

פלפל - שימוש בתאורת לד תוך נופית - הגדרת השלב הפיזיולוגי של הצמח

זיוה גלעד, אחיעם מאיר - מו"פ בקעת הירדן
ד"ר דנה חרובי, יצחק קמארה, סמדר גרינשטיין - מינהל המחקר החקלאי.
איציק אסקירה - מועצת הצמחים.

תקציר

היקף גידול הפלפל בבקעת הירדן וצפון ים המלח הינו כ-3500 ד'. בגידולים רבים כגון הפלפל, מחסור באור מהווה גורם מגביל, היות וחלק ניכר מנופם של הצמחים נתון במחסור של תאורה, עקב מיקומם הגאוגרפי ו/או מהצללה עצמית של הנוף על חלקי הפנימיים, או הצללה של מבנים או צמחים/עצים סמוכים. המחסור באור בתוך הנוף מגביל את היצרנות והיבול. דרך חדשנית לתגבור התאורה מתבססת על light-emitting diodes (LEDs). מטרת המחקר - בחינת השפעת השימוש בתאורת לדים תוך-נופית על פוטנציאל היבול - איכות כמות והתפלגות בעונה.

מהלך המחקר - בעונה 2021/22 נבדקו ההיבטים הבאים של שימוש בתאורה בגידול פלפל:

1. השפעת שעות הפעלת תאורה תוך-נופית על היבול בזן קנון
2. השפעת הפעלה תאורה תוך-נופית על היבול בשתילה מאוחרת של פלפל בזנים לאי-לאי (אדום) ולירי (צהוב)

תוצאות – ניסוי 1: בניסוי זה לא היו הבדלים מובהקים ביבול בין חלקות הביקורת לטיפול התאורה. לא נצפו הבדלים משמעותיים במשקל הפרי הממוצע בכל קטיפה בין הביקורת לתאורת יום או לילה כמו כן, לא היו הבדלים במדדי הצימוח וביומסה של הצמחים בין טיפולי התאורה לביקורת בתום הניסוי. ניסוי 2: בזן לירי לא היו הבדלים בין סך היבול בחלקות הביקורת בהשוואה לחלקות התאורה. בזן לאי-לאי לא היה הבדל ביבול לביקורת והתאורה לפי ק"ג לצמח, אולם היה הבדל מובהק במספר הפירות לצמח, עם תוספת של כמעט 20% למספר הפירות עם התאורה.

לסיכום - על אף העובדה כי בעונה 2021/2022 לא נצפה יתרון בטיפול התאורה, בחינה רב שנתית הדגימה עליה ביבול בטיפול התאורה בשנות המחקר הקודמות. דבר זה מצביע על מעורבותם של גורמים נוספים מעבר לעוצמת האור, כדוגמת הטמפרטורה והלחות, אשר משפיעים על פוטנציאל היבול של הצמחים וצריכים להילקח בחשבון בבואנו לשקול שימוש בתוספת תאורה מלאכותית לגידול זה.

היקף גידול הפלפל בבקעת הירדן וצפון ים המלח הינו כ- 3500 ד'. פלפל ליצוא נשתל במהלך חודש אוגוסט ומשווק החל מנובמבר. בחודשים נובמבר עד סוף מרץ עיקר הפרי מופנה ליצוא, כתלות באיכות ובמחיר. השוק המקומי, וכן מספר אפיקי יצוא, משוועים לפרי איכותי מסוף מרץ ועד יולי. בתקופה זו, יצרני הפלפל בערבה נמנעים מגידול חקלאי עקב דרישת סניטציה באזורם ולפיכך, מגדלי הפלפל בבקעת הירדן הינם ספקים כמעט יחידים של פרי זה לשוק וליצוא. על אף המקובל לחשוב כי בארצנו שטופת השמש האור איננו גורם מגביל בחקלאות, למעשה בגידולים רבים, כגון הפלפל, ההיפך הוא הנכון. כך, חלק ניכר מנופם של הצמחים נתון במחסור של תאורה – דבר הנובע ממיקומם הגאוגרפי (למשל פחות אור בצד הצפוני-מערבי) ו/או מהצללה עצמית של הנוף על חלקיו הפנימיים, או הצללה של מבנים או צמחים/עצים סמוכים. המחסור באור בחובו של הנוף מגביל את היצרנות ואת היבול. דרך חדשנית לתגבור התאורה מתבססת על "לדים" (LEDs) light-emitting diodes. הודות לפליטת החום הנמוכה וגודלם הפיזי הקטן של נורות הLED ניתן להשתמש בהן כתאורה 'תוך-נופית' - 'LED-interlighting' או 'intra-canopy illumination'^{1,2}.

ניסויים שערכנו בעונות הקודמות הראו כי ישנו פוטנציאל ליישום האגרוטכניקה של תאורה תוך-נופית בגידול פלפל חורפי בבתי צמיחה פסיביים³⁻⁵. בדו"ח זה מסוכמות תוצאות ניסויי 2021-2022 אשר בוצעו במחקר, ומוצג דיון המסכם את כלל הניסויים שבוצעו גם בשנות המחקר הקודמות.

מטרת המחקר: בחינת השפעת השימוש בתאורת לדים תוך-נופית על פוטנציאל היבול - איכות, כמות והתפלגות בעונה.

בעונה 2021/22 נבחנו ההיבטים הבאים של שימוש בתאורה בגידול פלפל:

1. השפעת שעות הפעלת תאורה תוך-נופית על היבול בזן קנון.
2. השפעת הפעלה תאורה תוך-נופית על היבול בשתילה מאוחרת של פלפל בזנים לאי לאי (אדום) ולירי (צהוב).

