

בקרת אקלים ברפתות באמצעות מערכות אוורור, סחרור וערפול

Climatic control of dairy barns by ventilation circulation and fogging systems

מוגש למועצה לענף החלב

ע"י

הנדסת מערכות גידול, ייצור וסביבה - המכון להנדסה חקלאית	אברהם ארבל
הנדסת מערכות גידול, ייצור וסביבה - המכון להנדסה חקלאית	שקליאר אלכסנדר
הנדסת מערכות גידול, ייצור וסביבה - המכון להנדסה חקלאית	מרדכי ברק
הנדסת מערכות גידול, ייצור וסביבה - המכון להנדסה חקלאית	אפרים מליץ
הנדסת מערכות גידול, ייצור וסביבה - המכון להנדסה חקלאית	אהרון אנטלר
בקר – מרכז מחקר נוה יער	אריה ברוש

תקציר

הצגת הבעיה – תנאי הגידול הם המפתח לייצור אופטימאלי ורווחת הפרה ומכאן לתמורה כלכלית גבוהה. בנוסף לתזונה נכונה וממשק מתאים, תנאי הגידול באים לידי ביטוי בתנאי האקלים השוררים בחלל המבנה (קרינה, טמפרטורה, לחות יחסית ומהירות האוויר) וריכוזי גזים רעילים (כגון אמוניה). מרבית הרפתות בארץ מבוססות על אוורור טבעי לסילוק עודפי חום ולחות, לייבוש הרפד ולהקטנת ריכוזי הגזים הרעילים. טמפרטורות הקיץ, הסתיו והאביב הגבוהות בארץ גורמות לכך שהפרות מצויות בתנאי עקה. כתוצאה מכך, הפרות אינן ניזונות באופן סדיר, מתגודדות ומגבירות את קצב ההלחחות. כתוצאה מכך, הפרות אינן ניזונות באופן סדיר ונפגמת תנובת החלב.

מהלך ושיטות עבודה – כמתוכנן, העבודה התמקדה באפיון מרכיבי המערכת (ספיקת אוויר ומים) בתלות תנאי סביבה, עומס החום והשפעתם על תנאי האקלים המתקבלים. בהתאם לעומס החום ותנאי האקלים המקומיים בחודשי הקיץ ובצוהרי היום, חושבו ספיקות המים וספיקות האוויר הדרושות כתלות במקדם הנוחות. בהתאם לכך, תתוכננה מערכות האוורור, סחרור וערפול אשר יותקנו ברפת מסחרית באזורי האקלים מדברי (ערבה או בקעה).

השנה השנייה התמקדה, בהתאם למגבלות התקציב, בהתאמת המבנה באופן חלקי ומעקב אחר התוצאות המעשיות. **תוצאות עיקריות** – המערכת המוצעת עשויה להקנות טמפרטורת פנים נמוכה באופן ניכר (12 מ"צ ומעבר לכך בתנאי הערבה) בהשוואה לאוורור בלבד. הירידה בטמפרטורה מלווה בעלייה בלחות היחסית ועם זאת מקדם הנוחות משתפר באופן ניכר. עומס החום של מבנים לפרות חולכות נאמד וכתחום 75 – 230 וואט למ"ר. ספיקות האוויר והמים גדלות ככול שעומס החום גדל, ככול שהטמפרטורה והלחות היחסית של הסביבה גדלות, וככול שטמפרטורה ולחות יחסית רצויים (במבנה) נמוכים יותר.

מסקנות והמלצות – השיטה המוצעת עשויה להקנות טמפרטורת פנים נמוכה באופן ניכר בהשוואה לאוורור בלבד. תמורה זו הולכת וגדלה ככול שלחות הסביבה נמוכה יותר (12 מ"צ ומעבר לכך בתנאי הערבה). בשיטה המוצעת, שטף האוורור המתבקש הינו נמוך מאוד בהשוואה לנהוג כיום. כהמשך לעבודה זו, חשוב להתמקד בנושאים

הבאים: אפיון תרומת מערכת הסחרור על רמת הנוחות, בחינת הלכה למעשה של רפתות על פי המתכונת המוצעת, עריכת השוואות אקלימית, פיזיולוגית וכלכלית, בין רפת המופעלת על פי המתכונת המוצעת לרפת מקובלת ובאזורים השונים של הארץ.

רקע תיאורטי ומעשי

תנאי הגידול הם המפתח לייצור אופטימלי ורווחת הפרה ומכאן לתמורה כלכלית גבוהה. בנוסף לתזונה נכונה וממשק מתאים, תנאי הגידול באים לידי ביטוי בתנאי האקלים השוררים בחלל המבנה (קרינה, טמפרטורה, לחות יחסית ומהירות האוויר) וריכוזי גזים רעילים (כגון אמוניה). מרבית הרפתות בארץ מבוססות על אוורור טבעי לסילוק עודפי חום ולחות, לייבוש הרפד ולהקטנת ריכוז הגזים הרעילים. טמפרטורות הקיץ, הסתיו והאביב הגבוהות בארץ גורמות לכך שהפרות מצויות בתנאי עקה. כתוצאה מכך, הפרות אינן ניזונות באופן סדיר, מתגודדות ומגבירות את קצב ההלחחות. במגמה להקטין את עומס החום, נהוגות היום בארץ מגוון של שיטות צינון הכוללות בין היתר הרטבה, אוורור ממוקד ושילובים ביניהם. שיטות אלה למרות יעילותן התרמית מעצימות את בעיית השפכים ע"י הגדלת נפח זבל ההפרשות, ומכאן לזיהום הסביבה. ובנוסף לכך, תנגודת הפרה קטנה לבעיות בריאות הקשורות להרטבתן. חסרונות נוספים הם בכך שהפרות מופרעות משיגרתן לצורך הצינון ואינן נהנות מצינון בזמן שהן רובצות בחלק היבש של הסככה לצורך מנוחה והעלאת גירה. כתוצאה מכך, עומס החום האפקטיבי עליהן עולה בשעות אלה. השיטה המוצעת (ראה להלן), באה להתגבר על חסרונות אלה. צינון פרות חלב בקיץ צריך להתמודד עם תנאים שונים החל מ-40°C ולחות יחסית של 20%, וכלה ב-30°C ולחות יחסית של 55%. שיטות הצינון הקיימות מתמודדות באופן דומה עם מגוון תנאים זה ולכן קיימת הצדקה להתייחס ספציפית לכל צרוף גורמים.

עבודה זאת מציעה גישה הנדסית כמותית לטיפול בבעית עומס החום של פרת החלב באמצעות הקניית מקדם הנוחות (THI) משופר. לכמת את האפשרויות לשיפורו בתנאי סככה נתונים ומשופרים (כגון הוספת וילונות צד ובידוד), לחשב ולכמת את האמצעים הפיסיקליים (ספיקת מים לעירפול וספיקת האוויר המוחלפת) וגבולותיהם. כל זאת כדי להקטין עלויות מצד אחד ולהסוך במים ולהקטין זיהום סביבה מצד שני.

מערכת הצינון המוצעת מבוססת על המרת חום מוחש לחום כמוס של האוויר באמצעות אידוי מים ובתהליך אדיאבטי (ללא תוספת חום) וללא הרטבה, כמתואר באיור 1 ובהתאם למתכונת הבאה: אוורור מאולץ או טבעי באמצעות פתחים בגג ומאווררים בדפנות (תוך סגירת הרפת באמצעות וילונות צד) או פתחי צד בהתאם, הספקת מים לאידוי כערפל ובאמצעות פומיות ריסוס ללחץ גבוה וסחרור האוויר שבמבנה (על מנת להקנות מהירות רצויה בנוסף לטמפרטורה ולחות). על ידי כך, כל טיפת מים מנוצלת לצינון בלבד.

