

מקורות

- [1] Abdolhosseini Qomi MJ, Noshadravan A, Sobstyl JM, et al. 2016. Data analytics for simplifying thermal efficiency planning in cities. *Journal of the Royal Society Interface* **13**(117): 20150971.
- [2] Chun-Ming H and Huang CH. 2016. Mitigating urban heat islands: A method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation. *Computers, Environment and Urban Systems* **57**: 130–143.
- [3] Guo F, Zhu P, Wang S, et al. 2017. Improving natural ventilation performance in a high-density urban district: A building morphology method. *Procedia Engineering* **205**: 952–958.
- [4] Li Z, Wang F, Kang T, et al. 2022. Exploring differentiated impacts of socioeconomic factors and urban forms on city-level CO₂ emissions in China: Spatial heterogeneity and varying importance levels. *Sustainable Cities and Society* **84**: 104028.
- [5] Nejat P, Jomehzadeh F, Taheri MM, et al. 2015. A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **43**: 843–862.
- [6] Qiao Z, Xu X, Wu F, et al. 2017. Urban ventilation network model: A case study of the core zone of capital function in Beijing metropolitan area. *Journal of Cleaner Production* **168**: 526–535.
- [7] Roxon J, Ulm FJ, and Pellenq RM. 2020. Urban heat island impact on state residential energy cost and CO₂ emissions in the United States. *Urban Climate* **31**: 100546.

מחקר אחר שנערך בעיר טאיין (Tainan) בטאיוואן [2] והתבסס על מיפוי של שימושי קרקע ונתוני אקלים, מצא שתכנון של מסדרונות רוח דרך איי חום עירוניים עשוי להפחית את הטמפרטורות באזורים הסמוכים למסדרונות. היות שגופי מים וצמחייה מסייעים בהורדת טמפרטורת האוויר, החוקרים ממליצים לשלב את הנחלים העירוניים, הפארקים והשטחים הציבוריים הפתוחים (שצ"פים) העירוניים כחלק ממסדרון הרוח העתידי. מחקרים שהשתמשו במודלים מורכבים, שקללו מגוון נתונים המשפיעים על אי החום העירוני, והגיעו לשלוש מסקנות עיקריות [6,3]: א. "נתיב אוורור עירוני" המתבסס על מערכת שטחים ירוקים ותצורת בניינים מתאימה מפחית בצורה מכרעת את תופעת אי החום העירוני. ב. בניינים גבוהים יוצרים חסימה (wall effect) המפחיתה את יעילות האוורור, ולכן יש הכרח לווסת את הגובה של הבניין. ג. שורות של בנייני רכבת ארוכים ו"בלוקים" גדולים של בניינים מפחיתים את יעילות האוורור ויש להימנע מבנייתם.

לסיכום, יש לגבש מדיניות תכנון רחבה להפחתת תופעת אי החום העירוני ומכאן להפחתת פליטות פחמן דו-חמצני, ולנסח הנחיות מחייבות לתכנון אקלימי (מוקדם) שישתלב במערך התכנוני הכולל. נוסף על כך, חשוב ליצור שיתוף פעולה בין מוסדות התכנון, האקדמיה והמגזר הפרטי, ולשלב ידע גאוגרפי, תכנוני ואקלימי לצורך גיבוש דרכי פעולה כוללות שישלבו פתרונות חדשים מבוססי מדע במערכת התכנון.



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"

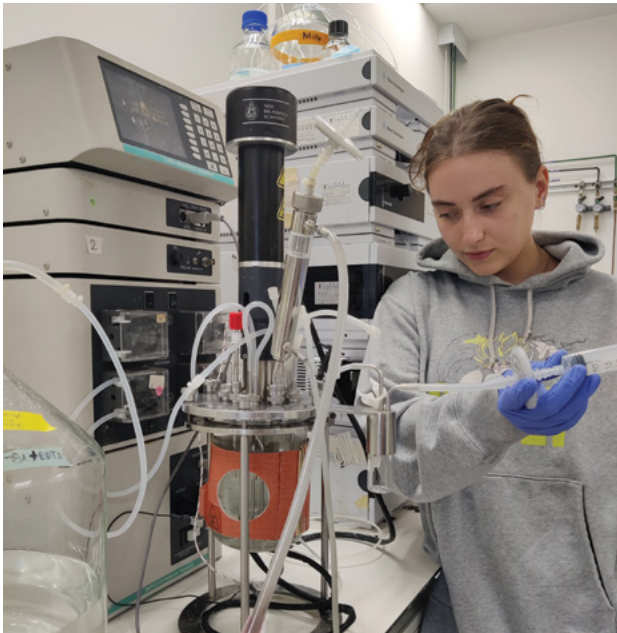
ללמד חיידקים לקבוע פחמן דו-חמצני – מצרכן ליצור באמצעות אבולוציה מעבדתית והנדסה מטבולית

רועי בן ניסן*, אליה מילשטיין, ליאור גרינשפון, אלעד נור ורון מילוא

המחלקה למדעי הצמח והסביבה, מכון ויצמן למדע

* roebn@gmail.com

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,



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

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

איור 1. חזון לתהליך הפקת מזון בר-קיימא בעזרת חיידקים



יצור צרכן, כך שישתמש בפחמן דו-חמצני מהסביבה וייצר 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 במעט 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 ליצרן (אבל עדיין תלוי כמובן במקור אנרגיה). מערכות ביולוגיות הניזונות מפחמן דו-חמצני, כמו הן שיצרנו, הן אבן דרך לקראת פלטפורמה גמישה לייצור בר-קיימא של חומרים שונים ומזון. כיום בתעשיית הבי-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 לתהליכי 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

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.

