

דו"ח מדעי מסכם לתכנית מחקר מספר: 459-0333-08

פיתוח מערכת בקרת אקלים עבור בתי צמיחה

Development of climate control system for greenhouses

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

אברהם ארבל	המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן
ו. אלחנתי	המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן
מרדכי ברק	המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן
אלכסנדר שקליאר	המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן
ג, לידור	המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן
ישראל צברי	מו"פ הערבה

A. Arbel, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: arbel@agri.gov.il

V. Alchanatis, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: victor@volcani.agri.gov.il

M. Barak, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: barak@agri.gov.il

A. Shklyar, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: shklyar@agri.gov.il

G. Lidor, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: lidor@volcani.agri.gov.il

I. Tsabari, Arava R&D. E-mail: Israel@arava.co.il

מאי 2008

סיוון תשס"ז

הממצאים בדו"ח זה הנם תוצאות ניסויים ואינם מהווים המלצות לחקלאים

חתימת החוקר

*

תקציר

הצגת הבעיה - מרבית מערכות הבקרה הנהוגות כיום ממוחשבות ומתבססות על הפעלת מערכות השליטה בהתאם לספים שנקבעו מראש. הווה אומר, הפעלה בדומה להפעלה תרמו סטטית ויומי סטטית והמחשב אינו מנוצל לבקרה מתקדמת יותר. גישה זו גורמת לסטייה ניכרת בתנאי הגידול בהשוואה לרצוי ואינה מאפשרת מיצוי יכולת מערכות השליטה הקיימות ממילא.

מהלך ושיטות עבודה - במהלך השנה הראשונה וכמתוכנן, התקנת החממה והמערכות הנלוות הושלמה בשלהי החורף אשר פעלו לשביעות רצוננו. אך לצערנו הרב, סופת ברקים שהתחוללה מספר ימים מועט לאחר מכן גרמה לנזקים רבים למרבית המערכות. במקביל לכך, פותח אלגוריתם בקרה אשר נבחן באמצעות הדמיה. אלגוריתם זה פותח על בסיס ההנחות הבאות: ספיקת האוויר ניתנת לשליטה באופן רציף ואילו ספיקת המים ניתנת לשליטה באמצעות שינויי מדרגה. במהלך השנה השנייה ובעקבות נזקי סופת הברקים, נרכשו והותקנו מחדש מרבית המרכיבים האלקטרוניים (מחשב, בקר, בקרי תדר וכדומה) והמצב חזר לקדמותו. במקביל לכך, העבודה התמקדה בפיתוח אלגוריתם בקרה אשר נבחן באמצעות הדמיה המבוסס על כך שספיקות האוויר והמים הניתנים לשליטה באופן רציף והוחל בפיתוח אלגוריתם בקרה שיבחן באופן מעשי ובתנאי החממה. שנה שלישית יוחדה להמשך פיתוח אלגוריתם בקרה מעשי, המבוסס על כך שספיקות האוויר והמים הניתנים לשליטה באופן רציף, ובחינתו בתנאי החממה הניסיונית.

תוצאות עיקריות - לצורך בקרה ניתן להסתפק במדידת תנאי הפנים בלבד ללא צורך בניית תנאי הסביבה. דבר, המקטין את עלות מערכת הבקרה הן בהתקנה והן בתפעול. בהפעלה הדרגתית, ככול שמספר דרגות ההפעלה של המים גדלה ניתן להצביע על כך שקיימת הפחתה ניכרת במספר המעברים ובלאי המערכת קטן משמעותית, קיימת התאמה טובה יותר של ספיקת המים הנדרשת בכל רגע נתון ובכפוף לכך ספיקת האוויר וכתוצאה מכך עלות ההפעלה קטנה באופן משמעותי. לעומת זאת, עלות המערכת גדלה בחלק מהמקרים. הספקת מים באופן רציף מקנה במרבית שעות היממה את התנאים הרצויים בדיוק רב ומספר המעברים היומי קטן באופן ניכר בהשוואה להפעלה ההדרגתית. מספר דרגות ההפעלה של המים יקבע כפשרה בהתאם ל: הצורך בצינון לילי, עלויות התקנה ותפעול והעמידה בתנאי ההפעלה.

מסקנות והמלצות - על בסיס תוצאות המעודדות שהתקבלו, אין בליבנו ספק שהמערכת המוצעת מהווה פתרון הולם ליישום מסחרי אשר יתרום רבות לשמירה על התנאים הרצויים בחממות, במהלך כל ימות השנה, על כל היתרונות הכלכליים הנלווים. מומלץ להמשיך בעבודה בהתאם לפרוט הבא: פיתוח אלגוריתם בקרה להפעלה הדרגתית, בחינת השילוב המוצע (מערכות שליטה ובקרה) בחממה בקנה מידה מסחרי, פיתוח אלגוריתמי בקרה שיתבססו על אוורור טבעי בעיקר להרחבת הנושא עבור רפתות ולולים, בחינת האלגוריתמים השונים הלכה למעשה במבנים מסחריים.

פרסומים מדעיים שנבעו מביצוע המחקר: פורסמו שני מאמרים מבוקרים בנייר ותלם.

מבוא ותאור הבעיה

אנו עדים כיום למגמה ההולכת ומתרחבת של החמרה בדרישות לשיווק תוצרת חקלאית. החמרה זו באה לידי ביטוי בכך שמוצבים מדדים בתחומים צרים יותר לקביעת איכות המוצר, התחייבות להספקה סדירה של המוצר במועדים שנקבעו מראש, עמידה ברמת אחידות גבוהה, תוצרת ללא שאריות חומרי הדברה ובמקרים רבים מוכתבים אף תנאי העבודה וממשקי הגידול משיקולים של זיהום סביבה ואחרים. עמידה בתנאים אלה, מחזק, מבטיחה תגמול כספי נאות ומאידך, מחייבת שליטה ובקרה של תנאי הגידול בבתי הצמיחה. כתוצאה מכך, ההשקעות בענף בתי הצמיחה הולכות וגדלות, וכתוצאה מכך הענף הופך להיות דומה יותר לתעשייה. ההשקעות מתמקדות בעיקר במבנה, מצעים, מערכות השקיה, מערכות שליטה בתנאי האקלים ובמערכות בקרה.

מרבית מערכות הבקרה הנהוגות כיום ממוחשבות ומתבססות על הפעלת מערכות השליטה בהתאם לספים שנקבעו מראש. ספים אלה נקבעים בעיקר באמצעות הגדרת רמות של טמפרטורה ולחות יחסית קיצוניים ומספר דרגות בתווך. הווה אומר, הפעלה בדומה להפעלה תרמו סטטית במספר רב של מצבים והמחשב אינו מנוצל לבקרה מתקדמת יותר. גישה זו גורמת לסטייה ניכרת בתנאי הגידול בהשוואה לרצוי ואינה מאפשרת מיצוי יכולת מערכות השליטה הקיימות ממילא.

תוצאה זו נובעת בעיקר מכך שמערכות השליטה הנהוגות אינן מאפשרות שליטה מלאה בתנאי האקלים (כפי שיפורט בהמשך). לצורך זה, תנאי הגידול הרצויים מוגדרים באמצעות שילוב של שלושת המשתנים הבאים: קרינה, טמפרטורה ולחות היחסית. לעומת זאת, מערכת הערפול שפותחה על ידי מגישי הצעה זו, אכן מאפשרת שליטה מלאה של תנאי האקלים הרצויים מחד אך מחייבת בקרה מתקדמת. בהתאם לכך, בעבודה זו מוצעת גישה שונה בתכלית בכך שמערכת הבקרה תקיים באופן רציף את התנאים האקלימיים הרצויים על אף שתנאי הסביבה משתנים, תוך כדי הפעלה משתנה של מערכות השליטה.

רקע תיאורטי ומעשי

שיטות הצינון האדיבטיות העיקריות הנהוגות כיום הם:

התזה - התזת מים באמצעות ממטירונים על פני העלווה והקרקע. כתוצאה מכך גדל שטח פני המים החופשיים ובעקבות זאת גדל קצב האידוי. תהליך האידוי גורם לירידת טמפרטורת המים עד טמפרטורת הלח של אוויר הסביבה הקרובה. יתרונה - בעלווה הנמוכה. חסרונותיה העיקריות של שיטה זו ביעילותה הנמוכה, ביצירת תנאים לפריצת מחלות פיטרתיות בעקבות המים החופשיים המצטברים על העלים [1, 2], וביצירת משקעים על פני העלווה. אי לכך, מערכת זו אינה ברת השוואה למזרן הלח ולמערכת הערפול. בנוסף לכך, בקרת מערכת זו מוגבלת מאוד ומתופעלת כיום באמצעות שעון ע"פ קביעות הנקבעות מראש.

מזרן לח - אוויר חיצוני מוזרם דרך מזרן רטוב ומועשר במים אל תוך החממה. כתוצאה מכך, טמפרטורת האוויר יורדת והלחות עולה. לשיטה זו מספר חסרונות:

1. השיטה מחייבת אוורור מאולץ להכנסת האוויר דרך המזרן. למזרן יש התנגדות ניכרת למעבר אוויר.
2. האוויר המטופל מוזרם לאורך החממה, דבר הגורם לשינוי הדרגתי ניכר בטמפרטורה ובלחות.
3. עלות גבוהה.

4. מחייבת הקזת מים להקטנת משקעים.

5. סתימה הדרגתית של המזרן.

6. החממה הופכת למלכודת חום במצב של הפסקת חשמל.

בשיטה זו ניתן לבקר את ספיקת האוויר בלבד משום שהמזרן רטוב באופן תמידי במגמה למנוע משקעים. במצב נתון, הקטנת ספיקת האוויר תגרום לשינוי גדול יותר לאורך החממה בטמפרטורה והלחות וההפך. כמו כן, הקטנת ספיקת האוויר עשויה לגרום לכניסת אויר לח מעבר לרצוי. הווה אומר שהתנאים המתקבלים ומדת השתנותם תלויים בספיקת האוויר.

ערפול - שיטה זו מבוססת על הספקת מים בצורת טיפות קטנות ככל הניתן (בתחום הערפל) במגמה להגדיל את שטח פני המים הבאים במגע עם האוויר. כמו כן ככל שהטיפה קטנה יותר קצב נפילתה קטן [3] והיא נישאת ע"י זרימת האוויר בקלות. שתי תופעות אלה מבטיחות יעילות גבוהה של אידוי המים תוך שמירה על עלווה יבשה. מערכת ערפול המוצעת על ידי מגישי הצעה זו [4 – 8] היא בהתאם למתכונת הבאה: אוורור מאולץ באמצעות פתחים בגג ומאווררים בדפנות ופומיות ריסוס הממוקמות מעל האמירים גבוה ככול האפשר והפזורות באופן אחיד בחממה. מערכות ערפול במתכונת זו נבחנו במהלך השנים האחרונות בתנאי הערבה התיכונה (עין יהב וחצבה) ונמצא שהן מקנות תנאי אקלים בתחום הרצוי, תנאים אחידים בכל שטח המבנה וללא פגיעה משמעותית ברמת קרינת השמש. כמו כן, מערכות צינון אלה יעילות יותר הן מבחינה אנרגטית והן מבחינת ניצול המים בהשוואה למזרן לח.

אפיון מרכיבי מערכות השליטה - התנאים האקלימיים הרצויים בבתי הצמיחה נובעים משיקולים של קצב גידול, יכולים, איכות יכול מניעת מחלות וכדומה. תנאים רצויים אלה באים לידי ביטוי בקרינה, בטמפרטורה ובלחות האוויר בחממה. מרבית הגידולים נהנים מקרינה גבוהה ולכן פתרונות של הקטנת עומס החום באמצעות הצללה, אינם רצויים. שמירת שני התנאים הנוספים (טמפרטורה ולחות אויר החממה) כתלות בתנאי הסביבה (מחוץ לחממה - קרינה טמפרטורה ולחות יחסית) מחייבת שליטה בשני פרמטרים עיקריים והם ספיקת האוויר העוברת דרך החממה וספיקת המים שיש לאדות. ספיקות אלה מתקבלות משיקולי מאזן אנרגיה ומסה אודות החממה [8 - 13] ובאים לידי ביטוי במשוואות הבאות :

א. ספיקת האוויר (m_a):

בהנחה של מצב יציב ובהזנחת שטפי החום לקרקע ולגידול, ומתוך ההנחה שהתנאים הרצויים בחממה (טמפרטורה ולחות יחסית) ידועים, ספיקת האוויר ניתנת לחישוב מתוך:

$$(1) \quad m_a = \frac{I(\tau\alpha) - U(T_i - T_a)}{h_i - h_a} \quad \text{for } h_i > h_a$$

כאשר: I - קרינת שמש, $(\tau\alpha)$ - מקדם עבירות בליעה קרינתית של החממה, U - מקדם מעבר חום של כיסוי החממה, T_i - טמפרטורת אויר החממה הרצויה, T_a - טמפרטורת אויר הסביבה, h_i - האנטלפיה של אויר החממה, ו- h_a - האנטלפיה של אויר הסביבה. במדידות שנערכו בתקופת השוליים (סתיו אביב בשעות הצהריים) בחממות מסחריות עולה שהמקדם $(\tau\alpha)$ שווה בערכו לכ - 0.5.

ב. ספיקת המים שיש לאדות (m_w):

בתנאים אלה ספיקת המים שיש לאדות היא :

$$(2) \quad m_w = m_a(X_i - X_a) \quad \text{for} \quad X_i > X_a$$

כאשר: X_i - יחס הערבוב של אויר החממה, X_a - יחס הערבוב של אויר הסביבה.

כמצוין, הפתרון המוצע (המתבסס על צינור אדיאבטי) מוגבל מבחינה עקרונית בהתאם לתנאים בהם האנטלפיה ויחס הערבוב של אויר החממה גדולים מאלה של אויר הסביבה. מקור ספיקת המים שיש לאדות כדי להגיע לתנאים הרצויים עשוי להיות מהצמחייה, הקרקע וממערכת הערפול המוצעת. אי לכך:

$$(3) \quad m_w = m_p + m_m$$

כאשר: m_p - ספיקת המים המתאדה שמקורה בצמחים ובקרקע, m_m - ספיקת המים שיש לאדות ולספק בצורה מלאכותית. מבחינה מעשית המערכת המוצעת יש ביכולתה לספק מים לאידוי אך אין ביכולתה לקלוט אדי מים מהאוויר שבחממה. משמעות הדבר היא שעל מנת לקיים את התנאים הרצויים ספיקת האידוי מהעלווה חייבת להיות קטנה מזו הכוללת.

מבחינה עקרונית, ספיקת האוויר הנדרשת עשויה להתקבל באמצעות אוורור טבעי המתבסס על אפקט הארובה [8 - 13]. התבססות על עיקרון זה מוגבל לתנאים בהן אין רוח [4 - 8] וגורם למגבלה חמורה בממדי החממה וקשיים בהפעלת ובבקרת המערכת. מעבודה שנעשתה לאחרונה [4 - 8] בחממה המצוידת במאווררים בשני צדדים (צפון ודרום) פתחי גג ופתחי צד בשני צדדים (מזרח ומערב), נראה שהרוח גורמת להפרעה ניכרת. בהתאם לכך, במגמה לאפשר חממות בממדים גדולים ככול האפשר ולצורך קבלת אחידות מלאה בתנאי האקלים בחלל הגידול, רצוי לנטרל את השפעת הרוח ולהתקין מאווררים בארבעת דפנות החממה.

