

תאורת לד תוך-נופית להעלאת היבול של הפלפל החורפי

דוח מסכם 2018

מס' מחקר -33

דנה חרובי (מרכזת המחקר) קירה רטנר, אורלי אידלמן, יאיר מני, 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 הלדים (LEDs) light-emitting diodes עברה פריצת דרך משמעותית עם התייעלותם האנרגטית ומגמת הירידה במחירם. תאורת לדים מחליפה בהדרגה את רוב סוגי התאורה השונים, כולל בחקלאות (1,2). יתרונות ה-LEDs על פני מקורות התאורה המסורתיים רבים, החל מאורך חיים משופר, שליטה מדויקת בהרכב הספקטראלי, צריכת חשמל נמוכה יותר, וכן פליטת חום נמוכה. פליטת החום הנמוכה וגודלם הפיזי הקטן של נורות הלד מאפשרים את שימושן כתאורה 'תוך-נופית' - 'LED-interlighting' או 'intra-canopy illumination' (3,4). השפעותיו של תגבור התאורה בתוך הנוף יכולות להיות רבות ומגוונות – מהגברת הפוריות, איכות וגודל הפרי, מניפולציה של מועד הקטיפה, ערכים תזונתיים, ועוד (5,6). 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 (7,8). 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) שרוי בעוצמת אור מאד נמוכה. כיוון שמגדלי הפלפל בבקעה מהווים ספקים עיקריים של פרי ליצוא בעונת האביב, ישנו צורך בהעלאת היבול ואיכותו. ניסוי הקדמי נערך בעונה 2016-2017 לבחינת פוטנציאל השימוש באגרנטכניקה של תאורת לדים תוך-נופית בגידול פלפל חורפי בבתי צמיחה [תוצאות אלו מסוכמות ב- (9)]. בדו"ח זה מסוכמות תוצאות ניסוי שנערך בעונה 2017-2018 - שימוש בתאורת לדים תוך-נופית להעלאת היבול של פלפל חורפי בבתי צמיחה.

שיטות וחומרים

הניסוי נערך בתחנת צבי במו"פ בקעת הירדן, במנהרה עבירה רוחב מפתח 11 מ'. הזן שנבחן קנון (זרעים גדרה) – שתילה התבצעה ב-14 באוגוסט תחת רשת נגד חרקים (50 מאש) ורשת צל 40%. ב-11 בספטמבר הוסרה רשת הצל, ב-2 בנובמבר הוחלפה הרשת נגד חרקים בכיסוי פוליאאתילן, וב-1 במרץ הונחה שוב רשת הצל עד לסוף העונה. הפעלת טיפולי התאורה ב-24 באוקטובר, 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 נבחנה בשני הרכבים ספקטראליים שונים: לבן

קר (cool white, CW) ואדום-ירוק-כחול (RGB). כל אחד מהנ"ל נבחן ב- 3 חזרות. לניסוי היו 6 מקטעי ביקורת באורך זהה לאלו עם תוספת התאורה (מפה, איור 1). כל טיפול תאורה נבחן לאורך של 5 מ'. התאורה הותקנה בשני גבהים (ר' איור 2) על מנת למקסם את חשיפת הנוף הפנימי לאור, וגובהה עודכן במהלך העונה בהתאם לצימוח. התאורה הופעלה למשך כל שעות אור היום הטבעי. נתוני התאורה, כולל עוצמה והרכב ספקטרלי אופיינו 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, טמפרטורת העלה, קצב הפוטוסינתזה (קיבוע CO_2) ומוליכות פיוניות. הפרי נקטף (מנובמבר 2017 ועד מאי 2018) מכל טיפול תאורה וביקורות בנפרד לאורך העונה. בוצעה ספירת פירות, שקילה ומיון לפי מרכיבי האיכות המקובלים.

תוצאות

איפיון מערכת התאורה

מדידות של ספקטרום האור במנהרה ובתוך הנוף, עם או בלי תאורה תוך-נופית, מוצגות באיור 3. עוצמת האור בתוך הנוף בחלקות הביקורת היתה בטווח של $30 - 30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. עם תוספת התאורה התקבלו בממוצע (במרחק של 10 ס"מ) עוצמות של $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (RGB) או $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ עבור RGB ו-CW, בהתאמה.

