

# ללמוד מן הטבע לרווחת האדם - מבטו של מהנדס



## מאת פרופסור־מחקר אמריטוס דניאל ויס

**ה** לימוד מן הטבע נעשה במישורים רבים, למשל שימוש ישיר בתופעות או בתהליכים, כגון פיתוח תרופות אנטיביוטיות בדרך של ניסוי, או טיוב צמחים ובעלי חיים בשיטות דמויות אבולוציה לפיתוח תכונות רצויות, כגון מתן כמות גדולה יותר של חלב או התפתחות פיזית מהירה יותר של בהמות. שלב מתקדם יותר של לימוד מהטבע נקרא ביומימטיקה – העתקת תופעות ומנגנונים מהטבע. אם ניקח את דוגמת הפרווה, הביומימטיקה מתבטאת בפיתוח פרוות מלאכותיות בעלות תכונות של שמירת חום הדומות לתכונות אלה – שמירת חום ומניעת זליגת חום – של הפרוות הטבעיות. השלב השלישי הוא הבנת הפתרון הטבעי לצורך מסוים ומציאת פתרון טוב יותר באמצעות ניתוח וזיקוק העקרונות של הצורך. אתן דוגמה מן התחום שלי – אווירונאוטיקה. העופות המסוגלים לעוף תוך כדי הפעלת כוחות הנעה לא מצאו דרך להפריד בין שני צרכים – שמירת הגוף באוויר מחד ויצירת כוחות הנעה שיביאו להתקדמות מאידך. לעומת זאת האדם הפריד את המנועים מהאלמנט המייצר עילוי – הכנפיים – ובכך אפשר שיפור של שניהם. במאמר זה אנסה לסקור תחום רחב של נושאים, בהדגשת העבודות של קבוצתי. בגלל הרקע שלי עיקר העבודות הללו התייחסו לתנועתם של בעלי

**צ**מחים ובעלי חיים התפתחו במשך מאות מיליוני שנה במעבדה המשוכללת והאכזרית ביותר – הסביבה האקולוגית של כדור הארץ. הם התפתחו בתנאים משתנים, בדרך כלל התפתחות הדרגתית המאפשרת הסתגלות ואופטימיזציה להשרדות ולשגשוג בתנאים הסביבתיים, ומדי זמן חל שינוי קיצוני פתאומי (כגון פגיעת אסטרואיד ענק) או מהיר במובן גאולוגי (סדרת התפרצויות געשיות גדולות). כל זה בסביבה תחרותית, שנוצרו בה סולמות אקולוגיים של השגת מזון והצורך בתזונה והתחמקות מסכנות. מתוך תהליך ההתפתחות האבולוציוני התפתחו חלקי גוף, צורות גוף ואופני התנהגות שהאדם למד להכירם, למד מהם ולמד לממש את התובנות שהשיג על סמך אלה. לימוד זה מן הטבע מלווה את האדם מימיו הראשונים – הוא הבין שחיות מתגברות על הקור באמצעות פרווה, ומכאן, הבין שכדאי אפוא ללבוש את פרוות החיה, שאמנם ניצודה לצורכי תזונה, אך מהר מאוד ניצודה במיוחד להשגת הפרווה; לאחר מכן כאשר צעד וטיפס בתנאים קשים על פני הקרקע וראה את הציפורים עושות דרכן בקלות, הוא התקנא בהן, וזו הייתה ראשיתה של ההנדסה האווירונאוטית... כיום אנו לומדים מן הטבע בתחומים רבים. אסקור אותם בקצרה ולאחר מכן אביא כמה דוגמאות ואתאר אותן בפירוט.



איור 1: זרע סמרה - הכנף האסימטרית גורמת לסחרור ומייצרת עילוי, המאט את נפילת הזרעון ומאפשר את הפצתו.

להנעת כלי טיס. העיקרון של יצירת כוח באמצעות סיבוב מהיר של להב נמצא בטבע בזרעי הסמרה (איור 1), שבשל מבנם האסימטרי הם מתחילים להסתחרר עם ניתוקם מהעץ. סחרור זה יוצר כוח עילוי, המאט את נפילתם ומאפשר לרוח זמן רב יותר כדי לשאתם הרחק מהעץ ההורה.

