

רועי בן ניסן

המחלקה למדעי הצמח והסביבה,
מכון ויצמן למדע

אליה מילשטיין

המחלקה למדעי הצמח והסביבה,
מכון ויצמן למדע

ליאור גרינשפון

המחלקה למדעי הצמח והסביבה,
מכון ויצמן למדע

אלעד נור

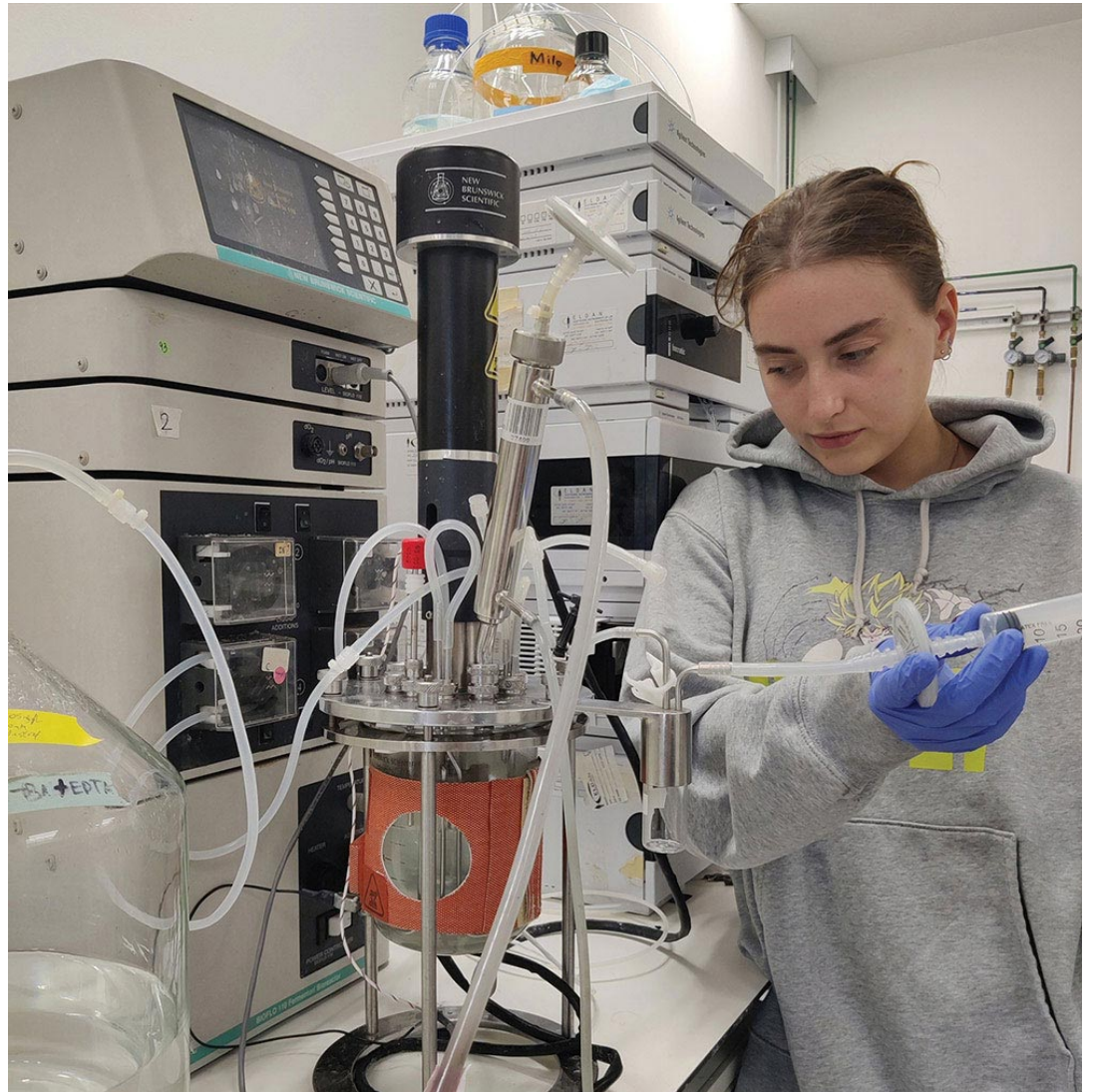
המחלקה למדעי הצמח והסביבה,
מכון ויצמן למדע

רון מילוא

המחלקה למדעי הצמח והסביבה,
מכון ויצמן למדע

ציטוט מומלץ

בן ר, מילשטיין א, גרינשפון ל
ואחרים. 2022. ללמד חיידקים
לקבע פחמן דו-חמצני – מצרכן
ליצור באמצעות אבולוציה מעבדתית
והנדסה מטבולית. *אקולוגיה וסביבה*
13(3): 9–11.