בהתאם למשוואות אלה ניתן לכמת את ספיקות האוויר והמים בכול רגע נתון. בעוד שהמערכות מתוכננות בכפוף לתנאי סביבה מקומיים קיצוניים שנתיים ולתנאים הרצויים בחממה, הרי, תפעול ובקרת המערכות הנו בהתאם לתנאי הסביבה הרגועים. בהתאם לכך, ניתן להצביע על כך שספיקות אלה משתנות בתחום רחב. הפעלה המערכות בהתאם לכך תביא לחיסכון ניכר בצריכת האנרגיה והמים על ידי הפעלת המאווררים והמשאבות באופן הדרגתי. מערכת זו יעילה יותר ממזרן לח משום שמאפשרת המרת חום מוחש לחום כמוס תוך כדי זרימת האוויר בחממה, בנוסף לזה המתחולל בכניסה לחממה ובדומה למזרן לח. תוספת זו בתנאי הארץ עשויה לעמוד על כ- 700 גרם מים למ"ר לשעה בחממה בה דיות הצמחים זניח וכדי מחצית מכך בחממה עם גידול מפותח [14].

מערכת זו אכן מאפשרת בקרה של שני משתנים אלה ללא תלות ביניהם על מנת לשמור על התנאים הרצויים. הווה אומר, שמירה על טמפרטורה ולחות יחסית רצויים בחממה, בעת ובעונה אחת, תוך השתנות תנאי סביבה (קרינת שמש, טמפרטורה ולחות). זאת, בניגוד לשאר המערכות הנהוגות כיום שאינן מאפשרות זאת, כמתואר למעלה. בהתאם לכך, שליטה מלאה על מערכת זו מחייבת מערכת בקרה מתקדמת. כמו כן, במגמה למצות את האפשרויות הגלומות בהפעלת מערכות ערפול, מחייבת מערכת חישה בעלת רגישות ודיוק ברמות גבוהות בהשוואה למקובל כיום.

כמצוין, שליטה במערכת הערפול מתמקדת בבקרת ספיקות האוויר והמים בלבד. וויסות ספיקת האוויר, עשוי להתקבל באופן רציף על ידי שינוי מהירות סיבוב המאווררים באמצעים שונים, כגון משני תדר. לעומת זאת, וויסות ספיקת המים באופן רציף מוגבל למדי ומחייב הפעלה חלקית של המערכת ובפולסים, בנוסף לוויסות לחץ המשאבה. זאת, משום שמטעמי גודל טיפה לא ניתן להקטין את הלחץ במידה רבה מהלחץ המומלץ. בהתאם לכך, מוצע להתקין מערכות עם חלוקה משנית ולהפעיל את המערכות בצורה הדרגתית.

ניהול ובקרה – הפעלת חממות ככלל ובקרת תנאי האקלים כפרט הנה תוצאה של מערכת קבלת החלטות בשתי רמות עיקריות - ניהולית ותפעולית. ברמה הניהולית נשקלים הדברים לטווח ארוך של מספר שנים, עונתי וימים בודדים וכתוצאה מכך מתקבלות החלטות אסטרטגיות, טקטיות ותפעוליות, בהתאמה. בטווח של שנים נבחנים הגידולים המתאמים בהתאם לשוקי היעד, היצע וביקוש, עלויות וכדומה. ברמה העונתית נשקלים הגורמים הנוגעים למועדי הספקה, עלויות הפעלה וגיבוש מהלך הגידול. בטווח הקצר (הנאמד במספר ימים) נבחנים האפשרויות לחיסכון בתשומות (כגון באנרגיה לחימום) על פי תוצאות מצטברות והצפי לעתיד. במרבית המקרים החלטות אלה מתקבלות על ידי המגדל על פי ניסיונו המצטבר. עם זאת, במהלך שלושת העשורים האחרונים פותחו מספר גישות העשויות לסייע למגדל בקבלת ההחלטות. גישות אלה מבוססות על אלגוריתמים כגון בינה מלאכותית ומערכות מומחה המאבחנים את המשתנים האופטימאליים בהתאם. לעומת זאת. ברמה התפעולית מערכת הבקרה שולטת במערכות השליטה בטווח הזמן הקצר הנאמד במספר דקות ואף באופן מיידי. התפר בין שתי הרמות האלה מתבטא בהזנת התנאים הרצויים מעת לעת על ידי הרמה הניהולית לרמה התפעולית. מתוך סקירת הספרות נראה שקיימים פרסומים רבים אלא שמרביתם מתמקדים בהיבטים השונים התחומים ברמה הניהולית (ראה [15] פרק 8), ומעטים ברמה התפעולית [16-24]. מבין כל המאמרים האלה, רק מאמר אחד [24] עוסק בבקרת חממות המצוידות בשילוב של מערכות אוורור וערפול, אלא שהבקרה נבחנה ברמה התיאורטית ולא בתנאים מעשיים כנדרש.

מערכת בקרה של חממה נדרשת לבקר מספר משתני פלט בעת ובעונה אחת (טמפרטורה, לחות ורמת CO_2). למרות שניתן באופן פשטני לבקר כל משתנה באופן בלתי תלוי, מערכת הבקרה הכוללת אינה יעילה ואף עלולה לא לתפקד כראוי. לשם כך, יש צורך בשימוש בשיטות בקרה מתקדמות יותר. קיימות מספר שיטות של בקרת מערכות מרובות קלטים ומרובות פלטים (MIMO). בשיטה הקלאסית ניתן להשתמש בתורת הבקרה של מערכות ליניאריות. מכיוון שהקירוב הליניארי של התהליכים המתרחשים בחממה אינו תמיד טוב, אפשר לתכנן מערכות בקרה לא ליניאריות, לדוגמא מבוססות על רשתות עצביות (Artificial Neural Networks) או המשלבות רכיבים של לוגיקה עמומה (Fuzzy Logic). מערכות בקרה מסוג זה משולבות היום בבקרה של מערכות מכאניות מורכבות אך עדיין לא נעשה בהם שימוש רחב בתחום בקרת החממות.

מטרות המחקר

מטרת העבודה העיקרית הנה פיתוח מערכת בקרת תנאי אקלים עבור בתי צמיחה המבוססת על עקרון של הפרדת ההשפעה ההדדית בין משתני הבקרה (מערכות ההפעלה) לבין המשתנים המבוקרים (תנאי האקלים בתוך החממה). מערכת הבקרה תיושם באמצעות תוכנה שתאפשר עמידה בדרישות הבאות: הפעלה ידידותית, שמירה על התנאים

הרצויים בתנאי סביבה משתנים, זיהוי מגבלות מרכיבי מערכת השליטה והפעלתן בהתאם. בכפוף לכך, מטרות המשנה של עבודה זו הם:

1. אפיון רמות הרגישות והדיוק הנחוצים ובחירת אמצעי חישה מתאימים.
2. פיתוח מערכת בקרה:
 - a. פיתוח ויישום מערכת לשליטה על מערכות ההפעלה של החממה שתאפר שליטה מלאה על מערכת ערפול בהתאם למתכונת המוצעת ובחינתה בתנאים מעשיים.
 - b. פיתוח מערכת בקרה (מודל בקרה ואלגוריתמים ליישומן) אשר תפעיל את מערכות ההפעלה של החממה על מנת לשמור על תנאי אקלים רצויים למרות הפרעות חיצוניות (ופנימיות).
3. הגדרת תנאי מעבר של משטרי ההפעלה השונים.
4. פיתוח תוכנת בקרה כוללת לשליטה במערכות נוספות כגון: חימום, אוורור טבעי, אוורור מאולץ ואחרות.

תאור מהלך העבודה

שנה ראשונה

במהלך שנה זו התמקדנו בעבודה בשני כיוונים עיקריים – תכנון והתקנות המערכות בחממה ניסיונית שתשמש כפלטפורמה לבחינת גישות שונות של בקרה (כמפורט למעלה), ופיתוח אלגוריתמים של בקרה ובחינתם באמצעות הדמיה.

תכנון והתקנות המערכות בחממה – התקנות המערכות בחממה נעשה בהתאם לפרוט הבא:

שדרוג והתקנת החממה – כמתואר באיור 1, חממה באורך של 18 מ', רוחב 6 מ' הותקנו המערכות הבאות:

מערכת אוורור - שישה מאווררים – שלושה בכל צד (אורכי).

מערכת ערפול – כמתואר באיור 2, המערכת מבוססת על הספקת מים באמצעות שני קווי פומיות (בחלוקה של שליש 8 פומיות ושני שליש – 16 פומיות) ומשאבה אחת. בנוסף לכך, המערכת כוללת: שני מסננים (20 מיקרון ו-5 מיקרון) בטור הממוקמים בכניסה למיכל, מיכל מוגבה בקיבולת של 100 ל', המיכל מצויד בברז מצוף, אלקטרודות למניעת הפעלת המשאבה בשעה שהמיכל ריק, המשאבה מצוידת בשסתום פריקת לחץ מתכונן, מד לחץ, שני ברזים לכל קו פומיות כאשר האחד N.C. והשני N.O. להזנה ופריקה מהירה של הלחץ שבקווים.

לוח חשמל – כמתואר באיור 3 (a), לוח החשמל כולל: ספק מתח (ישר 12 וולט) להפעלת התאים המאווררים המותקנים בחממה (כמפורט בהמשך), שני משני תדר – האחד להפעלת המאווררים והשני להפעלת המשאבה אשר הניתנים להפעלה באופן ידני ועל ידי בקר, ומגעים ידניים ופיקוד להפעלת הברזים החשמליים כמתואר באיור 3 (b). התקנה זו מאפשרת הפעלת מרכיבי המערכת באופן ידני או באמצעות בקר בכול שילוב רצוי, לשם עריכת ניסיונות וכיולים בהתאם.

מערכת מדידות – כמתואר באיור 4, הותקנו: שלושה תאים מאווררים למדידת טמפרטורות יבש ולח לאורך החממה בגובה זהה, תא מאוורר למדידת טמפרטורה (יבש) ולחות הממוקם במרכז החממה ותחנה מטאורולוגית הכוללת: מד קרינה, מד מהירות רוח, מד כיוון רוח, מד טמפרטורה ומד לחות יחסית. מערכת חישנים זו מחוברת לבקר (כמתואר בהמשך) ומשמשת לשתי מטרות: לאפיון ביצועי המכלול כתלות בתנאי הסביבה ולצורכי בקרה.

לצורכי בקרה השאיפה היא להשתמש במספר חישנים קטן ככול האפשר במגמה להקטין עלויות הן בהתקנה והן בהחזקה ותפעול.

בקרה – הותקן בקר מתוצרת National Instruments שיחודו בכך שבנוסף ליחידה המרכזית (FP-200) ניתן לצרף כל סדרה רצויה של כרטיסים באופן מודולארי והמתחברים בטור. בקר זה ניתן לתכנות באמצעות חיבורו למחשב ובאמצעות תוכנת LabView. לאחר טעינת התוכנה, בקר זה יכול לפעול באופן עצמאי אך מוגבל במשאבי הזיכרון לשמירת הנתונים. אי לכך, מומלץ להשאיר את הבקר מחובר למחשב באופן קבוע על כל היתרונות הנוספים כגון תצוגה בזמן אמיתי, עיבוד נוסף של תוצאות ואחרים. סדרת הכרטיסים (מודולים עם שמונה ערוצים כל אחד) שניתן לחבר הינה מגוונת מאוד ועשויה להתאים לכל מטרה. בנוסף ליחידה המרכזית (FP-2000), סדרת הכרטיסים נקבעה בהתאם לכניסות והיציאות המתבקשות במקרה זה, בהתאם לפרוט הבא:

- מודול למדידת טמפרטורה באמצעות תרמו כפלים (FP-TC-120)
- מודול למדידת זרם – 4-20 mA (FP-AI-110) לחיישנים שונים
- מודול למדידת פולסים (FP-DI-300) למדידת מהירות רוח וספיקת מים
- מודול יציאת מתח דיגיטאלית (FP-AO-210)
- יציאות מתח אנלוגית (FP-DO-401)

כמתואר, החממה הותקנה בצורה המאפשרת עריכת ניסיונות במגוון רחב של תצורות ומשטרי הפעלה ותוך כדי שילוב אלגוריתמים שונים של בקרה.

פיתוח הדמיית הבקרה ותנאי האקלים המתקבלים בעקבות זאת – ההדמיה שפותחה מבוססת על ארבעה מרכיבים עיקריים, כמתואר באיור 5 ובהתאם לפרוט הבא:

הכנסת נתונים – כולל מאפייני החממה, תנאים רצויים יום ולילה סטיות מותרות, ספיקות אויר ומים מקסימאליות ודרגות ההפעלה של המים. כמו כן, פרמטרי הבקרה שהם Δt – צעד הזמן ו- K – מקדם ההתכנסות לחישוב ספיקת האוויר, כפי שיוסבר בהמשך.

חישוב נתוני סביבה – הכולל קרינה בהנחה של שמים בהירים (כולל שעת זריחה ושעת שקיעה) וטמפרטורת אויר יבש ולח על פי קירוב של נתונים מטאורולוגיים ממוצעים רב שנתיים. שאר תכונות אויר הסביבה מחושבים על פי שני משתנים אלה ובהנחה של לחץ אטמוספרי סטנדרטי.