מדיניות, כמו סבסוד גופים העונים על קריטריונים סביבתיים לייצור ירוק ובר-קיימא של מוצריהם או לחילופין מיטוי 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 ושיוני האקלים, מחקרים מהסוג הזה דחופים במיוחד.

עיר-אוכל – אוכל כמערכת עירונית

נטע לב-רן

המעבדה לסוציולוגיה, המסלול לתכנון ערים ואזורים, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל
neta.le@campus.technion.ac.il

מהרגע שאנחנו קמים ועד שאנחנו הולכים לישון, אנחנו חושבים על אוכל. תוהים מה נשנש ליד הקפה, מתייסרים מה נכין היום לארוחת ערב. חלק מאיתנו בוחרים בדיאטה מסוימת או מבצעים בחירות כצרכנים מה לקנות וממי, וחלק גדלו באזור חקלאי ויודעים קצת יותר. עבור רובנו, תושבי הערים, אוכל הוא משמעותי אך מובן מאליו, כמו התבוננות בשקיעה – אנחנו חווים ומעריכים אותה, אבל לא חושבים כלל על כדור גז ענקי שבווער בחלל.

כל מאכל הוא תוצאה של שרשרת פעולות מורכבת: מגידול חקלאי, דרך טיפול, עיבוד, אריזה, קמעונאות וסיטונאות עד לצריכה וטיפול בפסולת. זו שרשרת תובענית במשאבים: אדמה, מים ואוויר, אנרגיה ודלק, פלסטיק, נייר, אלומיניום ועוד. ההערכה לשנת 2015 היא שמערכת האוכל אחראית ל-18 ג'יגה-טונות שווה ערך פחמן דו-חמצני בשנה, שהן בין 24% ל-42% מפליטות הפחמן העולמיות. 2.6 ג'יגה טונות פחמן, שהן כ-4% מהפליטות העולמיות, קשורות לשימושים שאינם עתירי קרקע בתוך העולם המתועש^[9], או במילים אחרות – לערים שאנו חיים או פועלים בהן. לצורך ההשוואה, עולם התעופה, הנחשב בזבזני במיוחד בפליטות פחמן, היה אחראי בשנת 2018 ל-2.4% מפליטות הפחמן העולמיות^[11].

היסטורית, העיר תמיד עסקה בהרחקת הרעב מחומותיה. המהפכה התעשייתית שינתה את העיסוק העירוני באוכל. טכנולוגיות חדשות לייצור, לשינוע ולאחסון, יחד עם תהליכי הגלובליזציה, ניתקו בפועל את העיר מהטבעת החקלאית שסביבה. העיר המואץ גרר

בעיות תברואה, והביא להתמקדות של המדיניות העירונית בתחומים של בריאות ציבור. גם כיום מדיניות האוכל העירונית מתמקדת באסדרת בריאות הציבור, ונדמה שהיא בעיקר סופרת: מספר הכיורים במטבח, תאריכי תפוגה או כמות שומן ומלח^[8].

מאמר דעה זה הוא קריאה להכרה ב'אוכל' כמערכת עירונית הדורשת התייחסות מעמיקה וכוללנית יותר. זו איננה קריאה חדשה. Kaufman ו-Pothukuchi ביקשו כבר ב-1999 להפוך את האוכל מבלתי-נראה לנראה ולהתייחס למערכת האוכל העירונית בדומה למערכת הדיור או למערכת התחבורה^[11]. משבר המזון העולמי ב-2008 האיץ עוד יותר את ההכרה בצורך זה^[8]. אחת הפעולות המשמעותיות בקידום מדינות אוכל עירונית היא 'אמנת מילאנו' (Milano Urban Food Policy Pact) מ-2015. האמנה הבין-לאומית, שחתומות עליה כיום 240 ערים מרחבי העולם, היא תוצר של תוכנית האקלים של מילאנו. האמנה מפרטת 37 פעולות מומלצות המחולקות לשש קטגוריות: משילות ומנהל, תזונה בת-קיימא, הון חברתי-כלכלי, ייצור, אספקה והפצה, ופסולת מזון^[10].

האמנה מציעה, למשל, פעולות לייצור אוכל ולטיפול בהפצה ברחבי העיר ובסביבתה הקרובה, בין אם באמצעות טכנולוגיות חדשות או באמצעות חקלאות עירונית מקומית, כדי לקצר את שרשרת האספקה והמשאבים המושקעים בשינוע ואחסון. ההתייחסות לנושא הפסולת היא גם בהקשר של צמצום הבזבז, כלומר אוכל ראוי לאכילה שמוצא את עצמו בזרם הפסולת, וגם טיפול נכון יותר בפסולת שנוצרת, אורגנית או אריזות. הפעולות האלה יכולות לסייע בהפחתת פליטות הפחמן העירוניות יחד עם הגברת המוכנות למשברים ולאירועי קיצון עתידיים^[10].

הצורך להכיר באוכל כמערכת עירונית מתחיל ומחלחל גם בישראל. משרד החקלאות ופיתוח הכפר פרסם ב-2021 מסמכים הנוגעים לחקלאות עירונית. במסמכים מתבצעות בחינה ראשונית של תפקידה העתידי האפשרי של חקלאות עירונית אל מול החקלאות התעשייתית במגזר הכפרי והתמקדות בהיבטים