

מאזני זרם

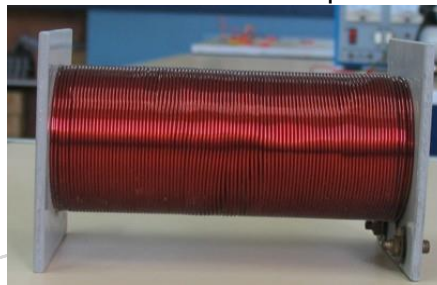
א. מטרת הניסוי

למדוד את הפרמיאביליות המגנטית μ_0 באמצעות מאזני זרם.

ב. רקע תיאורטי

השדה המגנטי של סליל

הסליל העשוי מחוט מוליך מבודד, המלוכף בצורה בורגית בליפופים עוקבים על גליל חלול העשוי מחומר מבודד, כפי שמתואר באיור 1. לעתים החוט מלוכף על הגוף הגלילי במספר שכבות הלך וחזור, כך שכל הליפופים הם באותו כיוון. כאשר מזרימים זרם בסליל נוצר בו שדה מגנטי.



איור 1

מתקיים עבור סליל "אינסופי":

(1) השדה המגנטי אפס בכל הנקודות שמחוץ לסליל.

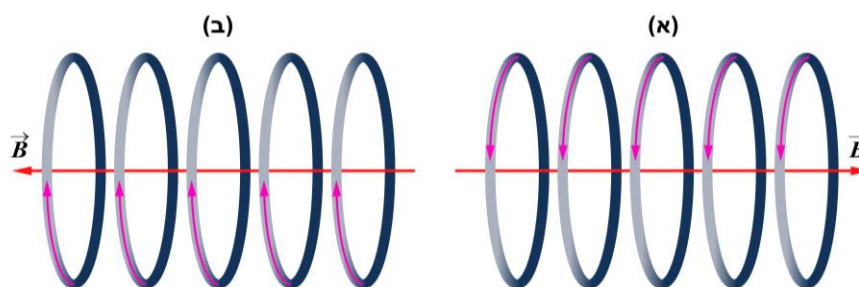
(2) השדה קבוע בגודלו ובכיוונו בכל הנקודות בתוך הסליל. גודלו נתון על ידי:

$$(1) \quad B = \mu_0 n I$$

כאשר $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$, I הוא הזרם בסליל ו- n מייצג את צפיפות הליפופים, כלומר מספר הליפופים ליחידת אורך. היחידה של n היא $(1/\text{m})$.

כיוון השדה המגנטי בתוך סליל אינסופי, בכל הנקודות, הוא תמיד בכיוון המקביל לציר הסליל. כדי לקבוע אם בסליל הנתון הוא מקביל בכיוון ימין או שמאל, למשל למקרה המתואר באיור 1, נתייחס לסליל כאל אוסף טבעות הנפרדות זו מזו, כפי שמתואר באיור 2.

הזרם העובר בכל הטבעות האלה הוא באותו כיוון, לכן לשדה המגנטי הנוצר במישור של כל אחת מהן יש אותו כיוון והוא ניצב למישור הטבעת (כלומר מכוון לאורך ציר הסליל), והכיוון שלו נקבע לפי כלל "יד ימין" השני. אם כיוון הזרם בסליל הוא כפי שמתואר באיור 2א, יהיה כיוונו של השדה המגנטי הנוצר במישור של כל אחת מהטבעות – ימין, ולכן כיוון השדה השקול בתוך הסליל יהיה מקביל לציר הטבעת בכיוון ימין. לעומת זאת, אם כיוון הזרם החשמלי הוא הפוך, כפי שמתואר באיור 2ב, יהיה כיוונו של השדה המגנטי השקול בתוך הסליל מקביל לציר הסליל בכיוון שמאל.



איור 2

נציין את הנקודות הבאות:

1. במציאות אין סלילים אינסופיים. עם זאת, אפשר להשתמש בקירוב טוב מאוד במשוואה (1), שהיא כאמור עבור סליל אינסופי, גם לחישוב השדה המגנטי בתוך סליל סופי אם מתקיימים שני התנאים:

- א. רדיוס הסליל R קטן מאוד ביחס לאורך הסליל ℓ , כלומר כאשר מתקיים: $R \ll \ell$.
- ב. חישוב השדה המגנטי מתבצע עבור נקודות שאינן קרובות לקצוות הסליל, כלומר קרובות יותר למרכז הסליל.

במקרים בהם מתקיימים שני התנאים הנ"ל נהוג לקרוא לסליל גם בשם **סילוניתי**.

