

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Pt<sub>x</sub>Co<sub>1-x</sub>/CoO ULTRA İNCE FİLMLERDE EXCHANGE BİAS**  
**ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**MEHMET EMRE AKÖZ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**FİZİK ANABİLİM DALI**

**GEBZE**  
**2015**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Pt<sub>x</sub>Co<sub>1-x</sub>/CoO ULTRA İNCE FİLMLERDE**  
**EXCHANGE BİAS ETKİSİNİN**  
**İNCELENMESİ**

**MEHMET EMRE AKÖZ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**DOÇ. DR. OSMAN ÖZTÜRK**  
**II. DANIŞMANI**  
**YRD. DOÇ. DR. MUSTAFA ERKOVAN**

**GEBZE**  
**2015**

**T.R.**  
**GEBZE INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**EXCHANGE BIAS INVESTIGATION OF**  
**Pt<sub>x</sub>Co<sub>1-x</sub>/CoO ULTRA THIN FILMS**

**MEHMET EMRE AKÖZ**  
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF**  
**MASTER OF SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF PHYSICS**

THESIS SUPERVISOR  
ASSOC. PROF. DR. OSMAN ÖZTÜRK  
II. THESIS SUPERVISOR  
ASSIST. PROF. DR. MUSTAFA ERKOVAN

**GEBZE**

**2015**



## YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 14 / 05 / 2015 tarih ve 2015/29 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 20 / 05 / 2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mehmet Emre AKÖZ'ün tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Osman ÖZTÜRK

ÜYE

: Prof. Dr. Muhammed Hasan ASLAN

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Sadullah ÖZTÜRK

### ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Exchange Bias (EB) etkisi, bir Ferromanyetik (FM) malzeme ile bir Antiferromanyetik (AFM) malzemenin üst üste geldiklerinde oluşturdukları yapılarda gözlenen bir etkidir. Bu etki ilk olarak 1956 yılında Meiklejohn ve Bean tarafından Co parçacıklarının yüzeylerindeki oksitlenmenin sonucu olarak gözlenmiştir. EB etkisinin kökeni ile ilgili birçok model öne sürülmüştür fakat tam olarak kökeni açıklayabilen bir model henüz bulunamamıştır. Kökeni bilinmemesine rağmen birçok teknolojik uygulamada kendisine kullanım alanı bulmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında farklı kimyasal oranda ferromanyetik PtCo ile antiferromanyetik CoO tabakalarından oluşan yapılarda EB etkisi araştırılarak hangi kompozisyonda EB etkisinin maksimum olduğunun belirlenmesi için yapılmıştır. Numuneler Si (001) kristal yönelimine sahip alttaş malzeme üzerine UHV şartlarında magnetron sputtering kaplama tekniği kullanılarak  $100 \text{ \AA}$   $\text{Pt}_x\text{Co}_{1-x}$  ( $x$ : 0.1 ile 0.9 arasında 0.1'lik adımlarla değişmektedir)/  $100 \text{ \AA}$  CoO yapılar olarak hazırlanmıştır.  $\text{Pt}_x\text{Co}_{1-x}$  tabakaların kimyasal oranlarının tespitinde X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) tekniği kullanılmıştır.

Numunelerin manyetik karakterizasyonunda Manyeto Optik Kerr Etkisi (MOKE) tekniği ile histeresis eğrileri açığa bağlı olarak elde edilip her bir numunenin H dış manyetik alan uygulandığında FM malzemelerde gözlenen mıknatıslanma vektör yönelimleri belirlenerek Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) tekniği kullanımında bu yönelimlere göre referans alınarak her bir numunenin belirlenen kolay-eksenlerine H dış manyetik alan altında EB etkileri ile beraber Engelleme Sıcaklıkları da belirlenmiştir. MOKE tekniği ile ayrıca her bir numunenin manyetik anizotropileri hakkında da bilgi sahibi olunmuştur.

**Anahtar Kelimeler: Manyetizma, Exchange Bias Etkisi, İnce Film, PtCo, CoO.**

## SUMMARY

Exchange Bias (EB) effect is an effect that is observed at the interface of a ferromagnetic (FM) material and an antiferromagnetic (AFM) material. This effect was first observed by Meiklejohn and Bean in 1956 as a result of surface oxidation of Co particles. Although a number of models were proposed about the origin of EB effect, none of these models is able to completely explain the origin of this effect. Despite origin is unknown, it has been widely used in technological applications.

This thesis study was conducted in order to investigate EB effect on thin films consist of ferromagnetic PtCo and antiferromagnetic CoO layers and to determine which composition maximizes EB field. Samples were prepared as 100 Å  $\text{Pt}_x\text{Co}_{1-x}$  (x: between 0.1 and 0.9 with 0.1 steps) / 100 Å CoO on Si (001) crystal orientation substrate by magnetron sputtering deposition technique in ultra high vacuum conditions. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) technique was used to determine  $\text{Pt}_x\text{Co}_{1-x}$  layers chemical ratio.

Magnetic characterization of the sample was carried out using magneto-optic Kerr effect (MOKE) technique and angle resolved hysteresis curves were acquired for each sample. Moreover, magnetization orientations depending on applied field were determined. EB fields and blocking temperatures were obtained using vibrating sample magnetometer (VSM) on easy axes that are found considering magnetization orientation. Besides, magnetic anisotropy information was gained using MOKE technique for each sample.

**Key Words: Magnetism, Exchange Bias Effect, Thin Film, PtCo, CoO.**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca benimle tecrübelerini paylaşan, bana her konuda destek olan, düşünce ve tavsiyelerini benden esirgemeyen, sahip oldukları bütün çalışma imkanlarını kullanmama izin veren değerli danışman hocalarım Doç. Dr. Osman ÖZTÜRK'e ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa ERKOVAN'a teşekkür ederim.

Manyetik karakterizasyon çalışmalarımı kendi çalışmalarından ayrı tutmayıp laboratuvar imkanlarını kullanmama izin vererek, aynı şekilde ilgilenen ve bilgi birikimini paylaşan Doç. Dr. Numan AKDOĞAN'a teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalar kapsamında desteklerini ve güzel sohbetlerini hiçbir zaman esirgemeyerek tecrübelerini paylaşan doktora öğrencisi Erdem DEMİRCİ, Araştırma Görevlisi Mustafa ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince konu itibari ile benzer konuları çalıştığımız, bilgi birikimi, yardım ve tavsiyelerini her zaman benimle paylaşan değerli ekip arkadaşım doktora öğrencisi Umut PARLAK'a teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmaları ile örnek hazırlama ve yüzeysel karakterizasyon çalışmaları hakkında tecrübelerini benimle bir ekip olgusu içinde paylaşan Dr. Ali Şems AHSEN ile Uzman Melek TÜRKSOY ÖCAL'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 212T217 numaralı TÜBİTAK projesi sonucunda ortaya çıkmış olup çalışma boyunca TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Bunun için destekte bulunan TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen, aldığım her kararda beni destekleyen, her koşulda hoşgörülerinden taviz vermeyen, üzerimde emekleri olan başta annem olmak üzere babam ve amcama teşekkür ederim. Her zaman ve her koşulda bana moral kaynağı olarak elinden gelen her türlü yardımda bulunan, sorumluluklarımı unutmamamı ve her zaman mantık çerçevesinde kalmamı sağlayan, çalışmalarım boyunca kendisine yeterince zaman ayıramadığım biricik kardeşim Halil Efe AKÖZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Motivasyon	4
1.2. İçerik	4
2. MANYETİZMA	6
2.1. Temel Manyetizma Kavramları	7
2.1.1. Manyetik Kutuplar	7
2.1.2. Manyetik Alan	7
2.1.3. Manyetik Kuvvet	8
2.1.4. Manyetik Akı Yoğunluğu	9
2.1.5. Manyetik Moment	10
2.1.6. Mıknatıslanma	11
2.1.7. Manyetik Duygunluk	12
2.1.8. Manyetik Geçirgenlik	12
2.2. Manyetizma Türleri	13
2.2.1. Diamanyetizma	13
2.2.2. Paramanyetizma	14
2.2.3. Ferromanyetizma	16
2.2.3.1. Histeresis Eğrisi	17
2.2.3.2. Domenler	19
2.2.3.3. Domen Duvarları	20
2.2.4. Antiferromanyetizma	21
2.2.5. Ferrimanyetizma	22



3. EXCHANGE BİAS	24
3.1. Meiklejohn-Bean Modeli	25
3.2. Mauri Modeli	26
3.3. Malozemoff Modeli	27
3.4. Takano Modeli	28
3.5. Domen Durumu Modeli	28
3.6. Spin Cam Modeli	29
3.7. Stoner-Wohlfarth Modeli	29
4. DENEYSEL TEKNİKLER	30
4.1. Vakum Kavramı ve Vakum Sistemleri	30
4.2. Magnetron Sputtering Deposition Tekniği	31
4.3. X-Işını Fotoelektron Spektroskopi (XPS) Tekniği	33
4.3.1. Fotoelektrik Etki	34
4.3.2. X-Işınları	35
4.4. Manyeto Optik Kerr Etkisi (MOKE) Tekniği	36
4.4. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Tekniği	41
5. PtCo/CoO YAPILAR	42
5.1. Kobalt ve Platin Elementlerinin Yapısal Bilgileri	42
5.2. PtCo Yapılar	43
5.3. CoO Yapılar	44
6. DENEYSEL SONUÇLAR	45
6.1. İnce Filmlerin Hazırlanması	45
6.2. XPS Karakterizasyonu	49
6.3. MOKE Karakterizasyonu	51
6.4. VSM Karakterizasyonu	56
7. SONUÇ ve ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	71

# SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
$R_{\uparrow}$	: Spin Yukarı Durumundaki Direnç
$R_{\downarrow}$	: Spin Aşağı Durumundaki Direnç
$\mu_p$	: Manyetik Geçirgenlik
$\chi_V$	: Hacim Duygunluğu
$\chi_m$	: Kütle Duygunluğu
a	: Atom Yarıçapı
Å	: Angstrom
A/m	: Amper/metre
Al-K $_{\alpha}$	: Alüminyum - K $_{\alpha}$
Ar	: Argon
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
C	: Coulomb
C	: Curie Sabiti
Co	: Kobalt
CoO	: Kobalt Oksit
e	: Elektron Yüğü
E	: Enerji
E	: Elektrik Alan
E $_B$	: Manyetik Alan Vektörü
E $_E$	: Elektrik Alan Vektörü
E $_k$	: Kinetik Enerji
eV	: Elektrovolt
F	: Kuvvet
F $_B$	: Manyetik Kuvvet
F $_B$	: Manyetik Kuvvet
Fe $_3$ O $_4$	: Manyetit
G	: Gauss
H	: Uygulanan dış manyetik alan

$h$	: Planck Sabiti
$H_C$	: Sıfırlayıcı Alan
HeNe	: Helyum Neon
$M$	: Mıknatıslanma
$m$	: Elektron Kütlesi
Mg- $K_\alpha$	: Magnezyum- $K_\alpha$
$M_r$	: Kalıcı Mıknatıslanma
$M_S$	: Doyum Mıknatıslanması
$N$	: Newton
$N$	: Birim Hacimdeki Atom Sayısı
Oe	: Oersted
$p$	: Manyetik Kutuplar Arasındaki Parçacıkların Yüğü
PtCo	: Platin Kobalt
$r$	: Manyetik Kutuplar Arasında Bulunan Parçacıklar Arasındaki Mesafe
$R$	: Direnç
Si	: Silisyum
$T$	: Tesla
$T$	: Sıcaklık
$T$	: Sıcaklık
Ti-Saph	: Titanyum Safir
$V$	: Yüğü Parçacık Hızı
$\nu$	: Işığın frekansı
$Z$	: Birim Hacimdeki Elektron Sayısı
$\theta$	: Küçük Açık
$\mu$	: Manyetik Moment
$\mu_0$	: Uzayın Manyetik Geçirgenliğı
$\chi$	: Manyetik Duygunluk
$\phi$	: İş Fonksiyonu
Å	: Angstrom
AFM	: Antiferromanyetik
ASF	: Atomik Hassasiyet Faktörü
EB	: Exchange Bias
emk	: Elektromotor kuvveti

FM	: Ferromanyetik
GMR	: Dev Manyetodirenç
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
IP	: In-Plane
MEMS	: Mikro Elektromekanik Sistem
MOKE	: Manyeto-Optik Kerr Etkisi
NM	: Manyetik olmayan
OoP	: Out of_plane
SI	: Uluslararası Sistem
UHV	: Aşırı Yüksek Vakum
UPS	: Morötesi Fotoelektron Spektroskopisi
VSM	: Titreşimli Örnek Manyetometresi
XPS	: X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi

# ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Sekil No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
1.1: GMR etkisi ve Exchange Bias etkisinin şematik gösterimi.	2
1.2: GMR etkisinin spin hareketlerinin şematik gösterimi	2
1.3: Sabit disk okuyucu kafalarında kullanılan GMR yapısı.	3
2.1: Bir manyetik kutbun oluşturduğu manyetik alan.	8
2.2: Bir atomun manyetik momentine katkılar.	11
2.3: Ferromanyetik malzemelerin ferromanyetik davranıştan paramanyetik davranışa geçişleri.	16
2.4: Standart bir histeresis eğrisinin karakteristik noktaları ile gösterimi.	18
2.5: Miknatıslanma yatkınlık çeşitleri.	18
2.6: Bir ferromanyetik malzemenin domenlere ayrılması.	19
2.7: Ferromanyetik malzemelerin miknatıslanma süreci.	20
2.8: Özel domen duvarları.	21
3.1: Histeresis eğrilerinde manyetik momentlerin davranışları.	24
3.2: 77 K’de manyetik alan uygulandığı ve uygulanmadığı zaman elde edilen histeresis eğrilerinin karşılaştırılması.	26
4.1 Manyetik malzemeye gelen polarize ışığın bu manyetik malzeme ile etkileşme çeşitleri olan Faraday ve Kerr etkileri.	37
4.2 Sıradan bir MOKE sisteminin şematik gösterimi.	38
4.3 Işığın s-polarize ve p-polarize olan polarizasyon çeşitlerinin gösterimi.	38
4.4 Farklı Manyeto Optik geometriye sahip MOKE çeşitleri.	40
4.5 Düzleme uygulanan H manyetik alana göre ölçüm çeşitleri.	40
6.1 GTÜ Nanoteknoloji Laboratuvarı Magnetron Sputtering Deposition sistemi.	45
6.2 GTÜ Nanoteknoloji Laboratuvarı Magnetron Sputtering Deposition sisteminin çalışma prensibinin şematik gösterimi.	46
6.3 Hazırlanan numunelerin yapıları.	48
6.4 GTÜ Nanoteknoloji Laboratuvarı XPS sistemi.	49
6.5 Pt <sub>0.4</sub> Co <sub>0.6</sub> numunesinin Co’a ait XPS spektrumu.	50
6.6 Pt <sub>0.4</sub> Co <sub>0.6</sub> numunesinin Pt’e ait XPS spektrumu.	50

6.7	Pt <sub>0.4</sub> Co <sub>0.6</sub> tabakasının üzerine hazırlanan CoO'e ait XPS spektrumu.	51
6.8	GTÜ MOKE Laboratuvarı'nda kurulu bulunan MOKE sistemi.	52
6.9	Pt <sub>0.1</sub> Co <sub>0.9</sub> /CoO numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları.	53
6.10	Pt <sub>0.2</sub> Co <sub>0.8</sub> /CoO numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları.	53
6.11	Pt <sub>0.3</sub> Co <sub>0.7</sub> /CoO numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları.	53
6.12	Pt <sub>0.4</sub> Co <sub>0.6</sub> /CoO numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları.	54
6.13	Pt <sub>0.5</sub> Co <sub>0.5</sub> /CoO numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları.	54
6.14	Pt <sub>0.6</sub> Co <sub>0.4</sub> /CoO numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları.	54
6.15	Pt <sub>0.7</sub> Co <sub>0.3</sub> /CoO numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları.	55
6.16	Pt <sub>0.8</sub> Co <sub>0.2</sub> /CoO numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları.	55
6.17	Pt <sub>0.9</sub> Co <sub>0.1</sub> /CoO numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları.	55
6.18	GTÜ PPMS Laboratuvarı'nda kurulu bulunan VSM sistemi.	56
6.19	Pt <sub>0.1</sub> Co <sub>0.9</sub> /CoO numunesinin VSM ölçüm sonuçları.	58
6.20	Pt <sub>0.2</sub> Co <sub>0.8</sub> /CoO numunesinin VSM ölçüm sonuçları.	58
6.21	Pt <sub>0.3</sub> Co <sub>0.7</sub> /CoO numunesinin VSM ölçüm sonuçları.	59
6.22	Pt <sub>0.4</sub> Co <sub>0.6</sub> /CoO numunesinin VSM ölçüm sonuçları.	59
6.23	Pt <sub>0.5</sub> Co <sub>0.5</sub> /CoO numunesinin VSM ölçüm sonuçları.	60
6.24	Pt <sub>0.6</sub> Co <sub>0.4</sub> /CoO numunesinin VSM ölçüm sonuçları.	60
6.25	Pt <sub>0.7</sub> Co <sub>0.3</sub> /CoO numunesinin VSM ölçüm sonuçları.	61
6.26	Pt <sub>0.8</sub> Co <sub>0.2</sub> /CoO numunesinin VSM ölçüm sonuçları.	61
6.27	Pt <sub>0.9</sub> Co <sub>0.1</sub> /CoO numunesinin VSM ölçüm sonuçları.	62
6.28	Pt oranına bağlı 10 K'deki exchange bias değerleri.	62
6.29	Pt oranına bağlı olarak engelleme sıcaklıklarındaki değişim.	63

# TABLÖLAR DİZİNİ

<b><u>Tablo No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: Oda sıcaklığında ferromanyetik davranış gösteren malzemelerin Curie sıcaklıkları.	17
4.1: Basınç ve gaz moleköl yoğunluğuna göre vakum seviyeleri.	31
6.1: Farklı kimyasal oranlardaki PtCo tabakaların kaplama süreleri.	47
6.2: Kullanılan CoO tabaka kaplama parametreleri.	48

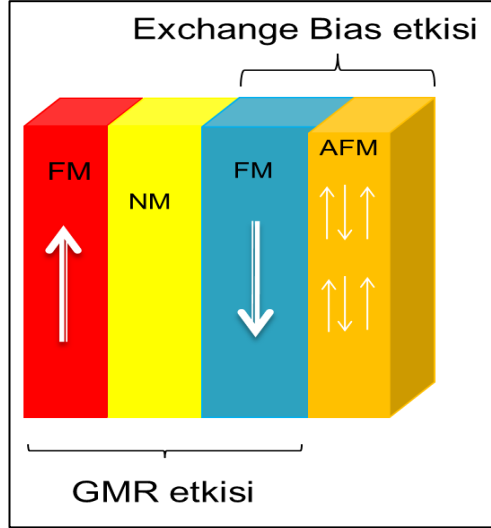
# 1. GİRİŞ

Tarih boyunca yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bilgi birikimi, o dönemden itibaren sonraki yıllarda yapılan çalışmalara her zaman yol gösterici olmuştur. Bundan dolayı yapılan çalışmalar, elde edilen tecrübelerin hepsi bireysel başarının yanında daha da önemlisi canlıların yaşam kalitesinin artmasına fayda sağlamıştır. Her bireyin başta ailesinde olmak üzere gerek çalışma ortamında gerekse sosyal ortamında kendisinden önce yapılan çalışmalara, elde edilen başarılarla ilave bir şeyler katmalı ki canlıların yaşamlarını olumlu yönde etkileyebilmelidir. Yapılan her çalışmanın sonucu, faydası hemen ortaya çıkmayabilir. Olumlu olsun olumsuz olsun her çalışma bir sonuç verir ve bu sonuç çerçevesinde sonraki çalışmalar hakkında karar verilmesine yardımcı olur. Tez çalışması kapsamında yapılmış olan bu çalışma da bundan sonraki çalışmalara yol gösterici olması temennisiyle literatürde eksik olduğu fark edilen ve günden güne gelişen teknolojiye katkı sağlama potansiyeli yüksek bilimsel bir çalışmadır.

Yüzyıllar önce ilk kez manyetik malzemeler keşfedildiğinden veya manyetizma ilk olarak açıklanabildiğinden yıllar sonra günümüzde, her geçen gün manyetizma alanında yapılan bilimsel çalışmalara bir yenisinin daha ekleneceği hatta hayatımızda bu kadar yaygın yer alacağı kimin aklına gelmiştir? Manyetik malzemelerin ilk yaygın kullanım alanı olan pusulalardan günümüzdeki kullanım alanlarına kadar genişlemesi bundan sonra daha da geniş kullanım alanlarında kendilerine yer bulacağına garantisini vermektedir. Günümüzde manyetizma alanında birçok araştırma yapılıyor olmakla beraber bunlardan en dikkat çekici olanlardan biri 1988'de yılında Albert Fert ve Peter Grünberg'in ekipleri ile beraber birbirlerinden bağımsız olarak ortaya çıkardıkları Dev Manyetodirenç (Giant Magnetoresistance, GMR)'tir [Baibich et al., 1988], [Binasch et al., 1989]. Bu çalışmalarından dolayı Fert ve Grünberg, 2007 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü almaya hak kazanmışlardır.

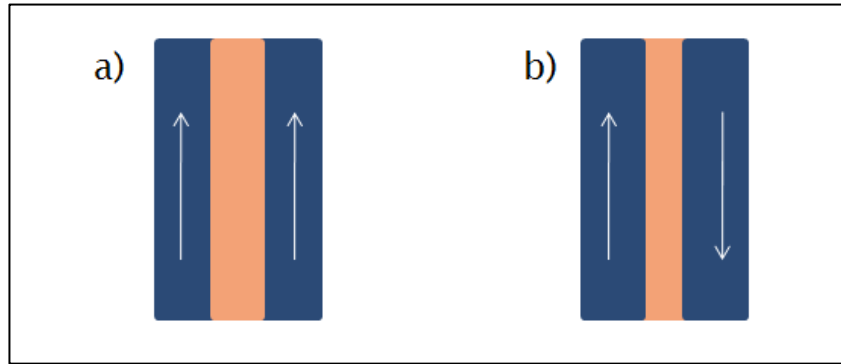
GMR özelliği, Şekil 1.1'de görüldüğü üzere iki ferromanyetik (FM) tabakanın arasına manyetik olmayan (non-magnetic, NM) iletken bir tabaka geldiği zaman gözlenir.





Şekil 1.1: GMR etkisi ve Exchange Bias etkisinin şematik gösterimi.

Spin yönelimlerine göre direnç durumlarındaki değişiklik Şekil 1.2’de görülmektedir. FM tabakalardaki spinler paralel olduğu zaman direnç değeri minimum, antiparalel olduğu zaman ise direnç durumu maksimum olur. Paralel spin durumundaki direnç değişimi Eşitlik 1.1 ile antiparalel spin durumundaki direnç değişimi ise Eşitlik 1.2 ile elde edilmektedir.

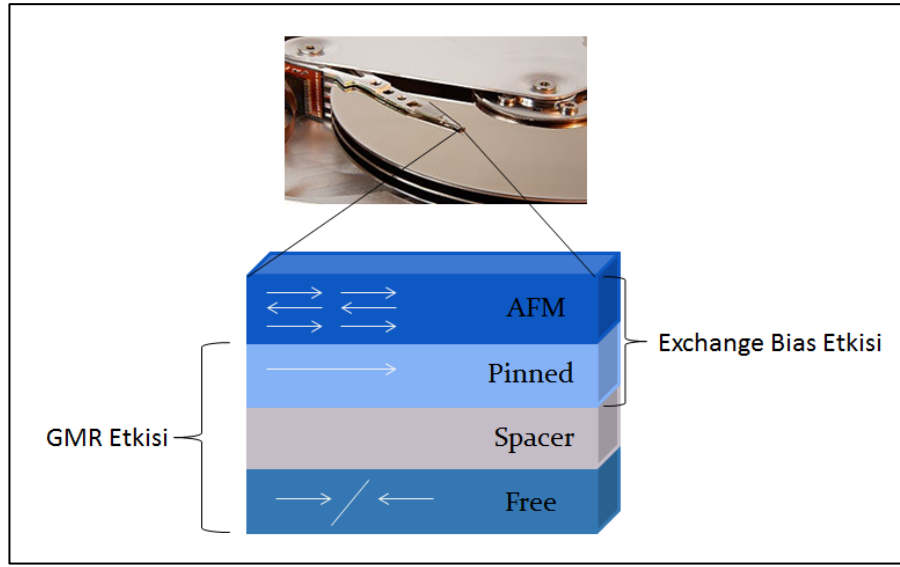


Şekil 1.2: GMR etkisinin spin hareketlerinin şematik gösterimi. a) Spinlerin paralel olma durumu, b) Spinlerin antiparalel olma durumu.

$$R = \frac{R_{\uparrow} R_{\downarrow}}{2} \quad (1.1)$$

$$R = \frac{2 R_{\uparrow} R_{\downarrow}}{R_{\uparrow} R_{\downarrow}} \quad (1.2)$$

GMR etkisi, manyeto dönüştürücülerde, manyetik alan sensör teknolojileri olarak otomotiv [Treutler, 2001], tıp [Ferreira et al., 2003], [Sheehan et al., 2003], [de Boer et al., 2007] gibi alanlarda, Şekil 1.3'te görüldüğü gibi sabit disk (hard disk) okuyucu kafalarında [Tsang et al., 1998], bilgi depolama cihazlarında [Tsang et al., 1998], [Sbiaa et al., 2011], mikro elektromekanik sistemlerde (micro electro mechanic systems, MEMS) [Guedes et al., 2012] gibi uygulamalarda gözlemlendiği söylenebilir. Ayrıca GMR etkisinin keşfedilmesi spintronik denen yeni bir çalışma alanının da ortaya çıkmasına sebep olmuştur.



Şekil 1.3: Sabit disk okuyucu kafalarında kullanılan GMR yapısı.

GMR yapılarında Şekil 1.3'te de gözlemlendiği gibi spin yönelimleri değişebilmektedir. Bu durumdan dolayı direnç ölçümü yapılabilmesi için FM tabakalardaki spinlerden birinin sabitlemesi gerekir. Bu sabitleme işleminin gerçekleşmesi için Exchange Bias etkisi kullanılır. Exchange Bias etkisi, 1956 yılında Meiklejohn ve Bean tarafından keşfedilmiştir [Meiklejohn and Bean, 1956], [Meiklejohn and Bean, 1957]. Exchange Bias etkisi, bir FM tabaka ile bir antiferromanyetik (AFM) tabakanın üst üste gelmesi ile ortaya çıkan bir etkidir. AFM tabaka ile etkileşen FM tabaka sabit tabaka (pinned layer) olurken diğer FM tabaka ise spinleri hareket edebilir (free layer). Exchange Bias etkisi daha önceden keşfedilmiş olmasına rağmen GMR etkisinin keşfedilmesiyle tekrardan güncel bir çalışma haline gelmiş ve önemi daha da artmıştır.

