



**מאת :** יוסף בן-חיים  
הנדסאי חשמל  
תרמוגרפיה בדרגה 2  
סריקות תרמיות בחשמל  
מפעל לייצור רכיבים  
ישראל

## רקע - אופי העבודה בסריקות תרמיות

במסגרת תפקידי כתרמוגרפיה חשמל (צלם תרמי) במפעל לייצור שבבי אלקטרוניקה בדרום הארץ, אני סורק מדי יום מכונות לייצור שבבים בפרוסות. פרט למכונות הללו, אני גם סורק את שאר היחידות התומכות השייכות להן כמו: לוחות, שנאים, משאבות, מפוחים, מאווררים, מנועים, צ'ילרים, גנראטורי RF. זה כולל גם כמובן את ההזנות החשמליות שלהן, במצב של "עומס מלא" (זרם עבודה נומינלי). סריקות תרמיות אלה מבוצעות מדי יום, כך שכל מכונה בחדר הייצור תיסרק פעם אחת בשנה, ע"פ הפרוצדורה, לצרכים של אחזקה מונעת, וגם למטרת הביטוח של המכונה. מטרת הסריקות הללו היא למצוא "תקלות עתידיות" במכונות, לפני שהן יתחילו לייצר רכיבים יקרים, על פרוסות הסיליקון. במידה ויימצאו ממצאים כלשהם (findings) תוך כדי הסריקה, הרי שצוות ה-I.R SCAN (המונה 2 חשמלאים תרמוגרפיים), שביצע את הסריקה הוא גם יהיה זה, שיתקן בד"כ את הבעיה. כמובן שזה קורה אך רק לאחר הורדת מתחים חשמליים למכונה, ובתיאום עם הטכנאי שלה. לעתים אין אפשרות לתקן את הכשל בו במקום, מכל מיני סיבות טכניות, ואז התיקון מתבצע ע"י הוונדור (טכנאי של יצרן המכונה). דבר זה נתון ע"פ: חומרת התקלה, רכיב במלאי, העדיפות של החזרת המכונה למצב תקין, וע"פ הל"ז של אותו הוונדור. במידה ומכונה לא תיסרק בזמן, עלולה להיווצר שם "בעיה חשמלית" כגון: חיבור רופף, קצר פנימי, מנוע תפוס, התיישנות רכיב, פגם פנימי וכו'. המכונה עלולה אז להפסיק את פעולתה באופן חלקי, ובמקרים קיצוניים אפילו באופן מלא עד לכיבוי של המכונה (shutdown). כמובן שמצב זה יכול להיות ממש קטסטרופאלי מכמה היבטים:

- 1) נזק כספי מיידי (בשל אובדן רכיבי ייצור שהיו בתהליך = פרוסות סיליקון)
- 2) שריפה מקומית במכונה (עניין של סכנת נפשות – פליטת עשן וגזים)
- 3) בזבז של זמן וכוח אדם בשל תיקון והחלפת האלמנט שכשל (downtime)
- 4) אפקט הריח השרוף והחריכה, שמתפשט בחדר הנקי גורם לנזק ברמה מולקולארית לרכיבי הייצור. (לעתים גם אם הם נמצאים הרחק מהמכונה הכושלת)
- 5) הפעלת צוות חירום ERT בזמן התקלה (במידה והיא גרמה למצב של אש, עשן, או לריח שרוף. דבר זה קורה במציאות, אבל לעיתים רחוקות מאוד)