בקרה – פיתוח אלגוריתם של הבקרה הינה מטרת עבודה זו. הבקרה למעשה אמורה לשלוט בספיקות האוויר והמים, על מנת להקנות את התנאים הרצויים (טמפרטורה ולחות יחסית) בכל רגע נתון. כידוע התנאים הרצויים מוגדרים עבור שעות היום ועבור שעות הלילה. בהתאם לכך ובהתאם לשעה מוגדר יום או לילה. במהלך הלילה הפעלת המים מוגבלת לדרגה הנמוכה ביותר בלבד. כמתואר, ההחלטה מתקבלת בהתאם לכך שהטמפרטורה המתקבלת בפועל (טמפרטורה רצויה T_i) בתחום הרצוי (טמפרטורה רצויה T_{sp} עם סטייה מותרת ΔT) – ללא שינוי, או מחוצה לו – הפעל או הפסק בהתאם. לעומת זאת, במהלך שעות היום אין מגבלה בדרגות ההפעלה. כמו כן, ההחלטה מתקבל בנוסף לשיקולי טמפרטורה (בדומה ללילה), גם משיקולי לחות יחסית (R) המתקבלים בפועל בתנאים קיצוניים בהם אין שליטה בספיקת האוויר (נדרשת ספיקה מעבר לספיקה המקסימאלי או מתחת לספיקה מינימאלית המתקיימת ללא שליטה). בהתאם לדרגת הפעולה שנבחרה ניתן לקבוע את ספיקת המים בפועל. חשוב

להדגיש שספיקת המים הכוללת הינה זו המסופקת ובתוספת האידוי הנובע מהצמחים. ספיקת אידוי המים מהצמחים מחושבת על פי המשוואה הבאה: (m_p)

$$(4) \quad m_p = (30 + 0.3I)/2500$$

כאשר I – קרינת השמש. כמתואר למעלה, קרינת השמש מחושבת בהנחה של שמים בהירים. ספיקת האוויר נקבעת בשני שלבים המשקפים שינויים בספיקת המים ובהתאם לסטייה הקיימת בלחות היחסית מהערך הרצוי, על פי המשוואה הבאה:

$$(5) \quad m_{anew1} = m_{aold} \frac{m_{wnew}}{m_{wold}}$$

$$(6) \quad m_{anew} = m_{anew1} + K(R_i - R_{sp})$$

כאשר: m – ספיקת האוויר או המים. הסימונים התחתיים הם: a – אויר, w – מים, new – בסוף צעד הזמן ו- old – בתחילת צעד הזמן. בהתאם לכך, ניתן להצביע שאלגוריתם זה מבוסס על ההנחה שספיקת האוויר גדולה מספיק ועשויה להשתנות בהתאם, על מנת לפצות על שינויי מדרגה בספיקת המים. מהירות ההתכנסות של ספיקת האוויר לערך הרצוי תלויה בערך של K . חשוב להדגיש, גישה זו דומה במהותה לבקרת PI עם מספר יתרונות:

1. שינוי מדרגה בספיקת האוויר בהתאם לשינוי בספיקת המים.
2. הבקרה למעשה נעשית על השינוי בספיקת האוויר ולא על ערכה המוחלט, ובכך קיימת התאמה לסטייה בתנאים לסטייה בספיקת המים. הווה אומר שבבקרה פרופורציונאלית קיימת סטייה מובנית, בגישה זו הסטייה מתאפסת.
3. בבקרת PI ניתן להראות שיציאה מהתחום הרצוי גורר אחריו שגיאה ניכרת לאורך זמן גם לאחר הגעה למצב בו ניתן לשלוט בתנאים הרצויים. בגישה המוצעת, הדבר נמנע כתוצאה מהצבת הערכים הקיצוניים האמיתיים של ספיקת האוויר תוך הצבת המגבלות המעשיות. אלגוריתם זה מתאפיין בנקודות העיקריות הבאות:

- קבלת ההחלטות מבוססת על מדידת תנאי פנים בלבד (טמפרטורה ולחות יחסית).
 - ספיקת המים נקבעת בעיקר ע"י הטמפרטורה הנמדדת ואילו ספיקת האוויר בהתאם ללחות וספיקת המים.
- הדמית תנאי החממה** - משנקבעו שני פרמטרים אלה על ידי הבקרה ובהתאם לתנאי הסביבה, משוואות שימור אנרגיה ומסת אדי המים המתקבלים כמתואר במשוואות (1) ו-(2), בהתאמה.

$$(7) \quad (h_{inew} - h_{iold})V\rho_i = \left(h_{am}m_a + I\tau\alpha - U(T_i - T_{am}) - \frac{h_{iold} + h_{inew}}{2}m_a \right)\Delta t$$

$$(8) \quad (W_{inew} - W_{iold})V\rho_i = \left(m_w + W_{am}m_a - \frac{W_{iold} + W_{inew}}{2}m_a \right)\Delta t$$

כאשר: h – אנטלפיה, V – נפח החממה ליחידת שטח, ρ – משקל סגולי, τ – מעבירות כיסוי החממה, α – מקדם בליעת החום של החממה, U – מקדם מעבר החום של החממה ו- W – יחס הערבוב של האוויר. הסימונים התחתיים הם: i – פנימי ו- am – סביבה. משוואות אלה מבוססות על ההנחה שהאנטלפיה של האוויר בחממה

משתנה באופן ליניארי במהל צעד הזמן ואילו שאר התכונות (טמפרטורה, משקל הסגולי ואחרות) נשארים בערכם ההתחלתי (בתחילת צעד הזמן). בהתאם לשתי משוואות אלה, בידוד האנטלפיה ויחס הערבוב של האוויר בחממה בתום צעד הזמן המתקבל:

$$(9) \quad h_{inew} = \frac{\{h_{am}m_a + I\tau\alpha - U(T_i - T_{am})\}\Delta t + h_{iold}(V\rho_i - 0.5m_a\Delta t)}{V\rho_i + 0.5m_a\Delta t}$$

$$(10) \quad W_{inew} = \frac{m_w + W_{am}m_a\Delta t + W_{iold}(V\rho_i - 0.5m_a\Delta t)}{V\rho_i + 0.5m_a\Delta t}$$

בהתאם לשני משתנים אלה מחושבים שאר תכונות האוויר בחממה. מכאן, התהליך חוזר חלילה עבור צעד הזמן הבא. הדמיה כוללת זו, הינה כר נוח וחסכוני לבחינת היתכנות ולאפיון ביצועיהם של אלגוריתמים שונים של בקרה, בטרם עריכת ניסיונות הלכה למעשה.

שנה שנייה – כמצוין, בשל סופת הברקים נפגעו רכיבים אלקטרוניים רבים. רשימת המרכיבים שנפגעו הינה ארוכה וכללה מרכיבים ממערכות שונות שהעיקריים בהם: (1) מחשב – לוח אם, צג וכרטיסי תקשורת, (2) מערכת מדידות – מד קרינה, מדי טמפרטורה ולחות ומד לחץ, (3) בקר – היחידה המרכזית ומרבית הכרטיסים המודולאריים, (4) חשמל – מגעים, ספקי כוח, ובקרי תדר. תיקון המרכיבים השונים ארך זמן רב בעיקר בשל הקושי באיתור המרכיבים הפגועים וההמתנה למימון התיקונים מחברת הביטוח. בעקבות זאת, נרכשו והותקנו מחדש מרבית המרכיבים האלקטרוניים והמצב חזר לקדמותו.

פיתוח אלגוריתמים לבקרה – פיתוח בקרה התבססה על שני כיוונים עיקריים: באמצעות הדמיה ובתנאים מעשיים. **פיתוח אלגוריתם בקרה באמצעות הדמיה** – לעבודה במסלול זה, בנוסף לפיתוח אלגוריתם הבקרה, מטרה נוספת והיא בחינת יחסי הגומלין בין הבקרה לבין האפשרויות להפעלה הדרגתית ו\או רציפה הגלומות במערכות השליטה (אוורור וערפול). במסגרת זו, במהלך השנה הראשונה נבחנה מערכת המתאפיינת בכך שספיקת האוויר משתנה באופן רציף ולעומת זאת, ספיקת המים משתנה באופן מדורג. בדומה לכך ועל בסיס נתונים אלה, השנה נבחנה מערכת המאופיינת בכך שספיקת האוויר וספיקת המים משתנים באופן רציף, פרט לכך שספיקת המים ההתחלתית מתקבלת בקפיצת מדרגה. בדומה לשנה הראשונה, ההדמיה שפותחה מבוססת על אותן מרכיבים, וההבדלים נובעים באלגוריתם הבקרה, כמתואר באיור 6 ובהתאם לפרוט הבא:

בקרה – הבקרה למעשה אמורה לשלוט בספיקות האוויר והמים, על מנת להקנות את התנאים הרצויים (טמפרטורה ולחות יחסית) בכל רגע נתון. כידוע התנאים הרצויים מוגדרים עבור שעות היום ועבור שעות הלילה. בהתאם לכך ובהתאם לשעה מוגדר יום או לילה.

קביעת ספיקת מים לילה – בדומה להפעלה מדורגת (כמתואר בדו"ח של השנה שעברה), במהלך הלילה הפעלת המים מוגבלת לדרגה הנמוכה ביותר בלבד. כמתואר באיור 6, ההחלטה מתקבלת בהתאם לכך שהטמפרטורה המתקבלת בפועל (T_i) בתחום הרצוי (טמפרטורה רצויה T_{sp} עם סטייה מותרת ΔT) – ללא שינוי, או מחוצה לו – הפעל או הפסק בהתאם.

קביעת ספיקת מים יום – במהלך שעות היום אין מגבלה בדרגות ההפעלה והספקת המים, פרט לדרגה ההתחלתית, הינה רציפה תוך כדי שינוי דרגות ההפעלה והלחצים בהתאם. כמתואר באיור 6, ספיקת המים נקבעת על פי שני המשטרים הבאים:

- משטר הפעלה המתאפיין בשינוי מדרגה – בדומה למשטר לילה, אלא בכפוף לתנאים הרצויים במהלך היום.

- משטר הפעלה רציף – ספיקת המים נקבעת על פי המשוואה הבאה:

$$(11) \quad m_{wnew} = m_{wold} + K_w(R_i - R_{sp})$$

קביעת ספיקת האוויר – כמצוין, ספיקת האוויר משתנה באופן רציף במהלך כל היממה. בכפוף למשטר ההפעלה של המים, ספיקת האוויר נקבעת על פי שני המשתנים הבאים:

- אנטלפיה – בתנאים בהם ספיקת המים משתנים באופן רציף וספיקת המים נקבעת על פי המשוואה הבאה:

$$(12) \quad m_{anew} = m_{aold} + K_{a1}(h_i - h_{sp})$$

- לחות יחסית – כל שאר התנאים שהם: ללא הספקת מים כלל, ספיקת המים משתנה בקפיצת מדרגה (דרגה התחלתית לילה או יום) והספקת מים בספיקה מקסימאלית. בתנאים אלה ספיקת האוויר נקבעת על פי המשוואה הבאה:

$$(13) \quad m_{anew} = m_{aold} + K_{a2}(R_i - R_{sp})$$

כאשר: m – ספיקת האוויר או המים. הסימונים התחתיים הם: a – אויר, w – מים, new – בסוף צעד הזמן ו- old – בתחילת צעד הזמן. מהירות ההתכנסות של ספיקת האוויר והמים לערכים הרצויים תלויים בערכים של K_w , K_{a1} ו- K_{a2} . חשוב להדגיש, גישה זו דומה במהותה לבקרת PI עם מספר יתרונות:

4. הבקרה למעשה נעשית על השינוי בספיקות האוויר והמים ולא על ערכיהם המוחלטים. הווה אומר שבבקרה פרופורציונאלית קיימת סטייה מובנית, בגישה זו הסטייה מתאפסת.
5. בבקרת PI ניתן להראות שיציאה מהתחום הרצוי, גורר אחריו שגיאה ניכרת לאורך זמן גם לאחר הגעה למצב בו ניתן לשלוט בתנאים הרצויים. בגישה המוצעת, הדבר נמנע כתוצאה מהצבת הערכים הקיצוניים האמיתיים של ספיקת האוויר תוך הצבת המגבלות המעשיות.

אלגוריתם זה מתאפיין בנקודות העיקריות הבאות:

- קבלת ההחלטות מבוססת על מדידת תנאי פנים בלבד (טמפרטורה ולחות יחסית).
- ספיקת המים נקבעת על פי המשתנים: לחות יחסית – בהפעלה רציפה וטמפרטורה – בהפעלת מדרגה ובהתאם לכך, ספיקת האוויר נקבעת על פי המשתנים: אנטלפיה ולחות יחסית.

שנה שלישית – בתום השנה השנייה ובעיקר בשנה השלישית, העבודה התמקדה בפיתוח אלגוריתמי בקרה בתנאים מעשיים, בהתאם לפירוט הבא:

סביבת עבודה – שלב זה מתמקד בפיתוח סביבת עבודה ידידותית לצורך הכנסת נתונים, הפעלה, עיבוד נתונים, אגירת נתונים ותצוגה, על פי הפרוט הבא:

- הכנסת נתונים – מסתכמת בהגדרת תנאים הרצויים בחממה על ידי קביעת צמד תכונות של האוויר (טמפרטורות יבש לח או טמפרטורה ולחות יחסית) בתלות בזמן היומי.
 - הפעלה – מעבר להכנסת נתונים רצויים, ניתנת האפשרות להתערב בקביעת הבקרה רצויה כגון: אוטומטית מלאה (בשליטה בספיקת האוויר והמים), ידנית מלאה (בשליטה בספיקת האוויר והמים) ומעורבת שבה ניתן לבחור ספיקת מים ידנית וספיקת אוויר אוטומטית (ע"פ טמפרטורות לח או לחות יחסית) או ההיפך – ספיקת אוויר ידנית וספיקת מים אוטומטית (ע"פ לחות יחסית).
 - עיבוד נתונים כולל חישוב תכונות האוויר הן הרצויים והן המדודים (על פי טמפרטורות יבש ולח או טמפרטורה ולחות יחסית) באמצעות Matlab (ראה למעלה) ושגרות שהוכנו לצורך זה. נתונים אלה משמשים הן לבקרה והן לתצוגה בהתאם לצורך.
 - אגירת נתונים – אגירת נתונים מתבצעת במספר שלבים: שלב ראשון – באמצעות LabView רישום תוצאות (מדודות, מחושבות ותנאי ההפעלה) בצעדי זמן קצרים (שניות עד מספר דקות) למשך זמן מוגבל (דקות עד שעה), תוך כדי דריסת תוצאות קודמות (להסכון בזיכרון מחשב), שלב שני – הכנת קובץ יומי על בסיס הנתונים שנאספו בשלב הראשון תוך כדי עיבודם באמצעות Matlab (לקבלת ערכים כגון ממוצע מקסימום מינימום וכדומה) בהתאם לדרישות, שלב שלישי – בדומה לשלב השני, אלא הכנת קובץ תקופתי (עונתי או שנתי) על בסיס הנתונים שנאספו בשלב השני.
 - תצוגה – על בסיס הנתונים הנ"ל תצוגה של זמן אמת ותצוגה של תוצאות מצטברות. תצוגת זמן אמת כוללת תוצאות רגעיות של מדידות, מחושבות ותנאי הפעלה שנקבעו, המוצגים באמצעים שונים (גרפים, מחוונים, נוריות ואחרים) כמכלול אחד. תצוגה זו מיועדת בעיקר להעברת מידע מהירה ובהינף מבט באשר להתראות, תיאור מצב ההפעלות, תוצאות רגעיות ואפשרות לשינוי תנאי גידול רצויים. בשלב מאוחר יותר התצוגה תכלול גם התראות אשר ישודרו באמצעי תקשורת שונים. תצוגה של תוצאות מצטברות מבוססת על הצגה גרפית של תוצאות יומיות או תקופתיות ומתבססת על הקבצים המתוארים בסעיף הקודם.
- בקרה** – תחילה כוילו ספיקות האוויר והמים כתלות בזרם ההפעלה המשודר למשני התדר (למאווררים ולמשאבה – על שלושת הדרגות). בהתאם לכך, נקבעו פונקציות של זרם ההפעלה כתלות בספיקות היחסיות (לאחר נרמול) לגבי המאווררים והמשאבה על שלושת דרגותיה. כמו כן, בהתאם לכך נקבעו מצב הברזים (סגורים או פתוחים) כתלות בספיקת המים היחסית הרגעית. בשלב שני, פותחו אלגוריתמי בקרה ידנית ואוטומטית עבור האוויר והמים. תחילה פותחו שני אלגוריתמי בקרה ידנית המאפשרות הפעלת המערכות באמצעות קביעת ספיקות האוויר והמים היחסיות באופן ידני. אלגוריתמי הבקרה הידנית (הן של ספיקת האוויר והן ספיקת המים) פותחו כחלק מהבקרה הכוללת המאפשרים למגדל להתערב ולבחור בבקרה הרצויה (כמפורט בהמשך) וכשלב ביניים המשמש לצורכי לימוד, פיתוח ואפיון תגובות המערכות. אלגוריתמי הבקרה האוטומטיים פותחו בהתבסס על הגישה של PI. תחילה, פותחו אלגוריתמי בקרה עבור המצבים בהם התנאים מאפשרים שליטה בספיקות האוויר והמים ללא כל מגבלה, ספיקת האוויר נקבעה על פי טמפרטורת הלח (בקרוב טוב שוות ערך לאנטלפיה ראה משוואה 9) וספיקת המים על פי לחות יחסית, בהתאם למשוואות הבאות:

$$(14) \quad m_{anew} = m_{ao} + K_a(Tw_i - Tw_{sp}) + R_a \sum (Tw_i - Tw_{sp}) \Delta t$$

$$(15) \quad m_{wnew} = m_{wo} + K_w(R_i - R_{sp}) + R_w \sum (R_i - R_{sp}) \Delta t$$

בשלב שני, פותח אלגוריתם בקרה לתנאים בהם ספיקת המים קבועה בשל הגעה לערכים המקסימאלי או המינימאלי. מאחר וספיקת המים אינה ניתנת לשליטה, אלגוריתם בקרה אוטומטי זה מיועד לשליטה בספיקת האוויר על פי הלחות היחסית ובהתאם למשוואה:

$$(16) \quad m_{anew} = m_{ao} + K_{a1}(R_i - R_{sp}) + R_{a1} \sum (R_i - R_{sp}) \Delta t$$

כאשר: m – ערך התחלתי (באחוזים), Δt – צעד הזמן ו- K ו- R – מקדמי ההתכנסות. בשלב שלישי, פותחה הבקרה האוטומטית המלאה עבור יממה שלמה המתבססת על שלושת האלגוריתמים האחרונים על כל המעברים. לבסוף, פותחה בקרה כוללת המאפשרת להתערב ולהפעיל את המערכות, בנוסף לבקרה האוטומטית המלאה, בהתאם לכל האלגוריתמים הנ"ל ועל פי כל צירוף רצוי.

