



İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETOELEKTİRK MANYETİK ALAN SENSÖRLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERGÜN DURMAZ

MALATYA

2026

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETOELEKTRİK MANYETİK ALAN SENSÖRLERİ

Ergün Durmaz

Fizik

Yüksek Lisans

Tez Danışmanı
Prof.Dr. Selçuk Atalay

Tez Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Selçuk Atalay
Prof. Dr. Nevzat Bayri
Prof. Dr. Harun Kaya

Bu Araştırma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2025-4257 Proje numarası ile desteklenmiştir

MALATYA
2026

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında; bilgi, tecrübe, değerli önerileri ve yapıcı eleştirileriyle beni yönlendiren, akademik gelişime önemli katkılar sağlayan ve her türlü desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Selçuk Atalay'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimleriyle katkıda bulunan Prof. Dr. Veli Serkan Kolat'a, Prof. Dr. Nevzat Bayri' ye, Dr. Orhan Orçun İnan'a ve Araştırma Görevlisi Ömer Faruk Şeker'e teşekkürlerimi sunarım.

Akademik hayatım boyunca olduğu gibi bu tez çalışmasının yürütülmesi sürecinde de maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, sabır ve anlayışlarıyla her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Tezin uygulama ve deneysel aşamalarında sağladıkları maddi ve manevi destekten dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (BAP), FYL-2025-4257 numaralı proje kapsamında verdikleri katkılar için teşekkür ederim.

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

ETİK ve YAPAY ZEKÂ KULLANIM BEYANI

09 /06/ 2026

İnönü Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak, “Prof. Dr. Selçuk Atalay” danışmanlığında hazırlayıp sunduğum “Manyetoelektrik Manyetik Alan Sensörleri” başlıklı Yüksek Lisans tezimde :

1. ETİK ve BİLİMSEL SORUMLULUKLARIM:

- Tezimde yer alan verileri, bilgileri ve belgeleri akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Çalışmada yararlandığım tüm kaynaklara bilimsel kurallara uygun şekilde atıfta bulunduğumu ve kaynakça gösteriminde APA 7. baskı kurallarına uyduğumu,
- Tezimin özgün olduğunu, çalışma ve yazım sürecinde patent ve telif haklarını ihlal edici hiçbir davranışta bulunmadığımı,
- Aksi bir durumda doğabilecek tüm hukuki ve akademik sonuçları kabul ettiğimi,

2. YAPAY ZEKÂ KULLANIMINA İLİŞKİN BEYANIM:

(X) Tez yazım sürecinde yapay zekâ tabanlı araçlardan **faydalanmadım**.

() Tez yazım sürecinde yapay zekâ tabanlı araçlardan **faydalandım**.

Bu durumda:

- Yapay zekâ araçlarını yalnızca bilimsel üretim sürecini desteklemek amacıyla kullandığımı,
 - Kullanımın hipotez geliştirme, teorik tartışma ve yorumlama gibi üst düzey akademik becerileri içermediğini,
 - Kullanımın tezin özgünlüğüne, bilimsel etik kurallarına ve ilgili mevzuata aykırı olmadığını,
 - Usulsüz kullanımlara (kaynak göstermeksizin metin üretimi, yanıltıcı kaynak gösterimi, otomatik içeriklerin özgün eser gibi sunulması vb.) kesinlikle başvurmadığımı,
 - Kullanılan yapay zekâ araçlarının ve işlevlerinin, danışmanımın bilgisi dâhilinde, ekte verilen tabloda şeffaf biçimde belirtildiğini,
 - Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber’de belirtilen ilkelere riayet ettiğimi,
- kabul ve taahhüt ederim.

Ergün Durmaz

İmza

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
ETİK ve YAPAY ZEKÂ KULLANIM BEYANI	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1.GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Bazı Temel Parametreler.....	3
2.1.1. Manyetik alan.....	3
2.1.3. Coersivite	4
2.1.4. Anizotropi alanı	4
2.1.5. Alınganlık.....	5
2.1.6. Manyetik domain	5
2.1.7. Curie sıcaklığı.....	5
2.1.8. Rezonans frekansı	5
2.2. Piezoelektrik	6
2.2.1. Piezoelektrik malzemeler	6
2.2.2. Piezoelektrik katsayısı	7
2.2.3. Elektromekanik dönüşüm faktörü	8
2.2.4. Piezoelektrik gerilim sabiti	8
2.3. Manyetostriksiyon (λ).....	9
2.3.1. Manyetostriktif malzeme.....	11

2.3.1.1. Manyetostriktif malzemelerin tarihi	11
2.3.1.2. Bazı Manyetostriktif malzemeler	13
2.4. Amorf Ferromanyetik Alaşımlar	15
2.5.1. Manyetik alan sensörlerinin tarihçesi	18
2.5.2. Manyetik alan sensörlerin bazı uygulamalar	19
2.5.2.1. İkinci dünya savaşı – denizaltı tespiti	19
2.5.2.2. Magnetoencephalography (MEG) – Beyin aktivitesi ölçümü (1968)	20
2.5.2.3. Otomotivde hall sensörlerinin kullanımı (1980’ler)	21
2.5.2.4. Akıllı telefon tabanlı hall etkisi sensörleri ile manyetik boncuk destekli biyosensör uygulamaları	22
2.5.3. Manyetik alan sensörlerin çeşitleri:	23
2.5.3.3. Fluxgate sensörleri	29
2.5.3.4. SQUID (Süperiletken Kuantum Girişim Cihazları)	31
2.5.3.5. Manyetooptik sensörler	32
2.5.3.6. Manyetoelektrik sensör	34
2.6. Manyetoelektrik Etki	36
2.8. Manyetoelektrik Sensörlerde Manyetik Alan Hassasiyeti	45
2.9. Manyetoelektrik Sensörlerde Rezonans Frekansı	49
2.10. DC Bias Manyetik Alanın Etkisi	51
3. MATERYAL VE METOT	55
3.1. Sensör Yapımında Kullanılan Malzemeler	55
3.2. Manyetostriktif Malzemelerin Hazırlanması ve Manyetoelektrik Sensörün Üretimi	56
3.2.1. Manyetostriktif malzemelerin kesimi	56
3.2.2. Etching (aşındırma) işlemi	56
3.2.3. Polishing (parlatma) işlemi	56

3.3. Manyetik Ölçümler	59
3.3.1 .M-H ölçüm sistemi	59
3.3.2. Manyetoelektrik ölçüm sistemi	62
3.3.2.1. Manyetoelektrik ölçüm yazılımı ve kontrol sistemi	65
3.4. Karakterizasyon Ölçümleri.....	66
3.4.1. SEM-EDX ölçümleri.....	66
3.4.2. XRD ölçümleri.....	67
3.4.3. FT-IR yöntemi	67
4.BULGULAR	68
4.1. Karakterizasyon Ölçümlerinin Sonuçları	68
4.2. Manyetik Ölçüm Sonuçları.....	74
4.2.1. M–H ölçüm sonuçları	74
4.2.2. Manyetoelektrik ölçüm sonuçları	75
4.2.2.1. 28 µm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörün ölçüm sonuçları	91
4.2.2.2. 50 µm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörün ölçüm sonuçları.....	96
4.3. 28 µm ve 50 µm Kalınlığındaki PVDF Tabanlı Sensörlerin Karşılaştırılması	102
5. TARTIŞMA	103
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	106
KAYNAKLAR	108

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Piezoelektrik katsayılar (Chhugani vd., 2019).....	7
Çizelge 2.2. Piezoelektrik Gerilme Sabiti Değerleri (Yaklaşık).....	9
Çizelge 2.3. Manyetostriktif malzemelerin bileşimleri ve manyetostriksiyon katsayıları	13
Çizelge 2.4. Kristal yapıya sahip manyetostriktif malzemelerin özellikleri.	14
Çizelge 2.5. Terfenol-D'nin manyetik özellikleri.	14
Çizelge 2.6. Amorf alaşımların 300 K'de doyum manyetizasyonu ve curie sıcaklıkları (Luborsky, 1980; Bayri, 2007)	17
Çizelge 2.7. Bazı numunelerin manyetoelektrik voltaj katsayıları (Pradhan vd., 2020).	41
Çizelge 3.1. Manyetoelektrik sensörlerin hazırlanmasında kullanılan manyetostriktif malzemelerin kompozisyonları.	55
Çizelge 3.2. Manyetoelektrik sensörlerin hazırlanmasında kullanılan boyutları (40 x 5)mm kalınlığı 0.5 mm piezoelektrik malzeme olan PZT nin özellikleri (He-Shuai Ltd., 2018).....	55
Çizelge 3.3. Manyetoelektrik sensörlerin hazırlanmasında kullanılan piezoelektrik malzeme PVDF, $(CH_2-CF_2)_n$ kompozisyonuna sahiptir. Çizelge, farklı kalınlıklardaki PVDF filmlerin özelliklerini karşılaştırmaktadır (Piezo PVDF, n.d.)..	56
Çizelge 4.1. Vacodur49 manyetostriktif alaşımının EDX analizi ile belirlenen elementel bileşimi.	70
Çizelge 4.2. AFŞ malzemesinin EDX analizine ait elementel bileşim sonuçları.....	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. M-H eğrisi.	4
Şekil 2.2. (A) Mekanik kuvvet ile indüklenen elektriksel voltaj. (B) Elektriksel voltaj ile indüklenen mekanik deformasyon (Cullity ve Graham, 2008).	6
Şekil 2.3. Piezoelektrik malzemelerin giriş/çıkışı (Behera, 2022a).	7
Şekil 2.4. Gerinim ile manyetik alan arasındaki ilişki (Olabi ve Grunwald, 2008).	9
Şekil 2.5. Gerinim ile manyetik alan arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (Jiles, 2015).	10
Şekil 2.6. Manyetostriksiyon etkisi: Gerilme ile manyetik alan arasındaki ilişki (Behera, 2022b).	12
Şekil 2.7. Melt-spinning metodu (Bayri, 2007).	16
Şekil 2.8. CAE MAD-XR sistemi (CAE, 2023).	20
Şekil 2.9. Beynin manyetik alanının kökeni ve EEG sinyalinin üretimi (Narli, 2020).	21
Şekil 2.10. Hall etkili ABS tekerlek hız sensörü (Ototaşarruf, 2019).	22
Şekil 2.11. Akıllı telefon tabanlı hall etkisi sensörleri ile manyetik boncuk destekli biyosensör uygulamalarının gösterimi (Zhu vd., 2020).	23
Şekil 2.12. Manyetik alan sensörlerin hassasiyet aralıklarının çizelgede gösterimi (Lenz ve Edelstein, 2006).	24
Şekil 2.13. Mıknatısın Manyetik Hale Dik Etki Ederek Voltaj Oluşturması (Akgul, 2021).	25
Şekil 2.14. AMR sensör elemanının çalışma prensibinin gösterimmi (ABLIC Inc., n.d.).	26
Şekil 2.15. GMR sensör elemanının çalışma prensibinin gösterimmi (ABLIC Inc., n.d.).	27
Şekil 2.16. GMR sensör elemanının çalışma prensibinin gösterimmi (ABLIC Inc., n.d.).	28
Şekil 2.17. Bazı Fluxgate sensör çeşitleri (Atalay vd., 2010).	30
Şekil 2.18. SQUID (süperiletken kuantum girişim cihazı) çalışma prensibinin gösterimi . (Zhang vd., 2024).	32
Şekil 2.19. Manyetooptik sensörün çalışma prensibinin gösterimi (Dorosinskiy ve Sievers, 2023).	33
Şekil 2.20. Tezde kullanılan manyetoelektrik sensörün genel görünümü ve kompozit yapısı.	34
Şekil 2.21. Web of Science'a göre anahtar kelime olarak 'manyetoelektrik' kelimesini içeren yıllık yayınlar (Clarivate, 2026).	38
Şekil 2.22. Manyetik ve ferroelektrik malzemelerin farklı yapılandırmaları; sarı bölgeler manyetik malzemeyi, mavi bölgeler ise ferroelektrik malzemeyi temsil etmektedir.	39

Şekil 2.23. Katmanlı yapıya sahip bir ME numunede voltaj ölçümü (Giang vd., 2012).	40
Şekil 2.24. (a) PZT'ye pozitif DC elektrik alan uygulandığında manyetoelektrik katsayısının α_{ME} DC bias manyetik alana H_{DC} göre değişimi; (b) PZT'ye negatif DC elektrik alan uygulandığında α_{ME} 'nin H_{DC} 'ye göre değişimi (Li vd., 2016).	42
Şekil 2.25. Manyetoelektrik gerilim katsayısının α_{ME} (a) AC manyetik alan frekansına f_{AC} ve (b) DC bias manyetik alana H_{DC} bağlı değişimi (Zhang vd., 2024).	43
Şekil 2.26. 4, 3 ve 2 cm uzunluğundaki laminatların uygulanan DC manyetik alana bağlı manyetoelektrik katsayıları (Lasheras vd., 2017).	44
Şekil 2.27. PZT-5A piezofiber/Metglas kompozit yapısında manyetoelektrik gerilim katsayısının (α_{ME}) frekansa bağlı değişimi. Ölçümler optimum DC bias manyetik alanı ($H_{DC} = 4$ Oe) altında gerçekleştirilmiştir (Turutin vd., 2022).	45
Şekil 2.28. AC manyetik alan çözünürlüğü: (a) vakum uygulanmamış numune, (b) vakum uygulanmış numune. DC manyetik alan çözünürlüğü: (c) vakum uygulanmamış numune, (d) vakum uygulanmış numune (Zhang vd., 2024).	46
Şekil 2.29. AC manyetik alan çözünürlüğü (Sun vd., 2023).	47
Şekil 2.30. DC manyetik alan çözünürlüğü (Sun vd., 2023).	47
Şekil 2.31. Metglas/PVDF tabakalı manyetoelektrik sensörde 40 Hz frekansta ve DC bias manyetik alan uygulanmadan, (a) AC manyetik alan şiddetine bağlı çıkış gerilimi ve (b) sensörün çözünürlüğü (Yang vd., 2022).	48
Şekil 2.32. DC manyetik alan sensörünün küçük DC manyetik alan değişimlerine verdiği çözünürlük cevabı (Shen vd., 2018).	49
Şekil 2.33. Manyetoelektrik sensörün çıkış geriliminin frekansa bağlı değişimi (Sun vd., 2023).	50
Şekil 2.34. Metglas/PVDF/Metglas tabakalı manyetoelektrik laminantta gerilim cevabının frekansa bağlı değişimi (Reis vd., 2016a).	51
Şekil 2.35. Manyetoelektrik sensör için $f_{res} = 60.101$ kHz'de ölçülen $V_{Çıkış}(H_{DC})$ eğrisi ve türevi (Sun vd., 2023).	52
Şekil 2.36. Metglas/PVDF/Metglas tabakalı manyetoelektrik laminantta gerilim cevabının (a) frekansa bağlı değişimi (Reis vd., 2016a).	52
Şekil 2.37. Metglas/PVDF/Metglas tabakalı manyetoelektrik yapıda gerilim cevabının ve manyetoelektrik katsayısının DC manyetik alana bağlı değişimi (Reis vd., 2016b). .	53

Şekil 2.38. Metglas/PVDF/Metglas tabakalı manyetoelektrik yapının DC manyetik alan sensörü olarak karakterizasyonu: (a) doğrusallık, (b) çözünürlük ve hassasiyet, (c) doğruluk ve (d) histerezis (Reis vd., 2016a).....	54
Şekil 3.1. Manyetoelektrik sensörün yapısı.	58
Şekil 3.2. Manyetoelektrik Sensörün fotoğrafı.	58
Şekil 3.3. Çalışmada hazırlanan manyetoelektrik sensör yapılarına ait şematik gösterim: (A) AFŞ/PZT/AFŞ ,(B) Vacodur49/PZT/Vacodur49 ,(C) AFŞ/PVDF (28 µm)/AFŞ ,(D) AFŞ/PVDF (50 µm)/AFŞ.....	59
Şekil 3.4. Uygulanan manyetik alan ile tipik bir malzemenin manyetizasyon değişimi gösterilmektedir.	60
Şekil 3.5. M-H ölçüm sistemi (Bayri, 2007).	62
Şekil 3.6. M-H ölçüm sisteminin fotoğrafı.....	62
Şekil 3.7. Manyetoelektrik ölçüm sistemi	64
Şekil 3.8. Manyetoelektrik ölçüm sisteminin fotoğrafı.	65
Şekil 4.1. Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemenin farklı büyütme ölçeklerinde elde edilen SEM görüntüleri.....	68
Şekil 4.2. Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemeye ait X-ışını kırınım (XRD) deseni.....	69
Şekil 4.3. Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemenin EDX analizi için alınan SEM görüntüsü.	70
Şekil 4.4. Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemeye ait EDX spektrumu.	70
Şekil 4.5. Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemeye ait SEM-EDX element dağılım (color mapping) görüntüleri: (A) birleşik (overlay) harita, (B) Co dağılımı, (C) Fe dağılımı, (D) Nb dağılımı, (E) V dağılımı.....	71
Şekil 4.6. AFŞ malzemesine ait EDX analizi için alınan SEM görüntüsü.	72
Şekil 4.7. AFŞ malzemesine ait EDX spektrumu.	72
Şekil 4.8. PVDF numunesine ait FTIR spektrumu.	73
Şekil 4.9. Vacodur49 kodlu manyetostriktif şeride ait M–H eğrisi.	74
Şekil 4.10. AFŞ malzemesine ait M–H eğrisi.	75
Şekil 4.11. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün geniş frekans aralığında titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.	76
Şekil 4.12. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün rezonans frekansı çevresinde titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.	76

Şekil 4.13. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alana bağlı olarak rezonans frekansı ve titreşim geriliminin değişimi.	77
Şekil 4.14. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde ME voltajının AC manyetik alan genliğine bağlı olarak farklı frekanslardaki değişimi.	78
Şekil 4.15. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alanın farklı frekanslarda gerilim genliği üzerindeki etkisi.	79
Şekil 4.16. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde rezonans frekansında DC manyetik alanın gerilim genliği üzerindeki etkisi.	79
Şekil 4.17. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün duyarlılığını belirlemek amacıyla zamana bağlı gerilim değişimi verilmiştir.	80
Şekil 4.18. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde mıknatısın oluşturduğu manyetik alanın çıkış gerilimi üzerindeki etkisi.	81
Şekil 4.19. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörün geniş frekans aralığında titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi. 82	
Şekil 4.20. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörün rezonans frekansı çevresinde titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.	83
Şekil 4.21. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alana bağlı olarak rezonans frekansı ve titreşim geriliminin değişimi ...	84
Şekil 4.22. Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörde ME katsayısının DC manyetik alan H_{DC} ile değişimi.	85
Şekil 4.23. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörde ME voltajının AC manyetik alan genliğine bağlı olarak farklı frekanslardaki değişimi. 86	
Şekil 4.24. Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alanın farklı frekanslarda gerilim genliği üzerindeki etkisi.	87
Şekil 4.25. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörde rezonans frekansında DC manyetik alanın gerilim genliği üzerindeki etkisi.	87
Şekil 4.26. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörün duyarlılığını belirlemek amacıyla zamana bağlı gerilim değişimi verilmiştir.	88
Şekil 4.27. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörün çıkış gerilimi cevabının uygulanan H_{AC} manyetik alanına bağlı değişimi.	89

Şekil 4.28. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörde mıknatısın oluşturduğu manyetik alanın çıkış gerilimi üzerindeki etkisi.	90
Şekil 4.29. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün geniş frekans aralığında titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.	91
Şekil 4.30. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün rezonans frekansı çevresinde titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.	91
Şekil 4.31. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alana bağlı olarak rezonans frekansı ve titreşim geriliminin değişimi	92
Şekil 4.32. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde ME voltajının AC manyetik alan genliğine bağlı olarak farklı frekanslardaki değişimi.	93
Şekil 4.33. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alanın farklı frekanslarda gerilim genliği üzerindeki etkisi.	94
Şekil 4.34. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde rezonans frekansında DC manyetik alanın gerilim genliği üzerindeki etkisi.	94
Şekil 4.35. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün duyarlılığını belirlemek amacıyla zamana bağlı gerilim değişimi	95
Şekil 4.36. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün geniş frekans aralığında titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.	96
Şekil 4.37. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün rezonans frekansı çevresinde titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.	97
Şekil 4.38. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alana bağlı olarak rezonans frekansı ve titreşim geriliminin değişimi.	98
Şekil 4.39. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde ME voltajının AC manyetik alan genliğine bağlı olarak farklı frekanslardaki değişimi.	99
Şekil 4.40. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alanın farklı frekanslarda gerilim genliği üzerindeki etkisi.	100
Şekil 4.41. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde rezonans frekansında DC manyetik alanın gerilim genliği üzerindeki etkisi.	100
Şekil 4.42. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün duyarlılığını belirlemek amacıyla zamana bağlı gerilim değişimi verilmiştir.	101

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	: Alternating Current
AFŞ	: Amorf Ferromanyetik Şerit
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu (T)
d₃₃	: Piezoelektrik Gerinim Katsayısı (10^{-12} m/V)
DC	: Direct Current
EDX	: Energy Dispersive X-ray
f	: Frekans (Hz)
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spectroscopy
H	: Manyetik Alan Şiddeti (A/m)
H_{AC}	: AC Manyetik Alan
H_c	: Koersivite
H_{DC}	: DC Manyetik Alan
H_k	: Anizotropi Alanı
M	: Manyetizasyon (A/m)
ME	: Manyetoelektrik
M_r	: Remanent Manyetizasyon
M_s	: Doyum Manyetizasyonu
nT	: NanoTesla
pT	: PikoTesla
PVDF	: Polyvinylidene Fluoride
PZT	: Lead Zirconate Titanate
SEM	: Scanning Electron Microscopy
T_c	: Curie Sıcaklığı

V : Gerilim (V)

XRD : X-Işınları Kırınımı

α_{ME} : Manyetoelektrik Gerilim Katsayısı

ϵ_r : Bağıl Dielektrik Sabiti

λ : Manyetostriksiyon Katsayısı

μ_o : Boşluğun Manyetik Geçirgenliği

μ_r : Bağıl Manyetik Geçirgenlik

μT : MikroTesla

ρ : Yoğunluk

χ : Manyetik

ÖZET

MANYETOELEKTİRİK MANYETİK ALAN SENSÖRLERİ

Amaç: Bu tez çalışmasının amacı, düşük manyetik alanlara duyarlı, yüksek hassasiyetli bir manyetoelektrik (ME) sensör elde etmektir.

Materyal ve Metot: Bu tez çalışmasında manyetostriktif malzeme olarak Vacodur 49 (Fe–Co–V; demir–kobalt–vanadyum) alaşımı ve Ni–Fe–Co esaslı amorf ferromanyetik şerit kullanılmıştır. Vacodur 49 kodlu manyetostriktif malzeme, manyetoelektrik sensör tasarımında ilk kez bu çalışma kapsamında kullanılmıştır. Piezoelektrik katman olarak PVDF ve PZT malzemeleri tercih edilmiş ve geliştirilen sensör yapılarının DC ve AC manyetik alan altındaki performansları deneysel olarak incelenmiştir.

Bulgular: Rezonans frekansı çevresinde sensör çıkış geriliminin belirli bir DC manyetik alan değerinde maksimuma ulaştığı belirlenmiştir. AC manyetik alan genliğinin artmasıyla manyetoelektrik voltajın yaklaşık doğrusal şekilde arttığı gözlenmiştir.

Sonuç: Elde edilen sonuçlar, Vacodur 49 tabanlı manyetoelektrik sensör tasarımının ve amorf ferromanyetik şerit tabanlı sensör yapısının yüksek hassasiyet sağladığını, DC manyetik alanda 0,3 nT, AC manyetik alanda ise 100 pT mertebesindeki düşük manyetik alan değişimlerini algılayabildiğini ve literatüre özgün bir katkı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Manyetostriksiyon, Manyetoelektrik sensör, PVDF, PZT, Rezonans frekansı, Vacodur 49.

ABSTRACT

MAGNETOELECTRIC MAGNETIC FIELD SENSORS

Aim: The aim of this thesis is to obtain a highly sensitive magnetoelectric (ME) sensor capable of detecting low magnetic fields.

Materials and Methods: In this study, Vacodur 49 (Fe–Co–V; iron–cobalt–vanadium) alloy and a Ni–Fe–Co–Si–B–C-based amorphous ferromagnetic ribbon were used as magnetostrictive materials. The magnetostrictive material coded as Vacodur 49 was employed for the first time in the design of a magnetoelectric sensor within the scope of this study. PVDF and PZT were selected as piezoelectric layers, and the performances of the developed sensor structures under DC and AC magnetic fields were experimentally investigated.

Results: It was determined that the sensor output voltage reached its maximum at a specific DC magnetic field value around the resonance frequency. It was also observed that the magnetoelectric voltage increased approximately linearly with increasing AC magnetic field amplitude.

Conclusion: The obtained results demonstrate that the Vacodur 49–based magnetoelectric sensor design and the amorphous ferromagnetic ribbon–based sensor structure provide high sensitivity, being capable of detecting low magnetic field variations on the order of 0.3 nT for DC magnetic fields and 100 pT for AC magnetic fields, and thus make an original contribution to the literature.

Keywords: Magnetoelectric sensor, Magnetostriction, PVDF, PZT, Resonance frequency, Vacodur 4

1.GİRİŞ

Manyetoelektrik (ME) sensörler, uygulanan manyetik alan değişimlerini elektriksel sinyallere dönüştürebilen yapıları sayesinde son yıllarda sensör teknolojileri içinde önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Bu sensörler; yüksek hassasiyet, kompakt yapı ve farklı uygulama alanlarına uyarlanabilirlik gibi avantajları nedeniyle savunma sanayi, biyomedikal sistemler, uygulamalarında kullanılmaktadır (Nan vd., 2008). Manyetoelektrik etki, genel olarak ferromanyetik manyetostriktif malzeme ve piezoelektrik malzemelerin bir araya getirilmesiyle elde edilmekte olup, uygulanan manyetik alanın önce manyetostriktif malzemede mekanik deformasyona, ardından da onu piezoelektrik katmana ileterek elektriksel gerilime malzemede mekanik. Bu nedenle ME sensörlerin performansı, doğrudan kullanılan malzemelerin özelliklerine malzemelerin uyumuna ve çalışma koşullarına bağlıdır (Nan vd., 2008; Srinivasan, 2010).

ME sensörlerin performansını belirleyen başlıca büyüklükler arasında rezonans frekansı, DC manyetik alan tepkisi ve ME voltaj katsayısı yer almaktadır. Rezonans frekansı, sistemin en yüksek çıkış sinyali verdiği bölgeyi ifade eder. DC manyetik alan tepkisi, sensörün dış manyetik alan altındaki davranışını ve hassasiyetini ortaya koymaktadır. ME voltaj katsayısı ise sensörün manyetik uyarıya karşı ürettiği elektriksel sinyalin göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Bu parametrelerin doğru biçimde incelenmesi, sensör tasarımında uygun malzeme seçimi ve iyi çalışma koşullarının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Dong vd., 2006; Srinivasan, 2010).

Bu tez çalışmasında, manyetoelektrik sensörlerin performansını belirleyen temel parametrelerin farklı manyetostriktif ve piezoelektrik malzeme çeşitleri üzerinden incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada piezoelektrik malzeme olarak PVDF ve PZT, manyetostriktif malzeme olarak ise Vacodur49 ve Amor ferromanyetik şerit (AFŞ) kullanılmıştır. Bu malzemelerden hazırlanan numunelerin öncelikle rezonans frekansları belirlenmiş, ardından farklı DC manyetik alanlarda manyetoelektrik voltaj ölçülmüş ve hassasiyet değerlerine bakılmıştır. Böylece PVDF, PZT, Metglas ve Vacodur49 malzemelerinin rezonans frekansı, voltaj sinyali ve genel sensör performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak değerlendirilmiştir.

Araştırmanın Amacı ve Önemi

Bu araştırmanın temel amacı, farklı piezoelektrik ve manyetostriktif malzeme çiftlerinin manyetoelektrik sensör performansı üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu kapsamda, PVDF/PZT ile AFŞ/Vacodur49 tabanlı yapıların rezonans frekansı, DC manyetik alan tepkisi ve ME voltaj katsayısı bakımından incelenmiştir. Çalışma sonucunda, hangi malzeme kombinasyonlarının daha yüksek hassasiyet ve daha güçlü voltaj sinyalinin çıkışının belirlenmesi amaçlanmıştır. Araştırmanın önemi, ME

sensörlerin tasarımında yalnızca sensör yapısının değil, aynı zamanda kullanılan malzemelerin özelliklerinin de önemli olduğu göstermesidir. Elde edilen sonuçlar, uygun malzeme seçiminin sensör duyarlılığını artırabileceğini ve farklı uygulama alanları için daha etkin sistemler geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Sınırlılıklar Varsayımlar ve Tanımlamalar

Bu çalışma, piezoelektrik malzeme olarak PVDF ve PZT, manyetostriktif malzeme olarak ise AFŞ ve Vacodur 49 kullanılarak hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Deneysel ölçümler, belirli laboratuvar koşullarında ve belirli manyetik alan üreten bobinlerle gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, yalnızca çalışmada kullanılan malzeme kombinasyonları, numune boyutları, deney düzeneği ve ölçüm koşulları gibi konularla değerlendirilmelidir. Çalışmada, deney düzeneğinin düzenli çalıştığı, ölçüm cihazlarının doğru kalibrasyonla kullanıldığı ve hazırlanan numunelerin malzeme özelliklerini temsil ettiği kabul edilmiştir. Ayrıca uygulanan DC manyetik alanın deney süresince homojen olduğu ve dış çevresel gürültülerin ölçüm sonuçlarını ihmal edilebilir düzeyde etkilediği varsayılmıştır.

Bu tezde manyetik alan, sensör yapısına dışarıdan uygulanan alanı; manyetizasyon, malzemenin uygulanan manyetik alana verdiği tepkiyi; piezoelektrik etki, mekanik gerilme altında elektriksel gerilim oluşumunu; manyetostriksiyon ise manyetik alan etkisiyle malzemenin boyut değiştirmesini ifade etmektedir. Rezonans frekansı, sensörün en yüksek cevabı verdiği çalışma frekansı; ME voltaj katsayısı ise uygulanan manyetik uyarı karşısında elde edilen elektriksel gerilim cevabının bir ölçütü olarak ele alınmıştır. Bu kavramlar, çalışmanın deneysel değerlendirmelerinde temel parametreler olarak kullanılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Bazı Temel Parametreler

Bu bölümde, manyetoelektrik sensörlerin davranışını belirleyen temel fiziksel parametreler ele alınmıştır. Manyetik ve piezoelektrik özelliklerle ilişkili bu parametreler, sensörün çalışma mekanizmasının anlaşılması açısından önem taşımaktadır.

2.1.1. Manyetik alan

“Manyetik alan (H), mıknatısların veya hareketli elektrik yüklerinin çevresinde oluşturduğu, etkileşimlerin yönünü ve şiddetini belirleyen vektörel bir fiziksel büyüklüktür. Literatürde genellikle B sembolü ile temsil edilen bu alanın yönü, mıknatısın kuzey (N) kutbundan güney (S) kutbuna doğru uzanan manyetik alan çizgileriyle modellenir. Modern fiziğin temel taşlarından biri olan bu olgu; sadece kalıcı mıknatıslar tarafından değil, aynı zamanda elektrik akımları (hareketli yükler), zamanla değişen elektrik alanları ve atomaltı parçacıkların içsel "*spin*" manyetik momentleri aracılığıyla üretilir. Uluslararası Birim Sistemi'nde (SI) birimi Tesla (T) olarak tanımlanmış olsa da, yerkürenin manyetik alanı gibi daha düşük şiddetli alanları ifade etmek için pratikte Gauss (G) birimi de yaygın olarak kullanılır“(Young ve Friedman, 2015).

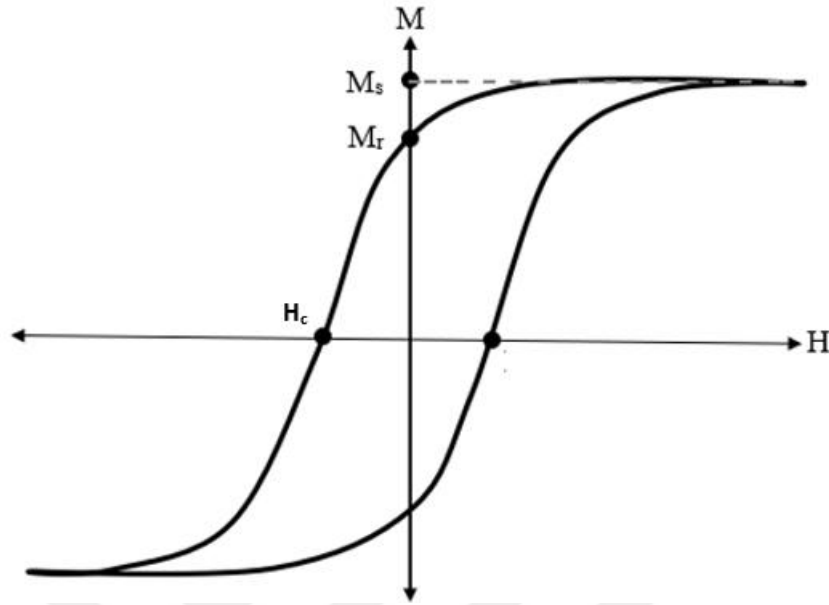
Bu çalışmada manyetik alan ölçümleri selenoid ve Helmholtz bobinleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Selenoid içerisinde, bobin sarımlarından geçen akım ile eksen boyunca doğrusal ve düzenli bir manyetik alan elde edilmiştir. Helmholtz bobinlerinde ise, iki eş yarıçaplı bobinden eşit akım geçirilerek bobinler arasındaki bölgede oldukça homojen bir manyetik alan oluşturulmuş ve ölçümler bu homojen alan bölgesinde yapılmıştır. Alanın homojenliği, gaussmetre ile farklı noktalarda gerçekleştirilen ölçümler sonucunda doğrulanmıştır.

2.1.2. Manyetizasyon

“Manyetizasyon, bir malzemenin manyetik alana karşı gösterdiği davranışı ifade eden önemli bir büyüklüktür. Genel olarak birim hacim başına düşen manyetik moment olarak tanımlanmaktadır (Gonano vd., 2015). Elektriksel kutuplanmaya benzer şekilde, bir malzemenin dışarıdan uygulanan manyetik alana nasıl tepki verdiğini gösterir. Bu nedenle, malzemenin manyetik alanı ne şekilde etkilediğini anlamada önemli bir rol oynar. Manyetizasyonun oluşmasında atom içindeki elektronların hareketi ile elektron ve çekirdek spinleri etkili olmaktadır. Malzemede ortaya çıkan net manyetizasyon ise, dış manyetik alanın etkisiyle oluşan toplam manyetik tepkiyi ifade etmektedir (Gonano vd., 2015).

Tipik bir M-H eğrisi, Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Bu eğri, bir manyetik malzemeye uygulanan dış H karşısında malzemenin kazandığı manyetizasyon (M) miktarını gösterir. Eğri, malzemenin

mıknatıslanma ve de mıknatıslanma sürecini grafiksel olarak sunar ve histerezis davranışını ortaya koyar.



Şekil 2.1. M-H eğrisi.

Bu eğride M_s , uygulanan alanın tüm manyetik domainleri hizaladığı doyum manyetizasyonunu; M_r , dış alan sıfıra indirildiğinde malzemede kalan remanent manyetizasyonu; H_r ise bu remanant duruma karşılık gelen remanant alanı ifade eder. Doyumda, manyetik momentler tamamen alan yönünde hizalanır; alan daha fazla artırılrsa da manyetizasyon değişmez. Alan azaltıldığında malzeme bir süre mıknatıslık korur ve bu, M_r ile temsil edilir. H_r ise bu durumu sıfırlamak için gereken ters yönlü alanı gösterir.

2.1.3. Coersivite

Bir manyetik malzemenin manyetizasyonunu sıfıra indirmek için ters yönde bir manyetik alan gerekir. Bu alana koersivite kuvveti (H_c) denir ve Oe birimiyle ifade edilir. Koersivite, malzemenin manyetik yönelimini yok etmek için gereken alan şiddetidir.

2.1.4. Anizotropi alanı

Anizotropi alanı (H_k), bir manyetik malzemenin manyetizasyonunun kristal yapısına bağlı olarak tercih edilen yönde doyuma ulaşması için gereken manyetik alan şiddetidir.

2.1.5. Alınganlık

Manyetik alınganlık (χ), bir malzemenin üzerine uygulanan manyetik alana karşılık gösterdiği manyetizasyon miktarını tanımlayan boyutsuz bir büyüklüktür. Matematiksel olarak, manyetizasyonun (M) manyetik alan şiddetine (H) oranı ile ifade edilir ve malzemenin manyetik tepkisini nicel olarak belirler (Cullity ve Graham, 2008).

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2.1)$$

şeklinde tanımlanır. Burada M manyetizasyonu (A/m), H ise manyetik alan şiddetini (A/m) göstermektedir. χ değerinin pozitif olması genel olarak paramanyetik veya ferromanyetik, negatif olması ise diamanyetik davranışa işaret eder (Cullity ve Graham, 2008).

2.1.6. Manyetik domain

Ferromanyetik veya ferrimanyetik malzemelerde atomik manyetik momentlerin (spinlerin) aynı yönde hizalandığı küçük bölgelerdir. Her domain içinde milyonlarca atom bulunur ve momentler, *exchange* etkileşimleri sayesinde paralel durarak domain içinde maksimum manyetizasyon oluşturur. Domainler, malzemenin manyetik enerjisini azaltmak için oluşur (Cullity ve Graham, 2011).. Tek bir büyük domain yerine, farklı yönlerde hizalanmış çok sayıda domain, dışarıya yayılan manyetik alanı ve manyetostatik enerjiyi düşürür. Domainler, aralarındaki geçiş bölgeleri olan domain duvarları (*Bloch* duvarları) ile ayrılır. Dış manyetik alan olmadığında domainler rastgele yönlenir ve net manyetizasyon sıfıra yakındır. Ancak alan uygulandığında alan yönündeki domainler büyür, diğerleri küçülür ve malzeme doyum manyetizasyonuna ulaşır. Domainlerin hareketi, histerezis, koersivite ve kalıcı manyetizasyon gibi özelliklerin temelini oluşturur (Cullity ve Graham, 2011). .

2.1.7. Curie sıcaklığı

Curie sıcaklığı (T_c) (veya Curie noktası), ferromanyetik bir maddenin kalıcı mıknatıslığını yitirip paramanyetik hâle geçtiği kritik sıcaklıktır (Coey, 2010). . Curie sıcaklığının üstünde, ısı enerjisi manyetik momentlerin rastgele yönelmelerine sebep olur ve madde paramanyetik hâle geçer. Paramanyetizma alanında çalışan Pierre Curie'nin anısına bu sıcaklığa Curie sıcaklığı denmektedir.

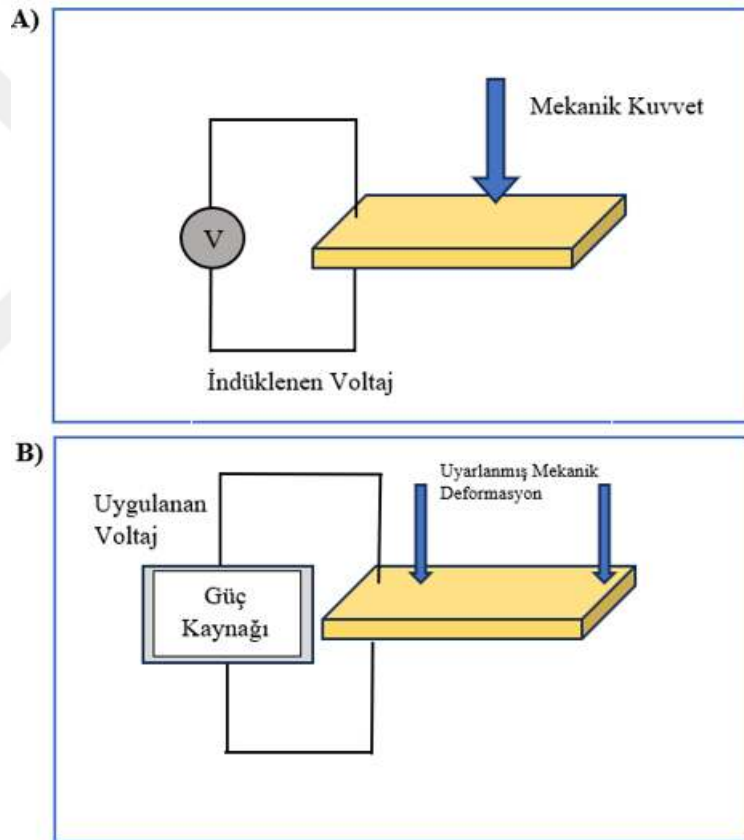
2.1.8. Rezonans frekansı

Rezonans, fizikte bir sistemin, genellikle doğrusal bir sistemin, bazı frekanslarda diğerlerine nazaran daha büyük genliklerde salınması eğilimidir. Bunlar, o sistemin rezonans frekansları olarak

adlandırılır. Bu frekanslarda küçük periyodik kuvvetler bile çok büyük genlikler üretebilir (Halliday vd., 2014).

2.2. Piezoelektrik

Piezoelektrik etki, bazı kristallerde uygulanan mekanik gerilme sonucunda elektriksel kutuplanmanın oluşması ve tersine, uygulanan elektrik alan altında mekanik şekil değişiminin meydana gelmesi olayıdır (Gorfman ve Zhang, 2024). Doğrudan piezoelektrik etki basınç, kuvvet ve titreşim gibi büyüklüklerin algılanmasında; ters piezoelektrik etki ise aktüatör uygulamalarında kullanılır (Gorfman ve Zhang, 2024). Piezoelektriklik kristal simetrisi ile yakından ilişkilidir; merkez simetrisine sahip kristaller piezoelektrik değildir ve 32 kristal sınıfının 21'i merkez simetrik değildir, bunların 20'si piezoelektrik etki gösterir (Kholkin vd., 2008).



Şekil 2.2. (A) Mekanik kuvvet ile indüklenen elektriksel voltaj. (B) Elektriksel voltaj ile indüklenen mekanik deformasyon (Cullity ve Graham, 2008).

2.2.1. Piezoelektrik malzemeler

Piezoelektrik malzemeler; seramikler, polimerler, kristaller ve kompozitler gibi farklı türlerde bulunabilen, mekanik enerji ile elektrik enerjisi arasında dönüşüm yapabilen fonksiyonel malzemelerdir.

Mekanik kuvvet veya basınç etkisi altında elektrik yükü ya da gerilim oluşmasına doğrudan piezoelektrik etki denir. Buna karşılık, uygulanan elektrik alan veya gerilim sonucunda malzemede mekanik şekil değişiminin meydana gelmesi ters piezoelektrik etki olarak adlandırılır (Behera, 2022a). Obstetrik ultrason uygulamalarında kullanılan dönüştürücüler de piezoelektrik etkiden yararlanmaktadır (Campbell, 2013).



Şekil 2.3. Piezoelektrik malzemelerin giriş/çıkışı (Behera, 2022a).

Piezoelektrik malzemeler kökenlerine göre iki ana grupta incelenir:

Piezoelektrik malzemeler kökenlerine göre doğal ve sentetik olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. Doğal piezoelektrik malzemelere kuartz (SiO_2), turmalin ve Rochelle tuzu örnek verilebilir. Sentetik piezoelektrik malzemeler ise seramik ve polimer esaslı olabilir; PZT, BaTiO_3 ve PVDF bu grupta yer alan yaygın örneklerdir (Uchino, 2017; Behera, 2022c). Piezoelektrik etki, merkez simetrisinden yoksun kristal yapılarda ortaya çıkar. Bu nedenle kristal simetrisi, bir malzemenin piezoelektrik davranış göstermesinde temel belirleyici unsurlardan biridir (Troler-McKinstry, 2008).

2.2.2. Piezoelektrik katsayısı

Piezoelektrik katsayılar, piezoelektrik malzemelerde mekanik ve elektriksel büyüklükler arasındaki bağlaşımı tanımlayan katsayılardır. Doğrudan piezoelektrik etkide uygulanan mekanik gerilme sonucu oluşan elektrik yükü ya da polarizasyonu, ters piezoelektrik etkide ise uygulanan elektrik alan sonucu meydana gelen birim şekil değiştirmeyi ifade eder. Bu nedenle piezoelektrik katsayılar tek bir büyüklük olarak değil, d_{33} , d_{31} ve d_{15} gibi yön bağımlı katsayılar şeklinde verilir (Gorfman ve Zhang, 2024). Bazı piezoelektrik malzemelere ait temsili piezoelektrik katsayı değerleri çizelge 2.1’de verilmiştir (Chhugani vd., 2019).

Çizelge 2.1. Piezoelektrik katsayılar (Chhugani vd., 2019).

Piezoelektrik malzeme	Katsayı, d (10^{-12} m/V)	Elektromekanik dönüşüm faktörü, k
Quartz	2.3	0.1
Poliviniliden florür (PVDF)	18	–

Piezoelektrik malzeme	Katsayı, d (10^{-12} m/V)	Elektromekanik dönüşüm faktörü, k
PbNb ₂ O ₆	80	–
Baryum titanat	100–190	0.49
Rochelle tuzu	350	0.78
PZT [Pb(Zr,Ti)O ₃]	480	0.72

2.2.3. Elektromekanik dönüşüm faktörü

Elektromekanik dönüşüm faktörü, piezoelektrik bir malzemenin elektrik enerjisini mekanik enerjiye ya da mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme etkinliğini gösteren boyutsuz bir katsayıdır. Piezoelektrik bağlaşım katsayısı, uygulanan elektrik girişine karşılık depolanan mekanik enerjinin veya uygulanan mekanik girişe karşılık depolanan elektrik enerjisinin bir ölçüsü olarak tanımlanır (Stewart, 2001). . Bu nedenle statik durumda

$$k^2 = \frac{W_{\text{dönüşen}}}{W_{\text{girdi}}} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada W_{girdi} sisteme verilen enerjiyi, $W_{\text{dönüşen}}$ ise diğer enerji alanına aktarılan enerjiyi göstermektedir (Li, 2021).

2.2.4. Piezoelektrik gerilim sabiti

Piezoelektrik gerilim sabiti, uygulanan mekanik gerilme sonucu piezoelektrik malzemede oluşan elektrik alanın ölçüsüdür. Bu sabit, piezoelektrik gerilim katsayısı ya da voltage output constant olarak da adlandırılır ve sensör uygulamalarında önemlidir. g_{ij} , piezoelektrik gerilim sabiti ile dielektrik geçirgenlik arasındaki ilişki kullanılarak (Li, 2021).

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{\epsilon^T} \quad (2.3)$$

şeklinde yazılır. Burada d_{ij} piezoelektrik gerilim sabitini, ϵ^T ise sabit gerilme altındaki dielektrik geçirgenliği göstermektedir.

Çizelge 2.2. Piezoelektrik Gerilme Sabiti Değerleri (Yaklaşık).

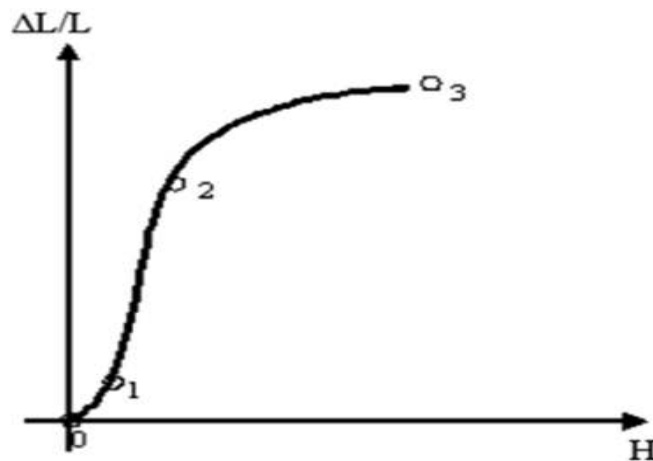
Malzeme	$g_{33}(\text{Vm/N})$	Kaynak
PZT	20 - 30	(Stewart, 2001)
PVDF	~200	(Kim, 2015)

2.3. Manyetostriksiyon (λ)

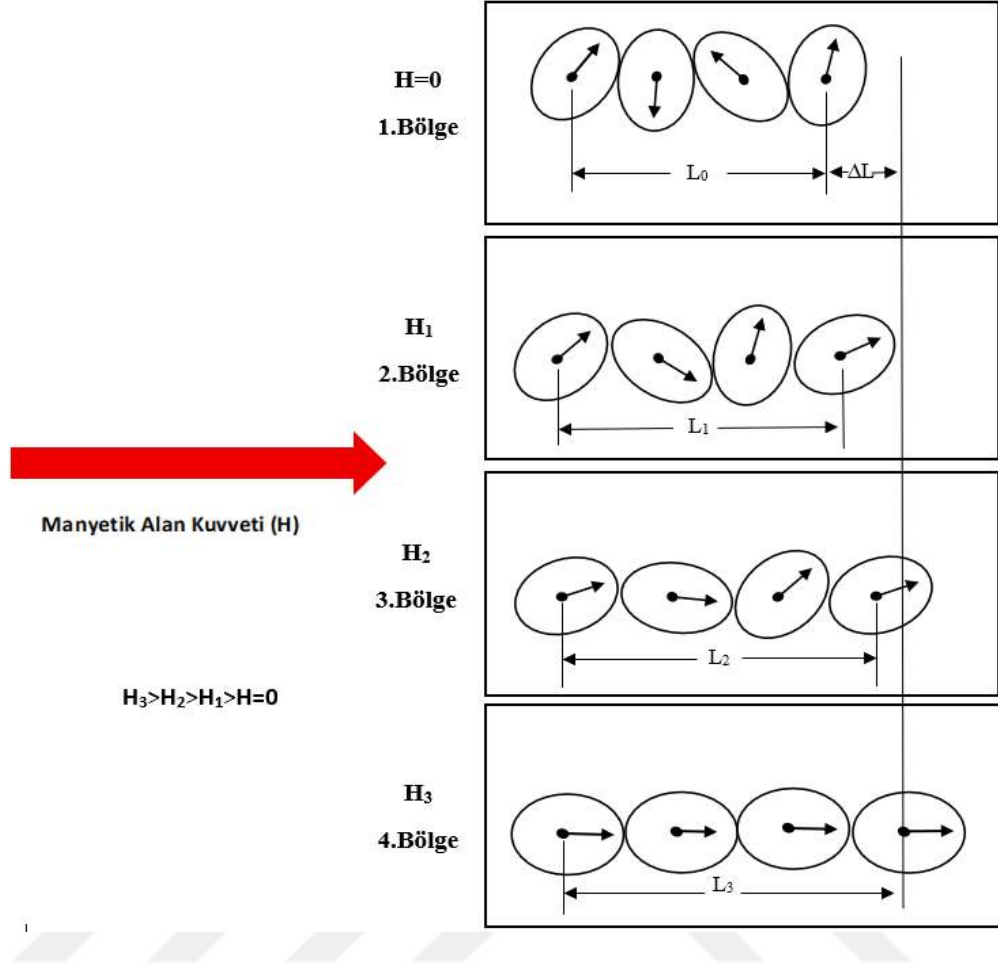
Bir madde manyetik bir alana maruz bırakıldığında, boyutlarında bir değişiklik meydana gelir. Bu etkiye Joule etki adı verilir. Bu etki, 1842 yılında Joule tarafından keşfedilmiştir; Joule, zayıf bir alanla boyuna manyetize edilen bir demir çubuğun boyunun değiştiği uzayabilir veya kısalabilir. Uzunluktaki bağıl değişim, yani $\Delta l/l$, basitçe bir gerinimdir. Ancak bu, uygulanan bir mekanik gerilme sonucu oluşan gerinimden farklı olduğu için, manyetik olarak indüklenen gerinime manyetostriksiyon adı verilir ve genelde λ ile ifade edilir (Jiles, 2015).

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.4)$$

Burada l , malzemenin manyetik alan uygulanmadan önceki başlangıç boyunu; Δl ise manyetik alan uygulanmasıyla meydana gelen boy değişimini ifade eder (Jiles, 2015). Bu uzunluk değişimi, küçük manyetik momentlerin dönmesinin bir sonucudur. Daha güçlü bir alan uygulamak, giderek daha fazla manyetik momentin alan yönünde daha güçlü ve belirgin bir şekilde yeniden yönlenmesine yol açar. Tüm manyetik domainler manyetik alanla aynı hizaya geldiğinde doyum noktası elde edilmiş olur. Şekil 2.4, uzunluk değişiminin uygulanan manyetik alana karşı idealize edilmiş davranışını göstermektedir (Olabi ve Grunwald, 2008).



Şekil 2.4. Gerinim ile manyetik alan arasındaki ilişki (Olabi ve Grunwald, 2008).



Şekil 2.5. Pozitif Gerinim ile manyetik alan arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (Jiles, 2015).

Manyetik domainlerin yeniden yönlenmesine ilişkin fiziksel mekanizma, Şekil 2.5'te basitleştirilmiş şematik bir gösterimle sunulmaktadır. 0 ile 1 arasındaki bölgede, uygulanan manyetik alanın düşük olduğu durumda domainler belirgin bir ortak yönelim sergilememektedir. Bununla birlikte, malzemenin üretim koşullarına bağlı olarak sınırlı düzeyde bir yönelim düzeni oluşabilmekte ve bu durum kalıcı manyetik öngerilim şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Oluşan gerilme ise büyük ölçüde manyetostriktif malzemenin iç yapısının homojenliğine ve malzeme bileşimine bağlıdır (Olabi ve Grunwald, 2008).

Manyetostriksiyonun uygulamaları

Manyetostriktif aktüatörlerin diğer aktüatör türlerine göre önemli üstünlüklerinden biri, oldukça düşük sürücü gerilimleri ile çalışabilmeleridir. Bu özellik, özellikle tıbbi uygulamalarda avantaj sağlamakta ve aynı zamanda yükselteç tasarımını da daha sade hâle getirmektedir. Bir manyetostriktif malzeme alternatif manyetik alana maruz bırakıldığında, alan frekansının iki katında mekanik titreşim oluşturur. Bu nedenle meydana gelen manyetostriktif titreşim, transformatörlerden yayılan uğultunun başlıca nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Buna karşılık, bir manyetostriktif malzemeye mekanik gerilme uygulandığında, ters manyetotriksiyon etkisi sonucunda malzemenin manyetik geçirgenliği değişmektedir. Aynı anda, alternatif akımla beslenen bir bobin tarafından oluşturulan alternatif manyetik alana da maruz kalınması durumunda, manyetik geçirgenlikte meydana gelen bu değişim manyetik akı yoğunluğu dağılımını da etkilemektedir (Ekreem vd., 2007). Bu değişim, ayrı bir algılama bobini yardımıyla belirlenebilmektedir. Çünkü alternatif manyetik akı, manyetik geçirgenliğe bağlı olarak değişen bir alternatif elektromotor kuvvetin (emk) indüklenmesine neden olmaktadır. Söz konusu etki, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesinde görev alan manyetostriktif dönüştürücülerde kullanılmaktadır (Ekreem vd., 2007).

