**מדידת לולאת חשל בפרימגנטים באמצעות חקר התפלגות דומיינים מגנטיים**

**תקציר**

תופעת התנהגותם של פרומגנטיים ופרימגנטיים תחת השפעת שדה מגנטי חיצוני היא תופעה שמרתקת חוקרים במשך שנים. בהשפעת שדה חיצוני, חומרים פרומגנטיים, מדגימים תכונות זיכרון אשר לה שימושים רבים ומגוונים בתעשייה. בניסוי זה, נבדקה תכונת הזיכרון בפרומגנטים, באמצעות חקר לולאות חשל המתקבלות מהשדה המגנטי הכולל כתלות בשדה המגנטי החיצוני הפועל על החומר. בנוסף, נבדקה תכונת הזיכרון של גביש גרנט (פרימגנט), על ידי חקר התפלגות דומיינים מגנטיים הנוצרים בחומר כתלות בעוצמת השדה המגנטי החיצוני. תוצאות הניסוי מאששות את אפקט ברקהאוזן ואת התלות המקובלת בין שטח החתך של החומר והזרם החשמלי לצורתן של לולאות החשל. עם זאת, זיהינו כי תופעת הזיכרון בגביש הגרנט איננה מובהקת כלל, ככל הנראה עקב מדידה צינורית וקשיות מגנטית נמוכה מאוד של הגביש.

1. **מבוא**

**חומר פרומגנטי** הינו חומר מגנטי, אשר בהשפעת שדה מגנטי חיצוני יוצר שדה מגנטי פנימי גדול משמעותית מהשדה החיצוני המופעל עליו (ביחס ל'פאראמגנטים' או 'דיאמגנטים'[[1]](#footnote-1)). חומרים אלו 'שומרים' על המגנטיות שלהם גם לאחר הפסקת החשיפה לשדה החיצוני. לתכונה זו קוראים 'זיכרון מגנטי', ויש לה שימושים רבים ומגוונים בתעשייה, כגון ייצור רכיבי זיכרון קשיח (Hard Disk) עבור מחשבים[[2]](#footnote-2), ייצור כרטיסי אשראי והקלטה דיגיטלית של קול (Digital Recording). חומרים פרומגנטיים מאופניים בפרמיאביליות[[3]](#footnote-3) גבוהה, בסדר גודל אופייני של עד .

**חומר** **פרימגנטי** הוא חומר בו המומנטים המגנטיים של האטומים הנמצאים בתתי-שכבות שונות מנוגדים זה לזה. בדומה לחומרים פרומגנטיים, תגובתם של חומרים פרימגנטיים לשדה מגנטי חיצוני הינה חזקה. ברמה המיקרוסקופית, החומר הפרימגנטי יוצר שכבות של דיפולים המצביעים לאותו כיוון, אך בין השכבות עצמן אין אחידות בכיוון. לפיכך, ברמה המקרוסקופית התגובה תיראה לרוב חלשה יותר מתגובתם של פרומגנטים. עבור גילוי תכונת הפרימגנטיות זכה הפיסיקאי הצרפתי Louis Néel בפרס נובל בפיזיקה לשנת 1970.

**רקע תיאורטי**

**כוח מגנטי ושדה מגנטי**

שדה מגנטי הוא שדה וקטורי המתאר את ההשפעה המגנטית בנקודה מסוימת על מטענים וזרמים חשמליים. ההשפעה של השדה המגנטי מתוארת ע"י כוח לורנץ:



וברמה המקרוסקופית עבור תיל נושא זרם חשמלי:



כאשר הינו המטען החשמלי של חלקיק נקודתי, מהירותו, וקטור השדה המגנטי, עוצמת הזרם בתיל ו- אורך התיל. עבור תיל מלופף פעמים, השדה המגנטי המורגש במרכז המערכת מוגדר בתור:

**תכונות של חומרים מגנטיים**

מגנטיות של חומר היא היכולת שלו לשנות את כיוון הדיפולים המגנטיים[[4]](#footnote-4) שלו בהשפעת שדה מגנטי חיצוני. מגנטיזציה של חומר מוגדרת בתור צפיפות הדיפולים המגנטיים שלו. עבור חומר סטנדרטי, גודל זה נתון ע"י:

(1.4)

כאשר מספר הדיפולים בחומר, נפח החומר ו- מייצג דיפול מגנטי בודד. שני הגדלים האופייניים לחומר המגדירים את המגנטיות שלו הינם פרמיאביליות החומר, המוגדרת בתור:

(1.5)

וסוספטיביליות החומר המוגדר בתור:

(1.6)

כאשר השדה המגנטי החיצוני, השדה הפנימי המורגש בחומר ו- המגנטיזציה.

