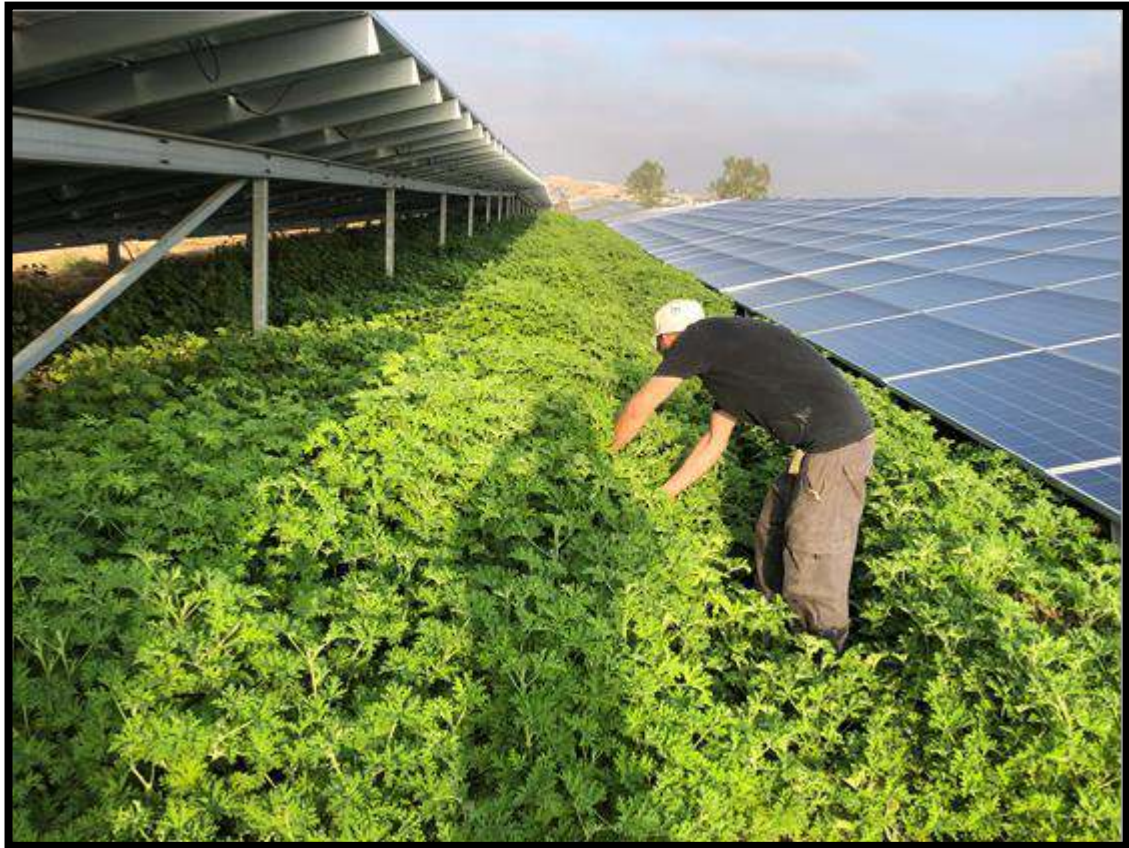


התייעלות אנרגטית במתקנים פוטו-וולטאים באמצעות כיסוי קרקע צמחי



ג'וליאן ליף – מנהל הניסוי, כתיבת הדו"ח

לוטן טלשיר – תפעול ואחזקת הניסוי

ד"ר יובל קיי – יעוץ חקלאי

לירן בן אלטבט – ניתוח סטטיסטי

דוד מנינגר – ניהול ותכנון המו"פ

יעוץ אקדמי: פרופ' אביתר אראל

תקציר

חברת גיא-טבע ייעוץ סביבתי בע"מ ביצעה מחקר אשר בחן התייעלות אנרגטית במתקנים סולאריים ע"י הפחתת טמפרטורת הפאנל באמצעות שימוש בכיסוי קרקע צמחי. המחקר מציע שימוש כפול במשאב הקרקע לייצור אנרגיה בשילוב חקלאות, ובכך להגדיל את הערך הכלכלי של הקרקע.

מטרת העבודה לתת מענה לשתי שאלות עיקריות:

[א] האם ניתן להשיג התייעלות אנרגטית במתקנים סולאריים על ידי הוספת צמחיית כיסוי אשר תצנן את הפאנלים הסובלים מעומס חום בחודשי הקיץ וכתוצאה מכך יעילותם פוחתת.

[ב] האם ניתן להשתמש בצומח חקלאי לצורך השגת מטרה זו, על מנת לאפשר את העלויות הגבוהות הכרוכות בשתילה וטיפול בצמחיה זאת לצד שימוש נוסף בקרקע לחקלאות.

המחקר בוצע בחודשי הקיץ (יוני – אוקטובר 2020) בשדה סולארי אותו מפעילה חברת EDF RENEWABLES הנמצא בקרבה ליישוב משאבי שדה. נשתלו שתי חלקות בגודל 2.2 דונמים כל אחת עם צמחיית כיסוי חקלאי (גירניום לימוני) וצמחיית כיסוי משתרע (דיכונדרה וסיגלית אוסטרלית), וחלקה דומה ללא טיפול שימשה כביקורת. הפרמטרים שנמדדו כללו טמפרטורת פאנל, קרינת שמש גלובלית, קרינה מוחזרת ונפלטת מפני הקרקע, מאזן קרינה, זרם, מתח, טמפרטורה ולחות אוויר, מהירות וכיוון רוח. באמצעות נתונים אלו נמדדו ההבדלים בין טמפרטורת הפאנלים בחלקות וההספק החשמלי חושב ונמדד. נמצא כי טמפרטורת הפאנלים בחלקות הניסוי נמוכה יותר בשעות האור בשיעור ממוצע של $1.0-2.2^{\circ}\text{C}$, ולכן הם מפיקים יותר חשמל (שיפור של כ-1%). השיפור המרבי התקבל בשעות השיא בפאנלים הגבוהים בחלקת הדיכונדרה, שהיו צוננים ב-3.5 מעלות בערך, ותפוקת החשמל שלהם עלתה ב-1.6% אחוז. הצמחייה שנמצאת באזור שבין הפאנלים פולטת ומחזירה פחות קרינה, והשפעתה מורגשת בעיקר על הפאנלים אשר גזרת הראייה שלהם ביחס לרצועת הצמחייה היא הגדולה ביותר. עיקר ההשפעה נובעת מהפחתה של הקרינה הנפלטת והמוחזרת מפני הקרקע במרווח בין השורות, ורק מקצתה עקב הבדלים בטמפרטורת האוויר. מההיבט החקלאי ניכר היה שעיקר היבול היה באזור שבין הפאנלים (5.1 טון/דונם), בעוד שבאזור העמוק מתחת לפאנלים היה ניתן להבחין בפחיתה של כ-50% ביבול. ניתוח ערך קרקע שבוצע באמצעות מדד ה- LER הביא לערך של 1.672, כלומר גידול בערך הקרקע של 67.2 אחוז. בקרקע המיועדת למיתקן סולארי המתאימה גם לגידולים חקלאיים השימוש הכפול בקרקע יביא אפוא תועלת, כל עוד הגידול החקלאי הוא רווחי בתנאים האלה. מאחר והצמחייה שנמצאת באזור שבין הפאנלים הינה בעלת ההשפעה החזקה ביותר על תפוקת החשמל, ואזור זה הוא גם בעל הפוטנציאל החקלאי העיקרי, מומלץ לנצל רק את האזור הזה לגידול חקלאי בעוד שבאזור שמתחת לפאנלים ניתן לזרוע מיני צומח משתרעים שמתאימים לצל אך אינם בעלי ערך כלכלי, כדוגמת הדיכונדרה.

תוכן העניינים

1.....	מבוא.....	1.
1.....	1.1. מטרת המחקר.....	
3.....	2. רקע מדעי.....	2.
3.....	2.1. השפעת הטמפרטורה של הפאנלים על תפוקת החשמל.....	
5.....	2.2. השפעת הצמחייה על המיקרו אקלים.....	
7.....	2.2.1. PVHI – Photovoltaic Heat Island – אי חום במתקנים פוטו-וולטאים.....	
7.....	2.2.2. הגדלת יעילות ייצור החשמל על ידי שימוש בצמחייה.....	
9.....	2.2.3. פאנלים פוטו-וולטאים על גבי גגות ירוקים.....	
9.....	2.3. שימוש משולב של חקלאות ושדות סולאריים (Agrivoltaics).....	
11.....	2.3.1. השפעת יישום משטח ירוק מתחת לפאנל סולארי.....	
13.....	2.3.2. השפעת הצמחייה על קרקע ונגר בשדות PV.....	
14.....	3. שאלת המחקר.....	3.
15.....	4. שיטות וחומרים.....	4.
15.....	4.1. פריסת הניסוי.....	
16.....	4.2. הכנת הקרקע והצמחייה בחלקות הטיפול.....	
20.....	4.3. מערך המדידות.....	
25.....	5. תוצאות (א) מיקרו-אקלים ותפוקת חשמל.....	5.
25.....	5.1. ביצוע מדידות הקיץ.....	
25.....	5.2. נתונים מיקרו-אקלימיים.....	
28.....	5.3. טמפרטורת פאנל ויעילות חשמלית.....	
34.....	5.3.1. יעילות חשמלית.....	
34.....	5.3.2. חישוב תפוקת החשמל על ידי שימוש בנתוני יצרן.....	
39.....	5.3.3. מודל כללי לטמפרטורת פאנל פוטו-וולטאי.....	
41.....	6. תוצאות (ב) צמחייה וחקלאות.....	6.
41.....	6.1. צריכת מים.....	
42.....	6.2. השוואת התפתחות הצמחים בחלקות השונות.....	
49.....	6.2.1. דיון ומסקנות ההיבט החקלאי.....	
50.....	7. ניתוח כלכלי.....	7.
50.....	7.1. שימוש דואלי בקרקע בישראל.....	
50.....	7.1.1. יעדי ממשלה.....	
50.....	7.1.2. מכרזי רשות החשמל.....	
51.....	7.1.3. תשלומי חכירה.....	
51.....	7.1.4. העסקה בין היזם ובעלי הקרקע.....	
51.....	7.2. חישוב LER.....	

53.....	7.3. עלות ותועלת חקלאית.....
53.....	7.3.1. עלות הרכיבים החקלאיים.....
56.....	7.3.2. הערכה כלכלית לגידול חקלאי בין הפנלים.....
56.....	7.3.3. עלות כללית של שדה גירניום לימוני.....
58.....	7.4. סימולציה כלכלית תיאורטית.....
58.....	7.4.1. הרווחים המשוערים ממתקן סולארי.....
58.....	7.4.2. הרווחים המשוערים משדה חקלאי.....
59.....	7.4.3. הערכת התועלת הכלכלית משיפור בתפוקת החשמל השנתית.....
59.....	7.4.4. התועלת הכלכלית הנובעת מחיסכון בתחזוקת המתקן.....
60.....	7.4.5. תועלת התוצרת החקלאית.....
60.....	7.4.6. סיכום.....
61.....	8. מסקנות והמלצות.....
63.....	9. מקורות.....

1. מבוא

ועידת פריז העולמית לנושא האקלים הביאה להחלטות ממשלה שונות וכתיבת תכנית מתאר ארצית המסדירה תכנון של מתקנים פוטו-וולטאים בשטחים שונים. מכוח תכנית מתאר ארצית 10/ד/10 מוקמים עשרות מתקנים פוטו-וולטאים בימים אלו ועוד עשרות תכניות למתקנים נמצאים על שולחנות מוסדות התכנון. על פי דו"ח ראשוני של תכנית האב למשק החשמל צפויים להיות בשנת 2030 כ-5,000-7,000 מגה וואט מותקנים של מערכות סולאריות (תובנות ראשוניות מתכנית האב למשק החשמל, 2017).

החלטות ממשלה 4450 ו-542, חוק האנרגיה המתחדשת שעבר בכנסת בשנת 2017 ומכסות למערכות סולאריות שפרסמה רשות החשמל האיצו משמעותית ייצום והקמה של מתקנים פוטו-וולטאים קרקעיים. בכלל זה, תמ"א 10 ד' 10 מהווה גם היא גורם חשוב לאסדרה של מתקנים אלו במנהל התכנון. ביום 17/03/2018 דווח על ידי חברת החשמל נתון שיא של ייצור חשמל מאנרגיות סולאריות, 804 מגה וואט, שהיוו 13.4% מסך הביקוש המשקי באותו זמן בארץ. נתון זה הינו תוצאה של הקמת מתקנים סולאריים בארץ בשנים האחרונות.

1.1 מטרת המחקר

מתקנים פוטו-וולטאים בישראל מוקמים לרוב בשטחי משבצות חקלאיות של מושבים וקיבוצים. מו"פ זה מציע שימוש כפול במשאב הקרקע לייצור אנרגיה בשילוב חקלאות. ככל שיתאפשר שימוש חקלאי לכיסוי הצמחי יגדל הערך הכלכלי של הקרקע.

מעבר לתועלת הכלכלית, בהתפתחות של צמחייה במתקנים פוטו-וולטאים טמון פוטנציאל לאפקט נלווה סביבתי חיובי ע"י מזעור ההשפעות של סחף קרקע ונגר עילי. בעת סופות גשם מתפתח נגר רב בשל פיתוח מוגבר ובנייה של משטחים בלתי חדירים. לנגר זה השפעה שלילית גם כתוצאה מהצפות וגם בשל פיחות בהעשרת מאגרי מי התהום. תהליך נלווה להתפתחות הנגר הינו בליית הקרקע, תהליך בעל אפקט סביבתי שלילי הן בעולם בכלל ובישראל בפרט. לסחף הקרקע השפעות על דגדגציה של טיב הקרקעות החקלאיות, נזקים לתשתיות ולמערכת האקולוגית. כיום, גובר החשש כי מתקנים פוטו-וולטאים שממוקמים בשטחים פתוחים תורמים להגברת תופעות אלו, דבר המקשה על ההליך התכנוני טרם ההקמה.

כפי שיוצג בהמשך, הנושאים המוצגים לעיל מבוססים על תיאוריות מדעיות ונתונים מענה לשלושה תחומים המפורטים בקול הקורא להגשת הצעות מחקר לשנת 2019 שפורסם ע"י חח"י:

א. **התייעלות אנרגטית תוך מזעור עלויות תפעול מערכת החשמל** – שיפור האספקה למערכת החשמל אצל היצרן הפרטי וללא שינויים ועבודות תשתית במערכת הולכת החשמל, כאשר ההספק המותקן של המערכת הסולארית נותר ללא שינוי.

ב. **אנרגיות חלופיות ומתחדשות והשפעת שילובן על מערכת החשמל** – ייעול מערכת הייצור של האנרגיות המתחדשות והגדלת התפוקה היחסית מתוך סך תמהיל הדלקים במערכת החשמל.

ג. **היבטים סביבתיים הקשורים למערכת החשמל** – מזעור ההשפעות הסביבתיות על סחף קרקע ונגר עילי במתקנים פוטו-וולטאים.

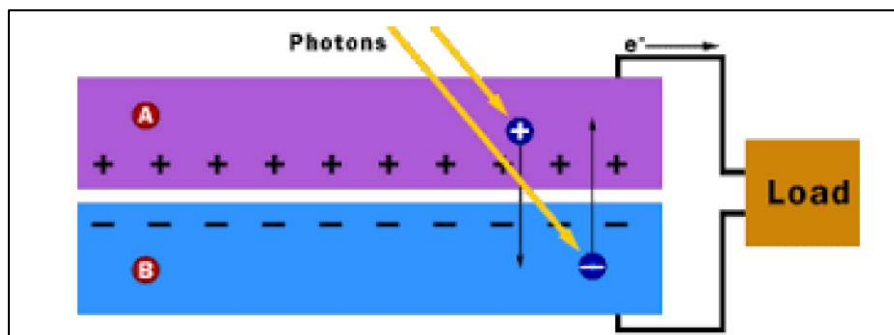
חברת גיאוטבע, ייעוץ סביבתי בע"מ וחברת EDF-EN, אנרגיות מתחדשות, הציעה מחקר הבוחן התייעלות אנרגטית במתקנים סולאריים ע"י הפחתת טמפרטורת הפאנל באמצעות שימוש בכיסוי קרקע צמחי.

השימוש בצמחייה מתחת לפאנלים אינו מהווה כיום פרקטיקה נפוצה לצורך הפחתת החום המוחש והקרינה הנפלטים מהקרקע, לצורך הגדלת יעילות הפאנלים. אולם, קיימים מספר מחקרים שנעשו על גבי גגות ירוקים הכוללים צמחייה ופאנלים פוטו-וולטאים התומכים בתאוריה המוצגת במסמך זה.

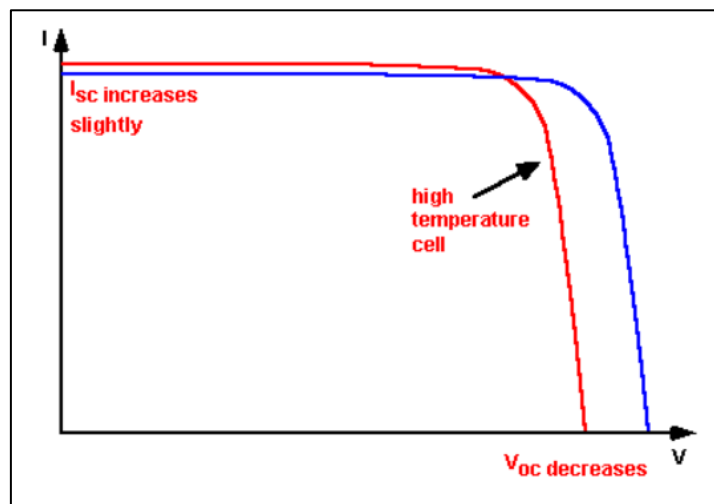
2. רקע מדעי

2.1 השפעת הטמפרטורה של הפאנלים על תפוקת החשמל

בדומה לכל מכשיר מוליך למחצה, תאים פוטו-וולטאים רגישים לשינויים בטמפרטורה. עליות בטמפרטורה מצמצמות את האנרגיה הנדרשת עבור אלקטרון לעבור לרמה גבוהה יותר במוליך למחצה. ה"דרך" שנדרש אלקטרון לעבור במוליך למחצה מכונה "פער האנרגיה" (איור 1). עליה בטמפ' מוסיפה אנרגית חום למערכת ולמעשה מעלה את רמת האנרגיה של האלקטרונים. לכן כאשר אור פוגע בתא הפוטו-וולטאי נדרשת פחות אנרגיה על מנת להעלות את האלקטרון לרמה גבוהה יותר או במילים אחרות נדרשת פחות אנרגיה על מנת לערער אלקטרון. בתא סולארי הפרמטר העיקרי אשר מושפע מהעלאת הטמפרטורה הינו המתח כפי שניתן לראות באיור 2.

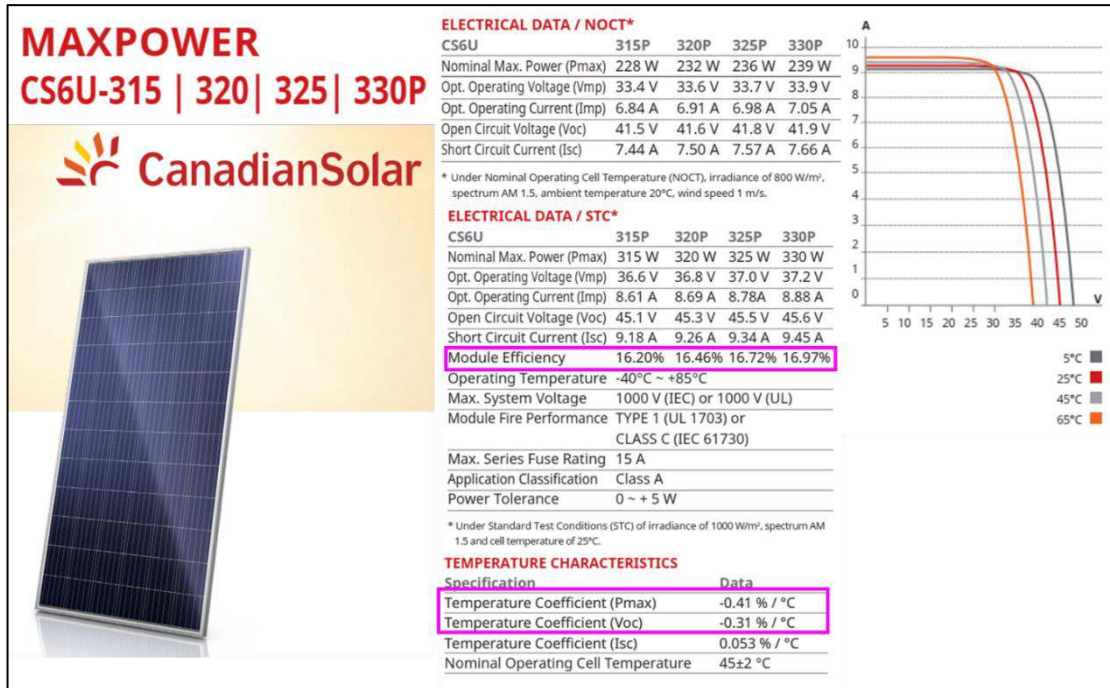


איור 1 אפקט פוטו-אלקטרי



איור 2 השפעת הטמפרטורה על המתח (V) והזרם (I) בתא סולארי (pveducation.org)

ניתן להעריך את השפעת קירור הפאנלים על תפוקת החשמל על ידי שימוש בקבוע היעילות המתקבל מיצרן הפאנלים הסולאריים. נתוני הפאנלים שנבדקו במסגרת ניסוי זה מבטאים ירידה של 0.41% בתפוקת החשמל בכל עלייה במעלת צלזיוס אחת או ירידה של 0.31% במתח בכל עלייה במעלת צלזיוס אחת. הפאנלים הסולאריים הינם מדגם CS6U-330P MAXPOWER. איור 3 מציג מידע טכני רלוונטי עבור פאנלים אלה.



איור 3 מידע טכני על הפאנלים הסולאריים המותקנים במתקן משאבי שדה (Canadian Solar) בסגול מודגשים הפרמטרים ששימשו אותנו בניסוי

ניתן לאמוד את טמפרטורת הפאנל ע"י נוסחה פשוטה אשר הוצעה על ידי Faiman (2008), בעיבוד לפי Sandia, המציעה את הקשר המופיע במשוואה 1.

$$T_m = T_a + \frac{E}{U_0 + U_1 \times W}$$

משוואה 1 הקשר בין טמפרטורת הפאנל לתנאים מטאורולוגיים

שבה T_m היא טמפרטורת הפנל ביחידות צלזיוס, T_a טמפרטורת האוויר ביחידות צלזיוס, E קרינת השמש על פני הפנל ביחידות ואט למ"ר, W מהירות הרוח סמוך לפנל ביחידות מטר לשנייה, ו- U_0 ו- U_1 הם מקדמי מעבר חום אשר ערכם 25 ואט למ"ר ו-6.84 ואט למ"ר בהתאמה. ערכי המקדמים נמצאו באופן אמפירי, ומהווים נתון ממוצע המתאים לכל סוגי הפנלים אשר נבדקו בניסוי בשדה בוקר. כפי שניתן לראות, הנוסחה אינה מביאה בחשבון את ההשפעה האפשרית של משטח ירוק על פאנל סולארי הנמצא מעל פני קרקע מכוסה צמחייה. זו טרם נמדדה בשדה.

2.2. השפעת הצמחייה על המיקרו אקלים

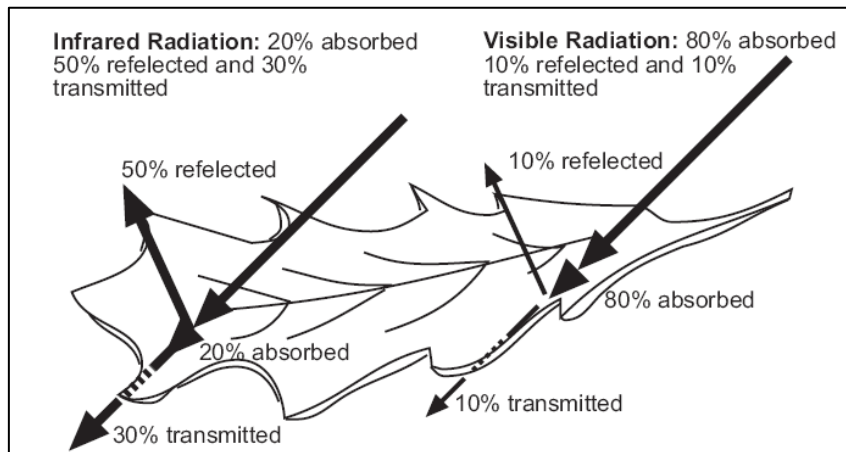
השפעת הצמחייה על המיקרו-אקלים נחקרה רבות בעשורים האחרונים. בתחום העירוני, פארקים מושקים בעלי צפיפות עצים גבוהה קרים יותר מסביבתם עקב הצללה ועקב אידוי-דיות (evapotranspiration) התורם להתקררות טמפרטורת פני השטח (Spronken-Smith and Oke, 1998). לאידוי-דיות ההשפעה המשמעותית ביותר על מאזן האנרגיה ולפיכך לקירור המשטח (Spronken-Smith et al., 2000).

צמחיית כיסוי משפיעה על המיקרו-אקלים על ידי שני מנגנונים עיקריים: הפחתת הקרינה הסולרית המוחזרת, ואידוי-דיות אשר מפחית את טמפרטורת המשטח. עובי שכבת הצמחייה לוכדת קרינה קצרת גל המגיעה מהשמש ויחד עם האלבדו¹ הנמוך של הצמחייה הקרינה המוקרנת על המשטח הירוק אינה מוחזרת לכיוון האטמוספירה (Kotzen, 2003) כמודגם באיור 4.

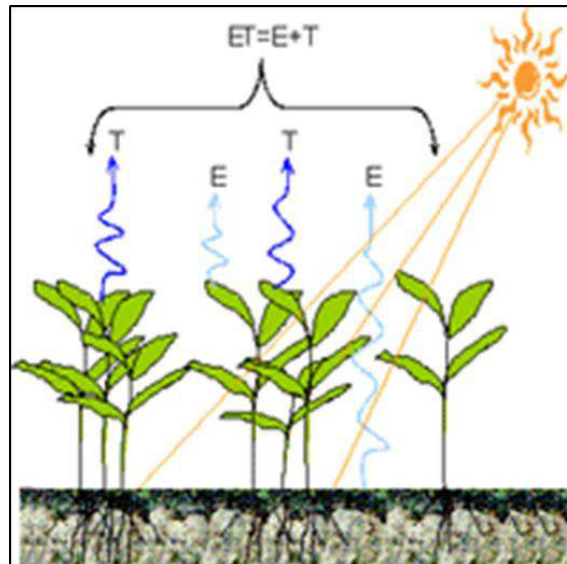
בליעת קרינה גבוהה על ידי גוף מובילה בדרך כלל להעלאת טמפרטורת פני השטח אך מכיוון שמדובר בצמחייה המשתמשת באנרגיית השמש להטמעה (photosynthesis) הקרינה אינה "מתורגמת" לחום מוחש אלא לאידוי-דיות (Monteith, 1965) כמודגם באיור 5. כתוצאה מכך המשטח הירוק אשר חשוף לקרינת שמש רוב שעות היום מתחמם הרבה פחות מקרקע חשופה ועשוי אף לתרום לקירור הסביבה על ידי אידוי-דיות. כך גם נמצא במחקר שבוצע במדרשת בן גוריון – טמפרטורת פני השטח של צמחים המבצעים הטמעה במהלך היום (כגון דשא) נמוכה יותר מצמחים סוקולנטיים שאינם מבצעים הטמעה ואידוי-דיות במהלך היום. כמו כן, לכל סוגי הצמחים טמפרטורת משטח נמוכה יותר מזו של אדמה חשופה (איור 6) (Snir et al., 2016). לכן, הם פולטים פחות קרינה אינפרה אדומה, אשר תרומתה לחימום הפאנלים משמעותית ביותר (Scherba et al., 2011).

לסיכום, הטמפרטורה של שטח מכוסה צמחייה נמוכה יותר מזו של קרקע חשופה או מרוצפת, עקב המבנה הפיזי של הצמח שבולע את קרינת השמש ועקב ביצוע אידוי-דיות הפולט אדי מים לסביבה.

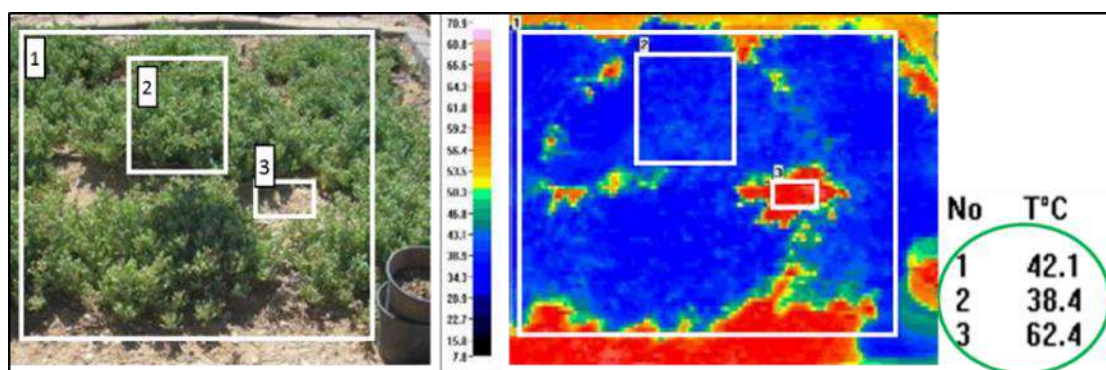
¹ האלבדו הוא היחס בין קרינת השמש המוחזרת ממשטח לקרינה הפוגעת בו.



איור 4 השפעת הצמחייה על המיקרו-אקלים - משטח העלה בולע את רוב הקרינה קצרת הגל ואורכת הגל המגיעה אליו (Kotzen, 2003)



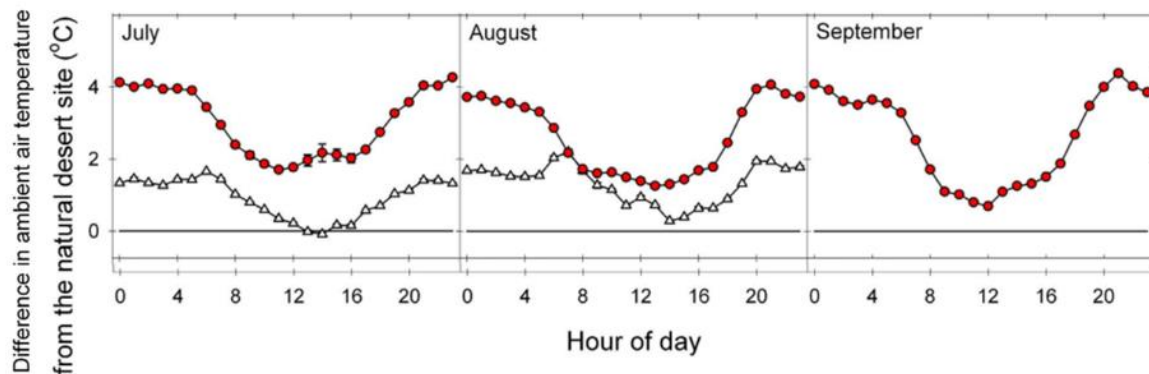
איור 5 השפעת הצמחייה על המיקרו-אקלים - הקרינה הנכנסת "מתורגמת" מאנרגיית חום לאידוי-דיות וכך המשטח לא מתחמם



איור 6 השפעת הצמחייה על המיקרו-אקלים - טמפרטורת משטח ירוק בהשוואה לאדמה חשפה ביום קיצי במדרשת בן גוריון (Snir et al., 2016)

2.2.1 PVHI – Photovoltaic Heat Island – אי חום במתקנים פוטו-וולטאים

מחקר שבחן את השתנות טמפרטורת הסביבה במתקנים פוטו-וולטאים מצא כי טמפרטורת הסביבה במתקן פוטו-וולטאי גבוהה עד כדי 4 מעלות מטמפרטורת הסביבה בשטח פתוח סמוך. מסקנת המחקר הייתה כי מתקנים פוטו-וולטאים מעלים את טמפרטורת הסביבה ביחס לשטח הפתוח, ואף יותר ממשטח חנייה המייצג אזור עירוני (Barron-Gafford et al, 2016).



