

שיפור בקרת האוורור המאולץ בחממות

מאיר טייטל¹, אלי בר-לב¹, מוטי ברק¹, דוד שמואל², מיכאל דריוגין¹, אלי מתן², חנה יחזקאל²
¹ המכון להנדסה, מרכז וולקני; ² מו"פ דרום, חוות הבשור

תקציר

הדו"ח מתאר עבודת מחקר שמטרתה לשפר את האוורור המאולץ בחממות ולחסוך אנרגיה. בתנאי אקלים חם כמו זה בישראל אין אפשרות לגדל בחממה ללא אוורור. בחלק גדול מהמקרים האוורור הוא מאולץ ועודפי החום והלחות מסולקים ע"י מאווררים גדולים המופעלים ע"י בקרת ON-OFF. המאווררים נכנסים לפעולה כאשר הטמפרטורה ו/או הלחות עולים מעל סף מסוים והם מפסיקים לפעול כאשר תנאי האקלים מגיעים לסף הרצוי. 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 העלווה, לשפר את אחידות המיקרואקלים במבנה ולחסוך באנרגיה, מוצע להפעיל את המאווררים באופן רציף במהירות משתנה, וכתוצאה מכך לשנות את ספיקת האוויר דרך המבנה לפי שינוי עומס החום לאורך היום. הדו"ח מציג עקרונות תיאורטיים בהפעלת מאווררים ע"י בקר תדר המסוגל לשנות את מהירות סיבוב המאווררים מאפס ועד למקסימום באופן רציף. הוא מביא תוצאות של עבודת מחקר שנעשתה בחממה בשטח דונם בחוות הבשור בה גידלו פלפל בהדליה. התוצאות מראות כי בהפעלת המאווררים במהירות משתנה ניתן למתן את התנודות בטמפרטורה ובלחות של אוויר החממה ולשמור על ערכים ממוצעים כמעט שווים לאלה המתקבלים באוורור ON-OFF. הפעלת המאווררים במהירות משתנה הקטינה את צריכת החשמל הממוצעת על פני חודש עד כדי 63% מהצריכה הנחוצה לתפעול המאווררים בפקוד ON-OFF. באוורור לילי לפינוי לחות היה החיסכון באנרגיה משמעותי עוד יותר. נערכה תצפית השוואתית בה נבדקו פרמטרים צמחיים בשתי שיטות האוורור. ההבדלים הגדולים ביותר התקבלו בתופעת שחור הפיטם, ופרי פחוס שהיו בצורה משמעותית גבוהים באוורור ON-OFF בהשוואה לאוורור הדרגתי. לא נמצא הבדל משמעותי ביבול הכללי וביבול לייצוא בהשוואה בין שיטות האוורור.

1. רקע כללי והגדרת הבעיה

באקלים חם כמו זה שבישראל, נאלצים לאוורר את החממות 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 המאווררים הנה בד"כ ON-OFF. כלומר 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. הדבר נכון במיוחד כאשר מאווררים חממות אוורור לילי כדי לפנות לחות. פינוי הלחות נועד למנוע התעבות אפשרית על העלים, לצמצם התפתחות מחלות אוהדות לחות ומנוע נזקים פיזיולוגיים הנגרמים מלחות גבוהה במשך הלילה. 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. בעיה נוספת היא בעיית האחידות באקלים החממה. כשהחממה גדולה, החקלאים נוהגים לעיתים קרובות, מטעמי חסכון באנרגיה, לחלק את המאווררים לשתיים או שלוש קבוצות ולהפעילן עפ"י עומס החום. דהיינו, קבוצה ראשונה מופעלת בעומס חום נמוך וככל שהעומס גדל מופעלות קבוצות מאווררים נוספות. בשל חלוקת המאווררים לקבוצות, נפגמת האחידות בטמפרטורה ובלחות ונוצרים אזורים בחממה בהם הטמפרטורה והלחות גבוהים במיוחד שקבוצה אחת בלבד פועלת.

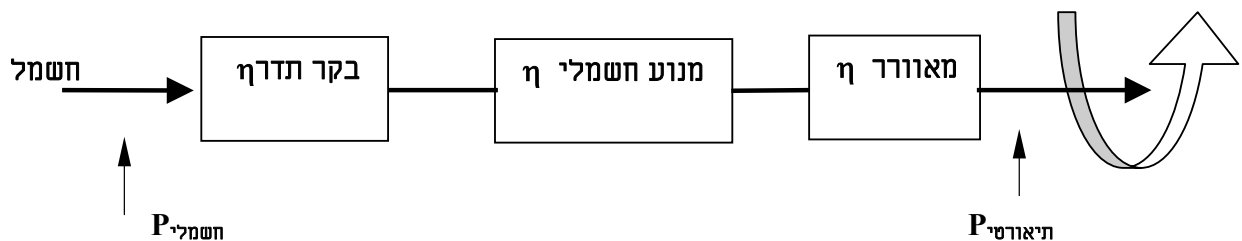
על מנת למתן את התנודות במיקרואקלים שבסביבת הצמח, להקטין את ההסתברות להתעבות מים על העלווה ולשפר את אחידות המיקרואקלים במבנה, נבדקה במחקר המתואר האפשרות להפעיל את המאווררים ע"י בקרת תדר משתנה (**בת"מ**). בשיטה זו ניתן לשלוט על מהירויות הסיבוב של מנוע המאוורר וכתוצאה מכך על ספיקת האוויר העוברת דרך החממה ולשנותה באופן רציף מאפס עד לערך מקסימלי. 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 פרקי הזמן שבהם המאוורר עובר ממהירות אפס למקסימום המהירות ויורד בחזרה לאפס. הוא מאפשר תכנות של מהירויות קבועות מראש ועליות מדרגה