**סליל**

בהינתן סליל בעל ליבה פרומגנטית ו- ליפופים, ההשראות (Inductance) של הסליל נתונה ע"י:

(1.8)

כאשר  *הפרמיאביליות המגנטית של הליבה, שטח הליבה ו- אורכה. מכיוון שהפרמיאביליות בחומרים פרומגנטיים אינה קבועה, נצפה לפיכך שההשראות לא תהיה קבועה גם כן. משמעות הדבר היא שעבור זרמים שונים, יש להשקיע עבודה שונה על מנת להזרים זרם בסליל.*

*כמו כן, השדה החיצוני הפועל במערכת כזאת הינו:*

*(1.9)*

**מעגלים מגנטיים**

במעגלים חשמליים, חוק אוהם מספק קשר בין מפל המתח במעגל, לבין ההתנגדות והזרם במעגל:

(1.7)

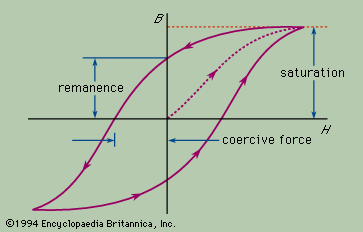
במעגלים מגנטיים, ההקבלה לחוק זה נותן לנו:

(1.8)

כאשר הכוח המגנטו מניע (כמ"מ), השטף המגנטי[[5]](#footnote-5) במעגל ו- ההתנגדות המגנטית במעגל.

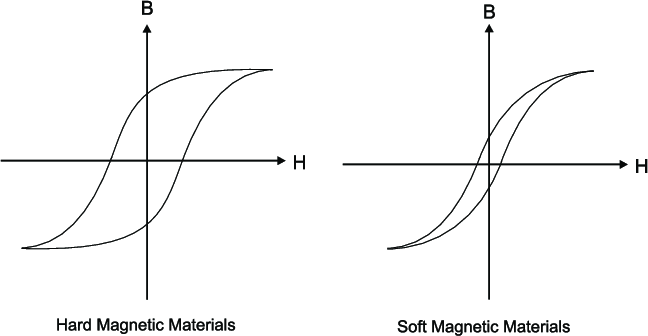
**לולאות חשל**

השדה המגנטי הפנימי שנוצר בחומרים פרומגנטיים תלוי לא רק בשדה החיצוני המופעל עליו, אלא גם במצב הספציפי (סידור הדיפולים הספציפי) שבו החומר מצוי בכל רגע. לפיכך, עקומת השדה הפנימי כתלות בשדה החיצוני איננה חד-חד ערכית, וצורתה נקראת לולאת חשל (Hysteresis Loop).



***איור (1.1):*** *אילוסטרציה של לולאת חשל סטנדרטית בחומר פרומגנטי שרירותי. הקו המקווקו הינו ה-Initial Magnetization Curve והקו הרציף הינו ערכי השדה הפנימי הנמדדים כתלות בשדה החיצוני, עבור שדה חיצוני משתנה באופן מחזורי.*

בפרומגנטיים, עבור שדה בעוצמה מסוימת, כלל הדיפולים המגנטיים בחומר יצביעו לאותו כיוון, ונקבל מצב של רוויה מגנטית (Saturation) כפי שניכר באיור. נקודות החיתוך של הגרף עם הצירים הינן השדה הפנימי המתקבל בחומר לאחר הפסקת השדה החיצוני (Remanence), ועוצמת השדה החיצוני שיש להפעיל על מנת שיורגש אפס שדה פנימי (Coercivity). השטח הכלוא בתוך לולאת החשל הינו ביחס ישר לקשיות המגנטית של החומר[[6]](#footnote-6). שטח הלולאה שווה לעבודה שצריך להשקיע על מנת לשנות את כיוון הדיפולים בחומר.



***איור (1.2):*** *הדגמה של השוני בלולאות החשל של חומר רך מגנטית לעומת חומר קשה מגנטית. מימין הלולאה המתקבלת עבור החומר רך ומשמאל עבור חומר קשה.*

***דומיינים מגנטיים ואפקט ברקהאוזן***

*בחומרים פרימגנטיים, הסתדרות של צבירי דיפולים באותו כיוון היא תופעה המכונה דומיינים מגנטיים. בין דומיינים, ישנם אזורים שנקראים קירות מגנטיים (*Domain Walls*), המחברים דומיינים שונים, ובהם כיוון הדיפולים משתנה בהדרגתיות מהכיוון בדומיין אחד לכיוון בדומיין השני. תיאורטית, בחשיפה לשדה חיצוני משתנה הדרגתית, קירות אלו אמורים לנוע ולשנות בהדרגתיות כיוון של דיפולים. בפועל, קירות אלו עלולים להיתקע בפגמים בחומר, עד לנקודה קריטית מסוימת שבה צביר של דיפולים ישנה את כיוונו בבת אחת, ונקבל קפיצה בגרף של השדה החיצוני לעומת השדה הפנימי. תופעה זו של קפיצות ואי-רציפויות מכונה אפקט ברקהאוזן.*

