

## שימוש במסכים תרמים לחיסכון באנרגיה בבתי צמיחה לגידול ירקות

יצחק אסקירה - מועצת הצמחים

מאיר טייטל, פרהד גאולה, אשר לוי, יוסי קשתי, רומן בריקמן - המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר  
דודו אלקיים, שבתאי כהן, רבקה אופנבך, דורית חשמונאי, אבי אושרוביץ - מו"פ ערבה תיכונה וצפונית

### תקציר

בחורף 2008/9 בוצע ניסוי בו נבחן השימוש במסכים תרמים בתחנת הניסיונות יאיר בערבה. הניסוי הינו המשך לתוכנית מדען בנושא חיסכון באנרגיה בבתי צמיחה לגידול ירקות. התוצאות שהתקבלו נמצאות בהתאמה רבה לתוצאות שהתקבלו בתנאי מעבדה בשנת הניסוי הראשונה. הטיפולים בחנו את כמות האנרגיה המושקעת בחממה לגידול פלפל על מנת לשמור על טמפרטורת לילה מינימלית של 16-18 מעלות. בחממה עם מסך תרמי התקבל חיסכון של כ 50% בצריכת האנרגיה בהשוואה לחממה ללא מסך תרמי. המסך התרמי אפשר גם יצירת תנאי גידול נוחים יותר בעונת האביב ושמר על טמפרטורת יום נמוכה במספר מעלות בהשוואה לחממה ללא מסך תרמי. עליית מחירי האנרגיה בעולם ובארץ כמו גם הגבלות סביבתיות על שימוש באנרגיה פוסילית מתכלה הביאה לעליה חדה בעלויות הייצור של ירקות ופרחים המיועדים ליצוא ולשוק המקומי ולפגיעה בכושר התחרות של החקלאי הישראלי בשווקי היעד. מחירי המזוט עלו מ- 900 ₪ בשנת 2004 לכ- 2,000 ₪ בשנת 2005 גרמו לעלית מחיר החימום ליחידת שטח של דונם אחד לעונה מ-16-15 אלף ₪ לכ- 35-38 אלף ₪ ומגמה זו נמשכה גם בשנים 2006/7 ואף החמירה. עקב עלית מחירים דרסטית זו חלק ניכר מהחקלאים שחיממו את בתי הצמיחה לגידול בזיל, פלפל, ורדים, גרברה ועוד, הפחיתו או הפסיקו את השימוש בחימום כתוצאה מכך נפגעה רמת היבול ליחידת שטח, פגיעה ביצוא, באיכות התוצרת, התפרצות מחלות נוף, ריסוסים כימיים מוגברים וכו'. היקף הייצוא הכולל של ארבעת הגידולים הנ"ל מישראל הסתכם בשנת 2005 בלמעלה מ- 200 מליון יורו.

מבנה החממה מספק מעטפת ייצור לצמח המאפשר שליטה על תנאי מיקרו האקלים והגנה מפני פגעי מזג האוויר. טמפרטורת האוויר בחממה תלויה באנרגיה המגיעה מהשמש מחד גיסא ובהפסדי החום דרך חומרי הכסות מאידך גיסא. הפסדי החום לסביבה מוחזרים לחממה ע"י מקור אנרגיה חיצוני בצורת חימום עד לרמה המאפשרת לצמח התפתחות אופטימלית תקינה. הפחתת איבוד החום לסביבה יפחית את הצורך בשימוש במקור אנרגיה חיצוני, יפחית את עלות הייצור ויהיה ידודותי לסביבה. לתכונות מעבירות האור (שקיפות), שמירת החום (תרמיות) ותוספים אחרים כגון מונעי עיבוי של יריעות הכיסוי יש השפעה ניכרת על היבול, רמתו ואיכותו. בעזרת התיבה החמה נמצא שמקדם מעבר החום הכולל  $U$  של יריעת הכיסוי הנבחנת עולה יחד עם העלייה בהפרשי הטמפרטורה. עבור הפרש טמפרטורה נתון עולה ערך המקדם  $U$  עם העלייה במהירות האוויר. אמצעי חשוב נוסף להפחתת איבוד החום בקרינה לסביבה הוא המסך התרמי – יריעה אטומה או מאווררת המשולבים בה אלמנטים שקופים ואלמנטים רפלקטיביים ומשמשת להצללה בעונת הקיץ לשמירת חום בעונת החורף.

