

אופטימיזציה של צינון תוך התחשבות בפרמטרים צמחיים

חוקרים שותפים:

ד"ר טייטל מאיר, ברק מוטי, אלי בר-לב - המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי.
דוד שמואל, אלי מתן, חנה יחזקאל - מו"פ דרום.

תקציר:

מודל מראה כי כשספיקת האוויר קטנה (בסביבות 20 חילופי אוויר לשעה), ייתכן מצב בו האוויר בחממה מתקרר בעקבות הפעלת המזרון הלח בעוד שהירידה בטמפרטורת הצמח זניחה. כלומר, אנו מקררים את האוויר, אך מקטינים את האפשרות של הצמח לקרר את עצמו בגלל העלייה בכמות אדי המים באוויר עקב הפעלת המזרון. כאשר מגדילים את ספיקת האוויר בחממה (ל40 חילופי אוויר לשעה), הצמח מצליח להתקרר לטמפרטורה נמוכה בהרבה מזו שהתקבלה עם הספיקה הקטנה. מודל זה מצביע על אפשרות לאופטימיזציה של קירור הצמח בתלות בספיקת האוויר דרך החממה, בתלות בהפרשי הלחות הסגולית פנים-חוץ ובתלות במהירות האוויר על פני העלווה. מטרת העבודה לשפר את מערכת הצינון מזרון לח, על מנת שתהייה מסוגלת להוריד את טמפרטורת הצמח בצורה יעילה מזו הקיימת כיום ולאורך זמן רב יותר ולקבוע קריטריונים להפעלה ושילוב נכונים של מאווררים, מסחררים ומזרון לח בחממה. נערכו ניסויים בחוות הבשור על צמחי פלפל בחממה גדולה ששטחה כ 300 מ"ר. נבחנה השפעת קצבי אוורור שונים על טמפרטורת האוויר וטמפרטורת העלווה בצינון ע"י אוורור מאולץ בלבד ובצינון ע"י מזרון לח. בניסויים התקבל שטמפרטורת האוויר הממוצעת בתוך הנוף הצמחי, בצינון ע"י אוורור מאולץ בלבד, הייתה בדרך כלל נמוכה מטמפרטורת הסביבה עם השפעה זניחה לשינויים בקצב האוורור. הפעלת מזרון לח הורידה את טמפרטורת האוויר לערכים נמוכים יותר מאלו שהתקבלו עם אוורור מאולץ עם השפעה משמעותית יותר לקצב האוורור. בעוד שבצינון ע"י אוורור, האוויר מתקרר תוך כדי תנועתו דרך הצמחייה, בצינון ע"י מזרון לח האוויר מתחמם. שינוי שיטת הצינון משנה את מנגנון מעבר החום מהעלווה, ממנגנון שעיקרו מעבר חום כמוס למנגנון שבו למעבר החום המרגש יש תרומה משמעותית יותר בצינון העלווה. כאשר החממה מצוננת ללא מזרון לח טמפרטורת העלים בדרך כלל נמוכה מטמפרטורת האוויר ועיקר מעבר החום נובע כתוצאה מטרנספירציה. כאשר מפעילים מזרון לח העלים חמים יותר מהאוויר בחממה וחלק גדול ממעבר החום מהעלים הוא מוחשי. בצינון עם מזרון לח קצב האייד קטן מזה המתקבל בצינון ע"י אוורור, כצפוי. בניסויים הנוכחיים האייד קטן ב30%. הגדלת קצב האוורור מ 10 ל 22 חילופי אוויר בשעה הגדילה את הטרנספירציה ב 20 – 25% בשני טיפולי הצינון.

