

בחינת תכונות מגנטיות של חומרים פרומגנטיים באמצעות מעגלים מגנטיים ואפקט פאראדיי

איתמר קרבי 204258511 עילי מליניאק 305434896

בניסוי זה בחנו תכונות מגנטיות בחומרים שונים והשפעת שדה מגנטי חיצוני על מגנטיזציה החומרים. בניסוי עסקנו בחומרים פאראמגנטיים בהם מגנטיזציה החומר נותרת גם לאחר הסרת השדה החיצוני אשר יצר אותם. תכונותיהן של חומרים אלו משמשות במגוון יישומים תעשייתיים (כגון שנאים) וטכנולוגיים (hard-disc, tape recorder).

במהלך הניסוי תכונות המגנטיות של החומרים נבחנו באמצעות לולאות חשל (Hysteresis Loops) אשר נמדדו בשתי שיטות עיקריות:

1. באמצעות צמד מעגלים חשמליים. בחלק זה צפינו בתופעה ברמה המקרוסקופית.
2. בעזרת מיקרוסקופ דרכו צפינו בחומר ברמה המיקרוסקופית.

במדידות בשיטה הראשונה ראינו כי תופעת המגנטיות בחומר הינה תופעה מורכבת לניתוח אנליטי מכיוון ששני המשתנים הנמדדים (שדה מגנטי פנימי ושדה מגנטי חיצוני) תלויים זה בזה באופן הדדי כך שלא ניתן לבטל את צימודם ולהתייחס לאחד מהם כמשתנה בלתי תלוי. עם זאת, מדידות שונות אפשרו לנו להגיע לתובנות לגבי **התלות של השדה החיצוני בכמות החומר**, תלות אשר אינה טריוויאלית ועליה הרחבנו את הניסוי שלנו. באופן גורף, המדידות בניסוי תאמו את מרבית התאוריות הרלוונטיות, אולם במהלך ניסוי הרחבה זיהינו תופעה מפתיעה ולפיה למגע פיסית והולכה חשמלית יש השפעה על המדידות בניסוי במעגל מגנטי ועל כך נפרט בהמשך.

המדידות בשיטה השנייה היוו נקודת מבט נוספת על אותה התופעה ואיששו את ההנחות שהנחנו לגבי התהליכים המתרחשים בתוך החומר בתהליך ההתמגנטות.

רקע תיאורטי

ראשית נגדיר מספר מושגים:

שדה מגנטי- שדה הנוצר ע"י מטענים נעים (זרמים) ופועל על מטענים נעים. הקשרים בין השדה המגנטי והחשמלי נתונים ע"י משוואות מקסוול. אחת ממשוואות מקסוול היא **חוק פאראדיי**- חוק הקובע ששינוי בשטף המגנטי יוצר כא"מ חשמלי. הניסוח הדיפרנציאלי של החוק הוא:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad 1.1$$

והניסוח האינטגרלי:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad 1.2$$

כאשר ϵ הוא המתח המושרה בלולאה המקיפה משטח דרכו עובר שטף מגנטי Φ . סימן המינוס בשני הניסוחים מוכר כ**חוק לנץ**- הכא"מ המושרה נוצר בכיוון המנוגד לשינוי בשטף, ועל כן יצור שטף מגנטי בכיוון המנוגד לשטף שיצר אותו.

באמצעות שימוש במשוואות מקסוול ניתן לקבל את השדה המגנטי הנוצר ע"י סליל:

$$\vec{B} = \mu_0 I \frac{N}{L} \quad 1.3$$

כאשר I הוא הזרם בסליל, N מספר הליפופים בסליל ו L הוא אורך הסליל.

נציין גם כי בקירוב בו השדה המגנטי דרך סליל או משטח קבוע, השטף המגנטי שווה ל:

$$\vec{\Phi} = \vec{AB} \quad 1.35$$

ניתן לראות שהשדה המגנטי תלוי לינארית בזרם הזורם בסליל. באמצעות חוק אוהם נקבל שהשדה פרופורציוני למתח בצורה לינארית, והשתמשנו בקשר זה למדידת השדה החיצוני, H במהלך הניסוי. מתח על קבל- המתח על קבל במעגל חשמלי נתון ע"י:

$$1.4 V = \frac{Q}{C}$$

כאשר Q הוא המטען על הקבל ו C הוא קיבול הקבל. בעזרת נוסחה זו וחוק פאראדי, ובנוסף בקירוב בו RC (מכפלת ההתנגדות והקיבול הכולל במעגל) גדולים מאוד מזמן המחזור של מתח החילופין ניתן להראות שהשדה המגנטי הכולל, פרופורציוני למתח על קבל אשר מחובר לסליל בטור. השתמשנו בקשר זה למדידת השדה המגנטי הפנימי הכולל, B, במהלך הניסוי.

מומנט דיפול מגנטי- גודל מיקרוסקופי \vec{m} הבא לתאר לולאת זרם בעלת שטח עם כיוון. ברמה המיקרוסקופית נתאר את צפיפות מומנט הדיפול של חומר בעל N דיפולים בנפח V באופן הבא:

$$1.5 \vec{M} = \frac{N}{V} \vec{m}$$

הגורמים להיווצרות דיפולים בתוך החומר הם:

- תנועת האלקטרונים סביב הגרעין
- ספין של אלקטרונים לא מזווגים

פרמביליות- מדד לרמת התגובה של חומר לשדה מגנטי המופעל עליו. בחומרים פאראמגנטיים ודיאמגנטיים הקשר בין הפרמביליות μ לשדות \vec{H}, \vec{B} נתון על ידי:

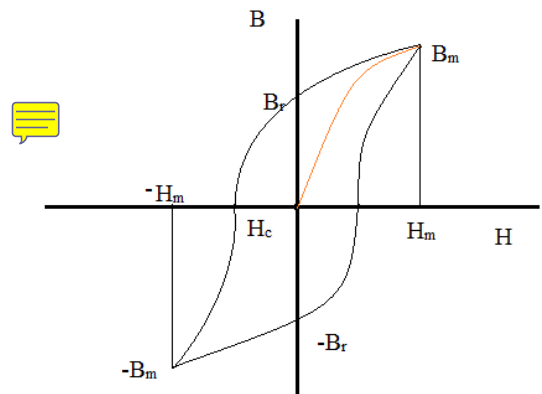
$$1.5 \vec{B} = \mu \vec{H}$$

בנוסף מתקיים $\mu = \mu_0(1 + \chi)$ כאשר μ_0 היא הפרמביליות של הריק ו χ הוא סופסטביליות שהיא תכונה של החומר אשר בחומרים הנ"ל מקיימת: $\vec{M} = \chi \vec{H}$. מקשרים אלו ניתן להסיק את הקשרים הבאים הבא:

$$1.6 \vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H})$$

$$1.7 \mu = \mu_0 \left(1 + \frac{\vec{M}}{\vec{H}}\right)$$

חומרים **פרומגנטיים** הם החומרים שבהם יש קבוצה של חומרים פאראמגנטיים, משמע שכאשר מופעל עליהם שדה מגנטי חיצוני הדיפולים של החומר יסתדרו בכיוון השדה והשדה הפנימי יגדל. כמו גם, שכאשר השדה החיצוני \vec{H} מתאפס, נותר שדה פנימי \vec{B} . החומרים מאופיינים בזיכרון מגנטי וקשיות מגנטית וכאשר מציגים גרף של תלות השדה הפנימי B בשדה H מקבלים לולאה הקרויה לולאת חשל (Hysteresis Loop). נציג את תכונותיה באיור 1:



איור 1- תמונה של לולאת חשל עבור חומר פרומגנטי. נקודת ההתחלה היא בראשית הצירים כלומר ללא מיגנט. הנקודות B_r הן שארית (remanence) השדה הפנימי לאחר שהשדה החיצוני מתאפס, וקרויות גם 'זיכרון מגנטי'. הנקודה H_c נקראת קוארסיביות (coercivity) ומתארת את גודל השדה החיצוני הנדרש ע"מ להחזיר את החומר למצב של אפס מגנטיזציה לאחר הגעה לרוויה. שטח הלולאה הוא העבודה שהושקעה בתהליך כולו.

כאשר נבחן את התופעה ברמה המיקרוסקופית ניתקל בתופעה ייחודית- **דומיינים** (domains) הם אזורים בחומר בהם הדיפולים מכוונים לאותו כיוון. בין הדומיינים מפרידים קירות (domain walls). למרות שבתוך הדומיין הדיפולים מכוונים באותו כיוון, אין זה אומר שבחומר קיימת מגנטיזציה נטו מכיוון שהדומיינים המכוונים בכיוונים שונים יכולים

לבטל אחד את השני. בכדי לצפות בדומינים נעזרנו **באפקט פאראדיי**- אפקט בו שדה מגנטי גורם לסיבוב מישור הקיטוב של גל העובר דרכו.

בחינת תכונות מגנטיות באמצעות מעגל מגנטי ולולאות חשל

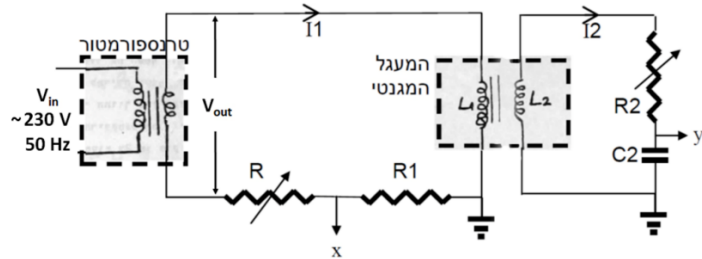
מבנה המערכת, מהלך הניסוי והמדידות

מערכת הניסוי כללה מעגל מגנטי שהורכב משני מעגלים חשמליים. רכיביהם היו:

1. מקור מתח חליפי, נגד משתנה וסליל.