מערכות ערפול (במתכונת דומה) נבחנו במהלך השנים האחרונות לצורכי צינון הממות ובתנאי הערבה התיכונה (עין ירב וחצבה) ונמצא שהן מקנות תנאי אקלים בתחום הרצוי (טמפרטורה - 28 מ"צ ולחות יחסית - 80%) ותנאים אחידים בכל שטח המבנה. כמו כן, מערכות צינון אלה יעילות יותר הן מבחינה האנרגטית והן מבחינת ניצול המים בהשוואה למזרן לח. ההבדל בין מערכות הערפול לצורכי רפתות ולצורכי הממות עשוי לנבוע מהדרישה למהירות אויר גבוהה משמעותית ברפת בהשוואה לחממה. חשוב לציין שמדובר בחממות גדולות עם עומס חום

הגבוהה משמעותית בהשוואה לסככות בקר לחלב מקובלות. במגמה להדגים את ביצועי המערכת העשויים להתקבל, ובהתבסס על מקדם נוחיות (THI) של פרה חולבת המוגדר (בתנאים ללא תנועת אויר) כ:

$$(1) \quad THI = 0.72(T_d + T_w) + 40.6$$

כאשר: T_d ו- T_w טמפרטורות היבש והלח של האוויר שבקרבת הפרה בהתאמה. חשוב להדגיש, הגברת מהירות האוויר לערכים רצויים ובקרבת הפרה מיטיבה עם הפרה, אך אין תיעוד מתאים לכך. בהתאם לכך וכמתואר באיור 1, נהוג להגדיר מקדם נוחיות כ: תנאים נוחים עד לערכים של 70, מעבר לכך ועד 75 כתנאים נסבלים, מעבר לכך ועד 78 כתנאי עקה ומעבר לכך כתנאי עקה קיצונית. באיור 2 מוצגים גם קווים שווי טמפרטורה לחה של האוויר. קווים אלה מאפיינים תהליך של צינון באמצעות אידוי מים. לשם הדגמה אויר בתנאים של 38 מ"צ ולחות יחסית של 20% (תנאי ערבה ובקעה השכיחים בחודשי הקיץ), הנם תנאי עקה קיצונית מאוד עבור פרה חולבת ($THI=83$). לעומת זאת, באמצעות שימוש במערכת המוצעת ניתן להקנות תנאים נסבלים ($THI=72$) בלחות יחסית של 80%, או תנאים נוחים ($THI=70$), תוך הגברת הלחות לכדי רוויה. לאחרונה הותקנו מספר מערכות ערפול לצינון רפתות (בית זרע, אפיקים ואחרים) הכוללות בעיקר פומיות ריסוס הממוקמות מעל אזור המדרך ובאוויר טבעי. מתוך תצפיות ראשוניות ניתן להצביע בבירור על הגדלת תנובת החלב בחודשי הקיץ, מאפשר הזרעה במהלך כל חודשי השנה באחוזי הצלחה סבירים, ושיפור ניכר ברווחת הפרה הבא לידי ביטוי בעיקר במספר ההלחות ובהתגודדות בהשוואה לסככות לא מצוננות.

מטרת העבודה הנה: התאמת מערכות אוורור, סחרור וערפול לבקרת אקלים ברפתות.

3. מהלך ושיטות עבודה

חישובים תיאוריים

חלק זה מתמקד באפיון ספיקת האוויר וספיקת המים (שיש לאדות) על פי מאזני אנרגיה ומסה. חישוב שטף החום (q – וואט למ"ר ריצפה) מתבסס על ההנחות הבאות: מצב יציב, מבנה מבוקר המאפשר שליטה בספיקת האוויר, ושטף חום לקירות ולריצפה (מוחש וכמוס) זניחים. בתנאים אלה, שטף החום מתקבל בקירוב טוב מתוך המשוואה:

$$(2) \quad q = \frac{Q_{loss}}{A_{an}} + q_c$$

כאשר: Q_{loss} – שטף החום הנפלט מהפרה (או כל בעל החיים אחר – וואט), A_{an} – שטח ריצפה המוקצה לפרה ו- q_c שטף חום מתקרת המבנה (וואט למ"ר). כמצוין, מאזן האנרגיה הנו בתלות בסוג בעל החיים (עופות, יונקים), מידת פעילותו הגופנית (מנוחה לעומת תנועה) והיצרנות (הנבה, הטלה, גדילה). לגבי חיות משק, שטף החום מוכתב מייעודן הכלכלי (כדוגמא - פרות בשר, פרות חלב, הרות) ורמת היצרנות (כדוגמא גיל, משקל, תנובת חלב, מצבי עקה ואחרים). לשם הדגמה, הדיון בהמשך מתמקד בפרות חולבות. השטף האנרגטי הנוצר בגוף בעל החיים (Q) הנו בהתאם לצריכת המזון, הרכב המזון ויעילות ההמרה המתקבל מתוך:

$$(2) \quad Q = m_f C_f \eta_f$$

כאשר: m_f – צריכת המזון ליחידת זמן, C_f – הערך הקלורי של המזון ו- η_f – יעילות ההמרה. מנת המזון של פרות חולבות משתנה מעת לעת ומורכבת מסוגים שונים של מזון כאשר הערך הקלורי שלה עומד כיום על כ- 17000 kJ/kg. יעילות ההמרה הממוצעת של פרות עומדת על כ- 0.75. אנרגיה זו משמשת לקיום הפרה (Q_{main}), ליצירת חלב (Q_{milk}), תוספת או גריעה במשקל (Q_{we}) ועודפי החום (Q_{loss}) הנפלטים לסביבה:

$$(3) \quad Q = Q_{main,P} + Q_{milk,P} + Q_{we,P}$$

על מנת לספק את האנרגיה לקיום הפרה (Q_{main}), יש צורך בהשקעת אנרגיה ($Q_{main,P}$) מוגברת בהתאם ליעילות התהליכים הפנימיים ($\eta_{main,P}$) ומתקבלת מתוך:

$$(4) \quad Q_{main,P} = \frac{Q_{main}}{\eta_{main,P}}$$

אנרגיה זו אינה תורמת ליצירת משקל או חלב אלא לקיום עצמי ולכן היא נפלטת לסביבה כחום בסופו של דבר. לגבי בקר נהוג לחשב מתוך:

$$(5) \quad Q_{main,P} = 5.3W^{0.75}$$

כאשר W – משקל הבקר. אנרגיית החלב ניתנת לחישוב מתוך:

$$(6) \quad Q_{milk} = m_{milk} C_{milk}$$

כאשר: m_{milk} – תנובת החלב ליחידת זמן ו- C_{milk} – הערך הקלורי של החלב. הערך הקלורי של החלב תלוי בהרכב הכולל בעיקר: מים, שומן, חלבון, וסוכרים. לשם הדגמה, הערך הקלורי של החלב בעל תכולה של 4% שומן הנו כ- 3140 kJ/kg. יעילות תהליך ייצור החלב ($\eta_{milk,P}$) עשויה להשתנות וכיום עומדת על כ- 0.65 בממוצע. אי לכך, ניתן להעריך את צריכת האנרגיה של הפרה לצורך ייצור החלב ($Q_{milk,P}$) מתוך:

$$(7) \quad Q_{milk,P} = \frac{Q_{milk}}{\eta_{milk,P}}$$

צריכת האנרגיה לתוספת (או גריעה) במשקל מתקבלת מתוך:

$$(8) \quad Q_{we} = m_{we} C_{we}$$

כאשר: m_{we} – קצב גדילה ליחידת זמן ו- C_{we} – הערך הקלורי של הרקמות הנוצרות. חשוב לציין, הגורמים לשינויים במשקל הגוף הנם מגוונים כגון גדילה, הריון ובניית רקמות שומן. בדומה למשוואה (7), על מנת לספק את האנרגיה לגדילה (Q_{we}), יש צורך בהשקעת אנרגיה ($Q_{we,P}$) מוגברת בהתאם ליעילות תהליך הגדילה ($\eta_{we,P}$) ומתקבל מתוך:

$$(9) \quad Q_{we,P} = \frac{Q_{we}}{\eta_{we,P}}$$

בהתאם לכך, ניתן לסכם ולאפיין את צריכת האנרגיה (Q) והפסדי החום (Q_{loss}) הנפלטים לסביבה מתוך:

$$(9) \quad \begin{aligned} Q &= Q_{main,P} + Q_{milk,P} + Q_{we,P} \\ &= \frac{Q_{main}}{\eta_{main,P}} + \frac{m_{milk} C_{milk}}{\eta_{milk,P}} + \frac{m_{we} C_{we}}{\eta_{we,P}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{loss} &= (Q_{mainP}) + (Q_{milkP} - Q_{milk}) + (Q_{weP} - Q_{we}) \\
 (10) \quad &= Q_{mainP} + m_{milk} C_{milk} \left(\frac{1}{\eta_{milkP}} - 1 \right) + m_{we} C_{we} \left(\frac{1}{\eta_{weP}} - 1 \right)
 \end{aligned}$$

