

## שימוש בתאורה תוך-נופית LED-interlighting בגידול פלפל חורפי – פוטנציאל ליבול ואיכות (דו"ח מסכם 2017)

דנה חרובי, קירה רטנר, אורלי אידלמן, נפתלי צור, יוספה שחק, המכון למדעי הצמח, מנהל המחקר החקלאי  
זיוה גלעד, אחיעם מאיר, מו"פ בקעת הירדן  
דוד סילברמן, תמר אלון, שה"מ  
אורי אדלר, מועצת הצמחים

### מבוא

בשנים האחרונות טכנולוגיית הLEDs (light-emitting diodes) עברה פריצת דרך משמעותית עם התייעלותם האנרגטית ומגמת הירידה במחירים. תאורת לדים מחליפה בהדרגה את רוב סוגי התאורה השונים, כולל בחקלאות<sup>1,2</sup>. יתרונות ה-LEDs על פני מקורות התאורה המסורתיים רבים, החל מאורך חיים משופר, שליטה מדויקת בהרכב הספקטרלי, צריכת חשמל נמוכה יותר, וכן פליטת חום נמוכה. פליטת החום הנמוכה וגודלם הפיזי הקטן של נורות הLED מאפשרים את שימושן כתאורה 'תוך-נופית' - 'LED-interlighting' או 'intra-canopy illumination'<sup>3,4</sup>. השפעותיו של תגבור התאורה בתוך הנוף יכולות להיות רבות ומגוונות – מהגברת הפוריות, איכות וגודל הפרי, מניפולציה של מועד הקטיף, ערכים תזונתיים, ועוד<sup>5,6</sup>. שימוש זה, אשר באופן טיפוסי מיושם כשילוב של לדים בצבעים אדום וכחול, פותח בהולנד ונמצא בשימוש עבור גידולי ירקות בעיקר במדינות צפוניות בחממות מבוקרות ובנוסף לתאורה עליונה (לרוב מסוג high-pressure sodium – HPS)<sup>7,8</sup>. בארץ, לכאורה אין מחסור באור. אך למעשה בתוך נופם של צמחים, ו/או כתלות במיקומם הגיאוגרפי או בשיטת ההדליה לגידולם, קיים מחסור באור שעשוי להגביל את היבול. בבקעת הירדן, פלפל גדל בהדליה ספרדית בערוגות של דו-שורה. בשיטה זו חלק גדול של נוף המצוי במרכז הערוגות (בין השורות) אינו מקבל מספיק אור. כיוון שמגדלי הפלפל בבקעה מהווים ספקים עיקריים של פרי ליצוא בעונת האביב, ישנו צורך בהעלאת היבול ואיכותו. בדו"ח זה מסוכמות תוצאות ניסוי ראשוני שנערך בעונה 2016-2017 לבחינת פוטנציאל השימוש באגרוטכניקה של תאורת לדים תוך-נופית בגידול פלפל חורפי בבתי צמיחה.

### מהלך המחקר ושיטות עבודה

הניסוי נערך בתחנת צבי במו"פ בקעת הירדן, במנהרה עבירה רוחב מפתח 11 מ'. הזן שנבחן קנון (זרעים גדרה) – שתילה התבצעה ב-8 באוגוסט תחת רשת נגד חרקים (50 מאש) ורשת צל 40%. ב-8 בספטמבר הוסרה רשת הצל, ב-8 בנובמבר הוחלפה הרשת נגד חרקים בכיסוי פוליאטילן, וב-23 בפברואר הונחה שוב רשת הצל עד לסוף העונה. הפעלת טיפולי התאורה ב-1 בנובמבר, לאחר סיום גל חנטה ראשון.

**בניית מערכת התאורה** - מערכת התאורה הורכבה מפסי נורות לדים בתוך גלילי סיליקון מוגני מים. הגלילים הוצמדו לפסי אלומיניום אשר הותקנו בתוך נוף הצמחים. התאורה נבחרה במספר הרכבים ספקטראליים שונים (איור 1B): (1) לבן חם (warm white, WW); (2) לבן קר (cool white, CW); (3) אדום-כחול (R:B – 3:1); (4) אדום-ירוק-כחול (R:G:B – 2:1:1); (5) אדום-כחול-כתום (R:B:O – 2:1:1). המספרים בסוגריים מציינים את מספר הפסים עבור כל סוג לד, בהתאמה. עוצמת התאורה בטיפולים השונים היתה  $80-100 \mu\text{mol} \cdot \text{photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  [במרחק 20 ס"מ ממקור התאורה]. כל טיפול תאורה נבחן לאורך של 5 מ' וכלל בתוכו 23 עד 26 צמחים.

