

פיתוח מד שטפי חום (משח"מ) ושילובו במערכת בקרת אקלים למבני משק החי

Development of heat fluxes sensor and its integration in the climate control systems for livestock housing

מוגש לקרן מדען ראשי משרד החקלאות

ע"י

| | |
|--|----------------|
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | אברהם ארבל |
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | אפרים מליץ |
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | אלכסנדר שקליאר |
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | מרדכי ברק |
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | גיא לידור |
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | אשר לוי |
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | יוסף גרינשפון |
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | לביא רוזנפלד |
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | אהרון אנטלר |

A. Arbel, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: arbel@agri.gov.il

E. Maltz, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: emaltz@volcani.agri.gov.il

A. Shklyar, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: shklyar@agri.gov.il

M. Barak, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: barak@agri.gov.il

G. Lidor, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: lidor@volcani.agri.gov.il

A. Levi, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: asherl@volcani.agri.gov.il

Y. Grinshpon, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: yosephg@volcani.agri.gov.il

L. Rozenfeld, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan.

A. Antler, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: antler@volcani.agri.gov.il

אוקטובר 2011

חשון תשע"ב

הממצאים בדו"ח זה הנם תוצאות ניסויים ואינם מהווים המלצות לחקלאים

תקציר

הצגת הבעיה – מרבית מערכות הבקרה הנהוגות כיום ממוחשבות ומתבססות על הפעלת מערכות השליטה בהתאם לספים שנקבעו מראש. הווה אומר, הפעלה בדומה להפעלה תרמו סטטית ויומי סטטית והמחשב אינו מנוצל לבקרה מתקדמת יותר. גישה זו גורמת לסטייה ניכרת בתנאי הגידול בהשוואה לרצוי ואינה מאפשרת מיצוי יכולת מערכות השליטה הקיימות ממילא.

מהלך ושיטות עבודה – במהלך השנה הראשונה נבחן המשח"מ ונראה שעל אף התוצאות המעודדות שהתקבלו, הסטיות המתקבלות עלולות להיות גדולות ובלתי נסבלות. תוצאה זו הינה תולדה של שני גורמים: הרגישות המובנית של השיטה המוצעת לסטיות במדידה ולכך שאין בידנו מערכת תקנית העשויה לשמש לכיול. לאור זאת ולצורך זה, בשנה השנייה הוחלט לפתח גישה נוספת המבוססת על מדידת טמפרטורת גוף שחור. העבודה בשנים השנייה והשלישית יועדה לבחינת רמת הדיוק הנחוצה של מערכת המדידות החלופית והתקנת מערכת ניסיונית לאפיון רמת הדיוק המתקבלת בפועל.

תוצאות עיקריות – רמות הדיוק המתקבלות עומדות על כ- ± 2 מ"צ בהערכת טמפרטורת הסביבה האקוויוולנטית, ± 50 וואט בהערכת שטף החום הקרינתי במהלך שעות הלילה ו- ± 100 וואט בהערכת שטף החום הקרינתי במהלך שעות היום. בהתחשב בכך שרמת הדיוק במדידת טמפרטורת הכדורים השחורים עומדת על ± 0.5 מ"צ (כמצוין למעלה), ניתן להצביע על כך שתוצאות אלה תואמות את התוצאות התיאורטיות. בהתחשב ששטף החום הכולל מפני פרה חולבת (נטו) 1000 עד 1500 וואט, רמת הדיוק המתקבלת הינה סבירה ועומדת על אחוזים בודדים. מסקנות והמלצות – שתי הגישות משלימות זו את זו ועשויות לשמש לצורכי בקרה. יחד עם זאת, הגישה המקורית מוגבלת לבעלי חיים קטנים ואילו הגישה החלופית מחייבת אומדן של טמפרטורת פני בעל החיים.

פרסומים מדעיים שנבעו מביצוע המחקר: אין בשלב זה.

מבוא ותאור הבעיה

תנאי הגידול הם המפתח לייצור אופטימאלי ורווחת בעלי החיים 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 מבני משק החי בארץ (רפתות, לולים ואחרים) מבוססים על אוורור טבעי לסילוק עודפי חום ולחות, לייבוש הרפד ולהקטנת ריכוזי הגזים הרעילים. בנוסף לכך, ובמגמה להקטין את עומס החום בחודשי הקיץ, נהוגות היום בארץ מגוון של שיטות צינון הכוללות בין היתר הרטבה, אוורור ממוקד ושילובים ביניהם. במרבית המקרים, מערכות אלה מבוקרות על פי מספר משתנים מועט כגון טמפרטורה ולחות של האוויר, או שילוב שלהם המגדיר רמת נוחיות (THI – Temperature Humidity Index), ללא התחשבות בפרמטרים נוספים כגון מהירות האוויר, שטף החום הישיר של בעל החיים (הנדרש בפועל), ואחרים. משמעות הדברים היא שבשל חוסר המידע וכתוצאה מהפעלת מערכות השליטה השונות, עלולים להתקיים תנאים שאינם מספקים ו/או בזבוז משאבים מיותר.

שטף החום הישיר של בעלי החיים, הנדרש בפועל והעשוי להיות מוגדר כאופטימאלי, מושפע משיקולים כלכליים ורווחת בע"ח. שטף חום זה, ניתן לאפיון בתנאי מעבדה. נתונים אלה מצויים בספרות בעיקר עבור בני אדם ומרבית

חיות המשק. משנקבע נתון זה, מערכות השליטה ובקרת האקלים אמורות לקיים תנאים שיאפשרו את מימושו. חום זה נפלט באמצעות מערכת הנשימה ומהמעטפת (בהסעה ובקרינה). תנאים אופטימאליים ניתנים להגדרה בין היתר על ידי מאפיינים פיסולוגיים, כגון באמצעות קצב נשימה וטמפרטורת גוף סדירים ורצויים. בתנאים אלה, שטף החום הנובע מהנשימה ניתן להגדרה, ובכך לבודד את שטף החום מהמעטפת המאופיין על ידי הפתרון המוצע (ראה להלן).

כיום, על מנת לאמוד את שטף החום הישיר מהמעטפת של בעל החיים הנפלט בתנאים מעשיים, יש צורך במדידת פרמטרים רבים כגון: טמפרטורת ולחץ האדים של מעטפת הגוף, טמפרטורת ולחץ האדים של אוויר הסביבה, מהירות האוויר, טמפרטורות הרקיע, הקרקע והמחיצות, קרינה ישירה, תכונות מעטפת הגוף ואחרים.

רקע תיאורטי ומעשי

בעלי חיים הינם יצרני חם כאשר שטף החם הנוצר הנו בתלות בסוג בעל החיים (עופות, יונקים, זוחלים), מידת פעילותו הגופנית (מנוחה, תנועה) והיצרנות (הנבה, הטלה, גדילה). לגבי חיות משק, שטף החם מוכתב מייעודן הכלכלי (כדוגמא - פרות בשר, פרות חלב, הרות) ורמת היצרנות (כדוגמא גיל, משקל, תנובת חלב, מצבי עקה). שטף החם נפלט לסביבה בעיקר ממעטפת הגוף בנוסף למערכת הנשימה. פליטת החם עשויה להתקבל ממספר תהליכים המתחוללים בעת ובעונה אחת שהעיקריים בהם:

1. מערכת הנשימה - על ידי העברת חם מוחש וכמוס בעת ובעונה אחת לאוויר.
 2. בהסעה והולכה לאוויר הסביבה - הסעת חם מוחש וכמוס ממעטפת הגוף לאוויר הסביבה. תהליכים התלויים בעיקר במהירות האוויר, ובהפרשי טמפרטורת ולחץ האדים בין המעטפת לאוויר שבסביבה.
 3. בקרינה - בעיקר לרקיע, קרקע ומחיצות כתוצאה מהפרשי טמפרטורה.
- שטף חם נוסף עשוי לנבוע ממקורות חיצוניים כגון קרינת השמש. בעלי חיים ככלל, עשויים לווסט את שטף החם הנפלט באמצעות תהליכים פיזיולוגיים: הזעה, הגברת תדירות נשימה (הלחתה), והתנהגותיים סיבולת לעלייה בטמפרטורת הגוף, צמצום או הגברת פעילות, שינוי מיקום ואחרים. שימוש באמצעים אלה, מעיד על תנאי עקה ברמות שונות.

