

צינון חממות בערבה באמצעות מגדלי קירור באידוי

אביתר אראל - המכונים לחקר המדבר ע"ש יעקב בלאושטיין, אוניברסיטת בן גוריון בנגב
אילון גדיאל ורבקה אופנבך - מו"פ ערבה תיכונה וצפונית

כתובת הכותב: erell@bgu.ac.il

תקציר

מגדלי צינון באידוי שימשו בבנייה המסורתית במדבריות של עיראק ואיראן כאמצעי לקרר את האוויר בבנייני מגורים. במגדלים אלה, אוויר חם ויבש מהסביבה נכנס דרך פתחי אוויר בגובה רב מעל פני הקרקע, מקורר באמצעות אידוי מים ומסופק לחדרי המגורים באמצעות פתחים בחלקם התחתון. תנועת האוויר מתקיימת כתוצאה מהפרשי הצפיפות בין האוויר החם והיבש בכונס לבין האוויר הקר והצפוף יותר המתקבל כתוצאה מאידוי המים, בסיוע הרוח – ואיננה דורשת מפוחים חשמליים. בשנים האחרונות נבנו מגדלי צינון דומים גם בבניינים מודרניים באזורים חמים בכל רחבי העולם, לרבות בישראל, במטרה לחסוך בעלויות מיזוג האוויר. בניסוי שנערך בתחנת הניסויים יאיר בערבה, נבחנה פעולתו של מגדל צינון כזה במגמה לבדוק את יעילותו כמתקן לבקרת טמפרטורה בחממה חקלאית לגידול לפלל בערבה. בסיכום עונות הניסויים 2009/10 ו- 2010/11 נמצא כי כונס אוויר מתאים עשוי להקטין מאוד את הצורך במפוח חשמלי, ויחד עם זאת לספק לחממה כמות אוויר נאותה. טמפרטורת האוויר אשר סיפק המגדל לחממה היתה קרובה למינימום האפשרי בחלק משעות היממה, אך מעט גבוהה מן הרצוי בשעות אחה"צ החמות. לאור הישגים האלה, ובהתחשב בכך שמדובר בניסוי חדשני ופורץ דרך בתחום, מוצע כי הניסוי יימשך למשך שנה נוספת - למרות שהמערכת לא סיפקה תנאי גידול אופטימליים - במגמה לבחון כונס אוויר משופר ובקרה משוכללת למערכת אספקת המים.

מילות מפתח: צינון באידוי, חממה, מגדל קירור, מערפלים, רוח, ערבה

מבוא

מזג האוויר המתון בערבה במהלך חודשי החורף מאפשר לחקלאים לגדל גידולים אשר אינם זמינים בשווקים בארצות קרות יותר בעונה זו. השימוש בחממות מאפשר לבקר את הטמפרטורה בקרבת הגידולים גם כאשר הבדלי הטמפרטורות החיצוניים במהלך היממה ובמחזור העונתי הם ניכרים. החממות, כמבנים סגורים, מאפשרות לשמור על טמפרטורות גבוהות מהסביבה. אולם, בתנאים מסוימים, הן מאפשרות לשמור גם על טמפרטורות נמוכות יותר, ובכך להאריך את עונת הגידול, במיוחד על ידי הקדמת מועד השתילה. השימוש בקרור באידוי למטרה זו נפוץ למדי, והשיטה הוכיחה את יעילותה. עם זאת, המתקנים הקיימים דורשים חשמל להפעלת מפוחים המספקים אוויר לחממה, וצורכים כמויות מים ניכרות. צריכת החשמל לצינון נעשית בשעות העומס כשהתעריפים יקרים והפסקות חשמל תדירות. בנוסף, המערכות הקיימות מחייבות ממשק תחזוקה קפדני שעלותו משמעותית.

היחידה לאדריכלות מדברית במכונים לחקר המדבר ע"ש בלאושטיין ערכה בקמפוס האוניברסיטה בשדה בוקר ניסויים במגדל צינון באידוי אשר היה מיועד לחללים מקורים גדולים או כיכרות ציבוריות (Pearlmutter *et al.*, 1996, 2008; Erell *et al.*, 2006, 2008). ההערכה היתה שבתנאי האקלים השוררים בערבה בקיץ, לרבות משטר הרוחות, מגדל כזה יפעל גם כאן חלק ניכר מהזמן ללא צורך בגיבוי של מפוח חשמלי, ויוכל לספק אוויר מצונן בטמפרטורה של כ- 22-24 מעלות במרבית שעות היממה.

מטרות הפרויקט

לבחון את התאמותם של מגדלי צינון לשימוש בחממות בתנאי הערבה, במהלך כל שעות היממה; לבחון אילו התאמות נדרשות בחממות לשם כך; לבחון את דפוסי ההפעלה של המגדל, ובפרט את משטר אספקת המים והפעלת מפוח גיבוי; להפעיל אב-טיפוס אשר יאפשר לחקלאים באזור להכיר את הטכנולוגיה וללמוד על אופן יישומה בחממות.

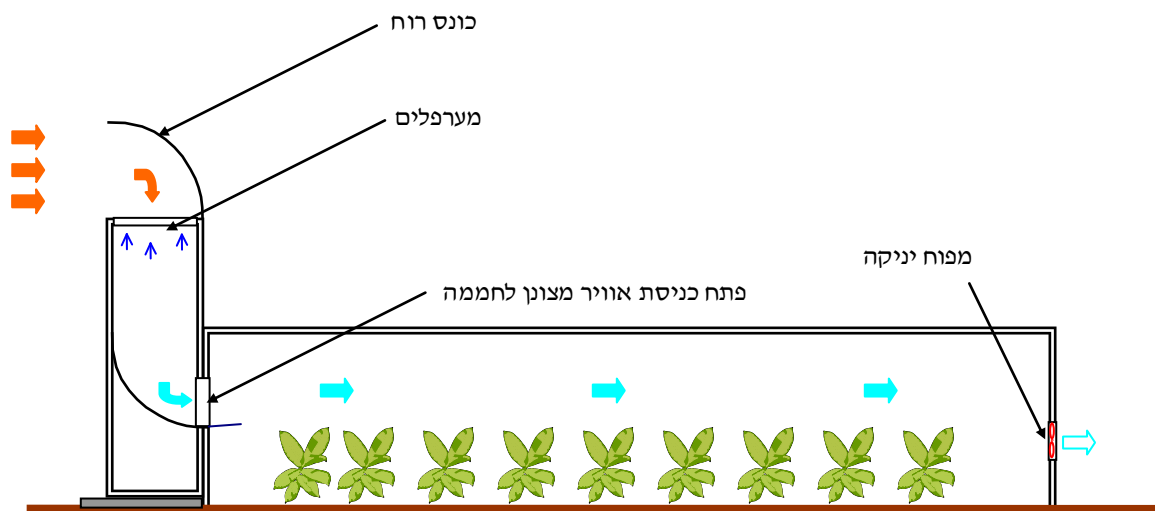
יעדים

הצלחה של הפרויקט תתבטא בבקרה נאותה של תנאי הגידול בחממה, ובפרט של הטמפרטורה, תוך הקטנת עלויות החשמל והקטנת צריכת המים לצינון החממות בהשוואה לשיטה המקובלת היום. עמידה ביעדים אלה, ובמבחן כלכלי, עשויה לעודד את יישום השיטה הזו בכל האזורים החמים בהם מתקיימת חקלאות המבוססת על חממות ואשר לבקרת האקלים בהם יש משמעות רבה בגידול. לשם כך הותקן מגדל קירור בחממה בחוות יאיר, לאחר שיערכו השינויים הנדרשים על מנת להתאים את מבנה המגדל אשר פותח בשדה בוקר למשטר הרוחות השורר בערבה ולדרישות הנובעות מהפעלתו בחממה חקלאית. פעולת המגדל והחממה תנוטר במהלך שנה, אשר במהלכה ימדדו טמפרטורת האוויר, לחות, תנועת אוויר וכן צריכת מים וחשמל.

