



החיפוש אחר מקורות אנרגיה חדשים, שיחליפו את אלה המתכלים והולכים, נחשב לאחד האתגרים הקריטיים של תקופתנו ■ עשרות חוקרים באוניברסיטת תל-אביב שוקדים עתה על פיתוחים מדעיים העשויים לשנות את חיינו כבר בעתיד הנראה לעין ■ המרכז לאנרגיה מתחדשת הוקם במטרה לתת תנופה למחקר הנרחב המתקיים בקמפוס בתחום חיוני זה



# מחלייפים כוח

ירוק עולה < עמ' 1 | לעולם בעקבות השמש < עמ' 3 | ננו־אנטנות: הסוד בדברים הזעירים < עמ' 4 | עושים רוח < עמ' 7 | עניין של יציבות < עמ' 8 | אוגרים כוח < עמ' 11 | נא להכיר: אנרגיה כחולה < עמ' 13 | חיסכון מן הצומח < עמ' 15 | אצה להן הדרך < עמ' 16 | ניהול מושכל הוא המפתח < עמ' 18



# מחליפים כוח

עורכת: אורנה כהן

עריכה: מיכל אלכסנדר

כתיבה: מיכל אלכסנדר, דני וסה, רפאל שלהב

עיצוב: מיכל סמוקובץ, המשרד לעיצוב גרפי

צילום: יונתן בלום

עיצוב השער: סטודיו חדד

איור השער: shutterstock

עריכה לשונית: ספי שפר

דפוס: הפיל הורוד מימד

# ירוק עולה



פרופ' יוסי רוזנוקס: "לאנרגיה המתחדשת חשיבות קיומית ואסטרטגית מהמעלה הראשונה"

**המרכז לאנרגיה מתחדשת באוניברסיטת תל-אביב הוקם בשנה החולפת במטרה להעניק תנופה למחקר הנרחב המתקיים ברחבי הקמפוס בתחום חיוני זה ■ המחקר באנרגיה מתחדשת – החותר למציאת מקורות אנרגיה מתחדשים ויעילים, שיחליפו את המקורות הפוסיליים (נפט, גז טבעי ופחם) המתכלים – נחשב לאחד האתגרים הקריטיים של האנושות בעידן המודרני**

מעבדות מתקדמות בתחומים הקריטיים של אגירת אנרגיה, אנרגיית השמש ואנרגיה המופקת מביומסה (חומר אורגני שאינו מאובן), ומקים בימים אלה מרכז מחקר ארצי בנושא הרכב החשמלי, בשיתוף עם אוניברסיטת בראיילן. מוקד נוסף של פעילות הוא פיתוח הקשר עם הקהילה הרחב, במטרה להעלות את המודעות הציבורית לתחום האנרגיה המתחדשת, ולשתף את הקהילה בפריצות הדרך המתרחשות באוניברסיטה, והעשויות לשנות את חיינו כבר בעתיד הנראה לעין.

מעל 300 חוקרים, פועלות היום בשבע פקולטות שונות – מדעים מדויקים, הנדסה, מדעי החיים, ניהול, משפטים, מדעי החברה ומדעי הרוח, וכן בבית הספר ללימודי הסביבה ע"ש פורטר. המחקרים, שחלקם מובילים בתחומיהם בארץ ובעולם, כוללים היבטים רבים ומגוונים של הנושא המורכב: אגירת אנרגיה בתאי דלק ובסוללות זערורות, אנרגיה סולארית-תרמית, טורבינות רוח, ייצור חשמל באמצעות פוטוסינתזה, פיתוח רשת חשמל חכמה ומשולבת למדינת ישראל, ננו-אנטנות והפקת דלק ביולוגי מאצות (אנא ראו תיאור מורחב של מחקרים אלה בדפים הבאים).

במשך השנים האחרונות בלבד הניבה פעילות ענפה זו מאות פטנטים וכאלף פרסומים בכתבי עת בינלאומיים. בנוסף לחשיבותן המדעית, יש לטכנולוגיות החדשניות המפותחות במעבדות האוניברסיטה גם פוטנציאל כלכלי עצום: ערכן בשוק העולמי המתרחב של אנרגיה מתחדשת עשוי להגיע למיליארדי דולרים כבר בשנים הקרובות.

במרכז לאנרגיה מתחדשת מוצאים חוקרים מרחבי הקמפוס גג משותף ואפשרויות רבות לשיתופי פעולה בינתחומיים פוריים עם עמיתים ממחלקות ופקולטות אחרות. המרכז עורך כנסים מדעיים בנושאים הנוגעים, מעניק תמיכה למחקרים נבחרים, ועושה מאמץ למשוך לשורות האוניברסיטה את תלמידי המחקר המצטיינים בישראל. בנוסף הוא פועל להקמת

"העולם זקוק כיום בדחיפות למקורות אנרגיה ירוקים וידידותיים לסביבה, ששימו קץ לזיהום ולהרס המתמשך של כדור הארץ", אומר פרופ' רוזנוקס, ראש המרכז לאנרגיה מתחדשת. "במדינת ישראל יש לאנרגיה המתחדשת גם חשיבות קיומית ואסטרטגית מהמעלה הראשונה. טכנולוגיה מתקדמת, שתאפשר לנו להפיק אנרגיה ממקורות נקיים, תעניק למדינה עצמאות בתחום האנרגיה, ותשחרר אותה מהתלות הפוליטית והכלכלית בנפט ובגז של שכנינו – בעתות שלום, ובמיוחד בימי עימות." מקור האנרגיה המתחדש העיקרי העומד לרשותה של ארצנו החמה ותכולת השמים הוא השמש. מתברר כי כישוי של 8% בלבד משטחו של הנגב במערכות פוטו-וולטאיות – הממירות את קרינת השמש לחשמל – יכול לספק את כל צריכת החשמל של מדינת ישראל! עם זאת, שני מכשולים טכנולוגיים מונעים כיום את יישומה של תוכנית מסוג זה: הצורך לאגור את אנרגיית השמש לשעות הלילה ולימים מעוננים, וכן שינויים מרחיקי לכת שיידרשו ברשת החשמל הארצית.

חוקרים באוניברסיטת תל-אביב התגייסו למשימה המדעית והלאומית הזאת, והם מתמודדים עם שני האתגרים, לצד סוגיות רבות נוספות בתחום האנרגיה המתחדשת. ואכן, אוניברסיטת תל-אביב פעילה מאוד במחקר באנרגיה מתחדשת: 55 קבוצות מחקר, המונות

**פרופ' יוסי רוזנוקס** הוא ראש המרכז לאנרגיה מתחדשת וראש המחלקה לאלקטרוניקה פיזיקלית בפקולטה להנדסה באוניברסיטת תל-אביב. הוא מומחה עולמי באפיון ננומטרי של מוליכים למחצה ובתחום של תאי שמש פוטו-וולטאיים, ועומד בראש קבוצת מחקר המונה כעשרה מדענים. עד היום הנחה פרופ' רוזנוקס יותר מ-45 סטודנטים לתארים גבוהים, ערך מספר ספרים ופרסם למעלה מ-120 מאמרים בכתבי עת בינלאומיים. כמו כן הוא שימש כנשיא האגודה הישראלית לואקום (2003-2006) וכראש מרכז וולפסון לחומרים ומרכז גורדון לאנרגיה (2005-2008).



פרופ' אברהם קריבוס. שוקד על שיפורה של טכנולוגיית מגדל השמש

אנרגיית השמש היא אנרגיה מתחדשת המצויה בשפע, אך היא תהפוך למשאב שימושי וכלכלי רק אם נצליח לשפר את יעילות ההמרה שלה לחשמל, מסביר פרופ' קריבוס, העוסק בפיתוח רכיבים לתחנות כוח סולאריות כבר למעלה מ־20 שנה. "יעילות המרת האנרגיה האצורה בדלקים המתכלים שבתחנות הכוח המסורתיות הינה בין 40% ל־60%, בעוד שתחנות הכוח הסולאריות הקיימות כיום מצליחות להניב חשמל ביעילות המרה שאינה עולה על 20%. זו הסיבה העיקרית לכך שעד כה הוקמו רק מעט תחנות כאלה ברחבי העולם". לדבריו, כל תחנות הכוח התרמיות הקיימות היום – בין אם הן מבוססות על דלק או על אנרגיית השמש – פועלות בצורה דומה:

האנרגיה מושקעת בחימום קיטור או אוויר לטמפרטורה של מאות מעלות צלסיוס. האוויר או הקיטור המחומם שואף להתפשט במרחב, וכוח ההתפשטות מנוצל לדחיפת כפות הטורבינה. הטורבינה בתורה מסובבת מחולל, שממיר אנרגיה מכאנית לאנרגיה חשמלית. מדד ניצולת האנרגיה בתהליך, הקרוי "יעילות ההמרה", הוא היחס בין כמות האנרגיה שהושקעה במקור לבין



האנרגיה שהפכה בסוף התהליך לחשמל. יעילות ההמרה גדלה ככל שהקיטור/אוויר מחומם לטמפרטורה גבוהה יותר, ולכן האתגר העומד בפני מפתחי תחנות הכוח הסולאריות הוא להגיע לטמפרטורות זהות לאלה המתאפשרות על ידי שריפת פחם, נפט וגז – באמצעות אנרגיית השמש בלבד. ואכן, דבר זה מתאפשר כבר היום בעזרת טכנולוגיה חדשנית המכונה "מגדל השמש".

### טכנולוגיית מגדל השמש

טכנולוגיית מגדל השמש מבוססת על מראות, שמרכזות את קרינת השמש למוקד הממוקם בראש מגדל ומשמש



מגדל שמש של חברת AORA Solar באלמריה, ספרד. מקור: AORA Solar

לחימום מים או אוויר. יעילות השיטה עשויה להשתוות לזו של תחנות מבוססות דלקים, והיא עולה על כל תחנות הכוח הסולאריות שהוקמו עד היום, המתבססות על חימום קיטור לטמפרטורה נמוכה יחסית.

צוות המחקר של פרופ' קריבוס שוקד על שיפורה של טכנולוגיית מגדל השמש עליידי שכלול המבנה של הרכיב הנמצא במוקד הקרינה, שתפקידו לקלוט את קרינת השמש ולחמם את האוויר. עיצוב נכון של רכיב זה ימזער את הפסדי האנרגיה ויאפשר את חימום האוויר לטמפרטורה הנדרשת. כדי לייעל את הרכיב, בוחנים החוקרים חומרים ועיצובים שונים במודל ממוחשב. עיצובים נבחרים ייבדקו לאחר מכן במעבדה. האפשרות לחמם אוויר במוקד המגדל לטמפרטורה של יותר מ-1,000 מעלות צלסיוס עשויה להניב חשמל מאור השמש ביעילות המרה של יותר מ-30%.