Modern manyetostriktif malzemeler arasında yer alan Terfenol-D'de, kalıntı manyetik alanlar genellikle çubuk eksenine yaklaşık dik olacak şekilde düzenlenmektedir. Bunun temel nedeni, manyetik alanları başlangıçta çubuk eksenini doğrultusunda hizalanmış domainlerin, dış manyetik alan eksenine paralel uygulandığında yön değiştirmemesi ve dolayısıyla manyetotriksiyon katkısının sınırlı kalmasıdır. Bu nedenle domainleri rastgele yönelmiş bir çubuk, teorik olarak mümkün olan en yüksek manyetotriksiyonun yalnızca yaklaşık beşte ikisini sağlayabilmektedir. Bu yüzden, tüm domainlerin çubuk eksenine dik doğrultularda hizalanması tercih edilmektedir. Bu düzen üretim aşamasında yaklaşık olarak sağlanabilmektedir. Ancak çubuk eksenini boyunca başlangıç yönelmesinin oluşmaması için mekanik ön yük uygulanması gerekmektedir (Ekreem vd., 2007). Ayrıca, ön gerilmenin Terfenol-D dönüştürücüsünün dinamik performansı üzerindeki etkisi Calkins vd. (1997) tarafından ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

2.3.1. Manyetostriktif malzeme

Magnetostriktif malzemeler, dinamik titreşim kontrolü, enerji hasadı, sensör ve aktüatör uygulamalarında kullanılan akıllı malzemelerdir. Magnetostriktif malzemelerin önemli uygulama alanlarından biri, ağır yapıların titreşim kontrolüdür (Behera, 2022b).

2.3.1.1. Manyetostriktif malzemelerin tarihi

Manyetotriksiyon, 1842 yılında James P. Joule tarafından, manyetize edilen bir demir numunenin boy değiştirdiğinin gözlenmesiyle tanımlanmıştır (Calkins vd., 2007). Daha sonraki çalışmalarda nikel, kobalt ve bunların alaşımlarında da benzer davranışlar rapor edilmiştir (Calkins vd., 2007). 1865 yılında Villari, uygulanan mekanik gerilmenin malzemenin manyetizasyonunu değiştirdiğini göstermiş ve böylece ters manyetostriktif etkiyi ortaya koymuştur (Szewczyk, 2016). Tek kristal demirde manyetokristalin anizotropiye ilişkin önemli bulgular 1926 yılında Honda ve Kaya tarafından rapor edilmiştir (Dapino, 2002). II. Dünya Savaşı sırasında sonar dönüştürücülerinde başlıca manyetostriktif

malzeme olarak nikel kullanılmıştır (Dapino, 2002). 1963–1965 yılları arasında terbiyum ve disprosiyumun çok büyük manyetostriksiyon gösterdiği ortaya konmuş, ancak bu etkinin esas olarak düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği görülmüştür (Dapino, 2002). Bunu izleyen çalışmalarda, nadir toprak elementlerinin Fe ile oluşturduğu alaşımlar geliştirilmiş ve 1975 yılında Clark tarafından oda sıcaklığında yüksek manyetostriksiyon sergileyen Terfenol-D tanıtılmıştır (Grunwald ve Olabi, 2008). Terfenol-D, yüksek manyetostriktif deformasyonu ve görece düşük manyetokristalin anizotropisi nedeniyle öne çıkmış; her ne kadar kırılğan yapıda olsa da çok sayıda aktüatör ve dönüştürücü uygulamasında yaygın olarak kullanılmıştır (Behera, 2022b; Grunwald ve Olabi, 2008). Daha sonraki yıllarda polimer matrisli ve hibrit kompozit manyetostriktif malzemeler de geliştirilmiştir (Behera, 2022b). Manyetostriktif malzemeler, manyetik enerji ile mekanik enerji arasında çift yönlü dönüşüm yapabildikleri için sensör ve aktüatör uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır (Behera, 2022b; Calkins vd., 2007).



Şekil 2.6. Manyetostriksiyon etkisi: Gerilme ile manyetik alan arasındaki ilişki (Behera, 2022b).

Malzemelerin kutuplanması gerekmez; bu nedenle piezoelektrik malzemelerde görülebilen depoling sınırlaması burada söz konusu değildir. Ayrıca bu malzemelerin düşük histerezis göstermesi, ihmal edilebilir düzeyde öz ısınma ve aktüasyon ile hassas algılama için daha basit kontrol algoritmalarına olanak sağlar (Behera, 2022b).

“Manyetostriksiyon, manyetik malzemelerin manyetizasyon süreci sırasında şekil veya boyutlarında değişim meydana getiren bir özelliktir. Uygulanan manyetik alanın etkisiyle malzemenin manyetizasyonu arttıkça, oluşan manyetostriktif gerinim de doyumluk değerine ulaşınca kadar değişmektedir (Behera, 2022b; Liang vd., 2020). Bu olay ilk kez 1840’lı yılların başında James Joule tarafından demir üzerinde gözlenmiştir (Engdahl, 2000). Manyetostriktif katsayı (λ), malzemenin manyetizasyonu sıfırdan doyumluğa çıkarken uzunluğunda meydana gelen kesirsel değişim olarak tanımlanmakta olup pozitif veya negatif değer alabilmektedir (Liang vd., 2020). Ayrıca alternatif akımların oluşturduğu zamana bağlı manyetik alanlar nedeniyle manyetostriksiyon, transformatör ve benzeri yüksek güçlü elektrikli cihazlarda düşük frekanslı titreşimlere ve akustik uğultuya neden olabilmektedir (Behera, 2022b; Liang vd., 2020).”

Çizelge 2.3. Manyetostriktif malzemelerin bileşimleri ve manyetostriksyon katsayıları (Dapino, 2002; Engdahl, 2000).

Malzeme	Bileşim	Manyetostriksyon katsayısı (λ)
Demir (Fe)	Fe	~20 ppm
Nikel (Ni)	Ni	~50 ppm
Terfenol-D	Tb _{0,3} Dy _{0,7} Fe ₂	1000–2000 ppm
Galfenol	Fe–Ga	200–400 ppm

2.3.1.2. Bazı Manyetostriktif malzemeler

Vacodur49:

Vacodur49, yaklaşık %49 Co, %49 Fe ve %2 V içeren, iz miktarda Nb de barındırabilen özel bir yumuşak manyetik alaşımdır. Bu alaşım, yüksek manyetik doygunluk göstermesi ve düşük koersivite değerleri sayesinde yüksek akı yoğunluğunun gerekli olduğu uygulamalarda tercih edilir. Ayrıca ısıl işlemle ayarlanabilen akma dayanımı nedeniyle özellikle elektrik motorları ve jeneratörlerde, mekanik dayanım ile manyetik performansın birlikte istendiği sistemlerde kullanıma uygundur (VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG., n.d.).

Permendur:

%49 Co, %49 Fe ve %2 V içeren özel bir yumuşak manyetik alaşımdır. Vanadyum katkısı işlenebilirliği iyileştirirken, alaşım yaklaşık 2.3 T doygun akı yoğunluğu ve yüksek geçirgenlik sağlar. Bu nedenle özellikle kompakt, hafif ve yüksek güçlü motorlar ile aktüatör uygulamalarında öne çıkar (Proterial, Ltd., n.d.).

Hiperco50:

Hiperco 50, esas olarak demir, kobalt ve vanadyumdan oluşan bir yumuşak manyetik alaşımdır. Çok yüksek manyetik doygunluk ve düşük çekirdek kaybı göstermesi nedeniyle mühendislik uygulamalarında önemli bir malzeme olarak öne çıkar. Alaşım, tane büyümesini kontrol etmek amacıyla az miktarda niyobyum da içerebilir ve farklı ısıl işlemlerle mekanik ve manyetik özellikleri ayarlanabilir. Şerit veya bobin formunda temin edilebilmesi sayesinde motorlar, jeneratörler, manyetik yataklar ve bazı aktüatör/sensör sistemlerinde kullanılmaktadır (Efinéa Metals, 2022).

Remendur :

Remendur, yaklaşık eşit oranlı kobalt-demir esaslı ve yaklaşık %2.5–3.0 vanadyum içeren bir alaşım grubudur. Fe-Co-V sistemine ait bu alaşımlar, vanadyum katkısının etkisiyle bileşim ve faz dengesi açısından incelenmiş özel malzemeler arasında yer almaktadır (Bennett ve Pinnel, 1974).

Çizelge 2.4. Kristal yapıya sahip manyetostriktif malzemelerin özellikleri.

Özellik	Vacodur 49	Permendur	Hiperco 50	Remendur
Doyum Manyetizasyonu (Ms / T)	2,35	~2,4	2,4	~2,4
Doyum Manyetostriksiyonu (λ_s / ppm)	70	60–100	60	60
Curie Sıcaklığı (Tc / °C)	950	980	940	940
Young Modülü (E / GPa)	200	200	207	207
Yoğunluk (g/cm ³)	8,12	8,12	8,12	8,12
Elektrik Direnci ($\mu\Omega\cdot m$)	0,42	0,42	0,40–0,42	0,40
Kaynak	(VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG., n.d.)	(Proterial, Ltd., n.d.)	(Efinéa Metals, 2022)	(Bennett ve Pinnel, 1974)

Terfenol-D :

Terfenol-D, terbiyum, disprosyum ve demirden oluşan bir alaşımdır ve oda sıcaklığında en yüksek manyetostriktif gerinim gösteren malzemelerden biridir. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye, mekanik enerjiyi ise elektrik enerjisine dönüştürebilen katı hâl bir malzemedir. Yüksek Curie sıcaklığı (yaklaşık 380 °C) sayesinde oda sıcaklığından 200 °C'ye kadar yüksek manyetostriktif performans gösterebilmektedir. Uygun çalışma koşullarında 1000 ppm'in üzerinde, bazı durumlarda ise 2000 ppm'e yaklaşan gerinim değerlerine ulaşabilmektedir (Patil vd., 2024). "Terfenol" adı, terbiyum (TER), demirin kimyasal sembolü olan Fe (FE) ve malzemenin geliştirildiği Naval Ordnance Laboratory (NOL) adının birleşiminden türetilmiştir. Daha sonra eklenen "D" harfi ise disprosyumu ifade etmektedir. Terfenol-D, başlangıçta yüksek güçlü sonar sistemleri için geliştirilmiş olup günümüzde aktüatör, sensör ve dönüştürücü uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Patil vd., 2024).

Çizelge 2.5. Terfenol-D'nin manyetik özellikleri (TdVib, t.y.; Narita ve Fox, 2018).

Özellik	Yaklaşık değer(ler)
Doyum manyetik akı yoğunluğu, (T)	< 1,0
Doyum manyetostriksiyonu, (ppm)	~1000–2000
Curie sıcaklığı, (°C)	~380
Young modülü, (GPa)	< 100
Yoğunluk (g/cm ³)	~9,25
Elektrik direnci (μΩ·m)	~0,58

2.4. Amorf Ferromanyetik Alaşımlar

Amorf ferromanyetik malzemeler, atomik yapıları düzenli bir kristal örgü oluşturmayan, yani uzun menzilli atom dizilimine sahip olmayan manyetik alaşımlardır. Kristal malzemelerde atomlar belirli bir geometri içinde sıralanırken, amorf yapılarda böyle bir düzen bulunmaz. Bu yapısal farklılık, söz konusu malzemelerin hem mekanik hem de manyetik davranışlarında belirgin değişimlere yol açmaktadır.

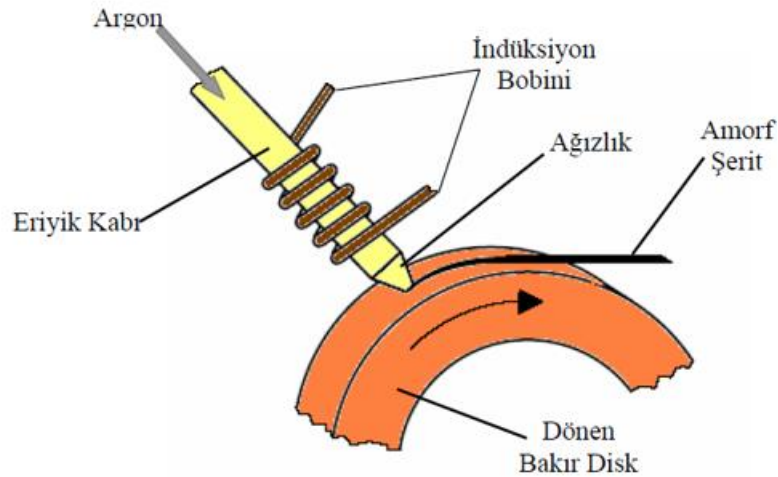
Amorf manyetik alaşımlar genel olarak iki temel grupta değerlendirilmektedir. Bunlardan birincisi geçiş metali–metaloid (TM-M) alaşımlarıdır. Bu gruptaki alaşımlar çoğunlukla yaklaşık %80 oranında Fe, Co veya Ni içerirken, kalan bölüm B, C, Si, P ya da Al gibi metalloid elementlerden oluşmaktadır. Metalloidler, alaşımin erime sıcaklığını azaltarak hızlı soğutma sırasında cam benzeri amorf yapının oluşmasını kolaylaştırmaktadır. Bunun yanında amorf fazın kararlılığını artırmakta; ancak manyetik özellikler üzerinde de etkili olarak doygun manyetizasyon ve Curie sıcaklığında azalmaya neden olabilmektedir. İkinci grup ise nadir toprak–geçiş metali (RE-TM) alaşımlarıdır. Bu alaşımlar özellikle manyeto-optik sistemlerde ve manyetik veri depolama teknolojilerinde kullanım alanı bulmaktadır (Luborsky, 1980; Bayri, 2007).

Düşük koersivite, düşük histerezis kaybı ve yüksek manyetik geçirgenlik gibi özellikleri nedeniyle amorf manyetik alaşımlar önemli yumuşak manyetik malzemeler arasında yer almaktadır. Bu nedenle transformatörler, manyetik algılayıcılar ve enerji verimliliğinin ön planda olduğu cihazlarda yaygın biçimde tercih edilmektedirler. Bazı amorf alaşımlar, Fe-Ni (Permalloy) alaşımlarına benzer düzeyde manyetik kayıp ve geçirgenlik sergileyebilmektedir. Yüksek manyetizasyon değerine sahip bazı türleri ise Fe-%3Si çeliklerinin kullanıldığı yüksek güçlü transformatör uygulamalarında alternatif oluşturabilecek niteliktedir. Bununla birlikte, bu alaşımlar daha düşük kayıp ve daha yüksek geçirgenlik sağlasalar da doygun manyetizasyon değerleri Fe-%3Si çeliklerine kıyasla bir miktar daha düşük kalmaktadır (Luborsky, 1980; Bayri, 2007).

2.4.1. Amorf alaşımların üretimi

Amorf alaşımlar, eriyik durumdaki alaşımin çok hızlı biçimde soğutulmasıyla elde edilmekte olup, kendilerine özgü manyetik, mekanik ve elektriksel özellikleri nedeniyle yoğun ilgi görmektedir. Bu ilginin artmasıyla birlikte, bu malzemelerin şerit, tel ve tabaka formunda üretilebilmesini sağlayan çeşitli üretim teknikleri geliştirilmiştir. Amorf yapı elde edebilmek için, eriyik alaşımin kristallenmesine fırsat vermeyecek kadar yüksek bir soğutma hızına ihtiyaç vardır. Bu hızın yaklaşık 10^6 °C/sn mertebesinde olması gerekmektedir. Böyle yüksek soğutma hızları gerektiğinden, amorf alaşımlar çoğunlukla ince film, tel veya şerit formunda üretilebilmektedir. Soğutma hızındaki artış aynı zamanda amorf yapı içerisinde elastik gerilmelerin oluşmasına yol açmaktadır. Bu gerilmeler, amorf malzemelerin yumuşak manyetik karakterini belirleyen temel etkenlerden biri olan manyeto-elastik anizotropinin ortaya çıkmasında önemli rol oynamaktadır (Bayri, 2007).

Amorf alaşımlar ilk olarak melt-spinning yöntemiyle şerit formunda üretilmiştir (Masumoto vd., 1981). Bu yöntemde, belirli oranlarda hazırlanan alaşım bileşenleri bir ergitme kabında sıvı hâle getirilir (Şekil 2.7). Ardından eriyik, uygun bir ağızlık yardımıyla yüksek hızda dönen bir termal kütle üzerine gönderilir ve burada çok kısa sürede katılaşır. Üretim sırasında oksitlenmeyi önlemek amacıyla işlem çoğunlukla inert gaz atmosferinde ya da vakum altında gerçekleştirilir. Bu teknikle elde edilen amorf şeritler birkaç santimetre genişliğinde ve onlarca mikrometre kalınlığında olabilmektedir. Günümüzde kullanılan gelişmiş üretim teknikleri sayesinde yaklaşık 1 mm ile 100 mm arasında genişliğe, ≤ 50 μ m kalınlığa ve teorik olarak sınırsız uzunluğa sahip amorf şeritler üretilebilmektedir. Ayrıca kullanılan ağızlığın geometrisine bağlı olarak yalnızca şerit değil, tel formunda üretim de gerçekleştirilebilmektedir (Atalay, 1992).



Şekil 2.7. Melt-spinning metodu (Bayri, 2007).

Çizelge 2.6. Amorf alaşımların 300 K'de doyum manyetizasyonu ve curie sıcaklıkları (Luborsky, 1980; Bayri, 2007).

Alaşım	$4\pi M_s$ (300 K'de) (kG)	M_s (emu/g)	$\mu B/\text{atom}$	T_c (K)
$\text{Fe}_{75}\text{P}_{15}\text{C}_{10}$	11,5	151	1,35	619
$\text{Fe}_{50}\text{P}_{16}\text{C}_3\text{B}_1$	1,68	–	–	596,5
$\text{Fe}_{50}\text{P}_{12.5}\text{C}_{7.5}$	8,7	–	–	565
$\text{Fe}_{50}\text{P}_{13}\text{C}_7$	7,9	–	–	–
$\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$	14,9	187	–	590
$\text{Fe}_{29}\text{Ni}_{49}\text{P}_{14}\text{B}_6\text{Si}_2$	17,1	–	–	–
$\text{Fe}_{50}\text{B}_{20}$	17,1	–	–	–
$\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{B}_{20}$	15,8	185	–	647
$\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$	4,9	194	–	186
$\text{Fe}_{47}\text{Co}_{53}\text{C}_{13}\text{C}_7$	12,0	120	–	647
$\text{Fe}_{48.5}\text{Co}_{51.5}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$	14,0	116	–	651
$\text{Fe}_3\text{Co}_{72}\text{P}_{16}\text{B}_6\text{Al}_3$	13,5	–	–	652
$\text{Fe}_6\text{Co}_{74}\text{B}_{20}$	6,5	4	–	586
$\text{Co}_{75}\text{P}_{16}\text{B}_6\text{Al}_3$	15,8	–	–	537
$\text{Co}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$	16,0	190	–	520
$\text{Co}_{50}\text{B}_{20}$	14,0	166	–	685
$\text{Ni}_{55}\text{P}_{15}$	6,0	7	–	630
Fe_{44}Ge	6,4	–	–	340
Fe_{35}Ge	2,9	–	–	35
$\text{Fe}_{30.5}\text{Ge}$	0,2	–	–	–
$\text{Fe}_{25.7}\text{Ge}$	0,0	–	–	–
$(\text{Fe}_{0.8}\text{Ni}_{0.2})_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$	13,1	–	–	729
$(\text{Fe}_{0.8}\text{Ni}_{0.2})_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$	13,1	–	–	733

2.5. Manyetik Alan Sensörü

Manyetik alan sensörü, çevresindeki manyetik alanın büyüklüğünü, yönünü veya zamana bağlı değişimini algılayarak bunu ölçülebilir bir elektriksel sinyale dönüştüren bir sensör türüdür. Bu sensörler Hall etkisi, manyetorezistif etki, fluxgate prensibi ve diğer manyetik algılama mekanizmalarına dayalı olarak çalışabilir (Grosz vd., 2017). Manyetik alanlar genellikle tesla (T) ya da gauss (G) birimiyle ifade edilir. Dünya'nın doğal manyetik alanı yaklaşık 25–65 μ T aralığındadır ve manyetik alan sensörleri bu seviyeden daha zayıf ya da daha güçlü alanları algılayabilecek şekilde tasarlanabilir (NOAA National Centers for Environmental Information, t.y.).

Manyetik alan sensörlerinin temel bileşenleri şunlardır:

Algılama elemanı: Manyetik alanla doğrudan etkileşime giren ve fiziksel tepki üreten yapıdır. Örneğin Hall etkili sensörlerde yarıiletken bir katman, GMR sensörlerde ise ince film çok katmanlı manyetik yapılar bu görevi üstlenir (Popovic, 2003).

Dönüştürücü: Algılanan fiziksel değişimi elektriksel sinyale çeviren birimdir.

Elektronik devreler: Sinyali işleyen, yükselten, filtreleyen ve gerekirse sayısal hâle getiren devre elemanlarıdır.

Çıkış arabirimi: Ölçülen değerın analog ya da dijital olarak diğer sistemlere aktarılmasını sağlayan birimdir (Grosz vd., 2017).

Manyetik alan sensörleri yalnızca alanın varlığını veya yokluğunu tespit etmekle kalmaz; aynı zamanda alanın büyüklüğünü, yönünü ve zamana bağlı değişimini de ölçebilir (Grosz vd., 2017; Ripka, 2001). Bazı sensörler tek eksenle ölçüm yaparken, gelişmiş manyetometreler üç eksenli ölçüm kapasitesine sahiptir. Bu özellik, yön tayini, konumlandırma ve hareket algılama uygulamalarında önemli avantaj sağlar (Ripka, 2001).

2.5.1. Manyetik alan sensörlerinin tarihçesi

Manyetik alanların kullanımı insanlık tarihinde oldukça eskiye dayanır. Antik Çin'de doğal mıknatıs taşı olan manyetit kullanılarak yön bulmaya yönelik ilk düzenekler geliştirilmiş, bu yapılar daha sonra pusulanın ortaya çıkmasına temel oluşturmuştur (National High Magnetic Field Laboratory, t.y.).

Bilimsel anlamdaki önemli gelişmeler ise 19. yüzyılda gerçekleşmiştir. 1820 yılında Hans Christian Ørsted, elektrik akımının bir pusula iğnesi üzerinde sapma oluşturduğunu gözlemleyerek elektrik ile manyetizma arasındaki ilişkiyi göstermiştir (Ørsted, 1820). 1879 yılında Edwin Hall, manyetik alan altındaki bir iletkenin enine gerilim oluştuğunu ortaya koymuş ve bu etki daha sonra

Hall etkili sensörlerin geliştirilmesine temel oluşturmuştur (Hall, 1879). 20.yüzyılın ikinci yarısında yarıiletken teknolojileri ve entegre devrelerin gelişmesiyle Hall sensörleri yaygınlaşmıştır. İnce film teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte anizotropik magnetorezistif (AMR) sensörler de özellikle 1970'lerin sonlarından itibaren pratik uygulamalarda önem kazanmıştır (Tumański, 2001). 1988 yılında dev magnetorezistif etki (GMR), Albert Fert'in grubu ile Peter Grünberg'in grubu tarafından bağımsız olarak keşfedilmiştir. Bu gelişme, yüksek veri yoğunluklu sabit disk okuma kafaları ve çok hassas manyetik algılama sistemleri için önemli bir dönüm noktası olmuş; Fert ve Grünberg'e 2007 Nobel Fizik Ödülü kazandırmıştır (Baibich vd., 1988; Binasch vd., 1989; Nobel Prize Outreach, 2007).

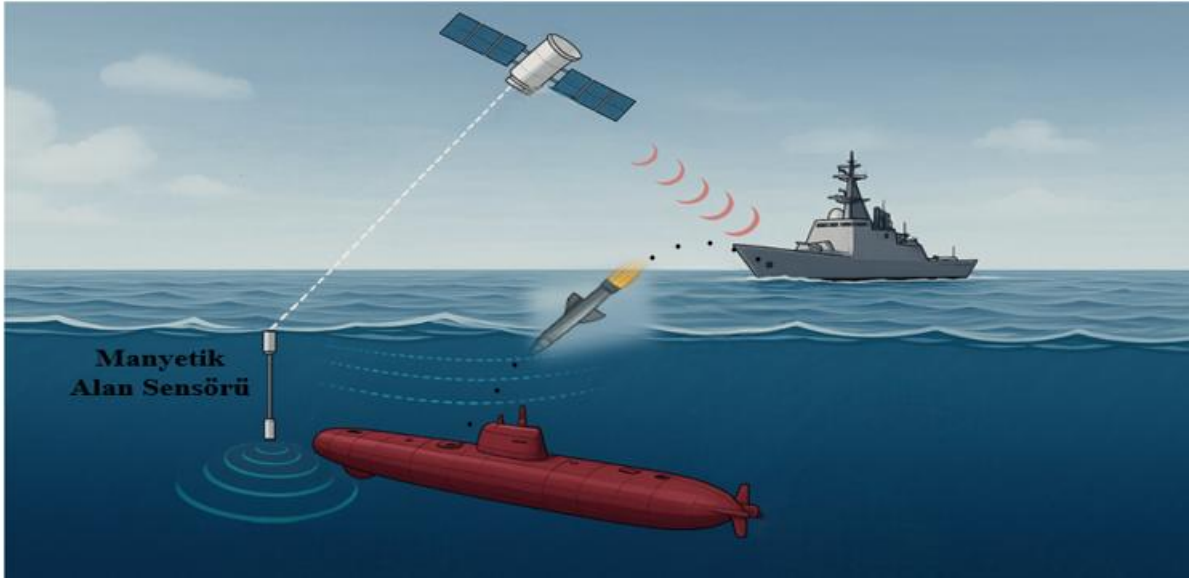
Günümüzde manyetik alan sensörleri yalnızca klasik elektromanyetik ilkelere değil, aynı zamanda spintronik, atomik manyetometri, SQUID ve ileri malzeme teknolojilerine dayalı olarak da geliştirilmektedir. Özellikle yüksek hassasiyetli modern manyetometreler femtotesla düzeyindeki çok zayıf manyetik alanların algılanmasına olanak sağlayabilmektedir (Grosz vd., 2017).

2.5.2. Manyetik alan sensörlerin bazı uygulamalar

2.5.2.1. İkinci dünya savaşı – denizaltı tespiti

Manyetik anomali dedektörü (MAD), Dünya'nın manyetik alanındaki çok küçük bozulmaları algılayabilen bir manyetometre türüdür. Özellikle askerî uygulamalarda, ferromanyetik malzemelerden oluşan denizaltıların tespitinde kullanılır. Modern çalışmalarda da MAD'nin gizli ferromanyetik hedeflerin algılanmasında önemli bir yöntem olduğu vurgulanmaktadır (Liu vd., 2019). Manyetik yöntemin jeofizik aramalarda kullanımı 19. yüzyılda gelişmiş, modern manyetik keşif teknikleri ise hava platformlarının II. Dünya Savaşı sırasında kullanılmaya başlanmasıyla büyük ivme kazanmıştır (Nabighian vd., 2005). Bu süreçte Victor Vacquier'in geliştirdiği fluxgate magnetometer, savaş yıllarında denizaltı tespitine uyarlanmış ve hava kaynaklı manyetik algılama sistemlerinin gelişiminde önemli rol oynamıştır (Maugh II, 2009).

MAD sistemleri, askerî kullanımın yanı sıra jeomanyetik ve aeromanyetik araştırmalarla da yakından ilişkilidir. Bu nedenle manyetik anomali ölçümleri hem denizaltı savunmasında hem de jeofizik araştırmalarda önemli bir yer tutmaktadır (Liu vd., 2019; Nabighian vd., 2005).

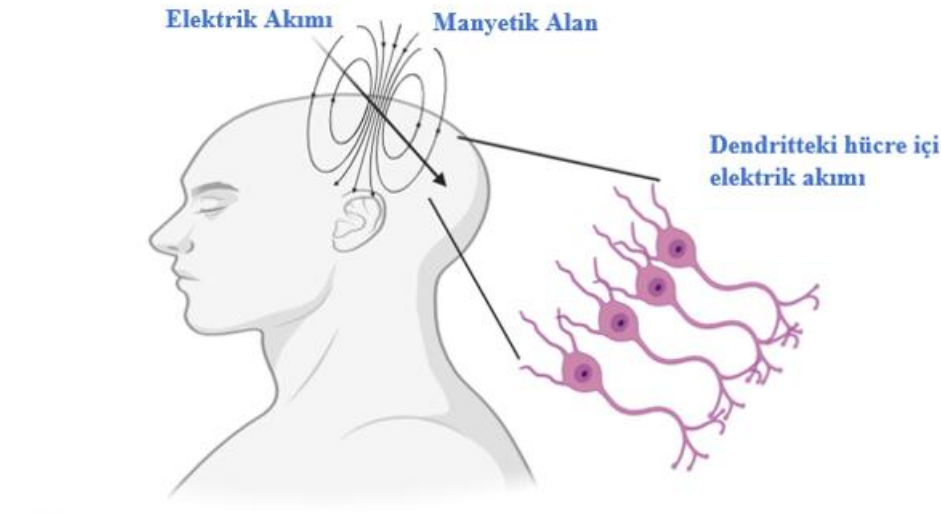


Şekil 2.8. CAE MAD-XR sistemi (CAE, 2023).

2.5.2.2. Magnetoencephalography (MEG) – Beyin aktivitesi ölçümü (1968)

Magnetoensefalografi (MEG), beyindeki nöronal aktivite sırasında, özellikle piramidal nöronların dendritlerinde oluşan postsinaptik iyonik akımların meydana getirdiği çok zayıf manyetik alanları ölçen, girişimsel olmayan bir işlevsel nörogörüntüleme tekniğidir (Hämäläinen vd., 1993). Elektriksel aktivitenin manyetik karşılığını kaydeden bu yöntem, yüksek zamansal çözünürlüğü sayesinde beyin işlevlerinin incelenmesinde önemli bir yer tutmaktadır (Hämäläinen vd., 1993; Gross, 2019). MEG, hem temel nörobilim araştırmalarında hem de klinik uygulamalarda kullanılmakta; özellikle epileptik odakların belirlenmesi, işlevsel kortikal alanların haritalanması ve cerrahi öncesi değerlendirme süreçlerinde değerli bilgiler sağlamaktadır (Ray ve Bowyer, 2010; Korvenoja vd., 2006).

MEG sinyalleri ilk kez 1968 yılında David Cohen tarafından bakır indüksiyon bobini kullanılarak ölçülmüştür; ancak düşük duyarlılık ve çevresel manyetik gürültü nedeniyle bu ilk düzenek sınırlı kalmıştır (Cohen, 1968). Daha sonra Cohen, süperiletken magnetometre kullanarak çok daha başarılı ölçümler gerçekleştirmiş ve böylece SQUID tabanlı MEG sistemlerinin gelişiminin önü açılmıştır (Zimmerman vd., 1970; Cohen, 1972). İzleyen yıllarda tek sensörlü sistemlerden çok kanallı ve tüm başı kapsayan sistemlere geçilmiş, böylece daha hızlı ve daha kapsamlı ölçümler mümkün hâle gelmiştir (Hämäläinen vd., 1993; Gross, 2019). Son yıllarda ise kriyojenik soğutma gerektirmeyen atomik manyetometre tabanlı sistemler öne çıkmıştır. Bu doğrultuda, 2012 yılında çip ölçekli atomik manyetometre ile MEG sinyallerinin kaydedilebildiği gösterilmiş, 2018 yılında ise giyilebilir MEG sistemleri ile daha doğal hareket koşullarında ölçüm yapılabileceği ortaya konmuştur (Sander vd., 2012; Boto vd., 2018).



Şekil 2.9. Beynin manyetik alanının kökeni ve EEG sinyalinin üretimi (Narli, 2020).

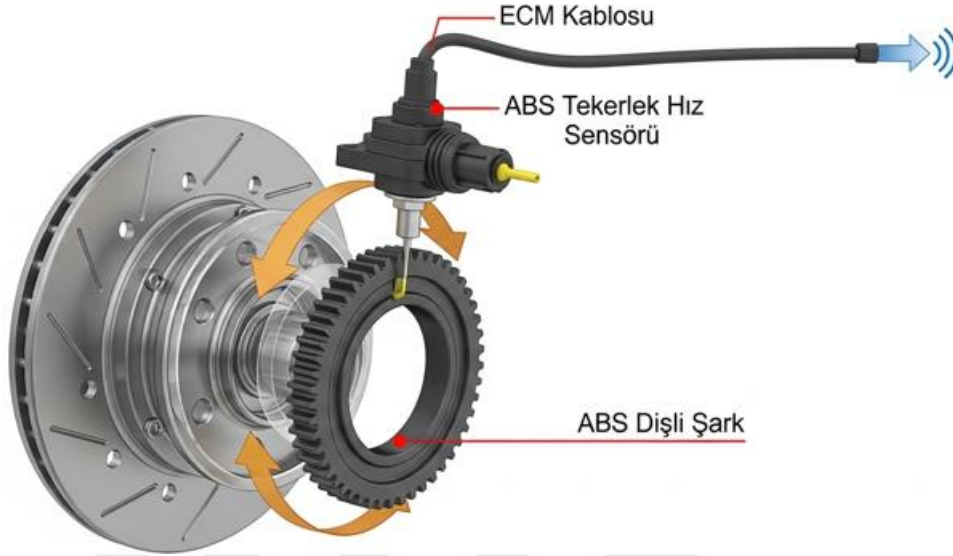
MEG sinyalleri son derece zayıftır ve tipik olarak femtotesla düzeyindedir; bu nedenle ölçümler çoğunlukla manyetik olarak yalıtılmış ortamlarda ve yüksek duyarlıklı sensörlerle gerçekleştirilir (Hämäläinen vd., 1993). MEG ve EEG sinyalleri temelde senkronize sinaptik akımlardan kaynaklanan akım dipolleridir. Ölçülebilir bir MEG sinyalinin oluşabilmesi için çok sayıda ve benzer yönelimli nöronun eşzamanlı aktivitesi gereklidir; bu nedenle MEG özellikle kortikal kaynaklara daha duyarlıdır (Hämäläinen vd., 1993; Murakami ve Okada, 2006).

2.5.2.3. Otomotivde hall sensörlerinin kullanımı (1980’ler)

Elektronik motor yönetim sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, krank mili konumu ve motor hızının doğru biçimde ölçülmesi otomotiv uygulamalarında temel gereksinimlerden biri hâline gelmiştir. Bu amaçla temassız algılama sağlayan Hall etkili ve indüktif sensörler yaygın olarak kullanılmıştır. Krank mili hız sensörleri, krank milinin hızını ve konumunu ölçerek motor kontrol ünitesine veri sağlar; bu bilgiler enjeksiyon ve ateşleme zamanlamasının kontrolünde kullanılır. Böylece motorun daha verimli çalışması sağlanırken yakıt tüketimi ve emisyonların azaltılmasına da katkı sunulur (Nwagboso, 1993; Bosch Mobility n.d.-a).

Bir diğer önemli kullanım alanı tekerlek hızının izlenmesidir. Tekerlek hız sensörleri, ABS başta olmak üzere ESP ve ASR gibi araç güvenlik sistemlerinin temel girişlerinden biridir. Modern aktif tekerlek hız sensörlerinde Hall teknolojisi yaygın olarak kullanılmakta; sensör, dönen kodlayıcının oluşturduğu değişen manyetik alanı algılayarak tekerlek hızına karşılık gelen dijital sinyaller

üretmektedir. Bu sayede çok düşük hızlarda dahi doğru ölçüm yapılabilmekte ve fren kontrol sistemlerinin yol tutuşu ile araç kararlılığını artıracak şekilde çalışması mümkün olmaktadır (Bosch Mobility n.d.-b; Hernandez, 2007).

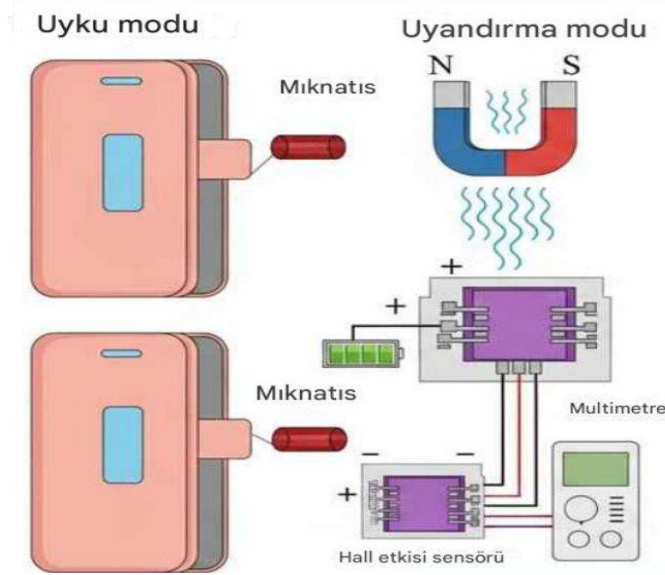


Şekil 2.10. Hall etkili ABS tekerlek hız sensörü (Ototaşarruf, 2019).

2.5.2.4. Akıllı telefon tabanlı hall etkisi sensörleri ile manyetik boncuk destekli biyosensör uygulamaları

Akıllı telefonlarda yer alan Hall etkisi sensörleri, manyetik alan değişimlerini algılayan yarıiletken tabanlı aygıtlardır. Bu sensörler, özellikle mıknatıs içeren kapak veya kılıf sistemlerinde açık-kapalı durumun algılanması için kullanılabilir. Kapak kapandığında mıknatıs sensöre yaklaşır, sensör manyetik alanı algılar ve buna bağlı olarak ekranın kapanması ya da özel pencere modunun etkinleşmesi gibi işlevler tetiklenebilir (Hall, 1879; ROHM Semiconductor, t.y.; ZTE Support, t.y.).

Son yıllarda, akıllı telefonlarda bulunan Hall etkisi sensörlerinin biyolojik testlerde kullanılmasına yönelik potansiyel uygulamalar da tartışılmaya başlanmıştır. Özellikle manyetik boncuklarla işaretlenmiş immunoassay yaklaşımlarında, Hall sensörleri düşük maliyetli ve taşınabilir algılama platformları açısından dikkat çekmektedir (Zhu vd., 2022; Fan vd., 2021). Ancak akıllı telefonun kendi Hall sensörünün bu amaçla kullanımı literatürde daha çok kavramsal ve perspektif düzeyinde ele alınmıştır; buna karşılık Hall-tabanlı manyetik boncuk algılama sistemleri genel olarak CMOS tabanlı biyosensör platformlarında deneysel olarak gösterilmiştir (Zhu vd., 2022; Fan vd., 2021; Aytur vd., 2007).

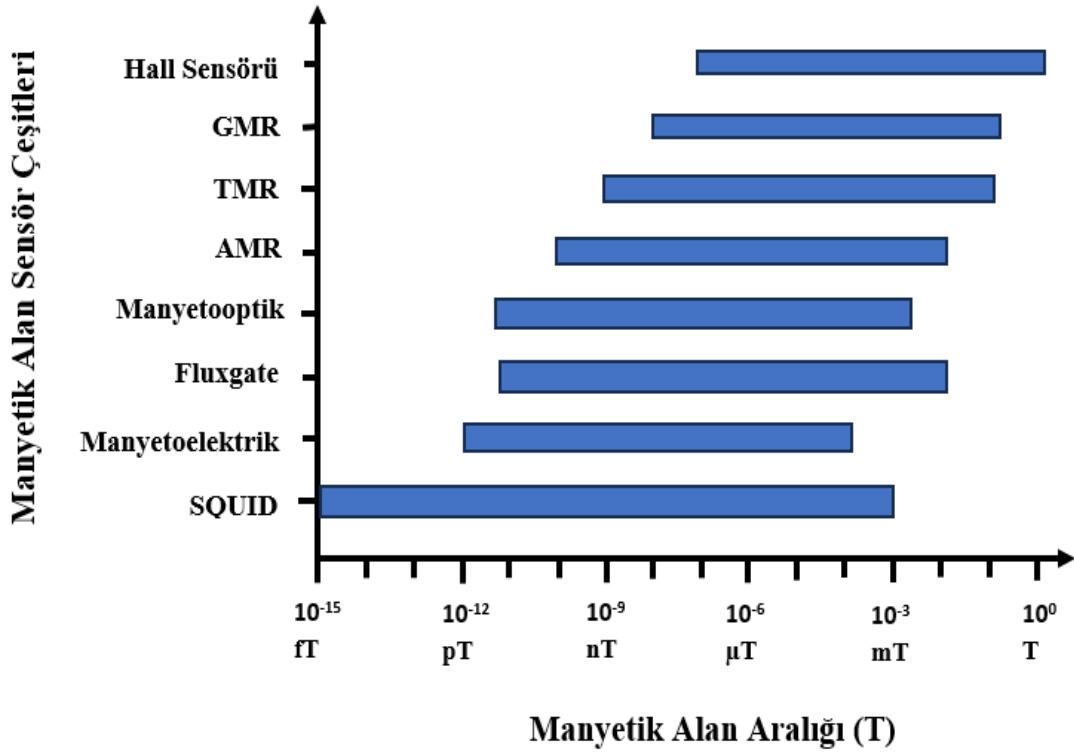


Şekil 2.11. Akıllı telefon tabanlı hall etkisi sensörleri ile manyetik boncuk destekli biyosensör uygulamalarının gösterimi (Zhu vd., 2020).

Manyetik boncuk destekli sandwich immunoassay yaklaşımında, sensör yüzeyi önce yakalama antikorlu ile işlevselleştirilir; ardından örnekte bulunan hedef molekül bu yüzeye bağlanır ve daha sonra manyetik boncukla işaretlenmiş ikinci bir antikor sisteme eklenir. Böylece sensör yüzeyinde tutulan manyetik boncuklar, hedef analit miktarıyla ilişkili bir manyetik sinyal oluşturur. Bu sinyal, alttaki manyetik algılayıcı tarafından elektriksel bir çıktı olarak okunabilir (Zhu vd., 2022; (Aytur vd., 2007; Zhu vd., 2020). Hall etkisi tabanlı manyetik boncuk algılama sistemleri, CMOS uyumluluğu, küçük boyut ve düşük maliyet gibi avantajları nedeniyle taşınabilir tanı platformları için umut verici görülmektedir. Bununla birlikte, akıllı telefonun dahili Hall sensörünün biyosensör olarak doğrudan ve yaygın biçimde kullanıldığını söylemek yerine, bu yaklaşımın henüz gelişmekte olan ve sınırlamaları bulunan bir araştırma yönü olduğunu belirtmek daha doğru olacaktır (Zhu vd., 2022; Fan vd., 2021) .

2.5.3. Manyetik alan sensörlerin çeşitleri:

- Hall Etkisi Sensörleri
- Manyetorezistans (MR) sensörler
- 1. Anizotropik Manyetorezistif (AMR) Sensörler
- 2. Dev Manyetorezistif (GMR) Sensörler
- 3. Tünelleme Manyetorezistif (TMR) Sensörler
- Fluxgate Sensörleri
- SQUID (Süperiletken Kuantum Girişim Cihazları)
- Manyetoelektrik Sensör



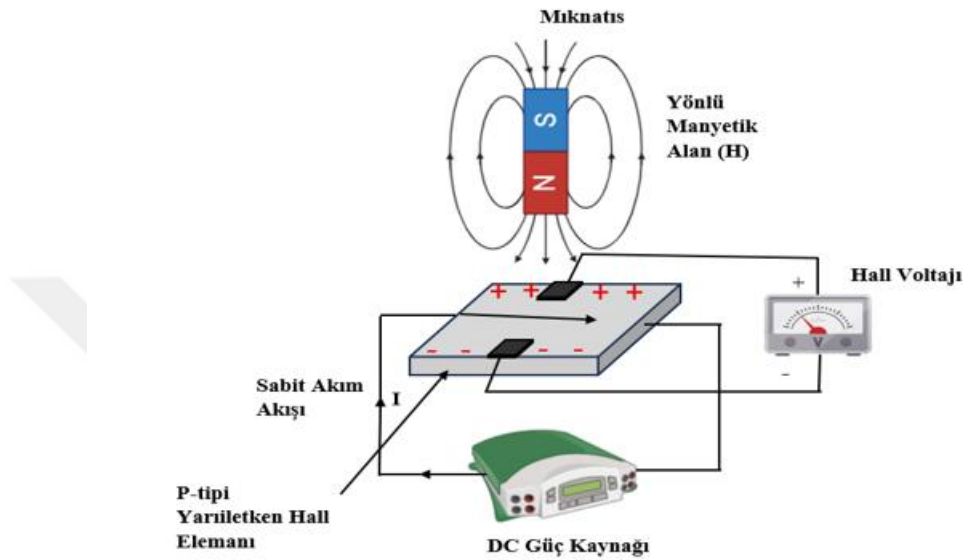
Şekil 2.12. Manyetik alan sensörlerin hassasiyet aralıklarının çizelgede gösterimi (Lenz ve Edelstein, 2006).

2.5.3.1. Hall Sensörleri

Hall sensörleri, dışarıdan uygulanan bir manyetik alanın büyüklüğünü algılayabilen, temassız ölçüm teknolojisi sunan yarıiletken tabanlı sensörlerdir. Bu cihazlar, temel olarak elektriksel sinyalleri manyetik alanla ilişkilendirerek ölçüm yapar. Günümüzde otomotiv sistemlerinden robotik kontrollere, biyomedikal uygulamalardan endüstriyel otomasyonlara kadar birçok alanda kullanılmaktadır (Ramsden, 2006). Hall etkisi, 1879 yılında Amerikalı fizikçi Edwin Herbert Hall tarafından keşfedilmiştir. Hall, bir iletken içerisinde akım geçerken iletkenine dik bir manyetik alan uygulanması durumunda, yük taşıyıcılarının yanal sapmaya uğrayarak iletkenin bir kenarında pozitif, diğer kenarında negatif yüklerin birikmesine neden olduğunu gözlemlemiştir. Bu yük birikimi, "Hall gerilimi" olarak adlandırılır (Hall, 1879). Bu etki başlangıçta temel fizik araştırmaları için önemliydi. Ancak yarıiletken teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, 1950'li ve 1960'lı yıllarda etkili biçimde ölçüm yapılmasına olanak tanıyan Hall sensörleri geliştirildi. 1960'ların sonlarında, kompakt ve ucuz Hall sensörleri seri üretime geçmiştir (Popovic, 2003).

Hall Etkisinin Fiziksel Prensibi

Hall etkisi, hareket eden yüklerin manyetik alan içerisindeki davranışı ile ilgilidir. Bir yarıiletken plaka üzerinden sabit bir elektrik akımı (I) geçirildiğinde ve bu plakaya dik yönde bir manyetik alan (B) uygulandığında, iletken içerisindeki yük taşıyıcıları Lorentz kuvveti ile saptırılır. Bu sapma, plaka üzerinde bir yan potansiyel farkı yaratır. Bu potansiyel fark, Hall gerilimi (V_H) olarak adlandırılır.



Şekil 2.13. Miknatisın Manyetik Hale Dik Etki Ederek Voltaj Oluşturması (Akgul, 2021).

2.5.3.2. Manyetorezistif sensör (MR sensör)

Manyetorezistif sensör (MR sensör), dış manyetik alanların bir malzemenin elektriksel direnci üzerindeki etkisini kullanarak manyetik alanı algılayan bir cihazdır. Bu sensörler, temel olarak manyetorezistans (magnetoresistance) olarak adlandırılan fiziksel olgudan yararlanır. Manyetorezistans, bir malzemenin elektriksel direncinin uygulanan harici manyetik alana bağlı olarak değişmesi anlamına gelir (McGuire ve Potter, 1975). Bu direnç değişimi, farklı fiziksel mekanizmalarla gerçekleşebilir ve bu mekanizmalara göre MR sensörler başlıca Anizotropik Manyetorezistans (AMR), Dev Manyetorezistans (GMR) ve Tünelleme Manyetorezistansı (TMR) olarak sınıflandırılır (Tumański, 2001; Baibich vd., 1988; Moodera vd., 1995).

Anizotropik Manyetorezistif (AMR) Sensörler

Anizotropik manyetorezistif sensörler, bir ferromanyetik malzemenin elektriksel direncinin, uygulanan manyetik alanın yönüne bağlı olarak değişmesi prensibine dayanan manyetik alan sensörleridir. Bu sensörlerde temel fiziksel ilke, manyetorezistans etkisidir. Bu etkinin temelleri William Thomson (Lord Kelvin) tarafından 1857 yılında ortaya konmuştur (McGuire ve Potter, 1975).

/. “Anizotropik” terimi, malzemenin farklı yönlerde farklı fiziksel özellikler göstermesi anlamına gelir. Ferromanyetik malzemelerde, özellikle permalloy gibi yumuşak manyetik alaşımlarda bu etki belirgin şekilde gözlenir (Tumański, 2001; McGuire ve Potter, 1975). Dış manyetik alan uygulandığında malzeme içindeki manyetik domenlerin yönelimi değişir; bu durum iletim elektronlarının saçılma olasılığını etkileyerek elektriksel direncin artmasına veya azalmasına neden olur (Tumański, 2001; McGuire ve Potter, 1975).

AMR sensörleri, dirençteki bu değişimi algılayarak uygulanan manyetik alanın şiddeti ve yönü hakkında bilgi sağlar. Düşük güç tüketimi, küçük boyutları ve yönsel hassasiyetleri nedeniyle konum algılama, hız ölçümü, akım algılama ve elektronik pusula sistemleri gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Tumański, 2001). Ayrıca bu sensörler, DC bileşenli statik manyetik alanları algılayabilmeleri bakımından Hall sensörlerini tamamlayıcı özellikler taşımaktadır (Tumański, 2001).

Çalışma Prensibi

AMR etkisi, ferromanyetik ince filmlerde elektriksel direncin manyetizasyon yönüne bağlı olarak değişmesi prensibine dayanır. Akım yönü ile manyetizasyon doğrultusu arasındaki açı değiştikçe elektron saçılması da değişir; buna bağlı olarak malzemenin direnci farklı değerler alır. Bu nedenle AMR sensörler, manyetik alanın hem yönüne hem de büyüklüğüne duyarlı bir çıkış üretir (Tumański, 2001; McGuire ve Potter, 1975).



Şekil 2.14. AMR sensör elemanının çalışma prensibinin gösterimi (ABLIC Inc., n.d.).

Dev Manyetorezistif (GMR) Sensörler

Dev manyetorezistif (giant magnetoresistance, GMR) sensörler, manyetik alan değişimlerine yüksek hassasiyetle cevap veren manyetik alan sensörleridir. Bu sensörler, spintronik alanının gelişiminde önemli bir yere sahiptir ve klasik manyetorezistans etkisinden farklı olarak elektronların spin yöneliminin elektriksel direnç üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir (Fert, 2008). GMR etkisi, ferromanyetik ve iletken ince tabakaların art arda dizildiği çok katmanlı yapılarda ortaya çıkar (Baibich vd., 1988; Fert, 2008).

GMR Etkisi ve Çalışma Prensibi

GMR etkisi, iki ferromanyetik tabaka arasında iletken bir ara tabakanın bulunduğu yapılarda gözlenir. Bu yapılarda elektronların saçılması, yalnızca yüklerine değil spin yönelimlerine de bağlıdır. Ferromanyetik tabakaların mıknatıslanma yönleri paralel olduğunda elektronların saçılması azalır ve yapı daha düşük direnç gösterir. Buna karşılık tabakaların mıknatıslanma yönleri antiparalel olduğunda spin-bağımlı saçılma artar ve elektriksel direnç yükselir (Baibich vd., 1988; Fert, 2008). Dış manyetik alan uygulanması, ferromanyetik tabakaların göreceli mıknatıslanma yönlerini değiştirerek yapıdaki direnç farkını kontrol eder. Böylece dış manyetik alanın büyüklüğü, sensörün direnç değişimi üzerinden belirlenebilir (Baibich vd., 1988; Fert, 2008).



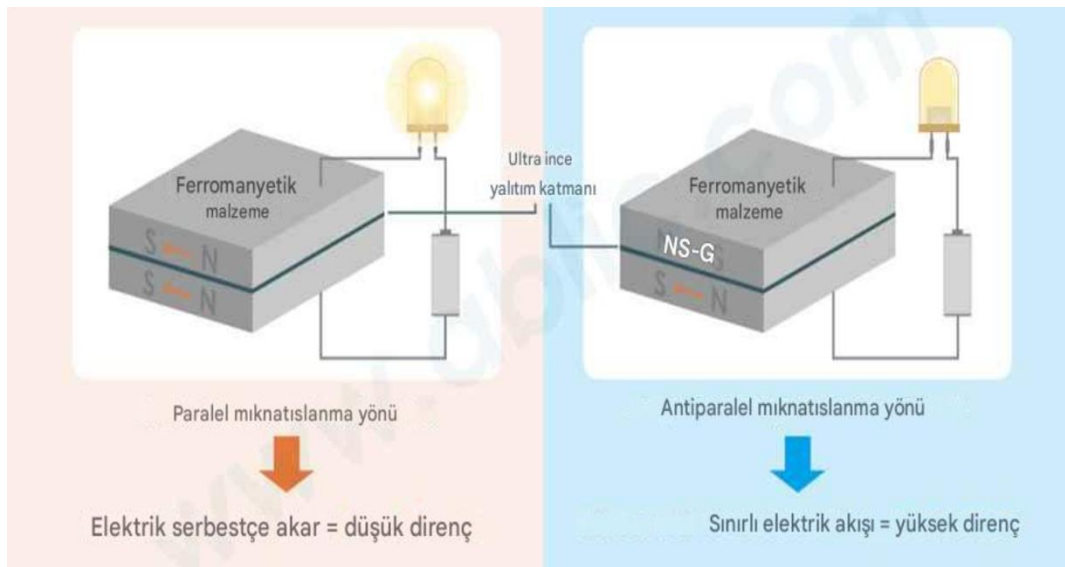
Şekil 2.15. GMR sensör elemanının çalışma prensibinin gösterimi (ABLIC Inc., n.d.).

Tünelleme Manyetorezistif (TMR) Sensörler:

Tünelleme manyetorezistif (tunneling magnetoresistance, TMR) sensörler, spintronik tabanlı manyetik alan sensörleri arasında yüksek hassasiyet ve yüksek sinyal düzeyi sunan yapılardır. Bu sensörler, iki ferromanyetik tabaka arasına yerleştirilmiş çok ince bir yalıtkan tabakadan oluşan manyetik tünel bağlantılarına dayanır (Mooodera vd., 1995; Yuasa vd., 2004; Butler vd., 2001). GMR yapılardan farklı olarak, TMR yapılarda ara tabaka iletken değil yalıtkindır. Bu nedenle elektrik iletimi, elektronların kuantum tünellemesi yoluyla gerçekleşir (Mooodera vd., 1995; Butler vd., 2001). Özellikle MgO bariyerli yapılarda oda sıcaklığında yüksek tünelleme manyetorezistans oranları elde edilebildiği gösterilmiştir (Yuasa vd., 2004; Butler vd., 2001).