מהלך המחקר ושיטות עבודה

בעונה 2021/22 בוצעו במסגרת המחקר שני ניסויים:

ניסוי I: הניסוי בוצע במנהרה עבירה, רוחב מפתח 11 מ'. שתילה ב- 16/8/21 זן קנון (זרעים גדרה) המבנה חופה ברשת 50 מ"ש + רשת 40% צל שחורה. הסרת רשת צל 22/9/21, כיסוי בפוליאאתילן 4/11/21. ב- 27/2/22 המבנה כוסה ברשת שחורה 40% צל מעל הפלסטיק.

בניסוי נבחנה תאורה בהרכב ספקטרלי אחד – לבן קר – cool white. אביזר התאורה הוא נורות BIOLED מחברת "צובה-ויזין". תאורת ה-BIOLED מורכבת משתי יחידות המחוברות גב לגב ומאירות כלפי מטה ומעלה. גובה התאורה עודכן במהלך העונה בהתאם לצימוח.

פרוט הטיפולים:

1. ביקורת – חלקות ללא תוספת תאורה (5 חזרות, כל אחת 5 מ')
2. תאורת יום - הפעלת תאורה מ 7/11/21 עד סוף העונה, זמן הארה 06:00-18:00 (4 חזרות, כל אחת 5 מ').
3. תאורת לילה - הפעלת תאורה מ 7/11/21 עד סוף העונה, זמן הארה 06:00-18:00 (5 חזרות, כל אחת 5 מ').

ניסוי II: נבדקה השפעת תוספת תאורה בשתילה מאוחרת בשני זנים: זן לאי-לאי, זן אדום (אפעל) ולירי, זן צהוב (הזרע).

הניסוי התבצע במנהרה עבירה, רוחב מפתח 11 מ'. שתילה ב- 20/9/21. המבנה חופה ברשת 50 מ"ש + רשת 40% צל שחורה. כיסוי בפוליאתיילן 3/11/21, ב-23/2/22 המבנה כוסה ברשת 40% צל מעל הפלסטיק. הפעלת תוספת תאורה החל מ- 7/11/21 ועד סוף העונה. פרוט הטיפולים:

1. ביקורת – חלקות ללא תוספת תאורה (6 חזרות בלירי, 5 חזרות בלאי-לאי כל חלקה באורך 5 מ').
2. הפעלת תאורה מ 7/11/21 עד סוף העונה, זמן הארה 00:00-18:00 (3 חזרות בלירי, 4 חזרות בלאי-לאי כל חלקה באורך 5 מ').

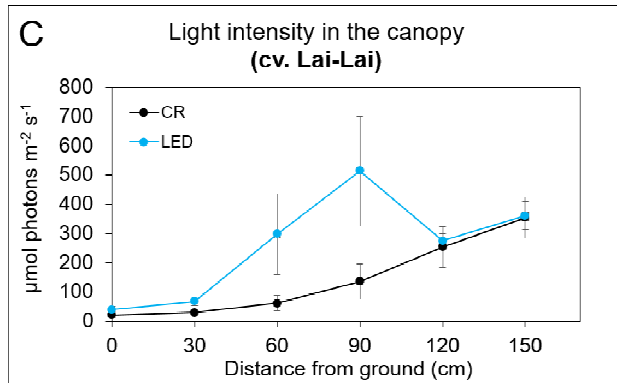
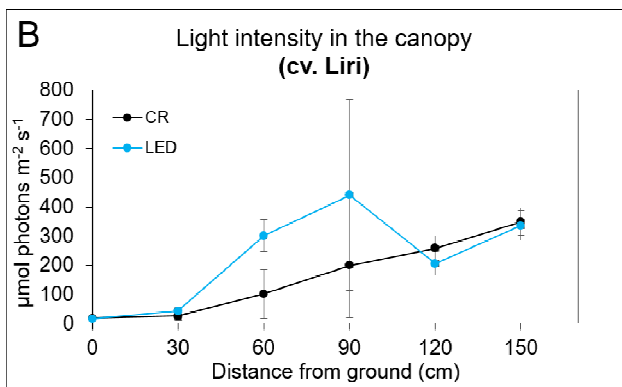
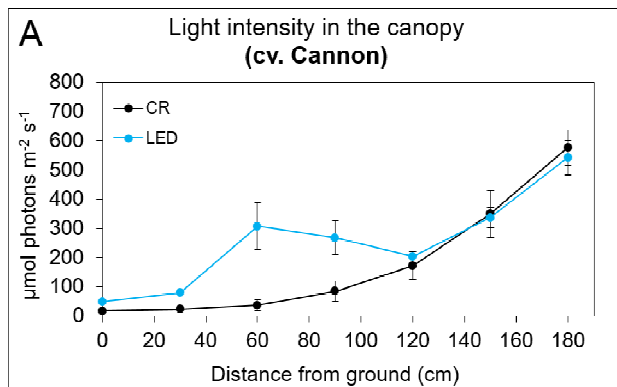
במהלך שני הניסויים נאספו המדדים הבאים:

1. עוצמות אור בתוך הנוף.
2. מדידות תכולת כלורופיל, ופלואורסנציה של כלורופיל, שחלוף גזים של הנוף הפנימי.
3. בחינת השפעה על יבול ואיכות – קטיף החלקות החל ב-23/11/21, עבור כל טיפול בשני הניסויים. בוצעה ספירת פירות, שקילה ומיון לפי מרכיבי האיכות המקובלים.

תוצאות

בשני הניסויים הותקנו נורות BIOLED עם אור לבן קר. איור 1 מציג את עוצמות האור בתוך הנוף שנמדדו בכל אחד מהזנים, העוצמות נמדדו מגובה הקרקע ועד לגובה גופי התאורה, ומגובה גופי התאורה כלפי מעלה עד קצה הצימוח.