התאורה הותקנה בשני גבהים על מנת למקסם את חשיפת הנוף הפנימי לאור, וגובהה עודכן במהלך העונה בהתאם לצימוח. התאורה הופעלה למשך כל שעות אור היום הטבעי. [טיפול התאורה הלבנה (WW, CW) נבחנו בשתי עוצמות, אך התברר שהעוצמה הנמוכה לא היתה מספקת - בדו"ח מוצגות רק התוצאות שהתקבלו עם התאורה בעוצמה הגבוהה יותר]. לניסוי היו שלושה מקטעי ביקורת באורך זהה לאלו עם תוספת התאורה (איור 1A). נתוני התאורה, כולל עוצמה והרכב ספקטרי אופייני בשטח באמצעות מכשור ייעודי, וכן נעשו מדידות לבחון את השפעת התאורה על המיקרו-אקלים ועל טמפרטורת העלווה.

**השפעת התאורה על גידול הפלפל והיבול** – לאורך עונת הגידול, התבצעו מדידות של פרמטרים פיזיולוגיים של העלים, כולל תכולת כלורופיל, פעילות פוטוסינתטית (מדד הפלואורסנציה  $F_v/F_m$ ), טמפרטורת העלה, קצב הפוטוסינתזה (קיבוע  $CO_2$ ) ומוליכות פיוניות. הפרי נקטף (11 קטיפים מנובמבר 2016 ועד אפריל 2017) מכל טיפול תאורה וביקורות בנפרד לאורך העונה. בוצעה ספירת פירות, שקילה ומיון לפי מרכיבי האיכות המקובלים.

## תוצאות

### מיקרו-אקלים וטמפרטורת העלווה

נתוני הטמפרטורה והלחות היחסית של האוויר נמדדו באמצעות מיקרולוגרים שנתלו במרחק 10 ס"מ מתאורת ה-LED ובאותו הגובה בחלקת ביקורת ללא תאורה. לא ניכר שינוי של המיקרו-אקלים שנבע מתוספת התאורה (איור 2). בנוסף, מצאנו כי לא היו הבדלים בטמפרטורת העלווה הפנימית בחלקות עם תאורה וללא תאורה [כפי שנמדד באמצעות תרמומטר אינפרא-אדום (IR)], איור 3].

### תכולת כלורופיל

תכולת הכלורופיל בעלווה של הנוף הפנימי עם תוספת התאורה השוותה לזו בחלקות הביקורת. נמצאה עלייה קלה בתכולת הכלורופיל בחלקות התאורה לעומת הביקורת, אך ברוב המקרים ההבדל לא היה מובהק באופן סטטיסטי (איור 4A). בכל טיפולי התאורה (לגבי כל טיפול בנפרד) לא נמצא הבדל בין תכולת הכלורופיל של העלווה הפנימית והחיצונית. אמנם בביקורת, נמצא הבדל משמעותי בתכולת הכלורופיל של העלווה הפנימית לעומת החיצונית - אשר הייתה גבוהה יותר (איור 4A). למרות שהשוני בין העלווה הפנימית והחיצונית לא היה גדול, נראה שהתאורה הקטינה את השוני הנ"ל.

