

נקודת מבט אחרת על הטבע – ביומימיקרי וקומיקס

ורד יפלח-וישקרמן*

תקציר

מורים רוצים לבנות שיעור בצורה "אחרת", שיעור שיתאפיין בעניין, בהנאה וברצון ללמוד וכן ליצור תחושה של זרימה בשיעור. השאיפה לגשר על הפער בין הרצון לבין המציאות בכיתה – מורכבת ומאתגרת. מורה יכול להצחיק ולעשות רגעי הפוגה בכיתה מסיטואציות שונות, אך חיפוש סוגיות של הומור בתחום דעת מדעי מתאפיין בקושי רב. כך הוא גם בעולם הביולוגיה והאקולוגיה, שעוסק בחלקו במלחמות הישרדות בין האורגניזמים השונים, בתיאור קטסטרופות אקולוגיות עקב משבר האקלים או מחלות ומגפות, סוגיות בגוף האדם, או לחלופין נושאים שהם "משעממים" יותר, כמו לימוד מבנה התא, האברונים הבונים אותו ותפקידם. הוראת הביולוגיה היא מעניינת, מאתגרת, חדשנית אבל היא לא מצחיקה – לרוב. בכתיבת מאמר זה שאלתי את עצמי איך אני משלבת את ההומור בעולם התוכן של הביולוגיה ובעיקר בנושא חדשני ועדכני בעולם המדעי – ביומימיקרי. בתחום דעת זה אנו צופים ומתבוננים בטבע כדי ללמוד ממנו על פתרונות מקיימים עבור בעיות הנדסיות או כדי לקבל השראה ולפתח המצאה לטובת המין האנושי. לאחר חשיבה לא מעטה החלטתי להתמקד במאמר זה בהוראה באמצעות חשיפה לנושא באמצעות ייצוג חזותי – הקומיקס. תחילה אעסוק בהיבט מושגי קצר על למידה חזותית, קומיקס ולאחריו – כיצד הקומיקס משתלב בעולם ההוראה המדעי ובעולם הביומימיקרי.

מילות מפתח: למידה חזותית, קומיקס, ביומימיקרי

* ד"ר ורד יפלח-וישקרמן, מרצה בכירה, ראש התוכנית לבית הספר העליסודי, מלמדת בהתמחות מדעים, המכללה האקדמית לחינוך ע"ש קיי, veredy@kaye.ac.il

למידה חזותית

ייצוגים חזותיים הופכים את הלמידה למהנה ומעניינת יותר ויוצרים חיבור אישי ורגשי כלפי החומר הנלמד. אפשר לקרוא על תהליך נשימה תאית וללמוד עליו נתונים מדעים, אך לא להרגיש את התהליך או להתבונן בו. לכן לומדים אין חיבור אישי ורגשי לנלמד, והלמידה מהנה פחות. אמצעים חזותיים (תמונות, סרטונים, ניסויים) מפתחים רגש אצל הלומד, יוצרים נגיעה אישית למידע ולמדע ומגבירים את העניין בלמידה. הטכנולוגיה והעושר של האמצעים החזותיים העומדים לרשותו של המורה מאפשרים למורה לתווך את הלמידה באמצעות אמצעים אלו. שימוש בייצוגים חזותיים לא קיים רק לשם "העשרה" או הגברת העניין והקשב (Kahiigi, 2008; שליטא, פרידמן והרתאן, 2011), אלא הוא כלי מרכזי לתקשורת, לחשיבה, ולחשיבה על חשיבה (מטה־קוגניציה). הכנת בצק בכיתה והתפתחו או ביצוע ניסוי מדעי בנשימה תאית, למשל, יאפשרו לתלמיד להתבונן, להרגיש ולהתחבר אישית לנושא.

למידה חזותית היא תהליך קוגניטיבי המשלב את הייצוג המילולי ואת הייצוג החזותי. לפי "תיאורית הקידוד הכפול" (Andrews, Sadoski & Paivio, 2002) כדי לזכור טוב יותר יש לשלב את שתי הדרכים, כלומר מלל עם תמונות. כאשר המידע מקודד במוח בשני הערוצים: החזותי והמילולי נבנה זיכרון חזק יותר (Seglem & Witte, 2009; Woolley, 2010).

קומיקס הוא מדיום בעל שני ממדים: משפטים (היצג לשוני) ותמונות (היצג חזותי).¹ מצד אחד, הקומיקס הוא מדיום חזותי, אך מצד שני הוא גם מכיל טקסט, המופיע בתחתית המסגרת של פאנל הציור – לצידו, מעליו או בבוועות בתוך מסגרת הציור – כאשר הגיבורים באיור מדברים זה עם זה או מהרהרים בינם לבין עצמם. לכן התמונות הממלאות את המסגרות מחייבות פרשנות ופענוח בזיקה לטקסט המלווה אותן. רולאן בארת (1988) בספרו **מחשבות על הצילום** הגדיר את האופן שבו אנו מתבוננים בתמונה לפי שני ממדים עיקריים: סטודיום ופונקטום. סטודיום הוא הממד הלשוני, החברתי, הפוליטי והביקורתי, שדרכו אנחנו מתבוננים בתמונות. הוא מתייחס לכך שאנשים מתרבויות, שפות ודתות שונות יפרשו את הסמלים בתמונה באופן שונה. הפונקטום הוא הממד הרגשי, וגם הוא ממד סובייקטיבי לחלוטין, שמשתנה כשהרגש של המתבונן משתנה. הלשון והתמונה הן הכלים של צייר הקומיקס, כלים בעלי אותו המשקל ואותה החשיבות ביצירת החוויה של הקומיקס והובלת הסיפור. מקלאוד (McCloud, 1998) מצביע על היתרונות הרבים של השילוב בין היצג לשוני וחזותי – כאמצעי בהעברת המידע וכאמצעי חשוב ביצירת הקומיקס.

¹ ויל אייזנר, מהאומנים המרכזיים בזרם הפופ־ארט, הגדיר בספרו **קומיקס ואומנות רציפה** את הקומיקס כ"אומנות רציפה", מילה נוחה לציון מדיום שמופיעים בו דימויים או תמונות – זה לצד זה. אן מילר (Miller, 2004) מרחיבה את ההגדרה ל"אומנות ויזואלית ונרטיבית היוצרת משמעות על ידי שימוש בדימויים המאורגנים ברצף ומתקיימים זה לצד זה במרחב". הגדרה אחרת לקומיקס היא מדיה חזותית וסוג אומנות שבה דמויות המצוירות ברצף קטעים המצטרפים מתמונה לתמונה לכדי עלילה והעברת מסר וליצירת תגובה אצל המתבונן (McCloud & Manning, 1998). טטלוביץ (Tatalovic, 2009) מציע חלוקה של הקומיקס לארבע קטגוריות: תמונה בודדת, רצועה, ספר קומיקס, סיפור גרפי. ההבדל ביניהם נובע מהאורך וממורכבות הנרטיב הסיפורי. הקומיקס מופיע מעלילות וסיפורים ארוכים שמתמשכים בסדרות ארוכות של ספרים וחוברות וכלה ברצועת קומיקס צרה ומצחיקה עם שורת מחץ בסופה. בקומיקס התמונות תומכות זו בזו כדי ליצור מסר המוצג בזמן קצר. אלמנטים, כגון רגשות, יחסים, התנהגות, מחשבות, מקום וזמן מוצגים בתוך האיור באמצעות בוועות שיח (לבוועות השיח בקומיקס יש שפה משלהן, בוועה "מזוגזגת" מציינת צעקה, שרשרת בוועות מאפשרת להציג כמה חילופי דברים באותו הריבוע, עיצובים אחרים של היקף הבועה והרקע מאפשרים לבטא שלל רגשות ורעיונות. הקול של הדמות והטקסט מוצג בתוך האיור (Akanca, 2020).

קומיקס הוא אומנות ועל פי דיווד פרקינס (Perkins, 1994), לשימוש באומנות יש פוטנציאל גבוה לעידוד פיתוח החשיבה, להגברת ההנעה (המוטיבציה). התמונות בקומיקס מושכות תשומת לב ומעודדות רגשות ומחשבות, הן מעוררות בצופים את היכולת להיזכר בהתנסויות מוכרות, מעודדות התעניינות ומדרבנות השתתפות של תלמידים. ההתבוננות מגייסת סוגים שונים וסגנונות שונים של קוגניציה: עיבוד חזותי, חשיבה אנליטית, הנמקה, המחשה. ולא פחות חשוב ההתבוננות בקומיקס מובילה לקישורים בנושאים חברתיים, פילוסופים תרבותיים ועוד.

בליך (2013), בדומה לפרקינס, טוען שקומיקס הוא מדיום חזותי המחובר לזמן ולמקום, להיסטוריה של החברה שהוא נוצר בה, להלך הרוח של התקופה, לתפיסת העולם של המדינה שהוא מתפרסם בה וכמובן גם לאמונות, לחרדות ולתקוות האישיות והקולקטיביות שמנביות אותו. לטענת בליך (2013) הקומיקס הוא ערוץ אסתטי וביקורתי המשמש כנייר הלקמוס של החברה, התרבות והפוליטיקה שבקרן הוא נוצר. מבעד לקומיקס משתקפים ערכיה של החברה, עמדותיה הפוליטיות, תשוקות ומכאובים, עקבות הזיכרון שלה מן העבר, תחושות העוול, שאיפותיה ורצונותיה וההתנהלות היומיומית שלה ביחסה אל השונה והאחר. הקומיקס הוא מדיום מגיב, בועט ונושך גם כאשר הוא מרחיק את העדות שלו אל בעלי החיים, כמו דמות הברווז האלמותית של דודו גבע, ארתור מאת דובי קייך או החתולים רפי וספטי של אילנה זפרן. שימוש בקומיקס או בחוויה וויזואלית אחרת, כגון סרטון, הוא לעיתים חלק בלתי נפרד מהשיעור. הוא מאפשר ליצור אווירה מתאימה להוראה, לעורר חוויה, "להחיות" את השיעור ולעודד יצירתיות. ניתן להשתמש בקומיקס כהכנה לנושא חדש או לשלבו במהלך מעשה ההוראה (לשם הדגמה, הבהרה, המחשה) או במטלות המסכמות של התלמידים.

