

## אי-לינאריות בחומרים פרומגנטיים

ניר גבריאלוב והדר שרביט

### מעבדה ב

כאשר מפעילים שדה מגנטי חיצוני על חומרים פרומגנטיים, מתרחש שינוי מיקרוסקופי באופן סידור הדיפולים המגנטיים בו. שינוי זה גורם להיווצרות שדה מגנטי פנימי בחומר, המפגין אי-לינאריות ביחס לשדה החיצוני. דהיינו, בניגוד לחומרים דיאמגנטיים שינוי האחרון גורר שינוי שאיננו ישיר ברובו בראשון. נהוג להמשיך תופעה זו ל"זיכרון" של החומר, בעיקר הודות לנוכחות שדה פנימי גם לאחר שחדל השדה החיצוני מלפעול. רוב התכונות הקשורות ביחסים בין השדה הפנימי והחיצוני, כמו גם התכונות שבין המגנטיזציה לשדה החיצוני, ניתנות לניתוח ולהבנה בעזרת "לולאות חשל" - תיאור גרפי הנותן מדד פונקציונלי ומדיד בין הגדלים שתוארו. במאמר זה בחנו את היווצרותן של לולאות חשל תחת שינויים מיקרוסקופיים ומקרוסקופיים במערכת הנסיונית. בהיבט המקרוסקופי, איששנו את הקשר הלא-לינארי הקיים בין השדה החיצוני והפנימי, ובדקנו איך הנ"ל מושפע משינויים בעוצמת השדה החיצוני, בשטח החתך של החומר ובסוגו. במקביל, התעניינו בתכונות הפרמאביליות של החומר, ומדדנו כיצד זו משתנה תחת שינויים אלה. יתרה מכך, בעזרת אפקט פאראדיי, צפינו וניתחנו ויזואלית הדומיננים המגנטיים השונים בו תחת שינוי עוצמת השדה החיצוני. כך קיבלנו מסקנות תואמות משתי זוויות הסתכלות שונות לתופעת לולאת החשל.

$$M = \chi_m H \quad (2)$$

כאשר  $\chi_m$  היא הסוספטביליות המגנטית (תכונה של החומר) ומשמעותה עד כמה החומר יגיב לשדה מגנטי חיצוני. עבור סוספטביליות שלילית נקבע שהחומר יוצר שדה מגנטי פנימי מנוגד לשדה החיצוני ולהפך.

נציין שתכונות הפרמאביליות והסוספטביליות קשורות זו בזו על ידי פרמאביליות הריק  $\mu_0$  על פי

$$\mu = \mu_0(1 + \chi_m) \quad (3)$$

כמו כן, נוה להגדיר פרמאביליות יחסית  $\mu_r$ :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4)$$

בחומרים פאראמגנטיים מתקיים  $\mu_r > 1$  ומכך מסיקים שקווי השדה הפנימי B שנוצר כתוצאה מהשדה H הם בכיוון זהה לקווי השדה של H. כאמור, בניסוי זה בחרנו להתמקד בחומרים פרומגנטיים בהם השדה הפנימי שנוצר איננו מגיב בצורה לינארית לשדה החיצוני ונראה כי קיים מנגנון "זיכרון" בחומר שגורם לכך.

כעת, נוכל להציב את (3) ו-(4) במשוואות (1) ו-(2) ולקבל

$$B = \mu_0(M + H) \quad (5)$$

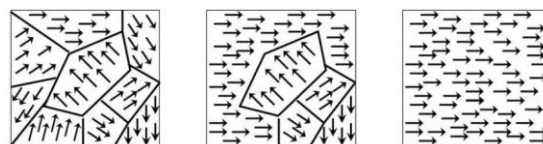
$$M = H(\mu_r - 1) \quad (6)$$

משוואות אלה ממחישות את התלות הלא לינארית הקיימת בין השדה הפנימי והמגנטיזציה ביחס לשדה החיצוני, וניתן להמחיש תלות זו באמצעות תרשים לולאת חשל. (ראה תרשים 1)

### 1. מבוא

#### לולאות חשל וחומרים פרומגנטיים

מומנט מגנטי נוצר ע"י כל אלקטרון בחומר, כתוצאה מהספין והמעטען שלו. כתוצאה מכך, כל אלקטרון מהווה דיפול מגנטי המושפע משדות מגנטיים חיצוניים. כאשר מופעל שדה מגנטי חיצוני H דרך חומרים פאראמגנטיים (או דיאמגנטיים), משתנה התפלגות וכיוון הדיפולים המגנטיים בו כך שהשדה בתוך החומר יגדל (יקטן). בניסוי זה נתמקד בחומרים פאראמגנטיים, או ליתר דיוק פרומגנטיים להם תכונה נוספת. בנוסף לתגובה המיידית לשדה החיצוני, בחומרים פרומגנטיים קיים "זכרון מגנטי", כך שגם לאחר שינוי בשדה החיצוני מבנה הדיפולים שנוצר נשמר. ככל שהשדה גדל, כך ירבו הדיפולים שפונים לכיוון השדה (ראה איור 1) – דבר שיוביל בתורו להיווצרות שדה פנימי בחומר.