טמפרטורת האוויר והעלווה

נתוני טמפרטורת האוויר נמדדו באמצעות מיקרולוגרים שנתלו במרחק 10 ס"מ מתאורת ה-LED ובאותו הגובה בחלקת ביקורת ללא תאורה. ניתן לראות כי לא היו הבדלים בטמפ' האוויר המינימלית בין חלקות הביקורת לתאורה (איור C, 4A). זאת בהתאם לכך שהתאורה פעלה רק בשעות היום. לעומת זאת, טמפ' האוויר המקסימלית היתה גבוהה יותר בחלקות התאורה בממוצע ב- 2.4°C או 2.1°C בשתי התקופות המוצגות (איור D, 4B). ההבדלים בטמפרטורת העלווה הפנימית בחלקות עם תאורה וללא תאורה [כפי שנמדד באמצעות תרמומטר אינפרא-אדום] נעו בין $2 - 1^\circ\text{C}$ אך לא היו אחידים או מובהקים בכל המקרים (נתון זה אינו מוצג).

תכולת כלורופיל ופעילות פוטוסינתטית

בכל אחד מהטיפולים, תכולת הכלורופיל בעלים של הנוף החיצוני היתה נמוכה מזו של עלים בנוף הפנימי (איור 5A). דבר זה נובע מכך שהנוף הפנימי חשוף לעוצמות אור נמוכות משמעותית מאלו שאליהן חשוף הנוף החיצוני. כצפוי, לא היו הבדלים בתכולת הכלורופיל של הנוף החיצוני בין הטיפולים השונים. תגבור התאורה בתוך הנוף לא הוביל לשינויים משמעותיים ברמת הכלורופיל של העלים בהשוואה לזו של עלים מחלקות הביקורת.

מדידות שחלוף הגזים בוצעו בתוך הנוף בתנאי האור הטבעיים של הביקורת (עוצמה נמוכה מאד) או בסביבת תאורה ה-LEDs. תוספת התאורה, CW או RGB, הגבירה את קצב הפוטוסינתזה (קיבוע CO_2) בעלווה הפנימית פי 2.5 ועד אפילו פי 7 לעומת העלווה הפנימית בביקורת ללא תאורה (איור 5B). עליות דומות נצפו במוליכות הפיוניות של עלים המוארים בתוך הנוף בהשוואה לעלים הלא מוארים (אינו מוצג). יש לציין כי קצבי

הפוטוסינתזה של עלים החשופים לאור השמש גבוהים פי 2.5~ מאלו של העלים עם התאורה המוספת בתוך הנוף, בהתאם לעוצמות האור הגבוהות יותר שאליהן חשוף הנוף החיצוני.

