

## תאורת לד תוך-נופית להעלאת היבול של הפלפל החורפי

דנה חרובי, קירה רטנר, צחי קמארה, יאיר מני - המכון למדעי הצמח, מנהל המחקר החקלאי  
זיוה גלעד, אחיעם מאיר-מו"פ בקעת הירדן  
איציק אסקירה -מכללת תל חי  
דוד סילברמן, תמר אלון – משרד החקלאות, שה"מ

### תקציר

אחד היישומים של תאורת LEDs בחממות הנה תאורה תוך-נופית – intra-canopy illumination. באמצעות נורות הלד, אשר אינן פולטות חום רב, ניתן לתגבר את התאורה בתוך נופם של צמחים על מנת לשפר את היבול. שיטה זו מיושמת עבור גידולי ירקות בחממות מבוקרות אקלים במדינות אשר יש בהן צורך גם לתגבור התאורה העליונה. בעונות 2016-17 ו-2017-18 בחנו שיטה זו, של תאורה תוך-נופית, עבור גידול פלפל במנהרה פסיבית בבקעת הירדן. בשיטת הגידול של פלפל בהדליה ספרדית בערוגות של דו-שורה, חלק גדול של הנוף המצוי במרכז הערוגות (בין השורות) שרוי בעוצמות אור מאד נמוכות. נמצא כי הפעלת התאורה בתוך הנוף במהלך שעות היום מחודש נובמבר ועד סוף העונה תרמה לעליה של כ-30% ביבול האביבי כתוצאה מעליה במספר הפירות. בעונה 2018-19 בחנו לראשונה את השימוש במוצר מסחרי זמין ואת התאמתו לשימוש בתוך הנוף. בנוסף, נבחנו שני מועדים עבור התחלת הפעלת התאורה (אוקטובר ונובמבר). מעקב אחרי חנטה בחודשים ינואר-פברואר הראה כי שיעורה היה גבוה יותר בחלקות עם תאורה מוספת, אך רק בשורות המערביות של הערוגות. בהתאם לכך, תוספת היבול שהתקבלה במרץ-אפריל גם מקורה בצד זה (מערב) של הערוגות.

### 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. ביניהם אורך חיים משופר, שליטה מדויקת בהרכב הספקטרולי וצריכת חשמל נמוכה יותר. 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 הקטיף, ערכים תזונתיים, ועוד (5,6). שימוש זה, אשר באופן טיפוסי מיושם כשילוב של לדים בצבעים אדום וכחול, פותח בהולנד ונמצא בשימוש עבור גידולי ירקות (עגבניה, מלפפון, פלפל) 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 הנוף 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. ניסויים שערכנו בעונות הקודמות הראו כי ישנו פוטנציאל ליישום האגרוטכניקה של תאורה תוך-נופית בגידול פלפל חורפי בבית צמיחה פסיביים (9-11). בדו"ח זה

סוכמות תוצאות ניסוי שנערך בבקעת הירדן בעונה 2018-19 – בה בחנו לראשונה את השימוש במוצר מסחרי זמין כתאורה תוך-נופית לצורך העלאת היבול של 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-20 באוגוסט תחת רשת נגד חרקים (50 מאש) ורשת צל 40%. ב-26 בספטמבר הוסרה רשת הצל, ב-5 בנובמבר הוחלפה הרשת נגד חרקים בכיסוי פוליאאתילן, וב-27 בפברואר הונחה שוב רשת הצל עד לסוף העונה.

**מערכות התאורה** – בעונה זו בחנו את המוצר המסחרי 'BIOLED' של חברת TzubaVision Eco Light Systems Ltd. כל גופי התאורה היו מסוג לבן קר (cool white, CW, איור 2A). הניסוי כלל 6 מקטעי תאורה באורך 5 מ' עם BIOLED: כאשר ב-3 מקטעים מועד הפעלת התאורה היה 50 יום לאחר שתילה (3.10.18, להלן 'אוקטובר'), וב-3 מקטעים מועד ההפעלה היה 80 יום לאחר שתילה (1.11.18, להלן 'נובמבר'). בכל מקטע היו שתי מערכות של 3 גופים משורשרים זה לזה באורך כולל של 5 מ', המחוברות זו לזו גב לגב (איור 2C). לניסוי היו בנוסף שתי חזרות של מערכות התאורה בהן השתמשנו בעונה הקודמת (2017-2018) שהורכבו מפסי נורות לדים (cool white) בתוך גלילי סיליקון מוגני מים (לדארט בע"מ, מושב חגור). אמנם בעקבות בעיות שהתעוררו עם מערכות התאורה של הפסים בעונה זו, בדו"ח מוצגות התוצאות רק מהטיפולים שנעשו עם מוצרי ה-BIOLED. התאורה הופעלה למשך כל שעות אור היום הטבעי, וגובהה (שני סוגי מערכות התאורה) עודכן במהלך העונה בהתאם לצימוח. 5 מקטעים נוספים, גם כן באורך 5 מ' כל אחד, שימשו כביקורת ללא תאורה (מפת הניסוי, איור 1). נתוני התאורה, כולל עוצמה והרכב ספקטרי אופיינו באמצעות מכשור ייעודי.

