

למידה מתוך חיקוי בעולם הטבע - הוראת ביומימיקרי

ורד וישקרמן -יפלח*

מילות מפתח: ביומימיקרי, קיימות, הוראת מדעי הטבע

עור הכריש (Hwang, 2015), פיתוח צורת החזית של קטר הרכבת המהירה ביפן כמקור השלדג (Kobayashi, 2005), פיתוח טורבינות רוח שקטות בהשראת כנפי הינשוף (Rho, 2017).

ב. חיקוי של תהליך - בחיקוי מסוג זה אנו מנסים להבין את

עקרונות התהליך המאפשר לאורגניזם להתאים את עצמו לבית הגידול ולחקותו. לדוגמה, הבנת תהליך התקשורת של איכון הד (echolocation) בעטלף ובדולפין אפשרה פיתוח של מערכות הסונאר והאולטראסאונד. דוגמה נוספת היא קני הטרמיטים הבנויים ממערכת של תעלות וצינורות אוויר המאפשרים תחלופת גזים עם הסביבה. כאשר התעלות פתוחות האוויר החם עולה למעלה ונפלט החוצה באמצעות תהליך 'הסעת חום', ואת מקומו תופס אוויר קר. באופן זה טמפרטורת הקן נשמרת קבועה. תכנון נבון מאפשר להשתמש בעיקרון של 'הסעת חום' כדי לשמור על טמפרטורה קבועה גם במבנים.

ג. חיקוי מערכת - הכוונה לחיקוי מערכת אקולוגית.

מערכת אקולוגית היא סביבה ביולוגית המורכבת מכל היצורים החיים שמתקיימים באזור גיאוגרפי מסוים וכן כל מרכיבי הסביבה הפיזיים שאינם חיים ושעימם יש ליצורים החיים קשרי גומלין. דוגמה לחיקוי ברמת מערכת העוסקת ביחסי הגומלין בתוך בית הגידול היא פיתוח זכוכית נגד ציפורים. ההבנה שציפורים אינן מתנגשות בקורי עכביש בבית הגידול, הובילה להמצאת זכוכית בעלת רשת שנראית רק לציפורים. דוגמה נוספת היא בד הריפוד Climatedex Lifecycle. משאירות הבד המורכב מתערובת של צמר נטול שאריות חומרי הדברה מכינים לבד שמשמש גננים כמצע לגידול פירות וירקות, ובכך מחזירים את החומרים המזינים הביולוגיים של הבד אל האדמה. זהו חיקוי המחזור שבעולם הטבע - ה"פסולת" של יצור מסוים עובר במערכת האקולוגית ומזין יצורים חיים אחרים.

ביומימיקרי בעולם החינוכי

במקביל להתפתחות התחום באקדמיה ובתעשייה יש עניין הולך וגובר בשילוב התחום במסגרות חינוכיות פורמאליות ובלתי פורמאליות (טופז, 2012) - הן כתחום דעת בין-תחומי הן כפדגוגיה. כפדגוגיה - פיתוח דרכי למידה-הוראה בכיתה ובאקדמיה, למשל, התנסות בתהליכי חקר ופיתוח בעיות. כתחום דעת בין-תחומי - ביומימיקרי מקושר לתחומי הדעת האלה:

- **קיימות וסביבה:** תוכניות חינוכיות אלו עוסקות בנושאי קיימות וסביבה באמצעות למידת עקרונות הקיימות בטבע. הסוגיות שבהם דנים: כיצד מערכות בטבע מתקיימות ושורדות לאורך זמן? כיצד בעיה נפתרת בטבע? ומהו פתרון הנדסי מקיים?

היצורים החיים בעולמנו הם תוצר התפתחות אבולוציונית והם שרדו הודות להתאמה ייחודית שהתפתחה במשך מאות מיליוני שנות אבולוציה. כל מי שלא התאים את עצמו, לא שרד את תנאי הקיום על פני כדור הארץ. לפיכך, מן הראוי ללמוד מהטבע. במהלך התפתחות החיים על פני כדור הארץ היצורים החיים התמודדו עם בעיות ועם אתגרים רבים בדומה לאתגרים שאנו מתמודדים עימם כיום.

