



אומדן היבטי קיימות והשפעה על שטחים פתוחים במערכות אגרו-וולטאיות בשדות ובמטעים בהשוואה לחממות

לירון אמדור^{1*} | איברהים יחיא²

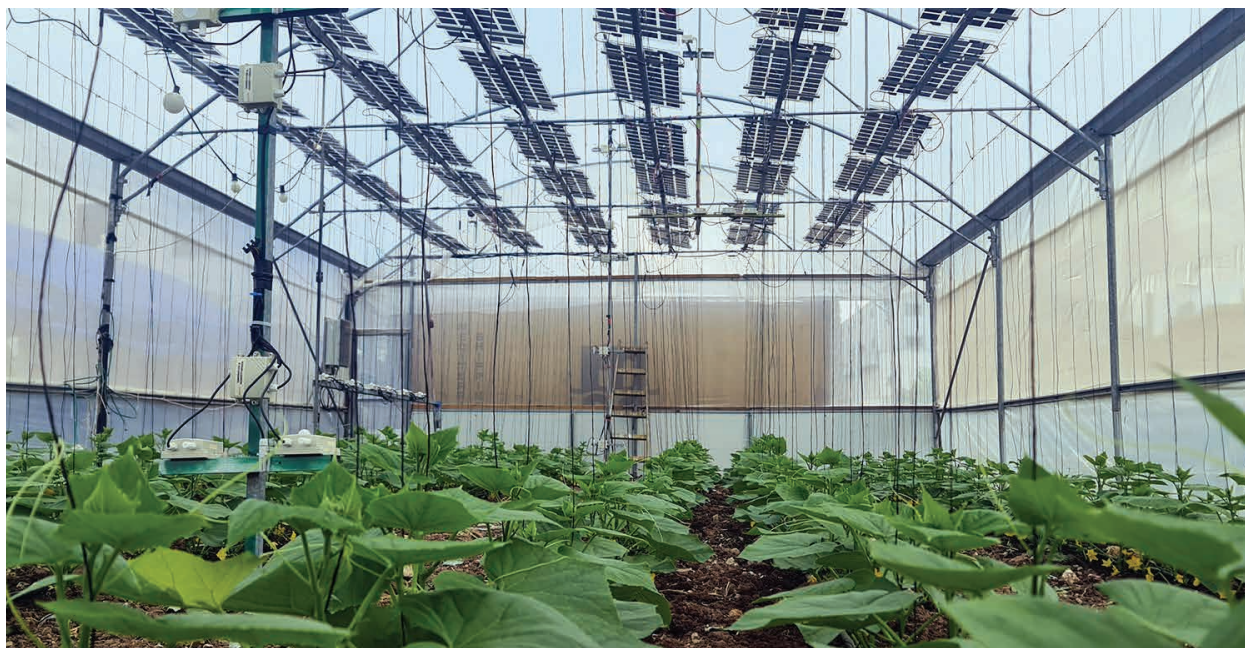
- 1 מכון דש"א, מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב
- 2 מו"פ המשולש, כפר קרע
- * amdurliron@gmail.com

רקע

מערכות אגרו-וולטאיות יכולות להיות משולבות בשטחים חקלאיים מסוגים שונים: שטחים חקלאיים פתוחים – כמו מטעים ושדות, על גבי חממות ובתי צמיחה, בבריכות דגים ועוד. המאמר עוסק בהשוואת היבטי הקיימות של מערכות אגרו-וולטאיות בשטחים חקלאיים פתוחים לעומת הצבתן בחממות. מדובר בפרק בפרויקט המחקר הבין-לאומי REGACE הממומן על ידי קרן Horizon Europe של האיחוד האירופי במטרה לפתח טכנולוגיה חדשנית לייצור אנרגיית שמש בחממות; הפרויקט מרוכז על ידי מו"פ המשולש שבכפר קרע, וכולל אתרי ניסוי בחמש מדינות.