ממהירות אחת לשניה. כמו כן, ניתן לבקר על מהירות סיבוב המנוע ע"י בקרת PID.

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 והפרח. בסדרה של מאמרים הראו אלוני וחובריו (1999a, 1999b) ו Yao et al. (2000) שמחזוריים של התכווצות והתפשטות מחלישים ככל הנראה את הקוטיקולה של פרי הפלפל והופכים אותה

רגישה יותר לתופעת הסידוקים. ככל שגדל הפרש הטמפרטורה בין היום והלילה כן גדל ההפרש בין עוצמת ההתרחבות והתכווצות של הפרי ובעקבות כך גדלה עוצמת ההסתדקות. השפעה של שינויי טמפרטורה עם הזמן נצפתה גם ע"י Fink (1993) שמצא כי שטח העלווה וכמות החומר היבש בקולרבי קטנו במשטר טמפרטורה שבו היו תנודות, בהשוואה למשטר שבו הטמפרטורה הייתה יציבה.

האפשרות של הפעלת מאווררים ע"י בקרה על מהירות סיבוב המנוע נבחנה בעבר ע"י Ford et al. (1998) ו Li and Heber (1992) והראתה כי בת"מ מאפשרת קבלת זרימת אוויר יציבה יותר בחממה שהיו בה שינויים בלחץ הסטטי כתוצאה משינויים ברוח החיצונית. כמו כן נצפתה עלייה בנצילות האוורור במהירויות סיבוב קטנות כשספיקת האוויר הדרושה הייתה קטנה. השימוש בבת"מ הצליח להביא גם לחיסכון באנרגיה שהגיע עד כדי 50% בספיקות אוויר קטנות כאשר לא היה צורך באוורור נמרץ. אפשר להראות כי צריכת החשמל היא פונקציה של מהירות הסיבוב של המאוורר בחזקה שלישית (Sayers, 1990). כלומר, באופן תיאורטי, מאוורר המסתובב פי 2 יותר לאט צורך רק שמינית מן האנרגיה שצורך מאוורר המסתובב במהירות מכסימלית. בפועל החיסכון באנרגיה הוא קטן יותר 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 האוויר המקררת את החממה ישנם שלושה רכיבים שלכל אחד מהם נצילות η 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:

$$P_{\text{חשמלי}} = \frac{P_{\text{תיאורטי}}}{\eta_{\text{מאורר}} \times \eta_{\text{מנוע}} \times \eta_{\text{בקר}}}$$

ההספק תיאורטי $P_{\text{תיאורטי}}$ הוא ההספק המחושב מבחינה תאורטית והוא נמצא ביחס ישר למהירות הסיבוב בחזקה שלישית. לדוגמא, אם ההספק התיאורטי הוא 1000 וואט כאשר המאורר מסתובב במהירות הנומינלית שלו, תיאורטי $P_{\text{תיאורטי}}$ ירד ל 125 וואט כאשר הוא יסתובב בחצי המהירות הנומינלית. (Bernier and Bourret (1999) הראו כי יש חשיבות רבה להתאמת ההספק הנומינלי של המנוע החשמלי להספק הנדרש ע"י המאורר. ככל שהמנוע החשמלי המחובר למאורר בעל הספק נומינלי גדול יותר מזה הנדרש לפעולת המאורר הנצילות הכללית תקטן וצריכת החשמל תעלה.

