

יעל הלפמן כהן

ארגון הביומימיקרי הישראלי; ביה"ס ללימודי סביבה ע"ש פורטר, אוניברסיטת תל-אביב

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

הלפמן כהן י. 2014. קיימות – מבט מהטבע. *אקולוגיה וסביבה* 5(3).



רכבת הקליע (Shinkansen) על רקע הר פוג'י ביפן. רכבת מהירה שעוצבה מחדש בתהליך ביומימטי המחקר את מבנה השלד, כדי לפתור את בעיית הרעש שיצרה | צילום: gettyimages

קיימות – מבט מהטבע

1 באוקטובר, 2014

[גיליון סתיו 2014 / כרך 5\(3\)](#)

[סקירות](#)

על קצה המזלג

- תחום הביומימטיקה מקדם מהפכה חשיבתית בדרך שהאדם מסתכל בה על הטבע – מקור להשראה במקום מקור למשאבים – ומקדם את הבנת הקיימות בכלל ואת הטמעתה בשדה הטכנולוגי בפרט.
- המאמר מתמקד בזיהוי עקרונות הקיימות בטבע ובתרגומם לעקרונות תכנוניים באמצעות תיאור גישות לתכנון מקיים.
- שיטות תכנון ביומימטיות יכולות לתת מענה לצורך ההולך וגובר בטכנולוגיות מקיימות.
- פתרונות לאתגרים סביבתיים מרכזיים (למשל בתחומי האנרגיה, החומר והמים) קיימים בטבע, וחלק מהם אף הובילו לפיתוח טכנולוגיות מקיימות.

המערכת

תקציר

הטבע הוא מקור ידע לפתרונות תכנוניים המעשירים תפיסות וידע של מהנדסים ומתכננים. התבוננות בטבע מזמנת צורת חשיבה אחרת לגבי האופן שאנו מתכננים, מייצרים, צורכים ומסיימים את חיי המוצרים שאנו משתמשים בהם. הטבע הוא לא רק מחסן חומרים, אלא גם מקור לידע ולתובנות. מגוון המינים העשיר הוא כר נרחב ללמידה. מערכות ביולוגיות הפועלות תחת מגבלות החיים מדגימות על פי רוב פתרונות חדשניים ומקיימים ברמת המבנים, ברמת התהליכים וברמת המערכת.

ביומימטיקה היא תחום דעת בצמיחה העוסק בחיקוי מודע של הפתרונות התכנוניים של הטבע. ביומימטיקה מיושמת בפועל בעיקר בשלב התכנון הרעיוני, באמצעות שיטות תכנון וכלים ביומימטיים, שפותחו כתוצאה מחיקוי הטבע. בשלבים אלה מורחב מגוון הפתרונות הפוטנציאליים על-ידי בחינת הפתרונות המקיימים של הטבע. תהליך העברת הידע מתחום הביולוגיה להנדסה מבוסס על זיהוי אתגר תכנוני אנלוגי בטבע, הפשטת הפתרון והעברתו ליישום.

שיטות תכנון ביומימטיות מאפשרות העברה של ידע בין הטבע להנדסה. הן תוכננו לזקק את הידע בטבע ולהנגיש אותו למתכננים. לשיטות אלה יכולת לתת מענה לצורך ההולך וגובר בטכנולוגיות מקיימות. פתרונות לאתגרים סביבתיים מרכזיים בתחומי האנרגיה, החומר והמים כבר נפתרו בטבע, וחלק מהם אף הוביל לפיתוח טכנולוגיות מקיימות. דוגמאות מייצגות לטכנולוגיות ביומימטיות אלה מוצגות במאמר. המאמר סוקר שני כלים ביומימטיים לתכנון מקיים, המבוססים על זיהוי עקרונות הקיימות בטבע ועל תרגומם לעקרונות תכנוניים: "מעריסה לעריסה" ו"עקרונות החיים". כמו כן, מוצג כלי חדש שפותח על-ידי כותבת המאמר לזיהוי עקרונות קיימות בטבע והעברתם להנדסה – "עקרונות האידיאליות בטבע". כלים אלה מאפשרים להטמיע את הקיימות עוד בשלבים הראשוניים של תהליכי התכנון מחד גיסא, ולהציע שיפורים למוצרים קיימים מאידך גיסא. המאמר דן במקומה של הביומימטיקה ככלי לתכנון מקיים המבוסס על צורת חשיבה הנגזרת מהפתרונות המקיימים של הטבע. שילוב כלי תכנון ביומימטיים עם כלים אחרים, כגון ניתוח מחזור חיי מוצר (LCA), נותן מענה רחב יותר לדרישות התכנון המקיים.

מבוא

בראש רשימת האתגרים של האנושות של המאה ה-21 נמצאת הדרישה לפיתוח מקיים [24]. משאבים ומערכות אקולוגיות נמצאים בהתדרדרות, בעוד שהדרישה לשירותיהם גדלה [26]. אנו עדיין תלויים בנפט, פולטים פחמן ומנצלים אחוז נמוך מחומרי הגלם בתהליכי הייצור הראשוניים [13]. דרוש שינוי מהותי באופן שאנו חושבים, מתכננים, מייצרים, צורכים ומסיימים את חיי המוצרים שלנו. התבוננות בטבע מזמנת תשובות מהותיות לשינוי הנדרש.

מערכות ביולוגיות פועלות תחת מגבלות, אך מדגימות על פי רוב פתרונות מקיימים. כמות משאבי החומר בטבע מוגבלת וסופית. תהליכי החיים תלויים במים ובאנרגיה שמקורה על פי רוב בשמש. מערכות ביולוגיות נתונות להשפעת כוחות טבע כמו כוח הכבידה, חיכוך וזרימה. למרות מגבלות אלה פועלות מערכות ביולוגיות על פי רוב מבלי לייצר אשפה או נזק בלתי הפיך למערכת האקולוגית. להפך, הן מעשירות את סביבתן תוך כדי פעילות. המבנים והצורות בטבע מספקים טווח נרחב של תכונות תוך שימוש מזערי במשאבי חומר ואנרגיה. תהליכי הייצור בטבע מתקיימים בסביבת החיים, ועל כן אינם מבוססים על חימום לטמפרטורות גבוהות, על לחצים כבדים או על שימוש בחומרים רעילים [4]. מערכות בטבע מאופיינות בזרימה יעילה של חומר ואנרגיה.