מתוך הנחה שהטמפרטורה הפנימית של המבנה אחידה, שטף החום מתקרת המבנה מתקבלת מתוך סידרת המשוואות הבאה:

$$(11) \quad q_c = I\alpha - h_{co}(T_{co} - T_{am}) - \varepsilon\sigma(T_{co}^4 - T_{sky}^4)$$

$$(12) \quad q_c = h_{ci}(T_{ci} - T) + \varepsilon\sigma(T_{ci}^4 - T^4)$$

$$(13) \quad q_c = \frac{K}{L}(T_{co} - T_{ci})$$

כאשר: I – קרינת השמש (וואט למ"ר), α – מקדם הבליעה של התקרה, h_{co} – מקדם מעבר חום בהסעה מהתקרה לסביבה החיצונית, T_{co} – טמפרטורת התקרה בצד החיצוני, T_{am} – טמפרטורת סביבה, ε – מקדם מעבר חום בקרינה של התקרה, σ – מקדם סטפן בולצמן ($5.6697 \cdot 10^{-8}$ וואט למ"ר למעלת קלווין ברביעית), T_{sky} – טמפרטורת רקיע, h_{ci} – מקדם מעבר חום בהסעה מהתקרה לאוויר הפנימי, T_{ci} – טמפרטורת התקרה בצד הפנימי, T – טמפרטורת האוויר הפנימי, K – מקדם מעבר חום בהולכה של התקרה ו- L – עובי התקרה. מקדמי שטפי החום מתקבלים מתוך:

$$(14) \quad h_{co} \cong 4.4 \frac{(\rho_{am} V_{wind})^{0.8}}{L_b^{0.2}}$$

$$(15) \quad h_{ci} \cong 4.4 \frac{(\rho_{in} V_{in})^{0.8}}{L_b^{0.2}}$$

כאשר: ρ_{am} – משקל סגולי של האוויר החיצוני, כאשר: ρ_{in} – משקל סגולי של האוויר הפנימי, V_{wind} – מהירות הרוח, V_{in} – מהירות פנימית הממוצעת של האוויר שבקרבת התקרה ו- L_b – אורך אופייני של התקרה (רוחב המבנה).

בהתאם לכך, ספיקת האוויר מתקבלת מתוך:

$$(16) \quad m_a = \frac{q}{H - H_{am}}$$

כאשר: H – אנטלפיה של האוויר הפנימי ו- H_{am} – אנטלפיה של אוויר הסביבה. בכפוף לכך, ספיקת המים הכוללת שיש לאדות מתקבלת מתוך:

$$(17) \quad m_w = m_a (W - W_{am})$$

כאשר: W – יחס הערבוב של האוויר הפנימי ו- W_{am} – יחס הערבוב של אוויר הסביבה. האנטלפיה (H) ו- יחס הערבוב (W) של האוויר הפנימי מחושבים בהתאם לטמפרטורה (T) ולחות יחסית (RH) הרצויים. לחלופין, בהינתן ספיקת האוויר וספיקת המים ניתן לחשב האנטלפיה ויחס הערבוב של האוויר הפנימי, ובהתאם לכך ניתן להשב את שאר תכונות האוויר.

בחינה מעשיות

במהלך השנה האחרונה הותקנה מערכת צינון ברפת חולבות בקיבוץ בית זרע, כמפורט באיורים 3 – 5 ועל פי הפרוט הבא:

מבנה – כמתואר באיור 3, סככה ברוחב 41 מ' ואורך 86.25 מ'.

מסחררים – הותקנו שלושה מסחררים (קוטר 7.3 מ') לאורך המבנה כאשר הספיקה של כל אחד הינה כ- 640,000 מ"ק לשעה, כמתואר באיור 4. המסחררים תופעלו לאורך כל היממה פרט לשעות בהן יש משבי רוח חזקים העלולים להסב נזקים למסחררים.

מערכת ערפול – כמתואר באיור 4, הותקנו ארבעה קווי פומיות ללחץ גבוה (70 אטמ') בספיקה כוללת של 2200 ליטר לשעה. המערכת תופעלה במהלך שעות היום פרט לשעות החליבה.

וילונות צד – כמתואר באיורים 4 ו-5, נוספו שתי מרפסות בצדדים הצפוני והדרומי ולאור גל המבנה. על המסגרות האלה הותקנה רשת 50 מ"ש כאשר החלק העליון קבוע ואילו החלק התחתון (האלכסוני), ניתן לפתיחה וסגירה על ידי גלילה על צינור המונע באמצעות מנוע-גיר, בדומה לנהוג בחממות. וילונות אלה נסגרו בשעות הבוקר ונפתחו בשעות הערב.

במקביל לכך הותקנה מערכת מדידות שכללה תא מאוורר למדידת טמפרטורת יבש ולח של האוויר בתוך הסככה. תא זה הוצב במרכז אורך הסככה, בגובה 2.2 מ' (על מנת למנוע גישה של הפרות) מעל קו הפומיות הצפוני (ראה איור 5). בנוסף לכך הותקנה תחנה מטאורולוגית שמוקמה הרחק מהסככה (בצידה הצפוני) ושכללה תא מאוורר (למדידת טמפרטורת יבש ולח של הסביבה), מד מהירות רוח ומד וכיוון רוח.

במהלך מרבית חודשי הקיץ של שנת 2008 המערכות תופעלו על פי המתכונת המתוארת למעלה ונערך מעקב שותף באשר לנתוני האקלים המתקבלים.

4. תוצאות ודיון

חישובים תיאוריים

באיור 6 מתואר צריכת האנרגיה הכוללת של פרה חולבת, צריכת האנרגיה לייצור החלב, הערך האנרגטי של החלב והפסדי החום של הפרה, כתלות בתנובת החלב. בהתאם לכך ניתן להצביע על כך שפרה יבשה מפיקה חום בשטף של כ- חצי ק"וואט והשטף גדל עם תנובת החלב לכדי 1.5 ק"וואט בתנובה של 40 ק"ג ליום. בהתחשב בכך ששטח המוקצה לפרה הנהוג בארץ נע בין 10 ל-20 מ"ר, ותנובה יומית ממוצעת של 36 ק"ג, שטף החום של הפרות ליחידת שטח (מ"ר מבנה) נע בתחום 75 – 150 וואט. שטף החום שמקורו במעטפת (בתקרה בעיקר) נובע בעיקר כתוצאה מקרינת השמש. שטף קרינת השמש הגלובלי מגיעה לכדי ק"וואט למ"ר בחודשי הקיץ במהלך שעות הצהריים. מרבית הרפתנים מודעים לכך ומלבינים את המבנים להגברת מקדם ההחזרה ובכך מקדם הקליטה (α) קטן לערכים הנעים בתחום של 0.1 – 0.2. משמעות הדברים, שהתקרה קולטת חום בשטף הנע בין 100 – 200 וואט למ"ר. כמתואר למעלה שטף זה נפלט לסביבה ולמבנה בהסעה ובקרינה. שטף החום הנוסף לתוך המבנה תלוי במידה רבה במקדם ההולכה של התקרה ועובייה (ראה משוואה 13). בהתאם לכך, ניתן להראות ששטף זה עשוי להיות זניח בתנאי מבנים מבודדים ולעלות לכדי 80 וואט למ"ר. על פי ניתוח זה, נראה ששטף החום הכולל של המבנה (q) עשוי לנוע בתחום 75 – 230 וואט למ"ר.