מערכות אגרו-וולטאיות בשטחים חקלאיים פתוחים כוללות בדרך כלל מבנה תמך להרמת הפאנלים מעל הגידולים, תוך קירוי חלקי של השטח. הדרך המקובלת לשילוב פאנלים בחממות היא על גג החממה, והפאנלים מוחזקים על ידי עמודי תמך או על שלד החממה. אפשרות נוספת היא להצמיד את הפאנלים לדפנות החממה. בשנים האחרונות פותחה במו"פ המשולש מערכת חדשנית המטמיעה את הפאנלים בתוך החממות, מתחת ליריעות הכיסוי (איור 1).

מערכות אגרו-וולטאיות הן מתקנים לייצור חשמל בעזרת פאנלים סולאריים המשולבים בשטחים חקלאיים, תוך שמירה על הפעילות החקלאית. מערכות אגרו-וולטאיות מאפשרות להפיק אנרגיה ומזון בתא שטח אחד, וזאת בניגוד למערכות פוטו-וולטאיות קרקעיות, שבמקרים רבים באות על חשבון עיבודים חקלאיים מאחר שהן תופסות את הקרקע. מיזמים אגרו-וולטאיים מאפשרים לקדם מקורות אנרגיה חלופיים ולצמצם את ההשפעה על האקלים, תוך שמירה על ביטחון המזון. מדינת ישראל מקדמת מערכות אגרו-וולטאיות באמצעות החלטות ממשלה תומכות ותכנון מאפשר. אומנם השפעתן של מערכות אגרו-וולטאיות על השטחים הפתוחים מתונה ביחס להשפעתם של מיזמים קרקעיים, אך הן משנות באופן יסודי את אופי המרחב, ומאחר שחלק מהן מגודרות, הן קוטעות את רצף השטחים הפתוחים. גידור יוצר קיטוע של בתי גידול, מונע מעבר של בעלי חיים, ועלול להוביל לפגיעה במגוון הביולוגי ולצמצום באוכלוסיות של מינים מסוימים. נוסף על כך, יש למערכות אגרו-וולטאיות מחירים בהיבטי קיימות אחרים, כפי שיפורט במאמר, ויש להביא זאת בחשבון בעת קביעת מדיניות אקלים וסביבה.



איור 1

פאנלים סולאריים בחממה מתחת ליריעות הכיסוי

מחקר REGACE, מרכז מו"פ המשולש, כפר קרע. צילום: איברהים יחיא.

במטעים ובשדות בעמק המעינות נקבע אחוז כיסוי של 45.7% בחלק מהשטח (הוועדה המקומית לתכנון ולבניה עמק המעינות, 2023). המדיניות למערכות אגרו-וולטאיות בישראל אינה כוללת אמירה חד-משמעית לטובת חממות, ומיזמים אגרו-וולטאיים במטעים ובשדות מקודמים בהיקפי שטח נרחבים.

בישראל יש כ-120,000 דונם גידולי ירקות בכיסוי (משרד החקלאות, 2025). ישראל הציבה לעצמה יעד של הספק סולארי כולל של 17.1 ג'יגה-ואט עד שנת 2030, שמתוכם 35% ימומשו על גגות מבנים (משרד האנרגיה, 2022). ההספק הממוצע בחממות המחקר של REGACE הוא 36.5 קילוואט לדונם, אך משיחות עם חקלאים מדרום הארץ עולה כי חלקם התקינו בחממות מערכות וולטאיות עם הספק של 50 קילוואט לדונם. המשמעות היא שפוטנציאלית, מערכות בשטח גידולי כיסוי יכולות לתרום 39% עד 53.8% מיעדי אנרגיית השמש של ישראל (בניכוי אלה שימומשו על גגות).

מטרות המחקר ושיטות המחקר

מטרת המחקר המוצג היא זיהוי משתני הקיימות של מערכות אגרו-וולטאיות בשטחים חקלאיים פתוחים לעומת חממות, ובחינה השוואתית שלהן, ככלי לקבלת החלטות מושכלות.

