

## 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 השלדג, 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 תוכנו 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 האי־אליות 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 ומצלים 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. במונח 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 מזהה 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 מזהה 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 מזהות 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

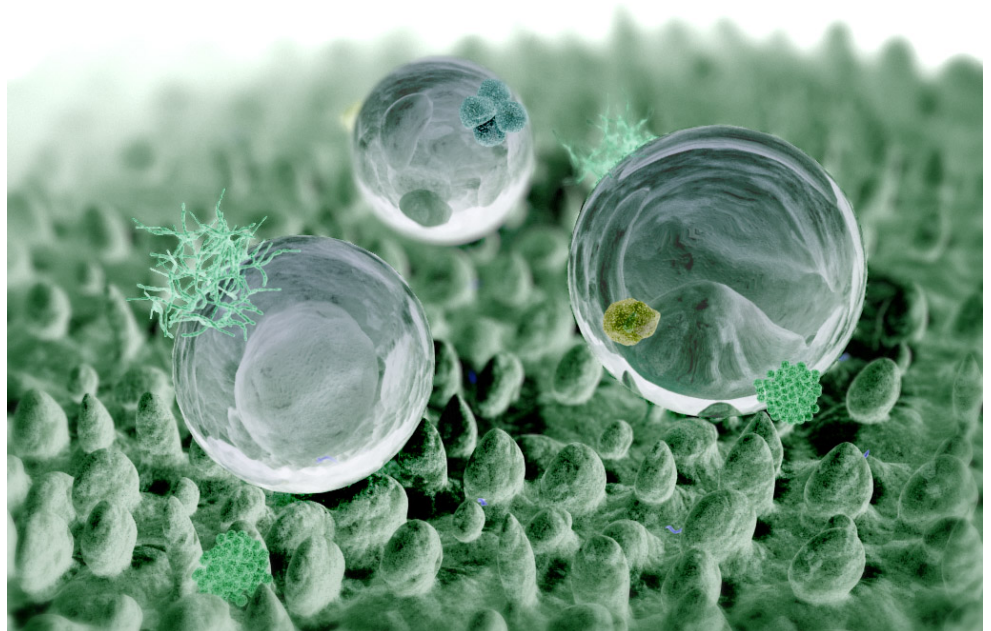
קיימות דוגמאות רבות לטכנולוגיות ביומימטיות מקיימות, ובהן טכנולוגיות העוסקות בנושאי הליבה הסביבתיים – האנרגיה, החומר והמים. להלן דוגמאות הממחישות את הפוטנציאל הטמון ביישום טכנולוגיות ביומימטיות מקיימות.

## אנרגיה: טורבינת רוח ביומימטית

לווייתן גדול סנפיר (*Megaptera novaehangliae*) 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<sup>[30]</sup>, 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 ברטלוויט (Barthlott) חשף את מנגנון הניקוי העצמי של עלי הלוטוס, וכינה אותו אפקט הלוטוס<sup>[22]</sup>. 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 הלכלוך 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 ביומימטיים 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 וביזיונם 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 לתבונה שניתן לסגור דליפות גם מבפנים, ולא רק מבחוץ. הטכנולוגיה שפותחה מאפשרת הזרקת "טסיות מלאכותיות" למערכת ההובלה 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 הביומימטי

תהליך התכנון הביומימטי נבדל מתהליכי תכנון רגילים בכך שהוא יכול להיות מבוצע בשני כיוונים: מהביומטי להנדסה (solution based design) או מההנדסה לביומטי (16) [problem based design]. תהליך תכנון ביומימטי מהביומטי 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 הביומטי 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 מהביומטי 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 לביומטי מתחיל באתגר התכנוני. בהמשך מאתרים מערכת ביולוגית המדגימה פתרון לאתגר. הפתרון הביומטי 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 ממנהיגי 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 מתוך המאופייין בצפיפות אחת לתוך המאופייין בצפיפות אחרת, ללא גל רעש. תבונה 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 מימטי, 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 לביומטי) או פתרון תכנוני בעל פוטנציאל חדשנות (עבור כיוון תכנוני מביומטי להנדסה).
2. הפשטה – זיקוק הידע הביומטי הנלמד למספר עקרונות פעולה, אסטרטגיות או מודלים מייצגים, שמסבירים את הפתרון הביומטי ויכולים להיות מועברים בהמשך ליישום הנדסי. תהליך ההפשטה הוא לב תהליך הפיתוח הביומימטי, ובמהלכו נבנה הגשר בין הביומטי להנדסה. לאחר שלב זה יכול המתכנן להתנתק מעולם התוכן הביומטי, לעבור לעולם התוכן הנדסי או הטכנולוגי, ובעת הצורך לחזור לעולם התוכן הביומטי 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 המחקר את אפקט הלוטוס: הפיתוח החל עם זיהוי מנגנון הניקוי העצמי בעלה הלוטוס ועם הבנת פוטנציאל החדשנות שלו בתחום טכנולוגיות 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 ביומימיטיים – כלומר, פותחו כתוצאה מחיקוי הטבע – ולכולם יכולת ניקוי עצמי.