## 1.1. Motivasyon

Yapılan bu çalışmada, literatürde bulunmayan FM PtCo alaşımlarının belirlenen farklı kimyasal oranlarına karşılık gelen Exchange Bias etkisinin belirlenmesi konusunda katkı sağlaması amaçlanmıştır. Bununla beraber eşit kimyasal orana sahip PtCo alaşımların tek kristal olarak hazırlandıklarında çok yüksek manyetokristal anizotropiye sahip oldukları literatürde mevcuttur. Ayrıca FM PtCo ile birlikte AFM CoO ile çalışmalar da bulunmaktadır [Demirci et al., 2014], [Öztürk et al., 2012], [Akdoğan et al., 2015]. Bu çalışmalarda gerek incelenen numunelerin hazırlanma tekniklerinin farklı olması gerekse incelenen kimyasal oranların sınırlı olmasından dolayı yapılan bu çalışma hem literatürdeki eksiği gidermek hem de PtCo/CoO yapıları daha ayrıntılı incelemek için yapılmış bir çalışmadır. Farklı yöntem ile hazırlanan bu yapıların da yüksek anizotropiye sahip olma olasılıklarından dolayı çalışılan bu yapıların gelecek nesil bilgi depolama ortamları için kritik bir öneme sahip olduğu söylenebilir.

## 1.2. İçerik

Bu çalışma Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ) Fizik Bölümü ile Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nin bünyesinde bulunan laboratuvar sistemleri ile gerçekleştirilmiştir. Si (001) alttaş üzerine Aşırı Yüksek Vakum (Ultra High Vacuum, UHV) şartlarında magnetron sputtering deposition tekniği ile 300°C sıcaklıkta farklı kimyasal oranlarda 100 Å kalınlığında  $Pt_xCo_{1-x}$  (x, 0.1 ile 0.9 arasında 0.1'lik adımlarla değişmektedir) alaşım, ince filmlerde Exchange Bias etkisinin araştırılmasında FM tabaka olarak kullanılmıştır. PtCo FM katmanının üzerine yine magnetron sputtering deposition tekniği ile 100 Å kalınlığında CoO AFM tabaka büyütülmüştür. Her bir numune için hem PtCo tabaka hazırlandıktan sonra hem de CoO tabaka hazırlandıktan sonra kimyasal oran tespiti için X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) tekniği ile karakterizasyon yapılarak numunelerin belirlenen kimyasal oranlarda olup olmadığı kontrol edilmiştir. PtCo yapıların farklı kimyasal oranlarda  $L1_0$  ve  $L1_2$  faz yapılarına sahip oldukları için X-Işını Kırınımı tekniği ile numunelerin yapısal faz karakterizasyonları da yapılmıştır. Hazırlanan numunelerin manyetik karakterizasyonu için Manyeto Optik Kerr Etkisi (MOKE)

tekniki ile Titreşimli Örnek Manyetometre (VSM) tekniği kullanılmıştır. Manyeto Optik Kerr tekniği ile numunelerin manyetik anizotropileri ile bir sonraki tekniği kullanmak için referans olan mıknatıslanma yönelimlerinin mıknatıslanmaya olan yatkınlığını gösteren kolay-eksenleri hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Son aşama olan Titreşimli Örnek Manyetometre tekniği ile de her bir numunenin Exchange Bias değerleri ile beraber engelleme sıcaklıkları belirlenmiştir.

Yapılan alışmalar sonucunda hazırlanan bu tezin hakkında genel bilgi verildiği bu birinci bölümün dışında, çalışma kapsamında temel olan manyetizma konusu ikinci bölümde, çalışma konusu olan Exchange Bias etkisi üçüncü bölümde, çalışma kapsamında uygulanan teknikler dördüncü bölümde, çalışılan numune olan PtCo/CoO hakkında genel bilgi beşinci bölümde, elde edilen sonuçlar altıncı bölümde ve son bölüm olan yedinci bölümde ise elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile ileride bu konuda bu numunelerle başka nasıl çalışmaların yapılabileceği bulunmaktadır.

## 2. MANYETİZMA

Günümüzde disiplinler arası çalışmaların yaygınlaşmasına rağmen bu çalışmaların daha bir başlangıç olduğu söylenemez. Bunun sebebi de bir disiplinin çalışma konusunun diğer bir disiplinde kullanılmasına başlanmasının yüzyıllar öncesine dayanmasıdır. İlk olarak temel bilimlerde yapılan çalışmaların gelişmeye başladığının daha sonra da bu çalışmaların diğer disiplinlerde kullanılmaya başlandığını söyleyebiliriz. Temel bilimlerden biri olan fizik alanında yapılan birçok çalışmanın da hem yüzyıllar öncesine dayandığı hem de birçok çalışmanın esin kaynağı olup kurtarıcısı olduğu bilinmektedir.

Fizik alanında bulunan çalışmalardan en eskilerinden biri “Manyetizma” konusudur. Manyetizma ve manyetik malzemeler yüzyıllardır pusulalarda kullanılmasına rağmen neler oldukları ve nasıl bir yapıya sahip oldukları hakkında 19. yüzyıla kadar yeterli bir bilgi sahibi olunamamıştır. Bundan dolayı da kullanım alanları çok kısıtlı kalmıştır. 20. yüzyıla gelindiği zaman da atom yapısı hakkında daha çok bilgi sahibi olunması ve kuantum teorisinin ortaya çıkması ile de manyetizmanın içindeki fizik ayrıntılı olarak anlaşılmaya başlamıştır. Bunun sonucunda da manyetik malzemeler kendilerine birçok kullanım alanı bulmuşlardır. 21. yüzyıla gelindiğinde artık hem uygulamalar için en uygun hangi malzeme gerektiği sorusuna cevap aranırken hem de manyetizmanın derinliklerine inme çalışmaları devam etmektedir. Günümüzde ise manyetik malzemelerin hayatımızın bir parçası olduğu kolayca söylenebilir.

Manyetizma ilk olarak Antik Yunan kaynaklarında ve eski Çin kaynaklarında karşılaşılan bir terimdir. Çin kaynaklarında 4. yüzyılda karşımıza çıkmaktadır [Timm, 2011]. Fakat Antik Yunan kaynaklarında daha da eski bir tarihte dile getirilmişlerdir. Yaklaşık milattan önce 428-347 zaman aralığında manyetizma fark edilmiştir [Timm, 2011]. Manyetizma (magnetism) adını ilk karşılaşıldığı yerden alır. Günümüzde Manisa/Türkiye olan zamanında ise Magnesia olan bölgede karşılaşılan manyetik malzemeler bilim sahnesine ilk adımlarını atmıştır [Cullity and Graham, 2009]. Burada karşılaşılan malzeme manyetitlerdir (magnetite,  $Fe_3O_4$ ). Manyetik malzemelerin 1040-1044 yılları arasında manyetik pusula olarak kullanılması da Çin kaynaklarında geçerek yazılı tarihte karşılaşılan ilk uygulamaları olduğu söylenebilir [Timm, 2011].

## **2.1. Temel Manyetizma Kavramları**

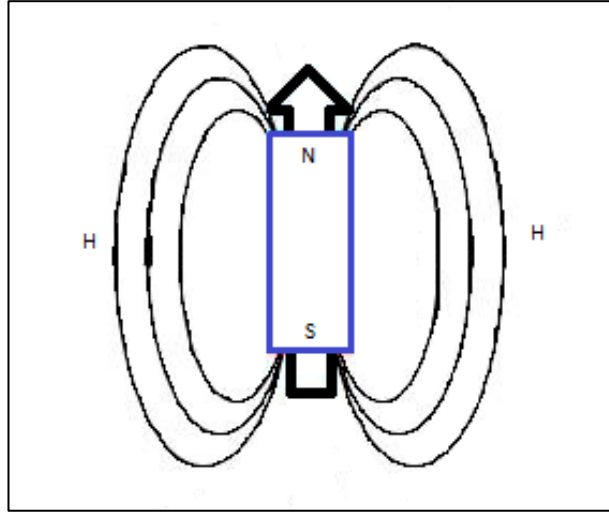
Manyetizma alanında yapılan çalışmalarda esas olarak manyetik malzemeler kullanılır. Manyetik malzemelerin nerede, ne şekilde ve neden kullanılabildiklerini, hangi şartlarda nasıl özellik gösterdiklerini fiziksel olarak açıklayabilmek gerekir. Bunun için de manyetizma hakkında bilgi sahibi olunması gerekir. Manyetizma çok geniş bir konu olmasına rağmen ilk olarak temel manyetizma kavramlarının bilinmesi manyetik malzemelere ilk bakışta özelliklerini bilimsel olarak açıklayabilmek için hayati bir önem taşımaktadır. Bundan dolayı manyetizma konusunda yapılan tezin bu kısmında temel manyetizma kavramlarına değinilecektir.

### **2.1.1. Manyetik Kutuplar**

Çubuk mıknatıslar yan yana getirildiği zaman aralarında birbirlerini itme veya çekme olayı gözlenir. Bu olayları oluşturan iki ayrı kuvvet vardır. Bu kuvvetler yayıldıkları bölgelerin merkezlerinde bulunur ve bu bölgeler manyetik kutup olarak adlandırılırlar. Bu manyetik kutuplar kullanılan çubuk mıknatısların uçlarındadırlar. Çubuk mıknatıs ile anlatılan manyetik kutupları daha kapsamlı düşünüldüğü zaman Dünya'nın da kendi manyetik kutupları olduğu söylenebilir. Bu manyetik kutuplar coğrafi kutuplardan farklıdır. Dünya'nın sahip olduğu bu manyetik kutuplar, dünya çapında bir manyetik alan olduğunu gösterir. Tarih boyunca yön belirleme için kullanılan en temel araç olan pusulalar da bu manyetik alan sayesinde yön göstermektedir.

### **2.1.2. Manyetik Alan**

Manyetik bir kutbun etkisinin gözlemlendiği alana manyetik alan denir. Manyetik alan  $H$  ile gösterilir. Bir kutbun oluşturduğu manyetik alan Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1: Bir manyetik kutbun oluşturduğu manyetik alan.

Manyetik alan oluşturmak için çeşitli hareketli yükler veya elektrik alanlar kullanılır. Deneysel olarak tel veya kapalı bir cisimden akım geçirerek veya doğal mıknatıs olan manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) kullanarak manyetik alan oluşturulur.

Bir kutbun oluşturduğu manyetik alan Eşitlik 2.1 ile hesaplanır. Birim olarak, SI birim sisteminde A/m iken cgs birim sisteminde ise Oersted (Oe)'tir.

$$H = \frac{p}{r^2} \quad (2.1)$$

### 2.1.3. Manyetik Kuvvet

Manyetik kutuplar arasında yüklü parçacıklardan dolayı bir manyetik kuvvet oluşur. Bu oluşan kuvveti hesaplamak için SI birim sistemine göre birimi Newton (N)'dur ve Eşitlik 2.2 ile hesaplanır. cgs birim sistemine göre ise birimi dyne'dir ve Eşitlik 2.3 ile hesaplanır.

$$F = \frac{\mu_0 p_1 p_2}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

$$F = \frac{p_1 p_2}{r^2} \quad (2.3)$$

Bir cisim B manyetik alan ile etkileşebileceği bir yerde bulunduğu zaman bu manyetik alan cisme bir  $F_B$  manyetik kuvvet uygular. Bu cisim  $V$  hızına sahip bir yüklü bir parçacık olarak kabul edilirse manyetik alan ile manyetik kuvvet arasında Eşitlik 2.4'te de görülen bir eşitlik sağlanır.

$$F_B = q (V \times B) \quad (2.4)$$

Manyetik kuvvetin büyüklüğü, esas olarak manyetik kuvvetin yönünü bulmak için kullanılan  $V \times B$  sonucunda  $\theta$  küçük açısının da etkisi bulunmaktadır. Bu küçük açıyı da dikkate alırsak manyetik kuvvet büyüklüğü Eşitlik 2.5 ile elde edilir.

$$F_B = |q| V B \sin \theta \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.6'dan çıkarılabileceği üzere  $V$  ile  $B$  birbirlerine paralel ( $\theta = 0^0$ ) veya antiparalel ( $\theta = 180^0$ ) olduğu zaman  $F_B$  manyetik kuvvet minimum değeri olarak sıfır olurken, birbirlerine dik oldukları ( $\theta = 90^0$ ) zaman ise  $F_B$  manyetik kuvvet maksimum değerini alır.

$$F_{max} = |q| V B \quad (2.6)$$

#### 2.1.4. Manyetik Akı Yoğunluğu

Manyetik indüksiyon olarak da adlandırılan manyetik akı yoğunluğu oluşan manyetik alan çizgilerinin yoğunluğudur ve  $B$  ile gösterilir. SI birim sistemine göre birimi Tesla (T), cgs birim sistemine göre birimi Gauss (G)'tur. Eşitlik 2.7'de SI birim sisteminde manyetik akı yoğunluğu hesabı, Eşitlik 2.8'de de cgs birim sistemine göre manyetik akı yoğunluğu hesabı verilmiştir.

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2.7)$$



$$B = H + 4\pi M \quad (2.8)$$

Tesla, Coulomb-Metre/saniye başına Newton (Eşitlik 2.9)'dur.

$$1 T = \frac{N}{C \cdot m / s} \quad (2.9)$$

Saniye başına Coulomb Amper'e eşit olduğu için Tesla aynı zamanda Eşitlik 2.10 ile de gösterilebilir.

$$1 T = \frac{N}{A \cdot m} \quad (2.10)$$

Tesla ile Gauss birbirlerine Eşitlik 2.11 ile dönüşebilirler.

$$1 T = 10^4 G \quad (2.11)$$

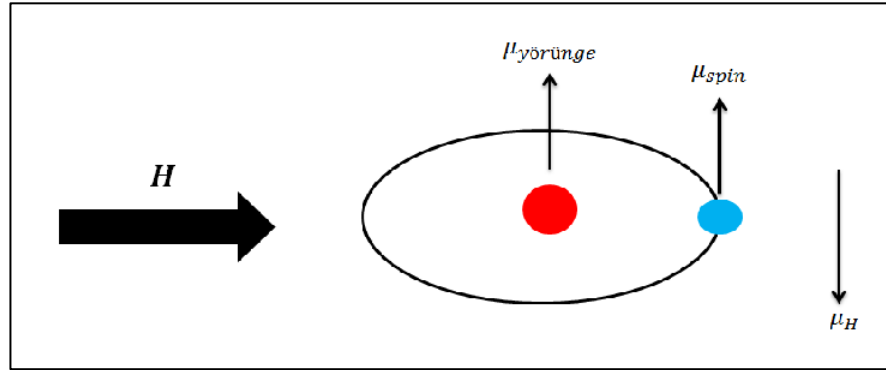
### 2.1.5. Manyetik Moment

Elektronların bulunması ve yörüngede olmalarından dolayı atomlar manyetik momente sahiptirler. Bu manyetik momente her bir elektrondan gelen momentin katkısı olduğu için toplam manyetik moment olduğu söylenebilir. Bu katkılar özelliklerine göre sınıflandırılırsa üç çeşit katkı bulunur. Elektronların yörüngesel olarak hareket ettiklerinden dolayı yörüngesel manyetik moment ile hareket anında spinlerin hareketinden kaynaklı spin manyetik moment atomların kendiliğinden sahip oldukları katkılardır. Yörünge ve spin hareketinden kaynaklanan manyetik momentlerin matematiksel ifadeleri Eşitlik 2.12 ve 2.13'te görülmektedir. Eşitlik 2.12'de yörünge hareketinden kaynaklanan manyetik moment ifadesi, Eşitlik 2.13'te ise spin hareketinden kaynaklanan manyetik moment ifadesi görülmektedir.

$$\mu_{yörünge} = \frac{e V r}{2} \quad (2.12)$$

$$\mu_{spin} = \frac{e h}{4 \pi m c} \quad (2.13)$$

Üçüncü katkı ise dışarıdan H manyetik alan uygulandığı zaman gözlenir. Bu durumda ise diğer iki katkıya zıt yönde bir manyetik moment gözlenir. Toplam manyetik momente katkı sağlayan üç katkı Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2: Bir atomun manyetik momentine katkıları.

### 2.1.6. Mıknatıslanma

Mıknatıslanma, birim hacimdeki manyetik moment sayısıdır (magnetization, M). Mıknatıslanma hesabı Eşitlik 2.14’te görülmektedir.

$$M = \frac{\mu}{V} \quad (2.14)$$

Bazı özel durumlarda ise mıknatıslanma birim kütledeki manyetik moment sayısı olarak da tanımlanabilmektedir. Bu özel durumları açıklarsak; sıcaklığa bağlı olarak manyetik malzemede gerçekleşen ısıl genleşmeden kaynaklı olan hacim değişimi de gerçekleşeceğinden mıknatıslanma değeri de değişecektir. Böylece hesaplanan mıknatıslanma değeri deneysel olarak elde edilen mıknatıslanma değeri ile tutarlı olmaz. Bu sebepten dolayı da kütle başına manyetik moment hesaplanır.

### 2.1.7. Manyetik Duygunluk

Manyetik duygunluk (Magnetic susceptibility,  $\chi$ ), bir manyetik malzemeye dışarıdan  $H$  manyetik alan uygulandığı zaman elde edilen  $M$  mıknatıslanma değerinin uygulanan alana göre yorumlanmasıdır.  $\chi$  manyetik duygunluk, birim manyetik alan başına mıknatıslanma olarak elde edilir. SI birim sisteminde birimsiz iken cgs birim sisteminde birimi  $\text{emu}/\text{cm}^3\text{Oe}$ 'tir. Hacim duygunluğu da denir (volume susceptibility,  $\chi_v$ ). Manyetik duygunluk hesabı Eşitlik 2.15 ile elde edilir.

$$\chi_v = \frac{M}{H} \quad (2.15)$$

Duygunluk çeşidi olarak kütle duygunluğu (mass susceptibility,  $\chi_m$ ) da mevcuttur. Birimi ise  $\text{emu}/\text{Oe.g}$ 'dir. Kütle duygunluk hesabı Eşitlik 2.16 ile elde edilir.

$$\chi_m = \frac{\chi_v}{\rho} \quad (2.16)$$

### 2.1.8. Manyetik Geçirgenlik

Manyetik geçirgenlik (magnetic permeability,  $\mu_p$ ), bir malzemeye dışarıdan  $H$  manyetik alan uygulandığı zaman bu malzemenin manyetik alan çizgilerini geçirebilme yeteneğidir. Manyetik geçirgenlik ifadesi temel olarak Eşitlik 2.17 ile elde edilir.

$$\mu_p = \frac{B}{H} \quad (2.17)$$

SI birim sisteminde  $\mu_p$  manyetik geçirgenlik Eşitlik 2.18 ile elde edilirken birimi  $\text{H}/\text{m}$ 'dir. cgs birim sisteminde ise Eşitlik 2.19 ile elde edilirken birimsizdir.

$$\mu_p = \mu_0 (1 + \chi) \quad (2.18)$$

$$\mu_p = 1 + 4\pi\chi \quad (2.19)$$

Boşluktaki manyetik geçirgenlik sabit olup değeri ise  $4\pi \times 10^{-7}$ 'dir.

## 2.2. Manyetizma Türleri

Malzemelerin hepsi kendilerine özgü bir spin yapısına sahiptirler. Bu spin yapılar kendiliğinden yani doğada buldukları şartlarda düzenli olmamakla beraber bir manyetik alana maruz kaldıkları zaman spin yönelimlerinde genel olarak bir düzene girdikleri görülmektedir. Bu şekilde H manyetik alanın etkisiyle spinlerinde belli bir yapıya geçiş gözlenen malzemelere manyetik malzemeler denir. Manyetik malzemeler spin durumlarındaki düzenlere göre başlıca beş çeşit manyetizma çeşidine ayrılırlar.

Gözlenen manyetizma yapılarına göre her bir malzemenin tek bir manyetizmaya sahip olduğu söylenemez. Bir malzemenin hangi manyetizmaya sahip olduğu değil hangi manyetizma özelliği baskın ise o manyetizmaya sahip olduğu söylenir. Diğer sahip oldukları manyetizma özellikleri ihmal edilir.

### 2.2.1. Diamanyetizma

Diamanyetizma zayıf mıknatıslanmaya sahip olan manyetizma çeşididir. Diamanyetik malzemelerin yörünge kabuklarında bulunan elektronların hepsi eşleşmiş durumdadır. Eşleşmemiş elektronların olmamasından dolayı da zayıf mıknatıslanmaya sahiptirler. Zayıf mıknatıslanmaya sahip olmalarından dolayı da net mıknatıslanmaları yoktur. Bundan dolayı manyetik olmayan (non-magnetic, NM) malzemeler olarak da adlandırılabilirler.

Diamanyetik malzemelere deneysel olarak dışarıdan bir H manyetik alan uygulandığı zaman uygulanan manyetik alana zıt yönlü manyetik momentler oluşarak malzemede mıknatıslanmanın oluşmasına sebep olur. Diğer temel manyetizmaya sahip olan manyetik malzemelerde de diamanyetizma gözlenir. Fakat sahip oldukları esas manyetizma yapıları kuvveti olduğu için diamanyetizmaları ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

Yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan diamanyetizmanın teorisi bize bir elektronun yörüngesine uygulanan manyetik alanın etkisiyle, elektronun yörüngesinin etkin akımının azalmakta olduğunu ve uygulanan manyetik alana zıt yönde bir manyetik moment oluştuğunu göstermektedir [Langevin, 1905]. Bu bir elektron olarak belirtilmesine rağmen bir atomda bulunan bütün elektronların üzerindeki etkinin toplamıdır. Bir diamanyetik malzeme için malzemenin sahip olduğu bütün atomlardan toplam bir etki elde edilir. Bu da bize her bir atomdan farklı olarak ve birbirlerinden bağımsız olarak diamanyetizmaya bir katkı olduğunu gösterir.

Uygulanan manyetik alana bağlı olarak oluşan manyetik moment Eşitlik 2.20 ile elde edilebilir.

$$\mu = \frac{\mu_0^2 e^2}{6m} a^2 H \quad (2.20)$$

Eşitlik 2.20'deki parametreler olan  $\mu$  manyetik momenti,  $\mu_0$  uzayın manyetik geçirgenliğini,  $e$  elektron yükünü,  $m$  elektronun kütlesini,  $a$  atomun yarıçapını ve  $H$  ise uygulanan manyetik alanı göstermektedir.

Bir diamanyetik malzemenin manyetik duygunluğu ise Eşitlik 2.21 ile elde edilir.

$$\chi = -\frac{NZ\mu_0^2}{6m} e^2 a^2 \quad (2.21)$$

Eşitlik 2.21'deki parametreler olan  $\chi$  manyetik duygunluğu,  $N$  diamanyetik malzemenin birim hacminde bulunan atomların sayısını,  $Z$  de diamanyetik malzemenin birim hacminde bulunan elektron sayısını göstermektedir. Eşitlik 2.20 ve Eşitlik 2.21'de de görülebileceği gibi diamanyetik malzemelerin manyetik momentleri ve manyetik duygunlukları sıcaklığa bağlı değildir.

### 2.2.2. Paramanyetizma

Malzemelerin karakterizasyonları üzerine yapılan çalışmalar sırasında paramanyetizma ilk olarak Pierre Curie tarafından 1895 yılında gözlenmiştir

[Akdoğan, 2013]. Fakat elde edilen sonuçların açıklanabilmesi için diamanyetizma teorisinin ortaya konması gerekiyordu. Diamanyetizmanın açıklanması esnasında Langevin paramanyetik bir malzemenin bütün atomlarının birbirine eşit olan net bir manyetik momente sahip olduğunu varsaydı [Langevin, 1905]. Bunun sebebi paramanyetik malzemelerde atomların elektronlarındaki spin ve orbital momentlerinin birbirini iptal etmemeleri gösterilmiştir. Böylece bu malzemelerin net mıknatıslanmaları da sıfıra eşittir. Curie bu sonuçları kendi çalışmasında göz önüne aldığına incelediği numunelerin farklı sıcaklıklarda manyetik duyunluk ölçümlerini gerçekleştirmiştir ve paramanyetizmaya giriş olarak yorumlanabilecek sonuçlara ulaşmıştır. Elde ettiği verilere göre diamanyetik malzemelerde kütle duyunluğunun sıcaklığa bağlı olmadığını, buna rağmen paramanyetik malzemelerde ise kütle duyunluğunun sıcaklık ile ters orantılı olduğu sonucuna varmıştır. Bu sonucu da Curie yasası olarak adlandırılan Eşitlik 2.22’de görülen denklem ile formülize etmiştir.

$$\chi_m = \frac{C}{T} \quad (2.22)$$

Bu denklem  $\chi_m$  kütle duyunluğunu, C ile gösterilen ve malzemenin malzemeye değişen karakteristik bir özellik olan gram başına denk gelen Curie sabiti ile değişken olarak kullanılan T Kelvin cinsinden sıcaklığın arasındaki bağıntıdır. Bu çalışmadan sonra 1907 yılında Pierre Weiss paramanyetizma konusunda bu elde edilen bilginin üzerine çalışmalarına devam edip daha ayrıntılı bir sonuca ulaşmıştır [Weiss, 1907]. Elde ettiği verilere göre Curie-Weiss yasası olarak adlandırılan yasa ortaya çıkmıştır. Bu sonucu da Weiss Eşitlik 2.23’ te gösterilen denklem ile formülize etmiştir.

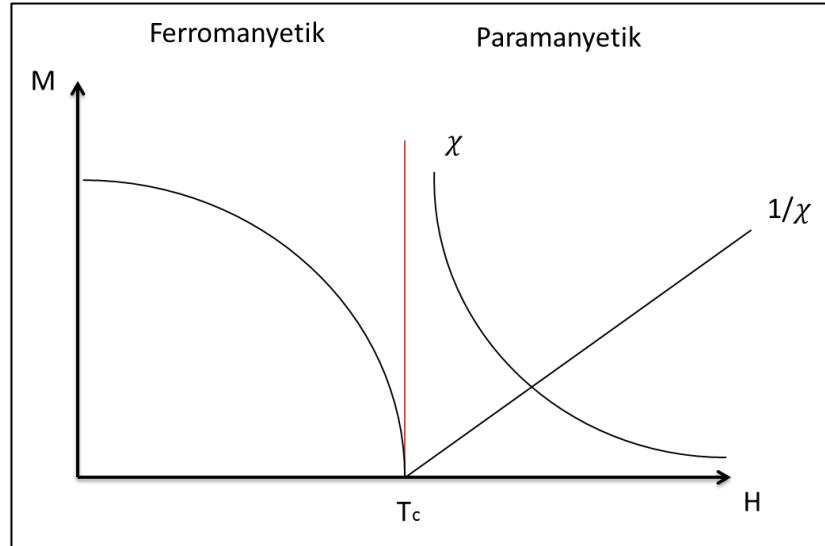
$$\chi_m = \frac{C}{T - \theta} \quad (2.23)$$

Bu sonuç Curie yasasının başka bir genel yasanın özel durumu olduğunu göstermiştir. Buradaki  $\theta$  bir sabittir ve Curie noktası olarak adlandırılan karakteristik bir özelliktir. Curie yasasına uyan malzemeler için  $\theta = 0$  durumu geçerlidir. Bunun sonucunda da kütle duyunluğu Eşitlik 2.22 durumundan elde edilir. Curie ve Curie-

Weiss yasaları paramanyetizmanın klasik teorisini oluşturup paramanyetizma hakkındaki temel bilgilerin elde edilmesini sağlamıştır. İlerleyen yıllarda paramanyetizmanın kuantum teorisi oluşturulup düşük sıcaklıklar için paramanyetik malzemelerin davranışları ile mıknatıslanma durumları incelenmiştir.