1. **מהלך הניסוי ושיטות עבודה**

הניסוי כלל שני חלקים עיקריים; בראשון, מדדנו לולאות חשל של חומרים שונים כתלות בשטח החתך והזרם החשמלי. בחלק השני חקרנו התפלגות של דומיינים מגנטיים ואת אפקט ברקהאוזן. מערכת הניסוי בשני החלקים הייתה שונה.

Diagram

Description automatically generated

*איור (2.1): מערכת הניסוי בחלק הראשון.*

**בחלק הראשון** של הניסוי, הרכבנו מעגל חשמלי (ראו איור 2.1), אשר כלל בתוכו גם מעגל מגנטי (ראו איור 2.2). ומדדנו את המתח על הנגד ואת המתח על הקבל , אשר פרופורציוניים לשדה המגנטי החיצוני והשדה המגנטי הכולל , בהתאמה.

Graphical user interface, application, Word

Description automatically generated

*איור (2.2): סקיצת תקריב של המעגל המגנטי ממערכת הניסוי.*

המתח על הנגד פרופורציוני לעוצמת הזרם במעגל (ראו משוואה 1.7), וכך גם שדה המגנטי החיצוני המופעל על הליבה המגנטית פרופורציוני לעוצמת הזרם (ראו משוואה 1.9), ומכאן, המתח על הנגד פרופורציוני לשדה המגנטי החיצוני . כמו כן, המתח על הקבל ניתן על ידי:

(2.1)

*אך מכך ש- (כאשר הוא שטח החתך של החומר הנבדק), נקבל בסה"כ שהמתח על הקבל פרופורציוני לשדה המגנטי הכולל . בהתחשב בכך, ביצענו מדידות כדלהלן:*

1. ***בדיקת השפעת שטח חתך-***

* *חומר קבוע.*
* *שטח חתך משתנה: מ- סמ"ר ועד סמ"ר, בקפיצות של סמ"ר (סה"כ 8 שטחי חתך שונים).*
* *ההתנגדויות קבועות:*

*כאשר כל ההתנגדויות נמדדות ב-.*

1. ***בדיקת השפעת עוצמת זרם חשמלי-***

* *שימוש ב-2 חומרים שונים.*
* *שטח חתך זהה וקבוע של סמ"ר.*
* *התנגדות משתנה של הנגד : טווח של , בדילוגים של*

מיקרוסקופ ומצלמה

מקטב 2

מקטב 1

גרנט מלופף בסליל

מקור אור

*איור (2.3): סקיצה של מערכת הניסוי בחלק ב' – חקר דומיינים מגנטיים ואפקט ברקהאוזן.*

**בחלקו השני** של הניסוי, חקרנו התפלגות של דומיינים מגנטיים ואת אפקט ברקהאוזן. מערכת הניסוי (ראו איור 2.3) כללה מיקרוסקופ אופטי המחובר למצלמה, שכבה דקה של גרנט פרימגנטי שמשני צדדיו 2 מקטבים ומסביבו סליל. מהות הסליל היא לגרום לשדה מגנטי בכיוון המאונך למקטבים ולגרנט הפרימגנטי. בכל מדידה, שינינו את השדה החשמלי בסליל (כאשר כתוצאה מכך השתנה השדה החשמלי העובר דרך הגרנט), וצילמנו את התפלגות האזורים המגנטיים בחומר. השלבים העיקריים בתהליך המדידה היו –

1. התחלת מדידה ממתח אפסי.
2. הגדלת המתח עד שתמונת הדומיינים המגנטיים המתקבלת מכילה צבע יחיד בקירוב טוב.
3. הורדת המתח בחזרה עד אפס.
4. החלפת כיוון המתח במעגל לצורך הדמיית המשך ירידה במתח.
5. עליה חזרה מעלה.

