

**TC.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AMORF FERROMANYETİK MALZEMELERİN FLUXGATE MANYETİK  
ALAN SENSÖRLERİ OLARAK KULLANIMI**

**ALPER FİDAN**

**DOKTORA TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**HAZİRAN 2014**

## ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Amorf Ferromanyetik Malzemelerin Manyetik Sensör Olarak Kullanımı” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

.....

Alper FİDAN

Tezin Başlığı :Amorf Ferromanyetik Malzemelerin Fluxgate Manyetik Alan Sensörleri Olarak Kullanımı

Tezi Hazırlayan :Alper FİDAN

Sınav Tarihi :06.06.2014

Yukarıda adı geçen tez, jürimizce değeriendirilerek Fizik Ana Bilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

### Sınav Jüri Üyeleri

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Selçuk ATALAY** .....  
İnönü Üniversitesi

**Prof. Dr. Mustafa GÖKTEPE** .....  
Balıkesir Üniversitesi

**Prof. Dr. Funda ATALAY** .....  
İnönü Üniversitesi

**Doç. Dr. Tekin İZGİ** .....  
İnönü Üniversitesi

**Doç. Dr. Nevzat BAYRİ** .....  
İnönü Üniversitesi

**Prof. Dr. Mehmet ALPALSLAN**

Enstitü Müdürü

# ÖZET

Doktora Tezi

## AMORF FERROMANYETİK MALZEMELERİN FLUXGATE MANYETİK ALAN SENSÖRLERİ OLARAK KULLANIMI

Alper Fidan

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

161 + xix sayfa

2014

Danışman: Prof. Dr. Selçuk Atalay

Fluxgate manyetik alan sensörlerinin manyetik sensörler arasında, birçok uygulama için, hem maliyet hem de hassasiyet açısından özel bir yeri vardır. Bu nedenle bu tip sensörlerle ilgili uzun zamandan beri birçok çalışma yapıldığı bilinmektedir.

Bu tezde amorf ferromanyetik  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ ,  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$  şeritleri ve amorf ferromanyetik  $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  telinin bobinsiz fluxgate özellikleri incelenmiştir. Bobinsiz fluxgate sensör yeni tür bir ortogonal fluxgate sensördür. Bugüne kadar şerit şeklindeki amorf ferromanyetik malzemeler ile ilgili herhangi bir bobinsiz fluxgate sensör araştırması rapor edilmemiştir.

Sonuç olarak, bobinsiz fluxgate sensörün amorf ferromanyetik tel ve şeritlerde çalışma mantığı, literatürde yer alan farklı modellere göre araştırılıp tartışılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELE:** Fluxgate, bobinsiz fluxgate sensör, manyetik sensörler,ferromanyetik teller, ferromanyetik şeritler

## **ABSTRACT**

Ph. D. Thesis

### **THE USAGE OF AMORPHOUS FERROMAGNETIC MATERIALS AS FLUXGATE MAGNETIC FIELD SENSORS**

Alper Fidan

Inonu University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics

161 + xix pages

2014

Supervisor: Prof. Dr. Selçuk Atalay

Fluxgate magnetic field sensors have, both in terms of cost and sensitivity, a special place among the magnetic sensors for many applications. For this reason it is known that many research have been done about this kind of sensors for a long time.

In this thesis the coil-less fluxgate properties of amorphous ferromagnetic  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ ,  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$  ribbons and amorphous ferromagnetic  $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  wire were investigated. Coil-less fluxgate sensor is a new type of orthogonal fluxgate sensor. There has been no reported coil-less fluxgate research about amorphous ferromagnetic materials in the form of ribbon up to date.

Consequently, the working principle of the coil-less fluxgate sensor in amorphous ferromagnetic wires and ribbons, in reference to the different models which are in the literature, was investigated and discussed.

**KEYWORDS:** Fluxgate, coil-less fluxgate sensor, magnetic sensors, ferromagnetic wires, ferromagnetic ribbons.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında değerli yorumlarını ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım, kıymetli hocam, Sayın Prof. Dr. Selçuk ATALAY'a;

Deneysel çalışmalarım sırasında benden yardımını esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Nevzat BAYRİ'ye;

Ayrıca benden desteklerini esirgemeyen, kıymetli hocalarım Prof. Dr. Funda ATALAY'a, Doç. Dr. Tekin İZGİ'ye ve Doç. Dr. V. Serkan KOLAT'a;

Deneysel çalışmalarda yardımlarından dolayı Dr. Vedat YAĞMUR'a ve Uzm. Kadir TOY'a;

Tez ile ilgili yorumlarını ve desteğini esirgemeyen sevgili arkadaşım Ali Onur KAYA'ya;

Hayatımın her döneminde bana destek olan AİLEME;

Tez çalışmamı, 109T361 nolu proje numarası ile destekleyen TÜBİTAK'a ve 2011-139 nolu proje numarası ile destekleyen İnönü Üniversitesi BAP birimine;

Sonsuz teşekkür ederim.

Sevgili eşim Nurhan'a...

## İÇİNDEKİLER

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>ÖZET</b> .....                                                    | i   |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                                | ii  |
| <b>TEŞEKKÜR</b> .....                                                | iii |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....                                             | v   |
| <b>SİMGELER ve KISALTMALAR</b> .....                                 | vii |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....                                         | ix  |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....                                       | xix |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....                                                | 1   |
| 1.1. Tezin Amacı .....                                               | 1   |
| 1.2. Tezin Ana Hatları .....                                         | 1   |
| 1.3. Bazı Temel Manyetik Özellikler .....                            | 1   |
| <b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....                                      | 4   |
| 2.1. Amorf Metal Alaşımlar .....                                     | 4   |
| 2.1.1. Amorf Alaşımların Üretimi .....                               | 4   |
| 2.2. Fluxgate Sensörler .....                                        | 9   |
| 2.2.1. Fluxgate sensörün yapısı .....                                | 18  |
| 2.3. Paralel Fluxgate Sensörün Gate (Kapı) Mekanizması .....         | 20  |
| 2.3.1. Tek korlu sensörler .....                                     | 24  |
| 2.3.2. Çift korlu sensörler .....                                    | 24  |
| 2.3.3. Ring- Core sensörler .....                                    | 25  |
| 2.3.4. RTD (Residence times difference) fluxgate sensörler .....     | 26  |
| 2.4. Ortogonal Fluxgate Sensörün Gate (Kapı) Mekanizması .....       | 28  |
| 2.4.1. Tel korlu ortogonal fluxgate sensörler .....                  | 31  |
| 2.4.2. Konumsal Çözünürlük .....                                     | 32  |
| 2.4.3. Telin içinde uyarıcı akım .....                               | 34  |
| 2.4.4. Kompozit teller .....                                         | 35  |
| 2.4.5. Mikro ortogonal fluxgate .....                                | 39  |
| 2.4.6. Çoklu tel kor kullanan sistemler .....                        | 41  |
| 2.4.7. Temel mod fluxgate sensörler .....                            | 43  |
| 2.5. Fluxgate Sensörlerin Performansını Etkileyen Parametreler ..... | 50  |
| 2.6. Bazı Fluxgate Sensör Uygulamaları .....                         | 52  |
| 2.6.1. Fluxgate sensör ile manyetik görüntüleme .....                | 53  |

|           |                                                                                                               |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.6.2.    | Fluxgate sensörlerin uydularda kullanımı .....                                                                | 56         |
| 2.6.3.    | Fluxgate pusula .....                                                                                         | 57         |
| 2.7.      | Sensörlerin Genel Özellikleri .....                                                                           | 59         |
| 2.7.1.    | Transfer fonksiyonu .....                                                                                     | 60         |
| 2.7.2.    | Histeris .....                                                                                                | 61         |
| 2.7.3.    | Kesinlik (Accuracy), Tam ölçek giriş (FSI), Tam ölçek çıkış ( FSO) .....                                      | 61         |
| 2.7.4.    | Kayma (Drift veya Offset ve Perming) .....                                                                    | 62         |
| <b>3.</b> | <b>MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....                                                                               | <b>64</b>  |
| 3.1.      | Giriş .....                                                                                                   | 64         |
| 3.2.      | Numunelerin Hazırlanışı .....                                                                                 | 65         |
| 3.3.      | Ölçüm Sistemleri .....                                                                                        | 68         |
| 3.3.1     | Fluxgate ölçüm sistemi .....                                                                                  | 68         |
| 3.3.2.    | M-H sistemi .....                                                                                             | 70         |
| <b>4.</b> | <b>ARAŞTIRMA BULGULARI</b> .....                                                                              | <b>72</b>  |
| 4.1.      | $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ Numunesi ile İlgili Ölçümler .....             | 72         |
| 4.1.1.    | $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ numunesinin M-H ölçümleri .....                | 72         |
| 4.1.2.    | $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ numunesinin fluxgate ölçümleri .....           | 73         |
| 4.2.      | $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$ Numunesi ile İlgili Ölçümler .....    | 93         |
| 4.2.1.    | $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$ numunesinin M-H ölçümleri .....       | 93         |
| 4.2.2.    | $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$ numunesinin fluxgate ölçümleri .....  | 94         |
| 4.3.      | $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ Numunesi ile İlgili Ölçümler .....   | 108        |
| 4.3.1     | $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ numunesinin M-H ölçümleri .....      | 109        |
| 4.3.2.    | $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ numunesinin fluxgate ölçümleri ..... | 110        |
| <b>5.</b> | <b>TARTIŞMA VE SONUÇ</b> .....                                                                                | <b>130</b> |
| 5.1.      | Bobinsiz Fluxgate Sensörün Yapısı .....                                                                       | 130        |
| 5.2.      | Çalışma Mantığı .....                                                                                         | 131        |
| 5.3.      | $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ Numunesi ile İlgili Sonuçlar .....             | 141        |
| 5.4.      | $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$ Numunesi ile İlgili Sonuçlar .....    | 144        |
| 5.5.      | $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ Numunesi ile İlgili Sonuçlar .....   | 144        |
| 5.6.      | DeneySEL Hata Kaynakları .....                                                                                | 151        |
| 5.7.      | Sonuç .....                                                                                                   | 151        |
| <b>6.</b> | <b>KAYNAKLAR</b> .....                                                                                        | <b>153</b> |
| <b>7.</b> | <b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....                                                                                         | <b>161</b> |

## SİMGELER ve KISALTMALAR

|               |                                               |
|---------------|-----------------------------------------------|
| $\zeta$       | Homojen bir teldeki döndürme etkisi           |
| $\lambda$     | Manyetositriksiyon                            |
| $\lambda_s$   | Doyum manyetositriksiyonu                     |
| $\mu$         | Manyetik geçirgenlik                          |
| $\mu_0$       | Boşluğun manyetik geçirgenliği                |
| $\mu_a$       | Etkin manyetik geçirgenlik                    |
| $\mu_r$       | Görelî manyetik geçirgenlik                   |
| $\chi$        | Manyetik alınganlık                           |
| $A_k$         | Kor malzemenin kesit alanı                    |
| $B$           | Manyetik indüksiyon                           |
| $B_s$         | Doyum manyetik indüksiyonu                    |
| $B_z$         | Z doğrultusundaki manyetik indüksiyon         |
| $D$           | Demanyetizasyon sabiti                        |
| $H_\phi$      | Dairesel yönde uyarıcı alan                   |
| $H_\perp$     | Manyetik alanın dik doğrultudaki bileşeni     |
| $H_\parallel$ | Manyetik alanın paralel doğrultudaki bileşeni |
| $H_{ac}$      | AC manyetik alan                              |
| $H_{dc}$      | Bias kaynaklı manyetik alan                   |
| $H_e$         | Uyarıcı alan                                  |
| $H_{dış}$     | Dış manyetik alan                             |
| $H_s$         | Doyum manyetik alan değeri                    |
| $H_z$         | Z doğrultusundaki dış manyetik alan           |
| $J$           | Akım yoğunluğu                                |
| $K_u$         | Anizotropi ekseni                             |
| $I_\phi$      | Uyarıcı akım                                  |

|                 |                                               |
|-----------------|-----------------------------------------------|
| $L$             | Solenoidin uzunluğu                           |
| $M$             | Manyetizasyon                                 |
| $M_{\perp}$     | Manyetizasyonun dik doğrudadaki bileşeni      |
| $M_{\parallel}$ | Manyetizasyonun paralel doğrultudaki bileşeni |
| $M_p$           | Pozitif yöndeki manyetik momentler            |
| $M_n$           | Negatif yöndeki manyetik momentler            |
| $M_z$           | Z doğrultusundaki manyetizasyon               |
| $N$             | Toplayıcı bobindeki sarım sayısı              |
| $V_{ind}$       | Telin uçlarında oluşın voltaj                 |
| $V_m$           | Matteucci voltajı                             |
| $V_{sec}$       | Çıkış voltajının ikinci harmoniği             |
| $U$             | Potansiyel enerji                             |
| RTD             | Residence times difference                    |
| PCB             | Printed circuit board                         |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|             |                                                                         |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1   | Ferromanyetik bir malzemenin histeris eğrisi.....                       | 2  |
| Şekil 2.1.  | Melt spinning metoduyla üretimin şematik gösterimi.....                 | 3  |
| Şekil 2.2.  | Melt spinning metodu ile amorf şerit ve tellerin üretimi.....           | 6  |
| Şekil 2.3.  | Melt spinning metodu ile üretilen amorf şeritler.....                   | 6  |
| Şekil 2.4.  | In-rotating water-spinning yönteminin şematiği .....                    | 7  |
| Şekil 2.5.  | In-rotating water-spinning yönteminin gösterimi .....                   | 7  |
| Şekil 2.6.  | Üretimden çıkan amorf şerit.....                                        | 8  |
| Şekil 2.7.  | Amorf tellerin manyetostriksiyona göre domain yapısı .....              | 8  |
| Şekil 2.8.  | Temel fluxgate manyetometre devresinin şematik çizimi.....              | 11 |
| Şekil 2.9.  | Paralel ve Ortogonal fluxgate sensörler.....                            | 12 |
| Şekil 2.10. | Fluxgate mantığı.....                                                   | 12 |
| Şekil 2.11. | Çift-Kor (Vacquier) fluxgate sensörün şematik çizimi.....               | 13 |
| Şekil 2.12. | Fluxgate sensörün dalga formları.....                                   | 14 |
| Şekil 2.13. | Farklı giriş sinyali uygulandığında dalga formları.....                 | 15 |
| Şekil 2.14. | Farklı türde paralel fluxgate sensörler .....                           | 16 |
| Şekil 2.15. | Farklı türde ortogonal fluxgate sensörler .....                         | 17 |
| Şekil 2.16. | Kor materyaller için değişik B-H eğrileri .....                         | 18 |
| Şekil 2.17. | Fluxgate sensörün devre şeması.....                                     | 19 |
| Şekil 2.18. | İki çekirdekli fluxgate akı mekanizması .....                           | 20 |
| Şekil 2.19. | RTD fluxgate sensörün şematiği .....                                    | 26 |
| Şekil 2.20. | Potansiyel enerji ve residence time değişimi .....                      | 27 |
| Şekil 2.21. | Ortogonal fluxgate sensörün çalışma mantığı .....                       | 29 |
| Şekil 2.22. | Ortogonal sensör için gating eğrileri .....                             | 30 |
| Şekil 2.23. | Ortogonal fluxgate temelli manyetik mikro telli sensörün şematiği ..... | 31 |
| Şekil 2.24. | Farklı fluxgate sensörlerin konumsal çözünürlüğü .....                  | 33 |
| Şekil 2.25. | Homojen akım dağılımına sahip manyetik tel.....                         | 34 |
| Şekil 2.26. | Manyetik tellerin domain yapısı.....                                    | 35 |
| Şekil 2.27. | Bakır korlu ve manyetik kaplamalı kompozit tel.....                     | 37 |
| Şekil 2.28. | Teorik hesaplamada kullanılan model kompozit tel.....                   | 38 |
| Şekil 2.29. | Cam eklentisi yapılmış kor malzemenin şematik gösterimi.....            | 39 |
| Şekil 2.30. | Mikro fluxgate sensörün şematiği.....                                   | 40 |

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.31. Mikrofluxgate sensörün yapısı.....                                                                                  | 40 |
| Şekil 2.32. Çok-Korlu sistemin şematik gösterimi .....                                                                          | 42 |
| Şekil 2.33. Çok-Korlu sistemde kullanılan kor malzemeler .....                                                                  | 42 |
| Şekil 2.34. Temel modda çalışan fluxgate sensörün devre şeması .....                                                            | 43 |
| Şekil 2.35. Temel modda ortogonal fluxgate sensörün çalışma mantığı .....                                                       | 44 |
| Şekil 2.36. Anizotropi yönelimi .....                                                                                           | 45 |
| Şekil 2.37. Temel modda çalışan fluxgate sensörün dc bias diagramı.....                                                         | 46 |
| Şekil 2.38. Temel mod sensörün şematiği.....                                                                                    | 47 |
| Şekil 2.39. Ortogonal fluxgate sensörler: a) amorf korlu b) tüp korlu .....                                                     | 48 |
| Şekil 2.40. Sensörün çıkış karakteristiği .....                                                                                 | 49 |
| Şekil 2.41. +DC bias ve –DC bias için bulunan giriş-çıkış karakteristiği .....                                                  | 50 |
| Şekil 2.42. Manyetik görüntüleme için tasarlanan fluxgate sensörler .....                                                       | 53 |
| Şekil 2.43. Üretilen sensör ile alınan görüntüler a) Düz sensör ile alınan görüntü<br>b) Eğilmiş sensör ile alınan görüntü..... | 54 |
| Şekil 2.44. Homojen bir manyetik alana sensörlerin tepkisi.....                                                                 | 55 |
| Şekil 2.45. YH-1 uydusu ve fluxgate sensörler.....                                                                              | 56 |
| Şekil 2.46. YH-1 uydusunda kullanılan fluxgate sensörlerin görüntüsü .....                                                      | 57 |
| Şekil 2.27. Yön belirleyici sistemin şematik gösterimi.....                                                                     | 58 |
| Şekil 2.48. Uçağın yönünün yerin manyetik alanına göre belirlenmesi.....                                                        | 58 |
| Şekil 2.49. Bir sensörde histeris oluşumu .....                                                                                 | 61 |
| Şekil 2.50. Offset ve perming olayları .....                                                                                    | 63 |
| Şekil 2.51. Sıcaklık şokundan sonra offset düzelmesi .....                                                                      | 63 |
| Şekil 3.1. Ölçümlerde kullanılan malzemeler .....                                                                               | 66 |
| Şekil 3.2. $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ şeridinin metal mikroskobu görüntüsü .....            | 66 |
| Şekil 3.3. Malzemelere ısıtma işlemi uygulanan sisteminin şematik çizimi.....                                                   | 67 |
| Şekil 3.4. Malzemelere akım altında ısıtma işlemi uygulanan sistem.....                                                         | 67 |
| Şekil 3.5. Ölçümlerde kullanılan sistemin şematik gösterimi .....                                                               | 68 |
| Şekil 3.6. Bobinsiz fluxgate ölçüm sistemi .....                                                                                | 69 |
| Şekil 3.7. Malzemelere tork uygulamak için kullanılan sistemin şematik çizimi....                                               | 79 |
| Şekil 3.8. Ölçümlerde malzemeye tork uygulamak için kullanılan sistem .....                                                     | 70 |
| Şekil 3.9. M-H ölçüm sisteminin şematik gösterimi.....                                                                          | 71 |
| Şekil 3.10. M-H ölçüm sistemi .....                                                                                             | 71 |
| Şekil 4.1. Isıtma işlemi görmemiş $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ malzemesinin M-H ölçümleri ..  | 72 |

|             |                                                                                                                                                                         |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.2.  | 480 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ malzemesinin M-H ölçümleri..... | 73 |
| Şekil 4.3.  | Isıtım işlem görmemiş malzemenin elde edilen 5 kHz ve 30 kHz’de fluxgate ölçümleri.....                                                                                 | 74 |
| Şekil 4.4.  | Isıtım işlem görmemiş malzemenin, 50 kHz’de elde edilen fluxgate ölçümleri.....                                                                                         | 74 |
| Şekil 4.5.  | 480 mA akım, 42.6 Mpa gerilme stresi altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri.....                                                          | 75 |
| Şekil 4.6.  | 480 mA akım ve $3.12\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri.....                                                           | 76 |
| Şekil 4.7.  | 480 mA akım ve $3.12\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri.....                                                           | 76 |
| Şekil 4.8.  | 480 mA akım ve $3.12\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri.....                                                           | 77 |
| Şekil 4.9.  | 480 mA akım ve $12.5\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(5 kHz).....                                                    | 78 |
| Şekil 4.10. | 480 mA akım ve $12.5\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(20 kHz).....                                                   | 78 |
| Şekil 4.11. | 480 mA akım ve $12.5\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(30 kHz).....                                                   | 79 |
| Şekil 4.12. | 480 mA akım ve $12.5\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(50 kHz).....                                                   | 79 |
| Şekil 4.13. | 480 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(10 kHz).....                                                     | 80 |
| Şekil 4.14. | 480 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(30 kHz).....                                                     | 81 |
| Şekil 4.15. | 480 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(40 kHz).....                                                     | 82 |
| Şekil 4.16. | 480 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(50 kHz).....                                                     | 82 |
| Şekil 4.17. | 480 mA akım ve $50\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri.....                                                             | 83 |

|                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.18. 480 mA akım ve $50\pi$ rad/m tork altında, 30 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri.....                                                                                    | 84 |
| Şekil 4.19. 480 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork altında, 10 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri.....                                                                                    | 84 |
| Şekil 4.20. 560 mA akım, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri.....                                                                                                                  | 85 |
| Şekil 4.21. 560 mA akım ve $6.25\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(5 kHz).....                                                                           | 86 |
| Şekil 4.22. 560 mA akım ve $6.25\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(50 kHz).....                                                                          | 86 |
| Şekil 4.23. 480 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri.....                                                                                                          | 87 |
| Şekil 4.24. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtıl işlem yapılmış malzemenin, $8.25\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(20 kHz).....                                                        | 88 |
| Şekil 4.25. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtıl işlem yapılmış malzemenin, $16.5\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(20 kHz).....                                                        | 88 |
| Şekil 4.26. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtıl işlem yapılmış malzemenin, $16.5\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(30 kHz).....                                                        | 89 |
| Şekil 4.27. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtıl işlem yapılmış malzemenin, $16.5\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(30 kHz).....                                                        | 90 |
| Şekil 4.28. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtıl işlem yapılmış malzemenin, $33\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri .....                                                                 | 90 |
| Şekil 4.29. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtıl işlem yapılmış malzemenin, $33\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(20 kHz).....                                                          | 91 |
| Şekil 4.30. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtıl işlem yapılmış malzemenin, $33\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(30 kHz).....                                                          | 92 |
| Şekil 4.31. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtıl işlem yapılmış malzemenin, $33\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(30 kHz).....                                                          | 92 |
| Şekil 4.32. Isıtıl işlem görmemiş malzemenin M-H eğrisi .....                                                                                                                                              | 93 |
| Şekil 4.33. 400 MPa stres, 720mA akım altında 15 dakika ısıtıl işlem ve 180 derece torsion uygulanmış $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$ malzemesinin M-H eğrisi .... | 94 |
| Şekil 4.34. Isıtıl işlem görmemiş malzemenin 30 kHz’de fluxgate ölçümleri .....                                                                                                                            | 95 |

|                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.35. 720 mA akım ve $12.5\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(5 kHz).....                                                       | 95  |
| Şekil 4.36. 720 mA akım ve $12.5\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(10 kHz).....                                                      | 96  |
| Şekil 4.37. 720 mA akım ve $12.5\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(20 kHz).....                                                      | 97  |
| Şekil 4.38. 720 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, $16.5\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(10 kHz) .....              | 97  |
| Şekil 4.39. 720 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, $16.5\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(20 kHz) .....              | 98  |
| Şekil 4.40. 720 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, $16.5\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(30 kHz).....               | 99  |
| Şekil 4.41. 720 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, $33\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(10 kHz) .....                | 99  |
| Şekil 4.42. 720 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, $33\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(20 kHz) .....                | 100 |
| Şekil 4.43. 720 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, $33\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(30 kHz) .....                | 101 |
| Şekil 4.44. 720 mA akım ve $12.5\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sağa ve sola $33\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(20 kHz) ..... | 101 |
| Şekil 4.45. 720 mA akım ve $12.5\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sağa ve sola $33\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(30 kHz).....  | 102 |
| Şekil 4.46. 720 mA akım ve $12.5\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sağa ve sola $33\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(40 kHz) ..... | 103 |

|                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.47. 720 mA akım ve $37.5\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, $16.5\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(5 kHz).....   | 103 |
| Şekil 4.48. 720 mA akım ve $37.5\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, $33\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(5 kHz) .....    | 104 |
| Şekil 4.49. 720 mA akım ve $37.5\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, $8.25\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(20 kHz) ..... | 105 |
| Şekil 4.50. 720 mA akım ve $37.5\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, $16.5\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(20 kHz).....  | 105 |
| Şekil 4.51. 720 mA akım ve $37.5\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, $33\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(20 kHz) .....   | 106 |
| Şekil 4.52. 720 mA akım ve $37.5\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, $49.5\pi$ rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri(20 kHz).....  | 107 |
| Şekil 4.53. 780 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(5 kHz).....                                              | 107 |
| Şekil 4.54. 780 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin fluxgate ölçümleri(20 kHz).....                                             | 108 |
| Şekil 4.25. Isıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ malzemesinin M-H ölçümü.....                                                                                    | 109 |
| Şekil 4.56. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, $12.5\pi$ rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin M-H ölçümü .....                                                | 109 |
| Şekil 4.57. Isıl işlem görmemiş malzemenin fluxgate ölçümü . .....                                                                                                                           | 110 |
| Şekil 4.58. Isıl işlem görmemiş malzemenin 30 mA akım altında, sağa tork uygulanarak fluxgate ölçümleri(20 kHz) .....                                                                        | 111 |
| Şekil 4.59. Isıl işlem görmemiş malzemenin, 30 mA akım altında, sola tork uygulanarak elde edilen fluxgate ölçümleri(20 kHz).....                                                            | 111 |

- Şekil 4.60. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $3,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 30 mA akım altında sağa tork uygulanarak elde edilen fluxgate ölçümleri.....112
- Şekil 4.61. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $3,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 30mA akım altında, sağa tork uygulanarak bulunan fluxgate ölçümleri(20 kHz) .... 113
- Şekil 4.62. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $3,25\pi$ rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sağa tork uygulanarak, 30 mA akım altında fluxgate ölçümleri(20 kHz) ..... 113
- Şekil 4.63. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $3,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sola tork uygulanarak, 30 mA akım altında fluxgate ölçümleri(20 kHz) ..... 114
- Şekil 4.64. 500 MPa gerilme, 30 mA akım altında, sağa  $3,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sola tork uygulanarak bulunan fluxgate ölçümleri(20 kHz) ..... 115
- Şekil 4.65. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $6,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sağa tork uygulanarak, 30 mA akım altında fluxgate ölçümleri(20 kHz).....115
- Şekil 4.66. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $6,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sağa tork uygulanarak, 30 mA akım altında fluxgate ölçümleri(20 kHz) ..... 116
- Şekil 4.67. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $6,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sola tork uygulanarak, 30 mA akım altında fluxgate ölçümleri(20 kHz).....117
- Şekil 4.68. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $6,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sola tork uygulanarak, 30 mA akım altında fluxgate ölçüm değerleri(20 kHz)....117
- Şekil 4.69. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $12,5\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sola tork uygulanarak, 35 mA akım altında fluxgate ölçüm değerleri..... .118
- Şekil 4.70. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $12,5\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sola tork uygulanarak, 35 mA akım altında fluxgate ölçüm değerleri..... 119

|                                                                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.71. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa $12,5\pi$ rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sola tork uygulanarak, 35mA akım altında fluxgate ölçüm değerleri.....     | 119 |
| Şekil 4.72. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa $12,5\pi$ rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sola tork uygulanarak, 35 mA akım altında fluxgate ölçüm değerleri.....    | 120 |
| Şekil 4.73. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa $12,5\pi$ rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sola tork uygulanarak, 35 mA akım altında fluxgate ölçüm değerleri.....    | 121 |
| Şekil 4.74. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa $12,5\pi$ rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sola tork uygulanarak, 35 mA akım altında fluxgate ölçüm değerleri.....    | 121 |
| Şekil 4.75. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 35 mA akım altında, sağa tork uygulanıp, -0.02 volt DC offset eklenerek fluxgate ölçüm değerleri.....             | 122 |
| Şekil 4.76. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 35 mA akım altında, sağa tork uygulanıp, -0.02 volt DC offset eklenerek fluxgate ölçüm değerleri.....             | 123 |
| Şekil 4.77. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 35 mA akım altında, sola tork uygulanıp, -0.02 volt DC offset eklenerek fluxgate ölçüm değerleri.....             | 123 |
| Şekil 4.78. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 35 mA akım altında, sola tork uygulanıp, -0.02 volt DC offset eklenerek fluxgate ölçüm değerleri.....             | 124 |
| Şekil 4.79. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 35 mA akım altında, sağa tork uygulanıp, 0.05 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri ..... | 125 |
| Şekil 4.80. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 35 mA akım altında, sağa tork uygulanıp, 0.05 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri. .... | 125 |
| Şekil 4.81. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 35 mA akım altında, sola tork uygulanıp, 0.05 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri ..... | 126 |

|                                                                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.82. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 35mA akım altında, sola tork uygulanıp, 0.05 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri ..... | 127 |
| Şekil 4.83. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 35mA akım ve 0- 228.6 MPa arası gerilme stresleri altında alınan ölçümleri.....                                  | 127 |
| Şekil 4.84. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 35 mA akım ve farklı gerilme stresleri altında alınan ölçümleri.....                                             | 128 |
| Şekil 4.85. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 30 mA akım, $8.25\pi$ rad/m ve farklı gerilme stresleri altında alınan ölçümleri.....                            | 129 |
| Şekil 4.86. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 30 mA akım, $8.25\pi$ rad/m ve farklı gerilme stresleri altında alınan ölçümleri.....                            | 129 |
| Şekil 5.1. Bobinsiz fluxgate sensörün çalışma mantığı.....                                                                                                                                                   | 131 |
| Şekil 5.2. $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ numunesinin dairesel histeris eğrileri.....                                                                                                          | 132 |
| Şekil 5.3. Matteucci etki için kurulan üç farklı düzenek.....                                                                                                                                                | 134 |
| Şekil 5.4. Pozitif ve negatif yönlerdeki manyetik momentler.....                                                                                                                                             | 136 |
| Şekil 5.5. $H_z$ tarafından indüklenen domain duvar hareketleri.....                                                                                                                                         | 136 |
| Şekil 5.6. Klasik bir ortogonal fluxgate için gating eğrisi .....                                                                                                                                            | 137 |
| Şekil 5.7. Bobinsiz fluxgate kor malzemeleri için değişen gating eğrileri.....                                                                                                                               | 137 |
| Şekil 5.8. $\nu$ kadar döndürme uygulandığında oluşan anizotropi eksenini.....                                                                                                                               | 138 |
| Şekil 5.9. İletken bir telde akımla oluşan dairesel manyetik alan .....                                                                                                                                      | 139 |
| Şekil 5.10. Isıl işlem görmemiş $Co_{71}Fe_4Mo_1Si_{14}B_9$ malzemesinin akıma karşı hassiyet değerleri.....                                                                                                 | 142 |
| Şekil 5.11. 480 mA akım ve $25\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş $Co_{71}Fe_4Mo_1Si_{14}B_9$ malzemesinin akıma karşı hassiyet değerleri .....                                           | 143 |
| Şekil 5.12. Isıl işlem görmemiş ve 480 mA akım, $25\pi$ rad/m tork altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş $Co_{71}Fe_4Mo_1Si_{14}B_9$ malzemesinin hassiyet değerlerinin frekansa karşı grafiği .....        | 143 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.13. 720 mA akım ve $12.5\pi$ rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ malzemesinin, $33\pi$ rad/m tork uygulanarak ölçülen hassasiyet - frekans grafiği..... | 144 |
| Şekil 5.14. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ malzemesinin, 35 mA akım altında, sağa ve sola tork altında hassasiyet grafiği.....                            | 145 |
| Şekil 5.15. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 35 mA akım altında, farklı gerilme streslerine karşı hassasiyet grafiği.....                                                                                               | 146 |
| Şekil 5.16. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 30 mA akım, $8.25\pi$ rad/m tork altında farklı gerilme streslerine karşı hassasiyet grafiği.....                                                                          | 146 |
| Şekil 5.17. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 30 mA akım altında, sağa $4.12\pi$ rad/m tork altında hassasiyet grafiği.....                                                                                              | 147 |
| Şekil 5.18. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 30 mA akım altında, sola $4.12\pi$ rad/m tork altında hassasiyet grafiği.....                                                                                              | 148 |
| Şekil 5.19. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 30 mA akım altında, sağa $8.25\pi$ rad/m tork altında hassasiyet grafiği.....                                                                                              | 148 |
| Şekil 5.20. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, 35 mA akım altında, sağa $16.5\pi$ rad/m tork altında hassasiyet grafiği.....                                                                                              | 149 |
| Şekil 5.21. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım altında, farklı DC offset değerleri ile hassasiyet grafiği.....                                                                                                  | 150 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1. Manyetik sensör türleri ve hassasiyet seviyeleri.....                     | 10 |
| Çizelge 2.2. Bugüne kadar üretilen farklı türde fluxgate sensörler ve özellikleri..... | 52 |
| Çizelge 3.1. Kullanılan malzemelerin bazı manyetik özellikleri.....                    | 65 |

## 1.GİRİŞ

### 1.1. Tezin Amacı

Bu tezde, amorf ferromanyetik malzemelerin bobinsiz fluxgate manyetik alan sensörü olarak kullanımı incelenmiştir. Kor malzeme olarak ferromanyetik, amorf tel ve şeritler kullanılmıştır. Bobinsiz fluxgate sensör, fluxgate sensörler arasında yeni bir tür sensör olarak önerilmiştir. Bu bölümde öncelikle temel tanımlamalar yapılacak ve konunun açıklanması ileriki bölümlere bırakılacaktır.

### 1.2. Tezin Ana Hatları

Tezin ilk bölümü giriş niteliğindedir. Manyetizma ve manyetik sensörlerle ilgili bazı temel ve genel özellikler verilecektir. Ayrıca bu bölümde tezin ileriki bölümlerinde başvurulacak olan bazı temel manyetizma bilgileri verilecektir.

İkinci bölümde fluxgate sensörler ile ilgili daha önceden yapılmış çalışmalar gözden geçirilecektir. Bundan başka, çalışmada kullanılan malzemeler ve üretimi ile ilgili bilgiler verilecektir.

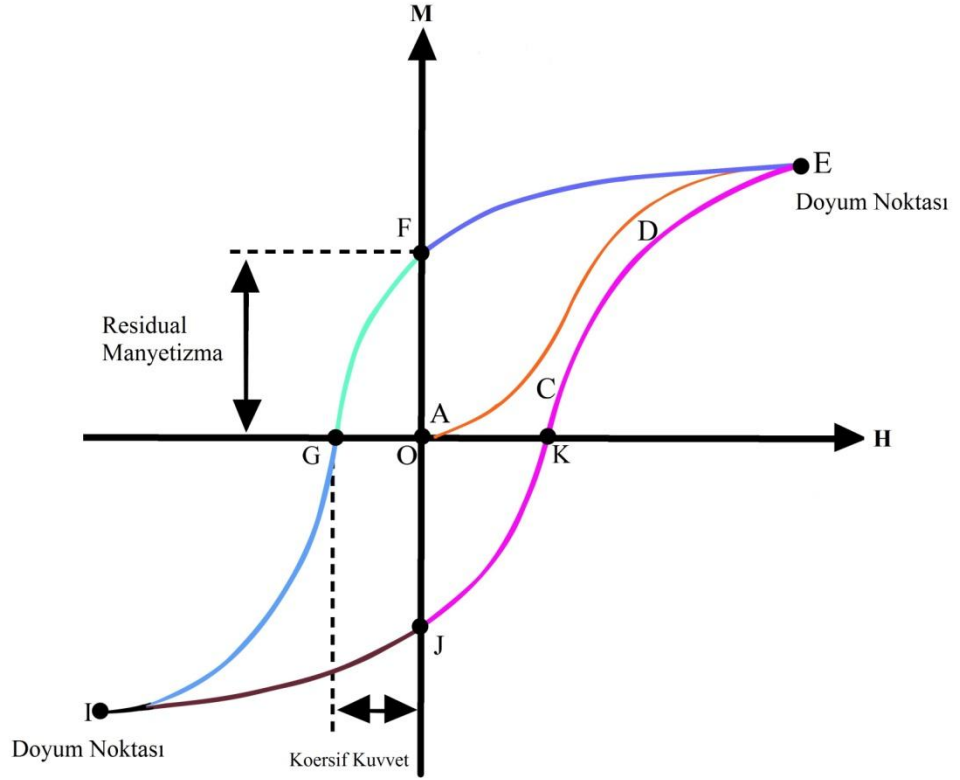
Üçüncü bölümde,  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_1\text{Mo}_1\text{Mn}_4\text{Si}_{14}\text{B}_9$  ve  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$  amorf şeritleri ve  $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  amorf teli ile alınan bobinsiz fluxgate sensör ölçümleri ve M-H ölçümleri ile ilgili deneysel yöntemlere yer verilecektir.

Tezin dördüncü bölümünde araştırmada elde edilen bobinsiz fluxgate ölçümleri ve M-H ölçümlerine ait bulgular verilecektir.

Tezin beşinci bölümü tartışma ve sonuç bölümüdür. Araştırma bulgularından elde edilen sonuçlar yorumlanacak ve bobinsiz fluxgate sensörün daha iyi hale getirilmesi için öneriler sunulacaktır.

### 1.3. Bazı Temel Manyetik Özellikler

Bir manyetik malzeme için en önemli makroskopik özellik M-H eğrisi olarak da adlandırılan histeris eğrisidir [1]. Şekil 1.1’de gösterilmektedir. Bu eğriden manyetik malzemenin ferromanyetik, diamanyetik veya paramanyetik bir malzeme olduğu anlaşılabilir. Ferromanyetik malzemeler için söz konusu eğriden malzemenin soft veya hard manyetik malzeme olduğu da anlaşılır.



Şekil 1.1 Ferromanyetik bir malzemenin histeris eğrisi [2]

Şekil 1.1’de gösterilen eğride başlangıçta malzemenin manyetizasyonun ve dış manyetik alanın sıfır olduğu kabul edilmiştir (O noktası). Dış manyetik alan yavaşça artırıldığında, malzemenin manyetizasyonu, manyetizasyon eğrisi olarak bilinen OACDE eğrisi boyunca artacaktır. E ve I noktaları, sırasıyla pozitif ve negatif yönde doyum noktaları olarak adlandırılmıştır. Bu noktalarda manyetik domainler aynı yöne (dış manyetik alanın yönüne) yönelmiştir. Bu noktalardan sonra, dış manyetik alandaki bir artış malzemenin manyetizasyonuna etki etmeyecektir [2,3].

Dış manyetik alan, H azaltıldığında EF yolunu takip ederek F noktasına kadar gelir. Bu noktada manyetik domainlerden bazıları yönelimlerini kaybederken, bazıları korur. Bu durumda F noktasında bir manyetizasyon değeri ölçülecektir. Burada FO değerine remanance manyetizasyon denir. G noktasında ise malzemenin manyetizasyonu sıfır olur. Burada GO yoluna koersivite bölgesi denir. G’den itibaren dış manyetik alan ters yönde artmaya başlar. Aynı eğri bu defa GIJK yolu için söz konusu olacaktır [2,3].

Şekil 1.1'deki eğrinin eğimi  $\chi$  ile gösterilen manyetik alınganlığı verir. Doyum manyetizasyonu, birim hacimdeki manyetik moment sayısı olarak tanımlanır. Bu eğri manyetik indüksiyona karşı dış alan olarak da çizilebilir (B – H eğrisi). Bu durumda eğim  $\mu$  ile gösterilen manyetik geçirgenliği verecektir. Denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$M = \chi H \quad (1.1)$$

$$B = \mu H \quad (1.2)$$

Burada  $\mu$ , malzemenin manyetik geçirgenliği, B manyetik indüksiyonu, H manyetik alanı temsil etmektedir [1].

Manyetik malzemeler, uygulamada, koersivitelerine göre soft ve hard olarak sınıflandırılabilirler [3]. İyi bir soft manyetik malzeme, düşük bir manyetostriksiyon ile beraber küçük bir histeris ve mümkün olabilen en yüksek derecede manyetik geçirgenlik göstermelidir [4]. Soft manyetik malzemeler genellikle transformatörlerin kor malzemesi olarak, motorlarda ve jeneratörlerde kullanılırken; hard manyetik malzemeler yüksek koersivite, yüksek remanence ve histeris kayıplarını gerektiren hoparlör vb. cihazlarda mıknatıs malzemesi olarak kullanılabilirler [3]. Bunun dışında manyetostriktif özellikli malzemeler de kullanılmaktadır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

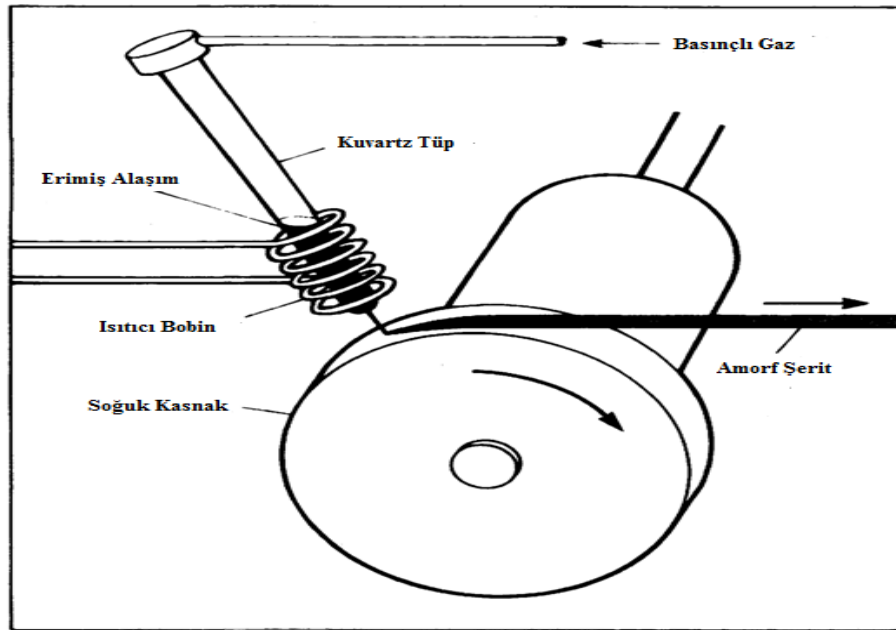
### 2.1. Amorf Metal Alaşımlar

Amorf metal alaşımlar uzun erişimli atomik düzenlenişe sahip olmayan metal alaşımlarıdır. Onlara cam ya da kristal halde olmayan alaşımlarda denir. Metalik camlar atomların uygun enerjiye sahip kristal örgülerine yerleşmelerine zaman kalmadan çok hızlı bir şekilde sıvı fazda soğutulması tekniğiyle üretilen alaşımların bir sınıfıdır. Bu amorf yapının bir sonucu olarak, bu alaşımlar benzersiz manyetik, mekanik, elektriksel ve korozyon davranışları gösterirler. Ferromanyetik özellikler açısından malzemenin kristal yapıya sahip olmasına gerek yoktur. Amorf metal alaşımlarda genellikle kısa menzilli, pozitif bir exchange etkileşimi ferromanyetik durumu sağlamaktadır [5]. Manyetik amorf alaşımlar iki veya üç teknolojik sınıfa ayrılabilir. Bular; transition metal-metaloid (TM-M) alaşımları, rare earth-transition metal (RE-TM) alaşımları ve geçiş metal-zirconium veya hafnium alaşımlarıdır. TM-M alaşımları, genellikle %80 oranında 3d geçiş metalleri (Fe, Ni, Co gibi) ve %15-20 oranında metalloid (M) atomları (genellikle P, B, Si, C) içermektedir. Tipik alaşımlar amorf yapının kararlı ve cam yapının şekillenmesi için gerekli olan Si ve B metalloidleri sayesinde yüzde olarak  $(\text{Fe,Co,Ni})_{70-85}(\text{Si,B})_{30-15}$  şeklindedir. Soft manyetik uygulamalar için amorf malzemeler, tipik olarak yaklaşık 20 µm kalınlığında ve 1-100 mm genişliğinde ince şeritler şeklinde üretilmektedir [6,7]. Bunların içinde Co temelli amorf teller dikkate değer fiziksel özellikleri ve çeşitli uygulamalarda kullanılabilirlikleri açısından dikkat çekmektedir [8].

#### 2.1.1. Amorf Alaşımların Üretimi

Amorf metal alaşımlar splat quenching, melt spinning, gaz atomizasyonu ve gaz fazından yoğunlaştırma gibi birçok hızlı soğutma tekniğiyle üretilmektedir [9]. Eriyik halindeki alaşımların hızlı soğutulmasıyla üretilen amorf alaşımlar, çok ilginç ve karakteristik manyetik, mekaniksel ve elektriksel özellik göstermesinden dolayı birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir [10]. Buna paralel olarak şerit, tel ve tabakalar halinde üretimi mümkün kılan çeşitli üretim teknikleri de geliştirilmiştir. Amorf alaşımlar eriyik haldeki alaşımların hızlı soğutulmasıyla elde edilmektedir. Amorf malzemelerin üretiminde kristal faz oluşumunu engellemek için soğutma

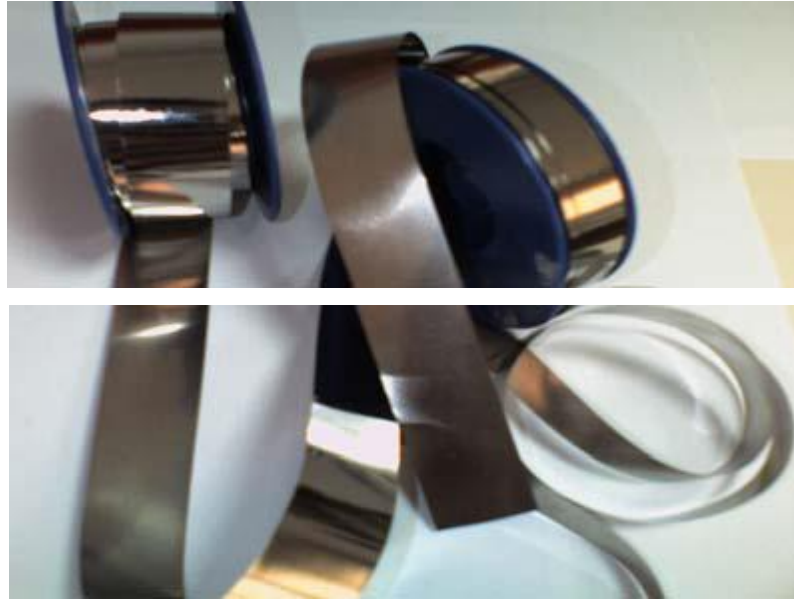
hızının yaklaşık  $10^6$  °C/sn oranında olması gerekmektedir. Bunu sağlamak için üretim sistemi 1 km/dak.'yı aşan hızlarda dönebilir [11]. Üretimde yüksek soğutma oranına gereksinim duyulduğu için bu malzemeler yalnızca ince film, tel ve şerit şeklinde elde edilmektedir. Üretim tekniğinde daha yüksek soğutma oranları amorf malzemelerin içinde elastik gerilmeler ortaya çıkarır. Bu durum, amorf malzemelerin soft manyetik özelliklerinde belirleyici bir faktör olan manyeto-elastik anizotropiyi ortaya çıkarır. Amorf alaşımlar, ilk olarak melt-spinning metodu ile şeritler şeklinde üretilmiştir [12]. Amorf şerit üretiminde, diğer üretim tekniklerine göre bu yöntem en çok kullanılanıdır [9]. Amorf şeritlerin yanı sıra amorf teller de aynı yöntemle üretilmektedir [13]. Bu teknikte belirli oranlarda malzeme istenilen alaşımı elde etmek üzere eriyik kabında bir araya getirilir. Şekil 2.1'de üretim sistemi şematik olarak, Şekil 2.2'de ise üretim anı gösterilmiştir. Daha sonra ısıtıcılar yardımı ile eriyik hale getirilen alaşım uygun bir ağızlık kullanılarak dönen bir termal kütle üzerine boşaltılır ve hızlı bir şekilde katılaştırılır. Üretim işlemi sırasında oksitlenmeyi önlemek için ısıtıcılar inert bir atmosfer altında veya vakum ortamında yapılmaktadır. Sonuçta şerit birkaç santimetre genişliğinde ve birkaç on mikrometre kalınlığındadır. Bugün kullanılmakta olan üretim teknikleri ile şeritler ~1 mm ile 100 mm genişliğinde, 1 µm ile 300 µm kalınlığında ve sınırsız uzunlukta üretilmektedir [14,15]. Üretilen şeritler Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Melt spinning metoduyla üretimin şematik gösterimi [10]



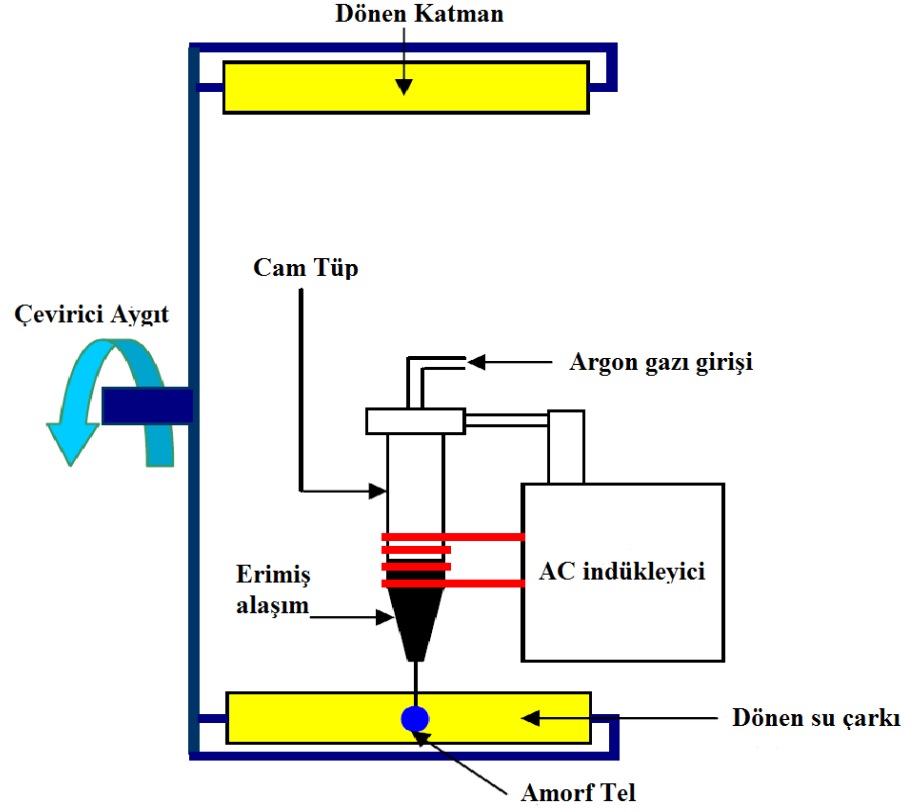
Şekil 2.2. Melt spinning metodu ile amorf şerit ve tellerin üretimi [7]



Şekil 2.3. Melt spinning metodu ile üretilen amorf şeritler [8]

Sistemde kullanılan ağızlığın şekli üretilmek istenen amorf malzemenin şeklini belirlemektedir. Aslında kristalleşme sıcaklığına düşmeden, eriyik fazdan amorf faza soğutma işlemini sürdürmek çok zordur [9]. Bu zorluk nedeniyle melt spinning yöntemi amorf tel üretimi için sınırlı olmaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, Ohnaka in-rotating water-spinning metodunu (soğuk su dolu dönen bir disk içinde tel üretim metodu) geliştirmiştir. Günümüzde amorf tel üretiminde yaygın olarak kullanılan metottur [9]. Bu yöntem Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Bu yöntemde istenilen alaşım altta ağızlığı bulunan bir kuvars eritme kabına konulur ve indüksiyon fırını kullanılarak eriyik hale getirilir. Hızlı soğutma için soğuk su içeren dönen silindir bir kütle kullanılır. Silindir çok yüksek hızla döndüğünde suyun ince dairesel bir tabakası alaşımı iç tarafta şekillendirir. Eriyik formuna gelen alaşım argon gaz basıncının itici kuvveti yardımıyla kuvars tüpün ağızlığından dışarı doğru itilerek soğuk su içerisinde katılaştırılır. Şekil 2.6'da üretim hattındaki şeridin

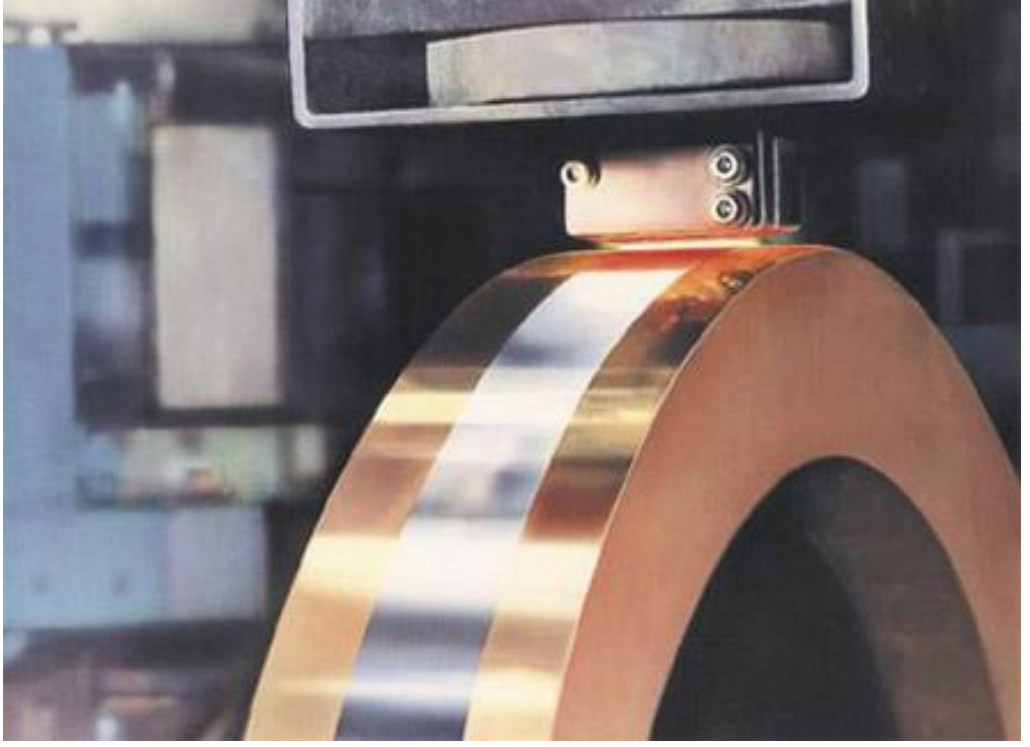
görüntüsü verilmiştir. Şekil 2.7’de ise amorf tellerin pozitif ve negatif manyetostriksiyon değerine göre domain yapısı ve yönelimi gösterilmektedir.



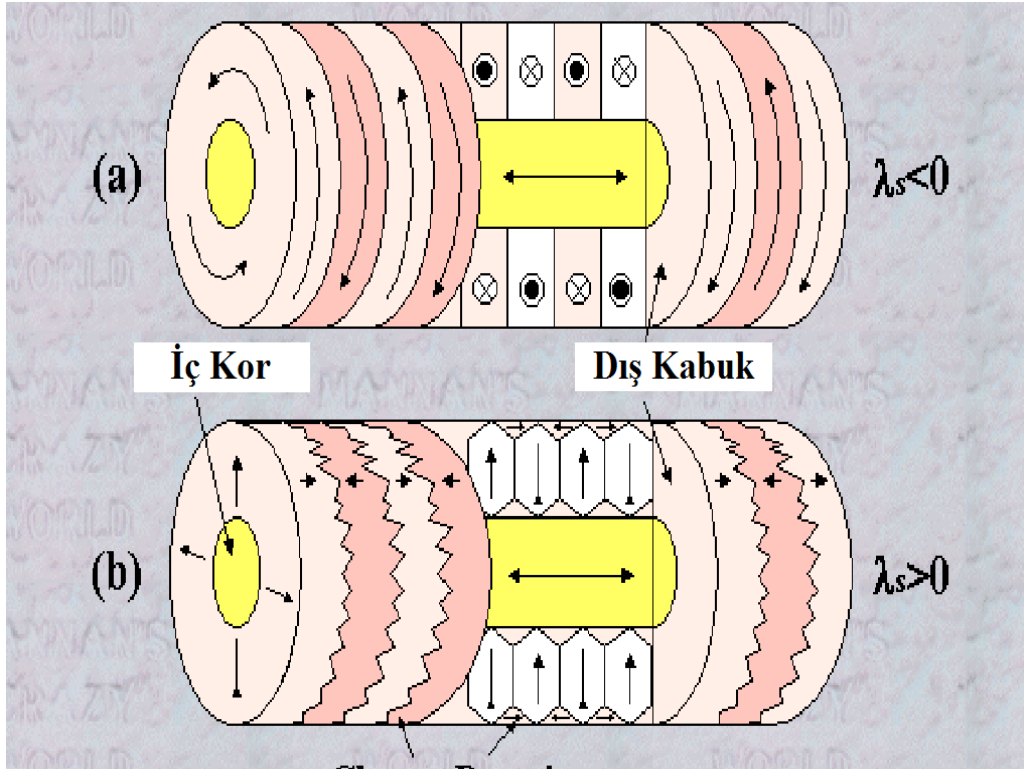
Şekil 2.4. In-rotating water-spinning yönteminin şematiği [9]



Şekil 2.5. In-rotating water-spinning yönteminin gösterimi [16]



Şekil 2.6. Üretimden çıkan amorf şerit [17]



Şekil 2.7. Amorf tellerin manyetostriksiyona göre domain yapısı [18]

## 2.2. Fluxgate Sensörler

Fluxgate sensörler, DC veya düşük frekanslı AC manyetik alanları ölçerler [19] ve  $10^{-10}$  T'dan  $10^{-4}$  T'ya kadar uzanan aralıkta ölçüm yapabilen, çok hassas, vektörel, oda sıcaklığında çalışabilen cihazlardır. İlk fluxgate sensörler 1930'lu yılların ilk yarısında bulunmuş ve 1940'lı yıllarda denizaltı dedekte edebilmek için geliştirilmiştir. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra fluxgate sensör jeofizik ve jeomanyetik araştırmalar, maden arama, uzay araştırmaları, yön tayini, askeri araştırmalar ve otomotiv sektörü gibi birçok alanda kullanım alanı bulmuştur [19-24]. 1950'li yıllarda F.C. Williams ve S.W. Noble fluxgate sensörlerin teorik altyapısı üzerine çalışmalar yapmışlar ve dolayısıyla bu alana olan ilgi de artmıştır [25]. Yine bu konuda 1965 yılında ring-core fluxgate sensörler üzerine A. Geyger önemli çalışmalar yapmıştır [26]. Ayrıca 1970'li yıllarda F. Primdahl fluxgate sensörler üzerine yoğun bir çalışma yürütmüş ve paralel ve ortogonal fluxgate sensörler için çıkış sinyal bilgisinin, uyarıcı sinyalin ikinci harmoniğine bağlılığını ortaya koymuştur [27,28].

Fluxgate manyetometrelerin temel avantajları arasında yüksek hassasiyet, yüksek çözünürlük ve düşük taban gürültüsü gelmektedir. Buna ek olarak günümüzdeki teknoloji düşük maliyetli, küçük boyutlu çözümlerin üretilmesini mümkün kılmaktadır [22]. Fluxgate sensörler günümüzde oda sıcaklığında çalışan en hassas manyetik sensörler olarak kabul edilirler [29]. Dolayısıyla çözünürlük açısından fluxgate sensörler diğer Hall etkisi ve manyetositriktif sensörler gibi katıhal sensörlerden daha yüksek hassasiyete sahiptir. Çok yüksek hassasiyete sahip ancak aynı zamanda çok yüksek maliyetli olan kuantum etki SQUID sensörlerle ise karşılaştırılabilecek ölçüdedir [30]. Fluxgate manyetometresinin doğrudan manyetik alan bileşenlerini ölçebildiği için elektronik manyetometreler arasında özel bir yeri vardır. SQUID manyetometre veya Hall manyetometresi gibi diğer vektörel manyetometreler de vardır. Ancak SQUID çalışmak için sıvı helyuma ihtiyaç duyar, dolayısıyla yüksek kararlılık ve hassasiyete rağmen sadece özel ölçümler için kullanılabilir. Hall manyetometresi ise fluxgate manyetometrenin hassasiyet ve kararlılığına ulaşamamaktadır [29]. Ayrıca Hall sensörler oldukça gürültülü ve sıcaklığa bağlı offsete sahiptir. Manyetodiotlar ve manyetotransistörler de aynı boyutta Hall sensöründen daha iyi değildirler. Büyük manyetoempedans (GMI)

sensörlerin zayıf duyarlılığa sahip olduğu söylenebilir. Anizotropik manyeto-direnç sensörlerde ise 1 nT'dan daha büyük gürültü olduğu belirtilmektedir [31].

Çizelge 2.1'de manyetik sensör türleri ve hassasiyet değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Manyetik sensör türleri ve hassasiyet seviyeleri [32,33]

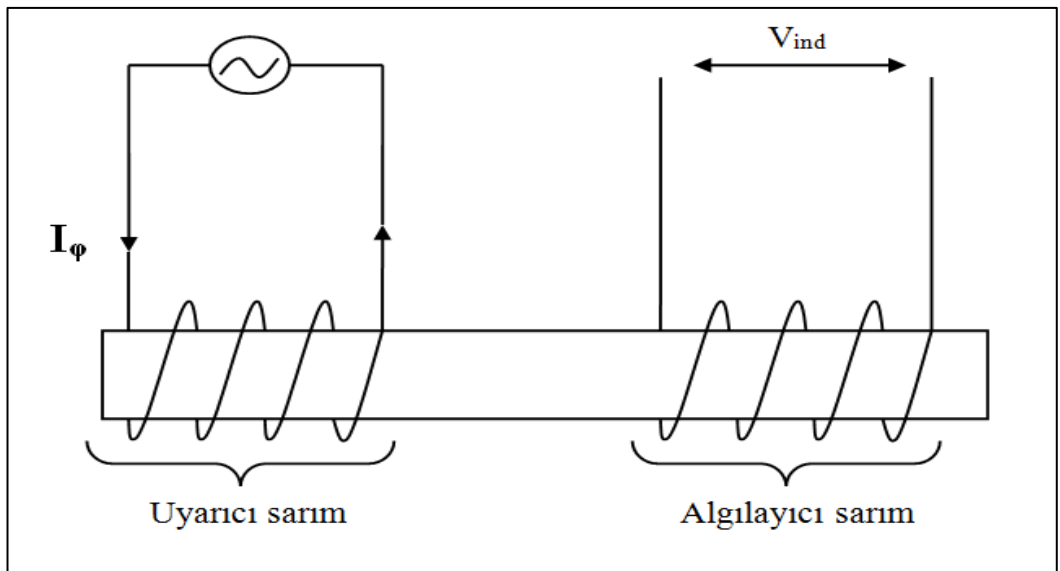
| Manyetik Sensör Türü            | Hassasiyet Aralığı (Tesla) |                   |                  |                  |                 |
|---------------------------------|----------------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|
|                                 | 10 <sup>-14</sup>          | 10 <sup>-10</sup> | 10 <sup>-6</sup> | 10 <sup>-2</sup> | 10 <sup>2</sup> |
| Test Bobini                     |                            |                   |                  |                  |                 |
| Fluxgate Manyetometre           |                            |                   |                  |                  |                 |
| SQUID Manyetometre              |                            |                   |                  |                  |                 |
| Hall Etki Sensörü               |                            |                   |                  |                  |                 |
| Manyeto-direnç Manyetometre     |                            |                   |                  |                  |                 |
| Manyetotransistör               |                            |                   |                  |                  |                 |
| Fiberoptik Manyetometre         |                            |                   |                  |                  |                 |
| Manyeto-optik Sensör            |                            |                   |                  |                  |                 |
| Giant Manyeto-empedans          |                            |                   |                  |                  |                 |
| Manyetodiot                     |                            |                   |                  |                  |                 |
| Optically Pumped Manyetometre   |                            |                   |                  |                  |                 |
| Nuclear-Precession Manyetometre |                            |                   |                  |                  |                 |

Özellikle jeofizikçilerin ilgisini çeken fluxgate sensörler 1984 yılında CCE uzay aracında kullanılmıştır [34]. Günümüzde değişik amaçlar için kullanılabilir. Dünyanın manyetik alanı ile Fe içeren materyallerin etkileşimleri bilinmektedir. Bu etkiden dolayı sensör aracılığı ile otomobiller arası uzaklık tespit edilebilir. Trafikte kullanmak amacıyla dünyanın manyetik alanını dedekte edilebilir. Sinyal farklı uzaklıklardan ölçüldüğünde, uzaklık arttıkça sinyalin azalmasıyla birlikte, sinyalin şekli de değişmektedir. Bu özellik kullanılarak otoyollarda trafik akışı kontrol edilebilir. Bu durumda, sensör köprü altlarına veya yol kenarlarına monte edilmektedir [35]. Bomba ve mayın tespitinde kullanılabilir. Atomik kuvvet mikroskoplarında, görüntüleme amacıyla yine fluxgate sensörler üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Bunların dışında fluxgate sensörler küresel yer bulma (GPS) sistemlerinde, otomotiv endüstrisinde, dünyanın manyetik alanında meydana

gelen değişimleri araştırmak amacıyla, askeri amaçlar gibi birçok alanda daha kullanım alanı bulmaktadır [35].

Fluxgate zerine yapılan çalışmalarda, deneysel çalışmaların teorisinin önünde gittiği belirtilmektedir. Teorik olarak Williams ve Noble'in (1950) yaptıkları çalışma en dikkat çeken çalışmalardan biridir [25]. Williams ve Noble ıkış voltajını hesaplamak için Faraday yasasını kullanmışlardır. Temel değişken olarak efektif manyetik geçirgenliği kullandıklarından, demanyetizasyon faktörünün karmaşık olan hesabı gerekmez. A. Geyger ve arkadaşları yaptıkları çalışmada halka (ring-core) sensörlerin duyarlılığını etkileyen esas faktörün başlangıçta manyetik geçirgenlik ve demanyetizasyon faktörü olduğunu göstermişlerdir [26].

Fluxgate sensörler, paralel ve ortogonal olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Fluxgate sensörleri bu başlıklar altında çeşitlendirmek kor malzemenin şekli ve çalışma anında dış manyetik alana karşı konumlanmasıyla ilişkilidir. Örneğin, ring-core fluxgate sensör paralel fluxgate sensör sınıfına girer ancak kor malzeme halka şeklinde olduğundan bu isimle anılmaktadır. Buna karşın paralel ve ortogonal isimlendirmeleri uyarıcı alanın algılanan alana paralel veya dik olmasıyla ilişkilidir. Bu sebeple fluxgate sensör tasarımlarında kor malzemenin manyetik yapısı ve geometrik şekli büyük önem taşımaktadır. şekil 2.8'de temel fluxgate sensörün şematiği verilmiştir. şekil 2.9'da ise paralel ve ortogonal fluxgate sensörler gösterilmektedir.

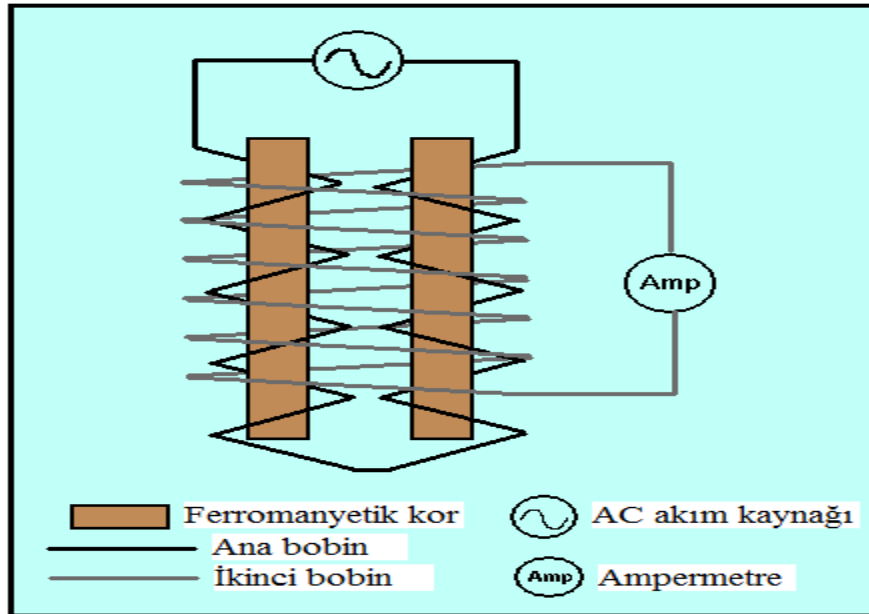


şekil 2.8. Temel fluxgate manyetometre devresinin şematik çizimi [36]



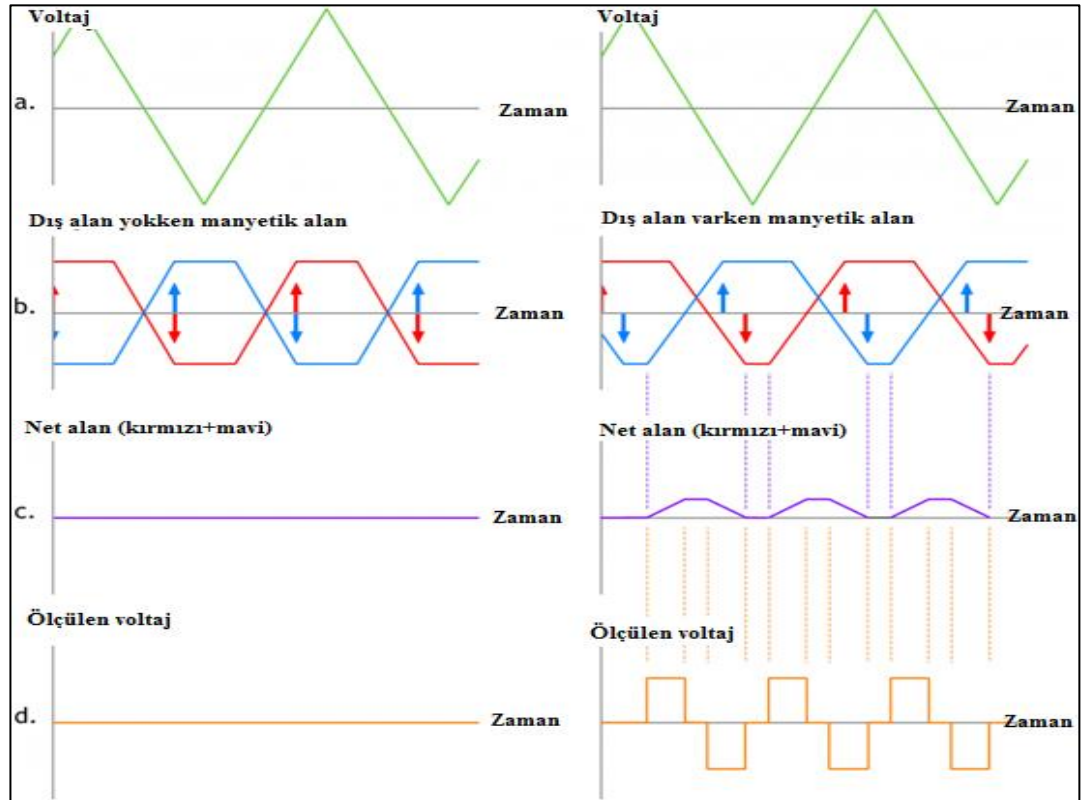
oluşturulan manyetik alan içinde, ferromanyetik korun manyetik geçirgenliğindeki değişime dayanır. Malzemenin manyetik geçirgenliği, uygulanan dış manyetik alana bağlı olarak,  $\mu_0$  ve  $\mu_0\mu$  arasında değişir. Söz konusu AC akım, ferromanyetik koru  $I_\phi$  akımı ile  $f$  frekansında indüklerse, korun manyetik geçirgenliği  $2f$  frekansı ile değişecektir. Burada  $B_0$ , ölçülen DC manyetik alana;  $V_{ind}$  ise toplayıcı bobinde oluşan voltaja karşılık gelmektedir [23]. Ferromanyetik kor doyum manyetizasyonundan uzakta ise manyetik geçirgenliği yüksek bir değere ( $\mu_0\mu$ ) sahip olacak ve manyetik akı ferromanyetik korun içinde yoğunlaşacaktır. Kor doyum manyetizasyonuna geldiğinde manyetik geçirgenlik  $\mu_0$  olacaktır. Bu durumda ferromanyetik korun içinden geçen akı kesilime uğrayacaktır. Bu durum Şekil 2.10a ve Şekil 2.10b’de gösterilmiştir. Fluxgate sensörler adını bu olaydan almaktadır. Bu çevrim her periyotta iki kez oluşur. Bu durumda dış manyetik alanın bilgisi ya akının zamanla değişiminden veya akı değişiminin harmonik değerlerinden okunabilir. Nyquist teoremine göre ise uyarma akımının frekansı, ölçülmek istenen alanın frekans değerinden en az iki kat daha fazla bir değere sahip olmalıdır. Gerçekte ise bu değer en az 100 kat olması gereklidir [7].

