

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**



**Ni/Cu ÇOK KATMANLI İNCE FİLMLEİN PÜSKÜRTME  
TEKNİĞİYLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SALİH ÇÖLMEKÇİ**

**BALIKESİR, OCAK - 2016**

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**FİZİK ANABİLİM DALI**



**Ni/Cu ÇOK KATMANLI İNCE FİLMLEİN PÜSKÜRTME**  
**TEKNİĞİYLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SALİH ÇÖLMEKÇİ**

**Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Hakan KÖÇKAR (Tez Danışmanı)**

**Yrd. Doç. Dr. Ali KARPUZ (Eş Danışmanı)**

**Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU**

**Doç. Dr. Öznur KARAAĞAÇ**

**Yrd. Doç. Dr. Hilal KURU**

**BALIKESİR, OCAK - 2016**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Salih ÇÖLMEKÇİ tarafından hazırlanan “Ni/Cu ÇOK KATMANLI İNCE FİLMLEİN PÜSKÜRTME TEKNİĞİYLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 25.01.2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Prof. Dr. Hakan KÖÇKAR

Eş Danışman  
Yrd. Doç. Dr. Ali KARPUZ

Üye  
Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU

Üye  
Doç. Dr. Öznur KARAAĞAÇ

Üye  
Yard. Doç. Dr. Hilal KURU

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi 2015/195 nolu araştırma projesi ile desteklenmiştir.**

## ÖZET

**Ni/Cu ÇOK KATMANLI İNCE FİLMLEİN PÜSKÜRTME TEKNİĞİYLE  
ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
SALİH ÇÖLMEKÇİ  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. HAKAN KÖÇKAR)  
(EŞ DANIŞMAN: YRD. DOÇ. DR. ALİ KARPUZ)  
BALIKESİR, OCAK - 2016**

Bu çalışmada, doğru akım (DC) püskürtme tekniği kullanılarak Ni/Cu çok katmanlı manyetik ince filmleri üretildi. Filmler üretilirken Cu tabaka kalınlığı, toplam film kalınlığı, Ni depozisyon hızı, Ni tabaka kalınlığı değiştirildi ve bu değişimlerin filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri üzerindeki etkileri araştırıldı. Manyetik ince filmler asetat alt tabaka üzerine büyütüldü. Bu filmlerin elementel analizi enerji ayırmalı X-ışını spektroskopisi, yapısal analizi X-ışını difraksiyonu ve taramalı elektron mikroskobu, manyetik analizi ise titreşimli numune manyetometresi ile yapıldı.

Birinci seride, Cu tabaka kalınlığı 200 nm'den 0 nm'ye kadar azalırken atomik Cu içeriğinin de azaldığı tespit edildi. Cu tabaka kalınlığının 15 nm ve altında olduğu filmlerde, Cu fcc (111) pikinin kaybolduğu, Ni fcc (200) pikinin oluştuğu ve şiddetinin arttığı gözlemlendi. Ayrıca, Cu tabaka kalınlığı azaldıkça film yüzeyindeki taneli yapılar kaybolmuş ve yüzey çizgisel formda izlenmiştir. Bunun yanı sıra, Cu tabaka kalınlığı azaldıkça Ni içeriğindeki artışa bağlı olarak doyum manyetizasyonu ( $M_s$ ) değeri  $180 \text{ emu/cm}^3$ 'ten  $2178 \text{ emu/cm}^3$ 'e artmıştır. İncelenen ikinci seride, toplam film kalınlığı 120 nm'den 280 nm'ye arttıkça atomik Ni ve Cu içerikleri sırasıyla % 51 ve % 49 değerlerinde yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Ayrıca, toplam kalınlığı en az olan filmin tek kristal yapıda büyüdüğü ve toplam film kalınlığı arttıkça Ni (111), Ni (200) ve Cu (111) düzlemlerine ait pik şiddetlerinin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, toplam kalınlığı en fazla olan filmin yüzeyindeki taneli yapıların, kalınlığı daha düşük olan filmlere göre, daha fazla olduğu ancak boyutlarının küçüldüğü görülmüştür. Toplam film kalınlığının değişmesiyle,  $M_s$  değerlerinde küçük değişiklikler olduğu anlaşılmıştır. Üçüncü seride, Ni depozisyon hızındaki değişimin filmlerin kristal fazında değişiklik oluşturmadığı ancak, depozisyon hızı arttıkça tanecik sayısı azaldığı için film yüzeyinin sadeleştiği gözlemlendi. Ni depozisyon hızının artmasıyla  $M_s$  ve koersivite ( $H_c$ ) değerlerinde bir artış olduğu tespit edildi. Ni tabakanın farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği dördüncü seride, tabaka kalınlığı azaldıkça atomik Ni içeriği azalmış, bunun sonucunda Ni fcc (111) düzleminin pik şiddeti azalırken Cu fcc (111) düzleminin pik şiddeti artmıştır. Ni tabaka kalınlığı azaldıkça, film yüzeyinde görülen çatlakların azalarak kaybolduğu ve  $M_s$  ile  $H_c$  değerlerinin de azaldığı anlaşılmıştır. Buna göre, Ni/Cu çok katmanlı ince filmlerin yapısal ve manyetik özelliklerinin incelenen depozisyon parametrelerinin değişiminden etkilendiği bulunmuştur.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Çok katmanlı yapılar, Manyetik özellikler, Ni/Cu ince filmler, Püskürtme tekniği.

## ABSTRACT

### PRODUCTION OF Ni/Cu MULTILAYER THIN FILMS BY SPUTTERING TECHNIQUE AND THEIR CHARACTERIZATION

MSC THESIS

SALIH COLMEKCI

BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

PHYSICS

(SUPERVISOR: PROF. DR. HAKAN KOCKAR )

(CO-SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. ALI KARPUZ )

BALIKESİR, JANUARY 2016

In this study, Ni/Cu magnetic multilayer thin films were produced by using direct current (DC) sputtering technique. During the film production, Cu layer thickness, total film thickness, Ni deposition rate and Ni layer thickness were changed and the effect of these changes on structural and magnetic properties of the films was investigated. The magnetic thin films were grown on an acetate substrate. The elemental analysis of the films was done by an energy dispersive x-ray spectroscopy and the structural analysis was done by an x-ray diffraction technique and a scanning electron microscope. The magnetic analysis was achieved by a vibrating sample magnetometer.

In the first series, it was detected that atomic Cu content decreased when the Cu layer thickness decreased from 200 nm to 0 nm. For the Cu layer thickness of 15 nm and lower than 15 nm, the peak of Cu fcc (111) disappeared, the peak of Ni fcc (200) appeared and its intensity increased. Also, the grainy structure on the film surface vanished and the surface was observed in the striped form as the Cu layer thickness decreased. Besides, the saturation magnetization ( $M_s$ ) value increased from  $180 \text{ emu/cm}^3$  to  $2178 \text{ emu/cm}^3$  depending on the increase in the Ni content as the Cu layer thickness decreased. In the second series investigated, the atomic Ni and Cu contents remained almost at the same value of 51 % and 49 %, respectively when the total film thickness increased from 120 nm to 280 nm. Also, it was detected that the film which has the lowest total thickness grew as a single crystal and the intensities of the Ni (111), Ni (200) and Cu (111) peaks increased as the total film thickness increased. In addition, the surface of the film with the highest thickness has a more grainy structure with lower grain dimension than those of the films with lower thickness. It was shown that  $M_s$  values slightly varied when the total film thickness changed. In the third series, it was observed that the change in the Ni deposition rate did not cause a change in the crystal phase of the films but, the film surface became simpler since the grain number decreased as the deposition rate increased.  $M_s$  and coercivity ( $H_c$ ) values increased when the Ni deposition rate increased. In the fourth series where the effect of different thicknesses of Ni layer was investigated, atomic Ni content decreased as the layer thickness decreased, and hence the peak intensity of the Cu fcc (111) plane increased while that of the Ni fcc (111) plane decreased. It was found that the cracks in the film surface tailed off and,  $M_s$  and  $H_c$  values decreased as the Ni layer thickness decreased. To the results, the structural and magnetic properties of the Ni/Cu multilayer thin films were affected by the change in the investigated deposition parameters.

**KEYWORDS:** Multilayer structures, Magnetic properties, Ni/Cu Thin films, Sputtering technique.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
TABLO LİSTESİ.....	ix
SEMBOL LİSTESİ.....	xi
ÖNSÖZ.....	xiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL BİLGİLER.....</b>	<b>4</b>
2.1 İnce Film Kaplama Yöntemleri.....	4
2.1.1 Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi.....	5
2.1.1.1 Doğru Akım (DC) Manyetik Alanda Püskürtme (Sputtering) Tekniği.....	6
2.2 Kristal Örgü Sistemleri.....	9
2.3 Manyetizmanın Temel Kavramları.....	10
2.4 Manyetik Maddelerin Sınıflandırılması.....	14
2.4.1 Diyamanyetizma.....	14
2.4.2 Paramanyetizma.....	15
2.4.3 Ferromanyetizma.....	17
2.4.3.1 Miknatıslanma (Hysteresis) Eğrisi.....	18
2.4.4 Antiferromanyetizma.....	20
2.4.5 Ferrimanyetizma.....	21
2.5 Manyetik Anizotropi.....	22

<b>3. DENEYSEL TEKNİKLER.....</b>	<b>24</b>
3.1 Püskürtme Sistemi.....	24
3.2 DC Magnetron Püskürtme Sistemi ile Film Üretimi.....	27
3.2.1 Farklı Kalınlıklı Cu Tabakalara Sahip Filmlerin Üretimi.....	29
3.2.2 Farklı Toplam Kalınlıklara Sahip Filmlerin Üretimi .....	30
3.2.3 Ferromanyetik (Ni) Tabakanın Farklı Depozisyon Hızları Dikkate Alınarak Yapılan Filmlerin Üretimi.....	31
3.2.4 Farklı Kalınlıklı Ni Tabakalara Sahip Filmlerin Üretimi.....	32
3.3 Enerji Ayırmalı X-ışını Spektroskopisi (EDX).....	33
3.4 X-Işınları Kırınımı (XRD) .....	34
3.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	36
3.6 Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM).....	37
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>39</b>
4.1 Ni/Cu Çok Katmanlı Yapılarında Cu Tabakasının Farklı Kalınlıklarının Etkisinin İncelenmesi.....	41
4.1.1 Elementel Analiz.....	41
4.1.2 Kristal Yapı Analizi.....	42
4.1.3 Yüzey Morfolojik Analizi.....	45
4.1.4 Manyetik Analiz.....	48
4.2 Ni/Cu Çok Katmanlı Yapılarında Farklı Toplam Film Kalınlığının Etkisinin İncelenmesi.....	52
4.2.1 Elementel Analiz.....	52
4.2.2 Kristal Yapı Analizi.....	53
4.2.3 Yüzey Morfolojik Analizi.....	56
4.2.4 Manyetik Analiz.....	58



4.3 Ni/Cu Çok Katmanlı Yapılarında Ferromanyetik Tabakanın Farklı Depozisyon Hızlarının Etkisinin İncelenmesi.....	61
4.3.1 Elementel Analiz.....	61
4.3.2 Kristal Yapı Analizi.....	62
4.3.3 Yüzey Morfolojik Analizi.....	66
4.3.4 Manyetik Analiz.....	68
4.4 Ni/Cu Çok Katmanlı Yapılarında Ni Tabakasının Farklı Kalınlıklarının Etkisinin İncelenmesi.....	70
4.4.1 Elementel Analiz.....	70
4.4.2 Kristal Yapı Analizi.....	71
4.4.3 Yüzey Morfolojik Analizi.....	73
4.4.4 Manyetik Analiz.....	75
<b>5. SONUÇ.....</b>	<b>79</b>
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>82</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 2.1:</b> Buhar fazdan yapılan kaplamalar ve fiziksel buhar biriktirme yöntemleri [16, 27].....	5
<b>Şekil 2.2:</b> Püskürtme sisteminin şematik yapısı .....	8
<b>Şekil 2.3:</b> Kristal örgü sistemleri a) sc yapı, b) bcc yapı, c) fcc yapı [38].....	9
<b>Şekil 2.4:</b> $v$ hızı ile dolanan bir elektron zıt yönlerde olmak üzere bir açısal momente ( $L$ ) ve bir manyetik momente ( $\mu$ ) sahiptir [40]. .....	12
<b>Şekil 2.5:</b> Diyamanyetik maddelerin manyetizasyonunun uygulanan manyetik alana göre değişimi.....	15
<b>Şekil 2.6:</b> a) Paramanyetik maddelerin manyetizasyonunun uygulanan manyetik alana göre değişim grafiği b) Paramanyetik maddelerin manyetik alınganlığının sıcaklığa bağlı değişim grafiği .....	16
<b>Şekil 2.7:</b> Ferromanyetik maddelerin manyetizasyonunun sıcaklığa bağlı değişim grafiği.....	18
<b>Şekil 2.8:</b> Manyetizasyonun uygulanan manyetik alan şiddetine bağlı değişimi (hysteresis grafiği) .....	20
<b>Şekil 2.9:</b> a) Antiferromanyetik maddenin manyetik alınganlığının sıcaklık ile değişimi b) Değiş tokuş enerjisi sonucu ortaya çıkan antiferromanyetik ya da ferromanyetik durum. [41]. .....	21
<b>Şekil 2.10:</b> Manyetik malzemelerin manyetik moment şekilleri; a) Ferromanyetizma, b) Antiferromanyetizma, c) Ferrimanyetizma .....	22
<b>Şekil 2.11:</b> Tek kristal nikelin kolay manyetizasyon eksenini, [111] ve nispeten zor manyetizasyon eksenini, [100] gösteren manyetizasyon eğrileri [38].....	23
<b>Şekil 3.1:</b> Balıkesir Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi nanomanyetik malzeme üretim laboratuvarında bulunan püskürtme sistemi.....	23
<b>Şekil 3.2:</b> Püskürtme sisteminin açık hali.....	23
<b>Şekil 3.3:</b> Vakum odasının iç kısmı.....	23

<b>Şekil 3.4:</b> Vakum odası üst kapağı ve alt tabaka tutucu. ....	23
<b>Şekil 3.5:</b> Bir kristal düzleminden X-ışını kırınımı (Şekil $\Theta=45^0$ ye göre çizilmiştir.) .....	23
<b>Şekil 4.1:</b> Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD desenleri .....	44
<b>Şekil 4.2:</b> Alt tabakaya ait SEM görüntüsü. ....	46
<b>Şekil 4.3:</b> Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin SEM görüntüleri a) Cu: 200 nm, b) Cu: 90 nm, c) Cu: 40 nm, d) Cu: 15 nm. ....	47
<b>Şekil 4.3: (devam):</b> Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin SEM görüntüleri e) Cu: 0 nm. ....	48
<b>Şekil 4.4:</b> Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin histeresis eğrileri (// : Paralel, $\perp$ : Dik).....	50
<b>Şekil 4.5:</b> Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerinde, $M_s$ ve $H_c$ değerlerinin filmlerdeki Ni içeriğine göre değişimi. ....	51
<b>Şekil 4.6:</b> Farklı toplam film kalınlığının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD desenleri .....	23
<b>Şekil 4.7:</b> Farklı toplam film kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin 40 000 büyütmedeki SEM görüntüleri a) 120 nm, b) 160 nm, c) 240 nm, d) 280 nm.....	57
<b>Şekil 4.8:</b> Farklı toplam film kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin histeresis eğrileri (// : Paralel, $\perp$ : Dik).....	60
<b>Şekil 4.9:</b> Ferromanyetik Ni tabakanın farklı depozisyon hızlarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD desenleri (Cu depozisyon hızı: 0.04 nm/s) .....	65
<b>Şekil 4.10:</b> Ferromanyetik Ni tabakanın farklı depozisyon hızlarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin SEM görüntüleri a) 0.02 nm/s, b) 0.06 nm/s, b) 0.10 nm/s.....	67
<b>Şekil 4.11:</b> Ferromanyetik Ni tabakanın farklı depozisyon hızlarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin histeresis eğrileri (// : Paralel, $\perp$ : Dik) .....	69
<b>Şekil 4.12:</b> Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD desenleri .....	72

- Şekil 4.13:** Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin 40 000 büyütmedeki SEM görüntüleri a) Ni: 92.5 nm, b) Ni: 42.5 nm, c) Ni: 32.5 nm, d) Ni:17.5 nm ..... 74
- Şekil 4.14:** Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin histeresis eğrileri (// : Paralel,  $\perp$  : Dik) ..... 77
- Şekil 4.15:** Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerinde,  $M_s$  ve  $H_c$  değerlerinin filmlerdeki Ni içeriğine göre değişimi. .... 78

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> Bazı ferromanyetiklerin curie sıcaklıkları [40].....	18
<b>Tablo 3.1:</b> Farklı kalınlıklı Cu tabakalara sahip filmlerin üretimlerinde kullanılan parametreler (1. Seri).....	30
<b>Tablo 3.2:</b> Farklı toplam kalınlıklara sahip filmlerin üretimlerinde kullanılan parametreler (2. Seri).....	31
<b>Tablo 3.3:</b> Ferromanyetik tabakanın farklı depozisyon hızları dikkate alınarak yapılan filmlerin üretimlerinde kullanılan parametreler (3.Seri).....	32
<b>Tablo 3.4:</b> Farklı kalınlıklı Ni tabakalara sahip filmlerin üretimlerinde kullanılan parametreler (4. Seri).....	33
<b>Tablo 4.1:</b> Filmlerin üretim parametreleri.....	40
<b>Tablo 4.2:</b> Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin elementel analiz sonuçları .....	41
<b>Tablo 4.3:</b> Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD analizinden elde edilen sonuçlar. ....	45
<b>Tablo 4.4:</b> Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerinin paralel ölçüm sonuçları .....	51
<b>Tablo 4.5:</b> Farklı toplam film kalınlığının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin elementel analiz sonuçları .....	52
<b>Tablo 4.6:</b> Farklı toplam film kalınlığının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD analizinden elde edilen sonuçlar .....	56
<b>Tablo 4.7:</b> Farklı toplam film kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin paralel ölçüm sonuçları .....	60
<b>Tablo 4.8:</b> Ni tabakasının farklı depozisyon hızlarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin elementel analiz sonuçları.....	62
<b>Tablo 4.9:</b> Ferromanyetik Ni tabakanın farklı depozisyon hızlarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD analizinden elde edilen sonuçlar.....	64
<b>Tablo 4.10:</b> Ferromanyetik Ni tabakanın farklı depozisyon hızlarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin paralel ölçüm sonuçları .....	69

<b>Tablo 4.11:</b> Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin elementel analiz sonuçları .....	70
<b>Tablo 4.12:</b> Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD analizinden elde edilen sonuçlar .....	73
<b>Tablo 4.13:</b> Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerinin paralel ölçüm sonuçları .....	76

## SEMBOL LİSTESİ

<b>Ni</b>	: Nikel
<b>Cu</b>	: Bakır
<b>M</b>	: Manyetizasyon
<b>H</b>	: Manyetik alan şiddeti
$\chi$	:Manyetik alınganlık
<b>V</b>	: Hacim
$\phi$	: Manyetik akı
$\mu$	: Manyetik geçirgenlik
$\mu_0$	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
<b>K</b>	: Kelvin
<b>T<sub>c</sub></b>	: Curie sıcaklığı
<b>T</b>	: Mutlak sıcaklık
<b><i>m</i></b>	: Net manyetik moment
<b><i>e</i></b>	: Elektronun yükü
<b><i>m<sub>e</sub></i></b>	: Elektronun kütlesi
<b><i>m<sub>p</sub></i></b>	: Protonun kütlesi
<b><i>m<sub>n</sub></i></b>	: Nötronun kütlesi
<b>M<sub>s</sub></b>	: Doyum Manyetizasyonu
<b>M<sub>r</sub></b>	: Kalıcı manyetizasyon
<b>H<sub>c</sub></b>	: Koarsivite
<b>DC</b>	: Doğru akım
<b>RF</b>	: Radyo frekans
<b>kV</b>	: Kilovolt
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	: Mikrometre

- mbar** : Milibar
- mA** : Miliamper
- nm** : Nanometre
- Å** : Angstrom
- d** : Kristal düzlemleri arasındaki uzaklık
- $\theta$**  : Bragg açısı
- $2\theta$**  : Difraksiyon açısı
- $\lambda$**  : X-ışını dalga boyu
- n** : Yansıma mertebesi, değerlik elektron sayısı
- t** : Tane büyüklüğü
- $t_{ort}$**  : Ortalama tane büyüklüğü
- B** : Yarı yükseklikteki pik genişliği değeri (FWHM)
- E** : Elektromotor kuvvet
- kOe** : Kiloörsted



## ÖNSÖZ

Çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen değerli danışmanlarım Prof. Dr. Hakan KÖÇKAR ve Yrd. Doç. Dr. Ali KARPUZ' a çok teşekkür ederim.

Film üretimine ve bu süreçte oluşan bazı aksaklıkların giderilmesine olan katkılarından dolayı Uzm. Mehmet UÇKUN'a, VSM ölçümlerindeki katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Hilal KURU'ya ve Doç. Dr. Öznur KARAAĞAÇ'a teşekkür ederim. XRD analizine olan katkısından dolayı Prof. Dr. Halil GÜLER'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez kapsamında incelenen filmlerin XRD, EDX analizleri ve SEM görüntüleri için Bilkent Üniversitesi, Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (UNAM)' ne teşekkür ederim.

Ayrıca, Sputtering ve VSM sistemlerinin alınmasına 2005K120170 numaralı proje ile destek olan Devlet Planlama Teşkilatı'na ve bu çalışmaya 2015/195 numaralı araştırma projesi ile destek olan Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan ve beni destekleyen eşime, katkılarından dolayı aileme çok teşekkür ederim.

**Balıkesir, 2016**

**Salih ÇÖLMEKÇİ**

# 1. GİRİŞ

Günümüzde nanobilim ve nanoteknolojiye olan ilgi giderek artmaktadır. Bunun nedeni, günümüz teknolojisinde ihtiyaç duyulmasına rağmen, hacimli (bulk) malzemelerde gözlenemeyen bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerin, boyutları nanometre mertebesinde olan malzemelerde ortaya çıkmasıdır [1, 2]. Nano boyutlu malzemelerin elde edilebilmesi, manyetik özelliklerdeki bazı değişimleri beraberinde getirmektedir [3]. Nanoteknolojik çalışmalar, bu malzemelerin üretimi, karakterizasyonu, mevcut özelliklerinin değiştirilmesi, kullanım alanları ve işlevselliklerinin artırılması gibi konuları kapsar.

Nano-manyetik malzemeler, manyetik kayıt cihazları, bilgisayar sabit diskleri, okuma yazma başlıkları, manyetik sensörler, spintronik aletler, biyomedikal ve biyoteknolojik uygulamalar olmak üzere çok geniş kullanım alanına sahiptir [4-7]. Kullanım alanlarına göre farklılıklar görülse de asıl amaç daha uzun ömürlü, daha hızlı, daha küçük boyutlu ve daha yüksek kapasiteli manyetik malzemeleri elde etmektir. Örneğin; manyetik kayıt cihazlarının doyum manyetizasyonu ( $M_s$ ) ve kalıcı manyetizasyon ( $M_r$ ) değerlerinin büyük, parçacık boyutunun küçük olması istenir. Böylece daha küçük boyutlarda daha yoğun kayıt yapılabilir [8-11]. Bunun yanı sıra, elektromıknatıs kullanımı gibi bazı uygulamalarda ise  $M_r$  değerinin küçük olması istenmektedir. Manyetik özelliklerin, farklı uygulamalarda farklı tarzlarda talep edilmeleri, nano-manyetik malzemelerin neden bilimsel araştırma konusu olduklarını daha iyi açıklamaktadır [12].

Boyutları makroskobik mertebede olan bir manyetik malzemenin tek boyutu nanometre mertebesine kadar küçültüldüğünde manyetik ince film elde edilir. Günümüzde manyetik ince filmlerin üretimi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar arasında oldukça yaygın olarak kullanılanlar yüzey kaplama teknikleridir [13]. Yüzey kaplama yöntemleri, kaplama malzemesinin fiziksel haline göre katı fazdan, sıvı fazdan, ergimiş ya da yarı ergimiş fazdan ve buhar fazından yapılan kaplamalar olmak üzere dört gruba ayrılır. Buhar fazdan yapılan kaplamalar ise kimyasal buhar biriktirme, fiziksel buhar biriktirme, iyon demeti destekli biriktirme

olmak üzere üç farklı şekilde yapılabilir [14, 15]. Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ise kendi içinde püskürtme ve buharlaştırma olarak ikiye ayrılır [16]. Bu tez çalışmasında, püskürtme tekniklerinden biri olan doğru akım (DC) manyetik alanda püskürtme (sputtering) tekniği kullanılmıştır.

Püskürtme, hedef metalin yeterli enerjiye sahip atomlarla veya iyonlarla bombardıman edilmesi ile hedef metalden atom koparma işlemidir [17]. Manyetik çok katmanlı yapıların, püskürtme tekniği kullanılarak üretilmesi ile manyetik sensör, manyetik kayıt ve depolama teknolojilerinde geniş uygulama alanları ortaya çıkmaktadır. Manyetik ince filmlerin püskürtme tekniği ile üretimi birçok avantajı beraberinde getirmektedir [14, 18]. Yüksek saflıkta ve homojen birikmelerin elde edilebilmesi, diğer üretim yöntemlerine kıyasla, depozisyonun alt tabaka üzerine çok iyi tutunması, ultra ince filmlerin de bu yöntemle büyütülebilmesi, farklı basınç ve sıcaklık değerlerinde biriktirme yapılabilmesi, birçok malzemenin bu yöntemle kaplanabilmesi, gelişmeye açık bir sistem olması bu avantajlar arasında sayılabilir [19, 20]. Püskürtme tekniği kullanılarak üretilen manyetik ince filmlerin karakteristik özellikleri üretim parametrelerine bağlı olarak farklılık gösterir. Üretim parametreleri farklı olan manyetik ince filmlerin yapısal ve manyetik analizlerindeki farklılıkları açıklayan birçok çalışma vardır [21-24].

Bu çalışmada, DC magnetron püskürtme yöntemi ile üretilen Ni/Cu manyetik ince filmlerin elementel, yapısal ve manyetik analizleri yapıldı ve farklı depozisyon parametrelerinin filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri üzerinde meydana getirdiği değişiklikler incelendi. Ayrıca üretilen Ni/Cu çok katmanlı yapıların, manyetik ince film teknolojisinde potansiyel uygulama alanlarının artırılması hedeflendi. Ni/Cu çok katmanlı yapılar dört farklı seri olarak üretildi. Birinci seride farklı Cu tabaka kalınlıklarının, ikinci seride farklı toplam film kalınlıklarının, üçüncü seride farklı Ni depozisyon hızlarının ve dördüncü seride ise farklı Ni tabaka kalınlıklarının filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri üzerine etkileri incelendi. Çalışma beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm çalışmanın amacının ve kapsamının belirtildiği “Giriş” bölümüdür. İkinci bölüm, yapılan çalışmanın alt yapısını oluşturan gerekli teorik bilgilerin verildiği “Kuramsal Bilgiler” bölümüdür. Üçüncü bölüm, manyetik ince filmlerin üretiminde kullanılan püskürtme sistemi ile üretim öncesi ve üretim sonrası aşamalar ve malzemelerin karakterizasyonunda kullanılan analiz tekniklerinin

anlatıldığı “Deneysel Teknikler” bölümüdür. Dördüncü bölüm, yapılan analizler sonucu elde edilen verilerin grafik ve tablolar yardımıyla açıklanıp yorumlandığı “Bulgular ve Tartışma” bölümüdür. Beşinci bölüm ise, elde edilen bulgular ve yapılan tartışmalar ışığında çalışmanın öne çıkan noktalarının vurgulandığı “Sonuç ” bölümüdür.