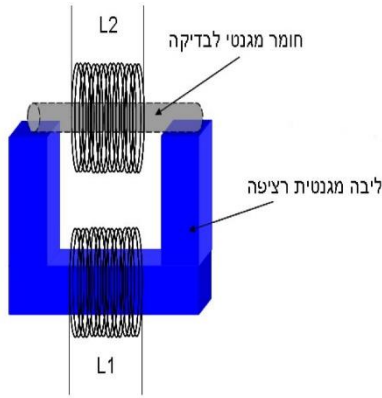
איור 1: המחשה של דומיננים מגנטיים (ראה אי-לינאריות מיקרוסקופית) בחומר פאראמגנטי. ככל שמגדילים (משמאל לימין) את השדה החיצוני שכיוונו ימינה, כך יותר דיפולים יפנו לכיוון השדה, עד שנגיעה לרוויה במגנטיזציה.

באופן כללי עוצמת השדה הפנימי B נתונה על ידי

$$B = \mu H \quad (1)$$

כאשר  $\mu$  הוא הפרמאביליות של החומר (תכונה של החומר) ומשמעותה מתן מדד לכמה החומר מגיב לשדה החיצוני H הפועל עליו. מהקשר הלינארי ברור כי ככל שהפרמאביליות גבוהה יותר, כך השדה הפנימי שיווצר גדול יותר, והמשמעות היא שהחומר מגיב בצורה משמעותית לנוכחות שדה חיצוני.

הסיבה לשינוי בסידור האלקטרונים היא קוונטית בעיקרה, אך ניתנת לתיאור פשוט על ידי המגנטיזציה בחומר:



איור 3: המעגל המגנטי המתואר במקווקו באיור 2

בהנתן ליבה מגנטית רפיעה עם שני סלילים  $L_1, L_2$  כמתואר באיור 3, המחוברת למעגל זרם חליפין כמתואר באיור 2, נרצה למצוא קשר בין גדלי המערכת  $V_C, V_{out}$  המתח על הקבל והמתח שיוצא לשדות הנמדדים ( $H$  ו  $B$  בהתאמה). ראשית, נראה שהשדה  $B$  פרופורציוני ל  $V_C$ : בהנתן שטח חתך  $S$  של החומר המגנטי (ראה חומר מגנטי לבדיקה באיור 3) מתקיים

$$V_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow V_2 \propto \phi = S \cdot B \quad (7)$$

כעת, עבור  $RC \gg T$  כאשר  $T$  הוא זמן המחזור של מתח החילופין  $V_2$ , נקבל שמפל המתח על  $C_2$  קטן ולכן הזרם דרכו ניתן לקירוב על ידי  $I_2 \approx V_2/R_2$ . נביע בעזרת קירוב זה את המתח הנופל על הקבל:

$$V_C = \frac{q}{C_2} = \frac{1}{C_2} \int I_2 dt = \frac{\int V_2 dt}{R_2 C_2} \propto \frac{SB}{R_2 C_2} \quad (8)$$

כמו כן, מתקיימים שני הקשרים הבסיסיים:

$$\frac{V_{out}}{R_1} = I, \quad H = \frac{NI}{L} \Rightarrow H = \frac{N V_{out}}{L R_1} \quad (9)$$

כך קיבלנו בסה"כ את הקשרים הפרופורציוניים

$$B \propto V_C, \quad H \propto V_{out} \quad (10)$$

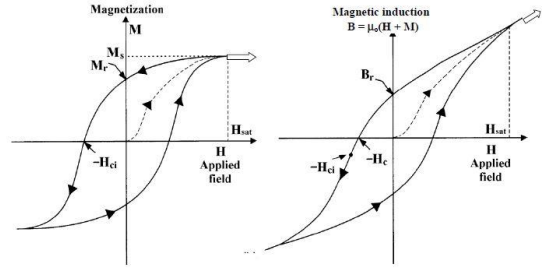
בעזרת פרופורציה זו נוכל לתת כימות לשדות המגנטיים (החיצוני והפנימי) ולשנותם על ידי שינוי המתחים  $V_C$  ו  $V_{out}$

### פרמאביליות ושטח החתך של החומר

על מנת לקבוע את הקשר הקיים בין פרמאביליות החומר לבין שטח החתך של החומר נעזר במקבילה המגנטית של חוק אוהם, הקובעת את היחס בין ההתנגדות המגנטית והשטף המגנטי לכוח המגנטו-מניע.

$$F = R\phi = \text{const} \quad (11)$$

בעזרת משוואה (11) נסיק שעבור שטף זהה, מתקיים  $\mathcal{R}_1 = \mathcal{R}_2$ , כלומר ההתנגדות המגנטית של שני חומרים (שונים) זהה. מהגדרת ההתנגדות, עבור אורך מעגל  $l$ , שטח חתך  $A$  ופרמאביליות  $\mu$  מתקיים:



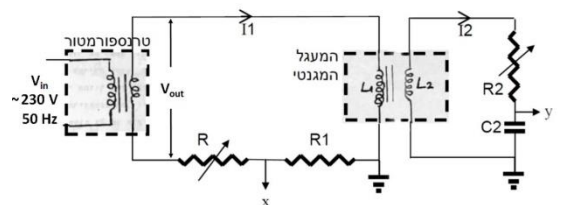
תרשים 1: מימין - לולאת החשל  $B(H)$  המתקבלת בהתאם לקשר (5). משמאל - לולאת חשל  $M(H)$  המתקבלת בהתאם לקשר (6). נציין נקודות חשובות בתרשים -  $M_r$ : המגנטיזציה שנותרה בחומר כאשר אין שדה חיצוני  $H$  שפועל.  $H_{ci}$ : השדה החיצוני שיש להפעיל בכיוון הפוך על מנת לאפס את המגנטיזציה.  $M_s$ : מגנטיזציה מקסימלית (רוויה)  $B_r$ : השדה שנותר בחומר לאחר שסיימו להפעיל עליו שדה חיצוני  $H$ .  $H_c$ : השדה החיצוני שיש להפעיל בכיוון הפוך על מנת לאפס את השדה  $B$  שנוצר בחומר. (קוארסיביות)