ביומימיקרי, בעברית - חיקוי החיים, הוא תחום דעת שפותח על מנת ללמוד מהטבע ולחקות אותו באופן מודע לצורך פתרון בעיות. ההנחה שעליה תחום זה נשען הוא שחלק מהאתגרים המעסיקים את המין האנושי נפתרו בעולם החי והצומח (הלפמן, 2014). הרעיון העיקרי בביומימיקרי הוא שבטבע יש מאגר נרחב של פתרונות לצרכים שונים, ולכן אפשר לחקור אותם ולהשתמש בהם כמקור ידע, השראה וחיקוי (bioinspiration). מכאן שהתבוננות בטבע לצורך איתור מבנים, מנגנונים, תהליכים - במערכות הביולוגיות והאקולוגיות יכולה לסייע במחקר, בלמידה ובפיתוח פתרונות טכנולוגיים והנדסיים באופן מקיים (מוצרים טכנולוגיים בעלי השפעה סביבתית נמוכה) (Benyus, 2002).

ההתבוננות בטבע החלה כבר לפני מאות ואולי אף אלפי שנים; האדם צפה, למד וחיקה את הטבע - על כל רבדיו. לאונרדו דה'וינצ'י היה כנראה הראשון שקישר באופן מודע בין אתגרים הנדסיים לתצפיות זואולוגיות בדרך יצירתית של חיקוי הטבע. אחת הדוגמאות הידועות היא הדגם המכונה "הציפור". זו הייתה מעין מכונת תעופה.

דוגמאות לחיקוי ברמות השונות

למידה מן הטבע מתאפשרת בשלוש רמות חיקוי: **רמת מבנה** (חיקוי החל מהרמה המולקולארית ועד לרמת מבנה האורגניזם השלם), **רמת התהליך / ההתנהגות** ו**רמת המערכת האקולוגית** (האקוסיסטמה, בית הגידול).

א. חיקוי ברמת המבנה - בסוג זה של חיקוי אנו מחקים את המבנה של אורגניזם ספציפי ומעבירים אותו למוצר. דוגמאות: פיתוח משטחים דוחי חיידקים לחדרי ניתוח בהשראת מבנה

* ד"ר ורד וישקרמן-יפלח היא ראש תוכנית המצוינים (רג"ב - ראש גדול בהוראה), ראש מרכז קיימות ומרצה בכירה בהתמחות מדעים במכללה האקדמית לחינוך על שם קיי.

השיטה אף עובדה לגרסה ישראלית הנקראת SIT (Systematic Inventive Thinking). עקרונות החשיבה ההמצאתית השיטתית מאפשרים לחוקרים להעביר עקרונות ביולוגים לעולם ההנדסה ולפתח ענף חדש הנקרא BIO-TRIZ, ענף המשלב ביומימיקרי וחשיבה המצאתית שיטתית (Vincent, 2006). הוראת STEAM מתייחסת לתהליכי הוראה ולמידה בתחומים: מדע, טכנולוגיה, הנדסה, אומנות ומתמטיקה (Science, Technology, Engineering, Art, and Mathematics). קיימים דגמים שונים לחינוך STEAM. (Dugger, 2010).

- ביומימיקרי הוא תחום דעת המזמן אפשרויות לשילוב מיומנויות STEAM בתכנים - בסביבות ההתנסות ובשיטות ההוראה והלמידה.

- **למידה חוץ-כיתתית, למידה מבוססת מקום.** חינוך מבוסס מקום הוא חינוך המבוסס על היכרות, המובילה ליצירת קשר בין האדם למקום שבו הוא חי. זהו חינוך אשר מסתכל בסביבה הקרובה כמשאב חינוכי. תחום הביומימיקרי מזמן התנסות בהתבוננות אחרת בתופעות בטבע. חשוב לציין שיש מגוון של תוכניות העשרה במערכות חינוך בלתי פורמאליות המאפשרות קיום של למידה חוץ-כיתתית, כדוגמת פעילויות בגני חיות מסוג הספארי ברמת גן (טופז, 2012; טופז, 2015) או בגנים בוטניים, כדוגמת גן רמת הנדיב בזיכרון יעקב. בניית תוכנית לימודים בביומימיקרי מאפשרת למידה משמעותית, שכן נוצר עניין משמעותי אם מעורבים בו משתתפים, כמו פעילות הלומד, חידוש, הפתעה, רכישת ידע חדש ומעורבות חברתית. מחקרים מראים, כי ככל שמספר המשתתפים הפועלים בזמנית יעלה, ייווצר עניין רב יותר (Dohn, 2011). למידה בתחום זה מאפשרת בשילוב החקר, למידה על פי תחומי העניין של התלמידים, שכן נמצאה מערכת יחסים חיובית בין העניין, הרלוונטיות והקשר לחיים האמיתיים לטווח רחב של הצלחות לימודיות והנאה מהלימודים (Osborne, 2001; Cochran 2003).