תוצאות ודיון

בחינת אלגוריתמי בקרה באמצעות הדמיה – לצורך אפיון ביצועי אלגוריתם הבקרה, נבחר יום קיץ מייצג בערבה כמתואר באיור 7. (a) מתואר מהלך קרינת השמש התואם תנאים של שמים בהירים להוציא בין השעות אחת לשתיים שרמת הקרינה נקבעה על 300 וואט למ"ר. באיור 7 (b) מתוארים מהלכי טמפרטורה ולחות יחסית המתאפיינות במגמות הפוכות זו לזו. שינוי מדרגה יזום זה נעשה במגמה לבחון את התנהגות המערכת כמקובל. חשוב להדגיש את הטמפרטורות הגבוהות במהלך שעות הלילה המצביעות על הצורך בצינון גם בשעות אלה. לצורך ההדמיה נקבעו ערכי המשתנים (אלא אם יצוין אחרת) הבאים:

- ספיקת אוויר מקסימאלית – 160 ק"ג (אוויר יבש) למ"ר לשעה, אלא אם יצוין אחרת
- ספיקת מים מקסימאלית – 900 ג' למ"ר לשעה, אלא אם יצוין אחרת
- חלוקת פומיות הריסוס על ידי שלושה קווים 23% 32% ו- 45%
- צעד זמן (ΔT) – 15 שניות
- מקדמי ההתכנסות בערכים של $K_w = 2$, $K_{a1} = 0.5$ ו- של $K_{a2} = 1$
- טמפרטורה רצויה – יום 28 ולילה 21 מ"צ
- לחות יחסית רצויה – 80% יום לילה
- סטיות מותרות – טמפרטורה 0.5 מ"צ ולחות יחסית 2% בהפעלת הדרגה הראשונה של המים (בעיקר לילה)

תוצאות ההדמיה ניתן לבחון בהשוואה לשתי מערכות יחוס והם:

אידיאלית – מערכת ייחוס בעל גישה תיאורטית וספיקת האוויר והמים (הכוללת) מחושבות על פי משוואות 1 ו- 2 כמתואר באיור 8 (a) ושטף האידוי של הצמחייה (בהתאם למשוואה 4) וכנגזרת מכך ספיקת המים שיש לספק, כמתואר באיור 3 (b). על פי תוצאות אלה ניתן להצביע על כך שלא ניתן לקיים את התנאים הרצויים (ראה למעלה) בחממה מייד לאחר הזריחה למשך כמחצית השעה (בשל שטף הקרינה המועט) ובשעות שלאחר השקיעה עד חצות

(בשל המגבלות כמפורט במשוואות 1 ו-2). בשעות הבוקר למשל, הסיבה שלא ניתן לקיים את התנאים הרצויים נעוצה בשטף הקרינה הנמוך. משך הזמן לכך גדל בעקבות דיות הצמחים. לעומת זאת, בשעות הערב, הסיבה לכך נעוצה בכך שהן האנטלפיה והן יחס הערבוב של אוויר החממה (על פי התנאים הרצויים) קטנים מאלה של הסביבה, בניגוד לדרישות כמצוין במשוואות (1) ו- (2). מצב זה מתהפך לקראת חצות וככול שהפרשים באנטלפיה וביחס הערבוב (בין פנים וחוצן) גדל, ספיקות האוויר והמים קטנות, בהתאמה.

ביקורת – מערכת ללא חלוקה הנהוגה כיום, לצורך אפיון התמורה השולית של ההפעלה ההדרגתית ו/או רציפה (על כל האפשרויות הכלולות בה). בתנאים אלה, תוצאות ההדמיה המתקבלות מתוארות באיור 9. באיור 9 (a) מתואר מהלך ספיקת האוויר, באיור 9 (b) מתואר מהלך ספיקת המים המסופקים באמצעות ערפול (m_m), באיור 9 (c) מתואר מהלך הטמפרטורה בחממה ובאיור 9 (d) מתואר מהלך של הלחות היחסית. על פי תוצאות אלה, ניתן להצביע על שינויים חדים בספיקות המים והאוויר לאורך היממה, דבר התורם לבלאי מואץ של שתי המערכות, אוורור וערפול. בנוסף לכך, ניתן להצביע על חריגות משמעותיות מהתחומים הרצויים (טמפרטורה ולחות) ובשעות הערב לא ניתן היה לשמור על הלחות הרצויה כלל ובכך למעשה הבקרה המוצעת כשלה. כישלון זה נובע מכך שספיקת האוויר בתנאים אלה, לא הייתה מספקת להרחקת עודפי הלחות ובניגוד להנחה הבסיסית של הבקרה. כמדד להגברת הבלאי, מספר ההפעלות היומי של מערכת הערפול היה במקרה זה, 1140. ניתן להראות שהקטנת צעד הזמן מ-15 שניות ל-6 שניות (ראה טבלה 1 - תוצאות בסוגריים) הגדילה את מספר המעברים ל-1410 ויחד עם זאת לא שינתה מהותית את התוצאות המתקבלות. על אף כל החסרונות שנמנו, ניתן להתעודד מהתוצאות בכך שככלל הבקרה פעלה באופן סביר למדי במרבית שעות היממה וניתן לצפות שהביצועים ישתפרו כתוצאה מהגמישות שתתקבל בהפעלה ההדרגתית ו/או הרציפה.

אלגוריתם בקרה בהפעלה הדרגתית – כמתואר בטבלה 1 (וכמפורט בדו"ח של השנה הראשונה), נבחנו מקרים רבים של הפעלה הדרגתית. בהתאם לכך, עולה שככול שמספר דרגות ההפעלה של המים גדלה ניתן להצביע על כך שקיימת הפחתה ניכרת במספר המעברים והקטנה משמעותית בבלאי המערכת, קיימת התאמה טובה יותר של ספיקת המים הנדרשת בכל רגע נתון ובכפוף לכך ספיקת האוויר וכתוצאה מכך עלות ההפעלה קטנה באופן משמעותי. לעומת זאת, עלות המערכת גדלה בחלק מהמקרים. בנוסף לכך ולשם הדגמה בלבד, נבחרה מערכת ערפול בעלת שלושה קווי הזנה (0.23, 0.32 ו-0.45) ובשני לחצים המקנים שמונה דרגות הפעלה. כמתואר באיור 10, ניתן להצביע על שיפור ניכר בהשוואה לתוצאות ה"ביקורת" בכך שהסטיות מהתנאים הרצויים מצטמצמות. כמו כן, בתנאים אלה מספר המעברים (בין הדרגות ההפעלה של המים) היומי קטן מאוד בהשוואה ל"ביקורת" ועומד על 216. מערכת זו משמשת כמערכת הייחוס נוספת להפעלה רציפה משום שהיא מתוכננת כך שמאפשרת רצף בספיקת המים במעבר בין הדרגות באמצעות שינוי לחצים.

אלגוריתם בקרה בהפעלה רציפה – תוצאות ההדמיה המתקבלות של מערכת בעלת ספיקה המשתנה באופן רציף (פרט לדרגה הראשונה כמתואר למעלה), מובאות באיורים 11 – 13. באיור 11 מובאות התוצאות של המערכת על פי המפרט כמתואר בסעיף הקודם. על פי תוצאות אלה, ניתן להצביע על כך שבמהלך מרבית שעות היום ספיקות המים והאוויר השתנו באופן רציף ונשמרו התנאים הרצויים בדיוק רב. כמו כן, התקבלה התכנסות מהירה בעקבות שינויי המדרגה בקרינת השמש. כתוצאה מכך, מספר המעברים היומי קטן באופן ניכר בהשוואה להפעלה

ההדרגתית ועומד על 130 בלבד לעומת 216 בהפעלה הדרגתית (של אותה המערכת). באיור 12 מובאים תוצאות דומות, אלא של מערכת שספיקת האוויר מוגבלת לכדי 100 ק"ג לשעה למ"ר. בהתאם לכך, בשעות הצהריים טמפרטורת האוויר עלתה לכדי 29 מ"צ תוך כדי הגדלת ספיקת המים באופן מתון יותר ושמירת לחות יחסית רצויה (80%). בדומה לכך, באיור 13 מובאים תוצאות של מערכת במגבלת מים של 600 ג' למ"ר לשעה. מכאן, התקבלה תוצאה דומה למקרה הקודם אלא בהקטנת ספיקת האוויר.

בקרה בתנאים מעשיים – כמתואר למעלה הוחל בפיתוח הבקרה המעשית אשר נעשית במספר כיוונים במקביל ועל פי הפרוט הבא:

סביבת עבודה – כמתואר באיור 14, פותחה סביבת עבודה ידידותית למשתמש הכוללת בין היתר: הכנסת תנאים רצויים (טמפרטורה ולחות יחסית יום לילה), המדידות הרגעיות (טמפרטורות, קרינות וכדומה) והערכים המחושבים בהתאם (תכונות נוספות של האוויר), תצוגה גראפית בזמן אמת ותנאי ההפעלה (מצב ברזים, לחץ עבודה, ספיקת המים וספיקת האוויר). כמו כן, ניתנת האפשרות למגדל להתערב ולבחור בבקרה הרצויה כמפורט בהמשך. אגירת הנתונים נעשית לעת עתה תוך כדי רישום המדידות, משתנים מחושבים ותנאי ההפעלה בצעדי זמן רצויים למשך זמן של ההפעלה. באשר לעיבוד נתונים תקופתיים (כמתואר למעלה), המשך הפיתוח יעשה לאחר גמר פיתוח ובחינת האלגוריתם הכולל (יממה שלמה) של הבקרה, בשלב מאוחר יותר של העבודה.

תוצאות אלגוריתמי הבקרה המעשיים – האלגוריתמים השונים נבחנו והתוצאות שהתקבלו מובאות על פי הפרוט הבא:

בקרה ידנית של ספיקות האוויר והמים – דוגמה לתוצאות המעשיות המתקבלות כתוצאה מהפעלה ידנית מובאות באיור 15. באיור 15 (a) מוצגים טמפרטורת הלח והלחות היחסית מחוצה לחממה ובתוך החממה, כתוצאה מהפעלת שתי המערכות כמתואר באיור 15 (b). באיור 15 (c) מוצגים טמפרטורת האוויר מחוץ לחממה ובחממה ובנוסף לכך קרינת השמש. באיור 15 (d) מוצגים מהירות וכיוון הרוח. על פי תוצאות אלה, ניתן להצביע על כך שעל אף שהמערכות הופעלו בספיקות קבועות, קיימים שינויים בתנאים המתקבלים בשל השינויים שחלים בתנאי הסביבה. במקרה זה, השינויים נובעים בעיקר במהירות ובכיוון הרוח וכן בטמפרטורות יבש ולח של הסביבה, ולעומת זאת קרינת השמש יציבה למדי. כמובן, הפרעות אלה יחייבו שינויים בתנאי ההפעלה לשמירת תנאים יציבים בחממה. מידת התכיפות של השינויים בתנאי ההפעלה תתקבל כפשרה בין רמת הדיוק בשמירה על התנאים הרצויים בכל רגע מחד גיסא, והבלאי הנוצר בעקבות זאת מאידך גיסא.

בקרה אוטומטית של ספיקת האוויר ע"פ טמפרטורת לח – תוצאות של בקרה אוטומטית של ספיקת האוויר ע"פ טמפרטורת לח מובאות באיור 16 במתכונת דומה לזו המתוארת בסעיף הקודם, אלא בתוספת טמפרטורת הלח הרצויה, כמתואר באיור 16 (a). כנהוג, אלגוריתמי בקרה נבחנו במידת התכנסותם לתנאים הרצויים ולאחר שינויי מדרגה. במקרה זה, החממה אווררה באופן ידני וללא מים ועם תחילת הניסוי הוצבה טמפרטורת הלח על 19.5 מ"צ ומערכת הערפול תופעלה באופן ידני כאשר ספיקת המים עמדה על 60%. על פי התוצאות נראה שההתכנסות לטמפרטורה הרצויה מתקבלת לאחר מספר דקות וככול שטמפרטורת הלח הרצויה נמוכה יותר ספיקת האוויר גבוהה יותר. תוצאות אלה התקבלו כאשר $K=20$ ו- $R=0.5$ (ראה משוואה 14).

בקרה אוטומטית של ספיקת המים ע"פ לחות יחסית – בקרה אוטומטית של ספיקת המים ע"פ לחות יחסית נבחנה במתכונת דומה, כמתואר באיור 17. על פי התוצאות ניתן להצביע על כך שהלחות היחסית התכנסה לערכים הרצויים לאחר מספר דקות מועט. כמתואר באיור 17 (b), תחילה, ספיקת המים עלתה ל- 100% ולאחר מכן הייתה במגמת ירידה והתייצבה על הערכים סביב ה- 70%. כמו כן ובהתאם לכך, מערכת הערפול תופעלה בדרגות השונות כפי שמשקף בשינויים בלחץ המים. כמתואר למעלה, מערכת הערפול הניסיונית הינה בעלת שלוש דרגות הפעלה והמעבר בין דרגה אחת לאחרת מלווה בשינוי לחץ קיצוני. תוצאות אלה התקבלו כאשר $K=2$ ו- $R=0.005$ (ראה משוואה 15).

בקרה אוטומטית של ספיקת האוויר ע"פ לחות יחסית – בקרה אוטומטית של ספיקת האוויר ע"פ לחות יחסית נבחנה כאשר ספיקת המים הופעלה באופן ידני ונקבעה על 100% והלחות היחסית הרצויה נקבעה על 60%, כמתואר באיור 18. בדומה למקרים הקודמים, ההתכנסות של הלחות היחסית לערך הרצוי התקבלה לאחר מספר דקות מועט. תוצאות אלה התקבלו כאשר $K=1$ ו- $R=0.5$ (ראה משוואה 16).