כשנתחיל להפעיל שדה חיצוני  $H$ , המגנטיזציה תעלה גם היא עד שנגיע לרוויה  $M_s$ . בשלב זה, אם נמשיך להעלות את השדה החיצוני, הקשר בין  $B$  ל  $H$  הופך לינארי ( $M$  קבוע). כעת, אם נחליש את השדה החיצוני נראה כי השדה הפנימי מקבל ערכים שאינם חד-ערכיים. לראיה נתבונן בנקודה  $B_r$  שלעיל, בה השדה החיצוני הוא 0 אך עדיין קיים שדה פנימי ("זיכרון המערכת"). על מנת לאפס שדה פנימי זה נפעיל שדה חיצוני בכיוון מנוגד ואיפוס מלא יתקבל עבור  $H = H_c$ . הכח שיש להפעיל ביצירת שדה שיאפס חזרה את השדה המגנטי נקרא כוח קורסיבי. תהליך זה הוא שמתאר את המסלול שרואים בתרשים 1, המגדיר את לולאות החשל.

השטח של לולאות החשל הוא סך העבודה שהושקעה על מנת לבצע את התהליך. עבור פרומגנט "קשה" נדרשת המון עבודה על מנת להשלים את המחזור של לולאת החשל. בחומר כזה, לולאת החשל תהיה רחבה יותר וצרה. עבור פרומגנט "רך", עבורו נדרשת מעט עבודה על מנת להשלים את המחזור, נצפה ללולאה צרה וגבוהה.

### היווצרות שדות מגנטיים במעגל עם סליל

נוסיף הקדמה תיאורית בנושא שדות מגנטיים בסלילים, שתשמש לתיאור מוצלח יותר של מערכת הניסוי הראשונה.



איור 2: המעגל החשמלי מהניסוי הראשון, מורכב מ-2 תתי מעגלים כמתואר לעיל

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (12)$$

משום ששני החומרים המגנטיים נמצאים באותו מעגל  $l_1 = l$   $l_2 := l$ . כך נשווה ונקבל

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l}{\mu_1 A_1} = \frac{l}{\mu_2 A_2} = \mathcal{R}_2 \quad (13)$$

ועל כן בסה"כ

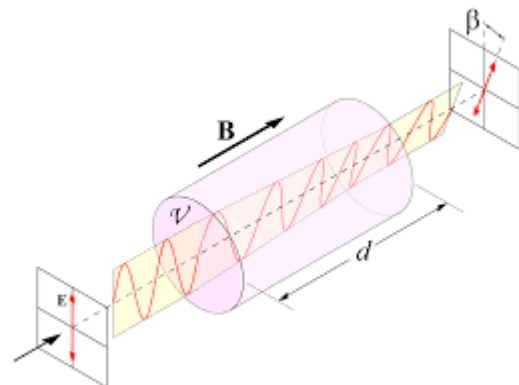
$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (14)$$

### אי לינאריות מיקרוסקופית

מהתבוננות באיור 1, עולה השאלה כיצד נוכל לחזות בדומיינים המגנטיים הנוצרים בחומר. מסתבר שמייקל פאראדיי נתן פתרון לשאלה זו, באמצעות ניסוח אפקט הקרוי על שמו – "אפקט פאראדיי". מתברר שדיפולים בעלי סידור זהה בחומר פרימגנטי נוטים להתאגד יחדיו באזורים המכונים דומיינים מגנטיים, וזאת על מנת למזער את האנרגיה הפנימית בחומר. חלוקת החומר לדומיינים מגנטיים כדלהלן מגדירה אזורי תיחום המפרידים את החלקים השונים בחומר בהם המגנטיזיה שונה. אפקט פאראדיי מסביר כיצד ניתן לצפות בדומיינים אלה, על ידי הקשר בין קיום של שדה מגנטי בחומר לבין ההסטה שנגרמת לגל אור כתוצאה משדה זה. בצורה ספציפית יותר, אפקט פאראדיי מגדיר את ההסטה בזווית  $\beta$  של מישור הקיטוב של גל כתוצאה מנוכחות שדה מגנטי  $B$  על פי הקשר הבא

$$\beta = \mathcal{V} B d \quad (15)$$

כאשר  $\mathcal{V}$  הוא קבוע ורדה,  $B$  הוא השדה המגנטי בחומר  $d$  הוא אורך המסלול שעובר הגל בחומר. (ראה איור 4)



איור 4: Faraday Rotator. קרן אור מקוטבת עוברת דרך גליל באורך  $d$ , בו שדה מגנטי  $B$  בכיוון התקדמות הקרן. כתוצאה מהמעבר במכשיר, מישור קיטוב הקרן מסתובב בזווית  $\beta$

כאשר נאיר חומר פרומגנטי, בו דומיינים מגנטיים בכיוונים שונים, אור שעובר דרך המגנט יקוטב לפי השדה המגנטי בדומיינים בו פגע. כעת, אם נסנן את האור שיוצא מהחומר דרך מקטב נוסף המסנן רק קיטובים מצורה מסוימת (הנובעים מדיפולים בכיוון יחיד) נוכל לראות ויזואלית את הדומיינים השונים. אור העובר בדומיינים בו השדה המגנטי מקטב לזווית

שתעבור את "המסנן" יגיע לעין, לעומת אור שיעבור בדומיינים אחר ולא יעבור את המקטב. נקבל תמונה ויזואלית בה אזורים בהם הדיפולים מכוונים בכיוון מסוים יהיו מוארים ואזורים אחרים חשוכים. בעזרת אפקט פאראדיי קיבלנו תמונה ויזואלית בה דומיינים שונים בצבע שונה.