רקע כללי והגדרת הבעיה:

המגמה של הארכת עונת הגידול לתוך חדשי הקיץ הולכת ומתרחבת בין חקלאי ישראל, מפני שהיא מאפשרת להגדיל את הרווחים, ולכסות את הוצאות ההקמה והתפעול היקרות של חממות מתוחכמות. על מנת להאריך את העונה, לשפר את טיב התוצרת והיבול, ולאפשר לחקלאי סביבת עבודה נוחה עם תפוקת עבודה גבוהה, חלק נכבד מהחקלאים מצננים את החממות בקיץ. בישראל החממות מצוננות בעיקר ע"י מזרון לח אשר מופעל כיום על פי טמפרטורת האוויר בחממה. כאשר הטמפרטורה עולה מעל סף מסוים המערכת נכנסת לפעולה ומורידה את הטמפרטורה. יחד עם זאת, היא מעלה את כמות אדי המים והלחות באוויר. ממודל תיאורטי שהציג מ. פוקס (מהמכון לקרקע ומים) בכנס בנושא צינון בתי צמיחה (1999) ובעבודת סיכום של מחקר (1995), עולה כי כאשר מפעילים את המזרון הלח, יעילות הצינון של הצמח (בהנחה שטמפרטורת הצמח היא זו שמעניינת) תלויה חזק בספיקת האוויר דרך מבנה החממה. המודל מראה כי כאשר ספיקת האוויר קטנה (בסביבות 20 חילופי אוויר לשעה), ייתכן מצב בו האוויר בחממה מתקרר בעקבות הפעלת המזרון הלח בעוד שהירידה בטמפרטורת הצמח זניחה. כלומר אנו מקררים את האוויר אך מקטינים את האפשרות של הצמח לקרר את עצמו בגלל העלייה בכמות אדי המים באוויר עקב הפעלת המזרון. כאשר מגדילים את ספיקת האוויר בחממה (ל40 חילופי אוויר לשעה), הצמח מצליח להתקרר לטמפרטורה

נמוכה בהרבה מזו שהתקבלה עם הספיקה הקטנה. מודל זה מצביע על אפשרות לאופטימיזציה של קירור הצמח בתלות בספיקת האוויר דרך החממה, בתלות בהפרשי הלחות הסגולית פנים-חוץ ובתלות במהירות האוויר על פני העלווה. המודל מניח קשר פשוט בין ספיקת וסחרור אוויר בתוך חלל המבנה וניתן לשלוט על קשר זה. המודל מניח שקיימת תלות בין האיוד מהמזרון הלח והדיות מהצמחים. ההחלטה אם להגדיל את האוורור תלויה ביכולת הצמח להגדיל את קצב העברת המים מהשורש לעלווה.

מטרות המחקר:

לשפר את מערכת הצינון מזרון לח, על מנת שתהייה מסוגלת להוריד את טמפרטורת הצמח בצורה יעילה מזו הקיימת כיום ולאורך זמן רב יותר.
מטרות המשנה הן:
לערוך ניסויים ולאמת את המודל התאורטי שפותח.
לקבוע קריטריונים להפעלה ושילוב נכונים של מאווררים, מסחררים ומזרון לח בחממה.

חומרים ושיטות:

הניסויים נערכו בחממה ששטחה כ 800 מ² בחוות הבשור בה מגדלים פלפל בהדליה. מאווררי החממה חוברו לבקר תדר המאפשר שינוי ספיקת האוויר דרך המבנה באופן רציף מאפס ועד 22 חילופי אוויר בשעה. נבחנה ההשפעה של ספיקת האוויר על המיקרואקלים בחממה בשתי ספיקות אוויר, 10 ו 22 חילופי אוויר לשעה ($0.011\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ ו $0.025\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ בהתאמה). שלוש יחידות למדידת טמפרטורה (לח יבש) הותקנו על הציר המרכזי של החממה, בגובה 1.3 מטר מהקרקע, בין הקיר עליו נמצאים המאווררים, הקיר הדרומי, והקיר הנגדי עליו נמצא המזרון הלח. יחידה אחת הושמה ליד המזרון הלח, השניה במרכז החממה והשלישית ליד המאווררים. במרכז החממה הותקנו בנוסף שתי יחידות המודדות טמפרטורות (לח+יבש) כפונקציה של הגובה בגבהים: 0.3 ו 2.3 מטר מעל הקרקע.