2. סליל, נגד משתנה וקבל.

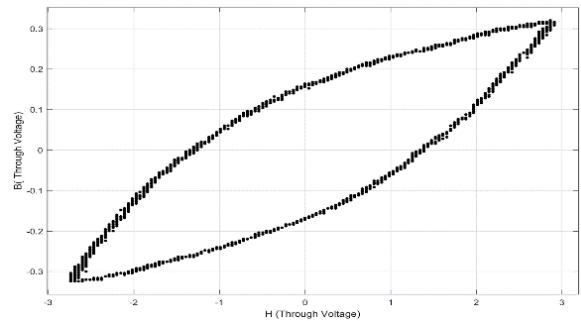
להלן שרטוט סכמתי של המעגל:



איור 2- האיור הוא של צוות מעבדה ב'



המדידות בניסוי התבצעו באמצעות סקופ TDS1001B אשר מדד את המתח על הנגד הקבוע במעגל I1 (פרופורציונלי לשדה H, משוואה 1.3), ואת המתח על הקבל במעגל I2 (פרופורציונלי בקירוב לשדה B, משוואה 1.4). כך יכולנו למדוד את יחסי המתחים ובכך למדוד לולאת חשל וניתוחה אפשר בחינה של תכונות המגנטיות של החומרים השונים. להלן דוגמה של לולאת חשל כפי שנמדדה במהלך הניסוי:



איור 3- לולאת חשל לדוגמה של פלדה קפיצית

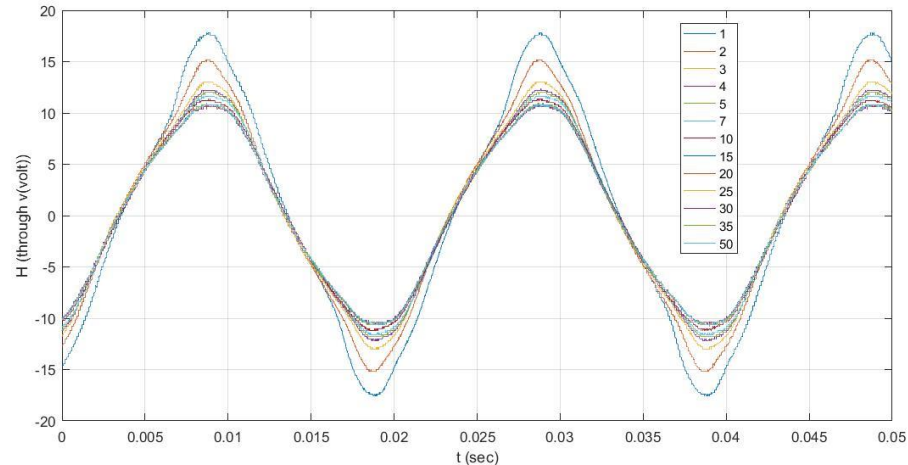
ראשית בחנו את ההשפעה של כמות החומר הפרומגנטי אשר הצבנו ב-L2 על ערכם של השדה המגנטי החיצוני והשטף דרך החומר הפרומגנטי. לאחר מכן, עברנו לבחון את השפעת סוג החומר הפרומגנטי על ערכי לולאת החשל ובכך בחנו את תכונות המגנטיות של החומרים השונים. בהמשך, עבור שני חומרים שונים בחנו את השתנות לולאת החשל כתוצאה משינוי בשדה החיצוני, זאת באמצעות שינוי ההתנגדות של נגד הכוח במעגל I1. בנוסף, מדדנו שתי לולאות חשל אשר דומות בערכיהן ובערך החיצוני עבורו הן התקבלו אך מדידתן התבססה על כמות חומר שונה שהוצבה ב-L2.

לבסוף, בחנו את הקשר בין כמות החומר אשר הוצב ב-L2 על הערכים של H ו-B עבור חומר נוסף ובנוסף לכך, בחנו האם לבידוד חשמלי בין הליבה המגנטית ב-I1 לפלטות יש השפעה על התופעות במעגלים מגנטיים. בחלק זה של הניסוי התווספו משטח בידוד מפלסטיק אשר הונח על הליבה, ו-50 פלטות המורכבות מברזל, טיטניום ומוליבדן בעלי ציפויים שונים לא ידועים (ייקראו ציפוי-1 ו-2).

עבור כל חומר מדדנו את המתחים המייצגים את H ו-B כאשר אנו מגדילים את כמות החומר. הניסוי בוצע פעמיים עם ובלי בידוד חשמלי (משטח פלסטיק) בין הפלטות לליבה המגנטית. במדידות בחלק זה של הניסוי כללו מספר מורכביות אשר מפורטות בנספח הרלוונטי.

תוצאות הניסוי וניתוח

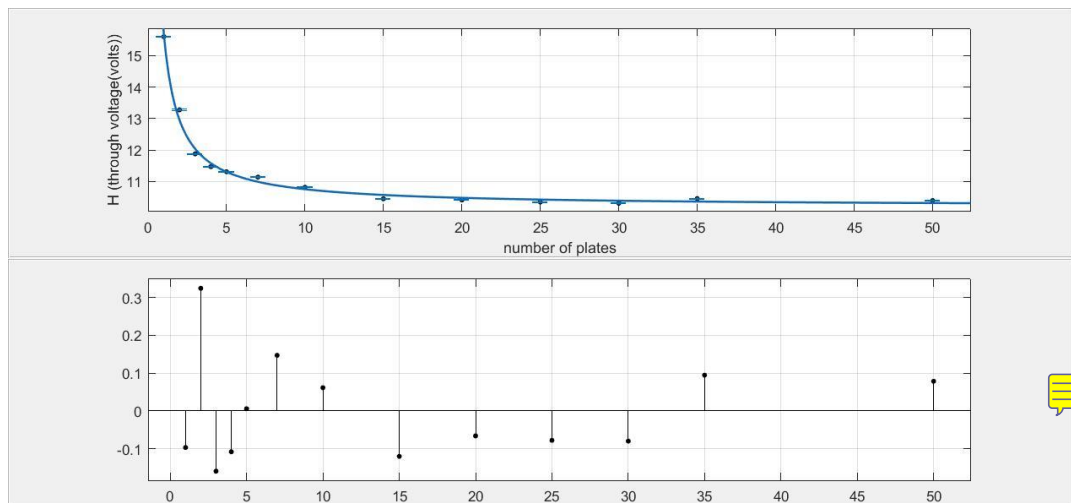
נציג את השפעת השטף המגנטי דרך החומר המוצב בסליל L2 על השדה הפנימי והשדה החיצוני. המדידה נלקחה עבור שתי תרכובות ברזל זהות בעלות ציפויים שונים, אך עקב הדמיון בתוצאות נציג רק את ציפוי-1:



איור 4- סיגל המתח הפרופורציוני ל H כפונקציה של הזמן. הצבעים השונים מייצגים את מספר המוטות כפי שמפורט במקרא. ניתן לראות שהאמפליטודה יורדת ככל שמוסיפים מוטות. עוד ניתן לראות שהירידה לא ליניארית.

למעגל I1 מסופק מתח סינוסאלי באמפליטודה של $45.37 \pm 0.08 \text{ volts}$, ומוצבים בו נגד כוח בהתנגדות של $13.08 \pm 0.02 \text{ k}\Omega$, ונגד קבוע של $1.050 \pm 0.002 \text{ k}\Omega$ עליו מדדנו את המתח הפרופורציוני לשדה H. במעגל I2 מוצב נגד אשר את ערכו קבענו על $62.06 \pm 0.06 \text{ k}\Omega$ קבל שערכו $509.8 \pm 0.8 \text{ nF}$ ועליו מדדנו את המתח אשר בקירוב מספק הינו פרופורציונלי ל-B. בגרפים באיורים 5 ו-6 לרכיבי המעגל ערכים זהים.