## 2. מהלך הניסוי - ניתוח לולאות חשל בחומרים פרומגנטיים

בחלק זה ניתחנו את צורת לולאות החשל כתוצאה משניונים במעגל החשמלי (איור 2) וחילצנו את ערך הפרמאביליות המתקבלת עבור המקרים השונים. במקרה הראשון, עבור חומר יחיד הגברנו את הזרם העובר דרך המערכת ומדדנו את הפרמאביליות בעזרת השיפוע המתקבל מלולאת החשל. (השיפוע חושב בין שתי נקודות הרוויה עבור כל לולאת חשל) במקרה השני מדדנו עבור שני חומרים שונים את הקשר בין הפרמאביליות לשטח החתך של החומר.

בפועל, בחלק הראשון של הניסוי, נתבקשנו לתת מדד לפרמאביליות כתלות בשדה החיצוני  $H$ . לשם כך, בחרנו חומר יחיד אשר הגיע בבדיקות שלנו לרוויה וביצענו מספר רב של מדידות לולאות חשל בזרמים הולכים וגדלים. התחלנו מהתנגדות המקסימלית (כלומר מהזרם המינימלי) האפשרית עבורה התקבלה לולאת חשל שניתן למדוד וסיימנו בהתנגדות אפס בה הזרם היה מקסימלי. בכל מדידה התבוננו בשיפוע המיוצג על ידי נקודות הקצה של לולאת החשל (נקודות הרוויה – ראה תרשים 1). זאת בהתאם למשוואה (1) אשר ממנה נחליץ  $\mu = \frac{dB}{dH}$ . בתהליך זה חילצנו גם את הפרמאביליות המקסימלית.

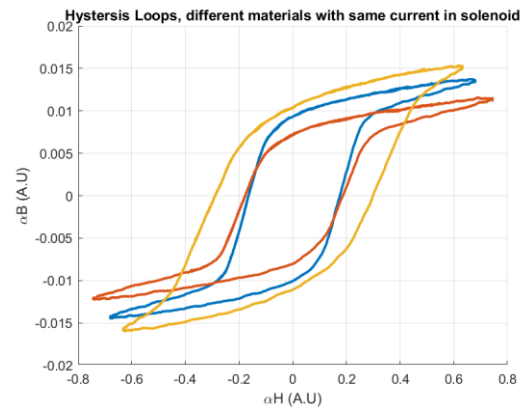
בחלק השני השווינו את הפרמאביליות של שני חומרים בדרך נוספת – בנוסף לקבלת לולאת חשל עבור כל חומר בנפרד, מדדנו את שטחי החתך של החומרים. בהתאם לפיתוח התיאורטי קבענו שהיחס ההופכי בין השטחים פרופורציוני ליחס הפרמאביליות של שני החומרים. זאת לפי נוסחא (14). ההשוואה בין החומרים הייתה כזו כך שהגובה של לולאות החשל (המהווה מדד לשדה  $B$  הפרופורציוני לשטף) בשני החומרים היה בקירוב זהה, והזרם במערכת היה זהה גם כן.

## 3. תוצאות

### השוואת לולאות חשל עבור חומרים שונים

עבור חומרים שונים, נצפה לתגובה שונה לשדה המגנטי החיצוני  $H$ . מדד טוב להשוואה הוא "קשייות" החומרים. נצפה שלחומר קשה יותר לתקבל לולאה רחבה יותר. המשמעות היא שעבור חומר כזה נדרשת יותר עבודה על מנת לשנות את כיוון הדיפולים בו, כך שיתאימו לכיוון השדה החיצוני  $H$ . לעומת זאת, עבור חומרים "רכים" נצפה שעובי הלולאה יהיה צר יותר. עבור חומרים אלה נדרשת עוצמת שדה נמוכה יותר על מנת לגרום

למגנטיזציה. בתרשים 4 ניתן לראות שלושה חומרים שונים הנתונים להשפעת שדה בעוצמה אחידה

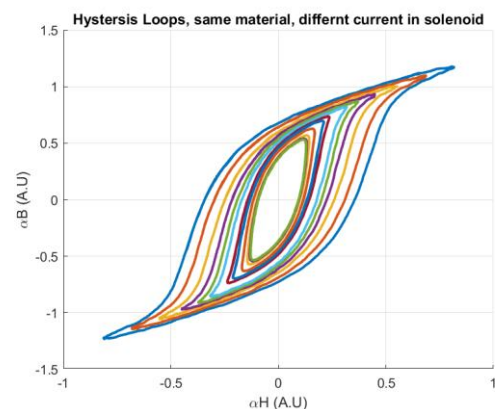


תרשים 2: שלושה חומרים שונים תחת השפעת שדה חיצוני באותה עוצמה.