ניתן לראות כי האזור שתוגבר עם התאורה בתוך הנוף היה כ- 90 ס"מ (מגובה 30 עד 120 ס"מ מעל הקרקע), כאשר בסמוך למנורות עוצמות האור היו כ- $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (איור 1). בזנים לירי ולא-לאי, בגובה של 90 ס"מ מעל פני הקרקע עוצמות האור היו גבוהות יחסית (איור 1B,C), כ- $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. לאור הנוף שהיה פתוח יותר בהשוואה לזן קנון, וכניסה של קרינת שמש.



איור 1. עוצמות האור בתוך הנוף, עם או ללא תאורה מוספת. (A) זן קנון, (B) זן לירי, (C) זן לאי-לאי. הערכים מייצגים ממוצעים \pm SD של 5 חלקות ביקורת ו-5 חלקות תאורה (A), 6 חלקות ביקורת ו-3 חלקות תאורה (B), 5 חלקות ביקורת ו-4 חלקות תאורה (C).

בזן קנון, שאיתו עבדנו גם בעונות הקודמות, אופיינו מספר מדדים פיזיולוגיים לאורך העונה (טבלה 1). מדידות שחלוף הגזים בוצעו בזמנים שונים במהלך היממה על מנת לאמוד האם השפעת התאורה במהלך היום (LD) שונה מזו של תאורת הלילה (LN). במדידות יום, קצבי קיבוע ה- CO_2 ('A') של עלי הנוף הפנימי ב-LD היו גבוהים פי 2.2 לעומת עלים מהביקורת. לעומת זאת, לא היו הבדלים מובהקים במוליכות הפיוניות ובקצב הטרנספירציה. ריכוז ה- CO_2 הבין-תאי (C_i) היה גבוה יותר בעלים המוארים בהשוואה לעלי הביקורת. מדידות של פעילות העלים בשולי הלילה (טבלה 1, אפור), הראו כי בעלי הביקורת ועלים שאינם מוארים ('off') בחלקות הטיפול באותה העת, ישנה פליטה של CO_2 בתהליך הנשימה ($\sim 0.35 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$). במקביל, חלקות התאורה במצב 'on' (הן LD והן LN) ערכי A היו כ- $2.3 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$. במדידות שולי יום (טבלה 1, חלק תחתון), ערכי A של העלים עם תאורה במצב 'on' היו פי 2-2.6 בהשוואה לעלי הביקורת. מוליכות פיונית (G_s) היתה גבוהה יותר מהביקורת רק בחלקות המוארות LN במדידות שולי לילה. כמו כן, קצב הטרנספירציה (E) היה גבוה יותר רק בחלקות המוארות LD בשולי הלילה. בשולי הלילה ערכי C_i היו גבוהים יותר בעלים של הנוף הפנימי בביקורת או ללא תאורה פעילה בהשוואה לעלים המוארים. בדומה לכך, בשולי היום ערכי C_i היו גבוהים יותר בעלים הלא פעילים בעת המדידה. נציין כי ההפרשים בטמפרטורות העלים במדידות של שולי יום/לילה נבעו מסדר ושעות המדידות, אשר מצוינים בטבלה. עוצמות האור שנמדדו בחלקות המוארות הייתה במוצע פי 4~ מהביקורת ומהחלקות הלא מוארות (עוצמות שנמדדו במהלך שחלוף הגזים).

טבלה 1. מדדים פוטוסינתטיים ושחלוף גזים של הנוף הפנימי (זן 'קנון') [†]									
(³) Fv/Fm	(²) תכולת כלורופיל	עוצמת אור (PAR)	טמפ' עלה	Ci	E	Gs	(¹) A	טיפול	פרמטר נמדד
	$\mu\text{mol m}^{-2}$	$\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$^{\circ}\text{C}$	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$	$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$		
0.81 ± 0.004 a	641 ± 13 b	54.8 ± 45.5 b	28.4 ± 1.5 a	327 ± 25 a	1.139 ± 0.506 a	0.062 ± 0.032 a	1.88 ± 1.06 b	CR	מדידות יום
0.81 ± 0.01 a	755 ± 14 a	134.7 ± 37.5 a	27.7 ± 1.8 a	280 ± 43 b	1.277 ± 0.469 a	0.076 ± 0.039 a	4.14 ± 1.03 a	LD (on)	(10:00-12:00)
-	639 ± 9 a	0.4 ± 0.6 b b	22.1 ± 0.3 a a	437 ± 21 a a	0.387 ± 0.211 b a	0.042 ± 0.029 ab b	-0.45 ± 0.45 b b	3-CR	מדידות 'שולי-לילה'
-	-	93.9 ± 37.7 a	23.6 ± 0.2 a	317 ± 35 b	0.631 ± 0.268 a	0.058 ± 0.033 a	2.36 ± 0.64 a	1-LD (on)	(16:00-20:00)
-	-	1.9 ± 0.6 b	22.9 ± 0.3 a	427 ± 40 a	0.317 ± 0.169 b	0.031 ± 0.019 b	-0.35 ± 0.53 b	2-LN (off)	
-	670 ± 14 a	0.3 ± 0.7 b	21.2 ± 0.3 b	439 ± 25 a	0.433 ± 0.176 a	0.053 ± 0.028 b	-0.33 ± 0.56 b	4-LD (off)	
-	650 ± 11 a	111.8 ± 61.1 a	18.2 ± 1.2 c	400 ± 28 b	0.447 ± 0.071 a	0.089 ± 0.029 a	2.20 ± 1.06 a	5-LN (on)	
-	663 ± 24 ab	41.3 ± 23.1 b b	27.4 ± 1.5 a a	348 ± 35 c b	0.902 ± 0.452 a a	0.064 ± 0.034 a ab	1.17 ± 0.86 b b	4-CR	מדידות 'שולי-יום'
-	-	2.9 ± 1.8 c	16.1 ± 0.1 b	438 ± 56 a	0.253 ± 0.088 b	0.039 ± 0.015 b	0.15 ± 0.59 c	2-LD (off)	(5:00-9:00)
-	-	91.2 ± 48.6 a	15.1 ± 0.8 c	404 ± 28 b	0.362 ± 0.126 b	0.066 ± 0.032 a	2.39 ± 0.80 a	1-LN (on)	
-	713 ± 30 a	122.7 ± 32.8 a	21.9 ± 1.3 b	313 ± 53 b	0.733 ± 0.206 a	0.080 ± 0.031 a	3.09 ± 0.95 a	3-LD (on)	
-	626 ± 33 b	22.8 ± 16.6 b	27.4 ± 2.4 a	405 ± 86 a	0.752 ± 0.419 a	0.045 ± 0.021 b	0.15 ± 1.08 c	4-LN (off)	