שיטות וחומרים

סכמת הפעולה של מערכת הצינון

מערכת הניסוי נבנתה בעונת 2009/10 בתחנת הניסויים יאיר בערבה. מערכת הצינון מבוססת על אידוי מים לתוך זרם אוויר טרי המוחדר אל החממה באמצעות מגדל צינון (תרשים 1). פתח המגדל נמצא מחוץ לחממה, גבוה ככל האפשר מעל פני הקרקע. על הפתח מותקן כונס רוח הפונה לכיוון הרוח השלטת באזור. אל האוויר הנכנס מרוסס ענן של טיפות מים באמצעות מערכת מערפלים המותקנת בראש המגדל. המים מתאדים בתהליך הסופח חום מהאוויר הנכנס, והאוויר הקריר והלח יותר מסופק לחממה באמצעות פתח הנמצא קרוב לבסיס המגדל. מפוח יניקה בצידה השני של החממה מעודד את תנועת האוויר מהמגדל דרך החממה, כך שהפרש הטמפרטורה בין כל חלקי החממה יהיה קטן ככל האפשר.



תרשים 1: סכמת הפעולה של מערכת הצינון בחממה.

מבנה המגדל

מידות מגדל הצינון נקבעו בהתייחס לשני קריטריונים:

1. שטח החתך (האופקי) צריך להיות גדול מספיק בכדי להבטיח כי מספר חילופי האוויר בשעה בחממה יהיה לפחות 20, בעוד שמהירות זרימת האוויר במגדל תהיה בערך 1 מטר/שנייה, מהירות אשר לפי הניסיון במגדלים אחרים ניתן להשיג ללא הפעלת מפוח (Erell, 2007). נפח החממה הוא כאלף מ"ק, ובהתאם לכך נקבע כי המגדל יהיה בעל שטח חתך של כ-9 מ"ר. משיקולי נוחות בייצור ובהתקנה נבנה מגדל ריבועי.

2. רצוי כי גובה המגדל יהיה גדול ככל האפשר, משני טעמים: ראשית, ככל שעולים מעל פני הקרקע, מהירות הרוח גדלה, ובהתאם לכך תהיה תרומתו של כונס הרוח גדולה יותר. שנית, משום שמהירות הזרימה הנוצרת במגדל עקב הפרש הלחצים בין אוויר חיצוני יבש לבין אוויר אשר קורר באידוי נמצא ביחס לשורש הריבועי של ההפרש בגובה בין הכניסה ליציאה, לפי הנוסחה:

$$w = \left(2gz \frac{T_e - T_p}{T_e} \right)^{1/2}$$

אשר בה w הוא מהירות האוויר (מ"שנייה) g הוא תאוצת הכובד (מ"שנייה²), T_e היא טמפרטורת הסביבה (מ"צ), T_p היא טמפרטורת האוויר המקורר (מ"צ) ו- z הוא הפרש הגובה (מ'). משיקולי עלות, הוגבל גובה המגדל בסופו של דבר ל-9 מטרים מעל פני הקרקע, כאשר לגובה זה נוסף כונס רוח בגובה 3 מטרים נוספים (תמונה 1).

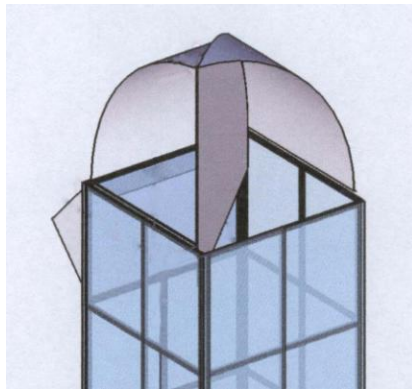


תמונה 1: מבט אל מגדל הצינון מכיוון צפון מערב.

חומרים: שלד המגדל עשוי פלדה ומעוגן לבסיס בטון, אשר מיועד להבטיח את יציבותו ויכולת ההתנגדות שלו לעומסי רוח. הכונס (ראו להלן) עשוי פח פלדה דק על גבי שלד מוטות פלדה. דפנות המגדל עשויות יריעות PVC.

מיקום: המגדל מוקם בצמוד לדופן הצפונית של החממה, כך שלא יטיל צל על הגידולים בתוכה ברוב שעות היממה. בפועל המגדל מטיל מעט צל על החממה רק בימות הקיץ החמים, כאשר היא אינה בשימוש, ורק בשעות הבוקר המוקדמות ושעות אחה"צ המאוחרות, כאשר עוצמת קרינת השמש בלאו הכי נמוכה מאוד. פתח אספקת האוויר מהגדל אל החממה נקבע בגובה שיאפשר זרימת אוויר מעל גובה הגידולים: תחתית הפתח נמצאת בגובה של כ-3 מטרים מקרקע החממה.

כונס רוח: תפקידו של כונס הרוח לתעל את זרימת האוויר החופשי מעל גג החממה אל פתח אספקת האוויר אשר נקבע בדופן שלה. צורת הכונס כצורת רבע כיפה, על מנת שאבדן האנרגיה בעת שינוי כיוון הזרימה מאופקי לאנכי (כלפי מטה) יהיה מזערי, ויעילות הכונס תהיה מרבית. לפי התכנון המקורי (תרשים 2), היה אמור להיות במרכז הכונס לוח אנכי אשר יחלק אותו לשניים ויפחית את איבוד האוויר כאשר הרוח אינה נושבת מצפון מערב, הכיוון אליו פונה פתח הכונס. לוח זה לא הותקן בעת בניית המגדל.

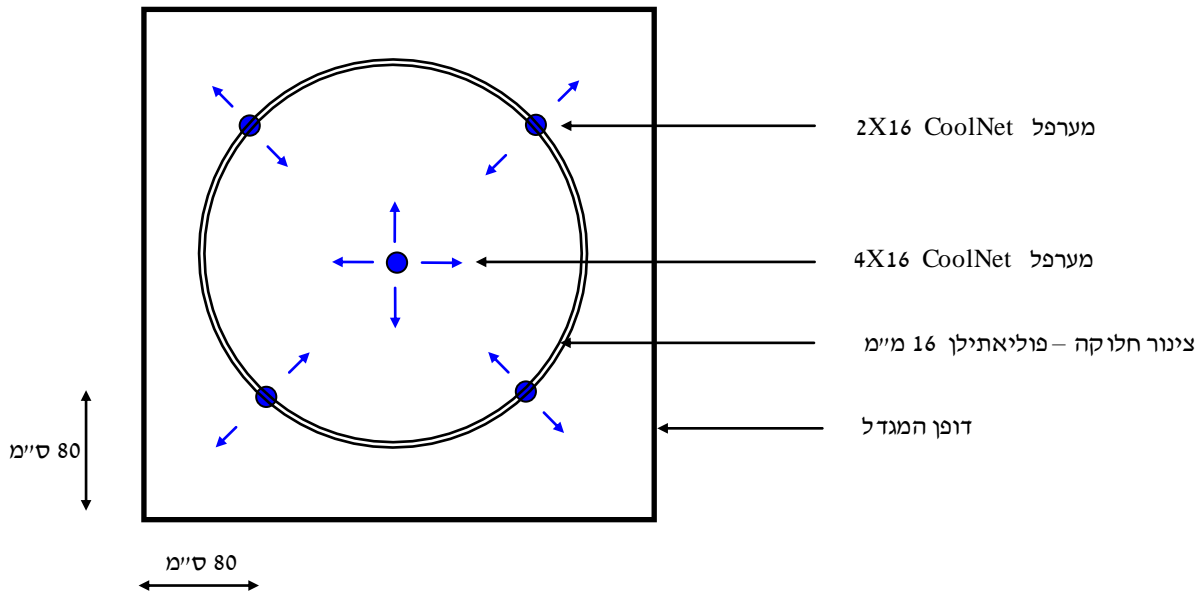


תרשים 2: תכנון כונס הרוח, הכולל מחיצה אנכית באמצעו.