בהתאם לתיאור הקשיות, ניתן לראות בבירור שהחומר עבורו התקבלה לולאת חשל צהובה הוא הקשה ביותר, ואילו החומר הכחול הוא החומר הרך ביותר.

#### מדידת הפרמאביליות מלולאות חשל שונות

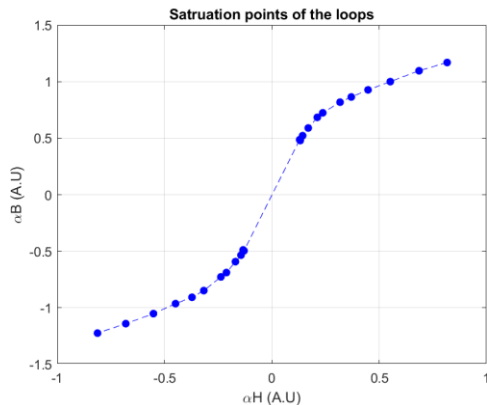
בהנתן זרמים שונים במערכת ועבור חומר פרומגנטי זהה, קיבלנו את תרשים 3. כל מדידה מיוצגת על ידי צבע שונה, כאשר המדידות עם הזרם הנמוך יותר מיוצגות על ידי לולאות קטנות יותר ולהיפך. מדידות אלה עולות בקנה אחד עם התאוריה – כאשר הזרם  $I_1$  קטן, השדה המגנטי  $H$  שסליל  $L_1$  משרה קטן גם הוא ועל כן השדה המגנטי שעובר דרך הליבה המגנטית הרציפה  $L_2$  גם הוא קטן. השדה המוקטן גורם לכך שיווצר בחומר שדה פנימי  $B$  בעל גודל הולך ופוחת (לפי משוואה 1) ובסה"כ כאשר גם ערך  $H$  וגם ערך  $B$  קטנים, לולאת החשל המתקבלת קטנה גם היא.



תרשים 3: גרף לולאות חשל דרך חומר פרומגנטי עבור זרמים משתנים

תרשים 3 מלמד אותנו על ערכי הפרמאביליות. ניתן לראות שככל שמתקרבים לרוויה, כך שיפוע הגרף קטן וערך הפרמאביליות קטן גם הוא. באופן כללי, מקדם הפרמאביליות הולך וגדל, עד שמקבל ערך מקסימלי באמצע הלולאה, ומחל לקטון עד שמגיע שוב לערכו ההתחלתי המינימלי. עובדה זו

מסתדרת עם התיאוריה (משוואה 1) המגדירה באופן דיסקרטי את הפרמאביליות כשיפוע  $dB/dH$ . אנו נתעניין בפרט הפרמאביליות



תרשים 4: גרף נק' סטורציה של לולאות חשל, השיפוע מייצג את הפרמאביליות של החומר.

כעת, חיברנו קו בין כל נקודות הסטורציה עבור כל מדידה וכך קיבלנו גרף ששיפועו מייצג את פרמאביליות של החומר. זאת בהתאם למשוואה (1) ולקשר התיאורטי  $\mu = \frac{dB}{dH}$ .

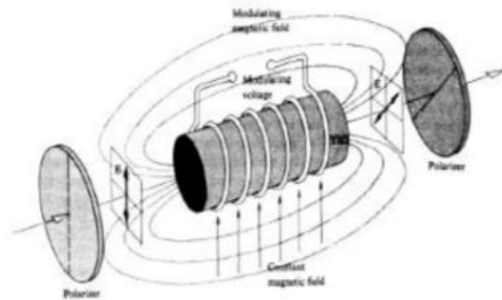
משום שהשיפוע בתרשים 3 מייצג מדד לפרמאביליות של החומר, השיפוע המקסימלי משמעותו הפרמאביליות המקסימלית. את השיפוע הנל חישבנו לפי הרוויה בלולאה הקטנה ביותר, וערכו יהווה עבורנו את הקירוב הטוב ביותר לערך האמיתי של הפרמאביליות המקסימלית. ייתכן בהחלט שהפרמאביליות מקבלת ערכים שונים משתואר לעיל. עם זאת, עבור כל זרם קטן יותר מהזרם עבורו התקבלה לולאת החשל הקטנה ביותר בתרשים 2 (לולאת החשל הפנימית הירוקה), לא התקבלה לולאת חשל שניתן להסיק ממנה מידע רלוונטי, כי לא התקבלו ערכי רוויה ברורים לעין. יתרה מכך, תרשים 3 מציג את הערכים הפרופורציוניים לשדה הפנימי והחיצוני ולא את הערכים עצמם. על כן, מדידה זו פורפורציונית לערך הפרמאביליות האמיתי. ערך השיפוע שהתקבל הוא  $slope = 3.7 \pm 0.2 \text{ A.U.}$ . בהמשך, כאשר נדון ביחס בין פרמאביליות של שני חומרים שונים, נקבל ביטוי בעל משמעות רבה יותר שייתן יחס מדויק ללא הנחות הפרופורציה על  $B, H$ .

