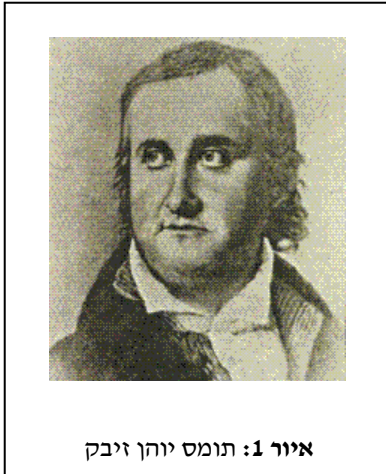


הצמד החומני

1. תגליתו של זיבק ותופעות תרמואלקטריות

בתחילת שנות ה-20 של המאה ה-19 ערך הפיסיקאי (והרופא) הגרמני זיבק (T. J. Seebeck)

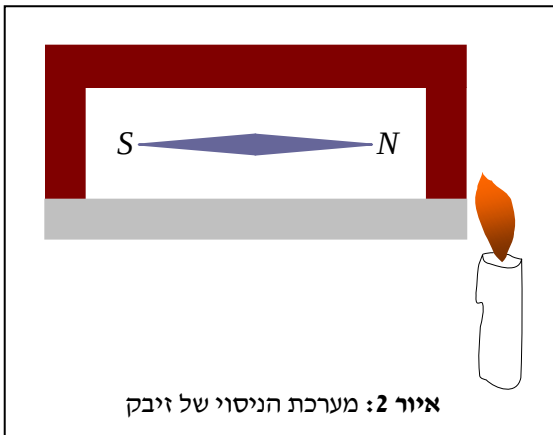


סדרה של מחקרים לבחינת תכונות מגנטיות של מתכות. במהלך אחד הניסויים הבחין בתופעה בלתי מוכרת עד אז: שתי פיסות מתכת, האחת עשויה נחושת והאחרת עשויה ביסמות', הוצמדו זו לזו בקצותיהן, כך שנוצרה לולאה דומתכתית (ראו איור 2). מחט מגנטית הותקנה בתווך שבין הפיסות. כאשר חומם אחד מצומתי החיבור של צמד המתכות באמצעות להבת נר, בעוד שהאחר נותר בטמפ' החדר, סטתה המחט המגנטית ממקומה. סטיית המחט הצביעה על השראתו של שדה מגנטי בסביבת הלולאה.

זיבק סבר **בטעות**, כי הטלת הפרש הטמפרטורות על צמד המתכות מגנטה את המתכות עצמן, וכי קיטוב מגנטי זה הוא שהשרה שדה מגנטי בסביבת המתקן. הוא גרס, כי ניסוי זה וניסויים דומים שערך הצביעו על זיקה ישירה בין זרימת חום

לבין השראה של קיטוב מגנטי במתכות. לתיאוריה ה**מוטעית** העניק את השם תרמומגנטיות.*

השערתו עוררה הסתייגויות בקרב רבים מעמיתיו. האחרונים סברו, כי – כפי שאומנם אושש מאוחר



יותר – מתח חשמלי, ולא קיטוב מגנטי, הוא שהושרה בלולאה הדומתכתית עקב הטלת הטמפרטורות השונות על צומתי החיבור. מתח זה הניע זרם חשמלי במעגל, והזרם החשמלי הוא שהשרה שדה מגנטי בסביבת המתקן. כך שלאמיתו של דבר, היה השדה המגנטי תוצאה עקיפה בלבד של זרימת החום במעגל של זיבק, והמתכות עצמן לא קוטבו מגנטית כלל.

התופעות, שמקורן ביחסי הגומלין שבין זרימת חום לבין התנהגותם של נושאי מטען חשמלי במוליכים, מכונות תופעות

תרמואלקטריות. תופעות אלה קיימות, משום שצפיפותם של נושאי מטען חשמלי במוליך תלויה בטמפ', ומשום שלצפיפויות האופייניות של נושאי מטען חשמלי יש ערכים שונים במוליכים שונים.