בהתאם לכך, חושבו ספיקת האוורור וספיקת המים (משוואות 16 ו-17 בהתאמה) כתלות בתנאי הסביבה (טמפרטורה ולחות יחסית), תנאי פנים "רצויים" (טמפרטורה ולחות יחסית) ושטף החום הכולל של המבנה, כמתואר באיורים 7 – 15. באיור a7 מוצג ספיקת האוויר ובאיור b7 מוצג ספיקת המים כתלות בתנאי הסביבה (טמפרטורה ולחות יחסית) מתוך הנחה ששטף החום הכולל של המבנה עומד על 150 וואט למ"ר והתנאים ה"רצויים" במבנה הינם: טמפרטורה של 27 מ"צ ולחות יחסית של 70% המקנים מקדם נוחות (THI) של 76.4. על פי תוצאות אלה ניתן להצביע על המגמות העיקריות הבאות:

- ספיקת האוויר גדלה ככול שטמפרטורת הסביבה ולחות הסביבה גדלים.
 - ספיקת האוויר גדלה בצורה אסימפטוטית בתנאים בהם האנטלפיה של האוויר הפנימי קרובה לזו של הסביבה ומעבר לכך לא ניתן לקיים את התנאים הרצויים.
 - ספיקת המים גדלה ככול שטמפרטורת סביבה גדלה בתנאים בהם הלחות היחסית של הסביבה נמוכה מזו של המבנה וקטנה ככול שטמפרטורת סביבה גדלה בתנאים בהם הלחות היחסית של הסביבה גבוהה מזו של המבנה.
 - ספיקת המים גדלה ככול שלחות היחסי של הסביבה גדולה עבור התנאים בהם טמפרטורת סביבה גדולה מזו שבמבנה, ספיקת המים במגמה הפוכה עבור התנאים בהם טמפרטורת סביבה קטנה מזו שבמבנה וכאשר הטמפרטורה הפנימית זהה לזו של הסביבה ספיקת המים לא מושפעת מהלחות היחסית.
- תוצאות אלה עשויות לשמש לאומדן הצריכה הרגעית או לצורכי תכנון על פי תנאי סביבה קיצוניים. לשם הדגמה, תנאים קיצוניים של ערבה מתאפיינים בטמפרטורה של כ-40 מ"צ ולחות יחסית של כ-20%. בתנאים אלה ספיקת האוויר הנדרשת עומדת על כ-50 ק"ג לשעה למ"ר (כ-10 החלפות) בלבד, וספיקת מים של כ-1000 גרם לשעה למ"ר. תוצאות אלה מחדדות את הצורך בהגבלת אוורור המבנה בהשוואה למבנים פתוחים הנהוגים כיום שבהם מספר ההחלפות גדול לאין ערוך.
- בדומה לכך ולצורך בחינת השפעת המשתנים השונים, חושבו ספיקות האוויר והמים כאשר אחד המשתנים שונה בהשוואה לתנאים שתוצאותיהן מתוארות באיור 7 ובהתאם לפרוט הבא:
- עבור שטף חום כולל של 50, 100, 200 ו-250 וואט למ"ר כמתואר באיורים 8, 9, 10 ו-11 בהתאמה. כצפוי, ספיקות אלה גדלות ככול ששטף החום גדל. חשוב להדגיש ששינוי בעומס החום אינו משתקף במקדם הנוחות ונותר כפי שהיה.
 - עבור טמפרטורה רצויה של 26 ו-28 מ"צ כמתואר באיורים 12, ו-13 בהתאמה. ספיקות אלה גדלות ככול שהטמפרטורה הרצויה קטנה ומקדם הנוחות משתפר.
 - עבור לחות יחסית רצויה של 60 ו-80% כמתואר באיורים 14, ו-15 בהתאמה. ספיקות אלה גדלות ככול שהלחות היחסית הרצויה גדלה ומקדם הנוחות משתפר.

בחינה מעשית

לצורך הדגמה נבחר יום מייצג מתאריך 22-7-2009, כמתואר באיור 16. על פי התוצאות נראה שטמפרטורת הפנים נמוכה בהשוואה לטמפרטורת חוץ בתחום שבין 4 ל-9 מ"צ. כצפוי, ההנחתה בטמפרטורת הפנים תלויה

במידה רבה במהירות ובכיוון הרוח (ראה איור 17). ככול שמהירות הרוח קטנה וככול שכיוון הרוח קרובה יותר להיות צפונית או דרומית (צדדים בהם הותקנו הווילונות) הפרש הטמפרטורות בין חוץ לפנים גדל. זאת, מהסיבה שהחלפות האוויר מצטמצמות וטיפות המים אינן נסחפות ישירות אל מחוץ למבנה אלא גורמות לצינון יעיל יותר של המבנה. מעבר לכך, בשל מיקומו של התא המאוורר (בגובה 2.2 כמתואר למעלה), הטמפרטורות בגובה הפרות ובקרבת הקרקע הינן נמוכות עוד יותר מאלה שנמדדו באמצעות התא הזה. משמעות הדברים היא שהתוצאות מהוות הוכחה נוספת לעבודה הקודמת [1], לצורך בפתרון המוצע, כמתואר למעלה והמהווה פתרון מלא הבעיה.

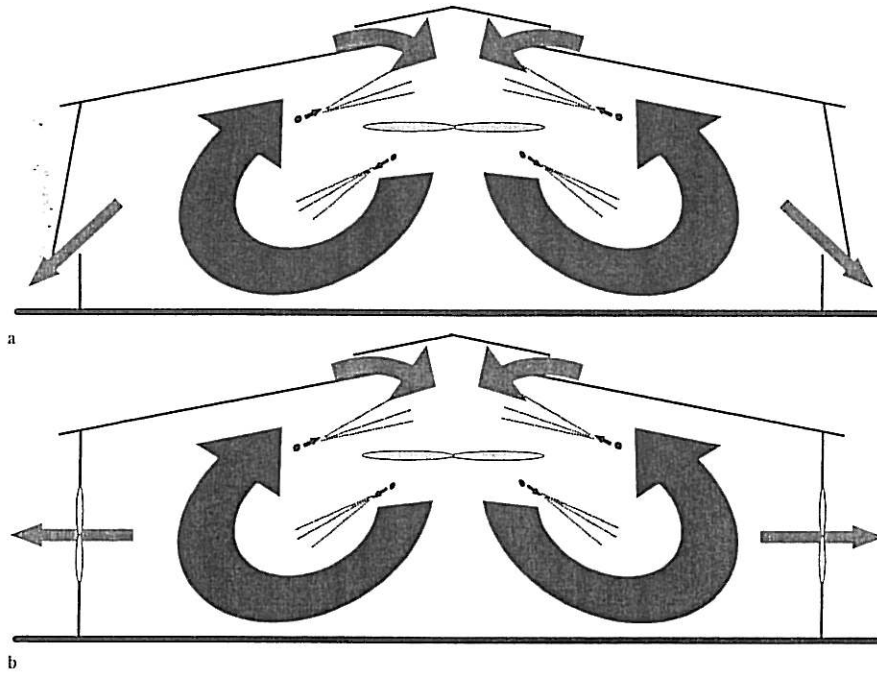
5. סיכום ומסקנות

השנה הראשונה של העבודה התמקדה באפיון תיאורטי של ספיקת האוורור וספיקת המים על פי מאזני אנרגיה ומסה, כתלות בתנאי סביבה (טמפרטורה ולחות יחסית), תנאי פנים (טמפרטורה ולחות יחסית) ובעומס החום. השנה השנייה התמקדה, בהתאם למגבלות התקציב, בהתאמת המבנה באופן חלקי ומעקב אחר התוצאות המעשיות. מתוך עבודה זו ניתן להצביע על המסקנות העיקריות הבאות:

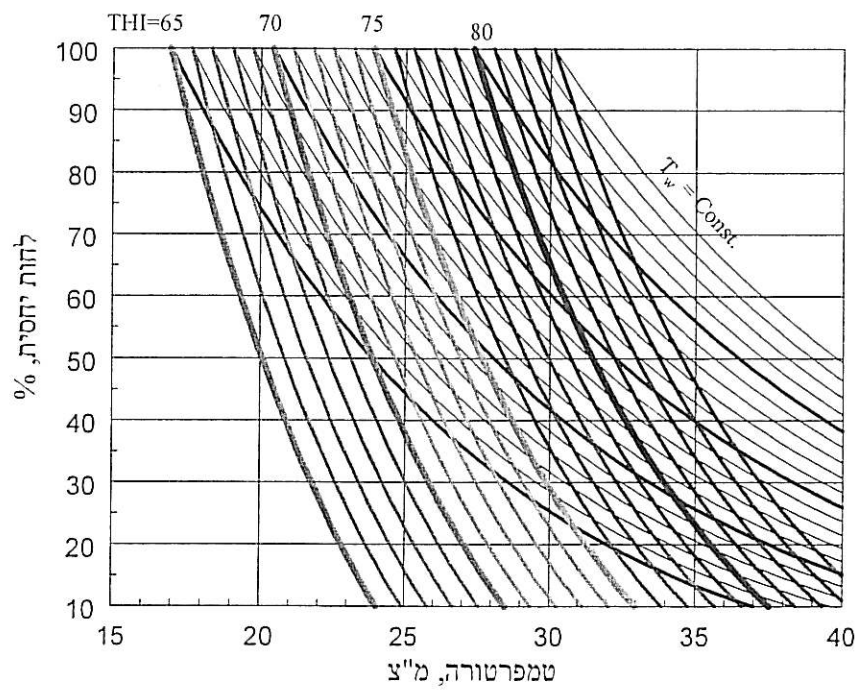
1. השיטה המוצעת עשויה להקנות טמפרטורת פנים נמוכה באופן ניכר בהשוואה לאוורור בלבד. תמורה זו הולכת וגדלה ככול שלחות הסביבה נמוכה יותר (12 מ"צ ומעבר לכך בתנאי הערבה).
2. הירידה בטמפרטורה מלווה בעלייה בלחות היחסית ועם זאת מקדם הנוחות משתפר באופן ניכר.
3. מקדם הנוחות הנהוג כיום אינו משקף את עומס החום (הכולל ושל הפרה בפרט) ומהירות האוויר שבקרבת הפרה.
4. עומס החום של מבנים לפרות חולבות בתחום 75 – 230 וואט למ"ר.
5. ספיקות האוויר והמים הנדרשות גדלות ככול שעומס החום גדל, ככול שהטמפרטורה והלחות היחסית של הסביבה גדלות, וככול שטמפרטורה ולחות יחסית רצויים (במבנה) נמוכים יותר.
6. בשיטה המוצעת, שטף האוורור המתבקש הינו נמוך מאוד בהשוואה לנהוג כיום.
7. כהמשך לעבודה זו, חשוב להתמקד בנושאים הבאים:
 - אפיון תרומת מערכת הסחרור על רמת הנוחות
 - בחינת הלכה למעשה רפתות על פי המתכונת המוצעת