**השפעת התאורה על פעילות פוטוסינתטית, על חנטה בחורף ועל היבול** – מדידות שחלוף גזים של העלווה הפנימית של הנוף (עם או בלי תאורה מוספת) בוצעו באמצעות מכשיר Licor 6800 עם תא שקוף. בשלושה מועדים בעונת החורף (1 בינואר, 21 בינואר, 20 בפברואר), סומנו ונספרו חנטים בחלקות התאורה BIOLED-Oct, BIOLED-Nov, וביקורת. החנטים סומנו בבלוק של 5 צמחים בכל חזרה של הטיפולים הנ"ל בנפרד בצד מזרח ומערב. ב-14 במרץ נספרו הפירות ששרדו על הצמחים מתוך אותם חנטים שסומנו. הפרי נקטף מכל חזרה של טיפול תאורה או ביקורת בנפרד לאורך העונה (מדצמבר 2018 ועד אפריל 2019). בוצעה ספירת פירות, שקילה ומיון לפי מרכיבי האיכות המקובלים.

## תוצאות

### איפיון מערכת התאורה ופעילות פוטוסינתטית בנוף הפנימי

לפני תחילת הניסוי נמדדו עוצמות האור של יחידות התאורה BIOLED בתנאי מעבדה  $255 \pm 12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (ממוצע  $\pm$  סטיית תקן של 36 יחידות תאורה ששימשו לניסוי, מדידה במרחק 10 ס"מ מגופי התאורה). עוצמת האור, כפי שנמדדה בגבהים שונים בתוך נוף הצמחים מוצגת באיור 3. הגרף מציג את עוצמת האור שנמדדו בתוך נוף הצמחים במרכז הערוגה בגבהים שונים, החל מגובה הקרקע ועד גובה קצה הצימוח. בחלקות ללא תוספת תאורה, עוצמת האור בגובה שבין 30 ס"מ מתחת לגופי התאורה ו-30 ס"מ מעל גופי התאורה נעה בין  $20-55 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . לעומת זאת, באותם הגבהים בחלקות המוארות עוצמת האור נעה בין  $70-350 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . בחלקות עם ה-BIOLED נוצר איזור מואר של כחצי מטר (גובה) במרכז הנוף, מעל ומתחת למיקום התאורה (גובה 0).

מדידות שחלוף גזים בוצעו בעלים של הנוף הפנימי במרחק של 10-20 ס"מ מעל גופי התאורה, ובגובה זהה בחלקות ביקורת ללא תאורה תוך-נופית. הערך הממוצע של קיבוע CO<sub>2</sub> בעלים מחלקות הביקורת היה שלילי (מוצג בטבלה להלן) לעומת עלים של הנוף הפנימי שהוארו עם BIOLED, בהם נמדדו ערכים בין 2.5-4.8 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. תוצאות אלו דומות לאלו שהתקבלו בעונות הקודמות, בהן עבדנו עם מערכת תאורה שהורכבה מפסי לדים home-made.

סוג טיפול	קצב קיבוע CO <sub>2</sub>
ביקורת (ללא תאורה)	-0.45 ± 0.90 μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> (n = 7 leaves)
תאורה תוך-נופית BIOLED	3.55 ± 0.85 μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> (n = 8 leaves)