## אנליזה של הצילום התרמי

במסגרת העבודה היומיומית צוות ה-I.R מגלה מדי פעם ממצאים ברכיבי החשמל במכונות, וגם לא אחת ביחידות האספקה התומכות במכונה. את הממצאים הללו אנו מצלמים, ומתעדים עם מצלמת אינפרא אדום, מדגם E320 של חברת FLIR. זוהי מצלמה חדישה, ללא צורך בקירור מאולץ (uncooled). למצלמה יש צג LCD 2.5", עם עדשה של  $41^\circ$  מעלות (מיועדת לסריקה במרחקים קצרים), והדיוק של המצלמה הוא  $0.1^\circ$  צלסיוס. הפרמטר של ה-emissivity ( $\epsilon$ ) נקבע ל-0.95, שהוא הערך הקרוב ביותר עבור חומר ה-P.V.C, ושאר החומרים הפלאסטיים מהם עשויים כבלי החשמל, החוטים, והמוליכים. (פרמטר ה- $\epsilon$  הוא היחס, שבין כמות קרינת האינפרא אדום, שפולט הגוף הנבדק, לעומת הקרינה הנפלטת מגוף "שחור" אידיאלי עם אותה הטמפרטורה). גם אם ערך זה איננו ממש מדויק במאת האחוזים, הרי שעיקר האיבחון בתחום התרמוגרפיה של החשמל מתבסס על הפרש הטמפרטורה ( $\Delta T$ ), של הגוף הנבדק, בין מצבו הרגיל (הנומינלי) לטמפרטורה במצבו בזמן התקלה. בתחום התרמוגרפיה של חשמל, לרוב אין צורך לבדוק טמפרטורה מוחלטת של גוף, כי האינדיקציה לחומרת הבעיה היא כאמור ערך ה- $\Delta T$ . רק לעתים מאוד רחוקות נתבקש לדעת, למשל את הטמפרטורה של צינור כלשהו, רק אז נמצא את הטמפרטורה המוחלטת בשיטת "היחוס". (בעזרת חומר פלסטי נדבק, שאנו יודעים את ה- $\epsilon$  שלו מראש, ושיודבק על גבי החלק הנבדק, ורק אותו למעשה נבדוק באמת). את התמונות התרמיות (תרמוגרמות), שתיעדנו במצלמה אנחנו מכניסים לדוחות ראשוניים (initials). לאחר גמר התיקון אנחנו מוסיפים את התמונות

הנוספות, שלאחר התיקון אל הדוחות הסופיים (finals). בשלב זה התוכנה של הדוחות תחשב גם את ה- $\Delta T$ , וע"פ ההפרש הזה היא תקטלג אותו לפי הקטגוריה של חומרת הממצא, וכפועל יוצא מזה היא גם תחשב את עלות החיסכון התיאורטי. אם כך הגיוני, שככל שהפרש הטמפ' של ממצא יהיה גדול יותר, כך תיגדל גם דרגת החומרה של התקלה (temperature criteria). כל הממצאים התרמיים ישויכו תמיד, ל-3 קטגוריות ע"פ הסטנדרט הנהוג במפעלי הייצור בעולם כדלהלן:

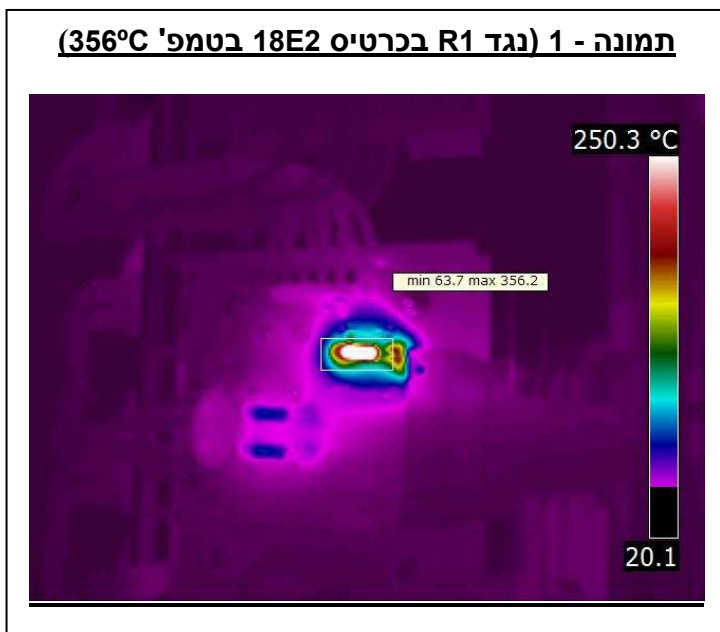
- א. הפרש טמפ' עד  $3^{\circ}\text{C}$  = קריטריון 1 ← חיסכון תיאורטי של : \$ 3,000
- ב. הפרש טמפ' בין  $3^{\circ}\text{C}$  ל-  $15^{\circ}\text{C}$  = קריטריון 2 ← חיסכון תיאורטי של : \$ 3,000
- ג. הפרש טמפ' שמעל  $15^{\circ}\text{C}$  = קריטריון 3 ← חיסכון תיאורטי של : \$ 36,000