רשימת ספרות

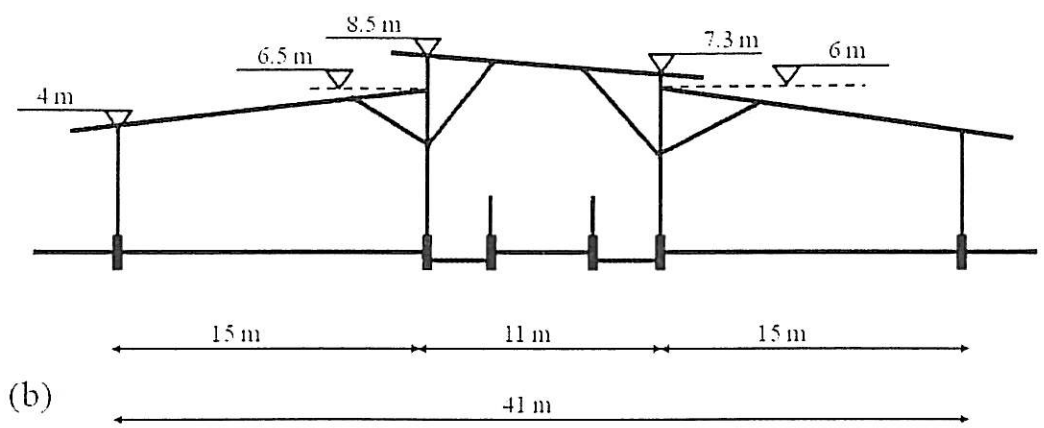
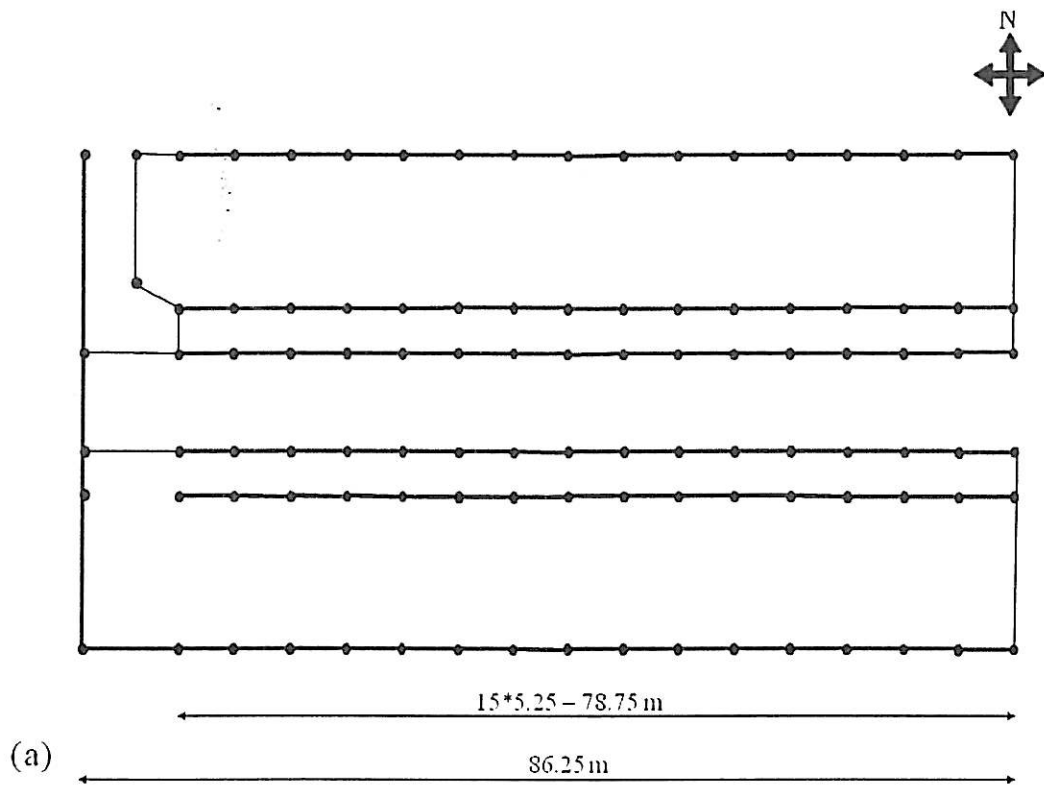
1. Arbel A., Barak M., Levi A. and Shklyar A. 2005. Fog system for cooling dairy barns. *Harefet Vehachalav, January:40-47(in Hebrew)*.



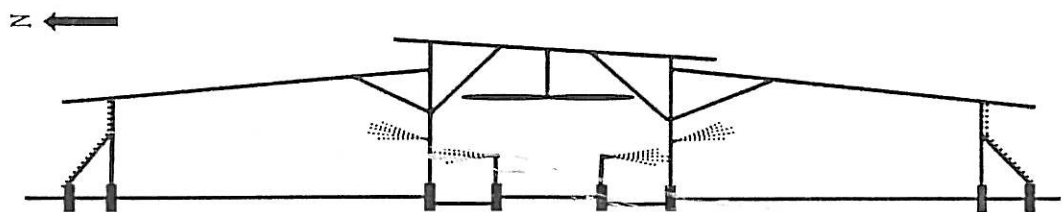
איור 1: תיאור סכמאטי של הרפת ומערכת הצינון המוצעת הכוללת את המערכת האוורור, סחרור וערפול, a – אוורור טבעי, b – אוורור מאולץ



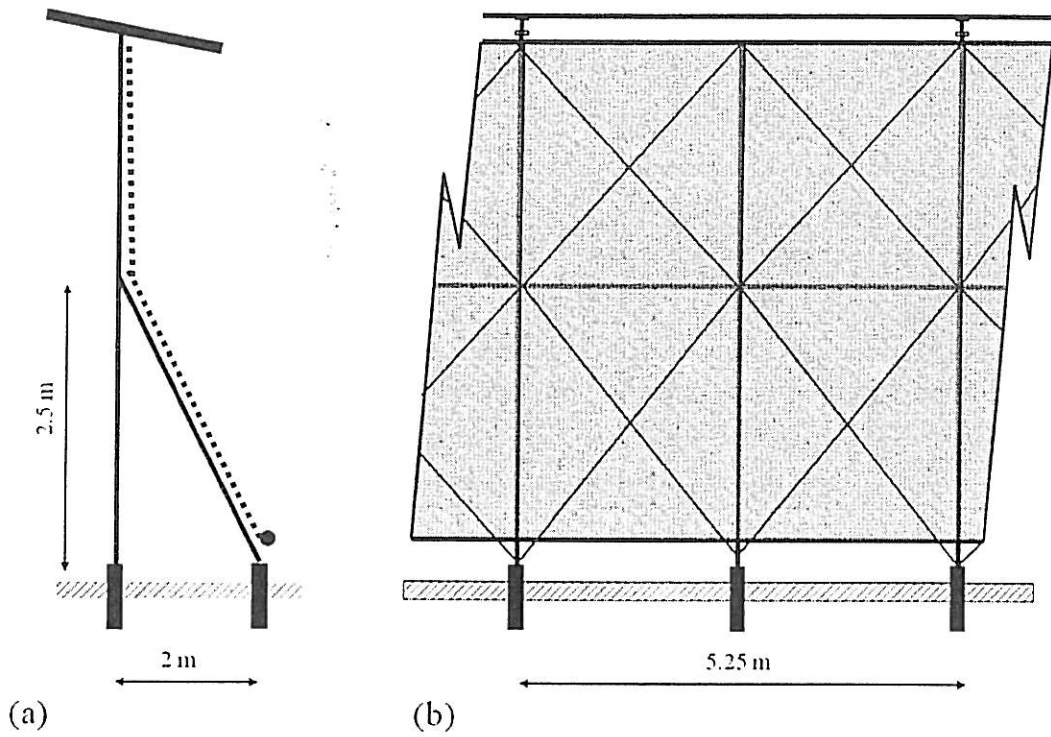
איור 2: מקדם נוהיות והשינויים העשויים להתקבל באמצעות צינון התנדפתי