#### מדידת יחס הפרמאביליות מחומרים בעלי חתך שונה

בחלק זה מדדנו את לולאות החשל של חומרים היוצרים לולאות בגובה זהה, כלומר חומרים שהשטף דרכם שווה. מכך הסקנו (לפי התיאור במבוא ומשוואה 11) שההתנגדות המגנטיות בחומרים אלה זהה, ומתוך הבנה זו יכולנו לחשב את היחס בין הפרמאביליות של החומרים הנתון על ידי משוואה (14). ברשים 4 ניתן לראות שני חומרים כלעיל:

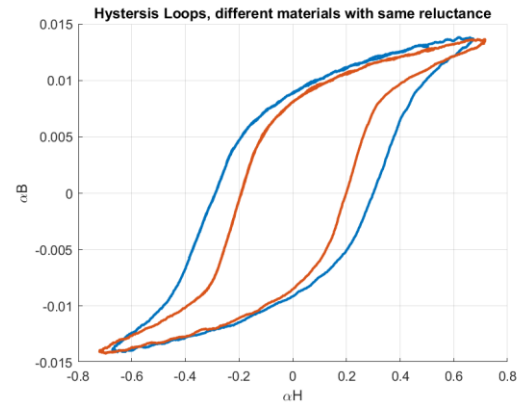
#### 4. חלק שני - חקר דומיינים מגנטיים בגביש פרימגנטי

את תופעת החשל בחומרים המגנטיים בחנו גם ברמה המיקרוסקופית. הרכבנו מעגל חשמלי בו היה מקור מתח, מפסק היפוך זרם וסליל. במרכז הסליל ובין 2 מקטבים (ראה איור 5) מיקמנו גביש גרנט פרימגנטי (סוג של פרומגנט) מלבני דק.



איור 5: מבנה רכיב הגביש. בין שני מקטבים, בתוך סליל עליו המתח משתנה, ממוקם גרנט פרימגנטי דק. השדה בכיוונים שונים בדומיינים בגביש, גורם לאור העובר בגביש להתקטב בכיוונים אחרים. בעזרת "מקטב היציאה" (מימין בתרשים) הבחנו בעוצמת האור השנה, וכך גם בין הדומיינים השונים

את הגביש צילמנו בעזרת מיקרוסקופ אופטי הקלט את קרני האור היוצאות ממנו. לפי חוק אמפר, השדה המגנטי במרכז סליל מושפע מהזרם העובר דרכו,  $H = \mu nI$ . כאשר  $\mu, n$  כריכות ליחידת אורך בסליל ופראמביליות החומר שבמרכזו בהתאמה,  $I$  הזרם. תוצאה זו נכונה כאשר מזניחים אפקטים של שפת הסליל, מה שנעשה בניסוי זה, מכיוון שהגביש דק מאוד ומרוחק מקצוות הסליל. נתייחס למתח על הסליל, לפי חוק אוהם, השדה נתון ע"י  $H = \frac{\mu nV}{R_L}$  (מתח על הסליל,  $R_L$  התנגדותו החשמלית). כתוצאה מאפקט פאראדיי, השדה המגנטי משפיע על מישור קיטוב האור. בדומיינים המגנטיים השונים, השדה המגנטי בכיוונים שונים ישנה זווית הקיטוב. תופעה זו מאפשרת, לאחר מעבר האור בגביש ובמקטב הנוסף, לזהות הדומיינים השונים לפי ההפרשים בעוצמת האור. צילמנו את הדומיינים במגנט תחת זרמים בגדלים שונים ובכיוונים מנוגדים. העלנו ממתח 0 במעגל, עד למתח בו הגביש הגיע לרוויה והחזרנו אותו למצב ההתחלתי. (ראה איור 6)



תרשים 5: בכחול - חומר בעץ שטח חתך של  $1.5 \cdot 10^{-5} \pm 10^{-6} m$  באדום - חומר בעל שטח חתך של  $1.13 \cdot 10^{-5} \pm 10^{-6} m$

כפי שניתן לראות, לחומר בעל שטח החתך הגדול יותר מתאימה לולאה רחבה יותר. עובדה זו מסתדרת עם התיאוריה, שהרי שטח חתך גדול יותר משמעותו יותר דיפולים בחומר, ועקב כך יותר אזורים מגנטיים בחומר. לכן, על מנת למגנט את החומר לחלוטין, כלומר, לשנות את כיוון הדיפולים בו כך שיצביעו בכיוון השדה החיצוני, יש להשקיע יותר עבודה. (דהיינו, השטח של לולאת החשל גדול יותר). באופן כללי, עבור חומר פרומגנטי מסוים (עם מקדם פרמיביליות מסוים), ככל ששטח החתך גדול יותר (יותר דיפולים) כך נדרש שדה חיצוני חזק יותר בכדי להגדיל השדה המגנטי בתוכו.

כעת, נוכל לתת ביטוי מדויק ליחס בין הפרמאביליות של שני החומרים. כפי שראינו בקשר (14), היחס בין הפרמאביליות הפוך ליחס בין שטחי החתך. על כן,

$$\frac{\mu_{blue}}{\mu_{red}} = \frac{Area_{red}}{Area_{blue}} \approx 0.75 \pm 0.02$$

במקרה זה אנחנו מקבלים תוצאה מדויקת יותר, כי איננו לוקחים בחשבון את כל הפרמטרים המובלעים בקשר הפרופורציוני בין השדות למתחים. עם זאת, תוצאה זו איננה תוצאה מדויקת לכל פרמאביליות בנפרד, ולמעשה לא מאפשרת לנו לדעת את הערכים של הפרמאביליות עבור כל חומר. אילו היינו מעוניינים בתוצאה זו, החלק הקודם בניסוי היה מאפשר לנו לעשות זאת. נחזור ונאמר שבחלק הקודם אנו מצפים לערכי פרמאביליות מדויקים פחות, שהרי חישוב השיפוע מתוך גרף  $B \propto$  תכלות ב  $H$  נותן לנו קירוב  $\mu$  ולא את  $\mu$  באופן מוחלט.