הצעת מבנה לתוכנית לימודים בביומימיקרי

להלן מטרות תוכנית הלימודים בביומימיקרי:

- **מטרות פדגוגיות:** חשיפה ללמידה חוץ-כיתתית כאמצעי להמחשת ההתאמות של אורגניזמים לבית הגידול, למידה מבוססת מקום, פיתוח חשיבה יצירתית, הכרת כלים דיגיטליים להכרת עולם הביומימיקרי, פיתוח הגישה האינטגרטיבית בהוראה המדגישה את הרעיון של שילוב בין תחומי דעת שונים בהוראה.

- **מטרות בתחום דעת:** הכרת תחום דעת חדש ועדכני,

- **מדע וטכנולוגיה ומדעים מדויקים:** ניתן להדגים עקרונות רבים הנלמדים במסגרת הוראת המדע והטכנולוגיה בבית הספר היסודי, בחטיבת הביניים ובחטיבה העליונה שבה הביומימיקרי מוכרת כתוכנית ניסויי בביולוגיה או כעבודת גמר. להלן מספר דוגמאות לשילוב הביומימיקרי בתחומי דעת שונים: במתמטיקה ניתן ליישם את סדרת פיבונאצ'י המזוהה, למשל, במבנה הקונכייה, האצטרובל, פרחים, גלקסיות ועוד.

- **בתחום הכימיה והפיזיקה** ניתן להדגים את מושג שטח הפנים וכוחות האחיזה באמצעות אפקט הלוטוס ואת פיתוח ההמצאה של חומרים דוחי מים (Quan, 2016). בתחום הביולוגיה ניתן להמחיש עקרונות של ויסות החום אצל השועלים (Badamah, 2015). השילוב של דוגמאות מהטבע במהלך ההוראה תורם להבנת התופעות והעקרונות המדעיים ומחזק את הקשר בין התופעה שנצפית בטבע לחיי היום-יום.

- **אדריכלות:** הטבע מספק לנו השראה לרעיונות ולפתרונות שניתנים להטמעה בסביבת מגורינו. עליית המודעות להשפעה האנושית על אקלים כדור הארץ והצורך ההולך וגובר בפתרונות אקולוגיים מאיצים את החיפוש אחר פתרונות, שהוכיחו את עצמם לאורך האבולוציה כמערכות יעילות בארכיטקטורה ובבנייה. ככל שיתעצם שיתוף הפעולה בין הביולוגיה לתחומי הבנייה והארכיטקטורה, כך נראה יותר ויותר דמיון לטבע ושילובו במעשי ידי האדם, כדברי אפלבלט ממכון דוידסון (אפלבלט, אוקטובר 2019). ניתן למצוא דוגמאות של שילוב הטבע הן ברמת חיקוי המבנה, כמו האצטדיון האולימפי בסין המחקה את מבנה קן הציפור, הן ברמת חיקוי התהליך, כמו תהליך ייצור לבנים ידידותיות לסביבה באמצעות חיידקים המייצרים סידן פחמתי. הסיידן הפחמתי מצטבר בחול ומקשה את החומר סביבו בלי לפלוט כלל גזי חממה, וכך נוצרת בהדרגה לבנה לבניין.

גם בחדשנות פדגוגית הביומימיקרי משולב בתחומים השונים:

- **לימוד חשיבה המצאתית שיטתית.** אלטשולר (Altshuller, 1999) פיתח את התיאוריה לפתרון בעיות TRIZ (ראשי התיבות ברוסית) שמכונה באנגלית *the theory of inventive problem solving*. התיאוריה מבוססת על מחקר של מאות אלפי פטנטים מתחומי הנדסה שונים. במחקרו הצליח אלטשולר לזקק 40 עקרונות המאפשרים למצוא פתרונות מקוריים לבעיה נתונה.

1 סדרת פיבונאצ'י היא סדרת מספרים שאיבריה הראשונים 1, 1, וכל איבר אחר בה שווה לסכום שני קודמיו (האיברים הראשונים שבה הם 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21 וכך הלאה).

