

## 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  $\pm 0.01$  grf ופלס 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  $\theta$  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

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{פראדי:}$$

כאשר  $\phi$  הוא השטף המגנטי בתוך הכריכה הסגורה 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:

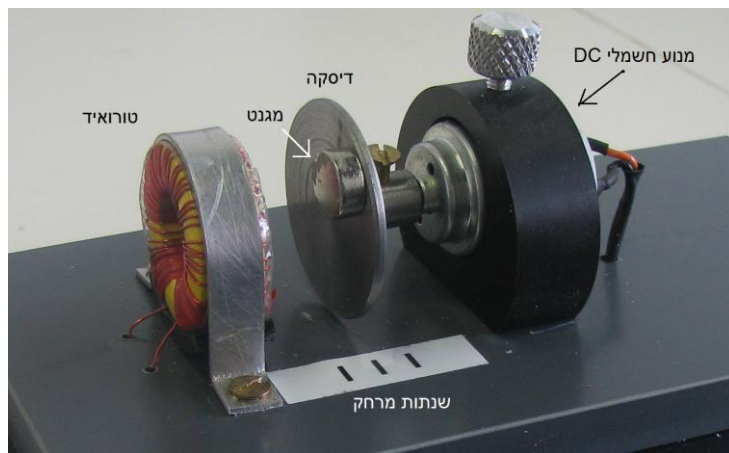
1. הזזה/סיבוב של הכריכה בשדה מגנטי חיצוני כך, שבכל רגע יעבור דרכה כמות שונה של שדה מגנטי.
2. שינוי שטח הכריכה כתלות בזמן כך שהשטף המגנטי דרכה ישתנה בכל רגע.
3. שינוי של השדה המגנטי החיצוני כך שדרך הכריכה יעבור שדה מגנטי שונה בכל רגע.
4. שילוב של כל השינויים יחד (שינוי של: שדה מגנטי חיצוני, גודל הכריכה, 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 (זרם חילופין שתדירותו 50 הרץ) כך שיוצר סביבו שדה מגנטי המשתנה

## -כוח מגנטי-

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).

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 המלופף 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

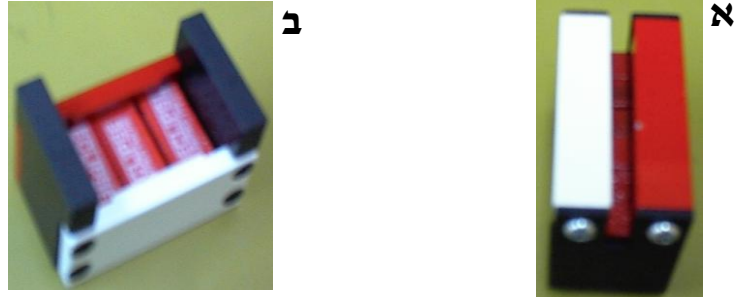
### 1.2 שאלות הכנה

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  $B = 1.5 \text{ T}$ . חשב את הכוח המגנטי (גודל וכיוון) הפועל על קטע באורך  $0.01 \text{ m}$  מהתייל כפונקציה של הזמן אם כיוון השדה המגנטי הוא:  
א. מזרחה ב. דרומה. ג.  $30^\circ$  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

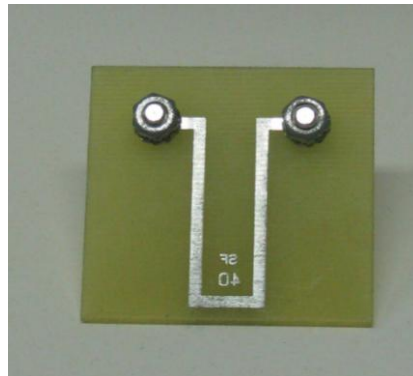
### 2.1 הכרת הציוד - הכוח המגנטי

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

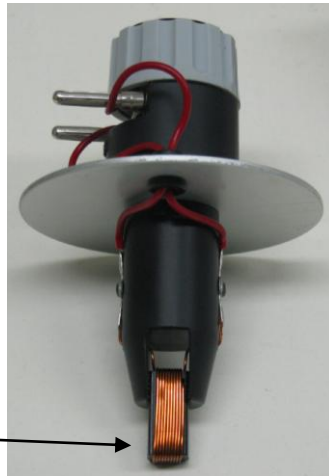


איור 2: א) מגנט קבוע בניסויים עבור תייל נושא זרם מסוג I.  
ב) מגנט קבוע בניסויים עבור סליל נושא זרם מסוג II.

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



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  $\theta$  והאורך  $L$  כקבועים). בשלב השני נבדוק שוב את הכוח המגנטי אך הפעם נשמור על הזרם  $i$  וזווית  $\theta$  קבועים ונחקור את השפעת אורך המוליך  $L$  על הכוח המגנטי. לצורך ביצוע שני השלבים הראשונים הרכב מערכת מדידה המתוארת באיור 5. בשלב השלישי אנו נשמור על הזרם  $i$  ואורך התייל  $L$  קבועים ונחקור את ההשפעה של שינוי הזווית  $\theta$  על הכוח המגנטי.

