

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STT-MRAM UYGULAMALARINA YÖNELİK P-MTJ
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

FATMA YILMAZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2022

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STT-MRAM UYGULAMALARINA YÖNELİK P-MTJ
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

FATMA YILMAZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. OSMAN ÖZTÜRK

GEBZE
2022

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**P-MTJ FABRICATION AND
CHARACTERIZATION FOR STT-MRAM
APPLICATIONS**

FATMA YILMAZ

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

**THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. OSMAN ÖZTÜRK**

**GEBZE
2022**

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

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 30/06/2022 tarih ve 2022/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04/07/2022 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Fatma YILMAZ'ın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Osman ÖZTÜRK

ÜYE

: Prof.Dr. Mevlüt KARABULUT

ÜYE

: Prof.Dr. Mustafa ALEVLİ

ONAY

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

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

MTJ'lerin veri depolama, veri işleme ve sensör uygulamalarında kullanılmaya başlanması ile MTJ katmanı hazırlamaya yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Yapılan bir çok çalışma IP-MTJ'lerde ölçeklendirilebilirliğin sınıra dayandığını göstermektedir. Bu durum daha küçük alana daha fazla bilgi depolamayı amaçlayan hafıza cihazlarında P-MTJ'nin önemini artırmıştır.

Bu çalışmada MTJ'nin üç temel tabakası olan sabit, serbest ve yalıtkan tabaka ayrı ayrı çalışıldıktan sonra bir araya getirilerek P-MTJ üretimi gerçekleştirilmiştir. Dik manyetik anizotropiye sahip sabit katman oluşturmak ve exchange biasın açıklanamayan noktalarına kapı aralamak amacı ile CoO kalınlığına bağlı exchange bias değişimi incelenmiştir. Manyetik saçırma tekniği kullanılarak antiferromanyetik malzeme olan CoO(x) katmanının üzerine, ferromanyetik [Pt(10)/Co(5)]_{x3} katmanı XPS kontrollü büyütülmüştür. Hazırlanan manyetik ince filmlerin kolay eksenleri MOKE tekniği kullanılarak belirlenmiş, AHE ve VSM teknikleri kullanılarak düşük sıcaklıklarda elde edilen mıknatıslanma eğrilerinden exchange bias değerleri hesaplanmıştır. Serbest tabaka olarak kullanmak amacı ile manyetik saçırma tekniği kullanılarak Pt/Co yapısı, Pt kaplama gücüne bağlı olarak büyütülmüştür. Hazırlanan çok katlı ince filmlerin kolay eksenleri ve sıfırlayıcı alan değerlerindeki değişim MOKE tekniği kullanılarak gözlemlenmiştir. Yalıtkan tabaka olarak MgO'e karar verilmiştir. Manyetik saçırma tekniği kullanılarak kaplama gücüne bağlı MgO büyütülmüştür. Her bir kaplama gücü için elementel oran hesabı XPS tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Son olarak ayrı ayrı çalışılan bu üç tabaka birlikte büyütülerek, P-MTJ yapısı hazırlanmıştır. Hazırlanan P-MTJ'nin VSM tekniği kullanılarak örnek düzlemine dik geometride RT ve LT mıknatıslanma eğrileri kaydedilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda iki ferromanyetik katmanın manyetik olarak bağımsız hareket ettiğini ifade eden adımli histeresis eğrisi gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Exchange bias, XPS, VSM, STT-MRAM, P-MTJ, TMR.

SUMMARY

With the use of MTJs in data storage, data processing and sensor applications, studies on preparing the MTJ stack have gained momentum. Many studies show that the scalability of IP-MTJs is at the limit. This has increased the importance of the role of P-MTJ in memory devices that the potential to improve the storage density.

In this study, all three layers of MTJ, which are pinned, free and insulator layers, were studied separately and then combined to produce P-MTJ. Initially, in order to produce a pinned layer with perpendicular magnetic anisotropy and to open the door to the unexplained points of exchange bias, the exchange bias change dependence on the CoO thickness was investigated. By using the magnetron sputter technique, the ferromagnetic [Pt(10)/Co(5)]_{x3} layer was grown on the antiferromagnetic CoO(x) layer under XPS control. The easy axes of the prepared magnetic thin films were determined using the MOKE technique, and the exchange bias effect were calculated from the magnetization curves obtained at low temperatures using AHE and VSM techniques. In order to use as free layer, the Pt/Co multilayer was grown with the different Pt sputtering powers to be able to optimize both hysteresis squareness and coercivity parameters. The easy axes and change in coercive field of the prepared multilayer thin films were obtained using the MOKE technique. MgO was chosen as the insulator layer. Using the magnetron sputtering method, MgO was grown with varying sputtering power also for optimizing the layer morphology and chemical stability. Chemical state of the films regarding to coating powers was determined using XPS technique. Finally, the complete P-MTJ structure was prepared by combining these three layers, which were studied separately. For P-MTJ, RT and LT magnetic hysteresis curves were recorded in geometry perpendicular to the sample plane using the VSM technique. As a result of the measurements made, a stepped hysteresis curve was observed, which expresses that the two ferromagnetic layers move independently magnetically.

Key Words: Exchange bias, XPS, VSM, STT-MRAM, P-MTJ, TMR.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Osman ÖZTÜRK'e çok teşekkür ederim.

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli arkadaşlarım Dr. Baha SAKAR, Öğr.Gör. Melek T. ÖCAL, Araş.Gör. Ayşe SÖNMEZ, Furkan ÖZTÜRK, Ali Kemal MAK'a çok teşekkür ederim.

Tanıştığımız günden itibaren hastalıkta sağlıkta, iyi günde kötü günde, güneşli günde yağmurda, ağladığımda güldüğümde, kahvemiz varken ve kahvemiz bitmişken hep yanımda olan ve her türlü konuyu tartışabildiğim canım arkadaşlarım Araş.Gör. İlker ÖZTOPRAK ve Ceyhun YILDIRIM'a çok teşekkür ederim.

Bilgi ve desteğini bizden esirgemeyen Prof.Dr. M. Hasan ASLAN, Prof.Dr. Mir Hasan SEYİTSOY, Doç.Dr. Sibel T. ÖZTÜRK, Dr.Öğr.Üyesi Ali Ş. AHSEN, Prof.Dr. Ercan ÖZDEMİR, Dr.Öğr.Üyesi Hicabi Sinan ÖZKAN, Prof.Dr. Mevlüt KARABULUT, Prof.Dr. Mustafa ALEVLİ hocalarıma ve yüksek lisansım boyunca laboratuvar imkanlarından faydalandığım Dr. Mustafa ÖZTÜRK, Dr. Erdem DEMİRCİ, Araş.Gör. Ahmet M. MERT, Araş.Gör. M. Emre AKÖZ, Araş.Gör. Okan ÖZDEMİR ve Bünyamin ÖZKAL'a çok teşekkür ederim.

Yüksek lisansım boyunca kendilerini ihmal etmeme rağmen beni destekleyen arkadaşlarım Ayşe TAŞKIRAN, Sami YILMAZ, Alev GÖRECİ, Kübra ERTAŞ, Suna ŞAHİN, Gülşah Şevval KIZGIR, Ayşegül BÖREKÇİ, Elif YILMAZ, Semra YILMAZ'a teşekkür ederim.

Okula yaklaştığım andan itibaren koşarak yanıma gelip üzerime atlayarak beni gördüğüne sevindiğini belli eden Arıza, Porsuk, Kocaman, Duman, Paşa ve isim koymadığımız diğer köpek arkadaşlara ve binamızın kertenkele, kurbağa ve fare gibi hayvanlara karşı koruyuculuk görevini üstlenen kedi Fatoş Hanım'a ve SKS'nin önündeki güllere ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmamı destekleyen 119M287 kodlu TÜBİTAK projesine teşekkür ederim.

Yıllardır hayatımda olan ve ölene kadar ayrılmak istemediğim kız kardeşlerim Seha ŞİMŞEK ve Seren DEMİRCAN'a çok teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca beni destekleyen annem Fikriye YILMAZ, babam Hüseyin YILMAZ ve ağabeyim Mustafa YILMAZ'a sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. EXCHANGE BIAS ETKİSİ	7
2.1. Talim Etkisi (Training Effect)	11
3. DENEYSEL TEKNİKLER	13
3.1. Manyetik Saçtırma (Magnetron Sputter, MS)	13
3.2. X ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)	15
3.3. Manyeto-Optik Kerr Etkisi (MOKE)	17
3.4. Anormal Hall Etkisi (AHE)	20
3.5. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)	24
4. P-MTJ HAZIRLANMASI VE KARAKTERİZASYONU	27
4.1. Sabit tabaka (Pinned Layer, PL) Çalışması	27
4.1.1. CoO(x)/Pt(10)/Co(5) Çok Katlı İnce Filmlerin Manyetik Saçtırma Tekniği ile Hazırlanışı	28
4.1.2. X ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) Ölçüm Sonuçları	32
4.1.3. Manyeto-Optik Kerr Etkisi (MOKE) Ölçüm Sonuçları	36
4.1.4. Anormal Hall Etkisi (AHE) Ölçüm Sonuçları	39
4.1.5. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Ölçüm Sonuçları	43
4.2. Yalıtkan tabaka (Insulator Layer) Çalışması	48
4.3. Serbest tabaka (Free Layer, FL) Çalışması	55
5. SONUÇLAR ve YORUMLAR	58
KAYNAKLAR	61



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
t_b	: Yalıtkan tabakanın kalınlığı
J_C	: Anahtarlama akım yoğunluğu
N_i	: İyon sayısı
η	: Verimlilik parametresi
N_e	: Elektron sayısı
t_{FM}	: Ferromanyetik katman kalınlığı
E_b	: Bağlanma enerjisi
ΔE	: Birim alan başına aryüz enerjisi
λ	: Elektronun belli bir ortamda alabileceği en uzun yol
α	: Gilbert sönüm sabiti
d	: Kalınlık
$\vec{V}$	: Hız
B	: Dış manyetik alan vektörü
M_{FM}	: Ferromanyetik katmanın doyum mıknatıslanması
K_{AFM}	: Antiferromanyetik katmanın doyum mıknatıslanması
H_{EB}	: Exchange bias alanı
n	: Manyetik çevrim sayısı
N_a	: Nötr gaz atomlarının sayısı
E_b	: Elektronun bağlanma enerjisi
V_H	: Hall voltajı
V_{NHE}	: Normal Hall voltajı
V_{AHE}	: Örneğin mıknatıslanmasının Hall voltajına katkısı
A	: Bobinin alanı
AHE	: Anormal Hall etkisi
BL	: Yalıtkan tabaka
EB	: Exchange bias
FL	: Serbest tabaka
GMR	: Dev manyeto direnç
$MOKE$	: Manyeto-optik Kerr etkisi
$MRAM$	: Manyeto direnç rastgele erişim belleği
MS	: Manyetik saçırma

MTJ	: Manyetik tünel eklemi
PL	: Sabit tabaka
PMA	: Dik manyetik anizotropi
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
SOT	: Spin orbit tork
STT	Spin transfer tork
TMR	: Tünel manyeto direnci
VCMA	: Voltaj kontrollü manyetik anizotropi
VSM	: Titreşimli rnek manyetometresi



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>SekilNo:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: MTJ'nin temel katmanlarının şematik gösterimi.	1
1.2: STT yöntemi ile MTJ'nin iletkenlik kontrolünün şematik gösterimi.	2
1.3: Bir MTJ'de TMR etkisinin şematik gösterimi a) paralel durum b) antiparalel durum.	4
2.1: M_{AFM} , M_{FM} , K_{AFM} , K_{FM} ve B yönelimlerinin şematik gösterimi.	8
2.2: İdeal FM/AFM arayüzünün şematik gösterimi (sol), FM(metal)/AFM(oksit) karmaşık arayüzeyinin şematik gösterimi (sağ).	8
2.3: FM/AFM spin diyagramının şematik gösterimi.	9
2.4: PtCo/CoO EB sisteminde 10K sıcaklığında ard arda ölçülen mıknatıslanma eğrileri (iç şekil) ve sıfırlayıcı alan değerinin talim etkisi sonucu davranışı.	12
3.1: Fizik bölümü yüzey fiziği laboratuvarı MS sistemi ve analiz odası fotoğrafı.	14
3.2: Kerr tarafından kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi.	18
3.3: Üç farklı MOKE geometrisinin (kutupsal, boyuna, enine) şematik gösterimi.	18
3.4: PMOKE tekniği ile elde edilmiş standart bir örnek için mıknatıslanma eğrisi.	19
3.5: GTÜ fizik bölümünde bulunan MOKE sisteminin fotoğrafı.	20
3.6: Akım geçen levhadaki elektron, harici manyetik alan, Lorentz kuvveti, elektronun hızı ve V_H 'nin şematik gösterimi.	21
3.7: Dış manyetik alan, örneğin mıknatıslanması ve örnek düzleminin şematik gösterimi.	22
3.8: Örnek tutucunun a) üstten fotoğrafı ve b) vakum haznesi.	23
3.9: VSM tekniğinin bileşenlerinin şematik gösterimi.	24
3.10: Standart bir örnekten VSM tekniği kullanılarak elde edilen mıknatıslanma eğrisi.	25
4.1: Tavlama öncesi ve sonrası Si(111) altaşların XPS ölçüm sonuçları.	29
4.2: MS yöntemi ile hazırlanan örneklerin şematik gösterimi.	29
4.3: Ti, Pt ve Co hedeflerinin kazıma sonrası XPS genel tarama grafiği.	31

4.4:	2014 ve 2020 tarihli örneklerin XPS ölçümleri.	32
4.5:	Farklı oksit fazlarına karşılık Co2p spektrumları, yatay eksen bağlanma enerjisi, düşey eksen şiddettir.	33
4.6:	ORN7 kodlu örneğin CoO/Pt(5) katmanı üzerinden alınan Co2p detaylı XPS taraması.	34
4.7:	ORN7 kodlu örneğin CoO/Pt(5) katmanı üzerinden alınan O1s detaylı XPS taraması.	35
4.8:	ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin PMOKE ölçüm sonuçları.	36
4.9:	ORN0 kodlu örneğin PMOKE (sol) ve ORN1 kodlu örneğin LMOKE (sağ) ölçüm sonuçları.	37
4.10:	ORN1 kodlu örneğin PMOKE (sol) ve ORN0 kodlu örneğin LMOKE (sağ) ölçüm sonuçları.	38
4.11:	ORN5 kodlu örneğin PMOKE ölçümü (sol) ve ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin CoO/Pt(5) katmanlarından alınan XPS ölçümlerinden elde edilen CoO kalınlığına bağlı Co/O oranları (sağ) grafiği.	39
4.12:	a) Si(111) alttaşlar üzerine yerleştirilen maskelerin şematik gösterimi filmin kaplanacağı kısım beyaz maskenin kendisi siyah renk ile gösterilmiştir. b) Maske üzerinden kaplama yapılmış ve AHE ölçümleri için ölçüm çipine yerleştirilmiş örnek (Açık renkli bölge film, koyu renkli bölge Si(111) alttaştır.).	40
4.13:	ORN7, ORN6, ORN5 maskeli örneklerinin RT-AHE ölçüm sonuçları.	41
4.14:	AHE ölçüm düzeneğinin 120 K sıcaklığında çekilmiş fotoğrafı.	41
4.15:	ORN7, 6, 5 kodlu örneklerin a) 300 K ve 120 K sıcaklığında gerçekleştirilen AHE ölçümleri b) Sıcaklığa bağlı sıfırlayıcı alan değeri değişimi grafiği.	42
4.16:	ORN7, 6, 5 kodlu örneklerin a) 120K-AHE ölçümleri ve b) sıcaklığa bağlı EB değişimi grafiği.	43
4.17:	ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin 10 K ve 300 K sıcaklıklarında gerçekleştirilen VSM ölçüm sonuçları.	44
4.18:	ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin LT-VSM ölçümlerinden elde edilen sıfırlayıcı alan değerlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği.	46
4.19:	ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin sıcaklığa bağlı $-H_{EB}$ değişimleri grafiği.	47

4.20:	ORN2 kodlu örneğin 120 K sıcaklığında ardışık ölçülen mıknatıslanma eğrileri.	48
4.21:	Akım ile kontrol edilen bir MTJ yapısının şematik gösterimi.	49
4.22:	MgO genel tarama XPS ölçüm sonuçları.	50
4.23:	Farklı (50W, 40W, 30W, 20W ve 10W) film büyütme güçlerinde büyütülen MgO katmanından alınan O1s detay tarama XPS ölçüm sonuçları.	51
4.24:	Farklı (50W, 40W, 30W, 20W ve 10W) film büyütme güçlerinde büyütülen MgO katmanından alınan Mg2s detay tarama XPS ölçüm sonuçları.	52
4.25:	Her bir kaplama adımı için Pt4f ve Mg1s detaylı XPS ölçüm sonuçları a) Pt4f pikinin düşüşü b) Mg1s pikinin yükselişi.	53
4.26:	MgO hedef için toplam kaplama süresine bağlı toplam kalınlık grafiği.	54
4.27:	Ti(5)/Pt(20)/Co(5)/Pt(20) örneğinin Pt2W, 4W, 7W ve 10W kaplama güç değerleri için MOKE ölçüm sonuçları.	56
5.1:	P-MTJ örneğinin örnek düzlemine dik geometride 300 K ve 10 K sıcaklığında gerçekleştirilen VSM ölçüm sonuçları.	58
5.2:	P-MTJ örneğinin sıcaklığa bağlı sıfırlayıcı alan değeri değişimi grafiği.	59

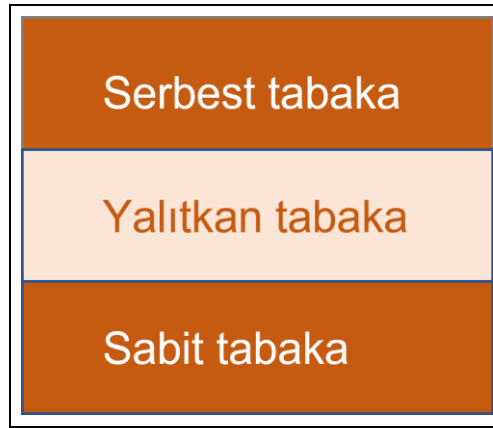
TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Alt kabuklar ve XPS spektrumunda oluşturdukları alan oranları.	16
4.1: MS sisteminde hazırlanan örneklerin kaplama parametreleri.	30
4.2: ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin Co2p bölgelerinin analizinde kullanılan pik parametreleri.	34
4.3: ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin O1s bölgelerinin analizinde kullanılan pik parametreleri	35
4.4: ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin XPS fit çalışması sonucu Co/O oranları.	36
4.5: Farklı (50W, 40W, 30W, 20W, 10W) film büyütme gücünde büyütülen MgO katmanının, Mg2s ve O1s bölgelerinin XPS analizinde kullanılan pik parametreleri.	52

1. GİRİŞ

Manyetik tünel eklemleri, (magnetic tunnel junction, MTJ) düşük güç tüketimi, nanosaniye mertebesinde çalışma hızı,    eklenebilirliği, dayanıklılığı ve g  ten kesildikten sonra uzun süre veri kaybetmemesi (nonvolatility) gibi özellikleri nedeni ile veri işleme, veri depolama ve sensör uygulamalarında kullanılabilir bir yapı olarak karşımıza çıkmaktadır.

şekil 1.1’de gösterildiği gibi MTJ’ler yalıtkan bir tabaka ile ayrılmış iki ferromanyetik (FM) tabaka olmak üzere üç temel tabakadan meydana gelmektedir. Bunlardan serbest tabakada (free layer, FL) mıknatıslanmasının kolayca y n değiştirebilmesi için yumuşak manyetik (soft magnetic) malzemeler kullanılmaktadır. Sabit ya da referans tabaka (fixed layer, pinned layer, PL) ise FL’ye manyetik olarak referans olması amacı ile mıknatıslanması kolayca y n değiştirmeyen, zor manyetik (hard magnetic) malzemeler kullanılarak oluşturulmaktadır. Tünel bariyeri (insulator veya barrier layer, BL) ise MTJ’de bu iki ferromanyetik tabakayı birbirinden elektriksel ve manyetik olarak ayırmaktır. Bu sebeple BL olarak yalıtkan ve manyetik olmayan (nonmagnetic) malzemeler tercih edilmektedir [1], [2].



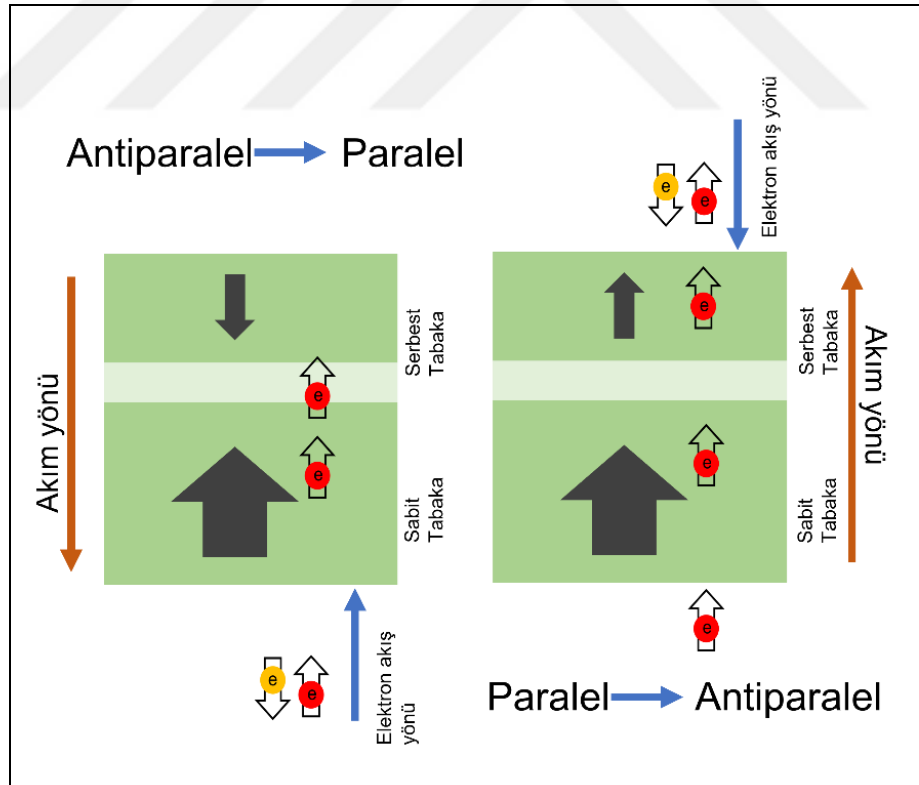
şekil 1.1: MTJ’nin temel katmanlarının şematik gösterimi.

Bir MTJ’de PL’nin mıknatıslanmasının yönü değişmeksizin, FL’nin mıknatıslanmasının yönü değiştirilebilir. Ferromanyetik katmanların birbirlerine göre manyetik yönelimleri MTJ’de direnç değişimine sebep olmaktadır. PL ile FL’nin mıknatıslanmalarının paralel yöneldiği durum düşük direnç, antiparalel yöneldiği durum ise yüksek dirence neden olmaktadır. Yüksek direnç durumunun “0” (sıfır), düşük direnç durumunun “1” (bir) mantık durumu olarak tanımlanabilir olması

MTJ'lerin sensör uygulamalarının yanında, veri depolama veya veri işleme uygulamalarında da kullanılabilir hale gelmesini sağlamaktadır.

MTJ'nin elektriksel direncini kontrol etmek için spin transfer tork (spin transfer torque, STT), spin orbit tork (spin orbit torque, SOT) ve voltaj kontrollü manyetik anizotropi (voltage controlled magnetic anisotropy, VCMA) olmak üzere üç temel anahtarlama (switching) yöntemi geliştirilmiştir [2].

STT yöntemi ile MTJ'nin durumunun değiştirilmesi Şekil 1.2'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 1.2 sol'da gösterildiği gibi antiparalel yönelmiş bir MTJ'yi paralel duruma döndürmek için elektronların, PL'den FL'ye doğru yönlendirilmesi gerekmektedir. Elektronlar PL'den akarken, azınlık elektronları saçılır ancak çoğunluk elektronları FL'ye geçer. Bu şekilde elektronu seçici olarak aktarma işlemine polarizasyon denmektedir. Polarize elektronlar PL'nin mıknatıslanmasına zıt yönde yönelmiş olan FL'nin mıknatıslanmasına spin açısal momentumu nedeni ile tork uygular. Polarize elektronlar tarafından oluşturulan bu tork nedeni ile FL'nin mıknatıslanması döner ve paralel durum oluşturulur [3].



Şekil 1.2: STT yöntemi ile MTJ'nin iletkenlik kontrolünün şematik gösterimi.

Şekil 1.2 sağ'da gösterildiği üzere, bir MTJ'de antiparalel durum elde edilmek istendiğinde akımın yönü değiştirilmektedir. Elektronlar paralel durumda olan bir MTJ'nin serbest tabakasından sabit tabakasına doğru yönlendirilir. Çoğunluk elektronları sabit katmana geçerken, azınlık elektronları serbest katmana geri saçılır. Saçılan elektronlar kritik bir akım değerinde FL'nin mıknatıslanmasının yönünü değiştirir ve MTJ'de antiparalel durum oluşturulmuş olur. FL'nin mıknatıslanmasının yön değiştirdiği kritik akım değerine anahtarlama akımı (switching current) denmektedir. Bu anahtarlama akım yoğunluğu J_C ;

$$J_C = \frac{\alpha}{\eta} \frac{2e}{\hbar} M_s H_{kt} + 2\pi M_s \quad (1.1)$$

denklemini kullanarak hesaplanmaktadır [3], [4]. Burada M_s doyum mıknatıslanması, t film kalınlığı, H_k etkin anizotropi alanı (effective anisotropy field) α Gilbert sönüm sabiti (Gilbert damping constant), η STT verimlilik parametresini ifade etmektedir. MTJ'nin durumunu değiştirmek için kullanılan bu akım simetrik değildir. MTJ'yi antiparalel duruma getirmek için gereken akım paralel duruma getirmek için gereken akımdan daha büyüktür.

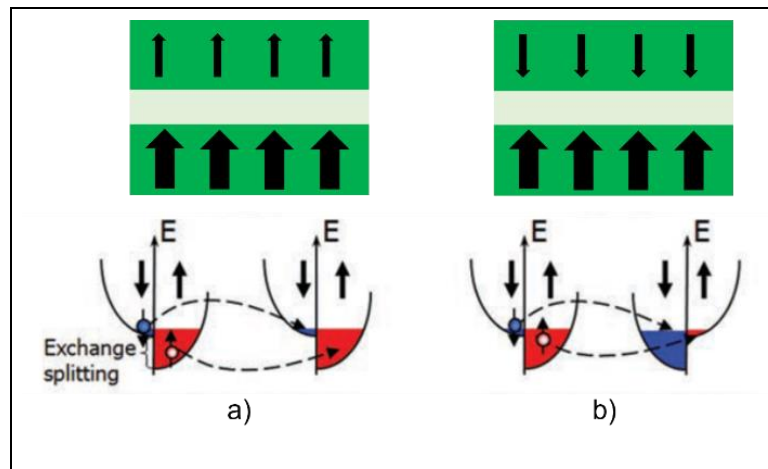
Manyeto direnç rastgele erişimli belleklerde (Magnetoresistance random access memory, MRAM) MTJ'nin direnç değişimi işlemi dışarıdan manyetik alan ile kontrol ediliyor iken STT ile iki yönlü bir akım ile bu kontrol sağlanmıştır. Bu sayede MTJ uygulamalarından olan STT-MRAM'ler hafıza cihazlarının daha basit ve ölçeklendirilebilir hale gelmesini sağlamıştır [5]. MTJ durumları arasında geçiş yaparken simetrik bir akım kullanabilmek amacı ile SOT tekniği kullanılarak yazma ve okuma yolları ayrılmıştır. Bu sayede, okuma işlemi sırasında gerçekleşebilecek istenmeyen yazma işlemi engellenmiş ve MTJ'nin kararlılığında iyileşme sağlanmıştır. Ancak bu durum ölçeklendirmeye sınır koymaktadır [6].