פעולתם של מנוע הסילון ושל הרקטה מושתתת על עיקרון אחר: הם משתמשים ישירות בחוק הפעולה והתגובה בכך שהם פולטים מסת אוויר (או מים) לכיוון אחד, דבר המספק תנע לגוף בכיוון הפוך. הראשונים שהשתמשו בשיטה זו (במים) הם חסרי חוליות ימיים, כגון התמנון והדינונונים, שברגיל מתקדמים באמצעות תנועות שחייה, אך בעת מצוקה הם פולטים סילון מים (או דיו) ובעזרתו מאיצים את התקדמותם. זו תנועה חד־פעמית או מחזורית, המדמה פעולת רקטה, אך סלפות (Salpa) מדמות ממש מנוע סילוני, באמצעות שאיפת מים מצד אחד, הוספת אנרגייה באמצעות לחיצה ופליטת המים במהירות גדולה יותר בצדן השני.

כאשר מתבוננים בעופות גדולים, בולט לעין שאברות קצה הכנף נפרדות ומאפשרות זרימת אוויר ביניהן. תופעה זו נותחה לפני כמה עשורים, והוכח שהיא מביאה ליעילות גדולה יותר של הכנפיים בעת דאייה ללא נפנוף – לזה דומה מצבם של כנפי מטוסים. ההסבר לכך הוא כדלקמן: העילוי על הכנף נוצר בזכות מבנה

חיים. מכיוון שבעלי חיים ימיים קיימים זמן רב יותר, התפתחו במים שיטות הנעה והתנהגות רבות, ואנו עסקנו בחלקן הקטן. משם עברנו לאוויר, ובתחום זה אתחיל כאן:

**כ**פי שנאמר קודם לכן, אחת הדוגמאות הבולטות ביותר ללימוד מן הטבע היא התעופה. כבר במיתולוגיה היוונית ובאגדות עמים ברחבי העולם סופר על ניסיונות לאפשר לאדם "לעוף כמו הציפורים". זו דוגמה מצוינת משני אספקטים שונים: הראשון הוא כמובן השלב הבסיסי של הבנה שתעופה של גופים כבדים מן האוויר היא אפשרית, והשני הוא הניסיון המתבקש לחקות את הטבע באמצעות הוספת כנפיים מלאכותיות לזרועות – שנחל כישלון חרוץ, ולמעשה עיכב את התפתחות התעופה במאות שנים, אם לא באלפי שנים. הוסבר שדדלוס מן המיתולוגיה היוונית נכשל בניסיונו לעוף כי השעווה שהדביקה את הכנפיים נמסה והוא איבד את הכנפיים, אך הסיבה האמתית היא גודל הכנפיים: כדי ליצור כוח עילוי מספיק להרים אדם צריך כנפיים גדולות מאוד בגלל כובד משקלו של האדם, אך יכולתם של שרירים וגידים אינה מספקת כדי לנפנף כנפיים בגודל כזה. בחישובים שנעשו בשנות השישים של המאה הקודמת הראו [1] שבגלל מגבלות אלה העופות הגדולים ביותר הם בעלי משקל של עד 15 ק"ג (אלבטרוס), והם זקוקים לעזרת הרוח להמראה. רק כאשר הבינו שניתן להפריד, כפי שנאמר קודם, את החלק המייצר עילוי (כנף) שאינו מנפנף מהחלק שייצור דחף (מנוע), יכלו האחים רייט ואחרים לעוף "כמעט כמו הציפורים".

אגב, הפתרון הראשון ליצירת דחף היה המדחף (פרופלור), שאינו קיים בצורה כזו בטבע היות שאין אפשרות בטבע להעביר חמצן ותזונה דרך מערכת ציר ומסב, כפי שדרוש למדחף. הסבר זה נכון למערכות מקרוסקופיות, אך בגדלים מולקולריים נמצאו "מכונות" שבהן קיים עקרון הסיבוב של ציר בתוך מסב. גם כאן יש דוגמאות טבעיות שהן מקבילות לאמצעי

לחיסכון באנרגייה. מבנה יהלום זה נוצל לאחרונה לתכנון חוות של טחנות רוח, ובזכותו עולה הנצילות הכוללת של החווה.