מפוח: תפקידו של המפוח להגדיל את זרימת האוויר במגדל בשעה שעוצמת הרוח החיצונית נמוכה והחממה איננה מקבלת די אוויר מצונן. הוא ממוקם באלכסון על דופן המגדל כך שלא יפגע בזרימת האוויר במגדל בהשפעת הרוח, ופועל במצב יניקה. ספיקת המפוח היא כ-30 אלף מ"ק שעה, והוא מונע על ידי מנוע חשמלי בהספק של $\frac{3}{4}$ כ"ס.

הערה: בשלב שני הותקן מפוח יניקה על הדופן הנגדית של החממה, אשר יכול לפעול בנוסף או במקום למפוח במגדל.

מערכת אספקת מים: מערכת אספקת המים מיועדת לצנן את האוויר הבא במגע עם טיפות מים המרוססות לתוכו. לשם כך הותקנו בראש המגדל 5 מערפלים, הכוללים 2-4 פיות ערפול כל אחד (תרשים 3). המערפלים, תוצרת נטפים דגם CoolNet, מיועדים לספק טיפות בקוטר חציון של כ-30 מיקרון בלחץ אספקה של 3-4 אטמוספרות. ניתן להרכיב פיות בעלות ספיקה נומינלית שונה – 5.5 ליטר/שעה, 7.5 ליטר/שעה או 16 ליטר/שעה. בשלב הראשון של הניסוי חוברת מערכת אספקת המים לרשת, והמים אשר סופקו היו בעלי תכולת מלחים גבוהה אשר גרמה לסתימה מהירה של הפיות. בשלב השני שונתה המערכת כך שהמערפלים קיבלו מים מטופלים, באמצעות משאבה.



תרשים 3 : פריסת המערפלים במגדל הצינור.

גידול חקלאי בחממה

בחממת הניסוי נשתל בעונת הניסוי השנייה (20/7/10) פלפל מהזן באנג'י (אפעל) ב- בעומד מחושב של כ- 3 צמחים למ"ר.

מערכת המדידות

מערכת המדידות תוכננה כך שתאפשר לקבל מידע על תנאי הסביבה, התנאים השוררים בתוך החממה (במספר נקודות), ועל התהליכים המתרחשים בתוך המגדל. לשם כך הותקנו המכשירים הבאים: מדידת נתוני סביבה בפתח כונס הרוח: נתוני הסביבה הם הרקע להתנהגות התרמית של החממה ולהבנת התפקוד של מערכת הצינור במגדל. הנתונים שנמדדו הם טמפרטורת האוויר (גולה יבשה); לחות (גולה לחה); מהירות רוח וכיוון רוח. כל הנתונים נמדדו בקרבת הפתח של כונס הרוח, בגובה של כ-9 מטר מעל פני הקרקע. מדידת הטמפרטורה והלחות נעשתה באמצעות שני צמדים תרמיים (thermocouples) מסוג נחושת-קונסטנטן בתוך פסיכרומטר מאוורר (באמצעות מאוורר חשמלי קטן). נתוני הרוח נמדדו בקצה זרוע ארוכה אשר הותקנה כך שהמכשירים לא יושפעו מהפרעה לזרימה אשר עלולה להיווצר על ידי המגדל עצמו: מהירות הרוח באמצעות מד רוח כפות מטיפוס MetOne, וכיוון רוח אף הוא באמצעות מכשיר של אותו יצרן.

מדידת טמפרטורות אוויר במגדל: בתוך המגדל, נמדדה טמפרטורת האוויר בשלושה גבהים – סמוך לכניסה, סמוך ליצירה ובאמצע הגובה, באמצעות צמדי תרמיים אשר הותקנו בתוך כדורי פינג פונג עם חיפוי עליון נוסף למניעת הרטבה בטיפות מים.

מדידת מהירות אוויר במגדל: מהירות האוויר במגדל היא אחד המרכיבים החיוניים במדידת הספק הקירור של המערכת, המושפע הן מטמפרטורת האוויר שהמערכת מספקת לחממה והן מספיקת האוויר (נפח ליחידת זמן). המדידה נעשתה באמצעות מספר מכשירים:

א. סדרה של ארבעה מכשירים מטיפוס תיל מחומם (hot-wire) אשר הוצבו לרוחב פתח היציאה של המגדל. מכשירים אלה נותנים מידע מדויק על זרימה בניצב למישור התיל, לרבות במהירויות זרימה

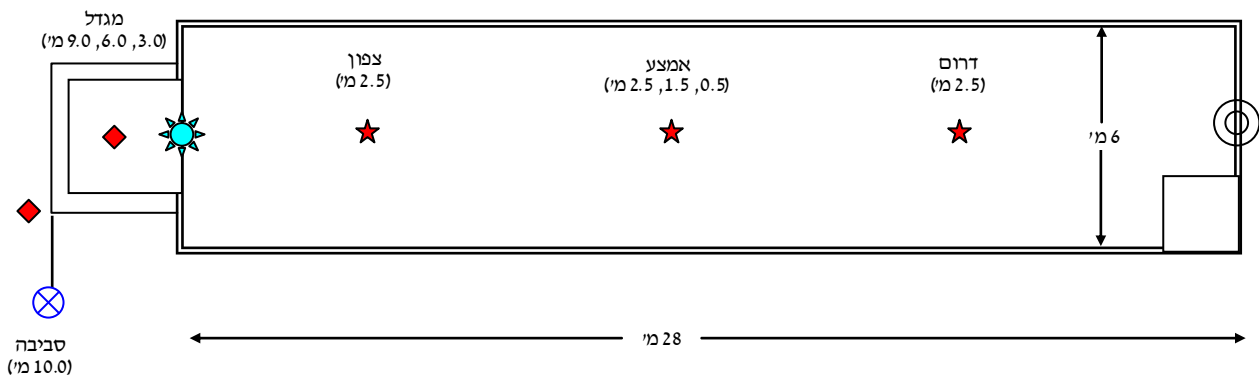
נמוכות מאוד – אך הם רגישים מאוד ללחות ואבק. הם הותקנו בחממה לתקופה קצרה בכדי לכייל את הנתונים אשר התקבלו משני מדי רוח אולטרה-סוניים אשר הותקנו במגדל.

ב. באמצע המגדל הותקן מד רוח אולטרה-סוני תלת ממדי מטיפוס Young 81000 אשר מטרתו היתה למדוד את הרכיב האנכי (כלפי מטה) של הזרימה במגדל. מכשירי מדידה אלה אמורים להיות עמידים מאוד לתנאי הסביבה, לרבות חשיפה לרוח, לחות ואבק, ומודדים את תנועת האוויר בשלושה צירים ניצבים.