### פעילות פוטוסינתטית

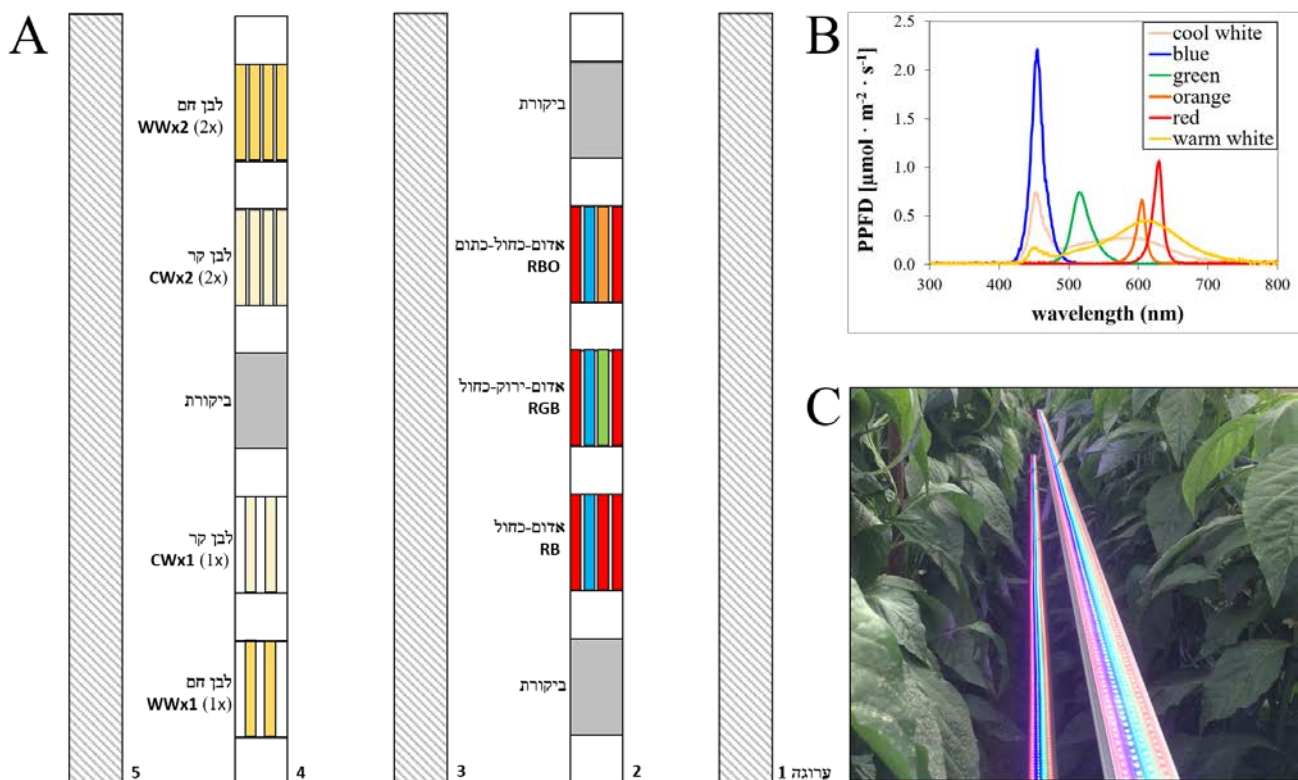
תוצאות מדידות פלואורסנציית כלורופיל (מדד ה- $F_v/F_m$ ) לאורך העונה הראו כי תוספת התאורה לא הובילה לפוטואינהיביציה של מערכת ריאקציית האור II (photosystem II – PSII), כלומר לא הצטברו נזקי קרינה בעלווה הפנימית עם תוספת התאורה בהשוואה לעלווה הפנימית ללא תאורה (איור 4B). בנוסף, השוואה של מדד זה בעלווה הפנימית מול החיצונית הראה שאין הבדלים משמעותיים ביניהם – כלומר גם בעלווה החיצונית לא הצטברו נזקי אור משמעותיים בגידול תחת כיסוי הפוליאאתילן.

מדידות שחלוף גזים הראו כי תוספת התאורה הגבירה את קצב הפוטוסינתזה (קיבוע  $CO_2$ ) בעלווה הפנימית באופן משמעותי - פי 2.3 עד 4 לעומת העלווה הפנימית בביקורת ללא תאורה (איור 5A). זאת כאשר המדידות התבצעו בתוך הנוף בסביבת תאורת הלדים. מעבר לכך, מצאנו כי לעלים אשר מקורם בסביבה זו (של התאורה) פוטנציאל לקצבי פוטוסינתזה אף גבוהים יותר כאשר נותקו מהצמחים ונמדדו תחת עוצמות אור גבוהות יותר בחלק החשוף של המנהרה (איור 5A). לעומת זאת, קצב הפוטוסינתזה בעלים שמקורם בנוף הפנימי של חלקות