כל הדוגמאות שהזכרו עד עתה התייחסו לגופים גדולים יחסית (מידה אופיינית היא כמה סנטימטרים ומעלה ומהירות של כמה עשרות סנטימטרים לשנייה ועד למטוסי ג'מבו ומהירויות על-קוליות). בתנאים אלה כוחות האינרצייה גדולים בהרבה מכוחות החיכוך עקב צמיגות. כאשר מקטינים את גודל הגוף או מאטים את מהירות התנועה, משנים את היחס הזה, וכל תכונות הזרימה משתנות. כאשר מדובר לדוגמה בחרקים שאורכם הוא מילימטר או שניים ומהירותם כמה סנטימטרים לשנייה, כגון thrips (ראה איור 3א), מתברר שכוחות הצמיגות גדולים כל כך, שמבחינתם האוויר הוא בעל תכונות דומות לדבש. חרקים אלה "ניצלו" עובדה זו, והתפתחו אצלם כנפיים, שאינן רציפות אלא דמויות מסרק. הכנפיים הללו מצליחות לייצר כוחות כמעט שווים (יותר מ-90%) לכוחות בכנפיים זהות בגודלן ובמהירות הנפנוף, תוך חיסכון בעשרות אחוזים במשקל הכנף. תופעה דומה מנוצלת על ידי זרעי הסביון כדי לרחף זמן רב ולהשיג פיזור גדול. אנו ניצלנו תכונה זו כדי לחסוך במשקל של משטחי עילוי כאלה ברחפנים קטנים (אורך כללי חמישה מילימטרים – איור 3ב) שאינם זקוקים לאנרגייה לריחוף ממושך, המנוצלים כדי לאפשר לרחפנים לרחף זמן רב באוויר ולבצע משימות כמו למשל גילוי מזהמים באוויר: מורחים חומר מסוים על הרחפן, והחומר משנה צבעו כשהוא בא במגע עם מזהם. המשך הפיתוח הביא לשיפורים המאפשרים גם לגופים גדולים (קצת) יותר להשתמש בכנפי מסרק ולייצר מעופפים דמויי חרקים. הפרויקט הזה, הנמשך כמה שנים, היה ההשראה לבול שהפיק דואר ישראל לציון 100 שנה לייסוד הטכניון (איור 4).

**מ** כאן נעבור לנושאים הקשורים בים. בשנות השבעים התגלתה תופעה מדאיגה ביותר של דילול אוכלוסיות דולפינים. עם השתכללות שיטות הדיג הממוכנות בעזרת רשתות, במיוחד