הוראה באמצעות הקומיקס מאפשרת לא רק הוראת תחום הדעת, אלא גם טיפוח תלמיד בעל אוריינות חזותית.² בעולם המודרני אוריינות כוללת כישורים רבים, ולא רק את היכולת לקרוא ולכתוב. לאוריינות יש גם היבט רב־ממדי משום שהידע והמידע מגיעים ממגוון רחב של מקורות וכיוונים, ובהם לתחום הוויזואלי תפקיד חשוב (Riddle, 2004). לכן חשוב ליצור "מורה חזותי" אשר ישלב תכנים חזותיים בתוכני החומר הנלמד ובעיצוב המרחב הלימודי והכיתתי, כפי שמציינת רחל שליטא בספרה של בן פשט (2021). מדיום הקומיקס מאפשר גם לשלב את יתרונותיו של ההומור במהלך השיעור. מחקרים טוענים שהומור המקושר לחומר הקורס מעורר את תשומת הלב של הלומדים ומייצר סביבה רגועה ופרודוקטיבית יותר (סביבה המקדמת למידה). הוא מעודד ביטחון עצמאי, יצירתיות (Banas, et al., 2011), מפחית חרדה, משפר את ההשתתפות בשיעור ומגביר את המוטיבציה ללמידה (Teslow, 1995). יצירת סביבת למידה חיובית מפחיתה את החרדות של הלומדים מאתגרי הלמידה, מגבירה את הסיכוי שהלומדים ירגישו בנוח לפנות אל המנחה בשאלות. הומור מגביר את תשומת הלב והעניין ומעלה את הקשב והריכוז. כל שבירת ציפייה או הפתעה ללומד (מה שמתרחש בהומור) מעוררת את הלומד ומגבירה את הסיכוי שנבצע העברה של החומר הנלמד. העברה היא אחד מביצועי ההבנה שהם פעילות ידע על ידע. העברה מוצלחת מתרחשת לאחר רכישת ידע, תרגול ויישום של התוכן הנלמד. הומור משפר הישגים לימודיים (Ziv, 1988) וחשוב לא פחות – הומור משפר את מערכת היחסים בין הלומד והמלמד (Aylor & Opplinger, 2003).

² אוריינות חזותית ניכרת ביכולת ליצור, לפרש ולהבין ביטויים חזותיים. היא כרוכה בפיתוח מגוון של יכולות, מיומנויות וכשרים של כתיבה וקריאה חזותית (Kędra, J., 2018).

האם קומיקס שווה אלף מילים? שימוש בקומיקס בהוראה ובהוראת המדעים

כדי לבחון את שילובו של הקומיקס במהלך ההוראה והלמידה יש לשאול שלוש שאלות (ראו: איור 1). השאלה הראשונה שראוי לשאול היא **מה התרומה של הקומיקס ללומד?** כדי לענות על שאלה זו יש לנסח את המטרות הלימודיות שאותן שואפים להשיג. המטרות יכולות להיות מגוונות – לא רק רכישת ידע אלא גם פיתוח של אסטרטגיות חשיבה, פיתוח מיומנויות וטיפוח ערכים. בהתייחסות לשאלה זו יש לתת את הדעת גם לרמה התפקודית של הלומדים ולמאפייניהם (כגון גיל, שפה, מגזר ורקע לימודי). בהתאם לכך יש לנסות לאפיין את טיבן של התנסויות הלמידה שיאפשרו להגשים את מטרות הלמידה באופן מיטבי.

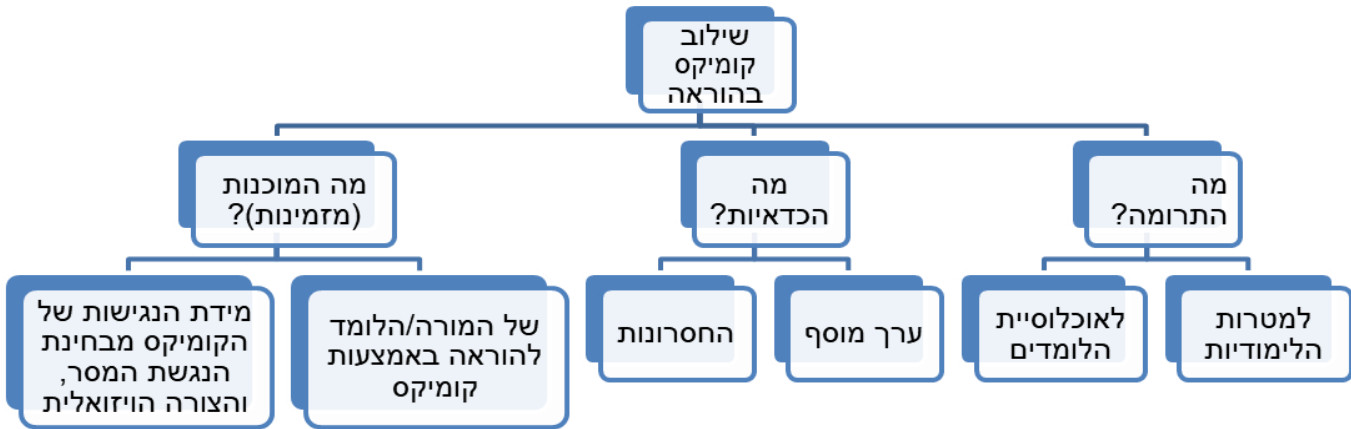
לדוגמה, יעד של פיתוח יכולת קריאה שוטפת והבנת הנקרא מושג באמצעות התנסות מרובה מאוד בקריאה מעמיקה של טקסטים מגוונים וחשיבה על משמעותם. הקומיקס מזמן שיפור מיומנויות קריאה (Golding & Verrier, 2020), כגון קריאה דמומה, קריאה בקול לפי דמויות, התאמה בין תמונה לטקסט. קריאת הקומיקס דורשת גם שילוב מיומנות של פענוח מסרים כי צריך להפיק מידע הן מהטקסט הכתוב הן מהצד החזותי. נוסף לכך הוראה באמצעות קומיקס מעשירה את אוצר המילים, מפתחת מיומנות של פתרון בעיות ומיומנות כתיבה, מגבירה מוטיבציה וזיהוי תפיסות שגויות, וחשוב לא פחות – ההקניה בכיתה מתבצעת באופן חווייתי ומסתמכת פחות על שינון (Trnava, E., Trnava J., & Vacek, V., 2013). מאז ומתמיד איורים שימשו כלי לימודי בהוראת המדעים. מחקרים שונים הראו שדיאגרמות, מפות ואמצעים חזותיים נוספים משפרים למידה, משום שהם הופכים את המדע לנגיש יותר וזכיר יותר (Avraamidou & Osborne, 2009). כלומר קומיקס הוא דרך יעילה להקניית ידע מדעי משום שהוא מושך את תשומת הלב וגורם לעניין ולהנאה (Roswati, Rustaman, & Nugraha, 2019; Özdemir, 2017; Tatalovic, 2009; Hosler & Boomer, 2011).

הקומיקס מאפשר למידה של נושאים מסובכים במדע בדרך קצרה ויעיל (Morel et al., 2019). הוא מונע פיתוח של תפיסות שגויות (Asci, 2020), מפתח עמדות חיוביות כלפי מדעים (Hosler & Boomer, 2011) ומפתח חשיבה לוגית (Rozkosz & Wiorogórska, 2016). אך עם זאת קשה למצוא קומיקס הרלוונטי למדעים (Özdemir, 2017; Roswati, Rustaman, & Nugraha, 2019) ולעיתים מורה צריך ליצור את משאבי ההוראה בעצמו.

הסוגיה השנייה שיש לתת את הדעת עוסקת בניתוח "המזמינות" של הקומיקס ללמידה, וזו צריכה להתייחס למגוון ההקשרים שבהם הקומיקס משמש.³ כך למשל, הערך הלימודי של סרטון עשוי להיות שונה כאשר לומדים מוצאים אותו בעצמם וצופים בו בביתם, או כאשר הוא מוצג בכיתה. שימוש בקומיקס בהוראה בכלל ובהוראת המדעים בפרט מחייב הסתכלות מתוך הקשר. תהליך ההוראה והלמידה צריך להיות קשור ורלוונטי לעולמו של הלומד. למידה מתוך הקשר מאפשרת העברה של הידע המדעי ליישום (Lin & Lin, 2016).

³ הפסיכולוג גיימס גיבסון (Gibson 1979) טבע את המונח "מזמינות" (Affordance) כדי לתאר יחס בין יצור (אדם או בעל חיים לסביבתו). סביבות מסוימות וגם עצמים בתוך הסביבה – מזמינים אפשרויות מסוימות. ב-1988 ניכס דונלד נורמן (Norman, 1988) את המושג "מזמינות" כאבן בוחן לניתוח ולעיצוב של ממשקי אדם-מכונה כדי לתאר את הפעולות והאפשרויות שמערכת כלשהי מזמנת למשתמש. המושג מאגד בתוכו כמה וכמה משתנים: התכונות הפיזיות של חומרי הלימוד, האופן שבו מערכת החושים שלנו מתווכת תכונות אלו, מערך ההמשגה שדרכו אנו מפרשים את המידע החושי, ההקשר החברתי שבו משתמשים בחומרים ולבסוף – הבנתנו את הדרכים להפעיל את המשאב שלפנינו וציפיותינו באשר למה שנוכל לעשות בו. זוהר, ע' ובושריאן, ע' (2020). **התאמת תוכניות הלימודים וחומרי הלימוד למאה ה-21 סיכום עבודתה של ועדת המומחים, תמונת מצב והמלצות.** היוזמה – מרכז לידע ולמחקר בחינוך האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים.

העברה מוצלחת של ידע תוכן חדש תתרחש לאחר שליטה בידע של התוכן ובמיומנויות הנושא, וזו תיעשה כאשר הנושא נלמד במספר הקשרים ובדרכי הוראה שונות (כגון לימוד בתוך הכיתה ומחוץ לכיתה או יישום החומר הנלמד ביצירת תוצר).



