

**התפתחות שדה חשמלי בחוטים מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות  
בנוכחות שדה מגנטי חילופי מקביל למישורי ההולכה**

**עבודה זו מוגשת כחלק מהדרישות לשם קבלת תואר מוסמך  
במחלקה לפיזיקה של אוניברסיטת בר-אילן**

**מגיש:**

**שמואל אזולאי**

**רמת גן 2006**

עבודה זו נעשתה בהדרכתו של פר' יוסף  
ישורון, המחלקה לפיסיקה אוניברסיטת  
בר אילן, רמת-גן.

תודתי העמוקה לפרופ' יוסף ישורון על הדרכתו ותמיכתו בכל שלבי עבודה זו.  
תודה לד"ר אלכסנדר פרידמן וד"ר שוקי וולפוס על השקעתם הרבה והנכונות  
לעזור בכל עת. תודה לפרופ' בוריס שפירא על הייעוץ, רעיונותיו העשירים ועזרתו  
הרבה.

הנני רוצה להודות מקרב לב לצוות מעבדתי: ד"ר פאינה קופונסקי, ד"ר בינה  
קלינסקי, פרופ' משה סינאני, מנחם כץ, יוסי עדני, דורון בר-נס, וגרגורי לוקובסקי,  
איליה סושניקוב ואברהם אוקסוסמן אשר סיפקו אווירה תומכת ומקצועית  
בתקופת המחקר. תודה מיוחדת לעמיתי למעבדה ולדיסלב רוטברג וישי ברונקנטל  
ששיחותינו חידדו וליבנו את הבנתי בפיזיקה של מוליכי על.

עבודה זו בוצעה במעבדה הלאומית למוליכות על שבמחלקה לפיסיקה  
באוניברסיטת בר-אילן.

תודה לצוות המחלקה: פרופ' יצחק רבין, פרופ' ליאוניד בורלשקוב, רחל רוטברג,  
ושרה ביאלקוביץ'.

תודתי הרבה להורי ומשפחתי על  
התמיכה הרבה.

ותודה לדנה על תמיכתה ללא  
סוף.

# **התפתחות שדה חשמלי בחוטים מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות בנוכחות שדה מגנטי חילופי מקביל למישורי ההולכה**

עמוד

|    |                                                          |
|----|----------------------------------------------------------|
| 2  | 1. הקדמה                                                 |
| 4  | 2. מבוא                                                  |
| 6  | 2.1. צפיפות זרם קריטי                                    |
| 7  | 2.2. חוטי BSCCO מסחריים                                  |
| 9  | 2.3. מדידות מגנטיות ומדידות הולכה חשמלית                 |
| 11 | 3. סקירת תוצאות קודמות                                   |
| 24 | 4. מטרות המחקר                                           |
| 25 | 5. מערכת המדידה                                          |
| 31 | 6. תוצאות                                                |
| 32 | 6.1.1. מדידות מתח חשמלי ממוצע, עקומות מתח זרם            |
| 39 | 6.1.2. תלות השדה החשמלי באמפליטודה ותדר השדה המגנטי      |
| 43 | 6.2.1. מדידות התפתחות השדה החשמלי בזמן                   |
| 49 | 6.2.2. ניתוח האות החשמלי התלוי בזמן                      |
| 51 | 6.3.1. מדידות פרופיל שדה מגנטי לוקלי במערכת מגנטו-אופטית |
| 56 | 7. דיון                                                  |
| 61 | 8. סיכום                                                 |
| 62 | 9. ביבליוגרפיה                                           |

נספח א

# 1. הקדמה

השימושים הנוכחים והעתידיים של מוליכי-על הוותיקים ומוליכי-העל בטמפרטורות גבוהות (HTS) הם מרובים ומגוונים הודות ליכולתם לשאת זרמים גדולים מבלי לייצר שדה חשמלי. למשל, בתצורת סליל ביכולתם לייצר צפיפות שטף מגנטי הגדולה לאין ערוך מזו המתקבלת מסלילים המיוצרים מחוטים סטנדרטיים (כגון חוטי נחושת). טמפרטורות המעבר למצב מוליך-על של HTS הם בסביבות 100 מעלות קלווין. גורם זה מאפשר קירור ה-HTS על ידי חנקן נוזלי ומקררים במעגל סגור. לפיכך, מוליכי-על HTS נראים מתאימים לשימושים בהתקנים בהם נדרשים זרמים חזקים ו/או שדות מגנטיים גבוהים.

הבעיה העיקרית המונעת את התפשטות ה-HTS לשימושים נרחבים היא הפגיעה בתכונת העל-מוליך בסביבות שדות מגנטיים. מוליכי-על מאבדים את תכונתם העיקרית ומתחילים לפתח שדה חשמלי כאשר הם חשופים לשדות מגנטיים. אך כאן יש חשיבות רבה לאופי השדה המגנטי. שדות מגנטיים ישרים (DC Fields) משפיעים על התכונות החשמליות הרבה פחות מהשפעת שדות מגנטיים חילופיים (AC Fields). כמו כן, יש חשיבות לכיוון בו מופעל השדה המגנטי ביחס למוליך-על; מכיוון ש-HTS הם חומרים בעלי אניזוטרופיה גדולה, לשדות מגנטיים בעלי אותה עוצמה תהיה השפעה שונה כאשר יופעלו בכיוונים שונים ביחס לצירים הקריסטלוגרפים של החומר.

סלילים הבנויים ממוליכי-על מתוכננים לשאת זרם מקסימאלי בנפח מינימאלי. סלילים אלו בנויים כך שהשפעת השדות המגנטיים העצמיים יהיו מינימאליים. עבודות קודמות בגבישים יחידים הראו כי לרכיב השדה המאונך בלבד השפעה על הזרם הקריטי במוליכי-על HTS ולפיכך, באופן טבעי, בתכנון סלילי HTS נלקח עד כה בחשבון רכיב השדה המאונך לחוט בלבד. כאשר עוברים לייצור סלילים המייצרים או חשופים לשדות AC, טבעי היה לחשוב שהנקודות הקריטיות, בהן לשדה יש את ההשפעה הגדולה ביותר, ימשיכו להיות הנקודות בהן השדה המגנטי המאונך מקסימאלי. בעבודה זו אנו מראים לראשונה כי בתנאי עבודה מסוימים לשדה המגנטי המקביל לחוט השפעה חשובה אשר לעיתים אף עולה על זו של השדה המגנטי המאונך. אנו מראים בבירור כי התנהגות החוט תחת השפעת שדה מגנטי חילופי מקביל שונה גם באופן איכותי מהשפעתו של שדה מגנטי מאונך. ההשלכות המעשיות של תוצאות המחקר הן מיידיות. מעתה ואילך יש לקחת בחשבון בכל תכנון סליל HTS הפועל בסביבת שדות מגנטיים חילופיים את השפעת רכיבי השדה המגנטי המאונך והמקביל גם יחד. מכיוון שהנקודות "החלשות" בסליל נקבעות ע"י שני רכיבי השדה, תהליך האופטימיזציה של הסליל הופך להיות מורכב יותר. צורת הליפוף וגיאומטריית הסליל צריכות לקחת בחשבון נקודות אלו. בעבודה זו אנו מביאים דוגמא

במידות שערכנו, הראינו לראשונה שהתנהגות השדה החשמלי בקונפיגורצית השדה החילופי המקבילי שונה באופן איכותי מההתנהגות בכל קונפיגורציה אחרת. כאשר החוט חשוף לשדה מאונך, התפתחות המתח החשמלי כתלות בזרם היא מעריכית עם חזקה גבוהה, כאשר הפרמטרים של השדה החיצוני משנים כמותית בלבד את תלות זו. לעומת זאת, בשדה מקביל התמונה השתנתה בצורה איכותית ולא ניתן עוד לתאר את התלות כמעריכית. בעבודה זו הרחבנו את תחום המדידות של עקומות זרם-שדה בשדה מגנטי חילופי ואפינו בהרחבה את התנהגות החוט והתפתחות השדה החשמלי בו. התוצאות מצביעות על כך שקיים מנגנון אלקטרו-מגנטי המייצר את השדה החשמלי הנמדד. מנגנון זה שונה מפעולה פשוטה של כח לורנץ על קווי השטף הלכודים. ניתוח התוצאות במסגרת מודלים שונים מראה כי תנועת קווי השדה החילופי המקביל תחת חוסר הסימטריה הנובעת מהזרם DC היא האחראית להתפתחות השדה החשמלי.

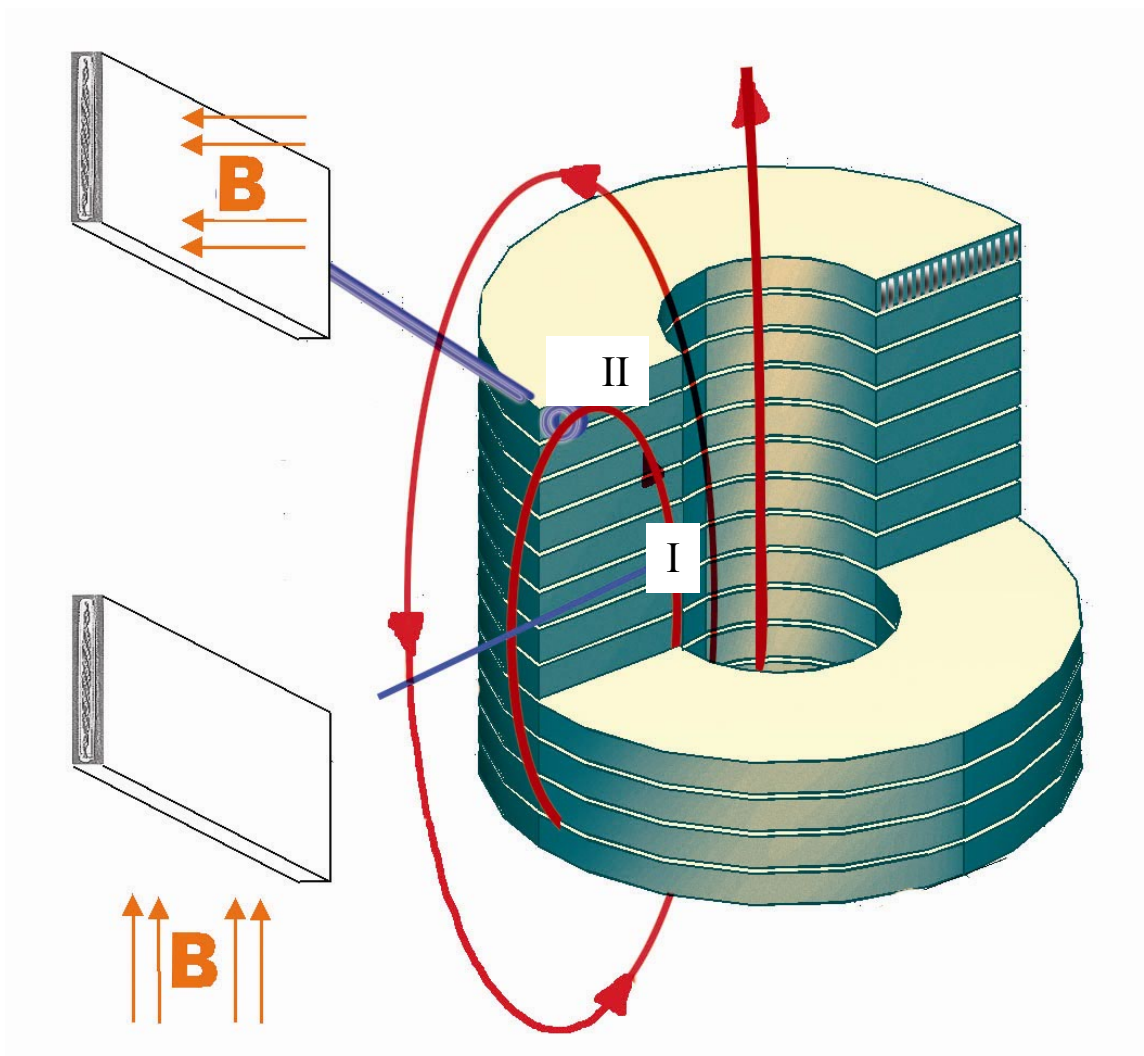
השדות החילופיים בהם השתמשנו היו בעוצמה 0-500 G ובתדרים 0-1000 Hz, ובזרמים עד 180 A, השתמשנו בחוטים מסחריים של חברת - American Superconductor co. (ASC). כל המדידות בוצעו בטמפרטורה של 77 K (טמפרטורת חנקן נוזלי).

חקרנו את השדה החשמלי המתפתח בחוט בכמה אופנים כולל הצגה חדשה, שלא פורסמה עד היום, של האות החשמלי המתפתח במוליך-על התלוי בזמן. השיטה כוללת שילוב של מדידה ממוצעת של שדה חשמלי כתלות בזרם, דהיינו עקומת E-I, ביחד עם מדידות רגעיות של המתח כתלות בזמן, דהיינו  $E(t)$ . שילוב זה נותן הבנה עמוקה יותר של התוצאות. בנוסף חקרנו את פרופילי השדה המגנטי הלוקאלי בדגם כאשר הוא חשוף לשדה מגנטי חילופי מקבילי. מצאנו התאמה מדויקת של התנהגות השדה החשמלי לנוסחה המוצעת על ידי מודלים תיאורטיים קיימים. בעבודה זו נציג שלוש תיאוריות שהועלו על מנת להסביר תופעות מקבילות שנמדדו בגבישים יחידים מוליכי-על. השלוש הן: צעידת פלקסונים, נענוע פלקסונים והתנגדות דינמית, נדון במודלים אלו בהמשך. התוצאות שקיבלנו עד היום מראות כי מודל ההתנגדות הדינמית הוא המתאים ביותר להסביר את התופעה בחוטים. מחקר זה פורסם לאחרונה ומובא בנספח א.

## 2. מבוא

איבודי אנרגיה במוליכי-על כתוצאה מחשיפה לשדה מגנטי נחקרים מזה עשרות שנים. בעשור האחרון כתוצאה מגידול ביצור חוטים מוליכי-על תופס מחקר זה תאוצה באופן כללי ובפרט מחקר המתייחס להשפעת שדה חילופי (AC). התקני חשמל רבים המיועדים למוליכי-על מתוכננים כעת לטמפרטורות גבוהות תודות לצפיפות הזרם הגדולה של מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות. טמפרטורות גבוהות אלו הן טמפרטורות בהן ניתן להשתמש בחנקן נוזלי או במקרים בקירור יבש (77-20 [K]). עד לפני כ-18 שנה נפוצו בעולם רק מוליכי-על בטמפרטורות נמוכות (LTS) בהם היישומים במוליכים אלו חייבו שימוש בקירור מבוסס הליום נוזל. שיטת הקירור הזו היא יקרה ומסורבלת. לעומתם, HTS מאפשרים סביבת עבודה קלה ונוחה יותר. אולם, HTS הם חומרים בעלי אניזוטרופיה גבוהה אשר תכונת ההולכה שלהם מושפעת מאוד משדות מגנטיים ומהכיוון שהם מופעלים בו. לדוגמה, בסליל מוליך-על המיוצר מחומרים מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות השדה המגנטי העצמי בסליל חזק והשפעתו על תכונות ההולכה של מוליכי-על אינה ניתנת להזנחה. כאשר עובדים בסביבת עבודה בה קיימים גם שדות חלופיים התמונה הולכת ומסתבכת הרבה יותר שכן שדות חלופיים קטנים יחסית (50-100 G) יכולים להוריד את הזרם הקריטי בסדר גודל ואף יותר.

כמו שצינו בהקדמה, שדה מגנטי מקטין דרמטית את הולכת-העל ב HTS. אם כך השדה העצמי של סליל הוא גורם קריטי לעוצמת השדה המקסימאלי שיכול לייצר הסליל וליציבותו של שדה זה. השדות העצמיים של סליל בצורת סילנאיד טיפוסית מאוירים בתמונה מס' 1. בתמונה זו ניתן לראות באופן איכותי שקווי השטף של הסליל חודרים לתוכו במקומות שונים. השדה העצמי בסלילים הוא בעל עוצמה מקסימאלית במרכז הדפנות הפנימיים של הסליל, נקודה I בתמונה 1. בתכנון סלילים מוליכי-על עוצבו הסלילים כך שאוריינטציית השדה במרכז הסליל מכוונת במקביל לפני השטח של החוט. עיצוב בצורה זו נגרר כתוצאה מאילוצים מכאניים של החומרים בהם השתמשו לייצור חוטים HTS. על אילוצים אלו ועל תכונות האניזוטרופיה של החוטים נרחיב בהמשך בפרק 2. 3. בבניית סלילים לשימוש בסביבת DC השדה המקבילי כמעט ואינו משפיע על תכונות ההולכה ואף ניתן להזנחה, בעוד שהשדה המאונך לפני הדגם מקטין באופן משמעותי את יכולת ההולכה של החוט [1]. ועל כן האזור בסליל שבו השדה העצמי משפיע בצורה החזקה ביותר הוא היכן שהשדה המאונך לפני הדגם חזק ביותר. אזור זה נמצא בחלק העליון של הסליל, נקודה II בצור 1. והוא נלקח בחשבון כאשר מגדירים את הנקודה הקריטית בסליל. כאשר החלו לתכנן סלילים לסביבת עבודה AC טבעי היה לחשוב שהנקודה הרגישה בסליל היא אותה אחת כמו בסלילי DC, במרכז החלק העליון של הסליל. במדידות שביצענו גילינו שהשדה המקבילי החילופי משפיע באותה המידה בתחומים מסוימים ואף יותר על תכונות ההולכה של השדה. בסלילים המיועדים לסביבת AC הנקודה שבה יש לשדה העצמי את ההשפעה הגדולה ביותר, קרי הנקודה הקריטית לסליל, היא דווקא במרכז הדפנות הפנימיים של הסליל הנקודה I.



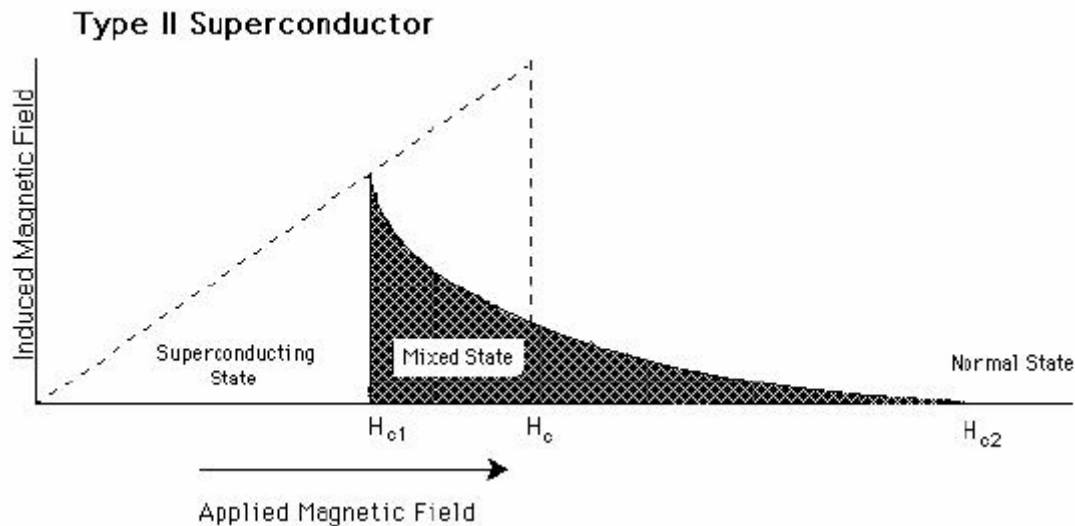
**תמונה 1.** סליל העשוי מפנקייקים המורכבים מכריכות חוטים מוליכי-על. בתוך כל פנקייק כרוכים חוטים ממוליך-העל ומחוברים בקצוותם לפנקייק הבא מתחתיו/מעליו. הקווים האדומים הם תיאור סכמתי של קווי השטף המגנטי בסליל. ניתן לראות את ההבדל בין הכיוונים השונים של השדה המגנטי ביחס לפני החוט.

באותן המדידות גילינו בנוסף שהשפעת השדה החילופי המקבילי על חוטי  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8-\delta}$  ( $\text{Ag/BSCCO}$ ) שונה איכותית מכל השפעה בתצורה אחרת של השדה המגנטי על פני כל קונפיגורציות אחרות. נתון זה חייב אותנו למצוא הסבר שונה למקור השדה החשמלי המתפתח כתוצאה מהפעלת השדה החילופי המקביל. להלן נקדים ונסביר מעט מהמושגים המעורבים במוליכי-על הקשורים ישירות למדידות שלנו.

## 2. 1. צפיפות זרם קריטית



ישנם שני סוגים של מוליכי-על: TYPE-II & TYPE-I. ההבדל העקרוני ביניהם הוא בחדירת השדה המגנטי אל תוך מוליך-העל. מוליכי-על מ TYPE-I אינם חדירים לשדה מגנטי הקטן מ  $H_c$ . ומעל שדה זה החדירה מלאה והומוגנית ומוליך-העל מאבד מתכונותיו. לעומתם, מוליכי-על TYPE-II, ש HTS נכללים בקטגוריה זו, חדירים חלקית לשדה מגנטי מעל השדה הקריטי הראשון ( $H_{c1}$ ) [2]. רק מעל השדה הקריטי השני ( $H_{c2}$ ) נעלמת לגמרי תכונת הולכת-העל והחומר הופך למוליך רגיל. עקומת מגנטיזציה סכמתית מופיעה בתמונה 2. חדירה חלקית זו מתבצעת על ידי פלקסונים. פלקסון הוא קוונטה של שטף מגנטי הנכנס אל תוך מוליך-העל. כאשר מוליך-על כולל בתוכו פגמים "יעדיפו" הפלקסונים "לשבת" בתוכם שכן אין צורך להשקיע אנרגיה על מנת להפוך אזור זה לנורמלי (מרכז הפלקסון הוא אזור נורמלי). ניתן לראות אזור זה כבור פוטנציאל שבו לכוד הפלקסון [3]. כאשר זורם זרם במוליך-על נוצר כוח לורנץ על הפלקסון וכאשר גובר כוח זה על כוח הלכידה של בור הפוטנציאל יוצא הפלקסון מבור זה ומתחיל לנוע. תנועה זו מלווה בשדה חשמלי על פי משוואת Maxwell ( $\nabla \times E = -\partial B / \partial t$ ). ככל שהמהירות של קווי השטף המגנטי בדגם עולה, עולה גם כן המתח החשמלי. מהירות התנועה יכולה להשתנות בגלל מספר גורמים: טמפרטורה, צפיפות הפלקסונים, הזרם במוליך ומספר בורות הלכידה (מספר "הפגמים" בחומר). הזרם בו גובר כוח לורנץ על כוח הלכידה מוגדר להיות הזרם הקריטי.

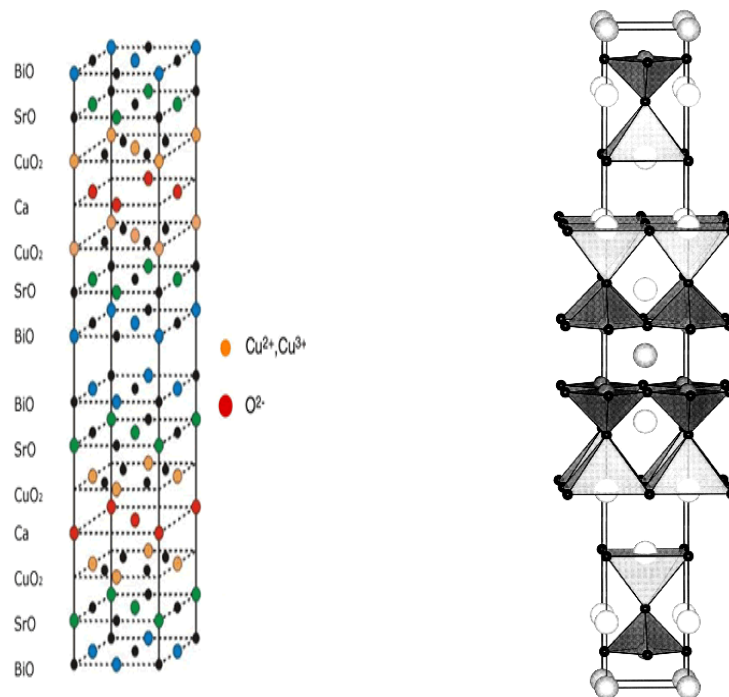


**תמונה 2.** עקומת מגנטיזציה של מוליכי-על מסוג ראשון וסוג שני Type I & Type II superconductor

ניתן לראות בתמונה את השבירה המיידית של הולכת-על במוליכי-על מסוג ראשון (הקו המקווקו). לעומת האזור המושחר המצויר לאחר  $H_{c1}$  בו קיימת הולכת-על אך היא דועכת עד ל  $H_{c2}$ . במצב זה יש חדירת שדה מדורגת.

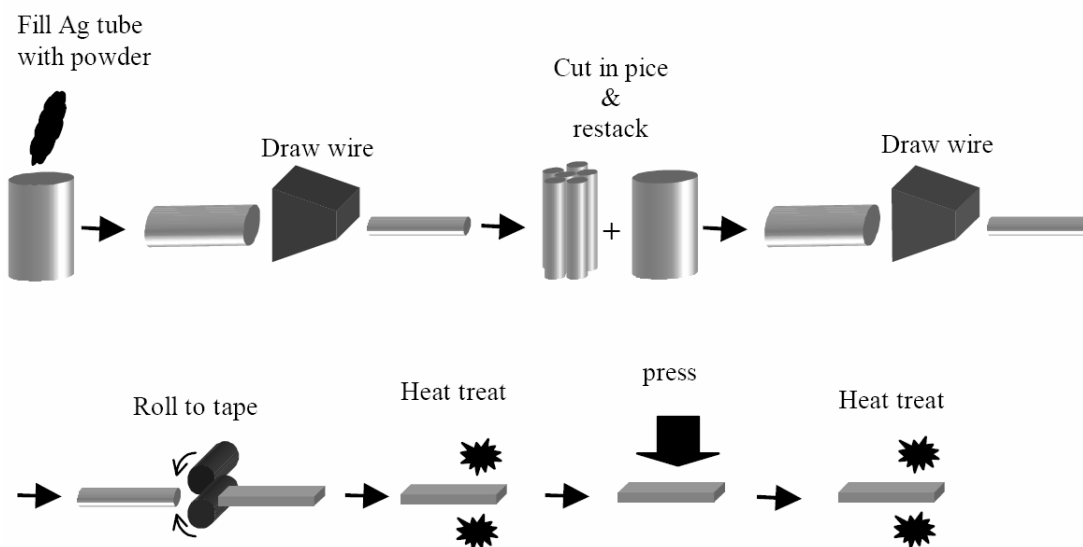
## 2.2. חוטי BSCCO מסחריים

החל משנת 1987 בה נתגלו חומרים מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות (HTS) [4] נוצר הצורך בחוטי HTS מסחריים. הדרישות מהחומרים הם אמינות, כושר נשיאת זרם גבוה, עמידות גבוהה בשדה מגנטי חיצוני ויכולת עיבוד מכאנית. החוט שנחקר בעבודה זו הוא חוט "הדור הראשון" BSCCO 2223 Tape [5]. חומר ה-BSCCO הוא חומר קרמי שביר שאינו ניתן לכיפוף, בעוד חוט מוליך זרם צריך שתהיה בו גמישות על מנת שיהיה אפשר לייצר ממנו סלילים. בנוסף, BSCCO הוא חומר בעל אניזוטרופיה גדולה ועל כן אופן הכנת החוט, כפי שיוסבר בהמשך, חייב לקחת בחשבון את האניזוטרופיה של החוט. הגורם לאניזוטרופיה של ה-BSCCO הוא מבנהו הגבישי. תא היחידה של BSCCO הוא בצורת פרובסקיט perovskite. חומרים אלו מאופיינים על ידי מבנה תיבתי כאשר בקצוות המלבן ישנן מולקולות נחושת, כך שעל כל אטום נחושת יושבת פרמידה כפולה של חמצנים. בין פאה אחת של נחושת לשניה נמצאים הביסמוט, הסטרונטיום והקלציום [6], כנראה בתמונה 3. הולכת העל מתבצעת בעיקר במישורי הנחושת [6] המוגדר להיות מישור a-b. הציר המאונך למישור זה הוא ציר c. תכונה זו גורמת לאניזוטרופיה חשמלית ומגנטית של החומר שיכולה להגיע ל 250 [7].



