

שיפור בקרת האוורור המאולץ בחממות

חוקרים שותפים:

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

תקציר:

הדו"ח מתאר עבודת מחקר שמטרתה לשפר את האוורור בחממות ולחסוך אנרגיה. על מנת לשמור על תנאי אקלים רצויים בתוך המבנה חקלאים נאלצים לאוורר חממות לעיתים קרובות. בחלק גדול מהמקרים האוורור הוא מאולץ ועודפי החום והלחות מסולקים ע"י מאווררים גדולים הפועלים ON-OFF. המאווררים נכנסים לפעולה כאשר הטמפרטורה ו/או הלחות עולים מעל סף מסוים והם מפסיקים לפעול כאשר תנאי האקלים מגיעים לסף רצוי. כתוצאה מכך, נגרמות תנודות חזקות בטמפרטורה ובלחות בחממה ובמיוחד נכון הדבר באוורור לילי המיועד לפינוי לחות. על מנת למתן את התנודות במיקרואקלים שבסביבת הצמח, להקטין את ההסתברות להתעבות מים על העלוה, לשפר את אחידות המיקרואקלים במבנה ולחסוך באנרגיה, מוצע להפעיל את המאווררים באופן רציף במהירות משתנה, ולשנות את ספיקת האוויר דרך המבנה לפי הצורך. הדו"ח מציג עקרונות תיאורטיים בהפעלת מאווררים ע"י בקר תדר המסוגל לשנות את מהירות סיבוב המאווררים מאפס ועד למקסימום באופן רציף. הדו"ח מביא תוצאות ראשוניות של עבודת מחקר בנושא, המראות כי ניתן למתן בצורה משמעותית תנודות בטמפרטורה ובלחות ולחסוך אנרגיה (30-50 אחוז) בתפעול מאווררים. נראה כי ההבדלים הגדולים ביותר בין שתי שיטות האוורור, בגידול פלפל, התקבלו בתופעת שחור הפיטס, פלאפלים ואחוז הבררה שהיו בצורה משמעותית גבוהים באוורור ON-OFF בהשוואה לאוורור הדרגתי.

רקע כללי והגדרת הבעיה:

חממות מאווררות לעיתים קרובות על מנת לשמור על תנאי אקלים רצויים. בחלק גדול מהמקרים האוורור הוא מאולץ ועודפי החום והלחות מסולקים לרוב ע"י מאווררים גדולים "36 או "48. בקרת ההפעלה על מאווררים אלה הינה בד"כ ON-OFF. ממעקב אחר פעולת המאווררים עולה כי הם נכנסים לפעולה כאשר הטמפרטורה והלחות עולים מעל סף מסוים והם מפסיקים לפעול כאשר תנאי האקלים מגיעים לסף רצוי. ההפעלות וההפסקות גורמת לתנודות חזקות בטמפרטורה ובלחות ובמיוחד נכון הדבר כאשר מאווררים חממות אוורור לילי כדי לפנות לחות. חקלאים רבים עובדים לפי משטר אוורור לילי של מספר דקות בשעה, על מנת לפנות אדי מים מחממה מחוממת, ובמקרים אלה הלחות בחממה עולה מיד עם הפסקת פעולת המאווררים.