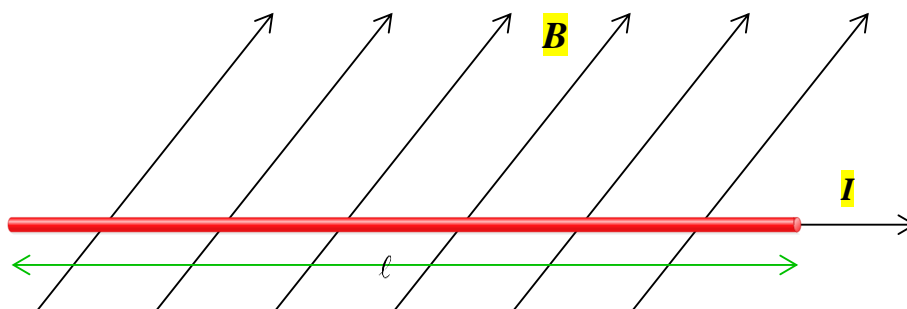
2. אם נתון סליל סופי שאורכו ℓ ומספר הליפופים שלו הוא N , נקבל שמספר הליפופים ליחידת אורך הוא: $n = N/\ell$, ואם מתקיים התנאי $R \ll \ell$, אז השדה המגנטי בנקודות הקרובות למרכז סליל זה יהיה:

$$(2) \quad B = \mu_0 \frac{N}{\ell} I$$

הכוח המגנטי הפועל על תיל נושא זרם:

כאשר מניחים תיל ישר שאורכו ℓ , הנושא זרם I בשדה מגנטי אחיד \vec{B} , כפי שמתואר באיור 3, יפעל על התיל כוח מגנטי \vec{F}_m . גודלו של כוח זה נתון על ידי הביטוי הבא:

$$(3) \quad F_m = IB\ell \sin \theta$$



איור 3

כאשר θ היא הזווית בין השדה המגנטי לזרם (לתיל). כוח זה מתאפס כאשר השדה מקביל לתיל ($\theta = 0$) ומקבל ערך מקסימלי של $IB\ell$ כאשר השדה ניצב לתיל ($\theta = 90^\circ$).

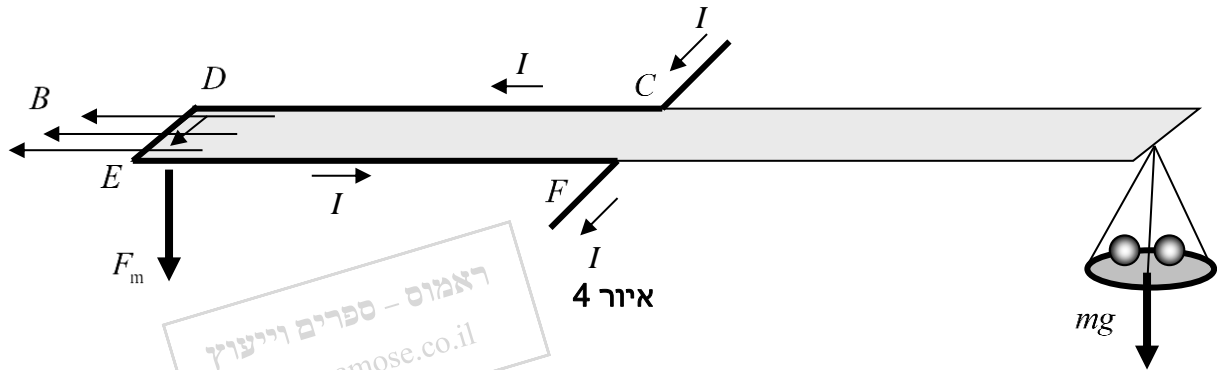
כיוון הכוח המגנטי \vec{F}_m המופעל על התיל הוא תמיד ניצב למישור המכיל את הזרם I (התיל) ואת וקטור השדה המגנטי \vec{B} . לפי זה, באיור 3 כיוון הכוח המגנטי ניצב למישור הדרך. השאלה היא האם כיוון הניצב הוא החוצה ממישור הדרך או פנימה? כדי לענות על שאלה זו ניעזר בכלל שהפיזיקאים פיתחו על סמך הניסויים ואשר בעזרתו קובעים את כיוונו של הניצב. כלל זה נקרא "כלל יד ימין":

כלל יד ימין: ניישר את כף יד ימין במקביל למישור המכיל את כיוון הזרם ואת וקטור השדה המגנטי, כשהאגודל פונה לכיוון הזרם ואילו שאר האצבעות פונות לכיוון השדה המגנטי. כיוון הכוח המגנטי יהיה ניצב למישור כף היד. (או לכופף את האצבעות ב- 90° מעלות, והן מראות את כיוון הכוח).