STT yönteminde MTJ'den geçen akım tünelleme akımıdır. 1975 yılında Michel Julliere tarafından ilk kez gözlemlenen bu etki şu şekilde açıklanmaktadır [7]. BL'nin yeterince ince ($\sim 10\text{\AA}$) olması durumunda elektronlar PL'den FL'ye (veya FL'den PL'ye) kuantum tünelleme olayı ile geçebilmektedir. PL ve FL'nin manyetik yönelimlerinin birbirlerine göre durumunun elektronun tünelleme olasılığını değiştirmesine bağlı olarak, MTJ'nin direnci değişmektedir. Yani Şekil 1.3.a)'da şematik olarak gösterildiği gibi paralel duruma sahip bir MTJ'de spin yukarı (spin up)

elektronları uygun spin yukarı alt bandına tünelleyebilirken, spin aşağı (spin down) elektronları uygun spin aşağı alt bandına tünelleyebilir. PL ve FL'nin mıknatıslanmalarının birbirine göre yönelimi paralel olduğu durumda band uyumu yüksek olduğu için düşük direnç oluşmaktadır. Antiparalel durumda ise bu band uyumu bozulmaktadır. Şekil 1.3.b)'de şematik olarak gösterildiği gibi spin yukarı elektronlarının tünelleyebileceği uygun spin durum yoğunluğu azalarak, elektronun tünelleme olasılığında düşüşe sebep olmaktadır ve bu durum yüksek direnç ile sonuçlanmaktadır [8]. Manyetik yönelimlerin direnç oluşturması, elektronun tünellemesi sırasında spin yönelimini korumasından kaynaklanmaktadır. Yani elektron sadece spin yönelimi aynı olan spin alt bandına (spin subband) tünelleyeabilmektedir. Ferromanyetik katmanların manyetik yönelimleri spin alt bandında değişime sebep olarak direnç değişimi oluşturmaktadır. Sonuç olarak iki spin alt bandı için fermi seviyesi durum yoğunluğu (Density of State, DOS) değerlerinin farklı olması MTJ'nin direncinde değişikliğe sebep olmaktadır [1], [9]. Bir MTJ'den akım geçirildiğinde iki ferromanyetik katmanın mıknatıslanmalarının birbirlerine göre durumundan kaynaklanan direnç değişiminden elde edilen Tünel Manyeto Direnci (Tunnel Magnetoresistance, TMR) oranı,

$$\text{TMR}_{\text{oranı}} = \frac{R_{\text{AP}} - R_{\text{P}}}{R_{\text{P}}} \quad (1.2)$$

denklemini ile hesaplanabilmektedir. Burada R_{AP} antiparalel durumun direncini, R_{P} paralel durumun direncini ifade etmektedir [10].



Şekil 1.3: Bir MTJ'de TMR etkisinin şematik gösterimi a) paralel durum b) antiparalel durum.

Bir MTJ’de düşük ve yüksek direnç durumunu oluşturabilmek için FL’nin zorlayıcı alan (coercivity, H_C) değerinin PL’nin zorlayıcı alan değerinden küçük olması gerekmektedir. FL’nin mıknatıslanmasının yön değiştirdiği manyetik alanda PL’nin mıknatıslanmasının yönünü koruması ile antiparalel durum elde edilmektedir. Zorlayıcı alan değerlerindeki bu fark birkaç yol ile gerçekleştirilebilir. Literatürde PL ve FL katmanlarında farklı ferromanyetik malzemeler kullanımı ya da aynı ferromanyetik malzemenin farklı kalınlıkta veya ısıtım işlemi uygulanarak hazırlanması ile farklı zorlayıcı alan elde edilmiştir [7]. Ayrıca PL katmanını tek bir ferromanyetik katmandan oluşturmak yerine antiferromanyetik (AFM) – ferromanyetik (FM) iki katmanın birleşimi şeklinde hazırlanıp aralarında exchange bias oluşturması ile zorlayıcı alan farkı sağlanan çalışmalar da mevcuttur [11].

Araştırmalar MTJ’de anahtarlama akımını azaltmaya ve MTJ boyutunu küçültmeye yönelmektedir [12]. Dik manyetik anizotropi (perpendicular magnetic anisotropy, PMA) gösteren manyetik sistemlere geçiş ile mıknatıslanmanın tersine çevrilmesi için gereken akım kritik derecede azaltılırken, daha küçük yanal boyutlu MTJ’lerde kararlılık artırılmıştır. IP-MTJ (In plane MTJ)’lerde mıknatıslanmanın kolay eksenini örnek düzleminde iken P-MTJ (perpendicular plane MTJ)’lerde örnek düzlemine diktir. IP-MTJ ile hazırlanmış MRAM’lerde yoğunluğu artırmak artık fiziksel olarak sınıra ulaştığı için P-MTJ çalışmaları artmaktadır. Yoğunluğu yüksek MRAM hazırlamak için en/boy oranı (aspect ratio, uzunluk/genişlik) küçük MTJ gerekmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalarda P-MTJ’lerde IP-MTJ’lere kıyasla %50 daha fazla TMR gözlemlenmiştir [13], [14].

Bu tez kapsamında manyetik saçtırma (MS) tekniği kullanılarak P-MTJ hazırlanması hedeflenmiştir. Hazırlanacak olan MTJ’nin sabit tabakası olarak spin vanası (AFM/FM) yapısı kullanılmıştır. Burada AFM katman olarak CoO, FM katman olarak Pt/Co tekrarlı yapısına karar verilmiştir. Yalıtkan tabaka olarak MgO, serbest tabaka olarak Pt/Co tekrarlı yapısı üzerinde çalışılmıştır. Bunun için önce sabit tabaka, serbest tabaka ve yalıtkan tabaka ayrı ayrı çalışılmış olup, kimyasal ve manyetik karakterizasyonu gerçekleştirildikten sonra, bu katmanların bir araya getirilmesiyle elde edilen P-MTJ yapısının özellikleri karakterize edilmiştir. Hazırlanan P-MTJ’de PL’nin mıknatıslanmasını sabitleme işlemi exchange bias ile gerçekleştirilmiştir. Sabit tabaka için exchange bias gözlemlenmek amacı ile AFM katman olarak belirlenen CoO seçilmesinin nedeni tek bir hedeften hem ferromanyetik hemde AFM malzeme üretilabiliyor olması ve CoO’nin Neel sıcaklığının (290K) oda sıcaklığına yakın olması

avantajıdır [15]. CoO ve MgO katmanlarının birebir oksit fazının oluşturulması sisteme entegre analiz odasında bulunan XPS tekniği kullanılarak atmosfere maruz kalmadan gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan örneklerin kolay eksenleri MOKE tekniği ile belirlendikten sonra AHE ve VSM teknikleri kullanılarak düşük sıcaklık mıknatıslanma eğrileri kaydedilerek exchange bias değerleri hesaplanmıştır.



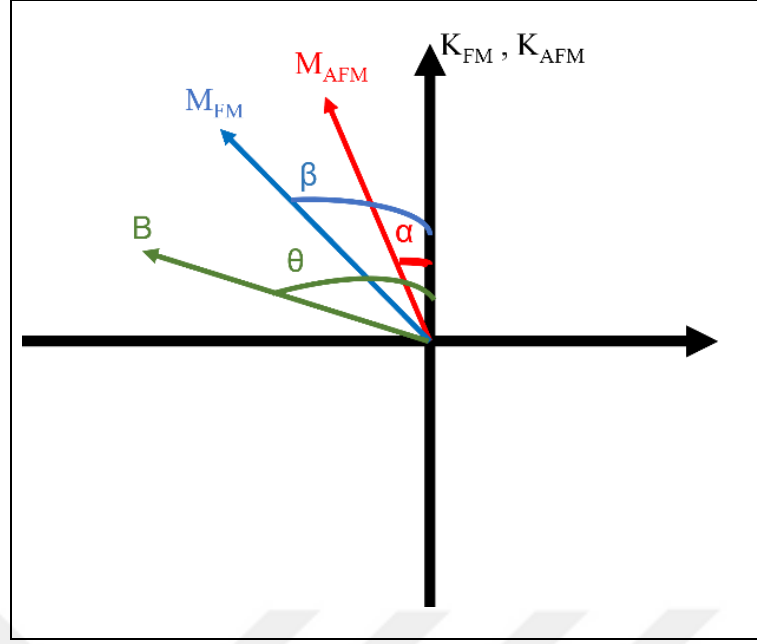
2. EXCHANGE BİAS ETKİSİ (EB)

Dev Manyeto Direnç (Giant Magnetoresistance, GMR) ve TMR ile yakından ilgili olan manyetik sensör, MRAM, spin vanaları ve manyetik okuma kafalarında uygulama alanı bulması ile mütakabil etkisi (exchange bias, EB) büyük ilgi görmektedir. GMR ve TMR kullanılarak yapılan teknolojik cihazlardaki düşük güç tüketimi, daha küçük alana daha fazla bilgi depolama, çalışma hızı vb. problemlerin çözümü için EB etkisinin fiziksel temellerinin anlaşılması gerekmektedir. EB etkisinin analitik olarak ifade edilebilmesi ile kontrol edilebilir ve sonuçları öngörülebilir çalışmalar gerçekleştirilebilecektir.

Tek yönlü manyetik anizotropi olarakta adlandırılan EB etkisinin manyetik olarak farklı iki yapının arayüzeyindeki eşleşme (coupling) nedeni ile ortaya çıktığı düşünülmektedir. Uygun bir FM ile AFM in birleştirilmesiyle oluşturulan heteroyapılarda gerçekleşen EB güncel teknolojik uygulamaların ilgi odağıdır. FM-AFM arayüzeyindeki manyetik momentlerin arasındaki exchange etkileşimi tek yönlü manyetik anizotropi enerjisine yol açmaktadır. Bu enerji,

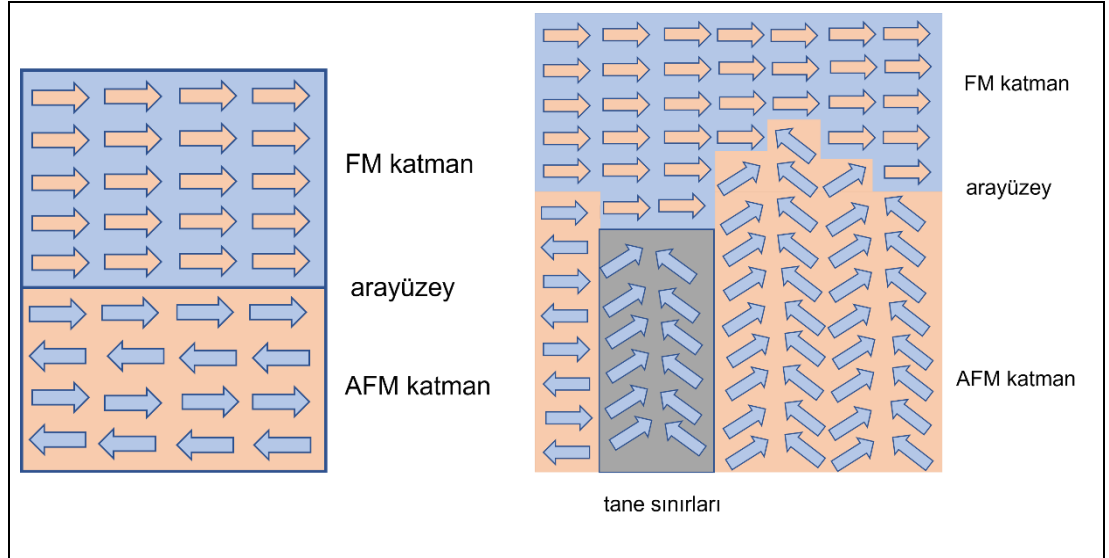
$$E = -B M_{FM} t_{FM} \cos(\theta - \beta) + K_{FM} t_{FM} \sin^2(\beta) + K_{AFM} t_{FM} \sin^2(\alpha) - J_{INT} \cos(\beta - \alpha) \quad (2.1)$$

denklemleri ile verilmektedir. B dış manyetik alanı, M_{FM} FM katmanının doyum mıknatıslanmasını, t_{FM} FM katmanının kalınlığını, t_{AFM} AFM katmanının kalınlığını, K_{FM} FM katmanının anizotropisini, K_{AFM} AFM katmanının anizotropisini, α , β , θ açıları ise mıknatıslanmalar ile FM anizotropi eksenleri arasındaki açıları ifade etmektedir. Şekil 2.1’de α , β , θ açıları şematik olarak gösterilmiştir. Denklem (2.1)’deki ilk terim dış manyetik alanın FM katman üzerindeki etkisini, ikinci terim FM anizotropinin etkisini, üçüncü terim AFM anizotropinin etkisini ve dördüncü terim ise arayüzey birleşmesinin katkısını ifade etmektedir [16].



Şekil 2.1: M_{AFM} , M_{FM} , K_{AFM} , K_{FM} ve B yönelimlerinin şematik gösterimi.

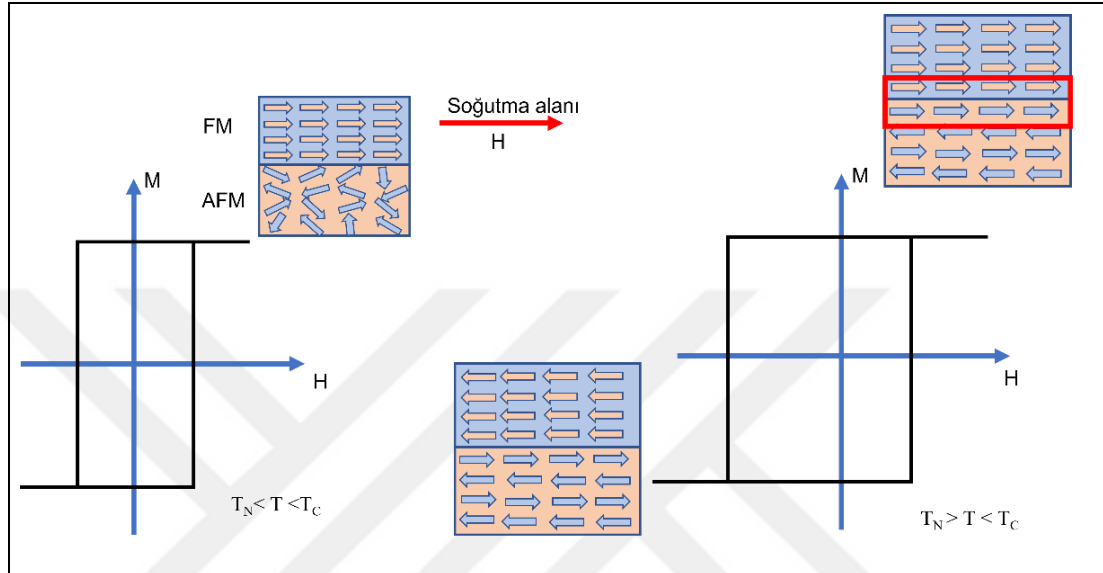
Şekil 2.1’de AFM katmanın alt kafes mıknatıslanması, B dış manyetik alan ve FM mıknatıslanma eksenini ile AFM ve FM anizotropi eksenleri arasındaki açılar şematik gösterimi verilmiştir. AFM ve FM anizotropi eksenleri paralel kabul edilmektedir.



Şekil 2.2: İdeal FM/AFM arayüzünün şematik gösterimi (sol), FM(metal)/AFM (oksit) karmaşık arayüzünün şematik gösterimi (sağ).

AFM/FM katmanlar epitaksiyel (epitaxial) büyütülürse arayüzey atomik olarak pürüzsüzlüğe yaklaşmaktadır. İdeal FM/AFM arayüzey Şekil 2.2 sol’da gösterilmiştir

[17]. Ancak Şekil 2.2 sağ'da gösterildiği gibi metal/oksit FM/AFM sistemlerinin arayüzlerinde tane boyutu (grain size), tane sınırları (grain boundaries), şekil (shape), pürüzlülük (roughness) nedeni ile eşit olmayan sayıda paralel ve antiparalel spinler oluşmaktadır. Ayrıca metaller ve oksitler çok farklı kafes parametrelerine sahip oldukları için arayüzlerinde stres oluşmaktadır.



Şekil 2.3: FM/AFM spin diyagramının şematik gösterimi.

Anizotropi (anisotropy), arayüzey pürüzlülüğü (interface roughness), spin dağılımı (spin configuration), manyetik bölge (magnetic domain), AFM ve FM katman kalınlığı parametrelerinin, EB etkisindeki rolü EB'nin mekanizmasının anlaşılmasını zorlaştırmaktadır. EB'nin analitik olarak açıklanması için Mauri Modeli, Malozemoff Modeli, Takano Modeli, Stoner-Wohlfarth Modeli, Meiklejohn-Bean Modeli gibi birçok model ortaya atılmış olmasına rağmen kaynağı tam olarak anlayamamıştır [18]. Bunlardan Meiklejohn-Bean modeli arayüzey pürüzlülüğünü ihmal ederek polikristal yapıları açıklamakta yetersiz kalsa da histeresisdeki kaymayı basitçe açıklamıştır. Bu model; Şekil 2.3 sol'da gösterildiği gibi manyetik çevrime (magnetic hysteresis) sahip FM/AFM heteroyapılarında, AFM'nin manyetik fazının değişerek paramanyetik (PM) olduğu Neel sıcaklığının (T_N) üzerindeki ve FM katmanının paramanyetik faza geçmemesi için Cuire sıcaklığının (T_C) altındaki bir sıcaklık değerinden, dış manyetik alan altında T_N 'nin altındaki bir sıcaklık değerine soğutulması ile Şekil 2.3 sağ'da görüldüğü gibi histeresizin merkezinde kayma gözlemlendiğini ileri sürmüştür [16]. PM faza geçmiş olan AFM katman, dış manyetik

alanla tek bir yöne yönlendirilmiş olan FM katman ile soğutulduğunda tekrar AFM fazına geçerken Şekil 2.3 sağ'da görüldüğü gibi FM/AFM arayüzündeki AFM katmanın manyetik momentleri FM katman ile aynı yöne yönelerek eşlenmektedir. AFM'nin diğer manyetik momentleri de bu arayüze göre yeniden şekillenmektedir. Toplam manyetizasyonun yönlendirilmesi durumunda, AFM/FM arayüzündeki bu eşlenme yönünde manyetik momentleri hizalamak kolay olurken zıt yönde hizalamak zorlaşmaktadır. Bu durum, sıfırlayıcı alan (coercive field) değerlerinin birinin diğerinden büyük olmasına neden olur [16]. Bu da manyetik çevrimin merkezinde kayma olarak gözlemlenir. Manyetik çevrimin merkezindeki bu kayma,

$$H_{EB} = \frac{H_{C1} + H_{C2}}{2} \quad (2.2)$$

denklemini kullanılarak hesaplanabilir. Burada H_{EB} EB alanı, H_{C1} ve H_{C2} manyetik çevrimin x eksenini (dış manyetik alan eksenini) kestiği noktalar yani sıfırlayıcı alan değerleridir. FM/AFM arayüzündeki manyetik momentlerin eşleşmesi uygulanan dış manyetik alan yönünde ise pozitif EB, zıt yönde ise negatif EB olarak isimlendirilmektedir.

FM/AFM sistemlerde AFM'nin türü oksit (CoO, NiO) ya da metalik (IrMn) olabilir. FM/AFM materyallerden ve kalınlıklarından bağımsız olarak farklı sistemleri karşılaştırabilmek amacı ile EB'nin büyüklüğü birim alan başına arayüz enerjisi olarak,

$$\Delta E = M_{FM} t_{FM} H_{EB} \quad (2.3)$$

denklemini ifade edilmektedir. Bu denklemde M_{FM} FM katmanının doyum mıknatıslanmasını ve t_{FM} FM katmanının kalınlığını ifade etmektedir.

Ferromanyetik rezonans (FMR) tekniği kullanılarak elde edilen rezonans pozisyonları ve çizgi şekillerinden (line shapes) EB hesaplanabilmektedir. FM/AFM heteroyapılarının manyeto direnç (magnetoresistance) ölçümlerinden EB ve anizotropiler hesaplanabilmektedir [19]. Ayrıca nötronların manyetik doğası sayesinde Nötron Kırınımı (Neutron Diffraction) tekniği kullanılarak FM/AFM katmanlarının domain oluşumlarının homojenliği belirlenebilmektedir [20]. Manyeto direnç ölçümlerinden FM/AFM heteroyapılarının H_{EB} alanı ve anizotropi sabitleri belirlenebilmektedir [21]. FM/AFM manyetik domain oluşumu da EB'ı etkileyen

etmenler arasındadır. Bu nedenle Bitter metod, Lorentz mikroskobu, manyetik kuvvet mikroskobu (MFM) gibi teknikler kullanılarak manyetik domain yapısını inceleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir [22].

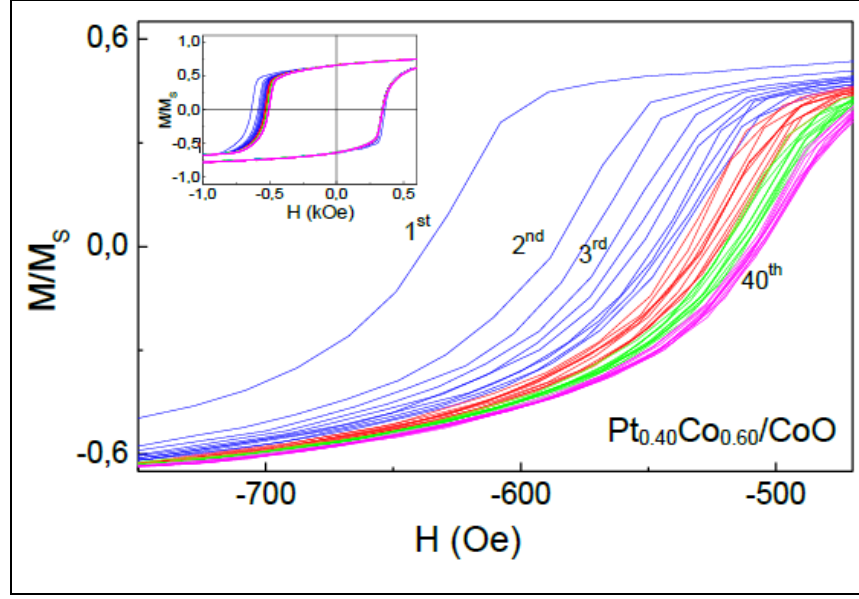
2.1. Talim Etkisi (Training Effect)

Exchange biasın başladığı sıcaklık olan engelleme sıcaklığı (blocking temperature, T_B) değerinin altında, hedeflenen bir sıcaklık değerine inildiğinde ardışık olarak manyetik çevrim alınırsa H_{EB} değerinde ciddi bir azalma görülmektedir. Bu etkinin nedeni yarı kararlı spin dağılımı, FM'nin her mıknatıslanmasının yönü değiştiğinde AFM'nin manyetik domainlerinin yeniden düzenleniyor olması ve spinlerin her çevrimden sonra enerjisel olarak uygun yönelimi bulmaya çalışması olduğu düşünülmektedir. Özellikle ilk iki manyetik çevrim arasında belirgin olan H_{EB} değerindeki azalma, belirli çevrim sayısı sonrası dengeye ulaşır ve artık azalma gözlemlenmez [23], [24]. H_{EB} 'ın tekrar tekrar alınan manyetik çevrim ile azalması,

$$H_{EB}^1 - H_{EB}^\infty \propto \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (2.4)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir [23]. Bu denklemde, H_{EB}^1 ilk çevrimden hesaplanan EB değerini, H_{EB}^∞ denge durumundaki EB değerini ve n manyetik çevrim sayısını ifade etmektedir. Eşitlik (2.4)'ten açıkça anlaşılabileceği üzere EB etkisindeki değişim manyetik çevrim sayısının kare kökü ile ters orantılıdır.

PtCo/CoO örnek yapısının 10 K sıcaklığında ard arda ölçülen mıknatıslanma eğrileri Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Şekil 2.4'ten de açıkça görüldüğü üzere negatif sıfırlayıcı alan değeri ikinci mıknatıslanma eğrisinde ciddi ölçüde azalmıştır [25]. Bu olay çoklu kristal (polycrystalline) AFM'lerde önemli ölçüde görülse de tek kristal (single crystal) ince filmlerde yok denecek kadar azdır [16], [26], [27].



Şekil 2.4: PtCo/CoO EB sisteminde 10 K sıcaklığında ard arda ölçülen mıknatıslanma eğrileri (iç şekil) ve sıfırlayıcı alan değerinin talim etkisi sonucu davranışı.

3. DENEYSEL TEKNİKLER

Bu bölümde tez kapsamında araştırılan örneklerin elde edilmesi ve karakterizasyon yöntemlerinden bahsedilecektir. Örnekler manyetik saçtırma (Magnetron Sputter, MS) tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan örneklerde CoO fazı, X ışını fotoelektron spektroskopisi (X-ray Photoelectron spectroscopy, XPS) tekniği ile kontrol edilerek oluşturulmuştur. Hazırlanan manyetik ince filmlerin kolay ve zor eksenleri Manyeto-Optik Kerr etkisi (Magneto-optic Kerr Effect, MOKE) tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Düşük sıcaklık ölçümleri anormal Hall etkisi (Anomalous Hall Effect, AHE) ve titreşimli örnek manyetometresi (Vibrating Sample Magnetometer, VSM) teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel tekniklerin kullanım amaçlarına göre teorik alt yapıları bu bölümde ayrı ayrı açıklanmıştır.

3.1. Manyetik Saçtırma (Magnetron Sputter, MS)

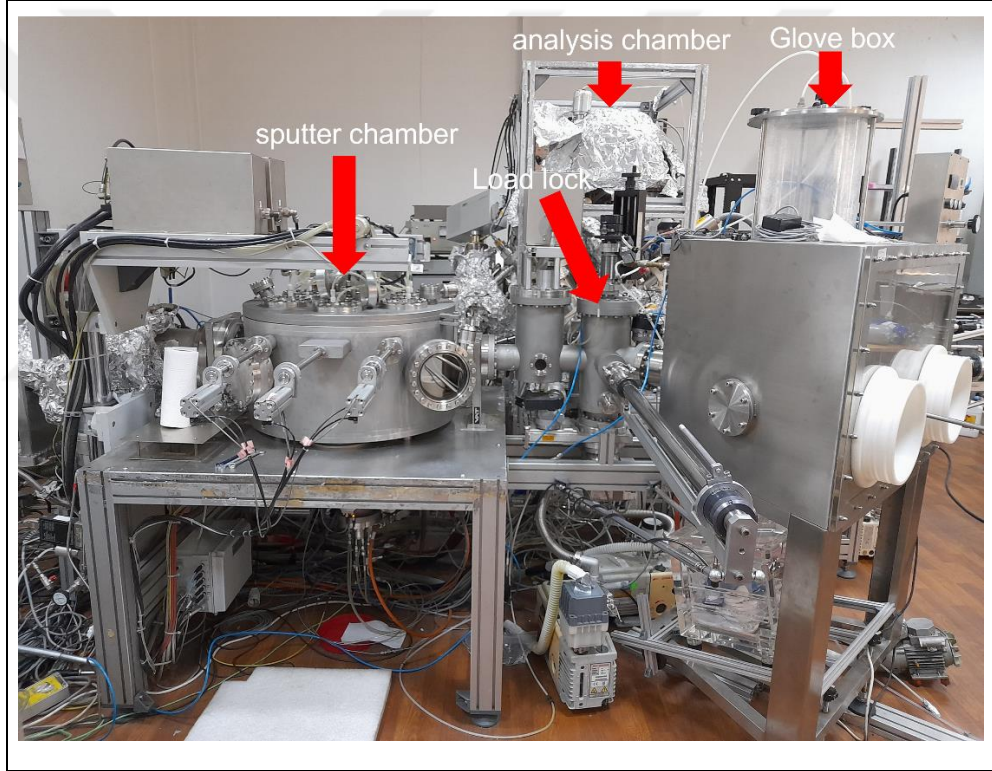
Manyetik saçtırma (Magnetron Sputter, MS) tekniği hem bilimsel araştırmalarda hemde endüstriyel çalışmalarda önemli ölçüde kullanılan fiziksel buhar biriktirme (physical vapour deposition, PVD) tekniğidir. MS sistemi basitçe hedef (katot) önünde üretilen plazma içerisindeki iyonların manyetik alan sınırlaması altında elektrik alan ile katotata çarptırılması, çarpan iyonların katottan kopardığı parçacıkların bir alttaş üzerinde biriktirilmesi mantığı ile çalışmaktadır [28]. Plazma iyonlardan ve elektronlardan oluşan karmaşık bir yapıdır. Plazmanın iyonlaşma derecesi:

$$\alpha = \frac{N_e}{(N_i + N_a)} \quad (3.1)$$

denklemleri ile verilmektedir. Bu denklemde N_e , N_i ve N_a ifadeleri sırası ile elektron, iyon ve nötr gaz atomları sayısıdır. Bu parametreler plazmanın oluşabilmesi ve kararlılığının sağlanması için önem taşımaktadır [29].

