברטלוט, בוטנאי, אוניברסיטת בון; חברת ISPO העלים של פרח הלוטוס נראים לרוב נקיים. הם מכוסים בבליטות ננו-מטריות הגורמות למים שעל העלה להסתחרר ולגרוף איתם חלקי לכלוך ואבק, וכך לשטוף את העלה ולהשאירו נקי במיוחד. צבע לקירות בתים וחלונות שיש בו בליטות ננו-מטריות דמויות הבליטות של עלה הלוטוס מאפשר לקירות להישאר נקיים במיוחד לאחר הגשם או לאחר שטיפה במים, והדבר נכון גם לגבי בדים בעלי בליטות דומות.

לטפס על קירות

שנה: 2012

ארץ: ארצות הברית

ממציאים: דנקן אירצ'יק, אלפרד קרוסבי, מייק ברטלט

לרגלי השממית יש מבנים ייחודיים המאפשרים לה לטפס אנכית על קירות. בהתבוננות במיקרוסקופ נראות אלפי בליטות בעור רגלי השממית. למרות הקשיחות של הבליטות, הן מאפשרות לשממית להידבק גם למשטחים חלקים. המדענים שגילו את המבנה הייחודי של רגלי השממית המציאו משטח הדבקה המחקר את הבליטות, ומאפשר הדבקה של משקלים גדולים, וכן הפרדה והדבקה מחדש באופן קל יחסית.



קופסה אווירודינמית

שנה: 2005

ארץ: גרמניה

ממציאים: חברת מרצדס-בנץ

חברת המכוניות מרצדס-בנץ פיתחה אב טיפוס של מכונית קטנה בעלת שתי דלתות ולה מבנה המחקר את צורתו של הדג הטרופי קופסינון. הקופסינון הוא דג קטן, יחסית, ולמרות תנועתו המסורבלת מעט במים, יש לו מבנה שנמצא אווירודינמי במיוחד בעבור מכוניות קטנות.



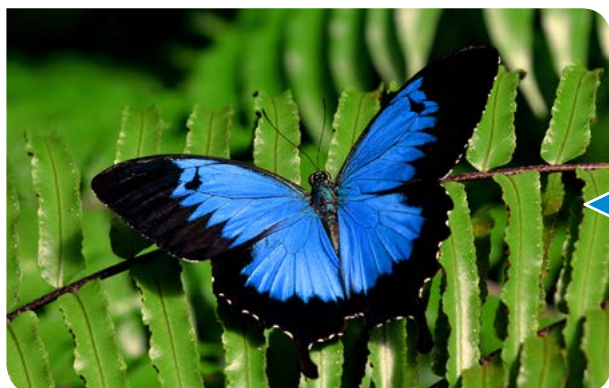
צבעים פיזיקליים

שנה: 2007

ארץ: ארצות הברית ויפן

ממציא: חברת Qualcomm, חברת Tiejin

צבעיהם של פרפרים כחולים ושל נוצות השווט נוצרים על ידי שכבות שקופות בעלות מבנים מיקרוסקופיים הגורמים לאור להישבר בזוויות מסוימות המחזירות אור כחול, ירוק או זהב. שימוש במבנים מיקרוסקופיים כאלה מחליף את הצבעים הרעילים הדרושים לתעשיית הטקסטיל לייצור בדים צבעוניים, או מאפשר יצירת טכנולוגיית מסכים אלקטרוניים הצורכת פחות אנרגיה משום שאין צורך בתאורה אחורית למסך.



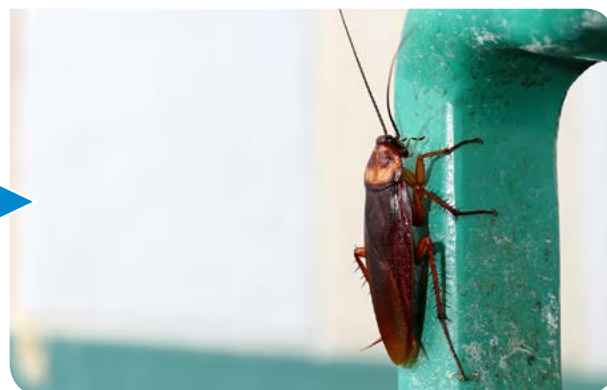
רובוט דמוי תיקן

שנה: 2016

ארץ: ארצות הברית

ממציאים: קאושיק ג'איראם וקוברט פול, אוניברסיטת ברקלי

השלד החיצוני של תיקנים עשוי כישין. אמנם זהו שלד קשיח, אך הוא מורכב מחלקים המאפשרים לתיקנים "להימנע" ולחדור חריצים צרים מאוד, עד כדי כמה מילימטרים. מדענים באוניברסיטת ברקלי מנסים ליצור רובוט בעל מבנה המחקר את מבנה השלד של תיקנים שיאפשר לו לחדור חריצים צרים במיוחד ולהשתמש בו במקרים של הצלת אנשים מהריסות בניינים.