נזכיר בקצרה את שלוש התופעות התרמואלקטריות, המוכרות בהעדר שדה מגנטי חיצוני:

1. **אפקט זיבק** מתאר השראה של מתח חשמלי, כאשר מפל טמפ' מוטל על מוליך. על אפקט זה, שהיה הראשון להתגלות מבין השלושה, נרחיב את הדיבור מיד.
2. **אפקט פלטיה** (ע"ש J. C. A. Peltier) מתאר פליטה של חום אל הסביבה או בליעה של חום מן הסביבה, כאשר זרם חשמלי זורם דרך משטח הגבול שבין צמד מוליכים שונים.

* זיבק פרסם את ממצאיו במאמר "Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz" ("קיטוב מגנטי של מתכות ושל עפרות באמצעות הפרש טמפרטורות"). המאמר (הארוך למדי...) פורסם בכתב העת "Abhandlungen der Königlich Akademie der Wissenschaften zu Berlin" ("אסופות האקדמיה למדעים של קניגליך בברלין") בדרך שהוקדש לשנים 1822-1823.

3. **אפקט תומסון** (ע"ש W. Thomson, Lord Kelvin) מתאר פליטה של חום אל הסביבה או בליעה של חום מן הסביבה, כאשר זרם חשמלי זורם לאורך מוליך אחיד, שעליו הוטל מפל טמפרטורה.

2. עקרון הפעולה של צמד חומני

בניסוי זה אנו נתמקד בבחינת האפקט התרמו-אלקטרי ע"ש זיבק. לפיכך נתייחס אל התופעה כאל עובדה פיסיקלית ניסויית, ונתרכז בתיאור מאפייניה התצפיתיים. למעשה, נצעד בדרך דומה לדרך, שבה צעדו חוקריה הראשונים של התופעה: הם תיארו את תצפיותיהם, מבלי שעמדה לרשותם תורה שלמה וסדורה להסבירן.

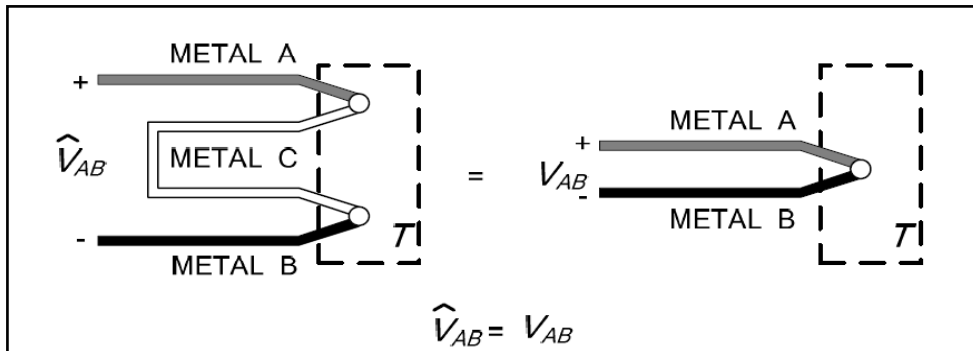
כאמור המערכת הבסיסית ביותר למדידת אפקט זיבק מורכבת משתי מתכות שונות המחוברות בשני קצותיהן (איור 2). כאשר שני הקצוות מוחזקים בטמפ' שונה, מושרה במעגל מתח חשמלי הגורם לזרם לזרום דרך המוליכים. זרם זה גורם להפרש מתחים חשמלי לאורך המעגל התלוי בהפרש הטמפ' בין הקצוות וניתן למדידה ע"י שימוש במד מתח.

חשוב לציין שצמד חומני אינו מודד טמפ' אלא הפרשי טמפ' בין קצות הצמד. לכן, על מנת להשתמש בצמד החומני כמד טמפ', יש לקבע את הטמפ' על אחת הצמתים (צומת הייחוס) לטמפ' קבועה וידועה, ולהשתמש בצומת השנייה (הצומת החופשית) כמד טמפ'. על כך נרחיב המשך.