MS sisteminde kullanılan hedef malzeme büyütülmek istenen filme göre MgO, SiO₂, CoFeB, Al₂O₃, NiFe gibi alaşım veya Co, Pt, Ti, Ru, Ir gibi saf metal olabilir. Plazma oluşturmak için genellikle Ar gazı kullanılmaktadır. Ancak hazırlanmak istenen filmin kimyasal yapısına göre sisteme Ar gazının yanı sıra N₂ ve O₂ gazları da eklenerek istenilen kimyasal fazlar oluşturulabilmektedir [30]. Kullanılması planlanan

hedef malzemeye göre uygulanacak voltaj türü belirlenmektedir. Örneğin; yalıtkan veya manyetik hedefler için radyo frekans (radio frequency, RF) voltaj kaynağı kullanılırken genellikle iletken hedefler için doğru akım (direct current, DC) voltaj kaynağı tercih edilmektedir. Kullanılan hedefin ve gazın saflığı büyütülen film kalitesini etkileyen etmenlerdendir. Kaplama gücü, kaplama öncesi ve kaplama sırasındaki MS sistemi basıncı, kullanılan güç kaynağı türü, hedef alttaşı mesafesi film büyümesi sırasında kontrol edilebilir parametrelerdendir [31]. Bu teknik ile örneğe ısıtma işlemi uygulanarak tek kristal film büyütülebilmekte ve dışarıdan manyetik alan uygulanarak tek manyetik domain yapısına sahip manyetik ince filmler hazırlanabilmektedir.



Şekil 3.1: Fizik bölümü yüzey fiziği laboratuvarı MS sistemi ve analiz odası fotoğrafı.

Şekil 3.1’de Fizik bölümü yüzey fiziği laboratuvarı MS sistemi, analiz odası ve sisteme entegre glove box gösterilmektedir. Bu sistemde MS kullanılarak hazırlanan örnekler, atmosfere çıkarılmadan analiz odasında karakterize edilebilmektedir. Ayrıca desenli (patterned) örnek büyütülmek istendiğinde, oluşturulmak istenen desene uygun maskeler glove box içerisinde, Ar atmosferinde örnek üzerine yerleştirilebilmektedir. MS sisteminde bulunan Kuartz Kristal Mikro-Balans (Quartz Crystal Microbalance,

QCM) ile hazırlanan ince filmlerin kalınlıkları belirlenmektedir. Pyrolithic Boron Nitride (PBN) ısıtıcı ile örneğe ısı işlem uygulanabilmektedir. MS sisteminin standart sıcaklığı 291 K'dir. Şekil 3.1'de fotoğrafı gösterilen sistemde gösterilen cihazlarda, MS sisteminin basıncı $\sim 10^{-9}$ mbar, analiz odasının basıncı $\sim 10^{-10}$ mbar, örnek yükleme odasının basıncı ise $\sim 10^{-8}$ mbar'dır. Transfer kolları ile örnek MS sisteminden analiz odasına atmosfere maruz kalmadan çekilerek gerekli analizler gerçekleştirilebilmektedir.

MS tekniği ile istenilen optik, manyetik ve elektriksel özelliklere sahip örnekler kullanım alanına göre geçirgen, yalıtkan veya iletken alttaşlar üzerine hazırlanabilmektedir.

3.2. X Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)

X ışını fotoelektron spektroskopisi (X ray photoelectron spectroscopy, XPS) bir örnekte bulunan elementleri ve bu elementlerin hangi kimyasal durumda olduklarını belirlemeye yarayan bir elektron spektroskopisi tekniğidir. Bu teknikte analiz edilmek istenen örnek, örnekte bulunan atomlardan elektron koparabilecek büyüklükte enerjiye sahip karakteristik X ışınına (genellikle Al K α 1486,6 eV; Mg K α 1253,6 eV) maruz bırakılmaktadır. X ışını soğurulması ile örnekte bulunan atomlardan elektron koparılmakta, kopan elektronun (fotoelektron) enerjisi yüklü parçacık enerji analizörü ile belirlenmektedir. Enerjisi ölçülen elektronların koparıldığı atomdaki bağlanma enerjisi:

$$E_b = h\nu - E_k - \Phi \quad (3.2)$$

Einstein eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu denklemde; $h\nu$ X ışınının enerjisini, E_k kopan elektronun kinetik enerjisini, Φ ise yüzey iş fonksiyonu parametrelerini ifade etmektedir. Bir elektronun bağlanma enerjisi bulunduğu atomun çekirdeğindeki pozitif yükler ile arasında oluşan Coulomb etkileşimi ile belirlenmektedir. Bu nedenle her element için E_B değeri o elemente özgü olmaktadır. Bu sayede, yayılan elektronun kinetik enerjisi elementi tanımlamak için kullanılabilir.

X ışını örnek içerisinde mikrometre mertebesinde yol alabilir iken, fotoelektron enerjisini kaybetmeden ~ 10 nm yol alabilmektedir. Bu durum, XPS tekniğini son derece yüzey hassas bir teknik haline getirmektedir. Enerjisinin bir kısmını elastik

olmayan saçılmalarla kaybeden fotoelektronlar, XPS spektrumuna arka plan (background) katkısı olarak yansımaktadır [32].

Örnekten koparılan elektronların geride bıraktığı boşluklar valans bandından elektronlar ile doldurulmaktadır. Bu geçişin enerjisi Auger elektronunun fırlatılmasına veya karakteristik X ışını yayınlanmasına neden olmaktadır. Örnekten koparılan fotoelektronlar ve Auger elektronları, örnekte bulunan atomların elektron popülasyonuna bağlı olarak XPS spektrumunda farklı pikler oluşturmaktadır. Çekirdek enerji seviyeleri (core energy level), valans seviyesi (valance level) ve Auger pikleri olmakla birlikte, bu piklerde meydana gelen kuyruk (tail) veya uydu (satellite) pikleri oluşması gibi ikincil prosesler de XPS spektrumunda gözlenmektedir. Çekirdek enerji seviyelerinin s alt kabuğu (subshell) dışındaki alt kabuklarında, spin yörünge eşleşmesi (spin-orbit coupling) nedeni ile iki pik (doublet) oluşmaktadır. Alt kabukların XPS spektrumunda oluşturdukları piklerin, elektron yoğunluklarına göre oranları Tablo 3.1’de verilmiştir. XPS spektrumu ile örnekte bulunan elementlerin bağlı konsantrasyonunu,

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\frac{I_1}{S_1}}{\frac{I_2}{S_2}} \quad (3.3)$$

formülünü kullanarak hesaplamak mümkündür. Denkleme göre iki elementin birbirine göre kimyasal oranı, XPS spektrumunda oluşturdukları pik alanlarının atomik duyarlılık faktörlerine (atomic sensitivity factor, ASF) oranı ile hesaplanabilmektedir. ASF değeri her element ve orbital için farklı olmakla birlikte kullanılan x ışını kaynağının elektron dedektörü ile yaptığı açıya da bağlıdır [33].

Tablo 3.1: Alt kabuklar ve XPS spektrumunda oluşturdukları alan oranları.

Alt kabuk	j	Alan oranı
s	$\frac{1}{2}$	-
p	$\frac{1}{2} : \frac{3}{2}$	1:2
d	$\frac{3}{2} : \frac{5}{2}$	2:3
f	$\frac{5}{2} : \frac{7}{2}$	3:4

XPS tekniği elemental oran hesabının yanı sıra, Bölüm 3.1’de adı geçen, MS sisteminde katman kalınlıklarını ölçmek için kullanılan QCM’i kalibre etmek için de kullanılmaktadır. Katman kalınlıkları, MS sisteminde bulunan QCM ile

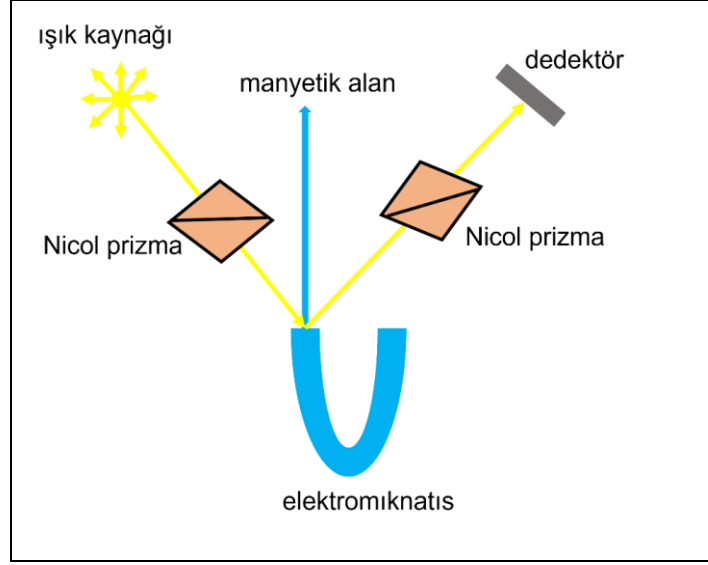
belirlenmektedir. QCM, piezo elektrik referans kristali yardımı ile büyütülen filmin bazı fiziksel parametrelerini de kullanarak kaplama kalınlığını belirlemektedir. QCM'nin film kalınlığı hesaplarken kullandığı denklemde bulunan materyal yoğunluğu ve akustik empedans çarpanı filmin bulk hali baz alınarak verilen değerlerdir. Yine QCM'nin film kalınlığını hesaplaması için cihaza girilen Tooling factor değeri QCM'nin referans kristali, alttaş ve hedef malzemenin sistemde bulunduğu geometrik yer baz alınarak hesaplanmaktadır. Tüm bu hesaplamalardaki hata payı göz önünde bulundurulduğunda, Å hassasiyetinde katman büyütülebilmesi, QCM'nin farklı bir metotla kalibre edilmesi gereğini doğurmaktadır. XPS tekniği ile film kalınlık hesabı için,

$$I = I_0 e^{-\frac{d}{\lambda}} \quad (3.4)$$

denklemini kullanılmaktadır. Beer-Lambert yasası olarak bilinen bu denklem de; I , kalınlığı d olan bir filminden geçen elektronun XPS spektrumunda oluşturduğu pik alanı, I_0 seçilen alttaştan alınan ilk XPS sonucundan hesaplanan pik alanı ve λ elektronun belirli bir ortamda alabileceği en uzun yol (Inelastic Mean Free Path, IMFP) parametrelerini ifade etmektedir. Denklem kullanılarak herbir hedef için ayrı ayrı hesaplanan kalınlıkların kaplama sürelerine bağlı grafiği çizilerek film büyüme hızları hesaplanabilmektedir.

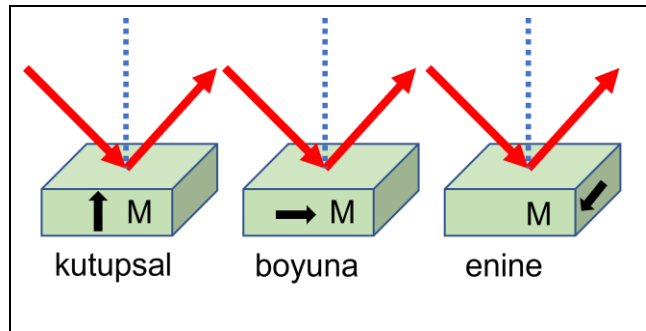
3.3. Manyeto-Optik Kerr Etkisi (MOKE)

Kerr 1877 yılında Brewster'in polarizasyon açısı yasasını ve Fresnel'in camdan yansıma teorisini kullanarak yepyeni bir teori ortaya atmıştır [34]. Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilen Kerr'in keşfinde kullandığı deney düzeneğinde Kerr, dış manyetik alan yokken, ışık kaynağının önüne yerleştirdiği Nicol prizma ışığı düzlem polarize ışık haline getirdikten sonra, elektromıknatıs çalışmıyorken, örnekten yansıtarak ve dedektörün önündeki Nicol prizma ışığı dedektöre geçirmeyecek şekilde ayarlamıştır. Dedektöre ışık düşmediğini gördükten sonra elektromıknatısı çalıştırmış ve dedektörden ışık geçtiğini gözlemlemiştir. Bu deney manyetik alanın ışığın polarizasyonunu değiştirdiğini açıkça ıspatlamaktadır.



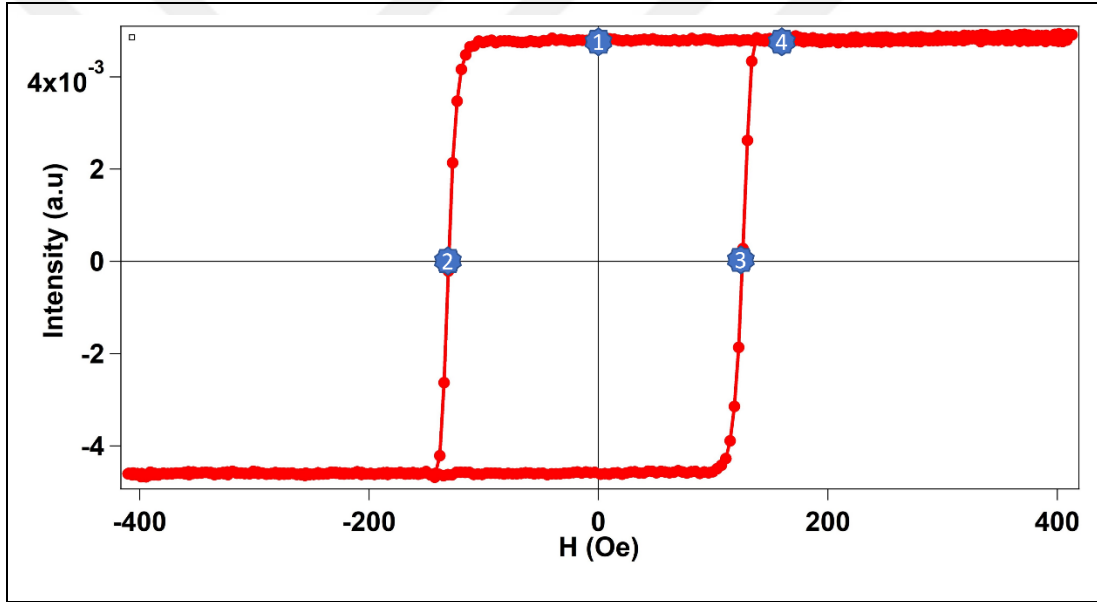
Şekil 3.2: Kerr tarafından kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Kerr bu deneyi elektromıknatıs açıkken, kapalıyken ve mıknatısın farklı kutuplarında tekrar tekrar gerçekleştirmiş ve ışığın hangi kutba düştüğünün de etkisi olduğunu gözlemlemiştir. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi MOKE tekniği, örneğin mıknatıslanmasının yönünün yansıma düzlemine göre durumuna bakılarak kutupsal (Polar MOKE, PMOKE), boyuna (Longitudinal MOKE, LMOKE), enine (Transversal MOKE, TMOKE) olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Örneğin mıknatıslanmasının yönü örnek düzlemine dik, yansıma düzlemine paralel ise PMOKE, örneğin mıknatıslanmasının yönü örnek ve yansıma düzlemine paralel ise LMOKE ve örneğin mıknatıslanması örnek düzlemine paralel ama yansıma düzlemine dik ise TMOKE olarak adlandırılmaktadır.



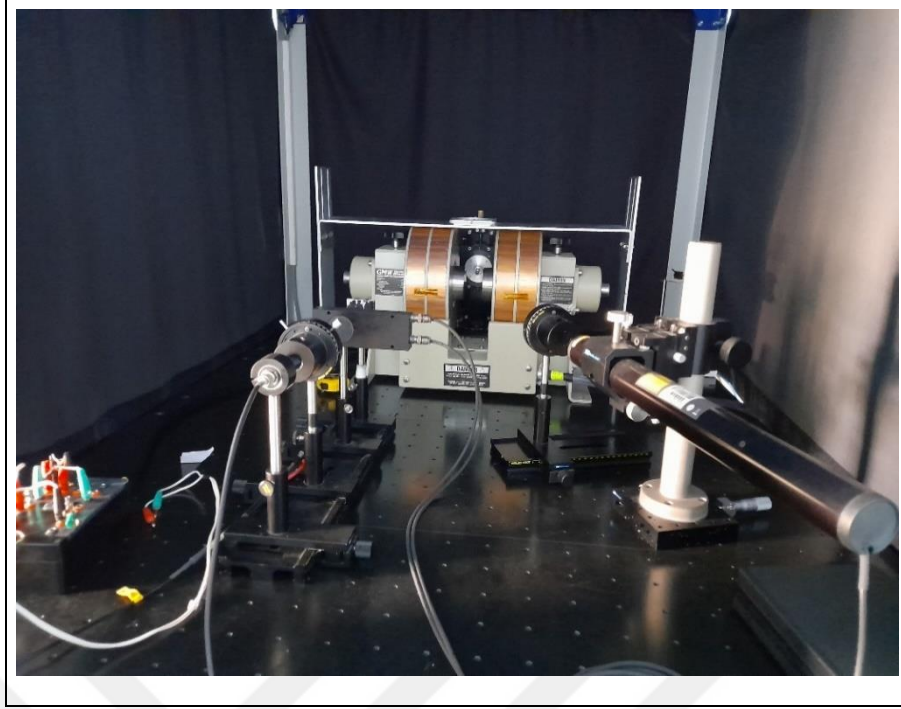
Şekil 3.3: Üç farklı MOKE geometrisinin (kutupsal, boyuna, enine) şematik gösterimi.

MOKE tekniği ile diğer manyetometre ölçümlerinden de elde edildiği gibi manyetik çevrim (histeresis, hysteresis) elde edilmektedir. Elde edilen histeresis ile örneğin manyetik anisotropisi ve sıfırlayıcı alan değerleri belirlenebilmektedir. Şekil 3.4'te standart FM bir örnek için PMOKE tekniği ile elde edilmiş manyetik çevrim verilmiştir. Manyetik çevrimde gösterilen 2 ve 3 noktaları sıfırlayıcı alan (coercive field, H_{C1} , H_{C2}) değerlerini ifade etmekte iken 1 ve 4 noktaları sırası ile dış manyetik alan yokken örneğin mıknatıslanmasını ifade eden kalıcı mıknatıslanma (remanent magnetization, M_R) değerleri ve mıknatıslanmanın doyuma ulaştığı nokta olan doyum mıknatıslanması (saturation magnetization, M_S) değerleri ile orantılıdır. Histeresisin kareliliğinin (squareness) bir ölçüsü olan M_R/M_S oranı bu değerler belirlenerek hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.4: PMOKE tekniği ile elde edilmiş standart bir örnek için mıknatıslanma eğrisi.

Şekil 3.4'te gösterilen manyetik çevrimin düşey ekseni örnekten yansıyan ışık şiddetidir (Intensity). Farklı ortamların yansımaya katsayısı farklı olduğu için, ışık şiddeti manyetik özellikten bağımsız olarak örnekten örneğe değişmektedir. Bu nedenle, MOKE ölçümünden elde edilen manyetik çevrimler birkaç örnekte kıyas amaçlı kullanılacaksa genellikle düşey eksen ± 1 aralığına normalize edilerek kullanılmaktadır. Bu teknik ile sadece FM malzemelerin manyetik karakterizasyonu yapılabiliyor olsa da, yüzey hassas olması, kolay ve hızlı bir şekilde histeresis elde edilebilmesi gibi avantajları ile ön plana çıkmaktadır.



Şekil 3.5: GTÜ fizik bölümünde bulunan MOKE sisteminin fotoğrafı.

Şekil 3.5’te fotoğrafı gösterilen optik masa üzerinde, Melles Griot-25 LHP 991-230 model 632,8 nm dalga boyuna sahip HeNe polarize lazer, lazerin önünde Melles Griot marka, Glan-Taylor PTY-20.0-425-475 model polarizör, ölçümde örneğe manyetik alan uygulamak amacı ile GMW marka 5403 model su soğutmalı elektromıknatıs, optik ayar yapılırken kolaylık olması maksadı ile hizalama deliği (pin hole), örnekten yansıyan ışığı ortam aydınlatmasından ayırmak amacı ile fused silika malzemeden yapılmış optik başlıklı fotoeleastik modülatör, örnekten yansıyan ışığı algılaması için 632,8 nm dalga boylu ışık bölgesinde çalışan Si fotodiyot bulunmaktadır.

3.4. Anormal Hall Etkisi (AHE)

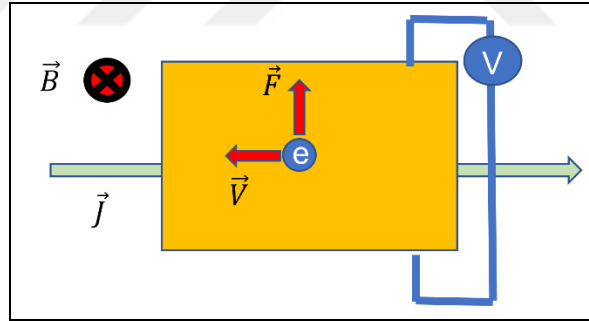
Metallerde ve yarı iletkenlerde direncin sebebi, iletim elektronları ile lokalize elektronlar arası etkileşimdir. Edwin H. Hall ilk defa 1879’da akım geçen iletken bir levhaya manyetik alan uygulayarak direncinin değiştiğini gözlemlemiştir. Şekil 3.6’da Hall’in deney düzeneğinin şematik gösterimi verilmiştir. Buna göre üzerinden akım geçen iletken bir levhaya akıma dik yönlü manyetik alan uygulandığında akımı oluşturan elektronlara Lorentz kuvveti etki etmektedir [35]. Bu kuvvet,

$$\vec{F} = q. \vec{V} \times \vec{B} \quad (3.5)$$

denklemini ile hesaplanmaktadır. Bu denklem, V hızı ile hareket eden q yükünün dışarıdan manyetik alana maruz bırakılması halinde yönü sağ el kuralı ile belirlenebilen bir F kuvveti etkisinde saptığını ifade etmektedir. Lorentz kuvveti etkisinde sapan elektronlar akıma ve manyetik alana dik doğrultuda bir potansiyel fark oluşturmaktadır. Bu potansiyel farka Hall voltajı denir ve V_H ile gösterilir. V_H ;

$$V_H = \frac{I. B}{q. n. d} \quad (3.6)$$

denklemini ile verilmektedir [36]. Burada, I levhadan geçen akım değerini, B uygulanan dış manyetik alanı, q taşıyıcı yük değerini, n taşıyıcı yük yoğunluğunu ve d levhanın kalınlığını ifade etmektedir. Denkleme göre, V_H kalınlıkla ters orantılıdır, bu da tekniğin yüzey hassas olmasını sağlamaktadır. Bu teknikten elde edilen V_H değerinin dış manyetik alana bağlı çizilen grafiğinin eğiminden yarı iletkenin yük taşıyıcılarının türü (p tipi, n tipi) belirlenebilmektedir [37].



Şekil 3.6: Akım geçen levhadaki elektron, harici manyetik alan, Lorentz kuvveti, elektronun hızı ve V_H 'nin şematik gösterimi.

Mıknatıslanmanın öz direnç üzerindeki etkisi artık tartışılmaz bir gerçektir. Özellikle ferromıknatıslarda dış manyetik alan uygulanmadan bile V_H olduğu gözlemlenmiştir. Bu etki anormal Hall etkisi (anomalous Hall effect, AHE) adını almıştır. Etkinin anormal olmasının sebebi dik manyetik anizotropiye (perpendicular magnetic anisotropy, PMA) sahip örneğin mıknatıslanmasının Hall direncine (R_H) katkısının yanında dış manyetik alanın Hall direncine katkısının ihmal edilebilir düzeyde kalıyor olmasıdır. FM malzemenin Hall direncine katkısının bu derece büyük olmasının polarize iletim elektronlarının spin yörünge etkileşiminin bir sonucu olduğu

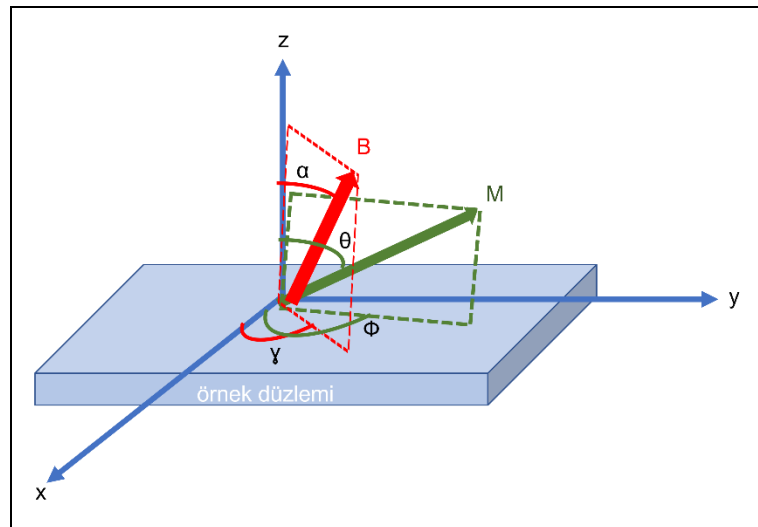
düşünülmektedir [37]. V_H 'nin mıknatıslanma ile orantılı olmasının sebebi spin-yörünge etkileşiminin elektronun spininin hizalanması ile orantılı olmasıdır. Ferromanyetik bir malzemenin Hall voltajı,

$$V_H = V_{NHE} + V_{AHE} \quad (3.7)$$

denklemleri ile verilmektedir [38]. Burada V_{NHE} normal Hall voltajı adını alan dış manyetik alanın Hall voltajına katkısı, V_{AHE} ise örneğin mıknatıslanmasının Hall voltajına katkısıdır. V_{AHE} 'nin yanında ihmal edilebilir büyüklükte olan V_{NHE} denklemden çıkarılır ve denklem kolay eksen belirlemek için açığa bağlı olarak ifade edilir ise V_H ;

$$V_H = R_s \frac{I \cdot M}{d} \cos \theta \quad (3.8)$$

denklemleri ile gösterilebilmektedir. Burada; R_s AHE sabitini, d film kalınlığını, I örnekten geçen akım değerini, M örneğin mıknatıslanmasını, θ ise mıknatıslanma ile film normali arasındaki açıyı ifade etmektedir [39]. Örnek düzlemi, örneğin mıknatıslanması ve dış manyetik alan (H) şematik olarak Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Eşitlik (3.8) ve Şekil 3.7 birlikte değerlendirildiğinde, AHE ölçümünden elde edilen V_H değerinin örneğin mıknatıslanmasının örnek düzlemine dik bileşeni ile orantılı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.7: Dış manyetik alan, örneğin mıknatıslanması ve örnek düzleminin şematik gösterimi.

Bu teknik ile örneğin manyetik çevrimini elde ederek, manyetik kolay eksenini, sıfırlayıcı alan değerlerini belirlemek, spin polarize akımları kontrol etmek ve manyetizasyonu karakterize etmek mümkündür [40].

Tez kapsamında hazırlanan manyetik ince filmlerin düşük sıcaklık AHE (Low Temperature, LT-AHE) ve odası sıcaklığı AHE (Room Temperature, RT-AHE) ölçümleri Fizik bölümü MOKE laboratuvarında bulunan AHE düzeneğine gerçekleştirilmiştir. AHE ölçümü almak için maskeli olarak hazırlanmış olan örnekler PCB'lere çift taraflı bant ile tutturulduktan sonra, Au tel ile kontak alınmıştır. Daha sonra, Şekil 3.8.a)'da üstten fotoğrafı gösterilen örnek tutucu üzerindeki dişi PCB ye yerleştirilmiştir. Ölçüm sırasında manyetik alan kaynağı olarak MOKE laboratuvarındaki elektromıknatıs kullanılmıştır.