איור 7 ההבדל בטמפרטורת הסביבה בין מתקן סולארי (עיגול אדום) ומשטח חנייה (משולש לבן) ביחס לשטח פתוח סמוך (מיוצגת ע"י הערך 0 בציר ה-Y) (Barron-Gafford et al, 2016)

2.2.2 הגדלת יעילות ייצור החשמל על ידי שימוש בצמחייה

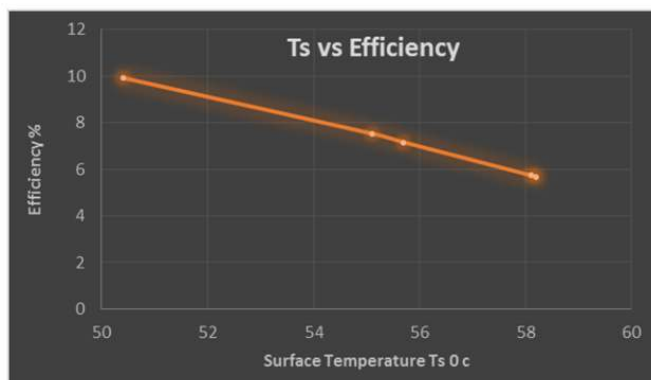
ידוע כי עליית טמפרטורת משטח הפאנל פוגעת ביעילות ייצור החשמל בשיעור התלוי בטיפוס הפאנל, ועשוי להיות בין כ-0.25 ל-0.5 אחוז לכל עלייה של מעלה בטמפרטורה (טבלה 1, Krauter et al, 2002).

טבלה 1 מקדם הירידה ביעילות הפאנל הפוטו-וולטאי כתלות בטמפרטורת הפאנל, עבור סוגים שונים של פאנלים.
(<http://solarprofessional.com/>)

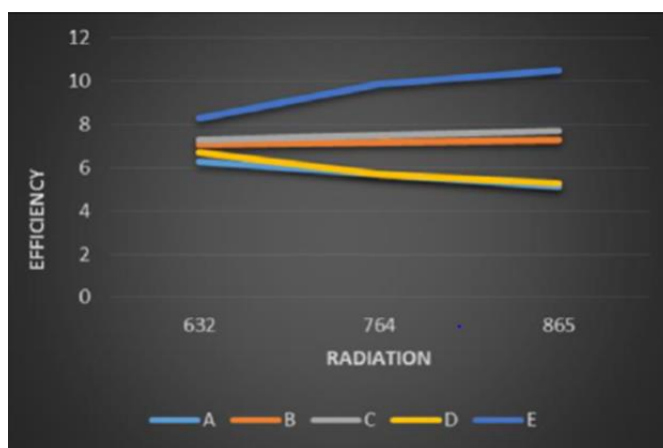
Technology	TC of Power, γ (%/°C)
c-Si	-0.45
μ c-Si	-0.44
a-Si (1-, 2- and 3-junction)	-0.24
CdTe	-0.29
CIGS	-0.47

במחקר שבוצע בהודו נמצא כי פאנל סולארי עם יכולת ייצור של 100W ייצר בקיץ 75W בלבד בגלל ההתחממות (Kande et al, 2016). יעילות ייצור החשמל יורדת ב-0.5% בכל עלייה של מעלת חום נוספת מעל ל-25° (איור 8). החוקרים אשר בחנו מה הדרך היעילה ביותר לקרר את הפאנל השתמשו במגשי מים, וסוגים שונים של צמחים מתחת לפאנלים. בכל יום של הניסוי נמדדה הקרינה והיעילות של הפאנלים (איור 10). החוקרים מצאו כי ניתן לקרר את הפאנלים וכך להגדיל את יעילות ייצור החשמל על ידי יישום מתחת לפאנלים של צמחייה המבצעת אידוי-דיות במהלך היום (Kande et al, 2016). יישום של מגש מים מתחת לפאנלים העלה את יעילות הפקת החשמל

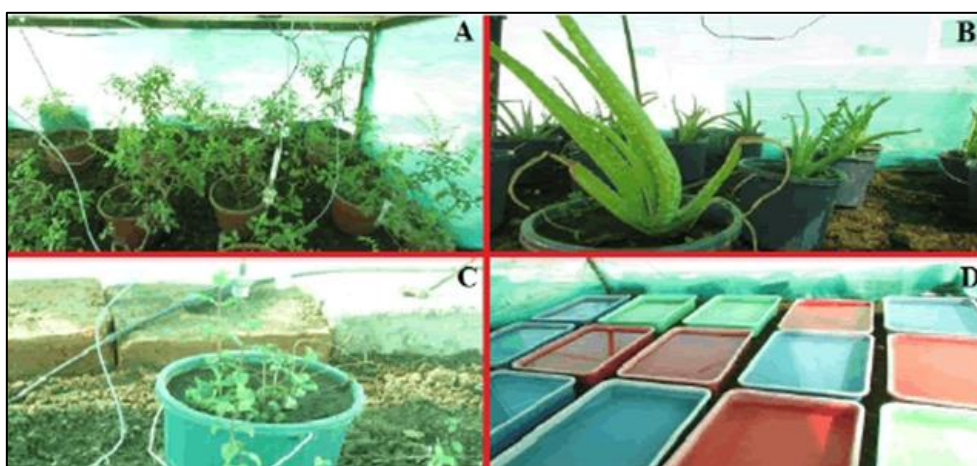
ב-3%-4, מנטה ובזיליקום העלו את היעילות ב- 1.8-2.2% והאלו-ורה, אשר אינו מבצע אידוי-דיות במהלך היום, לא שינה משמעותית את יעילות הפאנלים - בדומה למשטח ללא תכסית (איור 9).



איור 8 יעילות הפאנל הפוטו-וולטאי כתלות בטמפרטורת הפאנל (Kande et al, 2016)



איור 9 השינוי ביעילות כתלות בקרינה בטיפולים השונים: A – ללא טיפול, B – בזיליקום, C – מנטה, D – אלו-ורה, E – מים (Kande et al, 2016)



איור 10 הטיפולים השונים אשר ייושמו מתחת לפאנלים: A – בזיליקום, B – אלו-ורה, C – מנטה, D – מים (Kande et al, 2016)

2.2.3 פאנלים פוטו-וולטאים על גבי גגות ירוקים

מידע לגבי השפעת צומח על יעילות ייצור חשמל נמדדה בעיקר בהקשר של גגות ירוקים. במחקר שנערך בגרמניה במשך חמש שנים, נמצא כי פאנלים סולאריים על גבי גג ירוק (תמונה 1) סיפקו כ-6% יותר חשמל מאשר פאנלים סולאריים על גג אספלט (Kohler et al, 2007). מחקר נוסף מצביע על שיפור של כ-4.3% בייצור חשמל של פאנלים פוטו-וולטאים בקונפיגורציה המשלבת צומח (Hui et al, 2011). מחקר דומה מנוהל היום גם בישראל ע"י מרכז מחקר ע"ש קדס לאקולוגיה של גגות ירוקים, אוניברסיטת חיפה.

מדידות בגגות ירוקים הראו שדי בהבדל לא גדול כדי להביא לעלייה בתפוקת החשמל של הפאנל, במיוחד בשעות החמות בימי הקיץ. במחקר שעסק בגגות ירוקים נמצא גידול של 0.8-1.2% בתפוקת החשמל בגג ירוק לעומת גגות ללא כיסוי. הפאנלים שמוקמו מעל צמחיה היו קרים ב 1.5-3 מעלות צלזיוס מאשר פאנלים מעל גגות ללא כיסוי צמחי (Ogaili and Sailor, 2016).



תמונה 1 מחקר על יעילות אנרגטית של מתקנים פוטו-וולטאים על גגות ירוקים (Kohler et al, 2007).

2.3 שימוש משולב של חקלאות ושדות סולאריים (Agrivoltaics)

האפשרות לשלב גידולים חקלאיים במתקן פוטו-וולטאי נבחנה הלכה למעשה במספר מצומצם של אתרים בעולם. הראשון שבהם היה סמוך לעיר מונפליה בצרפת (Dupraz et al, 2011, איור 11). היתרון העיקרי של שדות משולבים כאלה היא החיסכון בשטח הקרקע בהשוואה לשני שדות נפרדים: האחד לגידול החקלאי והשני להפקת חשמל. הגידול בערך התפוקה מוערך בעזרת מדד הערך השקיל של הקרקע (LER – Land Equivalent Ratio).

מדד ה-LER הינו מדד השוואתי להערכת ערך קרקע בדו-שימושיות לעומת ערך השימושים בנפרד. ניתן להשתמש במדד זה גם עבור שילוב של קרקע חקלאית עם שדה פוטו-וולטאי.

משוואה 2 מציגה את אופן חישוב המדד. הביטוי השמאלי הינו יחס השינוי בתוצרת החקלאית והביטוי הימני הינו יחס השינוי בתפוקת החשמל. הגדלה בערך ה- LER משמע ערך קרקע גבוה יותר.

$$LER = (CY_{PV}/CY_{mono}) + (EP_{PV}/EP_{mono})$$

כאשר:

CY_{PV} – Crop Yield with Photovoltaic

CY_{mono} – Crop Yield without Photovoltaic

EP_{PV} – Electricity production with agriculture

EP_{mono} – Electricity production without agriculture

LER – Land Equivalent Ratio משוואה 2 חישוב

Dupraz et al דיווחו שלפי הדמיות המביאות בחשבון מצד אחד את הירידה בתפוקה החקלאית בשל החשיפה החלקית לשמש ומאידך את ההשפעה של הצמחייה על תפוקת החשמל – היה ערך המדד בתרחישים שונים בין 1.5-1.7. כלומר, ערכה של הקרקע היה גדול ב-50-70 אחוז בהשוואה לשטח קרקע אשר נדרש להפיק את אותה כמות של חשמל וגידולים חקלאיים בנפרד. ניתוח דומה נעשה על ידי Majumdar & Pasqualetti (2018) עבור שדות בקרבת העיר פניקס באריזונה.

ממשק חקלאי פשוט שלא דורש התערבות אינטנסיבית, מאפשר איסוף תוצרת בין שורות הפאנלים וללא הצללה ופגיעה בתשתיות המתקן יוכל לייצר את ההיתכנות הכלכלית הנדרשת למימוש עסקי של המו"פ.

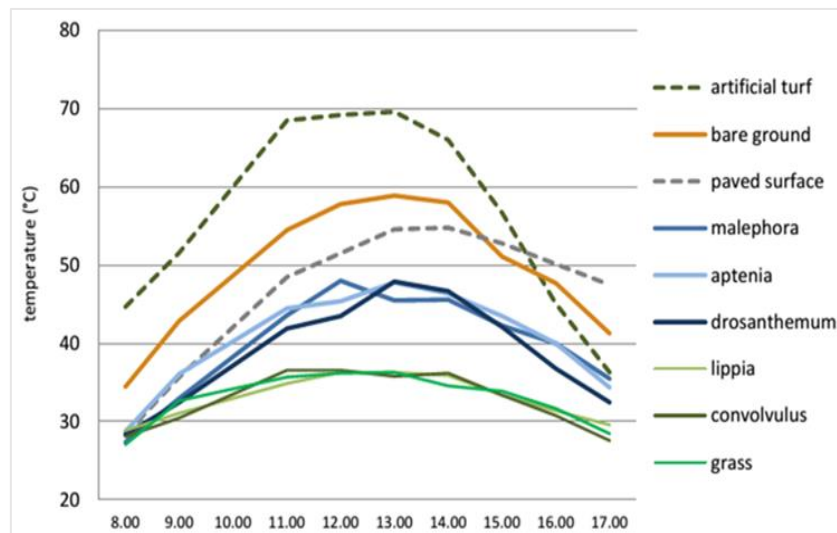


איור 11 השדה האגרו-וולטאי הראשון ליד מונפליה (Dupraz et al, 2011)

2.3.1 השפעת יישום משטח ירוק מתחת לפאנל סולארי

הערכה תיאורטית של הפרש הטמפרטורה הצפוי בין פאנל סולארי הנמצא מעל חול מדברי לבין פאנל סולארי הנמצא מעל משטח ירוק. זאת על ידי שימוש במשוואות פשוטות המחשבות את הקרינה הנפלטת והמוחזרת מכל סוג של משטח.

בתנאי מדבר ביום שמש קיצי טיפוסי בו טמפרטורת האוויר המקסימלית הינה 30° צלזיוס, הלחות היחסית 45%, וקרינת השמש המקסימלית הינה $985 [W/m^2]$. טמפרטורת קרקע חשופה יכולה להגיע ל- 60° צלזיוס בעוד שצמחיית מדבר הנמצאת תחת אותם תנאים תתחמם רק ל- 45° צלזיוס. אם מדובר בדשא מושקה טמפרטורת המשטח תרד מתחת ל- 35° צלזיוס (Snir et al., 2016). כהערכה ראשונית, ניתן לומר שטמפרטורת משטח ירוק יכולה להיות נמוכה בכ- 25° צלזיוס מקרקע חשופה ביום קיץ טיפוסי באמצע יולי (איור 12).



איור 12 השוואת טמפרטורות של משטחים שונים ביום קיץ טיפוסי בשדה בוקר (Snir et al., 2016)

ניתן לבצע חישוב תיאורטי של הקרינה הנפלטת מהקרקע או הצמחייה כלפי מעלה. עפ"י משוואת סטפן-בולצמן (משוואה 3) הקרינה ארוכת הגל הנפלטת $L_{\uparrow} [Wm^{-2}]$ ממשטח מסוים שווה למכפלת האמיסיביות של המשטח ϵ , קבוע סטפן בולצמן $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [Wm^{-2}K^{-4}]$, וטמפרטורת הקרקע $T[K]$ בחזקה רביעית.

$$L_{\uparrow} = \epsilon_s \sigma T_s^4$$

משוואה 3 משוואת סטפן-בולצמן

במידה וצמחייה אכן קרה בכ-25° צלזיוס מחול מדברי בשעות שיא החום כפי שהוצג בניסוי של Snir et al., 2016 לעיל, ניתן לחשב את הקרינה הנפלטת מכל משטח:

1. עבור משטח חול מדברי (אמיסיביות 0.95)

$$L_{\uparrow bare} = 0.95 * 5.67 * 10^{-8} * (60 + 273.15)^4 = 663.5 [W/m^2]$$

2. עבור משטח ירוק (אמיסיביות 0.97)

$$L_{\uparrow veg} = 0.97 * 5.67 * 10^{-8} * (35 + 273.15)^4 = 495.9 [W/m^2]$$

את הקרינה המוחזרת ניתן לחשב לפי האלבדו (משוואה 4) כאשר הקרינה המוחזרת $K_{\uparrow} [Wm^{-2}]$ שווה למכפלת האלבדו α והקרינה המתקבלת מהשמש $K_{\downarrow} [Wm^{-2}]$. ביום קיצי בו קרינת השמש המקסימלית הינה $985 W/m^2$, והאלבדו המקובל לסוגי המשטח הינו 0.4 לחול מדברי ו- 0.25 לצמחייה ירוקה.

$$K_{\uparrow} = \alpha K_{\downarrow}$$

משוואה 4 חישוב החזרת קרינת השמש על ידי מקדם האלבדו

1. הקרינה המוחזרת עבור משטח חול מדברי:

$$K_{\uparrow bare} = 0.4 * 985 = 394 [W/m^2]$$

2. הקרינה המוחזרת עבור משטח ירוק:

$$K_{\uparrow veg} = 0.25 * 985 = 246 [W/m^2]$$

סיכום מאזן הקרינה (Q) העוזבת את המשטח (נפלטת ומוחזרת)

1. משטח חול מדברי:

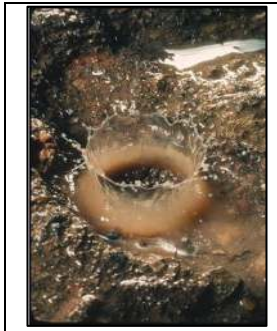
$$Q_{\uparrow bare} = K_{\uparrow bare} + L_{\uparrow bare} = 1056 [W/m^2]$$

2. משטח ירוק:

$$Q_{\uparrow veg} = K_{\uparrow veg} + L_{\uparrow veg} = 742 [W/m^2]$$

על פי חישוב תיאורטי זה, משטח חול מדברי החשוף לתנאי הסביבה ונמצא תחת כיפת השמים, ביום שמש טיפוסי, בשעה שהשמש במרכז השמים, יקרין לסביבה (על ידי פליטה והחזרה) כ- 315 ואט למ"ר יותר קרינה מאשר משטח ירוק החשוף לאותם תנאים.

2.3.2 השפעת הצמחייה על קרקע ונגר בשדות PV

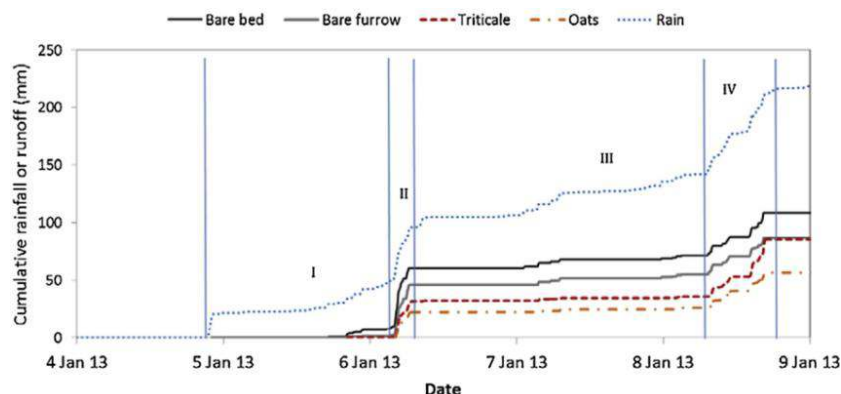


תמונה 2 טיפות המים מפרות את תלכדי הקרקע ויוצרות קרום קרקע

תהליך של סחף קרקע מתרחש לעתים קרובות בקרקעות חשופות מצמחייה או חיפוי אחר (Lieskovský and Kenderessy, 2012). טיפות המים מפרות את תלכיד הקרקע ומסיעות אותו בכיוון השיפוע (תמונה 2). בצורה זו, נערכות החרסיות בקרקע בשכבת הקרקע העליונה ומייצרות קרום קרקע בעל מוליכות הידראולית נמוכה (Assouline, 2004). היווצרות קרום קרקע והפחתת החידור של מי גשמים לתת הקרקע מגדילים משמעותית התפתחות של נגר עילי (Assouline, 2004). תופעה זו צפויה להתגבר במתקנים סולאריים בשל ריכוז טיפות הגשם בחלקו התחתון של הפאנל. כתוצאה מכך, עוצמת הגשם גדלה ויחס חלחול/נגר פוחת.

תופעת סחף קרקע בולטת בגידולי שדה שבקרקעות חקלאיות החשופות בתחילת עונת הגשם. אשל ואגוזי (2015), מדדו איבוד קרקע בקצב של 4-7 מ"מ בשנה בגידולים חקלאיים קובנציונאליים ובאקלים ים-תיכוני בישראל. נתונים אלו נתמכים במחקרים מהעולם המראים כי קצב איבוד הקרקע בשטחים חקלאיים גדול בהרבה מקצב היווצרותה (Montgomery, 2007; Eshel and Egozi, 2015). אחד הפתרונות להתמודדות עם בעיות של סחף קרקע הינו חיפוי קרקע ו/או כיסוי צמחי לצורך הפחתת אפקט האנרגיה הקינטית של טיפות הגשם. במחקר שנערך בשדה תפוחי אדמה באזור השרון, נעשה שימוש בכיסוי צמחי ונמדדו כמויות הסחף והנגר. מתוצאות המחקר עולה כי סחף הקרקע פחת ב- 95% וסך הנגר העילי פחת ביותר מ- 60% (Eshel et al, 2015).

להתפתחות של נגר וסחף השפעות נרחבות על הסביבה. משטחים תורמי נגר וסחף גורמים לסתימות של מערכות ניקוז, הצפות ופחיתה בהעשרה של מי התהום. מיתון אפקט הנגר והסחף הינו אינטרס כלכלי וסביבתי מובהק המעוגן גם במדיניות התכנון בישראל (מדריך לתכנון ובנייה משמרת נגר עילי, משרד השיכון, המשרד להגנת הסביבה, משרד החקלאות ופיתוח הכפר 2004).



איור 13 עובי הגשם (בכחול מקווקו) והנגר והגשם בטיפולי כיסוי צומח שונים במהלך סופת גשם בינואר 2013 (Eshel et al, 2015).

3. שאלת המחקר

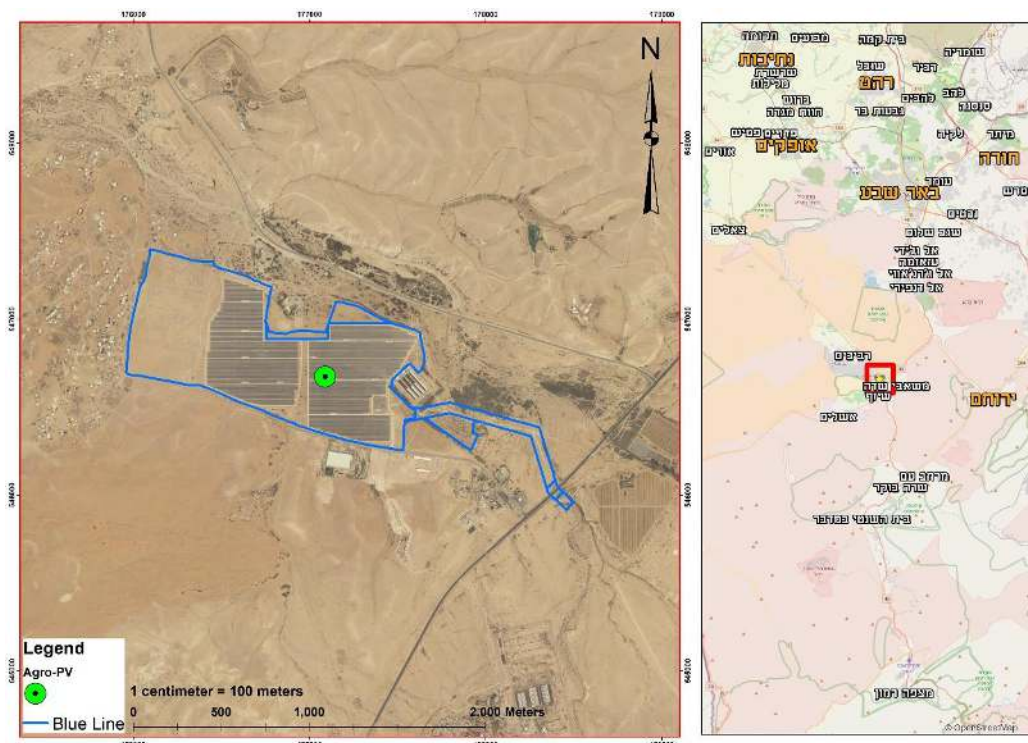
ידוע כי לצמחיית כיסוי השפעה משמעותית על המיקרו אקלים באמצעות שני מנגנונים – הפחתת הקרינה המוחזרת מהמשטח ואפקט האידוי-דיות התורם להורדת טמפרטורת המשטח ולהפחתה בקרינה האינפורה אדומה הנפלטת. זאת ועוד, ידוע כי יעילות ייצור החשמל בפאנלים פוטו-וולטאים פוחתת כאשר טמפרטורת הפאנל עולה. נושא זה נבדק עד היום בעיקר בהקשר של מתקנים סולאריים על גגות ולא נבחן בישראל במתקנים פוטו-וולטאים קרקעיים גדולים. צימוד התהליכים הנ"ל מצוי בלב המחקר המוצע.

המחקר המוצע מציע להתרכז בכמה נושאים הקשורים בהתפתחות צמחייה במתקנים פוטו-וולטאים: בראש ובראשונה, בחינת ההשפעה של צמחייה בין ומתחת לפאנלים פוטו-וולטאים על היעילות האנרגטית שלהם; ובנוסף, בחינת הפוטנציאל הגלום בגידול חקלאי במתקן פוטו-וולטאי.

4. שיטות וחומרים

4.1. פריסת הניסוי

הניסוי ממוקם במתקן הסולארי משאבי שדה (תת"ל 50) המתקן נמצא מערבית לדרך מספר 40 ולקיבוץ טללים בסמיכות למועצה האזורית רמת הנגב (איור 14). האקלים באזור הינו יבש וצחיח ומתאים למטרת הניסוי מבחינת יצירת מיקרו-אקלים מקומי על ידי צמחיה. הרוח השלטת באזור הינה צפון מערבית ולכן נבחר מיקום מרכזי ככל הניתן במתקן המוגן בעיקר מכיוון צפון ומערב על מנת למנוע השפעות שוליים שונות.

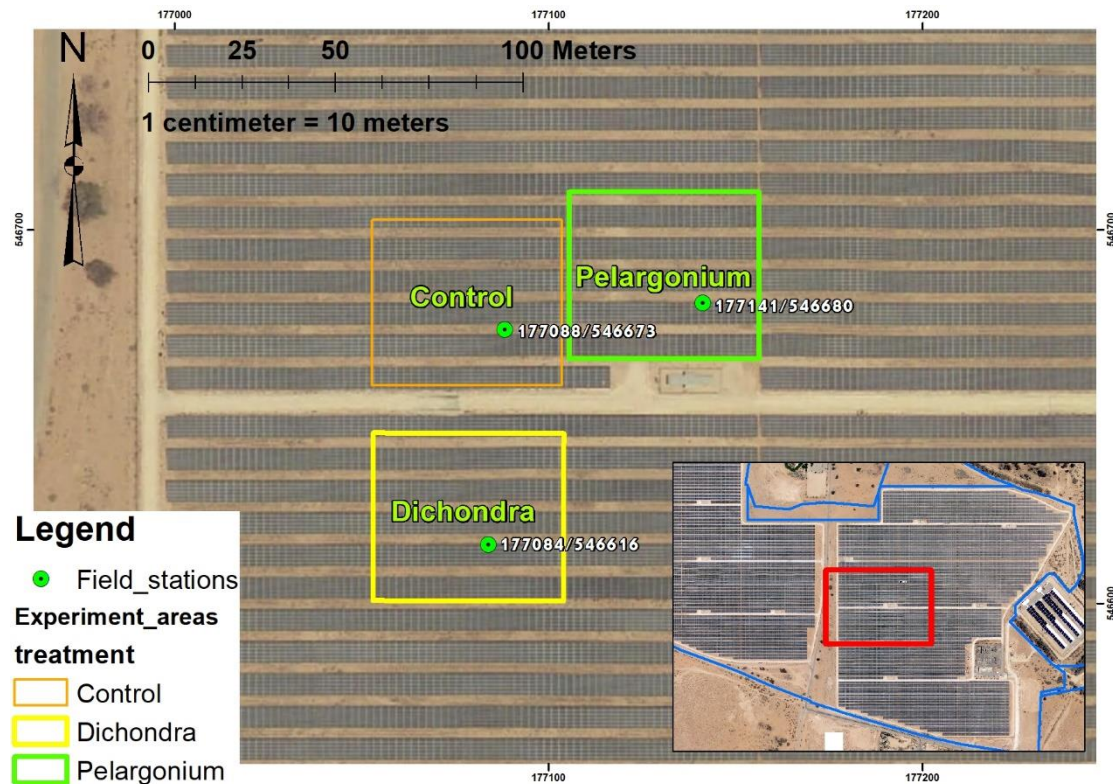


איור 14 מיקומו הגיאוגרפי של הניסוי

הניסוי מתבצע ב-3 חלקות בגודל 2.2 דונם כל אחת, אשר מוקמו בקרבה לדרך פנימית על מנת לאפשר נגישות נוחה לציוד. שתי חלקות הינן חלקות עם כיסוי צמחי מלא וחלקה אחת הינה חלקת ביקורת. ש,י חלקות הצמחייה פרוסות באלכסון על ציר צפון-מזרח – דרום-מערב על מנת למנוע השפעה הדדית בין החלקות על מאפייני מיקרו-אקלים מכיוון הרוח השלטת כיוון צפון-מערב (איור 15).

חלקה מספר אחת מכילה כיסוי צמחי מלא של גידול חקלאי בין הפאנלים ומתחתם, פלרגוניום חריף – גירניום לימוני (*Pelargonium graveolens*). חלקה זו נועדה לדמות צומח בעל מאפיינים חקלאיים שמתאים לאקלים המקומי. חלקה מספר שתיים הינה כיסוי צמחי מלא בין הפאנלים ומתחתם של שני צמחי כיסוי לסירוגין באותה חלקה, דיכונדרה זוחלת (*Dichondra repens*) וסיגל קיסוסי – סיגלית

אוסטרלית (*Viola hederacea*). חלקה זו נועדה לדמות צומח משתרע שאינו דורש טיפול אינטנסיבי ומתאים לתנאים משתנים של צל ושמש. חלקת ביקורת ללא כיסוי מדמה את המצב הנתון של המתקן הסולארי.



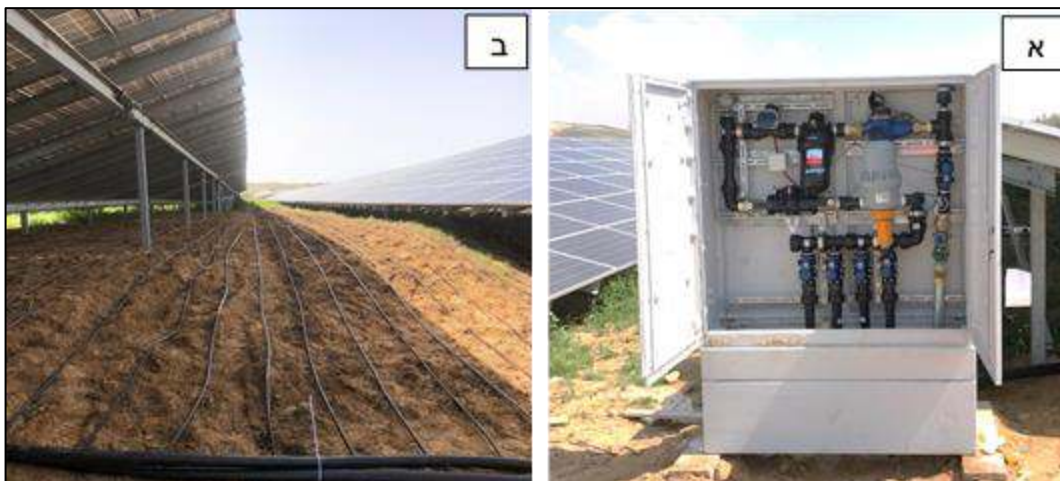
איור 15 פריסת חלקות הניסוי, בצהוב צמחי הכיסוי דיכונדרה זוחלת/ סיגל כיסוי, בירוק גידול חקלאי פלרגוניום חריף ובכתום חלקת ביקורת ללא כיסוי צמחי.

