

אנרגיה בחממות - ייעול השימוש והקטנת הצריכה Energy in greenhouses – usage improvement and reduced consumption

אברהם ארבל, מרדכי ברק, אלכסנדר שקליאר, גיא לידור – המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי
יגאל אלעד – המכון להגנת הצומח, מינהל המחקר החקלאי
מירון סופר, חנה יחזקאלי, שבתאי כהן, דוד שמואלי, אלק סולפוי, ליאנה גנות – מו"פ דרום, חוות הבשור

תקציר

נוכח המגמה של עליית מחירי הדלק שאנו עדים לה לאחרונה, עלות חימום חממות הפכה להיות מרכיב עיקרי בתשומות ובעקבות זאת, רמת הרווחיות קטנה מאוד. מגמה זאת אינה מקרית ומשקפת נכונה את מצב עתודות האנרגיה העולמי מחד גיסא, ואת המודעות ההולכת וגוברת לכל בעיות זיהום סביבה והתחממות כדור הארץ מאידך גיסא. משמעות הדברים היא שהמצב ילך ויחמיר ויש לעודד פיתוח שיטות לייעול השימוש והיסכון באנרגיה. לחות גבוהה ובעיקר מים חופשיים על העלווה מהווים כר נוח להתפתחות מחלות כגון עובש אפור, כימשון וכשותית. מחלות אלה מסכות נזקים רבים הבאים לידי ביטוי בהקטנת היבול ופגיעה חמורה באיכות המוצר. הדברה כימית מוגבלת משלוש סיבות עיקריות: גורמי המחלה מפתחים עמידות. כדוגמה לכך, כושר העמידות של מחוללי העובש אפור והכימשון לחלק ניכר מחומרי ההדברה תועד במדינות רבות; איסור השימוש בחלק מחומרי ההדברה ע"י הרשויות; והדרישות לתוצרת קטופה ללא שאריות חומרי הדברה. החלפת אוויר החממה באוויר חיצוני הנה השיטה המקובלת כיום להורדת הלחות ולהקטנת הסיכון בהופעת מים חופשיים על העלווה. שיטה זו הינה בזבזנית מאוד מבחינה אנרגטית.

המכלול הכולל המוצע מבוסס על שני המרכיבים העיקריים הבאים: (1) סגירה ובידוד החממה – סגירה מוחלטת של החממה למניעת החלפות אוויר עם הסביבה ובידוד החממה באמצעות תקרה תרמית ו/או כיסוי כפול ומנופח (2) מערכת משולבת לחימום וייבוש האוויר בחממה.

במהלך השנה, תוכננה והותקנה מערכת משולבת לחימום וייבוש. מערכת זו, הותקנה בחממת פלפל שבחוות הבשור שצוידה בתקרה תרמית אטומה, מערכת חימום מקובלת, מערכת אוורור מאולץ, מערכת בקרה ומערכת מדידות מקיפה. חממה זו תופעלה כמכלול בחמישה משטרי הפעלה עיקריים: במתכונת המוצעת וחימום בשיטה המקובלת, עם וללא תקרה תרמית ועם וללא אוורור לילי. על פי התוצאות שהתקבלו, ניתן להצביע על כך שהמערכת פעלה בהתאם לציפיות תוך כדי שמירה על טמפרטורה רצויה (18 מ"צ) ולחות יחסית רצויה (80% ואף מתחת לכך) והיסכון האנרגטי נאמד כדי 80% בהשוואה לחימום קונבנציונאלי ללא תקרה תרמית ועם אוורור לילי, וכדי 60% בהשוואה לחימום קונבנציונאלי עם תקרה תרמית ועם אוורור לילי.

מבוא ותיאור הבעיה

תנאי האקלים הרצויים באים לידי ביטוי ברמת קרינה, טמפרטורת עלווה, רמת דיוח, רמת פחמן דו חמצני ועלווה יבשה. מטעמי נוחיות, טמפרטורת עלווה ורמת דיוח רצויים מומרים לערכים שווים ערך של טמפרטורה ולחות יחסית של האוויר בסביבה הקרובה לעלווה. הווה אומר, בקרת טמפרטורה ולחות אוויר בחממה דרושה כדי להבטיח טמפרטורת עלווה וקצב דיוח ברמות הרצויות מחד, ומטעמי בריאות הצמח לשמירת עלווה יבשה, מאידך. לצורך הדגמה, במרבית החממות המחוממות טמפרטורת העלווה הנהוגה של כ-18 מ"צ ודיוח ברמה של כ-40 גרם למ"ר לשעה. הנחת היסוד של מרבית העבודות הדנות בבקרת לחות בחממה, הנה שמערכות יבוש ככלל אינן בשימוש. אי לכך, בקרת הלחות בחממה מתקבלת כתוצאה משילוב של חימום ואוורור. השיקולים המנחים את תהליך הבקרה, החל ממשק גידול וכלה בתרומה הכלכלית.