ג. במרכז פתח היציאה מהמגדל (פתח אספקת האוויר לחממה) הוצב מד רוח אולטרה-סוני נוסף, אף הוא מטיפוס Young 81000 (תמונה 2). נתון הרכיב האופקי של האוויר בניצב למישור הפתח שימש בסופו של דבר להערכת ספיקת האוויר לחממה.

מדידת טמפרטורות ולחות בתוך החממה: הטמפרטורה והלחות של האוויר בחממה נמדדו ב-5 נקודות, כך שהתקבל חתך אנכי ואופקי של התנאים השוררים בה. הנתונים נמדדו באמצעות צמדים תרמיים בפסיכרומטרים מאווררים אשר הותקנו על גבי תרנים דקים אשר הוצבו על ציר האמצע של החממה, כדלקמן: במרחק 5 מטר מהקצה הצפוני של החממה (בגובה 2.5 מ'), באמצע החממה (בגבהים 0.5 מ', 1.5 מ' ו-2.5 מ'), ובמרחק 5 מ' מהקצה הדרומי של החממה (תרשים 4).

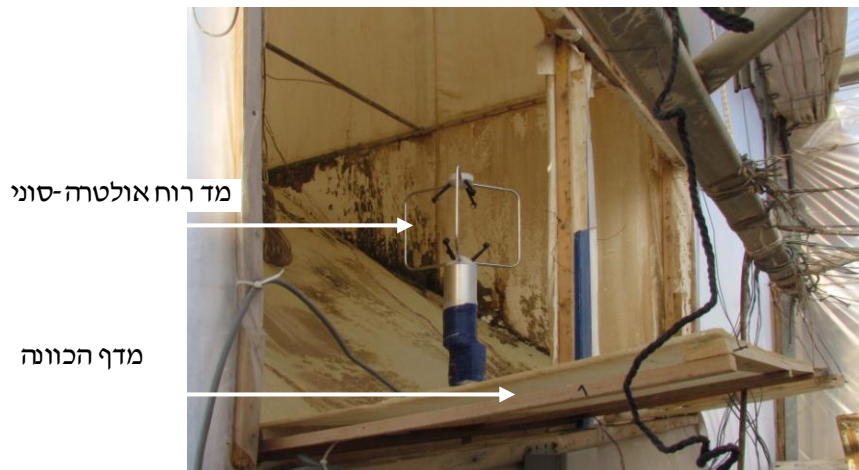
צפון ←



- ◆ מדידת טמפרטורה - גולה יבשה וגולה לחה בפסיכרומטר מאוורר
- ★ מדידת טמפרטורה - גולה יבשה במחסה מוגן מים
- ☀ מדידת מהירות אוויר - מד רוח אולטרה-סוני 3D
- ⊗ מדידת מהירות וכיוון רוח - מד רוח כפות ושבשבת

תרשים 4: מיקום ציוד המדידה, בציון גובה המכשיר מעל פני הקרקע.

איסוף ורישום הנתונים: כל הנתונים אשר נמדדו נרשמו באמצעות אוגר נתונים מטיפוס Campbell 23X. תדירות המדידה היתה פעם ב-10 שניות (למעט מהירות אוויר במדי רוח אולטרה סוניים, אשר נעשית בתדירות של 10 הרץ). המערכת רשמה נתונים ממוצעים עבור פרקי זמן של 10 דקות. הנתונים נאספו באמצעות מודם אלחוטי ועובדו בתוכנת אקסל.



תמונה 2: פתח היציאה ממגדל הצינור לתוך החממה, לאחר התקנת מדפי הכוונה (נראים בצד התחתון של התמונה).

מהלך הניסוי

במהלך השנה הראשונה נבנה מגדל הצינור והותקנו בו מערכת מערפלים ומפוח גיבוי. החממה הותאמה לניסוי (נדרשו שינויים קטנים בלבד). במגדל ובחממה הותקנה מערכת המדידות המיועדת לנטר את התנאים בסביבה (ובפרט – מהירות וכיוון רוח סמוך לכונס המגדל); את התנאים במגדל, לרבות מהירות האוויר ומפל הטמפרטורות; והתנאים בחממה.

בשנה השנייה בוצעו שני שינויים עיקריים במטרה להגדיל את ספיקת האוויר המצוץ לחממה:

א. התקנת מפוח יניקה בצד הנגדי למגדל של החממה. מפוח זה פעל בנוסף למפוח אשר הותקן במגדל או במקומו. המפוח הוא מן הסוג המותקן בסמוך למערכות צינון באידוי המבוססות על מזרון לח אשר נמצאות בשימוש נפוץ בחממות.

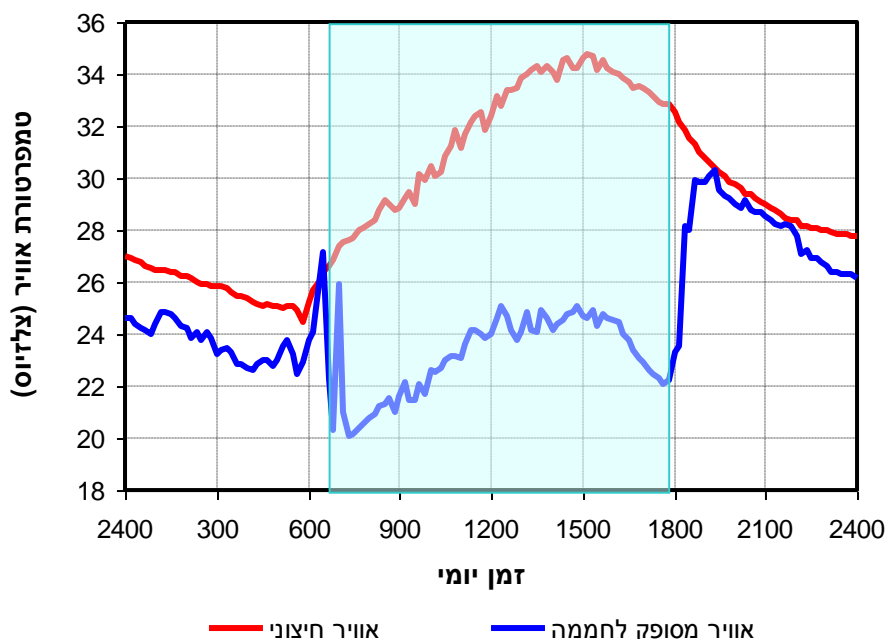
ב. הסרת מערכת רפפות הכוונה בבסיס המגדל והחלפתם במדפי הכוונה בתחתית הפתח. מדידות אשר נערכו בשנה הראשונה העלו כי מערכת רפפות הכוונה שהותקנה בתחתית המגדל היתה גסה מדי ויצרה התנגדות אירודינמית גדולה אשר הקטינה את ספיקת האוויר המצוץ אשר סופק לחממה. בשנה השנייה הוחלפו הרפפות במדפי הכוונה אשר הותירו את הפתח בין המגדל לחממה כמעט ללא הפרעה, אך עם זאת הקטינו מאוד את שקיעתן של טיפות מים אשר לא התאדו על הצמחים בקרבת הפתח.