איור 1: שילוב הקומיקס בהוראה

תהליך הלמידה מצריך פעילות של הלומד כולל חיבור בלתי פוסק של הידע החדש לידע הקודם של התלמיד. בתהליך ההוראה של מושג חדש יש לקשור אותו לרשת מושגים שקיימת אצל הלומד או לבנות אצלו רשת מושגים חדשה. בתחילת הלימוד רשת המושגים סביב נושא כמו ביומימיקרי היא דלה ולעיתים אין ידע כלל. בסוף תהליך הלמידה אנו יכולים לצפות לרשת רחבה יותר הכוללת ידע נוסף, כגון מבנים חוזרים בטבע, הבנת עקרונות החיים, הבנת תהליכים מחזוריים ומעגליים בטבע, שיווי משקל במערכות אקולוגיות ועוד. השימוש בקומיקס בהוראת ביומימיקרי, בדומה לשימוש בהוראת המקצועות המדעיים, בעל יתרונות רבים, אך יש לזכור שקשה להמחיש מערכות דינמיות ותנועה בגלל התמונה הסטטית (Trnova, E., Trna J., & Vacek, V., 2013).

השאלה השלישית שיש לשאול היא **מהי הכדאיות הפדגוגית של הקומיקס להשגת יעדי הלמידה?** במילים אחרות, מהו הערך המוסף הפדגוגי של חומרי הקומיקס מעבר למה שניתן להשיג בעזרת הקנייה בשיעור רגיל ללא קומיקס? התשובה לכך לדברי החוקרים היא שימוש בקומיקס מעבר להוראה של תוכן ידע. הקומיקס מאפשר ללמד תוכן ידע ובנוסף גם לפתח חשיבה ביקורתית, ערכים וחשיבה יצירתית (Khoiriyah & Suprpto, 2021).

בעת תכנון פעולה הוראתית עם קומיקס יש להתייחס לשני היבטים פדגוגיים. האחד – חשוב שהנושא יהיה מעניין, והאחר – על המורה לחשוב איך יוצרים את התיווך בין הנושא הנלמד לרלוונטיות לחיי היום-יום של הלומד (Toh e al., 2016). על המורה לחשוב על הקשר שבין הערך ללמידה לבין מוכנות התלמיד ללמוד באמצעות קומיקס. ככל שהערך ללמידה יהיה גבוה יותר ומוכנות התלמיד לקומיקס גבוהה יותר, כך לקומיקס יהיה ערך גדול יותר בהקניית נושא חדש.

תלמיד הלומד באמצעות קומיקס חייב להבין את האזור בשלמותו כולל לשון ותמונה, ולעשות את הקישור המחשבתי בין המילולי לחזותי. לכן הוראה באמצעות קומיקס מתאימה לגישה קונסטרוקטיביסטית

הדוגלת שידע נוצר תוך כדי למידה פעילה. אחת מהדרכים לביצוע למידה פעילה היא השימוש בסטוריטלינג (storytelling), וקומיקס היא דרך לספר סיפור. סטוריטלינג הוא כלי עוצמתי ללמידה ולהבנה: בשל יכולתו לסייע לנו לזכור ולארגן את המידע ולייצור הקשרים חדשים. ההזדהות והחיבור הרגשי, שהסיפורים מאפשרים, תורמים להבנה ולזיכרון של הלומדים עם מעט מאוד מאמץ מצידם. שימוש בסטוריטלינג בהוראה הופך את הלמידה לפעילה, למהנה ורלוונטית ומעצימה. הקומיקס המדעי מאפשר להעביר לא רק תוכן ולא רק טקסט סיפורי אלא גם תפיסות וערכים תוך שימוש בסטוריטלינג, וסיפור טוב – זוכרים (Weitkamp 2007, & Burnet). אריק קסטנר ניסוח זאת היטב בספרו **פצפונות ואנטון** (2006): "זה לא משנה אם הסיפור קרה או לא קרה. העיקר שהוא אמיתי! הסיפור אמיתי אם הוא יכול היה לקרות ממש כפי שמספרים אותו".

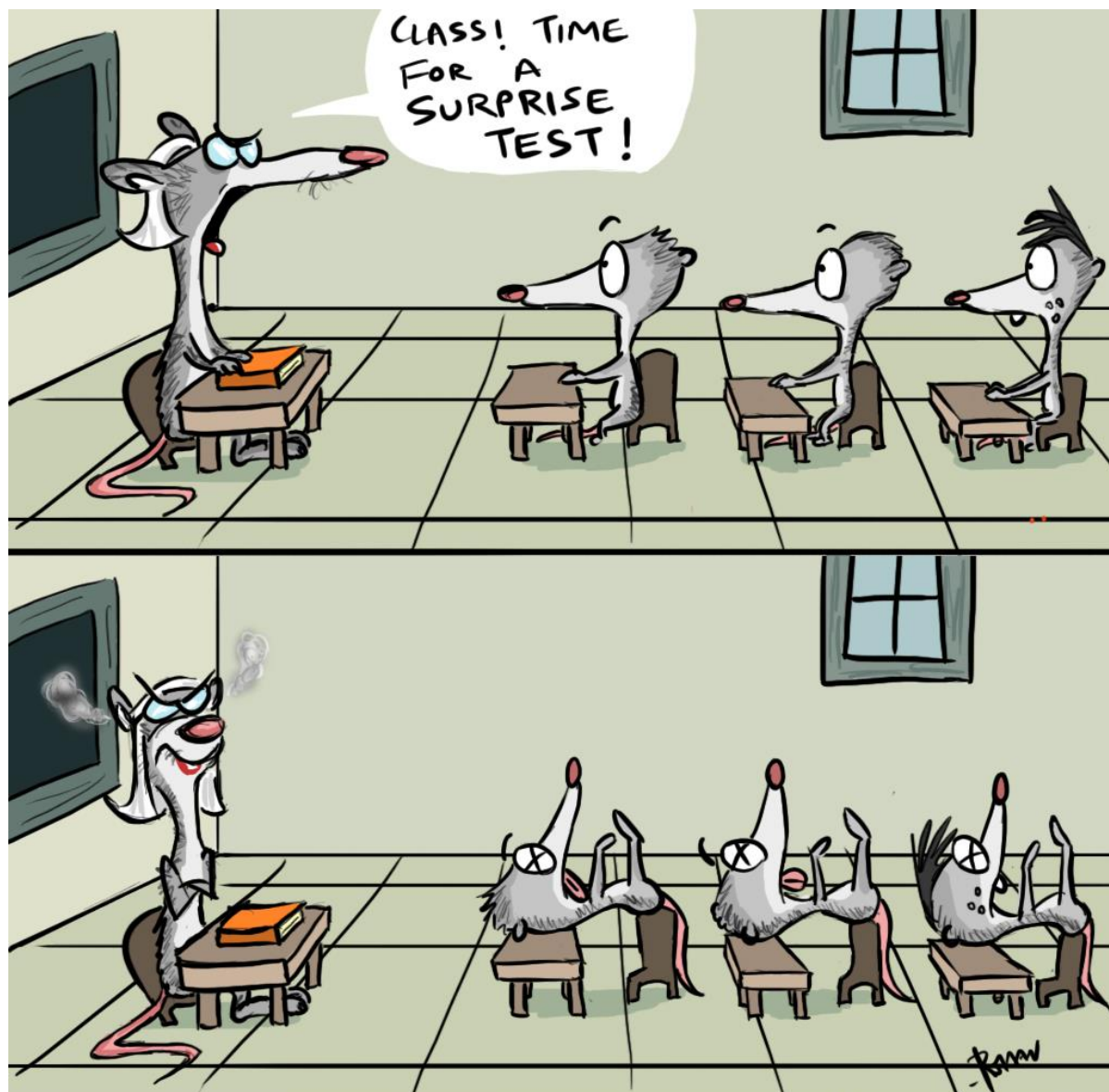
השימוש בייצוג החזותי של הקומיקס הוא דרך אפקטיבית ליצירת למידה משמעותית (Klavir & Gorodetsky, 2001). אוזובל (Ausubel, 1968) טען כי יש לשים לב לכך ש"למידה משמעותית" היא גם תהליך וגם תוצאה. כדי שיתרחש תהליך של למידה משמעותית צריכים, לדברי אוזובל, להתקיים שני התנאים האלה: הלומד יגלה נטייה להפיק את המשמעות הטמונה בנלמד והנלמד יהיה משמעותי ללומד. התנאי הראשון עוסק בלומד ובמוטיבציה שלו ללמידה. על הלומד להיות מכוון ובעל מוטיבציה ללמידה. אם ללומד אין מוטיבציה ללמידה, אזי תהליך הלמידה וגם תוצאת הלמידה יהיו בהכרח מכניים ונטולי משמעות. התנאי השני עוסק באופיו של הנושא הלימודי. כדי שחומר לימודי יוגדר כמשמעותי, כלומר בעל פוטנציאל להילמד בצורה משמעותית על ידי לומד מסוים, הוא צריך לעמוד בשני קריטריונים: א. החומר הלימודי ניתן לקישור למבנה ההכרה של בני אדם בשל היותו מבוסס על רעיונות הגיוניים, על תאוריות או על תצפיות. ב. לחומר הלימודי "משמעות הכרתית" עבור לומד מסוים, כלומר משמעות זו תלויה בלומד.

כדי שתתרחש למידה משמעותית, נדרש שהלומד יהיה בעל מסגרות ותבניות מושגיות מתאימות, שבאמצעותן ולתוכן הוא יוכל להטמיע את החומר הנלמד. כלומר צריכה להיות לחומר משמעות פוטנציאלית עבור הלומד המסוים. הקומיקס ככלי להוראה וללמידה חושף את התלמיד לתחום הידע הנלמד מנקודת מבט שונה ואחרת. גדולתו של מורה נמדדת ביכולתו ליישם בצורה טובה את הייצוג החזותי הנבחר.

קומיקס מדעי מהו?