פיתוחים נוספים של פרופ' קריבוס וצוותו כוללים: שיטה לניצול יעיל בשעות הלילה של חום סולארי שנאגר במהלך היום; וכן טכנולוגיה המשתמשת בפירוק פסולת ממקור אורגני באמצעות חום השמש, כדי לייצר ביוזמנית חשמל ודלקים כגון גז המימן – תהליך שיעילותו מתקרבת ל-50%.

**פרופ' אברהם קריבוס** מהפקולטה להנדסה באוניברסיטת תל-אביב עמל כבר מעל 20 שנה על פיתוחם של רכיבים לתחנות כוח הפועלות באמצעות אנרגיית השמש. באמתחתו הצטברו כבר מספר פטנטים ופיתוחים, שאך ממתינים לגורמים תעשייתיים שיקדמו את המחקר לשלב היישומי. בעתיד עשויה עבודתו לשמש בסיס להקמת תחנות כוח גדולות, שיונעו באנרגיה מתחדשת שמקורה בשמש.



# לעולם בעקבות השמש

**האם נוכל בעתיד להפיק חשמל בקנה מידה ארצי באמצעות אנרגיית השמש, ביעילות גבוהה ובמחיר נמוך מאלה של תחנות הכוח הנוכחיות? פרופ' אברהם קריבוס מהפקולטה להנדסה של אוניברסיטת תל-אביב מפתח טכנולוגיות חדשניות, שימירו את האור לחשמל ואת החלום – למציאות**



# ננו־אנטנות: הסוד בדברים הזעירים

אנרגיית השמש היא אולי המקור המבטיח ביותר לאנרגיה מתחדשת ונקייה – אנרגיה שנמצאת בכל מקום, כל יום, ולא תיגמר לנו לעולם. עם זאת, טכנולוגיות קיימות להמרת אנרגיית השמש לחשמל מצליחות לנצל אחוז קטן בלבד מקרינת השמש המגיעה לכדור הארץ ■ שיטה חדשה שמפתחים היום הפרופסורים אמיר בוג, יעל חנין וקובי שויער מהפקולטה להנדסה, עשויה להגדיל את ניצול אנרגיית השמש באמצעות ננו־אנטנות – אנטנות זעירות בממדים ננומטריים

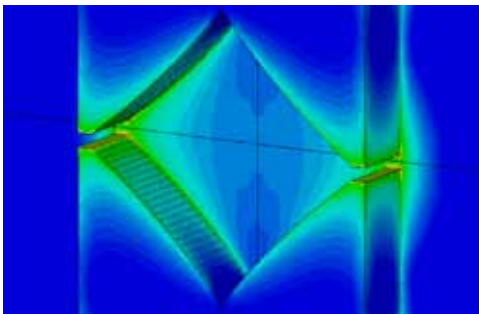
## ננו־אנטנות, ננו־צינוריות פחמן

אנרגיית השמש הנקלטת בננו־אנטנות הופכת בתחילה לזרם חילופין, ויש צורך להפוך אותה לזרם ישר, שניתן להעבירו ליעדיו ברשת החשמל. גם למטרה זו נעזרים החוקרים בננו־טכנולוגיה חדשנית: התקן מיישר זרם שמורכב מננו־צינוריות פחמן – מבני פחמן מולקולריים בצורת צינור חלול, המשלבים תכונות של מוליכות חשמלית מעולה עם קשיחות יוצאת דופן. הננו־צינוריות המחוברות לננו־אנטנה נוגעות מצדן האחד בזהב כדי לייצר הולכה חשמלית, ובצדן האחר – בטיטניום כדי לייצר התקן מיישר שישלט בכיוון הזרם. כיום מרכזים החוקרים מאמץ

התאים הסולאריים הנפוצים כיום הם תאים פוטו־וולטאיים העשויים מסיליקון. תאים אלה מנצלים רק כ־10% מהאנרגיה של קרינת השמש לטובת ייצור חשמל. קיימים אמנם סוגים אחרים של תאים סולאריים שמנצלים עד 40% מהקרינה, אך הם יקרים הרבה יותר, "מסביר פרופ' בוג. "המטרה שלנו היא לייצר אנטנה ננומטרית שתוכל, בזכות צורתה וממדיה הזעירים, לקלוט תחום רחב של אורכי גל כמו קרינת האינפרא־אדום בנוסף לקרינת האור הנראה. כך ניתן עקרונית לנצל עד 85% מקרינת השמש – יותר מפי שניים מהתאים הפוטו־וולטאיים המתקדמים ביותר הקיימים היום! מערך גדול של ננו־אנטנות, שממדיהן כחצי מיקרון על חצי מיקרון כל אחת, יוכל לנצל אנרגיה של קרינה הפוגעת בשטחים נרחבים". דגמי האנטנות שבונה הצוות מבוססים על מבנים העשויים זהב, אלומיניום, טיטניום או מתכת אחרת, שיוצרו בליטוגרפיית קרני אלקטרונים. שיטה זו, שהיא מדויקת מאוד אך יקרה יחסית, תוחלף בעתיד בשיטה זולה ממנה הדומה לדפוס.



ניכר בסוגיה "זעירה" במיוחד: מיקום הננו־צינוריות באופן מדויק במרכז של ננו־אנטנה מסוג חדש שפיתחו, ואף רשמו עליה פטנט – אנטנת ויאלדי כפולה. לאנטנה זו שני יתרונות מרכזיים: (א) היא מאוד רחבת סרט; כלומר, היא מסוגלת לקלוט קרינה בתחומי האינפרא־אדום והאור הנראה ברוזמנית; (ב) היא ניתנת לחיבור טורי במערכים גדולים, כך שהמתחים הזעירים שמתפתחים על



פילוג השדה  
החשמלי בננו־אנטנה



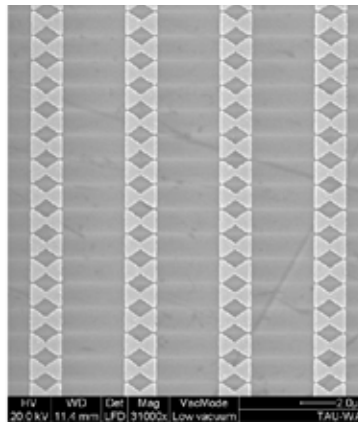
**פרופ' אמיר בוג: "היתרון של צוות המחקר שלנו הוא השילוב המוצלח של ננוטכנולוגיה, אופטיקה ותכנון אנטנות"**

**פרופ' אמיר בוג** הוא חבר סגל במחלקה לאלקטרוניקה פיזיקלית של בית הספר להנדסת חשמל באוניברסיטת תל-אביב. קבוצת המחקר של פרופ' בוג כוללת יותר מעשרה סטודנטים לתארים גבוהים ועוסקת במספר נושאים, כולל אנליזה נומרית של תופעות גלים אלקטרומגנטיים ואקוסטיים, תכנון אנטנות ורכיבים אופטיים, מיקרוסקופיה אטומית כשיטת גשש קלווין והדמיה מכ"מית. פרופ' בוג פרסם יותר מ-80 מאמרים בעיתונות המדעית, נתן יותר מ-150 הרצאות בכנסים בינלאומיים ורשם קרוב לעשרה פטנטים. בשנת 2008 הוא הועלה לדרגת עמית (Fellow) בארגון הבינלאומי של מהנדסי חשמל ואלקטרוניקה (IEEE) על תרומתו לפיתוח שיטות אנליזה המבוססות על משוואות אינטגרליות, תכנון והדמיה.

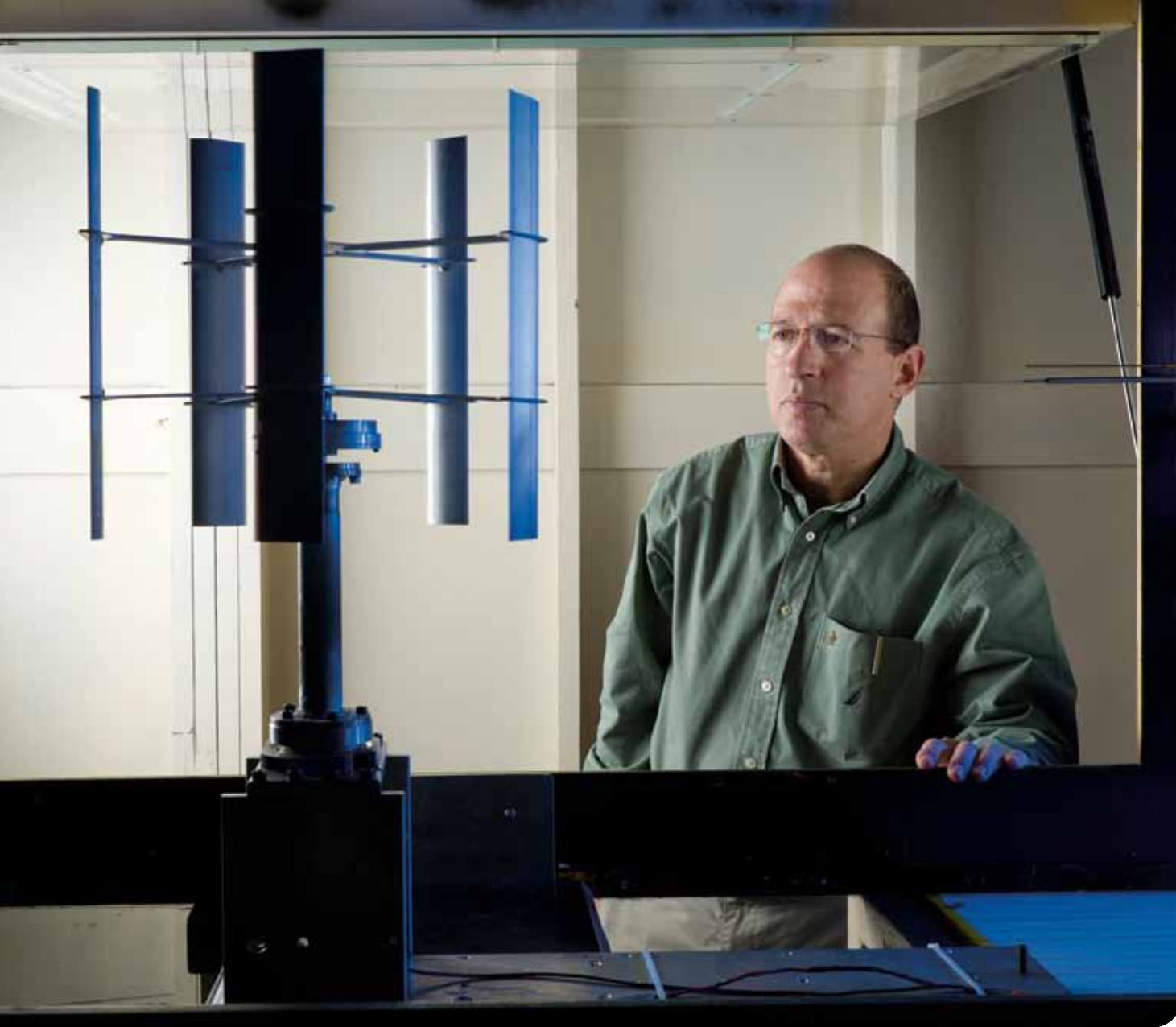
הנראה מגוון שימושים מרתקים נוספים: במערכות לראיית לילה, במערכות הדמיה וגם במערכות אבחון בתחום הביוטכנולוגיה. בנוסף, מכיוון שהננו אנטנה משנה את תכונותיה בנוכחותה של מולקולה זרה בודדת, היא עשויה לשמש גם כגלאי יעיל לחומרים זרים.