**תמונה 3.** מבנה מולקולארי של חומר ה-BSCCO 2223. בתמונה נראית חוסר הסימטריה של החומר. הולכת העל מתבצעת בשכבות, כלומר במישור a-b. הציר המאונך למישור זה הוא ציר c.

אחד הגורמים העיקריים לקושי שבהכנת חוטים מ BSCCO הוא הצורך לסדר את כל הגרגירים כך שציר c של כל הגרגירים יצביעו לאותו הכיוון. לאחר הכנתו החומר נראה כאבקת גרגירים כשכל גרגיר הוא גביש יחיד. רוב הגרגירים שנוצרים במהלך החימום של התערובת הכימית מקבלים צורה של פלטה, שרוחבה ואורכה הוא מישור a-b, וגובהה הוא ציר c הגבישי. מכניסים את החומר לתוך צינור כסף ארוך, ומבצעים דחיסה בחום. תהליך הדחיסה בחום מבטיח שהגרגירים יסתדרו זה על גבי זה עם מקסימום אוריינטציה משותפת לציר c [8]. כעת לוקחים מספר צינורות שהוכנו באותה השיטה ומכניסים לתוך צינור כסף גדול יותר. ריבוי צינורות הכסף הוא המנגנון ההנדסי המאפשר דחיסה עם אוריינטצית כיוון הטובה ביותר של הגרגירים, ובנוסף חוטיי הכסף משמשים כ bypass כאשר חומר מוליך-העל עובר למצב נורמלי. בחוטים שאנו השתמשנו מכינים 55 צינורות כאלו ומכניסים אותם ידנית אל תוך צינור נוסף של כסף. לאחר חימום ודחיסה מושכים את הקצה של החוט בין מכבש גלילי. ולכן במהלך הדחיסה מסתדרים רוב הגרגירים עם אוריינטציה משותפת של ציר c הגבישי. לנתון זה חשיבות קריטית ביכולות ההולכה של חוטים אלו מכיון שהולכת-העל היא בעיקר דרך מישור a-b, ככל שאוריינטצית הגרגירים תהיה טובה יותר כן הולכת-העל תהיה טובה יותר. תהליך ההכנה מאויר בתמונה 4.



**תמונה 4.** תהליך הכנת החוטים רבי הסיבים (multifilament) בשורה הראשונה מתואר הכנת סיב יחיד וכן הכנסת סיבים רבים לתוך צינור. דוחסים את הצינור במכתש גלילי על מנת לתת לחוט את צורתו המלבנית, שורה שנייה [9].

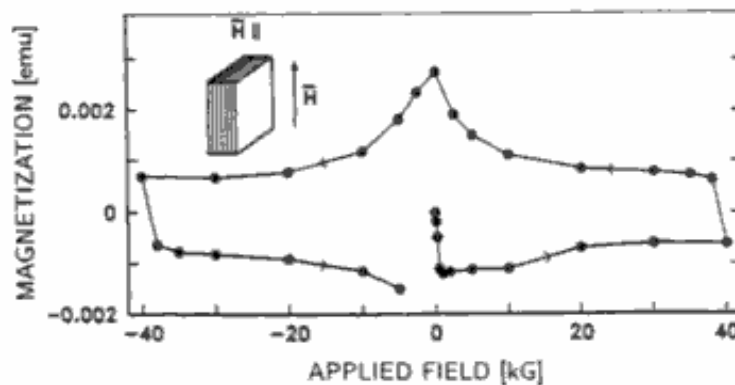
תהליך יצירת החוט גורר את אחת התכונות המגבילות של חוטים מוליכי-על. כאשר רדיוס העיקום קטן מ 70 מילימטר, נוצרת בחוט דפורמציה של הגרגירים והאוריינטציה המשותפת בציר c של הגרגירים קטנה [10]. כתוצאה מכך נמדדת ירידה ביכולת הובלת הזרם. חברת ASC, החברה המובילה בשוק החוטים מוליכי-על, משווקת במשך שנים את החוט הזה. חוט זה לוקח חלק במספר הולך וגדל של התקנים אלקטרו-מגנטיים.

## 2.3. מדידות מגנטיות ומדידות הולכה

### חשמלית

בחקר תכונות ההולכה במוליכי-על ישנם שלושה אפיקי מדידה עיקריים: מדידות מגנטיזציה, מדידות מגנטיות לוקאליות ומדידות הולכה חשמלית (Transport). בפרק זה נתאר מדידות מגנטיות ומדידות הולכה חשמלית ואת ההבדלים בניהן. בחרנו לבצע את המחקר בשימוש במדידות הולכה חשמלית אך שלושת המודלים התיאורטיים שבחנו פותחו בעקבות תופעות שנמדדו במדידות מגנטיזציה של גבישים יחידים. נקדים ונאמר כי החוט הוא מערכת מורכבת מאוד של גרגירים מוליכי על, כפי שצוין בפרק הקודם, ועל כן התאמה של תיאוריות שפותחו עבור גבישים יחידים לתופעות שנמדדות במדידות הולכה של חוטיים אינה מובנת מאליה. בפרק זה נראה כיצד ניתן ליישם את המודלים שיובאו להלן על מדידות הולכה בחוטיים.

במדידות מגנטיזציה מודדים את המומנט המגנטי,  $M$ , של חומרים מוליכי-על תחת השפעת שדות מגנטיים שונים. ניתוח התוצאות, על פי מודלים המבוססים על מודל Bean [11], מאפשר הערכה של הזרם הקריטי. כאשר מפעילים שדה חיצוני על מוליך-על נוצרת מגנטיזציה הפוכה לשדה המגנטי. תופעה דיאמגנטית זו היא תופעה תרמודינמית של הפאזה מוליכות על. אומנם גם חומרים רגילים מייצרים שדה מגנטי הפוך לשדה החיצוני, אך הזרמים הנדרשים ליצירת מגנטיזציה זו דועכים מהר (Eddy currents). ב Type-II, לאחר השדה הקריטי הראשון, נכנס חלק מהשדה אל תוך הדגם אך לא באופן הומוגני. נוצר גראדיינט שדה מגנטי ועל פי משוואת Maxwell זורם זרם המאונך לכיוון השדה. זרמים אלו נקראים זרמי מיסוך. מודל Bean מניח שצפיפות זרמי המיסוך היא תמיד צפיפות הזרם הקריטי ואיננה תלויה באינדוקציה המגנטית הלוקלית בדגם. הרחבה של מודל Bean לתלות בזמן [12] מניחה צפיפות זרם קריטי ב  $t=0$  אך כתוצאה מאנרגיה אקטיבציה תרמית, פלקסונים עוזבים את בורות הפוטנציאל, שיפוע פרופיל השדה המגנטי בדגם יורד, צפיפות הזרם קטנה ונמדדת רלקסציה בזמן של הזרמים הממסכים. לרוב מדידות המגנטיזציה מתבצעות באופן הבא: מפעילים שדה מגנטי ( $H$ ) על הדגם ומודדים את צפיפות השטף המגנטי ( $B$ ). על ידי שימוש בנוסחה  $B = \mu_0(H+M)$  מוצאים את האינדוקציה המגנטית של הדגם בכל שדה. בודקים את המגנטיזציה בכל שדה בטווח:  $-H_{c2} < H < H_{c2}$ . מדידות אלו מראות, בתחומים מסויימים של טמפרטורה ושדות, לולאת מגנטיזציה לא רוורסבילית המעידה על שטף מגנטי הלכוד בחומר שאינו יוצא גם כשמורידים את השדה. אם נסתכל בתמונה 5, נראה שגם כאשר השדה המגנטי מתאפס עדיין קיים שטף מגנטי לכוד בחומר.



**תמונה 5.** לולאה מגנטית טיפוסית של מוליכי-על. הלולאה מצביעה על כך שיש כאן מערכת בלתי רוורסבילית. רוחב הלולאה מאפשר למצוא את הזרם הקריטי בכל שדה ושדה. ניסוי זה בוצע ב YBCO ב 4K [13].

מדידות הולכה חשמלית, כפי שיורחב בהמשך, הן מדידות המאפיינות את המתח החשמלי הנוצר בדגם כתוצאה מהזרמת זרם חשמלי. בנוסף, ניתן לבדוק את התנהגות תלות זו כתוצאה מחשיפת הדגם לשדות מגנטיים שונים. במדידות אלו נהוג להגדיר זרם קריטי הנדסי והוא הזרם בו מתפתח שדה חשמלי של  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ . מדידות ההולכה בד"כ מתנהלות באופן הבא: מחברים נקודות מגעי מתח לדגם ומזרימים זרמים שונים כאשר בכל זרם מודדים את המתח החשמלי. מכל הנקודות האלו מרכיבים את עקומות המתח זרם (V-I curve) המאפיינות את מוליכי-העל. מלימוד של עקומות רבות שההבדל בניהן הוא עוצמת השדה המגנטי, תדירותו וכיוונו, ניתן ללמוד על המנגנונים המייצרים את השדה החשמלי. עד היום נצפה קשר בין המתח לזרם המתאים לחוק החזקה:  $V/V_0 = (I/I_0)^n$ . לחזקה  $n$  קיימת משמעות פיזיקאלית והיא פרופורציונלית לעוצמת הלכידה הממוצעת של הפלקסונים בחומר [14]. נקדים את המאוחר ונאמר שעקומות V-I שנמדדו במעבדתנו, של חוט מוליך-על החשוף לשדה חילופי המקביל לפני החוט, לא התאימו לקשר החזקה כלל, בשונה מכל קונפיגורציה אחרת.

במדידות מגנטיזציה של גביש יחיד ניתן לראות בבירור פיקים שונים של המגנטיזציה. פיקים אלו יכולים להצביע על מעברי פאזה מסדר שני. מסתבר שהפלקסונים מגלים התנהגות דומה לשריג של אטומים אמיתיים, יש להם מצב מסודר מצב נוזלי ואף מצבים מטהסטאבילים, זכוכיתיים [15]. כל אחת מהקפיצות בלולאת המגנטיזציה מצביעה על מעבר ממצב אחד למשנהו. כאשר באים לחקור מערכת שכזו חוקרים לרוב מעברי פאזה שונים התלויים בטמפרטורות.

מחקרי מגנטיזציה נעשים במספר רב של פרמטרים חיצוניים כגון טמפרטורות שונות שדות שונים וזוויות שונות. אחד המחקרים שפתח בפנינו את החיפוש של מחקרים מקבילים בגבישים יחידים היה המחקר של Zeldov וקבוצתו [16]. קבוצה זו, כפי שנרחיב בפרק הבא, חקרה את השפעת השדה המגנטי החילופי על לולאת מגנטיזציה לאורך ציר  $c$  של גביש יחיד. היא מצאה שקיימת אינטרקציה חזקה בין השדה המקבילי החילופי לשדה המאונך. קשר זה, בין מדידות מגנטיזציה למדידות הולכה, חשוב לנו על מנת להרחיב את תחום הידע שלנו לגבי שאלת המחקר.

### 3. סקירת עבודות קודמות

להלן סקירה של מספר עבודות קודמות שנעשו בנושא תוך ציון הרלוונטיות של כל אחת מהן לעבודתנו, והדגשת ההבדלים ביניהן מבחינת סוג מוליך-העל (LTS או HTS), מבנה הדגם, שיטת הניסוי והגישה העקרונית להסבר התופעה. הסקירה כוללת עבודות תיאורטיות רלוונטיות שהופיעו לאחרונה. עבודות אלו ככלל עוסקות בהתנהגות החומר החשוף לשדות מגנטיים חלופיים. בהמשך נעשה שימוש בעבודות אלו בניתוח התוצאות.

השפעתו של שדה מגנטי משתנה על ההולכה החשמלית במוליכי-על הינה בעיה בסיסית ויישומית המעסיקה חוקרים רבים בעולם. קבוצות מחקר בעלות אוריינטציה יישומית חוקרות את אפשרויות השימוש של מוליכי-על בהתקנים אלקטרומגנטיים שונים. עבור קבוצות אלו, הפרמטר החשוב ביותר, הוא ההספק המתפתח בחוט בתנאים שונים. על כן, מחקרים רבים בודקים את עקומות המתח זרם בטמפרטורות שונות ובחשיפת החוט לשדות שונים. חקר הנתונים הללו מועיל לשם תכנון אופטימאלי של מערכת סלילים מוליכי-על להתקנים שונים כמו, לדוגמה, במתקן ה-saturated core FCL, שנחקר במעבדה שלנו בבר אילן שגם בנתה אב-טיפוס ייחודי.

FCL (Fault Current Limiter) הינו מגביל קצר לזרמים גדולים כגון זרמי רשת החשמל. בזמן קצר יכולים זרמים אלו להגיע למאות אלפי אמפר. מתקן זה מבוסס על העיקרון בו על ליבת ברזל מלופפים שני סלילים. האחד סליל המייצר שדה DC וכך מכניס את הברזל לרוויה. הסליל השני הוא סליל בו זורם זרם AC אותו אנו מעוניינים להגביל בזמן קצר. בזרם נומינלי סליל ה-AC "רואה" ליבה רוויה ולכן העכבה של הסליל קטנה. בזמן קצר הזרמים הגדולים מייצרים שדות גדולים שמוצאים את הליבה מרוויה וכך הסליל מראה עכבה לרשת והעומס נופל על סליל זה [17]. בוחרים דווקא בסליל מוליך-על להיות סליל זה בגלל יכולתו לייצר שדה מגנטי גדול מבלי לדרוש אנרגיה כלל. התקן זה הכולל סליל מוליך-על נקרא: Saturated core superconducting coils FCL [18] אנו צופים שהתקן אלקטרו מגנטי כזה המשלב בתוכו סליל מוליך-על יכנס לשוק כמוצר בשנים הקרובות.

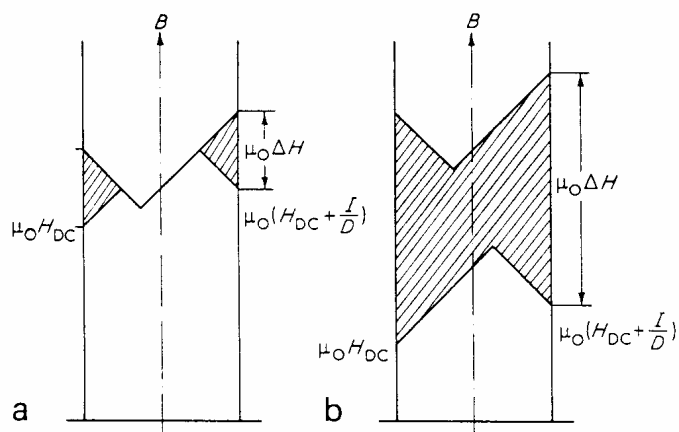
בהתקן כמו ה-FCL הסליל המוליך-על חשוף לשדות מגנטיים חלופיים. לימוד התנהגות החוט במצב בו הוא חשוף לשדה מגנטי מועילה ביותר לתכנון אופטימאלי של ההתקן. למשל, ניתוח השפעת השדות על ההפסדים בסליל יאפשר זיהוי הנקודות בסליל בהם רכיב השדה המקומי גורם להפסד אנרגיה מקסימלי ולחימום מוגבר נקודתית. בנקודות אלו יש לדאוג להסעת

בנוסף להיבט המעשי של התופעה, קיימת השאלה העקרונית איך הפרעה חילופית יוצרת מתח ישר, או איך מתבצעת האינטראקציה בין השדה החילופי, ובפרט השדה המגנטי המקבילי, למערכי הפלקסונים במוליכי-על. למרות מספר הרב של העבודות שהתפרסמו בתחום זה, עדיין חסרות תשובות חד משמעויות להרבה תופעות נצפות, שחלקן יפורטו בעבודה זו. לאחרונה הוצע מודל [19] המנסה להסביר את האינטראקציה בין השדה המגנטי החילופי שבמישור a-b לשדה הישר המכוון לציר c. עבודתנו בוחנת את התאמת תיאוריה זו לשאלת מחקר זה.

שתי גישות עיקריות מנסות להסביר מהו המנגנון העיקרי המייצר שדה חשמלי בחוטים מוליכי-על. המנגנון העיקרי המוצע הוא תנועת קווי השטף המגנטי בתוכם [2]. קיים מנגנון נוסף שחוקרים רבים מאמינים שהוא הגורם למתח החשמלי הנמדד בחוטים ואינו קשור לתזוזת פלקסונים. המנגנון נקרא קשרים חלשים (weak link) [20]. מודל זה מתייחס לעובדה שחוט מוליך-על בנוי ממספר רב של גבישים שהחיבור בין כל גביש לגביש הוא חיבור חלש. המשמעות של חיבור חלש הוא צימוד שני מוליכי-על שבזרמים קטנים מזרם קריטי לא מתפתח שדה חשמלי והם מתנהגים כמוליך-על יחיד, לעומת זרמים הגדולים מזרם קריטי בהם מתחיל להתפתח שדה חשמלי בנקודת הצומת, שאינן מוליכות על במצב זה. סה"כ ההספקים המתפתחים בכל צומת הם הפסדי האנרגיה הנמדדים בחוט מוליך-על המוליך זרם הגדול מהזרם הקריטי. השאלה המרכזית היא האם המתח הנמדד בחוטים החשופים לשדה מגנטי חילופי מקבילי הוא כתוצאה מתזוזת פלקסונים או כתוצאה מהתפתחות מתח בנקודות המפגש בין גרגיר לגרגיר. בעבודה זו ראינו איך מבחינה כמותית ואיכותית התוצאות מתאימות למודלים שפותחו עבור גביש יחיד. על כן, אנו מניחים שניתן להתייחס, בתנאים בהם ביצענו את הניסויים, לחוט מוליך העל כיחידה אחת ואין צורך להתייחס לקשרים חלשים. תוצאות המגנטו-אופטיקה המוצגות בפרק 6.3. מאשרות הנחה זו.

אחת התופעות המעניינות הנחקרת במוליכי-על מזה שנים רבות הינה יצירת מתח DC על ידי הפעלת שדה מגנטי AC [16,21-41]. בתחילה נסקור את העבודות החוקרות מדידות מגנטיזציה של מוליכי-על החשופים לשדות DC ושדות AC. לאחר מכאן נסקור עבודות הנוגעות למדידות מוליכות של חוטים החשופים לשדות חילופיים מאונכים למישור a-b. ולבסוף נראה שעד היום לא נחקרה כראוי השפעת השדה המקבילי AC על תכונות ההולכה של החוטים.

לראשונה הוסברה ההשפעה של שדה חילופי במוליכי-על בטמפרטורות נמוכות (LTS) על



**תמונה 6.** פרופיל שדה מגנטי  $B(x)$  של פלטה אינסופית החשופה לשדה מגנטי  $B_a = B_0 + B_1 \cos(\omega t)$  ודרכה עובר זרם אורכי קבוע DC. שבירת הסימטריה נובעת מהזרם DC הגורם לשדה עצמי חיובי בצד השמאלי של הגרף ושילי בצדו הימני. a- שדה AC קטן משדה חדירה מלאה, c- שדה AC גדול משדה חדירה מלאה [22].

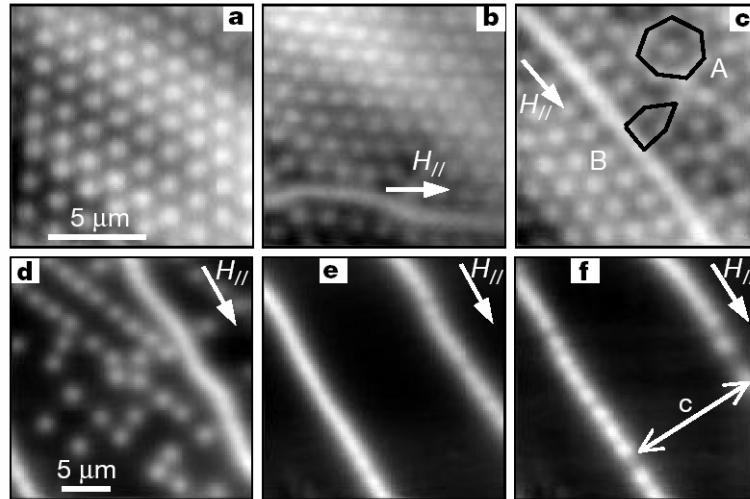
Huebener [24], חקר את השפעתו של שדה מגנטי חילופי קטן הרוכב על שדה DC גדול על המתח החשמלי בשכבות מוליכות על דקות של עופרת, בטמפרטורה 4.2 K, וראה כי שדה מגנטי חילופי קטן, הרוכב על שדה DC גדול, גורם להגברת מתח ה-DC הנוצר. המתח המכסימלי הופיע כאשר זמן המחזור של השדה AC היה שווה לזמן הלוקח לקו שטף לעבור מרחק השווה לאורך הדגם. Huebener הסביר את התופעה בקיומם של זרמי מערבולת המחלישים את אנרגיית הלכידה (pinning) במוליך-על. כתוצאה מכך מתגברת מהירות החדירה של הפלקסונים לתוך מוליך-העל ומפל המתח הישר על פניו עולה.



בעבודה אחרת חקר Huebener [25] את השפעת שדה מגנטי סינכרוניזציה קטן, הרכב על שדה מגנטי DC גדול, על ההתנגדות החשמלית בסרטי  $\text{Mo}_3\text{Si}$  ו- $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_x$  בטמפרטורה של 7.7 K. הוא מצא שבזרמים הקטנים מהזרם הקריטי, שדה משתנה גורם להופעת התנגדות חשמלית קבועה DC, התלויה ליניארית בתדר ובאמפליטודה השדה המגנטי המשתנה. החוקר הסביר את התופעה על סמך מודל התנגדות הדינמית. קרי, בכל מחזור של השדה קווי השטף המגנטי חוצים את הסרט מצד לצד וגורמים להופעת ההתנגדות החשמלית. התנגדות זו מוגדרת כיחס בין השדה החשמלי לצפיפות הזרם האורכי. ההתנגדות החשמלית הופיעה בכל גודל של שדה משתנה, כלומר, שדה הסף שווה לאפס, וזאת בניגוד למודל ההתנגדות הדינמית.

Koshelev [26] צפה שהאינטרקציה בין השדה המאונך לשדה המקבילי בחומר תקטין את כוח הלכידה של הפלקסונים המאונכים למישור a-b, ועל ידי כך יקטן הזרם הקריטי בחומר. במאמר זה הוא נותן הסבר תיאורטי בו הוא צופה שפלקסונים המקבילים למישור a-b (Josephson vortices) יגרמו לתזוזה של הפלקסונים המאונכים למישור a-b. בהמשך לעבודה זו Koshelev מרחיב את התאוריה לתחומי שדות שונים [27]. המסקנה היא שהאנרגיה של פלקסון יורדת כתוצאה מהעובדה שהוא מתעקל היכן שיש פלקסון ג'וספסון.

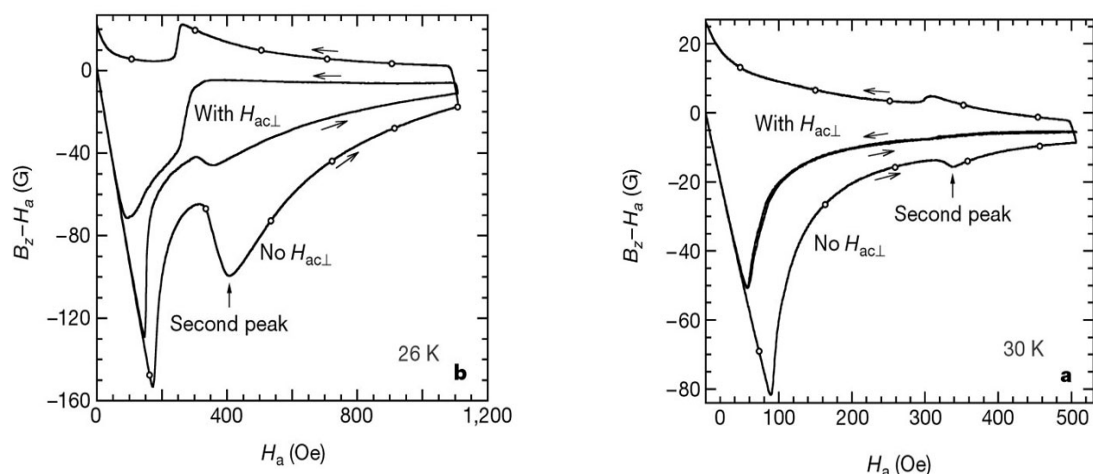
תאורייה זו נתמכה על ידי ניסוי שבוצע על ידי Grigorenko ועמיתיו [28]. על גביש יחיד מסוג BSCCO 2212 הפעילו שדות מגנטיים DC בזוויות משתנות. בחומרים אניזטרופים ניתן להסתכל על שדה המוטת מכיוון לצירים של החומר כסופרפוזיציה של שדות בכיוון הצירים של החומר. בתמונה 7 ניתן לראות את הפלקסונים המאונכים למישור a-b מסתדרים על פלקסוני ג'וספסון. ניתן אם כך לראות שקיימת השפעה הדדית בין השדה המאונך לשדה המקבילי. פלקסוני אבריקוסוב מעדיפים "לרכב" על פלקסוני ג'וספסון, ועל כן המוביליות הגבוהה של הפלקסונים האלו ביחס למצב ללא שדה מקבילי מורידה את הזרם הקריטי בחומר. בגלל מערכי הפלקסונים השונים, אבריקוסוב וג'וספסון, במוליך-על קיימת אינטרקציה בין שדות מאונכים. תוצאה זו מפתיעה כיוון שבגישה הפשטנית אין אינטרקציה בין שדות המאונכים זה לזה.