4.2 הכנת הקרקע והצמחייה בחלקות הטיפול

שתילת הצומח בניסוי התבצעה בסוף חודש מרץ עד תחילת אפריל, ע"ג קרקע חולית/לס מועשרת בקומפוסט "פרימיום" (חברת קומפוסט אורגני ביו-בי) בשיעור של 10 מ"ק/דונם המכילה (חנקן 137 ק"ג/דונם, זרחן 68 ק"ג/דונם ואשלגן 27 ק"ג/דונם). הקומפוסט שפוזר תוחח לתוך הקרקע באמצעות מתחחת גננית (תמונה 3). לאחר מכן נפרסה מערכת ההשקיה והטיפטוף (תמונה 4). מערכת ההשקיה כוללת: ראש מערכת (ארון, ברז ראשי, מד מים, מז"ח, ברזים חשמליים לכל חלקה, מקטין לחץ, מסנן, מחשב השקיה, משאבת דשן, מיכל דשן), צינור מוביל 75, צינור מחלק 50, צינור טפטוף מווסת של חברת נטפים (יונירעם), עם טפטפות כל 25 ס"מ בספיקה 1.6 ל"ש. לפני השתילה בוצעה שטיפה של הקרקע ב 30 מ"ק/דונם מי השקיה כדי לשטוף את המלחים.



תמונה 3 תיחוח חלקות הגידול לאחר פיזור הקומפוסט



תמונה 4 מערכת ההשקיה בניסוי, א: ראש מערכת (ארון, ברז ראשי, מד מים, מז"ח, ברזים חשמליים לכל חלקה, מקטין לחץ, מסנן, מחשב השקיה, משאבת דשן). ב: צינור מחלק 50 וצינורות טפטוף מבוסט של חברת נטפים (יונירעם), טפטפת כל 25 ס"מ ספיקה 1.6 ל"ש

בכל החלקות ההשקיה בוצעה לפי 50-75% ממקדם ההשקיה פנמן (Penman H., 1948) המתאר התאדות פוטנציאלית ממים או מקרקע קבוע פנמן היומי או השבועי מתקבל בתחנה המטאורולוגית. צריכת המים הצפויה בחלקות אלו הייתה 750-1000 מ"ק/דונם/שנה מים שפירים בתוספת 250 ג"ר של הדשן 20:20:20 למ"ק מים (50 PPM), ובתוספת מיקרואלמנטים (מגנזיום 0.5%, סידן 2% + יסודות קורט: 300 מ"ג/ק"ג ברזל, 150 מ"ג/ק"ג מנגאן, 75 מ"ג/ק"ג אבץ, 11 מ"ג/ק"ג נחושת, 8 מ"ג/ק"ג מוליבדן). ניטור מי ההשקיה ומי המשאב בוצעו לאורך כל תקופת הגידול, בתדירות של אחת לשבועיים. בנוסף לכך בוצעו טיפולים של עישוב וגיזום החלקות לפי צורך.

הטיפול השוטף בצמחייה במהלך תקופה זו כלל הגעה לשטח האתר של שני גננים פעם-פעמיים בשבוע על מנת לגזום את צמחי הגירניים בכדי שלא יצלו על הפאנלים ושימור השבילים על מנת לאפשר תחזוקה של המתקן. בנוסף בוצעה הסרה של עשביה וצמחים פולשים שאינם רצויים, תיקון הצנרת ותחזוקה של הצנרת בוצעה בתדירות של פעם בשבוע. משום שהיו תקלות בצנרת שנבעו בעיקר מכרסום על ידי תנים ועד לתיקונם זרימת המים הייתה גבוהה יותר בנקודות הפיצוץ. דישון בוצע במידת הצורך לפי החלטת הגננים והאגרונום.

בחלקה מס' 1, המייצגת גידול חקלאי, נשתלו 7,000 צמחי פלרגוניום חריף (גירניים לימוני) במרחק של 50 ס"מ זה מזה (תמונה 5), בשטחים שבין הפנלים ובשטחים שתחת הפנלים. ההשקיה בחלקה פוצלה לשני קווי השקיה נפרדים עם תוכניות השקיה שונות לכל תת חלקה. קו השקיה אחד לשטחים שבין הפנלים וקו השקיה שני לחלקות שתחת הפנלים.

ההשקיה בחלקה מספר 1 פוצלה לשני קווי השקיה נפרדים בטפטוף עילי עם תוכניות השקיה שונות לכל תת חלקה. קו השקיה לשטחים שבין הפנלים וקו השקיה שני לחלקות שתחת הפנלים. בחלקות בין הפנלים יש חמישה מפתחים ברוחב של 2.5 מ' (סה"כ 625 מ"ר). הספיקה השעתית שחושבה בפועל הינה 7.2 מ"ק לשעה. בכל מפתח הונחו 5 שלוחות טפטוף עילי במרחק של 50 ס"מ זה מזה, ובסה"כ 25 שלוחות. בחלקה זו ההשקיה נקבעה לפי חישוב של 75% ממקדם ההשקיה פנמן. בעונת שיא הקיץ מקדם פנמן באזור זה הינו 9 מ"ק/דונם/יום. לכן ההשקיה המבוקשת צריכה להגיע ל- 6.75 מ"ק/דונם/יום, בתזמון של השקיה אחת בכל יומיים.

בקו ההשקיה השני של חלקת גירניים לימוני בצל (החלקות שתחת הפנלים) יש חמישה מפתחים ברוחב 5.8 מ' כל אחד (סה"כ 1450 מ"ר), עם ספיקה שעתית של 10.2 מ"ק לשעה. בכל מפתח 9 שלוחות, ובסה"כ 45 שלוחות טפטוף עילי במרחק של 30 ס"מ בין שלוחה לשלוחה. בחלקה זו נקבעה ההשקיה לפי חישוב של 50% ממקדם ההשקיה פנמן. לכן ההשקיה בשיא הקיץ צריכה להגיע ל- 5 מ"ק/דונם/יום, בתזמון של השקיה אחת בכל יומיים.



תמונה 5 חלקת פלרגוניום חריף- גירניום לימוני (*Pelargonium graveolens*) לאחר שתילה

בחלקה מס' 2, המייצגת צמח כיסוי שאינו חקלאי, נשתלו צמחי 12,000 שתילי דיכונדרה זוחלת וסיגל קיסוסי לסירוגין במרחק של 30 ס"מ זה מזה, בשטחים שבין הפנלים ובשטחים שתחת הפנלים. ההשקיה בחלקה פוצלה לשני קווי השקיה נפרדים עם תוכניות השקיה שונות לכל תת חלקה, בשל השונות בחשיפה לשמש. קו השקיה אחד לשטחים שבין הפנלים וקו השקיה שני לחלקות שתחת הפנלים.

בחלקות בין הפנלים יש חמישה מפתחים ברוחב של 2.5 מ' (סה"כ 625 מ"ר). בכל מפתח הונחו 8 שלוחות טפטוף עילי במרחק של 30 ס"מ זה מזה, בסה"כ 40 שלוחות. הספיקה השעתית שחושבה בפועל הינה 9.3 מ"ק לשעה. בחלקה ההשקיה נקבעת לפי חישוב של 75% ממקדם ההשקיה פנמן. בשיא עונת הקיץ מקדם פנמן באזור זה הינו 9 מ"ק/יום/דונם. לכן ההשקיה צריכה להגיע ל- 6.75 מ"ק/יום/דונם, בתזמון של השקיה אחת בכל יום.

בקו ההשקיה של החלקות שתחת הפנלים חמישה מפתחים ברוחב 5.8 מ' כל אחד (סה"כ 1,450 מ"ר). בכל מפתח 16 שלוחות, ובסה"כ בכל המפתחים 80 שלוחות טפטוף עילי במרחק של 30 ס"מ בין שלוחה לשלוחה. בקו ההשקיה השני של חלקת דיכונדרה זוחלת וסיגל קיסוסי בצל (החלקות שתחת הפנלים) יש חמישה מפתחים ברוחב 5.8 מ' כל אחד (סה"כ 1450 מ"ר), עם ספיקה שעתית של 10.2 מ"ק לשעה. בחלקה זו ההשקיה נקבעת לפי חישוב של 50% ממקדם ההשקיה פנמן. לכן ההשקיה תוכננה להגיע ל- 5 מ"ק/דונם/יום בשיא הקיץ, בתזמון של השקיה אחת בכל יום. למרות זאת בשיא הקיץ ההשקיה שניתנה הגיע ל- 9 מ"ק/דונם/יום מסיבות טכניות. באופן כללי הצמחים נקלטו טוב וההשקיה הופחתה בסוף הקיץ לקבלת 5 מ"ק/דונם/יום.

4.3 מערך המדידות

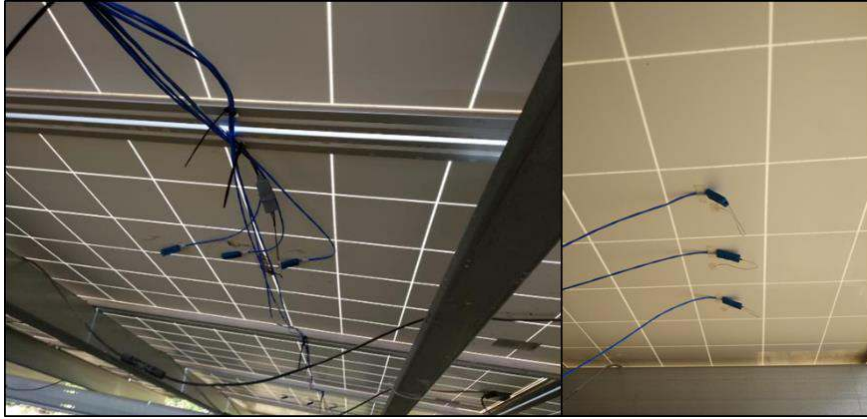
משלוח מכשירי המדידה ואוגרי הנתונים התקבל בתחילת חודש מאי 2020 למשרדי גיא-טבע. כלל המכשירים נוסו וכוילו בתנאי מעבדה במשרדי גיא-טבע במהלך חודש מאי. העלייה הרשמית לשטח והתקנת המכשירים בשדה בוצעה בתחילת חודש יוני (תמונה 6) התחלת המדידות הרשמית הייתה בסוף חודש יוני ונמשכה עד לתחילת עונת החורף. במהלך תקופת המדידות היו מקרים בודדים של תקלות אשר נבעו בעיקר מבעיות באספקת החשמל למכשירי המדידה ובעיות תקשורת אשר זוהו וטופלו מידית.

ציוד מדידות האקלים כולל מכשירים למדידת טמפרטורת הפאנלים, מכשירים למדידת מיקרו אקלים מתחת לפאנלים מכשירים למדידת המתח והזרם החשמלי ותחנת ייחוס מטאורולוגית. להלן הסבר מפורט על הפרמטרים הנמדדים ומכשירי המדידה ואיסוף הנתונים.

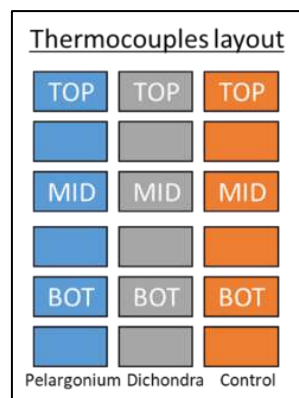


תמונה 6 הקמת תחנות המדידה

טמפרטורת הפנלים: טמפרטורת הפאנלים נמדדה בעזרת תרמוקפלים אשר הוצמדו לצידם האחורי (התחתון). בסה"כ הותקנו 27 תרמוקפלים מטיפוס T ו-2 מטיפוס E (תוצרת Campbell). התרמוקפלים הותקנו בשלוש שורות בכל חלקת ניסוי: (בשורה השנייה (BOT), הרביעית (MID) והשישית מלמטה (TOP)). לכל פאנל הוצמדו שלשה תרמוקפלים על מנת לייצר יתירות במידה ואחד התרמוקפלים נותן קריאה שגויה (תמונה 7, איור 16).



תמונה 7 תרמוקפלים מתחת לפאנל



איור 16 סכמת הפאנלים הנמדדים בכל אחת מהחלקות (TOP, MIDDLE, BOTTOM)

טמפרטורה ולחות האוויר מתחת לפנלים: בכל חלקה הותקן חיישן HYGROVUE5 מבית קמפבל, סה"כ שלשה חיישנים (תמונה 8). מכשיר המדידה ממוקם מתחת לפאנלים המכשיר שולח תוצאה ביחידות של מעלות צלזיוס עבור טמפרטורת האוויר ויחידות של אחוזים עבור מדידת הלחות. בעזרת מכשיר מדידה זה ניתן להשוות התפתחות מיקרו אקלים מקומי מתחת לפאנלים הסולאריים בחלקות הצמחייה בהשוואה לחלקות הייחוס.



תמונה 8 מד טמפ' אוויר ולחות HYGROVUE5

מאזן קרינתי (Net radiation): הותקנה מערכת למדידת מאזן קרינתי (Net radiation) על ידי נט-רדיומטר מבית APOGEE (תמונה 9). מכשיר דידה אחד אחד בכל חלקת ניסוי, סה"כ שלושה מכשירי מדידה. כל מכשיר מדידה נותן ארבעה פרמטרים ביחידות של וואט למטר רבוע: קרינה ישירה "קצרת גל" ו"ארוכת גל" מכיוון הפאנלים כלפי מטה (סימן חיובי) ומכיוון הקרקע (או הכיסוי הצמחי) כלפי מעלה (סימן שלילי). מאזן הקרינה הכולל הינו סכום ארבעת המרכיבים הנ"ל. מאזן קרינה חיובי מייצג מצב בו סכום הקרינות המגיע מכיוון הפאנלים (מעלה) גבוה מסכום הקרינות המגיע מכיוון הקרקע (מטה), אנו צופים למצב זה במהלך היום. בשעות הלילה המוקדמות כאשר האוויר מתקרר נצפה למצב ההפוך.



תמונה 9 נט-רדיומטר

זרם חשמלי: מבוצעת על ידי חיישנים הפועלים על ידי אפקט הול מדגם CR Magnetics CR5210. החיישנים עובדים בזרם DC ולהם מושחלים כבלי החשמל הנבדקים (תמונה 10). חיישנים אלו כוילו בתחילת חודש יוני 2020 ונכנסו לפעולה באמצע חודש יוני. כל חיישן מודד למעשה מחרוזת של עשרים פאנלים המחוברים אחד לשני בטור. ישנם עשרה חיישנים המפוזרים בחלקות השונות ונותנים תוצאה ביחידות של מילי אמפר.



תמונה 10 חיישן זרם CR5200 הפועל על ידי אפקט הול

מתח חשמלי: באמצע חודש אוקטובר 2020 הותקנו שני חיישנים למדידת מתח וזרם חשמלי מדגם SCK-M-I-8S-20A, PHOENIX CONTACT. חיישנים אלא מסוגלים למדוד מתח חשמלי עד ל-1,200V ומחוברים למחרוזת של עשרה הפאנלים באופן ישיר. מתח אופטימלי של עשרה פאנלים בזמני ייצור מרבי צפוי להיות כ-340V ולכן חיישנים אלו מתאימים. בנוסף למתח החשמלי חיישנים אלו מודדים גם את הזרם החשמלי. חיישן אחד הוצב בחלקת הדיכונדרה וחיישן נוסף הוצב בחלקת הביקורת. חיישנים אלו מודדים עשרה פאנלים המחוברים בטור בתוך מחרוזת (String) של 20 פאנלים סולאריים. מדידת המתח משלימה למעשה את מדידת הזרם החשמלי ובאמצעות שני מדדים אלו ניתן למדוד את נתון ההספק החשמלי בצורה ישירה.



איור 17 מכשיר מדידת מתח (1) רכיב SCK-M-I-8S-20A אשר מודד נתונים (2) רכיב SCK-C-MODBUS אשר אוסף ושולח נתונים מדודים (3) תצלום של רכיב SCK-M-I-8S-20A מותקן בשטח הניסוי

תחנה מטאורולוגית לייחוס: בנוסף הותקנה מערכת למדידת התנאים האקלימיים של הסביבה לצורך ייחוס, הכוללת טמפרטורת אוויר ונקודת טל (ביחידות של מעלות צלזיוס), לחות אוויר (באחוזים), מהירות רוח נמדדת על ידי מד רוח סוני (במטר לשנייה), וכיוון רוח (במעלות). נתונים אלו נמדדים על ידי רב מודד עם הצפנה אוטומטית מדגם GMX500. קרינת שמש גלובלית (כוללת) על מישור הפאנלים נמדדת באמצעות מד קרינה CMP3 מבית Kipp & Zonen, כאשר הערכים מתקבלים ביחידות של וואט למטר רבוע. החיישנים ממוקמים על תורן אשר מעוגנת לקונסטרוקציית הפאנלים (תמונה 11). כל הנתונים בתחנה זו מפוענחים ונרשמים על ידי אוגר נתונים מדגם CR300 מבית Campbell.



תמונה 11 תחנה מטאורולוגית לייחוס

איסוף, פיענוח ושליחת הנתונים: מכשירי המדידה האנלוגיים מחוברים למודולים מדגם VOLT116 המפענחים את המדידות האנלוגיות. המודולים ויתר המכשירים הדיגיטליים מחוברים לאוגר נתונים מרכזי מדגם CR1000X מבית קמפבל המפענח את המדידות הדיגיטליות, אוסף את כלל הנתונים ושולח אותם למשרדי גיאוטבע באמצעות מודם סלולרי CELL-215 מבית Campbell (תמונה 12).

כלל המערכת מוזנת מקולט שמש 20W + מצבר 12V.



תמונה 12 קופסאות אוגרי הנתונים המודולים והמודם הסלולרי

5. תוצאות (א) מיקרו-אקלים ותפוקת חשמל

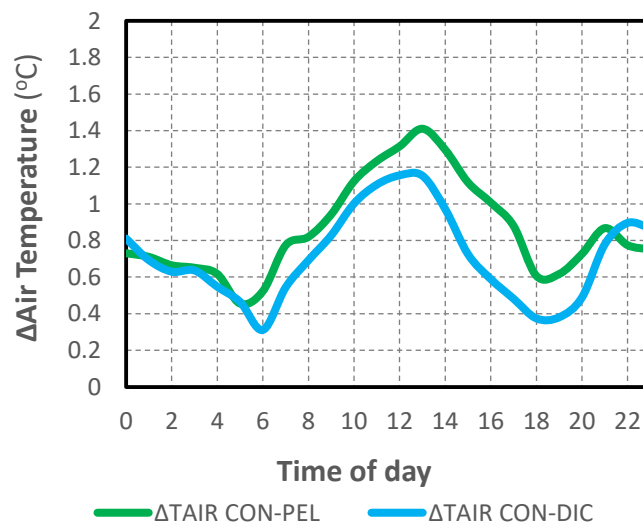
5.1 ביצוע מדידות הקיץ

ההתחלה הרשמית של מדידות הקיץ הייתה בתאריך 18.6.2020, בתאריך זה החלו המדידות ללא מדידת הזרם. החל מתאריך ה-24.6.2020 התחילו המדידות המסודרות הכוללות גם את מדידת הזרם. מדידות הפרמטרים השונים בוצעו באופן כמעט רציף למעט מספר תקלות נקודתיות. המדידות בוצעו ברציפות עד לתחילת חודש נובמבר (למעט מספר ימים בודדים בהם נוספו מכשירים ובוצע תיקון תקלות נקודתיות).

5.2 נתונים מיקרו-אקלימיים

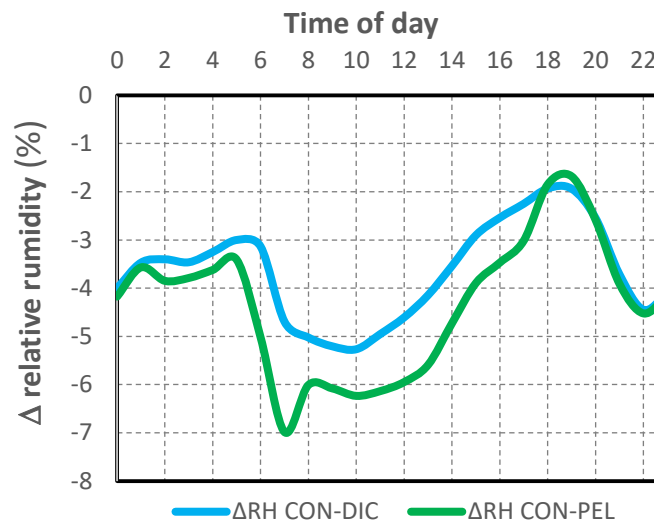
נתוני מיקרו-אקלים אשר נרשמו מתחת לפאנלים – טמפרטורת אוויר, לחות ומאזן קרינה - הראו הבדל מובהק בין שלושת החלקות בכל הפרמטרים הנמדדים (ראו נספח 1 – ניתוח סטטיסטי). חלקות הצמחייה שונות בצורה מובהקת מחלקת הביקורת וברוב המקרים נראה גם שוני בין חלקות הצמחייה השונות.

איור 18 מתאר את ההפרש הממוצע בין טמפרטורת האוויר בחלקת הייחוס (ללא צמחייה) לחלקות הניסוי (עם צמחייה) במהלך חודש אוגוסט. ניתן לראות כי האוויר בחלקת הביקורת חם יותר מאשר בחלקות הניסוי לאורך כל שעות היממה. ההפרש בשעות היום (בין השעות 9-16) - הוא גדול יחסית, 1.1-1.4 מעלות צלזיוס, בעוד שבשעות הלילה ההפרש קטן יותר – פחות מ-1 מעלה. ההפרש גדול יותר בחלקת הגירניום מאשר בחלקת הדיכונדרה.



איור 18 ממוצע לחודש אוגוסט של הפרש טמפרטורת האוויר בין חלקות הצמחייה לחלקת הביקורת, גרף כחול גירניום וגרף כתום דיכונדרה

מדידת הלחות היחסית שבאוויר הראתה שלאורך כל שעות היממה בחודש אוגוסט הלחות היחסית בחלקות הצמחייה גבוהה יותר מהלחות בחלקת הביקורת. תוצאה זו צפויה ומהווה את אחד ההסברים להפחתה בטמפרטורת האוויר. איור 19 מראה כי לאורך כל שעות היממה הלחות היחסית גבוהה יותר בחלקות הצמחייה. ההפרש גדול במיוחד בשעות האור: כ- 2-5% בחלקת הדיכונדרה ו-2-7% בחלקת הגירניום.



איור 19 ממוצע לחודש אוגוסט של הפרש הלחות היחסית באוויר בין חלקות הצמחייה לחלקת הביקורת, גרף כחול גירניום וגרף כתום דיכונדרה

החיישן אשר מודד את מאזן הקרינה ממוקם מתחת לפאנלים הסולאריים, בין הפאנלים לצמחייה (או לאדמה בחלקת הביקורת). החיישן מודד ארבעה פרמטרים:

1. קרינה קצרת גל המגיעה מכיוון הפאנלים כלפי מטה $[K_d]$, קרינה זו מייצגת את כמות האור שמגיע מהפאנלים מטה.
2. קרינה ארוכת גל המגיעה מכיוון הפאנלים כלפי מטה $[L_d]$, קרינה זו מייצגת את כמות החום שמגיע מהפאנלים לכיוון מטה (לקרקע). במקרה שלנו לא מדובר בקרינת השמש אלא בקרינת האור המוחזרת מהפאנל.
3. קרינה קצרת גל המגיעה מכיוון הקרקע כלפי מעלה $[K_u]$, קרינה זו מייצגת את האור המוחזר מהקרקע כלפי מעלה.
4. וקרינה ארוכת גל המגיעה מכיוון הקרקע כלפי מעלה $[L_u]$, קרינה זו מייצגת את החום הנפלט מכיוון האדמה או הצמחייה כלפי מעלה, כלפי הפאנלים.

מאזן הקרינה $[R_{net}]$ הוא סכום של כלל מרכיבי הקרינה (משוואה 5). את הקרינה המגיעה מלמעלה מקובל לסמן בסימן חיובי, בעוד שהקרינה המגיעה מלמטה כלפי מעלה מסמנים בסימן שלילי. להלן משוואת מאזן הקרינה:

$$R_{net} = K_d - K_u + L_d - L_u$$

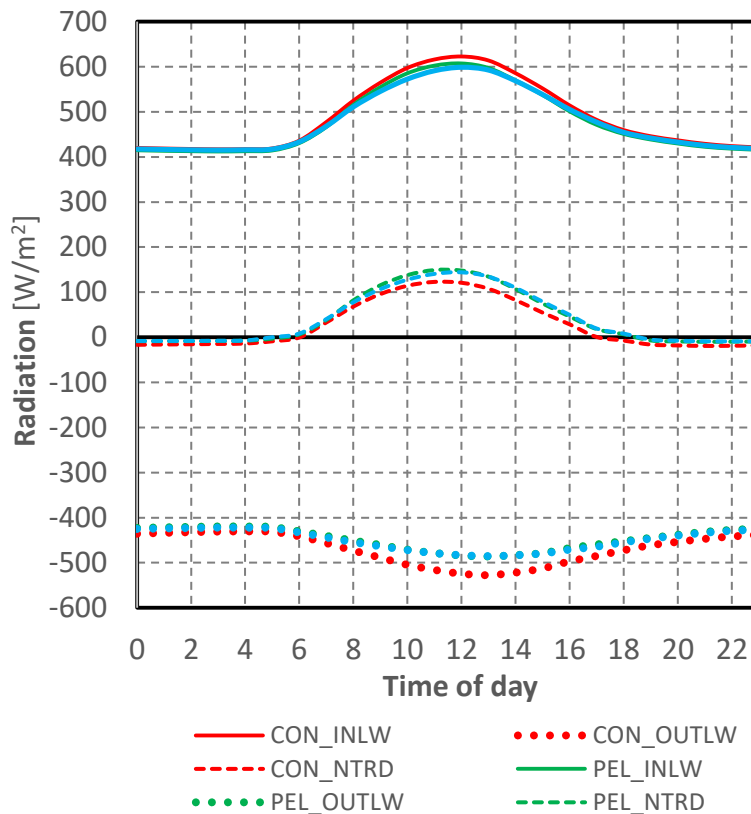
משוואה 5 חישוב מאזן הקרינה

כאשר אנו בוחנים את ההבדלים במאזן הקרינה בחודש אוגוסט ניתן לראות הבדל מובהק לאורך כל שעות היום בין חלקת הביקורת לחלקות הגידולים השונים (ראה נספח 1). איור 20 מראה כי מאזן הקרינה בחלקות עם הצמחייה גבוה בכ-25 ואט למטר רבוע בהשוואה לחלקת הביקורת. האלבדו של הצמחייה נמוך יותר מהאלבדו של הקרקע החשופה, ולכן הקרינה קצרת הגל המוחזרת ממנה נמוכה יותר. מאחר והצמחייה גם קרירה יותר מהקרקע בשל תהליך הדיות המתקיים בה, היא גם פולטת פחות קרינה אינפרא אדומה. המשמעות של הממצאים האלה היא ששטף הקרינה הכולל בצד התחתון של הפאנלים נמוך יותר בחלקות הניסוי, ולכן הפאנלים מתחממים פחות מאשר בחלקת הביקורת (ללא צמחייה).

באיור 20 ניתן לראות את שטפי הקרינה ארוכת הגל בלבד - זו הנפלטת מכיוון הקרקע כלפי מעלה (בחלק התחתון של האיור) וזו הנכנסת מכיוון הפאנלים כלפי מטה (בחלק העליון של האיור).

הקרינה קצרת הגל הינה קטנה במיקום זה, משום שהחיישן אינו חשוף לשמש ישירה אלא נמצא תחת הפאנלים ומוצל ולכן מושפע בעיקר מהקרינה האינפרא אדומה המתקבלת משני הכיוונים, הצמחייה (או הקרקע) והפאנל ולא מרמת האור. מאיור 20 ניתן ללמוד כי הקרינה ארוכת הגל הנפלטת מהקרקע כלפי מעלה גבוהה ב-50 ואט למטר רבוע בערך בחלקת הביקורת בהשוואה לחלקות הצמחייה. נתון זה מלמד שעומס החום בפני הקרקע שבחלקת הביקורת גבוה יותר מחום הצמחייה בחלקות האחרות.

בנוסף לכך הקרינה ארוכת הגל הנכנסת מכיוון הפאנלים לחיישן גם היא גבוהה בחלקת הביקורת בהשוואה לחלקות הצמחייה, משום שהפאנלים הנמצאים מעל האדמה החשופה חמים יותר מהפאנלים הנמצאים מעל חלקות הצמחייה (איור 20).



איור 20 מהלך יומי ממוצע של קרינות ארוכות גל נכנסות מכיוון הפאנלים (רצוף), נפלטות מכיוון הקרקע כלפי מעלה (מוקד) ומאזן קרינה (מרוסק), ממוצע לחודשי הקיץ יולי – אוגוסט – ספטמבר.

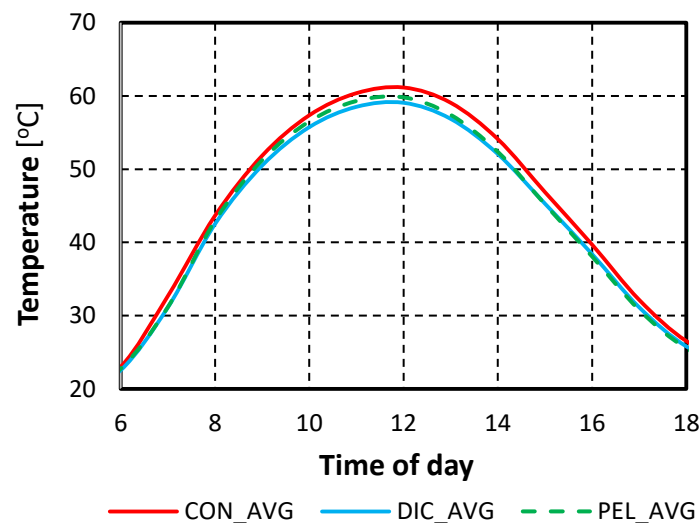
5.3. טמפרטורת פאנל ויעילות חשמלית

ידוע שעליה בטמפרטורה של פאנל סולארי מפחיתה את יעילות תפוקת החשמל של הפאנל בצורה ליניארית. לכל דגם של פאנל ישנו קבוע יעילות שונה. הפאנלים אשר מותקנים באתר משאבי שדה הינם מדגם MAXPOWER CS60U-330P מבית Canadian Solar, אשר להם קבוע טמפרטורה של -0.41 . כלומר, כל עלייה של הטמפרטורה במעלה אחת מעל 25°C תביא להפחתה בהספק החשמלי שמייצר הפאנל ב- 0.41% .

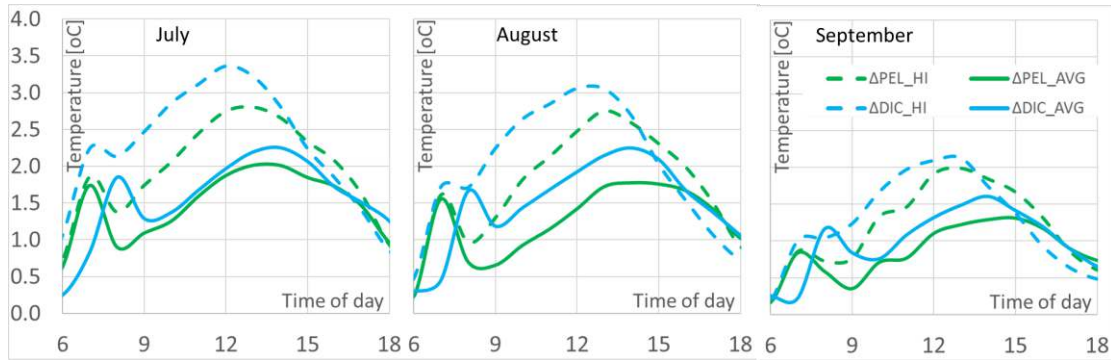
טמפרטורת הפאנל אשר נמדדה בחלקות הצמחייה הייתה נמוכה יותר מטמפרטורת הפאנל בחלקת הביקורת בכל ימות הקיץ, החל מהתחלת המדידות הרשמית באמצע יוני ועד לסוף חודש אוקטובר (ניתוח סטטיסטי מפורט המציג הבדלים מובהקים בטמפ' הפאנלים כתלות בטיפולים השונים, מוצג בנספח 1). באיור 21 ניתן לראות כי טמפרטורת הפאנל הממוצעת (ממוצע של כל התרמוקפלים באותה חלקה) בחודשים יולי ואוגוסט הינה גבוהה יותר בשעות היום בחלקת הביקורת מאשר בחלקות הצמחייה - במעלה עד מעלה וחצי בהשוואה לחלקת הגירניום, וב-2 מעלות בערך בהשוואה לחלקת הדיכונדרה. בשעות החשיכה טמפרטורת הפאנלים בכל החלקות דומה.