בישראל קיימים כיום (פברואר 2025) שישה מיזמים אגרו-וולטאיים בשטחים חקלאיים פתוחים, כולם הוקמו בחמש השנים האחרונות. שלושה מתוכם הם מחקריים ופועלים באוניברסיטאות או במרכזי מו"פ, ושלושה מסחריים. בכולם הפאנלים מורמים מעל הגידולים. במחצית מהמיזמים הגידולים החקלאיים הם גידולי שדה, ובמחציתם – מטעים וכרמים. נוסף על כך, ישנן כיום ברחבי הארץ עשרות חממות שבהן מערכות סולאריות, מרביתן מערכות מסחריות. החשמל המיוצר בחממות יכול להיות מוזרם לרשת החשמל ולייצר הכנסה נוספת לחקלאי. הגידולים בחממות שיש בהן פאנלים סולאריים הם ירקות, גידולי עלים ופרחים.

שילוב פאנלים סולאריים בחממות פשוט יחסית מבחינת האסדרה: ניתן להקים מערכות בהליך של היתר בנייה (משרד החקלאות, 2024), וזאת בדומה לגגות מבנים, בעוד שלאישור מתקנים אגרו-וולטאיים בשטחים פתוחים נדרשת תוכנית מתאר מפורטת. גם בהיבט המקרקעין ישנן הקלות: רמ"י (רשות מקרקעי ישראל) אינה מחייבת תשלום נפרד על הצבת פאנלים על גג חממות, בדומה להצבת פאנלים על גגות מבנים, וזאת בניגוד למיזם אגרו-וולטאי במטע או בשדה המחייב עסקה נפרדת ותשלום גבוה יחסית מול רמ"י. עם זאת, בחממות אחוז ההצללה המותר הוא עד 15% (משרד החקלאות, 2024), ואילו בשטחים פתוחים אחוז ההצללה נקבע פרטנית עבור כל מיזם בפני עצמו, ולעיתים הוא גבוה יותר – לדוגמה, במיזם אגרו-וולטאי בכרמים,

בחממות, החממה עצמה היא זו שתופסת את השטח הפתוח, והוספת שימוש של הפכת אנרגיה במסגרתה אינו מוסיף כגיעה בשטחים פתוחים.

השימוש במשאבי טבע והגדלת מִדְרָךְ הפחמן נובעים מהשימוש הניכר בברזל במבנה התמך של הפאנלים במערכות בשטחים פתוחים. מבדיקת מיזמים אגרו-וולטאיים הקיימים בישראל עולה כי לצורך הקמת מבנה התמך של הפאנלים משתמשים בממוצע בכ-103 ק"ג ברזל לקילוואט חשמל. בחממות הנכללות במחקר REGACE משתמשים במבנה התמך בממוצע בכ-48 ק"ג ברזל בלבד לקילוואט, מכיוון שהקורות המחזיקות את הפאנלים מוצמדות לשלד החממה, ואין צורך לבנות מבנה תמך ייעודי. ייצור ברזל צורך אנרגיה רבה וכרוך בפליטה משמעותית של פחמן דו-חמצני. ייצור של טונה ברזל בטכנולוגיה המקובלת בעולם מביא לפליטה של 1.9 טונות פחמן דו-חמצני (Sohn, 2019). מִדְרָךְ הפחמן של הברזל במבני התמך של מערכות אגרו-וולטאיות בשטחים פתוחים עומד על כ-178.2 ק"ג פחמן-דו חמצני לקילוואט חשמל. לעומת זאת, מִדְרָךְ הפחמן של הברזל במערכת התמך בחממות מחקר REGACE עומד על כ-91 ק"ג פחמן דו-חמצני לקילוואט בלבד.

היבטים כלכליים: ניתוח ממציא הפרסומים מהעולם מראה כי עלות ההשקעה במיזם אגרו-וולטאי בשטחים פתוחים היא בממוצע כ-1,200 אירו לקילוואט חשמל. עלות ההקמה של המתקן האגרו-וולטאי בחממות של מחקר REGACE היא בממוצע כ-921 אירו לקילוואט חשמל, כלומר זולה בכ-23% בהשוואה לעלות הקמה של מערכת אגרו-וולטאית בשטחים פתוחים (איור 2).