על מנת למתן את התנודות במיקרואקלים שבסביבת הצמח, להקטין את ההסתברות להתעבות מים על העלוה ולשפר את אחידות המיקרואקלים במבנה, אנו עורכים מחקר שמטרתו לבדוק את האפשרות להפעיל את המאווררים ע"י בקרת תדר משתנה (בת"מ). בשיטה זו משנים את מתח AC הקיים ברשת למתח DC פועם. המתח הפועם מסונן ע"י קבלים המנחיתים את האדווה ומועבר לטרנזיסטורים מסוג IGBT (insulated gate bi-polar transistors) הממותגים בתדר גבוה לטווחי זמן משתנים. כל המערכת האלקטרונית הזאת יכולה לספק למנוע של המאווררים מתח AC בתדר הניתן לשינוי. כתוצאה מכך, ניתן לשלוט על מהירויות הסיבוב של המנוע והמאוורר ועל ספיקת האוויר העוברת דרך החממה ולשנותה באופן רציף מאפס עד למקסימום. מאווררים המבוקרים ע"י בת"מ יכולים להשתלב ביתר קלות בבקרה ממוחשבת, ההולכת ותופסת מקום נכבד יותר בקרב חקלאים רבים בארץ ובעולם ולאפשר בקרה מתקדמת יותר החוסכת חשמל. השימוש בבת"מ נותן גמישות רבה בהפעלת מאווררים. הוא מאפשר שינוי הזמנים שבהם המאוורר עובר ממהירות אפס למקסימום מהירות ויורד בחזרה לאפס. הוא מאפשר תכנות של מהירויות קבועות מראש ועליות מדרגה ממהירות אחת לשנייה. כמו כן, ניתן לבקר על מהירות סיבוב המנוע ע"י בקרת PID. בשוק

קיימות חברות רבות המספקות בקרי תדר בהספקים שונים ואין שום בעיה להתקין בקר שיאפשר בקרה על מאווררי חממה ששטחה 10 דונם או יותר. אחת המטרות החשובות בניהול תקין של אקלים חממה היא לשמור על אחידות התנאים במרחב החממה, Fernandez and Bailey (1994). נוסף על כך, קיימת חשיבות רבה בשמירה על אחידות התנאים עם הזמן. Challa and Brouwer (1985) טוענים שקיימת תמימות דעים בין החוקרים לגבי חשיבות הטמפרטורה בבית הצמיחה. יחד עם זאת, הדעות חלוקות לגבי ההשפעה שיש לשינויים בטמפרטורה עם הזמן על התפתחות הצמח ועל איכות הפרי והפריח. השפעה של שינויי טמפרטורה עם הזמן נצפתה, לדוגמא, ע"י Fink (1993) שמצא כי שטח העלווה וכמות החומר היבש בקולרבי קטנו במשטר טמפרטורה שבו היו תנודות, בהשוואה למשטר שבו הטמפרטורה הייתה יציבה. שינויים חדים בטמפרטורה ולחות עשויים גם לתרום לתופעות של סידוקים בפלפל ועגבניות. האפשרות של הפעלת מאווררים ע"י בקרה על מהירות סיבוב המנוע נבחנה בעבר ע"י (Ford et al. 1998, ; Li and Heber 1992) והראתה כי בת"מ מאפשרת קבלת זרימת אוויר יציבה יותר בחממה שהיו בה שינויים בלחץ הסטטי. כמו כן נצפתה עלייה בנצילות האוורור במהירויות סיבוב קטנות כשספיקת האווריר הדרושה הייתה קטנה. השימוש בבת"מ הצליחה להביא גם לחיסכון באנרגיה שהגיע עד כדי 50% בספיקות אוויר קטנות כאשר לא היה צורך באוורור נמרץ. מניתוח תיאורטי אפשר להראות כי צריכת החשמל היא פונקציה של מהירות הסיבוב של המאוורר בחזקה שלישית. כלומר, באופן תיאורטי, מאוורר המסתובב פי 2 יותר לאט יצרך פי 8 פחות אנרגיה. בפועל החיסכון באנרגיה הוא יותר קטן כפי שנסביר להלן:

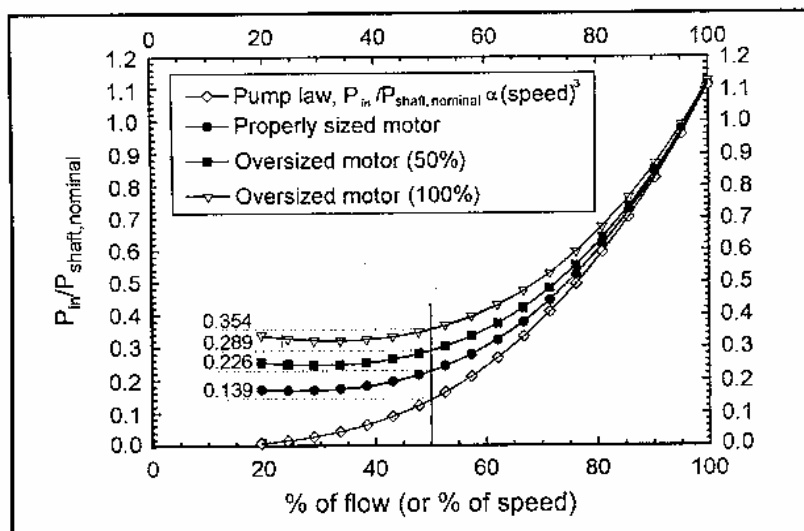


איור 1. סכימה עקרונית של חיבור מאוורר לחשמל דרך בקר סיבובי מנוע.

מאיור 1 אנו רואים כי בין ההספק החשמלי היוצא מרשת החשמל וספיקת האווריר המקררת את החממה ישנם שלושה רכיבים שלכל אחד מהם נצילות קטנה מ 100%. הנצילות של כל אחד מהרכיבים קטנה עם הקטנת מהירות הסיבוב של המאוורר. הנצילות של בקרי תדר עשויה לרדת עד 80% כאשר מהירות הסיבוב של המנוע יורדת ל 25% מהמהירות הנומינלית. ישנם יצרנים הטוענים כי נצילות בקרי התדר שלהם אינה יורדת מ 95% בכל תווך התדירויות. הנצילות של מנועי חשמל בדרך כלל פחות או יותר קבועה בסביבות 90 - 95%, ונצילות המאוורר עשויה לרדת עד כ 30%. ההספק החשמלי הנצרך הוא לכן:

$$P_{\text{חשמלי}} = \frac{P_{\text{תאורטי}}}{\eta_{\text{מנוע}} \times \eta_{\text{בקר}} \times \eta_{\text{מאוורר}}}$$

ההספק תאורטי $P_{\text{תאורטי}}$ הוא ההספק המחושב מבחינה תאורטית והוא נמצא ביחס ישר למהירות הסיבוב בחזקה שלישית. לדוגמא, אם מאוורר צורך 1000 ווט כאשר הוא מחובר לרשת החשמל ומסתובב במהירות הנומינלית שלו, $P_{\text{תאורטי}}$ ירד ל 125 ווט כאשר הוא יסתובב בחצי המהירות הנומינלית.



איור 2. היחס בין ההספק החשמלי וההספק על ציר המאוורר כפונקציה של הסליד של המנוע (עפ"י מקור 1).

איור 2 מציג תוצאות מעבודה של Bernier and Bourret (1999). האיור מתאר את היחס בין ההספק החשמלי (P_{in}) וההספק על ציר המאוורר (P_s) במהירויות סיבוב שונות של המאוורר. האיור מתייחס לארבעה מקרים: (i) פיתוח תיאורטי (היחס פרופורציוני למהירות הסיבוב בחזקה שלישית), (ii) הספק המנוע החשמלי מתואם לצריכת המאוורר, (iii) המנוע החשמלי מועמס ב 50% יותר מהספקו הנומינלי, (iv) המנוע החשמלי מועמס ב 100% יותר מהספקו הנומינלי. מהאיור ניתן להסיק כי כאשר בוחרים מנוע חשמלי כראוי והוא מסתובב במהירות נומינלית כפי שקורה היום בבקרת ON-OFF היחס $P_{in}/P_{s-nominal}=1.1$. כאשר מהירות הסיבוב יורדת לחצי $P_{in}/P_{s-nominal}=0.23$.