הטבע הוא מקור ידע לפתרונות תכנוניים מקיימים המעשירים תפיסות וידע קודם בקרב מהנדסים ומתכננים. במחקר שהשווה בין עקרונות לפתרון אתגרים תכנוניים במערכות ביולוגיות וטכנולוגיות, נמצא שיש רק 12% דמיון בין פתרונות ביולוגיים וטכנולוגיים. בטכנולוגיה יש שימוש ניכר בחומר ובאנרגיה, ואילו בטבע נעשה שימוש ניכר במבניות ובמידע לפתרון אותם אתגרים תכנוניים [29]. למידת הפתרונות של הטבע יכולה להיות אפוא, מקור לפתרונות מקיימים ויעילים במשאבי חומר ואנרגיה, בהנחה שהמתכנן אינו מסתפק בהעתקה מצומצמת של מבנה או מודל מהטבע, אלא גם מתבונן בצורה רחבה יותר על הקשר בין המבנה לסביבתו [20], וחותר לייצרו בדרך מקיימת תוך בחינת תהליכי הייצור והחומרים הנבחרים.

החיפוש אחר פתרונות מקיימים בטבע התרחב בשנים האחרונות, ומזוהה כחלק מתחום מדעי מתפתח הנקרא ביומימטיקה (או Biomimicry). משמעות המילה biomimicry היא "חיקוי החיים" ("bio" – חיים, "mimicry" – נגזר מהמילה "mimesis" שטבע אריסטו ומשמעותה חיקוי). ביומימטיקה היא תחום דעת העוסק בחיקוי מודע של הפתרונות התכנוניים של הטבע כדי לפתור אתגרים אנושיים [4]. לעתים מסתכם תהליך החיקוי בקבלת השראה בלבד מפתרון טבעי (bioinspiration), ולפעמים יש העברה מלאה של מודלים מהטבע עד רמת הפרמטרים. במובן הרחב, תחום הביומימטיקה עוסק בלמידה מהטבע, מהשראה ועד העתקה. בתהליך זה, האתגר המרכזי הוא גישור על הפער בין הביולוגיה להנדסה. כדי לתמוך בתהליך העברת הידע בין הביולוגיה להנדסה וליצור שפה משותפת ומובנת הן לביולוגים הן למהנדסים, פותחו שיטות תכנון ביומימטיות הנתמכות על-ידי כלים תכנוניים שונים.

משחרר האנושות התבונן האדם בטבע וחקר אותו. דה וינצ'י, למשל, התבונן עמוקות בטבע ובגוף האדם מנקודת מבט הנדסית ובניסיון למזג בסיסי ידע הנדסיים וביולוגיים. הוא הקדיש שעות רבות ביום להתבוננות, להסתכלות למחקר ולשרטוט של מעופפים שונים בטבע, כמו דג מעופף, עטלף, שפירית ואחרים, במטרה לפתח מכונה מעופפת. הוא העמיק בלימודי הזואולוגיה והאנטומיה של התעופה הטבעית, אך לא הסתפק בהתבוננות ובאיסוף

ידע, אלא חתר ליישמו. כידוע, דה וינצ'י לא צלח במשימתו לפתח את המטוס הראשון, אך הוא הניח את היסודות לתחום הביומימטיקה, המחבר ידע זואולוגי והנדסי בצורה שיטתית.

למרות העניין התמידי בטבע, רק בעשרות השנים האחרונות אנו מזהים התגבשות של תחום דעת מדעי העוסק בחיקוי שיטתי של הידע המצוי בטבע. ההתפתחות הטכנולוגית של העשורים האחרונים המאפשרת מידול וחקר של פתרונות הקיימים בטבע, האיצה את הגיבוש של תחום הביומימטיקה כתחום דעת מדעי. כיום מזוהה הביומימטיקה כתחום דעת בצמיחה, עם גידול מתמיד במספר הפרסומים, הפטנטים ומענקי המחקר המיוחסים לו^[23], כמו גם מכוני מחקר, עיתונים אקדמיים (*Biomimetics & Bioinspiration, Design & Nature*) ותכניות לימוד לתארים גבוהים.

ביומימטיקה כתחום דעת מזוהה כמנוע חדשנות, שעתידי לתרום כטריליון דולר לתל"ג העולמי עד שנת 2025^[11]. הידע הביולוגי שהולך ומצטבר עם השנים הוא הדלק של מנוע החדשנות הביומימטית. שיטות תכנון ביומימטיות מזוהות כשיטות תכנון המסוגלות לתת מענה לצורך ההולך וגובר בטכנולוגיות מקיימות^[25]. ההנחה הבסיסית היא שרוב האתגרים התכנוניים שאנו מתמודדים איתם כבר נפתרו בטבע, על פי רוב בצורה יעילה וחסכונית במשאבי חומר ובאנרגיה. הטבע הוא לא רק מחסן חומרים, אלא גם מקור לידע ולתובנות, ומגוון המינים העשיר מהווה כר נרחב ללמידה. הפתרונות המקיימים של הטבע הם תוצר של מעבדת התכנון (design) האבולוציונית, הם נבחנו במבחן הזמן ואינם מוגנים פטנט. בחינת הפתרונות התכנוניים של הטבע בשלבי התכנון מונעת את הצורך להמציא את הגלגל מחדש, ומספקת פתרונות חדשניים ומקיימים.



ברגלי השממית מיליוני שערות המאפשרות הצמדה למשטחים באמצעות כוחות ון דר וולס | צילום: Jim ©Jagenberg

טכנולוגיות ביומימטיות מקיימות

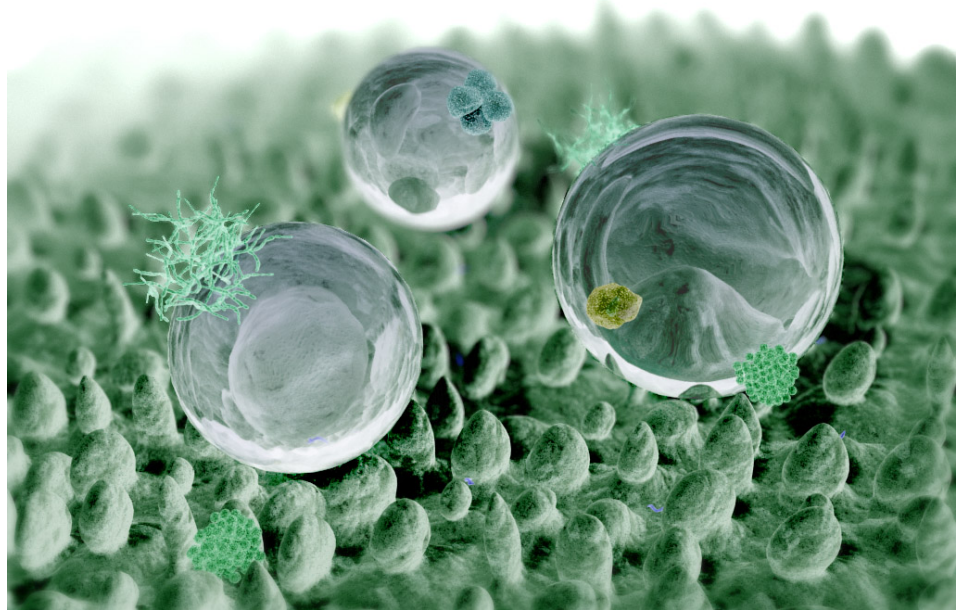
קיימות דוגמאות רבות לטכנולוגיות ביומימטיות מקיימות, ובהן טכנולוגיות העוסקות בנושאי הליכה הסביבתיים – האנרגיה, החומר והמים. להלן דוגמאות הממחישות את הפוטנציאל הטמון ביישום טכנולוגיות ביומימטיות מקיימות.