תוצאות

בשלב הראשון של תוכנית המדידות, אשר התקיים במהלך השנה הראשונה, נבחנו תפקוד כונס הרוח ואספקת האוויר לחממה בתנאים הקיימים בחוות יאיר. הממצאים העיקריים הראו כי:

- קיים קשר ישר בין וקטור הרוח הניצב לכונס לבין זרימת האוויר במגדל, כך שניתן לחזות את כמות האוויר שתסופק לחממה בהתאם למהירות הרוח ולכיוונה.
- בתנאים אופטימליים (רוח מכיוון צפון מערב במהירות של כ-5 מטר לשנייה) מספק המגדל כ-25-30 אלף מ"ק אוויר בשעה, שווה ערך להחלפת כל האוויר בחממה 20 פעמים בשעה.

באמצע חודש ספטמבר הופעלה מערכת המערפלים. תוצאות ראשוניות הראו (תרשים 5) כי בתנאים האלה, ניתן לספק לחממה אוויר בטמפרטורה הנעה בין 20-25 מעלות, כתלות בשינויים בטמפרטורה החיצונית במהלך שעות היום.



תרשים 5: מהלך הטמפרטורות בכניסה וביציאה ממגדל הצינון. האזור המסומן בתכלת מציין את שעות פעולת המתזים ומפוח היניקה, בין 7-18 (נתונים ליום 15 ספטמבר 2010).

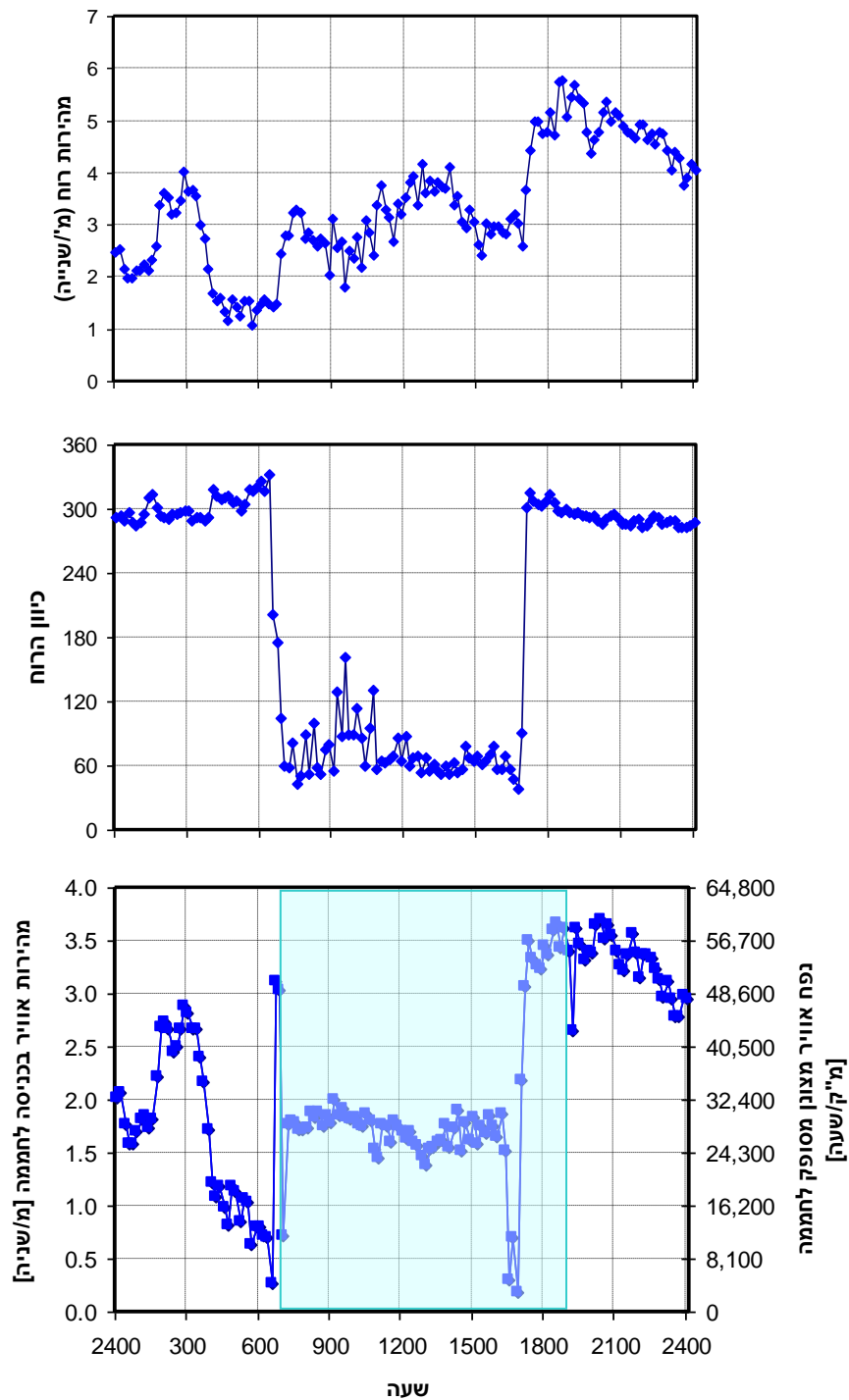
תרומתה של מערכת הצינון נמדדת בסופו של דבר בטמפרטורה (ובלחות) השוררים בחממה, אולם הספק הקירור תלוי בשני גורמים: כמות האוויר המצוין המסופק לחממה והטמפרטורה שלו. התוצאות המובאות להלן בוחנות גורמים אלה על סמך נתונים של יום אופייני - 4 ביוני 2011, לאחר שנעשו השינויים במערכת הכוונת האוויר בפתח אספקת האוויר לחממה בבסיס המגדל.

כמות האוויר המסופקת לחממה ובחינת פעולתו של כונס הרוח

כונס הרוח אשר הותקן במגדל הינו קבוע (כלומר – אינו עוקב אחר כיוון הרוח), ופיתחו פונה לכיוון צפון מערב. לפיכך, יעילות פעולתו תלויה בכיוון ממנו נושבת הרוח: כאשר הרוח נושבת בניצב לפתח הכונס הוא עשוי להגדיל את הזרימה לתוך החממה, וכאשר הרוח נושבת מכיוונים אחרים תרומתו קטנה מאוד או אפילו שלילית.

תרשים 6 מדגים את תרומת הכונס לזרימת האוויר במגדל. עד השעה 07:00 בערך, הרוח נשבה מכיוון צפון מערב, והמפוח לא פעל. בתנאים אלה, זרימת האוויר במגדל הושפעה ממהירות הרוח החיצונית, ונעה בין כ-45 אלף מ"ק/שעה כאשר עוצמת הרוח היתה כ-4 מ"שנייה ל-10 אלפים מ"שעה כאשר הרוח היתה בעוצמה של 1 מ"שנייה בלבד. בשעה 7:00 בערך, הרוח חגה תוך זמן קצר מאוד לכיוון צפון מזרח (כיוון 060), ונשבה מכיוון זה עד השעה 16:30 בערך. כאשר הרוח נושבת בכיוון זה, הוקטור הניצב לכיוון הכונס הוא שלילי, ולפיכך תנועת האוויר במגדל היא תוצאה של פעולת המפוח בלבד. בשעה 16:30 בערך חגה הרוח חזרה לכיוון צפון מערב. בעקבות השינוי בכיוון הרוח, הפך הוקטור הניצב לפתח הכונס חיובי, ולכן