### 2.2.3. Ferromanyetizma

Ferromanyetizma dışarıdan H manyetik alan uygulanmadan kendiliğinden mıknatıslanma özelliği gösterip düzenli bir spin dizilimine sahip olunan manyetizma çeşididir. Oda sıcaklığında sadece Fe, Ni ve Co ferromanyetik davranış gösterir. Ferromanyetizma özellikle kuvvetli bir mıknatıslanma davranışı gösterdiği için dikkat çekerek diğer manyetizma çeşitlerine göre daha yaygın olarak kullanılır. Sahip oldukları bu kuvvetli mıknatıslanmanın sebebi olarak manyetik momentlerin birbirlerine paralel durumda olmalarından kaynaklandığı söylenebilir. Böylece kendiliğinden mıknatıslanma davranışı gösterirler. Ferromanyetik malzemeler için kritik durum Curie sıcaklığında ( $T_C$ ) gerçekleşir. Çünkü bu sıcaklıkta Şekil 2.3'te de görüldüğü gibi ferromanyetik malzemelerde ferromanyetik davranıştan paramanyetik davranışa geçiş gözlenir.



Şekil 2.3: Ferromanyetik malzemelerin ferromanyetik davranıştan paramanyetik davranışa geçişleri.

Ferromanyetik malzemeler için kritik olan bu Curie sıcaklıkları malzemedan malzemeye değişerek her biri için bir karakteristik özellik olmaktadır. Oda

sıcaklığında ferromanyetik davranış gösteren malzemelerin Curie sıcaklıkları Tablo 2.1’de görülmektedir.

Tablo 2.1: Oda sıcaklığında ferromanyetik davranış gösteren malzemelerin Curie sıcaklıkları.

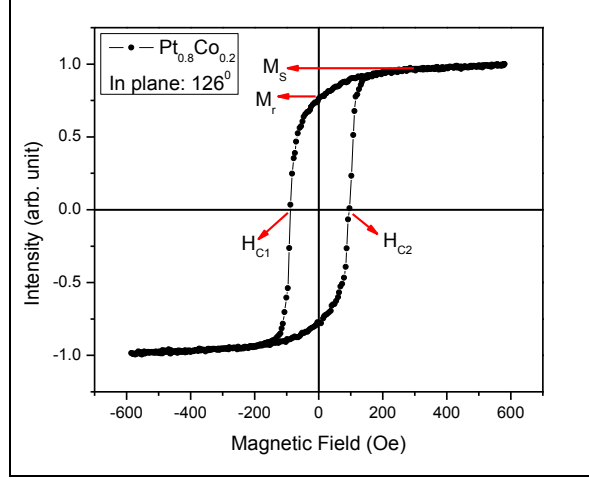
<b>Ferromanyetik Malzeme</b>	<b>Curie Sıcaklığı (K)</b>
Ni	628
Fe	1044
Co	1388

Ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanma eğrileri bize malzemenin iki özelliği hakkında bilgi verir. Bunlar doyum mıknatıslanmalarının büyüklüğü ve demanyetize durumdan doyum durumuna nasıl geçtiğidir. Doyuma ulaşmak için dışarıdan düşük manyetik alan uygulanması yeterli ise bu malzemelere yumuşak (soft) malzemeler denir. Dışarıdan yüksek manyetik alan uygulanması gerekiyorsa da bu malzemelere de sert (hard) malzemeler denir.

### **2.2.3.1. Histeresis Eğrisi**

Ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelere uygulanan H manyetik alanına bağlı M mıknatıslanmasını gösteren, mıknatıslanma eğrisi de denen histeresis eğrisi denir. Bu histeresis eğrileri sayesinde incelenen manyetik malzemenin karakteristik özellikleri olarak adlandırılan Şekil 2.4’te de görülen doyum mıknatıslanması  $M_S$ , kalıcı mıknatıslanma  $M_r$  ve sıfırlayıcı alan olarak da adlandırılan koersif alan  $H_C$  gibi değerler elde edilir. Uygulanan H manyetik alan mıknatıslanmada sürekli artışa sebep olmaz. Mıknatıslanma artmaya başladıktan sonra her malzeme için belli bir değere geldikten sonra önce bu değerde kalır. Daha sonra da azalmaya başlar. Mıknatıslanmanın yükselip sabitlendiği ve sabitlendikten sonra da azalmaya başladığı bu değere  $M_S$  doyum mıknatıslanması denir. Azalmaya başlayan mıknatıslanma uygulanan H manyetik alan ters yönde de uygulanmadan önce kaldırıldığında da manyetik malzeme bir miktar mıknatıslanma göstermeye devam eder. Malzemenin sahip olduğu bu mıknatıslanmaya da kalıcı mıknatıslanma (remenance) denir.

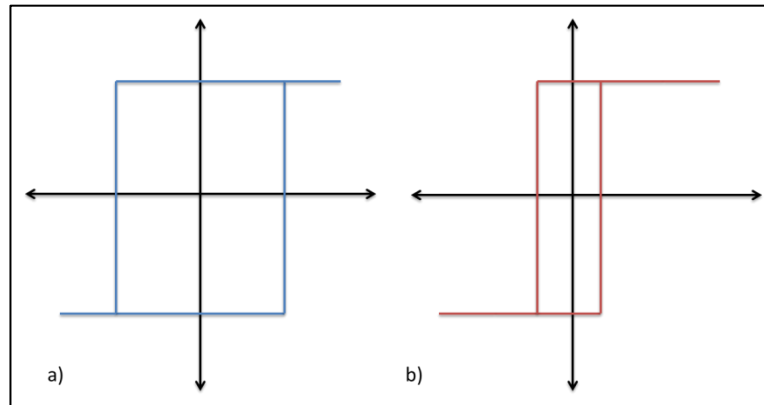




Şekil 2.4: Standart bir histeresis eğrisinin karakteristik noktaları ile gösterimi.

Malzemenin karakteristik özelliklerini veren histeresis eğrilerinin kareye benzemeleri histeresis kareselliği olarak adlandırılır. Histeresis kareselliği ne kadar belirginleşirse  $M_r/M_s$  değeri de 1'e yaklaşır. Elde edilen histeresis eğrilerinin dar olması bize bu malzemenin kolay mıknatıslanabileceğini ve düşük bir kalıcı mıknatıslanma değerine sahip olabileceğini gösterir. Aynı şekilde geniş olması ise malzemenin zor mıknatıslanabileceğini ve yüksek bir kalıcı bir mıknatıslanma değerine sahip olabileceğini gösterir.

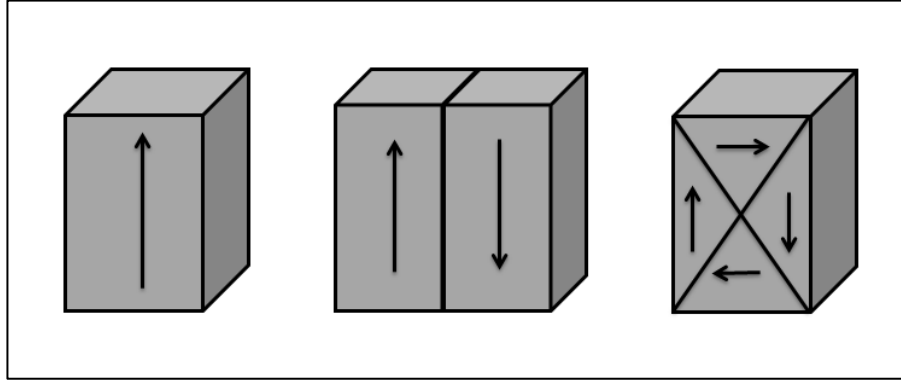
Ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanmaları aynı zamanda belirli eksenlerde olmaya yatkındır. Malzemelerin bu şekilde mıknatıslanmaya yatkınlıklarının kolay oldukları eksenlere kolay-eksen (easy-axis), zor oldukları eksenlere de zor-eksen (hard-axis) denir (Şekil 2.5). Bu mıknatıslanmaya yatkınlık özellikleri malzemeden malzemeye değişebilir.



Şekil 2.5: Mıknatıslanma yatkınlık çeşitleri. a) Kolay-eksen, b) Zor-eksen.

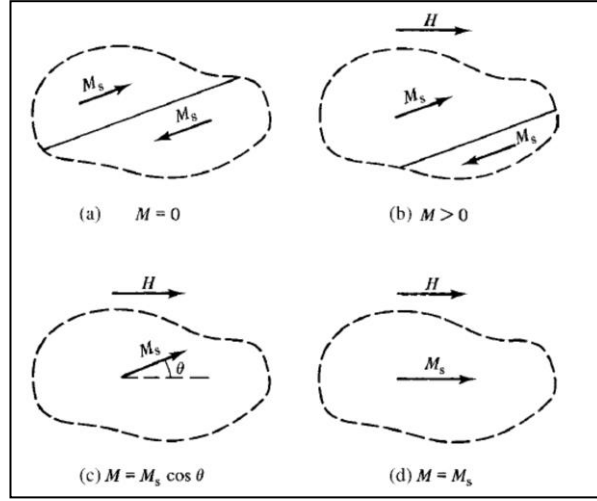
### 2.2.3.2. Domenler

Manyetik alan uygulanmadan Curie sıcaklığının üzerine ısıtılıp sonra da oda sıcaklığında soğumaya bırakılan ferromanyetik malzemelerin manyetik yapılarında doğada buldukları hallerinden farklı bir durum gözlenir. Bu durum doğada manyetik alan uygulanmadan kendiliğinden mıknatıslanmaya sahip olan bu ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanmalarını kaybetmeleridir. Bunun sonucu olarak ferromanyetik malzemeler doyum mıknatıslanmasına sahip çeşitli bölgelere ayrılırlar (Şekil 2.6). Oluşan bu bölgelerin her birine domen denir.



Şekil 2.6: Bir ferromanyetik malzemenin domenlere ayrılması.

Malzemelerin domen durumlarındaki değişim sahip oldukları çoklu domen durumundan tekli domen durumuna geçmesi olarak açıklanabilir. Şekil 2.7’de de görüldüğü gibi ilk olarak iki domene sahip olan bir ferromanyetik malzeme, manyetik alan uygulandığı zaman malzemenin uygulanan manyetik alan yönünde doyuma ulaşmaktadır [Parlak, 2014].

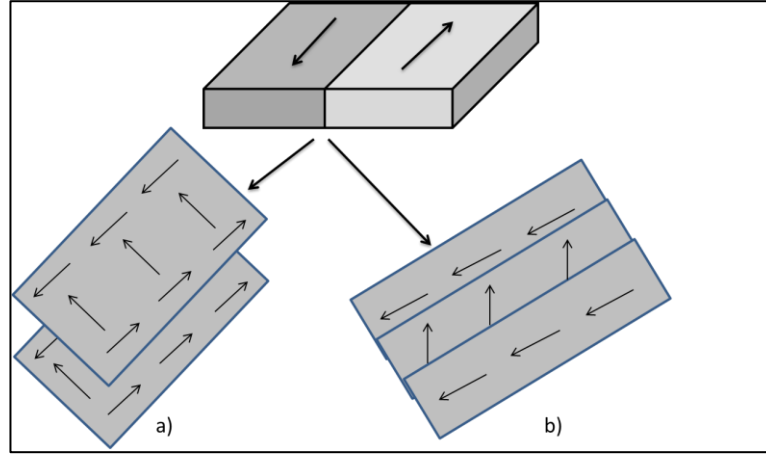


Şekil 2.7: Ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanma süreci.

### 2.2.3.3. Domen Duvarları

Manyetik malzemelerin yüzeylerinde bulunan domen duvarları, domenler arasındaki elektronların spin yönelimlerinin farklı şartlara göre yön değiştirdiği geçiş bölgeleri olarak adlandırılırlar. Farklı şartlar olarak, uygulanan  $H$  manyetik alanın sabit olduğu durumlarda, manyetik alanın uygulandığı açıya bağlı olarak domen duvarlarında farklı spin yönelimleri oluşur ve böylelikle özel domen duvar durumları ortaya çıkmış olur.

Domen duvarları, bazı özel durumlarda Bloch ve Néel duvarları olarak adlandırılırlar. Mıknatıslanma yöneliminde  $90^\circ$  ve  $180^\circ$  lik dönüşlere sahip domenlerin bulunduğu domen duvarlarına Bloch Duvarları denir (Şekil 2.8.a). Spin yönelimindeki dönüşlerde duvar kalınlığının, malzemenin kalınlığı ile karşılaştırılabildiği durumlardaki domen duvarlarına ise Néel Duvarları denir (Şekil 2.8.b).



Şekil 2.8: Özel domen duvarları a) Bloch duvarı; b) Néel duvarı.

#### 2.2.4. Antiferromanyetizma

Antiferromanyetizmada, ferromanyetizmada gözleendiği gibi manyetik momentler arasında belirli bir düzen vardır. Ferromanyetizmadan farklı olarak antiferromanyetizmada manyetik momentler dolayısıyla da spinler yan yana olarak antiparalel şekilde yönelirler. Yan yana gelen bu antiparalel spinler nicelik olarak birbirlerine eş olduklarından dolayı net mıknatıslanmaları sıfıra yakındır. Net manyetik momentleri olmamasına rağmen çok güçlü bir manyetik alan uygulanırsa ancak bu şart ile bir manyetik momente sahip olabilirler.

Antiferromanyetik malzemelerin sıcaklık ile manyetik duygunluklarında değişim gözlenmektedir. Genel olarak bu malzemeler bütün sıcaklıklarda çok küçük bir manyetik duygunluğa sahiptirler. Fakat bu manyetik duygunluk sıcaklık ile düzenli bir şekilde değişime sahip değildir. Antiferromanyetik malzemelerde sıcaklık arttığı zaman manyetik duygunluklarında artış gözlenmektedir. Her bir antiferromanyetik malzeme için bir sıcaklıkta manyetik duygunluk maksimum değerine ulaşır. Bu sıcaklığa Néel sıcaklığı ( $T_N$ ) denir.  $T_N$  kritik bir sıcaklık olup her bir antiferromanyetik malzeme için karakteristik bir değerdir. Bu değerin üzerinde antiferromanyetik malzemelerin spin yapıları değişerek paramanyetik düzene geçerler. Fakat manyetik duygunlukları ferromanyetik malzemelerinkine benzer olur. Bu değerin altında ise ters yönde davranışa sebep olan termal enerji çok küçüktür. Manyetik alan uygulanmasa bile toplam manyetik momentlerin antiparalel yönelimleri çok güçlüdür.  $T_N$  çoğu antiferromanyetik malzeme için oda sıcaklığının

altındadır. Sıcaklık ile manyetik duygunlukları arasındaki ilişki Eşitlik 2.24 ile formülize edilebilir.

$$\chi_m = \frac{C}{T + \theta} = \frac{C}{T - (-\theta)} \quad (2.24)$$

Eşitlik 2.24 bize antiferromanyetik malzemelerin negatif bir  $\theta$  değerinde Curie-Weiss yasasına uyduğunu gösterir. Buradaki  $\theta$  moleküler alan katsayısıdır ve her bir malzeme için karakteristik bir özellik olup malzemedan malzemeye değişir. Moleküler alan, bir atomun toplam manyetik momentlerini bir yönde yönlendirirken bu atoma komşu olan başka bir atomun toplam manyetik momentini zıt yönde olmasına katkı sağlar. Ters yönde davranışa sebep olduğu için değiş-tokuş kuvvetinin negatif olduğu söylenebilir.

Çalışmalarda antiferromanyetizma teorisinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Çünkü ferrimanyetizma teorisi ile aralarında fazla benzerlikler olmasına rağmen aralarında çok küçük farklar bulunmaktadır.

Bazı elementler Cr da görüldüğü gibi tek başlarına antiferromanyetik davranış gösterirken bazı elementler de oksitlenmiş olarak antiferromanyetik davranış gösterirler. Ferromanyetik malzemeler ile aralarında farklar olmasına rağmen oksitlenmiş ferromanyetik malzemeler (NiO, CoO, FeO) de antiferromanyetik davranış gösterirler.

Antiferromanyetik malzemelerin çoğu elektrik iletkenlik özellikleri göz önüne alınırsa yalıtkan veya yarı-iletkendirler. Bu özellikleri de serbest elektronlara sahip olmadıklarını göstermektedir.

### 2.2.5. Ferrimanyetizma

Ferrimanyetizma ayrı bir manyetizma türü olarak tanımlanmadan 1948 yılına kadar ferromanyetizma olarak kullanılmıştır. Yaygın olarak kullanılan ferrimanyetik malzemeler Fe ve başka bir metalin çift oksiti ile oluşan yapılar olup ferrite olarak adlandırılırlar. Ferriteler 1945 yılından son birkaç yıla kadar çok yaygın olarak kullanılan manyetik malzemeler olmuşlardır. Tam açıklanamasa da o zamanlarda ferromanyetik malzemelerden sonra en yaygın ve elverişli olarak kullanılan manyetik malzemelerdir. Yaygın olarak kullanılan bu malzemeleri merak konusu olup

araştırılmaya başlandı. 1948 yılında Louis Néel ferriteleri anlamak için bir teori geliştirdi ve bu yapıların farklı bir manyetizma çeşidi olduğunu ortaya koyarak ortaya çıkardığı bu yeni manyetizma türünü ferrimanyetizma olarak adlandırdı [Néel, 1948].

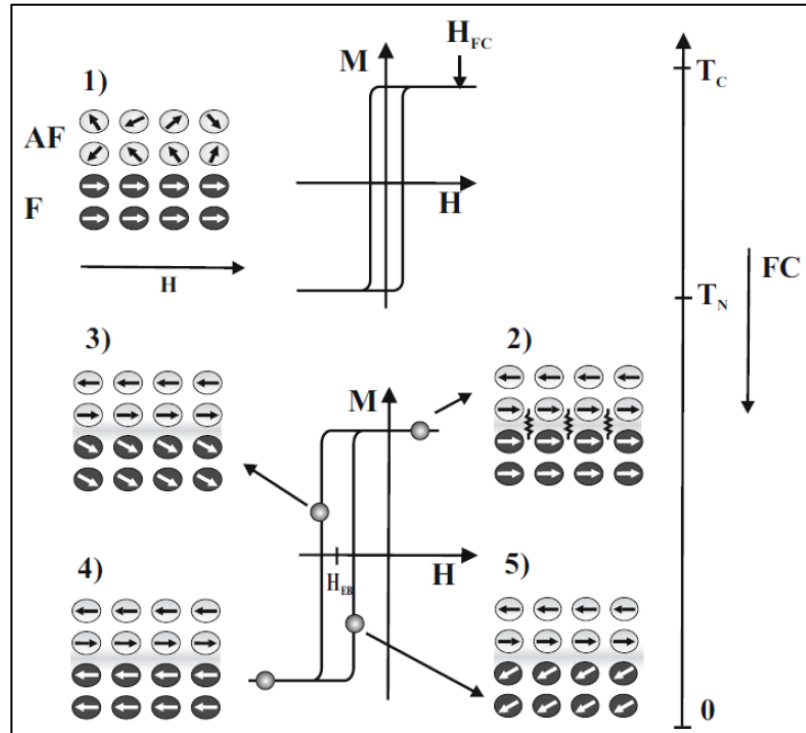
Ferrimanyetizma manyetik alan uygulandığında kısmen antiferromanyetizma ile aynı davranışı göstermektedir. Bu manyetizma türünde spinler iki eşit alt domenlere ayrılmış olup birbirlerine zıt yönlü olarak dizilmişlerdir. Bu dizilimlerinde ayırt edici olarak spin boyutlarına dikkat edilir. Zıt yönelimlerdeki spin boyutları birbirinden farklıdır. Bu yapılarından dolayı bazı kaynaklarda antiferromanyetizma esas yapı olarak görüldüğünden kusurlu antiferromanyetizma olarak da adlandırılırlar [Néel, 1952].

Ferrimanyetik malzemeler oda sıcaklığında kendiliğinden mıknatıslanmaya sahiptirler. Bu da ferrimanyetik malzemelerin kullanılmaları için en önemli motivasyonu sağlamaktadır. Ferrimanyetik malzemeler aynı ferromanyetik malzemelerde olduğu gibi doyuma ulaşmış domenlere sahiptirler. Dolayısıyla histeresis eğrilerine sahiptirler. Aynı şekilde Curie sıcaklığı ( $T_C$ ) yine kritik sıcaklıktır.  $T_C$  sıcaklığının üzerinde ferrimanyetik malzemelerin de kendiliğinden mıknatıslanmaları yok olur ve paramanyetik davranış gösterirler.

### 3. EXCHANGE BİAS

Exchange Bias, Meiklejohn ve Bean tarafından 1956 yılında keşfedilmiştir [Meiklejohn and Bean, 1956]. Bir Ferromanyetik (FM) malzeme ile bir Antiferromanyetik (AFM) malzemenin üst üste gelerek her iki manyetik malzemenin sahip olduğu karakteristik özelliklerden olan Curie ve Néel sıcaklıkları ile ilgili durumlar sağlandığı zaman  $H$  dış manyetik alan altında gözlenen bir etkidir. Meiklejohn ve Bean'in keşiflerinden sonra bu etkiyi tam olarak açıklamak ve tam anlamıyla bu etkiyi incelemek için başka çalışmalar da yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda da farklı Exchange Bias modelleri ortaya çıkmıştır. Bütün bu çalışmalara ve ortaya çıkan çeşitli Exchange Bias modellerine rağmen bu etki hala tam olarak açıklanamamasının yanında hard disk okuma kafaları ve bilgi depolama ortamları gibi birçok teknolojik uygulamada kendisine kullanım alanı bulmuştur.

Exchange Bias Etkisi'nin büyüklüğünü belirlemek için elde edilen histeresis eğrilerinden elde edilen koersif alan değerleri kullanılır. Bu histeresis eğrilerindeki manyetik momentlerin davranışları Şekil 3.1'de görülmektedir [Nogués and Schuller, 1999]. Exchange Bias Etkisini belirlemek için Eşitlik 3.1 kullanılır.



Şekil 3.1: Histeresis eğrilerinde manyetik momentlerin davranışları.

$$H_{EB} = \frac{|H_{C1} - H_{C2}|}{2} \quad (3.1)$$

FM/AFM yapılarında gözlenen Exchange Bias Etkisi'nin yanında ayrıca her bir tabakanın kendi karakteristik özelliklerinden olmamasına rağmen Engelleme Sıcaklığı ve Talim Etkisi olarak iki etki daha gözlenmektedir.

Bu etkilere kısaca değinmek gerekirse, Engelleme Sıcaklığı (Blocking Temperature) Exchange Bias Etkisi'nin (ortam şartları sıcaklık haricinde sabit kaldığı durumda) ortadan kalktığı sıcaklık olarak adlandırılmaktadır ve AFM tabakanın Néel sıcaklığından düşüktür [Radu et al., 2005].

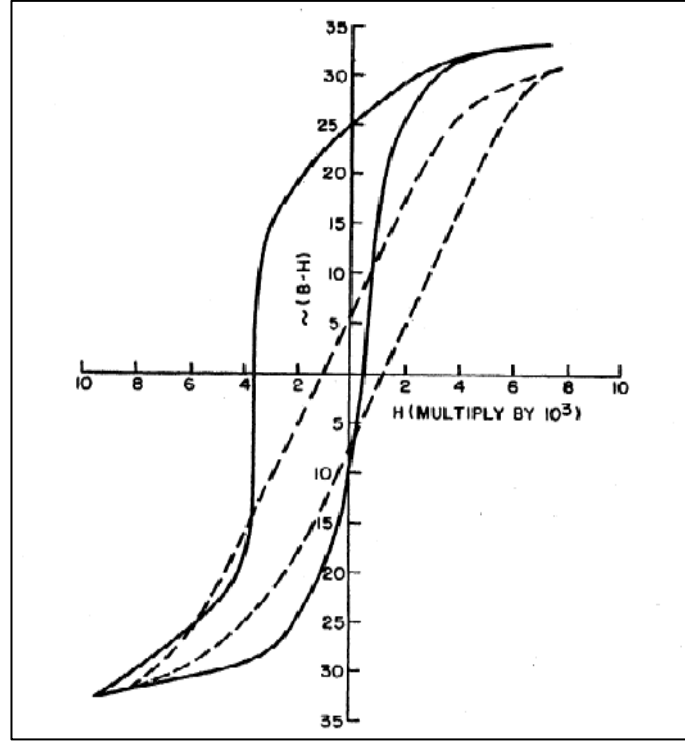
FM/AFM yapılarında Exchange Bias etkisi incelenen yapıda AFM tabakanın Néel sıcaklığının üzerine ısıtılmasıyla AFM tabakanın paramanyetik faza geçmesi sağlanır ve daha sonra bir dış H manyetik alan altında soğutma işlemi yapılarak Exchange Bias Etkisi gözlenir. Aynı sıcaklıkta birden fazla ölçüm yapıldığında ise elde edilen histeresis eğrilerinde Exchange Bias değerinin azaldığı görülür [Öztürk, 2011]. Numuneden numuneye sistemden sisteme belirlenen parametrelerde birkaç ölçüm sonucunda artık Exchange Bias gözlenmemeye başlar. Exchange Bias Etkisi'nin bu şekilde gözlenmemeye başlamasına Talim (Training) Etkisi denir.

### 3.1. Meiklejohn-Bean Modeli

Exchange Bias üzerine yapılmış olan ilk çalışmanın sonucunda bu etki tam olarak açıklanmamış olup yeni bir manyetik anizotropi olarak Exchange Anizotropi olarak değerlendirilmiştir [Meiklejohn and Bean, 1956]. Bu sonuç bir FM ve bir AFM malzemenin arasındaki etkileşimden elde edilmiştir. FM malzeme olarak yaklaşık 200 Å kalınlığındaki Co parçacıkları ile kendiliğinden oksitlenerek CoO haline gelen kabuk gibi Co parçacıklarını kaplamış olan AFM malzeme ile yapılmış olan bir çalışmadan elde edilmiştir. Bu çalışma dış manyetik alan altında sıcaklık 300 K'den 77 K'e düşürülerek gerçekleştirilmiştir. 77 K'e inildiği zaman iki sonuca ulaşılmıştır. Bunlardan ilki  $\sin \theta$ 'ya bağlı olarak elde edilen tork eğrisi grafiğidir. Elde edilen bu sonucu saf Co'nun  $\sin \theta$ -tork eğrisi grafiği ile karşılaştırarak yöne bağlı olmayan bir manyetik anizotropi olduğunu belirtmişlerdir [Meiklejohn and Bean, 1956]. Elde edilen diğer sonuç ise daha sonraki çalışmalarda da yaygın olarak



kullanılan histeresis eğrisi karşılaştırmasıdır. Bu histeresis karşılaştırması Şekil 3.2'de [Meiklejohn and Bean, 1956] görülmektedir.



Şekil 3.2: 77 K'de manyetik alan uygulandığı ve uygulanmadığı zaman elde edilen histeresis eğrilerinin karşılaştırılması.

Buradaki histeresis eğrileri 77 K'de elde edilmiştir. Kesikli olarak gösterilen histeresis eğrisi manyetik alan uygulanmadığı zamanki soğutma işleminde elde edilen histeresis eğrisi, çizgili olarak gösterilen histeresis eğrisi ise manyetik alan uygulanırken soğutma işleminde elde edilen histeresis eğrisidir. Bu histeresis eğrilerinin karşılaştırması sonucunda da 1600 Oe'lik kayma olduğunu gözlemlemişlerdir.

### 3.2. Mauri Modeli

Meiklejohn ve Bean'in keşfettiği Exchange Bias hakkında deneysel sonuçları göstermelerinin ardından bu çalışmalarını desteklemek ve teorik olarak anlaşılmasını sağlamak amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Bu teorik çalışmalara ilk olarak Mauri ekibi ile birlikte ve Malozemoff birbirlerinden bağımsız olarak peş peşe yaptıkları çalışmalarla destek sağlamaya çalıştıkları söylenebilir.