בעוד שמבחינה תאורטית ההספק נמצא ביחס ישר למהירות הסיבוב בחזקה שלישית כפי שראינו, הרי שספיקת האוויר דרך המאוורר נמצאת ביחס ישר למהירות הסיבוב. כלומר, הקטנה של מהירות הסיבוב פי שניים תקטין את הספיקה פי שניים. מהתבוננות בפעולת מאווררים בחממות אפשר לראות כי זמן הפעולה של המאווררים משתנה בהתאם לעומס החום והלחות. בימים בהם קרינת השמש אינה חזקה במיוחד נראה שהמאווררים נכנסים לפעולה בפרקי זמן קצרים וחלק ניכר מהזמן הם אינם פועלים. אם נשכיל להפעיל את המאווררים לאורך זמן גדול יותר ובספיקת אוויר נמוכה יותר, נוכל למתן את התנודות בטמפרטורה ובלחות ולחסוך אנרגיה. נניח כי נסובב את המאווררים בחצי המהירות בה הם מסתובבים כיום בבקרת OFF-ON, במצב זה נצטרך להפעיל אותם לאורך זמן הארוך פי שניים כפי הנראה (זהו אחד הפרמטרים שנבדק במחקר) על מנת להעביר את אותה כמות אוויר. מצד שני ההספק החשמלי הנצרך יהיה כ 0.2 מזה הנצרך ע"י הפעלת OFF-ON. לכן, סה"כ צריכת האנרגיה (כפולה של הספק בזמן) בהפעלה ע"י בקרת תדר המורידה את מהירות הסיבוב לחצי צפויה להיות כ 0.4 מזו המתקבלת בבקרת OFF-ON.

מטרות המחקר:

לפתח מערכת אוורור המסוגלת למתן בצורה משמעותית את השינויים החדים במיקרואקלים שבסביבת הצמח ולצמצם את בעיית ההתעבות על עלווה בחממה (התפתחות מחלות אוהדות לחות). לבדוק את האפשרות של חסכון באנרגיה בהפעלת מאווררים ע"י בת"מ.

מטרות המשנה הן :

- 2.1 להשוות בין המיקרואקלים המתפתח בחממה המבוקרת ע"י בקר ON-OFF לזה שבחממה המבוקרת ע"י בקר תדר משתנה.
- 2.2 לקבוע קריטריונים לבקרה על מאווררים המופעלים ע"י תדר משתנה.
- 2.3 להשוות בין השיטות מבחינת צריכת אנרגיה ועלויות התקנה ותפעול.

חומרים ושיטות:

בשלב זה נערכים ניסויים בחוות הבשור במגמה לבחון את האפשרות של שימוש בבת"מ בחממות. הניסויים נערכים בחממה בעלת שישה גמלונים בה מגדלים לפל, שחולקה ע"י יריעת פוליאטילן לשני תאים בעלי שלשה גמלונים כל אחד. בתא אחד בקרת האוורור היא OFF-ON ובתא השני היא בת"מ. בשני התאים ערכי הסף לבקרת הטמפרטורה במשך היום נקבעו כך שהפעלת המאווררים תהיה ב 26 מ"צ והפסקתם ב 25 מ"צ. פרמטר נוסף לבקרה היה הלחות היחסית בחממה. בשני תאי החממה אסור ללחות לעלות מעל ל 85% וברגע שהלחות עולה מעל סף זה המאווררים נכנסים לפעולה. בלילה המאווררים נכנסים לפעולה כאשר הלחות היחסית עולה מעל 96% והם מפסיקים לפעול בלחות יחסית נמוכה מ 92%. הטמפרטורה והלחות נמדדים בחמש נקודות בכל אחד מהתאים ע"י תרמוקפלים יבש ולח הנמצאים ביחידות מאווררות. המדידים הונחו לאורך ציר מרכזי של כל תא העובר בין הקיר עליו מותקנים המאווררים והקיר הנגדי עליו יש מזרון לח. פרוסי הטמפרטורה והלחות כפונקציה של הגובה מעל הקרקע נמדדים גם במרכז כל תא. במקביל לניסויים בחוות הבשור נערכו ניסויים במתקן לבדיקת מפוחים, לבדוק כיצד משתנים אופייני מאוורר "48 כתוצאה משינויים במהירות הסיבוב של המאוורר. מטרת הבדיקה הייתה לאפיין את הספיקה, היעילות ותצרוכת החשמל של מאוורר בהפרישי לחץ שונים. הבדיקה נערכה בהתאם לתקנים ANSI/AMCA 210-85 and ANSI/ASHRAE 51-1985. המאוורר שנבדק הנו מטיפוס צירי, מותקן בכונס בצורת פעמון היושב בתוך מסגרת מרובעת. הוא מצויד ברשתות הגנה תקניות לפי תקן ANSI/ASAE S493 הן בצד היניקה והן בצד הסניקה, בו מותקנים גם תריסים. התריסים מופעלים באמצעות זרם האוויר ומשקלות מאזנות.

