



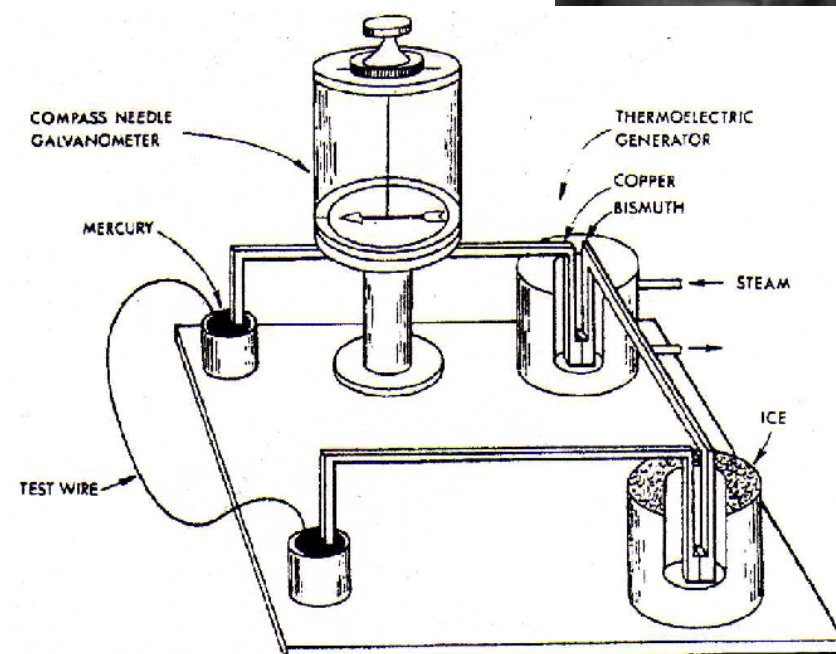
בית המדרש 'נקודת ארכימדס'
מרכז אחר"ית



שחזור חוק אוהם המקורי

פרוייקט

יולי 2020 תש"פ



פרטי המנחה:

שם : גילית פורת

משתלמים:

שם : נאוה ישראל

דוא"ל: nava201168@gmail.com

שם : מיכאל ברנר

דוא"ל: miki.brenner@gmail.com

	תוכן עניינים
4	מבוא
5	רקע תיאורטי
5	חוק אוהם
7	חוק אוהם הדיפרנציאלי
7	חומרים אוהמיים -
7	הניסוי של אוהם
9	מומנט פיתול של לולאת זרם
10	מומנט כוח של לולאת זרם
13	צמד תרמי או איך עובד מדחום דיגיטלי
15	ניסוי מקדים 1 - גליונומטר טנגנטי
15	מבוא
16	שדה מגנטי במרכז כריכה מעגלית נושאת זרם.
16	חוק המשיק (טנגנס) של מגנטיות.
20	גרף זווית כנגד מספר הכריכות
22	גרף זווית כנגד הזרם
24	ניסוי מקדים 2 - צמד תרמי (אפקט ס'יבק)
25	צמד תרמי
27	ניסוי מקדים 3 - מוליכות תרמית
34	ניסוי מרכזי- שיחזור ניסוי חוק אוהם המקורי
34	מבוא ורקע תיאורטי
41	סיכום:
	בחרנו בפרוייקט שיש לו משמעות גדולה בעינינו להוראת נושאים ע"י מורים לפיזיקה בבתי הספר. חוק אוהם מתאר את הקשר הנסינוי בין הזרם במוליך לבין המתח בין קצותיו. בעבודה זו הכרנו את הפרמטרים השונים המשפיעים על התנגדות של מוליך ואת המושג "התנגדות סגולית". למדנו באופן תיאורטי וניסויי על מעגלים חשמליים, על מכשירי מדידה וכיצד הם משפיעים על המעגל.
41	מעבר לחקר נושא באופן מעמיק, כמו כל ניסוי גם ניסוי חוק אוהם נלמד במסגרת תכנית הלימודים בתיכון, לביסוס הידע התיאורטי ועוזר לו להבין את התיאוריה, נוסחאות, כללים וחוקים. למדנו על תהליך העבודה המייגע והארוך של מדענים והתהליך היה מאתגר ומהנה. לקראת סוף הפרוייקט נאלצנו לעבוד מרחוק ללא ציוד מעבדה (סגר הקורונה), וזה הביא אותנו לעצירת בניית המודל/הניסוי המרכזי של הפרוייקט. ביססנו את הידע שלנו בביצוע ניסויים, מדידה, שגיאות ושימוש בכלים שונים לניתוח תוצאות.
41	תודה למנחים ולמרכז אחרת על הליווי והתמיכה לאורך כל הדרך.
42	ביבליוגרפיה

מבוא

במסגרת לימודינו בבית המדרש 'נקודת ארכימדס' החלטנו שננסה להתחקות אחרי מוחו של גאורג סימון אוהם ולנסות ולהבין איך הוא הצליח, במגבלות הציוד והידע הקיים באותה עת (1826), לערוך את אחד הניסויים המשמעותיים ביותר בתולדות תורת החשמל.

עריכת הניסוי שאוהם עשה בזמנו נראית לנו היום טריוויאלית ופשוטה לאור מה שאנו יודעים והציוד המשוכלל שעומד לרשותנו אך הדברים הללו לא היו בהישג ידו של אוהם, הוא היה צריך לחשוב ולהבין איך הוא יצליח לבצע את הניסוי שלו בהצלחה כל זאת בעולם ללא סוללות יציבות, מדי זרם משוכללים וידע רחב על סוגי חומרים.

בחרנו בנושא זה כיוון ששנינו מאוד אוהבים את נושא החשמל והיה נראה לנו מאוד מאתגר לנסות ולשחזר את הניסוי של אוהם, אחד החשובים בתולדות תורת החשמל.

אנו מקווים שבאמצעות שחזור מערך הניסוי המקורי של אוהם נבין לעומק את הסוגיות איתן אוהם התמודד ונוכל להעביר אותם לתלמידי פיזיקה באשר הם.

רקע תיאורטי

חוק אוהם

חוק אוהם נוסח על ידי הפיזיקאי גאורג אוהם לפני קרוב למאתיים שנה (1826). החוק מייצג את הקשר בין זרם, מתח והתנגדות של הרכיב הפשוט ביותר במעגל חשמלי, שתמיד יהיה קיים במעגל – הנגד. החוק הזה הוא אחת מאבני היסוד של תורת החשמל בפיזיקה. על פי חוק אוהם יש קשר ישר בין הזרם הזורם דרך נגד, ההתנגדות של הנגד והמתח שנופל על הנגד ($V=I \cdot R$, כלומר המתח שווה למכפלת ההתנגדות והזרם). על פי חוק אוהם קיימת תלות בין הזרם, המתח וההתנגדות של נגד במעגל חשמלי. הנחת היסוד היא שמדובר בתנאים רגילים, כלומר לא במצב של טמפרטורה קיצונית ולא בחומרים שהם מוליכים למחצה. זרם חשמלי הוא למעשה תנועה של מטענים (אלקטרונים במקרה זה), מתח חשמלי הוא הפרש הפוטנציאל של תנועת האלקטרונים בין שתי נקודות, והתנגדות, כשמה כן היא, היא ההתנגדות של הרכיב (נגד או תיל) לזרם החשמלי שעובר בו.

חוק אוהם הוא חוק אמפירי. ישנם מספר מודלים על פיהם חוק אוהם נגזר מתוך התורה האלקטרומגנטית, כמו למשל מודל דרודה. במקרים רבים הנחות המודל אינן מתקיימות. במערכות כאלו, גם חוק אוהם אינו מתקיים. בפרט, היחס הליניארי אותו חוק אוהם מתאר בין המתח לזרם, מתקיים בטווח טמפרטורות מסוים ואינו נכון באופן כללי (לדוגמה בטמפרטורות גבוהות או נמוכות מאד).

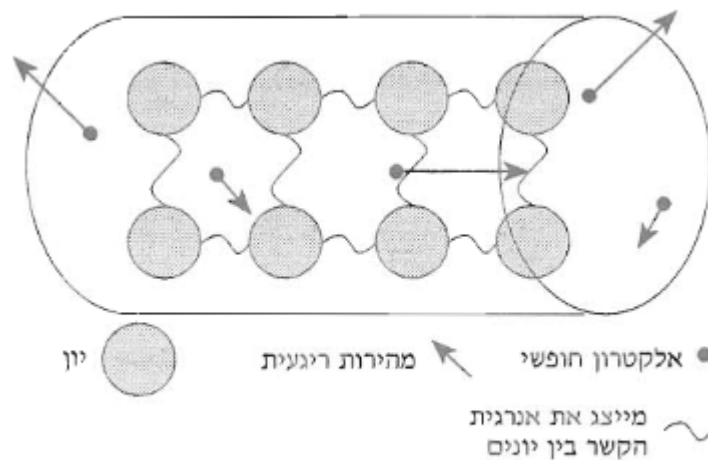
החוק תקף בחומרים ספציפיים (בעיקר מתכות, תמיסות אלקטרוליטיות וגרפיט) וכלל לא מתקיים במוליכים למחצה, שם היחס בין המתח לזרם אינו ליניארי. כמו כן, שדות חשמליים חזקים (הנוצרים בעיקר במתחים גבוהים) יוצרים תופעות פריצה חשמלית כגון ברקים, קשת חשמלית וכשלים במבודדים, אשר מורידים את ההתנגדות משמעותית - כלומר חוק אוהם מפסיק להיות תקף בתנאים אלה.

כאשר בודקים באופן ניסיוני את הקשר בין המתח לזרם, מקבלים בתחום רחב למדי של מתחים יחס ישר. תופעה זו מוכרת כחוק אוהם, בו ההתנגדות מוגדרת כיחס בין המתח בין קצות הנגד לזרם העובר דרכו. במערכות רבות בפיזיקה אמנם קיים יחס ליניארי בין גדלים פיזיקליים, אולם יחס זה מתקיים בדרך כלל בתחום צר. המיוחד במקרה זה הוא התחום הרחב יחסית בו הקשר הליניארי מתקיים, והשלכותיו המעשיות הרבות. במאה השנים האחרונות, עם ההתקדמות בהבנת מבנהו הפנימי של החומר היו ניסיונות למצוא מודלים מיקרוסקופיים להסברת תופעת ההולכה. מודלים אלו ניסו להבין את הסיבה לקיומו של התחום הרחב של מתחים עבורם מתקיים חוק אוהם.

למתכות טהורות מבנה מיקרוסקופי פשוט, עבורן קל יותר לבנות מודלים לתיאור תופעת ההולכה. מודל כזה, המבוסס על המכניקה הקלאסית, הוצע ב 1900 ע"י הפיזיקאי הגרמני פאול דרודה ונקרא "מודל דרודה".

מודל דרודה מניח כי המתכת מורכבת מגז אלקטרונים הנעים על רקע של יונים נייחים. המודל מניח שניתן לתאר את תנועת האלקטרונים במתכת באופן קלאסי, והאלקטרונים מתנהגים כמו גז אידיאלי פרט להתנגשויותיהם עם היונים. באופן פורמלי הנחות המודל הן:

- המתכת מורכבת מיונים נייחים ומאלקטרונים חופשיים הנעים ביניהם (ראו איור).



תרשים 1: תיאור סכימטי של אלקטרונים ויונים בגביש מתכתי

- כל אלקטרון נע ללא אינטראקציה עם האלקטרונים האחרים, וללא אינטראקציה עם היונים פרט להתנגשויות שמתרחשות באופן אקראי. בין ההתנגשויות האלקטרונים נעים אך ורק תחת השפעת שדות חיצוניים (מגנטיים או חשמליים) אם קיימים כאלה.
 - בפרק זמן אינפיניטסימלי dt ההסתברות שתתרחש התנגשות לאלקטרון מסוים היא dt/τ כאשר τ הוא קבוע שאינו תלוי במיקום, במהירות האלקטרון או בזמן שחלף מאז ההתנגשות הקודמת. במילים אחרות, ההתנגשויות של אלקטרונים הם תהליכים פואסוניים. ניתן להוכיח שמכך נובע כי הזמן הממוצע בין התנגשויות הוא τ .
 - לאחר התנגשות, האלקטרון יוצא במהירות שכיוונה אקראי וגודלה נקבע על פי הטמפרטורה באזור ההתנגשות (על פי חוק החלוקה השווה).
- הזמן בין ההתנגשויות τ

הזמן הממוצע בין ההתנגשויות, τ הוא פרמטר מרכזי במודל. את τ ניתן להעריך ע"י τ/v כאשר v הוא המהלך החופשי הממוצע ו- V היא המהירות הממוצעת של האלקטרונים. קשה למדוד את τ במדויק

על פי הנחות המודל, המהלך החופשי הממוצע הוא מסדר גודל של המרחק בין אטומים במתכת הנע בין 1 ל-10 אנגסטרם. את המהירות הממוצעת ניתן לקבל מחוק החלוקה השווה

$$\frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} K_B T \Rightarrow \bar{v} = \sqrt{\frac{3 K_B T}{m}}$$

עבור טמפרטורת החדר, מתקבל $\bar{v} \approx 10^7 \frac{m}{s}$ ו- $\tau \approx 10^{14} - 10^{15} sec$

כיום ידוע שהערכה זו רחוקה מהאמת, היות שהאלקטרונים אינם מצייתים להתפלגות הקלאסית של גז אידיאלי (התפלגות מקסוול בולצמן). זאת משום שאלקטרונים הם פרמיונים המוגבלים על ידי עקרון האיסור של פאולי, ולכן מצייתים להתפלגות פרמי דיראק, המנבאת להם מהירות ממוצעת גבוהה בהרבה (בערך פי מאה). מודל דרודה הצליח להסביר בצורה אינטואיטיבית את העובדה שהאלקטרונים נעים במהירות קבועה למרות העובדה שפועל עליהם כח חשמלי ומכאן הם אמורים לנוע בתאוצה. אחת ההצלחות של מודל דרודה הוא ניבוי הגרסה המיקרוסקופית (או הדיפרנציאלית) של חוק אוהם.

חוק אוהם הדיפרנציאלי

עבור זרמים העוברים בתווך שאינו אחיד ופשוט, ניתן להשתמש בצורה מקומית של חוק אוהם (או "חוק אוהם הדיפרנציאלי"), שהיא: $J(r) = \sigma(r)E(r)$. כאשר, בכל נקודה r במרחב, J הוא וקטור צפיפות הזרם, σ היא מוליכות סגולית ו- E הוא וקטור השדה החשמלי. במקרה הכללי ביותר המוליכות הסגולית תלויה בכיוון המרחבי של הזרם ואז σ היא טנזור מדרגה שנייה ולא סקלר.