ככלל, לחות גבוהה, טמפרטורה גבוהה (המתאימה לגידול) ובתוספת מים חופשיים על העלווה הנם תנאים מיטביים להתפרצות והתפשטות מחלות חיידקיות ופטרייתיות כגון עובש אפור, כימשון וכשותית. בתנאים אלה, קצב התפשטותם של המחלות הנ"ל מהיר מאוד. מחלות אלה מסכות נזקים חמורים למרבית הגידולים החקלאיים, הבאים לידי ביטוי בהקטנת יבולים ופגיעה חמורה באיכותם. מתוך בחינת מחזור התפתחות גורמי המחלות הנ"ל נראה שעבור מרביתן קיים שלב של נביטה (של הנבגים) או חדירה (של החיידק) לצמח. תהליך זה מתאפיין בכך שהוא מחייב מים חופשיים על העלווה ומתרחש בתחום רחב של טמפרטורות. הווה אומר, מניעת התפתחות המחלות מותנה בשמירה על עלווה יבשה בעוד ללחות היחסית השוררת חשיבות פחותה. בפלפל, בצד מחלת העובש האפור מופיעה מחלה חשובה שהינה הקימחונית הנגרמת על ידי הפטרייה *Leveillula taurica*. המחלה מתקיימת בתנאי לחות בינונית וגבוהה המצויה בחלקות פלפל אך נביטת הנבגים וההדבקה מתרחשים בתנאי לחות גבוהה. על רקע זה, השיטות המקובלות כיום לפתרון הבעיה, מבוססות על העיקרון של מניעת תנאים הגורמים להתפרצות והתפשטות המחלות הנ"ל. הווה אומר, הורדת הלחות בחממה ובמיוחד מניעת הרטבת עלווה:

עיבוי על פני הכיסוי החממה – כיסוי החממה מהווה משטח קר ולכן מתעבים אדי המים על פניו. זאת, עקב היותו בטמפרטורת ביניים בין זו של החממה לזו של הסביבה. המים שהתעבו זולגים לכיוון מרזבים פנימיים ומשם נאספים ומורחקים.

אוורור החממה – אויר החממה מוחלף באוויר חיצוני קר ויבש.

שילוב של עיבוי על פני הכיסוי ואוורור החממה – מבחינה מעשית, המגדלים מיישמים את שתי השיטות המתוארות למעלה במשולב.

הצורך בפתרונות חלופיים נובע מכך שהפתרונות המקובלים כיום גורמים לבזבז ניכר מבחינה אנרגטית. כתוצאה מכך ונוכח המגמה של עליית מחירי הדלק שאנו עדים לה לאחרונה, עלות חימום חממות הפכה להיות מרכיב עיקרי בתשומות ובעקבות זאת, רמת הרווחיות קטנה מאוד. במגמה למנוע בזבז זה וכמוצע בעבודה זו, הפתרון המתחייב מתבסס על העקרונות הבאים: (1) שמירה על חממה סגורה, (2) בידוד החממה ככל שניתן ו- (3) עיבוי באופן מבוקר מלוא ספיקת אדי המים שמקורם בצמחים ובקרקע, תוך כדי שמירה על התנאים הרצויים.

מטרות העבודה

מטרות העבודה שהוצבו לשנה זו הן: תכנון מפורט והתקנת מערכת משולבת לחימום וייבוש חממות, בחינת ביצועי המערכת המשולבת בהשוואה לתכנון, אפיון ביצועים של חימום חממות במתכונת המוצעת, אפיון שטף האידוי של הצמחיה כבסיס לתכנון ואפיון החיסכון האנרגטי המתקבל.

שיטות וחומרים

במהלך השנה האחרונה, תוכננה והותקנה מערכת משולבת לחימום וייבוש, על ידי חברת קירור חשמלי מישה בע"מ. מערכת זו, הותקנה בחממת פלפל שבחוות הבשור שצוידה בתקרה תרמית אטומה, מערכת חימום מקובלת, מערכת אוורור מאולץ, מערכת בקרה ומערכת מדידות מקיפה. חממה זו תופעלה כמכלול בחמישה משטרי הפעלה עיקריים: במתכונת המוצעת לחימום בשיטה המקובלת, עם וללא תקרה תרמית ועם וללא אוורור לילי.

גידול – פלפל מזן ורגסה (קצ"ט), נשתל בתאריך 19-9-2008 ובהדליה ספרדית.

חממה – בעלת שישה מפתחים ורוחב כולל של 45 מ' (6*7.5), שישה שדות ומרפסת (בצד הדרומי) ואורך כולל של 26 מ' (6*4+2) וגובה מרזב של 3.4 מ'.

תקרה תרמית אטומה – הותקנה על ידי חברת סולי, על פי המתכונת הבאה: תקרה תרמית "נושמת ורפלקטיבית" (תוצר LS דגם XLS A/A) ובתוספת (מעל) יריעת פוליאית'לן בעובי של 0.04 מ"מ.