נמצא כעת לפי השיטה שתוארה בחלק הקודם את הפרמאביליות המתקבלת עבור כל אחד מהחומרים  $blue, red$ . לשם כך, עבור לולאות החשל המקבלות עבור כל חומר בנפרד, נתבונן בערך השיפוע המקסימלי בכל אחת מהלולאות, ממנו נחליץ את החישוב הנוסף ליחס:

$$\frac{\mu_{blue}}{\mu_{red}} = 0.79 \pm 0.02$$

כלומר קיבלנו תוצאות דומות עם  $N_\sigma = 1.4$  עם זאת, נזכיר שהשיטה הראשונה מדויקת יותר, שהרי עבורה אין הנחות פרופורציה מובלעות בחישוב הפרמאביליות של כל חומר.

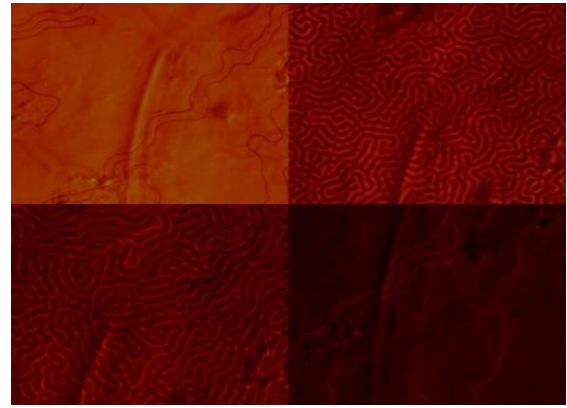


חומר פרימגנטי "רך", כלומר השדה החיצוני הנדרש על מנת שהדיפולים בו ישנו את כיוונם קטן יחסית.

## 5. מסקנות

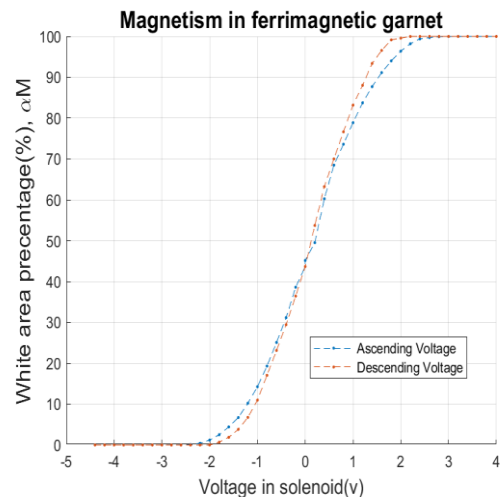
במהלך הניסוי חקרנו את התנהגות לולאות החשל עבור חומרים שונים ותחת תנאי התחלה שונים (שינויים בהתנגדות שמשמעותם הורדת הקטנת הזרם). גילינו שכשפועלים שדה מגנטי חיצוני H על חומר פרומגנטי, יוצר בו שדה פנימי B שמתנהג באופן שאיננו לינארי. תכונה זו של השדה B התבטאה ב"זיכרון" שנצפה בלולאת החשל, כאשר הגברת והורדת השדה החיצוני H השפיעה באופנים שונים על עוצמת השדה הפנימי. למשל, ראינו שכאשר מגבירים את H ולאחר מכן מורידים את עוצמת H חזרה, השדה הפנימי B מקבל ערכים שונים מאשר אלה שקיבל עבור הגברת השדה H הראשונית. תופעה זו היא מדד לכיוון הדיפולים המגנטיים שבחומר וברצון שלהם "להתכווץ" ביחס לשדה החיצוני. כמו כן, ראינו שעבור זרם הולך וקטן, שטח לולאת החשל הולך וקטן גם הוא. זאת משום שהקטנת הזרם מקטינה בתורה את ערך H, (המקטינה, כאמור, את B). יתרה מכך, בעזרת לולאות החשל יכולנו לתת מדד לפרמאביליות (המהווה מדד למגנטיזציה) של החומר, ועשינו זאת בשתי דרכים. הראשונה השתמשה בשיפוע של הגרף מתוך ההגדרה  $\mu = dB/dM$  והשנייה עשתה שימוש בשטח החתך של החומר מתוך הבנה שעבור חומרים שעובר דרכם שטף זהה, היחס בין הפרמאביליות הפוך ליחס בין שטח החתך. להבנתנו, לשתי השיטות יתרונות וחסרונות. הראשונה – מאפשרת לקבל ערך פרמאביליות עבור חומר מסוים, אך באיכות נמוכה יחסית. השנייה – מאפשרת לקבל יחס בין פרמאביליות של שני חומרים, אך בדיוק גבוה יותר.