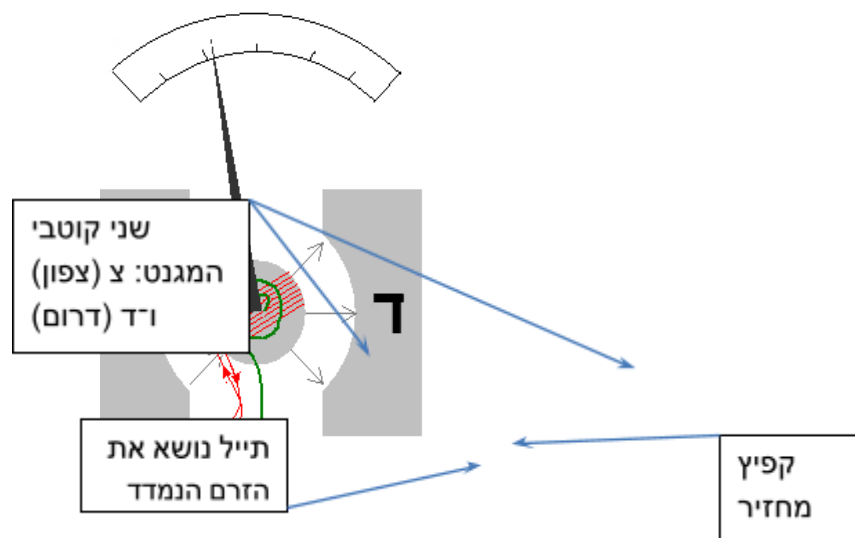
חומרים אוהמיים -

לגוף בעל שתי נקודות קצה מוגדרות המקיים את חוק אוהם נהוג לקרוא נגד אידיאלי. קיימים רכיבים חשמליים הנקראים נגדים מעשיים (או בקיצור נגדים), אשר תגובתם לזרם ולמתח קרובה לתגובה של נגד אידיאלי. לנגדים יש התנגדות קבועה בקירוב בתחומים מוגדרים של תנאי סביבה (כגון טמפרטורה), זרמים ומתחים. חומרים אוהמיים בעלי התנגדות סגולית נמוכה במיוחד נקראים "מוליכים". חומרים בעלי התנגדות סגולית גבוהה במיוחד נהוג לכנות "מבודדים".

הניסוי של אוהם

כידוע אוהם ערך את הניסוי המפורסם ב 1826 והוא לא ביצע את הניסוי למציאת חוק אוהם כפי שאנחנו מבצעים אותו היום עם רב-מודד למציאת הזרם והמתח ומקור מתח יציב, אלא באמצעות מכשירי המדידה הרלוונטיים לזמנו. את הזרם הוא מדד באמצעות גליונומטר טנגנטי ע"י מדידת מומנט הפיתול עקב השינוי בשדה המגנטי

גליונומטר



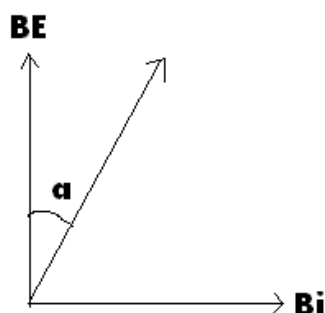
גליונומטר (Galvanometer) הוא סוג של מתמר אלקטרומכני היוצר תנועה זוויתית של מחט על פני קשת קבועה, בתגובה למעבר זרם חשמלי בסליל. הגליונומטר הוא רכיב משמעותי במדי זרם, במתח והתנגדות

הגליונומטר קרוי על שמו של המדען האיטלקי לואיג'י גלווני.

גליונומטר טנגנטי הוא שמו של מכשיר אשר בעזרתו ניתן למדוד זרם במעגל חשמלי. בנוסף, ניתן בעזרת מכשיר זה לחשב את גודל הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ במקום מסוים, ולבדוק קשרים פיזיקליים שונים.

המכשיר מורכב משלושה רכיבים עיקריים:

1. טבעת עשויה חומר לא מגנטי (לדוגמה אלומיניום)



2. תיל מוליך המתלפף סביב הטבעת מספר פעמים הניתן לשינוי.

3. מחט מצפן המונחת על מישור המאונך למישור הטבעת.

המכשיר ופעולתו מבוססים על העובדה כי זרם חשמלי יוצר מסביבו שדה מגנטי בכיוון מסוים, וכי לכדור הארץ שדה מגנטי. יש לכוון את הטבעת והמצפן כך שהטבעת תהיה מכוונת בכיוון צפון דרום והמצפן יורה על הצפון, ככל שניתן לדייק. כך וקטור השדה המגנטי אשר יצור התיל סביב הטבעת יהיה מאונך לרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ, מה שיקל בביצוע המדידות. מזרימים זרם חשמלי בתיל המעגלי, ומודדים את סטיית המצפן במעלות. נניח שמחט המצפן סטה ב- α מעלות מכיוונו המקורי (ראה תמונה)

$$\tan \alpha = \frac{B_i}{B_E}$$

את התוצאות נוכל לקבל על ידי הנוסחה הבאה:

כאשר B_E הוא הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ, ו- B_i הוא השדה המגנטי הנוצר על ידי הזרם החשמלי בתיל. את גודל השדה המגנטי הנוצר על ידי תיל מעגלי מחשבים באמצעות:

$$B_i = \frac{\mu_{0NI}}{2R}$$

כאשר μ_0 מייצג את פרמאביליות הריק, N את מספר הליפופים סביב הטבעת, I את גודל הזרם ביחידות אמפר, ו- R את רדיוס הטבעת במטרים.

נציב זאת בחישוב הקודם ונקבל:

$$\tan \alpha = \frac{\frac{\mu_{0NI}}{2R}}{B_E} = \frac{\mu_{0NI}}{2RB_E}$$

אם ברצוננו לגלות את גודל הזרם הזורם במעגל, נצטרך לדעת את גודל הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ במקום בו אנו מודדים. נציב את הנתונים בנוסחה שפיתחנו ונקבל את התוצאות בהתאם.

אם ברצוננו לגלות את גודל הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ במקום המדידה, נצטרך לדעת את גודל הזרם החשמלי במעגל. נוכל למדוד גודל זה בעזרת אמפרמטר.

נציב את הנתונים בנוסחה שפיתחנו ונקבל את התוצאה.

מדידות יחידות אינן מדויקות לרוב, ולכן מומלץ לבצע מספר רב של מדידות ולבצע קירוב

$$f(I) = \tan \alpha$$

ליניארי של הפונקציה:

מכשיר זה אינו אידיאלי לשימוש בתור מד זרם מהסיבות הבאות:

1. אי דיוק באיפוס המצפן עלול לגרום לשגיאות אקראיות במדידה.
2. אי דיוק במדידת המעלות עלול לגרום לסטיות בתוצאות.
3. על מנת למדוד זרם בעזרת מכשיר זה, יש לדעת את גודל הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ במקום המדידה, וגודל זה אינו קבוע והוא מושפע מגורמים רבים ועל כן המדידה אינה אמינה במלואה.

מומנט פיתול של לולאת זרם



הביטוי למומנט המגנטי של לולאת זרם

$$\mu = IA$$

מומנט הכוח המגנטי הוא גודל וקטורי שכיוונו ניצב ללולאת הזרם בכיוון לפי כלל יד ימין.

ומחושב על ידי

$$\tau = \mu * B$$

על פי הגיאומטריה של לולאה זרם, מומנט זה נוטה להתיישר עם השדה המגנטי B , כך שהוא מייצג את תצורת האנרגיה הנמוכה ביותר שלו. האנרגיה הפוטנציאלית הקשורה למומנט המגנטי היא

$$U(\theta) = -\mu * B$$

כך שהשינוי באנרגיה בין מומנט בכיוון השדה למומנט שאינו בכיוונו

$$\Delta U = 2\mu B$$

קשרים אלה נכונים עבור לולאת זרם סופית, ומושפעים מהדיפולים המגנטיים של מסלולי אלקטרונים, ומהמומנט המגנטי הקשור לסחרור האלקטרוני (electron spin).

ישנם גם חישובי מומנטים מגנטיים גרעיניים.

מומנט כוח של לולאת זרם

המומנט בסליל הנושא זרם, כמו במנוע DC, קשור לתכונות הסליל על ידי "המומנט המגנטי" או "מומנט הדיפול המגנטי". המומנט המופעל על ידי הכוח המגנטי (כולל שני צידי הסליל) מוגדר על ידי הנוסחה

$$\tau = BILW \sin \theta$$

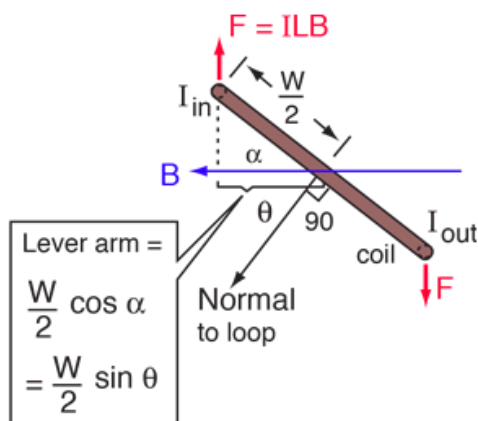
מאפייני הסליל מוגדרים כ-

$$\mu = IA$$

$$\mu = nIA \quad \text{או עבור } n \text{ ליפופים}$$

כיוון המומנט המגנטי ניצב ללולאת הזרם בכיוון הימני של כלל יד ימין, אנכית ללולאה באיור. גודל וקטור המומנט הוא

$$\tau = \mu B \sin \theta$$



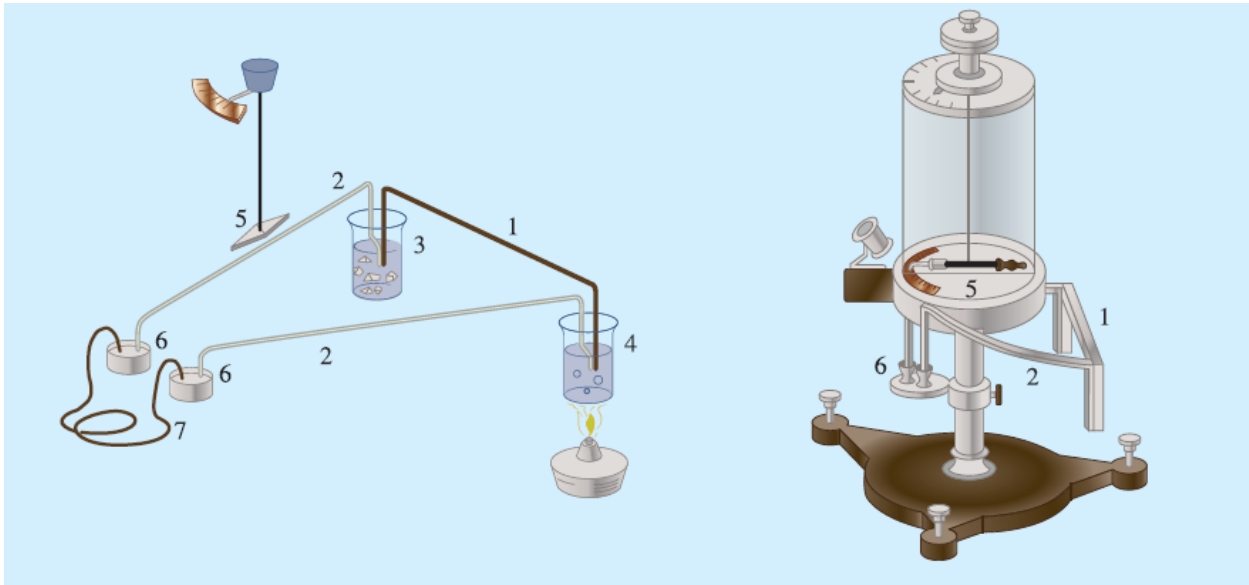
מכיוון שמומנט זה פועל בניצב למומנט המגנטי, אז הוא יכול לגרום למומנט המגנטי לפעול סביב השדה המגנטי בתדר אופייני הנקרא תדר לרמור. מומנט הכוח הדרוש כדי להתגבר על המומנט המגנטי ולסובב את הלולאה מזווית אפס ל-180 מעלות, יתן את עבודת הכוח הסיבובית על ידי האינטגרל

$$W = - \int_0^\pi \tau d\theta = - \int_0^\pi \mu B \sin \theta d\theta = - \mu B \cos \theta \Big|_0^\pi = 2\mu B$$

בנקודה בה המומנט המגנטי מנוגד לשדה המגנטי יש אנרגיה פוטנציאלית מגנטית גבוהה ביותר.

סוללות מקור מתח יציב

בתקופה בה ערך את הניסוי היו סוללות לא היה ברשותו מקור מתח יציב ולכן הוא נאלץ למצוא פתרון לכך ע"י יצירת צמד תרמי (יורחב בהמשך). הוא יצר הפרש טמפרטורה קבוע וע"י כך הוא הצליח ליצור מקור מתח יציב ומדד את הזרם במעגל. הוא השתמש במתכות בעלות מוליכות תרמית וחשמלית שונה כדי לקבל את היציבות שרצה.



איור מס' 1 - חוק אוהם המקורי

1. חוט ביסמוט (2) חוטי נחושת (3) כורית עם מי קרח (4) כורית עם מים רותחים/קיטור

(5) גליונומטר (6) כורית עם כספית (7) חוט מתכת המשמש כנגד.

אוהם ערך מספר ניסויים -

1) הוא שינה את הפרש הטמפרטורה ובעקבותיו את המתח במעגל ומדד את הזרם.

2) הוא שמר על מתח קבוע והחליף את המתכות שמהן עשוי הנגד.

3) הוא שמר על מתח קבוע ושינה את עובי הנגד במתכת זהה.

4) הוא שמר על מתח קבוע ושינה את אורך הנגד במתכת זהה.