מערכת אוורור – החממה צוידה במערכות אוורור טבעי ומאולץ על פי הפירוט הבא:

- **אוורור טבעי** – באמצעות ארבעת הוילונות הממוקמים בארבעת צידי החממה
- **אוורור מאולץ** – באמצעות חמישה מאווררים (48") כאשר שלושה מתוכם (1, 3, ו- 5) מופעלים באמצעות הפעל/הפסק והשניים האחרים באמצעות משנה תדר.

מערכת חימום קונבנציונאלית – כנהוג כיום, מבוססת על צנרת מים חמים המוזנים מתנור הממוקם מחוץ לחממה, צנרת חלוקה וצינורות חימום בצורת U הממוקמים בשבילים.

מערכת משולבת לחימום וייבוש – תוכננה על פי המפרט הבא: תנאים רצויים – טמפרטורה 18 מ"צ ולחות יחסית של 80%, שטף אידוי של 40 ק"ג לשעה ושטף חימום של 120 קו"ש. המערכת הותקנה במרכז החממה.

מסחררים – הותקנו ארבעה מסחררים.

מערכת מדידות – מערכת המדידות שהותקנה כללה:

- **תאים מאווררים למדידת טמפרטורות לה ויבש** – תאים אלה מוקמו בשלושה עמודות (עמודות 1 שבמרכז הגמלון הרביעי (ספירה מהצד המערבי) של החממה, 2 המפתח החמישי ו- 3 המפתח השישי - המזרחי) ובארבעה גבהים (0.3, 1.1, 1.9 ו- 2.9 מ'), לצורך אפיון רמת אחידות של תנאי האקלים המתקבלים במשטרי הפעלה השונים.
- **טמפרטורת עלווה** - במקביל לעמודות 2 ו- 3 הוצבו שני תרמו-כפלים למדידת טמפרטורת עלווה בשלושה גבהים: עלים תחתונים, אמצע ועליונים (בכפוף לצמיחת הגידול).
- **טמפרטורות קרקע** – הוצבו שלושה תרמו-כפלים למדידת טמפרטורת קרקע בשלושה עומקים 5, 10 ו- 15 ס"מ.
- **טמפרטורת מים חמים** – הוצבו שני תרמו-כפלים למדידת טמפרטורת המים החמים בכניסה וביציאה מהחממה אשר מוקמו בצנרת החלוקה.
- **מד ספיקת מים חמים** – הממוקם בכניסה לחממה.

