

כוח מגנטי והשראה אלקטרומגנטית

מילות מפתח:

שדה מגנטי, חוק לורנץ, השראה אלקטרומגנטית, צימוד הדדי.

הציוד הדרוש: ספק זרם ישר וחילופין, 2 מגנטים קבועים, ערכת תיילים נושאי זרם, מאזנים דיגיטליים בדיוק של ± 0.01 gr ופסל למדידת איזון אופקי, סליל נושא זרם, מחזיק לנושאי זרם, סרגל, כבלים חשמליים. זוג סלילים להשראה אלקטרומגנטית, ליבה מתכתית.

מטרות הניסוי:

1. בדיקה אמפירית של הכוח הפועל על מוליך נושא זרם בשדה מגנטי.
2. יצירת זרם על ידי השראה אלקטרומגנטית.

1. תיאוריה

1.1 חוק לורנץ

לפי חוק לורנץ, הכוח הפועל על מטען (q) הנע במהירות \vec{V} בנוכחות שדה מגנטי \vec{B} הוא:

$$(1) \quad \vec{F}_m = q\vec{V} \times \vec{B}$$

זרם הוא למעשה תנועה של אלקטרונים הנעים בתוך המוליך, ולכן על תייל ישר באורך L , הנושא זרם i ונמצא בתוך שדה מגנטי \vec{B} יפעל כוח בהתאם לביטוי (2).

$$(2) \quad \vec{F}_m = i\vec{L} \times \vec{B}$$

הווקטור \vec{L} הוא וקטור השווה לאורך התייל וכיוונו נקבע ככיוון הזרם הזורם דרכו. הכיוון של הכוח המגנטי ניצב למישור המוגדר ע"י השדה המגנטי והווקטור \vec{L} וערכו המוחלט נתון במשוואה (3).

$$(3) \quad F_m = iLB \sin \theta$$

כאן, F_m הוא הכוח המגנטי, i הזרם החשמלי B השדה המגנטי ו θ הזווית בין כיוון התייל לכיוון השדה המגנטי.

משוואה (3) הינה סקלרית בניגוד למשוואה (2) המתארת בצורה וקטורית את כיוון השדה המגנטי, הזרם והכוח הפועל על התייל. את כיוון של הכוח הפועל על התייל ניתן למצוא לפי כלל היד הימנית, כאשר האגודל יורה את כיוון תנועת הזרם, אצבעות היד את כיוון השדה, והכוח הפועל על המוליך יהיה מאונך לכף היד.

אם נסכם את התופעה נוכל לרשום כי מוליך נושא זרם המונח בשדה מגנטי חיצוני פועל עליו כוח. מתוך הרעיון הבסיסי הזה פותח המנוע החשמלי. על ידי הזרמה של זרם חשמלי למערכת סלילים הנמצאים בתוך שדה מגנטי נוצר מומנט סיבובי על עוגן המנוע הגורם לסיבובו.

1.2 השראה אלקטרומגנטית

תופעה הפוכה לזו שתיארנו בסעיף הקודם היא תנועה של מוליך בתוך שדה מגנטי חיצוני כך שהמוליך יחתוך את קווי שדה המגנטי תגרום ליצירת מתח מושרה בתוך המוליך. תופעה זו הינה הבסיס ליצור זרם חשמלי באמצעות מחוללים (גנרטורים). הדרישה ליצירת מתח היא שינוי של שדה מגנטי כתלות בזמן כפי שניסח זאת פראדי:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

כאשר ϕ הוא השטף המגנטי בתוך הכריכה הסגורה, המוגדר כעוצמה של השדה המגנטי B היוצא בניצב למשטח ששטחו A ($\phi = \vec{B}\vec{A}$) ו- N מספר הכריכות.

(הסימן השלילי מציין כי הזרם הנוצר בכריכה גורם ליצירת שדה מגנטי במגמה הפוכה לשדה המגנטי החיצוני).
ניתן ליצור שינוי שטף מגנטי במספר דרכים:

1. הזזה/סיבוב של הכריכה בשדה מגנטי חיצוני כך, שבכל רגע יעבור דרכה כמות שונה של שדה מגנטי.
2. שינוי שטח הכריכה כתלות בזמן כך שהשטף המגנטי דרכה ישתנה בכל רגע.
3. שינוי של השדה המגנטי החיצוני כך שדרך הכריכה יעבור שדה מגנטי שונה בכל רגע.
4. שילוב של כל השינויים יחד (שינוי של: שדה מגנטי חיצוני, גודל הכריכה, הזזות וסיבוב).