## 2. KURAMSAL BİLGİLER

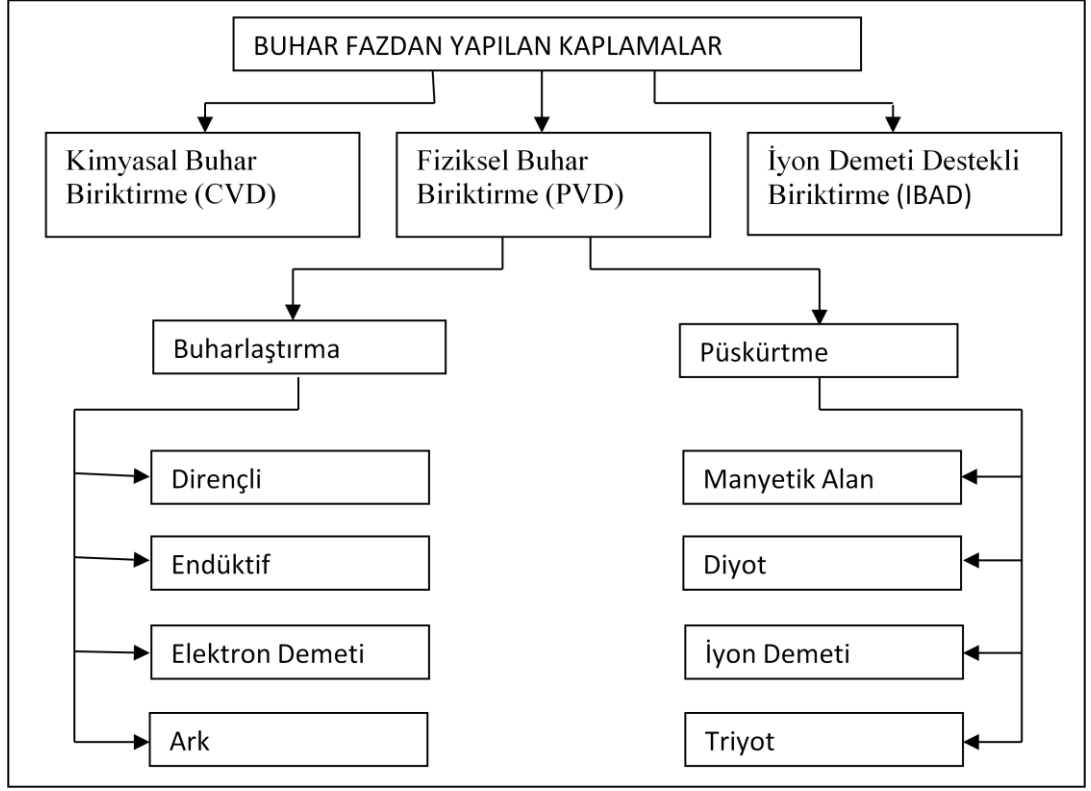
Bu bölüm, ince film kaplama yöntemleri, kristal örgü sistemleri ve manyetizmanın temel kavramları ile ilgili genel bilgileri içermektedir.

### 2.1 İnce Film Kaplama Yöntemleri

İnce filmler, atom ya da moleküllerin bir yüzeye (alt tabaka) birikmesi ile oluşan ve kalınlıkları nanometre mertebesinde olan malzemelerdir [25, 26]. Kaplama yöntemleri ile oluşturulan ince filmler pek çok özelliği bir arada barındırırlar. Bazı kaplama yöntemleri ile alt tabaka üzerine başka bir malzeme biriktirilirken, bazılarında ise malzeme yüzeyi tamamen değiştirilmektedir [27, 28]. Kaplama yöntemleri kullanılarak malzemelere; manyetik, optik, elektrik-elektronik, termal, kimyasal, tribolojik (sürtünme, aşınma) açıdan yeni özellikler kazandırılabilir [13, 29]. Yüzey kaplama yöntemleri kaplama malzemesinin bulunduğu fiziksel hale göre;

- 1) Buhar fazdan yapılan kaplamalar
- 2) Sıvı fazdan yapılan kaplamalar
- 3) Ergimiş ya da yarı ergimiş fazda yapılan kaplamalar
- 4) Katı fazdan yapılan kaplamalar

olarak dört grupta toplanır. Buhar fazdan yapılan kaplamalardan olan fiziksel buhar biriktirme yöntemi, bu çalışmanın konusu olduğu için burada ayrıntılı olarak incelenecektir. Şekil 2.1' de buhar fazdan yapılan kaplamalar ve bu kaplama yönteminin bir çeşidi olan fiziksel buhar biriktirme yöntemleri ayrıntılı olarak verilmiştir.



**Şekil 2.1:** Buhar fazdan yapılan kaplamalar ve fiziksel buhar biriktirme yöntemleri [16, 27].

### 2.1.1 Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi

Fiziksel buhar biriktirme; uygun vakum ve plazma ortamı oluşturularak, malzemenin katı bir hedef malzeme yüzeyinden atom veya molekül formunda buharlaştırılıp alt tabakaya taşınması işlemidir [27]. Fiziksel buhar biriktirme işlemi sırasıyla; buhar fazının oluşması, oluşan buharın hedeften alt tabakaya taşınması ve alt tabaka üzerine film birikmesi şeklinde gerçekleşir [29]. Fiziksel buhar biriktirme işlemi Şekil 2.1’ de görüldüğü gibi buharlaştırma ve püskürtme (sputtering) olarak ikiye ayrılır. Püskürtme yönteminde, gaz halindeki iyonların hedef metale çarpması ile atomlar yerlerinden sökülerek alt tabakaya taşınırken, buharlaştırma yönteminde atomlar hedef malzemeden termal olarak ayrılır ve ortamda bulunan reaktif gaz sayesinde alt tabakaya taşınırlar [30]. Fiziksel buhar biriktirme yöntemi yüksek vakum ortamına ihtiyaç duyar. Yüksek vakumlu ortama gereksinim duyulmasının nedeni, buhar halindeki malzemenin kaplanacağı yüzeye taşınması esnasında

ortamda bulunabilecek diğler parçacıklarla çarpışma olasılığının azaltılmasını sağlamaktır [31].

Fiziksel buhar biriktirme yönteminin bazı avantajları aşağıdaki gibi açıklanabilir.

- Metal, alaşım, seramik, polimer kaplamaların tümü bu yolla elde edilebilir.
- Bu yöntem kullanılarak yapılan biriktirmeler, diğler kaplama yöntemlerine kıyasla alt tabaka üzerine çok iyi tutunma özelliğine sahiptirler.
- Alt tabaka olarak değışik geometriye sahip ve yüksek sıcaklıklara dayanabilen malzemeler kullanılabilir.
- Çevreyi kirletmez, zehirli atık açığa çıkarmaz.
- Hedef malzemenin saflığı ve vakum ortamının temizliğinden dolayı yüksek saflıkta birikmeler elde edilir.
- Kaplama kalınlığı yüksek homojenliğe sahiptir.

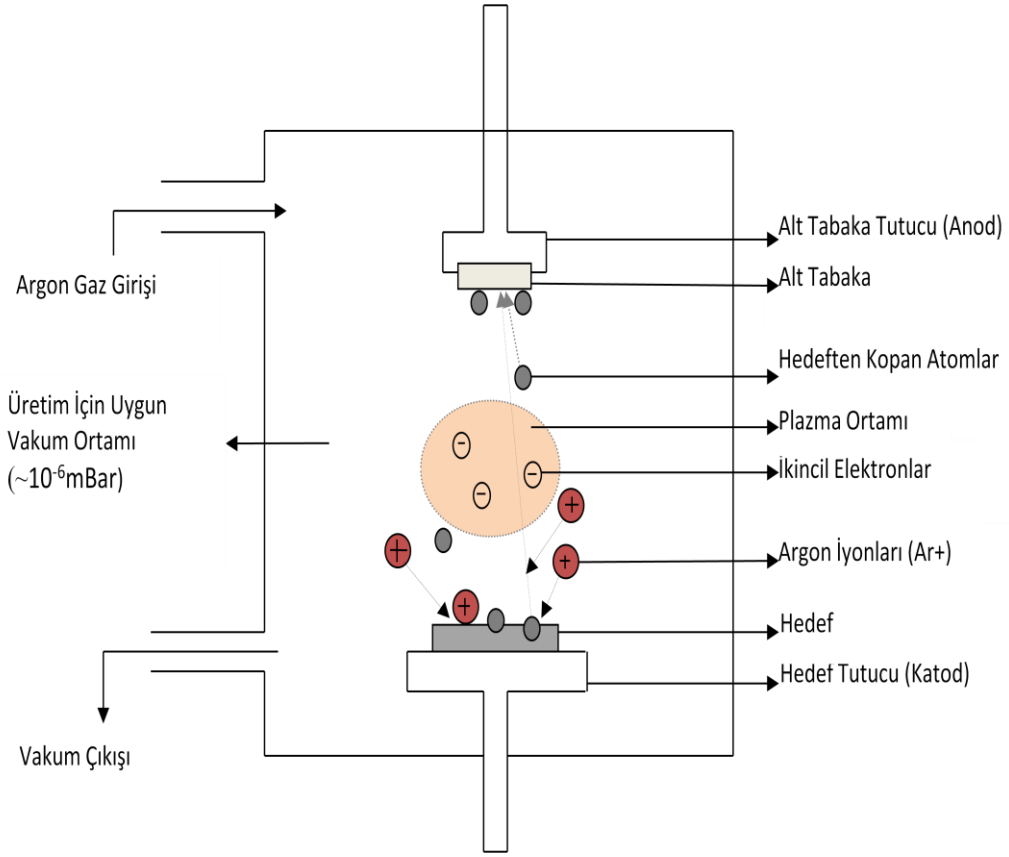
#### **2.1.1.1 Doğru Akım (DC) Manyetik Alanda Püskürtme (Sputtering) Tekniğı**

Püskürtme tekniğı Şekil 2.1’de görüldüğü gibi dört grupta toplanır. Bu yüksek lisans çalışmasının konusu DC püskürtme tekniğı ile malzeme üretme olduğı için bu kısımda ayrıntısıyla verilecektir. Püskürtme, katı bir yüzeyi (hedef) yeterli enerjiye sahip atomlarla veya iyonlarla bombardıman ederek bu yüzeyden atom koparma işlemidir. Başka bir ifade ile püskürtme, malzemeye ısı enerjisi verilmeden, malzemenin atomlarına momentum aktararak yapılan bir buharlaşma işlemidir [17]. Belirli enerjiye sahip parçacıklar hedef malzeme yüzeyine çarptığında momentum aktarımı gerçekleşir. Bu çarpışmalar sonucu ortaya çıkan enerji, hedef malzeme yüzeyinde dislokasyonlara sebep olarak atomlar arası bağların kopmasına neden olur ve hedef yüzeyindeki bazı atomlar serbest kalır [32, 33]. Hedef yüzeyine gelen iyonların, hedef metalden atom koparabilmesi için sahip olmaları gereken belli bir eşik enerjisi vardır. Gelen iyonlar bu değıer ve bu değıerden yüksek enerjilere sahip olurlarsa atomlar yerlerinden sökülebilir.

Püskürtme yönteminin sürdürülebilmesi için plazma ortamına ihtiyaç duyulur. Plazma ortamı, hedef malzemenin üzerine bir elektriksel gerilim (negatif potansiyel) uygulanması sonucu elde edilir. Uygulanan akım doğru akım (DC)' dir. Hedef malzeme, plazmadan daha negatif bir gerilimde bulunur. Böylelikle, pozitif iyonlar hedef malzemeye doğru hareket ederler. Oluşan plazma ortamında bulunan elektron ve iyonlar elektrik alanı oluştururlar ve böylece elektrik iletkenliği sağlanmış olur [30, 34]. Hedef metal yüzeyindeki çarpışmalar sonucu ortaya çıkan ikincil elektronları hedefe yakın bölgede tuzaklayabilmek için manyetik alana ihtiyaç duyulur. Uygulanan manyetik alan sayesinde ikincil elektronlar plazma ortamına geri kazandırılır. Böylece plazma ortamının sürekliliği sağlanmış olur ve daha yüksek bir püskürtme oranı elde edilir. Hedef malzemedan kopan atomlar ise yüksüz oldukları için manyetik alanın etkisinde kalmadan alt tabakaya ulaşırlar [35, 36]. Şekil 2.2' de püskürtme sisteminin şematik yapısı gösterilmektedir. Manyetik alanda püskürtme yönteminde kaplama malzemesi (hedef), su soğutmalı mıknatıs veya elektromıknatıslardan oluşan hedef tutucunun üzerinde yer alır. Kullanılan mıknatıslar silindirik şekildedirler ve elektrik ve manyetik alanların kaplama malzemesinin üzerinde birbirine dik olmasını sağlarlar [29].

Püskürtme yönteminin verimli olması için ve kimyasal tepkime olmaması için kullanılan gazın ağır ve biriktirme işlemine etki etmeyecek şekilde inert olması gerekir. Bu nedenle asal gazlar tercih edilir. Genel olarak reaktif gazlar düşük atom ağırlığına sahip olduklarından dolayı püskürtme işleminde tercih edilmezler [20]. Periyodik tablo incelendiğinde, iyonlaşma potansiyeli düşük olduğu için, saf halde bulunabilirliği daha kolay olduğu için ve ucuz bir gaz olduğu için asal gaz olarak argon gazı tercih edilir. Yüklü parçacıkları elektrik alan altında hızlandırıp yönlendirmek, yüksüz parçacıklara kıyasla daha kolay olduğu için püskürtme işleminde argon iyonları kullanılır [25]. Ortamda gaz fazlası bulunmasını önlemek ve yüzeyle tepkimeye girecek kadar argon gazı kullanmak vakum ortamının kirlenmesini büyük oranda azaltır. Argon gazının oranı gerekenden yüksek ya da düşük olduğunda homojen olmayan kaplama yüzeyleri oluşur ve bu da yüzey üzerinde gerilmelere yol açar. Argon iyonları, hedefe çarparak reaksiyonu başlattıkları gibi hedeften kopan atomları da alt tabakaya taşırlar. Argon iyonlarının hedefe ilk çarpması anında anod ve katod arasında elektriksel boşalma gerçekleşir ve ortama bir ışık yayılır ve bu da ark olarak ifade edilir [36].





**Şekil 2.2:** Püskürtme sisteminin şematik yapısı.

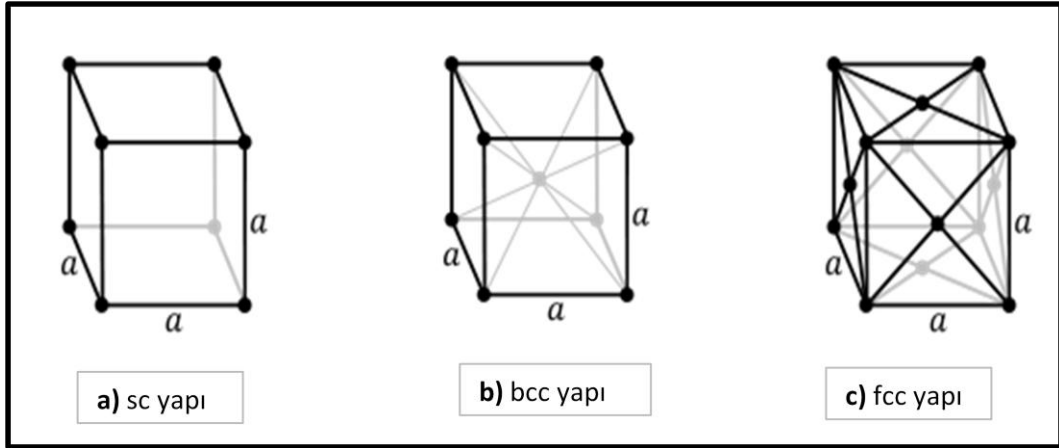
Doğru akım magnetron püskürtme yönteminde ortamın basıncı ideal olarak düşük ( $\sim 10^{-6}$  mBar) olmalıdır. Basıncın yüksek olması durumunda ise kopartılan atomların ortalama serbest yolu kısalmaktadır. Bu durum, atomların enerjilerinin azalmasıyla yönlerinden sapma olasılıklarının artması ve kaplama veriminin düşmesi anlamına gelir. Üretimde yüksek verimin elde edilmesi için hedef ile alt tabakanın birbirlerine göre pozisyonlarının iyi ayarlanmış olması gerekir. Hedef ile alt tabaka arası uzaklığın çok olması hedeften kopan atomların alt tabakaya düzgün bir şekilde birikme olasılığını azaltır ve üretim kalitesini düşürebilir. Hedef ve alt tabakanın sıcaklıklarının sürekli kontrol edilmesi ve kristal yapıda bozulmaya sebep olacak sıcaklıklara çıkılmaması önemlidir [25, 36].

Hedef yüzeyine çarpan her bir iyon karşılığında o malzemeden ayrılan atom veya molekül sayısı; yüzeye çarpan iyonların ağırlığı ve enerjisi, hedef malzeme cinsi, kristal yapısı ve gelen parçacıkların açıları gibi bir takım faktörlere bağlıdır [25, 34].

## 2.2 Kristal Örgü Sistemleri

Katıhal fiziğinin ortaya çıkışı, X-ışınlarının kırınımı olayının keşfedilmesi ve kristal özelliklerini başarıyla öngören bir dizi basit model hesapların yayınlanmasıyla olmuştur. Kristal, atom gruplarından oluşan üç boyutlu bir örgüdür. İdeal bir kristal, özdeş yapı taşlarının uzayda sonsuza kadar dizilişi ile ortaya çıkar. Doğada bulunan kristallerin hiçbiri ideal kristal değildir. Ancak fiziksel özellikler bakımından bazı hallerde kristalleri ideal kabul etmek gerekir [37]. Bir malzemedeki atomların dizilişi düzenli ise kristal yapı, düzensiz ve rastgele ise amorf yapı oluşur.

Örgü türleri, hücre yapısı özelliğine göre ayrılmak istendiğinde triklinik, monoklinik, ortorombik, tetragonal, kübik, trigonal ve altıgen olmak üzere yedi farklı şekilde gruplandırılırlar. Kübik yapıda ilkel hücre (basit kübik-sc) sadece bir örgü noktası içerirken, doğal cisim merkezli kübik (body centred cubic-bcc) hücresi iki örgü noktası, doğal yüzey merkezli kübik (face centered cubic-fcc) hücresi dört örgü noktası içerir [38]. Şekil 2.3' te bu yapıların geometrik gösterimleri verilmiştir.



**Şekil 2.3:** Kristal örgü sistemleri a) sc yapı, b) bcc yapı, c) fcc yapı [38].

Metaller genellikle fcc, bcc ve hcp (hexagonal closed packed) yapıda bulunurlar. Ni, Cu, Al, Ag, Au, Pb, Ne, Ar, Kr, Xe gibi bazı elementler genellikle fcc yapıda, Fe, Li, Na, K, Cr, Ba, W gibi bazı elementler genellikle bcc yapıda, Co, Ti, Mg, Zn, Gd, Tb, Dy gibi bazı elementlerde genellikle hcp yapıda kristalleşirler [39].

Bir kristalin simetrisinin kristalin özellikleri üzerinde çok büyük etkileri vardır. Birçok element birden fazla kristal yapıda bulunabilir, sıcaklık ve basınç gibi parametreler değiştikçe bir yapıdan diğerine geçebilir. Ancak bunlardan sadece biri kararlı bir yapı oluşturur [38].

### 2.3 Manyetizmanın Temel Kavramları

İki manyetik kutup arasındaki kuvvet, iki elektrik yükü arasındaki kuvvete benzemekle birlikte bu iki kuvvet arasında önemli bir fark olduğu bilinir. Elektrik yükleri birbirlerinden ayrılabilir (elektron ya da proton gibi). Bir başka deyişle doğada elektrik yükleri tek başlarına pozitif veya negatif olarak bulunabilirler. Buna karşın manyetik kutuplar her zaman çiftler halinde bulunurlar. Yani manyetik tek kutup yoktur. Ayrıca elektrik alanın kaynağı durgun yükler iken, manyetik alanın kaynağı hareketli yüklerdir. Değişken bir elektrik alan manyetik alanı oluşturabildiği gibi, değişken bir manyetik alan da elektrik alanı oluşturabilir [40].

Maddedeki tüm manyetik olaylar, atomik manyetik dipol momentlerle açıklanabilir. Bu atomik manyetik momentler hem elektronların yörüngesel hareketlerinden, hem de spin özelliğinden kaynaklanır. Bir atom çekirdeğinin de proton ve nötronlarından kaynaklanan manyetik momenti vardır. Ancak bir protonun ya da nötronun manyetik momenti, elektronun manyetik momentinin yanında çok küçük kalır ve genellikle ihmal edilir. Proton ( $m_p=1.672623 \times 10^{-27}$  kg) ve nötronun ( $m_n=1.6749286 \times 10^{-27}$  kg) kütleleri, elektronun ( $m_e=9.1093897 \times 10^{-31}$  kg) kütesinden çok büyük olduklarından manyetik momentleri yaklaşık  $10^3$  kere daha küçüktür.

Yarıçapı  $r$  olan çembersel bir yörüngede  $v$  hızı ile dolanan bir elektronun manyetik momenti yörüngesel hareketi ile ilgilidir. Elektron çemberin çevre uzunluğu olan  $2\pi r$  lik yolu  $T$  sürede aldığı için yörüngesel hızı:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (2.1)$$

dir. Çekirdek etrafında dolanan elektronun oluşturduğu  $i$  akımı:

$$i = \frac{e}{T} \quad (2.2)$$

ifadesine eşittir. Burada  $e$  elektronun yükü,  $T$  elektronun periyodudur.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.3)$$

ve

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2.4)$$

bağıntıları kullanılarak  $i$  akımı:

$$i = \frac{e}{T} = \frac{e\omega}{2\pi} = \frac{ev}{2\pi r} \quad (2.5)$$

ifadesi elde edilir. Yörünge etrafında dolanan bu elektronun oluşturduğu manyetik moment:

$$\mu = iA \quad (2.6)$$

dir. Burada  $A$  yörünge alanıdır ( $A = \pi r^2$ ). O halde manyetik moment:

$$\mu = iA = \left(\frac{ev}{2\pi r}\right) \pi r^2 = \frac{1}{2} evr \quad (2.7)$$

olur. Elektronun yörünge açısal momentumunun büyüklüğü:

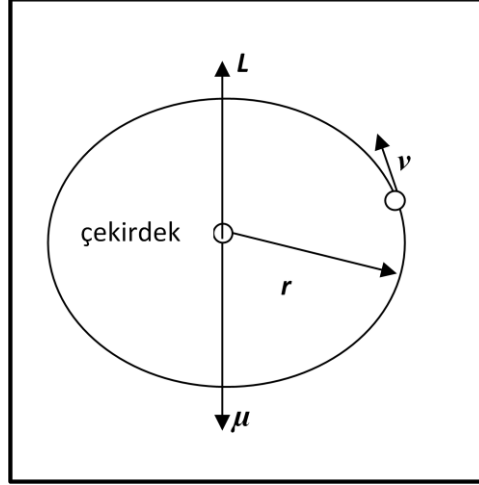
$$L = mvr \quad (2.8)$$

olduğundan, yörüngesel manyetik moment:

$$\mu_{yörünge} = \left(\frac{e}{2m_e}\right)L \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilir [40].  $m_e$  elektronun kütesidir. Bu sonuç bize elektronun manyetik momentinin, yörüngesel açısal momentum ile orantılı olduğunu ve

yörüngesel açısal momentum değerinin kesikli (kuantumlu) olduğunu açıklar. Elektron negatif yüklü olduğu için Şekil 2.4' te görüldüğü gibi  $\mu$  ve  $L$  vektörleri zıt yönlerde yönelirler.



**Şekil 2.4:**  $v$  hızı ile dolanan bir elektron zıt yönlerde olmak üzere bir açısal momente ( $L$ ) ve bir manyetik momente ( $\mu$ ) sahiptir [40].

Atomdaki bir elektronun manyetik momentinin yine aynı atomun ters yönde dolanan diğer bir elektronunun manyetik momenti tarafından dengelenerek etkisiz hale getirilmesi, maddelerin bir kısmının neden net bir manyetik momentinin olmadığını açıklar. Bu maddeler için elektronların yörüngesel hareketinin oluşturduğu manyetik etki ya sıfırdır ya da oldukça küçüktür [40].

Yörüngesel manyetik momentinden başka elektronun spin denen bir başka özelliği daha vardır ve manyetik momente buradan da katkı gelir. Elektronun spin hareketini açıklamak için kuantum mekaniğinden faydalanmak gerekir. Spin açısal momentumun büyüklüğü ( $S$ ), yörüngesel açısal momentumla aynı mertebededir. Kuantum teorisinin öngördüğü spin açısal momentumunun büyüklüğü:

$$S = \frac{h\sqrt{3}}{4\pi} \quad (2.10)$$

dir. Burada  $h$  planck sabitidir. Spin manyetik moment ise:

$$\mu_{spin} = \frac{eh}{4\pi m_e} \quad (2.11)$$

olur [40]. Burada  $e$  elektronun yükü,  $m_e$  elektronun kütlesidir. Toplam manyetik moment, elektronun yörünge etrafındaki hareketinden kaynaklanan manyetik moment ile spin hareketinden kaynaklanan manyetik momentinin toplamına eşittir [40,41]. Klasik bir sistemde manyetik alan altında bile olsa manyetik moment oluşmaz. Bundan dolayı mıknatıslanma olayının açıklanabilmesi için kuantum mekaniğine ihtiyaç duyulur [38].

Bir maddenin manyetik durumu, manyetizasyon vektörü ( $M$ ) ile ifade edilir. Manyetizasyon, malzemenin birim hacmindeki net manyetik moment sayısına eşittir.

$$M = \frac{m}{V} \quad (2.12)$$

$M$  manyetizasyon,  $m$  madde içindeki net manyetik moment sayısı,  $V$  maddenin hacmidir. Paramanyetik ve diamanyetik maddelerin manyetizasyonu ( $M$ ), manyetik alan şiddeti ( $H$ ) ile orantılıdır. Bu oran:

$$M = \chi H \quad (2.13)$$

olarak ifade edilir [40]. Burada  $\chi$  manyetik alınganlık ya da süseptibilite olarak verilir ve bir maddeden diğerine değişen birimsiz bir büyüklüktür. Ferromanyetik maddeler için denklem (2.13) geçerli değildir. Manyetik alınganlık ( $\chi$ ), maddenin uygulanan manyetik alana gösterdiği tepkinin bir ölçüsüdür. Manyetik indüksiyon ya da başka bir ifade ile manyetik akı yoğunluğu ( $B$ ), manyetik alandan dolayı ortaya çıkar ve ortamın manyetik alana karşı davranışını açıklar. Manyetik alan ( $H$ ) ve manyetik indüksiyon ( $B$ ) arasındaki bağıntı:

$$B = \mu H \quad (2.14)$$

olarak verilir.  $\mu$  manyetik geçirgenlik (permabilite) olarak ifade edilir. Madde bir dış manyetik alana maruz kalırsa toplam manyetik indüksiyon:

$$B = \mu_o(H+M) \quad (2.15)$$

olur.  $\mu_o = 4\pi 10^{-7} \text{ Wb/A.m}$  olup serbest uzayın manyetik geçirgenliğidir. Manyetik alınganlık ( $\chi$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) ifadeleri manyetik maddeler için karakteristik özelliklerdir [40, 42, 43].

## 2.4 Manyetik Maddelerin Sınıflandırılması

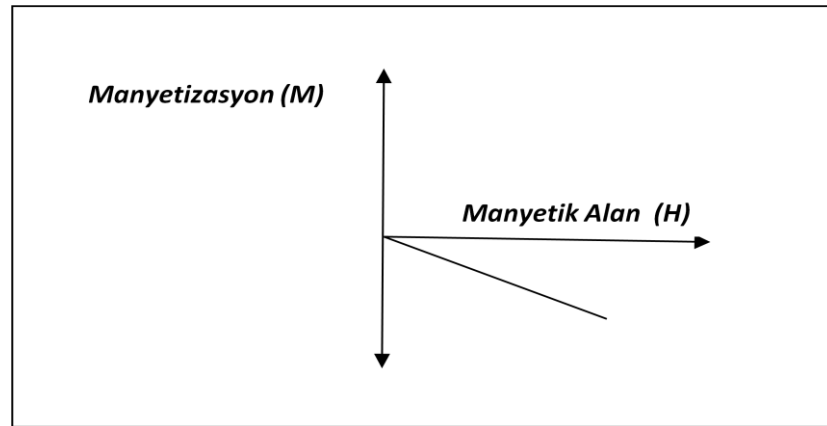
Manyetik özelliklerine göre maddeler diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik olmak üzere üç başlık altında toplanırlar. Özellikle ferromanyetik malzemeler bu çalışmanın konusu olduğu için ayrıntılı bir şekilde ele alınacaktır.

