



דו"ח מסכם לתכנית מספר 459-0203-2000

שילוב של מערכות האוורור והערפול לצינון מיטבי בבתי צמיחה

Adaptation of ventilation and fogging systems for cooling greenhouses

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

אבי ארבל	המחלקה לגידולים מבוקרים והנדסת הסביבה, המכון להנדסה חקלאית
מרדכי ברק	המחלקה לגידולים מבוקרים והנדסת הסביבה, המכון להנדסה חקלאית
עודד יקותיאלי	המחלקה לגידולים מבוקרים והנדסת הסביבה, המכון להנדסה חקלאית
עזרא רבינס	מו"פ ערבה תיכונה, מרכז ספיר

Avraham Arbel, Department of controlled Agriculture and Environment Engineering -Institute of Agricultural Engineering. A.R.O. Bet-Dagan P.O.B. 6, 50250. E-mail: [arbel@agri.gov.il](mailto:arbel@agri.gov.il)

Mordechi Barak, Department of controlled Agriculture and Environment Engineering -Institute of Agricultural Engineering. A.R.O. Bet-Dagan P.O.B. 6, 50250. E-mail: [barak@agri.gov.il](mailto:barak@agri.gov.il)

Oded Yekutieli, Department of controlled Agriculture and Environment Engineering -Institute of Agricultural Engineering. A.R.O. Bet-Dagan P.O.B. 6, 50250. E-mail: [odedv@agri.gov.il](mailto:odedv@agri.gov.il)

A. Rabins - R&D Arava Merkaz Sapir, E-mail: [ezra@arava.co.il](mailto:ezra@arava.co.il)

פברואר 2001

שבט תשס"א

#### 1. תקציר

הצגת הבעיה - הארכת עונת הגידול פרושה גידול במהלך הקיץ, תקופה שבה עומס החום הגו גדול בהשוואה לתקופה הנהוגה כיום (חורפית בעיקרה). מרבית מערכות הערפול שהותקנו ונבחנו עד כה היו על פי המתכונת הבאה: כניסת אויר מאחד הצדדים ומאווררים בצד הנגדי (בדומה למזרן לח). הפומיות מוקמו בצפיפות גדולה קרוב לכניסת האויר ובצפיפות ההולכת ופוחתת עם כיוון זרימת האויר. רוחב החממה עמד על כ- 35 מטר. בתנאים אלה, ניתן להצביע על המסקנות העיקריות הבאות: מערכת הערפול עדיפה על מזרן לח הן בביצועים והן בעלות, אינה מעודדת מחלות הנובעות מלחות גבוהה ואינה גורמת לצריבת עלים והמלחתם. מטרת העבודה הנה לבחון מערכות ערפול בחממות ע"פ המתכונת הבאה: פתחי אוורור הממוקמים בגג, פומיות הפזורות בצורה אחידה הממוקמות גבוהה ככול האפשר, ומפוחים בצדדים עבור אוורור מאולץ, ופתחי צד לאוורור טבעי.

מהלך ושיטות עבודה – העבודה התמקדה בחממה ניסיונית בהיקף הצי מסחרי ובשתי הממות מסחריות. הותקנו מערכות המדידה שכללו בעיקר מדי קרינה, מהירות רוח, כיוון רוח ותאים מאווררים למדידת טמפרטורות לח ויבש. בהתאם למגבלות, החממות תופעלו במשטרי ההפעלה הבאים: באופן ידני (אוורור מאולץ וטבעי), עם תקרה תרמית ובלעדיה ובאמצעות מערכת הבקרה. בהתאם לתוצאות שהתקבלו נבחנו מדת השפעת המרכיבים הנ"ל.

תוצאות עיקריות – ככלל התנאים המתקבלים בחממות אחידים למדי וניתן לקיים תנאים אקלימיים בתחום הרצוי במרבית ימות השנה גם בחממות גדולות (עד כה - נבחנו חממות בממדים של עד 100 על 60 מ'). הפעלת המערכת במתכונת המוצעת עם תקרה תרמית (הנהוגה כיום) או בלעדיה הניבה תוצאות דומות מבחינת טמפרטורה ולחות האוויר שבחממה. השימוש במי קו ללא טיפול מוקדם לא גרם לשקיעה של מלחים על העלווה וצריבתם. כמו כן, סתימת פומיות בעקבות זאת הייתה שולית. מאידך, ניכרת שקיעה משמעותית על המאווררים. שילוב של מערכת ערפול ואוורור טבעי גורם במרבית המצבים לחוסר אחידות וחוסר שליטה. שיפור ניכר הושג בתנאי האקלים המתקבלים כתוצאה מהפעלה באמצעות הבקר המתוכנת.

מסקנות והמלצות – מערכת הערפול במתכונת המוצעת (עם אוורור מאולץ) מאפשרת לקיים תנאים אחידים ובתחום הרצוי במרבית ימות השנה. מתכונת זו פשוטה להתקנה ומאפשרת תפעול החממה באמצעות בקר בצורה קלה יחסית. כהמשך לעבודה זו, חשוב להתמקד בנושאים הבאים: בחינת השפעת המערכת על הגידול לאורך העונה, בחינת המערכת המוצעת בחממות גדולות ככול האפשר במגמה להוזיל את העלות הכוללת ליחידת שטח, והמשך פיתוח תוכנת הבקרה שתענה על הדרישות: שמירה על התנאים הרצויים בתנאי סביבה משתנים והפעלה ידדית.

## 2. מבוא

אנו עדים כיום למגמה ההולכת ומתרחבת של הארכת עונת הגידול בבתי צמיחה. הארכת עונת הגידול פרושה שתילה מוקדמת והמשך גידול מעבר למועדים המקובלים כיום. משמעות הדבר, התחלת וסיום עונת הגידול בתקופת הקיץ, תקופה שבה עומס החום הנו גדול עקב שטף הקרינה וטמפרטורות הסביבה בהשוואה לתקופת הגידול הנוכחית, חורפית מעיקרה.

מערכת הערפול מבוססת על צינור אדיאבטי של אויר החממה באמצעות ריסוס טיפות זעירות בתחום הערפל המתאדות ללא הרטבת העלווה. בכך נמנעת האפשרות לפריצת מחלות כגון כשותית ועובש אפור. מערכות צינור אדיאבטיות נוספות הנהוגות כיום הם התזה ומזרן לח.

מרבית מערכות הערפול שהותקנו ונבחנו עד כה היו על פי המתכונת הבאה: כניסת אויר מאחד הצדדים ומאווררים בצד הנגדי (בדומה למזרן לח). הפומיות מוקמו בצפיפות גדולה קרוב לכניסת האוויר ובצפיפות ההולכת ופוחתת עם כיוון זרימת האוויר. רוחב החממה עמד על כ- 35 מטר. בתנאים אלה, ניתן להצביע על המסקנות העיקריות הבאות:

א. למערכת הערפול יתרונות על מזרן הן בביצועים (אחידות בתנאים וברמתם הממוצעת של טמפרטורה ולחות) והן בעלות עבור חממות גדולות (מעל שני דונם).

ב. מערכת הערפול מאפשרת לקיים תנאים אקלימיים בתחום הרצוי בחממות במרבית מהלך חודשי השנה ובמרבית אזורי הארץ. זאת ללא פגיעה משמעותית ברמת הקרינה.

ג. מתוך בדיקה ראשונית ובתנאי הפעלה כמומלץ, נמצא שמערכת הערפול אינה מעודדת התפתחות של מחלות הנובעות מלחות גבוהה.

ד. מתוך בדיקה ראשונית ובתנאי הפעלה כמומלץ, עולה שמערכת הערפול אינה גורמת לצריבות עלים ולהצטברות מלחים על פני העלים בורדים. כמו כן לא נמצאו ריכוזי יסודות (נתרן, אשלגן וכלור) גבוהים מהמקובל בעלי הורדים.

ה. בתנאי אקלים מדבריים (טמפרטורה גבוהה ולחות נמוכה), ניתוח תיאורטי מראה שניתן להתבסס על אוורור טבעי (ללא מאווררים) במשולב עם המערכת המוצעת בלבד. בכך קיימת הוזלה נוספת בעלות המערכת ובהפעלתה.

מטרת העבודה הנה לבחון מערכות ערפול בחממות ע"פ המתכונת הבאה: פתחי אוורור הממוקמים בגג, פומיות הפזורות בצורה אחידה בחממה ומפוחים בצדדים עבור אוורור מאולץ, ופתחי צד לאוורור טבעי.

### 3. פירוט הניסויים

הניסיונות נערכו בשלוש חממות – ניסיונית בהיקף חצי מסחרי, חממה מסחרית מקובלת ברוחב של כ- 33 מ' ומסחרית רחבה ברוחב של כ- 60 מ', בהתאם לפרוט הבא:

#### 3.1 - חממה ניסיונית בהיקף חצי מסחרי (תחנת יאיר)

לצורך עריכת הניסויים הוקצתה חממה בתחנת ניסיונות "יאיר" והוסבה בהתאם לפרוט הבא:

חממה - רוחב 30 מ' (חמישה גמלונים מפתח גמלון 6 מ') ואורך 28 מ' (שבעה שדות ואורך שדה 4 מ'), גובה מרזב 4 מ' ושטח כולל של 840 מ"ר.

פתחי גג לאוורור - חלונות גג בכל הגמלונים להוציא את הגמלון המזרחי כמקובל ועם מערכת הפעלה משותפת.

פתחי אוורור צד - וילונות צד בארבעת הצדדים מגובה של 1.2 לגובה מרזב עם הפעלה פרטנית.

אוורור מאולץ - ארבעה מאווררים בספיקה של 160,000 מ"ק לשעה המותקנים בצדדים צפון ודרום שניים בכל צד.

מערכת ערפול - בספיקה של 1300 ליטר לשעה עם חלוקה אחידה של הפומיות ואפשרות להפעלה חלקית ולסירוגין של קווי הפומיות.