בעוד שמבחינה תאורטית ההספק נמצא ביחס ישר למהירות הסיבוב בחזקה שלישית כפי שראינו, הרי שספיקת האוויר דרך המאורר נמצאת ביחס ישר למהירות הסיבוב. כלומר, הקטנה של מהירות הסיבוב פי שניים תקטין את הספיקה פי שניים. מהתבוננות בפעולת מאוררים בחממות אפשר לראות כי זמן הפעולה של המאוררים משתנה בהתאם לעומס החום והלחות. בימים בהם קרינת השמש אינה חזקה במיוחד נראה שהמאוררים נכנסים לפעולה בפרקי זמן קצרים וחלק ניכר מהזמן הם אינם פועלים. אם נשכיל להפעיל את המאוררים לאורך זמן גדול יותר ובספיקת אוויר נמוכה יותר, נוכל למתן את התנודות בטמפרטורה ובלחות ולחסוך אנרגיה. נניח כי נסובב את המאוררים בחצי המהירות בה הם מסתובבים כיום בבקרת ON-OFF, במצב זה נצטרך להפעיל אותם לאורך זמן ארוך פי שניים על מנת להעביר את אותה כמות אוויר. מצד שני ההספק החשמלי הנצרך יהיה כ 24% מזה הנצרך ע"י הפעלת ON-OFF. לכן, סה"כ צריכת האנרגיה (כפולה של הספק בזמן) בהפעלה ע"י בקרת תדר המורידה את מהירות הסיבוב לחצי צפויה להיות כ 48% מזו המתקבלת בבקרת ON-OFF.

מטרות המחקר היו פיתוח מערכת אוורור המסוגלת לספק תנאי אקלים ממוצעים דומים לאלה המתקבלים באוורור ON-OFF תוך צריכת אנרגיה קטנה יותר. בנוסף רצינו לבדוק את האפשרות של מיתון השינויים החדים במיקרואקלים שבסביבת הצמח כתוצאה מהפעלה לסירוגין של מערכת האוורור וכתוצאה מכך צמצום בעיית ההתעבות על עלווה והפרי (הגורמת התפתחות מחלות ונזקים פיזיולוגיים).

2. חומרים ושיטות

הזד"ח מתאר ניסויים שנערכו במשך שנתיים בתחנת הניסויים בבשור. בשנה הראשונה הניסויים נערכו בחממה ששטחה כ 1100 מ"ר בעלת שישה גמלונים, בה גידלו פלפל בהדליה. החממה חולקה ע"י יריעת פוליאטילן לשני תאים בעלי שלשה גמלונים כל אחד. בתא אחד הופעלו המאווררים ע"י בקרת ON-OFF ובתא השני ע"י בת"מ. ערכי הסף לבקרת הטמפרטורה בשני התאים נקבעו כך שבמשך היום המאווררים החלו לפעול כשהטמפרטורה בחממה עלתה מעל 26 מ"צ והפסיקו לפעול כשהטמפרטורה ירדה מתחת ל 25 מ"צ. כמו כן, ברגע שהלחות עלתה מעל 85% המאווררים החלו לפעול. בתחום שבין 25 – 26 מ"צ הסתובבו המאווררים בתא המבוקר ע"י בת"מ על פי המשוואה $N = (T - T_s)R + 1200$, כאשר N הוא מהירות הסיבוב, T טמפרטורת האוויר הממוצעת בחממה, $T_s = 25$ ו R קרינת השמש בוואט למ"ר. לעומת זאת, בתא שבו פעלה בקרת ON-OFF המאווררים הסתובבו במקסימום מהירות כל עוד טמפרטורת האוויר בחממה הייתה בתחום 25 – 26 מ"צ. הטמפרטורה והלחות נמדדו בחמש נקודות בכל אחד מהתאים ע"י תרמוקפלים יבש ולח שהושמו ביחידות מאווררות (ראה איור 2). שלוש מתוך חמש היחידות הוצבו לאורך הציר המרכזי של כל תא ושתי הנותרות הוצבו בגבהים שונים מעל הקרקע במרכז החממה. תנאי האקלים מחוץ לחממה (טמפרטורה, לחות, קרינה ומהירות וכיוון רוח) נמדדו ע"י תחנה מטאורולוגית שהוצבה סמוך לחממה. צורת החלוקה של החממה בשנה הראשונה גרמה לאטימה לא מושלמת בין שני התאים. לכן, בשנה השניה חולקה החממה לשלושה תאים בעלי שני גמלונים כל תא. התא האמצעי הושאר ריק ופתוח לאטמוספירה. כתוצאה מכך התקבלה הפרדה מושלמת בין התאים ללא השפעה הדדית. צריכת החשמל בכל תא נמדדה ע"י מוני חשמל תלת פזי. בשנה הראשונה הקריאה הייתה ידנית במכשיר בעל רזולוציה של 10 ווט-שעה. בשנה השנייה חוברו מונים בעלי יציאת פולסים ורזולוציה של 100 ווט-שעה. ספיקת האוויר בתא המבוקר ע"י בת"מ חושבה מתוך מדידת מפלי הלחץ על המאווררים במספר מהירויות סיבוב שונות ומידיעת אופיין המאווררים. בנוסף, חושבה הספיקה בשיטה שונה מתוך מדידת מהירות האוויר במספר נקודות בפתח הכניסה לחממה והכפלת המהירות הממוצעת בשטח הפתח. ההבדל המקסימלי בין השיטות היה קטן מ 10%. כל המדידים כולל מוני החשמל חוברו לאוגר נתונים מסוג 21X של חברת Campbell ודגמו אחת לשלוש שניות. אחת לדקה בוצע ממוצע של הערכים שנמדדו והממוצע נשמר בזיכרון אוגר הנתונים. מספר פעמים ביום הועברו הנתונים שנאספו למחשב שחובר לאוגר.