היבטים חברתיים: הקמת מערכות אגרו-וולטאיות בחממות דורשת כחות עבודת התקנה ועבודה חקלאית בהשוואה למערכות בשטחים פתוחים. עלות העבודה (המשקפת את מספר שעות העבודה) בהתקנת המערכות של מחקר REGACE זולה בכ-39% לקילוואט ביחס להתקנת מערכת אגרו-וולטאית בשטח פתוח (ניתוח פרסומים מהעולם, כפי שפורט לעיל). בשטחים פתוחים מערכות אגרו-וולטאיות מייצרות עבודה חקלאית נוספת בשל מורכבות התמרון של כלים חקלאיים בין עמודים, או בשל מגבלות על שימוש במכונות (למשל, קשה להפעיל קטפת מכנית בכרם אגרו-וולטאי, ויש צורך בקטיף ידני של הענבים). בחממות מרבית העבודה החקלאית ידנית ואינה מבוססת על מיכון, ולכן לא מתווספת עבודה חקלאית בעקבות התקנת מערכת סולארית. החיסכון בעבודה יכול להשפיע באופן שלילי על פיתוח תעסוקה במגזר האנרגיה והחקלאות, ומאידך גיסא, להשפיע באופן חיובי במקומות שיש בהם מחסור בעובדים. בישראל, שסובלת ממחסור מתמשך בעובדים בחקלאות, יש

לקיימות שלושה היבטים: סביבתי, כלכלי וחברתי (Purvis et al., 2019). במסגרת המחקר נבדקו היבטי הקיימות הבאים: היבט סביבתי – השפעות על שטחים פתוחים ועל המופע הנופי, שימוש במשאבי טבע, מִדְרָךְ הפחמן (carbon footprint); היבט כלכלי – עלות ההקמה של המערכת; היבט חברתי – יצירת תעסוקה בהקמה ובתחזוקה של מערכת האנרגיה, תוספת עבודה חקלאית בשל שילוב מערכת אנרגיה בשטח החקלאי. ישנם כמובן נושאים נוספים בכל אחד מהיבטי הקיימות הללו, וניתן לבחון אותם במחקרי המשך.

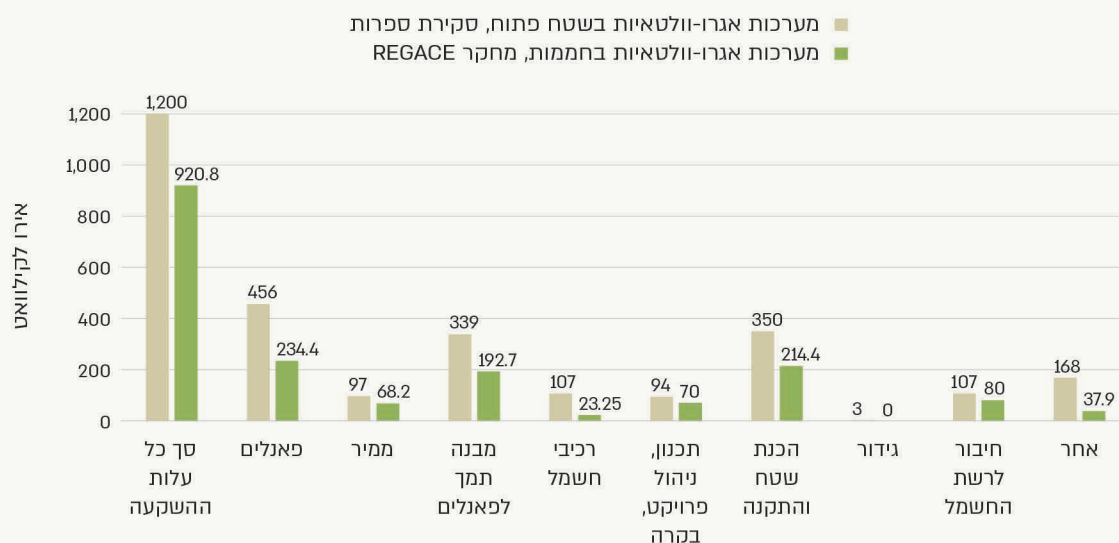
המחקר המוצג מתבסס על סקר של כל אתרי המערכות האגרו-וולטאיות הקיימים בישראל, שנערך בחודשים אוגוסט וספטמבר 2024, וכלל ביקורים באתרים וראיונות עם מנהליהם על בסיס שאלון מובנה; סקירת ספרות בנושאי כלכלה ותעסוקה במיזמים אגרו-וולטאיים בשטחים פתוחים; בחינת נתונים מתוך אתרי הניסוי בחממות של מחקר REGACE.

