T.C.

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GİYİLEBİLİR SENSÖR TEKNOLOJİLERİ İÇİN MANYETİK ESNEK FİLMLERİN GELİŞTİRİLMESİ

YASEMİN POLAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE

2020

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GİYİLEBİLİR SENSÖR TEKNOLOJİLERİ İÇİN MANYETİK ESNEK FİLMLERİN GELİŞTİRİLMESİ

YASEMİN POLAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. FİKRET YILDIZ

GEBZE
2020

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

DEVELOPMENT OF MAGNETIC FLEXIBLE FILMS FOR WEARABLE SENSOR TECHNOLOGIES

YASEMİN POLAT

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. FİKRET YILDIZ

GEBZE

2020

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 17/07/2020 tarih ve 2020/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 14/08/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Yasemin POLAT'ın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Fikret YILDIZ

ÜYE : Prof. Dr. Savaş BERBER

ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Taner KALAYCI

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu tez çalışmasında, silisyum ve PET (Polyethylene Terephthalate) alttaşlar üzerine hazırlanan ince film yapılarının giyilebilir ve esnek elektronik uygulamalarında kullanılmak üzere yapısal ve manyetik özelliklerinin detaylı olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, ferromanyetik (FM) ve antiferromanyetik (AFM) katmanlarının manyetik özellikleri ele alınmış, FeNi ve IrMn sırasıyla ferromanyetik katmanı ve antiferromanyetik katman olarak kullanılarak hem statik hem de dinamik özelliklerin kapsamlı bir çalışması yapılmıştır.

Hazırlanan ince film örneklerinin kristal yapı özellikleri XRD tekniği ile yapılmıştır. İnce film örnekleri silisyum ve esnek PET alttaş üzerine hazırlanarak titreşimli örnek manyeto metrisi (VSM) sisteminde manyetik alan altında 10K ile 400K arasındaki manyetik özellikleri incelenmiştir. VSM ölçümü öncesi ve sonrasında alınan FMR ölçümleri karşılaştırıldığında ortaya çıkan düzlem içi (in plane) ve düzlem dışı (out of plane) manyetik anizotropilerinin varlığı ve manyetik alan altında ısıtılmaya bağlı olarak nasıl değişeceği incelenmiştir.

Bu incelemelere ek olarak titreşimli örnek manyeto metrisi ölçümleri sonucunde ferromanyetik ve antiferromanyetik katmanlar arasındaki arayüzde var olan değişim önyargısı silisyum ve polyethylene terephthalate (PET) alttaş üzerine hazırlanan örnekler için ayrı ayrı hesaplanmıştır ve karşılaştırılması yapılmıştır.

Rezonans alanı verilerinin FMR sisteminde ince film yapılarına paralel ve dik uygulanan manyetik alan koşulları altında rezonans durum formülü (Kittel formülü) kullanılarak efektif alan (H_{eff}) değerleri her iki örnek için hesaplanmış ve karşılaştırılması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ferromanyetik Rezonans, Değişim Önyargısı, Esnek Filmler, Magnetron Saçtırma Yöntemi, Titreşimli Örnek Manyeto Metrisi.

SUMMARY

In this thesis, it is aimed to investigate in detail the structural and magnetic properties of thin film samples prepared for silicon and PET substrates for use in wearable and flexible electronics applications. In this context, the magnetic properties of the ferromanyetik (FM) and antiferromanyetik (AFM) layers were discussed, and a comprehensive study of both static and dynamic properties was carried out using FeNi and IrMn as ferromagnetic layer and antiferromagnetic layer, respectively.

The crystal structure properties of the thin film samples were made with XRD technique. The magnetic properties of thin film samples were studied by preparing them on silicon and flexible polyethylene terephthalate (PET) substrate and by heating them under a magnetic field in the vibrating sample magneto meter (VSM) system. When FMR measurements taken before and after the VSM measurement were compared, it was determined how the resulting in plane and out of plane magnetic anisotropies changed depending on the presence and heating under the magnetic field.

In addition to these findings, the exchange bias at the interface between ferromagnetic and antiferromagnetic layers was calculated and compared separately for the samples prepared on silicon and PET substrates as a result of the oscillating sample magneto metric measurements.

The effective field (H_{eff}) values of the resonance field data were calculated and compared for both samples using the resonance state formula (Kittel formula) under magnetic field conditions applied parallel and perpendicular to the thin film structures in the FMR system.

Keywords: Ferromagnetic Resonance, Exchange Bias, Flexible Films, Magnetron Sputtering Method, Vibrating Sample Magneto Meter.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Fikret YILDIZ'a,

Göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili eşim Selim POLAT'a, beni bu günlere kadar yetiştiren desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her an başarılarım için emek veren sevgili Aileme,

Tecrübeleri doğrultusunda bana olan katkılarından ve emeğinden dolayı sayın Dr. Perihan AKSU'ya, çalışmalarımda sürekli yanımda olan ve her zaman yardımlarını gördüğüm değerli arkadaşım Zürbiye ÇAPKU'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİL DİZİNİ	xii
TABLOLAR DİZİNİ	xvii
1.GİRİŞ	1
1.1.Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. TEMEL KAVRAMLAR VE BİLGİLER	3
2.1. Magentizmanın Temeli	3
2.1.1. Malzemelerin Maneytik Özelliklerine Göre Sınıflandırılması	4
2.1.2. Manyetik Domenler ve Domen Duvarları	11
2.1.3. Manyetik Döngü (Histerisiz)	13
2.1.4. Manyetodirenç (MR) Etki	14
2.1.5. Değişim Önyargısı (Exchange Bias) Etkisi	15
2.2. Dev Manyetodirenç(GMR) Etkisi	17
2.2.1. GMR Yapıları	18
2.3. Esnek ve Giyilebilir Manyetik Sensörler	21
3. DENEYSEL TEKNİKLER	23
3.1. İnce Filmlerin Büyütme Tekniği (Sputter Yöntemi)	23
3.2. İnce Film Karakterizasyon Yöntemleri	24
3.2.1. X-Işını Kırınımı (XRD)	25
3.2.2 Ferromanyetik Rezonans (FMR)	25
3.2.3. Titresimli Numune Magnetometresi (VSM)	27
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	29
4.1. Alttaş Temizliği ve Örneklerin Hazırlanması	29
4.2. Silisyum Alttaş Üzerine İnce Film Yapısının Büyütülmesi ve Hazırlanması	30
4.2.1. Silisyum Alttaş Üzerine Yapılan Kaplamanın XRD Sonuçları	31
4.2.2. Silisyum Alttaş Üzerine Kaplanan Yapının Manyetik Analizlerin	

Sonuçları 31
4.3. PET Alttaş Üzerine İnce Film Yapısının Büyütülmesi ve Hazırlanması 39
4.3.1. Pet Alttaş Üzerine Yapılan Kaplamanın XRD Ölçümü 40
4.3.2. PET Alttaş Üzerine Kaplanan Yapının Manyetik Analizlerin Sonuçları 41
4.4. Silisyum ve PET Alttaş Üzerine Kaplanan Yapıların M- H Grafiklerinin Karşılaştırılması 48
4.5. Dış Manyetik Alanın İnce Filme Dik ve Paralel Uygulanması Durumlarında H_{eff} Değerleri 50
4.6. PET/Au(2.3nm)/IrMn(10nm)/NiFe(4nm)/Au(2.3) İnce Filmi Yapısının Büyütülmesi ve Hazırlanması 57
4.6.1. PET Alttaş Üzerine Kaplanan Yapının Manyetik Analizlerin Sonuçları 58
4.7. PET/(Au(2.3nm)/IrMn(15nm)/NiFe(4nm)/Au(2.3) İnce Film Yapısının Büyütülmesi ve Hazırlanması 60
4.7.1. PET Alttaş Üzerine Kaplanan Yapının Manyetik Analizlerin Sonuçları 61
4.8. PET[/Au(2.3nm) / IrMn (4nm)/ FeNi (4 nm)/Au(2.3nm)] Örneğinin Üzerine [NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)]Kaplanması 68
4.8.1. PET Alttaş Üzerine Kaplanan Yapının Manyetik Analizlerin Sonuçları 67
4.9. VSM Ölçümü Yapılmış [PET/Au(2.3nm) / IrMn (4nm)/ FeNi (4nm) /Au(2.3nm)] Örneğinin Üzerine [NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)] Kaplanması 74
4.9.1. PET Alttaş Üzerine Kaplanan Yapının Manyetik Analizlerin Sonuçları 76
5. SONUÇLAR VE YORUMLAR 83

KAYNAKLAR 85
ÖZGEÇMİŞ 90

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar	**Açıklamalar**
$\boldsymbol{B}$	: Manyetik Akı Yoğunluğu Vektörü
C	: Curie Sabiti
$\boldsymbol{E}$	: Toplam Enerji
e	: Elektron Yükü
f_r	: Mikrodalga Frekansı
$\boldsymbol{H}$	: Manyetik Alan Şiddet Vekötrü
H_{eb}	:Değişim Önyargısı (Exchange Bias)
H_{res}	: Rezonans Alanı
H_{eff}	: Etkili Alan Değeri
H_c	: Manyetik Koersivite
I	: Akım Şiddeti
$\boldsymbol{L}$	: Açısal Momentum Vektörü
$\boldsymbol{M}$	: Mıknatıslanma (Manyetizasyon)
M_o,M_s	: Doyum Mıknatıslanması
$\mu 0$	: Serbest Uzatın Manyetik Geçirgenliği
$\boldsymbol{\mu}$	: Manyetik Moment
ρ_H	: Direnç Değeri
ρ_0	: 0 Manyetik Alan Altındaki Direnç Değeri
T	: Sıcaklık
Tc	: Curie Sıcaklığı
T_N	: Neel Sıcaklığı
ω_0	:Lamour Frekansı
ω	:Mikrodalga Frekansı
χ	: Hacimce Manyetik Duygunluk
γ	: Jiromanyetik Oran
Θ	: Açı
AFM	: Antiferomanyetik Malzeme
FM	: Feromanyetik Malzeme

GMR : Giant Magnetoresistance

NM : Manyetik Olmayan Malzeme

PET : Polyethylene Terephthalate

RKKY : Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	a) Geçiş sıcaklığı Tc'nin altındaki ferromanyetik bir malzemenin en düzenli manyetik dizilişi b) Dış manyetik alan altında ferromanyetik bir malzemenin manyetik düzenlenimi.	5
2.2:	Ferromanyetik bir malzemenin M-H grafiği.	6
2.3:	a) Geçiş sıcaklığı Tc'nin altındaki Antiferromanyetik bir malzemenin en Düzenli manyetik dizilişi b) Kuvvetli bir dış manyetik alan altında Antiferromanyetik bir malzemenin düzenlenimi.	6
2.4:	Diamanyetik malzemenin atomları.	7
2.5:	Diamanyetik bir malzemenin M-H grafiği.	8
2.6:	a) Paramanyetik bir malzemenin dış alan yokken kirastgele olan manyetik düzenlenimi. b) Dış manyetik alan altında Paramanyetik bir malzemenin olabileceği en düzenli hali.	8
2.7:	Paramanyetik bir malzemenin M-H grafiği.	9
2.8:	a) Ferrimanyetik bir malzemenin manyetik düzenlenimi b) Dış manyetik alan altında ferrimanyetik bir malzemenin düzenlenimi.	11
2.9:	Ferrimanyetik bir malzemenin M-H grafiği.	11
2.10:	(a) Domenler ve domen duvarı (b) Domen duvarları.	12
2.11:	Manyetik histerisis eğrisi.	13
2.12:	FM ve AF katmanlarının farklı harici manyetik alanlardaki spin konfigirasyonu.	16
2.13:	Gmr etkisinin şematik gösterimi. (a) direçteki değişiklik (b) mıknatıslanma konfigürasyonları (c) çok katmanlı mıknatıslanma eğrisi.	18
2.14:	Çok katmanlı GMR yapısı.	19
2.15:	Spin valf yapışı	19
2.16:	Sözde spin valf yapısı.	20
2.17:	Granular GMR yapısı.	21
3.1:	Gebze Teknik Üniversitesi İnce film Kaplama Sistemleri.	24
3.2:	Magnetron sputter sistemi çalışma prensibi.	24
3.3:	Bragg yasası şematik gösterimi.	25

3.4: Ferromanyetik Rezonans tekniği şematik gösterimi. 26
3.5: VSM çalışma prensibi. 28
3.6: Gebze Teknik Üniversitesi VSM Cihazı. 28
4.1: Silisyum alttaş üzerine yapılan ince film kaplama yapısı. 31
4.2: Silisyum üzerine büyüülen örneğin XRD analizi. 31
4.3: a) Düzlem dışı geometride FMR spekturumları. b) Düzlem içi geometride FMR spekturumları. 33
4.4: a) Düzlem dışı geometride rezonans alanları. b) Düzelm içi geometride rezonans alanları. 34
4.5: M-H ve M-T grafikleri. 36
4.6: a) Düzlem dışı geometride FMR spektrumları. b) Düzlem içi geometride FMR spektrumları. 37
4.7: a) VSM ölçümü sonrası düzlem dışı geometride rezonans alanları. b) VSM ölçümü öncesi ve sonrası üzlem dışı geometride rezonans alanları. 38
4.8: a) VSM ölçümü sonrası düzlem içi geometride gözlenen FMR spektrumlarının rezonans alanları. b) VSM ölçümü öncesi ve sonrası düzlem içi geometride gözlenen FMR spektrumlarının rezonans alanları. 39
4.9: PET alttaş üzeine yapılan ince film kaplama yapısı. 40
4.10: PET alttaş üzerine kaplanan öreneğin XRD grafiği. 40
4.11: a) Düzlem dışı geometride FMR spektrumları. b) Düzlem içi geometride FMR spektrumları. 42
4.12: a) Düzlem dışı geometride rezonans alanları. b) Düzelm içi geometride rezonans alanları. 43
4.13: a) M-H grafiği b) Oda sıcaklığında M-H grafiği c) M-T garfiği. 44
4.14: a) Düzlem dışı geomtride FMR spektrumları. b) Düzlem içi geometride FMR spektrumları. 46
4.15: a) VSM ölçümü sonrası düzlem dışı geometride rezonans alanları. b) VSM ölçümü öncesi ve sonrası düzlem dışı geometride rezonans alanları. 47
4.16: a) VSM ölçümü öncesi düzlem içi geometride rezonans alanları. b) VSM ölçümü öncesi ve sonrası düzlem içi geometride rezonans alanları. 47
4.17: VSM ölçümü sonrası M-H grafiklerinin karşılaştırılması a) Silisyum alttaş b) PET alttaş. 49

4.18: VSM ölçümü öncesi düzlem dışı geometride rezonans alanları. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş. 51
4.19: VSM ölçümü sonrası düzlem dışı geometride rezonans alanları. a) Silisyum alttaş b) Pet alttaş. 51
4.20: 0-30-45-60-90-120 derecelik açılarda düzlem dışı geometrilerinde FMR spektrumları karşılaştırılması. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş. 54
4.21: 0-60-120 derecelik açılarda düzlem dışı geometrilerinde FMR spektrumları karşılaştırılması. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş. 55
4.22: 0-45-90 derecelik açılarda düzlem dışı geometrilerinde FMR spektrumları karşılaştırılması. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş. 55
4.23: 0-30-60-90-120 derecelik açılarda düzlem içi geometrilerinde FMR spektrumları karşılaştırılması. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş. 56
4.24: 0-60-120 derecelik açılarda düzlem içi geometrilerinde FMR spektrumları karşılaştırılması. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş. 57
4.25: PET/Au(2.3nm)/IrMn(15nm)/NiFe(4nm)/Au(2.3) ince film yapısı. 58
4.26: a) Düzlem dışı geomtride FMR spektrumları. b) Düzlem dışı geometride FMR spektrumları. 59
4.27: a) Düzlem dışı geometride rezonans alanları. b) Düzlem içi geometride rezonans alanları. 60
4.28: PET/Au(2.3nm)/IrMn(15nm)/NiFe(4nm)/Au(2.3)] ince film yapısı. 61
4.29: a) Düzlem dışı geomtride FMR spektrumları. b) Düzlem içi geometride FMR spektrumları. 62
4.30: a) Düzlem dışı geometride rezonans alanları. b) Düzlem içi geometride rezonans alanları. 63
4.31: 0-30-45-60-90-120 derecelik açılarının düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 4nm IrMn b)10nm IrMn c)15nm IrMn. 64
4.32: 0-60-120 derecelik açılarının düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 4nm IrMn b)10nm IrMn c)15nm IrMn. 64
4.33: 0-45-90 derecelik açılarının düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 4nm IrMn b)10nm IrMn c)15nm IrMn. 65
4.34: Düzlem dışı geometride rezonans alanlarının açısal bağımlılığı. 65
4.35: Düzlem içi geometride gözlemlenen rezonans alanlarının açısal bağımlılığı. 66

4.36: 0-30-60-90-120 derecelik açılarının düzlem içi geometride FMR spektrumları. a) 4nm IrMn b)10nm IrMn c)15nm IrMn. 67
4.37: 0-6-120 derecelik açılarının düzlem içi geometride FMR spektrumları. a) 4nm IrMn b)10nm IrMn c)15nm IrMn. 67
4.38: PET/Au(2.3nm)/IrMn(1nm)/NiFe(4nm)/Au(2.3)/NiFe(4nm)/Au(2.3nm)] ince film yapısı. 68
4.39: a) Düzlem dışı geomtride FMR spektrumları. b) Düzlem dışı geometride FMR spektrumları. 70
4.40: a) Düzlem dışı geometride, b) düzlem içi geometride gözlemlenen ESR spektrumlarının rezonans alanlarının açısal bağımlılığı. 71
4.41: 0-30-45-60-90-120 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama. 72
4.42: 0-60-120 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama. 73
4.43: 0-60-90 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama. 73
4.44: 0-45-90 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a)1. kaplama b) 2. kaplama. 74
4.45: 0-60-120 derecelik açılarda düzlem içi geometride FMR spektrumları. a)1. kaplama b) 2. kaplama. 75
4.46: 0-30-60-90-120 derecelik açılarda düzlem içi geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama. 75
4.47: PET/Au(2.3nm)/IrMn(4nm)/NiFe(4nm)/Au(2.3)/NiFe(4nm)/Au(2.3nm)] ince film yapısı. 76
4.48: a) Düzlem dışı geometride FMR spektrumları. b) Düzlem içi geometride FMR spektrumları. 77
4.49: 0-45-60-90-120 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama. 78
4.50: 0-60-120 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama. 79
4.51: 0-45-90 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama. 80

4.52: 0-30-60-90-120 derecelik açılarda düzlem içi geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama. 81
4.53: 0-60-120 derecelik açılarda düzlem içi geometride FMR spektrumları.. a) 1.kaplama b) 2. kaplama. 81
4.54: a) 1. kaplamanın düzlem dışı geometride b) 2. kaplamanın düzlem dışı geometride c) Her iki örnek için düzlem dışı geometride d) Her iki örnek için düzlem içi geometride rezonans alanları. 82

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:	**Sayfa**
4.1: Kimyasal temizlik aşamaları.	30
4.2: Silisyum alttaş üzerine malzemelerin büyütme oranları.	30
4.3: PET alttaş üzerine malzemelerin büyütme oranları.	40
4.4: Değişim önyargısı ve koersivite değerleri.	49
4.5: FMR ölçümünden H_{res} değerleri.	49
4.6: Silisyum alttaş üzerine yapılan örnek için H_{eff} değerleri.	52
4.7: PET alttaş üzerine yapılan örnek için H_{eff} değerleri.	58
4.8: PET alttaş üzerine malzemelerin büyütme oranları.	58
4.9: PET alttaş üzerine malzemelerin büyütme oranları.	68
4.10: İkinci kaplama için büyüme oranları.	68
4.11: İkinci kaplama için büyüme oranları	76

1.GİRİŞ

Bu tezin konusu giyilebilir teknolojilerde kullanılmak üzere esnek ince film yapılarının geliştirilmesidir. Manyetik malzemelerin en önemli yönü, özelliklerinin fiziksel şekle, boyuta, aralarındaki mesafeye ve simetrilerine güçlü bir şekilde bağlı olmasıdır. İnce filmler, desenli yapılar, serbest nanopartiküller bilimsel toplulukta büyük ilgi görmüştür. Dış manyetik alan, sıcaklık, akım ve basınç ile manyetizasyonun kontrolü, manyetik sistemleri hem temel hem de teknolojik uygulama ile ilgili olarak daha dikkat çekici bir hale getirmiştir.

Literatürde yapılmış olan çalışmalarda elektronik cihazların imalatında silisyum levhaların yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Bununla birlikte, insan vücudu, organizmalar, giysiler vb. gibi birçok alanda kullanılmak üzere esnek ve giyilebilir elektroniklere ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, sert silisyum gofret bazlı elektronik cihazlar, bu alandaki uygulamalar için uygun değildir. Esnek elektronikler, elektronik devreleri ve cihazları, geleneksel elektronik cihazlara kıyasla önemli ölçüde daha düşük maliyetli, daha hafif ve daha kompakt olan esnek yüzeylerde birleştirme teknolojisidir. Bu çalışma da manyetik ince film yapılarının esnek bir alttaş üzerindeki uygulanabilirliğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

Literatürde yapılan araştırmalarda farklı magnetoresistance etkilerine dayanan oldukça hassas esnek manyetik sensörler üretildiği bilgisine varılmıştır. GMR yapılarılarının iyi bir değere sahip küçük cihazlar gerektiren çok çeşitli senaryolarda başarıyla kullanıldığı anlaşılmıştır. Ek olarak, manyetik çok katmanlı sistemler birçok teknolojik açıdan en umut verici araştırmalardır. Bunlar arasında, ferromanyetik ve antiferromanyetik katmanlar arasındaki arayüzde var olan değişim önyargısı etkisinin araştırılması da vardır.

Bu tez çalışmasında ince filmlerde ferromanyetik ve antiferromanyetik katmanlar arasındaki bağlantı şeması ayrıntılı olarak incelenmiştir. Farklı manyetik yapılar imal edilmiş ve farklı tekniklerle karakterize edilmiştir. Tezin taslağı aşağıda sunumuştur.

Genel bilgiler bölümünde, sonraki bölümlerde kullanılacak manyetizma kavramlarına ve GMR kavramına genel bir bakış sunmuştur.

Deneysel çalışmalar ve bulgular bölümünde incelenen manyetik nanoyapıların dinamik özelliklerini karakterize etmek için kullanılacak ferromanyetik rezonans

olgusu sunulmuştur. Örneklerin üretim ve karakterizasyon teknikleri açıklanmış; sputter (püskürtme) tekniği ince film kaplama tekniği olarak verilmiştir. Statik ve dinamik karakterizasyonlar farklı karakterizasyon teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örneğin, statik durumda; titreşimli örnek manyetometre gözden geçirilmiş, Dinamik modda; 9.1GHz'de x-band ferromanyetik rezonans tekniği sunulmuştur.

1.1.Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Yapılan literatür araştırmalarında esnek manyetik sensör uygulamalarının manyetik sensör uygulamaları içinde gelişmekte olan bir konu olarak yer aldığı görülmüştür. Yapılacak olan bu çalışma ile esnek manyetik sensör uygulamalarının gelişen giyilebilir teknoloji alanına katkı sağlanması açıdından giyilebilir teknolojilerde kullanılmak üzere esnek manyetik ince film yapılarının geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Yapılacak çalımanın en önemli noktası uygulanabilirliğinin gösterilmek istendiği ince film yapısnın esnek PET alttaş üzerine kaplanması olmuştur. Bu esnek malzeme kullanılarak hazırlanacak ince film örneklerinin manyetik analizleri, gelecekte yapılılacak farklı düzenlemelere sahip sensörlerin tasarımlarına katkı sağlaması amaçlanmıştır.

Bu kapsamda, bu tez çalışmasının ana hatlarıyla yoğunlaştığı konu, esnek manyetik sensör bir ince film üretiminin gerçekleştirilmesi için ince film yapılarının ve bu yapılar için gereken malzeme, tasarım, üretim ve test süreçlerinin geliştirilmesidir.

2. TEMEL KAVRAMLAR VE BİLGİLER

Bu bölümde, aşağıdaki bölümlerin anlaşılmasını kolaylaştıracak temel kavramlar ve bilimsel terimler sunulacaktır.

2.1. Magentizmanın Temeli

Mikroskobik olarak, manyetizma çekirdeğin etrafındaki elektronların hareketinden kaynaklanır. Bir elektronun iki tür hareketi vardır. Birincisi, elektronun çekirdeğin etrafında dönmesi ve orbital açısal momentum üretmesidir. Benzer şekilde, ikincisi elektron kendi ekseni etrafında döner ve spin açısal momentum üretir. Son olarak, toplam açısal momentum bu iki momentumun toplamıdır. Bununla birlikte, klasik olarak, manyetizmanın temel birimi olarak kabul edilen manyetik moment (μ), elektronun açısal momentumunu bir döngüdeki akım ile karşılaştırarak açıklanabilir. Örneğin, akım (I) dairesel bir telde akıyorsa ve tel tarafından çevrelenen alan A ise, bu hareketli elektronla ilişkili manyetik moment şu şekilde ifade edilebilir [1].

$$\mu = I.\ A \tag{2.1}$$

Manyetik moment açısal momentum ($\boldsymbol{L}$=mvr) olarak ifade edilebilir. 2.1 denklemindeki akım (I=e/t) ve A değerini değiştirerek 2.2 denklemi elde edilir [1].

$$\mu = (e/2m)\ \boldsymbol{L} \tag{2.2}$$

γ = e/2m yerine, manyetik moment 2.3 denkleminde verildiği şekilde yazılabilir.

$$\mu = -\gamma \boldsymbol{L} \tag{2.3}$$

Burada, γ jiromanyetik orandır. Zamana bağlı manyetik moment 2.4 denklemi ile şu şekilde ifade edilir,

$$d\mu/dt = \gamma(d\boldsymbol{L}/dt) \tag{2.4}$$

Dış manyetik alanalan (H) varlığında, manyetik moment için hareket denklemi,

$$d\mu/dt = \gamma\, \mu x \boldsymbol{H} \qquad (2.5)$$

Son olarak, dış manyetik alan üzerindeki manyetik momentin toplam enerjisi denklemi 2.6 da verildiği gibi ifade edilebilir,

$$\boldsymbol{E} = -\mu_0 \mu.H \qquad (2.6)$$

2.1.1. Malzemelerin Manyetik Özelliklerine Göre Sınıflandırılması

Michael Faraday'ın (1791-1867) yaptığı çalışmalar doğrultusunda tüm maddelerin diamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik maddelerden birinin altında sınıflandırılmıştır. Manyetik alınganlığı (χ) eksi olan maddeler diamanyetik, artı olanlar ise paramanyetik ve ferromanyetik olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmalara ek olarak antiferromanyetik ve ferrimanyetik malzeme gruplarıda vardır.

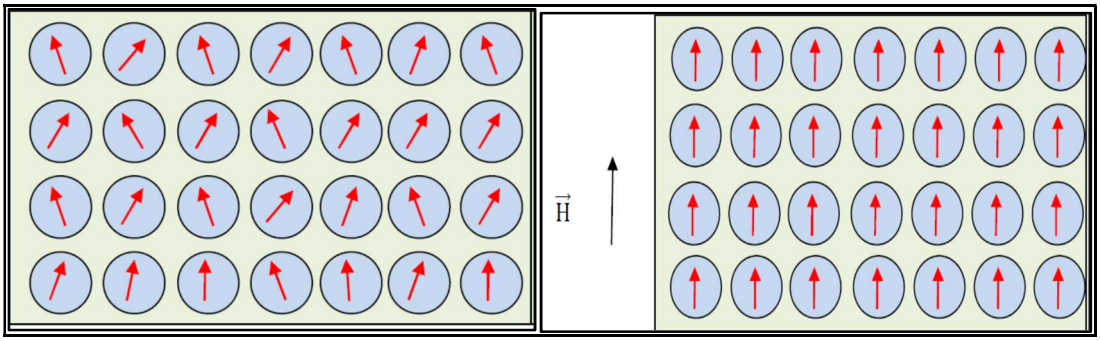
Dışarıdan uygulanan manyetik alana verdikleri tepkiler malzeme davranışlarını (elektron ve manyetik dipollerin verdikleri tepkiler) ile belirlenir. Ferromanyetik malzeme olarak en sık kullanılan malzemeler; demir, nikel ve kobalttır. Buna karşılık krom ise antiferromanyetik özellik gösteren malzeme olarak ortaya çıkmaktadır. Bu özellikleri göstermeyen tüm malzemeler manyetik olmayan malzemeler olarak sınıflandırılırlar.

2.1.1.1. Feromanyetizma

Ferromanyetizma ancak atomlar bir kafes içinde düzenlendiğinde ve atomik manyetik momentleri birbirine paralel hizalamak için etkileşime girebildiğinde mümkündür. Bu etki, klasik teoride, ilk olarak 1907'de Weiss tarafından öne sürülen ferromanyetik materyal içinde bir moleküler alanın varlığı ile açıklanmıştır. Bu alan, malzemeyi doygunluğa manyetize etmek için yeterlidir. Kuantum mekaniğinde, Heisenberg ferromanyetizma modelinde, manyetik momentlerin komşu momentler arasındaki değişim etkileşimi açısından paralel hizalanmasını tanımlar [8].

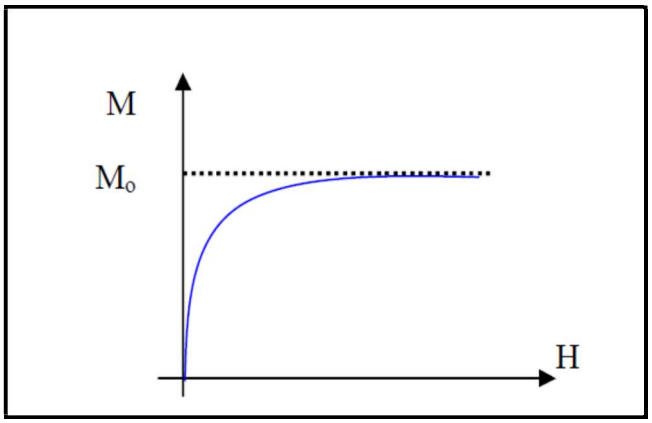
Demir (Fe), Nikel (Ni), Kobalt (Co) manyetik olarak oldukça kuvvetli maddeler olup oda sıcaklığında ve üzerinde ferromanyetiktir [8]. Buna ek olarak Curie sıcaklığının (T_c) altında, dış manyetik alanın varlığında ferromanyetik olarak, T_c sıcaklığının üstünde ise paramagnetik olarak davranır [5]. Ferromanyetik bir malzemede her bir atom net bir manyetik momente sahiptir ve bu atomların manyetik momentleri birbirleriyle etkileşirler. Harici manyetik alan altında tüm manyetik momentler birbirlerine paralel ve aynı yönlü bir yapı almaya çalışırlar.

Sekil 2.1a'da [4] ferromanyetik bir malzemenin atomlarının manyetik momentlerinin dizilimleri gösterilmiştir. Sekil 2.1b'de [4] ise harici manyetik alan altındaki ferromanyetik bir malzemenin atomlarının manyetik momentlerinin dizilimleri gösterilmiştir [4].



Şekil 2.1: a) Geçiş sıcaklığı Tc'nin altındaki ferromanyetik bir malzemenin en düzenli manyetik dizilişi. b) Dış manyetik alan altında ferromanyetik bir malzemenin manyetik düzenlenimi.

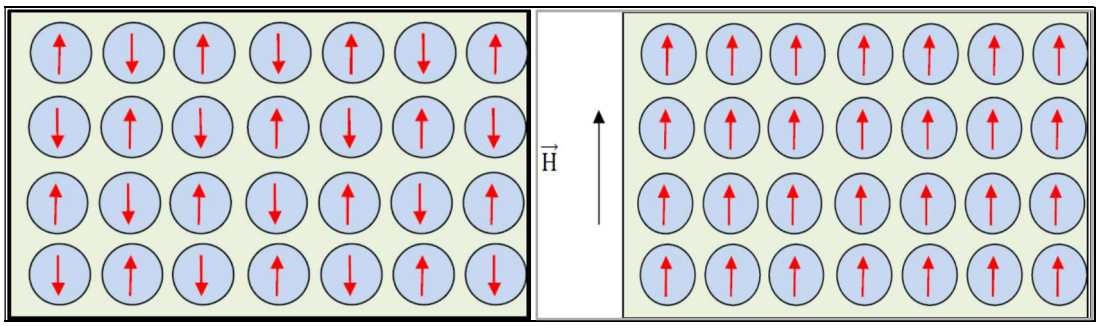
Şekil 2.2'de [4] ise ferromanyetik bir malzemenin üzerine dışardan bir manyetik alan uygulandığında gösterdiği tepki verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi dış manyetik alan (H) uygulanmaya başladığında malzeme içerisindeki atomlar uygulanan manyetik alan yönüne doğru düzenlenmeye başlar ve malzemenin toplam mıknatıslanmasını bu şekilde arttırırlar. Dış manyetik alan arttırılmaya devam edildikçe ve buna karşılık malzemede düzenlenecek atom kalmadığında, toplam mıknatıslanma bir doyuma (Mo, Ms) ulaşmış olur [4].



Şekil 2.2: Ferromanyetik bir malzemenin M-H grafiği.

2.1.1.2. Antiferomanyetizma

Periyodik tabloda oda sıcaklığında antiferromanyetizma özellik gösteren tek element kromdur (Cr). Antiferromanyetik malzemeler ferromanyetik malzemelere çok benzer, ancak komşu atomlar arasındaki değişim etkileşimi, atomik manyetik momentlerin anti-paralel hizalanmasına yol açar. Bu nedenle, manyetik alan birbirini götürür ve malzeme paramanyetik bir malzeme ile aynı şekilde davranır. Bu malzemeler néel sıcaklığı olarak bilinen bir geçiş sıcaklığının üzerinde paramanyetik hale gelir. (Cr: T_N = 37ºC) [8]. Şekil 2.3a'da [4] antiferromanyetik bir malzemenin atomlarının manyetik momentlerinin nasıl dizildikleri verilmiştir. Eğer şekildeki vektörler, eşit kuvvetli düşünülürse birbirlerinin etkilerini nasıl yok ettikleri görülmektedir. Şekil 2.3b'de [4] ise bu malzemeye dışardan çok kuvvetli bir manyetik alan karşısında atomların manyetik momentlerin düzenimleri gösterilmiştir [4].

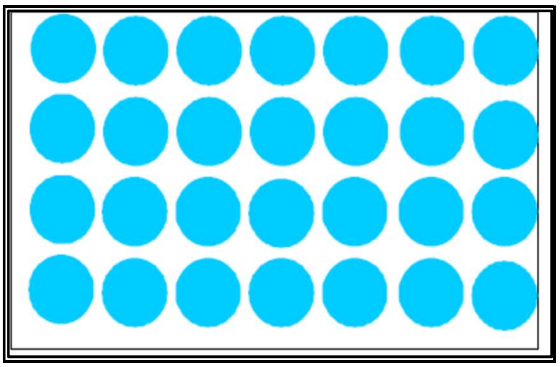


Şekil 2.3: a) Geçiş sıcaklığı Tc'nin altındaki Antiferromanyetik bir malzemenin en düzenli manyetik dizilişi. b) Kuvvetli bir dış manyetik alan altında Antiferromanyetik bir malzemenin düzenlenimi.

2.1.1.3. Diamanyetizma

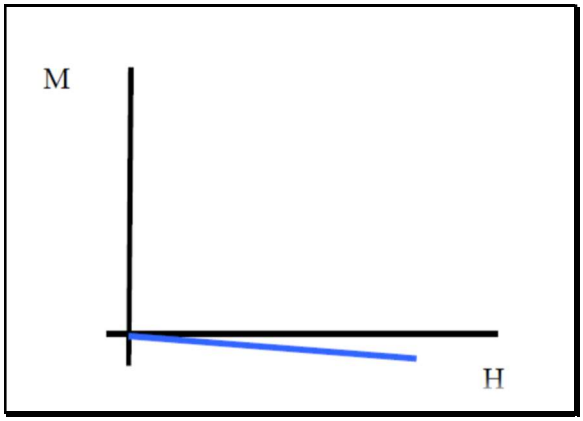
Faraday yasasına göre herhangi bir maddeye manyetik alan uygulanması durumunda, madde içindeki elektronlar ivmelenirler ve bunun sonucunda bir elektromotor kuvveti oluşur. Lenz yasasına göre, ortaya çıkan elektrik akımı, uygulanan alanı azaltacak yönde olur. Böylece uygulanan alana zıt yönlü bir mıknatıslanma oluşur. Diamanyetik malzemeler mıknatıs tarafından itilirler ve manyetik alınganlıkları (χ) eksidir. Yani, diamanyetik malzemeler, mıknatısın uyguladığı alana zıt yönlü bir alana sahiptir.

Çiftlenmemiş elektronu bulunmayan tüm atom veya bileşiklerde diamanyetizma görülür. Soy gazlar, hidrojen, helyum gibi malzemeler diamanyetik malzemelerdir. [5]. Şekil 2.4'de görüldüğü gibi eğer her bir mavi daireyi bir atom olarak düşünürsek, bu atomların hiç birinin net manyetik momentleri yoktur, sadece harici bir manyetik alanla karşılaştıklarında tepki verirler [4].



Şekil 2.4: Diamanyetik malzemenin atomları.

Şekil 2.5'de ise diyamanyetik bir malzemenin dışarıdan uygulanan bir manyetik alana (H) nasıl bir tepki verdiği görülmektedir. Bu tepki, malzemenin uygulanan alana zıt yönlü bir manyetik alan, yani, mıknatıslanma (M) meydana getirmesidir. Ayrıca bu grafikten dış manyetik alan arttıkça, malzemenin meydana getirdiği alanında arttığı görülmektedir. Sonuç olarak grafiğin $M = -\chi H$ ile verilen bir ilişkiyi temsil ettiği görülmektedir. Burada $-\chi$ diamagnetik malzemenin manyetik duygunluğu adını alır ve negatif bir niceliktir [4].

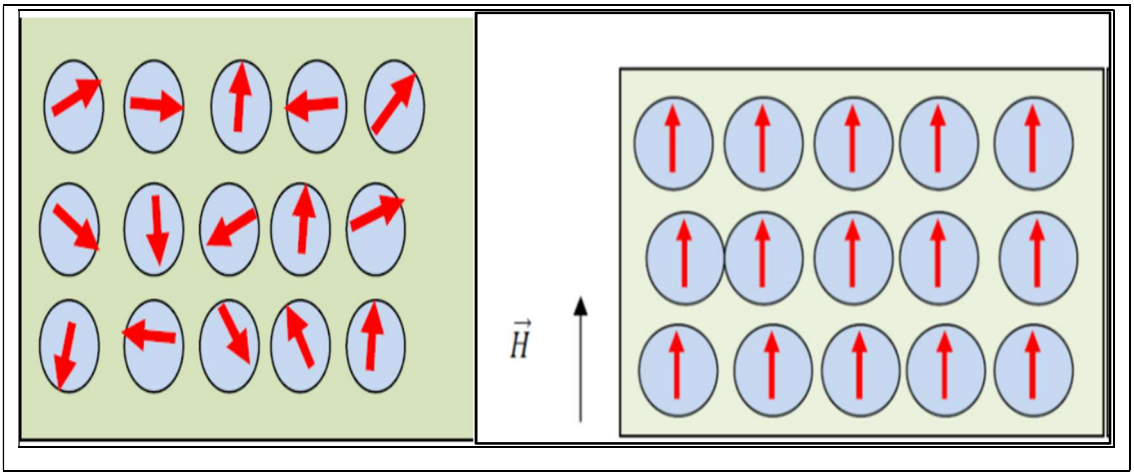


Şekil 2.5: Diamanyetik bir malzemenin M-H grafiği.