דחיפה יעילה

שנה: 2004

ארץ: ארצות הברית

מדענים: מאוניברסיטת דיוק, ווסט צ'סטר והאקדמיה של הצי האמריקני

המבנה המשונן של סנפיר הלווייתן התגלה כיעיל במיוחד למניעת ערבול אחורי של המים בעת שחייה ולדחיפה יעילה יותר. חיקוי מבנה משונן זה נעשה על ידי חברות המייצרות טורבינות רוח, על מנת ליעל את דחיפת האוויר ולחסוך באנרגיה הדרושה לסיבוב.



קטר מפלח אוויר

שנה: 1997

ארץ: יפן

ממציא: אייג'י נקטסו, מהנדס

צורת המקור של שלדגים מאפשרת להם לשלות דגים מהמים ולעבור מתווך אווירי לתווך מימי כמעט ללא התזה של מים. המהנדס הראשי של הרכבת היפנית המהירה בעולם, שהוא גם צפר חובב, שם לב לתכונה זו של השלדגים. בעזרת תוכנת מחשב חיקה את צורת המקור של השלדג ובנה על פיה קטר לרכבת. צורת הקטר החדשה מאפשרת לרכבת לעבור ממנהרה לאוויר הפתוח בלי רעש חזק שנבע מהפרש הלחצים והגיע למרחק קילומטרים, ובהדפת אוויר מינימלית, המאפשרת חיסכון באנרגיה.



סידן אמורפי

שנה: 2009

ארץ: ישראל

ממציאים ומגלים: פרופ' אמיר שגיא וד"ר אמיר ברמן מאוניברסיטת בן גוריון, חברת אמורפיקל

הסרטן הכחול האוסטרלי (*Cherax tenuimanus*) חי במקווי מים מתוקים העניים בסידן, ולמרות זאת מייצר שלד חיצוני חדש בתוך שלושה ימים בלבד. הוא עושה זאת על ידי אגירת סידן לאורך כל השנה במבנה הנקרא סידן אמורפי, המורכב מחלקיקים בעלי שטח פנים גדול. מבנה זה מאפשר לסידן להיות זמין לבניית השלד החיצוני באופן יעיל ביותר, לעומת הצורה הגבישית שהיא פחות זמינה לניצול על ידי הגוף. תכונה זו של הסידן האמורפי מנוצלת על ידי חברת אמורפיקל הישראלית לייצור סידן אמורפי כתוסף מזון הנספג בצורה יעילה יותר בעצמות ועשוי להיות פתרון טוב לבעיית זמינות הסידן ולמניעת אוסטאופורוזיס.





לשחות בעור של כריש

שנה: 1987

ארץ: ארצות הברית

ממציאים: מדעני NASA

עורם של כרישים בנוי מלוחיות ובהן חריצים המקבילים לכיוון השחייה. הלוחיות והחריצים מונעים היווצרות של מערבולות כתוצאה מהתנועה במים, וכן מונעים את גדילתן של אצות ויצורים ימיים על העור. המבנה המיקרוסקופי של הלוחיות בעור הכריש שימש השראה ליצירת חליפות שחייה מקצועיות, משטחים של סירות, מטוסים ותחנות רוח, וכן לציפוי רצפה בבתי חולים.



לקצור מים במדבר

שנה: 2001

ארץ: בריטניה, ארצות הברית, קנדה

מגלים ומפתחים: ד"ר אלן פארקר, חוקרים ב-MIT, חברת FogQuest
חיפושיות המדבר הנמיבי (לדוגמה, *Stenocara gracilipes*) שימשו השראה לפיתוח מתקן לאיסוף של מי ערפילים במקומות צחיחים. בשריון של החיפושית פזורות גבשושיות עשויות מחומר הידרופילי המוקפות בתעלות עשויות מחומר הידרופובי (סוג של שעווה). מים מהאוויר, לרוב מערפילי בוקר במדבר, נלכדים באמצעות החומר ההידרופילי, וזורמים בתעלות לכיוון פיה של החיפושית. המתקן לקציר מי ערפילים מורכב משילוב של חומרים הידרופילים והידרופוביים, וקיימים כמה מתקנים כאלה באזורים צחיחים ברחבי העולם שבהם אין לאוכלוסיה גישה למים.



