

;

## מערכת ערפול הדרגתית לצינון חממות

אברהם ארבל, מרדכי ברק, גיא לידור - המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי  
שבתאי כהן, דודו אלקיים, רבקה אופנבך, אבי אושרוביץ, דורית חשמונאי, ישראל צברי, רמי גולן - מו"פ ערבה  
תיכונה וצפונית

### תקציר

ענף החממות בארץ התבסס בעיקר על ייצוא תוצרת חקלאית לתקופת החורף בשל היתרון היחסי בהשוואה לאירופה והמהווה שוק יעד עיקרי. שוק זה מתאפיין ברמת דרישות גבוהה למוצרים איכותיים, מוצרים ללא שאריות חומרי הדברה והספקה סדירה. לאחרונה, שוק זה מוצף בתוצרת חקלאית עם כניסתן של מדינות דרום אירופה וצפון אפריקה המתחרות על אותו נתח שוק. כתוצאה מכך, רווחיות הגידול במגמת ירידה. הספקה סדירה של תוצרת חקלאית איכותית ובכל ימות השנה מבטיחה יתרון שיווקי ניכר למגדלים ועשויה להוות פתרון לכך. הספקה סדירה של תוצרת חקלאית מחייבת גידול וואו שתילה במהלך חודשי הקיץ, תקופה שבה עומס החום גדול בעקבות שילוב של שטף הקרינה וטמפרטורות הסביבה גבוהים בהשוואה לתקופת הגידול הנוכחית, חורפית בעיקרה. לצורך זה פותחה מערכת ערפול לצינון חממות. המערכת הותקנה בעונת 2008/9 בתחנת הניסויים יאיר בערבה בבית צמיחה בו נשתל פלפל. השנה הראשונה יוחדה בעיקר לבחינת ביצועים פיזיקאליים של המכלול המוצע הכולל מערכות אוורור, ערפול ובקרה. המערכת המוצעת תוכננה על פי התנאים הרצויים בחממה בצהרי היום של 28 מ"צ ולחות יחסית של 80%, תנאים מקומיים קיצוניים, בצהרי היום, והותקנה על פי המתכונת הבאה:

ערפול - לצורך הספקת מים הדרגתית, קווי פומיות הריסוס חולקו לשלושה קבוצות (שישית, שליש וחצי מכמות הפומיות). חלוקה זו עם הפעלת קווי ההספקה חלקית ולסירוגין תוך כדי שינויי לחץ בתחום המותר, מאפשרת שינוי הדרגתי של ספיקת המים שתענה על הצורך בספיקה נמוכה התחלתית, המתאימה לשעות הלילה והבוקר, והגדלתה בהתאם לעומסי החום במהלך שעות היום והלילה.

אוורור החממה - פתחי גג (לכניסת האוויר) ומאווררים המותקנים בדפנות. המאווררים חולקו לשתי קבוצות, כאשר אחת הקבוצות (קבוצה נשלטת) הופעלה באמצעות משנה תדר. ספיקת האוויר הרצויה מתקבלת באמצעות קביעת מספר קבוצות המאווררים המופעלים ובנוסף לכך וויסות התדר בקבוצה הנשלטת. בקרה - השליטה בתנאים הרצויים מתבצעת על ידי וויסות ספיקות האוויר והמים בהתאם, ובכפוף לסטיות המותרות.

לאור התוצאות המבטיחות שהתקבלו ניתן להצביע על המסקנות העיקריות הבאות: קיימת התאמה טובה מאוד בין התנאים המתקבלים בפועל לבין התנאים הרצויים, הבקרה מתמודדת היטב במצבים בהם לא ניתן לקיים את התנאים הרצויים, מערכות השליטה הופעלו בצורה יעילה וללא שינויים תכופים בהפעלה. מומלץ להמשיך בעבודה בהתאם לפירוט הבא: אפיון התמורה לגידול, בחינת אלגוריתמים נוספים לבקרה, והכללת משטרי הפעלה נוספים כגון אוורור טבעי וחימום.

## מבוא

ענף החממות בארץ התבסס בעיקר על ייצוא תוצרת חקלאית לתקופת החורף בשל היתרון היחסי בהשוואה לאירופה והמהווה שוק יעד עיקרי. שוק זה מתאפיין ברמת דרישות גבוהה (המחמירות לעיתים תכופות) למוצרים איכותיים, מוצרים ללא שאריות חומרי הדברה והספקה סדירה. לאחרונה, שוק זה מוצף בתוצרת חקלאית עם כניסתן של מדינות דרום אירופה וצפון אפריקה המתחרות על אותו נתח שוק. כתוצאה מכך, רווחיות הגידול במגמת ירידה. הספקה סדירה של תוצרת חקלאית איכותית ובכל ימות השנה מבטיחה יתרון שיווקי ניכר למגדלים ועשויה להוות פתרון לכך. הספקה סדירה של תוצרת חקלאית מחייבת גידול וואו שתילה במהלך חודשי הקיץ, תקופה שבה עומס החום גדול בעקבות שילוב של שטף הקרינה וטמפרטורות הסביבה גבוהים בהשוואה לתקופת הגידול הנוכחית, חורפית בעיקרה. נוכח התחממות כדור הארץ, בעיה זו עתידה להחמיר ויש להיערך לכך מבעוד מועד. לצורך זה פותחה מערכת ערפול לצינון חממות.