Graphical user interface

Description automatically generated

*תמונה (2.4): צילום דומיינים מגנטיים שהתקבל במהלך הניסוי. ניתן לראות שני צבעים עיקריים, כאשר כל צבע מבטא כיוון מגנטיזציה ראשי בדומיינים שנוצרו בגביש הגרנט. קיבענו את אחד הצבעים ככיוון שמשמעותו – כיוון המגנטיזציה. זוהי קביעה שרירותית, שאינה משנה את תוצאות הניסוי.*

Application

Description automatically generated with medium confidence

*תמונה (2.5): תמונה בינארית, שהתקבלה כצילום דומיינים מגנטיים במהלך הניסוי. ניתן לראות בקלות כי קיים רוב מוחלט של פיקסלים שחורים.*

ביצענו שינויים של במתח בין צילום לצילום. ביצענו את כל השלבים לעיל פעמיים ברצף לכל מדידה, וביצענו סה"כ 2 מדידות, עבור כיול שונה של זום המצלמה – זאת כדי להתמודד עם 2 שכבות שונות של אזורים מגנטיים.

ניתוח ההתפלגות של האזורים המגנטיים בוצע באמצעות תוכנה בשפת Python (ראה קוד מצורף בנספחים), אשר הפכה את התמונה לתמונה בינארית (ראה תמונה 2.5) בשיטת קביעת סף (Thresholding) חכמה, בהתבסס על היסטוגרמת הצבעים של התמונה (ראה איור 2.6).

Chart, histogram

Description automatically generated

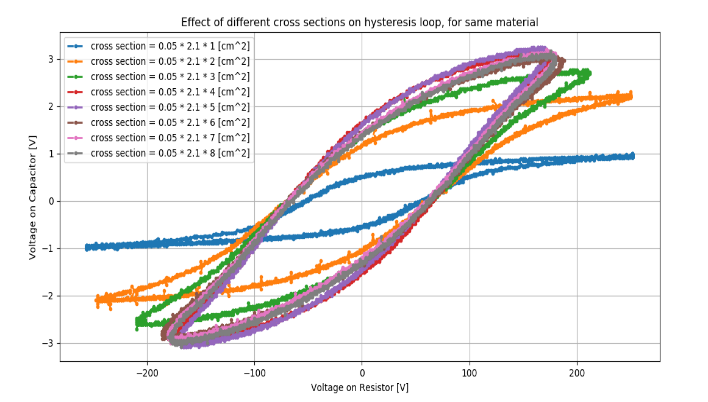
*איור (2.6): היסטוגרמת צבעים עבור המדידה בה , מתוך השכבה השנייה שנמדדה. ניתן לראות שהתפלגות הצבעים חלוקה לשני צבעים עיקריים, ונוטה לכיוון הצבע הכהה (שמאופיים בערכי פיקסלים נמוכים). עם זאת, בשלב זה עוד אין שוני ניכר בין אחוז הפיקסלים הכהים לאחוז הפיקסלים הבהירים, דבר המעיד שהמגנטיזציה בחומר איננה חזקה דיה. ראוי לשים לב כי Threshold מתאים עבור ערכי הצבעים הללו ממוקם בקירוב טוב באזור ערך פיקסל 120.*

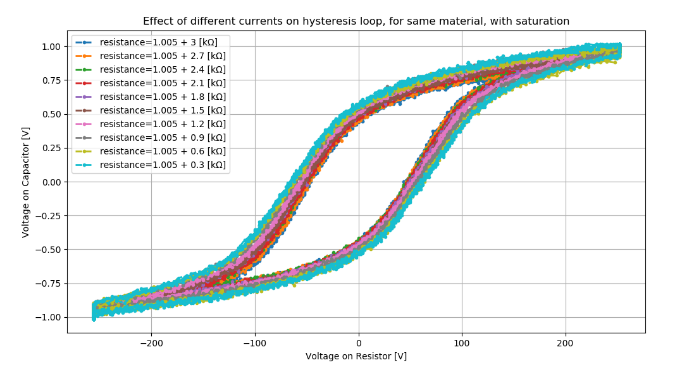
חשוב לציין שמכיוון שהחלפנו לעיתים קרובות את כיוון המתח החשמלי במדידות, נקבעו 2 ספים שונים, אחד עבור כל כיוון, כיוון שהיסטוגרמת הצבעים הייתה שונה מאוד עבור כל כיוון וסף אחד לא הניב את ההפרדה הדרושה בין הצבעים.