במגמה להימנע מתנאי מעקה [1 - 3] ומשיקולי רווחת בע"ח, קיימת השקעה רבה במבנים ובמערכות בקרת אקלים. במרבית המקרים, מערכות אלה מבוקרות על פי מספר משתנים מועט כגון טמפרטורה ולחות של האוויר, או מקדמי נוחיות [4 - 9] למיניהם (כגון THI - Temperature Humidity Index), המהווים שילוב שלהם וללא התחשבות בפרמטרים נוספים כגון מהירות האוויר, שטף החם הישיר של בעל החיים - הנדרש בפועל, ואחרים. שטף החם הישיר של בעלי החיים - הנדרש בפועל, עשוי להיות מוגדר כאופטימאלי, מושפע משיקולים כלכליים ורווחת בע"ח. שטף חם זה ניתן לאפיון בתנאי מעבדה. נתונים אלה מצויים בספרות בעיקר עבור בני אדם ומרבית חיות המשק. משנקבע נתון זה, מערכות בקרת אקלים אמורות לקיים תנאים שיאפשרו את מימושו. כמתואר למעלה, חם זה נפלט באמצעות מערכת הנשימה ומהמעטפת (בהסעה ובקרינה). תנאים אופטימאליים ניתנים להגדרה בין היתר, באמצעות קצב נשימה וטמפרטורת גוף סדירים ורצויים.

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). מאחר ועודפי החום נמסרים לסביבה בחלקם באמצעות נידף מים, יש לערוך מאזן באשר לשטפי המים של בעל החיים. לשם הדגמה, הדיון בהמשך מתמקד בפרות חולבות אלא אם יצוין אחרת. השטף האנרגטי הנוצר בגוף בעל החיים (Q) הנו בהתאם לצריכת המזון, הרכב המזון ויעילות ההמרה המתקבל מתוך:

$$(1) \quad Q = m_f C_f \eta_f$$

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:

$$(2) \quad Q = Q_{main,P} + Q_{milk,P} + Q_{we,P}$$

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:

$$(3) \quad Q_{main,P} = \frac{Q_{main}}{\eta_{main,P}}$$

אנרגיה זו אינה תורמת ליצירת משקל או חלב אלא לקיום עצמי ולכן היא נפלטת לסביבה כחום בסופו של דבר. לגבי בקר נהוג לחשב מתוך [10]:

$$(4) \quad Q_{main,P} = 5.3W^{0.75}$$

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

$$(5) \quad Q_{milk} = m_{milk} C_{milk}$$

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:

$$(6) \quad Q_{milk,P} = \frac{Q_{milk}}{\eta_{milk,P}}$$

צריכת האנרגיה לתוספת (או גריעה) במשקל מתקבלת מתוך:

$$(7) \quad Q_{we} = m_{we} C_{we}$$

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 (3), על מנת לספק את האנרגיה לגדילה (Q_{we}), יש צורך בהשקעת אנרגיה ($Q_{we,P}$) מוגברת בהתאם ליעילות תהליך הגדילה ($\eta_{w,P}$) ומתקבל מתוך:

$$(8) \quad Q_{we,P} = \frac{Q_{we}}{\eta_{w,P}}$$

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

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

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

עודפי החום (Q_{loss}) נפלטים בעיקר באמצעות מערכת הנשימה (Q_{Br}) ודרך מעטפת הפרה (Q_{SK}):

$$(11) \quad Q_{loss} = Q_{Br} + Q_{Su}$$

פליטת החום באמצעות מערכת הנשימה מתאפיינת בכך שהאוויר הנפלט בתנאי רוויה ובטמפרטורת גוף הפרה וניתן לחישוב מתוך:

$$(12) \quad Q_{Br} = m_{a,Br} (h_{Sat} - h_{am})$$

כאשר: $m_{a,Br}$ – ספיקת האוויר בנשימה ליחידת זמן, h_{Sat} – האנטלפיה של האוויר הנפלט אשר בתנאי רוויה ובטמפרטורת הגוף (T_B) ו- h_{am} – האנטלפיה של האוויר שבקרבת הפרה. תכונות האוויר ככלל והאנטלפיה בפרט ניתנים לאפיון באמצעות טבלאות או עקומות פסיכרוטריות או באמצעות חישוב מתאים [11 - 13]. תהליך זה מלווה בפליטת חום מוחש וכמוס ובהתאם לכך ספיקת המים המתאדה המתקבלת מתוך:

$$(13) \quad m_{w,Br} = m_{a,Br} (w_{Sat} - w_{am})$$

כאשר: w_{Sat} – יחס הערבוב של האוויר הנפלט ו- w_{am} – יחס הערבוב של האוויר שבקרבת הפרה. כמצוין, בתנאי עקה הפרה מגבירה את קצב הנשימה, הקרויה הלחתה. ההלחתה כרוכה בהפסקת העלאת הגירה ועמה צמצום צריכת המזון. יתרת הפסדי החום נפלטים מבעד למעטפת הפרה (Q_{Su}) לסביבה. מעטפת זו נתונה להשפעות סביבתיות כגון מהירות האוויר, טמפרטורה ולחות האוויר וקרינה קצרת וארוכת גל בעת ובעונה אחת.

מתוך ניתוח תיאורטי מעמיק [14 - 16], ניתן להראות שבמרבית התנאים המעשיים ששטפי החם בקרינה (Q_r) ובהסעה (Q_c) הנובעים ממעטפת גוף בצורת כדור והנתון בטמפרטורה רצויה, מתקבל בהתאמה מתוך המשוואות:

$$(14) \quad Q_r = aD^2$$

$$(15) \quad Q_c = bD^{1.6}$$

כאשר: D – קוטר הכדור, a ו- b – מקדמים המשתנים בהתאם לתנאי הסביבה, טמפרטורת המעטפת תכונות המעטפת וכדומה. בהתאם לכך, שטפי החום ליחידת שטח (q) הממוצעים מתקבלים מתוך:

$$(16) \quad q_r = \frac{a}{\pi}$$

$$(17) \quad q_c = \frac{b}{\pi} D^{-0.4}$$

גישה זו טומנת בחובה את האפשרות לאפיון רמת האחידות של שטפי החום בהתחשב ובהתאם לחלוקה משנית של הגוף הנמדד. הדיון בהמשך נסב בשטפי החום הכוללים של הגוף הנמדד מטעמי הדגמה בלבד. כמוכן, שטף החם הכולל (Q_{Su}) ממעטפת הכדור הינו סכום של השניים ומתקבל מתוך:

$$(18) \quad Q_{SU} = aD^2 + bD^{1.6}$$

משמעות הדברים היא שבכל רגע נתון, המקדמים a ו- b הינם בבחינת נעלמים. הצעה זו מבוססת על כך שלצורך אפיון שני נעלמים אלה מוצע להתקין שני כדורי מדידה בעלי קטרים שונים ופרט לכך זהים בתכונותיהם. שני כדורים אלה מחוממים באופן מבוקר (כמתואר למעלה) ובעת ובעונה אחת, לטמפרטורה זהה ובאותם תנאי הסביבה. בתנאים אלה, שני המקדמים האלה (a ו- b) זהים לשני הכדורים (1 ו-2) ועשויים להתקבל מתוך שתי המשוואות הליניאריות הבאות:

$$(19) \quad Q_{Su,1} = aD_1^2 + bD_1^{1.6}$$

$$(20) \quad Q_{Su,2} = aD_2^2 + bD_2^{1.6}$$

כאשר $Q_{Su,1}$ ו- $Q_{Su,2}$ הינם נמדדים ומשתנים באופן רגעי, ומבוקרים תוך כדי שמירה על הטמפרטורה הרצויה. מכאן, קצרה הדרך לחישוב שטפי החם הרגעיים בקרינה, בהסעה והכוללת עבור כל כדור ובלבד שיהיה בעל תכונות מעטפת, טמפרטורה ותנאי סביבה זהים. הווה אומר, לצורך אפיון שטפי חם של גוף בצורת כדור בקוטר נתון (D_b), שטפי החם בקרינה (Q_{rb}), בהסעה (Q_{cb}) והכוללת ($Q_{Su,b}$) מתקבלים בהתאמה מתוך:

$$(21) \quad Q_{rb} = aD_b^2$$

$$(22) \quad Q_{cb} = bD_b^{1.6}$$

$$(23) \quad Q_{Su,b} = aD_b^2 + bD_b^{1.6}$$

משמעות הדברים, בשיטה זו ניתן לאפיין את שטף החם בקרינה, בהסעה והכוללת של כדור בקוטר כל שהוא. **תיאור השיטה המוצעת** – מד שטף חם (משח"מ) הנו מתקן/רגש הדמיה לאפיון שטפי החם בקרינה, בהסעה וסכומם, מהמעטפת של גוף כל שהוא (בעלי חיים או גופים אחרים) עם סביבתם, באופן רציף וישיר ובתנאים מעשיים. המתקן כולל שני גופים המפיקים חם באופן מבוקר (כגון באמצעות אנרגיה חשמלית) ומדי טמפרטורה. לצורך אפיון שטפי החם, התהליך נמדד ומתבצע באופן מבוקר ובכפוף לתנאים הבאים:

1. משטר הפקת האנרגיה בטמפרטורה קבועה או שטף חום קבוע (או שווה ערך לו – כמתואר בהמשך).
2. המשח"מ עשוי להיות בצורת כדור, גליל או כל תצורה אחרת שתשמש להדמיית הגוף הנדון (בעל חי ייחודי או כל גוף אחר).
3. המשח"מ עשוי להיות מחומרים שונים שיאפשרו הדמיה טובה ככול האפשר לגוף הייחודי.
4. המשח"מ ימוקם וייחשף לתנאים מעשיים בהם נתון הגוף הנדון כגון: רטוב או יבש, חשוף לקרינת השמש ואחרים.

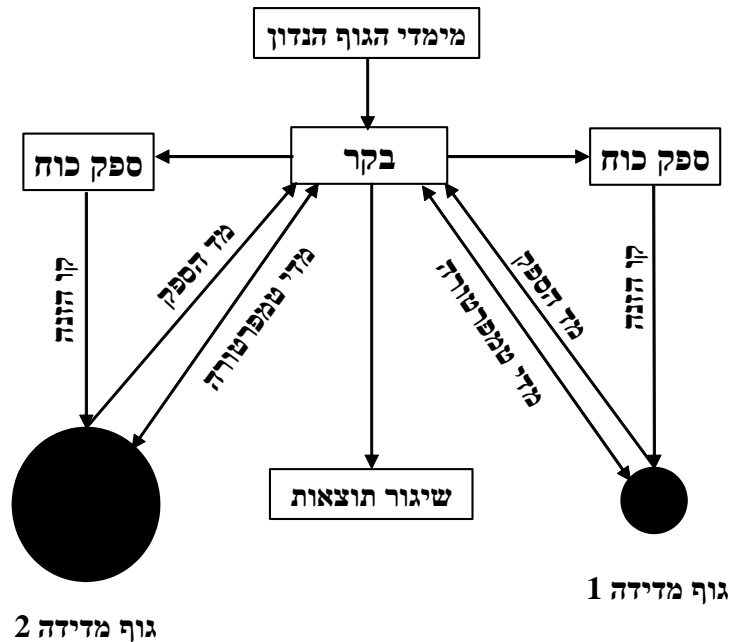
המתקן/רגש הדמיה המוצע מתואר באופן סכמתי באיור 1 וכולל את המרכיבים הבאים:

גופי מדידה – שני גופי מדידה (שני כדורים במקרה זה) השונים בגודלם ובממדים ידועים. פני הגופים האלה מחוממים באופן אחיד, על ידי אנרגיה חשמלית שמקורה בשני ספקי כוח ובאמצעות נגדים מתאימים.

ספקי כוח – שני ספקי כוח לחימום שני גופי המדידה (ספק לכל גוף) הנשלטים על ידי הבקר המתוכנת.

חיישני טמפרטורה – מספר מדי טמפרטורה הפזורים על מעטפת גופי המדידה המשמשים למדידת טמפרטורות ממוצעות של פני הגופים.

מדי הספק – שני מדי הספק למדידת ההספק החשמלי של שני גופי המדידה. לחילופין, מד מתח ומד זרם לכל גוף מדידה (לחישוב הספקי הגופים).



איור 1: תיאור סכמאתי של מד שטפי חום ממעטפת

בקר מתוכנת – בקר מתוכנת השולט על שני ספקי הכוח לוויסות שטף החימום של שני גופי החימום בהתאם למשטר החימום הרצוי (בטמפרטורה קבועה או שטף חום קבוע). במקביל לכך וכמשוב לתהליך הבקרה, הבקר קורא את חיישני הטמפרטורה (ומחשב את הטמפרטורה הממוצעת) ומדי ההספק. בהתאם לטמפרטורות הממוצעות מווסטים הספקי החשמל המסופקים לשני הגופים. כמתואר באיור 1, הבקר מוזן במימדי הגוף הנדון ובהתאם לשטפי החום של שני גופי המדידה מחושבים (כמתואר בהמשך) ומשוגרים התוצאות הבאות: טמפרטורת פני המעטפת ושטפי החום בקרינה, הסעה וסכומם. כמצוין למעלה, המתקן ניתן להפעלה בשני משטרים על פי הפרוט הבא:

בטמפרטורה קבועה – טמפרטורת פני המעטפת ידועה ומשמשת כיעד להשגה בתהליך בקרת חימום גופי המדידה. לאחר שיעד זה הושג בפועל (לגבי גופי המדידה), מחושבים שטפי החום בקרינה, בהסעה וסכומם של הגוף הנדון. **בשטף חום קבוע** – שטף החום הכולל של הגוף הנדון (בקרינה ובהסעה) ידוע ומשמש כיעד להשגה בתהליך בקרת חימום גופי המדידה. יעד זה מתקבל מתוך הפעלת המשטר הקודם (בטמפרטורה קבועה) ותוך כדי שינוי הדרגתי ומבוקר של טמפרטורת פני המעטפת. לאחר שיעד זה הושג בפועל, הטמפרטורה המשותפת לשני גופי המדידה הינה משותפת גם לגוף הנדון (המהווה טמפרטורת הסגנוציה בשף החום הנתון) ומכאן מחושבים גם שטפי החום בקרינה ובהסעה של הגוף הנדון.

לאור התוצאות שהתקבלו בשנה הראשונה של העבודה, בשנה השנייה הוחלט לפתח גישה נוספת המבוססת על מדידת טמפרטורת גוף שחור. גישה זו מבוססת על מערכת מדידות הכוללת: טמפרטורה ולחות של האוויר (בדומה למשח"מ), מדידת מהירות האוויר וטמפרטורת כדור שחור. הווה אומר שמדידת מהירות האוויר וטמפרטורת כדור

שחור מהווים תחליף לגופי המשח"מ. בדומה לגופי המשח"מ, מוצע שכגוף שחור ישמש ככדור בעל מסה אנרגטית נמוכה ככול האפשר. מתוך הנחה שהמסה האנרגטית של הגוף שחור זניחה, שטף החום הכולל (Q_B) מתאפס בכל רגע נתון, ומתקבל מתוך:

$$(24) \quad Q_B = 0 = Q_{Bc} + Q_{Br}$$

כאשר: Q_{Bc} – שטף חום בהסעה לסביבה ו- Q_{Br} – שטף חום בקרינה לסביבה. שטף החום בהסעה ממתקבל מתוך:

$$(25) \quad Q_{Bc} = \pi D_B^2 h (T_B - T_a)$$

כאשר: D_B – קוטר הכדור המשמש כגוף שחור, T_B – טמפרטורת הכדור, T_a – טמפרטורת האוויר ו- h – מקדם מעבר החום בהסעה. מקדם מעבר החום בהסעה מתקבל מתוך:

$$(26) \quad h = \frac{Nu K_a}{D_B}$$

כאשר: K_a – מקדם מעבר חום בהולכה של האוויר ו- Nu – מספר נוסלט. מספר נוסלט מחושב על ידי:

$$(27) \quad \begin{aligned} Nu &= 0.37 Re^{0.6} Pr_a^{1/3} & 20 \leq Re \leq 150000 \\ Nu &= 2 + 0.37 Re^{0.6} Pr_a^{1/3} & Re < 20 \end{aligned}$$

כאשר: Pr_a – מספר פרנטל של האוויר ו- Re – מספר ריינולדס. מספר ריינולדס מחושב על ידי:

$$(28) \quad Re = \frac{V_a D_B \rho_a}{\mu_B}$$

כאשר: V_a – מהירות האוויר, ρ_a – צפיפות האוויר, μ_a – צמיגות האוויר. שטף החום בקרינה של הכדור השחור מתקבל מתוך:

$$(29) \quad Q_{Br} = \pi D_B^2 \varepsilon_B \sigma (T_B^4 - T_{Su}^4)$$

כאשר: ε_B – אמסיביות (מקדם הפליטה/בליעה הקרינתית) של הכדור השחור, σ – מקדם סטפן-בולטצמן ו- T_{Su} – הטמפרטורה האקוויוולנטית של הסביבה.