(¹) מדדי שחלוף גזים: A - קצב קיבוע CO₂; Gs - מוליכות פיוניות; E - טרנספירציה; Ci - ריכוז CO₂ בין-תאי; T - טמפ' עלה; PAR - עוצמת הקרינה הפוטוסינתטית (400-700 nm), נמדדו באמצעות מכשיר LCi (ADC Bioscientific). נמדדו 30 עלים בכל קבוצה מ-5 חלקות תאורה/ביקורת שונות למדידות יום, ו-20 עלים בכל קבוצה מ-4-5 חלקות ביקורת/תאורת יום (LD)/תאורת לילה (LN) שונות, למדידות שולי יום/לילה. זמני המדידה מצויינים מתחת לכותרת של כל סדרת מדידות. עבור שולי יום/לילה, מצוין גם סדר המדידות בעמודת שם הטיפול; זמן המדידה התחיל בין שעה-שעתיים לפני/אחרי הפעלת/כיבוי התאורה בטיפולים השונים.

(²) תכולת כלורופיל, נמדדה באופן בלתי הרסני באמצעות מכשיר MC-100 (Apogee). בביקורת ובתאורת יום (LD) נמדדו 50 עלים (10 עלים מ-5 חלקות); ובתאורת לילה (LN) נמדדו 40 עלים (10 עלים ל-4 חלקות); מוצגים 3 מועדי בדיקה בשורות השונות של הטבלה.

(³) Fv/Fm - מדד של פלואורסנציית הכלורופיל, נמדד באמצעות PAM-2000 (Walz) לאחר החשכת העלים למשך 20 ד'. נמדדו 24 עלים (מ-4 חלקות שונות) מהביקורת ותאורת יום (LD).

[†] כלל המדידות בוצעו על עלים של הנוף הפנימי במרחק של 10-20 ס"מ מגופי התאורה. הערכים המוצגים הם ממוצעים ± SD, מספרי העלים עבור כל מדידה מצויינים מעלה. אותיות הנבדלות זו מזו מייצגות הבדלים מובהקים סטטיסטית ($p < 0.05$), עבור שורות באותו הצבע (לבן/אפור). עבור מדידות שחלוף גזים בשולי יום/לילה, ערכי הביקורת משותפים למדידות של LD או LN במצב on/off, והאותיות מסומנות באדום או כחול עבור ההשוואות הסטטיסטיות הרלוונטיות.

תכולת הכלורופיל ומדד ה-Fv/Fm של פלואורסנציית הכלורופיל נמדדו באופן בלתי הרסני בעלווה של הנוף הפנימי, עם ובלי תאורה מוספת. מדידה ראשונה הראתה כי רמות הכלורופיל היו גבוהות יותר בעלים שהוארו ביום (טבלה 1, חלק עליון). מדידות נוספות בהמשך העונה הראו כי רמת הכלורופיל היתה מעט נמוכה יותר בעלים שהוארו בלילה בהשוואה לעלים שהוארו ביום (טבלה 1, חלק תחתון), אולם שניהם לא היו שונים מהביקורת. לא נצפו הבדלים בערכי ה-Fv/Fm שנמדדו בעלי הנוף הפנימי עם או ללא תאורה מוספת, וערך זה (0.81) מעיד על תקינות המערכת הפוטוסינתטית.

לאורך העונה הפרי נקטף מכל חזרה של כל טיפול בנפרד נשקל ומוין בהתאם למקובל. היבול מניסוי I, זן קנון עם תאורה ביום (LD) בהשוואה לתאורה בלילה (LN) מוצג בטבלה 2. בשונה מעונות קודמות, בהן קיבלנו תוספת של כ-30% ביבול האביבי (עלייה בעיקר במספר הפירות), בניסוי זה לא היו הבדלים מובהקים ביבול בין חלקות הביקורת לטיפולי התאורה. לא נצפו הבדלים משמעותיים במשקל הפרי הממוצע בכל קטיפה בין הביקורת לתאורת יום או לילה (איור 2A). למרות זאת, ניתן להבחין במגמה מעניינת בה בתחילת העונה בחלקות עם תאורה משקל הפרי היה גבוה יותר ובסוף העונה, משקל הפרי היה

גבוה יותר בביקורת. כמו כן, לא היו הבדלים במדדי הצימוח וביומסה של הצמחים בין טיפולי התאורה לביקורת בתום הניסוי (טבלה 2).