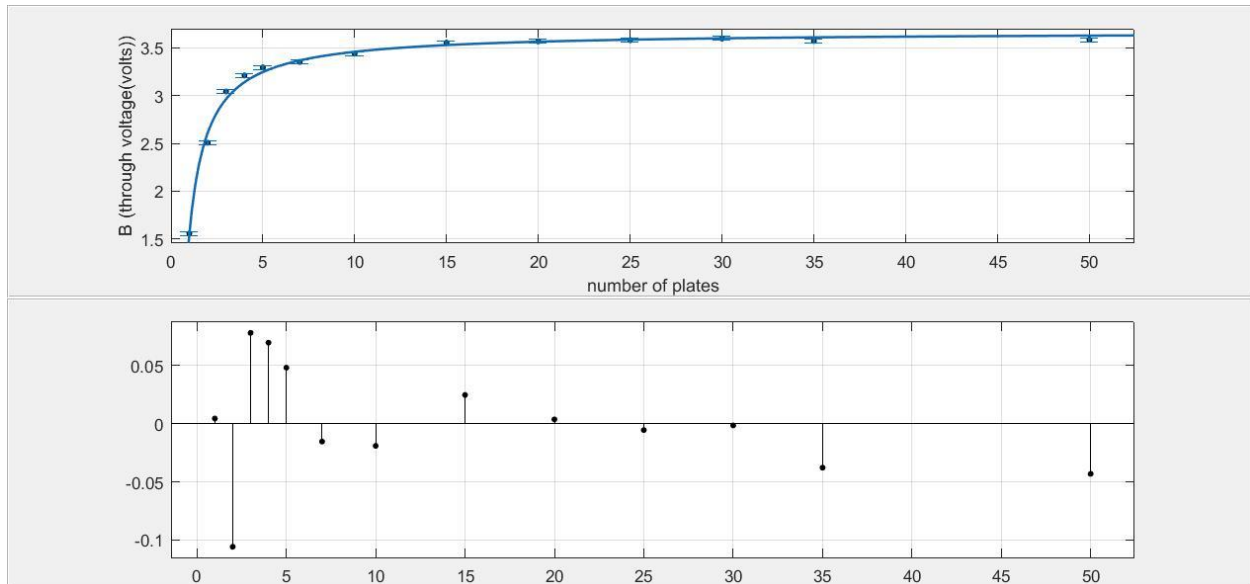
נציג כעת את השתנות השדה החיצוני והפנימי עם מספר הפלטות:



איור 5- בגרף ניתן לראות את H_{max} כפונקציה של מספר הפלטות אשר משפיע לינארית על השטח דרכו עבר השטף ובכך על השטף עצמו. ניתן להבחין במגמה ברורה בירידה. ההתאמה שבוצעה פרופורציונלית ל $1/\text{area}$ שדרכו עבר השטף. ניתן לראות ש H שואף לערך של 10.52 ± 0.09 וולט.

מהגרף ניתן לראות שעם עליית כמות הפלטות המוצבות בסליל L2, ישנה דעיכה בערך של השדה החיצוני, H. כלומר, ככל שכמות הפלטות המוצבות ב-L2 גדלה, והשטח דרכו עובר השטף המגנטי גדל, נזהה כי הערך של השדה החיצוני קטן.

כמו כן, בחנו את התהליך המשלים אשר בוחן את הקשר בין כמות הפלטות המוצבות בסליל L2, לשטף המגנטי העובר דרך הפלטות:



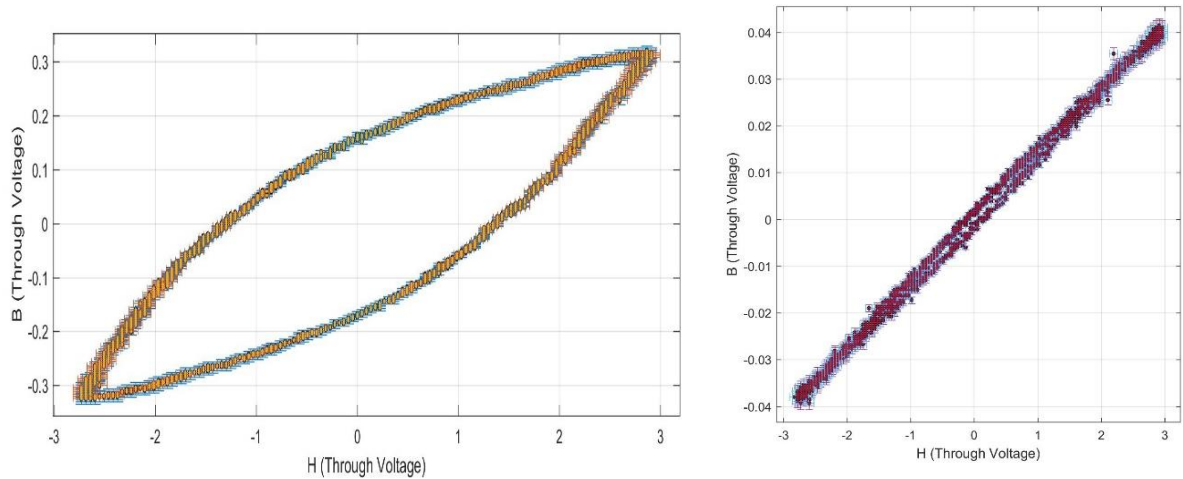
איור 26- גרף של B_{max} כפונקציה של מספר המוטות. ניתן לראות ש B עולה בצורה פרופורציונית ל $1/area$ - ושואף לערך של 3.67 ± 0.02 וולט.

קיימת מידה של הפתעה בגרף משום שאמור להיות קשר לינארי בין השטף המגנטי לשטח דרכו נמדד השטף (משוואה 1.35) אשר לא מופיע בגרף זה. כלומר על אף שהשטח דרכו עובר השטף גדל באופן לינארי הערך של השדה המגנטי החיצוני H קטן עם התווספות הפלטות ועל כן הערך של B לא גדל לינארית אלא עלייתו דועכת.

התופעה היא תוצאה של חוק פאראדיי וחוק לנץ באופן הבא:
 ערכו המקורי של H נקבע בהתבסס על הזרם במעגל I_1 שנובע ממתח החליפין שסופק \leftarrow הגידול בשטח החומר המגנטי גורר גידול בשטף המגנטי ובסך הכל B גדל \leftarrow קצב שינוי השטף המגנטי שהסליל L_2 משרה על הסליל L_1 גדל. לפי חוק פאראדיי הגידול בקצב שינוי השטף המגנטי (B) גורם להיווצרות של כ"מ ב- I_1 אשר מתנגד לכא"מ המקורי (זאת עפ"י חוק לנץ) $\leftarrow B$ גדל באופן לא לינארי משום ש- H קטן עם גידולו.

ביצענו מספר התאמות פונקציונליות שמטרתן היתה להבין את תלות השינוי (ירידה ב- H ועלייה ב- B). נזהה כי ההתאמות הטובות ביותר, אינן מושלמות ומכילות מגמה מסויימת בגרף השארים. בולט המרחק בין ההתאמה למדידות במיוחד באיזור בו שיפוע הגרף מתמתן ונכנס לאסימפטוטה. להערכתנו הדבר מעיד על כך שהשינוי בשדה נובע ממספר גורמים וההתאמה הפונקציונלית סבוכה.

נעבור להציג בחינת תכונות מגנטיות של **חומרים שונים** באמצעות לולאות החשל שלהם. ראשית נציג לדוגמה גרפים של לולאת חשל של שני חומרים, Spring Steel ו Nickel Alumnide. כמו כן בנספח מופיעות לולאות חשל של פלדה ונירוסטה:



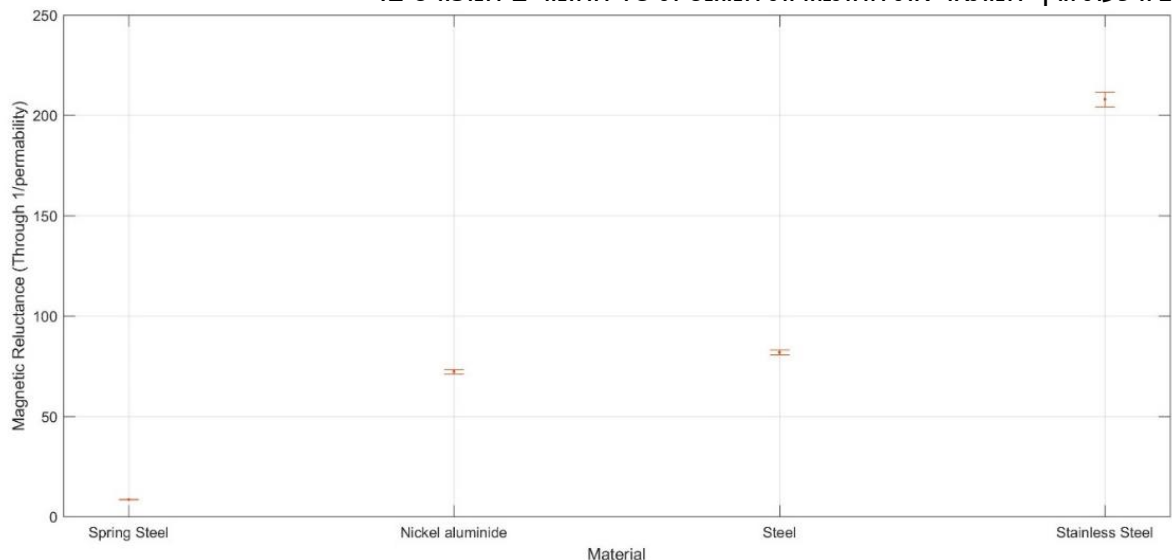
איור 7- מימין- לולאת חשל של Nickel Aluminide. משמאל- לולאת חשל של Spring steel.

למעגל I1 מסופק מתח סינוסאלי באמפליטודה של $45.37 \pm 0.08 \text{ volts}$, ומוציבים בו נגד כוח בהתנגדות של $13.08 \pm 0.02 \text{ k}\Omega$, ונגד קבוע של $1.050 \pm 0.002 \text{ k}\Omega$ עליו מדדנו את המתח הפרופורציונלי לשדה H. במעגל I2 מוצב נגד אשר את ערכו קבענו על $78.25 \pm 0.06 \text{ k}\Omega$ קבל שערכו $509.8 \pm 0.8 \text{ nF}$ ועליו מדדנו את המתח אשר בקירוב מספק הינו פרופורציונלי ל-B.