## חנטה בחורף

לאור תוצאות העונות הקודמות, בהן התקבלה עלייה של כ- 30% במספר הפירות באביב עם תוספת תאורה, ביצענו סימון וספירות של חנטים בחורף על מנת לברר האם בתקופה זו ישנה חנטה בשיעור גבוה יותר בחלקות עם תאורה. החנטים סומנו ונספרו בשלושה מועדים בבלוקים של 5 צמחים כל אחד מכל צד של הערוגה – מזרח ומערב. הנתונים המספריים שמוצגים באיור 5 הנם סיכום של החנטים שנספרו בכל טיפול בשלושת המועדים יחד. ניתן לראות כי בצד מזרח לא היו הבדלים בין הביקורת לשני טיפולי התאורה. לעומת זאת, שיעור החנטה היה גבוה יותר בצד מערב בשני טיפולי התאורה, כאשר התוספת הכי משמעותית היתה בטיפול BIOLED-Oct. בסך הכל (מזרח + מערב יחד) בטיפול זה היו 45% יותר חנטים, ובטיפול BIOLED-Nov היו 27% יותר חנטים. מספר שבועות לאחר סימון החנטים, ערכנו סקר לשרידותם (איור 6). אחוז השרידות של החנטים היה הכי גבוה בביקורת (אמנם עם שונות גבוהה בין החלקות) הן במזרח והן במערב והיה בממוצע 53%. בטיפולי התאורה, האחוזים הממוצעים היו נמוכים יותר, ונעו בין 39-47% בטיפולים והצדדים השונים (איור 6A). לעומת זאת, מבחינה מספרית, שרדו יותר חנטים בטיפולי התאורה, אך רק בצד מערב (איור 6B). בהשוואה לביקורת בצד מערב היו 36% יותר חנטים בשני טיפולי התאורה באותו הצד. בעקבות ממצא זה, החל מהקטיף של מרץ היבול בצד מזרח ומערב של הערוגה נספר ונשקל בנפרד.