Şekil 2.11’de Vacquier tipi bir paralel fluxgate sensör gösterilmektedir. Bu tip sensörlerde, Uyarıcı sarımları birbirine zıt yönde olan çift ferromanyetik kor bulunmaktadır.

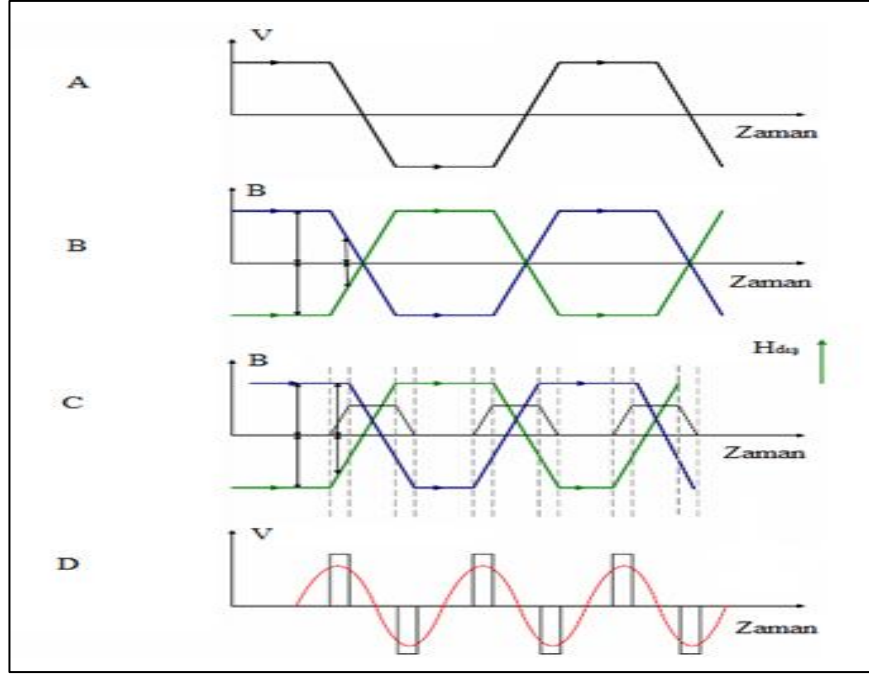


Şekil 2.11. Çift-Kor (Vacquier) fluxgate sensörün şematik çizimi [39]

Şekil 2.12’de ve Şekil 2.13’te görüldüğü üzere, paralel fluxgate sensörlerde, uyarıcı alan algılan alandan büyük değere sahip birinci harmonik bileşeni oluşturur. Bu sorunu ortadan kaldırmak için Şekil 2.11’de gösterilen Vacquier fluxgate sensörler kullanılmıştır. Bu sensör uyarıcı alanı elde etmek amacıyla iki adet ferromanyetik koran etrafına sarılmış iki sarımdan ve bunların etrafına sarılmış bir algılayıcı sarımdan oluşur. Her ferromanyetik koran ana bir uyarıcı bobin ile sarılmıştır fakat sarımların yönü birbirine zıttır. Ana sarımdan geçirilen bir alternatif akım, her bobinde büyük ve değişken bir manyetik alan meydana getirir. Bu durum verilen herhangi bir zamanda, bir döngüde ferromanyetik korlar içerisinde aynı büyüklükte fakat zıt yönde manyetik alanlar oluşturur. Eğer ferromanyetik korlar bir dış manyetik alanın etkisi altında ise, dış manyetik alanın bir bileşeni kor eksenine paralel olacaktır. Ana bobindeki akım artarsa, korlardan birindeki manyetik alan dış manyetik alana paralel olduğu için etkisi artacaktır. Diğer dış manyetik alanla zıt yönde olacak ve küçülecektir [7,23,39].



Şekil 2.12. Fluxgate sensörün dalga şekilleri [40]



Şekil 2.13. Farklı giriş sinyali uygulandığında dalga formları [41]

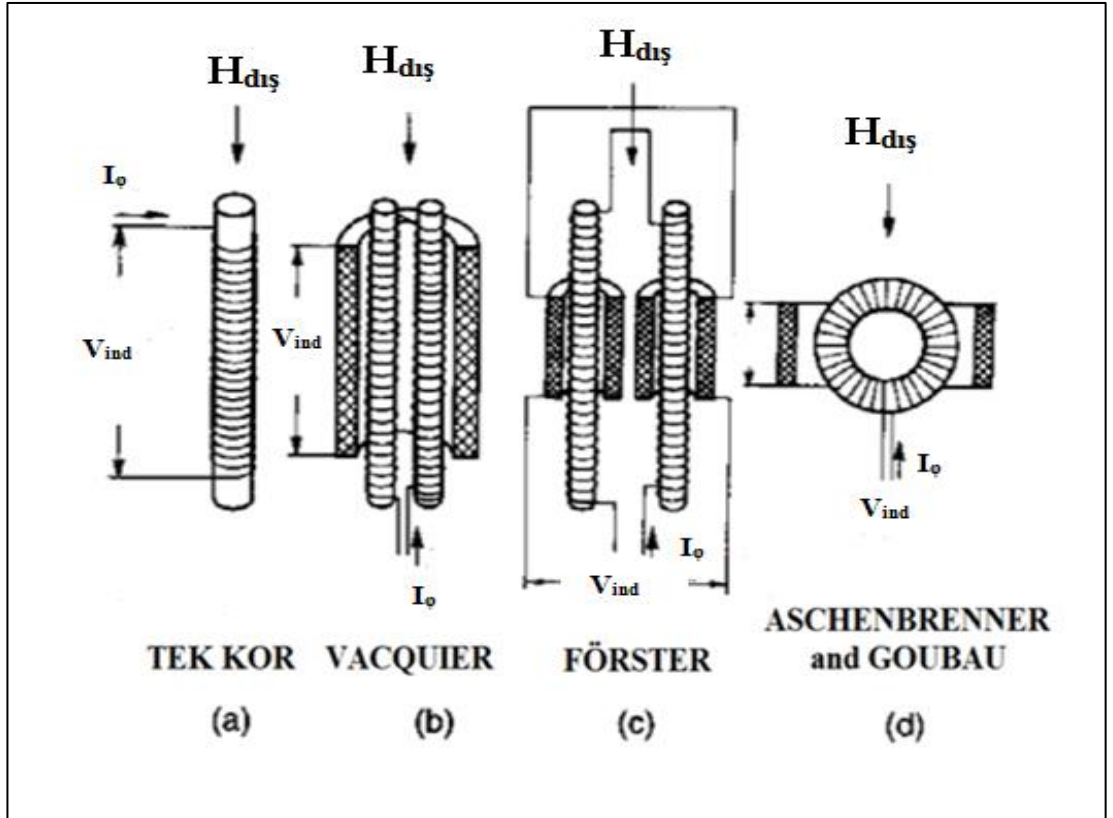
İkinci bir bobin, ferromanyetik kolları ve ana bobini sarmaktadır. Ana bobin tarafından indüklenen kolları oluşmuş manyetik alan ikinci bobinde bir potansiyel üretir. Bir dış manyetik alanın yokluğunda (örneğin yerin hiç manyetik alan olmasaydı), iki korda üretilen manyetik alanlar aynı büyüklükte fakat zıt yönde olacaktır. Dolayısıyla ikinci bobinde ölçülen voltaj sıfır olacaktır [23,39].

Eğer iki kor zayıf bir dış manyetik alana paralel olarak yerleştirilirse, bir tanesi dış manyetik alanla aynı yönde olacak ve onu güçlendirecektir. Diğer dış manyetik alana zıt yönde olacak ve daha zayıf bir alan üretecektir. Aradaki fark, ikinci bobinde manyetik alanın büyüklüğü ile orantılı, ölçülebilen bir voltaj indüklemeye yeterli olacaktır [39].

Uyarıcı sarımların oluşturdukları alanlar birbirine zıt yöndedir. Böylece uyarıcı sarımların ferromanyetik kolları üzerinde oluşturdukları akıların farkı alınmaktadır. Bu tip sensörde ferromanyetik kolları doyuma götürmek, tek kora sahip sensörlere göre daha kolay olmaktadır. Ancak ring-kor gibi kapalı manyetizasyon yoluna sahip sensörlerde doyum daha kolay olmaktadır. Bu sensörlerin geometrisi düşük gürültülü sensörler içinde en iyi olarak belirtilmektedir. Kapalı devre oldukları için diğer tasarımlara göre daha az enerji harcarlar [24].

Şekil 2.12’de üçgen dalga giriş sinyali uygulanmış ve dış alan varken ve yokken çıkış sinyalleri gösterilmiştir. Şekil 2.13’de ise kare dalgaya benzer giriş sinyali kullanılmış ve B’de dış alan yokken toplayıcı sarımdaki manyetik indüksiyon gösterilmiştir. C’de ise dış alan varken yine toplayıcı sarımdaki manyetik indüksiyon ve D’de ise ayarlanmamış (siyah) ve ayarlanmış (kırmızı) çıkış sinyalleri gösterilmektedir [41].

Şekil 2.14’te görülen tasarımlarda uyarıcı alan ve dış alan aynı yönde olduklarından bu sensörler paralel fluxgate sensörler olarak isimlendirilmiştir [28]. Paralel olarak tasarlanan fluxgate sensörlerde uyarma ve algılama mekanizmaları birbirine bağlı olduğundan, ayrı olarak tasarlanmazlar. Paralel tasarımlarda, geniş doğrusal değer elde etmek için AC alanı ile artan yüksek demanyetizasyon faktörüne sahip daha kısa ferromanyetik kor gereklidir.



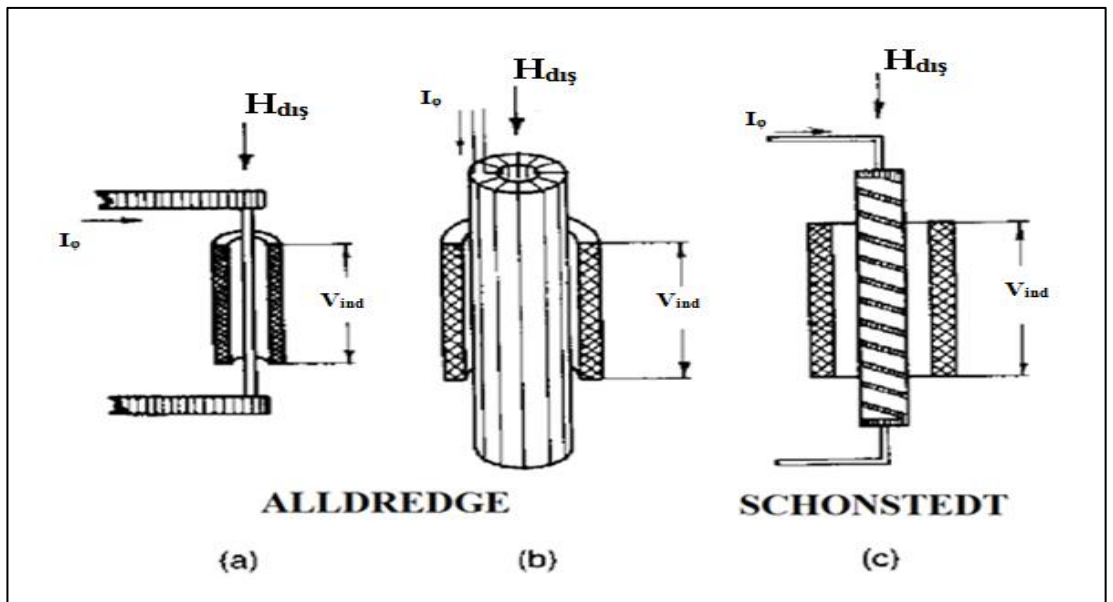
Şekil 2.14. Bugüne kadar yapılan farklı türde paralel fluxgate sensörler [28]

Ortogonal fluxgate sensörlerde ise uyarıcı alan ve dış alan birbirine diktir [28]. Bu tip sensörlerde de dış manyetik alanın bilgisi çift harmonikler de taşınır. Ancak

ortogonal fluxgate sensörlerde iki sarımda ayrı olduğundan birbirinden bağımsız olarak tasarlanabilir.

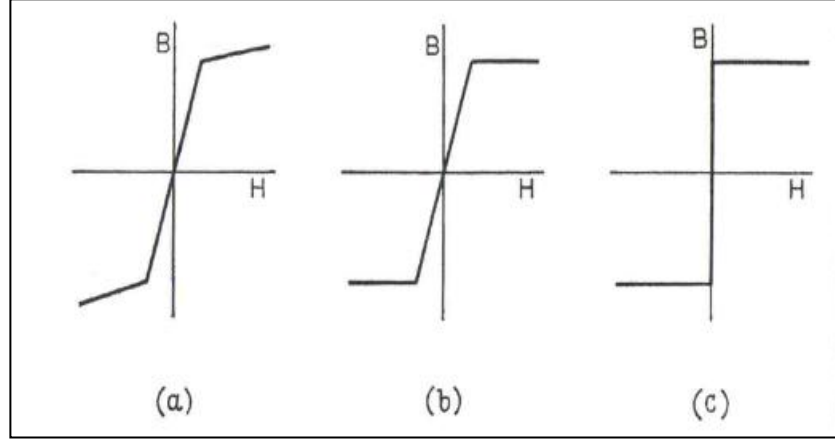
Algılayıcı sarım, ferromanyetik korun manyetik geçirgenliğinde periyodik olarak meydana gelen değişikliği algılar ve bu değişiklikle algılayıcı sarımda bir voltaj indüklenir. Bir dış alan yokken, bu voltaj simetriktir ve yalnızca tek harmoniklerden oluşur. Bir dış alanın varlığında ise sinyal tek ve çift harmoniklerden oluşur. Sinyalin ikinci ve daha yüksek dereceden çift harmonikleri dış alanın büyüklüğüyle orantılıdır [39].

Ortogonal sensörlerin en bilineni Şekil 2.15a ve Şekil 2.15b’de görülen Alldredge fluxgate sensörlerdir. Bu tip sensörler, 1958 yılında Alldredge tarafından tasarlanmıştır. Daha sonra 1965 ve 1970 yıllarında sırası ile S.C. Ling [42], F. Primdahl [26,28] ortogonal fluxgate sensörler geliştirmişlerdir. Şekil 2.15a’daki tasarımda ferromanyetik kor içinden geçen uyarıcı akımın, korun kesit alanının oluşturduğu düzlem üzerinde oluşturduğu manyetik alan çemberseldir. Şekil 2.15b’deki tasarım paralel ring-core fluxgate sensörlere benzerlik göstermektedir. Uyarıcı sarımın ferromanyetik kor etrafına toroidal şekilde sarılmasıyla, bu sarımların her birinin bir akım halkası şeklinde davrandığını düşünülebilir. Her iki tasarımda ferromanyetik korun uzunluğu boyunca olan manyetik alana duyarlıdır. Şekil 2.15c’deki Schönstedt sensörünün ferromanyetik kuru ise ölçülmek istenen alanla belli bir açı yapacak şekilde tasarlanmaktadır [7].



Şekil 2.15. Bugüne kadar yapılan farklı türde ortogonal türde fluxgate sensörler [28]

Ortogonal tasarımlarda ferromanyetik korun uzunluğundaki azalma, uyarıcı alandan etkilenmez. Dış alanın bilgisi, uyarıcı akıma DC bias eklendiğinde sensörde temel modda taşınabilmektedir. Yani dış alanın bilgisi tek harmoniklerde oluşmaktadır [7].



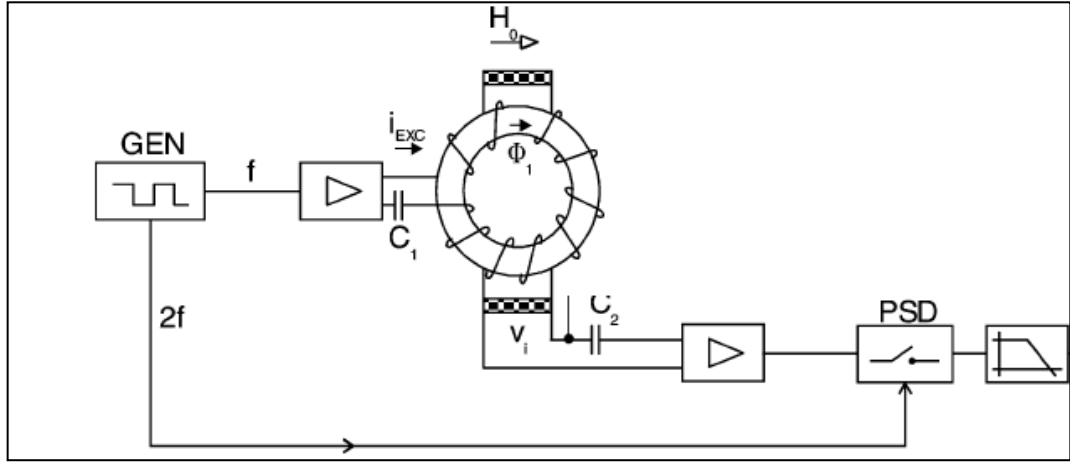
Şekil 2.16. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip kor materyaller için değişik B-H eğrileri [26]

Şekil 2.16'da yüksek manyetik geçirgenliğe sahip malzemeler için B-H eğrileri verilmiştir. A'da eğimin doyumdan önce ve sonra sonlu olduğu görülmektedir. B'de eğim doyumdan önce sonlu, doyumdan sonra sıfırdır. C'de ise eğim doyumdan önce sonsuz, doyumdan sonra sıfırdır. Fluxgate sensörler için genellikle b tercih edilir [26].

### 2.2.1. Fluxgate sensörün yapısı

Temel fluxgate sensör şematik olarak Şekil 2.8 ve Şekil 2.11'de verilmiştir [23]. Ayrıca ring-core sensör için kurulan bir devre şeması Şekil 2.17'de gösterilmektedir. Uyarıcı bobinden gelen sinyale ait ikinci harmonik filtrelenmektedir. Burada bir frekans katlayıcı aracılığıyla uyarıcı akımın ikinci harmoniği üretilir. Bu üretilen ikinci harmonik referans sinyal olarak alınır ve faza duyarlı dedektöre gönderilir. Faza duyarlı dedektörde ölçülen sinyalin faz durumuna göre (faz veya antifaz) yönü ve büyüklüğü belirlenir. Bunun dışında söz konusu sinyal bir tersleyici yardımıyla ters çevrilerek bir yükseltece gönderilip de okunabilir. Fluxgate sensörün elektroniğinde bazı sorunlar bulunmaktadır. Öncelikle sinyalden harmonik bileşenler çıkarılırken çift harmoniklerde faz hatalarının oluşmamasına özen gösterilmelidir. Bu durum kalibrasyon hatalarına yol açabilir. Burada tüm elektronik filtrelerin doğru

çalışması ve hassasiyeti büyük önem arz etmektedir. Sıcaklık veya şebekedeki ani voltaj değişimleri filtrelerin çalışması etkileyebilir. Bu durumda ölçümlerde hatalar oluşabilir. Elektronik sistemin bu tür olumsuzluklardan etkilenmemesi önemlidir. Eğer sensör temel durumda çalışmıyorsa ve uyarıcı sinyalde ikinci harmonik bileşenleri varsa, algılayıcı sarımda bir voltaj indüklenmesine sebep olur. Primdahl uyarıcı akıma %1 lik bir ikinci harmonik bileşen eklediğinde bunu sensör çıkışında gözlemiştir ve bu bileşenin uyarıcı akım içinde en fazla % 0,01 olması gerektiğini belirtmiştir [43].



Şekil 2.17. Fluxgate sensörün devre şeması [22]

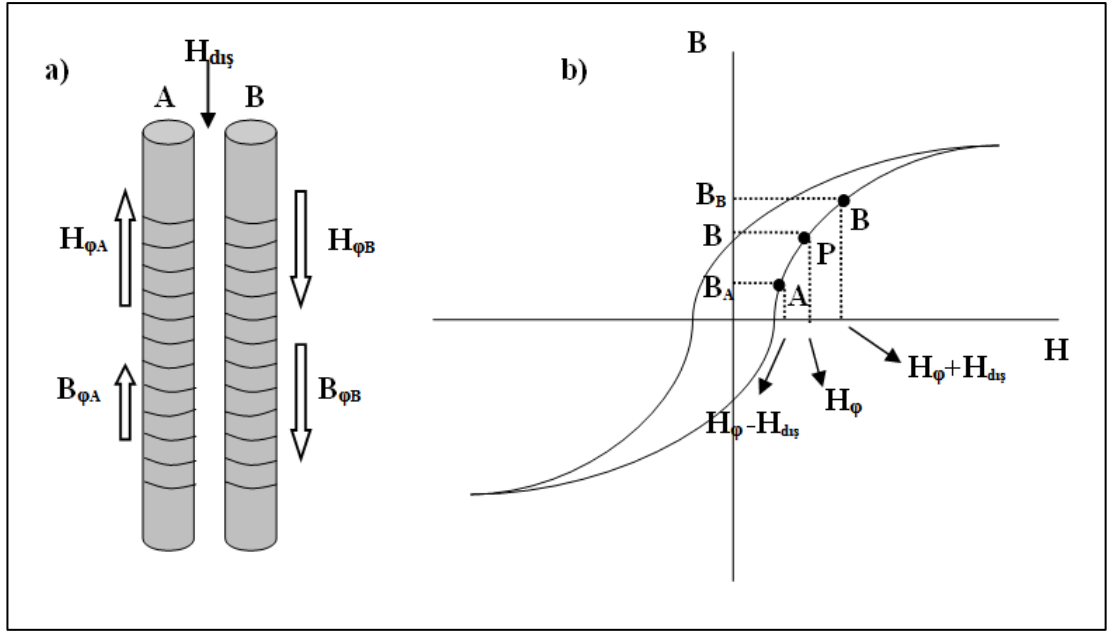
Sensör için bir başka hata kaynağı ise sıfır-offsettir. Normal bir manyetizasyon eğrisinin şekli bilinmektedir. Koarsif kuvvet materyal içinde bir kalıcı manyetizasyona sebep olmaktadır ve bu manyetizasyon kor içindeki manyetik alana eşittir. Bu alan bir dış alanın yokluğunda B-H eğrisinde bir asimetriye sebep olmaktadır. Gerçekten böyle bir alanın varlığı sensör ölçüm alırken ters çevirerek çıkışına bakıldığında gözlenebilir. Sıfır offset 30 gamma kadar kaymaya neden olabilir. Bu durum kor materyale uygulanan ısıtma işleminden dolayı oluşabilir ve korun güçlü bir manyetik alana maruz kalması sonucunda değişebilir. Çift kordan oluşan sensörler veya sarımların ayarlanması bu etkiyi azaltmakta ancak minimize edememektedir [7].

Bunun dışında fluxgate sensörlerin kararlılığı kor malzemenin manyetik ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Kor malzemede termal olarak ya da başka bir dış kuvvetle oluşturulan gerilme, manyetizasyonundaki değişme yol açar. Ayrıca sarılan bobinlerin sıcaklık ile olan ilişkisi sensörün kararlılığını termal olarak etkiler. Ayrıca

elektronik sistemin termal kararlılığı da sensörün kararlılığını etkiler. Bu konularla ilgili Primdahl'a ait çalışmalar bulunmaktadır [44].

### 2.3. Paralel Fluxgate Sensörün Gate (Kapı) Mekanizması

Şekil 2.18a' da görülen çift korlu yapıda, korların bu şekilde bağlanması elektronik bir filtrelemeye gereksinimi ortadan kaldırır. Dolayısı ile matematiksel işlemler de kolaylaşacaktır.



Şekil 2.18. İki çekirdekli fluxgate akı mekanizması [28]

A ve B korları  $H_{dış}$  gibi DC bir manyetik alana ve  $I_{\phi}$  gibi bir uyarıcı akıma maruz kalsın. Bu durumda uyarıcı bobinlerde  $H_{\phi}$  gibi periyodik bir uyarıcı alan oluşacaktır.  $H_{dış} = 0$  durumunda sensör, Şekil 2.18b'de görülen B-H eğrisindeki P noktasında çalışsın.  $H_{dış}$  alanı uygulandığında korların çalışma noktaları A ve B'ye kayacaktır. Bu durumda manyetik indüksiyonda oluşan fark aşağıdaki gibidir:

$$\Delta B = B_B - B_A \quad (2.1)$$

Çok küçük  $H_{dış}$  alanı için A ve B arası doğrusal olarak farz edilebilir. Bu durumda denklem 2.1 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta B = B_B - B_A \approx 2(H) \left( \frac{dB}{dH} \right)_{H_{\phi}} \quad (2.2)$$

Burada  $H = H_{dış}$  yazılabilir. Eğer malzemenin içindeki  $H_{dış}$  ile aynı doğrultuda fakat zıt yönde olan demanyetizasyon alanı,  $H_d$  dikkate alınırsa

$$H = \frac{H_{dış}}{1+D\mu} \quad (2.3)$$

yazılabilir. Burada  $D$  demanyetizasyon sabitidir. Denklem 2.3'ü denklem 2.2'de yerine yazılırsa,

$$\Delta B = B_B - B_A \approx 2(H) \left( \frac{dB}{dH} \right)_{H_\phi} = 2 \frac{H_{dış}}{1+D\mu} \mu \quad (2.4)$$

bulunur. Çıkış voltajı aşağıdaki denklemden hesaplanabilir.

$$V_{çıkış} = -NA_k \frac{d(\Delta B)}{dt} \quad (2.5)$$

Burada  $N$  toplayıcı bobindeki sarım sayısı ve  $A_k$  ise kor malzemenin kesit alanıdır. Denklem 2.4 burada yerine yazılırsa,

$$V_{çıkış} = -NA_k \frac{d(\Delta B)}{dt} = -NA_k \frac{d}{dt} \quad (2.6)$$

$$V_{çıkış} = -2NA_k H_{dış} \frac{\frac{d\mu}{dt}(1+D\mu) - D\mu \frac{d\mu}{dt}}{(1+D\mu)^2} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7  $d\mu/dt$  parantezinde yazılırsa,

$$V_{çıkış} = -2NA_k H_{dış} \frac{1}{(1+D\mu)^2} \frac{d\mu}{dt} \quad (2.8)$$

bulunur. Denklem 2.8  $dH_\phi/dH_\phi$  ile çarpılırsa,

$$V_{çıkış} = -2NA_k H_{dış} \frac{1}{(1+D\mu)^2} \frac{d\mu}{dH_\phi} \frac{dH_\phi}{dt} \quad (2.9)$$

$$V_{çıkış} = -2NA_k H_{dış} \frac{1}{(1+D\mu)^2} \frac{d^2 B}{dH_\phi^2} \frac{dH_\phi}{dt} \quad (2.10)$$

Burada uyarıcı akım olan  $I_\phi$  akımı,

$$I_\phi = I_\phi \cos(\omega t) \quad (2.11)$$

olarak yazılırsa, uyarıcı manyetik alan  $H_\phi$  alanı,

$$H_\phi = \frac{N}{L} I_\phi \cos(\omega t) = H_\phi \cos(\omega t) \quad (2.12)$$

şeklinde yazılabilir. Burada N toplayıcı bobindeki sarım sayısı ve L ise selenoidin uzunluğudur. Bir  $f(x)$  fonksiyonunun Maclaurin serisine açılımı göz önüne alınırsa,

$$f(x) \approx f(0) + f'(0)x + \frac{1}{2!}f''(0)x^2 + \frac{1}{3!}f'''(0)x^3 + \dots + \frac{1}{n!}f^n(0)x^n + \dots \quad (2.13)$$

bulunur. Şekil 2.16'daki B-H eğrisinin üst tarafı için  $B_1(H)$  şeklindeki fonksiyonun seriye açılımı düşünülürse,

$$\begin{aligned} B_1(H) &\approx B(0) + B'(0)H + \frac{1}{2!}B''(0)H^2 + \frac{1}{3!}B'''(0)H^3 + \dots + \frac{1}{n!}B^n(0)H^n + \dots \\ &= a_0 + a_1H + a_2H^2 + a_3H^3 + \dots + a_nH^n + \dots \end{aligned} \quad (2.14)$$

Simetriden dolayı  $B_1(H) = -B_2(-H)$  olacaktır. Bu durumda

$$\begin{aligned} B_2(-H) &\approx -B(0) - B'(-H) - \frac{1}{2!}B''(-H)H^2 - \frac{1}{3!}B'''(-H)H^3 + \dots - \\ &\frac{1}{n!}B^n(-H)(-1)^{n-1}(-H)^n + \dots \\ &= -a_0 + a_1H - a_2H^2 + a_3H^3 + \dots + (-1)^{n-1}a_nH^n + \dots \end{aligned} \quad (2.15)$$

Bu durumda  $B(H)$  fonksiyonu için yazılacak genel ifade denklem 2.14 ve denklem 2.15'in toplamı olacaktır.

$$B(H) \approx \pm a_0 + a_1H \pm a_2H^2 + a_3H^3 + \dots + \left[(-1)^{n-1}\right]^+ a_nH^n + \dots \quad (2.16)$$

$$\frac{d^2B}{dH_\phi^2} = \pm 2a_2 + 6a_3H \pm \dots \left[(-1)^{n-1}\right]^+ n(n-1)a_nH^{n-2} \dots \quad (2.17)$$

$$\frac{dH_\phi}{dt} = -H_\phi w \sin(wt) \quad (2.18)$$

Denklem 2.17 ve denklem 2.18, denklem 2.10'da yerine yazılırsa  $V_{\text{çıkış}}$ ,

$$\begin{aligned} &= -2NA_k H_{\text{dış}} H_\phi w \frac{1}{(1+D\mu)^2} \left[ \pm 2a_2 + 6a_3H_\phi \cos(wt) \dots \pm \dots \left[(-1)^{n-1}\right]^+ n(n-1)a_nH_\phi^{n-2} \cos^{n-2}(wt) \dots \right] \sin wt \end{aligned} \quad (2.19)$$

olarak bulunur. Denklem 2.19'da  $H_\phi = H_\phi \cos(wt)$  yazılırsa ve

$$\cos^p(wt) \times \sin(wt) \Rightarrow p = n - 2 \quad (2.20)$$

olarak bulunur.

Terimlerin herbiri wt'nin katlarının sinüs toplamı olarak yazılabilir. wt'nin tek katlarının sinüslü terimlerine  $\pm$  işaretleri gelecektir. Katsayılar yazılırsa,

$$\pm 2a_2 \sin(wt) \quad (2.21)$$

$$\pm 12a_4 H^2 \sin(wt) = \pm 12a_4 H_\phi^2 \cos^2(wt) \sin(wt) \quad (2.22)$$

$$= \pm 12a_4 H_\phi^2 \left( \frac{e^{iwt} + e^{-iwt}}{2i} \right)^2 \frac{e^{iwt} - e^{-iwt}}{2i} \quad (2.23)$$

$$= \pm 3a_4 H_\phi^2 \frac{e^{3iwt} - e^{-3iwt}}{2i} + \frac{e^{iwt} - e^{-iwt}}{2i} \quad (2.24)$$

$$= \pm 3a_4 H_\phi^2 (\sin(3wt) + \sin(wt)) \quad (2.25)$$

$\pm \sin(mwt)$  (m tek) ifadesinin Fourier Analizi sonucunda + işareti  $0 \leq wt < \pi$  bölgesine ve - işareti de  $-\pi \leq wt < 0$  bölgesine gelir. Ayrıca terimlere  $2/\pi m$  şeklinde bir sabit te eklenecektir. Bu durumda ifade wt'nin çift katlarının sonsuz kosinüs serileri olarak yazılabilir.

$$\pm \sin(wt) = \frac{2}{\pi m} + \sum_{q=2; q \text{ çift}}^{\infty} \frac{4m}{\pi(m^2 - q^2)} \cos(qwt), \quad (m \text{ tek}) \quad (2.26)$$

Böylelikle  $V_{\text{çıkış}}$  ifadesi için tek harmoniklerin herbiri uyarıcı frekansın çift harmoniklerinin serisi cinsinden yazılır. Aşağıda histerise bağlı faz ve genlik değişimleri ihmal edilmiş ve  $\cos^p(wt) \times \sin(wt)$  ifadesinin ikinci harmonik bileşeni, sinüs ve kosinüs ve binom açılımı için Euler formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Çıkış voltajının ikinci harmoniği  $V_{\text{sec}}$  olarak yazılmıştır.

$$\sec \text{ harm}[\cos^p(wt) \sin(wt)] = \frac{2^{-(p-1)}}{(p+1)} \left( \frac{p+1}{2} \right) \sin(2wt) \rightarrow p \text{ tek} \quad (2.27)$$

$$V_{\text{sec}} = 2NA_k H_{d1\phi} H_\phi w \frac{1}{(1+D\mu)^2} [ +6a_3 H + 20a_5 H^3 + 42a_7 H^5 \dots ] \sin(wt) \quad (2.28)$$

Denklem 2.28'de altı çizilen kısım için hesaplama yapılırsa:

$$6a_3 H \sin(wt) = 6a_3 H_\phi \cos(wt) \sin(wt) = 6a_3 H_\phi \frac{e^{iwt} + e^{-iwt}}{2} \frac{e^{iwt} - e^{-iwt}}{2i} \quad (2.29)$$

$$= 6a_3 H_\phi \frac{2^{-(p-1)}}{(p+1)} \left( \frac{p+1}{2} \right) \sin(2wt) |_{p=1} \quad (2.30)$$

$$20a_5 H^3 \sin(wt) = 20a_5 H_\phi^3 \cos^3(wt) \sin(wt) \quad (2.31)$$

$$= 20a_5 H_\varphi^3 \left( \frac{e^{iwt} + e^{-iwt}}{2} \right)^3 \frac{e^{iwt} - e^{-iwt}}{2i} \quad (2.32)$$

$$= 20a_5 H_\varphi^3 \frac{2^{-(p-1)}}{(p+1)} \left( \frac{p+1}{\frac{p-1}{2}} \right) \sin(2wt)|_{p=3} \quad (2.33)$$

$$42a_7 H^5 \sin(wt) = 42a_7 H_\varphi^5 \cos^5(wt) \sin(wt) \quad (2.34)$$

$$= 42a_7 H_\varphi^5 \left( \frac{e^{iwt} + e^{-iwt}}{2} \right)^5 \frac{e^{iwt} - e^{-iwt}}{2i} \quad (2.35)$$

$$= 42a_7 H_\varphi^5 \frac{2^{-(p-1)}}{(p+1)} \left( \frac{p+1}{\frac{p-1}{2}} \right) \sin(2wt)|_{p=5} \quad (2.36)$$

ifadeleri bulunur. Bu ifadeler 2.28 denkleminde yerine yazıldığında,

$$V_{sec} = 2NA_k H_{d1s} H_\varphi w \left[ 3a_3 H_\varphi^2 + 5a_5 H_\varphi^4 + \frac{105}{16} a_7 H_\varphi^6 \dots \right] \sin(2wt)|_{D=0} \quad (2.37)$$

ikinci harmonik denklemi bulunur [25,26].

### 2.3.1. Tek korlu sensörler

Bu tip sensörler Şekil 2.14a’da gösterilmektedir [28]. Tek korlu sistemler genelde manyetometrelerde zaman temelli ölçümler için kullanılırlar [22]. Bu tasarımda, diğer bobinli tasarımlarda olduğu gibi, kor malzeme etrafına sarılan uyarıcı bobin aracılığı ile uygulanan uyarıcı bir alternatif akım, sistemi her iki kutupta doyumda tutar. Bu durumda uyarıcı alanın yönü kor malzeme eksenine paralel olacaktır. Dış manyetik alan yokken Şekil 2.12’de ve Şekil 2.13’de görüldüğü gibi sistem iki kutupta eşit biçimde manyetize olacaktır. Dış manyetik alan oluştuğunda, uyarıcı manyetik alanlardan birini desteklerken, diğerinin etkisini azaltacaktır. Bu durumda iki manyetik alan arasında bir fark oluşacaktır. Eğer sisteme bir algılayıcı bobin sarılırsa söz konusu fark bu bobinde bir akım ve dolayısıyla sensör çıkışında bir voltaj indükleyecektir. Bu da en temel fluxgate sensörün çalışma mantığıdır.

### 2.3.2. Çift korlu sensörler

Birçok manyetometre çıkış sinyalinin ikinci harmoniğin ölçümüne dayalı klasik yöntemi kullanmaktadır. Bu durum birçok zorluğu da beraberinde getirmektedir. Uyarıcı ve algılayıcı sarımlardan kaynaklanan, uyarıcı frekansta büyük bir sinyal ve tek harmoniklerin olması ölçümü zorlaştırmaktadır. Daha önceden çalışma mantığı

açıklanan çift korlu sensörler kullanılarak bu durum büyük ölçüde giderilmektedir. Ancak burada iki kor ve sarımlar birbirinin tamamen aynısı olmak zorundadır. Şekil 2.11’de ve Şekil 2.14b’de Vacquier tipi çift korlu sensör gösterilmektedir. Bu sensörde algılayıcı sarım tektir. Şekil 2.14c’de Förster tipi çift kor sensör gösterilmektedir. Sisteme tek algılayıcı sarım yerine, birbirinin aynısı iki algılayıcı sarım eklenmiştir. Algılayıcı sarımlar seri olarak bağlanmıştır. Böyle bir tasarımda manyetik korların, algılayıcı sarımlara göre konumlarını ayarlayarak sensörün ayarını yapmak daha kolaydır. T. Saito tarafından bu tipte 50 cm uzunluğunda bir sensör ile 10 pT’lık çözünürlüğe ulaşıldığı rapor edilmiştir [45].

Büyük geometrik anizotropi çubuk şeklinde koru olan sensörlere asıl avantajını verir. Bu sensörler dik doğrultudaki alanlara karşı daha hassastırlar. Bu tip sensörleri ayrıca dez avantajları da vardır. Sensör korlarının uçlarının açık olması daha yüksek gürültü kaynağıdır. Ayrıca sıcaklık etkisi ile offset hataları için daha kararsız olur. Bunu dışında açık uçlu sensörleri doyuma götürmek daha zordur. Dolayısıyla sensör daha fazla enerji tüketir ve perming etkisine karşı daha hassas olacaktır [24].

### **2.3.3. Ring- Core sensörler**

Şekil 2.14d’de bir ring–kor sensör görülmektedir. Uyarıcı sarım toroid şeklinde ve algılayıcı sarım selenoid şeklindedir. Bu sensör dengelenmiş bir çift kor sensör olarak düşünülebilir. Sensör mekanizması Geyger tarafından çift korlu sensörler benzetilerek açıklanmıştır. Özellikle Geyger bu tip sensör üzerine yoğun olarak çalışmıştır [7]. Uyarıcı sarımın her bir yarısı kapalı bir manyetik devrenin bir yarım parçası olarak düşünülebilir. Kor malzeme olarak genellikle birkaç sarımlık soft manyetik şerit kullanılmaktadır.

Bu tip sensörler demanyetizasyon etkisine bağlı olarak daha düşük hassasiyete sahiptir. Buna karşılık düşük gürültülü sensörler arasında bazı avantajları vardır. Öncelikle kor malzeme algılayıcı sarıma göre yerinden oynatılarak daha iyi ayarlanabilir. Ayrıca kor içerisindeki mekanik stres homojen olarak dağılmıştır. Bunun dışında açık uçlu kor malzemeler daha gürültülüdür. Ancak burada sensörün şeklinden dolayı gürültü azalır [7,24].

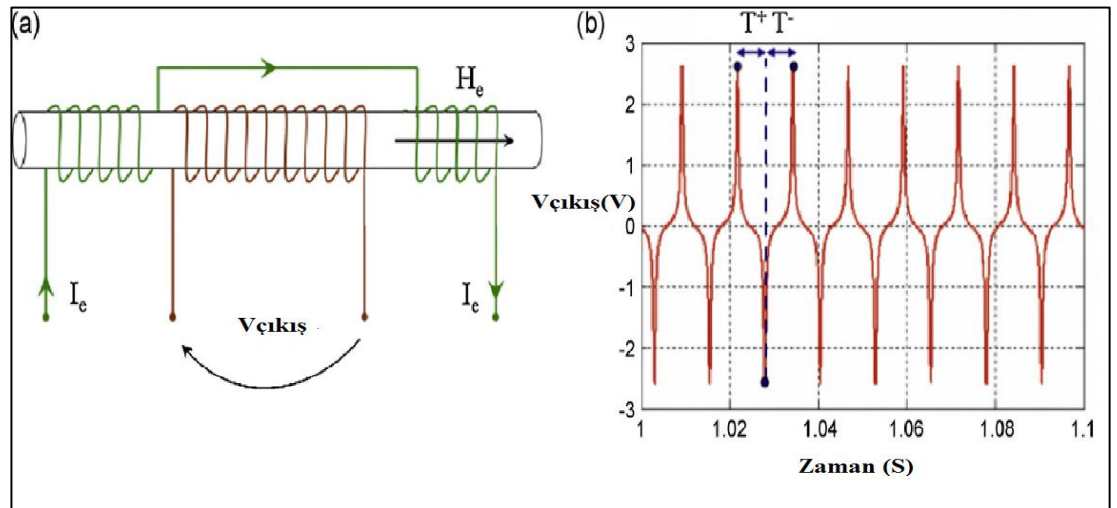
Genelde bu sensörlerde çap arttıkça hassasiyette artar. Ancak sensörün boyutuna göre hangi çapta en iyi çalışma aralığının olduğu genelde deneysel olarak bulunur.

Bunun dışında kor malzemenin boyutu, uyarıcı ve algılayıcı sarımların sayısı ve elektronik devredeki hatalar da sensör hassasiyetinde önemli rol oynar. Düşük gürültülü, 17–25 mm çapında bir sensör için 1–2 mm genişliğinde, 25µm kalınlığında, 4 ile 16 sarım arası kor malzeme gereklidir [23].

Sensörde yüksek simetri elde etmek için uyarıcı sarım çok hassas bir şekilde sarılmalıdır. Sayısal kontrollü sistemler olsa bile bu zor bir iştir. Bu noktada en iyi yöntem içteki bobini mümkün olduğunca sıkı sarmaktır. Böylece sonradan içteki bobin tellerinin yerinden oynaması veya dıştaki bobin tellerinin içe doğru kayması engellenecektir [23].

#### 2.3.4. RTD (Residence times difference) fluxgate sensörler

2005 yılında B. Ando ve arkadaşları tarafından bulunmuştur [22]. Fluxgate sensörlerde kor malzemenin iki kutupta periyodik olarak doyuma tutulması gereklidir. Eğer bir yönde dış bir manyetik alan varsa, manyetik alanın desteklediği yöndeki kutupta doyuma kalma süresi biraz daha artacak ve diğer yönde ise azalacaktır. Bu durumda arada süre olarak bir fark oluşacaktır. Sistemin çalışma mantığı bu süre farkının ölçümüne dayanır. Bir RTD fluxgate manyetometre, Şekil 2.19’da gösterildiği üzere ikili bobin tasarım mantığına göre çalışır. Buna göre bu sistemde de bir uyarıcı bobin, bir toplayıcı bobin ve buna ek olarak bir de amorf ferromanyetik kor bulunacaktır. A’da sensörün şematiği ve b’de çıkış potansiyeli gösterilmiştir [22].



Şekil 2.19. RTD fluxgate sensörün şematiği [22]

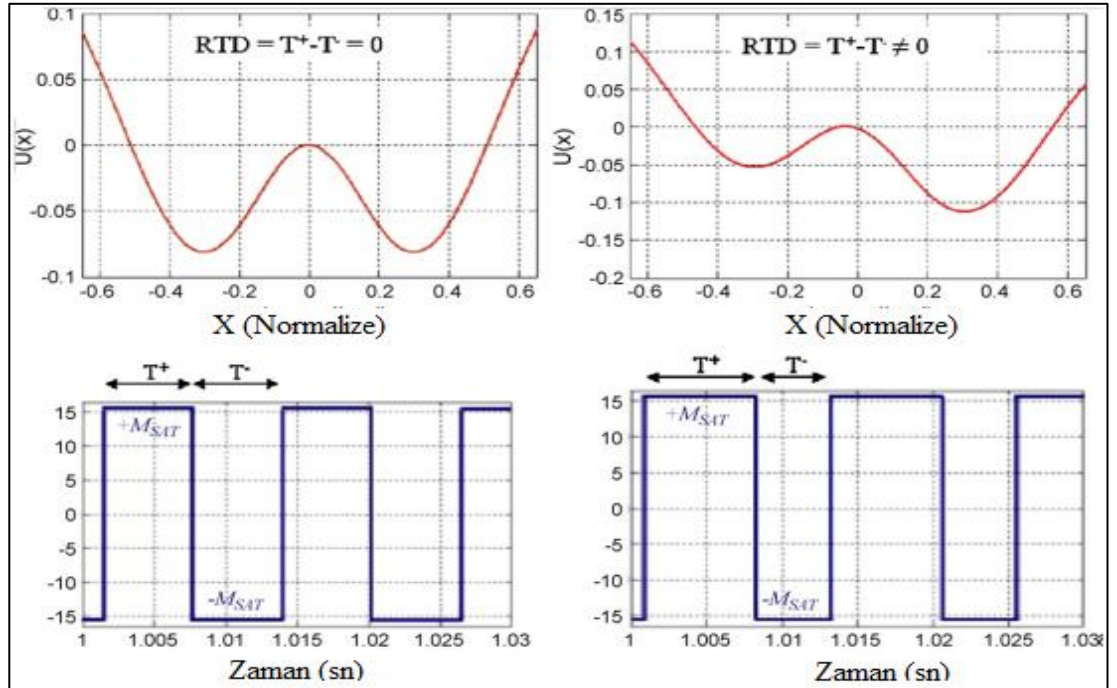
$$U(x) = \frac{x^2}{2} - \frac{1}{c} \ln \cosh[c(x + H_e(t) + H_{dış})] \quad (2.38)$$

$$RTD = \frac{2}{w} \left[ \arcsin \frac{H_c + H_{dış}}{H_\phi} - \arcsin \frac{H_c - H_{dış}}{H_\phi} \right] \quad (2.39)$$

Burada  $H_c$  koersif alan,  $H_e$  uyarıcı alan,  $c$  sıcaklıkla ters orantılı bir sabit,  $x$  normalize manyetik alandır.

Sistemde periyodik uyarıcı akım, uyarıcı bobinden geçtiğinde, kor malzemede geometrik yapıya bağlı olarak bir uyarıcı manyetik alan oluşacaktır. Sensörün ferromanyetik korunun alana tepkisi potansiyel enerji fonksiyonu  $U(x)$  yardımıyla türetilmektedir. Şekil 2.20’de  $U(x)$  gösterilmektedir.  $H_{dış}$ , ölçülmek istenen alandır. Potansiyel enerjinin türevi manyetizasyonu, manyetizasyonun türevi ise çıkış potansiyelini vermektedir [22].

100  $\mu\text{m}$  çaplı, FeSiB tel kullanılmış RTD fluxgate sensör için 10 Hz ile 100 Hz frekans bandı aralığında, 1 mA ile 50 mA genlikli uyarıcı akımların kullanılması bu sensörlerin performansını göstermektedir. 30 sn süresince uyarıcı akım olarak 80 Hz’de 20 mA uygulandığında duyarlılığı 0.03  $\mu\text{sn/nT}$  ve çözünürlüğü 0.3 nT olarak gözlenmiştir. 10 mA ve 40 Hz için duyarlılık 0.1275  $\mu\text{sn/nT}$ , çözünürlük 0.06 nT olarak gözlenmiştir [7].



Şekil 2.20. Potansiyel enerji ve residence time değişimi [22]

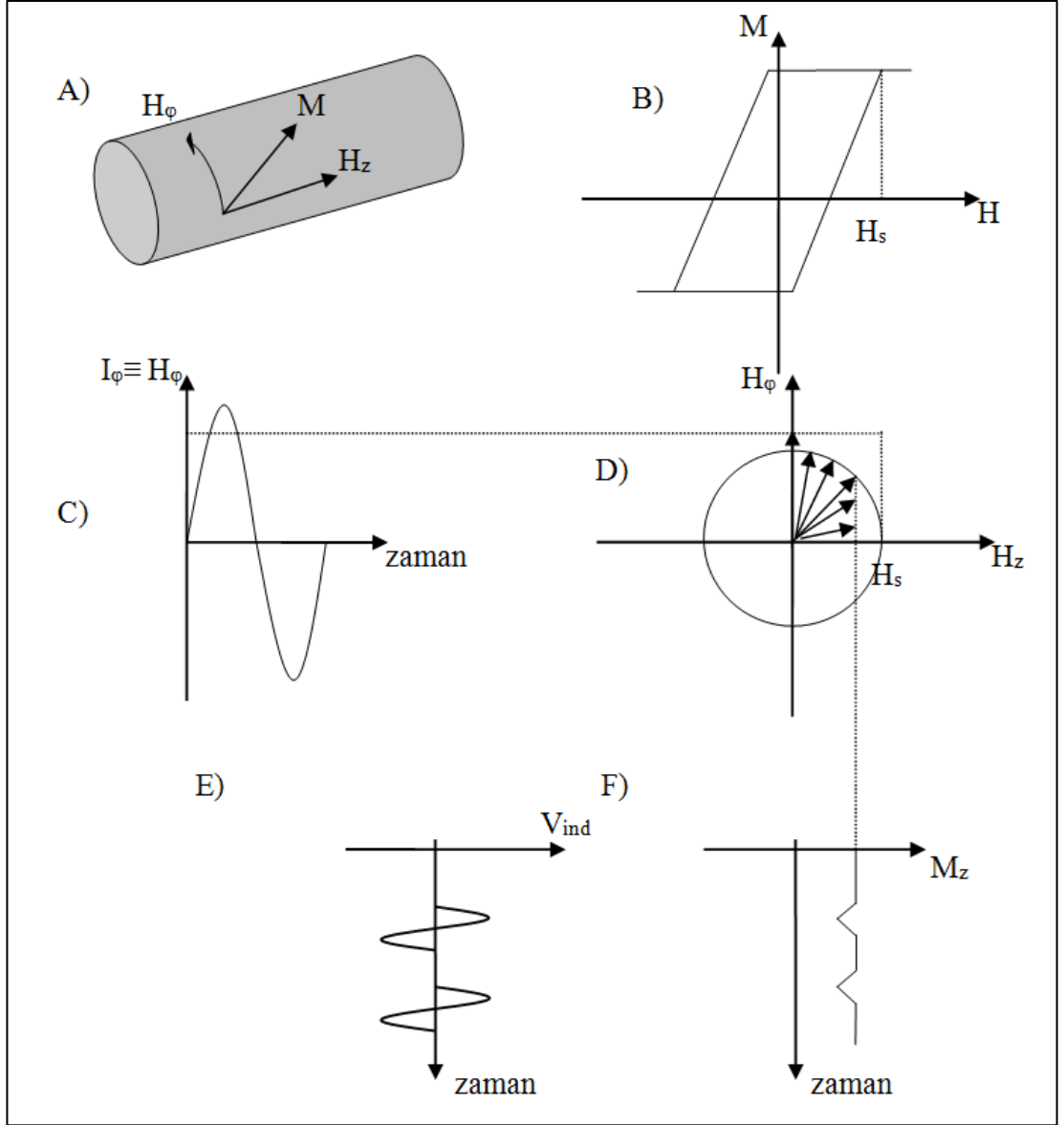
## 2.4. Ortogonal Fluxgate Sensörün Gate (Kapı) Mekanizması

Bu tip sensörlerin gating mekanizması Primdahl tarafından ayrıntılı olarak verilmiştir [25,26]. Sensör mekanizmasının çalışma şekli Şekil 2.21'de verilmektedir. Bugüne kadar üretilen sensör tipleri Şekil 2.15'te gösterilmiştir. Burada sinüs dalgası uyarıcı alan olarak kullanılmakta ve söz konusu uyarıcı alan ferromanyetik çekirdeğin her bir periyotta iki kez doyuma ulaşmasını sağlamaktadır. Dairesel yönde bir uyarıcı manyetik  $H_\phi$  alanına ve aksel doğrultuda  $H_z$  alanına maruz kalan, silindir şeklinde soft bir manyetik malzeme Şekil 2.21a'da gösterilmektedir. Burada uyarıcı alan toroidal bir bobin tarafından üretilmektedir. Şekli basitleştirmek için bobin gösterilmemiştir. Eğer dış bir manyetik alan yoksa manyetizasyon vektörünün yönü, uyarıcı alan yönünde olacaktır. Şekil 2.21b'de M-H eğrisi verilen malzeme tümüyle izotropik ise ve eğer dış bir manyetik alan varsa manyetizasyon vektörlerinin yönü birbirine dik olacaktır. Bu durumda minimum enerji prensibini sağlamak için M manyetizasyonun değeri  $H_z$  ve  $H_\phi$  arasında olacaktır. Şekil 2.21c'de ise uyarıcı akım gösterilmektedir [24].

$H_z$ 'nin doyum manyetizasyon değeri olan  $H_s$ 'den küçük olduğunda ( $H_z < H_s$ ) kor malzeme doyum durumunda olmayacaktır. Bu durumda  $H_\phi$  artarsa hem  $\alpha$  açısı hemde M manyetizasyonunun büyüklüğü artacaktır. Aksel doğrultudaki  $M_z$  değeri  $H_z$  sabit olduğu için değişmeyecektir. Bununla beraber eğer  $H_\phi$ ,  $H_s$  değerine ulaşırsa kor malzeme doyuma ulaşacak ve bundan sonra  $H_\phi$  daha da artarsa M manyetizasyonu artık değişmeyecektir. Burada  $H_\phi$ 'nin tek etkisi Şekil 2.21d'de gösterildiği gibi M manyetizasyonunu dairesele doğruya çevirmek olacaktır. Bu durumda M manyetizasyonu doyuma ulaştığı için,  $M_z$  manyetizasyonu sabit kalamayacak ve Şekil 2.21f'de gösterildiği gibi azalacaktır. Sonuç olarak aksel doğrultuda manyetik akıda bir değişim oluşacak ve Şekil 2.21e'de gösterildiği gibi toplayıcı bobinde bir voltaj indüklenenecektir [24]. Bu indüklenen voltajın çift harmoniklerinin büyüklüğü dış alanın büyüklüğü ile orantılıdır [7,23,24].

Uyarıcı alanın sinüs şeklide olduğunu ve doyum durumunun her periyotta iki kere sağlandığını açıklanmıştır. Bu durumda daha önce de söylendiği gibi, indüklenen voltaj uyarıcı frekansın çift harmoniklerini içerecektir. Söz konusu çift harmonikleri çıkış sinyalinden elde etmek için genellikle bir lock-in yükselteç kullanılır [7]. İndüklenen voltajın genliği aksel yöndeki alan  $H_z$ 'ye ve dolayısıyla  $M_z$

manyetizasyonuna bağlıdır. Sonuç olarak çift harmoniklerin genliği  $H_z$  alanının bir ölçüsüdür [24].

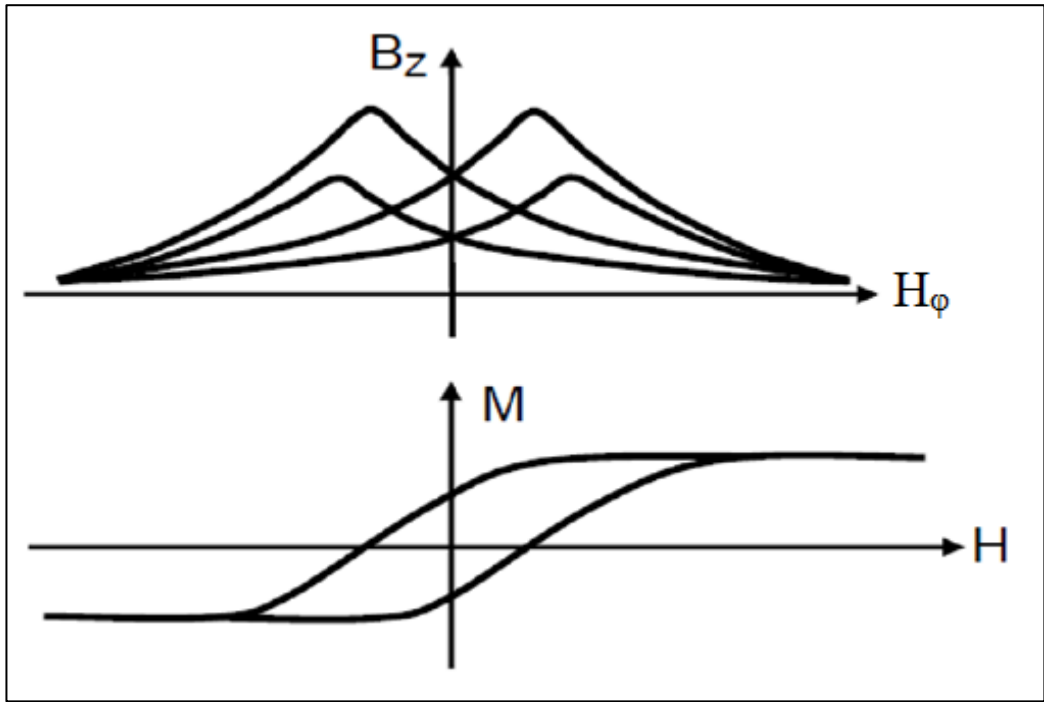


Şekil 2.21. Ortogonal fluxgate sensörün çalışma mantığı [7,23,24]

Eğer  $H_z$  alanının yönü ters çevrilirse  $M_z$  manyetizasyonu negatif olur ve indüklenen voltajın fazı  $\pi$  radyan kadar değişecektir. Bu durum ortogonal fluxgate sensörlerin pozitif ve negatif alanları algılayabildiği anlamına gelmekte ve genellikle indüklenen voltajın fazından, asimetrik bir fonksiyon elde edilerek, ölçülen manyetik alanın yönünü ayırt etmek için ikinci harmoniğin reel kısmı çıkış sinyali olarak kullanılmaktadır [24].

Bir gating eğrisi çekirdek malzemeden akının nasıl çıktığını gözlemlemek için ölçülür. Şekil 2.22'deki  $M$ - $H$  eğrisini göz önünde bulunduralım. Buradan kor malzemedeki kapı mekanizmasını veren  $B_z$ - $H_\phi$  eğrisini türetebiliriz. Gating eğrisindeki pik verdiği noktaların genliği, doyum durumunda değilken  $M_z$  değerine karşılık geleceğinden,  $H_z$  ile orantılıdır. Ayrıca pik noktaları sabit değildir. Daha yüksek  $H_z$  değerleri için doyum daha düşük  $H_\phi$  değerlerinde sağlanır. Bu durum pik noktaları arasındaki mesafelerde düşüşün nedenidir [23,24].

Gating eğrisinin pik noktaları  $H_z < 0$  için negatif ve  $H_z = 0$  için sıfır olacaktır. Bu durum dış manyetik alanın yokluğunda toplayıcı bobinlerde ölçülen voltaj değerinin sıfır olacağı anlamına gelecektir.



Şekil 2.22. Ortogonal sensör için gating eğrileri [24]

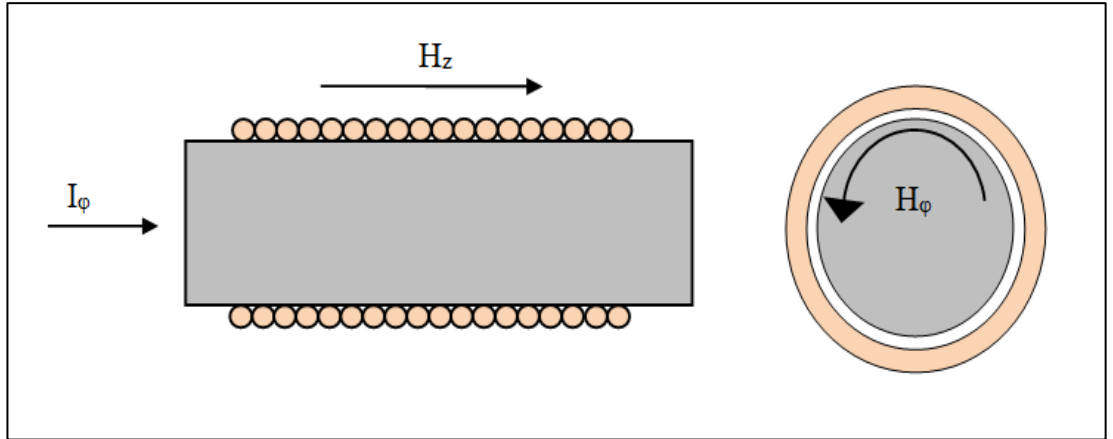
Yukarıda anlatılan model sadece kor malzemenin izotropik olduğu veya dairesel anizotropiye sahip olduğu durumlarda geçerlidir. Dairesel anizotropinin olmadığı durumlarda  $M$  manyetizasyonunun yönü sadece  $H_z$  veya  $H_\phi$  alanı ile değil aynı zamanda anizotropi ile de belirlenir. Böyle durumlarda  $M$  manyetizasyonunun  $\theta$  açısı,  $M$ 'nin toplam enerjisini minimize ederek elde edilir. Böylelikle  $H_\phi$  ve  $H_z$  alanlarının enerjilerinin yanı sıra anizotropi enerjisi de dikkate alınmış olur [24].

Dairesel anizotropinin olmadığı durumlar manyetizasyon değerini dairesellikten saptırıp, dış bir manyetik alanın yokluğunda dahi gating eğrilerini değiştirerek bir çıkış voltajına sebep olabilir. Bunun dışında, manyetik tellerde anizotropinin yönü ve büyüklüğü geometrik parametrelere ve üretim tekniklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Dolayısıyla kor malzemenin kolay eksen yönündeki manyetik özelliklerinin sensör uygulamalarında kullanılmadan önce belirlenmesi çok önemlidir [39].

#### 2.4.1. Tel korlu ortogonal fluxgate sensörler

Daha önceden bahsedildiği üzere fluxgate sensörler için mikrotellerin kullanılması ortogonal sensörlere yeni bir popülerlik kazandırmıştır [24].

Şekil 2.23'te manyetik mikrotel korlu ortogonal bir fluxgate sensör gösterilmektedir. Toplayıcı bobin manyetik telin etrafına sarılmış, manyetik tele uyarıcı akım  $I_\phi$  uygulanmış ve dairesel bir  $H_\phi$  alanı üretmesi sağlanmıştır [24].



Şekil 2.23. Ortogonal fluxgate temelli manyetik mikro telli sensörün şematik gösterimi [24]

Bu yapıda indükleyici sarıma ihtiyaç yoktur. İndükleyici alan telin içinden geçen uyarıcı akım tarafından oluşturulmaktadır. Dolayısıyla sensörün yapısı oldukça basitleştirilmiş ve üretim imkanı kolaylaşmıştır. Bundan başka uyarıcı bobinin olmaması sonucunda sensörün boyutları dikkate değer bir biçimde küçülecektir. Bu durum çok küçük sensörlerin kullanıldığı günümüzdeki bazı uygulamalarda ortogonal fluxgate sensörlerin önemini artırmaktadır [24].

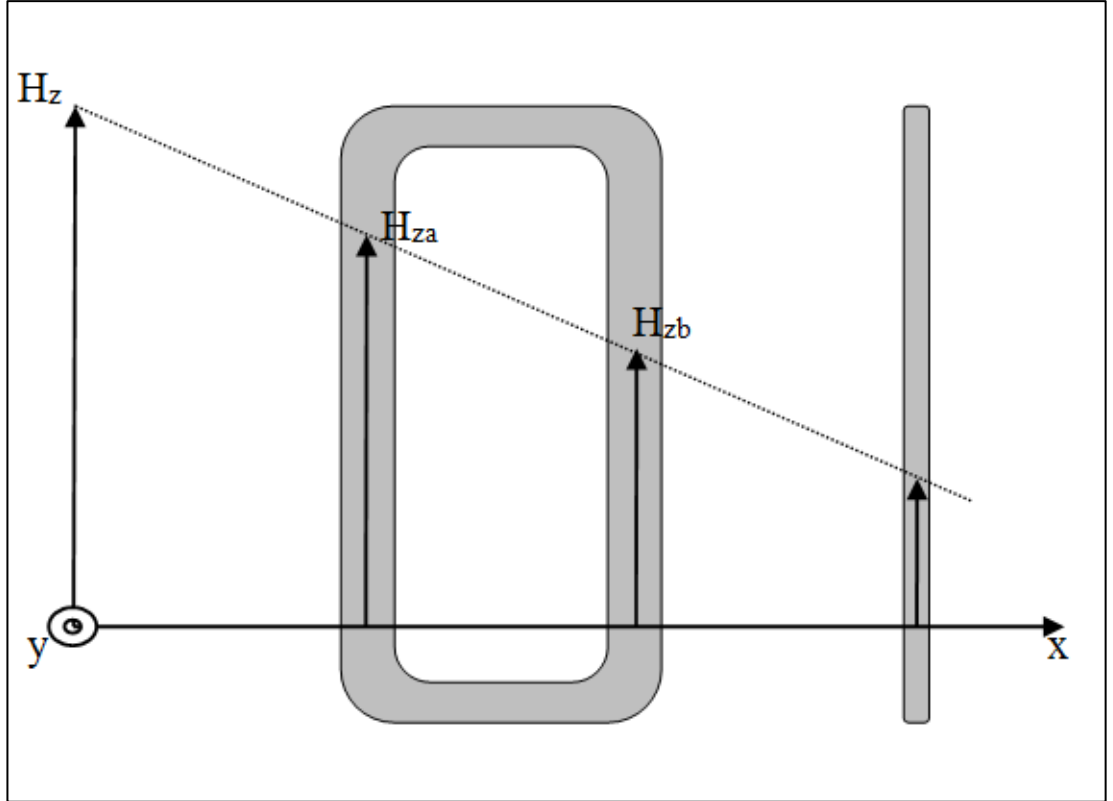
Mikrotellerle yapılan fluxgate sensörler, söz konusu tellerin üretim tekniklerinden dolayı son yıllarda popüler olmuştur. Örneğin Li ve arkadaşları bakır bir tele elektro-deposition yöntemi ile Ni-Fe film ile kaplayıp, kaplama esnasında manyetik alanın etkilerini göstermişlerdir [46]. Manyetik alanın büyüklüğünü ve yönünü uygun bir biçimde ayarlayarak, anizotropi doğrultusunun ayarlanması mümkün olduğu gibi kaplamanın üniform yapıda olması, manyetik özellikleri ve tanecik büyüklüğü de ayarlanabilir. Bundan başka elektro-kaplama yöntemiyle kaplanmış Permalloy filmlerde koersivite alanının büyük miktarda azaltılması mümkün olabilmektedir. Ayrıca bu malzemelere elektro-kaplama esnasında doğru akım yerine atmalar şeklinde akım uygulanarak manyetik geçirgenliklerinin artırılması da sağlanmıştır [47].

Kaplamanın üniformluğu bakır tel üzerine elektro-kaplama yapmadan önce bir bakır tabakası yayılarak sağlanmış ve böylelikle yüzey pürüzü azaltılmıştır. Bu durum koersivitenin azaltılmasına yardımcı olmuştur. Film kalınlığının tanecik büyüklüğü ve koersivite ile olan ilgisi Seet ve arkadaşları [48] tarafından çalışılmış ve daha kalın numunelerde tanecik büyüklüğünün daha büyük olduğu gösterilmiştir. Ayrıca Seet tarafından elektrokaplama sırasında akım yoğunluğunun sabit tutulması gerektiği tavsiye edilmiştir. Kalınlık arttıkça sabit akım kullanılırsa, akım yoğunluğu azalacak ve bu durum da tanecik büyüklüğünün artmasına neden olacaktır [48].

#### **2.4.2. Konumsal Çözünürlük**

Uyarıcı bobin olmamasına ek olarak tel-korlu fluxgate sensörlerin bir diğer avantajı, telin çapının (genellikle birkaç mikron olacak kadar) küçük olmasıdır. Küçük çap sensörün küçültülmesinde bir avantaj sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda manyetik alan ölçümünde konumsal çözünürlüğü de artırmaktadır [24]. X doğrultusu boyunca artan bir dış manyetik alan ( $H_z$ ) Şekil 2.24'te gösterilmektedir. Paralel fluxgate sensörlerde demanyetizasyon faktörünü ve sıfır alandaki voltaj atmalarını gidermek için ya ring-kor veya da RTD kor kullanılmalıdır. Böyle korlar ölçtüğü yöne göre (ölçülen dış manyetik alan gradyana sahip olduğu için) iki hassas bölüme sahiptirler. Şekil 2.24'te paralel sensörün ölçtüğü alanlar  $H_{za}$  ve  $H_{zb}$  olarak verilmiştir. Paralel fluxgate sensör tarafından ölçülen toplam alan bu ikisinin ortalaması olacaktır.

Paralel fluxgate sensörlerde 1-2 cm'den daha geniş kor malzeme nadir olarak kullanılır (konumsal çözünürlük bu kalınlığa sıkıştırılır). Buna karşılık ortogonal fluxgate sensörlerde çözünürlük miktarı telin çapı ile sınırlı olmak kaydıyla  $H_z$  alanını tek bir noktada ölçebilir. Ortogonal fluxgate ve konumsal çözünürlüğü Şekil 2.24'te en sağda gösterilmiştir. Bu tip kor malzemeye sahip ortogonal fluxgate sensörlerin konumsal çözünürlük miktarı klasik paralel fluxgate sensörlere göre iki kat fazladır. Dolayısıyla bu sensörlerle manyetik görüntülemeye başarılı uygulamalar geliştirilmiştir. Örnek olarak Terashima ve Sasada %3 tanecik yönelimli silikon-çelik malzemeden oluşan manyetik alanları, 50  $\mu\text{m}$ 'lik adımlarla (kullanılan amorf telin çapı 120  $\mu\text{m}$ 'dir) ölçen bir gradiometre geliştirmişlerdir. Sensörün konumsal çözünürlüğü çok yüksek olduğu için tek bir domainden çıkan manyetik alanı bile çizmek mümkün olmuştur [49].