את הדו"חות הסופיים, אנחנו מכניסים אל אתר הבית שלנו (web מפעלי), כך שכל טכנאי יוכל להיכנס ולראות את הממצאים הנוגעים לו. האתר מחשב עם כל יצירת דו"ח את הסכום, שנחסך ספציפית בשל פעילות צוות הסריקות התרמיות. אחר כך אפשר לראות מבחינה סטטיסטית גם את מס' הממצאים הכולל, וגם את החלוקה ע"פ קריטריונים, שאותם מעוניינים לראות. למשל ניתן לראות דו"ח התחלתי או סופי ע"פ: סוג המכונה, גודל המתח, סוג הרכיב, אזור המכונה, שם המהנדס שלה וכו'.

### דוגמא לסריקה וממצא חמור שהתגלה בכרטיס אלקטרוני א. הכנה לפני סריקה תרמית במכונה

בתאריך מסוים הוזמנו לסריקת I.R למכונה, שנמצאת באזור הדיפוזיה בחדר הנקי. המכונה בנויה בעיקרון מ-2 תנורים גליליים שהטמפ' שלהם בעבודה מגיעה ל- $400^{\circ}\text{C}$  לערך. בטרם סורקים את חיבורי גופי החימום, ושאר הרכיבים שבחדר הנקי, אנו אמורים לסרוק את לוח השנאים שמזין את התנורים. בבואנו ללוח זה, הנמצא קומה אחת מתחת למכונה, ולאחר שהטכנאים כבר גידרו את מקום העבודה בסרט אדום, הם מורידים מתחים למכונה, ונועלים את המפסקים הראשיים (פעולת LO/TO). רק לאחר שהם וידאו מצב של חוסר מתח חשמלי, הם פותחים את דלתות הלוח. הם אז מסירים את המכסים שעל: פסי הצבירה, השנאים, הכרטיסים האלקטרוניים וכו'. כל הפעולות הנ"ל הם לצרכי בטיחות בעיקר על מנת, שהסריקה תהיה בטוחה, אך גם אפקטיבית מבחינת גישה. (צילום חופשי בזוויות נוחות לכל חלקיו של הלוח ורכיביו השונים). הסיבה לכך שלא ניתן לעשות סריקה תרמית מבעד למכסים פלאסטיים או מתכתיים, היא שהחומרים הללו אינם "שקופים" לקרינה אינפרא אדומה. עם זאת חשוב לציין בנושא זה, שישנם זכוכיות I.R מיוחדות, שדרכן ניתן לסרוק ללא פתיחת הדלתות. שיטה זאת מאוד יקרה, והיא שימושית בד"כ בדלתות של שנאים, תאי מתח-גבוה, מגירות נשלפות וכו'.

### ב. הסריקה התרמית



בשלב זה הטכנאי בחדר הנקי מפעיל את המכונה בעומס מלא (בזרם עבודה של 135A, ובמתח של 208V). במצב זה ממתנינים בערך כ-10 דקות, כך שכל המפסקים והשנאים, וגם שאר הרכיבים החשמליים יגיעו אל הטמפ' הנומינלית שלהם. עתה מתחילים לסרוק את הרכיבים, כאשר הדגש בד"כ הוא על יחידות חשמליות "צורכות" זרם (שנאי ריאקטורים, מפסקי זרם, מאמ"תים, מגענים וכו'), וכמובן גם את הרכיבים האלקטרוניים אנו סורקים באותו הזמן. במקרה דנן, לאחר סריקת סליל ריאקטור השמאלי (#1), שמנו לב מיד שבאחד הכרטיסים האלקטרוניים שסימונו 18E2 ישנה נקודה "חמה" (hot spot), בנגד R1 כפי שניתן לראות בתמונה מס' 1. הטמפ' שהתפתחה על

הנגד הנ"ל הייתה כ- $356^{\circ}\text{C}$ . מניסיונו ידענו שהטמפ' על ארבעת הנגדים בכרטיס הזה אמורה להיות