אנרגיה: טורבינת רוח ביומימטית

לווייתן גדול סנפיר (*Megaptera novaeangliae*) שממדיו (אורך ומשקל) גדולים, מסוגל לנוע ביעילות במים הודות למבנה הבליטות בסנפיריו. על סנפיר הלווייתן נמצאות בליטות המייצרות נתיב זרימה למים, מונעות היווצרות מערבולות, ומפחיתות את התנגדות המים לתנועת הלווייתן. מבנה הבליטות הועתק לכנפיים של טורבינות רוח על-ידי חברת Whalepower הקנדית^[30], מתוך הנחה שדינמיקת הזרימה באוויר ובמים דומה. בניסויים שערכה החברה נמצאו הפחתה משמעותית של הגרר והגדלת יעילות תפוקת אנרגיית הרוח של טורבינות בעלות כנפיים עם בליטות, בהשוואה לטורבינות עם כנפיים בעלות קצה מוביל חלק.

חומר: אפקט הלוטוס

עלה לוטוס נראה תמיד נקי למרות שהוא גדל בסביבה בוצית. עובדה זו כמובן מסייעת לו לבצע תהליכי פוטוסינתזה יעילים. בוטנאי גרמני בשם ברטלוייט (Barthlott) חשף את מנגנון הניקוי העצמי של עלי הלוטוס, וכינה אותו אפקט הלוטוס [22]. עלה הלוטוס מכוסה בגבשושיות ננומטריות מכוסות שעווה. מבנה הגבשושיות מקטין את שטח המגע של טיפות המים הנופלות על המשטח, ויוצר זוויות מגע של מעל 140 מעלות בין הטיפה למשטח, תכונה המאפיינת משטחים שדוחים מים בצורה קיצונית (סופר-הידרופוביים). טיפות מים הנופלות על המשטח מקבלות צורה כדורית, מתגלגלות על משטח העלה המשופע, ומסירות חלקיקי לכלוך. התוצאה: חלקיקי הכלוך מוסרים באופן קבוע על-ידי טיפות מים, שהן משאב זמין בסביבת העלה, ללא השקעת אנרגיה, תוך ניצול כוחות ההידבקות (adhesion) וכוח הכבידה. לאפקט זה נרשמו פטנטים ויישומים ביומימיטיים רבים, לרבות צבעים, זכוכיות ובדים המתנקים בעצמם.



אפקט הלוטוס | הדמיית מחשב: William Thielicke

מים: טכנולוגיה לסתימת דליפות בהשראת הטבע

דליפות מים ונפט ממערכות הובלה הן בעיה מוכרת, הכרוכה באבדן משאבים יקרים וביזיום הסביבה. מעבר לאבדן המשאבים, הליך סתימת הדליפה יקר וארוך, וכרוך בסגירת הקו ובחציבה מחוץ למוקד הדליפה. טכנולוגיה חדשנית לסתימת דליפות, המכונה טכנולוגיית הטסיות (9) [Platelet Technology™], פותחה בהשראת מנגנון הקרישה הטבעי בגוף האדם. בעת פציעה מפעיל הגוף מנגנון קרישה פנימי שתחילת פעולתו באמצעות הטסיות. ההשראה ממנגנון זה הובילה לתובנה שניתן לסגור דליפות גם מבפנים, ולא רק מבחוץ. הטכנולוגיה שפותחה מאפשרת הזרקת "טסיות מלאכותיות" למערכת הובלה לאחר שזוהתה דליפה. ה"טסיות" שהוזרקו נעות עם הזרם ונצמדות למוקד הדליפה מבפנים בגלל הפרשי הלחצים באזור הדליפה. הטכנולוגיה יושמה בהצלחה עד כה הן במערכות להובלת מים הן במערכות להובלת נפט.

תהליך התכנון הביומימיטי

תהליך התכנון הביומימיטי נבדל מתהליכי תכנון רגילים בכך שהוא יכול להיות מבוצע בשני כיוונים: מהבילוגיה להנדסה (solution based design) או מההנדסה לבילוגיה (16) [problem based design]. תהליך תכנון ביומימיטי מהבילוגיה להנדסה מתחיל בזיהוי תופעה ייחודית בטבע שחקרו ביולוגים, זואולוגים או בוטנאים. בהמשך מאתרים אתגר תכנוני, שאנלוגי לבעיה שנפתרה בטבע, ומוצעים יישומים אפשריים. כך למשל, גילוי של אפקט הלוטוס הוביל לסדרה של טכנולוגיות לניקוי עצמי.

בתהליך העברת הידע בין הבילוגיה להנדסה נעזרים לעתים רק במערכת ביולוגית אחת, ולעתים הפתרון מבוסס על חקר של מספר מערכות ביולוגיות, בעיקר כשהתכנון מורכב יותר ומבוסס על מספר פונקציות. הידע המועבר

מהבילוגיה להנדסה הוא לרוב ידע פונקציונלי הקשור לרמות חיקוי של מבנים, תהליכים ועקרונות תכנוניים ברמות סדר שונות, מרמת התא, דרך רמת האיבר, רמת האורגניזם ועד רמת המערכת האקולוגית. בהקשר זה נחקר גם הקשר הבסיסי בין מבנים לפונקציות בהתאמה לסביבה.