- **מדי ספיקת מי עיבוי** – למדידת ספיקת מי העיבוי של המערכת המשולבת, הותקנו שני מדי ספיקה אחד לכל צד (צפוני ודרומי). כמו כן, מונה מים שהותקן על קו הניקוז מהחממה ונרשם אחד ליום.
 - **מדי קרינה** – הוצבו שני מדי קרינה למדידת קרינת השמש וקרינת תרמית.
 - **תחנה מטאורולוגית** – שמוקמה מחוץ לחממה ואשר כללה: תא מאוורר למדידת טמפרטורות יבש ולח, שני מדי קרינה למדידת קרינת השמש וקרינת תרמית, מד מהירות רוח ומד כיוון רוח.
- נתונים אלה נאספו, עובדו ונאגרו אחת ל- 10 דקות, על ידי אוסף נתונים ושודרו למחשב באמצעות מערכת סולארית, אחת ליממה, לעיבוד נוסף.
- משטרי הפעלה** – במשך כל תקופת הגידול ובמהלך שעות היום, החממה תופעלה באופן ידני באמצעות פתיחת כל ארבעת הוילונות (אוורור טבעי). לצורך זה, שעות היום הוגדרו כמחצית השעה לאחר הזריחה עד ל- כמחצית השעה לפני השקיעה. לעומת זאת, במהלך שעות הלילה החממה תופעלה באופן מבוקר ובמשטרים העיקריים הבאים:
- **מתכונת מוצעת** – חממה סגורה, תקרה תרמית פרושה ומערכת משולבת לחימום וייבוש המוצעת.
 - **ביקורת א** – וילון צפוני פתוח כ- 10 ס"מ, תקרה תרמית פרושה, חימום קונבנציונאלי ואוורור מאולץ (באמצעות שני המאווררים המופעלים על ידי משנה התדר) לשמירה על הלחות הרצויה.
 - **ביקורת ב** – וילון צפוני פתוח כ- 10 ס"מ, ללא תקרה תרמית, חימום קונבנציונאלי ואוורור מאולץ (בדומה לביקורת א).
 - **ביקורת ג** – חממה סגורה, תקרה תרמית פרושה, חימום קונבנציונאלי וללא אוורור.
 - **ביקורת ד** – חממה סגורה, ללא תקרה תרמית, חימום קונבנציונאלי וללא אוורור.
- בנוסף לכך, החממה תופעלה במשטרי הפעלה הבאים:
- **מתכונת מוצעת בתוספת מסחררים** – לצורך בחינת התרומה השולית באשר לרמת האחידות.
 - **מתכונת מוצעת בתוספת חימום קונבנציונאלי** – מהטעם שקיימות חממות המצוידות במערכת חימום קונבנציונאלית וניתן להסתפק רק בתוספת של מערכת הייבוש.
 - **מתכונת מוצעת וללא תקרה תרמית** – לצורכי השוואה.
- מערכות מעקב, שליטה ובקרה** – מעבר לכך ולצורך הפעלת החממה במשטרים השונים, הותקנו מערכות מעקב, שליטה ובקרה הבאים:
- **מצלמה** – הותקנה מצלמה אינטרנטית עם תאורה מתאימה לצורך מעקב שותף בעיקר באשר למצב החממה בכלל ומצב יובש העלים בפרט.
 - **צמד ברזים ידניים** – להפניית המים החמים למערכת חימום הקונבנציונאלית או למערכת המשולבת.
 - **שני מדי טמפרטורה** – הממוקמים בחממה ולצורך הפעלת המבער ומשאבת הסחרור של התנור, לחימום בשיטה הקונבנציונאלית.
 - **מד לחות** – להפעלת מערכת הייבוש (מדחס) שמוקם בקרבת התא המאוורר התחתון של עמודה 1.
 - **מד טמפרטורה** – לחימום באמצעות המערכת המשולבת ומוקם בכניסת האוויר אליה.
 - **משאבת לחץ** – אשר הופעלה ידנית על מנת לספק את הלחץ הרצוי כאשר החממה תופעלה באמצעות המערכת המשולבת.
 - **בקרת לחות** – לצורך בקרת הלחות במשטרי הפעלה: ביקורת א וביקורת ב, בהתאם לטמפרטורת יבש ולח (של התא המאוורר הממוקם באמצע הנוף של עמודה 1), חושבה הלחות היחסית באמצעות אוסף הנתונים. כמו כן, אוסף הנתונים תוכנת לשמש גם כמערכת בקרה המבוססת על האלגוריתם PI ע"פ לחות יחסית, לשליטה על התדר החשמלי (לצורך וויסות ספיקת האוויר המוחלף ובאמצעות משנה תדר) שהמאווררים הופעלו.

תוצאות ודיון

הנתונים שנאספו עובדו על בסיס יומי (מצהרי היום עד לצהרי היום שלמחרת). עיבוד זה כלל: הכנת גרפים על כל המשתנים השונים ובחתיכים השונים וחישובים של ערכים מצטברים יומיים (אנרגיה – חשמלית וחום, וספיקת מים

מעובים) ושעתיים (ממוצע). בנוסף לכך, חושב מקדם מעבר חום האקוויוולנטי ממוצע (צריכת אנרגיה כוללת הלילית חלקי שעות מעלה של הפרש טמפרטורות בין פנים וחוץ, ליחידת שטח מעטפת) של החממה. כמצוין, החממה תופעלה במרבית העונה במתכונת המוצעת. כתוצאה מכך, ספיקת מי העיבוי היומית הייתה בתחום 300 – 700 ק"ג וספיקת מי העיבוי ממוצעת שעתיית, בתחום 25 – 40 ק"ג, כמתואר באיור 1. על פי התוצאות ניתן להצביע על מגמת עלייה המיוחסת להתפתחות עלוות הגידול. כמו כן, בתום עונת החימום ספיקה מי העיבוי התקרבה לסף של 40 ק"ג לשעה. סף זה שימש לצורכי תכנון המערכת המשולבת ועל פי תוצאה זה ניתן להצביע על כך שביצועי המערכת תואמים את התכנון. חשוב להדגיש, תוצאות אלה התקבלו במגבלות של מבנה החממה (כמצוין למעלה), ללא חיפוי קרקע, והפלפל נשתל מאוחר. אי לכך, מומלץ להמשיך ולבחון משתנה זה בהתאם לכך וגידולים נוספים.

החיסכון האנרגטי המתקבל משתקף מתוך תוצאות מקדמי מעבר החום האקוויוולנטיים במשטרי ההפעלה השונים, כמצוין בטבלה 1 ובהתאם לפירוט הבא:

מתכונת מוצעת – בימים בהם טמפרטורת הסביבה לא ירדה מתחת לכדי 11 מ"צ, מקדם זה עמד כדי 1 (בשל האנרגיה החשמלית המושקעת בתהליך הייבוש) ובתחשיב עונתי, מקדם זה עמד על כ- 2.2. תוצאה דומה התקבלה כאשר מערכת הייבוש הופעלה בשילוב עם חימום קונבנציונאלי. לעומת זאת, בהפעלת המערכת המשולבת ללא תקרה תרמית מקדם זה גדל לערכים הדומים לאלה של ביקורות א ו- ד.