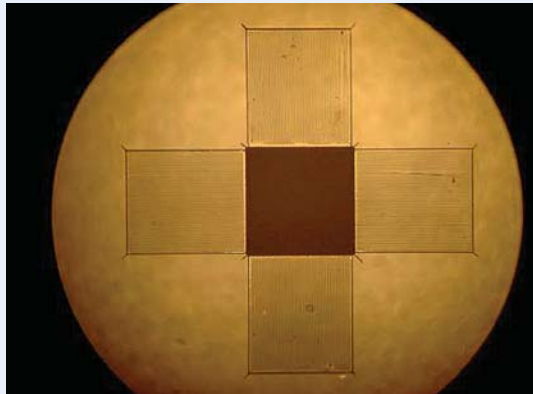


איור 2: מיסת מבנה של מטוסים לחיסכון באנרגייה

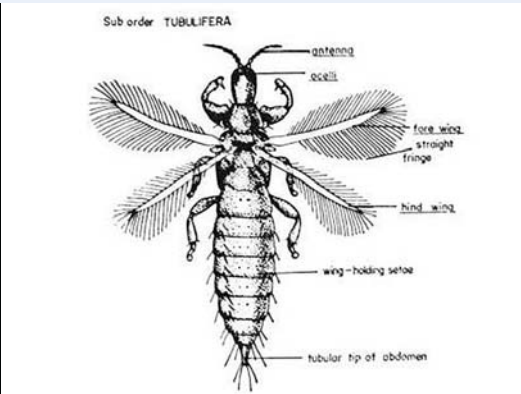
◀ חתך הכנף המביא לסירקולציה סביב החתך ולהפרש לחצים בין הצד התחתון של הכנף לצדה העליון. אך בקצה הכנף, הרחוק מהכתף, מתאפשר לאוויר לקצר את הדרך ולהגיע ישירות מסביב לקצה, ובכך לקלקל את העילוי באזור, ששטחו שווה בערך לרוחב הכנף בריבוע. כאשר העוף מפצל את אברותיו, כל אחת מהן היא כנף קטנה, וסך השטח ה"מקולקל" קטן. במטוסי נוסעים, שבהם הנצילות היא ערך עליון, אימצו את הפתרון הזה, וכיום במרבית המטוסים מתקינים גדרות קצה כנף, בעלות צורות שונות.

נסיים את הדיון, המקוצר מאוד, בתעופה של כלים גדולים בדוגמה אחרת שאותה אנו מנסים לחקות בימים אלה. מדובר בתעופת להקות עופות. הכול ודאי מכירים את תצורת ה-V שיוצרות להקות של עופות נודדים במעופן. כבר לפני כמאה שנה הובן שיש לתצורה זו יתרון אנרגטי, וחישובים הראו שניתן לחסוך עד כ-15% מהאנרגייה הדרושה לתעופה של כל פרט במהירות נתונה, והדבר נכון גם לטייסי טייסת אם יטוסו במבנה כזה. היישום אינו פשוט, היות שהמרחקים שעל פרטי המבנה לשמור מהווים סכנה בטיחותית. למרות זאת נעשו ניסויים (איור 2) שבהם הושגו רווחים אנרגטיים כאלה.

**ת** ופעם דומה מתגלה כאשר מתבוננים בעיון בלהקות דגים נודדות, המסתדרות במבנים דמויי יהלום כדי להיעזר בעקבות של שכניהם



איור 33: ננו-גלשן מטיטניום המרחף באוויר אטמוספרי בשל מבנה המסרק של הכנף - כאשר רוחב מוט מסרק הוא 5 מיקרון



איור 34: חרק בעל כנפיים דמויי מסרק - אורכו כ-1.5 מ"מ

מכאן נולדה שיטה, שהיא עדיין בשימוש היום, של הכנסת סירה מהירה למים לפני סגירת הרשתות (שהיקפיהן מגיעים למאות מטרים) שתבריח במהירות את הדולפינים כדי שיקפצו מעל הרשת. פתרון זה נראה מספק במשך זמן רב, אך בדיקות לאורך זמן של זני הדולפינים שנפגעו הראו שהאוכלוסיות אינן מתאוששות, והסיבה המשוערת היא אבדן גורים בעת המנוסה מהרשתות. צריך לזכור שגורי דולפינים יונקים במשך כמה חודשים והם נצמדים אל האם לתקופה של עד שלוש שנים.

לאור זה התחלנו במחקר שמטרתו להבין איך גורי דולפינים מצליחים לעקוב אחר הלהקה שלהם בעת נדידה רגילה, שגם היא נעשית במהירויות שקשה לגור לעמוד בהן לאורך זמן. מתברר שכאשר גור נמצא בקרבת אמו, במיקום ספציפי, האם יכולה לגרור אותו על ידי סחיפתו בניצול אפקטים הידרודינמיים, ואשר ליילוד – הסחיפה יכולה לספק לו עד 90% מן האנרגייה הדרושה לתנועה במהירות הנדידה האופיינית לזן זה. אפקט הסחיפה קטן מאוד עם התרחקות הגור מן האם, וכך תזוזה של כמה עשרות סנטימטרים של מרכז הכובד של הגור מן הנקודה האופטימלית יכולה להקטין את אפקט הסחיפה הזה עד לרבע מערכו המרבי. כמובן, כאשר מבריחים את האם אל הרשת ומכריחים אותה לקפוץ מעליה, הסחיפה פוסקת, כי צפיפות האוויר, ◀