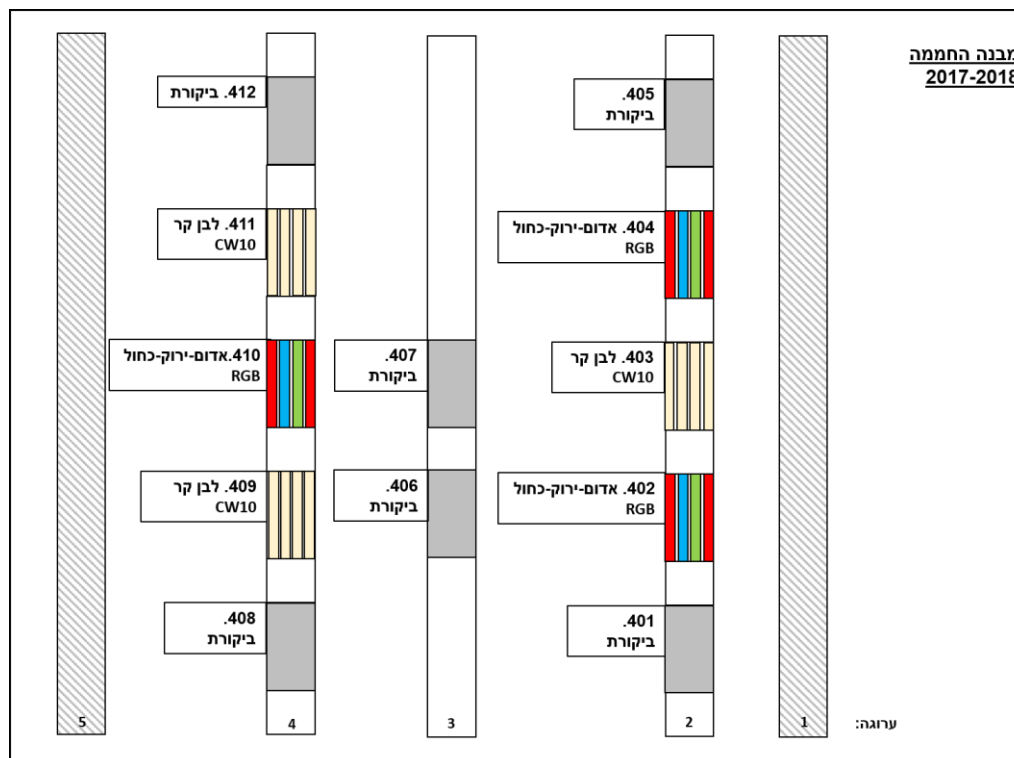
יבול

נתוני היבול (לפי משקל/מ"ר) מוצגים בטבלה 1. בחודשי הסתיו (נובמבר-דצמבר) והחורף (ינואר-פברואר), לא התקבלו הבדלים ביבול הממוצע בחלקות עם תוספת תאורה לעומת הביקורות. לעומת זאת, עם הארה באור לבן קר (CW) התקבלה תוספת של 30% ביבול האביבי (מרץ-אפריל). באופן מצטבר החלקות שהוארו ב- CW הניבו 25% (ק"ג/מ"ר) יותר יבול מהביקורת. ההרכב RGB הניב תוספת של 17% באביב, ובסך הכל כ- 11% יותר יבול יותר מהביקורת - הבדלים אלו אינם מובהקים. לא היו הבדלים משמעותיים ב- % היבול לייצוא, אשר נעו בין 92 ל- 93 אחוזים מסך היבול בכל הטיפולים.

היבול לפי מספר פירות/מ"ר (רק עבור פרי באיכות ייצוא) מוצג בטבלה 2. ניתן לראות כי ישנה התאמה בין % תוספת היבול במשקל ומספר פירות, כלומר תוספת היבול נבעה ישירות מתוספת של פרי. בנוסף, לא נמצאו הבדלים בגודל או משקל פרי ממוצע (של הפרי באביב) בין חלקות הביקורת לתאורה.

לאור התוצאות החיוביות של היבול עם תאורה cool white, בעונה הבאה (2018-19) אנו נתמקד רק בתאורה מסוג זה. כמו כן, נבחן נורות מסחריות – BIOLED של חברת צובה ויז'ן עם אותו הספקטרום, וזאת בהשוואה למערכת התאורה שנבנתה עבור הניסוי של שנת 2018. בנוסף, עם נורות ה- BIOLED ייבחנו שני מועדי התחלת תאורה שונים (תחילת אוקטובר ותחילת נובמבר), על מנת לבחון האם אפשר להעלות את היבול גם בחודשי החורף.