מאזני זרם

מאזני זרם הם מאזניים המורכבים מזרוע הנמצא במצב מאוזן על בסיס שעובר במרכזו. בצד אחד של הזרוע נמצא סל קטן שאפשר להניח בתוכו משקולות קטנות, ובצד שני קיים חוט חשמל לאורך

השפה החיצונית של הזרוע כפי שמתואר באיור 4. על צד זה של הזרוע משפיע שדה מגנטי אחיד המקביל לפני הקרקע וגם לזרוע (ראה איור 4).



כאשר זורם זרם I בחוט כפי שמתואר באיור 4, יפעל על הקטע DE של התיל כוח מגנטי כלפי מטה (כנגד כוח הכובד הפועל על הסל בצד השני). על הקטעים CD ו- EF של התיל לא פועל כוח מגנטי כי השדה המגנטי מקביל לקטעים אלה.

גודלו של הכוח המגנטי הפועל על הקטע DE כלפי מטה נתון על ידי:

$$(4) \quad F_{DE} = IB\ell \sin 90 = IB\ell$$

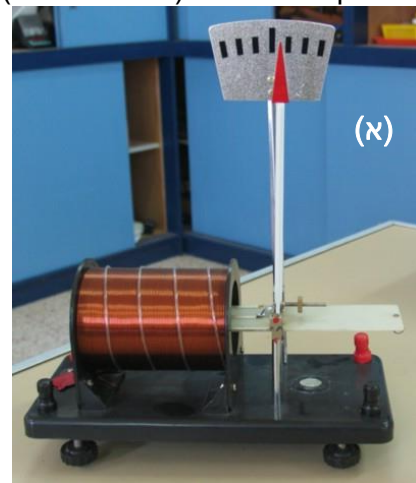
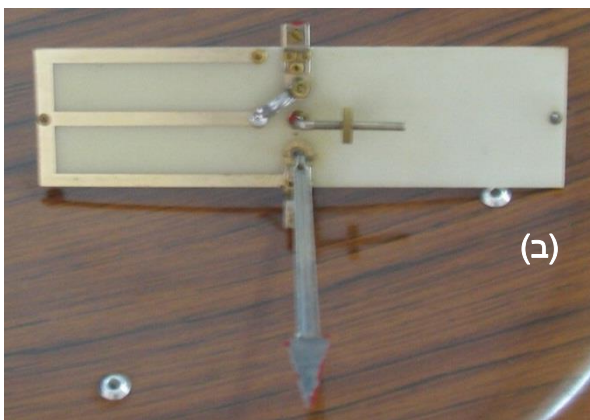
כאשר ℓ הוא אורך הקטע DE של התיל. התנאי שהזרוע תהיה מאוזנת הוא שיתקיים:

$$(5) \quad IB\ell = mg$$

ברור שעל מנת שמאזני הזרם יפעל כראוי, יש לכוון את כיוון השדה המגנטי ואת כיוון הזרם בזרוע כך שהכוח המגנטי הפועל על הקטע DE יהיה מכוון כלפי מטה.

ג. מכשור וציוד

- (1) סלול (מספר ליפופיו 500).
- (2) ספק מתח ישר.
- (3) תילים.
- (4) מאזני זרם, והוא המכשיר המתואר באיור 5א. צד אחד של זרוע המאזניים נמצא בתוך הסליל, ובצד השני קיים סל קטן (או וו לתלות עליו משקולות). לאורך שפת הזרוע הנמצא בתוך הסליל מודבק חוט חשמל (ראה איור 5ב). המצב כאן דומה בדיוק להסבר שהתייחס לאיור 4.



איור 5

(5) נגד משתנה.

(6) אמפרמטר.

(7) משקולות קטנות.