סטודנטית דוגמת תרבות, המגודלת למשך זמן ארוך לצורך גמילת חיידקים מסוכר, במעבדת 'עקרונות פעולה של רשתות אנרגיה ומטבוליזם' שבמכון ויצמן למדע | צילום: רועי בן ניסן

ללמד חיידקים לקבע פחמן דו-חמצני – מצרכן ליצור באמצעות אבולוציה מעבדתית והנדסה מטבולית

גיליון סתיו 2022 / כרך 13(3) / הפחתת פליטות גזי חממה 15 בנובמבר, 2022

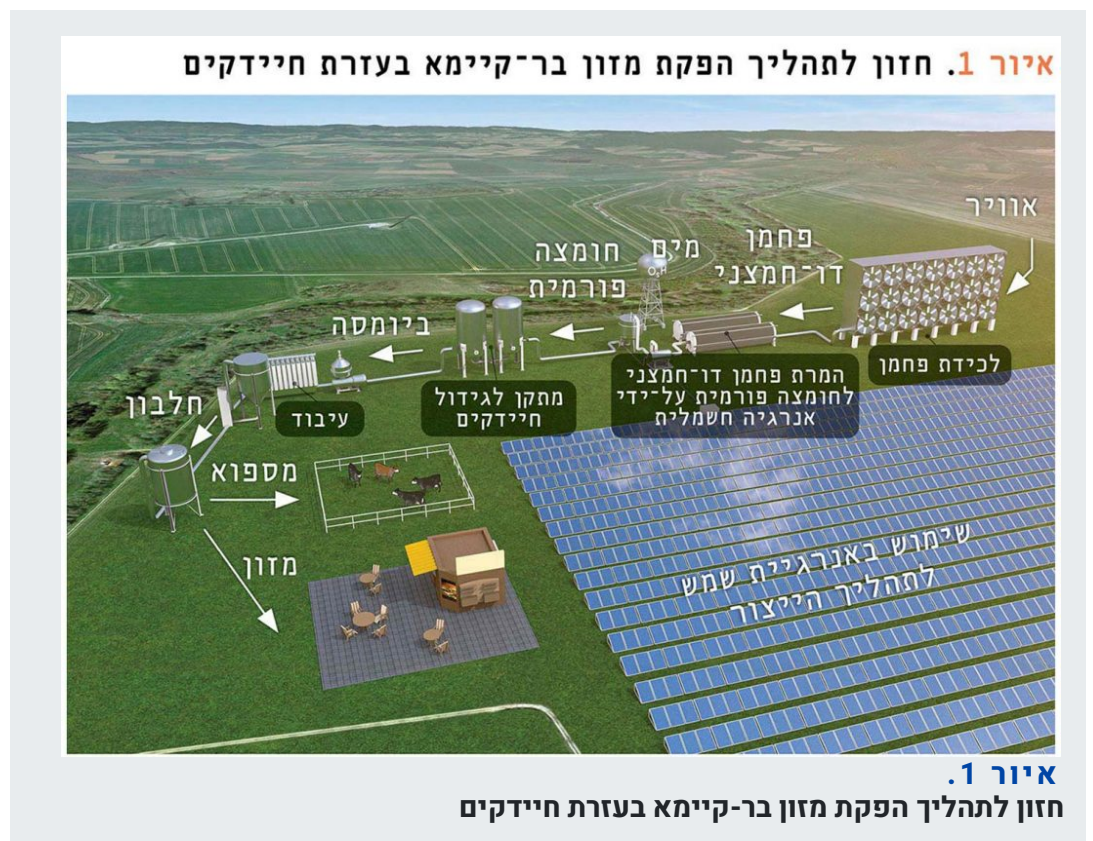
[בקצרה](#)