ראשית נרצה לדרג את הקשיות המגנטית של החומרים. מדד זה מתבסס על ערך הקוורסיביות של המגנט ומשמעותו היא כמות השדה החיצוני שצריך כדי לאפס את סך השדה הפנימי. נזהה מהגרפים כי פלדה קפיצית הינה קשה מגנטית משמעותית מיתר החומרים, ואותם לא ניתן לדרג לפי מדד זה משום שערך הקוורסיביות שלהם זהה בטווח שגיאת המדידה. ניתן גם להבין כי בפלדה קפיצית ההספק המבוזבז הינו הרב ביותר, וניתן להעריך אותו באמצעות שטח הלולאה. ההסבר לכך הוא שבכל מחזור נדרשת אנרגיה כדי לבטל את מגנט החומר ולמגנט אותו שוב חזרה.

תכונה נוספת שנבחן הינה הגעה לרוויה אשר מתאפיינת בגרף בהפיכת הלולאה לקו ישר. ניתן להביא את הפלדה הקפיצית לרוויה עבור ערך H רב יותר (כפי שיוצג בהמשך) וכמו כן, נזהה כי גם נירוסטה וניקל הגיעו לרוויה. לא ניתן לקבוע האם הפלדה הרגילה הגיעה לרוויה משום שבטווח שגיאת המדידה לא נמדדה לולאה אלא קו ישר ולכן ייתכן כי החומר לא הגיב מגנטית בניסוי.

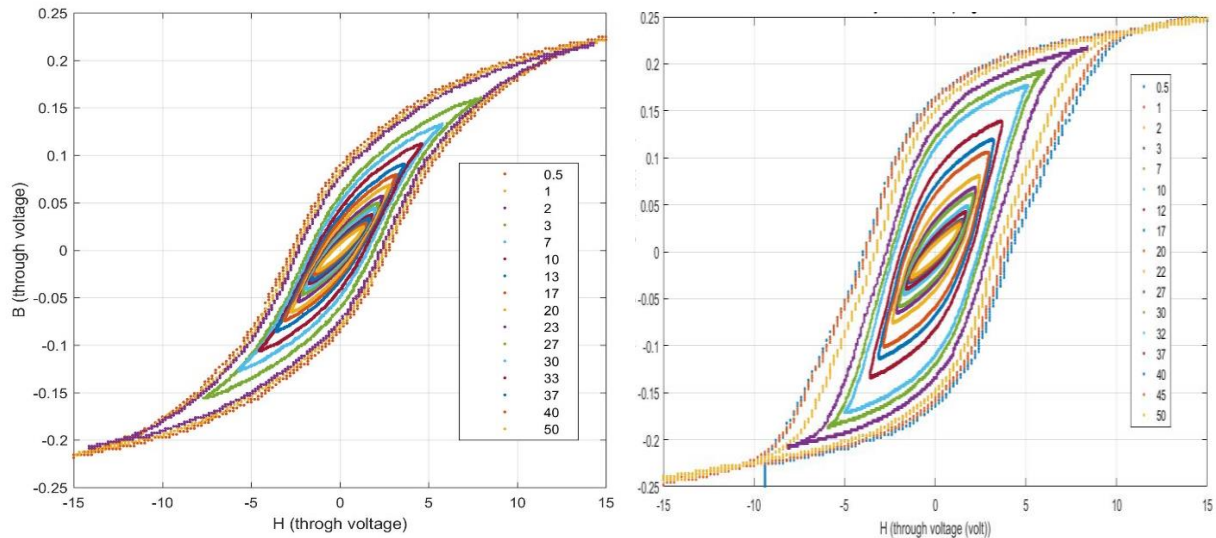
נציג כעת גרף המתאר את ההתנגדות המגנטית של החומרים המפורטים:



איור 8- הגרף מציג את ההתנגדות המגנטית של החומרים המוזכרים. ערך ההתנגדות המגנטית חושב באמצעות חישוב הפרמיליות של כל חומר בהסתמך על הערכים של השדה המגנטי הפנימי המקסימלי B, והשדה החיצוני המקסימלי H. בחינת החומרים התרחשה במעגל בתנאים זהים לזה של איור 7.

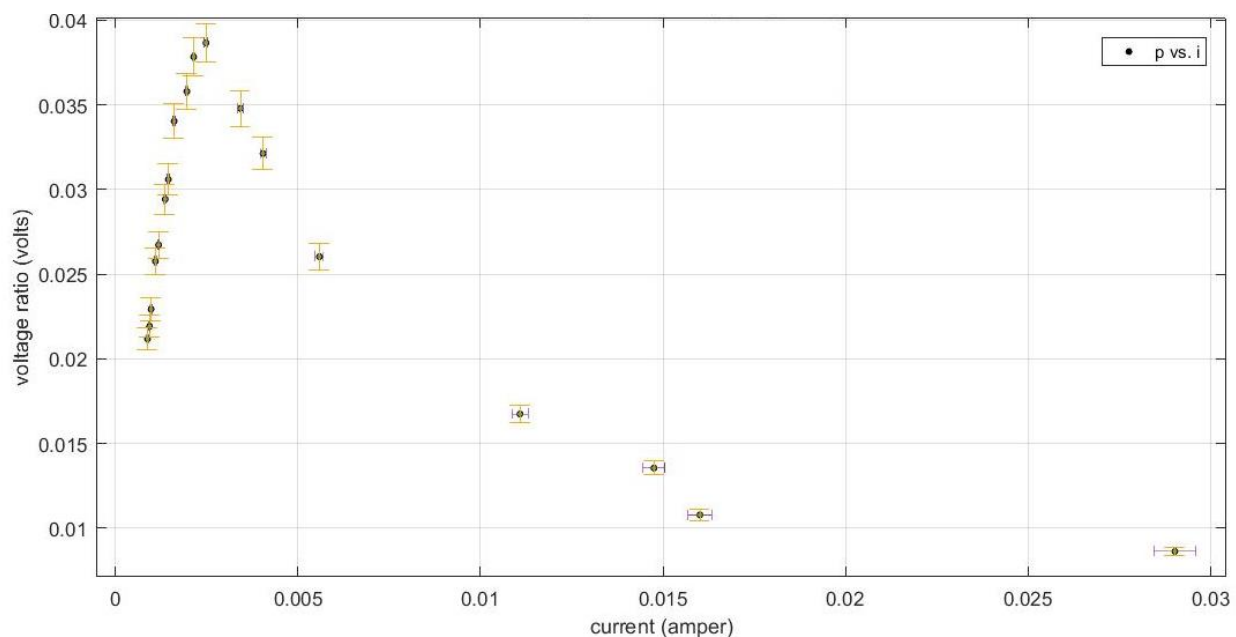
מהגרף ברור כי נירוסטה הינה בעלת ההתנגדות המגנטית הגבוהה ביותר, ופלדה קפיצית הינה בעלת התגובה המגנטית הגבוהה ביותר.

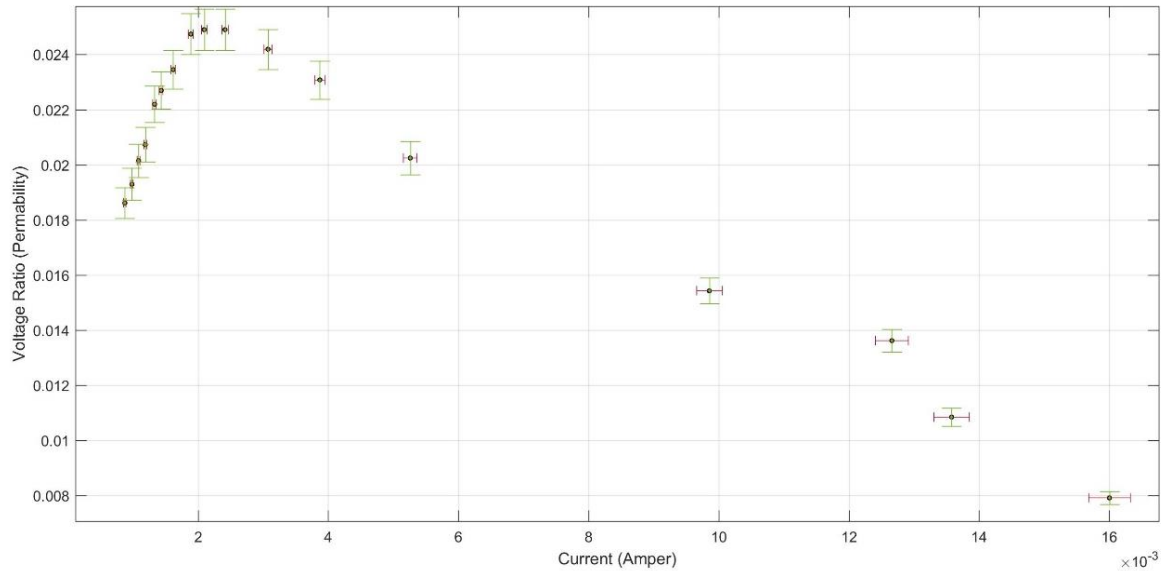
נציג כעת את לולאות החשל שנוצרות עבור פלדה קפיצית וברזל אשר משמש לשנאי תוך שינוי ערכו של השדה החיצוני. להלן גרף המציג הקשר הנ"ל בשני חומרים:



איור 9- הגרפים מציגים לולאות חשל של פלדה קפיצית ומתכת משנאי (יקרא חומר-1) (ימין לשמאל). כל לולאת חשל מתאימה להתנגדות אחרת של הנגד-כוח, כאשר הערכים מייצגים את ההתנגדות בקילו-אומים אשר הופיעה על הנגד (הגרפים חושבו באמצעות ההתנגדות המדויקת אשר מדדנו). רכיבי המעגלים זהים בערכיהם לאלה שב-איור 7.