נערכו ניסויים שבהם הופעל המאוורר בלבד וניסויים בהם הופעל המזרון הלח בשילוב עם המאווררים ונבחנה ההשפעה של כל שיטה על צינון החממה. בכל אחת משיטות הצינון נמדדו הפרמטרים הבאים: טמפרטורה ולחות בנקודות השונות בחממה, קרינת שמש מחוץ לחממה ובתוכה, קרינה נטו, טרנספירציה מהצמחים ע"י שקילה רציפה לאורך היום וטמפרטורה של שלוש עלים של הצמחים שנשקלו.

תוצאות ודיון:

איור 1 מראה את הפרשי הטמפרטורה פנים-חוץ, לאורך החממה וכפונקציה של הגובה, בטיפול אוורור ובטיפול צינון ובשתי ספיקות אוויר בכל טיפול. האיור מציג ממוצעים של מספר ימים לכל טיפול. איור 1a מציג את ההפרש בין הטמפרטורה הממוצעת (ממוצע של חמשת נקודות המדידה) וטמפרטורת האוויר בחוץ. מאיור 1a רואים כי גם ללא מזרון לח טמפרטורת האוויר הממוצעת בתוך הנוף יכולה להיות נמוכה מטמפרטורת האוויר בחוץ. בניסויים הנוכחיים הטמפרטורה הייתה נמוכה ב 1 מ"צ לערך מטמפרטורת הסביבה במשך רוב שעות הניסוי בין 1030 ו 1330. כאשר הופעל מזרון לח בשילוב עם המאווררים, טמפרטורת האוויר ירדה בהשוואה למצב של אוורור בלבד, כצפוי. הטמפרטורה בחממה הייתה נמוכה ב 2 מ"צ מטמפרטורת הסביבה בספיקת אוויר נמוכה וירדה עוד יותר עד כדי 4 מ"צ מתחת לטמפרטורת הסביבה כאשר ספיקת האוויר עלתה ל 22 חילופי אוויר בשעה. ראוי לשים לב כי לשינוי ספיקת האוויר עם אוורור בלבד ללא מזרון לח השפעה קטנה יותר על הפרש הטמפרטורה פנים חוץ מזו המתקבלת כאשר המזרון הלח עובד. איור 1b מציג הפרשי טמפרטורה בין מרכז החממה והסביבה לשם השוואה עם הפרשים שהוצגו באיור 1a. נראה כי אין הבדל משמעותי בין הטמפרטורה הממוצעת והטמפרטורה במרכז החממה, מלבד העובדה שהטמפרטורה במרכז מעט יותר נמוכה מהערך הממוצע. איור 1c מראה כי גרדיאנט הטמפרטורה לאורך החממה בין המזרון למאווררים גדול הרבה יותר כשהמזרון פועל בהשוואה לצינון ע"י אוורור.

בצינון ע"י אוורור האוויר הנע לאורך החממה ומתקרר מעט בשל הטרנספירציה מהצמחים ההופכת חום מוחש לחום כמוס. ההתקררות גדולה יותר עם העלייה במהירות האוויר. לעומת זאת, בצינון ע"י מזרון לח האוויר מתחמם תוך כדי תנועתו בחממה ומידת ההתחממות קטנה יותר כשקצב האוורור גדול יותר. הגרדיאנט הגדול ביותר של טמפרטורה התקבל לגובה החממה. גרדיאנט זה היה גדול יותר עם מזרון לח בהשוואה לצינון ע"י אוורור. בשתי שיטות הצינון הגרדיאנט קטן עם העלייה בספיקת האוויר.

טבלה 1 מציגה את הטרנספירציה מהצמחים ואת הפרש הלחות הסגולית לאורך החממה. הטבלה מראה כי כאשר המזרון הלח עובד קצב האיוד הוא כ 70% מזה המתקבל בצינון ע"י אוורור, כצפוי. כאשר המזרון הלח עובד הלחות הסגולית בחממה גבוהה יותר, ההפרש בלחץ האדים בין העלים לאוויר קטן יותר ולכן הטרנספירציה קטנה. נוסף על כך, תיתכן ירידה בטרנספירציה כי כשמזרון הלח עובד ספיקת האוויר בחממה קטנה בשל ההתנגדות הגבוהה יותר של המזרון לזרימת אוויר דרכו. הגדלת קצב האוורור מ 10 ל 22 חילופי אוויר בשעה הגדילה את הטרנספירציה ב 20% – 25% בשני טיפולי הצינון. התנהגות דומה נצפתה בשינויים בהפרש הלחות הסגולית לאורך החממה. הגדלת קצב האוורור הגדילה את הפרש הלחות ב 100% ו ב 20% בטיפולי האוורור וצינון ע"י מזרון לח בהתאמה. מצד שני, עם מזרון לח הפרש הלחות הסגולית לאורך החממה קטן מזה הנמדד בצינון ע"י אוורור בלבד.