החיים על פני כדור הארץ מתבססים, בדרך זו או אחרת, על קיבוע פחמן – היכולת של צמחים, אצות וחיידקים שונים להמיר פחמן דו-חמצני למולקולה אורגנית, סוכר, המשמשת אבן יסוד הכרחית לתהליכי החיים. אותם יצורים המספקים מקור פחמן זמין לכל שרשרת המזון, נמצאים בתחתית המארג, ומכונים יצרנים. לעומתם, במעלה מארג המזון מצויים הצרכנים – יצורים המשתמשים בסוכרים שייצרו היצרנים ומשחררים בחזרה לסביבה פחמן דו-חמצני. קבוצת הצרכנים כוללת חיידקים רבים, פטריות ובעלי חיים, בהם גם בני האדם. כך נוצרת מחזוריות: הסוכר הופך זמין לממלכת החיים בזכות היצרנים, מנוצל על-ידי הצרכנים, וחוזר לאטמוספירה כפחמן דו-חמצני. תהליך קיבוע הפחמן הוא כנראה אחד מתהליכי החיים העתיקים ביותר, והאחראי לממלכת החיים שאנו מכירים כיום.

כאשר בני האדם משתמשים במחצבי פחמן שנוצרו בזכות היצרנים בצורת דלקים, ומשחררים כמות גדולה של פחמן דו-חמצני בחזרה לאטמוספירה, הם מובילים לעליית ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה, שהיא גורם מרכזי לשינוי האקלים. יצרנים שונים עשויים לתרום לפתרון בעיית העלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני באמצעות תהליך ביוכימי של קיבוע פחמן. בתהליך זה היצורים הללו תופסים את הפחמן ישירות מהאוויר ובונים בעזרתו את אבני הבניין של התאים. נשאלת השאלה, האם ניתן "לתכנת מחדש" יצור צרכן, כך שישתמש בפחמן דו-חמצני מהסביבה ויִיצר סוכרים במקום לצרוך אותם?

כדי לענות על שאלה זו בחרנו את חיידק האי-קולי, החיידק המאופיין ביותר על-ידי עולם המדע. תחילה מיפינו את הגנים החיוניים שחסרים בחיידק לצורך ביצוע תהליך קיבוע הפחמן ברמה המטבולית. בניגוד ליצורים פוטוסינתטיים כמו צמחים, אותו אי-קולי אינו מסוגל לייצר אנרגיה מאור השמש, ולכן נדרשה תוספת של גן שיאפשר לו ייצור אנרגיה מחומר זמין אחר, חומצה פורמית. כבר הוכח שניתן לייצר חומצה פורמית ביעילות גבוהה מפחמן דו-חמצני באמצעות השקעת אנרגיה חשמלית, והכוונה היא שבעתיד האנרגיה תהיה ממקור מתחדש. כמו כן, הכנסנו שלושה גנים נוספים הנדרשים עבור שילוב הפחמן דו-חמצני בחילוף החומרים הקיים. החיידק שיצרנו לא הצליח לבצע את השינוי התזונתי כפי שציפינו, ולכן השתמשנו בטריק נוסף: אבולוציה מעבדתית. בתהליך זה החיידקים גדלו בתנאי דיאטה מיוחדים – מצע גידול מוגבל בסוכר – כדי שיחוו מצב של רעב, אך עם מספיק סוכר כך שיוכלו לגדול בצורה מצומצמת שמאפשרת להם לעבור שינויים אקראיים בגנום שלהם – מוטציות. כמו כן, החיידקים זכו לשפע פחמן דו-חמצני. בדרך זו החיידקים שהחלו להשתמש במשאב הבלתי נדלה קיבלו יתרון אבולוציוני על פני אלה שנותרו תלויים במטע הסוכר שהיה במצע הגידול. לאחר תהליך הסתגלות ממושך למשטר התזונה החדש (כחצי שנה) השלימו החיידקים את המהפך התזונתי השלם: הם חיים ומתרבים בסביבה ללא סוכר כלל, ומקור המזון היחידי שלהם הוא פחמן דו-חמצני^[2]. כך, הצלחנו לקחת יצור שהחל את דרכו כצרכן, והפכנו אותו ליצורן (אבל עדיין תלוי כמובן במקור אנרגיה).