מערכות בקרה והפעלה - לבקרת והפעלת המרכיבים הבאים:

1. וילונות צד (כל ארבעת הצדדים) – כאשר כל וילון נפתח ונסגר בהתאם לתנאים ולדרישות.
2. וילונות גג - לרמות פתיחה שונות בהתאם לתנאים.
3. מאווררים - הפעלה הדרגתית באמצעות ווסט (חשמלי).
4. מערכת הערפול - בקרת פעולת המשאבה בהתאם לספיקה הנדרשת מספר ברזים חשמליים שיופעלו לסירוגין או בחפיפה בהתאם לדרישות.

לצורך בקרת המערכת הזו לא ניתן להסתפק בהפעלה בהתאם לקביעות מראש, אלא שינוי הדרגתי ומשתנה בהתאם לתנאים השוררים בפועל, התנאים הרצויים ומגבלות המערך הכולל. אי לכך הותקן בקר מתוכנת המאפשר הפעלה הדרגתית הן של המפוחים והן של הספקת המים באמצעות פתיחת הברזים החשמליים והמשאבה לפרקי זמן בהתאם לנדרש.

טיפול במים - לצורך הפעלת מערכת הערפול בחממה זו בלבד, ספיקת המים המקסימלית היא של כ- 1.3 מ"ק לשעה וצריכה יומית של כ- 9 מ"ק. לצורך טיפול מוקדם, הוחלט להתקין מערכת אוסמוזה הפוכה בעלת ספיקה גדולה יותר שתשרת מטרות אחרות בחוות הניסיונות. מאחר ומערכת זו הותקנה מאוחר מהמתוכנן, בשנה הראשונה מערכת הערפול הוזנה במי קו לאחר סינון עדין בלבד.

מערכת מדידות - מערכת המדידות כללה תאים מאווררים למדידת טמפרטורות לח ויבש, ומדי קרינה שמוקמו בהתאם לפרוט הבא:

1. תאים מאווררים - עמודה של שלושה תאים במרכז החממה (1, 2 ו-3 הממוקמים בגבהים של: 2.7, 1.5 ו-0.6 מ' בהתאמה), בארבעת צדדי החממה (4, 5, 6, 7 ו-8 הממוקמים ליד הדפנות המזרחית, צפונית, מערבית ודרומית בהתאמה ובמרחק מהדופן של כ- 4 מ' ובגובה של כ- 1.5 מ'), ליד אחד המאווררים, ומחוץ לחממה.

2. מד קרינה - במרכז החממה מעל גובה האמירים.

3. בנוסף לכך, האתר מצויד בתחנה מטאורולוגית לאפיון תנאי הסביבה הכוללת: מדי קרינה (ישירה ומפוזרת) מדי מהירות וכיוון הרוח ותא נושם למדידת טמפרטורת לח ויבש.

נתונים אלה נאספו ונאגרו באמצעות אוסף נתונים ומחשב. בנוסף לכך, הבקר המתוכנת עורך רישום אודות פעולת מרכיבי המערכת (במצב הפעל או הפסק) ובאמצעות מתגי עזר למתח נמוך. כמו כן, נערכו מדידות ידניות של טמפרטורות לח ויבש באמצעות פסיכרומטר (אסמן) לצורך מיפוי נוסף של תנאי האקלים בחממה ומהירות האוויר לאפיון ספיקת המאווררים.

### 3.2 - חממה מסחרית מקובלת (משק של דודו בן אליהו - עין יב)

חממה - חממה בעלת שלושה גמלונים ושתי מרפסות. רוחב כולל של 33 מ' (שלושה גמלונים מפתח גמלון 8.5 מ' ושתי מרפסות 3.75 מ') ואורך 119 מ' (שלושים ושלושה שדות ואורך שדה 3.6 מ'), גובה מרזב 4 מ' ושטח כולל של 3927 מ"ר.

פתחי גג לאוורור - חלונות גג בשלושת הגמלונים.

אוורור מאולץ - 16 מאווררים המותקנים בצדדים מזרח ומערב לסירוגין שמונה בכל צד.

מערכת ערפול - בספיקה של 3960 ליטר לשעה. פיזור פומיות הריסוס כמתואר באיור 2 ובהתאם לפרוט הבא: קווים מזרחי ומערבי כל 0.9 מ' המופנות כלפי פנים החממה ושלושת הקווים הפנימיים זוג פומיות המופנות לצדדים כל 1.2 מ' (סה"כ 660 פומיות). מערכת הערפול כוללת שתי משאבות כאשר כל משאבה מזינה קו פומיות צדדי וקו פנימי.

מערכת בקרה - בקרת האקלים הקיימת בהתאם לפרוט הבא: פתיחת וילונות גג בתנאים שהטמפרטורה מעל 26 מ"צ או לחות יחסית שמעל 90%, הפעלת חצי מכמות המאווררים ב טמפרטורה שמעל 28 מ"צ, הפעלת

יתרת המאווררים בטמפרטורה שמעל 30 מ"צ, הפעלת משאבה האחת בטמפרטורה שמעל 30 מ"צ ולחות מתחת ל- 70%, ולבסוף הפעלת המשאבה השנייה בטמפרטורה שמעל 32 מ"צ ולחות מתחת ל- 70%. בקרה זו לוקה בחסר בשלושה מובנים עיקריים:

1. לא ניתן להפעיל את המשאבות לסירוגין.
  2. זמן מחזור שנקבע מראש הגורר הפעלת יתר מחזור, ומאידך להפסקות פעולת המשאבה בשעה שאמורה לפעול באופן רציף (דבר הגורם לבלאי מוגבר).
  3. אין שליטה על מספר המאווררים גם בשעה שמערכת הערפול בפעולה.
- טיפול במים - הטיפול המוקדם של המים מתבצע באמצעות מסיר אבנית המבוסס על אלקטרודות חשמליות בספיקה כוללת של 5 מ"ק לשעה ומסננים. מי קו מסופקים למאגר בעיקר בלילה ובאמצעות מצוף, מי המאגר מסופקים למסיר אבנית באמצעות משאבת סחרור (בספיקה של 30 מ"ק לשעה), ומכאן המים מתפצלים לשניים חלק האחד למאגר דרך מסנן גס והחלק האחר למשאבות הערפול דרך שני מסננים עדינים. הפעלת המשאבות מותנית באמצעות פרסוסטט הממוקם בקו היניקה של המשותף לשתי המשאבות.
- מערכת המדידות - מערכת המדידות כללה תאים מאווררים למדידת טמפרטורות לח ויבש, טמפרטורת קרקע ומדי קרינה שמוקמו בהתאם לפרוט הבא:

1. תאים מאווררים - עמודה של שלושה תאים במרכז החממה (1, 2 ו- 3 בגבהים של: 2.7, 1.8 ו- 0.6 מ' בהתאמה), במרכז גמלון המזרחי (4 - בגובה של כ- 1.2 מ'), ליד אחד המאווררים (5 - בגובה של כ- 1.2 מ'), ומחוץ לחממה (6).
  2. טמפרטורת קרקע במרכז החממה בערוגה ובשביל בעומק של כ- 2 ס"מ.
  3. מדי קרינה - במרכז החממה מעל גובה האמירים ומחוץ לחממה.
- נתונים אלה נאספו ונאגרו באמצעות אוסף נתונים ומחשב. בנוסף לכך, נערך רישום אודות פעולת המשאבות (במצב הפעל או הפסק) ובאמצעות מגעי עזר למתח נמוך.
- כמו כן, נערכו מדידות ידניות של טמפרטורות לח ויבש באמצעות פסיכרומטר (אסמן) לצורך מיפוי נוסף של תנאי האקלים בחממה ומהירות האוויר לאפיון ספיקת המאווררים.

### 3.3 - חממה מסחרית רחבה (משק של גדעון ויצחק - חצבה)

חממה - בעלת תשעה מפתחים (צפון-דרום כמקובל), רוחב מפתח של 6.2 מ', באורך של 100 מ' וגובה מרזב 3.2 מ'.

גידול - פלפל בהדליה כאשר חמשת המפתחים המערביים צמחיה בגובה של כ- 2 מ' ואילו ארבעת המפתחים המזרחיים צמחיה נמוכה וללא עלווה משמעותית.

מערכת אוורור - בכל מפתח שני קיים פתח אוורור גג (0.7 מ' ללא רשת), צמוד למרזב ובכיוון מזרח. פתחי אוורור צד מסביב לחממה מגובה של כ- 1 מ' בצדדים צפון ודרום ומ- 2 מ' בצדדים מזרח ומערב, עד למרזב (עם רשת 50 מש) ו- 12 מפותחים (קוטר 36" ובספיקה של כ- 35000 מ"ק לשעה) הממוקמים בצדדים מזרח ומערב בחלוקה שווה, צמוד לקרקע.

מערכת ערפול - משאבת בוכנות (לחץ הפעלה של כ- 55 אטמ' ובספיקה של כ- 3 מ"ק לשעה), וקווי דיזות הממוקמים במרכז המפתחים ולאורך החממה (צפון דרום).

טיפול במים - התפלת מים באמצעות מערכת אוסמוזה הפוכה.

מערכת מזידות - מערכת המזידות כללה תאים מאווררים למדידת טמפרטורות אוויר לח ויבש ומד קרינה. מד הקרינה מוקם בתוך החממה מעל גובה האמירים. התאים המאווררים מוקמו כמתואר באיור 1 ובהתאם לפרוט הבא:

1. מחוץ לחממה.

2. עמודה של שלושה תאים בגבהים: 0.4, 1.2 ו- 2 מ' בחלקה המערבי של החממה.

3. עמודה של שלושה תאים בגבהים: 0.4, 1.2 ו- 2 מ' בחלקה המזרחי של החממה.