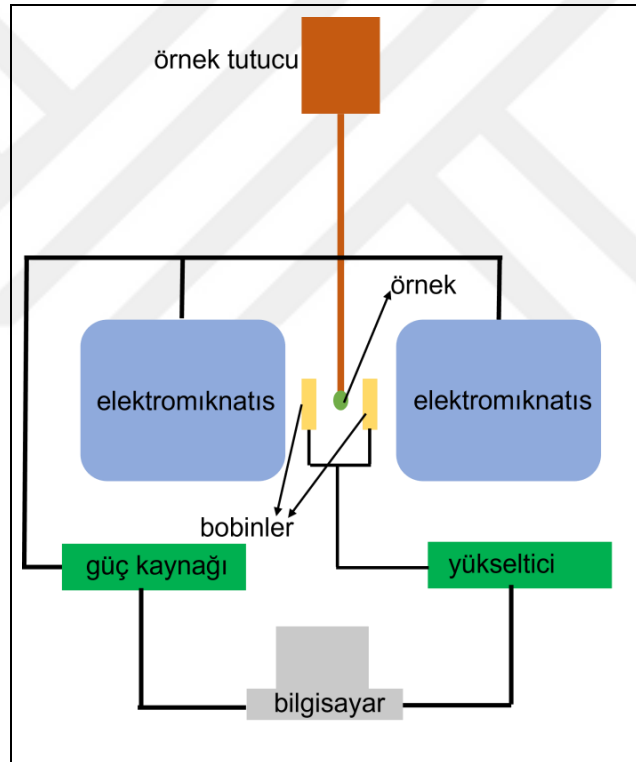
Şekil 3.8: Örnek tutucunun a) üstten fotoğrafı ve b) vakum haznesi.

AHE düzeneğinde soğutma işlemi sıvı Helyum (He) veya Azot (N) kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Düşük sıcaklık ölçümlerine başlanmadan önce Şekil 3.8.b)'de gösterilen vakum haznesi ile sistem vakuma alınmıştır. Tez kapsamında yapılan LT-AHE ölçümleri örnek tutucudaki çift cidarlı girişten sıvı azot (N) gönderilerek gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde kullanılan sıvı azot Nanoteknoloji enstitüsünde bulunan N sıvılaştırma sisteminden temin edilmiştir. Ölçüm sıcaklıkları örnek tutucu üzerinde, örneğin hemen altında bulunan ve önceden kalibrasyonu yapılmış olan Cernox sıcaklık sensörü ile belirlenmiştir. Cernox sıcaklık sensörü, 4 K-

420 K sıcaklık aralığında, dış manyetik alan altında ve vakum ortamında kullanılabilir.

3.5. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)

Titreşimli örnek manyetometresi (Vibrating sample magnetometer, VSM) Faraday'ın indüksiyon kanununa göre çalışan bir manyetometre türüdür. Bu kanun, değişen manyetik alanın akım indükleyeceğini (elektro motor kuvveti, emk oluşturacağını) belirtmektedir. Simon Foner tarafından 1955'te icat edildiği için Foner manyetometresi olarak da anılan bu teknik, Şekil 3.9'da gösterilen sistemden oluşmaktadır [41].



Şekil 3.9: VSM tekniğinin bileşenlerinin şematik gösterimi.

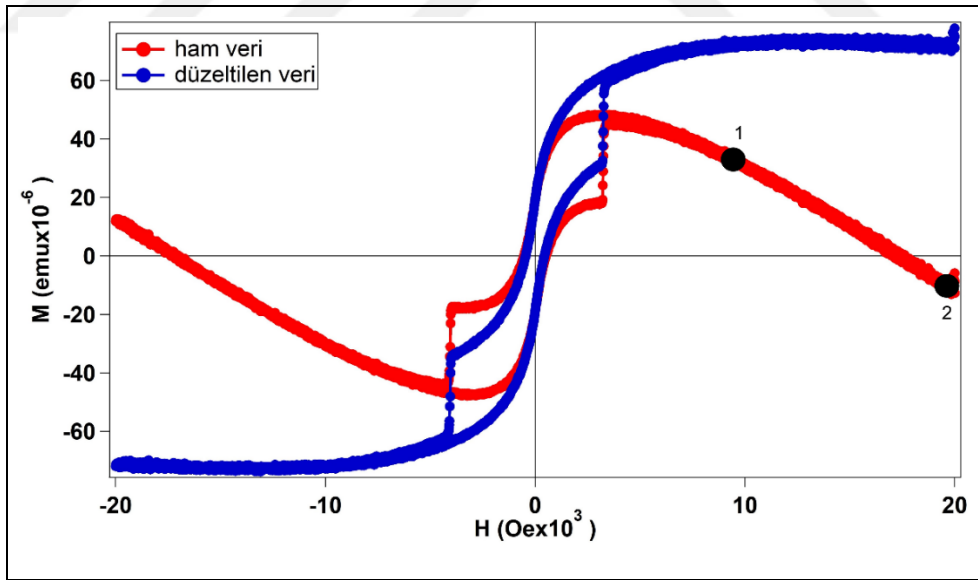
Şekil 3.9'da gösterildiği üzere VSM sistemi bir elektromıknatıs, elektromıknatısta manyetik alan oluşturabilmek için güç kaynağı, örneğin titreşmesini sağlamak için piezo elektrik malzemeden yapılmış örnek tutucu, akım tutucu bobinler (pick-up coils), bir yükseltici (amplifier), veriyi görüntülemek ve sistemi kontrol etmek için kullanılan bir bilgisayardan oluşmaktadır. Örnek tutucu piring, quartz veya plastik gibi manyetik olmayan parçalardan oluşmaktadır. Piring örnek tutucular,

ferromanyetik safsızlıklar içerebileceği için mıknatıslanma özelliği düşük olan örneklerde tercih edilmemesi gerekmektedir [42]. Akım tutucu bobinlerde indüklenen emk;

$$\varepsilon = -N \frac{d}{dt} (BA \cos \theta) \quad (3.9)$$

denklemini ile ifade edilmektedir. Burada N bobinin sarım sayısı, A bobinin alanı, B manyetik alan, θ manyetik alan ile bobin yüzey normali arasındaki açıdır. Bilinen bir örnek (1 mm³ hacme sahip çelik örneğin manyetik momenti 1 emu dur [41].) ile kalibre edilmiş sistemlerde bobin parametrelerinin bilinmesi gerekmemektedir. Sistemin çözünürlüğünü etkileyen en önemli etmen bobinlerdir.

VSM'nin çalışma mantığı basittir. Elektromıknatısın tam ortasına ve akım toplayıcı bobinlerin arasına yerleştirilen örnek piezoelektrik örnek tutucu sayesinde titreştirilmektedir. Mıknatıslanmış örnek, titreşim hareketi kaynaklı elde edilen değişen manyetik alan ile bobinlerde akım indüklenmesini sağlamaktadır. Bobinlerde oluşan emk örneğin mıknatıslanması ile orantılıdır.



Şekil 3.10: Standart bir örnekten VSM tekniği kullanılarak elde edilen mıknatıslanma eğrisi.

Bu teknik ile manyetik malzemelerin manyetik çevrimleri, doyum mıknatıslanmaları, paramanyetik duygunlukları (susceptibility), ve anizotropileri hızlı ve doğru bir şekilde ölçülebilmektedir. Ancak VSM tekniği kullanılarak elde edilen

veri örnekten gelen sinyalin yanı sıra örnek tutucu ve alttaştan gelen paramanyetik veya diamanyetik moment katkısını da içermektedir. Bu sebeple arka plan katkısının ham veriden çıkarılması gerekmektedir. Şekil 3.10'da standart bir örnekten VSM tekniği kullanılarak elde edilen mıknatıslanma eğrisini görmekteyiz. Burada 1 ve 2 noktaları arasına bir doğru oturtularak hesaplanan eğim, manyetik alan eksenini ile çarpılarak ham verideki diamanyetik katkı hesaplanabilmektedir. Daha sonra ham veriden, hesaplanan diamanyetik katkı çıkarılarak Şekil 3.10'da verilen düzeltilmiş manyetik çevrim elde edilmektedir.

Bu teknik ile örnekten 2 cm uzaklıkta ve vakumda ölçüm gerçekleştirildiği için örnek, basınç ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerden etkilenmemektedir. Numuneden geçen akı sabit genlikli alternatif bir voltaja dönüştürülmektedir. Bu durum örneğin titreştirilmesi sayesinde gerçekleştirilmektedir.

4. P-MTJ HAZIRLANMASI VE KARAKTERİZASYONU

Bu bölümde hazırlanması planlanan P-MTJ'nin temel tabakaları olan sabit tabaka, serbest tabaka ve yalıtkan tabaka için ayrı ayrı yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Sabit tabaka olarak kullanılacak dik manyetik anizotropiye sahip çok katlı ince filmlerin manyetik saçtırma tekniği ile hazırlanma koşulları detaylı olarak tartışılmıştır. Büyütülen filmlerin AFM katmanı olan CoO'nin XPS tekniği ile elemental analizi yapılmıştır. Yine hazırlanan örneklerin MOKE tekniği ile manyetik kolay eksenlerinin belirlenmesi AHE ve VSM tekniği ile exchange bias ölçümlerinin yapılması ayrı ayrı başlık halinde bu bölüm içerisinde anlatılmaktadır. Serbest tabaka için büyütülmesi planlanan filmde manyetik saçtırma tekniğindeki film büyütme gücünün mıknatıslanma eğrisine olan etkisi MOKE tekniği kullanılarak incelenmiştir. Yalıtkan tabaka olarak kullanılması planlanan MgO manyetik saçtırma tekniği ile XPS kontrollü farklı film büyütme güçlerinde büyütülerek, film büyütme gücüne bağlı elemental oran hesabı ve detaylı XPS fit çalışması yapılmış ve yine bu bölüm içerisinde anlatılmıştır.

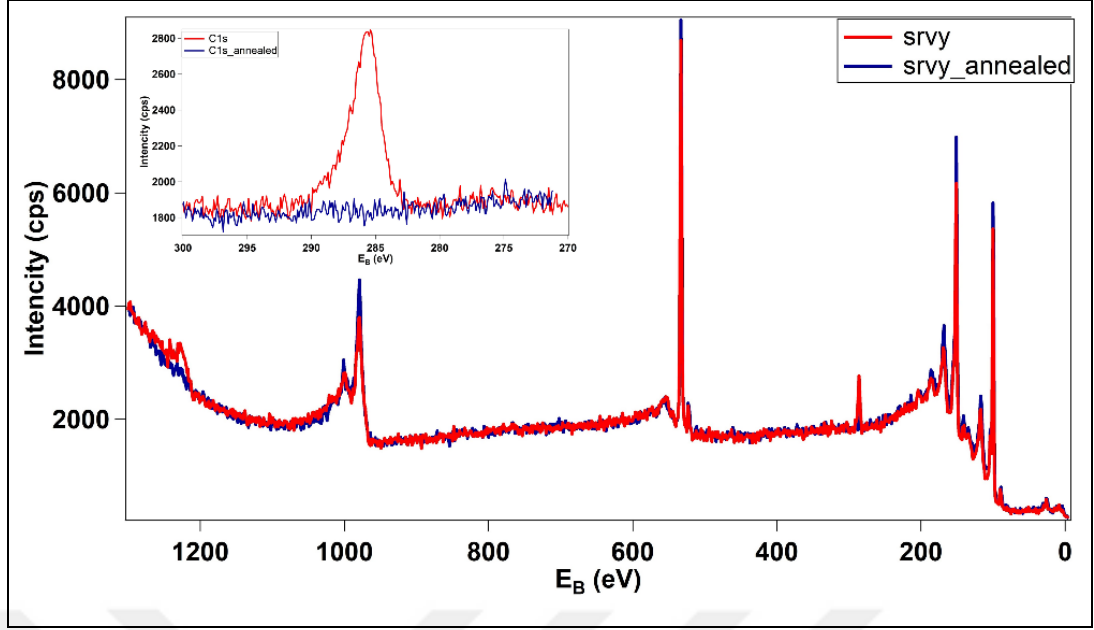
4.1. Sabit Tabaka (Pinned Layer, PL) Çalışması

MTJ'nin temel çalışma mantığı; sabit ve serbest tabakanın manyetik yönelimlerinin birbirlerine göre durumlarının MTJ'nin elektriksel direncini değiştirmesi prensibine dayanmaktadır. Bu olayın gerçekleşebilmesi için, serbest tabakanın mıknatıslanmasının yön değiştirdiği manyetik alan değerinde, sabit tabakanın mıknatıslanmasının mevcut yönelimini koruması gerekmektedir. Sabit tabakanın mıknatıslanmasının sabitlenmesi işlemi, sıfırlayıcı alan değeri, serbest tabakanın sıfırlayıcı alan değerinden daha büyük bir ferromanyetik malzeme ile sağlanabileceği gibi exchange bias etkisi ile de gerçekleştirilebilmektedir. Serbest tabakanın mıknatıslanmasının yönüne referans olarak üretilen sabit tabaka, STT-MRAM uygulamalarında kullanılmak üzere hazırlanan MTJ'nin içerisinde geçen akımın polarizasyonunu da sağlamaktadır. Exchange bias etkisi ile mıknatıslanması sabitlenen sabit tabakalarda spin polarizasyonu arttığı için MTJ'nin tepki süresi azalmaktadır.

Bu bölümde, tez kapsamında hazırlanması planlanan P-MTJ yapısında sabit tabaka olarak kullanmak amacı ile manyetik saçtırma tekniği kullanılarak altı farklı örnek hazırlanmıştır. Hazırlanan örneklerde EB gözlemek amacı ile AFM malzeme olarak CoO, FM malzeme olarak [Pt(10)/Co(5)]_{x3} katmanları büyütülerek CoO kalınlığına bağlı EB değişimi incelenmiştir. MS sistemi kullanılarak hazırlanan örneklerin film büyütme şartları, CoO katmanı üzerinde yapılan XPS çalışması, manyetik kolay eksenlerinin MOKE tekniği kullanılarak belirlenmesi, AHE ve VSM teknikleri kullanılarak elde edilen mıknatıslanma eğrilerinden EB değerlerinin hesaplanması yine bu bölüm içerisinde anlatılmıştır.

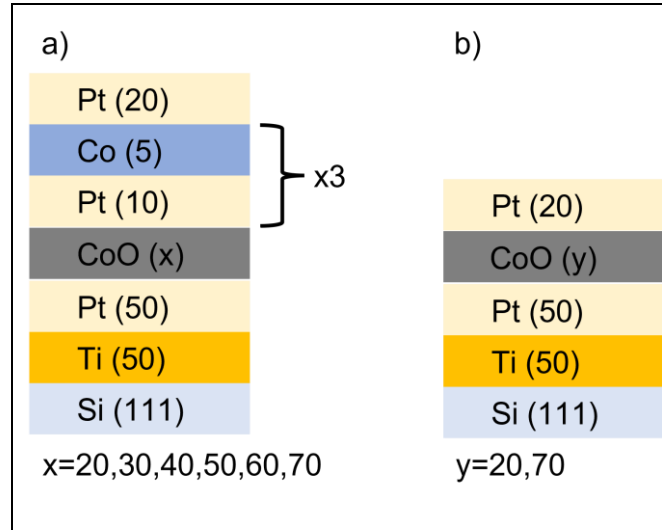
4.1.1. CoO(x)/Pt(10)/Co(5) Çok Katlı İnce Filmlerin Manyetik Saçtırma Tekniği ile Hazırlanışı

Tez kapsamında çalışılan filmler doğal oksit Silisyum [Si(111)] kristal alttaşlar üzerine büyütülmüştür. Alttaşların organik bileşiklerden arındırılması amacı ile saf su ve ardından etanol ile 15 dakika ultrasonik banyoda titreştirilmiştir. Daha sonra örnek tutuculara yerleştirilerek sisteme yüklenmiştir. Atmosferde alttaşlar üzerinde birikmiş olası karbon bazlı bileşiklerden arındırmak için MS sisteminde bulunan PBN ile tavlama (annealing) işlemi yapılmıştır. Tavlama işlemi, 15 dakikada 723 K sıcaklığına çıkılıp 30 dakika bu sıcaklıkta bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Tavlama işlemi bitiminden sonra, PBN kapatılmış örneğin sistemin temel sıcaklığı olan 291 K'e soğuması 45 dakika sürmüştür. Örneklerin tümünün büyütülmesi bu sıcaklıkta gerçekleştirilmiş olup, ilave ısı işlem uygulanmamıştır. Tavlama sonrasında alttaşların temizlenip temizlenmediğinin kontrolü için, XPS tekniği ile öncesi ve sonrası genel ve detaylı tarama yapılmıştır. Analiz odasının basıncı ölçüm sırasında $\sim 10^{-10}$ mbar, kullanılan X ışını kaynağı Al K_α (250 W; 12,5 kV)'dır. Tavlama öncesi ve tavlama sonrası Si(111) alttaşların XPS ölçümlerinin karşılaştırılması Şekil 4.1'deki gibidir.



Şekil 4.1: Tavlama öncesi ve sonrası Si(111) alttaşların XPS ölçüm sonuçları.

Şekil 4.1’de verilen tavlama öncesi C1s detay ölçümünde C1s piki yüzey karbon kirliliğinin varlığını açıkça göstermektedir. Tavlama sonrası C1s bölgesinde pik görülmemesi alttaşların atmosferde tutunan yüzey kirliliğinden arındırılmış olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.2: MS yöntemi ile hazırlanan örneklerin şematik gösterimi.

MTJ’lerde sabit tabaka olarak kullanılabilecek dik manyetik anisotropye sahip manyetik ince film hazırlamak ve EB’nin CoO kalınlığına bağlı değişimini incelemek amacı ile Şekil 4.2.a)’da gösterilen film yapısı hazırlanmıştır. Parantez içerisinde

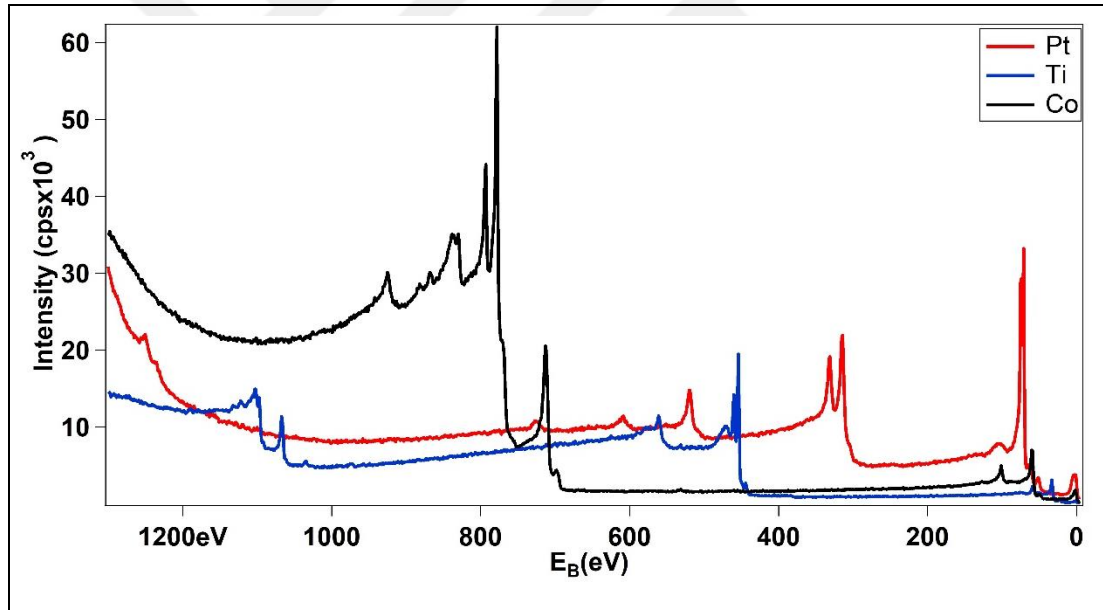
verilen rakamlar katman kalınlığını ifade etmekte olup tez boyunca bahsedilen kalınlıklar Angström (Å) cinsindendir. Burada Si(111) üzerine büyütülmüş Ti(50) ve Pt(50) katmanları ileride yapılacak olan TMR ölçümlerinde elektronik kontakt katmanı olarak kullanmak ve çekirdek tabaka (seed layer) olarak kullanmak amacı ile büyütülmüştür. Örneklerde EB gözlemlmek amacı ile AFM malzeme olarak CoO(x=20,30,40,50,60,70), FM malzeme olarak [Pt(10)/Co(5)]₃ tekrarlı yapıları kullanılmıştır. En üst katman olan Pt(20) tabakası, örneklerin manyetik ölçümlerinin alınması için atmosfere çıkarıldığında bozulmaması amacı ile koruyucu katman (cap layer) olarak büyütülmüştür. Şekil 4.2.b)'de verilen diğer örnek sistemi Bölüm 4.1.2'de detaylı olarak tartışılacak olan CoO içerisindeki metal kobalt varlığını desteklemek amacı ile hazırlanmıştır. Burada Ti ve Pt paramanyetik, CoO ise antiferromanyetiktir. Bu örnek sisteminde ferromanyetik sinyal verebilecek olan tek katman CoO'nin içerisindeki metal kobalttır. Bu nedenle CoO(y=20,70) olacak şekilde iki farklı örnek hazırlanmıştır. Örneklerin kodlaması, CoO kalınlığı x= 20, 30, 40, 50, 60, 70 olan Şekil 4.2.a) örnek sistemi için sırası ile ORN2, ORN3, ORN4, ORN5, ORN6, ORN7; CoO y= 20, 70 Şekil 4.2.b) örnek sistemi için sırası ile ORN0, ORN1 olarak belirlenmiştir. Örnekler hazırlanmadan önce, MS sisteminin basıncı $\sim 10^{-9}$ mbar mertebesinde dir. MS sisteminde her bir katman için kullanılan film büyütmesi sırasındaki parametreler Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: MS sisteminde hazırlanan örneklerin kaplama parametreleri.

Katman	Pozisyon (mm)	Güç kaynağı	Güç(W)	Basınc($\times 10^{-3}$ mbar)	Kaplama Hızı (Å/s)
Ti	100	PDC	10	3,48-3,79	0,14
Pt	70	DC	2	2,66-3,01	0,22
Co	70	RF	15	2,61-2,86	0,16
CoO	100	RF	40	1,82-2,21	0,32

Tablo 4.1'de belirtilen film büyütme güç ve basınç parametrelerine oluşturulan plazmanın kararlı (stable) olduğu durum gözlemlenerek karar verilmiştir. Metal durumdaki Ti, Pt ve Co katmanları 6N saflıkta Ar gazı atmosferinde büyütülmüştür. CoO katmanı ise metal kobalt hedeften Ar ve O gazı ortamında, reaktif kaplama ile gerçekleştirilmiştir. Reaktif kaplamadaki Ar:O₂ oranı 15:1'dir.

Bu çalışma için yapılması gereken film büyüme hızı kalibrasyonu MS sistemine entegre olan analiz odasında bulunan XPS tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MS odasında bulunan elementlerin (bu çalışma için Ti, Pt, Co) hız kalibrasyonları Ag folyo (foil) üzerinde çalışılmıştır. Ag folyo sisteme yüklenmeden önce metal parlatici ile parlatılmış ardından saf su ve ethanol ile onbeşer dakika ultrasonik banyoda titreştirilmiştir. XPS ölçümü ile yüzey temizliği kontrol edilmiştir. XPS tekniğinde kalınlık hesabı için Bölüm 3.2’de bahsedilen Beer- Lambert yasasından film kalınlığı çekilerek elde edilen denklem kullanılmıştır. Eşitlik (3.4)’ten elde edilen denklem ile herbir element için ayrı ayrı hesaplanan kalınlıkların kaplama sürelerine bağlı grafiği çizilerek, film büyüme hızları hesaplanmış ve Tablo 4.1’e kaydedilmiştir. CoO katmanı için daha önce X ışını yansımaları (X-Ray Reflectivity, XRR) tekniği ile kalibrasyonu yapılmış olan QCM’de gözlemlenen 35 Å Co kalınlığının 20 Å CoO kalınlığına karşılık geldiği hesabı kullanılmıştır [43].

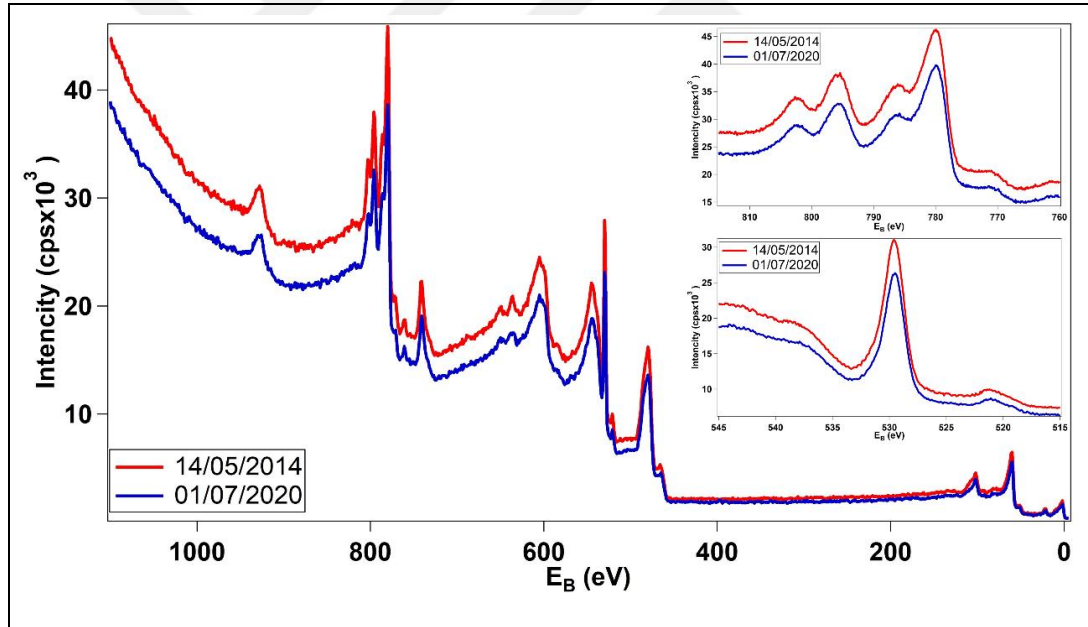


Şekil 4.3: Ti, Pt ve Co hedeflerinin kazıma sonrası XPS genel tarama grafiği.

Altaşlar tavlandıktan sonra ve CoO katmanı büyütüldükten sonra, kullanılacak olan hedefler sistemde bulunan bakır altaş üzerine film büyütülerek temizlenmiştir. Şekil 4.3’te Al K α (250 W; 12,5 kV) X ışını kaynağı kullanılarak alınan Ti, Pt, Co genel XPS taramasında O1s ve C1s bölgesinde pik olmaması hedef katotların temizlenmiş olduğunu göstermektedir. Hedef katotların temizliğinden emin olunduktan sonra örneklerin hazırlanmasına geçilmiştir.

4.1.2. X ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) Ölçüm Sonuçları

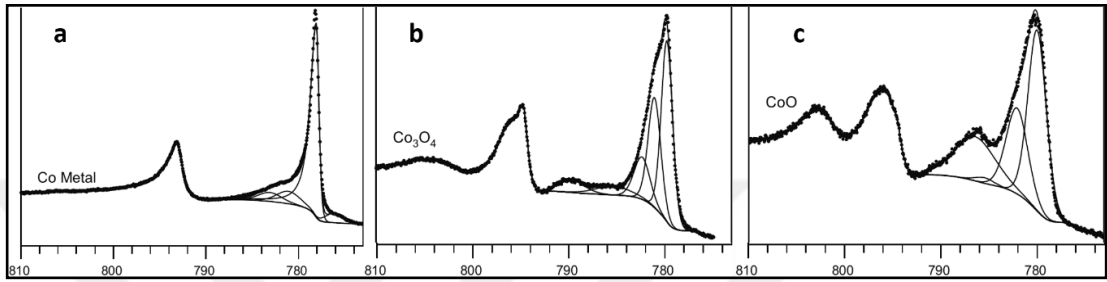
Tez kapsamında hazırlanması planlanan P-MTJ'de sabit tabaka olarak kullanmak amacı ile hazırlanan, sabit tabakanın mıknatıslanmasını sabitleme işlemini gerçekleştirmek için EB gözlemlmek amacı ile AFM malzeme olarak seçilen CoO'nun element ölçüsünün (stoichiometry) XPS tekniği kullanılarak belirlenmesi bu kısımda tartışılacaktır. Yapıları Si(111)/Ti(50)/Pt(50)/CoO(x)/[Pt(10)/Co(5)]_{x3}/Pt(20) olan ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerde CoO(x= 70, 60, 50, 40, 30, 20) katmanını üzerine 5 Å Pt büyütüldükten sonra ve koruyucu tabaka olan Pt(20) katmanını öncesi XPS ölçümü gerçekleştirilmiştir. Fit kolaylığı sağlaması açısından XPS ölçümlerinde Mg K_α (1253,6 eV) X ışını kaynağı, 250 W güç ve 12,5 kV anot potansiyeli parametreleri ile kullanılmıştır. MS sisteminde kullanılan örnek hazırlama parametreleri Bölüm 4.1.1'de detaylı olarak anlatılmıştır.