מערכות ביולוגיות הניזונות מפחמן דו-חמצני, כמו הזן שיצרנו, הן אבן דרך לקראת פלטפורמה גמישה לייצור בר-קיימא של חומרים שונים ומזון. כיום בתעשיית הביו-טק מתקיים שימוש נרחב בחיידקים הניזונים מכמויות גדולות של סירופ תירס כדי לייצר כימיקלים תעשייתיים. החיידק שפיתחנו ומערכות דומות יאפשרו הסבה להזנה מבוססת פחמן דו-חמצני. בהמשך המחקר אנו מקווים לספק את האנרגיה התהליכית התא באמצעות זרם חשמלי מאנרגיה ממקורות מתחדשים (אנרגיית שמש, למשל). גידול החיידקים בצורה זו אמור להוביל לחתימת פחמן שלילית של תוצרי החיידקים, כלומר סך כל התהליך יסיר פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה. נוסף על כך, מחקר שבוצע בשיתוף עם מעבדתנו מראה כי מבחינת נצולת שטח, מערכות כאלה לייצור מזון (ראו [איור 1](#)) עשויות להתעלות בביצועיהן על החקלאות המודרנית, ויכולות לייצר פי שניים יותר קלוריות ופי עשרה יותר חלבון – אפילו ביחס לגידולים חקלאיים יעילים ביותר, כמו סויה^[3].



על אף התקדמות המחקר, מבחינה כלכלית הדרך עוד ארוכה מאוד. כשמשווים בין מחירי המוצרים שמייצרים יצורים מבוססי

פחמן דו-חמצני לעומת הדרכים המסורתיות בתעשייה – קיים פער עצום לטובת הדרכים המסורתיות [1]. מספר גורמים עשויים לצמצמו. שינוי אחד יכול להגיע מהתפתחות טכנולוגית. לדוגמה, שיפור היעילות של היצירה והאגירה של אנרגיה ממקורות ירוקים או של ביצועי חיידקים באמצעות הנדסה גנטית, עשוי להוביל לעלייה בכמות התוצר לעומת האנרגיה המושקעת בתהליכי הייצור כיום. שינוי נוסף עשוי להגיע מירידה ברווחיות המוצרים הקיימים כרגע בשוק. שינוי האקלים מוביל לירידה בכמות השטחים הראויים לחקלאות, ובשילוב עם תהליכים נוספים עלול לגרום עלייה במחירי התוצרת החקלאית. שינוי מהותי נוסף סביר שיגיע מכיוון התוויית מדיניות, כמו סבסוד גופים העונים על קריטריונים סביבתיים לייצור ירוק ובר-קיימא של מוצריהם או לחילופין מיסוי כבד לגופים שמוצריהם מלווים בפליטות חומרים מזהמים שונים לסביבתם.

בני האדם, כמו שאר היצורים הצרכנים בטבע, תלויים ביצרנים לצורך קיומנו. יצירת יצרנים חדשים, שקולטים פחמן דו-חמצני מהסביבה, עשויה להוביל לעלייה בכושר הנשיאה של כדור הארץ על חשבון גז החממה הנפוץ ביותר, פחמן דו-חמצני. בשעה ששניים מהאתגרים המרכזיים שהאנושות מתמודדת מולם הם ביטחון תזונתי ושינוי האקלים, מחקרים מהסוג הזה דחופים במיוחד.

מקורות

1. Gleizer S, Bar-On YM, Ben-Nissan R, and Milo R. 2020. [Engineering microbes to produce fuel, commodities, and food from CO₂](#). *Cell Reports Physical Science* **1**(10): 100223.
2. Gleizer S, Ben-Nissan R, Bar-On YM, et al. 2019. [Conversion of Escherichia Coli to generate all biomass carbon from CO₂](#). *Cell* **179**(6): 1255–1263. e12.
3. Leger D, Matassa S, Noor E, et al. 2021. [Photovoltaic-driven microbial protein production can use land and sunlight more efficiently than conventional crops](#). *PNAS* **118**(26): e2015025118.