Çalışma Prensibi

TMR sensörlerin temel yapısı serbest ferromanyetik tabaka, tünelleme bariyeri ve sabit ferromanyetik tabakadan oluşur. Serbest tabakanın mıknatıslanma yönü dış manyetik alanla değişebilirken, sabit tabakanın mıknatıslanması belirli bir doğrultuda tutulur. Aradaki birkaç nanometre kalınlığındaki yalıtkan bariyer çoğunlukla MgO gibi bir oksit tabakadır (Yuasa vd., 2004; Butler vd., 2001). İki ferromanyetik tabakanın mıknatıslanma yönleri paralel olduğunda spin-polarize elektronların tünelleme olasılığı artar ve yapı düşük direnç gösterir. Buna karşılık tabakalar antiparalel hizalandığında tünelleme olasılığı azalır ve direnç yükselir (Mooodera vd., 1995; Butler vd., 2001). Bu direnç farkı dış manyetik alanın etkisiyle değiştirilebildiğinden, TMR sensörler hassas manyetik alan algılayıcıları olarak kullanılmaktadır (Mooodera vd., 1995; Yuasa vd., 2004; Butler vd., 2001).



Şekil 2.16. GMR sensör elemanın çalışma prensibinin gösterimi (ABLIC Inc., n.d.).

2.5.3.3. Fluxgate sensörleri

Fluxgate sensörler, doğru akım (DC) ve düşük frekanslı alternatif manyetik alanların hassas ölçümünde kullanılan elektromanyetik tabanlı manyetik alan sensörleridir. Bu sensörler, vektörel ölçüm yapabilmeleri ve yüksek duyarlılıkları nedeniyle özellikle zayıf manyetik alanların algılanmasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Klasik fluxgate yapılarında çözünürlük pT düzeyine kadar inebilmekte, dolayısıyla nanoTesla seviyesindeki alanların ölçümü de güvenilir biçimde gerçekleştirilebilmektedir (Ripka, 2001; Primdahl, 1979).

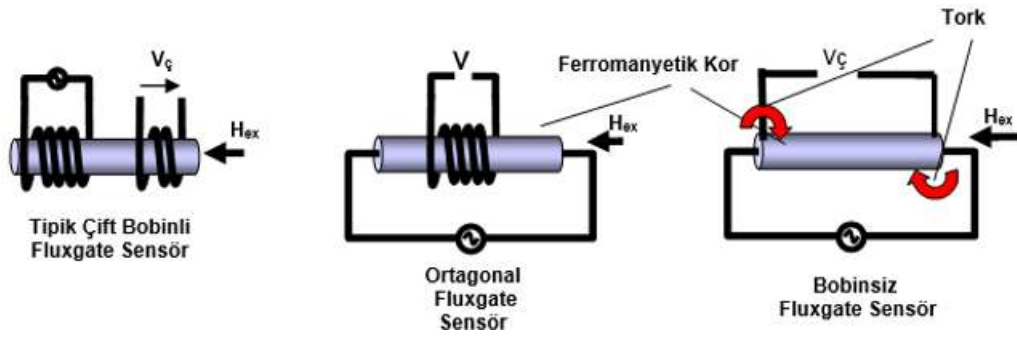
Fluxgate sensörlerin çalışma prensibi, yüksek manyetik geçirgenliğe sahip bir ferromanyetik çekirdeğin alternatif bir uyarım alanı ile periyodik olarak pozitif ve negatif doyuma sürülmesine dayanır. Çekirdek üzerine sarılan uyarım bobini bu doyumu oluştururken, algılama bobini çekirdekteki manyetik akı değişiminden kaynaklanan indüklenmiş sinyali algılar. Dış manyetik alan bulunmadığında sistem simetrik davrandığından ikinci harmonik bileşen ideal olarak oluşmaz; ancak dış bir DC alan mevcut olduğunda bu simetri bozulur ve algılama bobininde ikinci harmonik bileşen ortaya çıkar. Bu bileşenin genliği dış manyetik alanın büyüklüğüyle ilişkilidir ve elektronik devreler yardımıyla ölçülerek alan değeri belirlenir (Ripka, 2001; Primdahl, 1979).

Fluxgate teknolojisinin kökeni 1930'lu yıllara uzanır. Victor Vacquier ve çalışma arkadaşları, II. Dünya Savaşı sırasında havadan denizaltı tespiti için kullanılan ilk fluxgate magnetometrelerin geliştirilmesinde önemli rol oynamıştır. Daha sonraki dönemlerde fluxgate magnetometreler yalnızca jeofizik ve savunma alanlarında değil, aynı zamanda uzay bilimi görevlerinde de yaygın biçimde kullanılmıştır (Nabighian vd., 2005; Matsuoka vd., 2013).

Çalışma Prensibi

Fluxgate sensörlerin temel yapısı, bir ferromanyetik çekirdek ile bu çekirdek üzerine yerleştirilmiş uyarım ve algılama bobinlerinden oluşur. Uyarım bobinine uygulanan alternatif akım, çekirdeği periyodik olarak doyuma götürür. Bu sırada çekirdekte oluşan manyetik akı değişimi algılama bobininde bir gerilim indükler. Dış alanın yokluğunda doyuma ulaşma süreci simetrik olduğundan ölçülen sinyalde belirgin bir ikinci harmonik oluşmaz; dış alan varlığında ise çekirdeğin mıknatıslanma çevrimi asimetrik hâle gelir ve ikinci harmonik bileşen belirginleşir (Ripka, 2001; Primdahl, 1979).

Algılama bobininden elde edilen sinyal uygun elektronik devrelerle ayrıştırılır, yükseltilir ve dış manyetik alanın büyüklüğüne karşılık gelecek şekilde işlenir. Bu nedenle fluxgate sensörler özellikle düşük seviyeli statik manyetik alanların ölçümünde yüksek doğruluk ve kararlılık sunar (Ripka, 2001; Primdahl, 1979).



Şekil 2.17. Bazı Fluxgate sensör çeşitleri (Atalay vd., 2010).

Algılama bobininde oluşan çıkış yaklaşık olarak aşağıdaki gibi modellenenebilir:0

$$V(t) = a_1 \sin(\omega t) + a_2 \sin(2\omega t + \phi) + a_3 \sin(3\omega t + \phi_3) + \dots \quad (2.5)$$

Burada a_2 , ikinci harmonik bileşenin genliğini; ω , uyarım açısal frekansını; ϕ ise faz kaymasını göstermektedir. Klasik ikinci harmonik fluxgate sensörlerde ölçüm için genellikle 2ω bileşeni seçilir; çünkü dış manyetik alanın etkisini en belirgin biçimde yansıtan bileşen budur (Primdahl, 1979; Ripka, 1992).

Fluxgate Sensör Çeşitleri

Fluxgate sensörler, yapısal özelliklerine ve çalışma biçimlerine göre farklı türlerde geliştirilebilmektedir. Klasik fluxgate yapılarında ferromanyetik çekirdek, uyarım bobini ve algılama bobini birlikte kullanılır. Bunun yanında, uyarım alanı ile ölçülen alanın birbirine dik olduğu ortogonal fluxgate sensörler de geliştirilmiştir. Ortogonal fluxgate yapılar, temel modda çalışabilmeleri ve daha basit bazı düzeneklere izin vermeleri nedeniyle dikkat çekmektedir (Ripka, 1992; Sasada, 2002).

Bir diğer önemli tür bobinsiz (coil-less) fluxgate sensörlerdir. Bu sensörlerde klasik pickup bobini kullanılmadan, ferromanyetik elemanın cevabı doğrudan değerlendirilir. Özellikle amorf teller üzerinde gösterilen bobinsiz fluxgate etkisi, küçük boyutlu ve alternatif tasarımlar açısından dikkat çekici bir gelişme olmuştur (Atalay vd., 2010).

Ayrıca, son yıllarda minyatür fluxgate sensörler ve yüksek sıcaklıkta çalışabilen fluxgate sensörler üzerine de yoğun çalışmalar yapılmıştır. Minyatür fluxgate tasarımları, taşınabilir ve entegre sistemlerde kullanım amacıyla geliştirilirken, yüksek sıcaklığa dayanıklı fluxgate sensörler özellikle jeofizik araştırmalar ve derin sondaj gibi zorlu çevresel koşullar için önem taşımaktadır (Lu vd., 2014; Yuan vd., 2022).

Uygulamalar

Fluxgate sensörler, yüksek hassasiyetleri nedeniyle çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Jeofizik araştırmalarda yer manyetik alanının ve manyetik anomalilerin ölçümünde, savunma uygulamalarında ferromanyetik cisim ve denizaltı tespitinde, uzay görevlerinde ise gezegenler arası ve gezegensel manyetik alanların vektörel ölçümünde yaygın biçimde görev almaktadır (Matsuoka vd., 2013; Ripka, 1992).

2.5.3.4. SQUID (Süperiletken Kuantum Girişim Cihazları)

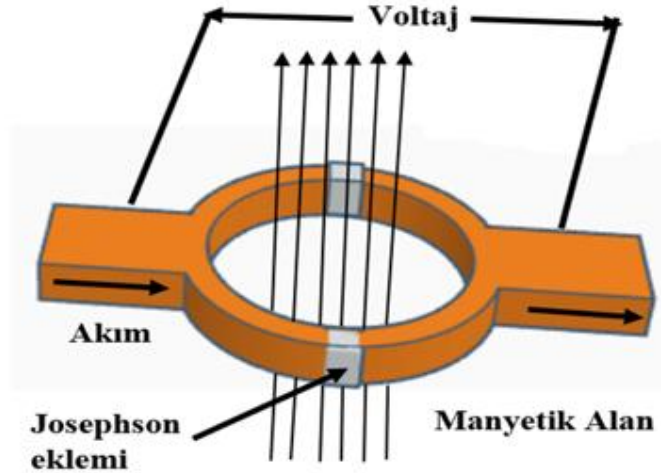
SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), süperiletkenlik ve kuantum girişim ilkelerine dayanan, son derece hassas bir manyetik alan algılayıcısıdır. Temel yapısı, bir süperiletken halka içerisine yerleştirilmiş bir veya iki Josephson birleşiminden oluşur. Bu nedenle SQUID'ler, manyetik akıdaki son derece küçük değişimleri elektriksel bir çıkış sinyaliye dönüştürerek algılayabilir. Çok yüksek duyarlılıkları sayesinde femtotesla mertebesindeki çok zayıf manyetik alanların ölçümünde kullanılmaktadırlar. Bu özellikleri nedeniyle biyomanyetizma, jeofizik, malzeme karakterizasyonu ve hassas laboratuvar ölçümleri gibi alanlarda önemli bir yer tutarlar (Fagaly, 2006; Tinkham, 2004).

SQUID cihazları, süperiletkenliğin korunabilmesi için düşük sıcaklıklarda çalıştırılır. Düşük sıcaklıklı süperiletkenlerden üretilen SQUID'ler genellikle sıvı helyum sıcaklığına yakın, yaklaşık 4.2 K civarında çalıştırılırken; yüksek sıcaklıklı süperiletkenlerden üretilen bazı SQUID'ler sıvı azot sıcaklığına yakın değerlerde de çalışabilmektedir. Bununla birlikte, en yüksek hassasiyet genellikle düşük sıcaklıklı sistemlerde elde edilmektedir (Fagaly, 2006; Jenks, 1997).

Çalışma Prensibi

SQUID'in çalışma prensibi, Josephson etkisi ve manyetik akı kuantalanmasına dayanır. Josephson birleşiminde, iki süperiletken arasında yer alan çok ince bir bariyer üzerinden Cooper çiftleri tünelleme yapabilir. SQUID halkasından geçen manyetik akı değiştiğinde, halkadaki süperiletken dalga fonksiyonunun faz ilişkisi değişir ve bu durum cihazın kritik akımını ya da çıkış gerilimini periyodik olarak etkiler. Böylece uygulanan manyetik alan, ölçülebilir bir elektriksel sinyale dönüştürülmüş olur (Fagaly, 2006; Tinkham, 2004). Genel olarak iki temel SQUID türü bulunmaktadır. DC-SQUID, süperiletken bir halka üzerine paralel bağlanmış iki Josephson birleşiminden oluşur ve doğru akım ile kutuplanarak çalışır. RF-SQUID ise süperiletken halka içine yerleştirilmiş tek bir Josephson birleşimi içerir ve radyo frekanslı bir okuma devresi ile çalıştırılır. DC-SQUID yapıları genellikle daha yüksek hassasiyet sağlarken, RF-SQUID yapıları daha basit tasarım avantajına sahiptir (Tinkham, 2004; Clarke ve Braginski, 2004). SQUID'lerde çıkış sinyali, uygulanan manyetik akının akı kuantumu Φ_0 ile ilişkili periyodik değişimine bağlıdır.

Bu nedenle cihaz, son derece küçük manyetik akı değişimlerini tespit edebilir ve uygun okuma elektroniği ile bu değişimler hassas biçimde ölçülür. Bu özellik, SQUID'i mevcut en duyarlı manyetik alan sensörlerinden biri hâline getirmektedir (Fagaly, 2006; Tinkham, 2004).



Şekil 2.18. SQUID (süperiletken kuantum girişim cihazı) çalışma prensibinin gösterimi . (Zhang vd., 2024).

2.5.3.5. Manyetooptik sensörler

Manyetooptik sensörler, manyetik alanı optik yöntemlerle algılayan sensörlerdir. Bu sensörlerin en temel çalışma mekanizması Faraday etkisine dayanır. Faraday etkisinde, manyetik alan doğrultusunda ilerleyen doğrusal polarize ışığın polarizasyon düzlemi döner. Bu özellik sayesinde manyetik alan bilgisi, ışığın polarizasyonundaki değişim üzerinden optik olarak ölçülebilir. Manyetooptik sensörler; elektromanyetik girişime karşı bağışıklık, elektriksel yalıtım ve uzaktan algılama gibi avantajları nedeniyle çeşitli ölçüm uygulamalarında kullanılmaktadır (Faraday, 1846; Zvezdin ve Kotov, 1997; Chen vd., 2023).

Manyetooptik etkilerin temeli, Michael Faraday'ın 1845 yılında manyetik alanın ışığın polarizasyon düzlemini döndürdüğünü göstermesine dayanır. Bu bulgu, ışık ile elektromanyetizma arasındaki ilişkinin ilk deneysel kanıtlarından biri olarak kabul edilir. Daha sonraki yıllarda lazer teknolojisinin, polarizasyon optiğinin ve manyetooptik malzemelerin gelişmesiyle birlikte bu etki sensör uygulamalarında kullanılabilir hâle gelmiştir. Özellikle garnet tabanlı malzemeler ve YIG benzeri sistemler, yüksek Faraday dönüşü ve uygun optik özellikleri nedeniyle manyetooptik aygıtlarda önemli bir yer edinmiştir (Faraday, 1846; Zvezdin ve Kotov, 1997; Arsad vd., 2023).

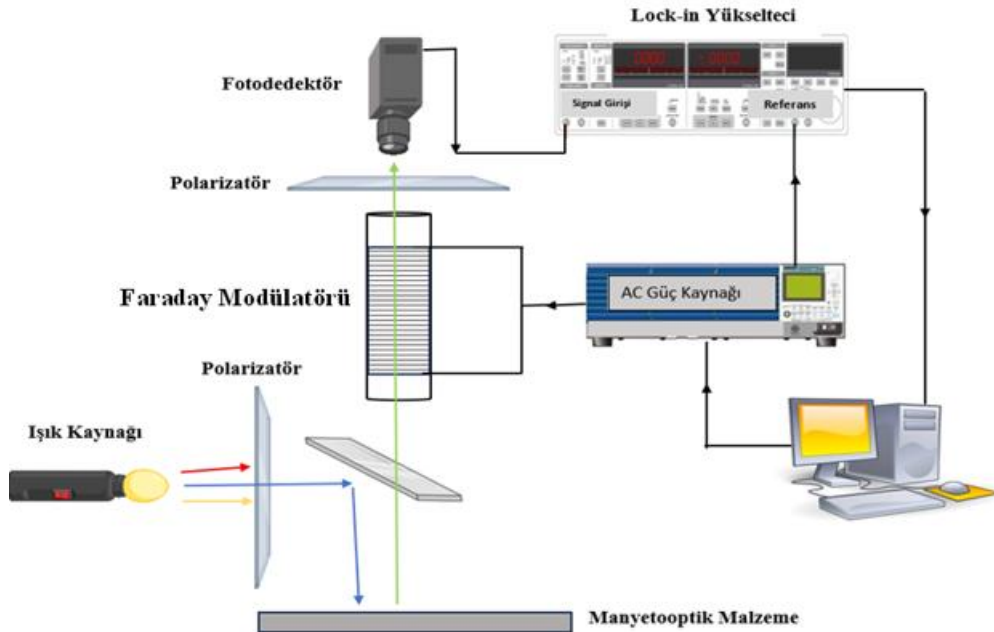
Manyetooptik Sensörlerin Çalışma Prensibi

Bir lazer kaynağından çıkan doğrusal polarize ışık, manyetooptik malzemeye yönlendirilir. Malzeme üzerine uygulanan manyetik alan, ışığın polarizasyon düzlemini belirli bir açı kadar döndürür. Bu dönme açısı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir:

$$\theta = VBL \quad (2.6)$$

Burada θ polarizasyon düzleminin dönme açısını, V Verdet sabitini, B manyetik akı yoğunluğunu ve L ışığın malzeme içerisinde katettiği yolu göstermektedir. Buna göre dönme açısı; kullanılan malzemenin optik-manyetik özelliklerine, uygulanan manyetik alanın büyüklüğüne ve optik yol uzunluğuna bağlıdır (Zvezdin ve Kotov, 1997).

Algılama Süreci: Manyetooptik sensörlerde ilk olarak ışık bir polarizatörden geçirilerek doğrusal polarize hâle getirilir. Daha sonra bu ışık manyetooptik malzemeden geçerken, uygulanan manyetik alanın etkisiyle polarizasyon düzlemi döner. Çıktaki analizör, bu dönmeye bağlı olarak ışık şiddetinde oluşan değişimi belirler. Son aşamada fotodedektör, ışık şiddetindeki değişimi elektriksel sinyale dönüştürür ve elektronik devre bu sinyali işleyerek manyetik alanın büyüklüğü hakkında bilgi verir (Zvezdin ve Kotov, 1997; Chen vd., 2023).



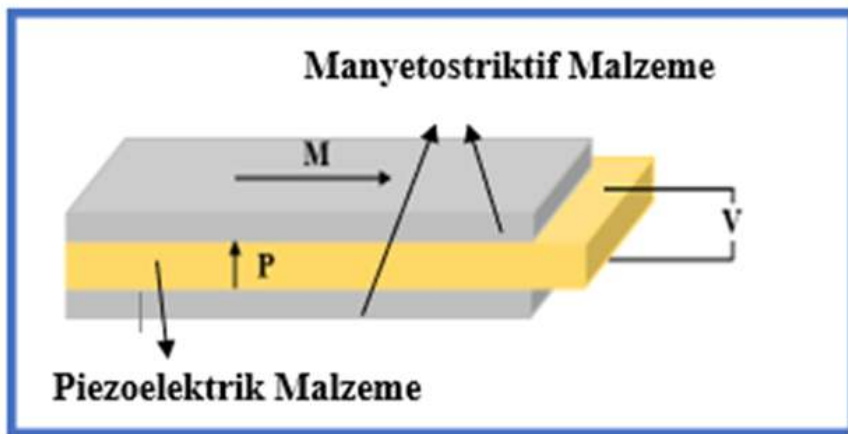
Şekil 2.19. Manyetooptik sensörün çalışma prensibinin gösterimi (Dorosinskiy ve Sievers, 2023).

2.5.3.6. Manyetoelektrik sensör

Manyetoelektrik (ME) sensörler, dış manyetik alanı elektriksel bir sinyale dönüştürebilen yüksek hassasiyetli algılayıcılardır. Bu sensörlerde algılama, magnetostriktif ve piezoelektrik fazlar arasındaki mekanik eşleşme sayesinde gerçekleşir. Uygulanan manyetik alan önce magnetostriktif fazda mekanik deformasyona neden olur; ardından bu mekanik gerinim piezoelektrik faza aktarılır ve elektriksel gerilim sinyali üretilir. Bu nedenle ME sensörler, manyetik alanı doğrudan gerilim çıktısına dönüştürebilen pasif yapılar olarak değerlendirilmektedir (Wang vd., 2014; Ma vd., 2011; Bichurin vd., 2021).

Geleneksel manyetik alan sensörlerinden farklı olarak ME sensörler, özellikle rezonans koşullarında çok yüksek duyarlılıklara ulaşabilmektedir. İnce film ve laminat tabanlı ME sensörlerde, mekanik rezonans çevresinde pikotesla mertebesinde gürültü seviyeleri ve çok zayıf manyetik alanların algılanabildiği gösterilmiştir. Bu nedenle bu sensörler, biyomanyetik ölçümler gibi zayıf manyetik alan uygulamaları için umut verici görülmektedir (Bichurin vd., 2021; Jahns vd., 2012). Ancak bu yüksek hassasiyet çoğunlukla rezonans çevresindeki dar bantlı çalışma koşullarında elde edilmektedir (Bichurin vd., 2021; Jahns vd., 2012). ME sensörlerin önemli avantajları arasında oda sıcaklığında çalışabilmeleri, düşük güç gereksinimi, kompakt yapı, elektromanyetik girişime karşı görece dayanıklılık ve mikro/nano sistemlerle bütünleştirilebilme potansiyeli yer almaktadır. Bu özellikleri nedeniyle biyomedikal ölçümler, akım ve manyetik alan algılama, jeofizik uygulamalar ve taşınabilir sensör sistemleri için dikkat çekmektedirler (Wang vd., 2014; Bichurin vd., 2021).

Bu tez çalışmasında ise, manyetoelektrik sensörün üretimi ve geliştirilmesi üzerine odaklanılmıştır. Amaç, literatürde bildirilen yaklaşımlara ek olarak hem yüksek hassasiyetli hem de mekanik açıdan dayanıklı bir ME sensör tasarlamak ve gerçekleştirmektir. Şekil 2.20’de tez kapsamında kullanılan manyetoelektrik sensörün tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 2.20. Tezde kullanılan manyetoelektrik sensörün genel görünümü ve kompozit yapısı.

Çalışma Mekanizması

Dışarıdan manyetik alan uygulaması: Sensör üzerine dış bir manyetik alan uygulandığında, magnetostriktif tabakada alanla ilişkili bir boyutsal değişim meydana gelir. Bu değişim, sensör yapısında mekanik deformasyonun başlamasına neden olur (Wang vd., 2014; Ma vd., 2011; Bichurin vd., 2021).

Mekanik tepki: Magnetostriktif tabakada oluşan deformasyon, piezoelektrik tabakaya aktarılır ve sensör yapısında bir mekanik gerinim oluşur. Rezonans koşullarında bu mekanik tepki belirgin şekilde büyüyebilir ve buna bağlı olarak sensörün alan duyarlılığı artabilir (Wang vd., 2014; Ma vd., 2011; Jahns vd., 2012).

Elektriksel çıkış: Piezoelektrik tabaka, kendisine aktarılan mekanik gerinimi elektriksel polarizasyona ve ardından ölçülebilir bir gerilim çıkışına dönüştürür. Böylece uygulanan manyetik alanın büyüklüğü, sensör çıkışındaki elektriksel sinyal üzerinden belirlenebilir (Wang vd., 2014; Ma vd., 2011; Bichurin vd., 2021).

Manyetoelektrik Sensör Türleri

Manyetoelektrik sensörler, malzeme yapısı, bağlantı tipi, boyut ölçeği ve çalışma moduna göre farklı türlerde sınıflandırılabilir. Genel olarak tek fazlı ME sensörler, kompozit ME sensörler, manyetoelektrik laminat sensörler, mikro/nano ölçekli ME sensörler ve rezonans bazlı ME sensörler başlıca sınıfları oluşturmaktadır. Tek fazlı yapılarda manyetik ve elektriksel düzen aynı faz içinde bulunurken, kompozit yapılarda magnetostriktif ve piezoelektrik fazlar mekanik eşleşme yoluyla bir araya getirilir. Sensör uygulamalarında ise özellikle kompozit ve laminat yapılar, daha güçlü ME bağlaşımı sundukları için daha yaygın biçimde kullanılmaktadır (Gao vd., 2021; Srinivasan, 2010; Wang vd., 2010).

Tek fazlı (single-phase) ME sensörler : Tek bir multiferroik malzeme fazına dayanır. Bu tür yapılarda aynı malzeme hem manyetik hem de elektriksel düzen gösterir. Ancak tek fazlı ME malzemelerde bağlaşım katsayısının görece düşük olması ve uygulama açısından çeşitli sınırlamalar bulunması nedeniyle sensör performansları genellikle kompozit sistemlerin gerisinde kalmaktadır. Buna rağmen, temel ME etkinin anlaşılması açısından önemli bir sınıf oluşturmaktadırlar (Gao vd., 2021; Srinivasan, 2010).

Kompozit ME sensörler : Magnetostriktif ve piezoelektrik fazların bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Bu yapılarda dış manyetik alan önce magnetostriktif fazda mekanik deformasyona yol açar; ardından bu deformasyon piezoelektrik faza aktarılır ve elektriksel sinyal elde edilir. Bu yaklaşım, tek fazlı yapılara göre çok daha yüksek ME bağlaşımı sağladığından, manyetik alan algılama

uygulamalarında en yaygın kullanılan sensör mimarisini oluşturur (Wang vd., 2014; Gao vd., 2021; Srinivasan, 2010).

Manyetoelektrik laminat sensörler : Kompozit sensörlerin en önemli alt türlerinden biridir. Bu yapılarda piezoelektrik ve magnetostriktif tabakalar ince katmanlar hâlinde üst üste yerleştirilir. Laminat mimari, fazlar arası gerinim aktarımını iyileştirdiği için daha yüksek ME katsayıları ve daha iyi sensör performansı sağlar. Özellikle düşük frekanslı ve rezonans çevresindeki hassas manyetik alan ölçümlerinde bu yapılar öne çıkmaktadır (Wang vd., 2014; Gao vd., 2021; Srinivasan, 2010).

Mikro/nano ölçekli ME sensörler: MEMS ve NEMS tabanlı ince film veya heteroyapı sistemlerdir. Bu tür sensörler küçük boyut, düşük güç tüketimi, yüksek entegrasyon kabiliyeti ve taşınabilir sistemlere uygunluk gibi avantajlar sunar. Özellikle ince film tabanlı yapılar kullanılarak geliştirilen mikro ve nano ölçekli ME sensörler, minyatür manyetik alan algılama uygulamaları için önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir (Gao vd., 2021; Wang vd., 2010).

Rezonans bazlı ME sensörler : Belirli bir mekanik rezonans frekansında çalışacak şekilde tasarlanır. Rezonans koşulunda mekanik titreşim genliği arttığı için çıkış gerilimi ve alan duyarlılığı belirgin biçimde yükselir. Bu nedenle çok zayıf manyetik alanların algılanmasında en yüksek performans genellikle rezonans modunda elde edilir. Bununla birlikte, bu tür sensörlerin çalışma bandı genellikle dardır; dolayısıyla yüksek hassasiyet ile sınırlı bant genişliği arasında bir denge söz konusudur (Wang vd., 2014; Bichurin vd., 2021).

2.6. Manyetoelektrik Etki

Manyetoelektrik (ME) etki, en genel anlamıyla, bir malzemede elektrik alan ile manyetik alan arasındaki bağlaşımı ifade etmektedir. Tek fazlı olup hem ferroelektrik hem de ferromanyetik özellik sergileyen ya da ferroelektrik ve ferromanyetik gibi en az iki farklı yapının bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemeler manyetoelektrik malzemeler olarak adlandırılmaktadır. İki fazlı yapılarda bu bileşenler çeşitli yöntemlerle birbirine bağlanmaktadır. Bu tür bir yapıya manyetik alan uygulandığında, manyetik fazda yaklaşık 10^{-4} – 10^{-6} mertebesinde meydana gelen uzama ve kısalma, ferroelektrik faz üzerinde bir gerilme oluşturur. Bunun sonucunda ferroelektrik malzemenin elektriksel polarizasyonu değişir ve malzemenin uçları arasında bir potansiyel farkı meydana gelir. Bu olay manyetoelektrik etki olarak tanımlanmaktadır. ME etki, pikoTesla düzeyinde hassas manyetik alan algılayabilen sensörlerden beynin kablosuz ve uzaktan uyarılmasına kadar uzanan geniş bir uygulama alanına sahiptir (Fiebig, 2005). ME etkiye katkı veren terimlerin sistematik biçimde incelenmesi ise serbest enerjinin açılımı üzerinden yapılmaktadır.

Bir malzemenin serbest enerjisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$F(\vec{E}, \vec{H}) = F_0 - P_i^S E_i - M_i^S H_i - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_{ij} E_i E_j - \frac{1}{2} \mu_0 \mu_{ij} H_i H_j - \alpha_{ij} E_i H_j - \frac{1}{2} \beta_{ijk} E_i H_j H_k - \frac{1}{2} \gamma_{ijk} H_i E_j E_k - \dots \quad (2.7)$$

Burada E ve H sırasıyla elektrik alanı ve manyetik alanı göstermektedir. Serbest enerjinin elektrik alana göre türevi alındığında kutuplaşma şu şekilde elde edilir:

$$P_i(\vec{E}, \vec{H}) = -\frac{\partial F}{\partial E_i} \quad (2.8)$$

$$= P_i^S + \varepsilon_0 \varepsilon_{ij} E_j + \alpha_{ij} H_j + \frac{1}{2} \beta_{ijk} H_j H_k + \gamma_{ijk} H_i E_j - \dots \quad (2.9)$$

Benzer şekilde, manyetik alana göre türev alınmasıyla manyetizasyon ifadesi elde edilmektedir:

$$M_i^S + \mu_0 \mu_{ij} H_j + \alpha_{ij} E_i + \beta_{ijk} E_i H_j + \frac{1}{2} \gamma_{ijk} E_j E_k - \dots, \quad (2.11)$$

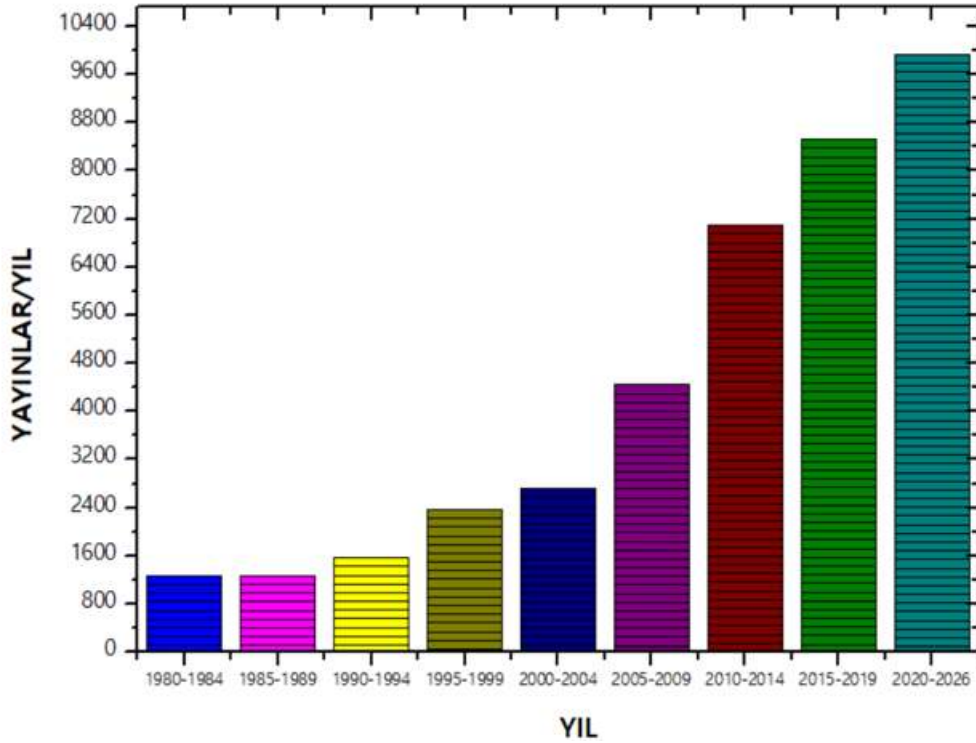
$$M_i(\vec{E}, \vec{H}) = -\frac{\partial F}{\partial H_i} \quad (2.10)$$

Burada P^S ve M^S sırasıyla kendiliğinden kutuplaşmayı ve kendiliğinden manyetizasyonu temsil etmektedir. $\hat{\varepsilon}$ ve $\hat{\mu}$ ise sırasıyla elektriksel ve manyetik duyarlılık tensörleridir. $\hat{\alpha}$ tensörü, manyetik alan etkisiyle kutuplaşmanın veya elektrik alan etkisiyle manyetizasyonun indüklenmesini ifade etmektedir ve bu durum doğrusal manyetoelektrik etki olarak tanımlanmaktadır. Buna ek olarak, $\hat{\beta}$ ve $\hat{\gamma}$ tensörleri ile ifade edilen daha yüksek mertebeden manyetoelektrik etkiler de söz konusudur (Fiebig, 2005).

ME etki üzerine gerçekleştirilen çalışmaların büyük bölümü doğrusal ME etki üzerinde yoğunlaşmıştır ve bu nedenle çoğu zaman “doğrusal” ifadesi kullanılmadan yalnızca “ME etkisi” terimi tercih edilmektedir. Bundan sonraki bölümlerde de aynı kullanım benimsenmiştir. ME etkisi, Fiebig (2005) tarafından ayrıntılı biçimde ele alınmış ve elektriksel ile manyetik özellikler arasındaki çapraz bağlaşımın teknolojik uygulamalar açısından taşıdığı yüksek potansiyel nedeniyle önemli ilgi görmüştür. Yaklaşık on yıllık yoğun deneysel ve kuramsal çalışmaların ardından, manyetoelektrik ortamların elektrodinamiğine ilişkin dönemin bilgi birikimi O’Dell’in kitabında özetlenmiş (O’Dell, 1970) ve kristallerde manyetoelektrik etkileşim olgularına odaklanan bir dizi konferans düzenlenmiştir (Freeman ve Schmid, 1975; Fiebig vd., 2004). Buna karşın, ME etkinin genel olarak zayıf olması, bu özelliği sergileyen bileşiklerin sayıca sınırlı kalması, pratik uygulamaların geliştirilmesindeki güçlükler ve ME

davranışının mikroskobik kökenlerinin yeterince açıklanamamış olması gibi nedenlerle yaklaşık yirmi yıl boyunca bu alandaki araştırmalarda belirgin bir yavaşlama yaşanmıştır (Fiebig, 2005).

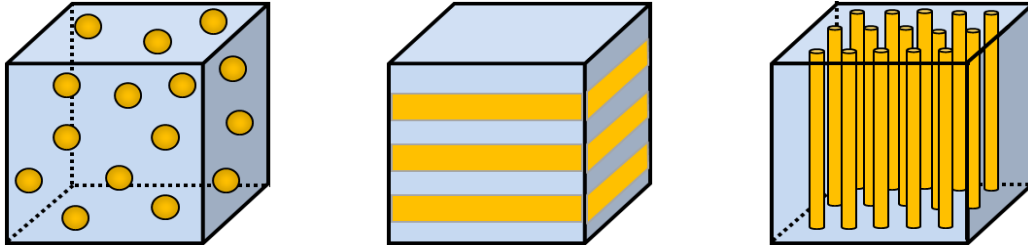
Son zamanlarda ise ME etkisinin dikkate değer bir şekilde yeniden canlandığı gözlemlenmiştir ve bu gelişimin evrimi şekil 2.21’de gösterilmektedir . Bu derlemenin amacı, söz konusu canlanmanın nedenlerini tartışmak ve öne çıkan noktaları vurgulamaktır.



Şekil 2.21. Web of Science'a göre anahtar kelime olarak 'manyetoelektrik' kelimesini içeren yıllık yayınlar (Clarivate, 2026).

Yaklaşık altmış yıl önce deneysel olarak ortaya konulan manyetoelektrik (ME) etki, günümüzde elektronik, manyetik alan algılama, biyomedikal uygulamalar ve tıp alanlarında önemini koruyan umut verici araştırma konularından biri olmayı sürdürmektedir (Kopyl vd., 2021). Yüzyılın başlarından 1970’li yıllara kadar geçen süreçte yoğun araştırmalar yürütülmüş olmasına rağmen, tek fazlı bileşiklerde elektrik alan ile manyetik alan arasında güçlü bir manyetoelektrik bağlaşım elde etmeye yönelik çalışmalar büyük ölçüde sınırlı başarı göstermiştir (Palneedi vd., 2016). Bunun başlıca nedenlerinden biri, tek fazlı manyetoelektrik malzemelerde Curie ve Néel sıcaklıklarının çoğunlukla oda sıcaklığının oldukça altında kalmasıdır. Ayrıca, o dönemde yüksek kaliteli bileşiklerin üretiminin oldukça güç olması da deneysel sonuçların hem az sayıda hem de çoğu zaman yetersiz olmasına yol açmıştır. Tek fazlı yapılarda elektriksel ve manyetik düzen arasındaki güçlü etkileşimi gözlemlemedeki bu güçlükler, iki ya da daha fazla tek fazlı bileşiğin bir arada kullanıldığı kompozit yapılar sayesinde büyük ölçüde

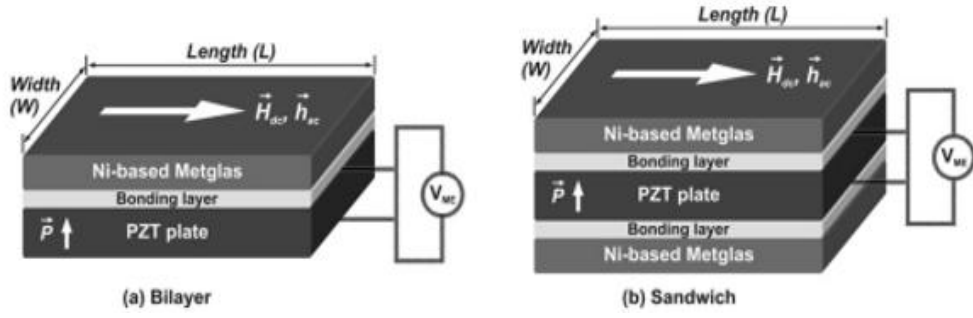
aşmıştır.(Kopyl vd., 2021; Palneedi vd., 2016; Pradhan vd., 2020). Bu yapılara ait farklı geometriler Şekil 2.22’de gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Manyetik ve ferroelektrik malzemelerin farklı yapılandırmaları; sarı bölgeler manyetik malzemeyi, mavi bölgeler ise ferroelektrik malzemeyi temsil etmektedir.

Manyetoelektrik etki, bir malzemenin elektriksel polarizasyonu ile dış manyetik alan arasında ya da tersine, net manyetizasyonu ile dış elektrik alan arasında meydana gelen etkileşim sonucunda ortaya çıkmaktadır. Elektriksel olarak kutuplanmış bir manyetoelektrik yapıda uygulanan manyetik alan, malzeme içerisindeki elektrik dipollerinin değişmesine neden olmaktadır. Benzer biçimde, uygulanan bir elektrik alan da malzemenin manyetik momentlerinin yönlenmesini değiştirebilmektedir. İlk durum doğrudan manyetoelektrik etki, ikinci durum ise ters manyetoelektrik etki olarak tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle, bir ME malzemeye manyetik alan uygulandığında ferroelektrik malzeme uçları arasında bir gerilim oluşması doğrudan ME etki olarak adlandırılırken; elektrik alanı ya da voltaj uygulanması sonucunda manyetik malzemenin manyetizasyonunda değişim meydana gelmesi ters ME etki olarak ifade edilmektedir (Palneedi vd., 2016; Pradhan vd., 2020).

Şekil 2.23’te manyetoelektrik etkinin çalışma prensibi örnek bir yapı üzerinden açıklanmaktadır. Bu yapıda metal-cam (Metglas ya da amorf ferromanyetik) malzeme ile piezoelektrik (PE) malzeme, güçlü bir yapıştırıcı aracılığıyla sıkı biçimde birleştirilmiştir. Uygulanan manyetik alan altında Metglas tabakasında meydana gelen boyutsal değişim, piezoelektrik tabaka üzerinde bir gerilme oluşturmaktadır. Bu mekanik etki sonucunda PE malzemenin uçları arasında bir voltaj meydana gelmektedir. Böylece ince film laminat yapı, uygulanan düşük frekanslı AC manyetik alanı, manyetostriktif ve piezoelektrik fazlar arasındaki mekanik bağlaşım aracılığıyla elektriksel voltaja dönüştürmektedir. Elde edilen voltajın büyüklüğü, dışarıdan uygulanan AC ve DC manyetik alanın şiddetine bağlı olarak değişmektedir. Bu sayede piezoelektrik malzeme uçlarında temassız ve kablosuz biçimde bir voltaj üretilmektedir (Giang vd., 2012).



Şekil 2.23. Katmanlı yapıya sahip bir ME numunede voltaj ölçümü (Giang vd., 2012).

Manyetoelektrik etki çoğu zaman manyetoelektrik voltaj katsayısı ile tanımlanmakta olup, bir ME malzemenin ürettiği voltajın uygulanan AC manyetik alan genliği ile doğrusal olarak değiştiği bilinmektedir. Bununla birlikte, bazı numunelerde yüksek bir α_{ME} (veya V) değeri elde edebilmek için yüksek genlikli AC manyetik alan uygulanması gerekebilmektedir. Ancak bu durum pratik açıdan çeşitli zorluklar doğurabilmektedir. Bu nedenle, ME numuneye bir DC bias manyetik alanı (H_{DC}) uygulanarak daha düşük genlikli AC manyetik alan değerlerinde de yüksek α_{ME} elde edilebilmektedir. Bu durumda ME katsayısı

$$\alpha_{ME} = V/H_{AC} \cdot t \quad (2.12)$$

eşitliği ile verilmektedir. Benzer şekilde, bunun tam tersi olan ters manyetoelektrik etki de uygun bir ters katsayı ile tanımlanmaktadır (Bichurin vd., 2021). Burada t , ferroelektrik (FE) tabakanın kalınlığını; H_{AC} , uygulanan AC manyetik alanın genliğini; V ise FE tabakası uçları arasında oluşan voltajı göstermektedir. Çeşitli makro ve nano yapıları manyetoelektrik malzemelerin oda sıcaklığındaki α_{ME} değerleri Çizelge 2.7’de sunulmuştur. Örneğin Metglas esaslı yapılar genellikle Şekil 2.20’de gösterildiği gibi katmanlı biçimde hazırlanmaktadır. Çizelgenin sağ bölümünde ise nanoboyutlu numunelere ait ME katsayı değerleri verilmektedir. Bu değerler çoğunlukla ferroelektrik yapı içerisine yerleştirilmiş manyetik nanoparçacıklar için rapor edilmektedir. Elbette burada ME katsayısını belirleyen tek etken bu değildir; numune boyutları, tabaka kalınlığı, nanoparçacık çapı, parçacıklar arası uzaklık ile uygulanan AC ve DC alan şiddeti gibi birçok parametre de etkili olmaktadır. Bu nedenle çizelgede verilen değerler genel bir ön bilgi niteliğindedir. Yüksek düzeyde manyetoelektrik etki elde edebilmek amacıyla farklı piezoelektrik ve piezomanyetik, yani yüksek manyetostriksiyon özelliğine sahip, malzemeler kullanılmaktadır.

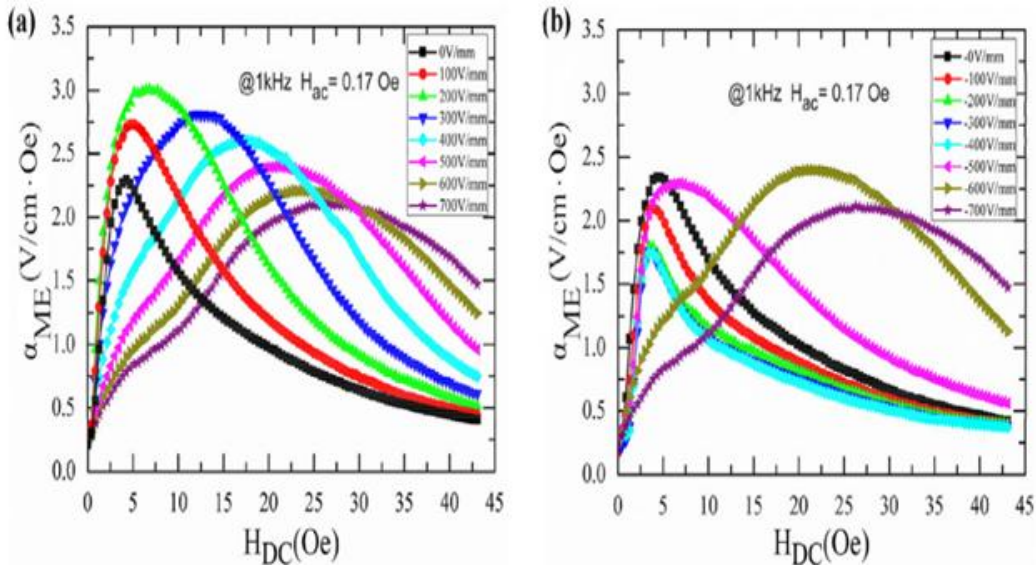
Çizelge 2.7. Bazı numunelerin manyetoelektrik voltaj katsayıları (Pradhan vd., 2020).

Numune	H _{DC} (Oe)	f _{AC} (Hz)	α (mV cm ⁻¹ Oe ⁻¹)
0.9Pb(Zr _{0.52} Ti _{0.48})O ₃ -0.1NiFe _{1.9} Mn _{0.3} O ₄	100	1000	140
PZT-20 wt%NiCo _{0.02} Cu _{0.02} Mn _{0.1} Fe _{1.8} O ₄	1250	100	115
P(VDF-TrFE)-CoFe ₂ O ₄	2000	5000	40
Ni _{0.8} Zn _{0.2} Fe ₂ O ₄ -0.41 vol% PZT	250	100	45
0.68Pb(Zr _{0.57} Ti _{0.43})O ₃ -0.32NiFe ₂ O ₄	1000	1000	80
0.62BTO-0.38CoFe ₂ O ₄ (1.5 wt% excess TiO ₂)	560	1000	130
PMN-PT-NiFe ₂ O ₄	2400	0	10,43
0.6BTO-0.4Ni(Co,Mn)Fe ₂ O ₄	500	100	81,7
Metglas/PVDF	2	20	21,460
Metglas/PMN-PT (fiber)/Metglas	8	100	52000
Metglas (fiber)/PMN-PT (fiber)/Metglas (fiber)	2	1000 (23000)	29310 (7,000,000)
Metglas/PVDF/Metglas	8	1000	7200
Metglas/PMT	-	1000	63,3
Metglas/PZT (fiber)/Metglas	-	1000 (33700)	12,000 (380,000)
FeBSiC/PZN-PT (fiber)/FeBSiC	2	1000 (20000)	10500 (400,000)
FeBSiC/PZT (fiber)/FeBSiC	4	1 (22000)	22,000 (500,000)
PZT/Ni _{0.7} Zn _{0.3} Fe ₂ O ₄ /Ni	-	20	280
Terfenol-D/PMN-PT/Terfenol-D	4000	1000	10,300
Terfenol-D/PVDF/Terfenol-D	2300	1000	7930
NCZF/textured 0.675PMN-0.325PT/NCZF	-	1000	1200
Ni/Doped-BaTiO ₃	7000	-	7,1
BaTiO ₃ /CoFe ₂ O ₄ (kompizit seramik)	730	1000	38
Pb(Zr _{0.52} Ti _{0.48})O ₃ /CoFe ₂ O ₄ (kompizit seramik)	600	1000	155

2.7. Manyetoelektrik Gerilim Katsayısı (α_{ME})

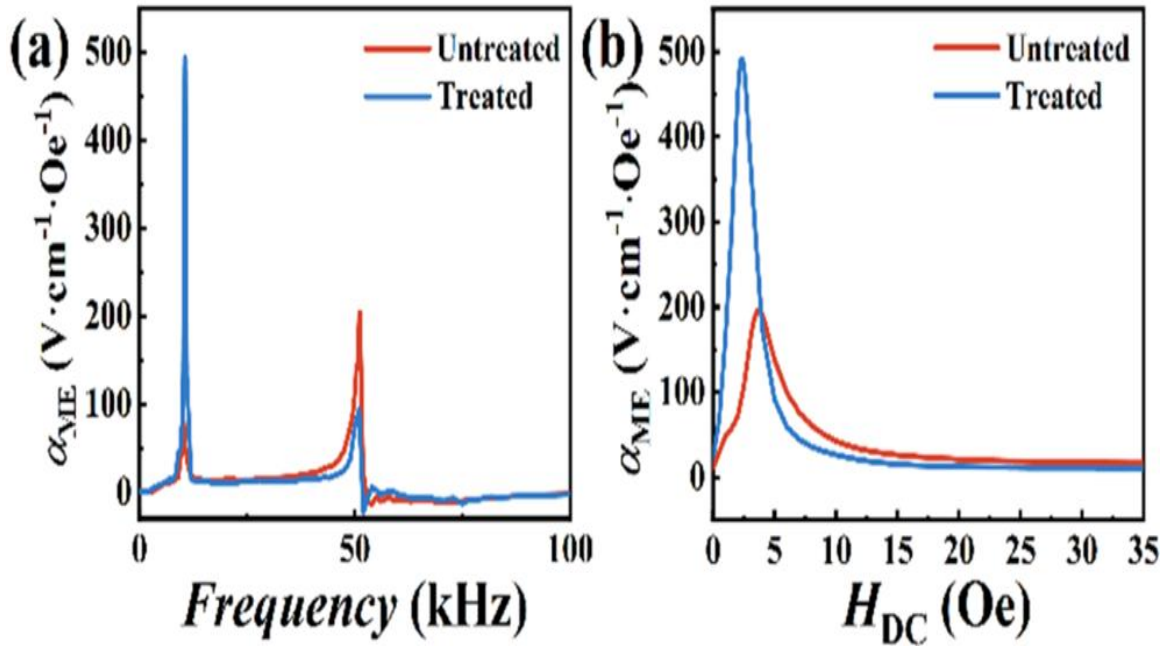
Bu alt başlık altında, PZT ve PVDF tabanlı, Metglas şerit içeren manyetoelektrik sensörlerde manyetoelektrik gerilim katsayısının (α_{ME}) DC bias manyetik alanı, AC manyetik alan frekansı ve yapısal parametrelere bağlı değişimi ele alınmıştır. Literatürde α_{ME} değerinin yalnızca kullanılan piezoelektrik ve manyetostriktif malzemelere değil, aynı zamanda uygulanan bias manyetik alana, rezonans koşullarına, ara yüzey bağlanmasına ve sensör boyutlarına da güçlü biçimde bağlı olduğu bildirilmektedir. Bu nedenle α_{ME} , şerit tabanlı manyetoelektrik sensörlerin performansının değerlendirilmesinde temel parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir.

Li ve arkadaşları (2016), PVDF/Metglas/PZT kompozit yapısında uygulanan DC elektrik alanının α_{ME} 'nin maksimum değerini ve optimum manyetik alanını değiştirdiğini göstermiştir. Bu sonuç, yalnızca manyetik parametrelerin değil, piezoelektrik faza uygulanan elektrik alanının da kompozit yapının manyetoelektrik cevabı üzerinde belirleyici olabildiğini ortaya koymaktadır. Li ve arkadaşları tarafından geliştirilen PVDF/Metglas/PZT kompozitinde manyetoelektrik katsayısının (α_{ME}), DC öngerilim manyetik alanına (H_{DC}) bağlı değişimi Şekil 2.24'te gösterilmektedir. Şekil 2.24(a)'da PZT'ye pozitif DC elektrik alan uygulanması durumunda, Şekil 2.24(b)'de ise negatif DC elektrik alan uygulanması durumunda elde edilen α_{ME} - H_{DC} eğrileri verilmiştir. Sonuçlar, uygulanan DC elektrik alanının maksimum α_{ME} değerini ve optimum H_{DC} konumunu değiştirdiğini; özellikle pozitif elektrik alan altında α_{ME} 'nin geniş bir bias manyetik alan aralığında yüksek tutulabildiğini, negatif elektrik alan altında ise yaklaşık -400 ile -500 V/mm arasında ani bir değişim meydana geldiğini göstermektedir (Li vd., 2016).



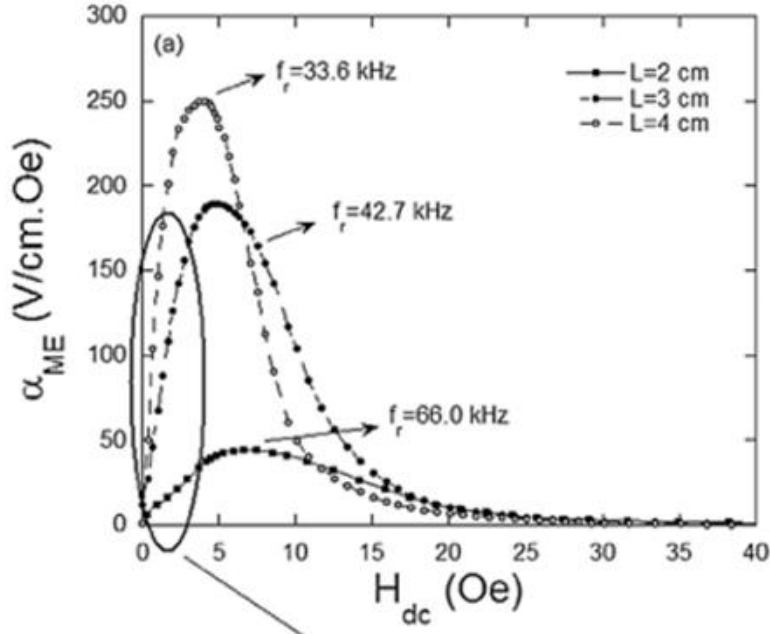
Şekil 2.24. (a) PZT'ye pozitif DC elektrik alan uygulandığında manyetoelektrik katsayısının (α_{ME}) DC bias manyetik alana (H_{DC}) göre değişimi; (b) PZT'ye negatif DC elektrik alan uygulandığında α_{ME} 'nin H_{DC} 'ye göre değişimi (Li vd., 2016).