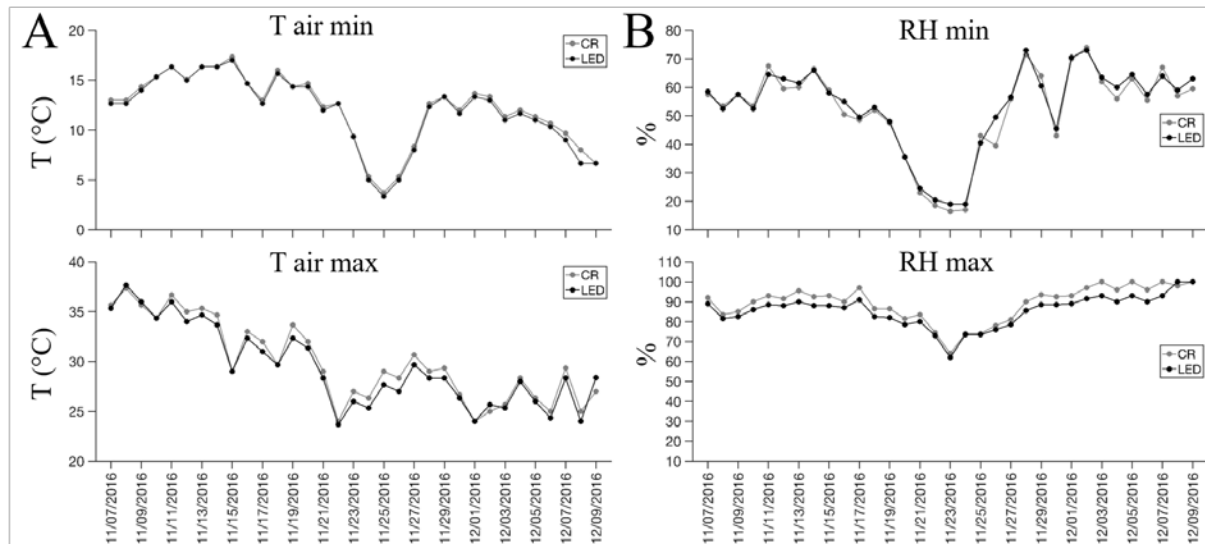
הביקורת היה נמוך ביותר וכמעט ולא השתנה כאשר אלו נבחנו תחת השפעה של עוצמת אור גבוהה יותר (איור 5A). מוליכות הפיוניות של העלווה הפנימית עם תוספת תאורה הייתה מעט גבוהה יותר (אך לא באופן מובהק) לעומת הביקורת כאשר נמדדה בסביבת הנוף הפנימי. אמנם, הבדלים משמעותיים של מוליכות הפיוניות התקבלו כאשר המדידות התבצעו מחוץ לנוף בעוצמות אור גבוהות יותר (איור 5B). באופן דומה, נמצא הבדל גם בקצב הטרנספירציה של העלים, כאשר נמדד מחוץ לנוף.

## יבול

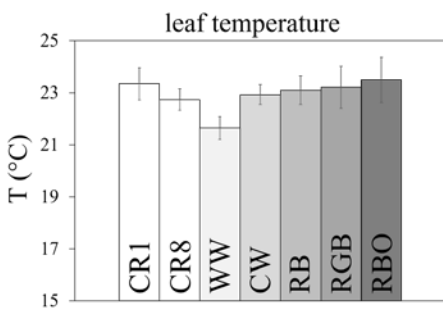
לא התקבלו הבדלים ביבול הממוצע בחלקות עם תוספת תאורה לעומת הביקורת בחודשי הסתיו (נובמבר-דצמבר) או החורף (ינואר-פברואר). לעומת זאת, בכל טיפולי התאורה השונים נמצאה עלייה בכמות היבול בהשוואה לביקורת בחודשי האביב (מרץ-אפריל). עלייה זו התבטאה בעלייה ממוצעת של כ-30% במשקל היבול הכולל (איור 6A), ובעלייה ממוצעת של 39% במספר הפירות לייצוא לעומת הביקורת (איור 6B). בטיפולי התאורה התקבל שיפור באיכות הפרי, קרי ירידה בשיעור היבול לשוק שהיה  $10.9 \pm 1.4\%$  בחלקות התאורה לעומת  $15.8 \pm 2.7\%$  בביקורת [חלקם השחור של העמודות באיור 6A,  $p < 0.05$ ]. העלייה במספר הפירות (לייצוא) בחלקות התאורה לא הייתה מלווה בשינויים בגודל או משקל פרי ממוצע בהשוואה לביקורת (איור 7).