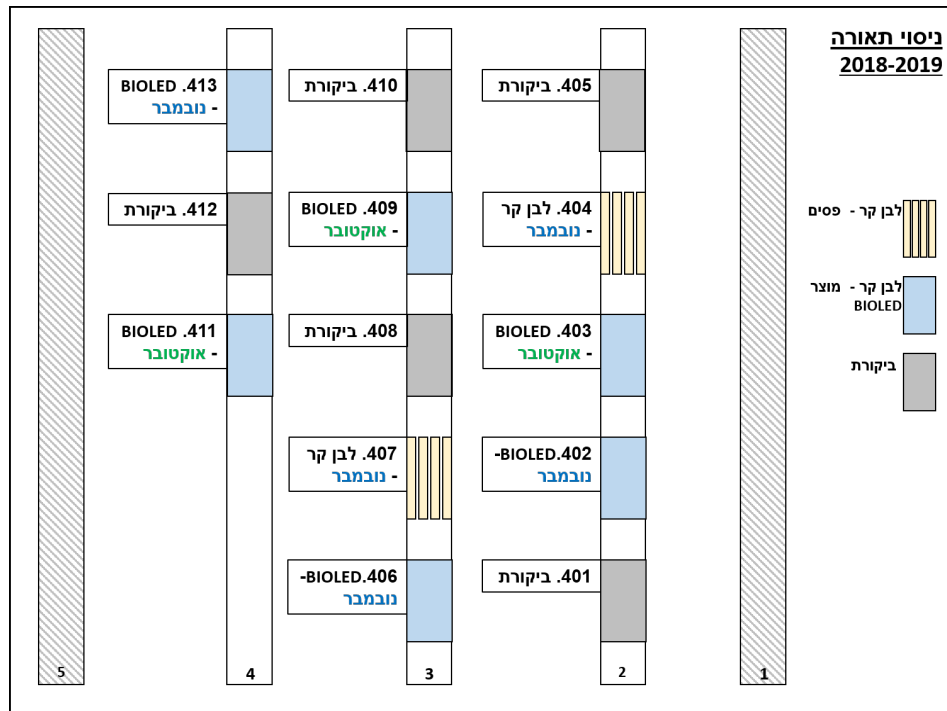
## יבול

בעונה זו היו בעיות הגנת הצומח שבעקבותן נעקרו לא מעט צמחים מחלקות הניסוי. על כן, נתוני היבול נורמלו לפי מספר הצמחים שהיו בכל חלקה של הניסוי. מבחינת היבול העונתי המצטבר, בחלקות BIOLED שהוארו החל מאוקטובר התקבלה תוספת יבול בשיעור של 25% בממוצע. בחלקות שהוארו החל מנובמבר היתה תוספת גם כן, אך בשיעור נמוך יותר, של 11% (איור 7). כפי שצויין לעיל, נתוני היבול של האביב הופרדו משני צידי הערוגות לצד מזרח ומערב (איור 8). כפי שניתן לראות בגרף של היבול לפי משקל/צמח (איור 8A), בשני טיפולי התאורה היבול בצד המערבי היה גבוה יותר מאשר בצד המזרחי של אותו טיפול. הפרשים אלו, בין הצדדים של אותו טיפול תאורה היו בגובה של 25-35%. לעומת זאת, בביקורת לא היו הבדלים ניכרים בין הצדדים. השוואה בין היבול בצד מערב של טיפולי התאורה לביקורת (ערכים מספריים מצויינים על גבי הגרפים, איור 8A), מראה כי בטיפול BIOLED-O התקבלה עלייה של כ- 50% ביבול האביבי, וב- BIOLED-N התקבלה עלייה של 25%. תמונה דומה מאד התקבלה עבור היבול מבחינת מספר פירות לצמח (איור 8B), כאשר בצד מערב היו תוספות של 50% ו- 30% ב- BIOLED-O ו- BIOLED-N, בהתאמה, לעומת הביקורת. ממצאים אלו נמצאים בהתאמה לנתוני החנטה שנאספו בחורף (איורים 5 ו- 6), ומעידים על כך שתוספות הפרי בחלקות התאורה מקורן בשורות המערביות של הערוגות. מבחינת סך היבול (מזרח ומערב יחד) באביב, התקבלה תוספת של 36% בטיפול התאורה BIOLED-O.

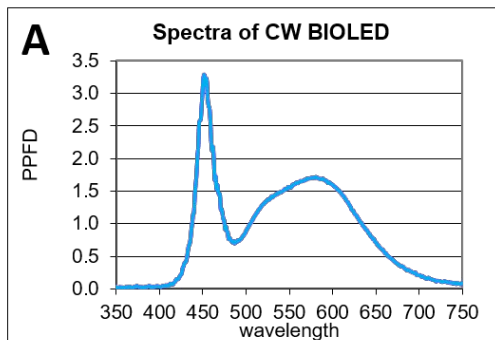
ותוספת של 16% בטיפול BIOLED-N. איור 9 מציג את התפלגות משקל הפרי בקטיפים השונים לאורך העונה. בחלק זה התוצאות מוצגות עבור שני צידי הערוגה של כל טיפול ביחד. בחלק ממועדי הקטיפה הפרי היה מעט גדול יותר בטיפול התאורה (דוג' ב- 12.2.19 באיור 9A), אולם בהסתכלות על כל העונה לא היתה מגמה קבועה בין הביקורת לטיפול ה-BIOLED.

## סיכום

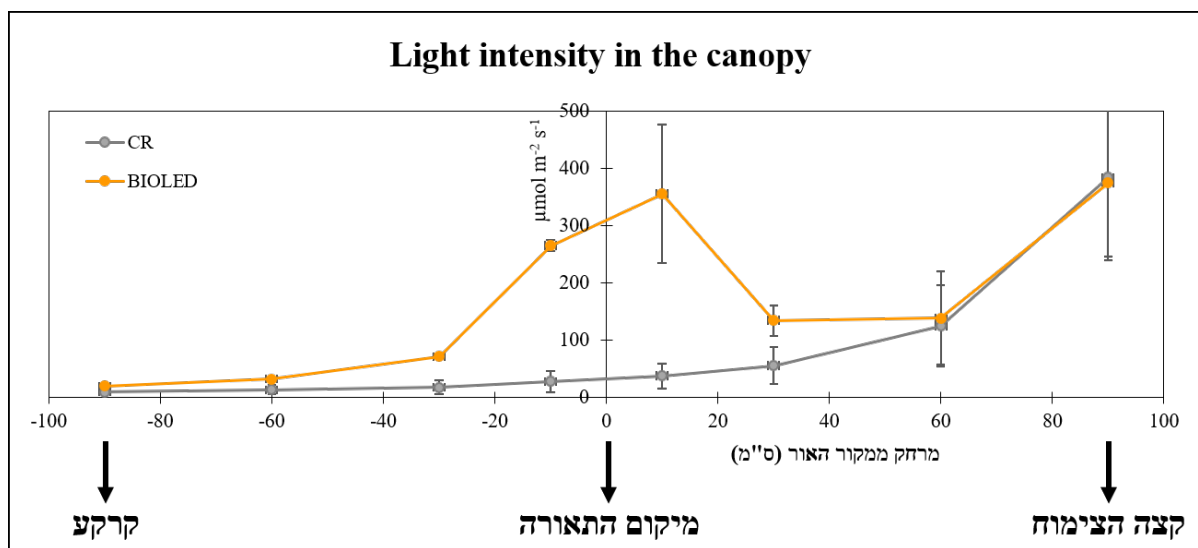
לתוספת יבול של פרי איכותי בתקופת האביב ישנה חשיבות כלכלית רבה; מזה שנים מורגש מחסור בפלפל איכותי בחודשים מרץ עד מאי, דבר שמתבטא בעליית מחירים ולחילופין יבוא של פרי. לאור התוצאות החיוביות של תוספת היבול עם הנורות המסחריות מסוג BIOLED [אור לבן קר (CW)], בעונה הבאה (2019-20) נמשיך את העבודה עם מנורות אלו. בעונה זו מצאנו כי תוספת היבול בחלקות התאורה נבעה מהשורות המערביות של הערוגות. דבר זה עשוי להיות קשור לתנאי הטמפרטורה והקרינה (הטבעיים) השונים בשורות משני צידי (מזרח/מערב) של הערוגות. לאור תוצאות אלו, בעונה הבאה נבצע בדיקות טמפי' נוף וקרינה בצד מזרח ומערב. כמו כן, נבצע מעקב רציף של החנטה פר צמח על מנת ללמוד יותר לעומק את השפעתה של תאורה תוך-נופית על החנטה בשלבי ההתפתחות השונים לאורך כל עונת הגידול.