3. תוצאות ודיון

איור 3 מציג את שינויי ספיקת האוויר וצריכת החשמל המנורמלים כפונקציה של מהירות הסיבוב המנורמלת של המאוורר, כפי שנמדדו בתא שבו המאווררים חוברו לבקר תדר. כדי לקבל את התוצאות הקטנו את מהירות סיבוב המאוורר ל 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ו 1.0 ממהירות הסיבוב הנומינלית ומדדנו את ספיקת האוויר וצריכת החשמל לאורך תקופה של 15 דקות בכל אחת מהמהירויות. האיור מראה גם את השינוי התיאורטי בצריכת האנרגיה שאמור להיות כתוצאה משינוי מהירות הסיבוב. מהירות סיבוב מנורמלת היא המהירות בה מסתובב המאוורר, לחלק למהירות הנומינלית הנמדדת כשהמאוורר מחובר ישירות לרשת החשמל למתח 220 וולט 50 הרץ. צריכת אנרגיה וספיקת אוויר מנורמלים מתקבלים מחלוקת הערכים הנמדדים במהירות סיבוב נתונה (הקטנה מהמהירות הנומינלית) בערכים הנמדדים כשהמאוורר מסתובב במהירות נומינלית. מהאיור רואים כי ספיקת האוויר קטנה באופן כמעט ליניארי עם הירידה במהירות סיבוב המאוורר כפי שהתיאוריה צופה. לעומת זאת הירידה בצריכת החשמל הייתה קטנה מזו המתקבלת מהחישוב התיאורטי. כפי שהוסבר בפרק 1, הירידה הקטנה יותר, נובעת משינויים בנצילות של המאוורר, המנוע החשמלי ובקר התדר הקטנים עם הירידה במהירות הסיבוב. דוגמאות למהלכי הטמפרטורה והלחות כפי שנמדדו ביום מייצג בשני התאים בין השעות 11:10 – 13:10 מוצגות באיורים 4 ו 5 בהתאמה. הערכים המוצגים הם ממוצעים של המדידות מכל חמשת היחידות שבכל תא. בתא שבו הופעלה בקרת תדר הייתה משרעת התנודות בטמפרטורה כ 0.5 מ"צ בעוד שבתא הסמוך שבו פעלה בקרת ON-OFF הייתה המשרעת גדולה יותר, כ 1 מ"צ. כפי שרואים, האוורור ההדרגתי ממתן את התנודות בטמפרטורה. חשוב לציין כי איורים 4 ו 5 מייצגים דוגמא בלבד של הפעלה בתנאי אקלים מסוימים. התנודות עשויות להשתנות מעט כפונקציה של האקלים בחוץ. כמו כן יש לזכור כי כל נקודה בכל אחד מהאיורים מייצגת ממוצע של דקה. סביר להניח שההבדלים במשרעת (בתנודות) היו גדולים יותר בפרקי זמן קצרים מדקה. העובדה שבת"מ ממתן את התנודות חזרה על עצמה ברוב ימי הניסויים. איור 4 מראה כי בשעות הצהריים ממוצע הטמפרטורה בתא המבוקר ע"י בת"מ היה גבוה מזה שבתא בו פעלה בקרת ON-OFF בחצי מעלה לערך. ניתן כמובן להוריד את הטמפרטורה בשעות הצהריים בתא המבוקר ע"י בת"מ ע"י פונקציה הבקרה (המשוואה הקושרת בין מהירות סיבוב המנוע לתנאי האקלים בתא). הגדלת מהירות סיבוב המאוורר בהפרש טמפרטורה וקרינה נתונים, תגרום לספיקת אוויר גדולה יותר דרך התא ולהורדת טמפרטורת האוויר לערכים נמוכים יותר. זה כמובן יעלה את צריכת החשמל. יש להדגיש, לעומת זאת, כי ממוצעי הטמפרטורה והלחות הסגולית לאורך כל היום, משעה 800 ועד 1800 בתקופה של שלושים יום, היו כמעט שווים בשני התאים, דהיינו 25.1 מ"צ ו 12.4 גר' מיסו ק"ג אוויר לח עם בקרת ON-OFF ו 25.2 מ"צ ו 12.8 גר' מיסו ק"ג אוויר עם בת"מ. איור 5 מראה את השינויים בלחות הסגולית (גר' מיסו ק"ג אוויר לח) של האוויר בין השעות 11:10 – 13:10. גם כאן רואים שבבקרת ON-OFF התנודות היו גדולות יותר מאלו שהתקבלו עם בת"מ. בזמן שהמאווררים פועלים הלחות הסגולית יורדת כתוצאה מפינוי אדים מהחממה וכאשר הם מפסיקים לפעול הלחות עולה עקב הטרנספירציה.