בערבה בתקופת הקיץ והסתיו שוררות טמפרטורות גבוהות הן בשעות היום והן בשעות הלילה. אחת הבעיות העיקריות היא שליטה על טמפרטורות הלילה, בטמפרטורת סביבה-לילה גבוהה של 25 עד 30 מעלות. בתנאים אלו הנשימה גוברת ועלולה לגרום לירידה באיכות האבקה ולנשירת פרחים (עגבניות, פלפל וכדומה). לדוגמא ענף הפלפל בערבה המהווה כיום את הציר המרכזי לגידול הירקות באזור, מגיע להיקפים של למעלה מ-16,000 דונם בשנת 2008 ומהווה את אחד מענפי הייצוא המרכזיים בישראל בתחום הירקות מושפע מאוד מתחום טמפרטורה גבוה, התופעות הם הפלת פרחים ויצירת זרעים מופרעת עקב בעיות חנטה הנגרמות בעטיים של טמפרטורות גבוהות. כאשר טמפרטורות הלילה מגיעות ל-26 מעלות ישנה ירידה ל-30% זרעים בפרי אשר נחשף לטמפרטורות לילה גבוהות לעומת פרי אשר התפתח בטמפרטורות לילה של 22 מעלות, ירידה במספר הזרעים בפרי גורמת לעיוותי פרי ולתופעות אי רגולריות וירידה באיכותו הכללית של הפרי עקב הפרה במאזן ההורמונים בפרי זה. אופיינה עליה במספר ההפלות הפרחים ובירידה במספר הפירות לצמח [1]. תופעות אלו התרחשו גם בניסויים אשר התמקדו בהארכת עונה הגידול בעגבניות במיוחד ובהם נמצא נזק רב בתפוקה במיוחד בעונת הסתיו כאשר הצמח בעל נוף קטן ואינו מסייע בצינון האוויר. למרות צינון בשעות היום בניסויים אלו, ואי יכולת טכנולוגית לצנן היטב בלילה, נגרם נזק אשר התבטא בחוסר חנטה ובנשירת פרחים וביבולים נמוכים.

מרבית מערכות הערפול שהותקנו ונוסו עד כה בחממות, תוכננו במגמה לענות על הצורך בצינון בשעות היום ובעיקר בצהרי היום. התוצאות מלמדות שאכן [2] ניתן לשמור על תנאים רצויים (28 מ"צ ו-80%) ללא הרטבת עלווה וללא הפחתה משמעותית בקרינה ורמת אחידות גבוהה [3]. לצורך זה מערכות אלה הותקנו על פי המתכונת הבאה:

**ערפול** - פומיות ריסוס הממוקמות גבוה ככול האפשר, בחלוקה אחידה על פני שטח החממה ומקור הספקה אחד.

**אוויר החממה** - פתחי גג ומאווררים המותקנים בדפנות המופעלים באמצעות משנה תדר (או באמצעים חלופיים) לוויסות ספיקת האוויר הרצויה.

**בקרה** - בקרת מערכת הצינון התבססה על ויסות ספיקת אויר באמצעות משנה תדר (או אמצעים חלופיים) והספקת המים במנות (פולסים) לפרקי זמן קצרים. שני חסרונות עיקריים להספקת מים במנות והם: בלאי מוגבר של מערכת הספקת המים בעקבות ההפעלות הרבות (המלוות ביצירת גלי הלם בצנרת), בשל המעברים החדים בהספקת המים, הפעלה זו חייבה בקרה מתקדמת וחיישנים רגישים. בתנאים אלה ועל פי התוצאות

;

המצטברות, נראה שהבקרים שנבחנו עד כה, לא הניבו תוצאות משביעות רצון בעיקר בשעות הלילה, הבוקר והערב.

מטרות עבודה: פיתוח מערכת ערפול הדרגתית לצינון חממות בתנאי הערבה ובמהלך כל שעות היממה; פיתוח ובחינת מדדי בקרה בקביעת מועד ואופן המעברים ממשטר יום ללילה וההיפך; בחינת התמורה שתקבל.