טבלה 2. יבול וביומסה בזן 'קנון' – תאורת יום (LD) ותאורת לילה (LN).				
יבול ⁽¹⁾				
טיפול	ק"ג / צמח		מס. פירות / צמח	
	כל העונה	אביב ⁽²⁾	כל העונה	אביב ⁽²⁾
ביקורת	3.68 ± 0.45 a	2.50 ± 0.39 a	17.2 ± 1.7 a	11.2 ± 1.5 a
LD	3.91 ± 0.19 a	2.43 ± 0.47 a	18.6 ± 0.9 a	12.6 ± 0.6 a
LN	3.78 ± 0.19 a	2.57 ± 0.27 a	18.4 ± 1.1 a	12.3 ± 0.4 a
מדדי צימוח וביומסה ⁽³⁾				
טיפול	גובה צמח (מ')	משקל צמח (ק"ג)	מס' פירות	משקל פירות (סך, ק"ג)
ביקורת	2.84 ± 0.23 a	1.91 ± 0.51 a	1.80 ± 1.97 a	0.20 ± 0.25 a
LD	2.82 ± 0.21 a	1.99 ± 0.48 a	1.60 ± 1.90 a	0.14 ± 0.16 a
LN	2.88 ± 0.24 a	2.08 ± 0.45 a	1.60 ± 1.73 a	0.16 ± 0.16 a

⁽¹⁾ נתוני היבול מייצגים יבול ממוצע ± SD ב- 5 חזרות בביקורת, ו- 4 חזרות בטיפולי התאורה (LD, LN). הנתונים נורמלו למס' הצמחים בכל חזרה (בין 21-30).
⁽²⁾ יבול אביבי מתייחס לסך היבול בחודשים מרץ-מאי.
⁽³⁾ נתוני הביומסה מייצגים ממוצע ± SD של 30 צמחים מכל טיפול (בכל טיפול נלקחו 10 צמחים מ- 3 חלקות שונות) אשר נמדדו במועד 12.5.22.

היבול מניסוי II, בזנים 'לירי' ו- 'לאי לאי' בשתילה מאוחרת, מוצג בטבלה 3. בזן לירי לא היו הבדלים בין סך היבול בחלקות הביקורת בהשוואה לחלקות התאורה. כ- 30% מסך היבול נקטף בינואר-פברואר, כמחצית מן היבול בחודשים מרץ-אפריל, והשאר (בין 19-25%) בחודשים מאי-יוני. בזן לאי-לאי לא היה הבדל ביבול בביקורת והתאורה לפי ק"ג לצמח, אולם היה הבדל מובהק במספר הפירות לצמח, עם תוספת של כמעט 20% למספר הפירות עם התאורה. בדומה לזן לירי גם ב-לאי-לאי אחוז היבול הגבוה היה בחודשים מרץ-אפריל, בין 43-49% בחלקות הביקורת ותאורה לפי משקל או מספר פירות. בחודשים מאי-יוני אחוז היבול מתוך הסך נע בין 15-22%. במשקל פרי ממוצע בזן לירי ובזן לאי-לאי (איור 2B, 2C) לא התקבלו הבדלים מובהקים בין הביקורת לתאורה, מלבד במועד 14.2.22 בזן לאי-לאי בו משקל הפרי הממוצע היה גבוה יותר עם התאורה. על מנת לאמוד את הפוטנציאל ליבול המשך, במועד 1.6.22 נקטף כלל הפרי הירוק מחלקות הביקורת והתאורה בשני הזנים, אך בשני הזנים לא נצפו הבדלים בין התאורה והביקורת (טבלה 4, מס' פירות). גם בגובה ומשקל הצמחים שנסקרו שבועיים לאחר מכן לא היו הבדלים מובהקים (טבלה 4).

טבלה 3. יבול בזנים 'לירי' ו'לאי-לאי' – שתילה מאוחרת.				
זן לירי				
טיפול	ק"ג / צמח		מס. פירות / צמח	
	כל העונה	% לפי חודשים**	כל העונה	% לפי חודשים**
ביקורת	4.29 ± 0.85 a	31 ± 1 (01-02)	18.5 ± 2.6 a	29 ± 2 (01-02)
		50 ± 3 (03-04)		49 ± 4 (03-04)
		19 ± 3 (05-06)		22 ± 5 (05-06)
תאורה	4.10 ± 0.40 a	29 ± 2 (01-02)	18.0 ± 1.6 a	28 ± 2 (01-02)
		50 ± 4 (03-04)		47 ± 3 (03-04)
		21 ± 3 (05-06)		25 ± 3 (05-06)

זן לאי-לאי				
מס. פירות / צמח		ק"ג / צמח		
% לפי חודשים**	כל העונה	% לפי חודשים**	כל העונה	טיפול
35 ± 8 (01-02)	14.8 ± 1.7 b	36 ± 7 (01-02)	3.69 ± 0.54 a	ביקורת
43 ± 13 (03-04)		47 ± 12 (03-04)		
22 ± 5 (05-06)		18 ± 6 (05-06)		
30 ± 3 (01-02)	17.7 ± 1.1 a	35 ± 9 (01-02)	4.30 ± 0.22 a	תאורה
48 ± 7 (03-04)		49 ± 11 (03-04)		
21 ± 5 (05-06)		15 ± 2 (05-06)		