מדידה זו מציגה ניתוח נוסף של תכונות מגנטיות של החומרים. ראשית נזהה כי החומרים הגיעו שניהם לרוויה עבור שדות חיצוניים שונים, כאשר פלדה קפיצית הקדימה את חומר-1 בהגעתה לרוויה. תכונה נוספת אשר בחנו בין שני החומרים היא הפרמביליות שלהם. להלן גרפים המציגים את הנתונים הללו:

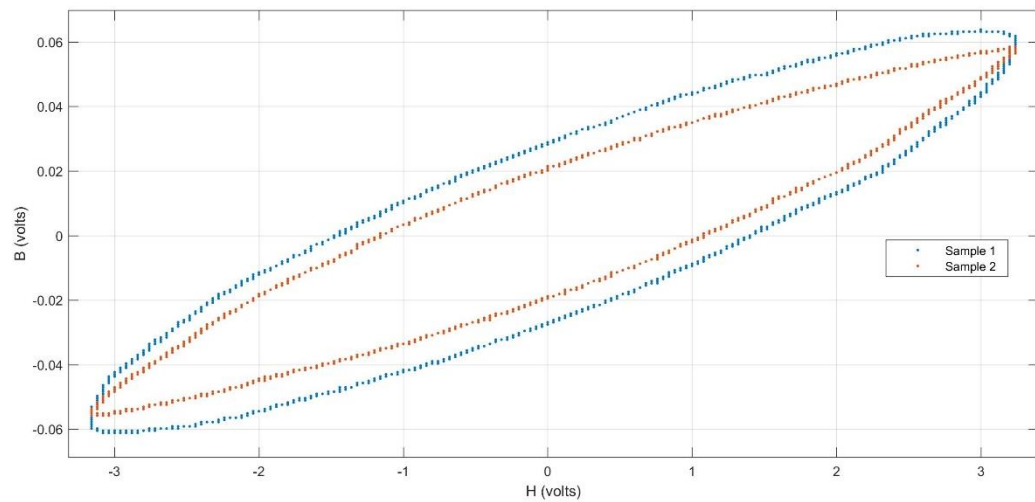




איור 3- הגרפים מציגים את הפרמביליות של פלדה קפיצית וחומר-1 (מלמעלה למטה) כתלות בזרם שזורם במעגל 1. הפרמביליות חושבה על פי $\mu = \frac{B}{H}$ והזרם עפ"י $I = \frac{V}{R}$. הפרמטרים האחרים של המעגל היו זהים לאלה שב-איור 2. נזהה כי הפרמביליות עולה עד לרוויה ולאחר מכן יורדת ומתמטית נבין כי היא שואפת ל- μ_0 (משוואה 1.7).

פרמביליות של חומר היא תכונה התלויה בשדה המגנטי החיצוני הפועל על החומר וכמו כן, היא תכונה שמשתנה בין חומרים. הערך של הפרמביליות המקסימלית מתקבל בהגעת החומר לרוויה. מתבקש להשוות את ערכי הפרמביליות שנמדדו לאלה מהספרות אך הדבר לא ניתן משום שגרפים אלה מציגים ערכים פרופורציונליים בלבד. במקום, ניתן להתרשם מהשוני בין גרפי הפרמביליות ולהבחין כי הפרמביליות המקסימלית של פלדה קפיצית הינה גבוהה ביותר מ-50% מזו של חומר-1 והיא מתקבלת עבור ערך H נמוך במקצת מזו של חומר-1.

נעבור לבחון שתי לולאות חשל בעלות ערכים דומים של חומרים שונים:

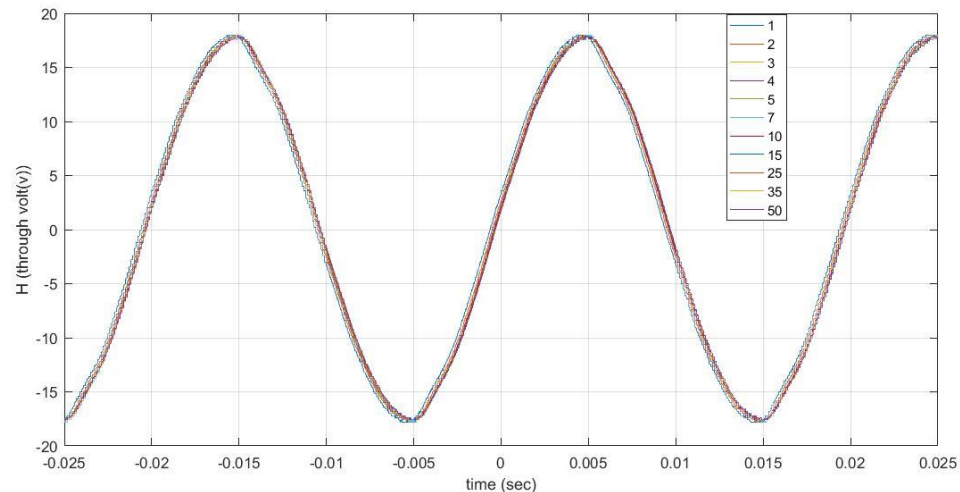


איור 4- בגרף משורטטות לולאות חשל של לוחית אחת של פלדה קפיצית (Sample 2) בעובי 0.5mm ולולאת חשל של 3 לוחות של חומר-2 בעובי כולל של 1.7mm. רכיבי המעגל היו זהים לאלה של המעגל ב-איור 2.

הדימיון בגרפים גורס כמובן ערכי פרמביליות דומים. לאחר מדידה זו עברנו לבחון את לולאות החשל של החומרים תחת שינוי ההתנגדות במעגל I1. עבור כמות חומר שונה השינוי התגובתי ב-H אשר נובע משינוי השטף המגנטי שונה (איור 5) ולכן הלולאות משתנות בצורה שונה.

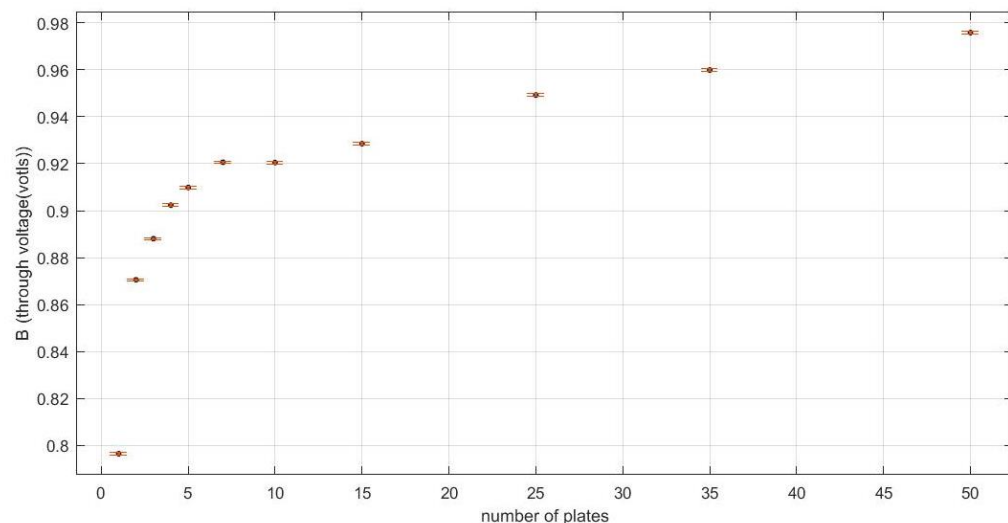
בנוסף למדידות אלה בחרנו לבחון את השפעת בידוד חשמלי על שינוי השדות המגנטיים והשתנותם עם הוספת פלטות מגנטיות. המדידות בוצעו עבור שני חומרים שונים אך עקב הדמיון בין התוצאות נציג רק את התוצאות אשר התקבלו עבור התרכובת בציפוי-1.