איור 22 מציג את הפרש הטמפרטורות הממוצע במהלך היום בחודשים יולי, אוגוסט וספטמבר. ניתן לראות כי בשעה 7 בבוקר בחודשים יולי ואוגוסט נצפה הבדל של כמעלה וחצי בשתי החלקות – כלומר, הפאנלים שמעל שתי חלקות הצמחייה קרים במעלה וחצי בערך בהשוואה לחלקת הביקורת (הנתונים בשעון חורף כמקובל). לאחר מכן ההפרש פוחת, כנראה כתוצאה מהתאדות הטל שהצטבר במהלך הלילה על הפאנלים. בשעות הבוקר המאוחרות ועד אחר הצהריים ניתן לראות עלייה של הפער, משום שהפאנלים שנמצאים מעל הצמחייה מתחממים בקצב איטי יותר מהפאנלים בקבוצת הביקורת. טמפרטורת הפאנלים מושפעת מאידוי-דיות, האלבדו של המשטח וכן מהקרינה ארוכת הגל אשר נפלטת מהמשטח כלפי מעלה.

ההבדלים בין הדיכונדרה והגירניום נובעים ככל הנראה ממשטר אידוי – דיות שונה של הצמחים והתאמתם השונה לנשימה בצל. צמחי הדיכונדרה והסיגלית האוסטרלית מתאימים יותר לצל מאשר הגירניום, ולכן (ככל הנראה) הפאנלים שמעליהם מתקררים יותר. כמו כן לקרינה ארוכת גל הנפלטת מן הקרקע תפקיד משמעותי בקביעת טמפרטורת הפאנלים, ייתכן שטמפרטורת המשטח בצמחי הדיכונדרה נמוך יותר מזה של צמחי הגירניום ולכן אנו צופים בקירור משמעותי יותר בצמחי הדיכונדרה. לבחירה של צמחייה מתאימה עשויה אפוא להיות השפעה על טמפרטורת הפאנלים ותפוקת החשמל.



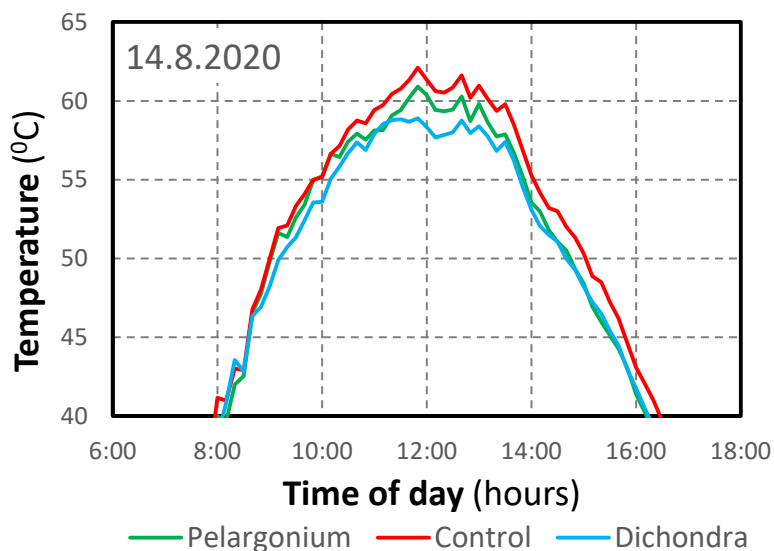
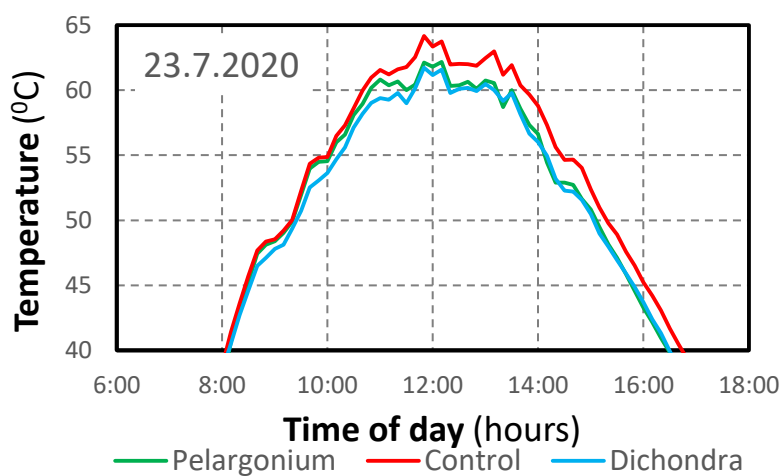
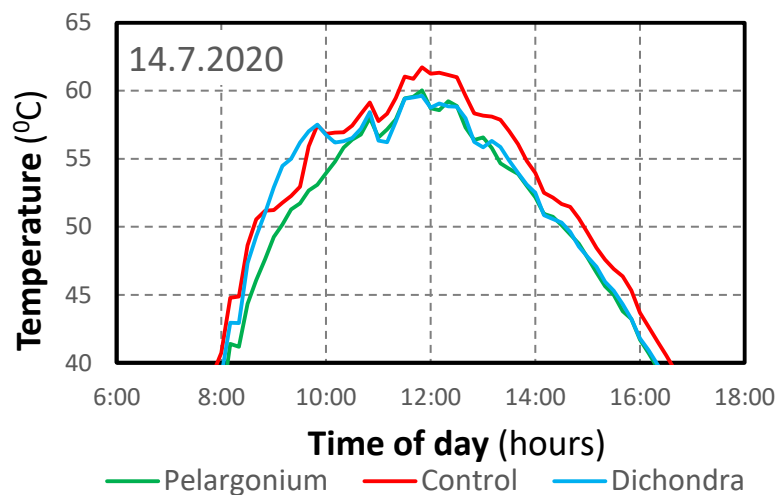
איור 21 מהלך יומי של טמפרטורת פאנלים ממוצעת בחודשים יולי ואוגוסט



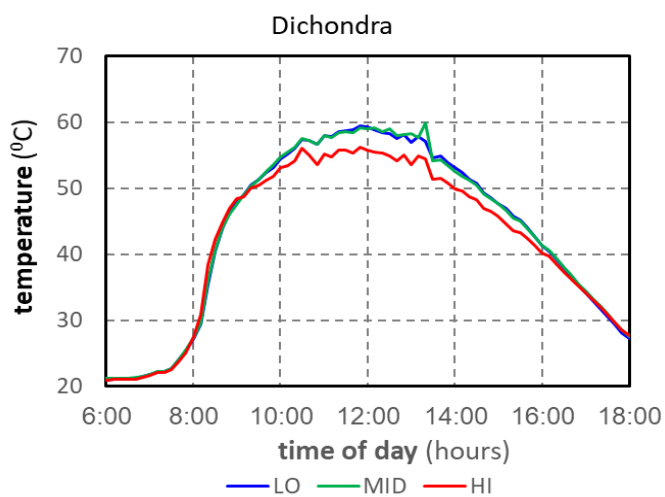
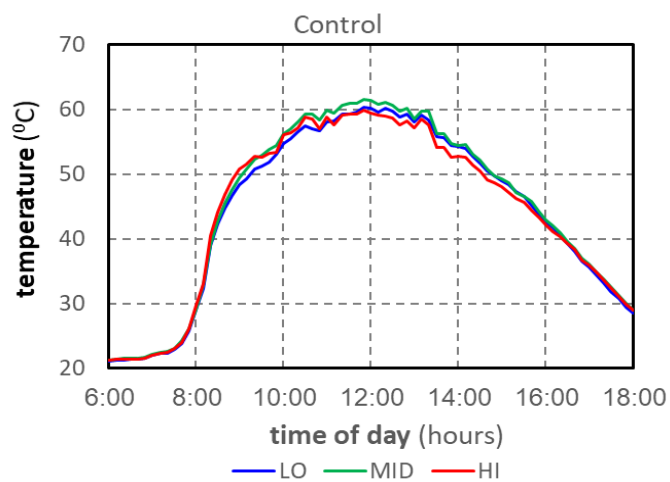
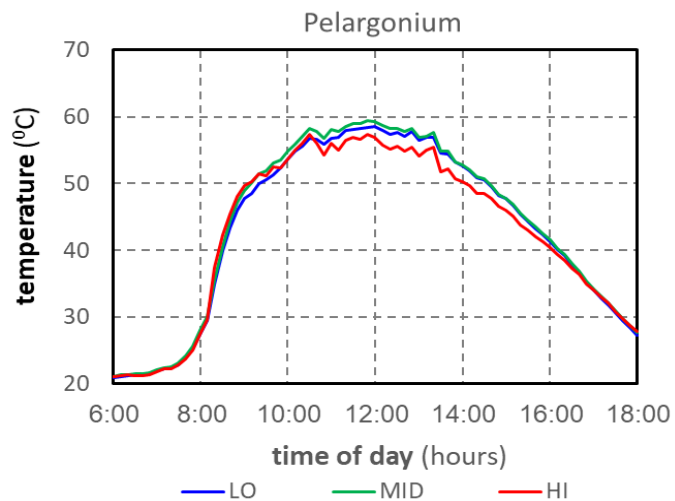
איור 22 הפרש ממוצע בחודשים יולי, אוגוסט וספטמבר בין חלקת הביקורת לטיפולים ממוצע של כל הפאנלים (קו רצוף) והפרש ממוצע בפאנלים הגבוהים (קו מרוסק)

הצגת הנתונים לאורך מספר ימים מאפשרת הצגה נוחה משום שנתונים אלו מתקבלים 'נקיים' יותר בשל ביטול השפעות רגעיות של עננות זמנית או רוח מאוד חזקה. עם זאת ניתן גם להציג נתונים עבור יום מסוים. איור 23 מציג ארבעה גרפים עבור ימים אשר נבחרו אקראית במהלך חודש יולי. ניתן לראות כי בכל אחד מהימים טמפרטורת הפאנלים הממוצעת (ממוצע חלקה) בחלקת הביקורת הייתה גבוהה ב- $2-3^{\circ}\text{C}$ בשעות השיא בהשוואה לחלקות הצמחייה.

טמפרטורת הפאנלים נמדדה בשלושה גבהים שונים (איור 16), ונמצא כי ההשפעה של הגובה שונה בין החלקות. בעוד שבחלקת הביקורת היו טמפרטורות הפאנלים הקרובים לקרקע, האמצעיים והעליונים דומות, הרי שבשתי חלקות הניסוי היו טמפרטורות הפאנלים הגבוהים נמוכות בהשוואה לאחרים. ההפרש היה גדול במיוחד בחלקת הדיכונדרה (2.16 מעלות בממוצע בשעות היום בחודש יולי), אולם גם בחלקת הגירניום הוא היה משמעותי (1.85 מעלות בממוצע בשעות היום בחודש יולי). איור 24 מציג את מהלך הטמפרטורות בשעות האור בשלוש חלקות הניסוי, בחלוקה לפי מיקום הפאנלים.



איור 23 טמפרטורת פאנל בכל אחת מחלקות הניסוי (ממוצע חלקה) בשלושה ימים אקראיים בחודשים יולי-אוגוסט

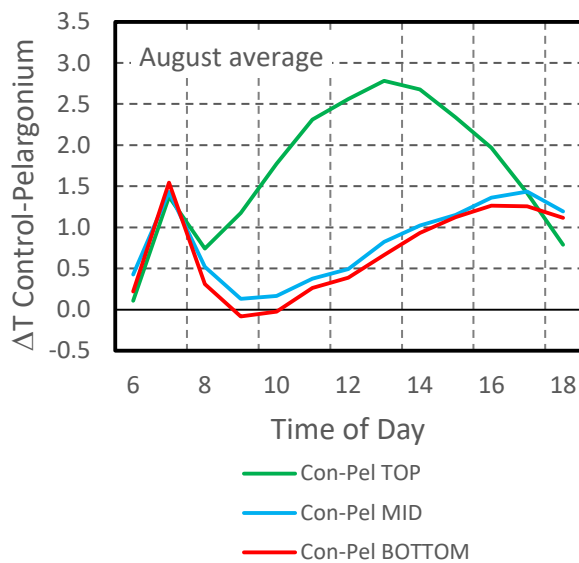


איור 24 טמפרטורות הפאנלים בשלוש החלקות, לפי הגובה מעל פני הקרקע (26 יולי 2020).

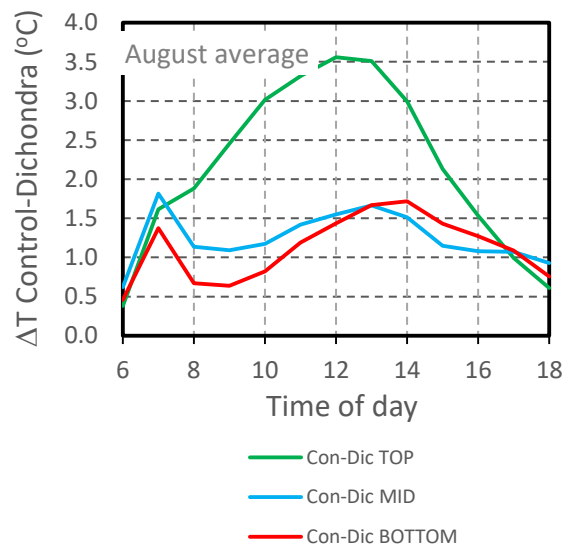
ההבדל בטמפרטורת הפאנלים לפי הגובה מעל הקרקע נובע ככל הנראה מהבדלים במאזן הקרינה, ולא רק מהבדלים בטמפרטורת האוויר. מקורו של ההבדל הזה הוא בטמפרטורה של רצועת הקרקע אשר בין שורות הפאנלים: בעוד שקרקע חשופה מתחממת מאוד, הרי שהטמפרטורה של פני שטח המכוסים צמחייה נמוכה יותר. ההשפעה המרבית ניכרת בחשיפה של הפאנלים הגבוהים, הנמצאים קרוב לרצועה הזו, ובמידה פחותה בפאנלים הנמוכים.

ההבדלים בטמפרטורת הפאנלים לפי הגובה מהקרקע מתבטאים גם בהבדלים בין החלקות.

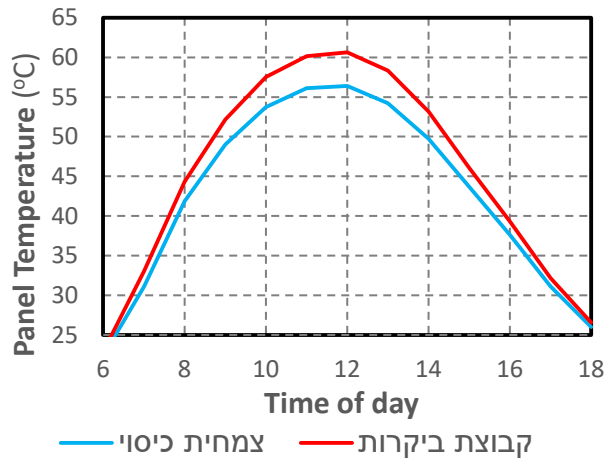
איור 25 מציג את הפרשי טמפרטורת הפאנלים השונים בין חלקת הדיכונדרה לחלקת הביקורת, ואיור 26 מציג אותם עבור חלקת הגירניום. הנתונים הינם ממוצע של חודש אוגוסט. ההפרש בין טמפרטורת הפאנל העליון בחלקות הניסוי ובין פאנל מקביל בחלקת הביקורת הוא הגבוה ביותר בשעות האור: כ-3.5 מעלות בחלקת הדיכונדרה וכ-2.7 מעלות בחלקת הגירניום. איור 27 מציג במספרים אבסולוטיים את טמפרטורת הפאנל הממוצעת בחודש אוגוסט עבור הפאנל הגבוה ביותר בחלקת הדיכונדרה והפאנל הגבוה ביותר בחלקת הביקורת. ניתן לראות הבדל של כ-4 מעלות צלזיוס במהלך השעות החמות של היום.



איור 26 הפרשי טמפרטורת הפאנלים בין חלקת הביקורת לחלקת הגירניום



איור 25 הפרשי טמפרטורת הפאנלים בין חלקת הביקורת לחלקת הדיכונדרה



איור 27 טמפרטורת הפאנל הממוצעת לחודש אוגוסט בפאנל הגבוה ביותר בחלקת הביקורת (גרף אדום) ובפאנל הגבוה ביותר בחלקת הדיכומה (גרף תכלת)

5.3.1 יעילות חשמלית

ניתן לאמוד את השפעת הצמחייה על תפוקת החשמל במספר אופנים:

1. מדידה ישירה של הזרם והמתח של הפאנלים בכל אחת מהחלקות. בשיטה זו יש לחבר מד זרם ומד מתח לפאנלים הסולאריים. מד הזרם מתחבר בצורה שאינה דורשת פתיחת המעגל אך מד המתח דורש בהכרח התערבות במעגל החשמלי של המתקן ופתיחת המעגל החשמלי. הפאנלים הסולאריים הנמדדים הינם חלק ממערכת סולארית שמכילה כ-180,000 פאנלים, כל הפאנלים מחוברים בטור ובמקביל ולכן ייתכנו השפעות על המתח והזרם החשמלי מגורמים חיצוניים.
2. שימוש בקבוע היעילות הנמצא בעלון המידע שמתקבל על ידי היצרן ושימוש בנתוני טמפרטורת הפאנל – בשיטה זו אין צורך למדוד זרם או מתח, וחישוב השינוי בתפוקה נעשה על פי קבוע הטמפרטורה אשר נמסר על ידי היצרן. החיסרון של שיטה זו הינה בכך שלא מדובר במדידה בשטח אלא בקבוע אמפירי שנמדד בתנאים מסוימים שלא בהכרח מתקיימים בשטח.

5.3.2 חישוב תפוקת החשמל על ידי שימוש בנתוני יצרן

להלן פירוט נתוני היצרן הרלוונטיים עבור חישוב תפוקת החשמל:

1. נצילות פאנל: 16.97%
2. שטח פאנל: 1.94 מ"ר
3. קבוע טמפרטורה: -0.41 אחוז/מעלת צלזיוס

הנתונים הרלוונטיים עבור החישוב שנמדדו בניסוי:

1. קרינת שמש גלובלית נכנסת
2. טמפרטורת פאנלים בכל אחת מהחלקות

תפוקת החשמל של פאנל בודד חושבה לפי המשוואה הבאה:

$$P = I_{sol} * E * A_{panel} * [1 - 0.0041 * (T_{panel} - 25)]$$

כאשר

P – הספק הפאנל (ואט)

I_{sol} – שטף קרינת השמש במישור הפאנל (ואט/מ"ר)

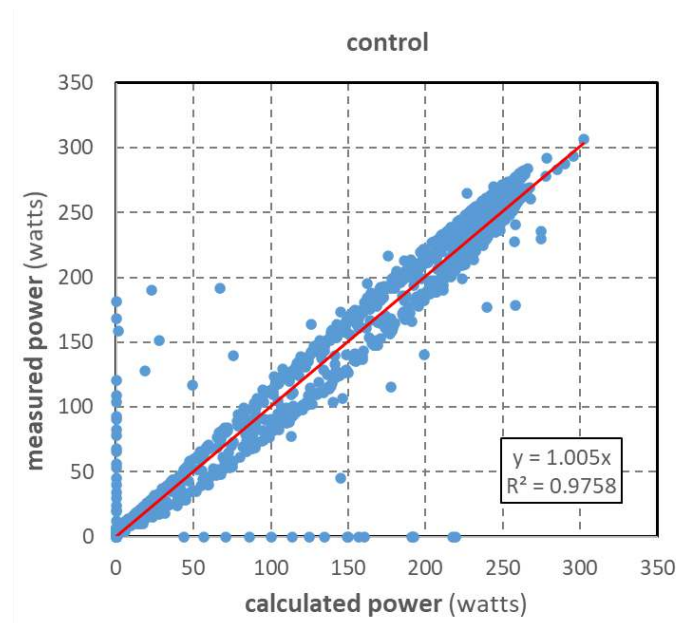
E – נצילות הפאנל

A_{panel} – שטח הפאנל (מ"ר)

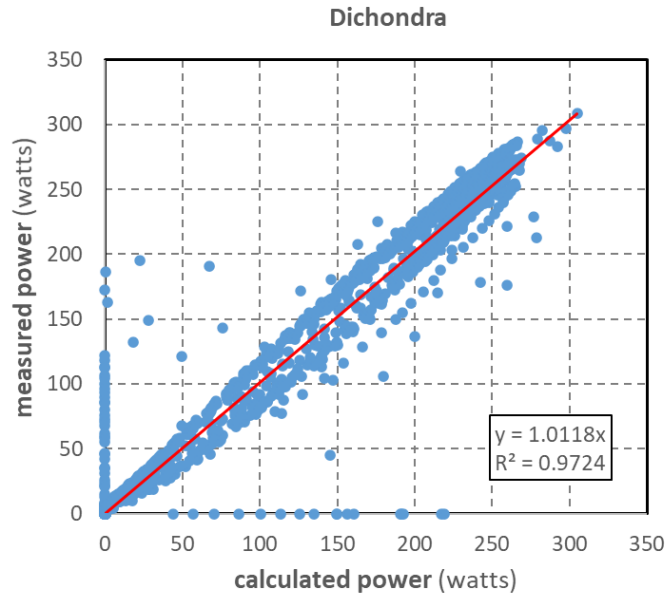
T_{panel} – טמפרטורת הפאנל (צלזיוס)

קורלציה גבוהה בין ההספק המחושב (עם תיקון הטמפרטורה) לבין ההספק אשר חושב ממדידות המתח והזרם מהווה אימות לכך שהפאנלים המותקנים בשדה מפיקים חשמל בהתאם לנתוני היצרן, ובפרט כי התיקון להשפעת הטמפרטורה הינו מדויק.

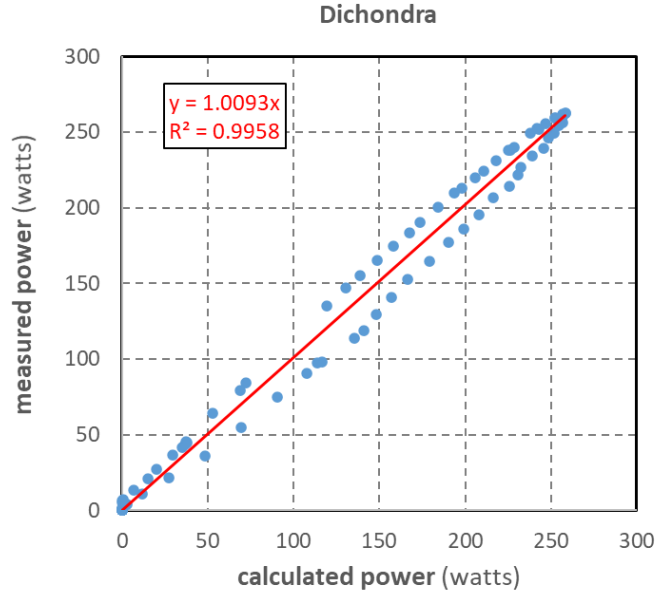
בתקופה אשר בה נמדדו המתח והזרם, בין 14-29 באוקטובר, הקורלציה בין הנתונים המחושבים לנתונים המדודים הייתה כמעט מושלמת (אם כי ישנו הבדל קטן מאוד בין שתי החלקות). קורלציה זו מאפשרת לבסס את החישוב של התפוקה גם עבור חודשים שבהם אין לנו מדידה ישירה של זרם ומתח (יולי, אוגוסט, איור 28, איור 29).



איור 28 הקורלציה בין ההספק המדוד בחודש אוקטובר לבין ההספק המחושב מנתוני היצרן עבור חלקת הביקורת



איור 29 הקורלציה בין ההספק המדוד בחודש אוקטובר לבין ההספק המחושב מנתוני היצרן עבור חלקת הדיכונדרה חשוב להדגיש כי על אף המתאם הגבוה בין הנתונים המחושבים לנתונים המדודים, ישנם הבדלים קטנים אך שיטתיים במהלך היומי האופייני, הנובעים מהיסטרזיס בין קרינת השמש והטמפרטורה של הפאנל, המתבטאים גם בהספק החשמלי שלו (איור 30).



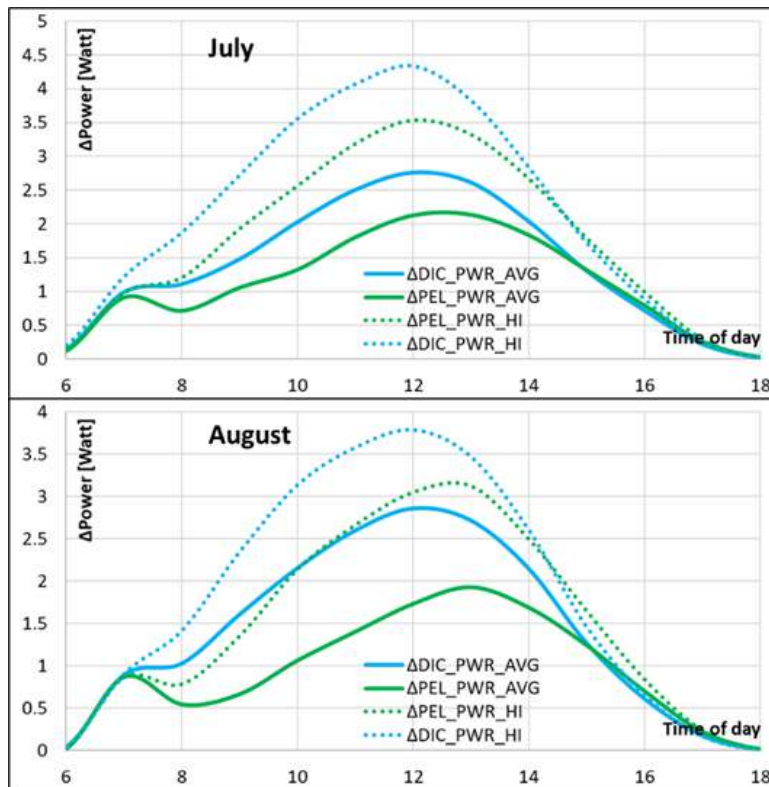
איור 30 היסטרזיס בין ההספק המחושב לבין ההספק המדוד בפאנל ממוצע בחלקת הדיכונדרה, הנובע מפיגור הזמן בין השינוי בקרינת השמש הפוגעת בפאנל לבין השינוי בטמפרטורה שלו.

טבלה 2 מציגה את ההספק לפאנל בודד שחושבו באמצעות קרינת השמש הנכנסת לפי נתוני היצרן עם תיקון לפי טמפרטורת הפאנל. הנתונים מראים תוצאות ממוצעות עבור החודשים יולי ואוגוסט בכל אחת משלוש החלקות. ניתן לראות שכבר החל משעות הבוקר המוקדם ההספק בחלקות הניסוי גבוה יותר מההספק בחלקת הביקורת. כבר מהשעה 10 בבוקר ועד לשעה 5 בערב ניתן לראות שיפור ממוצע של יותר מחצי אחוז.

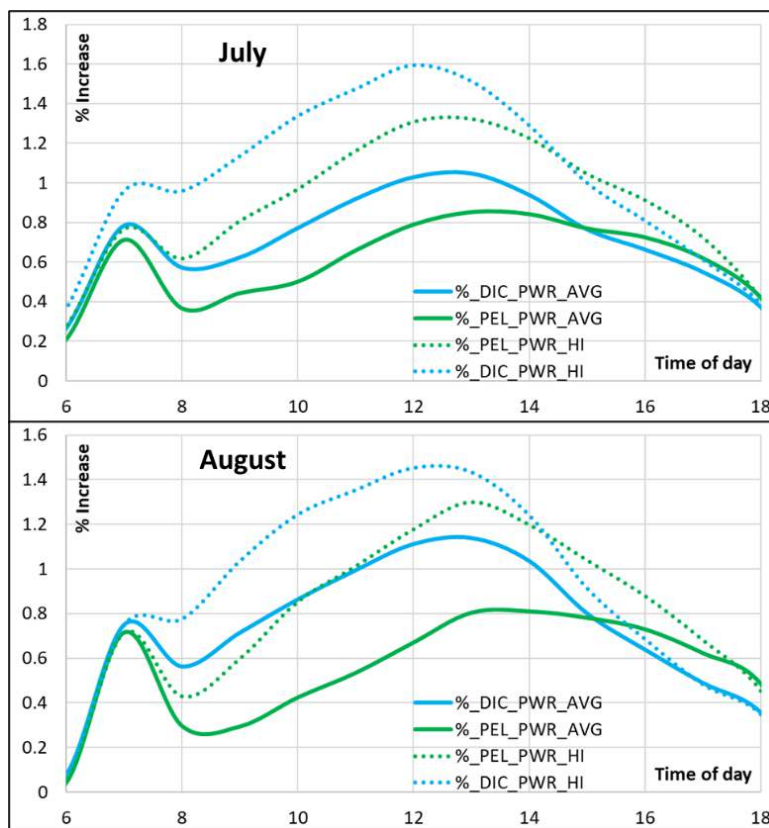
טבלה 2 תוצאות חישובי ההספק לפי נתוני יצרן, קרינת שמש וטמפרטורת פאנל

שעה ביום (שעון חורף)	הספק פאנל ביקורת ואט	הספק פאנל גירניים ואט	הספק פאנל דיכונדרה ואט	אחוז שיפור גירניים %	אחוז שיפור דיכונדרה %
6	49.99	50.51	50.53	0.13	0.18
7	119.10	121.07	121.25	0.72	0.77
8	182.42	182.63	183.41	0.33	0.57
9	224.98	225.82	226.74	0.36	0.67
10	249.13	250.32	251.38	0.46	0.82
11	260.54	262.04	263.25	0.60	0.96
12	256.09	257.87	259.03	0.73	1.07
13	237.26	239.31	240.13	0.83	1.09
14	205.85	207.58	208.06	0.83	0.99
15	156.90	158.31	158.34	0.78	0.78
16	94.81	95.31	95.44	0.73	0.65
17	34.62	34.90	34.85	0.62	0.52
18	2.68	2.68	2.68	0.44	0.37

איור 31 מציג את ההפרשים בהספק של פאנל ממוצע בין חלקת הביקורת לחלקות הניסוי. ניתן לראות שבמהלך היום ההספק בחלקות עם הצמחייה גבוה ב- 1-3 ואט עבור פאנל ממוצע וב- 1-4.5 ואט עבור פאנל גבוה. ניתן לחשב אם כך שבמהלך יומי ממוצע פאנל בחלקת הגירניים ופאנל בחלקת הדיכונדרה מייצרים 13.98 ו-20.70 ואט-שעה יותר מאשר בחלקת הביקורת, הווה אומר שיפור של 0.7-1% אחוז בנצילות במהלך שעות האור בעקבות הוספת הצמחייה. ניתן לראות את אחוז השיפור בנצילות השעתי באיור 32 עבור ממוצע של כל הפאנלים וכן עבור הפאנלים הגבוהים. אחוז השיפור המקסימלי עומד על 1.6 אחוז והתקבל בפאנלים העליונים בחלקת הדיכונדרה כלומר לתצורת המתקן ולסוג הצמחייה יכולה להיות השפעה משמעותית על ההתייעלות האנרגטית.