בבקרת ON-OFF היו השינויים בתחום של כ 3-3.5 גר'אק"ג לעומת שינויים קטנים יותר של כ 1.5 גר'אק"ג עם בת"מ. כאשר האוורור רציף כמו שנעשה בבת"מ פינוי הלחות מהחממה מתרחש כל הזמן והדבר ממתן את התנודות. יש לזכור כי שינוי שיפוע הפונקציה של מהירות סיבוב המאוורר כתלות בזמן ושינוי ערך הסף העליון של מהירות סיבוב המאוורר (פרמטרים הניתנים לתכנות בבקר) ישפיעו גם הם על השינויים בטמפרטורה ובלחות בחממה וכמובן על צריכת החשמל.

צריכת האנרגיה בכל אחת משיטות האוורור (סה"כ אנרגיה ליום ניסוי משעה 8:00 עד 18:00) כפונקציה של טמפרטורת הסביבה (ערך ממוצע לפרק הזמן שבין 8:00 ו 18:00) במשך שלושים יום בחודשים אפריל מאי מוצגת באיור 6. האיור מראה בברור כי כאשר טמפרטורת הסביבה הייתה גבוהה מ 21 מ"צ הייתה צריכת החשמל גבוהה יותר באוורור ON-OFF בהשוואה לאוורור ע"י בת"מ. לעומת זאת, כאשר הטמפרטורה הייתה נמוכה מ 21 מ"צ אוורור ע"י בת"מ צרך יותר אנרגיה. כלומר, בימים קרירים יחסית כאשר אין דרישה לאוורור נמרג ייתכנו מצבים בהם המאווררים מסתובבים לאט, לאורך זמן ארוך וכתוצאה מכך צורכים יותר אנרגיה מאוורור ON-OFF. יש לזכור יחד עם זאת שצריכת האנרגיה משתנה בתלות בפונקציית הבקרה (המשוואה הנתונה בפרק חומרים ושיטות). בניסיון שייצבר אפשר יהיה לשפר את ביצועי המערכת ע"י שיפור פונקציית הבקרה. כמו כן, סה"כ האנרגיה הנדרשת לאוורור בימים קרירים קטנה בהרבה מזו הנדרשת בימים חמים ולכן אף שבבת"מ היו ימים בהם הצריכה גדולה יותר, סה"כ צריכת החשמל לאורך הקיץ צפויה להיות קטנה יותר בבת"מ בהשוואה ל ON-OFF . בניסויים שביצענו הייתה צריכת החשמל במשך היום בממוצע על פני 30 יום 9.3 קילוואט באוורור ON-OFF לעומת 5.8 קילוואט באוורור ע"י בת"מ. בימים חמים מאוד בהם נדרש אוורור נמרג לאורך כל היום צפוי שההבדל בצריכת החשמל בין שיטות האוורור יקטן מאחר וגם בבת"מ המאווררים יצטרכו לעבוד תקופות ארוכות במהירות מקסימלית. יחד עם זאת, בימים חמים מאוד מופעל מזרון לח ואז הטמפרטורה בחממה יורדת והדרישה לאוורור נמרג לאורך כל היו פוחתת כך שהיתרון של שימוש בבת"מ עדיין יהיה תקף.

על מנת לבחון את האפשרות לחיסכון אנרגיה באוורור לילי המיועד לפינוי לחות, הופעלו המאווררים בתא אחד אחת לשעה לתקופה של חמש דקות במהירות הנומינלית, כפי שנעשה כיום ע"י חלק גדול מהמגדלים וכפי שמומלץ ע"י מדריכי גידול. לעומת זאת בתא השני הם הופעלו במשך 10 דקות, אחת לשעה, במהירות סיבוב הקטנה פי שניים מהמהירות הנומינלית של המאוורר. בצורה זו שמרנו על ספיקת אוויר כוללת שווה לאורך הלילה בשני התאים. בניסויים שנערכו במשך 14 לילות משעה 6 בערב ועד 6 בבוקר שלמחרת עולה כי בתא שבו מהירות המאווררים הייתה קטנה פי שניים וזמן הפעלתם גדול פי שניים הייתה צריכת החשמל חצי מזו שנמדדה בתא הסמוך. לעומת זאת ממוצעי הטמפרטורה והלחות בשני התאים במשך הלילה היו כמעט שווים ללא הבדל משמעותי. הקטנת מהירות הסיבוב פי שניים מצד אחד והגדלת הזמן בו המאווררים פועלים מצד שני שמרו על ספיקת אוויר כללית שווה דרך התאים

לאורך הלילה. מצד שני הקטנת מהירות הסיבוב פי 2 מקטינה את צריכת החשמל בפועל פי ארבע, ולכן חסכנו הרבה חשמל.