Şekil 4.4: 2014 ve 2020 tarihli örneklerin XPS ölçümleri.

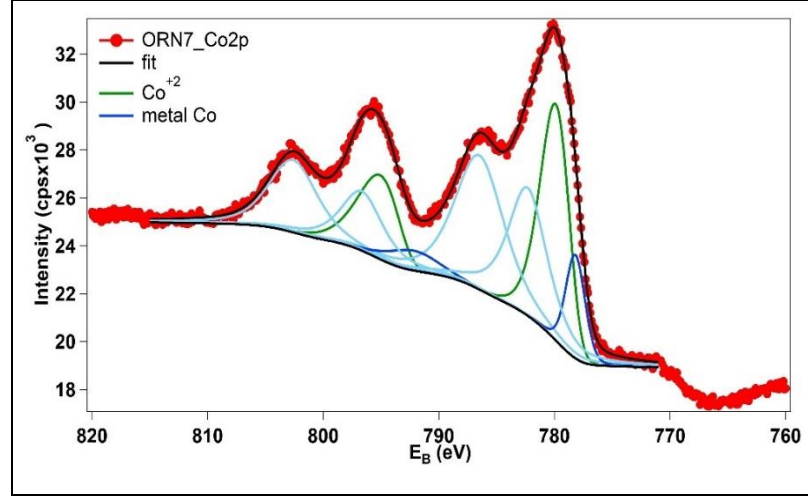
Hazırlanması planlanan örneklerin büyütülmesine geçilmeden önce, sistemimizde daha önce çalışılmış olan CoO'ı tekrar elde etmek amacı ile, MS sisteminde aynı parametreler kullanılarak 300 Å kalınlığında CoO katmanını, Cu alttaş üzerine büyütülmüştür ve ardından XPS ölçümü gerçekleştirilmiştir. 2014 ve 2020 örneklerinin XPS ölçüm sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir. 2014 yılında hazırlanan örnek ile, 2020 yılında hazırlanan örneğin alttaş farkı dolayısı ile oluşan sinyal şiddeti

farkı dışında aynı kimyasal özelliği gösterdiği Şekil 4.4'teki detay tarama Co2p ve O1s bölgelerinde de açıkça görülmektedir. Şekil 4.4'deki genel tarama XPS ölçüm sonuçlarına bakıldığında CoO katmanını üzerinde herhangi bir kirlilik oluşmadığı görülmektedir. Ayrıca Co2p_{3/2} ve O1s pik konumları her iki örnekte de aynı olup sırası ile 780,3 eV ve 529,6 eV olarak gözlemlenmiştir. Co2p_{3/2} pik konumunun 778,1 eV'den (metal kobalt için) 780,3 eV'ye kayması, Co'nun oksit formunda olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.5: Farklı oksit fazlarına karşılık Co2p spektrumları, yatay eksen bağlanma enerjisi, düşey eksen şiddettir.

Kobaltın oksit fazının belirlenmesinde ana pik pozisyonunun yanı sıra karakteristik olarak stokiyometriye bağlı oluşan ikincil piklerin şekline göre, elde edilen fazın kabaca belirlenmesi mümkün olmaktadır. Şekil 4.5'te, Biesinger'in yaptığı çalışmadan alınan Co2p detaylı taralamalarına göre; Şekil 4.5.b)'de gösterilen Co2p_{1/2}'nin yüksek ve düşük bağlanma enerjisi bölgelerinde küçük pikler oluşması ve Co2p_{1/2}'nin iki tepeye bölünmesi Co₃O₄'e atfedilirken, Şekil 4.5.c)'de verilen Co2p_{3/2} ve Co2p_{1/2}'nin yüksek bağlanma enerjisi bölgesinde yüksek alanlı ikincil piklerin (shake up) oluşması CoO fazına atfedilmektedir. Biesinger'in çalışmasına göre, bu çalışmada hazırlanan yapıdaki baskın fazın CoO olduğu görülmektedir [44]. Ancak baskın fazın CoO olması, yapıda metal kobalt veya kobaltın farklı oksit fazlarının az da olsa bulunmadığını göstermemektedir. Bu nedenle her bir örneğin CoO/Pt(5) katmanından alınan XPS ölçümleri için ayrı ayrı detaylı XPS fit çalışması gerçekleştirilmiştir.



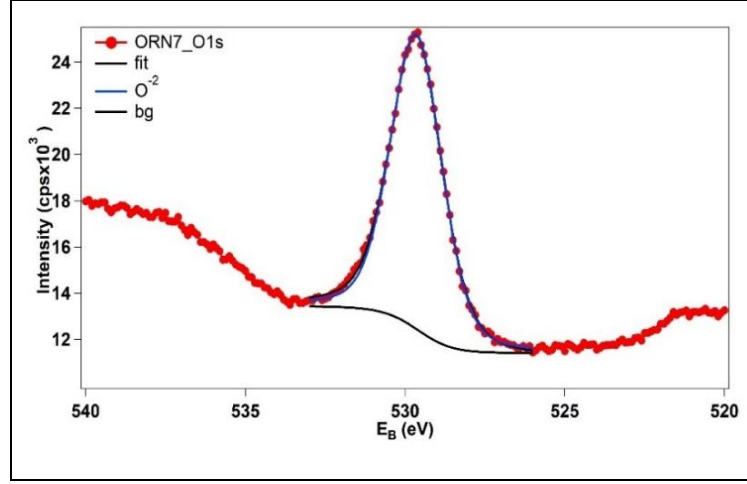
Şekil 4.6: ORN7 kodlu örneğin CoO/Pt(5) katmanı üzerinden alınan Co2p XPS detaylı taraması.

ORN7 kodlu örneğin Co2p bölgesinin detaylı XPS ölçümüne yapılan fitin data ile uyum içerisinde olduğu Şekil 4.6’da gösterilmektedir. Tüm örnekler için yapılan fit çalışmasında kullanılan pik parametreleri sabit tutularak Tablo 4.2’de verilmiştir. Her örnekte Co metal ve Co^{+2} pik pozisyonları sabit tutularak alan hesaplanmış arka plan fonksiyonu olarak ise Shirley kullanılmıştır. XPS fitinde kullanılan piklerden P1 ve P2 Co^{+2} çifti, P5 ve P6 metal Co çifti, P3, P4, P7 ve P8 pikleri uydu (satellite) piklerini ve shake up pikleri tanımlamaktadır.

Tablo 4.2: ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin Co2p bölgelerinin analizinde kullanılan pik parametreleri.

	Co2p							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Konum (eV)	780	795,3	786-786,5	802,6-803	778,1	792,1	782-783	796-797
FWHM (eV)	3	3	5	5	1,9	2	4	4

Şekil 4.7’de ORN7 kodlu örneğin CoO(70)/Pt(5) katmanı üzerinden alınan XPS ölçümünün O1s bölgesi ve fit sonuçları gösterilmiştir. O1s pikinde ikinci bir tepenin oluşmaması, yeterince dar ve simetrik, tek bir pik ile yapılan fitin datayla uyum içinde olması yapıda farklı oksit fazlarının olmadığını göstermektedir. Tüm örnekler için aynı fit düzeni kullanılmış ve O1s bölgesinin analizinde kullanılan pik parametreleri Tablo 4.3’te aralık olarak verilmiştir. Kullanılan tek pikin konumu aynı tutulmuş, arka plan fonksiyonu olarak Shirley kullanılmıştır.



Şekil 4.7: ORN7 kodlu örneğin CoO/Pt(5) katmanı üzerinden alınan O1s detaylı XPS taraması.

CoO'nin element ölçüsünün belirlenmesinde Bölüm 3.2'de açıklanmış olan eşitlik (3.3) kullanılmıştır. Denklemin CoO katmanına göre uyarlanmış hali eşitlik (4.1) şeklinde güncellenmiştir. Denklemden XPS fitlerinden elde edilen Co 2p ve O1s pik alanları (I_{Co} ve I_O) kullanılmıştır. Co2p ve O1s ASF değeri olarak sırası ile 3,590 ve 0,711 kullanılarak hesap yapılmıştır [33].

$$\frac{Co}{O} = \frac{\frac{I_{Co}}{S_{Co}}}{\frac{I_O}{S_O}} \quad (4.1)$$

Tablo 4.3: ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin O1s bölgelerinin analizinde kullanılan pik parametreleri.

O1s	
P1	
Konum (eV)	529,57-529,69
FWHM (eV)	1,89-1,97

Örneklerin Co2p ve O1s bölgelerinin fitlerinden elde edilen sonuçlar ile yapılan hesaplamalar, CoO kalınlığı ile karşılaştırılmalı olarak Tablo 4.4'te verilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre hazırlanan Tablo 4.4'ten görüldüğü üzere ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerde Co/O oranı, CoO katman kalınlığı arttıkça artmaktadır. CoO katman kalınlığı arttıkça Co/O oranının artması, yapıdaki metal kobalt miktarının arttığını göstermektedir.

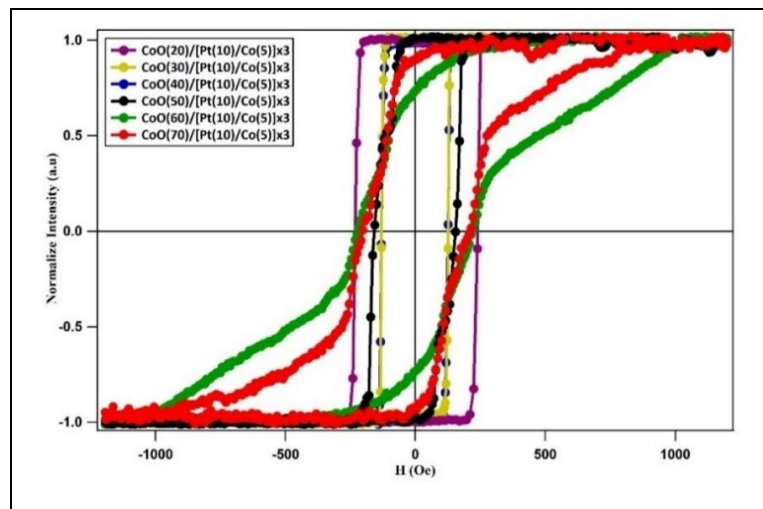
Tablo 4.4: ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin XPS fit çalışması sonucu Co/O oranları.

	CoO kalınlığı (Å)	Co/O oranı
ORN7	70	1,126
ORN6	60	1,101
ORN5	50	1,092
ORN4	40	1,033
ORN3	30	1,016
ORN2	20	1,006

Hazırlanan örneklerdeki CoO katman kalınlığı, 14.05.2014 tarihli CoO çalışmasında belirlenen şartlar ile hazırlanmış örneklerle yapılan XRR çalışmasında elde edilen sonuçlar kullanılarak belirlenmiştir [43]. Bu sonuçlara göre, MS sisteminde bulunan QCM’de gözlemlenen 35 Å Co kalınlığı, 20 Å CoO katmanı kalınlığına karşılık gelmektedir. Buna göre tez kapsamında hazırlanan örneklerin içerdiği CoO katmanları 2014 yılında yapılan denemeler sonucu belirlenmiş olan ve Bölüm 4.1.1’de belirtilen MS film büyütme parametreleri kullanılarak hazırlanmıştır.

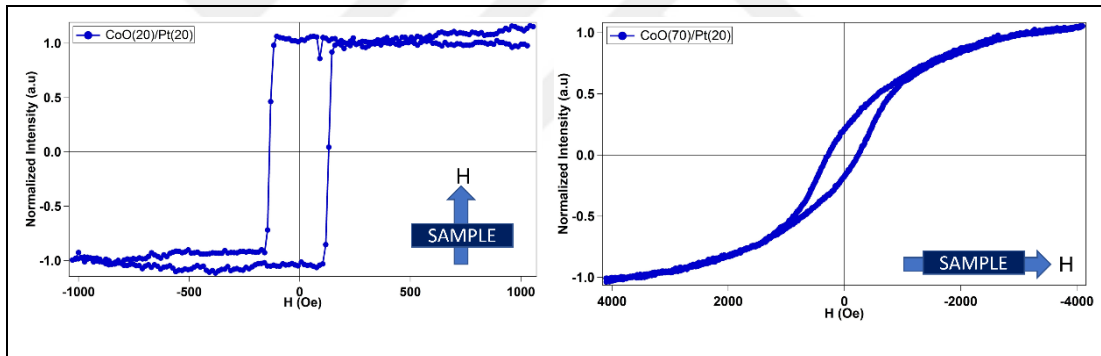
4.1.3. Manyeto-Optik Kerr Etkisi (MOKE) Ölçüm Sonuçları

Hazırlanan çok katlı manyetik ince filmlerin kolay ve zor eksenlerini ve sıfırlayıcı alan değerlerini belirlemek amacı ile üniversitemiz Fizik Bölümündeki MOKE laboratuvarında bulunan Nanosan Smart MOKE marka optik deney düzeneği kullanılmıştır. ORN2, ORN3, ORN4, ORN5, ORN6, ORN7 kodlu örneklerin örnek düzlemine dik geometride alınan PMOKE ölçümleri Şekil 4.8’deki gibidir.



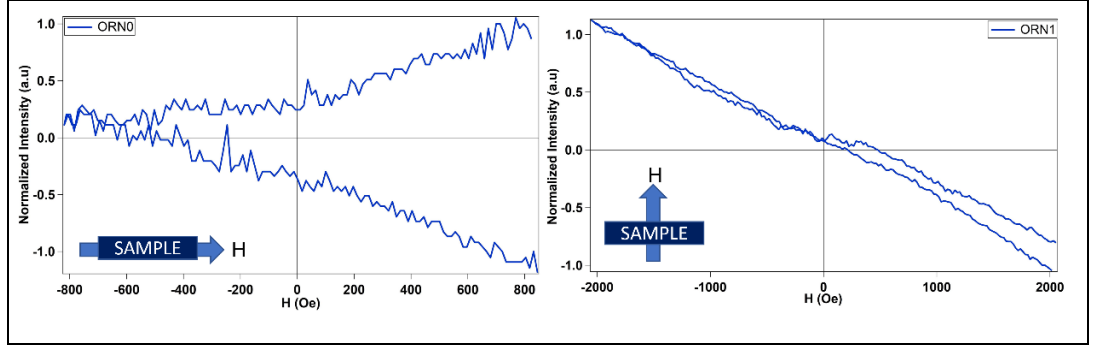
Şekil 4.8: ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin PMOKE ölçüm sonuçları.

Sabit tabaka için hazırlanan manyetik ince filmlerin Şekil 4.8’de gösterilen PMOKE ölçümlerinden elde edilen manyetik çevrimlerinden, örneklerin kolay eksenlerinin örnek düzlemine dik geometride olduğu anlaşılmaktadır. Manyetik malzemenin domain yapısının bir göstergesi olan manyetik çevrimin kareliliği (squareness) CoO kalınlığı arttıkça 1’in altına düşmektedir. Özellikle ORN6 ve ORN7’nin mıknatıslanma eğrilerinde açıkça görülen eğrilme ve ORN5 örneğinin manyetik çevrimindeki küçük step, bu üç örneğin mıknatıslanmasının tek bir manyetik domain gibi hareket etmediğini göstermektedir. Ancak, CoO katman kalınlığı azalarak giden ORN4, ORN3, ORN2 örneklerinin manyetik çevrimlerinin kareliliği 1’dir ve düşük CoO kalınlıklarında hazırlanmış olan manyetik filmlerin tek bir manyetik domainmiş gibi hareket ettiği anlaşılmaktadır. ORN7, ORN6, ORN5, ORN4, ORN3, ORN2, kodlu örneklerin sıfırlayıcı alan değerleri sırasıyla 205 Oe, 220 Oe, 156 Oe, 128 Oe, 128 Oe, 239 Oe olarak hesaplanmıştır. CoO kalınlığına bağlı sıfırlayıcı alan değerlerinin rastgele değiştiği kanısına varılmıştır.



Şekil 4.9: ORN0 kodlu örneğin PMOKE (sol) ve ORN1 kodlu örneğin LMOKE (sağ) ölçüm sonuçları.

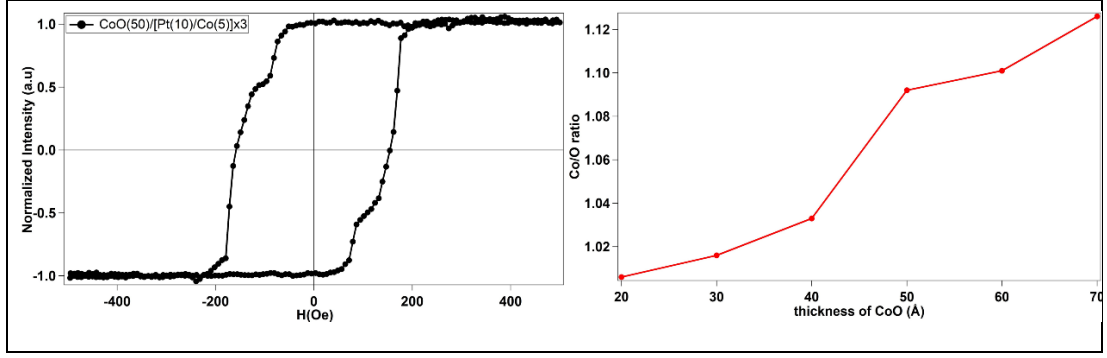
Şekil 4.9 sol’da gösterilen ORN0 örneğinin PMOKE ölçümünden elde edilen histeresize göre, örneğin mıknatıslanmasının kolay eksenini örnek düzlemine diktir ve sıfırlayıcı alan değeri 131 Oe olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.9 (sağ)’da gösterilen ORN1 örneğinin LMOKE ölçümünden elde edilen manyetik histeresis grafiğine göre, örneğin mıknatıslanmasının kolay eksenini örnek düzleminde ve sıfırlayıcı alan değeri 261 Oe olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.10: ORN1 kodlu örneğin PMOKE (sol) ve ORN0 kodlu örneğin LMOKE (sağ) ölçüm sonuçları.

Şekil 4.10’da gösterildiği gibi ORN0 da alınan LMOKE ve ORN1 de alınan PMOKE ölçümlerinde ferromanyetik sinyal alınamamış olması bu örneklerin bu düzlemlerinin mıknatıslanmalarının zor eksenini olduğunu göstermektedir.

ORN0 ve ORN1 kodlu çok katlı ince filmlerin yapısı [Si(111)/Ti(50)/Pt(50)/CoO(20,70)/Pt(20)] göz önüne alınırsa, Ti ve Pt katmanları paramanyetik, CoO katmanı ise AFM (Ölçümlerin yapıldığı sıcaklık ~ 300 K olduğu için ölçüm sırasında paramanyetik fazdadır.) özellik göstermektedir. Bu katmanlar arasında FM sinyal verebilecek tek katman, CoO içerisinde bulunabilecek oksitlenmemiş metal kobalttır. Kobaltın düşük kalınlıklarda (~ 5 Å) Pt ile oluşturduğu arayüzey (interface) sebebi ile dik manyetik anizotropiye sahip olduğu literatürün hemfikir olduğu bir yargıdır. ORN0’daki metal kobaltın az olması, arasında büyütüldüğü Pt(50) ve Pt(20) katmanları ile etkileşerek mıknatıslanmasının örnek düzlemine dik yöneldiği, ORN1’deki metal kobalt miktarının daha fazla olması nedeni ile dik manyetik anizotropiye sahip olamadığı ve mıknatıslanmasının örnek düzlemine döndüğü sonucuna varılmıştır.



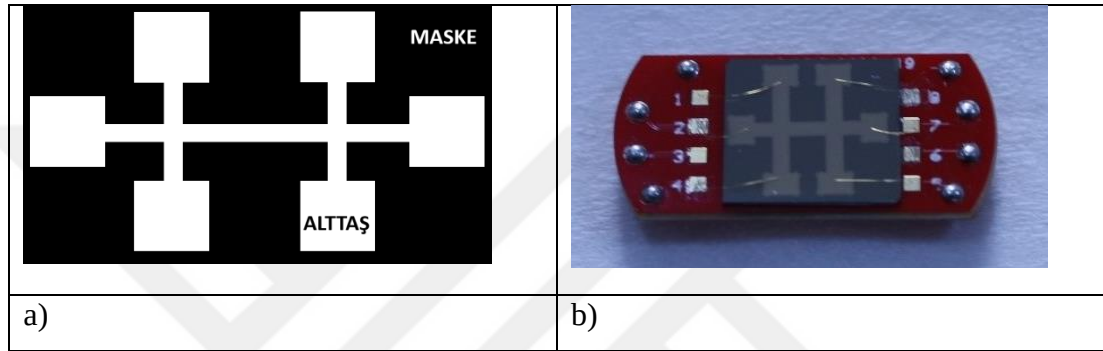
Şekil 4.11: ORN5 kodlu örneğin PMOKE ölçümü (sol) ve ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin CoO/Pt(5) katmanlarından alınan XPS ölçümlerinden elde edilen CoO kalınlığına bağlı Co/O oranları (sağ) grafiği.

ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin MOKE ölçüm sonuçlarına göre, mıknatıslanma eğrilerinin kareliliğindeki bozulmalar Şekil 4.11’de gösterildiği gibi CoO kalınlığı 50 Å olan ORN5 kodlu örnekte başlamıştır. Aynı örneklerin CoO(x)/Pt(5) katmanından alınan ve Bölüm 4.1.2’de analizi yapılan XPS ölçüm sonuçlarından elde edilen CoO kalınlığına bağlı Co/O oranı grafiği Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekil 4.11’de verilen CoO kalınlığına bağlı Co/O oranı grafiğinde 50 Å CoO kalınlığında Co/O oranının belirgin bir şekilde artması ve mıknatıslanma eğrilerindeki bozulmanın yine bu kalınlık değerinde başlaması 50 Å CoO kalınlığının, CoO içerisindeki metal kobaltın mıknatıslanma eğrisinin şeklinde değişikliğe sebep olacak kritik bir kalınlık değeri olduğunu göstermektedir. Sabit tabaka olarak kullanmak amacı ile hazırlanan örneklerin CoO(x)/Pt(5) katmanları üzerinden alınan XPS ölçümlerinden yapılan analizlerine göre CoO kalınlığı arttıkça, CoO içerisindeki metal Co miktarının arttığı Bölüm 4.1.2’de gösterilmiştir. CoO kalınlığı az olan ORN0’ın dik manyetik anisotropye sahip olması, CoO kalınlığı nispeten daha fazla olan ORN1 örneğinde mıknatıslanmanın örnek düzlemine dönmesi yine bu sonucu desteklemektedir.

4.1.4. Anormal Hall Etkisi (AHE) Ölçüm Sonuçları

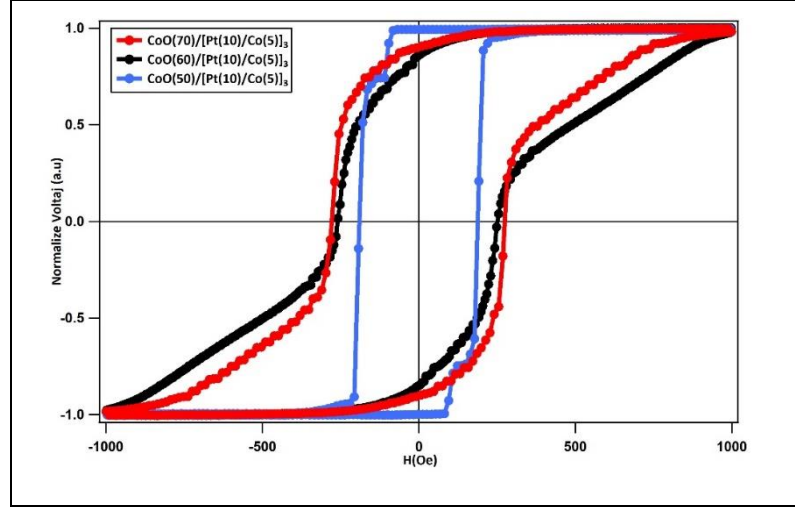
Manyetik anisotropileri MOKE ölçümleri ile belirlenen ORN7, ORN6, ORN5 örneklerinde RT (300 K) AHE ve EB gözlemlmek için gerçekleştirilen LT-AHE ölçümleri bu bölümde tartışılmıştır. Si (111) alttaşlar MS sistemine yüklenmeden üzerlerine Şekil 4.12.a)’da şematik olarak gösterilen maskeler yerleştirilmiş, örnekler hazırlanıp sistemden çıkarıldıktan sonra AHE ölçümlerinde kullanılan ölçüm çipine

çift taraflı bant ile yapıştırılmıştır. Daha sonra elektronik kontakt için örnekler üzerinden çipe wire bonder ile Au tel kullanılarak kontankt alınmıştır. Örneklerin AHE ölçümlerinden önceki son halinin fotoğrafı Şekil 4.12.b)'de gösterilmiştir. Daha sonra ölçüm çipleri örnek tutucuya yerleştirilmiş ve vakuma alınmıştır. Ölçüm sırasında vakum haznesinin içerisindeki basınç $\sim 10^{-3}$ mbar'dır. Ölçüm çipleri üzerindeki 2-7 kontak noktaları arasında 50 μ A akım uygulanarak örnek düzlemine dik geometride değişen manyetik alana bağlı V_H değerleri 1-4 kontakt noktaları üzerinden okunarak kaydedilmiştir.



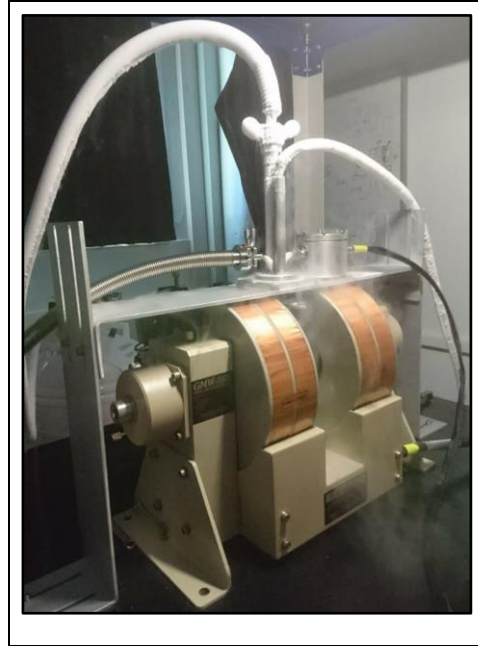
Şekil 4.12: a) Si(111) alttaşlar üzerine yerleştirilen maskelerin şematik gösterimi: filmin kaplanacağı kısım beyaz maskenin kendisi siyah renk ile gösterilmiştir. b) Maske üzerinden kaplama yapılmış ve AHE ölçümleri için ölçüm çipine yerleştirilmiş örnek (Açık renkli bölge film, koyu renkli bölge Si(111) alttaşır.).

Maskeli olarak hazırlanmış olan üç örneğin RT-AHE histeresisleri Şekil 4.13'te görüldüğü üzere PMOKE ölçümleri ile benzer davranış göstermektedir. Sadece dik manyetik anisotropiye sahip örneklerin histeresizinin gözlemlenebildiği bu teknik ile de ORN7 ve ORN6'nın histeresizlerinin kareliliğindeki bozulma, ORN5'in histeresizindeki adım (step) açıkça görülmektedir. ORN7, ORN6, ORN5 kodlu örneklerin RT-AHE ölçümlerinden elde edilen sıfırlayıcı alan değerleri sırası ile 282 Oe, 257 Oe, 246 Oe olarak hesaplanmıştır. Bu üç örnek için CoO kalınlığı azaldıkça sıfırlayıcı alan değerlerinde azalma gözlemlenmiştir.