Zhang ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında, PVDF/Metglas yapıda frekansın, DC manyetik alanın ve vakum işleminin manyetoelektrik sinyal üzerindeki etkileri incelenmiştir. Manyetoelektrik gerilim katsayısının (α_{ME}) frekans ve DC bias manyetik alana bağlı değişimi Şekil 2.25'te gösterilmiştir. Şekil 2.25(a)'da vakum uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin α_{ME} değerlerinin AC manyetik alan frekansına göre değişimi verilmiştir. Şekil 2.25(b)'de ise α_{ME} 'nin H_{DC} 'ye bağlı değişimi verilmiştir. Vakum işlemi uygulanan numunede daha yüksek manyetoelektrik cevap elde edildiği ve bias alanının daha düşük değerlere kaydığı görülmüştür. Bu sonucun, vakum işleminin ara yapışkan tabakayı iyileştirerek ara yüzeydeki gerinim aktarımını artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Zhang vd., 2024).



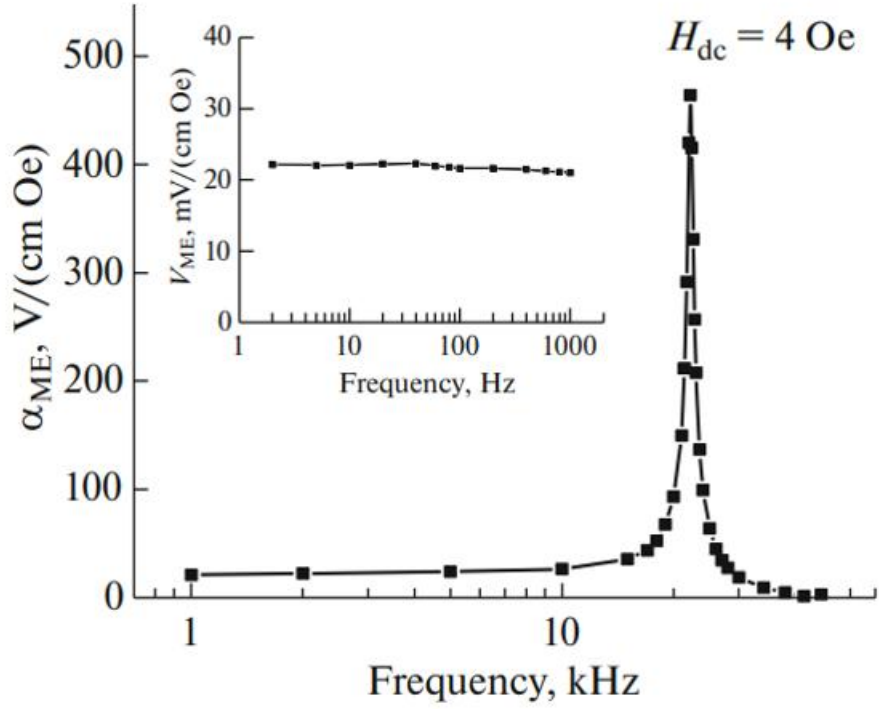
Şekil 2.25. Manyetoelektrik gerilim katsayısının (α_{ME})(a) AC manyetik alan frekansına (f_{AC})ve (b) DC bias manyetik alana (H_{DC})bağlı değişimi (Zhang vd., 2024).

Lasheras ve arkadaşlarının (2017) çalışmasında, sensör boyutu küçüldükçe demanyetizasyon etkilerinin arttığı, buna bağlı olarak da manyetoelektrik yanıtın ve manyetik alan duyarlılığının azaldığı gösterilmiştir. Bu sonuç, sensör geometrisinin yalnızca yapısal bir özellik olmadığını, aynı zamanda performansı doğrudan etkileyen önemli bir tasarım parametresi olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmada, 4, 3 ve 2 cm uzunluğundaki laminantların uygulanan DC manyetik alana bağlı manyetoelektrik katsayıları Şekil 2.26'da karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, sensör uzunluğu azaldıkça manyetoelektrik katsayı da düşmektedir. En yüksek değer 4 cm uzunluğundaki laminantta, en düşük değer ise 2 cm uzunluğundaki laminantta elde edilmiştir. Ayrıca eğrilerin doğrusal bölgeleri, sensörlerin DC manyetik alan duyarlılığının belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu durum, boyut küçüldükçe demanyetizasyona etkilerinin daha belirgin hale gelmesiyle açıklanmıştır (Lasheras vd., 2017).



Şekil 2.26. 4, 3 ve 2 cm uzunluğundaki laminatların uygulanan DC manyetik alana bağlı manyetoelektrik katsayıları (Lasheras vd., 2017).

Benzer şekilde Turutin ve arkadaşları (2022), PZT-5A piezofiber/Metglas kompozit yapıda frekansın manyetoelektrik gerilim katsayısı üzerinde belirleyici olduğunu ve rezonans koşullarında manyetoelektrik cevabın belirgin biçimde arttığını bildirmiştir. Bu çalışma, rezonans koşullarının α_{ME} değerini önemli ölçüde yükseltebildiğini açıkça göstermektedir. Turutin ve arkadaşları tarafından incelenen PZT-5A piezofiber/Metglas kompozit yapıda manyetoelektrik gerilim katsayısının (α_{ME}) frekansa bağlı değişimi Şekil 2.27’de verilmiştir. Şekilde, optimum 4 Oe DC öngerilim manyetik alanı altında elde edilen α_{ME} -f eğrisi sunulmuştur. Sonuçlar, manyetoelektrik gerilim katsayısının yaklaşık 10,5 kHz rezonans frekansında 470 V/(cm.Oe) değerine ulaştığını, düşük frekans bölgesinde (1–1000 Hz) ise yaklaşık 23 V/(cm.Oe) seviyesinde kaldığını göstermektedir (Turutin vd., 2022). Zhai ve arkadaşları (2006), Metglas/PVDF laminantlarda maksimum manyetoelektrik gerilim katsayısının düşük frekanslarda 7.2 V·cm⁻¹·Oe⁻¹ değerine ulaştığını, rezonans koşullarında ise bu değer 310 V·cm⁻¹·Oe⁻¹’e yükseldiğini ve maksimum cevabın yaklaşık 8 Oe gibi düşük bir DC bias manyetik alan altında elde edildiğini bildirmiştir. Fang ve arkadaşları (2009) ise Metglas/PVDF laminantlarda Metglas şeridin geometrisine bağlı manyetik akı yoğunlaşması etkisinin α_{me} üzerinde belirleyici olduğunu ve 1 mm genişlik, 30 mm uzunluk ve 25 µm kalınlığa sahip Metglas şerit kullanıldığında manyetoelektrik gerilim katsayısının 21.46 V·cm⁻¹·Oe⁻¹ değerine ulaştığını göstermiştir. Bu nedenle, α_{me} ölçümleri ribbon tabanlı manyetoelektrik sensörlerin performansını değerlendirmede temel parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir.



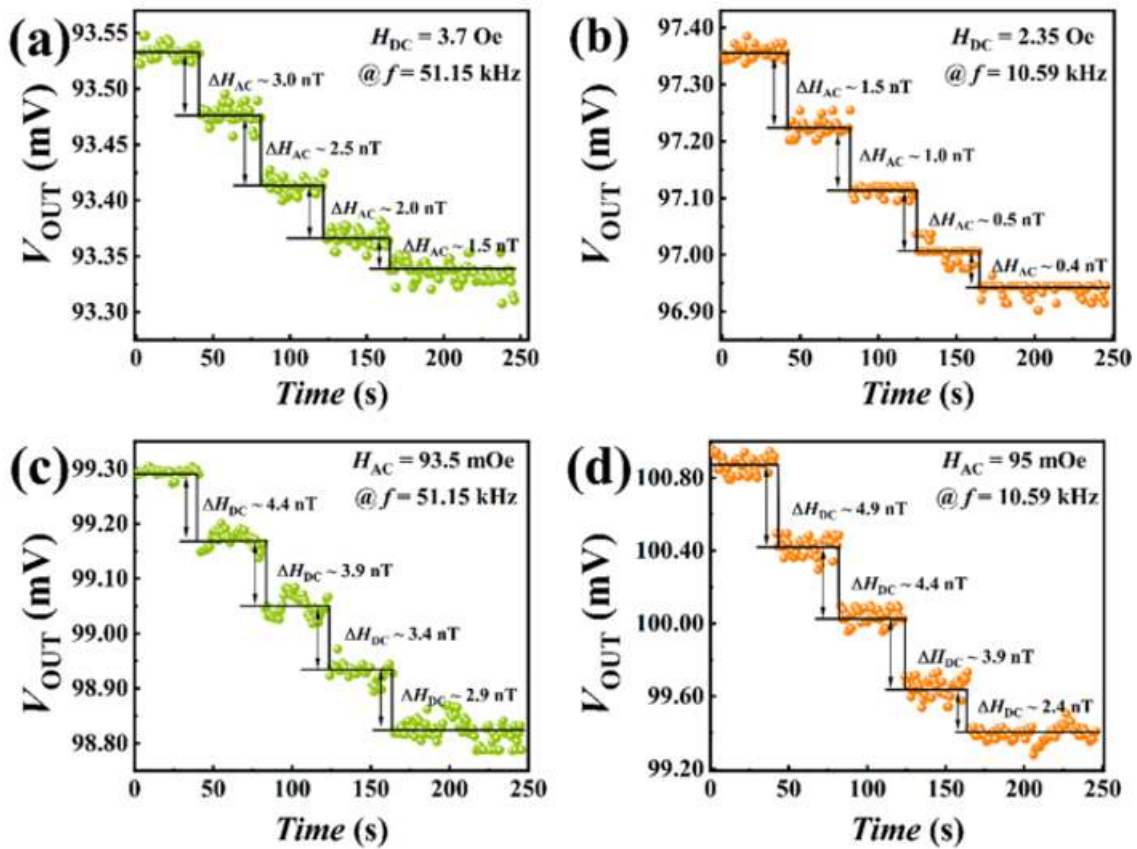
Şekil 2.27. PZT-5A piezofiber/Metglas kompozit yapısında manyetoelektrik gerilim katsayısının (α_{ME}) frekansa bağlı değişimi. Ölçümler optimum DC bias manyetik alanı ($H_{DC} = 4$ Oe) altında gerçekleştirilmiştir (Turutin vd., 2022).

Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, α_{ME} değerinin yalnızca malzeme türüne değil; DC bias manyetik alanına, rezonans koşullarına, sensör geometrisine ve ara yüzey bağlanma kalitesine de güçlü biçimde bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle rezonans koşullarında ve uygun bias alan altında α_{ME} değerinin belirgin biçimde arttığı, boyutsal küçülme ve yetersiz gerinim aktarımının ise sensör performansını olumsuz etkileyebileceği görülmektedir. Bu nedenle α_{ME} , şerit tabanlı manyetoelektrik sensörlerin performansını değerlendirmede temel parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir.

2.8. Manyetoelektrik Sensörlerde Manyetik Alan Hassasiyeti

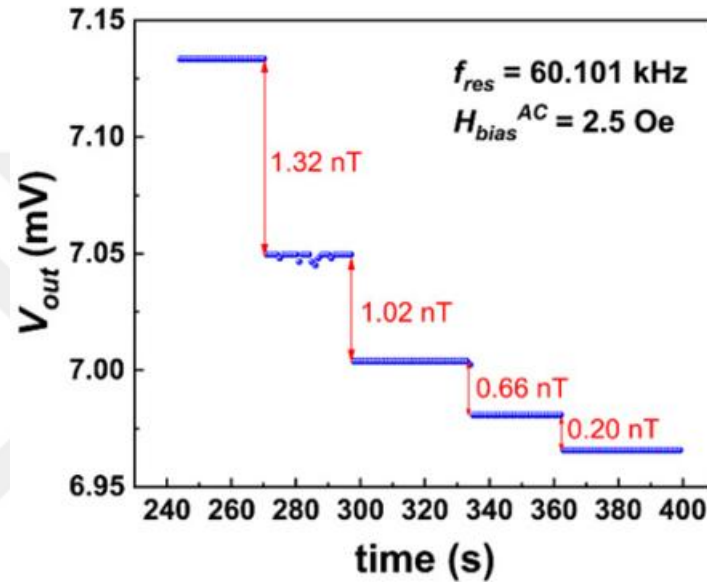
Manyetoelektrik sensörlerde manyetik alan hassasiyeti ve çözünürlük, sensörün zayıf manyetik alanları algılama kapasitesini ortaya koyan başlıca performans parametreleri arasında yer almaktadır. Literatürde, bu parametrelerin yalnızca kullanılan piezoelektrik ve manyetostriktif malzemelere değil; aynı zamanda ara yüzey bağlanmasına, paketlenme koşullarına, çalışma frekansına ve rezonans durumuna da bağlı olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle manyetik alan hassasiyeti ve çözünürlük, ME sensörlerin düşük alan ölçüm performansının değerlendirilmesinde temel ölçütlerden biri olarak kabul edilmektedir.

PVDF tabanlı yapılarda, ara yüzey bağlanmasının ve paketlenme koşullarının sensör çözünürlüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Zhang ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında, manyetostriktif ve piezoelektrik malzemelerin birleştirilmesi sırasında vakum uygulanmış ve uygulanmamış PVDF/Metglas numunelerinin AC ve DC manyetik alan çözünürlükleri karşılaştırılmıştır. Şekil 2.28’de görüldüğü gibi, vakum uygulanarak hazırlanan numune daha düşük algılama sınırı göstermiştir. Bu numunede AC manyetik alan çözünürlüğü 0.4 nT, DC manyetik alan çözünürlüğü ise 2.4 nT olarak belirlenmiştir. Vakum uygulanmayan numunede ise AC ve DC çözünürlük değerleri sırasıyla 1.5 nT ve 2.9 nT olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, vakum paketlenme işleminin ara yapışkan tabakanın yapısını ve gerinim aktarımını iyileştirerek sensörün düşük manyetik alanlardaki algılama performansını artırdığını ortaya koymaktadır (Zhang vd., 2024).

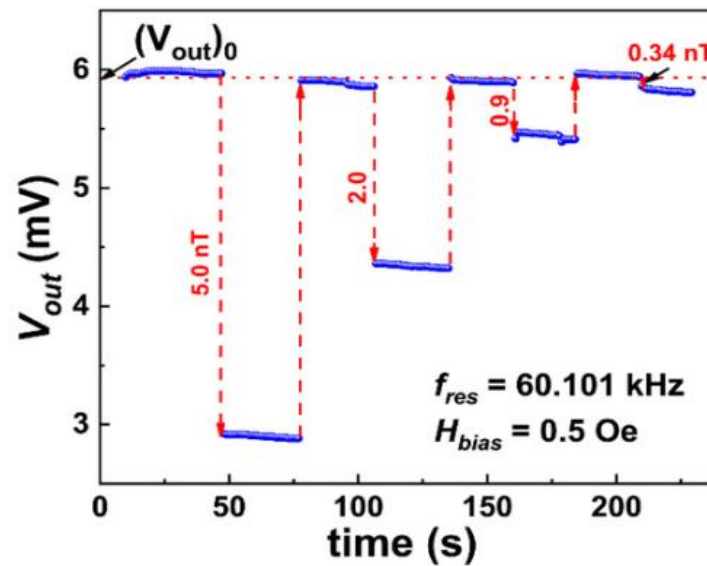


Şekil 2.28. AC manyetik alan çözünürlüğü: (a) vakum uygulanmamış numune, (b) vakum uygulanmış numune. DC manyetik alan çözünürlüğü: (c) vakum uygulanmamış numune, (d) vakum uygulanmış numune (Zhang vd., 2024).

PZT tabanlı yapılarda ise özellikle rezonans koşullarında daha yüksek çözünürlük değerlerine ulaşılabildiği görülmektedir. Sun ve arkadaşlarının (2023) çalışmasında, Metglas/PZT-5B tabanlı manyetoelektrik sensörün rezonans bölgesindeki manyetik alan çözünürlüğü incelenmiştir. Şekil 2.29'da 60.101 kHz frekansta ve 2.5 Oe bias alan altında AC manyetik alan çözünürlüğünün 0.20 nT olduğu gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 2.30'da aynı frekansta ancak 0.5 Oe bias alan altında DC manyetik alan çözünürlüğünün 0.34 nT düzeyine ulaştığı verilmiştir (Sun vd., 2023). Bu sonuçlar, rezonans bölgesinde çalışan PZT tabanlı ME sensörlerin oldukça yüksek duyarlılık gösterdiğini ve nT düzeyine yakın çözünürlük değerlerine ulaşabildiğini ortaya koymaktadır.

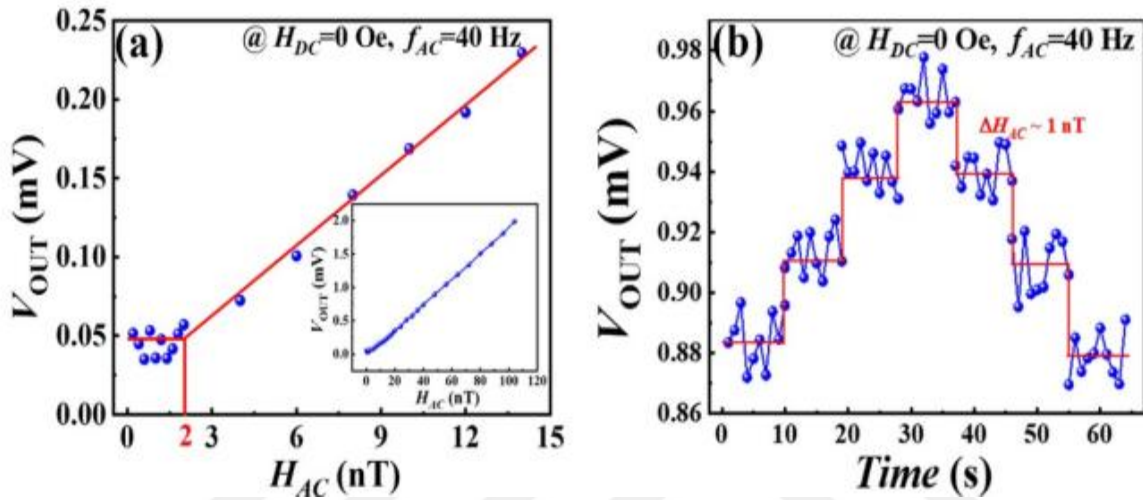


Şekil 2.29. AC manyetik alan çözünürlüğü (Sun vd., 2023).



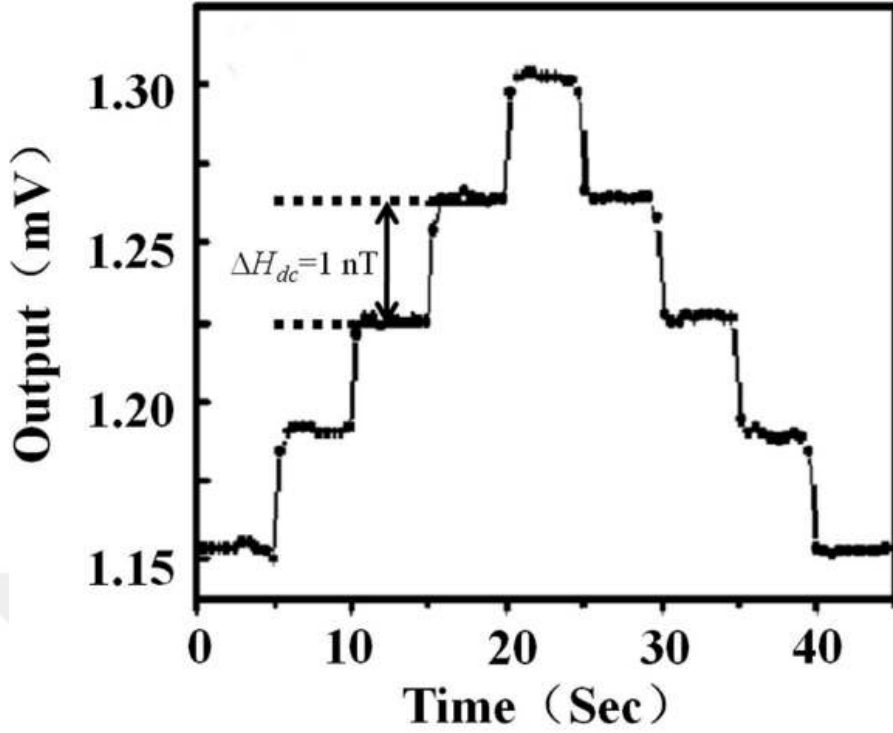
Şekil 2.30. DC manyetik alan çözünürlüğü (Sun vd., 2023).

Düşük frekanslı AC manyetik alan algılamasında ise PVDF tabanlı yapılara yönelik çalışmalar dikkat çekmektedir. Yang ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında, yay biçimli Metglas/PVDF/Ni tabakalı manyetoelektrik sensörün düşük frekanslı AC manyetik alan algılama performansı incelenmiştir. Şekil 2.31(a)'da 40 Hz frekansta ve DC bias manyetik alan uygulanmadan sensörün çıkış geriliminin AC manyetik alan şiddetine bağlı değişimi verilmiş; sonuçlar sensörün algılama sınırının 2 nT olduğunu göstermiştir. Şekil 2.31(b)'de ise aynı koşullarda sensörün çözünürlüğü sunulmuş ve minimum çözünebilir alan değişiminin 1 nT düzeyine ulaştığı gösterilmiştir (Yang vd., 2022).



Şekil 2.31. Metglas/PVDF tabakalı manyetoelektrik sensörde 40 Hz frekansta ve DC bias manyetik alan uygulanmadan, (a) AC manyetik alan şiddetine bağlı çıkış gerilimi ve (b) sensörün çözünürlüğü (Yang vd., 2022).

Shen ve arkadaşlarının (2018) çalışmasında, Metglas/PZT esaslı sandviç yapıda hazırlanmış bir manyetoelektrik DC manyetik alan sensörü incelenmiştir. Şekil 2.32'de gösterildiği gibi, sensör 1 nT büyüklüğündeki DC manyetik alan değişimini algılayabilmiştir (Shen vd., 2018). Bunun dışında, Metglas/piezofiber tabanlı bir manyetoelektrik sensörde 1 Hz'de 5.1 pT/VHz eşdeğer manyetik gürültü düzeyi rapor edilmiş olup, bu yapıların pT mertebesine kadar hassas ölçüm yapabildiği gösterilmiştir (Wang vd., 2011). PVDF tabanlı yapılarda ise Gutiérrez ve arkadaşları (2017), Metglas/PVDF/Metglas sensörlerde AC manyetik alan için 992 mV/Oe duyarlılık ve 0.3 μOe çözünürlük; DC manyetik alan için ise 30 mV/Oe duyarlılık ve 8 μOe çözünürlük elde edildiğini bildirmiştir (Gutiérrez vd., 2017). Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, PZT tabanlı yapılarda pT düzeyine kadar inen yüksek hassasiyet değerleri elde edilebilirken, PVDF tabanlı yapılarda çoğunlukla nT ve μOe düzeyinde olmakla birlikte düşük alan ölçümleri açısından oldukça başarılı sonuçların elde edildiği görülmektedir.

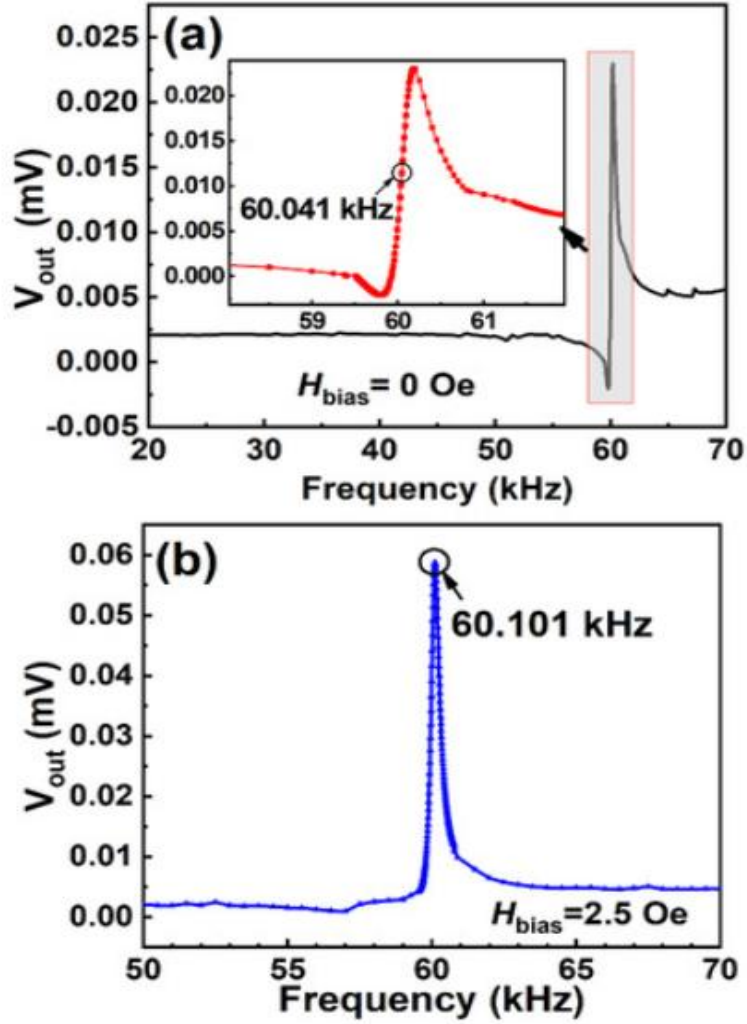


Şekil 2.32. DC manyetik alan sensörünün küçük DC manyetik alan değişimlerine verdiği çözünürlük cevabı (Shen vd., 2018).

2.9. Manyetoelektrik Sensörlerde Rezonans Frekansı

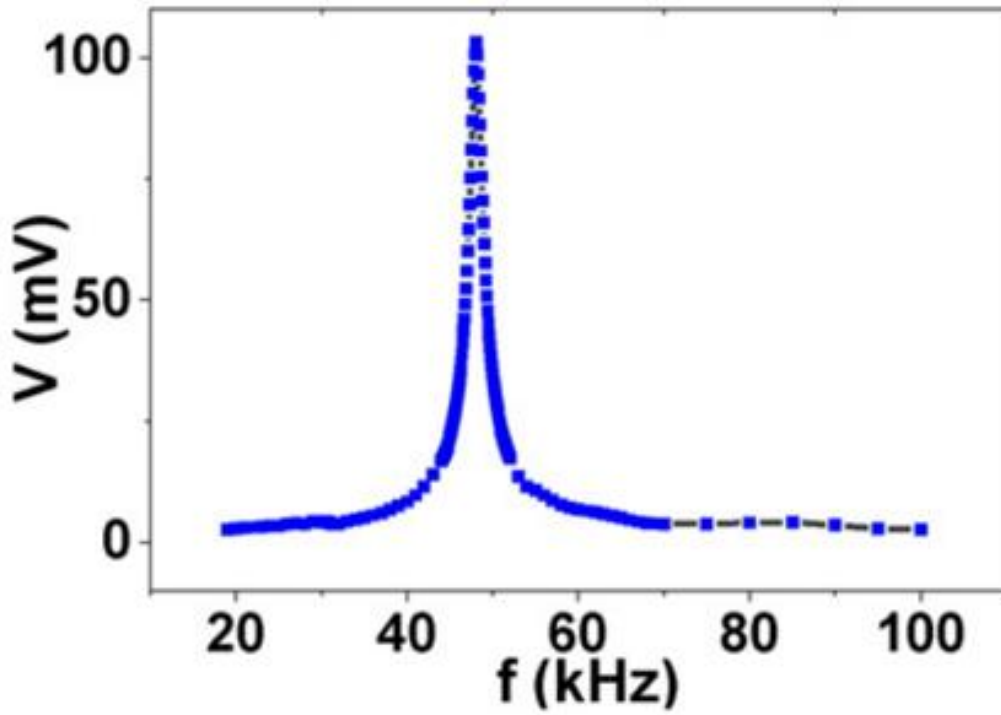
Rezonans frekansı, manyetoelektrik sensörlerin çıkış gerilimini ve dolayısıyla algılama performansını belirleyen temel parametrelerden biridir. Literatürde, Metglas/PZT ve Metglas/PVDF tabanlı tabakalı yapılarda manyetoelektrik cevabın rezonans bölgesinde belirgin biçimde arttığı bildirilmektedir. Ayrıca uygulanan DC bias manyetik alanın, sensörün yalnızca çıkış gerilimini değil, rezonans frekansını da etkileyebildiği gösterilmiştir.

Sun ve arkadaşları (2023) çalışmasında, Metglas/PZT-5B yapısına sahip manyetoelektrik sensörün çıkış geriliminin frekansa bağlı değişimi incelenmiştir. Şekil 2.33'te, DC bias alan uygulanmadığında sensörün rezonans frekansının 60.041 kHz olduğu görülmektedir. Sensöre 2.5 Oe DC bias alan uygulandığında ise rezonans frekansının 60.101 kHz değerine kaydığı ve çıkış geriliminin yaklaşık iki kat arttığı belirlenmiştir. Bu sonuç, DC manyetik alanın sensörün rezonans davranışını ve çıkış cevabını belirgin biçimde etkilediğini, söz konusu etkinin ise manyetostriktif tabakadaki ΔE etkisi ile ilişkili olduğunu göstermektedir (Sun vd., 2023).



Şekil 2.33. Manyetoelektrik sensörün çıkış geriliminin frekansa bağlı değişimi (Sun vd., 2023).

Reis ve arkadaşları (2016a) çalışmasında, Metglas/PVDF/Metglas tabakalı manyetoelektrik laminantın gerilim cevabı frekans ve DC manyetik alanın bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Şekil 2.34'te sensörün manyetoelektrik gerilim cevabının frekansa bağlı değişimi verilmiş ve en yüksek çıkış geriliminin yaklaşık 48 kHz rezonans frekansında elde edildiği gösterilmiştir (Reis vd., 2016a). Benzer şekilde Zhai ve arkadaşları (2006) da Metglas/PVDF/Metglas üç tabakalı kompozitte maksimum manyetoelektrik cevabın yaklaşık 50 kHz rezonans frekansında elde edildiğini bildirmiştir (Zhai vd., 2006). Ayrıca Metglas/PVDF/Metglas yapının elektronik optimizasyonuna yönelik başka bir çalışmada rezonans frekansı 54.5 kHz olarak rapor edilmiştir (Reis vd., 2016b). Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, Metglas/PVDF tabanlı yapılarda rezonans frekansının sensör tasarımı, yapısal özellikler ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişebildiği, ancak manyetoelektrik cevabın genel olarak rezonans bölgesinde maksimuma ulaştığı anlaşılmaktadır.

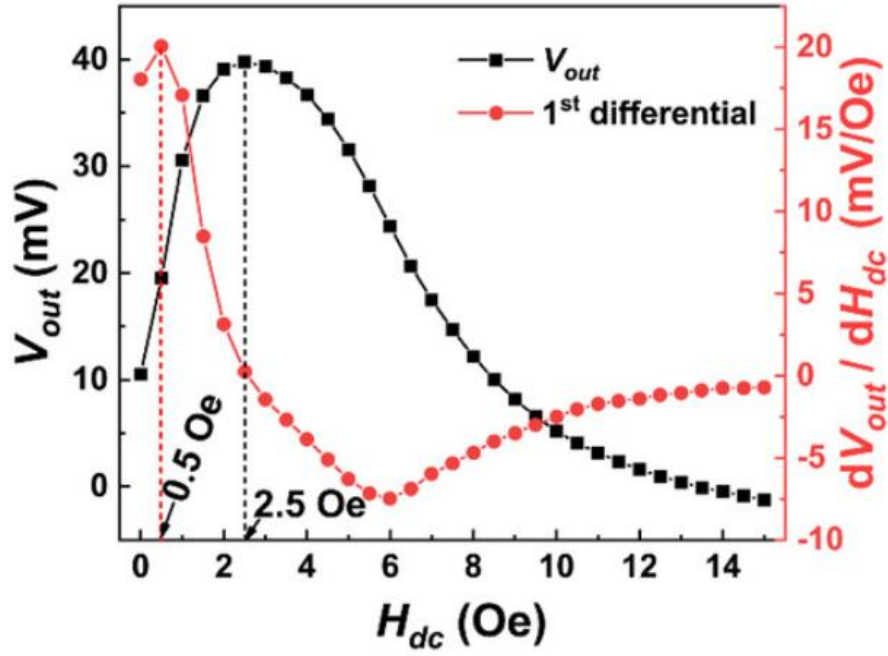


Şekil 2.34. Metglas/PVDF/Metglas tabakalı manyetoelektrik laminantta gerilim cevabının frekansa bağlı değişimi (Reis vd., 2016a).

2.10. DC Bias Manyetik Alanın Etkisi

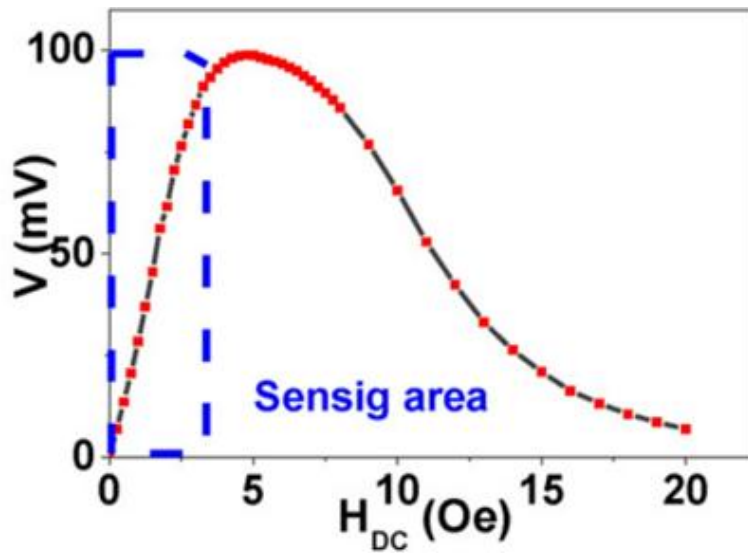
DC manyetik alan, manyetoelektrik sensörlerin çıkış gerilimini, çalışma noktasını ve algılama hassasiyetini belirleyen temel parametrelerden biridir. Literatürde, özellikle Metglas/PZT ve Metglas/PVDF tabanlı tabakalı yapılarda manyetoelektrik cevabın H_{DC} 'ye güçlü biçimde bağlı olduğu, belirli bir bias alanında maksimuma ulaştığı ve daha yüksek alanlarda azalma eğilimi gösterdiği bildirilmektedir. Bu nedenle uygun DC bias alanın belirlenmesi, sensör performansının optimize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Sun ve arkadaşları (2023) çalışmasında, sensörün çıkış geriliminin DC manyetik alana bağlı değişimi ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Şekil 2.35 de gösterilen grafikten, maksimum çıkış geriliminin yaklaşık 40 mV seviyesinde olduğu anlaşılmaktadır. Buna karşılık, dV_{out}/dH_{dc} türev eğrisinin en yüksek noktasının yaklaşık 0,5 Oe civarında ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum, 2,5 Oe değerinin AC alan ölçümleri için en uygun bias alanı olduğunu, 0,5 Oe değerinin ise DC manyetik alan değişimlerine en duyarlı çalışma noktası olduğunu göstermektedir (Sun vd., 2023).



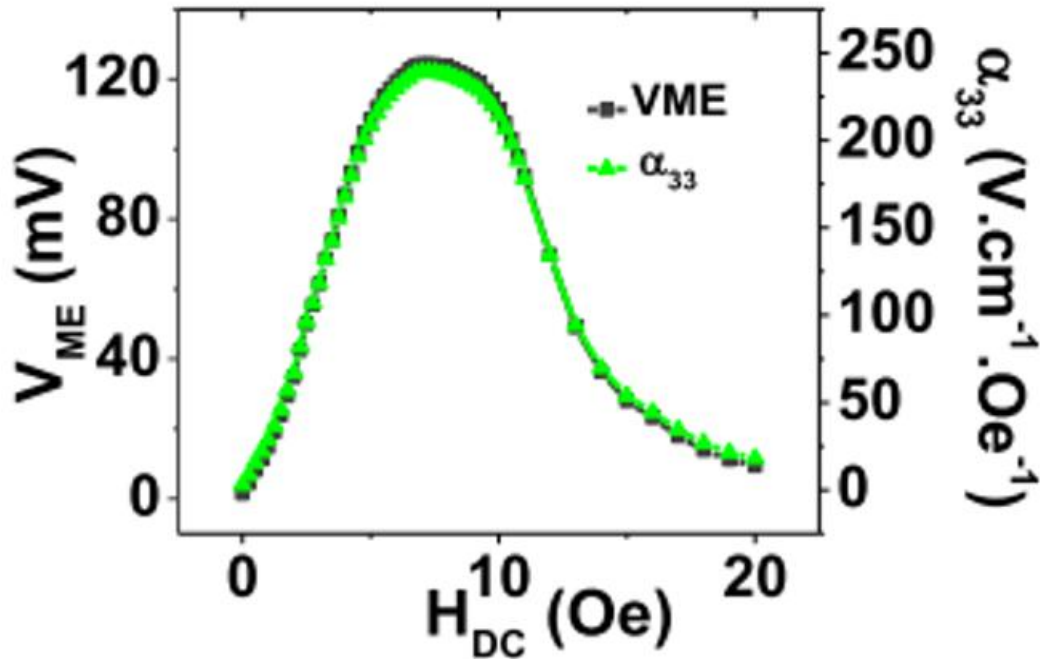
Şekil 2.35. Manyetoelektrik sensör için $f_{\text{res}} = 60.101 \text{ kHz}$ 'de ölçülen $V_{\text{çıkış}}(H_{\text{dc}})$ eğrisi ve türevi (Sun vd., 2023).

Reis ve arkadaşları (2016a) çalışmasında, Metglas/PVDF/Metglas tabakalı manyetoelektrik laminantın gerilim cevabı DC manyetik alanın bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Şekil 2.36'da manyetoelektrik gerilim cevabının DC manyetik alana bağlı değişimi sunulmuş; gerilim değerinin artan H_{DC} ile birlikte yükselerek yaklaşık 4,75 Oe civarında maksimuma ulaştığı ve daha yüksek alanlarda azaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, optimum DC bias manyetik alanın sensör performansını belirgin biçimde artırdığını göstermektedir (Reis vd., 2016a).



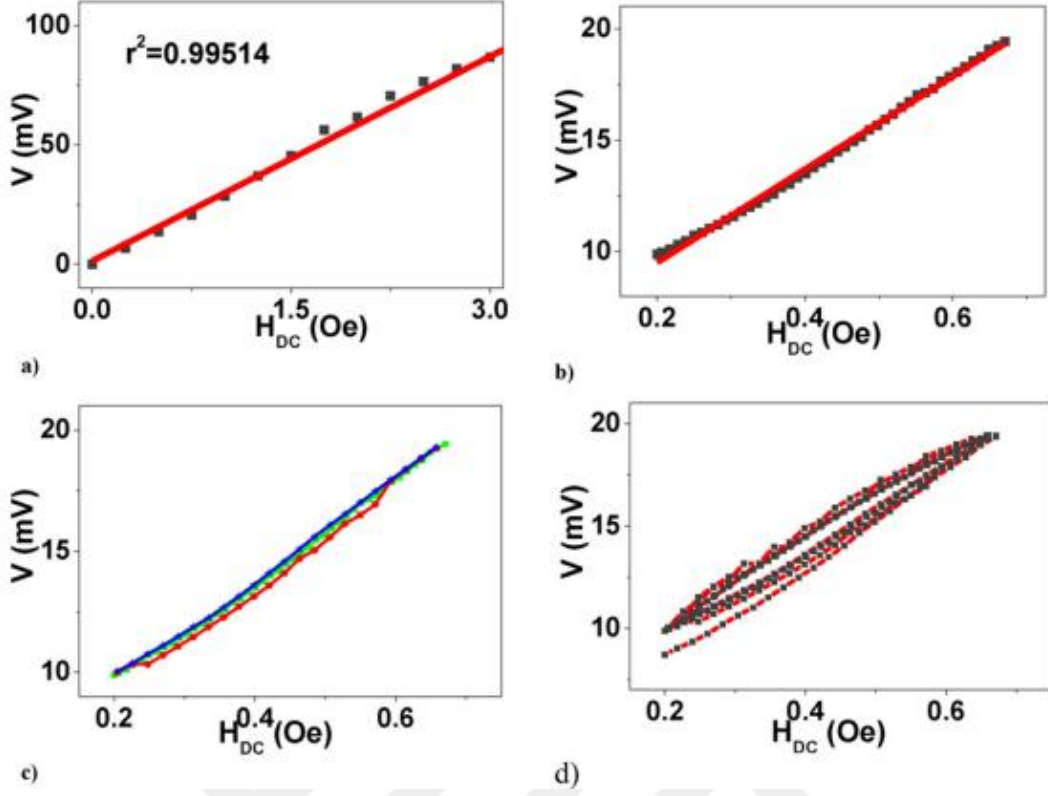
Şekil 2.36. Metglas/PVDF/Metglas tabakalı manyetoelektrik laminantta gerilim cevabının (a) frekansa bağlı değişimi (Reis vd., 2016a).

Benzer şekilde, Metglas/PVDF/Metglas tabakalı manyetoelektrik yapıda gerilim cevabının DC manyetik alana bağlı değişimi başka bir çalışmada da incelenmiştir. Şekil 2.37’de, manyetoelektrik geriliminin H_{DC} arttıkça yükseldiği ve yaklaşık 7 Oe civarında maksimum değere ulaştığı gösterilmiştir. Bu noktada maksimum manyetoelektrik katsayısının α_{33} değerinin $250 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Oe}^{-1}$ olduğu belirlenmiştir. Daha yüksek DC manyetik alanlarda ise gerilim cevabının azaldığı görülmüş olup, bu durum Metglas tabakasının manyetostriktif cevabının doyuma yaklaşmasıyla açıklanmıştır (Reis vd., 2016b).



Şekil 2.37. Metglas/PVDF/Metglas tabakalı manyetoelektrik yapıda gerilim cevabının ve manyetoelektrik katsayısının DC manyetik alana bağlı değişimi (Reis vd., 2016b).

Aynı yapının DC manyetik alan sensörü olarak karakterizasyonuna yönelik çalışmada, sensörün doğrusallık, çözünürlük, hassasiyet, doğruluk ve histerezis özellikleri de değerlendirilmiştir. Şekil 2.38’de verilen sonuçlar, sensörün 0–3 Oe aralığında doğrusal bir cevap sergilediğini ve düşük DC manyetik alanlarda 30 mV/Oe hassasiyet ile $8 \mu\text{Oe}$ çözünürlük değerine ulaştığını göstermiştir. Ayrıca sensör için 0.995 korelasyon katsayısı, %95.9 doğrusallık, %99.4 doğruluk ve %1.2 histerezis değeri elde edilmiştir. Bu bulgular, Metglas/PVDF/Metglas tabakalı yapının düşük alanlı DC manyetik alan algılamada yeterli hassasiyet ve kararlılığa sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Reis vd., 2016a).



Şekil 2.38. Metglas/PVDF/Metglas tabakalı manyetoelektrik yapının DC manyetik alan sensörü olarak karakterizasyonu: (a) doğrusallık, (b) çözünürlük ve hassasiyet, (c) doğruluk ve (d) histerezis (Reis vd., 2016a).

Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, DC bias manyetik alanın yalnızca manyetoelektrik gerilim genliğini değil, aynı zamanda sensörün çalışma noktası, hassasiyeti ve doğrusal ölçüm aralığını da belirlediği anlaşılmaktadır. Özellikle optimum H_{DC} değerinde sensör cevabının maksimuma ulaştığı, daha düşük alanlarda yüksek türev değerleri sayesinde alan değişimlerine duyarlılığın arttığı, daha yüksek alanlarda ise manyetostriktif cevabın doyuma yaklaşması nedeniyle performansın azaldığı görülmektedir.

3.MATERYAL VE METOT

Bu bölümde tez kapsamında kullanılan malzemeler, manyetoelektrik sensörün tasarımı ve manyetoelektrik ölçüm sistemi ayrıntılı biçimde sunulmaktadır. Malzemelerin manyetik özelliklerini incelemek amacıyla Manyetizasyon-Histerezis (M–H) ölçümleri gerçekleştirilmiş, böylece manyetostriktif bileşenlerin doyum manyetizasyonu, koersivite ve kalıcı manyetizasyon gibi temel parametreleri ortaya konmuştur. Ayrıca, malzemenin kristal yapısı X-ışını kırınımı (XRD), yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM), elementel kompozisyonu enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX/EDAX) ve fonksiyonel grupları Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile incelenmiştir.

3.1. Sensör Yapımında Kullanılan Malzemeler

Sensörün üretiminde kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin temel özellikleri aşağıdaki Çizelgelerde sunulmuştur. Bu Çizelgeler, sensörün manyetik, elektriksel ve mekanik performansını etkileyen ana bileşenleri kapsamaktadır.

Çizelge 3.1. Manyetoelektrik sensörlerin hazırlanmasında kullanılan manyetostriktif malzemelerin kompozisyonları.

Numune Kompozisyonu	Doyum manyetizasyon değeri M_s (T)	Magnetostriktion değeri (λ_s /ppm)	Kaynak
$Ni_{56.20}Fe_{28.15}Co_{13.18}Si_{0.95}C_{0.68}B_{0.04}$ Amorf Ferromanyetik Şerit (AFŞ)	0.17	-	(Ramanan, 1991)
$Co_{49}Fe_{49}V_2$ (Vacodur49)	2.3	70	(VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG., t.y.)

Çizelge 3.2. Manyetoelektrik sensörlerin hazırlanmasında kullanılan boyutları (40 x 5)mm kalınlığı 0.5 mm piezoelektrik malzeme olan PZT nin özellikleri (He-Shuai Ltd., 2018).

Özellikler	Değerler
Kompozisyon	$Pb(Zr_{0.5}Ti_{0.5})O_3$
Yoğunluk	7.7 g/cm ³
d_{33}	430 pC/N
d_{31}	-180 pC/N
d_{15}	590 pC/N
e_{33}	15.7 C/m ²
e_{15}	11.8 C/m ²
k_{33}	0.70 (boyutsuz)

Çizelge 3.3. Manyetoelektrik sensörlerin hazırlanmasında kullanılan piezoelektrik malzeme PVDF, $(CH_2-CF_2)_n$ kompozisyonuna sahiptir. Çizelge , farklı kalınlıklardaki PVDF filmlerin özelliklerini karşılaştırmaktadır (Piezo PVDF, n.d.).

Kalınlık(μm)	Young modülü (E)/MPa	d_{33} [pC/N]	d_{31} [pC/N]	g_{33} (V-m/N)	Pyroelectric elektrik($\mu C/m^2 \cdot K$)
28	> 2000	>20	>15	-0.33	30
50	>2000	>25	>30	-0.33	30

Çizelgedeki semboller: d_{31} ve d_{33} , mekanik gerilme altında oluşan elektriksel yükü veya deformasyonu gösteren piezoelektrik sabitlerdir (C/N veya pC/N); g_{33} , mekanik gerilme sonucu oluşan elektrik alanı ifade eden piezoelektrik voltaj sabitidir (V-m/N); p, sıcaklık değişimiyle ortaya çıkan polarizasyon yükünü gösteren Pyroelectric katsayıdır ($\mu C/m^2 \cdot K$); E ise malzemenin elastik sertliğini tanımlayan Young modülüdür (MPa).

3.2. Manyetostriktif Malzemelerin Hazırlanması ve Manyetoelektrik Sensörün Üretimi

3.2.1. Manyetostriktif malzemelerin kesimi

Çalışmada kullanılan manyetostriktif malzemeler, deneysel ölçümler ve karakterizasyon çalışmaları için uygun hâle getirilmiştir. Başlangıçta film ve plaka formunda temin edilen malzemeler, istenilen boyutlarda kesilmek üzere Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji ve Malzeme Araştırma Merkezi (UNAM) laboratuvarında dicing saw kullanılarak kesilmiştir. Kesim işleminden sonra malzemeler, işlem kolaylığı ve taşınabilirlik amacıyla plastik bant üzerine yapıştırılmış şekilde teslim alınmıştır. Bu banttan ayrıştırma işlemi sırasında eldiven kullanılmış, malzemeler önce aseton içerisinde bekletilerek bantın çözünmesi sağlanmış, ardından yüzeyde kalan kalıntıların giderilmesi için izopropil alkol (IPA) ile temizlenmiştir.

3.2.2. Etching (aşındırma) işlemi

Bu çalışmada kullanılan Vacodur 49 manyetostriktif malzemesi, XRD ve SEM analizlerinde daha net ve güvenilir veriler elde edebilmek amacıyla ön işleminden geçirilmiştir. Numune, yüzeydeki oksit tabakalarını ve istenmeyen kalıntıları uzaklaştırmak ve kristal yapının daha belirgin hale gelmesini sağlamak için 1 M HCl asidi içinde 1 saat süreyle etching işlemine tabi tutulmuştur.

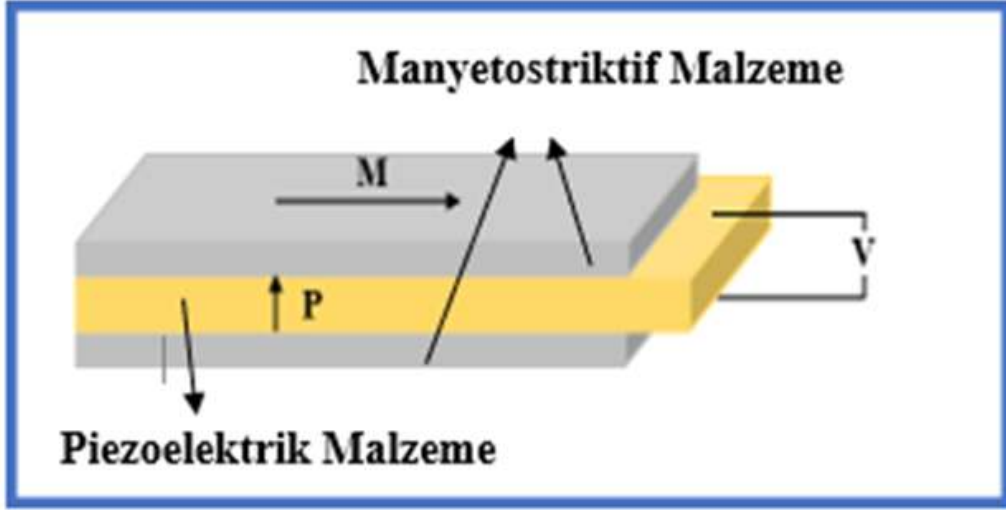
3.2.3. Polishing (parlatma) işlemi

Etching işleminden sonra, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ve SEM görüntülerinde morfolojik detayların daha net bir şekilde gözlemlenebilmesini sağlamak için Polishing (parlatma) işlemi uygulanmıştır. Polishing, numune yüzeyini homojen ve düz hâle getirerek deneysel verilerin doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini artırmıştır. Bu ön hazırlık adımı, Vacodur 49 malzemesinin manyetostriktif özelliklerinin analiz edilmesi için sağlam bir temel oluşturmuştur.3.2.4. Manyetoelektrik sensörün hazırlanması

Manyetoelektrik sensörlerin hazırlanma sürecinde, öncelikle piezoelektrik malzeme 40×6 mm boyutlarında kesilerek taban bileşen olarak kullanılmıştır. Bu piezoelektrik tabakanın alt ve üst yüzeylerine yüksek mekanik dayanım ve uzun ömürlü yapışma özellikleri nedeniyle tercih edilen West System 105 epoksi reçinesi ve 206 yavaş sertleştirici karışımı ince bir tabaka halinde uygulanmıştır. Bu epoksi sistemi, düşük viskozitesi sayesinde yüzeye homojen bir şekilde yayılabilmekte, aynı zamanda kürleşme sürecinde düşük büzülme özelliği göstererek tabakalar arasında gerilme kaynaklı ayrışmayı önlemektedir.

Epoksi tabakasının uygulanmasının ardından, manyetostriktif malzeme 35×5 mm boyutlarında hazırlanmış ve piezoelektrik tabakanın her iki yüzeyine dikkatli bir şekilde yerleştirilmiştir. Bu konumlandırmada tabakaların yüzey alanlarının maksimum temas etmesi ve yapıştırıcının tüm yüzeylere eşit şekilde nüfuz etmesi sağlanmıştır. Yapıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, tabakalar arası mekanik bağın güçlendirilmesi ve yüzey pürüzsüzlüğünden kaynaklı mikro boşlukların giderilmesi amacıyla örnekler 10 kg'lık sabit bir pres altında 48 saat boyunca bekletilmiştir. Bu işlem sırasında West System epoksi reçinesi kontrollü bir şekilde kürleşmiş ve yüksek mukavemetli bir ara bağ oluşturmuştur. Sonuç olarak, pres işlemi ve epoksinin yapısal bütünleştirme özelliği sayesinde piezoelektrik ve manyetostriktif tabakalar arasında kuvvetli bir mekanik etkileşim sağlanmıştır. Bu etkileşim, tabakalar arası gerinim transferini optimize ederek manyetoelektrik etkinliğini artırmıştır. Böylece manyetoelektrik etkiyi gösterebilecek dayanıklı ve işlevsel bir sensör yapısı elde edilmiştir. Manyetoelektrik sensörün tabakalı yapısı Şekil 3.1'de, hazırlanan sensörün fotoğrafı ise Şekil 3.2'de verilmiştir. Bu çalışmada manyetostriktif malzeme olarak Vacodur 49 ve Amorf ferromanyetik şerit (AFŞ) kullanılmıştır. Piezoelektrik katman olarak ise PZT ve PVDF malzemeleri kullanılmıştır.