ספירלה שקטה

ארץ: ארצות הברית

מפתחים: PAX Scientific Inc.

צורת הספירלה מופיעה ביצורים רבים ומשמשת לתפקודים שונים. בחברת פקס סיינטיפיק האמריקאית החליטו להשתמש בספירלה ליצירת מאווררים וטורבינות, משום שהספירלה מאפשרת לקבל מכשיר שקט וחוסך אנרגיה באופן משמעותי.





בקטריה להצלה

מערך הטמעה בנושא ביומימטיקה של חיידקים

מורן פרבר, מקיף ז' רביבים, ראשון לציון

2. הצגת גישת הביומימיקרי

בשלב זה רציתי להכיר לתלמידים מיקרואורגניזמים אשר היוו השראה לפיתוח מוצרים שונים לעזרת האדם באמצעות תחום הביומימיקרי. מאחר שרק מעט מוצרים פותחו בהשראת מיקרואורגניזמים הצגתי גם מוצרים שפותחו בהשראת אורגניזמים רב-תאיים (כדי שהתלמידים יבינו את עקרון הביומימיקרי). בדוגמאות שהצגתי התמקדתי במוצרים שפותחו בישראל כדי להראות שהרעיונות נמצאים אצלנו בבית ולא רק בחוץ מאיתנו במדינות אחרות; ואולי כך תהפוך יכולת ההמצאה לאפשרית יותר בעיני התלמידים, שיאמינו שגם הם יכולים. כדי לעודד אותם לחשוב בצורה יצירתית ולא שגרתית קיבלו התלמידים משימה לחשוב על מוצרים נוספים שאפשר לתכנן בעזרת חיידקים או בהשראתם, וכל קבוצה התבקשה להציג את פיתוחה.

דוגמאות המוצרים הוצגו באמצעות כתבות וסרטונים:

א. [דג הפסים הצבעוני](#) וחיישן החומרים שפותח בהשראתו, [כולל סרטון הפרסומת של המכשיר](#).

תאי חישה בעיניו של הדג רגישים לקרינה שבין אורך הגל האדום הנראה לעין לבין אורך הגל האינפרא-אדום המוקרן מגופים חמים. באורך גל זה יש לכל חומר אורגני החזר ייחודי משלו, וכך מאוסף חומרים אורגניים שונים מתקבל איחוד של כל ההחזרים הייחודיים. בעזרת עיקרון זה מפתחים בחברת [Consumer Physics, Inc](#) חיישן להרכב מזון וחומרים שונים, העשוי, לדוגמה, לסייע לחולי סוכרת לזהות סוכר במזונם או את כמות הפחמימות בו.

ב. [פיתוח דבק ביולוגי בהשראת הפיברין](#) - במעבדות החברה לייפבונד פיתחו דבק ביולוגי המורכב משילוב של החלבון ג'לטין המופק מחזיר ואנזים ממקור חיידקי. פעולתו של החומר מקנה יכולת הדבקה כמו רשת הפיברין, ללא צורך בהפקת פיברין מדם אדם, כשם שנעשה כיום.

ג. [פיתוח רובוטים זעירים בהשראת חיידקים](#) - הפתוגן *Giardia* אחראי לאחת ממחלות המעי הנפוצות ביותר בעולם. הוא

במהלך לימודי במסגרת תכנית רוטשילד-וייצמן במחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן ביקרנו במעבדות שונות ונחשפנו לשיטות חדשות. במעבדה אחת נחשפתי לסיפורה של ד"ר ארז, על תגלית מקרית שהובילה לפיתוח שיטה שיכולה להציל חיים, ובמעבדה אחרת נחשפתי לשימוש שעושה פרופ' אורן שולדינר במיקרוסקופ קונפוקלי היוצר תמונות חתך ומאפשר לאחדן לתמונה תלת-ממדית אחת.

הביקורים במעבדות הובילו אותי להרהר בכך שתגליות יכולות להגיע ממקומות בלתי צפויים והיכולות של בני האדם להמציא טכנולוגיות שעוזרות כל כך היא מופלאה. רציתי לחשוף את תלמידי (כיתה י') לטכנולוגיות שונות שפותחו ולרעיונות הנפלאים שמאחוריהן כך שיוכלו להעלות בעצמם רעיונות שונים לפיתוח מוצרים. בחרתי לעשות זאת בנושא מיקרואורגניזמים באמצעות תחום הביומימיקרי.