2.1.1.4. Paramanyetizma

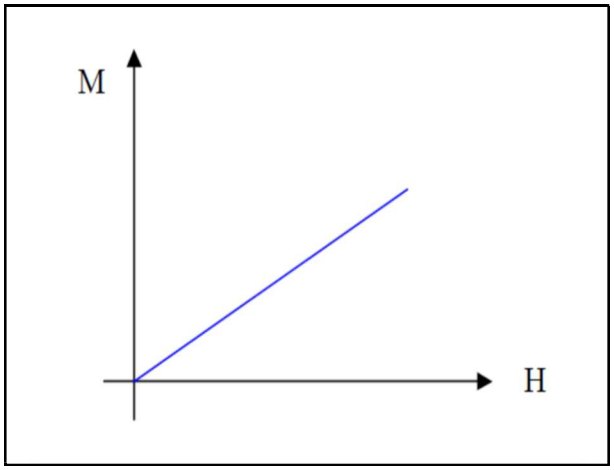
Paramanyetik malzemelerde manyetik momentler rastgele sıralanmışlardır. Sisteme dışarıdan manyetik alan uygulandığında alan yönüne dönerler. Fakat uygulanan alan ne kadar şiddetli ve sıcaklık ne kadar düşük de olsa, tüm manyetik momentler alan doğrultusuna yönelmezler. Bu nedenle paramanyetik malzemenin net manyetik momentleri çok küçüktür [5]. Paramanyetik durumda, dışarıdan bir manyetik alan uygulanmadıkça atomik momentlerin toplamı sıfır olmaktadır [7].

Şekil 2.6a'da [4] dışarıdan bir manyetik alan uygulanmıyor iken örgü içerisindeki atomların manyetik momentlerinin rastgele yönelimleri gösterilmiştir, Sekil 12.6b'de [4] ise malzemenin üzerine dışarıdan bir manyetik alan uygulandığında atomların manyetik momentlerinin yaklaşık dizilimleri gösterilmiştir [4].



Şekil 2.6: a) Paramanyetik bir malzemenin dış alan yokken rastgele olan manyetik düzenlenimi. b) Dış manyetik alan altında Paramanyetik bir malzemenin alabileceği en düzenli hali.

Şekil 2.7'de dış manyetik alan arttıkça, malzemenin toplam mıknatıslanmasının da orantılı (lineer) olarak arttığı görülmektedir. Bu, dış alanın daha fazla atomik manyetik momenti düzenlemesinden kaynaklanır [4].



Şekil 2.7: Paramanyetik bir malzemenin M-H grafiği.

Paramanyetik davranış Curie Yasası ile verilir. Curie Yasası'na göre manyetik duygunluk (alınganlık) (χ) aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\chi = \boldsymbol{M}/\boldsymbol{H} = (C/T) \tag{2.7}$$

Burada "C" Curie sabiti olup denklem (2.8) ile verilir.

$$C = N(\boldsymbol{\mu}^2\boldsymbol{B}/k) \tag{2.8}$$

Alınganlık ifadesinden görüldüğü gibi dışarıdan manyetik alan uygulandığında malzeme içerisindeki manyetik momentler düzenlenir ve mıknatıslanma artar. Fakat sıcaklık arttırıldığında ısısal titreşimlerden dolayı mıknatıslanma (M) ve dolayısıyla alınganlık (χ) değeri azalır, ısısal titreşimler manyetik momentinin yön değiştirmesine, bu da toplam mıknatıslanmanın azalmasına neden olur. Manyetik momentleri birbirleri ile etkileşmelerinin olduğu durumlarda devreye Curie-Weiss yasası girer. Bu yasa ise su şekilde ifade edilir:

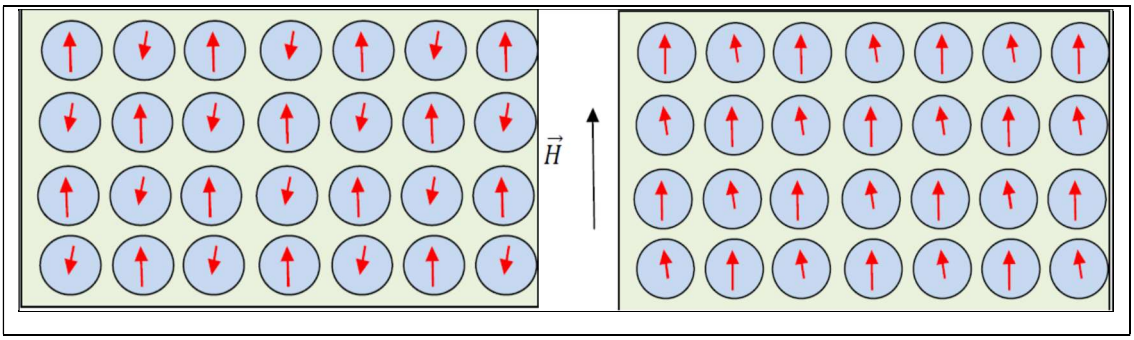
$$\chi = C/(T-Q) \tag{2.9}$$

Burada Q bir sıcaklık sabitidir. Bu sabit sıfır, artı ya da eksi işaretli bir değer alabilir. (Q=0) olduğunda Curie-Weiss yasası Curie yasasına dönüşür. Yani bu durumda malzeme içerisindeki manyetik momentler birbirleriyle etkileşmezler. Eğer Q sıfırdan farklı olursa malzeme içerisinde bulunan manyetik momentler arasındaki etkileşmeler göz önüne alınır. Bu durumda malzeme geçiş sıcaklığının (Curie sıcaklığı; T_c) üstünde "Paramanyetik" olur.

Q'nun artı işaretli olduğu durumlarda malzeme geçiş sıcaklığının (Curie sıcaklığı; T_c) altında "feromanyetik", Q'nun eksi işaretli olduğu durumlarda malzeme geçiş sıcaklığının (Neel sıcaklığı; T_N) altında "antiferomanyetik" olur [4].

2.1.1.5. Ferrimanyetizma

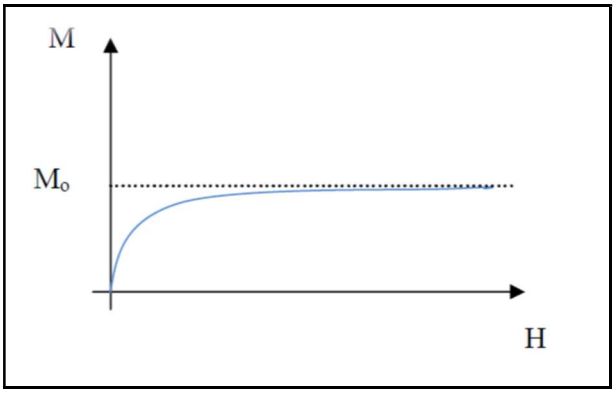
Ferrimanyetizma yalnızca saf elementlerden çok daha karmaşık kristal yapılara sahip bileşiklerde görülür. Bu malzemeler içinde değişim etkileşimleri, bazı kristal yönlerde atomların paralel hizalanmasına ve diğerlerinin anti-paralel hizalanmasına yol açar. Malzeme, tıpkı bir ferromanyetik malzeme gibi manyetik alanlara ayrılır ve manyetik davranışları da çok benzerdir, ancak ferrimanyetik malzemeler genellikle daha düşük doygunluk manyetizasyonuna sahiptir. Örneğin, Baryum ferritinde ($BaO.{}_6Fe_2O_3$) birim hücre, baryum ve oksijen iyonlarının manyetik momenti olmayan 64 iyon içerir, 16 Fe^{+3} iyonu paralel ve 8 Fe^{+3} hizalı antiparalel olarak hizalanmış momentlere sahiptir. Uygulanan alana paralel net bir mıknatıslanma sağlar, ancak iyonların yalnızca ⅛'i malzemenin manyetizasyonuna katkıda bulunduğu için nispeten düşük bir büyüklüktedir [8]. Şekil 2.8a'da [4] ferrimanyetik bir malzemenin atomlarının manyetik momentlerinin dizilimleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi örgü içerisindeki manyetik momentler birbirine paraleldir. Fakat yönelimleri farklı olan atomların, manyetik kuvvetleri de birbirlerinden farklıdır. Şekil 2.8b'de [4] ise malzemeye dışardan bir manyetik alan uygulandığında, atomların manyetik momentlerin dizilimleri gösterilmiştir.



Şekil 2.8: a) Ferrimanyetik bir malzemenin manyetik düzenlenimi b) Dış manyetik alan altında ferrimanyetik bir malzemenin düzenlenimi.

Şekil 2.9'da ise ferrimanyetik bir malzemenin üzerine dışardan bir manyetik alan uygulandığında gösterdiği tepki verilmiştir. Bu tepki ferromanyetik bir malzemenin verdiği tepkiye oldukça benzemektedir. Bu malzemelerin doyma mıknatıslanması değerleri ferromanyetik malzemelere göre daha düşüktür.

Grafikten görüldüğü gibi dış manyetik alan (H) uygulanmaya başladığında malzeme içerisindeki atomlar alanla aynı yönde dizilmeye başlarlar. Alan arttıkça bu diziliş daha düzenli olmaya ve sonuç olarak malzemenin toplam mıknatıslanmasını arttırırmaya başlar. Dış alan daha da arttığında ise, malzemede artık düzenlenecek atom kalmadığından, toplam mıknatıslanma doyum değerine (M_o, M_s) ulaşır [4].



Şekil 2.9: Ferrimanyetik bir malzemenin M-H grafiği.

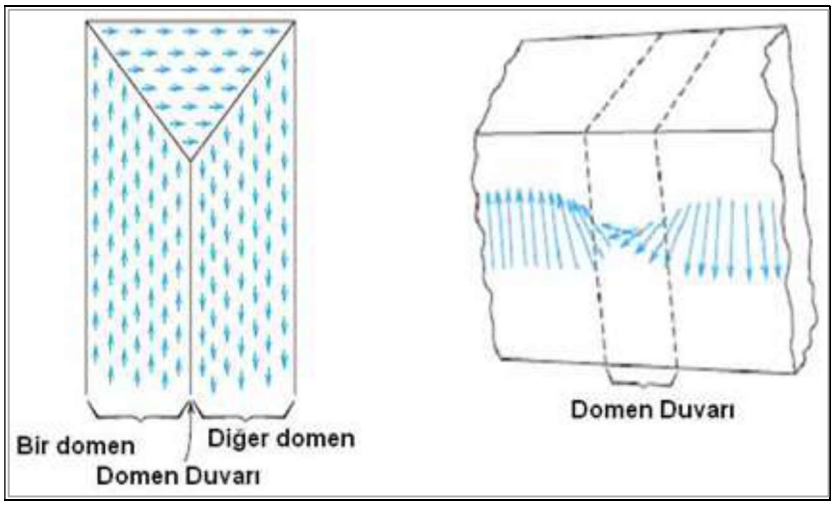
2.1.2. Manyetik Domenler ve Domen Duvarları

Ferromanyetik malzemeler manyetik özelliklerini sadece atomların taşıdığı manyetik momentten değil ayrıca manyetik bölgeler olarak bilinen malzemenin yaptığı küçük domenlerden kazanmaktadır. Her bir bölgede atomik dipollerin hepsi

tercihli bir yönde birlikte eşleşmişlerdir. Bu bölgeler manyetik bölgeler manyetik kuvvet mikroskobu (MFM) kullanılarak tespit edilebilmektedir [9].

Ortalama bir domen içerisinde 10^{12}-10^{18} atom momenti dizilmiştir. Her bir tek kristal sistemde ise yaklaşık 10^{6} domen bulunmaktadır. Domenlerin hacimleri yaklaşık olarak 10^{-12}-$10^{-8}m^{3}$ 'tür. Malzemeye harici bir manyetik alan uygulanması durumunda, domenlerdeki manyetik momentler dizilmek üzere kademeli olarak dönmeye başlarlar ve aynı yönde bir mıknatıslanma oluştururlar. Böylece domenlerin bir kısmı veya tamamı dizilmiş duruma gelir. Dizili hale gelen manyetik bölge sayısı arttıkça malzeme içerisindeki manyetik alanda o kadar yüksek olur. Tüm domenler dizildiğinde malzeme manyetik açıdan doygunluğa ulaşmış olur.

Malzeme manyetik açıdan doygunluğa ulaştıktan sonra dışarıdan uygulanan hiçbir ek manyetik kuvvet etki etmemektedir [8]. Farklı yönelimlere sahip olan domenlerin arasındaki sınırlara domen duvarları denir. Şekil 2.10'da [2] domen duvarları görülmektedir.

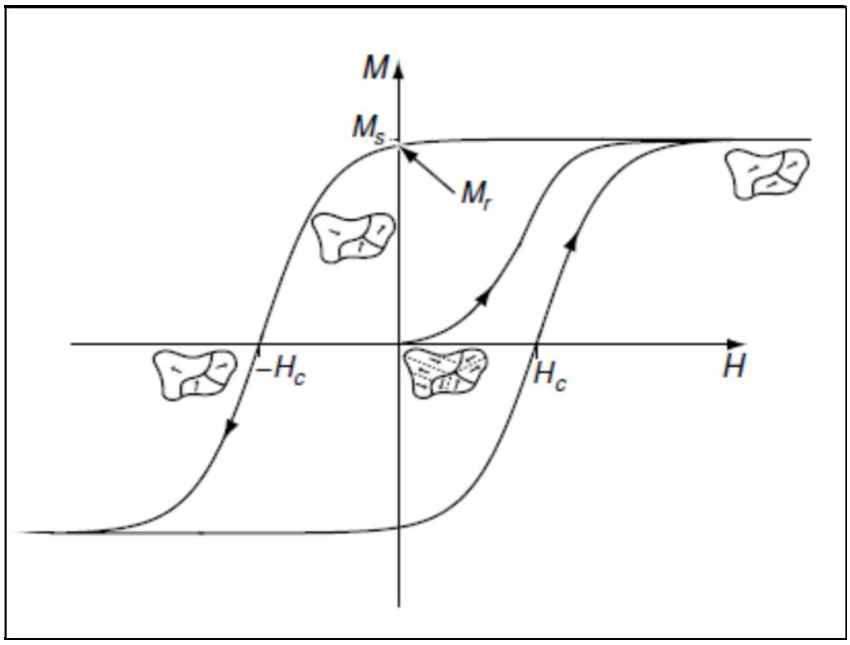


Şekil 2.10: (a) Domenler ve domen duvarı (b) Domen duvarları

Komşu domenler ise birbirlerinden domen duvarları ile ayrılır. Domen duvarları enerjisi domenlerden daha yüksektir ve domen alanıyla doğru orantılıdır. Domen duvarı enerjisi malzemeye özgün bir özelliktir. Manyeto kristalin anizotropinin derecesine ve komşu atomlar arası değişim etkileşim kuvvetine bağlıdır. Duvar kalınlığı da bu parametrelerle ilişkili olarak değişir. Mıknatıstaki kuvvetli bir anizotropi duvar kalınlığını daraltırken kuvvetli bir değişim etkileşimi ise daha geniş bir duvar kalınlığına sebep olur [2-6].

2.1.3. Manyetik Döngü (Histerisiz)

Ferromanyetik malzemeler, histerisiz çevrimi ile karakterize edilirler. Histerisiz çevrimi, tam bir mıknatıslanma periyodunda malzemenin manyetik alan şiddeti H ile manyetik akı yoğunluğu B arasındaki ilişkiyi gösterir. Histerisiz döngüsü teknik olarak manyetizmanın temelidir. Histerisiz döngüsü ferromanyetik malzemelerin domenlerde oluşan kendiliğinden mayetizasyon, M_s, gibi içsel manyetik özellikleri ile malzemenin şekil, yüzey pürüzsüzlüğü, mikroskobik kusurlar ve ısıl işlem geçmişi gibi faktörlerden etkilenen remanans, M_r ve koersivite, H_c gibi dışsal manyetik özellikleri birleştirmektedir [7].



Şekil 2.11: Manyetik histerisis eğrisi.

Sert manyetik malzemeler geniş, kare M-H halkalarına sahiptir. Kalıcı mıknatıslar için uygundurlar çünkü mıknatıslaşmayı doyurmak için yeterli bir $H \geq M_s$ alanı uygulayarak mıknatıslandıktan sonra alan kaldırıldığında mıknatıslanmış durumda kalırlar. Yumuşak manyetik malzemelerin çok dar halkaları vardır. Geçici mıknatıslardır ve alan kaldırılır kaldırılmaz manyetizasyonlarını kolayca kaybederler. Uygulanan alan, mikroskobik alanlar ölçeğinde zaten var olan kendiliğinden ferromanyetik düzeni ortaya çıkarmaya hizmet eder. Bu alan yapıları, başlangıçtaki manyetikleştirilmemiş durum, $M=M_s$ olduğu doymuş durum, $M=M_r$ olduğu sıfır

alanındaki kalan durum ve H=H_c'deki durum, M'nin işareti değiştirdiği zorlayıcı alan Şekil 2.21'de histerezis döngüsü üzerinde şematik olarak gösterilmektedir [7].

2.1.4. Manyetodirenç (MR) Etki

Manyetodirenç (MR), dış bir manyetik alanın etkisi altında malzemenin elektriksel direncinde meydana gelen göreli değişiklik olarak tanımlanır [10]. Genellikle şu eşitlikle verilir: ($\Delta_\rho=\rho_H-\rho_0$)' dır. Burada; ρH belli bir manyetik alan altındaki direnç değerini ve (ρ_0) ise sıfır manyetik alan altındaki direnç değerini göstermektedir. MR, direnç değerindeki artma ve azalmaya bağlı olarak pozitif ve negatif değerler alabilmektedir. Bütün metaller manyetodirenç özelliği sergilemektedir ancak bu değişim oldukça küçük düzeyde (yüzde birkaç) kalmaktadır [10].

Manyetizma tabanlı uygulamalar, modern eknolojinin birçok bakış açısında önemli bir rol oynamıştır. Bu uygulamalar, elektrik güç üretiminden bilgi depolamaya kadar değişik alanları kapsamaktadır. Bu alanda yapılmış daha önceki çalışmalar, özellikle dış manyetik alana karşı gösterilen dinamik veya statik tepkiler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bilgi çağının gelişmesi ile MR etki gibi manyetiketkileşme alanlarına olan ilgi daha da artmaya başlamıştır. Bunun temel sebebi MR etkinin bilgi depolamada ve okumada etkin bir şekilde kullanılabiliyor olmasıdır.

MR etkiyi temel alarak birçok sensör ve bilgi depolama cihazlarının prototipleri geliştirilmiş ve üretimleri yapılmıştır. Bugün MR etkinin yeni nesil elektrik cihazlarının geliştirilmesinde büyük bir potansiyele ve inanılmaz bir yeteneğe sahip olduğu gösterilmiştir. Bugüne kadar Olağan Manyetodirenç (OMR), Anizotropik Manyetodirenç (AMR), Devasa Manyetodirenç (GMR) ve Kolossal Manyetodirenç (CMR) gibi birçok farklı MR etki türü bulunmuştur. Bu MR özelliklerin gözlendiği materyaller ve oluşum mekanizmaları tamamen birbirinden farklıdır. MR etkisi sınıflandırılırken malzemelerin farklı manyetik sınıflara ait olması belirleyici bir durum oluşturmaktadır.

Malzemelerin anizotropi sabitleri, kristal yapıları, kompozisyonları, saflıkları ve yapıdaki atomik düzenlerin uzunlukları gibi fiziksel özellikler MR etki üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Dolayısıyla malzemelerde farklı özellikler sergileyen MR davranışları görülmektedir.

2.1.5. Değişim Önyargısı (Exchange Bias) Etkisi

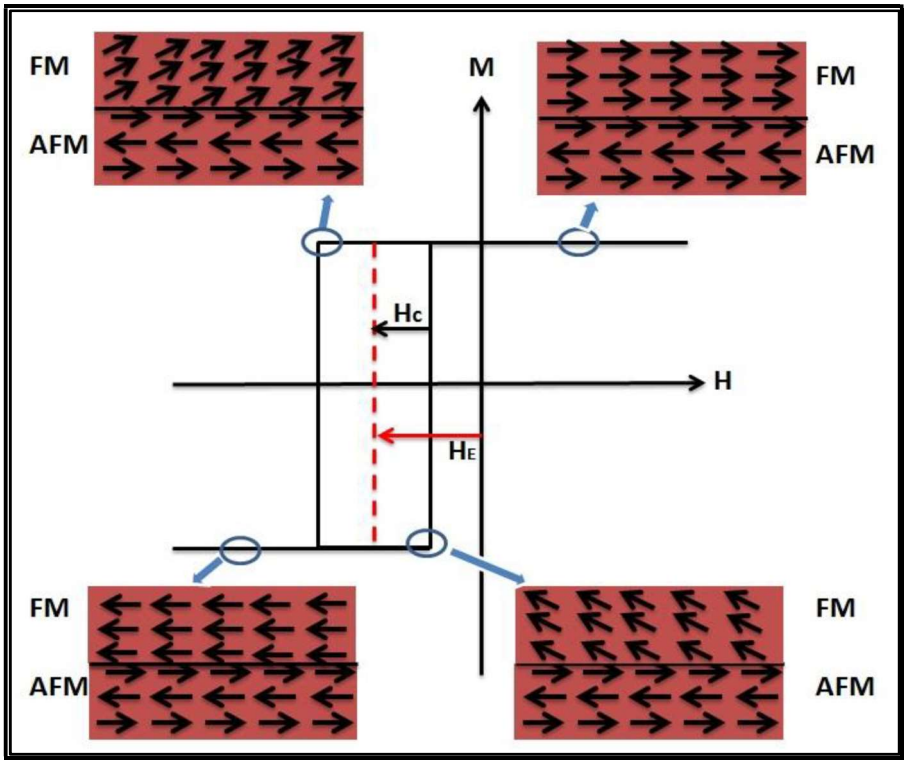
Değişim önyargısı, indüklenmiş tek eksenli manyetik anizotropi koşulu altında bitişik antiferromanyetik ve ferromanyetik katmanlar sisteminde görülebilir. Histerezis döngüsünün alan ekseni boyunca kaymasına yol açar. Sabit bir yön boyunca, ferromanyetik katman, antiferromanyetik katman ile değişim coupling etkileşimi nedeniyle mıknatıslanma tersine çevrilmesi için zorlaşır. Sonuç olarak FM katmanı, spin valve (vana) [1-4], manyetik sensörlerde [5] yaygın olarak kullanılan sabitlenmiş bir tabaka olarak kabul edilir. Uygulamaya bağlı olarak, manyetizasyon işleminin en önemli özellikleri histerezis döngülerinin şeklinin özelliklerine yansıyan değişim eğiliminin büyüklüğü veya ferromanyetik katmanların manyetizasyon anahtarlama dizisi olabilir [7].

AFM katmanı kalınlığı değişim eğilimi etkisi için önemli bir rol oynar. Bu nedenle, değişim eğilimi sistemlerinin malzeme parametrelerinin ve karakteristik özelliklerinin yukarıda belirtilen özellikleri nasıl etkilediğini incelemek önemlidir [1].

Değişim önyargısı sistemlerinde yaygın olarak kullanılan ferromanyetik malzemeler; Ni, Co, Fe, alaşımları ve Pt gibi elementlerin safsızlıkları ile katkılı alaşımlardır. Bu FM materyallerinin mıknatıslanması, zorlayıcı kuvveti ve manyetik anizotropisine bağlı olarak gerekli bir uygulama için farklı değişim eğilimi değerleri ve zorluğu bulunabilir [10-13]. İki tip permalloy vardır %72-% 80 Ni içeren 'yüksek nikel' permalloy [16-17] ve %40-%50 Ni içeren 'düşük nikel' Permalloy [17]. Değişim önyargısı etkisi büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır [24-25]. Hem ferromanyetik hem de antiferromanyetik katmanların kalınlıkları, değişim yanlılığının sıcaklığa bağımlılığını da etkiler.

Exchange biass etkisi büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır, sıcaklık değiştikçe, NiFe / IrMn'nin alan yapısının, özellikle de alan duvarlarının boyutunun, değişim yanlılığını etkileyen değişimler olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada IrMn/NiFe arasında değişim önyargısı gözlenmiştir. Bu ferromanyetik ve antiferromanyetik örneği [12] arasındaki arayüzde bulunan arayüzey bir etkidir. Antiferromanyetik sistemde, bir kristal düzlemdeki spinler paraleldir, bitişik düzlemdekiler ise antiparalel yönelmişlerdir. Öte yandan, ferromanyetik malzemeler kendiliğinden manyetik momentlere sahiptirler. Bu nedenle, FM ve AFM sistemi temasa geçtiğinde ve sistem manyetik alanın varlığında ısıtıldığında, arayüzde benzersiz bir etki yaratır ve bu da arayüzde ferromanyetik

malzemenin dönüşlerini sabitlemeye yardımcı olur. FM ve AFM çifti MHL'nin orijinine göre asimetrisidir [12]. FM ve AF'nin farklı harici manyetik alanlardaki spin konfigürasyonu Şekil 2.12'de [1] gösterilmektedir.



Şekil 2.12: FM ve AF katmanlarının farklı harici manyetik alanlardaki spin konfigirasyonu.

Şekil 2.12'de, spinlerin farklı harici manyetik alana nasıl yönlendirildiğini açıklamak için MHL döngüsü üzerindeki dört farklı nokta dikkate alınmıştır. Numunenin pozitif olarak doygun olduğu bir durumu ele alalım (spin konfigürasyonu sağ üstte verilmiştir) [1]. FM malzemeleri üzerindeki spinler, uygulanan alan yönü boyunca mükemmel şekilde hizalanır. Manyetik alan değeri düştüğünde (sol üstte), FM katmanındaki dönüşler ters yöne dönmeye hazırdır. Ancak anahtarlama alanları orijine göre simetrik değildir. FM ve AF arasında bağlama kuvveti kökenli MHL döngü merkezinin bir kayma tespit eder. Buna değişim önyargısı (H_{eb}) alanı denir [1]. Şekil 2.12'de [1] değişim önyargısı alanı gösterilmiştir. Manyetik alan negatiften pozitife süpürüldüğünde benzer işlem Şekil 2.12'de alt panelin sağ ve solunda temsil edilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, AFM'deki mıknatıslamanın sert olması ve harici manyetik alanın onu çevirememesidir. AFM katmanı yalnızca FM katmanını sabitlemek için kullanılır [1].

Buna ek olarak, exchange-coupled çok katmanlı sistemler de spin valf sensörleri, mikrodalga cihazları ve spintronik uygulamalar için ideal adaylardır [13]- [18]. Bu birleştirilmiş sistemlerin uygulamalarını geliştirmek için, birleştirme mekanizmasını ve bunun statik ve dinamik özellikler üzerindeki etkisini anlamak çok önemlidir. Bu konuda hem teorik hem de deneysel olarak kapsamlı araştırmalar yapılmıştır [19-22]. Bu alanda sıcaklığa bağlı çalışmalarda dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, ferromanyetik (NiFe) ve antiferromanyetik (IrMn) ince film numunesini ele alacağız. Hem statik hem de dinamik özelliklerin kapsamlı bir çalışması yapılmıştır [1].

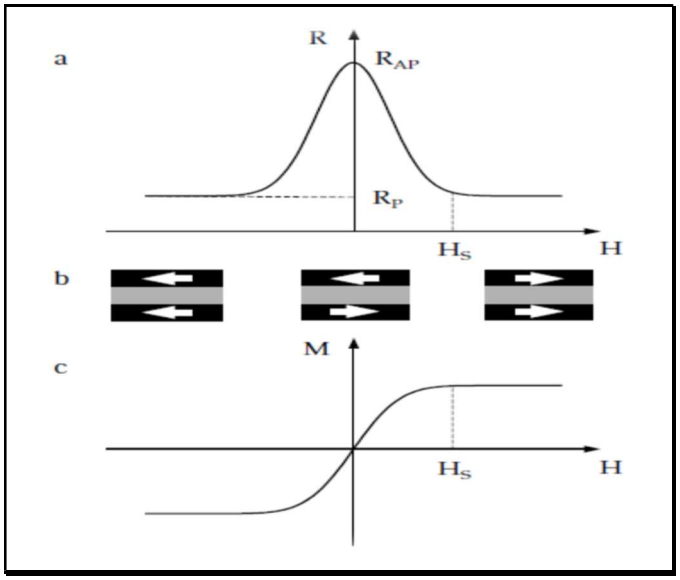
2.2. Dev Manyetodirenç(GMR) Etkisi

Dev Manyetodirenç (GMR), 1988 yılında Baibich [23] tarafından antiferromanyetiksel olarak etkileşen Fe/Cr tabakalarda gözlenmiş olup normal AMR etkiden çok daha büyüktür. Yine aynı yıl Baibich 'in başlatmış olduğu bu akım Albert Fert ve Peter Grünberg tarafından GMR olarak adlandırılarak yeni bir fiziksel etki tanımlanmıştır [24]. Bu etkiyi kullanarak manyetik alanda büyük elektriksel direnç değişimleri sergileyen malzemeler oluşturulmaya başlanmıştır. Bu yapılarda ferromanyetik tabakalar birbirinden manyetik olmayan tabakalar ile ayrılır. Bu etki genellikle spine bağlı etkileşimler ile açıklanır. Bu durumda normal metalde spin difüzyon uzunluğu ferromanyetik bölgelerin aralıkları ile uyumlu olmalıdır. Manyetik olmayan metal tabakanın kalınlığı ayarlanarak ferromanyetik tabakaların sıfır alanda antiferromanyetiksel etkileşmesi sağlanabilir. Küçük bir alan, komşu ferromanyetik tabakaların yönelimini modifiye ederek paralel yönelimini sağlayabilir.

Co/Cu tabakalı yapılarda oda sıcaklığında GMR etkinin %60-70 civarında olabileceği gösterilmiştir [29]. Bu durum manyetik kayıt teknolojisinde bir dönüm noktasını temsil etmektedir. Ferromanyetik nanoyapılı malzemeler, bulk materyallerden daha üstün ve farklı nitelikte mekanik, elektrik, manyetik ve optik özeliklere sahip olmaları nedeniyle son yıllarda yoğun ilgi çeken malzemeler olmuşlardır. GMR özelliği gösteren ferromanyetik nanoyapılar boyutlarına göre tek boyutu, iki boyutu ve üç boyutu nanometre mertebesinde olan malzemeler olarak gruplandırılabilir. Tek boyutu nanometre mertebesinde olan yapılara örnek olarak çok katmanlı yapılar ve spin valflar verilebilir [25]. Şekil 2.13'de [30] görüldüğü gibi çok katmanlı yapılar, ferromanyetik tabakaların ferromanyetik olmayan tabakalarla (NM)

birbirinden ayrılması ve periyodik olarak sıralanması ile oluşur. Bu yapılarda manyetik momentler, antiferromanyetik değiş-tokuş etkileşimi nedeniyle sıfır manyetik alanda antiparalel olarak yönelirler.

Doyum alanında ise manyetik momentler birbirine paralel olarak dizilirler [26]. Spin valf yapılar ise, Şekil 2.13' de ki gibi FM ve NM tabakaların sandviç seklinde dizilmesi ile oluşur. Bu yapılarda üstteki ferromanyetik tabaka bitişik antiferromanyetik tabaka ile birleşik iken, alt ferromanyetik tabaka uygulanan alan tarafından döndürülebilecek serbestliktedir. Spin valflerde, direnç değişimi için uygulanması gereken manyetik alan küçüktür ve bu özellik bu yapıları teknolojik uygulamalar için daha kullanışlıdır. [27].



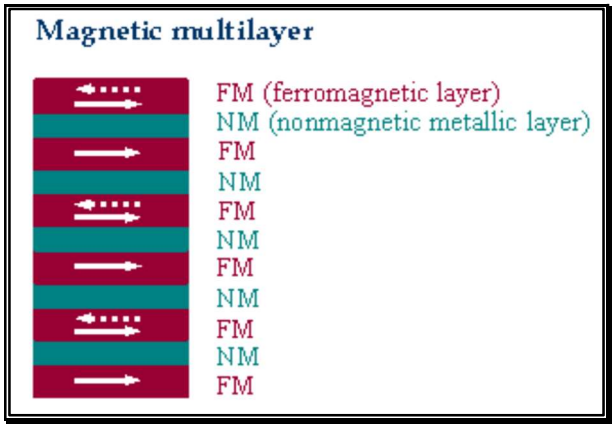
Şekil 2.13: Gmr etkisinin şematik gösterimi. (a) direçteki değişiklik (b) mıknatıslanma konfigürasyonları (c) çok katmanlı mıknatıslanma eğrisi.

2.2.1. GMR Yapıları

2.2.1.1. Çok Katmanlı GMR Yapısı

Şekil 2.14'de yapısı verilen çok katmanlı GMR'da iki veya daha fazla ferromanyetik katman, çok ince ferromanyetik olmayan bir ara parça (örneğin Fe/Cr/Fe) ile ayrılır. Belirli kalınlıklarda, bitişik ferromanyetik tabakalar arasındaki RKKY (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) kuplajı antiferromanyetik hale gelir ve

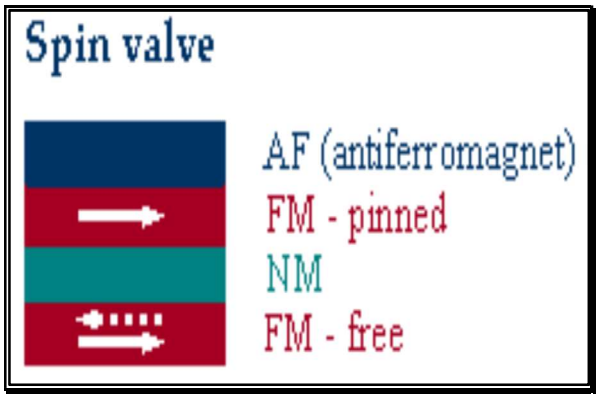
bitişik tabakaların manyetizasyonlarının anti-paralel olarak hizalanması için tercih edilir. Cihazın elektrik direnci normalde antiparalel durumda daha yüksektir ve fark oda sıcaklığında %10'dan fazla ulaşabilir. Bu cihazlardaki ara katman aralığı tipik olarak RKKY kuplajındaki AFM-FM salınımındaki ikinci antiferromanyetik zirveye karşılık gelir [28- 30].



Şekil 2.14: Çok katmanlı GMR yapısı.

2.2.1.2. Spin Valfi Yapısı

Şekil 2.15'de [31] verilen spin valfleri geliştirmek için yapılan araştırmalar, bireysel katmanlar arasındaki direnci arttırmak veya spin valf yığınına yarım metalik tabakalar eklemek gibi pratik yöntemlerle M_r oranını arttırmaya odaklanmıştır. Bu, bir elektronun dönüşünü koruyacağı mesafeleri ve ferromanyetik katmanlar ve arayüz tarafından elektronlar üzerindeki polarizasyon etkisini arttırarak çalışır. [31].



Şekil 2.15: Spin valf yapısı.

2.2.1.3. Pseudo-spin (Sözde Spin) Valf Yapısı

Sözde spin valf cihazları spin valf yapılarına çok benzer. Önemli fark, ferromanyetik tabakaların zorlamalarıdır. Bir pseudo-spin valf yapısında bir katman için yumuşak bir mıknatıs, diğeri için sert bir ferromagnet kullanılıyor olmasıdır. Bu, uygulanan alanın bir katmanın manyetizasyonunu diğerinden önce çevirmesine izin verir, böylece GMR cihazları için gerekli olan aynı anti-ferromanyetik etkiyi sağlar. Sözde spin valf cihazlarının çalışması için genellikle manyetik olmayan tabakanın kalınlığının yeterince kalın olmasını gerektirir, böylece değişim kuplajı minimumda tutulur. Cihaz üzerinde tam kontrol sağlamak için iki ferromanyetik katman arasındaki etkileşimi önlemek gereklidir [31] .



Şekil 2.16: Sözde spin valf yapısı.

2.2.1.4. Granülar Gmr Yapısı

Granül GMR yapısı Şekil 2.17'de [31] verilmiştir. Manyetik olmayan bir matriste manyetik bir malzemenin katı çökeltilerinde oluşan bir etkidir. Bugüne kadar, granül GMR sadece kobalt granülleri içeren bakır matrislerinde gözlenmiştir. Bunun nedeni, bakır ve kobalt karışmaz olmasıdır ve bu birlikre erimiş bir bakır ve kobalt karışımını hızla soğutarak katı çökelti oluşturaya yol açar. Granül boyutları soğutma hızına ve sonraki tavlama miktarına bağlı olarak değişir. Granül GMR malzemeleri, çok katmanlı benzerlerinde bulunan yüksek GMR oranları ile üretilememiştir [28]-[30].



Şekil 2.17: Granular gmr yapısı.

2.3. Esnek ve Giyilebilir Manyetik Sensörler

Mikroelektronik teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, yeni nesil ultra yüksek çözünürlüklü ekran teknolojileri başta olmak üzere, giyilebilir/ bükülebilir elektronik cihazlar, düşük enerji harcayan mobil cihazlar, şeffaf ve yeni nesil ışık yayan diyot tabanlı görüntü sağlayıcılar ve sensör sistemleri üzerinde son yıllarda önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Giyilebilir teknolojiler; veri toplamak, etkinlikleri izlemek ve deneyimleri kullanıcıların istek ve ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilen ağa bağlı cihazlardır. Bu teknolojiler, mikroçipler, sensörler ve kablosuz iletişim yetenekleri ile donatılmış ağa bağlı akıllı cihazlar olarak da ifade edilebilir. [32].

Sensörlerin dinamik kullanımı, mevcut sensörlerin sürekli olarak değiştirilmesine yol açmıştır. Bunlar gaz algılama [33-34], çevresel izleme [35-36], et [37], içecek [38], [39] gibi gıda ürünlerinde bileşenlerin izlenmesi gibi farklı sektörler için kullanılmıştır. Fizyolojik parametrelerin izlenmesi, insan davranışı ile ilgili bir model geliştirilmesine yardımcı olduğu için sensörlerin en önemli uygulamalarından biridir. Her özellik, bir hastanın karşılaştığı anormallikleri anlamak için ayrı ayrı incelenebilir ve bunlarla mücadele edilebilir.

Sensörler geniş bir şekilde iki kategoriye ayrılabilir: esnek [40] ve esnek olmayan [41]. Birincisi, özelliklerini değiştirmeden belirli bir ölçüde bükülebilen malzemelerden imal edilirken, ikincisi ise sert ve kırılgan malzemelerden yapılır. Esnek olmayan sensörler, silisyum alt tabakalara sahip sensörlerin en yaygın olanları daha önce geliştirilmiştir. Bu sensörler geniş bir uygulama alanı bulsalar da, sertlik, uyuşmazlık vb. gibi bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajlar, sensör üzerinde belirgin bir stres içeren herhangi bir uygulamanın izlenmesi, dolayısıyla sensöre zarar

verilmesi ile ilişkili olduğunda belirgindir. Bu, sensörün dinamik olarak kullanılabileceği alternatif bir yaklaşımın seçilmesiyle sonuçlanır, böylece kişi için herhangi bir rahatsızlığı ya da sensörü bükülebilir bir nesnede kullanırken zarar görmesini önlemek için esnek sensörlere başvurulur. Bunun dışında düşük üretim maliyeti, hafiflik, daha iyi mekanik ve termal özellikler, esnek sensörlerin kullanımını daha iyi bir yaklaşım haline getiren avantajlardan bazılarıdır. Giyilebilir sensörler, bir kişinin faaliyetlerinin izlenmesinde yararlı olmuşutur [42].