בטווח שבין 100°C ל-110°C. עד כמה שזה יישמע מוזר, למרות שאנחנו מצלמים סוגים די רבים, ושונים של מכונות, אין אנו משווים כל סריקה, שאנו מבצעים לתמונה תרמית מוכנה של אותו החלק. הסיבה לכך היא, שהיות ויש המון סוגים של מכונות, והרבה מאוד אזורים מחושמלים, לא ניתן להיסחב עם עשרות תמונות תרמיות בכל סריקה. כך שלמעשה בשל ניסיון רב שנים, אנו זוכרים איך הרכיבים הללו נראים בצורה "תרמית", ובפרט שזוהי עבודה יומיומית שגרתית. בנוסף גם נזכרנו, ש-3 חודשים קודם

**תמונה - 2 (נגד R1 בכרטיס 18E2 בטמפ' 109°C)**



במכונה זהה לזו היה "אירוע", שבו נשרף כרטיס זהה לזה שצילמנו. הכרטיס אז כל כך נחרך, ואף העלה עשן תוך כדי עבודה. עם ההבנה המלומדת הזו, בסיומה של הסריקה כולה, כולל בחדר הנקי, ביקשנו מהוונדור של המכונה להפסיק מתחים ללוח המכונה. דרשנו ממנו לבדוק את ההלחמות בכרטיס, וגם את הכבל שמתחבר אליו מהמכונה, שבחדר הנקי, ועד לאזור הכרטיס שבלוח הנבדק. באותו היום הספקנו ליצור את הדו"ח הראשוני, שהכיל את התמונה הראשונית עם כל הפרטים הרלבנטיים עבורה. דו"ח זה נשלח אל מהנדס המכונה לצורך ידיעתו על הממצא החמור, וכדי שיהיה לו זמן להיערך להמשך הטיפול.

### ג. איבחון התקלה ותיקון הממצא

רק לאחר כשבועיים מיום הסריקה הוזמנו שוב לסריקה חוזרת (rescan), וכמובן שזה היה בתיאום עם טכנאי המכונה, וגם עם אותו הוונדור שאיבחן את הבעיה. תוך כדי ההכנה לפני הסריקה השנייה אני תחקרתי את הוונדור לגבי הפעולות, שביצע לאחר התקלה, ולגבי התיקון בפועל. מסתבר שהיה "קצר" בשקע הרב פיני (25 PINS), שסימונו 18E9, בין שני גידים דקיקים בחיבור לשקע במתח 5VDC, שהיה ממוקם בגג הפנימי של הלוח. קצר זה היה בסה"כ במרחק של כ-2 מטר מעל הכרטיס, ולמרות שאנו סורקים גם את הכבלים, הצמות והגידים למיניהם, לא "ראינו" שום סימן לפליטת חום באותו השקע במסגרת הסריקה הראשונית. מה שכנראה קרה הוא, שהקצר בשקע "ניטרל" חלק מההתנגדויות הטוריות של הנגד R1, שנמצאות באותו המעגל החשמלי הטורי שלו (serial loop). במצב כזה הערך של ההתנגדות החשמלית האוהמית ירד די הרבה. כאשר ההתנגדות חשמלית יורדת במעגל חשמלי, כשמאידך אין שום שינוי במתח המקור, הרי שהזרם עולה באותו היחס. דבר זה הינו ידוע ע"פ החוק הכי בסיסי בתחום החשמל, שהוא כמובן חוק-אוהם.

### נוסחת חוק אוהם

$$I = V / R$$

- I = הזרם החשמלי באמפרים (A)
- V = המתח החשמלי בוולטים (V)
- R = התנגדות המעגל באוהמים (Ω)

אם כך נהיר לנו, שקצר זה במעלה הכרטיס (חיבור גלווני בין 2 פינים בתקע רב גידי), הגדיל את הזרם החשמלי בנגד הנ"ל, פי כמה מהזרם הנקוב שלו. תקלה זו היא שגרמה, להגדלת הטמפ' עליו, וגם על מוליכיו של הכרטיס. מסתבר אפוא, שבסריקה הנ"ל הספקנו "לראות" את הנגד הזה, עוד בטרם הספיק לחמם את מוליכי הכרטיס בצורה קיצונית לאורך זמן, ואת הרכיבים הסמוכים לו. למעשה, ניתן לומר שבשורה התחתונה, בסריקה קצרה זו חסכנו "כאב ראש" לא קטן, גם לטכנאים, גם למכונה, לשאר רכיבי הכרטיס, ובכלל נמנע אירוע בטיחותי חמור, כמו זה שהיה בעבר הלא רחוק. בתמונה מס' 2, ניתן לראות את אותו הכרטיס לאחר הסריקה החוזרת, ולאחר החלפת השקע הרב פיני. ניתן לראות בתמונה זו, את כל ארבעת הנגדים בטמפ' אחידה של כ-110°C. ע"פ אחד מהחוקים של התרמודינאמיקה ניתן לחשב את פליטת אנרגית החום שנוצרה (INFRA-RED), גם במקרה זה. הדבר המיוחד במקרים כאלה, שגם ללא ידיעת ערך זרם התקלה או המתח, ניתן בכל זאת לחשב את