ד. הניסוי (בניית המערכת וביצוע המדידות)

- (1) מדוד את אורך הקטע DE של התיל הנמצא לאורך לזרע (ראה איור 4), ורשום את התוצאה במחברתך.
- (2) מדוד את אורך הסלול ורשום את התוצאה במחברתך.
- (3) חבר תיל מוליך אל הדק אחד של ספק המתח, ואת הקצה השני שלו אל הכניסה של הסליל במאזני הזרם. את היציאה של הסליל חבר באמצעות תיל נוסף אל נקודת כניסת הזרם לזרוע. את נקודת יציאת הזרם מהזרוע חבר בטור באמצעות תיל נוסף לנקודת הכניסה של נגד משתנה, ואת נקודת היציאה של הנגד המשתנה חבר לכניסה של אמפרמטר. את היציאה של האמפרמטר חבר להדק השני של הספק. בכך נוצר מעגל חשמלי הכולל ספק מתח, סליל, זרוע המאזניים, נגד משתנה ואמפרמטר, כולם מחוברים בטור זה לזה. בשלב זה יש להשאיר את הספק כבוי.
- (4) אמן את מאזני הזרם (כשהזרם עדיין אפס) וזאת על ידי בורג המיועד לכך.
- (5) הפעל את הספק, ובדוק אם הכוח המגנטי הפועל על הזרוע שבתוך הסליל מכוון כלפי מטה. אם חלק זה של הזרוע מתרומם כלפי מעלה עקב הפעל הספק, המאזניים לא יעבדו כראוי, במצב זה יש לשנות את כיוון הזרם או בסליל או בזרוע, אך לא בשניהם יחד, כי אז כיוון הכוח המגנטי יישאר כלפי מעלה.
- (6) שים משקולת אחת קטנה בסל, ושנה בהדרגה את הזרם במעגל (על ידי שינוי ההתנגדות של הנגד המשתנה), עד שהמאזניים מתאזנים. במצב זה מדוד את עוצמת הזרם ורשום במחברת את עוצמת הזרם ואת מסת המשקולת שבסל.
- (7) חזור על הפועלה שבסעיף הקודם מספר פעמים, כך שבכל פעם יש להוסיף משקולת ולמדוד את עוצמת הזרם שעברו המאזניים מאוזנים.
- (8) הכן טבלה שכוללת שתי עמודות. בעמודה הראשונה רשום את ערכו של הכוח המגנטי שפועל על הקטע DE של הזרוע כלפי מטה (שהוא שווה למשקל המשקולות שבסל, mg) ואת עוצמת הזרם שעבורה המאזניים מאוזנים.

$F_m=mg$ (N)					
I (A)					

ה. עיבוד וניתוח המדידות

במצב שבו המאזניים מאוזנים, מתקיים:

$$(6) \quad F_m = mg$$

הכוח המגנטי הפועל על הקטע DE של הזרוע נתון גם על ידי הביטוי:

$$(7) \quad F_m = IB\ell$$

כאשר השדה המגנטי בתוך הסליל נתון על ידי:

$$(8) \quad B = \mu_0 nI = \mu_0 \frac{N}{L} I$$

L הוא אורך הסליל ו- N הוא מספר הליפופים הכולל של הסליל. משני הקשרים האחרונים נקבל:

$$(9) \quad F_m = I \left(\mu_0 \frac{N}{L} I \right) \ell = \left(\frac{\mu_0 N \ell}{L} \right) I^2$$

מכיוון שמתקיים $F_m = mg$, נוכל לרשום את הקשר האחרון גם כך:

$$(10) \quad mg = \left(\frac{\mu_0 N \ell}{L} \right) I^2$$

לכן על מנת למצוא את μ_0 עליך להתקדם באופן הבא:

(1) הכן, על סמך הטבלה שקיבלת מקודם, טבלה חדשה המתארת את הכוח המגנטי F_m (mg) כפונקציה של I^2 .

(2) שרטט גרף המתאר את F_m כפונקציה של I^2 .

(3) מצא את שיפוע הגרף ששרטטת, וחשב באמצעותו את μ_0 .



ו. שאלות הכנה

(1) הסבר מדוע בניסוי זה מניחים קודם משקולת בסל ולאחר מכן מחפשים את הזרם שעבורו המאזניים מתאזנים, ולא עושים את ההפך. קובעים את הזרם לערך מסוים ומחפשים את גודלה של המשקולת המקיימת שהמאזניים מאוזנים.

(2) הסבר מדוע לא פועל כוח מגנטי כל הקטעים CD ו- EF של התיל שבזרוע למרות שזורם בהם זרם (ראה איור 4).

(3) באיור 4 מבצעים את השינויים הבאים. קבע בכל אחד מהשינויים אם כיוון הכוח המגנטי על DE משתנה או לא. הסבר את קביעתך בכל אחד מהמקרים.

א. הופכים את כיוון הזרם בסליל בלבד.

ב. הופכים את כיוון הזרם בזרוע בלבד.

ג. הופכים את כיוון הזרם בסליל וגם בזרוע.

(4) האם ניתן לבצע ניסוי זה בזרם חילופין? הסבר את תשובתך.