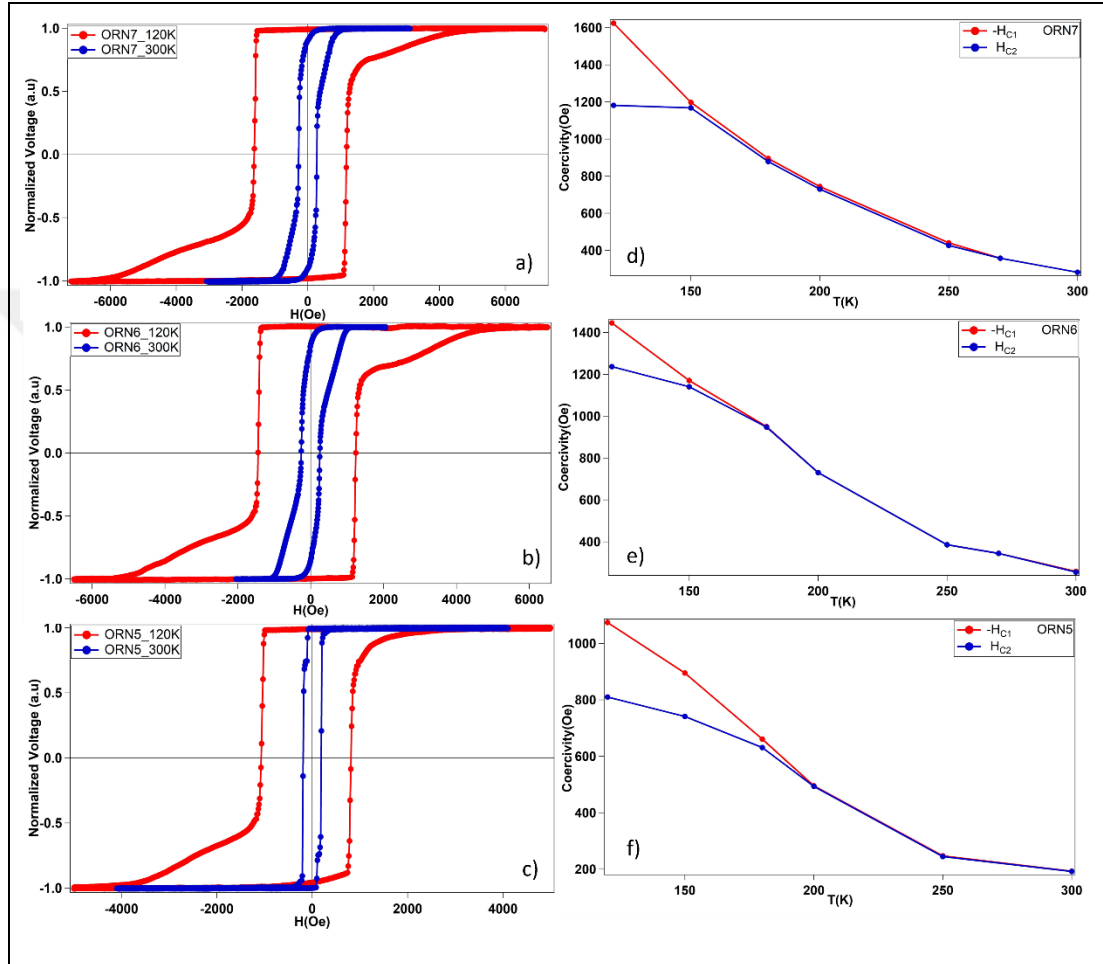
Şekil 4.13: ORN7, ORN6, ORN5 maskeli örneklerinin RT-AHE ölçüm sonuçları.

Hazırlanmış olan dik manyetik anisotropye sahip örneklerde EB gözlemlemek için aynı ölçüm düzeneği üzerinde örnekler, 350 K sıcaklığına ısıtılıp 10 dakika bu sıcaklıkta bekletilerek 4 kOe dış manyetik alan altında 120 K sıcaklığına soğutulmuştur. Bu sıcaklıkta sistemin basıncı $\sim 10^{-5}$ mbar'dır. Ölçüm çipleri üzerindeki 2-7 kontakt noktaları arasına 50 μ A akım uygulanıp örnek düzlemine dik geometride değişen manyetik alan altında 1-4 kontakt noktalarından V_H değerleri kaydedilerek histeresis elde edilmiştir. Bu ölçüm 150 K, 180 K, 200 K, 220 K, 250 K, 270 K sıcaklıkları için tekrar edilmiştir.



Şekil 4.14: AHE ölçüm düzeneğinin 120 K sıcaklığında çekilmiş fotoğrafı.

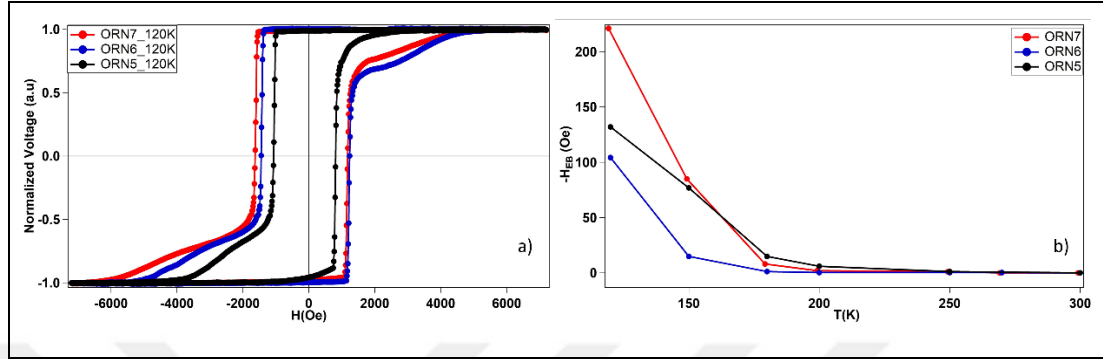
Sistemin 120K sıcaklığındaki fotoğrafı Şekil 4.14'deki gibidir. Sistemde soğutma sıvı azot ile yapılmaktadır. Soğutma düzeneğinin kapalı bir sistem olarak tasarlanmamış olması ve sıvı azot tankından sisteme giriş ve sistemden çıkış bağlantılarındaki ısı kaybı nedeni ile 120 K sıcaklığından daha düşük sıcaklıklara inilememiştir.



Şekil 4.15: ORN7, 6, 5 kodlu örneklerin a) 300 K ve 120 K sıcaklığında gerçekleştirilen AHE ölçümleri b) Sıcaklığa bağlı sıfırlayıcı alan değeri değişimi grafiği.

ORN7, ORN6 ve ORN5 kodlu örneklerin 300 K ve 120 K AHE ölçümlerinden elde edilen mıknatıslanma grafikleri Şekil 4.15.a-c)'de verilmiştir. ORN7, ORN6, ORN5 kodlu örnekleri için sıfırlayıcı alan değerleri 120 K sıcaklığında sırası ile 1403 Oe, 1341 Oe ve 942 Oe olarak hesaplanmıştır. ORN7 ve ORN6 kodlu örnekler için 120K sıcaklığındaki sıfırlayıcı alan değerleri 300 K sıcaklığına kıyasla ~5 kat ORN5 kodlu örnek için ise ~4 kat artmıştır. Şekil 4.15.d-f)'de ORN7, ORN6, ORN5 kodlu örnekler için sıcaklığa bağlı sıfırlayıcı alan değerleri grafiği verilmiştir. Grafiğe göre

EB'in başladığı sıcaklık ORN7 ve ORN6 için 180 K iken ORN5 kodlu örnek için 200 K olarak belirlenmiştir. ORN7, ORN6, ORN5 kodlu örneklerin T_B değerleri sırası ile 180 K, 180 K, 200 K olması CoO kalınlığı azaldıkça T_B 'nin oda sıcaklığına yaklaştığını göstermektedir.



Şekil 4.16: ORN7, 6, 5 kodlu örneklerin a) 120K-AHE ölçümleri b) sıcaklığa bağlı EB değişimi grafiği.

ORN7, 6, 5 kodlu örneklerin 120K-AHE ölçümleri Şekil 4.16.a)'da karşılaştırılmıştır. ORN5 kodlu örneğin 300 K sıcaklığında gerçekleştirilen AHE ölçümünde gözlemlenen adım kaybolmuş ancak diğer örneklerdeki gibi ± 2 kOe civarında başlayan eğrilmeler görülmüştür. Grafiklerde gözlemlenen ± 2 kOe civarındaki eğrilmeler CoO kalınlığı arttıkça arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca CoO kalınlığı arttıkça sıfırlayıcı alan değeri artmaktadır. ORN7, ORN6 ve ORN5 kodlu örneklerin 120 K sıcaklığı için hesaplanan EB değerleri sırası ile 221 Oe, 104 Oe ve 132 Oe'tir. Şekil 4.16.b)'ye göre CoO kalınlığına bağlı EB değişiminde bir ilişki kurulamamıştır.

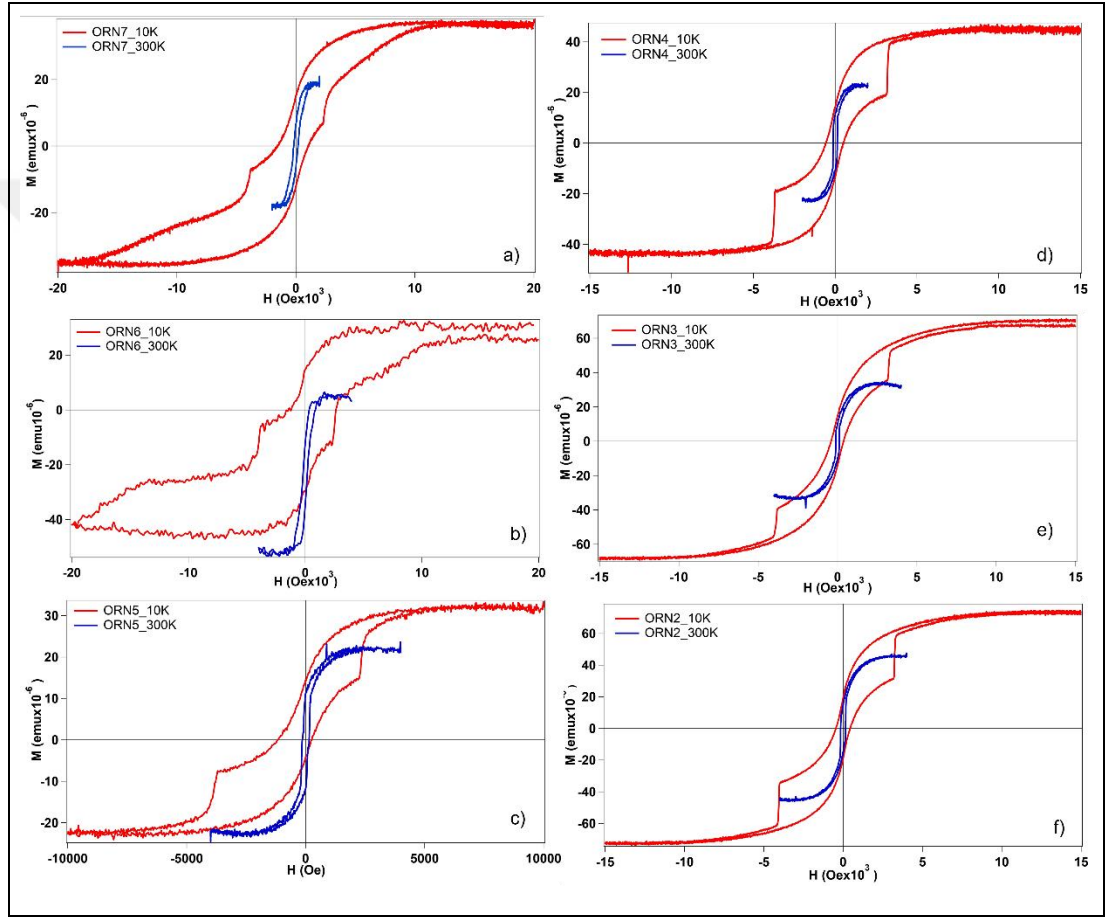
Tek bir örnekte yapılan altı farklı sıcaklık ölçümü sırasında 60 litre azot harcanmış olması ve 120 K sıcaklığının altındaki sıcaklık değerlerine inilememiş olması nedeni ile diğer örneklerin EB ölçümleri yine Fizik bölümünde bulunan PPMS laboratuvarındaki VSM tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.1.5. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Ölçüm Sonuçları

Hazırlanan çok katlı ince filmlerde EB gözlemlemek amacı ile üniversitemiz Fizik bölümünde bulunan Quantum Design PPMS 9 T model cihaz ile Titreşimli Örnek Manyetometresi (Vibrating Sample Magnetometer, VSM) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Örnekler cihazın örnek tutucusuna yerleştirilebilmeleri için en

fazla 6mm² alana sahip olacak şekilde kesilmiştir. MOKE ile örneklerin kolay eksenlerinin örnek düzlemine dik olduğu belirlendiği için örnekler örnek düzlemine dik geometride manyetik alana maruz kalacak şekilde örnek tutucuya yerleştirilmiştir.

Her bir örnek 350 K sıcaklığına 5K/1dk hız ile ısıtılıp bu sıcaklıkta 1 dakika bekletildikten sonra 4 kOe dış manyetik alan altında 10 K sıcaklığına 1K/dk hız ile soğutulmuştur. 10 K, 50 K, 100 K, 120 K, 150 K, 180 K, 200 K, 220 K, 250 K, 270 K, 300 K sıcaklıklarında mıknatıslanma eğrileri kaydedilmiştir.



Şekil 4.17: ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin 10 K ve 300 K sıcaklıklarında gerçekleştirilen VSM ölçüm sonuçları.

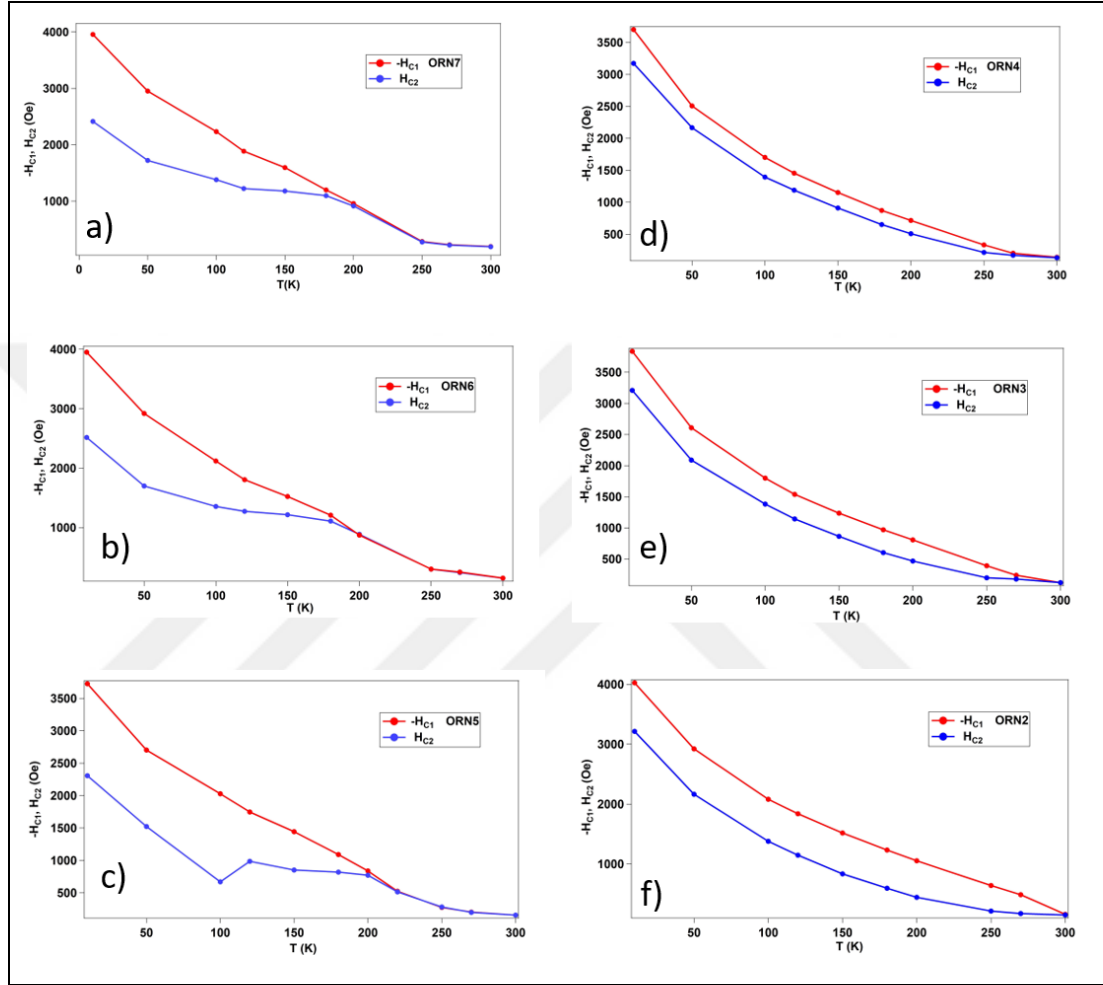
Şekil 4.17’de VSM 10 K ve 300 K ölçüm sonuçları karşılaştırılmaktadır. Buna göre ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin 10 K için sıfırlayıcı alan değerleri sırası ile 3185 Oe, 3233 Oe, 3000 Oe, 3434 Oe, 3506 Oe, 3618 Oe; 300 K için sıfırlayıcı alan değerleri sırası ile 181 Oe, 179 Oe, 142 Oe, 121 Oe, 119 Oe, 158 Oe olarak belirlenmiştir. ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 manyetik filmlerin 300 K sıcaklığından 10 K sıcaklığına inildiğinde sıfırlayıcı alan değerleri sırası ile yaklaşık 18, 18, 25, 29, 29, 23

kat artmıştır. Düşük sıcaklıklarda sıfırlayıcı alan değerinde görülmesi beklenen bu artışların CoO kalınlığına bağlı rastgele değiştiği gözlemlenmiştir. Örneklerin LT-VSM histeresislerinde gözlemlenen doyum bölgesindeki S şekli LT-AHE ölçümlerinde gözlemlenmemiştir. Bu nedenle özellikle ORN4, 3, 2 kodlu örneklerin histeresislerinin kareliği 1 dir. VSM’de görülen bu S şeklinin AHE’de görülmemesinin sebebinin AHE ölçüm tekniğinin yüzey hassas olması, alttaştan gelebilecek katkıların bu teknik ile gözlemlenemeyecek olmasıdır.

ORN5 kodlu örneğin 300 K sıcaklığındaki VSM histeresisinde Şekil 4.15.c)’de görülen adım 10 K histeresisinde kaybolmuştur ancak örneğin mıknatıslanması ~15 kOe te doyuma ulaşmıştır. CoO kalınlığı (70 ve 60 Å) olan ORN7 ve ORN6 kodlu örneklerin 10 K histeresisinin sıfırlayıcı alan değeri ile doyumu arasında eğrilmeler gözlemlenmiştir. Literatürde CoO ile yapılan EB çalışmalarında bu tarz eğrilmeler gözlemlenmiştir [45]. Bu durumun sebebi olarak FM katmanın şeritli bir domain yapısına sahip olması, örnekte aynı anda pozitif ve negatif EB etkisinin birlikte gözlemlenmesi ve CoO katmanının içerisinde oksitlenmemiş metal Co kümelerinin bulunması gibi maddeler önerilmiştir [46]–[48]. Her bir CoO kalınlığı için alınan XPS ölçümlerinden yapılan detaylı fit çalışmasından elde edilen sonuca göre CoO katmanı içerisinde metal Co bulunmuş ve CoO kalınlığı arttıkça metal Co miktarının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca ORN0 ve ORN1 kodlu örneklerde MOKE ölçümlerinde ferromanyetik sinyal alınmış olması yapının içerisinde metal Co olduğunu göstermektedir. ORN0 kodlu örneğin mıknatıslanmasının örnek düzlemine dik olması ve ORN1 kodlu örneğin mıknatıslanmasının örnek düzlemine paralel olması CoO kalınlığı arttıkça metal Co miktarının arttığını ve mıknatıslanmanın örnek düzlemine döndüğünü ıspatlayarak XPS fit çalışmasını desteklemektedir. Bu nedenle Şekil 4.17’de gösterilen ORN7 ve ORN6 kodlu örneklerin 10 K histeresisinin sıfırlayıcı alan değeri ile doyumu arasındaki eğrilmelerin CoO’in içerisindeki metal kobalttan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

ORN7, 6, 5, 4, 3 ve 2 kodlu örneklerin LT-VSM mıknatıslanma eğrilerinden hesaplanan sıfırlayıcı alan değerlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği Şekil 4.18’de verilmiştir. Buna göre EB’ın başladığı sıcaklık olan T_B değeri ORN7 ve ORN6 kodlu örnekler için 200 K, iken ORN5 için 220 K, ORN4 için 270 K ORN3 ve ORN2 için 270 K’nın üzerinde bir değerde başladığı gözlemlenmiştir. VSM ölçüm sistemindeki yoğunluktan dolayı 270K-300K sıcaklıkları arası detaylı tarama yapılamamıştır. Ancak EB’ın CoO in Neel sıcaklığı olan 290 K’nın üzerinde bir sıcaklık değerinde

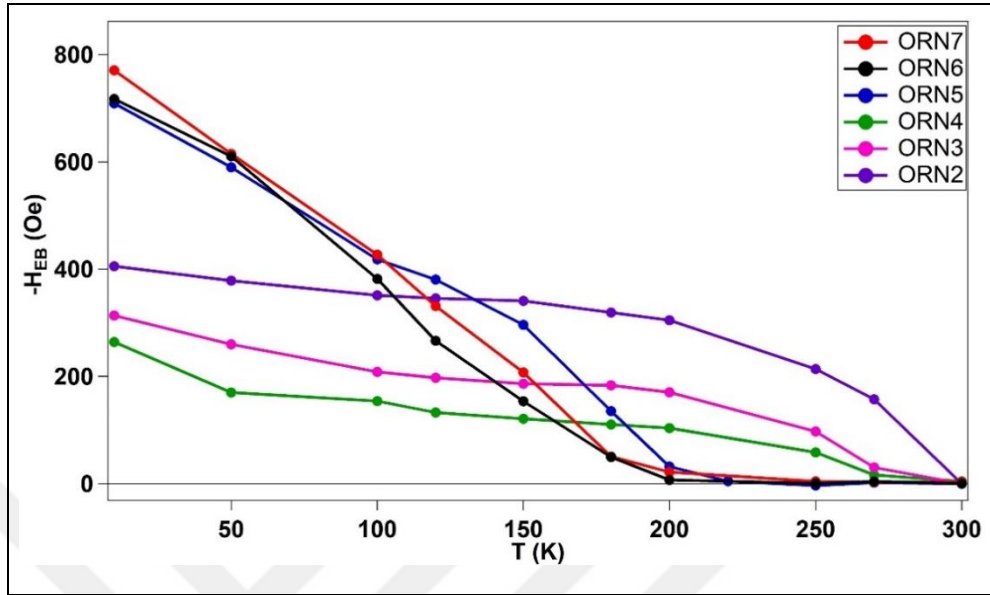
başlayamayacağı bilinmektedir. ORN3 için 270 K sıcaklığındaki hesaplanan EB değeri -30 Oe iken ORN2 için bu değer -157 Oe'tir. Ölçülen en son sıcaklık olan 270 K'de EB'nin hala devam ediyor olması T_B 'nin T_N 'ye çok yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.18: ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin LT-VSM ölçümlerinden elde edilen sıfırlayıcı alan değerlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği.

ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin Şekil 4.19'da sıcaklığa bağlı EB değişimi grafiği verilmiştir. Buna göre CoO kalınlığına bağlı EB değişimi iki farklı davranış göstermektedir. CoO kalınlığı 50 Å ve üzeri olan ORN7, 6, 5 kodlu örneklerde CoO kalınlığı arttıkça EB değeri artmaktadır, CoO kalınlığı 50 Å'un altında olan ORN4, 3, 2 kodlu örneklerde CoO kalınlığı arttıkça EB değeri azalmaktadır. Sonuç olarak 10 K sıcaklığında hesaplanan en yüksek EB değeri -780 Oe ile ORN7, en düşük EB değeri -245 Oe ile ORN4 kodlu örnekte gözlemlenmiştir. CoO kalınlığı 50 Å'un altında olan

ve kare histeresis özelliği gösteren örnekler içerisinde en yüksek EB değeri -405 Oe ile ORN2 kodlu örnekte gözlemlenmiştir.



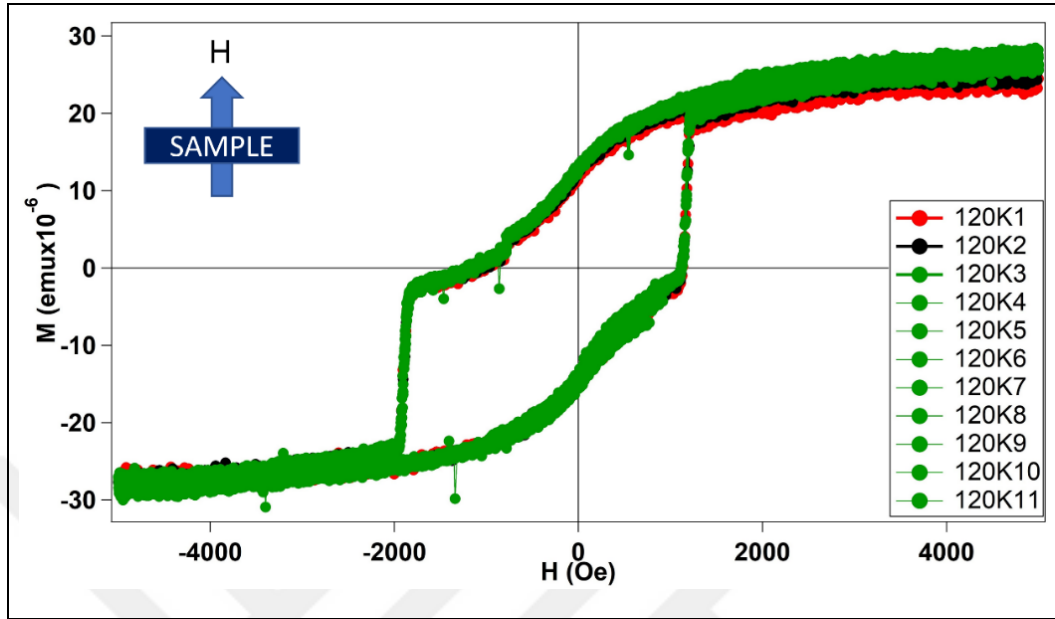
Şekil 4.19: ORN7, 6, 5, 4, 3, 2 kodlu örneklerin sıcaklığa bağlı $-H_{EB}$ değişimleri grafiği.

Bu çalışmanın sonucunda, ORN2 kodlu örneğin kare histeresis gösteren örnekler içerisinde en yüksek EB gözlemlenmiş örnek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca T_B 'nin 270 K'nin üzerinde olması ve bu sıcaklık değerinde halen -157 Oe değerinde EB'ye sahip olması nedeni ile bu çalışmanın sonunda sabit tabaka olarak kullanılması en uygun örnek olduğu belirlenmiştir.

Bir P-MTJ yapısının STT-MRAM uygulamalarında kullanılabilmesi için performansının çok iyi olmasının yanı sıra mevcut özelliklerini de koruması gerekmektedir. Talim etkisi, belirlenen bir sıcaklık değerinde özellikle çoklu kristal yapılarda ardışık alınan mıknatıslanma eğrilerinden hesaplanan EB değerindeki azalmadır. MTJ'nin performansını doğrudan etkileyebilecek olan bu etkiyi gözlemlemek amacı ile Fizik bölümü PPMS laboratuvarında VSM tekniği kullanılarak ardışık mıknatıslanma eğrileri kaydedilmiştir.

Hazırlanacak olan P-MTJ'de sabit katman olarak kullanmayı planladığımız ORN2 kodlu örnekte EB etkisinin ölçüm sayısına bağlılığını belirlemek amacı ile örnek 350 K sıcaklığına çıkarılmış, 4 kOe manyetik alan altında 120 K sıcaklığına 1K/dk hız ile soğutulmuştur. Ardından 120 K sıcaklığında 11 kez ardarda mıknatıslanma eğrisi alınmıştır. Yapılan ölçüm sonrası elde edilen mıknatıslanma

eğrileri Şekil 4.20'deki gibidir. Her bir ölçüm için 120 K sıcaklığında eşitlik (2.2) kullanılarak 344 Oe negatif EB hesaplanmıştır.



Şekil 4.20: ORN2 kodlu örneğin 120 K sıcaklığında ardışık ölçülen mıknatıslanma eğrileri.

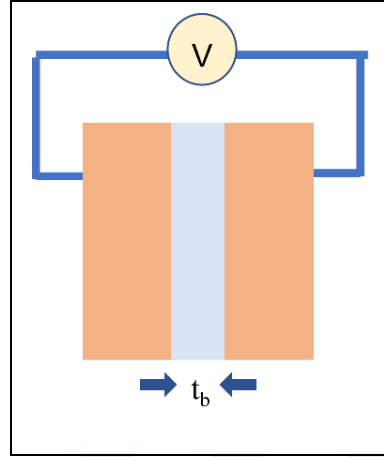
Özellikle ilk iki çevrimde kritik derecede düşmesi beklenen EB değerinin yapılan 11 ölçüm sonrası ORN2 kodlu örnekte ölçüm sayısına bağlı değişmediği Şekil 4.20'den de açıkça görülmektedir. Bu durum tekkrystal yapılarda gözlemlenmiş bir durumdur [27]. Bu durum manyetik saçtırma tekniği kullanılarak hazırlanan 20 Å kalınlığındaki CoO katmanının çekirdek tabaka olarak büyütülmüş olan Ti(50)/Pt(50) katmanlarının etkisi ile kristal olarak büyümüş olabileceği ihtimalini doğurmaktadır.