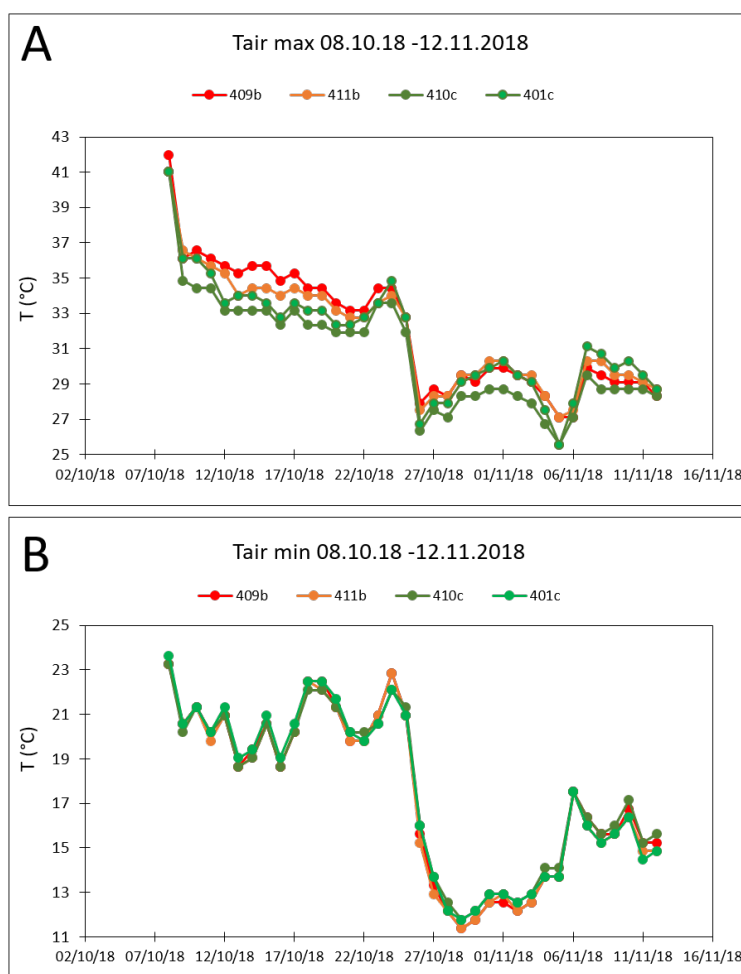
איור 1. מפת הניסוי 2018-2019.