**תמונה 7.** הדמיית צפיפות השטף המגנטי בחומר BSCCO החשוף לשדה מגנטי בזוויות שונות. בתמונה a רואים את שריג אבריקוסוב ובתמונה e רואים את פלאקסוני אבריקוסוב מסתדרים בשורה על גבי פלאקסוני ג'וספסון. ההדמיה בוצעה בשיטת ה Hall-Probe Scanning, בגביש יחיד BSCCO 2212 בטמפרטורה 81 K [28].

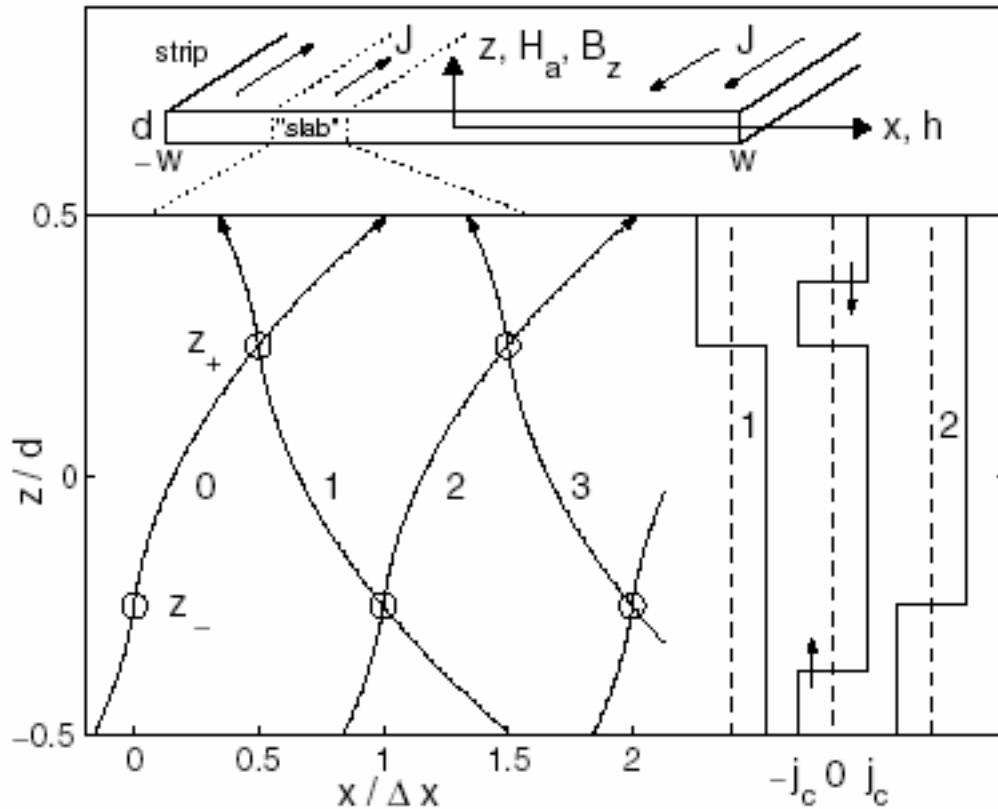
Fisher ועמיתיו [29,30] חקרו את השפעת שדה מגנטי חילופי בטווח האמפליטודות והתדרים 0-1000 Oe ו-30-3000 Hz, על לולאת המגנטיזציה של סרטי YBCO. בניסויים אלו הופעל שדה ישר בניצב למישור הסרט ושדה חילופי בניצב לשדה הישר ובמקביל למישור a-b בהעדר זרם הולכה. החוקרים הראו כי שדה AC גורם להתכווצות לולאת המגנטיזציה עד כדי הדירות (reversibility) של לולאות B-H. כלומר, שדה AC מקטין את זרמי המיסוך עד כדי היעלמותם. את התופעה הנצפית הסבירו החוקרים, בהסתמך על מודל Bean, על ידי הטענה ששדה מגנטי משתנה משרה זרמי מיסוך AC. זרמים אלו יוצרים על השפה שדה מגנטי, שלטענת החוקרים, בממוצע הוא שונה מאפס כתוצאה מתלות בתנאי ההתחלה של השדה. כתוצאה משדה זה, מצטמצם ערוץ זרם המיסוך למרכז הדגם בו הוא חופשי משדה חילופי. יחודו של השדה החילופי במקרה זה, על פי הרחבת מודל Bean לתלות בזמן, שבשדה חילופי הרלקסציה אינה משמעותית ועל כן זרמי המיסוך אינם דועכים ומקטינים את השטח האפקטיבי של ערוץ זרם המיסוך.

בעבודה של Zeldov [16] נבדקה לולאת מגנטיזציה של גבישים יחידים של BSCCO עם שדה מגנטי משתנה ובלעדיו במישור a-b של הגביש, כאשר שדה מגנטי סטטי מופעל בציר c. עם הפעלת שדה מגנטי משתנה קטן, הנע בין 0-80 Oe בתדר של 1 kHz, נוטה לולאת המגנטיזציה לדעוך עד שהיא נעשית הדירה, כנראה בתמונה 8. עקומות מגנטיזציה ללא הפעלת שדה מגנטי AC הראו לולאת hysteresis חזקה. על סמך תוצאות אלו הסבירו החוקרים את התופעה בכך ששדה מגנטי משתנה "מנער" את מרכזי הלכידה (vortex shaking) ומאיץ את הרלקסציה המגנטית,



תמונה 8. לולאות מגנטיזציה של גבישי BSCCO. עוצמת השדה החילופי עד 80G בתדר 1 KHz. בתמונה ניתן לראות את השפעת ה"כיווץ" של לולאת המגנטיזציה כאשר מופעל שדה חילופי מקבילי [16].

מודל שהוצע על ידי Brandt ו- Mikitik [19] הוא מודל "הצעידה". מודל זה מנסה להסביר מדוע במדידות מגנטיות לאורך ציר c קטנה משמעותית האינדוקציה המגנטית של הדגם בנוכחות שדה חילופי המקביל למישור a-b. מודל זה עושה סופר פוזיציה לאורך ציר c של שני זרמים האחד זרמי המיסוך של השדה החילופי והשני זרמי המיסוך של השדה הישר. במודל זה הוא מגלה שכתוצאה מהשדה החילופי מרגיש כל פלקסון לאורכו כוחות לכיוונים שונים. כדי להבין מודל זה נחשוב על זרמי המיסוך של השדה החילופי המייצרים הטיה של הפלקסונים אותם הם פוגשים, כתוצאה מכוח לורנץ. אם נוסיף לזרמים אלו זרם בכיוון אחד הוא יבטל את הזרמים במקום אחד ויגדיל את הזרמים במקום שני. וכך נוצרת הטיה סביב נקודה שאינה במרכז הדגם. נקודה זו משתנה מצד לצד בהתאם לכיוון השדה החילופי. תיאור של מודל זה נראה בתמונה 9. מודל זה חוזה את אותה הנוסחה שהוצעה על ידי Huebener [25] ו Ogosawara [21] במודל ההתנגדות הדינמית.



**תמונה 9.** תיאור "הצעידה" המתרחשת בדגם אינסופי דק החשוף לשדה מגנטי חילופי המקביל לצידו הרחב של הדגם, ולשדה ישר המאונך לצידו הרחב של הדגם. מצד ימין ניתן לראות סופר פוזיציה של זרמי המיסוך של שני השדות. כיוון הזרם הוא כיוון לכיוון  $y$ . הפלקסונים מסתדרים לפי כיוון הזרם, אשר אינו סימטרי ביחס למרכז הדגם [28].

הביטוי שהציעו Ogasawara, Mikitik, Brandt ו Huebener בארבע עבודות שונות הוא

$$E_y = \frac{\mu_0 \omega d J}{\pi J_c} [h - h_p(J)] :$$

כאשר  $E_y$  הוא השדה החשמלי,  $\omega$  הוא תדר השדה החילופי,  $d$  הוא גובה הדגם,  $J$  הוא עוצמת זרם המיסוך של השדה הישר,  $h$  הוא אמפליטודת השדה החילופי,  $h_p(J) -$  הוא שדה חדירה התלוי בזרם הזורם בחוט. נשים לב שנוסחה זו היא כללית ומניחה תלות ליניארית בכל הגורמים והם: השדה החילופי עוצמתו ותדירותו עוצמת הזרם הישר ורוחב הדגם.

## מדידות הולכה

מודל נוסף שהוצע על ידי Mikitik ו-Brandt [31] מציע הסבר להופעת המתח החשמלי כתוצאה משדה מגנטי משתנה בנוכחות זרם ישר, בגיאומטריית חוט ו-Slab. מודל זה דן בהשפעת שדה מגנטי משתנה הרוכב על שדה DC חזק, שניהם מאונכים/מקבילים למישור הרחב של החוט Slab בהתאמה ומאונכים לזרם DC הזורם לאורך הדגם. לפי המודל, המתח החשמלי מופיע כאשר שדה AC גדול משדה הסף, השדה המינימלי הדרוש כדי לחדור בצורה מלאה את הדגם בנוכחות זרם DC. עקרון המודל: זרם DC שובר את הסימטריה של התפלגות השדה המגנטי בדגם ( לפי מודל Bean). שדה מגנטי הגדול משדה הסף גורם לתנועה לרוחב הדגם של קווי השטף המגנטי שבממוצע שונה מאפס. כתוצאה נוצר שדה חשמלי הפרופורציוני לתדר ולאמפליטודת השדה AC. בשדות מגנטיים הקטנים משדה הסף אין מקבלים תוספת למתח החשמלי, כלומר בממוצע תנועת קווי השטף שווה לאפס. העבודה הנ"ל אינה לוקחת בחשבון את הרלקסציה המגנטית החזקה הקיימת ב-HTS, וכן מניחה שדה חשמלי אחיד לרוחב הדגם. מודל זה נותן תמונה איכותית על המתרחש בחוט, ולמעשה אין הבדל עקרוני בין עבודה זו למודל התנגדות הדינמית [25,21]. תיאור סכמתי של תיאוריה זו מוצג בתמונה 10.

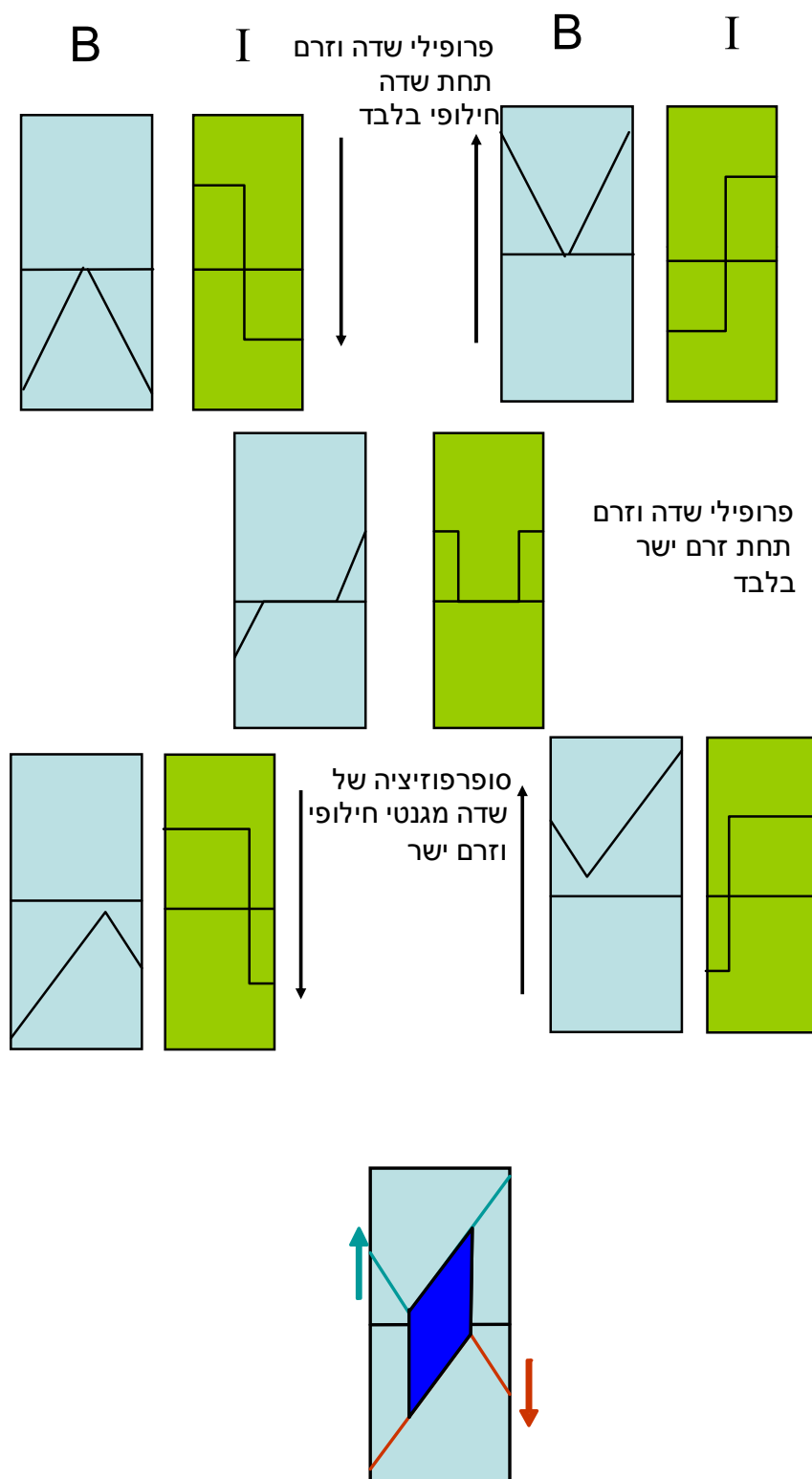
Rabbers [32], מדד אופייני V-I של חוט Bi-2223/Ag רב סיבי, בטמפרטורה של 77 K, בהשפעת שדה מגנטי AC, שכיוונו מאונך או מקביל לצידו הרחב של החוט, בעוצמות שונות בתחום 40-700 Oe ובתדירות קבועה של 35 Hz. Rabbers ראה שהגדלת שדה מגנטי מעל 100 Oe גורמת להופעת התנגדות כמעט אוהמית ( $n \approx 1$ ) עד לזרמים הקרובים לזרם הקריטי (קריטריון  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ). ניתוח התופעה הראה שההשפעה של שדה חילופין ניתנת לתיאור בשני אופנים שקולים. על ידי הגדלת המתח DC תוך כדי הזרמת זרם קבוע או על ידי הקטנת הזרם עבור מפל מתח קבוע. מן התוצאות היה ברור, כי שדה AC גורם להגדלת מתח DC במוליך-על. Rabbers הסביר את התופעה של עליית המתח, על סמך מודל "התנגדות דינמית", שתוארה לעיל. עד ל-100 Oe, הקטנת אמפליטודה השדה נותנת הגדלה הדרגתית בשיפועי V-I עד לשיפוע המתקבל בהעדר שדה חילופי. כאשר מגיעים לזרם הקריטי, כל אופייני V-I המתקבלים בעוצמות שונות של שדה חילופי מתלכדים עם אופיין ה-DC המתקבל בהעדר שדה חילופי. Rabbers הציג את תוצאותיו בסקלה לוגריתמית על מנת להסיק את גודל החזקה, הצגה שכזו של התוצאות אינה מגלה את אופי הקשר השונה שבין המתח לזרם במקרה זה. כמו כן Rabbers לא הבחין בהבדל האיכותי של השפעת שדה מקבילי ושדה מאונך, אלא רק בהבדל הכמותי.

Oomen [33] חקר את השפעת השדה המגנטי AC, המקביל למישור החוט BSCCO בטמפרטורת חנקן נוזלי. הוא חקר השפעת שדה בתדר 50 הרץ בזרמים הנמוכים מזרם קריטי. הוא הציג את ההתנגדות בחוט במספר זרמים שונים כתלות בשדה המגנטי. תוצאותיו הראו תלות ליניארית בין ההתנגדות החשמלית לאמפליטודת השדה. כמו כן התוצאות הראו שקיים שדה חדירה שבשדות קטנים ממנו אין מתח כלל. Oomen הסיק מתלות ליניארית זו שהמנגנון המייצר את המתח החשמלי במקרה זה הוא מודל ההתנגדות הדינמית.

במחקר שנעשה לאחרונה חקר Masti [34] התפלגות שדה לוקאלית של חוט BSCCO 2223 על ידי שימוש ב Hall prob scanning system. הוא גילה כי במהלך שינוי פאזת הזרם נלכד חלק מהשטף המגנטי בתוך החוט. לכידה זו גורמת להפסדים בזרם חילופי ונקראת Hysteresis losses. מחקרו עוזר להעריך הפסדים אלו בחוטים. אופן הניסוי היה מדידת האינדוקציה המגנטית הלוקאלית לאורך זמן מחזור של שדה ה AC. את אותה המדידה הוא ביצע במספר נקודות לאורך הדגם. ולבסוף סונכרנו התוצאות לגל הסינוס. המסקנה מעבודה זו הייתה שה Hysteresis losses בכיוון מאונך לפני השטח בזרם חילופי הם חלק שניתן להזנחה ביחס לגורמים האחרים המשפיעים על תכונות ההולכה של חוט כגון תנועת קווי שטף ואיבוד אנרגיה במטריצת הכסף כתוצאה מזרמי מערבולת בהם. בעבודה זו לא התייחסו ל- Hysteresis losses בכיוון המקביל לפני השטח.

נועם שקד ממעבדתנו [35] חקר את השפעת השדה החילופי המאונך-על תכונות ההולכה של חוט BSCCO ביפילארי בתחום אמפליטודת השדות 300-50 G ובתדרים 430-55 Hz. אחד הממצאים שהתגלו היה שהזרם הקריטי אינו תלוי בתדר השדה, וזאת בניגוד לצפי מהתיאוריות הקיימות. התיאוריה שהועלתה הייתה שאין חדירה מלאה של השדה המגנטי אל תוך הדגם. במקומות שנכנס השדה המגנטי הזרם הקריטי קטן משמעותית לעומת המקומות שלא נכנס שדה מגנטי. כך שהשטח האפקטיבי של החוט קטן – המודל הגיאומטרי. העבודה של שקד הראתה שאין תלות בין תדר השדה המגנטי לערך הזרם הקריטי, אנו נביא כמה מתוצאותיו בפרק המדידות.

## A magnetic AC field & external DC current



תמונה 10 . תאור סיכמתי להבהרת מודל ההתנגדות הדינמית. ראה הסברים בגוף הפרק.

בתמונה 10 אנו מסבירים צעד אחר צעד, באופן איכותי, את מודל ההתנגדות הדינמית. נסביר את המודל למקרה בו מוליך-על חשוף לשדה חילופי ועובר דרכו זרם. תמונות אלו מתארות את ערך השדה או הזרם בציר  $y$ , ציר  $x$  מתאר את הקורדינאטות של הדגם, כך שגבולות המסגרת הם גם הגבולות הפיזיים של הדגם. ערך הזרם הוא תמיד, לשם הפשטות, זרם קריטי וכיוונו הוא נגזרת לפי מיקום של השדה המגנטי (משוואות Maxwell -  $\mu_0 \cdot J = \nabla \times E$ , Bean model).

- בשורה הראשונה של הציור נמצאים זה לצד זה פרופיל הזרם והשדה במקרה בו יש רק שדה חיצוני על הדגם. מצד שמאל מתואר המקרה עבור שדה שלילי (כיוון השדה מטה), ומצד ימין מתואר המצב עבור שדה חיובי (כיוון השדה מעלה).
- בשורה השנייה של הציור נמצאים זה לצד זה פרופיל השדה והזרם במקרה שבו יש רק זרם חיצוני בדגם. ניתן לראות שבזרמים קטנים מזרם קריטי הזרם לא זורם בכל הדגם אלא רק בחלקו. תמונות מגנטו – אופטי מאשרות הנחה זו [36]
- בשורה השלישית מתואר פרופיל השדה והזרם במקרה בו יש גם שדה מגנטי חיצוני וגם זרם בדגם. מצד שמאל המצב בו השדה החיצוני הוא שלילי ומצד ימין המצב בו השדה החיצוני חיובי. מצב זה הוא סופר פוזיציה של שני המצבים הקודמים. בסימולציה המדמה את התפלגות הזרם בדגם המוליך זרם וחשוף לשדה, אושרה ההנחה שנשברת הסימטריה של התפלגות הזרם [37].
- בשורה הרביעית ישנה מסגרת יחידה המתארת את פרופיל השדה במקרה בו השדה חיובי ושלילי באותה המסגרת.

כשאנחנו בוחנים מסגרת זו ניתן לראות שבשדה חיובי חודרים את הדגם קווי שטף הן מצד ימין והן מצד שמאל אך לא בכמויות שוות. ניתן לראות שמצד ימין נכנסים יותר קווי שטף מאשר מצד שמאל (ערך השדה המגנטי גבוה יותר). לעומת זו כאשר מסתכלים על המצב ההפוך בו השדה שלילי ניתן לראות שפלקסונים רבים יותר עוזבים את הדגם מצד שמאל מאשר הפלקסונים שעוזבים את הדגם מצד ימין. המסגרת הכחולה הם אותם קווי שטף שנכנסו את הדגם מצד ימין ועזבו מצד שמאל. אלו קווי השטף המייצרים תוספת שדה חשמלי ישר בכל מחזור של השדה החילופי. למעשה הפלקסונים לא עוזבים את הדגם מצד שמאל במקרה והשדה שלילי, כפי שכתבנו, אלא פלקסונים שלילים חודרים אל הדגם.



בעבודה שנעשתה במעבדתנו על ידי וולד רוטברג [38] נחקר המעבר בין שני התחומים: שדה חילופי בתדר עד 50 הרץ לבין תחום השדה הישר (0 הרץ). בנוסף הוא השתמש במדידות המתח הרגעי. שאלה נוספת שהוא חקר היא, כיצד האפקטים של הרלקסציה משפיעים על התנהגות של מתח חשמלי המושפע משדה מגנטי משתנה. מסקנתו הייתה שיש להבדיל בין שני תחומים עיקריים שהם חדירה מלאה של הדגם וחדירה חלקית. מוליך-על החשוף לשדה מגנטי מאונך בתדרים הגדולים מ 50 הרץ, מראה התנהגות חשמלית שאינה תלויה בתדר מכיוון שאין חדירה מלאה של השדה החילופי. המודל הגיאומטרי הוצע כרעיון להסביר התנהגות זו. לעומת זאת בתדרים הקטנים מ 50 הרץ ובעוצמות שדה גדולות, השדה המגנטי חודר את כל הדגם וקיימת תלות ליניארית בין התדר לזרם הקריטי. ה I-V curve בתחום זה מראה צורה איכותית כמו העקומות במדידות שדה מקבילי. נראה בתוצאות גם כן השוואה מנורמלת בין תוצאות אלו לתוצאות מחקר זה.

לסיכום פרק זה, ראינו כי נעשתה עבודת מחקר רבה בשדות AC מאונכים ובשדות מקבילים. ראינו כי:

- בגבישים יחידים, המושפעים הן משדה DC והן שדה AC, עולה מתח ה-DC בדגם ביחס למקרה בו אין שדה AC.
- במדידות מגנטיזציה של גבישים יחידים החשופים לשדה חילופי מקבילי נראתה השפעה גדולה מאוד על לולאת המגנטיזציה כתוצאה מהפעלת השדה החילופי. לולאות המגנטיזציה שנמדדו כאשר הדגם היה חשוף לשדה מגנטי חילופי מקבילי "התכווצו". כלומר, הזרם הקריטי קטן באופן משמעותי כאשר מופעל שדה מקבילי.
- עבודות רבות הראו כי שדה מגנטי חילופי משפיע חזק הרבה יותר על עקירת פלקסונים מאשר שדה DC באותה העוצמה. השדה החילופי גורם לאבדני אנרגיה משמעותיים בעוד ששדה ישר באותו הערך שומר על התנגדות חשמלית שואפת לאפס.
- עבודות רבות נעשו על השפעת השדה המאונך-על תכונות ההולכה בחוטים מוליכי-על מסחריים. נמדדו ונותחו המתח הממוצע, המתח המתפתח בזמן והתפלגות השדה המגנטי במרחב עבור מספר רב של זרמים, תדרים ואמפליטודות שדה מגנטי חילופי. תוצאות מחקרים אלו הראו שהשפעתו של השדה המאונך-על החוט שונה בתחומים שונים של זרמים, תדרים ואמפליטודות. התוצאות מוסברות בעזרת מספר מודלים: המודל הגיאומטרי, זחילת שטף והתנגדות דינמית.
- החוקרים היחידים שחקרו את השפעת השדה החילופי המקביל על חוטים היו

ניתן איפוא לראות כי אפיון השפעת השדה החילופי המקביל על חוטים מוליכי-על לוקה עדיין בחסר. שאלות רבות על האופן בו משפיע שדה חילופי מקביל על חוטים אלו עדיין פתוחות. למשל, לא ברור עדיין אם התופעה מתקבלת גם בתחומי תדר ואמפליטודה אחרים מאלו שנמדדו ע"י Oomen. כמו-כן, מעולם לא נמדדה התלות בזמן של השדה החשמלי בקונפיגורציה זו.

את מקור השדה החשמלי בחוט מוליך-על החשוף לשדה חילופי מקבילי בחוטיים ניתן להסביר לפי כמה מהתאוריות שהוצגו לעיל. בין תאוריות אלו קיים הבדל עקרוני. ההבדל העקרוני הוא במקור המתח החשמלי. האם אלו קווי שטף **המאונכים** למישור a-b שתנועתם מייצרת את השדה החשמלי או שתנועת קווי השטף **המקבילים** למישור זה הם המייצרים את השדה החשמלי הנמדד. על פי תאוריית הצעידה והניעור מקור המתח הוא בקווי שטף המאונכים למישור a-b. לעומת זאת על פי מודל ההתנגדות הדינמית מקור השדה החשמלי הוא בתנועת קווי השטף המקבילים למישור a-b. נתייחס לכך בהרחבה בפרק הדיון.

## 4. מטרות המחקר

שלוש מטרות עיקריות יש למחקר זה :

1. אפיון והכרת התנהגות השדה החשמלי הנוצר כתוצאה מהפעלת שדה מגנטי חילופי מקבילי. מכיוון שעד היום התעלמו כמעט לגמרי מהשפעה זו מתוך הנחה שהשפעה זו דומה להשפעת שדה DC מקבילי, ומכיוון ששדה DC מקבילי משפיע באופן זניח לעומת השפעת שדה DC מאונך, ההנחה הרווחת היתה שתמונה דומה מתקיימת גם בשדה מקביל AC. לפיכך, עד היום, כמעט שלא נמדדה השפעה זו.
2. אפיון ההשפעה של שדה מגנטי מקבילי חילופי על הזרם הקריטי בחוטיים מוליכי-על. מכיוון שעד כה לא נלקחה בחשבון השפעת השדה המקבילי בעת תכנון סלילים מוליכי-על, המטרה הראשונה היא להכיר את השפעה זו על ביצועי החוט ולהסיק מכך מסקנות מעשיות על תכנון וליפוף סלילים.
3. הבנת המנגנון הפיזיקאלי המייצר את תוספת המתח הישר בחוטים מוליכי-על החשופים לשדה מגנטי חילופי. בפרט, עולה השאלה הבסיסית האם תנועת קווי השטף הנוצרים ע"י השדה המקבילי ובכיוונו הם היוצרים את עיקר השדה החשמלי או אולי השדה המגנטי משחרר קווי שטף מאונכים הנמצאים שם בגלל הזרם הישר והם אלו היוצרים את עיקר השדה החשמלי. נבחן את התוצאות לפי שלושה מודלים: ניעור פלקסונים, מודל הצעידה ומודל ההתנגדות הדינמית.