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

### 2.2.1 התלות של הכוח המגנטי בזרם

הרכב מערכת מדידה המתוארת באיור 5, הנח את הפלס על המאזניים, בדוק את איזונם האופקי.

א. הנח את המגנט על המאזניים.

ב. חבר לוחית אחת מסוג מאזני תייל נושא זרם מסוג I באורך 4.2 cm (SF 38) אל הזרוע המתקפלת. קרב את המתקן עם הזרוע המתקפלת כשהלוחית מחוברת אליה, והכנס 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. חבר את המגעים בזרוע המתקפלת למקור הזרם בעזרת החוטים.

ד. אפס את המאזניים בזרם  $i=0$ .

ה. וודא שהשדה המגנטי ניצב ללוחית.

ו. העלה את הזרם מאפס עד 5 אמפר בקפיצות של 0.5 אמפר ורשום בכל פעם את קריאת המאזניים.

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

ח. צייר גרף של הכוח המגנטי ( $F$ ) כפונקציה של הזרם  $i$  וודא שהקשר הוא ליניארי. חשב את השדה המגנטי המקומי מתוך השיפוע של הגרף.

## -כוח מגנטי-



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. הרכב מערכת מדידה המתוארת באיור 5.
- א. הזרם 4 אמפר בכל אחד משני הניסויים הבאים.
- ב. חבר לוחית אחת מסוג מאזני תייל נושא זרם מסוג I, קרב את המתקן עם הזרוע המתקפלת והכנס 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. רשום את הקריאה של המאזניים.
- ג. חזור על הניסוי עם עוד שלוש לוחיות בעלות מוליכים באורכים שונים ורשום את הקריאות של המאזניים בכל פעם.
- ד. צייר גרף של הכוח המגנטי כפונקציה של הזרם וודא שהקשר הוא ליניארי. חשב את השדה המגנטי מתוך השיפוע של הגרף.

### 2.2.3 ההשפעה של שינוי הזווית $\theta$ על הכוח המגנטי

הרכב את המערכת שבאיור 6.



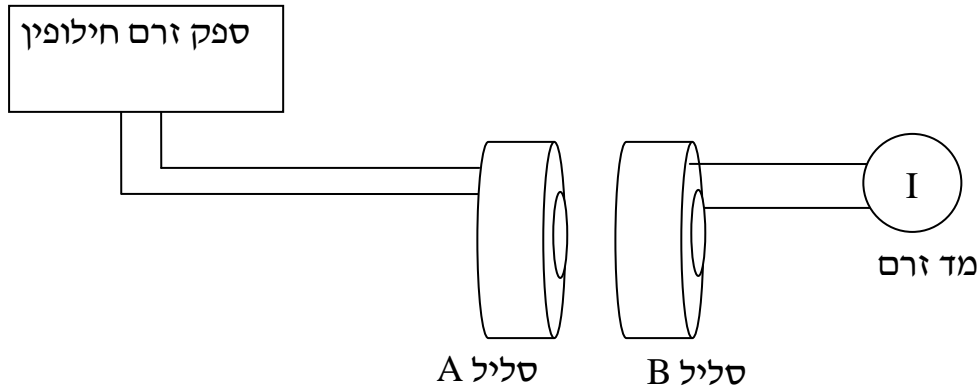
איור 6: תיאור המערכת הניסיונית לבדיקת ההשפעה של הזווית על הכוח המגנטי.

- א. הנח את המגנט השני המתאים לחלק הזה של הניסוי על המאזניים.
  - ב. חבר 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-1mm מתחתית המגנט. הסליל נושא זרם מסוג II מורכב עם מד זווית וניתן למדוד בו את זווית הסיבוב.
  - ג. חבר את המגעים של הזרוע המתקפלת אל מקור הזרם.
  - ד. אפס את המאזניים כאשר  $i=0$ .
  - ה. כוון את מתקן הסיבוב לאפס מעלות. סובב את המגנט כך שקווי השדה יהיו מקבילים למישור הסליל. במצב הזה (זווית אפס) הכוח המגנטי צריך להיות אפס. הפעל את מקור הזרם וסובב בעדינות את המגנט עד שהקריאה של המאזניים תתאפס (הכוח המגנטי הפועל על הסליל מתאפס).
  - ו. סובב את המתקן בקפיצות של 15 מעלות ורשום את קריאות המאזניים בכל זווית.
- צייר גרף של הכוח המגנטי כפונקציה של סינוס הזווית וודא שהקשר הוא ליניארי.
- ז. בצע דיון בתוצאות שקיבלת ורשום סיכום ומסקנות לכל הניסויים שביצעת.