תהליך תכנון ביומימטי מההנדסה לבילוגיה מתחיל באתגר התכנוני. בהמשך מאתרים מערכת ביולוגית המדגימה פתרון לאתגר. הפתרון הביולוגי נחקר, ומיושם בפתרון הטכנולוגי המפותח. דוגמה לכיוון פיתוח זה היא **הרכבת המהירה ביפן** (Shinkansen), שעוצבה מחדש בתהליך ביומימטי כדי לפתור את בעיית הרעש שיצרה הרכבת, הידועה גם בשם רכבת הקליע, עוצבה באופן ביומימטי. בכל פעם שהרכבת יצאה ממנהרה לאוויר הפתוח היא יצרה גל רעש שהגיע למרחק של 80 ק"מ, פגע באיכות החיים של התושבים באזור, ולא עמד בתקני הרעש שהוגדרו. אחד מהנדסי הרכבת היה חובב ציפורים. באחת הפעמים ששהה בטבע הוא הבחין בשלדג הצולל למים כדי לתפוס דג. השלדג נכנס למים בצורה חלקה, ללא גל רעש, ועובדה זו מאפשרת לו להצליח במשימתו ולהשיג מזון. המהנדס זיהה בצלילתו של השלדג למים אתגר שאנלוגי לבעיית הרעש ברכבת. גם השלדג וגם הרכבת נדרשים לעבור מתווך המאופיין בצפיפות אחת לתווך המאופיין בצפיפות אחרת, ללא גל רעש. תובנה זו הובילה לחקר מבנה הגוף של השלדג. הפתרון זוהה במבנה המקור. קטר הרכבת תוכנן מחדש על בסיס הפרמטרים של מקור השלדג, שהיה המודל לפתרון. המקור הוא דוגמה למודל מיטבי, תוצר מעבדת התכנון הטבעית שהוא תחליף לחישובים מתמטיים מורכבים בתחום של דינמיקת הזרימה. התוצאה: בעיית הרעש ברכבת נפתרה, ומהירות הרכבת ומידת החיסכון שלה באנרגיה – גדלו [5].

בכל כיוון פיתוח ובכל רמת חיקוי חייבים להימצא שלושה רכיבים עיקריים בתהליך התכנון הביומימטי:

1. מערכת ביולוגית – איתור מערכת ביולוגית המדגימה פתרון לאתגר תכנוני אנלוגי (עבור כיוון תכנוני מהנדסה לבילוגיה) או פתרון תכנוני בעל פוטנציאל חדשנות (עבור כיוון תכנוני מבילוגיה להנדסה).
2. הפשטה – זיקוק הידע הביולוגי הנלמד למספר עקרונות פעולה, אסטרטגיות או מודלים מייצגים, שמסבירים את הפתרון הביולוגי ויכולים להיות מועברים בהמשך ליישום הנדסי. תהליך ההפשטה הוא לב תהליך הפיתוח הביומימטי, ובמהלכו נבנה הגשר בין הביולוגיה להנדסה. לאחר שלב זה יכול המתכנן להתנתק מעולם התוכן הביולוגי, לעבור לעולם התוכן הנדסי או הטכנולוגי, ובעת הצורך לחזור לעולם התוכן הביולוגי להשלמת מידע.
3. העברה ליישום הנדסי או טכנולוגי – בתום שלב ההפשטה, הידע המזוקק מועבר ומיושם במודל הנדסי או הטכנולוגי.

שלוש אלה הם פועל יוצא של תהליך תכנון אנלוגי, שידע מועבר בו מתחום המקור (מערכת ביולוגית) אל תחום היעד (מערכת הנדסית או טכנולוגית). מרבית השיטות והכלים המתודולוגיים המפותחים כיום מיועדים לתמוך בשלב של חיפוש המערכת הביולוגית ובשלב ההפשטה.

לדוגמה, שלושת הרכיבים בתהליך התכנון הביומימטי באים לידי ביטוי בתהליך הפיתוח של טכנולוגיית הניקוי העצמי המחקה את אפקט הלוטוס: הפיתוח החל עם זיהוי מנגנון הניקוי העצמי בעלה הלוטוס ועם הבנת פוטנציאל החדשנות שלו בתחום טכנולוגיית הניקוי. פוטנציאל החדשנות סיפק מוטיבציה לחקר מנגנון הניקוי הטבעי ולזיקוק העקרונות הנמצאים בבסיס המנגנון. בתהליך ההפשטה זוהה מבנה הבליטות האפידרמיות כמבנה הליבה של המנגנון, והאופן שהוא מותאם לכוחות ההידבקות (adhesion) והכבידה הובהר. בשלב ההעברה ליישום הטכנולוגי הועתק מבנה הבליטות למגוון של חומרים, לרבות זכוכיות, בדים וצבעים. כל החומרים הללו הם ביומימטיים – כלומר, פותחו כתוצאה מחיקוי הטבע – ולכולם יכולת ניקוי עצמי.

תכנון ביומימטי ככלי לתכנון מקיים

ישנם מספר סוגים של כלים לתכנון מקיים [10]:

1. כלים המציעים רעיונות תכנוניים ואסטרטגיות, ומנחים את המתכנן מה לעשות;
2. כלים המציעים סדר עדיפויות, וממקדים מטרות. הם מנחים את המתכנן היכן להשקיע את משאבי התכנון;
3. כלים המגדירים מדדים, ומסייעים למתכנן למדוד אם המטרות שהוצבו אכן הושגו.

מתכנן ביומימטי משתמש בטבע כמחולל רעיונות תכנוניים (idea generator) חדשניים ומקיימים בעיקר בשלב הראשוני של תהליך התכנון הנדסי, שלב התכנון הרעיוני. בשלב זה מורחב מגוון הפתרונות האפשריים על-ידי בחינת הפתרונות המקיימים של הטבע. מתכנן ביומימטי משמש בטבע גם כמדד ברמת-על, המגדיר מה למדוד. כך, למשל, הרעיון של מדידת תפקודים של עיר בהשוואה למערכת אקולוגית יכול לנבוע מתהליך תכנון ביומימטי, אבל למדידה עצמה דרושים כלים אחרים, כגון ניתוח מחזור חיי מוצר (LCA – Life Cycle Assessment) [27].

העובדה כי הלמידה מהטבע מיושמת בשלבים הראשוניים של תהליך התכנון הנדסי עונה על צורך מהותי בכלים להטמעת קיימות בשלבים הראשונים של תהליך התכנון. לשלב התכנון הרעיוני השפעה מכרעת על

התכנון הסופי [28], אך בשלבים אלה חסר מידע מפורט לגבי הרכב החומר וצריכת האנרגיה, הנדרשים על פי רוב לניהול תהליכי תכנון מקיים [27]. בשלב התכנון הרעיוני יש לבסס את התכנון יותר על אסטרטגיות ועל עקרונות תכנוניים מקיימים, שיכולים להיגזר מהטבע. למעשה, עקרונות אלה הם כבר הידע המזוקק, לאחר הפשטה, שנגזר מהתבוננות במערכות ביולוגיות רבות ומנוסח בצורה שמאפשרת את העברתו ליישומים שונים. עקרונות תכנוניים מקיימים זהו כיחידות בסיסיות להעברה אנלוגית ביומימטית [12], ולכן הזיהוי שלהם הוא קריטי להצלחת תהליך תכנון ביומימטי מקיים [10]. עקרונות תכנוניים מקיימים יכולים להיות קשורים, למשל, לקשרים בין מבנים לפונקציות [14], והם דוגמה לעיקרון תכנוני מקיים של התאמה בין מבנה לתפקוד. כך, למשל, הקשר בין מבנה הבליטות לתפקיד הסרת הלכלוך בעלה הלוטוס, הוא דוגמה לעיקרון תכנוני מקיים של התאמת מבנה לתפקיד, כאשר הבליטות מאפשרות הסרת לכלוך ללא השקעת אנרגיה או חומר נוספים מצד העלה.