בשנת המחקר הראשונה (2007/8) נסקרו יריעות תרמיות שונות המשווקות בישראל ומסכים תרמים אטומים ברמות הצללה שונות. במטרה לבחון את מקדמי מעבר החום של היריעות ושילובם עם מסכים תרמיים שונים נעשה שימוש בתיבה חמה. תוצאות המעבדה הראו ששימוש ביריעות מתאימות בשילוב מסכים תרמיים אטומים הפחית בצורה ניכרת את מקדם מעבר החום ואיבוד החום לסביבה ומכאן חיסכון באנרגיה של 55-65% בהשוואה ליריעה רגילה ללא מסך תרמי. בשנה השנייה (2008/9) בוצע ניסוי שדה לאימות הנתונים שהתקבלו בתנאי מעבדה. הניסוי בוצע בתחנת הניסיונות יאיר בבית צמיחה בגודל של כ

900 מ"ר. במהלך הניסוי נמדדו ערכי מקדם  $U$  כפי שחושבו בתנאי מעבדה. החממה הופעלה לסירוגין עם מסך וללא מסך עם מערכת חימום בה חושבה ההשקעה הקלורית לשמירה על תנאי טמפרטורה אופטימאלית בחממה עם וללא מסך. נמצאה התאמה מלאה בין התוצאות המעבדתיות והתוצאות בחממה הניסיונית כך שהחיסכון באנרגיה המתקבל משימוש במסך אטום הוא 55-65%.

## מבוא

המנגנונים העיקרים לעיבוד חום מבית הצמיחה לסביבה דרך מעטפת המבנה/חומר הכסות הם העברת חום ע"י קרינה, הסעה והולכה. במטרה לאפיין את איבוד החום של החממה יש צורך לחשב את כל אחד מהגורמים הנ"ל או לאפיין את מקדם מעבר החום,  $U$ , באופן הבא:

$$U = \frac{Q}{A(T_h - T_c)} \quad (\text{W/m}^2 \text{ K})$$

כאשר  $Q$  הוא כמות החום העוברת דרך חומר בעל שטח  $A$  המפריד בין שתי מחיצות עם טמפרטורת אוויר  $T_h$  ו  $T_c$  ( $T_h > T_c$ ). זו האנרגיה הנדרשת לחמם  $1 \text{ m}^2$  של חממה במעלה אחת בין הסביבה הפנימית לחיצונית.

בשנת הניסוי הראשונה (2007/8) בוצעה ניסוי בתנאי מעבדה תוך שימוש ב"קופסה חמה". בשנת הניסוי השנייה (2008/9) בוצע ניסוי בחממה בה הותקן מערכת חימום ומסך תרמי אטום.

## שיטות וחומרים

ניסוי השדה בוצע בתחנת הניסיונות יאיר בחצבה במהלך עונת החורף 2008/9 בין החודשים ינואר-מרץ 2009. חממת הניסוי נשתלה בפלפל (10/8/2008) וטופלה כמקובל באזור. החממה היתה בגודל של כ 896 מ"ר בעלת 5 מפתחים ברוחב של 6.40 מ' באורך של 28 מ' כל אחד, גובה החממה היה 4 מ' מתחתית המרזב. החממה כוסתה בריעת פוליאטילן תרמית של חברת גניגר בעובי של 150 מיקרון ובעלת תרמויות של 15% בתחום שבין 6-14 ננומטר. בחממה הותקן מסך תרמי אטום של חברת "פולישק" בעלת רמת הצללה של 50% (IC 50). על מנת להפחית את עיבוד החום ממעטפת המבנה הותקנו מסכים תרמים בכל מעטפת המבנה בנוסף ליריעות הוילון ולרשת כמקובל בבתי צמיחה בערבה. המסכים במעטפת שימשו רק בשעות הלילה כאשר מסך ההצללה/תרמי שימש גם ביום וגם בלילה. בחממה הותקנה גם מערכת חימום מים מבוססת גז בעלת תפוקה קלורית של 120,000 לשעה. פיזור החום נעשה בעזרת צנרת חימום מעולעלת שנפרסה בכל שורה בין שורות הגידול. למערכת החימום חוברו חיישני מדידת חום בכניסה וביציאה וכן מד ספיקת מים על מנת לחשב את כמות החום שהמערכת צרכה בכל נקודת זמן.