איור 2 מציג את הפרשי הלחות הסגולית בפורמט דומה לזה שהוצגו הפרשי הטמפרטורה. האיור מראה כי הלחות הסגולית בחממה תמיד גבוהה מזו של הסביבה בשתי שיטות הצינון, כצפוי. בצינון עם מזרון לח הלחות גבוהה מזו המתקבלת בצינון ע"י אוורור בלבד בשל קליטת המים באוויר תוך כדי תנועתו דרך המזרון הלח נוסף על קליטת המים תוך כדי התנועה דרך הצמחיה כתוצאה מטרנספירציה של הצמחים. כמו בטמפרטורת האוויר גם בלחות ההפרשים הגדולים ביותר מתקבלים בכוון מאונך מהקרקע כלפי מעלה. ההפרשים קטנים עם העלייה בקצב האוורור.

טבלה 1 : טרנספירציה מהצמחים, E, והפרשי לחות סגולית לאורך החממה (מהמאווררים לכוון המזרון) $W_S - W_N$ בשני הטיפולים ובשני קצבי אוורור.

	10 exchanges h ⁻¹		22 exchanges h ⁻¹	
	0.011 m ³ s ⁻¹ m ⁻²		0.025 m ³ s ⁻¹ m ⁻²	
	E 1 (W /m ²)	W _S -W _N (W /m ²)	E 2 (W /m ²)	W _S -W _N (W /m ²)
NO PAD	270 .5	137 .4	329 .3	269 .8
PAD	188 .3	95 .6	234 .3	112 .5