דוגמאות לכלים ביומימטיים לתכנון מקיים

כדי לתמוך בתהליכי תכנון ביומימטיים לצורך העברת של פתרונות מקיימים מן הביולוגיה להנדסה, פותחו מספר שיטות וכלים ביומימטיים לתכנון מקיים:

"מעריסה לעריסה"

דוגמה לשיטה לתכנון מקיים בהשראת הטבע הוא תכנון "מעריסה לעריסה" [19], גישה תכנונית שפיתחו הארכיטקט William McDonough והכימאי Michael Braungart, שמחקה תהליכי ייצור בטבע המאופיינים בייצור, בצריכה ובפירוק שמאפשרים לחומרים להתמחזר שוב ושוב. הגישה נותנת מענה לכשל התכנוני המוגדר כתכנון קווי "מעריסה לקבר", שמתחיל בכריית משאבים ומסתיים במטמנה.

מקורות ההשראה לגישה התכנונית החליפית, "מעריסה לעריסה", הם מערכות טבעיות המאופיינות בזרימת משאבים מעגלית, בהתפרקות החומר ובחזרתו לטבע. מושג הפסולת הקיים בתעשייה, מוחלף על פי גישה זו במזון. בטבע, פסולת של אורגניזם אחד היא משאב חיוני ונדרש לאורגניזם אחר. כך, למשל, אם נתבונן בפריחת הדובדבן, נוהה אלפי פרחים שלכאורה עשויים להיתפס כ"בזבז", אך למעשה פרחים אלה אינם פסולת – הם מתפרקים בסוף חייהם, מזינים מיקרואורגניזמים, חרקים וצמחים, ומעשירים את האדמה. הביומסה של הנמלים בעולם גדולה פי ארבעה מכל הביומסה של המין האנושי, אך התפקוד שלהן מעשיר את הקרקע ומטייב אותה, מאביק צמחים, מפיץ זרעים ועוד. אם כן, הגישה התכנונית "מעריסה לעריסה" מכוונת לתכנון מערכות תעשייתיות וטכנולוגיות בעלות חילוף חומרים ביולוגי או טכנולוגי, כך שבסוף חיי המערכת יחזור החומר להזין מערכות אחרות, כמו בטבע.

בבסיס גישת "מעריסה לעריסה" השואבת את מקורות השראתה מן הטבע, עומדת גישת ה-Eco-Effectiveness, שאינה מסתפקת במזעור נזקים לסביבה ובהפחתת הזרימה מעריסה לקבר, אלא חותרת לתכנון "מעריסה לעריסה" שמאפשר למשאבים לשמור על איכותם. גישת Eco-Effectiveness אינה רואה בתעשייה גורם מזיק, אלא מחפשת את הדרכים להפוך אותה למועילה כפי שתהליכי הייצור בטבע מועילים. על פי גישה זו, התעשייה יכולה להיות כל כך בטוחה, יעילה ומעשירה, שלא נצטרך להרחיק ממנה את הפעילות האנושית.



כנפי הפרפר (Morpho) מכוסות במיקרוסקופים, המחזירים אורכי גל שונים ומאפשרים הפקת צבע באמצעות מבנה ולא באמצעות פיגמנטים. צבעים פיזיקליים אלה היו בסיס למספר פיתוחים ביומימיטיים, לרבות מסך הסכנוני באנרגיה

"עקרונות החיים"

דוגמה נוספת לכלי ביומימיטי המבוסס על עקרונות תכנוניים מקיימים בטבע הוא "עקרונות החיים". "עקרונות החיים" הם השם שניתן לאסטרטגיות קיימות בטבע שחוזרות בקרב אורגניזמים שונים ובקני מידה שונים, ומייצגות את פתרונות הטבע להישרדות ולהמשך קיום תחת מגבלות החיים. מספר מאמצים נעשו עד כה לזיהוי עקרונות אלה [4, 18, 31], אך הליבה מרוכזת ב"עקרונות החיים" של המכון האמריקאי Biomimicry 3.8 Institute [5], שפותחו והועמקו במהלך השנים. הגרסה האחרונה של העקרונות הללו מוצגת באיור 1.



"עקרונות החיים" כוללים שש אסטרטגיות מרכזיות ועשרים עקרונות תכנוניים, שחוזרים בטבע במערכות ביולוגיות שונות כדי להבטיח את המשך שרידותן. עקרונות אלה מבטאים את עקרונות הקיימות בטבע. כך, למשל, אסטרטגיה מרכזית שזוהתה היא "יעילות בשימוש במשאבים" (Be resource efficient). אורגניזמים ששורדים מדגימים שימוש יעיל במשאבים, תוך ניצול הזדמנויות ויצירת פסולת מזערית. עקרונות תכנוניים למימוש אסטרטגיה זו הם: הימנעות מתהליכים עתירי אנרגיה (Use low energy process); תכנון רב-תפקודי (Multifunctional design) – מבנה אחד המספק מספר פונקציות; התאמת מבנה לתפקיד (Fit form to function) – המבנה מספק את הפונקציה הנדרשת; מחזור חומרים (Recycle all materials) – שימוש חוזר במוצרים, כך ש: פסולת = מזון.

אסטרטגיה מרכזית אחרת שזוהתה היא "התאמה ותגובה מקומית" (Be locally attuned and responsive). אורגניזמים ששורדים הם אורגניזמים המגיבים לסביבתם. עקרונות תכנוניים למימוש אסטרטגיה זו הם מינוף תהליכים מחזוריים (Leverage cyclic processes) – ניצול תופעות מחזוריות לשרידות, כגון התאמת מחזור חיים של צמחים למחזור החיים של מאביקים; שימוש במשאבים מקומיים של חומר ואנרגיה (Use readily available materials and energy) – למשל איתור מקורות מזון וחומרי בנייה בסביבה המקומית; שימוש במעגלי משוב (Use feedback loops) – תגובה לשינויים בסביבה, כמו שינוי צבע פרווה בתגובה לעונות השנה; טיפוח יחסי שיתוף (Cultivate cooperative relationships) – למשל סימביוזות.