רצף ההוראה

1. ידע קודם

תכניות הלימודים בנושא מיקרואורגניזמים עוסקות בין היתר בעקום גידול של מיקרואורגניזמים, בניצול מיקרואורגניזמים להכנת מזון, ושמות דגש על ההגנה מפני מיקרואורגניזמים, בדרך של שימור מזון וחיסון. היה לי חשוב להציג לתלמידים תמונה רחבה יותר של עולם המיקרואורגניזמים ולחשוף אותם לתכונות "טובות" נוספות שלהם המשמשות את בני האדם ויצורים רבים אחרים.

התלמידים למדו, בהוראה פרונטלית, על חיידקים החיים בסימביוזה עם בעלי חיים אחרים ותורמים להם. עד שלב זה בהוראה עסקנו בכיתה בנושא פרוביוטיקה ובחיידקי המעיים. אני נוהגת להציג כתבות או ענייני אקטואליה מתי שרק אפשר, במטרה להפוך את חומר הלימוד למשמעותי יותר בעבור התלמידים. כך הם יכולים להיווכח שהוראה אינה מנותקת מחיי היומיום שלהם ושביכיתה הם לומדים את המציאות שמתרחשת מסביבם בכל יום. התלמידים נחשפו למחקרים חדשים, והכירו את [שיטת השתלת הצואה](#) והשפעתה החיובית, באמצעות כתבות עכשוויות העוסקות בהשתלות צואה שנערכו בחודשים האחרונים, למשל:

א. [כיצד חיידקים בצואה נלחמים במחלות ובהשמנה](#).

ב. [לראשונה בישראל: צואה של האם הושתלה בבתה - והיא נרפאה](#).

ג. [אלפי אמריקאים משתילים לעצמם צואה של אחרים כטיפול בבעיות מעיים](#).

התלמידים יצרו מוצרים מקוריים המנצלים את תכונות החיידקים



התלמידים התבקשו לשנות או לתקן את המוצרים שלהם בהתאם לדיון על המוצר שלהם בכיתה

על המוצר הצרפתי. המוצר הצרפתי עושה שימוש בחיידקים והישראלי פועל אחרת (אין פירוט על הטכנולוגיה).

סיפור מוצר זה שימש הכנה למשימה הבאה, שבה התבקשו התלמידים להכין פרסומת למוצר שלהם, לפי ההנחיות הבאות:

צרו פרסומת (עלון פרסום, סרטון, כרזה) המנסה לשווק את המוצר שלכם.

מה צריך להופיע בפרסומת?

- שם המוצר
- מטרת המוצר
- קהל היעד
- תכונת החיידק שעליו המוצר מתבסס
- הוראות הפעלה של המוצר. אפשר להכין גם דגם או סרטון המדגים כיצד יש להשתמש בו.
- איור המוצר וחלקי ההחלפה (אם יש)
- סיסמה קליטה שתעודד שימוש במוצר
- אם מדובר בעלון, עליו להיות קריא ואסתטי

5. סיכום

לסיכום דנו בתהליך פיתוח המוצר שהתלמידים עבדו עליו: מה היו הקשיים, מה הלך בקלות, האם השאלות והמשוב מהכיתה עזרו להם לפתח מוצר טוב יותר? הערכת הלמידה

פרק הלימוד אינו חלק מתכנית לימודים קונבנציונלית ולכן גם הערכת התלמידים נעשתה באופן שונה. תלמידי עבדו בעבר עם מחוונים והם מכירים שיטת עבודה זו, אבל אם זו פעם ראשונה, כדאי לתרגל אותה עם התלמידים. עם הצגת הפרסומת קיבל כל תלמיד דף משוב שהתבקש למלא בנוגע לעבודת חבריו (מסגרת 1). במקביל להערכת העמיתים מילאה המורה אף היא

כל קבוצה הציגה את המוצר שלה בכיתה; אפשר היה לשאול שאלות, להעלות קשיים או להעיר על המוצר

דף משוב (מסגרת 2).

לכל תלמיד ניתנו חמש נקודות בונוס שאותן יוכל להעניק לקבוצה שלדעתו הכינה את הפרסומת הטובה ביותר, מכל סיבה שהיא (מצחיקה ביותר, יצירתית ביותר וכולי).

ההפעלה בכיתה

התלמידים יצרו מוצרים מקוריים המנצלים את תכונות החיידקים. מאחר שלא נתתי להם הרבה פרטים על תכונות החיידקים הם יכלו להחליט דברים רבים בעצמם, ולכן, לדעתי, יצרו תוצרים מקסימיים; לדוגמה, שקית החובקת בקבוקי האכלה לתינוקות ומכילה את החיידקים שצבעם משתנה בטמפרטורות גבוהות.