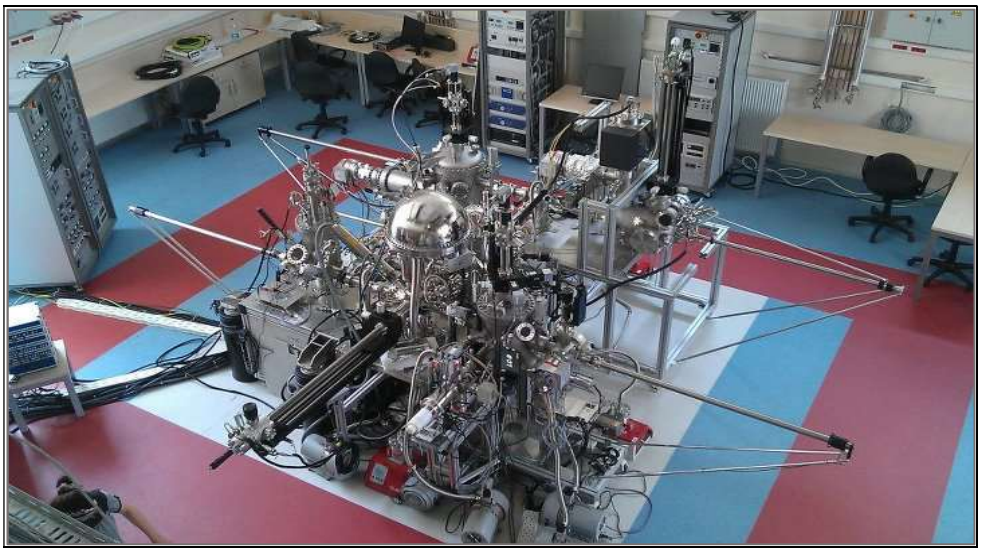
Bir kişinin davranışı ve eylemleri ile ilgili bilgileri doğru ve verimli bir şekilde sağlarlar. Günümüz dünyasında, giyilebilir sensörler tıp, güvenlik, iletişim vb. gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Giyilebilir cihazlar kişinin fizyolojik durumu ve hareket aktiviteleri hakkında gerçek zamanlı bilgileri izleyebilir ve kaydedebilir. Giyilebilir sensör tabanlı sağlık izleme sistemleri, tekstil elyafına, giysilere ve elastik bantlara entegre edilebilen veya doğrudan insan vücuduna bağlanabilen farklı tipte esnek sensörler içerebilir. Sensörler elektrokardiyogram (EKG), elektromiyogram (EMG), kalp atış hızı (HR), vücut sıcaklığı, elektrodinamik aktivite (EDA), kan basıncı (BP) ve solunum hızı gibi fizyolojik bulguları ölçebilir [45-46]. Ayrıca ivmeölçerler, jiroskoplar ve manyetik alan sensörleri gibi mikroelektro mekanik sistem (MEMS) tabanlı minyatür hareket sensörleri, aktiviteye bağlı sinyallerin ölçülmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır [44-43].

3. DENEYSEL TEKNİKLER

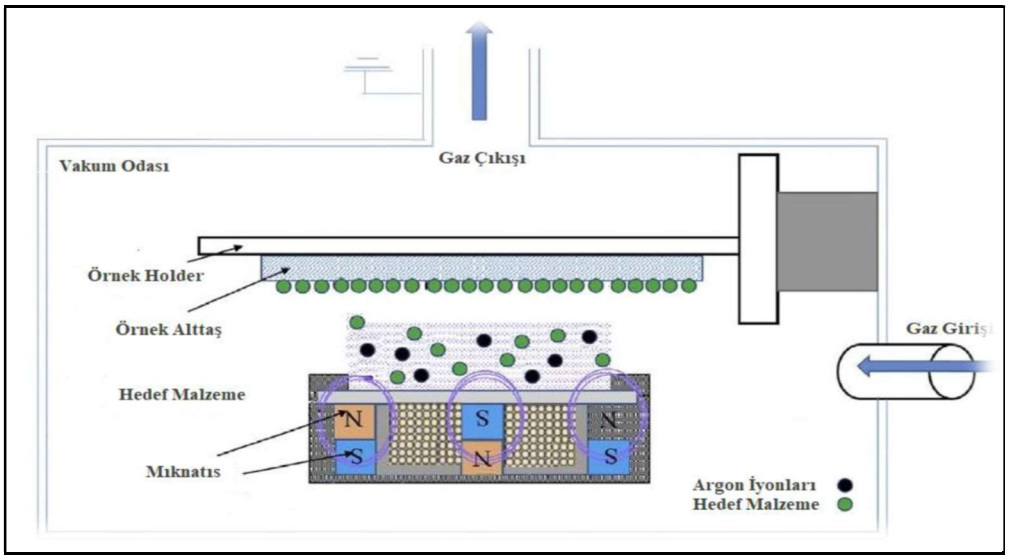
3.1. İnce Filmlerin Büyütme Tekniği (Sputter Yöntemi)

İnce film uygulamalarında birçok ince film hazırlama teknikleri mevcuttur. Fiziksel biriktirme yöntemleri arasında en yaygın olarak kullanılan yöntem magnetron sputter tekniğidir. Temel bazda saçtırma metodu yüksek enerjili iyonları kullanarak hedef malzeme (target) üzerinden atomların koparılarak başka bir yüzeyde biriktirilmesi olarak gerçekleştirilir [48]. Saçtırma yönteminin çalışma prensibi şu şekildedir; yüksek vakum seviyelerinde bir vakum odası içerisinde kontrollü olarak gönderilen argon atomları, anot ile katot arasında oluşturulan potansiyel fark sayesinde elektronlar ile çarpışarak iyonize olur. Yüzey üzerinde hedef malzemesinin biriktirilmesini sağlanmak için; yüksek kinetik enerjili argon iyonları hedef malzeme yüzeyinden atomları kopartarak örnek büyütülecek yüzeye yani alt taşa yönlendirilir. [48].

Sistemde dikkat edilmesi gereken nokta argon atomları ile çarpmadan sonra ayrılan ikincil elektronların büyütme kalitesine ve hızına etki etmesini önlemektir. Hedef malzemenin altına bir magnetron yerleştirerek belirtilen bu parametreleri belirli bir bölgede sınırlandırılır yani üzerine lorentz kuvveti etki eden elektronlar belirli bir bölgede (plazma oluşumu) hapsedilmiş olur. Homojen bir kaplama elde etmek için oluşturulan bölgenin içerisinde sınırlı kalan elektronlar daha fazla argon atomunu iyonize ederek sadece hedef malzemeden kopan atomların biriktirme yüzeyine ulaşmasını sağlar. Magnetron saçtırma yönteminde hedef malzemenin türüne göre uygulanan voltaj değiştirilebilir. Yalıtkan hedef malzemeler dc voltaj uygulandığında kutuplaşma gerçekleşeceği için argon iyonları ile çarpışma olmayacaktır ve biriktirme işlemi için hedef malzeme yüzeyinden atom koparmak mümkün değildir. Bu sebeple ac ve dc voltajın birleştirilerek kullanılması hedef malzemeyi negatif (katot), alttaşı ise pozitif (anot) gibi davranmasına sebep olacaktır. Şekil 3.2'de verilen rf sıçratma metodu; hedef malzeme negatif olduğunda pozitif yüklü argon iyonları yüzeye çarparak hedef malzemeden atom kopartır ve kopan atomların alttaş üzerinde biriktirilmesiyle büyütme işlemi gerçekleşmiş olur [49].



Şekil 3.1: Gebze Teknik Üniversitesi ince film kaplama sistemleri.



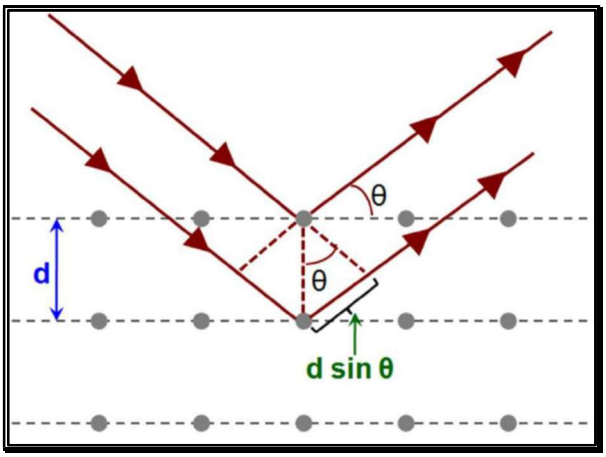
Şekil 3.2: Magnetron sputter sistemi çalışma prensibi.

3.2. İnce Film Karakterizasyon Yöntemleri

İnce film sistemlerinin karakterizasyon çalışmalarını yapısal ve manyetik karakterizasyonlar olmak üzere ele alınmıştır. Tez çalışmamız kapsamında hazırlanan örnekler yapısal özellikleri x-ışını kırınımı ölçümü ile yapılmıştır. Örneklerin manyetik analizleri ise ferromanyetik rezonans tekniği ve titreşimli örnek manyetometresi sistemleri kullanılarak yapılmıştır. Bu bölüm içerisinde, bu sistem ve tekniklerin çalışma prensipleri ve teorik alt yapıları detaylı olarak açıklanmıştır.

3.2.1. X-Işını Kırınımı (XRD)

Şekil 3.3'de de gösterildiği gibi belirli bir açıda gelen elektromanyetik dalgalar farklı düzlemlerden yansıma yaparak yapıcı girişimler oluşturur. Belirli açı değerlerinde gözlemlenen bu yapıcı girişimler sonucunda XRD paternleri oluşur. Tam olarak burada kullanılan elektromanyetik dalganın dalga boyu bilindiği takdirde Bragg Yasası kullanılarak düzlemler arası mesafe (d) hesaplanabilir.



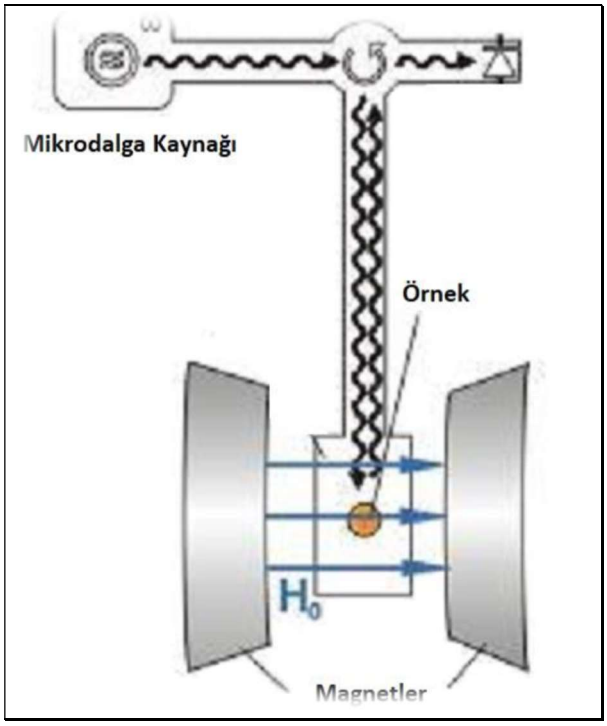
Şekil 3.3: Bragg yasası şematik gösterimi.

3.2.2 Ferromanyetik Rezonans (FMR)

FMR, farklı tipte anizotropileri belirlemek ve ferromanyetik sistemin sönümleme sabitlerini hesaplamak için iyi bir deney tekniğidir [53]. Mikrodalganın küçük dış pertürbasyon enerjisi, sistemin zemin durumu özelliklerinin tam olarak hesaplanmasını sağlar. Denge koşulu etrafında sistemin serbest enerjisinin karakterizasyonu bu teknik kullanılarak elde edilebilir. Çok katmanlı sistemin serbest enerjisi, FM ve AFM katmanı arasındaki bağlantıya güçlü bir şekilde bağlı olduğundan, FMR'nin açısal değişimi ve FMR spektrumlarının doğası, yalnızca iç ve manyetikliği giderme alanları hakkında değil, aynı zamanda değişim önyargısı bağlanması hakkında da yararlı bilgiler sağlar [54- 56].

Manyetizma tabanlı çalışmalarda manyetik malzemelerin, manyetik özelliklerini incelemek için birçok yöntem ve sistem mevcuttur. FMR tekniği bu yöntemler arasında en güçlü deneysel tekniklerden biridir. İnce filmlerin manyetik özelliklerini

tanımlayan manyetik anizotropi, manyetik moment, Curie sıcaklığı, manyetoelastik etkileşme katsayıları ve mıknatıslanmanın durulma mekanizması gibi tüm parametreler FMR sistemleri kullanılarak hesaplanabilir [50-52].



Şekil 3.4: Ferromanyetik rezonans tekniği şematik gösterimi.

FMR yönteminde sistemin içerisine yerleştirilen bir örneğin manyetik momentleri harici bir manyetik alan sayesinde uygulanan alana paralel olacak şekilde yönlendirilir. Bu esnada örnek malzemenin manyetik momentleri alan vektörü etrafında ωo öz frekansı (Larmour Frekansı) ile presesyon hareketi yapar. Bu koşullar altında örnek malzeme üzerine radyo frekansı (ω) uygulanırsa (manyetik alan bileşeni H_0 alanına dik olacak şekilde), ω frekansı, ω_0 öz frekansına yaklaşır ve enerji absorbe etmeye başlar. Frekanslar eşit olduğunda ($\omega_0=\omega$) yani rezonans durumunda maksimum mikrodalga enerjisi absorpsiyonu (soğrulması) olur. Bu olaya "ferromanyetik rezonans" denir. Ancak bu tez çalışması için deneylerde kullanılan ESR sistemlerinde mikrodalga frekansı sabit tutulmuş manyetik alan yani Larmour Frekansı değiştirilmiştir. Maksimum absorpsiyonun olduğu manyetik alan değeri rezonans alanı olarak ifade edilir ve denklem (3.3) gibi ifade edilir [50]-[52]:

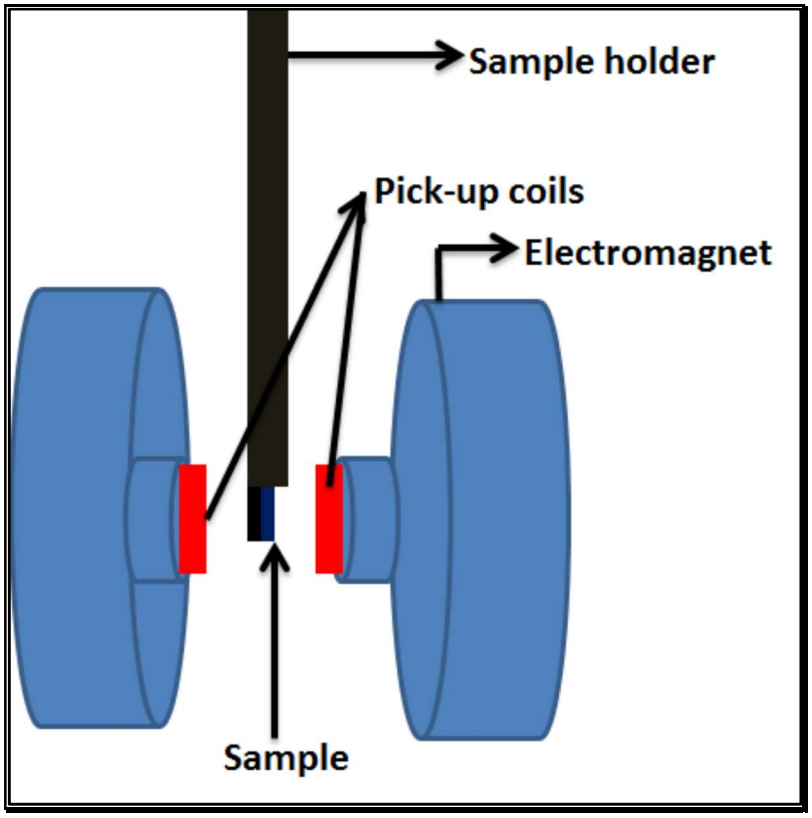
$$H_0 = (\omega_0/\gamma) \quad (3.1)$$

Ferromanyetik rezonans tekniği kullanılarak malzeme üzerinde anizotropi özelliklerini belirlemek için ESR spektrumunda pik olarak gözlemlen değerler belirlenir. İncelenecek olan örnekler düzlem içi geometride ve düzlem dışı geometride sistem içerisine yerleştirilerek ölçümleri yapılabilir ve incelenen örneklerin manyetik anizotropi değerleri hakkında bilgiler elde edilebilir [50].

3.2.3. Titresimli Numune Magnetometresi (VSM)

Malzemelerin manyetik ölçümleri, en az elektriksel ve kristalografik ölçümleri kadar önemlidir. Bilindiği gibi tüm malzemeler dışardan uygulanan bir manyetik alana karşı tepki vermektedirler. Dışardan uygulanan bu manyetik alan, malzeme içerisinde bir manyetizasyona neden olmaktadır ki her malzeme uygulanan alana karşı kendine özgü bir manyetizasyona sahip olur. Bu durum malzemenin uygulanan alana karşı göstermiş olduğu duyarlılıkla ilişkilidir. Bu duyarlılığın ölçüsüne malzemenin manyetik duygunluğu denmektedir. Yani manyetizasyonun, uygulanan alana göre değişim hızı dM/dH, malzemenin duyarlılığının yani duygunluğunun bir ölçüsüdür. Bu durumda dışardan uygulanan alanının malzemede manyetizasyonun oluşumuna neden olduğunu söyleyebiliriz. Bunun yanı sıra uygulanan alanın, hangi sıcaklıkta uygulandığı da önemlidir. Çünkü, düşük sıcaklık fiziğinde kritik T_c sıcaklığının altında ve üstünde malzeme farklı özelliklere sahiptir ve bu T_c sıcaklığı faz dönüşümünün olduğu sıcaklıktır.

Bu çalışmada DC manyetik ölçüm sonuçları, VSM ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiştir. Sistem oldukça hassas aralıklarda ölçüm yapabilme kabiliyetine sahiptir. VSM sisteminde düşük sıcaklıklarda (10K) ölçüm yapabilmek için helyum soğutma ünitesi kullanılmıştır. Örneğin bulunduğu çember içerisindeki sıcaklık, otomatik olarak görüntülenmekte ve hangi sıcaklıkta ölçüm yapılmak isteniyorsa, o değerde sabit bir şekilde tutulabilmektedir. Şekil 3.5'de [1] VSM sistemi gösterimi verilmiştir. Örnek VSM'in içerisine örnek çubuğunun ucuna iliştirilip yukarıdan konulmaktadır. Hazırlanan örnekler örnek tutucunun uç kısmında bulunan yuvalara yerleştirilerek ölçüm yapılabilmektedir. Örnek çubuğa yerleştirilip VSM' in içerisine gönderildiğinde, konumu tam iki mıknatıs arasına gelecek şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3.5: VSM tekniği şematik gösterimi.



Şekil 3.6: Gebze Teknik Üniversitesi VSM Cihazı.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalara ve sonuçlara yer verilmiştir. Örneklerin hazırlanma yöntemleri, yapılan analizler ve sonuçları, dikkat edilen hususlar konusunda bilgilendirilmeler yapılarak deneysel çalışmaların sonuçları detaylı bir şekilde sunulmuştur.

4.1. Alttaş Temizliği ve Örneklerin Hazırlanması

Yapmış olduğumuz çalışmada örneklerin hazırlanması için iki aşamalı bir süreç izlenmiştir. İlk olarak; ince filmlerin büyütüleceği alttaşların temizliği, ikinci olarak ise filmlerin büyütülme işlemidir. Bu çalışmada analiz sonuçlarına direkt olarak etki edebilecek bu iki süreç çalışma boyunca dikkatli ve planlı bir şekilde yürütülmüştür. İnce film sistemlerinin üretilme proseslerinde en önemli noktalardan biri film büyütülecek olan yüzeyin (alttaş) temizliğidir. Film büyütülecek yüzey büyütme öncesinde Tablo 4.1'de verilen solüsyonlar ile kimyasal temizlemesi yapılmış, daha sonra termal temizleme işlemi kademeli ısıtılarak yapılmıştır. Termal temizleme, büyütme öncesinde daha temiz bir yüzey elde etmek için uygulanmıştır. Yapmış olduğumuz çalışmada ilk ince film yapısı Silisyum (Si) alttaşlar üzerine hazırlanmıştır, filmi hazırlamak için kullanılan Si alttaş büyütme öncesinde ilk olarak kimyasal temizleme, daha sonra termal temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Film büyütme işleminden önce yapılan termal tavlama işleminde alttaş 650°C ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklık değerinde 1.5 saat bekletilmiştir.

Termal tavlama süreci sona erdikten sonra kristal yapının bozunuma uğramaması ve sistem güvenliği için sistematik bir soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir ve alttaş büyütme işlemi için hazır hale getirilmiştir. Yapılan termal temizleme işlemi ile büyütme öncesinde yüzeye yapışmış olan yabancı (kirlilik) atomlar ve moleküller temizlenerek büyütme işlemi öncesinde temiz bir yüzey ve saf bir alttaş elde edilerek analiz hatalarının en az seviyeye indirilmesi hedeflenmiştir.

Silisyum alttaş temizliğinin yapılmasından sonra ince film büyütme sistemi sayesinde filmlerin hazırlanacağı yüzeyler atmosfer basıncına çıkarılmadan büyütme işleminin yapılacağı sputter sistemine aktarılmıştır. Örneklerin büyütme işlemleri ultra yüksek vakum dc sputter (magnetron sıçratma) sistemi kullanılarak yapılmıştır. 6 adet

hedef malzemeyi aynı anda kullanabilme imkânı sunan cihaz içerisinde Au/IrMn/NiFe/Au ince film yapısı sputter tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Sistemin taban basıncı 10^{-9}mbar mertebesinde ve büyütme işlemi sırasında Ar gazı basıncı $1x10^{-3}$mbar'da tutulmuştur.

Yapmış olduğumuz çalışmada diğer ince film yapılarımız esnek ve şeffaf olan PET (Polyethylene terephthalate) alttaşları üzerine kaplanmıştır. PET alttaş malzemesi sadece Tablo-1 de sırasıyla verilen solüsyonlar ile temizlenmiştir. Bunun nedeni PET malzemesinin erime sıcaklığı ortalama 200°C olması yani termal ısıtma işlemine uygun olmamasıdır. Temizliği yapılan alttaşlar üzerine daha sonra dc sputter sisteminde aynı şekilde ince film yapısı büyütülmüştür.

Tablo 4.1: Kimyasal temizlik aşamaları.

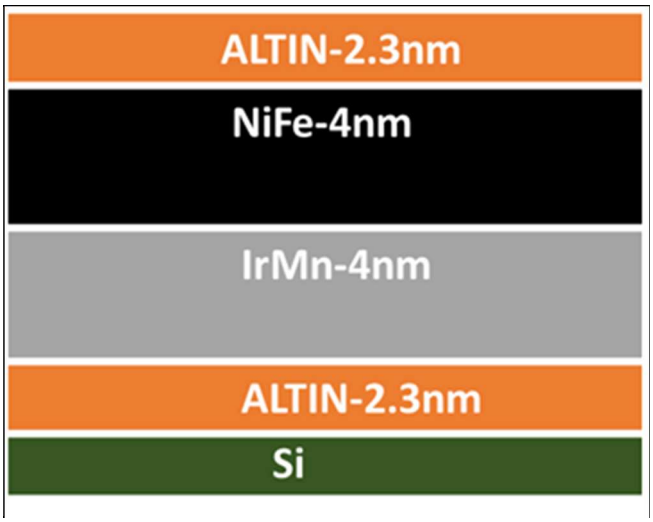
Solüsyon Adı	Temizleme Zamanı
Aseton	15 dakika
Metanol	15 dakika
Isopropanol	15 dakika

4.2. Silisyum Alttaş Üzerine İnce Film Yapısının Büyütülmesi ve Hazırlanması

Silisyum alttaş üzerine FeNi'nin Ni (% 80) ve Fe'yi (% 20) temsil ettiği bileşim [Au(2.3nm)/ FeNi(4 nm)/ IrMn(4nm)/ Au(2.3nm)] , $6x10^{-9}$mbar mertebesinde taban basıncı ile DC Sputter yöntemi ile kaplanmıştır. Ar basıncı $1x10^{-3}$mbar mertebesinde tutulmuştur. Biriktirme işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir ve 2,3nm kalınlığındaki bir Au katmanı seed (alt) ve capping (üst) katman olarak kullanılmıştır. Dört numune seti için yapısal bilgiler Tablo 4.2'de uygulama sırası ile sunulmuştur.

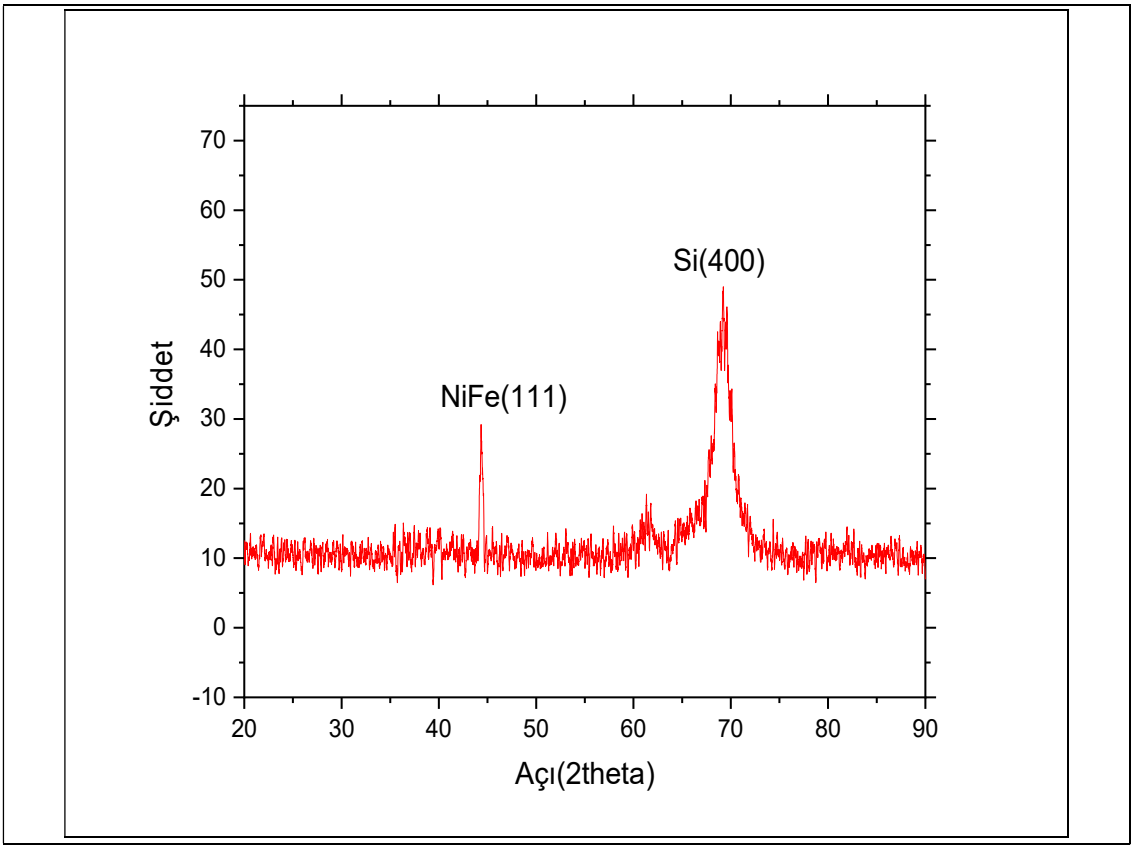
Tablo 4.2: Silisyum alttaş üzerine malzemelerin büyütme oranları.

Hedef Malzemesi	Power(W)	Growth rate(nm/min)	Kalınlık(nm)
Altın(Au)	DC=10W	1,52min	2.3nm
IrMn	DC=10W	4,27min	4nm
NiFe	AC=40W	6,40min	4nm



Şekil 4.1: Silisyum alttaş üzerine yapılan ince film yapısı.

4.2.1. Silisyum Alttaş Üzerine Yapılan Kaplamanın XRD Sonuçları



Şekil 4.2: Silisyum üzerine büyütülen örneğin XRD analizi.

4.2.2. Silisyum Alttaş Üzerine Kaplanan Yapının Manyetik Analizlerin Sonuçları

Hazırlanan örneklerin yapısal analizleri tamamlandıktan sonraki aşama manyetik özelliklerin ve manyetik anizotropi özelliklerinin belirlenmesi ve analiz edilmesi olmuştur. Manyetik analizlerin yapılması için ferromanyetik rezonans ve titreşimli örnek manyetometre teknikleri kullanılmıştır.

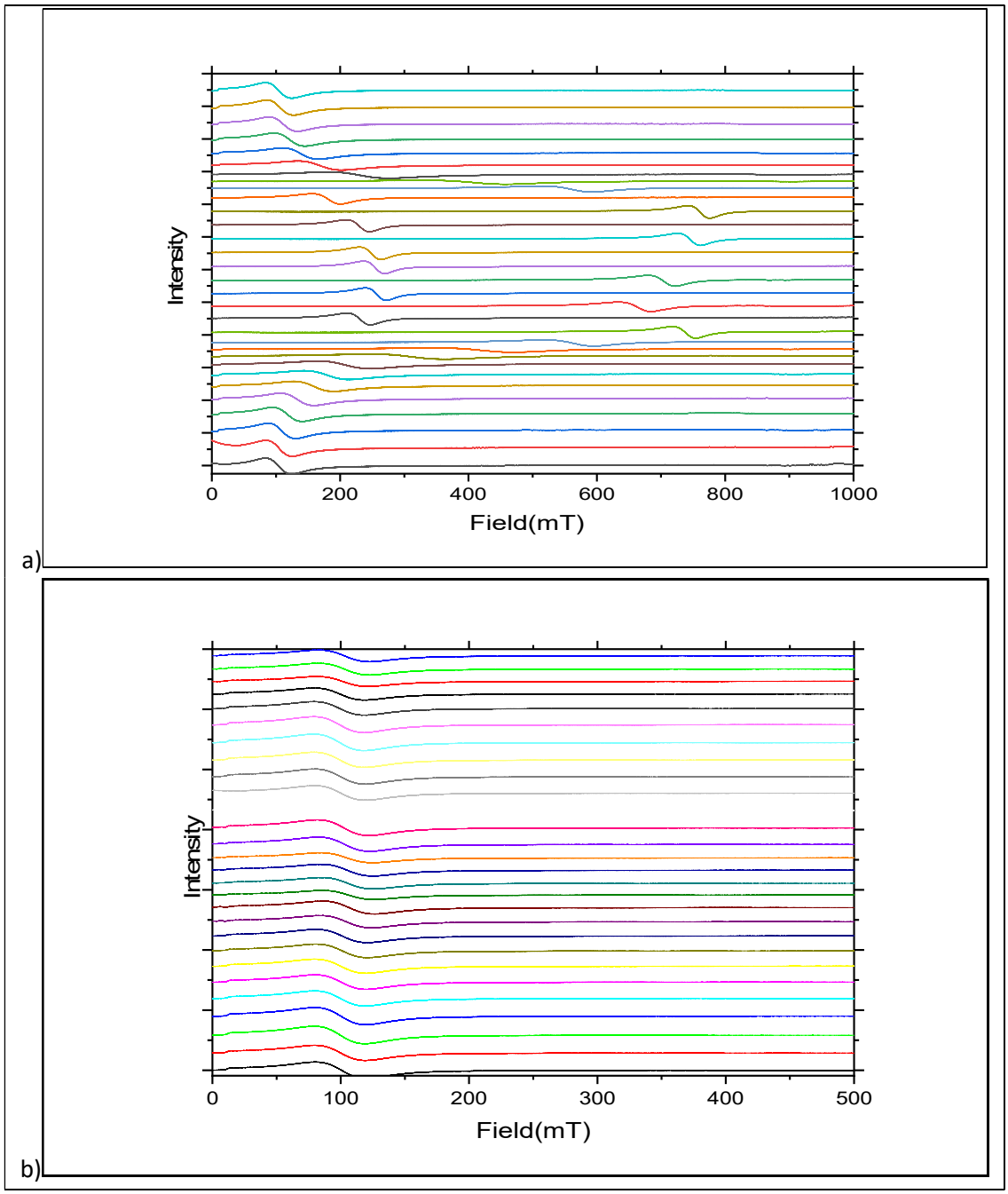
FMR tekniği manyetik özelliklerin ve manyetik anizotropi özelliklerinin anlaşılması açısından oldukça hassas ve kullanılabilir bir yöntemdir. Oda sıcaklığında açıya bağlı olarak yapılan FMR ölçümlerinde 2 farklı ölçüm geometrisi (düzlem içi ve düzlem dışı) kullanılarak hazırlanan örneklerin spektrumlarının ve rezonans alanlarının grafikleri elde edilmiştir. Denge durumu etrafındaki sistemin serbest enerjisi bu teknik kullanılarak elde edilebilir. Çok katmanlı sistemin serbest enerjisi, FM ve AFM tabakası arasındaki bağlantıya güçlü bir şekilde bağlı olduğundan, FMR'ın açısal değişimi ve FMR spektrumlarının doğası, sadece iç ve demanyetizasyon alanları hakkında değil, aynı zamanda değişim önyargısı hakkında da yararlı bilgiler sağlar.

FMR spektrumlarını deneysel olarak elde etmenin genellikle iki yolu vardır. İlk yöntem mikrodalga frekansını sabit tutarak, dış manyetik alanın değiştirilmesi. İkinci yöntem ise, harici manyetik alanı sabit tutarak mikrodalga frekansının değiştirilmesidir. İkinci yöntem hem alana hem de frekansa bağlı FMR spektrumları hakkında bilgi edinilmesini sağlar. Bu çalışmada, mikradalga frekansı sabit tutulurken, manyetik alan değiştirilerek ölçüm alınmıştır. Ferromanyetik rezonans tekniğinde, örnek sabit bir manyetik alan içerisine yerleştirilerek uygulanan harici manyetik alan vektörünün yüzey normali ile 90°'lik bir açı yapması sağlanır. Daha sonra örnek; örnek tutucu aracılığı ile manyetik alan ile farklı açılar yapacak şekilde döndürülür bu ölçüm geometrisine düzlem dışı, aynı şekilde örneğin manyetik alan vektörü ile sürekli dik açı yaparak kendi etrafında döndürülmesi ise düzlem içi geometrisi olarak adlandırlır.

Silisyum alttaş malzemesi üzerine kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn(4nm)/ FeNi (4nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısının manyetik analizi ilk olarak elektron spin rezonans spektroskopisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 9.1MHz frekansındaki FMR spektrumları, harici manyetik alanı süpürerek toplanmıştır. Bir spektrum için toplam süpürme süresi ~100sn olarak belirlenmiştir. FMR ölçümü alınmadan önce yapı 1cmx2cm boyutlarında FMR tutucusu boyutlarıyla uyumlu şekilde kesilmiş; FMR

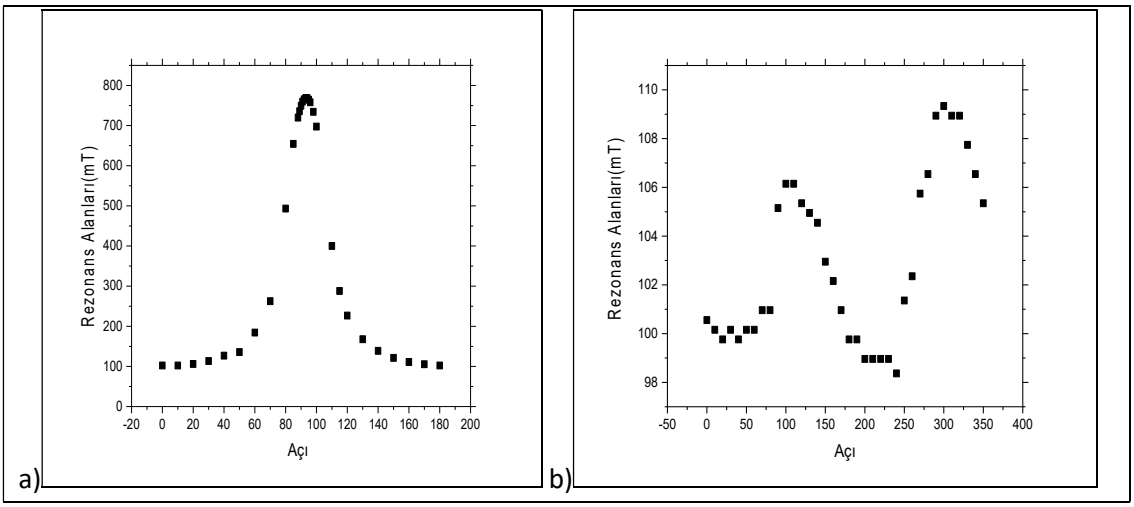
açısal bağımlılığı düzlem içi 0-360 derece açıları arasında her 10 derecelik açılarda, düzlem dışı ölçümleri 0-180 derece açıları arasında her 5 veya 10 derecelik açılarda alınmıştır.

Örneklerin spektrumları Şekil 4.3'de verilmiştir. Ölçümlerin sonucunda düzlem içive düzlem dışı geometrilerin her ikisi için de rezonans alanları detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 4.3: a) Düzlem dışı geometride FMR spekturumları. b) Düzlem içi geometride FMR spekturumları.

Manyetik malzemeler anizotropiktir, yani statik ve dinamik özellikleri uygulanan alanın yönüne büyük ölçüde bağlıdır. Köken açısından, bazı anizotropiler doğada içseldir, örneğin manyetokristal ve bazıları dışsaldır, örneğin şekil anizotropisi. Bu anizotropileri manipüle ederek manyetik özelliklerin ayarlanması, hem temel hem de teknolojik uygulamalarda çok önemlidir. Bu nedenle silisyum alttaş üzerine kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn(4nm)/ FeNi(4nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısının manyetik anizotropi özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için rezonans alanlarının detaylı bir şekilde incelemesi yapılmıştır. Her bir geometri için elde edilen FMR sinyallerinin açıya bağlı olarak detaylı analizleri sonucunda elde edilen rezonans alanları Şekil 4.4'de verilmiştir.