בניסויים למדידת מעברי חום וטמפ' אנו נתקלים לעיתים קרובות במערכות בהן הטמפ' בסביבת מד הטמפ' איננה קבועה אלא משתנה באופן רציף. מכיוון שלצמד חומני יש משה סופית וקיבול חום סופי, הוא אינו יכול להגיב במהירות אינסופית לשינויים בטמפ' הסביבה. את זמן התגובה ניתן להעריך באופן גס ע"י שימוש במודל של ניוטון למעבר חום. באופן איכותי חשוב לזכור שזמן התגובה יהיה תלוי בקיבול החום של מד הטמפ', מסתו, קבוע מעבר החום ושטח הפנים שלו. לכן, על מנת להבטיח מדידת טמפ' מדויקת בסביבה בה הטמפ' משתנה במהירות יש לדאוג לכך שזמן התגובה יהיה קצר בהרבה מהזמן האופייני להשתנות הטמפ' במערכת.

להבנת ההתנהגות הניסיונית של צמד חומני ניתן להיעזר בשלושה כללים:

1. חוק המתכות ההומוגניות – מעגל חשמלי תרמו-אלקטרי אינו יכול להתקיים אם המעגל מורכב ממתכת הומוגנית אחת בלבד גם אם שטח החתך של המוליכים במעגל משתנה. כלומר, הפרש טמפ' לבדו אינו מספיק על מנת לקיים זרם במעגל סגור. לשם כך נדרשות לפחות שתי מתכות שונות.
2. חוק מתכות הביניים – למעגל תרמו-אלקטרי המורכב מצמד חומני תמיד ניתן להוסיף מתכת נוספת מבלי לשנות את הפרש המתחים במעגל, בתנאי שהצמתים החדשות הנוצרות ממגע מתכת זו עם המתכות הקיימות נשמרות באותה הטמפ'. (ראו איור 3)

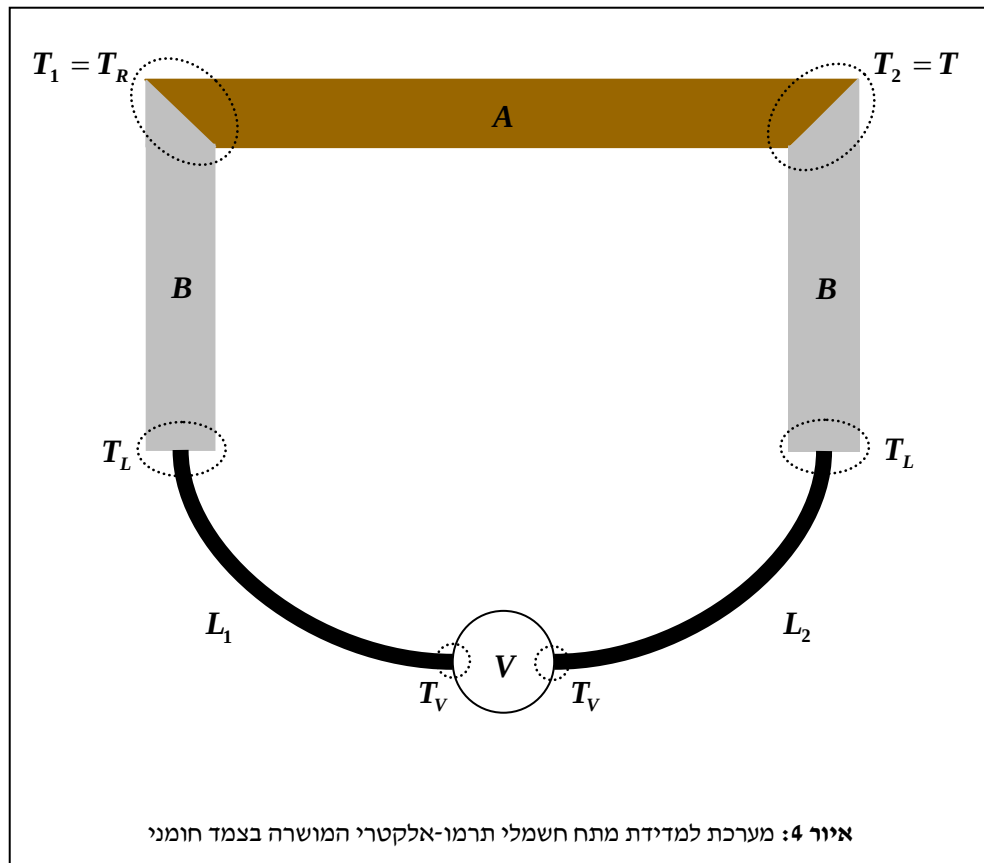


איור 3 - חוק מתכות הביניים.