מהניסוי הראשון הוא גילה את מה שאנו מכירים כיום כחוק אוהם $V=IR$

מהניסוי השני והשלישי הוא גילה את הקשר של ההתנגדות לתכונות הנגד $R = \rho \frac{L}{A}$

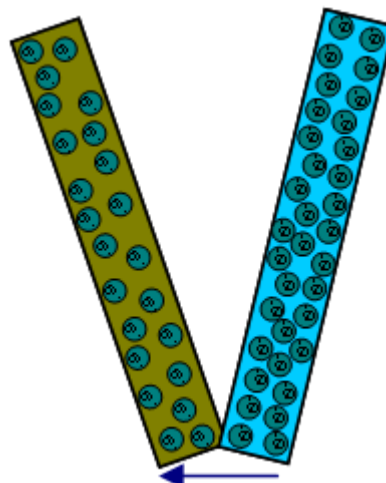
מהניסוי הרביעי והמעניין מכולם אוהם בעצם גילה את המושג של כא"מ ומתח הדקים.

$$V = \varepsilon - Ir$$

צמד תרמי או איך עובד מדחום דיגיטלי

רוב המדחומים הדיגיטליים המעבדתיים עובדים לפי עקרון הפעולה של צמד דו-חומני (מכונה גם רק 'צמד חומני', 'צמד תרמי', או לפי השם הלועזי: תרמוקופל Thermocouple). ההתקן הוא מאוד פשוט: מחברים יחד 2 מתכות שונות (נגיד נחושת וברזל) בנקודה אחת (המכונה גם נקודת צומת), ומודדים באמצעות מד-מתח את המתח החשמלי (V) שנוצר בין שתי המתכות. עבור כל טמפרטורה של הצומת – יש מתח חשמלי אופייני, כך שמה שמתקבל הוא מדחום: מכשיר שיכול למדוד טמפרטורות שונות באמצעות מדידה של משהו שמשתנה עם הטמפרטורה (במקרה הזה: על ידי מדידת מתחים חשמליים, בדומה למדחום כספית אשר מודד טמפרטורות שונות על ידי מדידת אורך של עמוד כספית). נסביר את עקרונות הפעולה של ההתקן:

1. כאשר 2 מתכות שונות נוגעות זו בזו נוצר ביניהם מתח חשמלי: כל מתכת בנויה מאלקטרונים (הטעונים מטען חשמלי שלילי) חופשיים הנעים בחופשיות בתוך מה שנקרא 'ים האלקטרונים' אשר מסביב לאטומים הטעונים מטען חשמלי חיובי. למתכות שונות – האלקטרונים החופשיים נמצאים בצפיפות שונה (או, במינוח יותר מדויק: האלקטרונים נמצאים ברמת אנרגיית-בסיס שונה), כאשר 2 מתכות שונות נוגעות זו בזו, אלקטרונים מהמתכת בעלת הצפיפות הגבוהה (או הרמה האלקטרונית הגבוהה) ינועו לעבר המתכת בעלת הצפיפות הנמוכה, כפי שאפשר לראות באיור הבא, האלקטרונים ינועו מהמתכת מימין למתכת משמאל:

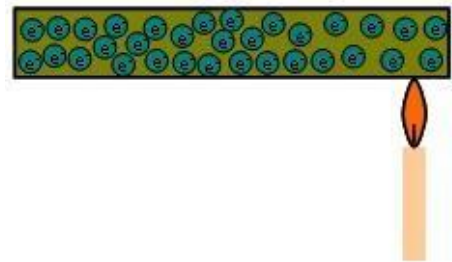


התוצאה: נוצר מתח חשמלי בין המתכות, המתכת שהייתה פחות צפופה תהפוך לבעלת מטען חשמלי שלילי (כי אלקטרונים שליליים נעו אליה) והמתכת היותר צפופה תהפוך לבעלת מטען חשמלי חיובי (כי אלקטרונים עזבו אותה). זהו למעשה פן אחר של אפקט פלטייה (Peltier) שבו מעגל חשמלי יכול להתקרר כאשר זרם עובר בו. אם יוצרים מעגל חשמלי משתי המתכות - התופעה מכונה אפקט סִיבֶק (Seebeck) על שם המדען שגילה אותו (או גם סִיבֶק-פלטייה, כי זה פן אחר של אותו אפקט).

2. כאשר מתכת רגילה נמצאת בהפרש טמפרטורות בין קצותיה, צפיפות האלקטרונים בין הקצוות משתנה, והתוצאה היא מתח חשמלי, כפי שניתן לראות בתמונות הבאות:



מתכת בטמפ' אחידה, אלקטרונים מפוזרים בצורה אחידה, אין מתחים חשמליים בין קצוות המתכת.



מתכת בעלת קצה חם יחסית לשני, האלקטרונים לא מפוזרים באופן אחיד לאורך המתכת, יש הפרש מתחים בין הקצוות.

הצמד התרמי עובד בעצם על איחוד של שני האפקטים: בצומת נוצר הפרש מתחים, והפרש המתחים משתנה עם שינוי הטמפרטורה - גם בגלל שינוי במצב האלקטרוני בצומת, וגם בגלל הפרש הטמפרטורה לאורך התיילים - בין הצומת לבין שאר המעגל. במתכת אחת בלבד, לא ניתן היה להשתמש בפועל למדידת טמפרטורה לאורך זמן כי כאשר היינו מחברים את הדקי מד-המתח לקצה החם הם היו מתחממים גם ומבטלים את האפקט, שימוש בשתי מתכות המחוברות למעגל, מה שיוצר צומת מרכזית - ושני צמתים בחיבור למעגל - מאפשר את המדידות המדויקות ביותר.

קצב החימום, או הקירור, של פלטייה עבור זרם חשמלי I הוא :

$$\frac{dQ}{dt} = (\Pi_B - \Pi_A)I$$

מקדמי פלטייה המחושבים לפי המודל הם :

$$\Pi_B = \frac{kT}{e} \ln \ln(n_R) \quad \Pi_A = \frac{kT}{e} \ln \ln(n_L)$$

הכוח האלקטרו-מניע, EMF, של סיבך הנובע משתי צמתים בטפרטורות T_H ו- T_C הוא :

$$V = -S(T_H - T_C)$$

מקדם סיבך, S , לפי המודל המחושב הוא : $S = \frac{k}{e} \ln\left(\frac{n_R}{n_L}\right)$

קצב החום של תומסון עבור צפיפות זרם J הוא : $\frac{dq}{dt} = -KJ\Delta T$

מקדם תומסון המחושב לפי המודל הוא : $K = \frac{3}{2} \frac{k}{e}$

ניסוי מקדים 1 - גלונומטר טנגנטי

מבוא

גלונומטר כמכשיר מדידה: גלונומטר טנגנטי (משיקי) הוא מכשיר מדידה קדום לזרמים חשמליים קטנים.

אולם השתמש בו כדי למדוד את הזרם במעגל. ליתר דיוק הוא מדד את השינוי בזרם כאשר שינה את ההתנגדות במעגל, אורך החוט. הוא השתמש במצפן מקרוסקופי על מנת למדוד שינויים קטנים בסטית מחט המגנט וחישב את מומנט הפיתול שפעל עליה.

אולם לא ידע את גודלו של השדה המגנטי של כדור הארץ ולכן בהנחה שהוא קבוע הוא מדד את השינוי של השדה השקול הנמדד.

אולם השתמש בעובדה שקיים יחס ישר בין טנגנס הזווית לעצמת הזרם במעגל, הוא חיבר מקור מתח קבוע (צמד תרמי) שינה את אורך הנגד ומדד את השינוי בטנגנס הזווית שהורה המצפן.

מטרות הניסוי:

מטרה ראשונה: חקירת התלות של עוצמת השדה המגנטי, שנוצר במרכז לולאה מעגלית נושאת זרם בשני פרמטרים:

1. עוצמת הזרם הזורם בלולאה, כאשר מספר הכריכות קבוע.

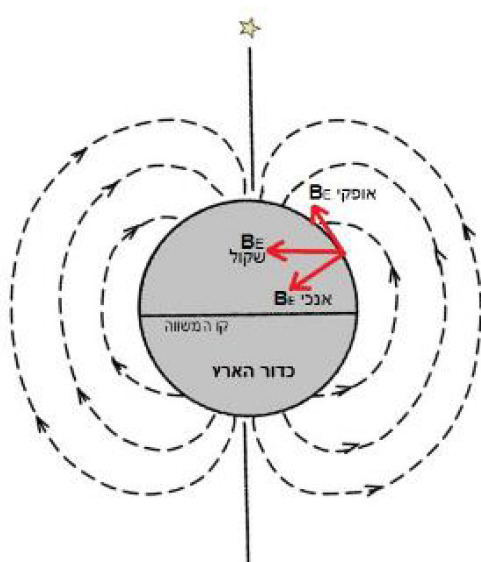
2. מספר הכריכות של הלולאה, כאשר עוצמת הזרם קבועה.

מטרה שנייה: מציאת גודל הרכיב האופקי של השדה המגנטי הארצי.

רקע תאורטי:

לכדור הארץ שדה מגנטי, בו הקוטב המגנטי הדרומי נמצא בסמוך לקוטב הגיאוגרפי הצפוני, ולהפך.

בקו המשווה, כיוונו של וקטור השדה המגנטי הארצי מקביל לפני כדור הארץ, אך ברוב המקומות על פני כדה"א, וקטור השדה המגנטי הארצי איננו אופקי.



לדוגמא: רכיבי השדה המגנטי הארצי באזור תל-אביב הם:

$$B_E = 30 \mu T \text{ רכיב האופקי}$$

$$B_h = 33 \mu T \text{ רכיב האנכי}$$

כאשר נניח מחט מגנטית (מגנט קטן) במקום כלשהו על פני כדור הארץ, המחט תתייבץ לאורך הרכיב האופקי של השדה המגנטי שקיים במקום זה.

כיוון המחט יהיה בקירוב מקביל לקו האורך (קו צפון-דרום) חוץ מאשר בקרבת הקטבים.

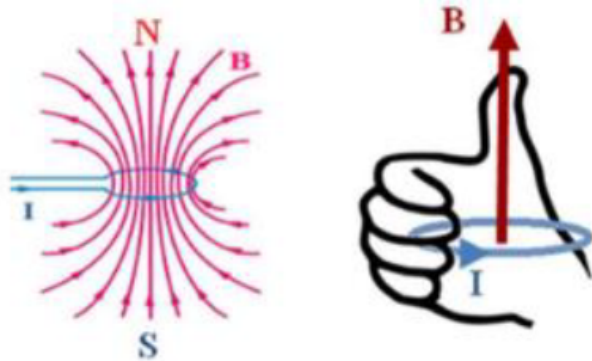
בניסוי זה נתייחס רק לרכיב האופקי של השדה המגנטי הארצי.

בניסוי נשתמש בעובדה, שאם במקום מסוים קיים שדה מגנטי אופקי נוסף, הרי שמחט המצפן תראה את הכיוון של השדה האופקי השקול.

שדה מגנטי במרכז כריכה מעגלית נושאת זרם.

במרכזה של כריכה מעגלית דקה, שדרכה זורם זרם, נוצר שדה מגנטי הניצב למישור הכריכה.

נסמן שדה זה B_I



גודל השדה המגנטי שיוצר הזרם

$$B_I = \frac{\mu_0 n I}{2R}$$

כאשר

μ_0 הוא קבוע הפרמאביליות של הריק וערכו $4\pi \cdot 10^{-7}$

n מספר הכריכות

I עוצמת הזרם נמדד באמפר A

R רדיוס הכריכה נמדד במטר m

כיוונו של השדה נקבע על פי כלל יד ימין.

נדגיש כי זהו השדה המגנטי במרכזו של מישור הכריכה, בנקודות אחרות גודלו שונה.

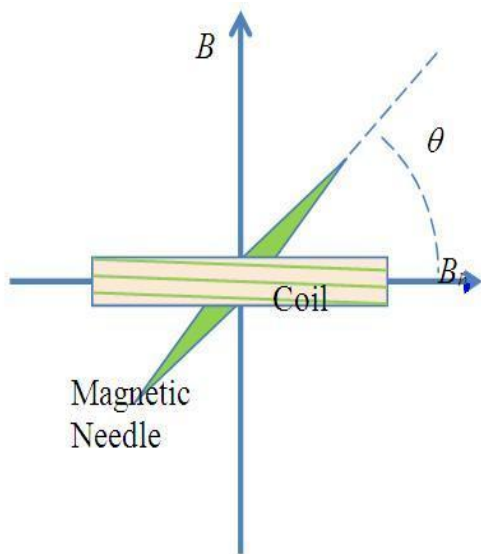
חוק המשיק (טנגנס) של מגנטיות.

כאשר מניחים מוט מגנט בין שני שדות מגנטיים B_E ו B מאונכים זה לזה, הוא מגיע למנוחה ויצור

זווית Θ עם B_h

גליונומטר טנגנטי (משיקי) הוא מכשיר מדידה קדום לזרמים חשמליים קטנים.

מורכב מסליל של חוט נחושת מבודד מלופף על מסגרת עגולה לא מגנטית. עבודתו מבוססת על עקרון החוק המשיקי של המגנטיות. כאשר מועבר זרם דרך הסליל המעגלי, נוצר שדה מגנטי (B) במרכז הסליל בכיוון הניצב למישור הסליל. הגליונומטר בנוי בצורה כזו שהרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ B_E נמצא בכיוון מישור הסליל.



מחט המצפן (המוגבלת לתנועה אופקית בלבד)

תתייצב ב"כיוון ביניים" כלשהו בין כיווני השדות,

בהתאם לכיוון השדה מגנטי השקול.

המחט המגנטית נמצאת אז בפעולה של שני שדות בניצב.

θ היא זווית ההסטה של המחט, נעשה חיבור הוקטורי של שני הרכיבים על פי חוק המשיק.

$$B = B_E \tan \theta \quad (1)$$

נסמן ב I את הזרם שעובר בסליל, רדיוס הסליל R עם n ליפופים, ואז השדה שנוצר על ידי הזרם הנושא את הסליל המעגלי הוא

$$B_I = \frac{\mu_0 n I}{2R} \quad (2)$$

משווים (1) ו- (2), ומקבלים

$$B_E \tan \theta = \frac{\mu_0 n I}{2R} \quad (3)$$

$$\frac{2R B_E}{\mu_0 n} = \frac{1}{\tan \theta} \quad (4)$$

הצד השמאלי של משוואה (4) הוא קבוע ונקרא גורם הפחתה K של הגליונומטר המשיק הנתון.

$$K = \frac{1}{\tan \theta} \quad (5)$$

כעת, מהמשוואה (3) ו- (5), העוצמה האופקית של השדה המגנטי של כדור הארץ היא

$$B_E = \frac{\mu_0 n}{2a} \frac{1}{\tan \theta} \quad (6)$$

מהלך הניסוי

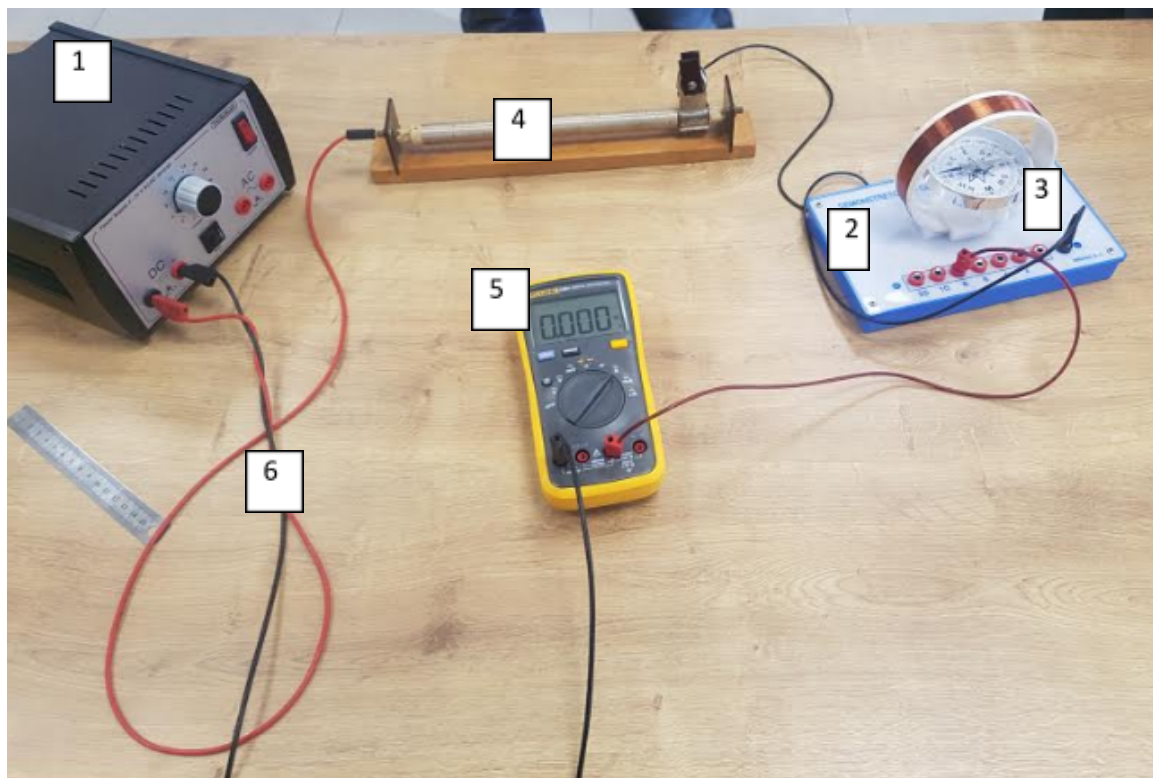


בסדרת הניסויים שנבצע, נמדוד את זווית הסטייה של מחט המצפן ביחס לכיוון צפון, כאשר הזרם קבוע ומספר הכריכות משתנה, או לחילופין- כאשר מספר הכריכות N הוא קבוע והזרם משתנה.