### 2.4.1 Diyamanyetizma

Dış manyetik alanın yokluğunda net manyetik momenti sıfır olan, manyetik alan etkisinde bırakıldıklarında ise alana zıt yönde ve zayıf bir manyetik momente sahip olan maddelere diyamanyetik maddeler denir. Bütün maddelerde diyamanyetik etki vardır ve diyamanyetik etki ancak diğer etkiler görülmediğinde ortaya çıkar [44]. Elektronların yörüngede dolanmalarının sebebi, pozitif yüklü çekirdeğin oluşturduğu çekici elektrostatik kuvvettir. Son yörüngesinde iki elektronu bulunan bir atomun, bu son yörüngesindeki elektronların manyetik momentlerinin büyüklükleri eşit fakat pauli dışarlama ilkesine göre yönleri ters olduğu için atomun net manyetik momenti sıfır olur. Bundan dolayı elektronun spin hareketinden manyetik momente katkı yoktur, katkı sadece yörünge hareketinden gelir. Diyamanyetik madde dış manyetik alana maruz kaldığında, elektronlar  $q\vec{v} \times \vec{B}$  ile verilen ek bir kuvvete maruz kalırlar. Burada  $q$  elektronun yükü,  $v$  elektronun hızı ve  $B$  manyetik indüksiyon olarak verilir. Bu kuvvetin etkisiyle zıt yönde manyetik momente sahip elektronun hızı artarken, alanla aynı yönde manyetik momente sahip olan elektronun hızı azalır. Bundan dolayı ters yönde dolanan elektronların manyetik momentleri birbirlerini yok edemez ve madde Şekil 2.5' te gösterildiği gibi uygulanan manyetik alana ters yönde net bir manyetik moment kazanır.

Diyamanyetik malzemelerin alınganlıkları negatif olmakla birlikte paramanyetik ve ferromanyetiklerden daha küçüktür ( $\chi \cong -10^{-5}$  ile  $-10^{-6}$  arası) ve aynı zamanda diyamanyetik alınganlık sıcaklıktan bağımsızdır [40]. Genel olarak soygazların tamamı (atomik yörüngelerdeki tüm kabuklar dolu olduğu için) ve bakır (Cu), gümüş (Ag), altın (Au), bizmut (Bi) gibi katılar diyamanyetik özellik gösterirler [45].

Bu tez çalışmasında diyamanyetik bir madde olan bakır metali, ince filmleri oluşturan metallere biri olarak kullanılmış, manyetik ve yapısal özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bakır metalinin 300 K'daki manyetik alınganlığı  $\chi = -9.8 \times 10^{-6}$  dır [40].



**Şekil 2.5:** Diyamanyetik maddelerin manyetizasyonunun uygulanan manyetik alana göre değişimi.

#### 2.4.2 Paramanyetizma

Bir dış manyetik alan yokken manyetik momentleri rastgele yönelen, dış manyetik alan etkisinde kaldıklarında ise atomik manyetik momentleri alan yönünde hizalanan, manyetik alınganlıkları düşük fakat pozitif olan ( $\chi \cong 10^{-3}$  ile  $10^{-5}$  arası) maddelere paramanyetik maddeler denir. Paramanyetik maddelerin mıknatıslanması Şekil 2.6' da gösterildiği gibi manyetik alanla doğru orantılıdır, manyetik

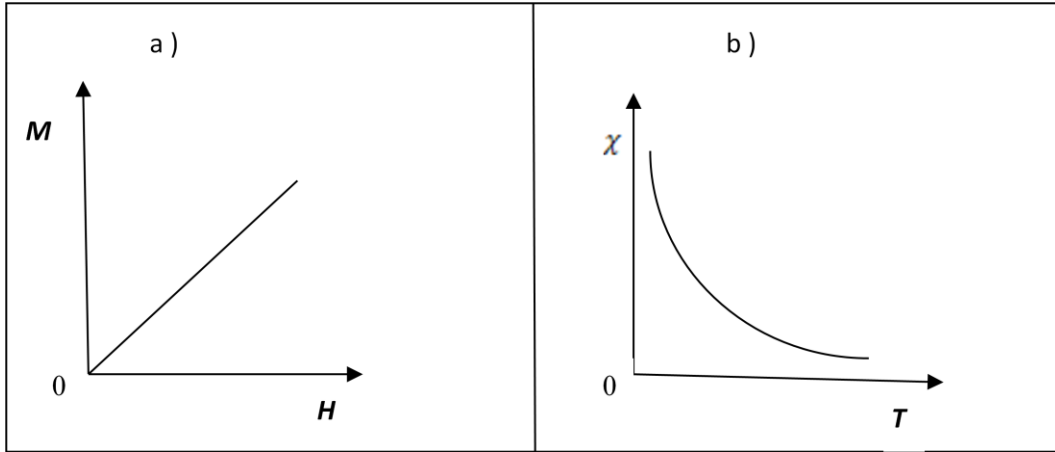


alınanlıkaları ise mutlak sıcaklıkla ters orantılıdır. Çok yüksek alanlarda ve düşük sıcaklıklarda mıknatıslanma maksimum olur. Bu durumda tüm manyetik dipol momentler aynı yönde yönelirler [40]. Paramanyetik maddelerin manyetik alınanlıkalarının sıcaklık ile ilişkisi (2.16)' da verilen bağıntı ile ifade edilir.

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (2.16)$$

Burada  $C$  curie sabiti,  $T$  mutlak sıcaklığı ifade eder.

Curie sıcaklığının altında, manyetik momentler paralel olarak dizildikleri için madde ferromanyetiktir. Curie sıcaklığının üstünde ise ısıl enerji yüksektir ve maddenin kristal yapısı bozulmuştur. Bu nedenle manyetik momentler rasgele yönelirler ve madde paramanyetik duruma geçer [40]. Curie sıcaklığında maddenin manyetik geçirgenliği ( $\mu$ ) aniden düşer, kalıcı manyetizasyonu ve koersivitesi sıfır olur [43]. Alüminyum (Al), Platin (Pt), Tungsten (W), Mangan (Mn) gibi maddeler paramanyetiklere örnektir.



**Şekil 2.6:** a) Paramanyetik maddelerin manyetizasyonunun uygulanan manyetik alana göre değişim grafiği b) Paramanyetik maddelerin manyetik alınanlığının sıcaklığa bağlı değişim grafiği.

### 2.4.3 Ferromanyetizma

Demir, nikel, kobalt, godyalinyum, disprozyum gibi atomları sürekli manyetik momente sahip olan, dış manyetik alan varlığında atomik manyetik momentleri paralel olarak hizalanan, dış alan kaldırıldığında ise mıknatıslanma özelliğini kaybetmeyen maddelere ferromanyetik madde denir. Ferromanyetik maddeler domain bölgelerinden oluşur ve kristal yapıya sahiptirler. Domain bölgelerinin hacimleri yaklaşık  $10^{-8}$  -  $10^{-12}$  m<sup>3</sup> olup  $10^{17}$  -  $10^{21}$  civarı atom içerirler [40]. Ferromanyetik maddelerin mıknatıslanma eğrisi ya da hysteresis eğrisi denilen ve kalıcı mıknatıslanmayı açıklayan yapıları mevcuttur. Dış manyetik alan yeterince artırıldığında ferromanyetik malzeme manyetik doyum değerine ulaşır. Artık manyetik domainlerin hepsi aynı yönde yönelmiştir. Buna doyum manyetizasyonu denir [41].

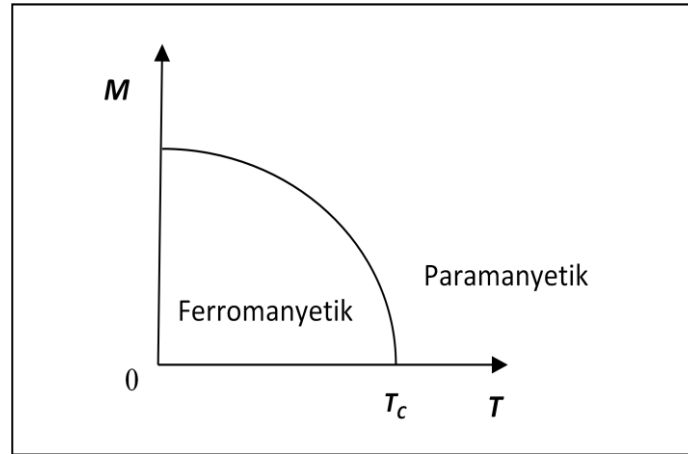
Ferromanyetik maddelerin alınganlıkları paramanyetik ve diyamanyetiklerden yüksek ( $\chi \approx 50$  ile 10000 arası) ve sıcaklığa bağlıdır [41]. Sıcaklığa bağlılığı Curie-Weiss yasası ile açıklanır. Buna göre:

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad (2.17)$$

dir [38]. Burada  $C$  Curie sabiti,  $T$  sıcaklık,  $T_c$  Curie sıcaklığıdır. Aşağıdaki Tablo 2.1' de bazı ferromanyetiklerin curie sıcaklıkları, Şekil 2.7' de ise ferromanyetik maddelerin manyetizasyonlarının sıcaklığa bağlı değişim grafiği verilmiştir. Manyetizasyon sıfır K değerinde maksimumdur. Manyetik hysteresis grafiği mıknatıslanmanın; uygulanan alan şiddetine, maddenin manyetik alan uygulanmadan önceki artık mıknatıslanma düzeyine ve maddenin saflık durumuna bağlı olduğunu açıklar [40]. Bir maddenin manyetik analizini yapmak için hysteresis eğrisini incelemek gerekir. Bu sayede doyum manyetizasyonu, koarsivitesi, kalıcı manyetizasyonu, manyetik geçirgenliği, sert ya da yumuşak manyetik olduğu anlaşılabilir [46, 63].

**Tablo 2.1:** Bazı ferromanyetiklerin curie sıcaklıkları [40].

Madde	$T_c$ (°C)
Nikel	358
Demir	770
Kobalt	1121



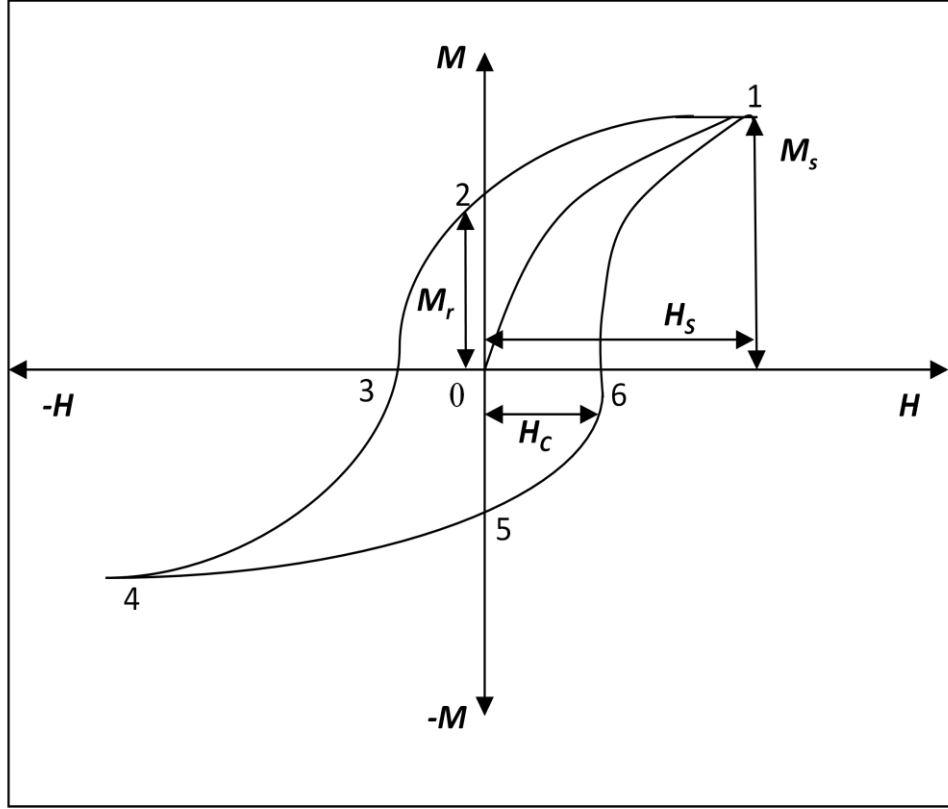
**Şekil 2.7:** Ferromanyetik maddelerin manyetizasyonunun sıcaklığa bağlı değişim grafiği.

#### 2.4.3.1 Mıknatıslanma (Hysteresis) Eğrisi

Ferromanyetik maddelerin momentleri dış manyetik alanın yokluğunda rastgele yönelmişlerdir ve toplam manyetik moment sıfırdır. Manyetik alan uygulandığında ise malzemenin manyetizasyonu uygulanan manyetik alan şiddetine bağlı olarak aşağıdaki Şekil 2.8' deki gibi bir hysteresis çevrimi oluştururlar. Hysteresis çevrimini daha ayrıntılı olarak inceleyecek olursak, 0-1 aralığında manyetik alan şiddeti ( $H$ ) arttırıldıkça domain bölgeleri alanla paralel hale gelmeye başlarlar ve yeterli şiddette alan uygulandığında manyetik momentlerin tamamına yakını paralel konuma geçerler. Manyetizasyonun maksimum olduğu bu duruma doyum manyetizasyonu denir ve  $M_s$  ile gösterilir. Doyum manyetizasyonunu meydana getirmek için gereken alana doyum alanı denir ve  $H_s$  ile gösterilir. Bu noktadan sonra dış manyetik alan yavaş yavaş sıfırlanırsa, 1-2 yolu oluşur ve 2

noktasında uygulanan alan sıfır olmasına rağmen manyetizasyon sıfır olmaz. Bunun nedeni ferromanyetik malzemelerin kalıcı ya da artık mıknatıslanması olarak açıklanır. Kalıcı mıknatıslanma  $M_r$  ile gösterilir. Koarsivite alanı ise kalıcı manyetizasyonu sıfıra indirmek için gerekli olan ters manyetik alandır ve  $H_c$  ile gösterilir. Uygulanan dış manyetik alanın yönü ters çevrilip şiddeti artırılırsa, 3 noktasında manyetizasyon sıfır olur. Manyetik alanın şiddeti artırıldıkça malzeme ters yönde mıknatıslanır ve 4 noktasında doyuma ulaşır. Daha sonra manyetik alan başlangıç yönünde artırılırsa 4-5-6 yolu oluşur ve manyetik alan yeterince artırılırsa 1 noktasına ikinci kez ulaşır. Böylelikle Şekil 2.8' de verilen manyetik hysteresis eğrisi elde edilmiş olur [40, 47].

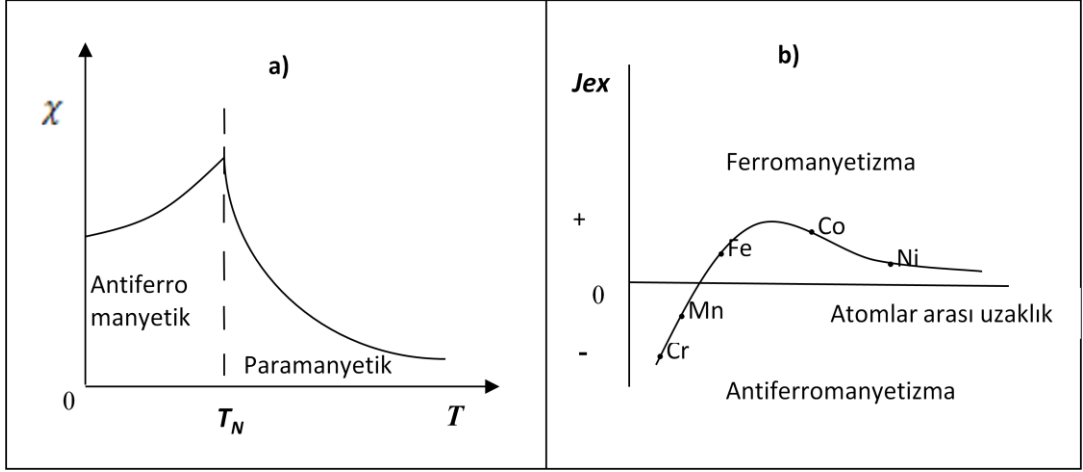
Hysteresis ilmeğinin şekli ferromanyetik maddenin karakteristiğine ve uygulanan alanın şiddetine bağlıdır. Sert ferromanyetik maddelerin hysteresis çevriminin oluşturduğu alan yumuşak ferromanyetiklere göre büyüktür. Sert ferromanyetiklerin kalıcı mıknatıslanması yüksekken, yumuşak ferromanyetiklerin kalıcı mıknatıslanmaları düşüktür. Yumuşak ferromanyetikler çok kolay mıknatıslanabilirler ve çok kolay mıknatıslık özelliğini kaybedebilirler. Yumuşak ferromanyetiklerin hysteresis çevrimleri dar olduğu için hysteresis çevrimindeki enerji kayıpları çok azdır [40].



**Şekil 2.8:** Manyetizasyonun uygulanan manyetik alan şiddetine bağlı değişimi (hysteresis grafiği).

#### 2.4.4 Antiferromanyetizma

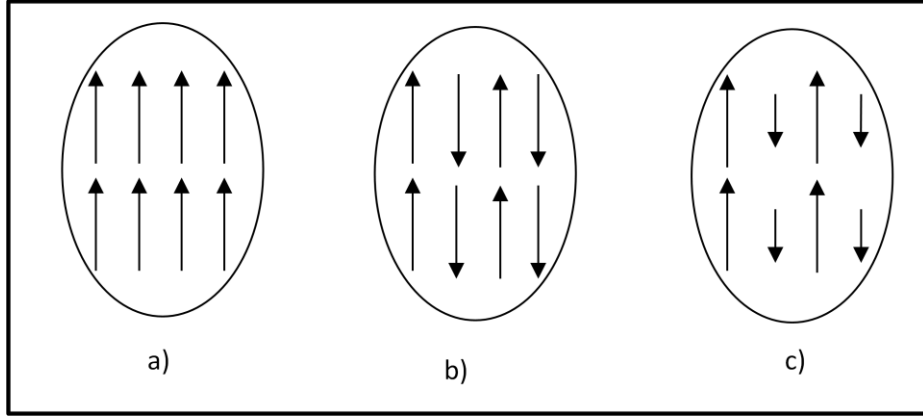
Antiferromanyetik yapıda spinler, bir geçiş sıcaklığı denilen Neel sıcaklığının ( $T_N$ ) altında antiparalel halde dizilirler ve bu durumda net manyetik momentleri sıfır olur. Antiferromanyetik maddelerin manyetik alınganlıkları, Neel sıcaklığında Şekil 2.9 a)' da gösterildiği gibi maksimum değerine ulaşır. Madde Neel sıcaklığının altında antiferromanyetik, Neel sıcaklığının üstünde paramanyetiktir [41]. Spin yönelimlerinin ters olmasının sebebi değiş tokuş etkileşmesidir. Şekil 2.9 b)' de gösterildiği gibi değiş tokuş enerjisi ( $J_{ex}$ ) negatif olduğunda antiferromanyetizma, pozitif olduğunda ise ferromanyetizma durumu ortaya çıkar. Değiş tokuş alanının büyüklüğü  $10^3$  Tesla kadar olabilir. Antiferromanyetik maddeye dış manyetik alan uygulandığında, uygulanan alanla doğru orantılı olarak manyetizasyonun arttığı görülür [41].



**Şekil 2.9:** a) Antiferromanyetik maddenin manyetik alınganlığının sıcaklık ile değişimi b) Değiş tokuş enerjisi sonucu ortaya çıkan antiferromanyetik ya da ferromanyetik durum [41].

#### 2.4.5 Ferrimanyetizma

Ferrimanyetik malzemelerin sahip olduğu düzen, Şekil 2.10 a)' da gösterilen ferromanyetik düzen ile Şekil 2.10 b)' de gösterilen antiferromanyetik düzen arası özel bir durumdur. Ferrimanyetik düzen Neel tarafından ilk defa 1948 yılında ferritlerin davranışını açıklamak için ortaya atılmıştır. Ferrimanyetizmada Şekil 2.10 c)' de görüldüğü gibi şiddetleri farklı büyüklüklerde olan antiparalel yönelmiş manyetik momentler vardır ve bu nedenle net bir mıknatıslanma ortaya çıkar. Bundan dolayı net manyetizasyon sıfır değildir [39]. Ferrimanyetik malzemeler manyetik alan altında ferromanyetiklere benzer davranış gösterirler ve Curie sıcaklığının altında kendiliğinden manyetizasyona sahiptirler [37].



**Şekil 2.10:** Manyetik malzemelerin manyetik moment şekilleri; **a)** Ferromanyetizma, **b)** Antiferromanyetizma, **c)** Ferrimanyetizma.

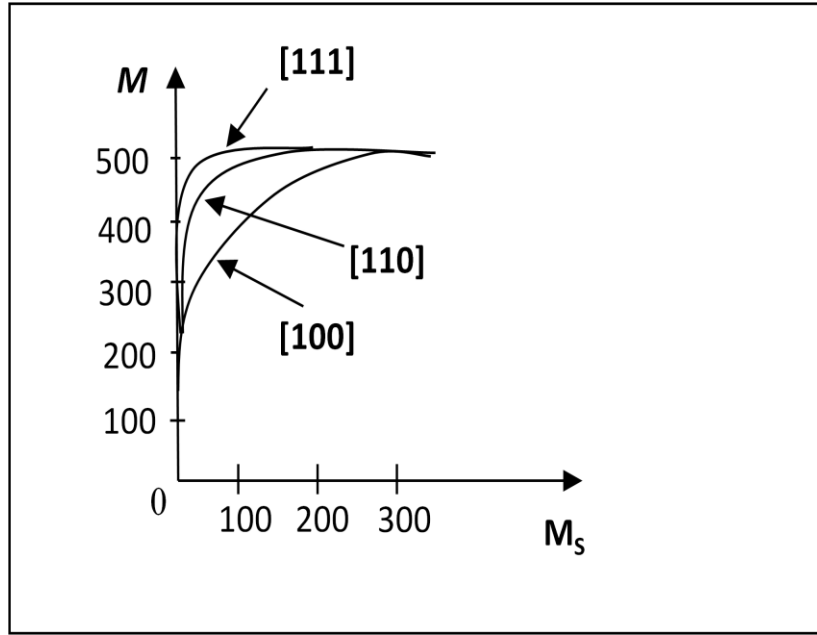
Demir bileşiklerinin önemli bir kısmı ferrimanyetik özellik gösterirler. Demir ferritlerin yaygın biçimde kullanılmasının sebebi, elektriksel öz dirençlerinin yüksek olması ve manyetik geçirgenliklerinin iyi olmasındandır [39]. En çok bilinen ferrimanyetik Demiroksit' tir ( $Fe_3O_4$ ). Genel olarak, ferrimanyetiklerin elektrik iletkenlikleri düşük olduğu için radyo frekanslı transformatör çekirdeği yapımında kullanılırlar [38].

## 2.5 Manyetik Anizotropi

Manyetik mazzemelerdeki atomik manyetik momentlerin tercihli yönler boyunca yönelmelerine manyetik anizotropi denir [37]. Manyetik alan uygulandığında atomik manyetik momentlerin düşük enerjilere sahipken bile yöneldikleri bu yöne manyetizasyonun kolay eksen yönü denir. Malzemeyi kolay eksen boyunca manyetize etmek için gerekli manyetik alan şiddeti, diğer eksenler için gerekli manyetik alan şiddetinden daha düşüktür. Bir manyetik malzeme birden çok kolay eksene sahip olabilir. Kolay eksen boyunca ferromanyetik malzemelerin manyetik alınganlıkları diğer eksenlere göre daha büyüktür [41]. Eğer anizotropi enerjisi olmasaydı domain duvar kalınlığındaki artış sınırsız olurdu. Duvar içindeki spinlerin büyük çoğunluğu kolay manyetizasyon eksenlerinden uzakta bulunur ve

bundan dolayı domain duvarının anizotropi enerjisi duvar kalınlığıyla orantılıdır [38].

Bu çalışmada ferromanyetik malzeme olarak nikel kullanılmıştır. Tek kristal nikelin kolay manyetizasyon ekseninin [111] ve nispeten zor manyetizasyon ekseninin ise [100] olduğu Şekil 2.11' de gösterilmiştir [38].



**Şekil 2.11:** Tek kristal nikelin kolay manyetizasyon eksenini, [111] ve nispeten zor manyetizasyon eksenini, [100] gösteren manyetizasyon eğrileri [38].



### 3. DENEYSEL TEKNİKLER

Bu bölümde, DC magnetron püskürtme tekniği hakkında genel bilgiler verilecek, üretim parametreleri ve üretim aşamaları anlatılacaktır. Üretilen Ni/Cu çok katmanlı manyetik ince filmlerin elementel, yapısal ve manyetik karakterizasyonlarında kullanılan deneysel teknikler hakkında ayrıntılı bilgiler verilecektir. Elementel analiz için kullanılan “Enerji Ayırmalı X-Işını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDX)”, yapısal analiz için kullanılan “X-Işınları Kırınımı (X-Ray Diffraction, XRD)” ve “Taramalı Electron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM)”, manyetik analiz için kullanılan “Titreşimli Numune Manyetometresi (Vibrating Sample Magnetometer, VSM)” teknikleri sırası ile anlatılacaktır.

#### 3.1 Püskürtme Sistemi

Bu çalışmada, Balıkesir Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Nanomanyetik Malzeme Üretim Laboratuvarında bulunan ve Şekil 3.1’ de gösterilen püskürtme sistemi kullanılmıştır. Püskürtme sistemi başlıca; kontrol paneli, rotary pompa, turbo moleküler pompa, soğutma sistemi, üretimin gerçekleştirildiği vakum odası (chamber) ve hedef malzemelerin yerleştirileceği iki adet magnetrondan (nikel ve bakırın ayrı) oluşmaktadır. Ayrıca bu çalışmada kullanılmayan buharlaştırma sistemi, RF güç kaynağı ve devre elemanları gibi bazı temel bileşenler de sisteme entegre durumdadır. Püskürtme sisteminin açık hali Şekil 3.2’ de gösterilmiştir.

Püskürtme sistemine entegre olan ve Şekil 3.1’ de numaralanmış parçalar;

- 1) **Kontrol paneli:** Üretim ile ilgili tüm parametrelerin ayarlandığı kısım.
- 2) **Rotary pompa:** Vakum odasının basıncını tek başına  $5 \times 10^{-2}$  mBar değerine kadar düşürebilen mekanik pompa.
- 3) **Turbo moleküler pompa:** Rotary pompanın basıncı  $5 \times 10^{-2}$  mBar değerine düşürmesinden sonra çalışmaya başlayan ve vakum odasının basıncını  $3 \times 10^{-6}$

mBar deęerine kadar dūőurebilen, çalıőırken su soęutma sistemi ile soęutulan yūksek pompalama gūcūne sahip mekanik pompa.

- 4) **Soğutma sistemi:** Magnetronların ve mekanik aksamın ısınmasını önlemek için kullanılan su soğutma sistemi.
- 5) **Vakum odası (chamber):** Őretim gerçekleőtirildięi, rotary ve turbo molekūler pompa ile ortam basıncı atmosfer basıncının altına dūőūrūlebilen ortam.
- 6) **Magnetronlar:** Nikel ve bakır metallerinin ũzerine monte edildiği, içerisinde silindir mıknatıs bulunan, ũzerinde elektrik ve manyetik alanın birbirine dik olarak oluőtūęu vakum odasının içinde bulunan yapı.

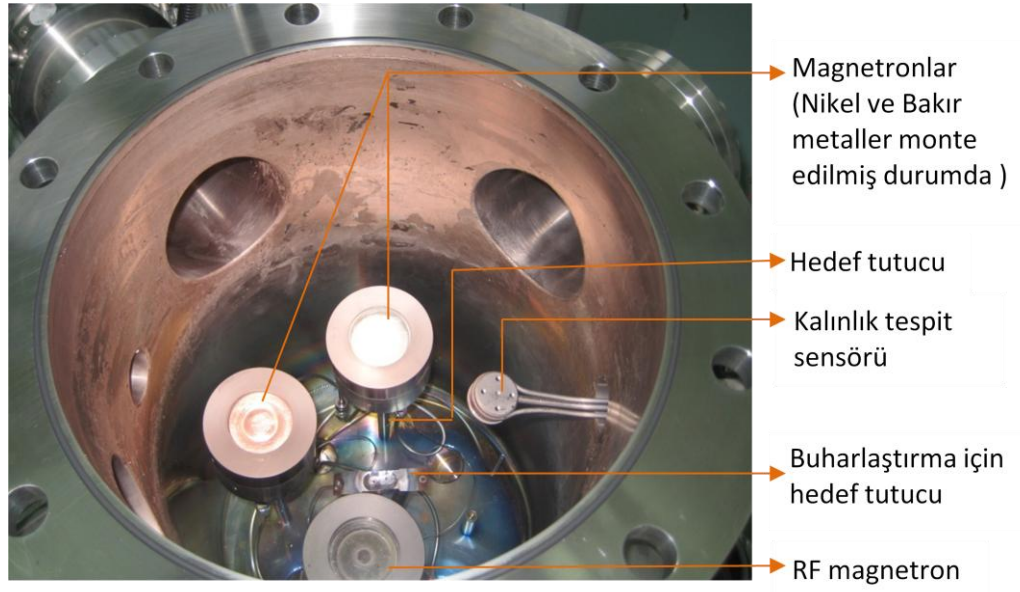


**Őekil 3.1:** Balıkesir Őniversitesi Fen Edebiyat Fakūltesi Nanomanyetik Malzeme Őretim Laboratuvarında bulunan pūskūrtme sistemi.