בניסוי זה נדגים את יצירת הזרם המושרה בכריכה לפי שיטות 3 ו-4.

בשלב ראשון נשתמש ב- 2 סלילים בעלי שטח חתך זהה, בסליל אחד נזרים זרם משתנה AC (זרם חילופין שתדירותו 50 הרץ וסימונו \sim) כך שיוצר סביבו שדה מגנטי המשתנה בהתאם לשינויים בזרם (נזכיר שתיל נושא זרם יוצר סביבו שדה מגנטי). בקרבתו של הסליל הראשון נניח סליל נוסף שתפקידו להרגיש את השינויים הנוצרים בשדה המגנטי של הסליל הראשון. שינויים אלו יגרמו לזרם מושרה בסליל השני. נמדוד את הזרם בסליל השני, זרם זה הוא **הזרם המושרה** (למעשה זהו אב טיפוס של שנאי).

בשנאי האידיאלי יחס ההספקים שווה בשני צידי השנאי: $P_A = V_A I_A = V_B I_B = P_B$
ולכן ניתן לחשב את יחס הליפופים (יחס השנאה) של השנאי לפי:

$$(5) \quad \frac{N_A}{N_B} = \frac{V_A}{V_B} = \frac{I_B}{I_A}$$

N_A, N_B - מספר הליפופים בצד A ו-B

V_A, V_B - מתח בצד A ו-B

I_A, I_B - זרם בצד A ו-B

בשלב השני ניצור שדה מגנטי משתנה בזמן באמצעות סיבוב של מגנט המחובר למנוע בתנועה מעגלית (איור 1). השינויים בשדה המגנטי יגרמו למתח מושרה בטורואיד (סליל המלוכף על טבעת פרומגנטית) הממוקם קרוב למישור הסיבוב של המגנט. את המתח המושרה נמדוד על סליל הטורואיד בעזרת מד מתח.



איור 1: המערכת ליצירת מתח מושרה בטורואיד

❖ [סרטון הדגמה על הנושא.](#)
❖ [סימולציה.](#)

1.2 שאלות הכנה

1. תייל ישר ואנכי נושא זרם חילופין של: $I(t) = 8 \cdot \sin(100\pi \cdot t)$ ($\omega = 2\pi f$) מונח בין הקטבים של אלקטרומגנט. השדה המגנטי בין הקטבים אופקי וגודלו $B = 1.5 \text{ T}$. חשבו את הכוח המגנטי (גודל וכיוון) הפועל על קטע באורך 0.01 m מהתייל כפונקציה של הזמן אם כיוון השדה המגנטי הוא:
א. מזרחה ב. דרומה. ג. 30° דרומה ממערב.

2. האם תוכל למדוד את הכוח במאזניים שברשותך? הסבר.
(הערה: זמן התגובה של המאזניים הוא 0.5 שנייה)

3. אלקטרון נע בכיוון צפון בתוך שדה מגנטי שכיוונו מערב, מהו כיוון הכוח שפועל על האלקטרון?

2. מהלך הניסוי

2.1 הכרת הציוד - הכוח המגנטי

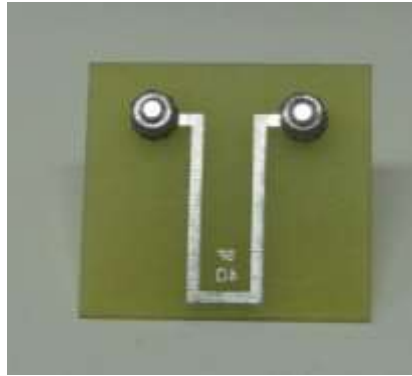
לרשותכם מגנטים קבועים בצורות שונות (סוג I וסוג II ראה איור 2)



איור 2: א) מגנט קבוע בניסויים עגור תייל נושא זרם מסוג I.
ב) מגנט קבוע בניסויים עגור תייל נושא זרם מסוג II.

כמו כן, תייל נושא זרם מסוג I (התייל מוצמד לפלטה מבודדת) וסליל נושא זרם מסוג II, ראו איורים 3 ו 4.

-כוח מגנטי-



איור 3 : תייל נושא זרם סוג I



איור 4 : תייל נושא זרם סוג II

2.2 מערכת הניסוי

ניסוי זה מורכב משלשה שלבים. בשלב הראשון נחקור את התלות של הכוח המגנטי בזרם כאשר אין תלות בזווית ובאורך (כלומר נשמור על הזווית θ והאורך L כקבועים). בשלב השני נבדוק שוב את הכוח המגנטי אך הפעם נשמור על הזרם i וזווית θ קבועים ונחקור את השפעת אורך המוליך L על הכוח המגנטי. לצורך ביצוע שני השלבים הראשונים תרכיבו מערכת מדידה המתוארת באיור 5. בשלב השלישי אנו נשמור על הזרם i ואורך התייל L קבועים ונחקור את ההשפעה של שינוי הזווית θ על הכוח המגנטי.