**מדידות:** מדידות טמפרטורה, לחות וקרינה נעשו בנקודות שונות בתוך ומחוץ למבנה. נעשה שימוש בצמד חומני יבש ולח (תא נושם) על מנת לחשב את הלחות המחולטת והיחסית. מדידת הקרינה נעשתה ע"י Net radiometer עם רגישות בטוח שבין 25,000-300 ננומטר. מדידות הטמפרטורה, לחות וקרינה נעשו במפתח האמצעי באופן אנכי בגבהים שונים (איור 1, טבלה 1). לצורך מדידת כמות הגז/אנרגיה שהושקעה לחימום החממה בנקודה P5 נמדדה טמפרטורת כניסה וספיקת המים במערכת (מד מים שמדד לכל פעימה 10 ליטר מים). כל החיישנים חוברו לאוגר נתונים שסרק את כל החיישנים בתדירות של 0.1 Hz בכל 10 דקות ורישומם באוגר.

**חישובים תאורטיים:** המנגנון העיקרי לאיבוד חום מבית הצמיחה דרך מעטפת המבנה הינה ע"י העברת חום בקרינה, הולכה והסעה. על מנת להגדיר את עיבוד החום מבית הצמיחה חיוני לחשב כל אחד מהתהליכים האלה בנפרד או להגדיר את סה"כ מקדם מעבר החום במבוטא להלן

$$U = \frac{Q}{A(T_h - T_c)} \quad (\text{W/m}^2 \text{ K})$$

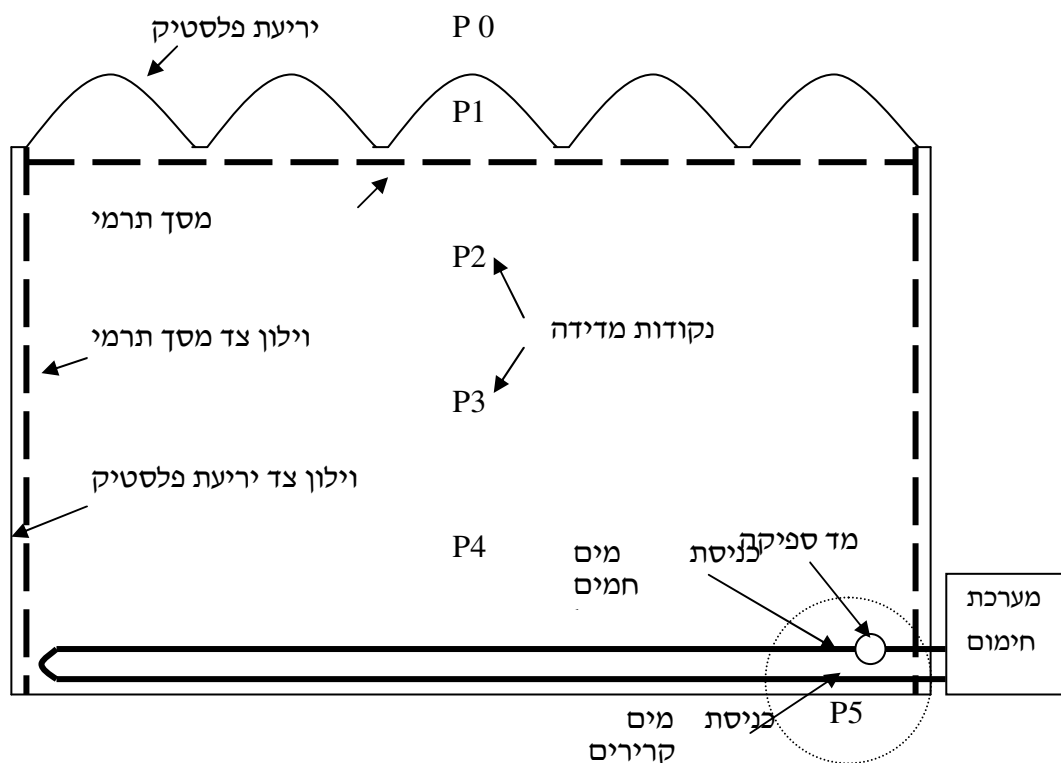
$Q$  = כמות החום האובד משטח  $A$  המופרדים בשתי מחיצות חוץ ופנים

$T_h$  and  $T_c$  ( $T_h > T_c$ ).