3. חוק טמפרטורות הביניים – אם צמד חומני מייצר הפרש פוטנציאלים תרמו-אלקטרי הנתון ע"י V_1 כאשר קצותיו נתונים בטמפ' T_1 ו- T_2 , והפרש פוטנציאלים תרמו-אלקטרי V_2 כאשר קצותיו נתונים בטמפ' T_2 ו- T_3 , אזי הפרש הפוטנציאלים התרמו-אלקטרי שייווצר כאשר קצותיו נתונים בטמפ' T_1 ו- T_3 יהיה $V_1 + V_2$.

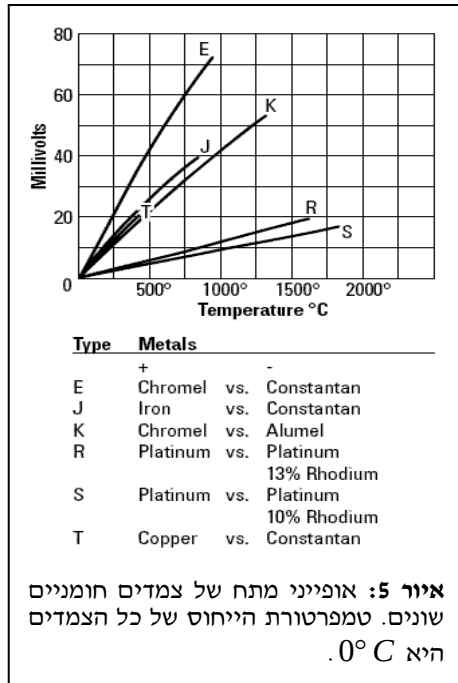
עתה נוכל להבין טוב יותר את התנהגות המעגל החשמלי המורכב מצמד חומני ומד מתח. נתבונן באיור 4. המתקן המתואר, המכונה **צמד חומני**, מאפשר מדידה של מתח זיבק. כל אחד משני קצותיו של מוליך חשמלי מסוג A צמוד לאחד משני קצוות של מוליך חשמלי מסוג B. את משטחי המגע שבין המוליכים נכנה צמתים. המוליך מסוג B קטוע. לכל אחת מנקודות הקטיעה של מוליך B מוצמד תיל חיבור L (לציון lead – תיל), המתחבר לאחד ההדקים של מד מתח V. התיילים L_1 ו- L_2 עשויים מוליך מסוג זהה. על אחד הצמתים שבין מוליך A לבין מוליך B מוטלת טמפ' T_1 , ועל הצומת האחר שביניהם מוטלת טמפ' T_2 . על שני הצמתים שבין מוליך B לבין התיילים L_1 ו- L_2 מוטלת טמפ' זהה T_L . על שני הצמתים שבין התיילים לבין הדקי מד המתח מוטלת טמפ' זהה T_V . הבחינו, שכל אחת מן הטמפרטורות האמורות מוטלת לא רק על משטח הגבול עצמו, אלא גם על האזורים הסמוכים אליו, כפי שממחישות הלולאות המקווקוות, התוחמות אזורים אחידי טמפ' אלה באיור. צמתים כאלה מכונים צמתים איזותרמיים. נצמצם את הדיון למקרה, שבו כל אחד מן המוליכים במערכת הוא מוליך אחיד (כלומר: לכל אלמנט נפח שלו יש תכונות פיסיקליות זהות) ואיזותרופי (כלומר: התכונות הפיסיקליות שלו אינן תלויות בכיוון ייחודי איזושהו של המרחב).

אף שהמערכת שבאיור 4 היא **מעגל חשמלי פתוח** (זרם חשמלי אינו זורם בה), ואילו המערכת בניסוי המקורי של זיבק (איור 2) היא מעגל חשמלי סגור (זרם חשמלי זורם דרכה), הרי שאפקט זיבק מתקיים בשתי המערכות. כל שעשינו במערכת שבאיור 4 היה לפתוח מעגל כדוגמת המעגל שבאיור 2,



כדי שנוכל להתקין בו מד מתח למדידת המתח המושרה.