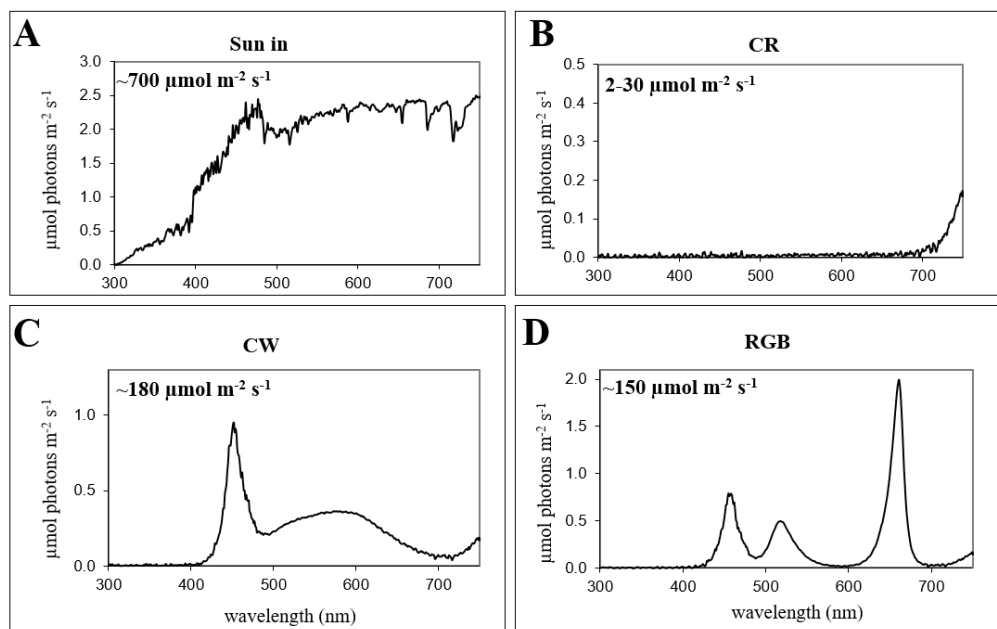
איורים וטבלאות



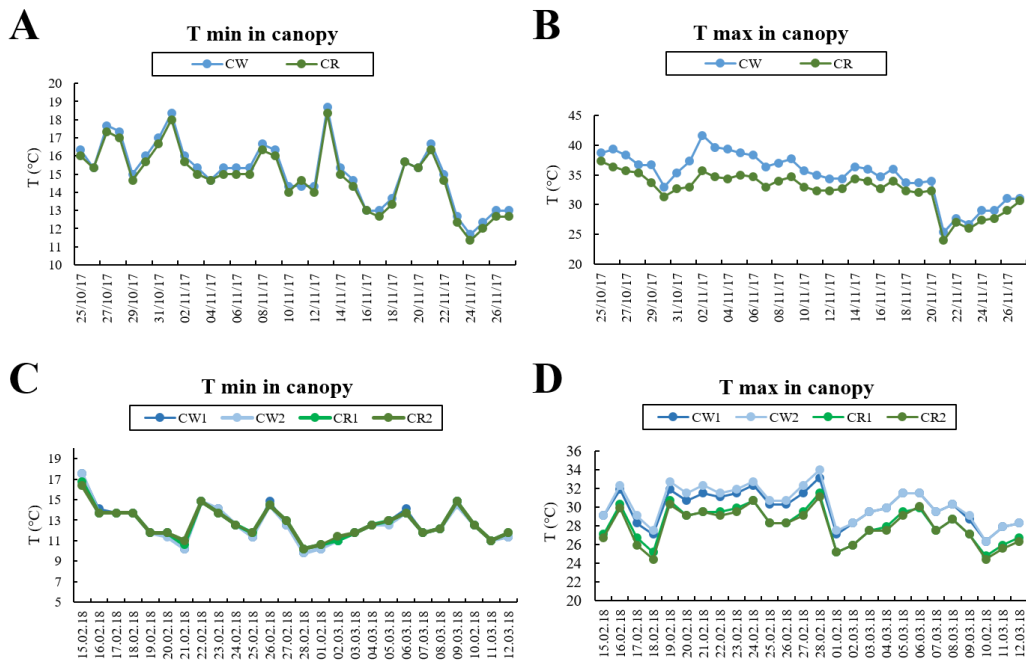
איור 1. מפת הניסוי 2017-2018.