## שיטות וחומרים

המערכת הותקנה בעונת הגידול 2008/9 בבית צמיחה בתחנת יאיר בערבה. השנה הראשונה יוחדה בעיקר לבחינת ביצועים פיזיקאליים של המכלול המוצע הכולל מערכות אוורור, ערפול ובקרה. השנה השנייה תיוחד לקביעת משטרי ההפעלה הרצויים, של מערכות הצינון ביום ובלילה והמעברים ביניהם באמצעות בחינת ביצועים פיזיולוגיים וההשלכה המתבקשת במהלך התנאים הפיזיקאליים הרצויים. לאחר שהתנאים הרצויים ואופן השגתם הוגדרו, בשנה השלישית יערך מעקב שותף על ביצועי המערכת לאורך כל העונה ותיבחן התמורה הכוללת של הפתרון המוצע. המערכת המוצעת תוכננה על פי התנאים הרצויים בחממה בצהרי היום של 28 מ"צ ולחות יחסית של 80%, תנאים מקומיים קיצוניים, בצהרי היום, והותקנה על פי המתכונת הבאה:

**ערפול** - ספיקת המים הכוללת תוכננה בהתאם לתנאים הקיצוניים (במהלך צהרי היום), ובהתאם לכך מספר וגודל המשאבות (משאבה אחת בספיקה כוללת של 1,200 ליטר לשעה ו- 200 פומיות). לצורך הספקת מים הדרגתית, קווי פומיות הריסוס חולקו לשלושה קבוצות (שישית, שליש וחצי מכמות הפומיות). חלוקה זו עם הפעלת קווי ההספקה חלקית ולסירוגין והמשאבות באופן הדרגתי או רציף, מאפשרת שינוי הדרגתי של ספיקת המים שתענה על הצורך בספיקה נמוכה התחלתית, המתאימה לשעות הלילה והבוקר, והגדלתה בהתאם לעומסי החום במהלך שעות היום והלילה.

**אוורור החממה** - בדומה למערכות שנוסו עד כה, הווה אומר, פתחי גג (לכניסת האוויר) ומאווררים המותקנים בדפנות. ספיקת האוויר הכוללת בהתאם לתנאים הקיצוניים (במהלך צהרי היום), ובהתאם לכך מספר המאווררים הנדרש (שמונה מאווררים 36" שמוקמו בארבעת דפנות החממה). המאווררים חולקו לשתי קבוצות (ארבעה מאווררים בכל קבוצה), כאשר אחת הקבוצות (קבוצה נשלטת) הופעלה באמצעות משנה תדר. ספיקת האוויר הרצויה (הרגעית) מתקבלת באמצעות קביעת מספר קבוצות המאווררים המופעלים ובנוסף לכך וויסות התדר בקבוצה הנשלטת.

**בקרה** - השליטה בתנאים הרצויים (טמפרטורה ולחות) מתבצעת על ידי וויסות ספיקות האוויר והמים בהתאם, ובכפוף לסטיות המותרות. מערכת בקרה זו הינה בשלבי פיתוח ונבחנה מבעוד מועד, בחממה הממוקמת במכון להנדסה חקלאית. במהלך שנה זו, המערכת הכוללת נבחנה בתנאי הערבה והעבודה התמקדה בעיקר בשיפור הבקרה בהיבטים הבאים: הקטנת סטיות, הקטנת בלאי המערכות, ידידותיות למשתמש, עיבוד נתונים מצטברים ומידת זמינותם למגדל.

**בית צמיחה** - גובה מרזב 4 מטר, 5 מפתחים של 6.40 כ"א, רוחב המבנה 32 מטר ואורכו 28 מטר, 896 מ"ר במבנה נשתלו (5.8.08) צמחי פלפל משלושה זנים: 7158, 7182 (זרעים גדרה) וסליקה (אפעל).

## תוצאות ודיון

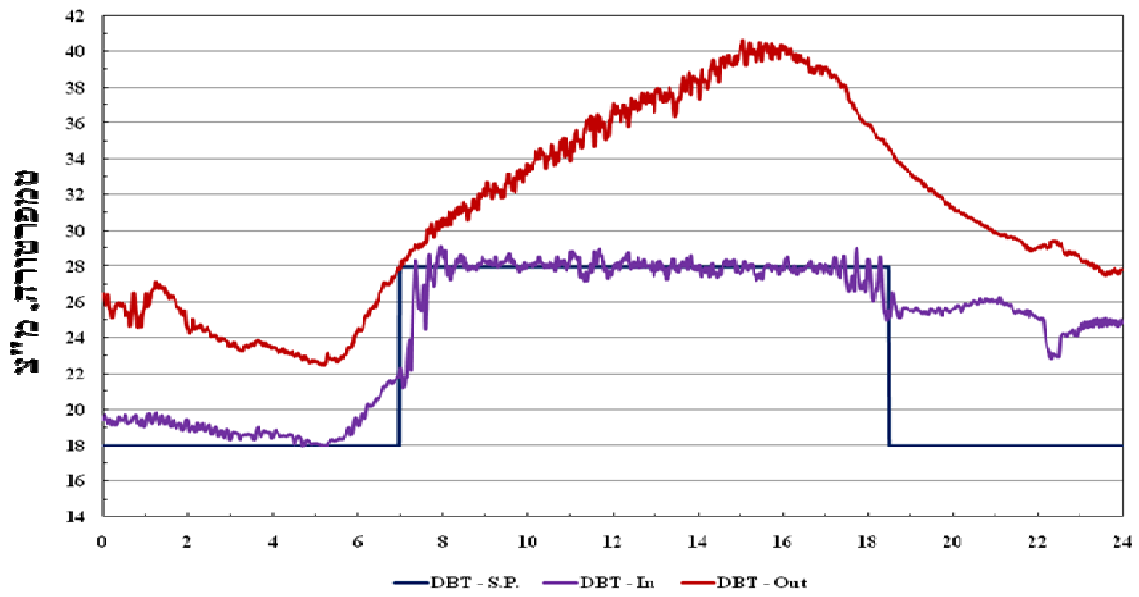
השנה הראשונה התמקדה באפיון ביצועי המערכת בהיבטים הפיזיקאליים ולא בגידולים. לצורך הדגמת ביצועי המערכת נבחר יום מייצג, כמתואר באיורים 1 – 8. באיור 1 מוצג מהלך היומי של הטמפרטורה הרצויה בחממה, הטמפרטורה השוררת בחממה בפועל והטמפרטורה מחוץ לחממה. על פי התוצאות ניתן להצביע על:

;

הפרש טמפרטורות בין חוץ לפנים עולה לכדי 12 מ"צ, שמירת הטמפרטורה הרצויה במרבית שעות היום, במהלך שעות הלילה לא נשמרה הטמפרטורה הרצויה פרט לשעות הבוקר המוקדמות. לעומת זאת, הלחות היחסית, כמתואר באיור 2, נשמרה היטב במהלך מרבית שעות היממה להוציא שעות הבוקר והערב. זאת, משום שניתנה עדיפות ללחות היחסית בתהליך הבקרה על מנת להימנע ככול האפשר מהרטבת העלווה. לצורך הסבר תוצאות אלה וכנגזרת מאיורים 1 ו-2, באיור 3 מוצגים מהלכי טמפרטורות הלח. כמתואר באיור 1, טמפרטורת הלח של הסביבה אינה מאפשרת לשמור על התנאים הרצויים בחממה במרבית שעות הלילה ומשום כך הסטייה בטמפרטורת היבש שבחממה מהטמפרטורה הרצויה. לעומת זאת, בשעות הבוקר והערב אין בקרינת השמש לשמור על הטמפרטורה הרצויה בחממה.

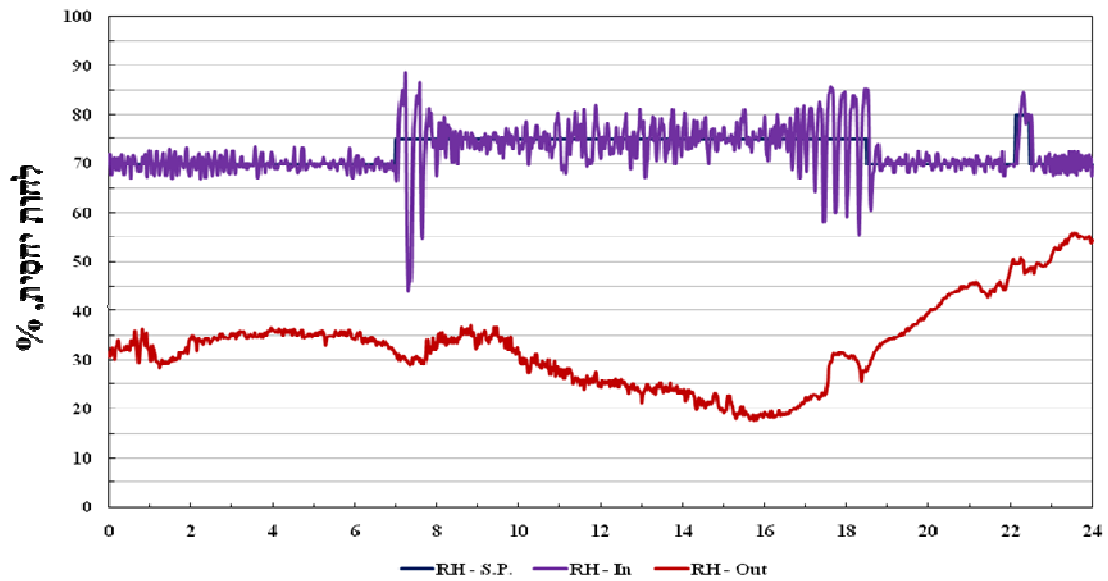
לצורך בחינת רמת הדיקוּק שמערכת הבקרה מעניקה, חושבו סטיות התקן של טמפרטורת היבש והלח והלחות היחסית בין השעות 9:00 עד 17:00 אשר עמדו על 0.31 מ"צ, 0.38 מ"צ ו-2.5%, בהתאמה. כמו כן, ניתן להצביע בברור על התכנסות מהירה לתנאים הרצויים, בעקבות שינויי מדרגה שנעשו בתנאים הרצויים. תוצאות אלה התקבלו כתוצאה מהפעלת מערכות האוורור והערפול כמתואר באיורים 4 ו-5. באיור 4 מוצגים מהלך יומי של ספיקות האוויר והמים (מערכת הערפול) היחסיות ובאיור 5 מוצגים מהלך שינויי המדרגה הן של מערכת האוורור (בעל שתי דרגות הפעלה) והן של מערכת הערפול (בעלת שבע דרגות הפעלה). ככלל, ניתן להצביע שהמערכות פעלו כצפוי וללא מעברים מיותרים במגבלות תנאי ההפעלה. מגבלות אלה מתמקדות בעיקר בשעות הלילה בהן ספיקת האוויר מקסימאלית עמדה על 50% ואילו ספיקת המים המקסימאלית על 24%. בתנאים אלה, ניתן להצביע על כך שמרבית המעברים בין הדרגות השונות של מערכת האוורור חלו בשעות הלילה, ולעומת זאת מרבית המעברים של מערכת האוורור חלו בשעות היום. מעברים אלה מהווים אחד המדדים של רמת הבלאי של המערכות וחשוב לצמצם זאת למינימום האפשרי. באיור 6 מוצגים מהלך יומי של מספר המעברים המצטבר של מערכות האוורור והערפול. על פי התוצאות נראה שמספר המעברים היומי של מערכת האוורור עמד על כ-20 ושל מערכת הערפול על כ-190. לצורך השוואה, מספר המעברים היומי של מערכת הערפול המופעלת בשיטת "פולסים" ובעלת דרגה אחת, עולה מעל ל-2,000. כמו כן, ניתן להראות שמספר המעברים במהלך שעות הלילה במידה ומציבים סף תחתון של ספיקת המים המקסימאלית המתאימה לדרגה הראשונה.