#### 4. תוצאות ודין

##### 4.1 - חממה ניסיונית בהיקף חצי מסחרי (תחנת יאיר)

תחילה חממה זו הוזנה במי קו (מוליכות חשמלית של כ- 2 דסמ"מ) ללא טיפול מוקדם פרט לסינון עדין. ראשית ניתן לציין שלא ניכרו סימנים לשקיעה של מלחים על העלוה. מאידך, שקיעה רבה של מלחים אכן הייתה אלא על המאווררים בלבד. שקיעה זו גרמה לפעולה לא מאוזנת של המאוורר והתנגדות למעבר האוויר. תוצאה זו מאשרת את ההנחה שמהירות הנפילה של טיפות המים, בקוטר המתאים לתחום הערפל, קטנה מאוד וכן נישאות היטב ע"י זרימות האוויר הקבועות בחממה. בכך נמנעת הרטבת העלוה. חשוב להדגיש, לאחר ההתאדות המים, מהטיפות נותרים המלחים בצורת חלקיקים הקטנים מאוד בהשוואה לטיפות המים. מתוך מעקב אודות סתימת הפומיות עולה שמעבר לטיפול באחוז קטן מהפומיות אחת לשבוע לא היה צורך בכל התערבות. מכל מקום, תופעות אלה הופיעו גם במקרים בהם המים טופלו באמצעות מרככים למיניהם. מאידך, באתרים בהם המים טופלו באמצעות אוסמוזה הפוכה, תופעות אלה לא הופיעו כלל. לאור תוצאות אלה ומגבלות המים בארץ, רצוי להמשיך ולבחון שימוש במים בעלי איכות נמוכה ולהתמודד עם הבעיות הקשורות בהתאמת המאווררים וניקונם.

החממה תופעלה בשני משטרי הפעלה עיקריים: באופן ידני ובאמצעות מערכת הבקרה המתוארת למעלה. בהפעלה ידנית נבחנו שני משטרי אוורור - מאולץ וטבעי.

##### 4.1.1 - הפעלה ידנית עם אוורור מאולץ

במגמה להמחיש את פוטנציאל המערכת לצינון החממה, נערכו ניסיונות במספר ימים אשר התמקדו בשעות הצהרים החמות והמערכת תופעלה על פי המתכונת הבאה: קביעת ספיקות האוויר והמים והפעלה רציפה. ספיקת האוויר נקבעה באמצעות הפעלה של מספר מאווררים וספיקת המים באמצעות וויסות הלחץ ביציאה מהמשאבה. כהדגמה לכך, התוצאות המתקבלות מובאות באיורים 1 - 3. באיורים אלה מתוארים תנאי הפעלה (חלק עליון של האיור) כתלות בזמן על ידי ציון מספר המאווררים שהופעלו ולחץ מערכת הערפול. התוצאות המתקבלות מוצגות באמצעות תשעה איורים המסודרים בשלושה עמודות ושלוש שורות. בשורות מיוצגים בסדר יורד טמפרטורת האוויר (יבש), לחות יחסית וטמפרטורת הלח של האוויר. העמודות מסודרות

בהתאם לפרוט הבא: העמודה הימנית מייצגת תנאי האקלים כתלות בגובה כפי שנמדדו במרכז החממה (תאים מאווררים 1, 2 ו-3), עמודה אמצעית מייצגת תנאי אקלים לאורך החממה (צפון-דרום) כפי שנמדדו בגמלון המרכזי (5, 2 ו-7), והעמודה השמאלית מייצגת תנאי אקלים לרוחב החממה (מזרח-מערב) כפי שנמדדו באמצע החממה (4, 2 ו-6). הדיון בהמשך מתמקד באיור 1 המייצג תנאים שהתקבלו בתאריך 21-7-1999. בהתאם לכך, ניתן להצביע על מספר תופעות עיקריות בהתאם לפרוט הבא:

1. השינויים בתנאי האקלים בין מצב הפעלה אחד למשנהו מהירים מאוד. עובדה המצביעה על ה"מסה התרמית" הנמוכה של החממה.

2. פרט לצד המערבי תנאי האקלים בחממה ברמת אחידות טובה מאוד. השונות של הצד המערבי נובעת משתי סיבות עיקריות: גמלון מערבי לא כולל פתח גג כמו כל שאר הגמלונים (ראה איור 1) וזרימה אויר לרוחב החממה כתוצאה מהרוח החיצונית כפי שמצוין למעלה.

3. טמפרטורת הלח של האוויר בחממה מושפע בעיקר מספיקת האוויר של החממה. תופעה זו נובעת מהעובדה שטמפרטורת הלח למעשה מייצגת את האנטלפיה של האוויר וזו מושפעת מספיקת האוויר [1 ו-2].

4. הגדלת ספיקת האוויר של החממה אינה גורמת בהכרח לירידה בטמפרטורה ובלחות היחסית של אוויר החממה, ומאידך גורמת לירידה בטמפרטורת הלח. תופעה המצביעה על ההכרח בבקרת ספיקת האוויר לשם שמירה על התנאים הרצויים.

5. הגדלת ספיקת המים מלווה בירידה בטמפרטורה ובעליה בלחות היחסית של אוויר החממה, ומאידך אינה גורמת לשינוי ניכר בטמפרטורת הלח.

תוצאות דומות התקבלו בניסויים שנערכו באותה מתכונת במהלך חודשי יולי ואוגוסט. באיור 2 מוצגות התוצאות שהתקבלו בתאריך 8-7-1999. באיור זה בולטת השונות בטמפרטורת הלח לרוחב החממה. בניסוי זה פתחי האוורור הממוקמים בדפנות המזרחית והמערבית היו פתוחים. לאור תוצאות אלה, הוחלט לסגור בהמשך את הפתח המזרחי ולהשאיר פתח מערבי עם פתיחה מוגבלת כפיצוי לחוסר פתח אוורור בגג בגמלון המערבי. כל הניסיונות הנ"ל נערכו בחממה ללא גידול. באיור 3 מוצגות התוצאות של ניסוי דומה עם גידול מפותח (פלפל) שנערך בתאריך 24-6-1999. בהתאם לתוצאות ניתן להצביע על כך שאין שונות לרוחב החממה בטמפרטורת הלח של האוויר כפי שבא לידי ביטוי בניסיונות המתוארים למעלה. ההסבר לכך נעוץ בעובדה שהצמחים היו מפותחים והיו גורם ממתן להפרעות הרוח. מאידך, בולטת התופעה, בתנאים בהם אוורור מאולץ ללא ערפול, שטמפרטורת האוויר (יבש) בקרבת הקרקע נמוכה בהשוואה לטמפרטורה שבמרכז העלווה ובאזור האמירים.

#### 4.1.2 - הפעלה ידנית עם אוורור טבעי

נעשו מספר ניסיונות ראשוניים לתפעל את מערכת הערפול במשטר של אוורור טבעי. לצורך זה פתחי האוורור בהיקף החממה ובגג נשמרו פתוחים והפעלת מערכת הערפול בלחצים שונים. התוצאה שהתקבלה התאפיינה בחוסר אחידות בתנאי האקלים בחממה וחוסר שליטה. הסיבה לכך נובעת מההפרעה הנגרמת מהרוח החיצונית. חשוב להדגיש, שילוב של מערכת הערפול והאוורור וקבלת תנאים אחידים מותנה בכניסה



או יציאה מהצדדים ומהגג באופן אחיד. תנאים אלה עשויים להתקבל באוורור מאולץ או טבעי המבוסס על אפקט הארובה ובתנאי שאין הפרעה של הרוח. תנאים אלה נדירים מאוד ולכן לא ניתן להתבסס על כך. כמובן, הפרעה זו ניכרת פחות במשטר של אוורור מאולץ כמתואר למעלה ויש לצמצמה ככול האפשר. לאור זאת ובמסגרת עבודה זו ערכנו ניתוח היאורטי של האפשרות של שילוב מערכת ערפול עם אוורור טבעי המבוסס על אפקט הארובה [3 ו-4] וללא כל הפרעה. מניתוח זה עולה שמהירות האוויר המתקבלת בתנאים מיטביים לא עולה על 1 מ' לשנייה. מהירות זו נמוכה משמעותית במרבית השעות ממהירות הרוח החיצונית כמתואר למעלה.

#### 4.1.3 - הפעלה באמצעות מערכת הבקרה

כמצוין למעלה, לצורך בקרת החממה במתכונת זו, הותקן בקר ממוחשב בעל פוטנציאל של הפעלה משתנה של מרכיבי המערכת, כתוצאה מהשתנות התנאים הסביבתיים, תוך כדי שמירה על התנאים הרצויים בחממה. זאת, בניגוד למרבית הבקרים המסחריים, המקובלים כיום ומשמשים בחממות, המאפשרים הפעלה של מרכיבי המערכת כתלות בהשתנות התנאים בחממה. במתכונת זו (חממה עם פתחי גג, מאווררים בדפנות וחלוקה אחידה של פומיות הריסוס), בקרת המערכת לקבלת התנאים הרצויים בחממה מצטמצמת לבקרה של ספיקת האוויר שיש להחליף וספיקת המים שיש לספק. בהקשר לכך ולצורך הפעלה רציפה ככול האפשר מערכת הצינון הותקנה ע"פ המתכונת הבאה:

1. הפעלת המפוחים בספיקה משתנה - באמצעות ווסת חשמלי.
  2. חלוקת קווי הפומיות לשניים המבוקרים באמצעות ברזים חשמליים - המאפשרת הפעלה קצובה בזמן ולסירוגין של קווי הפומיות.
- בתנאים אלה ולאחר הפעלה ראשונית איתור תקלות ותיקונן, הופעלה המערכת ע"פ התוכנה שהוכנה ע"י הספק. לצורך ההדגמה, תוצאות מאפיינות מתאריך 18-7-199 מוצגות באיור 4, ובמתכונת דומה לזו המתוארת בסעיפים הקודמים. מתוך תוצאות אלה ניתן להצביע על אי עמידה על התנאים הרצויים ושינויים גדולים כתוצאה מבקרה זו. כמו כן, התקבלו תנאים בהם אויר החממה בתנאי רוויה דבר שגרם בהכרח להרטבה. לאור זאת, יצרן הבקר גילה התעניינות ורצון לשיתוף פעולה לשיפור התוכנה בהתאם. עריכת מספר שינויים בתוכנה הוביל לשיפור ניכר כמתואר באיור 5. שיפור זה אינו מספק ולכן מומלץ להמשיך בעבודה בכיוון זה בהמשך.

#### 4.2 - חממה מסחרית מקובלת (משק של דודו בן אליהו - עין יהב)

החממה תופעלה בשני משטרי הפעלה עיקריים: באמצעות מערכת הבקרה ובאופן ידני.