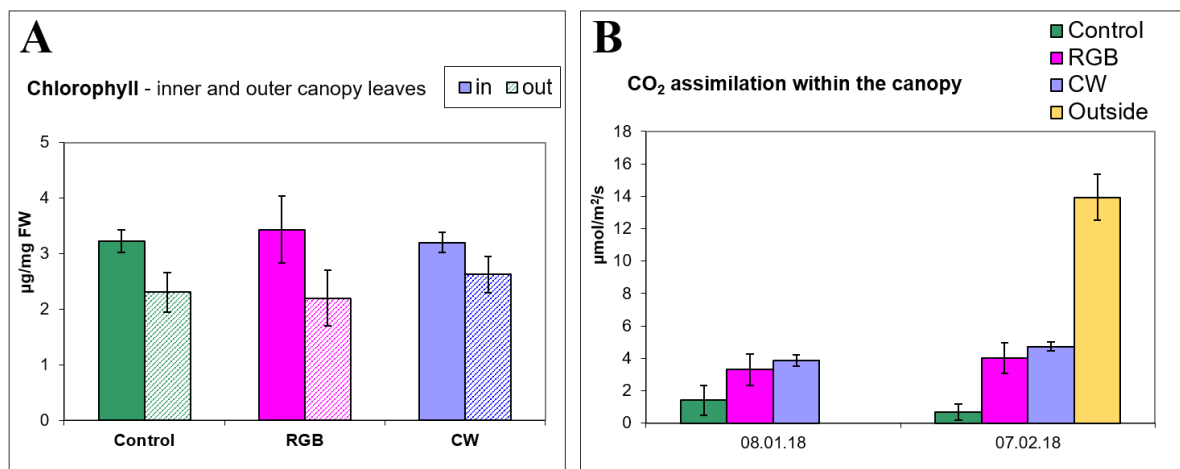
איור 2. מערכות תאורה אדום-ירוק-כחול (תמונה ימנית, RGB) ולבן קר (תמונה אמצעית ומשמאל, CW) כפי שהותקנו בשטח בעונה 2017-2018. התאורה הותקנה בשני גבהים שונים (חיצים) אשר עודכנו במהלך העונה עם הצימוד.



איור 3. איפיון ספקטרלי של האור במנהרה ובתוך הנוף. ספקטרום בשטח הפתוח של המנהרה (A), בתוך הנוף בחלקות ביקורת ללא תאורה מוספת (B), בתוך הנוף עם תוספת אור לבן קר (C, CW), ובתוך הנוף עם תוספת אור אדום-ירוק-כחול (D, RGB). המדידות התבצעו במרחק של 10 ס"מ מהתאורה ובגובה דומה בחלקות הביקורת. עוצמות האור מצויינות על גבי הגרפים.



איור 4. טמפרטורת האוויר עם או בלי תאורה תוך-נופית. טמפ' יומית מינימלית (A, C) ומקסימלית (B, D) בסמוך לתאורה – (תכלת, CW) ובחלקות ביקורת – (ירוק, CR). הנתונים נאספו באמצעות מיקולוגים מ-15.10.17 ועד 26.11.17 (A, B) ומ-15.2.18 ועד 12.3.18 (C, D).



איור 5. תכולת כלורופיל וקצב פוטוסינתזה עם או בלי תאורה תוך-נופית בפלפל. (A) תכולת כלורופיל בעלים מהנוף החיצוני (עמודות מקווקות) או הפנימי (עמודות מלאות) בחלקות הביקורת או עם תוספת תאורה תוך-נופית של אור לבן קר (CW) או אדום-ירוק-כחול (RGB). (B) קצבי הפוטוסינתזה (קיבוע CO₂) של עלים מהנוף הפנימי (עמודות ירוקות, 'control'), הנוף הפנימי בתוספת תאורה (עמודות תכלת) או RGB (עמודות רודות) ושל עלים מהנוף החיצוני החשוף (עמודה צהובה, 'outside'). המדידות התבצעו בינואר ופברואר 2018.