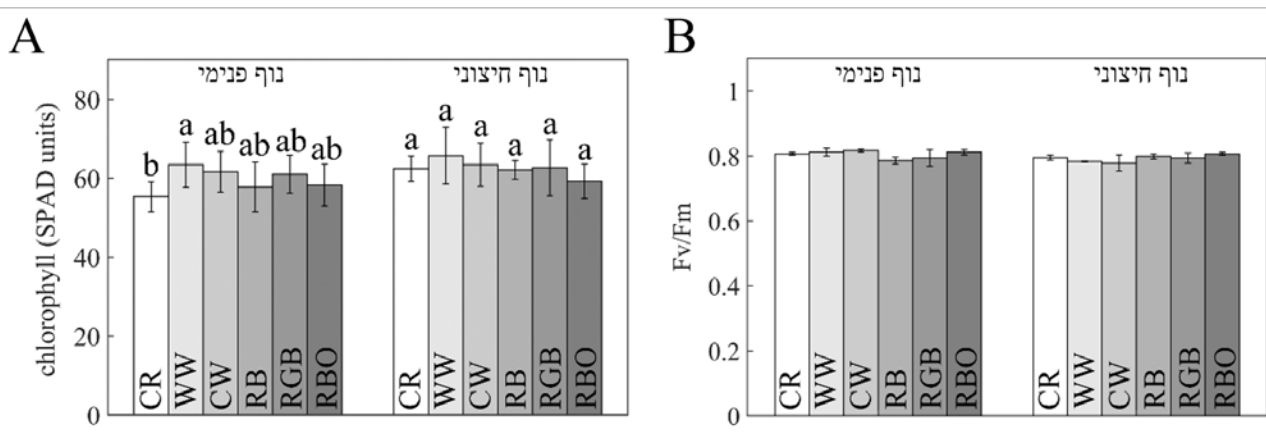
איור 1. תאורת לדים תוך-נופית בגידול הפלפל בחמרשת בבקעת הירדן. (A) ארגון חלקות התאורה והביקורות בין הערוגות במנהרה. (B) אפיון ספקטרלי של נורות הלדים השונות שמהן נבנתה מערכת התאורה (נמדד במרחק 10 ס"מ). (C) תמונה (מבט על, חודש נובמבר) של מערך התאורה (RGB) שהותקן במרכז הערוגה בשני גבהים שונים. בשתי הקומות.



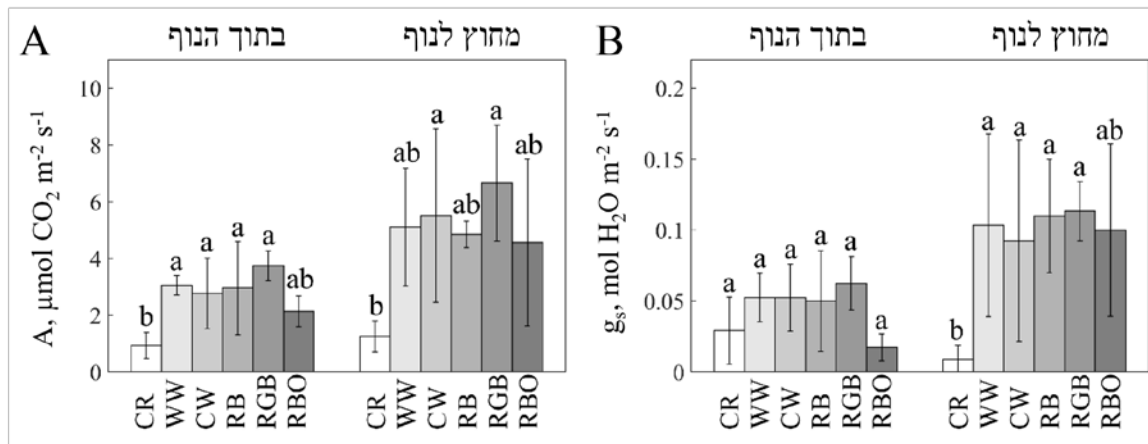
**איור 2. תאורת ה-LEDs לא השפיעה על המיקרו-אקלים.** (A) טמפרטורת מינימום (T air min) ומקסימום (T air max) שנמדדו לאורך חודש בסמוך לתאורה (LED) לעומת הביקורת (CR). (B) לחות יחסית מינימלית (RH min) ומקסימלית (RH max). הנתונים נאספו באמצעות מיקרו-לוגרים במרחק של כ-10 ס"מ מתאורת הלידים.