באמצעות מדידות אלו נוכל למצוא את גודל הרכיב האופקי של השדה המגנטי הארצי

רשימת ציוד

1. מקור מתח ישר בתחום . 0-24V
 2. גליונומטר טנגנטי.
 3. מצפן
 4. ריאוסטט – נגד משתנה שהתנגדותו בתחום
 5. אפרמטר בתחום
 6. תיילים
- מצבט תנין
- לולאה שקוטרה 11 ס"מ - רדיוס הלולאה הוא 5.5 ס"מ
- מס הכריכות משתנה ע"פ הצורך.



בתחילה השתמשנו באפליקציית סלולר למדידת השדה המגנטי בסביבת הניסוי, ניתן לקבל את גודלו של השדה המגנטי של כדור הארץ באתר העדפנו למדוד אותו ואכן המדידה הראתה נתון שונה 40.98 מיקרו טסלה.

לעומת זאת מתוך אתר

<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>

מתקבל שדה מגנטי ארצי אופקי של 4.5 מיקרו טסלה

גרף זווית כנגד מספר הכריכות

בגרף זה שינינו את מספר הכריכות בגליונומטר ומדדנו את השינוי בזווית. אי הוודאות במדידת הזווית הייתה של 1.5 מעלות. חישבנו את אי הוודאות לטנגנס הזווית, הוא משתנה כאשר הזוויות גדלות, כאשר הזוויות גדולות $\tan$ הזווית גדל בצורה משמעותית ולכן אי הוודאות הולכות וגדלות.

אי וודאות של מספר הכריכות הוא 0.5.

$$m = \frac{\mu_0 I}{2RB_E} : \text{שיפוע הגרף הוא}$$

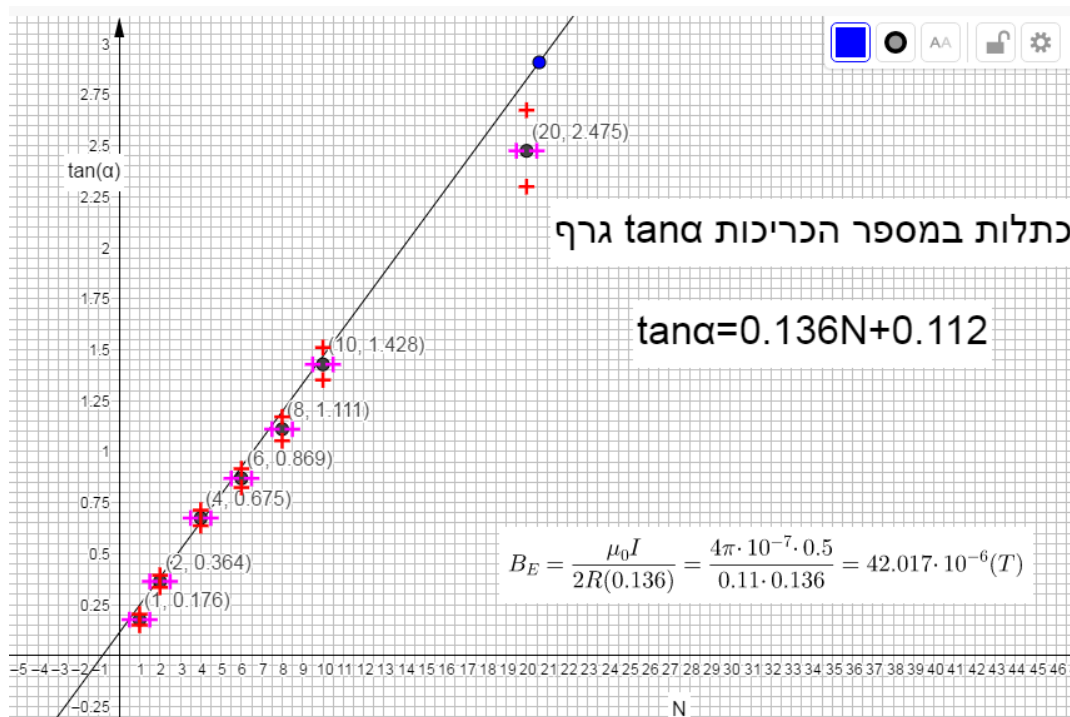
תוצאות הניסוי בנספחים.

לאחר בניית הגרף בתוכנת גיאוגברה, העברנו 2 ישרים

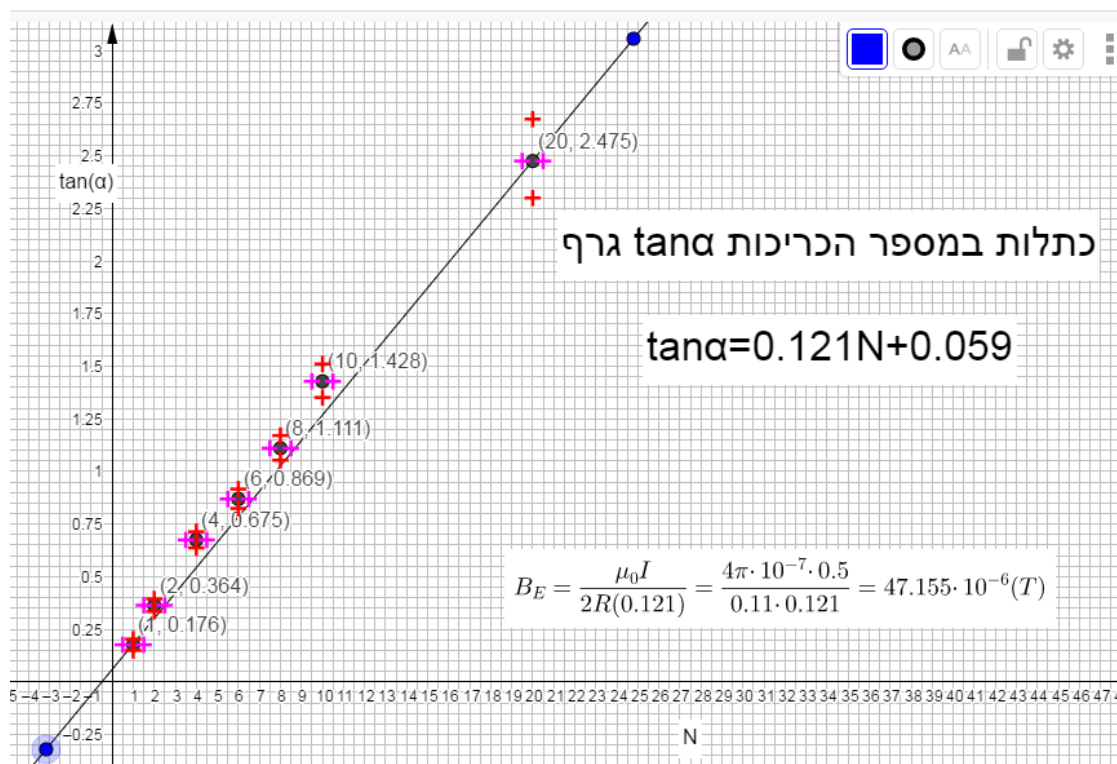
אחד, ישר מיטבי בין הנקודות בגרף של הערכים הגבוהים של α (גרף 1)

והשני, ישר מיטבי בין הנקודות בגרף של הערכים הנמוכים של α (גרף 2)

גרף 1



גרף 2



ביתוח תוצאות:

משיפועי הגרפים חישבנו את השדה המגנטי של כדור הארץ לכל ישר וקיבלנו שני ערכים מינימלי ומקסימלי,

$$B_{Emax} = 47.155 \mu T$$

$$B_{Emin} = 42.017 \mu T$$

נכונות המדידה: קיבלנו שהערך שנלקח מהאתר נמצא בין שני הערכים.

איכות המדידה: נחשב את ההפרש בין הערכים

$$\Delta B_{E(max-min)} = 5.138 \mu T$$

$$B_E = \frac{B_{Emax} + B_{Emin}}{2} \pm \frac{\Delta B_E}{2} = 44.586 \pm 2.569 \mu T$$

קיבלנו את השדה המגנטי המחושב ממדידות הניסוי

חישבנו את אי הוודאות היחסית:

היחס בין אי הוודאות שקיבלנו לערך שהחלטנו כמוסכם 45 מיקרו טסלה ו/או לערך הממוצע מנתוני הניסוי.

$$\frac{2.569}{45} * 100 = 5.7\%$$

$$\frac{2.569}{44.586} * 100 = 5.7\%$$

קיבלנו שגיאה יחסית סבירה של כ- 6%

גרף זווית כנגד הזרם

בגרף זה שינינו את הזרם בכריכה, באמצעות ריאוסטט, ומדדנו את השינוי בזווית.

גם כאן אי הוודאות במדידת הזווית הייתה של 1.5 מעלות. חישבנו את אי הוודאות לטנגנס הזווית, הוא משתנה כאשר הזוויות גדלות. גורם נוסף לאי הוודאות הנובע ממדידת הזרם, 5 מיליאמפר. שיפוע הגרף הוא

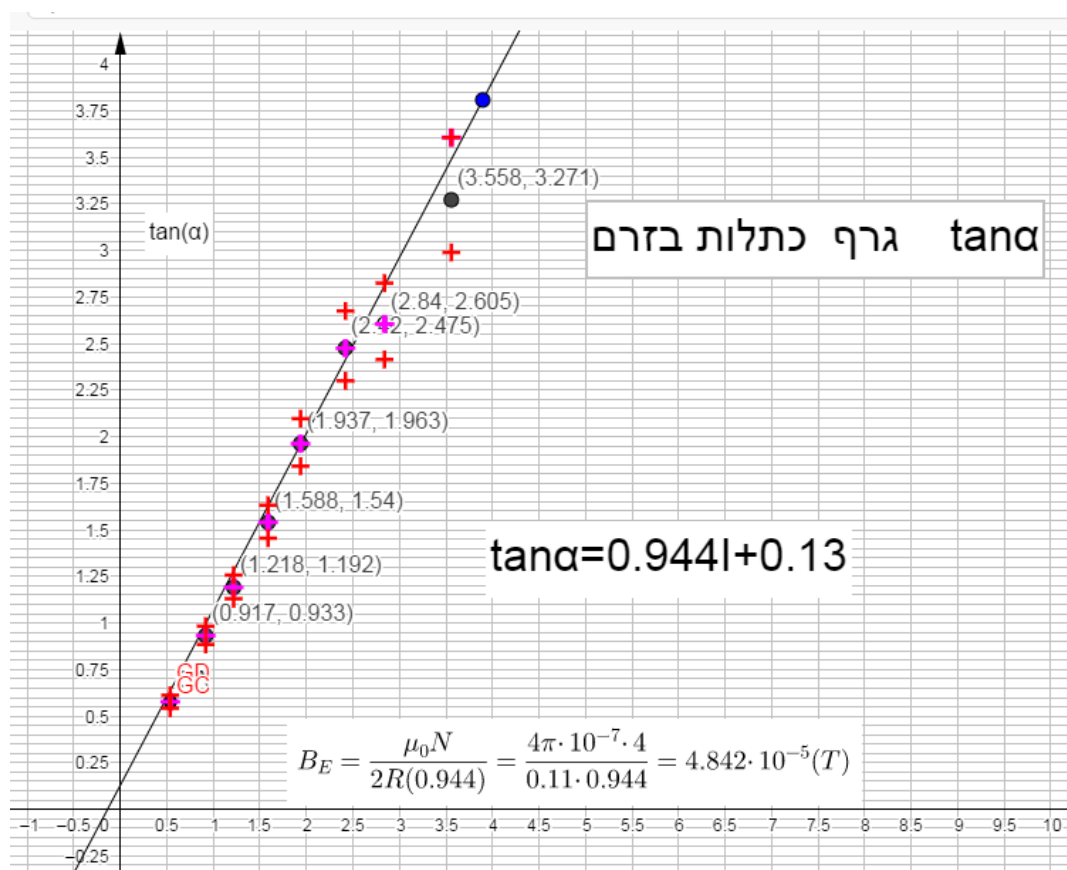
$$m = \frac{\mu_0 N}{2RB_E}$$

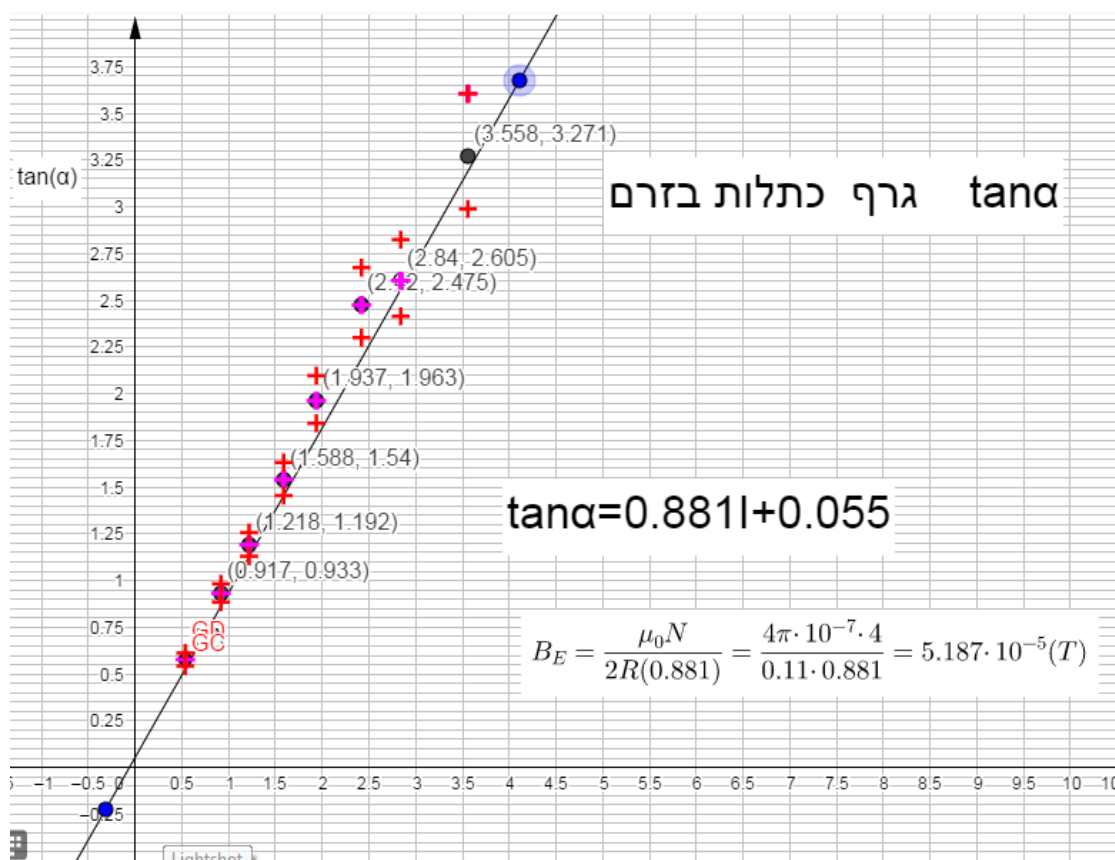
לאחר בניית הגרף בתוכנת גיאוגברה, העברנו 2 ישרים

אחד, ישר מיטבי בין הנקודות בגרף של הערכים הגבוהים של α (גרף 1)

והשני, ישר מיטבי בין הנקודות בגרף של הערכים הנמוכים של α (גרף 2)

גרף 1



ניתוח תוצאות:

משיפועי הגרפים חישבנו את השדה המגנטי של כדור הארץ לכל ישר, וקיבלנו שני ערכים מינימלי ומקסימלי

$$B_{E_{max}} = 48.42 \mu T$$

$$B_{E_{min}} = 51.87 \mu T$$

קיבלנו שני ערכים, הפעם הערך המוסכם 45 שנקלח מהאתר לא נמצא ביניהם.