##### 4.2.1 - הפעלה ידנית

במגמה להמחיש את פוטנציאל המערכת לצינון החממה, נערכו ניסיונות במספר ימים אשר התמקדו בשעות הצהריות החמות והמערכת תופעלה באופן ידני על פי המתכונת הבאה: ספיקת האוויר קבועה ומקסימלית, שתי המשאבות בפעולה רציפה ושינוי הדרגתי של ספיקת המים באמצעות ווסט הלחץ. בתנאים אלה וכהדגמה

לכך, התוצאות המתקבלות מובאות באיור 6. באיור זה מוצגים תנאי ההפעלה בראש האיור טמפרטורות האוויר יבש ולח (עליון ותחתון בהתאמה) של החממה והסביבה. מאחר וההפרשים בין טמפרטורת הלח של האוויר בחממה לזה של הסביבה משקפים את הפרשי האנטלפיה ומאחר וספיקת האוויר קבועה, ניתן להראות שהפרשים אלה תואמים את רמת עומס החום. מתוך איורים אלה ניתן להצביע על מספר תופעות עיקריות: כאשר מערכת הערפול אינה בפעולה (לחץ - 0) טמפרטורות האוויר שמעל האמרים זהה או גבוהה מזו של הסביבה.

פרט לטמפרטורת החיפון הממוקם גבוה (2.7 מ'), טמפרטורות האוויר בחממה אחידות למדי וניכרת ירידה ככול שהחיפון ממוקם נמוך יותר. רמת האחידות עולה ככול שלחץ ההפעלה גבוה יותר, שמשמעותו הספקת מים לאידוי בספיקה גבוהה יותר.

במרבית המצבים טמפרטורת הלח של האוויר בכניסה למאוורר הנה הגבוהה ביותר בעוד שטמפרטורת היבש הנה הנמוכה ביותר. בכך, ניתן להצביע על כך שהאוויר המוחלף מוצא לסילוק החום תוך שמירה על הלחות הרצויה.

#### 4.2.2 – הפעלה באמצעות בקר

תוצאות אופייניות של מערכת הערפול בהפעלה מבוקרת באמצעות מערכת הבקרה כמתואר באיור 7. באיור זה מוצגים טמפרטורות היבש והלח בהתאמה ובהתאם למיקום התא המאוורר. בשעות הצהריים, טמפרטורת האוויר באזור העלווה הייתה כ- 31 מ"צ וטמפרטורת הלח של כ- 27.5 מ"צ, ובהתאם לכך ללחות ממוצעת של כ- 75%. יום זה מתאפיין בעומס חום גבוה הבא לידי ביטוי הן בקרינה מלאה והן בטמפרטורות סביבה גבוהות - יבש של כ- 40 מ"צ ולח של כ- 25.5 מ"צ (הגבוהה בכ- 3 מ"צ מהממוצע) בשעות אחר הצהריים. חשוב להדגיש, תוצאות אלה התקבלו כאשר כ- 30% מהפומיות היו סתומות. בהתאם לכך, ניתן להצביע על תנודות גדולות מאוד בין מצב הפעל למצב הפסק, בעיקר בשעות הבוקר. תוצאה זו נובעת הן מרמת הרגישות של החיישנים המשמשים לבקרה והן מאופן תהליך הבקרה (כמתואר למעלה). משמעות הדבר, מערכת הערפול אינה מנוצלת היטב לצינון החממה. בעקבות זאת, המגדל נערך להחלפת מערכת הבקרה אשר תופעלה מאוחר יותר. מערכת זו פעלה במקביל לזו שבחממה הניסיונית (ראה למעלה) ומתוך מעקב נראה שמתקבלות תוצאות דומות.

#### 4.3 - חממה מסחרית רחבה (משקם של גדעון ויצחק – חצבה)

באיור 8 מובאים טמפרטורות האוויר (יבש ולח) ולחות היחסית של העמודות הממוקמות בחלקה המערבית ובחלקה המזרחית של החממה והסביבה עבור יום מאפיין. מהתוצאות ניתן להצביע על כך שטמפרטורת האוויר בגובה האמירים של העמודה שבחלקה המערבית גבוהה בכ- 1 מ"צ מטמפרטורת האוויר במיקום נמוך יותר (בתוך העלווה). טמפרטורה זו זהה לאלה שבעמודה הממוקמת בחלקה המזרחי של החממה. זאת, משום שבחלקה המזרחית עלויות הצמחייה דלילה.

מתוך השוואת טמפרטורות הלח של שתי העמודות ניתן להצביע על התנהגות וערכים דומים למדי. מאחר וטמפרטורת הלח מהווה מדד לאנטלפיה של האוויר, ומאחר והפרש האנטלפיה בין פנים וחץ מהווה מדד

לספיקת האוויר המתחלפת בחממה, נתונים אלה מצביעים על פיזור אחיד למדי של האוויר בחממה, על אף שהצמחייה שונה מהותית.

בהתאם לטמפרטורות הלח והיבש שנמדדו והוצגו למעלה, חושבה הלחות היחסית. כצפוי הלחות של העמודה המערבית ובחלקה התחתון גבוהה בכ- 10% משאר המקומות. זאת, בעיקר בשל התוספת בספיקת המים שמקורה בצמחים וגורמת לקירור נוסף של האוויר. מאחר והמשאבה סיפקה מים לסירוגין לשני חלקי החממה, ניתן להצביע על כך שטמפרטורת היבש של האוויר משתנה בצורה חדה יותר מזו של הלח. מאידך, ניתן להראות שההפרש בין טמפרטורת הלח של אויר החממה לזה של הסביבה משתנה מעת לעת. דבר זה מצביע על מספר המאווררים שהיו בפעולה.

במגמה לבחון את השפעת התקרה הזחיתה, נערכו מדידות במצבים הבאים: פרישה של כ- 95% כפי שהמגדל נהג לעשות, פרישה של כ- 50%, תקרה אסופה, פרישה של כ- 50%, פרישה של כ- 95%, תקרה אסופה ושוב פרישה של כ- 95%, כמתואר באיור 9 (במתכונת הדומה לאיור 8). בהתאם לתוצאות שהתקבלו נראה שאין השפעה משמעותית של התקרה התרמית על התנאים האקלימיים שבחממה. ההסבר לכך עשוי לנבוע משתי תופעות עיקריות:

1. היריעה הזחיתה, בשל האבק שהצטבר, קולטת את קרינת השמש הגורמת לחימום האוויר בכניסה.

2. חשיפת הצמחים לקרינה המגבירה את הדיות של הצמחים.

רצוי לציין, ממדידות ידניות, ע"פ המתכונת המתוארת למעלה, התקבלו תוצאות דומות. משמעות הדברים, תנאי אקלים אחידים למדי בכל רחבי החממה. כמו כן, טמפרטורת ולחות האוויר ביציאה מהמאוורר היו דומות לאלה של עמודות האוויר המתוארות למעלה. משמעות הדבר, כניסת האוויר לחממה אחידה, האוויר מטופל באופן אחיד (בשל פיזור אחיד של המים המסופקים) העובר מבעד לעלווה ומכאן התוצה באמצעות המאווררים.

מדידות אלה נערכו בחודשי הקיץ בהם קרינת השמש לא משתנה באופן משמעותי מיום ועומדת על כ- 900 וואט למ"ר (אופקי), בצהריי היום. בתנאים אלה ניתן להצביע על כך שמקדם מעבירות-בליעה של החממה הנו כ- 0.4. בהתאם לכך ולתנאים שהתקבלו בחממה (30 - 32 מ"צ ולחות 70% - 80%), ניתן להראות שספיקות המים והאוויר התיאורטיות [1] הן תואמות לאלה שהיו קיימות בפועל.

#### 5. סיכום ומסקנות

עבודה זו התמקדה בחממה ניסיונית בהיקף חצי מסחרי, בחממה מסחרית מקובלת (רוחב של כ- 33 מ') וחממה מסחרית רחבה (כ- 60 מ'). מתוך עבודה זו ניתן להצביע על המסקנות העיקריות הבאות:

1. שילוב של מערכת ערפול ומערכת אוורור המומלץ, הנו אוורור מאולץ באמצעות פתחים בגג ומאווררים בדפנות ופומיות ריסוס הממוקמות מעל האמירים גבוהה ככול האפשר והפזורת באופן אחיד בחממה.

2. שילוב של מערכת ערפול ואוורור טבעי גורם במרבית המצבים לחוסר אחידות וחוסר שליטה.

3. שיפור ניכר הושג בתנאי האקלים המתקבלים כתוצאה מהפעלה באמצעות הבקר המתוכנת.

4. השימוש במי קו ללא טיפול מוקדם לא גרם לשקיעה של מלחים על העלווה וצריבתם. כמו כן, סתימת פומיות בעקבות זאת הייתה שולית. מאידך, ניכרת שקיעה משמעותית על המאווררים.
5. ניכרת ההפרעה של הרוח בחממה הניסיונית בה הותקנו המאווררים בדפנות הצפונית והדרומית ופתחי אוורור בדפנות המערבית והמזרחית (בנוסף לפתחי הגג). פיזור אחיד של המאווררים בכל הדפנות עשוי למנוע זאת ועולה בקנה אחד עם המגמה של עבודה זו להקמת הממות ביחידות גדולות.
6. כהמשך לעבודה זו, חשוב להתמקד בנושאים הבאים:
- התאמת ממשק הגידול לכל ימות השנה.
  - בחינת השפעת המערכת על הגידול לאורך העונה.
  - בחינת המערכת המוצעת בחממות גדולות ככול האפשר במגמה להוזיל את העלות הכוללת ליחידת שטח.
  - המשך פיתוח תוכנת הבקרה שתענה על הדרישות: שמירה על התנאים הרצויים בתנאי סביבה משתנים, זיהוי מגבלות מרכיבי המערכת והפעלה בהתאם, והפעלה ידיונית.
  - בחינת שימוש במים בעלי איכות נמוכה תוך כדי התאמת המאווררים לתנאים.
  - טיפול מוקדם של המים - מתקנים שונים ואיכות הטיפול ומידת התאמתם גם לצורכי השקיה ומחזורם.
  - בחינת האפשרויות לניקוי קל ויעיל של הפומיות.