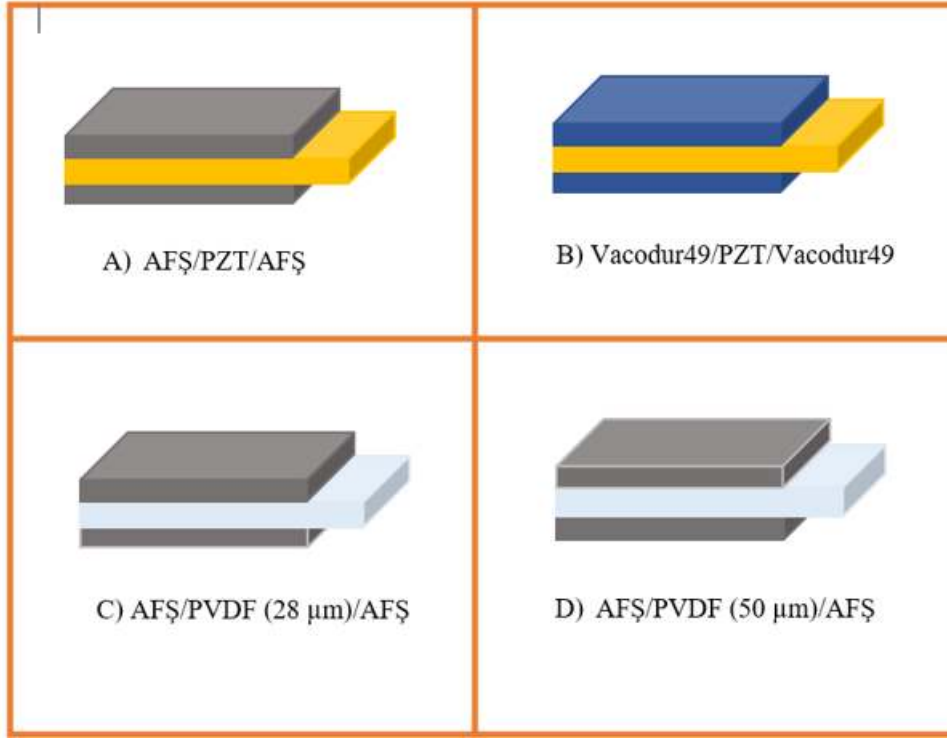
Bu kapsamda AFŞ/PZT/AFŞ, Vacodur49/PZT/Vacodur49 ve AŞF/PVDF/AŞF yapısına sahip manyetoelektrik sensörler hazırlanmıştır. PVDF tabanlı sensörlerde piezoelektrik katman olarak 28 μ m ve 50 μ m kalınlığında PVDF filmler kullanılmıştır. Böylece PVDF kalınlığının sensör performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hazırlanan sensör yapılarına ait şematik gösterim Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.1. Manyetoelektrik sensörün yapısı.



Şekil 3.2. Manyetoelektrik Sensörün fotoğrafı.

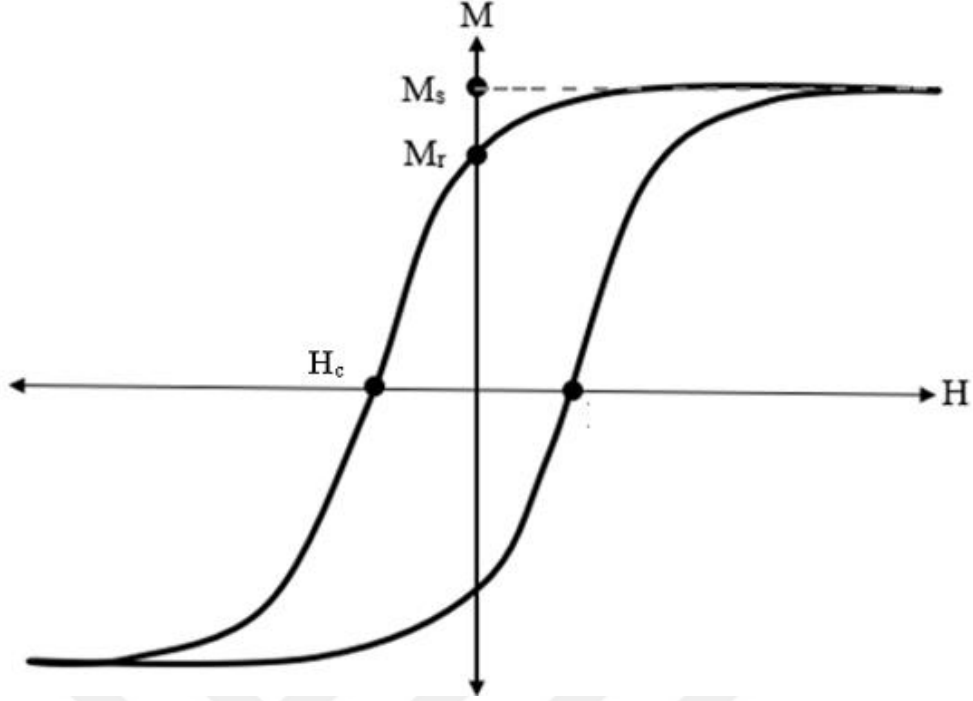


Şekil 3.3. Çalışmada hazırlanan manyetoelektrik sensör yapılarına ait şematik gösterim:
(A) AFŞ/PZT/AFŞ ,(B) Vacodur49/PZT/Vacodur49 ,(C) AFŞ/PVDF (28 µm)/AFŞ ,(D) AFŞ/PVDF (50 µm)/AFŞ

3.3. Manyetik Ölçümler

3.3.1 .M-H ölçüm sistemi

Amorf numunelerin koersivite (H_c), kalıcı manyetizasyon (M_r), manyetik alınganlık (χ) ve gibi manyetik parametreleri, manyetik histerezis (M–H) eğrilerinden elde edilmektedir. Bu eğriler, uygulanan manyetik alan ile manyetizasyon arasındaki ilişkiyi ortaya koyarak ilgili parametrelerin belirlenmesinde temel bir yöntem sağlar.



Şekil 3.4. Uygulanan manyetik alan ile tipik bir malzemenin manyetizasyon değişimi gösterilmektedir.

Şekilde H_c koersiviteyi, M_r kalıcı manyetizasyonu ve M_s ise doyum manyetizasyonunu göstermektedir. M-H ölçüm sisteminde, Şekil 3.5'te şematik olarak verilen çıkarma (subtraction) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde search bobinleri bir köprü devresi içerisine yerleştirilmektedir. Sistemde numune yokken dış manyetik alan uygulandığında toplam çıkış sıfır olmaktadır. Ancak bobinlerden birinin içine ferromanyetik bir numune yerleştirildiğinde, manyetik alana maruz kalan bu bobinde Faraday yasasına göre bir gerilim indüklenmektedir (Bayri, 2007). Bu durumda indüklenen V_1 gerilimi

$$V_1 = n\mu_0 \frac{d}{dt}(A_c H + A_s M) \quad (3.1)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini, M malzemenin manyetizasyonunu, A_c bobinin kesit alanını ve A_s numunenin kesit alanını göstermektedir.

Numune içermeyen diğer bobinde oluşan indüklenmiş gerilim ise,

$$V_2 = n\mu_0 \frac{d}{dt}(A_c H) \quad (3.2)$$

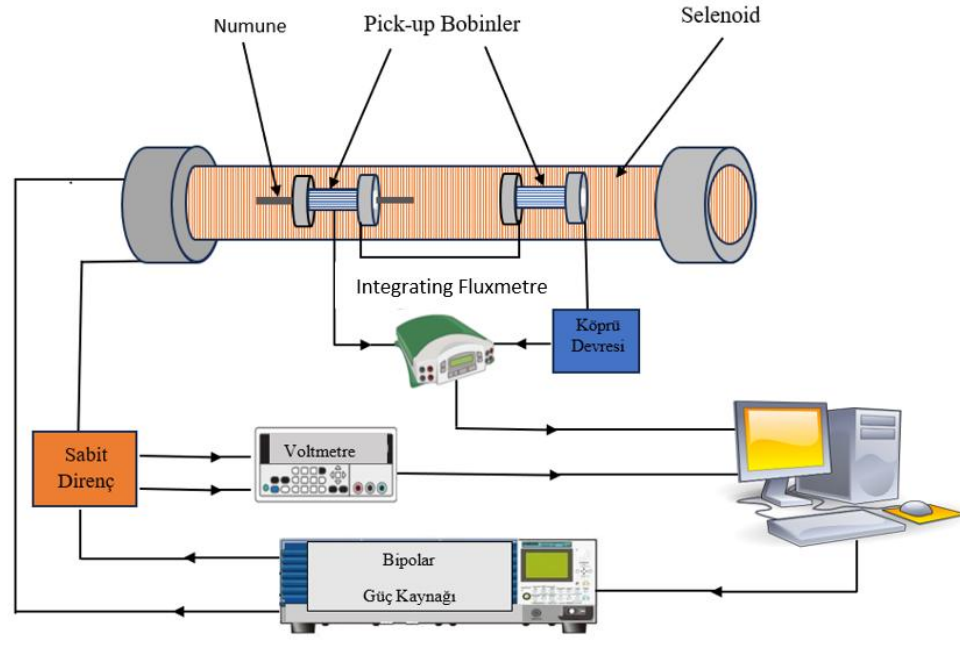
şeklinde verilmektedir. Toplam çıkış gerilimi V_0 , Denklem (3.1) ile Denklem (3.2)'nin farkı alınarak elde edilmekte ve

$$V_0 = n\mu_0 \frac{d}{dt} (A_S M) \quad (3.3)$$

biçiminde yazılmaktadır. Buna göre malzemenin manyetizasyonundaki değişim, toplam çıkış geriliminin zamana göre integraline bağlıdır. Böylece indüklenen voltajın integrasyonu sonucunda, M 'nin uygulanan manyetik alan H 'ye bağlı değişimi belirlenebilmektedir. Bu amaç doğrultusunda laboratuvarımızda, Şekil 3.5'te şematik olarak gösterilen bir M-H ölçüm sistemi kurulmuştur. Sistem tamamen bilgisayar kontrollü olup, veri toplama ve işleme işlemleri tarafımızdan geliştirilen özel bir program aracılığıyla yürütülmüştür (Bayrı, 2007).

Solenoidde doğru akım (DC) manyetik alan, Kepco marka bipolar güç kaynağı kullanılarak uygulanmaktadır. Bu kaynak ± 10 A (± 40 V) aralığında akım sağlayabilmekte ve böylece en fazla ± 10.000 A/m büyüklüğünde manyetik alan üretilebilmektedir. Düşük alan bölgesindeki hassas ölçümler için ise solenoide ek bir direnç bağlanmış ve ölçümler ± 1 A (± 20 V) aralığında gerçekleştirilmiştir. Denklem (3.3) ile tanımlanan sinyalin integrasyonu Lakeshore marka Integrating Fluxmeter kullanılarak yapılmıştır (Cullity ve Graham, 2008). Güç kaynağından solenoide verilen akım, standart bir direnç üzerinden ölçülerek bilgisayara aktarılmış; aynı anda pick-up bobin çıkışı Fluxmetre ile okunup entegre edilerek bilgisayar ortamına kaydedilmiştir.

Bu yöntem sayesinde, negatif maksimum manyetik alandan başlanarak pozitif maksimum alana çıkılıp tekrar negatif alana dönülmesiyle tam bir manyetik histerezis eğrisi elde edilmiştir. Ölçüm süresi yaklaşık 20–60 saniye arasında değişmekte olup, her bir eğri için yaklaşık 300–700 veri noktası toplanabilmektedir. Ayrıca ultra-yumuşak manyetik malzemelerin ölçümünde, düşük alan bölgesinden daha ayrıntılı veri alınabilmesi için program yoğun veri toplama yapacak şekilde ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.5. M-H ölçüm sistemi (Bayri, 2007).



Şekil 3.6. M-H ölçüm sisteminin fotoğrafı.

3.3.2. Manyetoelektrik ölçüm sistemi

Manyetoelektrik (ME) ölçüm sistemleri literatürde farklı şekillerde tasarlanabilmekte olup; kullanılan yöntem, sistemin hassasiyetini ve ölçüm doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada kullanılan sistem, Lock-in yükselteç tabanlı ölçüm yöntemine dayanmaktadır. Bu yöntemde, ölçülen sinyalin faz ve frekans bileşenleri senkron olarak karşılaştırılarak yüksek sinyal-gürültü oranı elde edilir. Manyetoelektrik ölçüm sistemi, uygulanan manyetik alan altında numunede indüklenen elektriksel gerilimin ölçülmesine dayanmaktadır. Sistem hem manyetik hem de elektriksel alan bileşenlerini aynı anda kontrol edebilmek amacıyla tasarlanmış olup, sensörün manyetoelektrik

bağlaşım katsayısını α_E belirlemede temel bir rol oynamaktadır. Ölçüm düzeneği; iç içe yerleştirilmiş iki farklı bobin, sinyal üretici, düşük akım kaynağı (DC), Lock-in yükselteç ve veri toplama biriminden oluşmaktadır (Şekil 3.7). Sistemde iç kısımda küçük boyutlu bir AC solenoid bobin, dış kısımda ise Helmholtz konfigürasyonunda yerleştirilmiş daha geniş çaplı bir DC bobin bulunmaktadır. İçteki solenoid bobin, sensör üzerine alternatif manyetik alan uygulamak amacıyla kullanılır ve sinyal üretici aracılığıyla beslenmektedir.

Sinyal üretici, düşük genlikli ve istenilen frekansta AC sinyal üretebilmekte, böylece düşük manyetik alan şiddetlerinde dahi sensörün manyetoelektrik tepkisi hassas biçimde incelenebilmektedir. Uygulanan bu alternatif manyetik alan, sensörün manyetostriktif bileşeninde manyetik dipollerin yönelmesine bağlı olarak mekanik deformasyon yerine doğrudan bir gerilim değişimine yol açar. Bu değişim, sensörün piezoelektrik tabakasında elektriksel gerilim üretimi şeklinde gözlenir. Dışta yer alan Helmholtz bobin ise sabit (doğru) manyetik alan oluşturmak için kullanılır. Bu bobin, düşük akım kaynağı ile beslenmiştir. Böylece bobin üzerinden geçen akım miktarı değiştirilerek manyetik alan şiddeti (H) hassas biçimde ayarlanabilir ve özellikle düşük alan koşullarında sensör tepkisi incelenebilmiştir. Bu alan, sensör üzerindeki bias manyetik alanını temsil eder. Bias alanı, manyetostriktif malzemenin dipol yönelimlerini belirleyerek etkin manyetostriksiyon katsayısını doğrudan etkiler; bu nedenle manyetoelektrik etki ölçümlerinde kritik öneme sahiptir. Her iki bobin ortak bir eksen boyunca konumlandırılmış olup, manyetoelektrik sensör bobinlerin tam merkezine yerleştirilmiştir. Sensör, piezoelektrik malzeme tabanlı olarak hazırlanmış ve bu malzemenin iki ucuna ince gümüş teller yardımıyla elektrot bağlantısı yapılmıştır. Elde edilen çıkış uçları Lock-in yükseltecin girişine bağlanarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Lock-in yükselteç, sinyal üreticiden alınan referans sinyali ile ölçülen sinyali faz açısından karşılaştırarak, mikro volt (μV) mertebesindeki çok küçük gerilimlerin doğru biçimde tespit edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca osiloskop, sistemde ek olarak küçük sinyalleri doğrudan gözlemlemek ve sistemin düzgün çalıştığını doğrulamak amacıyla kullanılmıştır. Bu sayede hem sinyal formu hem de faz ilişkisi gerçek zamanlı olarak izlenebilmiştir. Ölçümlere başlamadan önce, sistemin rezonans frekansı sinyal üretici kullanılarak belirlenmiştir. Daha sonra tüm manyetoelektrik ölçümler, belirlenen rezonans frekansı çevresinde gerçekleştirilmiştir. Böylece sensörün maksimum manyetoelektrik tepkisi elde edilmiştir. Sinyal üreticiden çıkan alternatif sinyalin genliği ve frekansı, sistemin rezonans koşullarına göre optimize edilmiştir. Manyetoelektrik sensörlerde, uygulanan AC alan frekansının sensörün mekanik rezonans frekansına yakın olması durumunda rezonans yükselmesi gözlenir. Bu durumda elde edilen manyetoelektrik gerilim genliği maksimum seviyeye ulaşır. Rezonans frekansının belirlenmesi için ölçüm genellikle frekans taraması şeklinde gerçekleştirilir; belirli bir DC bias alanı altında AC alan

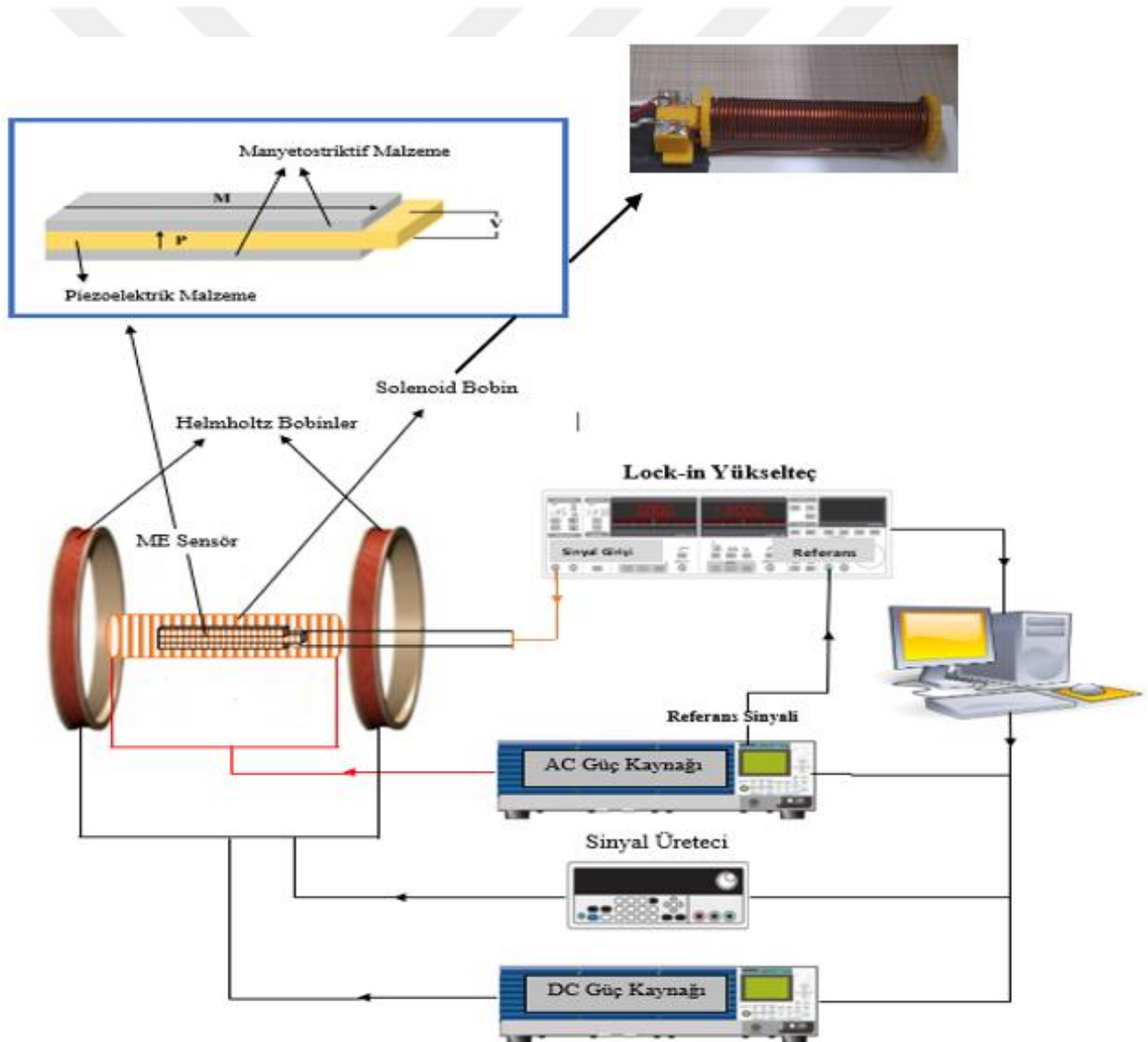
frekansı kademeli olarak artırılır ve sensör çıkış gerilimi kaydedilir. Bu veriler, sensörün rezonans frekansını ve manyetoelektrik bağlaşım katsayısını belirlemek için kullanılır.

Sistemin veri toplama birimi, Lock-in yükselteçten alınan çıkış sinyallerini bilgisayara aktararak kayıt altına almaktadır. Böylece DC alan, AC alan genliği ve frekans parametrelerine karşılık elde edilen gerilim değerleri analiz edilmiştir.

Manyetoelektrik bağlaşım katsayısı aşağıdaki ifade ile tanımlanmıştır:

$$\alpha_E = \frac{dV}{dH} \quad (3.4)$$

Burada V, sensör uçlarında indüklenen elektriksel gerilimi; H ise uygulanan manyetik alan şiddetini temsil etmektedir.



Şekil 3.7. Manyetoelektrik ölçüm sistemi .



Şekil 3.8. Manyetoelektrik ölçüm sisteminin fotoğrafı.

3.3.2.1. Manyetoelektrik ölçüm yazılımı ve kontrol sistemi

Manyetoelektrik ölçüm sistemi, sensörün farklı manyetik alan koşulları altındaki elektriksel tepkilerini analiz etmek amacıyla geliştirilen bir kontrol ve ölçüm yazılımı ile çalışmaktadır. Yazılım, AC ve DC manyetik alanlara karşı sensör çıkış voltajındaki değişimi frekans, zaman ve manyetik alan genliği parametrelerine bağlı olarak grafiksel biçimde izleme olanağı sağlamaktadır. Ölçüm sisteminde elde edilen tüm sinyaller, lock-in amplifikatör aracılığıyla faz ve genlik bileşenlerine ayrılarak yüksek hassasiyetle analiz edilmiştir.

Sensörün rezonans frekansının belirlenmesi amacıyla geliştirilen modülde, frekans değişimine karşı manyetik alan genliğinin davranışı grafiksel olarak gösterilmiştir. Ölçümde sensöre AC manyetik alan sinyal üretici üzerinden uygulanmış, buna ek olarak farklı DC manyetik alan şiddetleri DC güç kaynağı aracılığıyla oluşturulmuştur. Yazılım, uygulanan manyetik alan şiddetine bağlı olarak rezonans frekansı ve titreşim genliğindeki değişimleri eşzamanlı olarak sunmuştur.

Sensörün hassasiyetinin belirlenmesi amacıyla kullanılan modülde, zamana bağlı manyetik alan değişimi yazılım arayüzü üzerinden izlenmiştir. Ölçüm sisteminde Kepco güç kaynağı ve Source 2400 cihazı DC manyetik alanın oluşturulmasında kullanılmış olup, özellikle Source 2400 daha hassas manyetik alan taramaları için tercih edilmiştir.

Sensör üzerinde AC manyetik alanın oluşturduğu etkinin belirlenmesine yönelik modülde, uygulanan AC manyetik alana karşı sensör çıkış voltajındaki değişim gözlemlenmiştir. Bu sistemde AC güç kaynağı kullanılmış ve farklı frekans ile genlik değerlerinde manyetik alan tepkisi incelenmiştir.

Ayrıca sensör üzerinde DC manyetik alanın etkisini belirlemek amacıyla geliştirilen modülde, yazılım kullanıcı tarafından belirlenen maksimum DC manyetik alan değerinden minimum değere doğru belirli aralıklarla alan uygulayarak ölçüm işlemini otomatik olarak gerçekleştirmiştir. Ölçümler sırasında sensöre ayrıca AC güç kaynağı üzerinden sabit genlikte bir AC manyetik alan uygulanmıştır.

3.4. Karakterizasyon Ölçümleri

3.4.1. SEM-EDX Ölçümleri

Bu tez çalışmasında kullanılan piezoelektrik ve manyetostriktif malzemelerin yapısal ve morfolojik özelliklerini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilen karakterizasyon analizlerine yer verilmiştir. Malzemelerin mikroyapısal özelliklerinin ve elementel bileşimlerinin belirlenmesinde Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) yöntemlerinden yararlanılmıştır. Malzeme yüzeyine ait üç boyutlu morfoloji, yüzey pürüzlülüğü, girinti-çukurluk yapıları, tanecik boyutları ve benzeri yüzey özelliklerinin incelenebilmesi için SEM ölçümleri gerçekleştirilmiştir. SEM tekniğinin temel çalışma prensibi, elektron tabancasından çıkan yüksek enerjili ve odaklanmış bir elektron demetinin numunenin belirli bir bölgesine gönderilmesine dayanmaktadır. Numune yüzeyine ulaşan bu elektronların bir kısmı yüzeyden saçılarak ikincil elektronlar hâlinde geri yayılmakta, bu elektronlar dedektörler tarafından toplanarak yüzey topografisini ayrıntılı biçimde yansıtan görüntüler elde edilmektedir.

SEM cihazları sayesinde numune yüzeyi yaklaşık 20× ile 50.000× arasında değişen büyütme oranlarında incelenebilmektedir. Bu sayede mikron ve mikron altı ölçekteki yapısal ayrıntılar gözlemlenebilmekte; yüzey düzgünlüğü, tanecik boyutu dağılımı ve olası gözenekli yapı hakkında bilgi edinilebilmektedir. Numunelerin elementel içeriklerinin belirlenmesi amacıyla ise EDX analizi uygulanmıştır. Bu yöntemde, numune üzerine gönderilen yüksek enerjili elektronlar atomların iç yörüngelerindeki elektronlarla etkileşime girmekte ve bunun sonucunda karakteristik X-ışınları oluşmaktadır. Her elementin yaydığı X-ışınının enerjisi kendine özgü olduğundan, EDX dedektörü tarafından algılanan sinyaller yazılım aracılığıyla enerji spektrumuna dönüştürülmekte; spektrum üzerindeki piklerin konumları element türlerini, pik şiddetleri ise bu elementlerin yaklaşık miktarlarını göstermektedir.

EDX sistemi çoğunlukla SEM cihazına entegre biçimde çalıştığından, aynı bölgeden hem morfolojik hem de kimyasal içerik bilgisi elde edilebilmektedir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen tüm SEM ve EDX analizleri, İBTAM bünyesinde bulunan LEO EVO 40 marka SEM cihazı ve buna bağlı EDX dedektör sistemi kullanılarak yapılmıştır.

3.4.2. XRD ölçümleri

XRD ölçüm yöntemi, malzemelerin kristal yapısının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan önemli bir karakterizasyon tekniğidir. Elektromanyetik ışınının bir türü olan X-ışınları, bir malzemeden geçerken atomların elektronlarıyla etkileşime girerek saçılmaktadır. Belirli bir açıyla kristal yapı üzerine gönderilen X-ışınlarının bir bölümü yüzeydeki atomların elektronları tarafından saçılırken, diğer bölümü kristalin daha iç bölgelerine ilerleyerek alt tabakalardaki atomlarla etkileşimini sürdürmektedir. Bu tabakalardan saçılan X-ışınları, uygun koşullar altında birbirleriyle girişim oluşturarak malzemenin kristal yapısına ilişkin bilgi sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen XRD ölçümleri, piezoelektrik ve manyetostriktif malzemelerin kristal yapılarının incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Elde edilen veriler, malzemelerin faz bileşimlerinin ve kristalografik özelliklerinin belirlenmesinde önemli katkı sağlamıştır. Tüm XRD analizleri, İBTAM bünyesinde bulunan ilgili cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.4.3. FT-IR yöntemi

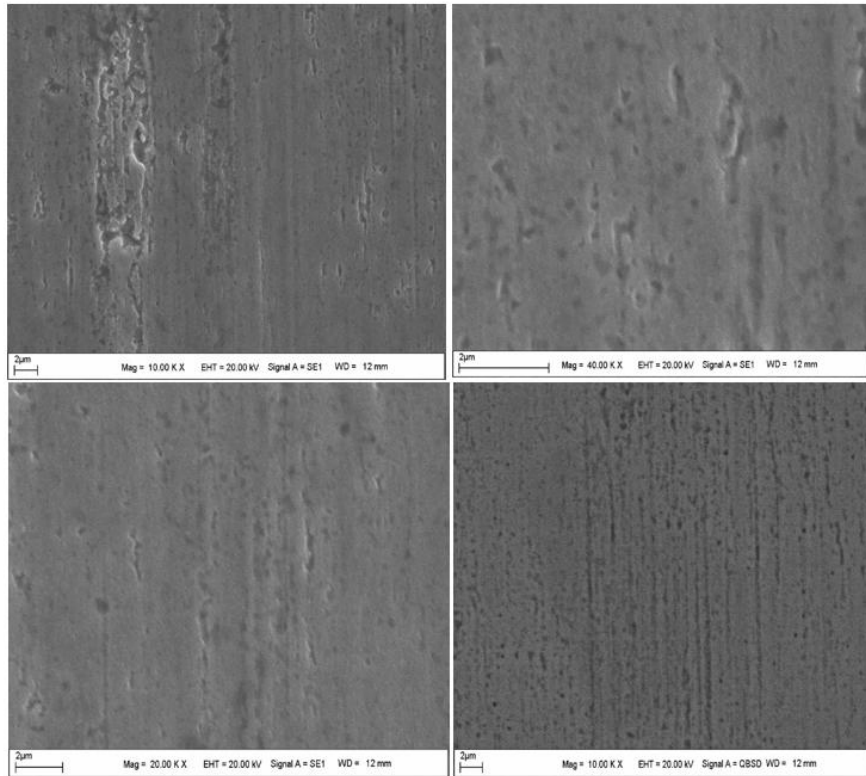
FTIR yöntemi, matematiksel Fourier dönüşümü kullanılarak, birden fazla frekans bileşeninden oluşan kızılötesi (IR) sinyalin ayrıştırılması ve her bir bileşenin şiddetinin belirlenmesine dayanan bir analiz tekniğidir. Bu tez kapsamında FTIR analizi yalnızca piezoelektrik özellik gösteren PVDF (Polyvinylidene Fluoride) malzemesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, PVDF numunesinin kimyasal bağ yapısını ve içerdiği fonksiyonel grupları belirlemek amacıyla İBTAM (İnönü Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma Merkezi) laboratuvarında yapılmıştır.

4.BULGULAR

Bu bölümde, hazırladığımız manyetoelektrik sensörlerin dış manyetik alan altındaki davranışlarını inceledik ve sistemin manyetoelektrik performansını belirleyen temel parametreleri değerlendirdik. Manyetoelektrik (ME) sensörlerde incelediğimiz başlıca büyüklükler; rezonans frekansı, DC manyetik alanın etkisi, AC manyetik alan tepkisi ve sensör hassasiyetidir. Bu parametreler, sensörün uygulanan manyetik alanı elektriksel sinyale dönüştürme yeteneğini ortaya koymaktadır. Elde ettiğimiz deneysel ölçüm sonuçlarını çeşitli yazılımlar kullanarak analiz ettik ve grafikler ile çizelgeler halinde sunduk. Bu bölümde AFŞ/PVDF/AFŞ, AFŞ/PZT/AFŞ ve Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörlerin performanslarını inceledik. Çalışmada PVDF tabanlı sensörlerde 28 μm ve 50 μm kalınlığındaki tercih ettik. Bu bölümde sunduğumuz tüm bulguları, 3. bölümde açıkladığımız üretim aşamaları ile cihaz ve yöntemleri esas alarak elde ettik.

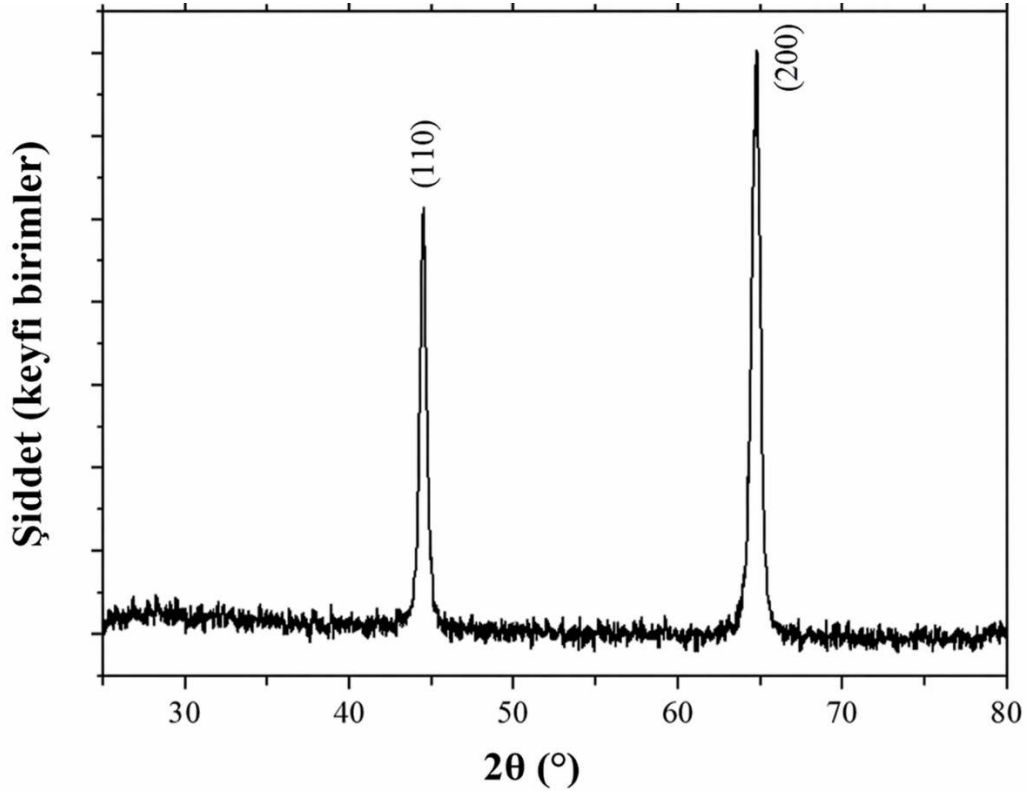
4.1. Karakterizasyon Ölçümlerinin Sonuçları

Bu bölümde, manyetoelektrik sensör yapısında kullanılan piezoelektrik ve manyetostriktif malzemelere ait karakterizasyon ölçüm sonuçları sunulmaktadır. Malzemelerin yapısal ve morfolojik özelliklerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen SEM, EDX, XRD ve FTIR analizlerine ait grafikler ve görüntüler bu bölümde verilmiştir.



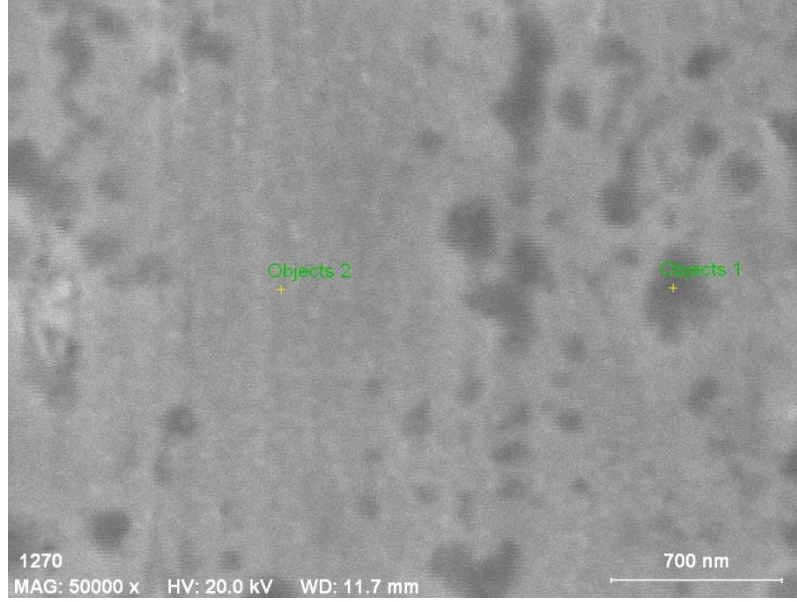
Şekil 4.1. Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemenin farklı büyütmelerde elde edilen SEM görüntüleri.

Şekil 4.1’de Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemenin farklı büyütmelemlerde elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde malzeme yüzeyinin genel olarak düzgün ve homojen bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Yüzey boyunca uzanan çizgisel izler dikkat çekmektedir. Bu çizgisel yapılar malzemenin içsel mikroyapısından kaynaklanmayıp, numune hazırlama aşamasında uygulanan poliş işlemi sırasında oluşan yüzeysel izlerdir. Belirgin çatlak, boşluk veya büyük kusurların gözlenmemesi, malzemenin yapısal bütünlüğünü koruduğunu ve yüzey kalitesinin iyi olduğunu göstermektedir.

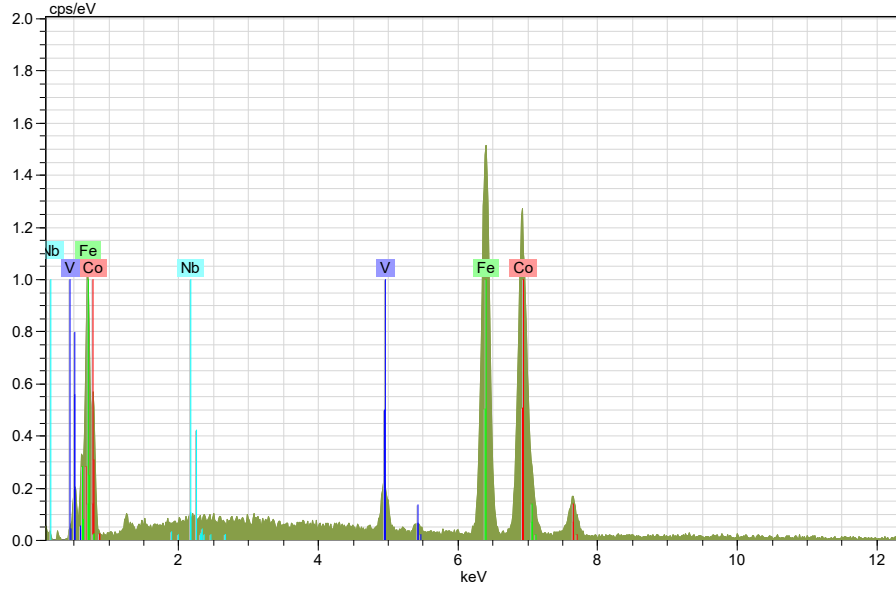


Şekil 4.2. Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemeye ait X-ışını kırınım (XRD) deseni.

Şekil 4.2’de Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemeye ait XRD deseni verilmiştir. Desende belirgin ve keskin pikler gözlenmektedir. Özellikle (110) ve (200) düzlemlerine ait pikler dikkat çekmektedir. Piklerin keskin olması, malzemenin kristal yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Herhangi bir ek faza ait belirgin bir pik gözlenmemiştir.



Şekil 4.3. Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemenin EDX analizi için alınan SEM görüntüsü.

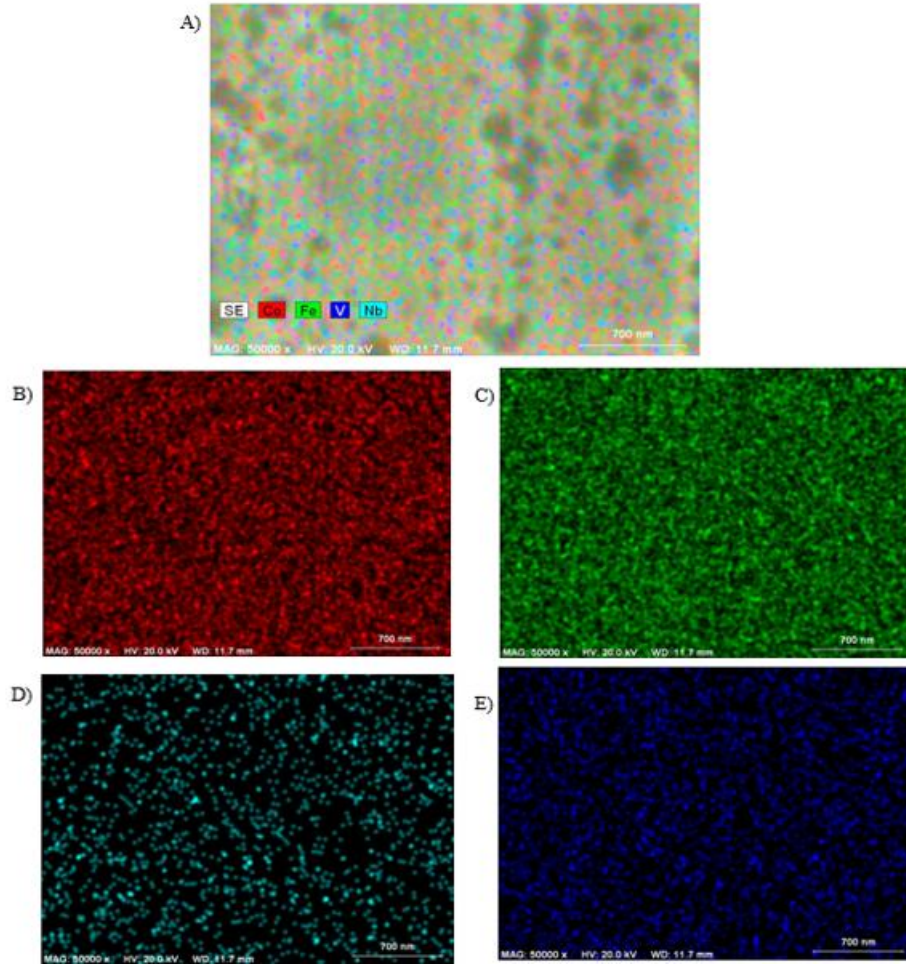


Şekil 4.4. Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemeye ait EDX spektrumu.

Çizelge 4.1. Vacodur49 manyetostriktif alaşımının EDX analizi ile belirlenen elementel bileşimi.

Element	Atom No	Seri	Ölçülmeyen Kons. (ağ.%)	Normalize Kons. (ağ.%)	Atomik Kons. (at.%)	Hata (%)
Co	27	K-serisi	47.92	48.23	47.00	1.4
Fe	26	K-serisi	47.32	47.63	48.98	1.4
V	23	K-serisi	2.85	2.87	3.23	0.1
Nb	41	L-serisi	1.26	1.27	0.78	0.1
Toplam	—	—	99.34	100.00	100.00	—

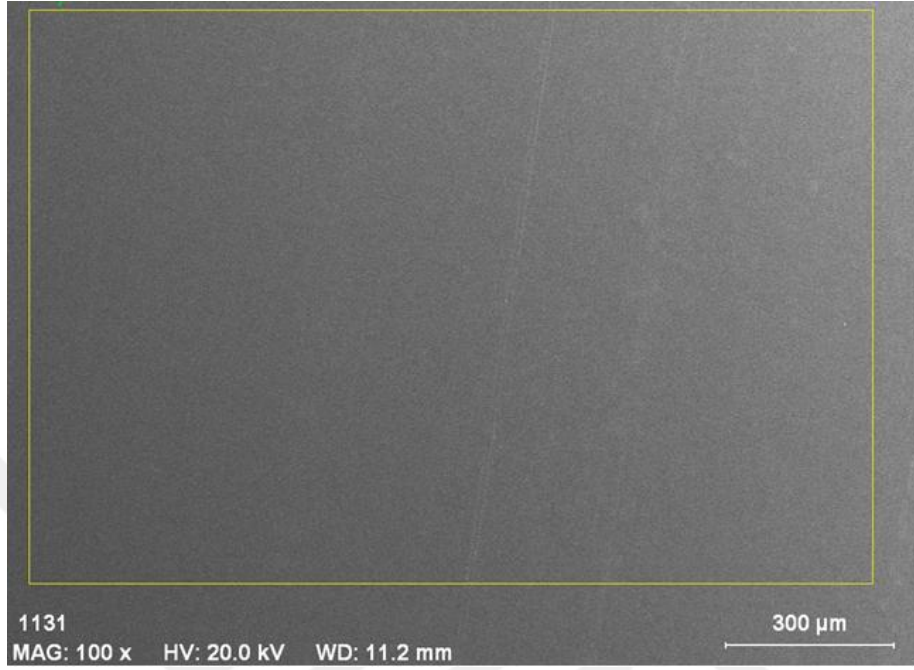
Şekil 4.3'te Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemenin EDX analizi için alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Analiz, numune yüzeyinde belirlenen bölgeler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'te elde edilen EDX spektrumu görülmektedir. Spektrumda Co ve Fe elementlerine ait belirgin pikler gözlemlenmektedir. Bunun yanında daha düşük oranlarda V ve Nb elementleri de tespit edilmiştir. Çizelge 4.1'de verilen elementel bileşim sonuçları incelendiğinde alaşımın büyük oranda Co ve Fe elementlerinden oluştuğu, V ve Nb elementlerinin ise daha düşük miktarlarda bulunduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemenin beklenen kimyasal bileşime sahip olduğunu göstermektedir.



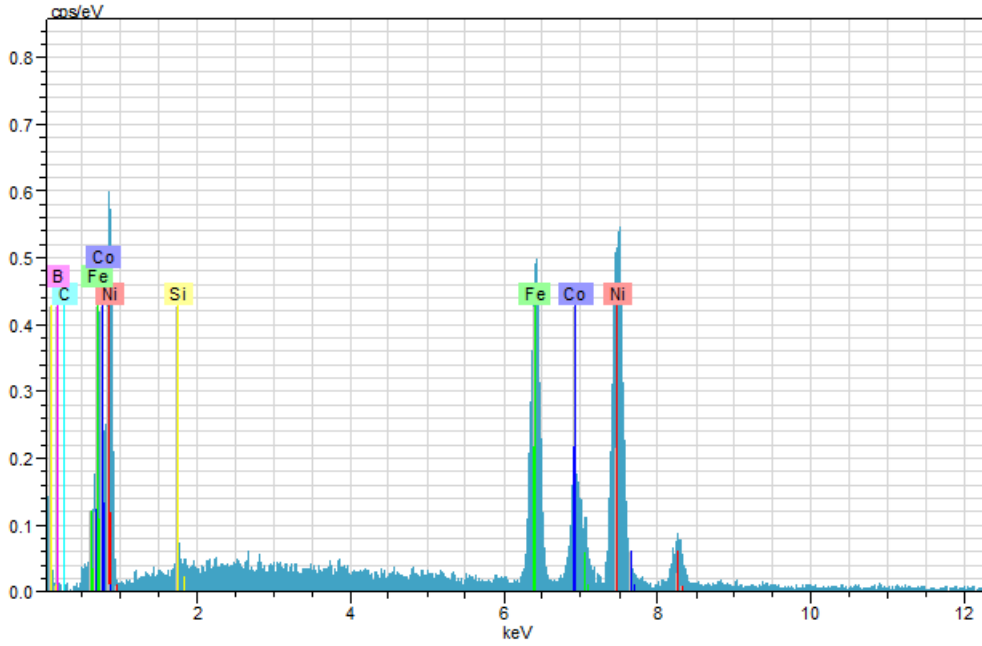
Şekil 4.5. Vacodur49 kodlu manyetostriktif malzemeye ait SEM-EDX element dağılım (color mapping) görüntüleri: (A) birleşik (overlay) harita, (B) Co dağılımı, (C) Fe dağılımı, (D) Nb dağılımı, (E) V dağılımı.

Şekil 4.5'te Vacodur49 numunesinin üzerindeki elementlerin nasıl dağıldığı görülmektedir. Şekil 4.5a'daki genel (karma) görüntüde, tüm elementlerin birbirine karıştığı ve yüzeye yayıldığı anlaşılmaktadır. Aynı ayrı bakıldığında; Kobalt (Co) ve Demir (Fe) haritaları, bu iki elementin numunenin her yerinde yoğun olarak bulunduğunu göstermektedir. Niyobyum (Nb) ve Vanadyum (V) elementleri ise daha az miktarda olmalarına rağmen, yapı içinde belirli bir noktada toplanmadan her tarafa eşit

şekilde dağılmışlardır. Sonuç olarak, görüntülerde elementlerin bir bölgede birikmediği, numunenin genelinde dengeli bir karışım oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 4.6. AFŞ malzemesine ait EDX analizi için alınan SEM görüntüsü.

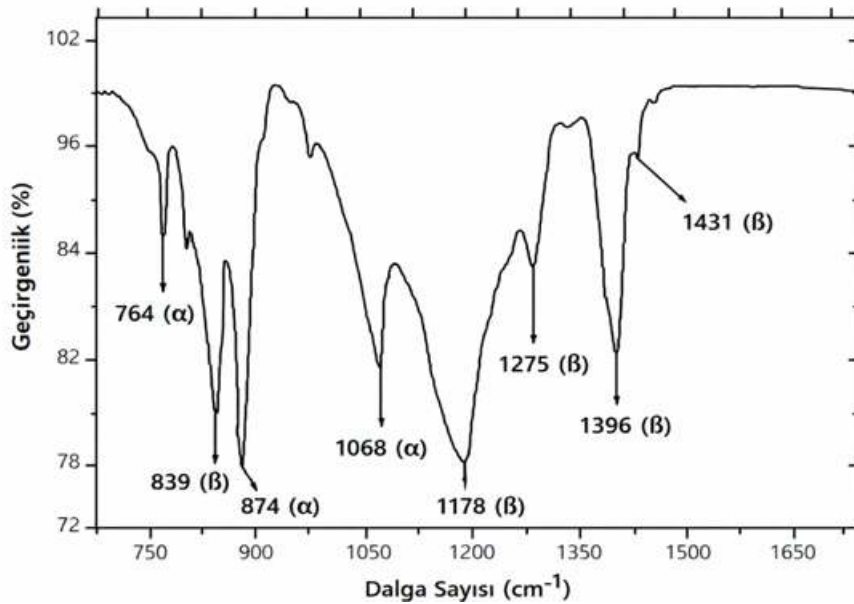


Şekil 4.7. AFŞ malzemesine ait EDX spektrumu.

Çizelge 4.2. AFŞ malzemesinin EDX analizine ait elementel bileşim sonuçları.

Element	Atom No	Seri	Ağırlıkça Oran (normalize edilmemiş) [wt.%]	Ağırlıkça Oran (normalize) [wt.%]	Atomca Oran [at.%]	Hata [%]
Ni	28	K-serisi	55,39	55,37	51,89	1,7
Fe	26	K-serisi	28,25	28,24	27,81	0,9
Co	27	K-serisi	14,47	14,47	13,50	0,6
Si	14	K-serisi	0,93	0,93	1,83	0,1
B	5	K-serisi	0,88	0,88	4,48	0,7
C	6	K-serisi	0,11	0,11	0,48	0,2
Toplam	—	—	100,03	100,00	100,00	—

Şekil 4.6’da AFŞ malzemesine ait EDX analizi için alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Analiz seçilen bölge üzerinden gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7’de elde edilen EDX spektrumu görülmektedir. Spektrumda Ni elementine ait piklerin baskın olduğu, bunun yanında Fe ve Co elementlerinin de belirgin şekilde bulunduğu gözlemlenmektedir. Çizelge 4.2’de verilen sonuçlar incelendiğinde sensörün büyük oranda Ni, Fe ve Co elementlerinden oluştuğu görülmektedir. Elde edilen elementel bileşim sonuçları malzemenin beklenen alaşım yapısına uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.8. PVDF numunesine ait FTIR spektrumu.

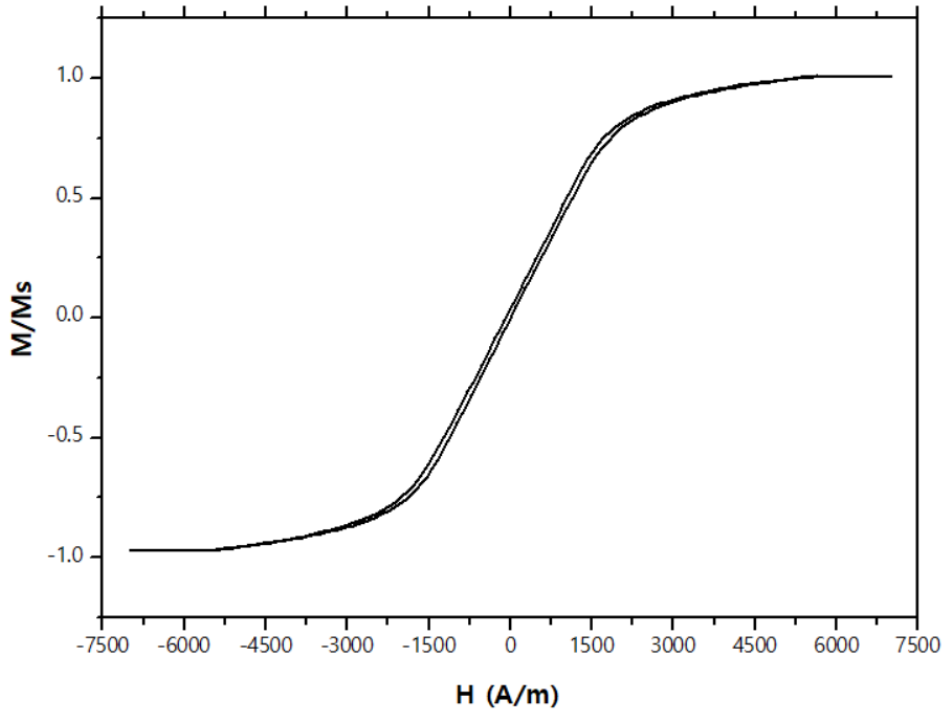
Şekil 4.8’de PVDF numunesine ait FTIR spektrumu verilmiştir. Spektrumda farklı dalga sayılarında gözlenen pikler, PVDF’nin kristal faz yapısı hakkında bilgi vermektedir. 764 cm^{-1} ve 874 cm^{-1} dalga sayılarında görülen pikler α -fazına ait karakteristik bantlar olarak değerlendirilmektedir. 1068 cm^{-1} bandı da α -faz varlığını göstermektedir. 839 cm^{-1} , 1178 cm^{-1} , 1275 cm^{-1} , 1396 cm^{-1} ve 1431 cm^{-1}

dalga sayılarında gözlenen pikler ise β -fazına ait bantlardır. Özellikle 839 cm^{-1} ve 1275 cm^{-1} pikleri β -fazın belirgin göstergeleridir. Spektrum genel olarak incelendiğinde β -faz bantlarının belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum, PVDF numunesinin piezoelektrik özellik göstermesi açısından uygun bir faz yapısına sahip olduğunu göstermektedir.

4.2. Manyetik Ölçüm Sonuçları

4.2.1. M–H ölçüm sonuçları

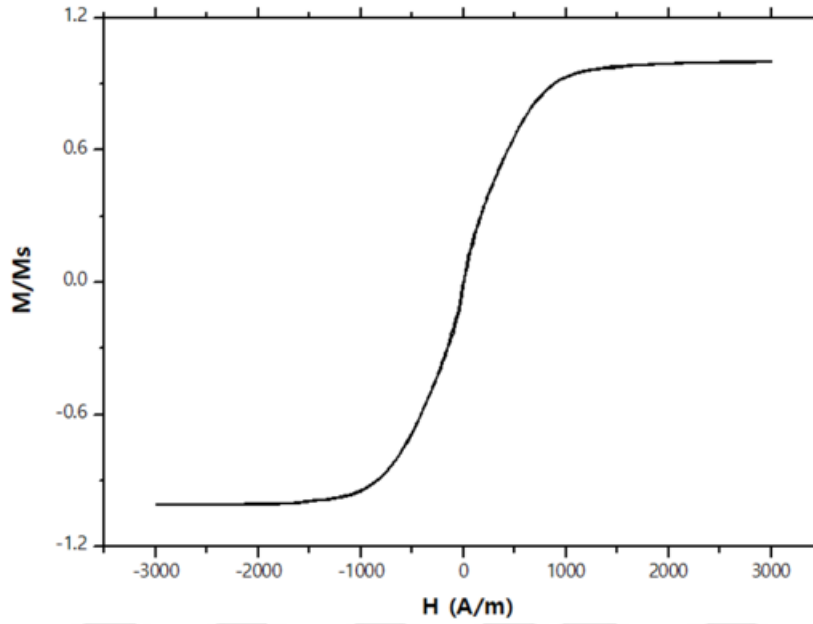
Amorf ferromanyetik malzemelerin yumuşak manyetik özelliklerinin belirlenmesinde koersivite (H_c) ve doyum manyetizasyonu (M_s) önemli parametrelerdir. Bu parametreler malzemenin manyetik davranışını doğrudan göstermektedir. Bu çalışmada, Bölüm 3.3'te açıklanan M–H ölçüm sistemi kullanılarak manyetostriktif özellik gösteren AFŞ ve Vacodur49 numunelerin M–H ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen histerezis eğrilerinden H_c ve M_s değerleri hesaplanmış ve malzemelerin yumuşak manyetik özellikleri değerlendirilmiştir.