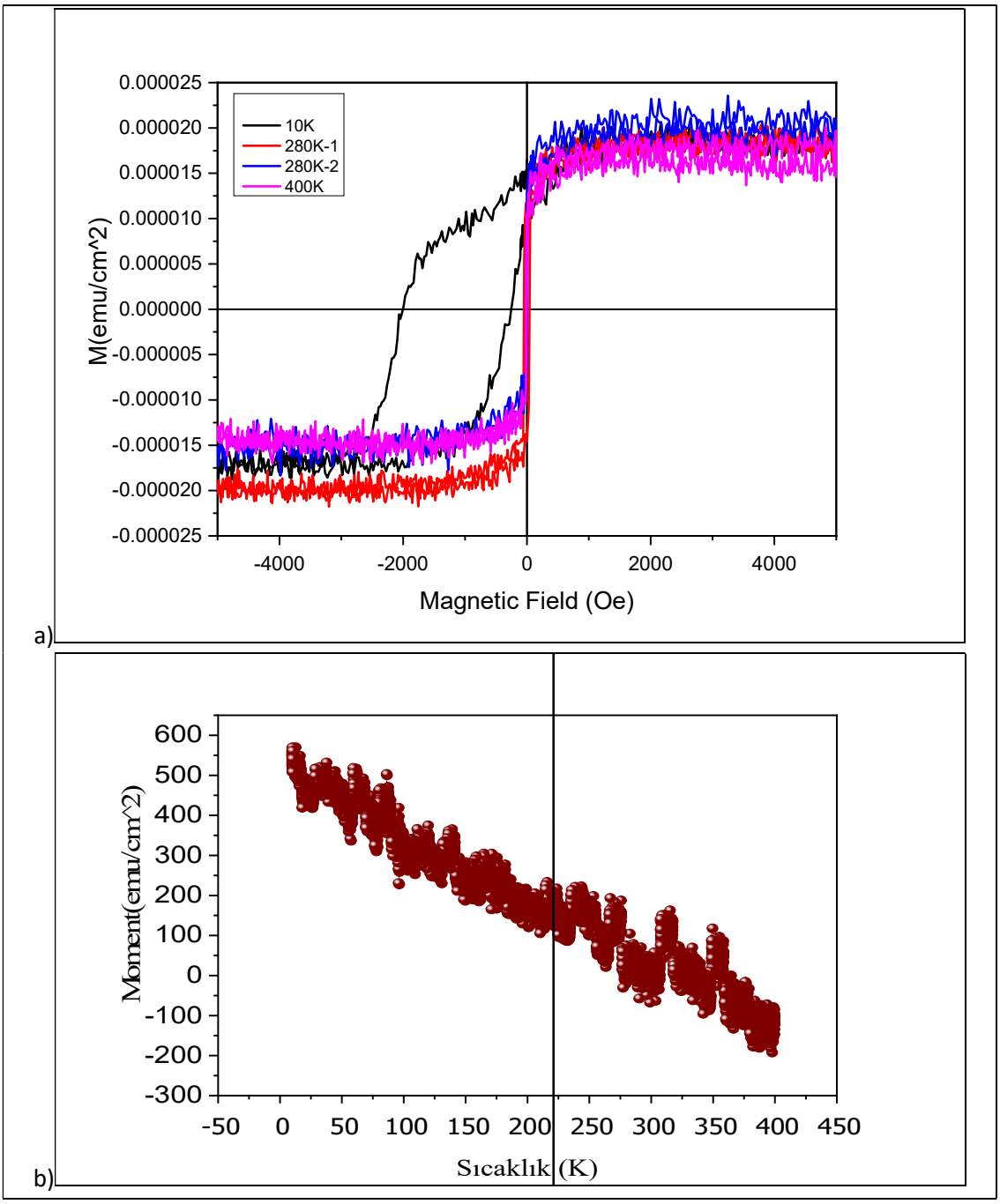


Şekil 4.4: a) Düzlem dışı geometride rezonans alanları. b) Düzelm içi geometride rezonans alanları.

Şekil 4.4'de Si/[Au(2.3nm) / IrMn(4nm)/ FeNi(4 nm)/ Au(2.3nm)] örneğinin düzlem içi ve düzlem dışı geometride kaydedilen ESR spektrumlarının rezonans alanlarının açısal beğımlılıkları incelendiğinde tek katlı FMR sinyalleri tespit edilmiştir. Dış manyetik alanın film düzlemine parallel olarak uygulandığı düzlem içi geometride eksensel simetrisi olmayan iki katlı manyetokristal anizotropinin varlığı belirlenmiştir. Bu asimetrilik antiferromanyetik katman olarak kullanılan IrMn atomlarının etkisi olduğu bölgelerden kaynaklanmaktadır. Düzlem dışı geometride ise yüksek anizotropi silisyum alttaş üzerine kaplanan örnektede belirlenmiştir. Silisyum alttaş üzerine kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn (4nm)/ FeNi(4 nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısı manyetik analizleri doğrultusunda mıknatıslanma özelliklerini ölçmek için titreşimli örnek manyetometrisi kullanılmıştır.

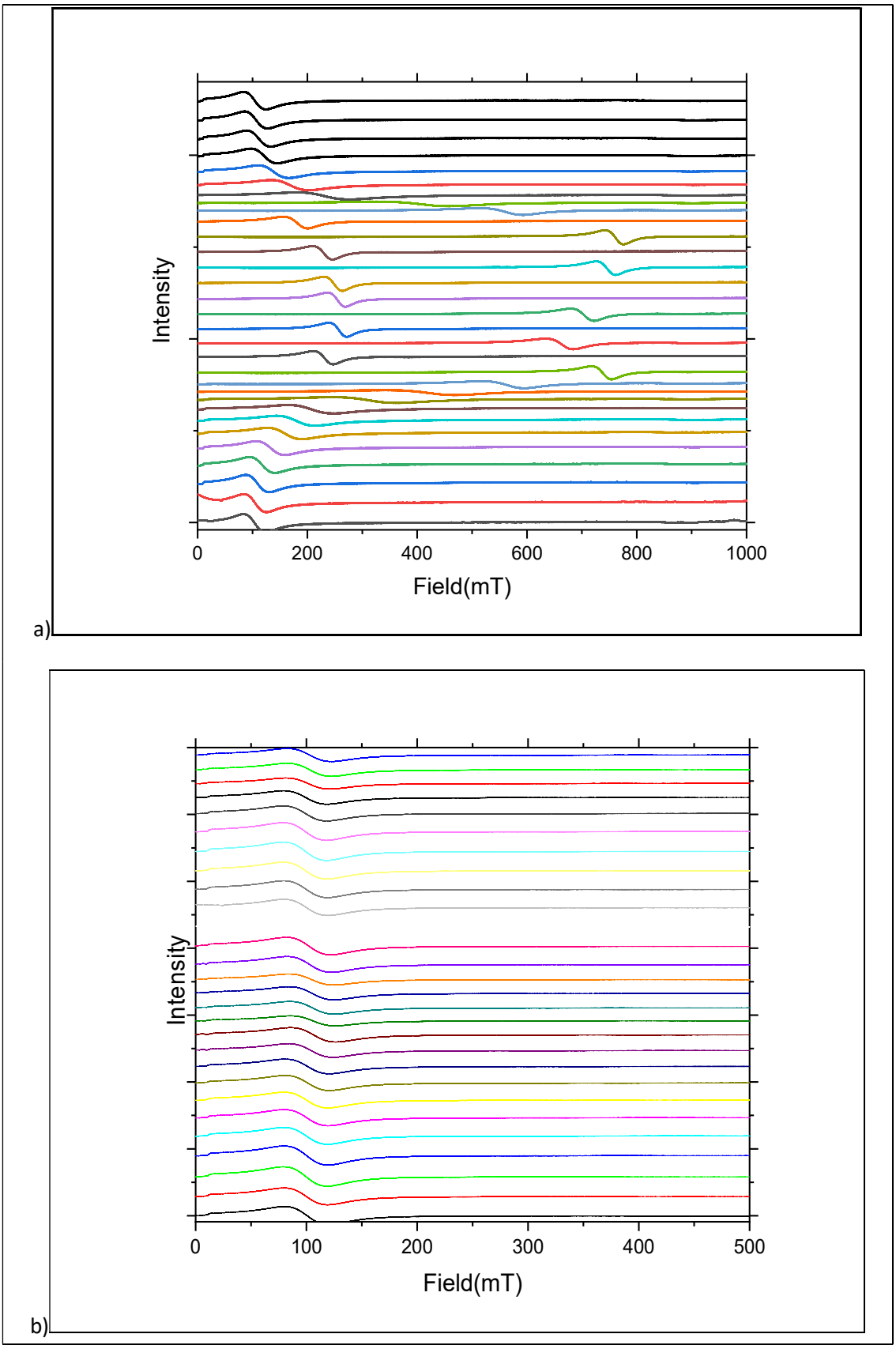
VSM ölçümü Gebze Teknik Üniversite'sinde bulunan Quantum Design 9T PPMS cihazı kullanılarak yapılmıştır. Örnekler oda sıcaklığından itibaren başlayarak 400K'e kadar 5000Oe altında ısıtılıp 10K'e kadar 5000 Oe alan altında soğutulmuştur. 10-400 K sıcaklık arasındaki 5000Oe alan altında belirli sıcaklıklarda mıknatıslanma ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler sonucunda mıknatıslanma ve histerisis eğrileri elde edilmiştir. Örnek için FC-ZFC (field cooling-zero field cooling) ölçümleri yapılarak M-T analizleri yapılmıştır. Antiferromanyetik sistemde, bir kristal düzlemdeki dönüşler paraleldir, ancak bitişik düzlemdeki dönüşlerin yönlendirilmesi antiparalel spontan manyetik momentlerdir. Bu nedenle, FM ve AFM katmanları temas ettiğinde ve sistem bir manyetik alan varlığında ısıtıldığında, arayüzde ferromanyetik malzemenin dönüşlerini arayüzde sabitlemeye yardımcı olan benzersiz bir etki olan değişim önyargısı 10K'de ortaya çıkmıştır. Şekil 4.5a'da siyah renk ile çizilmiş histerisis döngüsünün orjine göre negatif alan ekseni yönüne doğru kaydığı açıkça gözlenmiştir. Bu da değişim önyargısı varlığını açık şekilde ortaya koymuştur. 10 K de bu değişim önyargısı olayının görülmesinin nedeni AFM katmanı olan IrMn'ın Neel sıcaklığından (yaklaşık 410K) daha düşük bir sıcaklığa kadar ıstılmasıdır. Yani AFM Neel sıcaklığının altında kalarak paramanyetik faza geçememiştir. Bu etki farklı sıcaklıklarda bir faz geçişlerinin olduğuna işaret etmektedir. Bu sebeple örnekler üzerinde field cooling ve zero-field cooling ölçümleri de yapılmıştır.

Şekil 4.5b'de verilen ve neel sıcaklığını (antiferromanyetik malzemelerin kalıcı mıknatıslanmasını kaybedip paramanyetik davranışa geçtiği sıcaklık) belirlemek için 10-400K arasında da FC ölçümü yapılmıştır. FC eğrisinin artan sıcaklıkla beraber (400K'e doğru) sürekli azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.5: a) M-H b) M-T grafikleri.

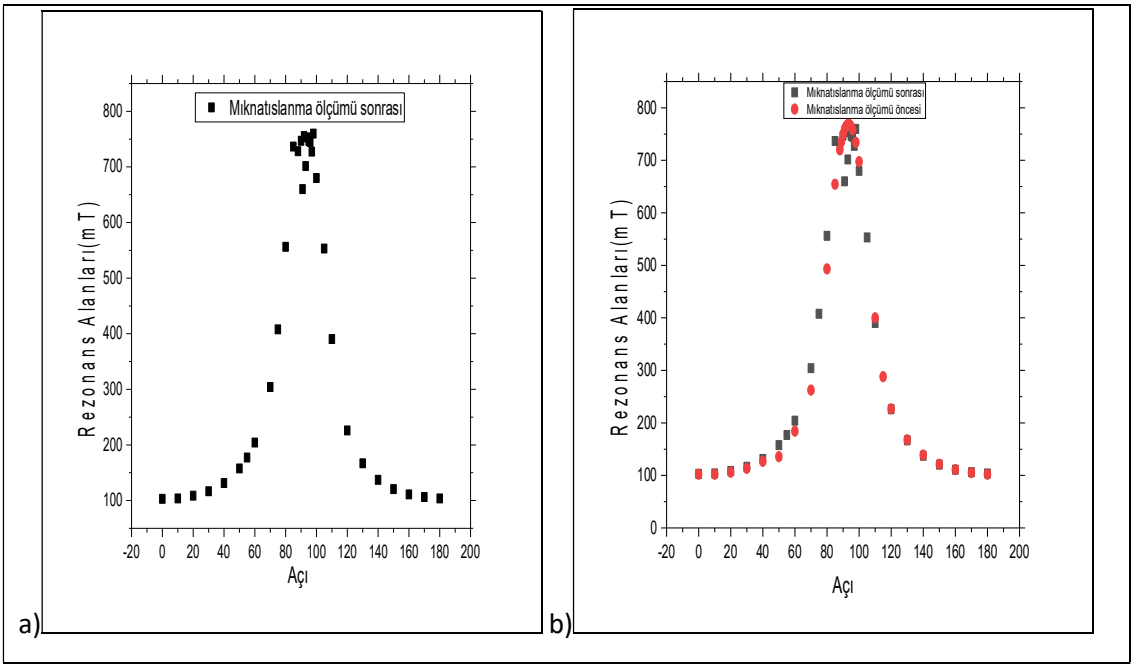
VSM sisteminde yapılan mıknatıslanma ölçümünün ardından yapı 1mmx2mm boyutlarında FMR tutucusu boyutlarıyla uyumlu şekilde ESR sistemine koyulmuştur; mıknatıslanma ölçümü yapılan Si/[Au(2.3nm)/ IrMn (4nm)/ FeNi (4 nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısının FMR sisteminde düzlem dışı ölçümleri 0-180 derecelik açılar arasında, düzlem içi ölçümleri 0-360 derecelik açılar arasında alınmıştır. Spektrum grafikleri Şekil 4.6'da verilmiştir.



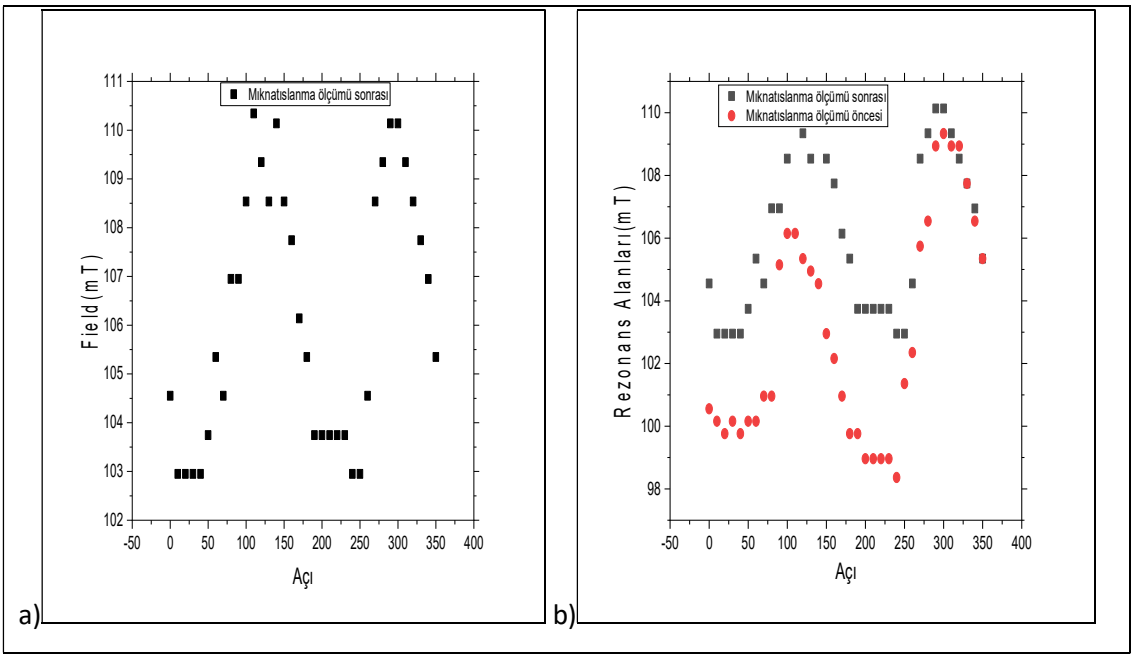
Şekil 4.6: a) Düzlem dışı geometride FMR spektrumları. b) Düzlem içi geometride FMR spektrumları

Mıknatıslanma ölçümü yapılan Si/[Au(2.3nm)/ IrMn (4nm)/ FeNi(4nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısının FMR sisteminde düzelem dışı ve düzlem içi ölçümleri sonrasında ortaya çıkan piklerin orta noktasına karşılık gelen değerler belirlenerek rezonansalanları-açı grafikleri çizdirilmiştir ve mıknatıslanma ölçümü öncesinde ortaya çıkan grafikler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.7 ve 4.8'de Si/[Au(2.3nm)/ IrMn (4nm)/ FeNi(4nm)/ Au(2.3nm)] örneğinin VSM ölçümü sonrasında düzlem içi ve düzlem dışı geometride kaydedilen ESR spektrumlarının rezonans alanlarının açısal bağımlılıkları verilmiştir.

Düzlem dışı geometri FMR ölçümleri karşılaştırmalı olarak verilen grafikte tek yönlü tek moddaki anizotropi çan şeklindeki açısal varyasyona yansımıştır. Düzlem içi geometride ise ferromanyetik özellik gösteren NiFe atomlarına bağlı olarak rezonans alanının değeri azalmış, eksensel simetriye sahip olmayan iki katlı manyetokristal anizotropinin varlığı belirlenmiştir.



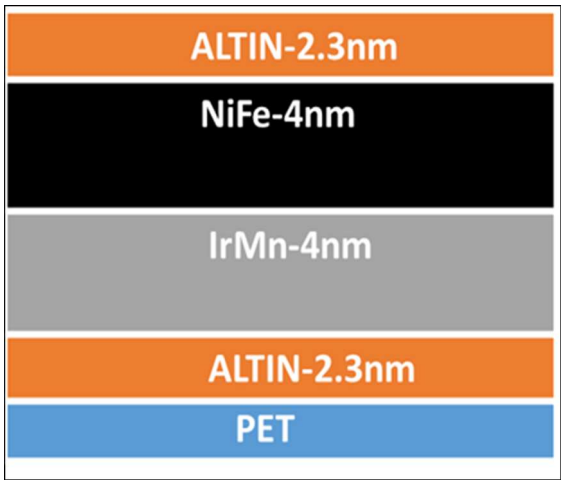
Şekil 4.7: a) VSM ölçümü sonrası düzlem dışı geometride rezonans alanları. b) VSM ölçümü öncesi ve sonrası üzlem dışı geometride rezonans alanları.



Şekil 4.8: a) VSM ölçümü sonrası düzlem içi geometride rezonans alanları. b) VSM ölçümü öncesi ve sonrası düzlem içi geometride rezonans alanları.

4.3. PET Alttaş Üzerine İnce Film Yapısının Büyütülmesi ve Hazırlanması

PET alttaşlar üzerine FeNi'nin Ni (% 80) ve Fe'yi (% 20) temsil ettiği bileşim [Au(2.3nm)/FeNi (4 nm) / IrMn (4nm)/Au(2.3nm)] , $6x10^{-9}$mbar taban basıncı ile DC Sputter yöntemi ile kaplanmıştır. Ar basıncı 1.0×10^{-3}mbar'da tutulmuştur. Biriktirme işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. 2,3nm kalınlığındaki bir Au (altın) katmanı seed (alt) ve capping (üst) katman olarak kullanılmıştır. Dört numune seti için yapısal bilgiler Tablo 4.3'de halinde sunulmuştur.

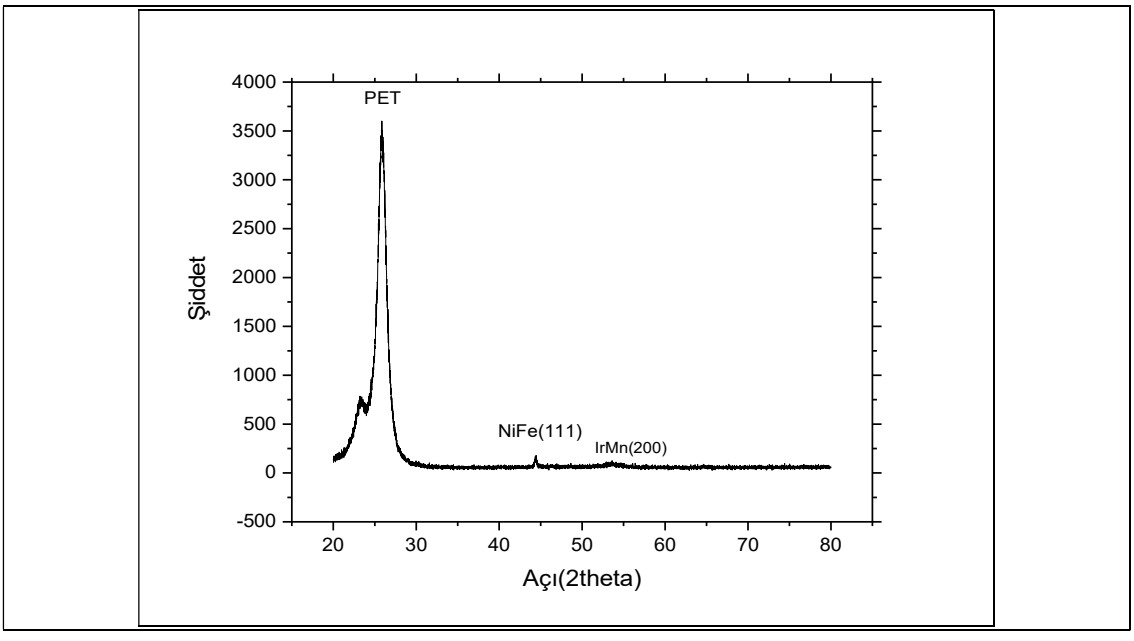


Şekil 4.9: PET alttaş üzeine yapılan ince film kaplama yapısı.

Tablo 4.3: PET alttaş üzerine malzemelerin büyütme oranları.

Hedef Malzemesi	Power(W)	Büyütme hızı(nm/min)	Kalınlık(nm)
Altın(Au)	DC=10W	1,52min	2.3nm
IrMn	DC=10W	4,27min	4nm
NiFe	AC=40W	6,40min	4nm

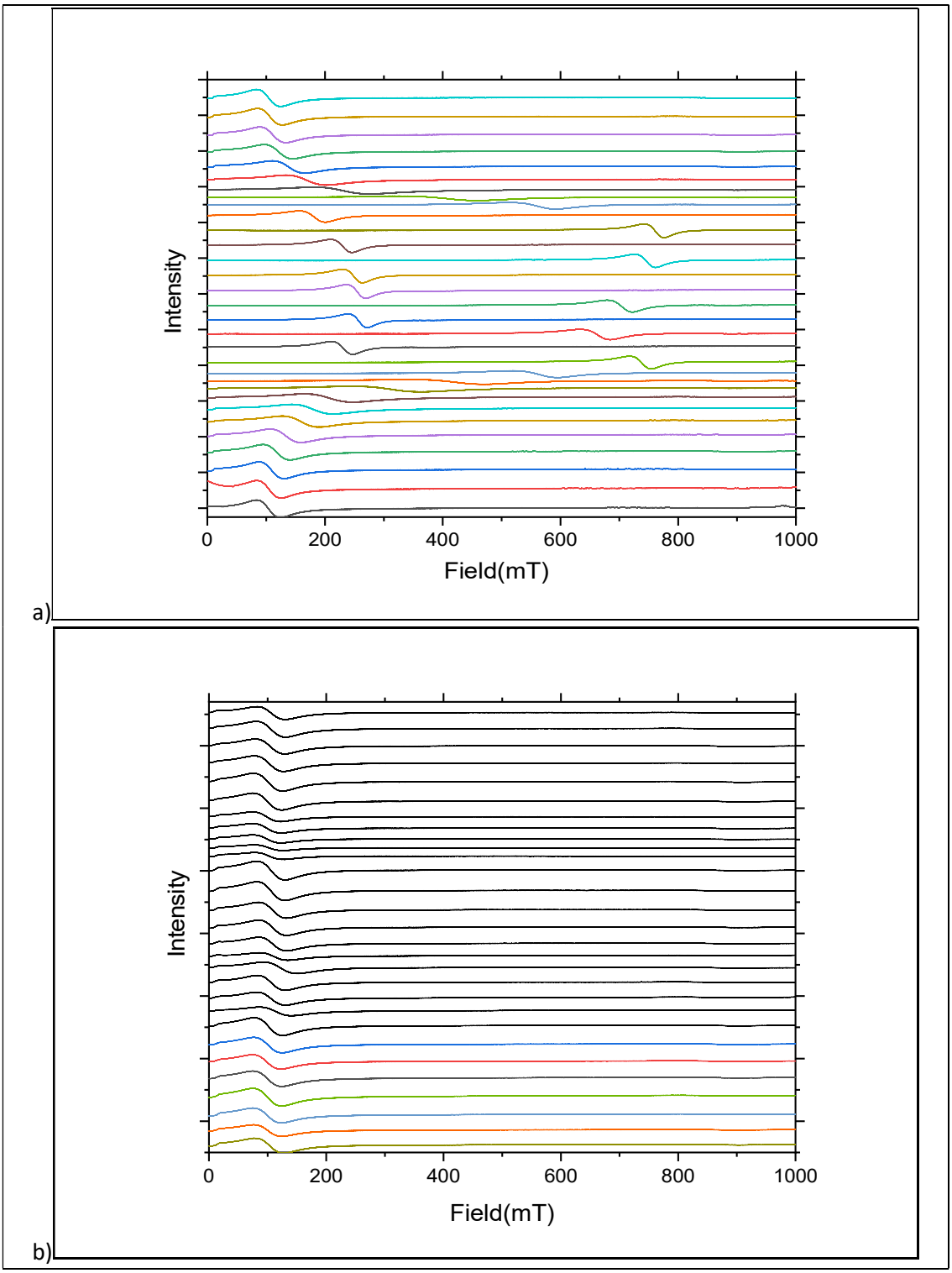
4.3.1. Pet Alttaş Üzerine Yapılan Kaplamanın XRD Ölçümü



Şekil 4.10: PET alttaş üzerine kaplanan öreneğin XRD grafiği.

4.3.2. PET Alttaş Üzerine Kaplanan Yapının Manyetik Analizlerin Sonuçları

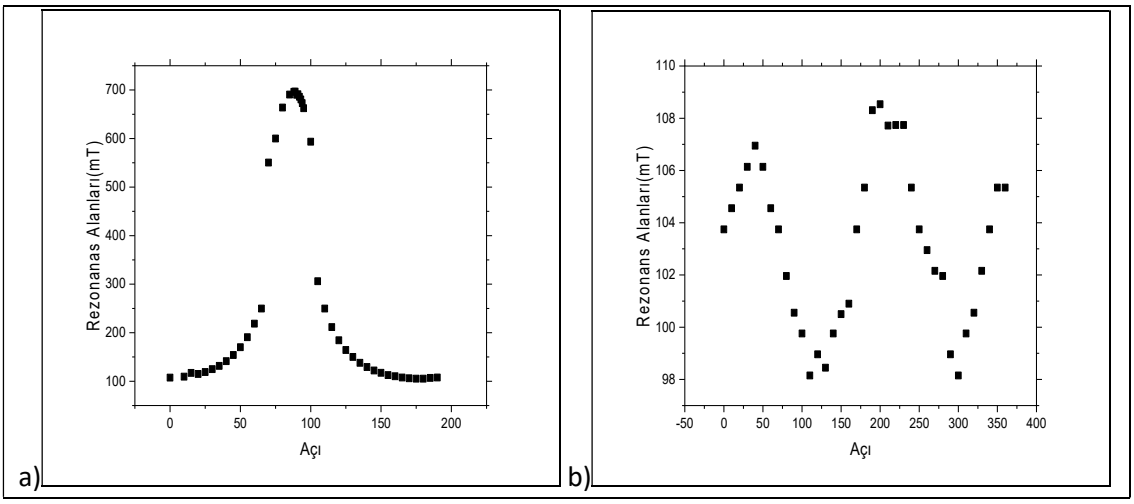
Silisyum alttaş malzemesi üzerine kaplanan ince film yapısının manyetik analizine benzer bir analiz PET alttaş üzerine kaplanan aynı kalınlıktaki ince film yapısı içinde Elektron spin rezonans spektroskopisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 9.1GHz frekanslı x-band mikrodalga kullanılmış ve spektrumları toplamak için manyetik alan değiştirilmiştir. PET alttaş malzemesi üzerine kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn(4nm)/ FeNi(4nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısı 1cmx2cm boyutlarında FMR tutucusu boyutlarıyla uyumlu şekilde kesilmiştir; düzlem içi geometri ölçümleri 0-360 derece açıları arasında 10 derecelik adımlarla, düzlem dışı geometri ölçümleri 0-180 derece açıları arasında 5 veya 10 derecelik adımlarla alınmıştır ve spektrum grafikleri Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11: a) Düzlem dışı geometride FMR spektrumları. b) Düzlem içi geometride FMR spektrumları.

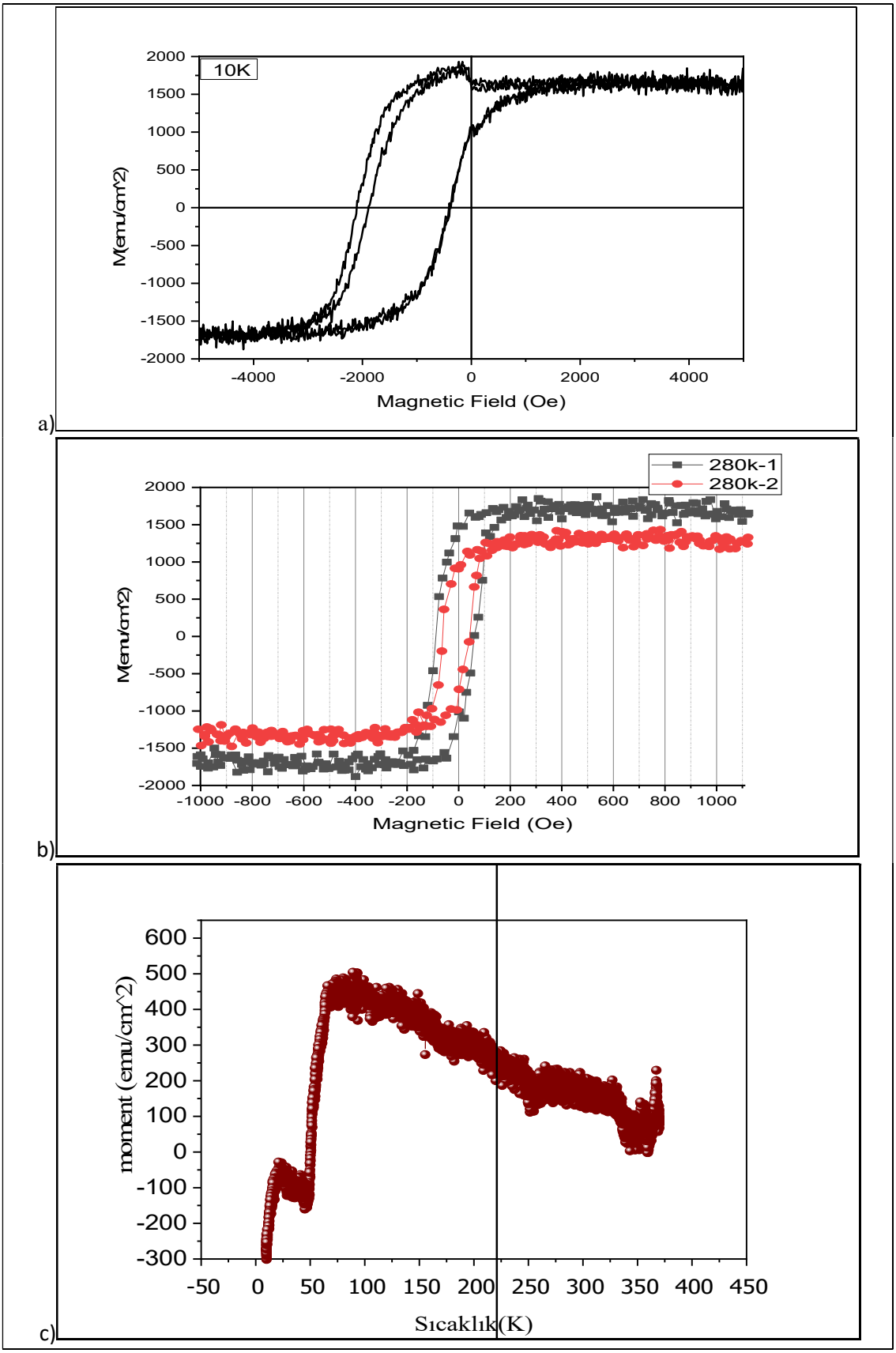
Elde edilen PET/[Au(2.3nm)/ IrMn(4nm)/ FeNi(4nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısının FMR sisteminde düzlem dışı ve düzlem içi geometrisinde alınan FMR ölçüm sonucunda ortaya çıkan piklerin orta noktasına karşılık gelen değerler belirlenerek rezonans alanı-açı grafikleri çizdirilmiştir.

Şekil 4.12’de PET/[Au(2.3nm)/ IrMn (4nm)/ FeNi(4nm)/ Au(2.3nm)] örneğinin düzlem içi ve düzlem dışı geometride kaydedilen ESR spektrumlarının rezonans alanlarının açısal bağımlılıkları verilmiştir. Rezonans alanlarının açısal bağımlılığı incelendiğinde, düzlem içi geometride örneğin eksensel simetriye sahip olmayan iki katlı manyetokristal anizotropinin varlığı belirlenmiştir. Bu asimetrilik AFM katman olan IrMn atomlarının etkisinden kaynaklanmıştır. Düzlem dışı geometride ise güçlü derecede tek eksenli yüksek anizotropi PET alttaş üzerine kaplanan örnektede belirlenmiştir.



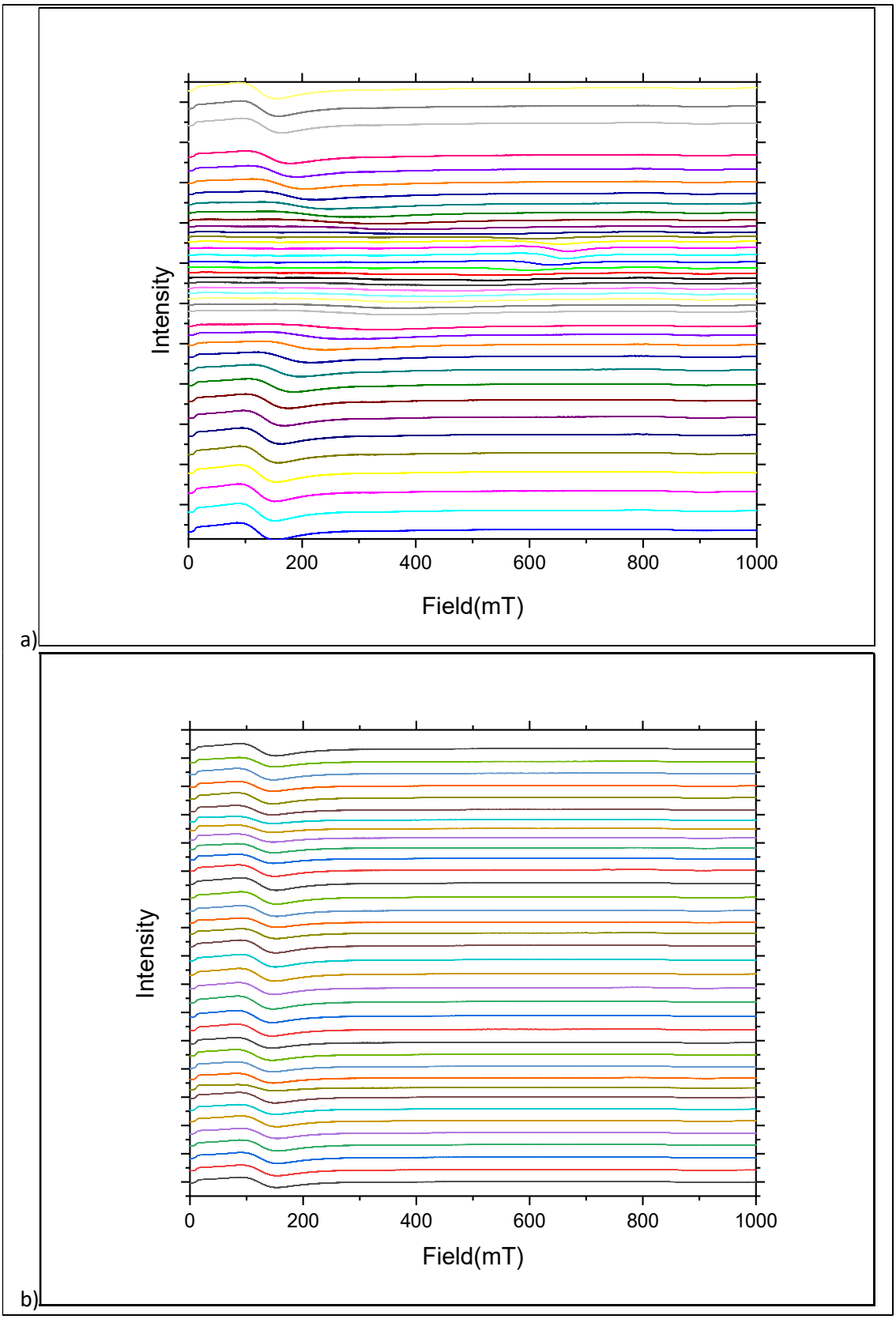
Şekil 4.12: a) Düzlem dışı geometride rezonans alanları. b) Düzlem içi geometride rezonans alanları.

PET alttaş üzerine kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn(4nm)/ FeNi(4 nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısının FMR ölçümlerinin tamalanmasının ardından silisyum alttaş üzerine kaplanan yapının mıknatıslanma ölçümüne benzer bir şekilde Gebze Teknik Üniversite’sinde bulunan VSM ölçümü Quantum Design 9T PPMS cihazında yapılmıştır. Örnekler oda sıcaklığından 280K’den başlayarak 400K’e kadar 5000Oe altında ısıtılıp 10K’e kadar 5000 Oe alan altında soğutulmuştur. 10-370K sıcaklık arasındaki 5000Oe alan altında belirli sıcaklıklarda mıknatıslanma ve histerisis ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler sonucunda mıknatıslanma ve histerisis eğrileri elde edilmiştir. Şekil 4.13c’de örnek için ZFC ölçümü yapılarak M-T analizi yapılmıştır. ZFC eğrisi önce artan sıcaklıkla beraber artmış daha sonra bir maksimum değere ulaşarak azalmaya başlamıştır. Bu sonuç ince filmin AFM davranış sergilediğini göstermiştir.



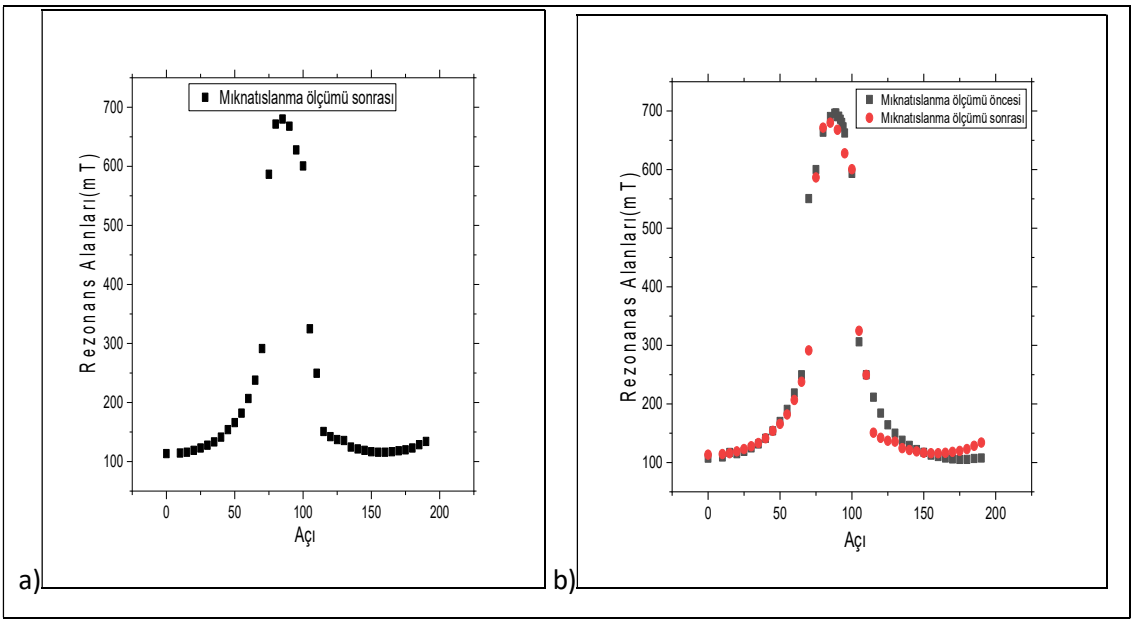
Şekil 4.13: a) M-H grafiği b) Oda sıcaklığında M-H grafiği c) M-T garfiği.