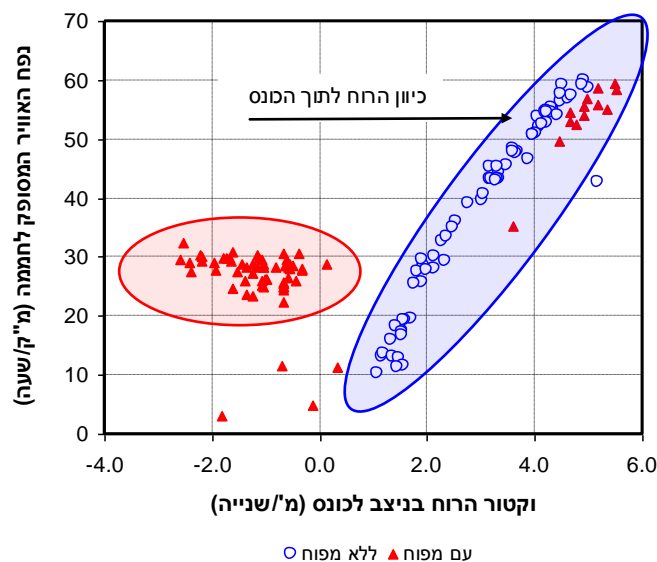
הגיאומטריה של הפתח מסייעת לזרימת האוויר אל החממה. בתנאים אלה, נפח האוויר אשר סופק לחממה גדל מ-25 אלף מ"ק/שעה (בהשפעת המפוח בלבד) ל-55 אלף מ"ק/שעה בקירוב.



תרשים 6: למעלה – מהירות הרוח במהלך שעות היממה. באמצע - כיוון הרוח. למטה - כמות האוויר המצונן אשר מספק מגדל האידוי לחממה. האזור המסומן בתכלת מציין את שעות פעולת המתזים ומפוח היניקה, בין 7-19 (נתונים ליום 4 יוני 2011).

תרשים 7 מדגים את הקשר בין וקטור הרוח, אשר חושב בעזרת נתוני מהירות וכיוון רוח אשר נמדדו בגובה 10 מ', סמוך לפתח הכונס, לבין כמות האוויר אשר סופקה לחממה. הנתונים המוצגים בתרשים נחלקים לשלוש אוכלוסיות:

- א. כאשר המפוח איננו פועל (עיגולים כחולים בתרשים), ישנו קשר ליניארי מובהק ביו עוצמת הרוח לבין נפח האוויר המסופק לחממה: ככל שמהירות הרוח גדלה, כך גדלה אספקת האוויר.
- ב. כאשר המפוח פועל והרוח נושבת מצפון מזרח, אין קשר בין וקטור הרוח לבין כמות האוויר המסופקת לחממה (משולשים אדומים באזור התחום על ידי האליפסה הורודה).
- ג. כאשר המפוח פועל והרוח נושבת מצפון מערב, תנועת האוויר היא תוצאה של הפעולה המשולבת של שני הגורמים (משולשים אדומים באזור התחום על ידי האליפסה הכחולה). גם המקרה הזה ניכר קשר בין עוצמת הרוח לנפח האוויר אשר סופק לחממה. עם זאת, ראוי לציין שבתנאים אלה, זרימת האוויר **ללא המפוח** היתה מעט גבוהה יותר מאשר הזרימה אשר התקיימה בשעה שהמפוח פעל, עבור אותם ערכים של וקטור הרוח. כלומר, פעולת המפוח איננה מסייעת, ואולי אף מפריעה, לזרימת האוויר במגדל בהשפעת הרוח כאשר זו נושבת בניצב לפתח הכונס.



תרשים 7: תרומת הכונס לאספקת האוויר המצונו לחממה, כתלות בכיוון הרוח ובעוצמתה, הנתונים על ידי הוקטור הניצב לפתח הכונס. ערכים שליליים, המודגשים באליפסה האדומה, מציינים שהרוח נשבה מכיוון גב הכונס. (נתונים ליום 4 יוני 2011).

טמפרטורת האוויר המסופקת לחממה

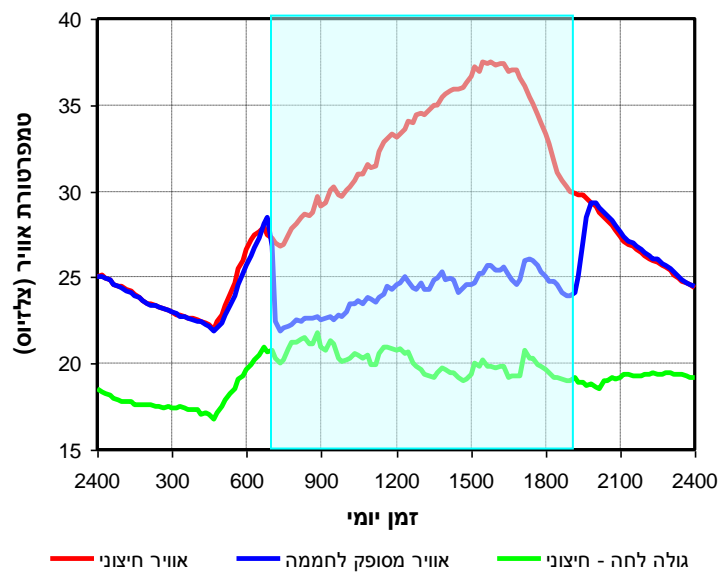
המידה שבה ניתן להוריד את טמפרטורת האוויר המצונו המסופק לחממה תלויה בעיקר בטמפרטורת הגולה הלחה של אוויר הסביבה. בתנאים מיטביים, טמפרטורת האוויר המסופקת לחממה עשויה להיות גבוהה ב-2-3 מעלות מטמפרטורת הגולה הלחה מחוץ לחממה. בכדי להבטיח צינון יעיל, יש להבטיח כי כמות המים המסופקת לאוויר המצונו תהיה מספקת, וכי טיפות המים תהיינה במגע עם האוויר היבש הנכנס למגדל מספיק זמן בכדי להתאדות. כאשר כמות המים המסופקת היא קטנה מדי, או שהטיפות אינן מספיקות להתאדות, פוטנציאל הקירור אינו מגיע לידי מיצוי, והטמפרטורה של האוויר המסופק גבוהה מטמפרטורת הגולה הלחה במידה ניכרת.

תרשים 8 מראה את הטמפרטורה של האוויר אשר סופקה לחממה, כפי שנמדדה סמוך לפתח המקשר בין המגדל לבין החממה. ניתוח התרשים מביא למספר מסקנות:

א. טמפרטורת האוויר אשר סופק לחממה היתה נמוכה ביותר סמוך להפעלת מערכת המתזים, בערך בשעה 07:00, ועמדה על כ-22 מעלות, בעוד שטמפרטורת הסביבה באותה שעה היתה כ-27 מעלות. מאחר וטמפרטורת הגולה הלחה באותו זמן היתה כ-20 מעלות, ניתן לקבוע כי אפקט הצינון שהושג היה מרבי.

ב. במהלך שעות היממה, גדל בהדרגה הפער בין טמפרטורת האוויר המצונן לבין טמפרטורת הגולה הלחה, והגיע להפרש של כ-5 מעלות החל מהשעה 15:00 בערך. מאחר וכמות האוויר שעברה במגדל במהלך היום היתה קבועה, בקירוב (תרשים 2), הסיבה לירידה בביצועים היא קצב אידוי בלתי מספק, אשר לא היה בו די להביא לרוויה את האוויר היבש היותר אשר נשאב למגדל בשעות הצהריים ואחר הצהריים.