זוהי האנרגיה הנדרשת לחימום  $1 \text{ m}^2$  של חממה במעלה אחת בין הפנים לסביבה החיצונית. ערך  $U$  של החממה חושב ע"י היחסים בהם  $T_h$  הוא הטמפרטורה בנקודה P2 ו-  $T_c$  היא הטמפרטורה בנקודה P0. לחישוב כמות האנרגיה שהושקעה לחימום החממה השתמשנו בנוסחה הבאה:

$$Q = mc(T_{in} - T_{out})$$

כאשר  $m$  ו-  $c$  הם כמות החום הכמוס של המים ( $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) ו-  $T_{in}$  and  $T_{out}$  הם הטמפרטורות של המים בניסה לחממה וביציאה ממנה חזרה למערכת החימום. כמות המים הזורמת במערכת (ספיקה שעתית) נמדדה ע"י מד ספיקה שחובר למערכת אגירת הנתונים והטמפרטורות נמדדו ע"י צמדים חומנים.



איור 1: תאור סכמתי של נקודות המדידה בבית הצמיחה

טבלה 1 : סוג ומיקום חיישנים בניסוי

מיקום	Net radiometer	טמפרטורה ולחות	גובה מפני הקרקע (מטר)
P0	Net 0	T0, RH0	6.0
P1	Net 1	T1, RH1	4.35
P2	Net 2	T2, RH2	3.35
P3	-	T3, RH3	2.35
P4	-	T4, RH4	0.75

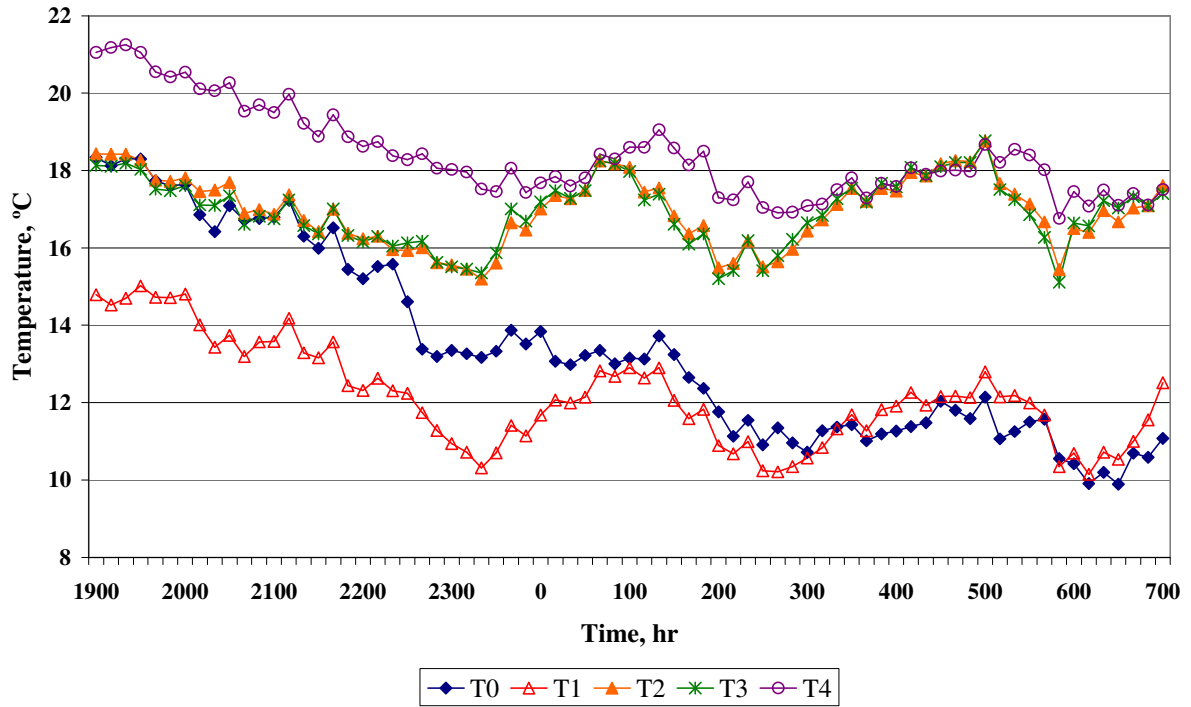
**תוצאות ודיון**

מערכת חימום הגז פעלה באופן אוטומטי על מנת לשמור על טווח מינימום מכסימום של טמפרטורות של 16-18 מעלות בתוך החממה. מהירות הרוח החיצונית בכל מהלך המדידות הייתה בין 1-2 מ/ש. בלילה הלחות היחסית בתוך המבנה הייתה בטווח של 90-100%.