VSM sisteminde yapılan mıknatıslanma işlemi ilk olarak 280K den başlatılmıştır. Daha sonra malzeme 5000Oe altında belirli aralıklar ile 370K'e kadar ıstılmış ve tekrar 280K'e soğutulmuştur. Şekil 4.13b'deki 280K-1 başlangıç sıcaklığı, 280K-2 ise 370K'e ısıtıldıktan sonra tekrar 280K'e soğutulduğundaki değeri göstermiştir. 280K-2 için Msat değerinin azaltıdığı belirlenmiştir. PET alttaş malzemesi üzerine kaplanan [Au(2.3nm) / IrMn(4nm)/ FeNi(4 nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısı VSM sisteminde alınan mıknatıslanma ölçümü sonrasında elektron spin rezonans spektroskopisi kullanılarak ölçüm alınmıştır. 9.1MHz frekansındaki FMR spektrumları, harici manyetik alanı süpürerek toplanmıştır. Bir spektrum için toplam süpürme süresi ~100 sn olarak belirlenmiştir. FMR açısal bağımlılığı düzlem içi geometride 0-360 derece açıları arasında her 10 derecelik adımlarla, düzlem dışı geometride ise ölçümler 0-180 derece açıları arasında her 5 veya 10 derecelik adımlarla alınmıştır. Örneklerin spektrumları Şekil 4.14'de verilmiştir.

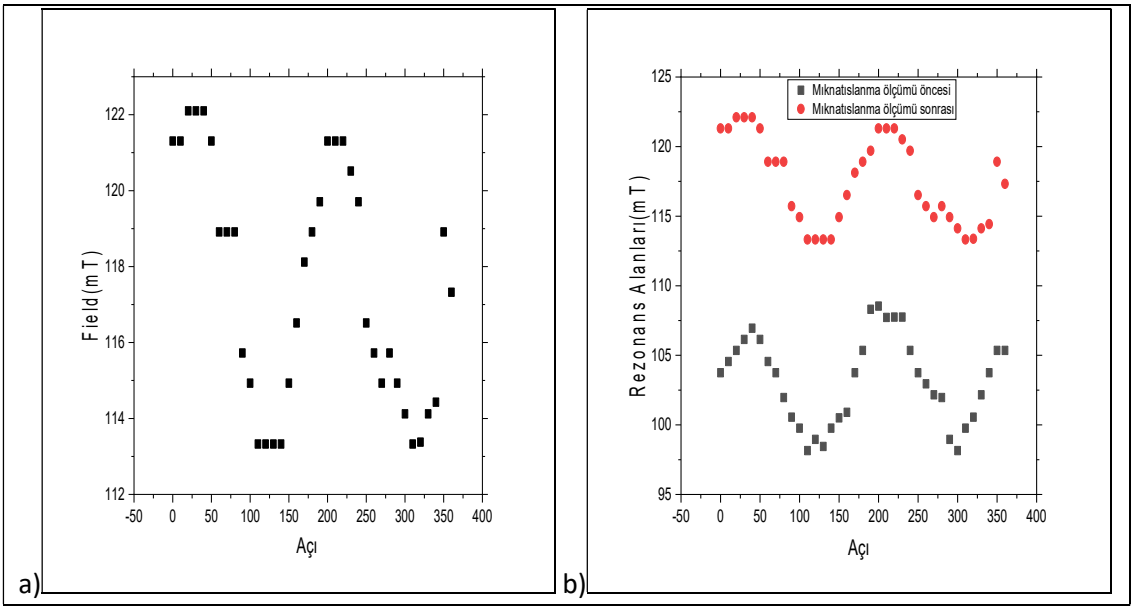


Şekil 4.14: a) Düzlem dışı geomtride FMR spektrumları. b) Düzlem içi geometride FMR spektrumları.

PET alttaş üzerine kaplanan ince filmlerin manyetik anizotropi özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için rezonans alanları garfiklerinin detaylı bir şekilde incelemesi yapılmıştır. Her bir geometri için elde edilen FMR sinyallerinin açıya bağlı olarak detaylı analizleri sonucunda elde edilen rezonans alanları Şekil 4.15 ve 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.15: a) VSM ölçümü sonrası düzlem dışı geometride rezonans alanları. b) VSM ölçümü öncesi ve sonrası düzlem dışı geometride rezonans alanları.

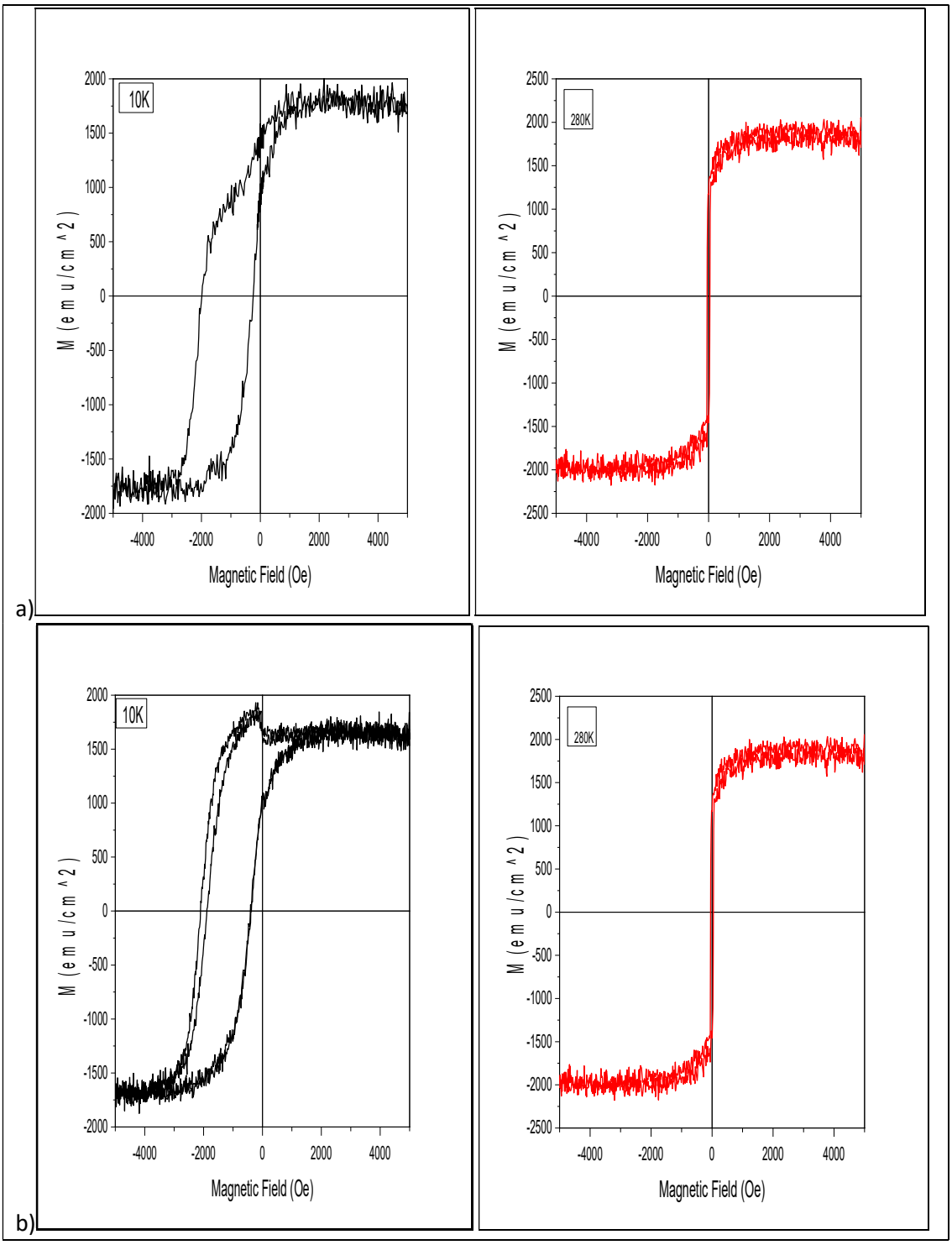


Şekil 4.16: a) VSM ölçümü öncesi düzlem içi geometride rezonans alanları. b) VSM ölçümü öncesi ve sonrası düzlem içi geometride rezonans alanları.

Şekil 4.15 ve 4.16 da verilen PET/[Au(2.3nm)/ IrMn(4nm)/ FeNi(4 nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapış için verilen rezonans alanlarının açısal bağımlılığı grafiği incelendiğinde, düzlem içi geometride VSM ölçümü öncesinde gözlemlen anizotrapiye benzer IrMn katmanından gelen etki ile eksensel simetriye sahip olmayan iki katlı manyetokristal anizotropinin varlığı belirlenmiştir. VSM ölçümü yapılan örneğin düzlem dışı geometrisi ele alındığında ise tek yönlü yüksek anizotropi çan şeklindeki açısal varyasyona açıkça yansımış ve önceki ölçümde elde edilen sonuçlarla uyumlu çıkmıştır.

4.4. Silisyum ve PET Alttaş Üzerine Kaplanan Yapıların M-H Grafiklerinin Karşılaştırılması

Silisyum ve PET alttaş üzerine kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn(4nm)/ NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)] ince filme yapısının mıknatıslanma ölçümlerinden elde edilen M-H grafikleri Şekil 4.17'de verilmiştir. Hazırlanan her iki örneğin VSM sisteminde yapılan mıknatıslanma ölçümü sonrasında değişim önyargısı (H_{eb}) açık bir şekilde ortaya çıkmıştır. PET alttaş üzerine kaplanan yapıda değişim önyargısı değerinin silisyum alttaş üzerine kaplanan yapıya göre yüksek olduğu belirlenmiştir. VSM ölçümünün diğer bir amacı ise incelenen malzemenin doyum mıknatıslanması değerinin belirlenmesidir. İncelen örneklerin kolay ve zor eksenleri buna göre belirlenir. Hazırlanan örneklerin histerisiz eğrileri incelendiğinde, 10K'de tipik bir ferromanyetik özellik gösterdiği gözlenmiştir. Her iki alttaş üzerine kaplanan aynı yapının doyum mıknatıslanması (M_s) ve koersivite (H_c) değerlerinin aynı olduğu M-H grafiği üzerinde belirlenmiş, manyetik malzemelerin karakteristik özellikleri (M_s, H_{eb} ve H_c) değerleri Tablo 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.17: M-H grafiklerinin karşılaştırılması. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş.

Tablo 4.4: Değişim önyargısı ve manyetik koersivite değerleri.

ALTTAŞ	H_{eb}(Oe)	H_c(Oe)	M_s(emu/cm^2)
SİLİSYUM	1060	880	1900
PET	1350	880	1900

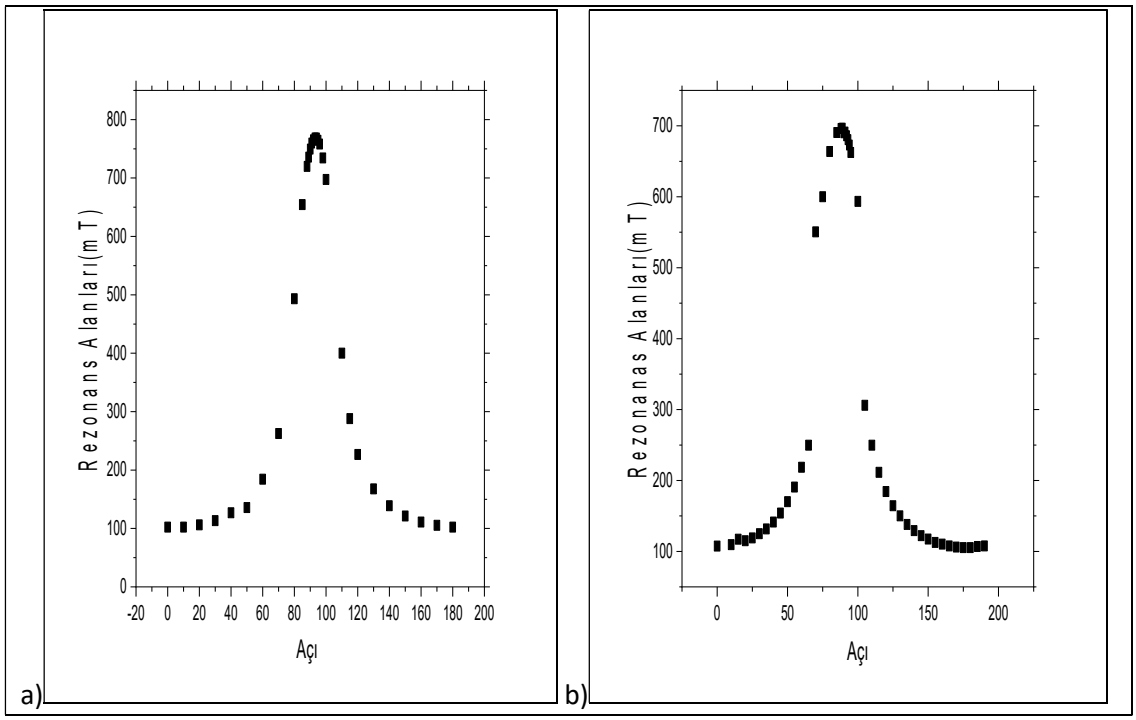
4.5. Dış Manyetik Alanın İnce Filme Dik ve Paralel Uygulanması Durumlarında H_{eff} Değerleri

Silisyum ve PET alttaş üzerine kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn (4nm)/ FeNi(4nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısnın VSM ölçümü sonrasında düzlem içi ve düzlem dışı geometride kaydedilen ESR spektrumlarının rezonans alanlarının açısal bağımlılıkları Şekil 4.18 ve 4.19'da gösterilmiştir. Tek yönlü anizotropi çan şeklindeki açısal varyasyona açıkça yansımıştır. Düzlem dışı geometrisinde gözlemlenen rezonans alanları açısal bağımlılığı grafikleriden 0 ve 90 derecelik açılardaki rezonans alanı değerleri belirlenerek aralarındaki farkın yarısı hesaplanmıştır [1].

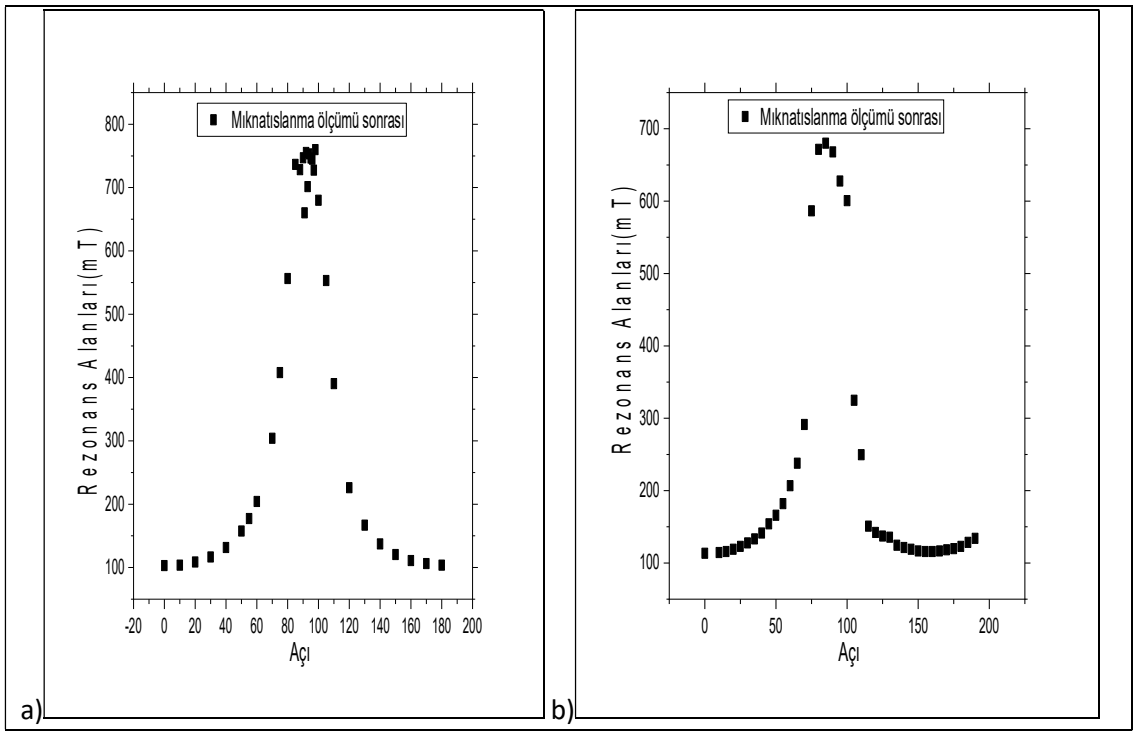
$$[H_{res}(90) - H_{res}(0)]/2 \qquad (4.1)$$

Tablo 4.5: FMR ölçümünden H_{res} değerleri.

ALTTAŞ	H_{res},0(Oe)	H_{res},90(Oe)	$[H_{res}(90) - H_{res}(0)]/2$(Oe)
SİLİSYUM	1029	7553	3262
PET	1133	6800	2833



Şekil 4.18: VSM ölçümü öncesi düzlem dışı geometride rezonans alanları. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş.



Şekil 4.19: VSM ölçümü sonrası düzlem dışı geometride rezonans alanları. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş.

Bir FMR ölçümünde, ferromanyetik bir örnek harici bir dc manyetik alana yerleştirilir ve mıknatıslamanın ön hareketini uyarmak için küçük zamanla değişen bir radyo frekansı alanı kullanılır. Daha sonra dc manyetik alan değişir ve bu alan sistemin doğal rezonans koşuluyla eşleştiğinde, maksimum mikrodalga emilimi tespit edilir. Alan, bu belirli mikrodalga frekansında rezonans alanı olarak adlandırılır.

Eğer bu tür ölçümler bir dizi farklı frekansta taşınırsa, numunenin iki çok önemli parametresi, yani etkili alan (H_{eff}) ve jiromanyetik oran (γ), frekans ve rezonans alanı verilerinin rezonans durum formülünde (Kittel formülü olarak da adlandırılır) kullanılmasıyla elde edilebilir. Deneylerin iki farklı konfigürasyonu vardır. Birincisi, harici dc alanının ince filme paralel olarak uygulandığı paralel FMR'dir. SI biriminde, paralel FMR okumaları için rezonans koşulu formülü denklem 4.2'de verilmiştir [23];

$$\omega_r = |\gamma|\, H_r//\sqrt{}\, (H_r// + H_{eff}) \tag{4.2}$$

$$\omega_r = 2\pi f_r \tag{4.3}$$

Burada f_r ve $H_{//}$ sırasıyla mikrodalga frekansı ve rezonans alanıdır. Harici dc manyetik alanının ince filme dik olarak uygulandığı duruma karşılık gelen rezonans formülü denklem 4.4'de verilmiştir [23].

$$\omega_r = |\gamma|(H_r - H_{eff}) \tag{4.4}$$

Tablo 4.6: Silisyum alttaş üzerine yapılan örenk için H_{eff} değerleri.

FMR REZONANS ALANI GRAFİĞİ	FMR REZONANS ALANI GRAFİĞİ	VSM ÖLÇÜMÜ SONRASI FMR REZONANS ALANI GRAFİĞİ	VSM ÖLÇÜMÜ SONRASI FMR REZONANS ALANI GRAFİĞİ
PARALEL	DİK	PARALEL	DİK
H(0)=102,158mT	H(90)=749,405mT	H(0)=102,951mT	H(90)=746,913mT

Eşitlik 4.2 ve 4.4'de verilen denklemler eşitlenerek Heff değerleri her bir ince film yapısı için hesaplanmştır. Tablo 4.6'da verilen silisyum alttaş üzerine kaplanan ince film örneğinin VSM ölçümü öncesi ($H_{eff,1}$) ve sonrasında ($H_{eff,2}$) elde edilen düzlem dışı geometride rezonans alanı-açı grafiğinden bulunan paralel H(0) ve dik

H(90) durumdaki değerlerleri kullanarak Heff değerleri hesaplanmış ve sırasıyla verilmiştir**.** İki değer arasındaki fark hesaplanarak manyetik alan altında ısıtma işlemi öncesi ve sonrası arasındaki büyüklük bulunmuştur.

- $H_{eff,1}$=501mT
- $H_{eff,2}$=498mT
- $H_{eff,1}$-$H_{eff,2}$= 3mT

Tablo 4.7: PET alttaş üzerine yapılan örenk için H_{eff} değerleri.

FMR REZONANS ALANI GRAFİĞİ	FMR REZONANS ALANI GRAFİĞİ	VSM ÖLÇÜMÜ SONRASI FMR REZONANS ALANI GRAFİĞİ	VSM ÖLÇÜMÜ SONRASI FMR REZONANS ALANI GRAFİĞİ
PARALEL	DİK	PARALEL	DİK
H(0)=107.513mT	H(90)690.106mT	H(0)113.327mT	H(90)=66.80mT

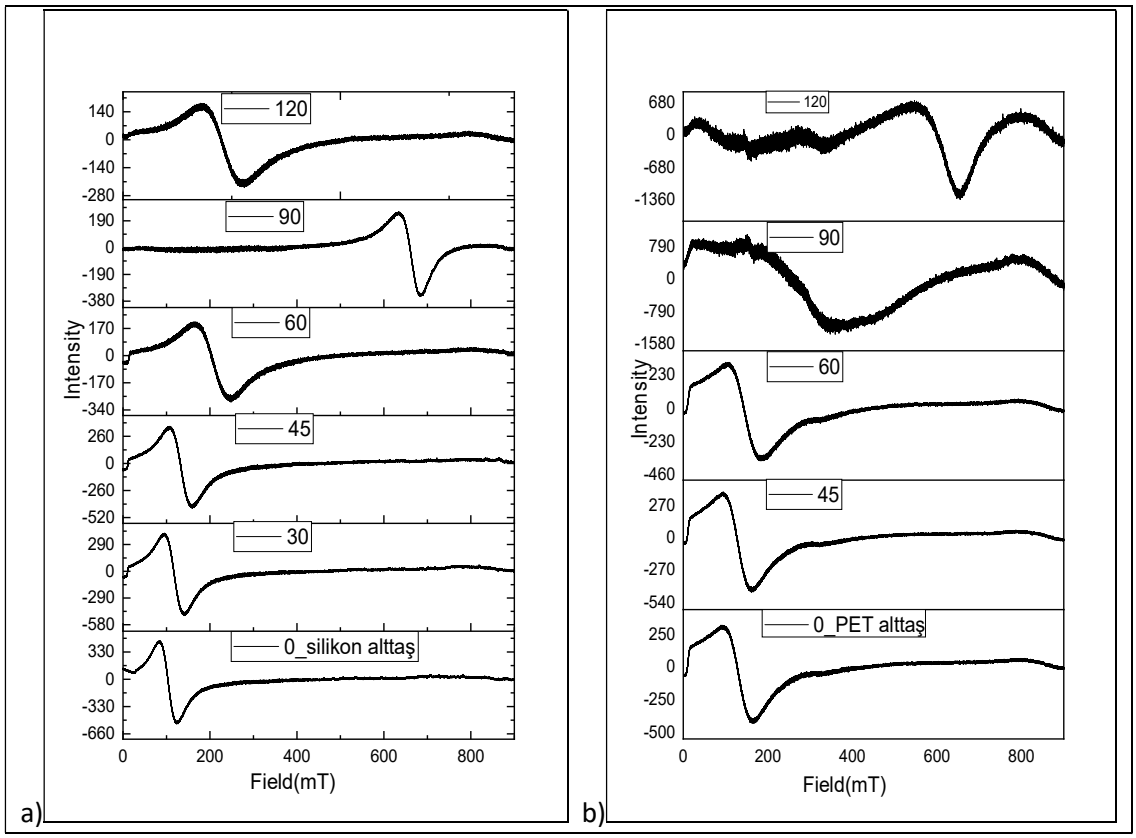
Tablo 4.7'de verilen PET alttaş üzerine kaplanan ince film örneğinin VSM ölçümü öncesi ($H_{eff,3}$) ve sonrasında ($H_{eff,4}$) elde edilen düzlem dışı geometride rezonans alanı-açı grafiğinden bulunan paralel H(0) ve dik H(90) durumdaki değerlerleri kullanarak Heff değerleri hesaplanmış ve sırasıyla verilmiştir. İki değer arasındaki fark hesaplanarak manyetik alan altında ısıtma işlemi öncesi ve sonrası arasındaki büyüklük bulunmuştur.

- $H_{eff,3}$=392mT
- $H_{eff,4}$=363 mT
- $H_{eff,3}$-$H_{eff,4}$= 29 mT

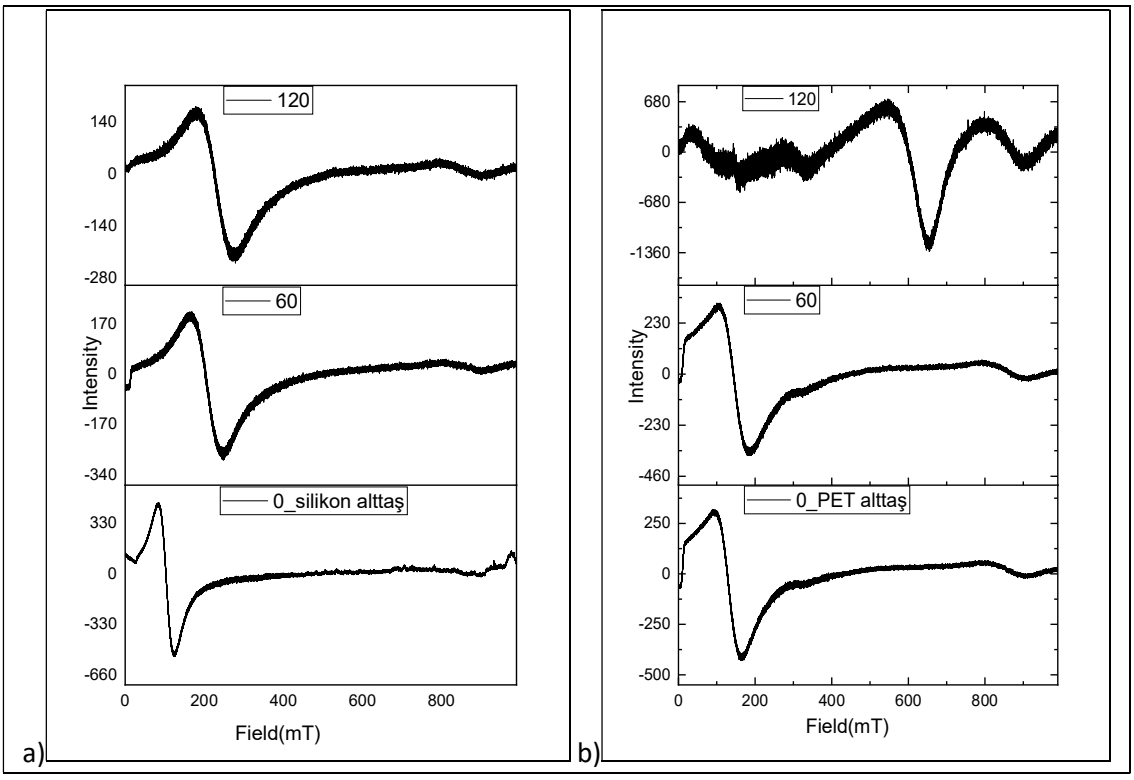
PET ve Si alttaş üzerine yapılan kaplamaların manyetik alan altında ısıtma işlemi öncesi ve sonrası için etkili alan değerleri hesaplandığında PET alttaş ile hazırlanan ince film örneğinde daha yüksek çıktığı hesaplanmıştır.

Silisyum ve PET alttaş malzemeri üzerine kaplanan Au(2.3nm)/ IrMn(4nm)/ NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısnın farklı açılarda düzlem dışı ve düzlem içi geometrilerinde FMR spektrumları karşılaştırlması yapılmıştır. Düzlem dışı

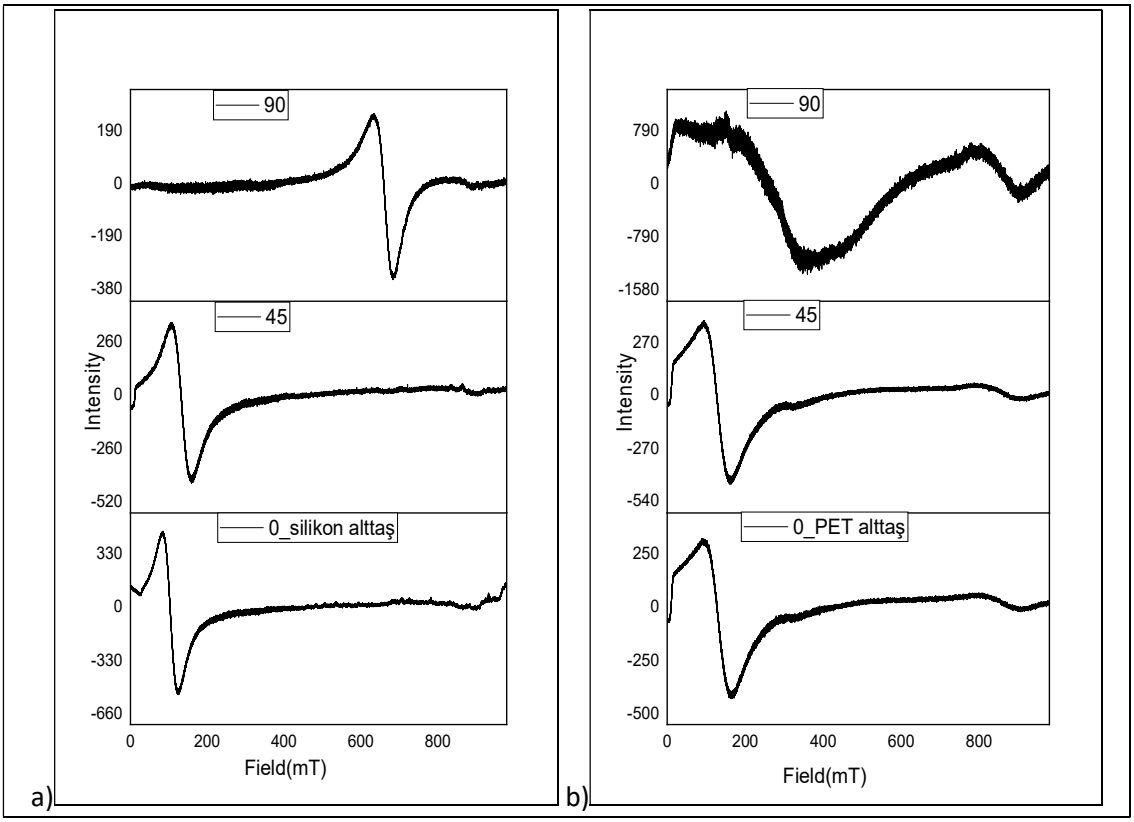
geometride, PET alttaş üzerine kaplanan ince film yapısı için alınan FMR ölçümlerinin 90 ve 120 derecelik açılarda bazı ek kıvrımlar gözlenmiştir. Bu ek kıvrımlar, mikroyapısal kusurlar ve ayrıca FM ve AFM katmanları arasındaki arayüzdeki pürüzlülük nedeniyle indüklenen farklı tek eksenli anizotropi ile ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Farklı açılardaki ayrıntılı incelemeleri Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.20: 0-30-45-60-90-120 derecelik açılarda düzlem dışı geometrilerinde FMR spektrumları karşılaştırılması. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş.

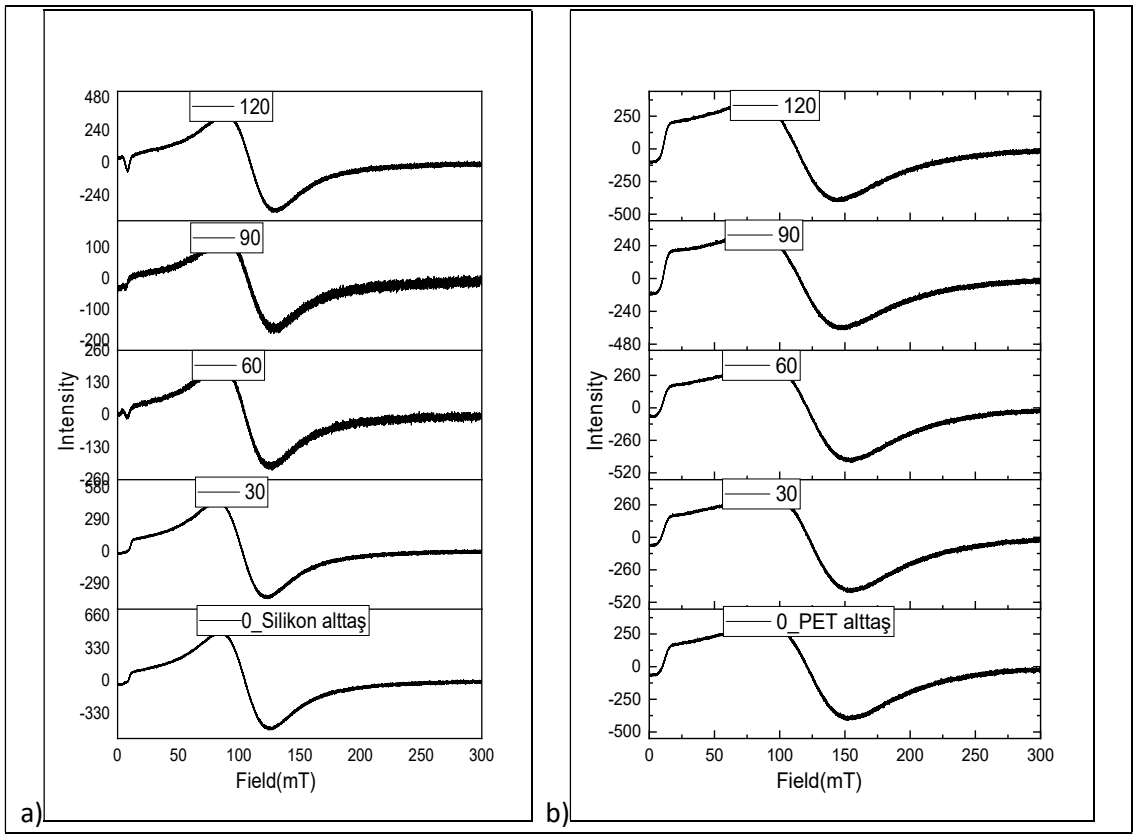


Şekil 4.21: 0-60-120 derecelik açılarda düzlem dışı geometrilerinde FMR spektrumları karşılaştırılması. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş.

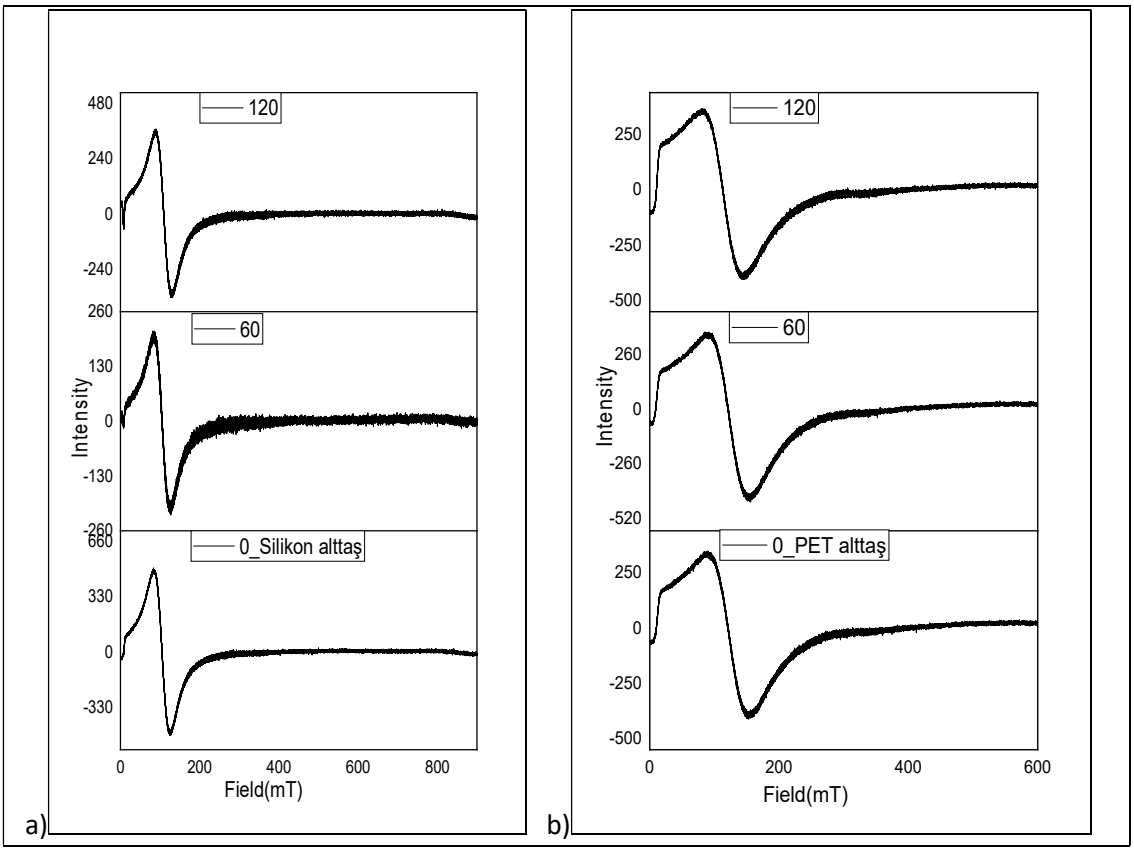


Şekil 4.22: 0-45-90 derecelik açılarda düzlem dışı geometrilerinde FMR spektrumları karşılaştırılması. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş.

Silisyum ve PET alttaş üzerine kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn(4nm)/ NiFe(4nm)/ Au(2.3)] ince film yapılarının farklı açılarda düzlem içi geometride FMR spektrumları karşılaştırılması yapılmıştır ve ek kıvrım gözlenmemiştir. Yapılan ölçümler Şekil 4.23 ve 4.24 ‘de verilmiştir.



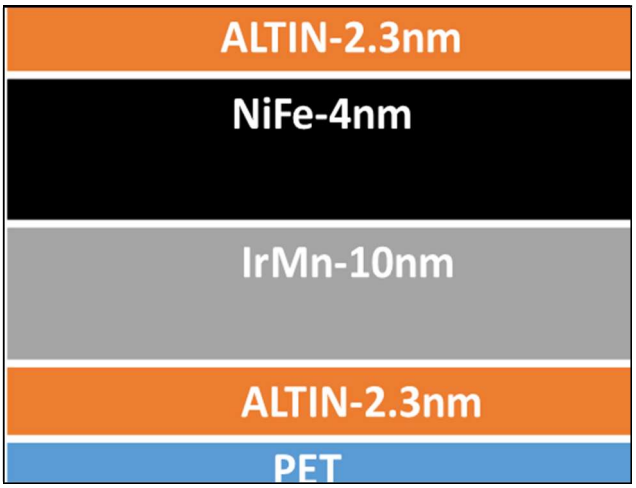
Şekil 4.23: 0-30-60-90-120 derecelik açılarda düzlem içi geometrilerinde FMR spektrumları karşılaştırılması. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş.