טבלה 1. יבול (ק"ג/מ"ר) עם או בלי תאורה תוך-נופית בהרכבים ספקטרלים RGB ו-CW

ייצוא	סך היבול	מרץ-אפריל	ינואר-פברואר	נובמבר-דצמבר	סוג הטיפול
9.37 ± 0.86 ^a	10.11 ± 0.86^a	4.99 ± 0.39 ^a	2.76 ± 0.22 ^a	2.36 ± 0.59 ^a	ביקורת
10.39 ± 0.40 ^{ab}	11.28 ± 0.44^{ab}	5.84 ± 0.09 ^{ab}	3.08 ± 0.40 ^a	2.59 ± 0.76 ^a	RGB
11.81 ± 1.06 ^b	12.60 ± 1.23^b	6.45 ± 0.73 ^b	3.20 ± 0.30 ^a	2.94 ± 0.30 ^a	CW

ערכי היבול המוצגים בטבלה הנם ממוצעים ± SD עבור 6 חלקות ביקורת, 3 חלקות תאורה RGB, ו-3 חלקות תאורה CW. אותיות הנבדלות זו מזו מייצגות הבדלים מובהקים סטטיסטית ($p < 0.05$).

טבלה 2. יבול (מס' פירות/מ"ר באכות יצוא) עם או בלי תאורה תוך-נופית בהרכבים ספקטרלים RGB ו-CW

סך היבול	מרץ-אפריל	ינואר-פברואר	נובמבר-דצמבר	סוג הטיפול
44.3 ± 3.2^a	21.1 ± 1.7 ^a	11.5 ± 1.2 ^a	11.8 ± 2.9 ^a	ביקורת
49.1 ± 3.0^{ab}	24.7 ± 2.1 ^{ab}	13.3 ± 1.6 ^a	12.0 ± 4.2 ^a	RGB
55.5 ± 6.0^b	28.0 ± 3.4 ^b	13.7 ± 1.8 ^a	13.8 ± 0.9 ^a	CW

ערכי היבול המוצגים בטבלה הנם ממוצעים ± SD עבור 6 חלקות ביקורת, 3 חלקות תאורה RGB, ו-3 חלקות תאורה CW. אותיות הנבדלות זו מזו מייצגות הבדלים מובהקים סטטיסטית ($p < 0.01$).

ספרות מצוטטת

- Mitchell, C. A., Dzakovich, M. P., Gómez, 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 AJ. Light-Emitting Diodes in Horticulture. In: J. Janick, editor. Horticultural Reviews: Volume 43. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.; 2015. p. 1–88.
- Singh D, Basu C, Meinhardt-Wollweber M, Roth B. LEDs for energy efficient greenhouse lighting. Renew Sustain Energy Rev. 2015;49:139–47.
- Gómez C, Morrow RC, Bourget CM, Massa GD, Mitchell CA. Comparison of intracanopy light-emitting diode towers and overhead high-pressure sodium lamps for supplemental lighting of greenhouse-grown tomatoes. Horttechnology. 2013;23(1):93–8.
- Jokinen K, Särkkä LE, Näkkilä J. Improving sweet pepper productivity by LED interlighting. Acta Hortic. 2012;956:59–66.
- Olle M, Virsile A. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. Agric Food Sci. 2013;22(2):223–34.
- D'Souza C, Yuk HG, Khoo GH, Zhou W. Application of light-emitting diodes in food production, postharvest preservation, and microbiological food safety. Compr Rev Food Sci Food Saf. 2015;14(6):719–40.
- Gómez C, Mitchell CA. Supplemental lighting for greenhouse-grown tomatoes: Intracanopy LED Towers vs. overhead HPS lamps. Acta Hortic. 2014;1037:855–62.
- Hao X, Zheng J, Little C, Khosla S. LED inter-lighting in year-round greenhouse mini-cucumber production. Acta Hortic. 2012;956:335–40.

9. חרובי ד., רטנר ק., אידלמן א., צור נ., שחק י., גלעד ז., מאיר א., סילברמן ד., אלון ת., אדלר א., שימוש בתאורה תוך-נופית LED-interlighting בגידול פלפל חורפי – פוטנציאל ליבול ואיכות. מבזק ירקות, 2018.