משמעות הדברים היא שבנוסף למדידת טמפרטורה ולחות של האוויר וכתחליף לשני כדורי המשח"מ יש צורך במדידת מהירות האוויר וטמפרטורת כדור השחור (הבלתי מחומם). בהתאם לכך ועל פי משוואות אלה ניתן לחשב את טמפרטורת הסביבה האקוויוולנטית.

להבדיל מהכדור השחור, מעבר חום הכולל מבעד למעטפת של בעל החיים מועבר תחילה בעיקר בהולכה מבעד הפרווה. בתנאים אלה, ניתן לחשב את שטפי החום ממעטפת בעל החיים בתהליך ניסוי וטעייה ועל פי המתכונת הבאה: תחילה מניחים טמפרטורת מעטפת (פרווה חיצונית) ושטף החום הכולל המועבר בעיקר בהולכה ומתקבל מתוך:

$$(30) \quad Q_{Sf}^1 = \pi D_A^2 \frac{K_F}{L_F} (T_A - T_{Sf})$$

כאשר: T_{Sf} – טמפרטורת המעטפת על פני הפרווה, T_A – טמפרטורת בעל החיים, K_F – מקדם מעבר חום בהולכה של הפרווה, L_F – עובי הפרווה ו- D_A – קוטר בעל החיים האקוויוולנטי של בעל החיים.

בשלב שני ובדומה לכדור השחור, מחושבים שטפי חום בהסעה (Q_{Sfc}) ובקרינה (Q_{Sfr}), בדומה למשוואות 25 ו-29, עבור בעל החיים תוך התייחסות לטמפרטורת והאמסיביות של פני הפרווה. נדגיש, בניגוד לכדור השחור שטף החום הכולל של בעל החיים גדול מאפס וניתן לחישוב בנוסף למשוואה 30 גם מתוך:

$$(31) \quad Q_{Sf}^2 = Q_{Sfc} + Q_{Sfr}$$

מתוך השוואה של משוואות 30 ו-31 ניתן להעריך מחדש את טמפרטורת פני הפרווה באמצעות המשוואה הבאה:

$$(32) \quad T_{Sf}^{New} = T_{Sf} - 0.5 \frac{T_A - T_{Sf}}{Q_{Sf}^1} (Q_{Sf}^2 - Q_{Sf}^1)$$

מכאן, חזרה שוב למשוואה 30, עד להתכנסות לרמה הרצויה.

כמובן, לאחר שאופיינו שטפי החום מהמעטפת של בעל החיים בהסעה, בקרינה וסכומם (הכולל), התהליך מבחינת בקרת אקלים במבנים זהה לזה שנעשה באמצעות המשח"מ. אי לכך וכמצוין, גישה זו עשויה לשמש כתחליף למשח"מ וכמערכת כולל.

מטרות המחקר

המטרה העיקרית של עבודה זו הינה פיתוח מערכת בקרת אקלים לשליטה במערכות ההפעלה השונות, על פי שטפי החום הקיימים בפועל ובהשוואה לרצויים. בהתאם לכך הוצבו מטרות המשנה הבאות:

1. פיתוח מערכת חישה למדידת שטפי החום ממעטפת בעלי החיים (בקרינה בהסעה וסכומם), באופן רציף, ישיר ובתנאים מעשיים.
2. פיתוח מערכת בקרת אקלים המבוססת על מד שטפי החום.
3. אפיון התמורה המתקבל בעקבות הפעלת מערכת הבקרה המוצעת.

תיאור מהלך העבודה

שנה ראשונה

העבודה בשנה הראשונה יועדה לבחינת רמת הדיוק הנחוצה של גופי המדידה, פיתוח בקרה מתאימה לתפעול גופי המדידה והתקנת מערכת ניסיונית לאפיון רמת הדיוק המתקבלת בפועל של המשח"מ המבוסס על גופים כדוריים.

בחינת רגישות – בחינת הרגישות נועדה בעיקר לאתר את הכיוונים הרצויים בפיתוח שיטת המדידה (כמתואר למעלה) על מנת לעמוד ברמת הדיוק הרצויה בהערכת שטפי החום (בקרינה, בהסעה והכולל) של בעל חיים או כל גוף אחר (גוף נמדד) כל שהוא. רמת הדיוק הרצויה עשויה להיות שונה מסיבות שונות ובהתאם לכך ניתן לגזור את רמת הדיוק הנחוצה של גופי המדידה (כדורים) ו/או יחס הקטרים. לצורך זה, חושבו שטפי החום של הגוף הנמדד כתלות ברמת הדיוק של גופי המדידה הכדוריים. חישוב זה מבוסס על ההנחה שרמת הדיוק (באחוזים) של השטף הכולל של הכדורים זהה, ואינו תלוי בקוטר הכדור. חשוב לציין, רמת הדיוק כוללת זו נובעת ממספר גורמים כגון: מדידת הטמפרטורה של הכדור, בקרת שטף החימום ומדידתו, רמת אחידות תנאי האקלים בהם מצויים שני הכדורים ומדידת קוטר הכדורים. לצורך אפיון הסטייה המקסימאלית, החישוב נעשה כך שעל כדור האחד (כדור 1) רמת הדיוק גרמה לעליה בשטף האנרגיה ואילו על הכדור השני (כדור 2) גרמה לירידה בשטף האנרגיה (או ההפך).

מערכת ניסיונית – הותקנה ונבחנה מערכת ניסיונית המבוססת על ארבעה כדורים המופעלים בעת ובעונה אחת. בהתאם לכך, התקבלו שישה זוגות של כדורים, חושבו שטפי החום של גוף נמדד משותף ונערכה השוואה בין התוצאות. כדורי המדידה הותקנו על פי המתכונת הבאה:

חימום - חימום באמצעות נגד וספק מתאים. הנגד החשמלי התקבל באמצעות מוליכים חשמליים שמשמשים לליפוף מנועים ושנאים חשמליים, בקטרים שונים ובהתאם לכך ההתנגדות הסגולית (למטר אורך). חוטים אלה לופפו על כדורי זכוכית על מנת לקבל חימום אחיד על פני הכדור. ההתנגדות הכוללת של הנגד חושבה בהתאם לתחומי ההספק הצפוי (בכפוף לקוטר הכדור הרצוי) ובהתאם למתח הספק נבחר קוטר מוליך בעל התנגדות סגולית המתאימה.

מדידת טמפרטורה - לכול כדור הוצמדו 10 צמדים תרמיים (תרמו קפלים) שחוברו בטור, לקבלת טמפרטורה ממוצעת. צמדים אלה מוקמו על פי המתכונת הבאה: ארבעה צמדים מסביב בצורה סימטרית סביב הקוטר האופקי הגדול ביותר ושתי שלשות צמדים סביב הקוטר האופקי אשר בגובה מחצית רדיוס הכדור של שני החצאים העליון והתחתון.

ספק כוח – לכול כדור הותאם ספק (מתח ישר) בהתאם להתנגדות הכוללת שלו ותחומי ההספק הצפויים.
בקרה – לכל כדור הותאמה לו הבקרה המתאימה. ככלל, בקרת שטף החימום של הכדורים מבוססת על אלגוריתם הבקרה פרופורציונאלית-אינטגראלית (PI) בהתאם למשוואה הבאה:

$$(33) \quad Q = Q_0 + K(T_i - T_{sp}) + R \sum (T_i - T_{sp}) \Delta t$$

כאשר: Q – שטף החימום המנורמל ומגדר כחלק יחסי (באחוזים) בהשוואה לערך המקסימאלי שניתן לקבל באמצעות הספק המתאים, Q_0 – דרגה התחלתית בזמן ההפעלה, T_i – טמפרטורת הכדור העכשווית, T_{sp} – טמפרטורת כדור רצויה, Δt – צעד זמן של הבקרה, K – מקדם ההפעלה הפרופורציונאלי, ו- R – מקדם ההפעלה האינטגראלי. המקדמים Q_0 , K ו- R מותאמים לכל כדור בהתאם לפשרה בין התכנסות מהירה וסטיות בטמפרטורת כדור קטנות ככול האפשר, ומתקבלים בתהליך של ניסוי וטעייה.