1. **תוצאות**

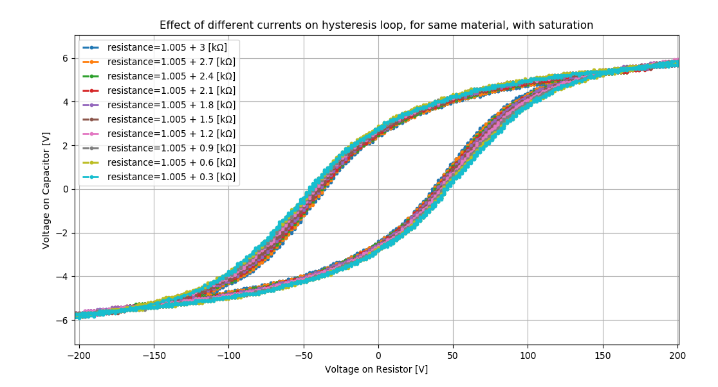
**השפעת שטח חתך ועוצמת זרם על פרומגנטים**

להלן הגרף שהתקבל עבור השפעת שטחי חתך שונים של חומר אחד על לולאות החשל שלו, ולאחריו 2 גרפים עבור מדידת סטורציה של חומרים שונים בעוצמות זרם חשמלי שונות;

*גרף (3.1): מפל המתח על הקבל כתלות במפל המתח על הנגד, עבור חומר זהה (חומר א') עם שטח חתך שונה. כל סט נקודות מייצג את הערכים הנמדדים עבור שטח חתך זה.*

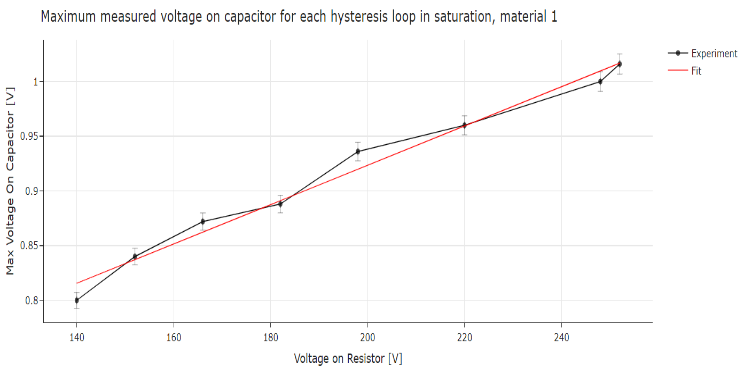


*גרף (3.2): מפל המתח על הקבל כתלות במפל המתח על הנגד, עבור חומר א' , עבור עוצמת זרם שונה במעגל. כל סט מדידות מציג את הערכים הנמדדים עבור התנגדות ספציפית המצויה במעגל.*



*גרף (3.3): מפל המתח על הקבל כתלות במפל המתח על הנגד, עבור חומר ב', עבור זרמים שונים במעגל. כל סט מדידות מציג את הערכים הנמדדים עבור התנגדות ספציפית המצויה במעגל.*

בגרפים (3.2) ו-(3.3), ניכר שהלולאות הגיעו לסטורציה, לפיכך, לפי משוואה (1.5) נצפה שלקיחת הערכים המקסימליים בסטורציה של כל גרף, וביצוע התאמה לינארית לנקודות אלו, תניב ישר שהשיפוע שלו הוא פרמיאביליות החומר החל מנקודה מסוימת בה הדיפולים בחומר מצביעים לאותו כיוון. גרפים עבור נקודות אלו:



*גרף (3.4): ערכי המקסימום בלולאות שהתקבלו עבור סטורציה של חומר א'. הנקודות השחורות הינן הערכים הנמדדים. הקו האדום הינו התאמה לינארית תיאורטית לנקודות. השגיאות חושבו ע"י התקדמות שגיאות, עבור השגיאה בשטחי החתך שלנו ונתוני השגיאות לאוהמטר שהשתמשנו בו (ראו תמונה 5.6 בנספחים). ההתנגדות הנמדדת במעגל 2 הייתה גדולה בהרבה מאשר במעגל 1 ועל כן השגיאות בציר x זניחות לעומת ציר y.*

Chart, line chart, scatter chart

Description automatically generated

*גרף (3.5): ערכי המקסימום בלולאות שהתקבלו עבור סטורציה של חומר ב'. הנקודות השחורות הינן הערכים הנמדדים. הקו האדום הינו התאמה לינארית תיאורטית לנקודות.**שגיאות חושבו כמפורט בגרף (3.4).*

ניכר מן הגרפים התאמות לינאריות טובות (). מכיוון שהצירים שלנו רק פרופורציונים לשדות ו- עד כדי קבוע, יהיה פשוט מנתונים אלו להוציא את הפרמיאביליות היחסית בין חומרים א' ו-ב'. משילוב משוואות (1.7) ו-(2.1), ומכיוון שלחומרים א' ו- ב' אותו שטח חתך, אך ערך ההתנגדות בכל אחד מהמדידות היה שונה, נקבל שאם נכפיל את קבועי ההתאמות שהתקבלו בערך של בכל אחד מן המעגלים בהתאמה, ונחלק ביניהם, נקבל את הפרמיאביליות היחסית.