נחשב את ההפרש בין הערכים

$$\Delta B_{E(max-min)} = 3.45 \mu T$$

$$B_E = \frac{B_{E_{max}} + B_{E_{min}}}{2} \pm \frac{\Delta B_E}{2} = 50.14 \pm 1.725 \mu T$$

השגיאה היחסית:

היחס בין אי הוודאות שקיבלנו לערך שהחלטנו כמוסכם 45 מיקרו טסלה ו/או לערך הממוצע מנתוני הניסוי.

$$\frac{1.725}{45} * 100 = 3.83\%$$

$$\frac{2.569}{44.586} * 100 = 3.44\%$$

קיבלנו שגיאה יחסית סבירה של – 3.5-4%

אי הוודאות הפעם נובעת משני גורמים גם במדידת הזווית וגם במדידת הזרם, ולכן טווח אי הוודאות פה גדל ביחס לגרף הקודם.

מכשיר המדידה (אמפרמטר) משפיע גם הוא על השדה המגנטי בסביבת הניסוי.

גם בניסוי זה כאשר מתעלמים מהזוויות הגדולות ניתן לראות שהסטיות בגרפים הולכות ומצטמצמות.

מסקנות:

בניסוי של הזווית כנגד מספר כריכות כנראה שהטעות גדולה יותר כיוו ששינוי מספר הכריכות מגדיל את ההתנגדות במעגל ולכן גם משפיע על הזרם במעגל, אנו לא בטוחים שהצלחנו לשמור על זרם קבוע

טעות החישוב בשני הניסויים כ- 10% והיא נובעת מכמה סיבות:

- (1) גודל המצפן- כאשר המצפן גדול ביחס לטבעת הזרם ישנם עוד שדות מגנטיים שמשפיעים על סטיית המחט ולכן עדיף לקחת מצפן קטן באופן יחסי לגודל הגליונומטר.
- (2) כאשר בדקנו את גודל השדה המגנטי בעזרת חיישן מגנטיות גילינו שספק הכוח לא יציב ולכן הוא כנראה השפיע על הזרם.
- (3) מכשירים בסביבת הניסוי המשפיעים על השדה המגנטי

ניסוי מקדים 2 - צמד תרמי (אפקט סיבק)

מטרות הניסוי

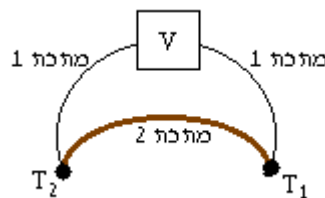
- להכיר ולהבין את התנהגותו של צמד תרמי.
- לאמת את הנוסחה של אפקט סיבק $V=KT$ (Seebeck effect) ולמצוא את קבוע סיבק (K) עבור צמד המתכות בניסוי.

2. תיאוריה

אחד החלקים החשובים ביותר בניסוי של אוהם הוא יצירת מקור המתח הקבוע ע"י צמד תרמי. אוהם לקח שתי מתכות, נחושת וביסמוט ובעזרתן יצר מקור מתח יציב עבור המעגל החשמלי שלו.

בניסוי זה ננסה למצוא את הקשר בין שינוי המתח בצמד מוליכים כתלות בשינוי הטמפרטורה עליו.

צמד תרמי



ציור 1: צמד תרמי.

שני חוטים העשויים ממתכות שונות ומחוברים בקצותיהם נקראים צמד תרמי. אם הקצוות מוחזקים בטמפרטורות שונות נוצר במעגל מתח חשמלי התלוי בהפרש הטמפרטורות. אפקט זה נקרא אפקט סיבק. ראה ציור 1.

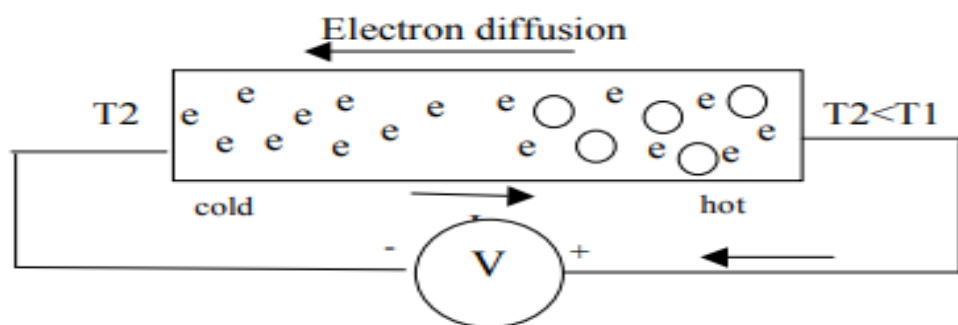
אפקט סיבק קשור להימצאותם של אלקטרונים חופשיים במתכת, אלקטרונים אלו אינם קשורים לאטום מסוים במתכת אלא חופשיים לנוע במתכת. קיומם של אלקטרונים חופשיים מאפשר מוליכות חשמלית טובה וכן הולכת חום. צפיפות האלקטרונים תלויה בסוג המתכת וכן בטמפרטורה.

למעשה אפקט סיבך נובע כתוצאה של שתי תופעות :

(א) תופעת פלטייה (Peltier) – תופעה זו קשורה לנקודת המגע של שתי מתכות שונות. בכל אחת מהמתכות ישנה צפיפות אלקטרונים שונה, ולכן בנקודת המגע זורמים האלקטרונים מהצפיפות הגבוהה לנמוכה ונוצר מתח מגע.

(ב) תופעת תומסון (Thomson) – תופעה זו קשורה לשינוי בצפיפות האלקטרונים במתכת עקב שינויי טמפרטורה. כאשר הקצוות של חוט מתכת מוחזקים בטמפרטורות שונות נגרם שינוי בצפיפות האלקטרונים וכתוצאה מכך נוצר זרם בתוך החוט. אפקט סיבך הינו צירוף של שתי תופעות אלו.

גודל המתח הנוצר באפקט סיבך תלוי בסוג המתכות מהם מורכב הצמד התרמי. לדוגמא: בצמד תרמי נחושת-ברזל נוצר מתח של $14 \times 10^{-6} V/^{\circ}C$, ובצמד תרמי כרומל-אלומל נוצר מתח של $40 \times 10^{-6} V/^{\circ}C$. הצמד התרמי משמש בעיקר למדידה רגישה של טמפרטורות.



תרשים 2

חשוב לציין שאפקט סיבך לא יעבוד במעגל עם מתכות זהות כיוון שחייב להיות הפרש בכמות האלקטרונים החופשיים של המתכות. ללא הפרש זה לא יקרה שום דבר.

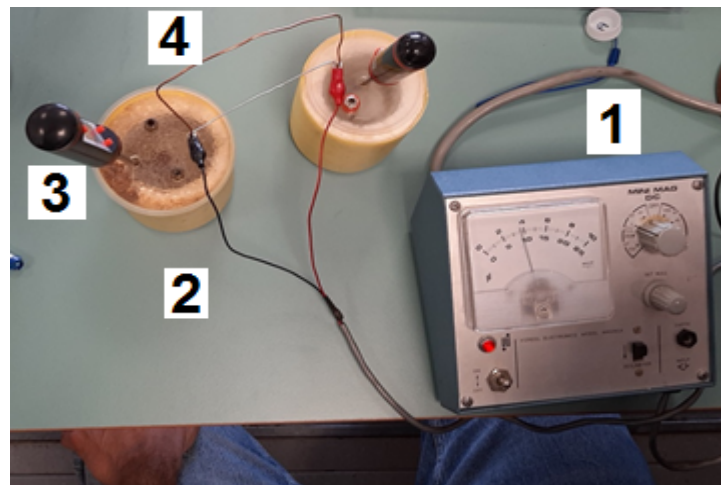
מהלך הניסוי :

לקחנו חוט נחושת ומהדק נייר והלחמנו אותם באמצעות בדיל וכך יצרנו צמד תרמי. הרעיון היה לקחת חוט נחושת וברזל אך הבנו שגם מהדק נייר שעשוי מפלדה, שהיא בעצם סגסוגת של ברזל ופחמן יעשה את העבודה. את הרעיון לצמד המתכות הללו קיבלנו מצפייה בסרטוני יוטיוב שבו הראו שגם שילוב פשוט וזמין כזה יצליח [להראות את האפקט](#). את קצוות הצמד התרמי הכנסנו לכוסות תרמיות כאשר באחת היו מי קרח בטמפ' של 6 מעלות ובכוס השניה מים בטמפרטורות משתנות.

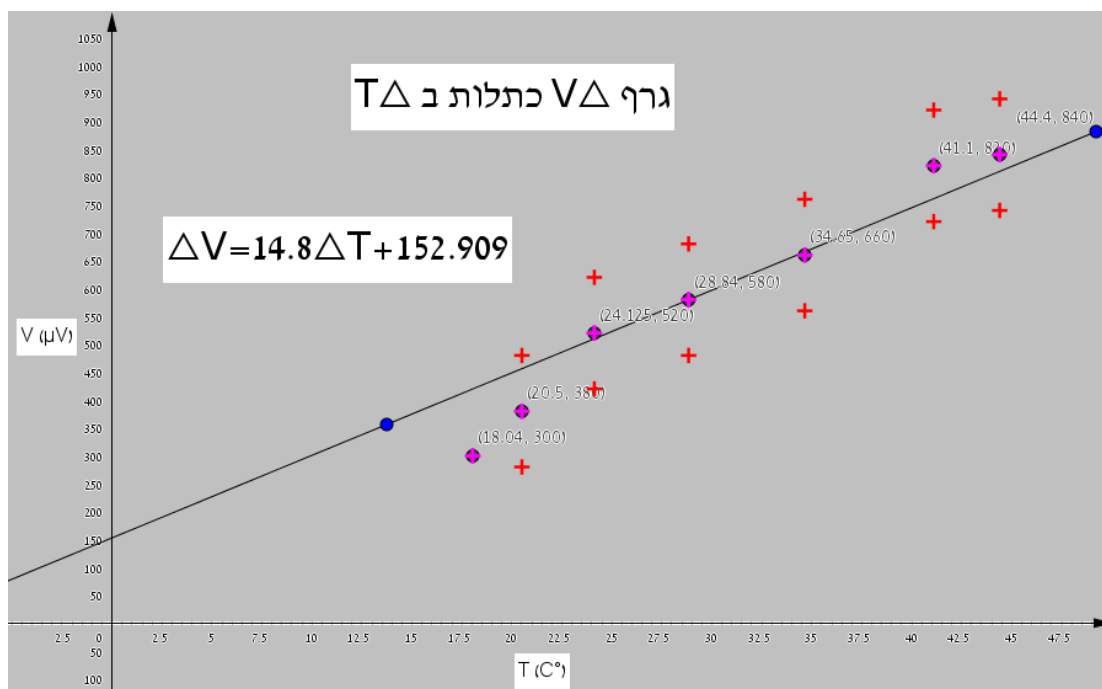
את הטמפרטורה מדדנו באמצעות מדחומים דיגיטליים (שהם בעצמם צמד תרמי) ואת הפרש המתחים מדדנו באמצעות מיקרו-וולטמטר (באדיבות אנג'לה) .

רשימת ציוד :

- מיקרו וולטמטר
- כוסות תרמיות
- מדי טמפרטורה
- צמד תרמי



תוצאות



הגרף שקיבלנו הוא הגרף האופטימלי ביחס לנתונים שלנו ולטווחי השגיאה היחסית של המדידות.

שיפוע הגרף מייצג את קבוע סיבק של הצמד התרמי שלנו (נחושת-פלדה) והוא יצא $14.8 \frac{\mu V}{C^{\circ}}$,

כאשר קבוע סיבק של צמד תרמי נחושת - ברזל הוא $14 \frac{\mu V}{C^{\circ}}$, אחוז הטעות הוא 5.7%.

נקודה מעניינת היא נקודת החיתוך עם ציר המתח, לפי הנוסחה של סיבק כאשר אין הפרש טמפרטורה לא אמור להיות הפרש פוטנציאלים בצמד התרמי. הפרש הפוטנציאלים הזה נוצר בעקבות חיבור המתכות השונות. כאשר שתי מתכות נוגעות זו בזו נוצרת דיפוזיה של אלקטרונים חופשיים ביניהם וכך מנוצר הפרש הפוטנציאלים (בגלל התופעה הזו מרגישים חשמל כאשר לועסים נייר אלומיניום). הגדלת הפרש הטמפרטורה מגדיל את הפרש הפוטנציאלים.

הטעות המחושבת פה נובעת מכמה סיבות :

1. הצמד שלנו הוא מנחושת ופלדה ולא נחושת וברזל ולכן היה ברור לנו מלכתחילה שלא נקבל את הקבוע התיאורטי.
2. מכשיר מדידת המתח שלנו היה מכשיר אנלוגי עם סטייה של 100 מיקרו וולט ולכן כאשר מודדים שינוי קטן ברמה של עשרות מיקרוולט הטעות היחסית גדלה.

3. מדידת המתח עצמה תלויה במיקום הפרובים על הצמד התרמי, כל תזוזה יכולה לשנות את המתח הנמדד.