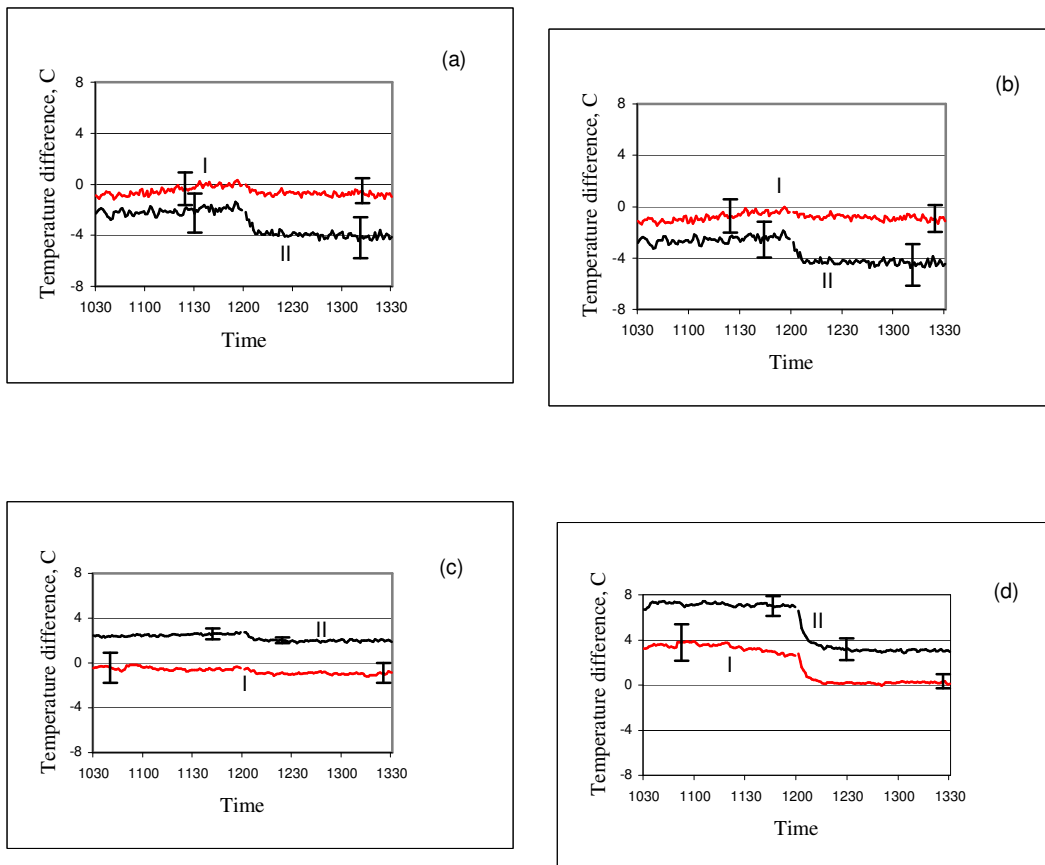


Figure 1. Air temperature differences: (a) between average greenhouse conditions and ambient; (b) between center of greenhouse and ambient; (c) between a point near the pad and a point near the fans; (d) between top and bottom of the crop at the center of the greenhouse. I- mode I; II- mode II. Low and high ventilation rates form 1030-1200 and 1200-1330 respectively. The error bars represent the highest values of two standard deviations.

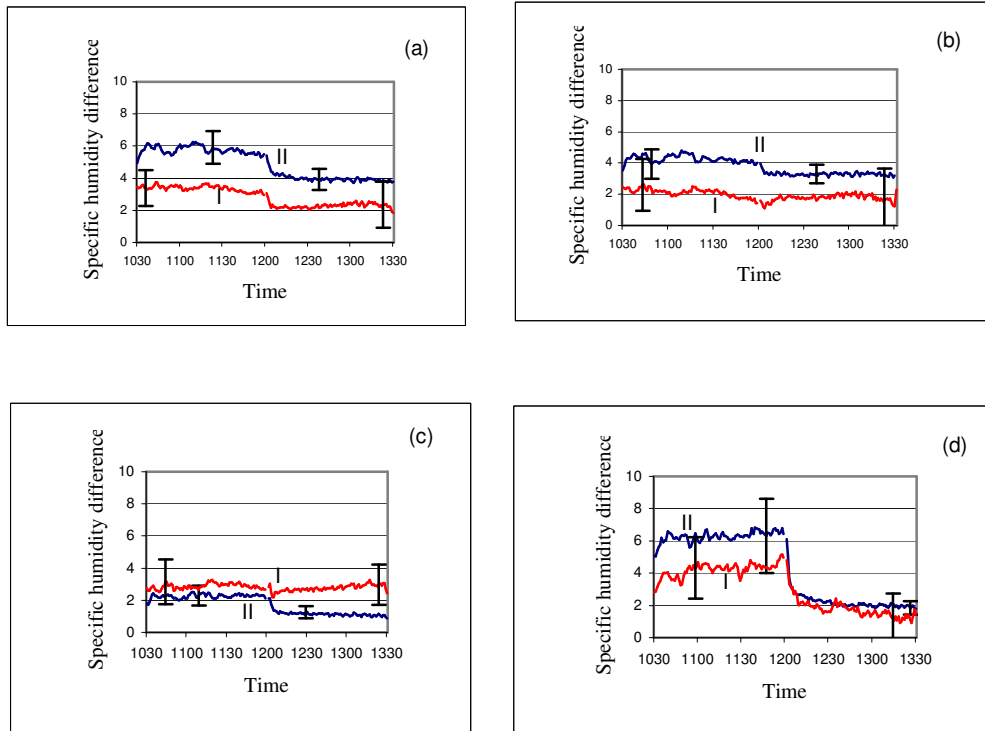


Figure 2. Specific humidity differences: (a) between average greenhouse conditions and ambient; (b) between center of greenhouse and ambient; (c) between a point near the pad and a point near the fans; (d) between top and bottom of the crop at the center of the greenhouse. I- mode I; II- mode II. Low and high ventilation rates form 1030-1200 and 1200-1330 respectively. The error bars represent the highest values of two standard deviations.