טבלאות 1 ו 2 מציגות תוצאות מעקב אחר היבול ואיכותו בשתי שיטות האורור. בשתי השנים לא היה הבדל משמעותי ביבול לייצוא בין שיטות האורור. נראה כי ההבדלים הגדולים ביותר בין שתי השיטות התקבלו בתופעת שחור הפיטם ופרי פחוס שהיו בצורה משמעותית גבוהים באורור ON-OFF בהשוואה לאורור בת"מ אם כי סה"כ אחוז הפרי הסובל מתופעות אלו היה נמוך. לא נצפו הבדלים משמעותיים ביבול הכללי, בעיוותים ובסידוקים. איור 7 מציג את היבול לייצוא כפונקציה של הקטיפים, החל מינואר בכל אחת מהשנים 2002 ו 2002.

טבלה 1: נתונים מצטברים , בכל טיפול נבחנו שש חלקות.

יבול כללי	פרי פחוס	שחור פיטם	שפיץ	סידוק	עיוות	פרי ליצוא	
14778	105	17	299	2494	1538	10749	אורור הדרגתי
14063	150	52	256	2236	1391	10090	אורור ON-OFF

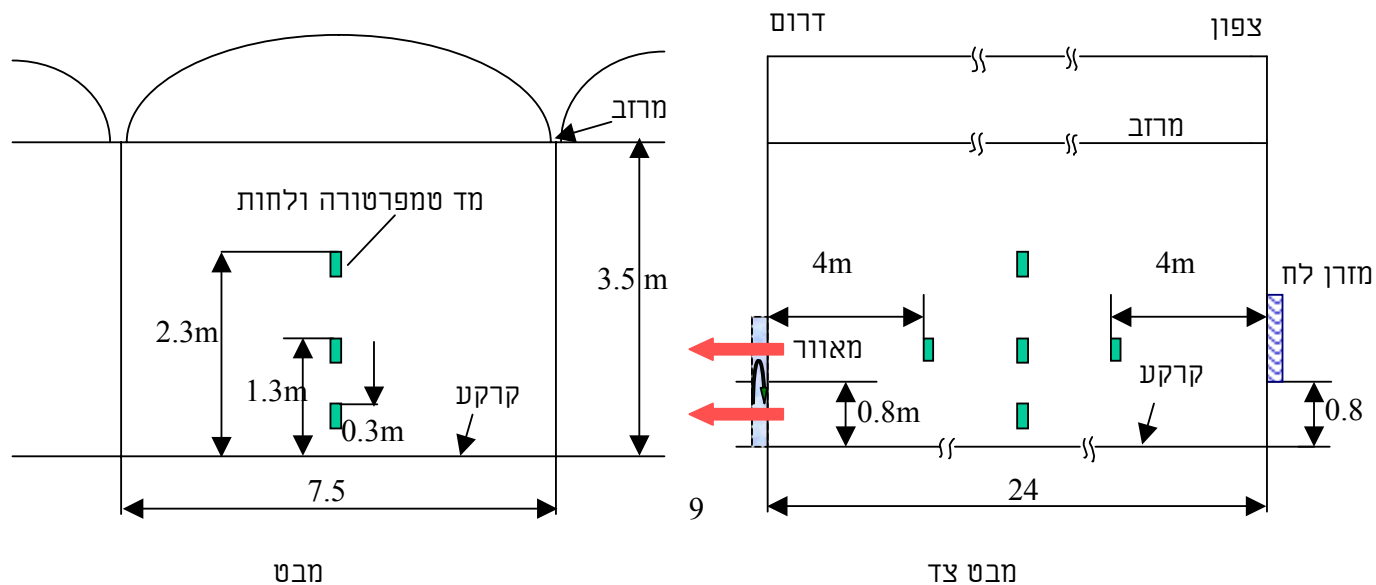