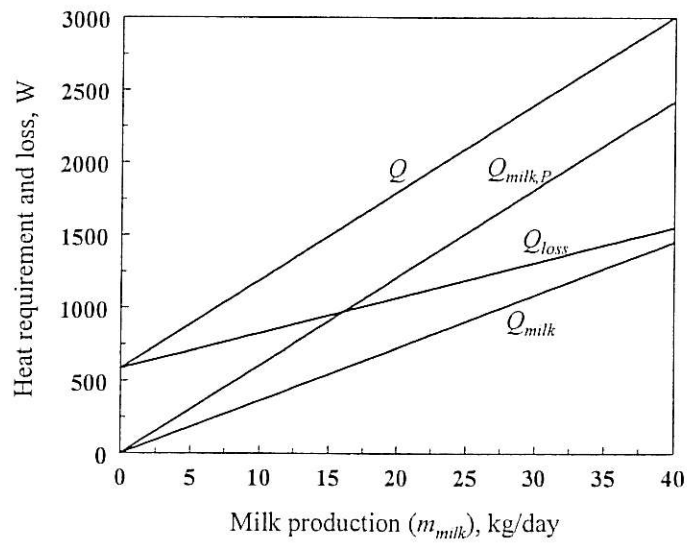
איור 3: תיאור סככת הרפת ומידותיה (a) מבט על (חתך) ו- (b) חתך צד



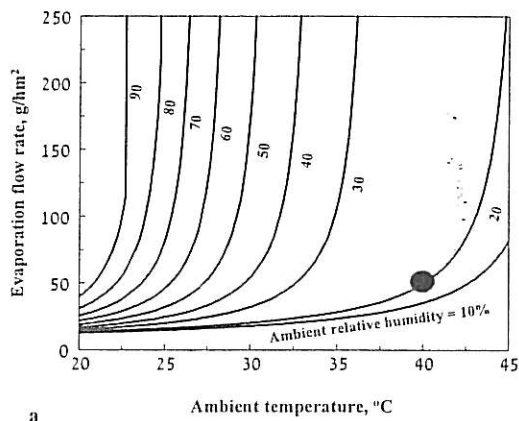
איור 4: תיאור סככת הרפת בתוספת מערכת הצינור הכוללת: מסחררים, מערכת ערפול ווילונות צד



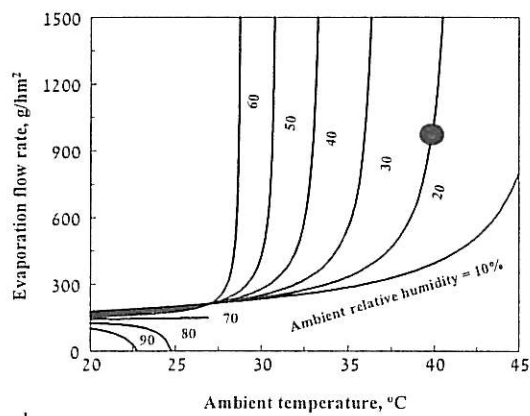
איור 5: תיאור סכמטי של מרפסות הצד ויילונות הצד (a) חתך צד ו- (b) מבט פנים



איור 6: מאזן אנרגטי של פרה חולבת כתלות בתנובת החלב.

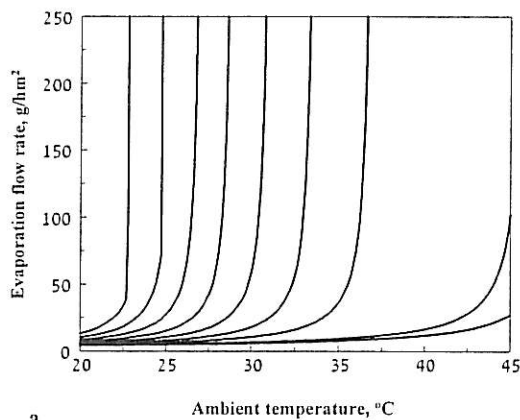


a

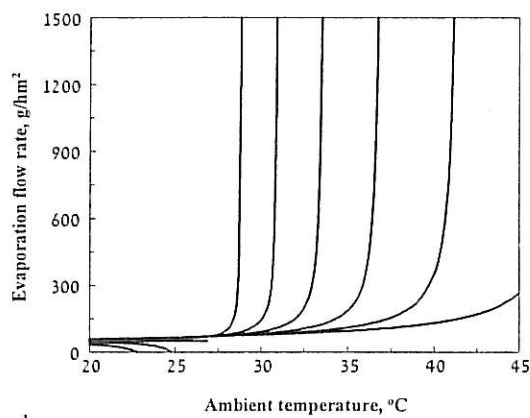


b

איור 7: a – ספיקת האוויר ו- b – ספיקת המים כתלות בטמפרטורה ולחות יחסית של הסביבה, בתנאים בהם: שטף חום כולל (q) של המבנה 150 וואט, טמפרטורה רצויה (T) במבנה 27 מ"צ ולחות יחסית רצויה (RH) של 70% ומקדם נוחות (THI) של 76.4

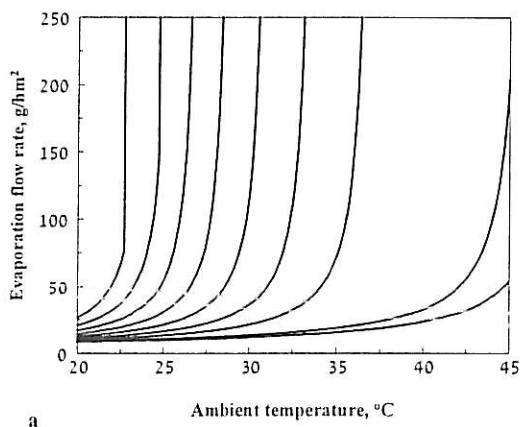


a

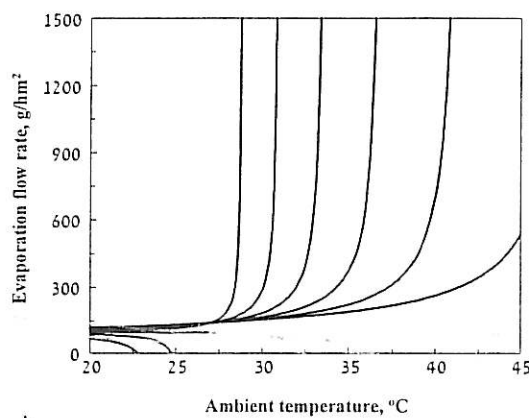


b

איור 8: a – ספיקת האוויר ו- b – ספיקת המים כתלות בטמפרטורה ולחות יחסית של הסביבה, בתנאים בהם: שטף חום כולל (q) של המבנה 50 וואט, טמפרטורה רצויה (T) במבנה 27 מ"צ ולחות יחסית רצויה (RH) של 70% ומקדם נוחות (THI) של 76.4