## 5. מערכת המדידה

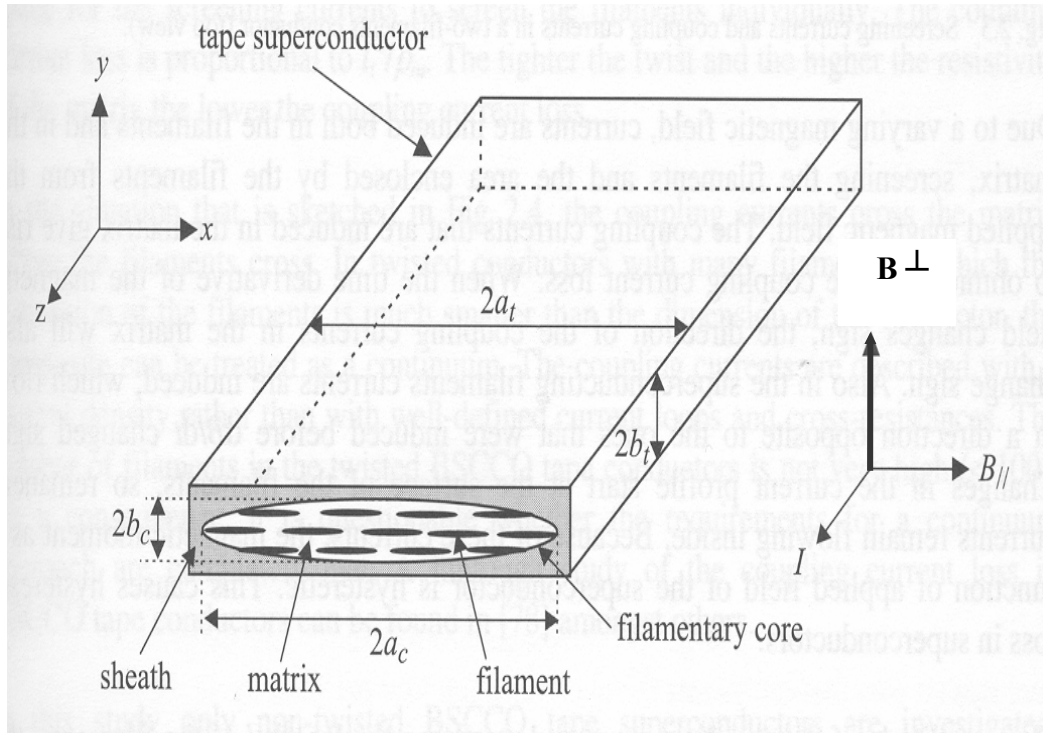
הניסויים המתוארים בעבודה זו בוצעו על חוט מוליך-על מסוג BSCCO 2223 של חברת ASC[4]. החוט מיוצר על ידי החברה באופן מסחרי והוא משמש כיום בכל היישומים המבוססים על חוטי HTS. מסיבה זו בחרנו בו. החוט ואריזתו המקורית מופיעים בתמונה 11.



**תמונה 11.** (a) חוט מוליך-על מסחרי BSCCO-2223 באורך של 200 m המלופף על גליל. החוט מתוצרת ASC. (b) קטע חוט מוליך-על מסחרי BSCCO-2223 עליו בוצעו המדידות.

חומר ה BSCCO שבתוך החוטים הוא חומר קראמי ועל כן הוא שביר. בנוסף, התכונות הגרגרית ואופן הכנת החוט אינם מאפשרים כיפוף של החוט מעבר לרדיוס 70 מילימטר מבלי לפגוע בתכונותיו.

בתמונה 12 מוצג חתך של חוט BSCCO-2223.



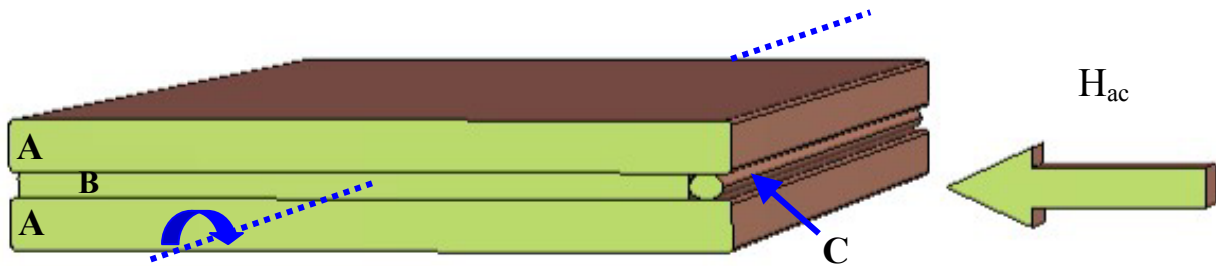
**תמונה 12.** חתך של BSCCO-2223 המורכב מ-55 סיבים מוליכי-העל הנמצאים בתוך מטריצת הכסף.

החוט מורכב מ-55 סיבים מוליכי-על הנמצאים בתוך מטריצת כסף. שתי שכבות נירוסטה בעובי של  $50\mu\text{m}$  מחזקות את החוט על ידי כך שהן מולחמות בשני צידי החוט מוליך-על. הפרמטרים האופייניים לחוט הינם: אחוז המילוי  $\eta\% = 40$ , שטח הליבה מוליכת-על  $2a_c \cdot 2b_c$  הינו  $3.94 \cdot 0.18 \text{ mm}^2$ , השטח הכללי של חתך החוט  $2a_t \cdot 2b_t$  הינו  $4.1 \cdot 0.27 \text{ mm}^2$ . המקדם  $t$  ו- $c$  מופנים לשטח חתך כללי של הדגם (tape) ולליבה רב סיבית של הדגם (core), ללא שכבת נירוסטה. הזרם הקריטי  $I_c$  116-130 A, החזקה  $n$  18-20,  $I_c$  זרם הקריטי (קריטריון  $1\mu\text{V/cm}$ ).

$$E = E_c \left( I/I_c \right)^n$$

BSCCO 2223 הוא בעל אניזוטרופיה גבוהה, כפי שצויין בפרק הקודם. כאשר אנו באים לחקור שדה המקביל למישור a-b אנו חייבים לדייק באוריינטציה של השדה שכן התלות בשדה משתנה משמעותית לפי הכיוון בו השדה מופעל. על מנת להבטיח דיוק כך שהשדה יהיה מקביל לחלוטין למישור הדגם נבנתה המערכת הבאה: על מצע של דלרין (Delrin) קובעו שני סלילים מקבילים בצורת מסלול מרוץ אשר במרכזם מונח הדגם. בחרנו בחומר דלרין מכמה סיבות האחת היא שחומר זה אינו מוליך ולכן לא יושרו בו זרמי מיסוך (Eddy current), בנוסף, החומר דלרין הוא החומר ממנו מורכבות כל חלקי המערכת פרט לסלילים ולחוט עצמו על מנת לשמור שלא ייווצרו לחצים מכאניים במהלך קירור המערכת. גורם זה הוא חיוני מאוד שכן התפשטויות תרמיות שונות של חומרים שמקוררים לטמפרטורת חנקן נוזלי עלול ליצור שינוי מיקום (דיפורמציה-טרמית) ואף שבירה של חלקים במערכת. גובה הדגם ניתן לשינוי על מנת להתאימו בדיוק למרכז הסלילים שם השדה הוא ההומוגני ביותר. כמו כן כוילו סלילים אלו על ידי מגנטומטר ונמצא כי הכיול הוא עשרים וחמש גאוס לאחד אמפר בסלילים. בין שני סלילים אלו הונח הדגם. בשני צדי הסלילים הוכנו תופסי הדגם, גם כן מדלרין. הדגם יושב בין שני מוטות G10 ובקצותיו הוא תפוס על ידי ציר המאפשר סיבוב של הדגם.

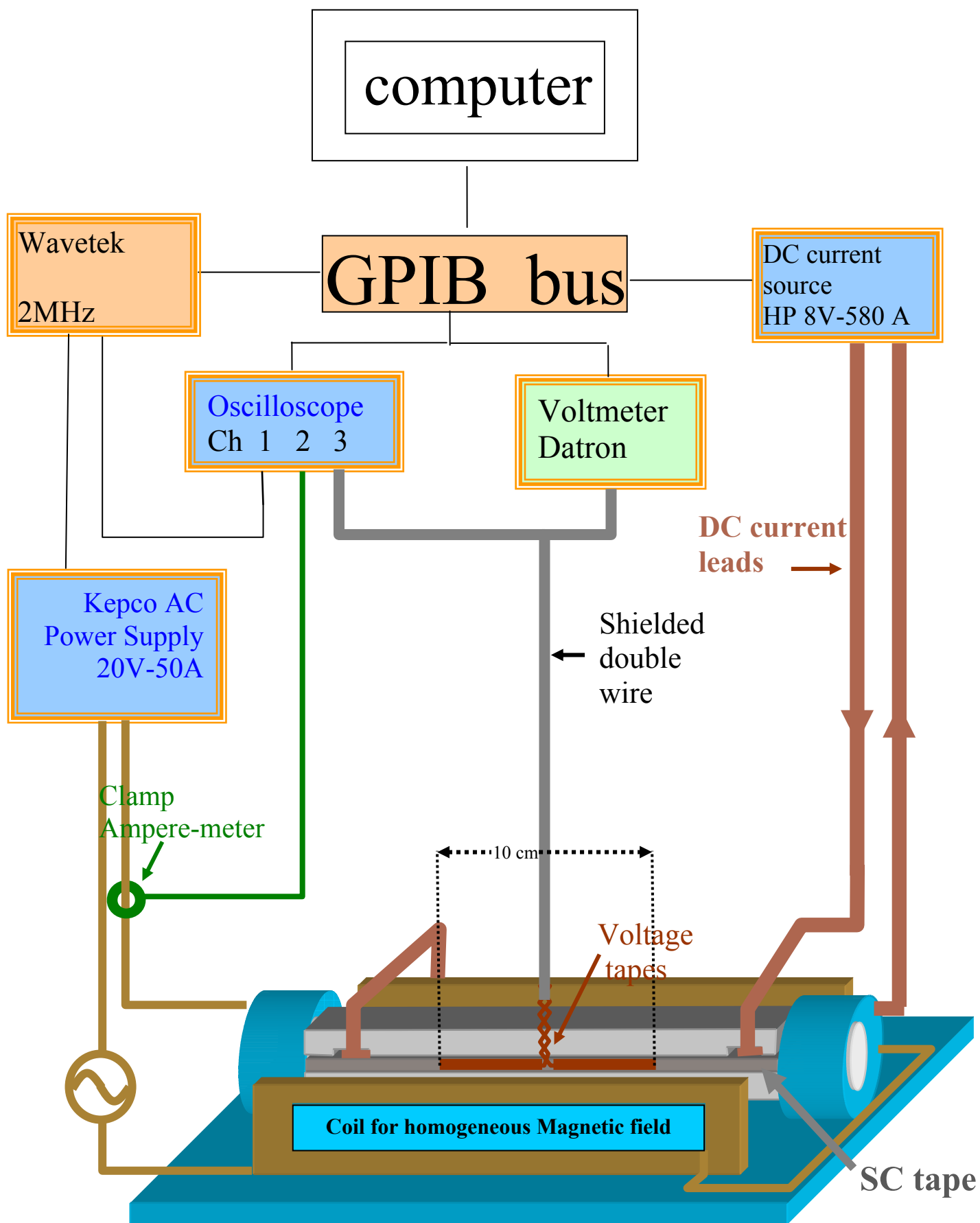
עובי החוט הוא כ 400 מיקרון ומגעי המתח המרוחקים 100 מילימטר אחד מהשני מולחמים בטמפרטורה נמוכה (נקודת הלחם 138 מעלות צלסיוס על מנת לא לפגום בחוט). חוט המדידה מוחזק בין שני המוטות התופסים את הדגם. כדי לוודא שהשדה המגנטי החילופי אכן מקביל לפני הדגם בנינו מערכת כזו שכאשר השדה המגנטי החילופי אינו מקביל לפני השטח הוא מייצר כא"מ מושרה. את המתח הזה ניתן למדוד ואף ניתן להוריד לאפס על ידי סיבוב הדגם. העקרון לפיו נבנה חלק זה הוא שכאשר מסובבים את הדגם ומוצאים את המקום בו המתח הכא"מ המושרה מתאפס אזי בהכרח, חוט המדידה ומוליך-העל נמצאים בדיוק באותו המישור המקביל לשדה המגנטי. כך אנו מוודאים שגם כאשר אנו במצב זה השדה המגנטי חייב להיות בדיוק בכיוון מקביל למישור הדגם כפי הנראה בתמונה 13.



**תמונה 13.** בתמונה זו מתוארים סכמטית שני המוטות (A) התופסים את הדגם (B). חוט המדידה מנחושת (C). כמו כן מתוארים בחצים כיוון השדה  $H_{ac}$  והחץ סביב הציר המרכזי מתאר את אופן סיבוב הדגם. כאשר כיוון השדה מקביל לפני השטח של מוליך-העל השטף המגנטי העובר בלולאה של מוליך-העל וחוט הנחושת שווה אפס.

המערכת הפועלת בתוך אמבט חנקן נוזל ב- $T=77\text{ K}$ . מתוארת בתמונה 14. (אמבט החנקן מבטיח שמירה על טמפרטורה יציבה למרות הספקי החום הגדולים המיוצרים מכניסות הזרם העשויות נחושת).

- על מנת לספק זרמים למערכת ולמדוד את המתחים השתמשנו במכשירים הבאים :
- ספק הזרם הישר לחוט מוליך-העל הוא : Aglient (HP) 0-8 V , 0-580 A
  - ספק הזרם החילופי לסליל מורכב משני רכיבים :
1. מחולל אותות Wavetek 0-1000 Hz, הנותן אות סינוס 5 V Peak to peak.
  2. ספק כוח 20V-50A Kepco (Power supply).
- למדידות מתח ממוצע השתמשנו במולטימטר 8.5 Datron 1207 ספרות.
  - למדידות מתח חשמלי התלוי בזמן השתמשנו באוסילוסקופ Tektronics
- כל המכשירים הנ"ל חוברו למחשב באמצעות GPIB והופעלו על די תוכנה שנכתבה במעבדה על בסיס LabView.



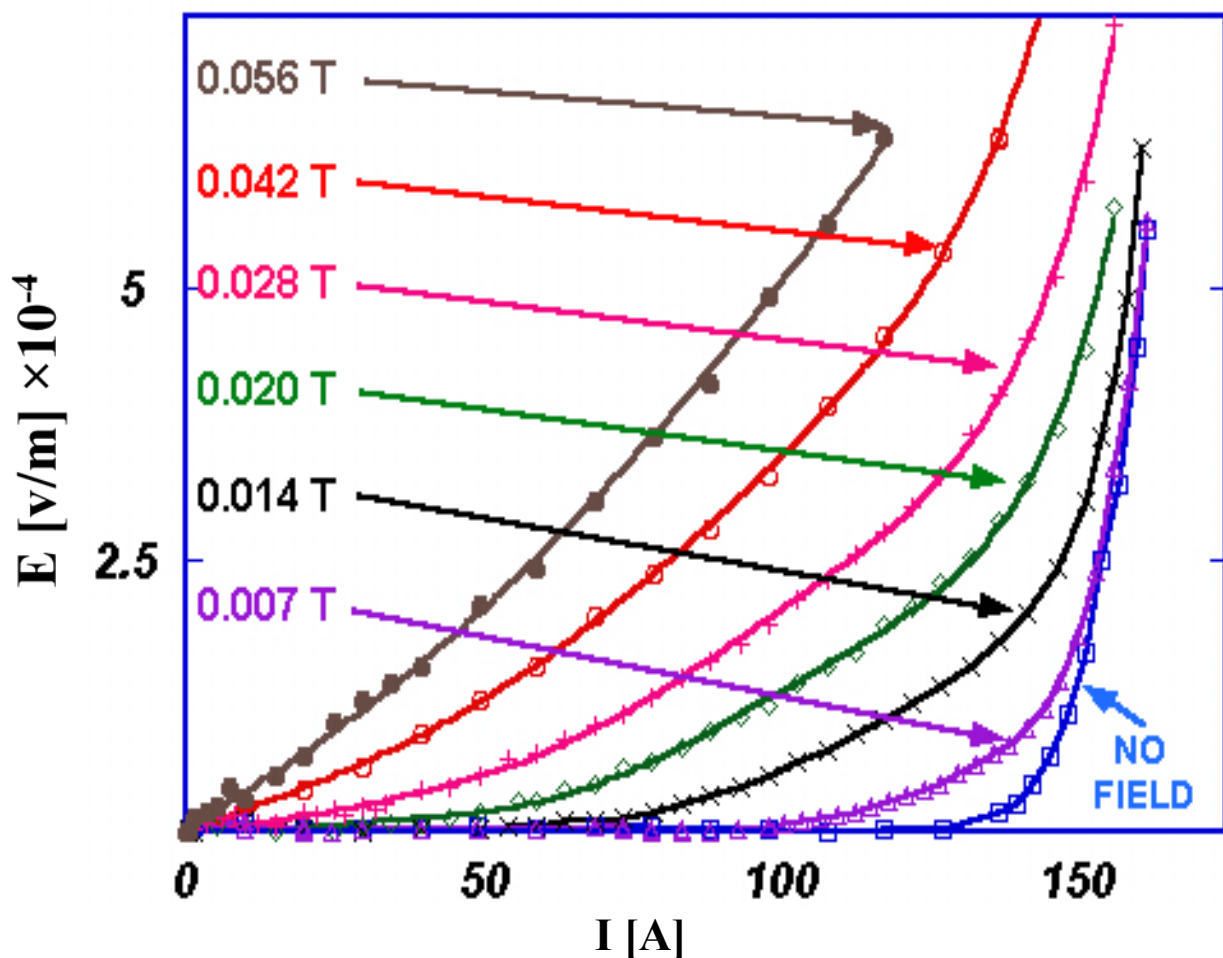
תמונה 14. מערכת מדידה של עקומות זרם-מתח V-I ומתח כתלות בזמן  $V(t)$ .



בנוסף למערכת זו ביצענו גם מדידות במערכת למדידות מגנטו-אופטיות [37]. מדדנו את התפלגות האינדוקציה הלוקלית במהלך כמה מחזורים של שדה חילופי המקביל לפני השטח באותו החוט ששימש למדידות V-I.

## 5. תוצאות

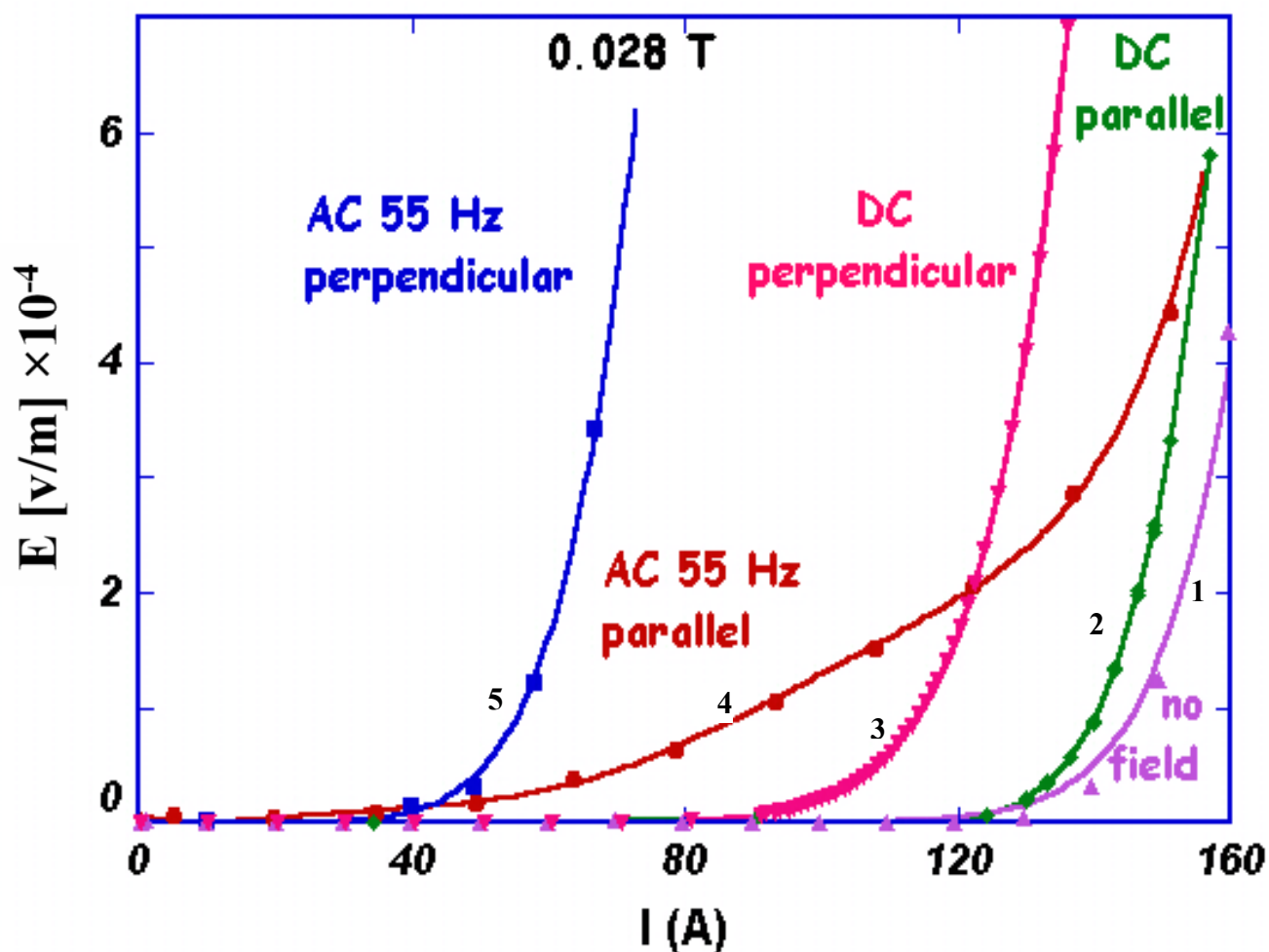
ביצענו שני סוגים עיקריים של מדידות חשמליות. מדדנו את המתח החשמלי המתפתח בדגם כאשר זורם בו זרם ומופעל עליו שדה מגנטי. פעם אחת מדדנו מתח חשמלי DC ופעם שנייה מדדנו את תלות המתח החשמלי בזמן. כל המדידות התרכזו בטמפרטורה של  $77\text{ K}$ . מדידות חשמליות גילו שהשפעת השדה המגנטי על עקומות ה I-E של מוליך-על מסוג BSCCO היא מיוחדת לתצורת השדה החילופי המקבילי. בהתחלה נציג עקומות E-I שהתקבלו בניסויים המראים תופעה ייחודית ביותר להשפעת השדה המגנטי החילופי. לרוב, כפי שכתבנו בהקדמה, עליית המתח בזרם היא עלייה מעריכית עם חזקה גבוהה (10-20). בעקומות V-I גילינו שבנוכחות שדה מגנטי המתח מתחיל לעלות מזרם הקטן יחסית לזרם הקריטי הנמדד ללא שדה מגנטי. העלייה של המתח כתלות בזרם היא עלייה חלשה. כלומר, אם נקרב לפונקציה מעריכית נקבל חזקה קטנה (1-2). זאת אומרת שבעוד שבלי שדה התנהגות המתח היא מעריכית, אצלנו ההתנהגות היא כמעט ליניארית. העלאת האמפליטודה של השדה מתבטאת בעליית מתח בזרמים קטנים יותר. התכונה העיקרית החדשה שהתגלתה בעקומות E-I בחשיפה לשדה מגנטי מקבילי היא חוסר התאמה לקירוב מעריכי בשונה מכל המדידות שנעשו עד היום. עבודה זו היא הראשונה להציג עקומות E-I של חוט החשוף לשדה מגנטי חילופי מקבילי.



**תמונה 15.** עקומות שדה-זרם של חוט מוליך-על החשוף לשדה מקבילי. העקומות השונות הן עקומות בהשפעת שדות חילופין בכיוון מקביל לשכבות מ  $0$  T -  $0.056$  T. תדר השדה הוא 55 הרץ.

תמונה 15 מתארת את עקומות ה- $E-I$  של חוט מוליך-על הנושא זרם ישר. כל אחת מהעקומות מתארת את התנהגות המתח כאשר החוט חשוף לשדה חילופי מקבילי שונה. ניתן לראות כי ככל שהאמפליטודה גדולה יותר קטן הזרם בו מתחיל להתפתח מתח חשמלי. התלות של המתח בזרם, בתחום הזרמים מהזרם בו מתחיל להתפתח שדה מגנטי עד לזרם קריטי, היא תלות כמעט ליניארית. התנהגות ליניארית של המערכת במדידות שדה חשמלי תחזור במדידות המתח התלוי בזמן בהם נקבל גם כן היגב ליניארי של המערכת. לשם השוואה נראה את השפעת שדות בכיוונים שונים ואופי שונה (DC fields) על עקומות ה- $E-I$ .

השפעת שדות שונים על עקומות E-I.