כל אנטנה מתחברים למתח כולל גבוה. בנוסף, מחפש הצוות דרכים להגביר עוד יותר את יישור המתח החשמלי שמייצרת האנטנה, על-ידי הקטנת הננו-מרווחים שדרכם עובר הזרם.

"היתרון של צוות המחקר שלנו הוא בשילוב המוצלח של ננו-טכנולוגיה, אופטיקה ותכנון אנטנות – שילוב בין הנדסה לפיזיקה", אומר פרופ' בוג. "שיתוף הפעולה הבינתחומי מאפשר לנו, מצד אחד, לגלות עקרונות מדעיים ולהוכיח שהם נכונים, ומצד שני להציע פתרונות יעילים לשימוש נרחב בעקרונות אלה. אנחנו לא מסתפקים ביצירת דגם אחד שידגים תופעה פיזיקלית מסוימת – כנהוג במחקר מדעי בסיסי, אלא מתאמצים לייעל את הדגמים ולכוון את הממצאים במעבדה ליישומים טכנולוגיים ממשיים." וכך, בנוסף לייעודן של הננו-אנטנות בתחום אנרגיית השמש, יהיו להן ככל



**מערך ננו-אנטנות המיוצר במרכז הננו של אוניברסיטת תל-אביב**



פרופ' אבי זיפרט. לרתום את אנרגיית הרוח לצורכי האדם

אשר יוצרים, בתגובה למידע מהחיישנים, ערבולי אוויר מבוקרים בקרבת הלהב, ובכך מגדילים את רמת הנצילות האנרגטית. כך, באמצעות השקעה קטנה של אנרגיה במקום הנכון ובזמן הנכון, אפשר להפחית משמעותית את גורם האקראיות של הרוח, ולשפר את הביצועים והתפוקה הכוללים של טורבינת הרוח.

בעתיד תאפשר לנו השיטה החדשנית להציב טורבינות רוח יעילות באתרים שבהם אנרגיית הרוח נחשבת היום בלתי כלכלית: במקומות שמהירות הרוח נמוכה או משתנה, באזורים שכיחונה ו/או עוצמתה אינם יציבים, ואף בערים ובקרבת יישובים. לכשיתגשם החזון הזה, יתרחבו באופן

ושקטות, שיפעלו ביעילות במהירויות רוח נמוכות בהרבה מהמקובל היום. טכנולוגיה כזאת תגביר באופן ניכר את היכולת לרתום את אנרגיית הרוח לצורכי האדם.

### לרתום את הרוח

צוות המחקר של פרופ' זיפרט במעבדת מדואו לאווירודינמיקה (Aerodynamics Laboratory) באוניברסיטת תל-אביב הוא מהמובילים בעולם בתחום הקרוי "בקרת זרימה פעילה", ועוסק בפיתוחו כבר למעלה מ-20 שנה. מדובר במערכת המשלבת חיישנים שמזהים את מצב זרימת הרוח סביב להבי הטורבינה, עם מפעילי זרימה – מתקנים זעירים

לרוח כמקור אנרגיה יש פוטנציאל גדול גם בישראל, בעיקר במקומות הגבוהים, אומר פרופ' זיפרט. "אך לפני שנוכל להציב ברחבי הארץ טורבינות רוח להפקת חשמל, עלינו לפתור כמה בעיות טכנולוגיות. ראשית, הטורבינות הקיימות היום יעילות רק בטווח מסוים של מהירות רוח. במקומות ובזמנים בהם הרוח חלשה יותר, לא ניתן להסתמך עליהן. שנית, הן רועשות, דבר המהווה מגבלה להצבתן באזורים מגורים או בקרבתם. שלישית, הן גדולות ודורשות שטח רב. במחקר שלי, בשיתוף עם פרופ' טוביה מילוא ופרופ' אבי קריבוס מבית הספר להנדסה מכנית, אנו שואפים לפתח טורבינות רוח קטנות





# עושים רוח

**הרוח היא אחד ממקורות האנרגיה הנקיים ביותר שנותן לנו הטבע, ומדענים ברחבי העולם מחפשים דרכים יעילות לרתום אותה לשימוש האדם. הקושי העיקרי הוא שהרוח, עוצמתה וכיוונה הם אקראיים ואינם ניתנים לחיזוי מדויק או לשליטה ■ במעבדתו של פרופ' אבי זיפרט בבית הספר להנדסה מכנית שבפקולטה להנדסה מפתחים טכנולוגיות חדשניות, שיאפשרו ניצול יעיל של אנרגיית הרוח גם במהירויות רוח נמוכות, בתנאים ובמקומות שונים**

ואת זיהום האוויר הנובע ממנה. עבודת הפיתוח דורשת שילוב של מחקר בסיסי המתבצע במעבדה עם מחקר יישומי – ניסויי דרך ונקבות רוח עם מודלים של משאית. התקווה היא שבתוך שנים אחדות יושלם המחקר בהצלחה, ויוביל למוצר שהשפעתו הסביבתית אדירה.

**פרופ' אבי זיפרט** הוא ראש בית הספר להנדסה מכנית באוניברסיטת תל-אביב ומומחה בינלאומי בתחומים של אווירודינמיקה במהירויות נמוכות ובקרת זרימה פעילה. מחקריו מתמקדים בהיבטים אנרגטיים של מערכות הקשורות בזרימת אוויר, המשפיעות על הסביבה. במסגרת פעילותו המדעית ערך פרופ' זיפרט מחקרים בנאס"א, ארה"ב, כיהן כסגן הדקאן למחקר של הפקולטה להנדסה, ופרסם יותר מ-40 מאמרים בכתיבת בינלאומיים. נכון להיום רשומים על שמו חמישה פטנטים, ומספר פטנטים נוספים שפותחו במעבדתו נמצאים בהליכי אישור.

**טורבינת רוח אנכית קטנה נבדקת במנהרת הרוח של בית הספר להנדסה מכנית בפקולטה להנדסה של אוניברסיטת תל-אביב**



סחורה. לכן הוא אינו מאפשר זרימת אוויר חלקה, ויוצר התנגדות גבוהה. כדי להקטין את ההתנגדות, שותלים המדענים מערכת בקרת זרימה פעילה בנגרר של המשאית, והשיטה החכמה מצליחה להגדיל את היעילות האנרגטית ולצמצם משמעותית את צריכת הדלק

ניכר גם האפשרויות לניצול אנרגיית הרוח: נוכל לרתום אותה ישירות לייצור חשמל ולאגירת אנרגיה, לטעינת מצברים ולשאיבת מים, לשימושים מגוונים בבנייני מגורים ועוד.

אין ספק ששימוש באנרגיית הרוח הנקייה כחלופה ישימה ויעילה לדלקים המזהמים שמשמשים אותנו היום, יתרום תרומה חשובה לבריאות האדם והסביבה. עם זאת, לדברי פרופ' זיפרט, הפעלת הטכנולוגיה כרוכה בינתיים בעלויות גבוהות, ולכן דרושה לשם כך תמיכה של ממשלה בעלת מודעות ואחריות סביבתית – כפי שנעשה כבר היום בתחום אנרגיית השמש.

## משאיות אווירודינמיות

לצד מחקריו על טורבינות הרוח, שואף פרופ' זיפרט לפתח יישומים נוספים לטכנולוגיה החדשנית של בקרת זרימה פעילה. בין היתר עוסקת קבוצתו במחקר ייחודי, שמטרתו להפחית את ההתנגדות האווירודינמית של משאיות גדולות הנעות בכבישים מהירים. חלקן האחורי של משאיות אלה אינו מעוצב בצורה אווירודינמית, אלא קטום בצורתו בשל דרישות מעשיות של טעינה ופריקה של