תוצאות ודיון:

איור 3 מציג את שינויי ספיקת האוויר וצריכת החשמל, כפי שנמדדו בפועל בחממה, כפונקציה של מהירות הסיבוב של המאוורר. האיור מראה גם את השינוי התיאורטי בצריכת האנרגיה שאמור להיות כתוצאה משינוי מהירות הסיבוב. מהאיור רואים כי ספיקת האוויר קטנה באופן כמעט ליניארי עם הירידה במהירות סיבוב המאוורר כפי שהתיאוריה צופה. לעומת זאת הירידה בצריכת החשמל קטנה מזו שמתקבלת מהחישוב התיאורטי. כפי שהוסבר בפרק 1, הירידה הקטנה יותר, נובעת משינויים בנצילות של המאוורר, המנוע החשמלי ובקר התדר עם הירידה במהירות הסיבוב. איור 4 מציג תוצאות ראשוניות של מדידות אקלים בשני חלקי החממה בצהריים. האיור מראה את הטמפרטורה והלחות בשני חלקי החממה ביום מסוים בין השעות 11:05 ו 13:10. הטמפרטורה והלחות המוצגים הם ממוצעים של המדידות מכל חמשת היחידות שבכל תא. מהאיור אפשר להסיק על האפשרויות הטמונות באוורור הדרגתי. כפי שרואים, האוורור ההדרגתי ע"י בת"מ מאפשר צמצום ניכר במספר ההפעלות במשך זמן נתון וע"י כך ממתן את התנודות בטמפרטורה ובלחות. חשוב לציין כי איור 4 מייצג דוגמא בלבד של הפעלה בתנאים מסוימים. כמו כן ראוי לציין כי מהתוצאות באיור 4 רואים כי יש השפעה הדדית בין התאים. אפשר לראות תנודות בעלות משרעת קטנה בתא המבוקר ע"י בת"מ, הנמצאות בקורלציה עם ההפעלות ON OFF שבתא השני. שינוי פרמטרים כגון סף עליון ותחתון של טמפרטורה ולחות, שינוי הזמנים שלוקח למאווררים להגיע עד למקסימום מהירות ולאחר מכן לרדת ממנה לאפס ושינוי ערך הסף העליון של מהירות סיבוב המאוורר ישפיעו על השינויים בטמפרטורה ובלחות בחממה וכמובן על צריכת החשמל. במסגרת עבודת המחקר נבחן את ההשפעה של שינוי הפרמטרים הנ"ל על המיקרואקלים בחממה ועל צריכת האנרגיה על מנת לקבוע קריטריונים להפעלה נכונה של בת"מ בחממות.