בקרה אוטומטית של ספיקת האוויר ע"פ טמפרטורת לח וספיקת המים ע"פ לחות יחסית – בדומה למקרים הקודמים, אלא שהפעם הוצבו ערכים רצויים הן לטמפרטורת הלח (20.5 מ"צ) והן ללחות היחסית (60%), כמתואר באיור 19. על פי תוצאות אלה, ניתן להצביע שוב על התכנסות מהירה ולאחר מספר דקות מועט. תוצאות אלה התקבלו כאשר עבור האוויר $K=25$ ו- $R=0.5$ (ראה משוואה 14), ועבור המים $K=2$ ו- $R=0.005$ (ראה משוואה 15).

הבקרה הכוללת ולמשך יממה שלמה מבוססת בעיקר על בקרת ספיקת האוויר על פי טמפרטורת הלח וספיקת המים על פי לחות יחסית, הן לשעות היום והן לשעות הלילה. בקרה זו תופעל כל עוד שספיקת המים ניתנת לשליטה. מעבר לבקרת ספיקת אוויר על פי לחות יחסית, יתבצע כאשר ספיקת המים הגיעה לתנאי רוויה (מקסימום או מינימום) ולא ניתנת לשינוי. מקדמי ההתכנסות של האלגוריתמים השונים (ספיקת אוויר ע"פ טמפרטורת לח או ע"פ לחות יחסית, וספיקת מים ע"פ לחות יחסית) יבחנו שוב ויקבעו בהתאם לתוצאות שיתקבלו בהפעלות ארוכות טווח – במהלך יממות שלמות.

סיכום ומסקנות

עבודה זו התמקדה בפיתוח המכלול של בקרה ומערכות שליטה לצינון חממות. לצורך זה, עבודה זו כללה פיתוח אלגוריתמי בקרת אקלים לצינון חממות, אפיון יחסי הגומלין בין הבקרה ומערכות השליטה ובחינת התוצאות המתקבלות כתוצאה מכך. במסגרת זו, מערכות השליטה הינן שילוב של מערכות ערפול ואוורור כאשר שטף האוורור ניתן לשינוי באופן רציף ושטף הספקת המים (ערפול) ניתן לשינוי בשתי צורות – הדרגתי ורציף. מכלולים אלה נבחנו תחילה, באמצעות תוכנות הדמיה שפותחו לצורך זה, כתלות במספר דרגות ההפעלה של המים. על בסיס זה ולצרכים מעשיים, פותחו סביבת עבודה ומספר אלגוריתמי בקרה אשר נבחנו בתנאים של החממה הניסיונית שצוידה והותאמה לצורך זה. על פי התוצאות המעודדות שהתקבלו ניתן להצביע על המסקנות העיקריות הבאות:

1. אין ספק שהשילוב המוצע מהווה פתרון הולם ליישום מסחרי אשר יתרום רבות לתפעול החממות במהלך כל ימות השנה על כל היתרונות הכלכליים הנלווים.

2. הבקרה שפותחה מאפשרת קבלת תנאים רצויים וברמת דיוק גבוהה במרבית הזמן וכל עוד שמערכות השליטה אינן בתנאי רוויה, והתנאים המיטביים האפשריים תחת מגבלות מערכות השליטה (תנאי רוויה).
3. סביבת העבודה שפותחה הינה נוחה, יעילה וידידותית למשתמש.
4. לצורך בקרה ניתן להסתפק במדידת תנאי הפנים בלבד ללא צורך בניטור תנאי הסביבה. דבר, המקטין את עלות מערכת הבקרה הן בהתקנה והן בתפעול.
5. הספקת מים באופן רציף מקנה במרבית שעות האור את התנאים הרצויים בדיוק רב ומספר המעברים היומי קטן באופן ניכר בהשוואה להפעלה ההדרגתית.
6. קביעת מספר דרגות ההפעלה מתקבל כפשרה בהתאם ל: הצורך בצינון לילי, עלויות התקנה ותפעול והעמידה בתנאי ההפעלה.
7. מומלץ להמשיך בעבודה בהתאם לפרוט הבא:
 - בחינת השילוב המוצע (מערכות שליטה ובקרה) בחממה בקנה מידה מסחרי
 - פיתוח אלגוריתמים נוספים ובחינתם
 - פיתוח אלגוריתמי בקרה שיתבססו על אורור טבעי בעיקר להרחבת הנושא עבור רפתות ולולים
 - פיתוח תוכנת בקרה כוללת לשליטה במערכות נוספות כגון: חימום, אורור טבעי, אורור מאולץ ואחרות

רשימת ספרות מצוטטת

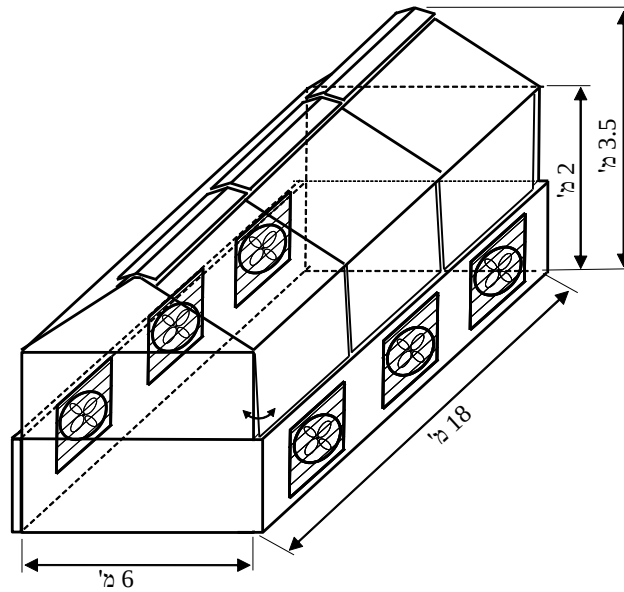
1. Elad, Y. 1989. Effet of aboitic on developent of Gray Mold of Rose and scanning electron microscopy, Phytopath. Modit. 28:122-130
2. Kenneth. H. 1983. Compendium of rose. the American Phytopathological Society. st. Paul MN.
3. Frenkel, H. 1986. Pesticide application, technique and efficiency. In: Pali. J. and R. Ausher (Eds.), Advisory Work in Crop Pest and Disease Management. Springer Verag, New York, NY. pp 132-160.
4. Arbel A., Yekutieli O. and Barak M. 1996. Fog system for cooling greenhouses. Mikun Vehandasa Bachaclaut 3:27-32 (in Hebrew).
5. Arbel A. Yekutieli O. and Barak M. 1998. Greenhouses cooling by fogging system. Maim Vehashkaya 382: 7-14 (in Hebrew).
6. Arbel A., Yekutieli O. and Barak M. 1999. Performance of a fog system for cooling greenhouses. Journal of Agricultural Engineering Research 72:129-136.
7. Arbel A., Barak M. and Shklyar A. 2002. Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. Biosystems Engineering 84:45-55.

8. Arbel A., Shklyar A. and Barak M. 1999. Buoyancy-driven ventilation in a greenhouse cooled by a fogging system. *Acta Horticulturae* 534:327-334.
9. Arbel, A., Zamir, N., Yekutieli, O. (1989). Greenhouses climatic conditions at noon in the Arava. *Hassade*, Vol. 70, 321-323 (in Hebrew)
10. Arbel, A., Zamir, N., Yekutieli, O. (1989). Adaptation of greenhouses for desert regions. *Flower Growers Journal* Vol. 3, 42-43 (in Hebrew)
11. Arbel, A., Segal, I., Yekutieli, O., Zamir, N. (1990). Natural ventilation of greenhouses in desert climate. *Acta Horticulturae* 281: 167-174
12. Bruce, J. M. 1987a. Natural ventilation - its role and application in the bio-climatic system. *Farm building R&D Studies* (8).
13. Bruce, J. M. 1987b. Thermal Buoyancy; a comparison of theory and experiment. *Farm building progress* (47).
14. Stanghellini, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops and aid to climate management. Ph. D. Dissertation, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 150 pp.
15. Hanan, J. J. 1998. Greenhouses advanced technology for protected horticulture, CRC Press, New York. 684 pp.
16. Hanan J. J., Coker, F. A. and Glodsberry, K. L. 1987. A climate control system for greenhouse research. *HortScience*, (22) 704-708
17. Tantau, H. J. 1980. Climate control algorithms. *Acta Hort.* (106) 49-54
18. Udit, A. J. 1983. Modeling and (adaptive) control of greenhouse climate. Ph.D. Dissertation. Landbou, Wageningen, 159 pp
19. Udit, A. J. 1987. Analysis and synthesis of greenhouse climate controllers. In *computer Applications In Agricultural Environments*. Clark et al., eds. Butterworths, London. Chap. 1, pp 1-20
20. Udit, A. J. and J. van de Vooren 1984a. New models for greenhouse climate control. *Acta Hort.* (148) 277-285
21. Udit, A. J. and J. van de Vooren 1984b. Modelling of greenhouse temperatures using time-series analysis techniques. 9th IFAC World Congress, Budapest, (1) 272-276
22. Jones, P. 1994. Environmental control: Thermostats to Computers. In *Greenhouse Systems. Automation, Culture, and Environmental*. NRAES-72. Rutgers Univ., New Brunswick, NJ

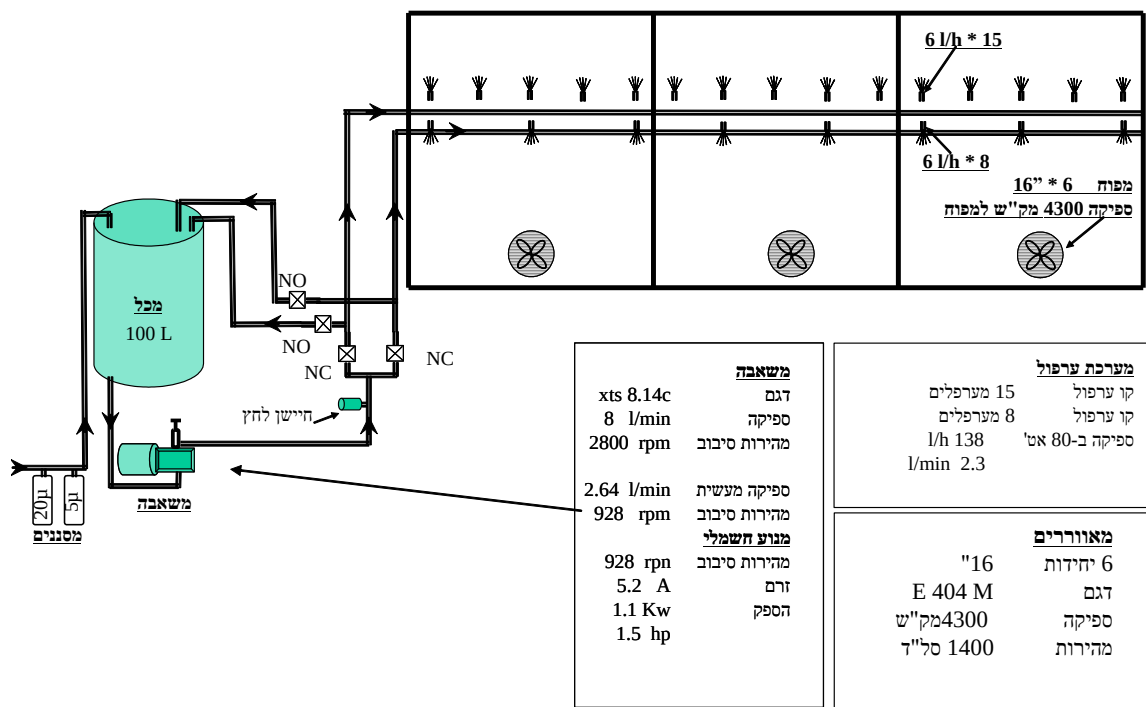
23. Sigrimis, N., Anastasiou, A. and Rerras, N. 2000. Energy saving in greenhouses using temperature integration: a simulation survey. Computers and Electronics in Agriculture, (26) 321-341
24. Pasgianos, G. D., Arvanitis, K. G., Polycarpou, P. and Sigrimis, N. 2003. A nonlinear feedback technique for greenhouse environmental control. Computers and Electronics in Agriculture, (40) 153-177

טבלה 1: מאפייני המערכות שנבחנו הבאים לידי ביטוי בחלוקה, רמות לחץ, דרגות ההפעלה, עלות וצעד הזמן וכתוצאה מכך ביצועים יחסיים הבאים לידי ביטוי במספר ההפעלות היומי, צריכת מים יומית ושטף אוורור יומי

חלוקת קווי הפומיות	רמות לחץ	מספר דרגות	ספיקת מים של דרגות ההפעלה (בסדר עולה) %	עלות %	צעד זמן שניות	מספר ההפעלות (הפעל או הפסק)	צריכת מים יומית %	שטף אוורור יומי %
1	1	1	100	100	15 (6)	1140 (1410)	100	100
1	2	2	100, 70	103	15	744	105	111
2	1	2	100, 50	103	15	642	101	110
2	2	5	100, 85, 70, 50, 35	106	15	324	90	97
2	2	8	80, 70, 67, 47, 33, 23, 100, 90	106	15	210	82	87
3	2	8	55, 48, 45, 32, 23, 16, 100, 70	118	15	216	79	81
3	2	13	46, 35, 33, 23, 17, 12, 90, 83, 73, 68, 58, 52, 100	118	15 (30) (60)	122 (84) (80)	73	75
4	2	15	35, 28, 20, 14, 10, 7, 70, 63, 60, 56, 49, 42, 100, 90, 80	130	15 (30) (60)	78 (62) (64)	70	70