# עניין של יציבות

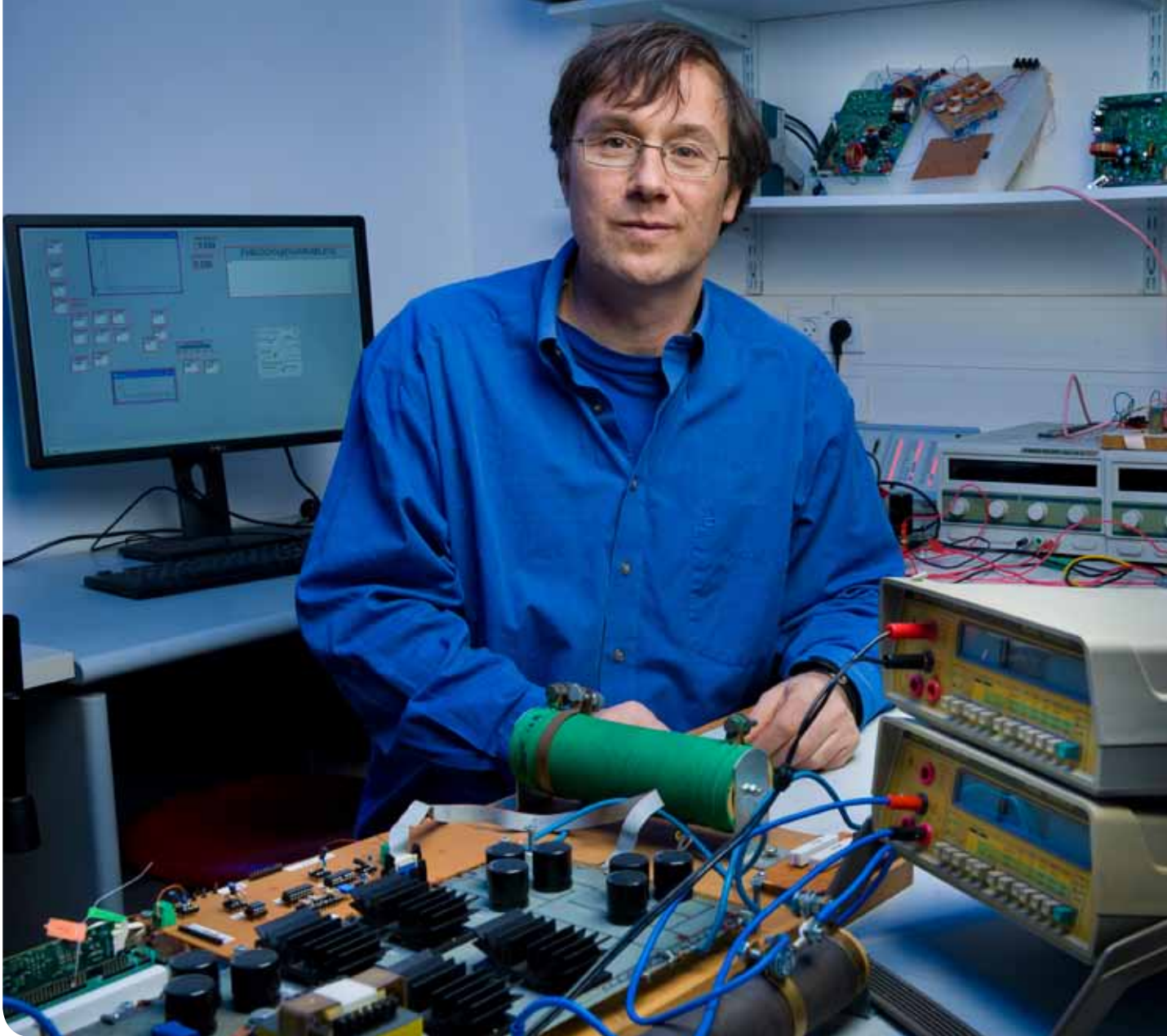
תושבי ישראל רגילים לאספקת חשמל אמינה ויציבה, 24 שעות ביממה. ואכן, רשת החשמל בארצנו היא מהמובילות בעולם ביציבותה – עם מספר נמוך ביותר של דקות ללא חשמל בשנה. אך רוב אזרחי המדינה אינם מודעים לעובדה כי יציבות הרשת הארצית אינה דבר מובן מאליה: היא כרוכה במנגנוני בקרה משוכללים ביותר. פרופ' ג'ורג' וויס ופרופ' מיכאל מרגליות מהמחלקה להנדסת חשמל-מערכות בפקולטה להנדסה מפתחים טכנולוגיה שתאפשר לרשת לשמור על יציבותה – גם כאשר היא תתבסס, יותר ויותר, על מקורות אנרגיה מתחדשים

פרופ' מיכאל מרגליות: "להפוך את הטכנולוגיה לסטנדרט"

מקורות של אנרגיה מתחדשת – כמו חוות שמש, טורבינות רוח ומכשירים המפיקים אנרגיה מגלי הים – מתבססים על טכנולוגיות שונות לחלוטין מזו של הגנרטורים הסינכרוניים. הם מייצרים חשמל באמצעות ממירים אלקטרוניים ממותגים, שהופכים את אנרגיית השמש/ הרוח/הגלים לאנרגיה חשמלית. לממירים אלו, שהם אלקטרוניים במהותם, אין כל חלקים מכניים נעים, והחשמל שהם מייצרים הוא בעל מאפיינים שונים מאוד מזה שמייצרים הגנרטורים בתחנות הכוח. עליית החלק היחסי של מקורות מתחדשים ברשת עלולה לפגוע ביציבותה. מסיבה זו נמנעות חברות חשמל בכל

"החשמל ברשתות המסורתיות מופק באמצעות גנרטורים גדולים, המכונים גנרטורים סינכרוניים", מסביר פרופ' וויס. "הטכנולוגיה הוותיקה הזאת, שמבוססת על חלקים מכניים נעים – כמו רוטור מסתובב – מייצרת חשמל בעל תכונות אופייניות מאוד – ובקרת היציבות שלה מותאמת למאפיינים אלה. מנגנוני הבקרה הנוכחיים מסתמכים על אלגוריתמים מורכבים ביותר, שהתפתחו לאורך שנים רבות, המוודאים שרמות המתח והתדר יישארו בתוך טווח מסוים – לא גבוה וגם לא נמוך מדי. חריגה מרמות אלה עלולה לגרום לתקלות ולנזקים חמורים במתקנים ומכשירים המחוברים לרשת החשמל."





**פרופ' ג'ורג' וויס** מתמחה בתורת הבקרה וב־power electronics, עם דגש על בקרה של מקורות מתחדשים לייצור חשמל. עד שנת 2007 היה חבר בקבוצת המחקר היוקרתית לבקרה ומערכות הספק ב־Imperial College בלונדון. פרופ' וויס פרסם מעל 100 מאמרים מדעיים וספר אחד, ושימש כיועץ מדעי למספר רב של חברות בתחום האנרגיה המתחדשת בישראל ובעולם.

**פרופ' מיכאל מרגליות** מתמחה בבקרה אופטימלית, בבקרה גיאומטרית ובתורת היציבות של מערכות דינמיות. פרופ' מרגליות פרסם מעל 40 מאמרים מדעיים ושני ספרים.

מתחדשת שיתחבר לרשת הארצית באמצעות ממיר כזה, יוכל להשתלב בה בקלות יחסית, ולהיעזר במנגנונים הקיימים לבקרת יציבות. בדרך זו ניתן יהיה להרחיב באופן משמעותי את השימוש באנרגיה מתחדשת לסוגיה השונים, עד שבהדרגה תתבסס צריכת החשמל כולה על מקורות מתחדשים.

"אנחנו מקווים שבעתיד תהפוך הטכנולוגיה שלנו לסטנדרט בכל ממיר המחבר בין מקורות אנרגיה מתחדשים לרשת החשמל", מסכם פרופ' מרגליות. "מדובר בשוק עולמי עצום, שגדל בצעדי ענק. כבר בשנת 2014 צפוי היקפו להגיע ל־7 מיליון ממירים ול־8.5 מיליארד דולר".

העולם מלחבר לרשת כמות גדולה מדי של מקורות אנרגיה מתחדשים, וחוקרים רבים מחפשים שיטות שיפתרו בעיה זו. כדי לתת מענה לבעיה, פיתחו פרופ' וויס ופרופ' מיכאל מרגליות ממיר אלקטרוני, המחקה את דרך פעולתו של גנרטור סינכרוני. הממיר, המכונה Synchronverter, מתבסס על אלגוריתם בקרה חדשני שמעניק לחשמל המופק מאנרגיה מתחדשת תכונות זרם, תדר ומתח הדומות לאלה של חשמל המיוצר בתחנות כוח מסורתיות – שמונעות על ידי דלקים פוסיליים מתכלים. וכך, מנקודת מבטה של הרשת, אין הבדל בין שני סוגי החשמל שזורמים אליה. מקור אנרגיה





פרופ' עמואל פלד. הגה רעיון מהפכני: תא הפועל על נתון ואוויר

הכימיקלים של תא הדלק אגורים מחוץ ליחידה המרכזית של התא במצב נוזל או גז, בניגוד לאלקטרודות המוצקות שממוקמות בתוך מארזי המצברים. שנית, הכימיקלים שבתאי הדלק הם מראש זולים במידה משמעותית מאלה המשמשים במצברים; ושלישית, בלבד של תא הדלק שוכנת ממברנה ייחודית שפותחה במעבדתו של פרופ' פלד בשילוב עם שיטה המאפשרת את ייצורה התעשייתי, והיא משמשת כמעבר בררני לחלקיקים זעירים בין הקטבים החשמליים בתהליך יצירת החשמל. כל אלה יחדיו מגבירים במידה ניכרת את הכדאיות הכלכלית של השימוש בתאי דלק במגוון יישומים. ואכן, קבוצתו של פרופ' פלד מפתחת תאי דלק

חשמל אינם מסוגלים לענות על הדרישה, כיוון שהם יקרים מדי ואורך החיים שלהם מצומצם מדי. תאי דלק הפיכים, לעומתם, הם אחד הפתרונות המבטיחים שמוצעים כיום לאגירת אנרגיה מתחדשת.

### תאי דלק שומרים על האנרגיה

כיצד פועל תא הדלק ומהם יתרונותיו? בדומה למצבר, תא הדלק הוא מתקן שאוגר אנרגיה בצורה כימית וממיר אותה לחשמל בעת הצורך. אך יש מספר הבדלים משמעותיים בין השניים: ראשית, לתאי דלק חיים ארוכים פי כמה בהשוואה למצברי עופרת או ליתיום, מכיוון שהבלאי של הכימיקלים המשתתפים בתהליך נמוך במידה רבה. כיצד משיגים זאת?

קיימות היום שיטות רבות לקציר אנרגיה ממשאבים מתחדשים, אך לכולן חולשה משותפת: אי־סדירות הופעתם של מקורות האנרגיה המתחדשים בהם אנו עושים שימוש. יש ימי שמש וימים מעוננים, הרוח מתחזקת ונחלשת לסירוגין, וכו'. מסביר פרופ' פלד, שחוקר ומפתח תאי דלק באוניברסיטת תל־אביב זה כ־30 שנה. "לכן, כדי שנוכל סוף־סוף לדחוק את השימוש בנפט, בפחם, בגז ובגרעין לטובת סביבה נקייה יותר, אנו חייבים להפוך את קציר האנרגיה המתחדשת לתהליך יציב ומשתלם כלכלית. המפתח לכך טמון בפיתוח אמצעים זולים ויעילים לאגירת אנרגיה. מצברי העופרת או הליתיום המשמשים אותנו כיום לאגירת





# אוגרים כוח

**כיצד אפשר לאגור לאורך זמן אנרגיה המופקת ממקורות אנרגיה מתחדשים, טבעיים ונקיים, כמו למשל שמש או רוח? בעיה זו מעסיקה כיום מדענים בכל העולם, ומעבדתו של פרופ' עמנואל פלד מבית הספר לכימיה שוקדת על פיתוחו ושדרוגו של פתרון מהפכני, זול ויעיל – תאי דלק הפיכים. עד היום רשמה הקבוצה עשרה פטנטים וכן מספר שיאי עולם בהספק חשמלי של תאי דלק מסוגים שונים**



של פרופ' פלד, שאף הוציא פטנט על התא החדשני – אינם נופלים במאומה מאלה של מתחרהו הפופולרי. כיום, משהוכחו ההיתכנות והכדאיות של תאי הדלק, מתמקדת קבוצתו של פרופ' פלד בשיפור מבנה האלקטרודות ואיכות הזרזים בתא, במטרה להוזיל עוד יותר את מחיר התפעול. אם תצלח מלאכתם, ייתכן שבעוד מספר שנים נוכל כלנו להגדיר מחדש את המושג "מצבר"...