כמות האנרגיה שנפלטת, ביחס למצב הנומינלי של אותו הרכיב. לפי חוק סטפאן-בולצמן, ערך ההספק האנרגטי בוואטים (W), שמוקרן מגופים הוא תלוי בסוג החומר ( $\epsilon$ ), והיא בחזקה הרביעית של הטמפר' במעלות קלווין, ונתונה בנוסחה כדלהלן :

### נוסחת סטפאן-בולצמן

$W$  = האנרגיה בוואטים המוקרנת, מגוף עבור שטח של 1 מ"ר (זהה למושג החשמלי, הספק  $P$ ).

$\epsilon$  = מקדם האמיסיביות ( $0 < \epsilon < 1$ ) (emissivity)

$\sigma$  = קבוע בולצמן  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$T$  = הטמפרטורה במעלות קלווין ( $^{\circ}\text{K}$ )

$$W = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

הערות : (1) כדי להמיר טמפר' במעלות צלסיוס למעלות קלווין יש להוסיף 273.

(2) להמרת האנרגיה (W) משטח של 1 מ"ר, ליחידות של 1 סמ"ר מכפילים הנוסחה ב-  $10^{-4}$ .

$$W_2 = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_2)^4$$

$$W_1 = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_1)^4$$

נתוני הטמפרטורות

$$T_1 = 110^{\circ}\text{C} = 383^{\circ}\text{K}$$

$$T_2 = 356^{\circ}\text{C} = 629^{\circ}\text{K}$$

מבחינה מתמטית בדוגמא זו, אין צורך לחשב את האנרגיה בוואטים, שנפלטה בפועל בשני המצבים. או אז נצטרך לחשב גם את שטחו של המשטח הפולט חום בנגד הנ"ל. (זהו בעצם שטח המעטפת שלו, שהוא בקירוב צורה הדומה לגליל). אם כך הדבר היחידי, שאותו יש למצוא, הוא היחס בין הטמפר', דהיינו בין זו הנומינלית, לבין הטמפר' בזמן של התקלה. באופן מעשי מספיק לנו למצוא את היחס -  $W_2/W_1$ , ואז נוכל לדעת פי כמה גדלה האנרגיה הנפלטת מהמצב הרגיל לעומת התקלה.

על נקלה רואים, שיחס זה הוא באמת היחס שבין הטמפר' שלהם במעלות  $^{\circ}\text{K}$ , אבל בחזקה רביעית, כלומר :

$$W_2/W_1 = (T_2)^4 : (T_1)^4 = (T_2/T_1)^4$$

$$(629/383)^4 = 1.6423^4 = 7.27$$

לסיום האיבחון ניתן לראות, שהטמפר' של הנגד R1, בכרטיס האלקטרוני בגלל מצב הקצר, עלתה פי 1.6423 (מ-  $383^{\circ}\text{K}$  ל-  $629^{\circ}\text{K}$ ). האנרגיה שנפלטה מהנגד אם כך הייתה פי כמעט **7.27** פעמים, יחסית למצבו הנומינלי בעבודה רגילה. ניתן רק לנחש מה היה קורה אם מכשירים חשמליים צורכי זרם, כמו למשל תנור או מזגן, היו לפתע מתחממים ביחס כזה של אנרגיה. ברור כמובן לכל חשמלאי, וגם לכל הדיוט, שהייתה נגרמת שריפה ודאית, אם לא הייתה הגנה חשמלית, אשר מנתקת מצב מסוכן זה.