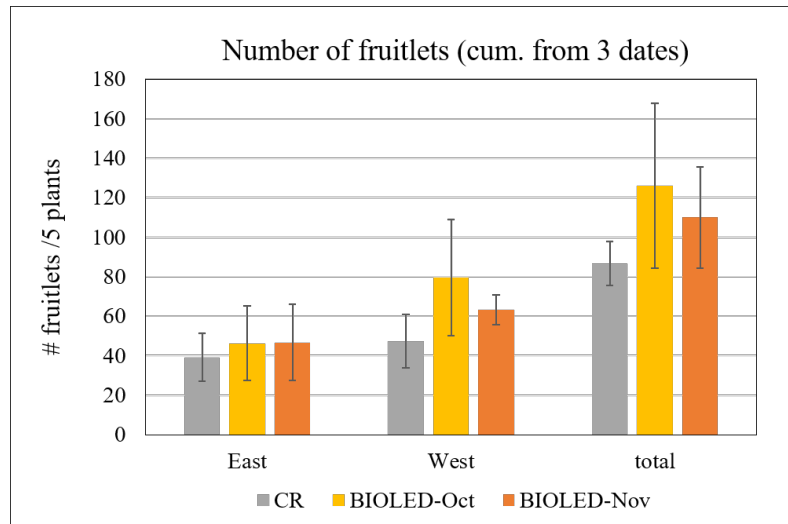
איור 2. מוצר התאורה BIOLED. (A) איפיון ספקטרלי של נורות BIOLED מסוג אור לבן קר (cool white, CW). (B) התקנת התאורה בשטח, מבט על (ספטמבר 2018). (C) מבט צד של חיבור יחידות ה-BIOLED לגב לבן במרכז הערוגה (אוקטובר 2018). (D) מבט צד על התאורה בתוך הנוף באביב (מרץ 2019).



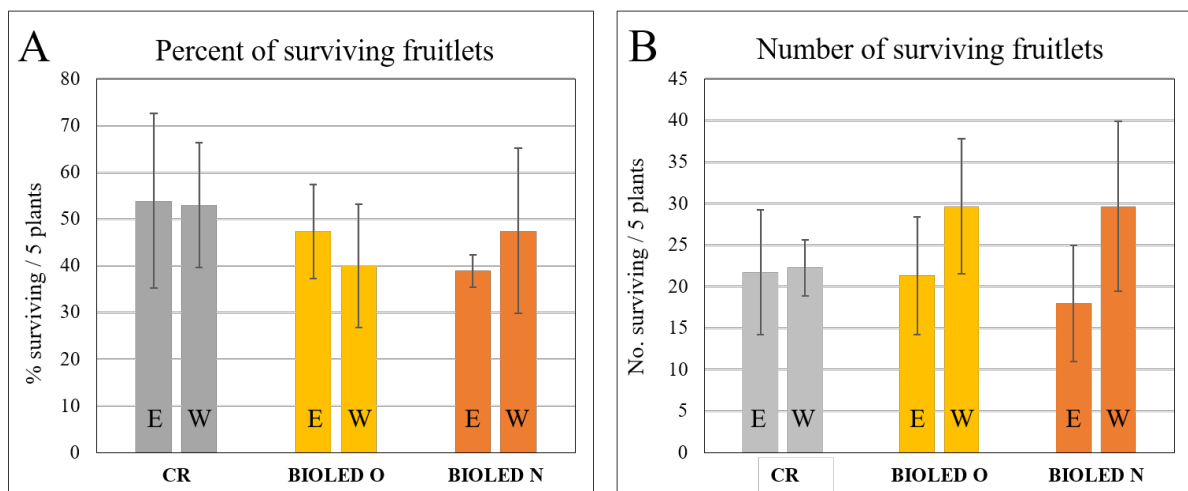
**איור 3. עוצמת האור בנוף הפנימי.** מדידות עוצמת האור בוצעו מגובה הקרקע (90') ועד לגובה קצה הצימוח (90'), כאשר מיקום התאורה הוגדר כ-0 ס"מ. העוצמות הנן סכומים של העוצמה שנמדדה עם הגלאי בכיוון הקרקע והעוצמה שנמדדה עם הגלאי בכיוון השמיים. הערכים מייצגים ממוצעים ± סטיית תקן מ-3 חלקות ביקורת ו-3 חלקות מוארות עם מוצר ה-BIOLED.