החשמלי טווח נסיעה של 500 ק"מ לטעינה אחת, פי שלושה מהטווח האפשרי כיום. אך לשימוש בנתרן יתרונות משמעותיים: הוא זול וזמין מהליתיום ועמיד מול חומרים רבים יותר – דבר שיאפשר חיטכון גם בעלויות המארז והאלקטרודות. בסופו של דבר, אמור תא מבוסס נתרן לעלות רק כמחצית ממחירו של תא מבוסס ליתיום, בעוד שביצועיו – על-פי המחקרים במעבדתו

**פרופ' עמנואל פלד** מבית הספר לכימיה של אוניברסיטת תל-אביב הוא מדען בעל שם עולמי בתחום תאי דלק ומצברים. הוא היה בין מייסדיהן של שתי חברות הזנק חדשניות, Chemtronics ו-EnStorage, המבוססות על טכנולוגיות שפותחו במעבדתו. כמו כן פיתחה קבוצתו תאי דלק ייחודיים, שרשמו שיאי עולם בתפוקת חשמל. פרופ' פלד שימש כראש מרכז וולפסון למחקר שימושי בחומרים ומרכז גורדון ללימודי אנרגיה באוניברסיטת תל-אביב, וכמנהל מרכז הידע לתאי דלק וסוללות של משרד המדע והטכנולוגיה. הוא פרסם יותר מ-150 מאמרים, רשם יותר מ-40 פטנטים וזכה בפרסים יוקרתיים בארץ ובעולם.



**תא דלק לאגירת אנרגיית רוח ושמש**



**תא דלק שפותח במעבדתו של פרופ' עמנואל פלד, המופעל על-ידי מתנול ומסוגל להפעיל מחשב נישא קטן**

מסוגים מגוונים, שכל אחד מהם מיועד למטרה שונה ועושה שימוש בכימיקלים אחרים:

תא דלק הפיך שאמור להוות יחידת בסיס למאגר אנרגיה גדול – כמו בתחנת כוח הקוצרת את אנרגיית השמש או הרוח – פועל באמצעות תמיסת חומצה ברומית וגז מימן. תא אחר, המיועד למכשירים אלקטרוניים ניידים, מוזן ישירות במתנול דווקא. ובתחום הלוהט של כלי הרכב החשמליים הגה פרופ' פלד רעיון מהפכני – תא הפועל על נתרן ואוויר, ומתחרה בהצלחה בתאי ליתיום-אוויר, שנחקרים היום בכל העולם ונחשבים לדור העתיד של המצברים למכוניות חשמליות. שני סוגי התאים אמורים להקנות לרכב



הבעיה בכל התהליכים 'הירוקים' לייצור אנרגיה היא שהם אמנם מפחיתים את הזיהום, אך אינם מבטלים אותו כליל; מסביר פרופ' נלסון. "גם אם נתדלק מכונית בדלק אורגני נקי המיוצר מצמח כמו תירס, עדיין יתבצע במנוע תהליך של שריפה, הפולט לאוויר מולקולות של פחמן דו-חמצני – שילוב של פחמן (C) וחמצן (O). אמנם, כמות ה- $CO_2$  הנפלטת שווה לכמות שקולט הצמח מהאוויר בתהליך הפוטוסינתזה, אך כדי לגדל את הצמח ולהפיק ממנו דלק נדרשות פעולות נוספות שפולטות  $CO_2$ , כמו דישון, קציר, הובלה וכד'. כך יוצא, שמאזן הפחמן נותר תמיד שלילי, ובשורה התחתונה התהליכים המקובלים להפקת האנרגיה אינם בני קיימא. במילים אחרות: בסופו של דבר, במועד כלשהו בעתיד, יתכלו כל הדלקים האורגניים המשמשים את האדם. במחקר שלנו אנו מבקשים למצוא דרך יעילה להפיק את הדלק בר הקיימא היחיד בעולם – מימן ( $H_2$ ). שריפה של דלק כזה תחבר את מולקולות המימן ( $H_2$ ) לחמצן (O) ותפלוט לאטמוספירה מולקולות שאינן מכילות כלל פחמן דו-חמצני – מולקולות  $H_2O$ , כלומר מים! זוהי בדיוק מהותה של אנרגיה כחולה: מקור אנרגיה בר קיימא, שאינו מתכלה וגם אינו מזוהם. בכוונתנו להשיג את היעד הזה באמצעות מניפולציות גנטיות ביצורים קיים, שבו מתרחש תהליך הפוטוסינתזה."

**פרופ' נתן נלסון. להתערב בתהליך הפוטוסינתזה ביצור חד-תאי במטרה לייצר אנרגיה כחולה**

סינקוציסטיס (Synechocystis) מקבוצת הבקטריות הכחוליות (Cyanobacteria), יצור פרימיטיבי אשר מצד אחד מבצע פוטוסינתזה, ומצד שני מסוגל לייצר מימן. הבעיה היא שמולקולות המימן פוגשות בתא ובסביבתו במולקולות החמצן הנפלטות בתהליך הפוטוסינתזה, והחמצן מעכב את תהליך יצירת המימן ואף מתרכב עמו ליצירת מים.

כדי לאגור גז מימן נקי שיכול לשמש כדלק, חיוני אם כן למנוע את המפגש בין המימן לחמצן. לשם כך מציע פרופ' נלסון לשתק לסירוגין את תהליך שחרור החמצן מהמים בפוטוסינתזה. כך ייווצר מימן ללא נוכחות חמצן, ואפשר יהיה לצבור אותו במכלים.

המקור לכל החמצן באטמוספירה, לרוב רובם של החומרים האורגניים והמזון שבטבע, ומכאן גם למרבית צורות החיים שעל פני כדור הארץ. מכיוון שכך, אחראית הפוטוסינתזה גם לכל הדלקים הצמחיים והפוסיליים המשמשים את האדם – פחם, נפט, גז, עץ, אתנול וכד'.

### **פתרונות המבוססים על הנדסה גנטית**

פרופ' נלסון, העוסק זה 40 שנה במחקר בסיסי של תהליכים בקרומי התא, העלה כעת רעיון מהפכני: להתערב בתהליך הפוטוסינתזה ביצור חד-תאי, באופן שיגרום לו לייצר בתוכו מולקולות מימן – כמקור לאנרגיה כחולה, נקייה לחלוטין. לצורך מחקר, הוא בחר בבקטריה חד-תאית בשם

### **פוטוסינתזה – מקור החיים בעולמנו**

הפוטוסינתזה, אותו תהליך מופלא שבאמצעותו ממירים צמחים את האנרגיה של אור השמש לאנרגיה כימית האצורה במולקולות אורגניות (גלוקוז), מהווה מוקד למחקרים רבים בעולם. אחד ממאפייני הייחודיים של הפוטוסינתזה הוא ביקוע מולקולת המים – הנחשבת לאחת היציבות ביותר בטבע – לשני מרכיביה, חמצן ומימן: החמצן נפלט לאוויר, והמימן משמש לבניית מולקולות הגלוקוז (סוכר) המהווה שדרה לשאר החומרים האורגניים המרכיבים את התא החי. למעשה, תהליך הפוטוסינתזה הוא

# נא להכיר: אנרגיה כחולה

מדענים רבים בעולם עוסקים בחיפוש אחר סוגים שונים של אנרגיה ירוקה: אנרגיה נקייה ממקורות טבעיים ומתחדשים. אך פרופ' נתן נלסון מהמחלקה לביוכימיה וביולוגיה מולקולרית מציע לקחת את מקורות האנרגיה שלנו צעד אחד קדימה, ולייצר אנרגיה כחולה, שבעת ניצולה פולטת אל האטמוספירה מים בלבד, ולפיכך דרגת הזיהום שלה אפסית ■ המחקר החלוצי זכה לאחרונה במענק יוקרתי מטעם המועצה למחקר של האיחוד האירופי (ERC)



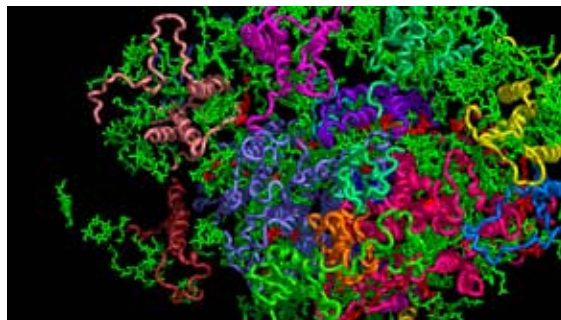
**פרופ' נתן נלסון** הוא מומחה לביוכימיה וביולוגיה מולקולרית, בעל שם בינלאומי בתחום המחקר הבסיסי של חלבונים וקומפלקסים של מולקולות בקרומי התא. בין תגליותיו החשובות: בידוד ואפיון קומפלקסים המעורבים בתהליכים הביו-אנרגטיים של התא, שפסגתו פענחו המבנה הגבישי של PS1, קומפלקס מורכב מאוד המעורב בתהליך הפוטוסינתזה בצמחים; גילוי גנים המקודדים למוליכים שונים, ביניהם מוליכים עצביים מוליכי מתכות ואחרים, ואפיון פעילותם. פרופ' נלסון זכה בפרסים יוקרתיים בישראל ובעולם, נבחר לחבר ב-EMBO – הארגון האירופי למצוינות במדעי החיים, ושימש כנשיא האגודה הישראלית לביוכימיה וביולוגיה מולקולרית, וכמנהל מכון דניאלה ריץ' לביולוגיה מבנית. פרופ' נלסון פרסם יותר מ-240 מאמרים, ועבודתו צוטטה יותר מ-15,000 פעמים במאמריהם של חוקרים בעולם. ב-2011 קיבל מחקר מענק יוקרתי לחמש שנים מטעם המועצה למחקר של האיחוד האירופי (ERC).

מימן. מניפולציה גנטית שלישית תאיך את קצב יצירת המימן בתא ותייעל את התהליך כולו. האנרגיה הכחולה שתיוצר בדרך זו לא תיצור זיהום כלל, ואפילו הבקטריות המתות – שיוחלפו אחרי חמישה מחזורים של ייצור מימן – יוכלו לשמש מזון לבהמות.

"הפתרון נשמע מבטיח, אך אנו נמצאים רק בראשיתו של המחקר," אומר פרופ' נלסון. "מדובר במחקר בסיסי שעשוי להימשך גם עשר שנים. העבודה עשויה להתפתח לכיוונים שונים ולהביא לתגליות שאיש אינו יכול לצפות אותן מראש. רק דבר אחד בטוח: מחכות לנו בדרך הרבה הפתעות מרתקות!"