מסקנות :

בהתאם לתוצאות הניסוי ניתן לראות שקיים קשר ליניארי בין הפרש הטמפרטורה בצמד התרמי לבין הפרש המתחים. קצב שינוי המתח כתלות בטמפרטורה תלוי בסוג המתכות.

ניסוי מקדים 3 - מוליכות תרמית

מטרת הניסוי : למצוא את קבוע המוליכות התרמית של נחושת.

את קבוע המוליכות התרמית אנו נמצא ע"י חישוב ההספק המתפתח המוט כתלות בגרדיאנט הטמפרטורה לאורך המוט. ניסוי זה נועד למדוד את מוליכות החום של מתכות שונות ונחושת בפרט.

על מנת למדוד את מוליכות החום פיתחנו נוסחה לחישוב מוליכות החום במתכת ואימתנו אותו ע"י שני ניסויים שונים.

מוליכות תרמית היא מדד ליכולתו של חומר להוליך חום, הנקבעת על ידי קצב זרימת החום דרך שטח החתך בחומר וגרדיאנט הטמפרטורה בכיוון הזרימה. מוליכות תרמית נמדדת בוואט למטר לכל קלווין.

K משמש לציון המוליכות התרמית על פי חוק פורייה למוליכות תרמית.

$$Q = -KA \frac{dT}{dx} \quad \text{או} \quad Q \propto A \frac{dT}{dx}$$

כאשר -

Q - זרימת חום דרך המוליך

A - שטח החתך

dT/dX - גרדיאנט הטמפרטורה בחתך

הקבוע K מייצג את קבוע מוליכות החום של החומר (W/mK). הוא מייצג את קצב דיפוזיית החום בחומר

הקבוע מספק אינדיקציה לקצב בו האנרגיה המועברת בתהליך דיפוזיה. זה תלוי במבנה הפיזי של החומר, האטומי והמולקולרי וקשור למצב החומר. סימן המינוס הוא תוצאה של העובדה שהחום מועבר לכיוון של הטמפרטורה נמוכה.

משוואת הולכת החום הכללית עבור מוליכות תרמית קבועה בקואורדינטה הקרטזית היא :

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

T - פיזור הטמפרטורה במרחב (C^0)

X, Y, Z - הקואורדינטות במרחב

q - קצב ייצור חום ליחידת נפח (W/m^3)

K - קבוע מוליכות החום של החומר (W/mK)

α - דיפוזיה תרמית של החומר (m^2/s)

T -שניות (sec)

ניתן לעשות כמה הנחות כדי לפשט את המשוואה הכללית:

1. זרימת החום הינה חד ממדית, כלומר הטמפרטורה, משתנה לאורך כיוון x בלבד. זה מושג על ידי הנחת בידוד על המשטח ההיקפי של הדגימה.

2. אפקט הסוף זניח

3. חומר הדגימה הוא איזוטרופי

4. אין דגימה של ייצור חום פנימי

5. מצב יציב מושג לפני שהנתונים הסופיים נרשמו

במצב זה המשוואה נראית כך

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0$$

כאשר אנו נמצאים במצב היציב תנאי הקצה הם כאלו :

כאשר $T=T_0$ $X=0$

כאשר $T=T_L$ $X=L$

כאשר לוקחים בחשבון את תנאי הקצה הנ"ל פתרון המשוואה הדיפרנציאלית הוא :

$$\frac{T - T_0}{T_L - T_0} = \frac{x}{L}$$

הטמפרטורה בנקודה כלשהי T -

$X=0$ הטמפרטורה ב- T_0
 $X=L$ הטמפרטורה ב- T_L
 $X=0$ המרחק מנקודה - X
 אורך המוליך- L

רשימת ציוד

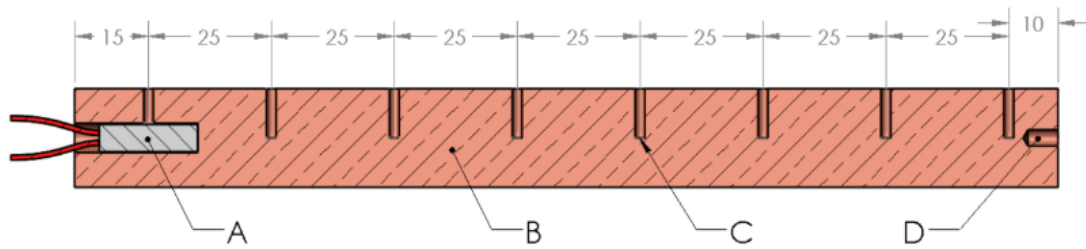
- סיר ג'חנון עם צלעות קירור
- מוט נחושת מבודד עם מדי טמפרטורה לאורכו.
- מוט נחושת מבודד עם מדי טמפרטורה לאורכו ונקודת חיבור לסיר.
- מד מתח
- שנאי
- מד זרם
- תיבת נתונים דיגיטלית
- חיבור לחשמל
- כבל תקשורת
- חוטי חשמל



תמונה 1

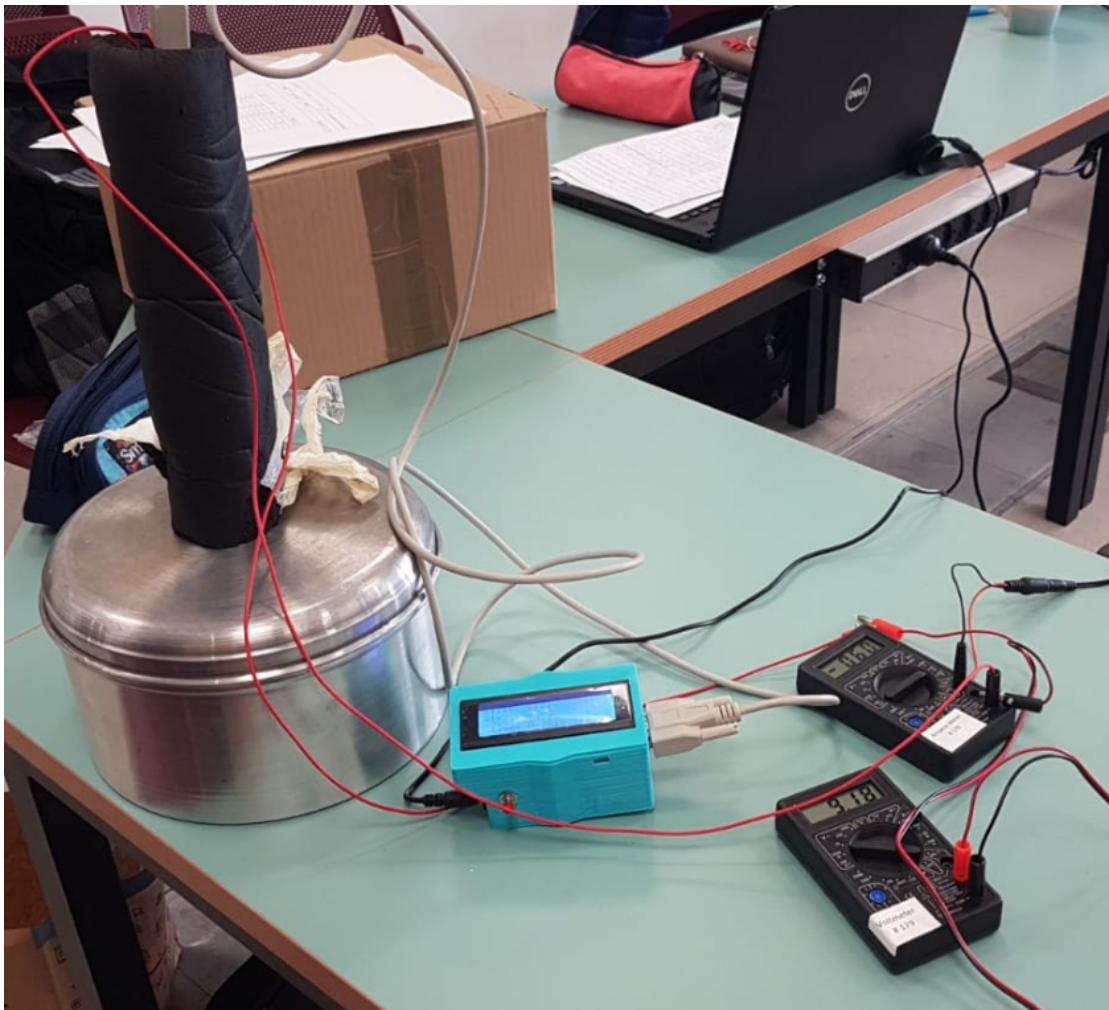
מהלך הניסוי :

בניסוי הראשון מדדנו את הטמפרטורה במוט נחושת בנקודות שונות המצויות במרחקים שווים



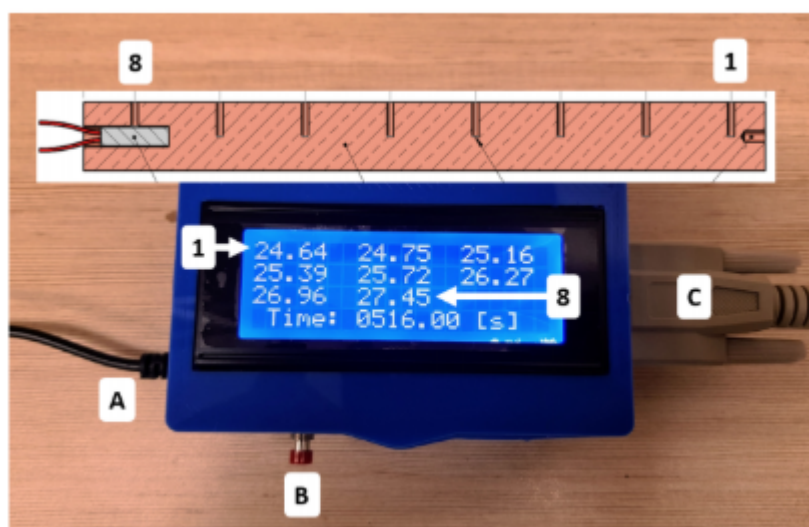
תרשים 1

על מנת לגרום לטמפרטורה להתפשט רק בממד אחד עטפנו את מוט הנחושת בחומר מבודד ואת קצה מוט חיברנו לכלי אלומיניום בעל צלעות קירור (סיר ג'חנון) מלא במים.



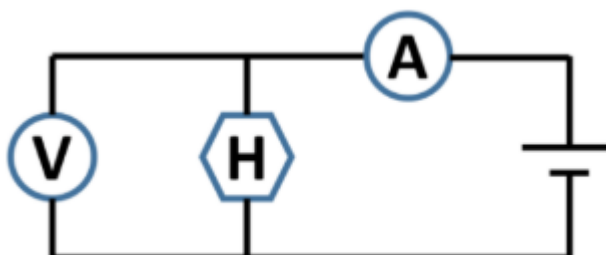
תמונה 2

את הטמפרטורה מדדנו בעזרת לוח תוצאות דיגיטלי המחובר למדי הטמפרטורה במוט.



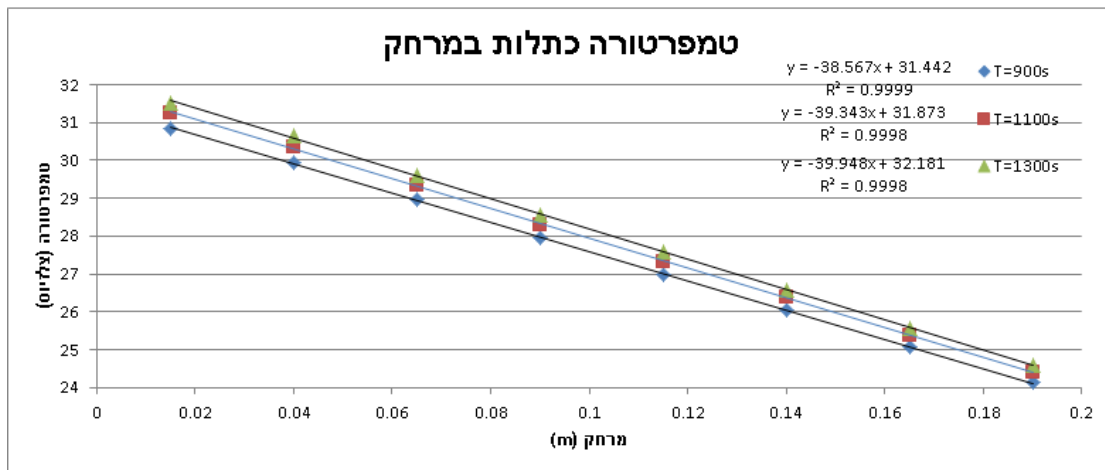
תמונה 3

במקביל מדדנו את הזרם במעגל החשמלי ואת המתח המתפתח על מוט הנחושת.



תרשים 2

תוצאות :



גרף 1

בניסוי מדדנו כל 100 שניות את הטמפרטורה משמורת החיישנים, ועשינו גרף של הטמפרטורה כתלות במרחק. ניתן לראות בטבלת הנתונים שהפרש הטמפרטורה הולך ומתייצב ככל שהזמן עובר ולכן יש שלושה גרפים בזמנים שונים. שיפוע הגרף מייצג את גרדיאנט הטמפרטורה.