**תמונה 16.** השוואה של עקומות זרם-שדה בקונפיגורציות שונות של שדות. עקומות E-I הנמדדות באותו חוט החשוף לשדות באמפליטודה  $280 \text{ G}$ . עקומת ה E-I החשופה לשדה מגנטי מקבילי היא העקומה היוצאת דופן. העקומות המתוארות הן, מימין לשמאל, על פי מספרי עקומה:

1. עקומת E-I ללא שדה מגנטי
2. עקומת E-I המושפעת משדה מקבילי DC
3. עקומת E-I המושפעת משדה מאונך DC
4. עקומת E-I המושפעת משדה מקבילי AC
5. עקומת E-I המושפעת משדה מאונך AC

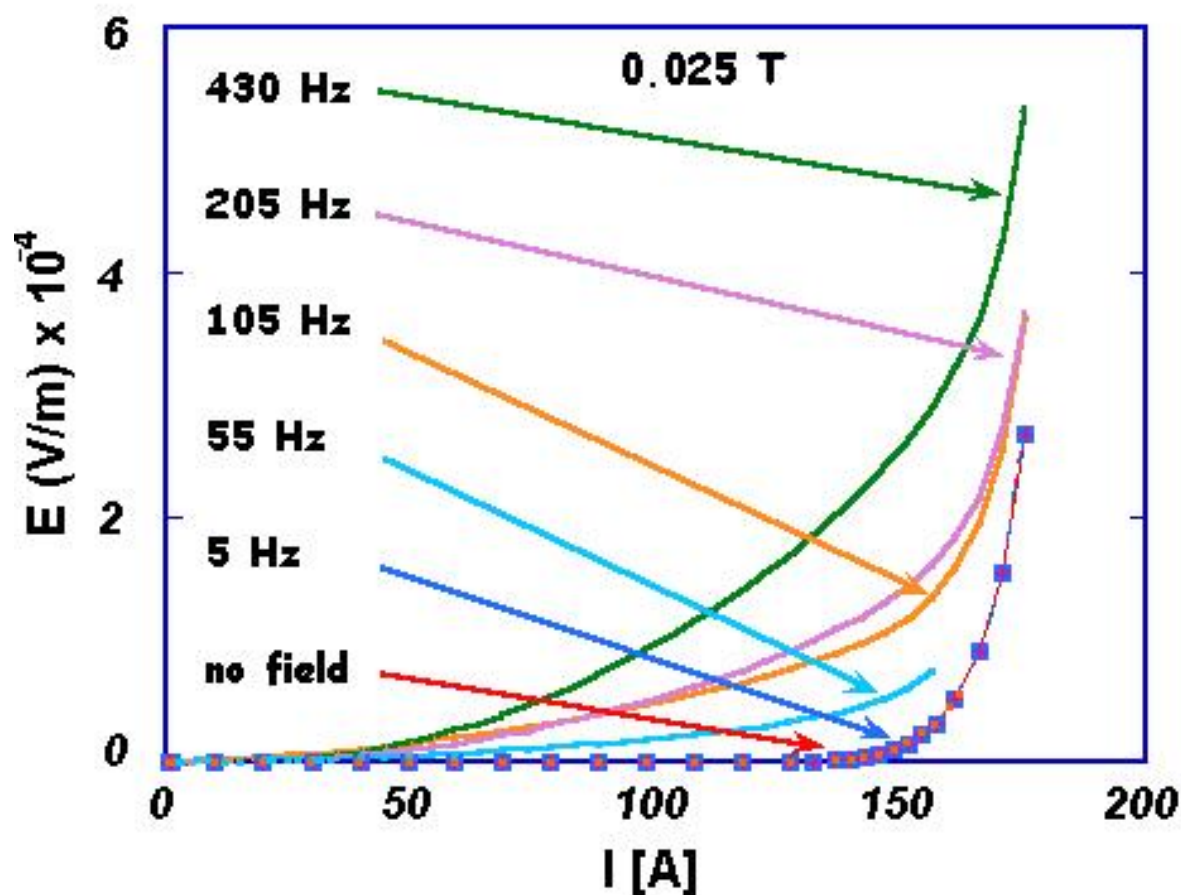
בתמונה 16 מוצגות עקומות שונות של E-I. העקומות שונות בכיוון בו מופעל השדה ובמהות השדה (AC או DC). למעט העקומה של השדה המגנטי החילופי המקבילי העקומות מתאימות לקירוב לחוק החזקה המוזכר לעיל עם חזקה גדולה 10-15 לעומתם, עקומת השדה המקבילי מתאימה, אם בכלל, לחזקה נמוכה מאוד (1-2). התאמה לקירוב החזקה ניתן לראות להלן.

ניתן לראות שההשפעה העיקרית של השדות השונים, למעט השדה החילופי המקבילי על העקומות היא הזזה של העקומה לזרמים נמוכים. לעומתם עקומת ה E-I המושפעת משדה מגנטי חילופי משנה באופן איכותי את התלות בין המתח לזרם. עקומת ה E-I מקיימות תלות מעריכית ומתאימות לחוק החזקה  $(E = E_0(I/I_c)^n)$ . מייחסים חשיבות פיזיקאלית לפרמטרים השונים במשוואה [14]. כאשר הזרם הקריטי הוא הזרם בו מתחילים הפלקסונים לנוע, זאת אומרת שכוח לורנץ הפועל על הפלקסונים המאונכים למישור a-b, פלאקסוני אבריקוסוב, גדול מכוח הלכידה. כאשר הם נעים, בזרמים הגדולים במעט מזרם קריטי הם זזים בדינאמיקה הנקראת Flux creep. בתנועה זו הפלקסונים מבצעים קפיצות בין בורות הלכידה. תנועה זו התלויה בעומק הבור והטמפרטורה מגדירה את הפרמטר n, החזקה בנוסחה המופיעה לעיל. ומכיוון שאנו לא רואים תלות מעריכית גבוהה אנו יכולים להניח שמקור המתח החשמלי הוא אינו תנועת פלקסוני אבריקוסוב בדינאמיקת Flux creep, אלא מנגנון אחר, חדש. כדי לחדד נקודה זו נסתכל על העקומה  $0.007 \text{ T}$  בתמונה 15. בעקומה זו ניתן לראות שהתלות של המתח בזרם לפני הזרם הקריטי היא תלות כמעט ליניארית ובסביבות הזרם הקריטי התלות היא תלות מעריכית, כמו שצינו בתמונה 15. דואליות זו של התנהגות המתח החשמלי לפני ובסביבות הזרם קריטי מובילה אותנו למסקנה ששני מנגנונים מייצרים מתח חשמלי כאשר חוט מוליך-על חשוף לשדה מגנטי מקבילי. האחד בסביבות הזרם קריטי הוא המנגנון הידוע של Flux creep והמנגנון השני, בזרמים הקטנים מזרם קריטי, אינו ידוע.

נתון נוסף המתגלה מהשוואת העקומות השונות בתמונה 16 הוא שלשדה המקבילי DC אין השפעה ניכרת על עקומות ה E-I. נתון זה מחדד את שאלת מחקר זה. מהו המנגנון המיוחד לשדה שהוא חילופי ומקבילי לפני השטח, המשפיע בצורה שונה כל כך על עקומות ה E-I.

### התלות בתדר

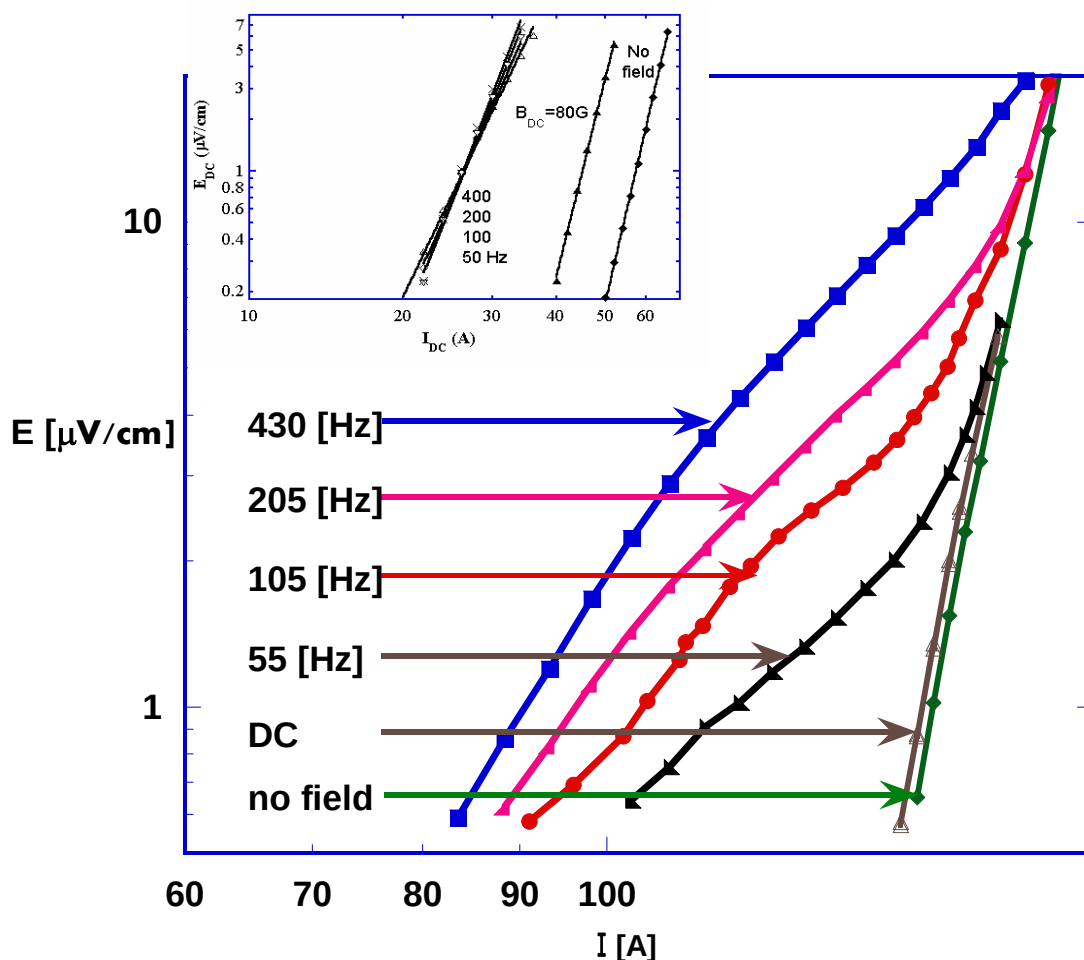
עקומות השדה-זרם תלויות בעוצמת השדה ובנוסף הן תלויות בתדר השדה. בתמונה 17 אנו מראים את שינוי עקומות הזרם מתח כתוצאה משינוי תדר.



תמונה 17. עקומות E-I באמפליטודת שדה 250G מקביל בתדרים שונים (5-430 Hz).

תמונה 17 מתארת עקומות E-I בתדרים שונים. בתמונה נראה כי החל מתדר נמוך (5 הרץ) בו קיימת השפעה מועטה של השדה החילופי, העלאת תדר השדה המגנטי גורם לעלייה בערך השדה החשמלי. ניתן לראות כי אופי התלות בין השדה החשמלי לזרם בתדרים שונים אינו משתנה. זאת אומרת שגם כאן ניתן לראות את דואליות ההתנהגות של שדה ביחס לזרם, כמו שנכתב בפסקה הקודמת. נתון נוסף שעולה מתמונה זו ומניסויים אחרים שעשינו הוא שהזרם בו מתחיל להיווצר מתח תלוי בתדר השדה בצורה חלשה הרבה יותר מאשר התלות בעוצמת השדה כפי הנראה בתמונה 15. נתייחס לנתון חשוב זה בהמשך בפרק ניתוח התוצאות.

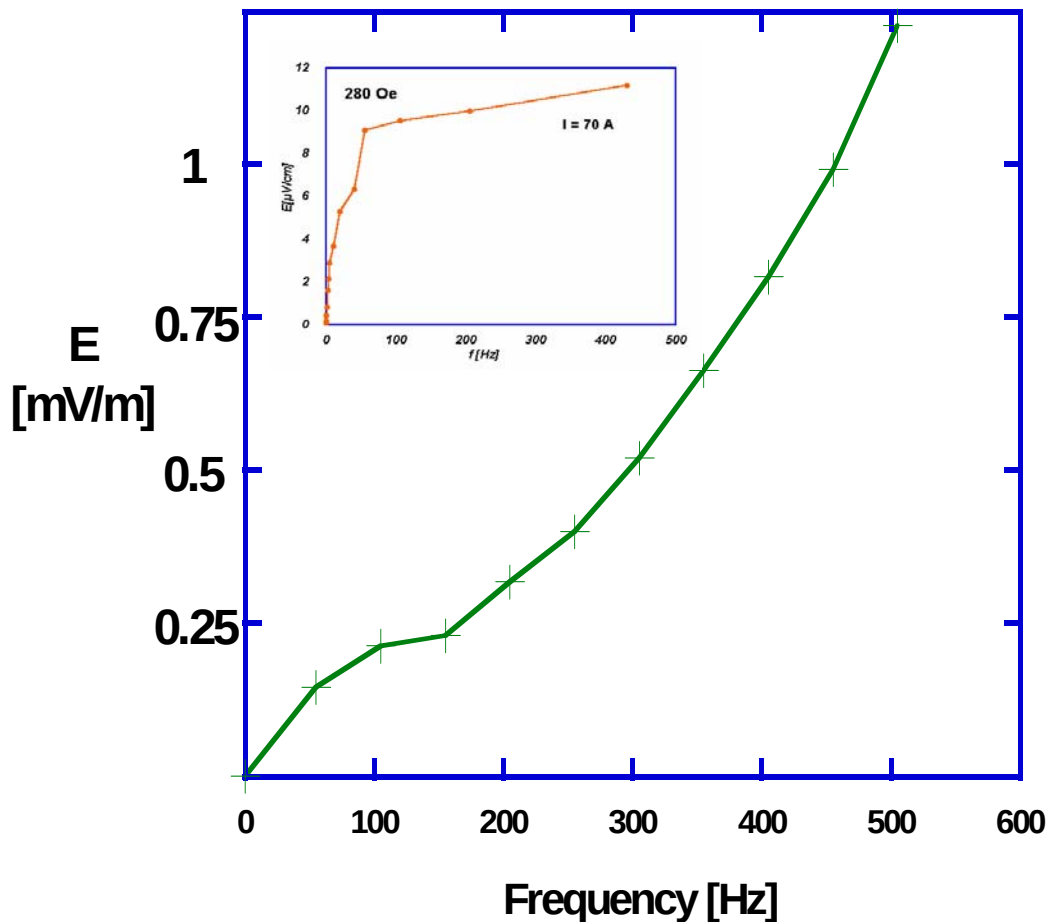
תמונה 18 מראה עקומות זרם-שדה, בגרף בעל צירים לוגריתמיים, לשם השוואה עם ניסויים קודמים בשדה מאונך.



תמונה 18. עקומות  $E$ - $I$  המוצגות בגרף בעל צירים לוגריתמיים. בגרף התחתון מוצגת השפעת השדה המקבילי ובגרף העליון השפעת השדה הניצב. עוצמות השדה המגנטי בשדה מאונך 80 G, ובשדה מקבילי 100 G.

בתמונה 18 ניתן להבחין בעוד הבדל בין השדה המאונך לשדה המקבילי. בעוד שבשדה מאונך השפעת התדר על העקומות השונות קטנה, בשדה מקבילי ככל שהתדר גדול יותר ערך המתח החשמלי גבוה יותר. בנוסף, ניתן לראות שהקירוב לנוסחת החזקה מוביל לתלות ליניארית בגרף העליון, לפי הגרף התחתון נראה שאין הצדקה לקרב את התוצאות לנוסחת החזקה, מכיוון שהעקומות בגרף התחתון אינם ישרות. כמו כן הזרם בו מתפתח שדה חשמלי של  $1\text{ }\mu\text{V/cm}$  בשדה מאונך לא משתנה כתוצאה משינוי בתדר בעוד שבשדה מקבילי זרם זה (הזרם הקריטי) קטן ככל שהתדר עולה.

התלות של המתח החשמלי כתלות בתדר בזרם מסוים בשדה מאונך ושדה מקבילי.

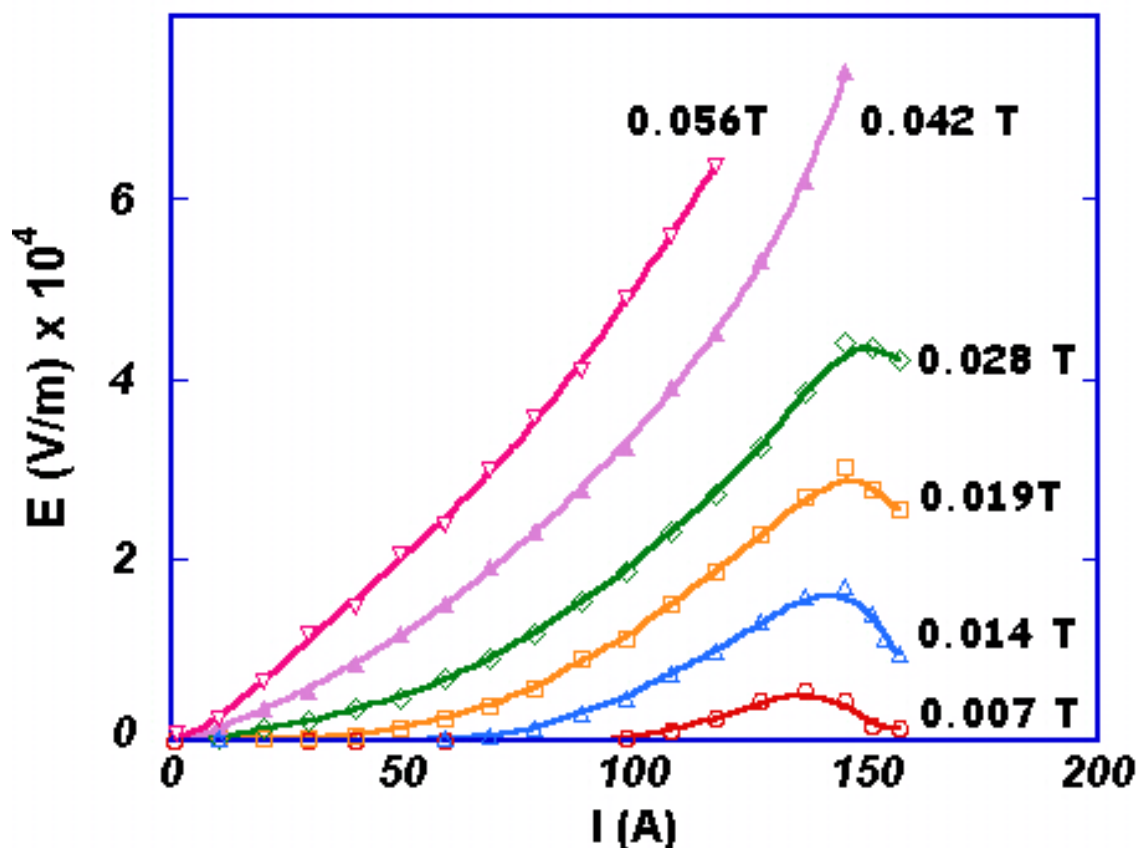


**תמונה 19.** בתמונה זו אנו מראים השוואה של התלות בין המתח החשמלי לתדר השדה המגנטי בשני מקרים. האחד הוא שדה מקבילי בעוצמה 280 G, הגרף התחתון, השני הוא שדה מאונך באותה העוצמה. הזרם הקבוע בשדה המקבילי הוא 120 A, הזרם הקבוע בשדה מאונך הוא 70 A.

בתמונה 19. ניתן לראות שקיימת מגמת עלייה של המתח החשמלי ככל שהזרם עולה בגרף התחתון, שדה חילופי. בעוד שבגרף העליון, שדה מאונך, הקשר בין המתח לזרם מפוצל לשניים עד חמישים הרץ יש עליה חדה של המתח כתלות בתדר ומתדר זה העלייה הופכת מתונה. נתייחס לנתון זה בסיכום הפרק

להשוואה בין השדה המאונך לשדה המקביל חשיבות רבה. לימוד התכונות המשותפות ועמידה על ההבדלים מאפשרת הבנה טובה יותר של אופן השפעת האניזוטרופיה ביצירת המתח החשמלי. חקר זה מוביל לראייה כוללת של אופן ההשפעת השדה החילופי על חוטי HTS BSCCO.

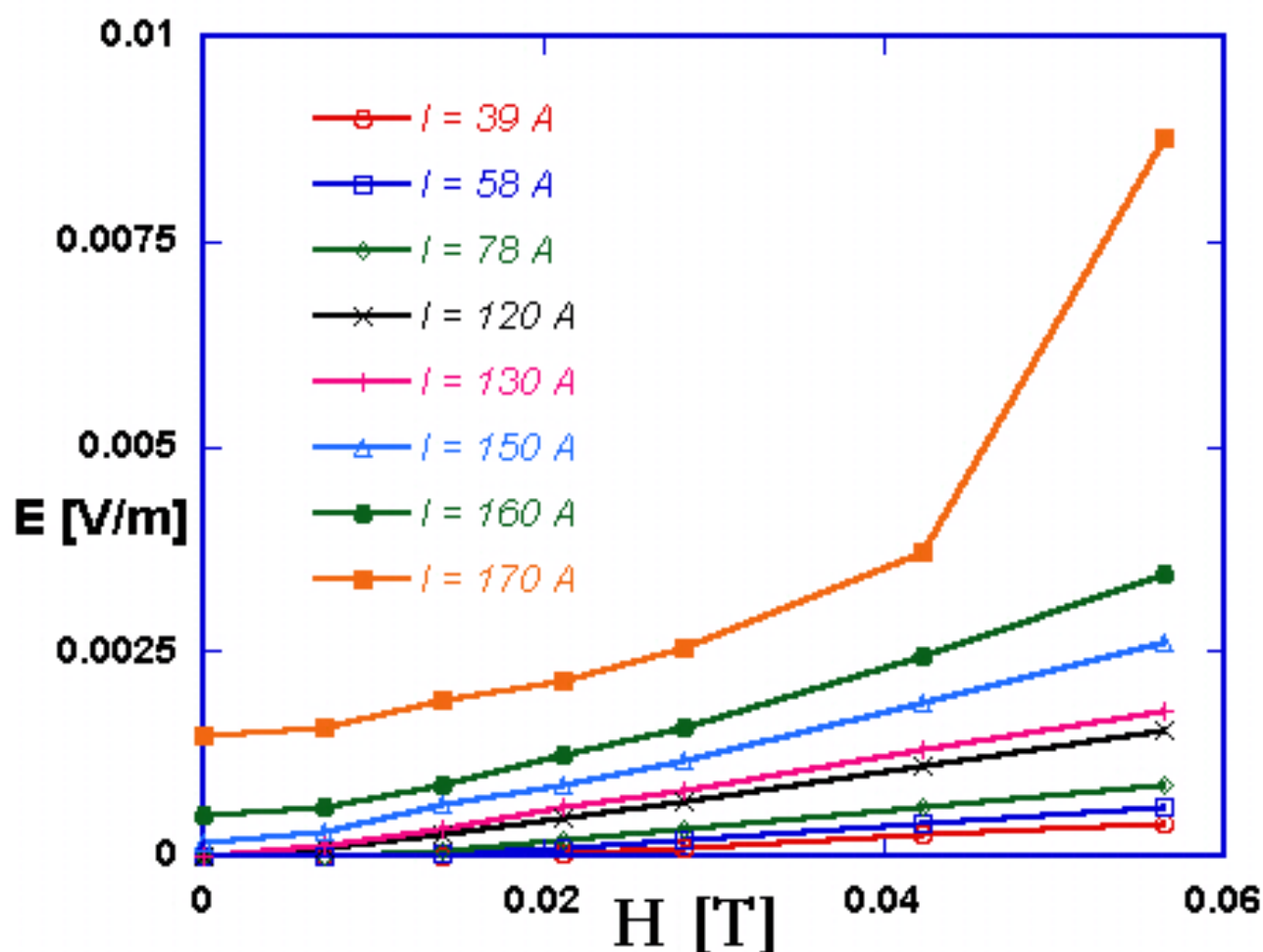
בגרף הבא אנו מציגים את התוספת למתח החשמלי כתוצאה מהפעלת השדה המגנטי החילופי. תוספת זו היא ההפרש בין המתח עם שדה למתח ללא שדה.



**תמונה 20.** ההפרש בין המתח הנמדד כאשר החוט חשוף לשדה מגנטי חילופי מקבילי לבין המתח המתפתח בחוט באותו הזרם ללא שדה חיצוני. אמפליטודת השדה החילופי מצוינת ליד כל עקומה.

בתמונה 20 ניתן לראות שתוספת המתח הנמדדת כאשר חשוף לשדה מגנטי מתחילה להיווצר מזרם הקטן מהזרם הקריטי ההנדסי הנמדד ללא שדה (בחוט זה הזרם הקריטי ללא שדה מגנטי חיצוני הוא 140 A). הזרם בו מתחיל להיווצר המתח תלוי בעוצמת השדה. לאחר זרם זה קיימת תוספת הולכת וגדלה של מתח חשמלי עד לזרם קריטי ההנדסי (הכוונה לזרם הקריטי שנמדד בחוט שאינו חשוף לשדה מגנטי חיצוני). מעבר לזרם הקריטי מתחילה תוספת מתח זו לרדת. לימוד של תוספת זו, שנמדדה והציגה תוצאות דומות בתדרים רבים, מחייבת אותנו להבנה שמקור המתח במוליך-על החשוף לשדות חילופיים מקבילים הוא אינו אותו מקור מתח המייצר שדה חשמלי לאחר הזרם הקריטי. במילים אחרות, כמו שאמרנו לעיל, קיימים שני מקורות מתח האחד בזרמים הקטנים מזרם קריטי שמקורו בשדה החילופי והשני לאחר זרם קריטי שאינו תלוי בשדה החילופי. השדה החשמלי הנוצר לפני הזרם הקריטי מקיים תלות שונה בזרם מזה הנמדד לאחר הזרם הקריטי. סימוך לטענה זו ניתן לראות בתמונה 21 בה ההתאמה הליניארית של השדה החשמלי כתלות באמפליטודת השדה החילופי נכונה רק בזרמים הקטנים מהזרם הקריטי. לעומת זאת בזרמים הגדולים מאלו לא ניתן עוד להתאים את העקומות לקירוב ליניארי.





**תמונה 21.** השדה החשמלי כתלות באמפליטודת השדה המגנטי החילופי בזרמים שונים. תדר השדה 55 הרץ.

בתמונה 21. ניתן לראות כי בזרמים נמוכים, 40-130 A, לאחר שדה מסויים קיים קשר, בקירוב, ליניארי בין השדה החשמלי לאמפליטודת השדה. תלות זו ניתן לראות בצורה טובה יותר בתמונה 22 להלן. כמו כן, בתמונה 21 ניתן לראות כי בזרמים הגדולים 160, 170 A התלות רחוקה מלהיות ליניארית. גם כאן, כמו בתמונה הקודמת (תמונה 20), קיים שוני איכותי בהתנהגות השדה החשמלי כאשר הזרם הזורם בחוט גדול מהזרם הקריטי הנמדד ללא שדה מגנטי חילופי.

## 6.1.2. תלות השדה החשמלי הממוצע

### באמפליטודה ותדר השדה המגנטי

Oomen [33] חקר את התלות של השדה המגנטי באמפליטודת השדה במקרה בו השדה הוא חילופי ומקביל לפני השטח. התוצאות נותחו בקירוב הליניארי. למרות שלא הייתה התאמה מוחלטת לתלות הליניארית הוא קבע שהמנגנון המייצר שדה חשמלי בקונפיגורציה זו הוא מודל ההתנגדות הדינמית, כפי שכתבנו בפרק הסקירה. בפרק זה נציג את התוצאות באותה הצורה של Oomen, תלות השדה החשמלי באמפליטודת השדה המגנטי, על מנת שנוכל לחפש את הקשר **הכמותי** לנוסחה המצופה על פי מודל ההתנגדות הדינמית:

$$E_y = \frac{\mu_0 \omega d J}{\pi J_c} [h - h_p(J)]$$

נוסחה זו קובעת שקיים קשר ליניארי בין השדה החשמלי לבין אמפליטודת השדה המגנטי, תדר השדה והזרם הזורם בחוט. נציין כי בתוצאות של Oomen היה רעש מדידה גדול והיה נראה כי התאמה ליניארית אינה בהכרח התאמה טובה לתוצאות. במערכת המדידה שלנו ראינו תלות ליניארית טובה עד זרמים 140 A, כפי הניתן לראות בתמונה 22. כמו כן מצאנו שהקשר הכמותי בין הפרמטרים השונים הצפוי על פי התיאוריה, מתאים לקשר הניסיוני בין פרמטרים אלו. בפרק זה נציג את האופן בו ביצענו את הקירוב הכמותי.