### 2.3 השראה אלקטרומגנטית

#### 2.3.1 מדידת זרם מושרה בסליל

בנה 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 חבר את הדקים שבשני הקצוות, התעלם מההדק האמצעי, אם על הסליל רשום 500 ליפופים חבר את ההדק האמצעי עם אחד הקצוות).

סליל B הוא סליל עם 1000 ליפופים (חבר להדקים משמאל ומימין)

1. העבר את המתג בגב הספק לזרם חילופין מסומן ב-AC. ברגע זה מספק הספק זרם חילופין בתדירות של 50 הרץ, הערך הרשום בסקלה שעל הספק זרם הוא ערך זרם השיא (ערך השיא הוא האמפליטודה של הזרם).

2. הצמד את 2 הסלילים אחד לשני וחבר את מד הזרם להדקי הסליל B. הקפד שמכשיר המדידה ימדוד זרם חילופין.

3. ערוך טבלה של הזרם המסופק לסליל A כתלות בזרם המושרה בסליל B. בצע קריאות של  $I_B$  כאשר הזרם  $I_A$  נע מ-0 ל-2A בקפיצות של 0.4A. (אין לעבור את 2 A).

4. ערוך גרף של הזרם המסופק לסליל A כתלות בזרם המתקבל בסליל B ומצא את המקדם הצימוד שבין הסלילים. בצע דיון פיסיקלי על משמעות התוצאות.

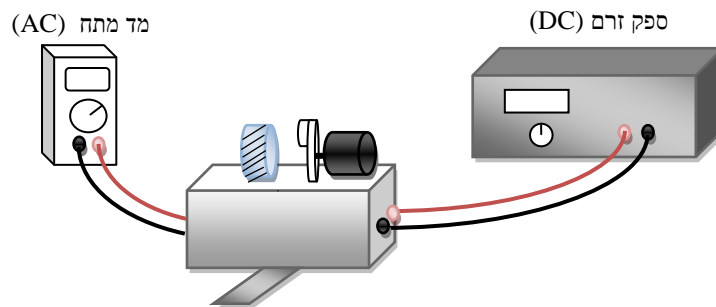
5. חזור על הניסוי שוב הפעם כאשר יש ליבה מתכתית העוברת בין הסלילים. הפעם אל תעבור את הזרם של 1.6A בסליל הראשוני. ערוך שוב גרף של הזרם המסופק לסליל A כתלות בזרם המתקבל בסליל B ומצא את המקדם הצימוד

שבין הסלילים. בצע דיון פיסיקלי על משמעות התוצאות בצע השוואה עם המצב ללא הליבה והסבר מדוע נוצר שינוי זה.

6. הוצא את הליבה קבע את הזרם בסליל הראשוני על 1.5 אמפר רשום את הערך של הזרם המתקבל בסליל B כאשר הסלילים צמודים אחד לשני. כעת הרחק את הסליל B מרחק של 1 ס"מ מסליל A. ומדוד את הזרם בסליל B. בצע את המדידות עד 5 ס"מ בקפיצות של 1 ס"מ. ציין מה קרה לזרם בסליל B, האם השינוי הוא ליניארי? הסבר את התוצאות וציין מדוע נוצר שינוי זה ומדוע הגיוני לקבל אופיין כפי שקיבלת.

### 2.3.2 מדידת מתח מושרה בטורואיד

בנה את מערך הניסוי הבא :



איור 8: מערך הניסוי למדידת מתח מושרה בטורואיד

חבר את ספק הזרם למנוע החשמלי (כניסת IN בצדי מערכת הניסוי) ואת מד המתח ליציאת OUT לצורך מדידת המתח המושרה הנוצר בטורואיד. וודא 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

מקם את הדיסקה 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. הדלק את מקור הזרם וכוון את עוצמתו ל-0.6 אמפר כך שהמנוע יתחיל להסתובב. מדוד את מתח החילופין שנוצר בטורואיד.

-כוח מגנטי-

חזור על המדידה עבור ערכי זרם: 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.

ערוך גרף של המתח המושרה הנוצר בטורואיד כפונקציה של מהירות הסיבוב של המגנט, בצע דיון בתוצאות והסק מסקנות.

## 2. תלות המתח המושרה במרחק הטורואיד מהמגנט

הבא את המנוע לסיבוב וקבע את הזרם מקור הזרם על 0.5A. מדוד את המתח המושרה כאשר המגנט נמצא בשנתה הראשונה כלומר במרחק של 1 ס"מ מהטורואיד. חזור על מדידת המתח המושרה שנוצר בטורואיד עבור שני מרחקים נוספים עבור השנתה השנייה והשלישית. השנתה השנייה מציינת מרחק של 1.5 ס"מ בין הדיסקה לטורואיד והשלישית 2 ס"מ. ערוך גרף של המתח המושרה כתלות במרחק בין המגנט לטורואיד. הסבר את התוצאות וענה על השאלה האם נכון יהיה לצפות לגרף לינארי?