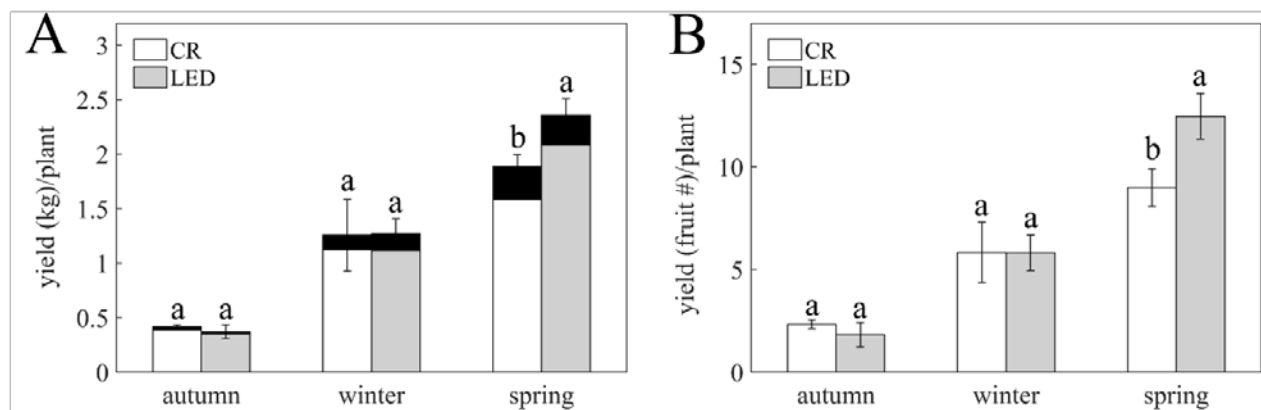
**איור 3. תאורת ה-LEDs לא השפיעה טמפרטורת העלווה.** טמפרטורת העלים נמדדה במרחק 10 ס"מ בעלים סמוכים לתאורת הלידים (לבן חם – WW; לבן קר – CW; אדום-כחול – RB; אדום-ירוק-כחול – RGB; אדום-כחול-כתום – RBO) באמצעות תרמומטר IR. לא נצפו הבדלים משמעותיים בטמפר' עלה, מלבד בחלקת WW שם הייתה טמפר' מעט נמוכה מעט מכל שאר הטיפולים והביקורת (CR1, CR8). עמודות מייצגות ממוצע  $\pm$  סטיית תקן (n=7).