דיג דגי הטונה באוקיינוסים, התרבו מקרי ההרג של דולפינים. דולפינים, כמו שאר היונקים הימיים, הם נושמי אוויר, וכשהם נתפסים ברשתות הדייגים הם אינם מצליחים לנשום וטובעים. היו הערכות שקצב הקטילה יביא להיעלמות זנים מסוימים של דולפינים בתוך שנים ספורות, והוחל בחיפוש אחר דרכים להציל אותם מרשתות הדייגים. באותו זמן שהיתי בסן דיאגו, ואחד ממחקריי דן בתופעה שהתגלתה למראה שחייה מהירה של דולפינים – ממהירות מסוימת הם משנים את אופן התנועה ומתחילים בסדרת קפיצות בליסטיות מהירות. מחקרנו הראה שהקפיצות הן שיטה לחיסכון באנרגייה, שמאפשרת לדולפינים לנוע מהר יותר ולמשך זמן רב יותר בעת בריחה. ניתוח התופעה העלה שהשהייה באוויר בעת הקפיצה חוסכת את הכוח הדרוש לנוע במים, והחל ממהירות מסוימת האנרגייה הדרושה לזינוק אל מחוץ למים פחותה מן האנרגייה הדרושה לשחייה לאותו מרחק. התנהגות זו התגלתה לאחר מכן גם בפינגווינים, שגם הם נושמי אוויר, ולכן כמו הדולפינים גם הם חייבים להישאר קרוב לפני השטח. תופעת הקפיצות מתרחשת בעת שחייה מהירה, כי תצרוכת החמצן עולה עם המהירות בחזקה שלישית. התנהגות זו אינה קיימת אצל דגים כי הם בעת סכנה יכולים לצלול לעומק.

בשל שיקולים של הידרודינמיקה. במחקרנו התברר שהם שחיינים יעילים בזכות המבנה ה"קופסתי", המאפשר להם לשלוט בהתנגדות וביציבות תנועתם באמצעות השלת מערבולות מפינות הגוף הקופסתי. נזכור שכדי לשחות מרבית הדגים חייבים לנענע את גופם ואת סנפיר הזנב, ובכך להגדיל את התנגדות המים להתקדמותם. בדולפינים למשל יחס ההתנגדות בעת שחייה מהירה, שבה חלקי הגוף השונים נעים רוחבית, ביחס להתנגדות בעת גלישה כשהגוף ישר, הוא פי ארבעה, ובכרישים עד פי שלושה. הגדלת התנגדות זו נחסכת לקופסונונים בזכות המבנה שלהם, ומכאן יעילותם. לאחר פרסום התוצאות המפתיעות הללו בנתה חברת מרצדס את הדגם "קונספט" של מכונית ביומימטית הנראית כמו קופסונון (איור 6).

בשל היחס הגבוה שבין התנגדות המים בעת שחייה להתנגדות בגלישה ישרה, מינים רבים של דגים אינם שוחים במהירות קבועה אלא במחזוריות המתבטאת בהפעלת תאוצה למהירות גבוהה, וגלישה חזרה למהירות הראשונית. מתברר ממחקרנו שבדרך זו הדגים חוסכים עשרות אחוזים באנרגייה הדרושה לנוע למרחק מסוים.

גם ציפורים שונות משתמשות בתכונה זו, וניתן לראות דרורים למשל המתקדמים בנסיקות (קפיצות) ובגלישות ולא במהירות קבועה. במחקר שנעשה



איור 5: דג הקופסונון



איור 4: בול הטכניון, המדגים רחפן בעל עיקרון דומה לזה שבאיור 3

◀ הקטנה פי 800 מזו של המים, מקטינה את הכוח ביחס זה. לכן הגור, אם בכלל הצליח לקפוץ בתיאום מדויק, עלול לאבד את התמיכה של אמו, ועד שהאם תאושש מן הטראומה של ההברחה, הגור עלול לאבד קשר אתה – ולמות. לאור תוצאותיו של מחקר זה שונו תהליכי ההברחה באופן שהגור יוכל לעקוב אחרי האם, ועתה מקווים שאוכלוסיות הדולפינים יתאוששו.