Şekil 4.24: 0-60-120 derecelik açılarda düzlem içi geometrilerinde FMR spektrumları karşılaştırılması. a) Silisyum alttaş b) PET alttaş.

4.6. PET/Au(2.3nm)/IrMn(10nm)/NiFe(4nm)/Au(2.3) İnce Filmi Yapısının Büyütülmesi ve Hazırlanması

PET alttaş üzerine FeNi'nin Ni (% 80) ve Fe'yi (% 20) temsil ettiği bileşim [Au(2.3nm)/FeNi (4 nm) / IrMn (10nm)/Au(2.3nm)] sputter sisteminde kaplanmıştır. Kaplanma sırasında taban basıncı $6.0x10^{-9}$mbar ve Ar basıncı $1.0x10^{-3}$mbar'da tutulmuştur. Biriktirme işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. 2,3nm kalınlığındaki bir Au katmanı seed ve capping katman olarak kullanılmıştır. Dört numune seti için yapısal bilgiler Tablo 4.6'da sunulmuştur.



Şekil 4.25: PET/[Au(2.3nm)/IrMn(15nm)/NiFe(4nm)/Au(2.3)] ince film yapısı.

Tablo 4.8: PET alttaş üzerine malzemelerin büyütme oranları.

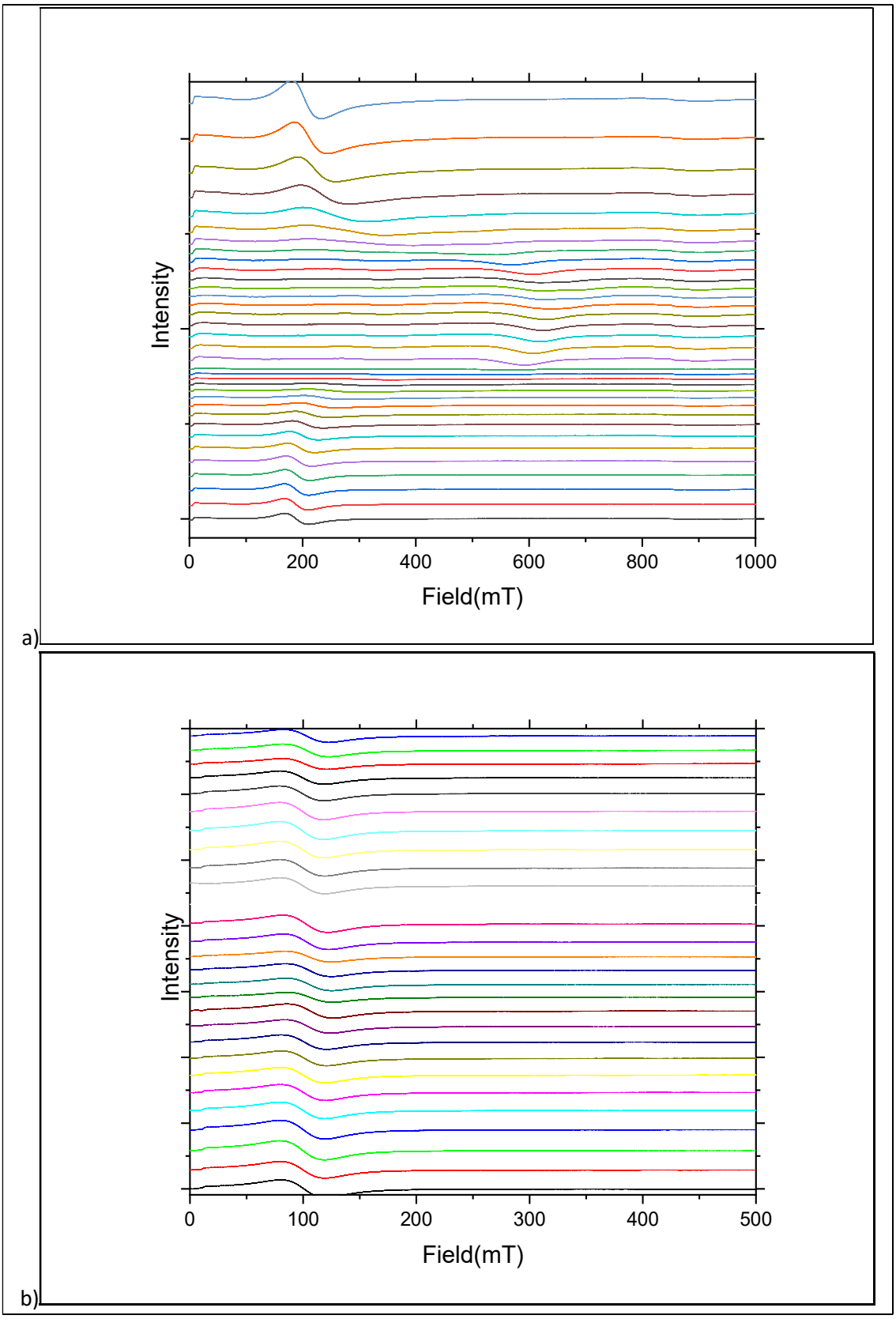
Hedef Malzemesi	Power(W)	Büyütme Hızı(nm/min)	Kalınlık(nm)
Altın(Au)	DC=10W	1,52min	2.3nm
IrMn	DC=20W	11,07min	10nm
NiFe	AC=40W	6,40min	4nm

4.6.1. PET Alttaş Üzerine Kaplanan Yapının Manyetik Analizlerin Sonuçları

PET/[Au(2.3nm)/ IrMn (10nm)/ FeNi (4 nm)/ Au(2.3nm)] kaplanan ince film yapısnın yapısal analizi tamamlandıktan sonra bir sonraki ölçüm, manyetik özelliklerin ve manyetik anizotropi özelliklerinin belirlenmesi olmuştur.

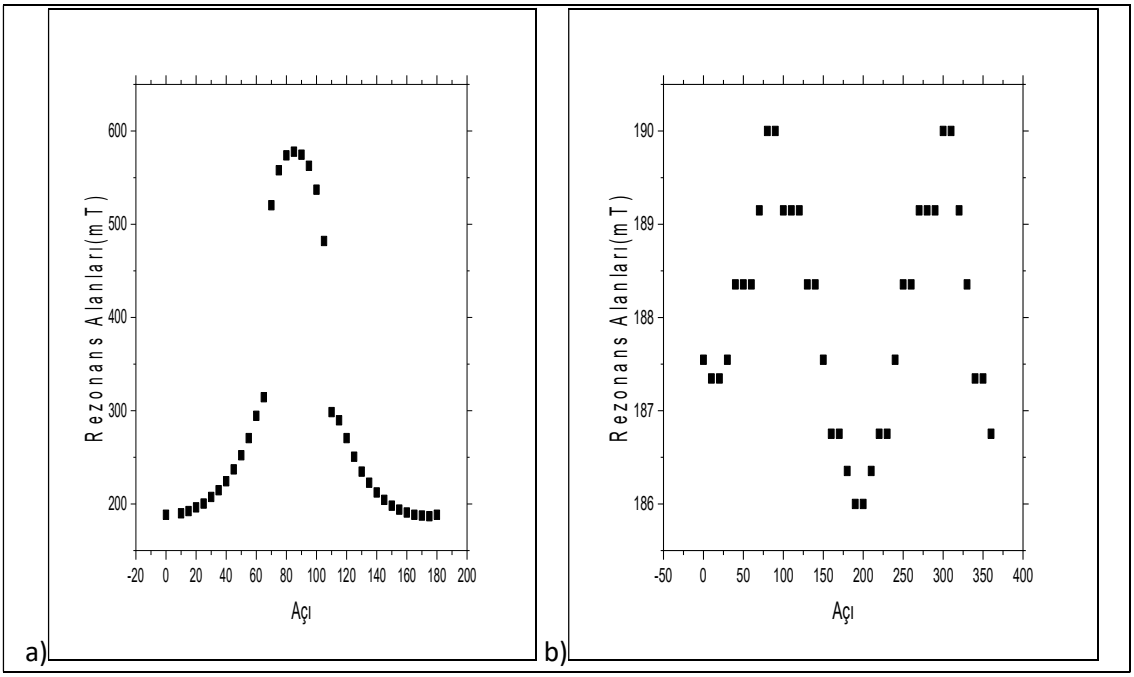
Manyetik analizlerin yapılması için Silisyum ve PET alttaş üzerine kaplanan ince film yapısı analizlerinde kullanılan Ferromanyetik Rezonans tekniği tekrar kullanılmıştır.

PET/[Au(2.3nm)/ IrMn(10nm)/ FeNi (4 nm)/ Au(2.3nm)]ince film yapısnın elektron spin rezonans sisteminde düzelme dışı geometri ölçümleri 0-180 derecelik açılarda her 10 derecelik adımlarla, düzlem içi geometri ölçümleri ise 0-360 derecelik açılarda her 10 derecelik adımlarla alınmıştır ve spektrum grafikleri Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.26: a) Düzlem dışı geomtride FMR spektrumları. b) Düzlem dışı geometride FMR spektrumları.

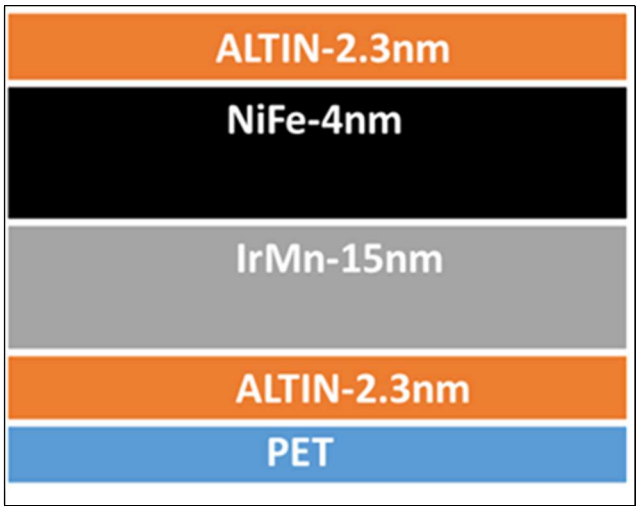
PET alttaş üzerine kaplanan ince filmlerin manyetik anizotropi özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için rezonans alanlarının detaylı bir şekilde incelemesi yapılmıştır. Her bir geometri için elde edilen FMR sinyallerinin açıya bağlı olarak detaylı analizleri sonucunda elde edilen rezonans alanları Şekil 4.27'de verilmiştir. Düzlem dışı geometride eksensel simetriye sahip iki katlı anizotropi gözlenmiştir. Daha önceki ölçümlerde ortaya çıkan tek eksenli anizotropi düzlem dışı geometride belirlenmiştir.



Şekil 4.27: a) Düzlem dışı geometride rezonans alanları. b) Düzlem içi geometride rezonans alanları.

4.7. PET/(Au(2.3nm)/IrMn(15nm)/NiFe(4nm)/Au(2.3) İnce Film Yapısının Büyütülmesi ve Hazırlanması

PET alttaş üzerine FeNi'nin Ni(% 80) ve Fe(% 20) temsil ettiği bileşim [Au(2.3nm)/ IrMn (15nm)/ FeNi (4 nm)/Au(2.3nm)] sputter yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplanma sırasında taban basıncı 6.0×10^{-9}mbar ve Ar basıncı 1.0×10^{-3}mbar da tutulmuştur. Biriktirme işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. 2,3nm kalınlığındaki bir Au katmanı seed ve capping katman olarak kullanılmıştır. Dört numune seti için yapısal bilgiler Tablo 4.9'da sunulmuştur.



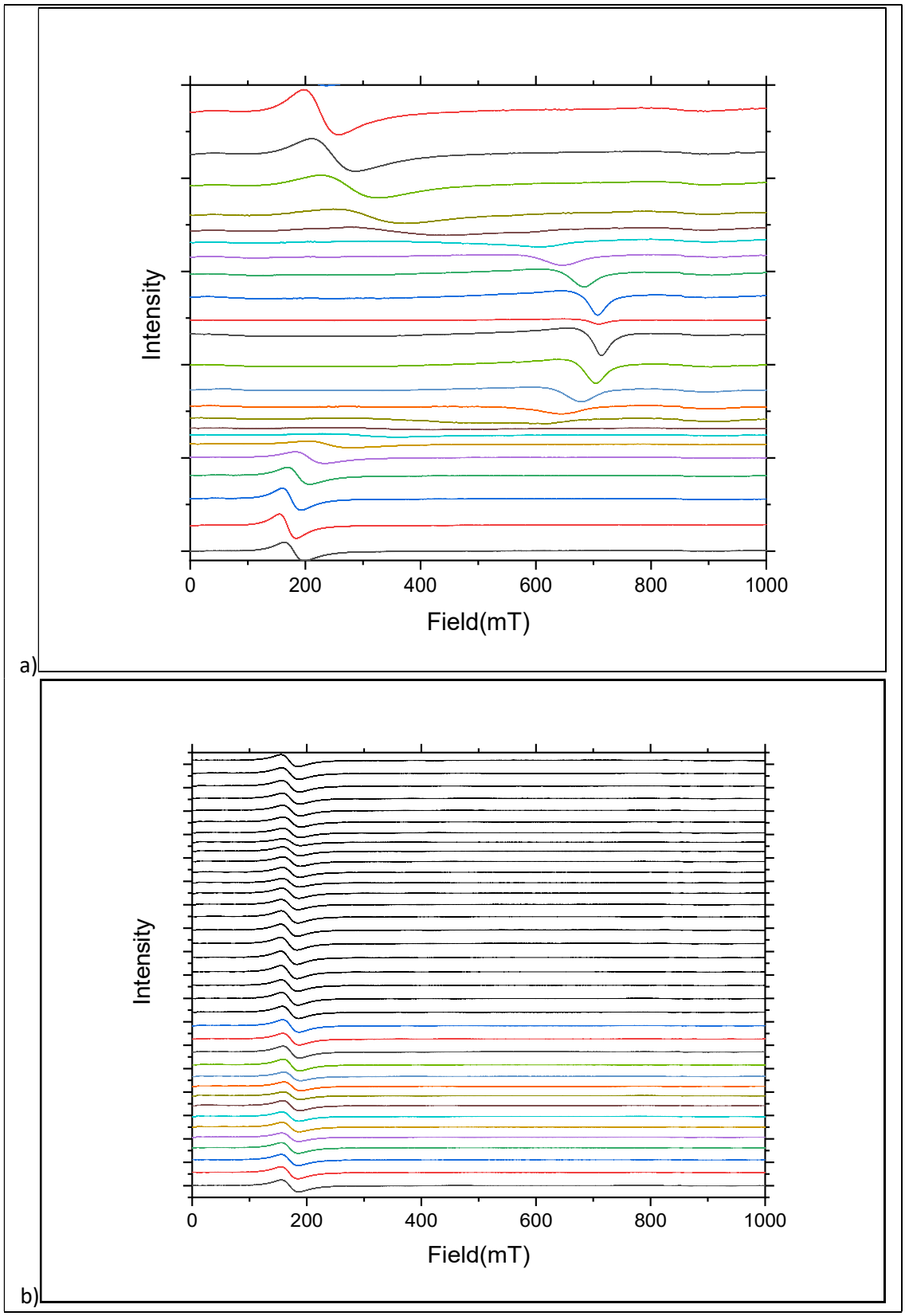
Şekil 4.28: PET/[Au(2.3nm)/IrMn(15nm)/NiFe(4nm)/Au(2.3)] ince film yapısı.

Tablo 4.9: PET alttaş üzerine malzemelerin büyütme oranları.

Hedef Malzemesi	Power(W)	Büyütme Hızı(nm/min)	Kalınlık(nm)
Altın(Au)	DC=10W	1,52min	2.3nm
IrMn	DC=20W	16,41min	15nm
NiFe	AC=40W	6,40min	4nm

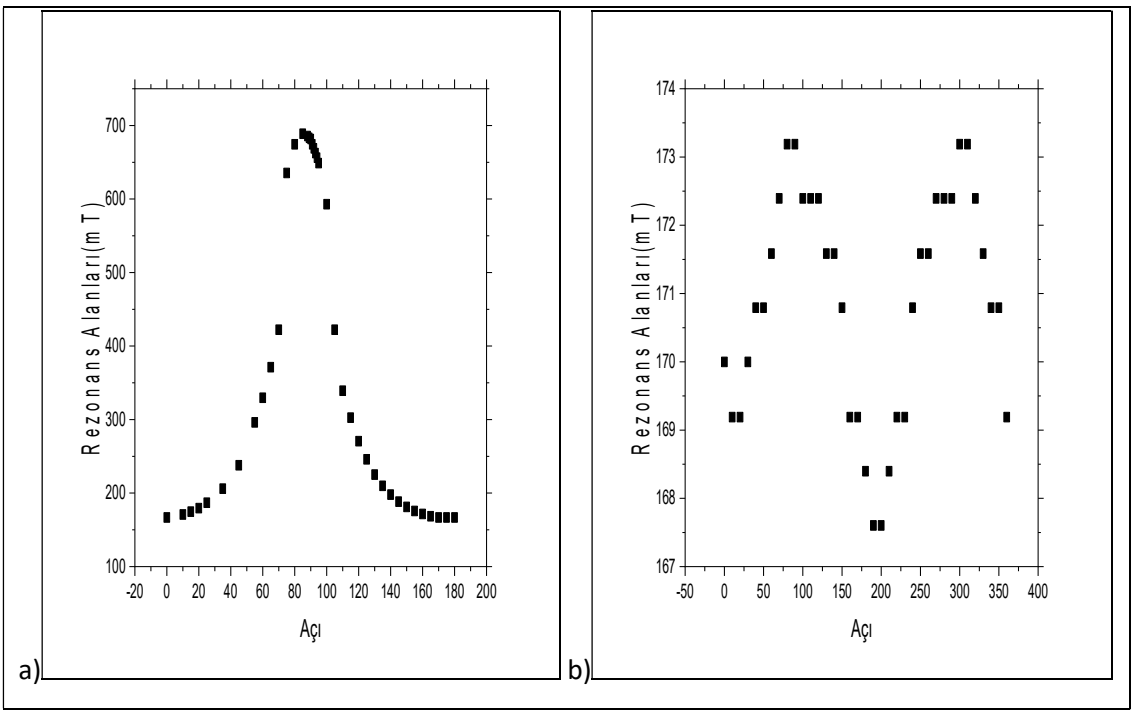
4.7.1. PET Alttaş Üzerine Kaplanan Yapının Manyetik Analizlerin Sonuçları

Kaplanan PET/[Au(2.3nm)/ IrMn (15nm)/ FeNi(4 nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısnın FMR sisteminde düzlem içi geometisinde 0-360, düzlem dışı geometrisinde ise 0-180 derecelik açılar arasında alınmış, Şekil 4.29'da spektrum grafikleri verilmiştir.



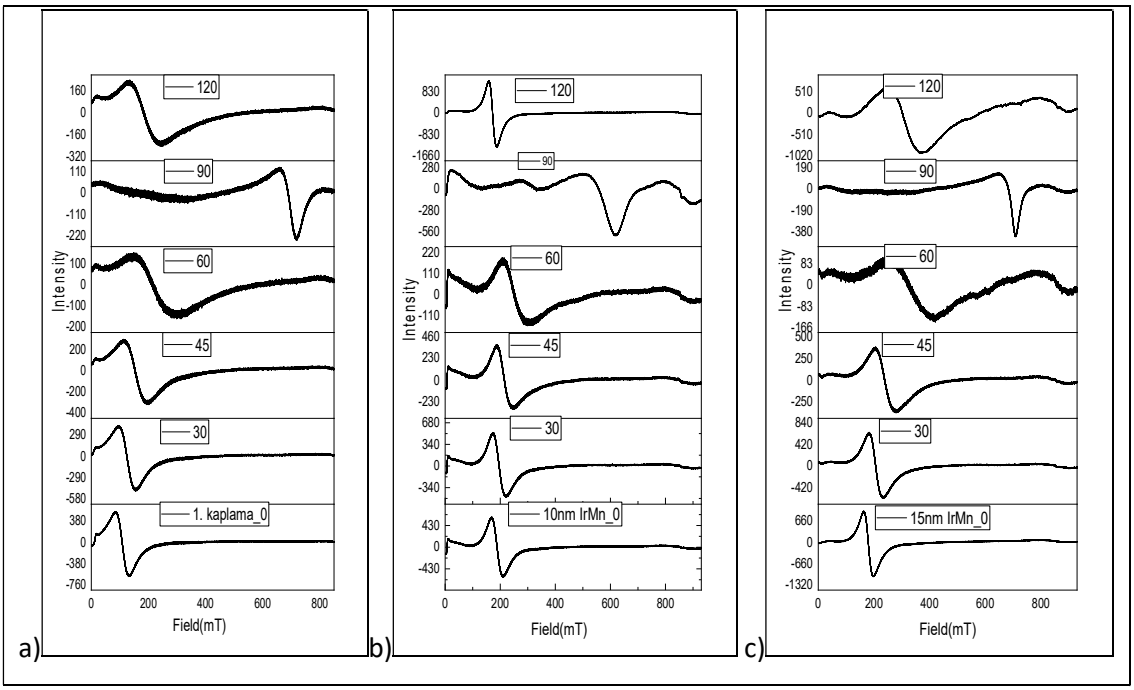
Şekil 4.29: a) Düzlem dışı geomtride FMR spektrumları. b) Düzlem içi geometride FMR spektrumları.

PET alttaş üzerine kaplanan ince filmlerin manyetik anizotropi özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için rezonans alanları detaylı bir şekilde incelemesi yapılmıştır. Daha önceki kaplama geometrileri için elde edilen FMR sinyallerinin açıya bağlı olarak detaylı analizleri, IrMn kalınlığını 15nm çıkararak yapılan FMR ölçüm sonuçları içinde aynı şekilde elde edilmiş ve rezonans alanları Şekil 4.30'da verilmiştir. Düzlem dışı geometride tek eksenli yüksek anizotropi, düzlem içi geometride ise simetrik iki katlı anizotropi IrMn kalınlığının 10nm olduğu örnek sonuçlarıyla uyumlu şekilde belirlenmiştir. IrMn kalınlığının artması sebebiyle düzlem içi geometride belirlenen rezonans alanı değeri azalmıştır.

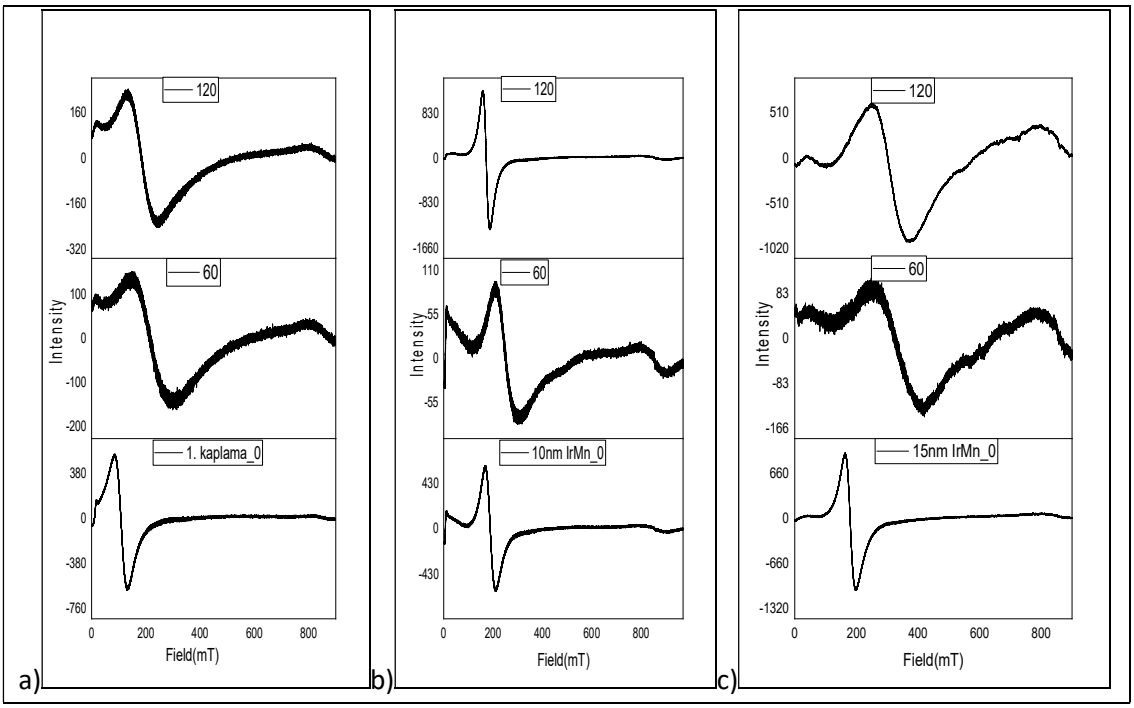


Şekil 4.30: a) Düzlem dışı geometride rezonans alanları. b) Düzlem içi geometride rezonans alanları.

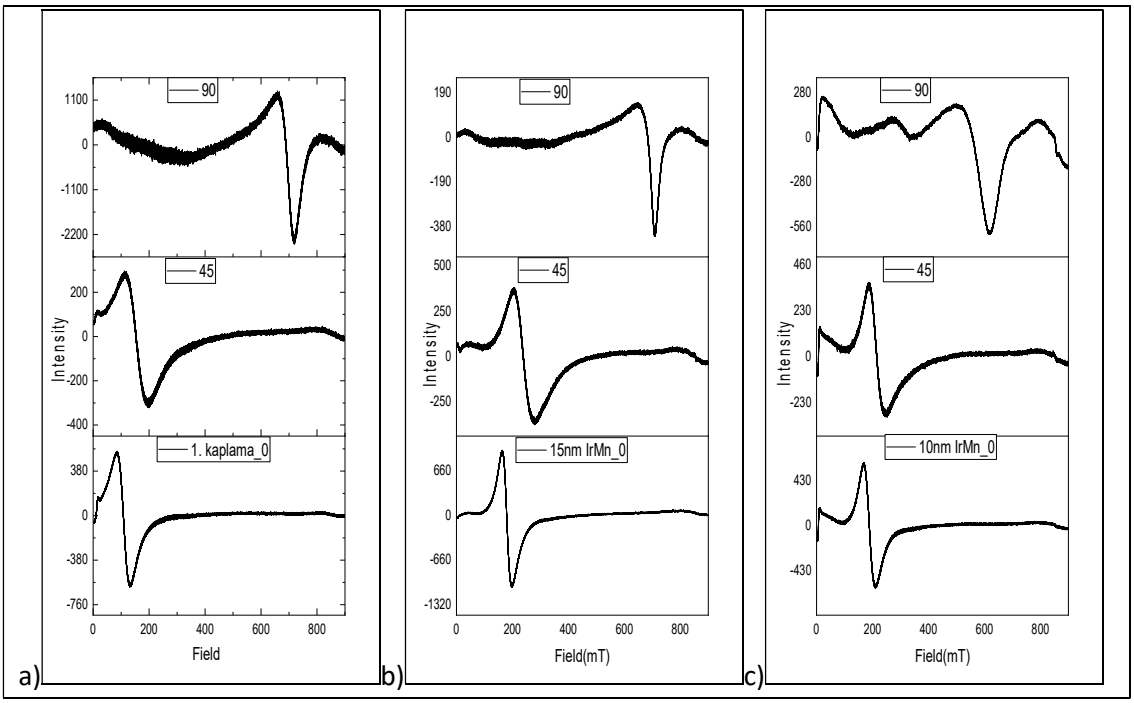
Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33'de PET alttaş üzerine farklı kalınlıkta (x; 4, 10, 15nm) IrMn malzemesi kullanılarak kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn (xnm)/ FeNi (4nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısının düzlem dışı geometrisinde FMR spekrumlarının farklı açılarda karşılaştırılması verilmiştir. Bu karşılaştırmanın amacı IrMn kalınlığının herhangi bir değişime yol açıp açmadığı olmuştur. Karşılaştırılan grafiklerde 60 derecelik ve 120 derecelik açılarsaki spektrumların beklendiği gibi aynı çıktığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.31: 0-30-45-60-90-120 derecelik açılarının düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 4nm IrMn b)10nm IrMn c)15nm IrMn.

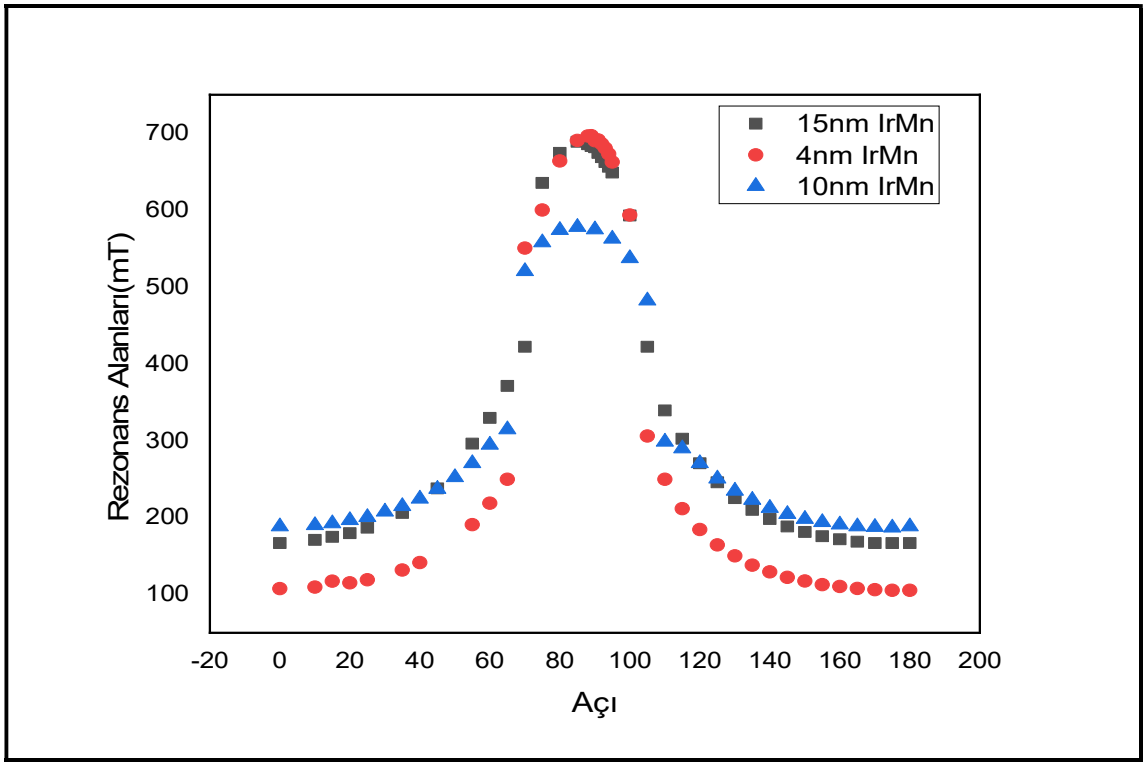


Şekil 4.32: 0-60-120 derecelik açılarının düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 4nm IrMn b)10nm IrMn c)15nm IrMn.

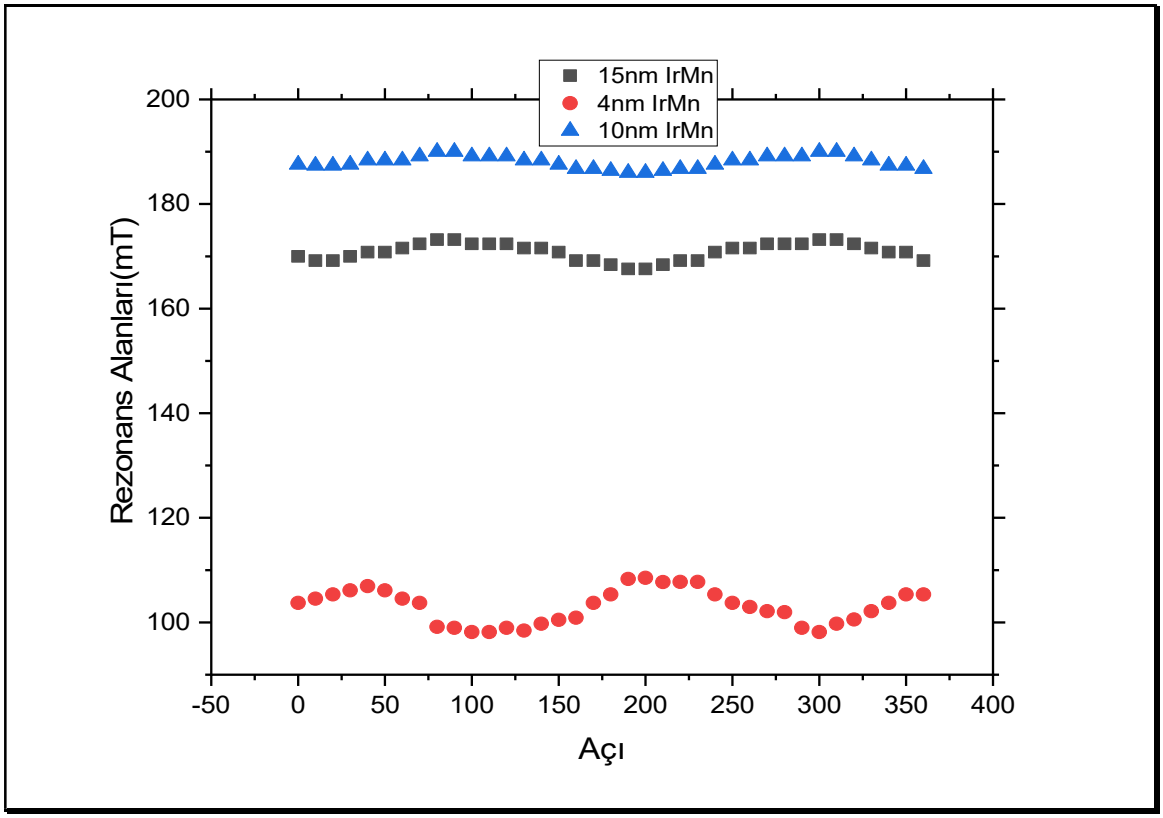


Şekil 4.33: 0-45-90 derecelik açılarının düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 4nm IrMn b)10nm IrMn c)15nm IrMn.

Farklı kalınlıkta kaplanan IrMn malzemesinin rezonans alanları değişimi Şekil 4.34'de açıkça gözlemlenmiştir. Değişen IrMn kalınlığına göre H_{res} değeri değişmiştir.



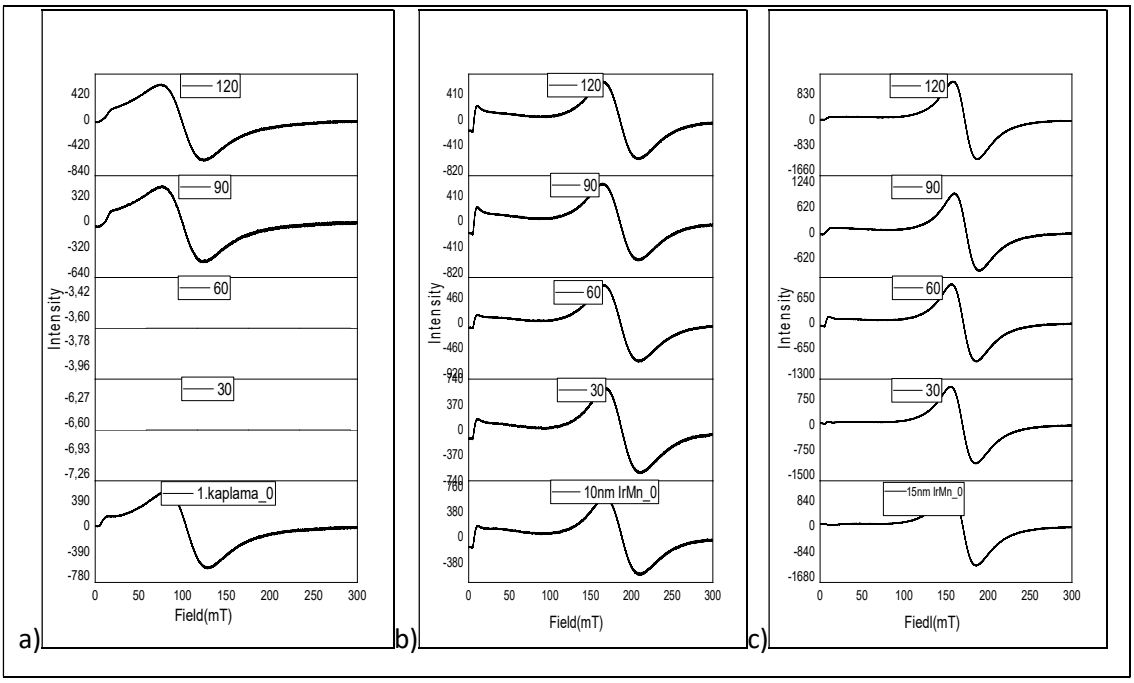
Şekil 4.34: Düzlem dışı geometride rezonans alanları.



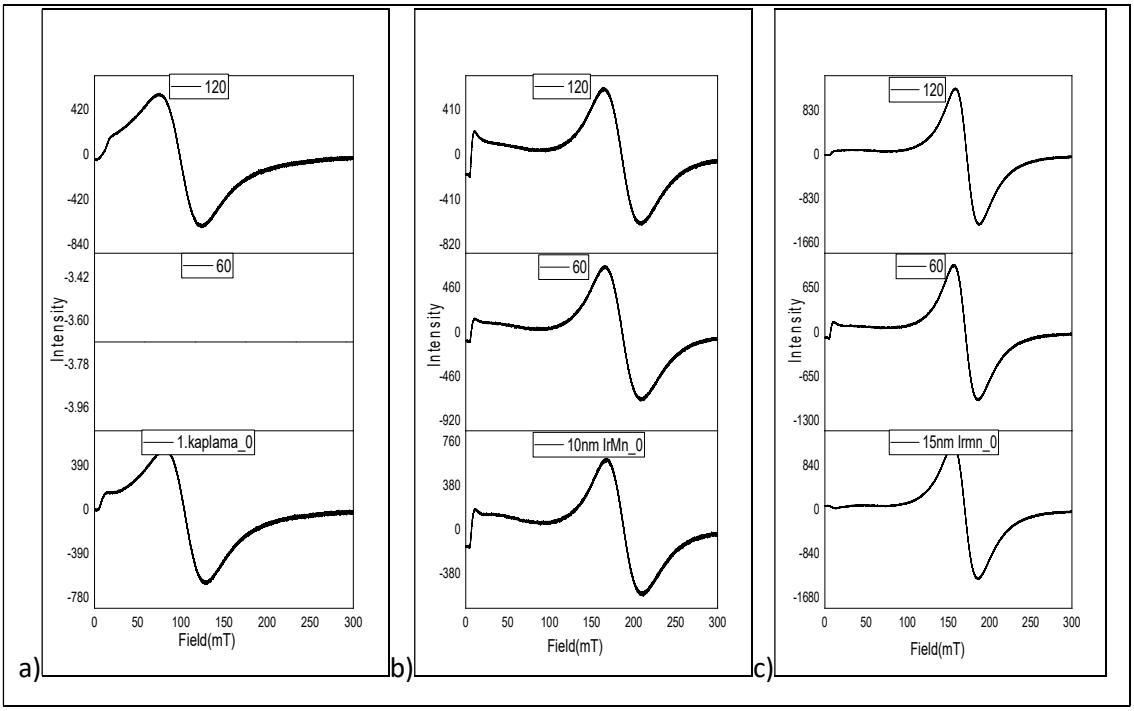
Şekil 4.35: Düzlem içi geometride rezonans alanları.