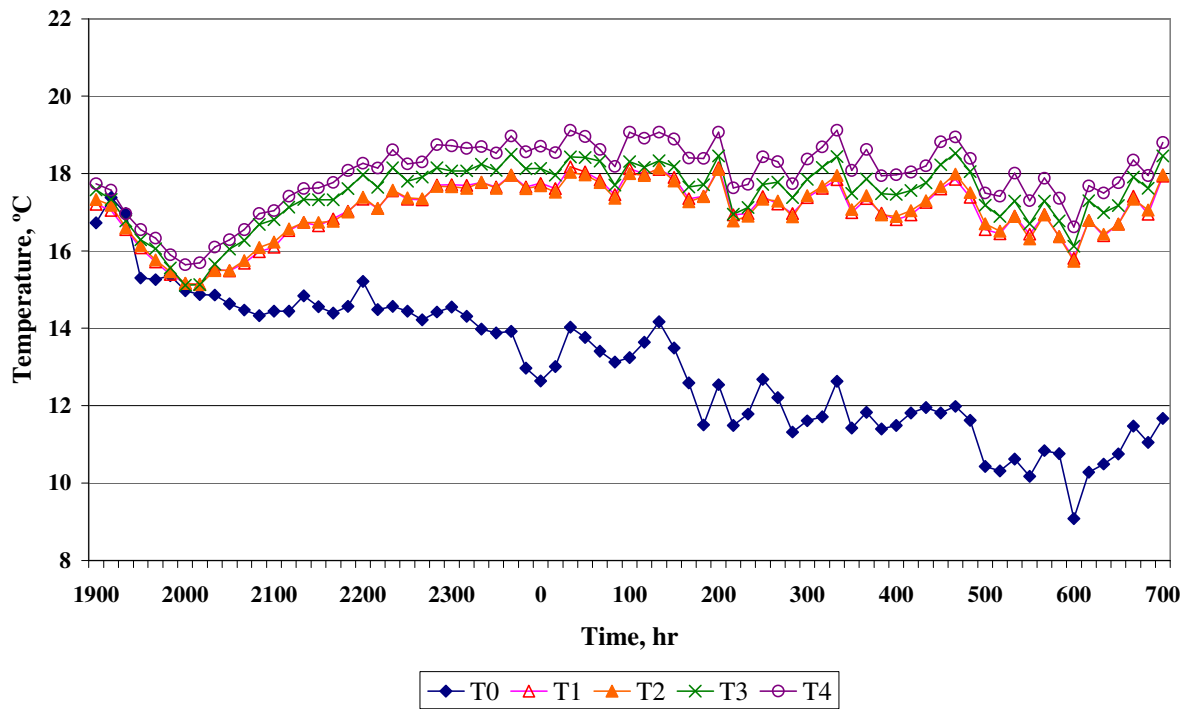
טבלה 2 : המטריצה של המסך התרמי לשילובי הניסוי השונים

טיפול	קיר החממה מסך תרמי	גג החממה מסך תרמי
1	IC 50	None
2	IC 50	IC 50
3	None	None
4	None	IC 50

השוואת תוצאות הטיפולים (טבלה 2) לא הראתה הבדל משמעותי בערכי מקדם מעבר החום  $U$ . לכן בהצגת הנתונים אוחדו ערכי מקדם מעבר החום  $U$  של כל הטיפולים. באיור 2 ו-3 מוצגים התנהגות הטמפרטורות בתוך ומחוץ למבנה עם וללא מסך תרמי. בשני האיורים ניתן לראות שכאשר טמפרטורת המינימום יורדת מתחת לטמפרטורה הרצויה של 16 מעלות התנור נכנס לפעולה עד שמושגת הטמפרטורה הרצויה הגבוהה (18 מעלות). מעניין כמובן לראות שערכי הטמפרטורה מעל נמוכה באופן ניכר מזו שמתחת למסך.