המחקר הזה הביא לידיע שיש בו תרומה גם לתחום התעופה. אמנם הכוח המועבר בין גופים קטן בשל רמת צפיפות האוויר הנמוכה, אך הוא גדל עם מהירות הטיסה בריבוע. מהירות הטיסה במטוסי סילון היא בערך פי 25-30 ממהירות תנועת הדולפינים, ולכן הכוחות המועברים שוב משמעותיים במובן זה שהם באותו סדר גודל כמו הכוחות הרגילים. כך, ניתן לתלות מטענים חיצוניים על כנפי מטוסים בתצורה שתמזער את ההתנגדות הנוספת.

מחקר אחר שהביא לתוצאות מפתיעות ולשימוש לא צפוי היה על שחיית קופסונונים (boxfish) (איור 5). משפחות דגים אלה הן בעלות צורות לא צפויות



הדוגמאות הידועות ביותר של תוכן ביומימטי היא ההסוואה. זיקית משנה צבעה לפי הרקע, חרקים שונים יוצרים דוגמאות מטעות על כנפיהם, וחיות מתחפשות לצמחים ומידמות להם בצבע ובצורה.

**T** וגמה מודרנית יותר היא הוולקרו - Velcro - משטח שעליו מבנה סבך של סיבים, הנתפסים בסיבים של מבנה שני. השימושים שלו רבים, למשל בנעליים במקום שרוכים. את רעיון הוולקרו הגה אזרח קנדי שטייל עם כלבו ארוך השער. בשעת הטיול נצמדו לשער של הכלב זרעי צמחים בעלי משטח מחוספס, והיה קשה להפרידם. מציפו הזרעים הללו צמח רעיון הוולקרו.

הארכיטקטורה אף היא ניזונה מדוגמאות טבעיות. למשל: שיטות האורור של קני חיות וחרקים, והבולטים שבהם הטרימיטים, שלמרות גודלם - פחות מסנטימטר - בונים מגדלים וחופרים מחילות שגודלם מטרים אחדים, מהוות בסיס לתכנון מערכות אורור טבעיות של מבנים. עדיין אין מבנים שמחקים ממש מגדלי טרימיטים, אך לפחות בניין אחד - מרכז איסטגייט בזימבבואה - מתיימר להיות מבוסס על עקרונות אלה.

מבנה פשוט וידוע הרבה יותר הוא חלת הדבש, המשמשת דוגמה למבנים קלים, המורכבים משכבות חמר דקות בצורת משושה, המסוגלות לשאת עומסים כבדים ומשמשות לחיסכון במשקל המבנה.

**A** בל התרומה הגדולה ביותר של הטבע לאנושות, המתגלה בקצב גדל והולך, היא התרופות. למן גילוי הפניצילין וחומרים אנטיביוטיים אחרים היה הטבע המקור וההשראה לתרופות. באמצעים של חישובים ברמה מולקולרית אנו מחקים כיום את הטבע בתרופות.

לסיכום, הלימוד מן ה"מעבדה" של הטבע הוא רק בתחילת הדרך, ונכונו לחוקרים, המוכנים להתבונן בתופעות ובהתנהגויות השונות המתגלות בכל עבר ולנתחן, הפתעות והישגים עצומים. ■



איור 6: מכונית הקונספט של מר צדס מבוססת על צורת הקופסונון.

במעבדתנו לאחרונה נצפו חסכוניות אנרגטיים של עד 20% בטיסה, במהירויות עבר-קוליות מחזוריות כאלה. אמנם אין לצפות שמטוסי נוסעים יטוסו כך כי טיסה כזאת תסב לנוסעים אי-נוחות רבה מדי, אך בכלים לא מאוישים הדבר אפשרי.

המחקרים של קבוצתי התרכזו בעיקר בתנועתיות של בעלי חיים וצמחים כדי ללמוד על שכלולים הניתנים לניצול טכנולוגי, או להביא להקטנת השפעותינו המזיקות על הסביבה. לכן מרבית המאמר הזה דן בסוג זה של תופעות.

יש לזכור שניתן ללמוד מן הטבע בתחומים שונים לגמרי מאלה, ואכן יש הצלחות מרובות. אחת



איור 7: מבנה קל וחזק מבוסס על מילוי בצורת חלת דבש