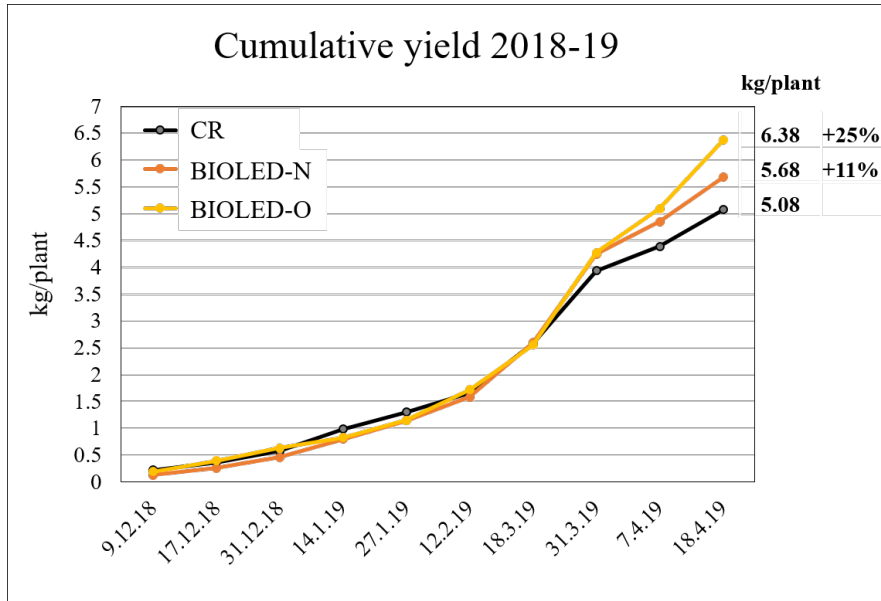
**איור 4. טמפרטורת האוויר עם או בלי תאורה תוך-נופית.** טמפ' יומית מקסימלית (A) ומינימלית (B) במרחק של 10-20 ס"מ מעל גופי התאורה – (קו כתום ואדום, נתונים שנאספו בשתי חלקות תאורה שונות) ובחלקות ביקורת באותו הגובה – (קווים ירוקים, נאספו בשתי חלקות ביקורת). הנתונים נאספו באמצעות מיקולוגים מ-8.10.18 ועד 12.11.18.



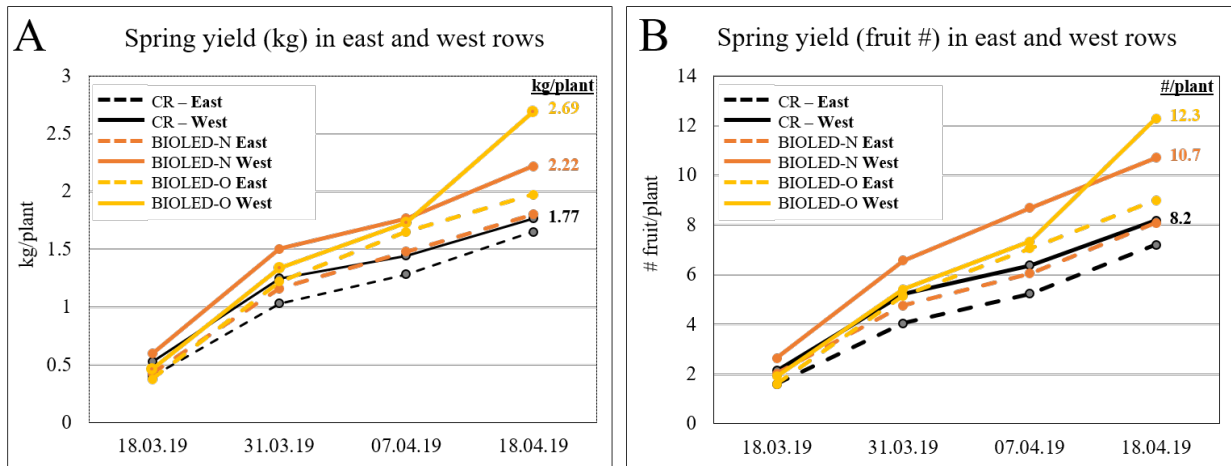
**איור 5.** שיעור החנטה בחורף בחלקות עם/בלי תאורה. בשלושה מועדים - (20.2.19, 21.1.19, 1.1.19) סומנו סך החנטים בבלוק של 5 צמחים בחלקות ביקורת (CR) וחלקות מוארות עם BIOLED. הנתונים נאספו בנפרד לשורות במזרח (East) ובמערב (West). לשני סוגי טיפולי התאורה (Oct., Nov.) היו 3 חזרות בכל צד (East/West), ולביקורת היו 5 חזרות בכל צד. בגרף מוצגים הסכומים של מספר החנטים שסומנו בשלושת המועדים יחד.