כאשר הטמפרטורות T_1 ו- T_2 שונות זו מזו, מושרה בין קצות המעגל מתח חשמלי, וניתן למדוד במד המתח. אם מחליפים את שתי הטמפרטורות זו בזו, הופך המתח המושרה את סימנו. כאשר הטמפרטורות T_1 ו- T_2 שוות זו לזו, מתח אינו מושרה במעגל. הדרישה, שכל אחד מן המוליכים במערכת יהיה אחיד ואיזוטרופי, מבטיחה, שהמתח המושרה לא יהיה תלוי בצורתם הגיאומטרית של רכיבי המעגל ובצורת התפלגותה של הטמפר' לאורך המעגל. הדרישות, שתילי החיבור L_1 ו- L_2 יהיו עשויים סוג מוליך זהה, שעל שני הצמתים שבין מוליך B לבין התיילים תוטל אותה טמפר' T_L , ושעל שני הצמתים שבין התיילים לבין הדקי מד המתח תוטל אותה טמפר' T_V – דרישות אלה מבטיחות, שהמתח המושרה לא יושפע מחיבור מד המתח למעגל, חיבור המצריך התקנה של תיילים והדקים נוסף על צמד המוליכים A ו- B . בתנאים המוזכרים תלוי המתח המושרה בצמד החומני בארבעה גורמים: **בסוג המוליך A , בסוג המוליך B , בטמפר' T_1 , המוטלת על הצומת האחד, ובטמפר' T_2 , המוטלת על הצומת האחר:** $V = V(A, B, T_1, T_2)$ (למרבה הצער, כאן יצאנו נפסדים מכך, שלא פרשנו תמונה מלאה של הפיסיקה העומדת ביסוד התופעה. בהסתמך על ניתוח מלא זהו עניין של מה בכך להראות, שאלה הם אכן פני הדברים).



נבחר צמד חומני, המורכב ממוליך A וממוליך B מסוימים, ונקבע את הטמפר', המוטלת על אחד הצמתים. נכנה צומת זה צומת הייחוס של הצמד, ונסמן את הטמפר' המוטלת עליו ב- T_R (לציון reference – ייחוס). את הטמפר' המוטלת על הצומת האחר אנו רשאים לשנות כרצוננו. נכנה צומת זה בשם צומת הבורח (או צומת המדידה), ונסמן את הטמפר' השרירותית המוטלת עליו ב- T . בצמד חומני כזה, שבו קיבענו את סוגי המוליכים A ו- B ואת טמפר' הייחוס T_R , יהיה תלוי המתח המושרה בטמפר' הבורח לבדה: $V_{A,B,T_R} = V_{A,B,T_R}(T)$ (האינדקסים התחתיים מציינים, שקיבענו את A , את B ואת T_R). התלות בטמפר' הבורח T אופיינית, כמובן, לכל צמד וצמד בהתאם לסוגי המוליכים המרכיבים אותו ולטמפר' הייחוס שהוטלה. באיור 5 מוצגים אופייני מתח של צמדים חומניים נפוצים.

תגובת המתח של צמד חומני נתון תלויה בטמפר' הבורח תלות מורכבת, שאינה ניתנת להבעה ע"י קשר פשוט.

אולם תמיד נוכל להביע את התלות במקורב ע"י פולינום, דהיינו: נוכל להציג סכום טיילור, המתקרב כדי מידת הדיוק הרצויה להתנהגות המדויקת בתחום רצוי של טמפרטורות. אם נבחר לפתח את הסכום ביחס ל- T_R , תהיה להצגה הפולינומית המקורבת של המתח האופייני הצורה הבאה:

$$V_{A,B,T_R}(T) \approx C_{0,A,B,T_R} + C_{1,A,B,T_R} \cdot T + C_{2,A,B,T_R} \cdot T^2 + \dots + C_{n,A,B,T_R} \cdot T^n \quad (1)$$

בביטוי (1) n היא המעלה של פולינום הקירוב ו- $\{C_{i,A,B,T_R}\}_{i=0}^n$ הם מקדמים, התלויים בסוגי המוליכים A ו- B ובטמפר' הייחוס T_R . כך, למשל, יהיה פולינום ממעלה ראשונה קירוב מניח את הדעת לאופיין המתח של צמדים חומניים נפוצים בעלי טמפר' ייחוס של $0^\circ C$ בתחום $0^\circ - 100^\circ C$ בערך. בפרט עבור תחומי טמפרטורה בהם הקשר הוא ליניארי נוכל לרשום:

$$V = k \cdot \Delta T \quad (2)$$

כאשר: V הוא הפרש המתחים המושרה בצמד החומני (בוולטים), k – הוא קבוע זיבק ו- ΔT הוא הפרש הטמפ' בין קצות הצמד.