## תכנון ביומימיטי ככלי לתכנון מקיים

ישנם מספר סוגים של כלים לתכנון מקיים [10]:

1. כלים המציעים רעיונות תכנוניים ואסטרטגיות, ומנחים את המתכנן מה לעשות;
2. כלים המציבים 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 ביומימיטי משתמש בטבע כמחולל רעיונות תכנוניים (idea generator) חדשניים ומקיימים בעיקר בשלב הראשוני של תהליך התכנון ההנדסי, שלב התכנון הרעיוני. בשלב זה מורחב מגוון הפתרונות האפשריים על-ידי בחינת הפתרונות המקיימים של הטבע. מתכנן ביומימיטי משמש בטבע גם כמדד ברמת-על, המגדיר מה למדוד. כך, למשל, הרעיון של מדידת תפקודים של עיר בהשוואה למערכת אקולוגית יכול לנבוע מתהליך תכנון ביומימיטי, אבל למדידה עצמה דרושים כלים אחרים, כגון ניתוח מחזור חיי מוצר [27, 10] (LCA – Life Cycle Assessment).

העובדה כי הלמידה מהטבע מיושמת בשלבים הראשוניים של תהליך התכנון ההנדסי עונה על צורך מהותי בכלים להטמעת קיימות בשלבים הראשוניים 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 ביומימיטית [12], ולכן הזיהוי שלהם הוא קריטי להצלחת תהליך תכנון ביומימיטי 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 הלכלוך ללא השקעת אנרגיה או חומר נוספים מצד העלה.

## דוגמאות לכלים ביומימיטיים לתכנון מקיים

כדי לתמוך בתהליכי תכנון ביומימיטיים לצורך העברת של פתרונות מקיימים מן הביולוגיה להנדסה, פותחו מספר שיטות וכלים ביומימיטיים 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 להתמחרר 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, נזהה 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" מכוננת לתכנון מערכות תעשייתיות וטכנולוגיות בעלות חילוף חומרים ביולוגי או טכנולוגי, כך שבסוף חיי המערכת יחזור החומר להזין מערכות אחרות, כמו בטבע.

בבסיס גישה "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.



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

## "עקרונות החיים"

דוגמה נוספת לכלי ביומימטי 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<sup>[4]</sup>.<sup>[31,18]</sup> אך הליבה מרוכזת ב"עקרונות החיים" של המכון האמריקאי<sup>[5]</sup> Biomimicry 3.8 Institute, שפותחו והועמקו במהלך השנים. הגרסה האחרונה של העקרונות הללו מוצגת ב**איור 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 "עילות 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 לסיביבתם. 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 פעולה (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 נתון מענה לחסר זה.



## עקרונות האיֶדאליות בטבע

כלי חדש לתכנון ביומימטי מקיים הוא כלי האיֶדאליות. את הכלי פיתחה כותבת המאמר, והוא מאפשר זיהוי עקרונות קיימות בטבע והעברתם להנדסה. המושג "איֶדאליות" מרמז על מצב דמיוני שקיים רק כרעיון, אך יש לשאוף אליו. "איֶדאליות" בהקשר תכנוני הוגדרה ב-TRIZ (תאוריה לפתרון בעיות בצורה המצאתית-שיטתית המבוססת על חקר של מאות אלפי פטנטים ומערכות טכנולוגיות) <sup>[1]</sup> 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 האיֶדאליות" ב-TRIZ המוצג ב**איור 2**, כל מערכת טכנולוגית הופכת לאיֶדאלית יותר עם הזמן ובמהלך התפתחותה, כך שהיא מספקת תועלת רבה יותר בפחות עלויות. התוצר האיֶדאלי הסופי הוא מצב היפותטי: כל התועלת שנובעת מהמערכת מסופקת בעלות ששואפת לאפס <sup>[1]</sup>.

### איור 2. הגדרת האיֶדאליות על פי TRIZ

$$\infty \leftarrow \frac{\text{סך הפונקציות המועילות}}{\text{סך הפונקציות המזיקות}} = \frac{\text{תועלת}}{\text{עלויות}} = \text{איֶדאליות}$$

### איור 2

### הגדרת האיֶדאליות על פי TRIZ

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

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

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

אסטרטגיות האיֶדאליות 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 האיֶדאליות חופפות חלקית ל"עקרונות החיים" ומעשירות אותם, כאשר אסטרטגיות האיֶדאליות 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 האיֶדאליות 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 האיֶדאליות 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 האידיאליות בטבע

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

## טבלה 1

### עקרונות האידיאליות בטבע

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

דרך עדשת האידיאליות 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" ול"עקרונות האידיאליות", העוסקים בהגדלת מספר הפונקציות המשיכות 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 האידיאליות 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 האיךאליות 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 איךאליות במוצר המתוכנן יגדיל את רמת האיךאליות, ומכאן גם את רמת הקיימות של המוצר. החוזק העיקרי של כלי האיךאליות 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 מזהמים. 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 הביומימטי, הרואה בטבע מקור לידע, תורגמה הלכה למעשה לשיטות תכנון ולכלים ביומימטיים המאפשרים שיתוף פעולה בין מהנדסים וביולוגים במטרה לתת מענה לצורך הולך 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 האיךאליות 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 האיךאליות 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, Grießhammer 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; Stanfors 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, 4<sup>th</sup> 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.