Şekil 4.9. Vacodur49 kodlu manyetostriktif şeride ait M–H eğrisi.

Şekil 4.9'da Vacodur49 kodlu manyetostriktif şeridine ait normalize edilmiş M–H eğrisi verilmiştir. Eğri incelendiğinde malzemenin düşük manyetik alan değerlerinde hızlı bir şekilde mıknatıslanma gösterdiği görülmektedir. Manyetik alan arttıkça manyetizasyon doygunluk değerine ulaşmaktadır.

M–H eğrisinden hesaplanan koersivite değerinin yaklaşık $H_c \approx 200$ A/m olduğu belirlenmiştir. Bu durum, malzemenin yumuşak manyetik karakter sergilediğini ve sensör uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir. Mıknatıslanma değerleri doygunluk manyetizasyon (M_s) göre normalize edilmiştir.

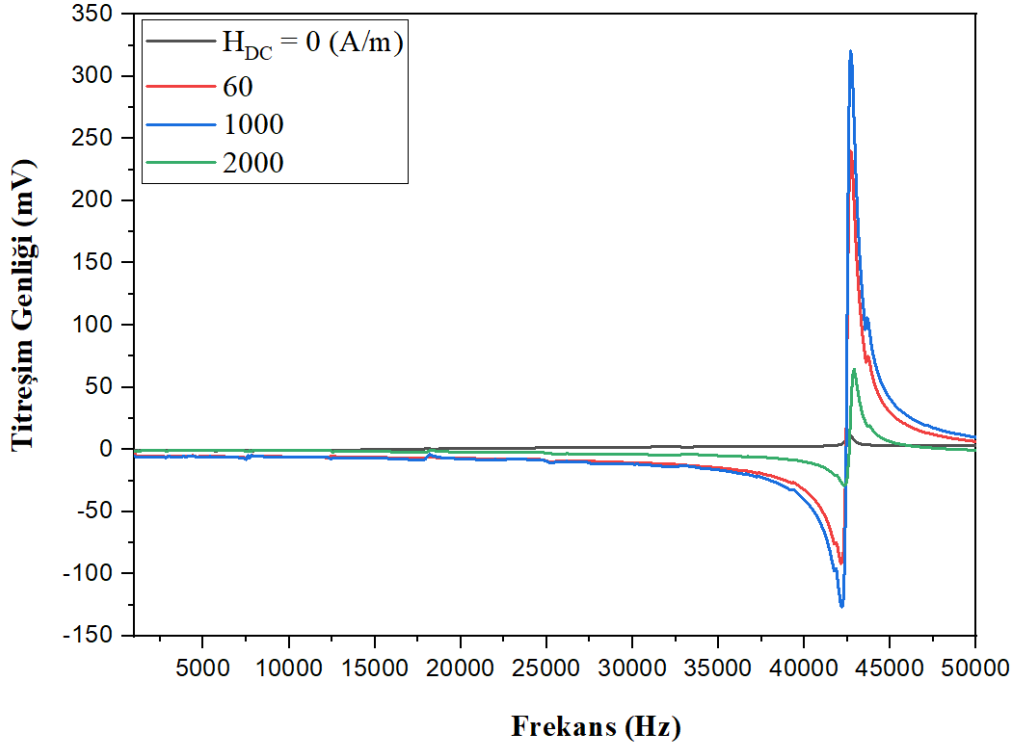


Şekil 4.10. AFŞ malzemesine ait M–H eğrisi.

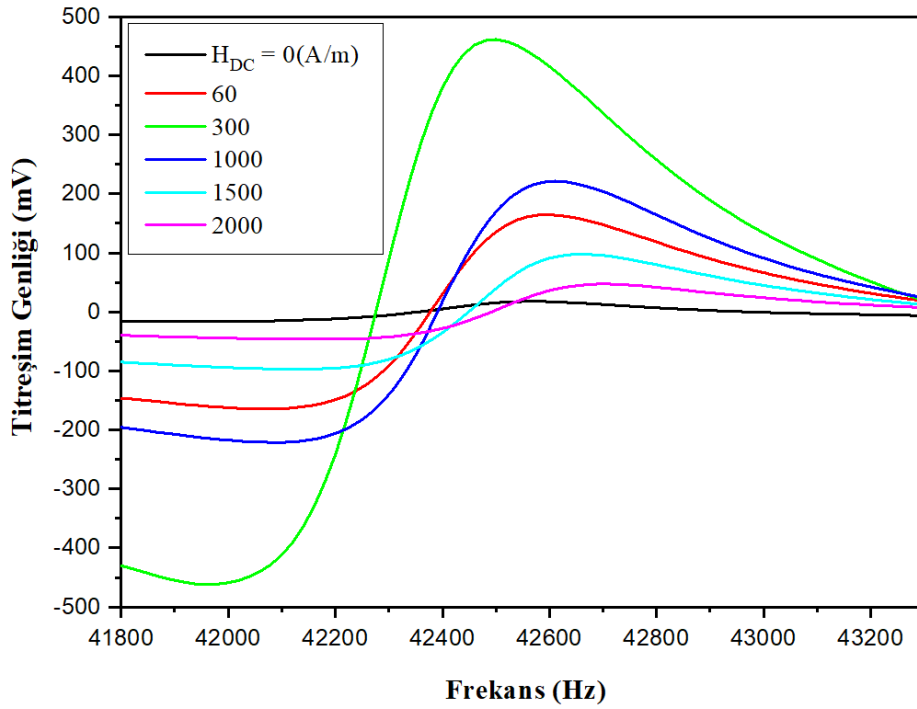
Şekil 4.10’da AFŞ malzemesine ait M–H eğrisi verilmiştir. Mıknatıslanma değerleri doygunluk manyetizasyonuna (M_s) göre oranlanmıştır. Eğri incelendiğinde malzemenin düşük manyetik alan değerlerinde hızlı bir mıknatıslanma gösterdiği görülmektedir. Manyetik alan arttıkça manyetizasyon doygunluk değerine ulaşmaktadır. M–H eğrisinden hesaplanan koersivite değerinin yaklaşık $H_c \approx 90$ A/m olduğu belirlenmiştir. Bu durum, sensörün yumuşak manyetik karakter sergilediğini ve manyetik alan değişimlerine duyarlı olduğunu göstermektedir.

4.2.2. Manyetoelektrik ölçüm sonuçları

Hazırlanan manyetoelektrik sensörün dış manyetik alan altındaki davranışı incelenmiş ve manyetoelektrik performansını belirleyen temel parametreler değerlendirilmiştir. ME sensörlerde incelenen başlıca büyüklükler; rezonans frekansı, DC manyetik alanın etkisi, AC manyetik alan tepkisi ve sensör hassasiyetidir. Bu parametreler, sensörün uygulanan manyetik alanı elektriksel sinyale dönüştürme yeteneğini göstermektedir. Bu kısımda AFŞ/PZT/AFŞ ve Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısına sahip iki farklı manyetoelektrik sensörün yanı sıra, AFŞ/PVDF (28 μ m kalınlığında)/AFŞ ve AFŞ/PVDF (50 μ m kalınlığında)/AFŞ yapısına sahip numunelerin ölçüm sonuçları sunulmuştur.

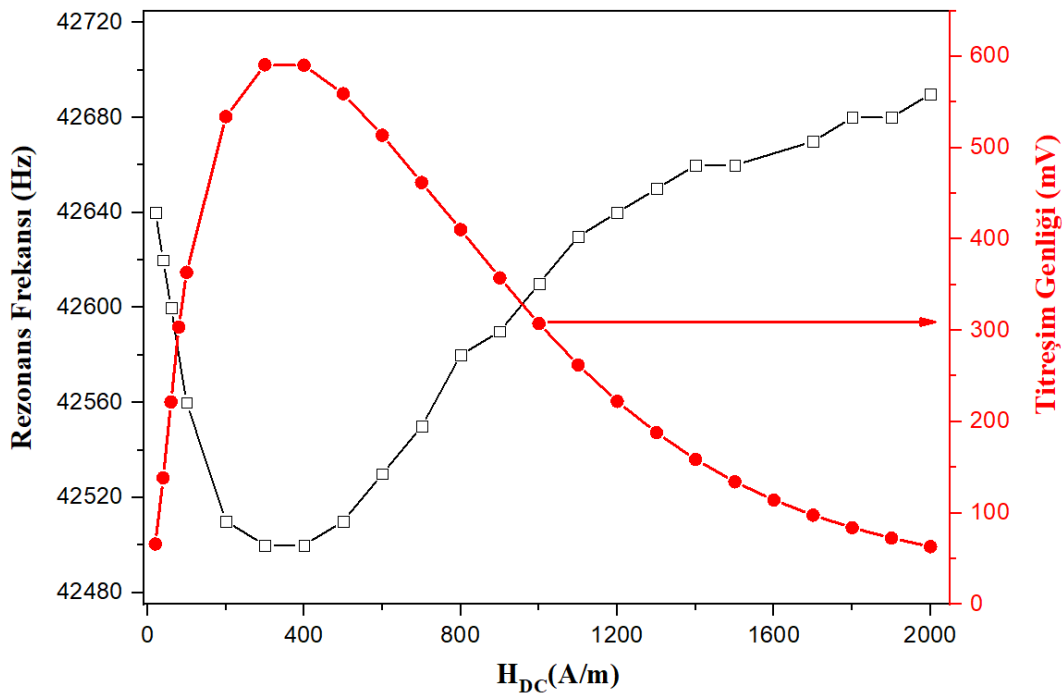


Şekil 4.11. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün geniş frekans aralığında titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.



Şekil 4.12. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün rezonans frekansı çevresinde titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.

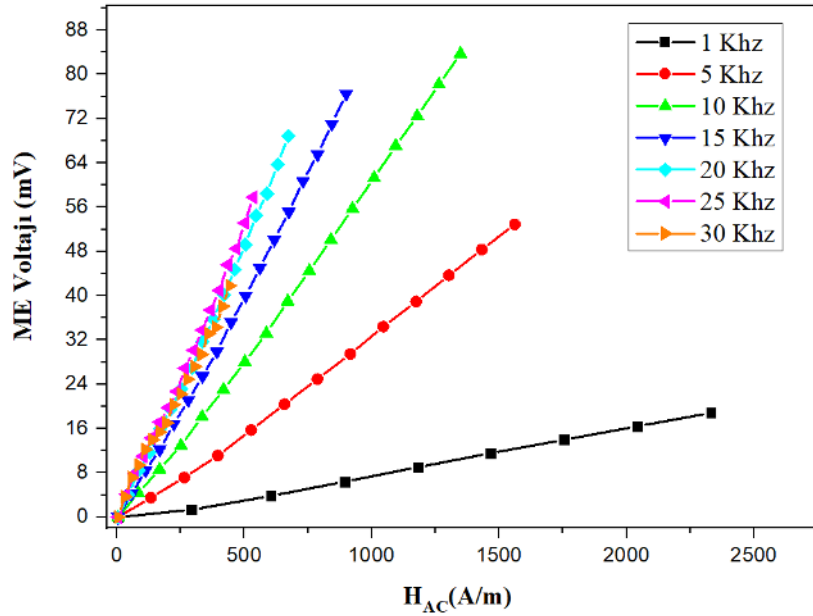
Şekil 4.11’de AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün geniş frekans aralığındaki davranışı gösterilmektedir. Grafikte sensörün yaklaşık 42.5 kHz civarında belirgin bir rezonans tepesi oluşturduğu görülmektedir. DC manyetik alan değerinin değişmesi, rezonans tepe genliğini doğrudan etkilemektedir. Bu durum sensörün manyetik alan değişimlerine duyarlı olduğunu göstermektedir. Şekil 4.12’de ise sensörün rezonans frekansı çevresindeki ayrıntılı davranışı verilmiştir. Grafikte sensörün rezonans frekansının yaklaşık 42.5 kHz olduğu görülmektedir. Farklı DC manyetik alan değerlerinde titreşim gerilimi genliğinin belirgin şekilde değiştiği gözlenmektedir. Özellikle yaklaşık 300 A/m DC manyetik alan değerinde maksimum titreşim gerilimi elde edilmiştir. Daha yüksek manyetik alan değerlerinde ise çıkış geriliminin azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.13. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alana bağlı olarak rezonans frekansı ve titreşim geriliminin değişimi.

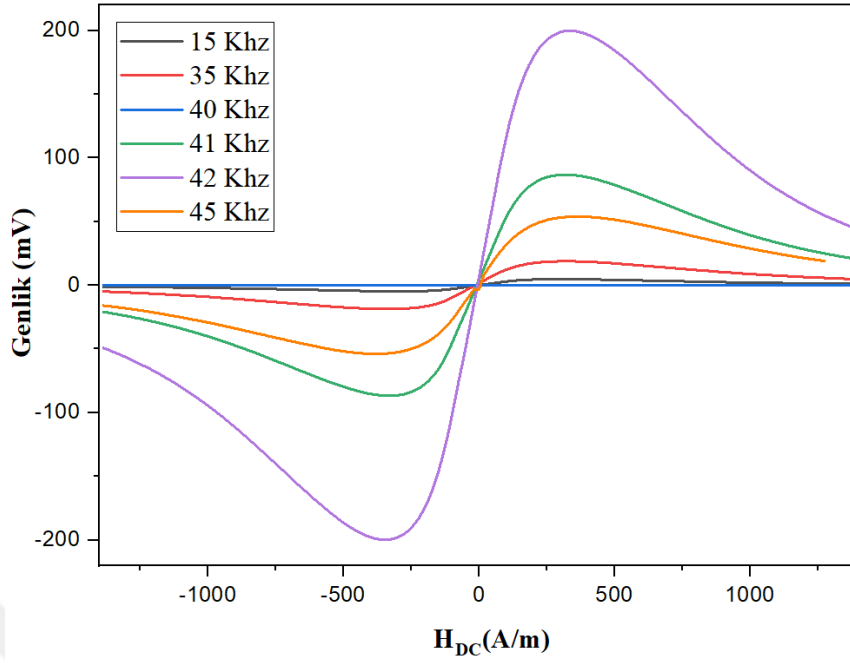
Şekil 4.13’de DC manyetik alanın artmasına bağlı olarak rezonans frekansı ve titreşim geriliminin değişimi birlikte gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, düşük DC alan değerlerinde titreşim geriliminin hızla arttığı ve belirli bir alan değerinde maksimuma ulaştığı görülmektedir. Titreşim geriliminin yaklaşık 350–400 A/m DC manyetik alan değerinde maksimuma ulaştığı görülmektedir. Bu noktadan sonra DC alanın artmasıyla gerilim azalmaktadır. Bu durum, manyetoelektrik etkinin belirli bir DC manyetik alan değerinde en yüksek seviyeye ulaştığını göstermektedir. Ayrıca rezonans frekansının da DC manyetik alana bağlı olarak değiştiği ve manyetik alan arttıkça frekansta kayma meydana geldiği görülmektedir. Rezonans frekansının yaklaşık 42.5–42.7 kHz aralığında değiştiği gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sensör için maksimum gerilimin elde edildiği DC alan değerinin

optimum çalışma noktası olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, PZT tabanlı manyetoelektrik sensörlerde DC bias manyetik alanın sensör cevabını belirgin şekilde etkilediğini gösteren literatürle uyumludur. Özellikle DC manyetik alan değiştikçe rezonans frekansında kayma olması ve çıkış geriliminin belli bir alan aralığında daha yüksek hâle gelmesi, Sun ve arkadaşlarının (2023) PZT tabanlı sensör için verdiği sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Bu nedenle AFŞ/PZT/AFŞ yapısında da DC bias alanın yalnızca genliği değil, sensörün çalışma noktasını da belirleyen önemli bir parametre olduğu söylenebilir.

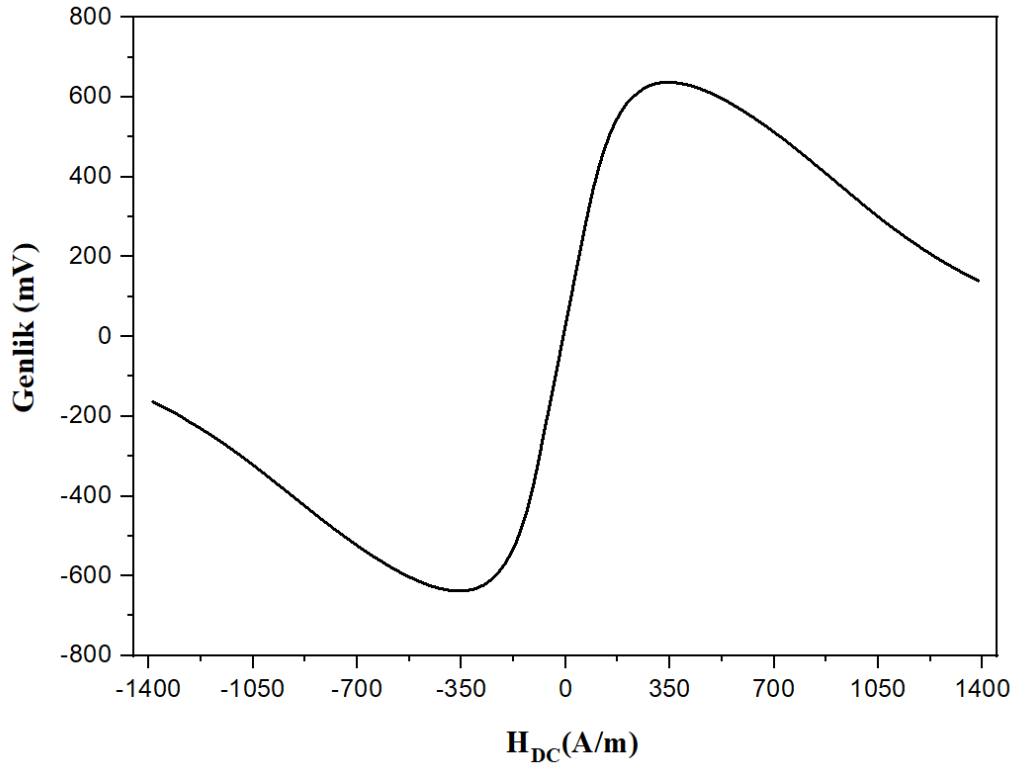


Şekil 4.14. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde ME voltajının AC manyetik alan genliğine bağlı olarak farklı frekanslardaki değişimi.

Şekil 4.14'te sensörün manyetoelektrik (ME) voltajının AC manyetik alan genliğine bağlı değişimi farklı frekanslarda gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, tüm frekanslarda AC manyetik alan arttıkça ME voltajının doğrusal şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum sensörün AC manyetik alan genliğine karşı lineer bir tepki verdiğini göstermektedir. Ayrıca frekans arttıkça elde edilen ME voltajının da arttığı gözlenmektedir. Özellikle yüksek frekanslarda daha yüksek gerilim değerleri elde edilmiştir. Bu sonuç, sensörün frekansa bağlı olarak artan manyetoelektrik cevaba sahip olduğunu ve belirli frekans aralıklarında daha yüksek hassasiyet gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuç, frekansın manyetoelektrik cevabı doğrudan etkilediğini gösteren literatürle uyumludur. Özellikle frekans arttıkça daha güçlü bir cevap elde edilmesi, Turutin ve arkadaşlarının (2022) frekansın manyetoelektrik gerilim katsayısı üzerindeki etkisini gösteren çalışmasıyla benzer bir eğilim ortaya koymaktadır. Bu durum, sensör performansının değerlendirilmesinde uygun frekans seçiminin önemli olduğunu göstermektedir.

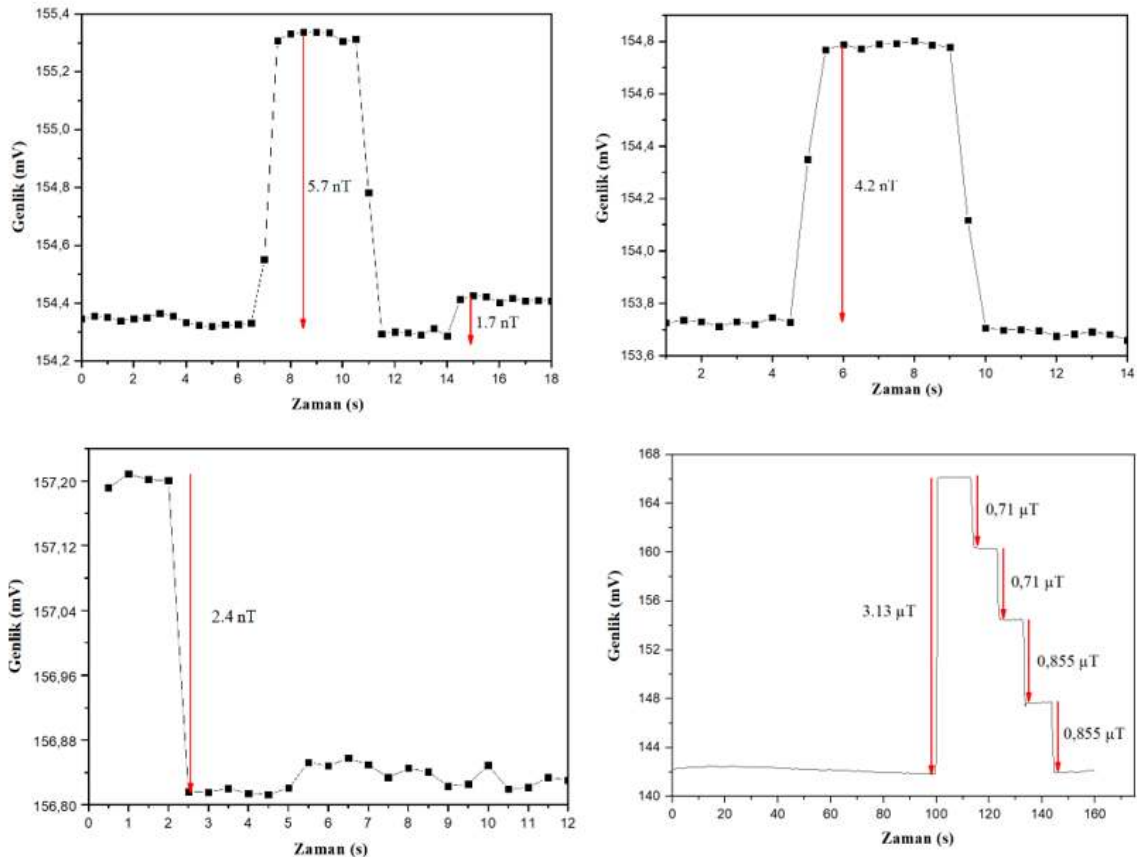


Şekil 4.15. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alanın farklı frekanslarda gerilim genliği üzerindeki etkisi.



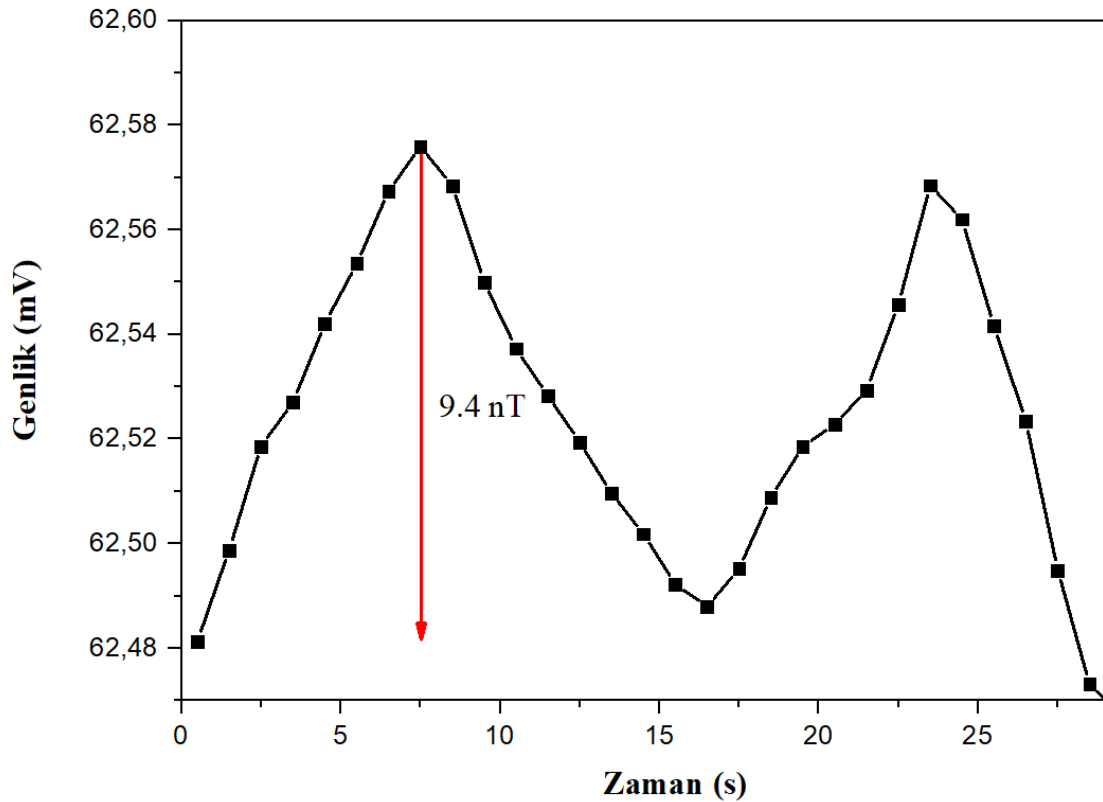
Şekil 4.16. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde rezonans frekansında DC manyetik alanın gerilim genliği üzerindeki etkisi.

Şekil 4.15'te DC manyetik alanın sensör çıkış gerilimi üzerindeki etkisi farklı frekanslarda gösterilmiştir. Ölçümler sırasında sensöre 16,4 Oe büyüklüğünde sabit bir AC manyetik alan uygulanmıştır. Grafik incelendiğinde, DC manyetik alanın artmasıyla birlikte gerilim genliğinin belirli bir aralıkta artış gösterdiği, daha sonra ise azaldığı görülmektedir. Özellikle rezonansa yakın frekanslarda gerilim genliğinin daha yüksek değerlere ulaştığı dikkat çekmektedir. Bu durum, manyetoelektrik etkinin DC manyetik alan ile güçlü bir şekilde kontrol edilebildiğini göstermektedir. Şekil 4.16'da ise rezonans frekansında DC manyetik alanın etkisi daha net bir şekilde görülmektedir. Gerilim genliği belirli bir DC alan değerinde maksimuma ulaşmakta ve bu noktadan sonra azalmaktadır. Bu maksimum nokta sensörün optimum DC çalışma alanını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, sensör performansının DC manyetik alan ile ayarlanabildiğini ve rezonans bölgesinde manyetoelektrik cevabın belirgin şekilde arttığını ortaya koymaktadır. Burada elde edilen sonuçlar da, DC manyetik alanın özellikle rezonans bölgesinde sensör çıkışını daha belirgin şekilde değiştirdiğini bildiren literatürle uyumludur. Sun ve arkadaşlarının (2023) çalışmasında da benzer şekilde DC bias alanın sensörün en uygun çalışma koşulunu belirlediği gösterilmiştir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, AFŞ/PZT/AFŞ yapısında gözlenen davranış literatürde verilen genel PZT tabanlı sensör eğilimini desteklemektedir.



Şekil 4.17. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün duyarlılığını belirlemek amacıyla zamana bağlı gerilim değişimi verilmiştir.

Şekil 4.17’de sensörün duyarlılığını belirlemek amacıyla zamana bağlı gerilim değişimi gösterilmiştir. Ölçümler sırasında AC güç kaynağından 43.5 kHz frekansında bir sinyal uygulanmış ve sensöre 207.18 A/m büyüklüğünde bir AC manyetik alan verilmiştir. Grafiklerde uygulanan çok küçük manyetik alan değişimlerine karşı sensör çıkış geriliminde belirgin basamaklı değişimler olduğu görülmektedir. NanoTesla (nT) ve mikroTesla (μ T) seviyesindeki alan değişimlerinin ölçülebilir gerilim farkları oluşturması, sensörün yüksek hassasiyete sahip olduğunu göstermektedir. Gerilim seviyelerinin yeni değerde kararlı şekilde sabit kalması ise sensörün tekrarlanabilir ve stabil bir tepki verdiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, hazırlanan sensörün düşük seviyeli manyetik alan değişimlerini güvenilir biçimde algılayabildiğini göstermektedir. Sensörün düşük seviyeli manyetik alan değişimlerine karşı düzenli ve kararlı cevap vermesi, PZT tabanlı manyetoelektrik sensörlerde yüksek hassasiyet elde edilebildiğini gösteren literatürle uyumludur. Özellikle Sun ve arkadaşlarının (2023) çalışmasında nT düzeyine yakın çözünürlük verilmesi ve Shen ve arkadaşlarının (2018) küçük DC manyetik alan değişimlerinin algılanabildiğini göstermesi, burada elde edilen sonuçların literatür açısından makul ve desteklenebilir olduğunu göstermektedir. Bu nedenle AFŞ/PZT/AFŞ yapısının zayıf manyetik alan değişimlerini algılama açısından başarılı bir davranış sergilediği söylenebilir.



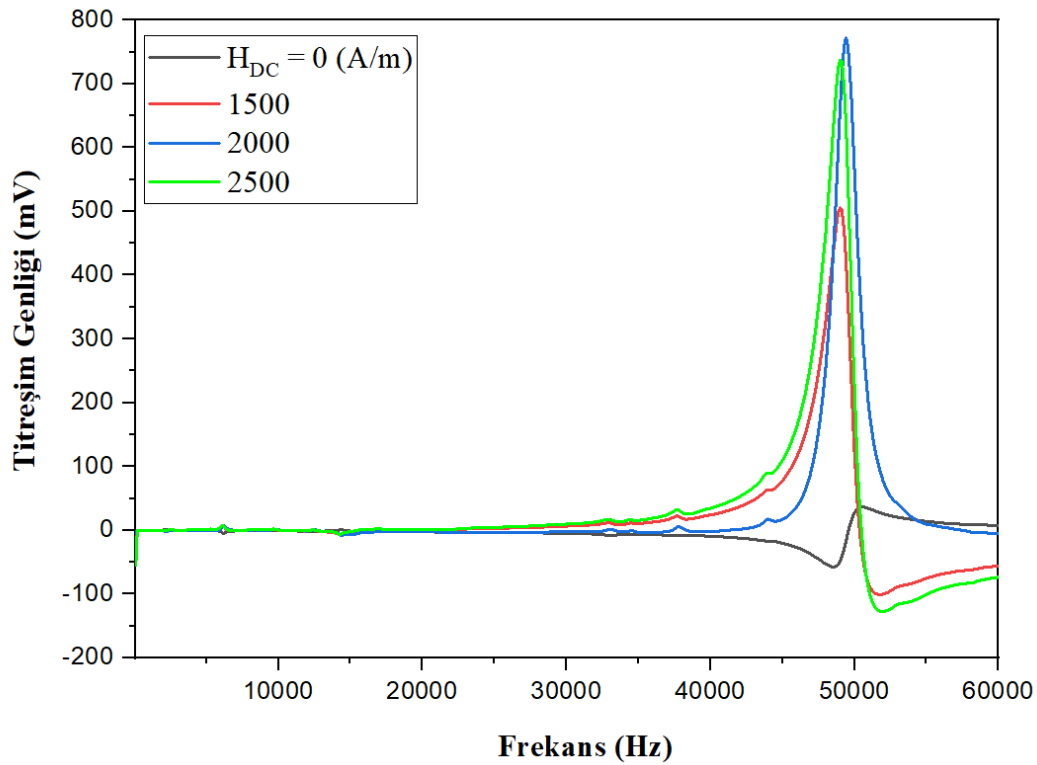
Şekil 4.18. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde mıknatısın oluşturduğu manyetik alanın çıkış gerilimi üzerindeki etkisi.

Şekil 4.18’de 40 mm × 20 mm × 4 mm boyutlarındaki dikdörtgen mıknatısın sensörden yaklaşık 400 cm uzaklıkta döndürülmesi sonucu PZT tabanlı sensör çıkış geriliminde meydana gelen değişim gösterilmektedir. Sensörün bulunduğu noktadaki manyetik akı yoğunluğu, dikdörtgen mıknatısın merkez eksenı boyunca oluşturduğu alanı veren Denklem (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır (Furlani, 2001). Grafik incelendiğinde, mıknatısın yön değiştirmesine bağlı olarak çıkış geriliminde belirgin ve tekrarlanabilir değişimler olduğu görülmektedir.

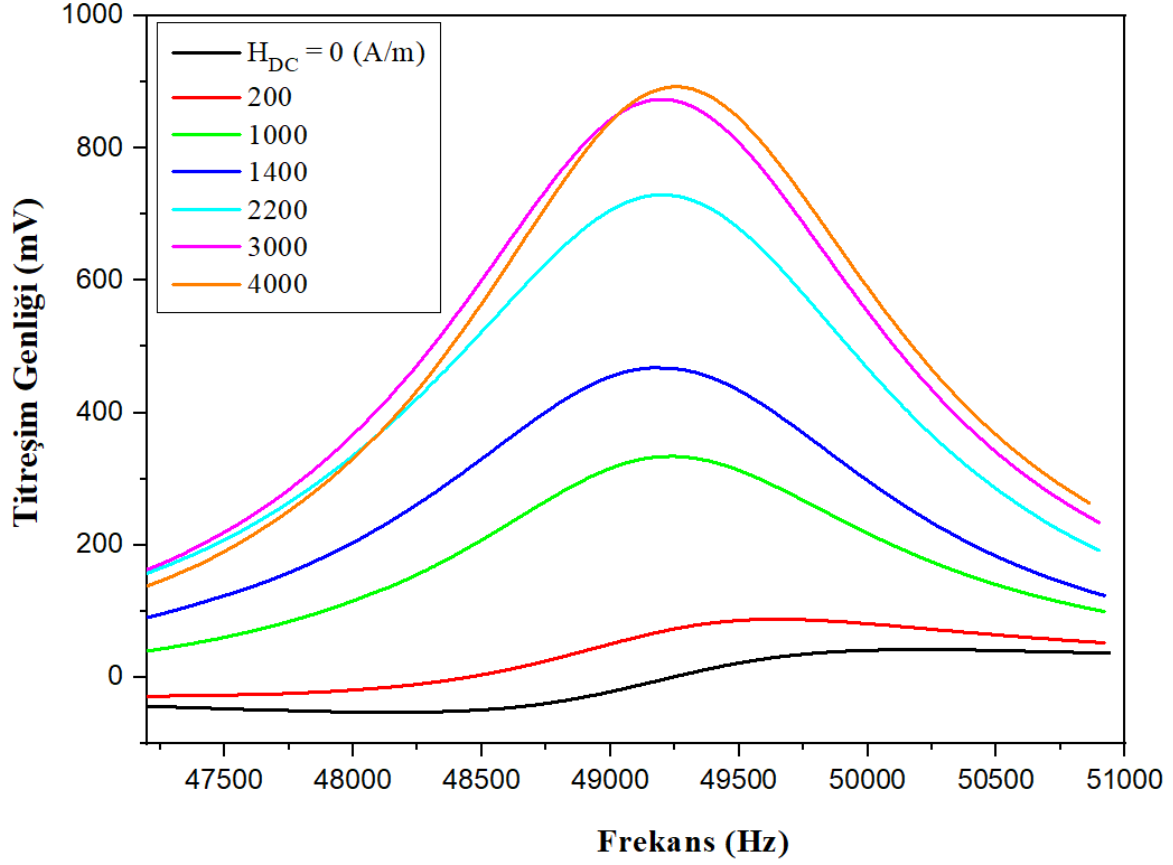
Yaklaşık 9.4 nT seviyesindeki manyetik alan değişiminin ölçülebilir bir gerilim farkı oluşturduğu gözlenmiştir. Gerilim değerlerinin yeni seviyede kararlı şekilde sabit kalması, sensörün uzak mesafeden gelen zayıf manyetik alan değişimlerine karşı duyarlı ve stabil bir cevap verdiğini göstermektedir.

$$B(z) = \frac{(B_r)}{\pi} \left[\arctan \left(\frac{LW}{2z \sqrt{(4z^2 + L^2 + W^2)}} \right) - \arctan \left(\frac{(LW)}{2(D+z) \sqrt{(4(D+z)^2 + L^2 + W^2)}} \right) \right] \quad (4.1)$$

Burada $B(z)$, mıknatıs yüzeyinden zuzaklıktaki manyetik akı yoğunluğunu, B_r mıknatısın remanans değerini, L mıknatısın uzunluğunu, W genişliğini ve D ise kalınlığını ifade etmektedir. (Furlani, 2001) .

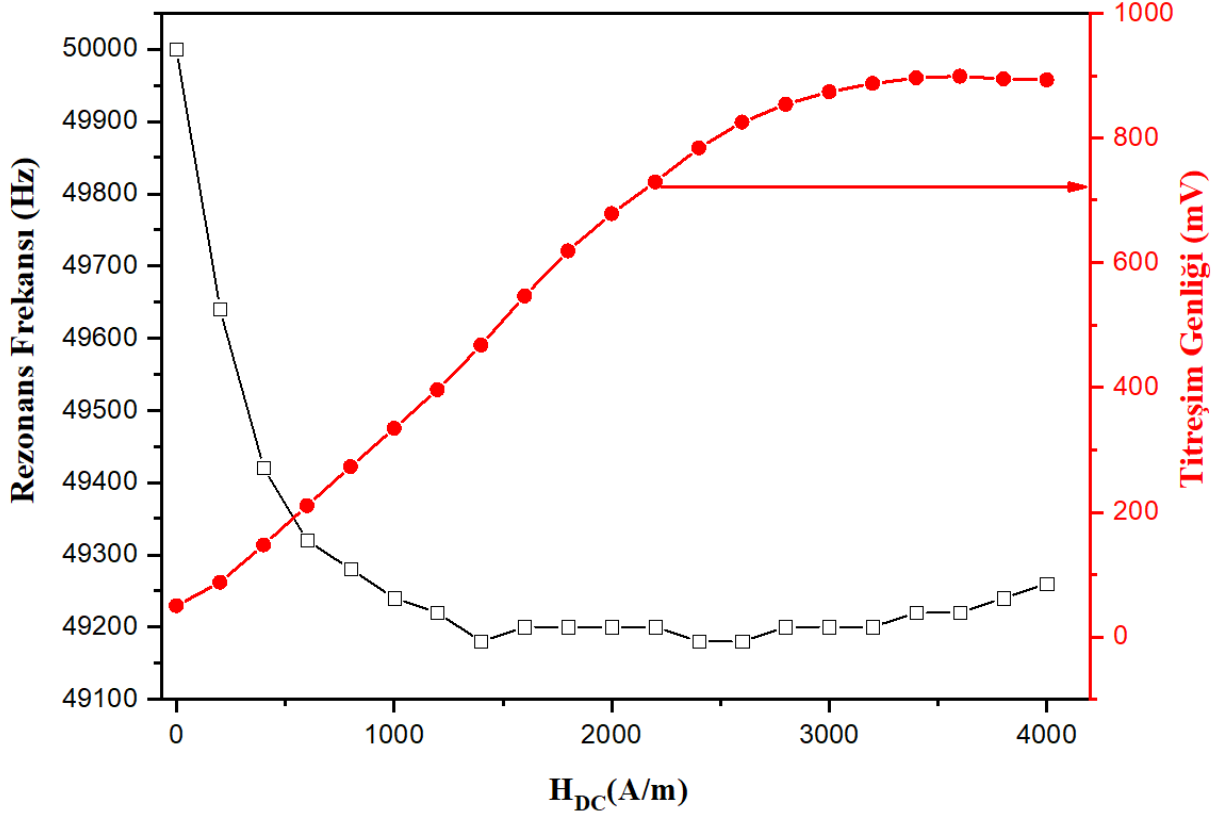


Şekil 4.19. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörün geniş frekans aralığında titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.



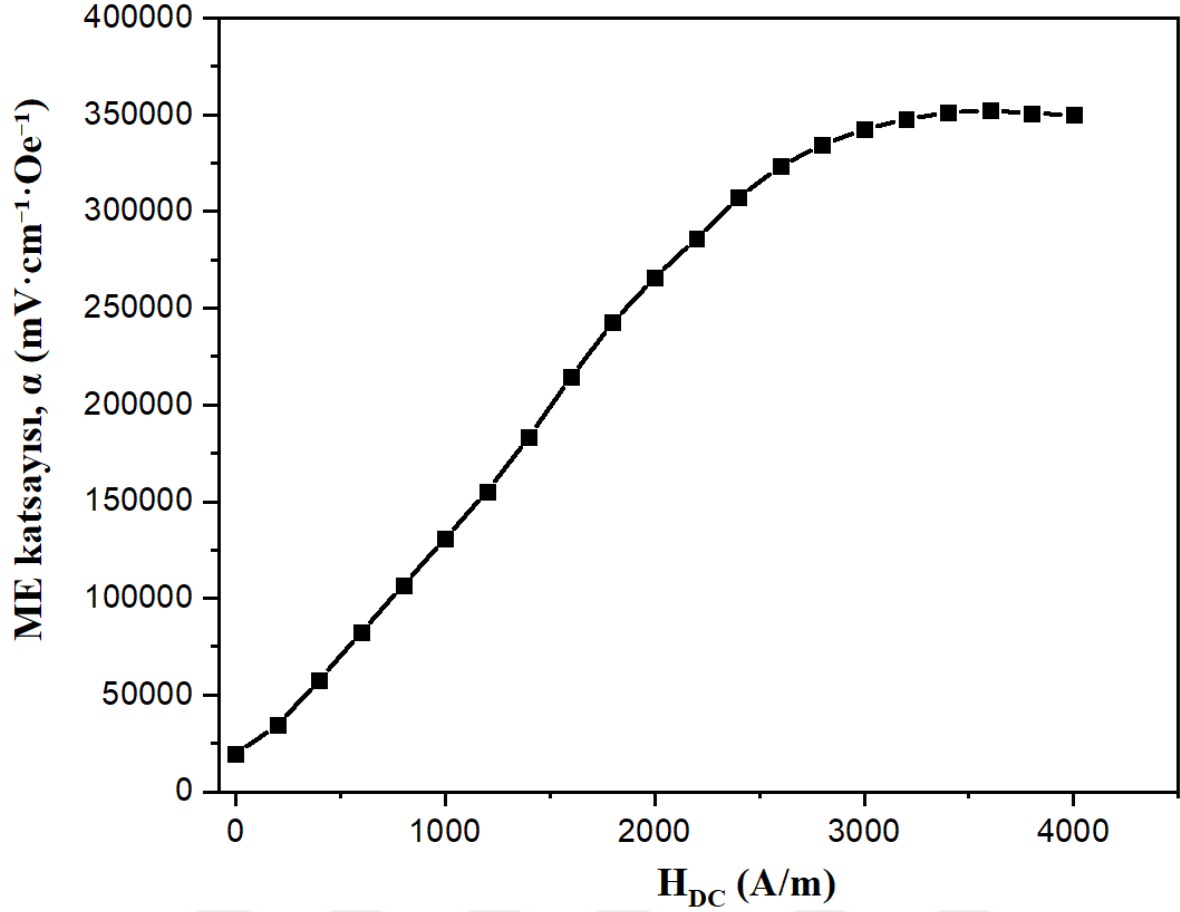
Şekil 4.20. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörün rezonans frekansı çevresinde titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.

Şekil 4.19’da Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörün geniş frekans aralığındaki davranışı gösterilmektedir. Grafikte sensörün yaklaşık 49 kHz civarında belirgin bir rezonans tepesi oluşturduğu görülmektedir. DC manyetik alan değerinin değişmesi, rezonans genliğini doğrudan etkilemektedir. Bu durum sensörün manyetik alan değişimlerine duyarlı olduğunu göstermektedir. Şekil 4.20’de ise sensörün rezonans frekansı çevresindeki ayrıntılı davranışı verilmiştir. Grafikte sensörün rezonans frekansının yaklaşık 49 kHz olduğu görülmektedir. Farklı DC manyetik alan değerlerinde titreşim gerilimi genliğinin belirgin şekilde değiştiği gözlenmektedir. DC manyetik alan arttıkça rezonans tepe genliğinin arttığı ve daha yüksek gerilim değerlerine ulaşıldığı görülmektedir.



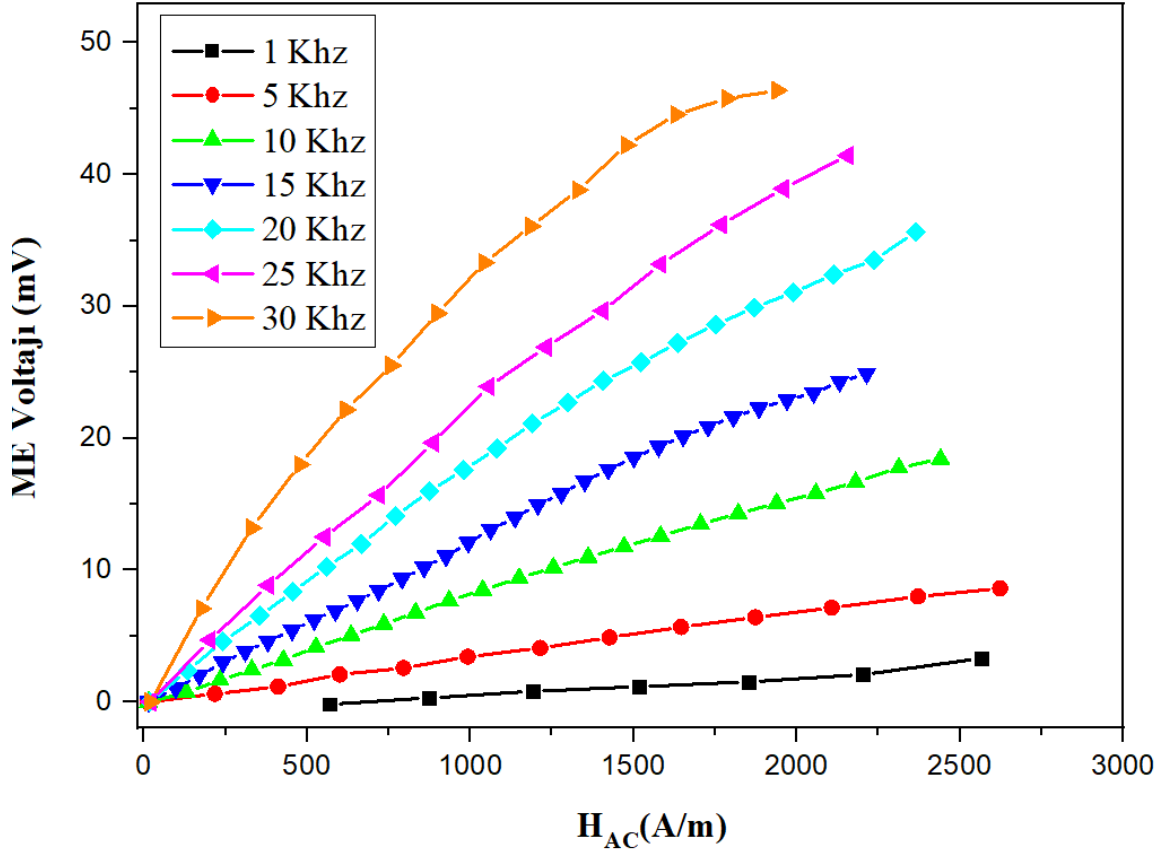
Şekil 4.21. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alana bağlı olarak rezonans frekansı ve titreşim geriliminin değişimi

Şekil 4.21’de DC manyetik alanın artmasına bağlı olarak rezonans frekansı ve titreşim genliğinin değişimi birlikte gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, DC manyetik alan arttıkça titreşim genliğinin belirli bir değere kadar yükseldiği ve daha sonra doyum eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu durum, manyetoelektrik etkinin belirli bir DC alan aralığında güçlendiğini göstermektedir. Rezonans frekansının ise düşük DC alan değerlerinde hızlı bir değişim gösterdiği, daha yüksek alanlarda ise daha kararlı bir davranış sergilediği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, DC manyetik alanın sensörün hem rezonans frekansını hem de çıkış genliğini etkilediğini ve maksimum genliğin elde edildiği alan değerinin sensör için uygun çalışma noktası olduğunu ortaya koymaktadır. Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısında elde edilen sonuçlar, kullanılan manyetostriktif katman farklı olsa da PZT tabanlı tabakalı manyetoelektrik sensörlerde rezonans cevabının ve DC bias alan etkisinin belirgin olduğunu gösteren literatürle genel olarak uyumludur. Özellikle sensör cevabının belirli bir DC alan aralığında güçlenmesi ve rezonans davranışının DC alanla değişmesi, PZT tabanlı yapılarda bildirilen genel eğilimle benzerlik göstermektedir. Bu yüzden Vacodur49 katmanlı yapının da bias alan ile ayarlanabilen bir manyetoelektrik davranış sergilediği söylenebilir.



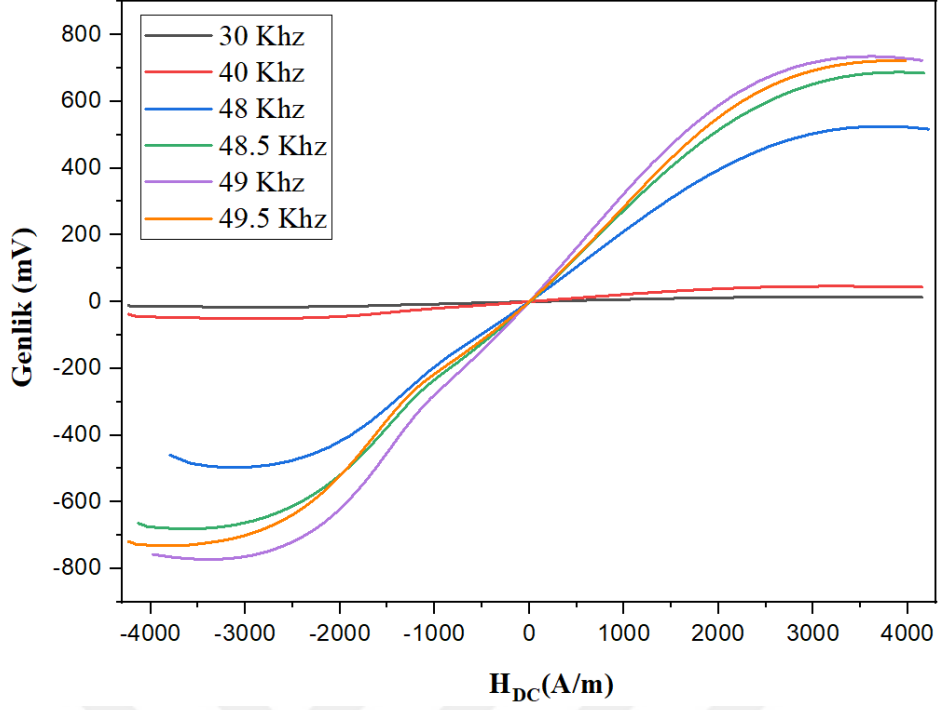
Şekil 4.22. Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörde ME katsayısının DC manyetik alan H_{DC} ile değişimi.

Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörde, DC manyetik alan arttıkça ME katsayısının düzenli olarak yükseldiği görülmektedir. Düşük ve orta alan bölgelerinde bu artış daha belirgin, yaklaşık 3000–3500 A/m civarında ME katsayısı maksimum değerine ulaşmakta ve daha sonra doyum eğilimi göstermektedir. Bu durum, uygulanan DC bias alanının manyetostriktif katmanın piezomanyetik cevabını artırdığını, ancak daha yüksek alanlarda malzemenin doyumluğa yaklaşmasıyla artışın sınırlı kaldığını göstermektedir. Sonuç olarak, sensörün en yüksek manyetoelektrik yanıtı belirli bir optimum DC manyetik alan aralığında elde edilmiştir. ME katsayısının DC manyetik alan arttıkça yükselmesi ve daha sonra doyum eğilimi göstermesi, literatürde verilen optimum bias alan davranışıyla uyumludur. Özellikle PVDF ve PZT tabanlı tabakalı yapılarda manyetoelektrik cevabın belirli bir DC alan aralığında en yüksek değere ulaştığı bildirilmektedir. Buradaki sonuçlar da benzer şekilde, sensörün en güçlü cevabının rastgele değil belirli bir çalışma aralığında ortaya çıktığını göstermektedir.

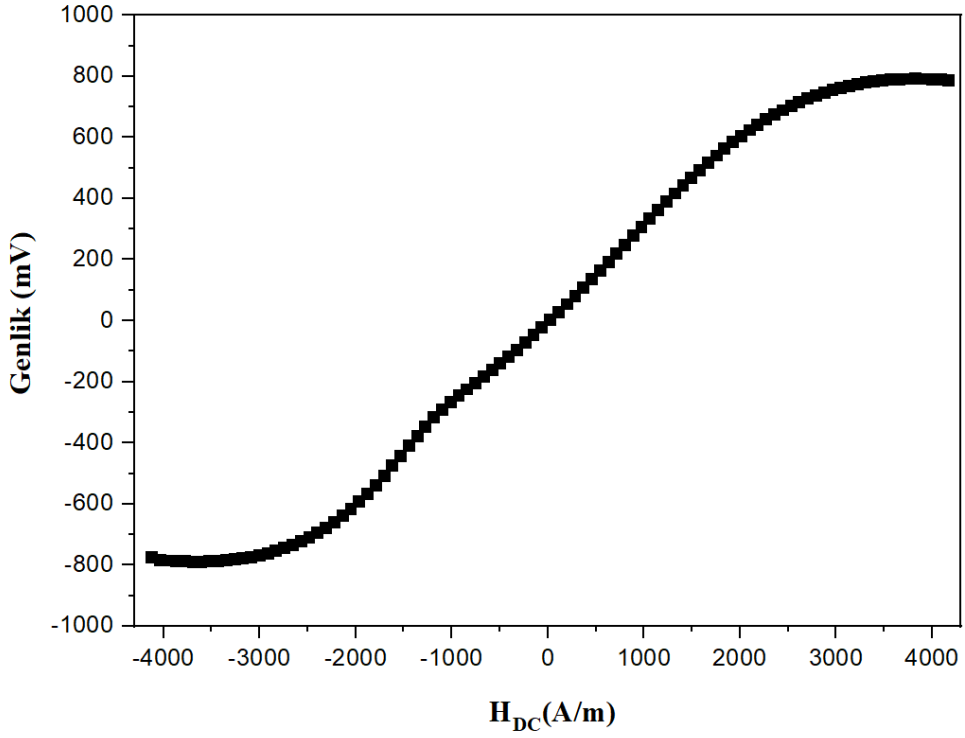


Şekil 4.23. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörde ME voltajının AC manyetik alan genliğine bağlı olarak farklı frekanslardaki değişimi.