על מנת להתאים את תוצאות הניסוי לנוסחה זו נראה:

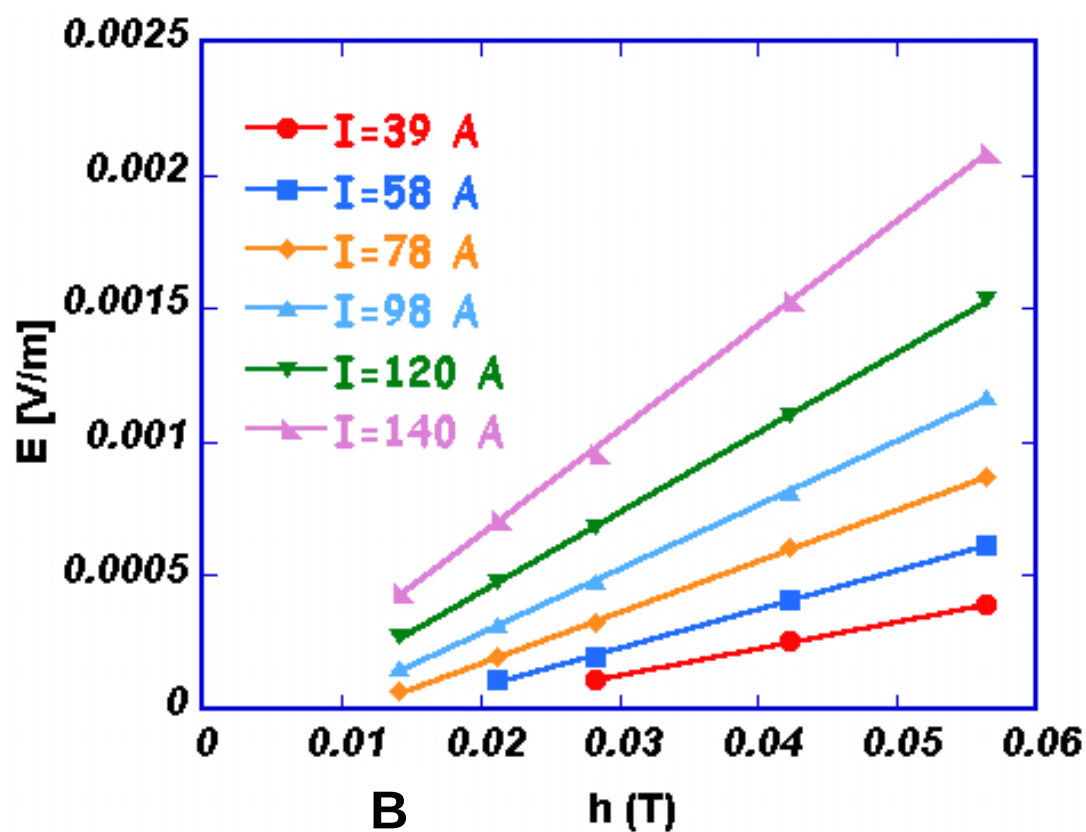
- שהקשר בין השדה החשמלי לבין הפרמטרים הוא אכן, בקירוב טוב, ליניארי.
- שחלוקה של השדה החשמלי בזרם, בעוצמת השדה ובתדר אכן נותן את הממד הנכון (d) של המערכת.

הנוסחה לעיל ניתנת להירשם גם באופן אחר:

$$E_y / ((h - h_p(J)) \cdot \mu_0 \cdot (J / J_c) \cdot f) = 2 \cdot d$$

הצד השמאלי של משוואה זו יחושב בעמודים הקרובים על סמך ניסויים רבים שחלקם יובא כאן.

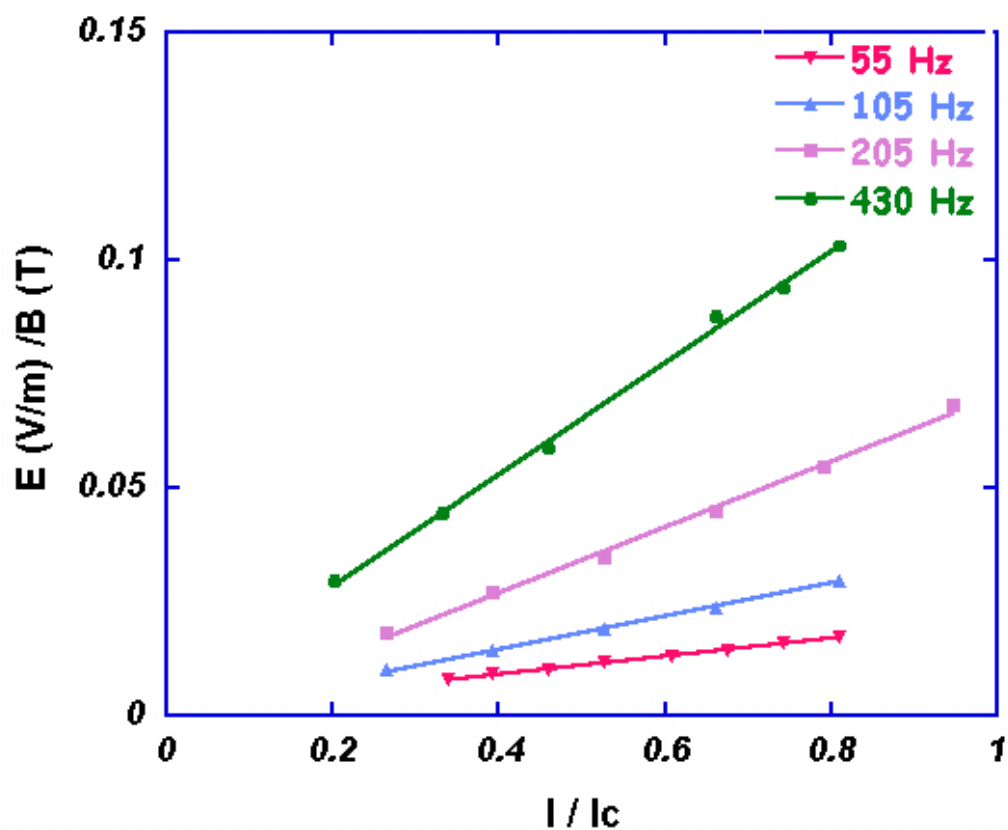
## תלות השדה החשמלי בעוצמת השדה החיצוני, עבור זרמים שונים



**תמונה 22.** השדה החשמלי כתלות באמפליטודת השדה המגנטי בזרמים שונים. תדר השדה 105 Hz.  
ניתן לראות שבקרוב טוב קיימת תלות ליניארית, בשיפוע שונה, עבור כל זרם.

ניתן לראות בתמונה 22 ששיפוע העקומות משתנה בזרמים שונים. בנוסף, ביצענו את הניסוי בתדרים שונים ובכולם קיבלנו את הקשר הזה. בתמונה 23 נציג את התלות של חילוק זה בזרם הזורם בחוט עבור תדרים שונים.

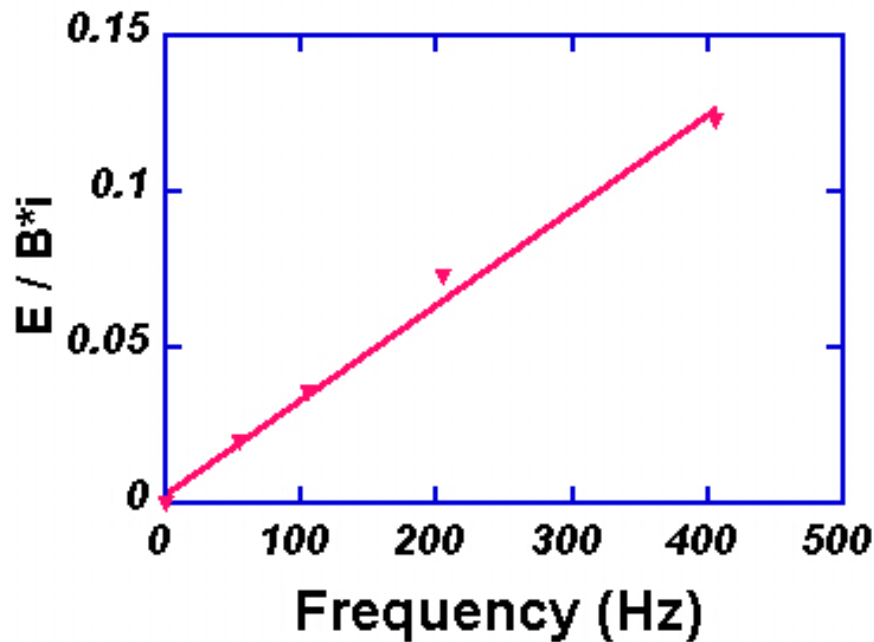
**תלות השדה החשמלי המחולק בשדה המגנטי בגודל הזרם החשמלי עבור תדרים שונים**



**תמונה 23.** השדה החשמלי מחולק באמפליטודת השדה המגנטי כתלות בזרם המנורמל לזרם הקריטי בתדרים שונים.

ניתן לראות שגם גרף זה מראה תלות ליניארית בין הגדלים השונים נחלק את השדה החשמלי הן בעוצמת השדה והן בזרם המנורמל (זרם בחוט לחלק לזרם הקריטי) ונציג את התוצאות כתלות בתדר השדה תמונה 24 .

תלות השדה החשמלי לחלק לשדה המגנטי והזרם כתלות בתדר.



תמונה 24. התלות של השדה החשמלי מחולק בזרם המנורמל ובאמפליטודת השדה כתלות של התדר.

מגרף זה, תמונה 24, ניתן להוציא את הערך הנמדד של הקבועים.

ואכן מצאנו קירוב מעולה לנוסחה.

$$E/(B \cdot I_c \cdot \omega) = 2 \cdot d$$

בעוד הנוסחה צופה את הקשר

$$E/(B \cdot I_c \cdot \omega) = 1.5 \cdot d$$

אנו מצאנו באופן ניסיוני את הקשר

להתאמה זו יש ערך חשוב ביותר שנעסוק בו בפרק ניתוח התוצאות. נציין רק שהנוסחה נמצאה לפני 30 על ידי Ogasawara [21] ואחר ניתנה פעמים בשני מאמרים שונים על ידי Brandt & Mikitik [19,31] ובמאמר נוסף על ידי Huebener [25]. אנו מצביעים כאן לראשונה על התאמה כמותית בין השדה החשמלי הישר המתפתח בחוט בסביבת שדה מגנטי חילופי לבין תדר השדה עוצמתו והזרם הזורם החוט.

לסיכום פרק זה נאמר שמצאנו שהקשר בין השדה החשמלי לתדר בשדה עוצמתו והזרם הזורם בחוט מתאים איכותית וכמותית לקשר שהובא בנוסחה שאותה בחנו. כאשר ננסה להתאים תאורייה לתוצאות בפרק ניתוח התוצאות נתייחס לנתון זה.

## 6. 2. 1. התפתחות השדה החשמלי בזמן

מידע נוסף, וחדשני, על השפעת השדה המגנטי החילופי על התכונות החשמליות של מוליכי-העל ניתן למצוא במדידות חשמליות התלויות בזמן. במערכת שלנו הפרעה חלופית יוצרת מתח ישר. המערכת האלקטרו מגנטית העל מוליכה אינה ליניארית ולכן העובדה שהפרעה חלופית מייצרת מתח ישר אינה מפתיעה. בעבודה קודמת של וולד רוטברג ונועם שקד [35,36] שחקרו את השפעת השדה הניצב נמצאה תופעה זו, בה הפרעה חלופית מייצרת מתח ישר. במדידות שדה חשמלי התלוי בזמן ניתן לראות את השדה החשמלי בכל רגע ורגע. ננסה להבין את צורת הגל של השדה החשמלי הנוצר ואיך היא משתנה כתוצאה משינויים בעוצמת ובתדר השדה ובזרם הישר הזורם דרך החוט. כמו כן ננסה להשוות את התוצאות לתוצאות שהתקבלו בשדה מאונך ונעמוד על ההבדלים בין שתי התופעות.

עקומות E-I מלמדות אותנו על התנועה הממוצעת של קווי השטף במוליך-העל. על מנת להוסיף עוד נדבך להבנתנו את מקור תנועה זו נחקור את התמונה הרגעית של קווי השטף. זאת אומרת ננסה להבין ממדידות המתח התלוי בזמן ( $E-t$ ), איך נעים קווי השטף כאשר השדה המגנטי עולה וכיצד הם נעים כאשר השדה יורד. צורת הגל תלמד אותנו על המערכת האלקטרו-מגנטית שלפנינו.

ביצענו מספר רב של מדידות שחלקן מוצגות להלן:

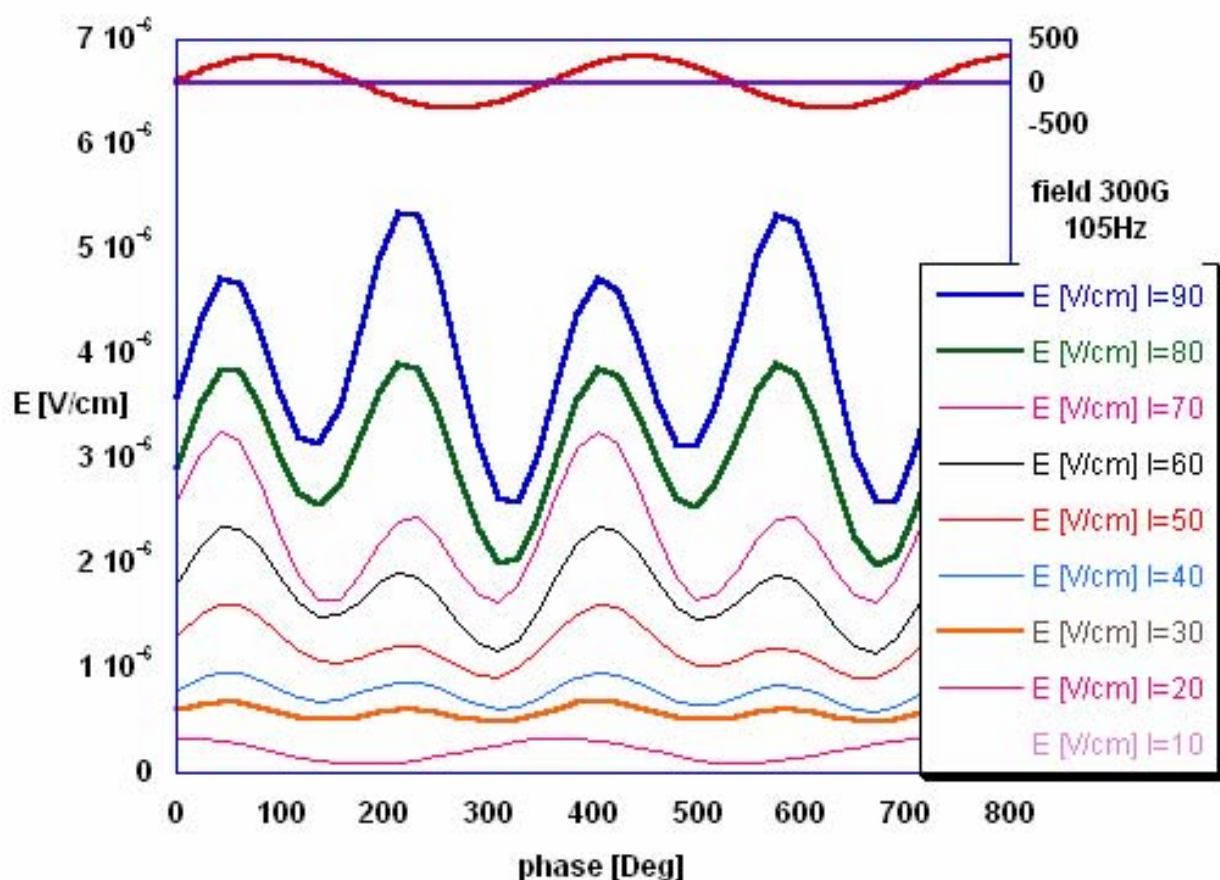
גרף 25 - האות החשמלי בשדה 300 G ותדר 105 Hz בזרמים שונים.

גרף 26 – השוואת האותות החשמליים הנמדדים בשדה מאונך ושדה מקבילי.

גרף 27 – האות החשמלי בזרם 120 A ובשדה 125 G בתדרים שונים.

גרף 28 - האות החשמלי בזרם 100 A ותדר 105 Hz באמפליטודות שדה שונות.

בעבודה זו לא הצגנו את כל המדידות שביצענו. למעשה הרחבנו את המדידות לתחומים רבים מאוד של זרמים תדרים ואמפליטודות שדה ובכולן גילינו את אותה התופעה באופן איכותי.



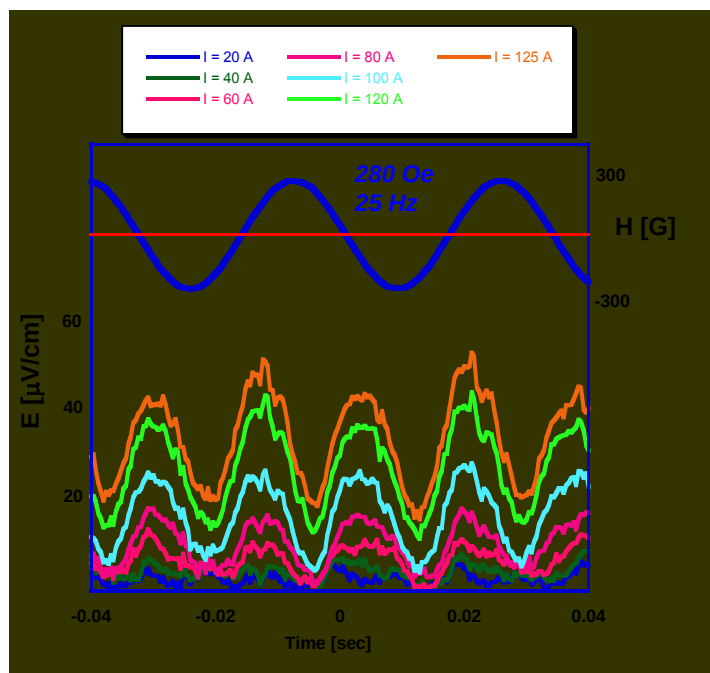
**תמונה 25.** המתח הנמדד בזרמים שונים כתלות בפאזה השדה. הגרף האדום העליון הוא השדה החיצוני, אמפליטודת השדה 300 G והתדר 105 Hz. הציר האופקי הוא ציר הזמן מנורמל לזמן מחזור של 360.

ניתן לראות את צורת המתח החשמלי הנמדד כתלות בזמן. כל גל מורכב מנקודות שכל אחת מהם היא מדידה רגעית של מתח חשמלי כאשר זרם זרם בחוט והוא נתון להשפעת שדה מגנטי. הדבר הראשון שמעניין בצורה זו היא העובדה שהמתח מתחיל להופיע כבר מזרמים קטנים מאוד (20-30 A) ואינו מתאפס גם כאשר ערך השדה המגנטי הוא 0. אם נמצע כל גל כזה וניצור גרף של מיצוע זה כתלות בזרם נקבל את עקומות E-I, זאת אומרת שגרף זה למעשה טומן בחובו הרבה יותר מידע מעקומות V-I רגילות. צורת הגל היא, בקירוב ראשון, עקומת סינוס בעלת תדר כפול מזה של השדה המגנטי הרוכב על היסט מסוים, נראה זאת בהמשך פרק זה. ככל שהזרם עולה גדלה אמפליטודת הגל וגם רמת ה DC שלו. כמו כן ניתן להבחין כי האות אינו סימטרי. אין

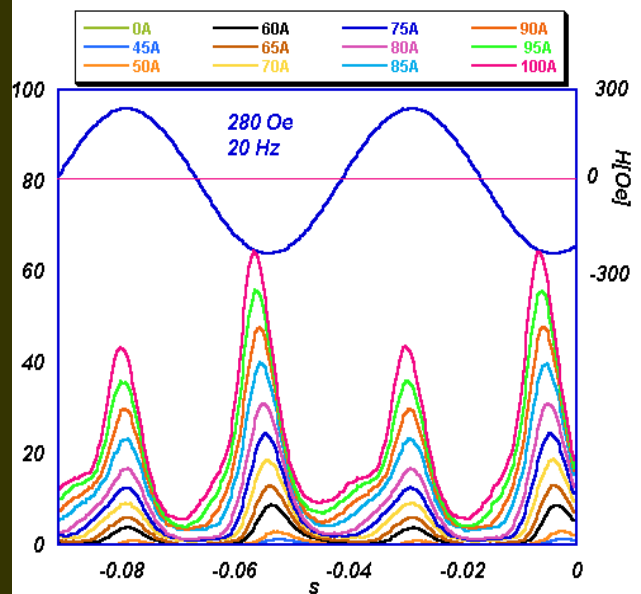
- האחד, שבכל חצי מחזור של השדה המגנטי מתפתח שדה חשמלי קרי קיימת תנועת קווי שטף בחומר הן בעליית השדה והן בירידת השדה.
- השני שהיגב המערכת להפרעה סינסיידלית הוא מתח סינוס. נתון זה אינו טריוויאלי שכן דבר זה מלמד על מנגנון ליניארי המייצר את המתח החשמלי.

על מנת לחדד את המסקנה השנייה נשווה מדידות שדה מאונך לשדה מקבילי. נראה כי בהפעלת שדה מאונך סינסיידלי צורת השדה התלוי בזמן אינה סינוס כי אם עליות רגעיות של המתח כאשר השדה המגנטי בשיאו. לעומת זאת בשדה מקבילי היגב המערכת להפרעה סינסיידלית הוא סינוס. בתמונה 26 ניתן לראות השוואה בין המתח התלוי בזמן בשדה מאונך ושדה מקביל. השוואה של ניתוחי פורייה של השוואה זו נראה בתמונה 27.

**Parallel field**

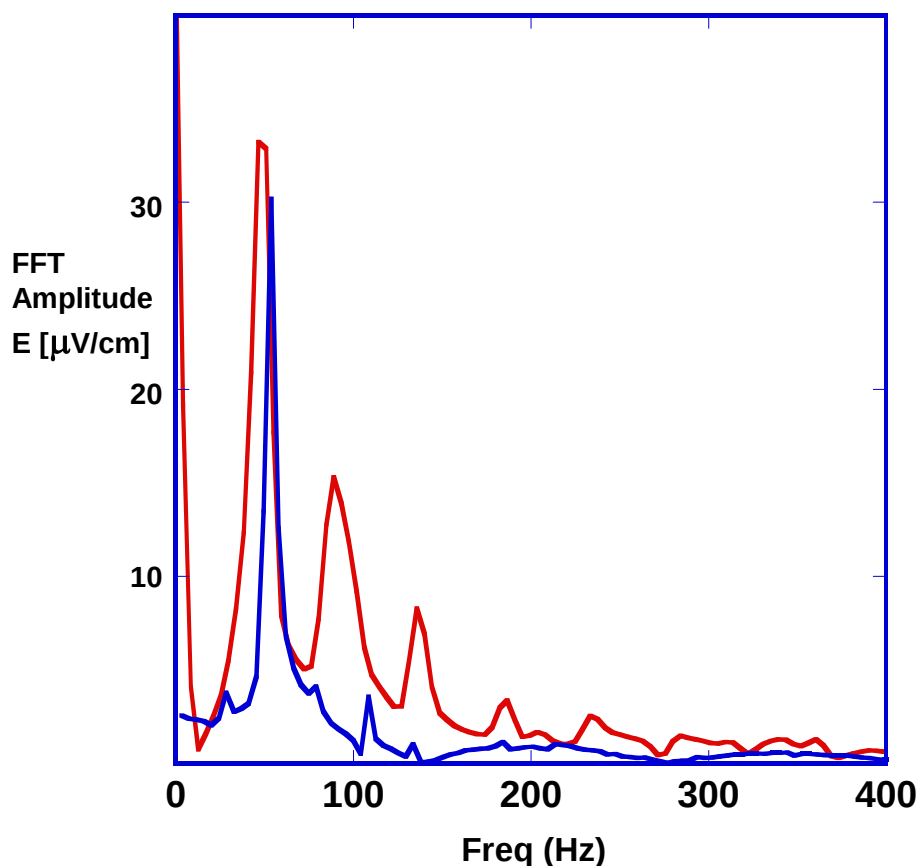


**perpendicular field**



תמונה 26 השוואה בין מדידות השדה החשמלי כתלות בזמן בשדה מקבילי, הגרף השמאלי, לשדה מאונך, הגרף הימני.



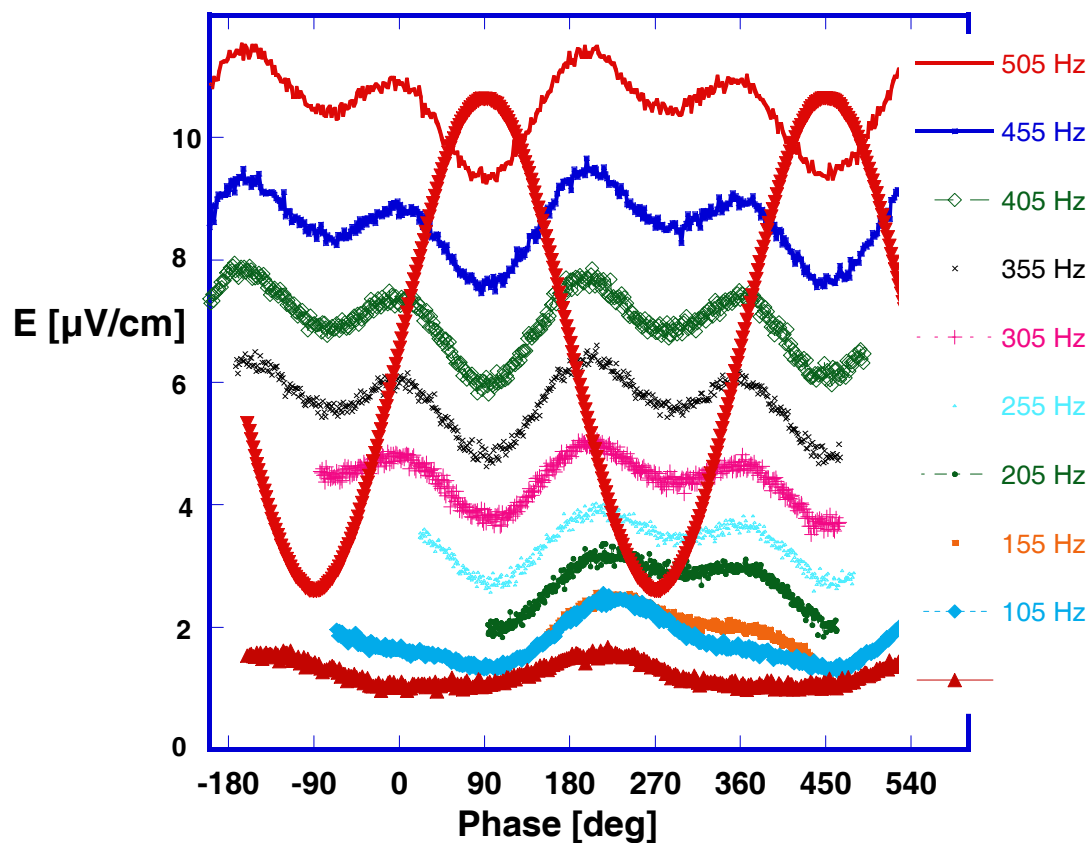


תמונה 27. ניתוח פורייה של האות החשמלי הנמדד בשדה מגנטי מאונך ( הקו האדום) לשדה מקבילי (הקו הכחול).