**איור 6.** שרידות חנטים עם/בלי תאורה מוספת בתוך הנוף. (A) אחוז החנטים ששרדו (מתוך הסך שסומנו - ראה איור 5) בביקורת ללא תאורה (CR) ובטיפולי התאורה BIOLED-O, BIOLED-N, בהתאמה אוקטובר ונובמבר). (B) מספר החנטים ששרדו בשלושת הטיפולים. הנתונים מוצגים בנפרד לשורות במזרח (E) ובמערב (W).

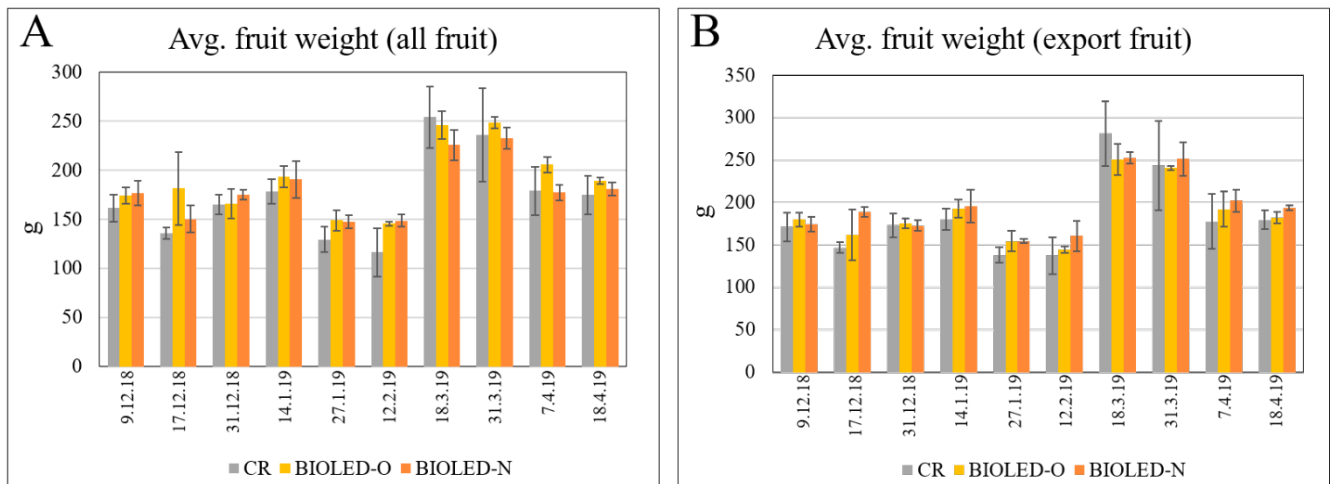


איור 7. יבול מצטבר לאורך כל העונה. ערכי היבול מייצגים יבול ממוצע של 5 חלקות ביקורת, 3 חלקות תאורה BIOLED-N ו-3 חלקות תאורה BIOLED-O.



איור 8. היבול האביבי. (A) יבול (ק"ג/צמח) מצטבר באביב בביקורת (CR, ללא תאורה, ממוצע של 5 חלקות), ובטיפול התאורה BIOLED-N, BIOLED-O (ממוצע של 3 חלקות לכל טיפול). לכל טיפול מוצג היבול בנפרד עבור צד מזרח (קווים מקווקוים) וצד מערב (קווים רציפים). (B) יבול (מספר פירות/צמח) מצטבר באביב.





**איור 9. משקל פרי ממוצע לאורך העונה. (A) משקל פרי (סך הפרי) ממוצע ( $\pm$ SD) בחלקות ביקורת (CR) ובטיפולי התאורה BIOLED-O, BIOLED-N בקטיפים השונים לאורך העונה. (B) משקל פרי (פרי באיכות ייצוא) ממוצע בטיפולים השונים לאורך העונה.**

## ספרות מצוטטת

1. 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.
2. Singh D, Basu C, Meinhardt-Wollweber M, Roth B. LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renew Sustain Energy Rev.* 2015;49:139–47.
3. 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.
4. Jokinen K, Särkkä LE, Näkkilä J. Improving sweet pepper productivity by LED interlighting. *Acta Hortic.* 2012;956:59–66.
5. 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.
6. 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.
7. Gómez C, Mitchell CA. Supplemental lighting for greenhouse-grown tomatoes: Intracanopy LED Towers vs. overhead HPS lamps. *Acta Hortic.* 2014;1037:855–62.
8. 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. Joshi NC, 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 Hortic (Amsterdam).* 2019;250(February):81–8.
10. Ratner K, Joshi NC, 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.* 2020;1268:19–26.

11. 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.