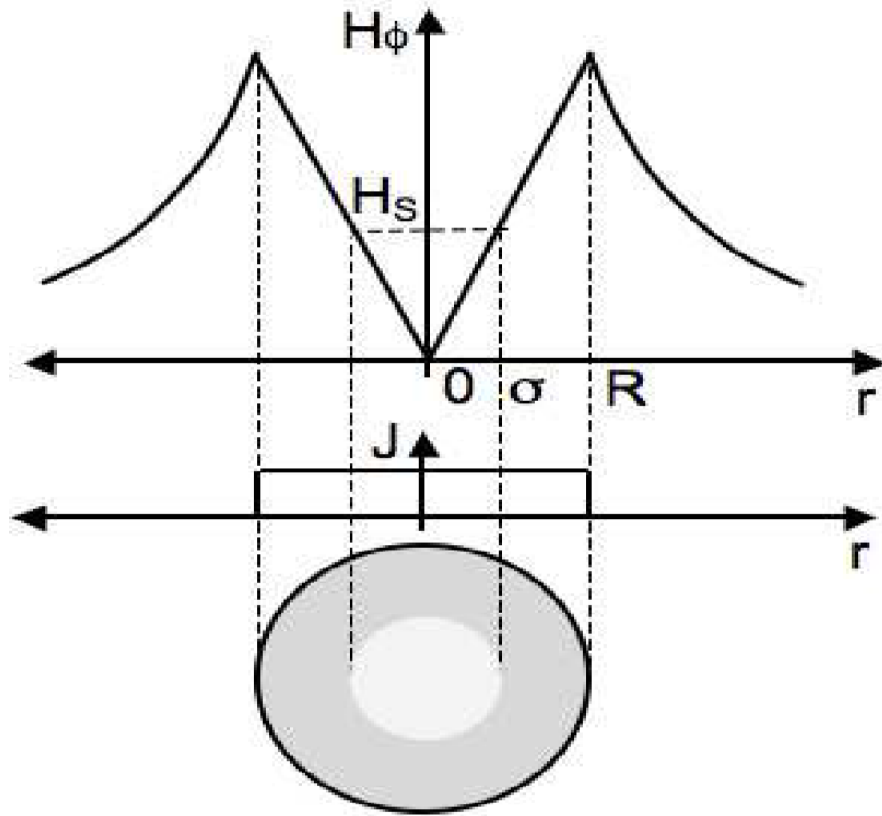


Şekil 2.24. Farklı fluxgate sensörlerin konumsal çözünürlüğü [24]

Çok ince korlu (50  $\mu\text{m}$ ), PCB teknolojisi temelli paralel fluxgate sensörler de önerilmiştir [50]. Ancak konumsal çözünürlük y doğrultusunda artmasına rağmen x doğrultusunda hala zayıftır.

### 2.4.3. Telin içinde uyarıcı akım

Ortogonal fluxgate sensörlerin en önemli eksikliklerinden biri telin içindeki uyarıcı akımın, telin merkezinden uzaklaştıkça homojen olmamasıdır. Bu doğrudan Ampere Yasasından kaynaklanmaktadır. Şekil 2.25'deki gibi homojen akım dağılımına sahip bir manyetik tel olduğunu düşünelim. Böylelikle yüzey etkisini (Skin Effect) ihmal edebiliriz. Uyarıcı  $H_\phi$  alanı  $r = 0$ 'dan (telin merkezi), telin en son sınırı  $r=R$ 'ye kadar doğrusal biçimde artacaktır. Eğer burada  $H_s$  kor malzemeyi doyuma ulaştırabilecek en küçük alan olarak tanımlanırsa,  $H_\phi < H_s$  olduğu telin daha içteki kısımlarında,  $r < \sigma$  için tamamen doyuma ulaşmaz. Bunun aksine toroidal bir kor tarafından uyarılan silindirik bir tel kullanırsak bütün kor eşit olarak doyuma ulaşacaktır [24].



Şekil 2.25. Homojen akım dağılımına sahip manyetik tel [24]

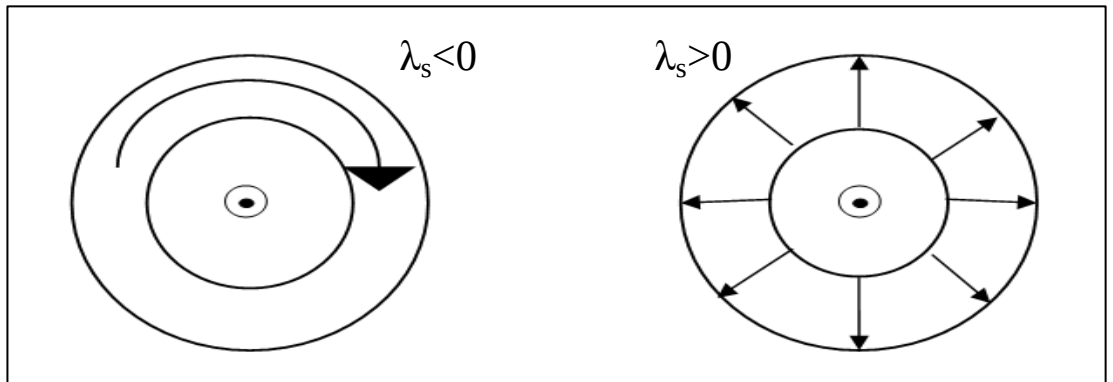
Burada doyum manyetizasyonu doğrudan bir sınıra sahip değildir. Doyuma ulaşan malzemenin miktarı manyetik alan arttıkça asimtotik olarak artar. Dolayısıyla doyum durumu ile doyuma uğramamış durum arasında kesin bir sınır yoktur. Bununla

beraber doyum durumunu pratik olarak manyetizasyon artışının sensörün çalışmasına daha fazla etki etmediği durum olarak düşünebilir [24].

Düzgün çalışan bir fluxgate sensör için doyum manyetizasyonu çok önemlidir. Telin doyuma ulaşan dış kısmı fluxgate mantığına uygun olarak çalışırken, iç kısımları doyuma ulaşmamasından dolayı fluxgate olarak çalışmayacaktır. Buna ek olarak doyuma ulaşmayan bu iç kısım çıkış karakteristiklerinde histerise yol açacaktır. Eğer tele kolay eksen doğrultusunda bir manyetik alan uygulanırsa, telin merkez kısmı da kendi doğrultusunda manyetize olacaktır. Korun bu kısmı doyuma ulaşmadığından dolayı teldeki manyetizasyon dairesel doğrultudaki uyarıcı alanla doyuma ulaştırılarak eski haline geri getirilemez. Telin merkezi dolayısıyla kendi histeris eğrisini takip edecektir [51,52].

Bundan dolayı sensörün çıkışında bir histeris oluşmaması için korun tam olarak doyuma ulaşması çok önemlidir. Ancak bütün kesit alanı boyunca teli doyuma ulaştırmak sonsuz bir akım gerektireceğinden dolayı imkansızdır. Dolayısıyla her zaman telin iç kısımları doyuma ulaşmamış bir halde kalır[51,52].

Ortogonal fluxgate sensörlerde kor malzeme olarak sıklıkla amorf teller kullanılmaktadır. Şekil 2.26'da görüldüğü üzere, telin manyetositriksiyonunun pozitif veya negatif olmasına göre iç kısım kolay eksen yönünde ve dış kısım radyal veya dairesel yönde manyetizasyona sahip olacaktır [53].



Şekil 2.26. Manyetik tellerin kesit alanının domain yönelimi [24]

#### 2.4.4. Kompozit teller

İç kısımdaki doyuma ulaşmayan bölge sorununu çözmek için Ripka tarafından kompozit teller önerilmiştir [51,52]. Kompozit telleri kullanmaktaki asıl amaç, soft

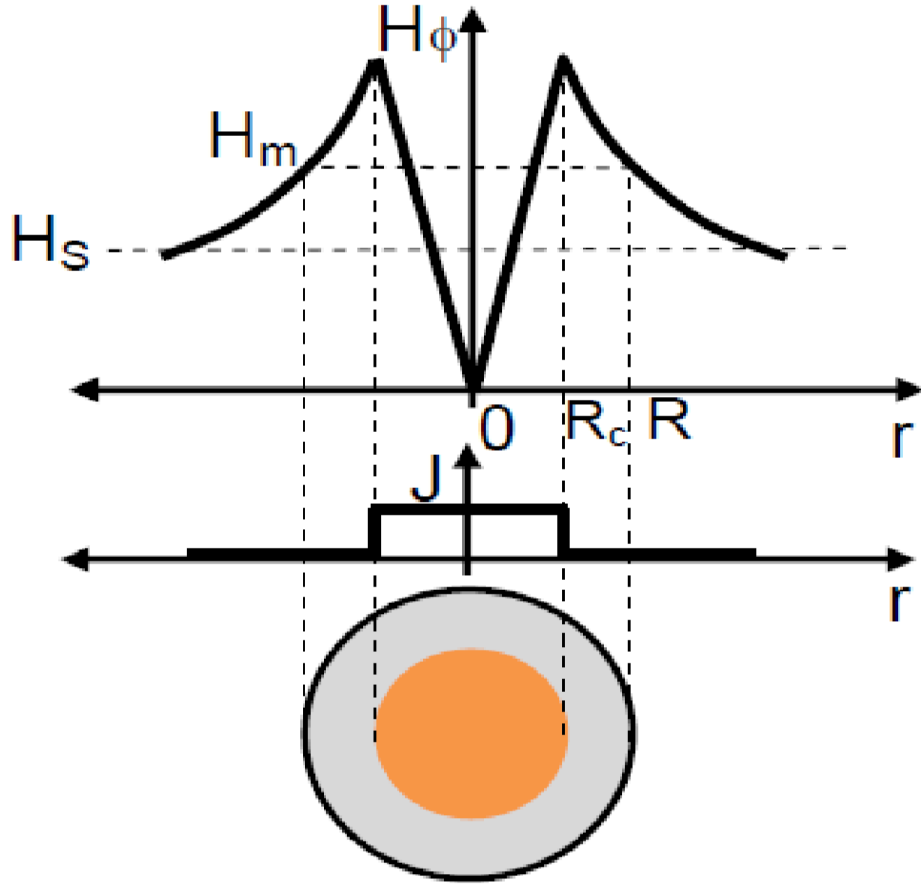
manyetik bir kabuk tarafından sarılmış, manyetik olmayan çekirdeğe sahip teller ortaya çıkarmaktır. Bu yolla tel tam olarak doyuma ulaşmadığında, sensör karakteristiğinde ortaya çıkan histeris ve perming etkisinden kurtulmak amaçlanmaktadır.

Buna göre 2.5  $\mu\text{m}$  kalınlığında permalloy katmanla sarılmış, 20  $\mu\text{m}$  çapında bakır bir kor için perming etkisi 20 mA uyarıcı akım altına sadece 1  $\mu\text{T}$ 'dır. Normal türden fluxgate sensörlerde olduğu gibi perming etkisinin daha yüksek uyarıcı akımla düştüğü gözlemlenmiştir. Burada akım arttıkça kor malzeme daha derinden manyetize olup doyuma ulaşacaktır.

Kompozit tel üretmek için en çok kullanılan yöntem manyetik bir alaşımın, örneğin  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (permalloy), bakır bir mikro tel üzerine elektrokaplama yöntemiyle kaplanmasıdır [54]. Bakırın direnci ( $\sim 17 \text{ n}\Omega\text{m}$ ) birçok manyetik alaşımdan daha düşüktür (permalloy için  $\sim 200 \text{ n}\Omega\text{m}$ ). 5  $\mu\text{m}$  permalloy kabuk ile sarılmış ve 50  $\mu\text{m}$  çapında bir permalloy için toplam akımın sadece %3,6'sı manyetik kaplamadan akar. Eğer sensör yüzey etkisi ihmal edilebilecek kadar düşük bir uyarıcı akım frekansında çalıştırılırsa, bütün akımın telin bakır kor kısmından aktığını düşünebiliriz. Bunun basitleştirilmiş şekli Şekil 2.27'de gösterilmiştir. Buna göre akım yoğunluğu  $J$ , bakır kordan homojen bir şekilde akmakta ve manyetik kaplamada sıfır değerini almaktadır.

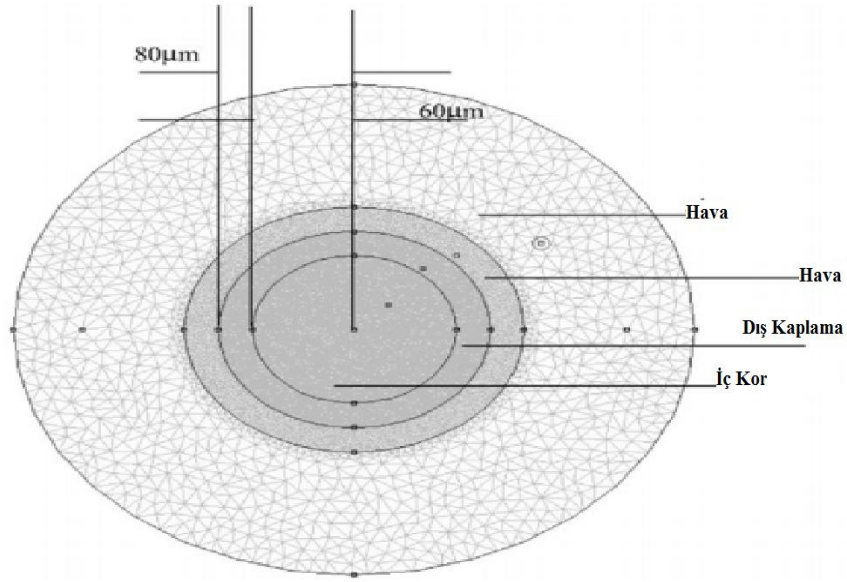
Uyarıcı akım tarafından üretilen dairesel manyetik alan bakır korun sınırına kadar ( $r=R_c$ ) doğrusal olarak artmaktadır.  $r>R_c$  bölgesinde ise  $1/r$  ile orantılı olarak azalmaktadır. Bu durumda manyetik katmanın dış tarafı daha düşük şiddette bir alan tarafından uyarılacaktır. Bu alana  $H_m$  olarak denirse,  $H_m$  değerini, doyum değeri olan  $H_s$ 'den büyük yapan uyarıcı akım değerleri teli tümüyle doyuma ulaştıracaktır[24].

Bu tip tasarımlarda koru saran kaplamanın doyum manyetizasyonuna ulaşması için daha büyük uyarıcı akımlara gereksinim vardır. Dolayısıyla yüksek akım dezavantajlara yol açacaktır. Buna karşılık daha kalın dış manyetik kaplama da hassasiyet artıracaktır. Bu iki durumun iyi dengelenmesi gerekmektedir [24].



Şekil 2.27. Bakır korlu ve manyetik kaplamalı kompozit tel [24]

Bununla beraber sensörün yüksek frekanslı uyarıcı akımlarda çalıştığı zamanlarda yüzey etkisi her zaman ihmal edilemeyebilir. Bu durumda uyarıcı akım bakır kordan manyetik kaplamaya doğru akıp, manyetik kaplamadaki manyetik alanı azaltacaktır. Akım dağılımına bağlı olarak manyetik alan büyük miktarlarda değişebilir. Kompozit tellerde akım dağılımını hesaplayabilmek için nümerik simülasyon önerilmiştir [55]. Şekil 2.28’de böyle bir nümerik simülasyon yöntemiyle modellenen kompozit tel gösterilmektedir. Akım derinliği hem kor malzemenin hem de manyetik kaplamanın iletkenliğine bağlıdır. Ayrıca manyetik kaplamanın manyetik geçirgenliğine de bağlıdır. Dolayısıyla akımın manyetik kaplamaya sızmasını önleyecek bir limit frekans değeri verilememektedir. Nümerik simülasyon tel içindeki akım dağılımını tahmin edebilmek için önerilmiştir.



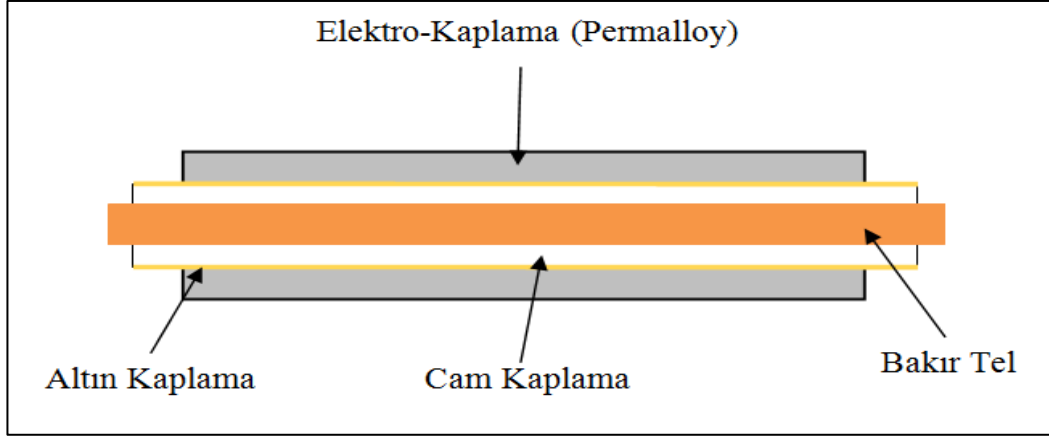
Şekil 2.28. Teorik hesaplamada kullanılan model kompozit tel [55]

Sonuç olarak ortogonal fluxgate sensör tasarımcıları, sensörün çalışma frekansını uygun seçmelidir. Bir taraftan yüksek akım gürültüyü azaltarak hassasiyeti artırırken, diğer taraftan yüksek frekans histeris ve perming etkilerine ek olarak gürültüyü artırarak telin tüm parçalarının tamamen doyuma ulaşmasını engellemektedir. Uyarıcı frekans bu iki zıt özelliğin birbiriyle uyum içerisinde olduğu en iyi değerde seçilmelidir [7].

2009 yılında Butta tarafından yüzey etkisine bağlı akım sızmasının manyetik kaplamaya sızmasını önlemek için daha karmaşık bir yapı önerilmiştir [56]. Şekil 2.29'da gösterilmektedir. Bu bakır kor ile manyetik kaplama arasına, elektriksel yalıtımı sağlamak için cam bir tabaka eklenmiştir. Dolayısıyla uyarıcı akımın sensörün çalıştığı frekanstan bağımsız olarak tamamen bakır kordan akması sağlanmıştır. Bakır korda yüzey etkisi oluşsa bile, Amper Kanununda verildiği üzere, bakır korun çapı boyunca oluşan manyetik alanı etkilemeyecektir.

Bakır kor ve manyetik kaplama arasında cam katkılı kompozit bir yapı oluşturmak için cam kaplı bakır teller taban olarak kullanılmıştır. Buna göre püskürtme yöntemiyle nanometre kalınlığında altın bir katman cam kaplamanın üzerine uygulanmıştır. Sonuç olarak manyetik alaşımın elektrokaplama altın katman

üzerinde gerçekleştirilmiştir. Böyle bir yapı kullanılarak doyum akımı üç kat kadar azaltılabilmektedir [56].



Şekil 2.29. Cam eklentisi yapılmış kor malzemenin şematik gösterimi [37]

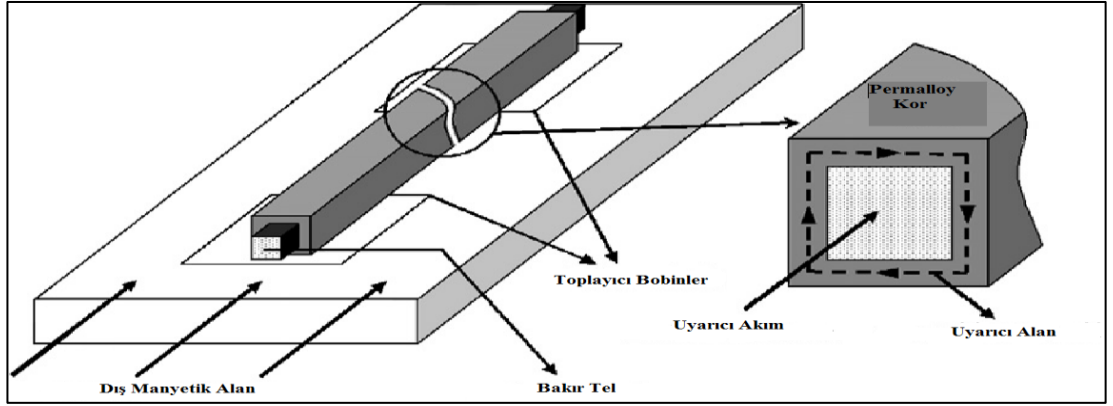
#### 2.4.5. Mikro ortogonal fluxgate

Daha önceden bahsedildiği gibi uyarıcı bobinin olmaması ortogonal fluxgate sensörlerin en önemli avantajlarından biridir. Böylece sensörün yapısı önemli bir biçimde basitleşir ve büyük oranda küçültülmesi mümkün olur.

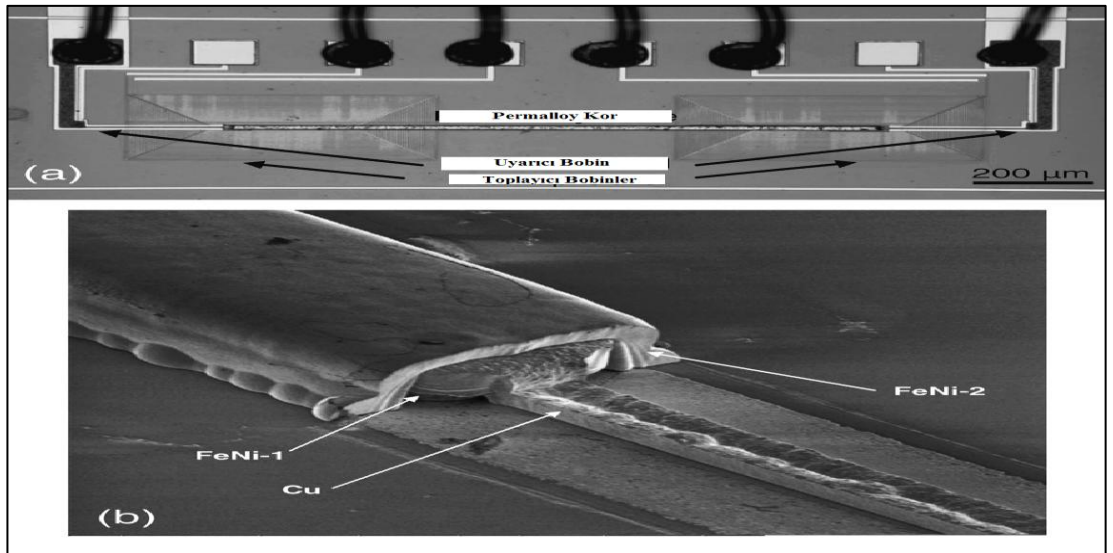
Boyutları küçültmek için yapılan ilk deneme Zorlu tarafından denenmiştir [57]. Buna göre 20  $\mu\text{m}$  çapında altın korlu ve 10  $\mu\text{m}$  kalınlığında Fe-Ni ile kaplanmış bir tel kullanılmıştır. Dolayısıyla telin toplam çapı 40  $\mu\text{m}$  ve uzunluğu ise 0,5 ile 4 mm arasında değişmektedir.

50 mA uyarıcı akım ile 100 kHz'de büyük doğrusal bir lineer bölge elde edilmiş ve telin böyle küçük bir akımla doyuma ulaştığı gösterilmiştir. Eğer akım 100 mA yükseltirise doğrusal aralık  $\pm 250 \mu\text{T}$  değerine ulaşır ve hassasiyet 4,3V/T olmaktadır. Sadece doyum değerinden biraz daha yüksek akımlar da perming etkisi için uygundur.  $\pm 50 \mu\text{T}$ 'lık şok alandan sonra 50 mA uyarıcı akım altında perming etkisi 16  $\mu\text{T}$  olmaktadır. 100 mA uyarıcı akımlar için ise 2  $\mu\text{T}$ 'ya düşmektedir. Ancak mikro tel temelli fluxgate sensörleri küçük boyutlarda üretmek çok zordur. Mikrofabrikasyon ortogonal fluxgate sensörlerin korları üç aşamada üretilmektedir [58]. İlk önce permalloy bir taban Cr/Cu katmanı uygulanmış yüzeye kaplanmıştır. Daha sonra merkezde buluncak olan bakır kor orta tabakaya ve en son olarakta üst tabakaya yine permalloy bakır etrafında kapalı bir dolanım yapacak şekilde kaplanır.

Sonuçta yapı dikdörtgen şeklinde bakır bir kora sahip olup, korun boyutları  $8 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$  kadardır. Bakır kor  $4 \mu\text{m}$  kalınlığında permalloy katmanı ile sarılmış ve yapının toplam toplam boyutları  $16 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  şeklindedir. Korun uzunluğu  $1 \text{ mm}$ 'dir. Korun boyutları fotolitografi ile hassas olarak ayarlanmıştır. Bu sistem Şekil 2.30 ve Şekil 2.31'de gösterilmektedir. Sisteme önceden  $2 \times 60$  sarımlık iki tane düzlemsel toplayıcı bobin önceden korun altına yerleştirilmiştir. Sensörün doğrusal çalıştığı bölge  $\pm 200 \mu\text{T}$  olup,  $100 \text{ kHz}$  ve  $100 \text{ mA}$  akım altında  $0,51 \text{ V/T}$ 'lık hassasiyet değerine sahiptir. Dolayısıyla sonuçta ortaya çıkan gürültü diğer ortogonal sensörlere göre ( $1 \text{ Hz}$ 'de  $95 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) daha yüksektir. Böyle tasarımların önemli problemlerinden biri de toplayıcı bobinlerin akıyı içiçe sarımlı olmasından dolayı tam olarak toplayamamasıdır. Gürültüyü azaltmak için farklı toplayıcı bobin tasarımlarının araştırılması gerekmektedir.



Şekil 2.30. Mikro fluxgate sensörün şeması [58]



Şekil 2.31. Mikrofluxgate sensörün yapısı. A) Devrenin görünümü B) Bakır kor etrafına sarılmış Permalloy kaplama [58]

#### 2.4.6. Çoklu tel kor kullanan sistemler

Paralel fluxgate veya klasik büyük korlu ortogonal fluxgate sensörlere göre manyetik telli, ortogonal fluxgate sensörlerin önemli dezavantajlarından biri de, kesit alanının küçük olmasından dolayı, düşük hassasiyettir [24].

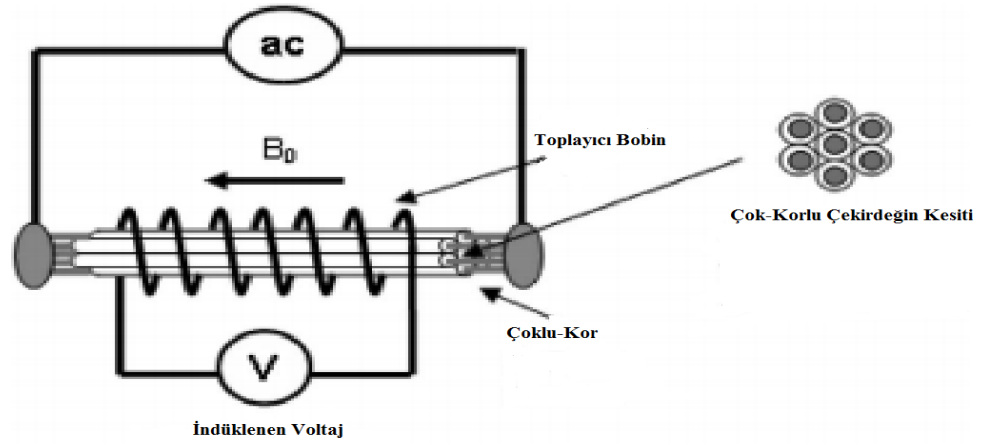
Hassasiyeti artırmak için çok-korlu sensörler önerilmiştir. Şekil 2.32 ve Şekil 2.33'de gösterilmektedir [59]. Bu tip sistemlerde manyetik kor birbirine sıkıca tutturulmuş, aynı frekans ve genlikte uyarıcı akımla beslenen birkaç manyetik telden oluşur. Teller arası elektriksel yalıtım yapılmıştır. Amorf tellerin kullanılması durumunda teller arası cam kaplama (tipik olarak 2  $\mu\text{m}$ ) elektriksel yalıtımı sağlamak için uygulanır.

Li ve arkadaşları çok korlu fluxgate sensörlerin çıkış özelliklerini farklı sayıda kor için incelemiştir [59]. Buna göre 16 korlu bir sistemin tek korlu bir sistemden 65 kat daha hassas olduğu bulunmuştur. Yani hassasiyetin kor sayısı ile üstel olarak arttığı gözlemlenmiştir.

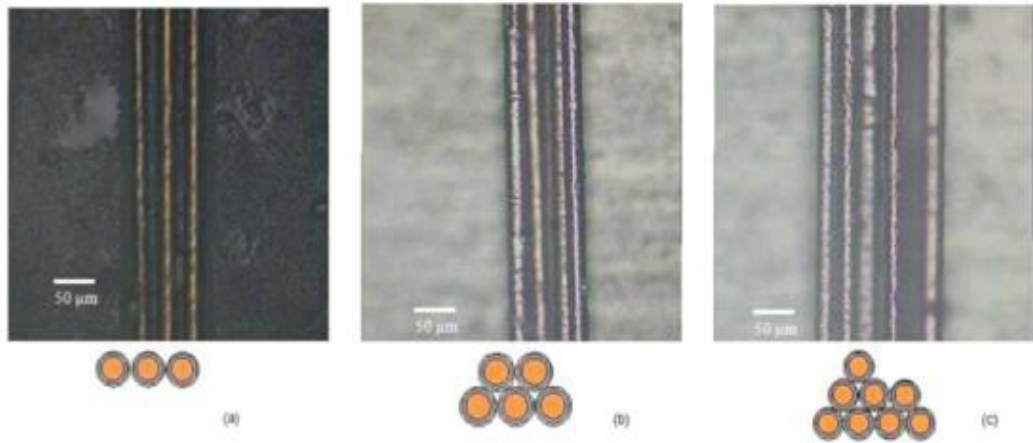
Hassasiyetteki böyle bir artışın sadece koru oluşturan ferromanyetik malzemeden kaynaklanmadığı ortaya çıkarılmıştır [60]. Tek korlu ve iki korlu sensörler için kesit alanlarının yakın olmasına rağmen, iki korlu sensörün hassasiyet değeri daha yüksek olacaktır. Eğer çok-korlu sistemlerde teller birbirinden yeterince uzak tutulursa (çapın 5 katı kadar), hassasiyetteki artışın doğrusal olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum hassasiyetteki bu artışın teller arası manyetik etkileşimden de kaynaklandığını göstermektedir [59].

Eğer hassasiyetle beraber gürültü de artıyorsa, hassasiyet artışının önemi kalmayacaktır. Konu ile ilgili Jie ve arkadaşları bir çalışma yapmış ve çok-korlu ortogonal fluxgate sensörlerin sadece daha yüksek hassasiyete sahip olmayıp aynı zamanda da daha düşük bir gürültüye sahip olduğunu göstermiştir [61]. Bu noktada teller birbirine ne kadar yakın olursa gürültüsünde o kadar az olduğu bulunmuştur. Bu durumda teller arası manyetik etkileşme daha artacaktır.

Ripka tarafından sensörün hassasiyetindeki artışın sensör devresinin kalitesiyle de ilgili olduğu önerilmiştir [62]. Bu durum yine Ripka tarafından doğrulanmıştır [63].



Şekil 2.32. Çok-korlu sistemin şematik gösterimi [59]



Şekil 2.33. Çok-korlu sistemde kullanılan kor malzemeler [59]

Tek tel-korlu ortogonal fluxgate sensörlerle kıyaslandığında, çok-korlu fluxgate sensörlerin kesit alanı daha büyük olacaktır. Dolayısıyla konumsal çözünürlükleri daha kötüdür. Bununla beraber hassasiyetin çok yüksek biçimde artışı göz önüne alarak birim alan başına hassasiyetin tek korlu sistemlere göre daha yüksek olduğunu söyleyebiliriz [24]. Eğer 16 korlu bir sistemi düşünürsek buradaki konumsal çözünürlük 4 kat kadar düşük olacaktır. Ancak bu durumda bile klasik tek korlu sistemlere göre 1 kat daha olduğu söylenebilir [24].

Bu tip sistemlerde dikkat edilmesi gereken önemli bir faktör, eğer teller birbirine çok yakın yerleştirilirse teller arası etkileşime dikkat edilmelidir. Bundan dolayı çıkış voltajında histerisis gözlemlenmektedir [63].

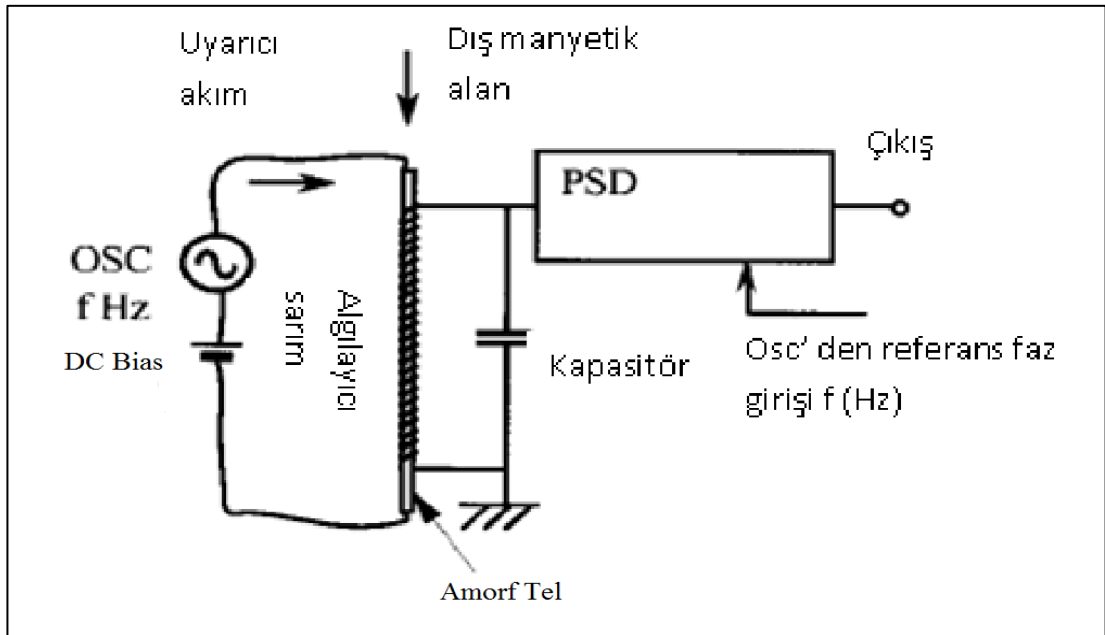
#### 2.4.7. Temel mod fluxgate sensörler

Ortogonal fluxgate sensörlerin yüksek gürültüye sahip olması nedeniyle geçmiş yıllarda paralel fluxgate sensörlere ağırlık verilmiştir. Bu durum araştırmaları paralel sensörlere kaydırmıştır. Çünkü eğer yüksek hassasiyet isteniyorsa gürültü en önemli parametredir. Geriye kalan doğrusallık, hassasiyet vb. özellikler uygun elektronik sistemler kullanılarak telafi edilebilir. Yüksek konumsal çözünürlükleri ile yeni popülerlik kazanmış olmalarına rağmen gürültü ortogonal fluxgate sensörlerde hala problemdir. Mikro fluxgate sensörlerin 1Hz’de nT/√Hz mertebesinde, tel korlu fluxgate sensörlerin ise 1Hz’de 100-400pT/√Hz mertebesinde gürültüye sahip olduğu rapor edilmiştir [58]. Sasada tarafından gürültüyü azaltmak için ortogonal fluxgate sensörlerin ikinci harmonik yerine temel modda çalışması önerilmiştir [64]. Bu tip sensörlerin devre şeması Şekil 2.34’te gösterilmiştir.

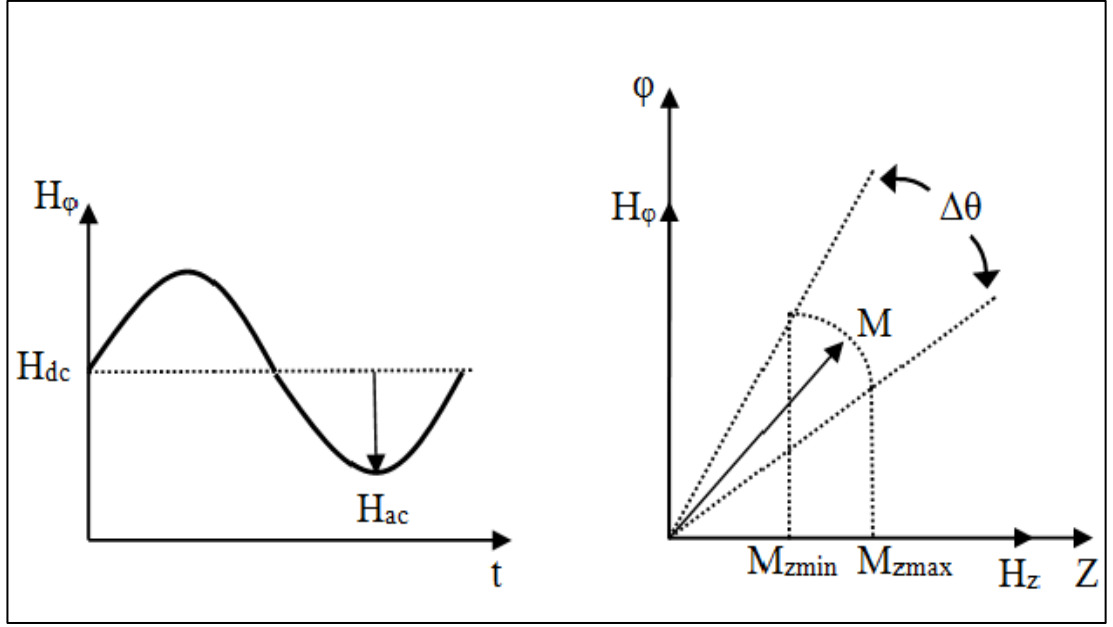
Bu tip sistemlerin yapısı tel korlu sensörlerle aynı olmasına rağmen sistemde uyarıcı akıma DC bir bias eklenmektedir. Toplayıcı bobinlerde oluşan çıkış voltajı temel frekansta olacaktır. Şekil 2.35’te gösterilmektedir. Uyarıcı akıma bir bias eklendiği için dairesel yöndeki uyarıcı alan:

$$H_{\phi} = H_{dc} + H_{\phi} \sin(2\pi ft) \quad (2.40)$$

şeklinde olacaktır.



Şekil 2.34. Temel modda çalışan fluxgate sensörün devre şeması [64]



Şekil 2.35. Temel modda ortogonal fluxgate sensörün çalışma mantığı [24]

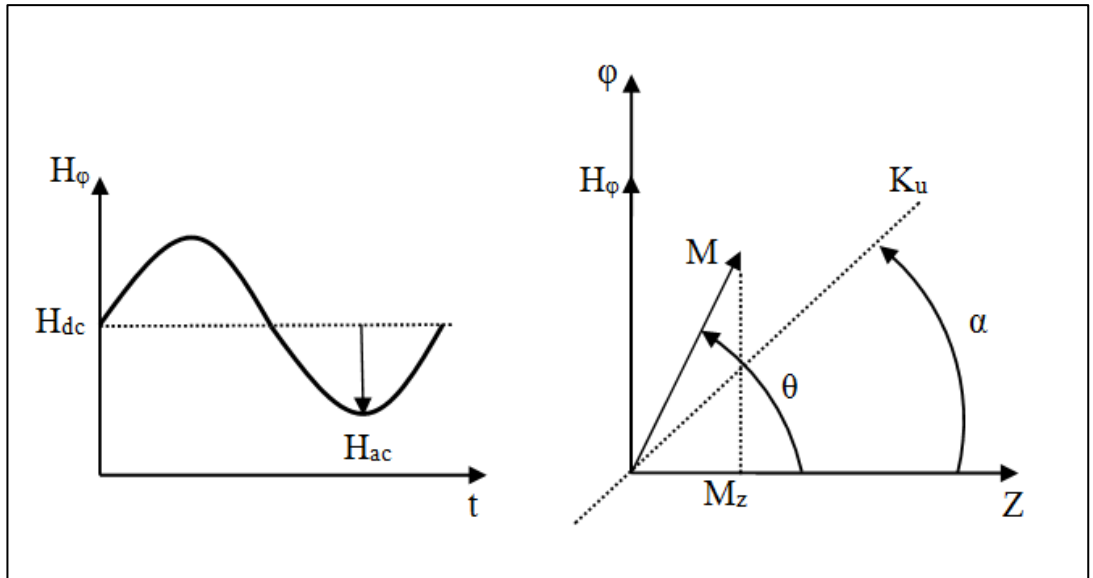
Burada  $H_{dc}$  eklenen bias kaynaklı alanı,  $H_\phi$  uyarıcı alanı,  $H_z$  dış manyetik alanı,  $M_z$  dış manyetik alan doğrultusunda ki manyetizasyonu,  $M$  toplam manyetizasyonu göstermektedir.

DC bias, uyarıcı akımı tek kutuplu tutacak kadar büyük olmalıdır. Böylelikle manyetizasyonun yönü değişmeyecektir.  $H_\phi$ ,  $H_z$  ve anizotropi enerjisine bağlı olarak minimum enerji durumunu sağlamak için  $M$  manyetizasyonu  $\pm\Delta\theta/2$  değeri civarında salınım yapacaktır. DC bias kullanılmayan fluxgate sensörlerde manyetizasyon her periyotta pozitiften negatife dönecektir. Dolayısıyla çıkış voltajı temelde ikinci harmoniği içerir. Bunun aksine temel modda ki ortogonal fluxgate sensörlerde dc bias, manyetizasyonun iki kutuplu olmasına (pozitiften negatife dönmesine) engel olur. Manyetizasyon sadece  $H_\phi$ 'nin  $f$  frekansı ile salınır. Bu durumda  $M_z$  aracılığı ile oluşturulan, toplayıcı bobindeki çıkış voltajı temel frekansta sinüs şeklinde olacaktır [24].

Temel modda ortogonal fluxgate sensörün DC bias içermeyen fluxgate sensörlerden tek farkı akının iki kutup yerine tek kutupta gating olmasıdır. Bu durum dışında yine klasik fluxgate sensörlerde olduğu gibi uyarıcı alanın kor malzemeyi doyurum manyetizasyonuna ulaştırması gerekmektedir. Dolayısıyla bu sensör de fluxgate sensör olarak sınıflandırılmaktadır.

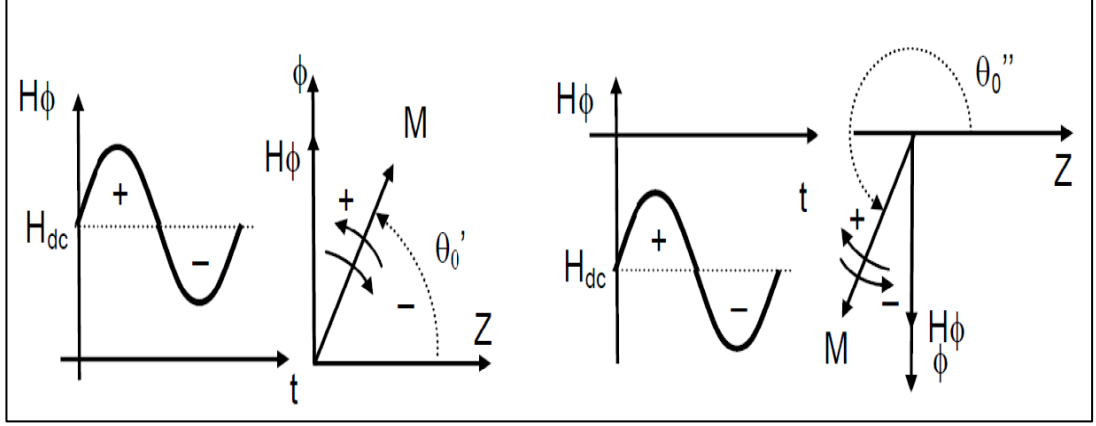
M manyetizasyonuna ve dolayısıyla çıkış voltajına etki eden faktörlerden biri de anizotropidir. Anizotropi, manyetizasyonun konumunu belirlemeye yardımcı olur. Örneğin  $H_z = 0$  durumunda, yani dış bir manyetik alanın yokluğunda, eğer  $\alpha = \pi/2$  ise yani anizotropi daireselse,  $M_z$  sıfır olacaktır. Ancak Şekil 2.36'da gösterildiği gibi eğer anizotropi dairesel değilse yani  $\alpha < \pi/2$  ise, dış manyetik alanın yokluğunda bile ( $H_z = 0$ ),  $M_z$  sıfır olmayacaktır. Bu durumda  $M$ ,  $H_\phi$  ve  $K_u$  arasında bir değer alacaktır ( $\alpha < \theta < \pi/2$ ). Sonuç olarak  $M_z$ 'nin zamana bağlı değişiminden ortaya çıkan çıkış voltajı,  $H_z = 0$  olmasına rağmen sıfır olmayacaktır. Bu durumda sensör çıkışında anizotropinin dairesel olmamasından dolayı bir offset oluşacaktır [24].

Amorf tellerde ve Cu/Py tellerde de dairesel olmayan bileşenler bulunur. Bu durumda temel modda çalışan fluxgate sensörlerde her zaman çıkışta bir offset beklenmelidir. Bu offset etkisini önlemek için Sasada bir yöntem önermiştir [60]. Buna göre dc bias negatif olduğunda, çıkış karakteristiği ters dönerken, offset değişmemektedir.  $H_z = 0$  durumunda  $M$ , Şekil 2.37'de gösterildiği gibi, pozitif dc bias için  $\theta'_0$  ve negatif dc bias için  $\theta''_0$  civarında salınacaktır.  $M$ 'nin z eksenindeki iz düşümü  $\theta''_0 = \theta'_0 + \pi$  olacak ve  $H_\phi$ ,  $M$ 'yi bias işaretine göre ters yöne dönderecektir.



Şekil 2.36. Anizotropi yönelimi [24]

Offset etkisini bastırmak için periyodik olarak dc bias ters çevrilir ve pozitif ve negatif bölgedeki bias çıkarılır. Hassasiyet ters çevrildiğinden karakteristikler çıkarılarak sinyaller toplanır ve böylece offset sıfırlanmış olur.

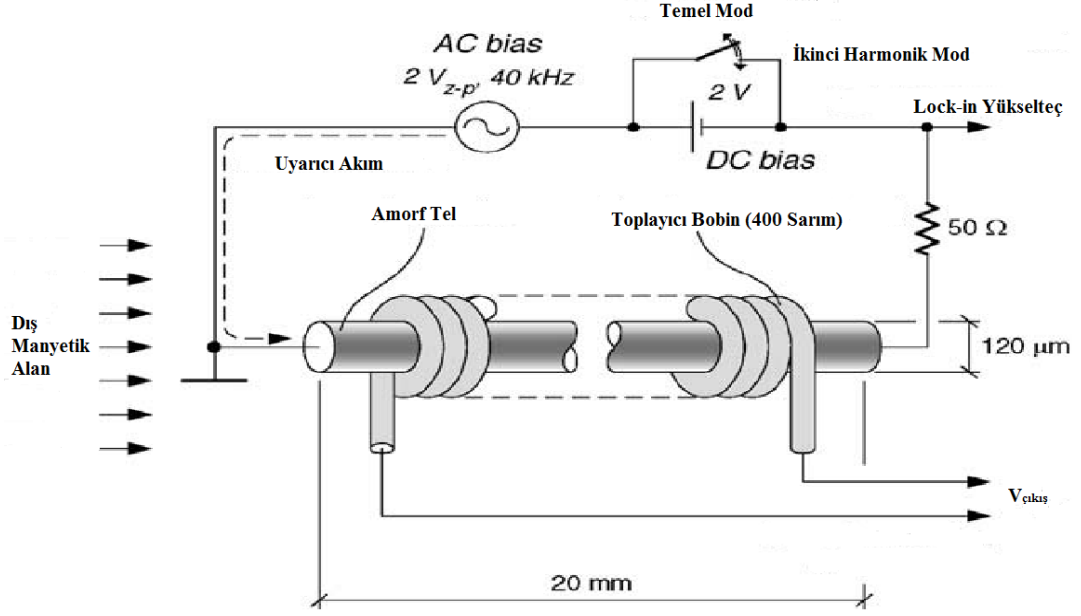


Şekil 2.37. Temel modda çalışan fluxgate sensörün pozitif ve negatif dc bias diagramı [24]

Bias, uyarıcı akımın frekansından daha düşük bir frekansta çevrilebilir. Sasada, uyarıcı akımın her 25 periyodunda bir biasın işaretini değiştirmeyi önermiştir [65]. Bu yolla, sensör çıkışında doyum durumundan ani olarak ters durumda doyuma geçiş kaynaklı gürültü önlenabilir. Biası dönüştürmenin neden olduğu gürültü etkisinden kurtulmak için geçişten hemen önceki ve sonraki periyotlar ihmal edilebilir. Bu dijital olarak kolaylıkla yapılabilir [66].

Burada önerilen bütün teknikler için elektronik sistemlerde bir takım dönüşümler (hem uyarıcı kısımda hem de sinyali işleyen kısımlarda ) yapılmalıdır. Elektronik sistemlerdeki bu dönüştürmeler bazı manyetometreler için sorun teşkil etmezken, taşınabilir cihazlarda sorun oluşturabilmektedir.

Temel modda çalışan ortogonal fluxgate sensörler, klasik fluxgate sensörlere göre daha düşük gürültü seviyesine sahiptirler. Bu durum sensörün yapısından çok çalıştırılma şekli ile ilgilidir. 120µm çapında, Co temelli amorf tel kor etrafına 400 sarımlı toplayıcı bobin kullanılarak, ikinci harmonik modda, 1Hz’de 1nT/√Hz gürültü seviyesi ölçülmüştür. Aynı sensör temel modda çalıştırılarak gürültü 20pT/√Hz’e azaltılmıştır. Bu durumda gürültü temel modda 50 kat azalmıştır. Sensörün şematiği Şekil 2.38’de verilmiştir [67].



Şekil 2.38. Temel mod sensörün şematiği [68]

Benzer bir sonuç Paperno tarafından, tüp kor bir fluxgate için bulunmuştur [68]. 5cm genişliğinde amorf bir şerit, tüp şeklinde üretilmiş bir kor etrafına sarılmıştır. Sensörde hem uyarıcı hem de toplayıcı bobinler kullanılmıştır. Sensör temel modda çalışırken gürültü seviyesi 1Hz’de 10pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  ölçülmüştür. Bu değer ikinci harmonik modda elde edilen değerden 30 kat daha düşüktür. Sensörün şematiği Şekil 2.39’da gösterilmiştir.

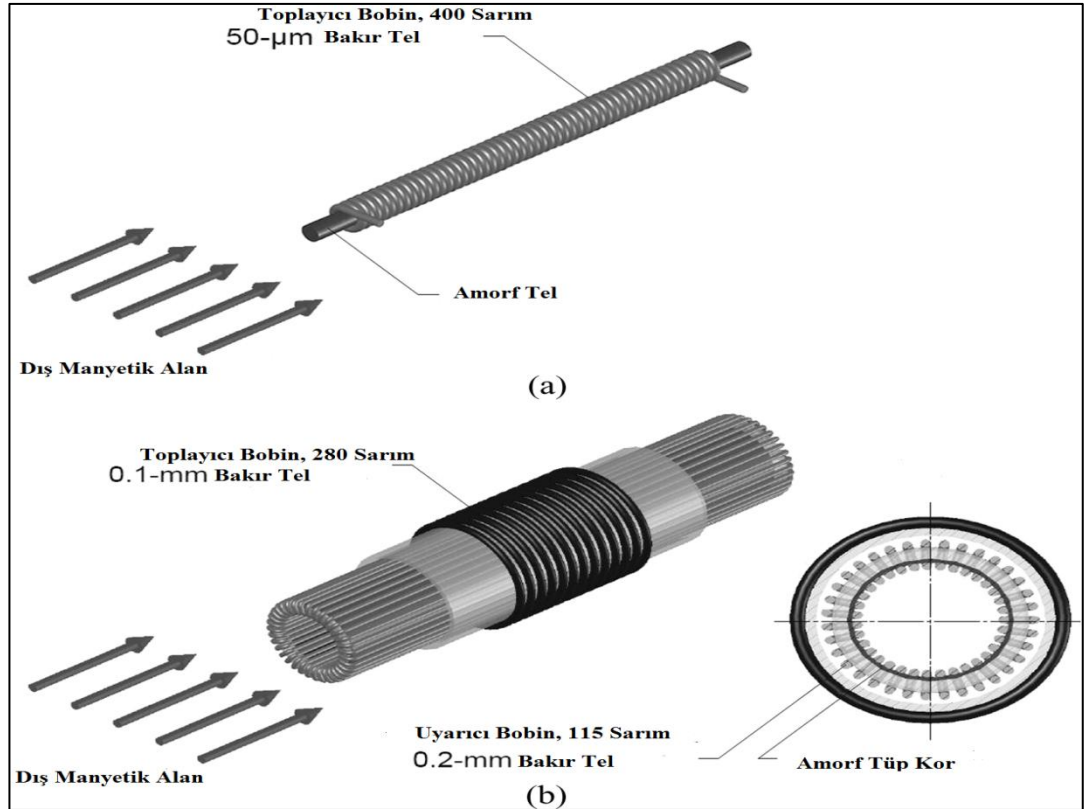
Dolayısıyla temel modda gürültü azalması, ister tüp kor ister tel kor olsun tüm ortogonal fluxgate sensörler için genelleştirilebilir. Bu durum gürültünün kaynağı analiz edildiğinde kolaylıkla görülebilir. Genelde fluxgate sensörlerdeki gürültünün kaynağı manyetik kordur. Manyetizasyonun pozitif doyumdan negatif doyuma doğru devamlı olarak döndürülmesi domain duvar hareketlerine sebep olur. Bu domain hareketleri de Barkhausen Gürültüsü’nün kaynağıdır. Toplayıcı bobinlerin korun içindeki akının zamanla değişimini algılamasından dolayı, çıkış voltajında daima Barkhausen kaynaklı bir gürültü ölçülecektir. Dolayısıyla fluxgate kor malzemeleri seçilirken kolaylıkla doyuma ulaşmayan ancak zıt kutuplarda doyum durumuna düzgün geçişler yapan malzemeler tercih edilir.

Uyarıcı akıma bir DC bias eklendiğinde söz konusu gürültünün kaynağı büyük oranda azalmaktadır. Şekil 2.35’te gösterildiği üzere eğer bias, bütün bir periyot boyunca koru doyumda tutabilecek kadar büyükse, manyetizasyon sadece uyarıcı

akım tarafından dönderilir. Dolayısıyla herhangi bir domain hareketi olmayacaktır [24].

Bununla beraber manyetik birimler cinsinden çıkış gürültüsü hesaplanacaksa hassasiyet hesaba katılmalıdır. Çok yüksek ayarlanmış dc bias kaynaklı akım,  $I_{dc}$  hassasiyeti dikkate değer bir biçimde düşürebilir. Çünkü bu durum M manyetizasyonunun  $\theta$  açısını artıracak ve manyetizasyonun eksen doğrultusundaki iz düşümünü azaltacaktır. Bunun aksine uyarıcı  $I_\phi$  akımı ile hassasiyet artacaktır [69]. Bu durumda  $I_\phi$ 'nin artışı toplam gürültünün azalması için yararlı olabilmektedir.

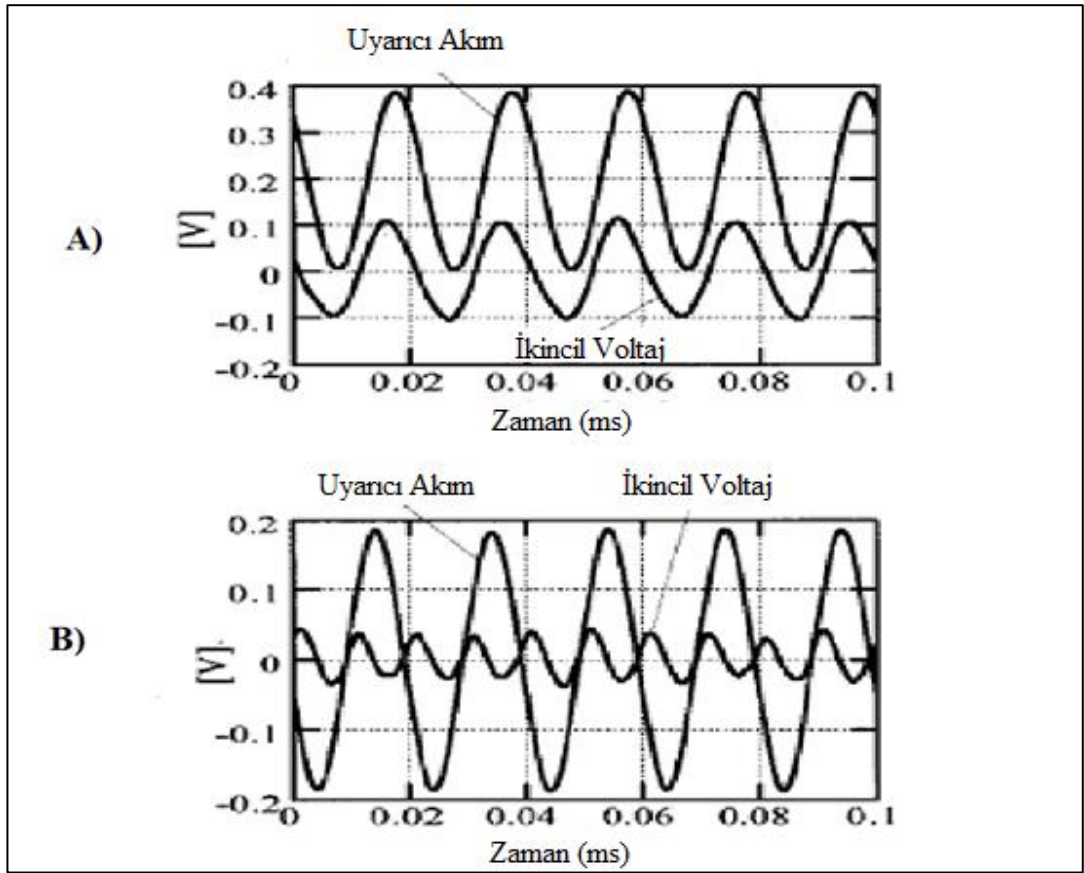
Dolayısıyla temel modda çalışan ortogonal fluxgate sensörler için en düşük gürültü değeri  $I_\phi$  ve  $I_{dc}$ 'nin en uygun seçildiği değerlerdir. Bu iki değer gürültüyü bastırarak kadar yüksek olmalı ve kor malzemedeki bir domain duvar hareketine sebep olacak kadar düşük olmamalıdır. Gürültüyü azaltmak için en iyi durum dairesel B – H eğrilerindeki küçük looplardan hemen önce olmalıdır [69]. Bu parametreler optimize edilerek, gürültü 1 Hz'de 7pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  seviyesine kadar indirilebilmiştir [70]. Ayrıca gürültü üç-telli kor kullanılarak 5pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  seviyesine düşürülmüştür.



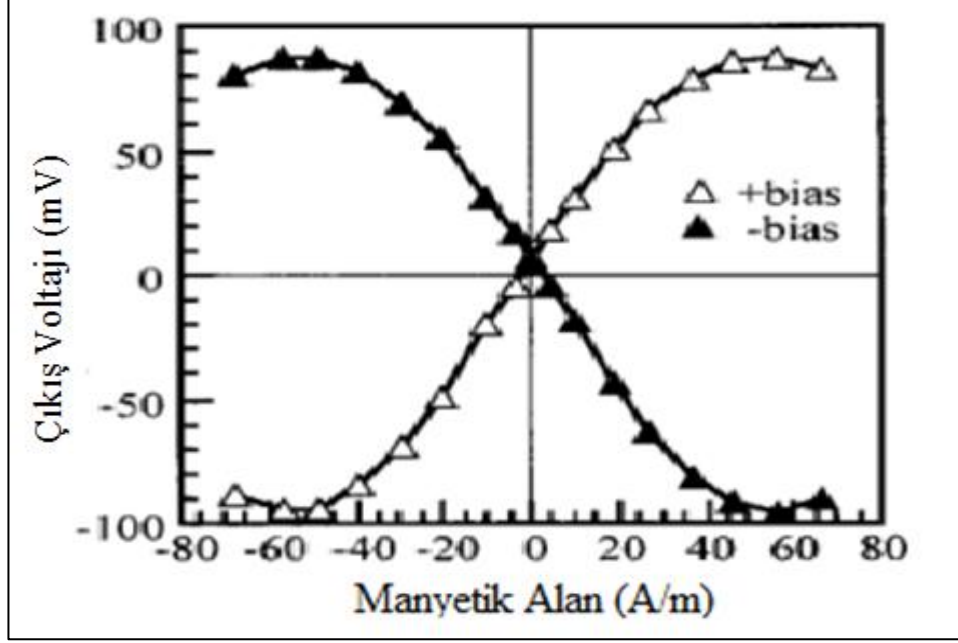
Şekil 2.39. Ortogonal fluxgate sensörler: a) amorf korlu b) tüp korlu [68]

Şekil 2.40'ta DC bias uygulanırken ve uygulanmıyorken oluşan uyarıcı akım sinyali ve çıkış sinyali verilmektedir. DC bias sonucunda oluşan uyarıcı akım sinyalinin peryodu ve DC bias durumdaki dalgalanmanın peryodu karşılaştırıldığında, DC biaslı durumda çıkış bilgisinin temel modda oluşumu, DC biassız durumda ise çıkış bilgisinin çift harmoniklerde oluşumu kolayca görülebilir [64].

Şekil 2.41'de, Şekil 2.38'de şematiği verilen sensör için çıkış voltajı gösterilmektedir. Bu eğrilerin dik ekseninde her manyetik alan değeri için potansiyelleri arasındaki uzaklık hesaplanıp 0.5 ile çarpılması sonucunda elde edilen bu verilerle grafik yeniden düzenlendiğinde offseti yok etmekte mümkün olmaktadır [64].



Şekil 2.40. Sensörün çıkış karakteristiği [64]



Şekil 2.41. +DC bias ve –DC bias için bulunan giriş-çıkış karakteristiği [64]

## 2.5. Fluxgate Sensörlerin Performansını Etkileyen Parametreler

Fluxgate sensörler ile ilgili şu ana kadar yapılan araştırmalara göre sensörün hassasiyetini etkileyen en önemli faktör ferromanyetik kordur [7, 54]. Ferromanyetik kord seçerken de sensörün geometrisi, tipi uygulanma amacı önemli kriterlerdir [27]. Bu sebeple duruma göre değişiklik gösterebilir, sensörün özelliklerini geliştirmede dikkat edilmesi gereken bazı noktalar oluşmuştur.

Fluxgate sensörün temel çalışma mantığı manyetik geçirgenliğin değişimine dayanır. Sonuçta yüksek manyetik geçirgenlik değerleri ortamda meydana gelen ani değişimleri daha kolay algılayacağından, sensörün duyarlılığını arttırmaktadır; ancak yüksek manyetik geçirgenlik sistemin gürültülere daha duyarlı olmasına sebep olmaktadır [7,23, 54].

Periyodik modülasyonun frekansı arttıkça,  $(dH(t)/dt)$  belirli bir değere kadar duyarlılıkta artacaktır. Ancak bir noktadan sonra eddy akımları artar veya yüzey etkileri önemli olmaya başlar, ferromanyetik materyalin gözlenen manyetik geçirgenliği azalmaya başlar. Uyarıcı alanın genliğini arttırmakta, sensörün duyarlılığını arttırmaktadır. İkinci harmonik fluxgate sensörler için en düşük frekans sınırı, sensörün uzun süreli kararlılığına bağlıdır. Ölçülmek istenen manyetik alan

için en st sınır ise uyarıcı akımın en st seviyede frekansı ile sınırlanır. Uyarıcı akım için bu değer 10 kHz ile 250 Hz arasında değişmektedir.

Ferromanyetik korun kesit alanı cihazın duyarlılığını arttırmaktadır, ancak burada da yüzey etkileri duyarlılığı olumsuz yönde etkilediğinden dikkat edilmelidir. Diğer bir faktör ise algılayıcı sarımlarda bulunan sarım sayısıdır. Sarım sayısı arttıkça duyarlılıkta artmaktadır ancak bununla birlikte sarımın direnci artacak, sensörde termal gürültüler etkili olmaya başlayacaktır. Sarımların konumu ise başka önemli bir faktördür. Düzlemsel sarımlar ferromanyetik korun köşelerine yerleştirilmelidir [7, 54, 58].

Sensörün lineer çalışma bölgesi doğrudan ferromanyetik korun doğal manyetik özelliklerine ve demanyetizasyon etkisine bağlıdır. Demanyetizasyon etkisinden dolayı, ferromanyetik korun gözlenen manyetik geçirgenliği, doğal manyetik geçirgenliğinden daha küçük olur. Böylece ferromanyetik malzeme daha büyük bir alan değerinde doyuma ulaşır ve daha büyük değerde lineer bölge oluşur. Eğer ferromanyetik kor uyarıcı alan doğrultusunda çok uzun ise, düşük demanyetizasyon değerine sahiptir, sonuç olarak lineer bölge küçüktür. Korun uzunluğu azaldıkça demanyetizasyon faktörü artacak, buna bağlı olarak da lineer bölgenin değeri artacaktır. Ortogonal sensörlerde uyarıcı ve dış alanlar bir birine dik olduğundan, uyarıcı alan demanyetizasyon faktöründen fazla etkilenmez. Böylece korun uzunluğunu değiştirmek, lineer bölgeyi değiştirirken uyarıcı alan bundan etkilenmez [7, 23, 54].

Çizelge 2.2’de bugüne kadar yapılan farklı türde fluxgate sensörler ve bu sensörlere ait bazı parametreler verilmiştir.

Çizelge 2.2. Bugüne kadar üretilen farklı türde fluxgate sensörler ve özellikleri [24]

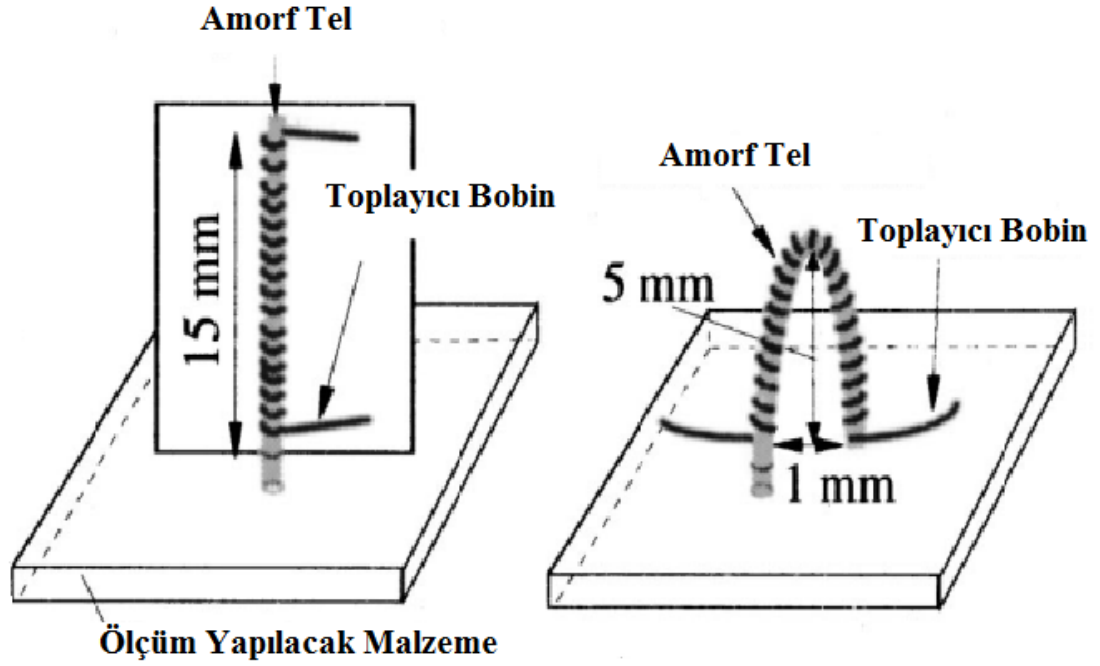
|                                                    | <b>Paperno<br/>2004</b>  | <b>Fan<br/>2006</b> | <b>Li<br/>2006</b>                   | <b>Zorlu<br/>2007</b>             | <b>Goleman<br/>2007</b>    | <b>Sasada<br/>2009</b>     |
|----------------------------------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>Çalışma<br/>Şekli</b>                           | Temel<br>Mod             | İkinci<br>Harmonik  | İkinci<br>Harmonik                   | İkinci<br>Harmonik                | Temel<br>Mod               | Temel<br>Mod               |
| <b>Tasarım</b>                                     | Amorf Tel                | Cu/Permalloy<br>Tel | 16 Tane<br>Cam<br>Kaplı<br>Amorf Tel | Düzlemsel<br>Cu/Permalloy<br>Yapı | U<br>Şeklinde<br>Amorf Tel | U<br>Şeklinde<br>Amorf Tel |
| <b>Uzunluk</b>                                     | 20mm                     | 9mm                 | 18mm                                 | 1mm                               | 28mm                       | 40mm                       |
| <b>Toplayıcı<br/>Bobin<br/>Sarımlar<br/>Sayısı</b> | 400                      | 1000                | 1000                                 | 2x60<br>Düzlemsel                 | 250                        | 2x1000                     |
| <b>Çap</b>                                         | 120µm                    | 20µm                | 16µm                                 | 16µmx10<br>µm (Kare<br>Şeklinde)  | 125µm                      | 120µm                      |
| <b>Uyarıcı<br/>Akım</b>                            | 40 mA ac<br>+<br>40mA dc | 10 mA rms           | 6 mA rms<br>sinüsel<br>(Her Tel)     | 100 mA                            | 4 mA ac<br>+<br>20 mA dc   | 8mA ac<br>+<br>47mA dc     |
| <b>Uyarıcı<br/>Frekans</b>                         | 40 kHz                   | 500 kHz             | 188 kHz                              | 100 kHz                           | 100 kHz                    | 118 kHz                    |
| <b>Hassasiyet</b>                                  | --                       | 20V/T               | 850V/T                               | 0.51V/T                           | 1600V/T                    | 350V/T                     |
| <b>Doğrusal<br/>Aralık</b>                         | --                       | --                  | --                                   | ±100µT                            | --                         | ±25µT                      |
| <b>Çözünürlük</b>                                  | 100pT                    | --                  | --                                   | 215nT                             | --                         | --                         |
| <b>Güç<br/>Tüketimi</b>                            | --                       | 100mW               | --                                   | 8.1mW                             | --                         | --                         |

## 2.6. Bazı Fluxgate Sensör Uygulamaları

Fluxgate manyetometreler, jeofizik alanında uzay araştırmaları için kullanılmaktadır [20]. Bunun dışında araç ve uçak yön bulma sistemlerinde de fluxgate pusulalardan yararlanılmaktadır. Ayrıca fluxgate mantığı DC akımların uzaktan ölçülmesi için akım sensörlerinde kullanılmaktadır. Manyetik izleri ve işaretleri okumak için ve ferromanyetik nesnelerin yerini saptamak için fluxgate manyetometrelerden yararlanılmaktadır.