נצמד למשטחים שונים ומסוגל לשחות בסביבה קשה, דבר המאפשר לו להדביק מינים רבים של יצורים. לכל אחד מזוג השוטונים של הפתוגן יש תפקיד אחר בתנועת השחייה. אורכו של כל שוטון הוא 12 מיקרומטר וקוטרו רק כמה מאות ננומטרים. יישום אופן התנועה של הפתוגן ברובוט זעיר היכול להיכנס לתוך הגוף יכול לשמש להעברת תרופות או לשבירת אבני כליה, לדוגמה.

ד. [פיתוח פרוביוטיקה סביבתית](#) בהשראת חיידקים פרוביוטים, כולל [סרטון פרסומת של מטהר האוויר](#).

3. פיתוח טכנולוגיות - עבודה בקבוצות

לאחר מכן התבקשו התלמידים לבצע משימה בקבוצות, לפי ההנחיות הבאות:

אתם חלק מחברה אשר מפתחת מוצרים בהשראת מיקרואורגניזמים או בעזרת שימוש בהם. עליכם לבחור תכונה של חיידק ולחשוב על מוצר שאפשר לייצר בעזרתה.

תכונות החיידקים לבחירתכם:

חיידקים בעלי יכולת לשנות את צבעם בחשיפה לטמפרטורה גבוהה לאורך זמן

חיידקים העוזרים לדיונן שלא להטיל צל

א. אילו בעיות אפשר לפתור בעזרת החיידק וכיצד אפשר לעשות זאת? פרטו מהי הבעיה ומה דרוש כדי לפתור אותה.

ב. אילו תכונות של החיידק מתאימות לפתרון וכיצד?

3. הצגת ההמצאות בכיתה

כל קבוצה הציגה את המוצרים בכיתה. בזמן ההצגה או אחריה אפשר היה לשאול שאלות, להעלות קשיים או להעיר על המוצר, והתלמידים התבקשו לשנות או לתקן את המוצרים שלהם בהתאם לדיון על המוצר שלהם בכיתה.

4. יצירת פרסומת למוצר

לאחר שהתלמידים הציגו את המוצרים שלהם הצגתי בפניהם מוצר צרפתי שנמצא בשימוש באירופה ומסתמך על אחת מתכונות החיידקים שהצגתי בעבודה: [מדבקה "חכמה" ובה גיל המכיל חיידקים. המדבקה משנה את צבעה בעקבות חשיפה לטמפרטורות גבוהות לאורך זמן](#). החברה מייצרת שני סוגים של מדבקות. הסוג הראשון, מדבקה שקופה המיועדת להדבקה על ברקוד של מוצרים. אם המוצר מוצא מקירור והחיידקים מתרבים, המדבקה מחליפה את צבעה לאדום, ואינה מאפשרת להעביר את המוצר בקופה. הסוג השני, מדבקה המיועדת לצרכן והנה הנמכרת ביותר בצרפת. מדובר במדבקה דמויית פרח הממוקמת באופן בולט על מוצרים וגם היא מחליפה את צבעה לאדום במקרה שהמוצר אינו מקורר כראוי.

בשוק קיימים מוצרים שונים הפועלים בדרכים שונות, וקיים גם [מוצר ישראלי](#) לזיהוי חלב חמוץ שהצגתי לתלמידים נוסף



מטרת השקית להזהיר את ההורה שהאוכל חם מדי ואין לתת אותו לתינוק עדיין. מדובר בשקית חד-פעמית שאפשר להלביש על הבקבוק בנקל. דוגמה נוספת לניצול החיידקים הייתה חליפת צלילה מיוחדת בעלת כיסים שקופים שאפשר לשים בהם צלחות פטרי המכילות חיידקים מאירים. כך יוכלו צוללנים לחקור את מעמקי הים בקלות רבה יותר (איור). התוצרים הוצגו בכיתה בעזרת שירים, כרזות, ציורים, עלוני פרסום שיצרו התלמידים וסרטוני פרסומת בכיכובם.

חלק מהמוצרים לא נראו מציאותיים בעיני התלמידים או שהם סברו שלא משתלם לייצרם ולכן זכו אלה בשלב משוב העמיתים לניקוד נמוך. הבהרתי שאנו לא מתכנני מוצר וכרגע איננו שופטים כמה משתלם כלכלית לייצר את המוצר, שכן חסר לנו ידע רב בתחום, וביקשתי שלא יתייחסו להיבטים אלה של המוצרים. אם מעוניינים לפתח גם היבטים אלה בתחום הביומימיקרי, אפשר לנסות להזמין מרצה העוסק בתכנון ויצירה של מוצרים טכנולוגיים כדי להעשיר את הכיתה.