קיימת הבחנה בין קומיקס מדעי לצורכי בידור ובין קומיקס מדעי שפותח לצורכי חינוך מדעי (Tatalovic, 2009). המטרה של שני סוגי הקומיקס היא להנגיש ידע ואוריינות מדעית לציבור בכלל ולתלמידים בפרט. קומיקס לצורכי בידור מקשר בין ההיבט החזותי וההיבט המילולי באמצעות שימוש באמצעים ספרותיים, כגון שימוש במטאפורות, בדיאלוגים ופיתוח עלילה. קומיקס חינוכי נועד גם לבדר וגם ללמד (Alaba, 2007; Matuk et al., 2019).

הצורה הפשוטה ביותר היא איור במשבצת אחת. אין הבדל בין איורים רגילים לקריקטורות "רגילות" המאופיינות בסאטירה, אירוניה והומור. האינפורמציה היחידה היא התמונה, והיא יכולה (אך אינה חייבת) להיות מלווה בטקסט. באיור 2 מתואר מצב רלוונטי מאוד לחיי התלמיד בבית הספר, מצב מצחיק המקושר לעקרונות ביולוגיים באקולוגיה בסוגייה לימודית של התמודדות בעלי חיים עם טורפיהם. באיור שני חלקים. בחלק העליון המורה אומרת "כיתה! זה הזמן לבחון פתע!", בחלק התחתון כל התלמידים נראים מתים והמורה מרוצה. התחזות למת היא דרך התמודדות התנהגותית של בעלי חיים לשם הימלטות מטרופים.



איור 2: אופוסומים בבית הספר / Opossums in school

המאייר: רוהן צ'קרוורטי / Rohan Chakravarty

דוגמה אחרת היא "scientoons". היא בנויה בצורה הזו: בצד אחד של התמונה הסבר מדעי קצר וענייני ומתחת לתמונה טקסט קצר המקושר לסיטואציה המדעית המתוארת. (ראו דוגמה באתר <http://scientoon.com/gallery/nggallery/scientoons/scientoons>). דוגמה נוספת היא concept cartoons. באיור מסוג זה ישנו איור אחד בלבד ובו יש קבוצה של דמויות המשוחחות על נושא מדעי מסוים ומציעות פתרונות שונים (Naylor & Keogh, 2013; Keogh & Naylor, 1999).

איורים בסגנון זה מציגים באופן לא מדעי בעיות מדעיות הקשורות בחיי הלומד, נקודות מבט שונות ושוויוניות לסיטואציה מדעית. הידע המדעי מוטמע בטקסט והדמויות מייצגות רעיונות או פתרונות המשפיעים על הבנת הבעיה מנקודות מבט שונות. לעיתים יש בועת שיח ריקה המרמזת על אפשרויות נוספות ומעודדת את הלומד

לחפש פתרונות נוספים. השיח מתבצע על ידי בועות שיח. באיור מסוג זה אין שימוש בהומור או בסאטירה, אלא בתוכן מדעי.

הסוג האחרון הוא רצועות קומיקס "comic strip". מדובר במספר איורים המחוברים לסיפור המעביר את המסר בצורה הומוריסטית. גם בסוג זה יש בועות שיח, אך יש להתייחס גם לצורתן של הבועות ולא רק לטקסט שבתוכן, משום שהן מעוצבות בהתאם למשמעות ולכוונה של התוכן. הבועה יכולה להכיל מספר סוגי טקסט מגוונים (שאלה, פקודה, היסוס וכו'), אך היא גם יכולה להיות ריקה כדי לשקף תחושת ריקנות או חוסר אונים (בליך, 2013).

ביומימיקרי וקומיקס

הקומיקס בהוראת הביומימיקרי משתמש בפתרונות עולם החי ותבונתו על פני האדם. כמו נקודת ההתבוננות החדשה שמציע תחום הביומימיקרי גם הקומיקס מציע נקודת מבט יוצאת דופן, המאפשרת ללומד להבין תוך כדי הומור וחיוך שביומימיקרי מזמן חשיבה על כך שלמעשה אנו והטבע מתמודדים עם אותם בעיות ואתגרים, ומשום שהטבע השכיל למצוא פתרונות, ראוי להתבונן בטבע וללמוד ממנו, ומתוך הידע הנצבר למצוא פתרונות לבעיות הנדסיות או לפתח המצאות חדשות לטובת המין האנושי.

הוראת ביומימיקרי משלבת בלמידה התבוננות וצפייה בטבע, בדומה לצפייה בקומיקס. שילוב התבוננות הומורסטית באמצעות הקומיקסים בהוראה של תחום דעת זה מחדד אצל התלמיד תהליך למידה אקטיבי שבמהלכו הלומד משתמש בחושים ובונה משמעות ופרשנות לקומיקסים העוסקים בתופעות הטבע.

ביומימיקרי – ביו מי? ביו מה? ואיפה הקומיקס?

ביומימיקרי, בעברית – חיקוי החיים. ביומימיקרי הוא ענף חדש ועדכני המשלב ביולוגיה, הנדסה, מתמטיקה ואומנות (בדגש על חשיבה עיצובית) כדי לפתור בעיות הנדסיות בדרכים מקיימות או לחלופין להביט על הטבע ולקבל השראה לפתח המצאה לטובת המין האנושי (הפלמן, 2014; יפלח-וישקרמן, 2021).

האורגניזמים החיים בעולמנו הם תוצר התפתחות אבולוציונית, והם שרדו הודות להתאמה ייחודית שהתפתחה במשך מאות מיליוני שנות אבולוציה. כל מי שלא התאים את עצמו לתנאים הקיימים על פני כדור הארץ – לא שרד. משום שאנו והאורגניזמים החיים על פני כדור הארץ מתמודדים עם בעיות דומות (כגון בעיות של אספקת מים, התמודדות עם תנאי אקלים קיצוניים, בעיות יציבות ועוד), ראוי שנלמד מהאורגניזמים שחיים וקיימים עד היום הודות להתאמות שעשו ואף נחקה אותם.

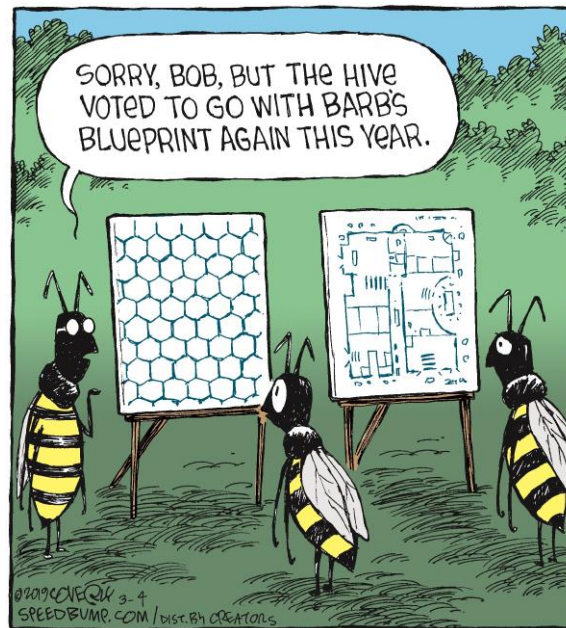
כאמור, מהותו של הביומימיקרי היא התבוננות מנקודת מבט שונה ולא שגרתית בטבע המובילה לחיקוי ולפיתוח יוצא דופן.

במאמר זה אציג שלוש נקודות מבט ביומימטיות על תופעות בטבע:

1. התבוננות ברמת המבנה
2. התבוננות ברמת התהליך
3. התבוננות ברמת עקרונות החיים.

התבוננות ברמת מבנה

התבוננות במבנה מאפשרת לנו ללמוד על המבנה של האורגניזם – החל מהרמת המבנה המולקולארי ועד לרמת מבנה האורגניזם השלם. בטבע קיימים מבנים ותבניות חוזרים, כגון ספירלה, סליל, קשקשים, פסים ועוד. המבנים והתבניות מספקים פתרונות יעילים לתפקודים של האורגניזמים בטבע, והם מהווים מקור השראה למתכננים ולמעצבים. אחד המבנים החוזרים הנפוצים בטבע הוא מבנה המשושים. המשושים מופיעים במבנים של מולקולות כימיות, בפתיתי שלג ואפילו בבריכת המשושים בארץ. באיור 3 ניתן לראות את מבנה המשושים בכוורת הדבורים כמבנה הנבחר לעיצוב, ולא המבנה המסובך והמורכב. שימוש במשושים מוביל ליצירת מבנה קומפקטי, חזק וחסכוני ביותר מבחינת אנרגיה ומשאבים. הוא גם יעיל להפליא עבור הדבורים מבחינת חלוקת העבודה במושבה.



איור 3: מהמורת מהירות / Speed Bump
המאייר: דייב קוברלי / Dave Coverly

דוגמה להסתכלות יישומית ביומימטית בסוגיית המבנה באה לידי ביטוי בחיקוי מקור השלדג ברכבת היפנית המהירה שינקנסן (Shinkansen Bullet Train), אחת הרכבות המהירות בעולם, שפותחה בסוף שנות ה-80 של המאה הקודמת. בעת פיתוח הרכבת התגלתה בעיית רעש משמעותית בגלל שינוי בלחץ האוויר, בעיקר ביציאה ממנהרה – גל רעש שהפריע לתושבים. אפקט הרעש נוצר בגלל המעבר בין שני תווכים בעלי לחץ אוויר משתנה – בכניסה וביציאה מהנהרה. המהנדסים נדרשו לפתור את בעיית הרעש מבלי לפגוע במהירות הרכבת, ולפיכך הם חיפשו פתרונות בטבע. השאלה המנחה את הצוות ההנדסי הייתה: האם יש אורגניזם בטבע העובר במהירות ובשקט בין שני תווכים? התשובה היא השלדג. באמצעות המבנה האווירודינמי של מקור השלדג, הוא מצליח להתגבר על השינוי בהתנגדות שבמעבר בין האוויר למים, והוא כמעט אינו מתיז מים בחדירתו למים. כתוצאה מההתבוננות בשלדג תוכנן הקטר במבנה זהה למקור השלדג. איור 4 מתאר בצורה הומוריסטית את יכולתו של השלדג לשלוח דגים בהצטיינות, והמלצתו לדייג הנדהם ללמוד ממנו בערוץ

היוטיוב היא בהחלט מפתיעה ומצחיקה. ניתן להציג קומיקס זה הן כסיכום לשיעור – כאתגרתה הומוריסטית – או כפתיח לשיח ולדיון בקשר שבין בעיות הנדסיות למציאת פתרונות בטבע.