ביקורת א – משטר הפעלה זה משמש לצורכי אפיון התרומה השולית של המערכת המשולבת. בתנאים אלה, מקדם מעבר החום (ע"פ טמפרטורה ממוצעת) של 7.5 וואט למ"ר למ"צ בהשוואה ל- 2.2 באמצעות המערכת המשולבת. הווה אומר, חיסכון קרוב ל- 70% בצריכת האנרגיה המיוחסת ישירות למערכת המשולבת. כמו כן, מתוך השוואה של ביקורת א למתכונת המוצעת וללא תקרה תרמית מתקבלים מקדמי מעבר דומים. נדגיש, מקדם מעבר חום יומי זה עשוי להיות גבוהה ככול שטמפרטורת סביבה גבוהה יותר וצריכת החום העיקרית נובעת מהצורך בהרחקת עודפי הלחות. כמצוין בטבלה 1, מקדם זה עומד על 5.8 תוך התייחסות ללילות קרים בלבד. בהתייחס לכך ומתוך השוואה לביקורת ב, ניתן ליחס לתקרה התרמית חסכון של כ- 60%.

ביקורת ב – משטר הפעלה זה משמש לצורכי אפיון התרומה השולית של המתכונת המוצעת הכוללת: מכלול של חממה סגורה, תקרה תרמית ומערכת משולבת. בתנאים אלה, מקדם מעבר החום (ע"פ טמפרטורה ממוצעת) של 11.4 וואט למ"ר למ"צ בהשוואה ל- 2.2 באמצעות המתכונת המוצעת. הווה אומר, חיסכון של יותר מ- 80% בצריכת האנרגיה המיוחסת למתכונת המוצעת ותמורה משותפת של התקרה התרמית ושל המערכת המשולבת.

ביקורות ג ו- ד – בניגוד לביקורות א ו- ב, לא ניתן לערוך השוואה אנרגטית למתכונת המוצעת, בשל כך שביקורות אלה אינן מקנות את הלחות הרצויה והעלווה במרבית הזמן, רטובה. עם זאת, ניתן לציין שצריכת האנרגיה של ביקורת א דומה לזו של ביקורת ד. משמעות הדבר שהחיסכון בצריכת האנרגיה שהתקבלה כתוצאה מהתקרה התרמית, קרובה לבזבוז האנרגטי הנובע מהרחקת עודפי המים באמצעות אוורור החממה. כמו כן, מתוך השוואה של ביקורת ג לביקורת ד נראה שהתקרה התרמית מקנה חסכון אנרגטי של כ- 50%.

כמצוין, מקדמי מעבר חום אלה משתנים בין היתר כתלות בתנאי הסביבה הבאים לידי ביטוי בעננות, טמפרטורות ולחות. מאחר ובמרבית ימות החורף, החממה תופעלה במתכונת המוצעת ובשאר משטרי ההפעלה החממה תופעלה מספר ימים בודדים (בכל משטר), לא ניתן לערוך ניתוח סטטיסטי. עם זאת, המגמות העיקריות שהועלו הינן ברורות ותואמות את ניסיון העבר.

כמובן, קיימת חשיבות רבה לרמת האחידות בתנאי הגידול. לצורך הדגמה נבחר יום מייצג (2009-2-6), גובה הגידול עמד על כ- 1.3 מ (בלבד), המתאפיין בכך שלא הייתה דרישה לחימום כלל וכמתואר באיורים 2 ו- 3. באיור 2 מוצגות טמפרטורות (יבש – DBT) של עמודה 2. על פי התוצאות אלה, ניתן להצביע על כך שקיים פילוג טמפרטורה כלפי מעלה. ריבוד זה הינו אבן יסוד בגישה הכוללת המוצעת. בדומה לכך, באיור 3 מוצגות טמפרטורות בחתך גובה של 1.1 מ'. על פי תוצאות אלה ואחרות ניתן להראות שטמפרטורת השכבות התחתונה והעליונה אחידות ולעומת זאת קיים הבדל כדי מעלה אחת בין עמודות 1 ו- 2 (הזהות) לעמודה 3. לעומת זאת, ניתן להראות שטמפרטורת הלח הינה זהה בגבהים השונים ולאורך החממה. בכפוף לכך, ניתן להראות שהלחות היחסית במגמת ירידה כתלות בגובה מפני הקרע, כך שבשכבה התחתונה נשמרה לחות יחסית של 80% ובקרבת התקרה התרמית מתחת ל- 70%. יחד עם זאת, ניתן להראות שטמפרטורות העלווה הינן אחידות.