תוצאות אלה התקבלו במחיר של צריכת המים, כמתואר באיור 7, ובצריכת חשמל של מערכות האוורור והערפול, כמתואר באיור 8. חשוב לציין שצריכת מים זו התקבלה מתוך הדרישה על לשמור על טמפרטורה רצויה של 28 מ"צ במהלך שעות היום ו-18 מ"צ במהלך שעות הלילה, ולחות יחסית של 75% ו-70%, בהתאמה. על פי התוצאות נראה שצריכת המים והחשמל העיקרית חלה בשעות היום. ניתן להראות שצריכת המים והחשמל מצטמצמות באופן משמעותי ככול שהטמפרטורה והלחות הרצויות שיוצבו כרצויות, גבוהות יותר. לשם הדגמה, אילו הוצבו הערכים 29 מ"צ ו-80% כתנאים רצויים, ניתן להראות שצריכת המים והחשמל מצטמצמות לכדי מחצית. מכאן, ניכרת חשיבות רבה לקביעת ערכים אלה.



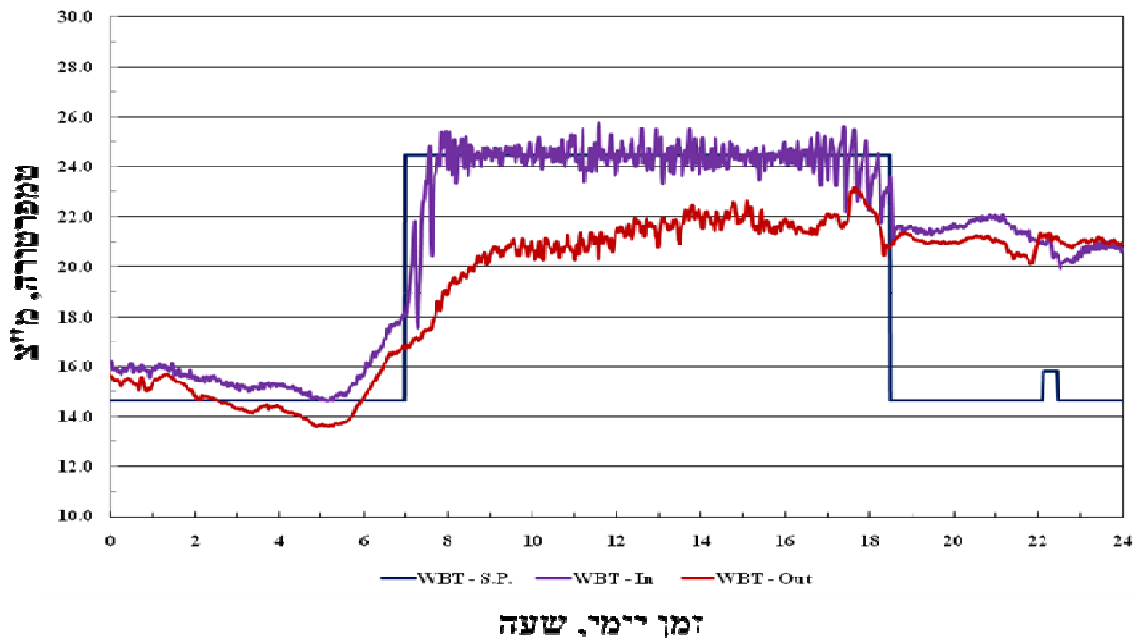
זמן יומי, שעה

איור 1: מהלך יומי של טמפרטורה (יבש - DBT) רצויה בחממה (S.P.), השוררת בחממה בפועל (In) ומחוץ לחממה (Out)