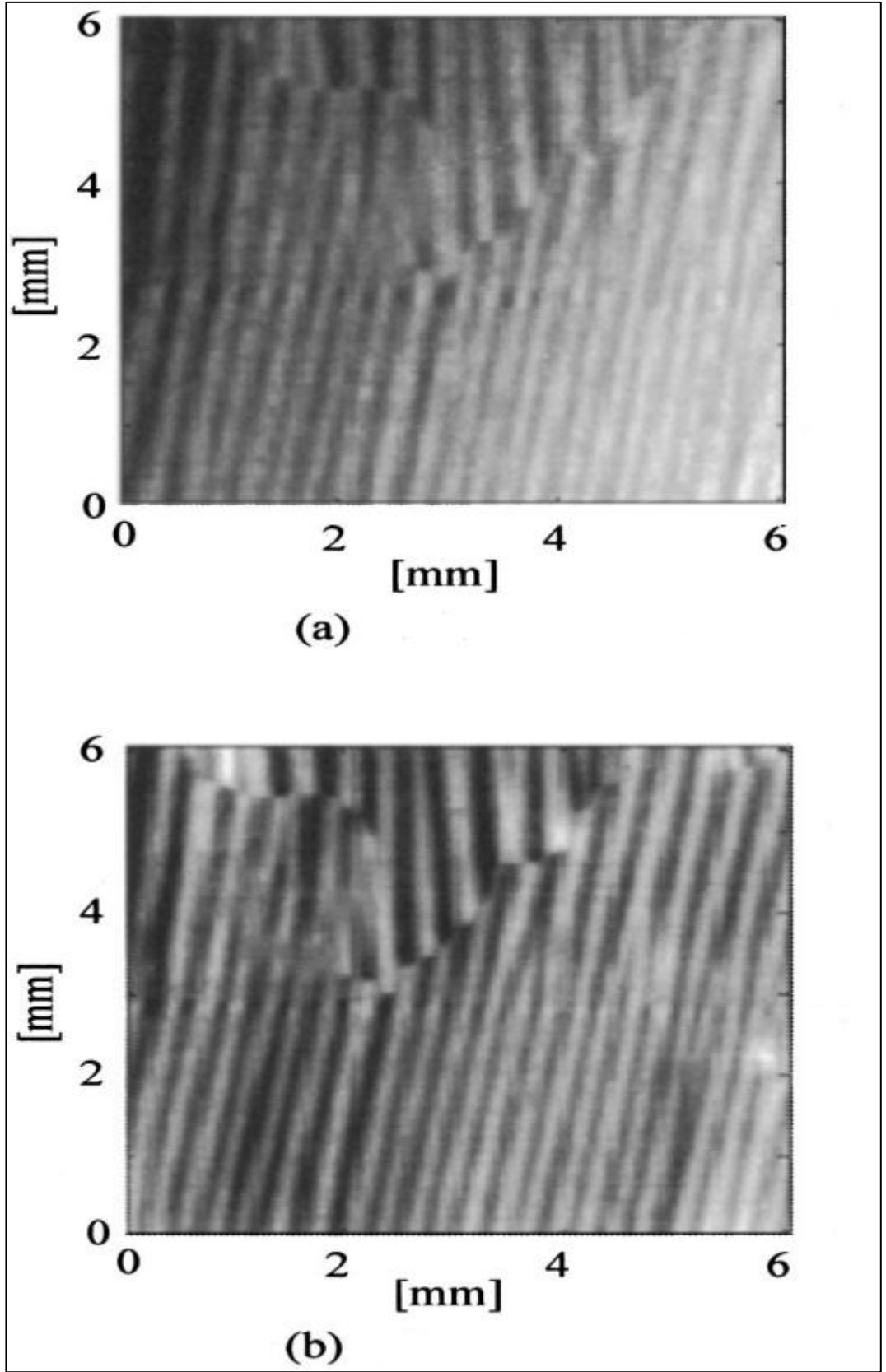
### 2.6.1. Fluxgate sensör ile manyetik görüntüleme

2002 yılında Tereshima ve Sasada ortogonal fluxgate sensör ile manyetik malzemelerin domain görüntülemesi üzerinde çalışmışlardır [71].



Şekil 2.42. Manyetik görüntüleme için tasarlanan farklı geometride fluxgate sensörler [71]

Şekil 2.42’de görüldüğü üzere, düz sensörün (I tipi) hassasiyeti, j şeklinde eğilen sensöre göre daha yüksek çıkmıştır. Buna karşılık eğik sensörün çıkış voltajının doğrusal olarak değiştiği görülmektedir. Sonuç olarak Şekil 2.43’te görüldüğü üzere, üretilen sensör ile domainlerin manyetik görüntülenmesi, dış bir manyetik alanın kuvvetlendirmesine gerek kalmadan, başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş; ayrıca eğik sensörün bir gradyometre olarak kullanılabileceği saptanmıştır.



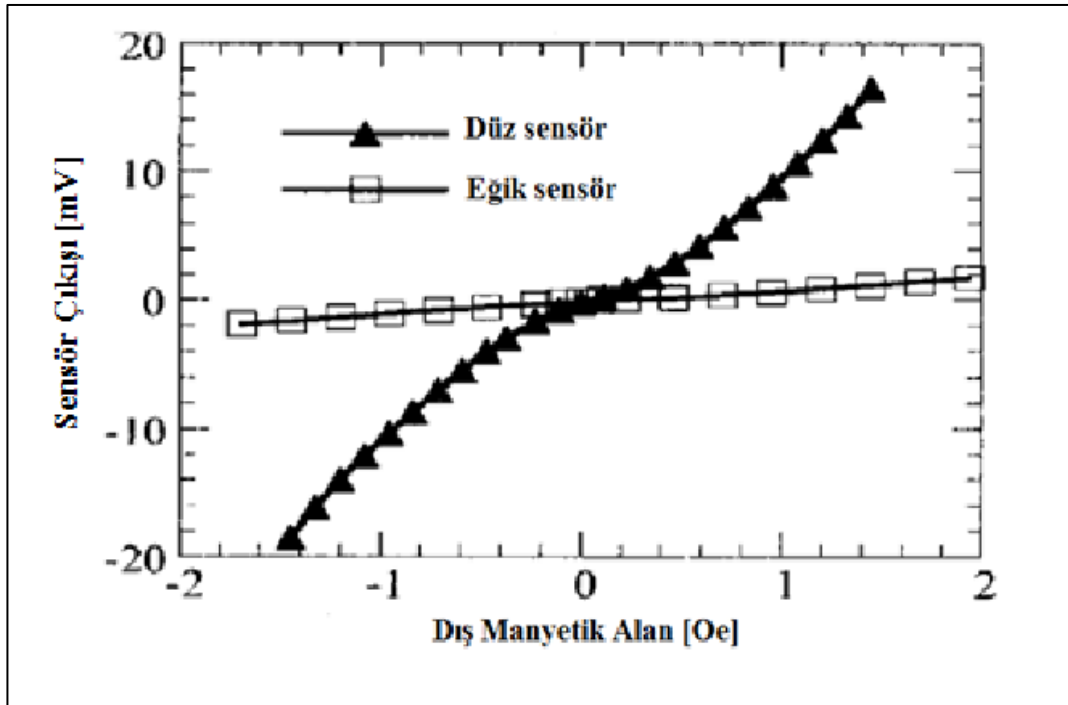
Şekil 2.43. Üretilen sensör ile alınan görüntüler. a) Düz sensör ile alınan görüntü  
b) Eğilmiş sensör ile alınan görüntü [71]

Çalışmada Co temelli, AC-20, amorf ferromanyetik tel kor malzeme olarak kullanılıp, ortogonal bir fluxgate manyetometre üretilmiştir. Çevresel manyetik etkilerden kurtulmak için fluxgate sensörlerin en iyi kullanım şekli, iki sensör kullanarak, gradyometre yapmaktır [71]. Ancak burada gradyometre etkisinin sağlanması için kor malzeme j şeklinde eğilmiş ve sensörün uzun tarafının ölçüm alınacak malzeme ile temas halinde olması sağlanmıştır. Böylece gradyometre etkisi tek bir kor ile sağlanmıştır. Sensörün kısa tarafı ise malzemden 1mm kadar uzakta durmaktadır.

Fluxgate sensörün performansını doğrulamak amacıyla, aynı ortogonal fluxgate sensöre sahip düz korlu bir elektriksel gradyometre kullanılmıştır.

Numune olarak 0,23 mm kalınlığında, %3'lük silikonlu çelik malzeme kullanılmıştır. Numuneler 6 cm'lik kareler halinde kesilmiştir. Her ölçümden önce numune demanyetize edilmiştir. Ölçüm sonuçları Şekil 2.44'te verilmiştir.

Manyetik ölçümler esnasında probun bir yüzeyi numuneye temas etmektedir. Böylelikle j şeklindeki sensörün uzun kısmı ve düz sensörün bir ucu, malzeme üzerinde ki bölgesel manyetik alan çizgilerini daha iyi toplayacaktır. Bütün ölçümler yerin manyetik alanı (yaklaşık 0,3 gauss) altında yapılmıştır.

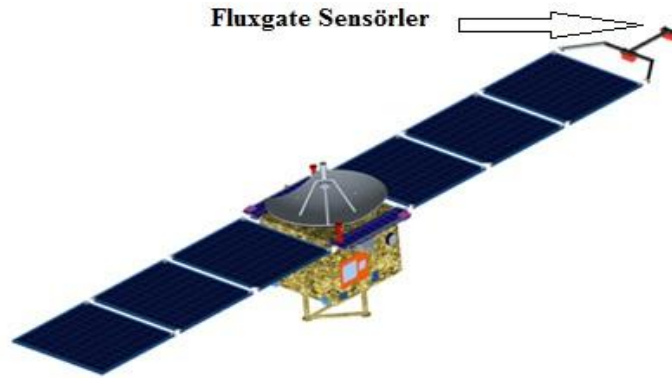


Şekil 2.44. Homojen bir manyetik alana sensörlerin tepkisi [71]

### 2.6.2. Fluxgate sensörlerin uydularda kullanımı

Fluxgate sensörler, 2011 yılında Çin tarafından Mars gezegenini keşif amacıyla gönderilen YH-1 uydusunda kullanılmıştır. Şekil 2.45'te uydunun çizimi, Şekil 2.46'da ise fluxgate sensörler görülmektedir. (a'da şematik çizimi, b'de uyduya takılmadan önce gösterilmektedir.)

YH-1 yaklaşık 125 kg ağırlığında, 900\*700\*700 mm boyutlarında, her iki tarafında katlanabilir güneş panelleri bulunan, kübik yapıda, mikro bir uydudur. Uydunun güneş panellerinden birinin kenarına, (sistem kaynaklı remanent manyetizasyonu en aza indirmek amacıyla) sensörler arasında 45 cm mesafe olacak şekilde, üç eksenli iki adet fluxgate sensör yerleştirilmiştir. Böylelikle sensörler bir gradyometre olarak çalışacaktır. Sistemin ölçebildiği aralığın  $\pm 256$  nT, gürültü seviyesinin 1 Hz'de  $0,01\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 'den daha iyi ve çözünürlüğünün 0,01nT kadar olduğu rapor edilmiştir [72,73].

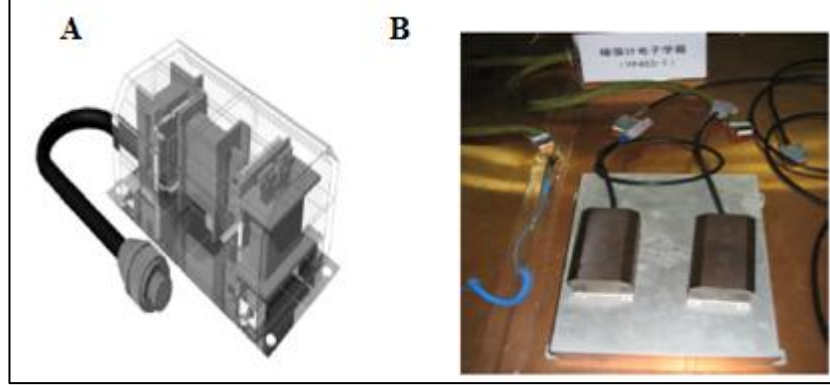


Şekil 2.45. YH-1 uydusu ve fluxgate sensörler [74]

1998 yılında, Astrid-2 uydusunda ring-kor fluxgate sensörlerden yararlanılmıştır. Cihazda, fluxgate manyetometreler için ilk olarak sayısal sinyal işleme teknikleri kullanılmıştır. Manyetometrenin güç tüketimi 2W, ölçebildiği aralık  $\pm 65\text{nT}$ 'dir [75,76].

2007 yılında, dünyanın manyetosfer tabakasındaki değişimleri incelemek amacıyla THEMIS görevi çerçevesinde uzaya gönderilen uydularda fluxgate manyetometrelerden yararlanılmıştır. Uydunun üzerindeki fluxgate sensör, manyetik alandaki 0.01nT mertebesinde değişimleri algılayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Sensör analog temelli yazılım ve donanım yerine sayasal tabanlı bir teknoloji

kullanılmaktadır. Sayısal fluxgate teknolojisinin kullanımı cihazda kullanılan aygıtların daha hafif olmasını sağlamaktadır [77].

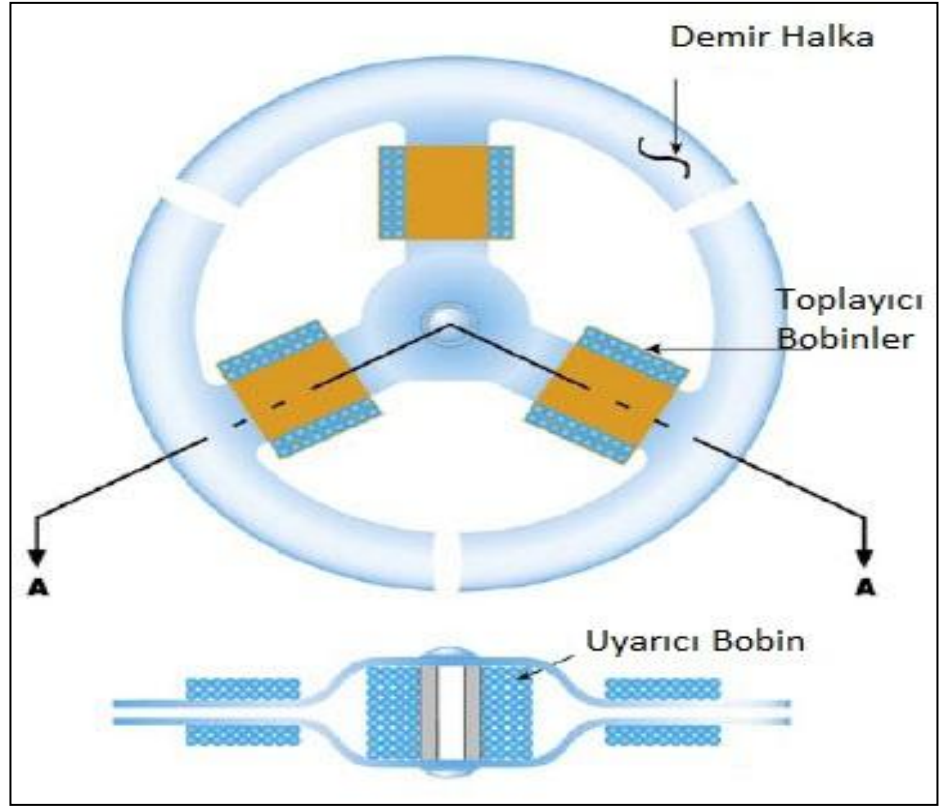


Şekil 2.46. YH-1 uydusunda kullanılan fluxgate sensörlerin [72]

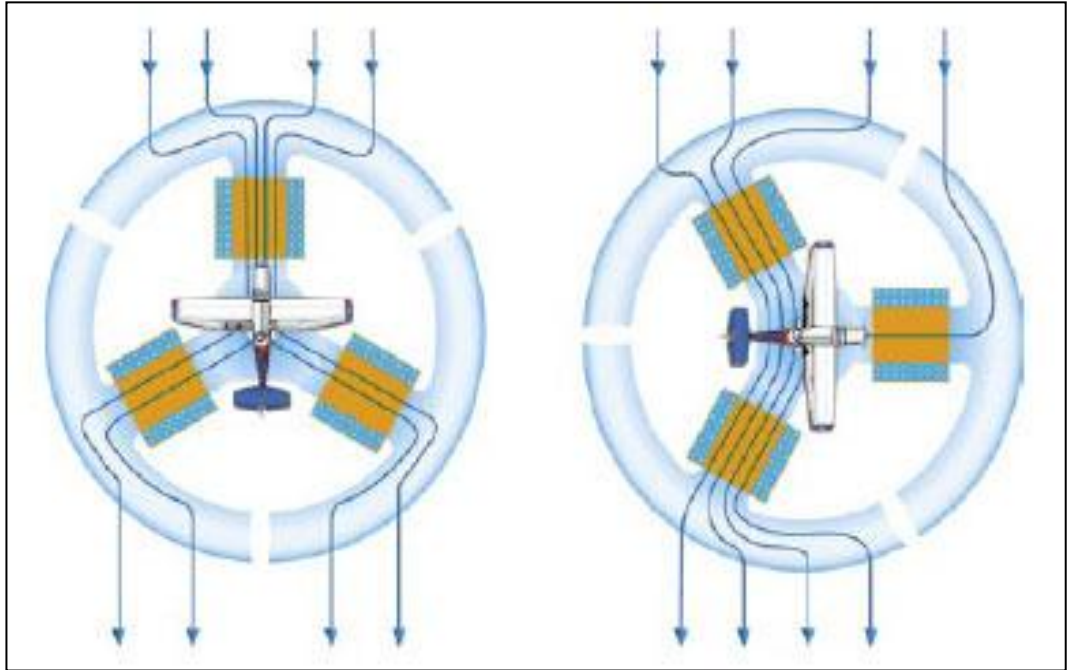
### 2.6.3. Fluxgate pusula

Fluxgate sensörlerin uygulama alanlarından biri pusuladır. Fluxgate pusula yüksek permeabiliteye sahip korun etrafında, iki veya daha fazla bobinden oluşan elektronik sistemlerdir. Buna göre iki bobinden oluşan sistem yerin manyetik alanının yatay bileşenini algılamak için kullanılır. Burada yatay bileşeni algılamak için bobinler yere paralel tutulmalıdır. Aksi durumda akı oluşmayacak ve bobinler bileşeni algılamayacaktır. Manyetik pusulaya göre bu sistemin avantajı elde edilen verinin hemen sayısal verilere çevrilip, aktarılabilmesi uzaktaki bir sistemde izlenebilmesidir [78].

Şekil 2.47’de soft demirden yapılan bir halkaya monteli fluxgate pusula gösterilmiştir. Birer bobin her üç bacağın etrafına da, halkada yerin manyetik alanının aracılığıyla indüklenen akımı algılamak için sarılmıştır. Demir halkanın ortasında sisteme sinüsoidal alternatif akım gönderen bir başka bobin bulunmaktadır. Ortadaki bobin sistemi doyum durumunda tutmaktadır. Dolayısıyla sistem yerin manyetik alanından gelen katkıyı algılayamamaktadır. Alternatif akım dolayısıyla, akım ters dönmeye başladığında sistem doyum durumundan çıkacak ve yerin manyetik alanı sayesinde bobinlerde akım indüklenecektir. Manyetik akı, birim alandan dik geçen manyetik alan çizgisi sayısıdır. Dolayısıyla Şekil 2.48 ’de gösterildiği gibi uçağın yönü değiştiğinde, bobinlerden geçen manyetik akı da ve dolayısıyla indüklenen akım da değişecektir. Her bobinin akıma katkısı hesaplanarak uçağın yönü tayin edilebilir [79].



Şekil 2.47. Yön belirleyici sistemin şematik gösterimi [78]



Şekil 2.48. Uçağın yönünün yerin manyetik alanına göre belirlenmesi [78]

## 2.7. Sensörlerin Genel Özellikleri

Bir sensör, genel olarak, verilen belirli fiziksel bir niceliğe kullanılabilen bir çıkış sinyali veren, bir giriş aygıtı olarak tanımlanır. Fiziksel niceliğin sensöre etkisi, sensörün verdiği yanıtın çıkış sinyalinde olacak şekildedir. Bunun tersi bir sinyali (genelde elektriksel) harekete dönüştüren aygıt aktivatördür. Birçok modern sensörün çıkışı elektrik sinyali şeklindedir ancak hareket, basınç, akı veya diğer kullanılabilir çıkış şeklinde de olabilir. Sensörlere bazı örnekler, sıcaklık farkını elektriksel sinyallere dönüştüren termočift, akışkan basıncını bir kuvvete veya konum değişikliğine dönüştüren basınç sensörü olarak sıralanabilir [23,79-83].

Bir transducer ise bir sinyali, herhangi bir fiziksel şekilden karşılık gelen başka bir fiziksel şekle çeviren bir aygıt olarak tanımlanır. Enerji, güç ve bilgi iletimi için bir şekilden başka bir şekle dönüştürülebilir. Mekanik enerji elektriksel enerjiye veya mekanik enerjinin bir şekli başka bir şekilde ki mekanik enerjiye dönüştürülebilir. Transducera örnek olarak elektriksel girişi ses dalgasına dönüştüren hoparlör, ses dalgasını elektriksel dalgaya dönüştüren mikrofon ve elektriksel enerjiyi konum değişikliğine dönüştüren stepper motor verilebilir [79].

Bütün sensörler pasif ve aktif olarak ikiye ayrılabilir. Pasif bir sensör enerji kaynağına ihtiyaç duymadan dış uyarıcının etkisine karşı doğrudan bir elektrik sinyali üretir böylelikle giriş enerjisi sensör tarafından çıkış sinyaline dönüştürülür. Pasif sensörlere örnek olarak termočift, fotodiyot veya piezoelektrik sensör verilebilir [80].

Aktif sensörler ise çalışmak için yükleyici sinyal olarak adlandırılan dış bir enerjiye ihtiyaç duyarlar. Bu sinyal sensör tarafından çıkış sinyali üretmek için modifiye edilir. Aktif sensörler bazen kendi özellikleri dış bir etkiyle değiştiği ve sonra bu özellikler elektrik sinyaline dönüştürülebildiği için parametrik olarak adlandırılırlar. Bir sensörün karakteristik özelliği, uyarıcı sinyali modüle etmesi ve bu modüle edilmiş sinyalin ölçülen niceliğin bilgisini taşıması olarak söylenebilir [80].

Manyetik sensör, manyetizma prensiplerini kullanan sensörlerdir [23,84]. Buna ek olarak ilk sayfanın ikinci paragrafındaki sensör tanımlamasına göre manyetik bir

sensör, manyetik alan kaynaklı bir sinyale, kullanılabilen bir çıkış sinyali veren bir aygıt olarak da tanımlanabilir..

Manyetik sensörler, bilim ve teknolojinin birçok alanında, önemli ve giderek artan bir rol oynamaktadır [9]. Manyetik sensörler, yüksek yoğunluklu manyetik kayıt, yol belirleme, güvenlik ve askeri alanlar, hedef belirleme ve takibi, hırsız alarmları, manyetik işaretleme ve etiketleme, jeomanyetik ölçümler, uzay araştırmaları ve insan vücudunun biyomanyetik ölçümleri gibi tüm endüstri ve mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [85]. Genel olarak manyetik sensörler birkaç temel mekanizmaya göre çalışır. Bunlar, manyetoindüktif sensörler için indüksiyon kanunları, manyetomekanik sensörler için Amper Kuvvet Yasası ve manyeto-elektronik temelli sensörler için, manyeto-optik, manyetodirenç veya manyetoelastik gibi, bir manyetik alan altında malzemenin özelliklerinin değişmesi olaylarına dayalıdır [81].

### 2.7.1. Transfer fonksiyonu

Her sensör için ideal (veya teorik) bir giriş-çıkış sinyal bağıntısı mevcuttur. Eğer sensör gerçekten ideal bir sensör olsaydı, çıkış sinyali giriş sinyalinin gerçek değerini temsil edecekti. İdeal bir giriş-çıkış sinyal bağıntısı transfer fonksiyonu olarak adlandırılır. Bu fonksiyon üretilen elektriksel bir çıkış sinyali  $S$  ile giriş sinyali  $s$  arasındaki bağıntıyı  $S = f(s)$  şeklinde verir. Böyle bir fonksiyon lineer veya non-lineer (logaritmik, üstel veya kuvvet fonksiyonu şeklinde) olabilir. Birçok durumda bağıntı tek boyutludur (çıkış sinyaline karşılık tek bir giriş sinyali şeklinde). Tek boyutlu lineer bir bağıntı:

$$S = a + bs \quad (2.41)$$

şeklindedir. Burada  $a$ , sıfır giriş sinyaline karşı çıkış değeri ve  $b$  ise bazen hassasiyet olarak da adlandırılan eğimdir.  $S$ , çıkış sinyalidir. Sensör özelliklerine bağlı olarak genlik, frekans veya faz olabilir. Transfer fonksiyonlarına örnek vermek gerekirse;

$$S = a + b \ln s \quad (\text{logaritmik fonksiyon}) \quad (2.42)$$

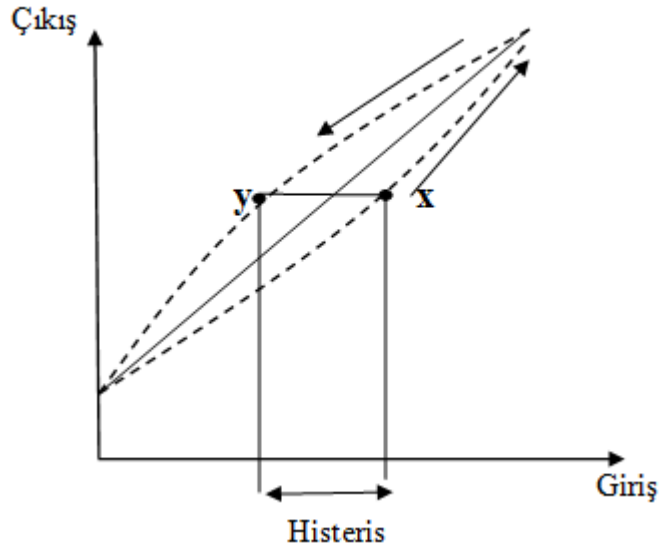
$$S = a e^{ks} \quad (\text{üstel fonksiyon}) \quad (2.43)$$

$$S = a_0 + a_1 s^k \quad (\text{kuvvet fonksiyonu}) \quad (2.44)$$

burada  $k$  sabit bir sayıdır [80].

### 2.7.2. Histeris

Histeris hatası, bir sensörde, belirli bir noktaya zıt yönlerden yaklaşıldığında, çıkış sinyalinin giriş sinyalinden sapması olarak tanımlanır. Örnek olarak, bir konum sensörü için nesne soldan sağa ve sağdan sola doğru hareket ettirildiğinde, verdiği değerler arasında 20 mV kadar hata olduğunu düşünelim. Eğer sensörün hassasiyeti 10 mV/mm ise bu durumda konumda ki hatası 2 mm olacaktır. Histeris oluşmasının tipik nedenleri sürtünmenin varlığı ve malzemedeki yapısal değişikliklerdir [80]. Şekil 2.49'da bir sensörde histeris oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 2.49. Bir sensörde histeris oluşumu [80]

### 2.7.3. Kesinlik (Accuracy), Tam ölçek giriş (FSI), Tam ölçek çıkış (FSO)

Sensör karakteristiklerinde önemli bir parametre de kesinliktir. Kesinlikte hata olarak adlandırılan aksi durum, giriş değerinden en yüksek sapma değeri ile ölçülür.

Sensör aracılığıyla ölçülen giriş değerinin dinamik aralığı, span veya tam ölçek giriş (FS) olarak adlandırılır. Kesinlikte kabul edilmeyecek büyüklükte hata değerine yol açmadan, sensöre uygulanabilecek en yüksek giriş değeridir [80].

Tam ölçek çıkış (FSO) ise en küçük giriş değeri ile en yüksek giriş değerlerinden elde edilen çıkış değerinin farkıdır. Bu nicelik ideal transfer fonksiyonu değerinden bütün sapmaları içermelidir.

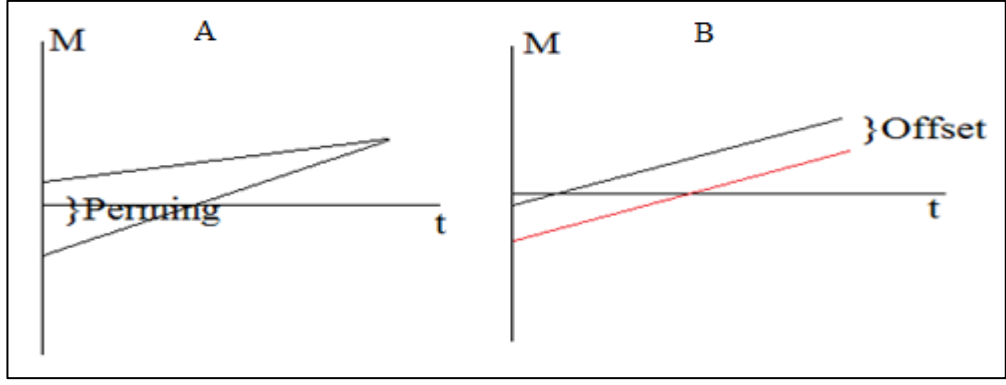
#### **2.7.4. Kayma (Drift veya Offset ve Perming)**

Kayma, giriş değerinde veya çevresel koşullarda bir değişiklik yokken çıkış değerinde bir değişim olmasıdır. Bu özellik ölçülürken tek değişken geçen zamandır. Bir konum transducerinde kayma olması konumda hiç değişiklik olmadığı anlamına gelmektedir. Kısa süreli kayma sebepleri arasında gürültü, kararsız elektronik devreler, mekanik kararsızlık, yetersiz elektriksel veya mekanik sönüm ve çevredeki düşük seviyeli elektriksel gürültüye aşırı hassasiyet olarak gösterilebilir. Uzun süreli drift ise elektriksel bileşen karakteristiklerinin değişmesi ve mekanik hatalar gösterilebilir [79].

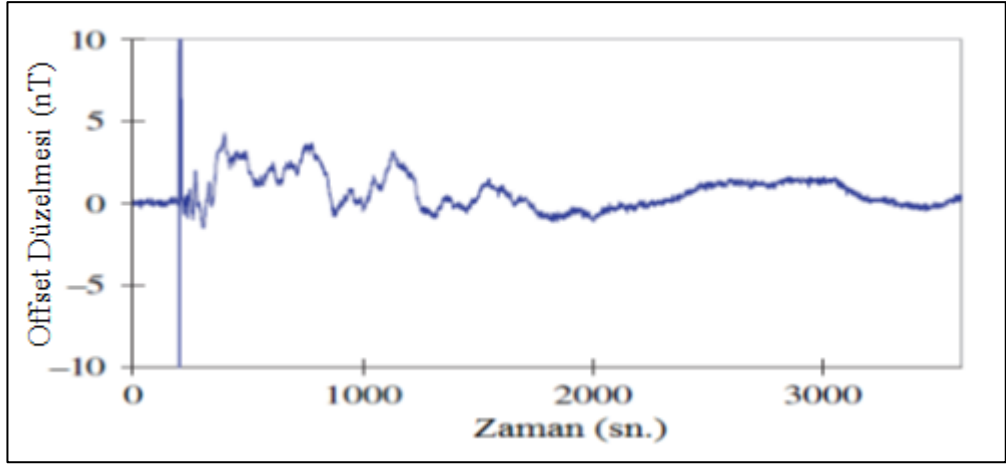
Perming ise manyetik sensörler için, sensöre uygulanan manyetik şoktan (manyetik alanın bir anda artırılması) sonra alan ters çevrildiğinde bir kayma (offset) oluşması olarak tanımlanır [86].

Şekil 2.50'de bir manyetik sensör için kayma ve perming olayları gösterilmiştir. A'da sensör bir anda belirli bir manyetizasyon değerine getirilmiş ve daha sonra ters alan uygulanmıştır. Görülen fark perming olarak adlandırılır. Bunu temel sebepleri arasında çevresel koşullar veya gürültü gösterilebilir.

B'de bir manyetik sensörün asıl transfer fonksiyonu kırmızı çizgi olması gerekirken, bir fark oluşmuş ve siyah çizgi olmuştur. Bu durumun giderilmesi sensörden sensöre değişir. Fluxgate sensörlerde bu durum indükleyici bir akım ile giderilmektedir. Şekil 2.51'de ise bir sensörde sıcaklık şokundan sonra offset düzelmesi verilmiştir.



Şekil 2.50. Perming ve Offset olayları



Şekil 2.51. Sıcaklık şokundan sonra offset düzelmesi [87]

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Giriş

Bobinsiz fluxgate sensör, bobini olmayan yeni bir tür ortogonal fluxgate sensördür. Ferromanyetik malzemedeki helisel anizotropi ve derin dairesel manyetik doyum temelinde çalışır [58]. Helisel anizotropi sağlamak için numuneye bükme uygulanacaktır. Ferromanyetik amorf tel büküldüğünde içinde bir helisel anizotropi oluşturulacak ve devreden elde edilen çıkış sinyalinin ikinci harmoniği uygulanan dış manyetik alanla doğrusal olarak değişecektir [64]. Adından da anlaşılacağı gibi, bobinsiz fluxgate sensöründe bobin kullanılmaz. Bu da sensörün temel avantajıdır [58].

Yukarıda belirtilen avantajdan dolayı, tezde önerilen kor malzemenin geliştirilebilecek fluxgate sensörün bobinsiz olması, üretim kolaylığı sağlayacak ve üretim maliyetleri açısından da önemli bir düşüş sağlayacaktır. Fluxgate kor malzeme olarak şeritlerden oluşturulabilecek tasarımların, tellerden oluşturulanlara göre daha uygun oldukları düşünülmektedir. Sonuçta teller sensör içerisinde iken darbelere karşı daha dayanıksız olacak, kolaylıkla deforme olup bükülebilecektir. Ayrıca kontak yapılmaları şeritlere göre daha zordur. Bu üç özellikten özellikle ilk ikisi, sensörün güvenilirliği açısından, kor malzemedeki istenmeyen özelliklerdir. Şeritlerin dikdörtgen yapıda olması istenen yere daha iyi kontak yapılabileceği, deformasyon veya bükülmelerinin daha zor olduğu anlamına gelmektedir.

Yukarıda anlatılan durumların daha iyi anlaşılması için  $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  amorf tel ile bobinsiz fluxgate ölçümleri alınıp, şeritlerle karşılaştırması yapılmıştır.

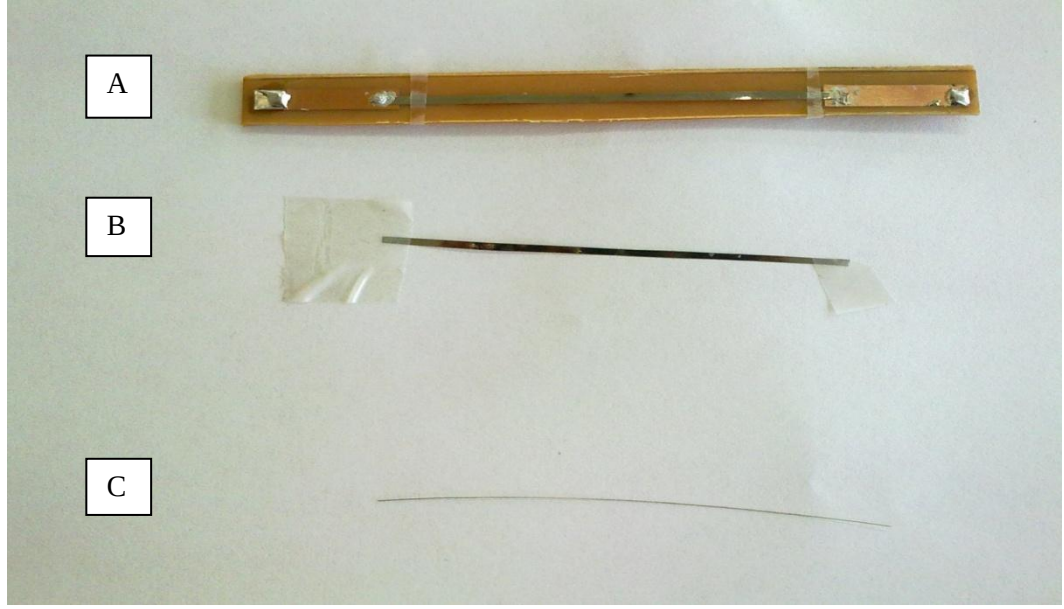
Buna göre ilk olarak elde bulunan  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Mn}_4\text{Si}_9\text{B}_{14}$ ,  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$  ve amorf şeritlerin ve  $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  amorf telinin, ısıtılma işlemi görmüş ve görmemiş şekilde, bobinsiz fluxgate ölçümleri alınarak, fluxgate özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca bu malzemelerin manyetik özelliklerinin daha iyi belirlenebilmesi için M-H ölçümleri yapılmıştır.

### 3.2. Numunelerin Hazırlanışı

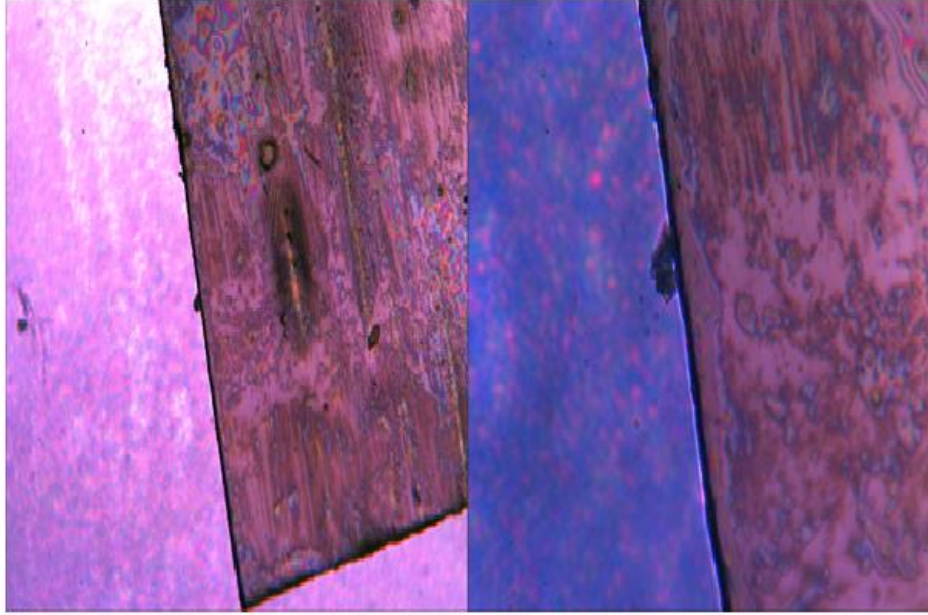
Şekil 3.1’de ölçümlerde kullanılan malzemeler gösterilmektedir. Buna göre A’da  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$  malzemesi, B’de  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$  malzemesi ve C’de  $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  malzemesi gösterilmektedir. Bobinsiz fluxgate ölçümleri alınmadan önce numuneler ölçümler için aşağıdaki şekilde hazırlanmıştır. Amorf ferromanyetik şeritler  $\sim 1$  mm eninde, 6 cm uzunluğunda;  $128\ \mu\text{m}$  çapındaki  $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  amorf ferromanyetik teli, 6 cm uzunluğunda kesilmiştir. Daha sonra 480, 520, 600, 720, 780 mA akımlar altında ısıtım işlemi uygulanmıştır. Bazı numunelerde, helisel anizotropiyi arttırmak için ısıtım sırasında ve ölçüm sırasında 0,  $3.12\pi$ ,  $6.25\pi$ ,  $12.5\pi$ ,  $25\pi$ ,  $37.5\pi$ ,  $50\pi$  rad/m’lik tork uygulanmıştır. Dairesel anizotropiyi arttırmak için ise, bazı numunelerde gerilme uygulanmıştır. Şekil 3.2’de  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$  malzemesinin (kesim sırasında oluşabilecek küçük çatlaklara karşı) mikroskop altında büyütülmüş hali görülmektedir. Çizelge 3.1’de kullanılan malzemelerin bazı manyetik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan malzemelerin bazı manyetik özellikleri [88-90]

| Malzeme                                       | $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ | $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$ | $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $B_s$ (Tesla)                                 | 0,82                                                           | 0,58                                                                    | 0,81                                                                     |
| Curie Sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )        | 365                                                            | 210                                                                     | --                                                                       |
| Manyetostriksiyon                             | <0,2 ppm                                                       | <0.2 ppm                                                                | -0,1                                                                     |
| Kristalleşme Sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 480                                                            | 540                                                                     | --                                                                       |

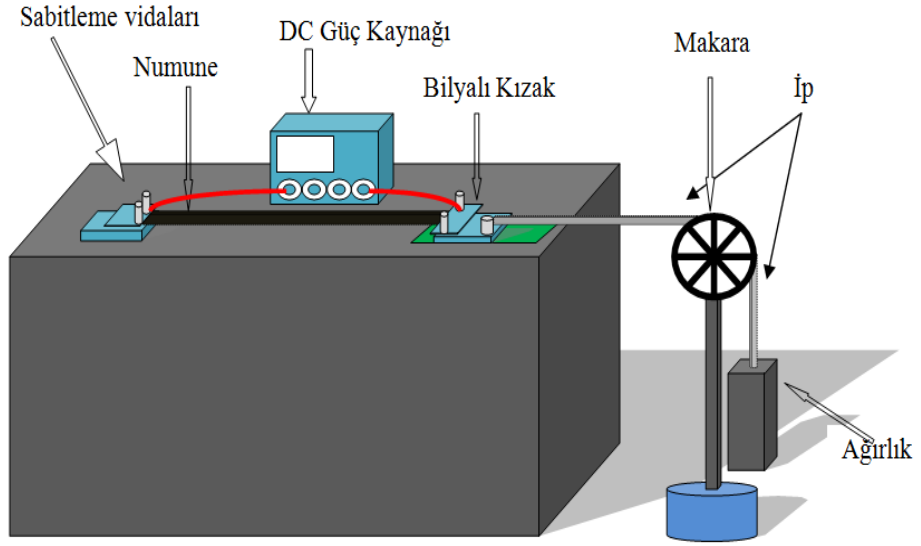


Şekil 3.1. Ölçümlerde kullanılan malzemeler

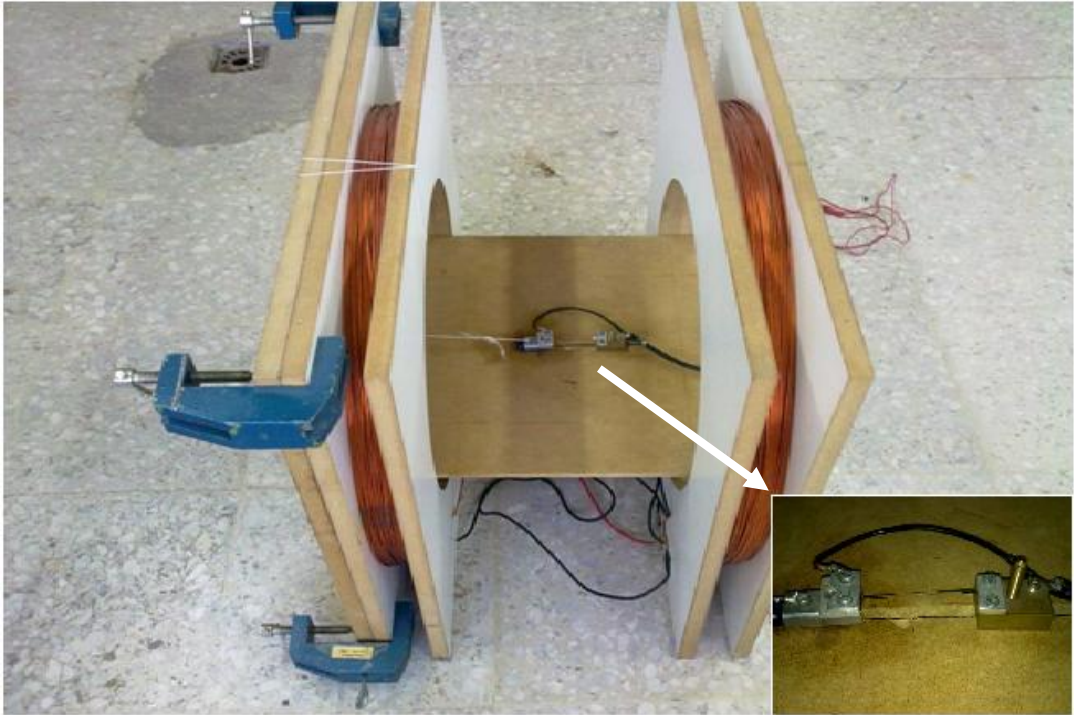


Şekil 3.2. Ölçümleri alınan  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$  amorf ferromanyetik şeridinin metal mikroskobu altındaki görüntüleri

Isıl işlem, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'teki düzeneğe bir DC güç kaynağı bağlanarak yapılmıştır. Daha sonraki aşamalarda ısıtıl işlem görmüş ve görmemiş numunelerin, M-H eğrileri alınmıştır.



Şekil 3.3 Numunelere akım altında ısıtma işlemi uygulanan sisteminin şematik çizimi



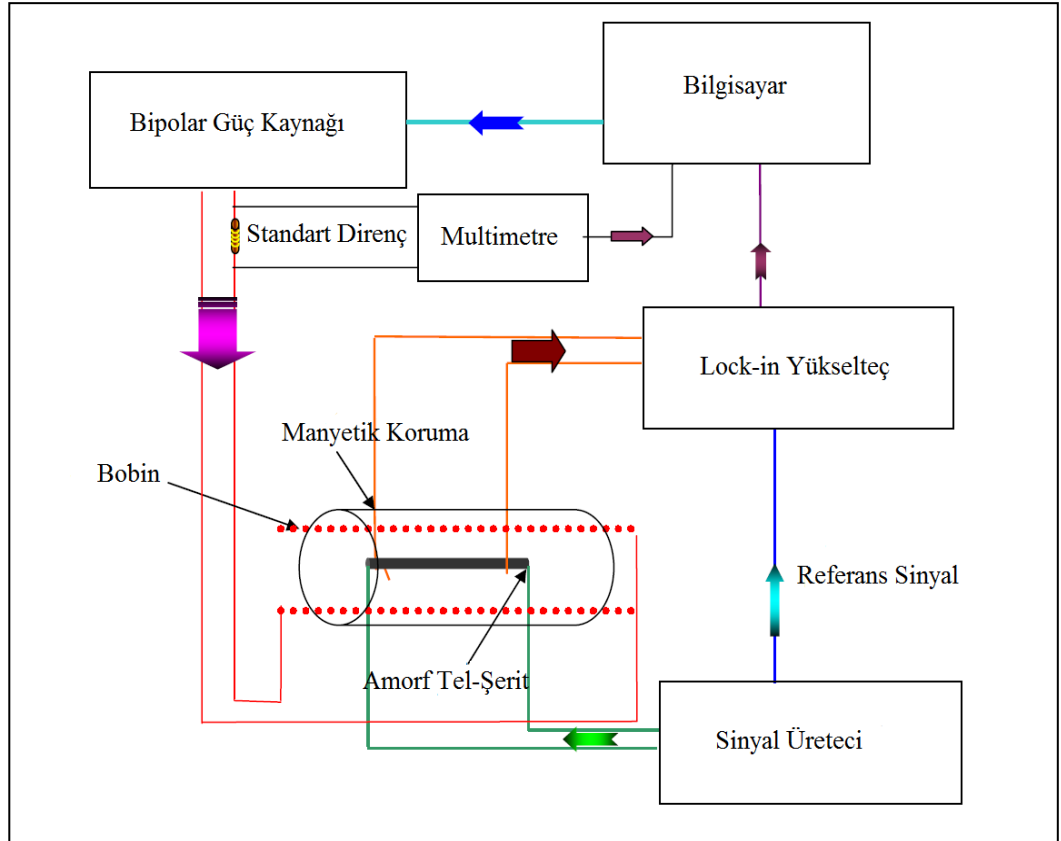
Şekil 3.4. Numunelere akım altında ısıtma işlemi uygulanan sistem

### 3.3. Ölçüm Sistemleri

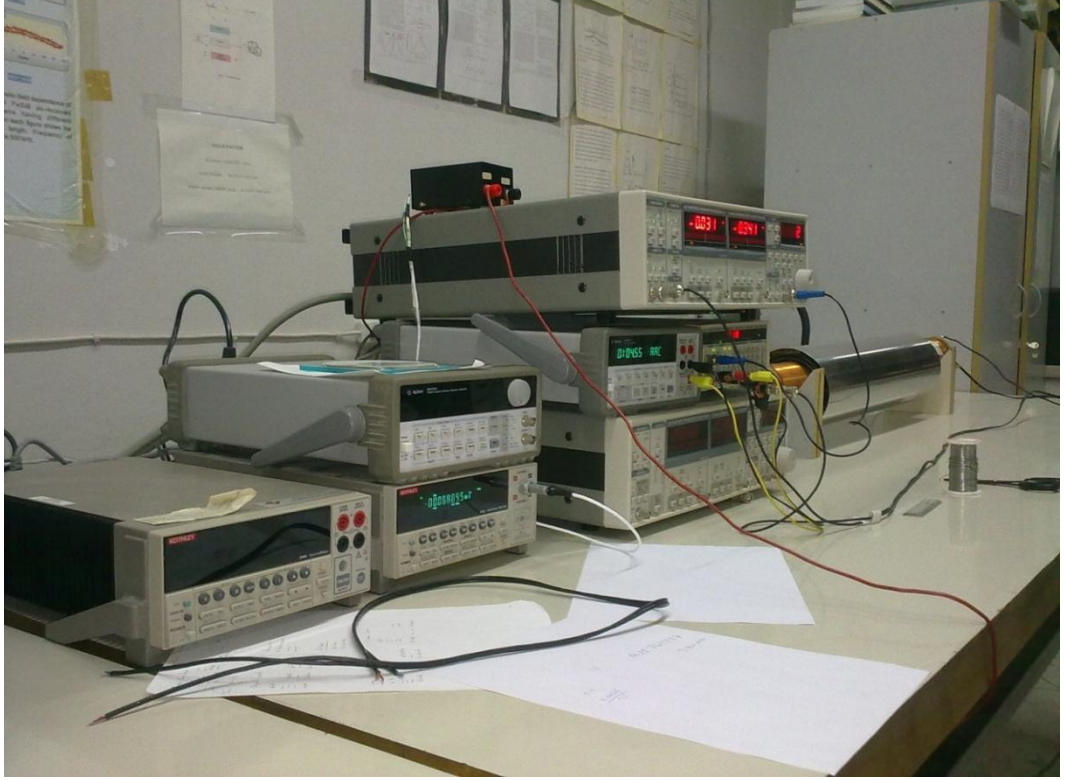
#### 3.3.1 Fluxgate ölçüm sistemi

Bobinsiz fluxgate ölçümleri alınırken, selenoid etrafında dört seviyeli manyetik koruma, KEPCO bipolar güç kaynağı, Keithley 2182 nanovoltmetre, Agilent 34401A multimetre, SRS SR830 lock-in yükselteç, SRS model DS345 sinyal üretici kullanılmıştır.

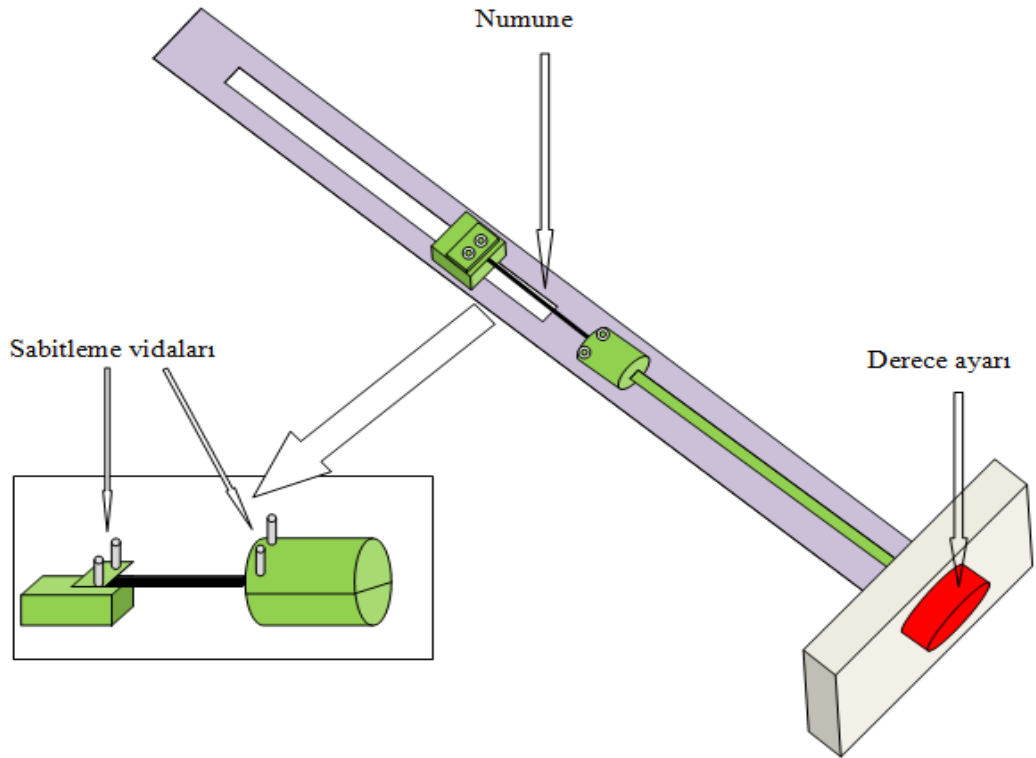
Amorf ferromanyetik malzemeleri doyuma ulaştıran alternatif akım, SRS model DS345 sinüs dalga üretici ile uygulanmıştır. Çıkış voltajının ikinci harmoniği SRS SR830 lock-in yükselteç kullanılarak numunelerin uçlarından ölçülmüştür. Dış manyetik alan KEPCO bipolar güç kaynağı kullanılarak dört kat manyetik korumalı bir selenoid aracılığı ile üretilmiştir. Uygulanan manyetik alanın bir fonksiyonu olarak çıkış voltajının ikinci harmoniği bir bilgisayar kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 3.5'te şematik olarak verilmiştir. Şekil 3.6'da sistemin görüntüsü verilmektedir.



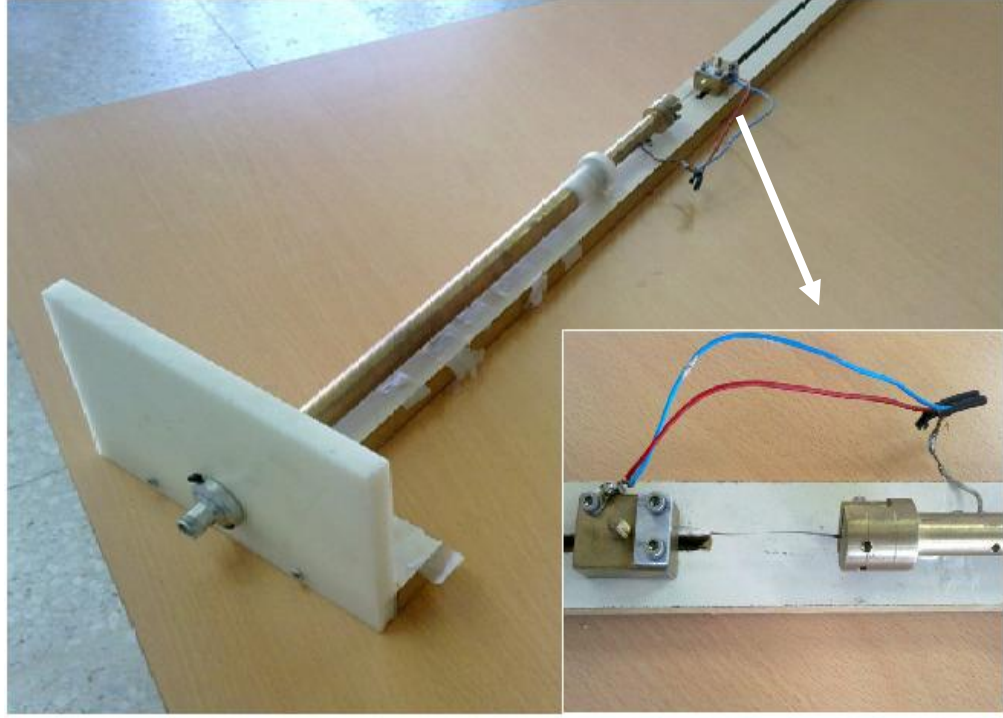
Şekil 3.5. Ölçümlerde kullanılan sistemin şematik gösterimi [7]



Şekil 3.6. Bobinsiz fluxgate ölçüm sistemi



Şekil 3.7. Ölçümlerde numuneye tork uygulamak için kullanılan sistemin şematik çizimi



Şekil 3.8. Ölçümlerde numuneye tork uygulamak için kullanılan sistem

Şekil 3.7’de malzemeye tork uygulanan sistemin şematiği verilmiştir. Şekil 3.8’de sistem gösterilmektedir.

### 3.3.2 M-H sistemi

M-H ölçüm sisteminin şematiği ve görüntüsü Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da verilmiştir. Bu sistemde çıkarma (substruction) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde toplayıcı bobinler bir köprü devresi içine yerleştirilmiştir. Yani numune yok iken alan uygulandığında toplam potansiyel sıfırdır. Toplayıcı bobinlerden birine yerleştirilen ferromanyetik malzeme, manyetik alana maruz kaldığında toplayıcı bobininde oluşan voltaj,  $V_{ind}$ , Faraday yasasına göre,

$$V_{ind} = N\mu_0 \frac{d}{dt}(A_c H + A_s M) \quad (3.1)$$

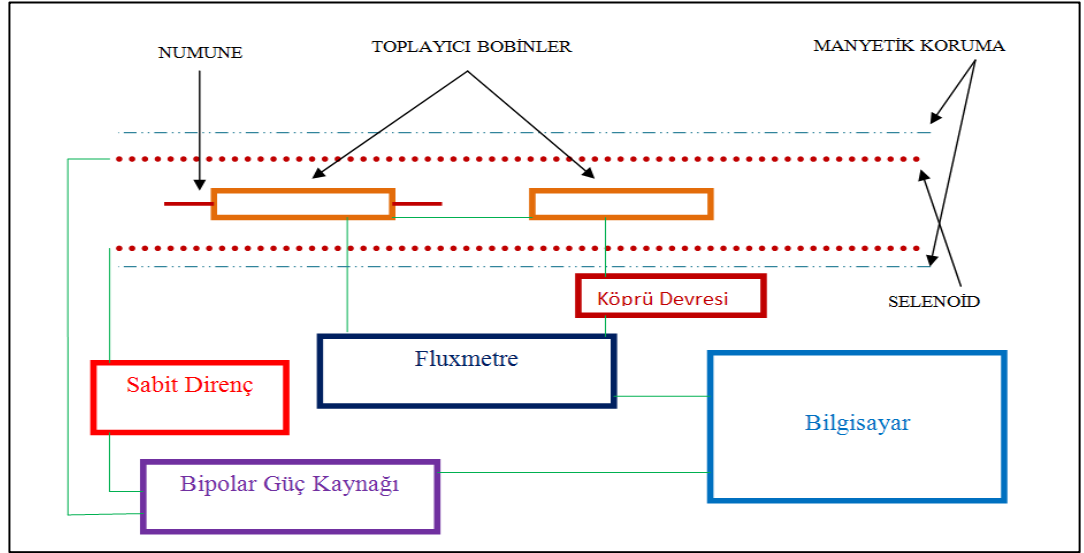
ile verilir. Burada  $\mu_0$  boş uzayın geçirgenliği,  $M$  manyetizasyon,  $A_c$  tarama bobininin kesit alanı,  $A_k$  numunenin kesit alanı ve  $H_{dış}$  ise dış manyetik alandır. Numune yerleştirilmeyen diğer bobinde oluşan voltaj,  $V_2$ ;

$$V_2 = N\mu_0 \frac{d}{dt}(A_c H_{dış}) \quad (3.2)$$

eşitliği ile verilir. Toplam potansiyel,  $V_0$ , 3.1 ve 3.2 denklemleri arasındaki farktır, yani;

$$V_0 = N\mu_0 \frac{d}{dt} (A_k M) \quad (3.3)$$

eşitliği ile verilir. Malzemenin manyetizasyonundaki değişim toplam çıkışın zaman integrali ile orantılıdır. Böylelikle elde edilen voltaj integrale edilerek  $M$  değeri uygulanan manyetik alanın fonksiyonu olarak bu yöntemle ölçülebilir [90].



Şekil 3.9. M-H ölçüm sisteminin şematik gösterimi [90]



Şekil 3.10. M-H ölçüm sistemi

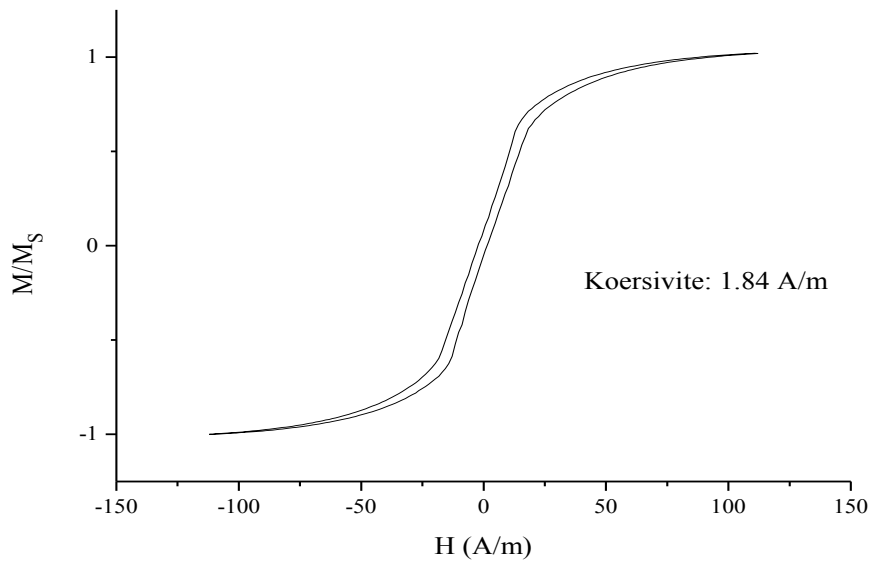
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ Numunesi ile İlgili Ölçümler

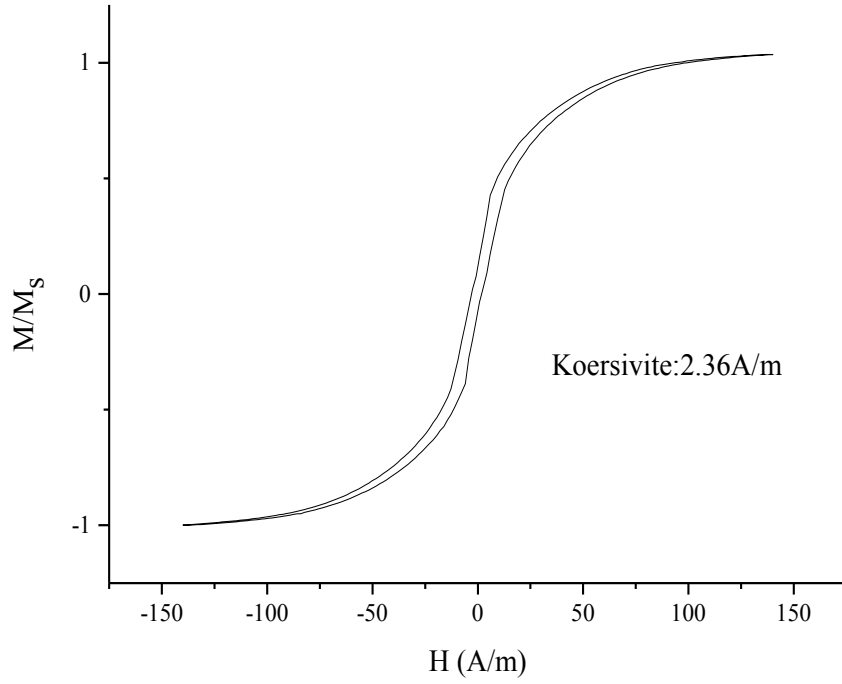
Kullanılan amorf ferromanyetik  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_1\text{Mo}_1\text{Mn}_4\text{Si}_{14}\text{B}_9$  şeridin manyetositriktif değeri sıfıra yakındır ( $<0,2 \times 10^{-6}$ ). Şerit 23  $\mu\text{m}$  kalınlığındadır.  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$  manyetik şeritleri  $\sim 1$  mm eninde, önce 8cm uzunluğunda daha sonra  $\sim 6$  cm'ye kesilerek, 480, 560 mA'lık akım altında, (helisel anisotropi sağlamak için) 0;  $3.12\pi$ ;  $6.25\pi$ ;  $12.5\pi$ ;  $25\pi$ ;  $50\pi$  rad/m'lik tork ve gerilme uygulanarak ısıtılma tabi tutulup, bobinsiz fluxgate ölçümleri alınmıştır. Bundan başka bazı numunelerin M-H ölçümleri de alınmıştır. Elde edilen sonuçlardan, iyi değişim gösteren numuneler için hassasiyet hesabı yapılmıştır.

#### 4.1.1. $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ numunesinin M-H ölçümleri

M-H ölçümlerinde değerlerin daha iyi karşılaştırılabilmesi için grafikler 1'e normalize edilmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 karşılaştırıldığında koersivite alanının biraz arttığı ve doğrusal bölgenin biraz azaldığı görülmektedir. Koersivite artışının ısıtılma işlem görmüş numunede helisel anizotropinin artmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.1. Isıl işlem görmemiş  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$  numunesinin M-H ölçümleri

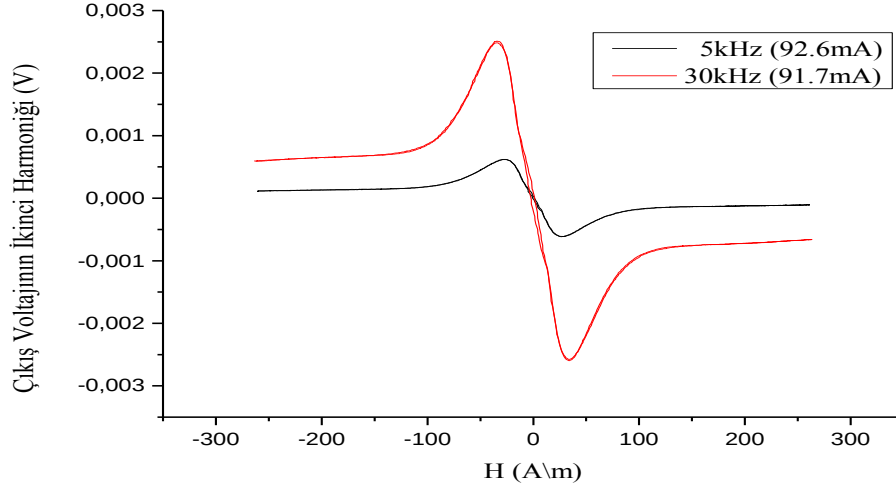


Şekil 4.2. 480 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtım işlemi görmüş  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$  numunesinin M-H ölçümleri

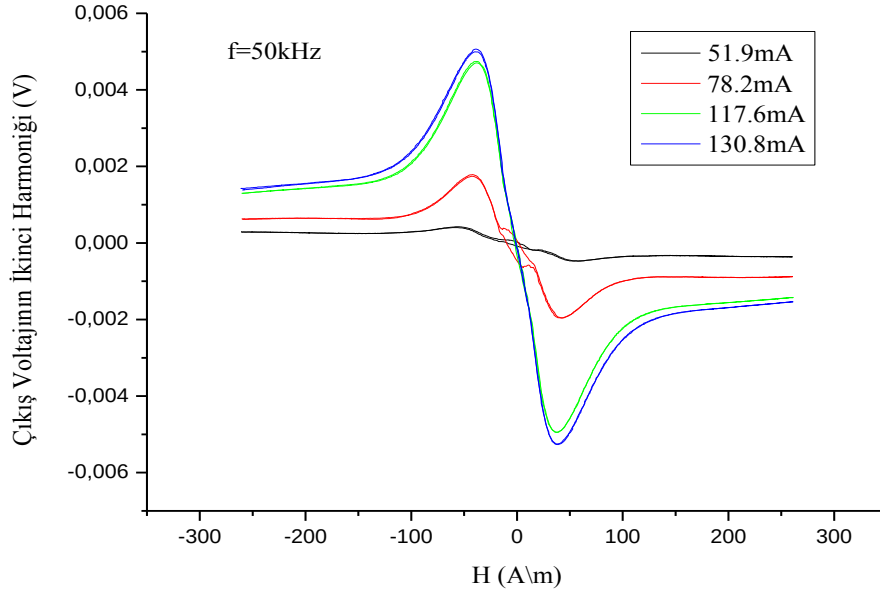
#### 4.1.2. $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ numunesinin fluxgate ölçümleri

İlk olarak, ısıtım işlemi uygulanmamış amorf ferromanyetik  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$  şeritte bobinsiz etki, alternatif sürücü akımın farklı değerleri ve frekansları için incelenmiştir. Çıkış voltajının ikinci harmoniğinde iyi bir doğrusal değişim elde edilmiştir (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4). Çıkış sinyalinin büyüklüğü küçük olmasına rağmen  $\pm 50$  A/m bölgesinde ölçülebilir ve doğrusaldır. Sonuçlar farklı işlem uygulanmamış malzemeler için tekrarlanmış ve çıkış voltajının ikinci harmoniğinde aynı değişim gözlemlenmiştir. Böyle bir değişim ısıtım işlemi uygulanmamış amorf tellerde gözlemlenememiştir. Daha önceki çalışmalarda gösterildiği gibi, bobinsiz fluxgate etkide doğrusal bir çıkış elde etmek için, numune enine veya dairesel doğrultuda bir alternatif akımla iki yönde doyuma ulaştırılmalı ve malzemenin helisel bileşeni olmalıdır.

Şekil 4.3'te alternatif sürücü akımının 90 mA üzerindeki değerleri için numunenin enine doğrultuda doyuma ulaştığı ve doğrusallığın gözlemlendiği gösterilmektedir. Isıl işlem uygulanmamış  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$  amorf şeritte, gözlenen doğrusal bobinsiz etki bu numunenin helisel anisotropiye sahip olduğunu ifade etmektedir.