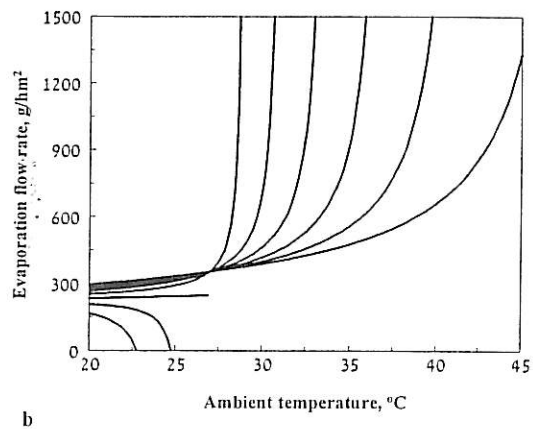
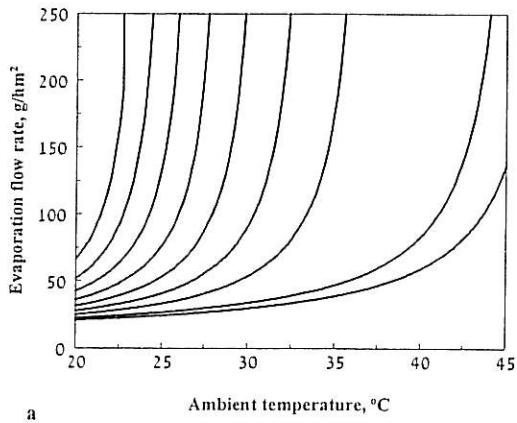


a

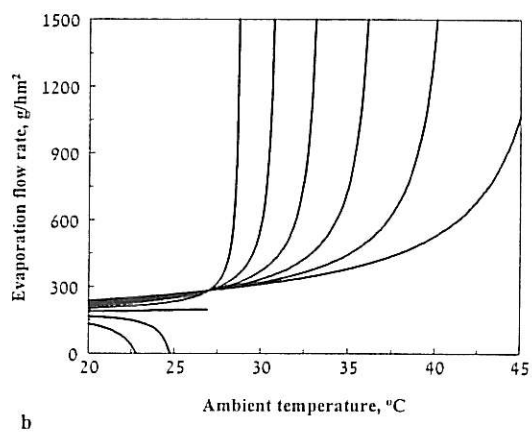
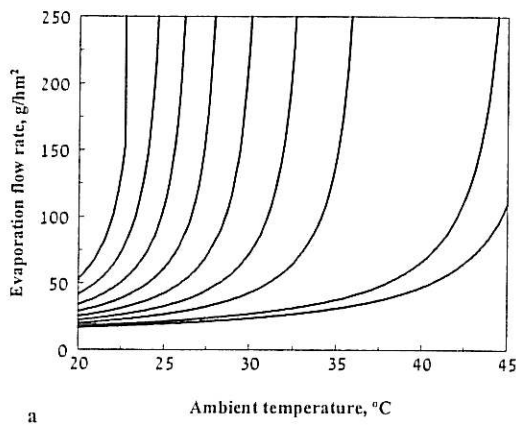


b

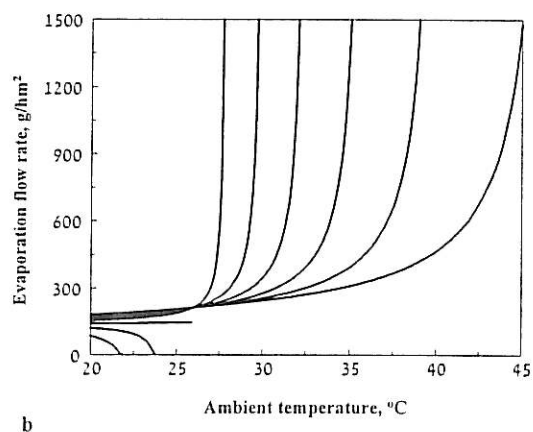
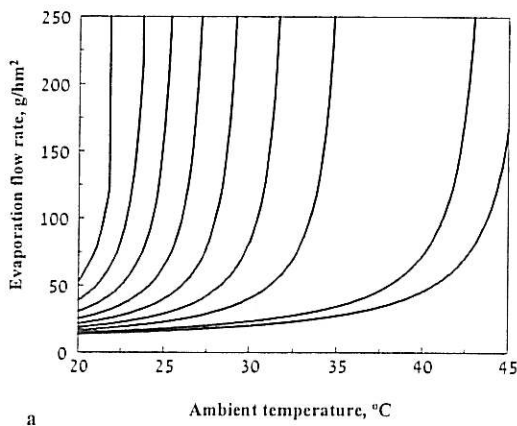
איור 9: a – ספיקת האוויר ו- b – ספיקת המים כתלות בטמפרטורה ולחות יחסית של הסביבה, בתנאים בהם: שטף חום כולל (q) של המבנה 100 וואט, טמפרטורה רצויה (T) במבנה 27 מ"צ ולחות יחסית רצויה (RH) של 70% ומקדם נוחות (THI) של 76.4



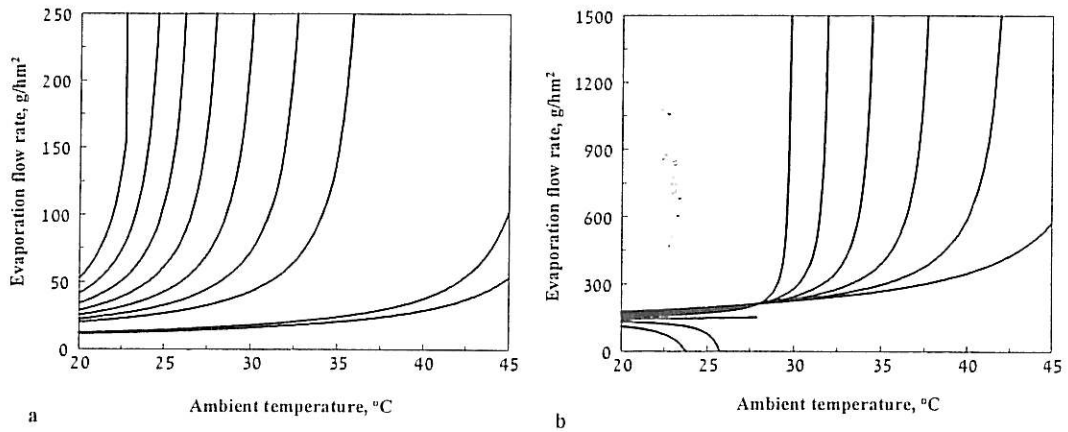
איור 10: a – ספיקת האוויר ו- b – ספיקת המים כתלות בטמפרטורה ולחות יחסית של הסביבה, בתנאים בהם: שטף חום כולל (q) של המבנה 200 וואט, טמפרטורה רצויה (T) במבנה 27 מ"צ ולחות יחסית רצויה (RH) של 70% ומקדם נוחות (THI) של 76.4



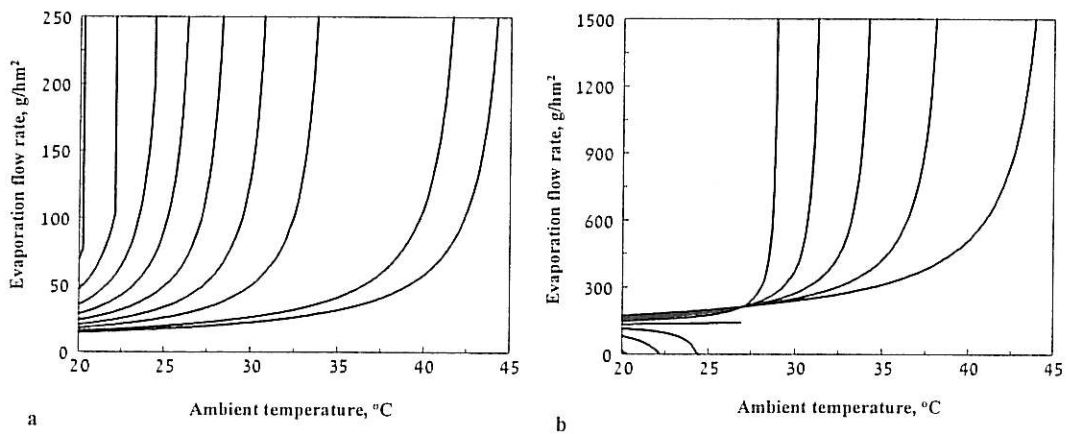
איור 11: a – ספיקת האוויר ו- b – ספיקת המים כתלות בטמפרטורה ולחות יחסית של הסביבה, בתנאים בהם: שטף חום כולל (q) של המבנה 250 וואט, טמפרטורה רצויה (T) במבנה 27 מ"צ ולחות יחסית רצויה (RH) של 70% ומקדם נוחות (THI) של 76.4