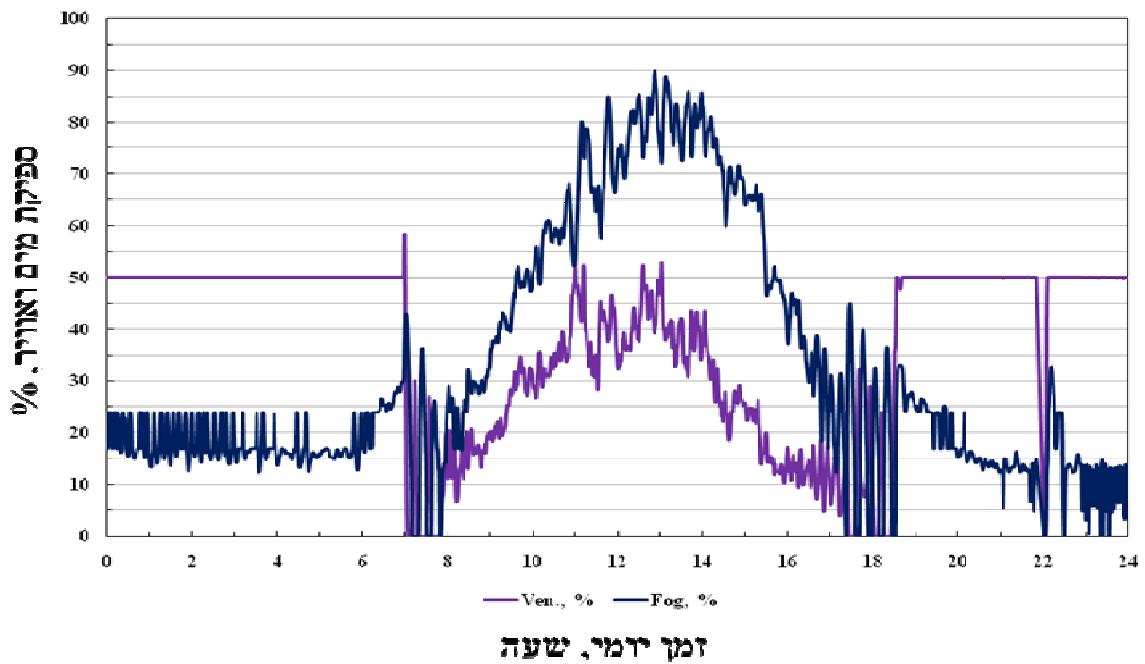


זמן יומי, שעה

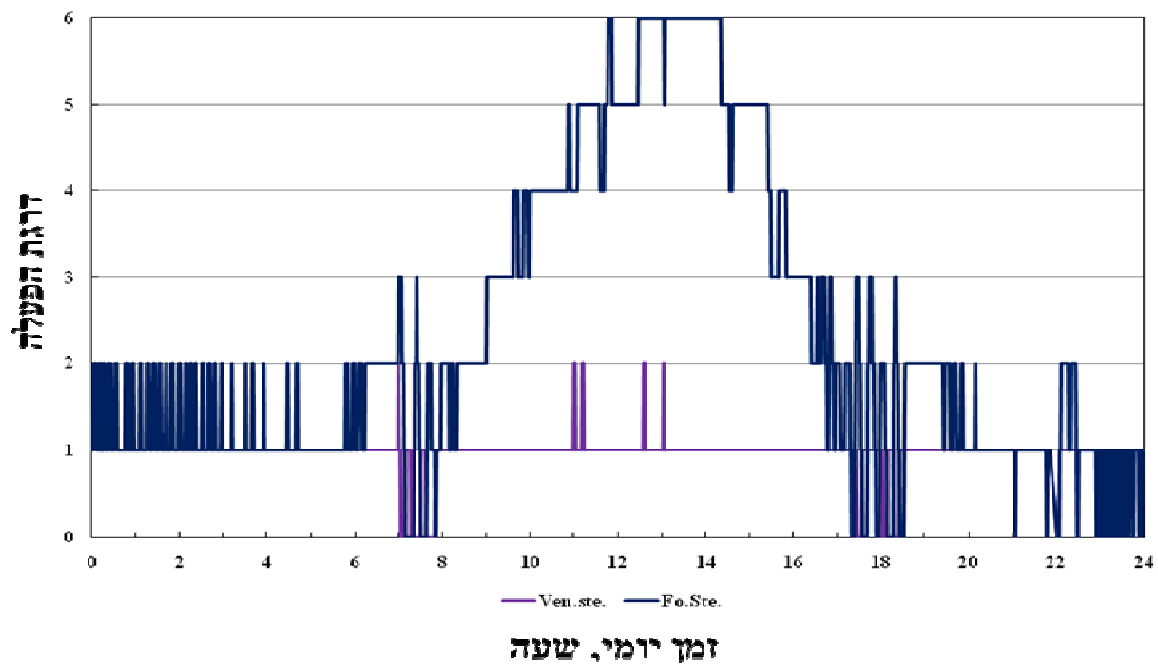
איור 2: מהלך יומי הלחות היחסית (RH) רצויה בחממה (S.P.), השוררת בחממה בפועל (In) ומחוץ לחממה (Out)