מתוך בחינת ימים המתאפיינים בדרישה לחימום וכאשר החימום במשטר הפעל/הפסק, ניתן להראות תופעות דומות אלא בריבוד מורחב, בעיקר מעל נוף הצמחייה. בתנאים אלה, ניתן להראות שחימום רציף או שימוש במסחררים שיפרו את רמת האחידות. כמובן, יישום שתי גישות אלה עשוי להבטיח רמת אחידות גבוהה עוד יותר. בנוסף לכך ולצורך חממות המצוידות במערכת חימום קונבנציונאלית, החממה תופעלה עם מערכת החימום הקונבנציונאלית והמערכת המשולבת לייבוש בלבד. על פי התוצאות נראה שמתקבלים תנאים אחידים. כמו כן, המערכת המשולבת נבחנה במשטר הפעלה ללא תקרה תרמית. על פי התוצאות שהתקבלו, ניתן להראות שרמת האחידות נשמרה.

בנוסף לכך, החממה תופעלה באמצעות מערכת החימום הקונבנציונאלית במספר משטרי הפעלה (כמצוין למעלה), לצורכי השוואה עם המתכונת המוצעת. על פי התוצאות שהתקבלו, ניתן להצביע על ממצא משותף לכל משטרי

הפעלה אלה בכך שטמפרטורות האוויר (יבש ולח) וטמפרטורות עלווה במגמת ירידה בהתאם לגובה. בנוסף לכך, ניתן להראות שמגמה זו קיימת גם בהתאם למרחק ממרכז החממה. כמו כן, הבדלים אלה גדלים ככול שצריכת החום גדלה. חשוב להדגיש, ריבוד זה הינו הפוך לזה שהתקבל באמצעות המערכת המוצעת. מבחינה זו, קיימת עדיפות למתכונת המוצעת כתוצאה מכך שהעלווה העליונה הינה העלווה החשובה בשל היותה הצעירה והפעילה ובהתאם לכך ניתן לבקר את הטמפרטורה הרצויה.

במקביל, נערך מעקב אחר התפתחות הגידול והופעת מחלות. ככלל, הגידול צמח באופן נמרץ בחממת הבדיקה בעונה זו, ונמנעו לחלוטין שתי התופעות פירות מעוותים ("פלפלים") ו"תקיעה". מחלות מוגברות לחות (כגון העובש האפור) לא היוו בעיה במהלך העונה ולא נמצאו ממצאים חריגים בנושא. כמן כן, לא הופיעה קימחונית משמעותית במהלך הגידול וזאת בעיקר בגלל טיפול נכון.

סיכום ומסקנות

במהלך השנה, תוכנן והותקן אב-טיפוס של המערכת המשולבת לחימום וייבוש. מערכת זו, הותקנה בחממת פלפל שבחוות הבשור אשר צוידה בתקרה תרמית אטומה, מערכת חימום מקובלת, מערכת אוורור מאולץ, מערכת בקרה ומערכת מדידות מקיפה. חממה זו תופעלה כמכלול במגוון רחב של משטרי הפעלה שהעיקריים בהם: במתכונת המוצעת וחימום בשיטה הקונבנציונאלית, עם וללא תקרה תרמית ועם וללא אוורור לילי. על פי התוצאות שהתקבלו, ניתן להצביע על המסקנות העיקריות הבאות:

1. המתכונת המוצעת פעלה על פי המתוכנן ללא דופי ואכן מקנה את התנאים הרצויים (טמפרטורה ולחות יחסית) וברמת אחידות טובה.
2. העלווה נשמרה יבשה במשך כל שעות הלילה.
3. ספיקת מי העיבוי לתכנון הינה כ- 40 ק"ג לשעה.
4. במרבית הלילות בהם טמפרטורת הסביבה לא ירדה מתחת לכ- 11 מ"צ, לא הייתה דרישה לחימום כלל, כאשר החממה תופעלה באמצעות המתכונת המוצעת.
5. המערכת המוצעת מקנה חיסכון אנרגטי מעבר ל- 60% בהשוואה לחימום הקונבנציונאלי עם תקרה תרמית ואוורור לילי.
6. המתכונת המוצעת מקנה חיסכון אנרגטי מעבר ל- 80% בהשוואה לחימום קונבנציונאלי ללא תקרה תרמית ואוורור לילי.
7. ניתן לשלב את המערכת המוצעת עם מערכת חימום קונבנציונאלית.