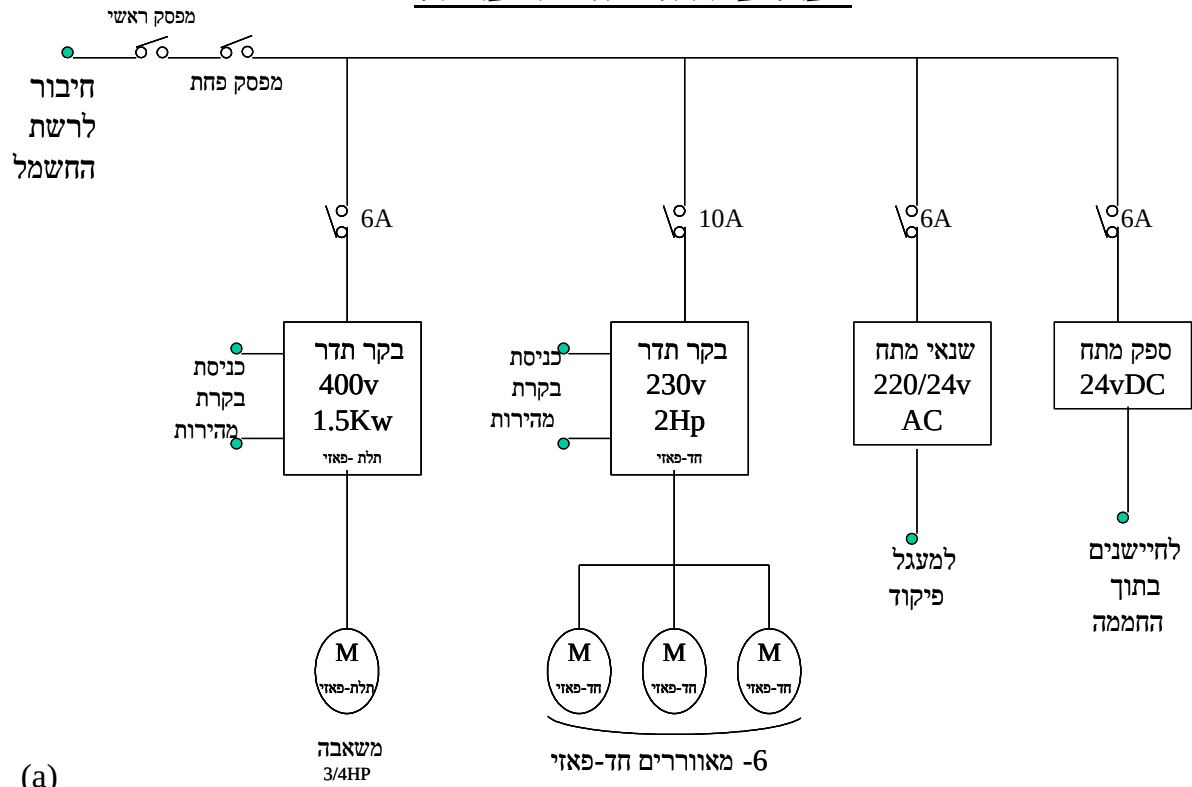


איור 1: תאור סכמאטי של החממה

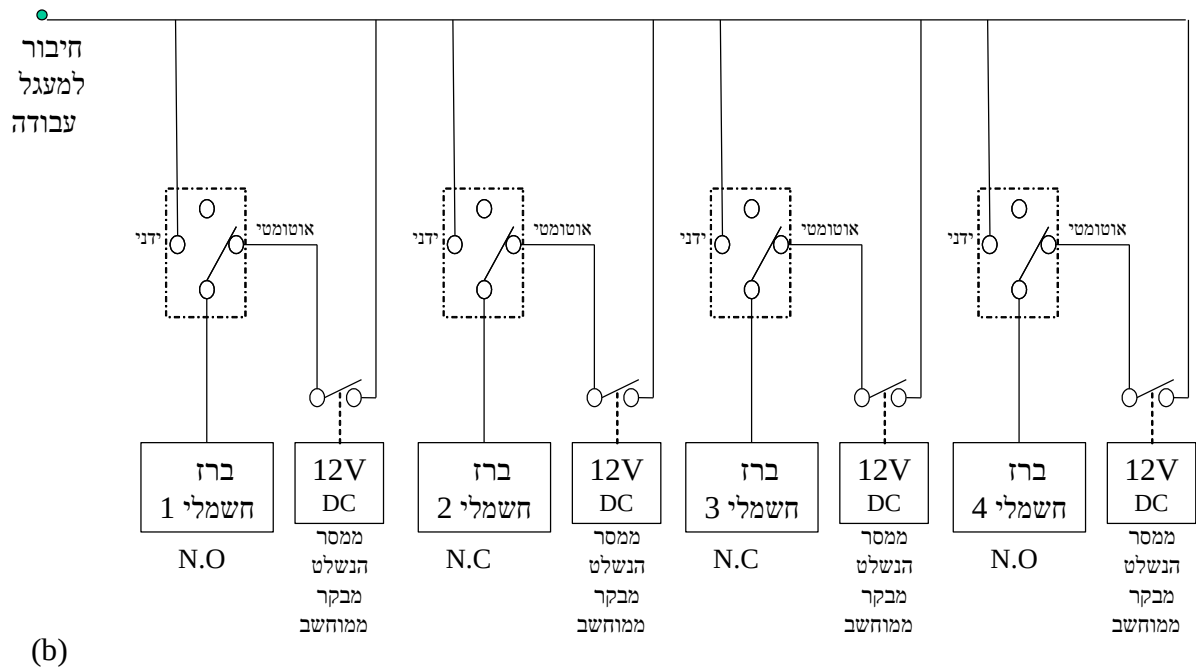
מערכת ערפול

איור 2: תאור סכמאטי של מערכת הערפול

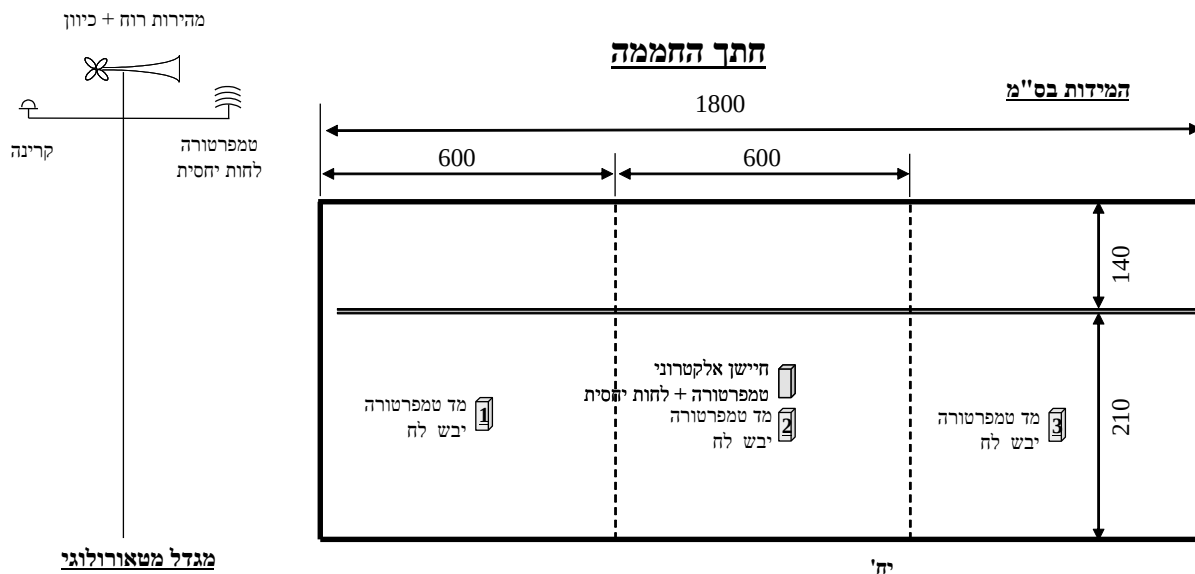
מעגל עבודה – חממת ערפול



מעגל פיקוד – חממת ערפול



איור 3: תאור סכמאטי של מערכת החשמל (a) מעגל עבודה (b) מעגל פיקוד



יח'.

National Instruments - בקר

FP 2000	1. בקר
FP-TC- 120	2. טמפרטורה
FP-AI - 110	3. כניסת זרם
FP-DI - 300	4. כניסת פולסים
FP-AO-210	5. יציאת מתח
FP-DO-401	6. יציאת פיקוד

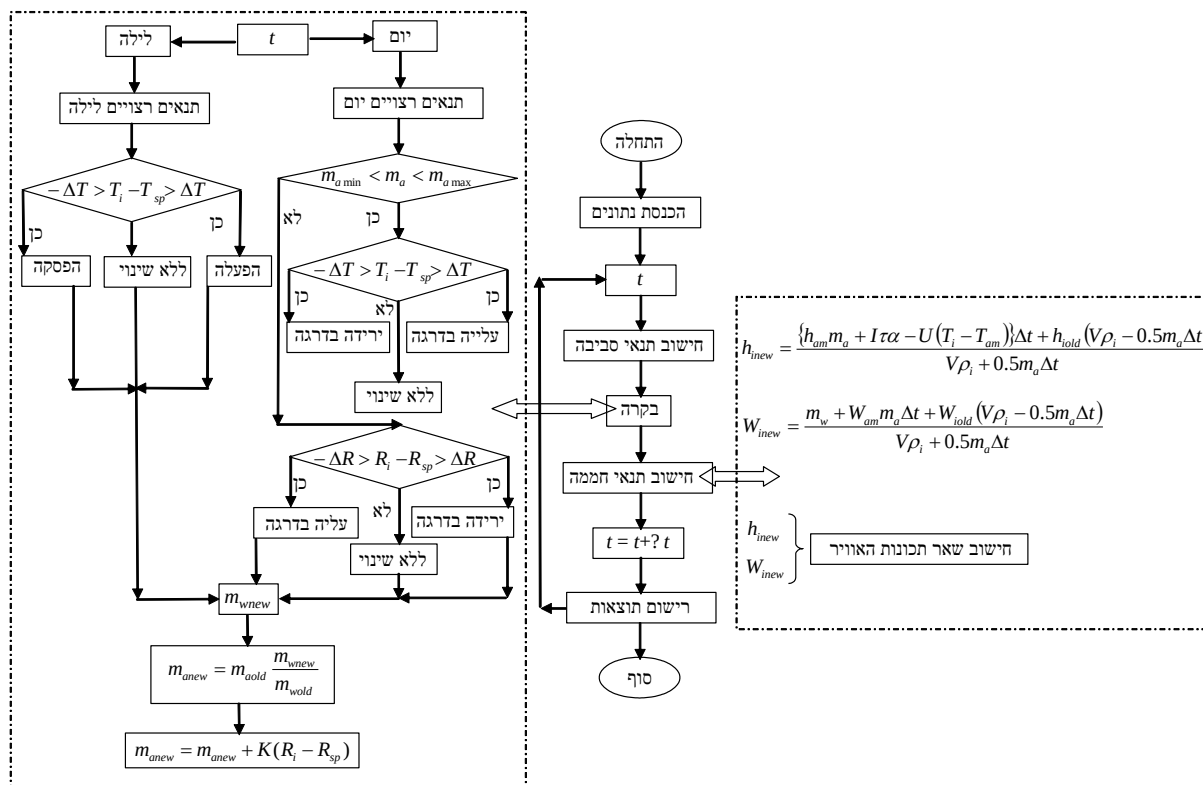
חיישנים בחממה

- | | | |
|--------|------------------|----|
| [mv] 6 | טרמוכפלים יבש לה | 1. |
| [ma] 2 | טמפ' ולחות אלקט' | 2. |

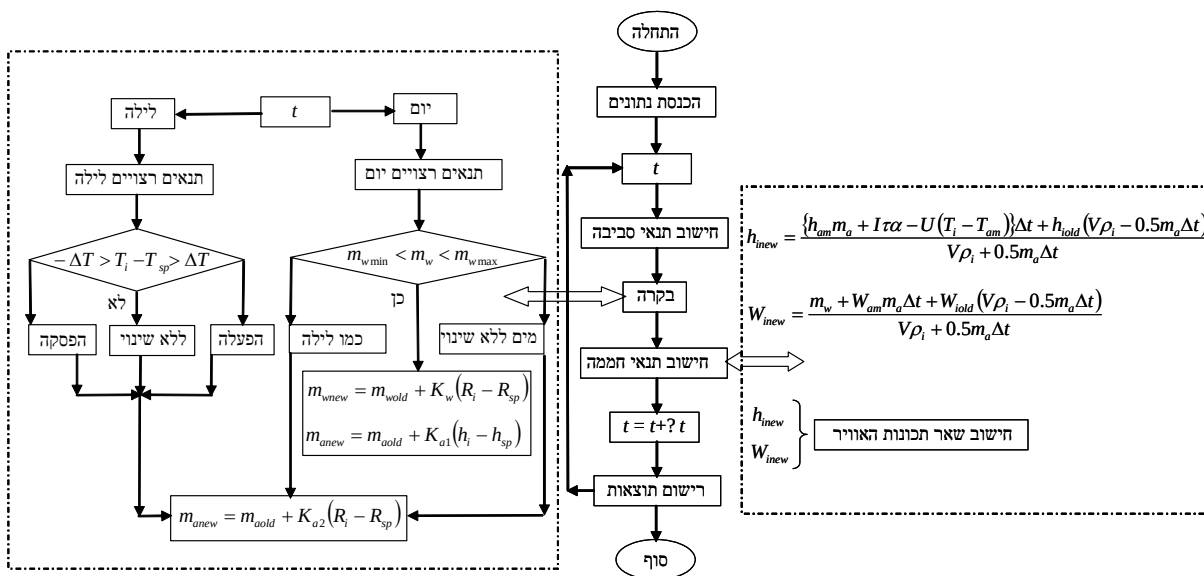
מגדל מטאורולוגי

- | | |
|-----------|--------------|
| [ma] 1 | • טמפ' |
| [ma] 1 | • לחות |
| [ma] 1 | • קרינה |
| [ma] 1 | • כיוון רוח |
| [pulse] 1 | • מהירות רוח |

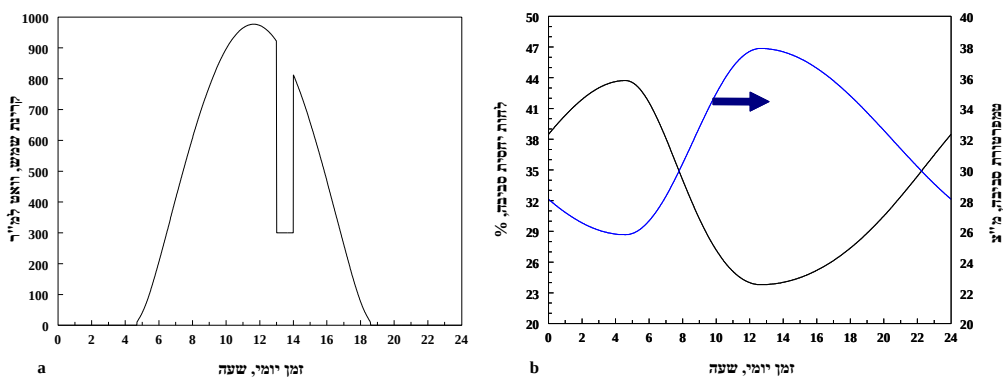
איור 4: תאור סכמאתי של מערכת המדידות



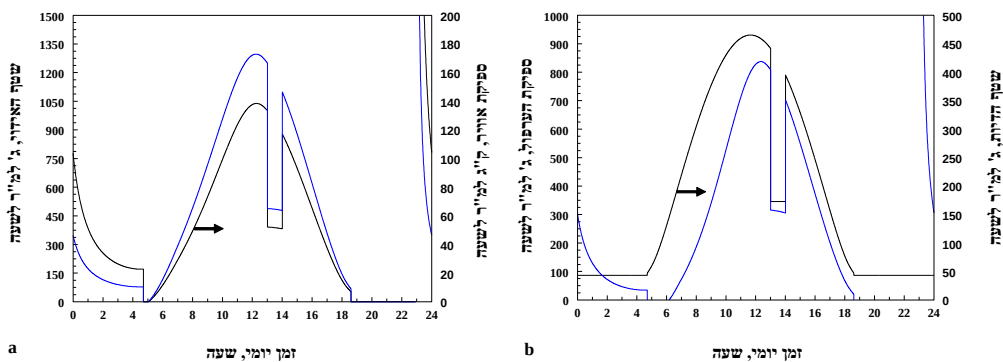
איור 5: תרשים זרימה של הדמית תנאים בחממה ובקרתם