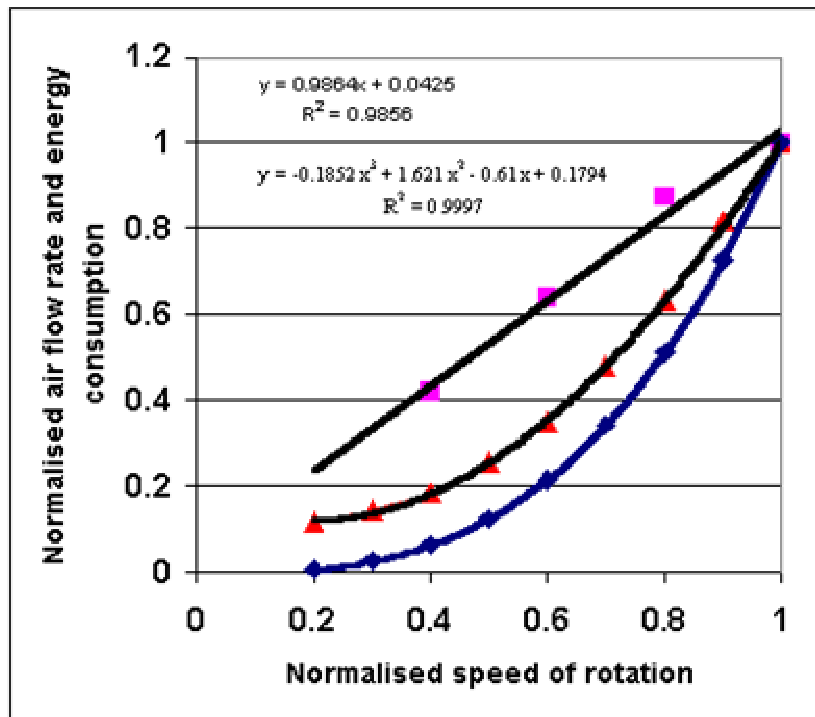
טבלה 1 מציגה תוצאות מעקב אחר היבול ואיכותו בשתי שיטות האוורור. נראה כי ההבדלים הגדולים ביותר בין שתי שיטות האוורור התקבלו בתופעת שחור הפיטם, פלאפלים ואחוז הבררה שהיו בצורה משמעותית גבוהים באוורור ON_OFF בהשוואה לאוורור הדרגתי. לא נצפו הבדלים משמעותיים ביבול, בעיוותים ובסידוקים.

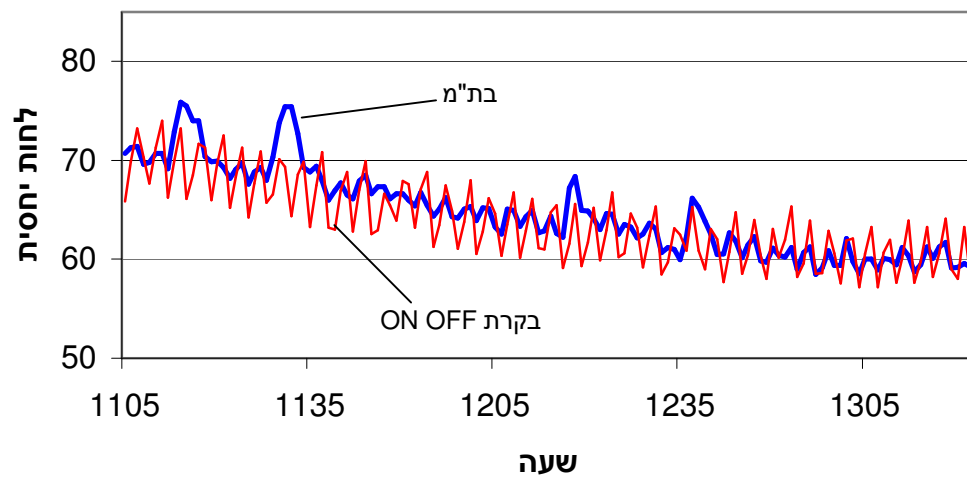
טבלה 1 : נתונים מצטברים לעונת 2001

משקל מצטבר לעונה 4.1.01 – 4.7.01

ייצוא	עיוות	סידוק	שפיץ	פיטם	פלאפל	
10043	1633	2648	288	18	114	איורור הדרגתי
10229	1527	2327	278	91	209	איורור on-off

איור 3: שינויי ספיקה וצריכת אנרגיה. ■, ספיקת אוויר ♦, צריכת אנרגיה תיאורטית ▲, צריכת אנרגיה בפועל.





איור 4. שינויי טמפרטורה ולחות בבקרת OFF-ON ובאווורור הדרגתי ע"י בקרה על הסליד של המאוורר.