השימוש ב"עקרונות החיים" ככלי תכנוני בא לידי ביטוי בהטמעת האסטרטגיות והעקרונות התכנוניים שזוהו כ"עקרונות החיים" עוד בשלב התכנון הרעיוני. אפשרות נוספת היא להשתמש ב"עקרונות החיים" ככלי לשיפור מוצרים קיימים, כך שהשיפורים המוצעים מבוססים על "עקרונות החיים" ועל יישומם. ההנחה הבסיסית היא שיישום של כמה שיותר "עקרונות חיים" במוצר המתוכנן יגדיל את רמת הקיימות של המוצר.

"עקרונות החיים" מספקים טווח רחב של אסטרטגיות ועקרונות קיימות, אך חלק מהם כלליים והיישום שלהם בהנדסה אינו תמיד ברור. נוסף על כך, לא ברור כיצד זהו עקרונות אלה, ואיך ניתן להמשיך בחיפוש ובאיתור של עקרונות נוספים. אין עדויות לגבי השלמות שלהם כמכלול עקרונות הקיימות בטבע. מתכנן יכול להשתמש בבסיס הידע המצטבר, אך לא יכול להשתמש ב"עקרונות החיים" כמסגרת לאיתור עקרונות נוספים. דרושה מסגרת שתוכל להוביל חיפוש של אסטרטגיות קיימות נוספות בטבע ולנסח אותן בצורה ישימה למתכננים. כלי האידיאליות נותן מענה לחסר זה.

עקרונות האידיאליות בטבע

כלי חדש לתכנון ביומימטי מקיים הוא כלי האידיאליות. את הכלי פיתחה כותבת המאמר, והוא מאפשר זיהוי עקרונות קיימות בטבע והעברתם להנדסה. המושג "אידיאליות" מרמז על מצב דמיוני שקיים רק כרעיון, אך יש לשאוף אליו. "אידיאליות" בהקשר תכנוני הוגדרה ב-TRIZ (תאוריה לפתרון בעיות בצורה המצאתית-שיטתית המבוססת על חקר של מאות אלפי פטנטים ומערכות טכנולוגיות) ^[1] כיחס איכותי בין סך הפונקציות המועילות של מערכת לפונקציות המזיקות שלה. פונקציות מועילות הן התועלת שהמערכת מספקת, ופונקציות מזיקות הן העלויות הלא-רצויות הקשורות לתפעול המערכת, כמו עלות של משאבים, רעש, אשפה, זיהום ועוד. לפי "חוק האידיאליות" ב-TRIZ המוצג ב**איור 2**, כל מערכת טכנולוגית הופכת לאידיאלית יותר עם הזמן ובמהלך התפתחותה, כך שהיא מספקת תועלת רבה יותר בפחות עלויות. התוצר האידיאלי הסופי הוא מצב היפותטי: כל התועלת שנובעת מהמערכת מסופקת בעלות לאפס ^[1].

איור 2. הגדרת האידיאליות על פי TRIZ

$$\infty < \frac{\text{סך הפונקציות המועילות}}{\text{סך הפונקציות המזיקות}} = \frac{\text{תועלת}}{\text{עלויות}} = \text{אידיאליות}$$

איור 2
הגדרת האידיאליות על פי TRIZ

בהינתן מגבלת משאבים, אסטרטגיה רלוונטית לקיימות (המשך קיום) היא "להשיג יותר בפחות", כלומר להשיג יותר תועלת בפחות משאבים. הקשר בין אידיאליות לקיימות ברור. קיימות יכולה להיות מושגת במערכות אידיאליות המספקות יותר תועלת בפחות משאבים. הרעיון של מזעור השפעות שליליות והגעה למרב ההשפעות החיוביות כבר נקשר בספרות לקיימות ^[7,17], ואף שימש בסיס לפיתוח של קווים מנחים מקיימים בפיתוח מוצר ^[8,21]. כותבת המאמר פיתחה במסגרת עבודת הדוקטורט שלה את רעיון האידיאליות והקשר שלו לקיימות לכלי לפיתוח ביומימטי מקיים ^[15].

גם מערכות ביולוגיות החשופות לתחרות על משאבים מדגימות אסטרטגיות אידיאליות כדי להתקיים. בעוד שלא ברור כיצד לבצע חיפוש של "עקרונות חיים", חיפוש של אסטרטגיות אידיאליות מונחה על-ידי כלל פשוט של הגדלת התועלת ממערכת לצד הקטנת העלויות שלה.

במסגרת המחקר נותחו מספר מערכות ביולוגיות באמצעות מסגרת האידיאליות כפי שהוגדרה ב-TRIZ (**איור 2**), כאשר המערכות הביולוגיות נלקחו מבסיס הנתונים המכיל פיתוחים ביומימטיים ממקורות מידע שונים העוסקים בתחום ^[3,5,6]. המערכות שנבחרו לניתוח הן מערכות המייצגות מבנים חוזרים בטבע, שזוהו בחלק אחר של המחקר ^[14]. בחרנו להתמקד דווקא במערכות אלה, משום שהן מייצגות פתרונות מבניים גנריים בטבע, וסביר להניח שייצגו גם אסטרטגיות אידיאליות.

אסטרטגיות האידיאליות והעקרונות התכנוניים בטבע שנמצאו מוצגים ב**טבלה 1**, בלוויית דוגמה לכל עיקרון תכנוני. ניתן לראות שנמצאו יותר אסטרטגיות ועקרונות תכנוניים להקטנת עלויות לעומת כאלה להגדלת התועלת. אסטרטגיות האידיאליות חופפות חלקית ל"עקרונות החיים" ומעשירות אותם, כאשר אסטרטגיות האידיאליות מנוסחות בצורה יישומית יותר. כך, למשל, עיקרון החיים של "שימוש במשאבי חומר ואנרגיה זמינים" אינו מספק את המידע היכן נמצאים משאבים אלה. מאידך גיסא, עקרון האידיאליות המקביל העוסק ב"שימוש במפלים (gradients) ובאפקטים פיזיקליים, כימיים וגיאומטריים כמקורות אנרגיה" מספק את התשובה היכן ניתן למצוא את המשאבים. דוגמה נוספת אפשר לראות בעקרון החיים "שימוש במעגלי משוב", שהוא עיקרון כללי ואינו מפרט היכן ניתן לאתר מעגלי משוב כאלה. עקרון האידיאליות המקביל "סנכרון פרמטרים של המערכת" מציע להשתמש במעגלי המשוב על-ידי סנכרון פרמטרים של המערכת עם פרמטרים בסביבה. למשל, פרחים ואף עלים מסוימים משנים את מיקומם (פרמטר של הצמח) ביחס למיקום השמש (פרמטר של הסביבה), תופעה המכונה נהייה לשמש (heliotropism), כדי להגביר את שעות החשיפה לאור השמש.