טבלה 2: נתונים מצטברים 3.1.02 - 3.4.02

שפיץ	סידוק	עיוות	פרי ליצוא	
547	358 8	751	12430	אורור הדרגתי
728	346	761	12435	

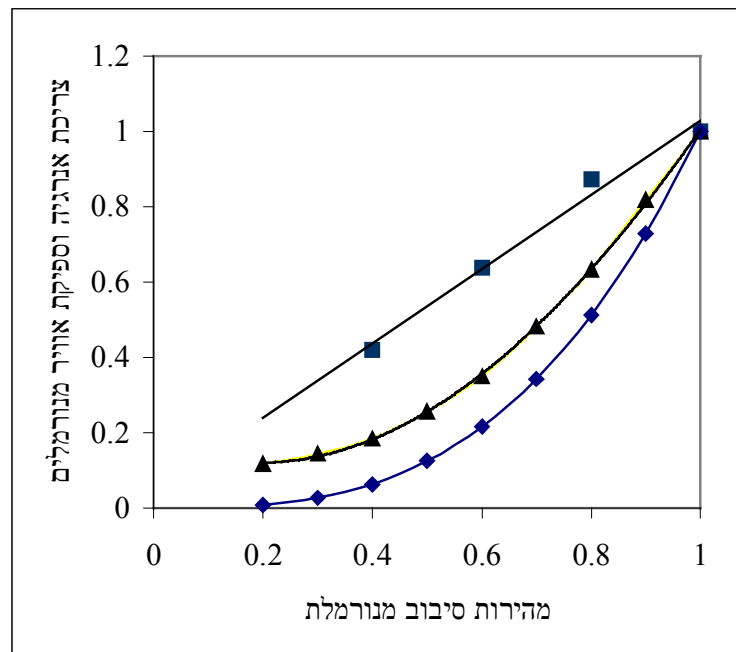
אווורר ON-OFF

4. מסקנות

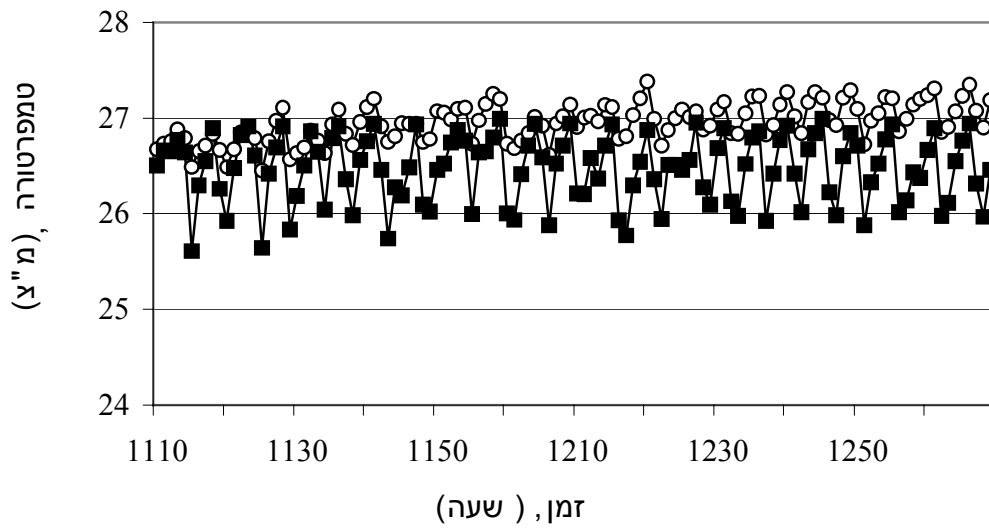
הפעלת מאווררי חממה ע"י בקרת תדר משתנה מאפשרת חיסכון בצריכת חשמל. בניסויים שנערכו בחודשים אפריל מאי הייתה הצריכה הממוצעת של חשמל במשך היום כ 63% מזו של בקרת ON-OFF, ובמשך הלילה היא אף קטנה לכדי חצי מזו של בקרת ON-OFF. התנודות בטמפרטורה ובלחות האוויר קטנו מאוד בבקרת תדר בהשוואה לאלו שהתקבלו בבקרת ON-OFF בעוד שהערכים הממוצעים לאורך היום של הטמפרטורה והלחות בשתי שיטות הבקרה היו כמעט שווים.



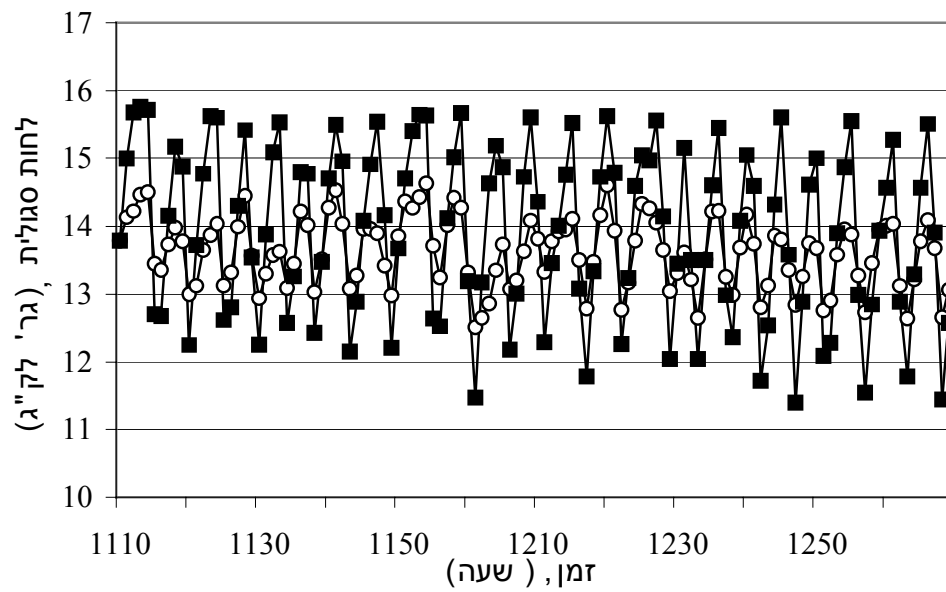
איור 2. תיאור סכמתי של החממה ומערכת המדידות. כל המידות במטרים.