להלן הדאטא הגולמי אשר התקבל מהמדידה עם בידוד חשמלי:

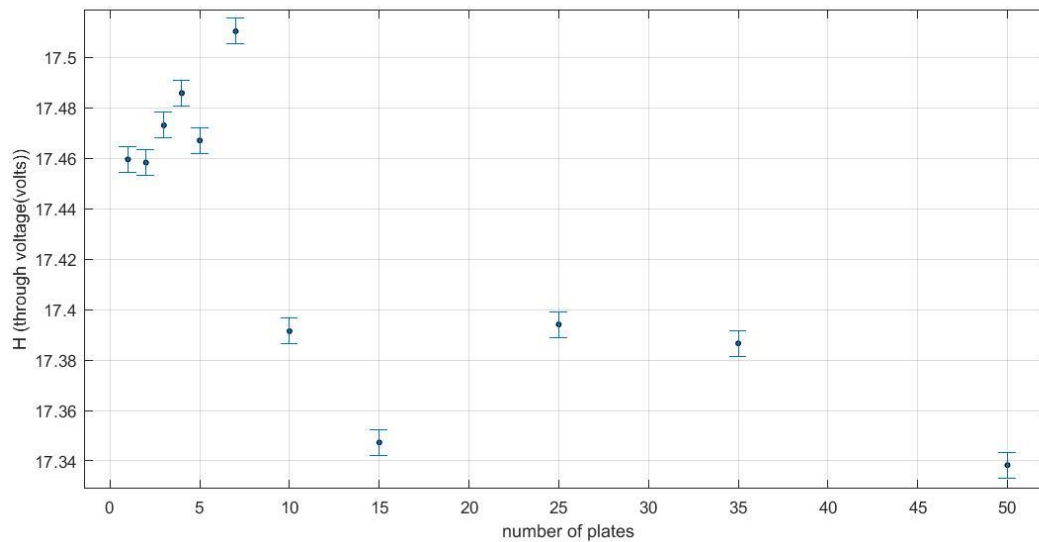


איור 5- סיגל המתח הפרופורציוני ל H כפונקציה של הזמן כאשר קיים בידוד בין הליבה המגנטית. ניתן לראות שבהשוואה לאיור 4, H כמעט לא משתנה כתוצאה מהוספת הפלטות. למעגל I1 מסופק מתח סינוסאלי באמפליטודה של $45.37 \pm 0.08 \text{ volts}$, ומוצבים בו נגד כוח בהתנגדות של $13.08 \pm 0.02 \text{ k}\Omega$, ונגד קבוע של $1.050 \pm 0.002 \text{ k}\Omega$ עליו מדדנו את המתח הפרופורציוני לשדה H. במעגל I2 מוצב נגד אשר את ערכו קבענו על $62.06 \pm 0.06 \text{ k}\Omega$ קבל שערכו $509.8 \pm 0.8 \text{ nF}$ ועליו מדדנו את המתח אשר בקירוב מספק הינו פרופורציוני ל-B. בכלל חלק זה של הניסוי רכיבי המעגל זהים בערכיהם.

נציג כעת את השתנות השדה החיצוני והפנימי עם מספר הפלטות, עם בידוד חשמלי:



איור 6- B_{max} כתלות במספר הפלטות כאשר יש בידוד. ניתן לראות ש B עולה אולם משנה מגמה באמצע (לאחר הוספת 10 מוטות) ולכן בגרף זה לא ניתן היה לבצע התאמה טובה. בנוסף, ל B אין אסימפטוטה, בהשוואה לאיור 6.



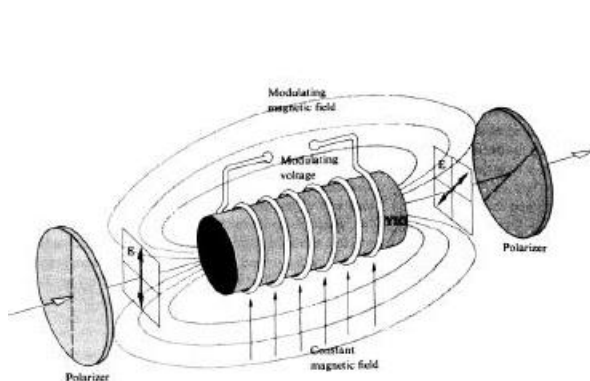
איור 7- H max כתלות במספר המוטות. ניתן לראות שאין שום מגמה ברורה בשינוי של H (בהשוואה לאיור 5). בנוסף ניתן לראות שערכי H מתחלקים באופן גס לשני מקבצים- עליון (עד 10 מוטות) ותחתון (10-50 מוטות). חלוקה זו מזדהה עם שתי המגמות ב-איור 13.

לעומת המדידות שבוצעו ללא בידוד (איורים 5,6) נזהה כי ההשפעה התגובתית אשר תיארונו קודם לכן אינה מתממשת, לפחות לא באותה עצימות. נזהה כי הן המדידה של H ושל B מורכבות משני חלקים אשר אינם דומים במגמתם לאלה שנצפו ללא בידוד. נדגיש כי אין סיבה שבידוד חשמלי ישפיע על ההשראות המגנטית ולכן להערכתנו חוק פאראדיי מתממש בשני המקרים. אנו מעריכים כי במקרה בו אין בידוד מתרחשת תופעה נוספת הקשורה בזליגה חשמלית בין הליבה המגנטית לחומרים שנדגמו. השערה אשר יכולה להסביר את התופעה היא בכך שבמגע בין הפלטות לליבה זרם עובר דרך הפלטות. זאת מכיוון שבליבה מושרה כא"מ אשר מייצר זרם. הזרם אשר עובר דרך הפלטות מייצר שדה מגנטי נוסף המתווסף לשדה המגנטי הקשור במגנטיזצית החומר.

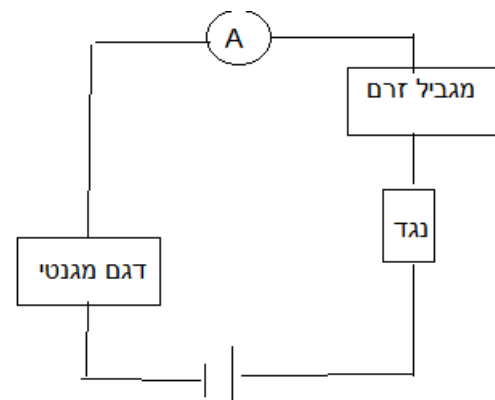
בחינת תכונות מגנטיות באמצעות אפקט פאראדיי

תיאור המערכת ומהלך הניסוי

המערכת מורכבת ממעגל חשמלי הכולל ספק מתח ישר, מד זרם, נגד ודגם מגנטי. הדגם המגנטי מורכב משני מקטבים וגרנט פרימגנטי אשר מלופפים בסליל שמתחבר למעגל. המעגל מתואר באיור 15 והדגם המגנטי מתואר באיור 16:

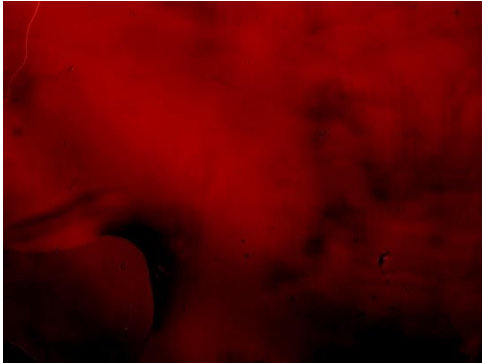


איור 16- הדגם המגנטי. ניתן לראות שהשדה המגנטי שנוצר מאורך לגרנט הפרימגנטי

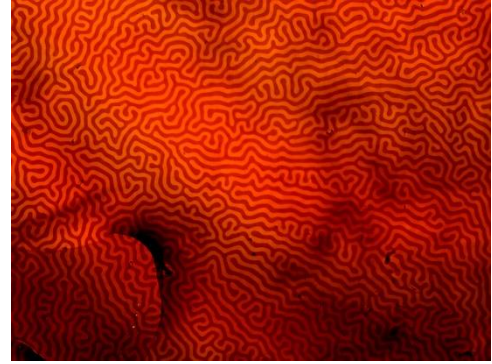


איור 15- המעגל ששימש אותנו בניסוי. במעגל זה ניתן להחליף את הכיוון המתח

במהלך הניסוי צפינו בדומיינים המגנטיים של החומר משתנים כתוצאה משינוי בזרם במעגל. הדגם המגנטי הונח על משטח המיקרוסקופ ודרכו צפינו בדומיינים תוך כדי שאנו משנים את הזרם במעגל בצורה דיסקרטית. לאחר כל שינוי של הזרם צילמנו תמונה של החומר בעזרת תוכנת MOTIC המחברת את המיקרוסקופ למחשב. דוגמא לתמונה כזו ניתן לראות באיור 17.



איור 18-דומיינים בחומר ברוויה מגנטית

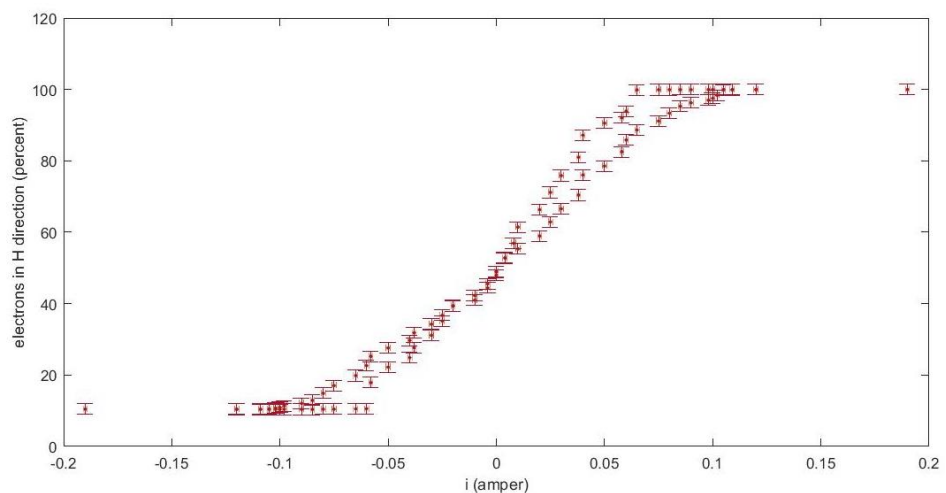


איור 17- דומיינים בחומר כפי שנצפו ע"י המיקרוסקופ. הדגימה נלקחה ללא שדה מגנטי חיצוני

כפי שהוצג ברקע התיאורטי, השימוש במקטבים גורם לכך שהבדלים בכיוון המגנטיזציה בחומר מיוצגים ע"י האור, כשחושך מייצג אלקטרונים אשר מכוונים בכיוון השדה המגנטי ואור מייצג אלקטרונים המכוונים הפוך מכיוון השדה המגנטי. התוצאה היא שכאשר החומר נמצא ברוויה מגנטית אנו מצפים לראות מסך אחיד. דוגמא לצילום של החומר ברוויה ניתן לראות באיור 18.