חשוב לי להדגיש כי לאורך ההפעלה בכיתה הסברתי את חשיבותו של כל שלב בתהליך יצירת המוצר. למשל, בשלב השאלות הראשון הסברתי כי המטרה היא לשפר את המוצר ולכן חשוב לשאול או להעיר על כל מה שהם מצליחים לחשוב עליו. כמו כן, הודגש שמשוב העמיתים הוא חלק בלתי נפרד מתכנון המוצר, והבהרתי כי הדבר לא יפגע בציון של הקבוצה הממושבת.

תוצרי התלמידים היו מגוונים מאוד, וכל קבוצה הציגה בדרך שונה ומקורית. החוויה השונה מהשגרה היומיומית בבית הספר יצרה אווירה טובה בכיתה ואיפשרה לתלמידים לגלות את



היצירתיות שבהם, דבר שתרם להנאתם.

מחווין להערכת עמיתים

לאחר שצפית בפרסומות השונות של קבוצות התלמידים מלא את המחווין הבא:

שמות חברי הקבוצה שאותה מעריכים: _____

שם התלמיד המעריך: _____

ענה על השאלות הבאות:

סמן ✓ במקום המתאים

קריטריונים להערכה	קיים	קיים באופן חלקי	לא קיים כלל
שם המוצר			
מטרת המוצר			
קהל היעד			
תיאור התכונה של החיידק שעליו המוצר מתבסס			
הוראות הפעלה של המוצר			
איור של המוצר ושל חלקי ההחלפה (אם יש)			
סלוגן/סיסמה קליטה שתעודד שימוש במוצר			
הפרסומת אסתטית			

ציין נקודה חיובית שכדאי לשמרה בפרסומת:

הצע נקודה שיש לשפרה בפרסומת:



מחווין למורה להערכת עבודת התלמיד

שם התלמיד _____ שמות חברי הקבוצה: _____

הממד	ניקוד מרבי	קריטריונים להערכה	השיג את המטרה במלואה	השיג את המטרה באופן חלקי	לא השיג את המטרה	ניקוד
התייחסות למשוב ראשוני	10	התייחסות להערות תלמידי הכיתה בהצגה הסופית	התייחסות מלאה למשוב התלמידים 10	התייחסות חלקית למשוב התלמידים 5	לא נעשה תיקון בעקבות המשוב 0	
איכות הפרסומת	5	שם המוצר	המוצר קיבל שם 5		לא הוצג שם המוצר 0	
	10	מטרת המוצר	מטרת המוצר ברורה 10	אפשר להבין את מטרת המוצר, אך היא אינה מוצגת במפורש 5	לא ברורה מטרת המוצר 0	
	5	קהל היעד	קהל היעד מוצג 5	אפשר להבין מיהו קהל היעד, אך הוא אינו מוצג מפורשות 2	לא ברור למי מיועד המוצר 0	
	5	תיאור תכונת החיידק שעליו המוצר מתבסס	תכונת החיידק מוצגת בבירור 5		אין הצגה של תכונת החיידק 0	
	15	הוראות הפעלה של המוצר	הוראות הפעלה מוצגות באופן ברור 15	אפשר להסיק כיצד מפעילים את המוצר, אך אין הסבר מפורש 7	לא ברור כיצד מפעילים את המוצר 0	
	15	איור המוצר וחלקי ההחלפה (אם יש)	כל חלקי המוצר מוצגים 15	התייחסות רק לחלק מחלקי המוצר 7	אין איור כלל של המוצר או חלקיו 0	
	10	סלוגן/סיסמה קליטה שתעודד שימוש במוצר	יש סיסמה 10		אין סיסמה 0	
	10	הפרסומת אסתטית	הפרסומת אסתטית 10	הפרסומת נעימה לעין אך לא ממש אסתטית 7	הפרסומת כלל אינה אסתטית 0	
מילוי משוב תלמידים	15	מילוי משוב על פרסומות חברי הכיתה	משוב כן ורציני 15	משוב שמולא לכל התייחסות לנקודות 7	משוב שאינו אמיתי ואינו מתייחס נכונה לפרסומת 0	



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 (Vaataam 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