ודאו לפני ביצוע המדידות כי המתג בגב המכשיר הוא על זרם ישר (DC).

2.2.1 התלות של הכוח המגנטי בזרם

תרכיבו מערכת מדידה המתוארת באיור 5, הניחו את הפלס על המאזניים, תבדקו את איזונם האופקי.

א. הניחו את המגנט על המאזניים.

ב. חברו לוחית אחת עם תייל נושא זרם מסוג I באורך 4.2 cm (SF 38)

אל הזרוע המתקפלת. קרבו את המתקן עם הזרוע המתקפלת כשהלוחית מחוברת אליה, והכניסו את הלוחית בין הקטבים של המגנט בצורה כזאת שניתן לקפל את הזרוע מבלי שהלוחית תפגע במגנט. החלק התחתון של הלוחית צריך להיות בגובה של כ- 1mm מתחתית המגנט.

ג. חברו את המגעים בזרוע המתקפלת למקור הזרם בעזרת החוטים.

ד. אפסו את המאזניים בזרם $i=0$.

ה. וודאו שהשדה המגנטי ניצב ללוחית.

ו. תעלו את הזרם מאפס עד 5 אמפר בקפיצות של 0.5 אמפר ורישמו בכל פעם את קריאת המאזניים.

ז. בחלק הזה של הניסוי, שני הפרמטרים שנשארים קבועים הם: הזווית ואורך התייל.

ח. ציירו גרף של הכוח המגנטי (F) כפונקציה של הזרם i וודאו שהקשר הוא ליניארי. חשבו את השדה המגנטי המקומי מתוך השיפוע של הגרף.



איור 5 : תיאור המערכת הניסויית

2.2.2 התלות של הכוח המגנטי באורך התייל

- בשלב הזה של הניסוי אנו נבדוק את התלות של הכוח המגנטי באורך התייל כאשר שאר הגדלים נשמרים. תרכיבו מערכת מדידה המתוארת באיור 5.
- א. הזרם 4 אמפר בכל אחד משני הניסויים הבאים.
- ב. חברו לוחית אחת עם תייל נושא זרם מסוג I ותמדדו את אורך התייל, קרבו את המתקן עם הזרוע המתקפלת והכניסו את הלוחית בין הקטבים של המגנט בצורה כזאת שניתן לקפל את הזרוע מבלי שהלוחית תפגע במגנט. החלק התחתון של הלוחית צריך להיות בגובה של כ- 1mm מתחתית המגנט. רישמו את הקריאה של המאזניים.
- ג. חזרו על הניסוי עם עוד שלוש לוחיות בעלות מוליכים באורכים שונים ורישמו את הקריאות של המאזניים בכל פעם.
- ד. ציירו גרף של הכוח המגנטי כפונקציה של אורך התייל וודאו שהקשר הוא ליניארי. חשבו את השדה המגנטי מתוך השיפוע של הגרף.

2.2.3 ההשפעה של שינוי הזווית θ על הכוח המגנטי

- תרכיבו את המערכת שבאיור 6.



איור 6: תיאור המערכת הניסיונית לבדיקת ההשפעה של הזווית על הכוח המגנטי.

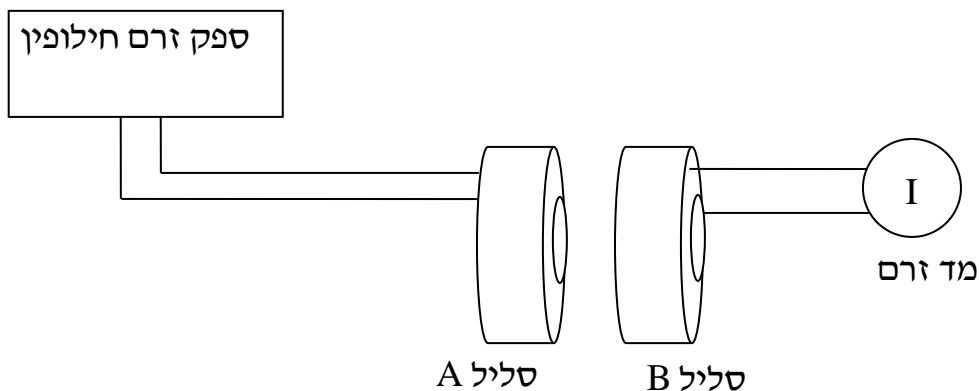
- א. הניחו את המגנט השני המתאים לחלק הזה של הניסוי על המאזניים.