איור 31 ההפרש בתפוקת החשמל (בואט) בין חלקת הביקורת לחלקת הצמחייה בחודשים יולי ואוגוסט עבור פאנל בודד. קו רצוף הינו ההפרש הממוצע עבור כלל החלקה וקו מנוקד הינו ההפרש בין הפאנלים הגבוהים בלבד



איור 32 אחוז השיפור בתפוקת החשמל (באחוזים) בין חלקת הביקורת לחלקת הצמחייה בחודשים יולי ואוגוסט עבור פאנל בודד. קו רצוף הינו ההפרש הממוצע עבור כלל החלקה וקו מנוקד הינו ההפרש בין הפאנלים הגבוהים בלבד

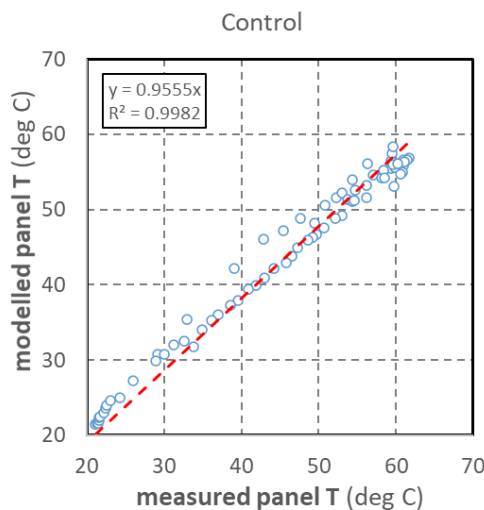
5.3.3 מודל כללי לטמפרטורת פאנל פוטו-וולטאי

מודל פיימן לאמידת טמפרטורת הפאנלים אשר הוצג בסקירת הספרות ומובא כאן שוב מבוסס על הנוסחה לחישוב טמפרטורת sol-air (Rao and Ballantyne, 1970), וכוללת 3 איברים: טמפרטורת האוויר, קרינת השמש ומקדם מעבר חום בהסעה (המושפע בתורו ממהירות הרוח).

$$T_m = T_a + \frac{E}{U_0 + U_1 \times W}$$

בהיעדר קרינת שמש (E), תהיה טמפרטורת הפאנל שווה (לפי המודל) לטמפרטורת האוויר. ההשפעה של קרינת השמש על הטמפרטורה תלויה במידה בה הפאנל מאבד חום אל סביבתו בהסעה. כאשר מהירות הרוח עולה, יהיה קצב האיבוד גבוה יותר. הביטוי במכנה של האיבר הימני הוא חישוב של מקדם מעבר החום בהסעה (h_c) המבוסס על מקדמים אמפיריים. כאשר אין רוח, ערכו 6.85 ואט/מ² קלווין. המקדם U_1 , שהוא כאמור אמפירי, נקבע על ידי פיימן כשווה ל-25.

הנתונים אשר נרשמו במהלך הניסוי אפשרו לנו לבחון את המודל של פיימן מחדש. איור 33 מציג את הקשר בין טמפרטורות הפאנלים אשר נמדדו ביום קיץ אופייני (27 ביוני 2020) בחלקת הביקורת לבין תוצאת החישוב לפי המודל. נתוני המדידה מבטאים את ממוצע החישובים באמצע הפאנל. טמפרטורת האוויר לחישוב נמדדה סמוך לפאנל, ונתוני הקרינה והרוח בקצה האתר בגובה 1 מטר מעל הפאנל העליון.



איור 33 הקורלציה בין הטמפרטורה המחושבת של הפאנל (לפי מודל פיימן) בחלקת הביקורת לבין הנתונים המדודים ביום 27 ביוני 2020.

הקורלציה היא גבוהה מאוד, אם כי ניתן תוצאת החישוב נמוכה מעט מהמדידה, באופן שיטתי. כמו כן, להבחין בהיסטריזיס המבטא את פער הזמן בין החשיפה לקרינת שמש לבין עליית הטמפרטורה של הפאנל.

יישום המודל של פיימן כפי שהוא מצריך מדידה של הטמפרטורה של האוויר סמוך לפאנל. כמו כן, הוא איננו נותן ביטוי להשפעה של הצמחייה על הטמפרטורה, אשר עליה עמדנו בפרק הקודם. לשם כך נבחנו האפשרות להכניס במודל שני שינויים:

א. השפעת קרינת השמש על טמפרטורת הפאנל איננה מביאה בחשבון את האלבדו שלו. אף כי ההחזר הוא נמוך מאוד, הוא איננו אפסי: מקדם הבליעה של פאנלים סולריים עשויי סיליקון גבישי הוא כ-0.91-0.93 (Santbergen, 2007). לפיכך, בנוסחה המתוקנת המוצעת כאן יתווסף מקדם אשר יבטא את הבליעה. ערכו של המקדם יכול לבטא גם את ההבדל בין פאנל המותקן מעל קרקע חשופה לבין פאנל המותקן מעל צמחייה, ובהתאם לכך יקבל פחות קרינה.

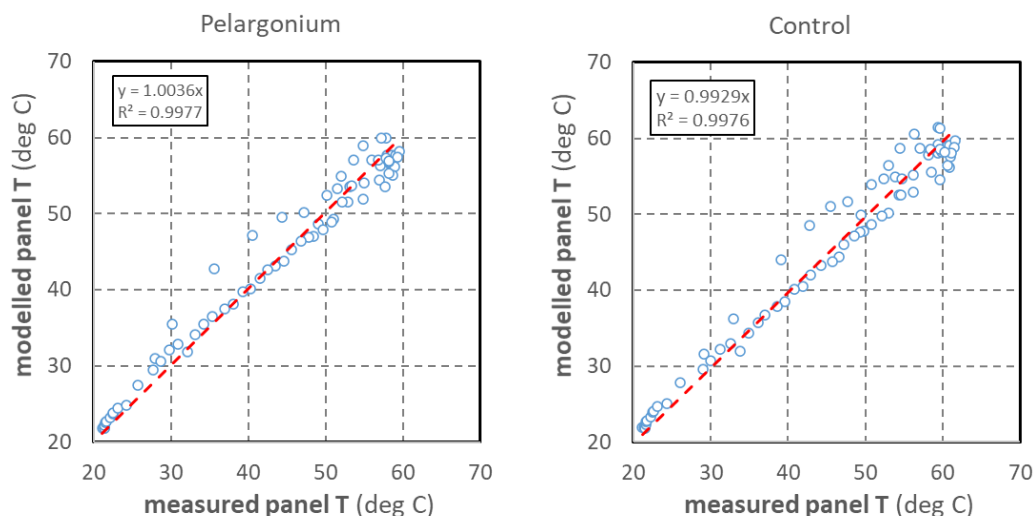
ב. בהתאם לכך, היה צורך להקטין את ערכו של מקדם מעבר החום בהסעה (hc), שהוא כאמור אמפירי.

מודל פיימן המתוקן הוא אפוא:

$$T_m = T_a + \frac{aE}{U_0 + U_1 \times W}$$

α הוא מקדם הבליעה של הפאנל, וערכם של המקדמים U_0 ו- U_1 הוא 6.85 (ללא שינוי) ו-18 (במקום 25), בהתאמה. מקדם U_0 הוא ערכו של מקדם מעבר החום בהיעדר רוח. ערכו של מקדם U_1 נקבע אמפירית. מקדם α שווה 0.91 עבור פאנל המותקן מעל צמחייה, ו-0.95 עבור פאנל הנמצא מעל קרקע חשופה. כל הנתונים המטאורולוגיים לחישוב ערכי המודל נמדדו בתחנה בקצה האתר.

איור 34 מציג השוואה בין הטמפרטורה המדודה של הפאנלים בשתי חלקות הניסוי – ביקורת ופלרגוניום – בהשוואה לטמפרטורה המחושבת לפי המודל המתוקן, גם כן עבור ה-27 ביוני 2020.



איור 34 הקולציה בין הטמפרטורה המחושבת של הפאנל (לפי מודל פיימן המתוקן) בחלקת הביקורת ובחלקת הפלרגוניום לבין הנתונים המדודים ביום 27 ביוני 2020.

6. תוצאות (ב) צמחייה וחקלאות

6.1 צריכת מים

משטר ההשקיה היה שונה בין הצמחייה אשר נמצאת בשמש לבין הצמחייה אשר נמצאת בצל פירוט ההשקיה בחלקות השונות מוצג בטבלה 3, אם כי היו שינויים נקודתיים במקרים שזוהה עודף מים או חוסר מים, כגון בשבועות של עומס חום חריג אשר בהם הוגברה ההשקיה. כאשר האדמה הייתה רטובה מידי הופסקה או הופחתה משמעותית ההשקיה למספר ימים. במהלך קליטת הצמחים, בחודש שלאחר השתילה, נעשתה השקיה אינטנסיבית יותר. בנוסף, היו פיצוצים רבים בצנרת (כמעט כל שבוע) בשל כרסום הצינורות על ידי תנים אשר חיפשו מים. עד לתיקון הצינורות הייתה זרימת מים רבה יותר בנקודות הפיצוץ.

טבלה 3 משטר ההשקיה

תקופה	חלקה	תדירות שבועית	משך (דקות)	ספיקה (מ"ק/שעה)	כמות (מ"ק)	סה"כ לתקופה (מ"ק)
20.3-29.6 15.5 שבועות	גירניום שמש	4	80	7.5	40	620.0
	גירניום צל	4	50	8.4	28	434.0
	דיבונדרה שמש	5	90	9.3	69.75	1081.1
	דיבונדרה צל	4	80	9.9	52.8	818.4
29.6-14.7 2 שבועות	גירניום שמש	4	60	7.5	30	60.0
	גירניום צל	4	50	8.4	28	56.0
	דיבונדרה שמש	4	70	9.3	43.4	86.8
	דיבונדרה צל	4	60	9.9	39.6	79.2
14.7-20.9 9.5 שבועות	גירניום שמש	4	60	7.5	30	285.0
	גירניום צל	4	50	8.4	28	266.0
	דיבונדרה שמש	4	60	9.3	37.2	353.4
	דיבונדרה צל	4	50	9.9	33	313.5
20.9-14.10 2 שבועות	גירניום שמש	2	60	7.5	15	30.0
	גירניום צל	2	50	8.4	14	28.0
	דיבונדרה שמש	3	60	9.3	27.9	55.8
	דיבונדרה צל	3	50	9.9	24.75	49.5
14.10-2.11 2 שבועות	גירניום שמש	2	45	7.5	11.25	22.5
	גירניום צל	2	40	8.4	11.2	22.4
	דיבונדרה שמש	2	60	9.3	18.6	37.2
	דיבונדרה צל	2	50	9.9	16.5	33.0

6.2. השוואת התפתחות הצמחים בחלקות השונות

בחלקת צמחי הדיכונדרה הזוחלת (*Dichondra repens*) ו- סיגל קיסוסי-סיגלית אוסטרלית (*Viola hederacea*) ניתן היה לראות כבר לאחר שלושה חודשים שגם תחת הפאנלים וגם באזורים שבין הפאנלים הצמחים התפתחו באופן טוב וכיסו 100% מהשטח (תמונה 13). הצמחים שבין שורות הפאנלים חשופים לקרינה גבוהה יותר ולכן מושקים ברמה גבוהה יותר. שילוב בין צמחי הדיכונדרה והסיגלית אוסטרלית היה מוצלח שכן היה כיסוי רב יותר של צמחי הדיכונדרה בין הפאנלים (אזור החשוף ליותר שמש) וכיסוי של סיגלית אוסטרלית תחת הפאנלים. הבחירה בשילוב של שני מינים שונים של צמחים, שכל אחד תופס אזור מיקרו-אקלימי שונה ביחס לפאנל, הביאה לתוצאה חיובית של כיסוי צפוף של כל השטח (תמונה 19).

סוגי הצמחים שנבחרו אינם מתפתחים לגובה רב ולכן אין צורך בכיסוח. באזורים שבין הפאנלים התבססו צמחי הדיכונדרה באופן טוב יותר והשתלטו על רוב השטח (תמונה 14). באזורים שתחת הפאנלים התפתחו הצמחים באופן שווה, כך הדיכונדרה והסיגלית כיסו בערך חצי מהשטח כל אחד (תמונה 15).



תמונה 13 חלקות השמש והצל של צמחי דיכונדרה זוחלת (*Dichondra repens*) וסיגל קיסוסי (*Viola hederacea*) לסירוגין בתחילת חודש יולי



תמונה 14 צמחי דיכונדרה זוחלת (*Dichondra repens*) שהשתלטו על חלקת השמש בתחילת חודש יולי



תמונה 15 חלקות הצל (תחת הפאנלים) בהם צמחי סיגל קיסוסי (*Viola hederacea*) ודיכונדרה זוחלת (*Dichondra repens*) התפתחו באופן שווה

בחלקת צמחי הגירניום ניתן לראות שגם תחת הפאנלים וגם באזורים שבין הפאנלים הצמחים התפתחו באופן טוב וכיסו כמעט 100% מהשטח (תמונה 16). הצמחים שנבחרו מתפתחים עד כה לגובה (70 ס"מ) ולכן יש צורך בגיזום תקופתי. עם זאת ניתן להשתמש בחומר הצמחי להפקת שמן אתרי.

באזורים שבין הפאנלים החשופים יותר לקרינת השמש הצמחים התפתחו לגובה נמוך יותר מאשר הצמחים שתחת הפאנלים (איור 35) עם עלים קטנים יותר (תמונה 17). מבחינה מורפולוגית יש הבדל ברור בעלווה בין החלקות השונות. העלים של הצמחים בין הפאנלים קטנים וצרים יותר. עלים אלו בעלי רקמות קשות יותר וצבעם בהיר יותר.

הבדל זה בין הצמחים המתפתחים בשמש ובצל נובע כנראה מהבדלי החשיפה לקרינת שמש ישירה ובשל רמת השקיה נמוכה יחסית לקבוע האידוי באזור (קבוע פנמן). בשבועות האחרונים חלקת

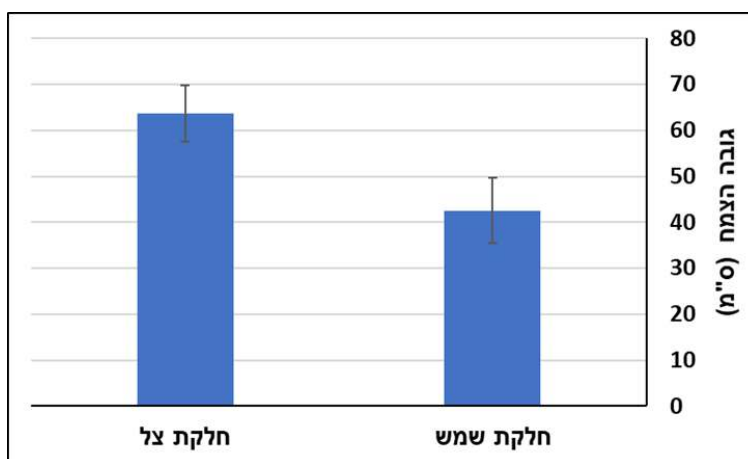
השמש הושקתה ברמה של 5.5 מ"ק/דונם/יום כשקבוע האידוי פנמן הגיע ל 8.5-9 מ"ק/דונם/יום. בגידול זה הגדל בשמש ישירה מקובל לחשב את ההשקיה לפי 75-90% ממקדם ההשקיה פנמן, ולכן ההשקיה הרצויה צריכה להגיע ל- 6.75 מ"ק/דונם/יום לפחות. לקראת השנה הבאה, נעלה את כמות ההשקיה בחלקות אלו כדי לשפר את הצימוח והתפתחות הצמח בקיץ.

באזורים שתחת הפאנלים התפתחו הצמחים גבוהים יותר אך פחות צפופים (תמונה 16, איור 36).

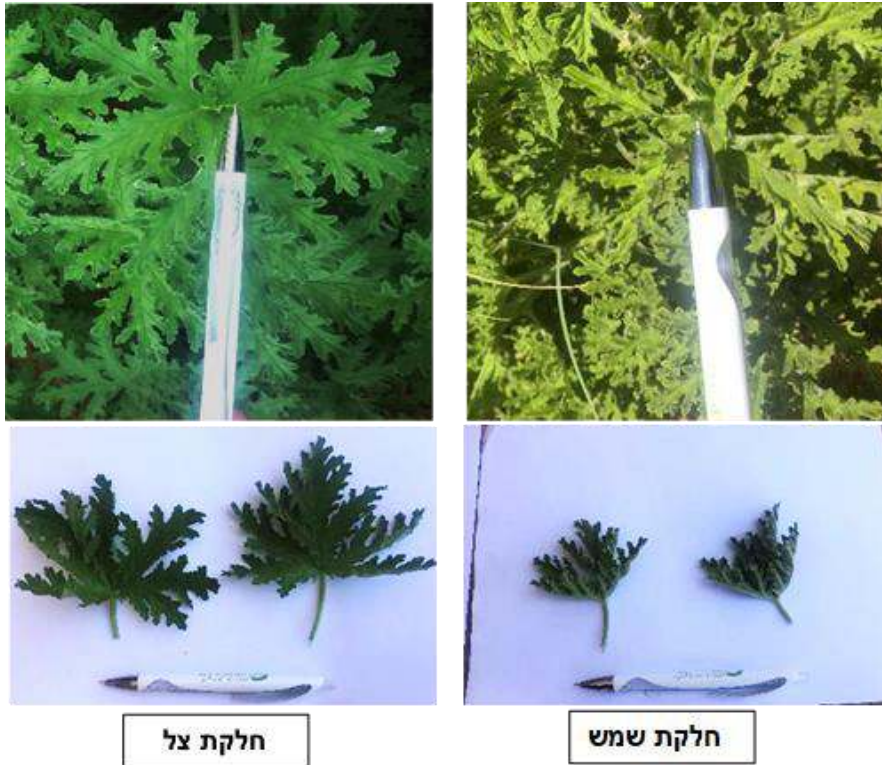
בדקנו את תכולת השמן האתרי בצמחים הגדלים בחלקות השונות, בשמש ובצל ולא מצאנו הבדל משמעותי בין החלקות.



תמונה 16 חלקות השמש והצל של צמחי פלרגוניום חריף- גירניום לימוני (*Pelargonium graveolens*) בתחילת חודש יולי

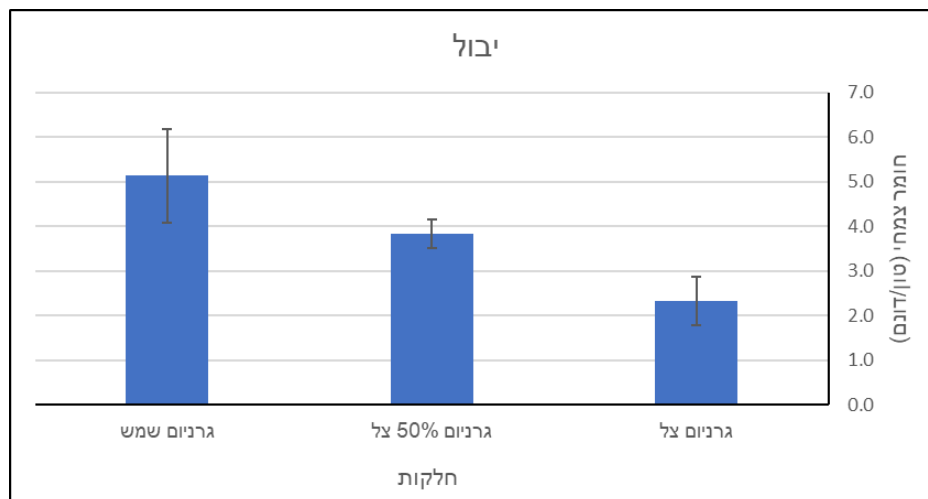


איור 35 גובה ממוצע של צמחי פלרגוניום חריף- גירניום לימוני (*Pelargonium graveolens*) בחלקות השונות (צל-תחת הפאנלים, שמש- בין הפאנלים) בחילת חודש יולי



תמונה 17 השוואה של עלים מהחלקות השונות (צל-תחת הפאנלים, שמש- בין הפאנלים) של צמחי פלרגוניום חריף- גירניום לימוני
(*Pelargonium graveolens*)

כדי לחשב את היבול של החלקה המייצגת גידול חקלאי, פלרגוניום חריף (גירניום לימוני), ביצענו קציר מדגמי של העלווה בסוף חודש אוגוסט ומדדנו את היבול המצטבר בחלקה לשלב זה. החומר הצמחי הרטוב נקצר, נשקל וחושב היבול לדונם בחלקה, לפי האזורים השונים. בוצעה הפרדה בין האזורים אשר היו חשופים לשמש (הרווח שבין השורות) לבין האזורים הנמצאים בחלק הגבוה של הפאנל (חלקת 50% צל) והאזורים הנמצאים בחלק הנמוך של הפאנל (חלקת צל מלא). בנוסף לכך בחלק התחתון ביותר של הפאנל יש אזור ברוחב של פחות ממטר אליו לא מגיע אור רב ובו צמחים כמעט לא מתפתחים. הקציר כלל שלושה חלקות מדגם של 1 מ"ר. בכל אחת מהחלקות חושבה מסת החומר הצמחי שנקצר (איור 36, טבלה 4). בקציר זה הוסר החלק העליון של הצמח ביחס של 2/3 ל-1/3 מכל צמח. ניתן להבחין הפחתה ביבול של בערך 50% בחלקות הצל הנמצאות עמוק מתחת לפאנל ביחס לחלקות השמש הנמצאות בין הפאנלים (איור 36, טבלה 4).



איור 36 היבול הממוצע של צמחי גרניום בחלקות השונות (צל-תחת הפאנלים, 50% צל ושמש-בין הפאנלים) בסוף חודש אוגוסט

טבלה 4 יבול חומר צמחי רטוב (טון/דונם) שנמדד בחלקות השונות בקציר שבוצע בסוף אוגוסט והשטח היחסי של כל חלקה

אזור ללא צומח (תחתית הפאנל)	גרניום צל	גרניום 50% צל	גרניום שמש	טון/דונם/קציר
0	2.3	3.8	5.1	
7	38	24	31	אחוז מהשטח [%]

במחקר החקלאי קרינת השמש הנמדדת הינה בדרך כלל באורכי הגל המשמשים לפוטוסינתזה בטווח של 400-700 ננומטר (PAR - Photosynthetically Active Radiation). המדידה הינה של מספר הפוטונים באורכי גל אלו הפוגעים בשטח מדוד למשך זמן מוגדר ביחידות של מיקרומול/מ"ר/שניה ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). כדי למדוד קרינה זו בניסוי השתמשנו במכשיר המדידה Delta Ohm portable light meter HD2302.0².

הקרינה שנמדדה בחלק התחתון של הפאנל באמצע היום בתחילת חודש אוקטובר הייתה נמוכה מ-40 מיקרומול/מ"ר/שניה בחלקות הפלרגוניום ונמוכה מ-60 בחלקת סיגל קיסוסי. בתקופה זו חלקות הצל (תחת הפאנלים) של צמחי סיגל קיסוסי ודיבונדרה זוחלת הצמחים התפתחו באופן תקין (איור 40).

בסוף חודש אוגוסט נצפתה החלשות של צמחי פלרגוניום חריף (גרניום לימוני) בחלקים התחתונים של הפאנלים הסולאריים ואף למוות של צמחים שלמים. עוד ניתן לראות הצהבה והתייבשות של

² <https://www.deltaohm.com/en/wp-content/uploads/document/DeltaOHM-2302.0-Portabe-Luxmeter-Datasheet-en.pdf>

העלים בחלקה. פגיעה זו נמצאה בחלק התחתון שלא חשוף לשמש ישירה בכל שעות היום ובאמצע היום הקרינה נמוכה מ- 100 מיקרומול/מ"ר/שניה פוטונים. הקרינה שנמדדה בחלק התחתון של הפאנל באמצע היום בתחילת חודש אוקטובר הייתה נמוכה מ- 40 מיקרומול/מ"ר/שניה בחלקות הפלרגוניום ונמוכה מ- 60 בחלקת סיגל קיסוסי. בתקופה זו חלקות הצל (תחת הפאנלים) של צמחי סיגל קיסוסי ודיכונדרה זוחלת הצמחים התפתחו באופן תקין (תמונה 19).

כפי שניתן לראות בתחתית תמונה 18 אזורים הנמצאים בחלק התחתון אך בקצה הפאנל הצדדי החשוף לשמש ישירה באמצע היום, לא נפגעו.

הפגיעה בצמחי הגירניום יכולה לנבוע ממספר סיבות:

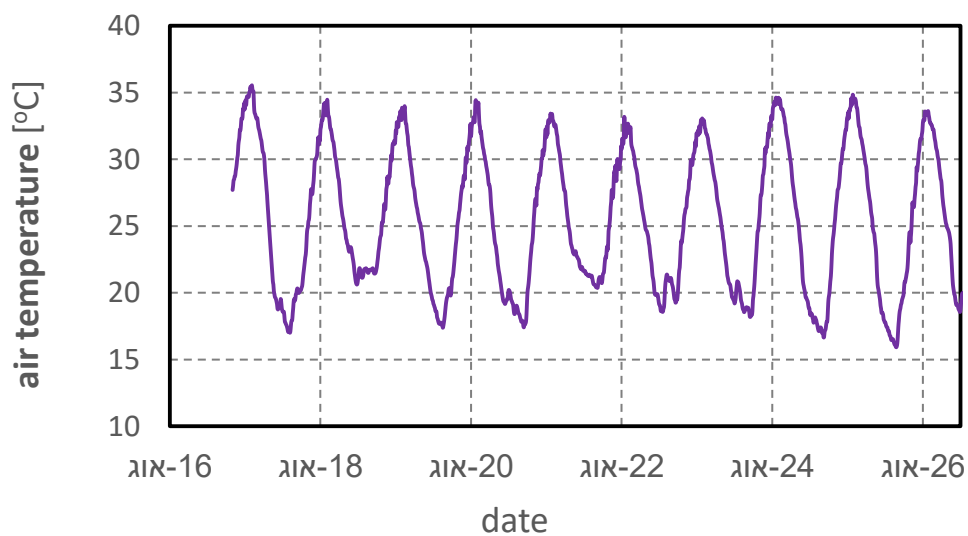
- (1) עוצמה נמוכה של אור המגיעה לאזור זה שלא מאפשר פעילות פוטו-סינתטית תקינה בצמחים.
- (2) אוורור לקוי בחלק התחתון של הפאנל עקב הצמחים המפותחים בחלק שבין הפאנלים שמונעים תנועה חופשית של אוויר (תמונה 18). בחודשים יולי אוגוסט הטמפרטורות תחת הפאנל הגיעו ל- 35 מעלות צלזיוס בערך באמצע היום, טמפרטורה שאינה קיצונית וצמחים רבים מסוגלים להתמודד איתה. באיור 37 ניתן לראות את טמפרטורת האוויר בין התאריכים 17/8/20-27/8/20.



תמונה 18 חלקות הצל של צמחי הגירניום (תמונה בתחילת חודש אוקטובר)



תמונה 19 חלקות הצל (תחת הפאנלים) בהם צמחי סיגל קיסוסי (*Viola hederacea*) ודיכונדרה זוחלת (*Dichondra repens*) התפתחו באופן תקין (תחילת אוקטובר)



איור 37 טמפרטורת האוויר בחלקת צמחי הגירניים בין התאריכים 17/8/20-27/8/20

6.2.1. דיון ומסקנות ההיבט החקלאי

היחלשות הגירניים שנמצא בחלקים התחתונים מתחת לפאנלים בסוף חודש אוגוסט מביאה למסקנה שבכל הנראה יש לגדל צמחים שונים בחלקות השמש וחלקות הצל. יש צורך בניטור פרמטרים שונים כטמפרטורה, לחות, קרינה, פד"ח ולחות קרקע באופן רציף ומפורט במספר רב של נקודות לרוחב הפאנל. בנוסף לכך יש צורך לבדוק מגוון רחב יותר של צמחים בחלקות 100% צל ולמצוא צמחים המתאימים לתנאים אלו. כדאי ליישם שני סוגי צמחים, שכל אחד מתאים לאזור מיקרו-אקלימי שונה, ובכך להביא לכיסוי צפוף יותר. יש לשקול את האפשרות של גידול רק באזור שבין הפאנלים ובמטר הראשון שתחת הפנלים על מנת להגיע למקסימום יבול, קרוב ככל הניתן ליבול של חלקה דומה בשטח פתוח.

הניסוי מלמד שניתן לאפיין גידולים חקלאיים מתאימים לשימוש במתקנים סולאריים במספר תכונות:

1. גידול חקלאי מניב רווח - ערך כלכלי גבוה ליחידת שטח - ניתן להפקה של שמן אתרי.
2. מתאימים לגידול בעונת הקיץ החמה (גידול העמיד לחום ותנאים קשים).
3. גידול נמוך ומשתרע שלא מיצר הצללה לפאנל הסולארי.
4. מתאימים גם לשמש וגם לצל.
5. גידול המאפשר איסוף ממוכן של התוצרת החקלאית בין ומתחת לפאנלים.
6. עדיפות לצמח רב שנתי - חסכון בעיבוד קרקע כל שנה.

דוגמאות של גידולים חקלאיים בעלי מאפיינים אלו: רוזמרין רפואי (*Rosmarinus officinalis*), מרווה רפואית (*Salvia officinalis*), אזוב מצוי (*Origanum syriacum*) קורנית (*Thyme*), לבנדר רפואי (*Lavandula angustifolia*), מנטה (*Mentha Linnaeus*). בנוסף לגידולי תבלינים לשמן אתרי יש לבחון ולנסות מגוון רחב של גידולים נוספים שיעניקו לגידול רווח כלכלי.

בחלקות השמש: גידולי מספוא כאספסת מצויה (*Medicago polymorpha*). לצמח זה יש ביקוש רב באזור הנגב בשל גידול נרחב של כבשים, עיזים ופרות באזור. הקרבה של צרכני האספסת למתקנים פוטו-וולטאים יכולה להוות יתרון כלכלי לגידול זה.

מורינגה (*Moringa*) למטרת חלבון צמחי. צמח זה גדל בקצב גבוה מאוד ויכול להוות מקור לחלבון. עם זאת צמח המורינגה גדל לגובה גדול מחצי מטר ולכן יש צורך במתקן פוטו-וולטאי גבוה יותר או קציר בתכיפות גבוה של היבול.

בחלקות הצל: אננס הינו גידול שלא צריך שמש ישירה והינו בעל ערך כלכלי. עם זאת יש לבצע ניסוי שיבדוק את התאמתו לתנאים תחת הפאנל. יש לזכור שאננס פותח פיוניות בעיקר בלילה ולכן כמעט לא מדיית בשעות היום דבר שיפחית את קירור הפאנל בשעות אלו.

7. ניתוח כלכלי

7.1 שימוש דואלי בקרקע בישראל

שימוש כפול בקרקע המיועדת למתקנים סולאריים יסייע להשגת יעדי הממשלה לאנרגיות מתחדשות לשנת 2030. דיונים מואצים נעשים לאחרונה בנושא, בעקבות החלטות הממשלה השונות בתחום הסולארי ומגבלות תכנוניות על תחנות כוח מונעות בגז טבעי. אסדרת השימוש הדואלי בקרקע במתקנים סולאריים נעשתה בהתייחס לשילובם במאגרי מים וגגות בניינים, אך טרם נעשתה בתחום החקלאות. ברור כי לאסדרת הנושא תרומה חשובה לכדאיות הכלכלית וההיתכנות של הקמת מתקנים פוטו-וולטאים במקומות רבים בארץ. להלן סקירה קצרה של ההיבטים השונים הקשורים באסדרת השימוש הדואלי בקרקע במתקנים סולאריים, וההשפעות הכלכליות האפשריות.

7.1.1 יעדי ממשלה

בתאריך ה- 10.11.2020 התקיים דיון בוועדה הארצית לתכנון ובנייה אשר בו עודכנו יעדי הממשלה. רשות החשמל הציגה תרחיש מוטה שימוש דואלי בקרקע, לפיו יש לקדם מתקנים קרקעיים בהיקף של 36,000 דונם עד לשנת 2030. בהתייחס לתרחיש זה עמדת המועצה הארצית הייתה כי מתקני ייצור פוטו-וולטאים ימוקמו ככל הניתן בשטחים מבונים ובשימוש דואלי.