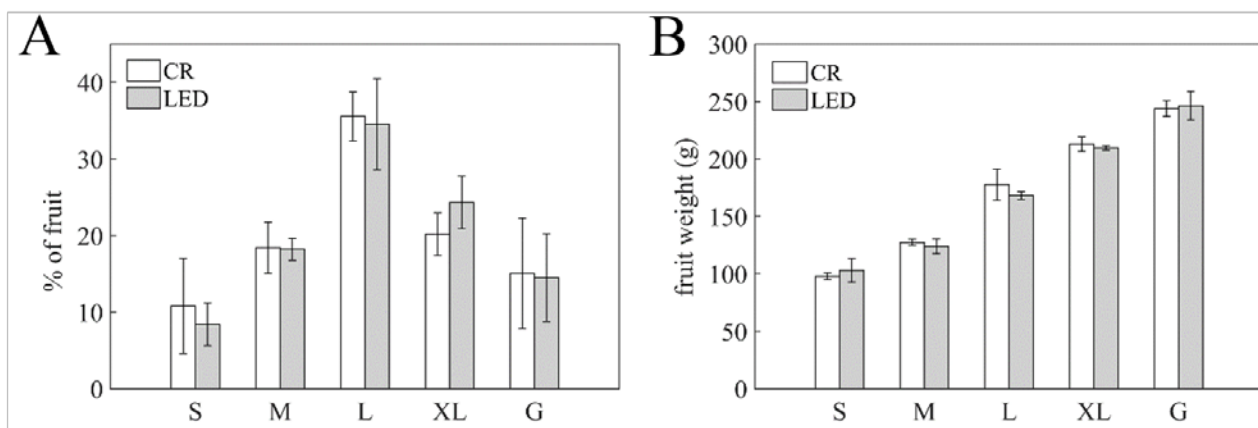
**איור 4. תכולה ופלאורסנציה של כלורופיל בעלוות הנוף הפנימי והחיצוני.** (A) תכולת כלורופיל (כפי שנמדדה באופן בלתי הרסני) בעלים מהנוף הפנימי של טיפולי התאורה (לבן חם – WW; לבן קר – CW; אדום-כחול – RB; אדום-ירוק-כחול – RGB; אדום-כחול-כתום – RBO) בהשוואה לביקורת ללא תאורה (CR). לא נצפו הבדלים משמעותיים בנוף הפנימי למעט בין WW לביקורת. כצפוי, לא ניכר הבדל בתכולת הכלורופיל בעלווה של הנוף החיצוני בין הטיפולים השונים (עמודות מימין). לעומת זאת, היה הבדל מובהק בין עלים מהנוף הפנימי והחיצוני של הביקורת ( $p < 0.001$ ). (B) פלאורסנציה של כלורופיל - מדד ה-Fv/Fm להצטברות נזקי קרינה ב-photosystem II – לא נצפו הבדלים בנוף הפנימי או החיצוני בין הביקורת לחלקות התאורה. עמודות מייצגות ממוצע  $\pm$  סטיית תקן (A: n=10; B: n=3-4). אותיות הנבדלות זו מזו ב-A) מציינות הבדלים מובהקים סטטיסטית ( $p < 0.05$ ).



**איור 5. השפעת תאורת הלדים התוך-נופית על קצב הפוטוסינתזה ומוליכות הפיוניות בעלוות הנוף הפנימי. קצב הפוטוסינתזה (A, קיבוע  $\text{CO}_2$ ) ומוליכות הפיוניות (B) בעלוות של הנוף הפנימי בטיפול התאורה השונים (לבן חם – WW; לבן קר – CW; אדום-כחול – RB; אדום-ירוק-כחול – RGB; אדום-כחול-כתום – RBO) לעומת ביקורת ללא תאורה (CR). העמודות משמאל מציינות את תוצאות המדידה בעלוות תוך-נופית שנמדדה בסביבת פנים הנוף ('בתוך הנוף') והעמודות מימין מציינות את תוצאות המדידה בעלוות מהנוף הפנימי אשר נמדדה בהשפעת עוצמת אור חזקה יותר בתוך המנהרה ('מחוץ לנוף' -  $\sim 650 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ). העמודות מייצגות ממוצע  $\pm$  סטיית תקן (n=3-4 עלים). אותיות הנבדלות זו מזו מציינות הבדלים סטטיסטיים מובהקים עבור כל קבוצה של עמודות בנפרד ( $p < 0.05$ ).**



**איור 6. השפעת התאורה התוך-נופית על היבול. (A) יבול ממוצע (לפי ק"ג/צמח) בחלקות עם תאורה מוספת (עמודות אפורות – LED) בהשוואה לחלקות הביקורת (עמודות לבנות – CR) בחודשים השונים של עונת הגידול (סתיו: נובמבר-דצמבר; חורף: ינואר-פברואר; אביב: מרץ-אפריל). נמצאו הבדלים מובהקים ביבול רק בחודשי האביב, כאשר במוצע הייתה עלייה של כ-30% ביבול לפי משקל כולל. חלקם העיקרי של העמודות (לבן/אפור) מסמן את היבול ליצוא (כ-85-90%), והחלקים השחורים של העמודות את היבול לשוק (כ-10-15%). בטיפול התאורה באביב היה שיעור נמוך יותר של יבול לשוק  $10.9 \pm 1.4\%$  בחלקות התאורה לעומת  $15.8 \pm 2.7\%$  בביקורת ( $p < 0.05$ ). (B) יבול ממוצע (לפי מסי' פירות/צמח) בעונות השונות. מסי' הפירות מייצג את היבול ליצוא שמוצג ב-A). בחודשי האביב התקבלה עלייה ממוצעת של 39% במספר הפירות בחלקות התאורה לעומת הביקורת. אותיות הנבדלות זו מזו מסמנות הבדלים מובהקים ( $p < 0.01$ ). [הבדל מובהק בין היבול בביקורת לתאורה באביב (לפי משקל, A) התקבל גם עבור סך היבול וגם עבור היבול ליצוא].**