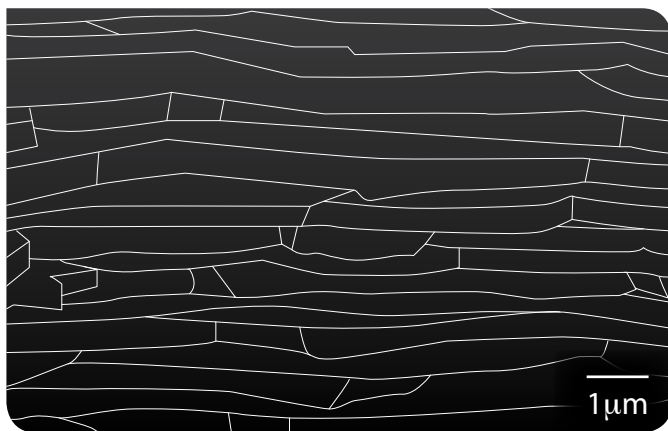
בשלב הראשון התבקשו הסטודנטים לצאת לחצר, להתבונן באורגניזם מסוים או בחלק של אורגניזם בסביבתו הטבעית, ולתאר תכונה מיוחדת או מפתיעה של היצור. תכונה יכולה להיות צורנית: מבנה ייחודי ומעניין כמו הציפוי החיצוני של פטרייה, או התנהגות מכנית ייחודית כמו נמלה הנושאת משא כבד במיוחד. מעניין לציין שסטודנטים להנדסה 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

לנכונות 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 וכתובת 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 הראשונה 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





מה בין קיפודיים למערכות אבטחה מתקדמות?

תכנית לימודים בנושא ביומימיקרי לתלמידים מחוננים

מאת: יריב גרשטיין, ביולוג ימי ומדריך בארגון הביומימיקרי הישראלי

בענפי המדע. ניתוח מעמיק בכל תחום סייע לתלמידים לפשט את המנגנונים המורכבים של אורגניזמים לרמה של פונקציה תפקודית. לדוגמה, עלי פרח הלוטוס הצומח בביצות מתנקים מבוץ בעזרת גבשושיות מיוחדות; במקרה זה ההפשטה היא מערכת ניקוי עצמית.

בנוסף נחשפו התלמידים לתחום הביולוגיה הימית, מאחר שהמדריך (אני) הוא ביולוג ימי המתמחה בחקלאות ימית בכלל ובגידול פלנקטון בפרט. כחלק מהעשרת תלמידי אשכול הפיס באוהל שם התקיים שיעור מעבדה בנושא רביית קיפודיים. במעבדה זאת ניסו תלמידי הביומימיקרי לזהות כמה שיותר מנגנונים המעניינים אותם. בהמשך ישיר למעבדת רביית הקיפודים החל אחד התלמידים בקבוצה לעסוק במנגנון הרבייה של קיפודיים תוך התמקדות בייחודיות של המפגש בין תא הזרע והביצית. על פי רוב, רק תא זרע של קיפודיים ממין מסוים יכול לחדור לביצית של קיפודיים בן אותו המין. המנגנון הוביל את התלמיד לחשוב על פיתוח מערכת אבטחה (מנעול ומפתח) המופעלת על ידי זיהוי ביולוגי. התלמיד ביצע הפשטה של המנגנון (תהליך שבו מפשטים את התהליך הביולוגי לרמה הנדסית או טכנולוגית) וכרגע הוא עובד על פיתוח ההמצאה.

פרויקט של תלמיד נוסף שנמצא בשלבי פיתוח ממש בימים אלה התחיל בבחינת חכמת ההמונים של הדבורים, כלומר, של תקשורת בין דבורים שנועדה לקבל החלטות שיחולו על כל הכוורת. תהליך ההפשטה והעברת הרעיון לביצוע הוביל את התלמיד להמציא מערכת אשר באמצעות תקשורת וחכמת המונים תוכל לעבד מידע שייאסף בבדיקות דם על מנת לזהות מחלות.



ארגון הביומימיקרי הישראלי ואשכול פיס בתיכון אוהל שם, בסיוע מנהלת האשכול ד"ר מאירה אוסטר, החלו בפרויקט ראשון מסוגו בישראל: תכנית לימודים בנושא ביומימיקרי לתלמידים מחוננים. בתכנית משתתפים שישה תלמידים מכיתות המחוננים בשכבת ט'. יש לציין כי התלמידים בחרו לקחת חלק בפרויקט נוסף על תכנית הלימודים הרגילה.