7.1.2 מכרזי רשות החשמל

בתאריך ה- 28.12.2020 הודיעה רשות החשמל על תוצאות המכרז השני להקמת מתקני ייצור חשמל סולארי משולב קיבולת אגירה. מחיר החשמל שישולם לזוכים בהליך הוא 17.45 אגורות לקוט"ש עבור התקנת מערכת בסדר גודל של 609 מגה וואט - מחיר הנמוך ביותר ב-12% מהמחיר שנקבע בהליך הקודם³.

לגבי מתקנים דואליים טרם בוצע מכרז רשמי, אך בסקירה של ועדת הכלכלה של הכנסת על אנרגיה מתחדשת בישראל, שפורסמה ב- 18.10.2020, נכתב כי קיימים חסמים משמעותיים במספר תחומים:

- I. היעדר אסדרות ותעריפים לנושא
- II. חוסר התייחסות לנושא בתמ"א 10 / ד / 10 לשדות פוטו-וולטאים, או בתמ"א 41
- III. הגדרות רמ"י לשימוש בקרקע, שאינן מכירות בדי שימושיות מעין זו

עוד צוין כי פיתוח טכנולוגיות אגרי-וולטאיות בעולם ובישראל נמצא עדיין בשלבים ראשוניים יחסית, וכרוך במחקר ובביצוע פיילוט. נציין כי הצעה לתיקון תמ"א 10/ד/10 מנובמבר 2019 כוללת אפשרות

³ <https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001354990>

לאשר היתר למתקן פוטו-וולטאי בשימוש כפול בייעודי ושימושי קרקע נוספים על הקבוע בתכנית הראשית, בין היתר על גגות חממות. עם זאת, ההצעה ככל הנראה לא עוסקת בדו-שימושיות מעל שדה חקלאי כפי שתוארה לעיל.

7.1.3 תשלומי חכירה

לפי ההחלטה החדשה של מועצת מקרקעי ישראל, התשלום עבור הקרקע יחשב כתשלום דמי חכירה לכל תקופת החכירה ויעמוד על מחיר אחיד שינוע בין 15,000 שקל ל-25,000 שקל לדונם⁴. לגבי מתקנים סולאריים דו תכליתיים, החלטה 1584 של רשות מקרקעי ישראל קובעת כי ישולמו עבור הפרויקט דמי חכירה בשיעור של 31% משווי הקרקע לתוספת המתקן⁵. מתוך מסמך ועדת הכלכלה של הכנסת אנו למדים כי החלטה זו מתייחסת לתוספת בדמי חכירה בעבור מאגרי מים, אך לא מתייחסת לשימוש כפול בקרקע חקלאית.

7.1.4 העסקה בין היזם ובעלי הקרקע

העסקאות אשר מבוצעות בין יזמים סולאריים לבעלי קרקע משתנות ותלויות במיקום הפרויקט, היתכנות הפרויקט, ערך הקרקע ויכולת המשא ומתן של הצדדים. עלויות השכירות של הקרקע נעות בין 2,000 שקל ל-4,000 שקל לדונם לשנה.

מחיר החשמל ומחיר הקרקע הינם גורמים בעלי השפעה משמעותית על התועלת הכלכלית שיכולה להיות ליזם סולארי במידה ויבחר בשימוש דואלי. לאור חוסר הוודאות הקיים בנוגע לעלויות הקרקע ולרווח הצפוי בהליך מכרזי תחרותי, לא ניתן ליצר ניתוח עלות תועלת מדויק לנושא זה. אולם, ברור כי העסקה בין היזם ובעלי הקרקע צפויה להשתנות כתוצאה משימוש כפול בקרקע.

7.2 חישוב LER

כפי שניתן לראות, להקמת מתקן סולארי מרכיבים כלכליים רבים אשר לאו דווקא ניתנים לכימות ותלויים במצב אסדרות מתקנים סולאריים וחשמל, מיקום גיאוגרפי, יעדי ממשלה ומשא ומתן עם בעלי הקרקע.

על מנת להציג חישוב פשוט יחסית שאינו לוקח בחשבון את המורכבות הכלכלית המלאה הכרוכה בהשקעה והקמה של מתקן סולארי ניתן להשתמש במשוואה פשוטה יחסית על מנת להציג את השינוי בערך הקרקע אשר נובע משימוש כפול.

בחרנו להתייחס לשני נתונים קבועים: היחס בין תפוקת החשמל במתקן סולארי ללא חקלאות ומתקן סולארי עם חקלאות והיחס בין התוצרת החקלאית עם פאנלים סולאריים מעל וללא פאנלים סולאריים

⁴ <https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-4908357,00.html>

⁵ <https://apps.land.gov.il/MoatzaWeb/InterHachByld.aspx?hachid=1584>

מעל, ולהתייחס אליהם במדד ה-LER (Land Equivalent Ratio), אשר תואר בפרק 2.3 (Dupraz et al, 2011). מדד זה מאפשר להשוות את ערך הקרקע בדו-שימושיות לעומת ערך השימושים בנפרד. משוואה 2 מציגה את אופן חישוב המדד כאשר מעוניינים להשוות תפוקת חשמל ותוצרת חקלאית בשדה בדו שימוש אל מול כל אחד מהשימושים בנפרד. היחס השמאלי הינו יחס השינוי בתוצרת החקלאית והיחס הימני הינו יחס השינוי בתפוקת החשמל. הגדלה בערך ה-LER משמע ערך קרקע גבוה יותר.

$$LER = (CY_{PV}/CY_{mono}) + (EP_{PV}/EP_{mono})$$

כאשר:

CY_{PV} – Crop Yield with Photovoltaic

CY_{mono} – Crop Yield without Photovoltaic

EP_{PV} – Electricity production with agriculture

EP_{mono} – Electricity production without agriculture

משוואה 6. חישוב LER – Land Equivalent Ratio

בניסוי שלנו הראינו שניתן להגיע לשיפור בתפוקה החשמלית בחודשים יוני-אוקטובר בשיעור הנע בין 0.5%-3% כתלות בסוג הצמחייה, פריסה וגובה של הפאנלים. נשתמש אפוא בנתון שמרני של 1.2% לצורך חישוב זה, ונקבל שהיחס EP_{PV}/EP_{mono} הינו 1.012.

אם אנו מניחים שהתוצרת החקלאית שקיבלנו בין הפאנלים מייצגת תוצרת חקלאית של שדה גירניום ללא פאנלים סולאריים, אזי התוצרת החקלאית המבוטאת על ידי CY_{mono} הינו 5.1 טון לדונם (טבלה 4). הערך CY_{PV} המתקבל הינו 3.367, והוא למעשה היבול שהתקבל ביחס לכלל השטח. נתון זה חושב מהתוצאות המופיעות בטבלה 4. היחס CY_{PV}/CY_{mono} אשר מתקבל הינו 0.6602, ולכן ערך ה-LER שמתקבל הינו 1.672.

כל עוד ערך ה-LER גבוה מ-1, המערכת המשולבת (סולארי וחקלאות) יעילה יותר מחקלאות בלבד או סולארי בלבד. שימוש במשוואה זו אינו מהווה תחליף מלא לניתוח כלכלי, אך היא מראה שיש פוטנציאל להצלחה כלכלית משום שיש עלייה קטנה בייצור ועלייה ברורה במרכיב החקלאות. כלומר, כל עוד הקרקע המיועדת למיתקן סולארי מתאימה גם לגידולים חקלאיים, השימוש הכפול בקרקע יביא תועלת ובתנאי שהגידול החקלאי הוא רווחי בתנאים האלה (או אפילו כמעט רווחי, אם מביאים בחשבון את הגידול בתפוקת החשמל).

7.3. עלות ותועלת חקלאית

7.3.1 עלות הרכיבים החקלאיים

בפרק זה נדווח על ההוצאות החקלאיות של הניסוי וננסה להשליך על מיזם דומה בקנה מידה אמיתי. ראשית, יש לציין ולהדגיש שההוצאות החקלאיות בניסוי זה היו גבוהות מאוד ביחס לשדה חקלאי רגיל: קנינו ציוד יקר שנפרס על חלקות קטנות, נעזרנו בגנן ולא ביצענו את כל התהליך החקלאי. מתודולוגיית העבודה שלנו התאימה לפיילוט ולא לשדה חקלאי בקנה מידה מסחרי.

בטבלה 5 מוצגות הוצאות ההקמה של חלקות הניסוי, ובטבלה 6 מוצגות ההוצאות השוטפות של החלקות.

טבלה 5 הוצאות ההקמה חקלאית לחלקות הניסוי

פירוט	עלות כוללת לדונם (ש"ח)
עיבוד קרקע (בובקט + תיחוח)	1,850
קומפוסט	1,400
צמחים (שתילים)	3,740
מערכת השקיה + ציוד נלווה	8,641
עבודה (פועלים)	6,050
ניהול + שונות	2,000
סה"כ	23,681

טבלה 6 הוצאות תחזוקה חקלאית שוטפת

פירוט	עלות שנתית לדונם (ש"ח)
עישוב	10,000
תיקון תקלות השקיה	2,000
גיזום וכיסוח קל	200
דישון	5,000
השקיה (מים - חושב לפי עלות שימוש חקלאי)	19,900
ניהול + שונות	5,000
סה"כ	42,100

כאמור, קשה להשתמש בנתונים של חלקת מ"פ זאת (שנה אחת לניסוי) באופן ישיר כדי לבצע אקסטרפולציה לינארית לשטחי גידול של מאות ואלפי דונמים. ראשית, העלות החקלאית לדונם יורדת ככל שהשטח גדול יותר. לדוגמא: מחשב השקיה אחד יכול לספק מים למאות ואפילו אלפי דונמים. בהוצאות ההקמה (טבלה 5) ניתן לראות שעלות מערכת ההשקיה הינה ההוצאה הגדולה ביותר

(8,641 ש"ח) - אך זו הוצאה שתתחלק על דונמים רבים בפרויקט חקלאי גדול. כמו כן, בפרויקט חקלאי-סולארי בקנה מידה מלא יהיה שימוש במיכון ייעודי לפרויקט אשר יפחית בעלויות העבודה הידנית, שבניסוי היו מההוצאות הגדולות גם בהקמה (6,050 ש"ח) וגם בתחזוקה השוטפת (17,200 ש"ח). בחלקה מסחרית ההוצאות לדונם תהיינה אפוא נמוכות בהרבה מאלו המוצגות בטבלאות אלו.

כדי להגיע להערכה מדויקת יותר של עלות מול תועלת של פרויקט סולארי/חקלאי ניתן לנסות להעריך את פחיתת היבול בחלקת הניסוי ביחס לחלקות חקלאיות קונבנציונליות. נתונים אלו ניתן לחשב באמצעות תוצאות ניסוי זה (טבלה 4, איור 36) ותחשיבים של משרד החקלאות ופיתוח הכפר לגידולים חקלאיים קונבנציונליים, או בנתונים הלקוחים מחלקות חקלאיות באזור הספציפי של השדה הסולארי. חלקות חקלאיות קונבנציונליות של גידולי תבלין באזור רמת הנגב מניבות בין 2.5 טון/דונם/שנה (קורנית) ועד 5 טון/דונם/שנה (רוזמרין, מנטה). על בסיס התוצאות של ניסוי זה ניתן להעריך שבגידולים תחת הפנלים תתקבל פחיתה ביבול של בערך 50% (איור 36). ניתן להשתמש בנתונים אלו כדי לבצע הערכה של הפדיון המתקבל מגידולים אלו בעזרת טבלה 7 עבור רוזמרין, טבלה 8 עבור מרווה, וטבלה 9 עבור אורגנו (מקור: משרד החקלאות ופיתוח הכפר). מטרת הטבלה היא לתת כלי עזר לחקלאים, רכזי ענפים, ועדות חקלאיות אזוריות, לארגוני החקלאים וכן לסייע לצוותי התכנון של משרד החקלאות ולשמש את מדריכי שרות ההדרכה והמקצוע, לקבלת החלטות כדאיות נטיעה וכדאיות גידול בגידולים השונים. הטבלה מציגה את מבחני הרגישות אשר בוצעו לגידול רוזמרין, בה ניתן לראות איך שינוי במחיר הממוצע לק"ג או ביבול בק"ג לדונם ישפיע על הרווח של הגידול הרלוונטי. כך הרווח ינוע בין 612 ש"ח/דונם (כאשר מחיר המכירה הוא 12.8 ש"ח לק"ג, והיבול הוא 1,500 ק"ג לדונם) ל- 30,512 ש"ח/דונם (כאשר מחיר המכירה הוא 17.6 ש"ח לק"ג, והיבול הוא 3,500 ק"ג לדונם). התחשיב המלא נמצא באתר המשרד⁶.

לפי הנתונים, הפדיון של השמן מגידולים אלו בשדה סולארי יהיו 20-30 אלף ש"ח לדונם לשנה (חושב לפי ערך שמן אתרי [1-1.15 ש"ח/מ"ל] * 0.5% שמן אתרי * יבול השמן בניסוי [4-6 טון/דונם/שנה]). לכן בפרויקט בקנה מידה מסחרי יש לצמצם את ההוצאות השוטפות (בהשוואה לאלו אשר התקבלו בניסוי) כך שלא יעלו על הפדיון. בפועל, מומלץ לבצע ניסויים בקנה מידה גדול יותר כדי לאשר הערכות אלו.

⁶ https://www.moag.gov.il/shaham/shaham_subject/tachshivim/Pages/default.aspx

טבלה 7 השפעת המחיר והיבול על הרווח: טבלת רגישות עבור רוזמרין מתוך תחשיבים של משרד החקלאות ופיתוח הכפר

מחיר ממוצע - ש"ח לק"ג		12.8	14.4	16.0	16.8	17.6
יבול ק"ג לדונם	1,500	612	3,012	5,412	6,612	7,812
	1,750	2,250	5,050	7,850	9,250	10,650
	2,000	3,887	7,087	10,287	11,887	13,487
	2,300	5,852	9,532	13,212	15,052	16,892
	2,600	7,817	11,977	16,137	18,217	20,297
	2,750	8,800	13,200	17,600	19,800	22,000
	3,000	10,437	15,237	20,037	22,437	24,837
	3,250	12,075	17,275	22,475	25,075	27,675
	3,500	13,712	19,312	24,912	27,712	30,512

טבלה 8 השפעת המחיר והיבול על הרווח: טבלת רגישות עבור מרווה מתוך תחשיבים של משרד החקלאות ופיתוח הכפר

מחיר ממוצע - ש"ח לק"ג		12.8	14.4	16.0	16.8	17.6
יבול ק"ג לדונם	1,000	-1,726	-126	1,474	2,274	3,074
	800	-2,861	-1,581	-301	339	979
	1,000	-1,726	-126	1,474	2,274	3,074
	1,200	-591	1,329	3,249	4,209	5,169
	1,400	544	2,784	5,024	6,144	7,264
	1,600	1,679	4,239	6,799	8,079	9,359
	1,800	2,814	5,694	8,574	10,014	11,454
	2,000	3,949	7,149	10,349	11,949	13,549
	2,200	5,084	8,604	12,124	13,884	15,644

טבלה 9 השפעת המחיר והיבול על הרווח: טבלת רגישות עבור אורגנו מתוך תחשיבים של משרד החקלאות ופיתוח הכפר

מחיר ממוצע - ש"ח לק"ג		13.4	15.0	16.7	17.5	18.4
יבול ק"ג לדונם	1,000	-2,035	-365	1,305	2,140	2,975
	1,200	-713	1,291	3,295	4,297	5,299
	1,400	609	2,947	5,285	6,454	7,623
	1,600	1,931	4,603	7,275	8,611	9,947
	1,750	2,922	5,845	8,767	10,229	11,690
	2,000	4,575	7,915	11,255	12,925	14,595
	2,400	7,219	11,227	15,235	17,239	19,243
	2,800	9,863	14,539	19,215	21,553	23,891
	3,200	12,507	17,851	23,195	25,867	28,539

7.3.2 הערכה כלכלית לגידול חקלאי בין הפנלים

על סמך ניסוי ראשוני זה אפשר להעריך שניתן לגדל גידולים חקלאיים הדומים לצמח הנבדק (פלרגוניום חריף) בשטח שבין הפאנלים ומתחת הפאנלים עד לעמוד הראשון, (תמונה 3, תמונה 13), שטח ברוחב של 4.2 מ' מסה"כ 8.6 מ' רוחב כולל (48%), ולקבל יבול ממוצע הקרוב (90%) לגידול דומה בשטח פתוח, לפי השוואה של תוצאות ניסוי זה (איור 36) ליבולים המתוארים בספרות מגידול רוזמרין לדוגמא (טבלה 7). בשטח שתחת הפאנלים בין העמוד הראשון לעמוד השני יש לצפות לירידה של 50-60% ביבול (איור 36, טבלה 4). בשטח הנמוך ביותר (1 מ' העמוקים ביותר תחת הפאנל), כמעט לא התקבל יבול ולכן ניתן להתייחס אליו כ- 0 יבול. לכן כאשר מסכמים את היבול הכללי של כל חלקת הניסוי, בין הפאנלים ותחת הפאנלים, ניתן להעריך בזהירות שהיבול יהיה בשיעור של בערך 60% מזה שיתקבל בחלקה דומה בשטח פתוח ללא פאנלים סולאריים. יש לשקול את האפשרות של גידול רק באזור שבין הפאנלים ובמטר הראשון שתחת הפאנלים, כדי להגיע ליבול דומה לחלקה בשטח פתוח.

התרומה הכלכלית של גידול זה תקבע לפי סוג הגידול ומחיר השוק, המשתנה בכל שנה. כדי לבצע הערכת כלכליות ניתן להתבסס על תוכניות כלכליות של גידולים אלו כדי להבין את הפוטנציאל הכלכלי הטמון בגידול. רווח של גידולי שדה יכול לנוע מכמה מאות שקלים לדונם (600-800 ש"ח/דונם) בגידול אספסת (נתוני משרד החקלאות), עד כמה אלפי שקלים לדונם (15,000-4,000 ש"ח/דונם) בגידולים כמרווה, רוזמרין ואורגנו (נתוני משרד החקלאות).

כאשר סוכמים את התרומה האנרגטית ואת התרומה החקלאית האפשרית (בעיקר בשטח שבין הפנלים) ניתן לקבל סינרגיה ברווח ביחס לשני פרויקטים אלו על שטחים נפרדים.

7.3.3 עלות כללית של שדה גירניום לימוני

טבלה 8 מציגה תחשיב עבור גירניום לימוני, אשר מתבסס על נתונים אשר התקבלו ממו"פ אזורי רמת הנגב. הערכים הם בחלקם הערכה מושכלת, והתחשיב אינו כולל עלות תשתיות כגון מערכת השקיה, מחשוב ומשאבת דיזל. לפי תחשיב זה ניתן לראות כי סה"כ עלות שתילת גירניום בקנה מידה מסחרי בשטח הפתוח הינו 8,158 ש"ח/דונם. העלות כוללת זריעה, מיכון, כוח אדם, השקיה, דיזל והדברה.

טבלה 10 תחשיב כלכלי עבור גירניים (מו"פ רמת הנגב)

סעיף	יח'	מחיר [ש]	כמות	סה"כ [ש]
משתת לעומק 45 ס"מ	דונם	36.19	1	36
חריש 35 ס"מ	דונם	56.11	1	56
דיסוק	דונם	19.87	1	20
קילטור להכנת שטח	דונם	11.98	1	12
קילטור נגד עשבים	דונם	11.98	1	12
החלקה	דונם	19.01	1	19
עירוג	דונם	24.87	1	25
דישון 100 יסוד ק"ג	דונם	28.48	1	28
פיזור קומפוסט	מק	20.74	1	21
תיחוח	דונם	41.50	1	42
עיגול	דונם	10.46	1	10
פרישה, גלילה והכנת טיפטוף (20 מ"מ)	דונם	43.28	1	43
עבודת טרקטור בגידול (50 כ"ס)	שעה	100.00	1	100
עבודת טרקטור באסיף (50 כ"ס)	שעה	100.00	6	600
ריסוס באמצעות טרקטור - שטח פתוח	דונם	7.44	8	60
רכב	חודש	25.00	3	75
סה"כ עלות המיכון*				
חומר ריבוי שתילים	שתיל	2.00	1000	2,000
סה"כ עלות חומר ריבוי				
מים שפירים	מק	1.90	1500	2,850
סה"כ עלות מים				
דשן 7.3.7	דונם	0.8	1500	1200
סה"כ דשן				
גול	ק"ג	58.00	0.2	12
סה"כ הדברת עשבים				
באיפידן	ליטר	80.00	0.2	16
לונה	ליטר	700.00	0.08	56
סבון LQ 215	ליטר	39.00	0.2	8
סיגנום/בליס	ליטר	400.00	0.05	20
עמיסטר	ליטר	315.00	0.05	16
פולאר	ליטר	1,100.00	0.04	44
סה"כ הדברת מחלות				
עבודה בהקמה ופירוק מערכת השקיה	יום	310.00	0.25	78
עבודה בשתילה ידנית	יום	310.00	0.4	124
עבודה בהשקיה	יום	310.00	0.1	31
עבודה בהפעלת מיכון בגידול	יום	310.00	0.5	155
עבודה בהפעלת מיכון בריסוס	יום	310.00	0.5	155
עבודה בעישוב ידני	יום	310.00	0.25	78
עבודות שונות בגידול	יום	310.00	0.75	233
עבודה בפינוי שאריות בסוף הגידול	יום	310.00	0.25	78
עבודה בניהול	יום	666.67	0.33	220
סה"כ עלות עבודה בגידול				
ריבית להון חוזר	אחוז/חודש	0.60%	1.5	60
שונות	אחוז	1.0%	5	332
סה"כ ריבית ושונות				
סה"כ				8,158

הערה: מחיר מיכון קבלני ע"פ 80% ממחירון ארגון עובדי הפלחה. (20% מהמחיר נלקח כעבודת צוות). מחיר מיכון שעתית נלקח 100% ממחיר המחירון

7.4. סימולציה כלכלית תיאורטית

מכל האמור לעיל ניתן לנקוב בעלויות של כלל הרכיבים הדרושים לנו לביצוע ההערכה הכלכלית. נחלק את הרכיבים השונים לרכיבי עלות ורכיבי תועלת.

נציין שוב שכל המידע בפרק כולל עלויות של מרכיבים שונים שהתקבלו מיזמים שונים בתחום הסולארי ונתונים לשינויים.

7.4.1. הרווחים המשוערים ממתקן סולארי

מרכיב ההוצאות של מתקן סולארי תלוי במרכיבים רבים שחלקם פורטו בהרחבה בסעיף 7.1 וכוללים בין היתר את עלויות השכירות של הקרקע, התשלום לרמ"י, תשלומים לחברת החשמל (בגין גיבוי איזון ושימוש ברשת), עלויות תפעול (תחזוקה, שטיפת הפאנלים, ביטוח). כמו כן עלות ההקמה הינה כ-2,100-2,300 ₪ לקילו-וואט מותקן. עלויות המימון יכולות להשתנות בהתאם לבחירה של יזם למימון מלא או מימון חלקי ובשיעור הריבית השנתית.

מרכיב ההכנסות תלוי בערך החשמל המיוצר לפי תעריף תע"ז שהינו כ-17.45 kWh / אג' נכון למכר האחרון, שעות השמש השנתיות המשתנות לפי המיקום הגיאוגרפי (הנחנו 1,750 שעות לצורך מודל זה) וגודל המתקן. כמו כן, קיימת ירידה שנתית בתפוקת המתקן של כ-0.6% בשל התיישבות המתקן. לאחר שקלול כלל המרכיבים הרווח המוערך עבור מתקן סולארי קרקעי הינו כ-13,000-14,000 ₪/דונם/שנה על פי המידע הקיים בידינו כיום.

7.4.2. הרווחים המשוערים משדה חקלאי

מרכיבי ההוצאות של הגידולים החקלאיים תלויים בגורמים רבים שפורטו מעלה בסעיף 7.3 את המרכיבים השונים של עלויות ההכשרה של שדה גירניים לימוני ניתן למצוא בפירוט בטבלה 10. הכנסות של גידולים הדומים באופיים לגירניים לימוני ניתן למצוא בתחשיבים המפורסמים באתר משרד החקלאות⁷ בדומה לרוזמרין המוצג בטבלה 7 שמכניס בין 12.8-17.6 ₪/ק"ג ניתן למצוא טבלאות זהות עבור אורגנו שמכניס בין 13.4-16.4 ₪/ק"ג ומרווה שמכניסה בין 12.8-17.6 ₪/ק"ג⁸.

את הרווחים של שימושים חקלאיים אלו ניתן למצוא בטבלאות הרגישות (טבלה 7, טבלה 8, טבלה 9) השפעת מחיר היבול על הרווח. את נתון היבול נעריך על בסיס המידע אותו אספנו במסגרת ניסוי זה. היבול היה 3,367 ק"ג/דונם (כלל השדה) כאשר היבול האופטימלי אליו ניתן היה להגיע הינו 5,100 ק"ג/דונם (חלקות השמש) ולכן היבול הצפוי מפריקט אגרי-סולארי בתנאים אלו ותוך שימוש

⁷ https://www.moag.gov.il/shaham/shaham_subject/tachshivim/Pages/default.aspx

⁸ https://www.moag.gov.il/shaham/shaham_subject/tachshivim/Pages/default.aspx

בצמחיה דומה הינו כ-66% מסך היבול האופטימלי (חושב מהתוצאות המופיעות בטבלה 4). על מנת לחשב את הרווח הצפוי מגידול דומה נשתמש בטבלה 7, טבלה 8, וטבלה 9 ובחר ערכים שהם כ-66% מהיבול הממוצע שמופיע בטבלאות על מנת לשמור על תאימות לתוצאות הניסוי. בנוסף, על מנת לשמור על חישוב שמרני נשתמש במחיר לק"ג נמוך יותר מאשר המחיר הממוצע אשר מופיע בטבלאות. ערכי הרווח המתקבלים הינם 5,050 ₪ /דונם/ שנה עבור רוזמרין (טבלה 7), 126- ₪ /דונם/ שנה עבור מרווה (טבלה 8), ו-1,291 ₪ /דונם/ שנה עבור אורגנו (טבלה 9). הרווח הממוצע עבור שלשת גידולים אלו בשדה סולארי בנגב תוך הנחות מחיר שמרניות יהיה אם כך 2,072 ₪ /דונם/ שנה. נתון זה לוקח בחשבון חקלאות על 100% מהשטח ולא רק באזור שבין הפאנלים שבו קרינת השמש רבה יותר.

7.4.3 הערכת התועלת הכלכלית משיפור בתפוקת החשמל השנתית

להלן הנחותינו:

1. ראשית על מנת לבצע סימולציה זאת עלינו לקבוע גודל שדה סולארי. לצורך הפשטות נעריך שדה בגודל של 1,000 דונמים.
 2. שדה בגודל כזה יכול בטכנולוגיה של פאנלים קבועים לייצר חשמל בהספק מותקן של 100 מגה-ואט.
 3. נניח שהשדה ממוקם בנגב באזור בו יש כ-1,750 שעות שמש שנתיות.
 4. נניח עלות של כ-17.5 אג'.
 5. התקבולים עבור שדה סולארי בעל מאפיינים כאלה הינם אפוא כ-30,625,000 ₪ בשנה.
 6. בניסוי זה נמדד שיפור בתפוקה החשמלית בחודשים יוני-אוקטובר בשיעור של 0.5-3% כתלות בסוג הצמחייה, פריסה וגובה של הפאנלים. נשתמש בנתון ממוצע של 1.2%.
- כלומר, התייעלות אנרגטית כתוצאה מצמחייה תתרום 367,500 ₪ בשנה עבור 1,000 דונמים.

7.4.4 התועלת הכלכלית הנובעת מחיסכון בתחזוקת המתקן

במתקנים סולאריים מתפתחת לעיתים רבות צמחייה בעקבות גשמי החורף וכתוצאה מהטל אשר נוצר על הפאנלים במהלך הקיץ. הצמחייה עלולה לגדול לגובה ולהצל באופן חלקי על התאים הסולאריים ולגרום לתופעה המכונה 'Hot-spots', אשר במהלך הזמן גורמת לקצר. עלות הסרה של צמחייה לא רצויה במתקנים סולאריים עשויה לנוע בין 400,000 שקל ל-500,000 שקל בשנה עבור מתקן בגודל של כ-1,000 דונם, כלומר בין 400 שקל ל-500 שקל לדונם לשנה. גידול חקלאי וקציר תקופתי של צמחייה מתאימה עשויים ליתר את הצורך בפעולה הזו.

7.4.5 תועלת התוצרת החקלאית

טבלה 11 מציגה את סיכום הנתונים שהוצגו בפרק זה. יש להדגיש ולומר שמדובר בקירוב גס, משום שמודלים חקלאיים נבנים במשך שנים רבות, ויש מעט מאוד ניסיון בגידול חקלאי בתנאים הקיימים במתקן שלנו. כמו כן, הנחנו תמהיל של גידולים חקלאיים שונים ולא לקחנו בחשבון בצורה מדויקת עלויות שוליות אשר נובעות מהכשרת הקרקע בתנאים שאינם אופטימליים, כמו ביצוע עבודה ידנית ללא מכונות גדולות.

טבלה 11 רווח צפוי לתא שטח מיישום חקלאות מתחת לשדה סולארי

מתקן סולארי רגיל	תוספת חקלאות למתקן סולארי
רווח מתקן סולארי: 13,000 ש"ח/דונם/שנה	רווח תוצרת חקלאית: 2,072 ש"ח/דונם/שנה
	התייעלות אנרגטית: 368 ש"ח/דונם/שנה
	שיפור עלויות תחזוקה: 400 ש"ח/דונם/שנה
	סה"כ שיפור מוערך: 2,840 ש"ח/דונם/שנה
	סה"כ רווח מתקן סולארי הכולל חקלאות: 15,840 ש"ח/דונם/שנה

7.4.6 סיכום

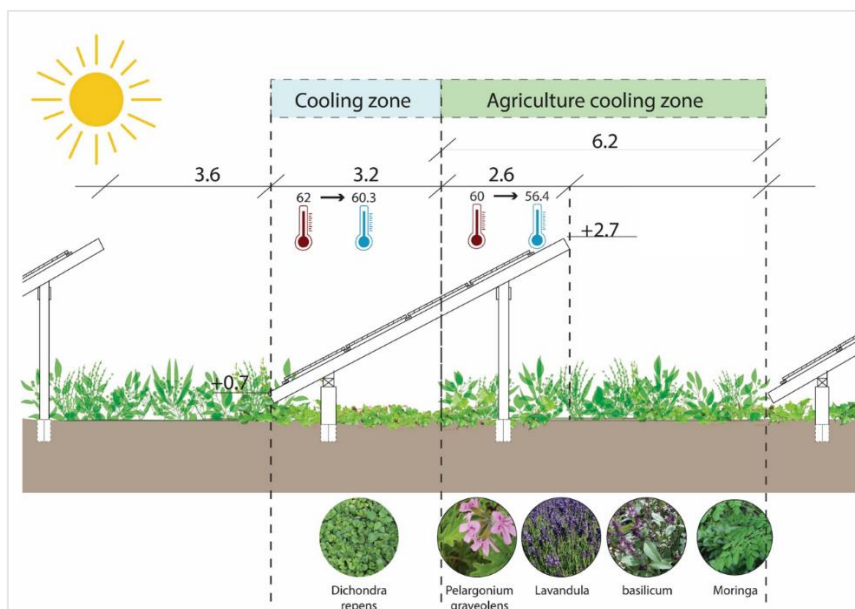
התחשיב אשר הוצג בפרק הזה מעיד על כדאיות כלכלית לשימוש דואלי בקרקע, במגבלות מסוימות. חשוב להדגיש כי הכדאיות של גידולים חקלאיים בכלל, וגידולים המתאימים לשדות סולאריים בפרט, מושפעת מאוד משינויים בעלות התשומות ומחירי השוק של התוצרת ברגע נתון. התחשיב אשר הוצג כאן משקף את מיטב המידע שהיה זמין בעת הזאת: העלויות של המרכיבים הרגולטוריים התקבלו מנתונים המפורסמים באתרי הממשלה השונים, והעלויות של המרכיבים החקלאיים התקבלו מנתונים המפורסמים באתר משרד החקלאות ומאנשי מקצוע ממכוני מחקר ופיתוח חקלאיים.