Mauri Modeli'nde Néel'in domen duvarları hakkındaki teorisini temel alınarak açıklama getirilmiştir. Oluşan Exchange Bias Etkisi'nin büyük kısmının AFM malzemenin domen duvarında depolandığı belirtilmektedir. Bundan dolayı elde edilen histeresis eğrisinde kayma miktarında azalma meydana gelir. Bu da Exchange Bias Etkisi olduğunu ortaya koyar [Mauri et al., 1987]. Bu model Mauri Modeli olarak adlandırılmıştır. Mauri ve ekibinin ortaya attığı sonuç deneysel olarak elde edilen verilerle daha tutarlıydı [Mauri et al., 1987]. Mauri'nin bu çalışması ayrıntılı olarak incelenecek olursa AFM malzemede bulunan domen duvarının kalınlıktan etkilenmediği fakat arayüzeydeki AFM malzemenin katmanı düzensiz olmasına rağmen bir manyetik anizotropiye sahip olduğu ileri sürülmüştür. Ayrıca FM malzemenin kalınlığı bu malzemenin domen duvar kalınlığından küçük olduğu da belirtilmiştir.

### **3.3. Malozemoff Modeli**

Malozemoff'un çalışmaları sonucu ortaya çıkardığı teorik model ise Malozemoff Modeli olarak adlandırılmaktadır [Malozemoff, 1987; Malozemoff 1988; Malozemoff, 1988]. Bu modele göre o zamana kadar kabul edilen kusursuz FM/AFM tabakaları arasındaki arayüzeylerin bu sefer kusurlu olduğu öne sürülerek arayüzeyde pürüzlülük olduğu kabul edilmiştir. Yapısal kusur olarak varsayılan bu pürüzlülüklerden dolayı arayüzeyde düzensiz bölgeler olduğu kabul edilir. Malozemoff Modeli'nde yapısal kusura sahip olan arayüzey konuma bağlı olarak sistemin manyetik özelliklerinde değişimlere sebep olmaktadır. Bundan dolayı da domen duvarlarındaki toplam enerjiyi minimize eden AFM domenler meydana gelir. Fakat oluşan bu domen duvarları da Mauri Modeli'nde kabul edilenin aksine arayüzeye dik olarak oluştuğu varsayılmıştır. AFM domenlerin sayısının fazlalığı arayüzey enerjisinin azalmasına bunun yanında da domen duvarlarının enerjisinin artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca çalışmaları sonucunda optimum domen boyutunu da belirlemiştir [Malozemoff, 1987].

### 3.4. Takano Modeli

Exchange Bias etkisini açıklamak için ortaya atılan teorik modellerden biri de 1988 yılında ortaya atılan Takano Modeli'dir. Takano ve ekibi yaptıkları çalışma sonucunda tek bir domende,  $Ni_{81}Fe_{19}$  (permalloy) ferromanyetik ince filmler ile CoO aniferromanyetik tanecikler arasında oluşan arayüzeylerdeki etkileşimler sonucunda meydana gelen manyetik davranışları incelemişlerdir [Takano et al., 1997]. AFM tabakanın taneciklerinin tane boyutlarının Exchange Bias değerine etkisini olduğu ortaya konulmuştur. Bu sonuçtan yola çıkarak teorik olarak hesaplamalar yapılmış ve deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu ortaya konulmuştur [Takano et al., 1998].

Elde ettikleri sonuçları fiziksel olarak açıklamak gerekirse bu çalışma sonucunda FM ince filmler ve AFM taneciklerin oluşturduğu arayüzeyde AFM taneciklerinin spin yoğunluğunun Exchange Bias değerine etki ettiğini ileri sürdükleri söylenebilir. Tane boyutu ile oluşan arayüzey pürüzlülüğü arasında sayısal bir bağ olduğu teorisi ortaya atılmıştır. Bu teoriye göre AFM spinlerin tane boyutlarına ters orantılı olarak Exchange Bias değerinde artışa sebep olduğu belirtilmiştir [Takano et al., 1998]. Bu çalışma da o zamana kadar olan Exchange Bias etkisini açıklamaya yönelik eksik kalmış olan AFM tane boyutunun ve etkinin gözlemlendiği arayüzeydeki durumlarının bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur.

### 3.5. Domen Durumu Modeli

Arayüzey pürüzlülüğünün Exchange Bias değerine etki ettiğinin ortaya çıkmasından sonra yapılan teorik çalışmalardan biri de Domen Durumu (Domain State) Modeli'dir. Bu model FM/AFM tabakalar arasında oluşan pürüzlülüğün dışında yapısal düzensizliklerin de olduğunu göz önüne alan bir modeldir. Bu düzensizlik AFM tabakanın homojen olarak FM tabakanın üzerinde olmaması yani AFM tabakanın seyrelmiş olarak bulunmasından kaynaklandığı ileri sürülen modeldir [Nowak et al., 2002]. Bu teorik modelde esas olarak Nowak ve ekibi Monte Carlo simülasyonu kullanarak arayüzeyde bulunan kusurların Exchange Bias değerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmalarını sonucunda elde ettikleri model ile deneysel olarak elde ettikleri sonuçların tutarlı olduğunu ortaya koymuşlardır [Nowak et al., 2002]. Fiziksel olarak yaptıkları çalışmayı ayrıntılı olarak yorumlarsak

eğer arayüzeyde olan kusurların yanında domen oluşumlarının Exchange Bias değeri üzerinde etkisi olduğunu temel alan teorik bir modeldir. Domen durumları soğutma işlemleri uygulanarak doyuma ulaşmış FM tabaka ile AFM tabakanın arayüzeylerinde net mıknatıslanma durumlarının olduğu bölgelerdir.

### **3.6. Spin Cam Modeli**

Exchange Bias ile ilgili ortaya atılan son teorik model olarak Radu ve ekibinin ortaya attığı Spin Cam (Spin Glass) Modeli'dir [Radu, 2005]. Spin Cam Modeli'ne göre FM ile AFM tabakaların bir araya geldiklerinde oluşturdukları arayüzeyde AFM malzemenin spinleri iki farklı davranışta incelenir. Bunlardan biri AFM tabakada bulunan spinlerin sabit kaldığı durumda yüksek manyetik anizotropi olduğudur. Diğer davranış ise FM/AFM yapıya manyetik alan uygulandığı zaman spinlerde yön değişimi gözlenmesidir. Bu da düşük manyetik anizotropi olduğu sonucunu ortaya koymuştur. Sahip oldukları bu iki davranış durumu göz önüne alındığında düşük manyetik anizotropiye sahip olunan durum herhangi bir sabit yapısı olmadığından dolayı Spin Cam Modeli olarak kabul edilmiştir [Radu, 2005]. Bu Spin Cam Modeli'nde koersif alanın arttığı durum söz konusudur. Bu da Exchange Bias gözlenmesine sebep olmaktadır.

### **3.7. Stoner-Wohlfarth Modeli**

Stoner-Wohlfarth Modeli, diğer Exchange Bias modellerinden farklı bir modeldir. Çünkü sadece Exchange Bias modeline dahil bir model değildir. Daha çok manyetik özelliklerden kaynaklı bir modeldir. Bu modelde ise FM tabakaların enerjisi ile sahip olduğu spinlerin FM tabaka yüzeyinde olduğu ve bundan dolayı da tek eksenli manyetik anizotropi olduğu kabul edilir [Parlak, 2014]. Bütün spinlerin H manyetik alan uygulandığı zaman aynı katkıyı sağladığı varsayılmaktadır. Bu varsayımlar ışığında düşük sıcaklıklara inildiğinde manyetik alan altında FM/AFM yapılarda Exchange Bias gözlemlendiği söylenebilir.

## 4. DENEYSEL TEKNİKLER

Bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan teknikler anlatılmaktadır. Çalışma kapsamında incelenecek numunelerin hazırlanması için Aşırı Yüksek Vakum (UHV) altında Magnetron Sputtering Deposition tekniği, hazırlanan numunelerin belirlenen farklı kimyasal oranlarda olup olmadığını incelemek için X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) tekniği, numunelerimizin manyetik karakterizasyonlarını yapabilmek için Manyeto Optik Kerr Etkisi (MOKE) ve Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) teknikleri kullanılmıştır. Bu teknikler tez çalışması boyunca uygulandıkları sıraya göre anlatılmadan önce önce nanoteknoloji çalışmalarında büyük bir öneme sahip olan vakum sistemleri hakkında bilgi verilmiştir.

### 4.1. Vakum Kavramı ve Vakum Sistemleri

Vakum kelimesi Latince olup (vacuus) boşluk anlamına gelmektedir. Vakum sistemleri ise kapalı bir hacim içerisinde atmosferik basınç değerinden düşük basınç değerine sahip olan sistemler şeklinde tanımlanmaktadır. Bu tanım vakum sistemleri ve vakum çalışmalarıyla dünya çapında öncü olan Amerikan Vakum Topluluğu (American Vacuum Society, AVS) tarafından 1958 yılında yapılmış olan tanımdır [Tarımcı ve Sarı, 2006]. Bu tanımlamada geçen basınç değeri hakkında birim hacimdeki gaz molekülü sayısının 22°C sıcaklıkta  $2,5 \times 10^{25}$  molekül/m<sup>3</sup> olduğu söylenebilir.

Vakum sistemleri günden güne yaygın bir şekilde kullanımı yaygınlaşmakta olup gerek imalat gerekse akademik çalışmalarda önem kazanan yapılar haline gelmiştir. Manyetik malzemeler, yarıiletken malzemeler, elektronik malzemeler ve optoelektronik malzemeler gibi hayatımızı kolaylaştıran birçok önemli malzemenin üretiminde kullanılmaktadır. Vakum sistemleri sayesinde yüksek hassasiyette bu malzemeler hazırlanabilmektedir. Yüksek hassasiyette olmalarının sebebi de vakum ortamında malzemelerin hazırlandığı ortamda atom ve gaz molekülleri gibi malzemelerin saflığını etkileyecek etkenlerin bulunmamasıdır.

Vakum durumu, şartlarına göre doğal vakum ve yapay vakum olmak üzere iki çeşittir. Doğal vakum, uzayda kendiliğinden mevcut olan gazsız durum olarak

belirtilmesine rağmen birim hacimde gaz moleküllerinin oranının çok düşük olduğunun unutulmaması gereken bir durumdur. Dünya’da ise doğal vakum yeryüzeyinden yükseldikçe atmosferdeki tabakalarda gözlenebilen bir durumdur. Yapay vakum ise teknolojinin ve bilimin gelişmesiyle teknik sistemlerle elde edilen bir durumdur.

Teknolojinin kullanılmasıyla elde edilen yapay vakum, bir ortamda bulunan gaz moleküllerinin istenilen doğrultuda akışlarını sağlayarak bu ortamdaki gaz molekül sayısını istenilen seviyeye düşürülmesiyle hazırlanır. Bunun için bir veya istenilen seviyeye ulaşmak için birbirine bağlanmış olarak birden fazla pompa kullanılır. Bu pompaların kullanıldıkları sistemler ile elde edilen yapay vakum kullanılan pompaların gücüne bağlı olarak farklı seviyelerde elde edilir. Elde edilen vakum seviyesini belirlemek için kapalı ortamın basıncı hakkında bilgi sahibi olunması gerekir. Basınç azaldıkça vakum seviyesi artar. Basınç değerine göre elde edilen vakum seviyeleri Tablo 4.1’de görülmektedir.

Tablo 4.1: Basınç ve gaz molekül yoğunluğuna göre vakum seviyeleri.

Vakum Seviyeleri	Basınç (mbar)	Gaz molekül Yoğunluğu (molekül/m <sup>3</sup> )
Alçak Vakum (Low Vacuum, LV)	1013 – 1	2,5 x 10 <sup>25</sup> – 10 <sup>22</sup>
Orta Vakum (Medium Vacuum, MV)	1 – 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>22</sup> – 10 <sup>19</sup>
Yüksek Vakum (High Vacuum, HV)	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>19</sup> – 10 <sup>16</sup>
Çok Yüksek Vakum (Very High Vacuum, VHV)	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-9</sup>	10 <sup>16</sup> – 10 <sup>13</sup>
Aşırı Yüksek Vakum (Ultra High Vacuum, UHV)	10 <sup>-9</sup> – 10 <sup>-12</sup>	10 <sup>13</sup> – 10 <sup>10</sup>

## 4.2. Magnetron Sputtering Deposition Tekniği

Sputtering kelimesi Türkçe olarak saçırma anlamına gelmektedir. Türkçesinden de anlaşıldığı üzere target (hedef) yüzeyinden atomları mekanik yöntem ile söküp alttaş (substrate) üzerine büyütme yapılmasına olanak sağlayan bir ince film kaplama tekniğidir. Mekanik olarak atom sökme işlemi momentum transferi ile hedef yüzeye yüksek enerjiye sahip iyon bombardıman edilmesiyle

sağlanır. Daha sonra kopan bu nötr atomlar alttaş üzerinde bir ince film tabakası oluşmasına sebep olur.

Mekanik olarak sökülen atomların oluşturduğu plazma katot olan hedef malzeme ile anot arasına uygulanan gerilim ile hedef olarak kullanılan elektroda doğru hareketlendirilirler. Böylece hedefe çarpan iyonlar hedef atomları sökmeye başlarlar. Bu teknik, diğer ince film kaplama tekniklerine göre daha hızlı ve pratik olduğundan dolayı daha yaygın kullanılmaktadır.

Sputtering tekniğinin temelde aynı olan farklı bir çeşidi de Magnetron Sputtering tekniğidir. Bu teknikte iyonlaşmış Ar atomlarını hareketlendirmek için kullanılan elektriksel alanın yanında bir de manyetik alan da uygulanır. Uygulanan manyetik alandan dolayı sökülen elektronlar sarmal bir yörüngede hareket ederler. Elektronların hedef malzemeden alttaşa aldıkları yol uzadığından dolayı daha çok çarpışmaya sebep olurlar (mean free path azalır). Böylece hedef yüzeyindeki yoğunlukları artar ve atom koparma işlemi daha hızlı gerçekleşmiş olur.

Kaplama öncesinde numunelere ısıl işlem olan tavlama (annealing) ve RF plazma dağlama (etching) işlemi yapılır. Bu işlemlerin yapılmasının sebebi ise üzerine kaplama yapılacak olan alttaş (substrate) ın üzerinde olabilecek herhangi bir yüzey bozukluğunun giderilmesinin veya yüzeye yapışmış olarak bulunan atomların yüzeyden temizlenmesinin hedeflenmesidir. Kaplama öncesi bu ön hazırlık işlemleri yapıldıktan sonra alttaş üzerine kaplama yapılabilir.

Sputtering tekniği kullanılan kaynağa göre Doğru Akım (Direct Current, DC), Radyo Frekanslı (Radio Frequency, RF) ve atmalı doğru akım (Pulse Direct Current) olmak üzere üç çeşittir. Kaplanacak malzemeye göre farklı kaynak kullanılmasının sebebi kullanılan hedef malzemenin elektriksel özelliği ile ilgilidir. İletken malzemeler için DC kaynak kullanılırken, yalıtkan malzemeler veya manyetik malzemeler için RF veya atmalı DC güç kaynakları kullanılmaktadır.

Magnetron Sputtering sistemlerinde aynı anda iki güç kaynağının (bir DC ve bir RF) çalıştırılmasıyla co-sputter tekniği ile de ince film kapmaları hazırlanabilir [Parlak, 2014]. Kullanılan co-sputter tekniğiyle hem alaşım hem de çok katlı filmlerin hazırlanması mümkündür [Demirci et al., 2014], [Erkovan et al., 2011], [Topkaya et al., 2010].

### 4.3. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) Tekniği

X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi tekniği (X-Ray Photoelectron Spectroscopy, XPS), yüksek hassasiyetli yüzey analiz tekniklerinden biridir. Manne Seigbahn tarafından ilk kez 1951'de keşfedilmesine rağmen, tek bir çalışmanın sonucunda ortaya çıkmamıştır. Gerek kullanılan X-Işınları gerekse bu tekniğin temelinde yatan fiziksel olay olan fotoelektrik etki bu tekniğin keşfedilmesine olanak sağlamıştır.

XPS tekniğinin oluşmasına ilk katkısı H. Hertz yapmıştır. Hertz, çalışmaları sonucunda ışığın elektronik sistemlerde bir etkiye sebep olduğunu gözlemlemiştir. Hertz'ten sonra A. Einstein fotoelektrik etkiyi teorik olarak kuantum mekanişel olarak açıklamıştır. Bu çalışmasından dolayı da 1921 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü almaya hak kazanmıştır.

XPS tekniği ile yüzeyden yaklaşık 10 nm kadar derinliğe inilerek bu bölgedeki kimyasal kompozisyon hakkında bilgi sahibi olunabilir. Bunun yanında kalınlık kalibrasyonları da yapılabilmektedir [Koç, 2008]. XPS tekniğinin çoklu tarama opsiyonu ile de yüksek çözünürlüklü olarak geniş enerji bant aralıklı tarama yapılarak elementlerin ana pikleri ile belirli enerji aralıklarına göre de tarama yapılabilen bir taramadır [Parlak, 2014].

XPS tekniğinde, kullanılan X-Işınları ile incelenecek yüzeyin etkileşmesi sonucunda yüzeyden kopan fotoelektronların analizör yardımıyla okunması söz konusudur. Bunun sonucunda, fotoelektronların kinetik enerjilerindeki değişime göre yoğunluk (intensity) spektrumu elde edilir. Aynı şekilde fotoelektronların bağlanma enerjilerindeki değişime göre yoğunluk spektrumları da incelenen yüzeyin elementel analiz, kimyasal stokiyometri ve mevcut olan kimyasal bağlar hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar.

Kullanılan X-Işını kaynakları monokromatiktir (tek dalga boyuna sahip). XPS tekniklerinde, X-Işını kaynağı olarak 1486.6 eV'a sahip Al-K<sub>α</sub> ile 1253.6 eV'a sahip Mg-K<sub>α</sub> anotlarından biri kullanılır. Farklı anot kullanılarak elde edilen X-ışınları, sahip oldukları enerji farklılıkları nedeniyle yüzeyi incelenen malzemenin iç kabuğunda bulunan farklı enerjiye sahip elektronların uyarılmasına sebep olur. İç kabuktan uyarılma sonucu sökülen elektronların kinetik enerjileri, bağlanma enerjilerinin fonksiyonu olarak her bir element için karakteristik olan bir değere sahiptir.



Fotoelektron Spektroskopi teknikleri, kullanılan fotonların enerjilerine göre iki çeşittir. Foton enerjisi 200 – 2000 eV arasında olan X-Işınları kullanılırsa XPS tekniği olarak adlandırılır. Eğer foton enerjisi 10 – 60 eV arasında olan Morötesi Işınlardan kullanılırsa Morötesi Fotoelektron Spektroskopi (Ultraviole Photoelectron Spectroscopy, UPS) olarak adlandırılır.

### 4.3.1. Fotoelektrik Etki

XPS tekniğinin temelinde yatan fiziksel olay fotoelektrik etkidir. XPS tekniğinin oluşmasına ilk katkısı Heinrich Hertz yapmıştır. Elektromanyetik dalgalar üzerinde çalışma yaparken deney düzeneğinde bulunan vericinin metal topuzlarından birine morötesi ( $\lambda = 50 \text{ nm}$ ) ışık gönderdiğinde hava boşluğunda kıvılcımların daha kolay oluştuğunu gözlemledi. Böylece ışığın elektronik sistemlerde bir etkiye sebep olduğunu gözlemledi [Hertz, 1887]. Bu çalışmadan sonra Albert Einstein 1905 yılında kendi yaptığı çalışmalar sonucunda fotoelektrik etkiyi açıklamıştır [Einstein, 1905]. Bu çalışmasından dolayı da 1921 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü almaya hak kazanmıştır.

Einstein yaptığı çalışmalarda yüzeye gelenin ışın değil foton olduğunu belirtmiştir. Her bir foton Eşitlik 4.1'den elde edilebilecek E enerjisine sahiptir.

$$E = h \nu \quad (4.1)$$

E enerjisinin bağlı olduğu parametrelerden h Planck sabiti olup  $\nu$  de ışığın frekansıdır. Bu durum göz önüne alındığında ışığın şiddetinin artması için birim zamanda yayılan fotonun artması gerekmektedir. Fakat frekans sabit olduğu için fotonların enerjileri de sabit kalıyordu. Foton gönderildiği yüzeye çarptıktan sonra sahip olduğu E enerjisinin bir kısmı çarptığı yüzeyde bulunan elektronları koparmak için kullanılırken kalan enerji de kopan elektronların kinetik enerjisi olarak bu elektronlara geçmektedir. Bu olay esnasında enerjinin korunumundan dolayı gelen fotonun sahip olduğu bütün enerji kullanılmış olur. Bu fiziksel olay Fotoelektrik Etki veya Fotoelektrik Olay olarak adlandırılmaktadır.

Yüzeye gönderilen fotonların kopardıkları bu elektronlar fotoelektron olarak adlandırılır. Elektronların koparılması için gereken enerjiye iş fonksiyonu denir ve  $\phi$

ile gösterilir. Gönderilen fotonun enerjisi ile iş fonksiyonu ve kopan elektronun kinetik enerjisi arasındaki bağıntı Eşitlik 4.2’de görülmektedir.

$$E_k = h \nu - \phi \quad (4.2)$$

Her element için  $E_k$  değeri farklı olup karakteristik bir özelliktir. Mekanik olarak açıklamak gerekirse yüzeye gönderilen fotonlar alt yörüngeden elektron koparmaktadır. Alt yörüngeden ayrılan elektronlar önceki konumlarında boşluklar bırakırlar. Bu boşluklar üst yörüngelerde bulunan elektronlar tarafından doldurulurlar. Bu elektronların alt yörüngelere geçmeleri için enerjilerinde kayıp olması gerekmektedir. Bu enerji kayıpları X-Işını olarak yüzeyden uzaklaşma veya yörüngelerden elektron kopararak Auger elektronu olarak yüzeyden ayrılma ile yüzeydeki enerjiyi korumuş olurlar.

### 4.3.2. X-Işınları

XPS tekniğine can alıcı katkı sağlayan diğer çalışma X-Işınlarının keşfidir. Wilhelm Konrad Röntgen’in 1895’te keşfettiği X-Işınları ile 1901 yılında ilk Nobel Fizik Ödülü’nü almaya hak kazanmıştır. Röntgen yaptığı çalışmalarda hızlı elektronlar baryum platin siyanür kaplı bir kağıt yüzeyine düştüğü zaman çok girişici bir radyasyonun oluştuğunu keşfetti [Baiser, 2008]. Kaynak olarak da bu kağıda yakın olarak duran siyah kartonla kaplı bir katot ışını tüpü kullanmıştır. Deney esnasında kağıt yüzey üzerinde parlama olduğunu gözlemledi. Hızlı olan bu elektronlar yüzeye düştüklerinde önceki çalışmalardan farklı olarak çok girişici bir radyasyon oluşmasına sebep oldular. Oluşan bu radyasyonun yapısı o zamanlarda tam olarak anlaşılamadığı için bilinmeyen ışın anlamına gelen X-Işını (X-Ray) adı verilmiştir. Daha sonraları bu X-Işınları üzerinde yapılan çalışmalar ile bu ışınların düzlem değiştirmeden aynı doğrultuda hareket ettikleri, elektrik ve manyetik alandan etkilenmedikleri, opak maddelerden geçebildikleri ve fotoğraf plakalarında iz bırakarak bir görüntünün bir yüzeye işlenebildiği ortaya çıkmıştır. Bu keşfin üzerinden uzun bir süre geçmeden X-Işınlarının elektromanyetik dalgalar olduğu anlaşılmıştır. Elektromanyetik teoriye göre hareketli bir elektrik yükü elektromanyetik dalga yayımlaması gerekmektedir. Yüzeye temas etmesi ile hareketi

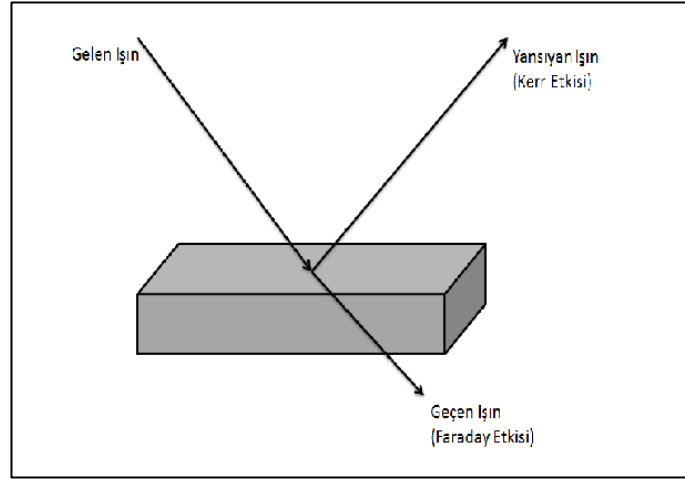
kesilen ışınımlara Bremsstrahlung (Frenleme Işınımı) denir. Elektronların bu ışınımlardan dolayı enerji kaybı fazladır. Bunun sebebi olarak da hareket eden elektronların çekirdeklerin etki ettikleri bölgeden geçerken ivmeleri artar. Elektronların enerjisi ile etkileştikleri bu çekirdeklerin atom sayıları arttıkça Bremsstrahlung enerjisi de artmış olur.

İlerleyen yıllarda X-Işınlınının gerek yapılarını açıklamak gerekse farklı alanlarda kullanım imkanları olduğunu ortaya koymak için çalışmalar yapılmıştır. 1896 yılında X-Işınları ilk tıbbi uygulaması gerçekleştirilirken aynı yıl içerisinde Thomas Edison X-Işınlınının zararlı etkileri olduğunu ortaya koymuştur. 1907 yılında ise Charles Barkla karakteristik radyasyonu keşfetmiştir. 1912 yılında ise W. L. Bragg X-Işınları ile kristal kırınımı tanımlamıştır. 1914 yılına gelindiğinde ise Henry G. J. Moseley X-Işını tayflarını sistematik olarak çalışarak elde ettiği sonuçlar ile bir elementin X-Işını dalgaboyu ile atom sayısı arasında bağıntı olduğunu ortaya koymuştur. 1946 yılında ise X-Işınları ilk synchrotron radyasyonu olarak da gözlenmiştir. İlerleyen teknoloji ve büyüyen hedefler doğrultusunda 1948 yılında da X-Işınları uzay araştırmalarında kullanılmaya başlanmıştır [Akdoğan, 2013].