על מנת לשמור על נקודת ייחוס קבועה של כמות אור כיילנו את החשיפה של המצלמה בתחילת הניסוי והשארנו אותה קבועה לאורך כל הניסוי. ניתן לראות שמגבלות התוכנה גרמו לכך שבתמונה אין הפרדת צבעים חזקה בין שחור ללבן. בנוסף ישנם כתמי חושך קבועים אשר מקורם בדפקטים של החומר הנמדד. על האופן בו התמודדנו עם מגבלות אלו בחישובי השגיאות מפורט בנספח. התמונות עובדו כאשר מכל תמונה קיבלנו את אחוז הפיקסלים השחורים והלבנים ובכך הערכנו את רמת הרוויה בחומר באחוזים.

את לולאת החשל ניתן לראות באיור 19:



איור 19- לולאת החשל של הגרנט הפרימגנטי. בגרף רואים את אחוז האלקטרונים בחומר המכוונים בכיוון השדה H כפונקציה של הזרם כאשר 0 ו100 אחוז מייצגים רוויה.



הגרף מייצג לולאת חשל מסוג M-H שבו ניתן לראות את שינוי המגנטיזציה בחומר כתלות משינוי בשדה החיצוני. בשונה מלולאות B-H אשר נמדדו באמצעות מעגלים מגנטיים, הרוויה בלולאה זו באה לידי ביטוי באסימפטוטה אופקית כאשר המגנטיזציה מגיעה למקסימום. תיאורטית היינו מצפים כי ערכי האסימפטוטה יהיו 100 ו-0 אחוז, אך בפועל בגלל הדפקטים בחומר אשר נשארו כהים לאורך כל המדידה ניתן לראות שהאסימפטוטה מתקבלת ב-100 ו 10 אחוז.

נדמה שהלולאה חוזרת לאותה נקודה ושלחומר כלל אין זיכרון מגנטי אולם ככל הנראה הזיכרון המגנטי והקוארסיביות קטנים משגיאות המדידה.



סיכום ומסקנות

במהלך הניסוי בחנו את תופעת המגנטיות בחומר ממספר זוויות. באמצעות כלים (סקופ, מיקרוסקופ) ואמצעי ניתוח מגוונים מדדנו לולאות חשל משני סוגים (M-H ו-B-H) ולהסיק מהן מסקנות על התכונות המגנטיות של חומרים שונים כמו גם על הקשרים בין השדה החיצוני לשדה הפנימי בחומר.

צפייה בלולאות החשל היוותה אישוש להנחה הבסיסית אשר בחומרים פרומגנטיים קיים שדה מגנטי גם לאחר הסרת השדה החיצוני אשר יצר אותו. במהלך הניסוי נוכחנו לגלות כי התלות של השדה הפנימי בשטח הדגימה אינה ליניארית. הנחתנו היא כי התופעה נובעת מהתלות של השדה החיצוני בשטח הדגימה ובחרנו לבחון תופעה זו לעומק. בחינה זו הובילה אותנו לבדיקת הקשרים ההדדיים המורכבים בין השדה החיצוני לשדה הפנימי, אשר פירשנו באופן הבא:

H נקבע ע"י הזרם במעגל $I_1 \leftarrow B$ גדל כתוצאה מהגדלת החומר המגנטי \leftarrow הגידול ב-B משרה כא"מ במעגל I_1 אשר מקטין את $H \leftarrow B$ גדל באופן לא לינארי משום ש-H קטן עם גידולו.



דיאגרמה זו מסבירה את התופעה שזיהינו ולפיה השינוי בשטף דרכו עובר השדה המגנטי אינו יוצר שינוי לינארי בשדה הפנימי. מדידה אשר היתה יכולה לשפוך אור נוסף על התופעה היא כזו בה מותירים את השדה החיצוני קבוע באופן מלאכותי ע"י שינוי ההתנגדות, תו"כ הוספת פלטות. מדידה כזו יכולה לאשש את ההנחה שהשינוי בשדה הפנימי כתלות בשטח הדגימה **בלבד** הוא לינארי.



במהלך המדידות שמנו לב כי למגע פיסי ישיר בין הפלטות לליבה המגנטית הרציפה יש השפעה על השתנות השדות המגנטיים, ובחרנו לחזור על חלק מהמדידות כאשר ישנו בידוד בין הפלטות לליבה כדי לבחון את התופעה. מדידות אלו הובילו לתוצאות שונות- בהן השדות השתנו בצורה פחותה משמעותית. הערכתנו היא שבניסוי נמדדה תופעה משנית נוספת של זליגה חשמלית בין הליבה המגנטית הרציפה לפלטות המתכת ולכן בידוד חשמלי ביטל את התופעה והשפיע על התוצאות.

נספחים

מגבלות מדידה ושגיאות

כפי שכבר הוזכר לעיל בניסוי ישנה בעיית מדידה והיא שהינו לחלוטין בלתי תלוי. על אף שכביכול הערך של H נקבע בסדר מוביל על ידי הזרם במעגל I_1 , הוא מושפע מערכו של B , כלומר ישנה תגובה רקורסיבית המקשה על בידוד המדידה למשתנה אחד בכל עת.

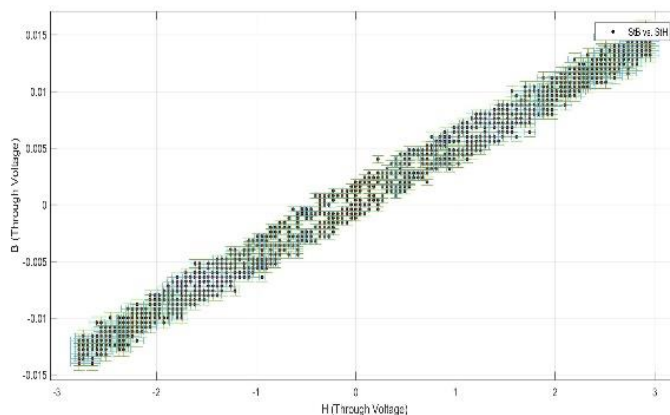
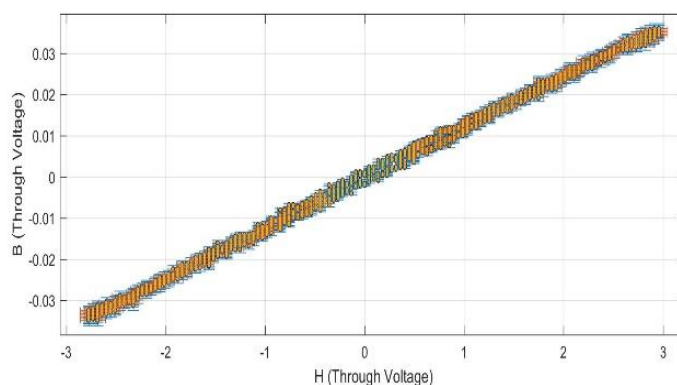
מגבלה נוספת במדידות היא שבמהלכן השתמשנו בפלטות של חומרים פרומגנטיים שונים, שעובייהם הינם דיסקרטים ולא שווים. הדבר שוב הגביל את היכולת לצמצם מדידה למשתנה אחד משום שגם עובי החומר המוצב בסליל L_2 היה שונה באחוזים בודדים בין החומרים השונים.

בחישובי השגיאות של H ו- B השתמשנו בשגיאה של התאמת 'sin1' במטלב. מדדנו את H ו- B כפונקציה של הזמן ולכן ההתאמה מתבצעת על פני זמני מחזור רבים ובכך מצמצמת את שגיאת המכשיר (שגיאה אקראית) שגיאות אלו חולקו ב 3.92

כאשר הצגנו את לולאות חשל כפי שנצפו בסקופ (B כפונקציה של H) השתמשנו בשגיאות ע"פ הוראות היצרן של הסקופ: http://www.sophphx.caltech.edu/Lab_Equipment/Tektronix_TDS1000_2000_User_Manual.pdf