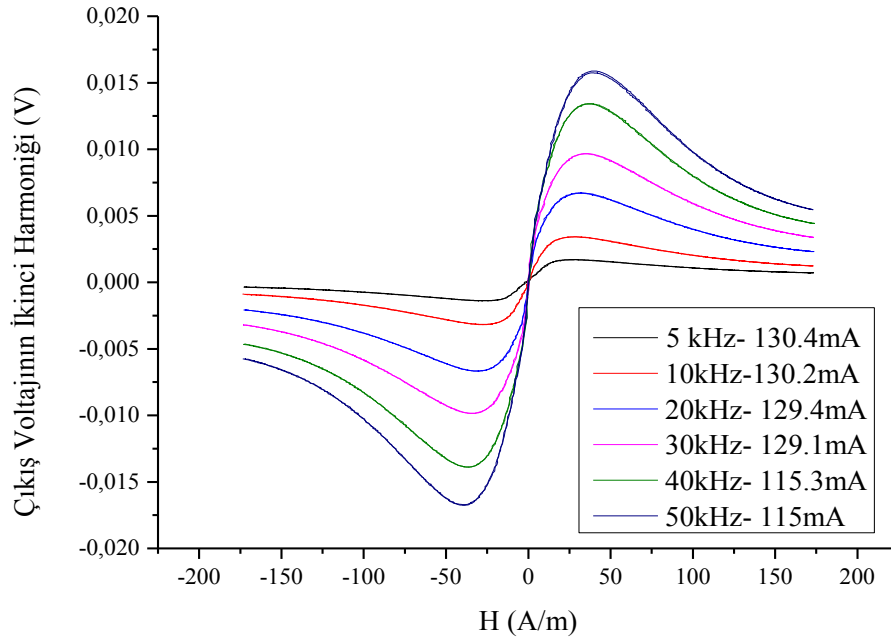
Şekil 4.3. Isıl işlem görmemiş numunenin elde edilen 5 ve 30kHz'de fluxgate ölçüm değerleri



Şekil 4.4. Isıl işlem görmemiş numunenin, 50kHz'de elde edilen fluxgate ölçüm değerleri

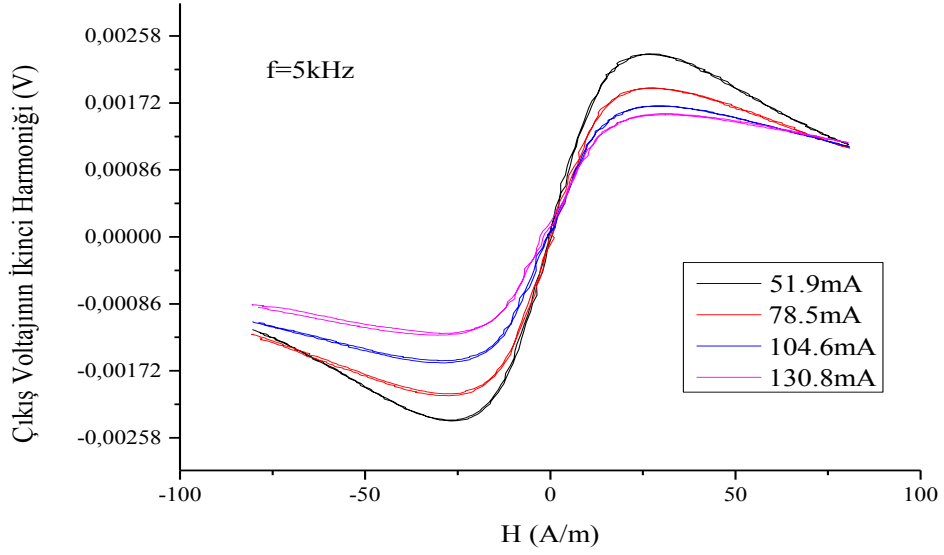
Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te ısıtıl işlem görmemiş numunede bir çıkış voltajının elde edilmesi, numunede önceden bir dairesel anizotropi olabileceği anlamına gelmektedir. Çıkış voltajının ikinci harmoniğinde iyi bir doğrusal değişim elde edilmiştir. Ayrıca frekans arttıkça hassasiyet değerinin arttığı görülmektedir. Bobinsiz fluxgate etkide doğrusal bir çıkış elde etmek için, numune enine veya dairesel doğrultuda bir alternatif akımla iki yönde doyuma ulaştırılmalı ve malzemenin helisel bileşeni olmalıdır. Aşağıda verilen fluxgate ölçümleri, ölçüm sırasında uygulanan tork ve frekansa göre sıralanmıştır.

Şekil 4.5'te farklı frekans değerlerine karşı bulunan ölçüm değerleri verilmektedir. Bu grafikten hassasiyetin frekansa da bağlı olduğu görülmektedir. Bunun dışında numuneye ısıtıl işlem sırasında gerilmeye uygulanmıştır. Gerilmenin dairesel anizotropiyi artırdığı düşünülmektedir. Bu durum hassasiyeti artıracaktır.



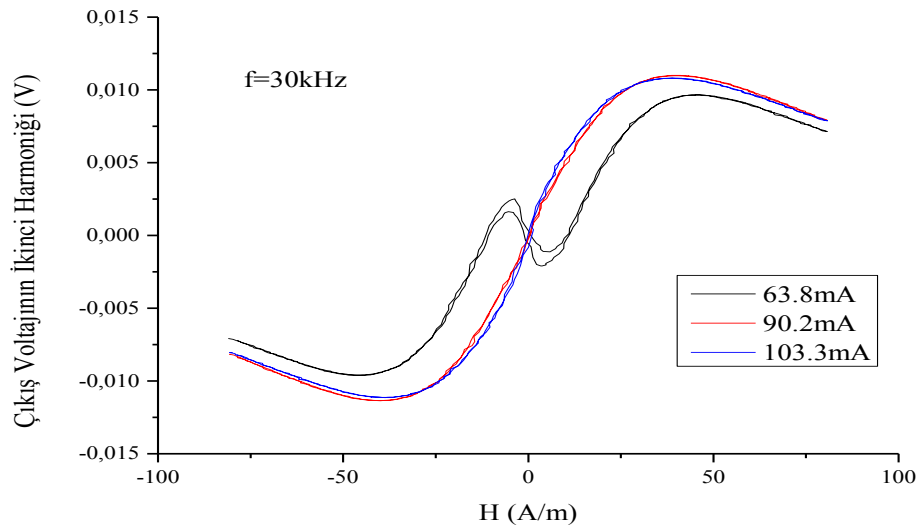
Şekil 4.5. 480 mA akım, 42.6 Mpa gerilme stresi altında, 15 dakika ısıtıl işlem yapılmış numunenin fluxgate ölçümleri

Şekil 4.6'da numuneye  $3.12\pi$  rad/m tork uygulanarak, 5kHz frekansta farklı akım değerleri için alınan ölçümler gösterilmektedir. Akımın artmasıyla hassasiyetin azaldığı görülmektedir. Düşük frekanslar için alınan ölçümlerde, numune tam olarak dairesel yönde doyuma gitmediği için doğrusal bir aralık oluşmamaktadır.



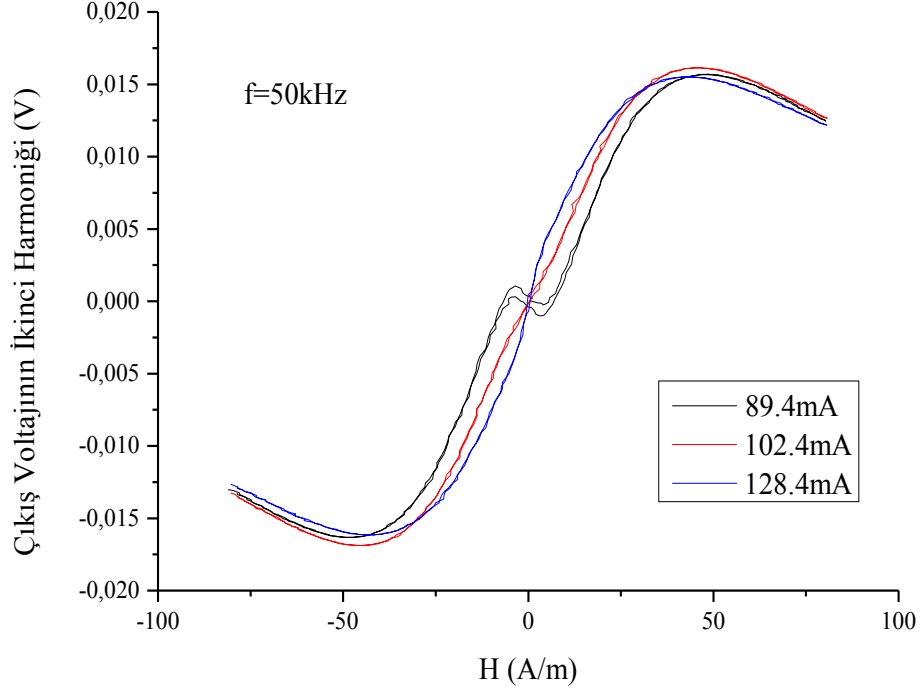
Şekil 4.6. 480 mA akım ve  $3.12\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş malzemenin ölçümleri

Şekil 4.7’de aynı akım ve tork değerleri için 30 kHz frekans altında ölçüm alınmıştır. Bu ölçüm, görece daha yüksek frekansta olduğu için daha sağlıklıdır. Beklenildiği gibi, numune düşük akım değerlerinde doyuma gitmediği için grafikte bir doğrusallık sağlanamamış, ancak yüksek akım değerlerinde numune doyuma götürülmüş ve grafikte bir doğrusallık sağlanmıştır.



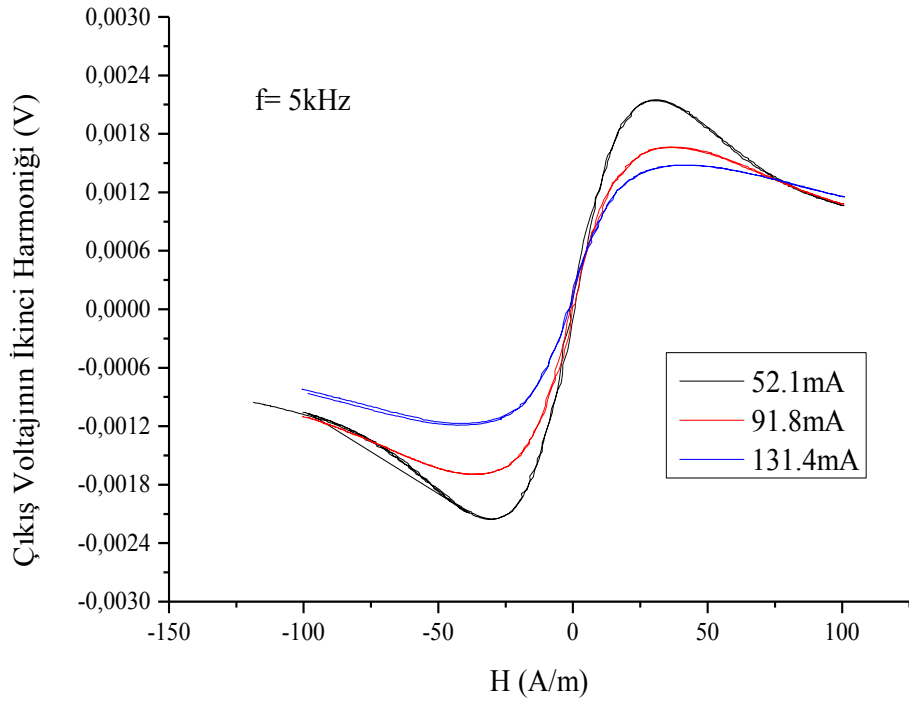
Şekil 4.7. 480mA akım ve  $3.12\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş malzemenin ölçümleri

Şekil 4.8’de 50 kHz frekansta alınan ölçümler görülmektedir. Hassasiyet, akım arttıkça artmıştır. Ancak yüksek frekanslarda eddy akımları etkin olmaktadır. Bu durum doğrusallığı bozmaktadır.

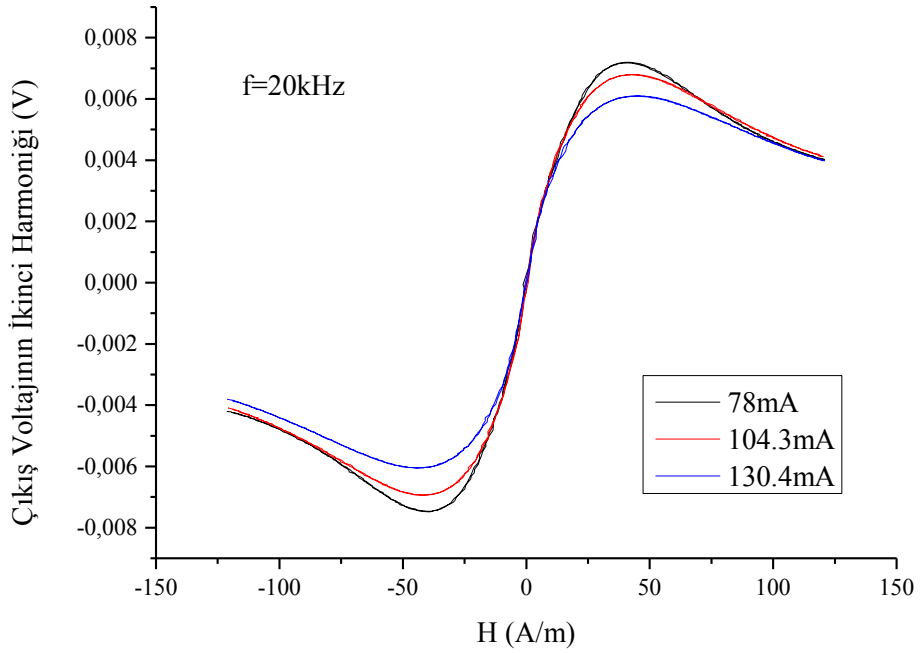


Şekil 4.8. 480 mA akım ve  $3.12\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş malzemenin ölçümleri

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da numuneye ısıtılma işlemi sırasında  $12.5\pi$  rad/m tork uygulanmıştır. Sırasıyla 5 ve 20 kHz için ölçüm sonuçları görülmektedir. Yine düşük frekanslarda ölçümler sağlıklı olmamakla birlikte, 20 kHz için hassasiyet akımla azalmıştır. Bu durumun sebebi helisel anizotropinin tam oluşmaması veya numunenin doyuma gitmemesi olabilir. Bunun dışında bu frekans için doğrusallık belirtilen nedenlerden dolayı sağlanamamıştır.

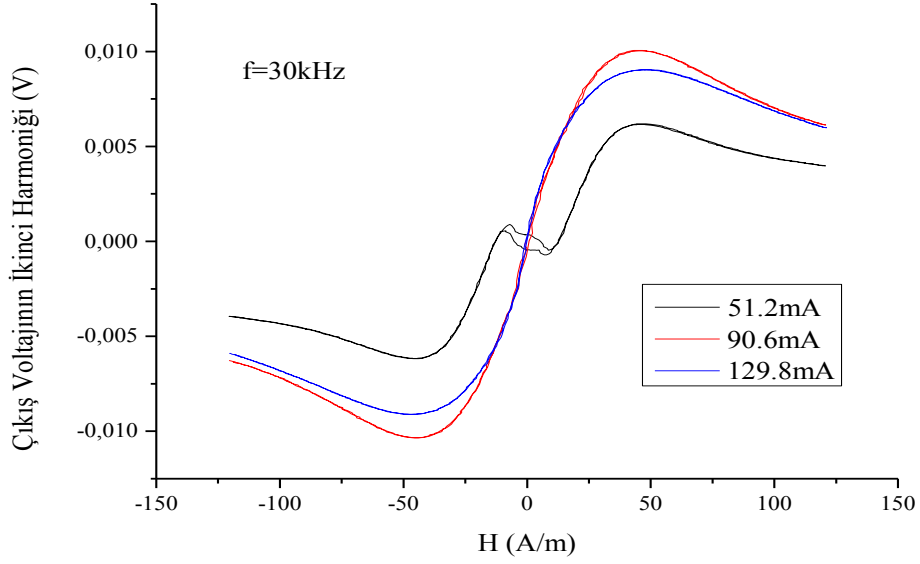


Şekil 4.9. 480 mA akım ve  $12.5\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri

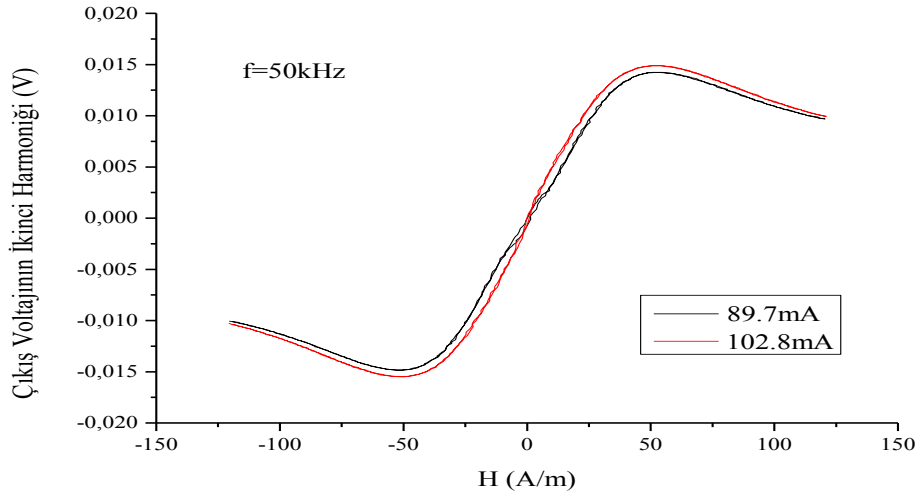


Şekil 4.10. 480 mA akım ve  $12.5\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de sırası ile 30 ve 50 kHz frekans değerleri için  $12.5\pi$  rad/m tork uygulanan numunenin ölçüm sonuçları verilmiştir. 30 kHz frekans için numunenin tam olarak doyuma gitmediği ve helisel anizotropinin oluşmadığı söylenebilir. Ancak 50 kHz frekansta 102.8 mA akım değeri için numune doyuma gitmiştir. Aynı zamanda helisel anizotropinin oluştuğu da söylenebilir. Ayrıca hassasiyet yüksek bir değerdedir.

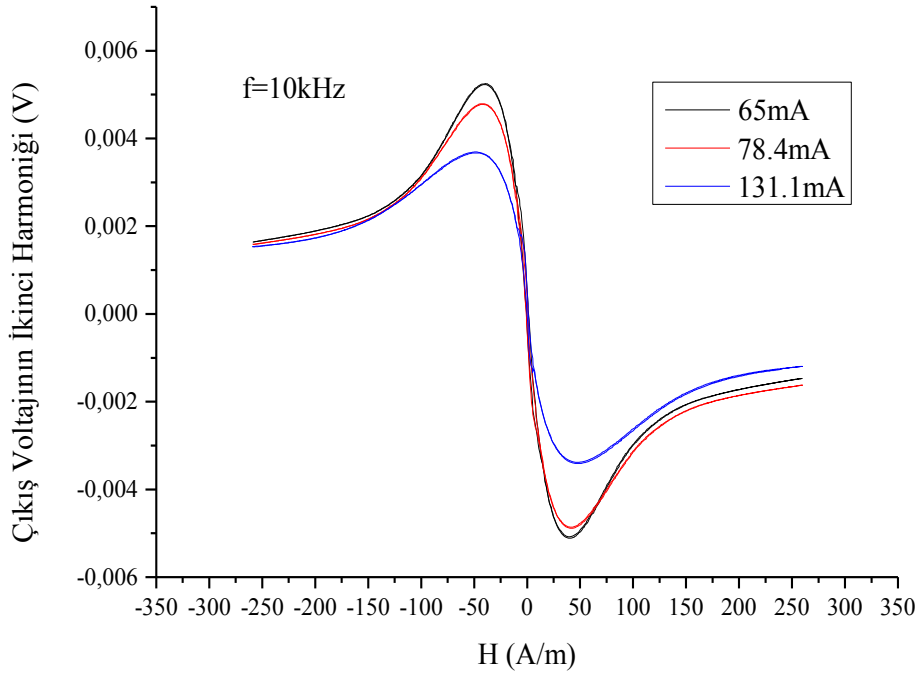


Şekil 4.11. 480 mA akım ve  $12.5\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtılmış malzemenin ölçümleri

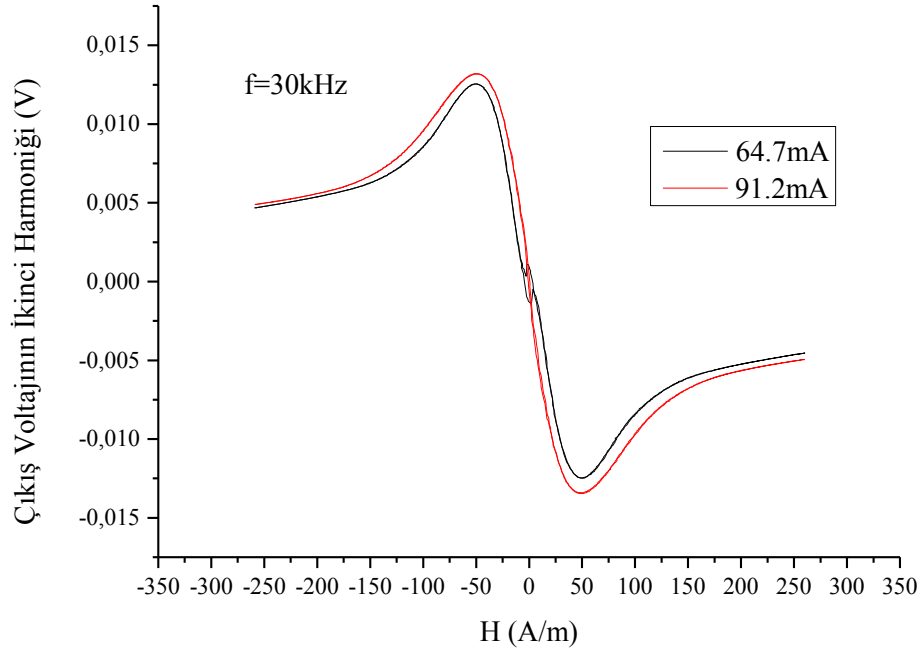


Şekil 4.12. 480 mA akım ve  $12.5\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtılmış malzemenin ölçümleri

Şekil 4.13'te numuneye  $25\pi$  rad/m tork uygulandığında, 10 kHz frekansta alınan ölçümler görülmektedir. Tüm akım değerleri için düşük bir aralıkta numunenin doğrusal grafik verdiği söylenebilir. Ancak hassasiyet değerleri yeterince yüksek değildir. Bunu dışında Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'den görüldüğü üzere eğriler ters yöndedir. Bu durum ısıtma işlem yaparken uygulanan torkun her numune için ters yönlerde olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla indüklenen helisel anizotropi ters yönlerdedir. Bu durum Şekil 4.12'deki eğrinin pozitif ve Şekil 4.13'deki eğrinin de negatif eğime sahip olmasına neden olur.



Şekil 4.13. 480 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtma işlem görmüş malzemenin ölçümleri.

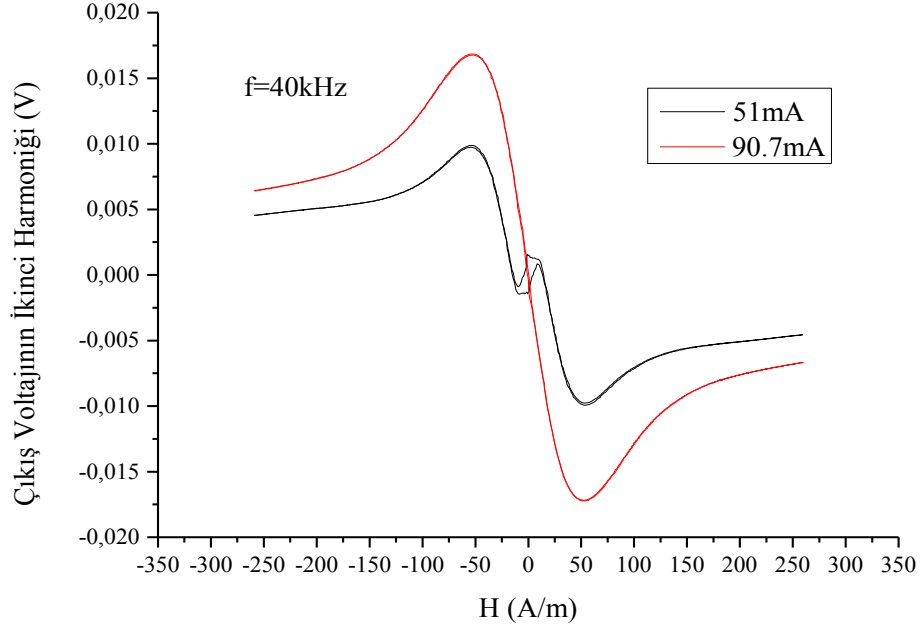


Şekil 4.14. 480 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş malzemenin ölçümleri.

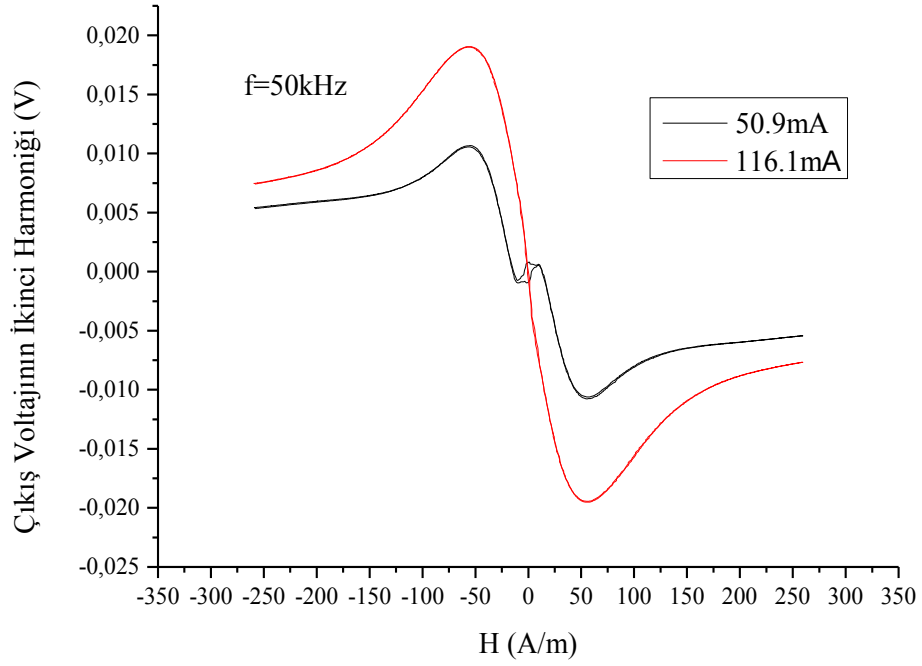
Şekil 4.14'te aynı numune için frekans 30 kHz değerine çıkarıldığında, hassasiyette gözle görülür bir artma olmuştur. 64.7 mA akım değerinde numune tam doyuma ulaşmadığı için, grafikte bir histerisis gözlemlenmiştir. Ancak 91.2 mA değerinde grafiğin  $\pm 10$  A/m civarında doğrusal olduğu söylenebilir.

Şekil 4.15'te frekans 40 kHz değerine yükseltildiğinde alınan ölçüm sonuçları verilmiştir. Buna göre, yaklaşık olarak  $\pm 25$  A/m aralığında doğrusal bir grafik elde edilmiştir. 90.7 mA akım değeri için hassasiyet yüksek bir değerdedir. Bu sonuç, hassasiyet açısından şeritlerde elde edilen en iyi sonuçtur. 51 mA akım değerinde ise grafikte histerisis oluşmuştur. Bu akım değerinin söz konusu frekansta numuneyi doyuma götürmediği söylenebilir.

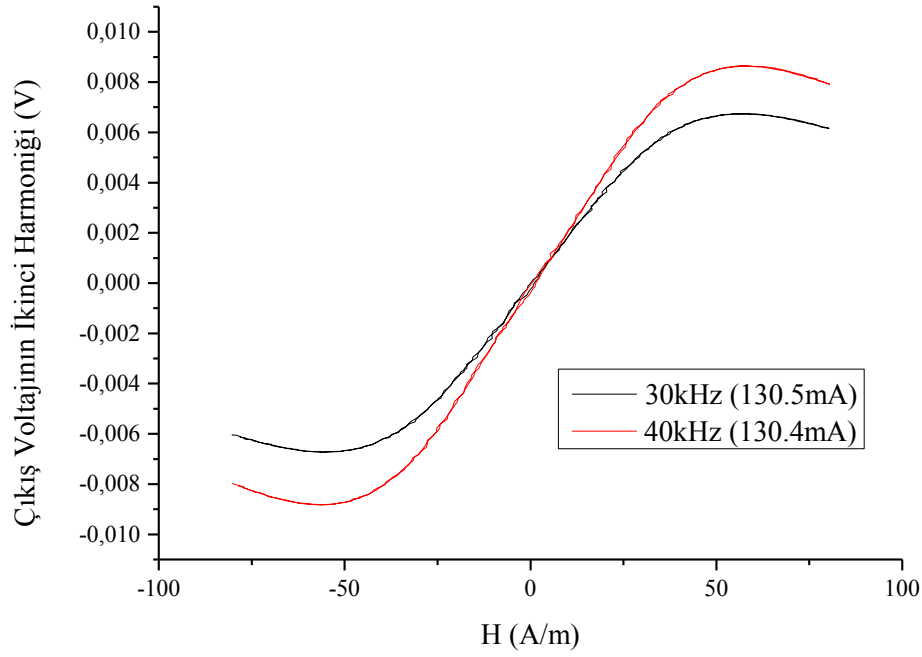
Şekil 4.16'da ise frekans 50 kHz değerine çıkarılmıştır. Bu frekansta, numunede eddy akımlarının arttığı ve grafiğin doğrusallığına etki etmeye başladığı düşünülmektedir. Dolayısıyla doğrusal bir değişim gözlemlenememiştir.



Şekil 4.15. 480 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri



Şekil 4.16. 480 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri

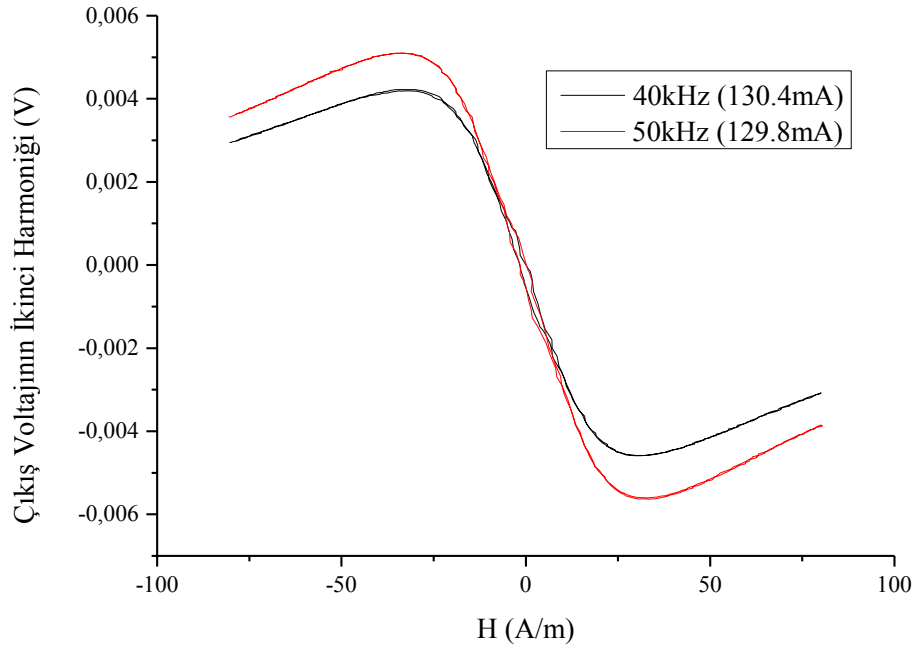


Şekil 4.17. 480 mA akım ve  $50\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş malzemenin ölçümleri

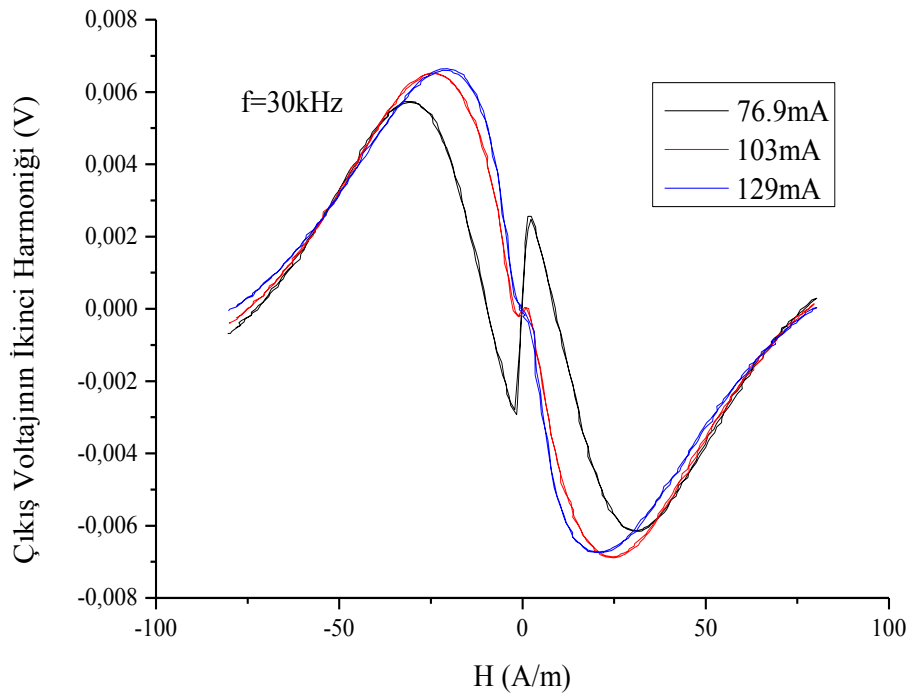
Şekil 4.17’de ısıtılma işlemi sırasında uygulanan tork artırılmış ve  $50\pi$  rad/m değerine çıkarılmıştır. Bu durumda 30 kHz’de doğrusal bir eğri elde edilmiş ancak hassasiyet değerinin biraz düştüğü gözlemlenmiştir. Helisel yöndeki ve dairesel yöndeki manyetizasyonların arasındaki uyumun biraz azalmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. 40 kHz frekans değerinde ise doğrusallığın bozulmaya başladığı görülmektedir. Bu durumun eddy akımlarından dolayı olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.18’de uygulanan ısıtılma işlemi süresi arttırılmış ve 30 dakikaya çıkarılmıştır. 40 ve 50 kHz frekansları altındaki ölçümler verilmiştir. Grafikte histeresis görülmektedir. Yüksek akıma uzun süre maruz kalan numune yapının bozulmaya başladığı düşünülmektedir. Buna bağlı olarak amorf numunede bir kristallenmenin de söz konusu olabileceği düşünülmektedir.

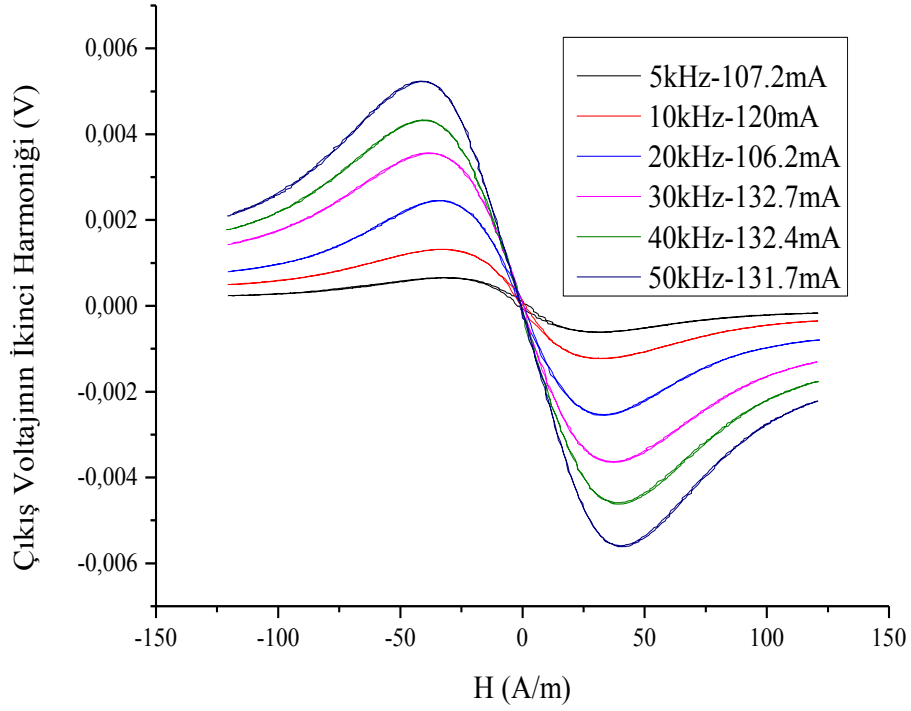
Şekil 4.19’da görüldüğü üzere ısıtılma işlemi süresi azaltıldığında çıkış voltajının ikinci harmoniğindeki doğrusallık kaybolmuştur. Bu durumun helisel anizotropinin tam olarak oluşmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.18. 480 mA akım ve  $50\pi$  rad/m tork altında, 30 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri



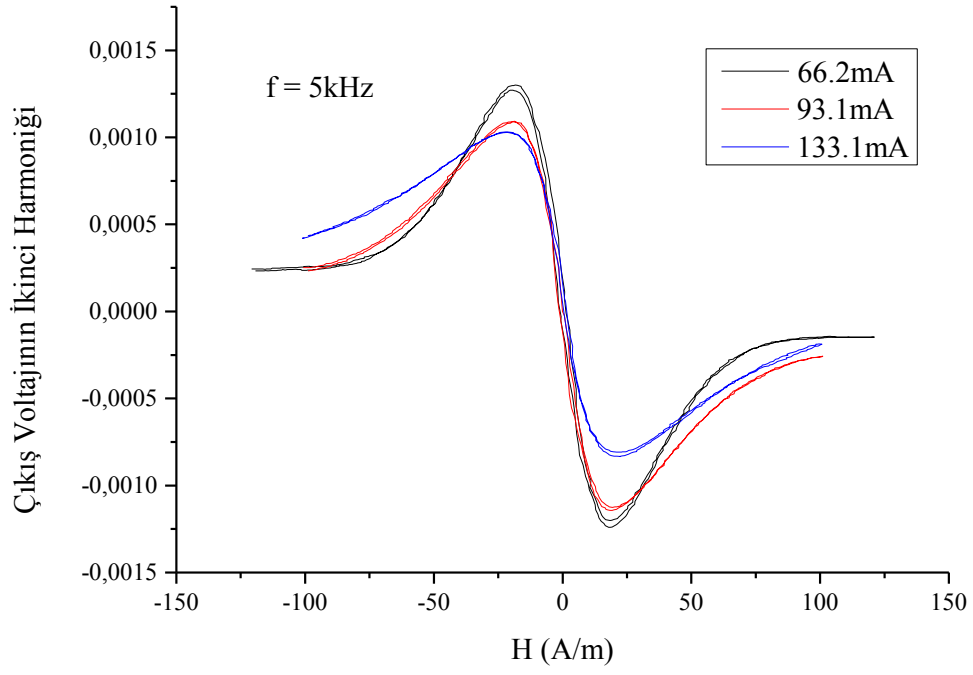
Şekil 4.19. 480 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork altında, 10 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri



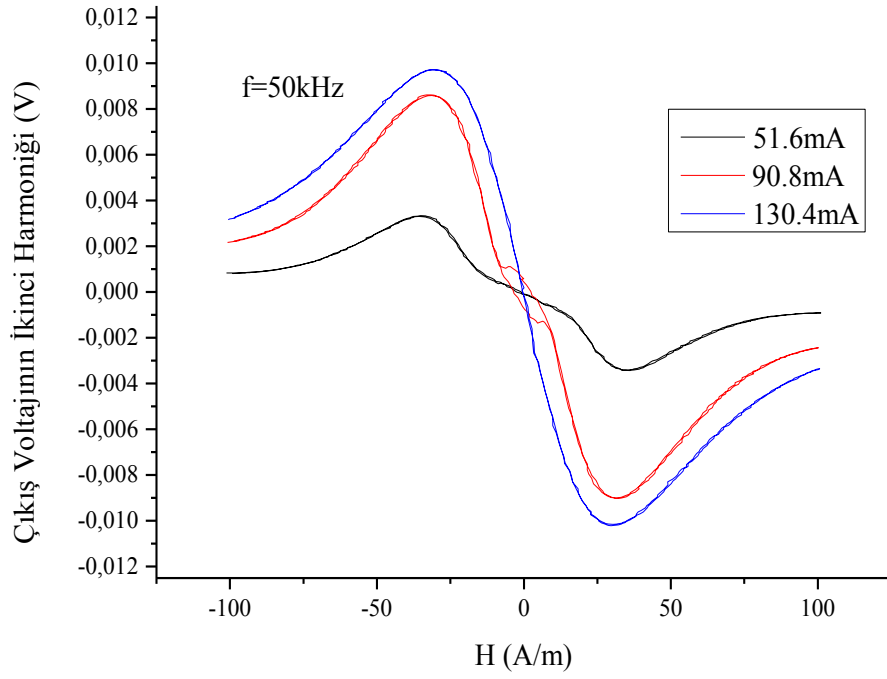
Şekil 4.20. 560 mA akım, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş malzemenin ölçümleri

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de görüldüğü üzere ısıtılma sırasında uygulanan akım değeri artırılmıştır. Bunun dışında Şekil 4.21’deki grafikte numuneye ayrıca  $6.25\pi$  rad/m tork uygulanmış ve ölçümleri alınmıştır. Isıtılma sırasında uygulanan akımın artması hassasiyeti büyük oranda düşürmüştür ve Şekil 4.20’de görüldüğü üzere çıkış değerlerinde, 5 kHz için bir histeris oluşmuştur. Bu durumun sebebi olarak akıma bağlı dairesel yöndeki manyetizasyonun çok fazla artması sonucu helisel yöndeki manyetizasyon uyumunun tam oluşamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

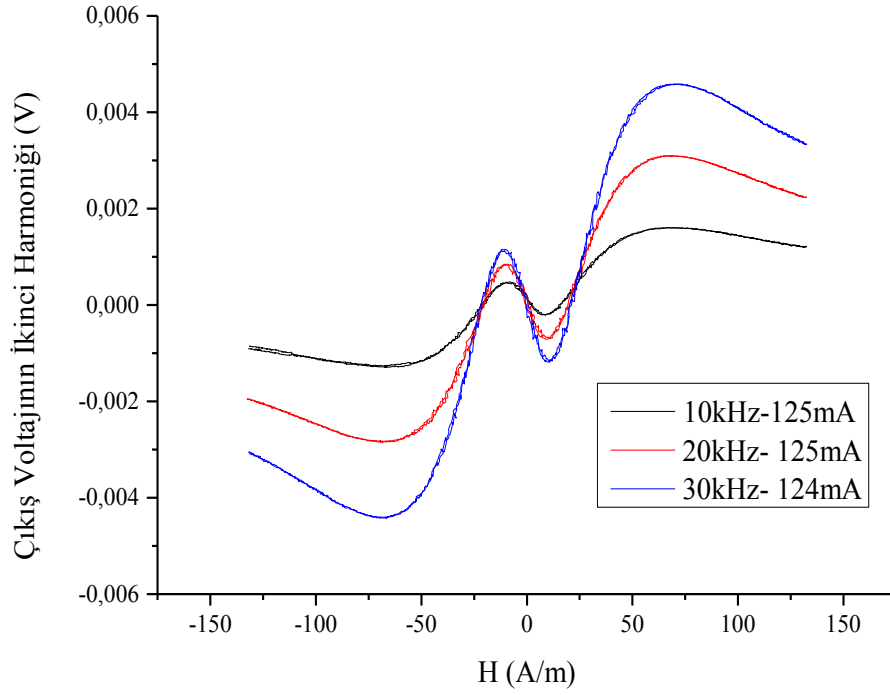
Şekil 4.22’de frekans 50 kHz değerine çıkarılmıştır. 130.4 mA akım değerinde yaklaşık  $\pm 10$  A/m aralığı için doğrusal bir grafik elde edildiği söylenebilir. Ancak hassasiyet değeri daha önceden alınan ölçümlere göre düşüktür.



Şekil 4.21. 560 mA akım ve  $6.25\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri



Şekil 4.22. 560 mA akım ve  $6.25\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri

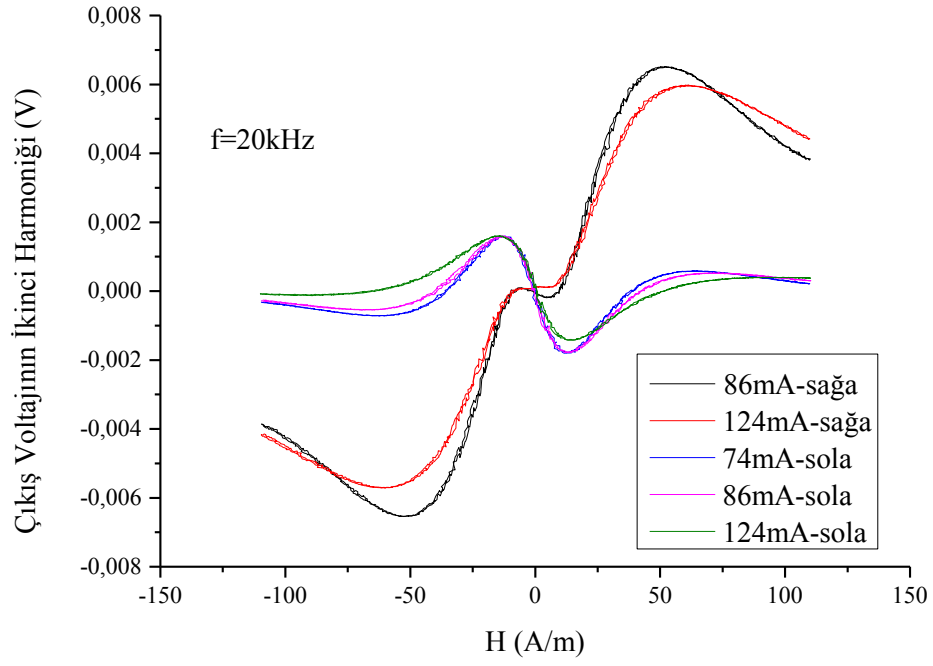


Şekil 4.23. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtılmış numunenin ölçümleri

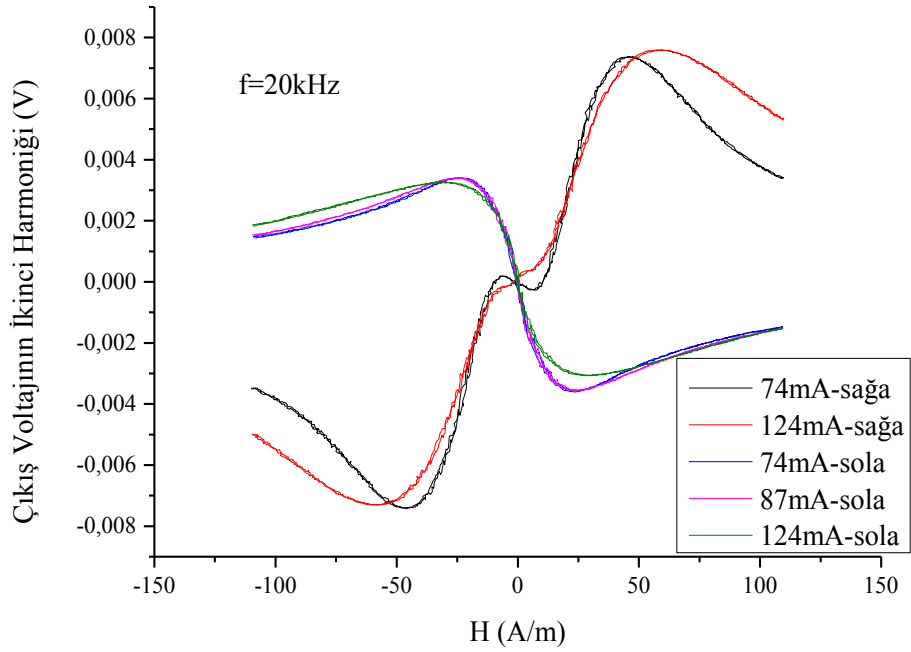
Şekil 4.23 480 mA akım altında ısıtılmış numunenin hiç tork uygulanmadan alınan ölçümlerini göstermektedir. Isıtılmış işlem sırasında da tork uygulanmamıştır. Helisel anizotropi oluşmadığı için grafikte bir doğrusallık yoktur.

Şekil 4.24'te numuneye, sağa ve sola doğru  $8.25\pi$  rad/m tork uygulanarak fluxgate ölçümleri alınmıştır. Sola tork uygulanarak alınan ölçümlerde numunede bir helisel anizotropi oluştuğunu söylemek mümkündür. Çünkü elde edilen grafik doğrusaldır. Ancak hassasiyet değeri düşüktür. Sağa tork uygulandığında, numunede helisel anizotropinin tam olarak oluşmadığı görülmektedir.

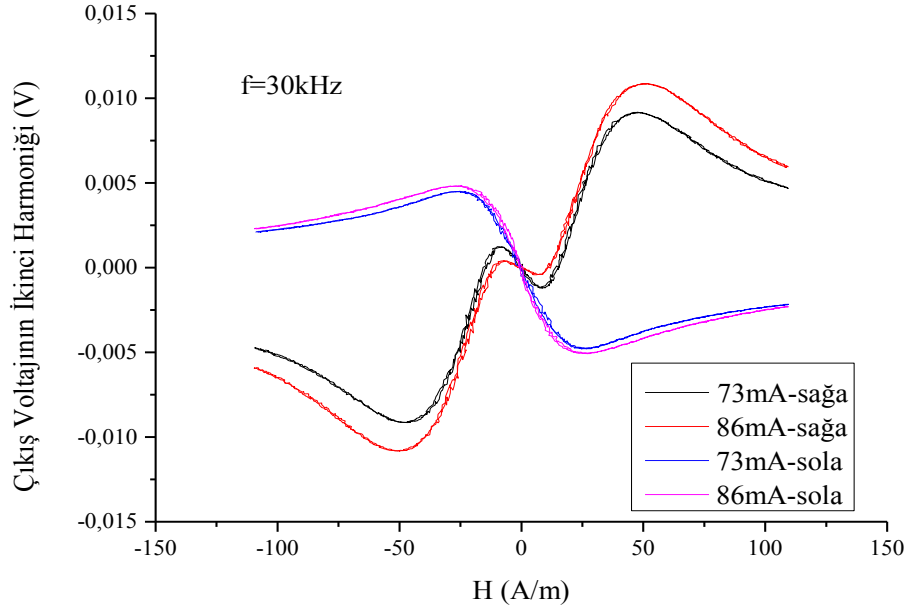
Şekil 4.25'te 20 kHz frekans değerinde sağa ve sola doğru  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanarak fluxgate ölçümleri alınmıştır. Sola doğru tork arttıkça, hassasiyet değerinin gözle görülür bir biçimde arttığı görülmektedir. Sağa tork uygulandığında, numunede helisel anizotropinin tam olarak oluşmadığı görülmektedir.



Şekil 4.24. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtılmış numunenin,  $8.25\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri



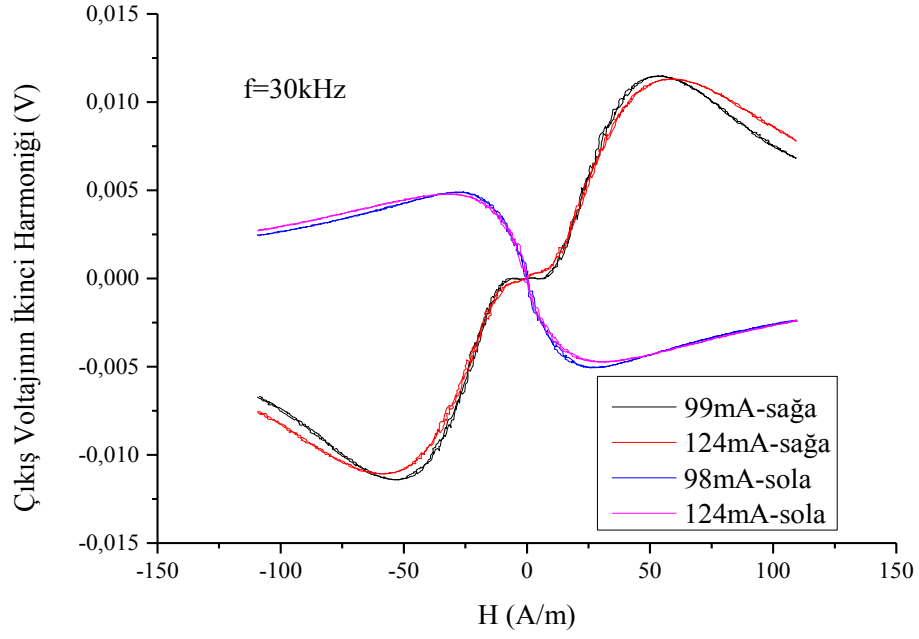
Şekil 4.25. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtılmış numunenin,  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri



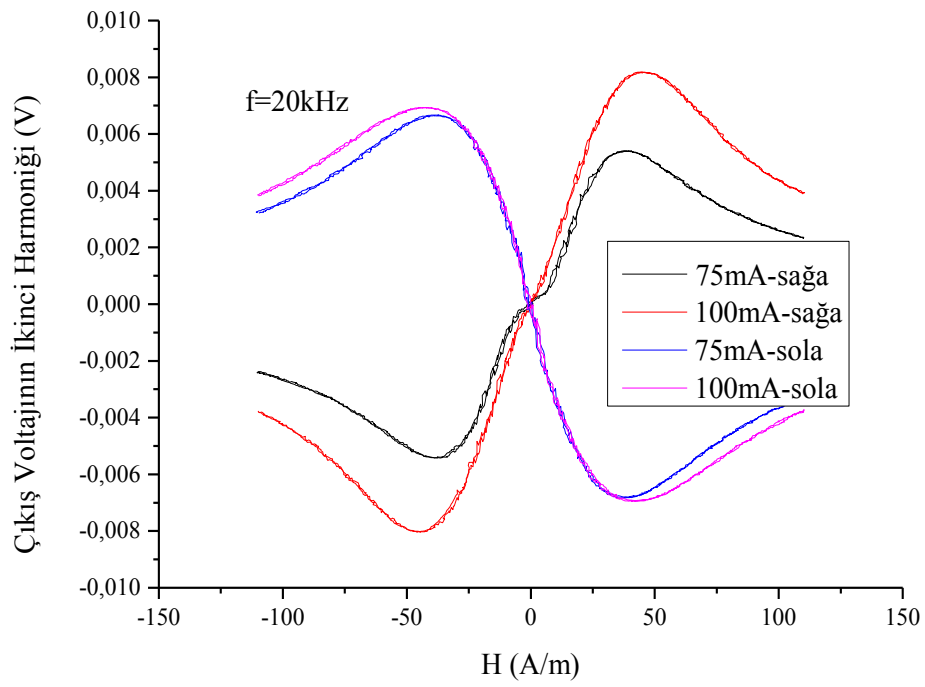
Şekil 4.26. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtılmış numunenin,  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27 'de 480mA akım altında 15 dakika ısıtılmış numunenin,  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri, farklı akım değerlerine göre verilmiştir. 30 kHz frekansta, sola tork uygulanan numunede, 73 ve 86 mA'lık akımlar için iyi bir doğrusal değişim elde edilmiştir. Ancak bu doğrusallık, Şekil 4.27'de görüldüğü üzere 98 ve 124 mA'lık akımlarda bozulmaya başlamıştır. Bunun sebebinin görece yüksek akımlarda dairesel anizotropinin daha fazla artıp, helisel yöndeki bileşeni azaltmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.

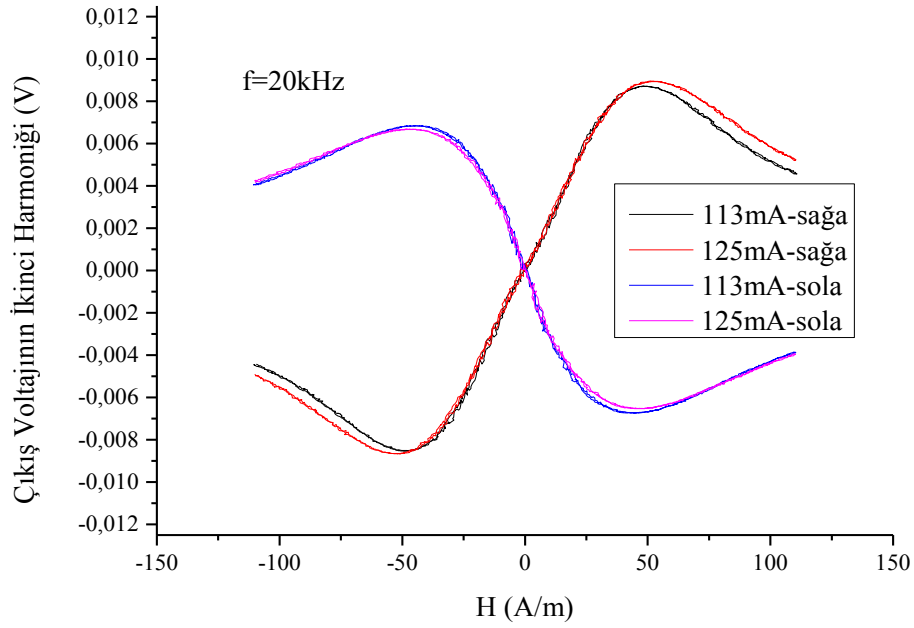
Şekil 4.28'de numuneye uygulanan tork  $33\pi$  rad/m değerine arttırılmıştır. Bu durumda, sola tork uygulandığında, helisel anizotropinin arttığı ve buna bağlı olarak hassiyetin de arttığı düşünülmektedir. Sağa tork uygulandığında oluşan eğrideki artan doğrusallığın, helisel anizotropinin artmasına bağlı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.27. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtılmış numunenin,  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri



Şekil 4.28. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtılmış numunenin,  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

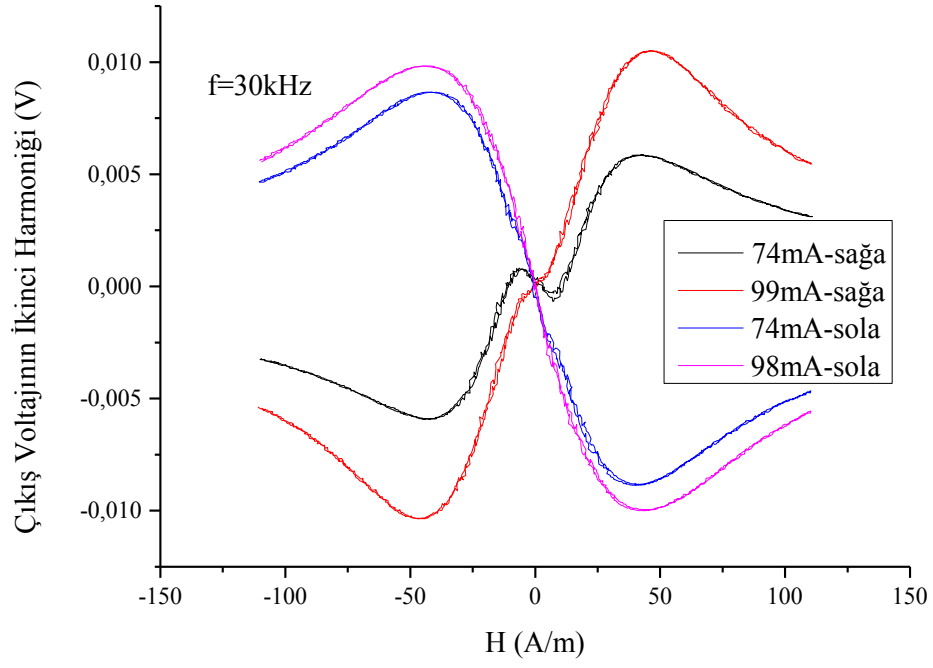


Şekil 4.29. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtılmış numunenin,  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

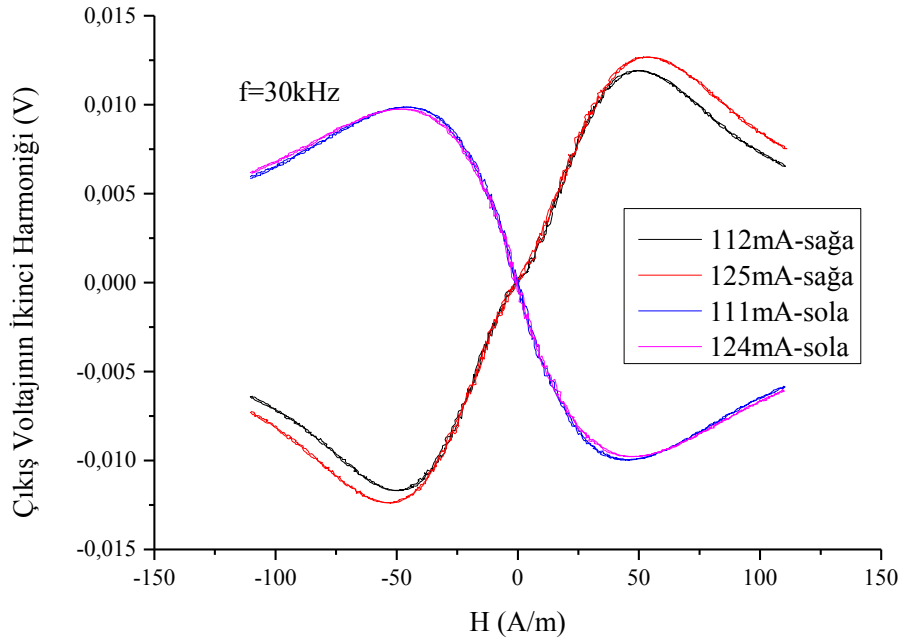
Şekil 4.29’da  $33\pi$  rad/m tork uygulanan numunede akım değerleri artırılmıştır. Dairesel yöndeki anizotropi bileşeninin artmasına bağlı olarak, hassasiyet her iki yönde de biraz artmıştır. Ayrıca, sağa tork uygulanan numunede doğrusallık ta artmıştır. Bu durumun sebebi olarak yine daireysel yöndeki anizotropi bileşeninin artışı gösterilebilir.

Şekil 4.30’da  $33\pi$  rad/m tork uygulanan numunede frekans 30 kHz değerine artırılmıştır. Buna bağlı olarak sola tork uygulanan durumda hassasiyet artmıştır. 98 mA akım için  $\pm 25$  A/m bölgesinde doğrusal bir eğri görülmektedir. Dairesel yönde ve helisel yöndeki anizotropilerin birbiri ile tam olarak uyumlu olduğu söylenebilir. Ancak sağa tork uygulanan durumda, akımın düşük olması sebebiyle, doğrusal bölgenin oluşmadığı görülmekte ve numunenin tam doyuma ulaşmadığı düşünülmektedir.

Şekil 4.31’de doğrusallık, Şekil 4.30 ile kıyaslandığında, sola tork durumunda bozulurken, sağa tork durumunda biraz daha artmıştır. Bu durumun akımın artmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.30. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtılmış numunenin,  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri



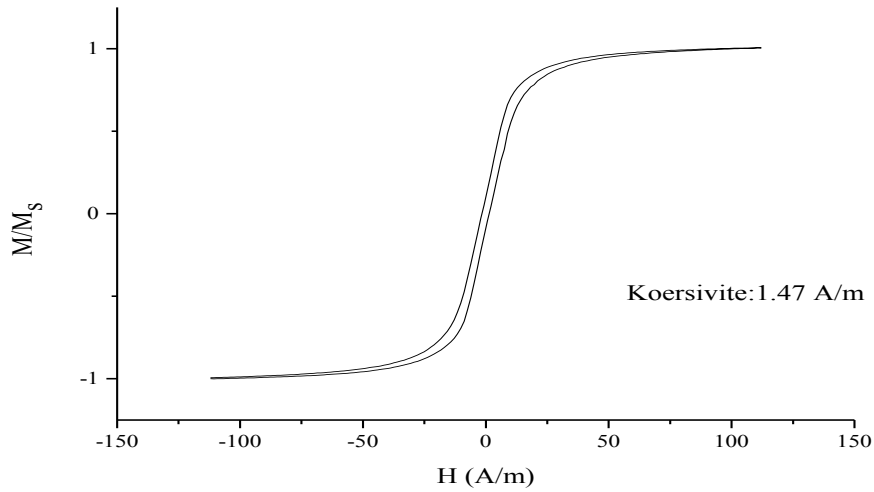
Şekil 4.31. 480 mA akım altında 15 dakika ısıtılmış numunenin,  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

## 4.2. Co<sub>67</sub>Fe<sub>4</sub>Mo<sub>1,5</sub>Si<sub>16,5</sub>B<sub>11</sub> Numunesi ile İlgili Ölçümler

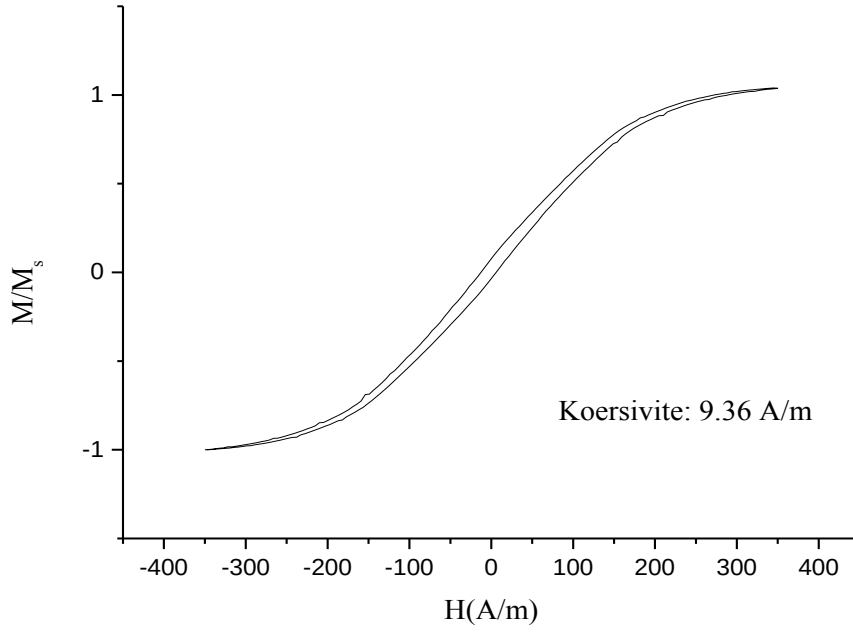
Kullanılan amorf ferromanyetik Co<sub>67</sub>Fe<sub>4</sub>Mo<sub>1,5</sub>Si<sub>16,5</sub>B<sub>11</sub> şeridin manyetositrikatif özelliği sıfıra yakındır ( $<0,2 \times 10^{-6}$ ). Şerit 23  $\mu\text{m}$  kalınlığındadır. Şerit yine  $\sim 1$  mm eninde, 8 cm uzunluğunda kesilerek; 480; 520; 680; 720 ve 780 mA'lık akım altında, (helisel anisotropi sağlamak için) 0;  $3.12\pi$ ;  $6.25\pi$ ;  $12.5\pi$ ;  $25\pi$ ;  $50\pi$  rad/m'lik tork ve gerilme uygulanarak ısıtılma tabi tutulup, bobinsiz fluxgate ölçümleri alınmıştır. Bazı numunelerde M-H ölçümleri de alınmıştır. Son olarak hassasiyet hesabı yapılmıştır.

### 4.2.1. Co<sub>67</sub>Fe<sub>4</sub>Mo<sub>1,5</sub>Si<sub>16,5</sub>B<sub>11</sub> numunesinin M-H ölçümleri

Öncelikle numunenin M-H eğrilerine bakılmıştır. Isıl işlem görmemiş numunenin M-H eğrisi Şekil 4.32'de verilmiştir. Koersivite değeri 1.47 A/m olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.33'de 400 MPa stres, 720 mA akım altında 15 dakika ısıtılma işlem ve  $12.5\pi$  rad/m'lik tork uygulanmış Co<sub>67</sub>Fe<sub>4</sub>Mo<sub>1,5</sub>Si<sub>16,5</sub>B<sub>11</sub> numunesinin M-H eğrisi verilmiştir. Koersivite değeri 9.36 A/m olarak hesaplanmıştır. Isıl işlem görmemiş numune yaklaşık olarak  $\pm 25$  A/m bölgesinde dış manyetik alana duyarlı iken, ısıtılma işlem gören bazı numunelerin yaklaşık  $\pm 150$  A/m bölgesinde dış manyetik alana duyarlı olduğu görülmektedir. Numunenin hassas olduğu dış manyetik alan aralığının oldukça arttığı söylenebilir. Ayrıca koersivite değerinin artmasıyla malzemede, ısıtılma işlemine bağlı, bir anizotropi oluştuğunu da söylemek mümkündür.



Şekil 4.32. Isıl işlem görmemiş numunenin M-H eğrisi ve koersivite değeri

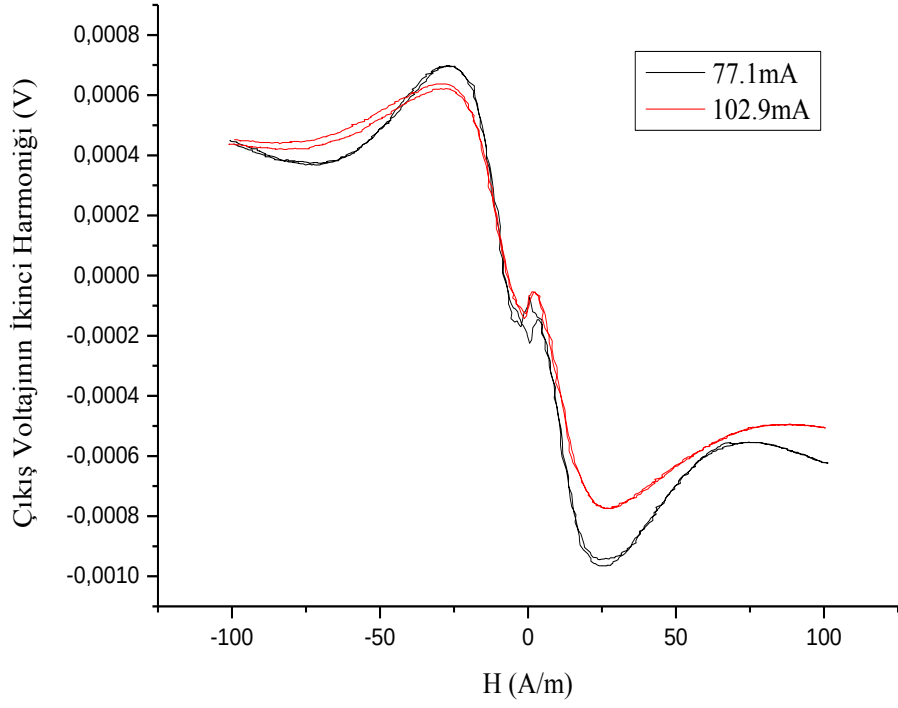


Şekil 4.33. 400 MPa stres, 720 mA akım altında 15 dakika ısıtılma ve 180 derece torsion uygulanmış  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$  amorf şeridinin M-H eğrisi ve koersivite hesabı

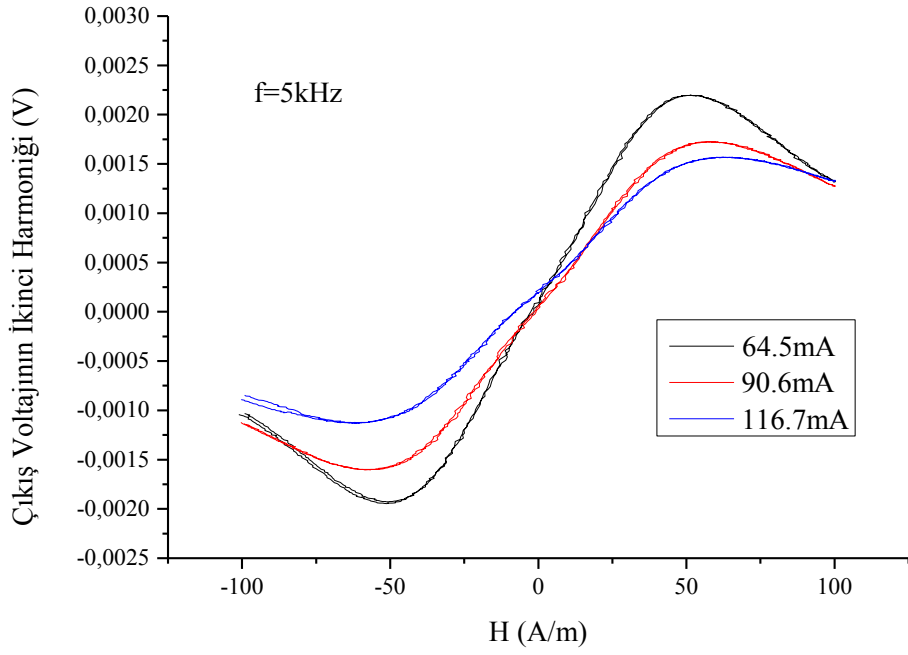
#### 4.2.2. $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ numunesinin fluxgate ölçümleri

Şekil 4.34'te ısıtılma işlemi görmemiş numunenin bobinsiz fluxgate eğrisi görüldüğü gibi doğrusal bir çıkış vermemektedir ve ayrıca eğride bir histeris vardır. Bu durumun sistemde bir dairesel anizotropinin bulunmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca numunenin dairesel yönde doyuma gitmediği düşünülmektedir.