את קבוע המוליכות חישבנו בדרך הבאה :

$$P(x) = -KA \frac{\Delta T}{\Delta X} \Rightarrow K = - \frac{P}{A \frac{\Delta T}{\Delta X}}$$

בגרף ניתן לראות את השינוי בטמפרטורה כתלות במרחק מנקודת החימום בזמנים שונים. את ההספק המתפתח על המוט חישבנו באמצעות הנוסחה $P=VI$ באמצעות הערכים שמדדנו בעזרת האמפרמטר והוולטמטר $P=9.1 \cdot 0.6=5.46W$. שטח החתך הוא $A = 0.000314m^2$ ומכאן ניתן לחשב את קבוע המוליכות התרמית של הנחושת –

$$K = - \frac{P}{A \frac{\Delta T}{\Delta X}} = - \frac{5.46}{0.000314 \cdot 39.948} = 435.14 \frac{W}{mK}$$

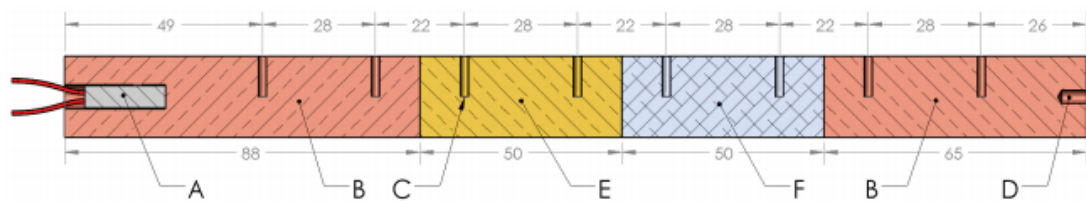
קבוע המוליכות של נחושת בספרות הוא $401 \frac{W}{mK}$

ניתן לראות שהניסוי מאוד קרוב לערך התיאורטי, שגיאה של 8.5%, השגיאה נובעת מכמה סיבות :

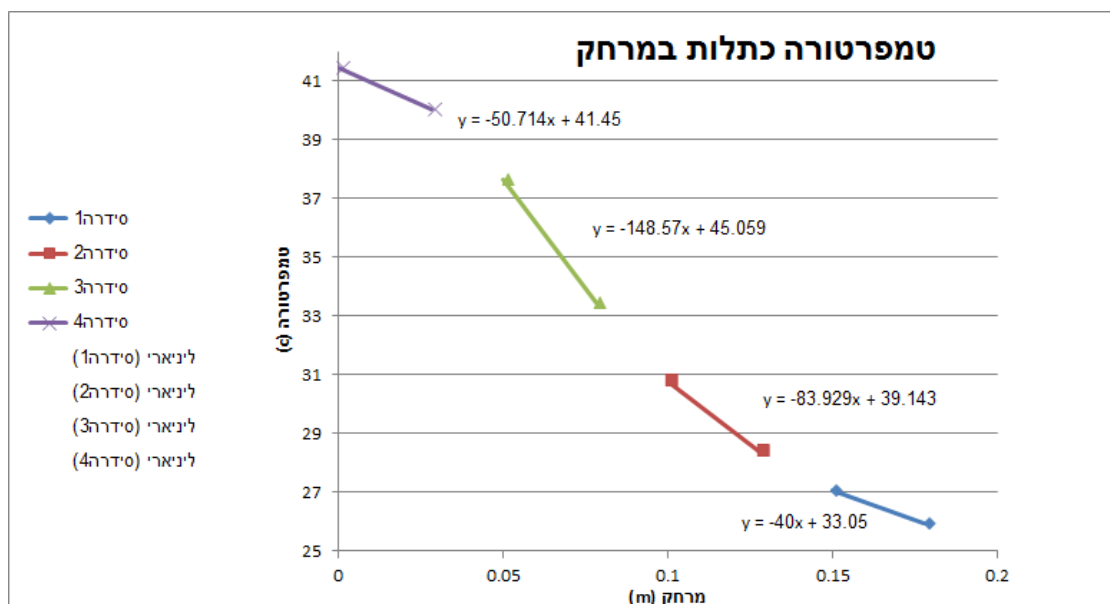
1. יכולת המדידה של מדי הטמפרטורה מוגבלת.
2. אמנם מוט הנחושת היה מבודד אך עדיין התפשטות החום לא הייתה רק בממד אחד וכנראה הייתה בריחת חום לחומר המבודד.
3. סיר המים לא שמר בהכרח על בידוד מוחלט בינו לבין המוט.

4. את קבוע המוליכות התרמית, K , לא חישבנו ישירות מהגרף אלא מחישוב נוסף שהתבסס על ההנחה שההספק החשמלי קבוע לאורך כל תהליך. בסופו של דבר ניתן לחשב את קבוע המוליכות התרמית של הנחושת.

הניסוי השני (מוליכות חום של מתכות שונות) מסתמך על הליניאריות שהתקבלה בניסוי הראשון
הניסוי בבסיסו הוא אותו ניסוי אך שהפעם המוט מורכב ממתכות שונות, נחושת, פליז ואלומיניום.



תרשים סכמתי של המוט בניסוי



גרף 2 - שינוי הטמפ' כנגד המרחק במתכות שונות

לפי אותה נוסחה מהניסוי הראשון ניתן לחשב את קבוע המוליכות התרמית של שלושת המתכות.

	נחושת 1	פליז	אלומיניום	נחושת 2
$\frac{\Delta T}{\Delta X} \left[\frac{k^0}{m} \right]$	-50.714	-148.57	-83.929	-40

$K = - \frac{P}{A \frac{\Delta T}{\Delta X}} \left[\frac{W}{mK} \right]$	342.7	116	207	432
K תיאורטי $\left[\frac{W}{mK} \right]$	401	111	237	401
אחוז השגיאה	14.5%	5.4%	12.6%	8.35%

ניתן לראות שהמדידות תואמות באחוז שגיאה, נמוך יחסית, את המציאות. כאמור, גם פה, אי הדיוק נובע מאותן סיבות מעלה אך גם מסיבות אחרות כגון שעבור כל מתכת נמדדו רק שתי טמפרטורה ולכן משוואת הקו הישר "מושלמת" לפי שתי הנקודות היחידות שמרכיבות את הגרף עבור כל מתכת. דבר נוסף הוא שחום הלך לאיבוד בין המתכות השונות.

מסקנות:

בהתאם לתוצאות הניסוי ניתן לראות שישנו קשר ליניארי בין הטמפרטורה לאורך המוליך (גרדיאנט הטמפ' קבוע). כמו כן ניתן לראות שלמתכות שונות ישנן מוליכויות תרמיות שונות שנקבעות לפי סוג המתכת.

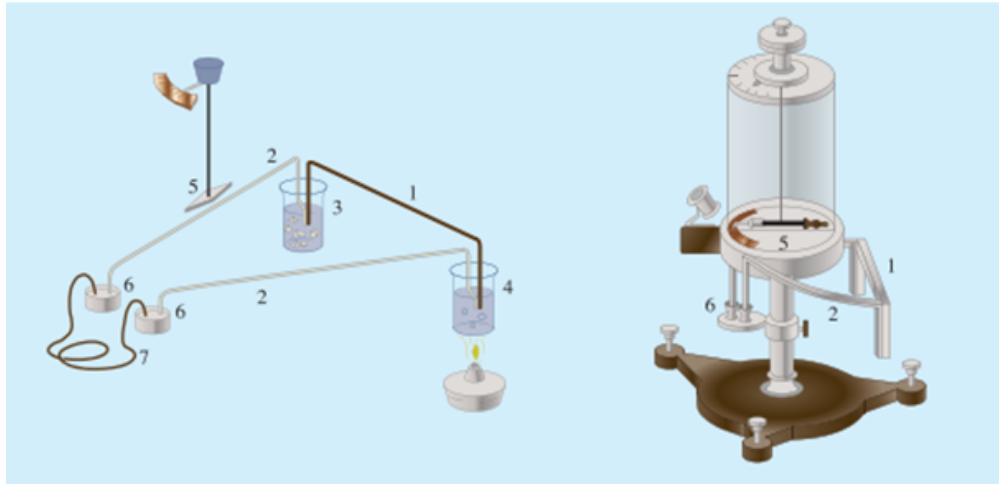
ניסוי מרכזי- שיחזור ניסוי חוק אוהם המקורי

מבוא ורקע תיאורטי

מטרתו של הפרוייקט הוא לנסות לשחזר באופן מיטבי את אחד הניסויים של אוהם. הניסוי הרביעי של אוהם (ראה מבוא), בניסוי זה הוא שמר על מתח קבוע ושינה את אורך הנגד במתכת זהה. זהו הניסוי המעניין מכולם, בו אוהם בעצם גילה את המושג של כ"מ ומתח הדקים.

תלמידים מקבלים תפיסה מדעית טובה כשהם משחזרים חקירות היסטוריות. המחקר של אוהם שהתגלה בשנת 1826 הוא אחד מאלה. המטרה היתה לבנות ערכת ניסוי פשוטה ונגישה, בה רעיונותיו של אוהם מיושמים בעזרת אמצעים מודרניים. התלמידים מבינים כיצד אוהם ובני דורו יכלו להציג מושגי יסוד הקשורים למעגל חשמלי, ללא מכשירי מדידה חשמליים.

שנית, התלמידים מוודאים כי הם הוכיחו את חוק אוהם בעזרת ניסוי, ממקור ראשון, ולא מתוך הסבר תיאורטי.



איור 1: ערכת הניסוי של אוהם (הסבר על החלקים ע"פ מיספורם – פירוט בהמשך)

איור 1 המעגל החשמלי של יחידת הניסוי שיצר אוהם.

המקור התרמו-אלקטרי כלל תייל ביסמוט (1) ושני תיילי נחושת (2) מחוברים היטב בקצוות. קצה אחד של הצמד התרמי נטבל בכלי המכיל קרח נמס (3), השני בכלי המכיל מים רותחים (4). מעל תייל הנחושת אחד, תלויה מחט מגנטית (5). מכשיר זה מודד מומנט פיתול מגנטי. מגעי הכספית (6) חיברו את חוטי הנחושת השונים לקצה של מקור המתח (7), החוטים בעלי קוטר אחיד, אך אורכים שונים. כאשר זרם חשמלי זרם במעגל, המחט המגנטית סוטה. בכל פעם אוהם החזיר את המחט למצב הראשוני, הוא קבע את הזרם לפי זווית הסטייה של המחט. במעגל מתקיים הקשר

$$I = \frac{\varepsilon}{r+R}$$

כאשר I – הזרם במעגל באמפר.

ε מתח ההדקים של הצמד התרמי r ההתנגדות של רכיבי המעגל ללא הנגד (מקור המתח) באוהם – נתייחס אליה כהתנגדות פנימית R התנגדות הנגד באוהם – נתייחס אליה כהתנגדות חיצונית הקשר המתמטי מתנהג כמו פונקציה היפרבולית, נגדיר משתנה תלוי אחר, ע"מ לקבל יחס ישר

$$\frac{1}{I} = \frac{r+R}{\varepsilon} = \frac{R}{\varepsilon} + \frac{r}{\varepsilon}$$

R ההתנגדות של תייל מחושבת ע"י הביטוי

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

כאשר

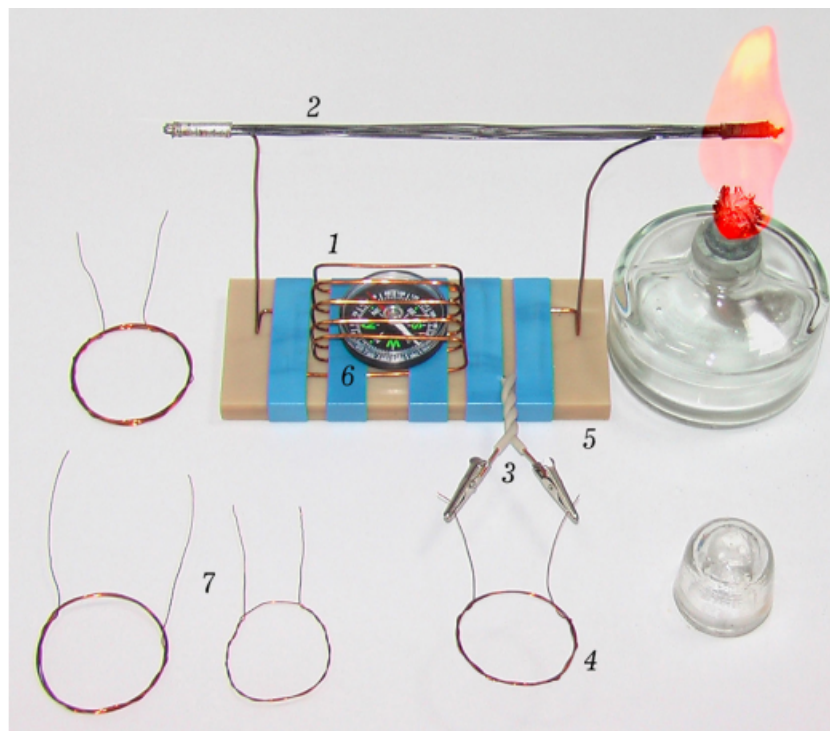
ונקבל יחס ישר:

$$\frac{1}{I} = \frac{r+R}{\varepsilon} = \frac{\rho}{A\varepsilon}L + \frac{r}{\varepsilon}$$

בביצוע הניסוי, אנו חוקרים את התלות של הזרם במערכת בכא"מ, התנגדות מקור והתנגדות עומס.

ערכה לאימות חוק אוהם

הערכה כוללת נגדים שונים (סלילי נחושת באורך שונה), צמד תרמי נחושת סגסוגת ברזל, סולנואיד, מצפן וכוהליה.



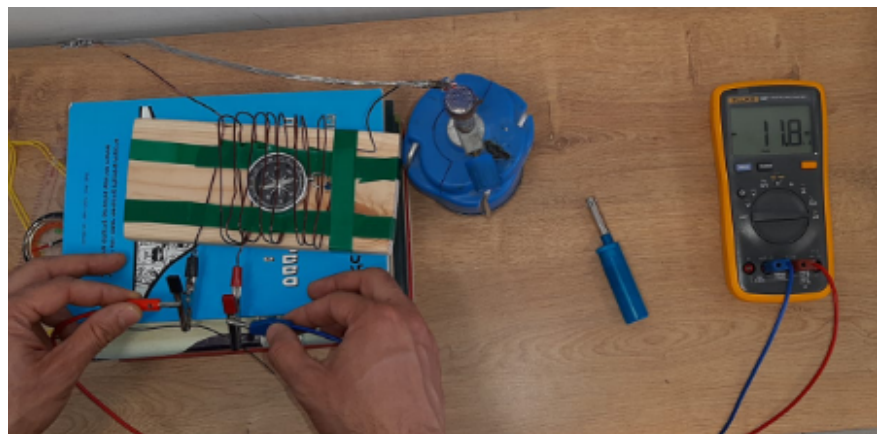
איור 2 מציג מכשיר פשוט לביסוס הניסוי ההיסטורי של אוהם.

הסליל המלבני (1) עשוי מחוט נחושת עבה קוטר של 1.4 מ"מ ואורך של 1 מ'. גודל הסליל הוא $40 \times 40 \times 12$ מ"מ"ק, הוא מכיל חמישה ליפופים, חשוב שקצות החוט יהיו מנוקים מבידוד. שש חתיכות של סגסוגת קונסטנטן (מתאימה לצמד תרמי) (2) בקוטר 1.0 מ"מ ואורך של 20 ס"מ אשר חוברו עם פיסת פח לקצוות של תייל הנחושת. אל חוט הנחושת הלחמו תנינים בקצוות (3). נבדקו מס "נגדים" (4) חוטי נחושת מבודדים באורכים שונים בקוטר 0.3–

0.5 מ"מ ואורכים של 25, 50, 75 ו-100 מ"מ (7). המצפן (6) ממוקם בתוך הסליל.

סגסוגת קונסטנטן (constantan) בעלת שילוב טוב ביותר של תכונות הדרושות ליישומים רבים של מד מתח. בעלת מוליכות תרמית וחשמלית נמוכות. למדנו שישנן מתכות/סגסוגות טבות לשימוש בצמד תרמי, למשל אינבר (Invar). סגסוגת ניקל-ברזל אשר ידועה בשל מקדם ההתפשטות התרמית הנמוך שלה. מקור השם אינבר הוא במילה האנגלית invariable (בלתי-משתנה). ומתייחס לאופן שבו הסגסוגת כמעט ואינה מתכווצת או מתרחבת בעת שינוי טמפרטורה. הומצאה ע"י הפיזיקאי השווייצרי שארל אדואר גיום בשנת 1896. הוא זכה בפרס נובל לפיזיקה בשנת 1920 בשל המצאה זו, שהייתה בעלת השפעה משמעותית על מכשירים מדעיים מדויקים ועל נורות להט.