מן התיאור שהבאנו עלול להיווצר רושם מוטעה, כאילו השראה של מתח זיבק, כאשר מוטל מפל טמפ' על מוליך, מותנית בהצמדתם זה לזה של זוג מוליכים שונים, וכאילו מקור התופעה הוא במתרחש על פני משטחי הגבול שבין מוליכים צמודים כאלה. למען הסר ספק נאמר מפורשות: התכונות התרמואלקטריות, שמהן נובע מתח זיבק, הן תכונות נפחיות של כל מוליך ומוליך כשלעצמו (ממש כמו התכונות של מוליכות חום ושל מוליכות חשמלית), ומתח כזה יושרה במוליך יחיד, כל אימת שיוטל עליו מפל טמפרטורה. ההיזקקות לצמד מוליכים היא אילוץ ניסויי; המעגל הותקן כפי שהותקן כדי לאפשר תצפית ניסויית של מתח תרמו-אלקטרי, שלא תהיה תלויה במד המתח עצמו. המתח התרמו-אלקטרי המדוד כך הוא, למעשה, המתח היחסי של צמד המוליכים. ראוי לציין בעניין זה, כי מתח זיבק אינו מושרה במוליך-על. לכן, אם אחד מזוג המוליכים בצמד הוא מוליך-על, ניתן למדוד את מתח זיבק המוחלט של המוליך האחר.

תכופות משתמשים בצמד חומני למדידת טמפרטורה. כדי לעשות זאת יש לכייל את הצמד תחילה: יש לערוך מדידות מדויקות מאוד של המתחים המושרים בצמד, כאשר מוטלות על צומת הבוחן שלו טמפרטורות שונות, שאף ערכיהן ידועים בדיוק רב. אזי יש להתאים לנתונים שנדגמו עקומת כיול של טמפ' בוחן בהימדד מתח מושרה, $T(V)$. או אז אפשר להשתמש בצמד כמדחום: לאחר שהוטלה טמפ' בוחן בלתי ידועה, שאותה מבקשים למדוד, אפשר לתרגם בעזרת עקומת הכיול את הוריית המתח המדוד לטמפ' המבוקשת. יתרונותיו של מדחום צמד חומני הם פשטותו היחסית של המתקן, האפשרות לעצבו בצורה ובגודל רצויים, האפשרות לעקוב אחר שינויים מהירים יחסית של טמפ' הודות להולכת החום הטובה של המתכות, הבאות במגע עם התווך הנבדק, והיותו מתאים לשימוש בתחום רחב יחסית של טמפרטורות.

למרות שצמדים תרמיים משמשים בכל העולם כאמצעי מקובל למדידת טמפרטורה, במעבדה זו אנו באים לבחון את אופן פעולת הצמד התרמי ולשם כך עלינו למדוד טמפרטורה על ידי אמצעי חלופי. האמצעי בו נשתמש הינו תרמיסטור.

"תרמיסטור" (Thermal resistor) הינו נגד אשר התנגדותו תלויה באופן משמעותי בטמפרטורה. תרמיסטור עשוי לרוב ממוליכים למחצה והתנגדותו נתונה ע"י הנוסחה:

$$R(T) = R_0 e^{\alpha \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (3)$$

כאשר R - התנגדות הנגד, T - טמפרטורה בקלווין, R_0 - התנגדות בטמפרטורה T_0 (לרוב 298.15K), α - קבוע התלוי בחומר בעל יחידות של K.

מדידה מדויקת של התנגדות התרמיסטור יכולה לשמש כאמצעי למדידת טמפרטורה בדיוק גבוה.

במפגש המעבדה:

- נחקור את תגובת המתח של צמד חומני נתון בתחומים שונים של טמפ', ונתווה אופיין מתח של הצמד (שימו לב: אנו נתווה אופיין מתח, ולא עקומת כיול).