כיצד עושים זאת? ראשית יבצעו החוקרים מניפולציה גנטית שתאפשר לגייס את יוני המימן (H+) והאלקטרונים הנוצרים בתהליכי הפוטוסינתזה והנשימה של התא, לצורך ייצורן של מולקולות מימן (H<sub>2</sub>). במקביל, בהליך נוסף של הנדסה גנטית, הם יגרמו לכך שתהליך שחרור החמצן בבקטריה יהיה רגיש לטמפרטורה. כלומר, בטמפרטורות גבוהות יחסית מולקולות המים לא יתבקעו, ולא ישתחרר חמצן. היצורים המהונדסים יוזרמו באופן תמידי בין שתי סביבות טמפרטורה: סביבה של 30 מעלות צלסיוס המאפשרת ייצור חמצן וחומרים אורגניים החיוניים לקיומו של התא, וסביבה של 40 מעלות שמונעת ייצור חמצן, ובכך מאפשרת אגירה של

**המבנה של  
photosystem I  
בצמח, האחראי  
על אחד משלבי  
הפוטוסינתזה.  
המכונה  
הגנו-פוטוכימית  
היעילה ביותר בטבע**







פרופ' שאול ילובסקי: "לייעול הפקת התאית יש משמעות כלכלית אדירה"

את הפקת התאית, ואנו מקווים להתאים את השיטה לצמחים נוחים לגידול, בעלי פוטנציאל עתידי גבוה להפקת דלק ביולוגי."

מחקרו של פרופ' ילובסקי חשוב במיוחד, מכיוון שלכל ייעול בהפקת התאית יש משמעות כלכלית אדירה. בעוד 25 שנה, כאשר לפי התחזיות יספקו הצמחים 30% מכל צורכי האנרגיה בעולם, גם ייעול של אחוז בודד בתהליך ההפקה יחסוך מיליארדי דולרים! לשם המחשה: כיום, העלות של 30% מהאנרגיה הנצרכת

המופק מגרגרי תירס. הפקת דלק מצמחים אלה קלה יחסית, ובכל זאת, אי אפשר יהיה להסתמך עליהם לאורך זמן, מאחר שהם דורשים תנאי גידול מיוחדים (למשל, הרבה מים או אדמה עשירה) ואף מהווים מקורות מזון חשובים לאוכלוסיית העולם. בעיה נוספת היא שהתהליכים הנהוגים היום להפקת תאית מרקמות צמחים אינם יעילים, כך שהאנרגיה המופקת אינה מצדיקה את כמות האנרגיה המושקעת בתהליך. במעבדה שלי גילינו קבוצת חלבונים שעשויה לייעל באופן משמעותי

צמחים מנצלים את אנרגיית השמש באופן טבעי באמצעות תהליך הפוטוסינתזה, מסביר פרופ' ילובסקי. "הצמח קולט את אנרגיית האור של השמש ומשתמש בה כדי ליצור סוכרים ממים ומגז הפחמן הדו-חמצני (CO<sub>2</sub>). מרבית הסוכרים הללו נאגרים בדפנות של תאי הצמח בצורה של חומר (פולימר) שנקרא תאית (צלולוז), ומן התאית אפשר להפיק דלק ביולוגי הקרוי אתנול. בברזיל, למשל, כ-30% מתצרוכת הדלק מקורה באתנול המופק מקני סוכר. במקומות אחרים מייצרים אתנול מעמילן





# היסכון מן הצומח

**צמחים הם מקור מצוין לאנרגיה טבעית, זמינה ונקייה, ומדענים מקווים שבעוד 25 שנה ימלא דלק המופק מצמחים 30% מצורכי האנרגיה של האדם ■ עם זאת, הדרך לעתיד עוד ארוכה, ותהליכים הנהוגים כיום להפקת אנרגיה מהצומח אינם יעילים דיים ■ במעבדתו של פרופ' שאול ילובסקי במחלקה לביולוגיה מולקולרית ואקולוגיה של צמחים, מגדלים צמחים שהותאמו גנטית להפקה יעילה של דלק ביולוגי**



וחברתית. "הצמחים הראשונים שייבחנו במעבדה יהיו מינים עשבוניים ממשפחת הדגניים. החוקרים יבדקו אם הגנים שגילו מצליחים לצמצם את כמות הליגנין בצמחים אלה. מינים עשבוניים משופרים, בעלי מוטציה לייצור מופחת של ליגנין, עשויים לייעל באופן משמעותי את תהליך הפקת הדלק הביולוגי ולחסוך מיליארדי דולרים לכלכלת העולם.

**פרופ' שאול ילובסקי** הוא חוקר בעל שם עולמי בתחום הביולוגיה המולקולרית של צמחים. במעבדתו שבאוניברסיטת תל-אביב הוא חוקר תהליכים של העברת אותות פנים-תאיים שמבקרים התמיינות וגדילה של תאים והתפתחות של צמחים. פרופ' ילובסקי פרסם מאמרי מפתח בכתבי-עת מהשורה הראשונה ומוזמן תדיר להרצות על מחקריו בכנסים בינלאומיים ולכהן בוועדות שיפוט של קרנות מחקר לאומיות ואירופיות. כמו כן, משמש פרופ' ילובסקי כעורך בכתבי-עת מובילים בתחום הצמחים ובתחום של העברת אותות פנים-תאיים.

אחר-כך הם שתלו את החלבונים שעברו שינוי בצמח מעבדה הקרוי ארבידופסיס (תודרנית לבנה) ועקבו אחר התפתחותו. החוקרים גילו שכאשר פעילות החלבון מופחתת או מופסקת (במילים אחרות, כשהמתג נשאר כבוי) רמת הליגנין בצמח עולה. לעומת זאת, כאשר נשתל בצמח חלבון הפעיל ללא הפסקה (במילים אחרות, כאשר המתג דולק כל הזמן, ולא ניתן לכבותו) ירד ייצור הליגנין בתאים, והתפתחו הצמחים המבוקשים – בעלי כמות מופחתת של ליגנין!

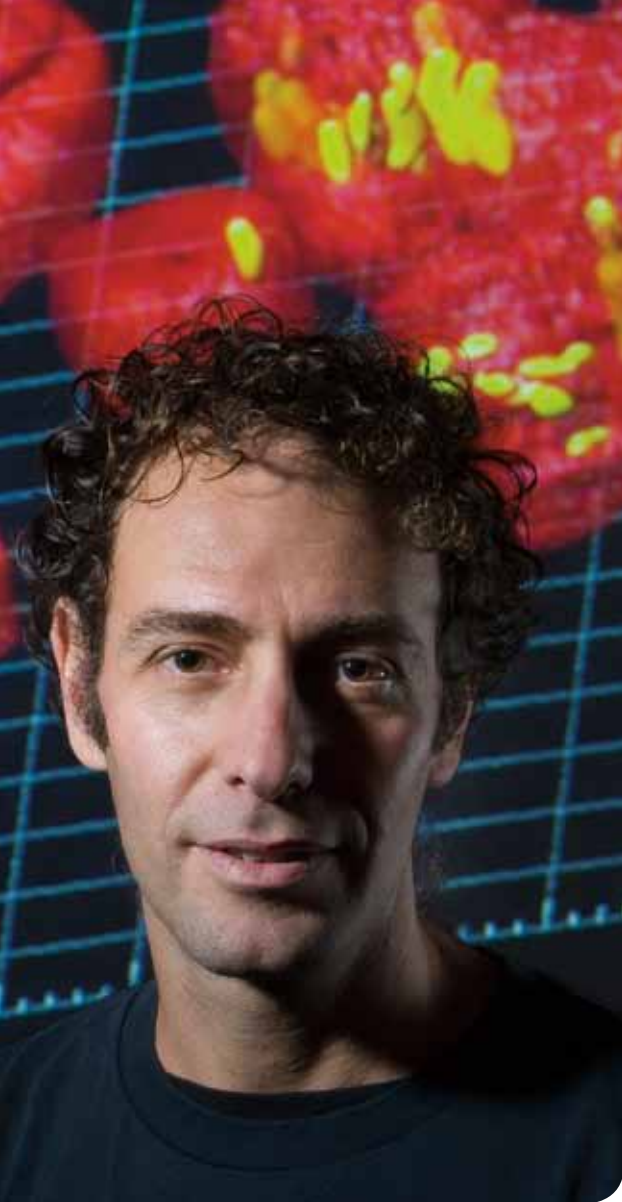
בשלב הבא מתכוונים החוקרים לשתול את החלבונים שגילו בצמחים בעלי פוטנציאל גבוה לייצור דלק בעתיד. "בעולם מחפשים למטרה זו צמחים שהם מצד אחד, נוחים וזולים לגידול, ומצד שני – אינם מתחרים בגידולים חקלאיים," אומר פרופ' ילובסקי. "מדובר בצמחים שאינם משמשים את האדם לצרכים אחרים כמו מזון או ביגוד ויכולים לגדול בקרקעות שוליות, עניות במזון ובמים, שאינן מתאימות לחקלאות. זאת, בשל ההבנה כי הפקת דלק מגידולים חקלאיים, כמו קנה סוכר או תירס, עלולה ליצור תחרות שהיא הרת אסון מבחינה כלכלית

מדי שנה בארה"ב לבדה היא 600 מיליארד דולר. אחוז אחד, משמעו לא פחות מ-6 מיליארד דולר!

## **הנדסה גנטית חוסכת מיליארדים**

צוות המחקר של פרופ' ילובסקי התמקד בגבעול, אשר במינים רבים של צמחים הוא המקור העיקרי של תאית. כדי להפיק תאית מהגבעול, יש להפרידו קודם כל ממרכיב אחר של תאי הגבעול – הליגנין (עצה); אך שיטות ההפרדה הכימיות הנהוגות כיום גורמות לאובדן של כ-50% מהתאית. לכן, כך הניחו המדענים, הפחתת כמות הליגנין בגבעול באמצעות הנדסה גנטית תייעל ותזיל משמעותית את הפקת התאית מהצמח.

כיצד מגדלים צמחים מעוטי ליגנין? בשלב הראשון הצליחו החוקרים לאתר חלבונים שמבקרים את רמת הליגנין בדופן התאים. חלבונים אלה פועלים בדומה למתג, שבעזרתו אפשר להפעיל או לכבות את תהליך ייצור הליגנין. באמצעים של הנדסה גנטית הם שינו את פעילות החלבונים והפכו אותם למתגים שנמצאים תמיד במצב כבוי (off) או, לחלופין, נמצאים כל העת במצב פעיל (on).