Şekil 4.23’de sensörün manyetoelektrik (ME) voltajının AC manyetik alan genliğine bağlı değişimi farklı frekanslarda gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, tüm frekanslarda AC manyetik alan arttıkça ME voltajının artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum, sensörün AC manyetik alan genliğine karşı doğrusal bir tepki verdiğini göstermektedir. Frekans arttıkça elde edilen ME voltajının da yükseldiği dikkat çekmektedir. Özellikle yüksek frekanslarda daha büyük gerilim değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuç, sensörün frekansa bağlı olarak artan bir manyetoelektrik cevaba sahip olduğunu ve belirli frekans aralıklarında daha yüksek hassasiyet gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuç, AC manyetik alan genliği ile birlikte frekansın da sensör çıkışını belirgin şekilde etkilediğini gösteren literatürle uyumludur. Özellikle frekans arttıkça cevabın güçlenmesi, Turutin ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında verilen frekans bağımlı manyetoelektrik davranışla benzerlik göstermektedir. Bu durum, Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısında da frekans seçiminin sensör performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

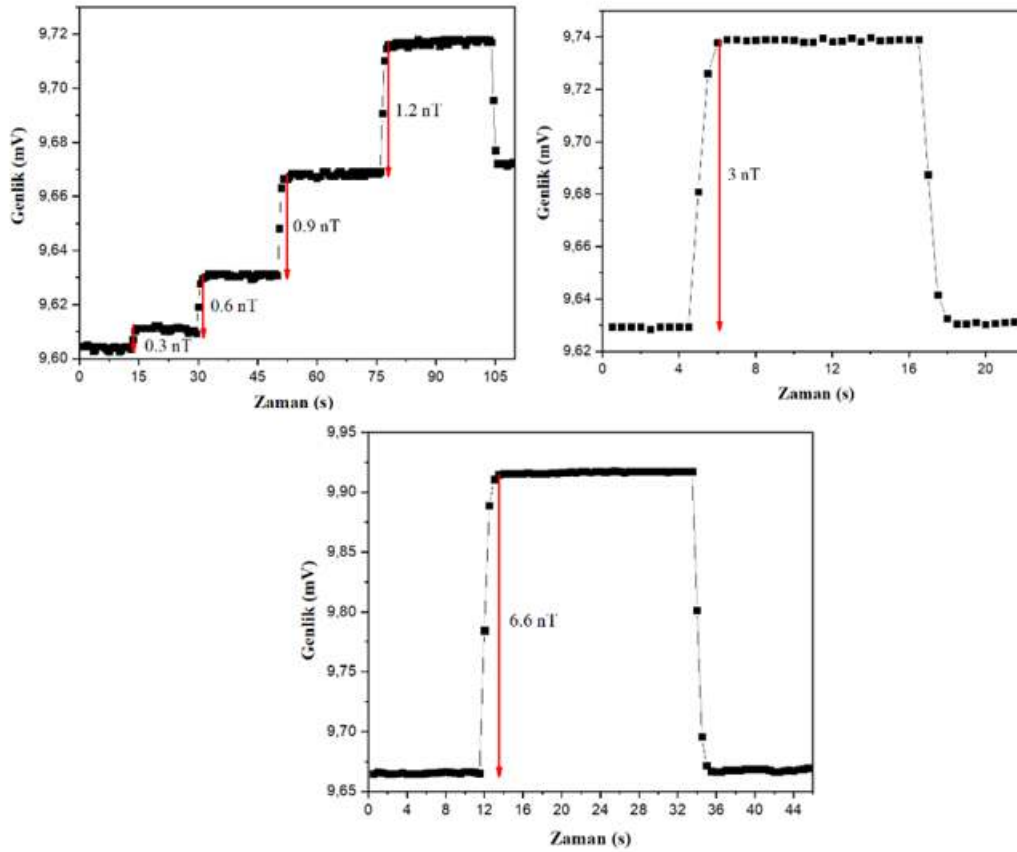


Şekil 4.24. Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alanın farklı frekanslarda gerilim genliği üzerindeki etkisi.



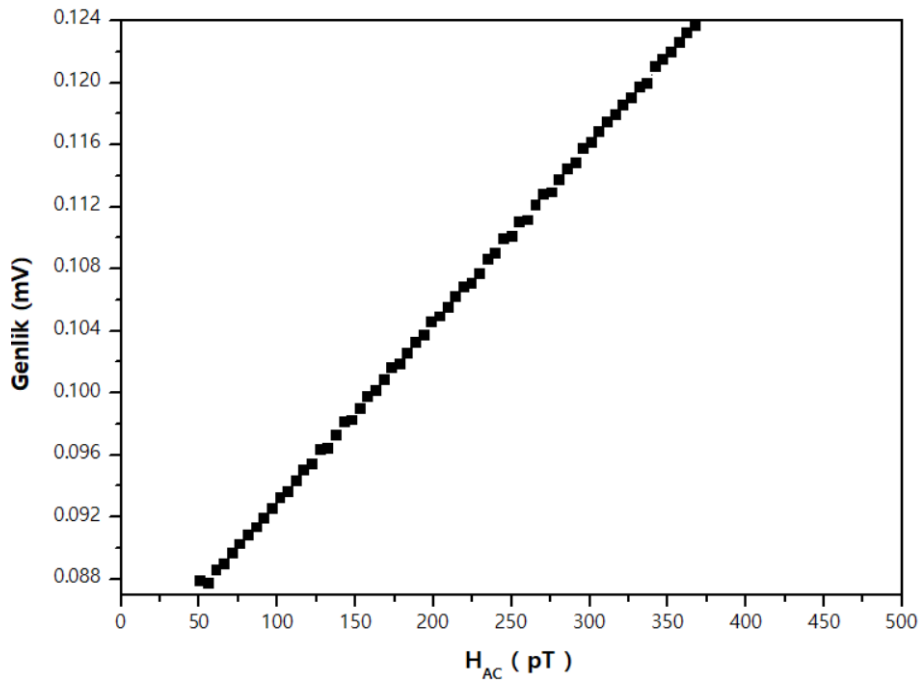
Şekil 4.25. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörde rezonans frekansında DC manyetik alanın gerilim genliği üzerindeki etkisi.

Şekil 4.24'de DC manyetik alanın sensör çıkış gerilimi üzerindeki etkisi farklı frekanslarda gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, rezonansa yakın frekanslarda gerilim genliğinin DC manyetik alanla birlikte belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Düşük frekanslarda ise gerilim değişimi oldukça sınırlı kalmaktadır. Bu durum, manyetoelektrik etkinin rezonans bölgesinde daha güçlü olduğunu göstermektedir. Şekil 4.25'de rezonans frekansında DC manyetik alanın etkisi daha net bir şekilde görülmektedir. Gerilim genliği DC manyetik alanın artmasıyla birlikte yükselmekte ve belirli bir aralıkta maksimum değerlere ulaşmaktadır. DC manyetik alanın sensör çıkışını özellikle rezonans frekansında daha belirgin etkilemesi, literatürde verilen bias alan–rezonans ilişkisiyle uyumludur. PZT tabanlı yapılarda bildirilen çalışmalarda da, rezonans civarında sensör cevabının DC alan değişimlerine daha hassas olduğu görülmektedir. Buradaki sonuçlar da Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısında benzer bir durumun bulunduğunu ve sensörün uygun bias alanla daha verimli çalıştırılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.26. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörün duyarlılığını belirlemek amacıyla zamana bağlı gerilim değişimi verilmiştir.

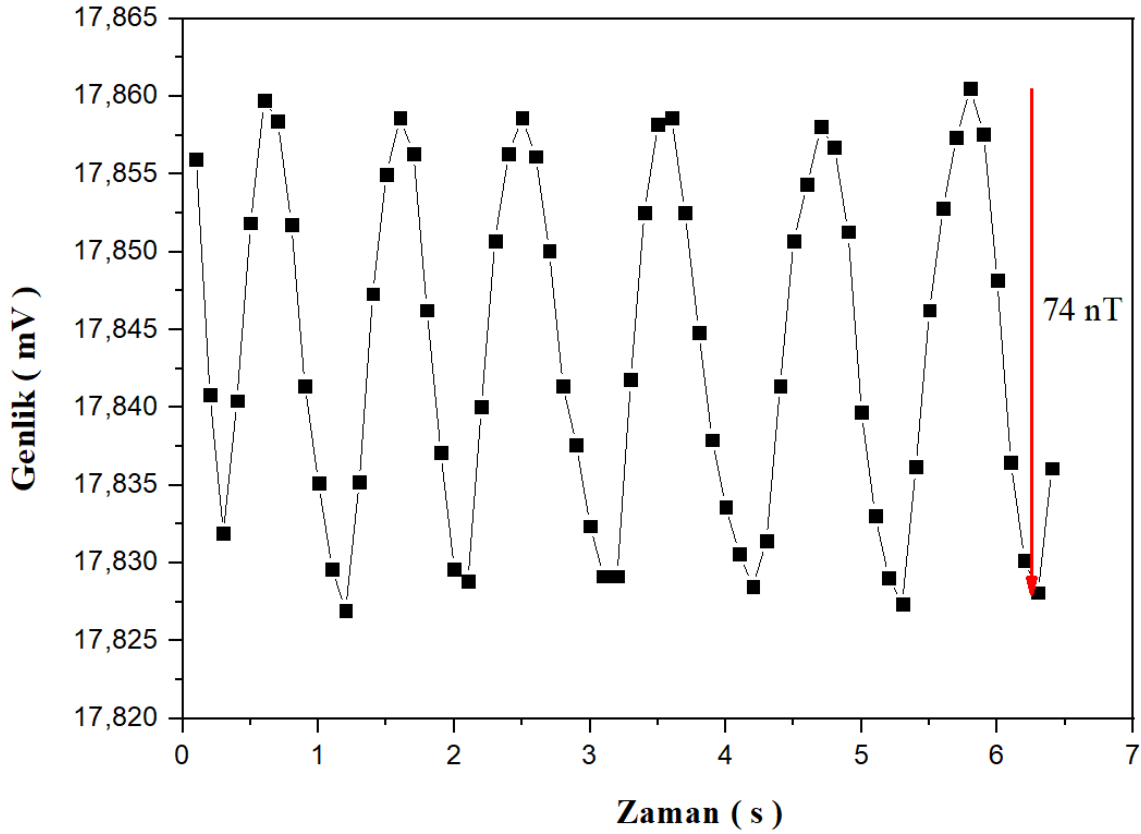
Şekil 4.26'da sensörün duyarlılığını belirlemek amacıyla zamana bağlı gerilim değişimi gösterilmiştir. Grafiklerde uygulanan nanoTesla seviyesindeki manyetik alan değişimlerine karşı sensör çıkış geriliminde basamaklı ve belirgin değişimler olduğu görülmektedir. Küçük manyetik alan artışlarının ölçülebilir gerilim farkları oluşturması, sensörün yüksek hassasiyete sahip olduğunu göstermektedir. Gerilim seviyelerinin uygulanan alan değişiminden sonra kararlı bir şekilde sabit kalması, sensörün stabil ve tekrarlanabilir bir cevap verdiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, sensörün düşük seviyeli manyetik alan değişimlerini algılayabildiğini ve hassas ölçüm uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir. Elde edilen hassasiyet sonuçları, PZT tabanlı manyetoelektrik sensörlerin çok zayıf manyetik alan değişimlerini algılayabildiğini gösteren literatürle uyumludur. Literatürde özellikle Sun ve arkadaşlarının (2023) çalışması ile Shen ve arkadaşlarının (2018) sonuçları, bu tür yapıların düşük alan değişimlerine duyarlı olduğunu göstermektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, Vacodur49/PZT/Vacodur49 sensörünün de hassas algılama uygulamaları için uygun bir potansiyele sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 4.27. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörün çıkış gerilimi cevabının uygulanan H_{AC} manyetik alanına bağlı değişimi.

Şekil 4.27'de, $H_{DC}=0$ koşulunda uygulanan AC manyetik alanın sensörün çıkış gerilimi üzerindeki etkisi görülmektedir. H_{AC} değeri yaklaşık 50 pT'den 370–380 pT aralığına doğru arttıkça, sensör çıkış genliği de yaklaşık 0.088 mV'den 0.124 mV seviyesine kadar yükselmektedir. Ölçüm noktalarının düzgün ve yaklaşık doğrusal bir eğilim göstermesi, sensörün DC bias alan uygulanmadan da zayıf AC manyetik alan değişimlerine kararlı bir şekilde yanıt verdiğini göstermektedir. Ayrıca sensör için

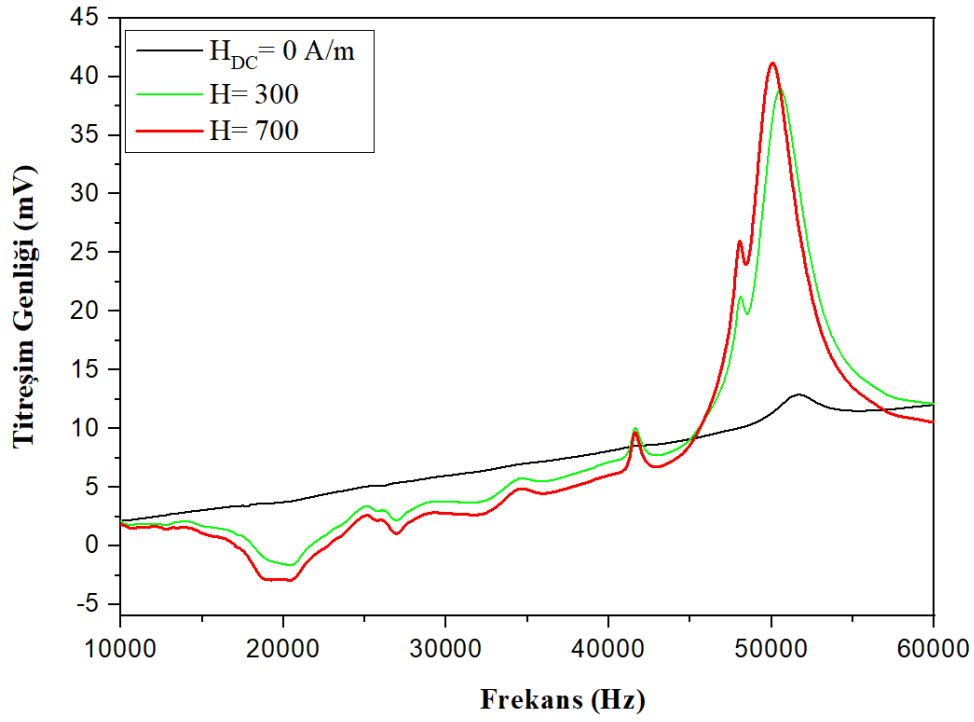
minimum algılanabilir AC manyetik alanın 100 pT düzeyinde olması, yapının çok düşük manyetik alanların tespitinde yeterli hassasiyete sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, sensörün lineerlik ve kararlılık açısından başarılı bir performans sergilediğini göstermektedir.



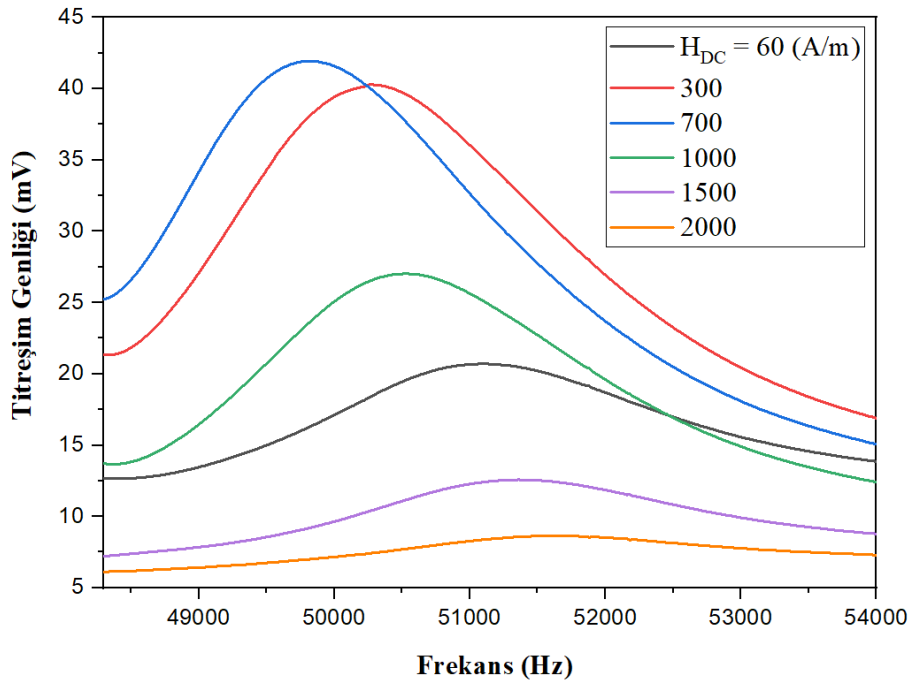
Şekil 4.28. Vacodur49/PZT/ Vacodur49 yapısına sahip manyetoelektrik sensörde mıknatısın oluşturduğu manyetik alanın çıkış gerilimi üzerindeki etkisi.

Şekil 4.28’de 40 mm × 20 mm × 4 mm boyutlarındaki dikdörtgen mıknatısın sensörden yaklaşık 380 cm uzaklıkta döndürülmesi sonucu çıkış geriliminde meydana gelen değişim gösterilmektedir. Sensörün bulunduğu noktadaki manyetik akı yoğunluğu, dikdörtgen mıknatısın merkez eksenini boyunca oluşturduğu alanı veren Denklem (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır. Grafik incelendiğinde, mıknatısın hareketine bağlı olarak sensör çıkışında düzenli ve tekrarlanabilir gerilim değişimleri olduğu görülmektedir. Yaklaşık 74 nT seviyesindeki manyetik alan değişiminin ölçülebilir bir gerilim farkı oluşturduğu gözlenmiştir. Gerilim değerlerinin belirli aralıklarda kararlı şekilde değişmesi, sensörün uzak mesafeden kaynaklanan zayıf manyetik alan değişimlerine karşı duyarlı ve stabil bir cevap verdiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, sensörün metreler mertebesindeki mesafelerden oluşan nanoTesla seviyesindeki manyetik alan değişimlerini algılayabildiğini ortaya koymaktadır.

4.2.2.1. 28 µm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörün ölçüm sonuçları

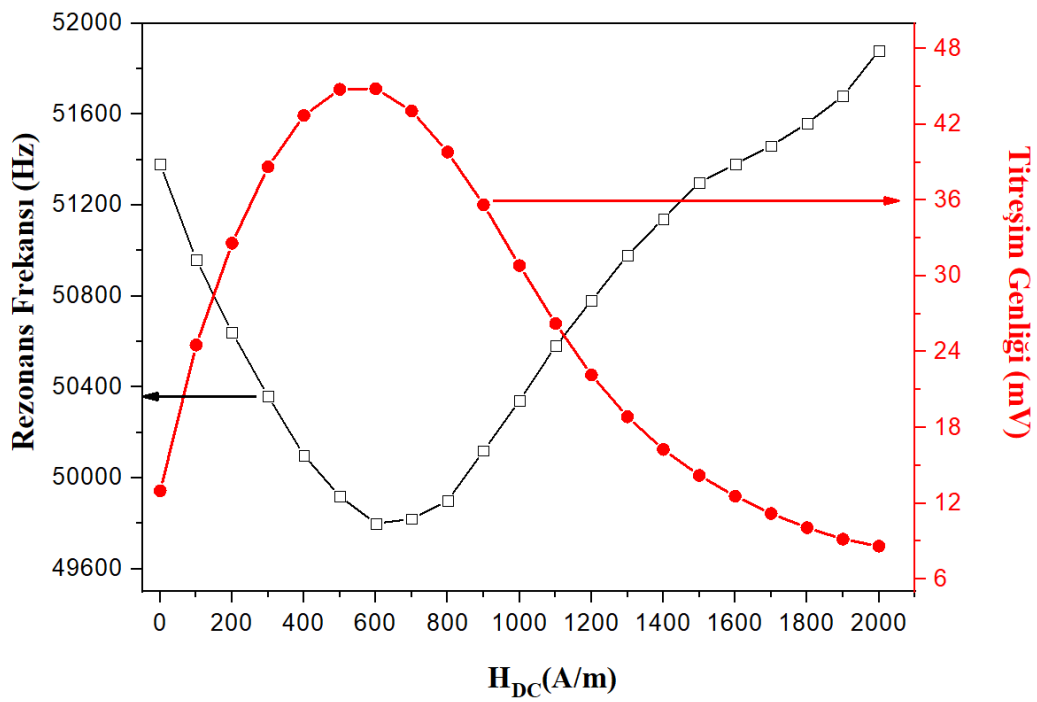


Şekil 4.29. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün geniş frekans aralığında titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.



Şekil 4.30. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün rezonans frekansı çevresinde titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.

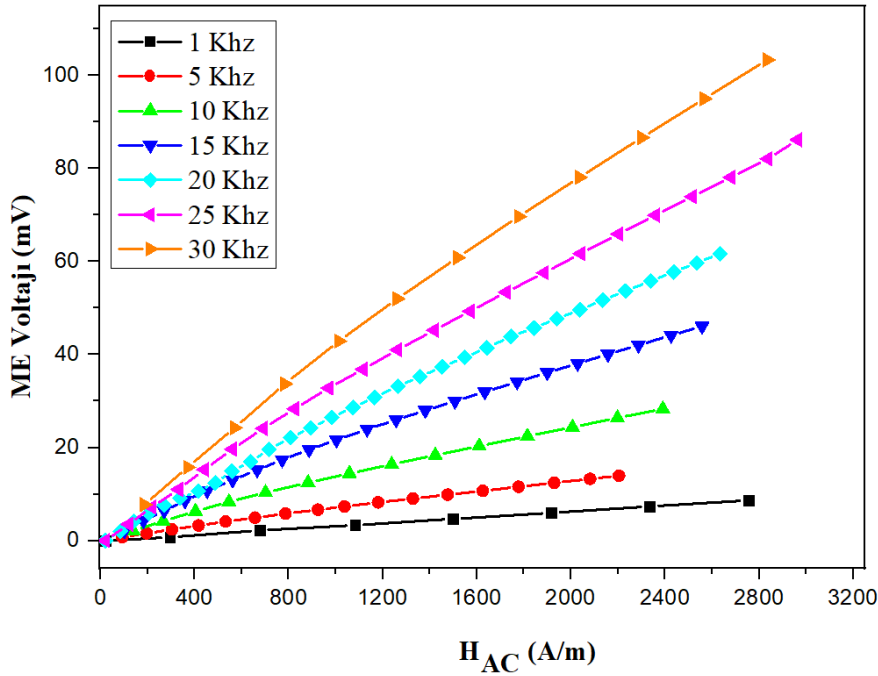
Şekil 4.29’da sensörün geniş frekans aralığında (10–60 kHz) yapılan tarama sonucu elde edilen gerilim değişimi, Şekil 4.30’da ise sensörün rezonans frekansı çevresindeki dar frekans aralığındaki davranışı gösterilmektedir. Geniş frekans taramasında yaklaşık 50 kHz civarında belirgin bir rezonans bölgesi olduğu görülmektedir. Dar aralıkta yapılan ölçümlerde ise bu rezonans tepesinin daha net ve ayrıntılı şekilde ortaya çıktığı gözlenmektedir. DC manyetik alan uygulanmadığında genlik düşük kalırken, 300 A/m ve 700 A/m değerlerinde rezonans genliğinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. En yüksek genlik 700 A/m değerinde elde edilmiştir. Bu sonuçlar, 28 μ m kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörde manyetoelektrik etkinin DC manyetik alan ile güçlendiğini ve rezonans bölgesinde maksimum elektriksel çıktının elde edildiğini göstermektedir



Şekil 4.31. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alana bağlı olarak rezonans frekansı ve titreşim geriliminin değişimi

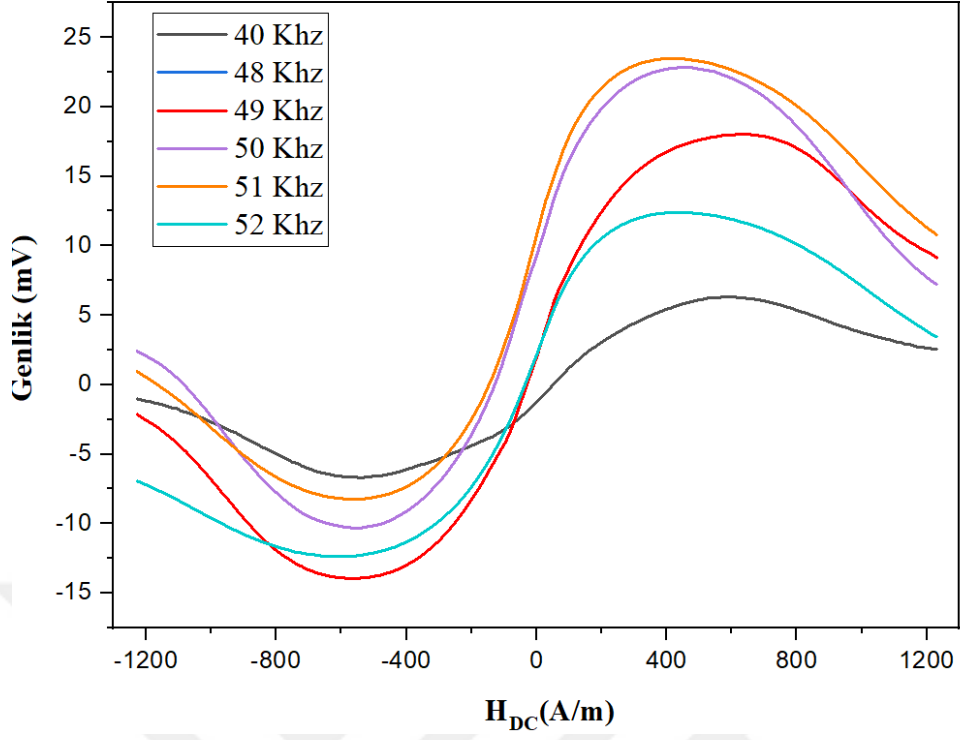
Şekil 4.31’de DC manyetik alanın artmasına bağlı olarak rezonans frekansı ve titreşim genliğinin değişimi birlikte gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, titreşim genliğinin DC manyetik alan arttıkça önce yükseldiği ve yaklaşık 500–600 A/m civarında maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Bu noktadan sonra DC manyetik alanın artmasıyla genlik azalmaktadır. Bu durum, manyetoelektrik etkinin belirli bir bias alan değerinde en yüksek seviyeye ulaştığını göstermektedir. Rezonans frekansının ise DC manyetik alana bağlı olarak değiştiği, düşük alanlarda azaldığı ve daha yüksek alanlarda tekrar artış eğilimi gösterdiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, PVDF tabanlı sensörde hem rezonans frekansının hem de çıkış genliğinin DC manyetik alan ile ayarlanabildiğini ve optimum bir çalışma alanı bulunduğunu göstermektedir. Bu bulgular, PVDF tabanlı tabakalı manyetoelektrik yapılarda cevabın

rezonans bölgesinde belirginleştğini bildiren literatürle uyumludur. Özellikle Reis ve arkadaşlarının (2016a) ve Zhai ve arkadaşlarının (2006) Metglas/PVDF tabanlı yapılarda rezonans çevresinde güçlü bir cevap elde edildiğini göstermesi, burada 28 μm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörde gözlenen davranışla benzerlik göstermektedir. Ayrıca sensör cevabının belirli bir DC manyetik alan aralığında daha güçlü hâle gelmesi, Reis ve arkadaşlarının (2016a; 2016b) çalışmalarında verilen optimum bias alan davranışını destekler niteliktedir. Bu nedenle 28 μm kalınlığındaki yapının literatürdeki PVDF tabanlı sensörlerle uyumlu bir eğilim sergilediği söylenebilir.

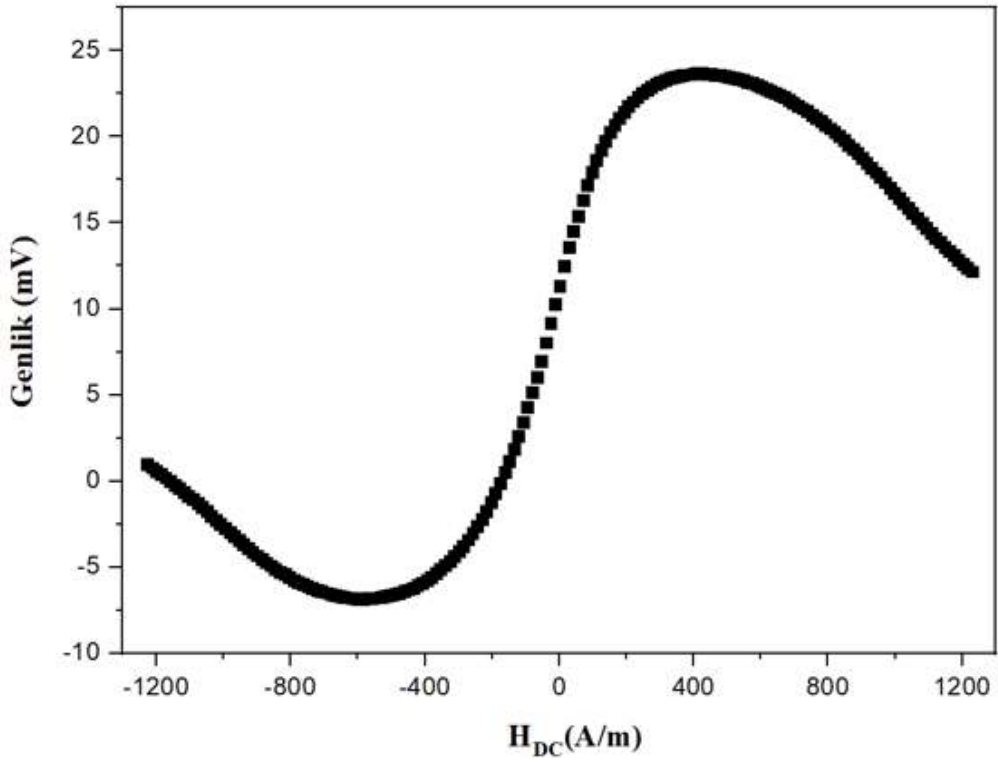


Şekil 4.32. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde ME voltajının AC manyetik alan genliğine bağlı olarak farklı frekanslardaki değişimi.

Şekil 4.32’de PVDF tabanlı sensörün 1 kHz–30 kHz frekans aralığında AC manyetik alan H_{AC} genliğine bağlı olarak manyetoelektrik (ME) voltaj değişimi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde tüm frekanslarda AC manyetik alan arttıkça ME voltajının yaklaşık doğrusal şekilde arttığı görülmektedir. Ayrıca frekans yükseldikçe elde edilen gerilim değerinin de arttığı dikkat çekmektedir. En yüksek ME voltajı 30 kHz’de elde edilmiştir. Bu sonuçlar, PVDF tabanlı sensörün hem AC manyetik alan genliğine hem de çalışma frekansına bağlı olarak artan bir manyetoelektrik cevaba sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, PVDF tabanlı yapılarda frekansın ve AC manyetik alan genliğinin manyetoelektrik cevabı etkilediğini gösteren literatürle uyumludur. Özellikle Zhang ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında frekansın manyetoelektrik cevap üzerindeki etkisi açık şekilde gösterilmiştir. Burada da frekans yükseldikçe daha güçlü çıkış elde edilmesi, 28 μm kalınlığındaki PVDF sensörün literatürde bildirilen genel eğilime uygun davrandığını göstermektedir.

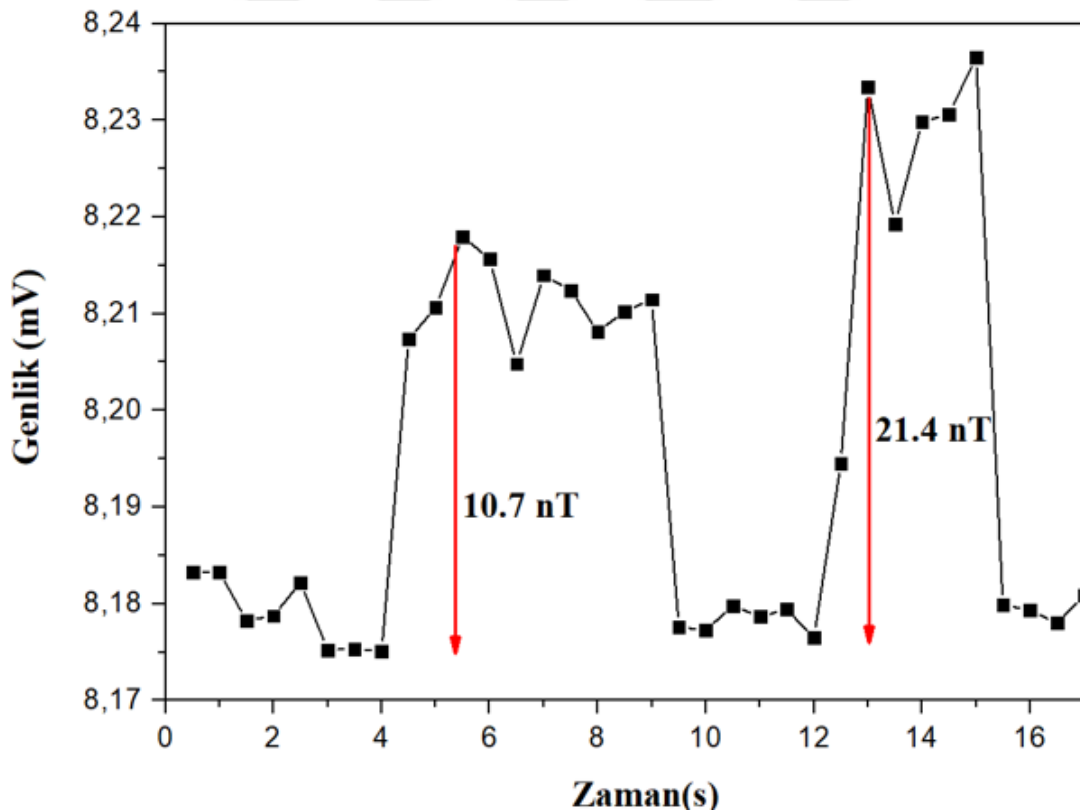


Şekil 4.33. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alanın farklı frekanslarda gerilim genliği üzerindeki etkisi.



Şekil 4.34. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde rezonans frekansında DC manyetik alanın gerilim genliği üzerindeki etkisi.

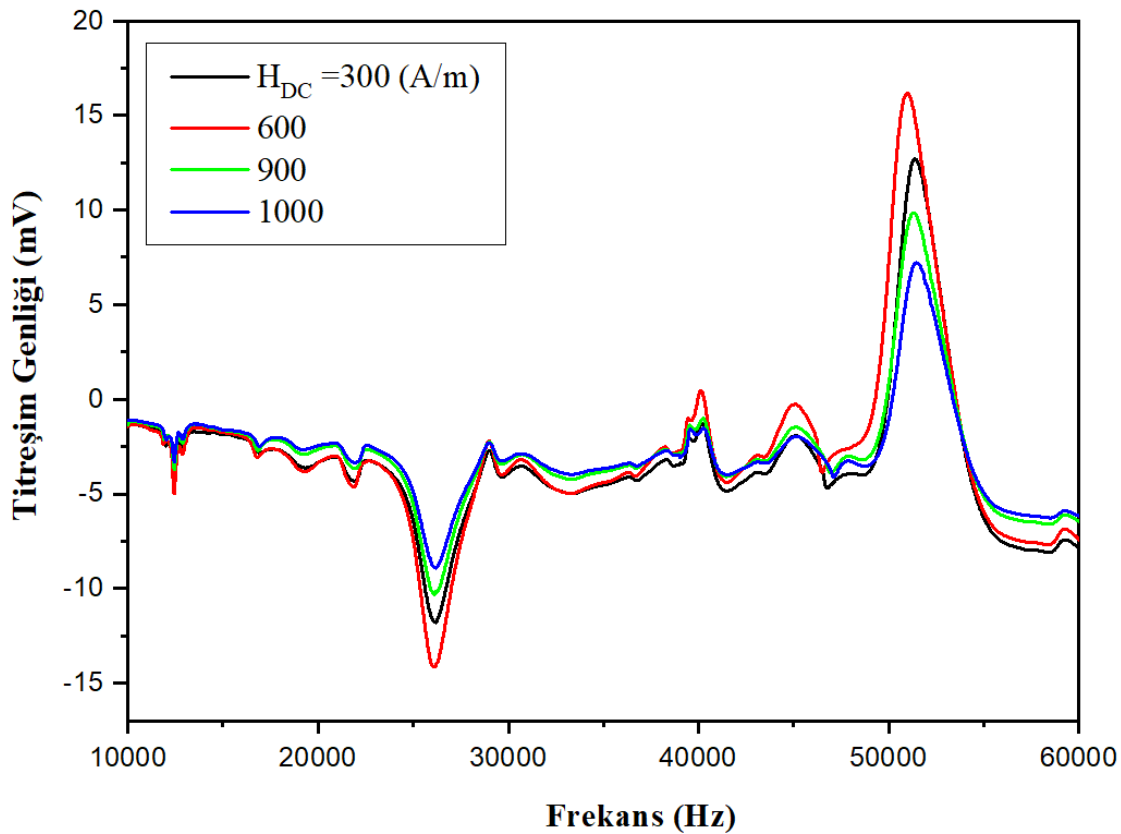
Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’de 28 μm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörde DC manyetik alanın gerilim genliği üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Şekil 4.33’de farklı frekanslarda DC manyetik alanın etkisi incelenmiş ve gerilim genliğinin hem negatif hem de pozitif alan yönlerinde değişim gösterdiği görülmüştür. Frekans arttıkça maksimum gerilim değerinin yükseldiği ve özellikle 50–51.5 kHz civarında en yüksek genliklerin elde edildiği gözlenmektedir. Şekil 4.34’de ise rezonans frekansında ölçülen gerilim genliğinin DC manyetik alana bağlı değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde genliğin DC manyetik alan arttıkça belirli bir değere kadar yükseldiği, daha sonra ise azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, PVDF tabanlı sensörde manyetoelektrik etkinin hem çalışma frekansına hem de DC manyetik alana bağlı olduğunu ve optimum bir alan değerinde maksimum çıkış elde edildiğini göstermektedir. Burada elde edilen sonuçlar, PVDF tabanlı sensörlerde DC bias alanın çıkış gerilimini belirgin biçimde etkilediğini bildiren literatürle uyumludur. Reis ve arkadaşlarının (2016a; 2016b) çalışmalarında da cevabın belirli bir DC manyetik alan aralığında yükseldiği, daha sonra ise azalma ya da doyum eğilimi gösterdiği belirtilmiştir. Bu nedenle 28 μm kalınlığındaki PVDF sensörde gözlenen davranışın, literatürde verilen bias alan bağımlı manyetoelektrik cevap ile benzer bir karakter taşıdığı söylenebilir.



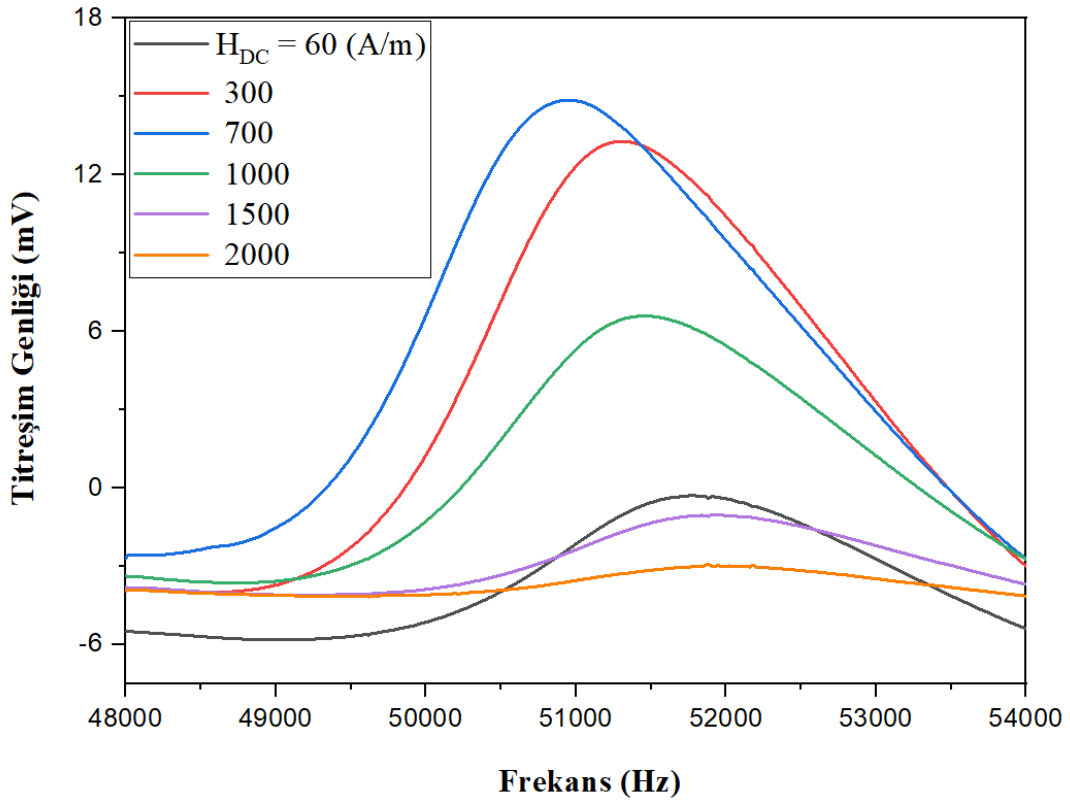
Şekil 4.35. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün duyarlılığını belirlemek amacıyla zamana bağlı gerilim değişimi .

Şekil 4.35’de sensörün zamana bağlı gerilim değişimi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde uygulanan küçük manyetik alan değişimlerine karşı çıkış geriliminde basamaklı artışlar olduğu görülmektedir. Yaklaşık 10.7 nT ve 21.4 nT seviyesindeki manyetik alan değişimlerinin ölçülebilir gerilim farkları oluşturduğu gözlenmiştir. Gerilim değerlerinin yeni seviyede kararlı şekilde sabit kalması, sensörün stabil ve tekrarlanabilir bir cevap verdiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, 28 µm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörün nanoTesla mertebesindeki düşük manyetik alan değişimlerini algılayabildiğini ve yüksek hassasiyete sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Sensörün nanoTesla mertebesindeki alan değişimlerine cevap vermesi, PVDF tabanlı manyetoelektrik sensörlerin düşük seviyeli manyetik alanları algılayabildiğini gösteren literatürle uyumludur. Özellikle Yang ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında düşük frekanslı alan algılama, Gutiérrez ve arkadaşlarının (2017) çalışmasında ise PVDF tabanlı yapılar için hassas alan ölçümü verilmiştir. Bu açıdan bakıldığında, 28 µm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörün de zayıf manyetik alan değişimlerine duyarlı olduğu söylenebilir.

4.2.2.2. 50 µm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörün ölçüm sonuçları

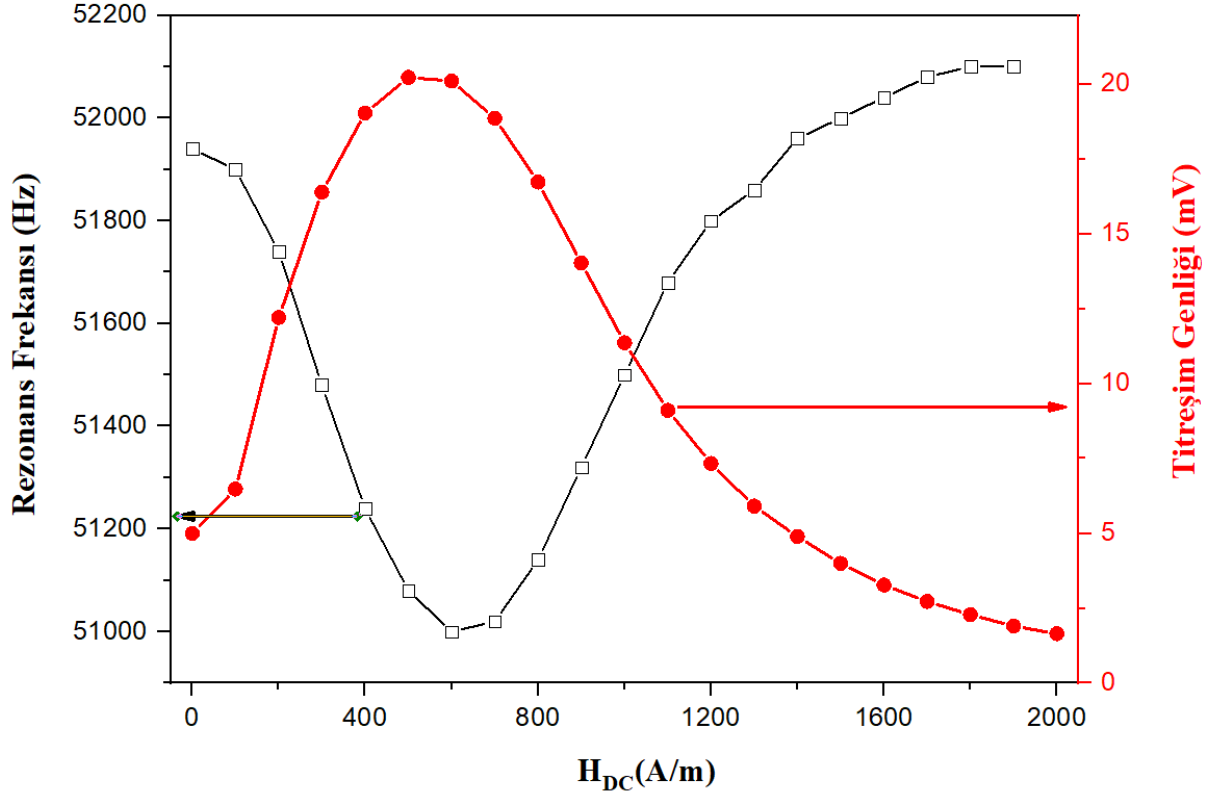


Şekil 4.36. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün geniş frekans aralığında titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.



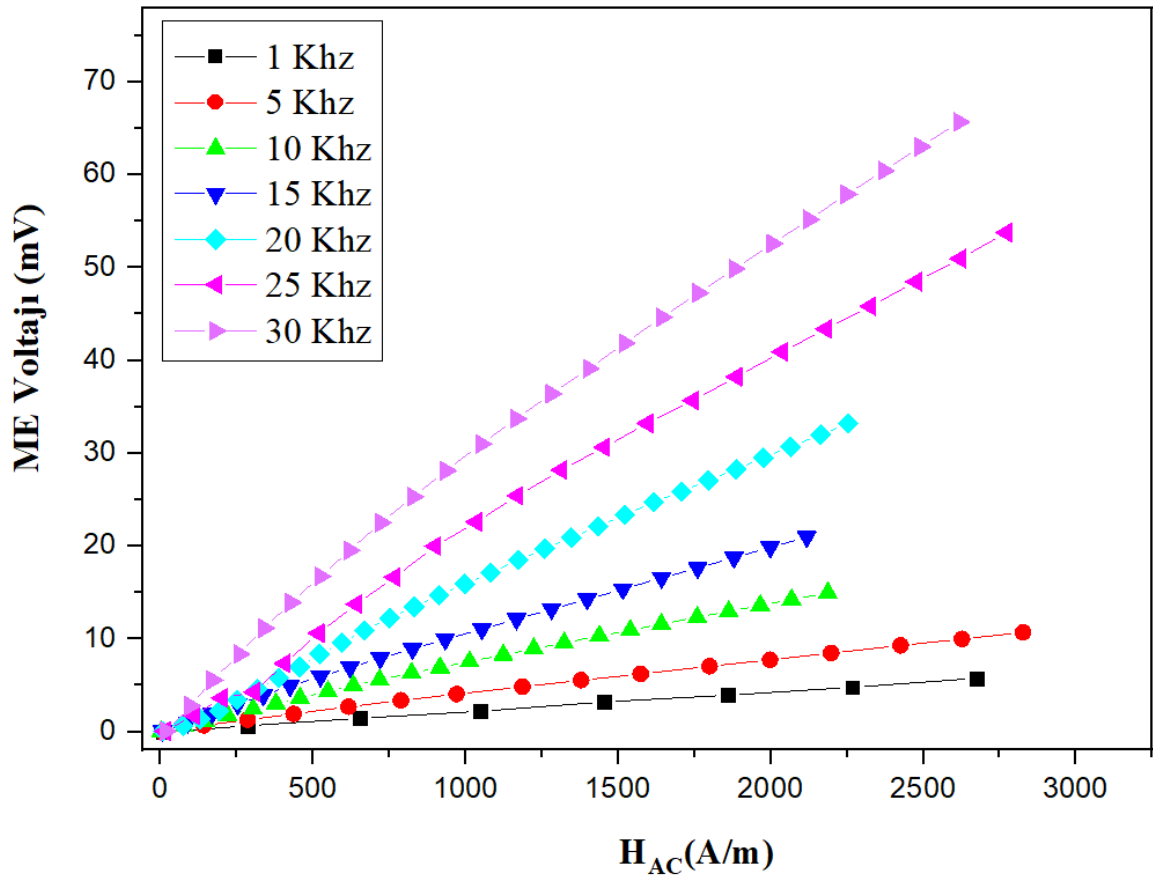
Şekil 4.37. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün rezonans frekansı çevresinde titreşim geriliminin farklı DC manyetik alanlara göre değişimi.

Şekil 4.36’de sensörün geniş frekans aralığında (10–60 kHz) yapılan tarama sonucu elde edilen gerilim değişimi, Şekil 4.37’de ise sensörün rezonans frekansı çevresindeki dar frekans aralığındaki davranışı gösterilmektedir. Geniş frekans taramasında yaklaşık 51 kHz civarında belirgin bir rezonans bölgesi olduğu görülmektedir. Dar aralıkta yapılan ölçümlerde ise bu rezonans tepesinin daha net ve belirgin şekilde ortaya çıktığı gözlenmektedir. DC manyetik alan düşük değerlerdeyken genlik sınırlı kalmakta, 300 A/m ve 700 A/m değerlerinde rezonans genliğinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. En yüksek genlik 700 A/m civarında elde edilmiştir. Daha yüksek DC manyetik alan değerlerinde ise genlikte azalma meydana gelmektedir. Bu sonuçlar, 50 µm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörde manyetoelektrik etkinin DC manyetik alan ile güçlendiğini ve rezonans bölgesinde maksimum elektriksel çıktının elde edildiğini göstermektedir.



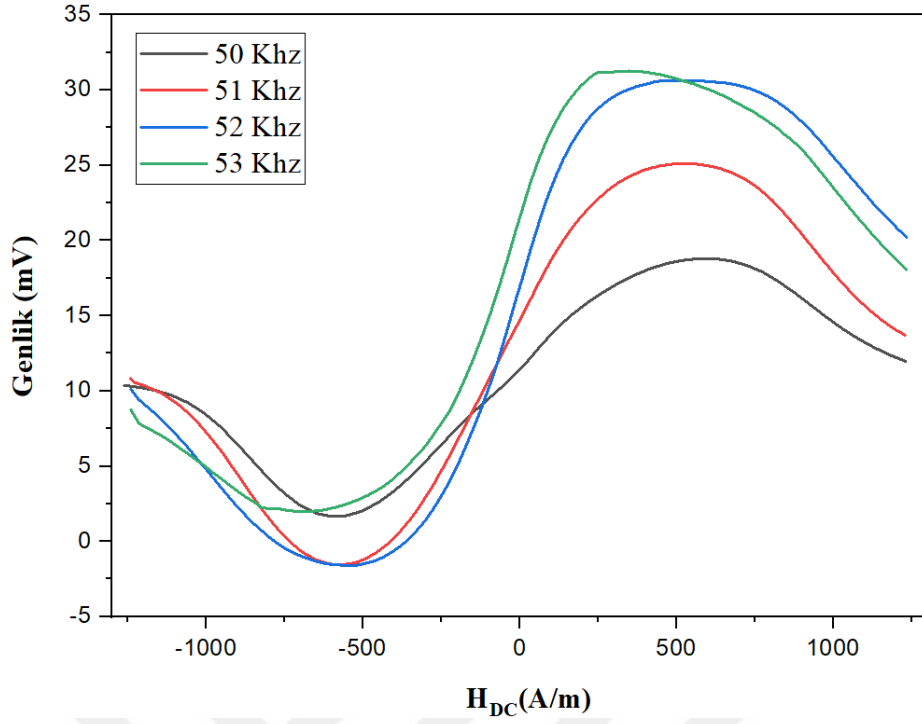
Şekil 4.38. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alana bağlı olarak rezonans frekansı ve titreşim geriliminin değişimi.

Şekil 4.38’de DC manyetik alanın artmasına bağlı olarak rezonans frekansı ve titreşim genliğinin değişimi birlikte gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, titreşim genliğinin DC manyetik alan arttıkça önce yükseldiği ve yaklaşık 400–600 A/m civarında maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Bu noktadan sonra DC manyetik alanın artmasıyla genlikte azalma meydana gelmektedir. Bu durum, manyetoelektrik etkinin belirli bir bias alan değerinde en yüksek seviyeye ulaştığını göstermektedir. Rezonans frekansının ise DC manyetik alana bağlı olarak değiştiği, düşük alanlarda azalma eğilimi gösterdiği ve daha yüksek alanlarda tekrar artış yönünde değiştiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, 50 μ m kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörde hem rezonans frekansının hem de çıkış genliğinin DC manyetik alan ile kontrol edilebildiğini ve optimum bir çalışma alanı bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, 50 μ m kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörde de rezonans davranışının ve DC bias alan etkisinin devam ettiğini göstermektedir. Literatürde Reis ve arkadaşlarının (2016a), Reis ve arkadaşlarının (2016b) ve Zhai ve arkadaşlarının (2006) çalışmaları PVDF tabanlı yapılarda rezonans bölgesinin belirgin olduğunu ve uygun bias alan altında cevabın güçlendiğini ortaya koymaktadır. Burada elde edilen sonuçlar da aynı genel eğilimle uyumludur. Bu nedenle PVDF kalınlığı değişse de sensörün temel manyetoelektrik davranışının literatürde bildirilen yapı ile benzer kaldığı söylenebilir.