ג. ניתן להשיג יותר קירור על ידי הפעלת מערכת אספקת המים כל שעות היממה, או לכל הפחות כבר בשעה 05:00 בערך: החל משעה זו נרשמה עלייה בטמפרטורת הסביבה, ובעקבותיה עליה בטמפרטורת האוויר אשר סופק לחממה, אשר ניתן היה להימנע ממנה. במקביל, רצוי להמשיך את פעולת הצינון עד חצות, בערך, מאותה סיבה.



תרשים 8: טמפרטורת האוויר המצונן אשר מספק מגדל האידוי לחממה. האזור המסומן בתכלת מציין את שעות פעולת המתזים ומפוח היניקה, בין 7-19 (נתונים ליום 4 יוני 2011).

טמפרטורת האוויר בחממה

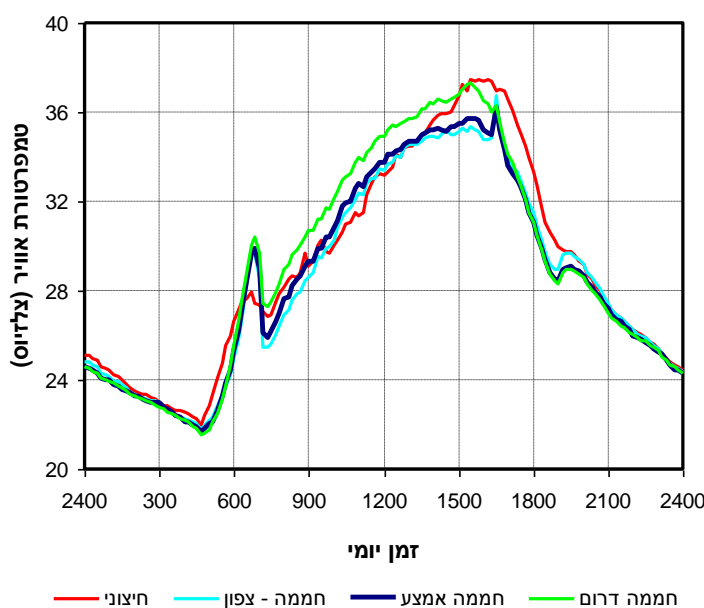
טמפרטורת האוויר בחממה היא תוצאה של מאזן האנרגיה הכולל, המושפע ממאזן הקרינה (קרינת שמש וקרינה אינפרא אדומה); ממעבר אנרגיה בהסעה (תנועת האוויר בין הסביבה לבין החממה); מאידוי מים המשפיע על החום הכמוס (במגדל הצינון, על פני הקרקע ובצמחים הגדלים בחממה); וממעבר האנרגיה בין הקרקע בחממה לבין החלל שמעליה, אשר עשוי להיות חיובי (דהיינו – הקרקע מתחממת) או שלילי

(הקרקע מתקררת). מערכת הצינון הפועלת במגדל היא אפוא רק גורם אחד, וכאשר באים לבחון את יעילותה, יש לעשות כן על רקע מכלול הגורמים אשר נמנו כאן.

תרשים 9 מראה את מהלך הטמפרטורות בשלוש נקודות בחממה במשך יממה אחת, וכן את מהלך טמפרטורת האוויר בסביבה. בשעות הלילה, הטמפרטורה בחממה דומה לטמפרטורת הסביבה. לאחר הזריחה ישנה עלייה מהירה בטמפרטורה, אשר הינה מהירה יותר בחממה מאשר מחוצה לה. הפעלת מערכת הצינון בערך בשעה 07:00 מביאה לירידה כמעט מיידית בטמפרטורה של החממה של כ-4 מעלות, אולם בהמשך היום הטמפרטורה בחממה שבה ועולה במקביל לטמפרטורת הסביבה, ומתחילה לרדת רק בשעות אחה"צ.

ראוי לשים לב לנקודות הבאות:

- א. טמפרטורת האוויר במרבית שטח החממה כמעט אחידה: ההבדל בין הטמפרטורה בנקודות המדידה "חממה צפון" ו"חממה אמצע" זניח, בעוד שהנקודה "חממה דרום", שהיא המרוחקת ביותר ממגדל הצינון, חמה יותר בשעות השיא ב-1-2 מעלות בלבד.
- ב. בשעה 07:00 בערך, כאשר נכנסת מערכת הקירור לפעולה, הטמפרטורה בחממה כבר גבוהה ב-2 מעלות בערך ביחס לטמפרטורת הסביבה.
- ג. הטמפרטורה המרבית בחממה, אשר נמדדה בין השעות 16:00-15:00, היתה נמוכה ב-2 מעלות בערך בהשוואה לטמפרטורה המרבית של האוויר החיצוני.



תרשים 9: טמפרטורת אוויר (גולה יבשה) בשלוש נקודות בחממה (בגובה 2.5 מ') בהשוואה לטמפרטורת אוויר חיצונית. (נתונים ליום 4 יוני 2011).

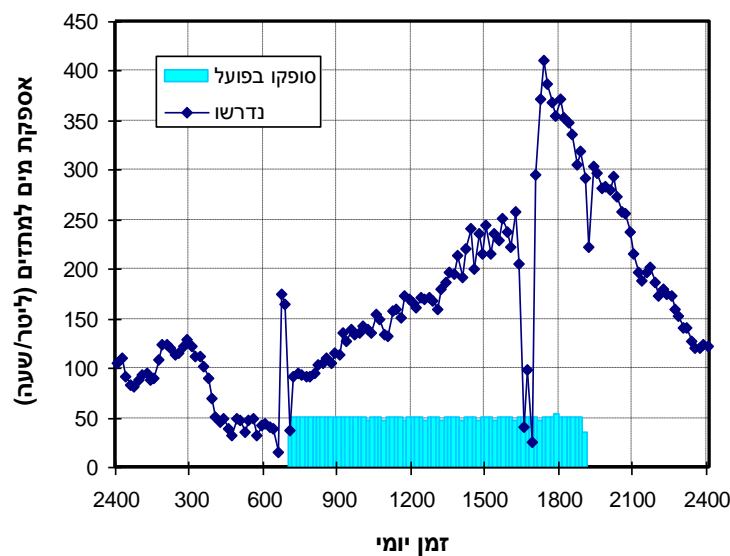
דיון

המדידות אשר נעשו במהלך החודשים מאי ויוני 2011 ממחישות כי מגדל הצינון מסוגל לספק כמות ניכרת של אוויר מצונן לחממה. הוכח גם כי כונס רוח עשוי להגדיל במידה ניכרת את נפח האוויר המצונן המסופק לחממה, ללא צורך במפוח, לפחות בחלק משעות היממה. יחד עם זאת, במבחן הקובע, דהיינו קיום תנאי

גידול נאותים בחממה, ובעיקר טמפרטורת אוויר נוחה - המערכת עדיין איננה ממצה את פוטנציאל הטמון בה.