איור 2 : השתנות הטמפרטורה בתוך ומחוץ למבנה עם וללא מסך תרמי



איור 3 : השתנות הטמפרטורה מחוץ ובתוך החממה עם וללא מסך תרמי

חישוב ערכי  $U$  כפונקציה של טמפרטורות אוויר מחוץ ובתוך החממה מוצגים באיור 4. באיור זה מוצגים גם ערכי  $U$  שנמדדו ב"קופסה החמה" בשנת הניסוי הראשונה. כפי שניתן לראות אין התאמה בין המדידות בחממה למדידות ב"קופסה החמה" במעבדה. ניתן לייחס זאת לאיבוד חום מהמבנה ומהקירות. יתרה מכך, ב"קופסה החמה" התא הקר המדמה את השמים וטמפרטורת האוויר בו כמעט זהים וערכם כ-

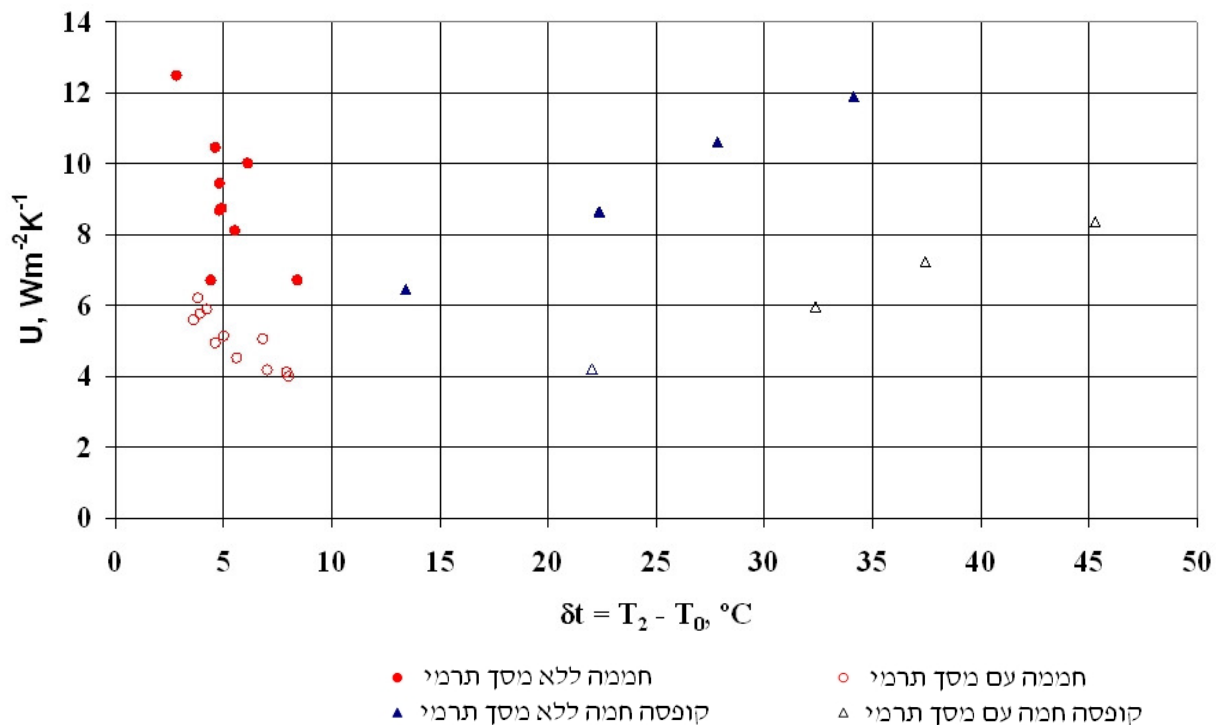
1- מ"צ, בזמן שבמהלך הניסוי טמפרטורת האוויר יכולה להגיע ל 10- מ"צ וטמפרטורת האוויר ל 10. מ"צ.

בהשוואת ערכי  $U$  של החממה עם וללא מסך ניתן לראות שהמסך מוריד את הערך בכ 50% והחיסכון באנרגיה שהתקבל גם הוא היה 50%. תוצאות אלה נמצאות בהתאמה גבוה מאוד לתוצאות שהתקבלו במעבדה ב"קופסה החמה".