איור 4: השלדג הכחול הקטן דג / The Small Blue Kingfisher Hunts

המאייר: רוהן צ'קרוורטי / Rohan Chakravarty

הציפורים בביומימיקרי מהוות כר פורה להומור בלמידה, והן מקור להשראה ולפיתוח תכנוני. אז מה הופך ציפור לציפור? לא כל יצור שעף הוא בהכרח ציפור או עוף (עטלף, למשל, הוא יונק), ולא כל עוף יכול לעוף (הפינגווין, למשל, הוא ציפור שאינה יכולה לעוף). כמו כן לא כל מטיל ביצים הוא ציפור, גם צבי ים וזוחלים מטילים ביצים. המאפיין הייחודי של משפחת העופות הוא הנוצות.

דרישה מהתלמידים לתכנן "חליפת על", למשל, יכולה להיות פתיחה הומוריסטית לנושא התעופה וחשיבות הנוצות. יש לציין בפניהם את התכונות הנדרשות לחליפה כזו: עליה לחמם אתכם בלילות קרים ולאורר אתכם בימים חמים, עליה להיות אטומה למים, קלילה ונעימה, לא נתפסת בקוצים ולא מתקמטת, והכי חשוב – שתעזור לכם לעוף! (קין, 2016). על התלמידים להגיע למסקנה שמדובר בנוצות, ושהחליפה המדוברת מגיעה קומפלט תפורה לעור ושימושית מאוד.

"חליפת העל" הזאת מאפשרת למינים שונים של ציפורים להגיע לשיאים שאף בעל חיים אחר אינו מסוגל להגיע אליהם. נוצותיו של הפינגווין שהפכו לדקות ולצפופות מקטינות את החיכוך שלו עם המים מחד גיסא, ומבודדות את גופו מהמים הקרים מאידך גיסא. אצל התנשמת המבנה הייחודי של הנוצה מאפשר טיסה שקטה המאפשרת ציד יעיל. וכמובן, יש נוצות מדהימות ביופיין, דוגמת הנוצות המקשטות את זנבו של הטווס או הנוצות של ציפורי גן העדן.

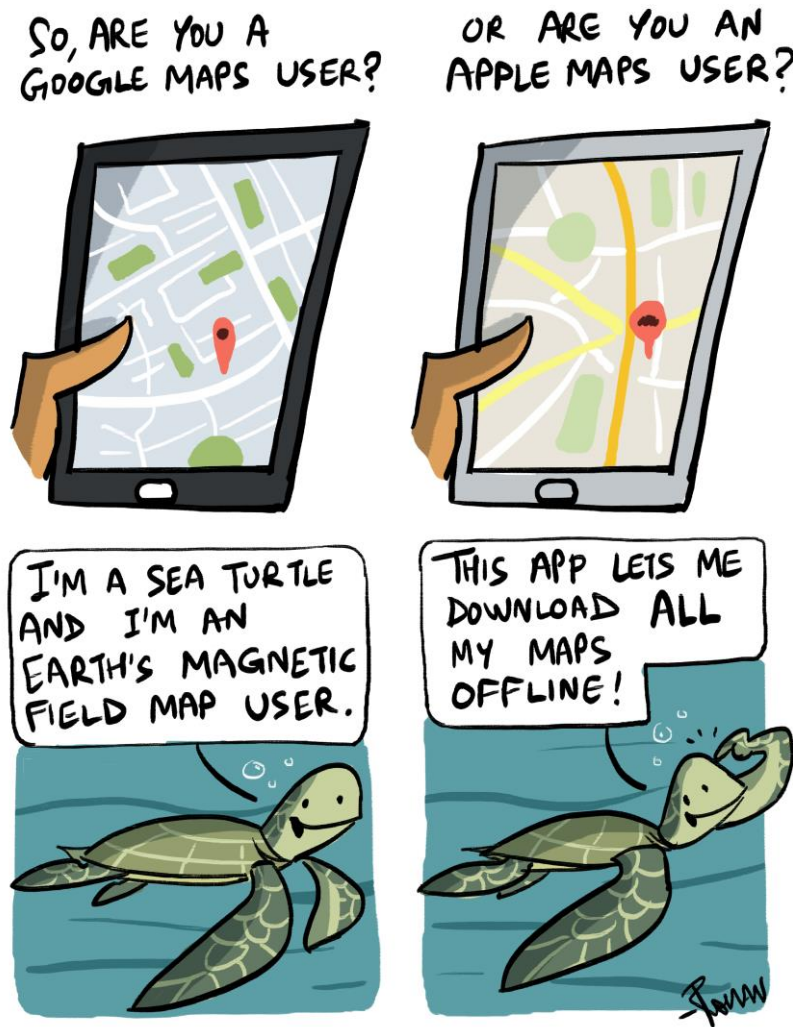
הפינגווינים הם מקור בלתי נלאה לקומיקס על ציפורים שאינן יכולות לעוף אך בעלות כנפיים ונוצות. להלן שתי דוגמות. בקומיקס (של המאייר סם גרוס) שפורסם ב-*New Yorker* (4.9.1995) מתואר פינגווין בודד שעף גבוה מעל חבריו הצופים בו, והוא אומר לחבריו המביטים בו (בהתייחסו לכנפיים שאינן פועלות): *We just haven't been flapping them hard enough*. בקומיקס אחר מתואר פינגווין המביט בעצבות בלהקת ציפורים נודדות ומחליט להירשם לבית ספר לטיסה. לאחר קבלת התעודה הוא טס ופוגש באוויר להקת אווזי בר ומוציא עליהם את תסכוליו בעזרת המנוע של המטוס (ראו:

https://www.reddit.com/r/FreshMemeTemplates/comments/fvyqq1/penguin_learning_to_fly_comic_puddlemunch/).

התבוננות ברמת התהליך

התבוננות בתהליכים ביולוגיים, כימיים, פיזיקליים וחברתיים תאפשר לנו להבין את עקרונות התהליך המאפשרים לאורגניזם להתאים את עצמו לבית הגידול ולחקותם לטובת פיתוח טכנולוגי. בחלק זה אתייחס לדרכים לשילוב הומור בהוראת ביומימיקרי של תהליכי ניווט, תעופה ושל תהליכי למידה – בעולם החי.

ניווט בטבע מתבצע בדרכים רבות ומגוונות, כגון הפרשת פרומונים אצל הנמלים או ניווט באמצעות השדה המגנטי אצל כרישים, צלופחים, צבי מים, לווייתנים, דולפינים, ציפורים ועוד. באיור 5 מוצג הצב כ"מוח על" המסוגל לזכור את כל שבילי הניווט בים ואין לו צורך באפליקציות שונות או באינטרנט. מעבר לידע המוקנה בסוגיית השדה המגנטי, יש באיורים אלו גם מסר אחר העוסק בתלות של האוכלוסייה באפליקציות השונות ובדגש על אפליקציות ניווט – כמה מאיתנו עוד יודעים לנווט בעזרת מפה?!



איור 5 : ניווט של צבים / Sea Turtle Navigation
המאייר: רוהן צ'קראוורטי / Rohan Chakravarty

דוגמה נוספת מעולם הציפורים והחרקים היא יכולת התעופה. בשפת הביומימיקרי אנו מתייחסים לסוגיית הניידות באוויר. מעוף הציפורים היווה את ההשראה לפיתוח כלי תעופה שונים, והראשון שעשה זאת היה לאונארדו דה'זינצ'י. ההתפתחות האבולוציונית הניבה מגוון צורות תעופה ומבני כנפיים. כיום, עופות מסוימים מסוגלים לעוף מהר במיוחד ובנסיקה מעלה (בז נודד, סיס), הפוך (עיטמים), ואפילו לאחור ואנכית (קוליברים). יש המעופפים למרחקים של עשרות אלפי קילומטרים (שחפית הקוטב) ולגבהים של מטוסי סילון, קרוב ל-9,000 מטר מעל פני הים (האווז העקוד). ההיבטים הלימודים על תהליך התעופה ועל מבנה גופה של הציפור מאפשר שילוב למידה של עקרונות פיזיקליים לצורך הישרדות.

להלן דוגמה להמחשת מנגנון התעופה כפתיח לשיעור: יונה, בז וינשוף נכנסים לאולפן הקלטות – זה נשמע אומנם כמו התחלה של בדיחה, אך מדובר בניסוי מרגש ומעורר פליאה באווירונאוטיקה של ממלכת החי. כל בעלי החיים התפתחו באופן שמאפשר להם לשרוד, ולשם כך הם מצוידים בכלים מגוונים. חלק

מהכלים משותפים למינים רבים. במקרה של עופות – אלו הם המקור, הכנפיים והנוצות. ועדיין, מינים מסוימים בעלי "נישה" אבולוציונית ייחודית, והם התמחו בה ושכללו אותה כמעט לכדי שלמות. התנשמת היא דוגמה מושלמת – היא עפה בדממה כזו שקשה להקליט אותה אפילו באמצעים דיגיטליים. כיצד היא עושה זאת? מה מבדיל את ציפור הטרף ואת מעופה החרישי משאר העופות שנשמעים לידה כמו מטוס סילון? בחלק זה בא לידי ביטוי הקניית המושגים הפיזיקליים וההיבטים הביומימיטיים של התכנון. (ראו: https://www.youtube.com/watch?v=d_FEaFgJyfA&t=3s).

אך, כאמור, ישנן ציפורים שאינן יכולות לעוף, כדוגמת התוכי קאקאפו שבאיור 6. מאיור זה של נעה כ"ץ ניתן ללמוד רבות על הציפור, על הבעיות שעמן היא מתמודדת, ולא פחות חשוב – על שימור הטבע (קאקאפו נמצאת בסכנת הכחדה חמורה). שילוב המידע בצורה הומוריסטית בתוך בועות השיח מאפשר הקנייה של ידע מדעי עדכני, וההאנשה של הדמויות וההתמודדות שלהם יוצרות קשר המאפשר למידה מתוך הקשר ואף מעלות את הסוגיה שניתן להתמודד עם חוסר הצלחה ולהפוך את החיסרון ליתרון.