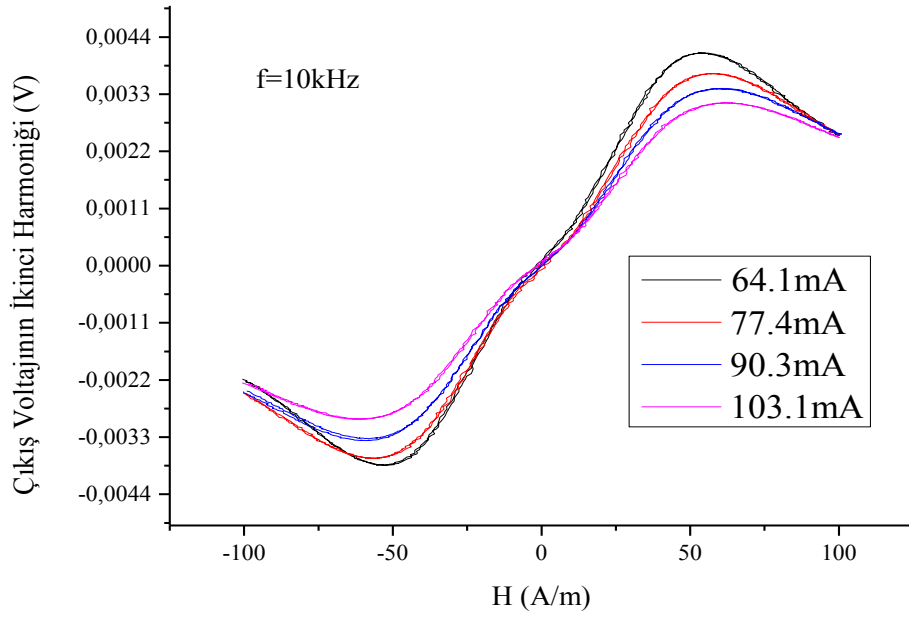
Şekil 4.35, 720 mA akım ve  $12.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında ısıtılma işlemi tutulan numunenin fluxgate ölçüm grafikleridir. Tork uygulamanın, helisel yöndeki anizotropi bileşenini; gerilme uygulamanın ise dairesel yöndeki anizotropi bileşenini artırdığı düşünülmektedir. Ancak hassasiyet artmış olmasına rağmen sistemde hala bir doğrusallık gözlenmemiştir.



Şekil 4.34. Isıl işlem görmemiş numunenin elde edilen 30 kHz’de fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



Şekil 4.35. 720 mA akım ve  $12.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri

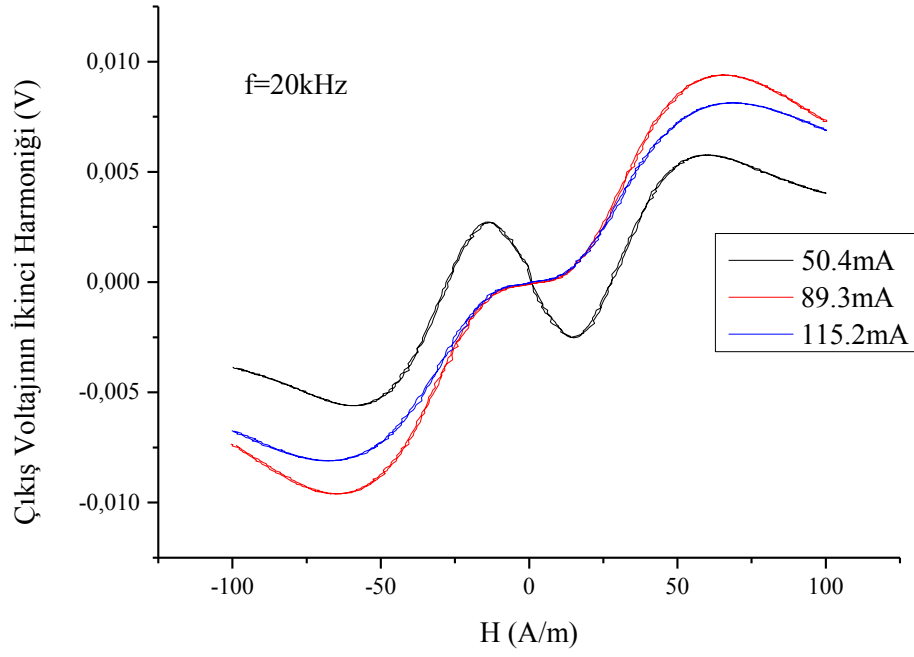


Şekil 4.36. 720 mA akım ve  $12.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri

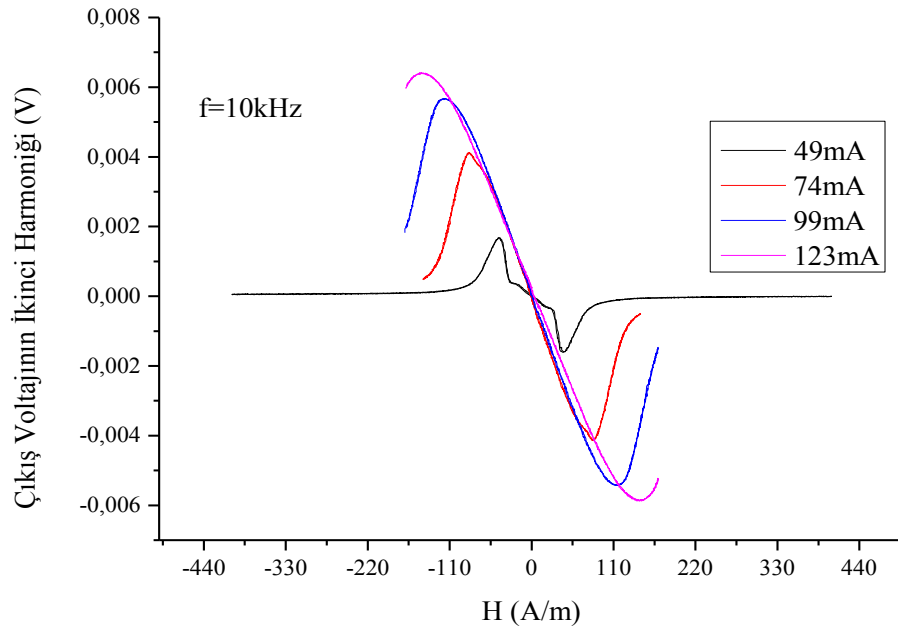
Şekil 4.36’da frekansın artmasıyla, hassasiyet artarken doğrusallık azalmaya başlamıştır. Bu durumda, numunenin dairesel yönde doyuma götürülemediği düşünülmektedir.

Şekil 4.37’de ise yüksek frekanslarda doğrusallık tamamen kaybolmuştur. Numunede, dairesel yöndeki anizotropi bileşeninin çok artması artması sonucunda helisellik azalmıştır.

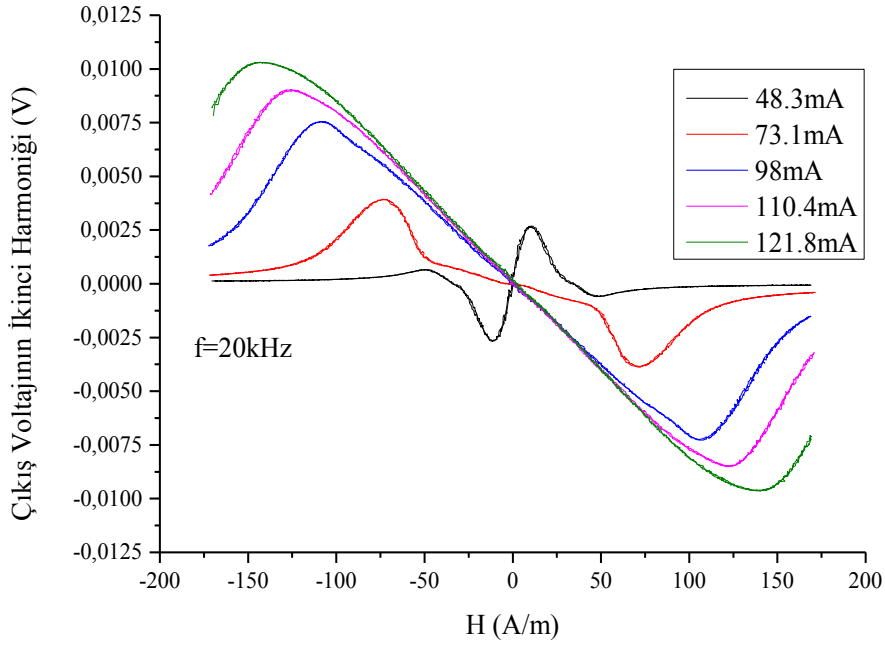
Şekil 4.38’de, numuneye ısıtıl işlem sırasında 720 mA akım, 400 MPa gerilme ve  $25\pi$  rad/m tork; ölçüm sırasında ise  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanmıştır. 123 mA akım değeri için yaklaşık  $\pm 100$  A/m bölgesinde doğrusal bir grafik elde edilmiştir. Ancak frekans düşük olduğu için hassasiyet te görece düşüktür.



Şekil 4.37. 720 mA akım ve  $12.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri



Şekil 4.38. 720 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

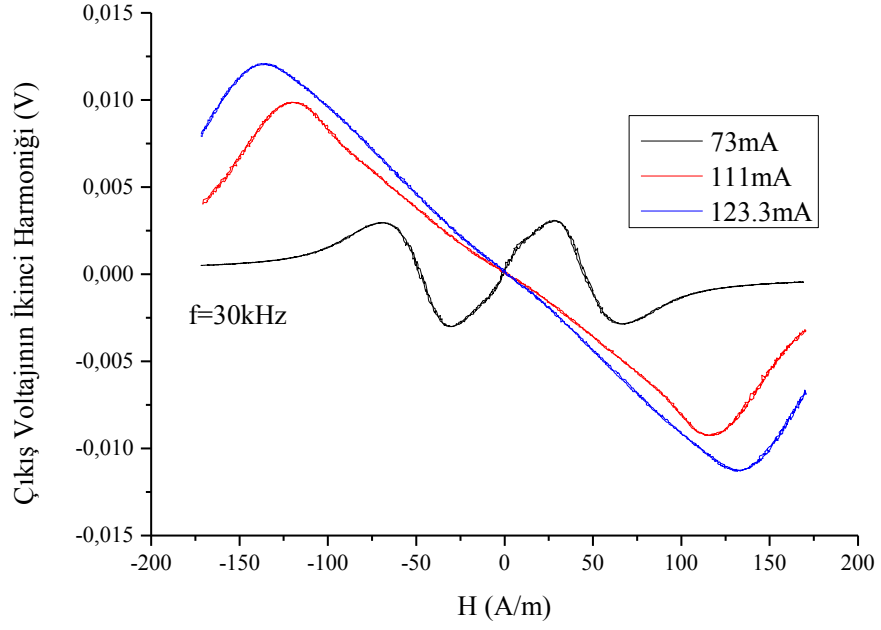


Şekil 4.39. 720 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

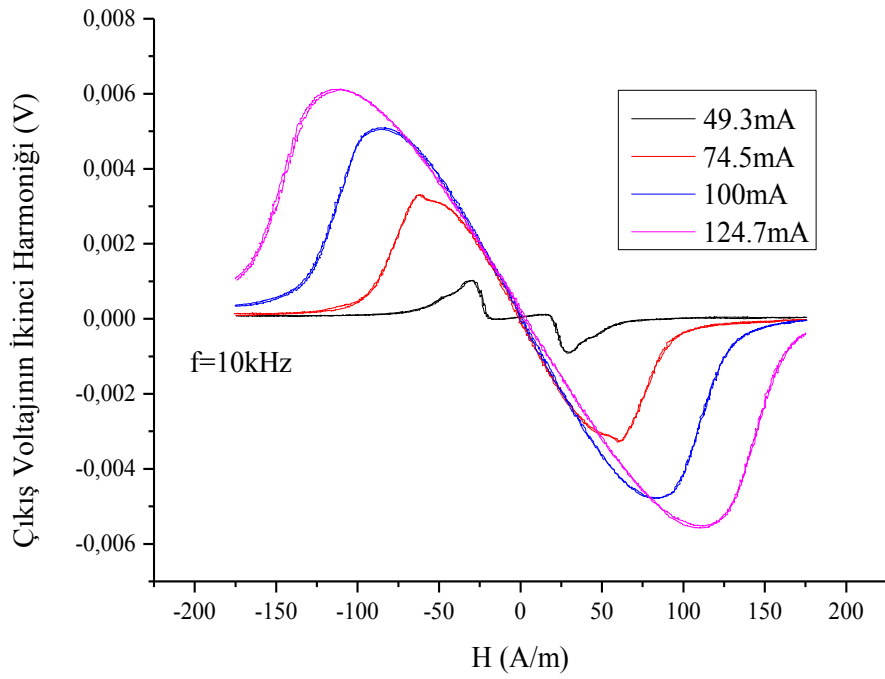
Şekil 4.39’da numuneye ısıtıl işlem sırasında 720 mA akım, 400 MPa gerilme ve  $25\pi$  rad/m tork; ölçüm sırasında ise  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanmıştır. 123 mA akım değeri için yaklaşık  $\pm 100$  A/m bölgesinde doğrusal bir grafik elde edilmiştir. Ancak frekans düşük olduğu için hassasiyet te görece düşüktür.

Şekil 4.40’ta, aynı numunenin 30 kHz frekans değerleri için alınan fluxgate ölçüm verileri gösterilmektedir. Frekansın artmasıyla doğrusal bölge gözlenmemiştir. Bunu sebebi olarak, bu frekans değerinde numunenin dairesel olarak doyuma gitmemesi gösterilebilir.

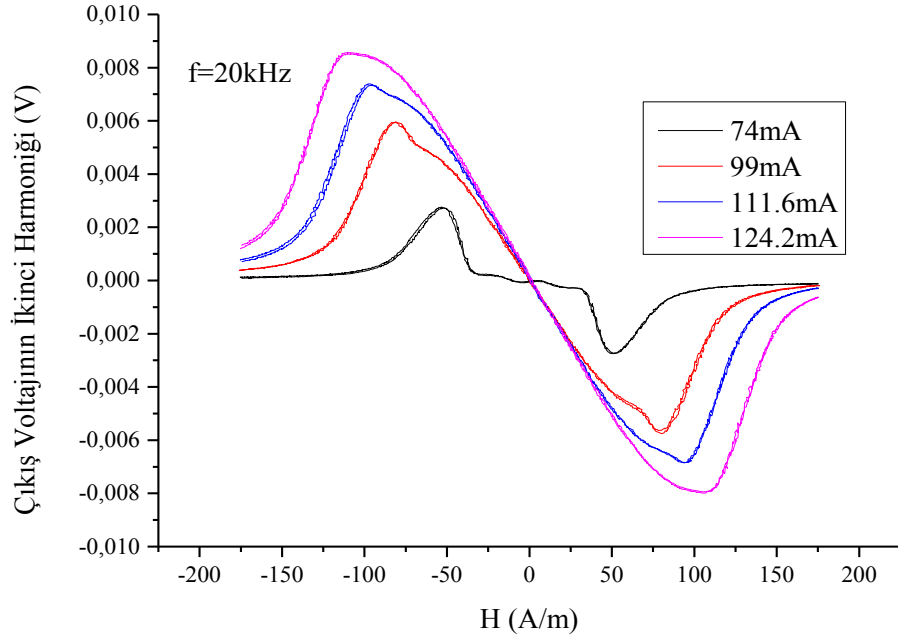
Şekil 4.41’de numuneye ölçüm sırasında  $33\pi$  rad/m tork uygulanmıştır. Tork değerinin artması ile düşük frekans değeri için bile bir doğrusal bölge elde edilmiştir. Bu durum helisel anizotropinin artması ile açıklanabilir.



Şekil 4.40. 720 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri



Şekil 4.41. 720 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

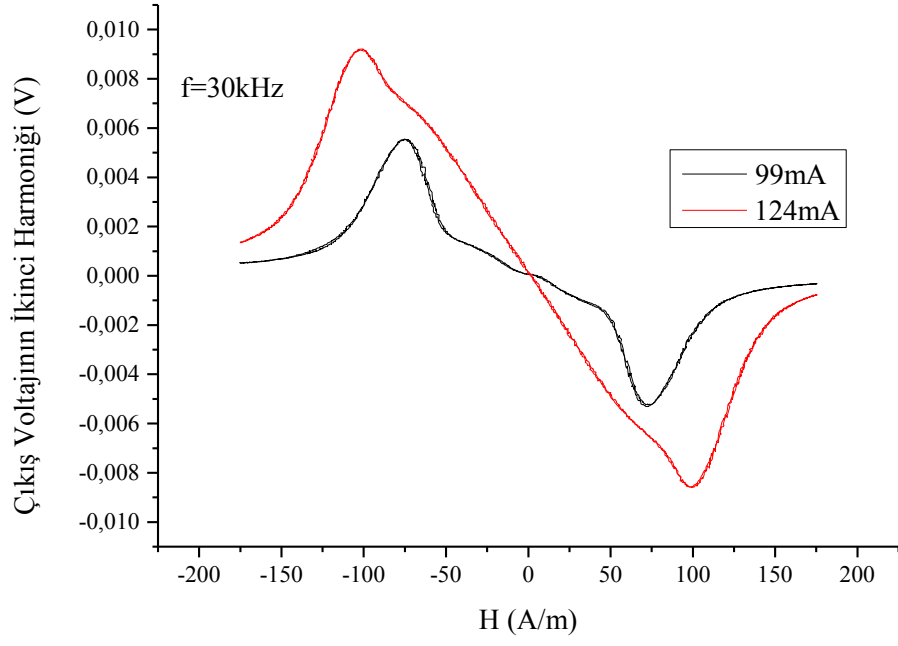


Şekil 4.42. 720 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

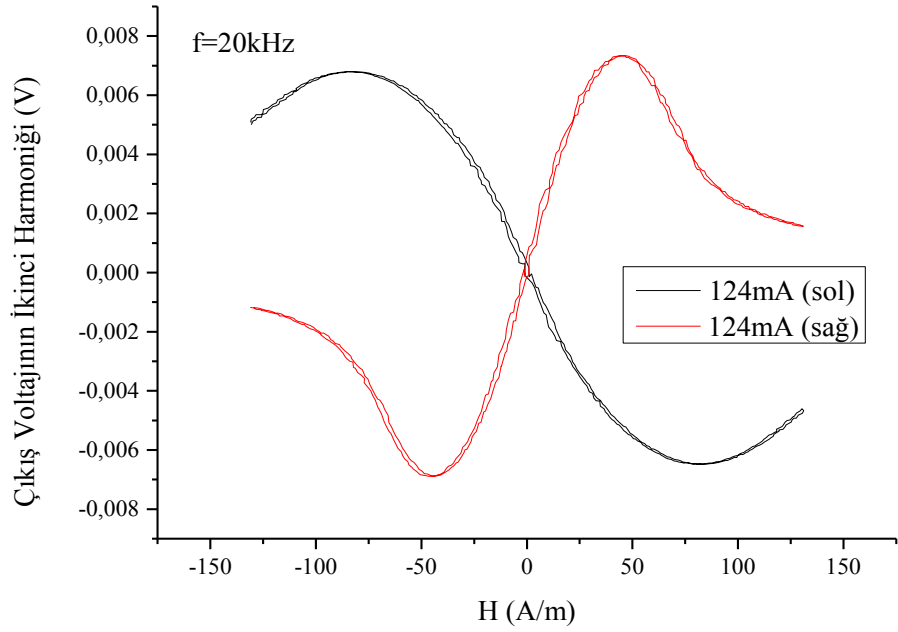
Şekil 4.42’de frekansın 20 kHz değerine artırılması ile hassasiyet artmıştır. Özellikle 124.2 mA akım değerinde, yaklaşık  $\pm 50$  A/m aralığında iyi bir doğrusal değişim gözlemlenmiştir.

Şekil 4.43’te frekans 30 kHz değerine arttırılmıştır. Ancak doğrusal bölgede bir azalma söz konusudur. Yaklaşık  $\pm 25$  A/m aralığında bir doğrusal değişimden söz edilebilir.

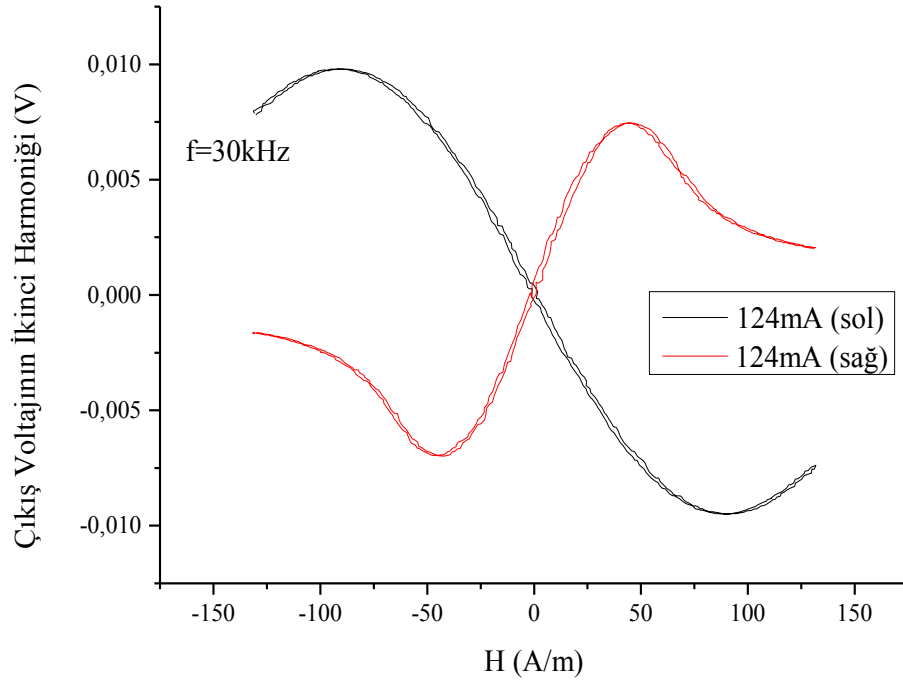
Şekil 4.44’te 720 mA akım ve  $12.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, sağa ve sola  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri gösterilmektedir. Her iki yön için de yaklaşık  $\pm 25$  A/m bölgesinde doğrusal bir değişimden söz etmek mümkündür.



Şekil 4.43. 720 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtılmış işlem görmüş malzemenin,  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri



Şekil 4.44. 720 mA akım ve  $12,5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtılmış işlem görmüş malzemenin, sağa ve sola  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

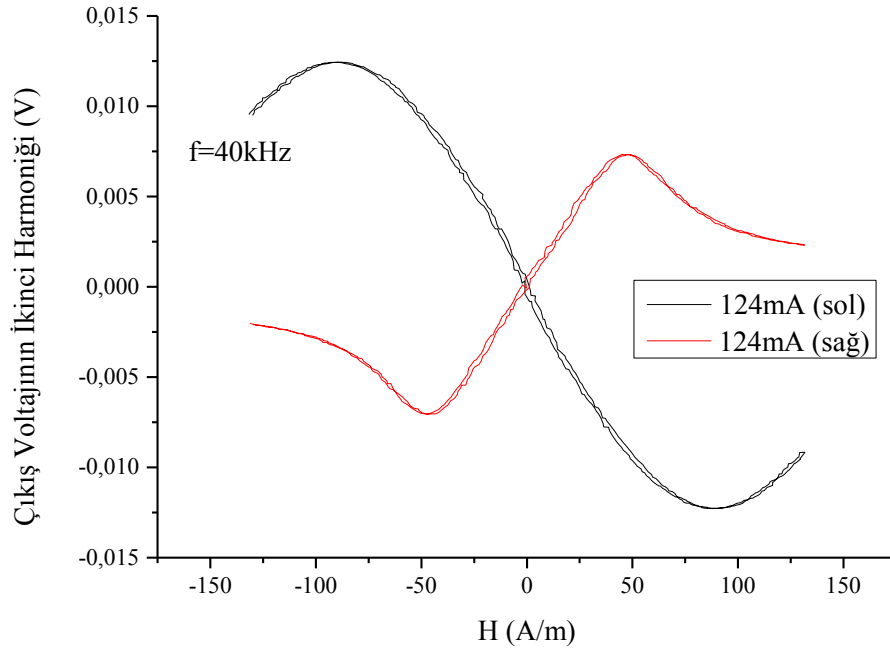


Şekil 4.45. 720 mA akım ve  $12.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sağa ve sola  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

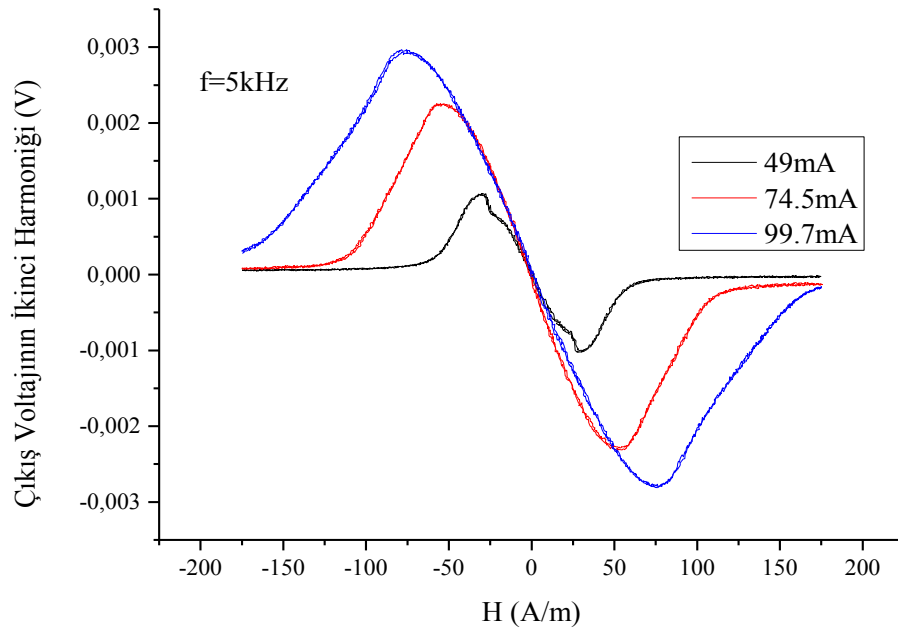
Şekil 4.45'te frekans 30 kHz değerine arttırılmıştır. Isıl işlem sırasında uygulanan torkun yönü ile aynı yönde olan ölçümde hassasiyet artmıştır. Buna ek olarak her iki yönde doğrusal aralık ta artmıştır.

Şekil 4.46'da frekans 40 kHz değerine arttırılmıştır. Isıl işlem sırasında uygulanan torkun yönü ile aynı yönde olan ölçümde hassasiyet artmıştır. Buna ek olarak her iki yönde doğrusal aralık yine artmıştır. Sola doğru tork uygulanan ölçümde doğrusal aralık yaklaşık  $\pm 50$  A/m; sağa doğru tork uygulanan bölgede doğrusal aralık yaklaşık  $\pm 25$  A/m kadar ölçülmüştür. Bu sonuçlardan helisel anizotropinin iyi bir şekilde oluştuğunu söylemek mümkündür.

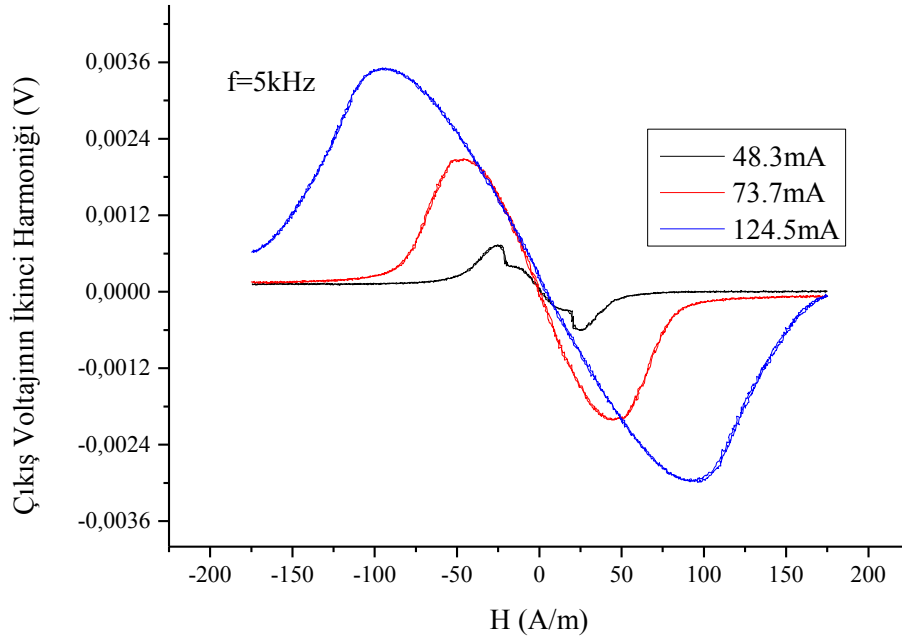
Şekil 4.47'de 720mA akım ve  $37.5\pi$  rad/m tork, 400mPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri verilmiştir. 5 kHz frekansta iyi bir doğrusal bölge elde edilememiştir. Hassasiyet değeri ise düşüktür.



Şekil 4.46. 720 mA akım ve  $12.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin, sağa ve sola  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri



Şekil 4.47. 720 mA akım ve  $37.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

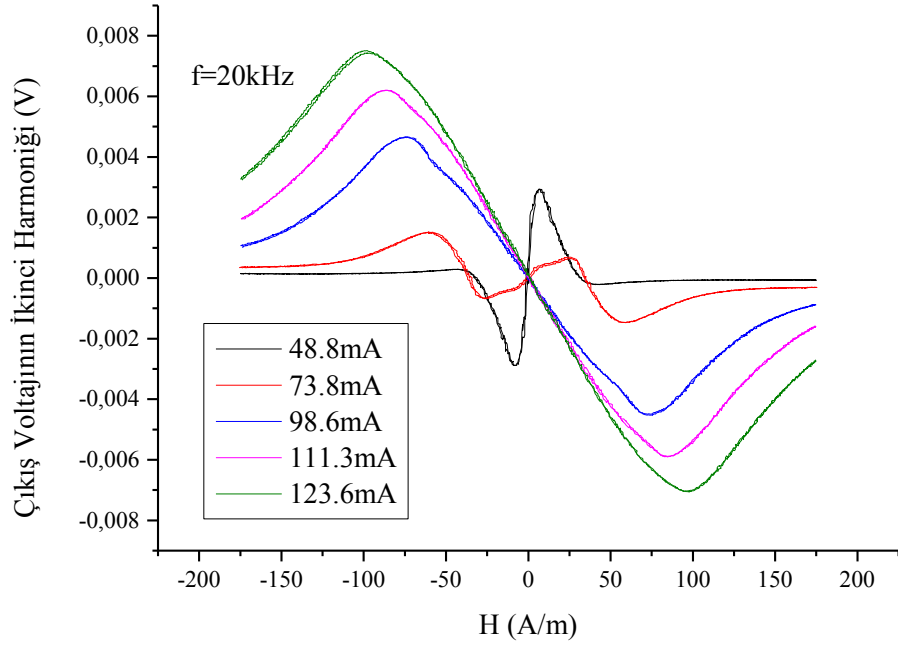


Şekil 4.48. 720 mA akım ve  $37.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

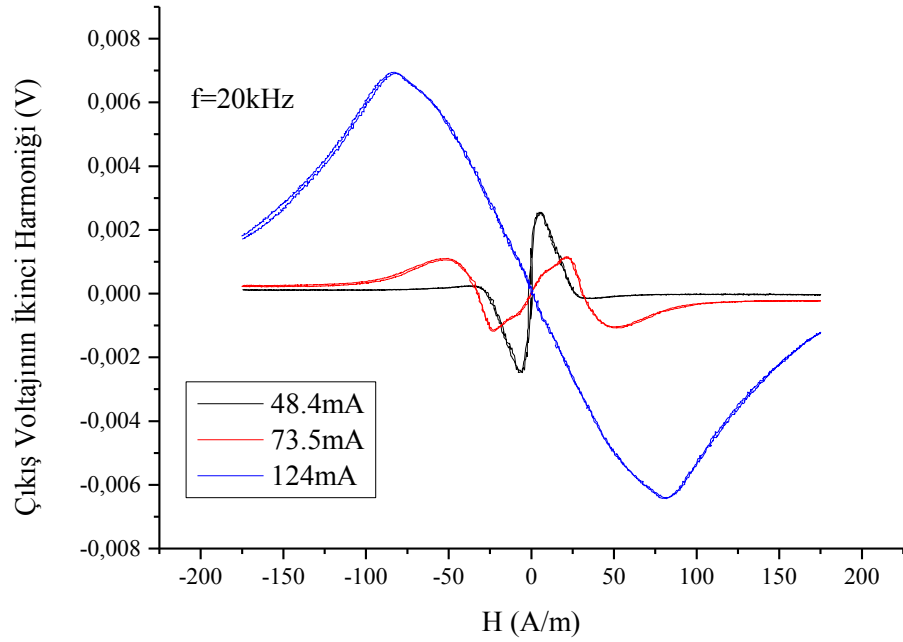
Şekil 4.48’de 5 kHz frekans değeri için akım seviyeleri ve tork arttırılmıştır. Hassasiyet az bir miktar artmış olmasına rağmen hala düşüktür.

Şekil 4.49’da, frekans 20 kHz değerine arttırılmış; ölçüm sırasında uygulanan tork ise  $8.25\pi$  rad/m değerine düşürülmüştür. Numunenin dairesel olarak doyuma gitmesi sayesinde özellikle 123 mA değerinde hassasiyet oldukça artmıştır. Bu akım değeri için  $\pm 50$  A/m civarında doğrusal bir bölge elde edilmiştir.

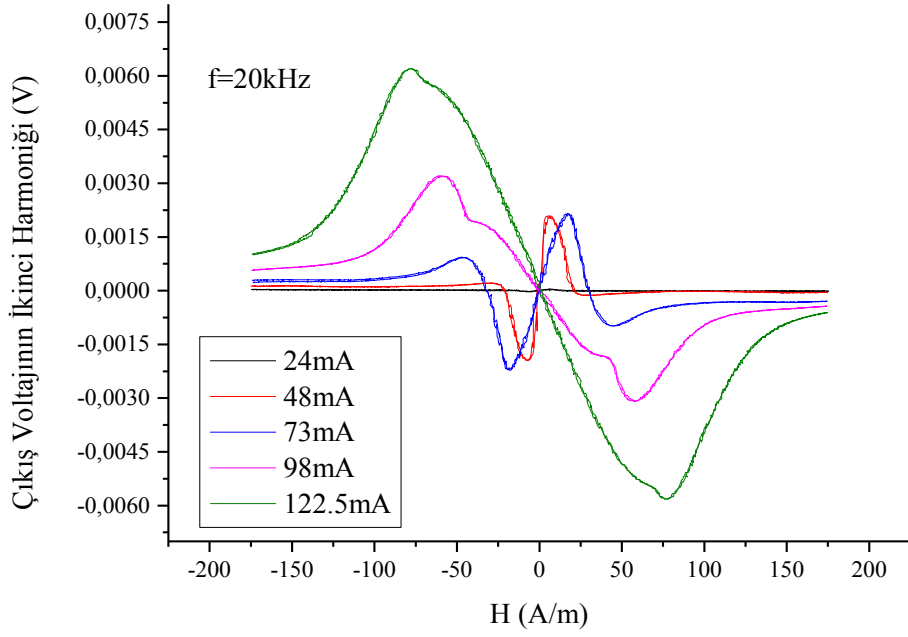
Şekil 4.50’de, ölçüm sırasında uygulanan tork  $16.5\pi$  rad/m değerine arttırılmıştır. 124 mA akım için yaklaşık  $\pm 25$  A/m civarında doğrusal bölge elde edilmiştir. Ancak hassasiyet değerinde gözle görülür bir değişim olmamıştır.



Şekil 4.49. 720 mA akım ve  $37.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $8.25\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri



Şekil 4.50. 720 mA akım ve  $37.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

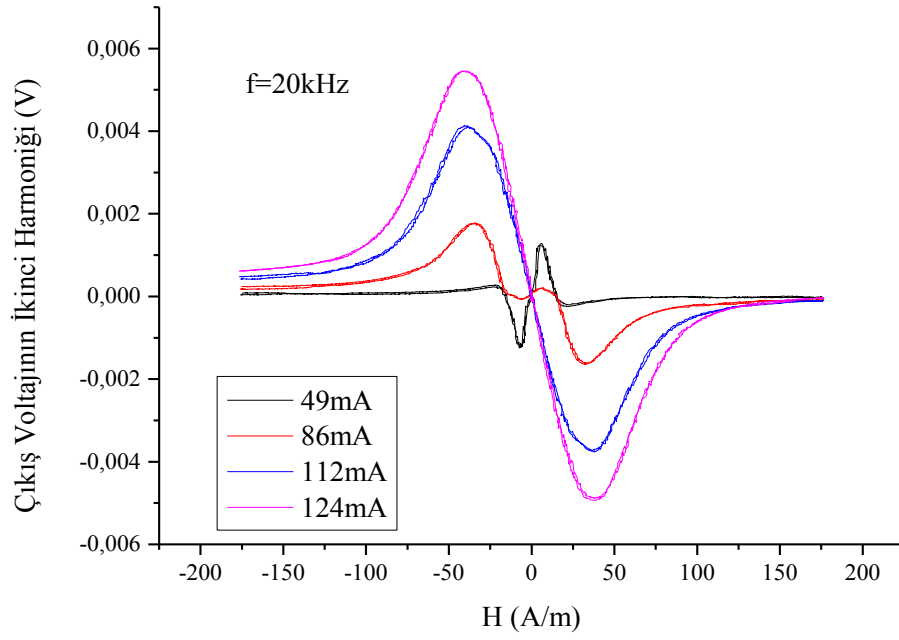


Şekil 4.51. 720 mA akım ve  $37.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri

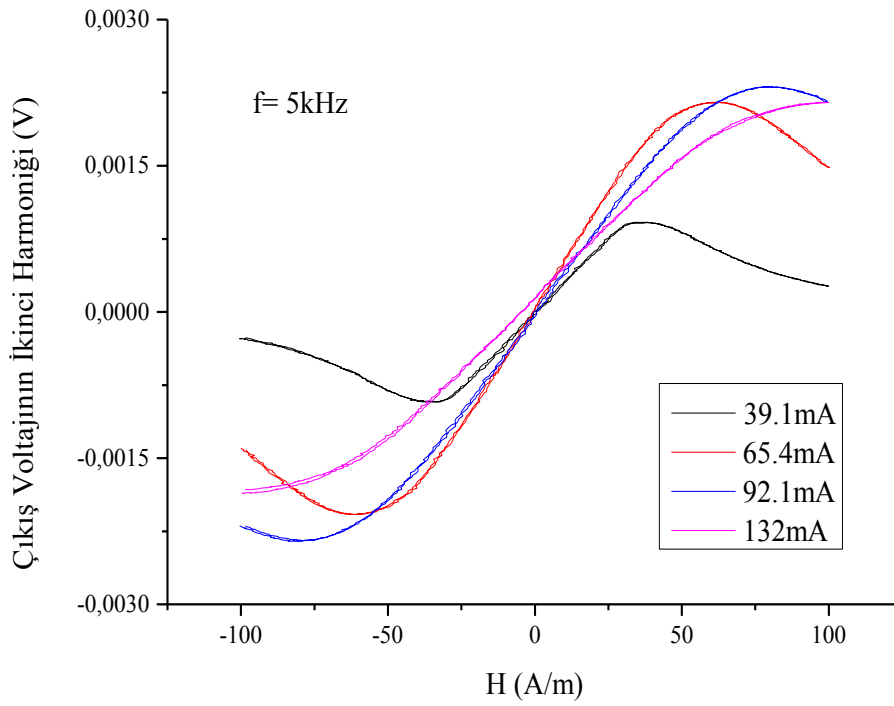
Şekil 4.51’de ölçüm sırasında uygulanan tork  $33\pi$  rad/m değerine arttırılmıştır. Hassasiyetin biraz düştüğü gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak numunede helisel yöndeki anizotropinin artarak, dairesel yöndeki anizotropi değerini azaltması ve sistemin tam olarak doyuma gitmemesi gösterilebilir.

Şekil 4.52’de 720 mA akım ve  $37.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $49.5\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri verilmiştir.

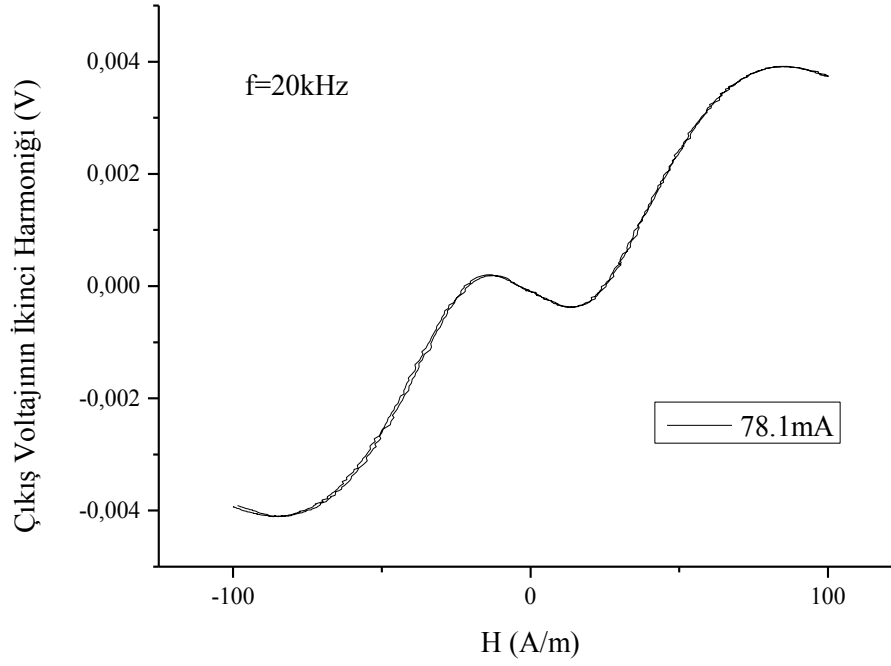
Şekil 4.53’te 780 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri verilmiştir. Frekans 5 kHz olmasına rağmen tüm akım değerlerinde iyi bir doğrusal bölge elde edilmiştir. Hassasiyet, 92.1 mA değerine kadar giderek artmakta; 132 mA akım değeri için ise dairesel anizotropinin, helisel yöndeki anizotropi bileşenin azaltması nedeni ile biraz azalmaktadır. Ancak hassasiyetteki değişim çok düşüktür.



Şekil 4.52. 720 mA akım ve  $37.5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $49.5\pi$  rad/m tork uygulanarak alınan fluxgate ölçümleri



Şekil 4.53. 780 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri



Şekil 4.54. 780 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri

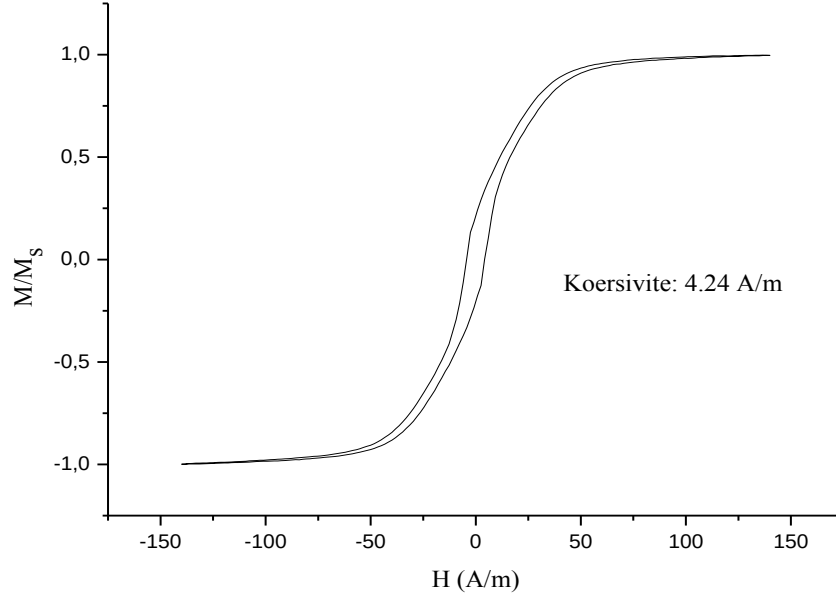
Şekil 4.54'te 780 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin ölçümleri verilmiştir. Frekans 20 kHz değerine arttırılmıştır. Ancak bu frekans değerinde numune dairesel yönde doyuma götürülemediği için doğrusal bir bölge elde edilememiştir.

#### 4.3. $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ Numunesi ile İlgili Ölçümler

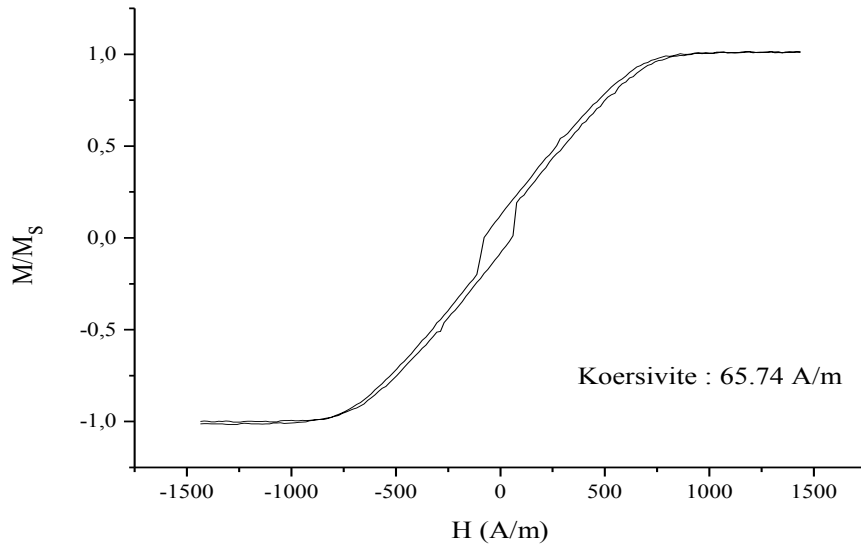
$(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  amorf ferromanyetik tel manyetositriktif özelliği yaklaşık sıfırdır. Tel 128  $\mu\text{m}$  çapındadır. 8 cm uzunluğunda kesilerek; 480, 520, 680 mA'lık akım altında 0 -  $50\pi$  rad/m arası tork ve gerilme uygulanarak ısıtıl işleme tabi tutulup, bobinsiz fluxgate ölçümleri alınmıştır. Bundan başka bazı numunelerin M-H ölçümleri de alınmıştır. Elde edilen sonuçlardan, iyi değişim gösteren numuneler için hassasiyet hesabı yapılmıştır.

#### 4.3.1 $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ numunesinin M-H ölçümleri

Şekil 4.55 ve Şekil 4.56’da ısıt işlem görmemiş ve görmüş numunelerin M-H eğrileri ve koersivite değerleri verilmiştir. Buna göre ısıt işlem koersivite değerini artırmıştır.



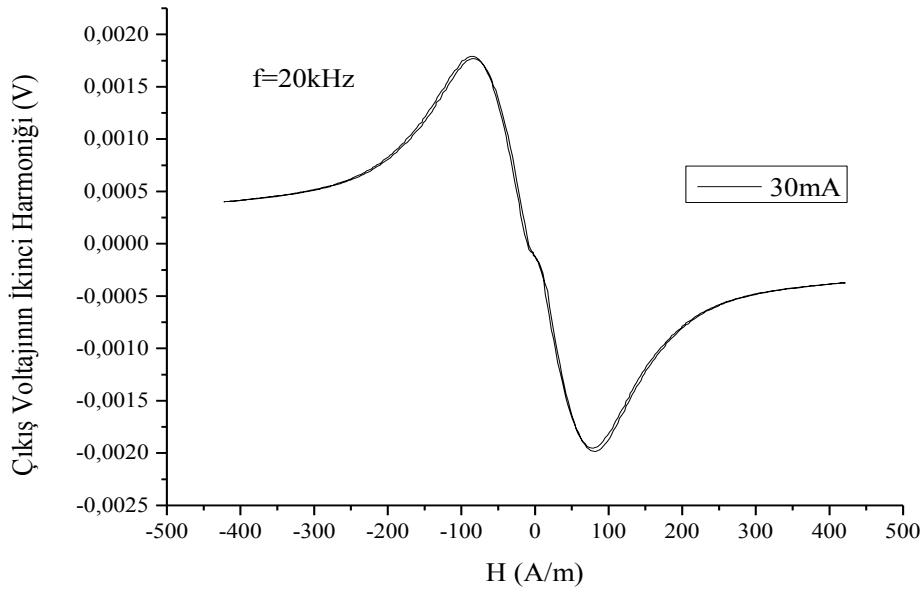
Şekil 4.55. Isıt işlem görmemiş  $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  numunesinin M-H ölçümü



Şekil 4.56. 500MPa gerilme, 450mA akım altında,  $12.5\pi\text{rad/m}$  tork uygulanarak, 15 dakika ısıt işlem görmüş numunenin M-H ölçümü

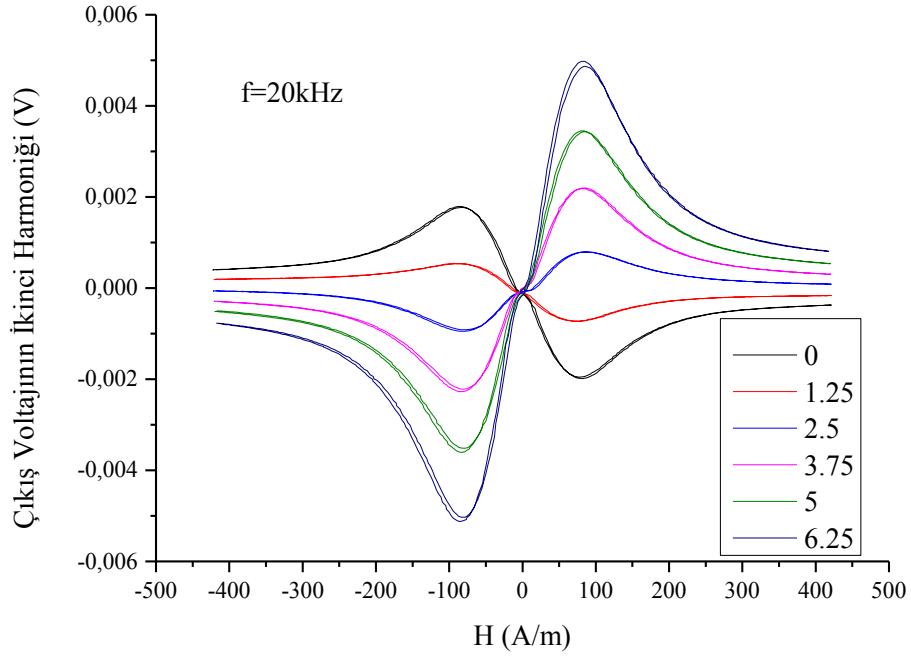
#### 4.3.2. $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ numunesinin fluxgate ölçümleri

Şekil 4.57’de ısıt işlem görmemiş numunenin bobinsiz fluxgate eğrisi verilmiştir. Bu sonuçtan  $\pm 25$  A/m bölgesinde grafiğin doğrusallığının bozulduğu görülmektedir. Bu durumun helisel anizotropinin tam oluşmaması ve düşük akım sebebi ile numunenin tam olarak dairesel yönde doyuma ulaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu bölümde verilen tüm grafiklerde tork değerleri  $\pi\text{rad/m}$  cinsinden verilmiştir.

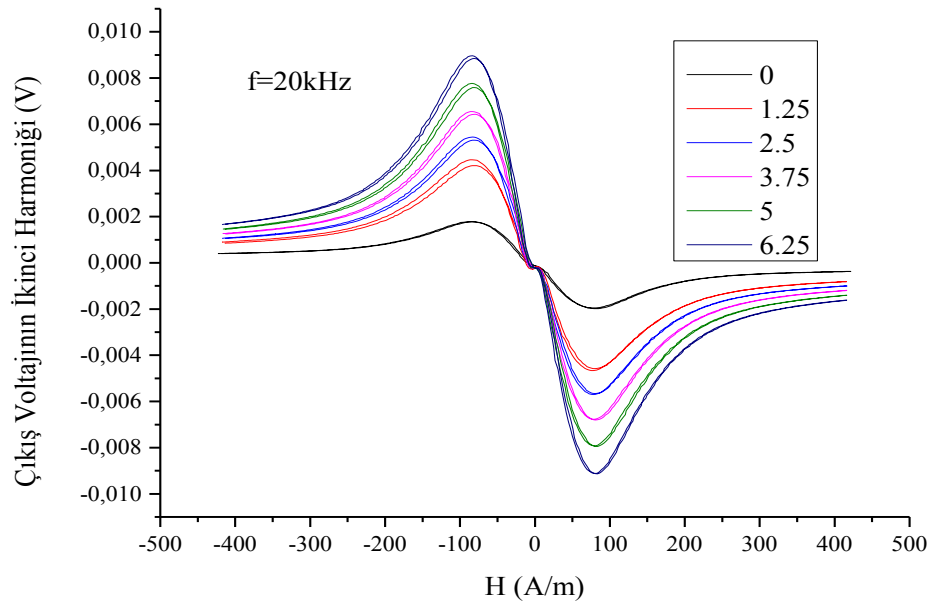


Şekil 4.57. Isıt işlem görmemiş numunenin elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir

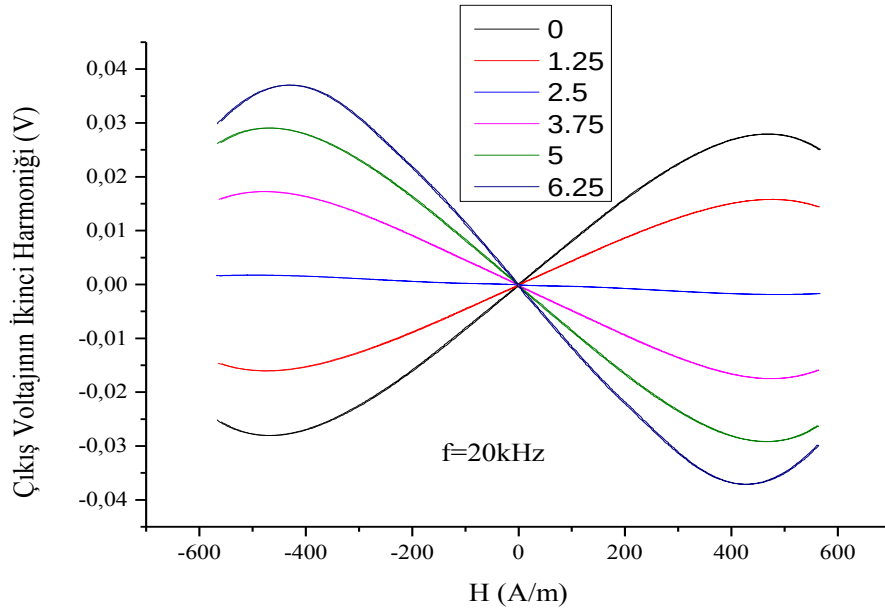
Şekil 4.58 ve Şekil 4.59’da numuneye tork uygulanması sonucu bir helisel anizotropinin oluşturulmasıyla hassasiyetin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak uyarıcı akımın düşük olması sebebiyle numune hala dairesel olarak doyuma ulaşmamış ve doğrusallık oluşmamıştır.



Şekil 4.58. Isıl işlem görmemiş numunenin, 30 mA akım altında, sağa tork uygulanarak elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



Şekil 4.59. Isıl işlem görmemiş numunenin, 30 mA akım altında, sola tork uygulanarak elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir

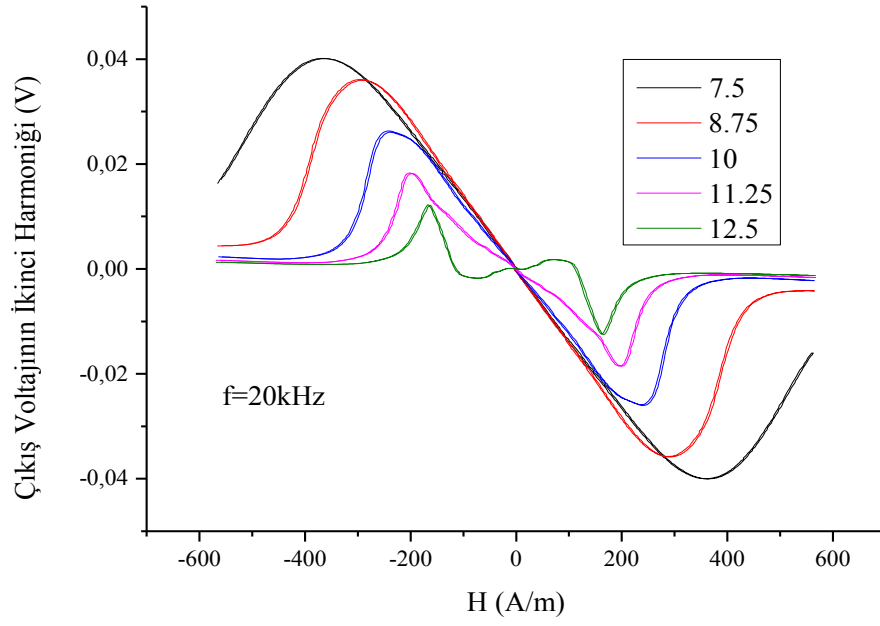


Şekil 4.60. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $3,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş numunenin, 30 mA akım altında sağa tork uygulanarak elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir

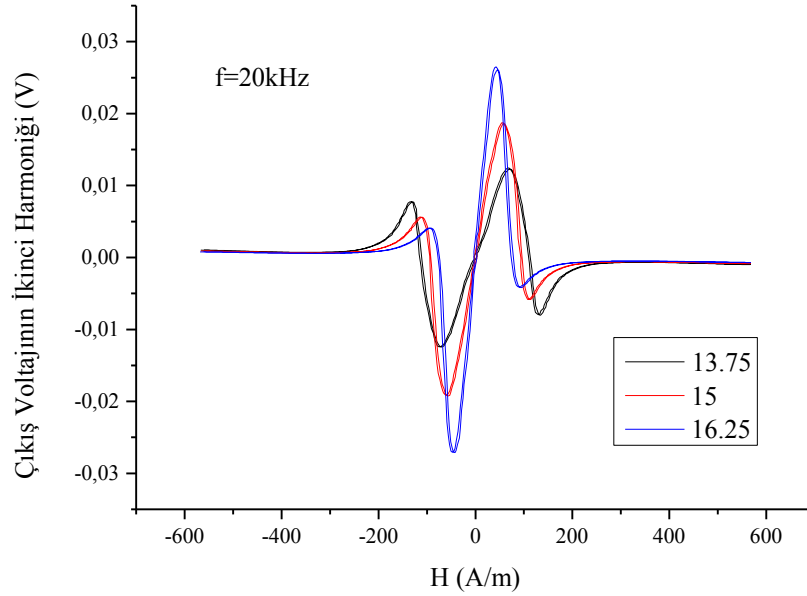
Şekil 4.60'ta tork ve gerilme altında ısıtılma işlemi görmüş numunede helisel ve dairesel manyetizasyonların daha iyi sağlanması sonucunda, düşük akım değerleri için bile, bir doğrusallık sağlanmıştır.

Şekil 4.61 incelendiğinde, tork değerinin artmasıyla sistemdeki helisellik artmıştır. Bu durum hassasiyeti artıracaktır. Tork değerinin daha çok artırılması sonucunda sistemdeki doğrusallık dozuluştur. Bu durumun helisel yöndeki manyetizasyonun artarak, dairesel yöndeki manyetizasyonu azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

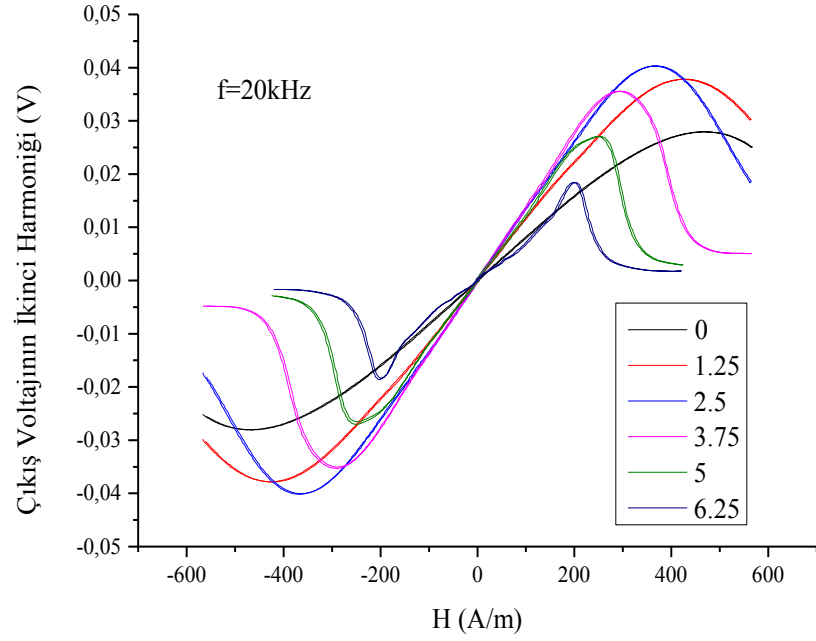
Şekil 4.62'de ise numuneye uygulanan tork daha da artırılmıştır. Bu durumda helisel yöndeki manyetizasyon, dairesel yöndeki manyetizasyonu daha çok azaltmış ve doğrusal bölge büyük oranda kaybolmuştur.



Şekil 4.61. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $3,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 30 mA akım altında, sağa tork uygulanarak elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



Şekil 4.62. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $3,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, sağa tork uygulanarak, 30mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir

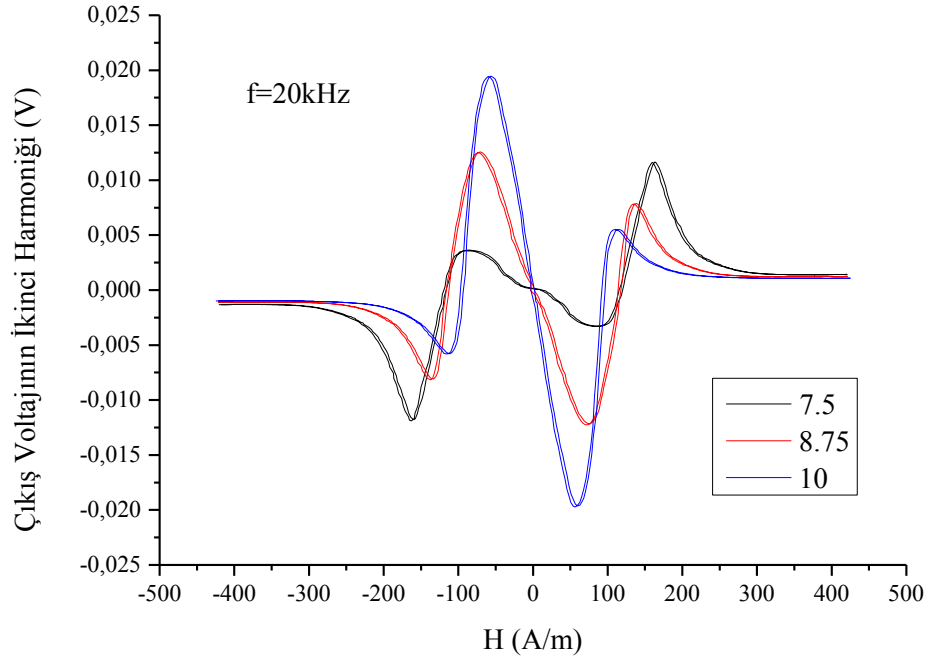


Şekil 4.63. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $3,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, sola tork uygulanarak, 30 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir

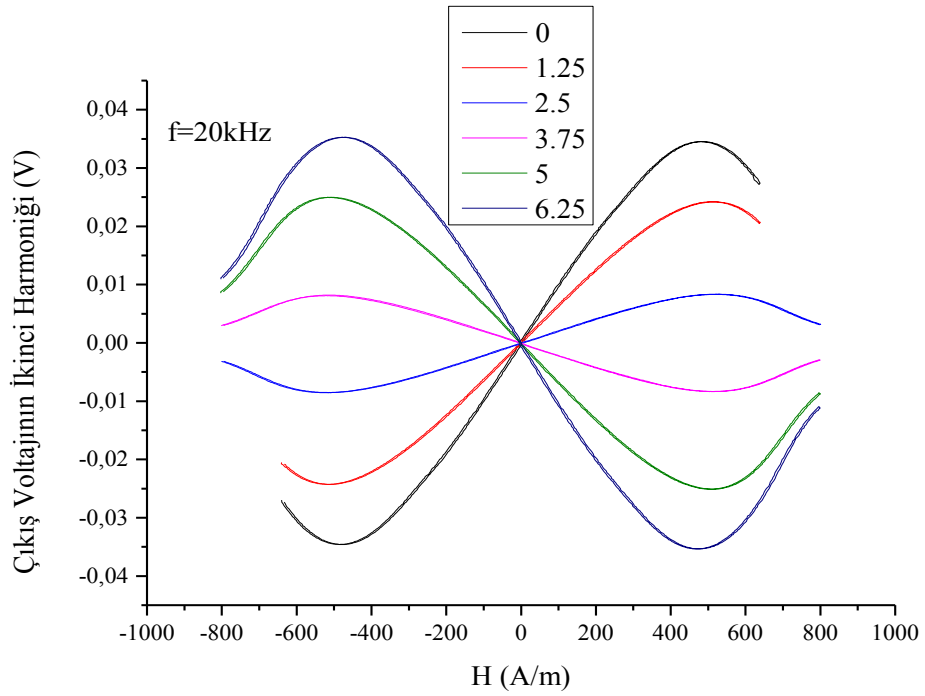
Şekil 4.63 incelendiğinde, uygulanan tork değeri arttıkça helisel anizotropi öne artmış daha sonra azalmıştır. Buna bağlı olarak doğrusal aralık ve hassasiyet te önce artmış ve sonra azalmıştır.

Şekil 4.64'te tork değerinin daha da artmasıyla, helisel anizotropi daha da artmış ve dairesel yöndeki anizotropiyi azaltmıştır. Buna bağlı olarak numunenin hassasiyeti azalmış ve doğrusal bölge büyük oranda kaybolmuştur.

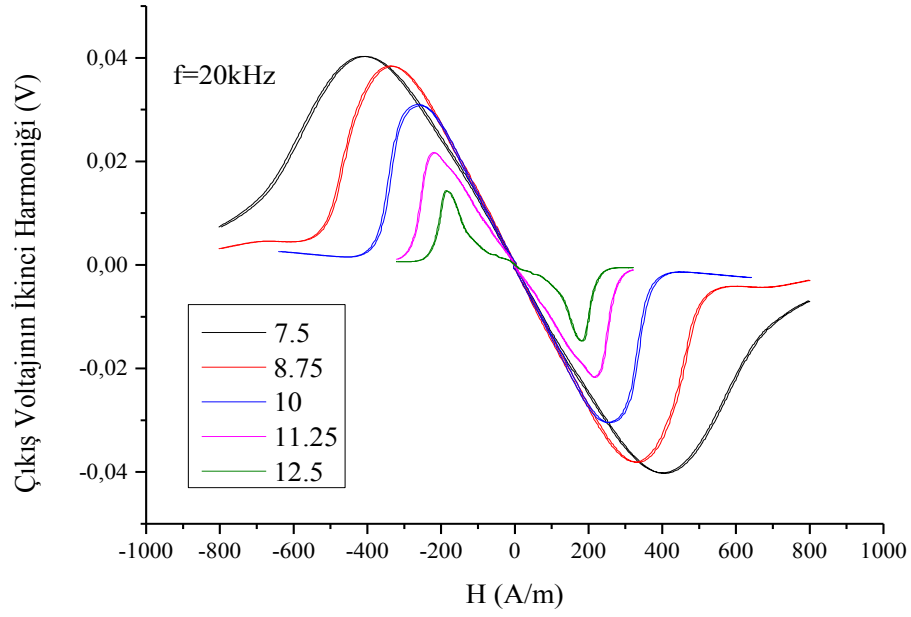
Şekil 4.65'te ise 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $6,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, sağa tork uygulanarak, 30 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir. Tork değerinin artmasıyla doğrusal aralık daha da artmıştır. Özellikle  $6,25\pi$  rad/m tork değeri için geniş bir doğrusal bölge elde edilmiştir.



Şekil 4.64. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $3,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş numunenin, sola tork uygulanarak, 30 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



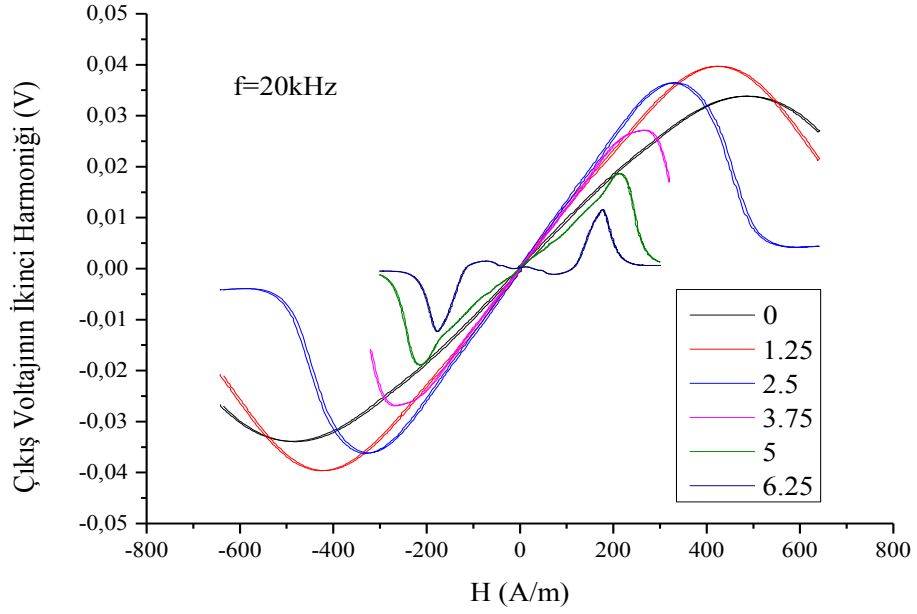
Şekil 4.65. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $6,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş numunenin, sağa tork uygulanarak, 30 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



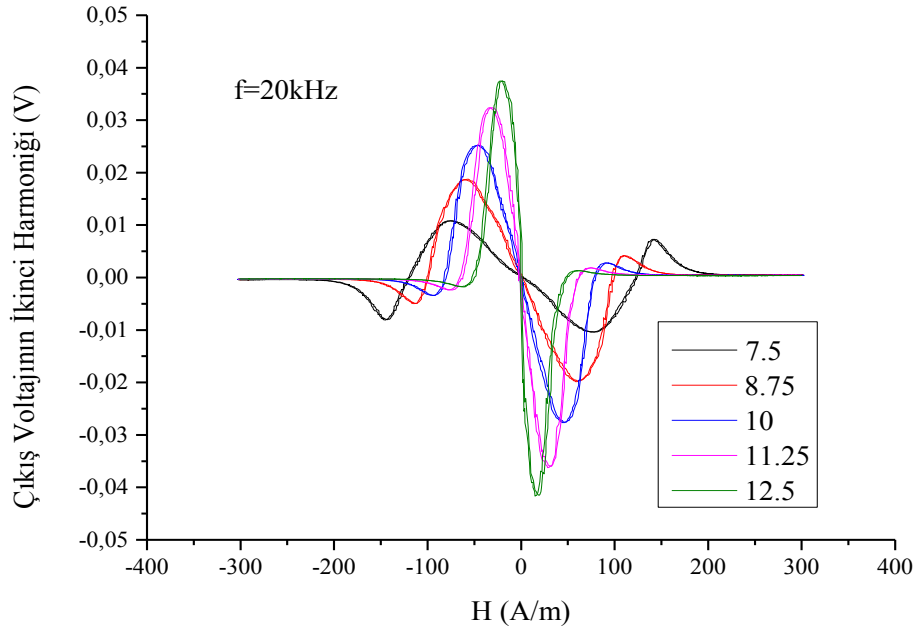
Şekil 4.66. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $6,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtılmış numunenin, sağa tork uygulanarak, 30 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir

Şekil 4.66’da uygulanan tork artırılmıştır. Helisel anizotropinin artmasına bağlı olarak hassasiyet önce artmış, daha sonra azalmıştır.