טבלה 1. עקרונות האינדאליות בטבע

דוגמה	עיקרון תכנוני	אסטרטגיה כללית	הגדלה / התועלת
מערכת שורשים מספקת גם אחיזה בקרקע וגם הובלה	תכנון רב תפקודי - הגדלת מספר הפונקציות המשויכות למבנה אחד	יותר פונקציות	הגדלה / התועלת
נאדיות הריאה מגדילות את שטח הפנים ומאפשרות חילוף חמצן רב יותר	הגברת האינטראקציה עם הסביבה להשגת אפקט חזק יותר באמצעות הגדלת שטח פנים: א. חזרה על אלמנטים ב. הגדלת גודל המערכת	אפקט חזק יותר - העצמה של ערכי הפונקציה	
מבנים של קו זרם (streamline) בטבע המפחיתים מערבולות	הפחתת הפרעות חיצוניות כמו חיכוך, עומסים, מערבולות ועוד.	מניעת הפרעות וזיקים למערכת	הקטנה עלויות
הפחתת שטח הפנים של עלים במדבר לצמצום אידיוי המים	הפחתת שטח הפנים כאשר הוא מזיק או מסוכן		
ניצול אנרגיית הרוח להפצת זרעים ניצול מפל טמפרטורה להסעת חום	ניצול מפלים פיזיקליים, כימיים וגאומטריים ומקורות אנרגיה זמינים אחרים	אסטרטגיה אפורטוניסטית - ניצול משאבים זמינים להיסכון בעלויות	
המבנה הגלילי של השורשים מאפשר להם חזירה טובה יותר לאדמה	התאמת מבנה לתפקיד - הפונקציה מסופקת על ידי המבנה		
דגים ממשפחת הטפודונטיים (Tetraodontidae) משתמשים במים מהסביבה (supersystem) לניפוח גופם	העברת פונקציות למערכת העל (supersystem) / ניצול משאבים מהסביבה		
טוכרון מועד הביטה של זרעים עם רמות הלחות בסביבה	טוכרון פרמטרים של המערכת למניעת בזבז	מניעת אשפה / בזבז - ניצול יעיל יותר של המשאבים	
מערכות הובלת מים בעצים - מבנה רשתי המספק הובלה טובה	שיפור הולכת האנרגיה במערכת כדי להפחית התנגדות לזרימה		
הפחתת חומר - גלילים חלולים, מבני כוורת	יותר על חלקים מיותרים		

טבלה 1
עקרונות האינדאליות בטבע

"עקרונות החיים" מבוססים על גישה הוליסטית הרואה באורגניזם חלק מהמערכת האקולוגית. אסטרטגיות האינדאליות מבוססות על גישה טכנית ותפקודית. כך למשל, עקרון החיים "טיפוח יחסי שיתוף" מבוסס על גישת רווח לכול (win-win), בעוד שהעיקרון האינדאלי המקביל "העברה של פונקציות למערכת-העל" מדגיש בעיקר את התועלת למערכת, אף על פי שגם אורגניזמים במערכת-העל עשויים להיתרם משיתוף זה.

דרך עדשת האינדאליות איתרנו עקרון קיימות חדש בטבע: "העצמת יחסי הגומלין עם הסביבה להשגת אפקט פונקציה חזק יותר באמצעות הגדלת שטח הפנים של המבנה". הגדלת שטח הפנים נגזרת לרוב מפני שטח לא חלקים המאופיינים בבליטות, או מהגדלת המבנה עצמו. בניגוד ל"עקרונות החיים" ו"לעקרונות האינדאליות", העוסקים בהגדלת מספר הפונקציות המשויכות למבנה אחד (תכנון רב-תפקודי), העיקרון החדש עוסק בהעצמת האפקט של פונקציה נתונה. למשל, אם מבנה מסוים מסיר לכלוך, כיצד יסיר יותר לכלוך? בדוגמת אפקט הלוטוס מעצימות הבליטות הרבות שנמצאות על האפידרמיס של העלה את יכולת הניקוי העצמי שלו.

ניתוחי האינדאליות שבוצעו במחקר לא כללו ניתוח תהליכים, והתמקדו יותר במבנים. מסיבה זו, אסטרטגיות קיימות תהליכיות, הקשורות למשל לתהליכים של צמיחה וייצור בטבע, נעדרות בשלב זה, אך ניתן להשלימן במחקר עתידי.

בדומה ל"עקרונות החיים", השימוש בעקרונות האינדאליות ככלי תכנוני בא לידי ביטוי בהטמעת האסטרטגיות והעקרונות התכנוניים שזוהו עוד בשלב התכנון הרעיוני, או שימוש בהם כבסיס להצעת שינויים תכנוניים. ההנחה הבסיסית היא שיישום של כמה שיותר עקרונות אינדאליות במוצר המתוכנן יגדיל את רמת האינדאליות, ומכאן גם את רמת הקיימות של המוצר. החוזה העיקרי של כלי האינדאליות הוא העובדה שהוא מסגרת פשוטה וברורה למתכננים, שמאפשרת המשך חיפוש של עקרונות קיימות בטבע וניסוחם באופן יישומי למתכננים.

מקיים או לא מקיים – זו השאלה

לצד הכלים הביומימטיים שפותחו לתמוך בהעברת פתרונות מקיימים מן הביולוגיה להנדסה, נותרת השאלה, האם פתרונות ביומימטיים הם בהכרח מקיימים? מתכנן ביומימטי יכול להעתיק פתרון תכנוני מסוים מן הטבע אך לבצע אותו בדרך לא מקיימת, תוך שימוש בחומרים מזיקים ובתהליכי ייצור מזוהמים. ברור כי שיטת תכנון ביומימטית אינה ערובה לקיימות, וכי יש לבצע תהליך מודע של העתקת הפתרונות המקיימים של הטבע תוך בחינת המערכת הביולוגית כחלק מסביבתה. לאחרונה פורסם מחקר של ניתוח שיטתי להערכת הקיימות של מוצר ביומימטי מורכב בעזרת מתודולוגיית ה-PROSA להערכת קיימות [2]. מוצר ביומימטי שפותח בשנות ה-60 ללא כל דרישה לתכנון מקיים, הושווה למספר מוצרים לא-ביומימטיים שפותחו לאחרונה כמוצרים מקיימים. נמצא שהמוצר הביומימטי שפותח לפני יותר מ-50 שנה זהה ברמת הקיימות שלו למוצרים המודרניים שפותחו תחת דרישות קיימות מחמירות. זוהי עדות ראשונה ומעודדת לקשר בין ביומימטיקה וקיימות. עם זאת, ברור שהכלים הביומימטיים שפותחו הם בעלי מספר מגבלות. ראשית, ההיבט החברתי של הקיימות אינו בא לידי ביטוי בפתרונות הביומימטיים שנתמכים על-ידי כלים אלה. כך למשל, כלים אלו מתייחסים בעיקר להיבטים פיזיים-סביבתיים של קיימות, כמו יעילות בשימוש במשאבים, בעוד שאינם מתייחסים להיבטים החברתיים של הקיימות. כמו כן, יש לשקול שילוב כלים אלה עם כלים אחרים, כגון ה-LCA, כדי לתת מענה רחב יותר לדרישות התכנון המקיים.