איור 6: קאקאפו

המאירת: נעה כ"ץ, מתוך "ספר הציפורים"

בהוראת הביומימיקרי חשוב להתייחס גם לתהליכי הלמידה בעולם החי, תהליכים המציגים מורכבות מחשבתית, לעיתים יוצאת דופן כמו אצל התמנונים. חלקנו בוודאי זוכרים את הגיבור האמיתי של מונדיאל 2014, הלא הוא פול התמנון, שהתפרסם בזכות יכולת ניבוי תוצאותיהם של משחקי הכדורגל. אף שמדובר בקוריוז משעשע, כישוריהם הקוגניטיביים המציאותיים של התמנונים מרשימים מאוד. בשידור של *NPR* מספר העיתונאי האמריקאי סקוט סיימון על אינקי, תמנון שנמלט מהאקווריום הלאומי של ניוזילנד. לאחר שנעלם ניסו מומחים לעלות על נתיב הבריחה. העקבות שהותיר מרמזים על בריחה נועזת: אינקי כיווץ את גופו (תמנונים ידועים ביכולת זו) והזדחל דרך רוח צר בראש האקווריום. משם הוא נפל לרצפה, עבר שניים וחצי מטרים על האדמה וגלש בצינור ניקוז – מרחק של כ-50 מטרים – עד שנחת במי המפרץ. "הוא הותיר אחריה את חברו לתא, בלוטצ'י, שעד כה לא אמר דבר לרשויות", התלוצץ סיימון.

אפשר להתייחס לתהליך הלמידה בעולם החי לא רק מהתבוננות בפרט בודד, אלא גם מהתבוננות בנחיל, המכונה בספרות "בינת הנחיל" או *Swarm Intelligence*. מינים, כגון דבורים, נמלים, טרמיטים ודגים פיתחו שיטות לעבודה ולחשיבה משותפות, שמאפשרות לקבל החלטות וליצור תחזיות חכמות הרבה יותר משל כל גורם בכוחות עצמו.

אנו נעזרים בבינת הנחיל במצב שבו יש אפשרויות בחירה רבות ורק מעט מאוד מידע שיעזור למערכת לקבל החלטה מושכלת, או במצב שדורש מהמערכת שלנו גמישות רבה מאוד ויכולת להשתנות בהתאם למצב החדש שנוצר. ההבנה הביולוגית של תהליכי למידת הנחיל היוותה השראה לפיתוח סט של אלגוריתמים חכמים שיאפשרו לנו לנצל את הטכנולוגיה שלנו בדרכים מרתקות וחדשניות לגמרי, לפיתוח בינה מלאכותית ולפתרון בעיות ניווט ותנועה.

התבוננות ברמת עקרונות החיים

"עקרונות החיים" (ראו: איור 7) הוא שמן של אסטרטגיות בטבע המצויות בקרב אורגניזמים שונים – בקני מידה שונים, והם מייצגים את פתרונות הטבע להישרדות ולהמשך קיום תחת מגבלות החיים. עקרונות החיים כוללים שש אסטרטגיות מרכזיות ועשרים עקרונות תכנוניים, שחוזרים בטבע במערכות ביולוגיות שונות כדי להבטיח את המשך שרידותן. הבנת כל אחד מהעקרונות תאפשר הכרת תופעות רבות בטבע והבנה של פתרונות שהטבע מבצע (*Biomimicry Guild, 2012*) כדי ליזום ולפתח רעיונות והמצאות.

עתה אמחיש את שילוב ההוראה באמצעות הקומיקס בארבעת העקרונות האלה: יעילות השימוש במשאבים, בחומר ובאנרגיה; התאמה לתנאים משתנים; קשב ותגובה לסביבה מקומית; תהליכי ייצור ידירותיים לחיים.



איור 7: עקרונות החיים

עקרון יעילות השימוש במשאבים, בחומר ובאנרגיה

אורגניזמים ששורדים לומדים לנצל משאבים סביבתיים באופן מיטבי. אחד מתת-העקרונות התכנוניים לשימוש בעיקרון זה הוא שימוש בתהליכים בעלי צריכת אנרגיה נמוכה, דוגמת הדוב בתרדמת החורף. יש בעלי חיים המתקיימים זמן ארוך מאוד בלי אוכל. חלקם דואגים לצייד את המאורה במאגרי מזון ומדי פעם הם מתעוררים, אוכלים וחוזרים לישון. אחרים אוכלים הרבה ומשמינים (מאוד) לפני שהם נכנסים לתרדמת החורף, ובזמן השינה הם מקיימים את גופם מהשומן שצברו. כשהם מתעוררים אחרי כמה חודשים, הם שוקלים הרבה פחות (כמעט חצי) ממה ששקלו כשהלכו לישון. כך הדובים החיים באזורים קרים נכנסים למאורה שלהם בתחילת החורף, הולכים לישון ומתעוררים שוב רק עם בוא האביב. הם יכולים להישאר במאורה חמישה חודשים ויותר, וכל הזמן הזה הם אינם אוכלים, אינם שותים ואפילו אינם מתפנים. במקום להטיל שתן הם ממחזרים את החומרים שנמצאים בשתן, ובכך הם מפחיתים את הצורך באכילה. בעקבות חקר סוגיית תרדמת החורף, למשל, אפשר לפתח רעיונות להמצאות. הרעיונות האפשריים משלבים חשיבה המצאתית, דמיון והומור.

אם נצליח להבין את מנגנון תרדמת החורף, אולי נוכל בעתיד ליצור תרדמת חורף גם בבני אדם. יכולות להיות לזה השלכות מדהימות. בתחום הרפואה למשל – אם אדם שעבר שבץ או אדם בעל דימום מוחי

יוכנס לתרדמת חורף, זרימת הדם שלו תואט מאוד, הוא יאבד פחות דם, ואולי הפגיעה במוח תקטן. אך לא רק בתחום הרפואה – כל חובב מדע בדיוני יוכל לספר לכם שביום שבו נצא ליישב כוכבי לכת אחרים, לתרדמת חורף יכולה להיות תפקיד משמעותי שיעזור לאסטרונאוטים לעבור את המסע.

מאיור 8 ניתן ללמוד לא רק על מהי תרדמת חורף, אלא גם על האילוצים שגורמים לדוב להיכנס לתרדמה, על היתרונות ועל החסרונות של התהליך ואפילו לפתח דיון על שינה ועל חשיבותה. גם אפשר לקשר את תרדמת החורף לעולם התלמיד בגיל העשרה אשר אוהב לישון בדומה לדוב ורואה בכך את הפעילות המועדפת. כמו כן ניתן להתייחס לסוגיית המזון אצל הדוב ולסוגיית הדבש והדוב ולקשור בין עולם הדבורים ועולם הדובים

During hibernation, a bear does not defecate or urinate. Its body can recycle body waste into protein!



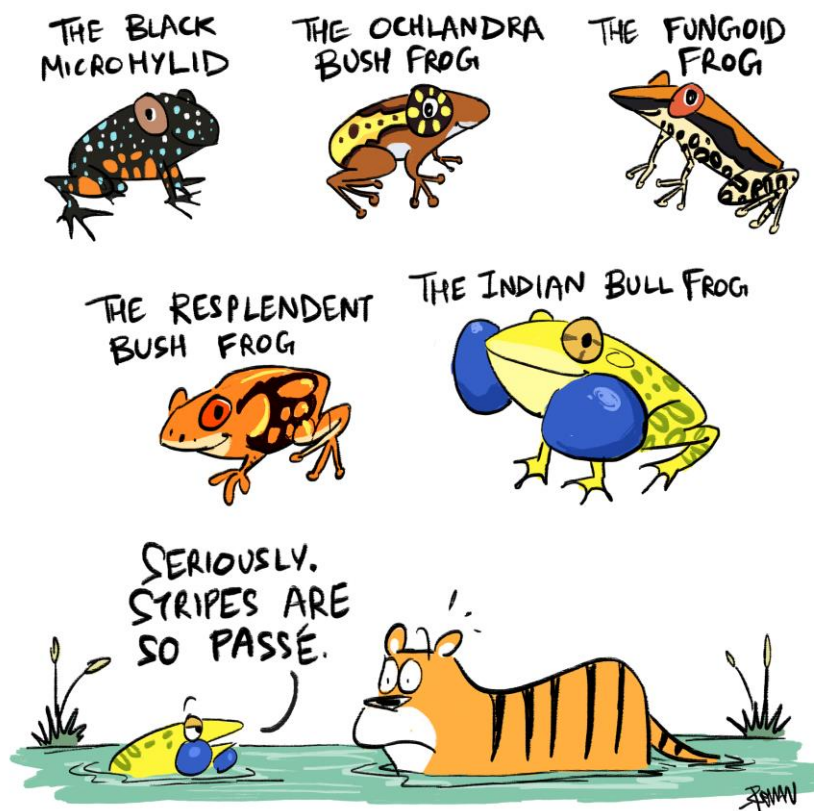
איור 8: שנת חורף היא משטר האימונים החביב עלי / Hibernation is my favourite workout regime
המאייר: רוהן צ'קראוורטי / Rohan Chakravarty

התאמה לתנאים משתנים

התאמה זו באה לידי ביטוי בעיקרון התכנוני – המגוון והשונות בטבע כמנגנון להתאמה לסביבת הגידול. איור 9 מתייחס למגוון הצפרדעים בהודו. באיור מופיע מגוון רחב ביותר של צפרדעים, אך כולן בעלות מבנה חוזר של נקודות. כשלפתע מופיע הטיגריס עם מבנה חוזר של פסים, הוא נחשב בעיני הצפרדעים כאופנה משנים קודמות (so passé). סוגיית המגוון והשונות מביאה אותנו במהלך השיעור לשיח סביב חשיבות שימור המגוון מהיבטים שונים – כלכלי, אקולוגי, פילוסופי, דתי, רוחני, אסתטי ועוד. מעבר לערך הכלכלי הטמון במגוון הביולוגי (מזון, תרופות, מוצרי עץ וכדומה) יש למגוון הביולוגי תרומה חשובה לקיומן של המערכות תומכות

החיים של כדור הארץ באמצעות מגוון של שירותי חינוך שהוא מספק, כגון טיהור מים וטיהור אוויר, מיתון סחף ושיטפונות, ייצוב חלקי של האקלים וכדומה (אטינגר, 2003).