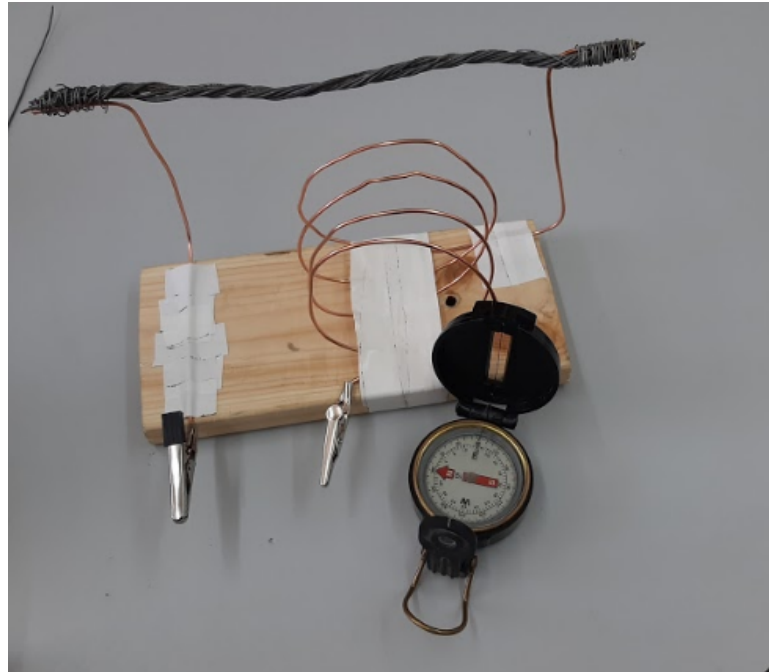
אם כן מטרת הניסוי להראות יחס ישר בין $1/\text{הזרם}$ במעגל לאורך תייל נחושת (הנגד) לשם כך עלינו להגיע למתח קבוע במעגל בעזרת צמד תרמי, לחבר אליו נגדים שונים (תייל נחושת באורך שונה) ולמדוד את הזרם (באמצעות גלונומטר את זווית הסטייה של מחט המצפן, ולחשב את טנגנס הזווית). ערכנו סדרת ניסויים מקדימים, על מנת להבין לעומק את הרקע התיאורטי, הכלים והציוד, הידע המקדים והתנאים בהם אוהם עבד. לאורך חודשי העבודה הראשונים של הפרוייקט הרהרנו בשיחזור הניסוי ובדרכים ליישום, היינו רחוקים מהדבר האמיתי והתברר לנו שתנאי העבודה, הציוד, החומרים וכו' הפכו את המשימה לקשה עד בלתי אפשרית. התחלנו מצמד תרמי, שבנינו לניסוי המקדים אפקט סיבאק, שהיה ברשותנו. בנינו את המעגל המתואר בתמונה וניסינו לקבל סטייה בזווית של מחט המצפן.



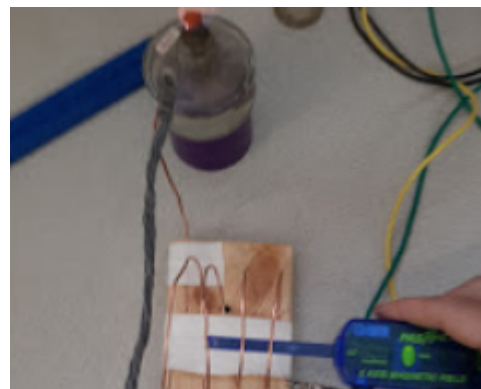
בנינו את הסליל, הנחנו בתוכו מצפן וחיברנו לצמד התרמי.

מחט המצפן לא סטטתה אפילו מעט, הנחנו שתייל הנחושת דק 0.5 מ"מ והוא בעל התנגדות גבוהה ולכן מתקבל זרם חלש מאוד, שגורם לשדה מגנטי קטן מאוד שאינו בסדרי גודל של השדה המגנטי של כדור הארץ.

בנינו סליל מתייל נחושת עבה יותר, אך ללא הצלחה במדידת הזרם.



החלטנו לנסות למדוד את הזרם וחיברנו אמפרמטר, אך הזרם שהתקבל היה לא יציב. הנחנו שהבעייה העיקרית היא החיבורים במעגל שבנינו. החיבור לתנינים בעייתי, לא היה שם מגע מלא בין התנין לתייל הנחושת, ליפפנו תייל נחושת דק לאורך 3 ס"מ על מנת להגדיל את המגע בין המתכות בצומת. בניסוי המקורי, אוהם השתמש בכוסות כספית לצמתי החיבור של הצמד התרמי, מצפן מיקרוסקופי ומתכת ביסמוט. כל אלה לא היו בהישג ידינו, והחלופות שלהם היו בעייתיות וכנראה שזו הסיבה של הקושי בשיחזור. ניסינו גם למדוד את השדה המגנטי במרכז הסליל, באמצעות חיישן שדה מגנטי של פסקו, אך גם כאן לא התקבלו תוצאות יציבות.



ערכת הניסוי שלנו נבנתה באמצעות עזרים פשוטים, חלקיה לא יציבים פיזית ומיקומם של חלק מהביזרים השתנה ממדידה למדידה.

סדרי הגודל של הזרמים שציפינו לקבל הם במיקרו אמפרים בודדים, וכל תייל או מכשיר מדידה שחוברו למעגל גרמו לאי יציבות בערכי הזרם והשדה המגנטי.

זו הסיבה שאוהם השתמש בגליונומטר טנגנטי, שמודד שדה מגנטי במרכז סליל או כריכה והוא אינו חלק מהמעגל.

לאחר נסיונות רבים למדוד זרם כלשהו במעגל עם צמד תרמי כמקור מתח הגענו לפתרון הבא שבאמצעותו מדדנו תוצאות.

בנינו צמד תרמי מ 12 חוטים דקים עשויים " חוט ברזל" (נראה שזו איזו סגסוגת של ברזל ועוד מתכות)

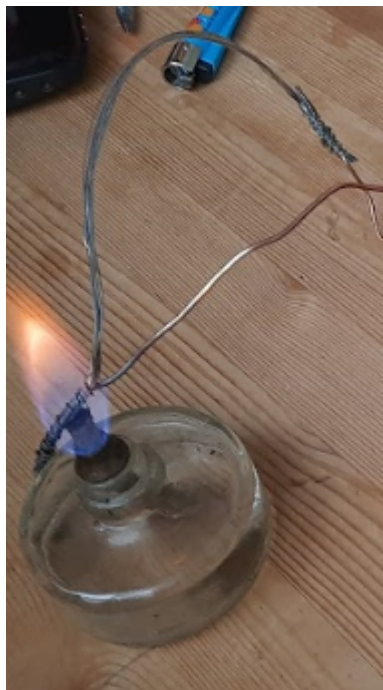
את החוטים חיברנו במקביל, ליפפנו אותם אחד לשניוליפפנו את הקצוות בתייל נחושת דק. את שני הקצוות חיברנו לתייל נחושת בעובי 1.5 מ"מ.

קצה אחד של הצמד מוקם סמוך לפתילייה של כוהלייה, על מנת לקבל חימום קבוע (במרכז הלהבה) בכל שלבי הניסוי.

הכוונה היא ליצור הפרש טמפרטורה קבוע, שיביא להפרש פוטנציאל חשמלי קבוע, לשנות את הנגד במעגל ולמדוד את הזרם.

כפי שניתן לראות בתמונות





לקצה אחד של תייל הנחושת חיברנו תנין, והקצה השני שהיה באורך 120 ס"מ, חיברנו באמצעות תנין בנקודות שונות לאורך התייל.

שני התנינים חוברו למיקרו-אמפרמטר ישירות לברגי חיבור הכניסות, ע"מ למנוע תוספת התנגדות במעגל שתגרום להקטנת הזרם. שמנו לב שמומלץ לחבר את המעגל למשך פרק זמן קצר, כיוון שהזרם גורם להתחממות של התיילים ובכך לשינוי בהתנגדות של התייל ואז לשינוי בזרם. הצלחנו למדוד זרם באמצעות מיקרו אמפרמטר שברשותנו, שהוא בעצם גליונומטר. מצורפות תמונות של סטיית המחט.



ניתוח התוצאות

מדדנו מס קטן של מדידות שמובאות בגרף הבא

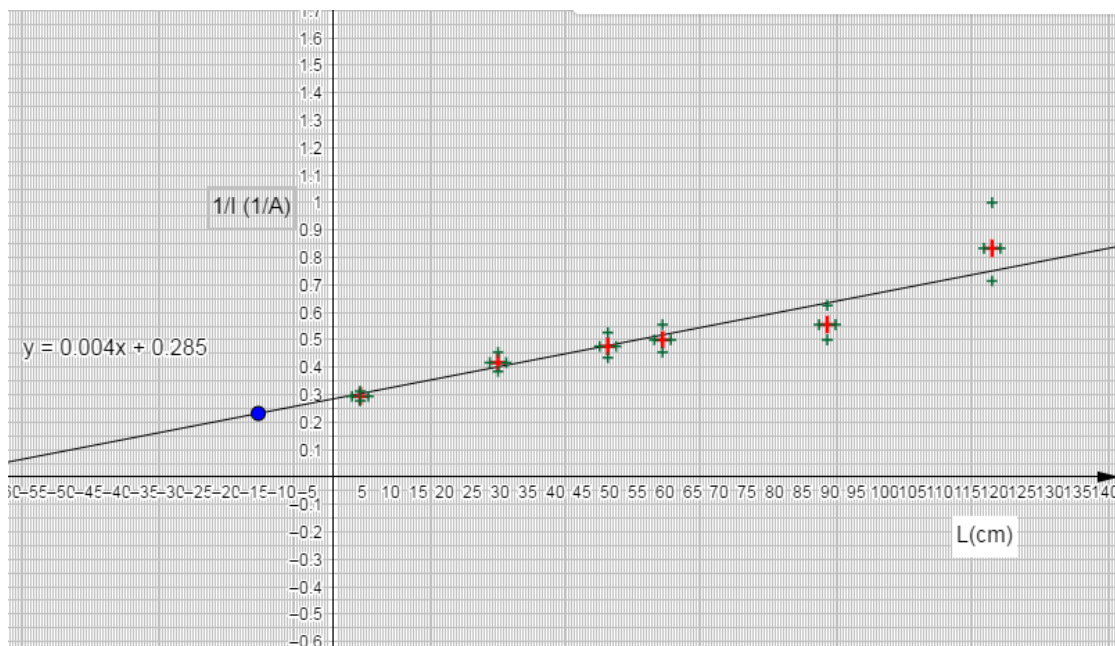
תוצאות הניסוי

מדדנו את הזרם בכמה אורכים של תייל נחושת

תחום אי הוודאות של הזרם הוא 0.2 מיקרו אמפר, כעובי המחט וקווי הסקאלה של האמפרמטר.
תחום אי הוודאות של אורך התייל הוא 1 ס"מ, כיוון שלא הצלחנו ליישר את התייל העבה למדוד
את אורכו כשהוא מתוח לחלוטין. גם בחיבור לתנינים היה חלק של התייל שלא נלקח בחשבון.

גרף 1/הזרם כתלות באורך התייל - הנגד

תוספת: הזרם נמדד במיקרו אמפר



ניתוח התוצאות

התקבל גרף עם שיפוע 0.004 נוכל לחשב את מתח ההדקים מהגרף

$$\frac{\rho}{A\varepsilon} = 0.004 * 10^8 [\Omega/mV]$$

$$A = \pi * (7.5 * 10^{-4})^2 = 1.767 * 10^{-6} [m^2]$$

$$[\rho = 1.72 * 10^{-8} \Omega m \text{ נחושת}]$$

$$\varepsilon = \frac{1.72 * 10^{-8}}{0.004 * 10^8 * 1.767 * 10^{-6}} = 2.43 * 10^{-8} V = 0.024 \mu V$$

כיוון שלא מדדנו את מתח ההדקים של מקור המתח שלנו, נוכל לומר שקיבלנו מתח הדקים של
מאיות מיקרו וולטים וזה מתאים מבחינת סדרי הגודל במעגל.
כמו כן התקבל יחס ישר סביב הנקודות בתחום אי הוודאות.

באורכים גדולים של התייל, המדידה היתה מדוייקת יותר, שהרי יש עוד רכיבים במעגל שההתנגדות שלהם היא בסדר גודל של הנגד המחובר.

סיכום:

בחרנו בפרוייקט שיש לו משמעות גדולה בעינינו להוראת נושאים ע"י מורים לפיזיקה בבתי הספר. חוק אוהם מתאר את הקשר הנסיוני בין הזרם במוליך לבין המתח בין קצותיו. בעבודה זו הכרנו את הפרמטרים השונים המשפיעים על התנגדות של מוליך ואת המושג "התנגדות סגולית". למדנו באופן תיאורטי וניסויי על מעגלים חשמליים, על מכשירי מדידה וכיצד הם משפיעים על המעגל.

מעבר לחקר נושא באופן מעמיק, כמו כל ניסוי גם ניסוי חוק אוהם נלמד במסגרת תכנית הלימודים בתיכון, לביסוס הידע התיאורטי ועוזר לו להבין את התיאוריה, נוסחאות, כללים וחוקים. למדנו על תהליך העבודה המייגע והארוך של מדענים והתהליך היה מאתגר ומהנה. לקראת סוף הפרוייקט נאלצנו לעבוד מרחוק ללא ציוד מעבדה (סגר הקורונה), וזה הביא אותנו לעצירת בניית המודל/הניסוי המרכזי של הפרוייקט. ביססנו את הידע שלנו בביצוע ניסויים, מדידה, שגיאות ושימוש בכלים שונים לניתוח תוצאות.

תודה למנחים ולמרכז אחרת על הליווי והתמיכה לאורך כל הדרך.

ביבליוגרפיה

- Mayer, V. V., & Varaksina, E. I. (November 01, 2014). Modern analogue of Ohm's historical experiment. *Physics Education*, 49, 6, 689-692.
- Kipnis, N. (January 01, 2009). A law of physics in the classroom: The case of Ohm's Law. *Science Et Education*, 18.
- Jungnickel, C., & MacCormmach, R. (1990). *Intellectual mastery of nature: Theoretical physics from Ohm to Einstein*. Chicago, Ill.[u.a.: Univ. of Chicago Pr.
- Kim, H. J., & Langley Research Center,. (2012). *System to measure thermal conductivity and Seebeck coefficient for thermoelectrics*.
- (הזרם החשמלי וחוק אום לפי מודל דרודה , "תהודה" כרך 16, חוברת מס' 2 (1994)

מקורות מקוונים

- גליונומטר טנגנטי - ויקיפדיה
<https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%92%D7%9C%D7%95%D7%95%D7%A0%D7%95%D7%9E%D7%98%D7%A8>
- האפקט התרמואלקטרי
https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect
- <https://www.esaral.com/tangent-galvanometer-experiment-construction-working/>
- <http://www.mccc.edu/~huangj/documents/gal.pdf>
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/magmom.html#c2>
- http://study.eitan.ac.il/sites/index.php?portlet_id=110514&page_id=43