#### **4.4. Manyeto Optik Kerr Etkisi (MOKE) Tekniği**

Manyeto Optik Etki, ilk olarak 1845 yılında Michael Faraday tarafından gözlenmiştir [Faraday, 1845]. Faraday bir cam malzemeye manyetik alan uyguladığında bu malzemedan geçen ışığın polarizasyonunda bir değişim olduğunu gözlemlemiştir. Bu etkiyi farklı malzemelerde de gözlenip gözlenmeyeceğini araştırmak için bu sefer metal yüzeylerde aynı işlemi gerçekleştirmiştir. Fakat o günkü şartlar gereği kullandığı malzemedeki yüzeysel sorunlar nedeni ile kesin bir sonuca ulaşamamıştır. Faraday'ın bu çalışmasından sonra 1877 yılında John Kerr de Manyeto Optik Etki'yi gözlemlemek için çalışmalara başladı. Kerr farklı olarak parlatılmış elektromıknatıs kutbundan yansıyan polarize olmuş ışığı incelemiş ve bunun Manyeto Optik Etki olduğunu fark etmiştir [Kerr, 1877], [Kerr, 1878]. Yapılan bu iki çalışmanın ortaya koyduğu sonuçlardan dolayı Manyeto Optik Etki kapsamında Faraday Etkisi ve Kerr Etkisi ortaya çıkmıştır. Faraday Etkisi, manyetik alan uygulanan malzemedan geçen ışığın polarizasyonunun değişmesi olarak tanımlanırken Kerr Etkisi ise manyetik alan uygulanan malzemedan yansıyan ışığın

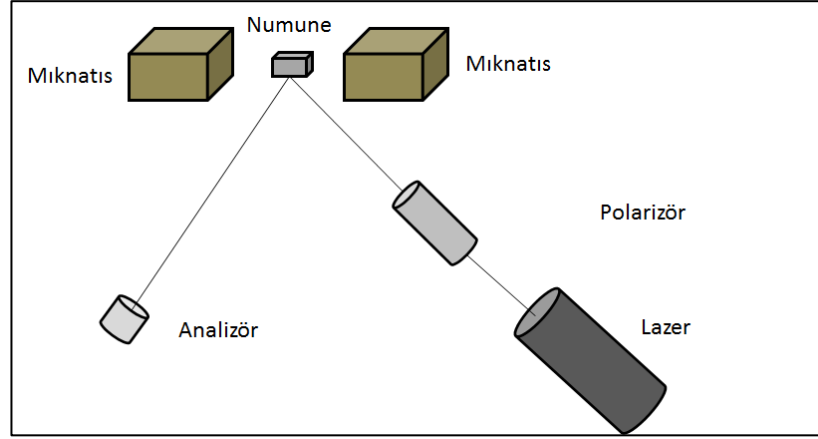
polarizasyonunun değişmesi olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.1). Bu iki etki kıyaslandığı zaman Kerr Etkisi'nin daha kullanışlı olduğu söylenebilir. Çünkü Faraday Etkisi'nin gözleneceği ışığı geçirebilecek ince malzemelere ihtiyaç duyulur. Bu malzemeler de gerek temin etme gerekse üretme açısından zor bulunabilen malzemelerdir.



Şekil 4.1: Manyetik malzemeye gelen polarize ışığın bu manyetik malzeme ile etkileşme çeşitleri olan Faraday ve Kerr etkileri.

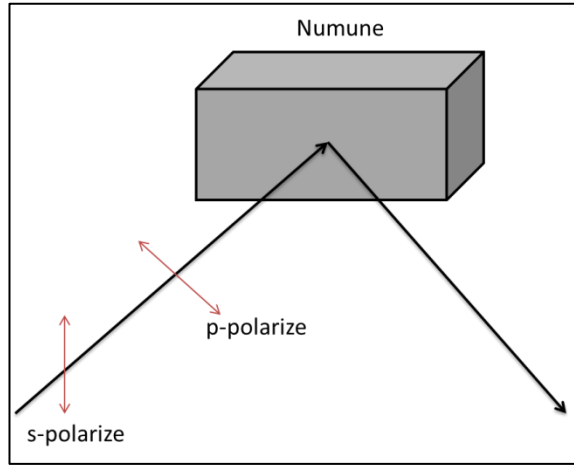
1985 yılında ise Sam D. Bader ve Qui bireysel çalışmalarında malzemelerdeki yüzey mıknatıslanmasını incelemek için Manyeto Optik Etkilerden Kerr Etkisini kullanmışlar ve bu etki Yüzey Manyeto Optik Kerr Etkisi (Surface Magneto Optic Kerr Effect, SMOKE) olarak adlandırılmıştır [Qui and Bader, 1999].

Manyeto Optik Kerr Etkisi (Magneto Optic Kerr Effect, MOKE) tekniği, temel olarak polarize olmuş ışık demetinin manyetik alan uygulanan bir manyetik malzemenin üzerinden yansıyan ışık demetinin bir analizör yardımı ile ışık demetinin polarizasyonunda meydana gelen değişmeyle incelenen malzemenin manyetik özelliklerinin gözlemlendiği bir tekniktir. MOKE sistemlerinde ışık demeti kaynağı olarak lazer kullanılmaktadır. Genel olarak da HeNe diyot lazeri ( $\lambda = 632 \text{ nm}$ ) kullanılır. Bunun yanı sıra Ti:Saph lazeri ( $\lambda = 845 \text{ nm}$ ) gibi farklı lazerler de mevcuttur [Wilkes, 2000]. MOKE sisteminin şematik gösterimi Şekil 4.2'de görölmektedir.



Şekil 4.2: Sıradan bir MOKE sisteminin şematik gösterimi.

Işık polarizasyonuna göre Şekil 4.3'te de görüldüğü gibi s-polarize ve p-polarize olmak iki çeşittir. Herhangi bir düzlem E elektrik alanını ve ışık dalgasının yönünü içerir ise bu durum düzlemin polarize olduğunu gösterir. E elektrik alan polarizasyonu gelen ışığın numuneden yansıma yüzeyine dik ise s-polarize (senkreht-polarized) ışık, E elektrik alan polarizasyonu ışığın numuneden yansıma yüzeyine paralel ise de p-polarize (parallel-polarized) ışık olarak adlandırılır.



Şekil 4.3: Işığın s-polarize ve p-polarize olan polarizasyon çeşitlerinin gösterimi.

MOKE tekniğinde kullanılan polarize ışık, etki ettiği yüzeyden yansırken eliptik polarize olarak yansması ve gelen ışığın ilk durumuna göre polarizasyon açısındaki değişim bu tekniğin temelini oluşturur. Değişime uğrayan bu iki özellik malzemelerin mıknatıslanmaları ile orantılıdır.

MOKE tekniğinin temelini oluşturan fizik incelenirse klasik dielektrik teori ile birlikte kuantum teorisi ile karşılaştırılır. Gönderilen polarize ışığın malzemenin

yüzeyinden birkaç Å derinliğindeki elektronlar ile etkileşmesi incelenebilir. Bu inceleme esnasında E elektrik alanının titreşimi malzemeye geldiği zaman elektrik alan vektöründen kaynaklanan  $F_E$  kuvvetinin etkisiyle titreşim oluşur. Malzeme mıknatıslanmış olduğundan dolayı her bir elektrona Lorentz Kuvveti etki eder.

$$F_E = q \times E_E \quad (4.4)$$

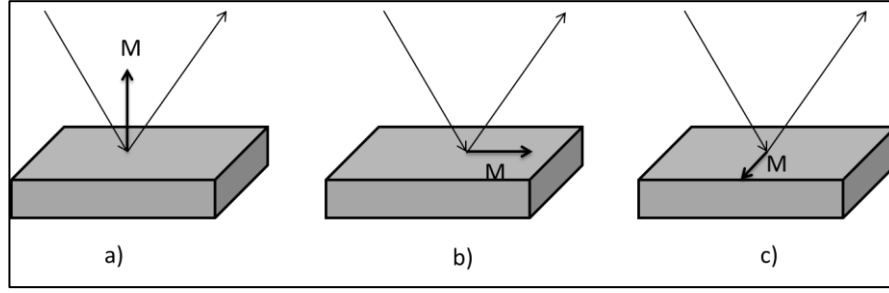
$$F = F_E + F_B \quad (4.5)$$

$$F = q \times (E + (V \times B)) \quad (4.6)$$

$$F = q \times (E_E + E_B) \quad (4.7)$$

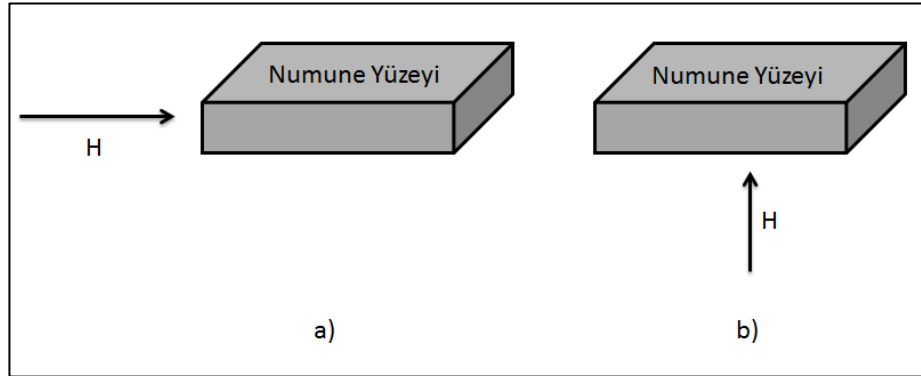
Bu durum klasik dielektrik teori temelini oluşturur. Klasik dielektrik teoriye göre kuvvet Eşitlik 4.4, Eşitlik 4.5, Eşitlik 4.6 ve Eşitlik 4.7 sonucunda elde edilir. Kuantum teorisi olarak Manyeto Optik Etki, kullanılan polarize ışığın elektrik alan vektörü ile manyetik malzemede bulunan elektronların spinlerinin etkileşmesi belirtilebilir.

Numune ile numuneye gelen ışığın saçılma düzlemine göre mıknatıslanma vektörü incelenecek olursa Şekil 4.4'te de görülen kutupsal, boyuna ve enine olmak üzere üç çeşit Manyeto Optik geometriye sahip MOKE vardır. Kutupsal (polar) MOKE mıknatıslanma yönü, ışığın numuneye geliş düzlemine paralel ve numuneden yansıma yüzeyine diktir. Boyuna (longitudinal) MOKE ise mıknatıslanma yönü hem ışığın numuneden yansıma yüzeyine hem de ışığın numuneye geliş düzlemine paralel olan MOKE çeşididir. Diğer çeşit olan enine (transverse) MOKE' ta ise mıknatıslanma yönü ışığın numuneye geliş düzlemine dik olması ve yansıma yüzeyine paralel durumda söz konusudur.



Şekil 4.4: Farklı Manyeto Optik geometriye sahip MOKE çeşitleri. a) Kutupsal MOKE, b) Boyuna MOKE, c) Enine MOKE.

Uygulanan  $H$  manyetik alan, incelenecek numuneye uygulandığı düzleme göre Şekil 4.5'te de görüldüğü gibi paralel ve dik olan iki çeşit ölçüm şekli mevcuttur. Paralel ölçüm (In-Plane, IP) durumunda  $H$  manyetik alan numunenin yüzeyine paraleldir, yani domen duvarlarındaki spinlere paralel uygulanır. Dik ölçüm (Out of-Plane, OoP) durumunda ise domen duvarlarındaki spinlere dik uygulanır. Bundan dolayı OoP ölçümlere dik (perpendicular) mıknatıslanma ölçümü de denir.



Şekil 4.5: Düzleme uygulanan  $H$  manyetik alana göre ölçüm çeşitleri. a) In-plane, b) Out of-plane.

Atomik seviyede atomlar bireysel olarak manyetik momente sahiptirler. Katıların manyetik davranışları, uygulanan  $H$  manyetik alan altında her bir atomun komşu atomlarıyla etkileşimleri sonucunda manyetik momentlerinde meydana gelen değişimine bağlıdır. Paramanyetik ve diamanyetik malzemelerin atomlarında manyetik momentlerinde herhangi bir eşleşmiş değişmiş kuvvet bulunmamaktadır. Her bir atomun manyetik momenti komşu atomlar ile bir çiftleşmeden dolayı oluşan etkileşime sahip olmadığından birbirlerinden bağımsız, yani serbesttir. Böylece uygulanan  $H$  manyetik alana bağlı net bir manyetik moment yoktur. Ferromanyetik

malzemelerde ise paramanyetik ve diamanyetik malzemelerdeki durumun aksine komşu atomlar arasında çiftleşmeden kaynaklanan bir değişim gözlenir.

MOKE tekniği kullanılırken uygulandığı malzemenin türüne, kullanılan ışığın dalgaboyuna, ortamdaki termal ve optiksel gürültülere bağlı olarak elde edilen sonuçlarda farklılıklar gözlenebilir.

## 4.5. Titreşimli Örnek Manyetometre (VSM) Tekniği

Titreşimli Örnek Manyetometresi (Vibrating Sample Magnetometry, VSM) ilk olarak 1959 yılında Simon Foner tarafında keşfedilmiş olup [Foner, 1959] Foner Manyetometresi olarak da bilinir [Öztürk, 2011]. Bu teknik ile manyetik malzemelerin manyetik karakterizasyonları yapılabilir [Foner, 1959]. Manyetik karakterizasyon sonucu olarak koersif alanlar, doyum mıknatıslanması, kalıcı mıknatıslanma, manyetik geçirgenlik ve manyetik duyunluk gibi karakteristik özellikler elde edilebilir. Bunun yanında sıcaklığa bağlı olarak da Curie ve Néel sıcaklıkları belirlenebilir.

VSM, temelinde Faraday Yasası prensibinin yattığı bir tekniktir. Faraday Yasası'na göre düzgün bir şekilde sahip kapalı bir devredeki manyetik akı değişimi devrede bir indüksiyon elektromotor kuvveti (emk) oluşturur [Cullity and Graham, 2009]. Manyetik akıdaki bu değişim indüklenen emk'ya eşit olması elektromanyetik indüksiyon ile açıklanabilir [Cullity and Graham, 2009]. Bir H Manyetik alan altında titreşmeye başlayan numunede manyetik akı değişimi oluşur. Bu değişim ile elde edilen indüksiyonun ölçülmesi VSM tekniğinin temelidir. İndüklenen emk ile titreşime sahip olan numunenin manyetik karakterizasyonu imkanı sağlanır.

VSM karakterizasyonu esnasında numuneler sinüsoidal olarak titreşen bir örnek tutucu (sample holder) üzerindedir. Salınım hareketinin titreşim genliği VSM motor modülü ile belirlenmektedir [Quantum Design, 2004].

VSM tekniği ile ince film, toz ve sıvı numunelerin manyetik karakterizasyonları yapılabilmektedir.



## 5. PtCo/CoO YAPILAR

Gelişen teknolojiye katkı sağlayan birçok çalışmadan biri de manyetizma konusunda yapılan çalışmalardır. Her geçen gün manyetizma ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilirken ortaya da bilinen manyetik malzemelerin farklı manyetik özellikleri, bundan dolayı da farklı kullanım alanları ortaya çıkmaktadır. Bu şekilde ortaya çıkan kullanım alanlarından biri de bilgi depolama ortamlarıdır. Bilgi depolama ortamlarında dikkat edilen en önemli parametreler tanecik boyutları ve tanecikler arasındaki etkileşimlerdir [Powers et al., 2002]. Tanecik boyutlarının daha da küçüldüğü manyetik malzemelerin hazırlanabilmeye başlanmasıyla beraber daha küçük alana daha çok bilgi kayıt edilebilmesi olanağı sağlanmıştır. Diğer parametre olan tanecikler arasındaki etkileşimler ise birim alanda daha çok bilgi saklanabilme olanağının yanında saklanan bilgilerin tanecikler arasındaki etkileşimlerden dolayı oluşan gürültü ve ısı gibi etkenlerden hasar görmeden saklanabilmesini sağlamıştır [Powers et al., 2002]. Oluşan bu gürültünün minimum olabilmesi için ayrıca manyetik yoğunluk kapasitesinin artması için nanomanyetik malzemeler kullanılmaktadır [Erkovan, 2010]. Nano boyutta tanecik boyutlarındaki ısı etkilerini azaltmak için manyetik anizotropi değeri yüksek yapılara ihtiyaç duyulmaktadır.

### 5.1. Kobalt ve Platin Elementlerinin Yapısal Bilgileri

Kobalt (Co), demir (Fe) ve nikel (Ni) ile birlikte demir grubu (demir üçlüsü) metalleri olarak adlandırılırlar [Petrucci et al., 2005]. Bu demir üçlüsü oda sıcaklığında ferromanyetik özellik gösteren elementlerdir. Bu özelliklerinin yanında değişik sıcaklıklarda manyetik karakteristik özelliklerinde değişiklik gözlenen ferromanyetik malzemelerdir. Co periyodik cetvelde sekizinci grupta bulunan bir geçiş metalidir. Atom numarası 27 ( $Z = 27$ )'dir. Co, değişik sıcaklıklarda ve üzerine hazırlandığı alttaş malzemenin kristal yapısına bağlı olarak değişik faz yapısına sahip bir elementtir [Sun and Murray, 1999], [Erkovan, 2010]. Bunun yanında kristal yapısında sıcaklığa bağlı olarak iki durum ortaya çıkmaktadır [Erkovan, 2010]. 425°C nin altında Hegzagonal Sıkı Paket (Hexagonal Closed Packed, HCP) ve yüksek sıcaklıklarda Yüzey Merkezli Kübik (Face Centered Cubic, FCC) durumları

gözlenmektedir [Nie et al., 2003]. Co' in kristal yapısı tanecik boyutu arasında da bir ilişki mevcuttur [Kitakami et al., 1997].

Kobaltın mıknatıslanma özelliğini arttırıp manyetik özelliklerinde değişime sebep olması için belirlenen kimyasal oranlarda alaşım yapılmak için platin yaygın olarak kullanılan bir elementtir [Demirci et al., 2014]. Platin (Pt) atom numarası 78 ( $Z = 78$ ) olan periyodik cetvelde sekizinci grupta bulunan bir geçiş metalidir. FCC kristal yapısına sahiptir. Yüksek ergime noktasına ve yüksek ısı iletkenliğine sahip olduğu için katalitik özelliklerinin yüksek olduğu söylenebilir. Bu özelliklerinin yanında ağır, şekil verilebilir ve sünek yapısı olduğu için kıymetli bir metaldir. Genel olarak korozyona dayanıklıdır. Sıcaklık değişimi ile Pt yapılarında korozyon gözlenmez. Sadece siyanür, kükürt, halojenler ve alkali metaller ile etkileşime girerse korozyona uğrarlar.

## 5.2. PtCo Yapılar

Pt ve Co elementleri birbirleri ile alaşım oluşturabilen elementlerdir [Ashcoft and Mermin, 1976]. Bu iki element birbirleri ile alaşım oluşturdukları ve bunların manyetik özelliklerinde değişimler gözleendiği literatürde mevcuttur [Demirci et al., 2014]. Bu alaşımlarla beraber PdFe ve PtFe gibi alaşımlar da aynı şekilde alaşım olarak hazırlanarak farklı manyetik özelliklere sahiptir [Sellmyer, 2002], [Klemmer et al., 1995], [Skomski, 2003]. Bu alaşımların oluşturduğu ve sahip oldukları bu düzene  $L1_0$  faz yapısı olarak bilinmektedir [Erkovan, 2010]. Pt ve Pd gibi metallerin ferromanyetik malzemelerle oluşturduğu alaşımlara kazandırdıkları özelliklerden dolayı da alaşımlarda yaygın olarak kullanılmaya başlayan elementlerden bazılarıdır.

$L1_0$  faz yapısına sahip olan bu alaşımlar yüksek manyetokristal anizotropiye sahip olduklarından dolayı yeni nesil manyetik kayıt ortamlarında kullanılmaktadırlar. PtCo yapılar  $L1_0$  faz yapısına sahip olan ve kalıcı manyetik alaşım özelliği gösteren ilk alaşımlar olmaktadır [Brown et al., 2003]. PtCo yapılar  $L1_0$  faz yapısının haricinde düzeni bozulan farklı yapılara da sahiptirler. Bu yapılar da  $L1_2$  faz yapısı olarak adlandırılmaktadır. Literatürde farklı kimyasal oranlara sahip  $Pt_xCo_{1-x}$  yapıları ile yapılan çalışmalarda  $x > 0.25$  durumu için bu faz yapıları gözleendiği bilinmektedir [Ashcoft and Mermin, 1976].

### 5.3. CoO Yapılar

CoO yapıların iki kararlı bir de kararsız olmak üzere üç çeşit faza sahip oldukları bilinmektedir [Ok and Mullen, 1968]. CoO yapıların sahip oldukları bu fazlar arasında geçişler gözlenmektedir. Bu geçişler numune hazırlama koşulları ile doğrudan ilgilidir. Özellikle hazırlanma aşamasında sistem sıcaklığının ve sistemde bulunan oksijen ( $O_2$ ) basıncının etkisi büyüktür. Belirlenen parametreler ile CoO bir yapının faz diyagramları elde edilebilir [Seehra and Wijn, 1992].

Yapısal olarak FCC kristal yapısına sahiptirler. Ayrıca manyetik özelliği için can alıcı değer olan Néel sıcaklığı da 289 K'dir. Ayrıca kuvvetli olmasalar da yarı iletken davranış gösterirler [Abrudan, 2007].

## 6. DENEYSEL SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında gerek numunelerin hazırlanması gerekse yapılan karakterizasyon çalışmaları bu bölümde sırası ile verilmiştir. Çalışmanın her bir aşamasında kullanılan cihazlar hakkında teorik bilgiler önceki bölümlerde verilmiş olmasına rağmen sistemlerin özellikleri, numunelerin hazırlanma parametreleri ile karakterizasyon sırasındaki ölçüm parametreleri hakkında bilgilere ve karakterizasyon sonuçlarına bu bölümde değinilmiştir.

### 6.1. İnce Filmlerin Hazırlanması

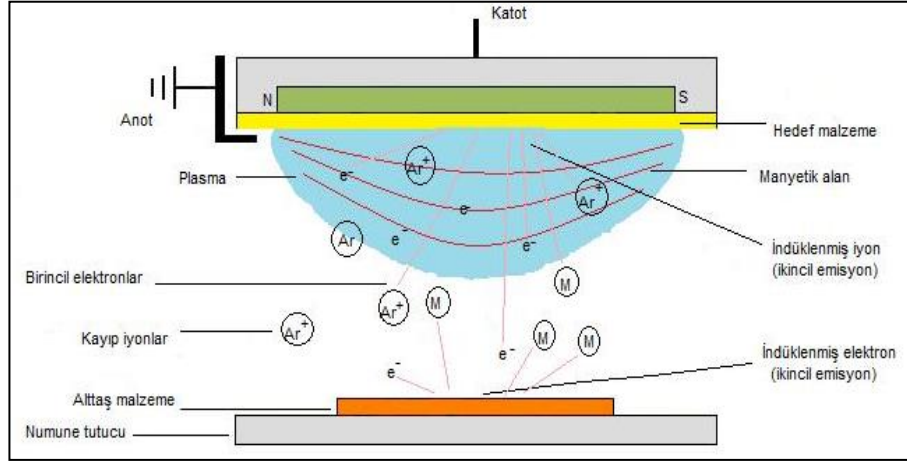
Tez çalışması kapsamında incelenen numuneler Gebze Teknik Üniversitesi Nanoteknoloji Laboratuvarı'nda hazırlanmıştır. Burada UHV şartlarında bulunan Şekil 6.1'de görülen Magnetron Sputtering Deposition (Bestec UHV Sputtering System 2000) sistemi kullanılmıştır. Bu sistemde ayrıca kaplanacak alttaş (substrate) yüklendiği örnek yükleme kısmı da bulunmaktadır. Sistemde biri puls DC (Pulse Direct Current) olmak üzere dört DC (Direct Current, Doğru Akım) ve iki de RF (Radio Frequency, Radyo Frekansı) güç kaynağıyla kontrol edilebilen altı hedef (target) malzeme yüklenme yerine sahiptir.



Şekil 6.1: GTÜ Nanoteknoloji Laboratuvarı Magnetron Sputtering Deposition sistemi.

Sistemde çapları 3 inch ve farklı kalınlıklardaki (1mm - 5mm) hedef malzemeler kullanılabilir. Hedef malzeme ile üzerine kaplama yapılacak altaş arasında mesafe 10mm – 100mm arasında ayarlanabilmektedir.

Sistemlerde farklı anot-katot konfigürasyonu bulunabilmektedir. Kullanılan Magnetron Deposition sistemindeki anot-katot konfigürasyonu Şekil 6.2’de görülmektedir. Hedef malzeme olan katot, anot tarafından çevrelenmiştir.



Şekil 6.2: GTÜ Nanoteknoloji Laboratuvarı Magnetron Sputtering Deposition sisteminin çalışma prensibinin şematik gösterimi.

Sistemin numune yükleme kısmına (Load Lock Chamber) kısmına tek seferde on numune yüklenebilir. Ayrıca kaplama ünitesine dahil olan Quartz Crystal Monitoring (QCM) ile kaplama yapılan numunelerde yapılan kaplamanın kalınlığı Å cinsinden de takip edilebilmektedir. Hazırlanan numunelerde kalınlık  $\pm 1\text{Å}$  hassasiyette elde edilebilmektedir. QCM atomik tartı olarak da tanımlanabilir.

Altaş olarak kullanılan Si(001) malzemesi UHV şartları altına alınmadan önce Ultra Sonik Karıştırıcı’ da beşer dakika boyunca hem ethanol hem de methanol banyosu yapılarak temizlenmiştir. Daha sonra UHV ortamına yerleştirilen altaşlara 600°C sıcaklıkta 30 dakika boyunca ısıtma işlemi uygulanmıştır. Kaplama işlemi sırasında da altaş malzemeler 300°C sıcaklıkta tutularak alaşımlandırma gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklık grubumuzca daha önceden çalışılmış olan PtCo çalışmalarında belirlenen bir sıcaklıktır [Erkovan, 2010].

FM tabaka olan PtCo tabakası hazırlanırken Magnetron Sputtering Deposition tekniğinin co-sputtering özelliği kullanılmıştır. Bu özellik kullanılırken hem Pt hem de Co hedef malzemelerinde plazma bulunmaktadır. Bu plazmalar birbirlerinden

uzakta olup herhangi bir şekilde birbirleri ile etkileşime girmemektedir. Hazırlanan numuneler bilgisayar kontrolü ile hangi hedef malzemenin plazmasında ne kadar süre kalacağını belirtilmiş olup bu süreler de Tablo 6.1’ de verilmiştir. Bu süreler her bir element için kaplama hızı kullanılarak belirlenmiştir. Pt ve Co’ ın kaplama hızları için ayrı ayrı kaplamalar yapıp bu sisteme bağlı olan analiz odasındaki XPS tekniği kullanılarak belirlenmiştir. FM tabakadaki PtCo yapısının istenilen kimyasal oranlarda olup olmadığı her bir numunenin FM tabakası hazırlandıktan sonra XPS tekniği ile incelenmiştir. Bu sonuçlar XPS karakterizasyonu kısmında açıklanmıştır. FM tabakalar hazırlandıktan sonra bu tabakaların üzerine AFM tabaka olan CoO yapılar hazırlanmıştır.

Tablo 6.1: Farklı kimyasal oranlardaki PtCo tabakaların kaplama süreleri.