#### רשימת ספרות

1. Arbel A., Yekutieli O. and Barak M. (1996), Fog system for cooling greenhouses, *Mikun Vehandasa Bachaclaut* 3:27-32.
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., Shklyar A. and Barak M. (2000), Buoyancy-driven ventilation in a greenhouse cooled by a fogging system. *Proceeding of the International Conference and British-Israeli Workshop, on Greenhouse Techniques towards the 3rd Millennium, Acta Horticultural* 534: 327-334.
4. Arbel A., Shklyar A. and Barak M. (2001), Simulation model for a buoyancy-driven ventilation in a greenhouse cooled by a fogging system. Accepted for publication in the *Fourth International Symposium on Mathematical Modelling and Simulation in Agricultural and Bio-Industries, Haifa, Israel*.

1. Arbel A., Shklyar A. and Barak M. (2000), Buoyancy-driven ventilation in a greenhouse cooled by a fogging system. *Proceeding of the International Conference and British-Israeli Workshop, on Greenhouse Techniques towards the 3rd Millennium, Acta Horticultural 534: 327-334.*
2. Arbel A., Shklyar A. and Barak M. (2001), Simulation model for a buoyancy-driven ventilation in a greenhouse cooled by a fogging system. Accepted for publication in the *Fourth International Symposium on Mathematical Modelling and Simulation in Agricultural and Bio-Industries, Haifa, Israel.*

## 6. סיכום עם שאלות מנחות

### 1. מטרות המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.

מטרת העבודה הנה לבחון מערכות ערפול בחממות ע"פ המתכונת הבאה: פתחי אוורור הממוקמים בגג, פומיות הפזורות בצורה אחידה בחממה ומפוחים בצדדים עבור אוורור מאולץ, ופתחי צד לאוורור טבעי. כמתוכנן, בשנה זו הוסבה חממה בתהנת יאיר בהתאם למתכונת זו ונערכו ניסויים. הניסויים שנערכו כללו שלושה משטרים הפעלה: הפעלה ידנית עם אוורור מאולץ, הפעלה ידנית עם אוורור טבעי והפעלה באמצעות הבקר.

### 2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח.

ככלל התנאים המתקבלים בחממות אחידים למדי וניתן לקיים תנאים אקלימיים בתחום הרצוי במרבית ימות השנה גם בחממות גדולות (עד כה נבחנו חממות בממדים של עד 100 על 60 מ'). הפעלת המערכת במתכונת המוצעת עם תקרה תרמית (הנהוגה כיום) או בלעדיה הניבה תוצאות דומות מבחינת טמפרטורה ולחות האוויר שבחממה. השימוש במי קו ללא טיפול מוקדם לא גרם לשקיעה של מלחים על העלווה וצריבתם. כמו כן, סתימת פומיות בעקבות זאת הייתה שולית. מאידך, ניכרת שקיעה משמעותית על המאווררים. שילוב של מערכת ערפול ואוורור טבעי גורם במרבית המצבים לחוסר אחידות וחוסר שליטה. שיפור ניכר הושג בתנאי האקלים המתקבלים כתוצאה מהפעלה באמצעות הבקר המתוכנת.

### 3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו.

תנאי האקלים המתקבלים הן בהתאמה טובה לתוצאות המתקבלות מהניתוח התיאורטי ובהתאם לספיקת האוויר והמים. הצללה באמצעות תקרה תרמית מקטינה את שטף הקרינה אך אינה תורמת לשיפור תנאי האקלים בחממה. מאחר והקרינה נחוצה לתהליך הפוטוסינתזה, מומלץ להתבסס על צינור החממה באמצעות המערכת המוצעת ולא באמצעות הקטנת שטף החום. מבחינה תאורטית קיימת האפשרות לשילוב של מערכת ערפול ואוורור טבעי המתבסס על אפקט הארובה, דבר המגביל את ממדי החממה ומחייב מצב של ללא רוח. אי לכך, מומלץ להתבסס על אוורור מאולץ המבטיח תנאי גידול אחידים גם בחממות בעלות ממדים גדולים. שימוש במים מליחים לא גרם להרטבה או שקיעה של מלחים על העלווה וצריבתם. כמו כן, סתימת פומיות

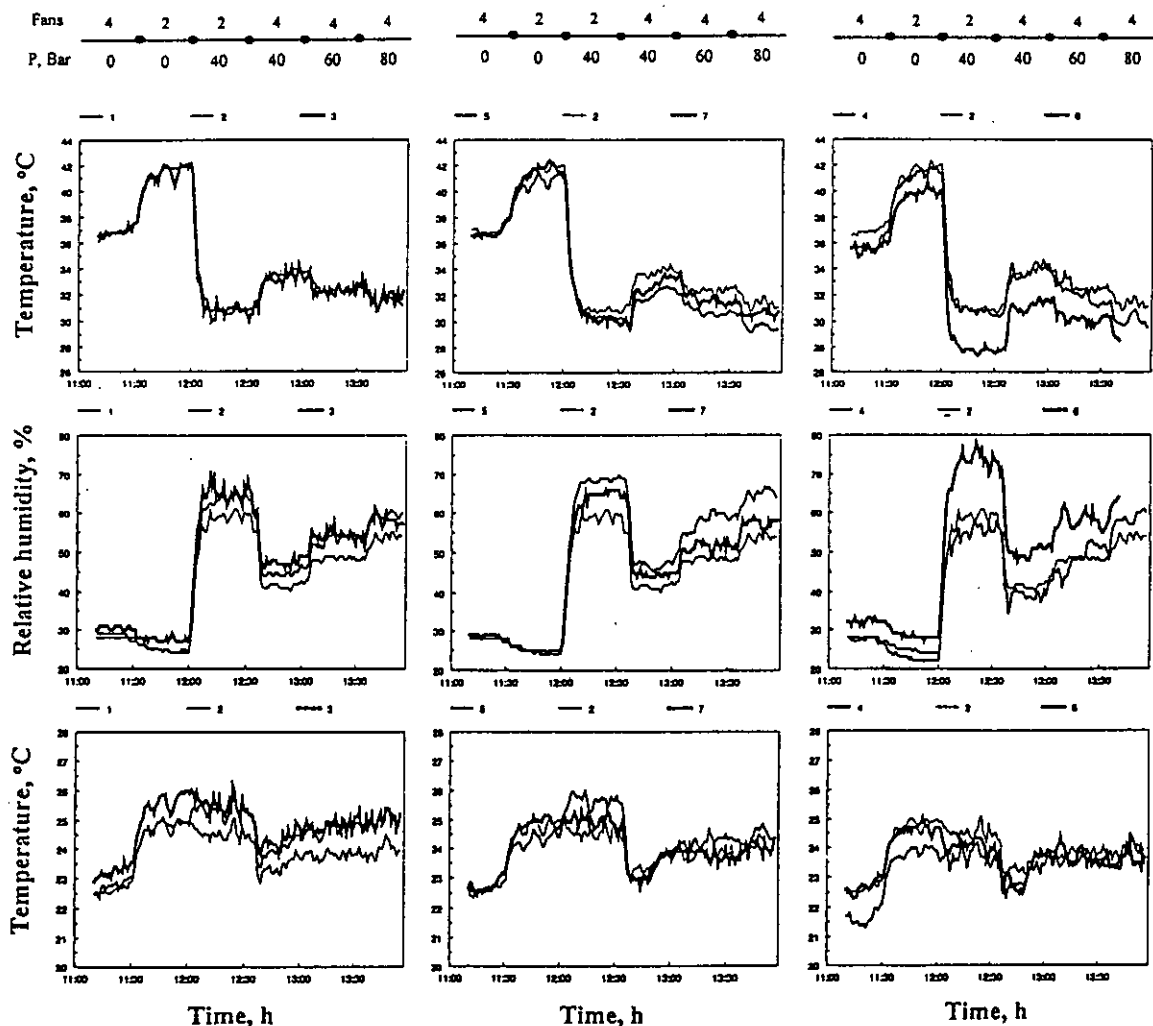
בעקבות זאת הייתה שולית. מאידך, ניכרת שקיעה משמעותית על המאווררים. בהתחשב במצב משק המים בארץ, מומלץ להמשיך ולבחון את השימוש במים מליחים תוך התאמת המאווררים למטרה זו.

4. הבעיות שנתרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה.

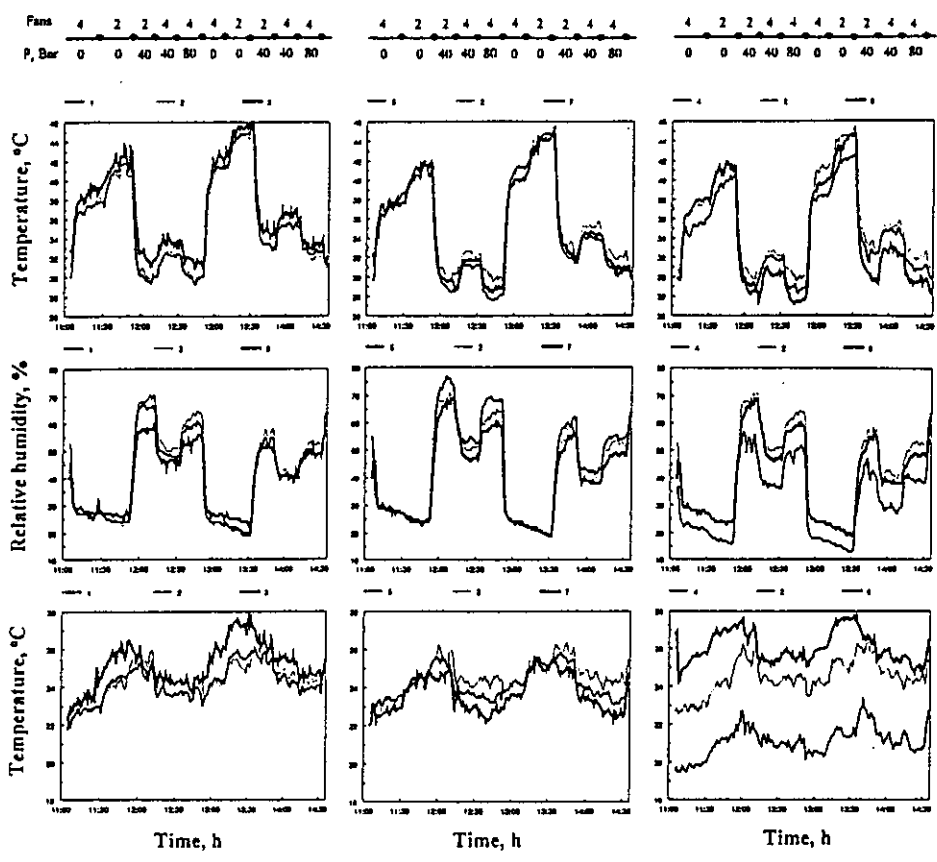
כהמשך לעבודה זו, חשוב להתמקד בנושאים הבאים: התאמת ממשק הגידול שיתאים לכל ימות השנה באמצעות מועדי שתילה, טיפול מוקדם של המים - מתקנים שונים ואיכות הטיפול, בחינת האפשרויות לניקוי קל ויעיל של הפומיות, התאמת המאווררים לתנאי העבודה הייחודיים, והמשך פיתוח תוכנת בקרה שתתאים להפעלת מערכת ערפול בתנאים משתנים.

5. האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח?

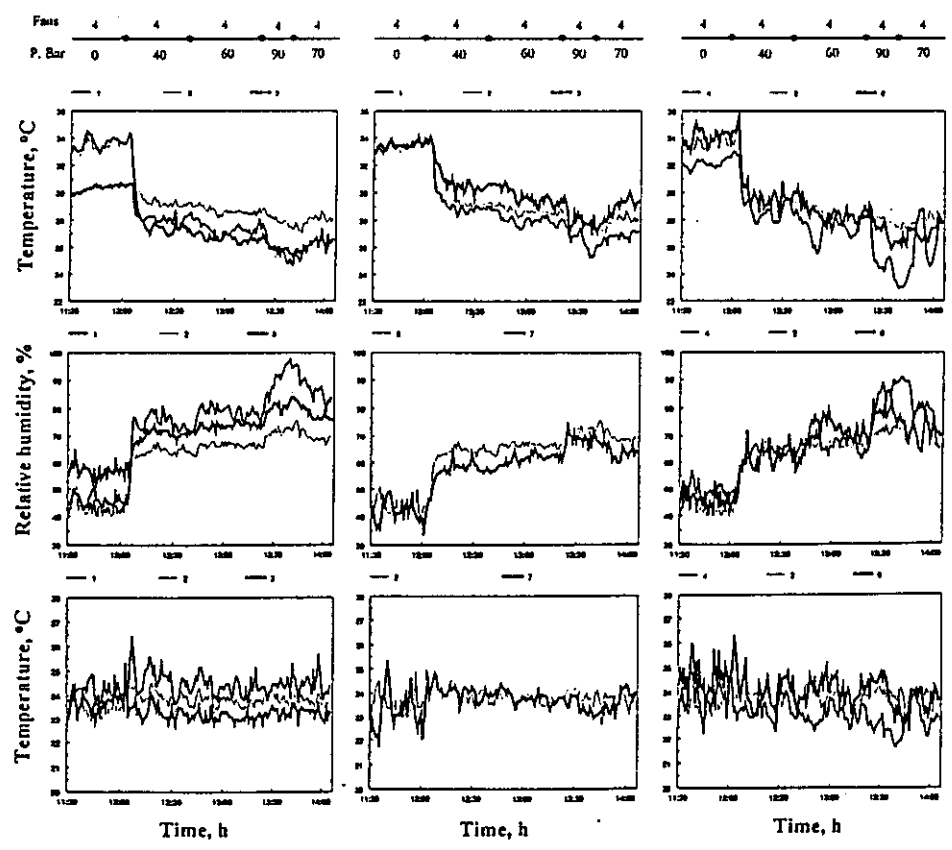
הידע שהצטבר הופץ באמצעות ימים פתוחים, מתן הרצאות לחקלאים ושני מאמרים מבוקרים (ראה למעלה) שהוצגו בכנסים בין-לאומיים.



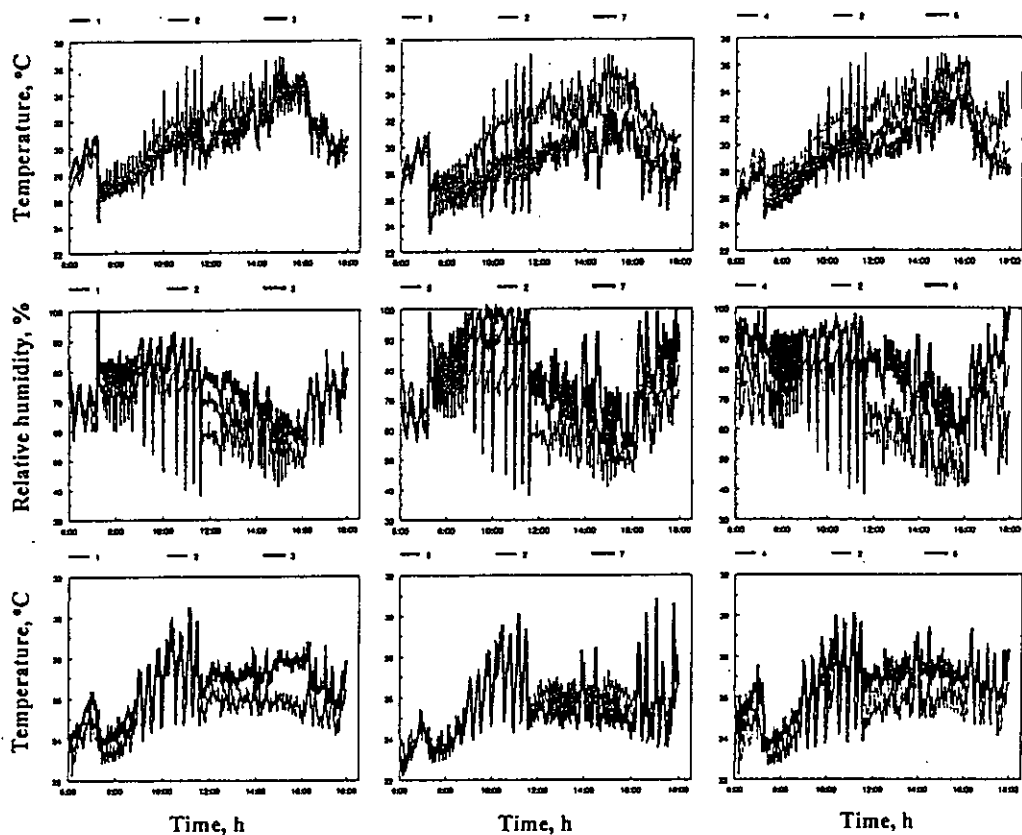
איור 1: תנאי אקלים בחממה הניסיונית שהתקבלו כתוצאה מהפעלה ידנית (מתאריך 21 ביולי).



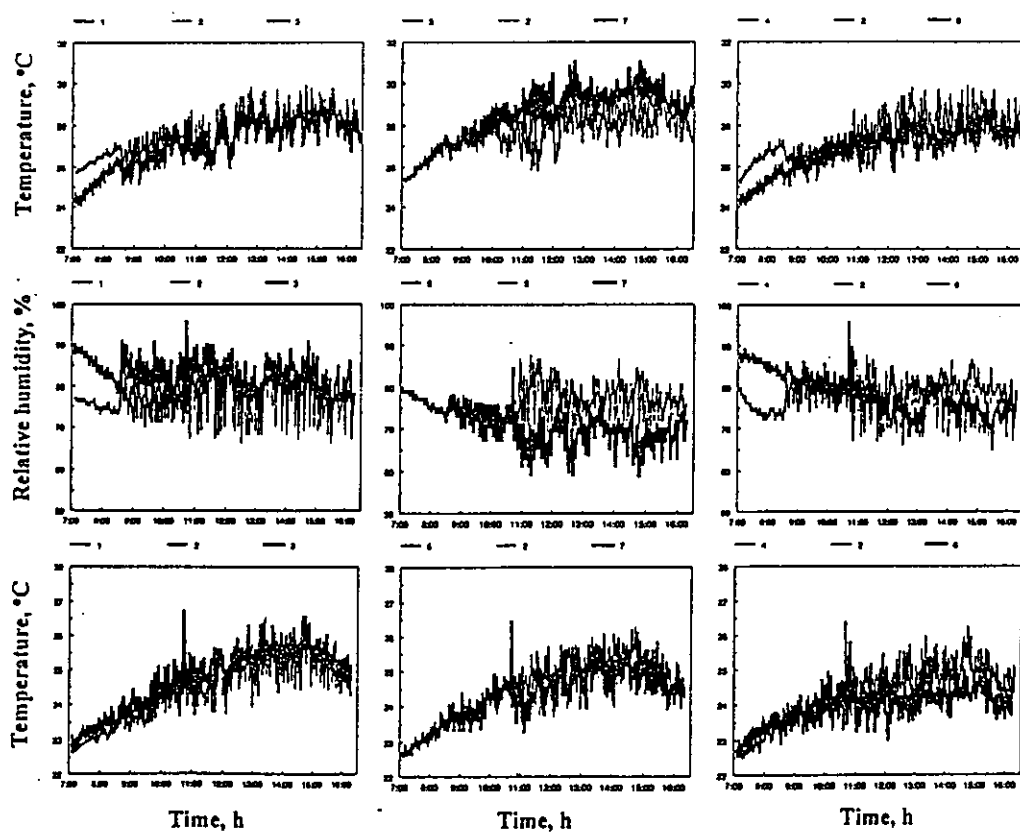
איור 2: תנאי אקלים בחממה הניסיונית שהתקבלו כתוצאה מהפעלה ידנית (מתאריך 8 ביולי).



איור 3: תנאי אקלים בחממה הניסיונית שהתקבלו כתוצאה מהפעלה ידנית (מתאריך 24 ביוני).