קבועי ההתאמות שהתקבלו, לאחר הנרמול בערך ( לגרף (3.4) ו- לגרף (3.5)):

ולפיכך נקבל את ערך הפרמיאביליות היחסית:

**חקר דומיינים מגנטיים ואפקט ברקהאוזן**

מבחינה איכותית, ניכר יחס ברור (ראו גרף 3.6) בדמוי לולאת חשל בין השדה המגנטי הפועל על גביש הגרנט להסתדרות הדיפולים בחומר (וכפועל יוצא היחס בין הצבעים הכהים והבהירים בתמונות).

Chart, scatter chart

Description automatically generated

*גרף (3.6): אחוז הצבע הכהה בצילומי הדומיינים המגנטיים, כתלות במתח שהושרה על הסליל (הפרופורציוני לשדה המגנטי החיצוני). ניתן לראות שהתקבלה צורה המזכירה לולאת חשל. עם זאת, קיימים הבדלים ניכרים – הלולאה הנ"ל איננה בעלת שטח רחב, איננה סימטרית, והיא נחתכת במרכזה. ראן דיון להסברים אפשריים להבדלים הללו.*

כמו כן, ניכר כי ישנן נקודות אי-רציפות בגרפים של האזורים המגנטיים המוזכרים לעיל, בדומה לצפוי על פי אפקט ברקהאוזן (ראו גרף 3.7).

Chart, scatter chart

Description automatically generated

*גרף (3.7): אחוז הצבע הכהה בצילומי הדומיינים המגנטיים, כתלות במתח שהושרה על הסליל, עבור השכבה השנייה שנבדקה, בחלק מהתנועה (העלייה השנייה במתח, מהמינימום למקסימום). באדום, מסומנות 3 נקודות אי הרציפות הברורות ביותר בגרף.*

1. **דיון**

התוצאות של חקר הלולאות בחומרים פרומגנטיים עולות בקנה אחד עם התיאוריה המקובלת בתחום; התיאוריה צופה יחס לינארי בין השדה המגנטי הכולל לשדה המגנטי החיצוני (במצב של סטורציה מגנטית), ואכן התקבלה התאמה טובה מאוד ליחס הלינארי הצפוי. כמו כן, התיאוריה צופה שהשדה המגנטי הכולל תלוי ביחס ישר בשטח החתך של החומר הפרומגנטי המונח במעגל המגנטי ואכן מבחינה איכותית התקבלה התאמה טובה לציפייה התיאורטית הנ"ל.

התוצאות של חקר לולאת החשל של גביש גרנט פרימגנטי תומכות באפקט ברקהאוזן; ניתן להיווכח (ראו גרף 3.7) כי ישנן נקודות אי רציפות רבות לאורך התנועה, כפי שחוזה האפקט. כמו כן, מבחינה איכותית קל לראות בתמונות שהתקבלו מהמצלמה כי לעיתים תזוזה קטנה מאוד בשדה המגנטי החיצוני יצרה שינוי גדול יחסית בהתפלגות הדומיינים המגנטים (ראו תמונה 5.7 בנספחים).

עם זאת, לולאת החשל שהתקבלה מעקומת התפלגות הדומיינים המגנטיים לעומת המתח (שפרופורציוני לשדה המגנטי חיצוני) איננה לולאת חשל קלאסית; ההבדלים הבולטים בינה לבין לולאה קלאסית – היא צרה מאוד, איננה סימטרית, ונחתכת במרכזה.

הסברים משוערים להבדלים הנ"ל בצורת הלולאה:

רוחב הלולאה - כיוון שאין בידינו נתונים אודות הקשיות המגנטית של הגביש, אנו מניחים כי הוא רך מאוד מבחינה מגנטית, דבר הגורם לכך שהלולאה צרה מאוד.

א-סימטריה – ראשית, אפקט ברקהאוזן גורם לקפיצות אי רציפות 'רנדומליות' בנתונים, וכתוצאה מכך שובר את הסימטריה של הלולאה. ככל הנראה בלקיחת דגימות בצפיפות רבה יותר, היינו יכולים להתגבר על כך. כמו כן, בבואנו לנתח את הדומיינים המגנטים, הסתכלנו באזור ספציפי עד מאוד, כלומר ה'ראייה' שלנו בתוך החומר הצטמצמה לחלק קטן מהחומר בלבד. ייתכן שחלק זה אינו מייצג כהלכה את התנהגות החומר כולו, ומכאן הפערים.