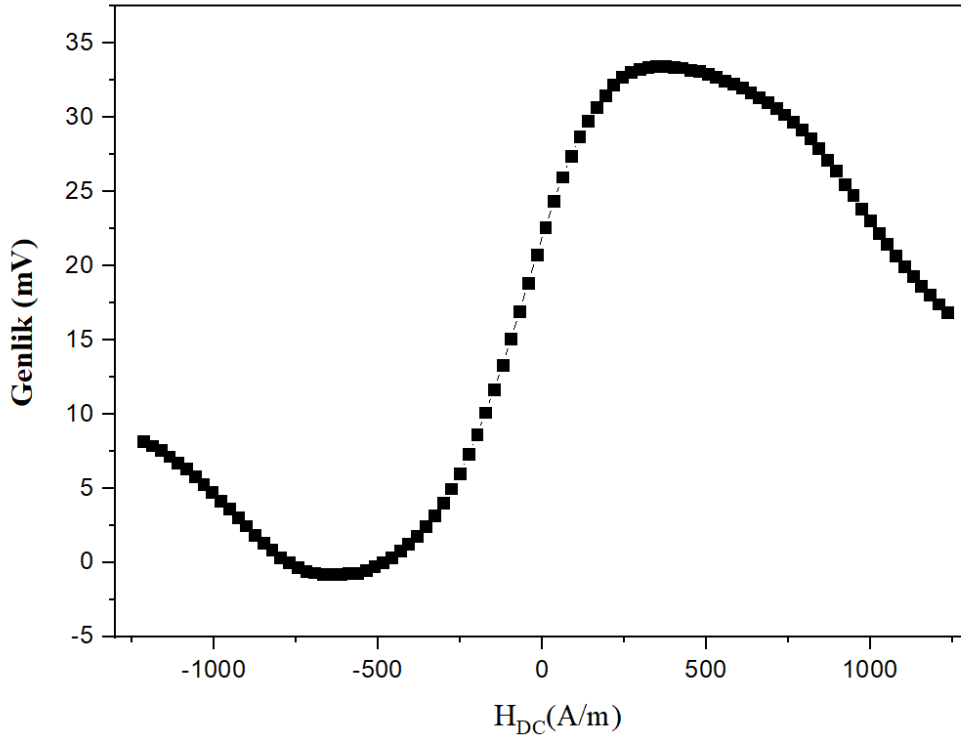


Şekil 4.39. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde ME voltajının AC manyetik alan genliğine bağlı olarak farklı frekanslardaki değişimi.

Şekil 4.39’da PVDF tabanlı sensörün 1 kHz–30 kHz frekans aralığında AC manyetik alan H_{AC} genliğine bağlı olarak manyetoelektrik (ME) voltaj değişimi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde tüm frekanslarda AC manyetik alan arttıkça ME voltajının yaklaşık doğrusal şekilde arttığı görülmektedir. Ayrıca frekans yükseldikçe elde edilen gerilim değerinin arttığı dikkat çekmektedir. En yüksek ME voltajı 30 kHz’de elde edilmiştir. Bu sonuçlar, 50 μm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörün hem AC manyetik alan genliğine hem de çalışma frekansına bağlı olarak artan bir manyetoelektrik cevaba sahip olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, PVDF tabanlı sensörlerde hem frekansın hem de uygulanan AC manyetik alanın sensör cevabını artırabildiğini gösteren literatürle uyumludur. Özellikle Zhang ve arkadaşlarının (2024) frekans bağımlı cevap ile ilgili bulguları, burada elde edilen sonuçlarla benzer bir yön göstermektedir. Bu durum, 50 μm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörde de çalışma frekansının performans açısından önemli bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

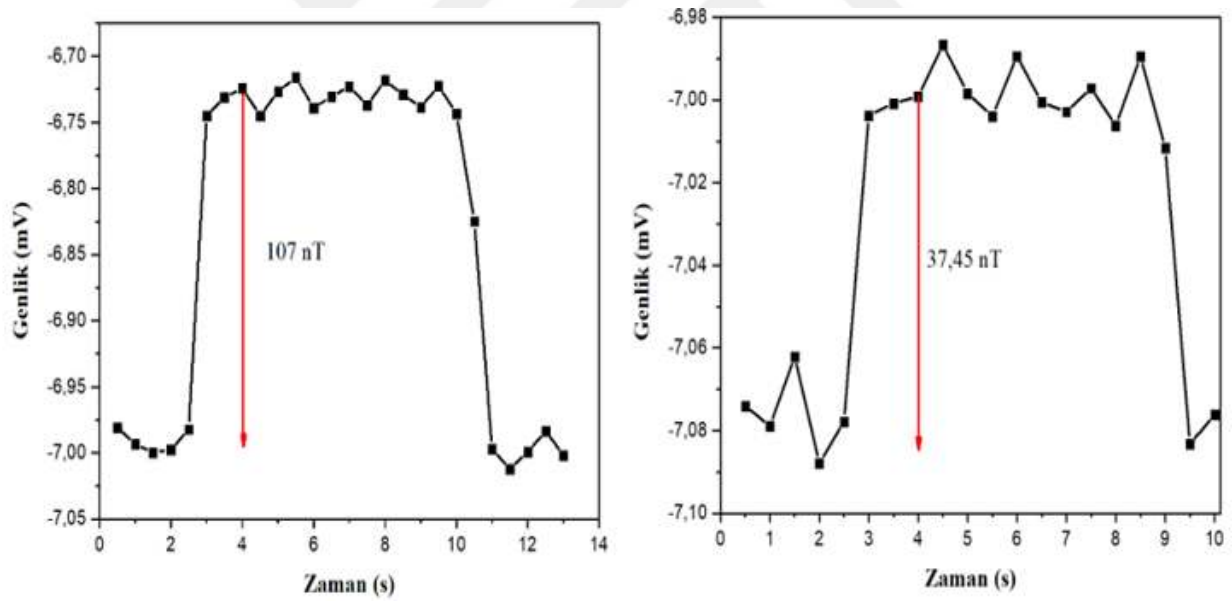


Şekil 4.40. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde DC manyetik alanın farklı frekanslarda gerilim genliği üzerindeki etkisi.



Şekil 4.41. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörde rezonans frekansında DC manyetik alanın gerilim genliği üzerindeki etkisi.

Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de 50 μm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörde DC manyetik alanın gerilim genliği üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Şekil 4.40’da farklı frekanslarda DC manyetik alanın etkisi incelenmiş ve gerilim genliğinin hem negatif hem de pozitif alan yönlerinde belirgin değişim gösterdiği görülmüştür. Frekans arttıkça maksimum gerilim değerinin yükseldiği ve özellikle 52–53 kHz civarında en yüksek genliklerin elde edildiği gözlenmektedir. Şekil 4.41’de ise rezonans frekansında ölçülen gerilim genliğinin DC manyetik alana bağlı değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde genliğin DC manyetik alan arttıkça belirli bir değere kadar yükseldiği, daha yüksek alanlarda ise azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, 50 μm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörde manyetoelektrik etkinin hem çalışma frekansına hem de DC manyetik alana bağlı olduğunu ve belirli bir alan değerinde maksimum çıkış elde edildiğini göstermektedir. Buradaki sonuçlar, PVDF tabanlı sensörlerde DC bias manyetik alanın çıkış gerilimini kontrol ettiğini gösteren literatürle uyumludur. Reis ve arkadaşlarının (2016a; 2016b) çalışmalarında da benzer şekilde, sensör cevabının DC manyetik alanla ayarlanabildiği ve belirli bir alan aralığında daha güçlü hâle geldiği bildirilmiştir. Bu nedenle 50 μm kalınlığındaki PVDF sensörde gözlenen davranışın, literatürdeki genel PVDF tabanlı sensör eğilimiyle benzer olduğu söylenebilir.



Şekil 4.42. AFŞ/PVDF/AFŞ yapısına sahip manyetoelektrik sensörün duyarlılığını belirlemek amacıyla zamana bağlı gerilim değişimi verilmiştir.

Şekil 4.42’de sensörün zamana bağlı gerilim değişimi gösterilmektedir. Grafiklerde uygulanan küçük manyetik alan değişimlerine karşı çıkış geriliminde basamaklı değişimler olduğu görülmektedir. Sol grafikte yaklaşık 107 nT, sağ grafikte ise 37.45 nT seviyesindeki manyetik alan değişimlerinin ölçülebilir gerilim farkları oluşturduğu gözlenmiştir. Gerilim değerlerinin yeni seviyede kararlı şekilde sabit kalması, sensörün stabil ve tekrarlanabilir bir cevap verdiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, 50 µm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörün nanoTesla mertebesindeki düşük manyetik alan değişimlerini algılayabildiğini ve yüksek hassasiyete sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Sensörün nanoTesla düzeyindeki alan değişimlerine belirgin cevap vermesi, PVDF tabanlı manyetoelektrik sensörlerin düşük seviyeli manyetik alan değişimlerini algılayabildiğini gösteren literatürle uyumludur. Yang ve arkadaşlarının (2022) ve Gutiérrez ve arkadaşlarının (2017) çalışmaları da PVDF tabanlı yapıların hassas algılama açısından kullanılabileceğini göstermektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, 50 µm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörün de zayıf manyetik alan ölçümleri için uygun bir davranış sergilediği söylenebilir.

4.3. 28 µm ve 50 µm Kalınlığındaki PVDF Tabanlı Sensörlerin Karşılaştırılması

Bu çalışmada piezoelektrik katman olarak 28 µm ve 50 µm kalınlığındaki PVDF filmler kullanılarak hazırlanan AŞF/PVDF/AŞF yapısına sahip manyetoelektrik sensörlerin performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, her iki sensör yapısında da belirgin bir rezonans davranışı bulunduğunu göstermiştir. Ölçümler sonucunda sensörlerin yaklaşık 50–53 kHz frekans aralığında rezonans gösterdiği belirlenmiştir. 28 µm kalınlığındaki PVDF sensörde rezonans tepesinin yaklaşık 50 kHz civarında olduğu gözlenirken, 50 µm kalınlığındaki PVDF sensörde rezonans frekansının yaklaşık 51 kHz civarında meydana geldiği görülmüştür.

Her iki sensörde de DC manyetik alan arttıkça titreşim geriliminin belirli bir bias alan değerine kadar arttığı ve daha sonra azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Duyarlılık ölçümleri sonucunda her iki sensörün de nanoTesla (nT) mertebesindeki manyetik alan değişimlerini algılayabildiği görülmüştür. Bu sonuçlar, PVDF tabanlı manyetoelektrik sensörlerin düşük seviyeli manyetik alan ölçümleri için uygun olduğunu göstermektedir.

5. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında manyetoelektrik sensör performansını belirleyen temel parametreler, farklı piezoelektrik ve manyetostriktif malzeme kombinasyonları üzerinden incelenmiştir. Çalışmada piezoelektrik katman olarak PZT ve PVDF, manyetostriktif katman olarak ise amorf ferromanyetik şerit ve Vacodur 49 kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, sensör performansının yalnızca tek bir malzeme özelliğine değil; rezonans frekansına, DC bias manyetik alanına, AC manyetik alan şiddetine, piezoelektrik tabakanın yapısına ve manyetostriktif katman ile piezoelektrik katman arasındaki mekanik bağlaşımın etkinliğine bağlı olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, manyetoelektrik cevabın DC bias manyetik alanı, rezonans koşulları, sensör geometrisi ve ara yüzey bağlanma kalitesi gibi birçok parametreye bağlı olduğunu bildiren Li ve arkadaşları (2016), Zhang ve arkadaşları (2024) ve Lasheras ve arkadaşlarının (2017) çalışmalarıyla uyumludur. Tezin giriş, özet ve abstract kısımlarında da çalışmanın amacı, farklı malzeme kombinasyonlarının rezonans frekansı, DC manyetik alan tepkisi ve ME voltaj katsayısı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi olarak ifade edilmiştir.

PZT tabanlı sensörlerde elde edilen sonuçlar, rezonans bölgesinde manyetoelektrik sinyalin belirgin biçimde arttığını göstermektedir. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip sensörde AC manyetik alan genliği arttıkça ME voltajının doğrusal şekilde arttığı, frekans yükseldikçe gerilim değerlerinin de arttığı ve sensörün belirli frekans aralıklarında daha yüksek hassasiyet gösterdiği görülmüştür. Ayrıca DC manyetik alanın artmasıyla gerilim genliğinin belirli bir aralıkta yükseldiği, daha sonra azaldığı ve rezonans frekansında belirli bir DC alan değerinde maksimuma ulaştığı belirlenmiştir. Bu durum, PZT tabanlı sensörde optimum bir DC çalışma alanı bulunduğunu ve sensör performansının bias alan ile ayarlanabildiğini göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar, rezonans koşullarında manyetoelektrik gerilim katsayısının önemli ölçüde arttığını bildiren Turutin ve arkadaşları (2022) ile maksimum cevabın belirli bir DC bias manyetik alan altında elde edildiğini gösteren Sun ve arkadaşlarının (2023) çalışmalarıyla uyumludur.

AFŞ/PZT/AFŞ sensörün duyarlılık ölçümleri de yüksek hassasiyetli bir davranış ortaya koymaktadır. Zamana bağlı gerilim ölçümlerinde, 43.5 kHz frekansında ve 207.18 A/m büyüklüğünde AC manyetik alan altında, nT ve μ T seviyesindeki çok küçük alan değişimlerinin ölçülebilir gerilim farkları oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca mıknatısla yapılan deneyde yaklaşık 9.4 nT seviyesindeki manyetik alan değişiminin de belirgin bir çıkış gerilimi farkı oluşturduğu belirtilmiştir. Gerilim seviyelerinin yeni değerlerde kararlı kalması, sensörün tekrarlanabilir ve stabil bir cevap verdiğini göstermektedir. Bu bulgular, AFŞ/PZT/AFŞ yapısının düşük seviyeli manyetik alan değişimlerini güvenilir biçimde algılayabildiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, Shen ve arkadaşlarının (2018) nT

seviyesindeki DC manyetik alan değişimlerini algılayabilen Metglas/PZT tabanlı sensör sonuçları ve Sun ve arkadaşlarının (2023) yüksek hassasiyetli PZT tabanlı sensör çalışmalarıyla uyumludur.

Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısına sahip sensörde de benzer şekilde rezonans bölgesinde yüksek bir manyetoelektrik voltaj elde edilmiştir. DC manyetik alan arttıkça titreşim genliğinin belirli bir değere kadar yükselip daha sonra doyum eğilimi göstermesi, bu yapıda da optimum bir çalışma alanı bulunduğunu göstermektedir. Rezonans frekansının düşük DC alanlarda daha hızlı, yüksek alanlarda ise daha kararlı değişmesi; manyetoelektrik etkinin çalışma koşullarına duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. AC manyetik alan genliğine bağlı ölçümlerde ise ME voltajının tüm frekanslarda artış gösterdiği ve frekans yükseldikçe daha büyük gerilim değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Bu davranış, rezonans bölgesinde artan manyetoelektrik cevabın ve optimum DC bias alan etkisinin gözleendiği Turutin ve arkadaşları (2022) ile Sun ve arkadaşlarının (2023) bulgularıyla benzerlik göstermektedir.

Zamana bağlı ölçümlerde 0,3 nT seviyesindeki alan değişimlerine karşı basamaklı ve belirgin gerilim değişimleri elde edilmesi, Vacodur49/PZT/Vacodur49 sensörün de yüksek hassasiyetli, stabil ve tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu hassasiyet düzeyi, literatürde PZT tabanlı manyetoelektrik sensörler için rapor edilen nT seviyesindeki çözünürlük değerleriyle uyumludur (Shen vd., 2018; Sun vd., 2023).PVDF tabanlı sensörlerde, piezoelektrik katman olarak 28 µm ve 50 µm kalınlığında PVDF filmler kullanılarak hazırlanan AFŞ/PVDF/AFŞ yapıları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki sensörde de belirgin rezonans davranışı bulunduğunu ve rezonansın yaklaşık 50–53 kHz frekans aralığında gerçekleştiğini göstermiştir. Piezoelektrik katmanı 28 µm kalınlığında PVDF filmden oluşan sensörde rezonans tepesinin yaklaşık 50 kHz civarında, piezoelektrik katmanı 50 µm kalınlığında PVDF filmden oluşan sensörde ise yaklaşık 51 kHz civarında meydana geldiği belirlenmiştir. Bu rezonans frekansları, Metglas/PVDF tabanlı yapılarda yaklaşık 48–54.5 kHz aralığında rezonans frekansları rapor eden Reis ve arkadaşları (2016a), Reis ve arkadaşları (2016b) ve Zhai ve arkadaşlarının (2006) sonuçlarıyla uyumludur.

28 µm kalınlığındaki PVDF film kullanılan sensörde, DC manyetik alan uygulanmadığında genlik düşük kalırken, 300 A/m ve 700 A/m değerlerinde rezonans genliğinin belirgin şekilde arttığı ve en yüksek genliğin 700 A/m’de elde edildiği görülmüştür. Aynı sensörde, DC manyetik alan arttıkça titreşim genliğinin yaklaşık 500–600 A/m civarında maksimuma ulaştığı, daha sonra ise azaldığı belirlenmiştir. 50 µm kalınlığındaki PVDF film kullanılan sensörde de hem rezonans frekansının hem de çıkış genliğinin DC manyetik alan ile kontrol edilebildiği ve optimum bir çalışma alanının bulunduğu ifade edilmiştir.

Bu sonuçlar, PVDF tabanlı sensörlerde de DC öngerilim manyetik alanının sensör performansı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde Reis ve arkadaşları (2016a, 2016b), Zhang ve arkadaşları (2024) ve Li ve arkadaşları (2016) da maksimum manyetoelektrik cevabın belirli bir DC bias manyetik alan altında elde edildiğini bildirmiştir.

PVDF tabanlı sensörlerin AC manyetik alan tepkileri incelendiğinde, hem 28 μm hem de 50 μm kalınlığındaki sensörlerde AC manyetik alan arttıkça ME voltajının yaklaşık doğrusal şekilde arttığı ve en yüksek ME voltajının 30 kHz’de elde edildiği görülmüştür. Bu doğrusal davranış, PVDF yapılarının da AC manyetik alan değişimlerine düzenli ve öngörülebilir bir cevap verdiğini göstermektedir. Duyarlılık ölçümlerinde 28 μm kalınlığındaki sensörde yaklaşık 10.7 nT ve 21.4 nT seviyelerindeki alan değişimleri, 50 μm kalınlığındaki sensörde ise yaklaşık 107 nT ve 37.45 nT seviyelerindeki alan değişimleri ölçülebilmektedir. Bu sonuçlara göre, her iki PVDF tabanlı sensör de nanoTesla mertebesinde çalışabilmekle birlikte, mevcut deney koşullarında 28 μm kalınlığındaki yapının daha düşük alan değişimlerini ayırt edebildiği için daha yüksek duyarlılık gösterdiği söylenebilir. Elde edilen hassasiyet değerleri, Yang ve arkadaşları (2022), Zhang ve arkadaşları (2024) ve Gutiérrez ve arkadaşlarının (2017) PVDF tabanlı sensörlerde rapor ettiği nT seviyesindeki algılama performanslarıyla uyumludur. PZT ve PVDF tabanlı sensörler birlikte değerlendirildiğinde, PZT tabanlı yapılarda rezonans çevresindeki manyetoelektrik cevabın güçlü, kararlı ve düşük alanlara duyarlı olduğu; PVDF tabanlı yapılarda ise esnek polimer karakterine rağmen nT mertebesinde hassasiyet elde edildiği görülmektedir. Literatür kısmında verilen piezoelektrik katsayı ve gerilme sabiti değerleri PZT ve PVDF’nin farklı fiziksel avantajlara sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle sensör performansının yalnızca piezoelektrik katsayı büyüklüğüyle açıklanamayacağı; malzeme kalınlığı, mekanik bağlaşım, rezonans koşulları ve manyetostriktif katmanın özellikleri ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Bu değerlendirme, manyetoelektrik performansın malzeme özelliklerinin yanı sıra rezonans frekansı, DC bias alanı ve ara yüzey bağlaşımı gibi parametrelerden güçlü biçimde etkilendiğini bildiren Li ve arkadaşları (2016), Zhang ve arkadaşları (2024) ve Lasheras ve arkadaşlarının (2017) çalışmalarıyla uyumludur. Ayrıca Vacodur 49’un bu çalışma kapsamında manyetoelektrik sensör tasarımında ilk kez değerlendirilmiş olması, tezin özgün yönlerinden birini oluşturmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında düşük manyetik alanlara duyarlı, yüksek hassasiyetli manyetoelektrik sensörlerin geliştirilmesi amacıyla PZT ve PVDF piezoelektrik katmanları; amorf ferromanyetik şerit ve Vacodur 49 manyetostriktif katmanları ile birlikte kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, hazırlanan tüm sensör yapılarında rezonans frekansının, DC bias manyetik alanının, AC manyetik alan genliğinin ve malzeme kombinasyonunun sensör performansı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Böylece PVDF, PZT, amorf ferromanyetik şerit ve Vacodur 49 malzemelerinin ME sensör davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak değerlendirilmiştir.

Karakterizasyon ve manyetoelektrik ölçüm sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, Vacodur49 numunesinin XRD deseninde belirgin ve keskin piklerin gözlenmesi malzemenin kristal yapıda olduğunu ve belirgin bir ek faz içermediğini göstermiştir. Amorf ferromanyetik şeride ait M–H ölçümlerinde ise malzemenin düşük manyetik alanlarda hızlı mıknatıslanma gösterdiği ve yaklaşık 90–200 A/m aralığında düşük koersivite sergilediği belirlenmiştir. AFŞ/PZT/AFŞ yapısına sahip sensörde yaklaşık 42.5 kHz rezonans frekansı elde edilmiş, maksimum titreşim geriliminin yaklaşık 300–400 A/m DC manyetik alan aralığında olduğu görülmüş, AC manyetik alan arttıkça ME voltajının doğrusal şekilde yükseldiği belirlenmiş ve mıknatıs deneyinde yaklaşık 400 cm uzaklıktan 9.4 nT seviyesindeki manyetik alan değişimi algılanabilmiştir. Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısına sahip sensörde ise yaklaşık 49 kHz civarında rezonans elde edilmiş, DC manyetik alan arttıkça rezonans genliğinin yükselip daha sonra doyum eğilimi gösterdiği, AC manyetik alan genliğine karşı doğrusal bir cevap verdiği ve yaklaşık 380 cm uzaklıktan 74 nT seviyesindeki manyetik alan değişimini algılayabildiği görülmüştür. PVDF tabanlı sensörlerde 28 µm kalınlığındaki yapıda rezonansın yaklaşık 50 kHz civarında olduğu, en yüksek genliğin 700 A/m’de elde edildiği, optimum bias alanın yaklaşık 500–600 A/m aralığında bulunduğu ve 10.7 nT ile 21.4 nT seviyelerindeki alan değişimlerinin algılanabildiği belirlenmiştir. 50 µm kalınlığındaki PVDF tabanlı sensörde ise rezonansın yaklaşık 51 kHz civarında olduğu, en yüksek genliğin yine 700 A/m civarında elde edildiği, optimum bias alanın yaklaşık 400–600 A/m aralığında bulunduğu ve 107 nT ile 37.45 nT seviyelerindeki alan değişimlerinin ölçülebildiği görülmüştür. Ayrıca her iki PVDF tabanlı sensörde de AC manyetik alan arttıkça ME voltajının yaklaşık doğrusal biçimde yükseldiği ve en yüksek ME voltajının 30 kHz’de elde edildiği belirlenmiştir.

Bu çalışmanın önemli sonuçlarından biri, Vacodur 49 kodlu manyetostriktif malzemenin manyetoelektrik sensör tasarımında ilk kez bu çalışma kapsamında değerlendirilmiş olmasıdır. Vacodur49/PZT/Vacodur49 yapısında elde edilen sonuçlar, bu malzemenin yüksek hassasiyetli ME sensör tasarımında kullanılabilecek güçlü bir aday olduğunu göstermektedir. Bunun yanında amorf ferromanyetik şerit tabanlı hem PZT hem de PVDF sensörlerde elde edilen yüksek hassasiyet, bu malzemenin de düşük alan algılama uygulamaları için uygun olduğunu ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, tez kapsamında geliştirilen sensör yapılarının nanoTesla mertebesindeki düşük manyetik alan değişimlerini algılayabildiği ve sensör tasarımına özgün katkı sunduğu sonucuna varılmıştır.

Gelecek alışmalarda PZT ve PVDF tabanlı sensörlerin aynı deney koşulları altında doğrudan karşılaştırılması, PVDF film kalınlığının daha geniş bir aralıkta incelenmesi, yapıştırıcı tabakanın ve elektrot geometrisinin optimize edilmesi, sensör boyutlarının değiştirilerek rezonans davranışının ayrıntılı biçimde araştırılması ve farklı manyetostriktif malzemelerle yeni kompozit yapıların denenmesi önerilmektedir. Ayrıca sensörlerin uzun süreli kararlılık, elektriksel parazite dayanım ve biyomedikal uygulama koşullarındaki performanslarının incelenmesi, geliştirilen yapıların kullanım potansiyelini daha net ortaya koyacaktır



KAYNAKLAR

- ABLIC Inc. (n.d.). Operating principle of an AMR sensor element [Şekil]. ABLIC. <https://www.ablic.com/en/semicon/products/sensor/magnetism-sensor-ic/intro3/>.
- Akgul, F. T. (2021, 2 Eylül). Hall effect sensör nedir? Nasıl çalışır? Ne işe yarar? [Görsel]. Maker Robotistan. <https://maker.robotistan.com/hall-effect-sensor-hall-etkisi-olayi-sensoru/>
- Arsad, A. Z., Zuhdi, A. W. M., Ibrahim, N. B., & Hannan, M. A. (2023). Recent advances in yttrium iron garnet films: Methodologies, characterization, properties, applications, and bibliometric analysis for future research directions. *Applied Sciences*, 13(2), 1218. <https://doi.org/10.3390/app13021218>.
- Atalay, S. (1992). Magnetoelastic properties of iron-based amorphous wires [PhD thesis, University of Bath].
- Atalay, S., Bayri, N., Izgi, T., Atalay, F. E., & Kolat, V. S. (2010). Coil-less fluxgate effect in amorphous wires. *Sensors and Actuators A: Physical*, 158(1), 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.12.028>.
- Aytur, T., Foley, J., Anwar, M., Boser, B., Harris, E., & Beatty, P. R. (2006). A novel magnetic bead bioassay platform using a microchip-based sensor for infectious disease diagnosis. *Journal of Immunological Methods*, 314(1–2), 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.jim.2006.05.006>.
- Baibich, M. N., Broto, J. M., Fert, A., Van Dau, F. N., Petroff, F., Etienne, P., Creuzet, G., Friederich, A., & Chazelas, J. (1988). Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Physical Review Letters*, 61(21), 2472–2475. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2472>.
- Bayri, N. (2007). Amorf ferromanyetik alaşımlarda stres-empedans ve manyetoempedans etki [Doktora tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=3AyOgnxyq0L5qSP-PFYhuQ&no=g62lh5L4qNEj9iTMgLimqw..>
- Behera, A. (2022a). *Advanced materials: An introduction to modern materials science*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80359-9>.
- Behera, A. (2022b). Magnetostrictive materials. In *Advanced materials: An introduction to modern materials science* (pp. 127–156). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80359-9_4.
- Behera, A. (2022c). Piezoelectric materials. In *Advanced materials: An introduction to modern materials science* (pp. 43–76). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80359-9_2.
- Bennett, J. E., & Pinnel, M. R. (1974). Aspects of phase equilibria in Fe/Co/2.5 to 3.0% V alloys. *Journal of Materials Science*, 9(7), 1083–1090. <https://doi.org/10.1007/BF00552822>.

- Bichurin, M., Petrov, V., Leontiev, V., Semenov, A., & Srinivasan, G. (2021). Magnetoelectric magnetic field sensors: A review. *Sensors*, 21(18), 6232. <https://doi.org/10.3390/s21186232>
- Binasch, G., Grünberg, P., Saurenbach, F., & Zinn, W. (1989). Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Physical Review B*, 39(7), 4828–4830. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.4828>.
- Bosch Mobility. (n.d.-a). Engine management systems. <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/control-units/engine-management-system-2w/>.
- Bosch Mobility. (n.d.-b). Wheel-speed sensor. <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/sensors/wheel-speed-sensor/>.
- Boto, E., Holmes, N., Leggett, J., Roberts, G., Shah, V., Meyer, S. S., et al. (2018). Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system. *Nature*, 555(7698), 657–661. <https://doi.org/10.1038/nature26147>.
- Butler, W. H., Zhang, X.-G., Schulthess, T. C., & MacLaren, J. M. (2001). Spin-dependent tunneling conductance of Fe|MgO|Fe sandwiches. *Physical Review B*, 63(5), 054416. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.63.054416>
- CAE. (2023, March). CAE MAD-XR [Product datasheet]. CAE. https://www.cae.com/content/docs/defense-security/DS_CAEMADXR_March2023.pdf.
- Calkins, F. T., Dapino, M. J., & Flatau, A. B. (1997). Effect of prestress on the dynamic performance of a Terfenol-D transducer. In *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials 1997: Smart Structures and Integrated Systems* (Vol. 3041, pp. 293–304). <https://doi.org/10.1117/12.275654>..
- Calkins, F. T., Flatau, A. B., & Dapino, M. J. (2007). Overview of magnetostrictive sensor technology. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18(10), 1057–1066. <https://doi.org/10.1177/1045389X06072358>
- Campbell, S. (2013). A short history of sonography in obstetrics and gynaecology. *Facts, Views & Vision in ObGyn*, 5(3), 213–229.
- Chen, G., Jin, Z., & Chen, J. (2023). A review: Magneto-optical sensor based on magnetostrictive materials and magneto-optical material. *Sensors and Actuators Reports*, 5, 100152. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2023.100152>
- Chhugani, T., Routray, R., Murugan, R., & Jayakrishna, K. (2019). Maintenance and monitoring of composites. In *Structural health monitoring of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites* (pp. 129–151). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102291-7.00008-3>..

- Clarivate. (2026). Web of Science Core Collection. Erişim tarihi: 11 Nisan 2026.
<https://clarivate.com/academia-government/scientific-and-academic-research/research-discovery-and-referencing/web-of-science/web-of-science-core-collection/>
- Clarke, J., & Braginski, A. I. (Eds.). (2004). The SQUID handbook: Fundamentals and technology of SQUIDs and SQUID systems (Vol. 1). Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/3527603646>.
- Coey, J. M. D. (2010). Magnetism and magnetic materials. Cambridge University Press.
- Cohen, D. (1968). Magnetoencephalography: Evidence of magnetic fields produced by alpha-rhythm currents. *Science*, 161(3843), 784–786. <https://doi.org/10.1126/science.161.3843.784>.
- Cohen, D. (1972). Magnetoencephalography: Detection of the brain's electrical activity with a superconducting magnetometer. *Science*, 175(4022), 664–666. <https://doi.org/10.1126/science.175.4022.664>.
- Cullity, B. D., & Graham, C. D. (2008). Introduction to magnetic materials (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Dapino, M. J. (2002). Magnetostrictive materials. In M. Schwartz (Ed.), *Encyclopedia of smart materials*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471216275.esm051>.
- Cullity, B. D. ve Graham, C. D. (2011). Introduction to magnetic materials (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Dong, S., Zhai, J., Li, J. F., & Viehland, D. (2006). Near-ideal magnetoelectricity in high-permeability magnetostrictive/piezofiber laminates with a (2-1) connectivity. *Applied Physics Letters*, 89(25), 252904. <https://doi.org/10.1063/1.2420772>
- Dorosinskiy, L., & Sievers, S. (2023). Magneto-optical indicator films: Fabrication, principles of operation, calibration, and applications. *Sensors*, 23(8), 4048. <https://doi.org/10.3390/s23084048>
- Efinéa Metals. (2022, November 3). Hiperco 50 data sheet. https://www.efineametals.com/wp-content/uploads/2022/11/Hiperco-50-Data-Sheet-11_3_2022.pdf.
- Ekreem, N. B., Olabi, A. G., Prescott, T., Rafferty, A., & Hashmi, M. S. J. (2007). An overview of magnetostriction, its use and methods to measure these properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1–3), 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.064>
- Engdahl, G. (Ed.). (2000). Handbook of giant magnetostrictive materials. Academic Press.
- Fagaly, R. L. (2006). Superconducting quantum interference device instruments and applications. *Review of Scientific Instruments*, 77(10), 101101. <https://doi.org/10.1063/1.2354545>.
- Fan, H., Wang, J., Feng, Q., Hu, Q., Zuo, S., Nabaei, V., & Heidari, H. (2021). Detection techniques of biological and chemical Hall sensors. *RSC Advances*, 11, 12208–12227. <https://doi.org/10.1039/D0RA10027G>.
- Fang, Z., Lu, S. G., Li, F., Datta, S., Zhang, Q. M., & El Tahchi, M. (2009). Enhancing the magnetoelectric response of Metglas/polyvinylidene fluoride laminates by exploiting the flux concentration effect. *Applied Physics Letters*, 95(11), 112903. <https://doi.org/10.1063/1.3231614>.

- Faraday, M. (1846). Experimental researches in electricity.—Nineteenth series. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 136, 1–20. <https://doi.org/10.1098/rstl.1846.0001>.
- Fert, A. (2008). Origin, development, and future of spintronics. Reviews of Modern Physics, 80(4), 1517–1530. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.80.1517>.
- Fiebig, M. (2005). Revival of the magnetoelectric effect. Journal of Physics D: Applied Physics, 38(8), R123–R152. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/8/R01>.
- Fiebig, M., Eremenko, V. V., & Chupis, I. E. (Eds.). (2004). Magnetoelectric interaction phenomena in crystals. Kluwer Academic Publishers.
- Freeman, A. J., & Schmid, H. (Eds.). (1975). Magnetoelectric interaction phenomena in crystals. Gordon and Breach Science Publishers.
- Furlani, E. P. (2001). *Permanent magnet and electromechanical devices: Materials, analysis, and applications*. Academic Press
- Gao, J., Jiang, Z., Zhang, S., Mao, Z., Shen, Y., & Chu, Z. (2021). Review of magnetoelectric sensors. Actuators, 10(6), 109. <https://doi.org/10.3390/act10060109>.
- Giang, D. T. H., Duc, P. A., Ngoc, N. T., & Duc, N. H. (2012). Geomagnetic sensors based on Metglas/PZT laminates. Sensors and Actuators A: Physical, 179, 78–82. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.03.030>
- Gonano, C. A., Zich, R. E., & Mussetta, M. (2015). Definition for polarization P and magnetization M fully consistent with Maxwell's equations. Progress in Electromagnetics Research B, 64, 83–101. <https://doi.org/10.2528/PIERB15100606>.
- Gorfman, S., & Zhang, N. (2024). Piezoelectric coefficients and crystallographic symmetry. In Piezoelectric materials: From fundamentals to emerging applications (pp. 1–15). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527841233.ch1>.
- Gross, J. (2019). Magnetoencephalography in cognitive neuroscience: A primer. Neuron, 104(2), 189–204. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2019.07.001>.
- Grosz, A., Haji-Sheikh, M. J., & Mukhopadhyay, S. C. (Eds.). (2017). High sensitivity magnetometers. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-34070-8>.
- Grunwald, A., & Olabi, A. G. (2008). Design of a magnetostrictive actuator. Sensors and Actuators A: Physical, 144(1), 161–175. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.12.034>.
- Gutiérrez, J., Lasheras, A., Martins, P., Pereira, N., Barandiarán, J. M., Lanceros-Méndez, S., & Vilas, J. L. (2017). Metallic glass/PVDF magnetoelectric laminates for resonant sensors and actuators: A review. Sensors, 17(6), 1251. <https://doi.org/10.3390/s17061251>.
- Hall, E. H. (1879). On a new action of the magnet on electric currents. American Journal of Mathematics, 2(3), 287–292.

- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2014). *Fundamentals of physics* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Hämäläinen, M., Hari, R., Ilmoniemi, R. J., Knuutila, J., & Lounasmaa, O. V. (1993). Magnetoencephalography—Theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain. *Reviews of Modern Physics*, 65(2), 413–497. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.65.413>.
- He-Shuai Ltd. (2018). Material specification for piezoelectric ceramics (PZT-40 to PZT-61HD) [PDF document]. He-Shuai Piezoelectric Technology Co., Ltd.
- Hernandez, W. (2007). A survey on optimal signal processing techniques applied to improve the performance of mechanical sensors in automotive applications. *Sensors*, 7(1), 84–102. <https://doi.org/10.3390/s7010084>.
- Jahns, R., Greve, H., Woltermann, E., Quandt, E., & Knöchel, R. (2012). Sensitivity enhancement of magnetoelectric sensors through frequency-conversion. *Sensors and Actuators A: Physical*, 183, 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.05.049>.
- Jenks, W. G. (1997). SQUIDs for nondestructive evaluation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 30(20), 293–323. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/30/3/002>.
- Jiles, D. (2015). *Introduction to magnetism and magnetic materials* (3rd ed.). CRC Press.
- Kholkin, A. L., Pertsev, N. A., & Goltsev, A. V. (2008). Piezoelectricity and crystal symmetry. In A. Safari & E. K. Akdoğan (Eds.), *Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications* (pp. 17–38). Springer.
- Kim, T. H. (2015). Characterization and applications of piezoelectric polymers (Technical Report No. UCB/EECS-2015-253). EECS Department, University of California, Berkeley.
- Kopyl, S., Surmenev, R., Surmeneva, M., Fetisov, Y., & Kholkin, A. (2021). Magnetolectric effect: Principles and applications in biology and medicine—A review. *Materials Today Bio*, 12, 100149. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2021.100149>.
- Korvenoja, A., Kirveskari, E., Aronen, H. J., Avikainen, S., Brander, A., Huttunen, J., et al. (2006). Sensorimotor cortex localization: Comparison of magnetoencephalography, functional MR imaging, and intraoperative cortical mapping. *Radiology*, 241(1), 213–222. <https://doi.org/10.1148/radiol.2411050796>.
- Lasheras, A., Gutiérrez, J., & Barandiarán, J. M. (2017). Size effects in the equivalent magnetic noise of layered Fe₆₄Co₁₇Si₇B₁₂/PVDF/Fe₆₄Co₁₇Si₇B₁₂ magnetoelectric sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 263, 488–492. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.07.019>.
- Lenz, J., & Edelstein, S. (2006). Magnetic sensors and their applications. *IEEE Sensors Journal*, 6(3), 631–649. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.874493>.

- Li, J., Li, Y., Zhu, D., Wang, Q., Zhang, Y., Zhu, Y., & Li, M. (2016). Magnetoelectric effect modulation in a PVDF/Metglas/PZT composite by applying DC electric fields on the PZT phase. *Journal of Alloys and Compounds*, 661, 38–42. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.216>.
- Li, J.-F. (2021). Lead-free piezoelectric materials. Wiley-VCH.
- Liang, X., Dong, C., Chen, H., Wang, J., Wei, Y., Zaeimbashi, M., He, Y., Matyushov, A., Sun, C., & Sun, N. X. (2020). A review of thin-film magnetoelastic materials for magnetoelectric applications. *Sensors*, 20(5), 1532. <https://doi.org/10.3390/s20051532>.
- Liu, S., Hu, J., Li, P., Wan, C., Chen, Z., Pan, M., Zhang, Q., Liu, Z., Wang, S., Chen, D., Hu, J., & Pan, X. (2019). Magnetic anomaly detection based on fully connected neural network. *IEEE Access*, 7, 182198–182208. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2943544>.
- Lu, C.-C., Huang, J., Chiu, P.-K., Chiu, S.-L., & Jeng, J.-T. (2014). High-sensitivity low-noise miniature fluxgate magnetometers using a flip chip conceptual design. *Sensors*, 14(8), 13815–13829. <https://doi.org/10.3390/s140813815>.
- Luborsky, F. E. (1980). Amorphous ferromagnets. In E. P. Wohlfarth (Ed.), *Ferromagnetic materials: A handbook on the properties of magnetically ordered substances* (Vol. 1, pp. 255–371). North-Holland Publishing Company. [https://doi.org/10.1016/S1574-9304\(05\)80121-X](https://doi.org/10.1016/S1574-9304(05)80121-X).
- Ma, J., Hu, J., Li, Z., & Nan, C.-W. (2011). Recent progress in multiferroic magnetoelectric composites: From bulk to thin films. *Advanced Materials*, 23(9), 1062–1087. <https://doi.org/10.1002/adma.201003636>.
- Manandhar, P., Chen, K.-S., Aledealat, K., et al. (2009). The detection of specific biomolecular interactions with micro-Hall magnetic sensors. *Nanotechnology*, 20(35), 355501. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/35/355501>.
- Masumoto, T., Ohnaka, I., Inoue, A., & Hagiwara, M. (1981). Production of Pd-Cu-Si amorphous wires by melt spinning method using rotating water. *Scripta Metallurgica*, 15, 293–296. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(81\)90347-1](https://doi.org/10.1016/0036-9748(81)90347-1).
- Matsuoka, A., Shinohara, M., Tanaka, Y.-M., Fujimoto, A., & Iguchi, K. (2013). Development of fluxgate magnetometers and applications to the space science missions. In K. Oyama & C. Z. Cheng (Eds.), *An introduction to space instrumentation* (pp. 217–225). TERRAPUB. <https://doi.org/10.5047/aisi.021>.
- Maugh II, T. H. (2009, January 24). Victor Vacquier Sr. dies at 101; geophysicist was a master of magnetics. *Los Angeles Times*.
- McGuire, T. R., & Potter, R. I. (1975). Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys. *IEEE Transactions on Magnetics*, 11(4), 1018–1038. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1975.1058782>.

- Moodera, J. S., Kinder, L. R., Wong, T. M., & Meservey, R. (1995). Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions. *Physical Review Letters*, 74(16), 3273–3276. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.3273>.
- Murakami, S., & Okada, Y. (2006). Contributions of principal neocortical neurons to magnetoencephalography and electroencephalography signals. *The Journal of Physiology*, 575(3), 925–936. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.105379>.
- Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., Phillips, J. D., & Ruder, M. E. (2005). The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70(6), 33ND–61ND. <https://doi.org/10.1190/1.2133784>.
- Nan, C. W., Bichurin, M. I., Dong, S., Viehland, D., & Srinivasan, G. (2008). Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *Journal of Applied Physics*, 103(3), 031101. <https://doi.org/10.1063/1.2836410>
- Narita, F., & Fox, M. (2018). A review on piezoelectric, magnetostrictive, and magnetoelectric materials and device technologies for energy harvesting applications. *Advanced Engineering Materials*, 20, 1700743. <https://doi.org/10.1002/adem.201700743>.
- Narli, S. S. (2020, February 17). Derin öğrenme ile EEG sinyal işleme. Medium. <https://medium.com/@serhan.narli/eeg-sinyal-i%C5%9Fleme-9446c1dc6f6f>.
- National High Magnetic Field Laboratory. (t.y.). Early Chinese compass – 400 BC. <https://nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/early-chinese-compass-400-bc/>.
- NOAA National Centers for Environmental Information. (t.y.). Geomagnetism frequently asked questions. <https://www.ncei.noaa.gov/products/geomagnetism-frequently-asked-questions>
- Nobel Prize Outreach. (2007). The Nobel Prize in Physics 2007. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2007/summary/>
- Nwagboso, C. O. (1993). Sensors and systems for crankshaft position measurement. In C. O. Nwagboso (Ed.), *Automotive sensory systems* (pp. 61–94). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1508-7_4
- O’Dell, T. H. (1970). *The electrodynamics of magneto-electric media*. North-Holland Publishing Company.
- Olabi, A. G., & Grunwald, A. (2008). Design and application of magnetostrictive materials. *Materials & Design*, 29(2), 469–483. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.12.016>.
- Ørsted, H. C. (1820). Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam. *Schweigger’s Journal für Chemie und Physik*, 29, 275–302.
- Ototaşarruf. (2019, 18 Kasım). ABS sensörü nedir? ABS sensörü arıza belirtileri nelerdir? [Görsel]. <https://www.ototasarruf.com/lpghaber.php?faydalibilgilerID=342>.

- Palneedi, H., Annapureddy, V., Priya, S., & Ryu, J. (2016). Status and perspectives of multiferroic magnetoelectric composite materials and applications. *Actuators*, 5(1), 9. <https://doi.org/10.3390/act5010009>.
- Patil, M. A., & Kadoli, R. (2024). Engineers guide to Terfenol-D actuators: Design, performance, and real-world applications. *Sensors and Actuators Reports*, 8, 100236. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2024.100236>.
- Piezo PVDF. (n.d.). Piezoelectric poled PVDF film kit. Retrieved October 13, 2025, from <https://www.piezopvdf.com>.
- Popovic, R. S. (2003). *Hall effect devices* (2nd ed.). CRC Press.
- Pradhan, D. K., Kumari, S., & Rack, P. D. (2020). Magnetoelectric composites: Applications, coupling mechanisms, and future directions. *Nanomaterials*, 10(10), 2072. <https://doi.org/10.3390/nano10102072>.
- Primdahl, F. (1979). The fluxgate magnetometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 12(4), 241–253. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/12/4/001>.
- Proterial, Ltd. (n.d.). Permendur (soft magnetic alloy with high magnetic flux density) YEP™-2V. https://www.proterial.com/e/products/industrial_machinery/permendur.html.
- Ramanan, V. R. V. (1991). U.S. Patent No. 5,011,553. U.S. Patent and Trademark Office.
- Ramsden, E. (2006). *Hall-effect sensors: Theory and application* (2nd ed.). Newnes.
- Ray, A., & Bowyer, S. M. (2010). Clinical applications of magnetoencephalography in epilepsy. *Annals of Indian Academy of Neurology*, 13(1), 14–22. <https://doi.org/10.4103/0972-2327.61271>.
- Reis, S., Silva, M. P., Castro, N., Correia, V., Martins, P., Lasheras, A., Gutierrez, J., Barandiarán, J. M., Rocha, J. G., & Lanceros-Mendez, S. (2016a). Characterization of Metglas/poly(vinylidene fluoride)/Metglas magnetoelectric laminates for AC/DC magnetic sensor applications. *Materials and Design*, 92, 906–910. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.086>.
- Reis, S., Silva, M. P., Castro, N., Correia, V., Rocha, J. G., Martins, P., Lasheras, A., Gutierrez, J., & Lanceros-Mendez, S. (2016b). Electronic optimization for an energy harvesting system based on magnetoelectric Metglas/poly(vinylidene fluoride)/Metglas composites. *Smart Materials and Structures*, 25, 085028. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/085028>.
- Ripka, P. (1992). Review of fluxgate sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 33(3), 129–141. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(92\)80159-Z](https://doi.org/10.1016/0924-4247(92)80159-Z).
- Ripka, P. (Ed.). (2001). *Magnetic sensors and magnetometers*. Artech House.
- ROHM Semiconductor. (n.d.). Applications for Hall Effect IC switches in portable electronics.
- Sander, T. H., Preusser, J., Mhaskar, R., Kitching, J., Trahms, L., & Knappe, S. (2012). Magnetoencephalography with a chip-scale atomic magnetometer. *Biomedical Optics Express*, 3(5), 981–990. <https://doi.org/10.1364/BOE.3.000981>

- Sasada, I. (2002). Symmetric response obtained with an orthogonal fluxgate operating in fundamental mode. *IEEE Transactions on Magnetics*, 38(5), 3377–3379. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2002.802286>
- Shen, Y., Ma, D., & Gao, J. (2018). A man-portable magnetoelectric DC magnetic sensor with extremely high sensitivity. *IEEE Electron Device Letters*, 39(9), 1417–1420. <https://doi.org/10.1109/LED.2018.2858280>
- Srinivasan, G. (2010). Magnetoelectric composites. *Annual Review of Materials Research*, 40, 153–178. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104459>
- Stewart, M. (2001). Measurement good practice guide No. 44: d33 measurement of piezoceramics. National Physical Laboratory.
- Sun, K., Jiang, Z., Wang, C., Han, D., Yao, Z., Zong, W., Jin, Z., & Li, S. (2023). High-resolution magnetoelectric sensor and low-frequency measurement using frequency up-conversion technique. *Sensors*, 23, Article 1702. <https://doi.org/10.3390/s23031702>
- Szewczyk, R. (2016). The magnetoelastic Villari effect—description and application. *Archive of Metallurgy and Materials*, 61(2A), 891–896.
- TdVib. (t.y.). Terfenol-D. <https://tdvib.com/terfenol-d/>
- Tinkham, M. (2004). Introduction to superconductivity (2nd ed.). Dover Publications.
- Trolier-McKinstry, S. (2008). Crystal chemistry of piezoelectric materials. In *Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications* (pp. 39–56). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-76540-2_3.
- Tumański, S. (2001). Thin film magnetoresistive sensors. Institute of Physics Publishing.
- Turutin, A. V., Kubasova, I. V., Kislyuk, A. M., Kuts, V. V., Malinkovich, M. D., Parkhomenko, Y. N., & Sobolev, N. A. (2022). Ultra-sensitive magnetoelectric sensors of magnetic fields for biomedical applications. *Nanobiotechnology Reports*, 17(3), 261–289. <https://doi.org/10.1134/S2635167622030223>.
- Uchino, K. (Ed.). (2017). *Advanced piezoelectric materials: Science and technology* (2nd ed.). Woodhead Publishing.
- VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG. (n.d.-a). VACODUR 49 [Data sheet]. https://vacuumschmelze.com/03_Documents/Brochures/Datasheet%20VACODUR%2049.pdf
- VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG. (n.d.-b). VACODUR 49 [Broşür]. Erişim adresi: https://vacuumschmelze.com/03_Documents/Brochures/Flyer%20VACODUR%2049.pdf.
- Wang, Y., Gray, D., Berry, D., Gao, J., Li, M., Li, J., & Viehland, D. (2011). An extremely low equivalent magnetic noise magnetoelectric sensor. *Advanced Materials*, 23(36), 4111–4114. <https://doi.org/10.1002/adma.201100773>.

- Wang, Y., Hu, J., Lin, Y., & Nan, C.-W. (2010). Multiferroic magnetoelectric composite nanostructures. *NPG Asia Materials*, 2(2), 61–68. <https://doi.org/10.1038/asiamat.2010.32>
- Wang, Y., Li, J., & Viehland, D. (2014). Magnetoelectrics for magnetic sensor applications: Status, challenges and perspectives. *Materials Today*, 17(6), 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.05.004>.
- Yang, S., Xu, J., Zhang, X., Fan, S., Zhang, C., Huang, Y., Li, Q., Wang, X., Cao, D., & Li, S. (2022). Self-biased Metglas/PVDF/Ni magnetoelectric laminate for AC magnetic sensors with a wide frequency range. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55, 175002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac4cf5>
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2015). *Sears and Zemansky's university physics with modern physics* (14. baskı). Pearson Education.
- Yuan, K., Du, A., Zhao, L., Sun, S., Feng, X., Zhang, C., Zhang, Y., & Qin, H. (2022). Ring-core fluxgate sensor for high operation temperatures up to 220 °C. *Micromachines*, 13(12), 2158. <https://doi.org/10.3390/mi13122158>.
- Yuasa, S., Nagahama, T., Fukushima, A., Suzuki, Y., & Ando, K. (2004). Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions. *Nature Materials*, 3, 868–871. <https://doi.org/10.1038/nmat1257>.
- Zhai, J., Dong, S., Xing, Z., Li, J., & Viehland, D. (2006). Giant magnetoelectric effect in Metglas/polyvinylidene-fluoride laminates. *Applied Physics Letters*, 89(8), 083507. <https://doi.org/10.1063/1.2337996>.
- Zhang, X., Yang, S., Fan, S., Li, Y., Han, Z., Wang, X., Cao, D., Li, Q., & Xu, J. (2024). Low-frequency and high-sensitivity PVDF/Metglas magnetoelectric sensor based on bending vibration mode. *ACS Applied Electronic Materials*, 6, 1590–1599. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.3c01395>.
- Zhang, Y., Qin, X., Liu, G., Wang, C., Li, Q., Yuan, J., & Liu, W. (2024). Enhancing precision in SQUID sensors: Analyzing washer geometry dependence at the microscale. *Applied Sciences*, 14(14), 6212. <https://doi.org/10.3390/app14146212>.
- Zhu, J., Zhao, N., & Zhou, R. (2020, September). Towards new forms of particle sensing and manipulation and 3D imaging on a smartphone for healthcare applications. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.10269>.
- Zhu, J., Zhao, N., Liu, S., Wei, S., & Zhou, R. (2022). Toward new forms of particle sensing and manipulation and 3D imaging on a smartphone for healthcare applications. *Advanced Photonics Research*, 3(6), 2100106. <https://doi.org/10.1002/adpr.202100106>.
- Zimmerman, J. E., Thiene, P., & Harding, J. T. (1970). Design and operation of stable rf-biased superconducting point-contact quantum devices, and a note on the properties of perfectly

clean metal contacts. Journal of Applied Physics, 41(4), 1572–1580.
<https://doi.org/10.1063/1.1659074>.

ZTE Support. (n.d.). What is the Hall sensor on a mobile phone? What are the purposes?

Zvezdin, A. K., & Kotov, V. A. (1997). Modern magnetooptics and magnetooptical materials. Institute of Physics Publishing.



EKLER

EK-1 Özgeçmiş

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ergün Durmaz

ÖĞRENİM DURUMU

- **Lisans:** 2020, İnönü Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü
- **Yüksek Lisans:** 2024, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Katıhal Fiziği Programı

GÖREV ALDIĞIM PROJELER

- TÜBİTAK 1001 kapsamında yürütülen "Amorf Ferromanyetik Tel ve Şerit Kullanarak Kullan-At Mikrokantilever Üretimi ve Gaz ve Sıvı Ortamda Uygulamaları" başlıklı (Proje No: 123F073) projede bursiyer olarak görev aldı.
- İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen "Manyetik Nanoparçacıkların Elektromanyetik Kalkanlama Uygulamaları" başlıklı dış kaynaklı projede (Proje No: FDP-2025-3966) araştırmacı olarak görev aldı.
- İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen "Manyetoelektrik Manyetik Alan Sensörleri" başlıklı yüksek lisans tez projesinde (Proje No: FYL-2025-4257) bursiyer ve araştırmacı olarak görev aldı.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

- Atalay, S., Durmaz, E., & İnan, O. O. (2025). *Fabrication and characterization of a Vacodur49/PZT/Vacodur49 magnetoelectric sensor*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 635, 173623.
- Atalay, S., Durmaz, E., ve diğerleri. (2025). *Manyetoelektrik Sensörler ve Uygulamaları*. Fizikteki Yeni Gelişmeler ve İleri Konular. Nobel Akademik Yayıncılık.

DİĞER YAYINLAR

- Atalay, S., Durmaz, E., & Şeker, Ö. F. (2026). *Structural evolution and microwave absorption properties of MnFe₂O₄/BaTiO₃ nanoparticle systems and their composites*. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 37(7), 488.