THE SNAZZIEST INDIAN FROGS



איור 9: הצפרדעים ההודיות האופנתיות ביותר / The snazziest Indian frogs
המאייר: רוהן צ'קראוורטי / Rohan Chakravarty

קשב ותגובה לסביבה מקומית

אורגניזמים מקשיבים לסביבה ומתאימים את עצמם לסביבה בהיבט מורפולוגי, ביוכימי או התנהגותי. אחד העקרונות התכנוניים למימוש אסטרטגיה זו הוא טיפוח יחסי שיתוף בעולם החי (הדדיות / סימביוזה). משמעות התהליך בעולם החי היא שיתוף פעולה בין אורגניזמים שונים לקבלת תועלת הדדית. להדדיות יש מגוון רחב של קומיקסים. אחד משיתופי הפעולה הנפוצים בעולם הקומיקס הוא בין ההיפופוטם או הקרנף והציפור המנקה אותו (ההדדיות באה לידי ביטוי בכך שהציפור מרוויחה מזון והקרנף / ההיפופוטם מרוויחים ניקיון). מערך שיתוף פעולה בטבע הידוע אף יותר הוא בין הדבורה והפרחים. להלן תיאור סיטואציה בין שלוש דבורים. באיור מתואר שליח הנושא חבילה שעליה רשום "אבקת פרחים". מקבל החבילה אומר לחברו את המשפט: "I know it's not good for the environment; but ordering inline is just so convenient". בספרה של נעה כ"ץ (2021, עמ' 85) היא מתארת את התנן המצרי, שנקרא כך בעברית משום שיוחסה לו האגדה היוונית שעל פיה הוא ניקה לתניני היאור את השיניים בסוג של יחסים הדדיים. הוא מצויר

כשהוא בוהה בפה פעור של תנין ומסביר לקוראים (ולתנין הרעב) שאין סיכוי שהוא הולך להיכנס בין המלתעות העצומות האלה ("בלי להעליב, אביגדור", הוא אומר לתנין, "אבל אני בחיים לא איכנס לשם").

תהליכי ייצור ידידותיים לחיים

עיקרון זה מתייחס לעובדה שהכימיה של עולם החי מתבססת על מים, על פירוק תרכובות למרכיבים בלתי מזיקים ועל שימוש במעט מאוד יסודות (מימן, חנקן, חמצן ופחמן). כלומר התכונות של האורגניזמים השונים מוקנות באמצעות מבנה ופחות על ידי שימוש בחומרים. ניתן להמחיש סוגיה זו על ידי עולם הצבע בטבע, למשל, צבע המופק מפיגמנטים (כמו אצל הדיונון)⁴ לעומת צבע פיזיקלי הנובע משכבה חיצונית במבנה קשקשי הגורמת להחזרת קרני אור (כמו אצל הזיקית)⁵. דוגמה אחרת עוסקת באופן ההיצמדות של בעלי חיים למשטחים, כפי שהיא באה לידי ביטוי אצל הלטאה. יכולת ההדבקה של רגלי הלטאה לקירות מתבצעת באמצעות אלפי קשרים כימיים חלשים המתרחשים בין רגלי הלטאה והמשטח שאליו היא נצמדת. באיור 3 ("מהמורות מהירות") שתי לטאות משוחחות על לטאה שלישית אשר נמה וחולמת כשהדגם על גופה הוא עננים בצבע תכלת: *"Look like he's having the dream" where he can fly again*.

אחד השימושים המוכרים של השינוי בצבע הוא ההסוואה. נעה כ"ץ בספר **הציפורים** הצליחה להמחיש בדרכה הייחודית את ההסוואה של פפיון השדות (ראו: איור 10). בועות הדיבור של צמד הציפורים פנינה ונחמה מסתירות את צבי שעומד לידן, עד שהוא פוצה את פיו בריבוע השני ("סמאללה! צבי כמה זמן עמדת שם?"). כך הן ממחישות את ההסוואה המוצלחת של פפיון השדות שבהתקרב הסכנה קופא במקומו.

⁴ האיבר האחראי לשינוי צבע העור של הדיונון נקרא כרומטופור. בעור של הדיונון יש שפע של כרומטופורים שהם יחידה עצבית המפעילה שרירים. הכרומטופור בנוי משקיקים המכילים פיגמנט ספציפי אדום, צהוב או חום. כשהשרירים המעוצבבים מתכווצים השקיקים נדחפים החוצה, כמו דיסקים שטוחים של צבע שפועלים בדומה לפיקסלים. התרחבות השקיק או התכווצותו קובעות את מידת השטח ואת הפיזור של הצבע ואחראיות לפעולת ההסוואה הייחודית של הדיונון.

⁵ מתחת לעור של הזיקית קיימת שכבה שמכילה גבישי מלח זעירים אשר שוברים את קרני האור. הגבישים שמתחת לעור הזיקית מסודרים ברשת תלת־ממדית, מה שהופך את ספקטרום שבירת האור שלהם למגוון. הזיקית יכולה לתמרן את שכבת הגבישים על ידי כיווץ והרחבה וכך ליצור מערך מורכב מאין כמותו של שיקוף אורכי גל ויצירת צבע.



איור 10: פפיון השדות
המאירת: נעה כ"ץ, מתוך "ספר הציפורים"

סיכום

העיקרון המרכזי בשימוש בקומיקס בהוראת הביומימיקרי הוא השימוש בקומיקס בהלימה למטרות הלמידה (הקניית ידע תוכן, חיזוק תובנות, חינוך ערכי, פיתוח חשיבה ביקורתית ועוד). ההצלחה של הקומיקס אינה מקרית, אלא היא מבוססת על ידע או על מיומנויות רלוונטיות המותאמות למטרות השיעור ולרמתו של הלומד. הקומיקס צריך להיות בהיר, מובן ומקדם למידה.

כל קומיקס שהמורה בוחר עבור תהליך ההוראה, ובדגש על ביומימיקרי, צריך להתייחס לשלושה אלמנטים: הומור, למידה חזותית ולמידה מטקסט (Lin, et al., 2015). כמו כן עליו לעבור מסננת של שאלות:

- ברמת התפקוד של הלומד: מי קהל היעד?
- ברמה הלוגית: כיצד הקומיקס בנוי? האם הקומיקס נוח למשתמש (והכוונה ללא מלל מיותר) והאם הקומיקס משרת את מטרת השיעור/תוכן הידע הרלוונטי?
- ברמה הרגשית: מה המסר מאחורי האיור?

בדומה להומור גם תחום הביומימיקרי מאפשר הסתכלות מנקודת מבט אחרת בטבע. הוא מאפשר להרחיב את ההוראה של נושאים שונים בצורה אחרת ואף להראות שבעלי החיים או אפילו הצמחים מוצלחים יותר מאיתנו וחלקם אף בעלי "כוחות על" שהאדם רק יכול להתקנא בהם. לדוגמה, בשיעור העוסק בהבנת

הנושא "כוח מהו?" או בנושא העוסק במנגנוני ראייה, בעקרונות פיזיקליים באופטיקה או בהוראת מבנה העין אפשר להשתמש בסרטן המנטיס כהשראה.⁶

כלומר ביומימיקרי הוא נושא בין-תחומי המשלב תחומי דעת שונים של אקולוגיה, הנדסה ומתמטיקה ויכול אפילו לתת נקודת מבט פילוסופית על החיים על פני כדור הארץ. ביומימיקרי משלב חשיבה יצירתית, חשיבה מדעית, פתרון בעיות, סקרנות ושאלות שאלות. עולם הביומימיקרי מאפשר היכרות מאלפת עם עולמות אחרים שנמצאים ממש כאן לידינו. התקדמות המחקר המדעי מלמדת אותנו יותר ויותר על יכולות החשיבה בעולם החי, וזו הזדמנות לחשוב מחדש על יחסנו ליצורים שחולקים איתנו את העולם ועל השאלה: האם מותר האדם מן הבהמה? האם מותר לאדם לנהוג בטבע על פי רצונו או צרכיו?

שילוב הקומיקס בהוראה (Gorodetsky, & Klavir, 2003; Yaman, 2010; Graham, 2011) בכלל הוא דרך למשוך את התלמיד למעורבות בלמידה, והוא יכול לספק אימון ולבנות פיגומים לנושא ההוראה. הוראה באמצעות קומיקס מאפשרת למידה והוראה עם חיוך. התכנים, הרלוונטיות וההקשר לעולמו של הלומד מאפשרים למידה מעמיקה (ובביומימיקרי – גם הקנייה של ערך הכבוד לטבע), והשימוש בהומור משמש כתבלין להשבחת טעמו של השיעור. שילוב קומיקס בהוראת ביומימיקרי מאפשר גם "נקודת מבט של לייזר" – נקודת מבט מעמיקה על נושא ספציפי וייחודי (דוגמת מבנה הנוצה) או "מבט של זרקור" – נקודת מבט רחבה על פני כמה תחומים (דוגמת נושא הניווט). נקודות המבט המרובות מאפשרות הוראה אחרת ויוצאת דופן. אם איור מצליח לעורר שאלות, מחשבות וחיוך – זוהי הצלחה, מכיוון שמתקיים תהליך של למידה אותנטית מתוך הקשר לחיי הלומד.