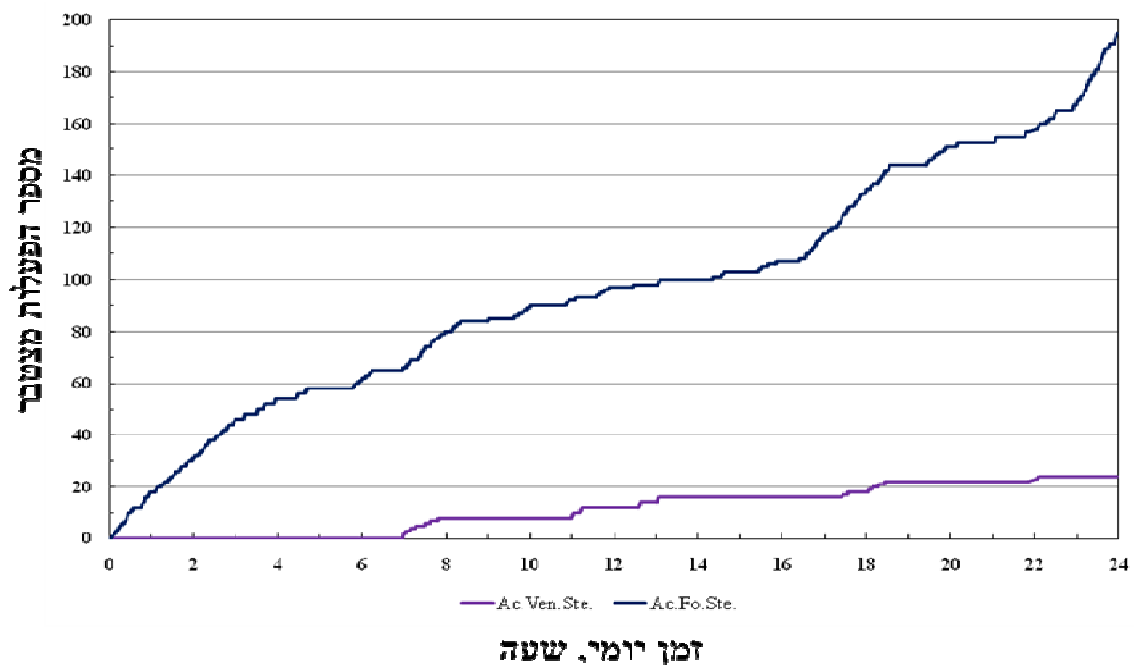
איור 3 : מהלך יומי של טמפרטורה (לח - WBT) רצויה בחממה (S.P.), השוררת בחממה בפועל (In) ומחוץ לחממה (Out)



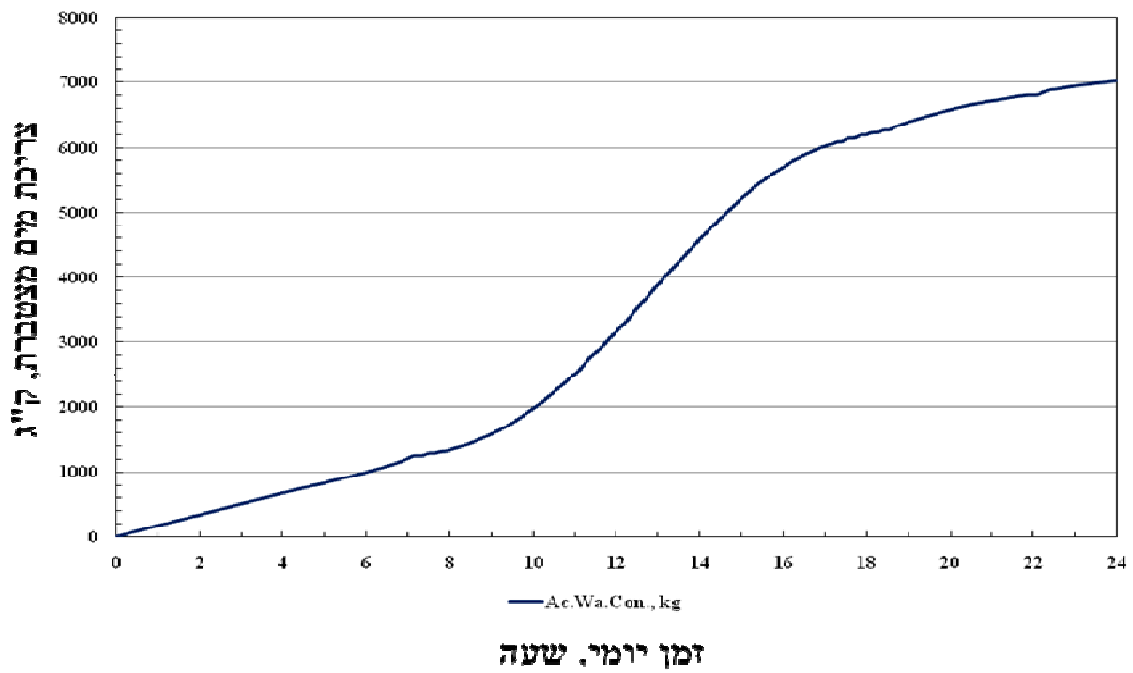
איור 4 : מהלך יומי של ספיקות האוויר (Ven) והמים (Fog) היחסיות