Üretimler süresince oda sıcaklığı 25 °C de sabit tutuldu. Çok katmanlı manyetik ince filmleri üretmek için %99.99 saflıkta, 5.08 cm çapında ve 2 mm kalınlığında nikel ve bakır metaller kullanıldı. Nikel ve bakır metallerinin monte edildiği magnetronlar ve vakum odasının iç kısmı Şekil 3.3’ te gösterilmiştir. Film üretimi yapılırken, manyetik olmayan bir malzeme olan ticari asetat malzeme alt tabaka olarak tercih edildi. Püskürtme sisteminin üst kapağında bulunan, asetat alt tabakanın yerleştirildiği alt tabaka tutucu Şekil 3.4’ te gösterilmiştir.



**Şekil 3.2:** Püskürtme sisteminin açık hali.



Şekil 3.3: Vakum odasının iç kısmı.



Şekil 3.4: Vakum odası üst kapağı ve alt tabaka tutucu.

### 3.2 DC Magnetron Püskürtme Sistemi ile Film Üretimi

Bu bölümde, püskürtme sistemi ile film üretimi öncesinde ve üretim esnasında yapılan işlemler ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Püskürtme sistemini vakum altına almadan önce bazı temizlik ve kontrol işlemlerinin yapılması gerekir. İlk olarak istenmeyen kirlenme ve bulaşmaları önlemek için eldiven giyilmesi, alt tabaka ve hedef metallere eldivensiz dokunulmaması önemlidir. Kullanılan alt tabaka

(asetat) istenilen boyutlarda kesildikten sonra üretimin yapılacağı taraf izopropil alkol ile temizlendi ve uygun şartlarda kurutulduktan sonra alt tabaka tutucuya yerleştirildi. Aynı işlemler nikel ve bakır metalleri için yapıp magnetronlara tutturuldu. Nikel ve bakır metalleri magnetronlara yerleştirildikten sonra avometre ile iletkenlik kontrolü yapıldı ve magnetron ile kablo bağlantıları arası elektriksel direnç değerinin beklendiği gibi çok küçük olduğu görüldü. Ayrıca avometrenin bir ucu magnetrona, diğer ucu vakum odasının dış kısmına dokundurularak herhangi bir elektriksel iletim ya da kaçak olmadığı teyit edildi. Bu işlemler her üretim aşamasından önce tekrarlandı. Anlatılan bu ön hazırlık işlemleri tamamlandıktan sonra vakum odasının üst kapağı kapatıldı ve vakum altına alma işlemine geçildi.

Vakum altına alma işlemi gerçekleştirilirken, ilk olarak su soğutma sistemi açıldı ve su sıcaklığının 12 °C nin altına düşmesinden sonra rotary pompa çalıştırıldı. Rotary pompa vakum odasının basıncını  $5 \times 10^{-2}$  mBar değerine düşürdüğünde turbo moleküler pompa devreye sokuldu. Bu andan itibaren, basınç değeri hızlı bir şekilde düşmeye ve üretim için gerekli vakum ortamı oluşmaya başladı. Rotary pompanın çalıştırılmasından yaklaşık bir saat sonra vakum odasının basıncı  $3 \times 10^{-6}$  mbar değerine düştü ve ortam üretim için hazır hale gelmiş oldu. Kalınlık monitörüne, nikel ve bakır metallerinin yoğunluk ve “z faktörü” değerleri girildi. Püskürtme işlemine başlamadan önce alt tabaka kapağının (shutter) kapalı konumda olduğu kontrol edildi. Argon gazı plazmayı oluşturmak üzere vakum ortamına verildi ve vakum ortamının basıncının  $4.5 \times 10^{-3}$  mBar değerine kadar arttığı görüldü. Başlangıçta argon gazı, plazmanın daha kolay oluşabilmesi için yüksek değerde açıldı ve plazma oluştuktan sonra üretimin yapılacağı 40 sccm (dakikadaki standart santimetreküp) değerine kadar yavaş yavaş düşüldü. Bu aşamadan sonra DC güç kaynağı açıldı ve katod ile anod arasına potansiyel farkı uygulanmaya başlandı. Doğru akım değeri, argon gazında olduğu gibi başlangıçta yüksek değerde iken plazma oluştuktan sonra üretimde kullanılacak değere düşürüldü. Plazma oluştuktan kısa bir süre sonra alt tabaka kapağı açıldı ve aynı anda kalınlık monitörü sıfırlandı. Böylece biriktirme işlemi başlamış oldu. Planlanan kalınlıktaki filmler sırasıyla, Tablo 3.1, Tablo 3.2, Tablo 3.3, Tablo 3.4’ te belirlenen akım, gaz ve depozisyon değerlerinde üretildi. İstenilen kalınlığa erişildiğinde ilk olarak alt tabaka kapağı kapatıldı ve sonrasında akım ve gaz değerleri sıfırlandı. Turbo moleküler pompa kapatıldıktan bir süre sonra rotary pompa ve su soğutma sistemi kapatıldı. Üretilen

filmi vakum ortamından çıkarmak için vakum odasının basıncını artırmamız gerektiğinden ortama çok yavaş ve az miktarda argon gazı verildi. Vakum odasının basıncı ile dış basınç eşitlendiğinde vakum odasının kapağı açıldı ve üretilen film alt tabaka tutucudan alınarak karakterizasyon işlemlerine kadar uygun şartlarda saklandı.

Bu çalışmada, Ni/Cu çok katmanlı manyetik ince filmleri, incelenen parametrelerin, filmlerin yapısal ve manyetik karakterizasyonları üzerine etkilerini araştırmak üzere dört ayrı seri olarak üretilmiştir.

### **3.2.1 Farklı Kalınlıklı Cu Tabakalara Sahip Filmlerin Üretimi**

Bu seride, ferromanyetik malzeme olan Ni' nin her bir tabaka için kalınlığı 10 nm olarak sabit tutuldu. Bununla beraber diyamanyetik malzeme olan Cu' nun her bir tabaka için kalınlığı (y) 90 nm, 40 nm, 30 nm, 15 nm, 10 nm olarak değiştirilerek beş farklı film üretimi yapıldı. Bu serideki toplam film kalınlığının 200 nm olarak sabit tutulabilmesi için manyetik ince filmler 2, 4, 5, 8, 10 katlı olarak (x) üretildi. Diğer bir deyişle film tabakalarının kalınlıkları,  $x[\text{Ni}(10 \text{ nm})/\text{Cu}(y \text{ nm})]=200 \text{ nm}$ , ifadesi ile verilebilir. Depozisyon hızı (deposition rate) 0.05 nm/s olarak sabit tutuldu. Doğru akım değeri, nikel üzerinde plazma oluşturabilmek için 310 mA, bakır üzerinde plazma oluşturabilmek için 60 mA olarak uygulandı. Birinci seride üretilen filmlere ait üretim parametreleri Tablo 3.1' de verilmiştir.

**Tablo 3.1:** Farklı kalınlıklı Cu tabakalara sahip filmlerin üretimlerinde kullanılan parametreler.

Film adı	Ni Tabaka Kalınlığı (nm)	Cu Tabaka Kalınlığı (nm)	Tabaka Sayısı	Toplam Kalınlık (nm)	Depozisyon Hızı (nm/s)		Doğru Akım (mA)		Argon Gaz Akış Değeri (scm)	
					Ni	Cu	Ni	Cu	Ni	Cu
NiCu 2	10	90	2	200	0.05	0.05	310	60	40	40
NiCu 3	10	40	4	200	0.05	0.05	310	60	40	40
NiCu 4	10	30	5	200	0.05	0.05	310	60	40	40
NiCu 5	10	15	8	200	0.05	0.05	310	60	40	40
NiCu 6	10	10	10	200	0.05	0.05	310	60	40	40

Ayrıca, birinci seride üretilen filmlerin dışında, toplam kalınlığı 200 nm olan, tek katlı, saf Cu (NiCu 1) ve saf Ni (NiCu 7) filmleri de üretildi. Üretilen filmler bulgular ve tartışma kısmında birinci seri ile birlikte değerlendirildi. Bu filmlerin üretimi esnasında, depozisyon hızı 0.05 nm/s olarak uygulanırken, doğru akım değeri bakır üzerinde plazma oluşturabilmek için 60 mA, nikel üzerinde plazma oluşturabilmek için 320 mA olarak uygulandı.

### 3.2.2 Farklı Toplam Kalınlıklara Sahip Filmlerin Üretimi

Bu seride, toplam kalınlığı (z) 120 nm, 160 nm, 240 nm ve 280 nm olan dört farklı film üretimi yapıldı. Ni' nin her bir tabaka için kalınlığı 10 nm, Cu' nun her bir tabaka için kalınlığı 30 nm olarak sabit tutuldu ve ince filmler 3, 4, 6, 7 katlı (x) olarak üretildi. Film tabakalarının kalınlıkları,  $x[\text{Ni}(10 \text{ nm})/\text{Cu}(30 \text{ nm})]=z \text{ nm}$ , ifadesi ile verilebilir. Depozisyon hızı 0.05 nm/s olarak sabit tutulurken, doğru akım değeri nikel üzerinde plazma oluşturabilmek için 370 mA, bakır üzerinde plazma oluşturabilmek için 70 mA olarak uygulandı. İkinci seride üretilen filmlere ait üretim parametreleri Tablo 3.2' de verilmiştir.

**Tablo 3.2:** Farklı toplam kalınlıklara sahip filmlerin üretimlerinde kullanılan parametreler.

Film adı	Ni Tabaka Kalınlığı (nm)	Cu Tabaka Kalınlığı (nm)	Tabaka Sayısı	Toplam Kalınlık (nm)	Depozisyon Hızı (nm/s)		Doğru Akım (mA)		Argon Gaz Akış Değeri (scm)	
					Ni	Cu	Ni	Cu	Ni	Cu
<b>NiCu 8</b>	10	30	3	120	0.05	0.05	370	70	40	40
<b>NiCu 9</b>	10	30	4	160	0.05	0.05	370	70	40	40
<b>NiCu 10</b>	10	30	6	240	0.05	0.05	370	70	40	40
<b>NiCu 11</b>	10	30	7	280	0.05	0.05	370	70	40	40

### 3.2.3 Ferromanyetik (Ni) Tabakanın Farklı Depozisyon Hızları Dikkate Alınarak Yapılan Filmlerin Üretimi

Bu seride, Cu' nun depozisyon hızı 0.04 nm/s de sabit tutulurken, Ni' nin depozisyon hızı sırası ile, 0.02 nm/s, 0.06 nm/s, 0.10 nm/s olarak değiştirilerek manyetik ince filmler üretildi. Ni' nin depozisyon hızını artırmak için doğru akım değeri artırıldı. Doğru akım değeri, Ni üzerinde plazma oluşturabilmek için sırasıyla 50 mA, 150 mA, 190 mA, Cu üzerinde plazma oluşturabilmek için 160 mA olarak uygulandı. Ni' nin her bir tabaka için kalınlığı 10 nm, Cu' nun her bir tabaka için kalınlığı 30 nm olarak belirlendi. Bu seride incelenen filmlerin tamamı beş katlı ve 200 nm kalınlıklarında üretildi. Diğer bir ifadeyle filmler, 5[Ni(10 nm)/Cu(30 nm)]=200 nm ifadesi ile temsil edilebilirler. Üçüncü seride üretilen filmlere ait üretim parametreleri Tablo 3.3' te verilmiştir.



**Tablo 3.3:** Ferromanyetik tabakanın farklı depozisyon hızları dikkate alınarak yapılan filmlerin üretimlerinde kullanılan parametreler.

Film adı	Ni Tabaka Kalınlığı (nm)	Cu Tabaka Kalınlığı (nm)	Tabaka Sayısı	Toplam Kalınlık (nm)	Depozisyon Hızı (nm/s)		Doğru Akım (mA)		Argon Gaz Akış Değeri (scm)	
					Ni	Cu	Ni	Cu	Ni	Cu
<b>NiCu 12</b>	10	30	5	200	0.02	0.04	50	160	40	40
<b>NiCu 15</b>	10	30	5	200	0.06	0.04	150	160	40	40
<b>NiCu 16</b>	10	30	5	200	0.10	0.04	190	160	40	40

### 3.2.4 Farklı Kalınlıklı Ni Tabakalara Sahip Filmlerin Üretimi

Bu seride, Cu' nun her bir tabaka için kalınlığı 7.5 nm olarak sabit tutulurken, Ni' nin her bir tabaka için kalınlığı (k) 92.5 nm 42.5 nm, 32.5 nm, 17.5 nm olarak değiştirilerek dört farklı üretim yapıldı. Manyetik ince filmler 2, 4, 5, 8 katlı olarak (x) üretildi ve toplam kalınlık bu serideki tüm üretimler için 200 nm, depozisyon hızı 0.05 nm/s olarak sabit tutuldu. Film tabakalarının kalınlıkları,  $x[\text{Ni}(k \text{ nm})/\text{Cu}(7.5 \text{ nm})]=200 \text{ nm}$  ifadesi ile verilebilir. Doğru akım değeri, Ni üzerinde plazma oluşturabilmek için 110 mA, Cu üzerinde plazma oluşturabilmek için 195 mA olarak uygulandı. Dördüncü seride üretilen filmlere ait üretim parametreleri Tablo 3.4' te verilmiştir.

**Tablo 3.4:** Farklı kalınlıklı Ni tabakalara sahip filmlerin üretimlerinde kullanılan parametreler.

Film adı	Ni Tabaka Kalınlığı (nm)	Cu Tabaka Kalınlığı (nm)	Tabaka Sayısı	Toplam Kalınlık (nm)	Depozisyon Hızı (nm/s)		Doğru Akım (mA)		Argon Gaz Akış Değeri (scm)	
					Ni	Cu	Ni	Cu	Ni	Cu
<b>NiCu 17</b>	92.5	7.5	2	200	0.5	0.5	110	195	40	40
<b>NiCu 18</b>	42.5	7.5	4	200	0.5	0.5	110	195	40	40
<b>NiCu 19</b>	32.5	7.5	5	200	0.5	0.5	110	195	40	40
<b>NiCu 20</b>	17.5	7.5	8	200	0.5	0.5	110	195	40	40

### 3.3 Enerji Ayırmalı X-ışını Spektroskopisi (EDX)

Enerji Ayırmalı X-ışını Spektroskopisi (EDX), incelenen numunenin üzerine yüksek hızlı elektron demeti gönderilerek numune üzerinden karakteristik X-ışını fotonlarının yayınlanması ve bunların uygun algılayıcılarla analiz edilip numuneyi oluşturan bileşenlerin tespit edilmesi prensibine dayanır. İncelenen numune üzerine gönderilen elektronların enerjisi, numunenin elektronlarının bağlanma enerjisinden daha büyüktür ve numunedeki atomun iç yörüngesinden bir elektron kopmasına neden olur. Numuneden kopan elektronun yerini atomun üst yörüngesinden gelen ve daha fazla enerjiye sahip olan elektron doldurur [48]. Üst yörüngeden alt yörüngeye geçen elektron bu esnada karakteristik bir X-ışını yayınlar. Numune içindeki atomların yoğunluğu, yayınlanan karakteristik X-ışınlarının şiddetleri ile orantılıdır ve numunenin elementel bileşimi hakkında bilgi verir. EDX spektroskopisi, ortaya çıkan bu karakteristik X-ışınlarının enerjilerine göre ayırt edilip ölçülmesi işlemidir [46, 49]. Spektrumda görülen piklerin her biri bir atoma özgü yani karakteristik olduğu için periyodik tabloda bir elemente karşılık gelir. Piklerin şiddeti o elementin numunedeki miktarını ifade eder [37, 43]. Bu yöntem ile numune üzerinde belirlenen bir noktanın elementel analizi yapılabileceği gibi numune üzerindeki herhangi bir bölgenin de elementel analizi yapılabilir.

Bu çalışmada, üretilen Ni/Cu ince filmlerin elementel analizi, Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (UNAM)' nde bulunan SEM cihazına bağlı "EDAX, AMETEK" markalı EDX cihazı ile yapıldı.

### 3.4 X-Işınlari Kırınımı (XRD)

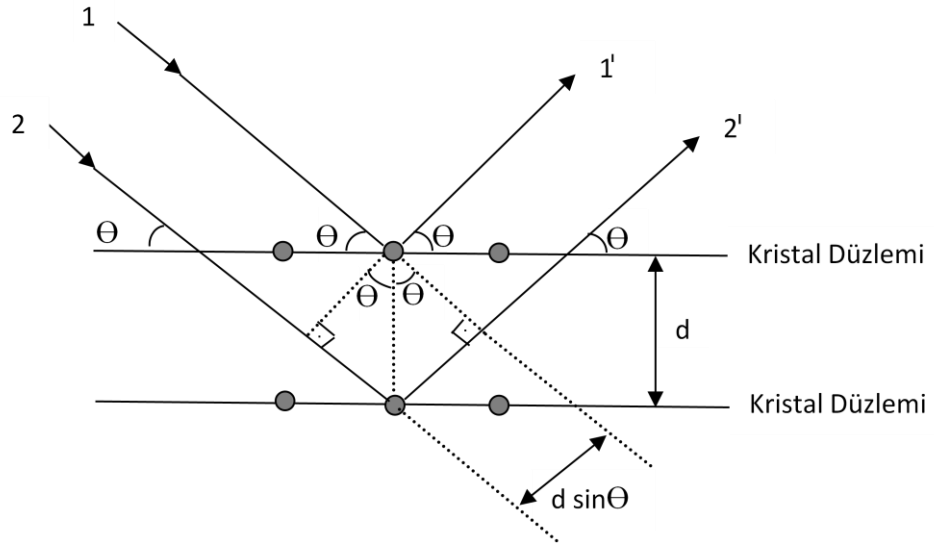
Bir kristal üzerine gönderilen X-ışınlarının, kristalin örgü noktalarındaki atomlar tarafından saçılması sonucu oluşturduğu kırınım desenlerinin incelenmesi ile malzemelerin kristal yapı analizinin yapılabildiği önemli bir yöntemdir. XRD tekniği kullanılarak, malzemelerin tercihli yönelimleri, kristalin ortalama tane büyüklüğü, kristal düzlemleri ve bu düzlemler arası mesafeler hesaplanabilir [50]. XRD tekniğinin kristal yapı analizinde kullanılmasının nedeni, X-ışını dalga boyunun (0.01 nm ile 10 nm arası) tipik atomlar arası boşluklar (0.1 nm ile 0.2 nm arası) ile karşılaştırılabilir büyüklükte olmasından kaynaklanır. Ayrıca bu teknik numuneye zarar vermez ve yapısal özelliklerini değiştirmez [51, 52]. X-ışınları, vakum altındaki bir tüp içinde anot ve katot arasındaki potansiyel fark ile katottan hızlandırılan elektronların bakır hedefe çarptırılması ile üretilir. X-ışınları tüpünde elektronların çarpacağı hedef metal olarak bakır kullanılmasının sebebi bakırın iyi bir iletken olması ve bundan dolayı hedef metalin kısa sürede soğutulabilmesidir [46].

Malzeme üzerine gönderilen X-ışınları kristalin örgü noktalarındaki atomlar tarafından saçılmaya uğrar. Bu saçılma durumu (3.1) eşitliğinde verilen Bragg dalga teorisi ile açıklanabilir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3.1)$$

Burada; **d** düzlemler arası mesafe (örgü sabiti),  **$\theta$**  gelen ışınlarla kristal düzlemleri arası açı, **n** yansımanın hangi düzlemler arasında olduğunu belirten yansıma mertebesi ve  **$\lambda$**  X-ışınının dalga boyudur. Örgü noktalarından saçılan X-ışınlarının bazıları yapıcı girişim oluşturarak birbirlerini kuvvetlendirirken, bazıları da yıkıcı girişim oluşturarak birbirlerini yok ederler. Kırınım desenleri yalnızca komşu düzlemlerden olan yansımaların yapıcı girişim oluşturmasıyla ortaya çıkar. Şeki 3.5' te bir kristal düzleminden saçılarak yapıcı girişim oluşturan X-ışınının geometrik gösterimi verilmiştir. Yapıcı girişim oluşabilmesi için Bragg yasasında

ifade edildiği gibi X-ışınlarının optik yol farkının dalga boyunun tam katlarına eşit olması gerekir [48]. Numune üzerine dalga boyu bilinen X-ışını gönderilir ve yapıcı girişimin olduğu noktalardaki  $\Theta$  değerinin ölçülmesiyle kristal örgü sabiti ( $d$ ) bulunabilir. Aynı şekilde  $d$  biliniyorsa  $\lambda$  değeri bulunabilir. Bragg yasası  $\lambda \leq 2d$  durumu için geçerli olur. Bu nedenle kısa dalga boyulu X-ışınları kullanılır. Gelen ve yansıyan ışınlar arasındaki açıya kırınım açısı denir ve değeri  $2\Theta'$  dır. Kırınım açısı ( $2\Theta$ ) her zaman sabittir [37, 38, 47].



**Şekil 3.5:** Bir kristal düzleminde X-ışını kırınımı (Şekil  $\Theta=45^{\circ}$  'ye göre çizilmiştir).

Yapıcı girişim oluşturarak birbirini kuvvetlendiren X-ışınları kırınım desenleri, XRD analizi sonucunda karşımıza örgü noktalarında bulunan atoma özgü pik olarak çıkar. Kristal düzleminin tane büyüklüğü ( $t$ ), Scherrer bağıntısı kullanılarak bulunur. Scherrer bağıntısı;

$$t = \frac{0.9\lambda}{B \cos \Theta} \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir. Bu eşitlikte  $t$  kristal düzlemin tane büyüklüğü,  $\lambda$  kristal düzleme gönderilen X-ışını dalga boyu,  $B$  incelenen düzleme ait pikin yarı yükseklikteki pik genişliği,  $\Theta$  yansıma açısıdır [51].

Bu çalışmada üretilen Ni/Cu ince filmlerin kristal yapı karakterizasyonu, Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (UNAM)' nde bulunan PANalytical marka X' pert Pro Multi-Purpose X-Ray Diffractometer (MPD) model XRD cihazı ile yapıldı. Ölçümler esnasında Cu-K<sub>α</sub> ( $\lambda = 0.15406$  nm) radyasyonu kullanıldı ve  $2\theta$  değeri  $40^\circ$  ile  $70^\circ$  arasında değiştirildi.

### 3.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), katı yüzeylerin yüksek büyütme oranlarına sahip görüntülerini elde etmek için kullanılan bir karakterizasyon tekniğidir. SEM analizi ile görüntü elde etmek için incelenecek olan katı numunenin yüzeyi yüksek gerilim altında ivmelendirilmiş elektron demetiyle taranır [53]. Görüntünün oluşması, bu tarama sonucunda ortaya çıkan verilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra dijital ortama aktarılması prensibine dayanır [54, 55].

Numune yüzeyine çarpan hızlandırılmış elektronlar:

- 1) Atomların dış yörüngelerindeki düşük enerjili ikincil elektronların yerlerinden sökülmesine sebep olur. Numune üzerine gönderilen yüksek enerjili elektronlar, numune atomlarının dış yörüngesinde bulunan elektronlar ile inelastik çarpışmalar gerçekleştirir ve bunun sonucunda da düşük enerjili Auger elektronları ortaya çıkar. Auger elektronları numune yüzeyi hakkında bilgi verir. Hızlandırılmış elektronlar ile yörünge elektronları arasındaki diğer etkileşimler sonucunda enerjisi azalan veya kendi yörüngesinden atılan ikincil elektronlar numunenin yüzeyine doğru hareket eder. İkincil elektronlar sayesinde yüksek çözünürlükte görüntü elde edilmiş olur.
- 2) Numune atomları ile elastik çarpışma yaparak geri saçılır. Geri yansıyan elektronların görüntüsü örneğin fiziksel yapısı hakkında bilgi verir fakat numunenin derinlerinden geldiği için enerjisi azdır ve ayırım gücü düşüktür.
- 3) Numune atomları ile inelastik çarpışma yaparak karakteristik X-ışını yayınlanmasına sebep olur. Yayınlanan bu X-ışınları numunenin kimyasal

bileşimi hakkında bilgi verir ve daha önce bahsettiğimiz EDX analizinin kaynağını oluşturur [37, 49].

Bu çalışmada, püskürtme tekniği ile üretilen Ni/Cu ince filmlerin SEM görüntüleri alınmadan önce, daha yüksek kalite ve çözünürlükte görüntüler elde edilebilmek için numunelerin yüzeyi püskürtme tekniği kullanılarak 10 nm Altın (Au) ile kaplandı. Üretilen Ni/Cu ince filmlerin SEM görüntüleri Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (UNAM)' nde bulunan "FEI marka, Quanta 200 FEG model SEM ile yapıldı.

### **3.6 Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM)**

Şiddeti sabit bir manyetik alanın etkisi altında titreşen numunenin, yüzeyinden geçen manyetik akının değişimi sonucu algılayıcı bobinlerde indüklenen voltaj'ın ölçülmesi VSM' in çalışma prensibini açıklar. İndüklenen voltaj, manyetik alanda titreşen numunenin manyetizasyon değeri ile orantılıdır. VSM analizi sonucunda malzemenin manyetizasyon (hysteresis) eğrisi elde edilir. Faraday indüksiyon yasasına göre [41] oluşan voltajın büyüklüğü bobin içindeki manyetik akının zamanla değişim hızı ile orantılıdır. Manyetik akının zamanla değişimi iki yolla mümkündür. Bunlar; zamanla değişen manyetik alan uygulamak ya da bobinler içinde bulunan numuneyi titreştirmek olarak bilinir [41, 43].

VSM tekniği kullanarak malzemenin manyetizasyon eğrisini elde etmek için önce sistemi kalibre etmek gerekir. Bunun için boyutları ve doyum manyetizasyonu bilinen Ni standart kullanımı yaygındır. Kalibrasyon esnasında numune algılayıcı bobinler arasında uygun koordinatlara getirilerek sabitlenir ve en uygun şartlarda kalibrasyon tamamlanır. Kalibrasyon sonrasında sistem, ölçüm sonuçlarını en doğru verecek hale getirilmiş olur.

Bu çalışmada, manyetik ölçümler 5 mm çapında daire şeklinde kesilen Ni/Cu çok katmanlı yapıların hysteresis eğrileri analiz edilerek gerçekleştirildi. Hysteresis eğrileri, oda sıcaklığında, manyetik alanın +20 kOe' den -20 kOe' e kadar taranması sonucu elde edildi. Ölçümler, manyetik alanın film yüzeyine paralel ve dik uygulanması ile iki farklı durum için alındı. Burada "dik" olarak ifade edilen ölçüm,

dış manyetik alanın film yüzeyine dik olarak uygulandığı, “paralel” ölçüm ise dış manyetik alanın film yüzeyine paralel olarak uygulandığı ölçümlerdir. Üretilen Ni/Cu ince filmlerin manyetik özellikleri, Balıkesir Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Nanomanyetik Malzeme Ölçüm Laboratuvarında bulunan, duyarlılığı 0.5  $\mu$ emu olan “ADE TECHNOLOGIES DMS-EV9” markalı bir VSM sistemi ile incelendi.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, üretimi yapılan Ni/Cu çok katmanlı manyetik ince filmlerin elementel, yapısal ve manyetik analizlerinden elde edilen bulgular verilir, verilen bu bulgular tartışılacaktır. Çalışma boyunca üretimi yapılan dört farklı seriye ait üretim parametreleri Tablo 4.1’ de verilmiştir.

İncelenen birinci seride, Ni/Cu çok katmanlı yapılarında, Cu tabakasının farklı kalınlıklarının filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri üzerine etkisi incelendi. Film serisi üretilirken, Tablo 4.1’ de birinci seri için verilen, toplam film kalınlığı (200 nm), depozisyon hızı (0.05 nm/s) ve Ni tabaka kalınlığı (10 nm) sabit tutuldu. İncelenen ikinci seride, Ni/Cu çok katmanlı yapılarında, farklı toplam film kalınlıklarının filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri üzerine etkisi incelendi. Film serisi üretilirken, Tablo 4.1’de ikinci seri için verilen, Cu tabaka kalınlığı (30 nm), depozisyon hızı (0.05 nm/s) ve Ni tabaka kalınlığı (10 nm) sabit tutuldu. Üçüncü seride, ferromanyetik Ni tabakalarının farklı depozisyon hızlarının etkisi incelendi. Bu seri üretiminde, Cu tabaka kalınlığı (30 nm) toplam kalınlık (200 nm), Ni tabaka kalınlığı (10 nm) olarak sabit tutuldu. Dördüncü seride ise, Ni tabakasının farklı kalınlıklarının filmlerin özellikleri üzerine etkisi incelendi ve Cu tabaka kalınlığı (7.5 nm), toplam film kalınlığı (200 nm), depozisyon hızı (0.05 nm/s) sabit tutuldu.