8. מסקנות והמלצות

נמדדה השפעה של צמחיה על טמפרטורת הפאנלים. עיקר ההשפעה נובעת מהבדלים במאזן הקרינה של הפאנלים והפחתה של הקרינה הנפלטת והמוחזרת מפני הקרקע במרווח בין השורות. הצמחייה שנמצאת באזור שבין הפאנלים פולטת ומחזירה פחות קרינה, והשפעתה מורגשת בעיקר על הפאנלים אשר גזרת הראייה שלהם ביחס לרצועת הצמחייה היא הגדולה ביותר, ובמקרה שלנו – שורת הפאנלים הגבוהה ביותר. התקררות הפאנלים מביאה לעלייה בתפוקת החשמל.

על מנת ליישם חקלאות במתקן סולארי מהסוג שבדקנו, מומלץ לנצל את השטח הפנוי שבין הפאנלים עבור צומח חקלאי. באזור זה ניתן לגדל תוצרת השקולה ל- 75-100 אחוז מהתוצרת של חלקה דומה בשטח פתוח. הנגישות לאזור זה נוחה וקלה יותר ומתאימה אף לחקלאות שאינה ידנית בהינתן ציוד חקלאי מותאם. באזורים הנמוכים שמתחת לפאנלים ניתן להשתמש בצמחיית כיסוי משתרעת, על מנת לצמצם בעיות תחזוקה שנגרמות מצומח שאינו רצוי ומבעיות במערכת ניקוז שמקורן בסחיפת קרקע.

איור 38 מציג את העיקרון של שימוש בשטח שבין הפאנלים לחקלאות ובשטח מתחת לפנלים בחלקים הנמוכים לצמחיית כיסוי משתרעת. הצמחייה כולה מסייעת בצינון הפאנלים במתקן, בעוד שהצמחייה שבין הפאנלים משמשת גם לחקלאות והינה בעלת ערך חקלאי.



איור 38 תיאור סכמתי של עיקרון השימוש בשטח שבין הפאנלים לחקלאות, ובשטח מתחת לפאנלים בחלקים הנמוכים לצמחיית כיסוי משתרעת

הנתונים הכלכליים שהוצגו בניסוי זה מצביעים על כך שהתמריץ של יזם במערכת סולארית לאפשר חקלאות בשטח המתקן עשוי להיות שיפור בתפוקה האנרגטית וצמצום בעלויות האחזקה. יש מקום לבחון בצורה מעמיקה יותר את הרווח הכלכלי מהצד של החקלאי. בהתאם לכך, ייתכן ויזם סולארי יוכל להציע הפחתה בעלות הקרקע או השתתפות בחלק מן ההוצאות החקלאיות, כל עוד הדבר מתאפשר במסגרת התועלת הצפויה.

בהתאם לדיון שהתקיים במנהל התכנון בתאריך ה- 10.11.2020 רשות החשמל הציגה תרחיש מוטה שימוש דואלי בקרקע בו יש לקדם מתקנים קרקעיים בהיקף של 36,000 דונם עד לשנת 2030. בהתייחס לתרחיש זה עמדת המועצה הארצית לתכנון ובנייה הייתה כי מתקני ייצור פוטו-וולטאים ימוקמו ככל הניתן בשטחים מבונים ובשימוש דואלי. לכן ייתכן כי בשנים הקרובות האסדרה תשאף לקדם מתקנים סולאריים ללא דו-שימוש. במקרה כזה ייתכן וגם מכרזי חברת החשמל ישתנו, ותגדל הרווחיות ליזם.

9. מקורות

- Assouline, S., 2004. Rainfall-induced soil surface sealing: a critical review of observations, conceptual models, and solutions. *Vadose Zone J.* 3, 570.
- Barron-Gafford G., 2016. The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *Scientific Reports*, DOI: 0.1038/srep35070
- Dupraz C., Marrou H., Talbot G., Dufour L., Nogier A. and Ferard Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* 36:2725-2732.
- Faiman D., Feuermann D., Ibbeston P., Medwed B., Zemel A., Lanetz A., Liubansky V., Setter I., Suraqui S. (2006). The Negev Radiation Survey. *Journal of Solar Energy* 126(3): 906-914.
- Faiman D. (2008). Assessing the Outdoor Operating Temperature of Photovoltaic Modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16:307–315.
- Eshel G., Egozi R., Goldwasser Y., Kashti Y., Fine P., Hayut E., Kazukro H., Rubin B., Dar Z., Keisar O., Disegni M.D. (2015). Benefits of growing potatoes under cover crops in a Mediterranean climate. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 211; 1-9.
- Hui, S. & Chan, S. (2011). Integration of green roof and solar photovoltaic systems. Proceedings of the Joint Symposium: Integrated Building Design in the New Era of Sustainability, 22 November 2011, Hong Kong.
- Kotzen B. 2003. An investigation of shade under six different tree species of the Negev desert towards their potential use for enhancing micro-climatic conditions in landscape architectural development. *Journal of Arid Environments* 55(2):231-74
- Kande S.M., Wagh, M.M., Ghane, S.G., Shinde, N.N., Patil, P.S. (2016) Experimental analysis of effect of vegetation under PV solar panel on performance of polycrystalline solar panel. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications* 6 (5).
- Köhler, M., Wiartalla, W. & Feige, R. (2007). Energy and Thermal Performance Interaction Between PV-Systems and Extensive Green Roofs. Proceedings of the 5th Annual International Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show, Minneapolis, MN (United States), 29 Apr - 1 May 2007.
- Krauter S. & Ochs F. (2002). An all-in-one home system. *Conference Record of IEEE Photovoltaic Specialists Conference*.
- Majumdar D. and Pasqualetti M. (2018). Dual use of agricultural land: Introducing 'agrivoltaics' in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA. *Landscape and Urban Planning* 170:150-168.
- Monteith, J. L. 1965. Evaporation and environment. Symposia of the Society for Experimental Biology. 19, pp. 205-234.
- Montgomery, D.R., 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Science*. 104, 13268.

Ogaili H. & Sailor D. (2016). Measuring the Effect of Vegetated Roofs on the Performance of Photovoltaic Panels in a Combined System. *Journal of Solar Energy Engineering* 138(6): 061009 (8 pages).

Rao, K. R. and Ballantyne, E. R. (1970). "Some Investigations on the Sol-Air Temperature Concept", *Division of Building Research Technical Paper No. 27*.

Reuters (2016). Operators eye income gains from wilder vegetation.
<https://www.reutersevents.com/renewables/pv-insider/operators-eye-income-gains-wilder-vegetation>. Accessed Jan 15, 2021.

Penman, H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society London A* (194), S. 120–145.

PV Education, n.d. "Solar Cell Operation, effect-of-temperature"
<https://www.pveducation.org/>

Santbergen R. and Zolingen R. (2007). The absorption factor of crystalline silicon PV cells: A numerical and experimental study. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 92(4): 432-444.

Scherba A., Sailor J.D., Rosentiel N.T., Wamser C.C. (2011). Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment. *Building and Environment* 46: 2542-2551.

Snir K, Pearlmuter D, Erell E (2016). The moderating effect of water efficient ground cover vegetation on pedestrian thermal stress. *Landscape & Urban Planning* 156:1–12

Spronken-Smith RA, Oke TR, Lowry WP. 2000. Advection and the surface energy balance across an irrigated urban park. *International Journal of Climatology* 20(9):1033-47.

Spronken-Smith R and Oke T. 1998. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing* 19(11):2085-104.

Sandia. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/module-temperature/faiman-module-temperature-model/>. Accessed 28/6/2018.

מסמך החלטות מועצה ארצית לתכנון ובניה 10.11.20 ישיבה מספר 648

תובנות ראשוניות מתכנית האב למשק החשמל, רשות החשמל 2017.

מדריך לתכנון ובניה משמרת נגר עילי. משרד השיכון, המשרד להגנת הסביבה, משרד החקלאות ופיתוח הכפר 2004

נספח 1 - ניתוח סטטיסטי מפורט

1. מבוא

חברת גיאוטבע - יעוץ סביבתי בע"מ ביצעה מחקר אשר בחן התייעלות אנרגטית במתקנים סולאריים ע"י הפחתת טמפרטורת הפאנל באמצעות שימוש בביסוי קרקע צמחי. מטרת העבודה לתת מענה לשאלה האם ניתן להשיג התייעלות אנרגטית במתקנים סולאריים על ידי הוספת צמחיית ביסוי אשר תצנן את הפאנלים.

על מנת לקבוע התייעלות אנרגטית נבדקו השינויים בטמפרטורת הפאנלים בשעות שונות. בנוסף נמדדו טמפרטורת אוויר, לחות יומית וקרינה כוללת על מנת שנוכל להבין את כלל התהליכים. השינויים במדדים אלו נבדקו כתלות בקיום צמחיית ביסוי חקלאית (גירניום לימוני, *Pelargonium graveolens*) וצמחיית ביסוי משתרעת (דיכונדרה זוחלת, *Dichondra repens*) לעומת שטח ללא צמחיית ביסוי.

השערת המחקר היתה שקיום של צמחיית ביסוי (חלקות הביסוי), תפחית את טמפרטורת הפאנלים לעומת פאנלים שתחתם אין כל צמחייה (חלקת הביקורת). ההנחה הבסיסית היא שכתוצאה מירידת הטמפרטורה יעילות הפאנלים תעלה (פרק 2 – רקע מדעי).

2. שיטות

המחקר בוצע בחודשי הקיץ (יוני – אוקטובר 2020) בשדה סולארי משאבי שדה (תת"ל 50) המופעל על ידי חברת EDF-Renewables. נשתלו שתי חלקות בגודל 2.2 דונמים כל אחת, עם צמחיית ביסוי חקלאי (גירניום) וצמחיית ביסוי משתרעת (דיכונדרה) (פרק 4 – שיטות וחומרים).

ניתוח סטטיסטי זה בוצע עבור סט נתונים של 20 ימים בחודש אוגוסט 2020.08.26-6 (להוציא את ה-16.08 בשל נתונים חסרים באותו יום).

2.1 טמפרטורת הפאנלים

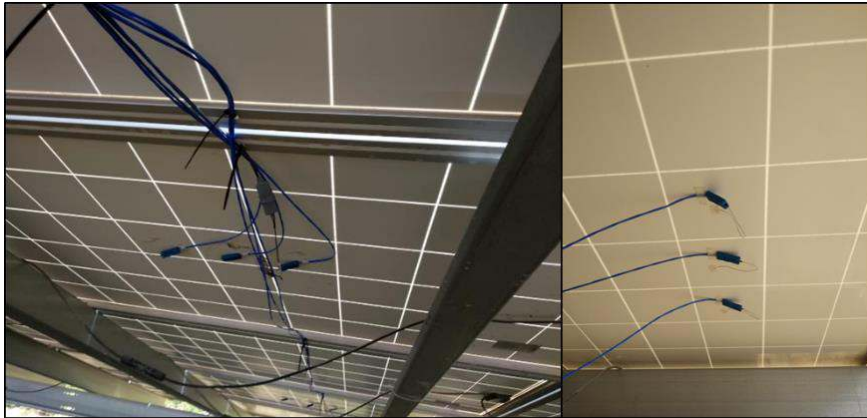
טמפרטורת הפאנל נמדדו על ידי חיישני תרמוקפל מסוג T. התרמוקפלים הותקנו בשלוש שורות בכל חלקת ביסוי: (בשורה השניה (BOT), הרביעית (MID) והשישית מלמטה (TOP)). לכל פאנל הוצמדו שלשה תרמוקפלים על מנת לייצר יתירות במידה ואחד התרמוקפלים נותן קריאה שגויה (ראו תמונה א' 1, איור א' 1, והרחבה בפרק 4.3 – מערך המדידות)

הניתוח התבצע על 26 סנסורים, 9 סנסורים בקבוצת הביקורת (Control), 9 סנסורים בקבוצת הגירניום (*Pelargonium*), ו-8 סנסורים בקבוצת הדיכונדרה (*Dichondra*).

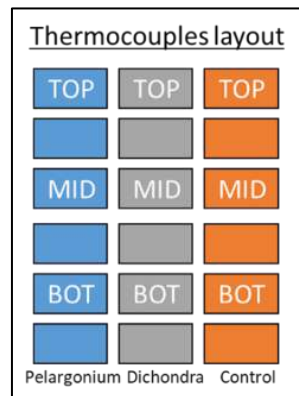
על מנת לעמוד על ההבדל בטמפרטורת הפאנל שנגרם כתוצאה מהגידולים השונים, תוך התחשבות במרכיב הזמן, בוצעו 4 השוואות, בין כל קבוצות הטיפול, בזמנים שונים ביום. הזמנים שנדגמו הם 18:00, 16:00, 13:00, 10:00.

נתוני הטמפרטורה חושבו כממוצע לשעה שחלפה עד לנקודת זמן מסוימת, כלומר ממוצע הטמפרטורה בשעה 16:00 הוא הממוצע של כל המדידות שנלקחו בין השעה 15:00 ל 15:50.

על מנת לבדוק את המובהקות הסטטיסטית של ההבדלים בין הקבוצות הנ"ל, בוצע מבחן T מזוג (Paired samples T-test).



תמונה א' 1 תרמוקפלים מתחת לפאנל



איור א' 1 סכמת הפאנלים הנמדדים בכל אחת מהחלקות (TOP, MIDDLE, BOTTOM)

2.2. טמפרטורת אוויר, לחות וקרינה נטו

על מנת לעמוד על ההבדל בפרמטרים טמפ' אוויר ולחות, חושבו הערכים הממוצעים ליממה, לכל אחד מהפרמטרים הנ"ל, בחלקות הטיפול השונות. על מנת לבדוק את המובהקות הסטטיסטית של כל ההבדלים בין חלקות הטיפול השונות, בוצע מבחן T מזוג.

מדידת הקרינה נטו נעשתה מתחת הפאנלים באמצעות נט-רדיומטר. היא שווה לסכום של שטפי הקרינה בגלים ארוכים ובגלים קצרים, כלפי מטה וכלפי מעלה. קרינה בגלים קצרים כלפי מטה שווה

לקרינת השמש הפוגעת בקרקע בניכוי הקרינה המוחזרת ממנה. קרינה בגלים ארוכים שווה לקרינה האינפרא אדומה הפוגעת בקרקע (מקורה ששמים אך גם באנרגיה הנפלטת מהפאנלים) בניכוי הקרינה המוחזרת כלפי מעלה והקרינה הנפלטת מהקרקע. גם כאן על מנת לבדוק את המובהקות הסטטיסטית של כל ההבדלים בין חלקות הטיפול השונות, בוצע מבחן T מזוג.

התפלגות ההפרשים בין נתוני הקרינה של חלקת הדיכונדרה לחלקת הגירניום לא מתפלגים נורמלית, ולכן היה צורך לבחון את ההבדל בין שתי חלקות הגידול השונות בעזרת מבחן א-פרמטרי (Wilcoxon matched pairs test).

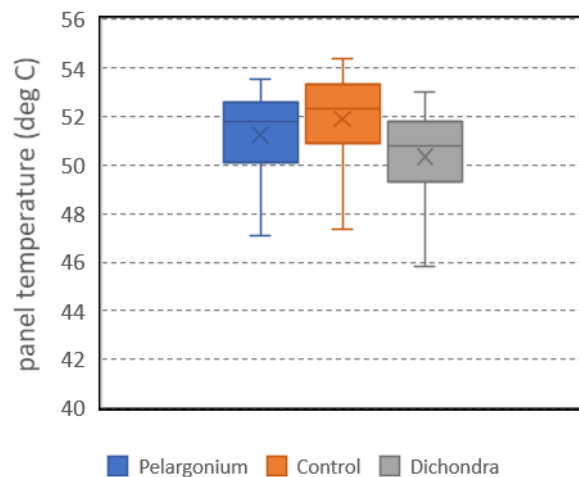
3. תוצאות המבחנים הסטטיסטיים

3.1. טמפרטורת פאנלים

3.1.1. שעה 10 בבוקר

3.1.1.1. השוואה בין קבוצות הטיפול השונות, ללא הפרדה למיקומים השונים.

איור 2' מציג את ממוצע הטמפרטורה בשעה 10 בבוקר, בשלוש החלקות. טבלה א' 4 מציגה את המאפיינים הסטטיסטיים של הטמפרטורה הנמדדת בשעה 10 בשלוש החלקות: גירניום (PEL), דיכונדרה (DIC) וביקורת (CON). טבלה 3 מציגה את תוצאות מבחן T מזווג, המחשב את ההפרשים של כל זוג טיפולים ועונה על ההיפותזה כי ההפרש שונה באופן מובהק מאפס. על סמך תוצאות אלו ניתן לומר כי הטמפרטורה של הפאנלים משתנה באופן משמעותי סטטיסטית כתלות בסוג הצמחייה אשר נשתלה סמוך לפאנלים.



איור 2': טמפרטורת פאנלים ממוצעת בחלקות השונות בחודש אוגוסט בשעה 10 בבוקר

טבלה א'1: מאפיינים סטטיסטיים של נתוני הטמפרטורה אחידה אוגוסט בשעה 10 בבוקר, בהתאם לטיפולים השונים
(PEL – pelargonium; CON – control; DIC – dichondra)

Descriptive Statistics

	PEL	CON	DIC
N	20	20	20
Mean	51.23	51.89	50.34
Std. error mean	0.42	0.43	0.43
Median	51.79	52.31	50.77
Std deviation	1.90	1.94	1.92
Minimum	47.08	47.35	45.82
Maximum	53.55	54.36	52.99

טבלה א'2: תוצאות מבחן T מזוג, ובדיקת הנחת נורמליות, להפרשים בין הטמפרטורות הנמדדות בשעה 10 בבוקר לטיפולים השונים בחודש אוגוסט.

Paired Samples T-Test

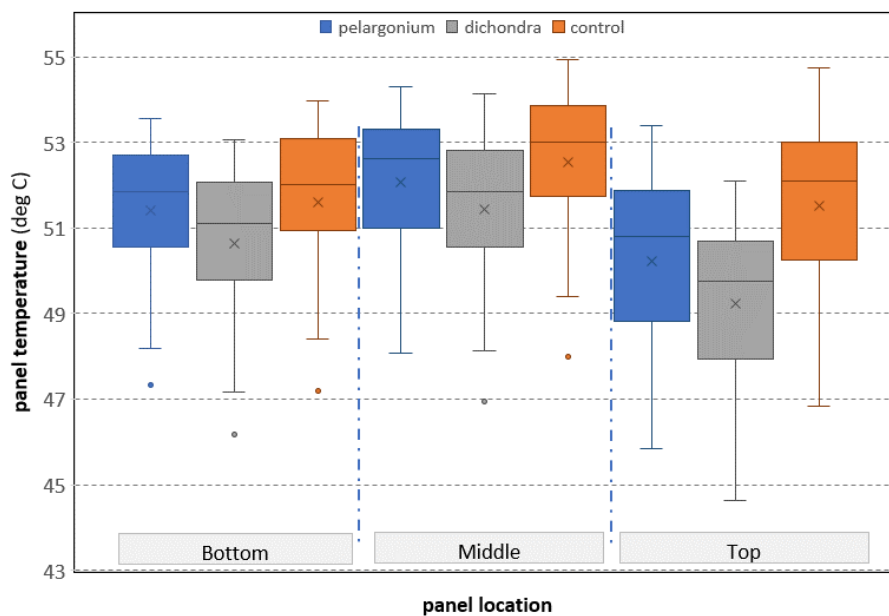
			statistic	df	p	Mean difference	SE difference
PEL	CON	Student's t	-11.86	19	< .001	-0.66	0.06
CON	DIC	Student's t	20.54	19	< .001	1.55	0.08
DIC	PEL	Student's t	-9.80	19	< .001	-0.89	0.09

Normality Test (Shapiro-Wilk)

			W	p
PEL	-	CON	0.94	0.245
CON	-	DIC	0.91	0.068
DIC	-	PEL	0.93	0.166

3.1.1.2. השוואה בין קבוצות הטיפול השונות לפי המיקומים השונים

מיקומי הפאנלים מתחלקים לשלוש- עליונים, אמצעיים ותחתונים, בהתאם למיקומם ביחס לקרקע, ראו איור א' 1. איור א' 3 מציג את ממוצע הטמפרטורה בשעה 10 בבוקר בשלושת הטיפולים השונים ולפי חלוקה למיקומי הפאנלים השונים. טבלה א' 3 מציגה את המאפיינים הסטטיסטיים של הטמפרטורה הנמדדת בשעה 10 בכל סוגי הטיפולים תוך השוואה לפי המיקומים השונים. על סמך תוצאות המבחן המוצגות באיור א' 3, ניתן לומר כי הטמפרטורה של הפאנלים משתנה באופן מובהק סטטיסטית כתלות בגידולים השונים, בהתאם למיקומים השונים.



איור א' 3: טמפרטורה ממוצעת של הפאנלים העליונים בחלקות הטיפול השונות בחודש אוגוסט בשעה 10 בבוקר

טבלה א' 3: מאפיינים סטטיסטיים של נתוני הטמפרטורה בשעה 10 בבוקר, בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים והמיקומים השונים של הפאנלים (הסנסורים)

Descriptive Statistics

	Pel_bottom	Con_bottom	Dic_bottom	Pel_middle	Con_middle	Dic_middle	Pel_top	Con_top	Dic_top
N	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Mean	51.41	51.61	50.63	52.06	52.54	51.44	50.22	51.52	49.24
Std. error mean	0.40	0.42	0.42	0.40	0.41	0.41	0.48	0.48	0.46
Median	51.84	52.02	51.11	52.63	53.00	51.85	50.81	52.10	49.76
Standard deviation	1.79	1.89	1.88	1.79	1.84	1.85	2.15	2.13	2.04
Minimum	47.34	47.19	46.17	48.08	48.00	46.95	45.83	46.84	44.62
Maximum	53.55	53.98	53.05	54.30	54.93	54.13	53.40	54.75	52.09

טבלה א' 4 : תוצאות מבחן T מזווג, ובדיקת הנחת נורמליות, להפרשים בין הטמפרטורות הנמדדות בשעה 10 בבוקר בחודש אוגוסט, כתלות בטיפולים השונים, עם חלוקה לפי המיקומים השונים.

Paired Samples T-Test

			statistic	df	p	Mean difference	SE difference
Pel_bottom	Con_bottom	Student's t	-3.21	19	0.005	-0.20	0.06
Con_bottom	Dic_bottom	Student's t	13.12	19	< .001	0.98	0.07
Dic_bottom	Pel_bottom	Student's t	-8.76	19	< .001	-0.79	0.09
Pel_middle	Con_middle	Student's t	-7.32	19	< .001	-0.47	0.06
Con_middle	Dic_middle	Student's t	13.77	19	< .001	1.10	0.08
Dic_middle	Pel_middle	Student's t	-6.48	19	< .001	-0.63	0.10
Pel_top	Con_top	Student's t	-20.84	19	< .001	-1.31	0.06
Con_top	Dic_top	Student's t	25.47	19	< .001	2.28	0.09
Dic_top	Pel_top	Student's t	-9.64	19	< .001	-0.98	0.10

Normality Test (Shapiro-Wilk)

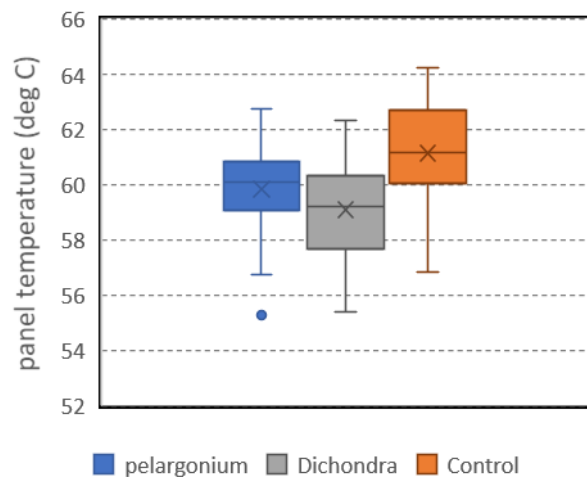
			W	p
Pel_bottom	-	Con_bottom	0.94	0.245
Con_bottom	-	Dic_bottom	0.90	0.036
Dic_bottom	-	Pel_bottom	0.94	0.230
Pel_middle	-	Con_middle	0.96	0.634
Con_middle	-	Dic_middle	0.84	0.004
Dic_middle	-	Pel_middle	0.97	0.656
Pel_top	-	Con_top	0.98	0.874
Con_top	-	Dic_top	0.97	0.830
Dic_top	-	Pel_top	0.94	0.241

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

3.1.2. שעה 13 בצהריים

3.1.2.1. השוואה בין קבוצות הטיפול השונות, ללא הפרדה למיקומים השונים.

איור א' 4 מציג את ממוצע הטמפרטורה בשעה 13 בצהריים, בשלושת הטיפולים השונים. טבלה א' 5 מציגה את המאפיינים הסטטיסטיים של הטמפרטורה הנמדדת בשעה 13 בכל סוגי הטיפולים. טבלה א' 6 מציג את תוצאות מבחן T מזווג, המחשב את ההפרשים של כל זוג טיפולים ועונה על ההנחה כי ההפרש שונה באופן מובהק מאפס. על סמך תוצאות אלו ניתן לומר כי הטמפרטורה של הפאנלים משתנה באופן משמעותי סטטיסטית כתלות בגידולים השונים הגדלים בסביבת הפאנלים.



איור א' 4: טמפרטורה ממוצעת של הפאנלים בחלקות הטיפול השונות בחודש אוגוסט בשעה 13 בצהריים

טבלה א' 5 : מאפיינים סטטיסטיים של נתונים הטמפרטורה בחודש אוגוסט בשעה 13 בצהריים, בהתאם לטיפולים השונים

Descriptive Statistics

	PEL	CON	DIC
N	20	20	20
Mean	59.83	61.14	59.11
Std. error mean	0.40	0.44	0.43
Median	60.10	61.15	59.23
Standard deviation	1.80	1.97	1.93
Minimum	55.28	56.83	55.37
Maximum	62.76	64.27	62.32

טבלה א' 6: תוצאות מבחן T מזווג, ובדיקת הנחת נורמליות, להפרשים בין הטמפרטורות הנמדדות בשעה 13 בצהריים, בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים

Paired Samples T-Test

			statistic	df	p	Mean difference	SE difference
PEL	CON	Student's t	-17.28	19	< .001	-1.31	0.08
CON	DIC	Student's t	31.99	19	< .001	2.03	0.06
DIC	PEL	Student's t	-7.28	19	< .001	-0.72	0.10

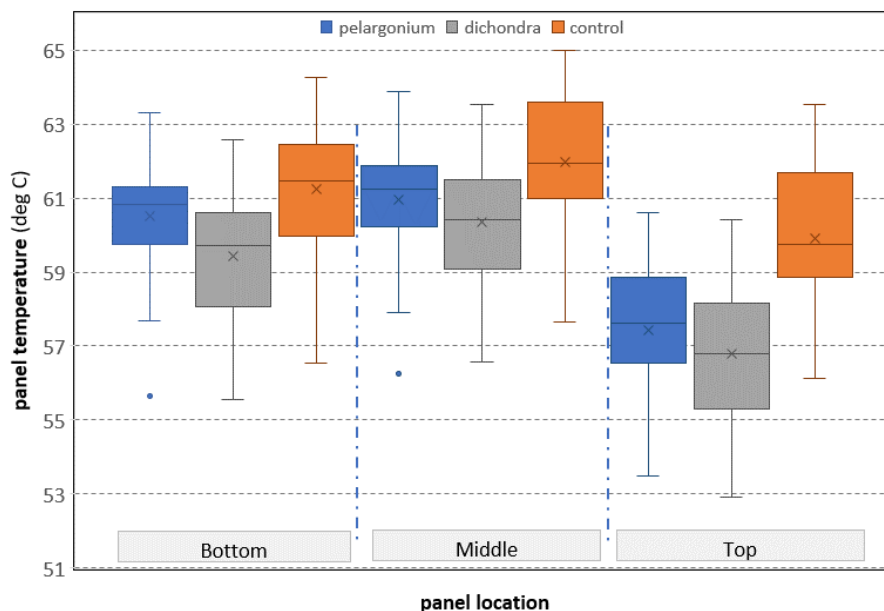
Normality Test (Shapiro-Wilk)

			W	p
PEL	-	CON	0.97	0.651
CON	-	DIC	0.97	0.818
DIC	-	PEL	0.98	0.893

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality.

3.1.2.2. השוואה בין קבוצות הטיפול השונות לפי המיקומים השונים

איור א' 5 מציג את הטמפרטורה הממוצעת של הפאנלים התחתונים, אמצעיים ועליונים, בחלקות הטיפול השונות. טבלה א' 7 מציג את המאפיינים הסטטיסטיים של הטמפרטורה הנמדדת בשעה 13 בצהריים, בכל סוגי הטיפולים תוך השוואה לפי המיקומים השונים. בכל המיקומים (פאנלים עליונים, אמצעיים ותחתונים) הטמפרטורה בקבוצת הביקורת גבוהה מזו שבקבוצת הגרניים, והאחרונה גבוהה מזו שבקבוצת הדיכונדרה. על סמך תוצאות המבחן המוצגות בטבלה א' 8, ניתן לומר כי הטמפרטורה של הפאנלים משתנה באופן משמעותי סטטיסטית כתלות בגידולים השונים, בהתאם למיקומים השונים.



איור א' 5: טמפרטורה ממוצעת של הפאנלים העליונים בחלקות הטיפול השונות, בשעה אחת בצהריים, בחודש אוגוסט

טבלה א' 7: מאפיינים סטטיסטיים של נתוני הטמפרטורה בשעה 13 בצהריים, בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים והמיקומים השונים של הפאנלים (הסנסורים).

Descriptives

	Pel_bottom	Con_bottom	Dic_bottom	Pel_middle	Con_middle	Dic_middle	Pel_top	Con_top	Dic_top
N	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Mean	60.51	61.24	59.43	60.95	61.97	60.34	57.44	59.92	56.78
Std. error mean	0.39	0.43	0.43	0.40	0.43	0.42	0.43	0.47	0.45
Median	60.82	61.45	59.71	61.24	61.93	60.41	57.62	59.74	56.78
Standard deviation	1.74	1.93	1.90	1.79	1.94	1.89	1.94	2.11	2.02
Minimum	55.65	56.55	55.55	56.25	57.64	56.58	53.49	56.13	52.91
Maximum	63.29	64.25	62.57	63.86	65.00	63.53	60.59	63.54	60.40

טבלה א' 8: תוצאות מבחן T מזווג, ובדיקת הנחת נורמליות, להפרשים בין הטמפרטורות הנמדדות בחודש אוגוסט בשעה 13, כתלות בטיפולים השונים, עם חלוקה לפי המיקומים השונים.