**1.2 הרחבה בנושא הנגד** - יש לציין שבמקרים ספציפיים כמו זה, ניתן לחשב בקירוב די גס, גם את גודל הזרם שעבר בנגד. הסיבה לכך נובעת מהעובדה, שנגד נחשב לעומס חשמלי "טהור", הווה אומר שכל ההספק הפעיל (P), שלו נהפך באופן מעשי לחום. (אנרגית חום = קרינה אינפרא אדומה).

$$P = V \cdot I = I^2 \cdot R = V^2 / R$$

נביט בנוסחת ההספק החשמלי בזרם ישר :

רואים ע"פ הפרמטרים בנוסחה, שמציאת הזרם בנגד (I), יכולה להיות מחושבת במידה, וידועים לנו המתח הנופל על הנגד, או התנגדות הנגד. מכיוון שזאת לא הייתה המטרה שלנו מלכתחילה, והיות וגם לא נלקחו נתוני התנגדותו של הרכיב בשטח, ראינו באופן עקרוני, שטמפר' של רכיב טהור יכולה לשפוך אור גם על תופעות אחרות בתחום החשמל.

במקרה שלנו אפשר יהיה למצוא רק את ההספק הנומינלי של הנגד לפי נוסחת סטפאן-בולצמן, וזאת אם נדע בקירוב את שטח הפנים הגלילי שלו, שהוא למעשה המשטח פולט החום. תחילה צריך למצוא את שטח המעטפת של הנגד בסמ"ר, ולהציבו אח"כ בנוסחה של  $W_1$ .

$$S = 2 \cdot (\pi \cdot R^2) + (2 \cdot \pi \cdot R) \cdot h = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot (R + h) = \pi \cdot D \cdot (R + h)$$

שטח מעטפת של גליל :

תמונה 3 - נגד זעיר לדוגמא



קוטר :  $D = 2.5 \text{ mm} = 0.25 \text{ cm}$

רדיוס :  $R = 1.25 \text{ mm} = 0.125 \text{ cm}$

גובה :  $h = 7 \text{ mm} = 0.7 \text{ cm}$

נתוני הנגד בקירוב :

שטח מעטפת הגליל ע"פ נתוני נגד דומה :  $S = \pi \cdot D \cdot (R + h) = \pi \cdot 0.25 \cdot (0.125 + 0.7) \approx 0.65 \text{ cm}^2$

עם נתון שטח המעטפת, נמצא את ההספק הפעיל של הנגד, ע"פ נוסחת סטפאן-בולצמן, כאשר השטח

$$P_1 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_1^4 \cdot S = 0.95 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \cdot 383^4 \cdot (10^{-4} \cdot 0.65) \approx 0.075 \text{ W} \quad : \text{כבר ידוע ביחידות של סמ"ר}$$

ניתן לומר כי אמנם תוצאה זו אינה ממש מדויקת, היות וייתכנו סטיות בערכים של: האמיסיביות ( $\varepsilon$ ) של החומר ממנו עשוי הרכיב, דיוק הטמפ' במצלמה, נתוני הנגד, הפסדי הספק בקו של הנגד ובמוליכיו וכו'. באופן כללי אפשר להגיד, שחישוב כזה נותן אומדן להספק האנרגטי שיש לאלמנט, הפולט קרינה אינפרא-אדומה. הערך המוחלט של ההספק, בד"כ לא יהיה רלבנטי עבורנו, אלא אם כן אנחנו עוסקים ממש במחקר מדעי או אחר. בשבילנו התרמוגראפרים הפרמטר החשוב ביותר, בזמן גילוי ממצא תרמי הוא כידוע הפרש הטמפרטורות ( $\Delta T$ ), שהוא נותן בסופו של דבר בדו"ח הסופי, את גודלו של הקריטריון (עמ' 2 למעלה). לעיתים רחוקות בלבד אנחנו גם נרצה לדעת, את היחס של האנרגיות בין 2 המצבים ( $W_2/W_1$ ), שהוא למעשה היחס של הטמפרטורות בחזקה רביעית, הנובע מנוסחת סטפאן-בולצמן.