**Tablo 4.1:** Filmlerin üretim parametreleri.

Seri No	Film Adı	Cu Tabaka Kalınlığı (nm)	Toplam Kalınlık (nm)	Depozisyon Hızı (nm/s)	Ni Tabaka Kalınlığı (nm)
1.Seri	NiCu 1	<b>200</b>	200	0.05	0
	NiCu 2	<b>90</b>	200	0.05	10
	NiCu 3	<b>40</b>	200	0.05	10
	NiCu 4	<b>30</b>	200	0.05	10
	NiCu 5	<b>15</b>	200	0.05	10
	NiCu 6	<b>10</b>	200	0.05	10
	NiCu 7	<b>0</b>	200	0.05	200
2.Seri	NiCu 8	30	<b>120</b>	0.05	10
	NiCu 9	30	<b>160</b>	0.05	10
	NiCu 10	30	<b>240</b>	0.05	10
	NiCu 11	30	<b>280</b>	0.05	10
3.Seri	NiCu 12	30	200	<b>0.02</b>	10
	NiCu 15	30	200	<b>0.06</b>	10
	NiCu 16	30	200	<b>0.10</b>	10
4.Seri	NiCu 17	7.5	200	0.05	<b>92.5</b>
	NiCu 18	7.5	200	0.05	<b>42.5</b>
	NiCu 19	7.5	200	0.05	<b>32.5</b>
	NiCu 20	7.5	200	0.05	<b>17.5</b>

## 4.1 Ni/Cu Çok Katmanlı Yapılarında Cu Tabakasının Farklı Kalınlıklarının Etkisinin İncelenmesi

### 4.1.1 Elementel Analiz

Bu seride, Cu tabakalarının kalınlıkları 200 nm' den 0 nm' ye kademeli olarak azaltıldı. Yapılan elementel analiz sonucuna göre, filmlerin içeriklerinin Cu ve Ni atomlarından oluştuğu Tablo 4.2' de görülmektedir. Manyetik ince filmler % 77 C ve % 23 O atomlarından oluşan asetat alt tabaka üzerine büyütüldü. Cu tabakalarının kalınlıkları 200 nm, 90 nm, 40 nm, 30 nm, 15 nm, 10 nm, 0 nm şeklinde azalırken sırasıyla filmlerin atomik Cu içerikleri % 100, % 78, % 58, % 55, % 33, % 23, % 0 olarak bulundu. Filmlerin geri kalanının Ni olduğu tespit edildi. Bu sonuca göre, Cu tabakalarının kalınlığı azaldıkça, ince filmlerin Cu içeriği kademeli olarak azalmış bunun sonucu olarak Ni içeriği kademeli olarak artmıştır. Elde edilen bu sonuç, elektrodpozisyon yöntemi ile üretilen NiCu/Cu süperörgülerde farklı Cu tabaka kalınlıklarının etkisinin incelendiği [21] çalışmasında elde edilen sonuç ile uyum içindedir.

**Tablo 4.2:** Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin elementel analiz sonuçları.

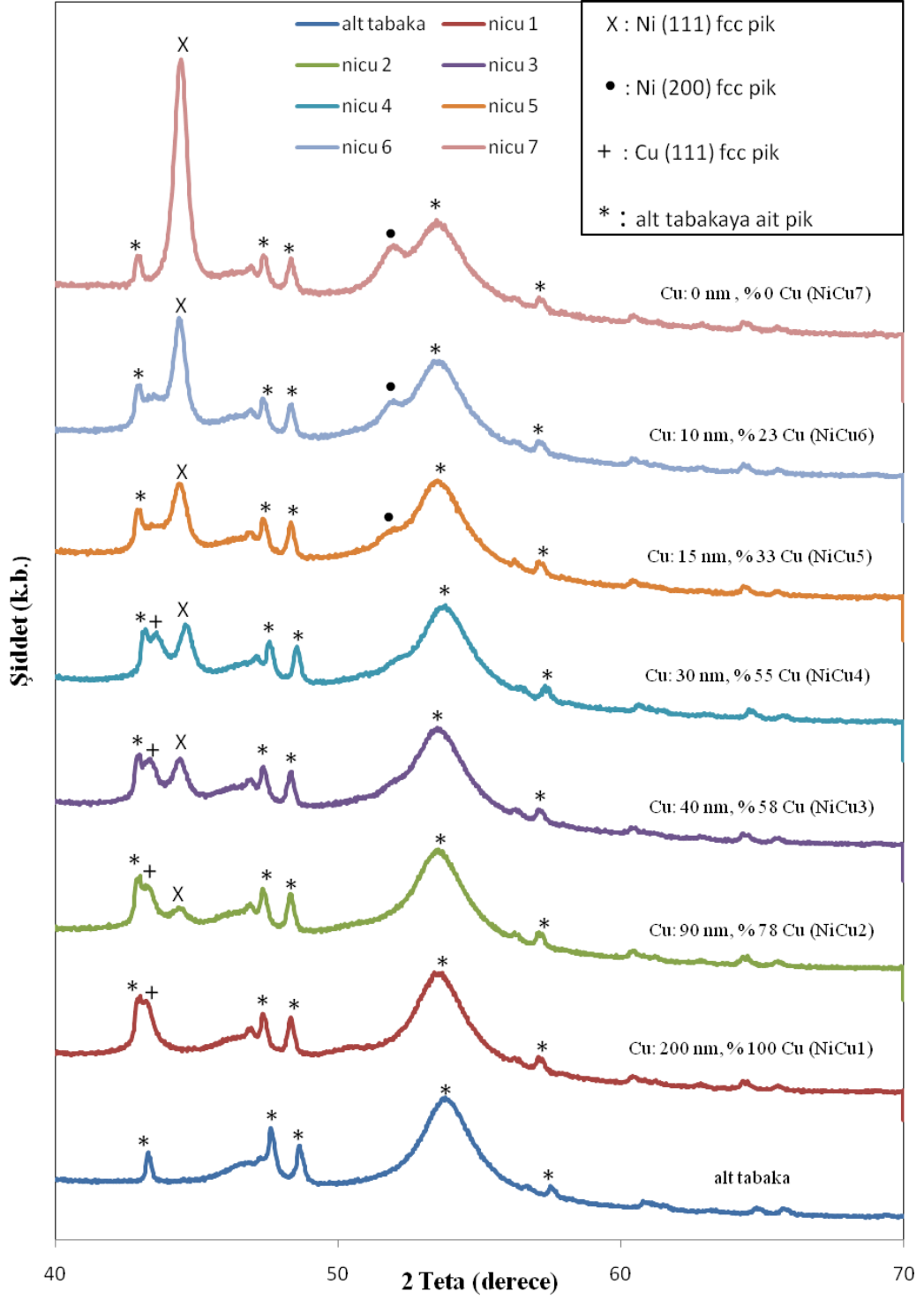
Film Adı	Temsili Gösterim	Cu Tabaka Kalınlığı (nm)	Film İçeriği (at.%)	
			Ni	Cu
NiCu 1	1[Ni(0nm)/Cu(200nm)]=200nm	200	0	100
NiCu 2	2[Ni(10nm)/Cu(90nm)]=200nm	90	22	78
NiCu 3	4[Ni(10nm)/Cu(40nm)]=200nm	40	42	58
NiCu 4	5[Ni(10nm)/Cu(30nm)]=200nm	30	45	55
NiCu 5	8[Ni(10nm)/Cu(15nm)]=200nm	15	67	33
NiCu 6	10[Ni(10nm)/Cu(10nm)]=200nm	10	77	23
NiCu 7	1[Ni(200nm)/Cu(0nm)]=200nm	0	100	0

#### 4.1.2 Kristal Yapı Analizi

Farklı depoziyon parametrelerinde büyütülen Ni/Cu ince filmlerin kristal yapı analizi için X-ışınları difraksiyonu (XRD) tekniği kullanıldı ve depoziyon parametrelerinin filmlerin kristal yapısı üzerine etkileri araştırıldı. X-ışını ölçümleri, dalga boyu 0.15406 nm olan  $\text{CuK}_\alpha$  ışınması kullanılarak  $2\Theta=40^\circ$  ile  $2\Theta=70^\circ$  arasında ve  $0.026^\circ$  adım aralığında yapıldı. Cu tabakasının farklı kalınlıklarına göre üretilen filmlerin XRD desenleri Şekil 4.1' de gösterilmiştir. XRD ölçümleri asetat alt tabakanın büyüme tarafı üzerinden yapıldı. Filmlerin yanı sıra, alt tabakanın kristal yapısı biriktirme işlemi yapılmadan önce aynı yöntem kullanılarak tespit edildi. Alt tabakaya ait pikler kırınım deseninde \* olarak etiketlenmiştir (bakınız Şekil 4.1). Şekil 4.1' de gösterilen kırınım desenlerine göre, XRD desenlerinde gözlenen pikler, yüzey merkezli kübik yapı (fcc)' ya aittir. Bununla birlikte, kırınım deseni daha detaylı olarak incelendiği zaman, saf Cu (NiCu1) filminin  $2\Theta=43^\circ$  'de şekillenen fcc (111) pikine sahip olduğu görülür. Ayrıca Cu tabaka kalınlığının 0 nm olduğu, saf Ni filminin (NiCu 7) ise,  $2\Theta=44^\circ$  ve  $2\Theta=51^\circ$  'de ortaya çıkan sırasıyla Ni fcc (111) ve Ni fcc (200) piklerine sahip olduğu görüldü. Üretimi yapılan bu film serisinde, Cu tabaka kalınlığının kademeli olarak azaltılması ile  $2\Theta\approx 43^\circ$  'de şekillenen Cu atomlarına ait olan fcc (111) pikinin şiddetinin kademeli olarak azaldığı ve % 33 Cu (NiCu 5), %23 Cu (NiCu 6), % 0 Cu (NiCu 7) içeren filmlerde Cu fcc (111) pikinin kaybolduğu görülmektedir. Buna paralel olarak, Cu tabaka kalınlığının kademeli olarak azaltılması ile  $2\Theta\approx 44^\circ$  'de şekillenen Ni fcc (111) pikinin şiddetinin kademeli olarak arttığı ve  $2\Theta\approx 51^\circ$  'de şekillenen karakteristik fcc (200) pikinin ortaya çıktığı ve şiddetinin kademeli olarak arttığı tespit edilmiştir. Bu artışların EDX analizi sonuçlarına göre filmlerdeki Ni miktarlarındaki artıştan kaynaklandığı söylenebilir. Bu sonuçlara göre, filmlerdeki Ni içeriği arttıkça fcc yapıya ait olan bu piklerin şiddetinin arttığı açıkça görülmektedir.

Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği ve Şekil 4.1' de XRD desenleri verilen seride, düzlemler arası uzaklıklar ( $d$ ), elde edilen Bragg açısı değerlerinden yararlanarak hesaplandı. Cu tabaka kalınlığı 200 nm, 90 nm, 40 nm, 30 nm, 15 nm, 10 nm, 0 nm olan ince filmler için en şiddetli pik (111) piki ve buna ait düzlemler arası uzaklıklar sırası ile  $d_{(111)}= 0.2091$  nm,  $d_{(111)}= 0.2090$  nm,  $d_{(111)}= 0.2036$  nm,  $d_{(111)}= 0.2030$  nm,  $d_{(111)}= 0.2040$  nm,  $d_{(111)}= 0.2040$  nm,  $d_{(111)}= 0.2035$  nm olarak (bakınız Tablo 4.3) hesaplandı. Bu hesaplamalara göre Cu tabaka kalınlığı

azaldıkça, düzlemler arası uzaklıkların literatürde verilen ( $d_{(111)} = 0.2034$  nm) değeri [51] ile uyumunun arttığı anlaşıldı. Üretimi yapılan filmlerin örgü sabitleri ( $a$ ), XRD desenlerinde görülen piklerin açısız konumları ve miller indisleri kullanılarak en küçük kareler yöntemiyle hesaplandı. Buna göre; % 100 Cu içeren NiCu 1 filminin örgü sabiti  $a = 0.3621$  nm, % 33 Cu içeren NiCu 5 filminin örgü sabiti  $a = 0.3541$  nm ve % 100 Ni içeren NiCu 7 filminin örgü sabiti  $a = 0.3501$  nm olarak bulundu. Bulunan bu sonuçlara göre, atomik Cu içeriği azaldıkça örgü sabitinin Ni örgü sabitine yaklaştığı görüldü ( $a_{Cu} = 0.36150$  nm,  $a_{Ni} = 0.35238$ ) [51, 56]. XRD desenlerindeki piklerin şiddetlerinden yapılan yönelim hesapları [57] sonucunda tüm filmlerin tercihli yönelimlerinin (111) olduğu görüldü. XRD desenlerinde görülen piklerin açısız konumlarından ve yarı yükseklikteki genişliklerinden yararlanılarak tane büyüklükleri ( $t$ ), Scherrer bağıntısı kullanılarak [51] hesaplandı ve Tablo 4.3' te verildi. Ayrıca, Cu tabaka kalınlığı 200 nm, 90 nm, 40 nm, 30 nm, 15 nm, 10 nm, 0 nm olarak azalırken sırası ile her bir filme ait ortalama tane büyüklüğü ( $t_{ort}$ ), 46 nm, 52 nm, 50 nm, 50 nm, 20 nm, 24 nm, 25 nm olarak hesaplandı. Bulunan bu sonuçlara göre, Cu tabaka kalınlığı azaldıkça ortalama tane büyüklüğünün 50 nm civarından 23 nm civarına düştüğü söylenebilir. Filmlerin XRD desenlerinden elde edilen sonuçlarla hesaplanan fiziksel büyüklükler Tablo 4.3' te gösterilmektedir. XRD analizleri sonucunda, filmlerin tamamının fcc yapıda olduğu ve kristal yapının filmlerin Cu tabaka kalınlığının değişmesinden etkilendiği görülmektedir.



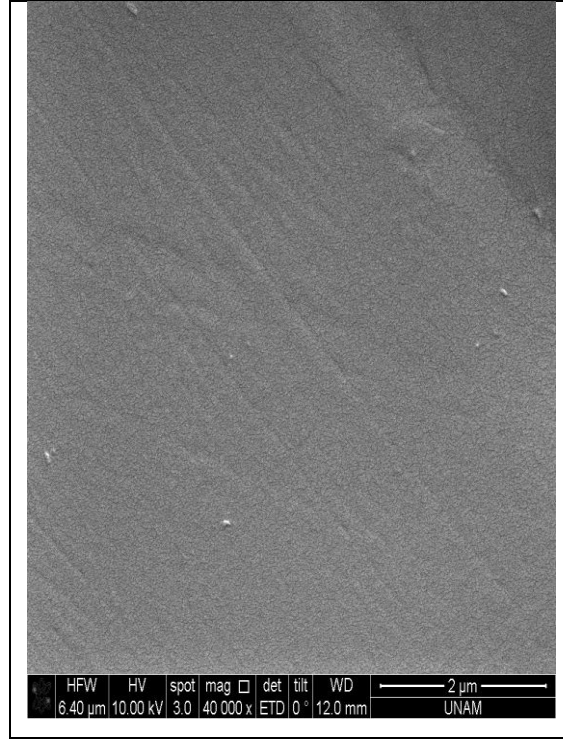
**Şekil 4.1:** Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD desenleri.

**Tablo 4.3:** Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD analizinden elde edilen sonuçlar.

Film adı		NiCu 1	NiCu 2	NiCu 3	NiCu 4	NiCu 5	NiCu 6	NiCu 7
Değişken parametre								
<b>Cu Tabaka Kalınlığı (nm)</b>		200	90	40	30	15	10	0
<b>Atomik Cu İçeriği (at. % Cu)</b>		% 100	% 78	% 58	% 55	% 33	% 23	% 0
<b>Tercihli Yönelim</b>		(111)	(111)	(111)	(111)	(111)	(111)	(111)
<b>t<sub>ort</sub> (nm)</b>		46	52	50	50	20	24	25
<b>Örgü Sabiti (nm)</b>		0.3621	0.3620	0.3526	0.3516	0.3541	0.3512	0.3501
<b>Cu fcc (111)</b>	<b>2<math>\Theta</math></b>	43.231	43.247	43.391	43.582	-	-	-
	<b>d (nm)</b>	0.2091	0.2090	0.2083	0.2075	-	-	-
	<b>t (nm)</b>	46	68	69	69	-	-	-
<b>Ni fcc (111)</b>	<b>2<math>\Theta</math></b>	-	44.433	44.455	44.594	44.366	44.364	44.464
	<b>d (nm)</b>	-	0.2037	0.2036	0.2030	0.2040	0.2040	0.2035
	<b>t (nm)</b>	-	20	31	34	23	21	20
<b>Ni fcc (200)</b>	<b>2<math>\Theta</math></b>	-	-	-	-	51.668	51.785	51.904
	<b>d (nm)</b>	-	-	-	-	0.1767	0.1763	0.1760
	<b>t (nm)</b>	-	-	-	-	14	35	47

### 4.1.3 Yüzey Morfolojik Analizi

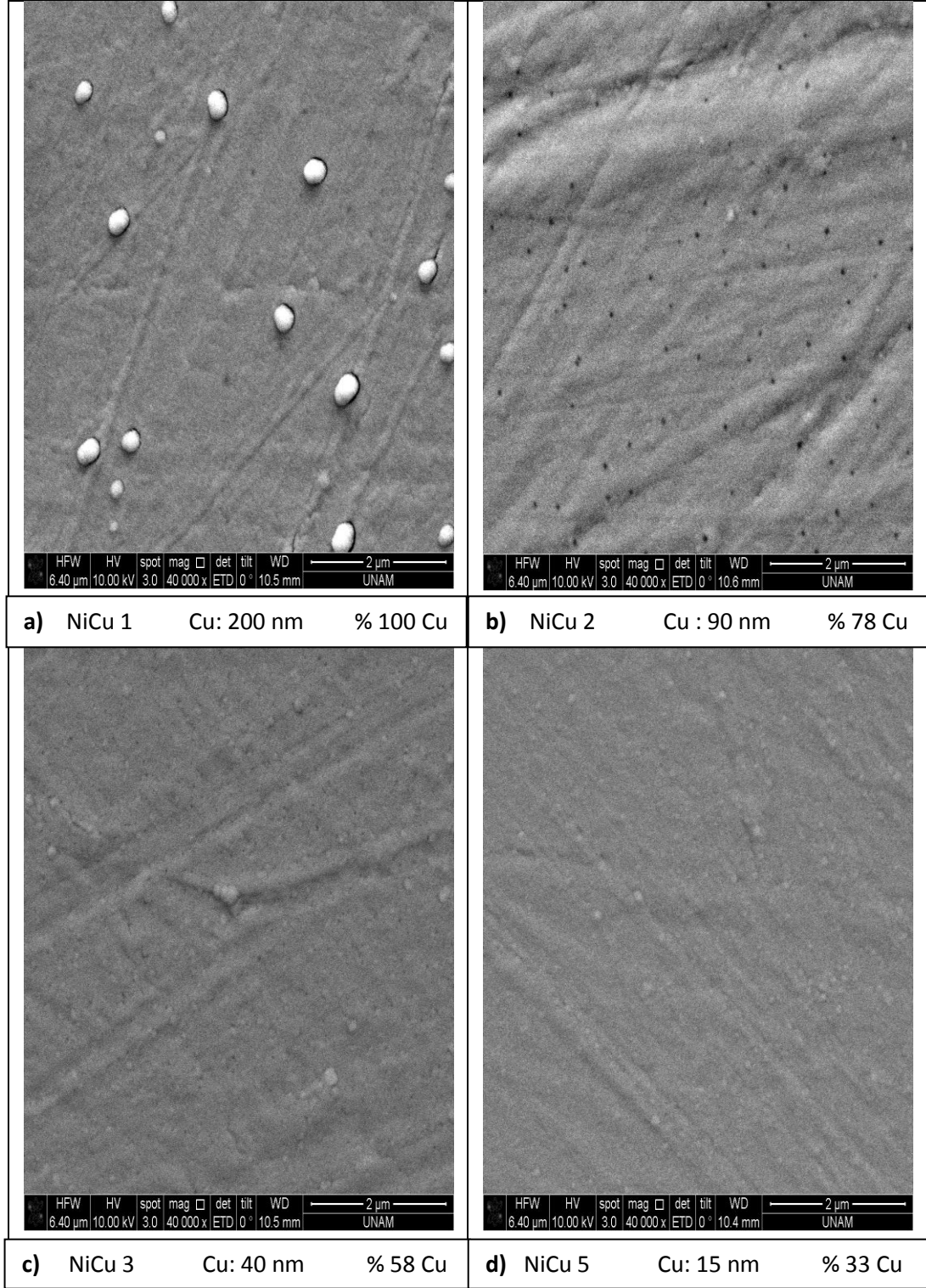
Yüzey morfolojik yapısının incelenmesinin amacı Ni/Cu ince filmlerin yüzey özelliklerinin Cu tabaka kalınlığına bağlı olarak nasıl değiştiğini görmektir. Tek katmanlı ve çok katmanlı filmlerin elektron mikroskopunda 40000 kat büyütülmesi sonucu elde edilen SEM görüntüleri yüzey morfolojik yapısı hakkında bilgiler içermektedir. Filmlerin üstüne büyütüldüğü alt tabakaya ait SEM görüntüsü Şekil 4.2' de verilmiştir. Film yüzeylerinde beliren çizgi ve deformasyonların alt tabaka resminde de mevcut olması, bunları alt tabaka kaynaklı olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.2:** Alt tabakaya ait SEM görüntüsü.

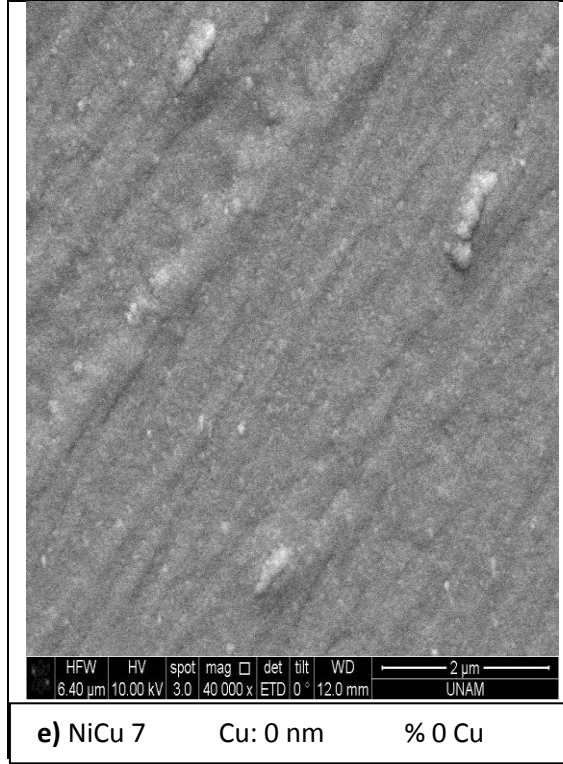
Şekil 4.3 (a)' da saf Cu filminden elde edilmiş SEM görüntüsü gösterilmiştir. Bu SEM görüntülerinde, açık renkli ve çapları yaklaşık  $0.5 \mu\text{m}$  olan küresel tanecikli (grain) yapılar görülmektedir. Grain yapıları üstünden bölgesel olarak yapılan EDX analizi sonuçları, film üzerinden genel olarak alınan ve Tablo 4.2' de verilen EDX sonuçları ile uyumludur. Bu durum, tespit edilen tanecikli yapıların, filmlerin atomik içeriklerinin farklılaşmasından kaynaklanmadığını göstermektedir. Şekil 4.3 (b)' deki % 78 Cu içeren filmin SEM görüntüsü incelendiğinde, tanecikli yapıların tamamen kaybolduğu ve film yüzeyinde homojen olarak dağılmış siyah noktaların ortaya çıktığı görülmüştür. Bununla birlikte, SEM görüntüleri incelendiğinde, % 58 Cu, Şekil 4.3 (c), % 33 Cu, Şekil 4.3 (d), içeren filmlerin yüzeylerinin saf Ni, Şekil 4.3 (e), filminin yüzeyine kıyasla daha homojen oldukları söylenebilir. Bunun yanı sıra, filmlerdeki Cu oranının azalmasıyla birlikte yüzeyin çizgisel formu daha da artmış, saf Ni filminin yüzeyinde bu çizgisel form iyice belirgin hale gelmiştir. Bu sonuç, Ni oranı arttıkça Cu' ın fcc (111) pikinin şiddetinin azalması buna karşın, Ni' in fcc (111) pikinin ve fcc (200) pikinin şiddetinin kademeli olarak artması ile ilgili olabilir.

Sonuç olarak; bakır tabaka kalınlığındaki azalmaya bağlı olarak filmlerin yüzey morfolojilerinin değiştiği tespit edilmiştir.



**Şekil 4.3:** Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin SEM görüntüleri **a)** Cu: 200 nm, **b)** Cu: 90 nm, **c)** Cu: 40 nm, **d)** Cu: 15 nm.





**Şekil 4.3 (devam):** Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin SEM görüntüleri e) Cu: 0 nm.

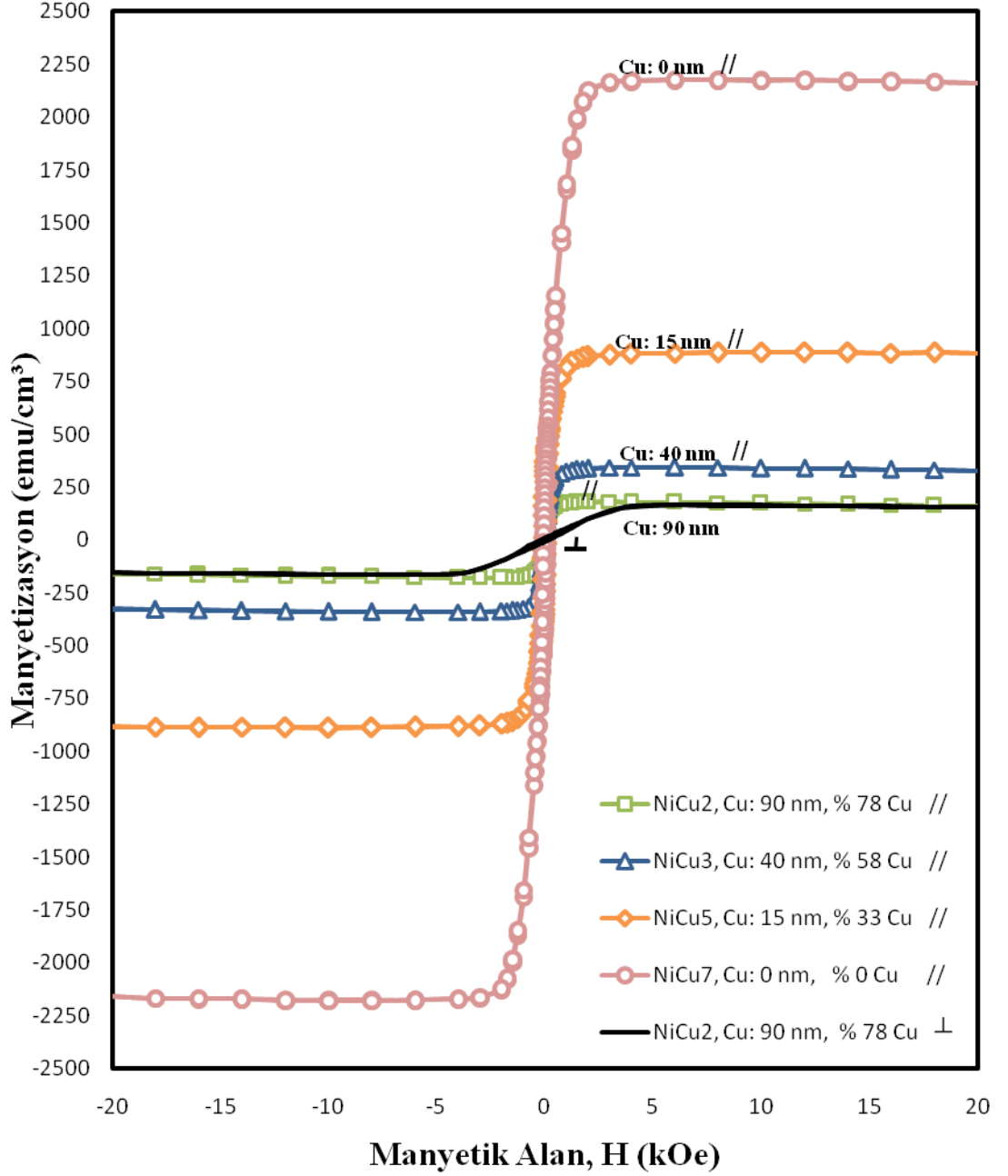
#### 4.1.4 Manyetik Analiz

Ni/Cu ince filmlerin manyetik özellikleri üzerine, Cu tabakaların farklı kalınlıklarının etkisini incelemek için VSM sistemi kullanılarak histeresis eğrileri elde edildi ve bu eğriler Şekil 4.4' te gösterildi. Dış manyetik alanın film yüzeyine paralel ve dik uygulanması ile doyum manyetizasyonu ( $M_s$ ), koarsivite ( $H_c$ ), kalıcı mıknatıslanma ( $M_r$ ) değerleri tespit edildi ve Tablo 4.4' te verildi. Ayrıca, paralel ve dik ölçümlerden manyetizasyonun kolay ve zor eksenleri belirlendi. Üretimi yapılan filmlerin doyum noktasındaki aynı yöne sıralanmış manyetik moment değeri, film hacmine bölünerek birim hacimdeki manyetik moment değeri yani doyum manyetizasyonu değeri hesaplandı. Bir manyetik malzemenin sahip olduğu doyum manyetizasyonu değeri, malzemeyi oluşturan elementlerin bileşimine sıkıca bağlıdır ve bu değer bireysel manyetik elementler için ayırt edici bir özelliktir [46]. Cu tabaka kalınlığının 90 nm, 40 nm, 15 nm, 0 nm olarak azaltılması ile elde edilen  $M_s$  değerleri sırasıyla  $180 \text{ emu/cm}^3$ ,  $343 \text{ emu/cm}^3$ ,  $889 \text{ emu/cm}^3$ ,  $2178 \text{ emu/cm}^3$  olarak bulundu.