<b>Numune</b>	<b>Pt kaplama süresi</b>	<b>Co kaplama süresi</b>
Pt <sub>0,1</sub> Co <sub>0,9</sub>	2	11
Pt <sub>0,2</sub> Co <sub>0,8</sub>	4	10
Pt <sub>0,3</sub> Co <sub>0,7</sub>	6	8
Pt <sub>0,4</sub> Co <sub>0,6</sub>	8	7
Pt <sub>0,5</sub> Co <sub>0,5</sub>	10	6
Pt <sub>0,6</sub> Co <sub>0,4</sub>	12	5
Pt <sub>0,7</sub> Co <sub>0,3</sub>	14	4
Pt <sub>0,8</sub> Co <sub>0,2</sub>	16	3
Pt <sub>0,9</sub> Co <sub>0,1</sub>	18	2

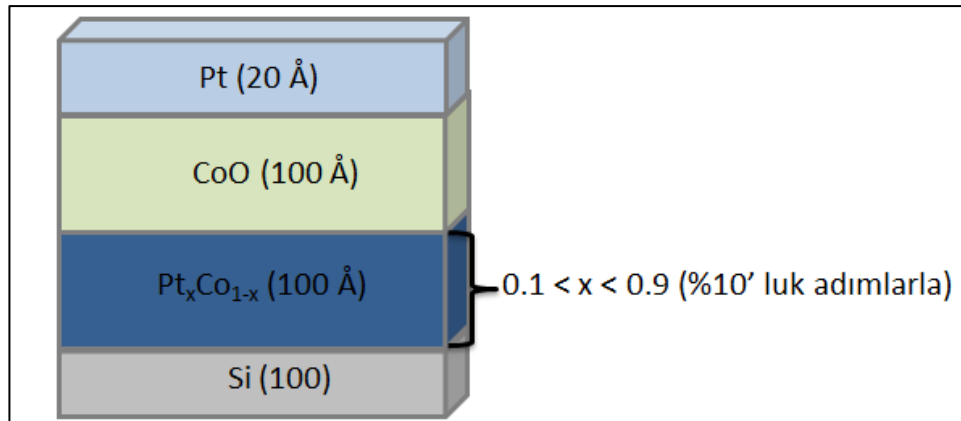
AFM tabaka olan CoO tabakanın kaplanması ise FM tabakanınkinden farklıdır. Aynı sistemde daha önceki çalışmalarda [Öztürk et al., 2012], [Demirci et al., 2014], [Akdoğan et al., 2015] da uygulanan parametreler tekrar denenmiş olup bazı değişikliklerle aynı işlemler uygulanmıştır. Hazırlanan FM tabakanın üzerine herhangi bir oksitlenme gerçekleşmeden önce ve herhangi bir kaplama yapılmadan sisteme O<sub>2</sub> gazı verilip sistemin basıncı  $1 \times 10^{-5}$  mbar seviyesine getirilir. Daha sonra da sisteme Ar gazı verilerek Tablo 6.2’ de ile verilen şartlar sağlanarak CoO tabaka kaplanmıştır. Ar gazı verilirken Gaz Akış Kontrol cihazıyla (Mass Flow Controller, MFC) ile kontrollü olarak verilmiştir.

Tablo 6.2: Kullanılan CoO tabaka kaplama parametreleri.

Parametre	Değeri
z-position	100 mm
Power Act	40 W
Power Reflected	0
DC Bias	240 V
CL	740
CT	760
MFC <sub>Ar</sub>	3.2 sccm
MFC <sub>O<sub>2</sub></sub>	0.2 sccm
P <sub>kaplama</sub>	1.25 - 1.3 x 10 <sup>-3</sup> mbar
Kalınlık	100 Å
Starting Power	100 W
Power	40 W
DC Bias	20 V
Timeout	120 s
Timer 1	60 s
Timer 2	60 s

AFM tabaka da hazırlandıktan sonra numunelerimizin son tabakası olarak yüzeylerinin oksitlenmemeleri için koruyucu tabaka (cap layer) olarak Pt kaplanmıştır.

Tez çalışması kapsamında 3” çapında %99.9999 saflıkta olan Pt ve Co hedef malzemeler kullanılmıştır. Alttaş olarak da Si(001) kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 6.3’te görülmektedir.



Şekil 6.3: Hazırlanan numunelerin yapıları.

Numunelerimiz istenilen kalınlık ve kimyasal oranlarda hazırlandıktan manyetik karakterizasyon tekniklerinden olan MOKE tekniği kullanılmıştır.

## 6.2. XPS Karakterizasyonu

Hazırlanan numunelerin istenilen kimyasal oranda olup olmadıklarının kontrolü için XPS sistemi kullanılmıştır. Kullanılan XPS sistemi de Gebze Teknik Üniversitesi Nanoteknoloji Laboratuvarı'nda bulunmakta olup numunelerin hazırlandığı Magnetron Sputtering Deposition sistemi ile birleşik halde bulunmaktadır. Tez çalışmasında kullanılan XPS PHOUBS-150 marka XPS sistemi Şekil 6.4'te görülmektedir. XPS kısmı laboratuvardaki UHV sistemin Analitik Vakum Odası'nda bulunan yüzey analiz tekniklerinden sadece bir tanesidir. Bunun dışında X-Işını Fotoelektron Kırınımı (X-Ray Photoelectron Diffraction, XPD), Düşük Enerji Elektron Kırınımı (Low Energy Electron Diffraction, LEED) ve Auger Elektron Spektroskopisi (Auger Electron Spectroscopy, AES) analiz teknikleri de bulunmaktadır.

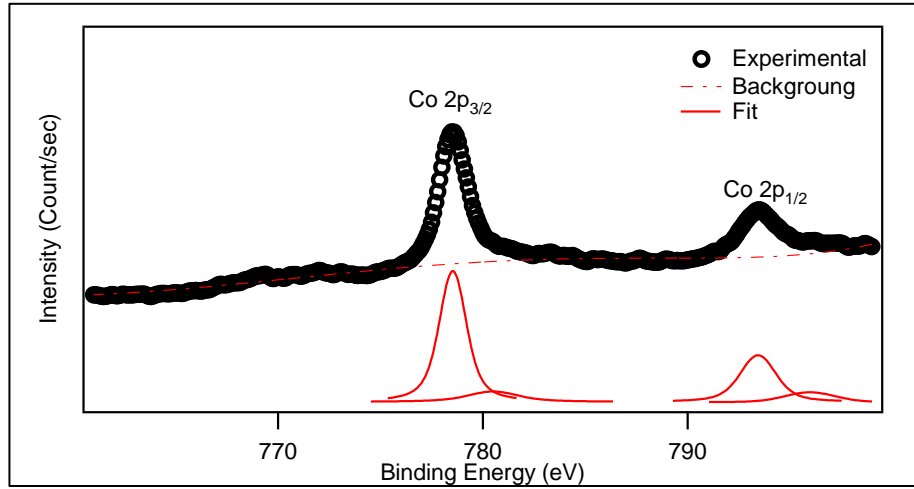


Şekil 6.4: GTÜ Nanoteknoloji Laboratuvarı XPS sistemi.

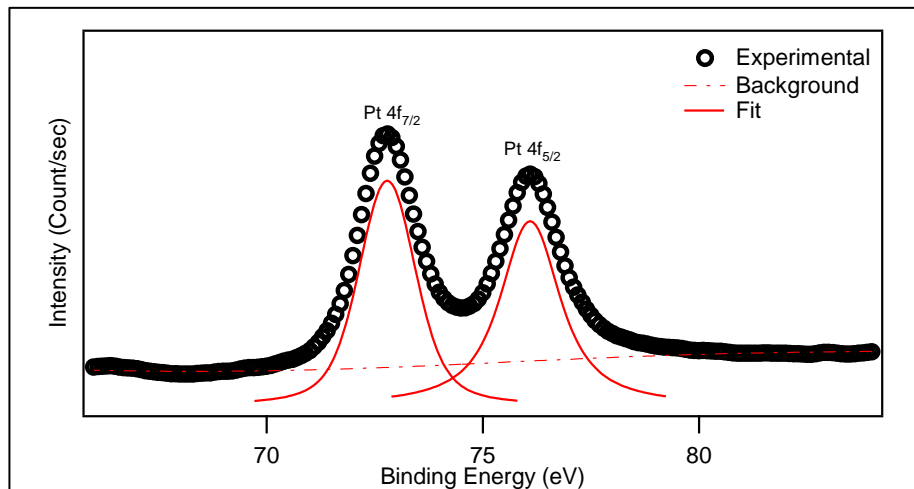
Numunelerin her birinin değişik kimyasal oranlarda olacak olan FM tabakaları hazırlandıktan sonra XPS karakterizasyonları yapıldı. Elde edilen sonuçlardan istenilen kimyasal oranlarda oldukları anlaşıldıktan sonra AFM tabakaları hazırlanmıştır. Analitik Vakum Odası bütün XPS karakterizasyonu işlemleri boyunca  $<10^{-10}$  mbar seviyesinde bulunmuştur. Her bir numunenin FM tabakasının XPS sonuçları elde edilip incelenmiştir.



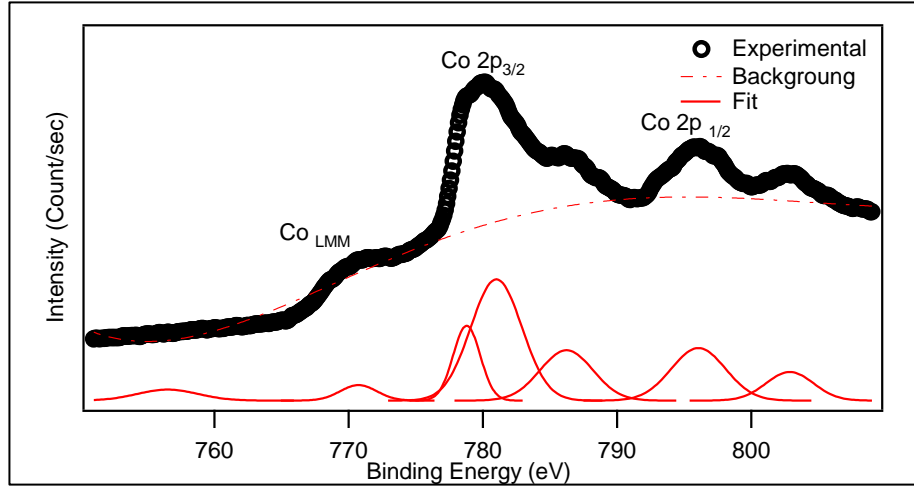
Hazırlanan farklı kimyasal orana sahip numunelerin PtCo tabakalarının XPS analizleri yapılarak tam kimyasal oranları belirlenmiştir. Bu kimyasal oranları tespit etmek için ilk olarak alaşım olan Pt ve Co elementlerinin ayrı ayrı XPS piklerinin dar spektrumları alınmıştır. Daha sonra alt tarafta kalan background çıkarılarak uygun matematiksel fonksiyonlar ile fit işlemi gerçekleştirilmiştir. Ana piklerin altında kalan alan değerleri tespit edilerek hem XPS deney düzeneğine hem de her element için farklı olan Atomik Hassasiyet Faktörü (Atomic Sensitivity Factor, ASF)'ne bölünmüştür. Bu işlemin ardından Pt ve Co elementleri için bulunan değerler birbirlerine oranlanarak incelenen numuneler için kimyasal kompozisyonlar belirlenmiştir. Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'de incelenen numunelerden  $Pt_{0.4}Co_{0.6}$  numunesinin Pt, Co ve CoO XPS spektrumları verilmiştir.



Şekil 6.5:  $Pt_{0.4}Co_{0.6}$  numunesinin Co'a ait XPS spektrumu.



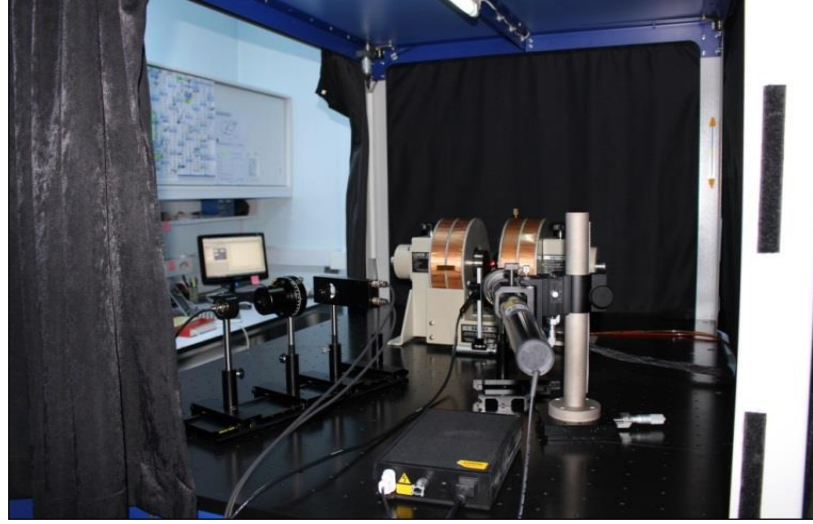
Şekil 6.6:  $Pt_{0.4}Co_{0.6}$  numunesinin Pt'e ait XPS spektrumu.



Şekil 6.7: Pt<sub>0.4</sub>Co<sub>0.6</sub> tabakasının üzerine hazırlanan CoO'ye ait XPS spektrumu.

### 6.3. MOKE Karakterizasyonu

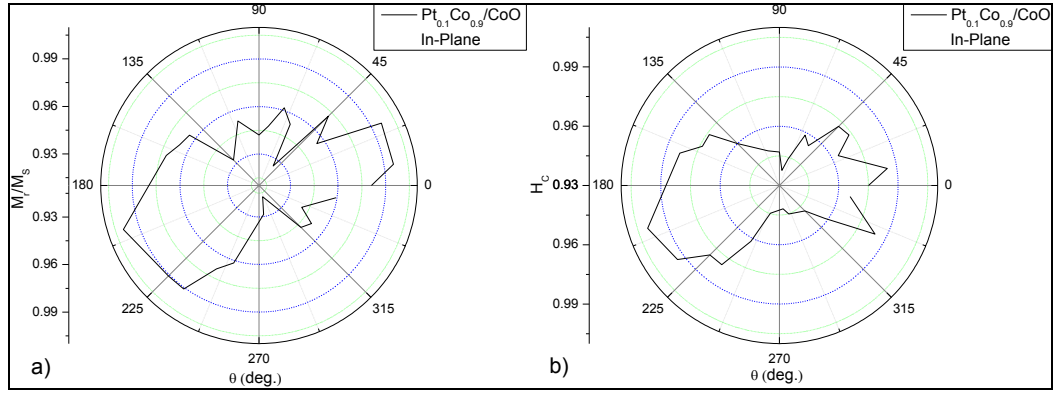
Tez çalışması kapsamında hazırlanan tüm örneklerin oda sıcaklığındaki mıknatıslanma ölçümleri Gebze Teknik Üniversitesi'nde bulunan Şekil 6.8'de görülen Nanosan Smart MOKE marka MOKE deney sisteminde gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde nano yapılı manyetik ince filmlerin mıknatıslanma durumları hakkında bilgi alınabilmektedir. Oda sıcaklığında ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerin mıknatıslanma eğrilerinin belirlenmesi ve manyetik yönelimlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Standart MOKE sistemlerindeki cihazlar bulunmasının yanında 1.6 T lık çift kutuplu elektromıknatıs, 632nm dalgaboyuna sahip HeNe diyot lazer ve 360° dönebilen numune tutucu sistemin ayırt edici cihazlarıdır.



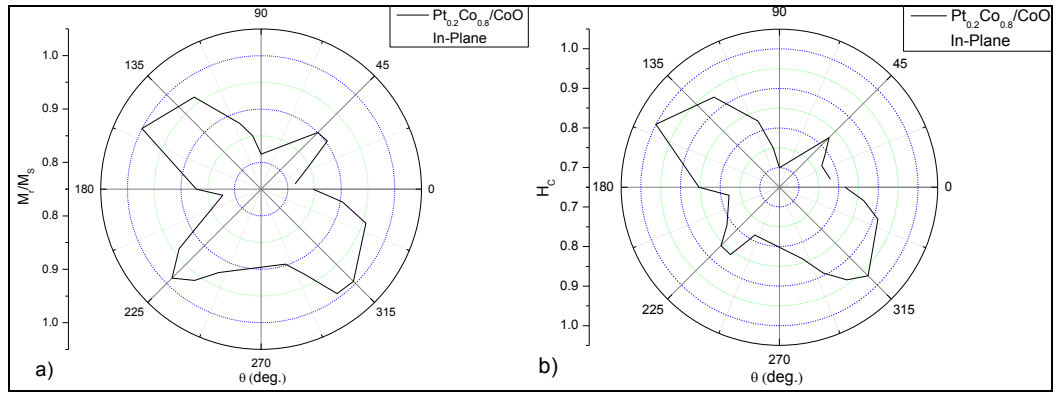
Şekil 6.8: GTÜ MOKE Laboratuvarı'nda kurulu bulunan MOKE sistemi.

$Pt_xCo_{1-x}/CoO$  yapıların MOKE tekniği kullanılarak yapılan karakterizasyon çalışmalarının sonuçları bu bölümde verilmiştir. İlk olarak in-plane ölçümleri yapılmıştır.

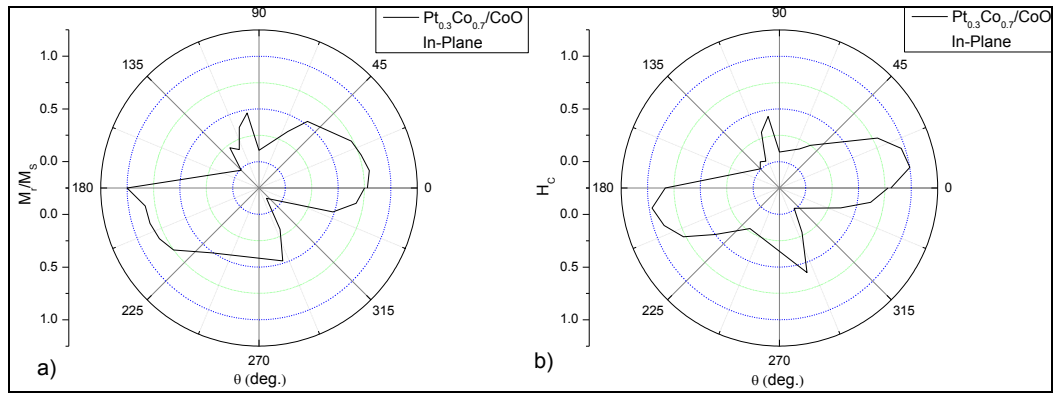
MOKE deney düzeneğinde in-plane ölçümlerine başlamadan önce ilk olarak her bir numune karakterizasyon işlemi için sisteme yerleştirildiği durum  $0^0$  olarak kabul edildiğinde  $45^0$  ve  $90^0$  döndürüldüğü zamanlar da dahil olmak üzere her bir numune için üç deneme ölçümü yapılmıştır ve her açıda farklı koersif alan ve doyum mıknatıslanması değeri gözlemlenmiştir. Bu ölçümlerin taşıdığı anlam bu davranışı gösteren örneklerin bir manyetik anizotropiye sahip olduklarıdır. Bahsedilen bu anizotropinin gözlenmesinden dolayı MOKE tekniği ile daha hassas olarak her bir örnek için açığa bağlı olarak histeresis ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler  $0^0$  den  $360^0$  ye kadar  $9^0$  lik adımlarla gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerin sonucunda da her bir örneğin kolay mıknatıslanma eğilimlerinin olduğu kolay-eksenler (easy-axis) belirlenmiştir. Ayrıca örneğin manyetik anizotropi durumu hakkında bilgiler elde edilmiştir. Bu açığa bağlı ölçümlerin sonucunda elde edilen  $0^0$ ,  $45^0$  ve  $90^0$  ölçümleri başlangıçta anizotropi olup olmadığını belirlemek için yapılan ölçüm sonuçları ile kıyaslanmış ve sonuçların tutarlı olduğu gözlenmiştir. Şekil 6.9 ile Şekil 6.17 arasında MOKE karakterizasyonları sonucunda elde edilen grafikler verilmiştir. İlk grafiklerde kalıcı mıknatıslanma değerinin doyum mıknatıslanma değerine oranının açısız değişim verilmiştir. İkinci grafikte ise koersif alanın açığa bağlı değişimi verilmiştir.



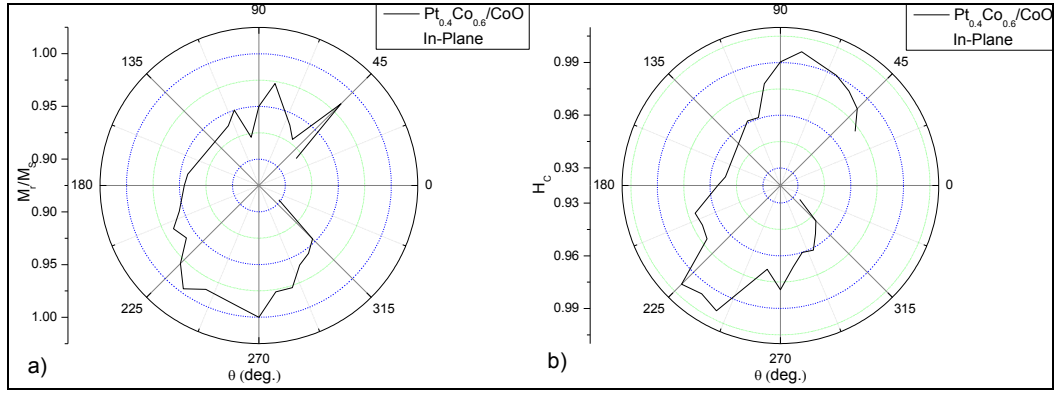
Şekil 6.9:  $Pt_{0.1}Co_{0.9}/CoO$  numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları. a) Açığa bağlı  $M/M_S$  grafiği; b) Açığa bağlı  $H_C$  grafiği.



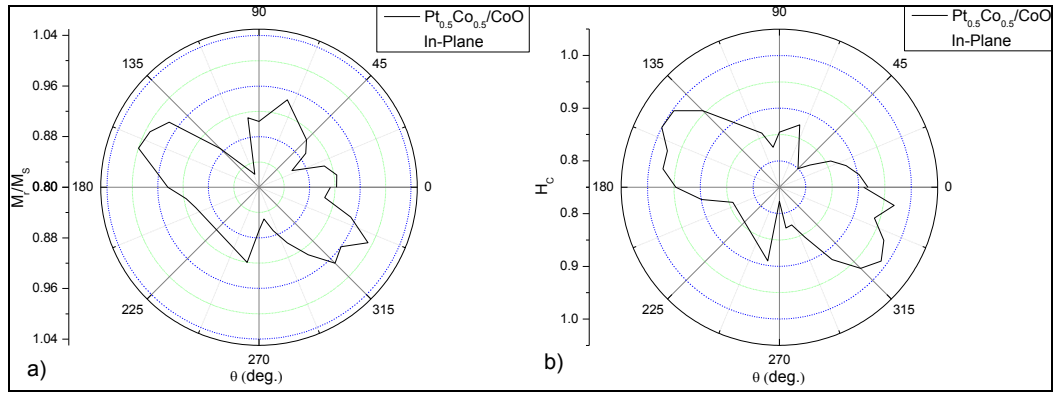
Şekil 6.10:  $Pt_{0.2}Co_{0.8}/CoO$  numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları. a) Açığa bağlı  $M/M_S$  grafiği; b) Açığa bağlı  $H_C$  grafiği.



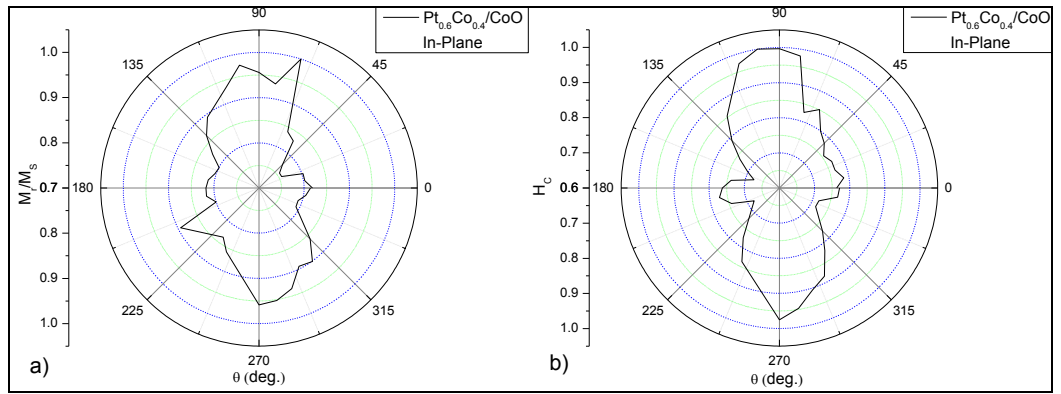
Şekil 6.11:  $Pt_{0.3}Co_{0.7}/CoO$  numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları. a) Açığa bağlı  $M/M_S$  grafiği; b) Açığa bağlı  $H_C$  grafiği.



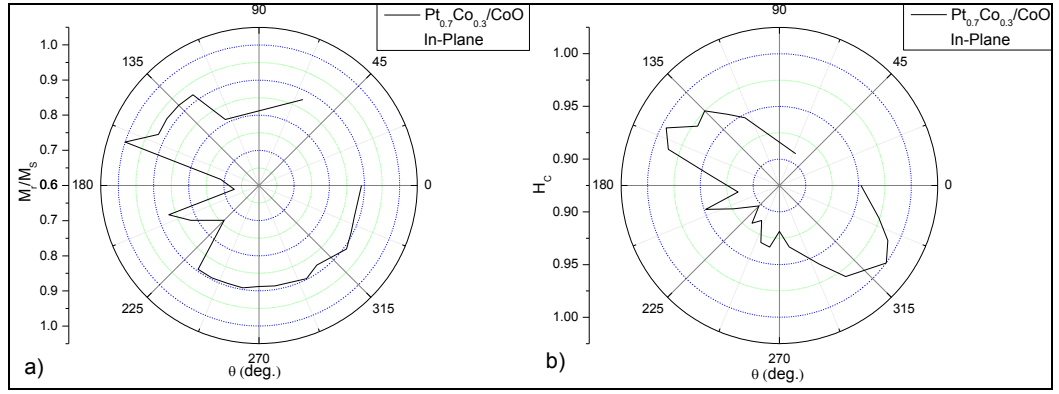
Şekil 6.12:  $Pt_{0.4}Co_{0.6}/CoO$  numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları. a) Açığa bağlı  $M/M_S$  grafiği; b) Açığa bağlı  $H_C$  grafiği.



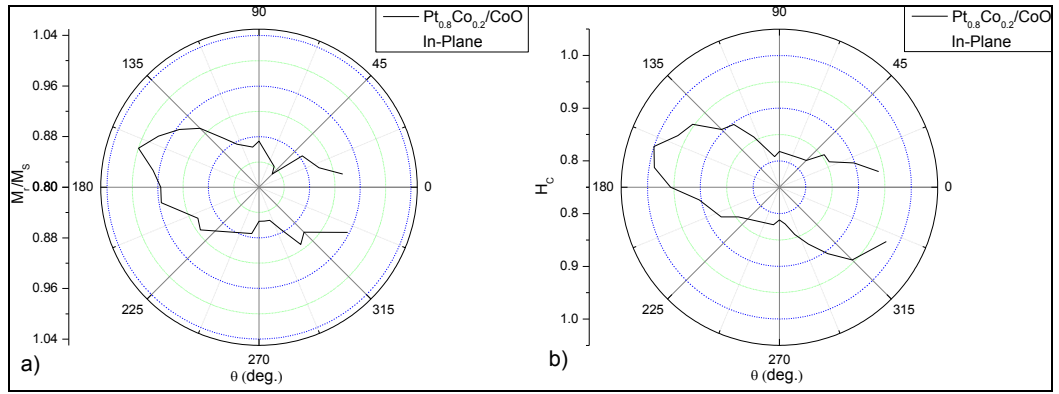
Şekil 6.13:  $Pt_{0.5}Co_{0.5}/CoO$  numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları. a) Açığa bağlı  $M/M_S$  grafiği; b) Açığa bağlı  $H_C$  grafiği.