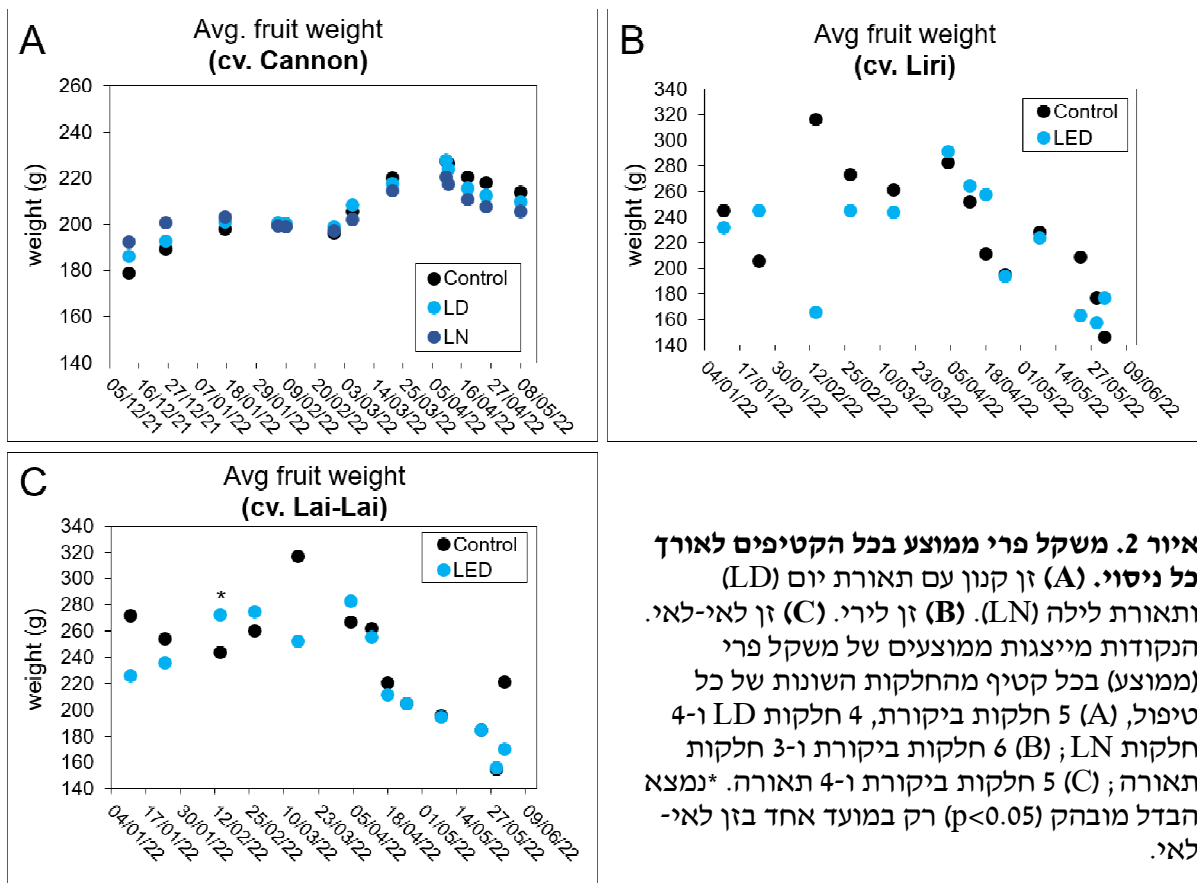
** היבול בחלוקה אחוזית (%) לחודשים: ינואר-פברואר (01-02), מרץ-אפריל (03-04), ומאי-יוני (05-06).

אותיות נבדלות זו מזו מייצגות הבדלים ($p < 0.05$) בין הביקורת לטיפול התאורה של כל זן.

טבלה 4. פוטנציאל יבול וביומסה בזנים 'לירי' ו'לאי-לאי' ⁽¹⁾ .			
זן / טיפול	מס' פירות ⁽¹⁾	גובה צמח (מ') ⁽²⁾	משקל צמח (ק"ג) ⁽²⁾
לירי - ביקורת	121 ± 38 a	2.40 ± 0.25 a	1.66 ± 0.35 a
לירי - תאורה	109 ± 8 a	2.32 ± 0.34 a	1.67 ± 0.36 a
לאי לאי - ביקורת	125 ± 28 a	2.34 ± 0.26 a	1.49 ± 0.31 a
לאי לאי - תאורה	121 ± 14 a	2.31 ± 0.26 a	1.51 ± 0.31 a

⁽¹⁾ סך פרי ירוק שנקטף במועד 1.6.22 ומייצג את פוטנציאל היבול בתום איסוף נתוני הקטיף. ממוצע ± SD של 6 ו-3 חזרות, בהתאמה, בביקורת ותאורה בזן לירי; 5 ו-4 חזרות, בהתאמה, בביקורת ותאורה בזן לאי-לאי.

⁽²⁾ נתוני הביומסה מייצגים ממוצע ± SD של 30 צמחים מכל קבוצה, מ-3 חלקות ביקורת ו-3 חלקות תאורה בכל זן, שנמדדו ב 14.6.22.



איור 2. משקל פרי ממוצע בכל הקטיפים לאורך כל ניסוי. (A) זן קנון עם תאורת יום (LD) ותאורת לילה (LN). (B) זן לירי. (C) זן לאי-לאי. הנקודות מייצגות ממוצעים של משקל פרי (ממוצע) בכל קטיפ מהחלקות השונות של כל טיפול, 4 חלקות LD ו-4 חלקות טיפול, 5 חלקות ביקורת, 4 חלקות LD ו-4 חלקות LN (B); 6 חלקות ביקורת ו-3 חלקות תאורה; 5 חלקות ביקורת ו-4 חלקות תאורה. *נמצא הבדל מובהק ($p < 0.05$) רק במועד אחד בזן לאי-לאי.