למרכיבים בלתי מזיקים ושימוש במעט מאוד יסודות (מימן, חנקן, חמצן ופחמן).

6. **שינוי לשם הישרדות:** עיקרון זה מתייחס לשינויים אבולוציוניים כלומר שינוי המתרחש בחומר הגנטי (DNA) ונשמר ומתבטא לאורך דורות רבים של המין.

ג. תנאי ההפעלה המאפשרים קיום בכתי גידול שונים על פני

כדור הארץ. בהיבט זה יש הקנייה של ההבנה ושל החשיבות של הגורמים הביוטיים (אורגניזם חי או חלק מאורגניזם או אורגניזם שמת, לדוגמה: בעלי חיים, צמחים, חיידקים ועוד) והאביוטיים (מרכיב לא-חי של הסביבה, למשל: קרקע, מים, טמפרטורה, לחות וכדומה) הבונים בית גידול ושל ההתאמות שביצעו האורגניזמים השונים להתמודדות עם בית הגידול. דוגמה לתוכן לימודי: בבית גידול מדברי האורגניזמים מתמודדים עם בעיות רבות, ואחת מהן היא ההתמודדות עם החום. נשאלת השאלה: כיצד האורגניזמים מתמודדים עם הבעיה? מהן ההתאמות המבניות/ ההתנהגותיות/ הביוכימיות שהם ביצעו כדי להתאים את עצמם לבית הגידול?

ג. הימצאות מבנים חוזרים.

בטבע קיימים מבנים ותבניות חוזרים המופיעים הן ברמה המולקולארית הן ברמת המבנה הנראה לעין (לדוגמה: ספירלה, סליל, קשקשים ועוד). הבנה של מבנים אלה מאפשרת פיתוח הנדסי ועיצובי לפתרון בעיות הנדסיות. (Helfman, 2016).

ד. היבט התפקוד/הפונקציות שבטבע.

טקסונומיה זו מקשרת בין ביומימיקרי, הנדסה ושפת העיצוב. המונח 'פונקציה' בשפה הביומימטית מתייחס להבנה כיצד האורגניזם מבצע תפקודים בהתאם לאתגרים הקיימים בבית הגידול. יש פונקציות רבות ומגוונות בטבע, לדוגמה: אחסון, תנועה, הגנה, תקשורת ועוד. בהוראת היבט זה יש לזקק את הבעיה שאנו רוצים לפתור או את המוצר שאנו רוצים לתכנן. לאחר הגדרת הבעיה/המוצר יש לחקור ולבדוק כיצד אורגניזמים פותרים אתגר זה.

נניח שאנו רוצים לעצב מוצר האוגר נוזלים (ההיבט הפונקציונאלי/תפקודי הוא סוגיית האחסון). בשלבי התכנון מתייחס לשאלות מעין אלה: כיצד הטבע מאחסן נוזלים? מה אני רוצה שהדגם שלי יבצע - יאסוף נוזלים? יקרר? וכדומה. לאחר ההגדרה המדויקת של הפונקציה נתחיל את שלב החקר הביולוגי ובו נחפש אורגניזם העונה על השאלות שנשאלו. על סמך התשובות והבנת המנגנון ניתן להתחיל בתהליך של עיצוב הדגם/המוצר.

הוראת הביומימיקרי

לאחר הקניית בסיס תוכן בביומימיקרי ניתן לגשת להוראת

הבנת מערכת יחסי הגומלין שבין האורגניזם לסביבה, הכרת הבעיות בסביבה ובבית הגידול ודרכים לפתרון בעולם החי, תכנים באבולוציה, פיתוח למידת חקר, הכרת תכנים בתחום חשיבה המצאתית שיטתית.

• **מטרות ערכיות:** הגברת המודעות לשמירה על הטבע ועל הסביבה, הכרת מגוון המינים, חשיבותם ופעילויות לשימורם, התנסות בהיבטים אתיים של שימור מול פיתוח, בעיות אתיות בתחום הקיימות, כגון סוגיית האקלים, חיזוק יחס של כבוד לסביבה, עידוד לימודי מדעים והנדסה.