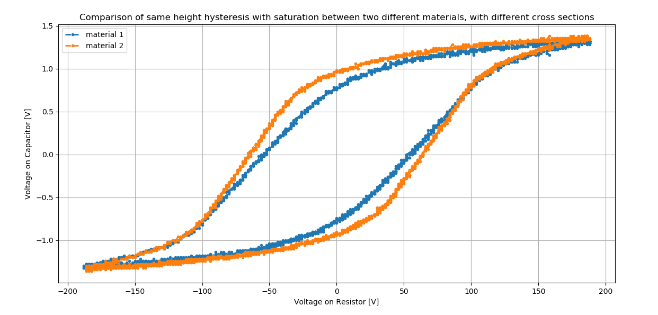
חתך במרכז הלולאה – על פי מחקר שביצעו M.Yoneda ושותפיו בשנת 2015, בפרימגנטים מסוימים ישנה תופעה של Double Loop. כפי שהשם רומז, הלולאה במקרים אלו נראית כ-2 לולאות נפרדות הנחתכות במרכז. תופעה זו איננה מוסברת תיאורטית באופן נהיר, אך ניכרת בבירור מסימולציות נומריות של לולאות חשל בחומרים פרימגנטיים (ראו ביבליוגרפיה).

בסך הכל, קיבלנו תוצאות שעולות בקנה אחד עם התיאוריה המקובלת, למעט גביש הגרנט שמגיב לשדה המגנטי החיצוני בצורה מעט שונה מהמצופה. להערכתנו, בעבודה עם חומר פרימגנטי שקשיותו המגנטית ידועה מבעוד מועד, ניתן להעריך את רוחב הלולאה הצפוי באופן מדויק הרבה יותר. כמו כן, אנו מעריכים כי צפיפות מדידות גבוהה יותר ומיצוע על פני אזורים שונים בפרימגנט (במקום התמקדות באזור יחיד) יעלו את רמת הדיוק של הלולאה המתקבלת בצורה ניכרת.

1. **נספחים**

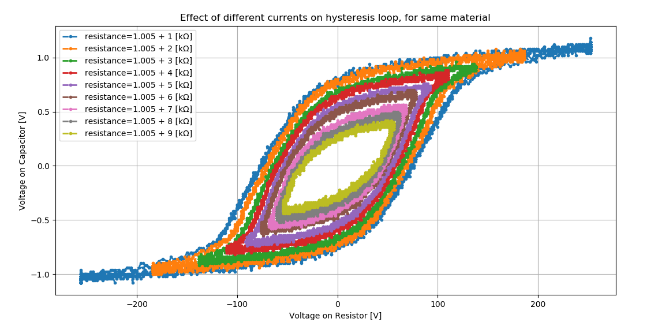
בכדי לבדוק את השערותינו ואת התיאוריה הרלוונטית לצורך הניסויים המרכזיים שביצענו, עשינו מספר מדידות שונות שאינן רלוונטיות לניסוי המרכזי, אך מוצגות להלן.

ראשית, ביצענו השוואה בין הקשיות המגנטית של חומרים שונים (ראו גרף 5.1).



*גרף (5.1): המתח על הקבל (פרופורציוני לשדה המגנטי הכולל) כתלות במתח על הנגד (הפרופורציוני לשדה המגנטי החיצוני), עבור שני חומרים שונים, בעלי שטחי חתך שונים, אשר לולאות החשל שלהן דומות בגובה. הדבר מאפשר להעריך היטב את הבדלי השטח ביניהם, ואכן ניתן להתרשם שהחומר שהגרף שלו מסומן בצבע כחול הינו רך יותר מבחינה מגנטית מאשר החומר שצבע הגרף שלו כתום.*

לאחר מכן, ביצענו השוואה בין תגובת לולאות החשל לשינוי הזרם במעגל, בין 3 חומרים שונים (ראו גרפים 5.2, 5.3, 5.4).

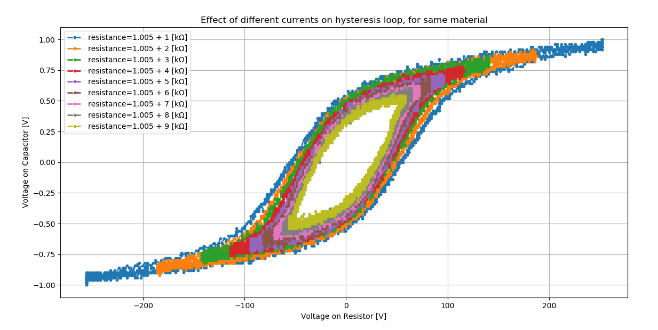


*גרף (5.2): לולאות חשל כתלות בעוצמת הזרם במעגל, עבור חומר א'.*

Chart

Description automatically generated

*גרף (5.3): לולאות חשל כתלות בעוצמת הזרם במעגל, עבור חומר ב'.*



*גרף (5.4): לולאות חשל כתלות בעוצמת הזרם במעגל, עבור חומר ג'.*

ניתן להתרשם מכך שחלק מהחומרים הגיעו לרוויה/סטורציה מגנטית עבור הפרמטרים שקבענו, וחלקם לא. כמו כן, צורות לולאת החשל ושטחן שונות מאוד.