ביומימיקרי הוא תחום דעת מתפתח בעולם העוסק בחקר פתרונות הטבע וחיכויים לאתגרים טכנולוגיים שונים, תחום המזוהה כיום כמנוע חדשנות. בשדה הפדגוגי הטבע הוא מעבדת לימוד ומחקר חווייתית המזמנת תהליכי חקר והתבוננות במערכות ביולוגיות בעיניים טכנולוגיות, התבוננות המאפשרת ללמוד טכנולוגיה בדרך חדשנית וחווייתית. לימוד טכנולוגיה באמצעות ביומימיקרי מקדם מיומנויות נדרשות במאה ה-21 בתחום ה-STEM (Science, Technology, Engineering, Math), ובהן: חשיבה אנלוגית, חשיבה מערכתית וחשיבה פונקציונלית, וזאת לצד הקניית ערכים חברתיים וסביבתיים.

את הפרויקט התחילו התלמידים בחשיפה לתחום הביומימיקרי ובהכרת מושגי היסוד שבו, כגון צורך, פתרון, תפקוד, הפשטה והעברה; וכן בחשיפה למגוון רחב של דוגמאות לפיתוחים ביומימטיים, במשחקי חשיבה ובדיונים מעמיקים על חשיבה ביומימטית. תהליך הלמידה כלל גם הבנה של מערכות אורגניות ותרגול זיהויים של מנגנונים מעניינים המהווים נקודת מוצא לפיתוח המצאות.

במהלך התכנית הושם דגש בפיתוח חשיבה מערכתית-פונקציונלית, הכוללת זיהוי הדרישה התפקודית של מערכת; זיהוי רכיבים של המערכת הקשורים לתפקודה והקשרים ביניהם; תיאור התנהגות המערכת כולל סוגי הפלט והקלט שלה; והשוואה בין מערכות ביולוגיות למערכות טכנולוגיות. כחלק מתהליך הלמידה התנסו התלמידים בהבנת תהליך התכנון בהשראת הטבע: מהם שלבי התהליך (מהגדרת הצורך ועד הפתרון), מה עושים בכל שלב, אילו כלים עומדים לרשותנו ומהם המנגנונים במערכת הטבעית שאותם נוכל להעביר למערכת טכנולוגית.

תחום הביומימיקרי מאפשר למצוא מנגנון המתקשר לתחום העניין של כל תלמיד: מדעים, הנדסה, מחשבים או אפילו עיצוב. מנגנונים כאלה נקראים Bio WOW. הכלים המקצועיים של ביומימיקרי מסייעים לפשט את המנגנונים הביולוגיים ולהעבירם לתחומי העניין השונים, כך שיוכלו להפוך להמצאות ביומימטיות. בשל כך, וגם בשל העובדה כי מדובר בכיתת מחוננים, שתלמידיה לומדים גם באוניברסיטאות ובעלי ידע רחב יחסית בתחום המדעים, חשפנו את התלמידים לתחומים שונים

אלה הן רק שתי דוגמאות לתהליך פיתוח פתרון טכנולוגי בהשראת הטבע. תהליך הפיתוח מתבסס על (PBL, Project Based learning), דבר המאפשר ליצור פיתוחים חדשים ויצירתיים ולהעבירם מתחום הביולוגיה לטכנולוגיה.

כחלק מתהליך הלמידה והפיתוח נחשפו התלמידים למנועי חיפוש מיוחדים לתחום הביומימיקרי כמו find structure, אתר חדשנות מהטבע של ארגון הביומימיקרי הישראלי, ואף שכללו את היכולת לברור מידע ולקבצו מתוך שפע המחקרים והמידע הנמצאים במנועי החיפוש השונים.

את תוצרי הפרויקט יציגו התלמידים כפוסטר מדעי, מצגת או אב־טיפוס באשכול הפיס, ובנובמבר 2016 יוצגו ההמצאות בכנס השנתי של ארגון הביומימיקרי הישראלי וארגון המהנדסים הישראלי באוניברסיטת תל אביב. הדרישות מהתוצר הסופי הן ברמה אוניברסיטאית, דבר הדורש חקר מעמיק והסרת מכשולים העומדים בדרך ליישום הרעיון והפיתוח הביומימטי.

התכנית מתאימה לכל בית ספר תיכון ואינה דורשת משאבים מיוחדים למעט קבוצה של תלמידים סקרנים והדרכה וליווי מתאימים.

לסיכום, הרעיונות של התלמידים יצירתיים ומרתקים. התלמידים עברו ועוברים תהליך נפלא של חשיפה לתחום הביומימיקרי ומקבלים כלים, שבהם יוכלו להשתמש על מנת להמציא ולחדש בכל תחום שיבחרו בעתיד. באמצעות הסתכלות על הטבע ולמידה ממנו יוכלו התלמידים לייצר גשר מעולם הביולוגיה הרחב לכל תחום שיעסקו בו בעתיד. יכולת ההתבוננות והלמידה תלווה אותם כאשר ילכו.