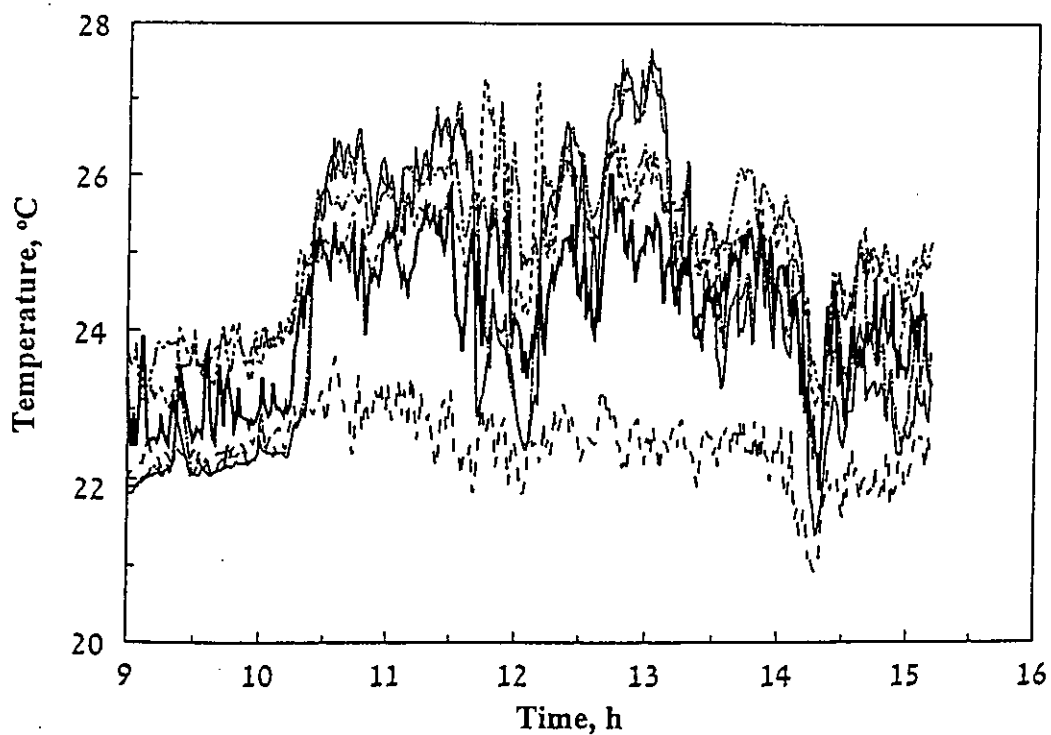
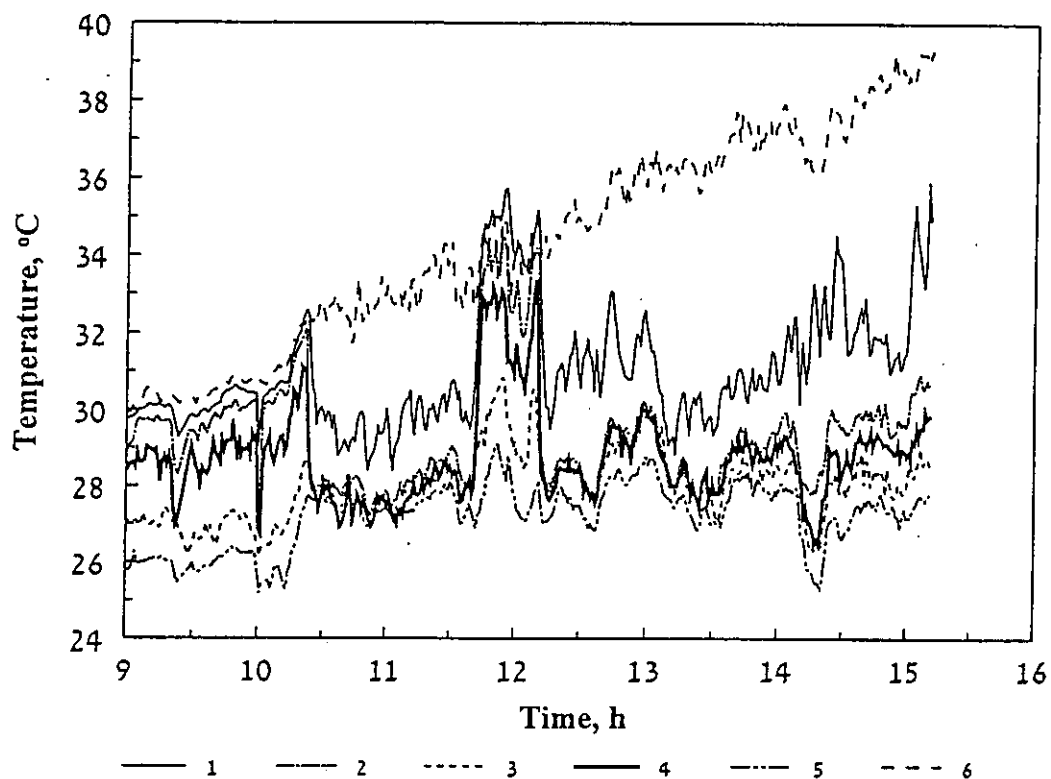
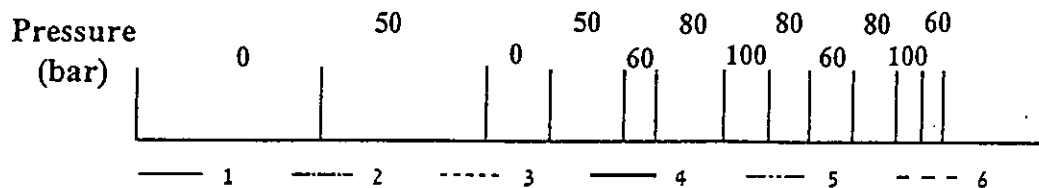


איור 4: תנאי אקלים בחממה הניסיונית שהתקבלו כתוצאה מהפעלה מבוקרת (מתאריך 18 ביולי).

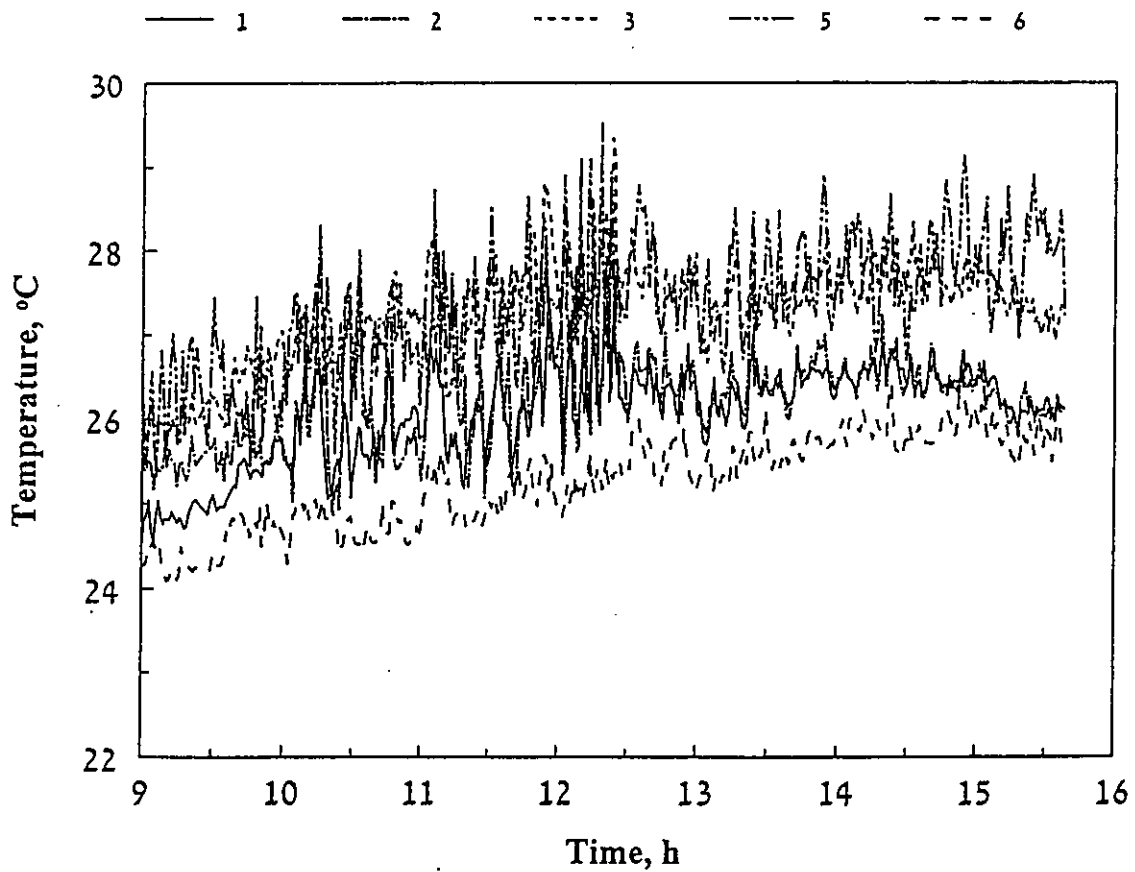
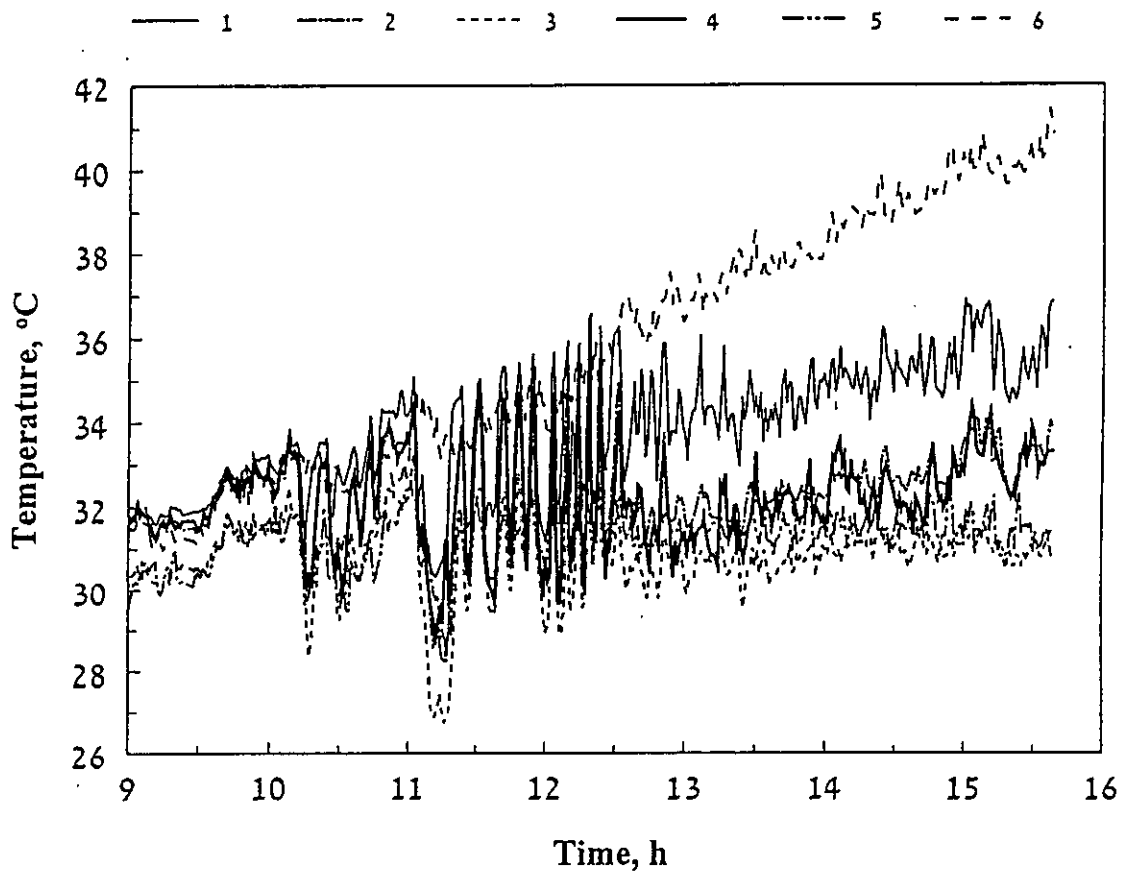