Daha önce yapılan literatür araştırmalarında değişim önyargısı ve rezonans alanları (H_{res}) değerlerinin, feromanyetik ve antiferomanyetik katmanlarının tekrarlanma sayısına ve kalınlığına önemli ölçüde bağlı olduğu anlaşılmıştır [1]. Şekil 4.34'de 4nm, 10nm ve 15nm kalınlıkta kaplanan IrMn ince film yapılarının kalınlık arttıkça farklı rezonans alanları değerleri belirlenmiştir. Elde edilen resonans alanları grafikleri incelendiğinde 4nm kalınlığında kaplanan IrMn için elde edilen değişim önyargı değerinin en büyük, IrMn kalınlığı 10nm ye çıkarıldığında ise değişim önyargısı değerinin en az olacağı düşünülmüştür.

PET alttaş üzerine farklı kalınlıkta (x;4nm-10nm-15nm) IrMn malzemesi kullanılarak kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn (xnm)/ FeNi (4 nm)/ Au(2.3nm)] ince film yapısının düzlem içi geometrisinde FMR spekrumlarının farklı açılarda karşılaştırılması yapılmış ve birbirleri ile uyumlu çıktığı Şekil 4.36 ve 4.37'da verilmiştir.



Şekil 4.36: 0-30-60-90-120 derecelik açılarının düzlem içi geometride FMR spektrumları. a) 4nm IrMn b)10nm IrMn c)15nm IrMn.



Şekil 4.37: 0-6-120 derecelik açılarının düzlem içi geometride FMR spektrumları. a) 4nm IrMn b)10nm IrMn c)15nm IrMn.

4nm kalınlığında kaplanan IrMn ince film yapısının için 127.153mT manyetik alanı etrafında 0 açısında tek rezonans modu, 10nm ve 15nm kalınlıkta kaplanan IrMn katmanları için sırasıyla 209.643mT ve 184.924mT manyetik alan etrafında 0

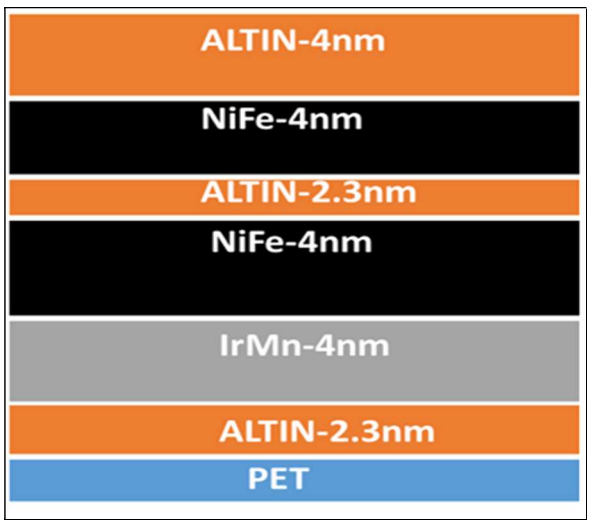
derecelik açıda tek rezonans modu gözlenmiştir. Buna karşılık incelenen rezonans alanı grafiklerinden satellite modes (kuyruk modları) yada 2.ci modlar gözlenmemiştir.

4.8. PET[/Au(2.3nm) / IrMn (4nm)/ FeNi (4 nm)/Au(2.3nm)] Örneğinin Üzerine [NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)]Kaplanması

PET malzemisinin üzerine sırasıyla [Au(2.3nm) / IrMn (4nm)/ FeNi (4 nm) /Au(2.3nm)] sputter sisteminde kaplanan yapının üzerine 2. kaplama olarak sırasıyla NiFe(4nm)/ Au(2.3nm) kaplanmıştır. Dört numune seti için yapısal bilgiler Tablo 4.10'da sunulmuştur.

Tablo 4.10: İkinci kaplama için büyütme oranları.

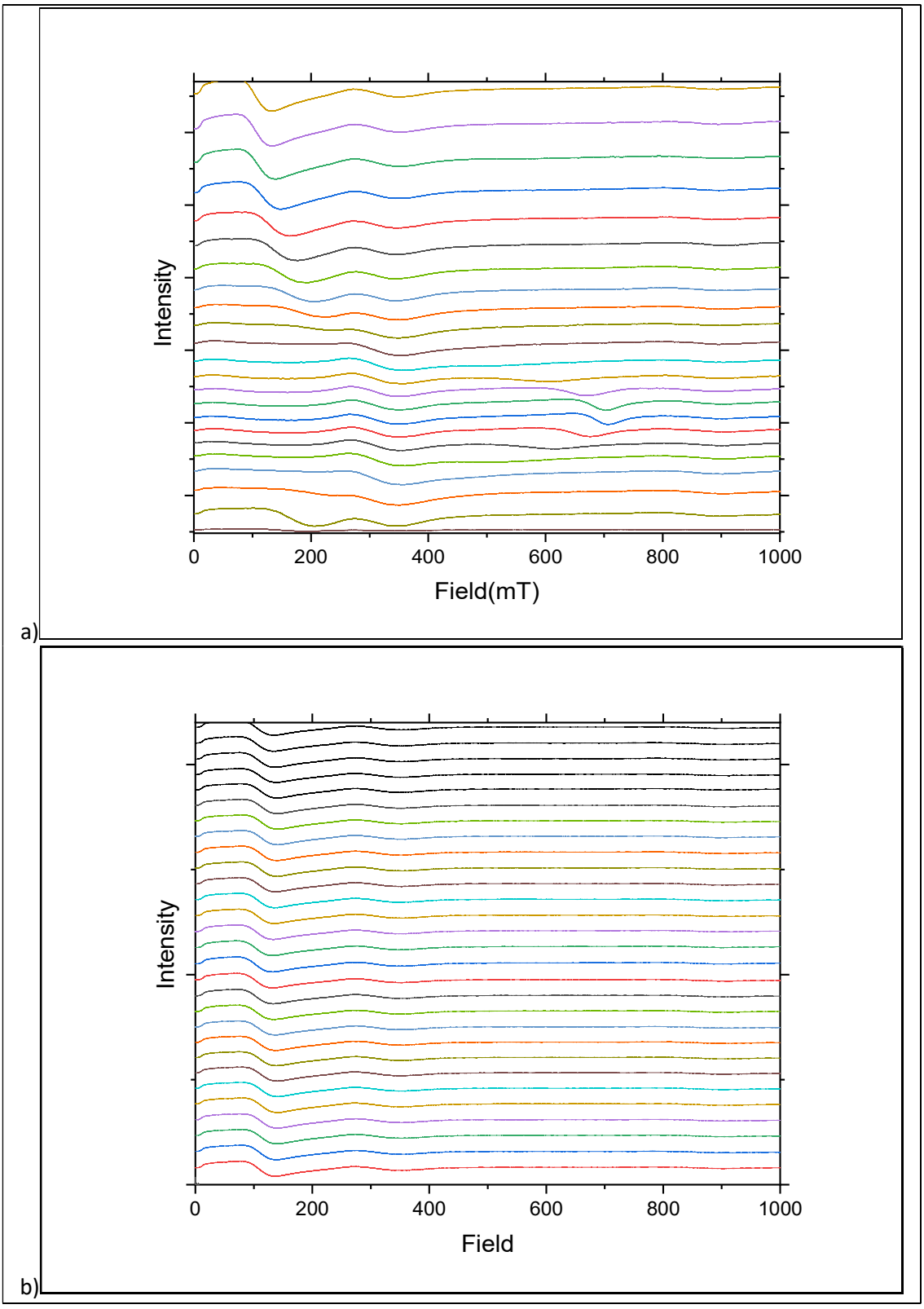
Hedef Malzemesi	Power(W)	Büyütme Hızı(nm/min)	Kalınlık(nm)
Altın(Au)	DC=10W	1,52min	2.3nm
IrMn	DC=20W	6.40min	4nm
NiFe	AC=40W	6,40min	4nm



Şekil 4.38: PET/[Au(2.3nm)/IrMn(4nm)/NiFe(4nm)/Au(2.3)/NiFe(4nm)/Au(2.3nm)] ince film yapısı.

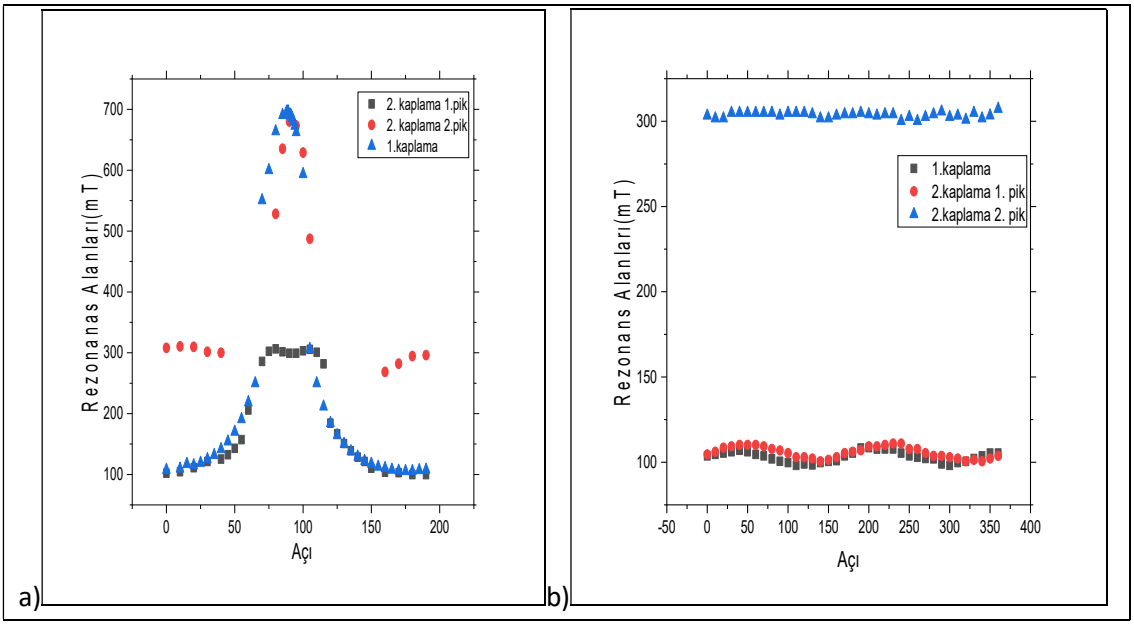
4.8.1. PET Alttaş Üzerine Kaplanan Yapının Manyetik Analizlerin Sonuçları

İlk olarak PET alttaş üzerine sputter sisteminde [Au(2.3nm) / IrMn (4nm)/ NiFe (4 nm) /Au(2.3nm)] yapısı kaplanmıştır. Daha sonra bu yapı 2. kez sputter sistemine koyularak üzerine NiFe (4 nm)/Au(2.3nm) yapısı kaplanmıştır. Kaplanan yapı ESR sisteminde; düzlem içi geometri ölçümleri 0-360 derece açıları arasında her 10 derecelik açılarda, düzelm dışı geometrisi ölçümleri ise 0-180 derece açıları arasında her 5 veya 10 derecelik açılarda alınmıştır. Spektrum grafikleri Şekil 4.39'da verilmiştir.



Şekil 4.39: a) Düzlem dışı geomtride FMR spektrumları. b) Düzlem içi geometride FMR spektrumları.

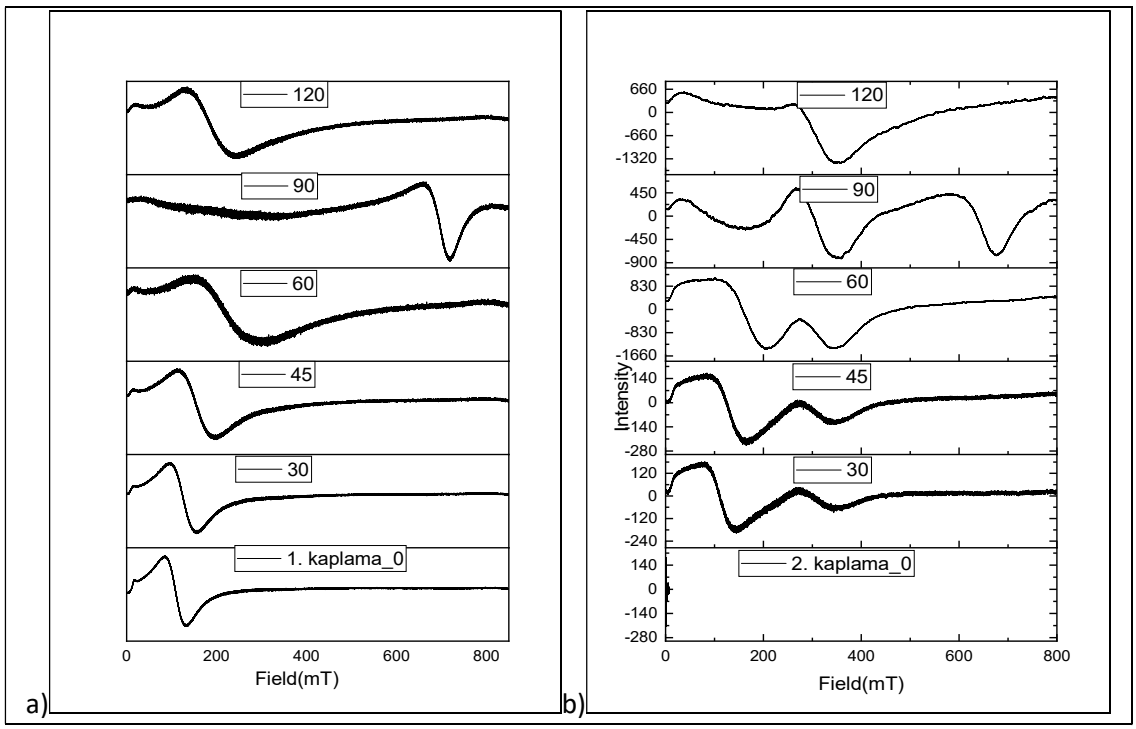
Kaplanan ince filmlerin manyetik anizotropi özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için rezonans alanları detaylı şekilde incelemesi yapılmıştır. Her bir geometri için elde edilen FMR sinyallerinin açıya bağlı olarak detaylı analizleri sonucunda elde edilen rezonans alanları-açı grafikleri Şekil 4.40'da verilmiştir. Düzlem dışı ve düzlem içi geometride mavi ve kırmızı renkler ile verilen iki farklı tek eksenli yapının varlığı görülmüştü. Gözlenen bu katkılar iki kaplamada da kullanılan NiFe yapısından kaynaklanmıştır.



Şekil 4.40: a) Düzlem dışı geometride rezonans alanları. b) Düzlem içi geometride rezonans alanları.

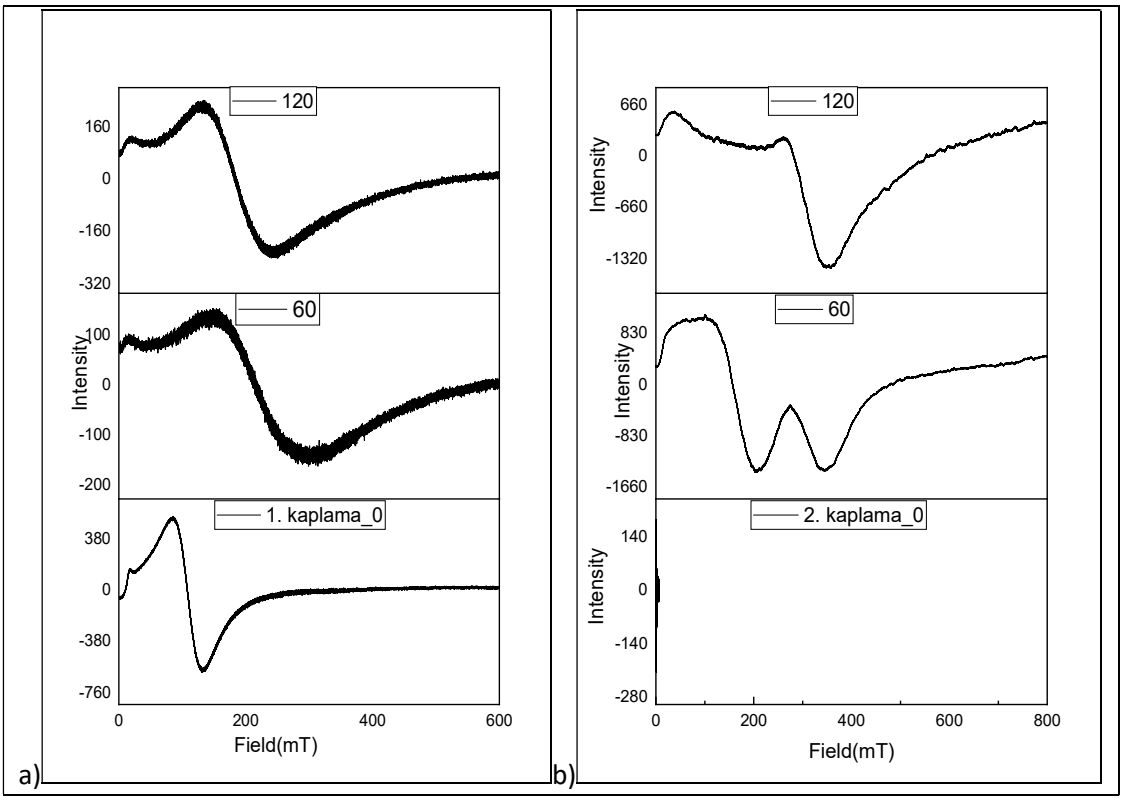
Düzlem dışı geometrisinde alınan FMR ölçümleri sonucu ortaya çıkan rezonans alanı grafiğinde gözlemlenen bükülmeler FM ve AFM katmanlarının arayüzünde mevcut olan heterojenlikten kaynaklanmıştır. Bunun nededi PET alttaş üzerine yapılan 1.kaplamadan PET/[Au(2.3nm)/ IrMn(4nm)/ NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)] sonra ince film yapısının vakum sistemi dışına çıkartılıp bekletilmesi ve daha sonra temizliği yapılarak 2.kaplama PET/[Au(2.3nm)/ IrMn(10nm)/ NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)/ NiFe(4nm)/ Au(4nm)] için sputter sistemine koyulması olarak ele alınmıştır. Au(2.3nm)/ IrMn(10nm)/ NiFe(4nm)/ Au(2.3nm) ve NiFe(4nm)/ Au(4nm)] katmanları arasında biriken partiküller iki NiFe (ferromanyetik) katmanlarının birbiri ile yeteri kadar etkileşmesini egellemiş olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 4.41, 4.42, 4.43, 4.44'de PET alttaş üzerine kaplanan [Au(2.3nm) / IrMn (4nm)/ FeNi(4nm)/ Au(2.3nm)/ NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)] yapının düzlem dışı FMR spektrum grafiklerinin farklı açılarda karşılaştırılması yapılmıştır.

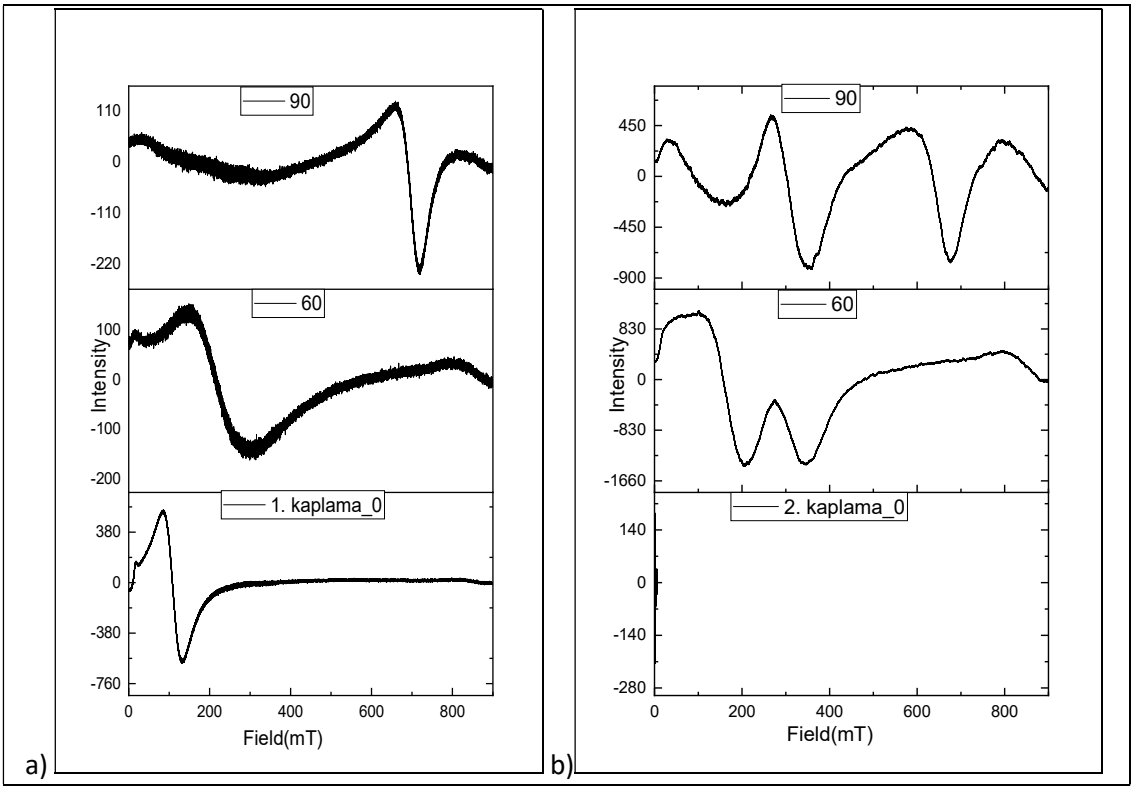


Şekil 4.41: 0-30-45-60-90-120 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama.

Yapılan 1. ve 2. kaplamanın ardından düzlem dışı geometrisinde FMR spektrumlarının karşılaştırılması Şekik 4.41'de verilmiştir. Şekil 4.41a'da verilen [Au(2.3nm) / IrMn (4nm)/ FeNi (4nm) /Au(2.3nm)] düzlem dışı geometri FMR spektrumlarında 0, 30, 45, 60, 90 ve 120 derecelik açılarda tek rezonans mod gözlemlenmiştir. Yapılan bu kaplamanın üzerine [(NiFe(4nm)/Au(2.3nm)] yapısı 2. kaplama olarak yapılmıştır ve Şekil 4.41b'de düzlem dışı geometride 0, 30, 45, 60, 120 derecelik açılarda satellite modları yada 2. Ve 3. modlar gözlenmiş ve bu modların sayısı 90 derecede artmıştır. Burada meydana gelen 2. modlar 2. kaplama olarak yapılan ferromanyetik katmandan (NiFe) gelmiştir. Buna ek olarak meydana çıkan diğer modlar 2 kaplama arsında oluşan kirlilikten dolayı ortaya çıkmıştır. Buna ek olarak 1. kaplamada 60 ve 120 derecelik açılardaki spektrumların beklendiği gibi aynı olduğu gözlenmiş fakat 2. kaplamada ortaya çıkan 60 ve 120 derecelik açılardaki spektrumların farklı olması bu yapının AFM özelliğinden kaynaklandığını göstermiştir.

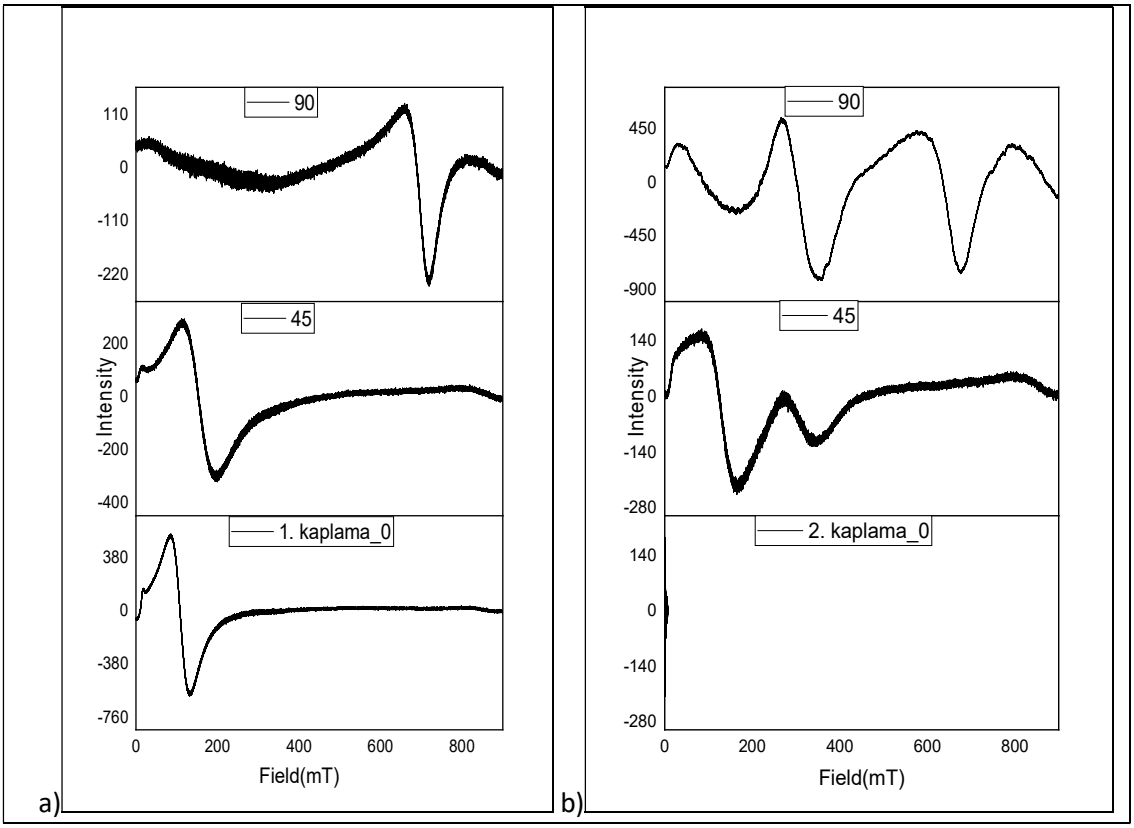


Şekil 4.42: 0-60-120 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama.



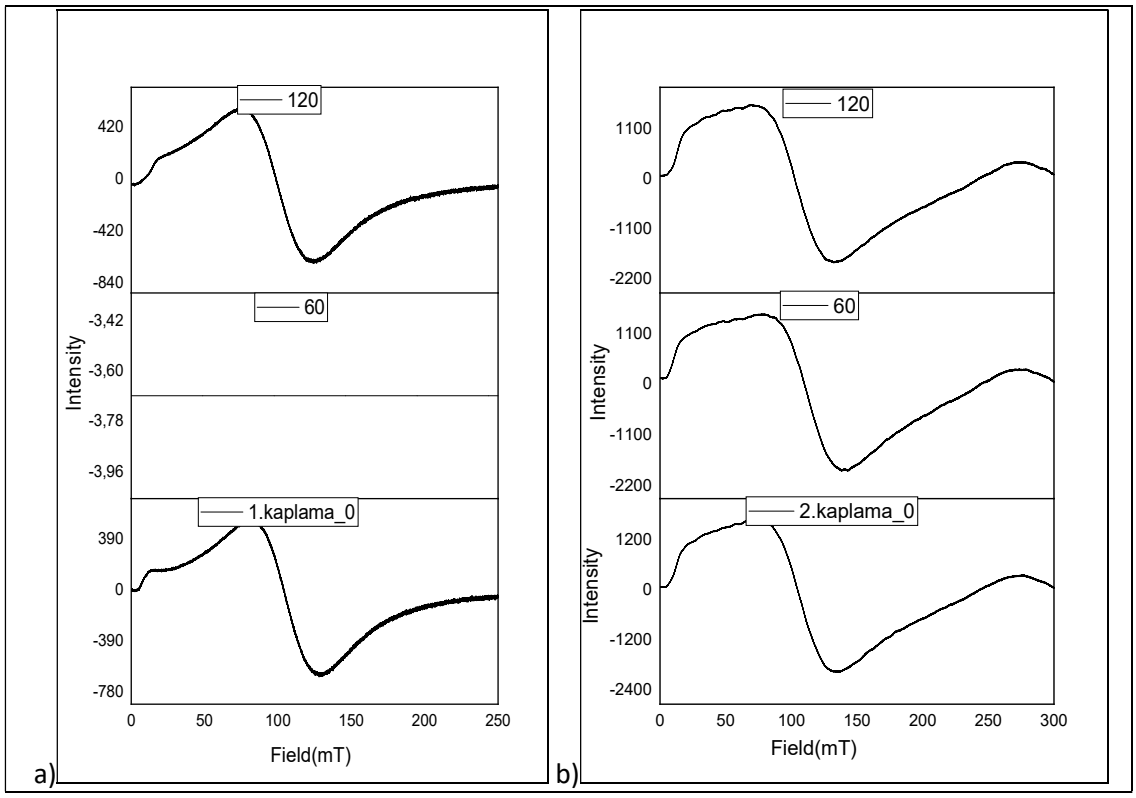
Şekil 4.43: 0-60-90 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama.

Şekil 4.43b'de verilen grafikte 60 derecelik açıda kuyruk pikleri açıkça gözlemlenmiştir. 90 derecelik açıya yaklaştıkça kuyruk pikleri sayısı artmıştır. Şekil 4.42b'de verilen grafikte 60 derecede kuyruk pikleri açıkça gözlenmiştir. 120 derecelik açıya yaklaştıkça kuyruk pikleri sayısı azalmıştır.

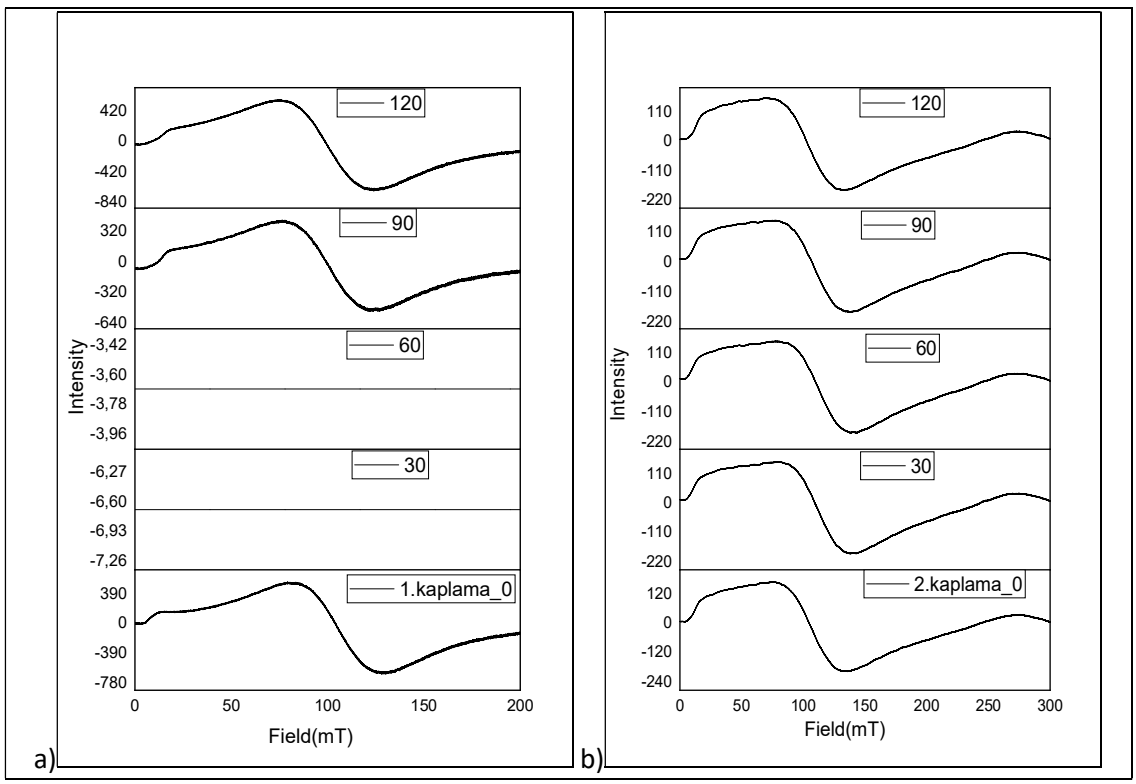


Şekil 4.44: 0-45-90 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama.

Şekil 4.44b'de verilen grafikte 45 derecede kuyruk pikleri açıkça gözlemlenmiştir. 90 derecelik açıya yaklaştıkça kuyruk pikleri sayısı iki katına çıkmıştır. PET alttaş üzerine kaplanan ince film yapılarının farklı açılarda düzlem içigeometrisinde FMR spektrumları Şekil 4.45 ve 4.46'da verilmiştir. Verilen grafiklerde kuyruk pikleri gözlenmemiştir.



Şekil 4.45: yapılarının 0-60-120 derecelik açılarda düzlem içi geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama.



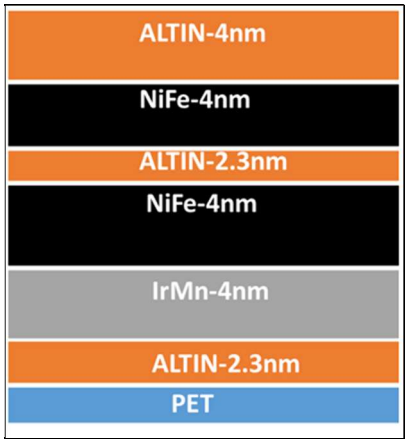
Şekil 4.46: 0-30-60-90-120 derecelik açılarda düzlem içi geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama.

4.9. VSM Ölçümü Yapılmış [PET/Au(2.3nm) / IrMn (4nm)/ FeNi (4 nm) /Au(2.3nm)] Örneğinin Üzerine [NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)] Kaplanması

PET malzemisinin üzerine sırasıyla [Au(2.3nm)/ IrMn (4nm)/ FeNi(4nm)/ Au(2.3nm)] sputter sisteminde kaplanmış ve daha sonra VSM sisteminde mıknatıslanma ölçümü yapılmış ince film yapısının üzerine tekrar sırasıyla NiFe(4nm)/ Au(2.3nm) kaplanmıştır. Dört numune seti için yapısal bilgiler Tablo 4.9'da sunulmuştur.

Tablo 4.11: İkinci kaplama için büyüme oranları.

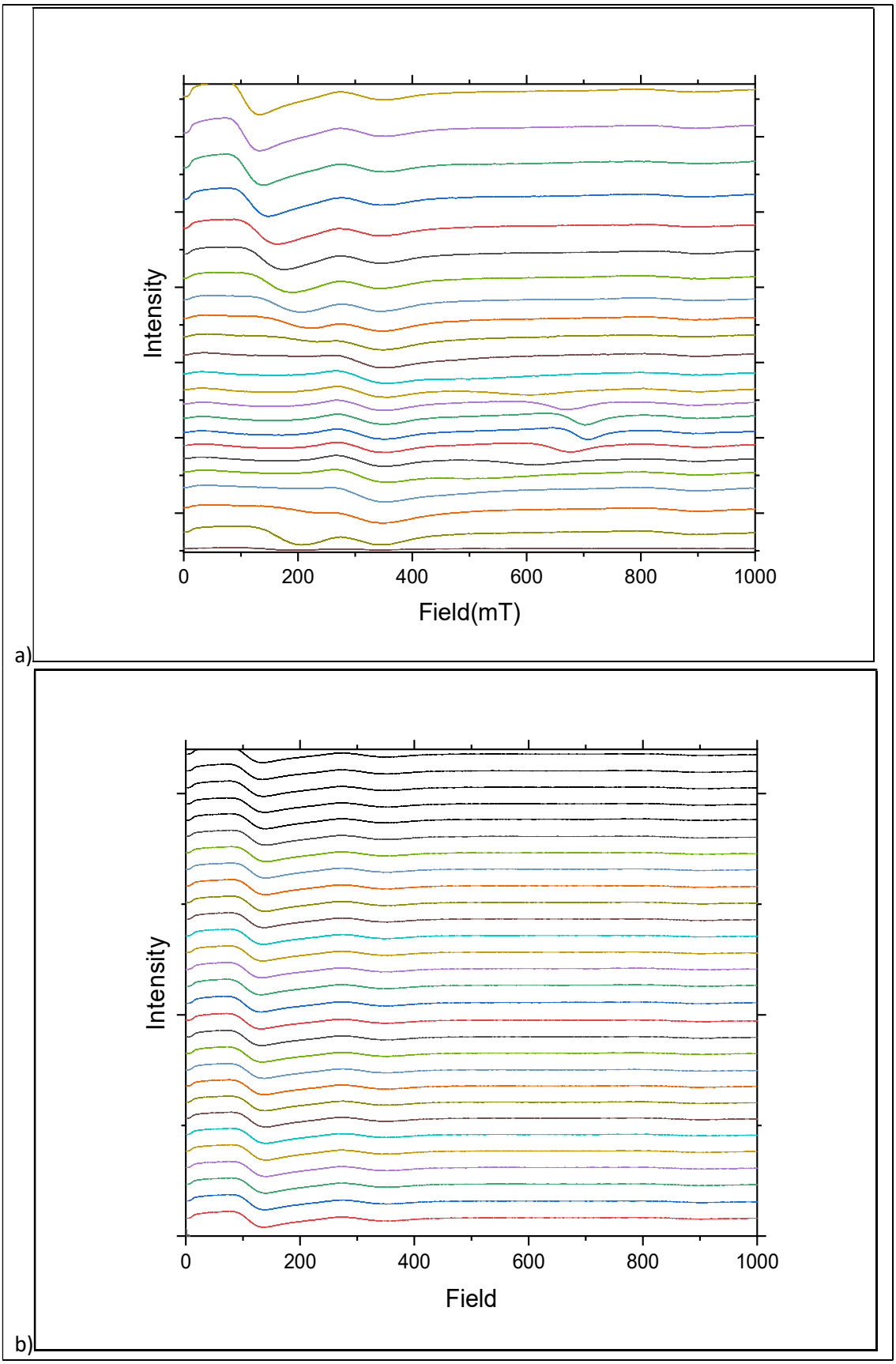
Hedef Malzemesi	Power(W)	Growth rate(nm/min)	Kalınlık(nm)
Altın(Au)	DC=10W	1,52min	2.3nm
IrMn	DC=20W	6.40min	4nm
NiFe	AC=40W	6,40min	4nm



Şekil 4.47: PET/[Au(2.3nm)/IrMn(4nm)/NiFe(4nm)/Au(2.3)/NiFe(4nm)/Au(2.3nm)] ince film yapısı.