תוכנית לימודים בביומימיקרי ברמת תחום הדעת צריכה לכלול את **ההיבטים** האלה:

א. עקרונות החיים:

קיימים שישה עקרונות. כאשר אנחנו בוחנים כל עיקרון בנפרד, הבנת כל אחד מהעקרונות תאפשר הכרת תופעות רבות בטבע והבנה של פתרונות שהטבע מבצע (Biomimicry Guild, 2012). להלן העקרונות:

1. **תושייה ויעילות במשאבים:** אורגניזמים ששורדים לומדים לנצל משאבים סביבתיים באופן מיטבי. הם משתמשים במה שבסביבתם, באופן יעיל וחסכוני תוך שימוש בתהליכי מחזור החומרים בטבע ותוך יצירת מינימום חומרי לוואי.

2. **התאמה לתנאים משתנים: באה לידי ביטוי ביצירת שונות ומגוון** בטבע כמנגנון להתאמה לסביבת הגידול או על ידי תהליכים של ביזור (חלקים שונים במערכת המבנית עושים אותו תפקיד) או יתירות (אותו חלק משוכפל).

3. **התאמה מקומית:** אורגניזמים מתאימים את עצמם לסביבה. הם משתמשים בתהליכים מחזוריים תוך שיתוף פעולה ויחסי גומלין בין היצורים בבית הגידול. דוגמה לכך היא התאמת מחזור החיים של הצמחים עם המאביקים.

4. **הטבע משלב התפתחות עם גדילה:** עיקרון זה מתייחס לאופן שבו מתרחשים תהליכים של צמיחה פיזית והתפתחות בטבע. יש לשים דגש על ההבדל בין גדילה, שהיא הגדלת המידות הפיזיות של האורגניזם או של חלקים ממנו, לעומת התפתחות הכוללת את צמיחת התשתיות המאפשרות לאורגניזם הגדל לתפקד ולהתפתח. כדי לאפשר למערכת לתפקד באופן תקין שתי התופעות צריכות להתרחש במקביל ובאופן מבוקר ומאוזן. דוגמה לכך היא שימוש באבני הבניין של חומצות אמינו הבונות בסופו של התהליך את החלבון.

5. **תהליכי ייצור ידירותיים לחיים:** מתייחסים לסוגיה שהכימיה של עולם החי מתבססת על מים, פירוק תרכובות

weizmann.ac.il/online/biomimicry/%D7%94%D7%90%D7%93%D7%A8%D7%99%D7%9B%D7%9C%D7%99%D7%9D-%D7%A9%D7%9C-%D7%94%D7%98%D7%91%D7%A2

הלפמן כהן, י' (2014). קיימות - מבט מהטבע. **אקולוגיה וסביבה כתב העת למדע ומדיניות הסביבה** 3(5), 244-234. <http://magazine.isees.org.il/ArticlePage.aspx?ArticleId=462>

וישקרמן יפלה, ו' (2018). ללמוד מהטבע - Bimimicry לסטודנטים להוראה. **אקולוגיה וסביבה כתב העת למדע ומדיניות הסביבה**, 4, 16-15. <http://magazine.isees.org.il/CurrentIssue.aspx?IssueId=54>

טופז, מ' (2012). ביומימיקרי: חדשנות בהשראת הטבע, **חיות וחברה**, 46, 30-20.

טופז, מ' (2015). מעבדה לרעיונות בגן החיות - ביומימיקרי בספארי, **אאוריקה**, 38, 4-1.

Altshuller, G. (1999). *The innovation algorithm, TRIZ, systematic innovation and technical creativity*. Technical Innovation Center.

Badarnah, L. (2015). A biophysical framework of heat regulation strategies for the design of biomimetic building envelopes. *Procedia Engineering*, 118: 1225-1235. <http://doi.10.1016/j.proeng.2015.08.474>

Benyus, J. (2002). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Perennial.

Biomimicry Guild (2012). *Introduction to Biomimicry*. Biomimicry Guild. http://www.biomimicryguild.com/guild_biomimicry.html

Cochran Smith, M (2003). Learning and Unlearning: The education of teacher educators. *Teaching and Teacher Education*, 19(1), 5-28.

Dohn, N. B. (2011). Upper Secondary Students' Situational Interest: A case study of the role of a zoo visit in a biology class. *International Journal of Science*, 35(16):1-20. <http://doi.10.1080/09500693.2011.628712>

Dugger, E. W. (2010). Evolution of stem in the United States. The 6th Biennial International Conference on Technology Education Research in Australia. [paper] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.476.5804>

El-Zeiny, R. M. A. (2012). Biomimicry as a Problem Solving Methodology in Interior Architecture. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 50), 502-512.