איור 5: תנאי אקלים בחממה הניסיונית שהתקבלו כתוצאה מהפעלה מבוקרת (מתאריך 29 באוגוסט).

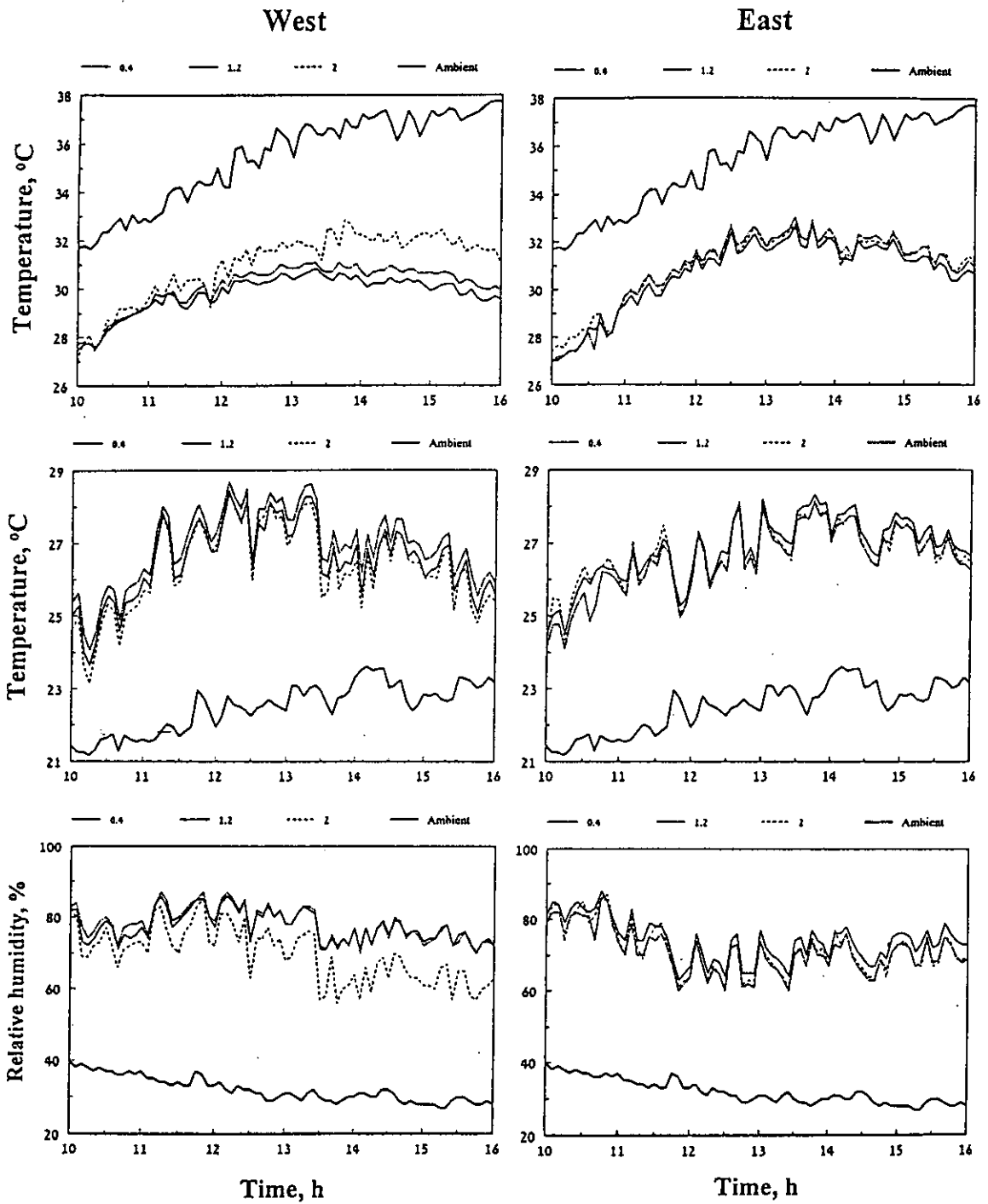




איור 6: תנאי אקלים בחממה מסחרית מקובלת (צרה) שהתקבלו כתוצאה מהפעלה ידנית.



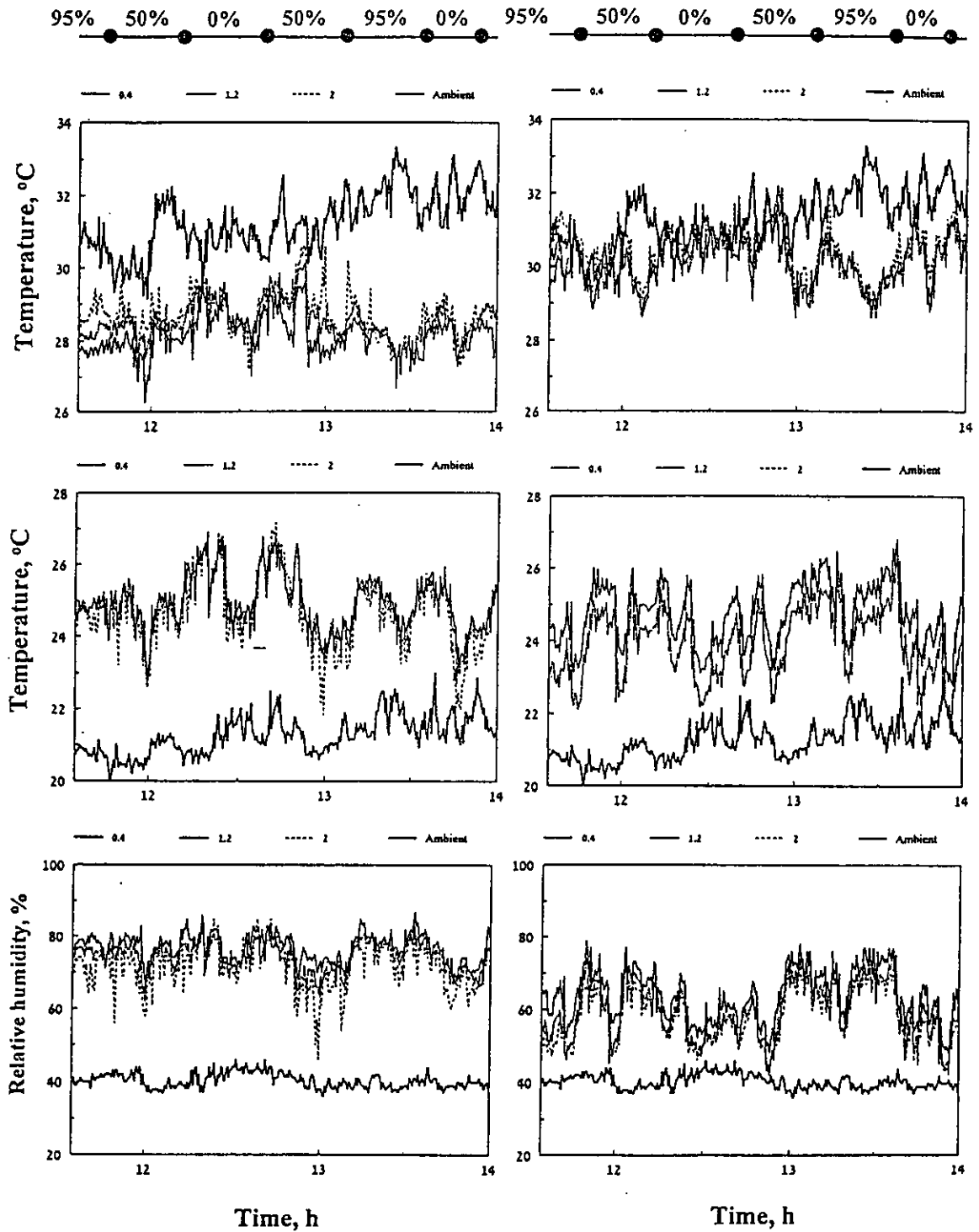
איור 7: תנאי אקלים בחממה מסחרית מקובלת (צרה) שהתקבלו כתוצאה מהפעלה מבוקרת.



איור 8: תנאי אקלים בחממה מסחרית רחבה שהתקבלו כתוצאה מהפעלה מבוקרת.

West

East



איור 9: תנאי אקלים בחממה מסחרית רחבה שהתקבלו כתלות בפרישה של התקרה התרמית הפנימית.