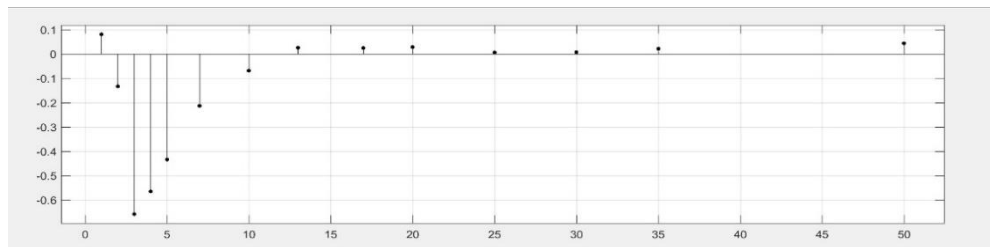
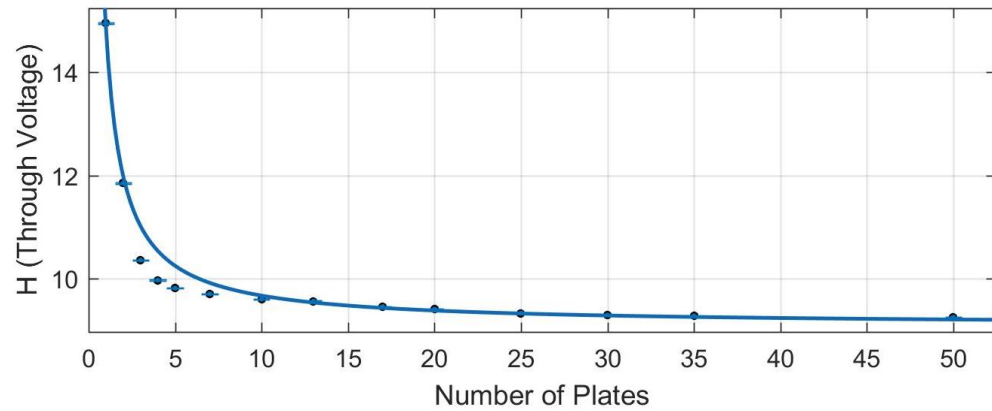
בחלק 2 התמודדנו על מגבלות התוכנה ועם דפקטים בחומר כפי שפורט בגוף הדו"ח. על מנת להתגבר על הפרדת האור של התוכנה קבענו פרמטר אשר קובע בינארית האם כל פיקסל הוא שחור או לבן. הקוד המפורט ששימש אותנו לעיבוד התמונה מצורף בסוף הניסוח. על מנת להתחשב בדפקטים של החומר (שטחים אשר נשארים כהים) הכנסנו כשגיאת מדידה את אחוז השטחים בעלי הדפקטים מסך כלל התמונה.

לולאות חשל של פלדה ונירוסטה

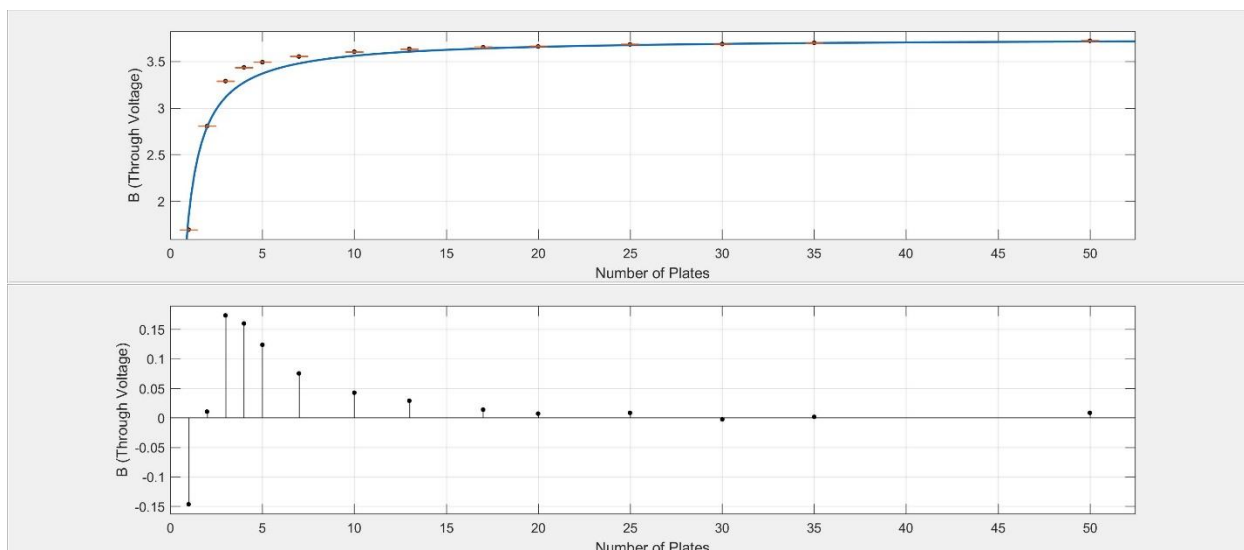


איור 20- לולאות חשל של פלדה ונירוסטה (מלמעלה למטה). הרכיבים זהים בגודלם לפירוט שבאיור 7

לולאות חשל של מתכת בציפוי-2 ללא בידוד:

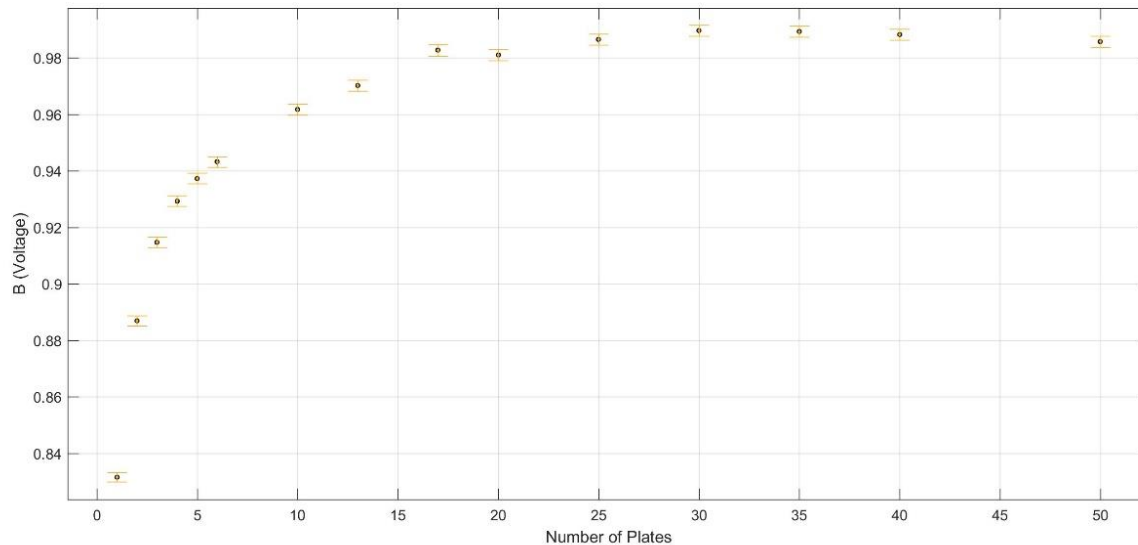


איור 821- H_{max} כתלות במספר המוטות. ניתן לראות שההתנהגות דומה מאוד לזו שנראתה באיור 5 (עבור דגימה אחרת), אולם ניתן להבחין שכאן ההתאמה פחות טובה והמגמה בגרף השארים יותר חזקה. כאן H שואף ל- 9.1 ± 0.09 וולט.

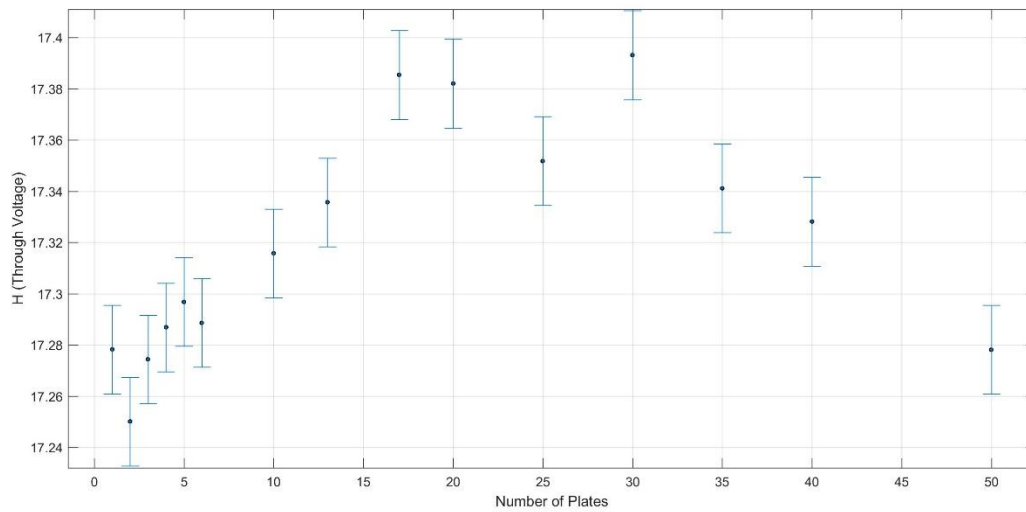


איור 22- B_{max} כתלות במספר המוטות. ניתן לראות התאמה בין המגמה בגרף זה למגמה בגרף אשר באיור 6. B שואף ל 3.75 ± 0.03 וולט.

לולאות חשל של מתכת בציפוי-2 עם בידוד:



איור 9- B_{max} כתלות במספר המוטות עבור הדגימה השנייה. ניתן לראות שבדומה לאיור 13 ישנן שתי מגמות בגרף, אחת עד 17 מוטות והשנייה מ-17 מוטות ואילך. גם בגרף זה לא ניתן היה לבצע התאמה טובה אולם נראה שישנה אסימפטוטה.



איור 10 - H_{max} כתלות במספר המוטות עבור הדגימה השנייה. ניתן לזהות את ההתאמה בין גרף זה לגרף באיור 14 כאשר שתי המגמות בגרף מתחלקות באופן ברור.

הקוד ששימש לניתוח התמונה באמצעות אפקט פאראדיי:

```
function [a,k]= binarpic(b)
a=ones.*size(b);
for i=1:768
    for j=1:1024
        if b(i,j)<=60
            a(i,j)=0;
        else a(i,j)=1;
        end
    end
end
b=length(a(a==0));
w=length(a(a==1));
k=[b/(b+w)*100;w/(b+w)*100];
```