מדידת הספק – ההספק המתקבל בפועל מחושב מתוך מדידת המתח והזרם המסופקים לכדור.

שנה שנייה

לאור התוצאות שהתקבלו בשנה הראשונה, העבודה בשנה זו יועדה לבחינת רמת הדיוק הנחוצה של מערכת המדידות החלופית (כמתואר למעלה) והתקנת מערכת ניסיונית לאפיון רמת הדיוק המתקבלת בפועל.
בחינת רגישות תיאורטית – בחינת הרגישות נועדה בעיקר לאתר את הכיוונים הרצויים בפיתוח שיטת המדידה (כמתואר למעלה) על מנת לעמוד ברמת הדיוק הרצויה בהערכת שטפי החום (בקרינה, בהסעה והכולל) של בעל חיים או כל גוף אחר (גוף נמדד) כל שהוא. רמת הדיוק הרצויה עשויה להיות שונה מסיבות שונות ובהתאם לכך ניתן לגזור את רמת הדיוק הנחוצה של מערכת המדידות. לצורך זה ובהתאם לניתוח התיאורטי (ראה למעלה), חושבו שטפי החום של הגוף הנמדד כתלות ברמת הדיוק של מערכת המדידות (כמפורט בהמשך).

מערכת הניסיונית לאפיון רמת הדיוק המתקבלת בפועל – לצורך זה, הותקנה מערכת מדידות המבוססת על מספר כדורים שחורים שונים. מערכת זו תופעלה במהלך השנה האחרונה לסירוגין למשך מספר ימים ובאופן רציף. מאחר ואין בידנו מערכת ייחוס תקנית, הותקנה מערכת הכוללת שישה כדורים שחורים בקטרים שונים הנמדדים בעת ובעונה אחת ובתנאים זהים (ככול האפשר). בנוסף לכך, הותקנו מד מהירות רוח (Gill-WindSonic) בעל

רמת דיוק של 2%) ותא מאורר למדידת טמפרטורת יבש ולח (דיוק של ± 0.5 מ"צ). טמפרטורת הכדורים השחורים שהותקנו נמדדת באמצעות 10 תרמו-כפלים הממוקמים על פני הכדור (באופן אחיד) ומחוברים במקביל. טמפרטורת הכדורים כוילה באמצעות מיקומם במנהרת רוח (מבודדת וחשוכה) – תנאים בהם מעבר חום בקרינה זניח וטמפרטורת הכדור אמורה להיות זהה לטמפרטורת האוויר. כיוול זה נעשה מתוך השוואה למד טמפרטורה (PT100) בעל רמת דיוק של ± 0.3 מ"צ ומכאן שרמת הדיוק של טמפרטורת הכדורים השחורים הינה בתחום של ± 0.6 מ"צ.

מערכת זו, מוקמה בשטח פתוח לאחר שכוילה, ותופעלה במהלך השנה האחרונה לסירוגין באופן רציף למשך מספר ימים. המדידות נרשמו אחת ל-10 שניות ונאגרו. מערכת מדידה זו מאפשרת מדידת שישה כדורים ובכך ניתן להשוות את התוצאות בינם לבין עצמם על פי הפירוט הבא: תחילה ועל פי טמפרטורת הכדורים מהירות וטמפרטורת האוויר חושבה טמפרטורת הסביבה האקוויוולנטית (עבור כל כדור), לאחר מכן ובהתאם לכך, חושב שטף החום בקרינה מפני הפרה (מתוך הנחה שטמפרטורת פני הפרה של 35 מ"צ וקוטר אקוויוולנטי של 1.35 מ') ולבסוף חושבו הסטייה המוחלטת והסטייה היחסית של שטף החום הקרינתית כפי שמשקפים על פי המדידות של ששת הכדורים. לצורך זה, תחילה חושב ממוצע של שטפי החום הקרינתי של ששת הכדורים ובהתאם לכך חושבו הסטיות הנ"ל. קוטר הכדורים השחורים שהותקנו על פי הפירוט הבא: A – 282 מ"מ, B – 167 מ"מ, C – 106 מ"מ, D – 86 מ"מ, E – 280 מ"מ ו-F – 92 מ"מ.

שנה שלישית

כהמשך ובדומה לשנה השנייה, העבודה בשנה זו התמקדה באפיון הסטיות של המדידות לאורך תקופה ארוכה הכוללת מגוון רחב של תנאי אקלים.

תוצאות ודיון

שנה ראשונה

בחינת רגשיות תיאורטית של המשה"ב – כמפורט בדו"ח של השנה הראשונה, ניתן להצביע התוצאות העיקריות הבאות:

- כאשר הגוף הנמדד גדול מהכדור הגדול (מבין השניים) או קטן מהכדור הקטן – הסטיות הגדולות ביותר בשטפי החום של הגוף הנמדד (קרינתי, הסעתי והכולל).
- כאשר הגוף הנמדד שווה בקוטרו לאחד משני הכדורים – הסטייה בשף הכולל זהה לזו של הכדורים ולעומת זאת שטפי החום הן קרינתי והן הסעתי סטיות גדולות בהשוואה לסטיות הכדורים.
- כאשר הגוף הנמדד קטן מהכדור הגדול וגדול מהכדור הקטן – הסטייה בשף הכולל קטנה מזו של הכדורים ולעומת זאת שטפי החום הן קרינתי והן הסעתי בעלות סטיות גדולות בהשוואה לסטיות של הכדורים.
- בהנחה שהגוף הנמדד גדול מהכדור הגדול (כפי שמתבקש בעבודה זו), חושבו הסטיות המתקבלות כתלות ביחס של קטרי הכדורים (D_2/D_1) , יחס במקדמים (a/b) ויחס שבין הקוטר (האקוויוולנטי) של הגוף הנמדד לכדור הגדול (D_b/D_1) . כצפוי, ככול שסטיית המדידה של כדורי המדידה גדלה כך גדלה הסטייה בהערכת השטף הכולל של הגוף הנמדד. כמו כן, ככול שיחס הקטרים של הכדורים קטן גדלה הסטייה של השטף הכולל של הגוף הנמדד.

- על פי התוצאות נראה שככול שיחס המקדמים b/a קטן, הסטייה של השטף החום הכולל של הגוף הנמדד קטנה. מגמה דומה מתקבלת באשר לשטף החום בקרינה, ולעומת זאת מגמה הפוכה באשר לשטף החום בהסעה. יחד עם זאת, הסטיות בשטפי החום הן בקרינה והן בהסעה גדולות מאלה של השטף הכולל.
- ככול שהיחס שבין הקוטר (האקוויוולנטי) של הגוף הנמדד לכדור הגדול (מבין השניים) קטן, הסטייה של השטף החום הכולל של הגוף הנמדד קטנה.

המערכת ניסיונית של המשח"ב – המערכת תופעלה ונבחנה (כמפורט בדו"ח של השנה הראשונה) תחילה בתנאים שונים כגון תנאי חדר, מתחת לרשת צל ותנאים חיצוניים ונראה היה שפעלה בהתאם לציפיות תוך כדי שמירה על טמפרטורת גופי המדידה בסטיות שלא עלו על 0.1 מ"צ. תוצאה זו מעידה על כך שהבקרה שפותחה לצורך זה פעלה בהתאם לציפיות וניתן להזניח את הסטיות בטמפרטורת גופי המדידה. בשלב שני הוחל בבחינת רמת הדיוק המתקבלת. לצורך זה, ארבעת הכדורים הוצבו בתעלת רוח ונבחנו במספר מהירויות אוויר. בנוסף לשינוי מהירות האוויר, טמפרטורת האוויר השתנתה במהלך הזמן ולעומת זאת, טמפרטורת גופי המדידה נותרו סביב 40 מ"צ. הסטייה בטמפרטורת גופי המדידה לא עלתה על 0.2 מ"צ וסטיית תקן של 0.05 מ"צ לכל ארבעת הגופים. משמעות הדברים בקרת טמפרטורת גופי המדידה עומדת בדרישות והסטייה קטנה וזניחה.