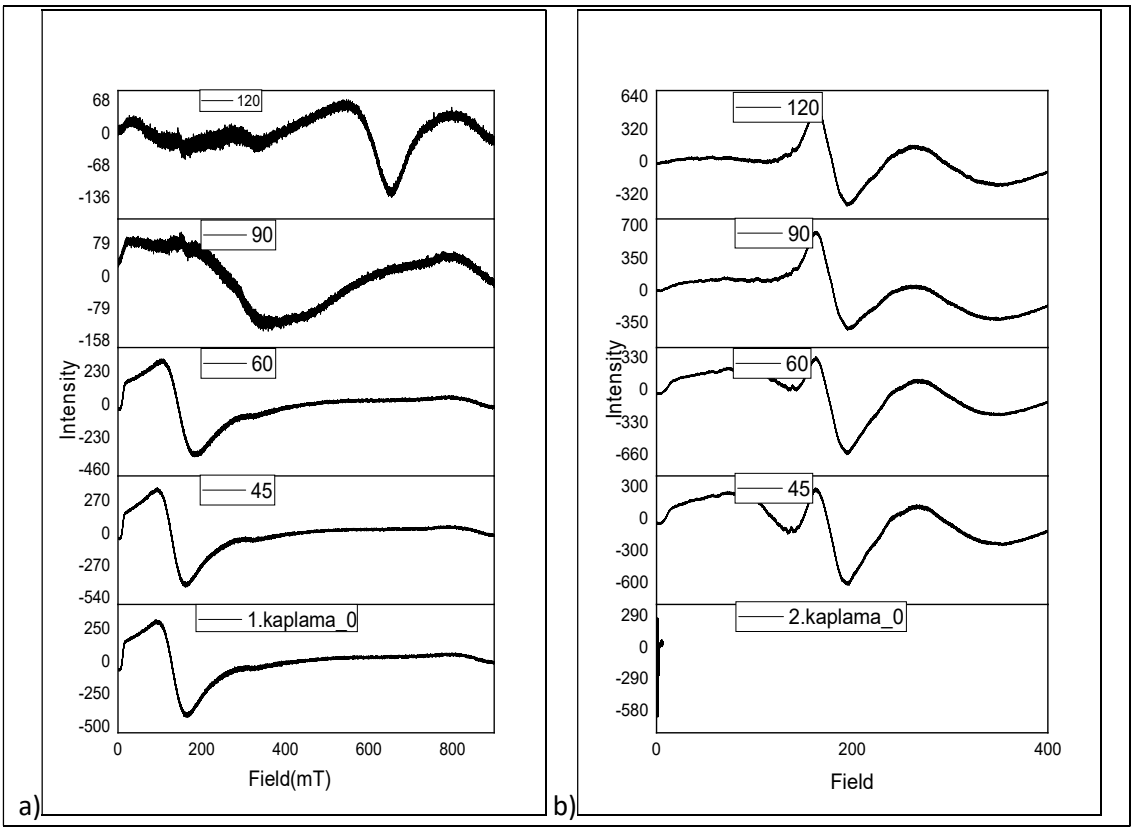
4.9.1. PET Alttaş Üzerine Kaplanan Yapının Manyetik Analizlerin Sonuçları

PET alttaş üzerine kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn (4nm)/ FeNi (4nm)/ Au(2.3nm)/ NiFe(4nm)/ Au(4nm)] kaplanan yapı FMR sisteminde; düzlem içi geometrisi ölçümleri 0-360, düzlem dışı geometrisi FMR ölçümleri ise 0-180 derece açıları arasında alınmıştır. Spektrum grafikleri Şekil 4.48'de verilmiştir.



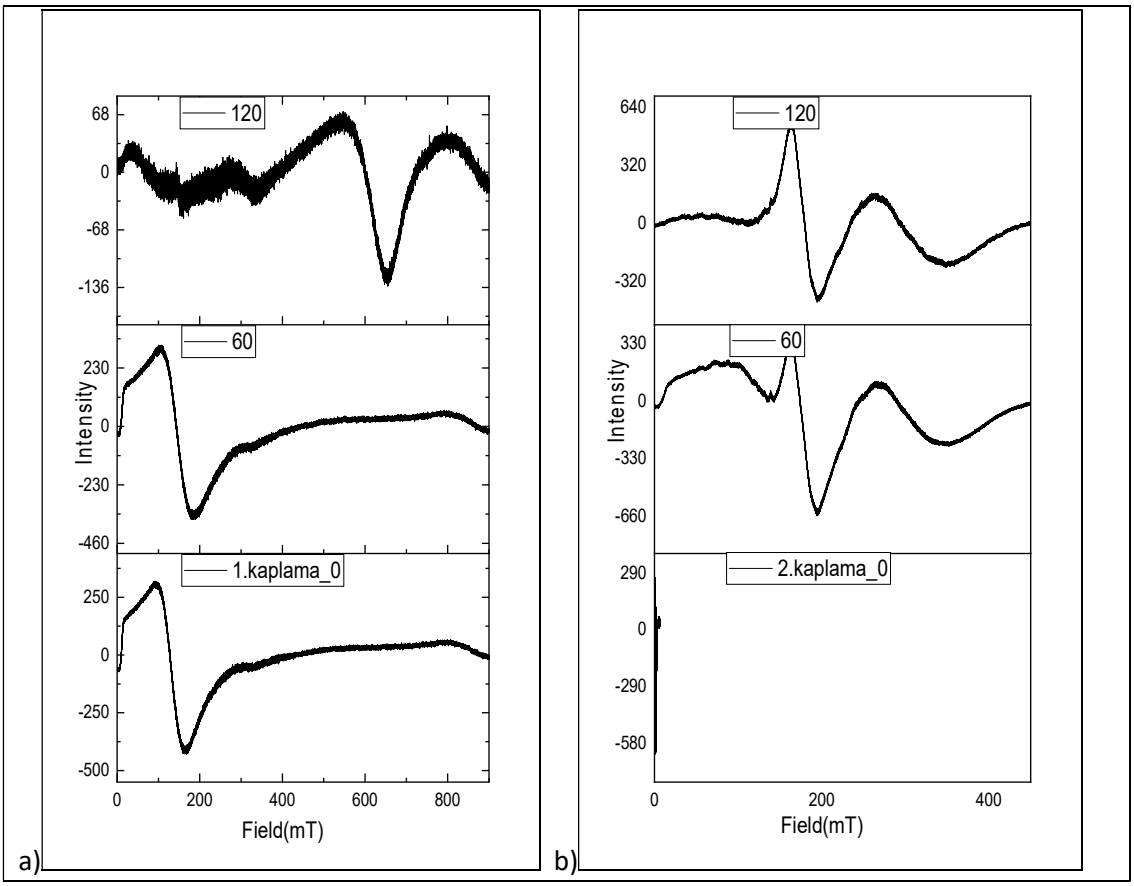
Şekil 4.48: a) Düzlem dışı geometride FMR spektrumları. b) Düzlem içi geometride FMR spektrumları.

Yapılan 1. ve 2. kaplamanın ardından düzlem dışı geometrisinde FMR spektrumlarının karşılaştırılması Şekil 4.49, 4.50 ve 4.41'de verilmiştir. Şekil 4.49a'da verilen [Au(2.3nm)/ IrMn (4nm)/ FeNi (4nm)/ Au(2.3nm)] düzlem dışı geometri FMR spektrumlarında 0, 30, 45, 60, 90 ve 120 derecelik açılarda tek rezonans mod gözlenmiştir. Yapılan bu kaplamanın üzerine [(NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)] kaplaması 2. kaplama olarak yapılmıştır ve Şekil 4.49b'de düzlem dışı geometri FMR spektrumlarının verildiği grafikte 45 derecede satellite modları gözlemlenmiştir. 60, 90 ve 120 derecelik açılarda ise aynı şekilde satellite modları (kuyruk pikleri) veya 2. modlar gözlemlenmiştir. Gözlenen bu 2. modlar 2. kaplama olarak yapılan ferromanyetik katmandan (NiFe) gelmiştir.

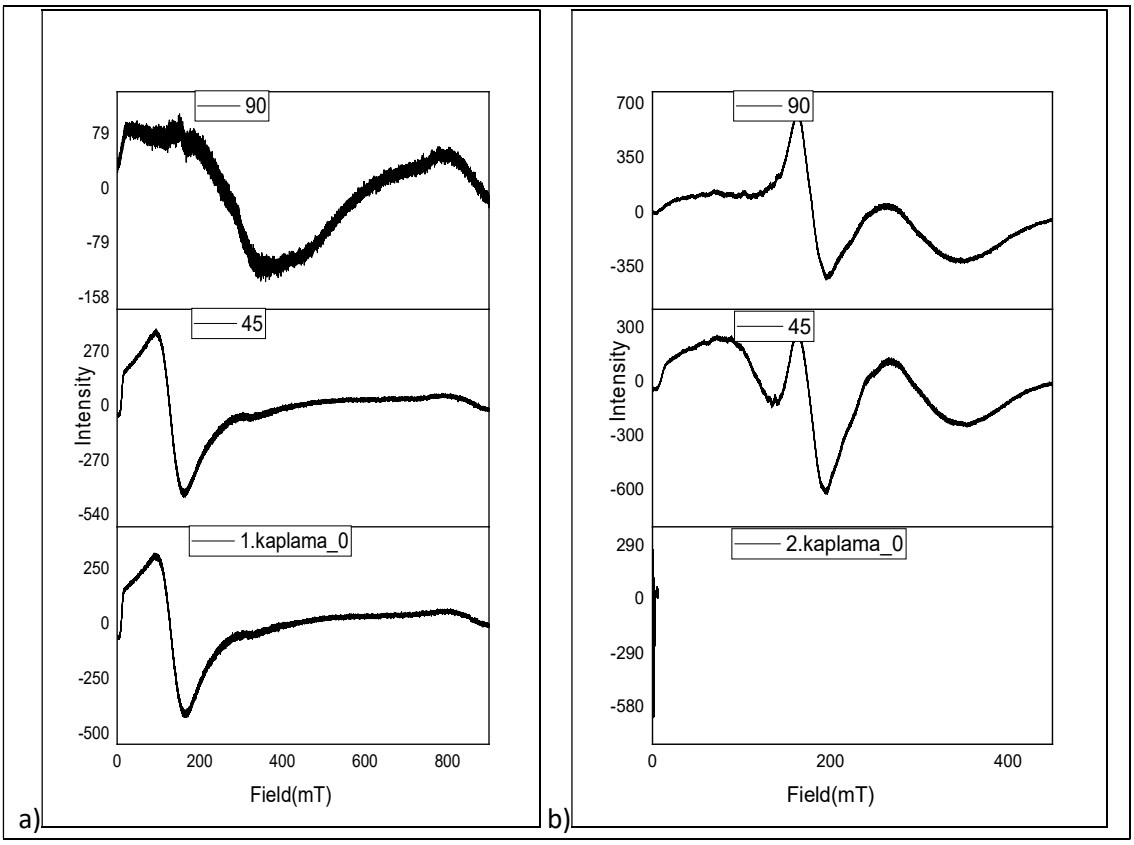


Şekil 4.49: 0-45-60-90-120 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama.

Şekil 4.50 ve 4.51'de PET alttaş üzerine kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn (4nm)/ FeNi (4nm)/ Au(2.3nm)/ NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)] yapısının düzlem dışı geometride FMR spektrum grafiklerinin farklı açılarda karşılaştırlması yapılmıştır 2. modlar aynı şekilde gözlenmiştir.

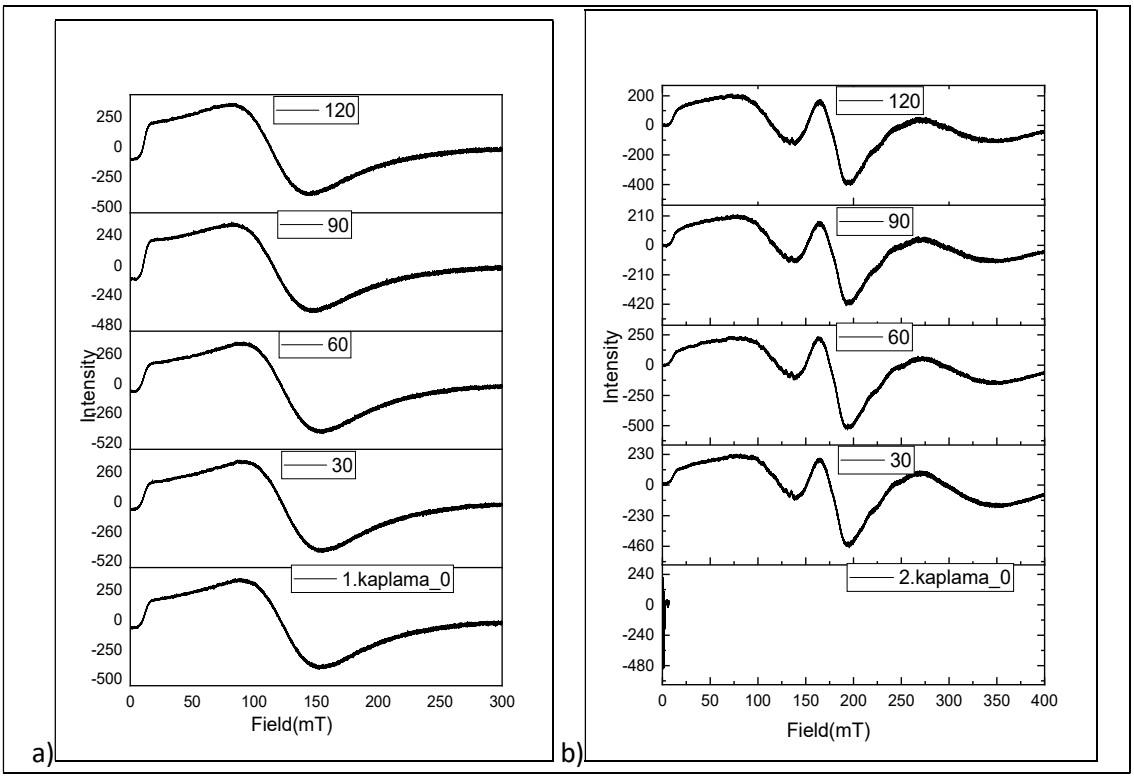


Şekil 4.50: 0-60-120 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama.

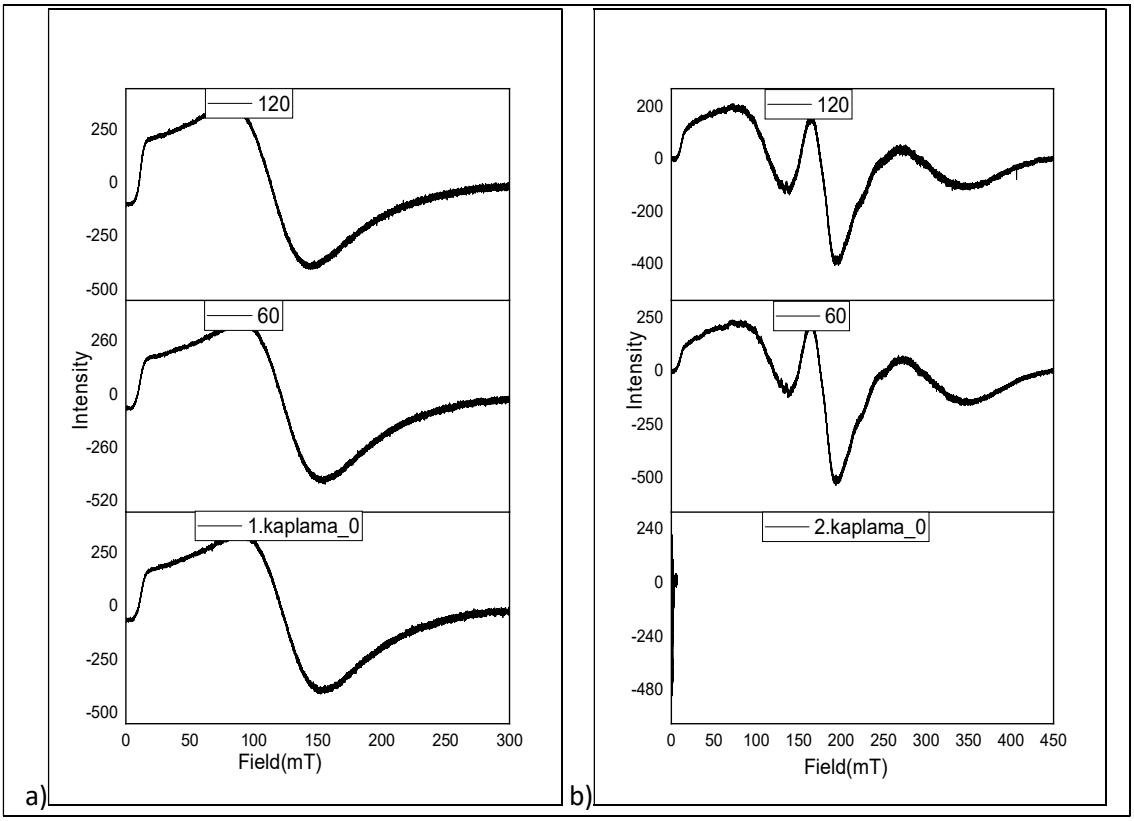


Şekil 4.51: 0-45-90 derecelik açılarda düzlem dışı geometride FMR spektrumları a) 1. kaplama b) 2. kaplama.

Şekil 4.52 ve 4.53'de PET alttaş üzerine kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn(4nm)/ FeNi(4nm)/ Au(2.3nm)/ NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)] yapısının düzlem içi geometride FMR spektrum grafiklerinin farklı açılarda karşılaştırlması yapılmıştır 2. modlar aynı şekilde gözlenmiştir.

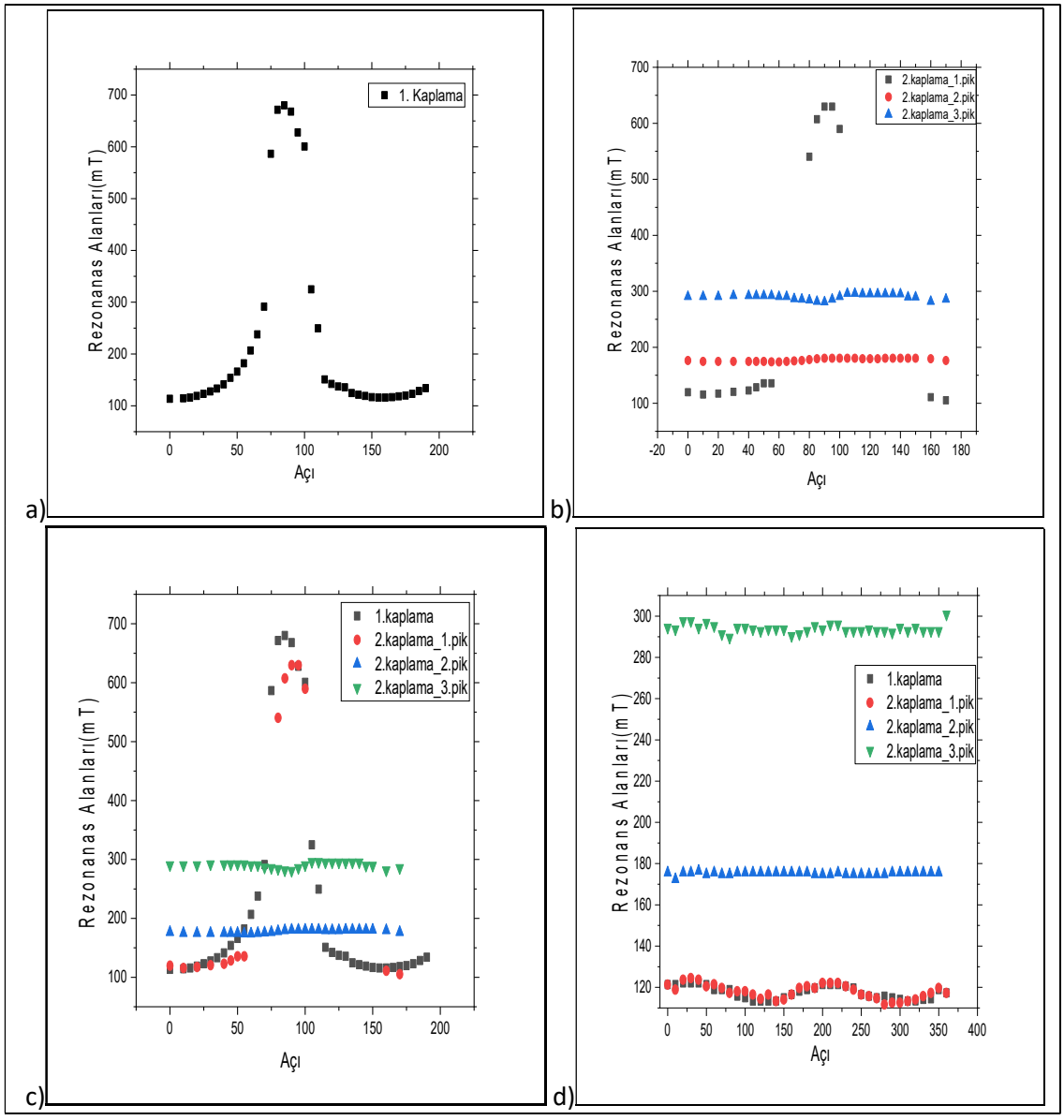


Şekil 4.52: 0-30-60-90-120 derecelik açılarda düzlem içi geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama.



Şekil 4.53: 0-60-120 derecelik açılarda düzlem içi geometride FMR spektrumları. a) 1. kaplama b) 2. kaplama.

Kaplanan ince filmlerin manyetik anizotropi özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için rezonans alanları detaylı bir şekilde incelemesi yapılmıştır. Her bir geometri için elde edilen FMR sinyallerinin açıya bağlı olarak detaylı analizleri sonucunda elde edilen 1. ve 2. kaplamaların rezonans alanları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.52'de verilmiştir. Düzlem dışı geometride üç farklı, düzlem içi geometride dört farklı tek eksenli yapılar belirlenmiştir. Ortaya çıkan farklı yapıların ilk nedeni iki farklı NiFe katmanının ayrı ayrı katkı sağlaması, ikinci nedeni ise NiFe katmanlarının kendi aralarında etkileşimlerinden kaynaklanmıştır.



Şekil 4.54: a) 1. kaplamanın düzlem dışı geometride b) 2. kaplamanın düzlem dışı geometride c) Her iki örnek için düzlem dışı geometrisi d) Her iki örnek için düzlem içi geometride rezonans alanları.

5. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu tez çalışmasında, silisyum ve PET alttaşlar üzerine hazırlanan ince film örneklerinin giyilebilir ve esnek elektronik uygulamalarında kullanılmak üzere yapısal ve manyetik özelliklerinin detaylı olarak araştırılması yapılmıştır. Bu çalışmada, FM/ AFM ince film numunesi arasındaki manyetik etkileşmeler ele alınmıştır. Hem statik hem de dinamik özelliklerin kapsamlı bir çalışması yapılmıştır.

Hazırlanan ince film örneklerinin kristal yapı özellikleri XRD tekniği ile yapılmıştır. İnce film örnekleri silisyum ve esnek PET alttaş üzerine hazırlanarak ve titreşimli örnek manyeto metrisi sisteminde manyetik alan altında ısıtılarak manyetik özellikleri incelenmiştir. VSM ölçümü öncesi ve sonrasında alınan FMR ölçümleri karşılaştırıldığında ortaya çıkan düzlem içi ve düzlem dışı manyetik anizotropilerinin varlığı ve manyetik alan altında ısıtılmaya bağlı olarak nasıl değiştiği tespit edilmiştir. Bu tespitlere ek olarak titreşimli örnek manyeto metrisi ölçümleri sonucunda ferromanyetik ve antiferromanyetik katmanlar arasındaki arayüzde var olan değişim önyargısı silisyum ve PET alttaş üzerine hazırlanan örnekler için ayrı ayrı hesaplanmış, karşılaştırılması yapılmıştır. Esnek olmayan ve esnek olan alttaşlar üzerine hazırlanan ince film yapılarının manyetik ölçümlerinden H_c, M_s değerlerinin aynı olması ve Heb değerinin daha yüksek olması PET esnek malzemelerinin bu alanda kullanılabilir olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır.

Bölüm 4.8 ve 4.9'da ayrıntılı şekilde verilen ve düzlem dışı geometride alınan FMR ölçümleri sonucu ortaya çıkan rezonans alanı grafiğinde gözlemlenen 2. ve 3. modlar olmuştur. Bunun nededi PET alttaş üzerine yapılan 1. kaplamadan sonra malzemenin vakum sistemi dışına çıkartılıp bekletilmesi ve daha sonra temizliği yapılarak 2. kaplama için sputter sistemine koyulmasıdır. Au(2.3nm)/ IrMn(10nm)/ NiFe(4nm)/ Au(2.3) ve NiFe(4nm)/ Au(4nm) katmanları arasında biriken partiküller, iki NiFe (ferromanyetik) katmanlarının birbiri ile yeteri kadar etkileşmesini egellemiştir. 2. ve 3. modların yada kuyruk piklerinin oluşmasına katkı sağlayan ayrı kaplanan ferromanyetik (NiFe) katmanlardır.

PET alttaş üzerine yapılan 1. ve 2. kaplamanın ardından düzlem dışı geometrisinde FMR spektrumlarının karşılaştırılması Bölüm 4.8'de verilmiştir. Verilen [Au(2.3nm) / IrMn (4nm)/ FeNi (4 nm) /Au(2.3nm)] düzlem dışı geometri

FMR spektrumlarında 0, 30, 45, 60, 90 ve 120 derecelik açılarda tek rezonans mod gözlenmiştir. Yapılan bu kaplamanın üzerine [(NiFe(4nm)/Au(2.3nm)] kaplaması 2. kaplama olarak yapılmış, düzlem dışı geometri FMR spektrumlarının verildiği grafikte 90 derecede satellite modları gözlenmiştir. 0, 30, 45, 60, 120 dereclik açılarda ise aynı şekilde satellite modları (kuyruk pikleri) yada 2. modlar gözlenmiştir. Bunun sebebi ise 1. kaplama sonrasında ince film yapısı vakum sisteminden çıkartılmış FMR ölçümleri alınmış daha sonra 2. kaplamadan önce vakum sistemine tekrar kayulmasıdır. İlk kaplamada büyütülen NiFe ile 2. kaplamada büyütülen NiFe spinlerinin birbiriyle yeteri kadar etkileşememiş olması FMR spektrumlarına kuyruk pikleri olarak yansımıştır.

Bölüm 4.9'da ayrıntılı olarak verilen [Au(2.3nm) / IrMn (4nm)/ FeNi (4 nm) /Au(2.3nm)] düzlem dışı geometri FMR spektrumlarında ise 0, 30, 45, 60, 90 ve 120 derecelik açılarda tek rezonans mod gözlenmiştir. Yapılan bu kaplamanın üzerine [(NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)] kaplaması 2. kaplama olarak yapılmış ve düzlem dışı geometri FMR spektrumlarının verildiği grafikte 45 derecede satellite modları gözlenmiştir. 60, 90, 120 derecelik açılarda ise aynı şekilde satellite modları gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak 1. kaplama sonrasında ince film yapısı vakum sisteminden çıkartılmış FMR ölçümleri alınmış daha sonra 2. kaplamadan önce vakum sistemine tekrar koyulması olmuştur. İlk kaplamada büyütülen NiFe ile 2. kaplamada büyütülenn NiFe spinlerin birbiriyle yeteri kadar etkileşememiş olması ek modları yada kuyruk piklerini ortaya çıkarmıştır. Sonuç olarak PET alttaş üzerine kaplanan [Au(2.3nm)/ IrMn(4nm)/ FeNi(4nm)/ Au(2.3nm)] ve [(NiFe(4nm)/ Au(2.3nm)] yapıları vakum sisteminden çıkarılmadan sırasıyla, aynı anda büyütülseydi, ortaya tek eksenli anizotropiye sahip ve ek modların oluşmadığı daha net bir sonuç çıkması beklenirdi.

Yapılan ölçümler ve tartışmalar sonucunda, tezin amacı olan giyilebilir ve esnek elektronik uygulamalarında; esnek alttaş olarak PET malzemesi kullanılabileceği çıkan sayısal sonuçlarar ile desteklenmişitr. Bu şekilde yapılacak çalışmalar PET'in üzerine büyütülen ince film yapılarının detaylı bir şekilde aydınlatılmasını sağlayacağı için literatür araştırmalarına vereceği katkı büyük bir önem arzetmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Khanal S., (2017), "Study of Static and Dynamic Properties of Magnetic Nanostructures'', Doctoral Thesis, University of New Orleans.

[2] Emrah Ç., (2008), "Ferromanyetik Filmlerde Oluşan Yüzey Manyetik Anizotropisinin Nümerik Çözümlenmesi'', Yüksek Lisans Tezi, Edirne Üniversitesi.

[3] Ohring M., (1995), "Magnetic Properties of Materials in Engineering Materials Science'', 2nd Edition, San Diego: Academic Press.

[4] Gökmen B., (2010), " 3d Geçit Metali Ni Katkılı Zn1-xNixO ve 4f- Lantanit Gd Katkılı Zn1-xGdxO Bileşiklerinin Yapısal ve Manyetik Özellikleri'', Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi.

[5] Çakır Ö., (2006), "HfFe6Ge6 Tipi İntermetalik Bileşiklerin Magnetik Özelliklerinin İncelenmesi'', Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi.

[6] Vural L., (2010), "Sert Ferrit ve NdFeB Tipi Mıknatısların Karakterizasyonu ve Tersinir Olmayan Kayıpların Yapı Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[7] Coey J.M.D., (2010), "Magnetism and Magnetic Materials'', 1st Edition, Cambridge University Press.

[8] Web1, (2020), http://www.magnets.bham.ac.uk/magneticmaterials/index.shtml, (Erişim Tarihi: 15.05.2020).

[9] Ünal M. S., (2011), ''Doğal Kaynaklardan ve Atık Malzemelerden Stronsiyum Ferrit Mıknatıs Üretimi'', Yüksek Lisan Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[10] Guo Z.B., Yang W., Shen Y.T., Du Y.W., (1998), ''Solidstate communication'', Journal of ScienceDirect, 105, 89-92.

[11] Gunnarsson R., (2002), "Some aspects on interfaces in perovskite manganites", Doctoral Thesis, Göteborg University.

[12] Meiklejohn W.H., Bean C. P., (1957) "New Magnetic Anisotropy'', Journal Of Physical Review, 105(2), 904-913.

[13] Silva R.B., Viegas A.D.C., Nascimento V.P., Correa M.A., Schelp L.F., Baggio-Saitovitch E., (2009), "High fequency magnetoimpedance in Ni81Fe19/Fe50Mn50 exchange biased multilayer'', Journel of Applied Physics Letters, 94(4).

[14] Dubowik J., Stobiecki F., Goscianska I., Lee Y. P., Paetzold A., Roll K., (2005), “Temperature dependence of ferromagnetic resonance in permalloy/NiO exchange-biased films’’, Journel of European Physical Journal B, 45, 283-288.

[15] Gloanec M., Rioual S., Lescop B., Zuberek R., Szymczak R., Aleshkevych P., (2009), “Dynamical effect in measurement of the exchange-bias field: A consequence of the slow-relaxer mechanism’’, Journal of Physical Review B, 80.

[16] Jimenez E., Camarero J., Perna P., Mikuszeit N., Teran F.J., Sort J., (2011), “Role of anisotropy configuration in exchange-biased systems," Journal of Applied Physics, 109.

[17] Sort J., Dieny B., Nogues J., (2005), “Exchange bias in antiferromagnetic-ferromagneticantiferromagnetic structures with out-of-plane magnetization’’, Journal of Physical Review B, 72.

[18] Sort J., Salazar-Alvarez G., Baro M. D., Dieny B., Hoffmann A., Novosad V., (2006), “Controlling magnetic vortices through exchange bias’’, Journa of Applied Physics Letters, 88.

[19] Chui K. M., Tripathy D., Adeyeye A. O., (2007), “Temperature dependence of magnetotransport properties of Ni80Fe20/Fe50Mn50/Ni80Fe20 trilayers," Journal of Applied Physics, 101(9).

[20] Garcia C., Florez J. M., Vargas P., Ross C. A, (2010), “Asymmetrical giant magnetoimpedance in exchange-biased NiFe," Journal of Applied Physics Letters, 96.

[21] Garcia C., Florez J. M., Vargas P., Ross C.A, (2011), “Effect of the exchange bias coupling strength on the magnetoimpedance of IrMn/NiFe films’’, Journal of Applied Physics, 109.

[22] Phuoc N.N., Xu F., Ma Y., Ong C.K., (2009), “Permalloy-FeMn exchange-biased multilayers grown on flexible substrates for microwave applications ’’, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 321(17), 2685-2690.

[23] Popova E., Keller N., Gendron F., Thomas L., Brianso M.-C., Guyot M., Tessier M., Parkin S., (2001), “Perpendicular magnetic anisotropy in ultrathin yttrium iron garnet films prepared by pulsed laser deposition technique’’, Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces and Films 19(5), 2567–2570.

[24] Peter A.G., (2008), “Nobel Lecture: From spin wavesto giant magnetoresistance and beyond’’ Journal of Reviews of Modern Physics, 80(4), 1531-1540.

[25] Djamal M., Sutan R., Yulkifli A., Khairurrijal K., (2009), “Effect of Cu Layer Thickness on Giant Magnetoresistance Properties of NiCoFe/Cu/NiCoFe Sandwich’’, ICROS-SICE International Joint Conference, 365-368, F., Japan, 18-21 August.

[26] Nickel J., (1995), "Magnetoresistance Overview'', Computer Peripherals Laboratory HPL, 95-60.

[27] Duygu A., (2014) "Manteyik Nanotellrede Manyetodirençteki Etki'', Yüksek Lisans Tezi, T.C. İnönü Üniversitesi.

[28] Web 2, (2020), http://simple.wikipedia.org/wiki/Giant_magnetoresistance, Erişim Tarihi: 15.05.2020).

[29] Mohammad A.Z., Ashok K.V., Upender K., (2020), "A brief ıntroduction to giant magneto resistive (GMR) sensors'', Journal of a Peer Reviewed Research, 4(1), 95-101.

[30] Tsymbal E.Y., Pettifor D., (2001), "Perspectives of giant magnetoresistance'', Journal of Solid State Physics, 56, 113 – 237.

[31] Evegeny Y.T., David G.P., (2001), "Perspectives of Giant Magnetoresistance'', H. Ehrenreich and F. Spaepen, Editors, '' Solid State Physics Book'', Academic Press.

[32] Hicran Ö.K., (2017), "Giyilebilir Teknoloji Ürünleri Pazarı ve Kullanım Alanları'', Journal of Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 9 (4), 99-112.

[33] Anindya N., Asif I. Z., Xie L., Subhas C. M., Jurgen K., (2016), "Novel sensing approach for LPG leakage detection: Part I—Operating mechanism and preliminary results," Journal of IEEE Sensors, 16(4), 996–1003.

[34] Anindya N., Asif I. Z., Xie L., Subhas C. M., Jurgen K., (2016), "Novel sensing approach for LPG leakage detection Part II: Effects of particle size, composition, and coating layer thickness," Journal of IEEE Sensors, 16(4), 1088–1094.

[35] Subhas C.M., (2015), "Wearable Sensors for Human Activity Monitoring," Journal of IEEE sensors, 15(3),1321-1330.

[36] Mohd A.M.Y., Mukhopadhyay S.C., (2011), "Development of planar electromagnetic sensors for measurement and monitoring of environmental parameters," Journal of Measurement Science and Technology, 22(2).

[37] Mukhopadhyay S.C., Gooneratne C.P., (2007), "A novel planar-type biosensor for noninvasive meat inspection," Journal of IEEE Sensors, 7(9), 1340–1346.

[38] Zia A. I. , Mukhopadhyay S.C., Yu P., Al-Bahadly I. H. , Gooneratne C.P., Kosel J.R., (2014), "Introducing molecular selectivity in rapid impedimetric sensing of phthalates'', IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 838–843, M., Uruguay, 12-15 May.

[39] Asif I.Z., (2013), “Technique for rapid detection of phthalates in water and beverages,” Journal of Food Engennering, 116(2), 515–523.

[40] Segev-Bar M., Haick H., (2013), “Flexible sensors based on nanoparticles,” Journal of ACS Nano, 7(10), 8366–8378.

[41] Unno Y., Affolder A., Allport P.P., Martinez-McKinney F., (2011), “Development of n-on-p silicon sensors for very high radiation environments,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 636(1), 24-30.

[42] Mukhopadhyay S.C., (2015), “Wearable sensors for human activity monitoring: A review”, Journal of IEEE Sensors 15(3), 1321–1330.

[43] Patel S., Park H, Bonato P., Chan L., Rodgers M., (2012), “A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation,” Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 9(1), 1.

[44] Deen M.J. (2015), “Information and communications technologies for elderly Ubiquitous healthcare in a smart home’’, Journal of Personal and Ubiquitous Computing, 19(3-4), 573–599.

[45] Pantelopoulos A., Bourbakis N.G., (2010), “A Survey on Wearable Sensor-Based Systems for Health Monitoring and Prognosis’’ Journal of IEEE Transctions Sysems Man And Cybernetics, 40(1), 1–12.

[46] Nemati E., Deen M., Mondal T.A, (2012), “Wireless wearable ECG sensor for long-term applications’’, Journal of IEEE Communnications Magazine, 50(1), 36–43.

[47] Hong Y., Kim I., Ahn S., Kim H., (2010), “Mobile health monitoring system based on activity recognition using accelerometer’’, Journal of Simulation Modelling Practice and Theory, 18(4), 446–455.

[48] Juhasz J.A., Best S.M., (2011), “Surface modification of biomaterials by calcium phosphate deposition’’, Y. V. Pathak, Editor, “Surface Modification of Nanoparticles for Targeted Drug Delivery Book’’, Springer.

[49] Alfonso E., Olaya J., Cubillos G.I., (2012) “Thin Film Growth Through Sputtering Technique and Its Applications”, M. Andreeta, Editor, “Crystallization – Science and Technology and Technology Book’’, IntechOpen.

[50] Akbaş Y., (2019), “Spintronik Uygulamalr İçin(Py)xCu-x Manyetik İnce Film Sistemlerinin Geliştirilmesi ve Analizi’’, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.

[51] Farle M., (1999) “Ferromagnetic resonance of ultrathin metallic layers”, Technical Report No: S0034-4885(98)82219-7, Department of Experimental Physics, Freie University, Germany.

[52] Heinrich B., Cochran J.F., (1993), “Ultrathin metallic magnetic films: magnetic anistropies and exchange interactions”, Journal of Advances in Physics, 42(5), 523-639.

[53] Vonsovski S.V., (1964), “ Ferromagnetic Resonance’’, 1st Edition, Elsevier.

[54] Kuanr B.K., Maat S, Chandrashekariaih S., Veerakumar V., Camley R.E., Celinski Z., (2008), “Determination of exchange and rotational anisotropies in IrMn/Fe(t)/IrMn exchange coupled structures using dynamic and static techniques: Application to microwave devices, ’’Journal of Applied Physics, 103.

[55] McCord J., Mattheis R., Elefant D., (2004), “Dynamic magnetic anisotropy at the onset of Exchange bias: The NiFe/IrMn ferromagnet/antiferromagnet system’’ Journal of Physical Review B, 70(9).

[56] Stoecklein W., Parkin S.S.P., Scott J.C., (1988), “ Ferromagnetic resonance studies of exchange-biased Permalloy thin films, Journal of Physical Review B, 38, 6847-6855.

ÖZGEÇMİŞ

Yasemin Polat 1992 yılında Bursa'da doğdu. 2011 yılında başladığı Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümünden 2016 yılında ''Piezoelektrik Malzemeler ve Kullanım Alanları'' isimli bitirme çalışmasını tamamlayarak mezun oldu. 2018 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında lisansüstü eğitimine başladı. Yüksek lisans tez çalışmalarını Gebze Teknik Üniversitesi Nano Manyetizma ve Spintronik (NASAM) Laboratuvarı'nda yaptı.