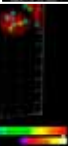
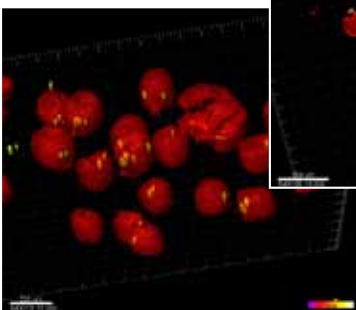
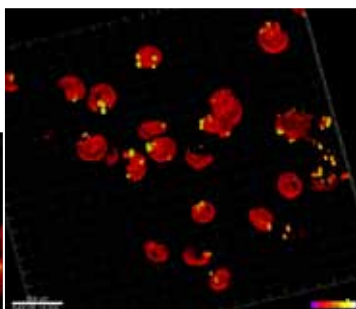
# אצה להן הדרך

**דלק טבעי (ביודיזל) המופק מתירס כבר היה לשם דבר בעולם, ונחשב ל"דבר הבא" בחוגים סביבתיים נרחבים ■ ד"ר יובל אבנשטיין וד"ר יעל מיכאלי מהמחלקה לפיזיקה כימית מעדיפים עם זאת להפיק דלק דווקא מ... אצות! לדעתם, יצורי הים הקדמוניים הללו הם מקור אנרגיה מבטיח ובעל יתרונות משמעותיים ביותר**

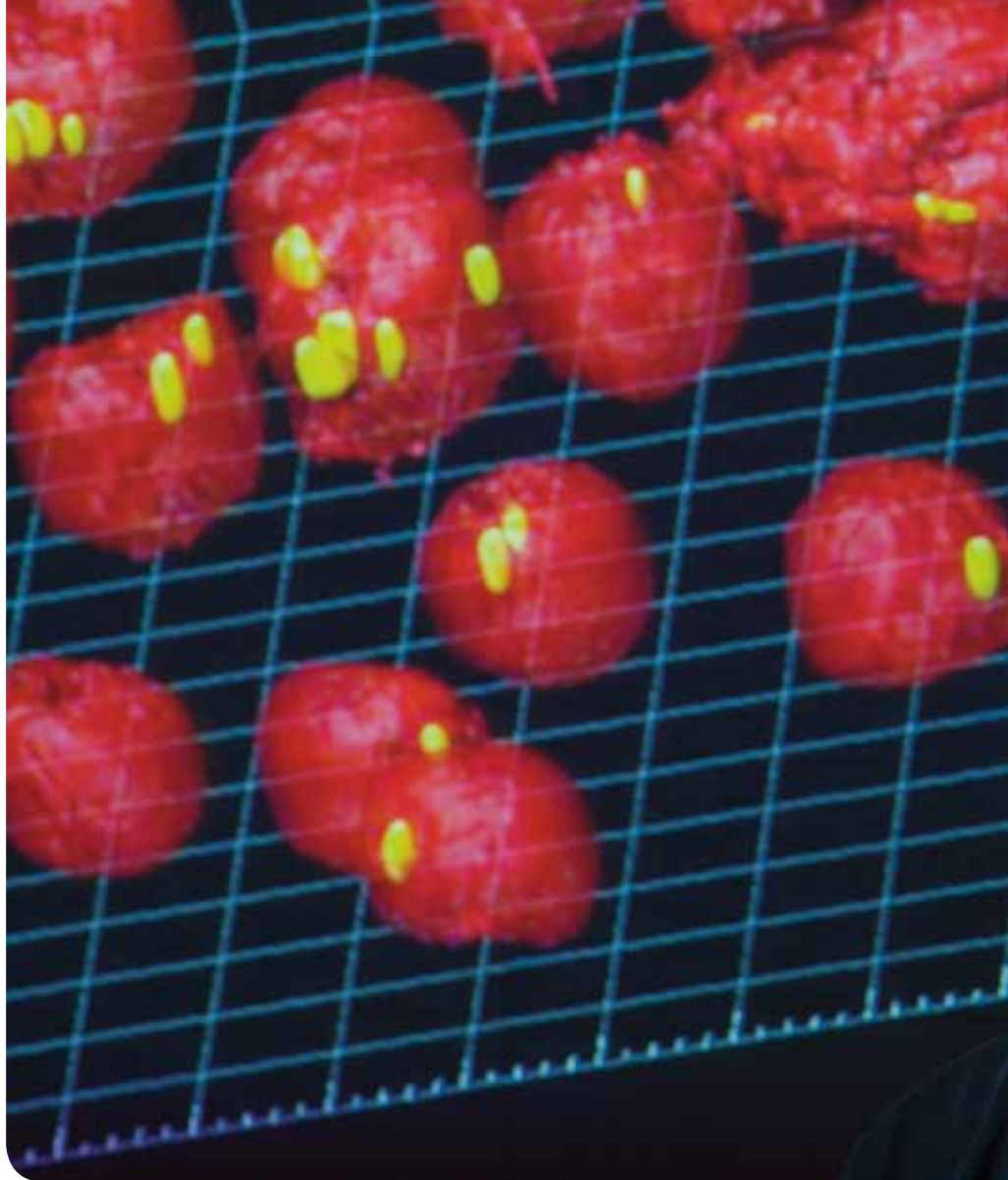


ביודיזל הוא דלק שמוצר באופן טבעי על-ידי צמחים ואורגניזמים, ורבים רואים בו תחליף ראוי וירוק לסוגי הדלק המתכלים שאנו משתמשים בהם היום, אומר ד"ר אבנשטיין. "נכון להיום, רוב הביודיזל בשוקי עולם הוא כוהל המופק מתירס. הבעיה היא שגידולי התירס לדלק מתחרים בגידולי מזון. חקלאים רבים מעדיפים לגדל תירס לדלק בשל רווחיותו, וכך עלול להיווצר מחסור מסוכן במזון. האצות, לעומת זאת, אינן מזון. הן מייצרות דלק איכותי, כמעט מוכן לשריפה, ואפשר לגדל אותן בשטחים שכלל אינם מתאימים לעיבוד חקלאי, כמו למשל באזורים מדבריים. יותר מכך, אפשר לגדל כמויות גדולות של אצות במכלים המתנשאים לגובה ואינם דורשים שטח רב, בניגוד לגידולי שדה."

האצות שבהן מתמקדים החוקרים הן יצורים חד-תאיים, שמסוגלים לייצר ולאגור דלק טבעי בכמות המגיעה עד ל-60% ממשקלם היבש. דלק זה הוא סוג



הדמיה תלת-ממדית של אצות חד-תאיות מסוג קלמידמונס



ד"ר יובל אבנשטיין: "האצות מייצרות דלק איכותי, וניתן לגדלן בשטחים שאינם מתאימים לעיבוד חקלאי"

(Real Time Polymer Chain Reaction). השיטה, שמודדת כמויות RNA מסוגים מסוימים המצויות בתא בזמן נתון, מסייעת לחוקרים לאתר חלבונים הקשורים קשר הדוק לתהליך ייצור הדלק. מסביר ד"ר אבנשטיין: "ה־RNA הוא חומר גנטי המהווה מתכון לייצור חלבונים בתא. רמה גבוהה של RNA מסוג מסוים מעידה כי התא עושה מאמץ לייצר חלבון מהסוג התואם, בתגובה לשינוי מסוים שיצרנו בתנאי הסביבה. כך אנחנו מצליחים לזהות חלבונים שרמתם עולה משמעותית בתגובה לתנאים סביבתיים ספציפיים המעודדים ייצור דלק. חלבון שזוהה כמשמעותי בתהליך ייצור השמן עובר בדיקה מעמיקה, כולל מניפולציות גנטיות שנועדו להגביר את התפוקה".

בהמשך הדרך מקווים המדענים לצאת מגבולות המעבדה ולחבור לגורמים תעשייתיים, שיקדמו ייצור מסחרי של דלק ביולוגי המבוסס על אצות.

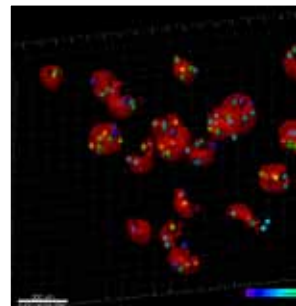
ד"ר יובל אבנשטיין הוא מדען צעיר ומבטיח, שחזר לישראל בקיץ 2011 במסגרת המאמץ הגדול של אוניברסיטת תל־אביב להשיב לישראל את מיטב מוחותיה. ד"ר אבנשטיין התמחה בכימיה פיזיקלית ובביופיזיקה, ופיתח טכנולוגיות אופטיות חדשניות לקריאת מידע גנטי במסגרת עבודתו באוניברסיטת UCLA בארה"ב. הוא זכה במלגת רוטשילד ובמלגה הבינלאומית היוקרתית Human Frontiers Fellowship, ופרסם כ־20 מחקרים בכתיבת מדעיים מובילים. עם שובו לישראל הוענק לו פרס מורשה של הקרן הישראלית למדע. כספי הפרס משמשים אותו להקמת מעבדה מתקדמת לביופיזיקה, שתצויד במגוון מיקרוסקופים ייחודיים – פרי פיתוחים חדשניים של ד"ר אבנשטיין עצמו.

לעומקו. לשם כך הם משנים באופן שיטתי פרמטרים מגוונים בסביבת הגידול, כמו תזונה, טמפרטורה, מחזורי אור וחושך ואספקת חומרים חיוניים כגון חנקן וברזל – ובוחנים מהם התנאים האופטימליים לייצור כמות מירבית של דלק. טכנולוגיה מתקדמת של הדמיה אופטית מאפשרת מעקב צמוד אחר הצטברות השמן בתא בזמן אמת: השמן נצבע לשם זיהוי, וכך אפשר לאתר את הכמות המתהווה, ואת המקום בו היא מתרכזת בתוך התא. במקביל להדמיה, שמספקת תמונה ויזואלית של המתרחש, מבקשים המדענים להבין את המתחולל בתא ברמה הביולוגית־גנטית. לשם כך הם מיישמים שיטת אנליזה גנטית המכונה RT-PCR

של שמן המיוצר על־ידי האצה בעיקר בעת מצוקה, כמנגנון הישרדות – מעין מחסן אנרגיה לימי מחסור, הדומה במידה רבה לשומן שמייצר גוף האדם. והתכונות שהתגלו במעבדה אכן מבטיחות: מתברר שביוזיל המופק מאצות יכול לשמש לתדלוק רכב כמעט כפי שהוא, ללא תהליכי עיבוד יקרים ומזהמים. אך כיצד אפשר לייצר כמות גדולה של הדלק הטבעי הזה, שתספיק לשימוש מסחרי? זהו האתגר הניצב היום בפני צוות המחקר באוניברסיטת תל־אביב.