בתמונה זו (27) הפיק הראשון של כל אחד מעקומות אלו נמצא בדיוק בתדר כפול לתדר השדה. מהתמונה עולה כי האות החשמלי המתקבל במדידות שדה מגנטי מקבילות הוא סינוס. כפי שצינו, נתון זה אינו טריוויאלי שכן האות המתקבל בשדה מאונך אינו יכול להיחשב כסינוס, שכן ניתוח הפורייה מגלה הרמוניות רבות הקיימות באות החשמלי. מערכת המגיבה להפרעה סינוסואידלית על ידי יצירת שדה חשמלי סינוסואידלי היא מערכת ליניארית. נתייחס לנתון זה בהרחבה בפרק הדיון.

נתון נוסף הנגזר מהשוואה זו, כפי הניתן לראות בתמונה 26, הוא שבזרמים עד לכמחצית מזרם קריטי (A 0-75), במדידות השדה המאונך, השדה החשמלי הנמדד כאשר עוצמת השדה קטנה הוא אפס. לעומת זאת בשדה מקבילי כבר מזרמים נמוכים יחסית עשירית של הזרם הקריטי (A 0-20) המתח איננו מתאפס כלל, גם כאשר ערך השדה המגנטי הוא אפס. בשדה מאונך כאשר אמפליטודת השדה נמוכה השדה אינו חודר את כל הדגם ומאפשר הולכת-על של הזרם החיצוני ולכן בקטע זה לא נמדד מתח חשמלי. לעומת זאת בשדה מאונך שדה החדירה קטן מאוד שכן עובי הדגם קטן מאוד ביחס לרוחבו (יחס גיאומטרי 20). נתייחס לנתון זה בהרחבה בפרק הדיון.

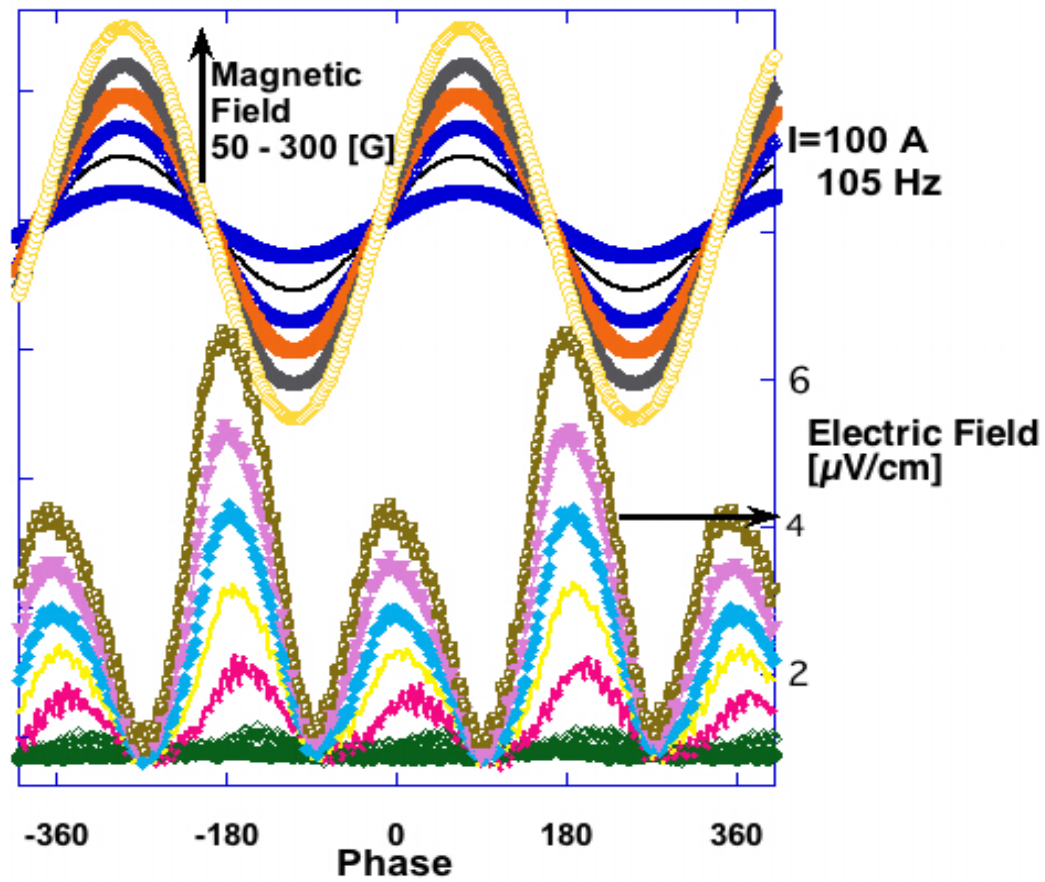
אות המתח החשמלי התלוי בזמן בתדרים שונים.



**תמונה 28.** השדה החשמלי בתדרים שונים כתלות בפאזה השדה. הזרם הישר בחוט הוא 120 A. משרעת השדה המגנטי החילופי היא 125 G.

בתמונה 28 ניתן לראות כי כאשר הפרמטר המשתנה הוא תדר השדה ואילו עוצמת השדה החילופי והזרם הזורם בחוט קבועים אזי רמת ה DC עולה ככל שהתדר עולה. לעומת זאת, אמפליטודת האות כמעט שאינה משתנה. נשווה תמונה זו לשינוי עוצמת השדה תוך שמירה על תדר וזרם קבועים.

אות השדה החשמלי עבור אמפליטודות שדה שונות



**תמונה 29.** המתח הנמדד במשרעות שדה שונות (  $0.03 - 0\text{ T}$  ) בתדר  $105\text{ Hz}$  כתלות בפאזאת השדה. זרם ישר בחוט  $100\text{ A}$ .

בתמונה 29 התדר נשאר קבוע ואמפליטודת השדה משתנה. בתמונה זו רואים שכאשר עוצמת השדה עולה אמפליטודת האות החשמלי עולה. לשוני בין התנהגות האות עם עליית התדר (תמונה 28) להתנהגותו בהעלאת אמפליטודת השדה (תמונה 29) נתייחס בפרק הבא.

## 6.2.2. ניתוח אות המתח התלוי בזמן

תיאור האות - המתח הנמדד בחוט מורכב משני שיאי מתח בכל מחזור אחד של השדה המגנטי (תמונות 25, 28, 29). לכן, אנו מגדירים את אות השדה החשמלי כמתנדנד בתדר כפול ביחס לתדר השדה המגנטי. תדר כפול זה ניתן לראות בניתוח פורייה המוצג בתמונה 27. בניתוח המדידות התייחסנו לשני פרמטרים המתארים את האות: האחד הוא הרקע של האות (Off-set), השני הוא משרעת האות (Amplitude). ניתן לראות שהעלאת הזרם (תמונה 25) גורמת לעלייה הן בגובה האות והן במשרעת האות. התנהגות שונה של פרמטרים אלו תעיד על דינאמיקה שונה של יצירת שדה חשמלי. עליה במשרעת האות מעידה על עליה רגעית במתח, זאת אומרת תזוזה רגעית של פלקסונים שקטנה לאחר שהשדה המגנטי יורד. לעומת זאת עליית הגובה של האות מעידה על תנועה בלתי פוסקת של פלקסונים, שלא תלויה ישירות בעליה ובירידה של השדה החילופי. בחנו את השינוי באות שגורם כל אחד מהפרמטרים המשפיעים על השדה המגנטי וגילינו התנהגות שונה עבור פרמטרים שונים בעיקר אמפליטודת השדה והתדר שלו.

מגרפים אלו (29,28) ניתן לראות את חשיבות מדידות האות החשמלי. בעוד שבמדידה ממוצעת לא ניתן היה להבחין בהבדל משמעותי בין השפעת עליה באמפליטודת השדה לבין עליה בתדר השדה (תמונות 19,22). במדידות האות החשמלי ניתן היה להבחין בהבדל משמעותי ביניהם. כאשר מעלים את אמפליטודת השדה עיקר עליית האות היא במשרעת שלו, ואילו כאשר מעלים את תדר השדה עיקר העלייה היא אופסט האות. ניסינו להבחין הבדל זה על פי מודל ההתנגדות הדינמית, ניסינו להסביר מהי המשמעות של כל אחד מהפרמטרים הללו.

על פי מודל ההתנגדות הדינאמית כמות השטף העוברת מצד אחד של הדגם אל הצד השני תלויה בשני גורמים בלבד. האחד הוא שיפוע הפרופיל המגנטי, קרי הזרם הקריטי. והשני הוא אמפליטודת השדה. ככל שאמפליטודת השדה עולה גדלה כמות השטף המגנטי הנעה בדגם מצד לצד. על כן עלייה באמפליטודת השדה אחראית על עלייה באמפליטודת האות החשמלי הנמדד. לעומת זאת תדר השדה המגנטי אחראי על המהירות בה נעים קווי השטף, שכן קווי השטף עוברים את אותו המרחק (רוחב הדגם) אך עושים זאת מהר יותר, בזמן מחזור קצר יותר. ועל כן כיוון שמהירות קווי השטף עולה ה offset גדל, כפי הניתן לראות בתמונה 28.

עיקרי התוצאות שהובאו לעיל יכולות אם כך לסתור או לחזק התאמתן של תיאוריות שונות. ננסה בפסקה זו לראות כיצד תתכנה התוצאות לפי מודל הצעידה ולפי מודל ההתנגדות הדינמית, וכיצד הן סותרות את מודל ה"ניעור". התוצאות הנובעות מהניסויים הם שקיימת הן תנועה רגעית של קווי שטף והן, בתדרים גבוהים, תנועה רציפה של שטף מגנטי. על פי ההבנה הפשוטה של מודל הניעור, מודל זה מניח כי השדה מנער את מערך הפלקסונים, וכאשר קווי השטף עוזבים את מרכזי לכידתם הם חופשיים להגיב לזרם ונעים כתוצאה מכוח ליניארי שאינו תלוי בזמן שפועל עליהם, ולכן הם נעים בצורה מתמדת ללא מודולציה בזמן. האותות החשמליים שנמדדו הראו תמיד מודולציה בזמן של השדה החשמלי. שתי התאוריות שכן צופות מודולציה בזמן הם מודל הצעידה ומודל ההתנגדות הדינמית. בשני התאוריות האלו, כפי שהובהר בפרק 3, קווי השטף נעים כאשר השדה הופך את כיוונו, ונחים כאשר ערך השדה מינימאלי/מקסימאלי. תנועה שכזו תגרור אחריה אות חשמלי המשתנה בזמן.

לסיכום פרק זה נאמר כי השדה המגנטי החילופי משפיע בקירוב טוב באופן ליניארי על המתח החשמלי, הן בממוצע המתח החשמלי בזמן והן בצורת האות החשמלי הנגרם. כמו כן לפרמטרים השונים של השדה המגנטי, תדר ואמפליטודה, יש השפעות שונות. אמפליטודת השדה מעלה את המתח הרגעי ותדר השדה מעלה את רמת ה-DC של המתח החשמלי. אך המסקנה העיקרית מפרק זה היא הקשר הישיר בין השדה המגנטי לשדה החשמלי, שכן להפרעה מגנטית סינוסואדלית יש היגב סינוסואידלי, נתייחס לליניאריות זו בפרק הדיון.

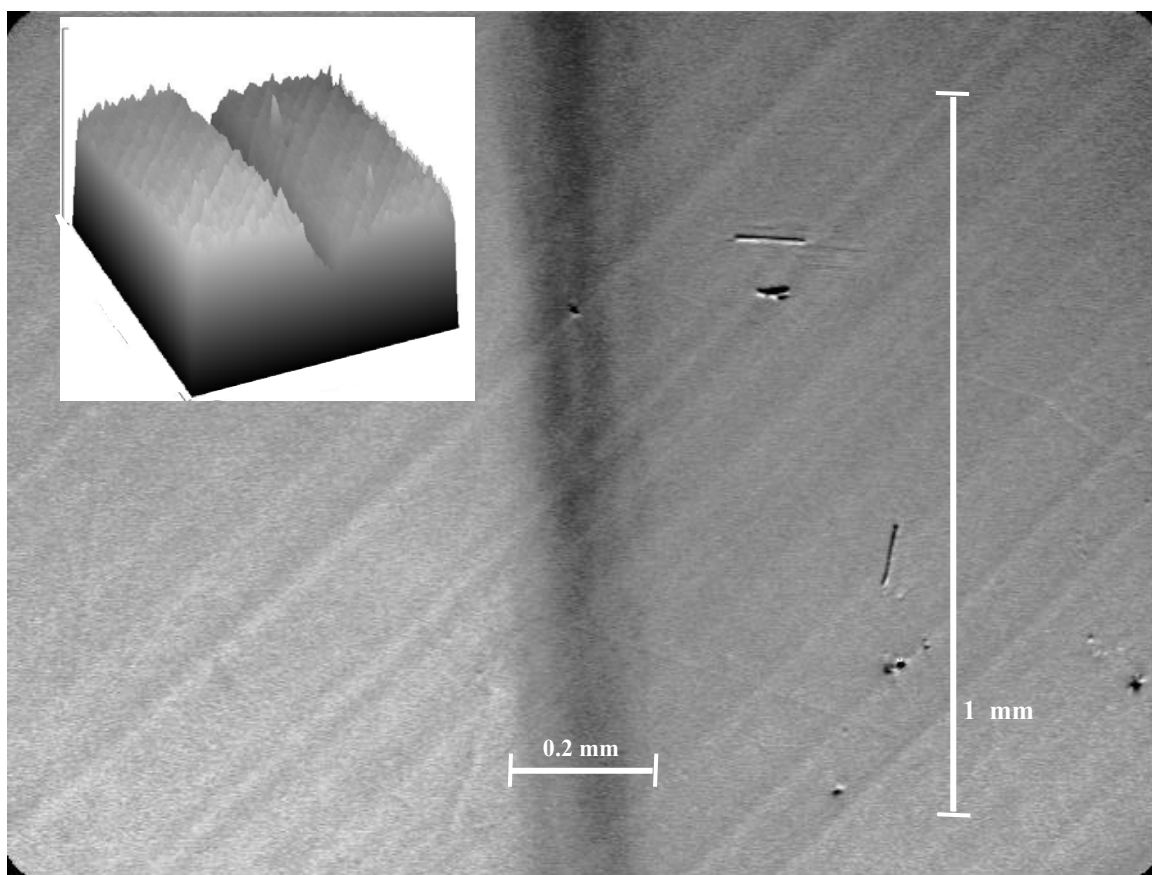
## 6.3.1. מדידות פרופיל שדה מגנטי לוקלי במערכת מגנטו-אופטית

המודלים שתיארנו בפרק הרקע צופים התפתחות שדה חשמלי כתוצאה מתנועת קווי שטף. מודל ההתנגדות הדינמית בוחן את תנועת קווי השטף המקבילים לכיוון השדה והם אלו האחראים ליצירת השדה החשמלי. לעומתו, במודל "הצעידה", שדה חילופי הניצב לקווי השטף גורם להטייתם בכיוונים המתחלפים עם שינוי סימן השדה החיצוני ובסופו של דבר ל"פסיעה" של קו השטף בכיוון הנקבע ע"י כוח לורנץ המקומי. במודל ה"shaking", השדה החילופי הניצב לקווי השטף משחרר אותם מתוך בורות הלכידה ומאפשר להם לנוע בתנועה של flux flow, גם כאן בכיוון כוח לורנץ.

ניתן איפוא לראות כי בעוד במודל ההתנגדות הדינמית השדה החשמלי מושפע ישירות מ-B, בשני המודלים האחרים  $J_{ac}$  (זרמי המיסוך של השדה המגנטי החילופי) הוא הפרמטר העיקרי הקובע את מידת החופשיות של קווי השטף ולפיכך את השדה החשמלי. כדי למדוד את הזרם  $J_{ac}$ , המושרה בכיוון השדה החילופי החיצוני, בצענו סדרת מדידות מגנטו-אופטיות. מדידות אלו מאפשרות לקבל את פרופיל השדה בדגם שהוא פרופורציוני ישירות לזרם הנ"ל.

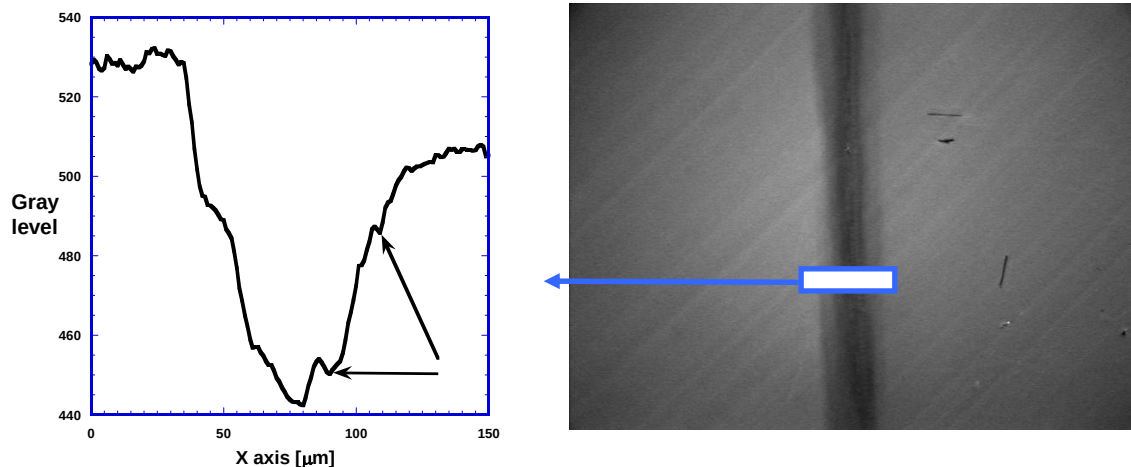
מערכת מגנטו אופטית חוקרת פרופילים מגנטיים ותמונות התפתחות בזמן של פרופילים מגנטיים. על גוף נחושת המקורר לטמפרטורת חנקן נוזלי 77 K הנחנו דגם חוט מוליך-על באופן שהתמונה המגנטית תהיה של האינדוקציה המגנטית במישור a-b. הפעלנו שדות שונים בין עד ל 250 G ובתדרים 10 Hz וצילמנו את האינדוקציה המגנטית הלוקאלית בחומר. חקר זה של האינדוקציה הלוקאלית לכיוון מישור a-b אינו נפוץ הן מבחינת הקושי המכני (העמדת אינדיקטור מגנטו אופטי בצורה מאונכת למישור הרחב של הדגם, כאשר יחס האורך רוחב של הדגם הוא 20) והן מפני שרוב המחקרים עוסקים בתופעות המתרחשות במגנטיות בציר c. במדידות אלו ניתן לראות שמוליך-העל מתנהג כמוליך-על גם במישור a-b. נתון זה אינו טריוויאלי שכן חוט מוליך-העל הוא רב סיבי, כפי שצוין במבוא, ועל כן זרמי המיסוך שעוברים בו עוברים בהכרח דרך מטריצת הכסף שאינה מוליכה על.

מערכת שתוכל לצלם את פרופיל השדה המגנטי בחוט מוליך-על כאשר זורם בו זרם וגם מופעל עליו שדה מגנטי היתה יכולה ללא ספק להבהיר טוב יותר מהו מקור המתח החשמלי הנמדד. שכן ניתן היה לראות תזוזות קווי שטף המתאימה למודל ההתנגדות הדינמית בזמן אמת.



**תמונה 30.** האינדוקציה המגנטית של חוט מוליך-על החשוף לשדה מגנטי מקבילי כפי הנצפית במערכת המגנטו-אופטית במעבדת הלאומית למוליכות על בבר אילן.

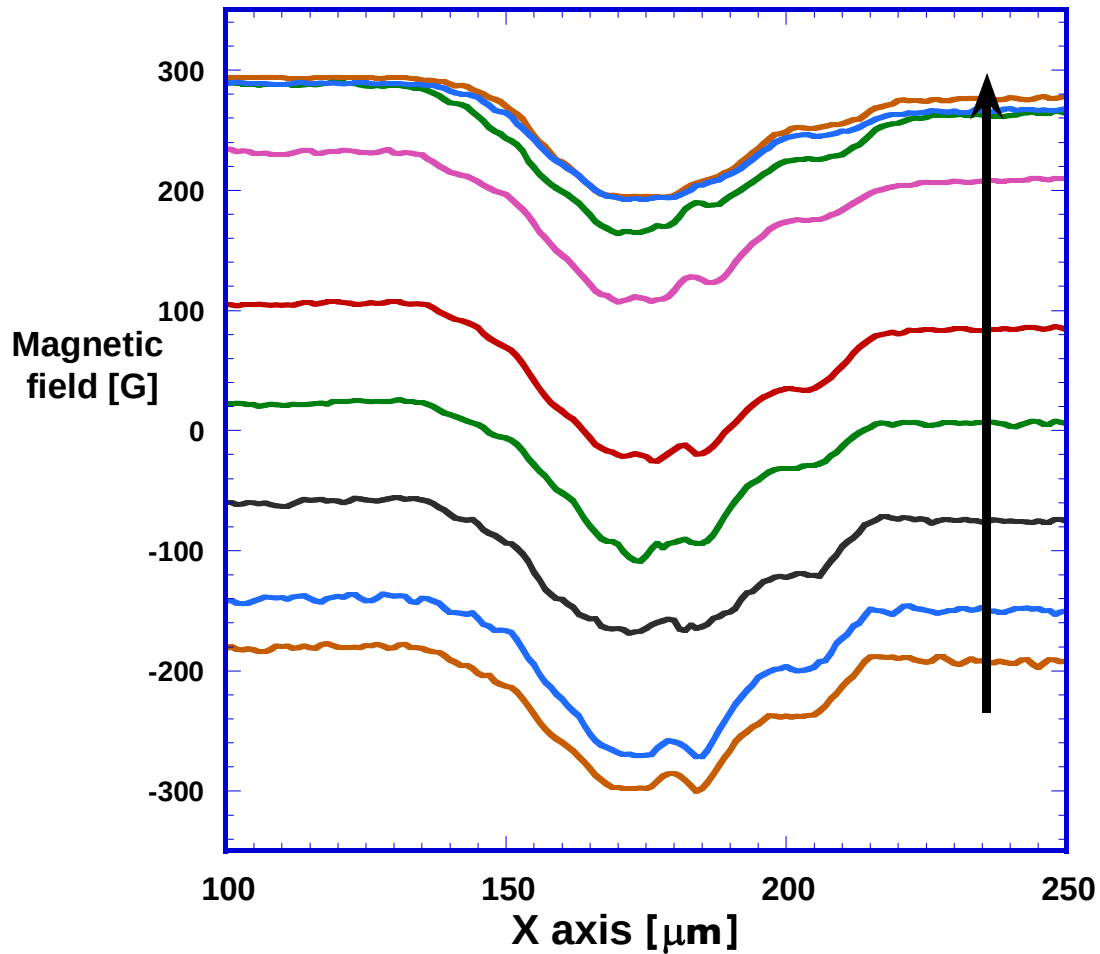
בתמונה זו ניתן לראות מוליך-על החשוף לשדה מגנטי חילופי. את התמונה המגנטית מנתחים על ידי חישוב כמות האור הנמדדת בכל נקודה. ככל שיש יותר אור כך יש שדה מגנטי גדול יותר. בתמונה הקטנה בחלק השמאלי רואים תמונת שטח של עוצמות האור ובהן רואים בברור את פרופיל החדירה שאותו אנו מציגים בגרפים הבאים ניתן לראות במרכז התמונה מקטע שחור שהוא המוליך-העל בו, ברגע העלאת שדה יש שדה מגנטי קטן יותר מהשדה סביבו. ניתן להבחין,



תמונה 31. תמונה מגנטו אופטית של הפנים הצרים של חוט BSCCO החשוף לשדה מקבילי. פרופיל השדה המגנטי, הנמדד בתוך הריבוע הכחול, נתון בגרף השמאלי.

תמונות אלו המראות לראשונה את ההתנהגות המורכבת של חוט מולטי-פילאמנט החשוף לשדה מגנטי מקבילי. תמונה זו התקבלה כאשר השדה המגנטי הועלה. ניתן לראות כי במקומות המסומנים בחץ בגרף השמאלי קיים פרופיל נוסף של שדה מגנטי מלבד זה הנראה בכל הדגם. מקומות אלו הם המקומות בהם יש פילאמנטים. תוצאה זו נצפתה כבדרך אגב ואיננה מהותית למחקר זה. להרחבה בנושא זה ניתן לראות את עבודתם של Johansen et al [38].