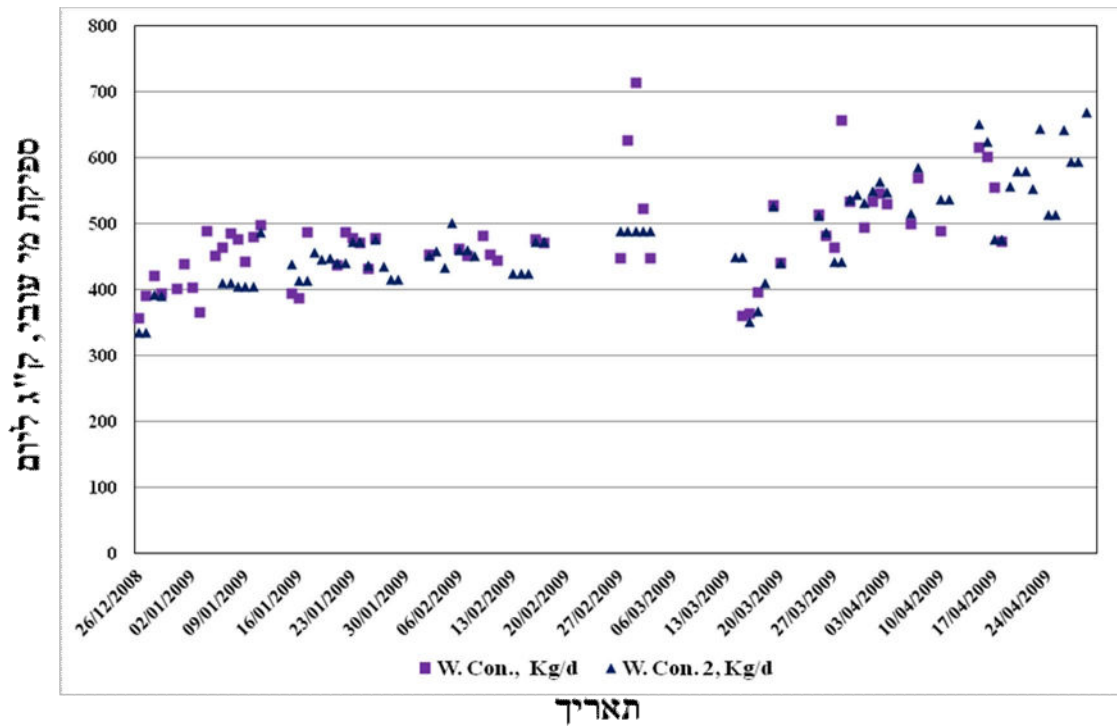
הבעת תודה

תודתנו נתונה לקרן הברון הירש – יק"א ולמו"פ דרום על מימון המחקר במשותף. כמו כן, לחברת קירור חשמלי מישה בע"מ על שנתמה למאמץ בעריכת תכנון מפורט והתקנת אב-טיפוס של המערכת המשולבת במחיר סמלי.

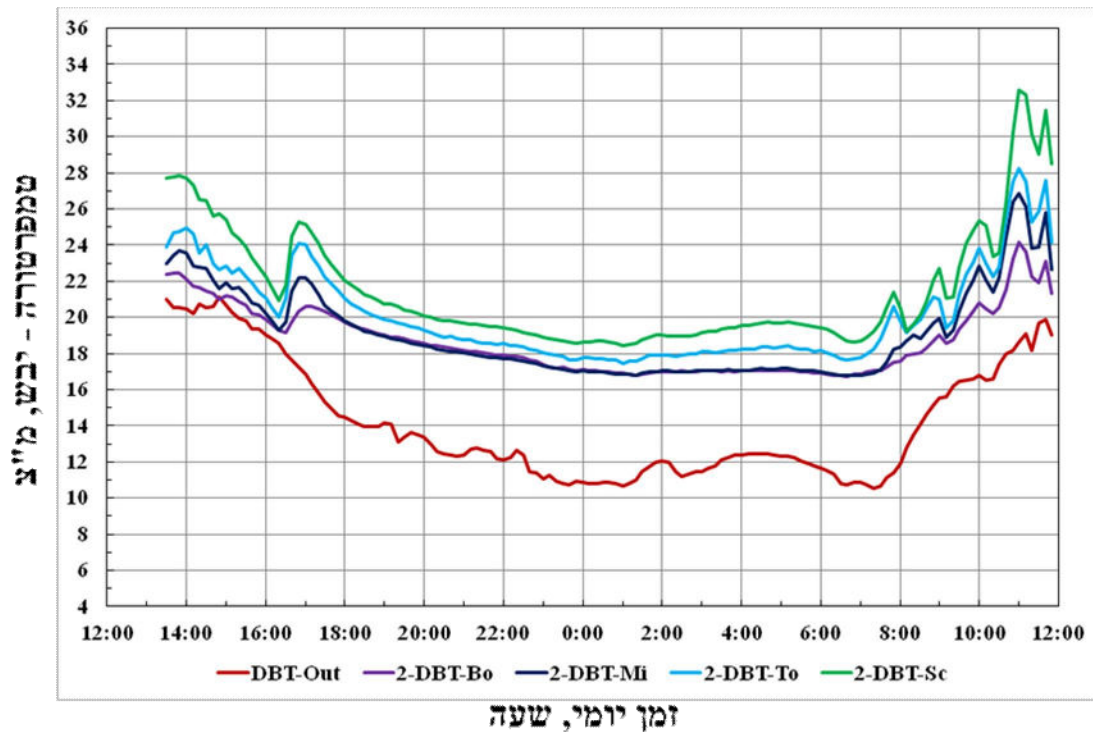
טבלה 1: מקדם מעבר חום אקוויוולנטי של החממה, כתלות במשטר ההפעלה והטמפרטורה המייצגת