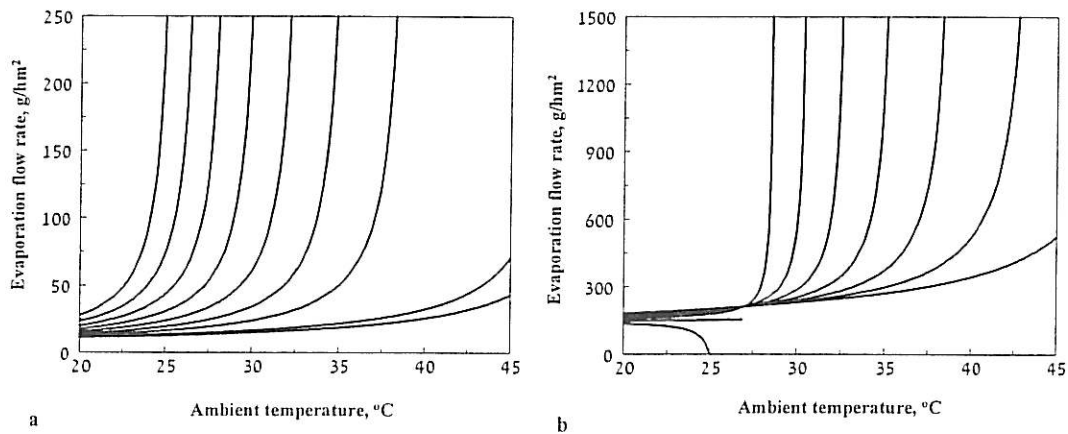
איור 12: a – ספיקת האוויר ו- b – ספיקת המים כתלות בטמפרטורה ולחות יחסית של הסביבה, בתנאים בהם: שטף חום כולל (q) של המבנה 150 וואט, טמפרטורה רצויה (T) במבנה 26 מ"צ ולחות יחסית רצויה (RH) של 70% ומקדם נוחות (THI) של 75.1



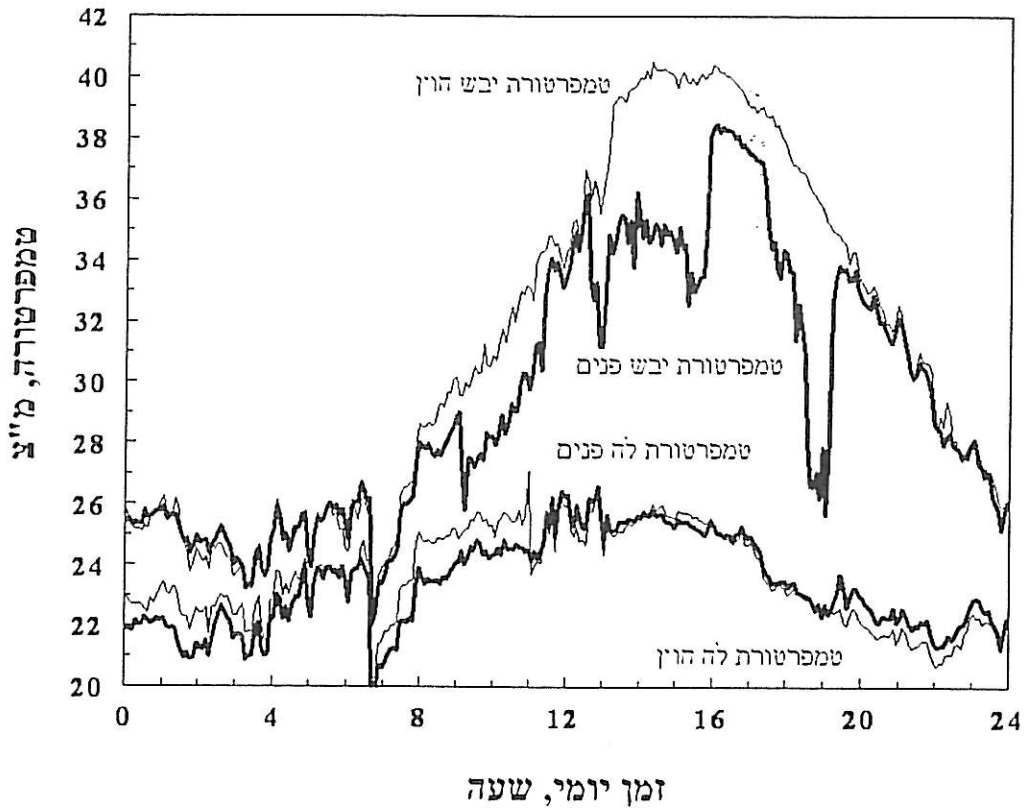
איור 13: a – ספיקת האוויר ו- b – ספיקת המים כתלות בטמפרטורה ולחות יחסית של הסביבה, בתנאים בהם: שטף חום כולל (q) של המבנה 150 וואט, טמפרטורה רצויה (T) במבנה 28 מ"צ ולחות יחסית רצויה (RH) של 70% ומקדם נוחות (THI) של 77.8



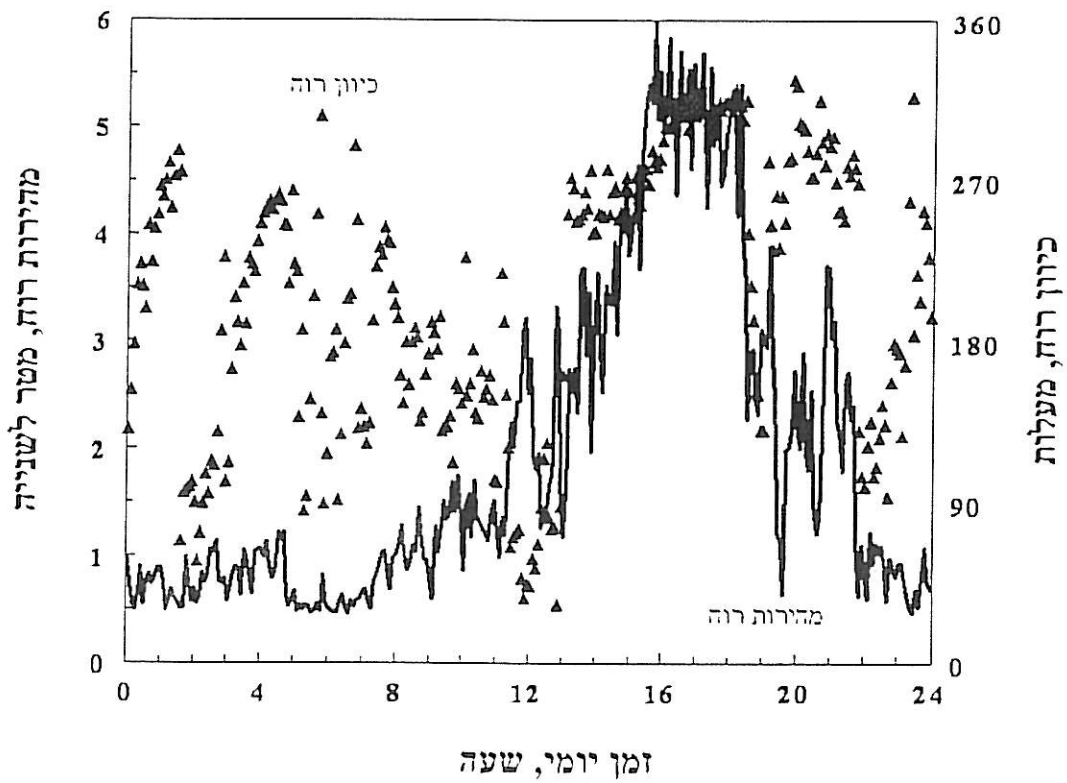
איור 14: a – ספיקת האוויר ו- b – ספיקת המים כתלות בטמפרטורה ולחות יחסית של הסביבה, בתנאים בהם: שטף חום כולל (q) של המבנה 150 וואט, טמפרטורה רצויה (T) במבנה 27 מ"צ ולחות יחסית רצויה (RH) של 60% ומקדם נוחות (THI) של 75.3



איור 15: a – ספיקת האוויר ו- b – ספיקת המים כתלות בטמפרטורה ולחות יחסית של הסביבה, בתנאים בהם: שטף חום כולל (q) של המבנה 150 וואט, טמפרטורה רצויה (T) במבנה 27 מ"צ ולחות יחסית רצויה (RH) של 80% ומקדם נוחות (THI) של 77.5



איור 16: מהלך יומי של טמפרטורות יבש ולח, בתוך הסככה ומחוצה לה.



איור 17: מהלך יומי של מהירות וכיוון הרוח.