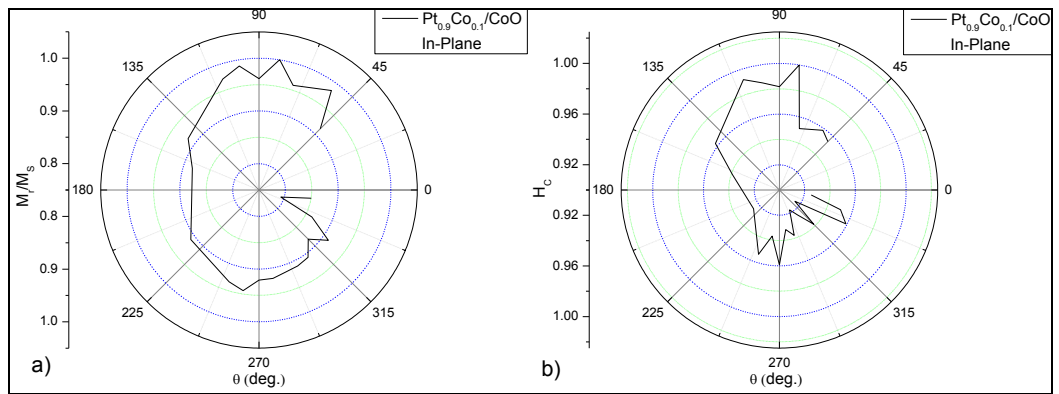
Şekil 6.14:  $Pt_{0.6}Co_{0.4}/CoO$  numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları. a) Açığa bağlı  $M/M_S$  grafiği; b) Açığa bağlı  $H_C$  grafiği.



Şekil 6.15:  $Pt_{0.7}Co_{0.3}/CoO$  numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları. a) Açığa bağlı  $M/M_S$  grafiği; b) Açığa bağlı  $H_C$  grafiği.



Şekil 6.16:  $Pt_{0.8}Co_{0.2}/CoO$  numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları. a) Açığa bağlı  $M/M_S$  grafiği; b) Açığa bağlı  $H_C$  grafiği.



Şekil 6.17:  $Pt_{0.9}Co_{0.1}/CoO$  numunesinin açığa bağlı MOKE ölçüm sonuçları. a) Açığa bağlı  $M/M_S$  grafiği; b) Açığa bağlı  $H_C$  grafiği.

In-Plane ölçümlerden sonra her bir numunenin dik mıknatıslanma (Out of-Plane) ölçümleri yapılmıştır. Bu ikinci grup dik mıknatıslanma ölçümleri sonucunda

her bir numunenin kolay-eksenlerinin In-Plane durumlarda gözleendiği ortaya çıkmıştır.

Bu sonuçlardan iki önemli sonuç elde edilmiştir. Bunlardan ilki tüm örneklerde epitaksiyel olarak hazırlanmalarına rağmen bir manyetik anizotropi vardır. Elde edilen anizotropi türü olarak her bir numunenin tek-eksenli manyetik anizotropiye sahip oldukları söylenebilir. Genel olarak numunelerde 2-fold ve 4-fold tek-eksenli anizotropi bulunmaktadır. Ayrıca MOKE karakterizasyonları sonucunda  $Pt_{0.30}Co_{0.70}/CoO$  ile  $Pt_{0.60}Co_{0.40}/CoO$  numunelerindeki mıknatıslanma değerlerinin diğer numunelere göre gözle görünür değerlerde düşük olduğu gözlenmiştir. İkinci sonuç ise hazırlanan numunelerin Exchange Bias etkisinin ölçülmesi için VSM sistemine yerleştirilmesi sırasında hangi açıyla yerleştirilmeleri gerektiğinin bu ölçümler sonucunda tespit edilmiş olmasıdır.

#### 6.4. VSM Karakterizasyonu

Tez çalışması kapsamında son aşama olarak, hazırlanan bütün örnekler Gebze Teknik Üniversitesi'nde bulunan Quantum Design PPMS9T marka PPMS deney sisteminde VSM ölçümü gerçekleştirildi. Kullanılan PPMS sisteminin mekanizması Şekil 6.18'de gösterilmiştir. Farklı kimyasal oranlara sahip  $Pt_xCo_{1-x}/CoO$  yapıların 10 K ile 300 K arasında Exchange Bias ölçümleri yapılmıştır.



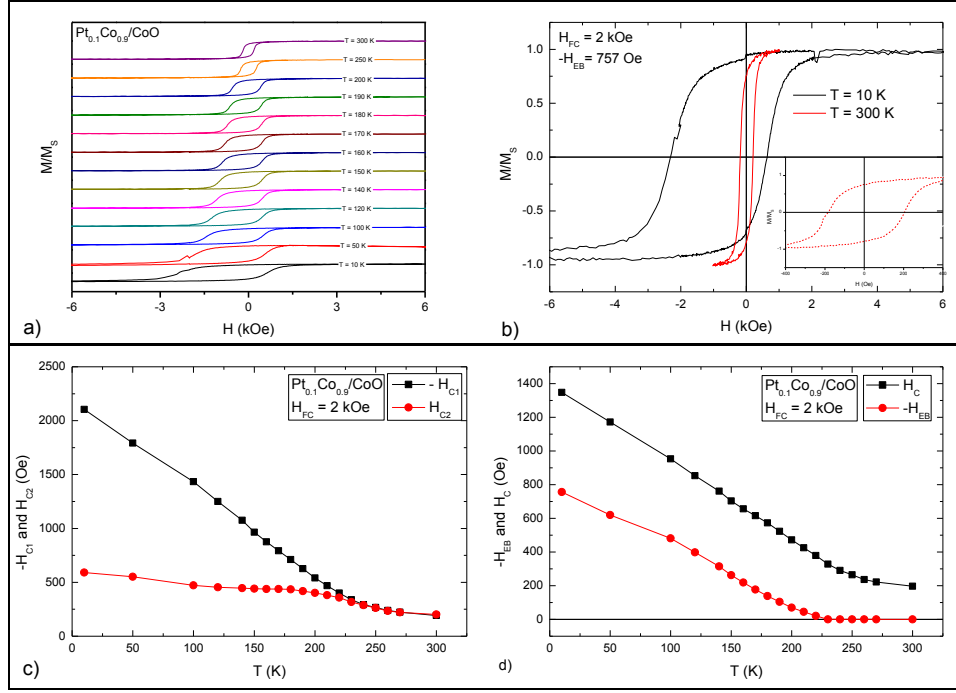
Şekil 6.18: GTÜ PPMS Laboratuvarı'nda kurulu bulunan VSM sistemi.

Hazırlanan tüm numunelerin Exchange Bias özellikleri ve engelleme sıcaklıklarının tespitinde şöyle bir yol izlenmiştir: antiferromanyetik tabakanın CoO olmasından dolayı (Néel sıcaklığın 290 K civarında olması) örneklerin ayrıca ısıtılmasına gerek kalmamıştır. Numuneler bundan dolayı 10 K sıcaklığa 2 kOe alan altında soğutulmuş ve örnek sisteminin bu sıcaklık değerine ulaşmasından sonra dış manyetik alan kapatılarak değişik sıcaklıklarda mıknatıslanma ölçümleri gerçekleştirilerek Exchange Bias etkisinin büyüklüğü ve engelleme sıcaklıkları tespit edilmiştir.

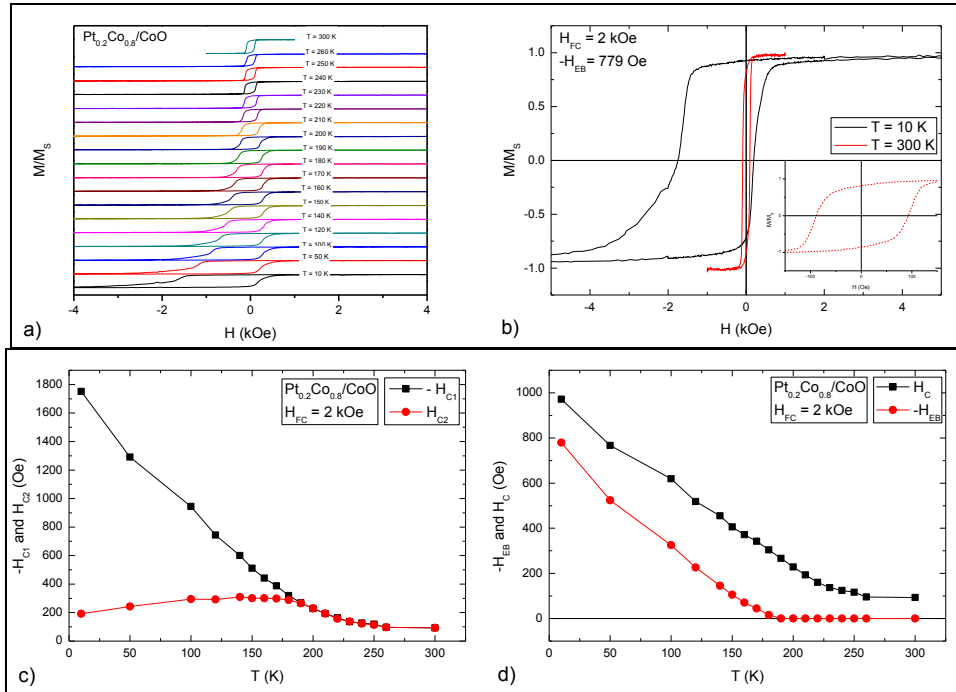
VSM karakterizasyonları sonucunda elde edilen bilgiler aşağıda verilen grafiklerle gösterilmiş ve sonuçlar kısmında ilgili yorumlar yapılmıştır. Karakterizasyonu yapılan numunelerin bazılarının belirlenen sıcaklıklarda elde edilen histeresis eğrileri ilk grafik olarak verilmiştir. Bu grafiklerden sonraki ikinci grafikler ile bütün sıcaklıklardaki histeresis eğrileri verilmemiş olan numunelerin ise ilk grafikleri ise her bir numunenin uygulanan manyetik alana göre en düşük sıcaklıkta ve en yüksek sıcaklık olan oda sıcaklığındaki mıknatıslanma grafikleridir. Bu grafikteki histeresis eğrilerinden 10 K grafiği en düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen dolayısıyla Exchange Bias değerinin en yüksek ölçüldüğü durumu göstermektedir. Diğer grafik ise soğutma işlemine başlanmadan önce oda sıcaklığında (300 K) yapılan ve Exchange Bias etkisinin gözlemlenmediği sıcaklığın grafiğidir. Bu grafik içerisinde bulunan küçük grafik ise, oda sıcaklığında elde edilen histeresis eğrisinin ayrıntılı görüntüsüdür. Bu grafik, oda sıcaklığındaki koersif alanların belirgin olarak gözlenmesi için kullanılmaktadır. Sonraki grafiklerin ilki o numunelerin sıcaklığa bağlı olarak koersif alanlarındaki değişim gösterilmiştir. Bu grafikler kullanılarak ölçülen numunenin engelleme sıcaklığı olan  $T_B$ , Exchange Bias değerinin gözlenmemeye başladığı sıcaklık değeri belirlenmiştir. Son grafiklerde ise incelenen numunenin sıcaklığa bağlı olarak ortalama koersif alanı ile Exchange Bias değerinin bir karşılaştırılması olarak verilmiştir. Bu karşılaştırma sayesinde ise ölçüm sonucu elde ettiğimiz değerlerin tutarlılığını kontrol edilmiştir.

Her bir numunenin incelenmesi sonucunda elde edilen sonuçlar, değişik sıcaklıklar ile kıyaslanmış olup sonuçların tutarlı olduğu gözlenmiştir. Her bir numune için elde edilen sonuçlar Şekil 6.19 ile Şekil 6.26 arasındaki şekillerde verilmiştir.

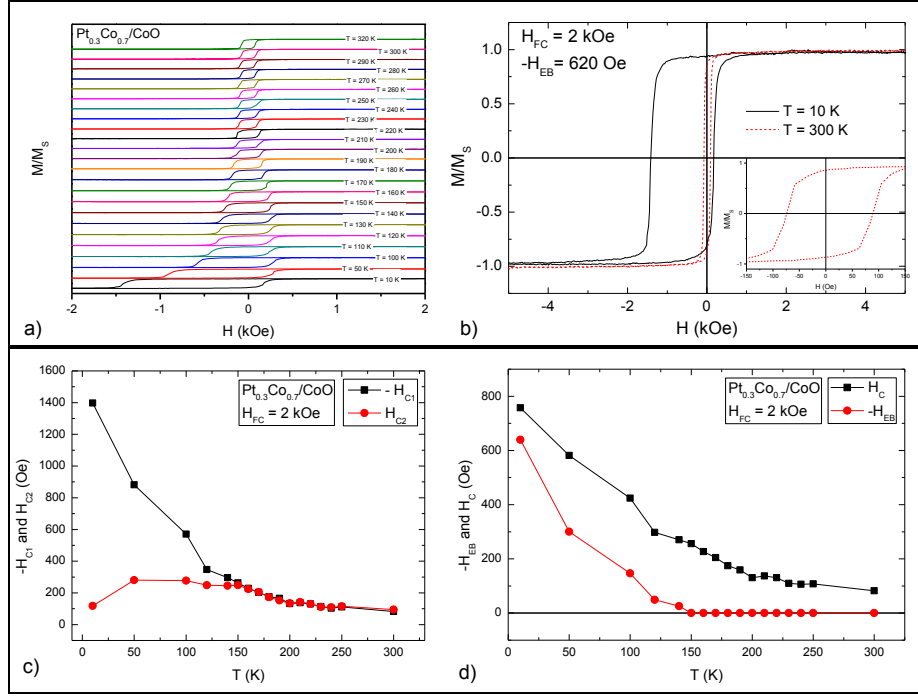




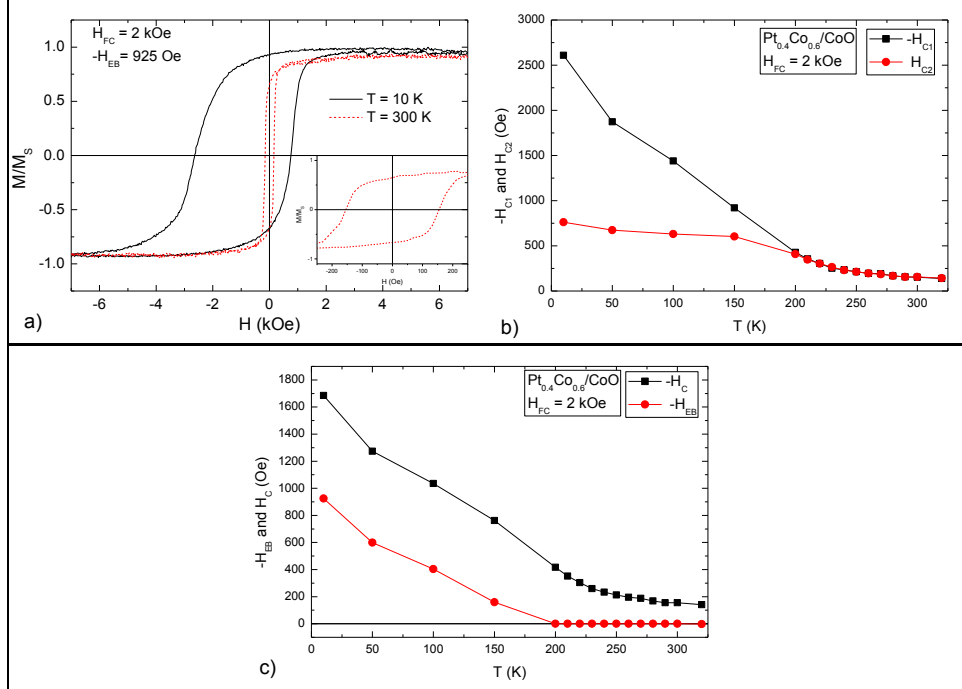
Şekil 6.19: Pt<sub>0.1</sub>Co<sub>0.9</sub>/CoO numunesinin VSM ölçüm sonuçları. a) Bütün sıcaklıklardaki histeresis eğrileri; b) Uygulanan manyetik alana göre 10 K ve 300 K'deki mıknatıslanma değerlerinin karşılaştırılması; c) Sıcaklığa bağlı -H<sub>C1</sub> ve H<sub>C2</sub> grafiği; d) Sıcaklığa bağlı H<sub>C</sub> ve -H<sub>EB</sub> grafiği.



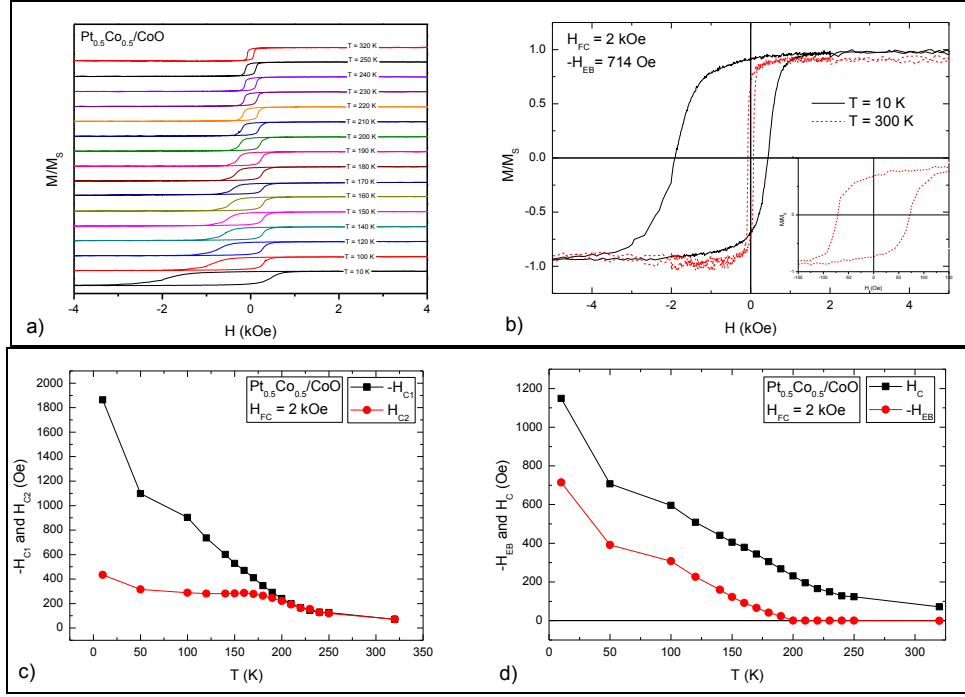
Şekil 6.20: Pt<sub>0.2</sub>Co<sub>0.8</sub>/CoO numunesinin VSM ölçüm sonuçları. a) Bütün sıcaklıklardaki histeresis eğrileri; b) Uygulanan manyetik alana göre 10 K ve 300 K'deki mıknatıslanma değerlerinin karşılaştırılması; c) Sıcaklığa bağlı -H<sub>C1</sub> ve H<sub>C2</sub> grafiği; d) Sıcaklığa bağlı H<sub>C</sub> ve -H<sub>EB</sub> grafiği.



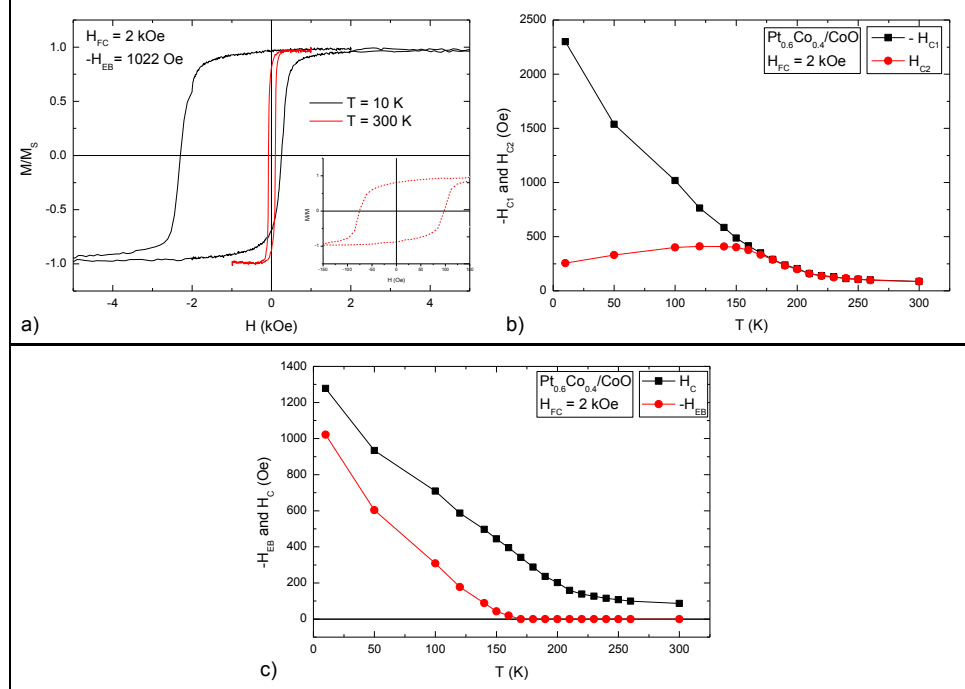
Şekil 6.21:  $Pt_{0.3}Co_{0.7}/CoO$  numunesinin VSM ölçüm sonuçları. a) Bütün sıcaklıklardaki histeresis eğrileri; b) Uygulanan manyetik alana göre 10 K ve 300 K'deki mıknatıslanma değerlerinin karşılaştırılması; c) Sıcaklığa bağlı  $-H_{C1}$  ve  $H_{C2}$  grafiği; d) Sıcaklığa bağlı  $H_C$  ve  $-H_{EB}$  grafiği.



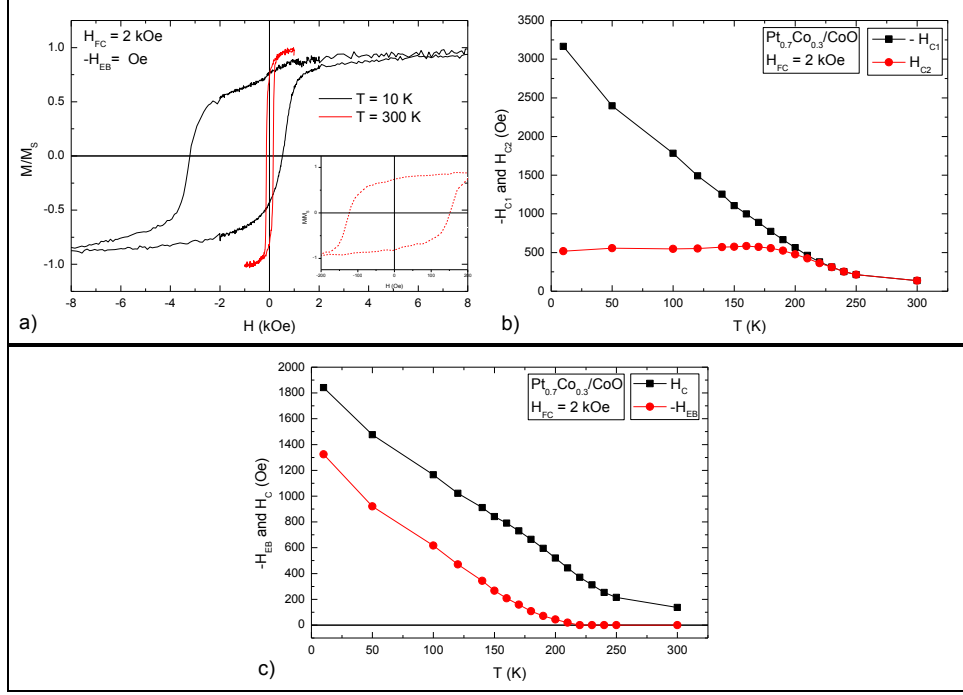
Şekil 6.22:  $Pt_{0.4}Co_{0.6}/CoO$  numunesinin VSM ölçüm sonuçları. a) Uygulanan manyetik alana göre 10 K ve 300 K'deki mıknatıslanma değerlerinin karşılaştırılması; b) Sıcaklığa bağlı  $-H_{C1}$  ve  $H_{C2}$  grafiği; c) Sıcaklığa bağlı  $H_C$  ve  $-H_{EB}$  grafiği.



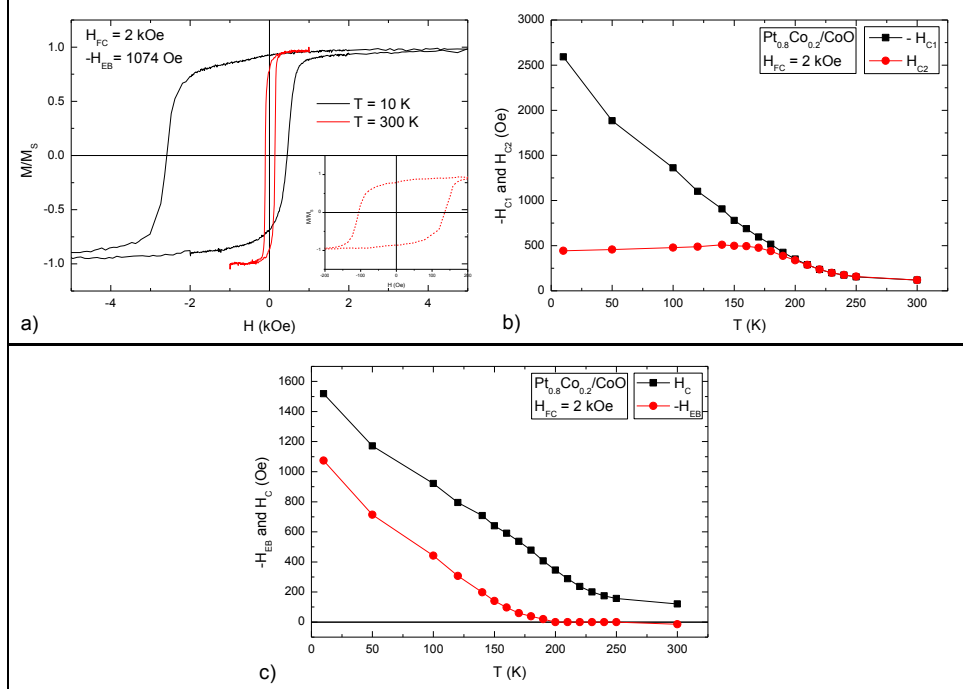
Şekil 6.23:  $Pt_{0.5}Co_{0.5}/CoO$  numunesinin VSM ölçüm sonuçları. a) Bütün sıcaklıklardaki histeresis eğrileri; b) Uygulanan manyetik alana göre 10 K ve 300 K'deki mıknatıslanma değerlerinin karşılaştırılması; c) Sıcaklığa bağlı  $-H_{C1}$  ve  $H_{C2}$  grafiği; d) Sıcaklığa bağlı  $H_C$  ve  $-H_{EB}$  grafiği.