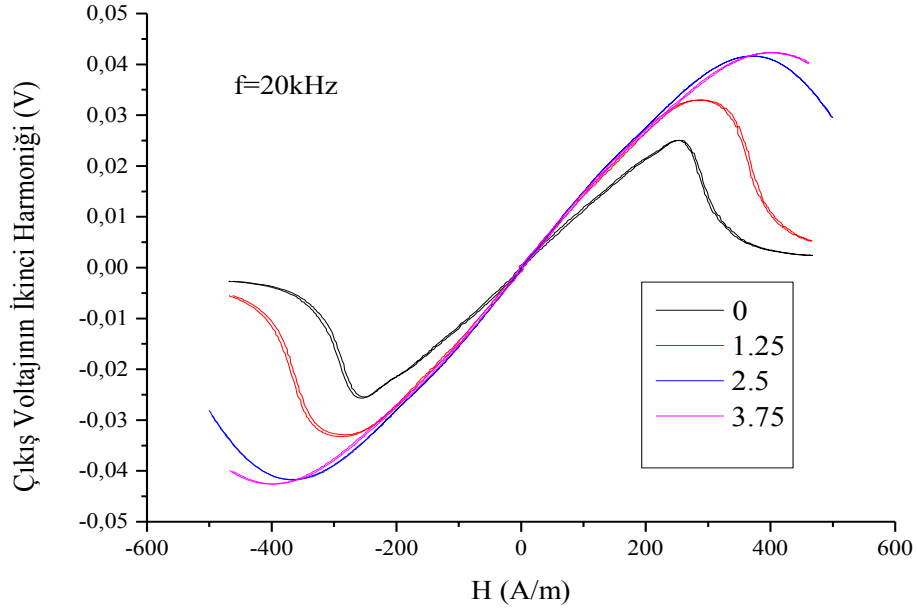
Şekil 4.67 ve Şekil 4.68’de ölçüm sırasında uygulanan tork, sola doğru uygulanmıştır. Hassasiyet önce biraz artmış, daha sonra azalmıştır.  $5\pi$  rad/m’lik tork değerinden sonra doğrusal bölge kaybolmuştur.



Şekil 4.67. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $6.25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, sola tork uygulanarak, 30 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



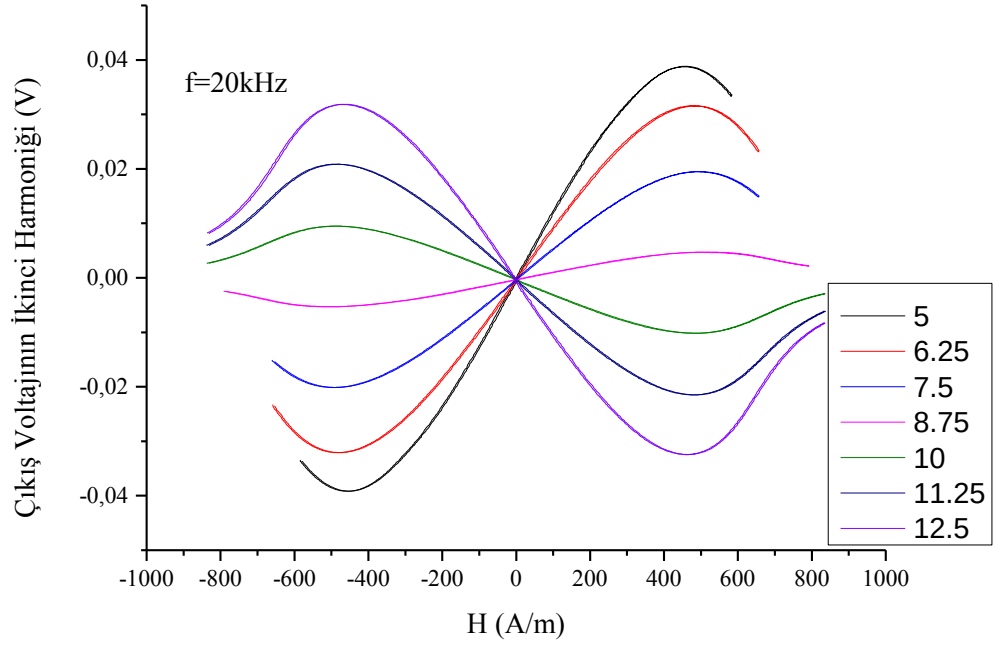
Şekil 4.68. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $6,25\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, sola tork uygulanarak, 30 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



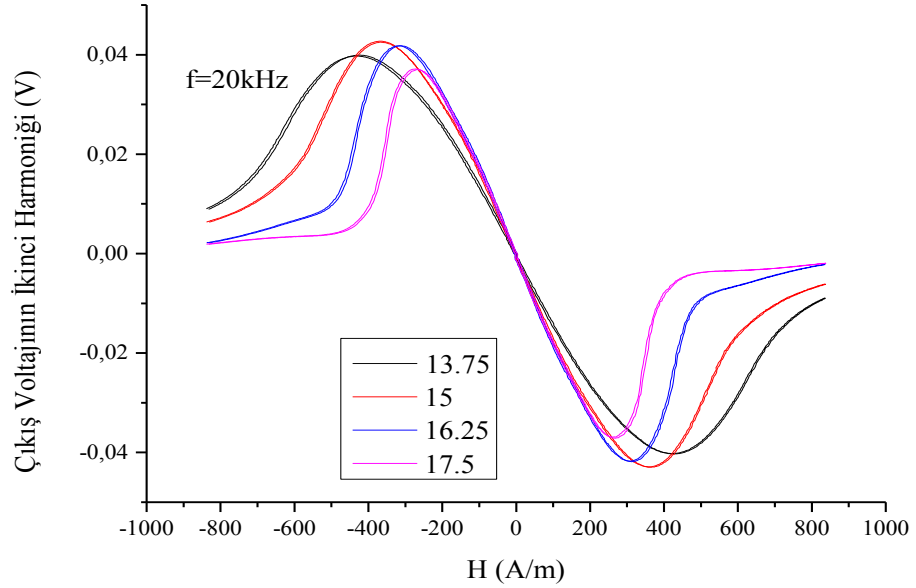
Şekil 4.69. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $12,5\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş numunenin, sola tork uygulanarak, 35 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir

Şekil 4.69’da 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $12,5\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş numunenin, sola tork uygulanarak, 35 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir. Uygulanan torkun artırılması ile iyi bir doğrusal değişim elde edilmiştir. Özellikle  $3.75\pi$  rad/m tork değeri için oldukça yüksek bir hassasiyet değeri elde edilmiştir.

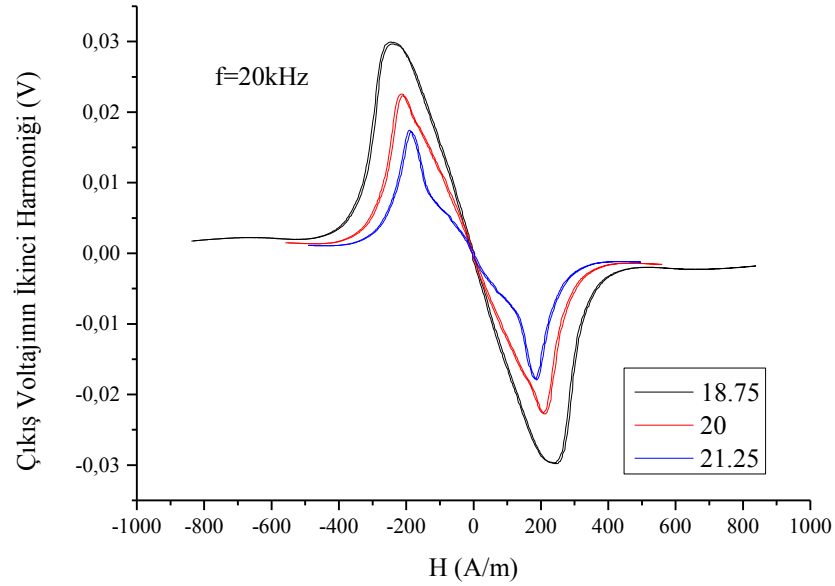
Şekil 4.70 ve Şekil 4.71’de uygulanan tork arttırılmaya devam edilmiştir. Uygulanan bütün tork değerleri için doğrusal bir bölge gözlemlenmektedir. Helisel anizotropinin iyi bir şekilde oluştuğu söylenebilir. Ancak tork artışı ile beraber hassasiyet önce artmış, sonra azalmıştır. Ayrıca Şekil 4.71’de tork arttıkça grafiğin eğimide artmaktadır. Bu durum, numunenin manyetik geçirgenliğinin artışı olarak yorumlanabilir.



Şekil 4.70. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $12,5\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, sola tork uygulanarak, 35 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



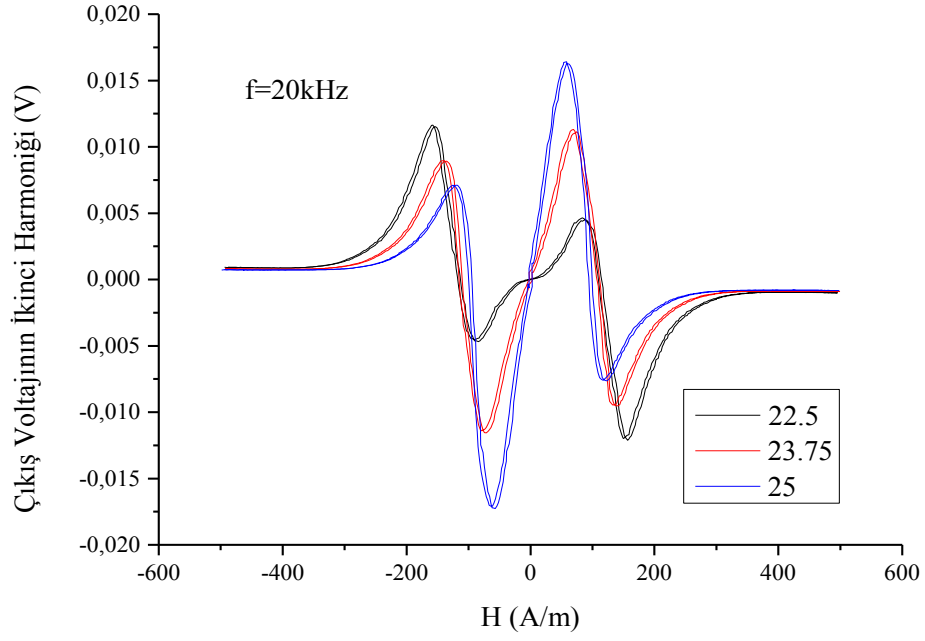
Şekil 4.71. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $12,5\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, sola tork uygulanarak, 35 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



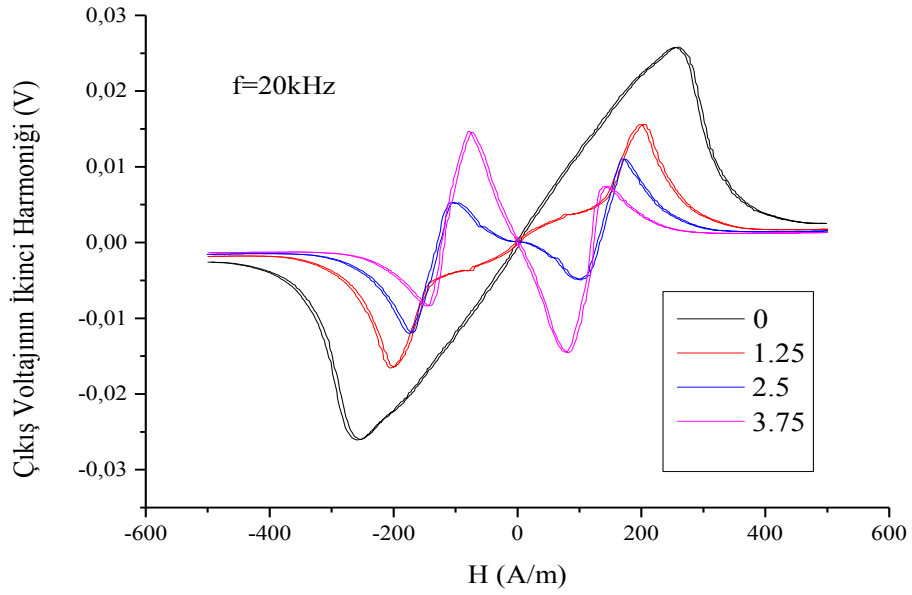
Şekil 4.72. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $12,5\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş numunenin, sola tork uygulanarak, 35 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir

Şekil 4.72 ve Şekil 4.73'te uygulanan tork daha da artırılmıştır. Özellikle  $20\pi$  rad/m değerinden sonra tork, ölçümlere hiçbir katkı yapmamaktadır. Bu tork değerinden sonra doğrusal bölge bozulmuştur.

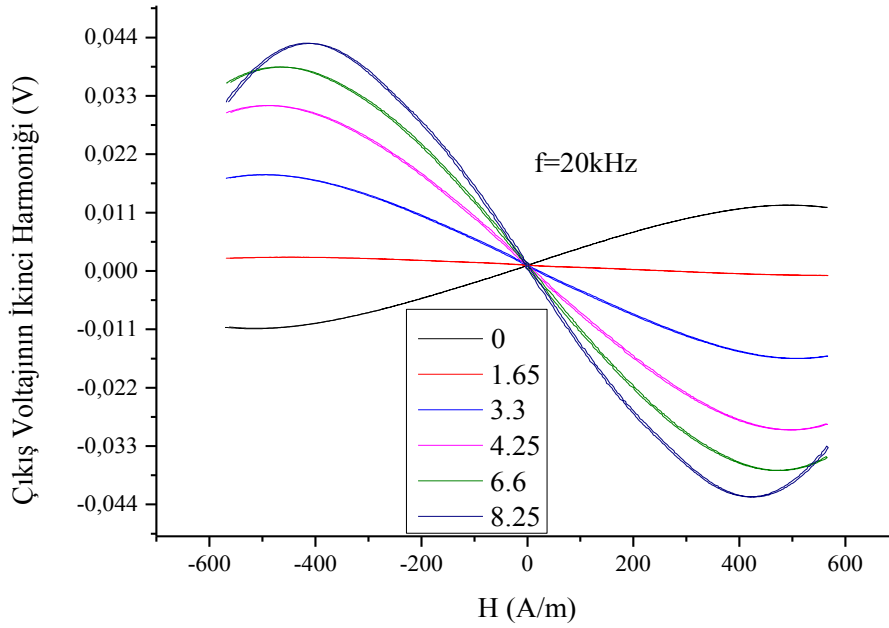
Şekil 4.74'te 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $12,5\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş numunenin, sağa tork uygulanarak, 35mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir. Bu numunede, söz konusu tork değerleri için helisel anizotropi tam olarak oluşmadığından dolayı, doğrusal bir bölge elde etmek mümkün olmamıştır.



Şekil 4.73. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $12,5\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, sola tork uygulanarak, 35 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



Şekil 4.74. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, sağa  $12,5\pi$  rad/m tork uygulanarak, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, sağa tork uygulanarak, 35 mA akım altında elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir

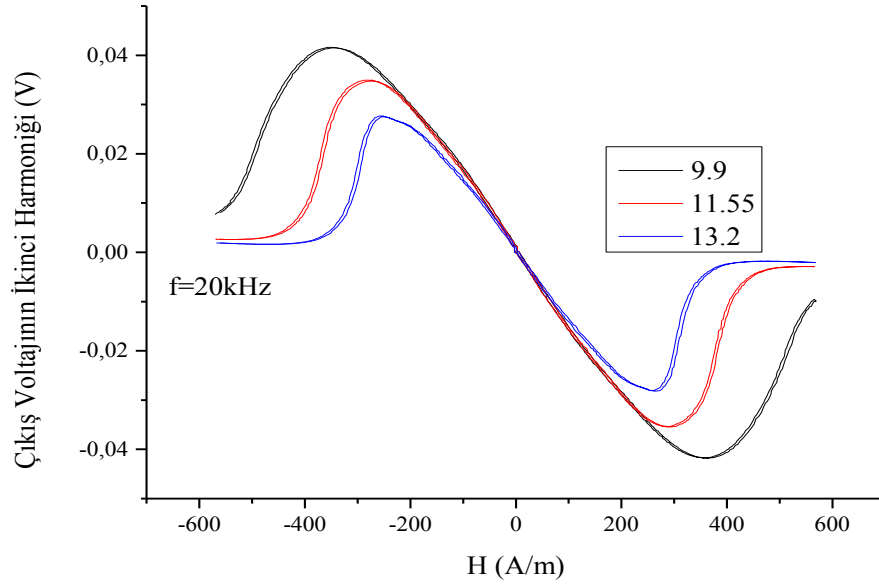


Şekil 4.75. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım altında, sağa tork uygulanıp, -0.02 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir

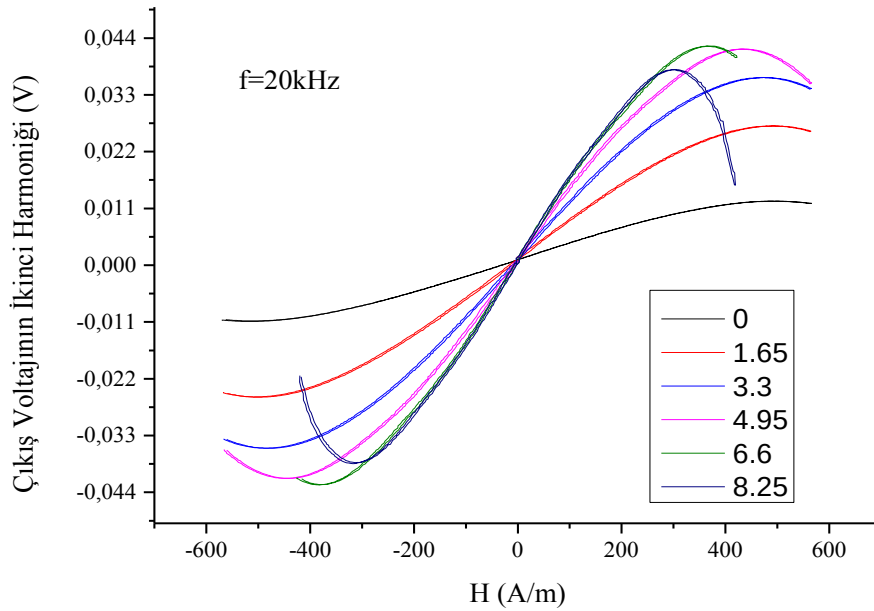
Şekil 4.75'te 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım altında, sağa tork uygulanıp, -0.02 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir. Burada DC offset uygulanmasının nedeni, dış bükülmeye karşı, voltajın ikinci harmonik eğrisi, sıfır değerinde biraz kaymaya uğramaktadır. Bu durumu gidermek için offset uygulanmıştır.  $8.25\pi$  rad/m'lik tork değerinde hassasiyet için iyi bir değişim gözlemlenmiştir.

Şekil 4.76'da tork derecesi artırılmaya devam edilmiştir. Hassasiyet önce artmış, daha sonra azalmıştır.

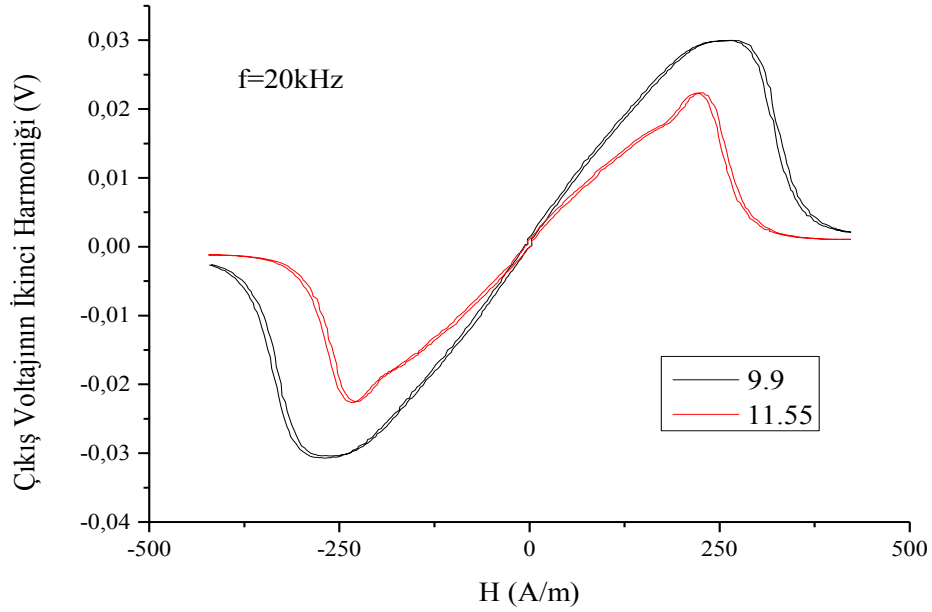
Şekil 4.77'de 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım altında, sola tork uygulanıp, -0.02 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir. Hassasiyet önce artmış, daha sonra azalmıştır.



Şekil 4.76. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım altında, sağa tork uygulanıp, -0.02 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



Şekil 4.77. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım altında, sola tork uygulanıp, -0.02 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir

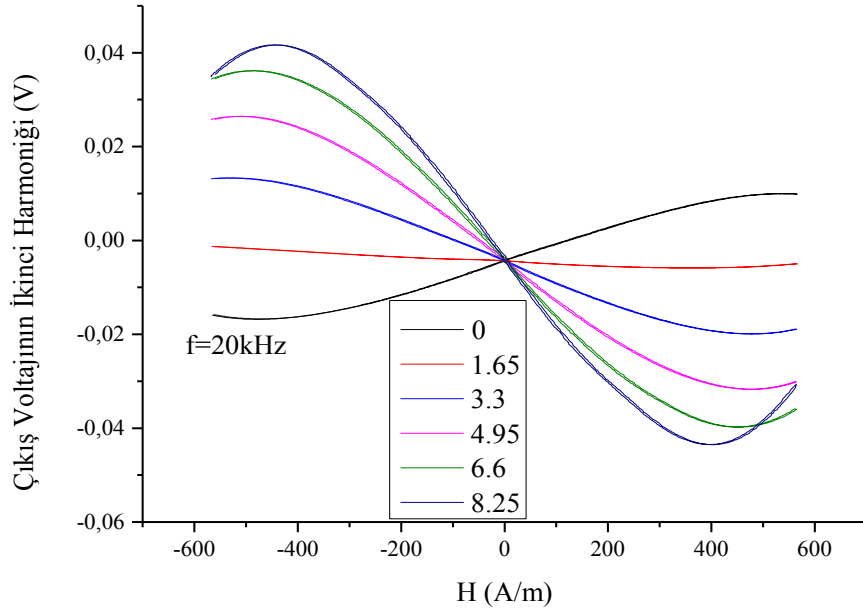


Şekil 4.78. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35mA akım altında, sola tork uygulanıp, -0.02 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir

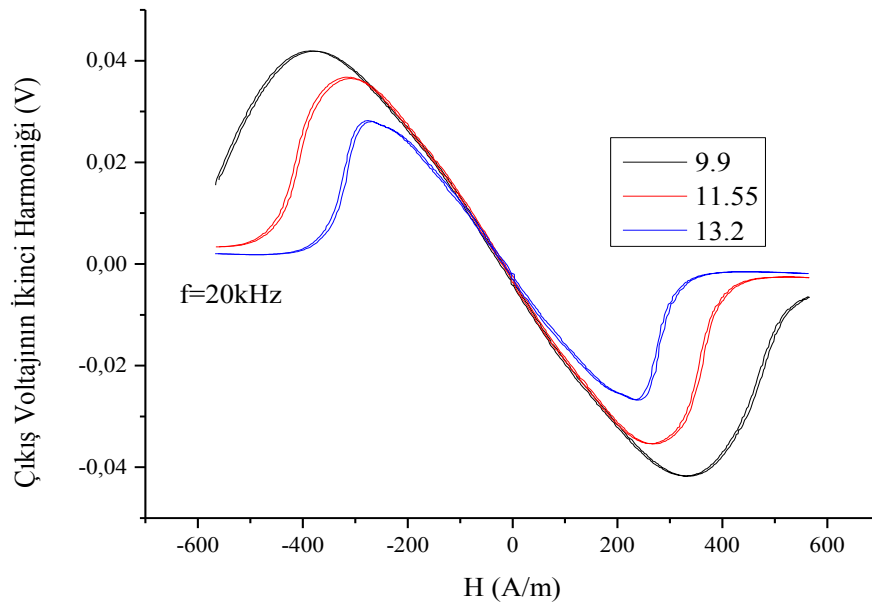
Şekil 4.78’de tork derecesi artırılmaya devam edilmiştir. Hassasiyet önce artmış, daha sonra azalmıştır.

Şekil 4.79’da 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım altında, sağa tork uygulanıp, 0.05 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir. Hassasiyet heliselik arttıkça artmaya devam etmektedir.

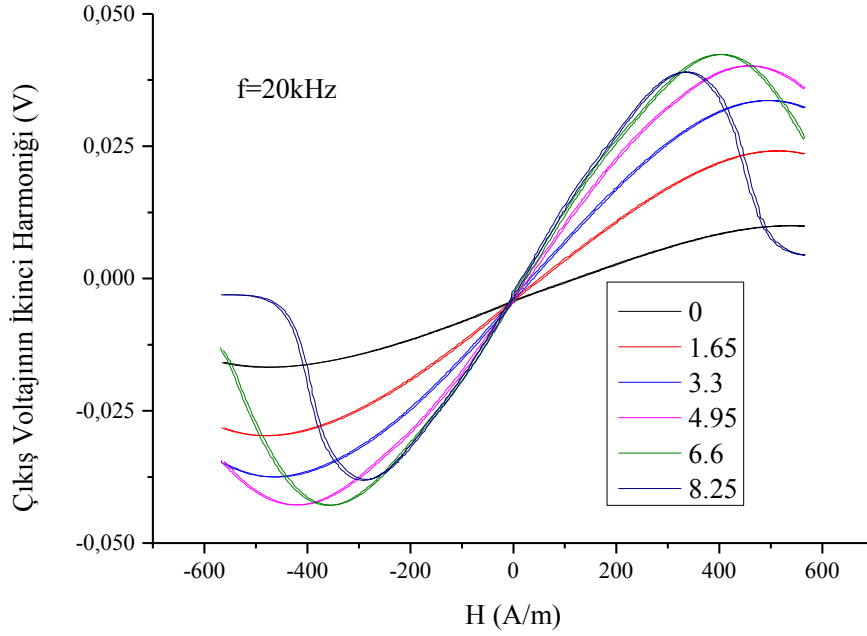
Şekil 4.80’de tork dereceleri daha fazla artırılıp, ölçümler alınmıştır. Tork artıkça, heliseliliğin artıp, dairesel yöndeki bileşeni azaltması sonucunda hassasiyet düşmektedir.



Şekil 4.79. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım altında, sağa tork uygulanıp, 0.05 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



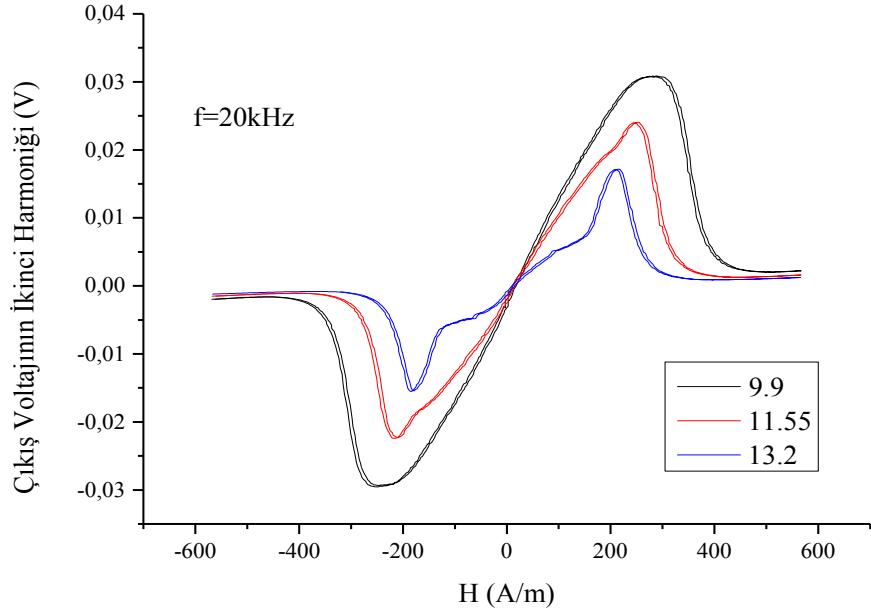
Şekil 4.80. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım altında, sağa tork uygulanıp, 0.05 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



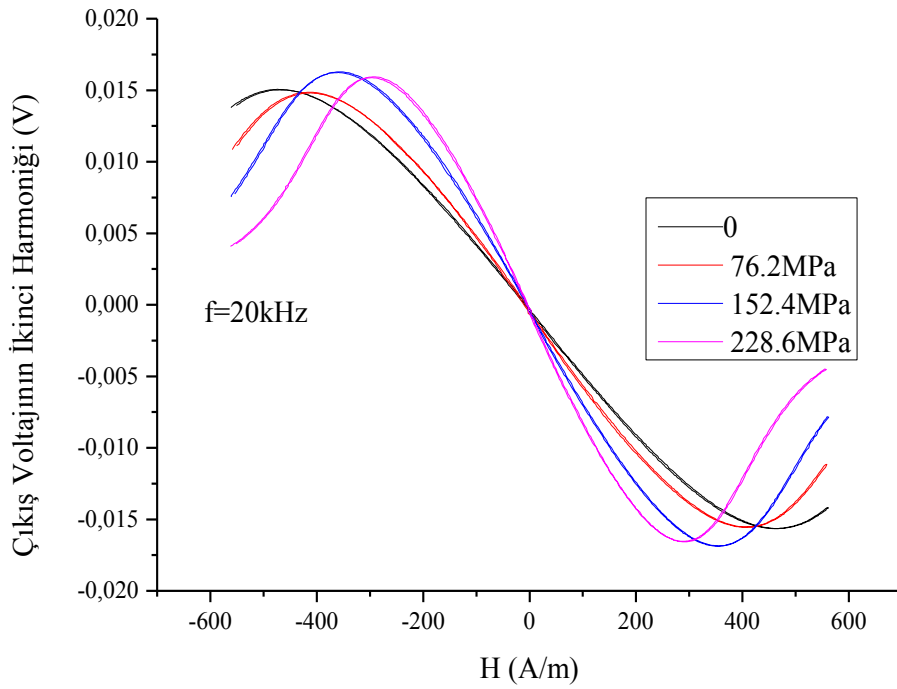
Şekil 4.81. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtılmış numunenin, 35 mA akım altında, sola tork uygulanıp, 0.05 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir

Şekil 4.81 ve Şekil 4.82 incelendiğinde, 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtılmış numunenin, 35 mA akım altında, sola tork uygulanıp, 0.05 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri görülmektedir. Bu numune için hassasiyet, uygulanan tork ile önce artmış daha sonra azalmıştır.

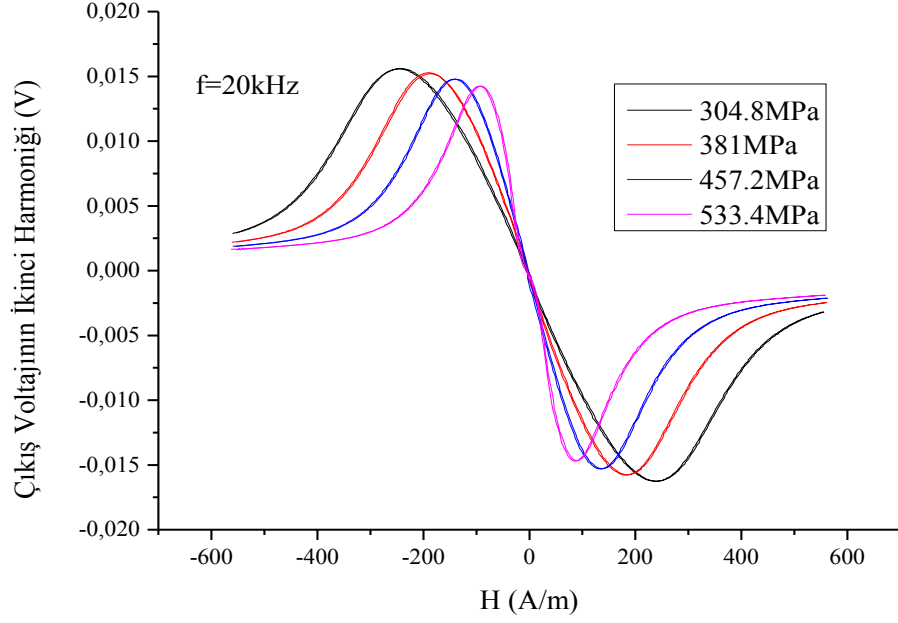
Şekil 4.83'te 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtılmış numunenin, 35 mA akım ve 0- 228.6 MPa arası gerilme stresleri altında alınan ölçümleri verilmektedir. Gerilme stresinin dairesel anizotropiyi artırdığı düşünülmektedir. Dairesel anizotropinin artışı hassasiyeti artırır. Ancak dairesel anizotropinin fazlaca artışı numunedeki helisel bileşeni azaltacaktır. Bu durumda grafikten görüldüğü üzere hassasiyet önce artacak, daha sonra düşecektir.



Şekil 4.82. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım altında, sola tork uygulanıp, 0.05 volt DC offset eklenerek elde edilen fluxgate ölçüm değerleri verilmiştir



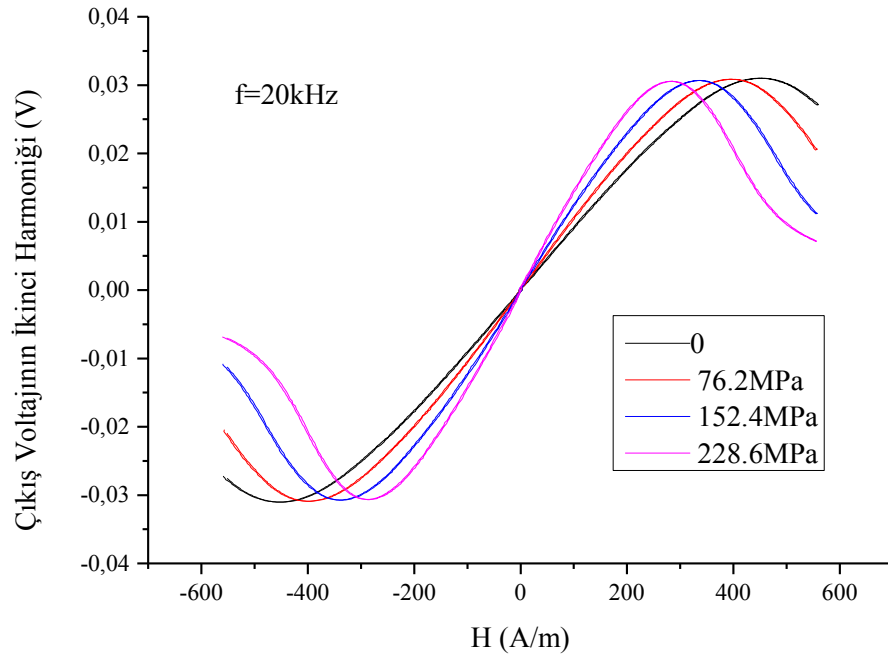
Şekil 4.83. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım ve 0- 228.6 MPa arası gerilme stresleri altında alınan ölçümleri



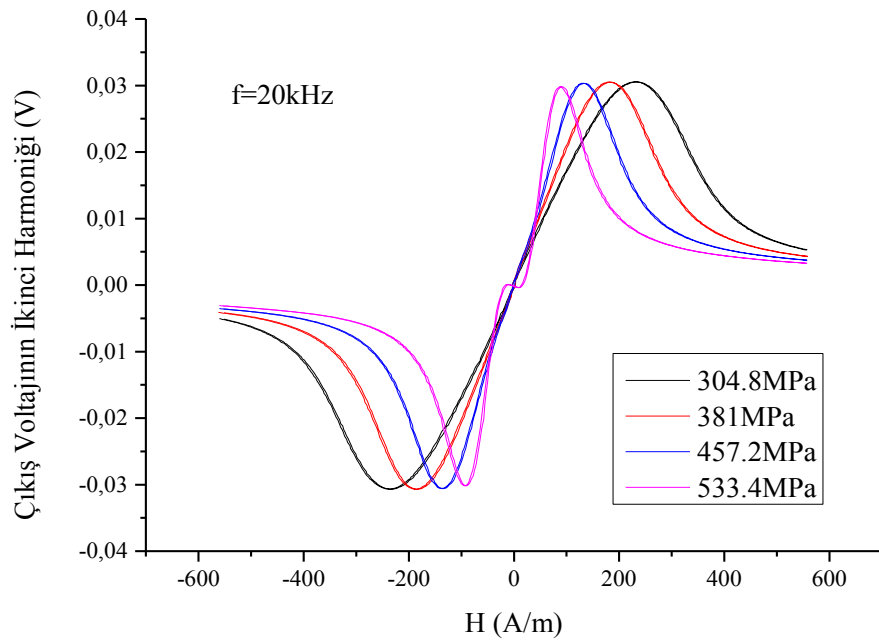
Şekil 4.84. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtılmış numunenin, 35 mA akım ve farklı gerilme stresleri altında alınan ölçümleri

Şekil 4.84'te numuneye uygulanan gerilme daha çok arttırılmıştır. Bu durum hassasiyetin giderek düşmesine sebep olmuştur.

Şekil 4.85 ve Şekil 4.86'da 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtılmış numunenin, 30 mA akım,  $8.25\pi$  rad/m ve farklı gerilme stresleri altında alınan ölçümleri verilmektedir. Numuneye gerilme ile beraber bir tork eklendiğinde, helisel anizotropinin fazlaca artması sonucunda dairesel anizotropi bileşeni azalmıştır. Bunun sonucu olarak hassasiyet azalmıştır. 533 Mpa değerinden sonra doğrusal bölge kaybolmuştur.



Şekil 4.85. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 30 mA akım,  $8.25\pi$  rad/m ve farklı gerilme stresleri altında alınan ölçümleri



Şekil 4.86. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 30 mA akım,  $8.25\pi$  rad/m ve farklı gerilme stresleri altında alınan ölçümleri

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu bölümde bobinsiz fluxgate sensörün özellikleri, deneylerde kullanılan malzeme ve yöntemler verilecektir.

Bobinsiz fluxgate sensör yeni tür bir fluxgate sensördür. Adından da anlaşılacağı gibi sensörün yapısında bobin bulunmaz. Bu durum üretimini daha kolay ve ucuz bir hale getirmektedir [91].

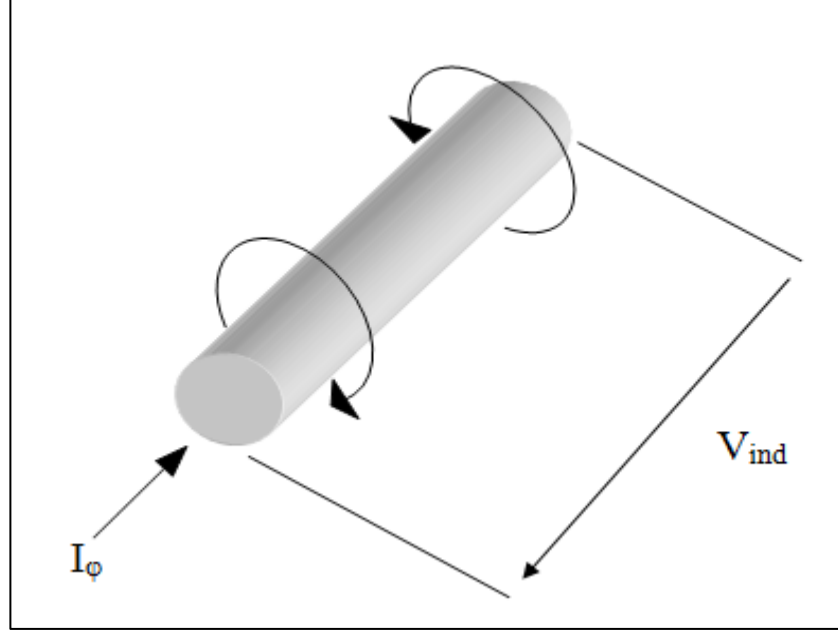
İkinci bölümde anlatıldığı üzere, mikro-tellere yapılan fluxgate sensörler üretim kolaylığı açısından popülerlik kazanmıştır. Bu tip sensörlerde tel kor sadece bir toplayıcı bobine ihtiyaç duymaktadır. Bu bobin kolaylıkla sarılabilmesine rağmen yüksek oranda küçültme gereken durumlarda dezavantaj oluşturmaktadır. Bu duruma bir öneri Zorlu tarafından getirilmiştir [58]. Ancak üretim aşamasını uzatan bu sensör, daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla toplayıcı bobinin de olmadığı bir fluxgate sensör daha uygun bir çözüm olacaktır.

### 5.1. Bobinsiz Fluxgate Sensörün Yapısı

Bobinsiz fluxgate sensörde ferromanyetik katman ile kaplanmış bakır korlu kompozit bir mikrotele tork uygulanır. Bu sırada telin içinden AC ( $I_\phi$ ) bir akım geçirilir. Daha sonra, telin eksen boyunca, tele dış bir manyetik alan uygulanır. Eğer uyarıcı akım, her iki kutupta, manyetik katmanı doyuma ulaştırmaya yeterli ise, dış manyetik alanın da etkisiyle, telin uçlarında çıkış potansiyelinin çift harmonikleri oluşacaktır. Oluşan ikinci harmonik, eksenel yönde uygulanan manyetik alanla orantılıdır. Dolayısıyla bu yapı manyetik sensör olarak kullanılabilir. Bu durumda, çıkış potansiyeli, doğrudan telin uçlarından elde edildiği için toplayıcı bobine ihtiyaç olmayacaktır. Sensörün yapısı Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

Sensörün yapısı manyetoempedans sensörlere benzemesine rağmen, bu sensör ortogonal bir fluxgate sensör olarak sınıflandırılmaktadır. Bobinsiz fluxgate sensörde çıkış karakteristikleri, doğrusal olarak, sadece kor malzemenin doyuma ulaştığı durumlarda gözlemlenmektedir. Eğer kor malzeme için doyum ortadan kalkarsa sinyal kaybolacaktır. Ayrıca bobinsiz fluxgate sensörün çalışma frekansı kHz mertebesinde iken manyetoempedans sensörler mHz mertebesinde çalışmaktadır. Bu durum her iki olayın birbirinden farklı olduğunu göstermektedir. Bir başka deyişle,

manyetoempedans sensörler dış manyetik alanın manyetik geçirgenliği değiştirmesine bağlı olan, yüzey etkisinin (Skin Effect) değişimi mantığına göre çalışmaktadır [92-94]. Yüzey etkisi malzemenin manyetik geçirgenliğinin, iletkenliğinin ve akım frekansının bir fonksiyonudur [94]. Ancak bobinsiz fluxgate sensörlerde dış manyetik alan, dairesel B-H eğrisinin doğrusal olarak değişmesine ve dolayısıyla çift harmoniklerin oluşmasına sebep olur.



Şekil 5.1. Bobinsiz fluxgate sensörün çalışma mantığı [24]

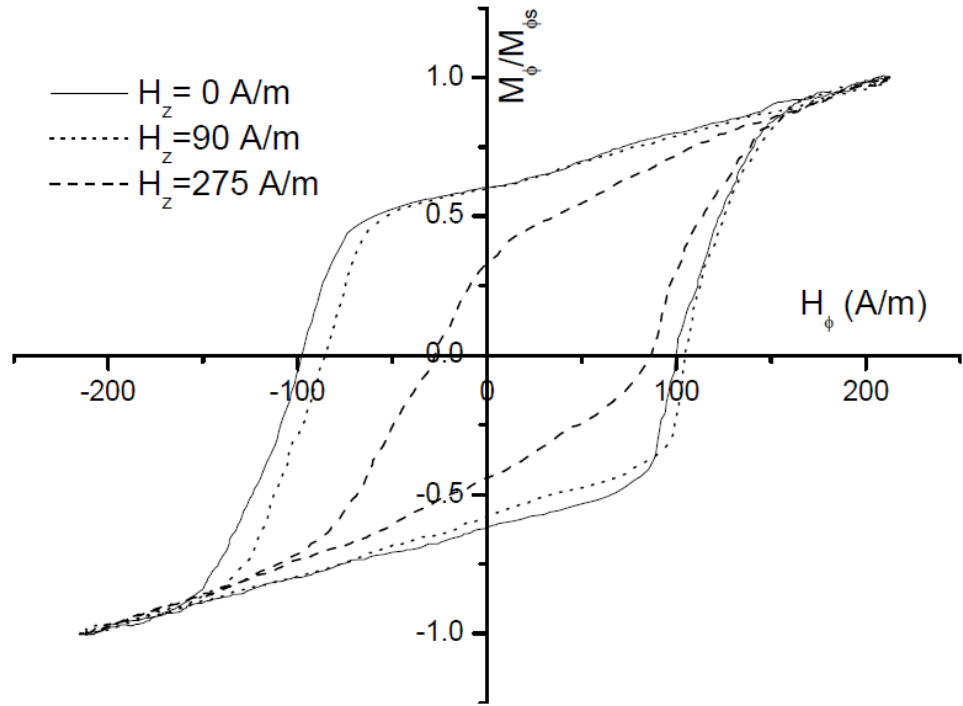
Sensörler arasındaki fark çıkış karakteristikleri açısından daha da belirgindir. Bobinsiz fluxgate sensörlerde, asimetrik karakterli dış manyetik alana doğrusal olarak bağlı bir ikinci harmonik vardır. Bu durum pozitif ve negatif yöndeki alanlarda ayırt edilebilir. Manyetoempedans sensörlerde ise empedans doğrusal olmayan simetrik bir karakteristik gösterir. Bir manyetometrede kullanılabilmesi için DC bias bir alana ihtiyacı vardır [95]. Dolayısıyla çıkış potansiyeli yaklaşık olarak doğrusal bir fonksiyon olacaktır.

## 5.2. Çalışma Mantığı

Bobinsiz fluxgate sensörün hassasiyeti kor malzemenin bükülme miktarına bağlıdır [96]. Ayrıca tel zıt yönlerde bükülürse, hassasiyet negatif olmaktadır. Dolayısıyla bobinsiz fluxgate sensörün çalışma şekli, manyetik telin bükülmesi sonucunda oluşan helisel anizotropiye bağlı olduğu düşünülmektedir. Eğer helisel

anizotropi oluşmazsa, bir çıkış voltajı ölçülememektedir. Bu durum 2010 yılında Butta tarafından doğrulanmıştır [97]. Permalloy bir kabuk elektrokaplama yöntemi ile helisel bir manyetik alan altında kaplanmıştır. Helisel alanın boyuna bileşeni bir Helmholtz bobini, enine bileşeni ise tel içinden geçen DC bir akım ile sağlanmıştır. Bunun dışında helisel anizotropi, numuneye elektrokaplamanın tork altında uygulanması ile sağlanabilir [98, 99].

Yüksek ve pozitif manyetositriksiyona sahip şeritlerde helisel anizotropi tork ve gerilmenin aynı anda uygulanmasıyla oluşturulur. Düşük manyetositriksiyona sahip amorf şeritlerde ise helisel anizotropi ya akım altında ısıtım işlemi ile (current annealing) veya manyetik alan altında ısıtım işlemi ile (magnetic field annealing) oluşturulur. [100].



Şekil 5.2.  $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  numunesi için, 15 kHz frekans ve farklı  $H_z$  değerleri için 250 MPa gerilme stresi ve  $16.5\pi$  rad/m tork altında, 425 mA dc akım altında, 15 dakika ısıtılan telin dairesel histeris eğrileri

Şekil 5.2’de  $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  numunesi için alınan dairesel manyetizasyon eğrileri görülmektedir. Dairesel manyetizasyon eğrilerini ölçmek için kullanılan

deneysel yöntem [101] da bulunabilir. Söz konusu eğrilerin yorumlanması dairesel yöndeki manyetizasyonun daha iyi anlaşılması için önemlidir.

Şekil 5.2’de  $H_z$  değerlerinin artması ile dairesel koersivite değerinde azalma görülmektedir. fluxgate sensörlerde çıkış voltajının dairesel geçirgenliğin bir fonksiyonu olduğu bilinmektedir [28] ve  $H_z$  gibi boyuna bir manyetik alan uygulandığında,  $M_\phi$ – $H_\phi$  eğrilerinden dairesel geçirgenliğin büyük bir değişime uğradığı görülmektedir. Bobinsiz fluxgate çıkış değişiminin, dairesel geçirgenliğin değişimi ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Büyük manyetoinduktans, manyetoempedans (MI), Matteucci ve Wiedmann etkiler amorf tellerde gözlenmiştir [102-111]. Son zamanlarda, lineer olmayan MI etki amorf ve manyetik kompozisyona sahip teller için rapor edilmiştir [8,112-114]. Manyetik malzemelerin çoğunda MI tepki (hem ilk hemde ikinci harmonik sinyalleri) araştırılmıştır. Bu etkiler arasındaki farkı anlayabilmek için Matteucci ve Wiedmann etkilere kısaca bir göz atılması uygun olur.

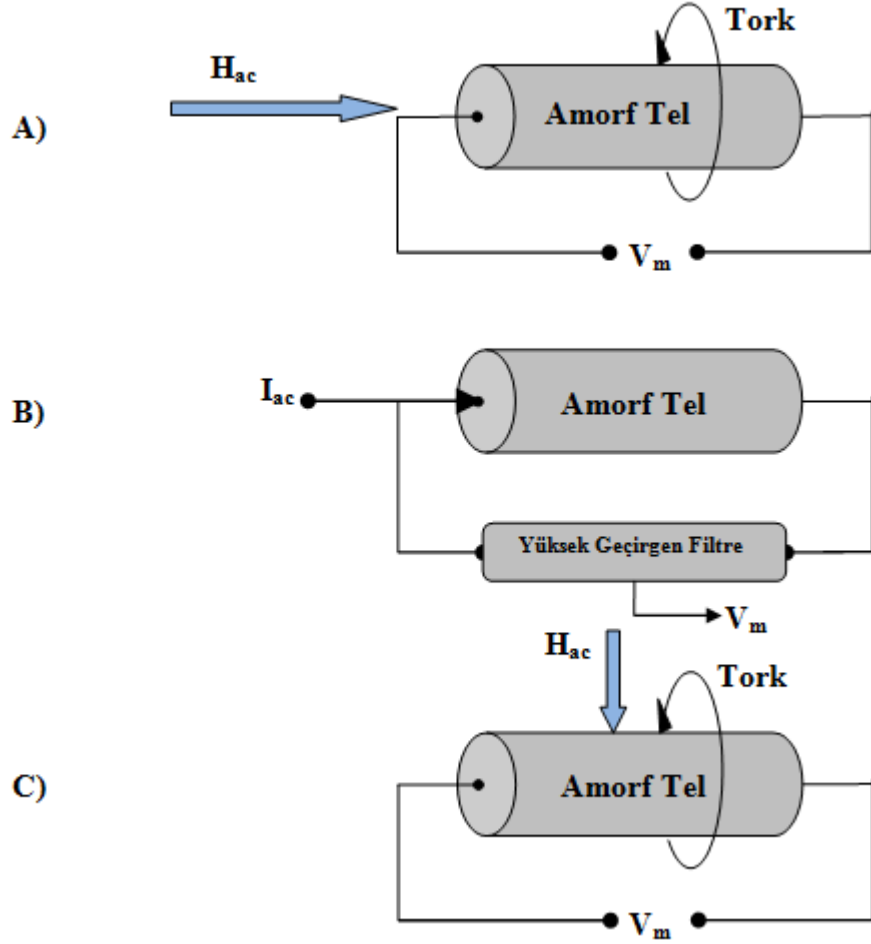
Matteucci Etki, kolay eksen yönünde oluşan bir dış manyetik alana yerleştirilmiş, bükülmüş bir telde oluşan dairesel manyetizasyonun artışıdır [115].

Matteucci Etki’de, torsion uygulanmış bir manyetik malzemeye boyuna, ac bir manyetik alan uygulanırsa numunenin uçlarında AC voltaj atmaları görülür. Amorf manyetositriktif bir şeride boyuna, zayıf bir manyetik alan (0.08 kA/m’den daha az) ve bir bükme uygulandığında söylenen Matteucci Etki gözlenir. Dolayısıyla Matteucci Etki’nin manyetostriksiyon ile yakından ilişkili olduğu düşünülmektedir. Tork uygulanmış bir amorf şeritte Barkhausen Etki’ye bağlı domain duvar hareketi sonucunda şeridin uçlarında voltaj atmaları oluşacaktır [101].

Amorf tellerde, bu etkinin büyüklüğünün birkaç on mV’a kadar olabilmesi, bu telleri sensör uygulamaları için kullanışlı bir hale getirmektedir. Matteucci etkiyi ölçebilmek için kurulan normal bir deney düzeneği Şekil 5.3a’da verilmiştir. Buna göre tele kolay eksen yönünde ki AC bir manyetik alan ile bir bükme uygulanırsa, telin uçları arasında bir voltaj atması ölçülür. (Bu durumda telin manyetizasyon yönelimi helisel olacaktır.) Bobin gerektirmeyen bir diğer alternatif düzenek Şekil 5.3b’de gösterilmiştir. Tel yüzeyinde dairesel veya helisel alanı üretmek için bobin yerine tel boyunca uygulanan bir alternatif akım kullanılır. Eğer yeterince yüksekse

Matteucci voltajına neden olan bir değişimi indükleyebilir. Burada yüksek geçirgen bir filtre kullanılır.

Bir üçüncü yöntemde, Şekil 5.3c’de görüldüğü üzere, bölgesel olarak kor değişimini sağlamak için telin eksenine dik bir yönde alternatif bir manyetik alan uygulanır. Bu durum sürücü frekansın iki frekansta bir Matteucci voltajı ortaya çıkarır [14].



Şekil 5.3. Matteucci etkiyi için kurulan üç farklı düzenek [14]

Genelde manyetositriksiyon ile ilgilenilirken, en kolay durum olduğu için, malzemelerin homojen bir manyetizasyona sahip olduğu göz önüne alınır. Bir diğer dikkate değer durum ise dairesel kesitinde helisel manyetizasyona sahip bir ferromanyetik bir çubuk veya teldir. Bu durum telin etrafında bulunan bir bobin tarafında yaratılan homojen, boyuna bir manyetik alan ile telin içinden geçirilen akımın oluşturduğu dairesel manyetik alanın üst üste bindirilmesiyle oluşturulabilir.

Dairesel alan telin merkezinde sıfır, yüzeyinde ise maksimum şiddettedir. Sonuçta oluşan alan helisel olacak ve telin döndürecektir. Döndürme telin eksenini yönünde sıfır olacak ve eksenden uzaklaştıkça artacaktır. Bu döndürme etkisi Wiedemann Etkisi olarak bilinir. Homojen bir telde bu döndürme etkisinin büyüklüğü:

$$\xi = \varphi / L \quad (5.1)$$

ile verilir. Birim uzunluk başına dönme (rad/m) olarak tanımlanır [115,116].

Wiedemann Etkisi bir manyetik malzemeye uygulanan, helisel bir manyetik alanın malzemeyi döndürmesi olarak özetlenebilir. Bunun dışında bir malzeme aynı anda daireysel manyetik alana ve torka maruz kalırsa, manyetizasyonun (daireysel alana dik doğrultuda) boyuna bir bileşeni ortaya çıkacaktır. Bu ise Ters Wiedemann Etkisi olarak bilinir [115-117].

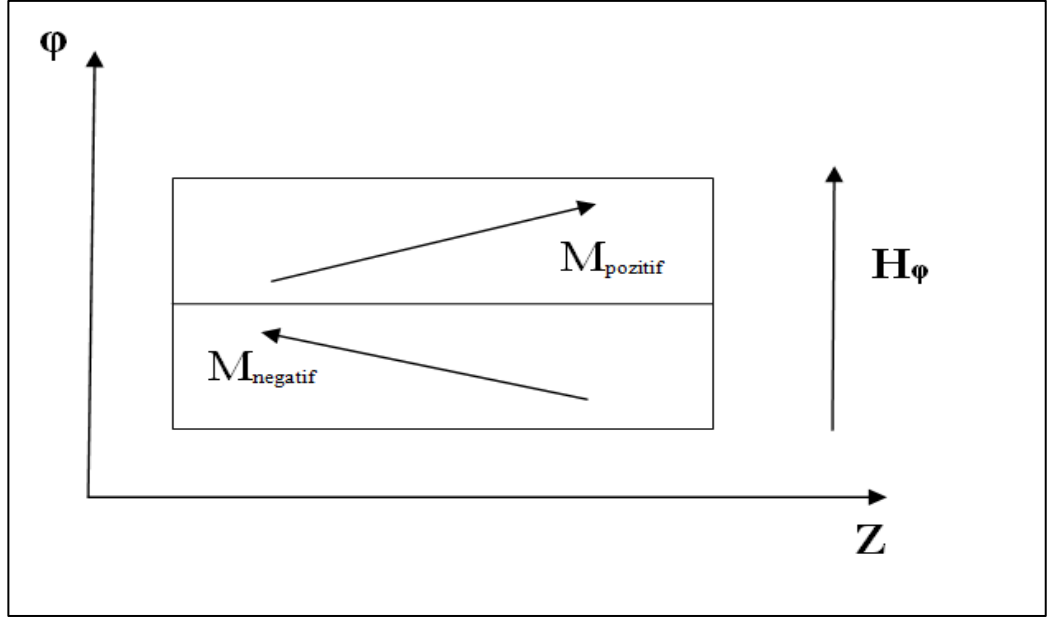
Wiedemann Etkisi aynı zamanda doğrusal manyetositriksiyonun bir türüdür. Ferromanyetik bir telin helisel bir manyetik alanda dönmesi sonucunda oluşan  $\varphi$  açısı, telin boyu  $L$ , akım yoğunluğu  $j$  ve manyetositriksiyon  $\lambda_s$  ile orantılıdır.

$$\varphi = 3/2 \lambda_s j L H \quad (5.2)$$

2009 yılında Ripka ve Butta bobinsiz fluxgate sensörün çalışma mantığını açıklamak amacıyla için bir model önermişlerdir [118]. Model ferromanyetik korun içinden geçen akımın, manyetizasyon sürecinde, koru daireysel olarak doyuma götürmesi sırasında oluşan helisel anizotropi temeline dayanır. Buna göre model, bobinsiz fluxgate sensörü domain duvar hareketi ve manyetizasyonun döndürülmesi mantığına göre açıklamaya çalışır. Bunu açıklamak için model, tork uygulanmayan durum ve tork uygulanan durum olarak ikiye ayrılmıştır.

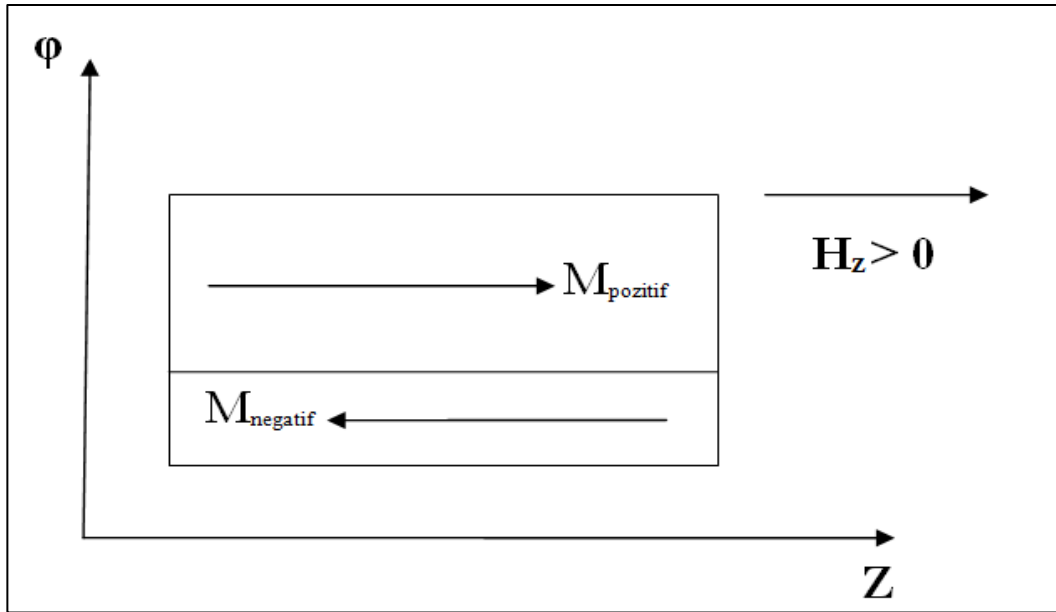
Tork uygulanmayan durumda, Şekil 5.4'te gösterildiği gibi, numune zıt yönlerde boyuna manyetize edilmiş iki adet domainden oluşur. Dairesel yöndeki manyetizasyon ile boyuna manyetizasyon ayrı tutulmuştur.

Kor malzeme boyunca uygulanan akım dolayısıyla ortaya çıkan daireysel manyetik doğrultudaki alan, minimum enerji şartını sağlamak için domainleri zıt doğrultularda yönlendirir.



Şekil 5.4. Pozitif ve negatif yönlerdeki manyetik momentler [118]

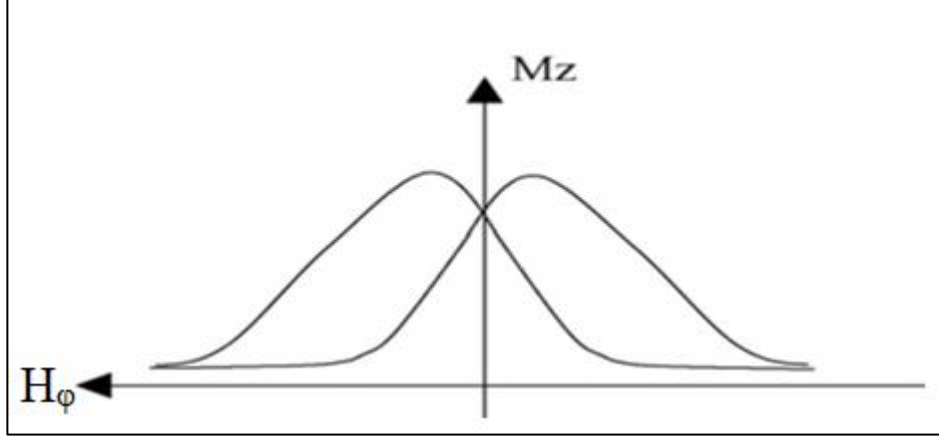
Diğer taraftan Şekil 5.5’ te görüldüğü üzere boyuna dış manyetik alan,  $H_z$ , domain duvar hareketlerini indükler.



Şekil 5.5.  $H_z$  tarafından indüklenen domain duvar hareketleri [118]

Sonuç olarak boyuna doğrultuda net bir manyetizasyon elde edilir. Daha sonra bu dairesel manyetik alan domainleri bir miktar kendi yönüne doğru döndürür. Böylece boyuna doğrultuda izdüşümleri azalacaktır.

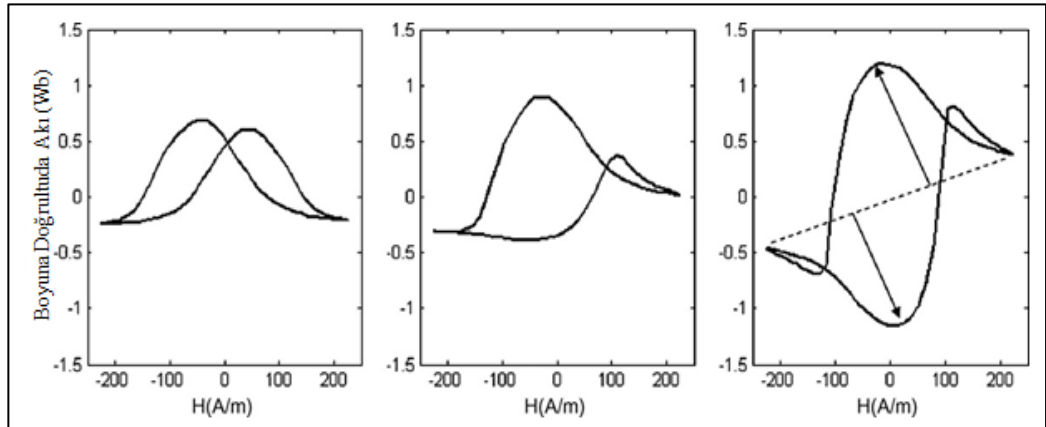
Şekil 5.6’da gösterilen gating eğrisinde anizotropi doğrultusundaki, bu durum boyuna manyetik alan gating eğrisinin yüksekliğini, dik doğrultudaki manyetik alan ise modülasyonu belirler.



Şekil 5.6. Klasik bir ortogonal fluxgate için gating eğrisi [118]

Şekil 5.6’da boyuna manyetizasyon,  $M_z$  ve dairesel yöndeki manyetizasyon olan  $H_\phi$ ’nin grafiği verilmiştir. Grafikteki tepe değerleri,  $H_\phi$ ’nin artı ve eksi yönündeki koersivite değerlerine eşit olduğu anda oluşur.

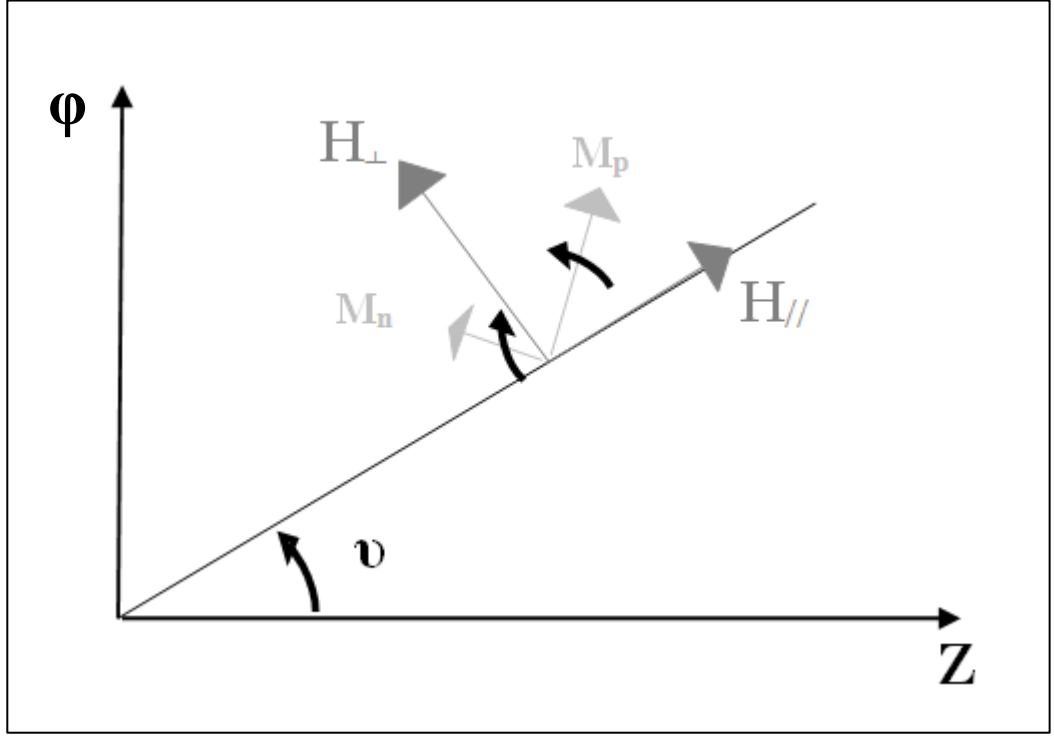
Numuneye tork uygulandığında ise manyetik katmanda bir helisel anizotropi oluşturulacaktır. Bu durumda gating eğrisi Şekil 5.7’de gösterildiği gibi deforme olacak ve eğer tork daha fazla uygulanırsa eğri daha fazla deforme olacaktır.



Şekil 5.7. Bobinsiz fluxgate kor malzemeleri için değişen gating eğrileri [118]

Sonuçta bükme en fazla olduğunda şekil bir histeris eğrisine benzemektedir. Ancak eğrinin eğimi negatif ve döndürme açısı ters çevrildiğinde, eğrinin düşey ekseninde ters döndüğü görülmektedir.

Şekil 5.8’de döndürme uygulanmış durumda domain momentlerinin grafiği görülmektedir. Anizotropi eksenini artık, z eksenine göre,  $\nu$  kadar dönmüştür. Bu defa anizotropi eksenine dik doğrultudaki alan  $H_{\perp}$  ve  $H_{//}$  ise anizotropi eksenine paralel alandır. Bu defa momentlerin döndürülmesinden  $H_{\perp}$  ve domain duvar hareketinden ise  $H_{//}$  sorumludur.



Şekil 5.8.  $\nu$  kadar döndürme uygulandığında oluşan anizotropi eksenini [118]

Dairesel doğrultudaki uygulanan  $H_{\phi}$  alanının, sistemin  $\nu$  kadar dönmesinden dolayı,  $H_{\phi\perp}$  ve  $H_{\phi//}$  bileşenleri olacaktır. Bu durumda dış bir manyetik alanın yokluğunda bile,  $H_{\phi}$ 'nin anizotropi doğrultusunda  $H_{\phi//}$  bileşeni olacağı için, bir manyetik artış söz konusu olacaktır. Ayrıca burada  $H_{\phi//}$  periyodik olarak işaret değiştirecektir. Dolayısıyla, Şekil 5.7’de, klasik ortogonal fluxate sensörlerde olduğu gibi çift tepe noktalı, biri negatif tarafa dönmüş, eğriler gözlemlenmesinin sebebi açıklanmış olacaktır. Tepe noktalarının yüksekliğini artık  $H_z$  değil  $H_{\phi//}$  belirleyecektir. Bu durum  $\nu$  döndürme açısı ters çevrildiğinde, sonuçta oluşan gating eğrisinin neden düşey ekseninde döndüğünü de açıklamaktadır.  $H_{\phi}$ 'nin aynı kalmasına rağmen,  $\nu$  döndürme açısı ters çevrildiğinde,  $H_{\phi//}$  işaret değiştirecektir.