### חלבונים לייצור דלק

כדי לייעל את תהליך ייצור השמן באצות שואפים החוקרים, קודם כל, להבין אותו







פרופ' אשר טישלר. לתת מענה לסוגיה הקריטית של תכנון מערכת החשמל לשנים הבאות

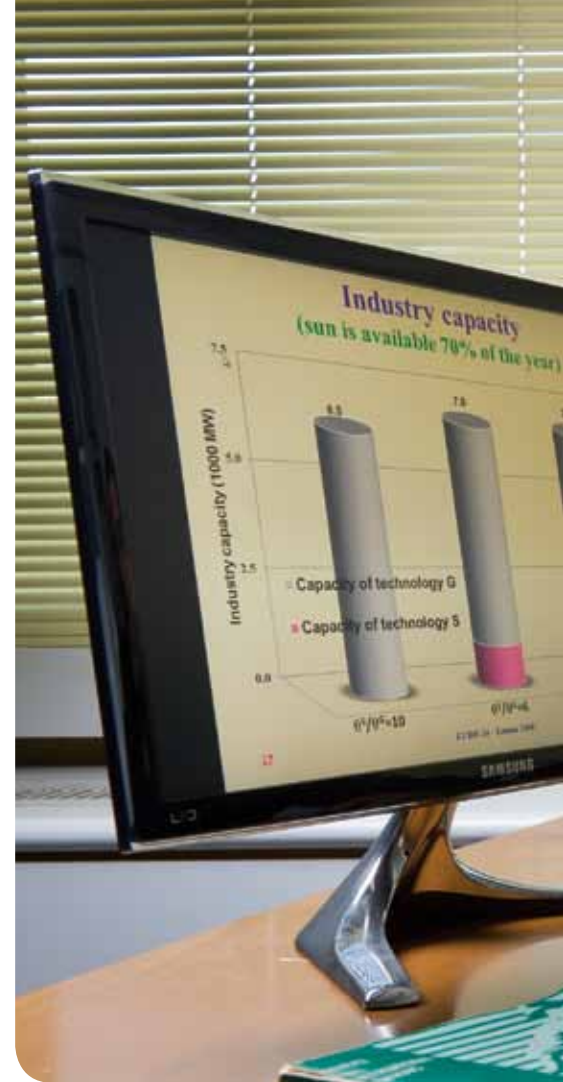
# ניהול מושכל הוא המפתח



זיהום האוויר שנגרם מפליטת  $CO_2$  וגזים אחרים בעקבות השימוש בדלקים מתכלים מהווה בעיה אקוטית בישראל, מסביר פרופ' טישלר, שחוקר את נושא כלכלת האנרגיה כבר יותר מ-30 שנה. "מעבר לנזק הסביבתי, יוצר הזיהום נזק תדמייתי לישראל כחברה ב-OECD (הארגון הבינלאומי לשיתוף פעולה ולפיתוח כלכלי), הדורש מהמדינות החברות בו דיווח על צעדיהן לקידום השמירה על הסביבה. אם לא נקדם בקרוב את השימוש באנרגיה נקייה, אנו עלולים להיקלע לבידוד כלכלי, כצעד תגובה מצד הארגון. במגבלות הקיימות בישראל, הפתרון טמון בעיקר במעבר לשימוש באנרגיה סולארית ובמכונות חשמליות. אך רצוי ככל שיהיה, תהליך זה אינו פשוט משתי סיבות עיקריות: ראשית, כיום הטכנולוגיה אינה מפותחת דיה ויקרה מאוד לתפעול; ושנית, המבנה

**מכוניות חשמליות, תאים פוטו-וולטאיים (תאי שמש) ותחנות כוח תרמו-סולאריות – כל אלה עתידים להזין את השקע החשמלי בביתנו בעוד מספר שנים, אם נשכיל לנהל ולתכנן היטב את המחקר, הפיתוח וההפעלה של הטכנולוגיות הנדרשות ■ כך עולה ממחקריו של פרופ' אשר טישלר, דקאן הפקולטה לניהול**





תעריפי חשמל גמישים שישתנו על פני היממה ועונות השנה, באופן המשקף את העלות השולית הכוללת של ייצור וחלוקת החשמל. תעריפים חלקיים כאלה כבר קיימים בישראל, אולם יש לשכלל אותם: עליהם להביא בחשבון גם את עלות הנזק הסביבתי שגורם ייצור חשמל על-ידי פחם וגז, ולעודד ייצור חשמל באמצעות טכנולוגיות סולאריות וטכנולוגיות אחרות של אנרגיה מתחדשת.

פתרונות מושכלים אלה ואחרים הם פירותיו של מחקר בתחום מנהל העסקים. תחום זה נעשה חיוני יותר ויותר עבור מפתחי טכנולוגיות, המגלים כי לא תמיד די בטכנולוגיה חדשנית, חכמה ואיכותית; הפעלה כדאית של טכנולוגיה זו מחייבת גם למצוא ו/או לקיים את השוק המתאים. הצלחתה תלויה בייצור יעיל, מבנה שוק נכון, תעריפי חשמל מושכלים, כניסה נכונה לשוק, המשך נאות של תהליך המחקר והפיתוח, והמשך העצמתו של הגוף שמפתח את הטכנולוגיה. הגוף המפתח עצמו חייב להיות בנוי נכון ומנוהל היטב, עליו לטפח את ההון האנושי שלו, ולהשתלב באופן מושכל בשווקים בהם הוא פועל. למעשה, ניהול מושכל ונכון מהווה את ההבדל בין רעיון טוב לבין שיפור מהותי ברווחת החיים של כולנו.

**פרופ' אשר טישלר** הוא מומחה במנהל עסקים, המשמש כדקאן הפקולטה לניהול וכראש המכון לניהול אסטרטגי ע"ש אלי הורוביץ באוניברסיטת תל-אביב. תחומי המחקר שלו כוללים כלכלת וניהול אנרגיה, כלכלת וניהול ביטחון, מחקר ופיתוח ושיטות מחקר. פרופ' טישלר פרסם יותר ממאה מאמרים בכתבי-עת אקדמיים, כיהן בעבר ומכהן היום כחבר במספר פורומים בתחומי האנרגיה והביטחון, ושימש כיועץ לגופים שונים בישראל ובחו"ל, ביניהם צה"ל ומשרד הביטחון, משרדי האוצר והתשתיות הלאומיות, וכן בנקים וחברות בענפי התעשייה, השירותים וההייטק.

למדינה לתכנן ולבנות מערכת חשמל ארצית שתהיה בחלקה הגדול סולארית ונקייה. פרופ' טישלר מציין מספר אתגרים טכנולוגיים עיקריים:

ראשית, על מדינת ישראל להשקיע בפיתוח טכנולוגיות סולאריות שיוזילו את מחיריהם של התאים הפוטו-וולטאיים ושל תחנות הכוח התרמו-סולאריות – שממירים את אנרגיית השמש לחשמל. רק הוזלה משמעותית, שתבוא בעקבות פיתוח הטכנולוגיות החדשניות, תוכל להגביר בהדרגה את השימוש בהן. בנוסף, יש צורך במחקר ובפיתוח של שיטות מתקדמות ויעילות לאגירת חשמל בקנה מידה גדול. כיום, בהיעדר אמצעים כאלה, החשמל מיוצר ונצרך כמעט בו-זמנית. במערכת חשמל עתידית, שחלק גדול ממנה יהיה סולארי, תיווצר בעיה מהותית: ייצור החשמל יקטן משמעותית בשעות הלילה ובימים עם שמש חלקית או חסרה, בעיקר בחורף. הטכנולוגיות החדשות שיפותחו יאפשרו למערכת לאגור חשמל בעיתות השמש, שהן רבות מאוד בארצנו, ולהשתמש בו בשעות החשיכה ובימים מעוננים.

לצד הפיתוחים הטכנולוגיים, מציעים פרופ' טישלר ואנשי אקדמיה אחרים בישראל ובחו"ל גם מגוון פתרונות טכנולוגיים חכמים. אחד הרעיונות הללו מעניין ויצירתי במיוחד: מכונות חשמליות, שהן עצמן תחנות כוח קטנות בעלות סוללה גדולה למדי, יוכלו בעתיד לשמש כמאגר אנרגיה למערכת חשמל ארצית שחלק גדול מהקיבולת שלה הוא סולארי. כך, בעוד כ-15 שנה, כשהיה בישראל לפי הצפי כ-200,000 מכונות חשמליות, אפשר יהיה להיעזר במצבריהן כגיבוי לעיתות עומס בביקוש לחשמל. שיטה חכמה זו עשויה לחסוך את בנייתן של שתי תחנות כוח מזהמות, אך יישומה מותנה בהיערכות נכונה: יש לתכנן מודל כלכלי שיעודד את בעלי המכונות החשמליות לפרוק חלקית את הסוללות כאשר הם אינם משתמשים ברכב. במילים אחרות: צריך להציע לבעלי המכונות תמריץ כספי שיהפוך את הפריקה למשתלמת עבורם. בנוסף, סבור פרופ' טישלר, יש לקבוע

של רשת חשמל המסתמכת בחלקה על מקורות אנרגיה מתחדשים טרם התגבש, והוא מורכב מאוד לניהול."

### סוף מעשה בתכנון תחילה

במחקריו כיום שואף פרופ' טישלר לתת מענה מושכל לסוגיה הקריטית של תכנון מערכת החשמל הישראלית לשנים 2015-2050. באמצעות מודלים מתמטיים הוא בוחן כיצד נכון לנהל מערכת חשמל המשלבת מקורות אנרגיה מתחדשים, ומהי הדרך היעילה ביותר להקים מערכת כזאת. המסקנה הגורפת ממחקריו עד כה היא כי ממשלת ישראל חייבת להקצות משאבים למחקר ופיתוח של טכנולוגיות קלינטק "ורוקות". חברות פרטיות לא יעשו זאת, לדבריו, כי מחקר כזה לא יהיה רווחי עבורן – מכיוון שהוא מניב ידע שהוא במהותו מוצר ציבורי. רק שיפורים טכנולוגיים משמעותיים, בתמיכת הממשלה, יאפשרו

# החוקרים המשתתפים בחוברת

## **פרופ' מיכאל מרגליות**

טלפון: 03-6407768  
michaelm@post.tau.ac.il

## **פרופ' נתן נלסון**

טלפון: 03-6406017  
nelson@post.tau.ac.il

## **פרופ' עמנואל פלד**

טלפון: 03-6408438  
peled@post.tau.ac.il

## **פרופ' אברהם קריבוס**

טלפון: 03-6405924  
kribus@tauex.tau.ac.il

## **פרופ' יוסי רוזנוקס**

טלפון: 03-6406248  
yossir@eng.tau.ac.il

## **ד"ר יובל אבנשטיין**

טלפון: 03-6408751  
uv@post.tau.ac.il

## **פרופ' אמיר בוג**

טלפון: 03-6408246  
boag@eng.tau.ac.il

## **פרופ' ג'ורג' וויס**

טלפון: 03-6405164  
gweiss@eng.tau.ac.il

## **פרופ' אברהם זייפרט**

טלפון: 03-6405310  
seifert@eng.tau.ac.il

## **פרופ' אשר טישלר**

טלפון: 03-6408720  
atishler@post.tau.ac.il

## **פרופ' שאול ילובסקי**

טלפון: 03-6405268  
shauly@tauex.tau.ac.il