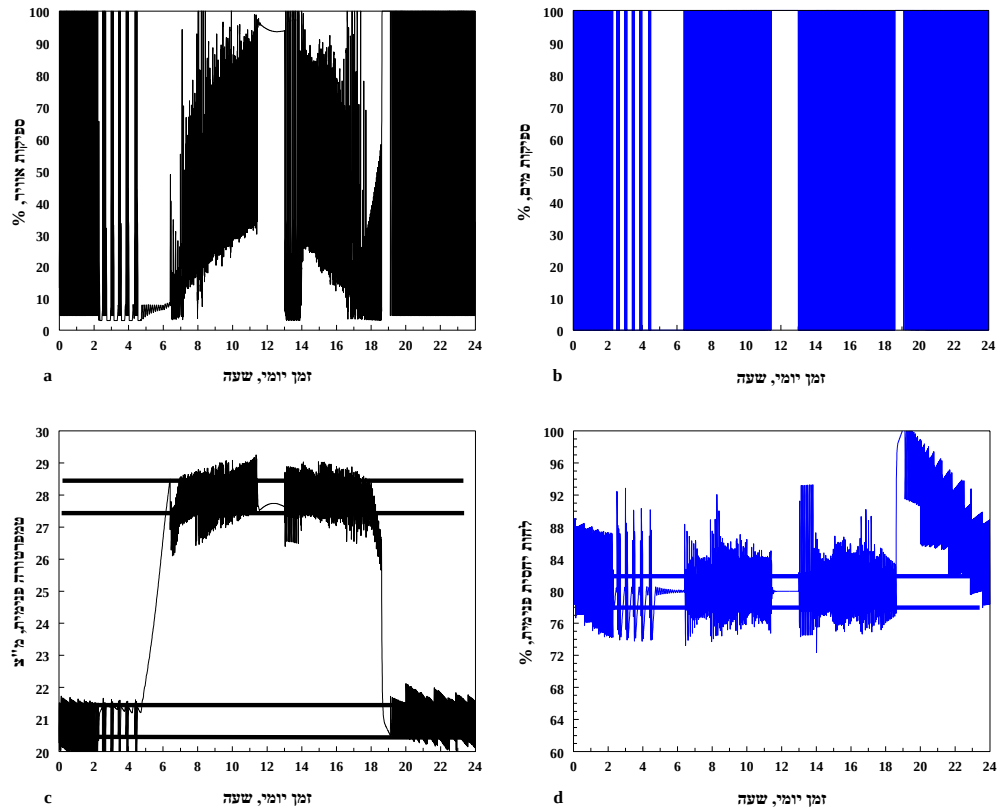
איור 6: תרשים זרימה של הדמית תנאים בחממה ובקרתם



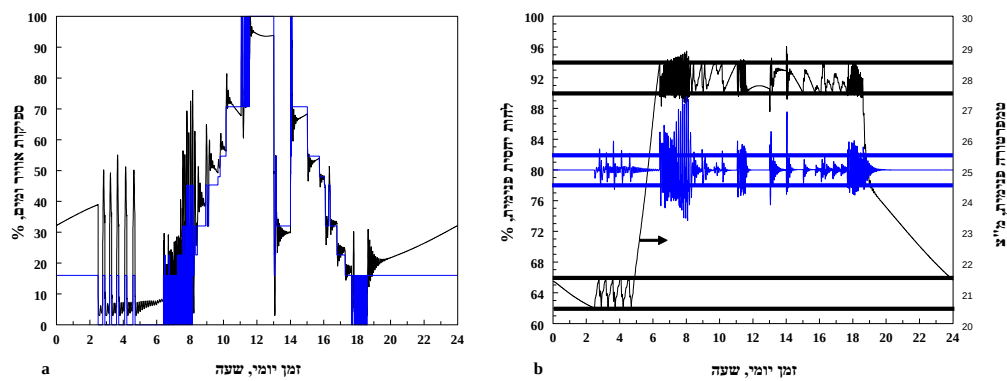
איור 7: תנאי סביבה: (a) – מהלך יומי של קרינת השמש, (b) – מהלך יומי של טמפרטורת ולחות האוויר של הסביבה.



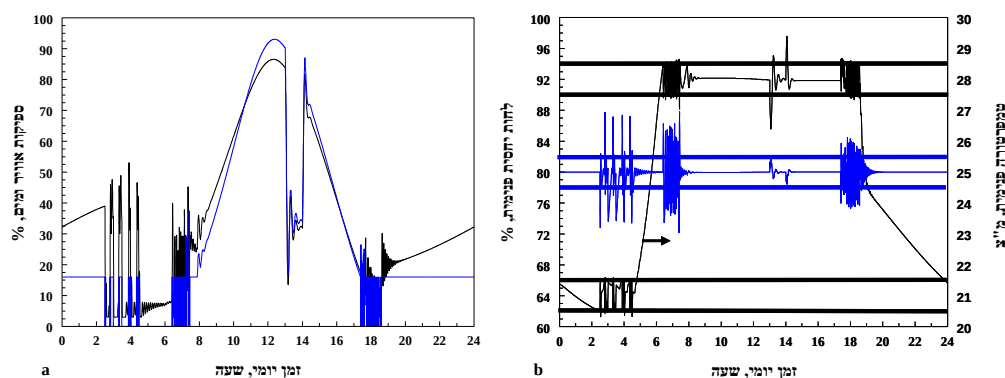
אזור 8: תוצאות הדמיה של הבקרה: (a) – מהלך יומי של ספיקת האוויר וספיקת המים הכוללת, (b) – מהלך יומי של שטף דיות הצמחים וספיקת המים שיש לספק.



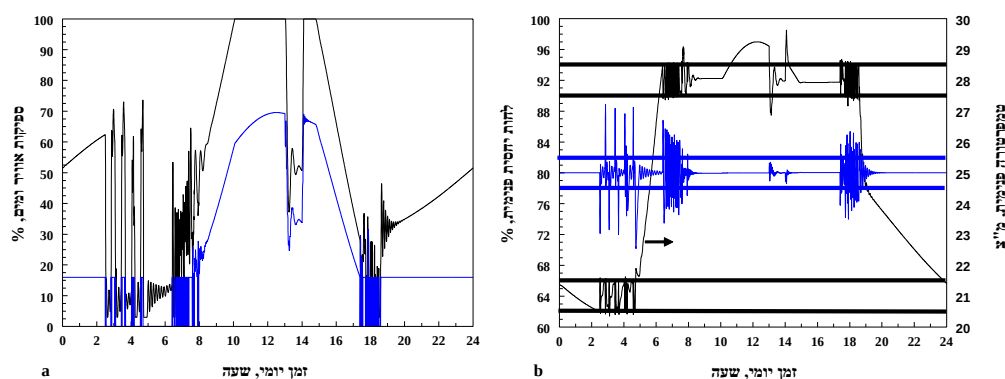
איור 9: מהלך יומי של תוצאות ההדמיה הבאים לידי ביטוי בתנאי ההפעלה ובתנאי האקלים בחממה: (a) ספיקת האוויר, (b) ספיקת המים, (c) טמפרטורה ו- (d) לחות יחסית, כאשר המים מסופקים באמצעות מערכת קווי פומיות אחת וללא חלוקה.



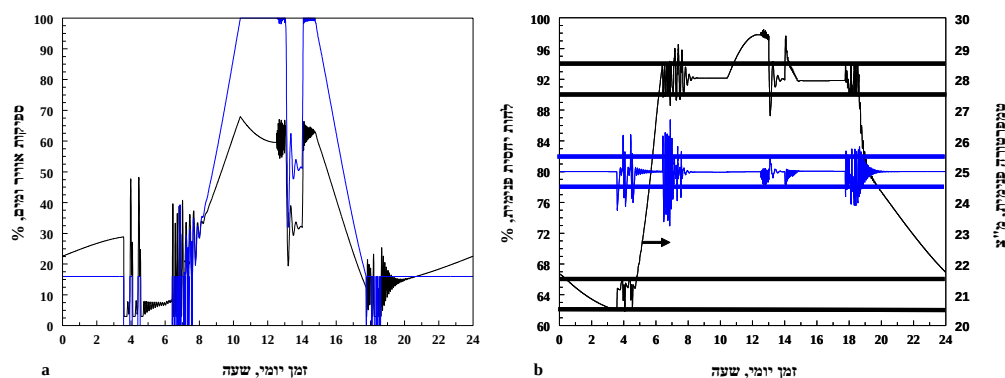
איור 10: תוצאות הדמיה של הבקרה: (a) – מהלך יומי של ספיקת האוויר וספיקת המים, (b) – מהלך יומי של טמפרטורת ולחות האוויר בחממה, כאשר המים מסופקים באופן דרגתי ובאמצעות שלוש מערכות קווי פומיות בחלוקה של 23%, 32% ו- 45% ובהפעלה בשתי רמות לחצים אפשריים.



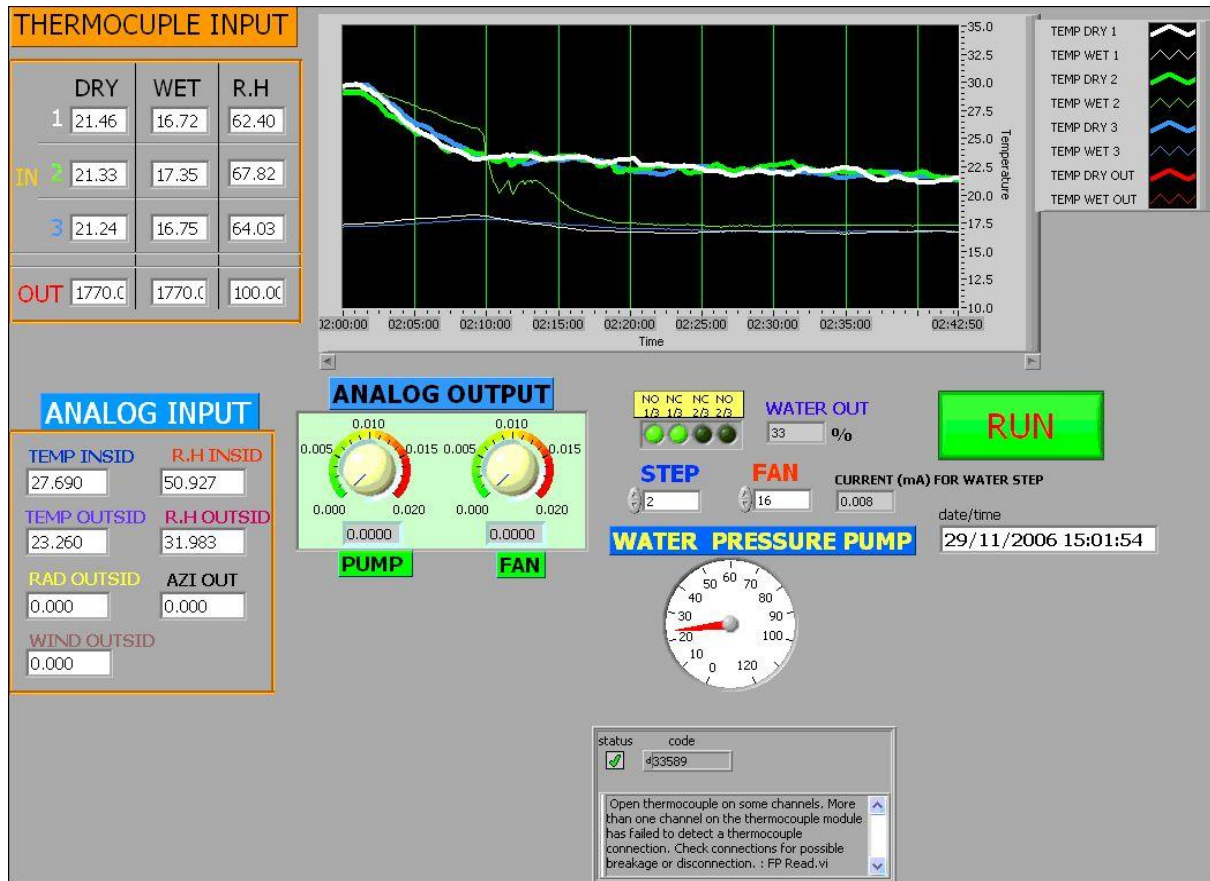
איור 11: תוצאות הדמיה של הבקרה: (a) – מהלך יומי של ספיקת האוויר וספיקת המים, (b) – מהלך יומי של טמפרטורת ולחות האוויר בחממה, כאשר המים מסופקים באופן רציף ובאמצעות שלוש מערכות קווי פומיות בחלוקה של 23%, 32% ו-45%.



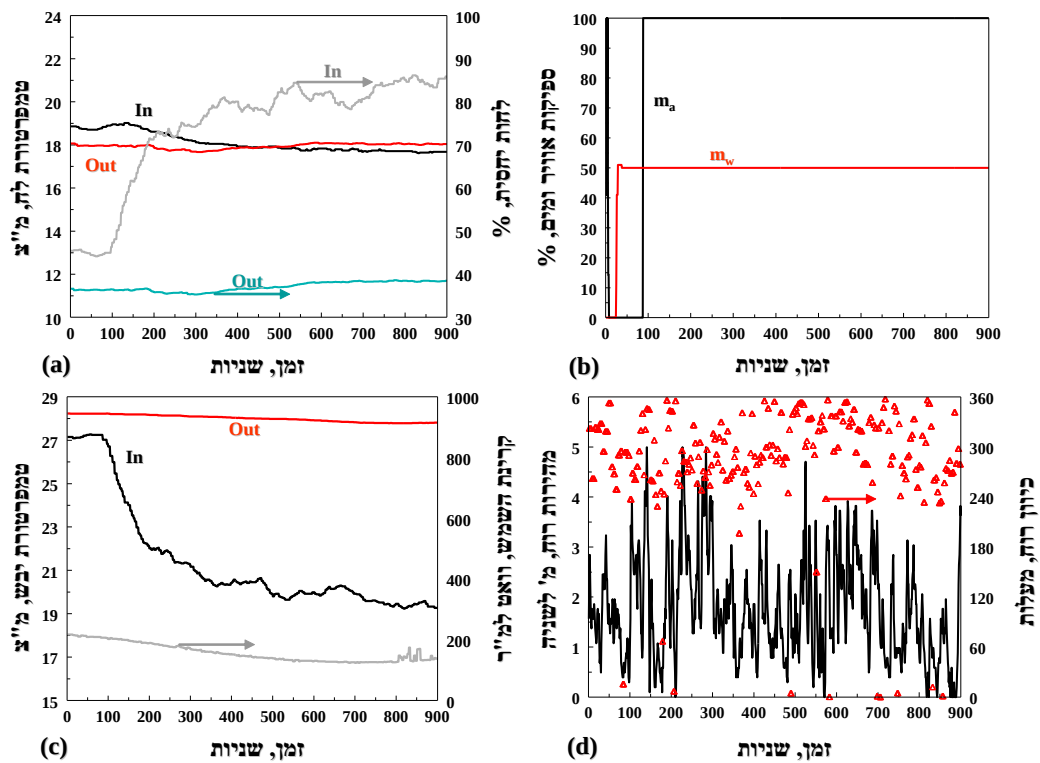
איור 12: תוצאות הדמיה של הבקרה: (a) – מהלך יומי של ספיקת האוויר וספיקת המים, (b) – מהלך יומי של טמפרטורת ולחות האוויר בחממה, כאשר ספיקת האוויר מוגבלת ל-100 מ"ק לשעה למ"ר והמים מסופקים באופן רציף ובאמצעות שלוש מערכות קווי פומיות בחלוקה של 23%, 32% ו-45%.