דיון

במחקר זה למדנו מספר היבטים של יישום שיטת התאורה התוך-נופית, ובחנו האם יישומה עבור גידול פלפל בתנאים פסיביים מגדילה את היבול באביב. תוך כך, נבחנו 3 מערכות תאורה שונות, שני זני פלפל (גידול חורפלי), תאורה בזמנים שונים לאורך העונה, תאורה בזמנים שונים לאורך היממה, ושני זני פלפל בשתילה מאוחרת.

מערכות תאורה

מבין מערכות התאורה שנבחנו, רק שימוש בתאורת BIOLED (חברת Bioled Ecolight systems Ltd.) עם אור לבן קר הביאה לעלייה ביבול האביבי. מנורות C-LED, בעלות נורות לד בתחום האדום והכחול, תרמו לתוספת יבול בצמחי עגבנייה (מידע מחברת C-LED [איטליה] ונציגתה בארץ- שלחין טכנולוגיות). אולם השימוש במנורות אלו כתאורה תוך-נופית בפלפל גרמה ליותר נזקי למערכת הפוטוסינתטית (photoinhibition) בעקבות עוצמות האור הגבוהות שלהן. למרות שקצבי קיבוע CO_2 בעלווה של הנוף הפנימי היו גבוהים (פי 3 מהביקורת) עם C-LED, ייתכן והעלות האנרגטית של התמודדות הצמח עם עודפי קרינה, הדורשים תיקון והחלפה של מרכיבים פוטוסינתטיים, לא אפשרה בסופו של דבר לצבור אנרגיה שתועלה לתוספת של חנטים ופרי. ספקטרום האור של מנורות Light-wheel (חברה ישראלית, נציגה רשמית של Osram) היה דומה לזה של BIOLED, אולם תוספת הקרינה של מנורות Light-wheel הייתה נמוכה מהצפוי. בנוסף, ככל הנראה שפיזור האור באמצעות מנורות אלו היה לא אופטימלי. [מאמר בנושא בחינת מערכות התאורה פורסם במבזק ירקות ⁶].

זני פלפל

בניסוי עם זני פלפל בגידול חורפי, נערכה השוואה בין 'קנון' לזן 'גלעד', אשר הנם בעלי רקע גנטי שונה, עם או ללא תוספת תאורת BIOLED, כאשר בזן קנון נבחנה תאורת יום בהשוואה לתאורת שולי-יום ובזן גלעד תאורת יום. בשני הזנים תוספת התאורה תרמה באופן משמעותי לפעילות הפוטוסינתטית של הנוף הפנימי. **בזן קנון** בוצעה ספירת חנטים והערכת שרידותם לאורך העונה. מצאנו כי עם תוספת תאורה הייתה תוספת משמעותית של חנטים ביחס לביקורת, אולם בעיקר בצד המערבי של הערוגות, הן בטיפול התאורה בשעות היום והן בשולי היום. בדומה לניסויים קודמים עם זן זה, נמצא כי תוספת התאורה תרמה לתוספת יבול באביב (מרץ-מאי). תוספת היבול התאפיינה ע"י פתיחה של פער בין היבול של צמחי התאורה לזה של צמחי הביקורת בחודשי האביב, כאשר באופן מצטבר התקבלה באביב תוספת של כ-30% במשקל ומספר הפירות לצמח⁷. **בזן גלעד** תוספת התאורה תרמה לתוספת ביבול הכללי שמקורה בתוספת למספר הפירות וכן המשקל הממוצע של פרי בודד היה גבוה יותר- דבר שלא ראינו בניסויים אחרים עם זן קנון. הייתה עלייה של בין 20-35% לטובת היבול (הן במשקל והן במספר פירות) בחלקות התאורה, אך ערכי היבול הכללי היו בעלי שונות יחסית גבוהה. שונות זו ככל הנראה נובעת מכך שהזן גלעד מתאפיין ע"י נוף פתוח יותר בהשוואה לקנון (מאמר שיפורסם ב- *Acta Hort.*).

זמני הארה לאורך העונה

בניסוי זה נבחנו שלושה זמני הארה שונים בעונה עם תאורת BIOLED, ונמצא כי רק התאורה שהופעלה לאורך כל הניסוי ('1') (נובמבר ועד סוף הניסוי) הובילה לתוספת משמעותית של יבול באביב. גם לתאורה שהופעלה מנובמבר והופסקה בפברואר ('2') הייתה תרומה מסויימת ליבול, אולם פחותה מזו של הראשונה. להארה החל מחודש ינואר ועד סוף הניסוי ('3'), לא הייתה כלל השפעה על היבול בהשוואה לביקורת. מתוצאות אלו ניתן להסיק כי לתוספת הקרינה בתוך הנוף בחודשים נובמבר-דצמבר ישנה השפעה פיזיולוגית אשר מאפשרת לצמחים לתמוך ביבול לאורך החורף. ייתכן וישנה השפעה עקיפה על התפתחות מערכת השורשים; לא עסקנו בנושא זה במחקר הנוכחי. בשני הטיפולים הראשונים (תאורה אשר הופעלה בנובמבר), מספר הפירות המצטבר לאורך כל העונה היה זהה, אך הפרי עם תאורה '1' היה גדול יותר. ייתכן וסיום הפעלת התאורה בחודש פברואר בתאורה '2' גרם לעקה שזירזה הופעת פרחים וחנטה בטיפול זה על חשבון גודל פרי.