- ב. חברו סליל נושא זרם מסוג II אל המתקן עם הזרוע המתקפלת והכניסו אל בין הקטבים של המגנט. החלק התחתון של הסליל צריך להיות בגובה של כ-1 mm מתחתית המגנט. הסליל נושא זרם מסוג II מורכב עם מד זווית וניתן למדוד בו את זווית הסיבוב. אורך הסליל הינו $L = 10\text{ cm}$.
- ג. חברו את המגעים של הזרוע המתקפלת אל מקור הזרם.
- ד. אפסו את המאזניים כאשר $i=0$.
- ה. כוונו את מתקן הסיבוב לאפס מעלות. סובבו את המגנט כך שקווי השדה יהיו מקבילים למישור הסליל. במצב הזה (זווית אפס) הכוח המגנטי צריך להיות אפס. תפעילו את מקור הזרם, תספקו זרם של 3A וסובבו בעדינות את המגנט עד שהקריאה של המאזניים תתאפס (הכוח המגנטי הפועל על הסליל מתאפס).
- ו. סובבו את המתקן בקפיצות של 15 מעלות ורישמו את קריאות המאזניים בכל זווית.
- ז. ציירו גרף של הכוח המגנטי כפונקציה של סינוס הזווית וודאו שהקשר הוא ליניארי.
- ח. בצעו דיון בתוצאות שקיבלת ורישמו סיכום ומסקנות לכל הניסויים שביצעת.

2.3 השראה אלקטרומגנטית

2.3.1 מדידת זרם מושרה בסליל

בנו את מערך הניסוי הבא :



איור 7 : תיאור סכמתי של המערכת הניסוינית למדידת ההשראה האלקטרומגנטית

הסליל הראשוני A אמור להיות סליל עם 250 ליפופים (אם רשום על הסליל 250 ליפופים חברו את הדקים שבשני הקצוות, התעלמו מההדק האמצעי, אם על הסליל רשום 500 ליפופים, חברו את ההדק האמצעי עם אחד הקצוות).

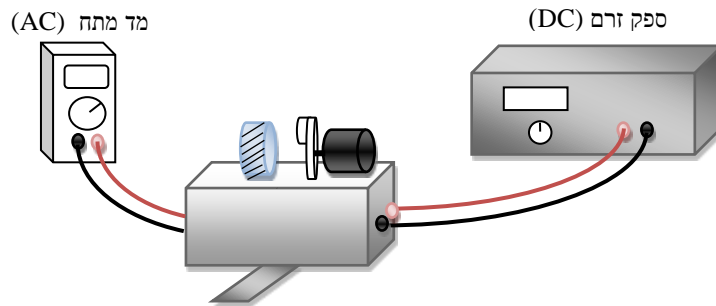
- סליל B הוא סליל עם 1000 ליפופים (חברו חוטים להדקים שבשני הקצוות)
1. העבירו את המתג בגב הספק לזרם **חילופין מסומן ב- AC**. ברגע זה מספק הספק זרם חילופין בתדירות של 50 הרץ, הערך הרשום בסקלה שעל ספק הזרם הוא ערך זרם השיא (ערך השיא הוא האמפליטודה של הזרם).
 2. הצמידו את 2 הסלילים אחד לשני וחברו את מד הזרם להדקי הסליל B. הקפידו שמכשיר המדידה ימדוד זרם חילופין. (שימו לב: מד הזרם מודד את זרם RMS