כמצוין, הותקנה מערכת ניסיונית המבוססת על ארבעה כדורים (1 – 4) המופעלים בעת ובעונה אחת. בהתאם לכך, התקבלו שישה זוגות של כדורים (1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, ו-3-4), חושבו שטפי החום הכוללים של גוף נמדד בקוטר 0.4 מ ונערכה השוואה בין התוצאות. על פי התוצאות נראה שעבור צמדים שהאחד מהם הכדור הקטן ביותר, מתקבלים סטיות גדולות בהשוואה לאחרים. תוצאה זו מלמדת על רמת דיוק נמוכה של כדור זה ובהתאם לכך הסטיות המתקבלות. מתוך הנחה שהשטף של הגוף הנמדד הינו הממוצע של זה כפי שחושב על ידי שלושת צמדי גופי המדידה: 1-2, 1-3 ו-2-3, חושבה מהי הסטייה המתקבלת כמתואר באיור 10. על פי התוצאות, נראה שהסטייה גדלה ככול שיחס הקטרים של גופי המדידה קטן, מגמה זו דומה למגמה של הניתוח התיאורטי (ראה למעלה). עם זאת, חשוב לציין שיחס הקטרים של גופי המדידה יחסית קטנים (1-2) – 1.69, 1-3 – 2.66 ו-2-3 – 1.58), ומכאן הסטיות בגדולות באופן יחסי. הסטייה המתקבלת של צמד גופי המדידה בעל יחס הקטרים הטוב ביותר (1-3) – 2.66 הינה עומדת על כ- 10% בלבד, תוצאה המתקרבת לערכים שהתקבלו בניתוח התיאורטי. חשוב לציין, תוצאות אלה התקבלו עבור גופי מדידה שהותקנו באופן ידני וניתן לצפות לרמות דיוק טובות הרבה יותר בייצור סדרתי ומסחרי.

שנה שנייה

בחינת רגישות של המערכת החלופית – לצורך בחינת הרגישות ובהתאם לניתוח התיאורטי (כמפורט בדוח שנה שנייה), חושבו שטפי החום של הגוף הנמדד כתלות ברמת הדיוק של מערכת המדידות ובהתאם לפירוט הבא:

1. **רמת הדיוק באומדן שטף חום קרינתי** – כמתואר למעלה, שטף החום הקרינתי המחושב של בעל החיים הינו תלוי אך ורק בטמפרטורת פני הגוף הנמדד וטמפרטורת האקוויוולנטית של הסביבה. בשיטה המוצעת טמפרטורת הסביבה מחושבת מתוך טמפרטורת הגוף השחור, מהירות האוויר וטמפרטורת האוויר. הווה אומר, שבהינתן טמפרטורת פני בע"ח ובאמצעות המערכת המוצעת, שטף החום הקרינתי של בע"ח תלוי בשלושת מדדים אלה (טמפרטורת הגוף השחור, מהירות האוויר וטמפרטורת האוויר), על פי הפירוט הבא:

• **השפעת שגיאת המדידה של טמפרטורת הכדור השחור** – לשם הדגמה ועל פי התוצאות שהתקבלו, ניתן להצביע שבתנאים בהם קוטר הכדור 0.2 מ', טמפרטורת האוויר 30 מ"צ ומהירות האוויר 5 מ' לשנייה, שינויים בטמפרטורת הכדור השחור בתחום 10- עד +10 מ"צ (בהשוואה לטמפרטורת האוויר) משתקפת בטמפרטורת הסביבה לכדי 80- עד +80 ושטף חום לכדי +2000 עד -2000 וואט ובהתאמה. בתנאים אלה ומתוך הנחה ששגיאת המדידה (של טמפרטורת הכדור השחור) ± 0.5 מ"צ, השגיאה המוחלטת בשטף החום של בעל החיים תלויה בעיקר במהירות האוויר ועמדה על כ- 100 וואט – במהירות של 5 מ' לשנייה. בדומה לכך ומתוך הנחה ששגיאת המדידה קטנה ל- ± 0.25 ו- ± 0.1 מ"צ, ניתן להצביע על שיפור ניכר ברמת הדיוק המתקבלת והשגיאה המוחלטת קטנה לכדי 50 ו- 20 וואט בהתאמה.

• **השפעת שגיאת המדידה של טמפרטורת אוויר הסביבה** – הסטייה היחסית קטנה ככול ששגיאת המדידה קטנה.

• **השפעת שגיאת המדידה של מהירות האוויר** – ככלל, שגיאת מהירות אוויר הינה יחסית למהירות הנמדדת והערכים נעים 1 – 5%. בהתאם לכך, הסטייה היחסית הינה קבועה כתלות בהפרש הטמפרטורות (בין הכדור השחור לאוויר הסביבה), וקטנה ביחס ישר ככול ששגיאת המדידה קטנה.

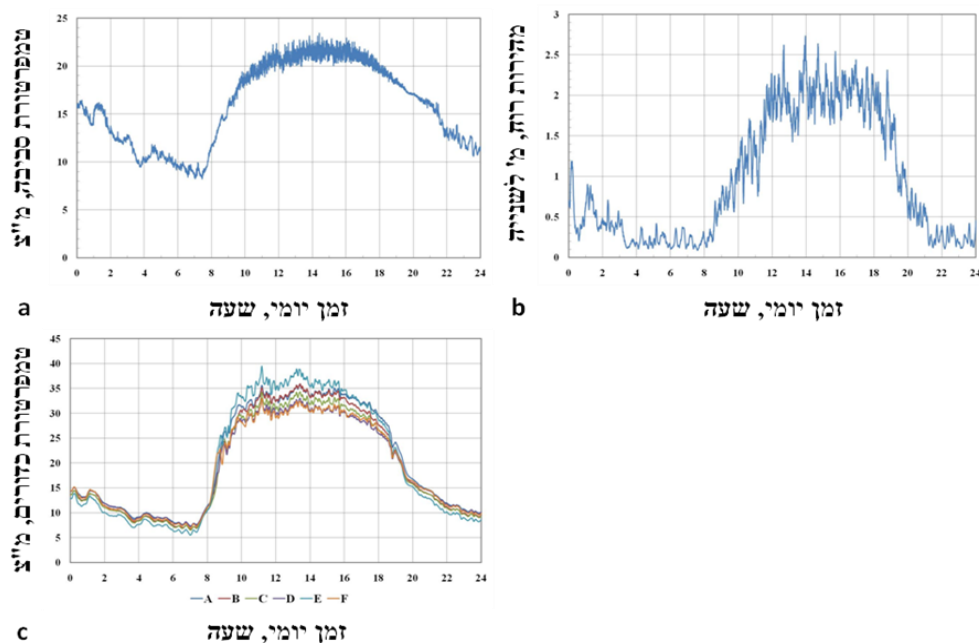
• **השפעה כוללת** – הסטייה היחסית הכוללת עומדת על אחוזים בודדים במרבית תחום המדידה, פרט לנקודת האיפוס בה ניתן להזניח את שטף החום הקרינתי ממלא. בתנאים אלה, הסטייה המוחלטת לא עולה על 35 וואט, כמתואר באיור 9. כמו כן, ניתן להראות שהקטנת הכדור השחור מקנה סטייה יחסית זהה ולעומת זאת הסטייה המוחלטת גדלה לכדי ± 50 וואט. תוצאה דומה התקבלה עם הקטנת בע"ח (קוטר אקוויוולנטי), הווה אומר, סטייה יחסית זהה ולעומת זאת הסטייה המוחלטת קטנה בהתאם.

2. **רמת הדיוק באומדן שטף חום הסעתי (חום מוחש)** – כמצוין, בהינתן טמפרטורת פני בע"ח, שטף חום מוחש הנפלט מפני בע"ח נאמד ישירות בהתאם למהירות וטמפרטורת האוויר (ראה משוואה 25). כמתואר באיור a10, הסטייה היחסית הינה ביחס ישר לשגיאת המדידה של מהירות האוויר (קטנה לכדי 60% ממנה). לעומת זאת, השגיאה היחסית בהשפעת מדידת טמפרטורת האוויר, הינה בתלות בהפרש הטמפרטורות. על פי התוצאות ניתן להראות שככול שהפרש הטמפרטורות קטן השפעת השגיאה במדידת טמפרטורת האוויר היא הדומיננטית והשפעת שגיאת מהירות האוויר ניכרת יותר ככול שהפרש הטמפרטורות גדל.