**2.2 הרחבה כללית בנושא** - על בסיס דוגמא פרטנית זו ניתן ליישם חישוב דומה לזה אפילו על אובייקטים אחרים לגמרי. עד כמה שזה ייראה בלתי אפשרי, הרי שניתן למצוא למשל, את החום הנפלט מגוף של אדם, דרך העור שלו, החוצה אל האוויר האופף אותו. כמובן, שההבדל בין חישוב זה לחישוב הקודם (של הנגד הזעיר), הינו בחישוב שטח המעטפת, שהוא די מסובך בגוף תלת מימדי כמו גוף האדם. למזלנו חישוב זה כבר בוצע, ומסתבר שהממוצע של שטח מעטפת של גוף האדם, בנתונים של משקל וגובה רגילים הוא כ- 1 מ"ר. אם כך יש לדעת רק עוד פרמטר בודד, שהוא מקדם האמיסיביות ( $\varepsilon$ ) של עור האדם, לצורך הצבתו בנוסחה הידועה ( $W$ ) הנזכרת לעיל. מסתבר שגוף האדם הוא גוף הקרוב מאוד, בהתנהגותו לגוף "שחור" (blackbody), עובדה התורמת לנו בהוצאת החום מפנים הגוף, החוצה לעבר משטח פני העור, וכך מסייעת לוויסותו החיוני.

**הגדרת גוף שחור** = גוף הבולע באופן מושלם ומלא את הקרינה האלקטרומגנטית, בכל אורך של גל. עקב המרת הקרינה האלקטרומגנטית לאנרגיה תרמית באותו הגוף, נוצר שינוי הטמפ' בגוף עצמו. מסיבה זו הוא נחשב למקור אידיאלי לקרינה תרמית. (כמו למשל תנור ספיראלה, או להבדיל השמש שלנו, שהיא המקור הכי חשוב לקרינה תרמית עבור עולמנו). לגוף "שחור" המקדם הוא:  $\varepsilon = 1$ .

אם כך הנתונים לגבי העור של גוף האדם:  $T_{\text{skin}} = 32^\circ\text{C} = 305^\circ\text{K}$ ,  $S = 1 \text{ m}^2$ ,  $\varepsilon = 0.98$

$$P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S = 0.98 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \cdot 305^4 \cdot 1 \approx 481 \text{ W} \quad : \text{נציב נתונים לגילוי ההספק המבובזבז מהעור}$$

המסקנה המתבקשת מתוצאה מדהימה זו היא, שגוף האדם פולט בכל שעותיו אנרגיה, הדומה לזו של אנרגיה חשמלית בגודל של כ- 1 קילוואט-שעה.  $E = P \cdot t = 0.481 \cdot 2 = 0.962 \text{ KWh} \approx 1 \text{ KWh}$

לסיכום איבחון ממצא זה של הנגד הזעיר (וגופים אחרים) ניתן לומר, שבשל התנהגותם של גופים בטבע, ע"פ חוק זה של סטפאן-בולצמן, מתאפשר לנו למזלנו הרב למצוא, אפילו שינויי טמפ' מזעריים בסריקה תרמית. קל וחומר שינויים דראסטיים, ייראו לנו בהבלטה יתירה במצלמת ה- I.R., כאילו אותו האלמנט הנצפה פולט אנרגיית חום רבה. (מהעובדה שהאנרגיה היא כפונקציה של הטמפ' בחזקה 4).

## ד. מסקנה וסיכום הממצא התרמי

סריקות תרמוגראפיות הן כלי חשוב לאחזקה מונעת. הן חוסכות תקלות מסובכות, זמן הדממה, שעות עבודה וכוח אדם, שריפות, קלקולים פנימיים, ובזבזבז כסף עתידי. הן לא מיועדות אך ורק לצרכני זרם גדולים בלבד כמו, שרבים נוטים לחשוב, אלא גם לצרכנים מינוריים. מקרה זה הוא דוגמא קלאסית לרכיב אלקטרוני, שאינו נחשב כצרכן זרם גדול (רכיב DC), ואף על פי כן כדאי מאוד לסרוק גם אותו במסגרת הסריקה התרמית הכללית. מתברר אפוא, שהסריקה התרמוגראפית מגדילה את יעילותו של המתקן החשמלי הנבדק מכל הבחינות, ואף מוכיחה לכלל האנשים, ולאנשי מקצוע החשמל בפרט, שאין לזלזל אפילו בנגד זעיר, שאורכו כחצי סנטימטר, המולחם איפשהו בכרטיס אלקטרוני "זניח".