סיכום

תפיסתה עולם הביומימטית, הרואה בטבע מקור לידע, תורגמה הלכה למעשה לשיטות תכנון ולכלים ביומימטיים המאפשרים שיתוף פעולה בין מהנדסים וביולוגים במטרה לתת מענה לצורך ההולך וגובר בטכנולוגיות מקיימות.

כלי תכנון ביומימטיים שהוזכרו במאמר וכלים אחרים יכולים לסייע בחקר של מערכות ביולוגיות כדי להבין את התופעה הנחקרת בצורה שתעניק למהנדסים תובנות מדויקות יותר בשלב התכנון הרעיוני.

אתגרים סביבתיים מרכזיים בתחומי האנרגיה, החומר והמים כבר נפתרו בטבע, וחלק מהם אף הוביל לפיתוח טכנולוגיות מקיימות. זיהוי ותרגום של עקרונות הקיימות בטבע לכלים תכנוניים, כמו גישת "מעריסה לעריסה", "עקרונות החיים" ו"עקרונות האידיאליות בטבע" מאפשרים להטמיע את הקיימות עוד בשלבים הראשוניים של תהליכי התכנון מחד גיסא, ולהציע שיפורים למוצרים קיימים מאידך גיסא.

איינשטיין טען כי "לא נוכל לפתור בעיות באמצעות צורת החשיבה ששימשה אותנו כשיצרנו אותן". הטבע מזמן לנו צורת חשיבה אחרת לגבי האופן שאנו מתכננים, מייצרים, צורכים ומסיימים את חיי המוצרים שנמצאים בשימושנו, והוא מקור לאופטימיות לגבי היכולות של האנושות לתת מענה לצורך הבהול בפיתוח מקיים.

תודות

תודה לפרופ' יורם רייך על ההנחיה בפיתוח כלי האידיאליות שהוצג במאמר, ולגב' מאיה גבעון על סיוע בתרגום תרשים "עקרונות החיים" מאנגלית לעברית.

מקורות

1. Altshuller G. 1999. The innovation algorithm, TRIZ, systematic innovation and technical creativity. Worcester, MA: Technical Innovation Center, Inc.
2. Antony F, Griefßhammer R, Speck T, and Speck O. 2014. Sustainability assessment of a lightweight biomimetic ceiling structure. *Bioinspiration & Biomimetics*, **9**(1): 016013-016028.
3. AskNature – [Biomimetic database](#). Viewd 24 Jan 2013.
4. Benyus JM. 1997. Biomimicry: Innovation inspired by nature. New York: Quill.

5. [Biomimicry 3.8 Institute](#). Viewed 24 Jan 2013.
6. [BiomimicryNews – Biomimicry News & Research](#). Viewed 4 Jan 2013.
7. Charter M and Tischner U. 2001. Sustainable solutions: Developing products and services for the future. Sheffield: Greenleaf publishing.
8. Chen JL and Yang YC. 2011. Eco-innovation by integrating biomimetic with TRIZ ideality and evolution rules. In: Hesselbach J and Herrmann C (Eds). Globalized solutions for sustainability in manufacturing. Berlin: Springer.
9. Evans K and Boynton J. 2006. Sealing and locating leaks using Platelet Technology®. Brinker Technology Ltd.
10. Faludi J. 2012. Biomimicry place in green design. *Zygote Quarterly* **3**: 120-129.
11. Fermanian Business & Economic Institute, P. L. N. U. 2010. Global biomimicry efforts: An economic game changer.
12. Goel AK, Bras B, Helms M, et al. 2011. Design patterns and cross-domain analogies in biologically inspired sustainable design. Proceeding AAAI Spring Symposium on AI and Sustainable Design; Mar 2011; Stanfords University, Palo Alto CA: AAAI.
13. Hawken P, Lovins AB, and Lovins LH. 2010. Natural capitalism: The next industrial revolution. London: Earthscan.
14. Helfman CY, Reich Y, and Greenberg S. 2014. Biomimetics: Structure-function patterns approach. *Journal of Mechanical Design* **136**(11): 111108.
15. Helfman CY, Reich Y, and Greenberg S. 2014. Sustainability strategies in nature. Design & nature. Opatja: WIT Press.
16. Helms M, Vattam SS, and Goel AK. 2009. Biologically inspired design: Process and products. *Design Studies* **30**(5): 606-622.
17. Hill B. 2005. Goal setting through contradiction analysis in the bionics-oriented construction process. *Creativity and Innovation Management* **14**(1): 59-65.
18. Hoeller N, Salustri F, DeLuca D, et al. 2007. Patterns from nature. Proceedings of the SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics; 3-6 Jun 2007; Springfield MA, USA.
19. McDonough W and Braungart M. 2002. Cradle to cradle: Remaking the way we make things. New-York: North Point Press.
20. Reap J. 2009. Holistic biomimicry: A biologically inspired approach to environmentally benign engineering (PhD dissertation). Georgia Institute of Technology.
21. Russo D, Regazzoni D, and Montecchi T. 2011. Eco-design with TRIZ laws of evolution. *Procedia Engineering* **9**: 311-322.
22. Solga A, Cerman Z, Striffler BF, et al. 2007. The dream of staying clean: Lotus and biomimetic surfaces. *Bioinspiration & Biomimetics* **2**(4): 126-134.
23. [The Da Vinci Index & Biomimicry](#). Viewed 15 May 2014.
24. The Millennium Project – Global Future Studies & Research. [Global Challenges for Humanity](#). Viewed 15 May 2014.
25. The Natural Edge Project – [TNEP International Keynote Speaker Tours](#). Viewed 15

May 2014.

26. The Natural Step – [Accelerating the Transition to a Thriving World](#). Viewed 15 May 2014.
27. Tukker A. 2000. Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review* **20**(4): 435-456.
28. Ullman DG. 2009. The mechanical design process, 4th ed. New York: McGraw–Hill.
29. Vincent JF, Bogatyreva OA, Bogatyrev NR, et al. 2006. Biomimetics: Its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface* **3**(9): 471-482.
30. Whake Power – [Builing the Energy Future on a Millions Years of Field Tests](#). Viewed 15 May 2014.
31. Zari MP. 2007. Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability. School of architecture, Victoria University, NZ.