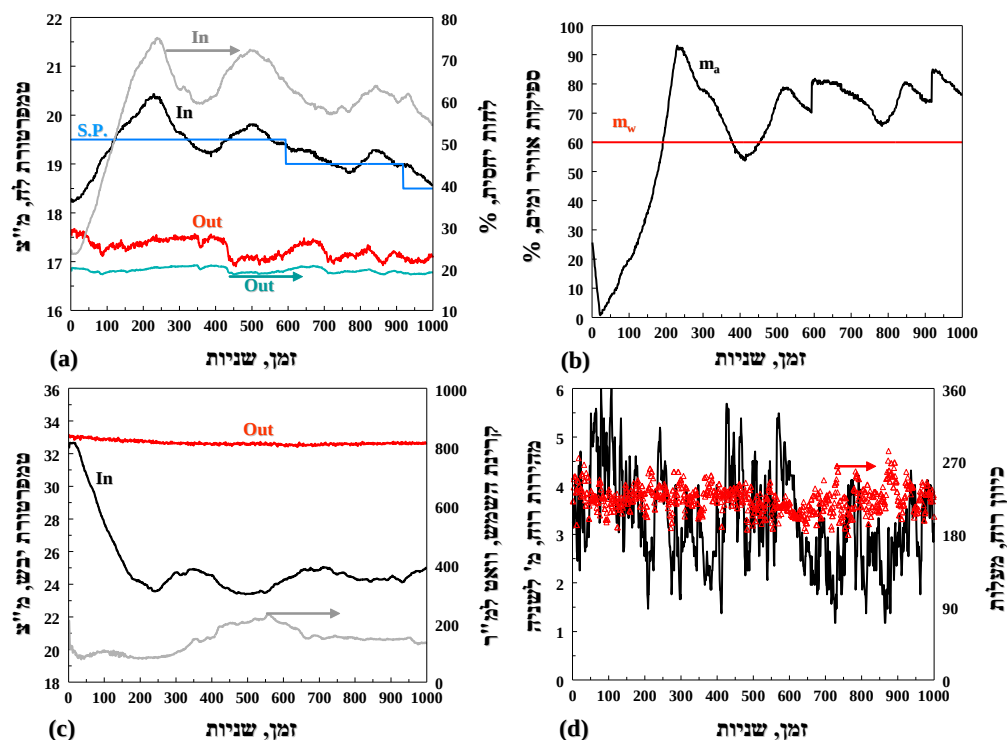
איור 13: תוצאות הדמיה של הבקרה: (a) – מהלך יומי של ספיקת האוויר וספיקת המים, (b) – מהלך יומי של טמפרטורת ולחות האוויר בחממה, כאשר ספיקת המים מוגבלת ל-600 ג' לשעה למ"ר ומסופקים באופן רציף ובאמצעות שלוש מערכות קווי פומיות בחלוקה של 23%, 32% ו-45%.



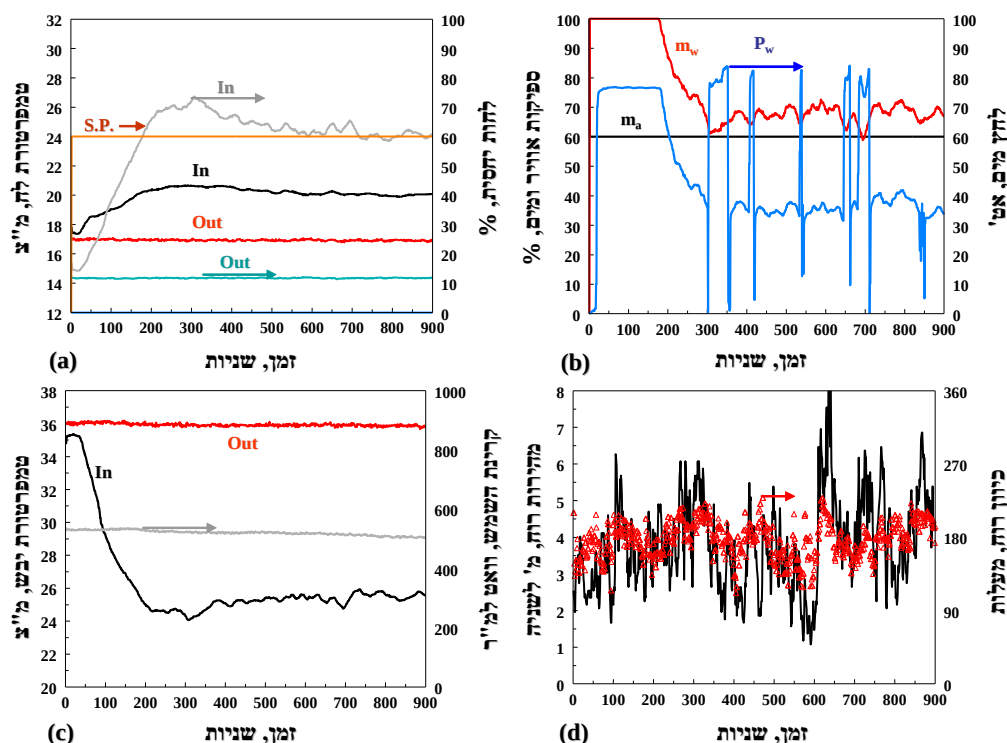
איור 14: תצוגת הבקרה הידנית



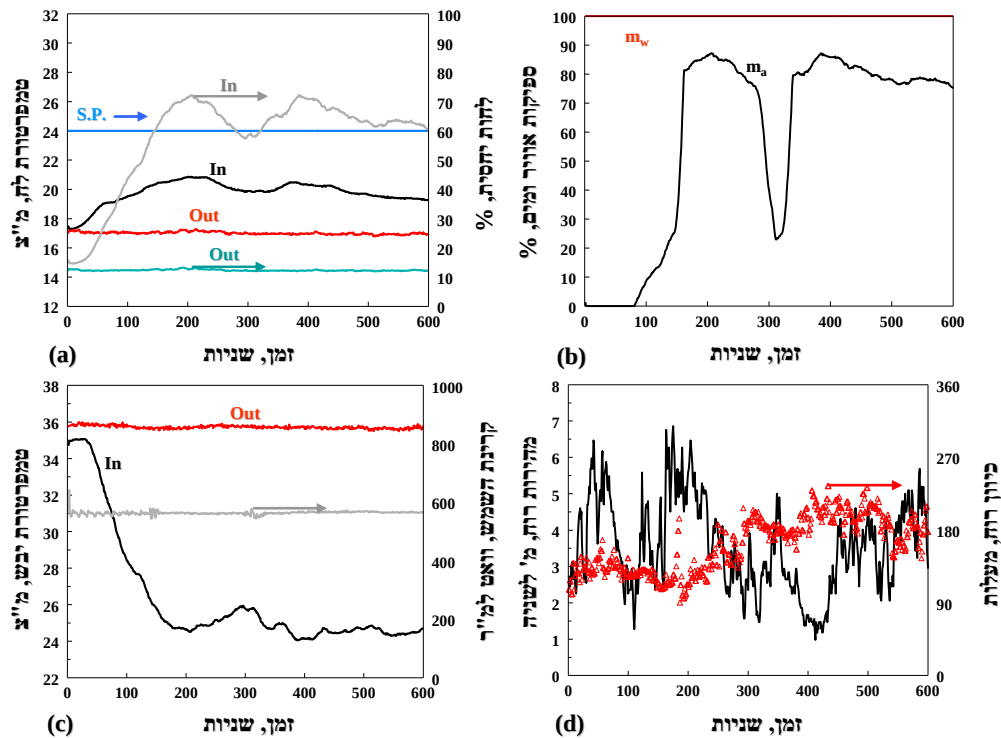
איור 15: תוצאות הפעלה ידנית (a) – טמפרטורת לח ולחות יחסית פנים וחוצ, (b) – ספיקות האוויר והמים היחסיות, (c) – טמפרטורת יבש פנים וחוצ וקרינת השמש, (d) מהירות וכיוון הרוח



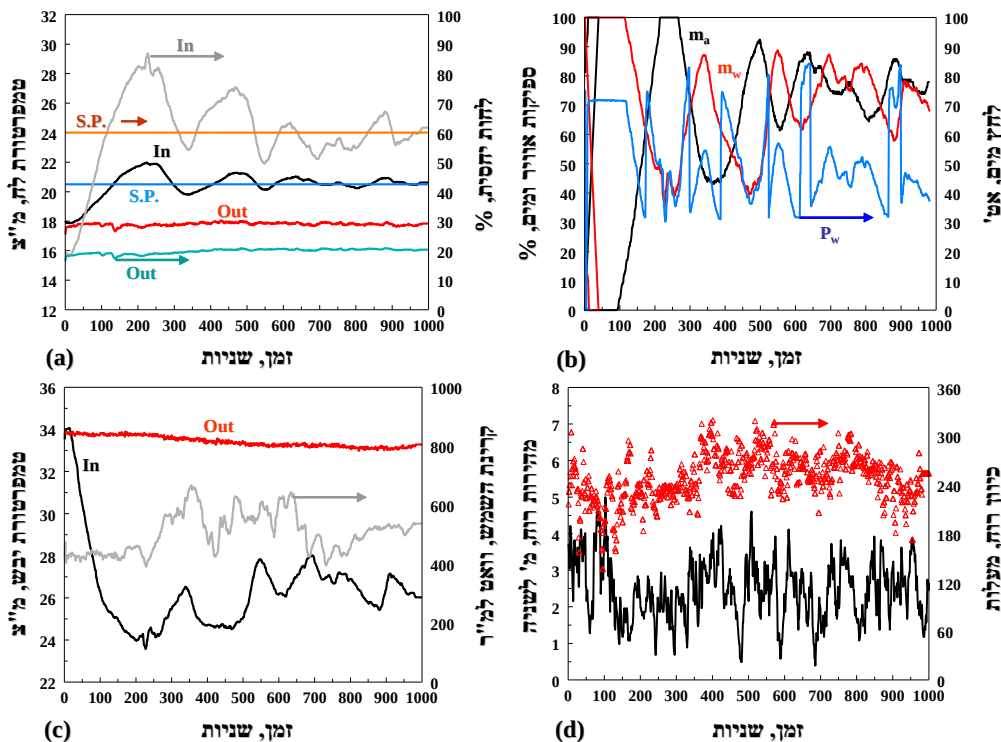
איור 16: תוצאות הפעלה אוטומטית של אוויר ע"פ טמפרטורה לחה והפעלה ידנית של המים (a) – טמפרטורת לח פנים (רצויה ובפועל) ולחות יחסית פנים וחוז, (b) – ספיקות האוויר והמים היחסיות, (c) – טמפרטורת יבש פנים וחוז וקרינת השמש, (d) מהירות וכיוון הרוח



איור 17: תוצאות הפעלה אוטומטית של מים ע"פ לחות יחסית והפעלה ידנית של האוויר (a) – טמפרטורת לח חוז ופנים ולחות יחסית פנים (רצויה ובפועל) וחוז, (b) – ספיקות (האוויר והמים) היחסיות ולחץ המים, (c) – טמפרטורת יבש פנים וחוז וקרינת השמש, (d) מהירות וכיוון הרוח



איור 18: תוצאות הפעלה אוטומטית של אוויר ע"פ לחות יחסית והפעלה ידנית של המים (a) – טמפרטורת לח פנים וחוזן ולחות יחסית פנים (רצויה ובפול) וחוזן, (b) – ספיקות האוויר והמים היחסיות, (c) – טמפרטורת יבש פנים וחוזן וקרינת השמש, (d) מהירות וכיוון הרוח



איור 19: תוצאות הפעלה אוטומטית של אוויר ע"פ טמפרטורת לחה ומים ע"פ לחות יחסית (a) – טמפרטורת לח ולחות יחסית פנים (רצויות ובפועל) וחוזן, (b) – ספיקות (האוויר והמים) היחסיות ולחות המים, (c) – טמפרטורת יבש פנים וחוזן וקרינת השמש, (d) מהירות וכיוון הרוח

סיכום עם שאלות מנחות

1. מטרת המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
מטרת העבודה העיקרית הינה פיתוח מערכת בקרת תנאי אקלים עבור בתי צמיחה המצוננות באמצעות מערכות ערפול, והמבוססת על עקרון של הפרדת ההשפעה ההדדית בין משתני הבקרה (מערכות ההפעלה) לבין המשתנים המבוקרים (תנאי האקלים בתוך החממה). מערכת הבקרה אוטומטית שתאפשר עמידה בדרישות הבאות: הפעלה ידידותית, שמירה על התנאים הרצויים בתנאי סביבה משתנים, זיהוי מגבלות מרכיבי מערכת השליטה והפעלתן בהתאם.
2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח.
במהלך השנה הראשונה וכמתוכנן, החממה והמערכות הנלוות הושלמה התקנתן בשלהי החורף אשר פעלו לשביעות רצוננו, אך לצערנו הרב, סופת ברקים שהתחוללה מספר ימים מועט לאחר מכן גרמה לנזקים רבים למרבית המערכות. במקביל לכך, פותח אלגוריתם בקרה אשר נבחן באמצעות הדמיה. אלגוריתם זה פותח על בסיס ההנחות הבאות: ספיקת האוויר ניתנת לשליטה באופן רציף ואילו ספיקת המים ניתנת לשליטה באמצעות שינויי מדרגה. במהלך השנה השנייה ובעקבות נזקי סופת הברקים, נרכשו והותקנו מחדש מרבית המרכיבים האלקטרוניים (מחשב, בקר, בקרי תדר וכדומה) והמצב חזר לקדמותו. במקביל לכך, העבודה התמקדה בפיתוח אלגוריתם בקרה אשר נבחן באמצעות הדמיה המבוססת על כך שספיקות האוויר והמים הניתנים לשליטה באופן רציף והוחל בפיתוח אלגוריתם בקרה שיבחן באופן מעשי ובתנאי החממה. שנה שלישית יוחדה להמשך פיתוח אלגוריתם בקרה מעשי, המבוסס על כך שספיקות האוויר והמים הניתנים לשליטה באופן רציף, ובחינתו בתנאי החממה הניסיונית.
3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו.
על בסיס תוצאות המעודדות שהתקבלו, אין בליבנו ספק שהמערכת המוצעת מהווה פתרון הולם ליישום מסחרי אשר יתרום רבות לשמירה על התנאים הרצויים בחממות, במהלך כל ימות השנה, על כל היתרונות הכלכליים הנלווים. מומלץ להמשיך בעבודה בהתאם לפרוט הבא: פיתוח אלגוריתם בקרה להפעלה הדרגתית, בחינת השילוב המוצע (מערכות שליטה ובקרה) בחממה בקנה מידה מסחרי, פיתוח אלגוריתמי בקרה שיתבססו על אוורור טבעי בעיקר להרחבת הנושא עבור רפתות ולולים, בחינת האלגוריתמים השונים הלכה למעשה במבנים מסחריים.
4. הבעיות שנתרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה.
על בסיס תוצאות המעודדות שהתקבלו, אין בליבנו ספק שהמערכת המוצעת מהווה פתרון הולם ליישום מסחרי אשר יתרום רבות לשמירה על התנאים הרצויים בחממות, במהלך כל ימות השנה, על כל היתרונות הכלכליים הנלווים. מומלץ להמשיך בעבודה בהתאם לפרוט הבא: פיתוח אלגוריתם בקרה להפעלה הדרגתית, בחינת השילוב המוצע (מערכות שליטה ובקרה) בחממה בקנה מידה מסחרי, פיתוח אלגוריתמי בקרה שיתבססו על אוורור טבעי בעיקר להרחבת הנושא עבור רפתות ולולים, בחינת האלגוריתמים השונים הלכה למעשה במבנים מסחריים.
5. האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח?
פורסמו שני מאמרים מבוקרים בניר ותלם.