טמפרטורת עמודה 2 ובגובה 0.3 מ'	טמפרטורת עמודה 2 ובגובה 1.9 מ'	טמפרטורת עמודה 2 ובגובה 1.9 מ'	טמפרטורה ממוצעת של כל העמודות ובכל הגבהים פרט לגובה 2.9 מ'
1.2	1.3	1.1	מתכונת מוצעת – אנרגית חום
2.2	2.4	2	מתכונת מוצעת – אנרגית כוללת חום וחשמל *
6.8	7.5	4.6	מתכונת מוצעת ללא תקרה תרמית
2.5	2.6	2.4	המערכת המשולבת הפועלת לייבוש בלבד בתוספת חימום קונבנציונאלי
7.5	7	7.3	ביקורת א
5.8	5.8	5.9	ביקורת א רק ימים קרים (מתחת ל- 12 מ"צ)
11.4	11.2	12.4	ביקורת ב
2.9	3	3	ביקורת ג
5.6	5.9	6	ביקורת ד

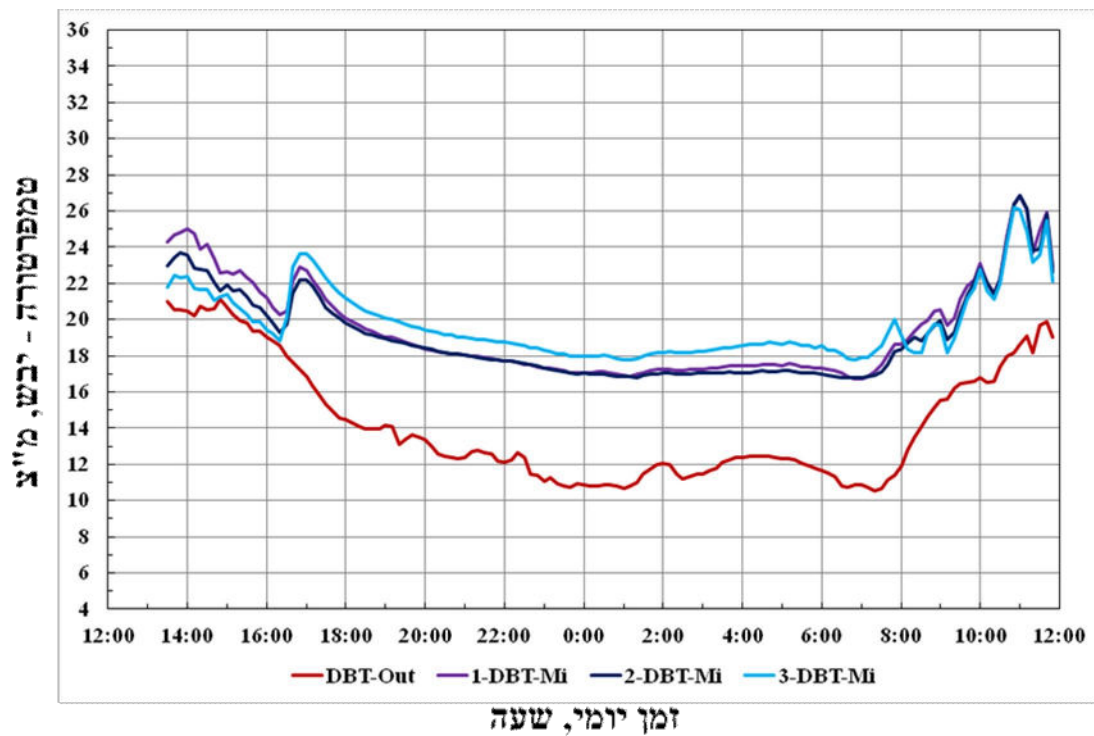
* בהנחה שהמערכת המשולבת פעלה באופן רציף במשך כל שעות ההפעלה



איור 1: ספיקת מי עיבוי יומית: W. Con. – מדוד באמצעות מדי הספיקה, ו-W. Con. 2 – על פי מונה מים



איור 2: טמפרטורת אוויר יבש עמודה 2 והסביבה מתאריך 6-2-2009: DBT-Out – סביבה, ובגבהים 2-DBT-Bo – 0.3 מ', 2-DBT-Mi – 1.1 מ', 2-DBT-To – 1.9 מ' ו-2-DBT-Sc – 2.9 מ'



איור 3: טמפרטורת אוויר יבש בגובה 1.1 מ' והסביבה מתאריך 6-2-2009 DBT-Out – סביבה, 1-DBT-Mi – עמודה 1, 3-DBT-Mi – עמודה 2 ו-3-DBT-Mi – עמודה 3