רשימת המקורות

- אטינגר, ל' (2003). מגוון ביולוגי כערך. **אאוריקה 16**, 5-1.
- <https://www.matar.tau.ac.il/wp-content/uploads/2015/02/newspaper16-docs04.pdf>
- בארת, ר' (1988 [1980]). **מחשבות על הצילום** (תרגום: ד' יניב). כתר.
- בליך, ב"ב (2013). קומיקס – איזו מין חיה זו? **בצלאל כתב עת לאומנות חזותית וחומרית**, 348-374.
- http://journal.bezalel.ac.il/sites/default/files/pdf/Ben_Baruch.pdf
- הפלמן, י' (2014). קיימות – מבט מהטבע. **אקולוגיה וסביבה 3**(5), 234-244.
- יפלא וישקרמן, ו' (2021) למידה מתוך חיקוי בעולם הטבע הוראה הביומימיקרי, **לקסי קיי**, 15, 21-25.
- כ"ץ, נ' (2020). **ספר הציפורים**. ידיעות ספרים.
- כ"ץ, נ' (2021). **ספר הציפורים 2**. ידיעות ספרים.
- קינן, ע' (2016). צפר צמרת על ציפורים וחיות אחרות: כתבה במשקל נוצה. **ערבות**, 26-27.
- קסטנר, א' (2009 [1931]). **פצפונות ואנטון** (תרגום: מיכאל דק). אחיאסף.
- שליטא, ר', פרידמן, א', והרתאן, ר' (2011). **אוריינות חזותית בפעולה: חינוך בעידן החזותי**. מכון מופ"ת, הוצאת הספרים ע"ש י"ל מאגנס.

⁶ סרטן המנטיס (Mantis shrimp) הסרטן הזה מסוגל לתקוף את טרפו תוך 3 אלפיות השנייה - זמן קצר פי 90 ממצמוץ אנושי אחד. תאוצת הצבתות שלו מגיעה לכ-10,000 g ועשויה לייצר כוח של עד 1,500 ניוטון – שווה ערך לכוח הדרוש כדי להרים משקולת של 150 קילוגרם! דוגמה אחרת בהבנת מנגנוני ראייה, עקרונות פיזיקליים באופטיקה או הוראת מבנה העין, יכולה להתבסס שוב סרטן המנטיס. אנחנו מסוגלים לראות טווח של 3 אורכי גל. המנטיס מסוגל לראות 12 אורכי גל, כולל אינפרא אדום ואולטרא סגול.

- שליטא, ר' (2021). אוריינות חזותית וחינוך חזותי - ממורים לאומנות למורים חזותיים בתוך מ' בן-פזט, (עורכת) **שדה האוריינות החזותית - שיטוט מקומי במרחבים של תאוריה, יישום ופרשנות**. (עמ' 136-160). מכון מופ"ת, הוצאת הספרים ע"ש י"ל מאגנס.
- Alaba, S. O. (2007). The use of educational cartoons and comics in enhancing creativity in primary school pupils in Ile-ife, Osun State, Nigeria. *Journal of Applied Sciences Research*, 3(10), 913–920.
- Akcanca, N. (2020). An alternative teaching tool in science education: Educational comics. *International Online Journal of Education and Teaching (IOJET)*, 7(4). 1550-1570.
- Andrews, R., Sadoski, M. & Paivio, A. (2002). Imagery and text—A Dual Coding Theory of Reading and writing/Response. *British Journal of Educational Psychology*, 72: 147
- Aşçı, A. U. (2020). Examining the comic strips which takes places on the texts on secondary school Turkish language course books in terms of education of values. *The Journal of International Social Research*, 13(69), 868-889.
- Avraamidou, L., & Osborne, J. (2009). The role of narrative in communicating science. *International Journal of Science Education*, 31(12), 1683–1707.
<https://doi.org/10.1080/09500690802380695>
- Aylor, B., & Oppliger, P. (2003). Out-of-Class Communication and Student Perceptions of Instructor Humor Orientation and Socio-Communicative Style. *Communication Education*, 52(2), 122-34. <https://doi.org/10.1080/03634520302469>
- Banas, J.A., Dunbar, N., Rodriguez, D., & Liu S.J. (2011). A review of humor in educational settings: four decades of research. *Communication Education*, 60(1), 115– 144.
<https://doi.org/10.1080/03634523.2010.496867>
- Biomimicry Guild (2012). Introduction to Biomimicry. Retrieved from:
http://www.biomimicryguild.com/guild_biomimicry.html
- Graham, S. (2011). Comics in the classroom: Something to be taken seriously. *Language Education in Asia*, 2(1), 92-102.
- Golding, S., & Verrier, D. (2020). Teaching people to read comics: the impact of a visual literacy intervention on comprehension of educational comics. *Journal of Graphic Novels and Comics*.
<https://doi.org/10.1080/21504857.2020.1786419>
- Gorodetsky, M., & Klavir, R. (2003). What can we learn from how gifted/average pupils describe their processes of problem solving? *Learning and instruction*, 13(3), 305-325.
- Hosler, J., & Boomer, K. B. (2011). Are comic books an effective way to engage non majors in learning and appreciating science? *CBE-Life Sciences Education*, 10, 309-317.
<https://doi.org/10.1187/cbe.10-07-0090>
- Kahiigi, E. K. (2008). Exploring the E-learning State of Art. *The Electronic Journal of e-Learning*, 6 (2), 77–88.

Keogh, B., & Naylor, N. (1999). Concept cartoons, teaching and learning in science: an evaluation. *International Journal of Science Education*, 21(4), 431–446.

<https://doi.org/10.1080/095006999290642>

Kędra, J. (2018). What does it mean to be visually literate? Examination of visual literacy definitions in a context of higher education, *Journal of Visual Literacy*, 37: 2, 67-84.

<https://doi.org/10.1080/1051144X.2018.1492234>

Khoiriyah, S., Suprpto, N. (2021). Effectiveness of Comics to Train Students' Critical Thinking Skills in Physics Learning: A Mini-Review. *Studies in Learning and Teaching*, 2(1) 5-15.

<https://doi.org/10.46627/silet.vi.49>

Klavir, R., & Gorodetsky, M. (2001). The encounter of gifted/non- gifted students with cartoons and their analogical verbal problems. *Gifted Child Quarterly*, 45, 205-215.

Lin, S. F., Lin, H. S., Lee, L. & Yore, L. D. (2015). Are science comics a good medium for science communication? The case for public learning of nanotechnology. *International Journal of Science Education*, 5(3), 276-294. <http://dx.doi.org/10.1080/21548455.2014.941040>

Lin, S.-F., & Lin, H. (2016). Learning nanotechnology with texts and comics: the impacts on students of different achievement levels. *International Journal of Science Education*, 38(8), 1373-1391. <https://doi.org/10.1080/09500693.2016.1191089>

Matuk, C., Hurwich, T., Spiegel, A., & Diamond, J. (2021). How Do Teachers Use Comics to Promote Engagement, Equity, and Diversity in Science Classrooms? *Research in Science Education*, 51, 685–732. <https://doi.org/10.1007/s11165-018-9814-8>

McCloud, S., & Manning, A. D. (1998). Understanding comics: The invisible art. *IEEE Transactions on Professional Communications*, 41(1), 66-69.

Morel, M., Peruzzo, N., Juele, A. R. & Amarelle, V. (2019). Comics as an educational resource to teach microbiology in the classroom. *Journal of microbiology & biology education*, 20(1), 1-4. <https://doi.org/10.1128/jmbe.v20i1.1681>

Naylor, S., & Keogh, B. (2013). Concept Cartoons: What Have We Learnt? *Journal of Turkish science education*, 10(1), 3-11.

Özdemir, E. (2017). Humour in elementary science: Development and evaluation of comic strips about sound. *International Electronic Journal of Elementary Education*, 9(4), 837- 850.

Perkins, L. (1994). *The Intelligent Eye*. The Getty center for education in the arts.

Riddle, J. (2009). *Engaging the eye generation: Visual literacy strategies for the K-5 Classroom*. Stenhouse Publishers

Roswati, N., Rustaman, N. Y. & Nugraha, I. (2019). The development of science comic in human digestive system topic for junior high school students. *Journal of Science Learning*, 3(1), 12-18. <https://doi.org/10.17509/jsl.v3i1.18120>

- Rota, G., & J. Izquierdo. (2003). "Comics" as a tool for teaching biotechnology in primary schools. *Electronic Journal of Biotechnology*, 4(2): 85-89.
- Rozkosz E. A. & Wiorogórska, Z. (2016). Bibliostory-Educational comic stories. A social constructivist approach to media and information literacy education for children and adolescents. *In Information literacy: Key to an inclusive society. 4th European Conference on Information Literacy*, (pp. 718-728). Prague. #
- Seglem, R., & Witte, S. (2009). You Gotta See It to Believe It: Teaching Visual Literacy in the English Classroom. *Journal of Adolescent & Adult Literacy* 53(3): 216-226.
<https://doi.org/10.1598%2FJAL.53.3.3>
- Tatalovic, M. (2009). Science comics as tools for science education and communication: A brief, exploratory study. *Journal of Science Communication*, 8(4), 1-17.
<https://doi.org/10.22323/2.08040202>
- Teslow J.L. (1995). Humor me: a call for research *Educational Technology Research and Development*, 43, 6-28. <https://doi.org/10.1007/BF02300453>.
- Toh, T. L., Cheng, L. P., Jiang, H. & Lim, K. M. (2016). Use of comics and storytelling in teaching mathematics. In P. C. Toh & B. Kaur (Eds.), *Developing 21st Century Competencies in the Mathematics Classroom* (pp. 241-259). Worldscientific.
https://doi.org/10.1142/9789813143623_0013
- Trnova, E., Trna J., & Vacek, V. (2013). The roles of cartoons and comics in science education. In M. F., Dorrio, B. V., & Kires, M. (Ed.), *Proceedings of the 10th International Conference on Hands-on Science* (pp. 240-244). Slovakia.
- Weitkamp, E. & Burnet, F. (2007). The Chemedian brings laughter to the chemistry classroom, *International Journal of Science Education*, 29(15), 1911-1929.
<https://doi.org/10.1080/09500690701222790>
- Woolley, G. (2010). Developing Reading Comprehension: Combining Visual and Verbal Cognitive Processes. *The Australian Journal of Language and Literacy*, 33(2): 108-125.
- Yaman, H. (2010). Cartoons as a Teaching Tool: A Research on Turkish Language Grammar Teaching. *Educational Sciences: Theory and Practice*, 10(2), 1231-1242
- Ziv, A. (1988). Teaching and learning with humor: Experiment and replication. *Journal of Experimental Education*, 57(1): 5-15. <https://doi.org/10.1080/00220973.1988.10806492>