Bulunan bu sonuçlara göre, Cu tabaka kalınlığı azaldıkça filmlerin doyum manyetizasyonu kademeli olarak artmaktadır (bakınız Tablo 4.4). Başka bir ifade ile, ferromanyetik malzeme içeriği arttıkça, bir dış manyetik alanda birim hacimdeki aynı yönelime sahip manyetik moment sayısı ve dolayısıyla doyum manyetizasyonu artmıştır. Bu beklenen bir sonuçtur ve ince filmlerin üretiminde kullanılan Ni' nin ferromanyetik, Cu' nun ise diyamanyetik olması ile açıklanabilir [41]. Ayrıca bu sonuç, bakır tabaka kalınlığı artarken atomik Fe içeriğinin azaldığı [58] çalışmasında bulunan sonuç ile uyum içindedir. Bununla beraber, farklı Co içerikli Ni-Co filmlerin incelendiği [59] çalışmasında, her iki bileşen de manyetik olmasına rağmen, Co içeriği azaldıkça doyum manyetizasyonunun da benzer şekilde azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın nedeni ise hacimli saf Co atomlarının doyum manyetizasyonunun Ni atomlarınınkinden fazla olmasıdır. Üretimi yapılan Ni/Cu ince filmlerin  $M_s$  değerlerinin filmdeki Ni bileşimine göre değişimi incelendiğinde (bakınız Şekil 4.5), Ni oranının artmasıyla  $M_s$  değerlerinin hızlı bir artış gösterdiği açıkça görülür. Hacimli saf Ni atomlarının  $M_s$  değerinin  $480 \text{ emu/cm}^3$  olduğu dikkate alındığında, % 67 ve % 100 Ni içeren filmler için elde edilen  $M_s$  değerleri bu değerden büyüktür. Bu durumun, üretilen filmlerin ince film yapısında olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Filmlerin  $H_c$  değerleri Cu tabaka kalınlığının 90 nm, 40 nm, 15 nm, 0 nm olduğu filmler için sırasıyla 62 Oe, 92 Oe, 82 Oe, 77 Oe olarak bulunmuştur. Şekil 4.5 incelendiğinde artan Ni içeriğine göre  $H_c$  değerinin hızlı bir artışla en yüksek değere ulaştığı daha sonra kademeli olarak azaldığı açıkça görülür.  $H_c$  değerinin diğerlerine göre daha yüksek çıktığı Cu tabaka kalınlığının 40 nm (NiCu 3) olduğu film için Cu (111) ve Ni (111) piklerinin hemen hemen eşit ve belirgin olması (bakınız Şekil 4.1) yüksek  $H_c$  değerinin sebebi ile ilgili olabilecek dikkate değer bir durumdur. Cu tabaka kalınlığının 90 nm olduğu filmin dik histeresis eğrisi, paralel histeresis eğrisi ile karşılaştırıldığında (bakınız Şekil 4.5), paralel histeresis eğrisinin dik histeresis eğrisine göre daha yüksek bir kalıcı mıknatıslanma ( $M_r \text{ paralel} = 64 \text{ emu/cm}^3$ ,  $M_r \text{ dik} = 7 \text{ emu/cm}^3$ ) ve daha düşük bir koarsivite ( $H_c \text{ paralel} = 62 \text{ Oe}$ ,  $H_c \text{ dik} = 152 \text{ Oe}$ ) değerine sahip olduğu görülmektedir. Bulunan bu sonuçlara göre, manyetizasyonun kolay eksen yönünün film yüzeyine paralel olduğu ve bu durumun manyetik şekil anizotropisinden kaynaklandığı söylenebilir. Sonuç olarak, Cu tabaka

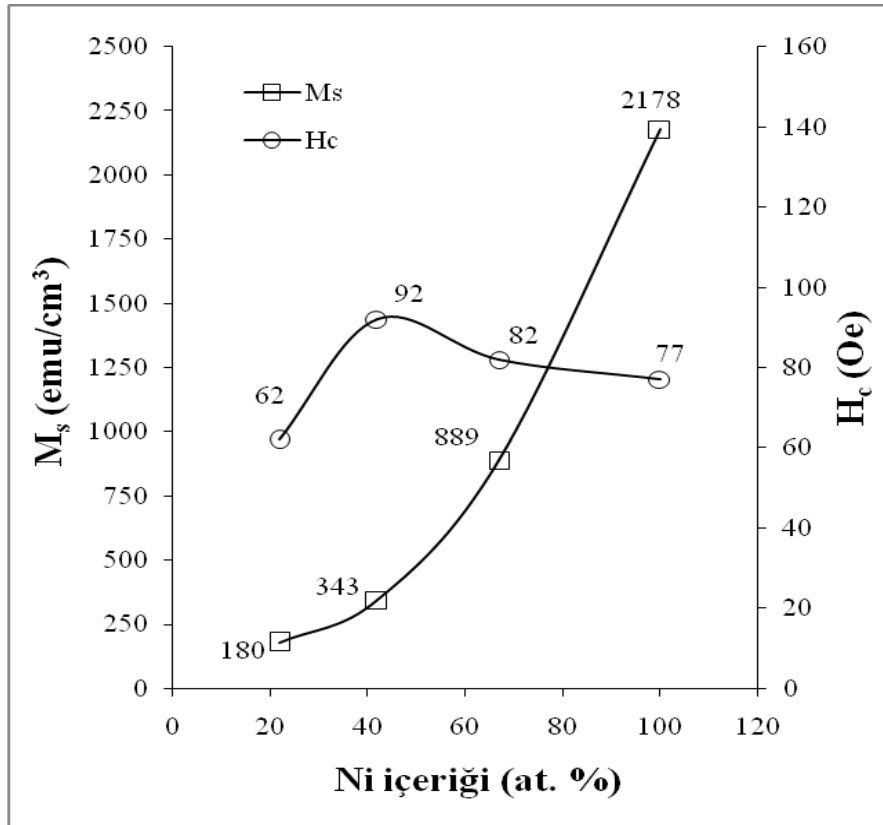
kalınlığında ve dolayısıyla Cu içeriğindeki değişimin manyetik özellikler üzerinde, yapısal özelliklerdeki değişime bağlı olarak bir etki oluşturduğu söylenebilir.



Şekil 4.4: Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin histeresis eğrileri (// : Paralel, ⊥ : Dik).

**Tablo 4.4:** Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerinin paralel ölçüm sonuçları.

Film adı		NiCu 2	NiCu 3	NiCu 5	NiCu 7
		Değişken parametre			
Cu tabaka kalınlığı (nm)		90	40	15	0
Atomik Ni içeriği (at. %)		22	42	67	100
Paralel	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	180	343	889	2178
	$H_c$ (Oe)	62	92	82	77
	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	64	125	329	283



**Şekil 4.5:** Cu tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerinde,  $M_s$  ve  $H_c$  değerlerinin filmlerdeki Ni içeriğine göre değişimi.

## 4.2 Ni/Cu Çok Katmanlı Yapılarında Farklı Toplam Film Kalınlığının Etkisinin İncelenmesi

### 4.2.1 Elementel Analiz

Bu seride toplam film kalınlığı 120 nm, 160 nm, 240 nm, 280 nm olan dört farklı üretim yapıldı. İnce filmlerin üretimleri esnasında Ni ve Cu tabaka kalınlıkları sabit tutulurken, toplam kalınlık ve buna bağlı olarak katman sayısı artırılmıştır. Manyetik ince filmler % 77 C ve % 23 O atomlarından oluşan asetat alt tabaka üzerine büyütüldü. Yapılan elementel analiz sonucuna göre, filmlerin içeriklerinin Cu ve Ni atomlarından oluştuğu Tablo 4.5’ te görülmektedir. Toplam film kalınlığı 120 nm, 160 nm, 240 nm, 280 nm şeklinde artarken filmlerin atomik Cu içerikleri sırasıyla % 52, % 49, % 49, % 49, atomik Ni içerikleri ise % 48, % 51, % 51, % 51 olarak bulundu. Bu sonuca göre, toplam film kalınlığı arttıkça manyetik ince filmlerin atomik Ni ve Cu içeriklerinin yaklaşık olarak aynı kaldığı tespit edilmiştir. Toplam film kalınlığının elektrodepozisyonla üretilen Ni-Co filmlerinin özellikleri üzerinde etkisinin incelendiği [60] çalışmasında elde edilen elementel analiz sonuçlarında da benzer sonuçlar bulunmuş, atomik içeriğin farklı film kalınlığından bağımsız olduğu rapor edilmiştir.

**Tablo 4.5:** Farklı toplam film kalınlığının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin elementel analiz sonuçları.

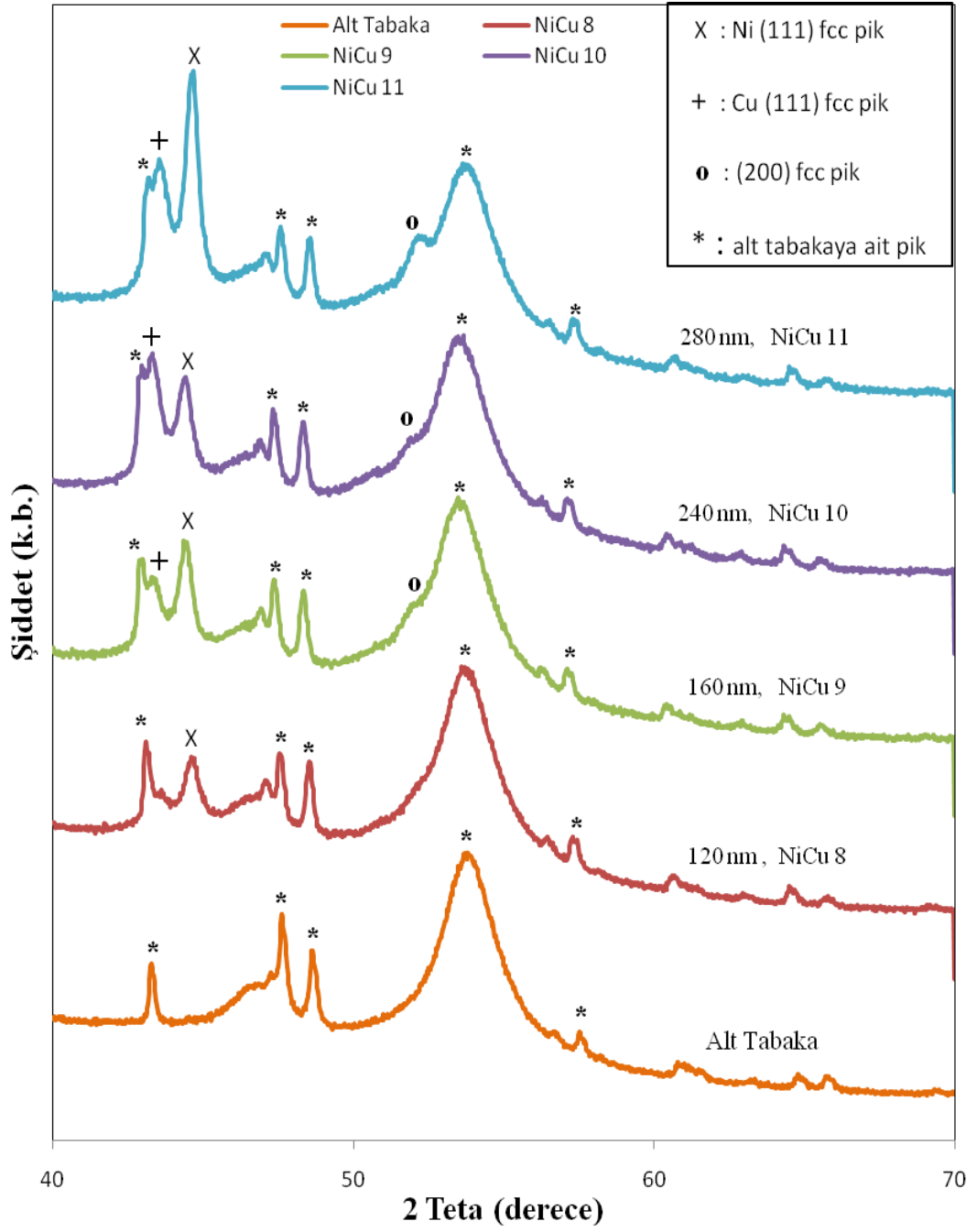
Film Adı	Temsili Gösterim	Toplam Kalınlık (nm)	Film İçeriği (at.%)	
			Ni	Cu
NiCu 8	3[Ni(10nm)/Cu(30nm)]=120nm	120	48	52
NiCu 9	4[Ni(10nm)/Cu(30nm)]=160nm	160	51	49
NiCu 10	6[Ni(10nm)/Cu(30nm)]=240nm	240	51	49
NiCu 11	7[Ni(10nm)/Cu(30nm)]=280nm	280	51	49

#### 4.2.2 Kristal Yapı Analizi

Farklı toplam film kalınlığının etkisinin incelendiği Ni/Cu ince filmlerin kristal yapı analizi XRD tekniği kullanılarak yapıldı ve farklı toplam film kalınlıklarının filmlerin kristal yapısı üzerine etkileri araştırıldı. Alt tabakanın kristal yapısı ise diğer serilerde olduğu gibi biriktirme işlemi yapılmadan önce aynı yöntem kullanılarak tespit edildi. Toplam kalınlıkları farklı olan filmlerin XRD desenleri Şekil 4.6' da gösterilmiştir. Alt tabakaya ait pikler kırınım deseninde daha önceki seride olduğu gibi \* olarak etiketlendi (bakınız Şekil 4.6). Şekil 4.6' da gösterilen kırınım desenlerine göre, tüm filmler için XRD desenlerinde gözlenen pikler, fcc yapıya aittir. Bununla birlikte, kırınım deseni daha detaylı olarak incelendiğinde, 120 nm kalınlığındaki NiCu 8 filminde Ni ve Cu içerikleri (bakınız Tablo 4.6) hemen hemen eşit olmasına rağmen tek kristal yapıda büyüdüğü ve sadece  $2\theta=44^\circ$  'de Ni fcc (111) pikinin belirdiği görülür. Tabaka kalınlığı arttıkça Ni fcc (111) pik şiddetinin de arttığı Şekil 4.6' da görülmektedir. Ayrıca, 120 nm kalınlıktaki filmde görülmeyen fcc Cu'nun (111) piki, 160 nm, 240 nm ve 280 nm kalınlıktaki filmler için,  $2\theta=43^\circ$  civarında ortaya çıkmış ve toplam kalınlık arttıkça pik şiddeti de kademeli olarak artış göstermiştir. Benzer bir şekilde  $2\theta=51^\circ$  'de görülen fcc yapının karakteristik (200) piki, 120 nm (NiCu 8) üretimi hariç diğer tüm filmlerin XRD desenlerinde görülmüş ve kalınlığı 280 nm olan film için oldukça belirgin hale gelmiştir. Bu sonuçlara göre, ince filmlerin toplam kalınlığı arttıkça fcc yapıya ait olan bu piklerin şiddetlerinin arttığı açıkça görülmektedir. Bunun nedeni, artan film kalınlığının kristal düzlemlerinden yansıyan X-ışınlarının şiddetini artırması ve difraktometredeki sayım detektörlerine yapıcı girişim yapan daha fazla elektromanyetik radyasyonun yansması olabilir.

Toplam kalınlığı 120 nm, 160 nm, 240 nm, 280 nm olan ince filmler için en şiddetli pik (111) piki ve buna ait düzlemler arası uzaklıklar sırası ile  $d_{(111)}= 0.2027$  nm,  $d_{(111)}= 0.2039$  nm,  $d_{(111)}= 0.2088$  nm,  $d_{(111)}= 0.2030$  nm olarak hesaplandı (bakınız Tablo 4.6). Bulunan bu sonuca göre, düzlemler arası uzaklıkların toplam kalınlığın artması ile yaklaşık olarak aynı kaldığı söylenebilir. Toplam kalınlığı 240 nm olan NiCu 10 filmi dışında toplam film kalınlığı arttıkça örgü sabitinin azaldığı ve Ni örgü sabitine ( $a_{Ni}= 0.35238$  nm,  $a_{Cu}= 0.36150$  nm) [51] daha yakın olduğu söylenebilir. Bu durum, NiCu 10 üretiminde diğer filmlerin aksine Cu pik şiddetinin

Ni pik şiddetinden daha büyük olmasından kaynaklanıyor olabilir. XRD desenlerindeki piklerin şiddetlerinden elde edilen sonuca göre tüm filmlerin tercihli yönelimlerinin (111) olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, XRD desenlerinde görülen piklerin açısız konumlarından ve yarı yükseklikteki genişliklerinden yararlanılarak, tane büyüklükleri ( $t$ ), Scherrer bağıntısı kullanılarak [51] hesaplandı. Buna göre, toplam kalınlığı 120 nm, 160 nm, 240 nm, 280 nm olan filmlerin en şiddetli pikleri için tane büyüklükleri sırası ile  $t = 69$  nm,  $t = 55$  nm,  $t = 55$  nm,  $t = 23$  nm olarak bulundu. Ayrıca, toplam kalınlık 120 nm, 160 nm, 240 nm, 280 nm olarak artarken her bir filme ait ortalama tane büyüklüğü sırası ile 69 nm, 37 nm, 37 nm, 32 nm olarak hesaplandı. Bulunan bu sonuçlara göre toplam film kalınlığı arttıkça ortalama tane büyüklüğünün azaldığı söylenebilir. Filmlerin XRD desenlerinden elde edilen sonuçlarla hesaplanan kristal yapıya ait fiziksel büyüklükler Tablo 4.6' da gösterilmektedir. Kristal yapı analizi sonucuna göre, filmlerin tamamının fcc fazında olduğu ve kristal yapının toplam film kalınlığının değişmesinden etkilendiği görülmektedir.



**Şekil 4.6:** Farklı toplam film kalınlığının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD desenleri.

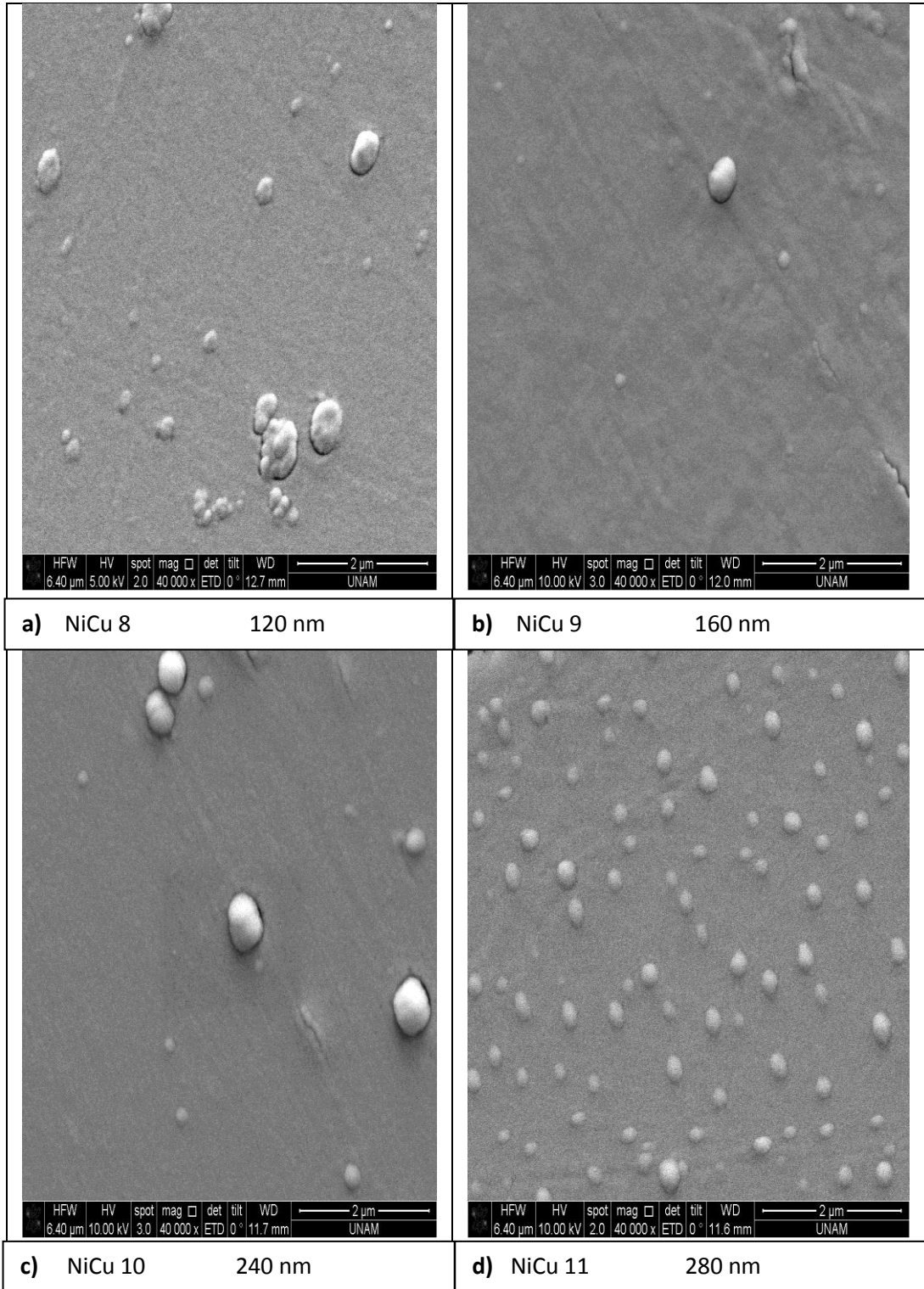


**Tablo 4.6:** Farklı toplam film kalınlığının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD analizinden elde edilen sonuçlar.

Film adı		NiCu 8	NiCu 9	NiCu 10	NiCu 11
Değişken Parametre					
<b>Toplam Kalınlık (nm)</b>		120	160	240	280
<b>Atomik Ni İçeriği (at. % Ni)</b>		% 48	% 51	% 51	% 51
<b>Atomik Cu İçeriği (at. % Cu)</b>		% 52	% 49	% 49	% 49
<b>Tercihli Yönelim</b>		(111)	(111)	(111)	(111)
<b><math>t_{ort}</math> (nm)</b>		69	37	37	32
<b>Örgü Sabiti (nm)</b>		0.3511	0.3497	0.3616	0.3486
<b>Cu fcc (111)</b>	<b><math>2\theta</math></b>	-	43.3113	43.2931	43.5876
	<b>d (nm)</b>	-	0.2087	0.2088	0.2074
	<b>t (nm)</b>	-	23	55	55
<b>Ni fcc (111)</b>	<b><math>2\theta</math></b>	44.6680	44.3888	44.4538	44.5797
	<b>d (nm)</b>	0.2027	0.2039	0.2036	0.2030
	<b>t (nm)</b>	69	55	21	23
<b>fcc (200)</b>	<b><math>2\theta</math></b>	-	51.8575	51.7847	52.0746
	<b>d (nm)</b>	-	0.1761	0.1763	0.1754
	<b>t (nm)</b>	-	18	24	20

### 4.2.3 Yüzey Morfolojik Analizi

Ni/Cu ince filmlerin yüzey özelliklerinin toplam film kalınlığına bağlı olarak nasıl değiştiğini görmek için yapılan yüzey morfolojik analizi sonucu elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.7' de gösterilmiştir. Filmlerin büyütüldüğü alt tabakaya ait SEM görüntüsü Şekil 4.2' de verildi. Film yüzeylerinde gözlenen çizgi ve deformasyonların alt tabaka resminde de mevcut olması, bunların alt tabaka kaynaklı olduğunu göstermektedir. Şekil 4.7 (a)' da 120 nm (NiCu 8) kalınlıktaki filmde elde



**Şekil 4.7:** Farklı toplam film kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin 40 000 büyütmedeki SEM görüntüleri a) 120 nm, b) 160 nm, c) 240 nm, d) 280 nm.

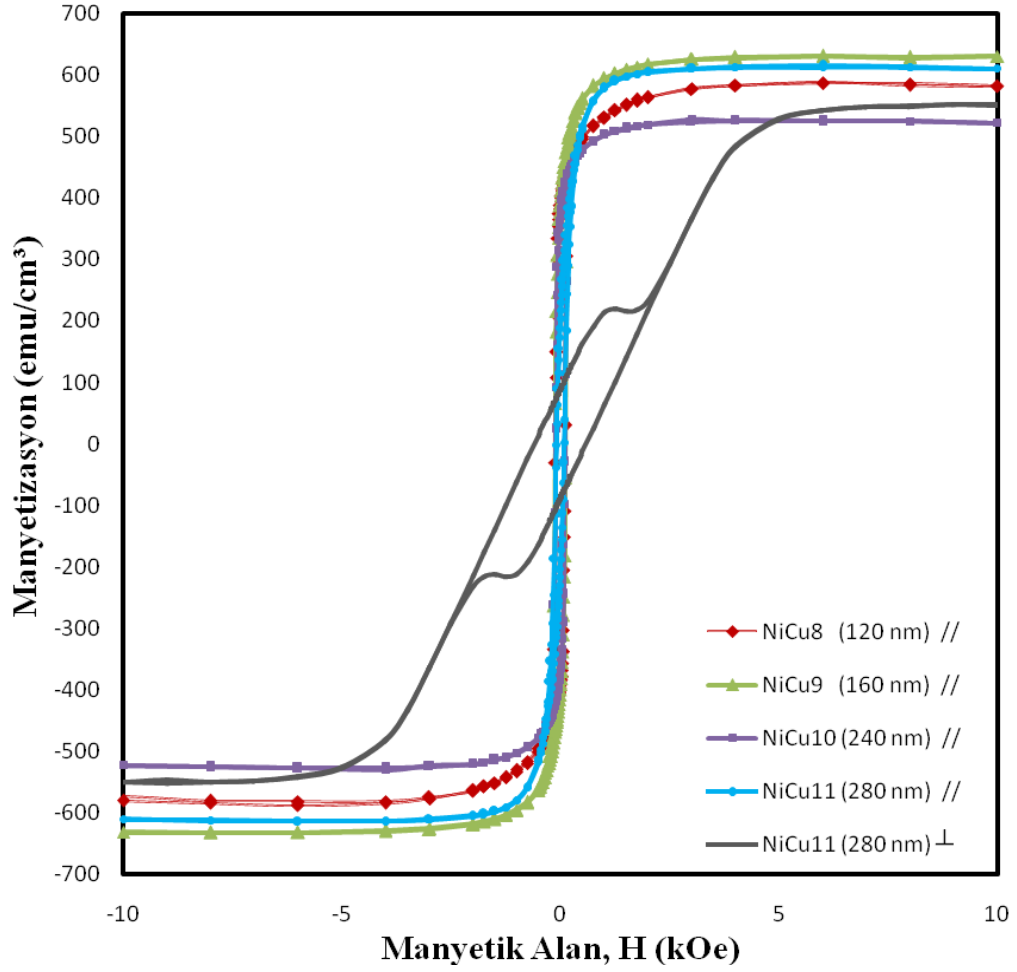
edilmiş SEM görüntüsü gösterilmiştir. Bu SEM görüntüsünde, açık renkli ve çapları yaklaşık 0.5  $\mu\text{m}$  ile 1  $\mu\text{m}$  arası olan az sayıda küresel tanecikli (grain) yapılar görülmektedir. Toplam kalınlığı 160 nm olan filmin Şekil 4.7 (b)' deki SEM görüntüsü incelendiğinde ise, Şekil 4.7 (a)' daki açık renkli ve küresel tanecikli yapıların yaklaşık aynı sıklıkla ve aynı çap büyüklüğüyle mevcudiyetini sürdürdüğü görülmektedir. Toplam kalınlığı 240 nm olan filmin SEM görüntüsünde, Şekil 4.7 (c), ise küresel tanecikli (grain) yapıların daha ince filmlerde görülen aynı formasyonu devam etmektedir. Şekil 4.7 (d)' de verilen, toplam kalınlığı 280 nm olan filme ait SEM görüntüsünde ise, diğer filmlere kıyasla film yüzeyinde görülen tanecik yapısında ciddi değişimler vardır. Film kalınlığı 280 nm olduğunda tanecik çapının önemli oranda küçüldüğü ve yaklaşık 0.1  $\mu\text{m}$  ile 0.3  $\mu\text{m}$  arasında değiştiği bulunmuştur. Ayrıca, yüzeydeki bu grain yapılarının miktarının arttığı SEM resminden açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra, toplam kalınlık arttıkça, alt tabakadan kaynaklanan çizgi ve deformasyonların kısmen azaldığı görülmektedir. Sonuç olarak, toplam film kalınlığındaki artışa bağlı olarak filmlerin yüzey morfolojilerinin değiştiği tespit edilmiştir.