להלן גרף לולאת החשל שהתקבלה בחלק השני של הניסוי, עבור גביש הגרנט הפרימגנטי, עם שגיאות (ראו גרף 5.5); השגיאות הוערכו לפי השגיאה הממוצעת באלגוריתם קביעת הסף שהשתמשנו בו – בממוצע 2% שגיאה, ולפי שגיאת מכשיר מדידת המתח (ראו תמונה 5.6).

Chart, scatter chart

Description automatically generated

*גרף (5.5): לולאת החשל של גביש הגרנט, שנמדדה בחלק ב' של הניסוי, בצירוף שגיאות.*

A screenshot of a computer

Description automatically generated

*תמונה (5.6): דף מתוך המדריך למשתמש של האוהממטר בו השתמשנו למדידת ההתנגדויות במעגל.*

A picture containing outdoor

Description automatically generated**

*תמונה (5.7): צילומי המיקרוסקופ, עבור שכבה 2. שני הצילומים בהפרש מתח של 0.4 וולט. ניתן לראות בבירור אזור שלם בתמונה הימנית שנעלם בתמונה השמאלית – דוגמא ברורה של אפקט ברקהאוזן.*

להלן קטע קוד המייצר את לולאת החשל מהתמונות שצילמה המצלמה:

def analyze\_barkhausen\_effect():  
 layers = ["layer1", "layer2"]  
 stages = ["up", "down", "up2"]  
 for layer in layers:  
 results = dict()  
 for stage in stages:  
 directory = "data\\{0}\\{1}".format(layer, stage)  
 for filename in os.listdir(directory):  
 if os.path.splitext(filename)[1] != ".bmp":  
 continue  
  
 # determine threshold  
 if "-" in filename:  
 threshold = 0.37  
 else:  
 threshold = 0.4  
  
 voltage = os.path.splitext(filename)[0]  
 magnetization = calculate\_magnetization(os.path.join(directory, filename), threshold)  
 if voltage not in results:  
 results[voltage] = [magnetization]  
 else:  
 results[voltage].append(magnetization)  
 graph\_results\_barkhausen(results)

def calculate\_magnetization(image\_path, threshold):  
 image = read\_image(image\_path, 1)  
  
 imdisplay(image\_path, 2)  
 imdisplay(image\_path, 1)  
 plot\_histogram(image, image\_path)  
  
 histogram, bin\_edges = np.histogram(image, bins=256, range=(0.0, 1.0))  
 plt.plot(bin\_edges[0:-1], histogram)  
 plt.title("Grayscale Histogram")  
 plt.xlabel("grayscale value")  
 plt.ylabel("pixels")  
 plt.xlim(0, 1.0)  
 plt.show()  
  
 black = (np.asarray(image) < threshold).sum()  
 white = (np.asarray(image) >= threshold).sum()  
 white\_percentage = white \* 100 / (black + white)  
  
 return white\_percentage

1. **ביבליוגרפיה**

1. M.Yoneda, S.Obata, M.Niwa, Simulation of the Magnetic Hysteresis Loop in Ferrimagnetism (2015)

2. Prof. G. Beach, Hysteresis in ferromagnetic materials (2013)

3. J.F. Dillon Jr., Observation of Domains in the Ferrimagnetic Garnets by Transmitted Light (1958)

1. פאראמגנטים ודיאמגנטים הינם חומרים אשר תכונת המגנטיות שלהם נגרמת רק בהשפעת שדה מגנטי חיצוני, והשדה המגנטי הפנימי שנוצר בהם קרוב מאוד לשדה המגנטי החיצוני (פרמיאביליות אופיינית של קצת יותר/פחות מ-1). [↑](#footnote-ref-1)
2. <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic-core_memory> [↑](#footnote-ref-2)
3. ראו משוואה 1.5 [↑](#footnote-ref-3)
4. מומנט דיפול מגנטי היא תכונה אשר מאפיינת כל חלקיק המרכיב חומר, הקשורה לאוריינטציה של אותו אטום, וכמו כן לספין שלו. [↑](#footnote-ref-4)
5. שטף מגנטי הינו גודל המתאר את כמות השדה המגנטי העוברת ביחידת שטח ליחידת זמן. [↑](#footnote-ref-5)
6. קשיות מגנטית של חומר מתארת את יכולתו לשמור על מגנטיזציה בהיעדר שדה מגנטי חיצוני. [↑](#footnote-ref-6)