4.2. Yalıtkan Tabaka (Insulator Layer) Çalışması

İki ferromanyetik elektrot arasına yeterince ince (birkaç nanometre) yalıtkan tabaka (insulator layer) yerleştirilerek hazırlanmış bir MTJ'nin elektrotları arasına bias voltajı uygulandığında, elektron bir elektrottan diğerine kuantum tünelleme ile geçerek iletkenlik sağlamaktadır.

Şematik gösterimi Şekil 4.21'deki gibi olan bir yapıda iletkenlik oluşmasının sonucu olan tünelleme akımının bias voltajı ve yalıtkan tabaka kalınlığı ile ilişkisi eşitlik (4.2)'de verilen Simmon'ın denklemi ile ifade edilmektedir [49]. Bu denklemde

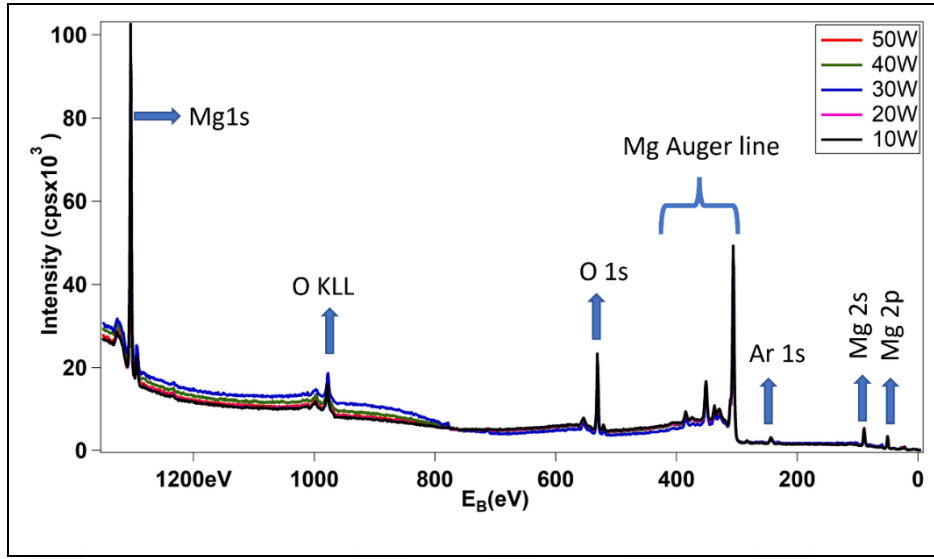
I tünelleme akımını, Φ tünel bariyeri yüksekliğini, V bias voltajını ve t_b yalıtkan tabakanın kalınlığını ifade etmektedir.



Şekil 4.21: Akım ile kontrol edilen bir MTJ yapısının şematik gösterimi.

Yalıtkan tabakanın kalınlığı arttıkça tünelleme akımının üstel bir şekilde azaldığı Simmon'ın denkleminde anlaşılmaktadır. Tünelleme akımının oluşmasında yalıtkan tabaka kalınlığı önemli bir parametre olsa da yapılan çalışmalar bunun tek parametre olmadığını göstermiştir [50]. Örneğin literatürde yalıtkan tabaka olarak TiO_x , Al_2O_3 ve MgO metal oksit tabakalar fazlaca çalışılmıştır. Al_2O_3 ile yapılan çalışmalarda en yüksek %70 TMR gözlemlenmiştir [51]. Parkin ve grubu MgO ile yaptığı çalışmalarda %165 TMR değeri elde ederken, David ve grubunun yaptığı çalışma ile bu değer %230'a kadar yükseltilmiştir [52], [53]. Tüm bu çalışmalar sonucunda yalıtkan tabaka kalınlığının yanı sıra FM elektrotlar arasına uygulanan bias voltajı, FM elektrotların elektronik band yapısı, arayüzey pürüzlülüğü, kafes uyumsuzluğu (lattice mismatch), arayüzey kusurları (interfacial defects) ve kristal yapının TMR değerini büyük ölçüde etkilediği hem teorik hemde deneysel olarak gösterilmiştir [54]–[56]. Yalıtkan tabakanın, TMR oranını ve MTJ'nin performansını belirleyen temel tabaka olduğu yapılan çalışmalarla anlaşılmıştır. Ikeda ve grubunun 2008'de MgO yalıtkan tabaka kullanarak yaptığı çalışmada 300 K sıcaklığında 604% TMR, 5 K sıcaklığında 1144% TMR gözlemlenmiş olması MgO 'in umut vaat eden bir tünel bariyeri olduğunu göstermektedir [57].

$$I(V) = f(t_b) \left\{ \left(\bar{\Phi} - \frac{V}{2} \right) e^{-\left(1,025 \sqrt{\bar{\Phi} - \frac{V}{2}} \right) t_b} - \left(\bar{\Phi} + \frac{V}{2} \right) e^{-\left(1,025 \sqrt{\bar{\Phi} + \frac{V}{2}} \right) t_b} \right\} \quad (4.2)$$

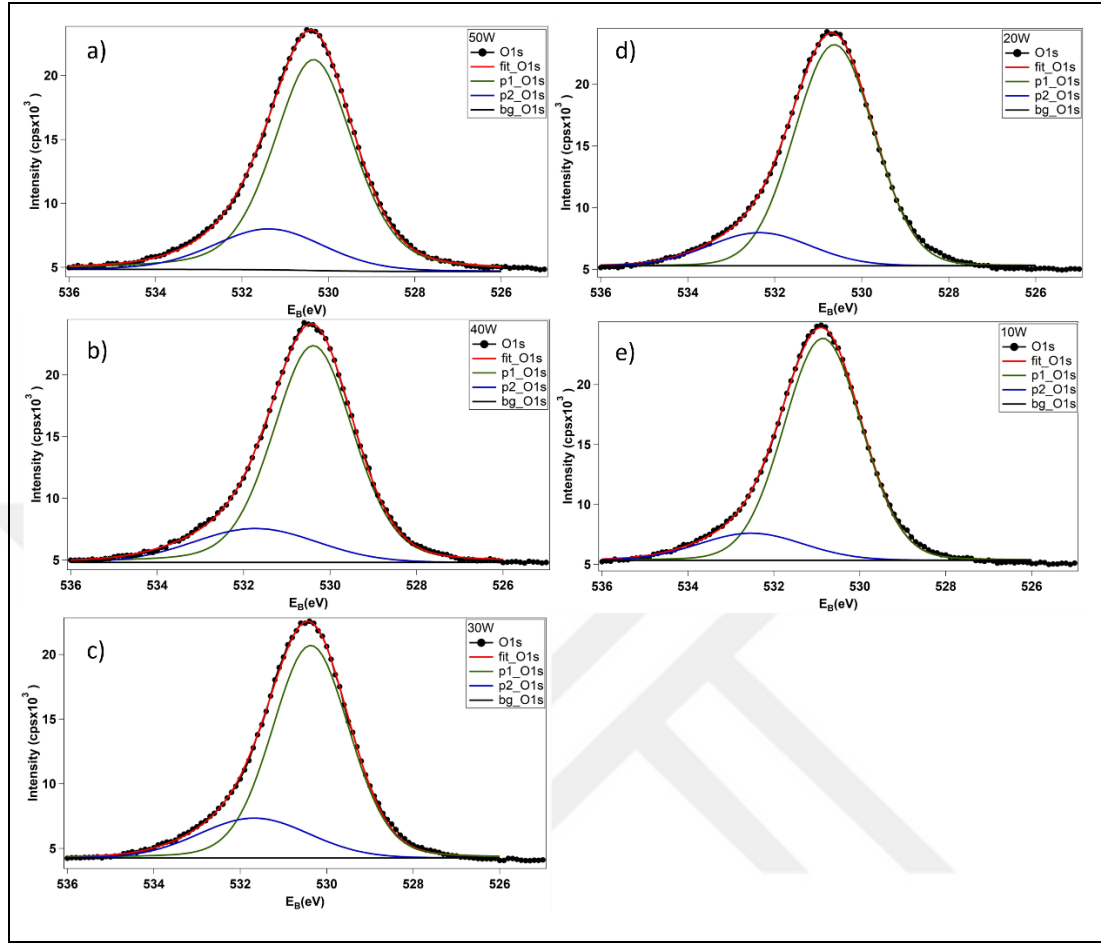


Şekil 4.22: MgO genel tarama XPS ölçüm sonuçları.

Bu tez kapsamında da yalıtkan tabaka olarak MgO seçilmiş, pürüzlülüğü azaltmak ve daha düşük kalınlıklarda tek düze (uniform) bir tabaka oluşturmak amacı ile manyetik saçırma sisteminde plazmanın kararlı olduğu en düşük güce inilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla 4N saflıkta MgO hedeften 50 W, 40 W, 30 W, 20 W, 10 W güç değerlerinde MgO büyütülerek XPS ölçümü gerçekleştirilmiştir. XPS ölçümleri sisteme entegre analiz odasında örnek atmosfere maruz kalmadan yapılmıştır. X ışını kaynağı olarak Al K α (250 W; 12,5 kV) kullanılmış her bir güç değeri için genel tarama, Mg2s ve O1s bölgeleri için detaylı tarama gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.22’de her bir güç değeri için gösterilen genel tarama XPS ölçümlerinde Mg ve O pikleri dışında Ar piki gözlemlenmektedir. Bunun nedeni film büyümesi sırasında kullanılan Ar iyonunun hedef MgO’e gömülmesi sonucu tekrar hedeften alttaşa dökülmesidir. MgO yumuşak bir malzeme olduğu için bu beklenen bir durumdur. Bu durumun dışında kirlilik oluşturabilecek farklı bir element gözlemlenmemiştir.

Hazırlanması planlanan P-MTJ yapısında yalıtkan tabaka olarak kullanılması düşünülen MgO tabakasının içerisinde metal Mg bulundurması kaçak akım oluşmasına ve TMR gözlemlenmemesine neden olacağı için her bir kaplama gücünde Mg2s ve O1s detaylı XPS ölçümlerine fitleme çalışması yapılmıştır. Şekil 4.23’te 50 W, 40 W, 30 W, 20 W ve 10 W film büyütme güçleri için yapılan O1s fit çalışması gösterilmektedir. Şekil 4.23’de yeşil ile gösterilen ve O⁻²’ yi ifade eden pik pozisyonları kaplama güç değerlerine göre Tablo 4.5’te verilmiştir. Tablo 4.5’e göre

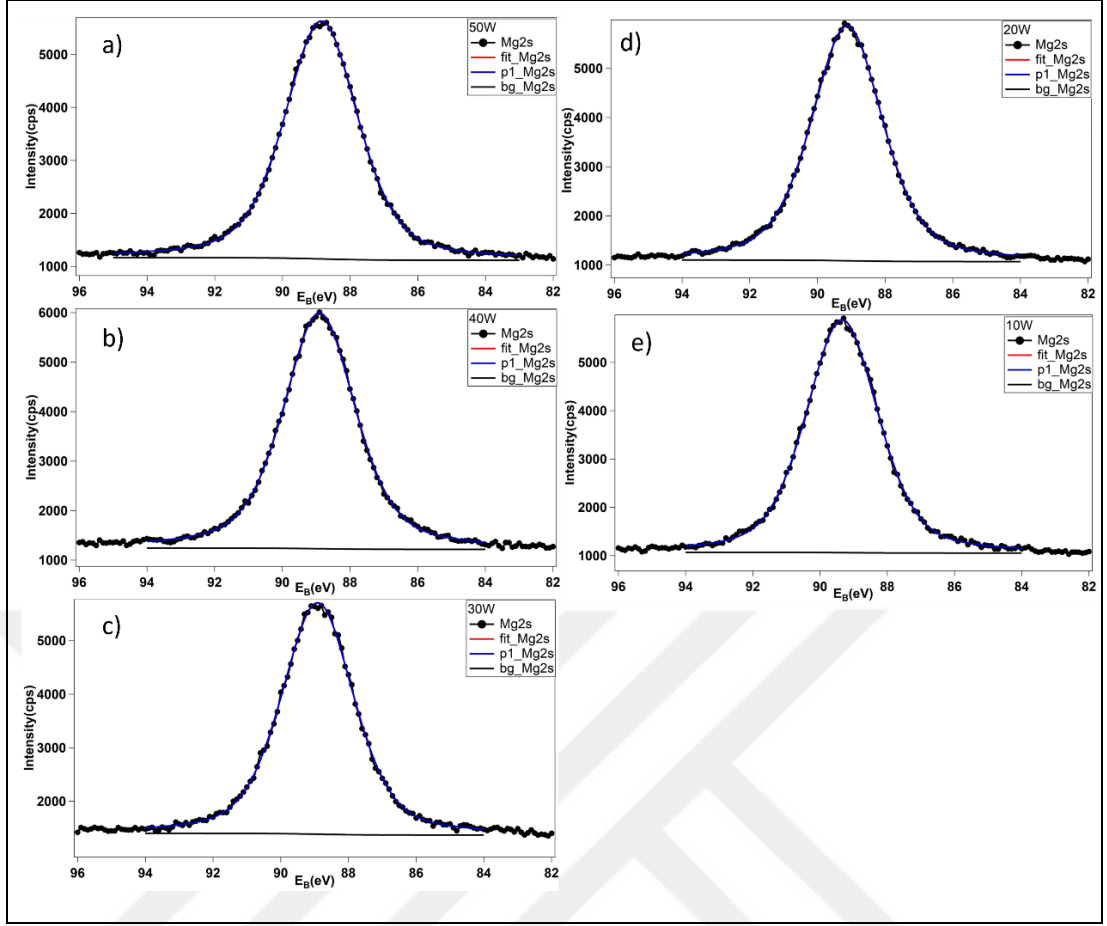
O1s pikleri 530,34 – 530,86 eV aralığındadır. Literatürde O1s için 530-531 eV bağlanma enerjisi MgO'ye atfedilmiştir [33], [58].



Şekil 4.23: Farklı (50 W, 40 W, 30 W, 20 W ve 10 W) film büyütme güçlerinde büyütülen MgO katmanından alınan O1s detay tarama XPS ölçüm sonuçları.

Yapılan O1s fit çalışmasında Şekil 4.23'te mavi renk ile verilen yüksek bağlanma enerjisinde bir pik daha gözlemlenmektedir. Gözlemlenen bu pikin pozisyonu 50 W, 40 W, 30 W, 20 W ve 10 W kaplama güç değerleri için sırası ile 531,37 eV, 531,73 eV, 531,68 eV, 532,35 eV, 532,53 eV'tur. Literatürde O1s detay taramasında gözlemlenen 531-533 eV bağlanma enerjisi aralığı yüzey hidrooksitlerine atfedilmiştir [59]. Her bir kaplama gücü için yapılan detaylı fit çalışmasına göre kaplama gücü azaldıkça yüzey hidrooksitleri azalmaktadır.

Şekil 4.24'te Mg2s bölgesi için yapılan fit çalışması gösterilmektedir. Her bir MS film büyütme gücü için yapılan fit data ile uyum içerisinde olup kullanılan pik parametreleri Tablo 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.24: Farklı (50W, 40W, 30W, 20W, 10W) film büyütme güçlerinde büyütülen MgO katmanından alınan Mg2s detay tarama XPS ölçüm sonuçları.

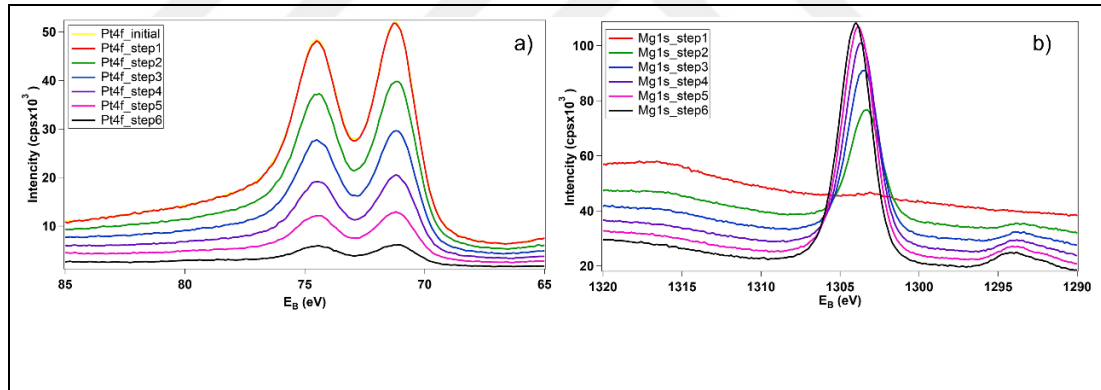
Tablo 4.5: Farklı (50W, 40W, 30W, 20W, 10W) film büyütme gücünde büyütülen MgO katmanının, Mg2s ve O1s bölgelerinin XPS analizinde kullanılan pik parametreleri.

	Mg2s		O1s		Mg2s/O1s oranı
	Konum(eV)	FWHM	Konum(eV)	FWHM	
50W	88,85	2,56	530,34	2,19	0,929
40W	88,90	2,52	530,39	2,19	0,999
30W	88,91	2,53	530,37	2,10	0,998
20W	89,12	2,50	530,63	2,16	1,035
10W	89,35	2,54	530,86	2,14	1,005

Mg2s ve O1s bölgesinde yapılan fitleme çalışmasından elde edilen FWHM değerleri Tablo 4.5'te görüldüğü üzere sırası ile ~2,5 ve ~2,1 olarak belirlenmiştir. Ayrıca Tablo 4.5'te görüldüğü üzere Mg2s pik pozisyonu 88,8-89,5 eV aralığında olup bu aralık literatürde MgO'e atfedilmektedir [60], [61]. O1s ve Mg2s pik pozisyonuna göre her bir güç değeri için MgO oluştuğunu işaret etse de eşitlik (3.3) kullanılarak Mg/O oranı hesaplanmıştır. Yapılan hesapta ASF değerleri Mg2s ve O1s için sırası ile

0,252 ve 0,711 olarak kullanılmıştır [33]. Her bir güç değeri için hesaplanan Mg2s/O1s oranı Tablo 4.5'te verilmiş olup ~ 1 olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak, Şekil 4.24'te verilen Mg2s bölgesinde metal Mg'a atfedilen 88,5 eV bağlanma enerjisinde pik gözlemlenmemiştir [62]. Bu da yapılan 50 W, 40 W, 30 W, 20 W ve 10 W kaplama gücü denemelerinde metal Mg'a rastlanmadığı anlamına gelmektedir. Her bir güç denemesi için fit çalışması yapılan O1s bölgesinde yüzey hidroksitleri belirlenmiştir. Oluşan bu yüzey hidroksitleri 573 K sıcaklığına ısıtma işlemi gerçekleştirilerek ciddi ölçüde azaltılabilmektedir [63]. Ancak bu sıcaklıkta yapılacak olan tavlama işlemi sabit tabaka için belirlemiş olduğumuz ORN2 kodlu örnekte bulunan Pt/Co katmanlarının manyetik özelliğini bozmaktadır ve yüzey hidroksitlerinin TMR oranını etkileyip etkilemediği ile ilgili literatürde bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu sebeple bu tarz bir işleme gerek duyulmamıştır. Yapılan O1s fitleme çalışmasından elde edilen sonuca göre en az yüzey hidroksiti barındıran ve en düşük güç değeri olan 10 W kaplama gücü, hazırlanması planlanan P-MTJ'de kullanılacak olan MgO kaplama gücü olarak belirlenmiştir.

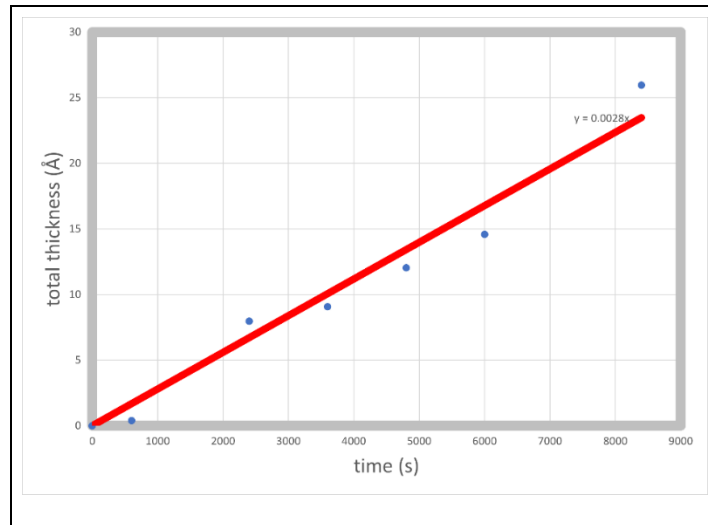


Şekil 4.25: Her bir kaplama adımı için Pt4f ve Mg1s detaylı XPS ölçüm sonuçları a) Pt4f pikinin düşüşü b) Mg1s pikinin yükselişi.

Yalıtkan tabaka olarak kullanılması planlanan MgO için belirlenen 10 W, MS sistemi film büyütme gücü için XPS kontrollü kalınlık kalibrasyonu yapılmıştır. Kalınlık kalibrasyonunda alttaş olarak kullanılmak üzere sisteme Ag folyo yüklenmiş ve üzerine 100 Å kalınlığında Pt katmanı büyütülmüştür. Burada büyütülen Pt katmanının sebebi MgO sebebi ile Ag folyonun oksitlenerek hesaplanacak olan film büyüme hızında hata oluşturmasını engellemektir. Bilindiği üzere XPS ölçümünde ölçülen elementin yüzeye yakınlığına bağlı olarak pik şiddeti değişmektedir. Bu durum XPS tekniğini incelenen elementin örnek içerisindeki düzeydeki konumu hakkında

bilgi edinilmesini mümkün kılmaktadır. Bu kapsamda daha önce Bölüm 3.2’de detaylı bir şekilde açıklanan Beer Lambert formülü olarak ta bilinen belirli dalga boyundaki bir elektromanyetik dalganın sönümlenmesinin, geçtiği ortam içerisinde aldığı yol ile ilişkisini anlatan eşitlik (3.4) kullanılarak MgO için 10 W kaplama gücünde kalınlık kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle vakuma alınmış olan Ag folyo üzerine 100 Å Pt büyütülmüş ve başlangıç (initial) pik şiddetini belirlemek için XPS ölçümü gerçekleştirilmiştir. Mg1s’in bağlanma enerjisinin 1250 eV’un üzerinde olması nedeni ile Al K_α X ışını kaynağı 250 W; 12,5 kV kaynak parametrelerinde kullanılmıştır. MS sisteminde MgO için belirlenen film büyütme parametreleri; RF kaynak, 10 W kaplama gücü, ~3.10⁻³ mbar argon basıncı, 70 mm hedef alttaş mesafesi olarak belirlenmiştir. Pt4f pikinde düşme miktarını gözlemlemek için ilk adımda 600s, ikinci adımda 1800s, sonraki üç adımda 1200s ve altıncı adımda 2400s MgO büyütülerek her bir adım sonrası XPS ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.25.a)’da Pt4f pikinin her bir adımda düşüşü ve Şekil 4.25.b)’de Mg1s pikinin her bir kaplama adımında yükselişi grafiği verilmiştir. Burada Pt4f bölgesinin her bir adım için alınan XPS ölçümünün analizinde Shirley tipi arka plan fonksiyonunun çıkarılması ile voigt fonksiyonuna fiti üzerinden pik alanı elde edilmiştir. Yapılan fit çalışmasından elde edilen sonuçlar ve NIST veri tabanının Akkerman referansından hesaplanan 28,74 Å IMFP değeri eşitlik (3.4)’te yerine koyularak her bir adım için kalınlık hesabı yapılmıştır. Şekil 4.26’da MgO hedef için toplam kaplama süresine bağlı toplam kalınlık grafiği verilmiştir. Bu grafiğin eğiminden MgO kaplama hızı 0,0028Å/s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.26: MgO hedef için toplam kaplama süresine bağlı toplam kalınlık grafiği.

Bu çalışmanın sonucunda hazırlanması planlanan ilk P-MTJ denemesinde PL ve FL'nin manyetik olarak ayrılarak tek bir FM katman gibi davranmasını önlemek için 30 Å kalınlığında MgO yalıtkan tabaka 10 W kaplama gücü kullanılarak büyütülmesine ve hazırlanan P-MTJ'nin adımlı histeresis özelliği gösterip göstermediği belirlendikten sonra P-MTJ'nin performansına göre MgO'nun kalınlığının azaltılmasına karar verilmiştir.

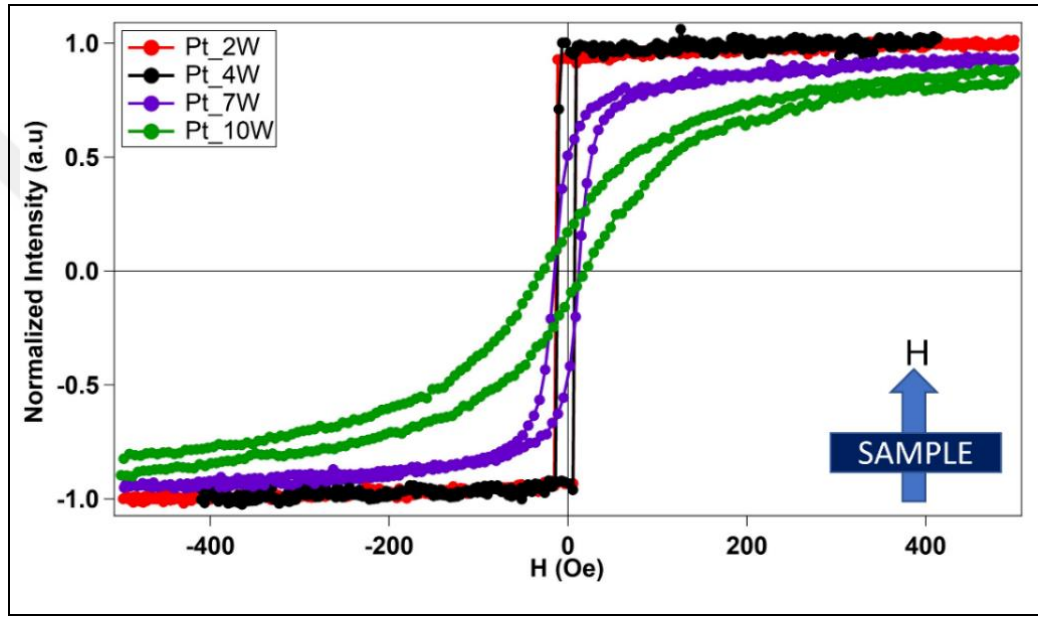
4.3. Serbest Tabaka (Free Layer, FL) Çalışması

Bir MTJ'de sabit ve serbest tabakanın manyetik yönelimlerinin birbirine göre durumu değiştirilerek yazma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu yazma işlemi ile ilgili Giriş bölümünde yapılan detaylı tartışmalara göre serbest tabakanın sıfırlayıcı alan değerinin küçük olması, yumuşak manyetik ya da süperparamanyetik malzemeden üretilmiş olması gerekmektedir [64], [65]. Anahtarlama alanının (switching field) ve anahtarlama akımının (switching current) küçük olması MTJ'nin tepki süresini ve güç tüketimini azaltmaktadır [66]. Serbest tabakanın sıfırlayıcı alan değeri anahtarlama işlemine etki eden temel parametrelerden bir tanesidir [67]. Ayrıca MTJ'de yazma işlemi sırasında hatalı anahtarlamaı ortadan kaldırmanın bir yolu olarak serbest tabakanın histeresizinin kareliliğinin 1 olması önerilmiştir [68].