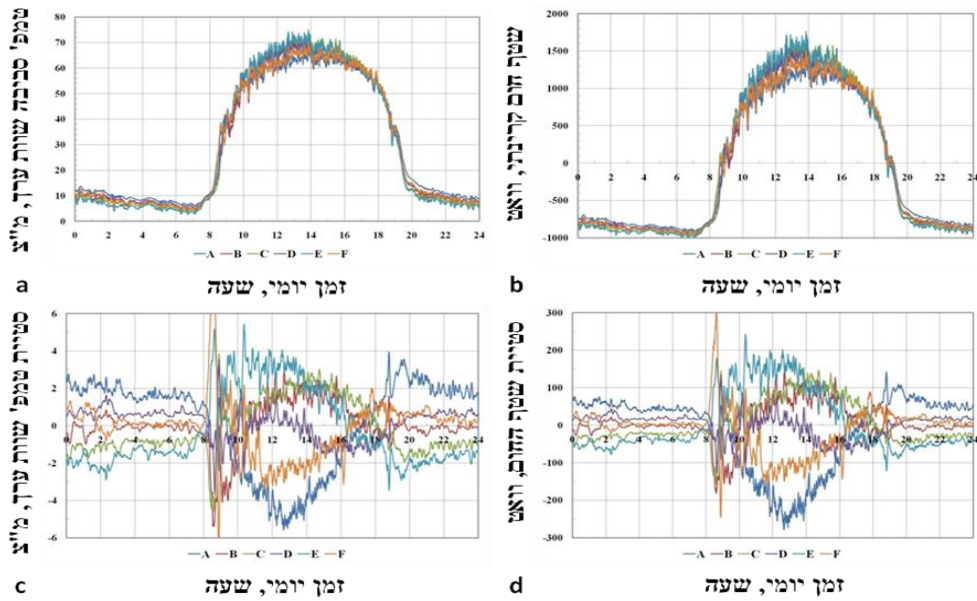
3. **רמת הדיוק באומדן שטף חום הכולל** – על פי התוצאות האלה נראה שבמטרה לשמור על שגיאה יחסית קטנה (הן בקרינה והן בהסעה) מ- 5%, יש לערוך מדידות של טמפרטורה (כדור שחור ואוויר) עם שגיאה שלא תעלה על ± 0.25 מ"צ ומהירות אוויר עם רמת דיוק שלא תעלה על 2.5%. מאחר ושני שטפי החום מתחוללים במקביל, השגיאה היחסית הכוללת נאמדת ע"פ המקסימאלית מבין השתיים. הווה אומר שגיאה כוללת שלא תעלה על 5%. בהתחשב בעובדה שעבור פרה חולבת שטף החום הכולל נאמד בתחום 1000 עד 3000 וואט וואט, השגיאה המוחלטת תעמוד על כ- ± 50 וואט והשגיאה היחסית תעמוד על אחוזים בודדים.

תוצאות ניסיוניות – לצורך הדגמה, נבחר יום מייצג כמתואר באיורים 2 ו- 3. באיור 2 מוצגים טמפרטורת סביבה (a), מהירות האוויר (b) וטמפרטורת ששת הכדורים (c). על פי התוצאות ניתן להצביע על כך שטמפרטורת הסביבה אינה קבועה ובעל תנודתיות של כ- ± 0.5 ו- ± 1.5 מ"צ במהלך שעות הלילה והיום, בהתאמה. כמו כן, מהירות הרוח נמוכה בשעות הלילה בהשוואה לשעות היום ומשתנה באופן תדיר במהלך כל היממה. עם זאת,

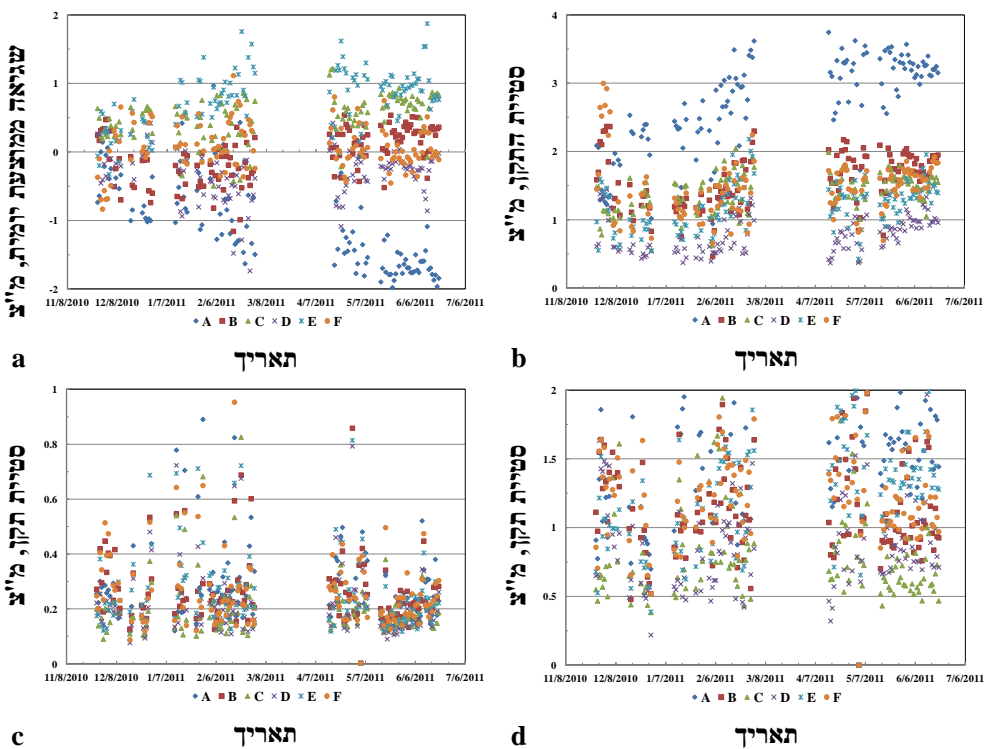
טמפרטורת הכדורים השחורים בעלי תנועה נמוכה יחסית. בתנאים אלה, חושבו טמפרטורת הסביבה האקוויוולנטית, שטף החום בקרינה של בע"ח (כמתואר למעלה), כפי שמשקפים מתוך טמפרטורות המדודות של ששת הכדורים וכמתואר באיורים a3 ו-b3, בהתאמה. לבסוף, חושבו הסטיות בטמפרטורת הסביבה האקוויוולנטית ושטף החום בקרינה מפני הפרה, כמתואר באיורים c3 ו-d3, בהתאמה. על פי התוצאות ניתן להצביע על כך שרמות הדיוק המתקבלות עומדות על כ- ± 2 מ"צ בהערכת טמפרטורת הסביבה האקוויוולנטית, ± 50 וואט בהערכת שטף החום הקרינתי במהלך שעות הלילה ו- ± 100 וואט בהערכת שטף החום הקרינתי במהלך שעות היום. בהתחשב בכך שרמת הדיוק במדידת טמפרטורת הכדורים השחורים עומדת על ± 0.5 מ"צ (כמצוין למעלה), ניתן להצביע על כך שתוצאות אלה תואמות את התוצאות התיאורטיות. בהתחשב ששטף החום הכולל מפני פרה חולבת (נטו) 1000 עד 1500 וואט, רמת הדיוק המתקבלת הינה סבירה ועומדת על אחוזים בודדים. מעקב זה נמשך גם בשנה השלישית ותוצאותיו מובאים באיור 4. באיור a4 מוצגת השגיאה הממוצעת היומית של טמפרטורת הסביבה האקוויוולנטית כפי שמשקפת על פי תוצאות של כל כדור בנפרד (כאשר ממוצע של ששת הקריאות משמש כקו ייחוס). סטיית התקן היומית של שגיאה זו חושבה (באיור b4) ובמרבית המקרים לא עולה על 2 מ"צ. בדומה לכך, חושבה סטיית התקן עבור שעות הבוקר המוקדמות ועבור שעות הצהריים, כמתואר באיורים c4 ו-d4, בהתאמה. בהתאם לכך, ניתן להצביע על סטיית תקן קטנה משמעותית בשעות הלילה בהשוואה לשעות היום. לאור תוצאות מבטיחות אלה נראה ששיטה זו מתאימה לשמש לצורכי אומדן שטפי החום מב"ח. מתוך השוואה של השיטה החלופית הזו לשיטת המשח"מ המקורית, נראה ששיטה זו יציבה יותר ורגישה באופן משמעותי פחות לשגיאות המדידה.