בהמשך הניסוי, אפיינו את השתנות הדומיינים המגנטיים בגביש גרנט פרימגנטי וחילצנו משינוי זה את לולאת החשל מתאימה. ראינו שכאשר מפעילים על החומר שדה מגנטי חיצוני בעוצמות הולכות וגוברות, מספר האלקטרונים בעלי ספין בכיוון זהה הולך וגדל, עד שהחומר מגיע לרוויה במגנטיזציה ומתייצב כאשר כל הדיפולים "מצביעים" לאותו כיוון. את הקשר בין השדה החיצוני למגנטיזציה ראינו בבירור בלולאת החשל שהתקבלה. כמו כן, לולאת החשל המחישה שהחומר שחקרנו "רך", במובן שנדרש שדה חיצוני חלש על מנת לייצר בו שדה פנימי. חלק זה המחיש את התלות המיקרוסקופית הקיימת בין השדה החיצוני H, אשר הגברתו משמעותה הגדלת מספר הדיפולים שפונים לאותו כיוון.



איור 6: תצלומי מיקרוסקופ של הגביש הפרימגנטי תחת זרמים שונים בסולנואיד. סקאלת אורך בתמונה 10mm. צבע אדום בתמונה מעיד על ספין של דיפולים בכיוון מסוים, וצבע שחור בספין בכיוון מנוגד. כאשר העלנו את הזרם בסלול, יותר ויותר דיפולים הסתדרו בכיוון השדה החיצוני, כאשר הצבעים האדום והשחור התקבלו מזרמים (ולכן גם שדה חיצוני) בכיוונים הפוכים

ככל שהגדלנו את השדה החיצוני ראינו כי הצבע בתמונה, ולכן גם כיוון הדיפולים בגביש נהיה אחיד. כדי לחשב המגנטיזציה, המרנו את התמונות לצבעי שחור ולבן, כאשר לבן ניתן לאזורים אשר עוברים סף מסוים. סף זה נקבע להיות ממוצע השטח הלבן כאשר אין שדה חיצוני כלל. אחוז הדומיינים המוארים חושב כך עבור תמונות מערכי מתח שונים מתוך הבנה שנתון זה מתכוונתי למגנטיזציה בכיוון מסוים בחומר (סקריפט מטלאב מצורף כנספח). בתרשים 6 מוצגים ערכי המגנטיזציה בחומר, כתלות במתח השדה החיצוני, כאשר 0 מגנטיזציה מנורמלת להיות כאשר החומר ברוויה "שחורה" לחלוטין.

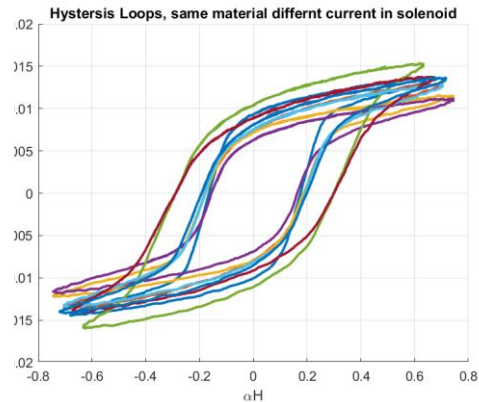


תרשים 6: לולאת החשל בגביש גרנט פרימגנטי. בגרף אחוז השטח המואר (הפרופורציה למגנטיזציה) כתלות במתח על הסולנואיד (פרופורציה לשדה החיצוני). ככחות מוצגים ערכים הרלוונטיים לעלייה במתח ובאדום לירידה. ניתן לראות בביקור שהתקבלה לולאת חשל כמצופה

כפי שניתן לראות-בגרף התקבלה לולאת חשל כמצופה. בפרט, ערכי המגנטיזציה בירידת השדה החיצוני גדולים מאלו בעלייה (לדוג' בתחום  $1V \leq V \leq 2V$ ). לולאת החשל שהתקבלה הינה צרה, מה שמעיד על כך שהגרנט בו השתמשנו בניסוי הוא

## 6. נספחים

א. לולאות חשל מכל החומרים אשר נמדדו במעבדה. בחלק הראשו של הניסוי בחרנו להתמקד בשלושה חומרים בלבד על מנת לאפשר הצגה ברורה יותר של הנתונים



תרשים 7: לולאות החשל שהתקבלו עבור מקבץ חומרים שונים

ב. מצורף קוד MATLAB לעיבוד תמונות הדומייניות

```
%% setting maxImage
maxImage = imread('polar2/up/gray4.4v.jpg'); %the darkest image
maxImage = maxImage(X_START:X_END, Y_START:Y_END);
maxImage = cast(maxImage, 'double');

%% setting threshold
avgImage = imread("polar1/up/gray0.0v.jpg");
avgImage = avgImage(X_START:X_END, Y_START:Y_END);
avgImage = cast(avgImage, 'double');
avgImage = abs(avgImage - maxImage);
threshold = mean(avgImage, 'all');

%% manipulating all pictures and creating precentage graph. pics is the
array of pictures.
for i=1:pics_num
    image = imread(GRAY_PATH + '/' + pics(i));
    image = image(X_START:X_END, Y_START:Y_END);
    image = cast(image, 'double');
    image = abs(image - maxImage);
    image(image < threshold) = 0;
    image(image >= threshold) = 1;
    %figure; % can be enabled if showing each picture is needed
    imshow(image);
    whitePrecentage = mean(image, 'all') * 100;
    name = regexp(pics(i), '\d\.\d', 'match');
    voltage = str2double(name{1, 1}{1, 1});
    if startsWith(GRAY_PATH, 'polar2')
        voltage = -voltage;
    end
    precentage(i, :) = [voltage, whitePrecentage];
end
```