סקירת הספרות כללה מאמרים אקדמיים, פרסומים של רשויות ממשלתיות ומוסדות מחקר, ומצגות מכנסים בין-לאומיים בתחום המערכות האגרו-וולטאיות. נמצאו ונבדקו 18 פרסומים (למשל: Horowitz et al. 2020; Schindele et al. 2020; Feuerbacher et al. 2022) מהשנים 2020–2023, המפרטים פרמטרים כלכליים של 39 מערכות אגרו-וולטאיות ב-15 מדינות ברחבי העולם.

תוצאות

היבטים סביבתיים: למערכות אגרו-וולטאיות בשטחים חקלאיים פתוחים יש השפעה נופית ניכרת: שדות ומטעים משנים את מופעיהם למעין "יער מתכת", מאחר שעמודי ברזל גבוהים מוצבים בהם בצפיפות רבה (במיזמים האגרו-וולטאיים בישראל גובה העמודים נע בין 1.5 ל-4.5 מטר, והם מוצבים במרחק של כ-3–6 מטר זה מזה), ופאנלים מוצבים בשיעור כיסוי ממוצע של 27%. לעומת זאת, בחממות הפאנלים מוצבים קרוב יחסית לגג או לדפנות החממה, או מתחת ליריעות הכיסוי. הם נטמעים בחממה מבחינה נופית, ואינם יוצרים מופע חריג.

באשר להשפעה על רצף שטחים פתוחים: רק בשני מיזמים אגרו-וולטאיים במטעים ובשדות בישראל יש שימוש בגדר היקפית, והאחרים אינם מגודרים; עם זאת הצבת העמודים, הקורות והפאנלים בשטח החקלאי מביאה לשינוי באופי בית הגידול, בתפקוד האקולוגי שלו ובתרומתו למכלול השטחים הפתוחים (צלוק, 2021). במערכות שנמצאות



איור 2

השוואת רכיבי עלות השקעה במערכת אגרו-וולטאית בשטחים פתוחים ובחממות

מקורות: עבור מערכות אגרו-וולטאיות בשטחים פתוחים: ממוצע נתוני סקירת ספרות מהעולם; עבור חממות: נתוני מחקר REGACE, חמישה אתרי ניסוי.

לחלק מהטכנולוגיות יש השפעות סביבתיות שמעמידות את התועלת האקלימית בסימן שאלה. ייצור ברזל למערכת התמך של מיזם אגרו-וולטאי בשטח פתוח צורך אנרגיה ופולט כמויות רבה של פחמן, אותו גורם שאנרגיות ממקורות מתחדשים נועדו לצמצם; אומנם גם לבניית חממה נדרש ברזל, אך במיזם אגרו-וולטאי בחממה הברזל ישמש לשתי תכליות בו-זמנית: לנשיאת יריעות החממה ולפאנלים הסולאריים; יש כאן יעול של השימוש במשאבי טבע בהשוואה למצב שבו שלד ברזל אחד מוקם לטובת חממה ושלד נוסף לטובת הצבת פאנלים במיזם אגרו-וולטאי בשטח פתוח. המחקר שהוצג יכול לסייע לקובעי המדיניות לקבל החלטה מושכלת על סוג מיזמי האנרגיה שכדאי לקדם, על בסיס מגוון פרמטרים של קיימות.

תודות

המחקר נערך במסגרת מכון דש"א אוניברסיטת תל אביב ומו"פ המשולש. המחקר הוא חלק מפרויקט מחקר REGACE המרוכז על ידי מו"פ המשולש, ושותפים לו חוקרים מישראל וממספר מדינות באירופה. הפרויקט קיבל מימון מתוכנית המחקר והחדשנות Horizon Europe של האיחוד האירופי במסגרת הסכם מענק מספר 101096056. הטכנולוגיה של שילוב סולארי בחממות פותחה במו"פ המשולש.