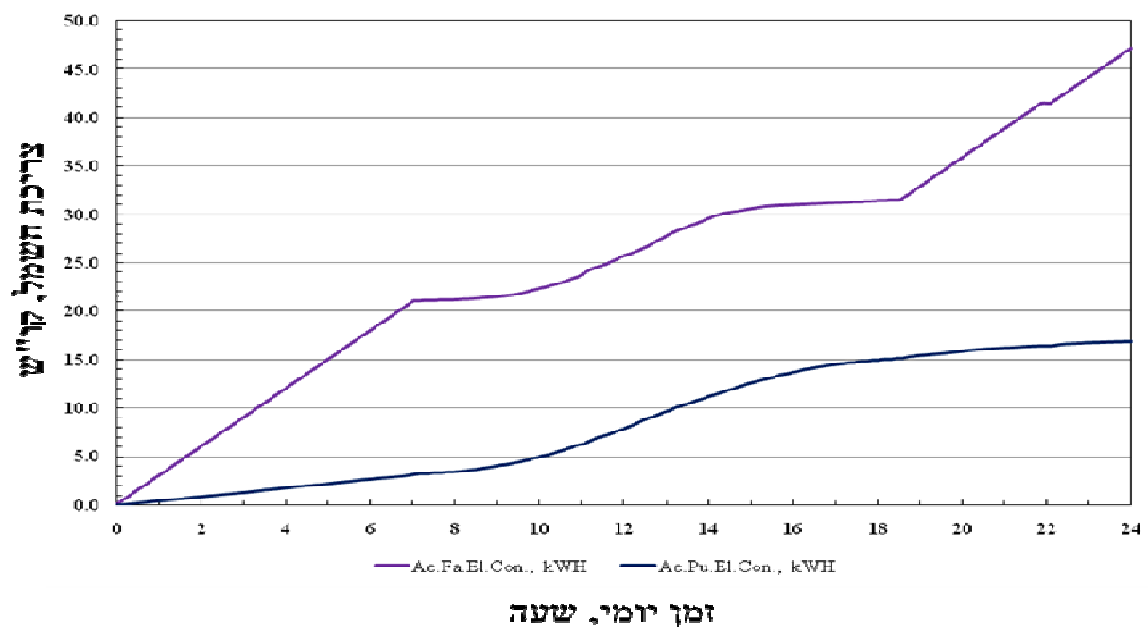
איור 5 : מהלך יומי של דרגות ההפעלה של מערכות האוורור (Ven) והערפול (Fo)



איור 6 : מהלך יומי של מספר ההפעלות (מעבר בין דרגות ההפעלה השונות) המצטבר של מערכות האוורור (Ac.Ven.Ste) והערפול (Ac.Fo.Ste)



איור 7 : מהלך יומי של צריכת המים לצינון המצטברת (Ac.Wa.Con.)



איור 8 : מהלך יומי של צריכת החשמל המצטברת של מערכות האורור (Ac.Fa.El.Con.) והערפול (Ac.Pu.El.Con.)



;

## סיכום ומסקנות

לאור התוצאות המבטיחות שהתקבלו ניתן להצביע על המסקנות העיקריות הבאות:

1. קיימת התאמה טובה מאוד בין התנאים המתקבלים בפועל לבין התנאים הרצויים; 2. הבקרה מתמודדת היטב במצבים בהם לא ניתן לקיים את התנאים הרצוי; 3. מערכות השליטה הופעלו בצורה יעילה וללא שינויים תכופים בהפעלה; 4. מומלץ להמשיך בעבודה בהתאם לפירוט הבא: אפיון התמורה לגידול, בחינת אלגוריתמים נוספים לבקרה, משטרי הפעלה נוספים, אוורור טבעי, חימום וכדומה.

## הבעת תודה

תודתנו נתונה לקרן הברון הירש – יק"א ולמו"פ ערבה תיכונה וצפונית על מימון המחקר במשותף.

## מקורות

1. Aloni B, Peet MM, Pharr M, Karni L. 2001. The effect of high temperature and high atmospheric CO<sub>2</sub> on carbohydrate changes in bell pepper (*Capsicum annuum*) pollen in relation to its germination. *Physiologia Plantarum* 112: 505–512.
2. Arbel A., Yekutieli O. and Barak M. 1999. Performance of a fog system for cooling greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72:129-136.
3. Arbel A., Barak M. and Shklyar A. 2002. Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. *Biosystems Engineering* 84:45-55.