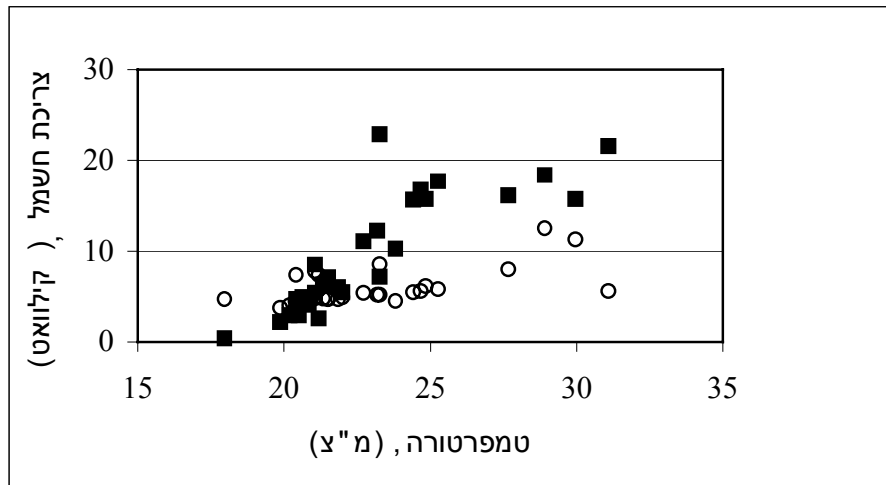
איור 3: שינויי ספיקה וצריכת אנרגיה. ■, ספיקת אוויר ♦, צריכת אנרגיה תיאורטית ▲, צריכת אנרגיה בפועל.



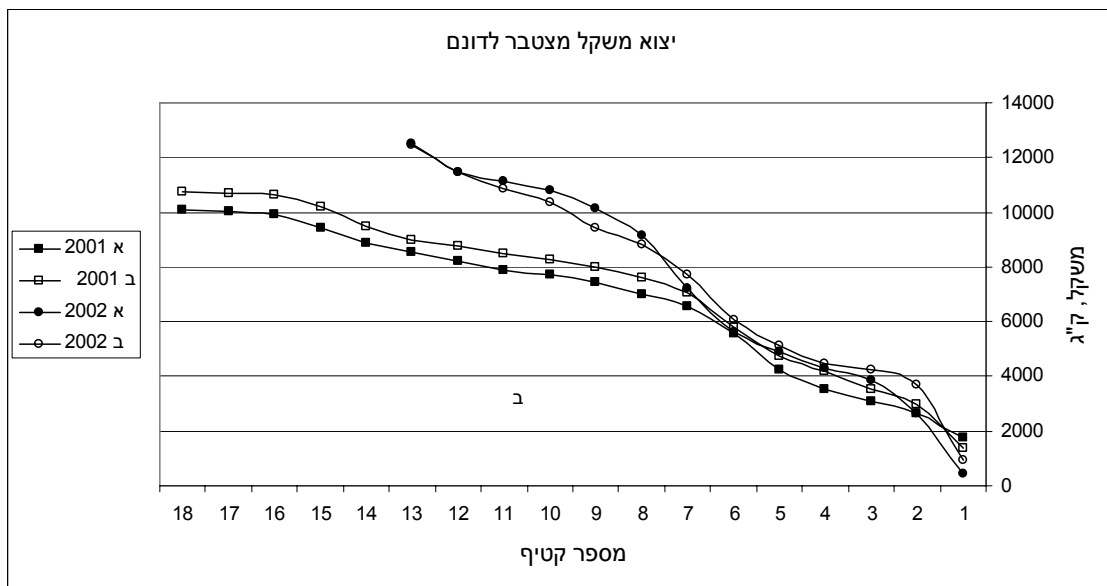
איור 4. מהלך טמפרטורה בשני התאים. \circ , תא מבוקר ע"י בקר תדר; \blacksquare , תא מבוקר ע"י בקר ON-OFF.



איור 5. מהלך הלחות הסגולית (גר' אדים לק"ג אוויר לח) בשני התאים. \circ , תא מבוקר ע"י בקר תדר; \blacksquare , תא מבוקר ע"י בקר ON-OFF.



איור 6. צריכת חשמל בכל אחד מהתאים מהשעה 8 בבוקר עד 6 אחה"צ. \circ , תא מבוקר ע"י בקר תדר; \blacksquare , תא מבוקר ע"י בקר ON-OFF.



איור 7. משקל מצטבר לדונם של פרי לייצוא כפונקציה של הקטיפים בשנים 2001 ו 2002. א – אוורור הדרגתי, ב- אוורור on-off.