לשקול בזהירות את המשמעות של הצורך בתוספת עבודה חקלאית בעקבות הקמת מערכת אגרו-וולטאית במטע או בשדה. היבט חברתי נוסף שראוי לשקול, אף שלא נבדק במחקר, הוא שמערכות אגרו-וולטאיות בשטחים פתוחים הן רחבות היקף, ועל כן נותנות עדיפות לחקלאים גדולים ולתאגידים חקלאיים. קידום מערכות בחממות, לעומת זאת, תומך במשק המשפחתי הקטן.

דיון ומסקנות

בהיבטים סביבתיים יש למערכות בחממות השפעות נמוכות יחסית על הנוף, על השימוש במשאבי טבע (ברזל) ועל פליטת פחמן. בניגוד למערכות אגרו-וולטאיות בשטחים פתוחים, הן גם אינן גורמות לקיטוע של המרחב, שכן החממה עצמה תופסת את הקרקע, והמערכת הסולארית רק מוסיפה שימוש על מבנה קיים. בחישוב לקילוואט חשמל, עלות ההקמה של מערכת אגרו-וולטאית בחממות נמוכה יותר מאשר הקמת מערכת אגרו-וולטאית בשטחים פתוחים, עובדה שיכולה לספק תמריץ להקמת מערכות אנרגיה ממקורות מתחדשים ולצמצם שימוש בדלקי מחצבים.

מיזמים אגרו-וולטאיים נועדו לצמצם השפעות אקלימיות באמצעות מעבר לאנרגיות ממקורות מתחדשים. עם זאת,

מקורות

- Feuerbacher A, Herrmann T, Neuenfeldt S, Laub M, and Gocht A. 2022. Estimating the economics and adoption potential of agrivoltaics in Germany using a farm-level bottom-up approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168(C), 112784.
- Horowitz K, Ramasamy V, Macknick J, and Margolis R. 2020. *Capital Costs for Dual-Use Photovoltaic Installations: 2020 Benchmark for Ground-Mounted PV Systems with Pollinator-Friendly Vegetation, Grazing, and Crops*. National Renewable Energy Laboratory. U. S. Department of Energy. www.nrel.gov/docs/fy21osti/77811.pdf
- Purvis B, Mao Y, and Robinson D. 2019. Three pillars of sustainability: In search of conceptual origins. *Sustainability Science*, 14(3), 681–695.
- Schindele S, Trommsdorff M, Schlaak A, Obergfell T, Bopp G, Reise C, et al. 2020. Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*, 265, 114737.
- Sohn HY. 2020. Energy consumption and CO₂ emissions in ironmaking and development of a novel flash technology. *Metals*, 10(1), 54.
- הוועדה המקומית לתכנון לבנייה עמק המעינות. 2023. היתר בנייה מס' בקשה 20210307/1 10000160089. 5.2.2023.
- משרד האנרגיה. 2022. מפת הדרכים לאנרגיות מתחדשות בשנת 2030. www.gov.il/BlobFolder/news/re_290522/he/roadmap_reference_2030.pdf
- משרד החקלאות. 2024. מתקנים כונו-וולטאים על גג או חזית חממה הנחיות ועקרונות לאישור משרד החקלאות ופיתוח הכפר. מהדורה שלישית דצמבר 2024. www.gov.il/he/pages/photovoltaic_installations_on_the_roof_or_front_of_a_greenhouse_guidelines_and_principles_for_approval
- משרד החקלאות. 2025. אתר מידע גיאוגרפי כונו לציבור. <https://data1-moag.opendata.arcgis.com>
- צילום מ. 2021. שיקולים אקולוגיים בהפעלת חוות אגרו-וולטאיות בשטחים חקלאיים. המשרד להגנת הסביבה. https://www.gov.il/he/pages/ecological_considerations



מתקן אגרו-סולארי במו"פ רמת הנגב, טכנולוגיה בבעלות חברת אגריליין מערכות אנרגיה בע"מ, 2024
צילום: לירון אמדור



פאנלים סולאריים בחווה חקלאית הסמוכה לעיר רומא שבאיטליה, 2024
צילום: לירון אמדור