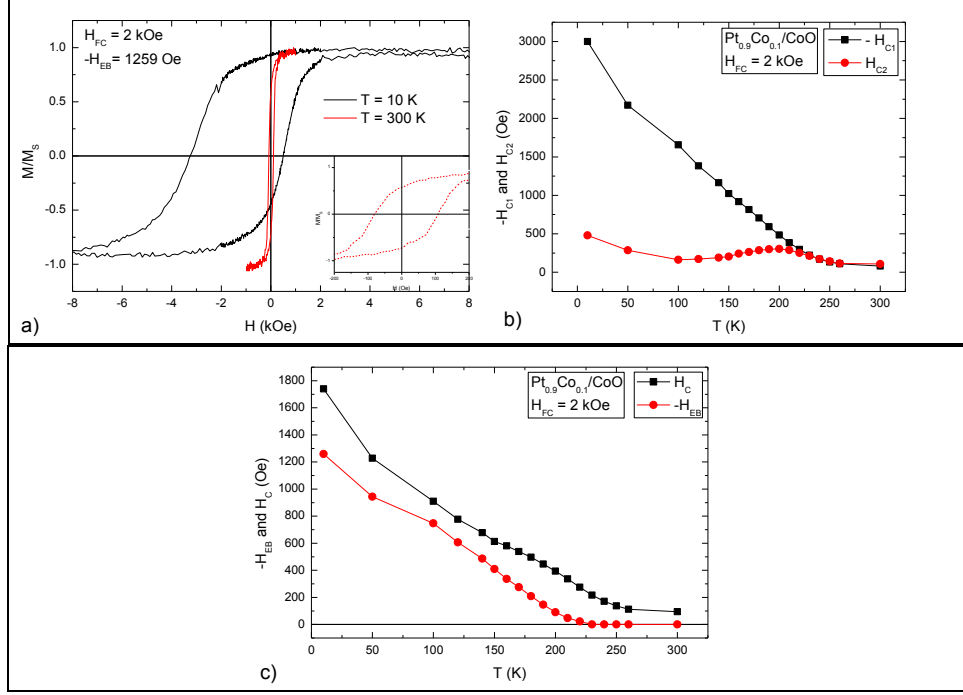
Şekil 6.24:  $Pt_{0.6}Co_{0.4}/CoO$  numunesinin VSM ölçüm sonuçları. a) Uygulanan manyetik alana göre 10 K ve 300 K'deki mıknatıslanma değerlerinin karşılaştırılması; b) Sıcaklığa bağlı  $-H_{C1}$  ve  $H_{C2}$  grafiği; c) Sıcaklığa bağlı  $H_C$  ve  $-H_{EB}$  grafiği.



Şekil 6.25:  $Pt_{0.7}Co_{0.3}/CoO$  numunesinin VSM ölçüm sonuçları. a) Uygulanan manyetik alana göre 10 K ve 300 K'deki mıknatıslanma değerlerinin karşılaştırılması; b) Sıcaklığa bağlı  $-H_{C1}$  ve  $H_{C2}$  grafiği; c) Sıcaklığa bağlı  $H_C$  ve  $-H_{EB}$  grafiği.

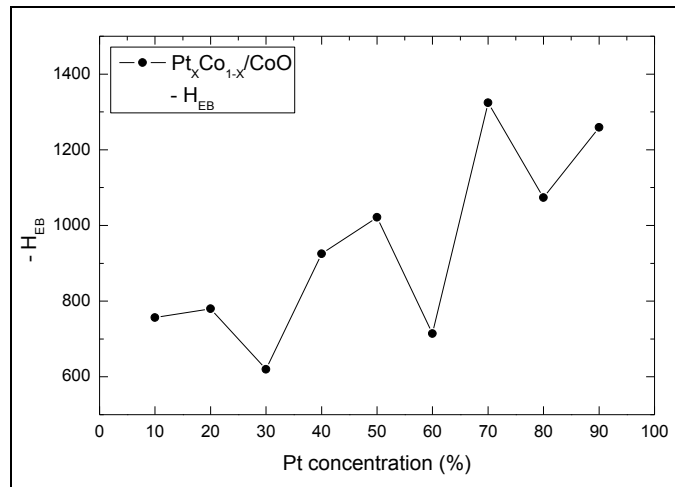


Şekil 6.26:  $Pt_{0.8}Co_{0.2}/CoO$  numunesinin VSM ölçüm sonuçları. a) Uygulanan manyetik alana göre 10 K ve 300 K'deki mıknatıslanma değerlerinin karşılaştırılması; b) Sıcaklığa bağlı  $-H_{C1}$  ve  $H_{C2}$  grafiği; c) Sıcaklığa bağlı  $H_C$  ve  $-H_{EB}$  grafiği.

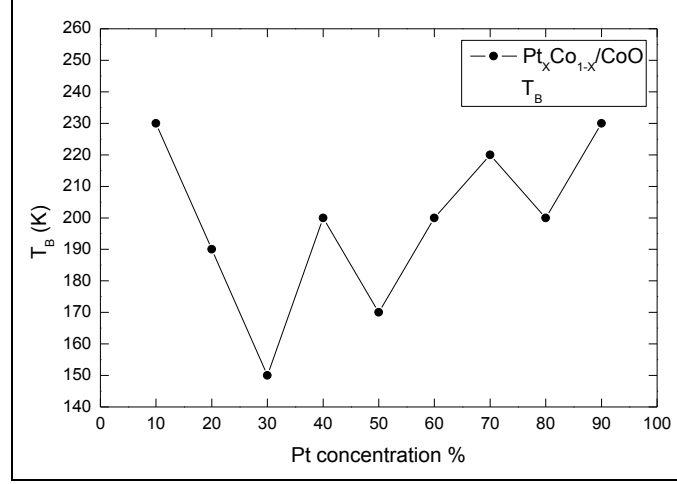


Şekil 6.27: Pt<sub>0,9</sub>Co<sub>0,1</sub>/CoO numunesinin VSM ölçüm sonuçları. a) Uygulanan manyetik alana göre 10 K ve 300 K'deki mıknatıslanma değerlerinin karşılaştırılması; b) Sıcaklığa bağlı -H<sub>C1</sub> ve H<sub>C2</sub> grafiği; c) Sıcaklığa bağlı H<sub>C</sub> ve -H<sub>EB</sub> grafiği.

Her bir numune için VSM karakterizasyonlarından elde edilen sonuçların değerlendirilmesinin ardından her bir numuneden alınan sonuçlar Pt oranına bağlı olarak 10 K'deki exchange bias değerleri ile değerlendirilmesi Şekil 6.28'de engelleme sıcaklığının Pt oranına bağlı değişimi Şekil 6.29'da verilmiştir.



Şekil 6.28: Pt oranına bağlı 10 K'deki exchange bias değerleri.



Şekil 6.29: Pt oranına bağlı olarak engelleme sıcaklıklarındaki değişim.

$Pt_xCo_{1-x}/CoO$  numunelerimizin VSM karakterizasyonları sonucunda Pt oranına göre elde edilen grafiklerden açıkça görülmektedir ki Pt oranı arttıkça exchange bias değerini artmaktadır. PtCo tabaka içerisinde Pt 0.7 oranına geldiğinde exchange bias değeri maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu orandan sonra PtCo tabaka içerisinde Pt'in etkileşime gireceği Co miktarı azaldığı için artış gözlenmemektedir. Pt oranı 0.3 ve 0.6 olduğunda ise bu artma davranışı yerine azalma davranışı görülmektedir. Bu oranlardaki exchange bias değerindeki azalmanın kökeni olarak PtCo yapılarının sahip olduğu iki faz olan  $L1_0$  fazı ve  $L1_2$  fazı arasında bir geçişin olduğu düşünülmektedir. Bu değişimin gözlenen azalma davranışında etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu oranlardaki exchange bias davranışları ile engelleme sıcaklıklarının davranışları da tutarlıdır.

## 7. SONUÇ ve ÖNERİLER

Son bölüm olan bu bölümde tez çalışması sonucunda elde edilen çıktıları genel olarak değerlendirilip bu çalışmanın başka çalışmalara referans olabilmesi için ve bu çalışmadan yola çıkarak  $Pt_xCo_{1-x}/CoO$  yapılarla ilgili olarak nasıl çalışmalar yapılabileceğinden de bahsedilmiştir. İlk olarak izlenen deneysel adımlarla ilgili sonuçlara ve yapılabilecek yeni çalışmalardan bahsedilmiştir. Ardından da tez çalışmasından elde edilen sonuçlara değinilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında numunelerin hazırlanması sürecinde ortaya çıkan sonuçlara değinmek gerekir. İstenen kimyasal oranlara sahip PtCo FM malzemelerin co-sputtering yöntemiyle hazırlanıyor olabilmesi bu çalışma kapsamında gösterilmiş oldu. Motivasyonumuzdaki farklı kimyasal oranlardaki FM malzemelerden oluşan numuneler epitaksiyel olarak hazırlanıp manyetik karakterizasyonlar yapılarak tek kristal yapıya sahip olunması durumunda sonuçlarda bir değişim olup olmadığı ortaya konulabilir.

Motivasyonumuza göre hazırlanan numuneler AFM tabakanın kalınlığı aynı tutularak farklı kalınlık ve farklı kimyasal oranlara sahip PtCo FM tabakalar için de incelenebilir. Böylece farklı kimyasal oranlardaki  $Pt_xCo_{1-x}/CoO$  yapılarda kalınlık azaldıkça manyetik özelliklerin ve exchange bias etkisindeki değişimler incelenebilir.

Yapılan çalışmadaki manyetik karakterizasyonların ilki olan MOKE karakterizasyonu yerine manyetik anizotropi araştırmalarında daha yaygın kullanılan ve elde edilen sonuçları daha hassas olan FMR sistemi de kullanılabilir. FMR tekniği ile farklı ölçüm geometrileri için manyetik anizotropi bilgisi elde edilebilir.

Hazırlanan numunelerdeki sabit kalınlıklardaki FM ve AFM tabakalara sahip  $Pt_xCo_{1-x}/CoO$  yapılarda exchange bias etkisinin ve engelleme sıcaklıklarının FM tabakadaki kimyasal oran değişimine göre nasıl etkilendikleri ve nasıl davranışta buldukları incelenmiştir. Deneysel sonuçlar kısmında da değinildiği gibi exchange bias etkisinin tespit edilme aşamasında kullanılan VSM sisteminde her bir numune sıvı He kullanılarak oda sıcaklığı olan 300 K'den ilk olarak 10 K'e inilip sonrasında belirlenen her sıcaklıklara artarak çıkarken belirlenen her bir sıcaklıkta incelenmiştir. Farklı olarak belirlenen sıcaklıkların her birine 300 K'den inilerek de inceleme yapılabilir. VSM karakterizasyonları sırasında  $Pt_{0.3}Co_{0.7}/CoO$  yapıda bu şekilde de bir inceleme yapılmış olup genel olarak yapılan karakterizasyon sürecinde elde

edilen sonuçlarla kıyaslanmış ve elde edilen sonuçlarla arasında sistemin deneysel hata oranında kalan küçük sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu da her bir sıcaklığa 300 K'den inilse de ilk sefer minimum sıcaklığa inilip sonra basamak basamak son sıcaklığa kadar çıkılsa da elde edilen sonuçlarda bir fark olmadığı sonucunu ortaya çıkarmıştır. İncelenecek sıcaklık değerleri minimum 10 K olacak şekilde çalışma esnasında belirlenmiştir.

VSM karakterizasyonu sonucunda Pt oranı arttıkça exchange bias etkisinin gözlemlendiği değerlerde bir artış olmaktadır. Bunun sebebi olarak da Co ile etkileşime giren Pt'in, Co'nun mıknatıslanma değerini arttırmasıdır. Bu artış sırasında bir osilasyon hareketi olduğu gözlemlenmiştir. Pt konsantrasyonuna bağlı olarak Pt'in 0.3, 0.6 ve 0.8 olduğu numunelerde bu osilasyon gözlemlenmiştir. 0.3 ve 0.6 oranlarında gözlenen osilasyonlar PtCo yapıların sahip oldukları  $L1_0$  fazında gözlenebilen mıknatıslanma değerlerindeki farklılıklar olup bu oranlarda PtCo yapıların diğer bir fazı olan  $L1_2$  fazına geçişten kaynaklandığı düşünülmektedir. Pt oranının 0.8 olduğu durumdaki azalma ise en yüksek exchange bias değerinin gözlemlendiği 0.7 oranından sonra gözlemlendiği için Pt ile Co'nun etkileşimleri azaldığından dolayı olduğu düşünülmektedir. Buna rağmen numunelerin aynı vakum şartlarında hazırlanmasına dikkat edilmesi için alttaşların hepsi aynı anda hazırlanacak sisteme yüklenmiş olup XPS karakterizasyonları aşamasında da numunelerin ayrı ayrı veya bir arada dış ortamdaki etkilenmemeleri için çalışılmış olsa da tabaka kalınlıklarında olabilecek küçük sapmaların exchange bias değerini etkilemiş olabileceği de düşünülmektedir. Bununla birlikte exchange bias değerleri 0.2, 0.5 ve 0.7 oranlarında osilasyonda artış gözlemlenmektedir. Yapılan bu tez çalışması sonucunda en yüksek exchange bias değerinin 0.7 oranında olduğu gözlemlenmiştir.

Hazırlanan numunelerdeki PtCo tabakaların kristal yapıda oldukları düşünülmektedir. Yapılan XRD karakterizasyon sonuçları da bunu desteklemektedir. Literatürde bulunan PtCo yapılarla ilgili üç faz bölgesi tanımlanmıştır.  $Pt_xCo_{1-x}$  yapılarda  $25 < x < 35$  ve  $75 < x < 85$  aralıkları için  $L1_2$  fazı ile  $45 < x < 55$  aralığı içinse  $L1_0$  fazı tanımlanmıştır [Antonov et al., 2004]. Her fazın sahip olduğu kristalografik özellikler farklıdır. Bunun sonucu olarak da incelenen numunelerde bu aralıktaki olan numunelerin manyetik anizotropilerinde farklılıklar görülmüştür. Bu sonuçlara rağmen numunelerin polikristal yapıda oldukları da düşünülmektedir. Bunun nedeni olarak da numunelerde gözlemlenen manyetik anizotropinin numunelerin hazırlanma sürecinde kullanılan magnetron sputtering deposition sisteminin manyetik alanından



kaynaklanan manyetik alanın numunelerin sahip olduğu manyetik anizotropiler üzerinde etkisi olup optik anizotropiye de sebep olabilme ihtimalleridir.

Kimyasal orana bağılı olarak engelleme sıcaklığında değişiminde de exchange bias etkisindeki davranışta gözlemlendiği gibi bir osilasyon gözlenmiştir. İncelenen numunelerde engelleme sıcaklığı 150 K ile 230 K arasında değerlere sahip olduğu gözlenmiştir. Engelleme sıcaklığı AFM tabakanın kalınlığına göre değişim göstermektedir. AFM tabakanın kalınlığı arttıkça engelleme sıcaklığı AFM'nin Néel sıcaklığına yaklaşmaktadır [Radu, 2003]. Literatürde bulunan  $Pt_{0.4}Co_{0.6}/CoO$  ve  $Pt_{0.55}Co_{0.45}/CoO$  numuneleri için yapılan çalışmadaki sonuçlar ile tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar tutarlılık göstermektedir [Demirci et al., 2014].

Oda sıcaklığında MOKE tekniği kullanılarak yapılan karakterizasyonlarda her bir numunenin VSM karakterizasyonunda kullanılmak üzere kolay-eksen mıknatıslanma yönelimleri belirlenmiştir. Bu karakterizasyon sonucunda Pt konsantrasyonuna bağılı olarak her bir numunenin kolay-eksen yönelimlerinde doyum mıknatıslanma değerlerinin, exchange bias etkilerinin ve engelleme sıcaklıklarının karşılaştırması yapılmıştır. Böylece aynı Pt oranına bağılı olarak aynı değerlerde bir osilasyon davranışı belirlenmiştir.

Bütün bu elde edilen sonuçlar kapsamında tez çalışmasının başlangıcında sahip olduğumuz hedeflerin hepsine ulaşılmıştır. Literatürdeki belirtilmiş olan eksikler ilk aşama olarak konferanslarda sunum olarak kısa vadede giderilmeye başlanmış olup tez çalışmasının sonunda da farklı makaleler ile literatüre yazılı olarak da kazandırılma çalışmaları devam etmektedir. Tez çalışmasının gerek teorik olarak yapılan açıklamalarla gerek kullanılan tekniklerle gerek elde edilen sonuçlarla gerekse de  $Pt_xCo_{1-x}/CoO$  yapılar ile yapılabilecek çalışmalar hakkındaki bilgilerle bundan sonraki çalışmalara ışık tutup bilimsel olarak referans olabilme potansiyeli yüksektir.

## KAYNAKLAR

Abrudan R. M., (2007), "Growth, Structure and Magnetic Properties of Single Crystalline Fe/CoO/Ag (001) Bilayers", Doctorate Thesis, Freie Universitat.

Akdoğan N., (2013), "Manyetik Malzemeler Ders Notları", Gebze Teknik Üniversitesi.

Akdoğan N., Yağmur A., Öztürk M., Demirci E., Öztürk O., Erkovan M., (2015), "Interface Induced Manipulation of Perpendicular Exchange Bias in Pt/Co/(Pt,Cr)/CoO Thin Films", Journal of Magnetism and Magnetic Material, 373, 120-123.

Antonov V., Harmon B., Yaresko A., (2004), "Electronic Structure and Magneto-Optical Properties of Solids", 1st Edition, Kluwer Academic Publishers.

Ashcoft N. W., Mermin N. D., (1976), "Solid State Physics", 1st Edition, Saunders College.

Baibich M. N., Broto J. M., Fert A., Nguyen Van Dau F., Petroff F., Eitenne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J., (1988), "Giant Magnetoresistance of (001) Fe/ (001) Cr Magnetic Superlattices", Physical Review Letters, 61 (21), 2472-2475.

Beiser A., (2008), "Modern Fiziğin Kavramları", 1. Baskı, Akademi Yayıncılık.

Binasch G., Grünberg P., Saurenbach F., Zinn W., (1989), "Enhanced Magnetoresistance in Layered Magnetic Structures with Antiferromagnetic Interlayer Exchange", Physical Review B, 39 (7), 4828-4830.

Brown G., Kraczek B., Janotti A., Schulthess T. C., Stocks G. M., Johnson D. D., (2003), "Competition Between Ferromagnetism and Antiferromagnetism in FePt", Physical Review B , 052405, 1-7.

Cullity B. D., Graham C. D., (2009), "Introduction to Magnetic Materials", 1st Edition, Wiley.

de Boer B. M., Kahlman J. A. H. M., Jansen T. P. G. H., Duric H., Veen J., (2007), "An Integrated and Sensitive Detection Platform for Magneto-resistive Biosensors", Biosensors and Bioelectronics, 22, 2366-2370.

Demirci E., Öztürk M., Sınır E., Ulucan U., Akdoğan N., Öztürk O., Erkovan M., (2014), "Temperature-dependent Exchange Bias Properties of PolyCrystalline PtxCo1-x/CoO Bilayers", Thin Solid Films, 550, 595–601.

Design Q., (2004), "VSM Option User Manual", 1st Edition, Quantum Design.

Einstein A., (1905), "Über Einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes Betreffenden Heuristischen Gesichtspunkt", Annalen der Physik, 322, 132-148.

Erkovan M. (2010), “Ultra İnce Geçiş Metal Filmlerin (PtCo, Py/Cr) Kristalografik Yapıları ve Manyetik Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

Erkovan M., Öztürk S. T., Topkaya R., Özdemir M., Aktaş B., Öztürk O., (2011), “Ferromagnetic Resonance Investigation of Py/Cr Multilayer System”, Journal of Applied Physics, 110, 023908.

Faraday M., (1845), “Faraday’s Diary”, 1st Edition, George Bell and Sons.

Ferreira H. A., Graham D. L., Freitas P. P., and Cabral J. M. S., (2003), “Biodetection Using Magnetically Labeled Biomolecules and Arrays of Spin Valve Sensors (Invited)”, Journal of Applied Physics, 93 (7281), 7281-7286.

Foner, S., (1959), “Versatile and Sensitive Vibrating Sample Magnetometer, The Review of Scientific. Instruments, 30, 548-557.

Guedes A., Jaramillo G., Buffa C., Vigevani G., Cardoso S., Leitão D. C., Freitas P. P., and Horsley D. A., (2012), “Towards picoTesla Magnetic Field Detection Using a GMR-MEMS Hybrid Device”, IEEE Transaction on Magnetics, 48 (11), 4115-4118.

Hertz H., (1887), “Ueber Einen Einfluss des Ultravioletten Lichtes auf die Electriche Entladung”, Annalen der Physik, 267, 983-1000.

Kerr J., (1878), “On Reflection of Polarized Light from the Equatorial Surface of a Magnet”, Philosophical Magazine, 5 (30), 161-177.

Kitakami O., Sato H., Shimada Y., Sato F., Tanaka M., (1997), “Size Effect on the Crystal Phase of Cobalt Fine Particles, Physical Review B, 56 (21), 13849-13853.

Klemmer T., Hoydick D., Okumura H., Zhang B., Soffa W. A., (1995), “Magnetic Hardening and Coercivity Mechanism in  $L1_0$  Ordered FePd Ferromagnets”, Scripta Metallurgica and Materialia, 33 (10), 1793-1805.

Koç N., (2008), “ $Co_{0.7}Pt_{0.3}$  İnce Filminin Yüzey ve Manyetik Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

Langevin P., (1905), “Etude expérimentale de diverses radiations, applications de la théorie des électrons”, Annales de Chemie et de Physique, 5, 70–127.

Malozemoff A., (1987), “Random-field Model of Exchange Anisotropy at Rough Ferromagnetic-Antiferromagnetic Interfaces”, Physical Review B, 35, 3679-3682.

Malozemoff A., (1988), “Mechanisms of Exchange Anisotropy”, Journal of Applied Physics, 63, 3874-3879.

Mauri D., Siegmann H., Bagus P., Kay E., (1987), “Simple Model for Thin Ferromagnetic Films Exchange Coupled to an Antiferromagnetic Substrate”, Journal of Applied Physics, 62, 3047-3049.

- Meiklejohn W. H., Bean C. P., (1956), "New Magnetic Anisotropy", *Physical Review*, 102 (5), 1413-1414.
- Meiklejohn W. H., Bean C. P., (1957), "New Magnetic Anisotropy", *Physical Review*, 105 (3), 904-913.
- Néel L.,(1948), "Propriétés Magnétiques des Ferrites: Ferrimagnétisme et Antiferromagnétisme", *Annales de Chimie et de Physique*, 3, 137-198.
- Néel L., (1952), "Antiferromagnetism and Ferrimagnetism", *Proceedings of the Physical Society Section A*, 65, 869-885.
- Nie X., Jiang J. C., Meletis I. E., Tung T. D., Spinu L., (2003), "Synthesis, Structure, and Magnetic Properties of  $\epsilon$ -Co Nanocrystalline Thin Films and Annealing Effects", *Journal of Applied Physics*, 93 (8), 4750-4755.
- Nogués J., Schuller I. K., (1999), "Exchange Bias", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 192, 203-232.
- Nowak U., Usadel K. D., Keller J., Miltényi P., Beschoten B., Güntherodt G., (2002), "Domain State Model for Exchange Bias. I. Theory", *Physical Review B*, 66, 014430-014438.
- Ok H. N., Mullen J. G., (1968), "Evidence of Two Forms of Cobaltous Oxide", *Physical Review*, 168, 550-562.
- Öztürk M., Sınır E., Demirci E., Erkovan M., Öztürk O., and Akdoğan N., (2012), "Exchange Bias Properties of  $[\text{Co}/\text{CoO}]_n$  Multilayers", *Journal of Applied Physics*, 112 (093911), 1-7.
- Öztürk M., (2011), "Manyetik Malzemelerde Kaydırma Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Parlak U., (2014), "Ni/CoO İnce Filmlerde Exchange Bias Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Petrucci R. H., Harwood W. S., Herring F. G., (2005), "Genel Kimya İlkeler ve Modern Uygulamalar 1", 8. Baskı, Palme Yayıncılık.
- Powers N., Yan M. L., Gao L., Liou S. H., Sellmyer D. J., (2002), "Magnetic Intergranular Interaction in Nanocomposite  $\text{Co}_x\text{Pt}_{100-x}$ : Thin Films", *Journal of Applied Physics*, 91(10), 8641-8643.
- Qiu, Z. Q., Bader, S. D., (1999), "Surface Magneto-optic Kerr Effect (SMOKE)", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 200 (1), 664-678.
- Radu F., (2005), "Fundamental Aspects of Exchange Bias", Doctorate Thesis, Ruhr University.

Sbiaa R., Meng H., Piramanayagam S. N., (2011), "Materials with Perpendicular Magnetic Anisotropy for Magnetic Random Access Memory", *Physica Status Solidi Rapid Research Letters*, 5 (12), 413–419.

Sheehan P. E., Edelstein R. L., Tamanaha C. R., Whitman L. J., (2003), "A Simple Pen-spotting Method for Arraying Biomolecules on SolidSubstrates", *Biosensors and Bioelectronics*, 18, 1455-1459.

Seehra M., Wijn H. P. J., (1992), "Various Other Oxides" 1st Edition, Springer.

Sellmyer D. J., "Applied Physics: Strong Magnets by Self-assembly", (2002) *Nature*, 420, 374-375.

Skomski R., (2003), "Nanomagnetics", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 15 (20), R841.

Sun S., Murray C. B., (1999), "Synthesis of Monodisperse Cobalt Nanocrystals and Their Assembly into Magnetic Superlattices", *Journal of Applied Physics*, 85 (8), 4325-4330.

Takano K., Kodama R., Berkowitz A., Cao W., Thomas G., (1997), "Interfacial Uncompensated Antiferromagnetic Spins: Role in Unidirectional Anisotropy in Polycrystalline Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>/CoO Bilayers", *Physical Review Letters*, 79, 1130-1133.

Takano K., Kodama R., Berkowitz A., Cao W., Thomas G., (1998), "Role of Interfacial Uncompensated Antiferromagnetic Spins in Unidirectional Anisotropy in Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>/CoO Bilayers", *Journal of Applied Physics*, 83, 6888-6892.

Tarımcı Ç., Sarı H., (2006), "Vakum Tekniği", 1. Baskı, Seçkin Yayıncılık.

Topkaya R., Erkovan M., Öztürk A., Öztürk O., Aktaş B., Özdemir M., (2010), "Ferromagnetic Resonance Studies of Exchange Coupled Ultrathin Py/Cr/Py Trilayers", *Journal of Applied Physics*, 108, 023910.

Timm C., (2011), "Theory of Magnetism", 1st Edition, International Max Planck Research School for Dynamical Processes in Atoms, Molecules and Solids.

Treutler C. P. O., (2001), "Magnetic Sensors for Automotive Applications", *Sensors and Actuators A*, 91, 2-6.

Tsang C. H., Fontana Jr. R. E., Lin T., Heim D. E., Gurney B. A., Williams M. L., (1998), "Design, Fabrication, and Performance of Spin-valve Read Heads for Magnetic Recording Applications", *IBM Journal of Research and Development*, 42 (1), 103-116.

Wilkes J. A., (2000), "The Experimental Ultrafast Magneto-Optical Kerr Effect", Master Thesis, College of William and Mary.

## ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Emre Aköz 1987 yılında İstanbul’da doğmuştur. İlköğretim eğitimine İstanbul ili Kadıköy ilçesinde bulunan Fehmi Ekşioğlu İlköğretim Okulu’nda başladı ve derece ile bitirdi. Lise eğitimini İstanbul ili Kadıköy ilçesinde bulunan Göztepe İhsan Kurşunoğlu Lisesi’nde (Yabancı Dil Ağırlıklı, YDA) sürdürdü. 2007 yılında başladığı Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (GYTE) Fen Fakültesi Fizik bölümünü 2012 yılında bitirdi. Lisans eğitimi süresince Anadolu Üniversitesi (AÜ) İşletme Fakültesi İşletme bölümünde de uzaktan eğitim gördü ve 2015 yılında mezun oldu. Fizik bölümündeki lisans eğitimini tamamladığı aynı yıl içerisinde yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi’nde Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda başladı. Disiplinler arası çalışmaların yaygınlaşmasından dolayı aynı enstitüde Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı’nda da yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Yüksek lisans eğitimi boyunca bursiyer olarak TÜBİTAK destekli çeşitli projelerin çalışmalarında yer aldı.