#### 4.2.4 Manyetik Analiz

Farklı toplam film kalınlıklarının, Ni/Cu ince filmlerin manyetik özellikleri üzerine etkisini incelemek için histeresis eğrileri elde edildi ve bu eğriler Şekil 4.8' de gösterildi. Dış manyetik alanın film yüzeyine paralel ve dik uygulanması ile  $M_s$ ,  $H_c$ ,  $M_r$  değerleri tespit edildi ve paralel ölçüme ait değerler Tablo 4.7' de verildi. Ayrıca, paralel ve dik ölçümlerden manyetizasyonun kolay eksenini belirlendi. Üretimi yapılan filmlerin doyum noktasındaki aynı yöne sıralanmış manyetik moment değeri, film hacmine bölünerek doyum manyetizasyonu hesaplandı. Toplam film kalınlığının 120 nm, 160 nm, 240 nm, 280 nm olarak artırılması sonucu elde edilen  $M_s$  değerleri sırasıyla 590  $\text{emu}/\text{cm}^3$ , 630  $\text{emu}/\text{cm}^3$ , 528  $\text{emu}/\text{cm}^3$ , 615  $\text{emu}/\text{cm}^3$  olarak hesaplandı. Bulunan bu sonuçlara göre,  $M_s$  değerlerinde küçük farklılıklar olmasına rağmen, toplam film kalınlığının artması ile  $M_s$  değerlerinin yaklaşık olarak aynı kaldığı görülmektedir. Ayrıca toplam kalınlığı en az olan filmin (NiCu 8) XRD grafiğinde, diğer filmlerin aksine sadece Ni (111) pikinin gözlenmesi, yani tek kristal olarak büyümesi,  $M_s$  değerinde küçük sapmalara neden olmuş olabilir. Bunun yanı sıra, 240

nm (NiCu 10) kalınlığa sahip filmin XRD deseninde (bakınız Şekil 4.6), diğer filmlerden farklı olarak Cu (111) pikinin Ni (111) pikinden daha şiddetli çıkması, düşük  $M_s$  değerinin nedeni olabilir. Hacimli saf Ni atomlarının  $M_s$  değerinin  $480 \text{ emu/cm}^3$  olduğu dikkate alındığında, toplam film kalınlığı farklı olan üretimlerin tamamı için elde edilen  $M_s$  değerleri (bakınız Tablo 4.7) bu değerden büyüktür. Bu durumun üretilen filmlerin ince film yapısında olmasından kaynaklandığı düşünölmektedir.

Toplam film kalınlığının 120 nm, 160 nm, 240 nm, 280 nm olarak arttırılması sonucu ortaya çıkan  $H_c$  değerleri sırasıyla 116 Oe, 123 Oe, 104 Oe, 89 Oe olarak bulunmuştur. Ayrıca  $H_c$  değeri 12.6 Oe' den (1 kA/m) daha küçük malzemelerin yumuşak, 126 Oe' den (10 kA/m) daha büyük olan malzemelerin sert manyetik malzeme [41] olduğu dikkate alındığında üretimi yapılan malzemelerin sert manyetik malzeme grubuna daha yakın olduğu söylenebilir. Toplam kalınlığı en fazla olan (NiCu 11) filmin dik histeresis eğrisi, paralel histeresis eğrisi ile karşılaştırıldığında (bakınız Şekil 4.8), paralel histeresis eğrisinin dik histeresis eğrisine göre daha yüksek bir kalıcı mıknatıslanma ( $M_r \text{ paralel} = 204 \text{ emu/cm}^3$ ,  $M_r \text{ dik} = 88 \text{ emu/cm}^3$ ) ve daha düşük bir koarsivite ( $H_c \text{ paralel} = 89 \text{ Oe}$ ,  $H_c \text{ dik} = 587 \text{ Oe}$ ) değerine sahip olduğu görölmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, manyetizasyonun kolay eksen yönünün film yüzeyine paralel olduğu ve bu durumun manyetik şekil anizotropisinden kaynaklandığı söylenebilir. Sonuç olarak, toplam film kalınlığındaki değişimin, manyetik özellikler üzerinde azda olsa değişikliğe sebep olduğu ve bu değişimin yapısal özelliklerdeki değişime bağlı olarak ortaya çıktığı düşünölebilir.



**Şekil 4.8:** Farklı toplam film kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin histeresis eğrileri (// : Paralel, ⊥ : Dik).

**Tablo 4.7:** Farklı toplam film kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin paralel ölçüm sonuçları.

		Film adı			
		NiCu 8	NiCu 9	NiCu 10	NiCu 11
Değişken parametre	Toplam kalınlık (nm)	120	160	240	280
	Atomik Ni içeriği (at. %)	48	51	51	51
Paralel	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	590	630	528	615
	$H_C$ (Oe)	116	123	104	89
	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	396	398	371	204

### **4.3 Ni/Cu Çok Katmanlı Yapılarında Ferromanyetik Tabakanın Farklı Depozisyon Hızlarının Etkisinin İncelenmesi**

#### **4.3.1 Elementel Analiz**

Bu seride, ferromanyetik Ni tabakasının farklı depozisyon hızlarının filmlerin yapısal ve manyetik özellikler üzerine etkisi incelendi. Yapılan elementel analiz sonucuna göre, filmlerin içeriklerinin Cu ve Ni atomlarından oluştuğu Tablo 4.8' de görülmektedir. Ni tabaka kalınlığı 10 nm, Cu tabaka kalınlığı 30 nm ve toplam kalınlık 200 nm olarak belirlendi ve tüm üretimler için bu değerlerde sabit tutuldu. Bunların yanı sıra, Cu tabakasının depozisyon hızı da belirli bir değerde (0.04 nm/s) sabit tutulurken, Ni depozisyon hızı 0.02 nm/s, 0.06 nm/s, 0.10 nm/s olarak artırıldı. Buna göre, en düşük depozisyon hızında üretilen film hariç diğer filmlerin atomik Ni içeriklerinin % 7 olarak sabit kaldığı, filmlerin geri kalan kısmının (% 93) Cu atomlarından oluştuğu bulundu. Elde edilen bu sonuç, DC magnetron sputtering yöntemi ile üretilen FeCl/Cu çok katmanlı yapılarında ferromanyetik tabakanın farklı depozisyon hızlarının etkisinin incelendiği [61] çalışmasında elde edilen sonuç ile uyum içindedir. 0.02 nm/s depozisyon hızında üretilen filmin ise, yüzde yüze yakın oranda Cu atomlarından oluştuğu ve içeriğinde ki Ni atomu bileşiminin safsızlık mertebesinde olduğu tespit edildi. Bu durum, depozisyon hızı 0.02 nm/s olarak ayarlandığında, kalınlık tespitinde kullanılan sensör malzemede Ni atomlarının tespit edilmesine rağmen, ince film yapısını oluşturmak için yeterli enerjiye sahip olamaması ile ilişkili olabilir. Dolayısıyla Ni atomlarının film bileşiminde dikkate değer bir biçimde yer alamaması bu duruma atfedilebilir.

**Tablo 4.8:** Ni tabakasının farklı depozisyon hızlarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin elementel analiz sonuçları.

Film Adı	Temsili Gösterim	Ni Tabakanın Depozisyon Hızı (nm/s)	Cu Tabakanın Depozisyon Hızı (nm/s)	Film İçeriği (at.%)	
				Ni	Cu
NiCu 12	5[Ni(10nm)/Cu(30nm)]=200nm	0.02	0.04	0	100
NiCu 15	5[Ni(10nm)/Cu(30nm)]=200nm	0.06	0.04	7	93
NiCu 16	5[Ni(10nm)/Cu(30nm)]=200nm	0.10	0.04	7	93

### 4.3.2 Kristal Yapı Analizi

Ni tabakanın farklı depozisyon hızlarına ait XRD desenleri Şekil 4.9’ da gösterilmiştir. Alt tabakaya ait pikler diğer serilerde olduğu gibi kırınım deseninde \* olarak etiketlendi (bakınız Şekil 4.9). Ni depozisyon hızının kademeli olarak arttırıldığı bu seride, Şekil 4.9’ da görüldüğü gibi,  $2\theta \approx 43^\circ$  de fcc (111) piki ve  $2\theta \approx 50^\circ$  de fcc (200) piki gözlemlendi. EDX analizinde, yüzde yüze yakın Cu olduğu tespit edilen NiCu 12 filmine ait XRD deseninin, Şekil 4.1’ de gösterilen saf Cu (NiCu 1) filmi ile aynı olmamasının sebebi, bu filmdeki Cu depozisyon hızının, NiCu 1 filminden farklı olmasından veya Ni atomlarının safsızlık mertebesinde olmasından kaynaklanıyor olabilir. Bulunan bu sonuçlara göre, filmlerin tamamının fcc yapıda olduğu ve Ni depozisyon hızının arttırılması ile,  $2\theta \approx 43^\circ$  de ve  $2\theta \approx 50^\circ$  de gözlenen fcc piklerine ait pik şiddetlerinin ve pik genişliklerinin aynı kaldığı görüldü.

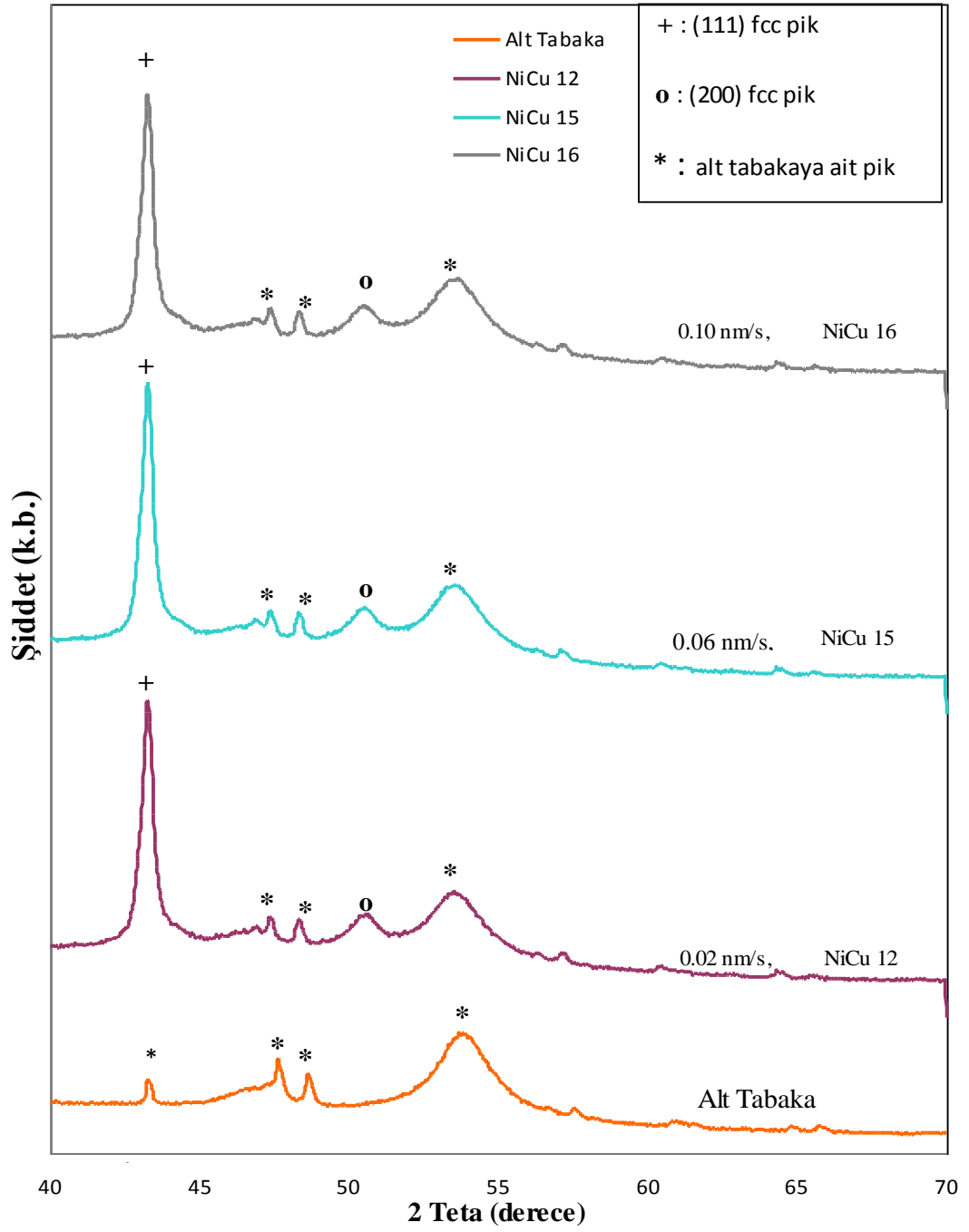
Ni tabakasının farklı depozisyon hızlarının etkisinin incelendiği seride, düzlemler arası uzaklıklar ( $d$ ), daha önce yapıldığı gibi elde edilen Bragg açısı değerlerinden yararlanarak hesaplandı (bakınız Tablo 4.9). Ni depozisyon hızı sırası ile 0.02nm/s, 0.06 nm/s, 0.10 nm/s olan ince filmler için en şiddetli pik (111) piki ve buna ait düzlemler arası uzaklıklar sırası ile  $d_{(111)} = 0.2090$  nm,  $d_{(111)} = 0.2089$  nm,  $d_{(111)} = 0.2090$  nm olarak hesaplandı. Bulunan bu sonuca göre, düzlemler arası uzaklıkların Ni depozisyon hızının artışı ile değişmediği söylenebilir. Üretimi yapılan filmlerin örgü sabitleri ( $a$ ), XRD desenlerinde görülen piklerin açısız

konumları ve miller indisleri kullanılarak en küçük kareler yöntemiyle hesaplandı. Tablo 4.9' da da verilen örgü sabiti değerlerinin 0.3619 nm ile 0.3595 nm arasında değiştiği ve literatürde verilen ( $a_{Cu}= 0.36150$  nm,  $a_{Ni}= 0.35238$  nm) değerlerle karşılaştırıldığında Cu örgü sabitine daha yakın olduğu söylenebilir [55]. Bu sonuç elementel analiz sonuçları ile uyum içindedir. XRD desenlerindeki piklerin şiddetlerinden anlaşıldığı üzere, tüm filmlerin tercihli yönelimlerinin (111) olduğu bulundu. Ayrıca, XRD desenlerinde görülen piklerin açıl konumlarından ve yarı yükseklikteki genişliklerinden yararlanılarak, tane büyüklükleri ( $t$ ), Scherrer bağıntısı kullanılarak [51] hesaplandı ve Tablo 4.9' da verildi. Ni depozisyon hızı sırası ile 0.02nm/s, 0.06 nm/s, 0.10 nm/s olarak artarken, her bir filme ait ortalama tane büyüklüğü 30 nm olarak hesaplandı. Bulunan bu sonuçlara göre Ni depozisyon hızı arttıkça ortalama tane büyüklüğünün aynı kaldığı söylenebilir. Kristal yapı analizi sonucunda pik şiddetleri ve pik genişlikleri, tercihli yönelim,  $d$  ve  $t_{ort}$  değerlerinin yaklaşık olarak aynı kaldığı ve bunun sonucu olarak da kristal yapının Ni depozisyon hızının değişimine bağlı olmadığı bulundu.



**Tablo 4.9:** Ferromanyetik Ni tabakanın farklı depozisyon hızlarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD analizinden elde edilen sonuçlar.

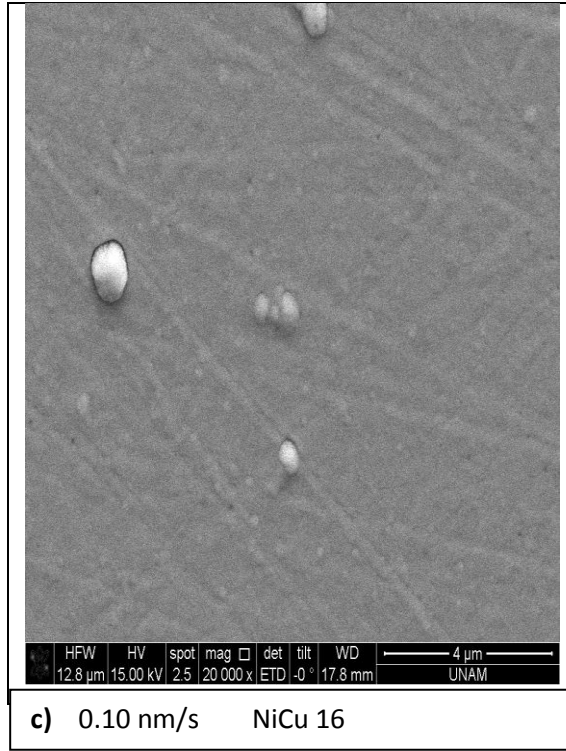
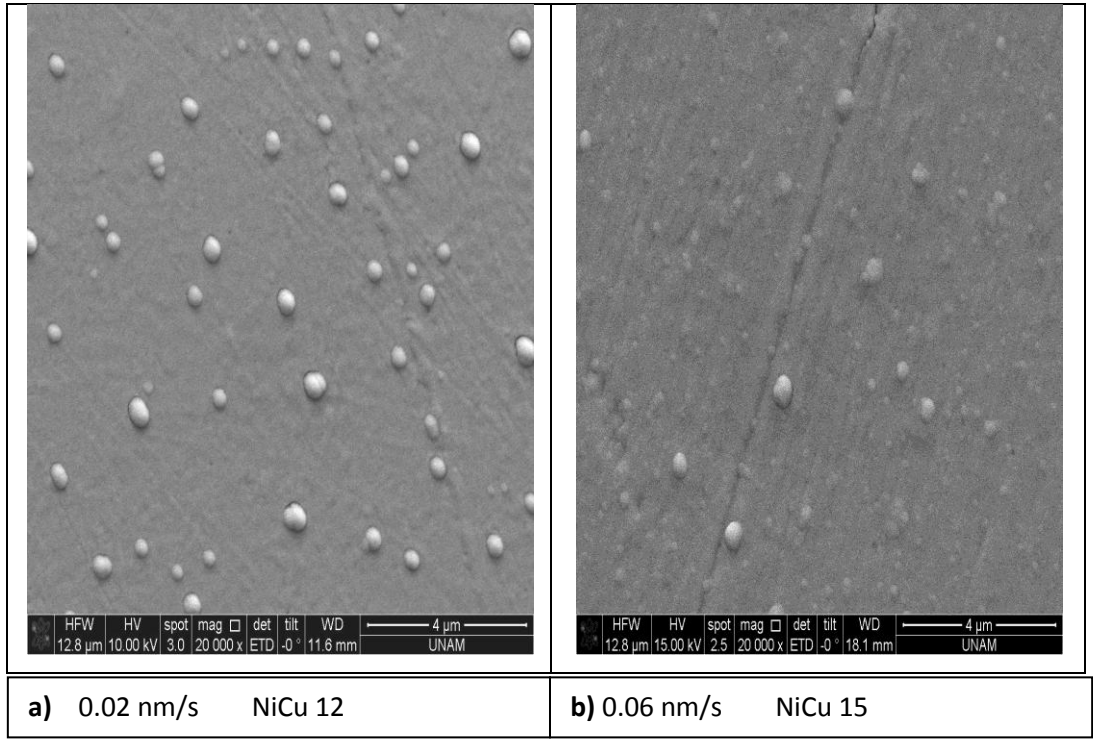
Film adı		NiCu 12	NiCu 15	NiCu 16
<b>Değişken parametre</b>				
<b>Ni Depozisyon Hızı (nm/s)</b>		0.02	0.06	0.10
<b>Cu Depozisyon Hızı (nm/s)</b>		0.04	0.04	0.04
<b>Atomik Ni İçeriği (at. % Ni)</b>		% 0	% 7	% 7
<b>Atomik Cu İçeriği (at. % Cu)</b>		% 100	% 93	% 93
<b>Tercihli Yönelim</b>		(111)	(111)	(111)
<b>t<sub>ort</sub> (nm)</b>		30	30	30
<b>Örgü Sabiti (nm)</b>		0.3619	0,3603	0,3595
<b>Cu fcc (111)</b>	<b>2<math>\Theta</math></b>	43.2388	43.2590	43.2416
	<b>d (nm)</b>	0.2090	0.2089	0.2090
	<b>t (nm)</b>	30	30	30
<b>Cu fcc (200)</b>	<b>2<math>\Theta</math></b>	50.3676	50.4355	50.4593
	<b>d (nm)</b>	0.1810	0.1807	0.1807
	<b>t (nm)</b>	28	28	28



**Şekil 4.9:** Ferromanyetik Ni tabakanın farklı depoziyon hızlarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD desenleri (Cu depoziyon hızı: 0.04 nm/s).

### 4.3.3 Yüzey Morfolojik Analizi

Ni tabakanın farklı depozisyon hızlarına bağlı olarak, Ni/Cu ince filmlerin yüzey özelliklerinin nasıl değiştiğini anlamak için yapılan yüzey morfolojik analizi ve bunun sonucunda elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.10' da verilmiştir. Filmlerin üzerine büyütüldüğü alt tabakaya ait SEM görüntüsü Şekil 4.2' de verilmiştir. Şekil 4.10 (a)' da Ni depozisyon hızının 0.02 nm/s olduğu (NiCu 12) filmde elde edilmiş SEM görüntüsü gösterilmiştir. Bu SEM görüntüsünde küresel tanecikli yapılar açıkça görülmektedir. Bu taneciklerin çapları yaklaşık 0.1 µm ile 0.4 µm arasında değişmektedir. Taneciklerin üstünden bölgesel olarak yapılan EDX analizi sonuçlarının, film üzerinden genel olarak alınan ve Tablo 4.8' de verilen EDX sonuçları ile yaklaşık olarak aynı olduğu bulunmuştur. Bu sonuç, film yüzeyinde açıkça görülen tanecikli yapıların şekillenmesinin film bileşimine bağlı olmadığını göstermektedir. Şekil 4.10 (b) ve Şekil 4.10 (c) depozisyon hızı 0.06 nm/s ve 0.10 nm/s olan filmlerin SEM görüntülerini göstermektedir. Bu SEM resimlerinde görüldüğü gibi depozisyon hızı 0.02 nm/s olan film yüzeyinde görülen tanecikli yapıların varlığı devam etmekte ancak bunların sayısı, en düşük depozisyon hızında (0.02 nm/s) üretilen filmin yüzeyinde görülenlerden daha seyrekdir. Bununla birlikte Şekil 4.10 (b) ve Şekil 4.10 (c)' de açıkça görüldüğü gibi, depozisyon hızındaki artış yüzeydeki tanecikli yapının daha da azalmasına neden olmuş ve yüzey daha sade hale gelmiştir. Sonuç olarak, Ni depozisyon hızındaki değişimin filmlerin ortalama tane büyüklükleri üzerinde önemli bir etkisi olmamakla birlikte, yüzeyde şekillenen tane yapılarının sayılarında belirgin bir değişime neden olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 4.10:** Ferromanyetik Ni tabakanın farklı depoziyon hızlarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin SEM görüntüleri **a)** 0.02 nm/s, **b)** 0.06 nm/s, **c)** 0.10 nm/s.

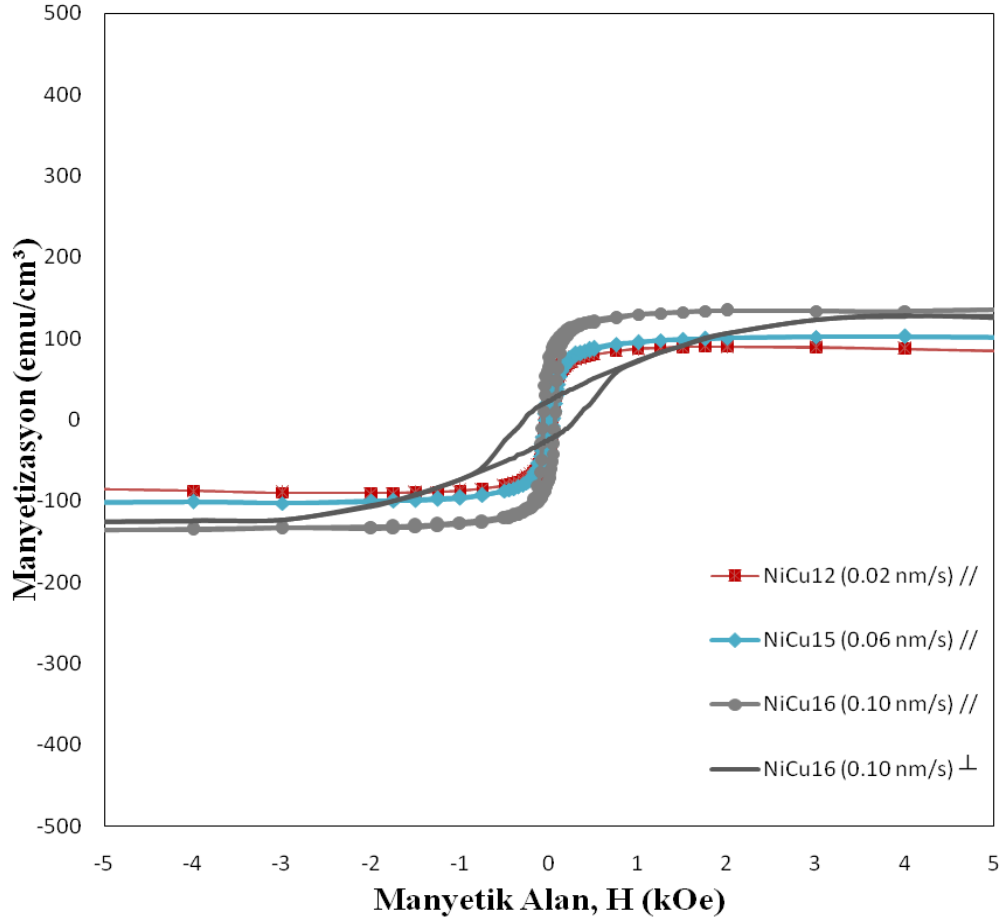
#### 4.3.4 Manyetik Analiz

Ni tabakanın farklı depozisyon hızlarının, Ni/Cu ince filmlerin manyetik özellikleri üzerine etkisini incelemek için histeresis eğrileri elde edildi ve bu eğriler Şekil 4.11’ de gösterildi. Dış manyetik alanın film yüzeyine paralel ve dik uygulanması ile  $M_s$ ,  $H_c$ ,  $M_r$  değerleri tespit edildi ve paralel ölçüme ait değerler Tablo 4.10’ da verildi. Ayrıca, daha önceki serilerde de yapıldığı gibi, paralel ve dik ölçümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak manyetizasyonun kolay eksenini belirlendi. Elde edilen sonuçlara göre, Ni depozisyon hızı 0.02nm/s, 0.06 nm/s, 0.10 nm/s olarak arttırıldığında elde edilen  $M_s$  değerleri sırasıyla 90 emu/cm<sup>3</sup>, 106 emu/cm<sup>3</sup>, 138 emu/cm<sup>3</sup> olarak bulundu. Buna göre, depozisyon hızındaki artış filmlerin  $M_s$  değerlerinde az da olsa bir artışa neden olmuştur. Ni depozisyon hızı 0.02 nm/s (NiCu 12) olan filmin histeresis eğrisi oluşturması ve  $M_s$  değerinin en küçük çıkması, yapılan EDX analizi (bakınız Tablo 4.8) sonucunda atomik Ni içeriğinin safsızlık mertebesinde olduğu sonucu ile uyum içindedir. Ni depozisyon hızının 0.02nm/s, 0.06 nm/s, 0.10 nm/s olarak arttırılması sonucu elde edilen  $H_c$  değerleri sırası ile 46 Oe, 48 Oe, 65 Oe olarak bulundu. Manyetik tabakanın depozisyon hızının artmasıyla, taneli yapıların sayısında azalma meydana gelmesine karşın  $H_c$  değerlerinde bir artış meydana gelmiştir.