$$\text{השווה ל- } \frac{I_{\text{amplitude}}}{\sqrt{2}}$$

3. ערכו טבלה של הזרם המסופק לסליל A כתלות בזרם המושרה בסליל B. במד זרם ביחרו את תחום העבודה של 200mA ובצעו קריאות של I_B כאשר הזרם I_A נע מ- 0 ל- 2A בקפיצות של 0.4A. (אין לעבור את 2 A).
4. ערכו גרף של אמפליטודת הזרם I_B הנמדד בסליל B $(I_B = I_{B_{RMS}} \cdot \sqrt{2} = I_{\text{multimeter}} \cdot \sqrt{2})$ כתלות בזרם המסופק בסליל A ומצאו את מקדם הצימוד שבין הסלילים (היחס בין הזרמים) $(\frac{I_B}{I_A})$. בצעו דיון פיסיקלי על משמעות התוצאות.
5. חזרו על הניסוי שוב, הפעם כאשר יש ליבה מתכתית העוברת בין הסלילים. הפעם אל תעברו את הזרם של 1.6A בסליל הראשוני. תערכו שוב גרף של אמפליטודת הזרם I_B הנמדד בסליל B $(I_B = I_{B_{RMS}} \cdot \sqrt{2} = I_{\text{multimeter}} \cdot \sqrt{2})$ כתלות בזרם המסופק בסליל A ומצאו את מקדם הצימוד שבין הסלילים. בצעו דיון פיסיקלי על משמעות התוצאות בצעו השוואה עם המצב ללא הליבה והסבירו מדוע נוצר שינוי זה.
6. הוציאו את הליבה, קבעו את הזרם בסליל הראשוני על 1.5 אמפר ורישמו את ערך הזרם המתקבל בסליל B, כאשר הסלילים צמודים אחד לשני. כעת הרחיקו את הסליל B מרחק של 1 ס"מ מסליל A ותמדדו את הזרם בסליל B. בצעו את המדידות עד 5 ס"מ בקפיצות של 1 ס"מ. ציינו מה קרה לזרם בסליל B. שימו לב שהשינוי בזרם אינו לינארי. בצעו התאמה ומצאו **קשר אמפירי** המתאר בצורה טובה את אופיין הזרם בסליל B כתלות במרחק בין הסלילים.

2.3.2 מדידת מתח מושרה בטורואיד

בנה את מערך הניסוי הבא :



איור 8: מערך הניסוי למדידת מתח מושרה בטורואיד

חברו את ספק הזרם למנוע החשמלי (כניסת IN בצדי מערכת הניסוי) ואת מד המתח ליציאת OUT לצורך מדידת המתח המושרה הנוצר בטורואיד. **וודאו שספק הזרם נמצא במצב DC**, מד המתח מכוון למדידת מתח AC ויחידת המגנט והטורואיד מוצמדת לשולחן היטב באמצעות מלחציים.

1. תלות המתח המושרה במהירות הסיבוב

מקמו את הדסקה שעליה מודבק המגנט לפי קו השנתה הקרובה ביותר לטורואיד (לצורך כך יש להרפות מעט את הבורג הנמצא על ההתקן המקבע של המנוע ובתום הכיוון יש להדק אותו חזרה), קו זה קובע מרחק של כ 1 ס"מ בין המגנט לטורואיד.

- **נא לא להדק את הבורג שמחזיק את המנוע חזק מידי, חיזוק יתר ימנע מהדסקה להסתובב.**
 - וודאו שהבורר של ספק הזרם מסובב עד הסוף נגד כיוון השעון. (מצב זרם 0)
 - הדליקו את מקור הזרם ותעלו את עוצמתו עד שהמנוע יתחיל להסתובב.
 - קבעו את הזרם של מקור הזרם על 0.6A.
 - תמדדו את **מתח החילופין** שנוצר בטורואיד (מתח חילופין מסומן בסימן ~) במד מתח).
 - חזרו על המדידה עבור ערכי זרם הבאים: 0.55, 0.5, 0.45, 0.4A
- הקשר בין תדירות הסיבוב של המגנט לזרם המסופק למנוע נתון לפי הקשר האמפירי:

$$f_{(Hz)} = 125 \cdot I_{(A)}$$

כאשר f היא תדירות הסיבוב של המגנט (בסיבובים לשניה) ו- I הוא הזרם המסופק למנוע החשמלי.

- תערכו גרף של המתח המושרה הנוצר בטורואיד כפונקציה של תדירות הסיבוב של המגנט, בצעו דיון בתוצאות והסיקו מסקנות.

2. תלות המתח המושרה במרחק הטורואיד מהמגנט

- תעלו את עוצמת מקור הזרם באיטיות עד שהמנוע יתחיל להסתובב.
- קבעו את הזרם של מקור הזרם על 0.5A.
- תמדדו את המתח המושרה כאשר הדסקה נמצאת בשנתה הראשונה כלומר במרחק של 1 ס"מ מהטורואיד. חזרו על מדידת המתח המושרה שנוצר בטורואיד עבור שני מרחקים נוספים עבור השנתה השנייה והשלישית. השנתה השנייה מציינת מרחק של 1.5 ס"מ בין המגנט לטורואיד והשלישית 2 ס"מ.
- ערכו גרף של המתח המושרה כתלות במרחק בין המגנט לטורואיד. הסבירו את התוצאות באופן איכותי וענו על השאלה האם נכון יהיה לצפות לגרף לינארי?