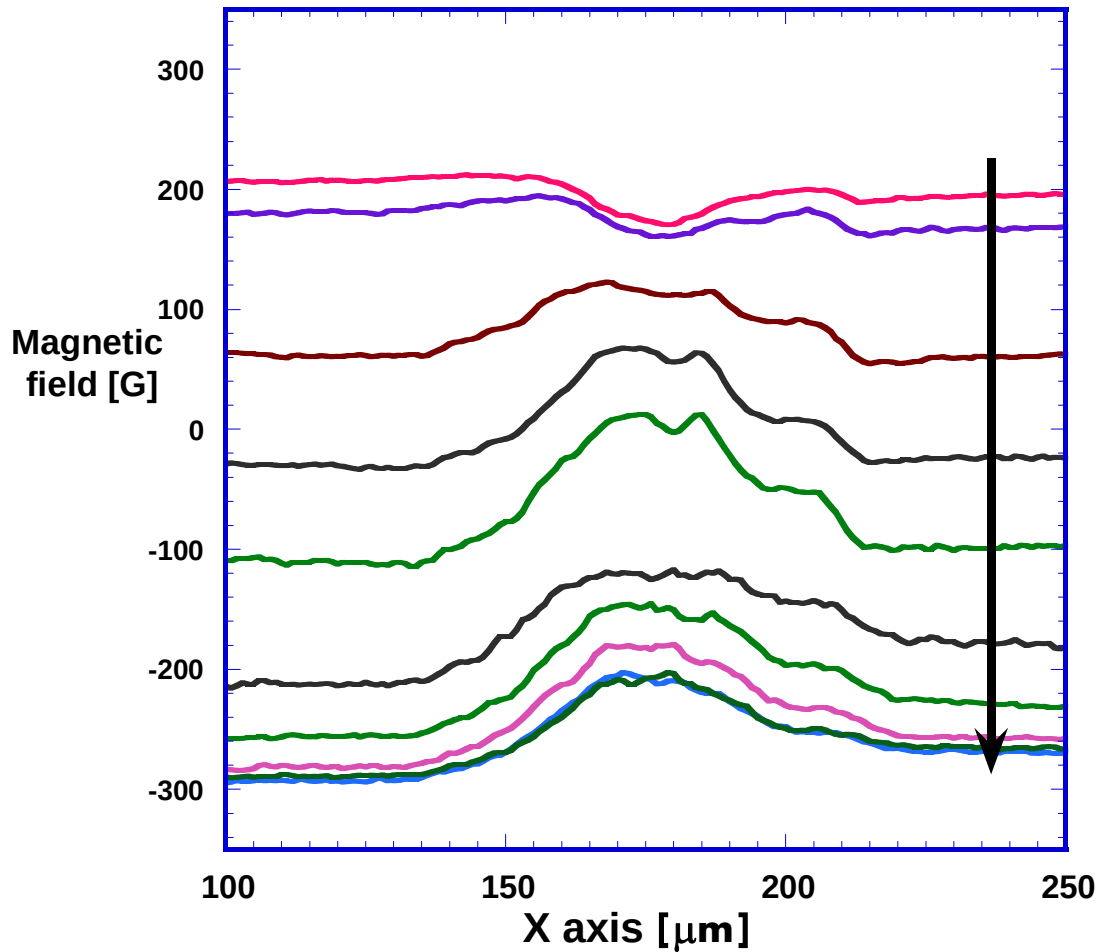




תמונה 32. פרופילי שדה מגנטי במשך עליית השדה החיצוני עד לערך של 300 G תדר 55 Hz וטמפרטורה 77 K. כל אחד מהקווים מסמל צילום הפרופיל המגנטי בזמן אחר במהלך העלאת שדה. ציר ה- x הוא המיקום ביחידות מיקרו-מטר.

כאשר השדה המגנטי החיצוני עולה נוצר פרופיל שדה מגנטי ששיפועו אינו משתנה מגודל השדה. לאחר שהשדה עולה והפרופיל נקבע, עלייה נוספת של השדה מעלה את רמת המגנטיזציה בכל הדגם בצורה שווה. תמונה זו היא תמונה אופיינית של התנהגות מגנטית לוקאלית בחומרים מוליכי-על החשופים לשדה מגנטי חיצוני. מגרף זה ניתן למצוא את הזרם הקריטי על ידי הנוסחה  $\partial B_x / \partial y = \mu_0 J_z$  (האיבר  $\partial B_y / \partial x = \mu_0 J_z$  מוזנח שכיוון השדה החיצוני הוא x, על פי [2]). על פי חישוב הממוצע פרופילים רבים נמצא שצפיפות הזרם הקריטי במוליך-על זה היא  $9,550 \text{ A/cm}^2$ . גודל אופייני לחוטיים מוליכי-על. צפיפות הזרם על פי מדידות מוליכות על פי הקריטריון 1 מיקרו וולט לס"מ הוא  $15,000 \text{ A/cm}^2$ . כמו כן ביצענו את הניסוי בתדר 10 Hz ומצאנו כי שיפוע השדה אינו משתנה. תדרים גדולים מתדרים אלו לא מתאפשרים במערכת הקיימת בגלל מגבלות המצלמה.

### פרופילי שדה מגנטי במשך ירידת השדה החיצוני



**תמונה 33.** פרופיל השדה המגנטי הממוצע בתוך שטח החתך של הדגם.

כל אחד מהקווים מסמל צילום הפרופיל המגנטי במהלך ירידת שדה. אמפליטודת השדה 300 G והתדר 55 Hz.

בתמונה זו רואים את התמונה המגנטית בירידת השדה. הן בתמונה זו והן בתמונה הקודמת רואים כי שיפוע השדה המגנטי בתוך הדגם,  $J_{ac}$ , אינו תלוי באמפליטודת השדה. ניתן לראות גם כן כי העלאת שדה מעלה את צפיפות קווי השטף בתוך הדגם –  $B_{ac}$ . נתון זה אינו מפתיע אך מחייב כי המודל שיתאר את תופעה זו יראה כי עלייה בצפיפות השדה המגנטי המקבילי בתוך הדגם היא המקור לשדה החשמלי.

לסיכום פרק זה התוצאות העיקריות של מדידות אלו הן:

1. חדירת השטף היא טוטאלית, ללא שדה ראשוני בר מדידה.
2. חוט המוליך על המורכב מפילאמנטים רבים מתנהג כיחידה אחת מוליכת על בכיוון מישור a-b.
3. זרמי המיסוך אינם תלויים באמפליטודת השדה, והתלות בתדר קטנה.

## 6. דיון

בתחילת פרק זה נסקור את התוצאות העיקריות של הניסויים שבוצעו.

עיקרי התוצאות של מדידות המתח הממוצע (עקומות I-E)

- עקומות ה E-I מתנהגות בצורה שונה לפני ואחרי הזרם הקריטי "ההנדסי". לפני הזרם הקריטי יש כמעט ליניאריות בין המתח לזרם ולאחר מכאן יש תלות מעריכית עם חזקה גבוהה.
- קיימת, ובקירוב טוב, תלות ליניארית של השדה החשמלי בתדר השדה, בעוצמת השדה ובזרם הזורם בחוט בזרמים הנמוכים מהזרם הקריטי ההנדסי. יש התאמה כמותית טובה מאוד לצפי הנוסחה התיאורטית שנבחנה בפרק 6.1.2.
- ככל שאמפליטודת השדה AC עולה כך הזרמים בהם מתחיל להתפתח מתח קטנים
- הזרם בו מתחיל להיווצר המתח אינו תלוי בתדר.
- השדה החשמלי הנוצר כתוצאה מהשפעת השדה המגנטי החילופי הוא במגמת ירידה כאשר הזרם גדל מעל לזרם קריטי

עיקרי התוצאות של מדידות המתח כפונקציה של הזמן

- השדה החשמלי מקסימאלי כאשר השדה המגנטי במגמת עלייה וקטן כאשר השדה מקסימאלי.
- צורת האות המגיב לסינוס הוא סינוס בעל תדר כפול. נובע מכך כי בכל מחזור של השדה המגנטי קווי השטף מבצעים תנועה כפולה.
- העלאת אמפליטודת השדה מעלה את אמפליטודת האות, לעומת זאת העלאת התדר מעלה את רמת ה DC של האות.

עיקרי התוצאות של המדידות המגנטו-אופטיות

- שדה מגנטי מקבילי יוצר פרופיל מגנטי לאורך ציר c. פרופיל זה אינו תלוי בעוצמת השדה.
- העלאת השדה המגנטי מעלה בצורה ישירה ופרופורציונית את כמות השטף המגנטי הנמצא בחומר.

בפרק זה נראה איך כל אחת מתוצאות הניסוי מראות כי :

- א. מקור השדה החשמלי בחוט מוליך-על החשוף לשדה מגנטי מקבילי הוא בתנועת קווי שטף המקבילים למישור a-b ולא בתנועת קווי השטף המאונכים למישור זה.
- ב. המודל המתאים ביותר לתאר את תנועת קווי שטף אלו הוא מודל ההתנגדות הדינמית.

במטרות העבודה רשמנו כי ננסה לבחון את המקרה שלנו על פי שלוש תיאוריות. נחזור בקצרה על עיקרי כל אחת מהתאוריות :

- ניעור פלקסונים – שדה חילופי ניצב לפלקסונים מנענע את מערך הפלקסונים שמקורם בזרם הישר ומוציא אותם מבורות הלכידה, כתוצאה מכך הם חופשיים בתנועתם להגיב לכוח לורנץ הפועל עליהם כתוצאה מהזרם הישר.
- צעידת פלקסונים - מקור המתח החשמלי הוא בתנועת קווי השטף המאונכים למישור הדגם. קווי שטף אלו נעים למרכז הדגם כתוצאה מכוח לורנץ הנוצר מהזרם הישר ומהזרמים המושרים על ידי השדה החילופי.
- ההתנגדות הדינמית - מקור המתח הוא בקווי השטף המקבילים למישור הדגם. קווי שטף אלו חוצים את הדגם מצד לצד בכל מחזור של השדה החילופי. מעבר זה מתרחש בשני שלבים האחד כניסת השטף למרכז הדגם מצד א והשלב השני הוא יציאה מצד ב של הדגם.

מעקומות ה E-I ניתן לראות כי קיימים שני מקורות למתח החשמלי. האחד, הידוע, המייצר תלות מעריכית בין המתח לזרם - כוח לורנץ המוציא את קווי השטף המאונכים למישור הדגם מחוץ למרכזי לכידתם בזרמים הגדולים מזרם קריטי. אופי התלות בין המתח לזרם בזרמים הקטנים מזרם קריטי, תלות שאינה מעריכית אלא ליניארית, מלמד שמקור המתח אינו אותו המקור שמייצר מתח בזרמים הגדולים מזרם קריטי. ואכן מודל ההתנגדות הדינמית הוא היחיד שחזזה שהמקור למתח חשמלי הוא ממקור שונה. המקור למתח זה אינו בקווי השטף המאונכים לפני השטח אלא בקווי השטף המקבילים לפני השטח.

ראינו שקיימת תלות ליניארית בין השדה החשמלי לתדר השדה החילופי לעוצמתו ולזרם הזורם בחוט. כאשר התלות בין הגורמים האלו לשדה החשמלי היא ליניארית יש להניח שההשפעה של גורמים אלו על השדה החשמלי היא ישירה. ואכן תנועת קווי השטף המקבילים למישור a-b מושפעים ישירות הן מעוצמת הזרם הישר (כוח לורנץ גדל ככל שהזרם עולה) והן מעוצמת השדה החילופי המקבילי (צפיפות קווי שטף אלו עולה). מודל ההתנגדות הדינמית מוסיף לתלות זאת את התלות הליניארית של השדה החשמלי בתדר שכן ככל שהתדר עולה גדל מספר

נתון נוסף הנלמד מתוצאות המתח הממוצע הוא שככל שאמפליטודת השדה גדלה כך קטן הזרם בו מתחיל להתפתח מתח, אך זרם זה כמעט ולא תלוי בתדר. ואכן במודל ההתנגדות הדינמית ובמודל ה"צעידה" מתחיל להתפתח מתח רק כאשר הזרמים, הזרם החיצוני וזרמי המיסוך, ממלאים את כל הדגם. זאת אומרת שככל שאמפליטודת השדה עולה זרמי המיסוך גדלים ומספיק זרם DC קטן על מנת להיות במצב של חדירה מלאה. לעומת זאת לתדר השפעה קטנה על זרמים אלו, ואכן התוצאות מאשרות נקודה זו. מנתון זה לא ניתן ללמוד בהכרח על מקור השדה החשמלי מכיוון ששלושת המנגנונים שנבחנו בעבודה זו צופים את אותה התלות של הזרם בו מתחיל להתפתח מתח באמפליטודה ותדר השדה החיצוני. תלות זו היא אכן התלות שנצפתה.

בזרמים הגדולים מזרם קריטי ניתן לראות כי השדה החשמלי המתפתח כתוצאה מהשדה המגנטי החילופי קטן ביחס לשדה החשמלי המתפתח כתוצאה מהעלאת הזרם. בעוד עליית השדה החשמלי לפני הזרם הקריטי היא עלייה ליניארית, מעל זרם קריטי העלייה היא עלייה מעריכית ולא ניתן עוד להבחין בהשפעת השדה המגנטי החילופי על השדה החשמלי. נתון זה מלמד אותנו שישנם שני מקורות לשדה החשמלי האחד לאחר הזרם הקריטי והוא תנועת קווי שטף המאונכים למישור  $a-b$ , והשני, המוכרח להיות מקור שונה מהראשון, הוא תנועת קווי שטף המקבילים למישור  $a-b$ . מודל ההתנגדות הדינמית הוא המודל היחיד בו מקור השדה החשמלי אינו בקווי שטף המאונכים למישור  $a-b$ .

לפי התוצאות של התלות של השדה החשמלי בזמן ניתן לראות כי השדה החשמלי מקסימאלי כאשר השדה המגנטי במגמת עלייה וקטן כאשר השדה מקסימאלי. זאת אומרת שקווי השטף המייצרים את המתח החשמלי אינם זזים בצורה מונוטונית בזמן אלא זזים באופן לא רציפה, פעמיים בכל מחזור. מודל ההתנגדות הדינמית צופה שבזמן שהשדה החילופי במגמת עלייה קווי השטף הנמצאים במרכז הדגם ינוחו ולא ינועו, ובזמן עליית השדה או ירידתו קווי השטף נעים. ואכן ניתן לראות כי כאשר השדה עולה או יורד נוצר מתח וכאשר הוא בשיאו המתח החשמלי קטן, תמונה 28.

במידת האות התלוי בזמן ראינו שהתגובה של המערכת להפרעה סינוסואידלית היא שדה חשמלי סינוסואידלי בעל תדר כפול. היגב זה מלמד אותנו שהמערכת היא מערכת ליניארית שכן המערכת אינה משנה את אופי ההפרעה. מודל ההתנגדות הדינמית אינו מניח שתהליכים פנימיים בחומר, תהליכים מיקרוסקופיים, אשר במוליכי-על אינם ליניאריים, הם המקור להופעת

תופעה נוספת שהתגלתה במדידות האות התלוי בזמן היא השוני בין השפעת התדר והאמפליטודה על האות החשמלי. בעוד שהעלאת אמפליטודת השדה מעלה את אמפליטודת האות החשמלי, העלאת התדר מעלה את רמת ה-DC. העלאת המשרעת של השדה מגדילה את כמות קווי השטף החודרים את הדגם אך עלייה בתדר השדה אינה משנה את כמות קווי השטף שעוברים את החומר. על פי מודל ההתנגדות הדינמית כמות קווי השטף אינה תלויה בתדר השדה אך מהירות קווי השטף תלויה בתדר ככל שהתדר גדול יותר זמן המעבר של קווי שטף מצד לצד קטן ועל כן מהירותם גדלה. Offset האות מושפע מהמהירות שקווי השטף נעים, ועל כן הוא גדל ככל שהתדר עולה.

מדידות מגנטו אופטיות מראות בבירור כי שיפוע פרופיל השדה כמעט שאינו תלוי בעוצמת השדה החילופי, אם בכלל. במילים אחרות, העלאת  $B_{ac}$  אינה גורמת להעלאת  $J_{ac}$  ולפיכך היינו מצפים לשדה חשמלי שאינו תלוי ב-B לו רק קווי השטף המאונכים לחוט היו אחראים ליצירת השדה החשמלי, שכן אלו מושפעים רק מ  $J_{ac}$ .

מנגד ניתן לראות כי עליית השדה המגנטי מגבירה את הצפיפות המגנטית בתוך הדגם B- וכן התוצאות הקודמות מראות כי ככל שאמפליטודת השדה עולה כך השדה החשמלי עולה. העלאת השדה מגדילה את צפיפות קווי השטף המקבילים למישור a-b ונמדדת מכאן עלייה בשדה החשמלי, ניתן להסיק מכך שקווי שטף אלו הם המקור לשדה החשמלי המתפתח בדגם.

מנגד קיימים עוד שני מודלים שבחנו את התוצאות לפיהם:

האחד הוא נייעור - "shaking" קווי השטף. מודל זה לא צופה תלות בתדר שכן ברגע שנוערו קווי השטף והוצאו ממרכזי הלכידה, עלייה בתדר לא תשנה מאומה. בנוסף תיאורית הנייעור צופה כי לאחר ששחררו קווי השטף המאונכים למישור a-b, שמקורם בזרם הישר, הם ינועו במהירות שאינה תלויה בזמן שכן הם מגיבים לכוח לורנץ קבוע שכן השפעת השדה החילופי הינה שחרור קווי השטף הלכודים והזרם הישר הוא המניע את קווי השטף. אך אנו רואים על פי ניתוח האותות התלויים בזמן שהשדה החשמלי תלוי בזמן זאת אומרת שתנועת קווי השטף אינה רציפה אלא תלויה בזמן.

השני הוא מודל הצעיפה של Brandt, על פי תיאוריה זו המתח נוצר כתוצאה מתנועת קווי שטף המאונכים לפני החוט. קווי שטף אלו הם קווי שטף המייצרים את השדה החשמלי בחוט מוליך על שזורם בו זרם מעל זרם קריטי ואינו חשוף כלל לשדה מגנטי. הצפי ליצירת מתח חשמלי של תנועת קווי שטף אלו הוא מתח התלוי בצורה מעריכית בזרם, שכן הדינאמיקה הידועה לתנועת קווי שטף אלו היא Flux creep. תוספת המתח החשמלי המיוחדת לקופיגורציית השדה החילופי המקבילי אינה מתנהגת כלל על פי חוק החזקה, תמונה 16. ההתנהגות השונה של המתח החשמלי לפני ואחרי הזרם הקריטי ההנדסי מחייבת אותנו להבנה שקיימים שני מקורות שונים למתח החשמלי. מודל זה מניח כי מדובר באותו המקור למתח, ועל כן מודל זה מתאים פחות להסבר התופעה בחוטיים.

למעשה אין הבדל כמותי בגודל השדה החשמלי בין שני המודלים (מודל הצעיפה וההתנגדות הדינאמית) וההכרעה בין שיטות אלו היא איכותית בלבד.

על פי התמונות המגנטו-אופטיות של האינדוקציה בדגם אנו רואים שהפרופיל המגנטי המייצר את  $J_{ac}$  קיים אך אינו משתנה כאשר אמפליטודת השדה עולה. על פי תמונות אלו, אם אכן יצירת המתח בחוטיים הייתה לפי מודל הצעיפה, ניתן היה לצפות שהשדה החשמלי לא היה תלוי באמפליטודת השדה. אך התוצאות מראות קשר ליניארי בין עוצמת השדה לשדה החשמלי.

## 7. סיכום

לסיכום עבודה זו נאמר כי ראינו שהשדה החשמלי המתפתח בחוט מוליך-על החשוף לשדה מגנטי חילופי מקבילי מתנהג בצורה מפתיעה הן כמותית והן איכותית. מבחינה כמותית מצאנו כי השדה החילופי המקבילי הוא בעל השפעה חזקה מאוד ביחס לשדה ישר באותו הכיוון ושעל כל מתכנן סלילים HTS, החשוף לשדות חילופיים, לקחת בחשבון רב את איבודי האנרגיה הנובעים מחשיפת החוט לשדות אלו. מבחינה איכותית ראינו כי התפתחות השדה החשמלי במקרה זה שונה מכל התפתחות שדה חשמלי שנמדדה עד היום. חקרנו בהרחבה את התנהגות השדה החשמלי הן הממוצע והן הרגעי בחשיפה לשדות מגנטיים השונים בעוצמתם ותדירותם ובטווח זרמים גדול. ובנוסף חקרנו את ההתנהגות המגנטית של החוט כאשר הוא חשוף לשדה חילופי והגענו למסקנה כי קווי השטף המקבילים לפני החוט, הנכנסים לדגם מצד אחד כתוצאה ויוצאים ממנו מצד שני בכל מחזור של השדה החילופי, הם המקור למתח החשמלי. מודל ההתנגדות הדינמית, שפותח לראשונה על ידי Ogasawara לפני שלושים שנה, הורחב ע"י Brandt & Mikitik ו Huebener על מנת לתאר ההשפעה של שדה מגנטי חילופי על התכונות המגנטיות והחשמליות של מוליך על החשוף לשדה חילופי, הוא המנגנון הגורם ליצירת שדה חשמלי בחוטים מוליכי-על החשופים לשדה מגנטי חילופי המקביל לפני השטח.



# References

1. *Handbook of Applied Superconductivity*, Ed. B. Seeber, Inst. of Physics Pub. Bristol and Philadelphia, Chapter **B 9.2**, 446 (1998).
2. *Introduction to Superconductivity and High-Tc materials*, M. Cyrot, D. Pavuna, pub world scientific Jul (1992).
3. A.B. Pippard, IEEE **19**, 217220 (1969).
4. J. G. Bednorz and K. A. Muller, Phys. **64**, 189 (1986).
5. American supeconductor. [www.amsuper.com](http://www.amsuper.com)
6. *Superconductivity*, C. P. Poole, H. A. Farach and R. J. Creswick, Pub Academic Press; New Ed edition 194 (1996).
7. D. Majer, E. Zeldov and M. Konczykowski. Phys. Rev. Lett. **75**, 1166 (1995).
8. P. M. Grant, IEEE **7**, 2,(1997).
9. "AC loss in AG/Bi-2223 tapes in AC fields" M. M. Farhoudi, M. Sc thesis Wollongong University (2002).
10. S. Elschner, J. Bock, G. Brommer and P. F. Henmann, IEEE, **32** (1996).
11. C. P. Bean, Phys. Rev. Lett. **8**, 250 (1962).
12. P. W. Anderson, Phys. Rev. Lett. **9**, 309 (1962).
13. *Case Studies in Superconducting Magnets: Design and Operational Issues*, Y. Iwasa, Springer, online publish (1994).
14. Y. Yeshurun, A. P. Malozemoff and A. Shaulov, Rev. Mod. Phys. **68**, 911 (1996).
15. E. Zeldov, D. Majer, M. Konczykowski, V. B. Geshkenbein, V. M. Vinokur and H. Shtrikman, Nature **375**, 373 (1995).
16. N. Avraham, B. Khaykovich, Y. Myasoedov, M. Rappaport, H. Shtrikman, D. E. Feldman, E. Zeldov, T. Tamegai, P. H. Kes and M. Li, Nature **411**, 451 (2001).
17. B.P. Raju, K. C. Parton and T.C. Bartram, IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, **101**, 3173 (1982).
18. Patent pending A. Fridman, Y. Wolfus, Y. Yeshurun and V. Rosenshtein, (2006).
19. E. B. Brandt and G. P. Mikitik Phys. Rev. Lett. **89**, 027002 (2002).
20. L. Burlachkov, E. Mogilko, Y. Schlesinger, Y. M. Strelniker and S. Havlin, Phys. Rev. B, **67**, 104509 (2003).
21. T.Ogasawara, K.Yasukochi and H. Sekizawa, *Cryogenics* **16**, 33 (1976).
22. T.Ogasawara, Y.Takahashi, K. Kanbara, Y.Kubota, K.Yasohama and K.Yasukochi, *Cryogenics*, **19**, 736 (1979).
23. V.V. Adrianov, V. B. Zenkevich, V. V. Kurguzov, V. V. Sychev and F. F. Ternovskiy, Sov. Phys. JETP, **31** 815 (1970).
24. R. P. Huebener, L. G. Stafford and F. E. Aspen, Phys. Rev. B, **5**, 3581 (1972).
25. M. P. Risse, M. G. Aikele, S. G. Doettinger and R. P. Huebener, Phys. Rev. B, **55** 1519 (1997).
26. A. E. Koshelev, Phys. Rev. Lett. **83**, 187 (1999).
27. A. E. Koshelev, Phys. Rev. B, **68** (2003).
28. A. Grigorenko, S. Bending, T. Tamegai, S. Ooi and M. Henini, Nature **414**, 728 (2001).
29. I. F. Voloshin, N. V. Ilin, N. M. Makarov, L. M. Fisher and V.A. Yampolskii, JETP Lett. **53**, 115 (1991).
30. I. F. Voloshin, N. V. Ilin, N. M. Makarov, L. M. Fisher and V.A. Yampolskii, Physica C **268**, 169 (1997).
31. E. B. Brandt and G. P. Mikitik, Superconducting Science and Technology **17**, 1(2004).

32. J. J. Rabbers, B. Ten Haken, F. Gomory and H. H. J. Ten Kate Physica C **300**, 1 (1998).
33. M.P. Oomen, J. Rieger, M. Leghissa, B.T. Haken, T. Kate, Supercond. Sci. Technol. **12** 382 (1999).
34. M. Masti1, J. Lehtonen, R. Perala, R. Mikkonen, L. Soderlund, P. Seppa, Meas. Sci. Technol. **16** 1092 (2005).
35. *"Electromagnetic Power Devices Based on High Temperature Superconductors"* Noam Shaked, Ph.D. Thesis, Bar Ilan University (2003). ; N. Shaked, A. Friedman, M. Sinvani, F. Kopansky, Y. Wolfus, Y. Yeshurun, Physica C **401** (2004).
36. T. H. Johansen, Y. M. Galperin, M. Bazilievich, A. V. Bobyl, M. E. Gaevski. Inst. Phys. Conf. Ser. **167** 653 (2000).
37. *"Calculated E-I characteristics of HTS pancakes and coils exposed to inhomogeneous magnetic field"* Yossi Adanny M.Sc Thesis Bar Ilan University (2005).
38. *"The influence of AC magnetic field on HTS tape carrying DC transport current"* Vladislav Roitberg, M.Sc Thesis Bar Ilan University (2005).
39. D. Giller, A. Shaulov, T. Tamegai and Y. Yeshurun, Phys. Rev. Lett. **84**, 3698 (2000).
40. E. H. Brandt and M. Indenbom, Phys. Rev. B **48**, 12893 (1993).
41. T. H. Johansen, Y. M. Galperin, M. Bazilievich, A. V. Bobyl, D. V. Shantsev, and M. E. Gaevski. Inst. Phys. Conf. **167**, 653 (2000).

Effects of alternating magnetic fields parallel  
to the Cu-O layers in high- $T_c$  superconducting  
wires

**Shmuel Azulay**

Submitted in partial fulfillment of the requirements for the Master's Degree  
in the Department of Physics, Bar-Ilan University

**2006**

**Ramat-Gan, Israel**

This work was carried out  
under the supervision of  
professor Yosef Yeshurun,  
Department of physics,  
Bar-Ilan University.

## **Abstract**

A study of the degradation of the critical current of Bi-2223 tapes under AC magnetic fields is of great importance for HTS power applications. In particular, in a common AC coil design, the field component parallel to plane of the tape is much stronger than the perpendicular component. In this work we present the results of electric field measurements of Bi-2223 tape exposed to AC magnetic field parallel to the broad side of the tape with various frequencies and amplitudes. The observed E-I curves can be described as an additional voltage to the E-I curve superimposed on the zero-field curve. This additional voltage increases with amplitude and frequency of the AC magnetic field and grows almost linearly with DC current, peaks close to the zero-field critical current and decreases thereafter. We analyzed the correlation of the electric field with indicated parameters on the base of the theoretical predictions of Dynamic Resistant and "Marching fluxions" models. Measurements of the time dependent electric field exhibit double-frequency features and strong dependence of the electric field on the amplitude and frequency of the AC magnetic field. As a result, we found, that the magnetic mechanism generates the electric field is one known as "dynamic resistant" model. This model, have developed 30 years ago by Ogasawara, claim that flux lines move along the sample from side to side each cycle of the external field duo to asymmetric magnetic profile caused by the DC current.