Helfman, Y. (2014). Biomimetics: Structure-Function Patterns Approach. *Journal of Mechanical Design*, 136(11), 111108-111119. <http://doi.10.1115/1.4028169>

Helfman, C.Y., & Reich, Y., (2016). *Biomimetic design method for innovation and sustainability*. Springer.

Helms, M., Vattam, S. S., & Goel, A. K. (2009). Biologically inspired design: process and products. *Design studies*, 30, 606-622.

Hwang, J., et al. (2015). Biomimetics: forecasting the future of

הביומימיקרי בשני האופנים שלהלן, בהתאם לאוכלוסיות הלומדים והשאלות שנשאלות (El-Zeiny, 2007; Helms, 2009; Zari, 2012).

1. **מהביומיקרי אל התוצר (היישום)**. בכיוון חקר זה התלמידים הסטודנטים מתבוננים בטבע הסובב אותם, בוחרים באורגניזם, חוקרים אותו, חושבים ומציעים יישומים שניתן לפתח בהשראת אורגניזם זה. כיוון חקר זה נודע בשמות: *Biology to design, Bottom Up, Solution driven*.

2. **מהצורך הטכנולוגי ההנדסי אל הביומיקרי**. בכיוון חקר זה התלמידים הסטודנטים נחשפים לאתגר ביולוגי או הנדסי. התלמידים פונים אל הטבע לחפש פתרונות באורגניזמים המתמודדים עם בעיות דומות ולפתח דגם עיצובי בהשראתם. כיוון חקר זה נודע גם בשמות: *Challenge to biology, Top-down, Problem driven*. כיוון חקר זה דורש הגדרה מדויקת של האתגר או הבעיה שרוצים לפתור, לאחר מכן יש לחפש במאגרי מידע שונים, כגון *AskNature* (www.asknature.org) או *www.biomimicry.net* (<http://www.biomimicry.net>), אורגניזם המתמודד עם בעיה דומה ולחקור כיצד הוא מתמודד עם בעיה זו. מתוצאות החקר והבנת המנגנון באורגניזם מתאפשר פיתוח דגם הפותר את האתגר/הבעיה.

תכנים הנלמדים בביומימיקרי רלוונטיים למציאות המשתנה והשאלות הנשאלות מתאימות לעולם הידע של המאה ה-21. הם מזמנים עיסוק בסוגיות אקטואליות ובדילמות המפתחות מודעות חברתית-סביבתית תוך פיתוח אזרחות סביבתית ומיומנויות הרלוונטיות לתלמיד, כגון למידה שיתופית, פיתוח לומד עצמאי, פיתוח חשיבה יצירתית והיכולת לפתור בעיות (וישקרמן-יפלה, 2018).

חשיפה לנושא הביומימיקרי במערכת החינוך ובמערכות אחרות מאפשרת לנו ליצור אוכלוסייה חושבת, יוצרת ופתוחה לשיח דיאלוגי עם עולם הטבע - מתוך כבוד ולא מנקודת מבט של ניצול משאבי כדור הארץ. הטבע הוא ספרייה עצומה שיכולה להוות השראה לפיתוח. אך מקור הידע הנפלא נמצא בסכנה בשל ההתערבות ההרסנית של המין האנושי. כאשר אורגניזם נכחד המשפט: "מין שנכחד הוא ספר ידע שאבד" מקבל משמעות מעט אחרת הודות לחשיפה לנושא זה.

המקורות

אפלבלט, ד' (אוקטובר 2019) האדריכלים של הטבע. **מכון דוידסון לחינוך מדעי, מכון ויצמן**. <https://davidson.>

science, engineering, and medicine. *International Journal of Nanomedicine*, 10, 5701–5713.

Kobayashi, K. (2005). Shinkansen Technology Learned from an Owl? - The story of Eiji Nakatsu. *Japan for Sustainability Newsletter*, 31.

http://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id027795.html

Osborne, J., & Collins, S. (2001). Pupils' views of the role and value of the science curriculum. *International Journal of Science Education*, 23, 441-67.

Quan, x. et al. (2016). Biomimetic self-cleaning surfaces: synthesis, mechanism and applications. *Journal of the Royal Society Interface*, 13, 1-12.