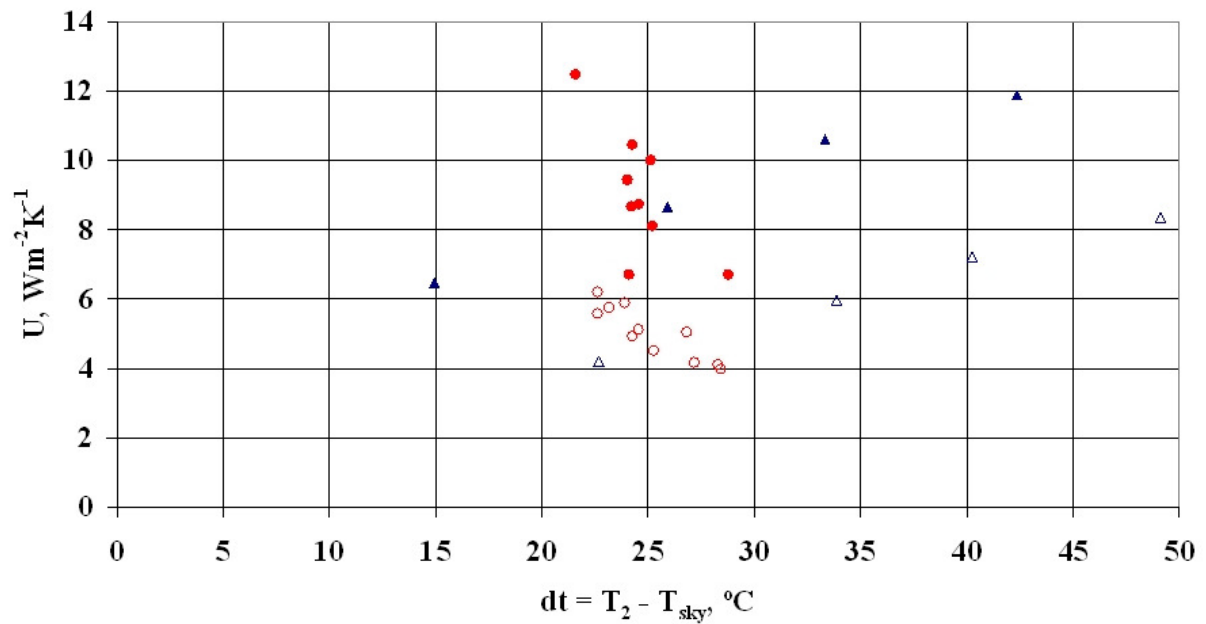
טמפרטורת הרקיע חושבה על פי הנוסחה הבאה (Swinbank):

$$T_{sky} = 0.0552 T_0^{1.5}$$

הנוסחה מציגה את טמפרטורת הרקיע כפונקציה של טמפרטורת האוויר החיצונית. באיור זה גם מוצג תוצאות הקופסה השחורה כפונקציה של הפרשי הטמפרטורות בין המשטח החם והמשטח הקר. כפי שניתן לראות קיים התאמה טובה בין המדידות בחממה וב"קופסה החמה".



איור 4: חישוב ערכי מקדם מעבר החום ( $U$ ) בחממה ובקופסה חמה כפונקציה של הפרשי טמפרטורת אוויר.



- חממה ללא מסך תרמי
- חממה עם מסך תרמי
- ▲ קופסה חמה ללא מסך תרמי
- △ קופסה חמה עם מסך תרמי

איור 5: חישוב ערכי מקדם מעבר החום ( $U$ ) בחממה ובקופסה חמה כפונקציה של הפרשי טמפרטורת קרינת החום.

### סיכום

בניסוי זה נמצא כי מסך תרמי אטום מאפשר חיסכון של כ- 50% מהוצאות האנרגיה לחימום בית צמיחה לטמפרטורה אופטימלית של 18 מ"צ. המסך תרמי מפחית את איבוד החום לסביבה ומקטין את הצורך בחימום.

נתונים אלה נמצאים בהתאמה לתוצאות שהתקבלו ב"קופסה חמה" בתנאי מעבדה בשנת הניבוי הראשונה.

### הבעת תודה

למו"פ ערבה על שיתוף הפעולה הפורה שאפשר את קיומו של הניסוי, לחברת פולישק על תרומת המסכים התרמיים