Tüm bu bilgiler ışığında bu tez kapsamında hazırlanması planlanan P-MTJ'de serbest tabaka olarak kullanmak amacı ile kareliliği 1 olan ve sıfırlayıcı alan değeri sabit tabaka için Bölüm 4.1.5'de belirlemiş olduğumuz ORN2 kodlu örneğin sıfırlayıcı alan değerinden mümkün olduğunca düşük olacak bir serbest tabaka hedeflenmiştir. Grubumuzun daha önce yaptığı çalışmalarda kullanılan en basit katman olan Ti(5)/Pt(20)/Co(5)/Pt(20) çok katlı ince film sistemi Pt katmanı için 2 W, 4 W, 7 W ve 10 W güçlerinde hazırlanmıştır [69], [70]. Ti(5) ve Co(5) katmanı için Bölüm 4.1.1'de sabit tabaka çalışmasında kullanılan film büyütme parametreleri kullanılmıştır. 4 W, 7 W ve 10 W Pt güç değeri için film büyüme hızları MS sisteminde bulunan QCM ile belirlenmiştir. 2 W, 4 W, 7 W ve 10 W film büyütme güç değerleri için kaplama hızları sırası ile 0,224 Å/s, 0,475 Å/s, 0,860 Å/s ve 1,250 Å/s'dir. Hazırlanan örneklerin manyetik kolay eksenleri MOKE tekniği kullanılarak belirlenmiştir.

Hazırlanan örneklerin Şekil 4.27'de verilen örnek düzlemine dik geometride gerçekleştirilmiş MOKE ölçüm sonuçlarına göre manyetik kolay eksenleri örnek

düzlemine diktir. Çok katlı ince filmlerin Pt kaplama gücü 2W, 4W, 7W, 10W değişimine göre sıfırlayıcı alan değerleri sırası ile 10 Oe, 12 Oe, 19 Oe ve 26 Oe olarak hesaplanmıştır. Buna göre Pt kaplama gücü arttıkça sıfırlayıcı alan değerleri de artmaktadır. Ayrıca Pt 2W ve 4W kaplama gücü ile hazırlanan örneklerin histeresislerinin kareliliği 1 iken, 7 W ve 10 W örnekleri için bu değer sırası ile 0,5 ve 0,2 ye düşmüştür. MS sistemi Pt katmanı film büyütme gücü 7 W ve 10 W olan örneklerin mıknatıslanma eğrilerindeki bozulma Şekil 4.27’de de açıkça görülmektedir.



Şekil 4.27: Ti(5)/Pt(20)/Co(5)/Pt(20) örneğinin Pt 2W, 4W, 7W ve 10W kaplama güç değerleri için MOKE ölçüm sonuçları.

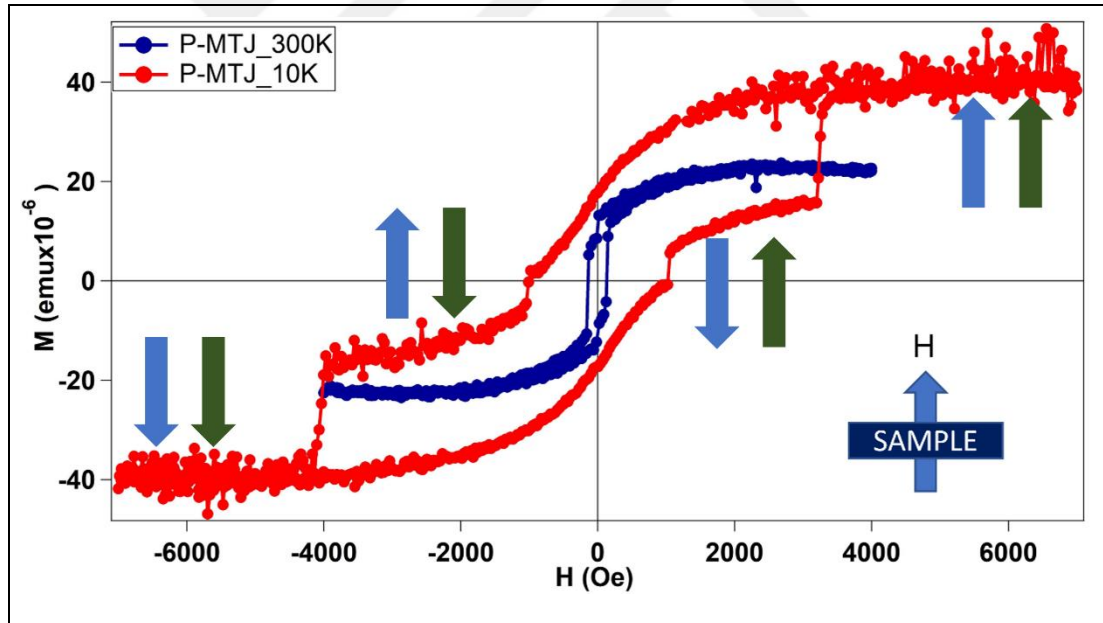
Hazırlamayı planladığımız P-MTJ’de serbest tabaka olarak kullanmak amacı ile Ti(5)/Pt(20)/Co(5)/Pt(20) çok katlı ince film sisteminde yapılan bu çalışmanın sonucunda 2 W ve 4 W Pt kaplama gücünde hazırlanan örneklerin sıfırlayıcı alan değerlerinin birbirine çok yakın ve diğer örneklere göre düşük olması, histeresislerinin kareliliğinin 1 olması nedeni ile serbest tabaka olarak kullanılabilir olduğu belirlenmiştir. Fakat manyetik saçırma tekniğinde özellikle tekrarlanabilir film büyütme için önemli olan plazma voltajı, plazma akımı ve MS sistemi basıncı gibi parametrelerin kaplama süresi içerisinde kontrol edilmesi gerekmektedir. Ancak MS sisteminde 4 W film büyütme gücünde Pt kaplama hızının, 2 W film büyütme gücünde Pt kaplama hızının iki katı olması ve hazırlanacak olan serbest tabakanın kalınlığının çok ince (20 Å) olması nedeni ile Pt film büyüme süresi düşmektedir. Film büyüme

süresinin düşmesi kaplama parametrelerini kontrol etmeyi zorlaştırmaktadır. Bu nedenle serbest tabaka için yapılan çalışmada 2 W kaplama gücünün en uygun Pt güç değeri olduğu sonucuna varılmıştır.



5. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu tez kapsamında P-MTJ üretmek amacı ile P-MTJ'nin temel tabakaları olan sabit tabaka, serbest tabaka ve yalıtkan tabaka ayrı ayrı çalışılmıştır. Sabit tabaka için Bölüm 4.1.5'de karar verilen ORN2 kodlu örnek, yalıtkan tabaka için Bölüm 4.2'de film büyütme parametrelerine karar verilen karar verilen MgO(30) tabakası, serbest tabaka için Bölüm 4.3'te karar verilen tpcp_Pt2W kodlu örnek kullanılarak Si(111) alttaş üzerine P-MTJ hazırlanmıştır. Hazırlanan P-MTJ'nin literatürde bahsedilen iki FM katmanın manyetik olarak birbirinden bağımsız davrandığını gösteren adımlı histeresis özelliğini belirlemek için RT-VSM, PL ve FL'ın sıcaklığa bağlı sıfırlayıcı alan değerini belirlemek ve EB hesaplamak amacı ile LT-VSM ölçümleri örnek düzlemine dik geometride gerçekleştirilmiştir [71]. PL ve FL'ın ayrı ayrı manyetik kolay eksenlerinin örnek düzlemine dik olduğu Bölüm 4.1.3 ve 4.3'te belirlendiği için MOKE ölçümüne ihtiyaç duyulmamıştır.

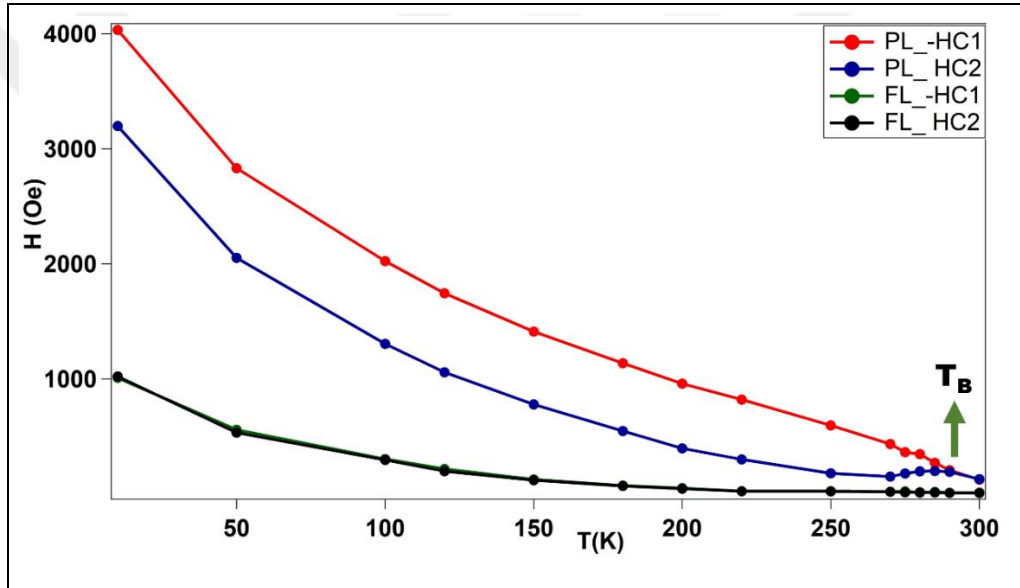


Şekil 5.1: P-MTJ örneğinin örnek düzlemine dik geometride 300 K ve 10 K sıcaklığında gerçekleştirilen VSM ölçüm sonuçları.

Hazırlanan P-MTJ'nin 300 K sıcaklığında VSM ölçümü gerçekleştirildikten sonra PL'da EB gözlemlmek amacı ile 350 K sıcaklığına ısıtılmıştır. 350 K sıcaklığında 4 kOe manyetik alan uygulanarak, bu alan altında 10 K sıcaklığına soğutulmuş ve bu sıcaklık değerinde değişen manyetik alana bağlı manyetik moment ölçümü gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sıcaklık artırılarak hedeflenen sıcaklık

değerlerinde histeresis alınmıştır. 300 K ve 10 K VSM ölçümlerinden elde edilen histeresisler Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Örnek düzlemine dik geometride yapılan VSM ölçümlerine göre 300 K sıcaklığında FL’nin sıfırlayıcı alan değeri 14 Oe iken 10 K’da 1035 Oe’e yükselmiştir. PL’nin 300 K sıcaklığında sıfırlayıcı alan değeri 157 Oe iken 10 K sıcaklığında bu değer 3570 Oe’e yükselmiştir.

Şekil 5.1’de gösterilen 300 K ve 10 K sıcaklıklarındaki VSM ölçümlerinden elde edilen histeresislerin doyum mıknatıslanmasında dalgalanmalar görülmektedir. Bu dalgalanmaların sebebi Bölüm 4.1.5’te açıklanmıştır ve benzer ölçümler PMOKE veya AHE tekniği ile alınırsa gözlemlenmeyecektir. Bu sebeple histeresizin kareliliği 1 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.2: P-MTJ örneğinin sıcaklığa bağlı sıfırlayıcı alan değeri değişimi grafiği.

LT-VSM ölçümlerinde elde edilen histeresislerden PL ve FL için ayrı ayrı HC1 ve HC2 değerleri kaydedilmiş, Şekil 5.2’de toplanmıştır. Şekil 5.2.’de verilen grafikten açıkça anlaşılabileceği üzere PL’nin sıfırlayıcı alan değeri FL’nin sıfırlayıcı alan değerinden büyüktür. Hazırlanan P-MTJ’nin sabit tabakasının T_B değerini belirlemek amacı ile 270K-290K sıcaklık aralığında, 5 K adımlarla manyetik çevrim alınmıştır. Sabit tabakada gerçekleşen EB etkisinin başladığı sıcaklık 290 K olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklık değerinde 7,7 Oe negatif EB gözlemlenmiştir.

Bu tez kapsamında manyetik saçtırma tekniği kullanılarak STT-MRAM uygulamalarına yönelik P-MTJ hazırlanmıştır. Hazırlanan MTJ’nin sabit, serbest ve yalıtkan katmanı ayrı ayrı optimize edildikten sonra bir araya getirilmiştir. Sabit tabaka

için yapılan çalışmada CoO katmanı içerisinde oksitlenmemiş metal kobaltın bulunduğu XPS tekniği ile belirlenmiş olup MOKE tekniği ile de doğrulanmıştır. Ayrıca CoO içerisindeki metal Co kümelerinin belirli bir kritik kalınlıkta manyetik çevrimin şekline etki edebileceği belirlenmiştir. Sabit tabaka için kareliliği 1 olan, T_B değeri 290K olan ve Talim etkisi gözlemlenmeyen bir örnek sistemi üretilmiştir. Yalıtkan tabaka için seçilmiş olan MgO farklı MS sistemi film büyütme güçlerinde büyütülerek XPS fit çalışması yapılmıştır. Yapılan fit çalışmasından elde edilen sonuca göre her bir kaplama gücünde Mg/O oranı 1 olarak hesaplanmıştır. Ancak kaplama gücü azaldıkça yüzey hidrooksitlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Serbest tabaka için yapılan çalışmada MS sistemi Pt kaplama gücünün manyetik çevrimin şeklini doğrudan etkilediği belirlenmiş olup 2 W kaplama gücünde kareliliği 1 olan düşük sıfırlayıcı alan değerine sahip bir serbest tabaka üretilmiştir. Her bir katmanı ayrı ayrı çalışılan P-MTJ Si(111) üzerine büyütülüp manyetik olarak STT-MRAM uygulamalarında kullanılabilecek özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu tez kapsamında hazırlanan P-MTJ'nin önümüzdeki süreçte AC empedans ve DC manyetodirenç ölçümlerinin yapılarak TMR oranı, direnç alanı ürünü (resistance area product, RA), anahtarlama alanı, anahtarlama akımı gibi değerlerinin hesaplanması planlanmaktadır. Yapılacak olan hesaplardan elde edilecek sonuçlara göre P-MTJ'de yalıtkan tabaka kalınlığının azaltılması farklı yalıtkan tabaka kullanılması gibi değişiklikler yapılarak iyileştirme çalışmaları yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Zhu J. G., Park C., (2006), “Magnetic tunnel junctions”, *Materials Today*, 9 (11), 36–45.
- [2] Maciel N., Marques E., Naviner L., Zhou Y., Cai H., (2020), “Magnetic tunnel junction applications”, *Sensors*, 20 (1), 1–20.
- [3] Bhatti S., Sbiaa R., Hirohata A., Ohno H., Fukami S., Piramanayagam S. N., (2017), “Spintronics based random access memory: a review”, *Materials Today*, 20 (9), 530–548.
- [4] Slonczewski J. C., (1996), “Current-driven excitation of magnetic multilayers”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 159 (2), 1–7.
- [5] Berger L., (1996), “Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current”, *Physical Review B*, 54 (13), 9353.
- [6] Senni S., Torres L., Sassatelli G., Gamatie A., Mussard B., (2016), “Exploring MRAM Technologies for Energy Efficient Systems-On-Chip”, *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 6 (3), 279–292.
- [7] Julliere M., (1975), “Tunneling between ferromagnetic films”, *Physics Letters A*, 54 (3), 225–226.
- [8] Apalkov D., Khvalkovskiy A., Watts S., Nikitin V., Tang X., Lottis D., (2013), “Spin-transfer torque magnetic random access memory (STT-MRAM)”, *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems*, 9 (2), 1–35.
- [9] Hirohata A., Yamada K., Nakatani Y., Prejbeanu L., Diény B., Pirro P., (2020), “Review on spintronics: Principles and device applications”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 509 (3), 1-28.
- [10] Su D., Wu K., Saha R., Peng C., Wang J., (2020), “Advances in Magnetoresistive Biosensors”, *Micromachines*, 11 (1), 1-34
- [11] Parkin S. S. P., Roche K. P., Samant M. G., Rice P. M., Beyers R. B., Scheuerlein R. E., (1999), “Exchange-biased magnetic tunnel junctions and application to nonvolatile magnetic random access memory”, *Journal of Applied Physics*, 85 (8), 5828–5833.
- [12] Nishimura N., Hirai T., Koganei A., Ikeda T., Okano K., Sekiguchi Y., (2002), “Magnetic tunnel junction device with perpendicular magnetization films for high-density magnetic random access memory”, *Journal of Applied Physics*, 91 (8), 5246–5249.

- [13] Bhatti S., Sbiaa R., Hirohata A., Ohno H., Fukami S., Piramanayagam S. N., (2017), "Spintronics based random access memory: a review", *Materials Today*, 20 (9), 530–548.
- [14] Nishimura N., Hirai T., Koganei A., Ikeda T., Okano K., Sekiguchi Y., (2002), "Magnetic tunnel junction device with perpendicular magnetization films for high-density magnetic random access memory", *Journal of Applied Physics*, 91 (8), 5246–5249.
- [15] Ström V., Jönsson B. J., Rao K. V., Dahlberg D., (1997), "Determination of exchange anisotropy by means of ac susceptometry in Co/CoO bilayers", *Journal of Applied Physics*, 81 (8), 5003–5005.
- [16] Nogués J., Schuller I. K., (1999), "Exchange bias", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 192 (2), 203–232.
- [17] Berkowitz A. E., Takano K., (1999), "Exchange anisotropy a review", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 200 (3), 552–570.
- [18] Meiklejohn W. H., Bean C. P., (1957), "New Magnetic Anisotropy", *Physical Review*, 105 (3), 904–913.
- [19] Cheng S. F., Teter J. P., Lubitz P., (1996), "Factors affecting performance of NiO biased giant magnetoresistance structure", *Journal of Applied Physics*, 79 (8), 6234.
- [20] Ball A., Leenaers A., van der Zaag P., (1996), "Polarized neutron reflectometry study of an exchange biased Fe₃O₄/NiO multilayer", *Applied Physics Letters*, 69 (10), 1489-1491.
- [21] Miller B. H., Dan Dahlberg E., (1996), "Use of the anisotropic magnetoresistance to measure exchange anisotropy in Co/CoO bilayers" *Applied Physics Letters*, 69 (25), 3932-3934.
- [22] Zhu J. G., Zheng Y., Lin X., (1997), "Micromagnetics of small size patterned exchange biased Permalloy film elements", *Journal of Applied Physics*, 81 (8), 4336-4341.
- [23] Radu F., Zabel H., (2007), "Exchange bias effect of ferro-/antiferromagnetic heterostructures", *Springer Tracts in Modern Physics*, 227, 97–184.
- [24] Menéndez E., Silva L. E. S., Johann G., Sort J., Dias T., (2019), "Unraveling the origin of training in granular Co-CoO exchange bias systems with buried antiferromagnetic constituents", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 478, 170–174.
- [25] Demirci E., (2018), "Manyetoelektrik Cr₂O₃ Tabanlı İnce Film Sistemlerinde Dik Exchange Bias Etkisinin İncelenmesi", *Doktora Tezi*, Gebze teknik üniversitesi.

- [26] Gökemeijer N. J., Ambrose T., Chien C. L., Wang N., Fung K. K., (1997), “Long-range exchange coupling between a ferromagnet and an antiferromagnet across a nonmagnetic spacer layer”, *Journal of Applied Physics*, 81 (8), 4999–5001.
- [27] Michel R. P., Chaiken A., Kim Y. K., Johnson L. E., (1996), “NiO Exchange Bias Layers Grown by Direct Ion Beam Sputtering of a Nickel Oxide Target”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 32 (5), 4651–4653.
- [28] Depla D., (2014), “On the effective sputter yield during magnetron sputter deposition”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 328, 65–69.
- [29] Thornton J. A., (1978), “Magnetron Sputtering: Basic Physics and Application To Cylindrical Magnetrons”, *Journal of Vacuum Science Technology*, 15 (2), 171–177.
- [30] Oztoprak I., (2019), “Composition and Post-Annealing Effects on Magnetic Behavior of Pt/Co Thin Films”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze teknik üniversitesi.
- [31] Depla D., Mahieu S., de Gryse R., (2009), “Magnetron sputter deposition: Linking discharge voltage with target properties”, *Thin Solid Films*, 517 (9), 2825–2839.
- [32] Végh J., (2005), “On analyzing the intrinsic processes through the Shirley background correction procedure”, *Surface Science*, 577 (2), 220–228.
- [33] Moulder J. F., Sticlke W. F., Sobol P. E., Bomben K. D., (1992), “Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy”, Jill Chastain, Minesota.
- [34] Weinberger P., (2008), “John Kerr and his effects found in 1877 and 1878”, *Philosophical Magazine Letters*, 88 (12), 897–907.
- [35] Hall E. H., (1881), “On the “Rotational Coefficient” in nickel and cobalt”, *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 12 (74), 157–172.
- [36] Haan S., Lodder C., Popma T., (1991), “The (Anomalous) Hall Magnetometer as an Analysis Tool For High Density Recording Media”, *Journal of Magnetics Society of Japon*, 15 (91), 349-354.
- [37] Karplus R., Luttinger J. M., (1954), “Hall effect in ferromagnetics”, *Physical Review*, 95 (5), 1154–1160.
- [38] Haan S., Lodder C., Popma T., (1991), “The (Anomalous) Hall Magnetometer as an Analysis Tool For High Density Recording Media”, *Journal of Magnetics Society of Japon*, 15 (91), 349-354.
- [39] Okamoto K., (1983), “A new method for analysis of magnetic anisotropy in films using the spontaneous hall effect”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 35 (3), 353–355.

- [40] Sinitsyn N. A., (2008), “Semiclassical theories of the anomalous Hall effect”, *Journal of Physics Condensed Matter*, 20 (2), 1-18.
- [41] Lopez-Dominguez V., Quesada A., Guzmán-Mínguez J. C., Moreno L., Lere M., Spottorno J., (2018), “A simple vibrating sample magnetometer for macroscopic samples”, *Review of Scientific Instruments*, 89 (3), 1-7.
- [42] van Oosterhout G. W., (1957), “A rapid method for measuring coercive force and other ferromagnetic properties of very small samples”, *Applied Scientific Research*, 6 (1), 101–104.
- [43] Akdogan N., Yagmur 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 Materials*, 373, 120–123.
- [44] Biesinger M. C., Payne B. P., Grosvenor A. P., Lau L. W. M., Gerson A. R., Smart R. St. C., (2011), “Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Cr, Mn, Fe, Co and Ni”, *Applied Surface Science*, 257 (7), 2717–2730.
- [45] Öztürk M., (2016), “Co/CoO Tabanlı İnce Filmlerde Exchange Bias’ın Elektrik Alan ile Kontrolü”, *Doktora Tezi, Gebze teknik üniversitesi*.
- [46] Dobrynin A. N., van Bael M. J., Temst K. and Llevens P., (2007), “Evidence for coexistence of exchange bias and exchange spring effects in oxidized Co nanocluster assembled films”, *New Journal of Physics*, 9 (8), 258.
- [47] Lin J., Shi Z., Zhou S. M., Zhang X., Xia Y. J., (2009), “Exchange bias in NiCo/FeMn bilayers with stripe domains”, *Chinese Physics Letters*, 26 (10), 107-501.
- [48] Chien L., Gornakov S., Nikitenko I., Shapiro J., Shull D., (2003), “Hybrid domain walls and antiferromagnetic domains in exchange-coupled ferromagnet/antiferromagnet bilayers”, *Physical Review B*, 68 (1), 1–5.
- [49] Simmons J. G., (1964), “Generalized thermal J-V characteristic for the electric tunnel effect”, *Journal of Applied Physics*, 35 (9), 2655–2658.
- [50] Loong L. M., Qiu X., Neo Z. P., Deorani P., Wu Y., Bhatia C. S., (2014), “Strain-enhanced tunneling magnetoresistance in MgO magnetic tunnel junctions”, *Scientific Reports*, 4 (1), 6505.
- [51] Wang D., Nordman C., Daughton J. M., Qian Z., Fink J., (2004), “70% TMR at room temperature for SDT sandwich junctions with CoFeB as free and reference layers”, *IEEE Transactions on Magnetism*, 40 (4), 2269–2271.

- [52] Parkin S. S. P., Kaiser C., Panchula A., Rice P. M., Hughes B., Samant M., (2004), “Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers”, *Nature Materials*, 3 (12), 862–867.
- [53] Djayaprawira D. D., Tsunekawa K., Nagai M., Maehara H., Yamagata S., Watanabe N., (2005), “230% room-temperature magnetoresistance in CoFeBMgOCoFeB magnetic tunnel junctions”, *Applied Physics Letters*, 86 (9), 1–3.
- [54] Hayakawa J., Ikeda S., Matsukura F., Takahashi H., Ohno H., (2005), “Dependence of giant tunnel magnetoresistance of sputtered CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions on MgO barrier thickness and annealing temperature”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 44 (16), 1–4.
- [55] Butler W. H., Zhang X. G., Schulthess T. C., MacLaren J. M., (2001), “Spin-dependent tunneling conductance of Fe/MgO/Fe sandwiches”, *Physical Review B*, 63 (5), 544161–5441612.
- [56] Mathon J., Umerski A., (2001), “Theory of tunneling magnetoresistance of an epitaxial Fe/MgO/Fe(001) junction”, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 63 (22), 1–4.
- [57] Hayakawa J., Ikeda S., Matsukura F., Takahashi H., Ohno H., (2005), “Dependence of giant tunnel magnetoresistance of sputtered CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions on MgO barrier thickness and annealing temperature”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 44 (16–19), 1–4.
- [58] Nagaraja B. M., Padmasri A. H., David Raju B., Rama Rao K. S., (2007), “Vapor phase selective hydrogenation of furfural to furfuryl alcohol over Cu-MgO coprecipitated catalysts”, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 265 (1–2), 90–97.
- [59] Casey P., Hughes G., O’connor E., Long R. D., Hurley P. K., (2008), “Growth and characterisation of thin MgO layers on Si(100) surfaces”, *Journal of Physics*, 100 (4), 42–46.
- [60] Vasquez R. P., (1993), “MgO(100) by XPS”, *Surface Science Spectra*, 2 (1), 13–19.
- [61] Nefedov V. I., Firsov M. N., Shaplygin I. S., (1982), “Electronic structures of MRhO₂, MRh₂O₄, RhMO₄ and Rh₂MO₆ on the basis of X-ray spectroscopy and ESCA data”, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 26 (1), 65–78.
- [62] Fuggle J. C., (1977), “XPS, UPS and AES studies of oxygen adsorption on polycrystalline Mg at ~100 and ~300 K”, *Surface Science*, 69 (2), 581–608.
- [63] Rheinheimer V., Unluer C., Liu J., Ruan S., Pan J., Monteiro P. J. M., (2017), “XPS study on the stability and transformation of hydrate and carbonate phases within MgO systems”, *Materials*, 10 (1), 75.

- [64] Almeida J. M., Freitas P. P., (2009), “Field detection in MgO magnetic tunnel junctions with superparamagnetic free layer and magnetic flux concentrators”, *Journal of Applied Physics*, 105 (7), 2–5.
- [65] Zhang Y., He G., Zhang X., Xiao G., (2019), “Magnetotransport and electronic noise in superparamagnetic magnetic tunnel junctions”, *Applied Physics Letters*, 115 (2), 22-27.
- [66] Kawahara T., Ito K., Takemura R., Ohno H., (2012), “Spin-transfer torque RAM technology: Review and prospect”, *Microelectronics Reliability*, 52 (4), 613–627.
- [67] Ohno H., Endoh T., Hanyu T., Ando Y., Ikeda S., (2014), “Spin-transfer-torque magnetoresistive random access memory (STT-MRAM) technology” Woodhead Publishing Limited.
- [68] Zhu J. G., Park C., (2006), “Magnetic tunnel junctions”, *Materials Today*, 9 (11), 36–45.
- [69] Ocal M. T., Sakar B., Oztoprak I., Balogh-Michels Z., Neels A., Ozturk O., (2021), “Structural and morphological effect of Ti underlayer on Pt/Co/Pt magnetic ultrathin film”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 60 (10), 10505.
- [70] Sakar B., Sievers S., Garcia-sanchez F., Schumacher H. W., (2021), “A Ti / Pt / Co Multilayer Stack for Transfer Function Based Magnetic Force Microscopy Calibrations”, 7 (6), 78.
- [71] Miyazaki T., Tezuka N., (1995), “Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 139 (3), 94–97.

ÖZGEÇMİŞ

Fatma YILMAZ öğrenim hayatına 1997 yılında başladı. 2015 yılında, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fatih Eğitim Fakültesi, Ortaöğretim Fen ve Matematik Alanları Fizik Öğretmenliği programını tamamladı. Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsü Fizik yüksek lisans programına 2018 yılında başladı. Yüksek lisans eğitimi süresince 119M287 nolu “Spin Tork Teknolojisine Dayalı Chip ve STT-MRAM Uygulamalarına Yönelik Dik Manyetik Anizotropiye Sahip Çok Katlı İnce Film Geliştirme: Kalıcı TMR Etkisinin Artırılması” başlıklı Tübitak projesinde çalıştı.