יש לכך מספר סיבות:

- א. כונס האוויר של המגדל פועל היטב בשעות הבוקר והערב, כאשר הרוח היא צפון מערבית (300), אך לא בשעות החמות ביותר ביום, כאשר כיוון הרוח הוא צפון מזרח (060). בשעות אלה, כמות האוויר המצונן אשר סופקה לחממה היתה כחצי מהכמות אשר סופקה בשעות הבוקר והערב.
- ב. עדיין אין התאמה מיטבית בין כמות המים המסופקת למתזים לבין זרימת האוויר במגדל. כתוצאה מכך, ישנן שעות – בעיקר אחר הצהריים - שבהן כמות המים אינה מספיקה בכדי לצנן את האוויר. תרשים 10 מראה את כמות המים אשר היה צורך לספק על מנת להביא לרוויה את כמות האוויר אשר הוחדרה לחממה באמצעות מגדל הצינון, בהתחשב בלחות ובטמפרטורה של אוויר הסביבה בכל רגע נתון (לצורך החישוב הובא בחשבון לחץ אטמוספרי קבוע של 1030 מ"ב, בהתאם לגובה של חצבה - כ-150 מ' מתחת לפני הים). אמנם אין צורך להביא את האוויר לרוויה על מנת להשיג קירור משמעותי, אך גם אם מניחים כי הכמות הדרושה בפועל היא כ-80% מהכמות המוצגת בתרשים, ניתן לראות בבירור כי כמות המים אשר סופקה בפועל היתה קטנה במידה ניכרת ביחס לכמות הרצויה.



תרשים 10: כמות המים הדרושה (תיאורטית) בכדי להביא לקירור מרבי של האוויר אשר סופק לחממה ביום 4 ביוני 2011 בתהליך של אידוי ישיר, בהתחשב בטמפרטורה ובלחות של אוויר הסביבה.

- ג. על מנת להבטיח אידוי מלא של טיפות המים המסופקות לאוויר הנכנס למגדל, יש להבטיח כי תהליך האידוי יהיה קצר יותר מאשר זמן הנפילה של הטיפה, מרגע שיצאה מהמתז ועד לכניסתה אל חלל החממה. ככל שקוטר הטיפות קטן יותר, משך האידוי קצר יותר וניתן להסתפק במגדל בגובה נמוך יותר מבלי להביא להרטבה של הגידולים ברסס. המתזים שהותקנו במגדל CoolNet (נטפים) דורשים לחץ של כ-3-4 אטמוספרות בכדי להפיק טיפות בקוטר (חציון) של כ-30-40 מיקרון. הלחץ שסופק בפועל היה נמוך יותר, ולכן קוטר הטיפות היה גדול מדי והאידוי היה פחות יעיל.

ד. החממה איננה אטומה מספיק, כך שחלק מהאוויר החודר אליה בהשפעת מפוח היניקה איננו מגיע מהמגדל, אלא מקרעים ביריעות בדפנות - ולכן איננו מצונן. הדבר מתבטא גם במפל הטמפרטורות לאורך החממה, שהיא מעט קרירה יותר קרוב למגדל וחמה יותר בצד הרחוק ממנו.

סיכום ומסקנות

על אף שמגדלי צינן באידוי הותקנו בשנים האחרונות במספר בניינים בכל רחבי העולם, טרם נעשה שימוש במגדלי צינן לשם בקרת תנאי הטמפרטורה בחממות. הניסוי אשר בוצע בחוות הניסויים יאיר בחצבה המחיש כי השימוש במגדל עם כונס אוויר מתאים עשוי להקטין מאוד את הצורך במפוח חשמלי, ויחד עם זאת לספק כמות אוויר נאותה. הקושי העיקרי אשר איתו יש להתמודד הוא אידוי כמות מים מספקת על מנת להביא לצינן הרצוי, מבלי שהאוויר היוצא מן המגדל יישא טיפות מים אשר עלולות לפגוע בגידולים. במקביל, יש צורך לשפר גם את פיזור האוויר בחממה על מנת להביא לטמפרטורה אחידה ככל האפשר בחלל.

על מנת לבחון בצורה מלאה ומקיפה את הפוטנציאל של המערכת בהתקנה מיטבית, מוצע להמשיך את המדידות לשנה נוספת, אשר במהלכה יבוצעו השינויים הבאים:

א. התקנת כונס רוח משופר, אשר יאפשר לנצל את הרוח להגדלת ספיקת האוויר במגדל הן כאשר הרוח נושבת מכיוון צפון מערב (שעות הבוקר המוקדמות ואחה"צ המאוחרות) והן כאשר היא נושבת מצפון מזרח (שעות הצהריים).

ב. התקנת בקרה משוכללת יותר למערכת אספקת המים למתזים, אשר תאפשר הפעלה מדורגת של המערפלים בהתאם לתנאי הסביבה: כמות המים אשר תסופק תהיה גדולה יותר כאשר האוויר החיצוני חם ויבש וכאשר מהירות הזרימה בכונס גבוהה יותר, ותהיה קטנה יותר כאשר ספיקת האוויר היא נמוכה או כאשר האוויר פחות חם ויותר לח.

ג. התקנת משאבה אשר תבטיח כי המים המטופלים המסופקים למערפלים יגיעו בלחץ הדרוש.

ד. בחינת ההשפעה של מערכת הצינן על פני מספר שעות רב יותר – ואפילו כל היממה בעונה החמה ביותר.

ה. הקפדה על אטימות מעטפת החממה, כך שהאוויר הנכנס אליה בהשפעת המפוח יהיה אוויר מצונן בלבד.

תודות

התקנת המגדל מומנה על ידי קרן יק"א בישראל ומו"פ ערבה תיכונה וצפונית. ההפעלה השוטפת של הניסוי נעשתה על ידי הצוות המסור בחוות הניסויים יאיר, בראשות יובל ברזילי, מנהל התחנה, ושל אבי אושרוביץ. תודה מיוחדת לוולפגנג מוצפי-הלר, טכנאי המדידות של היחידה לאדריכלות ובינוי ערים במדבר במכונים לחקר המדבר ע"ש בלאושטיין, אשר הרכיב את מכשירי המדידה בחממה, תכנת את אוגר הנתונים והיה אחראי על עיבוד הנתונים השוטף במהלך המדידות. לבסוף, תודה מקרב לב לעמיתי פרופ' יאיר עציון, אשר הלך לעולמו בטרם עת לפני שבועות אחדים. יאיר היה שותף למחקרים רבים במהלך כל שנותי כחוקר באוניברסיטת בן גוריון, לרבות אחדים מן המחקרים הראשונים על מגדלי צינן באידוי. הוא תרם מן הידע שלו גם בשלבים הראשונים של ניסוי זה, עד אשר נאלץ להפסיק את עבודתו בשל מחלתו – אשר ממנה בסופו של דבר לא קם.

מקורות

Erell E. (2007) Evaporative cooling. Book chapter in Santamouris, M. (Ed.) Advances in Passive Cooling, James & James Science Publishers, London. 303p.

Erell E., Pearlmutter D. and Etzion Y. (2008) A Multi-Stage Down-Draft Evaporative Cool Tower for Semi-Enclosed Spaces: Aerodynamic Performance. Solar Energy, 82:420-429.

Erell E., Etzion E. Pearlmutter D. and Mutzafi-Haller W. (2006) Multi-stage Down-Draft Evaporative Cool Tower for Large Closed and Semi-enclosed Spaces. Final research report submitted to the BMBF (Germany) and Ministry of Science and Technology, Israel.

Pearlmutter D., Erell E., Etzion Y., Meir I.A. and Di H. (1996) Refining the use of evaporation in an experimental down-draft cool tower, Energy and Buildings, 23:191-197.

Pearlmutter D., Erell E. and Etzion Y. (2008) A Multi-Stage Down-Draft Evaporative Cool Tower for Semi-Enclosed Spaces: Experiments with a water spraying system, Solar Energy, 82:430-440.

Cooling Greenhouses in the Arava with Evaporative Cool Towers

Evyatar Erell

The Jacob Blaustein Institutes for Desert Research, Ben Gurion University of the Negev

Email for correspondence: erell@bgu.ac.il

Keywords: cool tower; evaporative cooling; greenhouses; sprayers; wind;