**איור 7. תאורת ה-LED בתוך הנוף לא השפיעה על גודל הפרי ומשקלו. (A) התפלגות גודל פרי ו- (B) משקל הפרי בחלקות הביקורת (CR) ובחלקות התאורה (LED). הנתונים מוצגים עבור קטגוריות גודל הפרי השונות, המיון נעשה כמקובל לפי קוטר הפרי: S 'קטן', ( $< 60$  mm); M', בינוני (60-70 mm); L', גדול (71-85 mm); XL', גדול מאד (86-95 mm); G', ענק (96-110 mm). העמודות מציינות ממוצע  $\pm$  סטיית תקן ( $n=522-75$  פירות). הנתונים מייצגים פירות מעונת האביב (חודשים מרץ-אפריל), כאשר ההבדל העיקרי ביבול, הנובע מעלייה במספר הפירות, התקבל כתוצאה מטיפול התאורה (ראה איור 4).**

## סיכום

לתוספת יבול של פרי איכותי בתקופת האביב ישנה חשיבות כלכלית רבה; מזה שנים מורגש מחסור בפלפל איכותי בחודשים מרץ עד מאי, דבר שמתבטא בעליית מחירים ולחילופין יבוא של פרי. התוצאות שהתקבלו בניסוי ראשוני זה מעידות על פוטנציאל לשיטת התאורה התוך-נופית לצורך הגדלת היבול האביבי ושיפור איכות הפרי. בחלקות שהוארו ע"י אור לבן קר (CW), אדום-ירוק-כחול (RGB) ולבן חם (WW) בתוך הנוף התקבל היבול הרב ביותר בחודשי האביב. בעונה הנוכחית (2017-2018) אנו מתמקדים בשני הרכבי תאורה, CW ו-RGB ומבצעים את הניסוי עם חזרות עבור כל טיפול.

**תודה למועצת הצמחים ולקרון קיימת לישראל על השתתפותן במימון הניסוי.**

## ספרות מצוטטת

- Mitchell, C. A., Dzakovich, M. P., Gomez, C., Lopez, R., Burr, J. F., Hernández, R., Kubota, C., Currey, C. J., Meng, Q., Runkle, E. S., Bourget, C. M., Morrow, R. C. and Both, A. J. in *Horticultural Reviews: Volume 43* (ed. J. Janick) 1–88 (John Wiley & Sons, Inc., 2015).
- Singh, D., Basu, C., Meinhardt-Wollweber, M. & Roth, B. LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **49**, 139–147 (2015).
- Gómez, C., Morrow, R. C., Bourget, C. M., Massa, G. D. & Mitchell, C. A. Comparison of intrac canopy light-emitting diode towers and overhead high-pressure sodium lamps for supplemental lighting of greenhouse-grown tomatoes. *Horttechnology* **23**, 93–98 (2013).
- Jokinen, K., Särkkä, L. E. & Näkkilä, J. Improving sweet pepper productivity by LED interlighting. *Acta Hort.* **956**, 59–66 (2012).
- Olle, M. & Virsile, A. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agric. Food Sci.* **22**, 223–234 (2013).
- D'Souza, C., Yuk, H. G., Khoo, G. H. & Zhou, W. Application of Light-Emitting Diodes in Food Production, Postharvest Preservation, and Microbiological Food Safety. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **14**, 719–740 (2015).
- Gómez, C. & Mitchell, C. A. Supplemental lighting for greenhouse-grown tomatoes: Intrac canopy LED Towers vs. overhead HPS lamps. *Acta Hort.* **1037**, 855–862 (2014).
- Hao, X., Zheng, J., Little, C. & Khosla, S. LED inter-lighting in year-round greenhouse mini-cucumber production. *Acta Hort.* **956**, 335–340 (2012).