Paired Samples T-Test			statistic	df	p	Mean difference	SE difference
Pel_bottom	Con_bottom	Student's t	-9.34	19	0.005	-0.73	0.08
Con_bottom	Dic_bottom	Student's t	30.30	19	< .001	1.81	0.06
Dic_bottom	Pel_bottom	Student's t	-9.42	19	< .001	-1.08	0.12
Pel_middle	Con_middle	Student's t	-11.53	19	< .001	-1.02	0.09
Con_middle	Dic_middle	Student's t	22.01	19	< .001	1.63	0.07
Dic_middle	Pel_middle	Student's t	-5.73	19	< .001	-0.61	0.11
Pel_top	Con_top	Student's t	-27.89	19	< .001	-2.48	0.09
Con_top	Dic_top	Student's t	32.88	19	< .001	3.14	0.10
Dic_top	Pel_top	Student's t	-6.81	19	< .001	-0.66	0.10

Normality Test (Shapiro-Wilk)

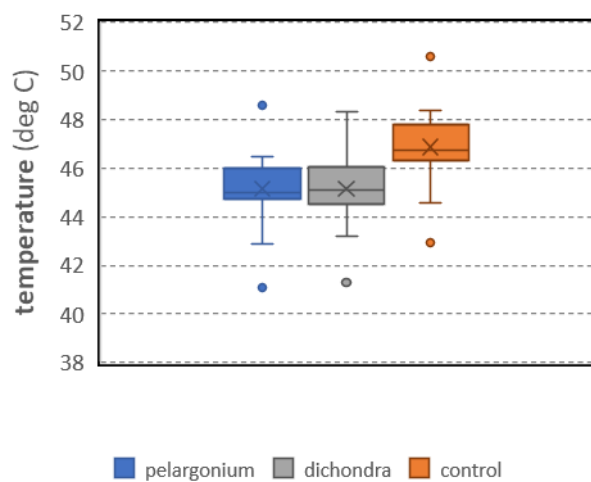
			W	p
Pel_bottom	-	Con_bottom	0.96	0.595
Con_bottom	-	Dic_bottom	0.89	0.031
Dic_bottom	-	Pel_bottom	0.97	0.818
Pel_middle	-	Con_middle	0.95	0.391
Con_middle	-	Dic_middle	0.97	0.797
Dic_middle	-	Pel_middle	0.95	0.405
Pel_top	-	Con_top	0.97	0.680
Con_top	-	Dic_top	0.97	0.742
Dic_top	-	Pel_top	0.96	0.521

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

3.1.3.16 שעה

3.1.3.1 השוואה בין קבוצות הטיפול השונות, ללא הפרדה למיקומים השונים.

איור א' 6 מציג את ממוצע הטמפרטורה בשעה 16, בשלושת הטיפולים השונים. טבלה א' 9 מציגה את המאפיינים הסטטיסטיים של הטמפרטורה הנמדדת בשעה 16, בכל סוגי הטיפולים. טבלה א' 10 מציג את תוצאות מבחן T מזווג, המחשב את ההפרשים של כל זוג טיפולים ועונה על ההנחה כי ההפרש שונה באופן מובהק מאפס. על סמך תוצאות אלו ניתן לומר כי הטמפרטורה של הפאנלים, בשעה 16, משתנה באופן משמעותי סטטיסטית כתלות בגידול כלשהו בסביבת הפאנלים, אך אינה משתנה באופן משמעותי כתלות בסוג הגידול.



איור א' 6: טמפרטורה ממוצעת של הפאנלים בחלקות הטיפול השונות בחודש אוגוסט בשעה 16

טבלה א' 9: מאפיינים סטטיסטיים של נתונים הטמפרטורה בשעה 16 אחר הצהריים, בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים

Descriptive Statistics

	PEL	CON	DIC
N	20	20	20
Mean	45.16	46.89	45.17
Std. error mean	0.33	0.35	0.33
Median	45.09	46.78	45.11
Standard deviation	1.49	1.55	1.46
Minimum	41.09	42.92	41.30
Maximum	48.58	50.61	48.34

טבלה א' 10: תוצאות מבחן T מזווג, ובדיקת הנחת נורמליות, להפרשים בין הטמפרטורות הנמדדות בשעה 16 אחר הצהריים, בהתאם לטיפולים השונים בחודש אוגוסט

Paired Samples T-Test

			statistic	df	p	Mean difference	SE difference
PEL	CON	Student's t	-44.16	19	< .001	-1.72	0.04
CON	DIC	Student's t	37.26	19	< .001	1.72	0.05
DIC	PEL	Student's t	0.06	19	0.950	0.00	0.05

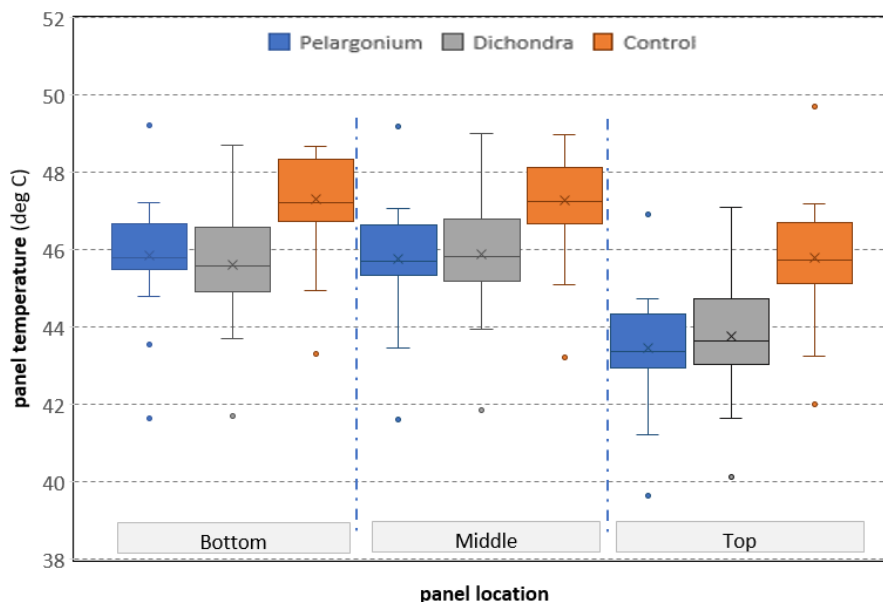
Normality Test (Shapiro-Wilk)

			W	p
PEL	-	CON	0.94	0.239
CON	-	DIC	0.92	0.094
DIC	-	PEL	0.93	0.185

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality.

3.1.3.2. השוואה בין קבוצות הטיפול השונות לפי המיקומים השונים

איור א' 7 מציג את הטמפרטורה הממוצעת של הפאנלים התחתונים, אמצעיים ועליונים, בחלקות הטיפול השונות. טבלה א' 11 מציגה את המאפיינים הסטטיסטיים של הטמפרטורה הנמדדת בשעה 16 אחר הצהריים, בכל סוגי הטיפולים תוך השוואה לפי המיקומים השונים. על סמך תוצאות המבחן המוצגות בטבלה א' 12 ניתן לומר כי הטמפרטורה של הפאנלים משתנה באופן משמעותי סטטיסטית כתלות בגידולים השונים, בהתאם למיקומים השונים. למעט, הטמפרטורה שנמדדה בפאנל האמצעי שאינה שונה בין הגירנוים לדיכונדרה ($t_{19}=2.21, p=0.039$). בכל שאר המיקומים (פאנלים עליונים ותחתונים) הטמפרטורה בקבוצת הביקורת גבוהה מזו שבקבוצת הדיכונדרה, והאחרונה גבוהה מזו שבקבוצת הגרניום.



איור א' 7: טמפרטורה ממוצעת של הפאנלים העליונים בחלקות הטיפול השונות, בשעה ארבע אחר הצהריים, בחודש אוגוסט

טבלה א' 11: מאפיינים סטטיסטיים של נתוניי הטמפרטורה בשעה 16 אחר הצהריים, בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים והמיקומים השונים של הפאנלים (הסנסורים)

Descriptive Statistics

	Pel_bottom	Con_bottom	Dic_bottom	Pel_middle	Con_middle	Dic_middle	Pel_top	Con_top	Dic_top
N	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Mean	45.84	47.32	45.62	45.76	47.28	45.88	43.46	45.79	43.77
Std. error mean	0.34	0.34	0.32	0.34	0.35	0.33	0.33	0.35	0.33
Median	45.79	47.22	45.59	45.69	47.26	45.84	43.38	45.73	43.64
Standard deviation	1.50	1.54	1.44	1.51	1.56	1.48	1.46	1.57	1.45
Minimum	41.65	43.30	41.70	41.61	43.21	41.87	39.64	42.01	40.13
Maximum	49.21	50.86	48.70	49.19	51.03	49.02	46.93	49.70	47.09

טבלה א' 12 : תוצאות מבחן T מזווג, ובדיקת הנחת נורמליות, להפרשים בין הטמפרטורות הנמדדות בשעה 16 אחר הצהריים בחודש אוגוסט, כתלות בטיפולים השונים, עם חלוקה לפי המיקומים השונים

			statistic	df	p	Mean difference	SE difference
Pel_bottom	Con_bottom	Student's t	-37.87	19	< .001	-1.47	0.04
Con_bottom	Dic_bottom	Student's t	38.14	19	< .001	1.70	0.04
Dic_bottom	Pel_bottom	Student's t	-4.40	19	< .001	-0.22	0.05
Pel_middle	Con_middle	Student's t	-28.33	19	< .001	-1.52	0.05
Con_middle	Dic_middle	Student's t	27.67	19	< .001	1.40	0.05
Dic_middle	Pel_middle	Student's t	2.00	19	0.060	0.11	0.06
Pel_top	Con_top	Student's t	-53.86	19	< .001	-2.32	0.04
Con_top	Dic_top	Student's t	38.23	19	< .001	2.02	0.05
Dic_top	Pel_top	Student's t	7.80	19	< .001	0.30	0.04

Normality Test (Shapiro-Wilk)

			W	p
Pel_bottom	-	Con_bottom	0.98	0.878
Con_bottom	-	Dic_bottom	0.95	0.395
Dic_bottom	-	Pel_bottom	0.95	0.386
Pel_middle	-	Con_middle	0.96	0.525
Con_middle	-	Dic_middle	0.88	0.016
Dic_middle	-	Pel_middle	0.96	0.523
Pel_top	-	Con_top	0.96	0.633
Con_top	-	Dic_top	0.94	0.258
Dic_top	-	Pel_top	0.93	0.179

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

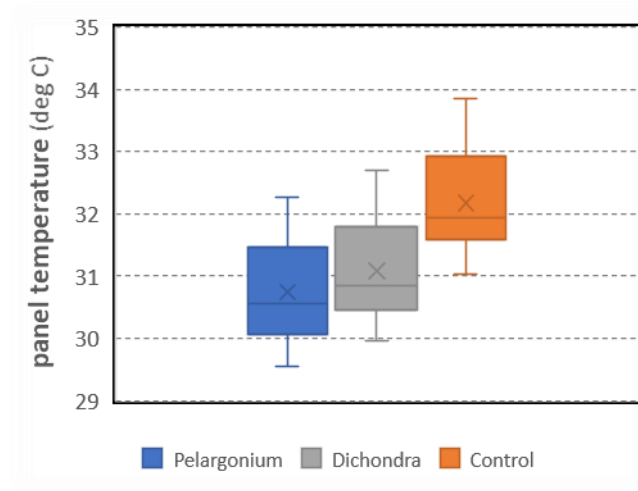
3.1.4. שעה 18

3.1.5. השוואה בין קבוצות הטיפול השונות, ללא הפרדה למיקומים השונים.

הטמפרטורה הממוצעת בקבוצת הביקורת ($M=32.2$, $SE=0.180$) הייתה גבוהה יותר מהטמפרטורה הממוצעת בקבוצת הדיכונדרה ($M=31.1$, $SE=0.174$). הטמפרטורה הממוצעת בקבוצת הגירניום ($M=30.7$, $SE=0.176$) הייתה נמוכה יותר מהטמפרטורה הממוצעת בקבוצת הדיכונדרה ($M=31.1$, $SE=0.174$).

על סמך תוצאות אלו ניתן לומר כי הטמפרטורה של הפאנלים, בשעה 18, משתנה באופן משמעותי סטטיסטית, כתלות בגידולים השונים הגדלים בסביבת הפאנלים איור א' 8 מציג את ממוצע הטמפרטורה בשעה 18, בשלושת הטיפולים השונים. טבלה א' 14 מציג את תוצאות מבחן T מזווג, המחשב את ההפרשים של כל זוג טיפולים ועונה על ההנחה כי ההפרש שונה באופן מובהק מאפס.

מציגה את המאפיינים הסטטיסטיים של הטמפרטורה הנמדדת בשעה 18 בכל סוגי הטיפולים.



איור א' 8: טמפרטורה ממוצעת של הפאנלים בחלקות הטיפול השונות בחודש אוגוסט בשעה 18

טבלה א' 13: מאפיינים סטטיסטיים של נתונים הטמפרטורה בשעה 16 אחר הצהריים, בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים

Descriptive Statistics

	Pel	Con	Dic
N	20	20	20
Mean	30.74	32.18	31.08
Std. error mean	0.18	0.19	0.18
Median	30.56	31.94	30.85
Standard deviation	0.82	0.84	0.81
Minimum	29.54	31.03	29.95
Maximum	32.27	33.85	32.69

טבלה א' 14: תוצאות מבחן T מזווג, ובדיקת הנחת נורמליות, להפרשים בין הטמפרטורות הנמדדות בשעה 16 אחר הצהריים, בהתאם לטיפולים השונים בחודש אוגוסט

			statistic	df	p	Mean difference	SE difference
PEL	CON	Student's t	-44.38	19	< .001	-1.44	0.03
CON	DIC	Student's t	43.19	19	< .001	1.10	0.03
DIC	PEL	Student's t	23.92	19	< .001	0.34	0.01

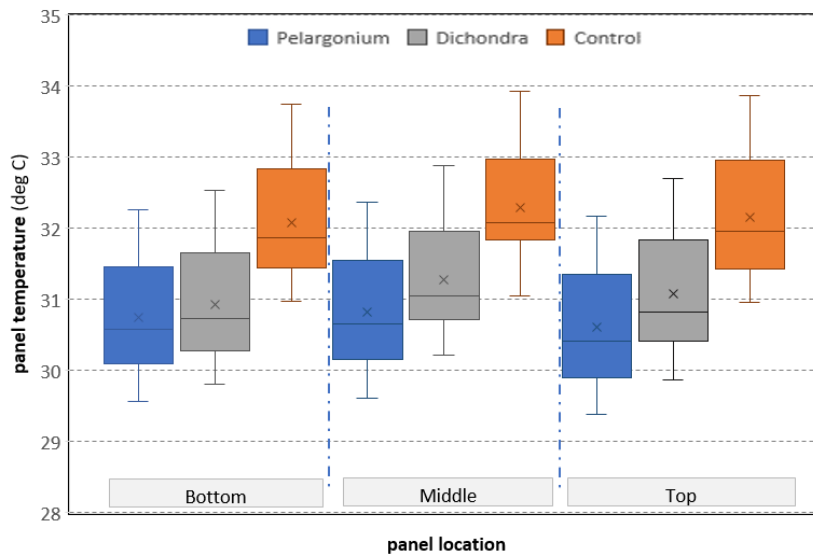
Normality Test (Shapiro-Wilk)

			W	p
Pel	-	Con	0.97	0.803
Con	-	Dic	0.97	0.840
Dic	-	Pel	0.96	0.554

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

3.1.6. השוואה בין קבוצות הטיפול השונות לפי המיקומים השונים

איור א' 9 מציג את הטמפרטורה הממוצעת של הפאנלים התחתונים, אמצעיים ועליונים בחלקות הטיפול השונות. טבלה א' 15 מציגה את המאפיינים הסטטיסטיים של הטמפרטורה הנמדדת בשעה 18 בערב, בכל סוגי הטיפולים תוך השוואה לפי המיקומים השונים. בכל המיקומים (פאנלים עליונים, אמצעיים ותחתונים) הטמפרטורה בקבוצת הביקורת גבוהה מזו שבקבוצת הדיכונדרה, והאחרונה גבוהה מזו שבקבוצת הגרניום. על סמך תוצאות המבחן המוצגות בטבלה א' 16, ניתן לומר כי הטמפרטורה של הפאנלים משתנה באופן משמעותי סטטיסטית כתלות בגידולים השונים, בהתאם למיקומים השונים.



איור א' 9: טמפרטורה ממוצעת של הפאנלים העליונים בחלקות הטיפול השונות, בשעה שש בערב, בחודש אוגוסט

טבלה א' 15: מאפיינים סטטיסטיים של נתוניי הטמפרטורה בשעה 18 בערב, בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים והמיקומים השונים של הפאנלים (הסנסורים)

Descriptive Statistics

	Pel_bottom	Con_bottom	Dic_bottom	Pel_middle	Con_middle	Dic_middle	Pel_top	Con_top	Dic_top
N	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Mean	30.74	32.08	30.93	30.83	32.30	31.28	30.62	32.15	31.08
Std. error mean	0.18	0.19	0.18	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.19
Median	30.58	31.86	30.73	30.65	32.08	31.05	30.41	31.95	30.83
Standard deviation	0.81	0.85	0.82	0.83	0.80	0.79	0.84	0.90	0.84
Minimum	29.57	30.97	29.80	29.61	31.05	30.22	29.38	30.96	29.86
Maximum	32.26	33.75	32.54	32.37	33.93	32.89	32.16	33.86	32.71

טבלה א' 16: תוצאות מבחן T מזווג, ובדיקת הנחת נורמליות, להפרשים בין הטמפרטורות הנמדדות בחודש אוגוסט בשנה 18 בתלות בטיפולים השונים, עם חלוקה לפי המיקומים השונים

Paired Samples T-Test			statistic	df	p	Mean difference	SE difference
Pel_bottom	Con_bottom	Student's t	-50.93	19	< .001	-1.34	0.03
Con_bottom	Dic_bottom	Student's t	48.16	19	< .001	1.15	0.02
Dic_bottom	Pel_bottom	Student's t	13.66	19	< .001	0.19	0.01
Pel_middle	Con_middle	Student's t	-29.46	19	< .001	-1.47	0.05
Con_middle	Dic_middle	Student's t	32.13	19	< .001	1.02	0.03
Dic_middle	Pel_middle	Student's t	19.30	19	< .001	0.45	0.02
Pel_top	Con_top	Student's t	-54.93	19	< .001	-1.53	0.03
Con_top	Dic_top	Student's t	44.98	19	< .001	1.07	0.02
Dic_top	Pel_top	Student's t	37.29	19	< .001	0.46	0.01

Normality Test (Shapiro-Wilk)

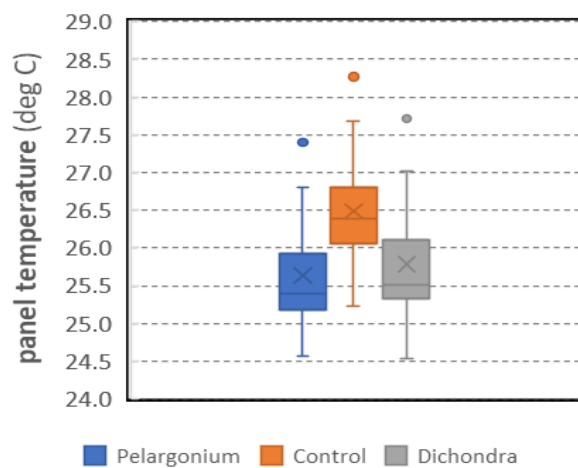
			W	p
Pel_bottom	-	Con_bottom	0.95	0.394
Con_bottom	-	Dic_bottom	0.98	0.962
Dic_bottom	-	Pel_bottom	0.95	0.390
Pel_middle	-	Con_middle	0.94	0.227
Con_middle	-	Dic_middle	0.97	0.714
Dic_middle	-	Pel_middle	0.88	0.018
Pel_top	-	Con_top	0.94	0.254
Con_top	-	Dic_top	0.96	0.482
Dic_top	-	Pel_top	0.95	0.315

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

3.2. טמפרטורת אוויר

איור א' 10 וטבלה א' 17 מציגים את המאפיינים הסטטיסטיים של טמפרטורת האוויר היומית הנמדדת בכל סוגי הטיפולים. טבלה א' 18 מציגה את תוצאות מבחן T מזווג, המחשב את ההפרשים בין כל זוג טיפולים ועונה על ההנחה כי ההפרש שונה באופן מובהק מאפס.

ההבדלים בטמפרטורת האוויר הם מובהקים סטטיסטית. טמפרטורת האוויר הממוצעת בחלקת הביקורת (M=26.49, SE=0.16) הייתה גבוהה יותר מהטמפרטורה הממוצעת בחלקת הדיכונדרה (M=25.78, SE=0.17). טמפרטורת האוויר הממוצעת בקבוצת הדיכונדרה הייתה גבוהה יותר מהטמפרטורה הממוצעת בקבוצת הגירניום (M=25.64, SE=0.15). על אף שההבדלים כאן מובהקים סטטיסטית, מדובר על הבדלים נמוכים יחסית בין הממוצעים (0.14 מעלות).



איור א' 10: טמפרטורת אוויר יומית ממוצעת של הפאנלים בחלקות הטיפול השונות, בחודש אוגוסט.

טבלה א' 17: מאפיינים סטטיסטיים של טמפרטורת האוויר היומית הממוצעת בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים.

Descriptive Statistics

	Pel	Con	Dic
N	20	20	20
Mean	25.64	26.49	25.78
Std. error mean	0.15	0.16	0.17
Median	25.39	26.38	25.51
Standard deviation	0.68	0.71	0.74
Minimum	24.56	25.22	24.54
Maximum	27.39	28.27	27.71

טבלה א' 18: תוצאות מבחן T מזווג, ובדיקת הנחת נורמליות, להפרשים בין טמפרטורת האוויר היומית הממוצעת, בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים.

Paired Samples T-Test

			statistic	df	p	Mean difference	SE difference
Pel	Con	Student's t	-43.08	19	< .001	-0.85	0.02
Con	Dic	Student's t	35.09	19	< .001	0.70	0.02
Dic	Pel	Student's t	7.23	19	< .001	0.15	0.02

Normality Test (Shapiro-Wilk)

			W	p
Pel	-	Con	0.96	0.626
Con	-	Dic	0.91	0.065
Dic	-	Pel	0.97	0.824

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

3.3. לחות האוויר

הלחות המוחלטת חושבה מטמפרטורת האוויר (T) ומהלחות היחסית (RH) בעזרת הנוסחה הבאה¹

Formula for calculating absolute humidity

In the formula below, temperature (T) is expressed in degrees Celsius, relative humidity (rh) is expressed in %, and e is the base of natural logarithms 2.71828 [raised to the power of the contents of the square brackets]:

$$\text{Absolute Humidity (grams/m}^3\text{)} = \frac{6.112 \times e^{[(17.67 \times T)/(T+243.5)]} \times rh \times 18.02}{(273.15+T) \times 100 \times 0.08314}$$

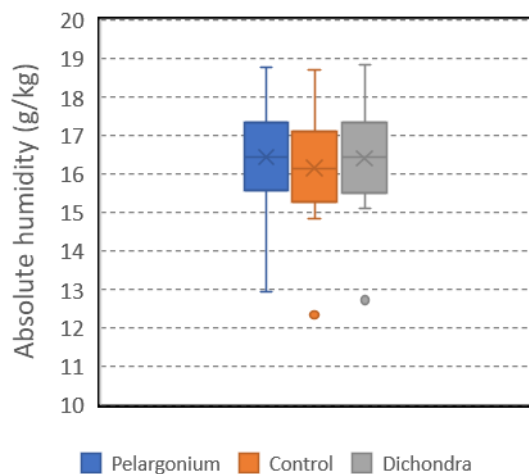
which simplifies to

$$\text{Absolute Humidity (grams/m}^3\text{)} = \frac{6.112 \times e^{[(17.67 \times T)/(T+243.5)]} \times rh \times 2.1674}{(273.15+T)}$$

This formula is accurate to within 0.1% over the temperature range -30°C to +35°C

¹ <https://www.vaisala.com>

איור א' 11 מציג ממוצע יומי של הלחות המוחלטת של האוויר סמוך לפאנלים בשלושת הטיפולים השונים.



איור א' 11: לחות יומית מוחלטת ממוצעת כפי שנמדדה בחלקות הטיפול השונות בחודש אוגוסט

הערה: הלחות המוחלטת מבטאת רק את מאסת אדי המים בנפח אוויר נתון, ובניגוד ללחות היחסית, אינה משתנה כאשר חל שינוי בטמפרטורת האוויר.

טבלה א' 19 : מציגה את המאפיינים הסטטיסטיים של הלחות היומית הנמדדת בכל סוגי הטיפולים. על סמך התוצאות המפורטות בטבלה א' 20 המציגה את תוצאות מבחן T מזווג ניתן לומר כי הלחות משתנה באופן משמעותי סטטיסטית כתלות בקיום גידול, אך לא נמצא הבדל סטטיסטי מובהק בלחות בין סוגי הגידולים השונים. הלחות היומית הממוצעת בחלקת הביקורת ($M=16.15$, $SE=0.31$) הייתה נמוכה יותר באופן מובהק מהלחות הממוצעת בחלקת הדיכונדרה ($M=16.40$, $SE=0.30$) ובחלקת הגרניום ($M=16.43$, $SE=0.28$).

טבלה א' 19 : מאפיינים סטטיסטיים של נתוני הלחות המוחלטת היומית, בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים

Descriptive Statistics			
	Pel	Con	Dic
N	20	20	20
Mean	16.43	16.15	16.40
Std. error mean	0.28	0.31	0.30
Median	16.45	16.14	16.44
Standard deviation	1.27	1.37	1.34
Minimum	12.94	12.34	12.72
Maximum	18.76	18.71	18.84

טבלה א' 20: תוצאות מבחן T מזווג, ובדיקת הנחת נורמליות, להפרשים בין הלחות היומית הממוצעת, בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים

Paired Samples T-Test

			statistic	df	p	Mean difference	SE difference
Pel	Con	Student's t	9.90	19	< .001	0.28	0.03
Con	Dic	Student's t	-17.08	19	< .001	-0.25	0.01
Dic	Pel	Student's t	-1.22	19	0.237	-0.03	0.02

Normality Test (Shapiro-Wilk)

			W	p
Pel	-	Con	0.95	0.431
Con	-	Dic	0.95	0.332
Dic	-	Pel	0.91	0.076

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

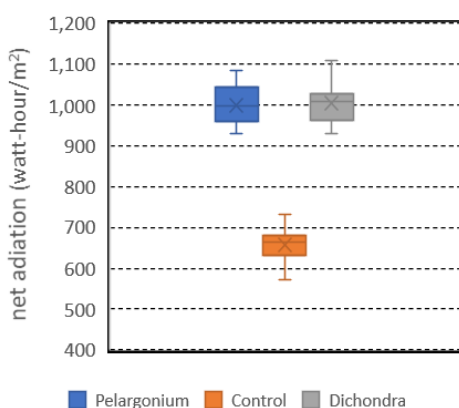
3.4. קרינה נטו

איור א' 12 מציג את סכום מאזן הקרינה נטו היומית הנמדדת, בשלושת הטיפולים השונים. טבלה א' 21 מציגה את המאפיינים הסטטיסטיים של סכום הקרינה הכללית היומית הנמדדת בכל סוגי הטיפולים. מציג את תוצאות מבחן T מזווג, המחשב את ההפרשים של כל זוג טיפולים ועונה על ההנחה כי ההפרש שונה באופן מובהק מאפס.

מאחר שההפרשים בין נתוני הקרינה של חלקת הגירניים לחלקת הדיכונדרה אינם מתפלגים נורמלית, ביצענו מבחן א- פרמטרי לנתונים מזווגים (Wilcoxon matched pairs test), תוצאות

המבחן מוצגות בטבלה א' 23. על סמך התוצאות המפורטות מטה ניתן לומר כי הקרינה הכללית משתנה באופן משמעותי סטטיסטית כתלות בגידול כלשהו בסביבת הפאנלים, איך אינה משתנה באופן משמעותי כתלות בסוג הגידול.

הקרינה נטו היומית הממוצעת בחלקת הביקורת ($M=27.5$, $SE=0.42$) הייתה נמוכה יותר מהקרינה הממוצעת בחלקת הגירניים ($M=42.1$, $SE=0.489$) ומחלקת הדיכונדרה ($M=42.2$, $SE=0.492$).



איור א' 12: קרינה כללית יומית, בחודש אוגוסט, לפי חלקות הטיפול השונות.

טבלה א' 21 : מאפיינים סטטיסטיים של נתוני הקרינה הכללית היומית, בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים

Descriptive Statistics

	Pel	Con	Dic
N	20	20	20
Mean	999.39	657.21	1003.94
Std. error mean	10.15	9.22	10.01
Median	998.25	662.63	1007.72
Standard deviation	45.40	41.23	44.75
Minimum	928.70	572.04	928.78
Maximum	1084.40	732.02	1108.09

טבלה א' 22: תוצאות מבחן T מזווג, ובדיקת הנחת נורמליות, להפרשים בין הקרינה הכללית היומית, בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים

Paired Samples T-Test

			statistic	df	p	Mean difference	SE difference
Pel	Con	Student's t	60.10	19	< .001	342.18	5.69
Con	Dic	Student's t	-119.22	19	< .001	-346.73	2.91
Dic	Pel	Student's t	0.89	19	0.385	4.55	5.12

Normality Test (Shapiro-Wilk)

			W	p
Pel	-	Con	0.96	0.502
Con	-	Dic	0.96	0.573
Dic	-	Pel	0.96	0.620

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

טבלה א' 23: תוצאות מבחן א-פרמטרי Wilcoxon Matched Pairs, להפרשים בין הקרינה הכללית היומית, בחודש אוגוסט, בהתאם לטיפולים השונים

Wilcoxon Matched Pairs Test (Net Radiation)

	N	T	Z	p-value
Pelargonium & Control	20	0.00	3.92	0.000
Dichondra & Control	20	0.00	3.92	0.000
Dichondra & Pelargonium	20	75.00	1.12	0.263

4. סיכום

במרבית ההשוואות שהוצגו בנספח זה, נמצא הבדל מובהק בין כל חלקות הטיפול - הן בין חלקת הביקורת לגידולים השונים והן בין הגידולים עצמם. ההבדל קיים גם ברמת הטיפול וגם ברמת המיקום בתוך חלקות הטיפול (הבדלים מובהקים בין הפאנלים הגבוהים בכל חלקה לבין הפאנלים הבינוניים והפאנלים הנמוכים).

בבחינת טמפרטורת הפאנלים הממוצעת בחלקות הטיפול בשעות היום השונות, נמצא כי הטמפרטורה הגבוהה ביותר הייתה בחלקת הביקורת והיא שונה באופן מובהק סטטיסטית מהטמפרטורה בחלקות הגרניים והדיכונדרה. בשעות הבוקר והצהריים הטמפרטורה בחלקת הדיכונדרה הייתה נמוכה יותר מאשר בחלקת הגרניים. לעומת זאת, בשעות אחר הצהריים לא נמצא הבדל סטטיסטי מובהק בין חלקת הגרניים ולחלקת הדיכונדרה. בשעות הערב, המגמה התחלפה והטמפרטורה הממוצעת בחלקת הגרניים הייתה נמוכה מעט מחלקת הדיכונדרה.

בבחינת טמפרטורת האוויר נמצא כי בחלקת הביקורת נמדדו הערכים הגבוהים ביותר, והם היו שונים באופן מובהק מהערכים בחלקות הדיכונדרה והגרניים. ההבדלים בטמפרטורה בין שני סוגי הגידולים היו מובהקים אך קטנים.

בבחינת לחות האוויר, נמצא כי בחלקת הביקורת נמדדו הערכים הנמוכים ביותר. על אף שהיה הבדל סטטיסטי מובהק בין הערכים בחלקת הביקורת לאלו שבחלקות הדיכונדרה והגרניים, ההבדלים הללו היו נמוכים יחסית. לא נמצאו הבדלים משמעותיים סטטיסטית בין הערכים שנמדדו בחלקת הדיכונדרה לחלקת הגרניים.

בבחינת הקרינה נטו נמצא הבדל סטטיסטי מובהק בין נתוני הקרינה נטו היומית הממוצעת בחלקת הביקורת לקרינה בחלקת הדיכונדרה והגרניים. הקרינה בחלקת הביקורת הייתה נמוכה באופן משמעותי מהקרינה בחלקות הגידולים השונות. לא נמצא הבדל משמעותי בקרינה בין חלקת הגרניים לחלקת הדיכונדרה.