Sonuç olarak  $H_z$ 'nin boyuna alandaki kaymayı, dairesel uyarıcı alana göre, belirlediği söylenebilir. Bu durumda kayma, dairesel alan zamana bağlı olduğu için,

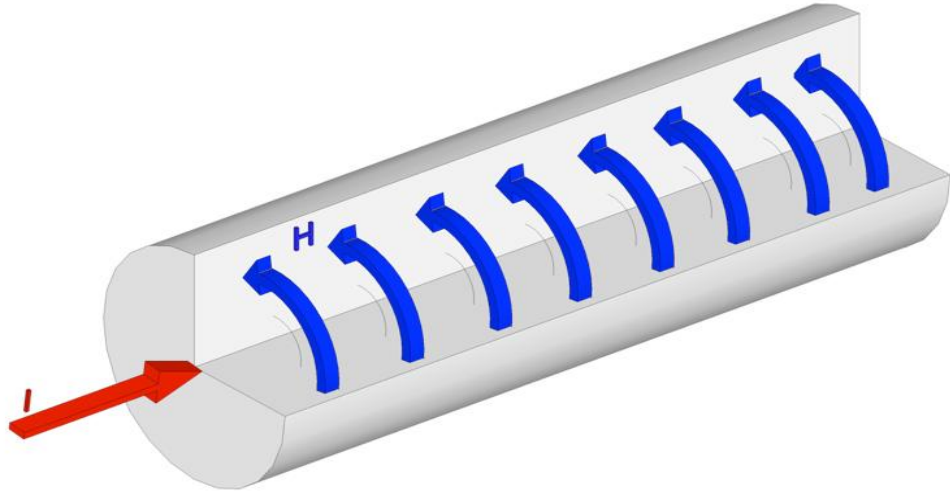
zamana da bağılıdır. Zaman temelinde bir asimetri gözlemlenecek ve çift harmoniklere karşılık gelecektir.

Kor malzemeye bir döndürme uygulandığında oluşan eksenindeki öteleme dolayısıyla:

$$M_z = M_{//} \cos \psi - M_{\perp} \sin \psi \quad (5.3)$$

$$M_{\phi} = M_{//} \sin \psi + M_{\perp} \cos \psi \quad (5.4)$$

İfadeleri ile yazılabilir. Bu durumda  $M_{//}$  değerinin  $\phi$  doğrultusunda da bileşeni olacaktır. Yani  $M_{//}$ ,  $\phi$  doğrultusuna da etki edecektir. Böylelikle döndürme açısı  $\psi$  artırıldığında hassiyette artacaktır.  $\psi$  döndürme açısı artarsa  $\phi$  ekseninde  $M_{//}$  değerinin izdüşümü de artacaktır.



Şekil 5.9. İletken bir telden  $I$  gibi bir akım geçirildiğinde oluşan dairesel manyetik alan [37]

Şekil 5.9'da içinden akım geçen bir telde oluşan dairesel manyetik alan gösterilmektedir. Eğer tel AC bir akım ile beslenirse telde oluşan dairesel manyetik alanın yönü akımın frekansına bağlı olarak yön değiştirecektir. Bu oluşan alan, dairesel yöndeki alan ve buna  $H_z$  gibi boyuna bir dış manyetik alan eklenilirse, helisel yönde net bir manyetik alan elde edilir.

$H_z$ 'nin bir fonksiyonu olarak bükülen telde çıkış potansiyelinin ikinci harmoniğinde ki değişim ile ilgili birçok makale yayınlanmıştır ve elde edilen sonuçlar ikinci

harmonik voltaj büyüklüğünün kompleks davranışlara sahip olduğunu göstermiştir [8,112,113,119]. Ancak söz konusu çalışmaların çoğunda kullanılan uyarıcı akım değerleri numuneyi dairesel yönde doyuma ulaştırmak için yeterli değildir ve daha düşük bükülme gerilimleri uygulanmıştır. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar domain duvar hareketi ve manyetik moment yönelimine dayanarak açıklanmıştır [8,112,113,119]. Bu çalışmada, önceki çalışmalara benzer olduğu için, bükülen bir tel için, çıkış voltajının ikinci harmoniğindeki değişimin belirtilen modellere dayanarak açıklanabildiği varsayılmıştır. Ancak bazı durumlarda düşük manyetik alan bölgesinde gözlenen doğrusallık bu modeller ile açıklanamaz [7]. Bobinsiz fluxgate etkisi, manyetoempedans ve Matteucci etkilerine çok benzemektedir. Daha önceden de ifade edildiği gibi manyetoempedans etkinin mekanizması yüzey etkisi ile açıklanabilmektedir. Fluxgate etkiden tamamen farklıdır. Hem Matteucci hem de fluxgate etkisi helisel anizotropi gerektirir. Ancak bu iki etki arasındaki asıl fark fluxgate etkisinde dairesel yönde doyuma gerek varken, Matteucci etkide dairesel doğrultuda doyuma gerek olmamasıdır. Ayrıca iyi bir Matteucci sinyal belirlemek için numune manyetositriktif değerine sahip olması gerektiği bilinmektedir. Fakat bobinsiz fluxgate durumunda yaklaşık sıfır manyetostriktif değerine sahip  $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  telde sinyalin çıkışında büyük bir değişim belirlenirken, daha büyük manyetositriktif değere sahip, ısıtılmış işlem görmemiş  $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$  telin bobinsiz fluxgate değişiminin yaklaşık sıfır olduğu rapor edilmiştir. Fakat  $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$  telin çok iyi bir Matteucci sinyal gösterdiği rapor edilmiştir [104,107,108]. Bu nedenle bobinsiz fluxgate ve Matteucci etkinin aynı olmadığı düşünülmektedir. Sonuç olarak bobinsiz fluxgate mekanizmasını anlayabilmek için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

Sensörün hassasiyeti uyarıcı akımın genliğine bağlıdır. Bununla beraber klasik fluxgate sensörlerde hassasiyet uyarıcı akımın genliğinin artırılmasıyla yükselirken, bobinsiz fluxgate sensörlerde düşer. Uyarıcı akım arttırıldığında, sistemin dairesel yöndeki manyetizasyon bileşeni artacak ve bu durumda bileşke manyetizasyon vektörünün yönü, dairesel yöne doğru kayacaktır. Dolayısıyla eksenel yöndeki manyetizasyonun, helisel manyetizasyona katkısı azalacaktır. Buna karşılık uyarıcı akımın ferromanyetik koru doyuma götürecekt kadar yüksek olmasına da dikkat edilmelidir.

Helisel anizotropi arttıkça sensörün hassasiyeti de artacaktır. Ancak bu noktada doyum değerini sağlamak için uyarıcı akım da artacaktır.

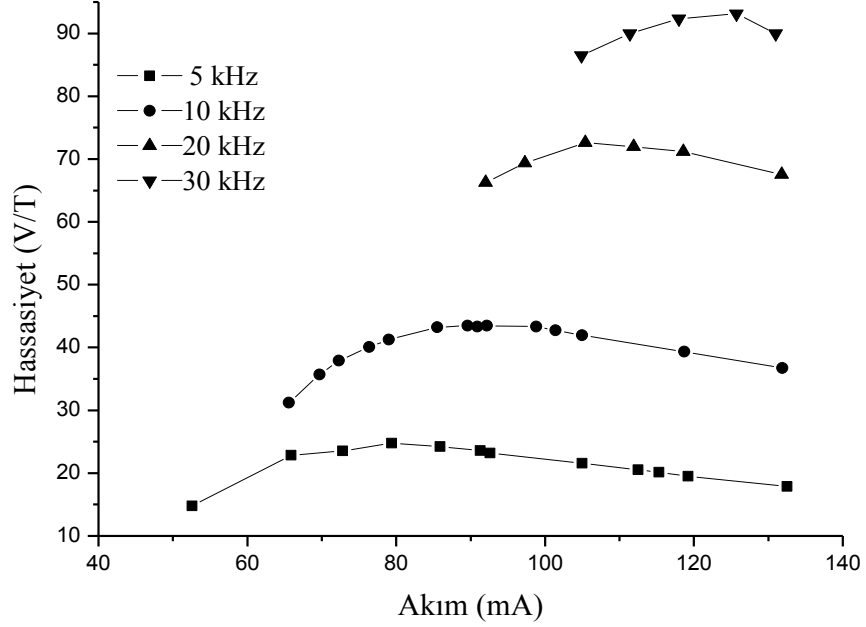
Sonuç olarak bobinsiz fluxgate sensörlerde, dairesel yöndeki manyetik alan, sistemde tek harmoniklerin oluşmasına sebep olur. Bu noktada pozitif ve negatif yöndeki manyetizasyonlar simetrik olacağı için herhangi bir çıkış potansiyeli elde edilemez. Sisteme boyuna, dış bir manyetik alan eklenirse pozitif ve negatif yöndeki simetri bozulacak, sistemde ikinci ve daha üst çift harmonikler oluşacaktır. Bu durumda ölçülebilecek bir çıkış potansiyeli elde edilebilir. Böylelikle oluşan çift harmonikler dış manyetik alan ile orantılı olacaktır. Özetle fluxgate sensörlerde iki farklı doğrultudaki manyetik alanın birbiri ile olan etkileşimi incelenmektedir. Daha önceden ifade edildiği gibi bobinsiz fluxgate sensörlerin çalışma mantığı ile ilgili bazı yayınlar olsada [118, 120] tam çalışma mantığı hala tartışılmaktadır.

### 5.3. $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$ Numunesi ile İlgili Sonuçlar

Şekil 5.10'da farklı frekans değerleri için alternatif sürücü akımın, bobinsiz fluxgate etkinin çıkış değerlerindeki hassasiyet ile değişimini göstermektedir. Eğriye doğrusal bir denklem fit edilmiş ve bu eğrinin eğiminden hassasiyet hesabı yapılmıştır. Hassasiyet hesabı sadece doğrusal bölgeler için yapılmış dolayısıyla doğrusal bölgenin bulunmadığı düşük  $I_\phi$  değerleri için hassasiyet değerleri verilmemiştir.  $I_\phi$  değeri arttıkça hassasiyetin önce arttığı ve sonra da azaldığı görülmektedir. Isıl işlem uygulanmamış malzeme yaklaşık 120 mA'lık akım için  $\pm 40$  A/m aralığında en yüksek  $\sim 90$  V/T seviyesinde doğrusallığa sahiptir.

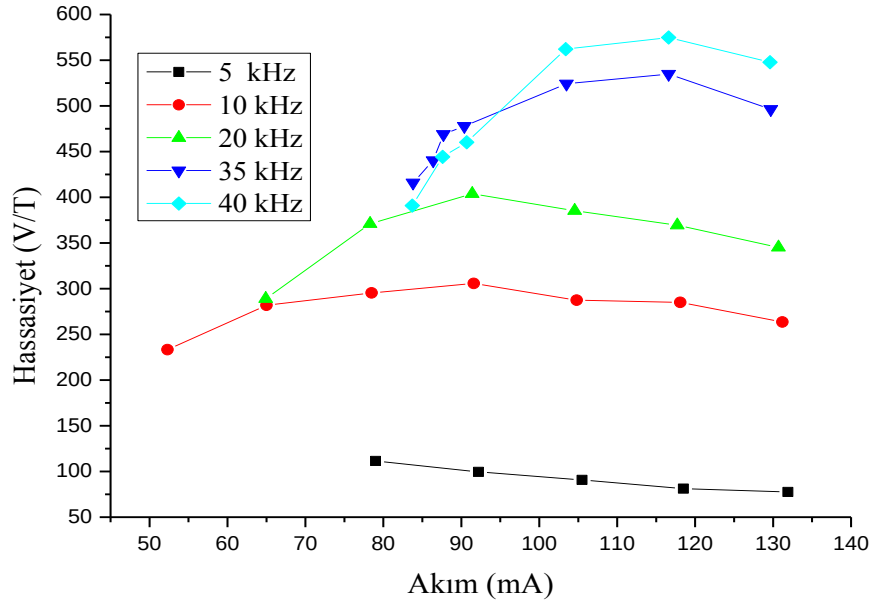
Manyetik malzemelerin tork altında ısıl işleme tabi tutulmasının bir helisel manyetizasyona yol açacağı bilinmektedir. Bobinsiz fluxgate için helisel anizotropi önemli bir parametre olduğundan dolayı amorf şeritler 480 ve 560 mA akımda 3, 6.25, 12.5, 25 ve  $50\pi$  rad/m tork altında ısıl işleme tabi tutulmuştur. Sonuçlar tork altında ısıl işlem uygulanan numunedeki çıkış sinyalinin, ısıl işlem uygulanmayana göre dikkate değer biçimde arttığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlar bobinsiz fluxgate etkinin hem frekans hem de  $I_\phi$ 'ye bağlı olduğunu göstermiştir. Numune dairesel yönde doyuma ulaşmadan bobinsiz fluxgate etkinin oluşmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek  $I_\phi$  değerlerinde fluxgate etkinin küçüldüğü

görülmüştür.  $I_\phi$  akımının daha da artırılması manyetizasyonun yönünün dairesel doğrultuda fazlaca artmasına ve helisel yöndeki bileşeni azaltmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Bu durum sensörün hassasiyetini azaltacaktır.

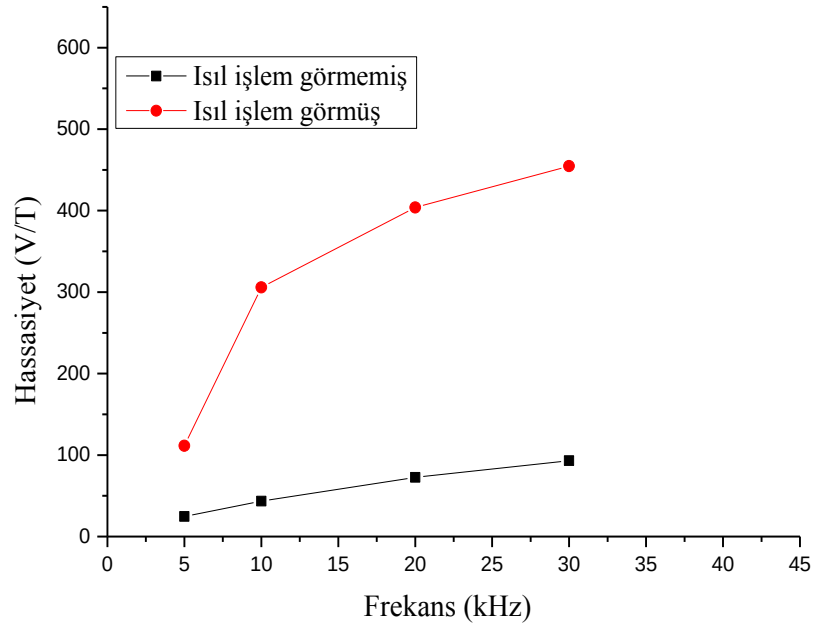


Şekil 5.10. Isıl işlem görmemiş  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$  numunesinin akıma karşı bulunan hassasiyet değerleri

Daha önce ısıl işlem yapılmamış numunede de görüldüğü gibi, Şekil 5.11’de ısıl işlem yapılan numunenin hassasiyeti sürücü akımının frekansının bir fonksiyonu olarak önce artmış, sonra da azalmıştır.  $I_\phi$  arttıkça dairesel doğrultudaki manyetik alan artar. Bu durum bobinsiz fluxgate sensörünün çıkış değerinin azalmasına yol açacak şekilde helisel manyetizasyon bileşenini azaltabilir. İdeal çalışma noktası tork kaynaklı gerilme,  $I_\phi$ ’nin büyüklüğüne bağlı olarak indüklenen helisel ve dairesel doğrultudaki manyetizasyonların bileşimidir. Isıl işlem görmemiş ve  $25\pi$  rad/m tork altında işlem görmüş numuneler için hassasiyet değerleri sürücü akım frekansının fonksiyonu olarak Şekil 5.12’de verilmiştir. Sensörün en yüksek hassasiyet değeri  $\sim 100$  mA sürücü akım için  $\pm 40$  A/m doğrusal çalışma bölgesinde 570 V/T’dir. Bu durum daha önceden rapor edilen bobinsiz fluxgate hassasiyet değerleriyle kıyaslanabilmektedir.



Şekil 5.11. 480 mA akım ve  $25\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$  numunesinin akıma karşı bulunan hassiyet değerleri

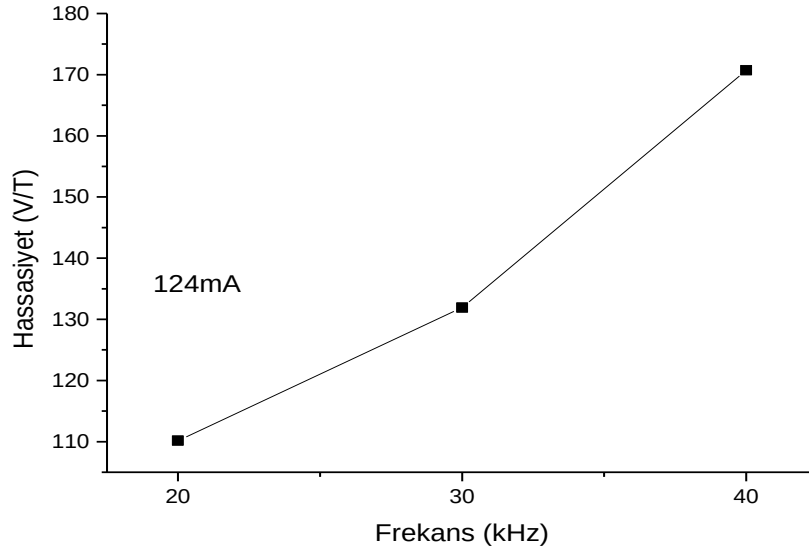


Şekil 5.12. Isıl işlem görmemiş ve 480 mA akım,  $25\pi$  rad/m tork altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$  numunesinin bulunan hassiyet değerlerinin frekansa karşı grafiği

#### 5.4. $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$ Numunesi ile İlgili Sonuçlar

Bobinsız fluxgate ölçümleri amorf ferromanyetik  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$  numunesi ile de alınmıştır. Bu malzemenin de manyetik geçirgenliği yüksek olup, manyetositriksiyon değeri sıfıra yakındır.

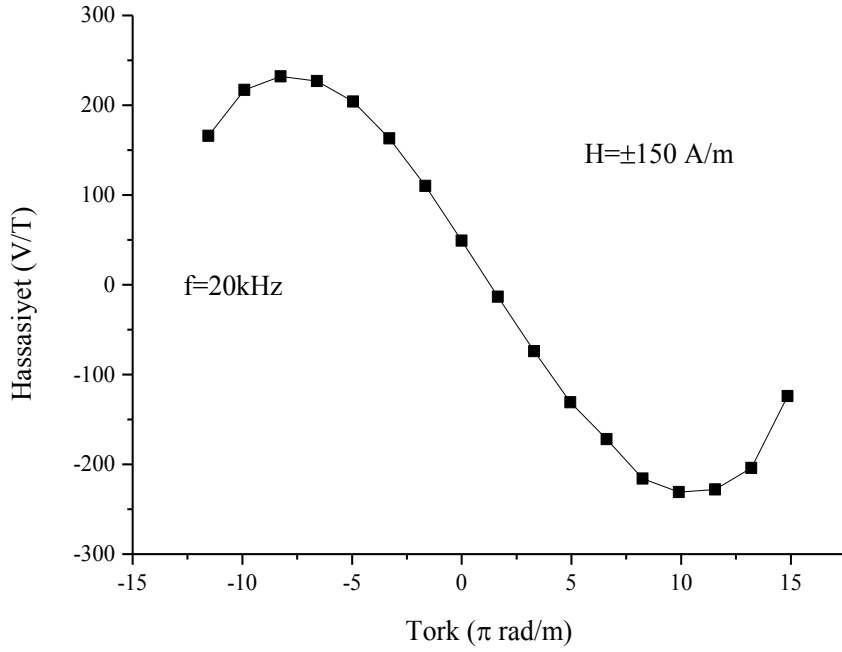
Şekil 5.13'te görülen grafikten numunenin ölçülebilen en yüksek hassasiyet değerinin yaklaşık 170 V/T olduğu hesaplanmıştır. Buna göre hassasiyet frekansa bağlı olup, frekans arttıkça hassasiyet artmaktadır. Bu değer  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$  numunesine göre düşüktür. Ancak Şekil 4.45'te görüldüğü üzere, bu numune  $\pm 50$  A/m aralığında doğrusal bir eğri vermiştir. Buna göre manyetik alan duyarlılığı daha fazladır. Gerilme stresi altında ısıtıl işlem uygulanması dairesel anizotropiyi artırmış ve bu da doğrusal bölgenin artmasına yol açmıştır.



Şekil 5.13. 720 mA akım ve  $12,5\pi$  rad/m tork, 400 MPa gerilme altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş malzemenin,  $33\pi$  rad/m tork uygulanarak ölçümü alınan  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$  numunesinin hassasiyet-frekans grafiği

#### 5.5. $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ Numunesi ile İlgili Sonuçlar

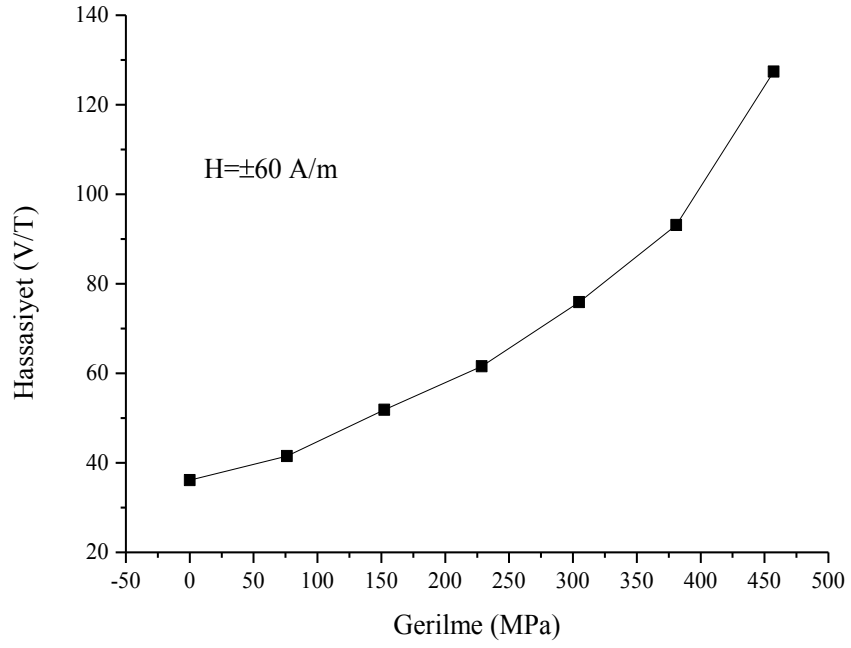
Bu telin manyetik özellikleri Çizelge 3.1'de görülmektedir. Buna göre manyetositriksiyon değeri sıfıra yakındır. Tel çeşitli akım, gerilme stresi ve tork uygulanarak ısıtıl işleme tabi tutulmuştur.



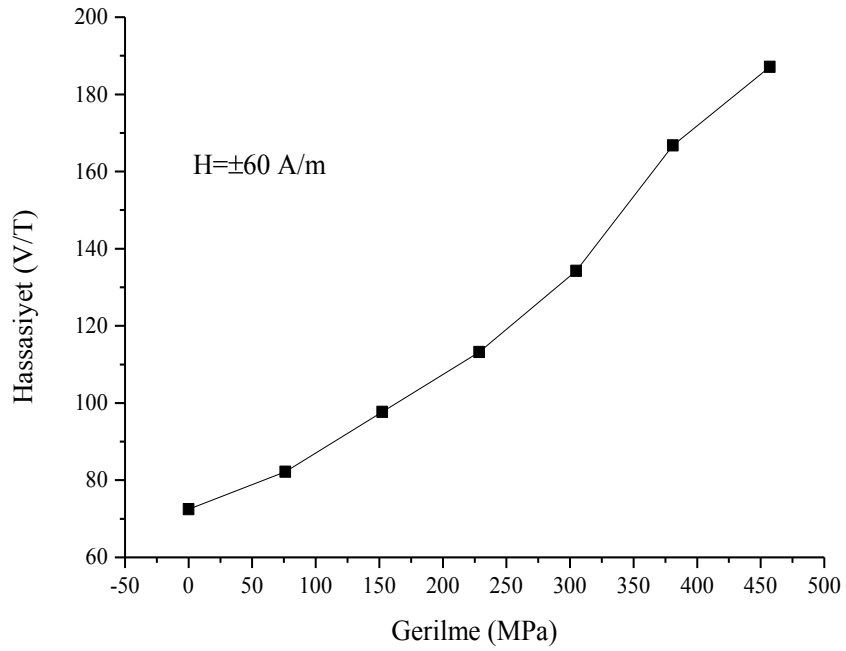
Şekil 5.14 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım altında, sağa ve sola tork uygulanan numunenin hassasiyet grafiği

Şekil 5.14'te 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35mA akım altında, sağa ve sola tork uygulanan numunenin hassasiyet grafiği verilmiştir. Buna göre ölçümler esnasında dış bükülme değerleri artırıldığında ortaya çıkan helisel anizotropi artış göstermektedir. Çıkış voltajının ikinci harmonik değerleri artan bükülme değerleri ile maksimum değere ulaşınca kadar artmaktadır. Bu numune doğrusal olduğu yaklaşık  $\pm 2.5\pi$  rad/m bölgesinde bir tork sensörü olarak kullanılabilir.

Şekil 5.15'te 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35mA akım altında, farklı gerilme streslerine karşı hassasiyet grafiği; Şekil 5.16'da ise 500 MPa gerilme, 450mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 30 mA akım,  $8.25\pi$  rad/m tork altında farklı gerilme streslerine karşı hassasiyet grafiği verilmiştir. Fluxgate ölçüm sonuçları Şekil 4.83, Şekil 4.84, Şekil 4.85 ve Şekil 4.86'da verilmiştir.



Şekil 5.15. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım altında, farklı gerilme streslerine karşı hassasiyet grafiği

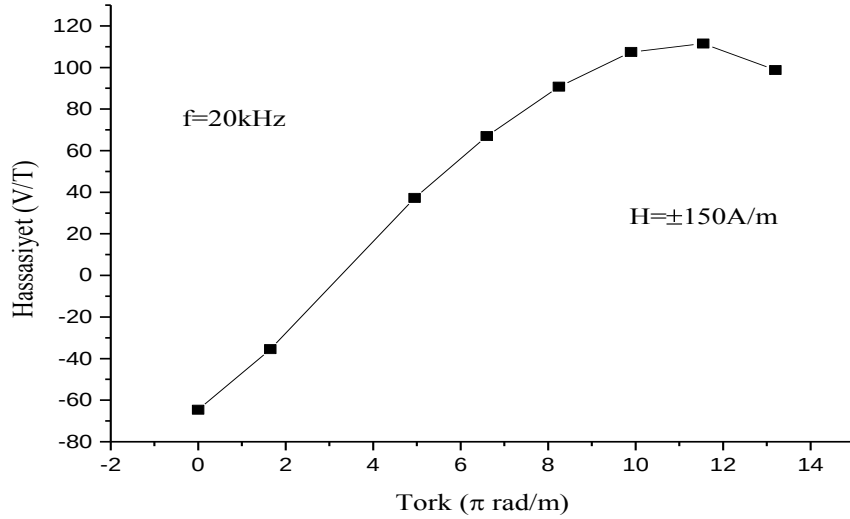


Şekil 5.16. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 30 mA akım,  $8.25\pi$  rad/m tork altında farklı gerilme streslerine karşı hassasiyet grafiği

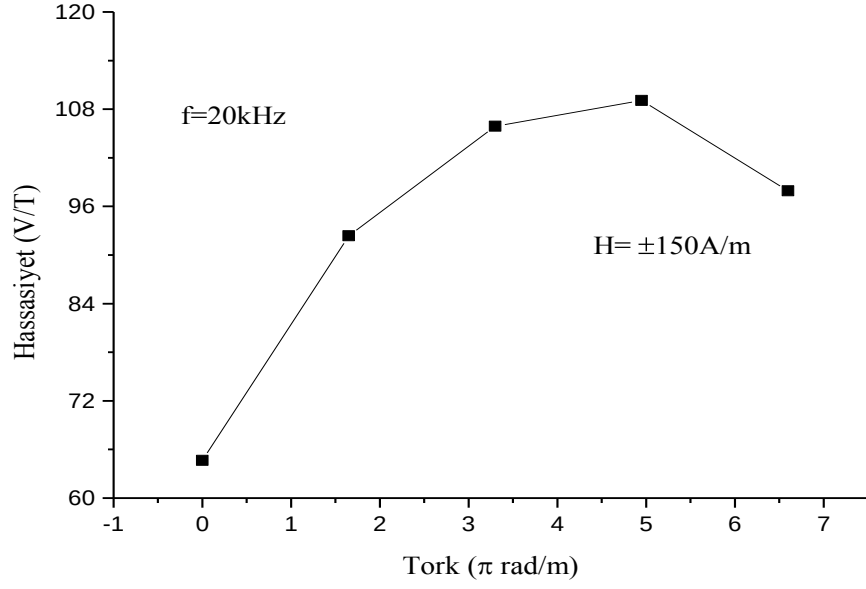
Şekil 5.15 ve Şekil 5.16 karşılaştırıldığında numuneye ölçüm esnasında gerilme uygulamanın  $H_\phi$  yönündeki manyetizasyon bileşenine katkıda bulunduğu söylenebilir. Dolayısıyla hassasiyet artmıştır. Ancak Şekil 5.16'da ölçüm sırasında gerilmeye ek olarak numuneye  $8.25\pi$  rad/m'lik bir tork uyguladığında, helisel bileşene katkıda bulunacaktır. Bu durum hassasiyetin, daha düşük uyarıcı akım altında bile, daha da artmasına sebep olacaktır. Ancak  $8.25\pi$  rad/m'den sonraki tork değerlerinde numunenin helisel bileşeninin fazlaca artması sebebiyle numuneyi dairesel olarak doyuma götürmek zorlaşmıştır. Dolayısıyla doğrusal bir grafik elde etmek zorlaşmıştır.

Sadece gerilme uygulanan numune için  $\sim 130$  V/T kadar bir hassasiyet, gerilmeye ek olarak  $8.25\pi$  rad/m'lik bir tork uygulanan numunede ise  $\sim 190$  V/T kadar hassasiyet değeri elde etmek mümkün olmuştur.

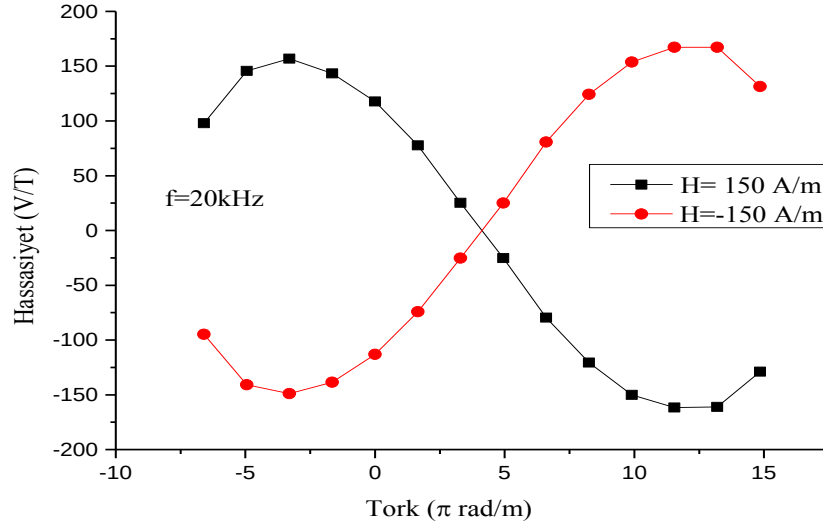
Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıt işlem görmüş numunenin, 30 mA akım altında, sırası ile sağa ve sola  $4.12\pi$  rad/m tork uygulanan numunenin hassasiyet grafikleri verilmiştir. Buna göre, bu numune için en yüksek hassasiyet değeri  $\sim 110$  V/T civarındadır. Daha önceden elde edilen hassasiyet değerlerine göre biraz daha düşüktür. Uygulanan  $4.12\pi$  rad/m tork değerinin helisel anizotropiyi yeterince büyük oluşturmadağı düşünülmektedir.



Şekil 5.17. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıt işlem görmüş numunenin, 30 mA akım altında, sağa  $4.12\pi$  rad/m tork uygulanan numunenin hassasiyet grafiği



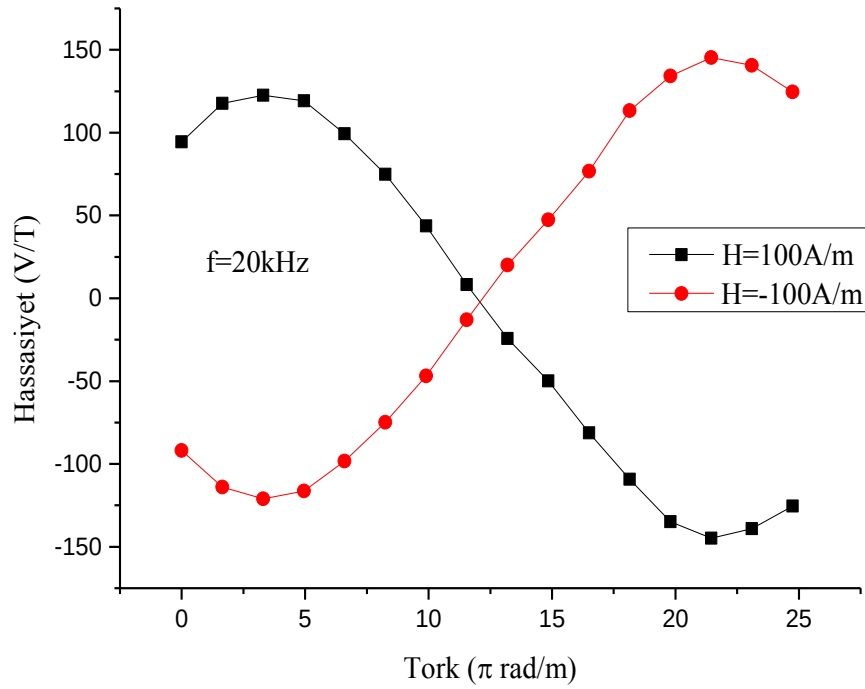
Şekil 5.18. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 30 mA akım altında, sola  $4.12\pi$  rad/m tork uygulanan numunenin hassasiyet grafiği



Şekil 5.19. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtıl işlem görmüş numunenin, 30 mA akım altında, sağa  $8.25\pi$  rad/m tork uygulanan numunenin hassasiyet grafiği

Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 için yapılan yorum, Şekil 5.19'daki numunenin hassasiyet grafiğinde desteklenmektedir. Uygulanan  $4.12\pi$  rad/m tork değerinin helisel anizotropiyi yeterince büyük oluşturamadığı ve tork değerinin  $8.25$  rad/m değerine arttırılmasıyla hassasiyetin arttığı görülmektedir. Elde edilen hassasiyet değeri  $\sim 175$  V/T mertebesinde.

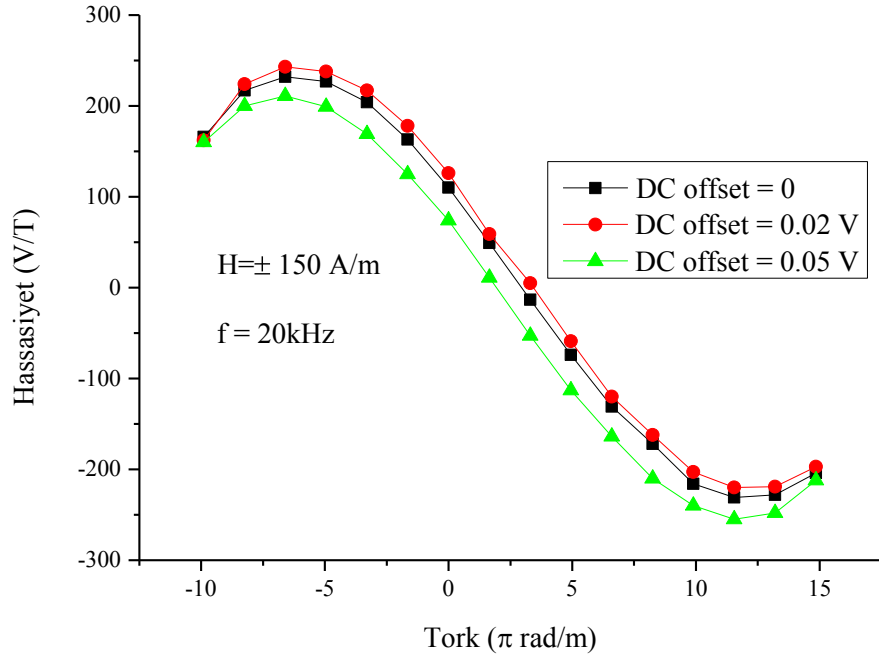
Şekil 5.20'deki numunede ise tork  $16.5\pi$  rad/m değerine kadar çıkarılmış ve hassasiyet hesaplanmıştır. Hesaplanan en yüksek hassasiyet değeri  $\sim 150$  V/T kadardır. Helisel anizotropinin artmasıyla hassasiyet azalmıştır. Helisel anizotropinin artmasıyla numuneyi doyum değerine götürmek daha çok zorlaşmış, artan akım ile beraber numunedeki manyetizasyon helisel doğrultudan biraz daha dairesel doğrultuya kaymıştır. Bu durumda hassasiyet biraz azalmıştır. Ancak numuneden hala bir bobinsiz fluxgate ölçümü alınabildiğine göre malzemede helisel yönde bir manyetizasyon hala mevcuttur.



Şekil 5.20. 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş numunenin, 35 mA akım altında, sağa  $16.5\pi$  rad/m tork uygulanan numunenin hassasiyet grafiği

Dairesel anizotropi, bobinsiz fluxgate etkinin anlaşılmasında önemli faktörlerden biri olduğundan dolayı, teller DC akım ve mekanik stresler altında ısıtılmıştır. Negatif bir bükülme gerilimi (saat yönünün tersi) 250 MPa gerilme stresi ve 425 mA DC akımda ısıtılan numune ve bir pozitif bükülme gerilimi (saat yönü) ise 1000 MPa gerilme stresi ve 425 mA dc akımda ısıtılan numuneye uygulandı. Benzer olarak ısıtılan tel numunede, eğimin yönü ısıtılma işlemi görmemiş telden de gözlemlendiği gibi bükülme geriliminin yönü zıt yöne çevrildiğinde değişmektedir. Ortaya çıkan

daireysel anizotropinin sensör hassasiyetini artırdığı düşünülmektedir. Çıkış potansiyelinin ikinci harmoniğindeki maksimum değişimin 10 mV değerinden 60 mV değerine arttığı gözlenmiştir. Ayrıca ısıl işlem gören numuneler daha düşük  $I_\phi$  değerlerinde daireysel olarak doyuma ulaşır. Akım-gerilme stresi altında ısıtılan numunelerde lineer bölgenin arttığı gözlenmiştir. Akım-gerilme stresi altında ısıl işlem, histeris eğrilerinin şeklini daha fazla kare haline getiren bir daireysel anizotropi ortaya çıkarır. Diğer bir deyişle daha yüksek gerilme stresi altında ısıl işlem daireysel anizotropiyi artıracaktır.



Şekil 5. 21 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıl işlem görmüş numunenin, 35 mA akım altında, farklı DC offset değerleri ile hassasiyet grafiği

Şekil 5.21’de 500 MPa gerilme, 450 mA akım altında, 15 dakika ısıl işlem görmüş numunenin, 35mA akım altında, farklı DC offset değerleri ile hassasiyet grafiği verilmiştir. Bir manyetik malzeme helisel anizotropiye sahipse dış bükülmeye karşı voltajın ikinci harmonik eğrisi sıfırda tam olarak çapraz değildir ve daima bir kayma mevcuttur [7]. Bu durumda, grafik eksenleri tam karşılamayacağı için DC offset eklenerek söz konusu durum giderilmeye çalışılmıştır.

## 5.6. Deneysel Hata Kaynakları

Önceki bölümde, bir bobinsiz fluxgate sensörün temel avantajının bobin içermeyen yeni bir manyetik alan sensörü olduğu rapor edilmiştir [7]. Bu nedenle fluxgate sensör boyutu küçültülebilir. Ancak bobinsiz fluxgate'in asıl problemi ölçümler esnasında uygulanan bükülme gerilimidir. Ölçümlerin tekrarlanabilmesi için numunenin konumu çok önemlidir. Numune tutturucuya yerleştirilirken hizalama hatası, gerilme stresi ve lehimleme gibi işlemler,  $H_z$ 'ye karşı çıkış voltajının ikinci harmoniğinde değişimlere yol açabilir. Ölçümler esnasında uygulanan bükülme ve tutturuculara yapılan kontaklar pratik değildir. Dairesel ve helisel anizotropi ortaya çıkarmak için bir çok çalışma yapılmıştır, bu yüzden numunelere önceki çalışmalarda yapılan benzer ısıtım şartlarını uygulanmıştır [121-126].

## 5.7. Sonuç

Bu tezde  $Co_{71}Fe_4Mo_1Si_{14}B_9$ ,  $Co_{67}Fe_4Mo_{1,5}Si_{16,5}B_{11}$  amorf ferromanyetik şeritleri ile  $(Co_{0,94}Fe_{0,06})_{72,5}Si_{12,5}B_{15}$  amorf ferromanyetik telinin bobinsiz fluxgate özellikleri incelenmiştir.

Manyetik malzemelerin tork altında ısıtım işlemi tabi tutulmasının bir helisel manyetizasyona yol açacağı bilinmektedir. İlk olarak  $Co_{71}Fe_4Mo_1Si_{14}B_9$  numunesi 480 mA akımda 3; 12.5; 25;  $50\pi$  rad/m tork altında ısıtım işlemi tabi tutulmuştur. Bobinsiz fluxgate için helisel anizotropi önemli bir parametre olduğu için şeritte helisel bir anizotropi indüklenmiştir. Ayrıca ısıtım işlemi görmemiş numunede de bobinsiz fluxgate etki gözlemlenmiştir. Dolayısıyla  $Co_{71}Fe_4Mo_1Si_{14}B_9$  malzemesinde kendiliğinden bir miktar dairel anizotropi olduğu düşünülmektedir. Sonuçlar tork altında ısıtım işlemi uygulanan numunedeki çıkış sinyalinin ısıtım işlemi uygulanmayana göre dikkate değer biçimde arttığını göstermiştir.

Bulunan sonuçlardan bobinsiz fluxgate etkinin hem uyarıcı akım hem de frekansa bağlı olduğu düşünülmektedir. Bobinsiz fluxgate etki numune ancak dairel doyuma ulaştığında gözlemlenmektedir. Bunun dışında yüksek uyarıcı akım değerlerinde fluxgate etkinin azaldığı görülmüştür. Uyarıcı akımının daha da artırılması manyetizasyonun yönünün dairel doğrultuya yönelmesine ve helisel yöndeki

bileşenin azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Bu durum sensörün hassasiyetini azaltacaktır.

Isıl işlem uygulanmış numunede elde edilen 570 V/T'lık çıkış değeri daha önceden rapor edilen bobinsiz fluxgate değerleriyle karşılaştırılabilecek seviyededir. Bu hassasiyet değeri ölçüm alınan şeritler arasında elde edilen en yüksek değerdir. Ayrıca şerit olduğu için tellere göre sensör uygulamalarında daha avantajlıdır.

İkinci olarak  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$  malzemesine çeşitli tork ve farklı akım değerleri altında ısıtıl işlem uygulanmış ve ölçümleri alınmıştır. Bu numunede ısıtıl işlem uygulanmamış şeridin çıkış voltajının ikinci harmoniğinde bir doğrusallık gözlenememiştir. Dolayısıyla malzemede dairesel anizotropinin (dolayısıyla helisel anizotropinin) ancak ısıtıl işlem ile oluşturulduğu düşünülmektedir. Bu numunede elde edilen en yüksek hassasiyet değerinin yaklaşık 170 V/T olduğu hesaplanmıştır. Hassasiyet aralığı  $\pm 150$  A/m'dir. Bu aralık değeri  $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{14}\text{B}_9$  numunesine göre daha geniş olmasına rağmen düşüktür.

Bundan başka  $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  amorf ferromanyetik tel numunesi ile de bobinsiz fluxgate ölçümleri alınmıştır. Telin manyetostriksiyon değeri sıfıra yakındır. Tel çeşitli akım, gerilme stresi ve tork uygulanarak ısıtıl işleme tabi tutulmuştur.

Bu numunede sadece gerilme uygulanan numune için  $\sim 130$  V/T kadar bir hassasiyet, gerilmeye ek olarak  $8.25\pi$  rad/m'lik bir tork uygulanan numunede ise  $\sim 190$  V/T kadar hassasiyet değeri elde etmek mümkün olmuştur. Bunun dışında şekil 5.14'teki grafiğe göre, bu malzeme doğrusal olduğu  $\pm 2.5\pi$  rad/m bölgesinde bir tork sensörü olarak kullanılabilir.

Sonuç olarak, sistemde oluşturulan dairesel anizotropi, helisel anizotropi ve mekanik gerilme birbirine uyumlu olmalıdır. Böylece sistemde bobinsiz fluxgate etkinin en iyi şekilde gözlemleneceği düşünülmektedir. Kullanılan sensörün bobini olmadığı için üretimi daha ucuz ve kolay olabilecektir.

Bobinsiz fluxgate etkide hassasiyetin artırılması için ileriki araştırmalarda yüksek manyetik geçirgenlik, yüksek doyum manyetizasyonu ve düşük manyetositriksiyona sahip farklı tel veya şeritler kullanılabilir. Bunun dışında yine söylenen özelliklere sahip amorf olmayan ferromanyetik malzemeler de kullanılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] D. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman & Hall/CRC, (1998) 46-111.
- [2] <http://pms.iitk.ernet.in/wiki/index.php/Hysteresis> (on-line access on 22.04.2014).
- [3] S. Chikazumi, *Physics of Ferromagnetism*, Oxford University Press, 2005, 602.
- [4] J. M. D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*, Cambridge University Press, 2010, 439.
- [5] S.R. Elliot, *Physics of Amorphous Materials*, Longman Inc., Newyork, 1984, 350.
- [6] F.E. Luborsky, *Amorphous Metallic Alloys*, Butterworth&Co Ltd., 1983, 1-3.
- [7] Prof.Dr. Selçuk Atalay, Doç.Dr. V. Serkan Kolat, Doç.Dr. Nevzat Bayrı, Doç.Dr. Tekin İzgi, *Bobinsiz Fluxgate Manyetik Alan Sensörü*, Tübitak Proje Raporu, Kasım 2011.
- [8] N.A. Buznikov, A.S. Antonov, CheolGi Kim, Chong-Oh Kim, *The effect of domain-walls motion on second harmonic amplitude of magnetoinductive response in Co-based amorphous wires*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 285 (2005) 101–111.
- [9] Manh-Huong Phan , Hua-Xin Peng, *Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications*, **Progress in Materials Science**, 53 (2008) 323–420.
- [10] J. Konieczny, A. Borisjuk, M. Pashechko, L.A. Dobrzański, *Magnetic properties of Co-based amorphous ribbon under cyclic heating and cooling*, **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, Vol. 42, Issue 1-2 (2010) 1.
- [11] R. Zallen, *The Physics of Amorphous Solids*, Wiley&Sons Publications, 1998 7.
- [12] T. Matsumoto, I. Ohnaka, M. Hagiwara, *Production of Pd-Cu-Si amorphous wires by melt spinning method using rotating water*, **Scripta Metallurgica**, 15 (1981) 293-306.
- [13] F.E. Luborsky, J.L. Walter, H.H. Liebermann, *Engineering magnetic properties of Fe–Ni–B amorphous alloys*, **IEEE Trans Magn.**, 15 (1979) 909–11.
- [14] P.T. Squire, D. Atkinson , M.R.J. Gibbs, S. Atalay, *Amorphous wires and their applications*, **J Magn Magn.Mater**, 132 (1994) 10–21.
- [15] M. Vazquez, *Soft magnetic wires*, **Physica B** 299 (2001) 302–313
- [16] [http://www.icmm.csic.es/gnmp/?page\\_id=166](http://www.icmm.csic.es/gnmp/?page_id=166). (on-line access on 22.04.2014)
- [17] <http://neomagnet.net/cp6.html>. (on-line access on 22.04.2014)
- [18] <http://www.study-on-line.co.uk/whoami/thesis/chap6.html> (on-line access on 22.04.2014)

- [19] P. Ripka, *Review of Fluxgate Sensors*, **Sensors and Actuators A**, 33 (1992) 129-141.
- [20] P. Ripka, *Advances in Fluxgate Sensors*, **Sensors and Actuators A**, 106 (2003) 8-14.
- [21] T.M. Liakopoulos, Chong H. Ahn, *A micro-fluxgate magnetic sensor using micromachined planar solenoid coils*, **Sensors and Actuators A**, 77 (1999) 66-72.
- [22] B. Ando, S. Baglio, A.R. Bulsara, C. Trigona, *Design and characterization of a microwire fluxgate magnetometer*, **Sensors and Actuators A**, 151 (2009) 145-153.
- [23] P. Ripka, *Magnetic Sensors and Magnetometers*, Artech, Boston, 2001, 75-120.
- [24] K. Kuang, *Magnetic Sensors-Principles and Applications*, InTech, Croatia, 2012, 19-40.
- [25] F.C. Williams, S.W. Noble, *The fundamental limitations of the second harmonic type of magnetic modulator as applied to the amplification of small dc signals*, **Journal of the Institute Electronics Engineers**, 97 (1950) 445-459.
- [26] A. Geyger, *Nonlinear-Magnetic Control Devices*, McGraw-Hill, New York, (1964).
- [27] F. Primdahl, *The fluxgate magnetometer*, **J. Phys. E: Sci. Instrum.**, Vol. 12, (1979) 242-253.
- [28] F. Primdahl, *The Fluxgate Mechanism, Part I: The Gating Curves of Parallel and Orthogonal Fluxgates*, **IEEE Transaction on magnetics**, Vol. Mag-6, No 2 (1970) 376-383.
- [29] Weng-Sheng Huang, Jen-Tzong Jeng and Chih-Cheng Lu, *Harmonic frequency characterisations of a CMOS micro fluxgate sensor for low magnetic field detection*, **Procedia Engineering** 5 (2010) 993-996.
- [30] Jian Lei, Chong Lei, Yong Zhou, *Fabrication and characterization of a new MEMS fluxgate sensor with nanocrystalline magnetic core*, **Measurement** 45 (2012) 535-540.
- [31] J. Kubik, L. Pavel, P. Ripka, *PCB racetrack fluxgate sensor with improved temperature stability*, **Sensors and Actuators A: Physical**, 130-131, (2006) 184-188.
- [32] A.E. Mahdi, L. Panina, D. Mapps, *Some new horizons in magnetic sensing: high- $T_c$  SQUIDS, GMR and GMI materials*, **Sensors and Actuators A** 105 (2003) 271-285.
- [33] James. E. Lenz, *A review of magnetic sensors*, Proceedings of the IEEE, June 1990.
- [34] T.A Potemra, L.J. Zanetti, M.H. Acuna, *The AMPTE CCE Magnetic Field Experiment*, **Geoscience and Remote Sensing**, IEEE Transactions on Volume:GE-23, no.3, (May 1985) pp.246,249.

- [35] F. Kaluza., A. Gruger, H. Gruger, *New and future applications of fluxgate sensors*, **Sens. Actuators, A: Physical**, 106, (2003) 48–51.
- [36] Åke Forslund, *Designing a Miniaturized Fluxgate Magnetometer*, Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology Stockholm, 2006.
- [37] <https://www.greyc.fr/sites/default/files/electronique/4%202012%20Mattia%20Ortho%20Fluxgatt.pdf> (on-line access on 22.04.2014.)
- [38] <http://www.fluxgateworld.com/assets/files/Application%20Notes/AN-1.pdf> (on-line access on 22.04.2014).
- [39] <http://archive.today/9Nsz> (on-line access on 22.04.2014).
- [40] <http://www.carisma.ca/index.php/background/increasing-sensitivity>. (on-line access on 22.04.2014)
- [41] [http://www3.imperial.ac.uk/spat/research/space\\_magnetometer\\_laboratory/spaceinstrumentationresearch/magnetometers/fluxgatemagnetometers/howafluxgateworks](http://www3.imperial.ac.uk/spat/research/space_magnetometer_laboratory/spaceinstrumentationresearch/magnetometers/fluxgatemagnetometers/howafluxgateworks) (on-line access on 06.05.2014).
- [42] S. C. Ling, NASA Tech. Brief., 65, (1965) 10103.
- [43] F. Primdahl, W.R. Darker, *Long-Term Stability of a Ferrite Core Flux-Gate Magnetometer in High Field*, **IEEE Transactions on Magnetics**, MAG-7 (1970) 909-910.
- [44] F. Primdahl, *Temperature compensation of fluxgate magnetometers*, **IEEE Transactions on Magnetics**, 6 (1970) 819-822.
- [45] T. Saito, T. Sakurai, K. Yumoto, Tadayoshi Tamura, *Fluxgate Magnetometer with a 0.5—m Length Two—Core Sensor*, **Sci. Rep. Tohoku Univ.**, Vol. 27 (1980) 85-93.
- [46] X.P. Li, Z.J. Zhao, H.L. Seet, W.M. Heng, T.B. Oh, J.Y. Lee, *Effect magnetic field on the magnetic properties of electroplated NiFe/Cu composite wires*, **Journal of Applied Physics**, Vol. 94, Iss. 10 (2003) 6655-6658.
- [47] X.P. Li, H.L. Seet, J. Fan, J.B. Yi, *Electrodeposition and characteristics of Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>/Cu composite wires*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol.304, Iss. 1, (2006) 111-116.
- [48] H.L. Seet, X.P. Li, Ning, N. Ning, W.C. Ng, J.B. Yi, *Effect of magnetic coating layer thickness on the magnetic properties of electrodeposited NiFe/Cu composite wires*, **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 42, Iss. 10 (2006) 2784-2786.
- [49] Y. Terashima, I. Sasada, *Magnetic domain Imaging using orthogonal fluxgate probes*, **Journal of Applied Physics**, Vol. 91, Iss. 10, (2002) 8888-8890.
- [50] J. Kubik, L. Pavel, L. Ripka, P. Kaspar, *Low-Power Printed Circuit Board Fluxgate Sensor*, **IEEE Sensors Journal**, Vol. 7, Iss. 2, (2007) 179-183.
- [51] P. Ripka, X.P. Li, F. Jie, *Orthogonal fluxgate effect in electroplated wires*, **IEEE Sensors**, (2005).
- [52] F. Jie, X.P. Li, P. Ripka, *Low power orthogonal fluxgate sensor with electroplated Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>/Cu wire*, **Journal of Applied Physics**, Vol. 99, Iss. 8, (2006).

- [53] M. Vázquez, A. Hernando, *A soft magnetic wire for sensor applications*, **Journal of Physics D: Applied Physics**, Vol. 29, Iss. 4, (1996) 939-949.
- [54] V. Yağmur, *Elektrokimyasal Olarak Üretilen Manyetik Kompozit Tellerin Bobinsiz Fluxgate Sensör Olarak Kullanımı*, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [55] J.P. Sinnecker, K.R. Pirota, M. Knobel, L. Kraus, *AC magnetic transport on heterogeneous ferromagnetic wires and tube*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 249, Iss. 1-2, (2002) 16-21.
- [56] M. Butta, P. Ripka, G. Infante, G.A. Badini Confalonieri, M. Vázquez, *Bi-metallic magnetic wire with insulating layer as core for orthogonal fluxgate*, **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 45, Iss. 10, (2009) 4443-4446.
- [57] O. Zorlu, P. Kejik, F. Vincent, R.S. Popovic, *A novel planar magnetic sensor based on orthogonal fluxgate principle*, *Proceedings of International Conference on PhD Research in Microelectronics and Electronics*, Lausanne, Switzerland, (2005) 215-218.
- [58] O. Zorlu, P. Kejik, R.S. Popovic, *An orthogonal fluxgate-type magnetic microsensor with electroplated Permalloy core*. **Sensors and Actuators A-Physical**, Vol. 135, Iss. 1, (2007) 43-49.
- [59] X.P. Li, J. Fan, J. Ding, H. Chiriac, X.B. Qian, J.B. Yi, *A design of orthogonal fluxgate sensor*, **Journal of Applied Physics**, Vol. 99, Iss. 8, (2006)
- [60] X.P. Li, J. Fan, J. Ding, X.B. Qian, *Multi-core orthogonal fluxgate sensor*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 300, Iss. 1, (2006) e98-e103.
- [61] F. Jie, N. Ning, W. Ji, H. Chiriac, X.P. Li, *Study of the Noise in Multicore Orthogonal Fluxgate Sensors Based on Ni-Fe/Cu Composite Microwire Arrays*, **IEEE Transaction on Magnetics**, Vol. 45.
- [62] P. Ripka, X.P. Li, F. Jie, *Multiwire core fluxgate*, **Sensors and Actuators A - Physical**, Vol. 156, Iss.1, (2009) 265-268.
- [63] P. Ripka, M. Butta, F. Jie, X.P. Li, *Sensitivity and Noise of Wire-Core Transverse Fluxgate*, **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 46, Iss. 2, (2010) pp. 654-657
- [64] I. Sasada, *Orthogonal fluxgate mechanism operated with dc biased excitation*, **Journal of Applied Physics**, Vol. 91, Iss. 10, (2002), pp. 7789-7791
- [65] I. Sasada, *Symmetric response obtained with an orthogonal fluxgate operating in fundamental mode*, **IEEE Transactions on magnetics**, Vol. 38, Iss. 5, (2002) pp. 3377-3379
- [66] E. Weiss, E. Paperno, A. Plotkin, *Orthogonal Fluxgate employing discontinuous excitation*, **Journal of Applied Physics**, Vol. 107, Iss. 9, (2010)
- [67] E. Paperno, *Suppression of magnetic noise in the fundamental-mode orthogonal fluxgate*, **Sensors and Actuators A-Physical**, Vol. 116, Iss. 3, (2004) pp. 405-409.

- [68] E. Paperno, E. Weiss, A. Plotkin, *A Tube-Core Orthogonal Fluxgate Operated in Fundamental Mode*, **IEEE Transaction on Magnetics**, Vol. 44, Iss. 11 (2008), pp. 4018-021.
- [69] M. Butta, S. Yamashita, I. Sasada, *Reduction of noise in fundamental mode orthogonal fluxgate by optimization of excitation current*. Accepted in **IEEE Transactions on Magnetics**, (2011).
- [70] I. Sasada, H. Kashima, *Simple Design for Orthogonal Fluxgate Magnetometer in Fundamental Mode*, **Journal of the Magnetics Society of Japan**, Vol. (33), n. 2, (2009) pp. 43-45.
- [71] Y. Terashima, I. Sasada, *Magnetic domain imaging using orthogonal fluxgate probes*, **Journal of Applied Physics**, Vol. 91, Number 10, (2002).
- [72] Hua Zhao, G. W. Zhu, P. Yu, J. D. Wang, et al. in: Flux-gate Magnetometer for Mars Exploration, Proc. SPIE 7129, Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Optoelectronic Technology and Instruments, Control Theory and Automation, and Space Exploration, Beijing, China, (2008).
- [73] J. S. Ping, in: Z.H. Qian, X. Y. Hong, W. M. Zheng, et al. Brief introduction About Chinese Martian Mission Yinghuo-1, 41st Lunar and Planetary Science Conference, (2010).
- [74] [http://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/yinghuo-1.htm](http://space.skyrocket.de/doc_sdat/yinghuo-1.htm) (Online access on 23.04.2014).
- [75] E. B. Pedersen, F. Primdahl, J. R. Petersen, J. M. G. Merayo, Peter Brauer and O. V. Nielsen, *Digital fluxgate magnetometer for the Astrid-2 satellite*, **Meas. Sci. Technol.** 10, (1999) N124–N129.
- [76] P. Brauer, T. Risbo, J.M.G. Merayo, O.V. Nielsen, *Fluxgate sensor for the vector magnetometer onboard the 'Astrid-2' satellite*, **Sensors and Actuators A**, 81 (2000) 184–188.
- [77] H.U. Auster, K.H. Glassmeier, W. Magnes, O. Aydogar et al., *The THEMIS Fluxgate Magnetometer*, Space Sci Rev., DOI 10.1007/s11214-008-9365-9
- [78] <http://www.flightlearnings.com/2010/10/02/heading-indicators-part-three-the-flux-gate-compass-system/> (on-line access on 22.04.2014)
- [79] D. S. Nyce, *Linear Position Sensors: Theory and Application*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2004
- [80] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs and Applications*, Springer-Verlag New York, Inc., 2004
- [81] D.C. Jiles, C.C.H. Lo, *The role of new materials in the development of magnetic sensors and actuators*, **Sensors and Actuators A**, 106 (2003) 3–7
- [82] P. Dimitrova, S. Andreev, L. Popova, *Thin film integrated AMR sensor for linear position measurements*, **Sensors and Actuators A**, 147 (2008) 387–390.
- [83] I. R. Sinclair, *Sensors and Transducers*, third edition, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [84] Jon S. Wilson, *Sensor Technology Handbook*, Elsevier Inc., 2005.

- [85] B.D.Cullity, C.D.Graham, *Introduction to Magnetic Materials*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009.
- [86] B. Ando, S. Baglio, S. La Malfa, C. Trigona, A. R. Bulsara, *Perming Effect in Residence Times Difference Fluxgate Magnetometers*, Sensors and Microsystems: AISEM 2009 Proceedings (2009).
- [87] P.Ripka, *Improving the Accuracy of Magnetic Sensors*, Lecture Notes in Electrical Engineering, Volume 21, Part I, 2008, 45-60.
- [88] K. Lal, S.K.. Chattopadhyaya, A.K Meikap, S.K.. Chatterjee, *Low Temperature electrical conductivity and magnetoconductivity of  $Fe_{39}Ni_{39}Mo_4Si_6B_{12}$  and  $Co_{58}Ni_{10}Fe_5Si_{11}B_{16}$  metallic glass alloys*, **Czech. J. Phys.**, (2001)
- [89] J. Swierczek, H. Lampa, Z. Nitkiewicz, Z. Balaga, *Microstructure and some magnetic properties of annealed Vitrovac 6025X amorphous ribbons*, **Materials Science and Engineering A** 356 (2003) 108-113.
- [90] N. Bayri, *Amorf Ferromanyetik Alaşımlarda Stres-Empedans ve Manyeto-empedans Etki*, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs 2007.
- [91] M. Butta, P. Ripka, *Linearity of Pulse Excited Coil-Less Fluxgate*, **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 45, No. 10 (2009).
- [92] M. Knobel, M. Vázquez, L. Kraus, *Handbook of Magnetic Materials*, Vol. 15 (2003) pp. 497-563.
- [93] N.A. Buznikov, A.S.Antonov, A.A.Rakhmanov, *A model for torsion-stress effect on nonlinear magnetoimpedance in amorphous wires with negative magnetostriction*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials** 323 (2011) 190–195.
- [94] F. Vacher, F. Alves, C. Gilles-Pascaud, *Eddy current nondestructive testing with giant magneto-impedance sensor*, **NDT&E International** 40 (2007) 439–442.
- [95] M. Malatek, P. Ripka, L. Kraus, *Double-core GMI current sensor*, **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 41, Iss. 10, (2005 ) pp. 3703-3705.
- [96] M. Butta, P. Ripka, S. Atalay, F.E. Atalay, X.P. Li, *Fluxgate effect in twisted magnetic wire*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 320, Iss. 20, (2008) pp. e974-e978.
- [97] M. Butta, P. Ripka, G. Infante, G.A Badini Confalonieri, M. Vázquez, *Bi-metallic magnetic wire with insulating layer as core for orthogonal fluxgate*, **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 45, Iss. 10, (2009) pp. 4443-4446.
- [98] M. Butta, P. Ripka, M. Vazquez, G. Infante, L. Kraus, *Microwire electroplated under torsion as core for coil-less fluxgate*, Proceedings of EMSA 2010, Bodrum, July 2010.
- [99] L. Kraus, M. Butta, P. Ripka, *Magnetic anisotropy and giant magnetoimpedance in NiFe electroplated on Cu wires*, Proceedings of EMSA 2010, Bodrum, July 2010.

- [100] D.N. Zhmetko, P.V. Lemish, *The magnetizing mechanism of the amorphous ribbons with the helical magnetic anisotropy*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 196-197 (1999) 816-818.
- [101] K. Kawasaki, T. Kohzawa, M. Takagi, K. Mohri, M. Kanoh, L.V. Panina, *Mechanism of Matteucci effect using amorphous wires*, **IEEE Transactions on Magnetism**, 8, (1993) 318-325.
- [102] D.X. Chen, J.L. Munoz, A. Hernando, M. Vazquez, *Magnetoimpedance of metallic ferromagnetic wires*, **Physical Review B**, 57, (1998) 10699-10704.
- [103] Md. Kamruzzaman, I.Z. Rahman, M.A. Rahman, *A review on magnetoimpedance effect in amorphous magnetic materials*, **Journal of Materials Processing Technology**, 119, (2001) 312-317.
- [104] K. Mohri, T. Uchiyama, L.P. Shen, C.M. Cai, L.V. Panina, *Amorphous wire and CMOS IC-based sensitive micro-magnetic sensors (MI sensor and SI sensor) for intelligent measurements and controls*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 249, (2002) 351-356 .
- [105] F.E. Atalay, H. Kaya, S. Atalay, *Giant magnetoimpedance effect in electroplated CoNiFe/Cu wires with varying Ni, Fe and Co content*, **Journal of Alloys and Compounds**, 420, (2006) 9-14.
- [106] F.E. Atalay, H. Kaya, S. Atalay, *Magnetoimpedance effect in electroplated NiFeRu/Cu wire*, **Journal of Physics D: Applied Physics**, 39, (2006) 431-436.
- [107] K. Mohri, Takeuchi S., *Sensitive bistable magnetic sensors using twisted amorphous magnetostrictive ribbons due to Matteucci effect*, **Journal of Applied Physics**, 53, (1982) 8386-8388.
- [108] K. Mohri, F.B. Humphrey, K. Kawashima, K. Kimura, M. Mizutani, *Large Barkhausen and Matteucci effects in FeCoSiB, FeCrSiB and FeNiSiB amorphous wire*, **IEEE Transactions on Magnetism**, 26, (1990) 1789-1791.
- [109] A.P. Zhukov, *The remagnetization process of bistable amorphous alloys*, **Materials and Design**, 5, (1993) 299-306.
- [110] A.F. Cobeno, J.M. Blanco, A. Zhukov, L. Dominguez, J. Gonzalez, A. Torcunov, P. Aragonese, *Matteucci effect in glass coated microwires*, **IEEE Transactions on Magnetism**, 35, (1999) 3382-3384.
- [111] L. Kraus, M. Malatek, M. Dvorak, *Magnetic field sensor based on asymmetric inverse Wiedemann effect*, **Sensors and Actuators A: Physical**, 142, (2008) 468-473.
- [112] J.G.S.Duque, C. Gomez-Polo, A. Yelon, P. Ciureanu, A.E.P. de Araujo, M. Knobel, *The effect of helical magnetoelastic anisotropy on magnetoimpedance and its second harmonic component in amorphous wires*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 271, (2004 ) 390-395.
- [113] J.G.S.Duque, A.E.P. de Araujo, M. Knobel, A. Yelon, P. Ciureanu, *Large nonlinear magnetoimpedance in amorphous  $Co_{80.89}Fe_{4.38}Si_{8.69}B_{1.52}Nb_{4.52}$  fibers*, **Applied Physics Letters**, 83, (2003) 99-101.

- [114] C. Losin, C. Gomez-Polo, M. Knobel, A. Grishin, *Torsional dependence of second harmonic amplitude of giant magnetoimpedance in FeCoSiB amorphous wire*, **IEEE Transactions on Magnetics**, 38, (2002) 3087-3089.
- [115] D.V. Malyugin, *On the theory of Wiedemann effects*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 97 (1991) 193-197.
- [116] D. Gignoux, M. Schlenker, *Magnetism Fundamentals*, Springer Science + Business Media, Inc. Boston 2005.
- [117] J.L. Costa, Y. Makino, K.V. Rao, *Some Recent Studies on Amorphous Wires*, Intermag'90 Satellite Symposium on Amorphous Magnetic Wire and Applications, London 1990.
- [118] M. Butta, P. Ripka, *Model for coil-less fluxgate*, **Sensors and Actuators A: Physical**, Vol. 156, Iss. 1 (2009) pp. 269-273.
- [119] C. Gomez-Polo, J.G.S. Duque, M. Knobel, *Nonlinear giant magnetoimpedance and the asymmetric circumferential magnetization process in soft magnetic wires*, **Journal of Physics: Condensed Matter**, 16, (2004) 5083-5094.
- [120] M. Butta, P. Ripka, *Two-domain model for orthogonal fluxgate*, **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 44, Iss. 11, (2008) 3992-3995.
- [121] L. Kraus, N. Zarubova, K. Zaveta, P. Duhaj, *Creep-induced magnetic anisotropy of an amorphous Fe<sub>80</sub>Cr<sub>2</sub>B<sub>14</sub>Si<sub>4</sub> alloy*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 72, (1988) 199-208.
- [122] L. Kraus, M. Vazquez, A. Hernando, *Creep-induced magnetic anisotropy in a Co rich amorphous wire*, **Journal of Applied Physics**, 76, (1994) 5343-5348.
- [123] P. Aragonese, J.M. Blanco, L. Dominguez, J. Gonzalez, K. Kulakowski, *Influence of the helical anisotropy on the bistable behavior of amorphous wires*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 168, (1997) 177-181.
- [124] I. Ogasawara, K. Mohri, *Tension annealing cold-drawn amorphous CoFeSiB wires*, **IEEE Transactions on Magnetics**, 26, (1990) 1795-1797.
- [125] J.M. Blanco, A. Zhukov, J. Gonzalez, *Torsional stress impedance and magnetoimpedance cast (Co<sub>0.95</sub>Fe<sub>0.05</sub>)<sub>72.5</sub>Si<sub>12.5</sub>B<sub>15</sub> amorphous wire with helical induced anisotropy*, **Journal of Physics D: Applied Physics**, 32, (1999) 3140-3145.
- [126] J.M. Blanco, A. Zhukov, J. Gonzalez, *Asymmetric torsion stress giant magnetoimpedance in nearly zero magnetostrictive amorphous wire*, **Journal of Applied Physics**, 87, (2000) 4813-4815.

## 7. ÖZGEÇMİŞ

Alper FİDAN,

1979 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Malatya'da tamamladı. 2004 yılında İnönü Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden mezun oldu. 2005 yılında İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilimdalında yüksek lisansa başladı. 2008 yılında yüksek lisansını tamamladı. 2009 yılında İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim dalında doktora eğitimine başladı.

### Tez Kapsamında Yapılan Yayınlar:

- A. Fidan, S. Atalay, N. Bayri, F.E. Atalay, V. Yagmur, *Coil-Less Fluxgate Effect in Amorphous  $Co_{71}Fe_1Mo_1Mn_4Si_{14}B_9$  Ribbon*, **Solid State Phenomena, Trans Tech Publications Inc.**, Vol.190 (2012) p167.
- S. Atalay, N. Bayri, A. Fidan, F.E. Atalay and V. Yagmur, *Torsion Sensor Based on Coil-less Fluxgate Effect*, **Sensors and Actuators A: Physical**, Volume 178, May 2012, Pages 100–103.