איור 2: מהלך יומי של תוצאות המדידה (a) טמפרטורת סביבה, (b) מהירות רוח, (c) טמפרטורת כדורים שחורים (בעלי קוטר: A – 282, B – 167, C – 106, D – 86, E – 280 מ"מ ו-F – 92 מ"מ)



איור 3: מהלך יומי של התוצאות המחושבות (a) טמפרטורת סביבה אקוויוולנטית, (b) שטף חום בקרינה מבע"ח, (c) סטיות בטמפרטורת הסביבה האקוויוולנטית, (d) הסטייה בשטף חום בקרינה, כאשר הכדורים השחורים בעלי קוטר: A – 282, B – 167, C – 106, D – 86, E – 280 מ"מ ו-F – 92 מ"מ



איור 4: מהלך יומי של התוצאות המחושבות (a) שגיאה ממוצעת יומית, (b) סטיית תקן היוםית של השגיאה, (c) סטיית תקן של השגיאה בשעות מחצות עד לשעה ארבע, (d) סטיית תקן של השגיאה בשעות עשר עד לשעה שתיים אחר הצהריים, כאשר הכדורים השחורים בעלי קוטר: A – 282, B – 167, C – 106, D – 86, E – 280 מ"מ ו-F – 92 מ"מ

סיכום ומסקנות

בעבודה זו נבחנו שתי גישות לאפיון שטפי החום מפני בעלי חיים, הגישה המקורית שהתבססה על המשח"ב והגישה החלופית המתבססת על כדור שחור ומד מהירות. בהתאם לכך ועל פי התוצאות שהתקבלו ניתן להצביע על המסקנות העיקריות הבאות:

בגישה המקורית המבוססת על המשח"ב:

1. המשח"ב אכן מקנה תוצאות טובות במגבלה המחייבת שהקוטר האקוויוולנטי של בעל החיים יהיה קרוב ככול האפשר לקוטר הכדור הגדול.
2. הסטיות בשטף החום הכולל של הגוף הנמדד בשיטת המשח"ב, גדלות ככול שהסטייה במדידת ההספקים של גופי המדידה, ככול שיחס הקטרים של גופי המדידה קטן וככול שיחס הקטרים שבין הגוף הנמדד לבין גוף המדידה הגדול (מבין השניים), גדל.
3. הסטיות בשטפי החום הן בקרינה והן בהסעה גדולות מאלה של השטף הכולל.
4. תוצאות המערכת הניסיונית שהתקבלו בפועל תואמות לתוצאות מבחן הרגשיות התיאורטי.
5. הבקרה שפותחה עונה על הציפיות בשמירת טמפרטורת גופי המדידה בסטיות קטנות וזניחות.

בגישה החלופית המבוססת על כדור שחור ומד מהירות רוח:

1. גישה זו מחייבת אומדן של טמפרטורת פני בעל החיים.
 2. תוצאות המערכת הניסיונית שהתקבלו בפועל תואמות לתוצאות מבחן הרגשיות התיאורטי.
 3. השגיאה היחסית באומדן שטפי החום מבע"ח הינה ללא תלות בקוטר הכדור השחור.
 4. השגיאה היחסית באומדן שטפי החום מבע"ח הינה ללא תלות בגודל (קוטר אקוויוולנטי) של בע"ח.
 5. בניגוד לשיטת המשח"מ, שיטה חלופית זו יציבה יותר ורגישה באופן משמעותי פחות לשגיאות המדידה.
- בהתאם לכך נראה ששתי הגישות משלימות זו את זו ועשויות לשמש לצורכי בקרה. יחד עם זאת, הגישה המקורית מוגבלת לבעלי חיים קטנים ואילו הגישה החלופית מחייבת אומדן של טמפרטורת פני בעל החיים.

רשימת ספרות מצוטטת

1. Kadzere C. T., Murph M. R., Silanikove N. and Maltz E., (2002). Heat stress in lactating dairy cows: a review, *Livestock Production Science*, 77 59-91.
2. Berman A., Folman Y. M., Kaim M., Mamen Z., Herz D., Wolfeson A. and Graber Y., (1985). Upper critical temperatures and forced ventilation effects for high-yielding dairy cows in a tropical climate. *J. Dairy Sci.* 68, 488-495.
3. Hamanda T., (1971). Estimation of lower critical temperatures for dry and lacting dairy cows. *J. Dairy Sci.* 54, 1704-1705.
4. Thom, E. C. The Discomfort Index. *Weatherwise*, v.12p.57-59, 1959.
5. Johnson, H. D. Environmental temperature and lactation with special reference to cattle. *International Journal of Biometeorology*, Lisse, v.9, p.103-16, 1965.

6. Buffington, D.E.; Collazo Arocho, A.; Canton, G.H. Pitt, D. Black globe-humidity index (BGHI) as a confort equation for dairy cows. Trans. ASAE, St. Joseph, MI, V.24, n. 3, p. 711 - 714, 1981.
7. Nienaber, J. A.; Hahn, G. L. Engineering and management practices to ameliorate livestock heat stress. In: Proceedings, International Symposium of the CIGR. New Trends In Farm Buildings, Lecture 6, 1-18. May 2-6, 2004, Evora, Portugal. 2004 CDRom.
8. Gates, R. S.; Zhang, H.; Colliver, D. G.; Overhults, D. G. Regional variation temperature humidity index for poultry housing. Transaction of the ASAE. Vol. 38, n. 1, p. 197-205. 1995.
9. Tao, X.; Xin, H. Temperature-Humidity-Velocity Index for market-size broilers. Proceedings of the 2003 ASAE Annual International Meeting. Paper n. 034037. Nevada-USA, 2003.
10. Brody S. 1964. Bioenergetics and growth. Hafner Publishing Company, Inc, New York
11. ASHRAE (1996). Handbook of Fundamentals, Chapter 6. New York
12. ASHRAE STANDARD 41.6-1994. An American National Standard Method for Measurement of Moist Air Properties. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 1994.
13. Arbel A., Barak M. and Shklyar A. 2003. Numerical method for calculation of moist air thermodynamic properties, according to different parameters and at wide range. *Mikun Vehandasa Bachaclaut*, 3:39-45 (in Hebrew).
14. MecAdams W. H. (1853), Heat transmission, 3rd ed. McGraw-Hill Book Company Inc, New York
15. Kreith F. (1965), Principles of heat transfer, International Textbook Company, Scranton, Pennsylvania
16. Bird R. B., Stewart W. E. and Lightfoot E. N. (1960), Transport phenomena, John Wiley & Sons, Inc, New York

סיכום עם שאלות מנחות

1. מטרת המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
פיתוח מערכת חישה למדידת שטפי החום ממעטפת בעלי החיים (בקרונה בהסעה וסכומם), באופן רציף, ישיר ובתנאים מעשיים.
2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח.
במהלך השנה הראשונה נבחן המשח"מ ונראה שעל אף התוצאות המעודדות שהתקבלו, הסטיות המתקבלות עלולות להיות גדולות ובלתי נסבלות. תוצאה זו הינה תולדה של שני גורמים: הרגישות המובנית של השיטה המוצעת לסטיות במדידה ולכך שאין בידנו מערכת תקנית העשויה לשמש לכיול. לאור זאת ולצורך זה, בשנה השנייה הוחלט לפתח גישה נוספת המבוססת על מדידת טמפרטורת גוף שחור. העבודה בשנים השנייה והשלישית יועדה לבחינת רמת הדיוק הנחוצה של מערכת המדידות החלופית והתקנת מערכת ניסיונית לאפיון רמת הדיוק המתקבלת בפועל.
3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו.
שתי הגישות משלימות זו את זו ועשויות לשמש לצורכי בקרה. יחד עם זאת, הגישה המקורית מוגבלת לבעלי חיים קטנים ואילו הגישה החלופית מחייבת אומדן של טמפרטורת פני בעל החיים. רמות הדיוק המתקבלות עומדות על כ- ± 2 מ"צ בהערכת טמפרטורת הסביבה האקוויוולנטית, ± 50 וואט בהערכת שטף החום הקרינתי במהלך שעות הלילה ו- ± 100 וואט בהערכת שטף החום הקרינתי במהלך שעות היום. בהתחשב בכך שרמת הדיוק במדידת טמפרטורת הכדורים השחורים עומדת על ± 0.5 מ"צ (כמצוין למעלה), ניתן להצביע על כך שתוצאות אלה תואמות את התוצאות התיאורטיות. בהתחשב ששטף החום הכולל מפני פרה חולבת (נטו) 1000 עד 1500 וואט, רמת הדיוק המתקבלת הינה סבירה ועומדת על אחוזים בודדים.
4. הבעיות שנותרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה.
על בסיס תוצאות מעודדות שהתקבלו, מומלץ להמשיך את העבודה בשילובם של שתי הגישות במערכות בקרת האקלים, הלכה למעשה.
5. האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח?
עדיין לא.