זמני הארה – יום ולילה

בניסוי זה (תוצאות בדו"ח הנוכחי) נבחנו זמני הארה ביום, כפי שנעשה בניסויים קודמים, והארה בשעות הלילה, כאשר בשני הטיפולים זמן ההארה היה זהה (12 שעות). לא נמצאו הבדלים ביבול (זן קנון) בין חלקות הביקורת לאלו עם התאורה. אנו משערים כי הסיבה לכך היא החורף הקר שהיה בשנה זו (2021-2022), בהשוואה לשנתיים שלפני כן, ובאופן ספציפי באמצע חודש ינואר ובחודש מרץ. בעקבות כך, היה עיכוב בהבשלה וקטיף הפרי, דבר שניכר מהיבול הגבוה יחסית שנקטף לקראת סוף הניסוי. עומס הפרי על הצמחים ככל הנראה עיכב חנטה נוספת שהייתה יכולה להתקבל בצמחים עם התאורה. בנוסף לכך, בשנת מחקר זו התפשט וירוס עלים, מתקופת החורף עד סוף הניסוי, שלא איפשר המשך קטיפים סדירים באביב.

זני פלפל – שתילה מאוחרת

בניסוי (תוצאות בדו"ח הנוכחי) נבחנו שני זנים 'לירי' ו-'לאי לאי' בשתילה מאוחרת (לקראת סוף ספטמבר). בניסוי זה גם לא התקבלו תוספות יבול עם תוספת התאורה. פיזור היבול אופייני לאורך העונה,

כאשר חלק גדול מהיבול (43-50% בשני הזנים) נקטף בחודשים מרץ-אפריל, ללא קשר לתאורה. בנוסף, הפרי התאפיין במשקל גבוה בתחילת הקטיפים (תחילת חודש ינואר) ולא נצפתה מגמה כלשהי בהשוואה בין הביקורת לתאורה. ייתכן כי הסיבה לאי קבלת תוספת יבול בזנים אלו קשורים לתנאי החורף הקר (כפי שפורט בפסקה הקודמת), או לזנים עצמם, ו/או לפיזיולוגיה שונה הקשורה לשתילה המאוחרת.

סיכום

ייחודיות המחקר בכך שהוא בוצע בתנאי גידול פסיביים, בשונה מרוב העבודות ויישומים אחרים של interlighting אשר בוצעו בחממות מבוקרות אקלים. אולם, בשנים האחרונות אנו עדים להתאמת השיטה בעוד מקומות באזור הים התיכון (לדוג' ⁸), בהם לא היה מקובל להשתמש בתאורה לתגבור הקרינה בתוך הנוף. כיום לא יהיה כלכלי ליישם תוספות תאורה ע"י שימוש ברשת החשמל. אולם, המשך הפיתוחים הטכנולוגיים בתחום התאורה, העלייה האפשרית בנצילות של נורות ה-LED יחד עם הוזלת מחירם, והאפשרות להפעילם על ידי מערכות פוטו-וולטאיות, ייתכן ויאפשרו יישום מסחרי/רחב היקף של תוספת תאורה לשיפור גידולים חקלאיים גם באזור שלנו.

ספרות

1. Gómez, C., Morrow, R. C., Bourget, C. M., Massa, G. D. & Mitchell, C. A. Comparison of intracanopy light-emitting diode towers and overhead high-pressure sodium lamps for supplemental lighting of greenhouse-grown tomatoes. *Horttechnology* **23**, 93–98 (2013).
2. Jokinen, K., Särkkä, L. E. & Näkkilä, J. Improving sweet pepper productivity by LED interlighting. *Acta Hort.* **956**, 59–66 (2012).
3. Joshi, N. C., Ratner, K., Eidelman, O., Bednarczyk, D., Zur, N., Many, Y., Shahak, Y., Aviv-Sharon, E., Achiam, M., Gilad, Z. & Charuvi, D. Effects of daytime intra-canopy LED illumination on photosynthesis and productivity of bell pepper grown in protected cultivation. *Sci. Hort.* (Amsterdam). **250**, 81–88 (2019).
4. Ratner, K., Joshi, N. C., Yadav, D., Many, Y., Kamara, I., Esquira, I., Achiam, M., Gilad, Z. & Charuvi, D. Application of LED-interlighting for improving the yield of passive tunnel-grown bell pepper. *Acta Hort.* **1268**, 19–26 (2020).
5. חרובי ד., רטנר ק., אידלמן א., צור נ., שחק י., גלעד ז., מאיר א., סילברמן ד., אלון ת., אדלר א., בגידול פלפל חורפי – פוטנציאל ליבול ואיכות. מבזק LED-interlighting שימוש בתאורה תוך-נופית 45-50, 318, 2018, ירקות.
6. חרובי ד., קמארה צ., כהן מ., רטנר ק., טיווארי ו., מני י., זיו כ., יודלביץ פ., רפאל ג., פליק א., אלקלעי-טוביה ש., צ'לופוביץ' ד., אסקירה א., גלעד ז., מאיר א., סילברמן ד. תאורה תוך-נופית להעלאת היבול של פלפל חורפי בבתי צמיחה. מבזק ירקות, 2022, 343, 48-56.
7. Tiwari, V., Kamara, I., Ratner, K., Many, Y., Lukyanov, V., Ziv, C., Gilad, Z., Esquira, I. & Charuvi, D. Daytime or Edge-of-Daytime Intra-Canopy Illumination Improves the Fruit Set of Bell Pepper at Passive Conditions in the Winter. *Plants* **11**, (2022).
8. Paucek, I., Pennisi, G., Pistillo, A., Appolloni, E., Crepaldi, A., Calegari, B., Spinelli, F., Cellini, A., Gabarrell, X., Orsini, F. & Gianquinto, G. Supplementary LED interlighting improves yield and precocity of greenhouse tomatoes in the mediterranean. *Agronomy* **10**, (2020).