Ni depozisyon hızının 0.10 nm/s olduğu filmin dik histeresis eğrisi, paralel histeresis eğrisi ile karşılaştırıldığında (bakınız Şekil 4.11), paralel histeresis eğrisinin dik histeresis eğrisine göre daha yüksek bir kalıcı mıknatıslanma ( $M_{r\text{ paralel}} = 71 \text{ emu/cm}^3$ ,  $M_{r\text{ dik}} = 24 \text{ emu/cm}^3$ ) ve daha düşük bir koarsivite ( $H_{c\text{ paralel}} = 65 \text{ Oe}$ ,  $H_{c\text{ dik}} = 285 \text{ Oe}$ ) değerine sahip olduğu görülmektedir. Bulunan bu sonuçlara göre, manyetizasyonun kolay eksen yönünün film yüzeyine paralel olduğu ve bu durumun manyetik şekil anizotropisinden kaynaklandığı söylenebilir.

**Tablo 4.10:** Ferromanyetik Ni tabakanın farklı depozisyon hızlarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin paralel ölçüm sonuçları.

Değişken parametre		Film adı		
		NiCu 12	NiCu 15	NiCu 16
Ni depozisyon hızı (nm/s)		0.02	0.06	0.10
Atomik Ni içeriği (at. %)		0	7	7
Paralel	$M_S$ (emu/cm <sup>3</sup> )	90	106	138
	$H_C$ (Oe)	46	48	65
	$M_r$ (emu/cm <sup>3</sup> )	48	33	71



**Şekil 4.11:** Ferromanyetik Ni tabakanın farklı depozisyon hızlarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin histeresis eğrileri (// : Paralel, ⊥ : Dik).

## 4.4 Ni/Cu Çok Katmanlı Yapılarında Ni Tabakasının Farklı Kalınlıklarının Etkisinin İncelenmesi

### 4.4.1 Elementel Analiz

Bu seride, Ni tabaka kalınlığı kademeli olarak azaltılarak Ni/Cu filmleri üretildi. Daha sonra, atomik içeriklerin değişimi incelendi. Yapılan elementel analiz sonucunda, filmlerin içeriklerinin Ni ve Cu atomlarından oluştuğu tespit edildi. Buna göre, Ni tabakalarının kalınlıkları 92.5 nm, 42.5 nm, 32.5 nm, 17.5 nm şeklinde azalırken filmlerin atomik Ni içerikleri sırasıyla % 76, % 64, % 59, % 44 olarak bulundu (bakınız Tablo 4.11). Filmlerin geri kalanının ise Cu atomlarından oluştuğu tespit edildi. Bu sonuca göre, Ni tabakalarının kalınlığı azaldıkça, ince filmlerin atomik Ni içeriği kademeli olarak azalmış, atomik Cu içeriği ise kademeli olarak artmıştır. Elde edilen bu sonuç, elektrodepozisyon yöntemi ile üretilen NiCu/Cu süperörgülerde farklı NiCu tabaka kalınlıklarının etkisinin incelendiği [62] çalışmasında elde edilen sonuç ile uyumludur.

**Tablo 4.11:** Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin elementel analiz sonuçları.

Film Adı	Temsili Gösterim	Ni Tabaka Kalınlığı (nm)	Film İçeriği (at.%)	
			Ni	Cu
NiCu 17	2[Ni(92.5nm)/Cu(7.5nm)]=200nm	92.5	76	24
NiCu 18	4[Ni(42.5nm)/Cu(7.5nm)]=200nm	42.5	64	36
NiCu 19	5[Ni(32.5nm)/Cu(7.5nm)]=200nm	32.5	59	41
NiCu 20	8[Ni(17.5nm)/Cu(7.5nm)]=200nm	17.5	44	56

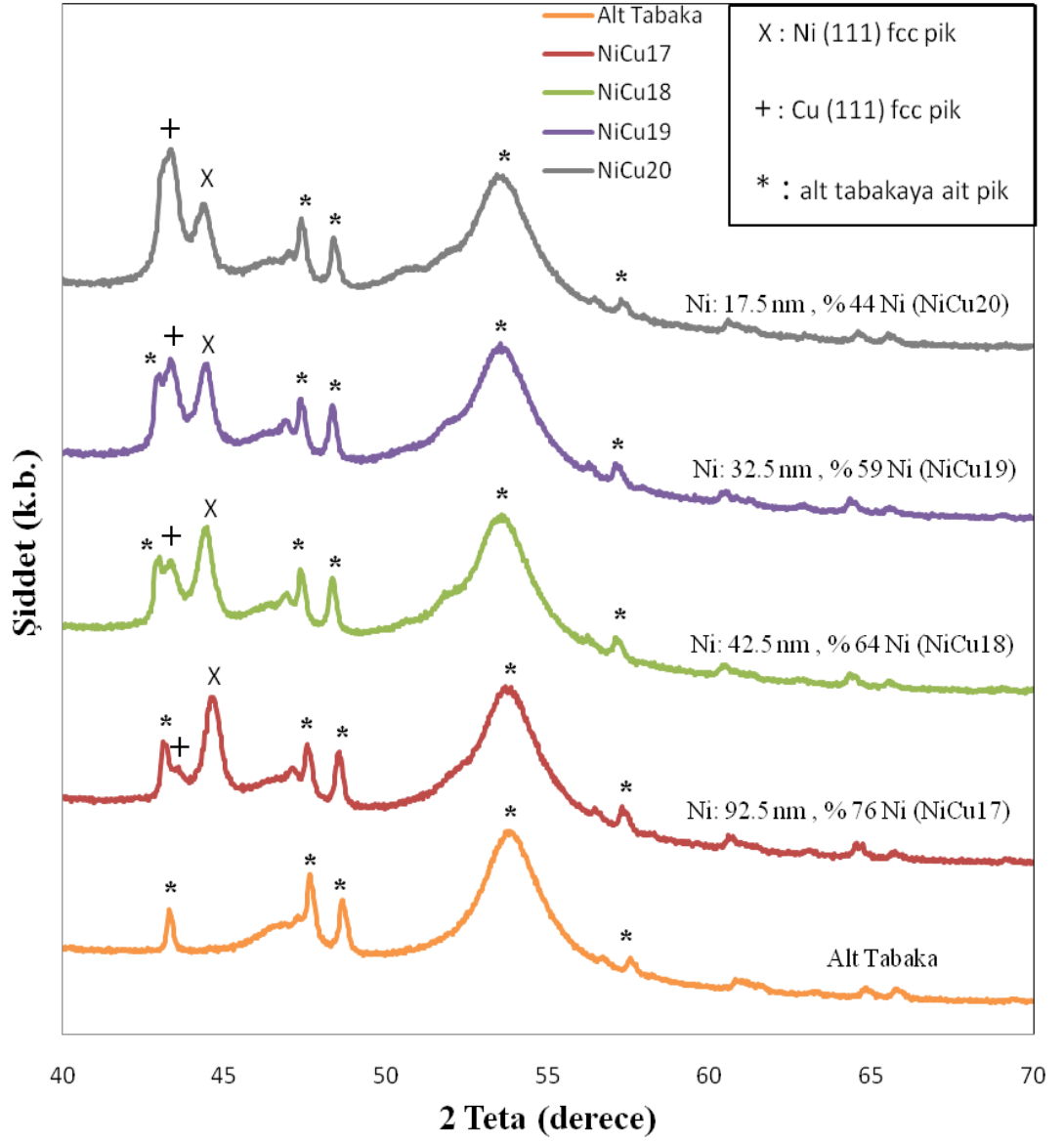
#### 4.4.2 Kristal Yapı Analizi

Ni tabakanın farklı kalınlıklarının, ince filmlerin kristal yapılarında meydana getirdikleri değişimleri incelemek için elde edilen XRD desenleri Şekil 4.12' de gösterilmiştir. Alt tabakaya ait pikler önceki serilerde yapıldığı gibi kırınım deseninde \* olarak etiketlendi (bakınız Şekil 4.12). Kristal yapı analizine göre incelenen tüm filmler fcc yapıya sahiptir. Ni tabaka kalınlığı 92.5 nm, 42.5 nm, 32.5 nm, 17.5 nm şeklinde azalırken  $2\theta \approx 43^\circ$  'de şekillenen Cu fcc (111) pik şiddetinin kademeli olarak arttığı,  $2\theta \approx 44^\circ$  'de şekillenen Ni fcc (111) pik şiddetinin de kademeli olarak azaldığı Şekil 4.12' de görülmektedir. Ni tabaka kalınlığı en fazla olan filmde (NiCu 17), Ni (111) pik şiddeti Cu (111) pik şiddetinden büyükken, Ni tabaka kalınlığı en az olan filmde (NiCu 20) Cu pik şiddeti daha büyüktür. Elde edilen bu sonuçlara göre, Ni tabaka kalınlığı azaldıkça ince filmlerin kristal yapılarında farklılıklar görüldüğü ve bu farklılıklarında atomik Ni içeriği azalırken, atomik Cu içeriğindeki artıştan (bakınız Tablo 4.11) kaynaklandığı söylenebilir.

Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği ve Şekil 4.12' de XRD desenleri verilen seride, Bragg açısı değerlerinden yararlanarak  $d$  değerleri hesaplandı ve Tablo 4.12' de verildi. Ni tabaka kalınlığı 92.5 nm, 42.5 nm, 32.5 nm, 17.5 nm şeklinde azalırken ince filmler için en şiddetli pik (111) piki ve buna ait düzlemler arası uzaklıklar sırası ile  $d_{(111)} = 0.2030$  nm,  $d_{(111)} = 0.2040$  nm,  $d_{(111)} = 0.2085$  nm,  $d_{(111)} = 0.2085$  nm olarak hesaplandı. Bu hesaplamalara göre Ni tabaka kalınlığı azaldıkça, düzlemler arası uzaklıkların literatürde verilen ( $d_{(111)} = 0.2034$  nm) [51] değerden uzaklaştığı söylenebilir. Üretimi yapılan filmlerin örgü sabitleri, Ni tabaka kalınlığı 92.5 nm, 42.5 nm, 32.5 nm, 17.5 nm şeklinde azalırken sırası ile  $a = 0.35167$  nm,  $a = 0.35345$  nm,  $a = 0.36113$  nm,  $a = 0.36118$  nm olarak bulundu. Örgü sabiti hesaplamalarından elde edilen sonuçlara göre, Ni tabaka kalınlığı azaldıkça örgü sabitinin kademeli olarak arttığı ve Cu örgü sabitine yaklaştığı görülmektedir ( $a_{Cu} = 0.36150$  nm,  $a_{Ni} = 0.35238$ ). Şekil 4.12'de verilen XRD desenlerindeki pik şiddetlerinden yapılan yönelim hesapları sonucunda tüm filmlerin tercihli yönelimlerinin (111) olduğu ve Ni tabaka kalınlığındaki değişimden etkilenmediği bulunmuştur. Scherrer bağıntısı kullanılarak hesaplanan tane büyüklüğü değerleri Tablo 4.12' de verildi. Ayrıca tane büyüklüğü ve pik şiddeti değerlerinden yararlanılarak hesaplanan  $t_{ort}$  değerleri Ni tabaka kalınlığı 92.5 nm/s, 42.5 nm/s, 32.5 nm/s, 17.5 nm/s olarak azalırken sırası ile 52 nm, 40 nm, 45 nm, 27



nm olarak hesaplandı. Filmlerin XRD analizlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.12’de gösterilmektedir.



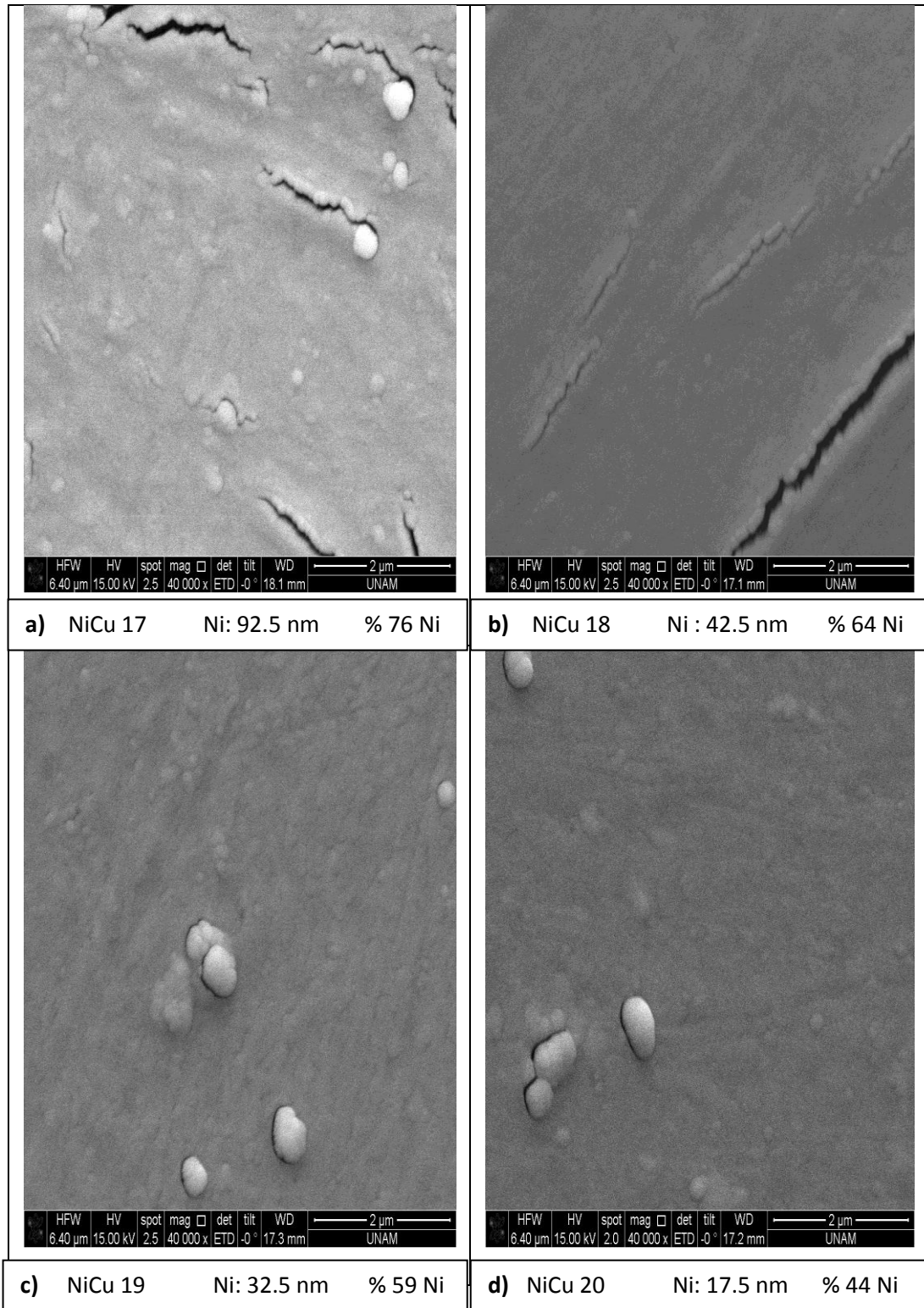
Şekil 4.12: Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD desenleri.

**Tablo 4.12:** Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin XRD analizinden elde edilen sonuçlar.

Film adı		NiCu 17	NiCu 18	NiCu 19	NiCu 20
Değişken parametre					
Ni Tabaka Kalınlığı (nm)		92.5	42.5	32.5	17.5
Atomik Ni İçeriği (at. % Ni)		% 76	% 64	% 59	% 44
Tercihli Yönelim		(111)	(111)	(111)	(111)
$t_{ort}$ (nm)		52	40	45	27
Örgü Sabiti (nm)		0.35167	0.35345	0.36113	0.36118
Cu fcc (111)	$2\theta$	43.5192	43.3520	43.3624	43.3563
	d (nm)	0.2077	0.2085	0.2085	0.2085
	t (nm)	45	54	45	25
Ni fcc (111)	$2\theta$	44.5915	44.3540	44.2878	44.4320
	d (nm)	0.2030	0.2040	0.2043	0.2037
	t (nm)	55	30	46	30

#### 4.4.3 Yüzey Morfolojik Analizi

Ni/Cu ince filmlerin yüzey morfolojik özelliklerinin Ni tabaka kalınlığına bağlı olarak nasıl değiştiğini görmek amacıyla SEM görüntüleri elde edildi ve Şekil 4.13' de gösterildi. Filmlerin üstüne büyütüldüğü alt tabakaya ait SEM görüntüsü daha önce Şekil 4.2' de verilmişti. Film yüzeylerinde beliren çizgi ve deformasyonların alt tabaka resminde de mevcut olması, bunların alt tabaka kaynaklı olduğunu göstermektedir. Şekil 4.13 (a)'da Ni tabaka kalınlığı ve Ni içeriğinin en fazla olduğu NiCu 17 filmine ait SEM görüntüsü gösterilmiştir. Bu görüntüde mikrometre mertebesinde taneli yapılar görülmektedir. Ayrıca film yüzeyinde uzunlukları 2 $\mu$ m'ye kadar varabilen çatlak ya da yarık olarak tarif edilebilecek kısımlar gözlenmektedir. Şekil 4.13 (b)' deki % 64 Ni içeren filmin (NiCu 18) SEM görüntüsü incelendiğinde, NiCu 17 filminin yüzeyinde tespit edilen çatlaklar mevcudiyetini sürdürmesine rağmen taneli yapılar büyük oranda kaybolmuş, yüzey



**Şekil 4.13:** Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin 40 000 büyütmedeki SEM görüntüleri **a)** Ni: 92.5 nm, **b)** Ni: 42.5 nm, **c)** Ni: 32.5 nm, **d)** Ni:17.5 nm.

daha sade bir yapıya bürünmüştür. Şekil 4.13 (c) (NiCu 19) ve Şekil 4.13 (d)' deki (NiCu 20) SEM görüntüsü incelendiğinde, taneli yapılar tekrar belirgin şekilde gözlenmiş ancak yüzeydeki çatlaklar tamamen kaybolmuştur. Elde edilen bu sonuçlara göre, Ni tabaka kalınlığındaki azalmaya bağlı olarak filmlerin yüzey morfolojilerinin değiştiği tespit edilmiştir.

#### 4.4.4 Manyetik Analiz

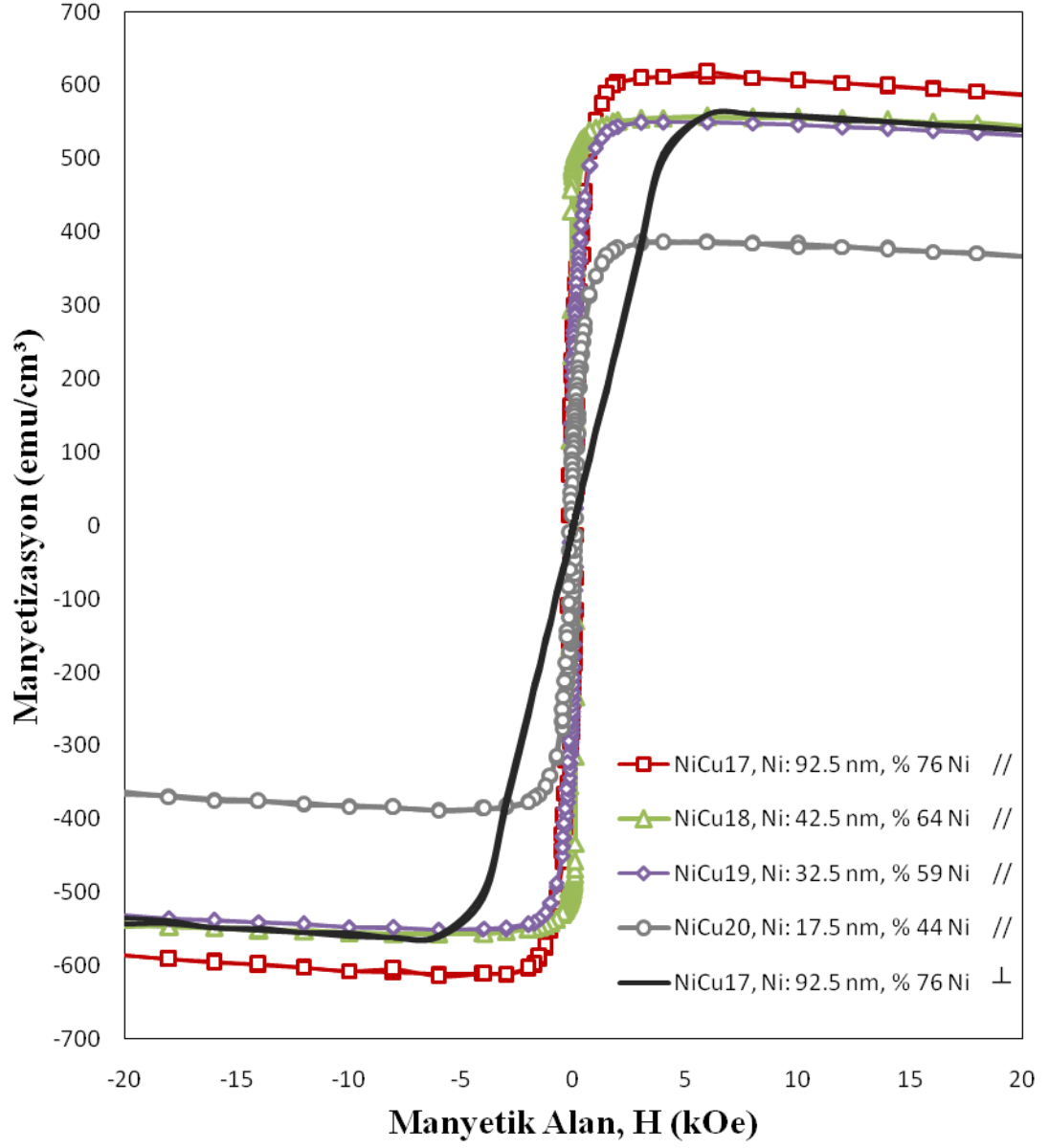
Ni tabakanın farklı kalınlıklarının, Ni/Cu ince filmlerin manyetik özellikleri üzerine etkisini incelemek için histeresis eğrileri elde edildi ve bu eğriler Şekil 4.14' te gösterildi. Dış manyetik alanın film yüzeyine paralel ve dik uygulanması ile elde edilen doyum manyetizasyonu ( $M_s$ ), koarsivite ( $H_c$ ), kalıcı mıknatıslanma ( $M_r$ ) değerleri tespit edildi ve paralel ölçüme ait değerler Tablo 4.13' te verildi. Ayrıca daha önceki incelemelerde yapıldığı gibi paralel ve dik ölçümler karşılaştırılarak manyetizasyonun kolay eksenini belirlendi. Ni tabaka kalınlığının 92.5 nm, 42.5 nm, 32.5 nm, 17.5 nm olarak azaltılması ile elde edilen  $M_s$  değerleri sırasıyla 617 emu/cm<sup>3</sup>, 558 emu/cm<sup>3</sup>, 550 emu/cm<sup>3</sup>, 387 emu/cm<sup>3</sup> olarak bulundu. Elde edilen bu sonuçlara göre, Ni tabaka kalınlığı azaldıkça filmlerin doyum manyetizasyonu değerleri Tablo 4.13' te görüldüğü gibi kademeli olarak azalmaktadır. Doyum manyetizasyonunun azalması beklenen bir durumdur ve Ni tabaka kalınlığı azaldıkça filmdeki Ni oranının azalması, buna paralel olarak birim hacim başına düşen manyetik moment sayısındaki azalmadan kaynaklanmaktadır. Bu durum  $M_s$  değerlerinin filmdeki Ni bileşimine göre değişimini gösteren Şekil 4.15' te de açıkça görülmektedir. Hacimli saf Ni atomlarının  $M_s$  değerinin 480 emu/cm<sup>3</sup> olduğu dikkate alındığında, % 76, % 64, % 59 Ni içeren filmler için elde edilen  $M_s$  değerleri bu değerden büyüktür. Bu durumun, üretilen filmlerin ince film yapısında olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, tabaka kalınlığı 42.5 nm (NiCu 18) ve 32.5 nm (NiCu 19) olan filmlerin Şekil 4.14' te görülen histeresis eğrilerinin birbirine çok yakın olması atomik Ni içeriklerinin çok yakın (bakınız Tablo 4.11) olmasından kaynaklanmaktadır. Ni tabaka kalınlığının 92.5 nm, 42.5 nm, 32.5 nm, 17.5 nm olduğu filmler için  $H_c$  değerleri sırasıyla 144 Oe, 129 Oe, 114 Oe, 111 Oe olarak bulunmuştur. Şekil 4.15 incelendiğinde azalan Ni içeriğine göre  $H_c$  değerinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Ayrıca Ni tabaka kalınlığı azaldıkça, SEM

resimlerinde görülen çatlak ve kırılmaların azalması koarsivite değerindeki azalmaya neden olmuş olabilir. Bir başka ifadeyle, film yüzeylerinde görülen çatlaklar  $H_c$  değerlerinde artışa katkı sağlamış olabilir. Bunun yanı sıra üretimi yapılan malzemelerin sert manyetik malzeme grubunda veya sert manyetik malzeme grubuna yakın olduğu söylenebilir.

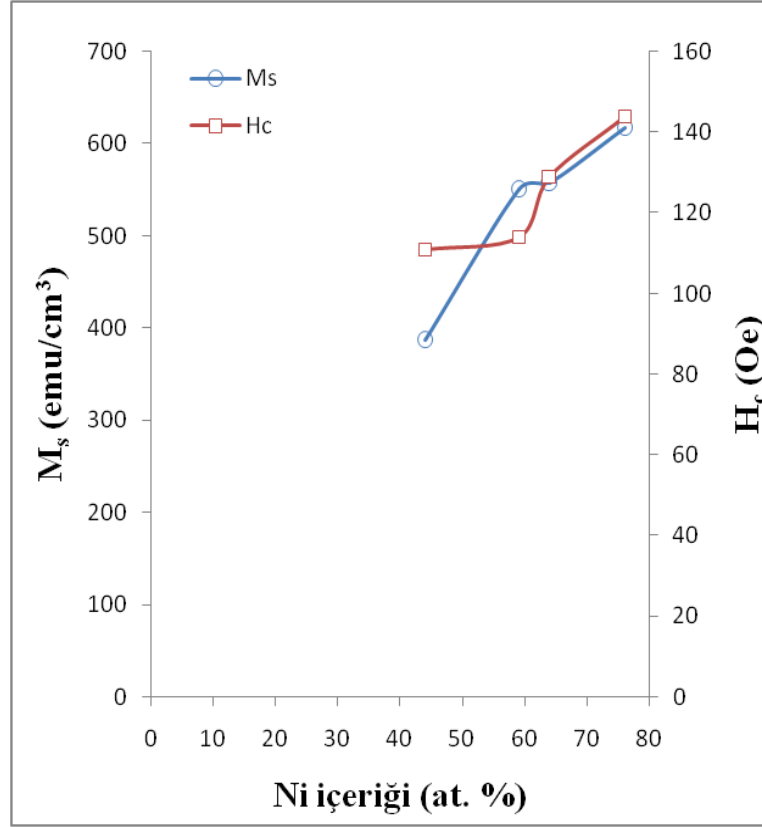
Ni tabaka kalınlığının en fazla olduğu filmin (NiCu 17) dik histeresis eğrisi, paralel histeresis eğrisi ile karşılaştırıldığında (bakınız Şekil 4.14), paralel histeresis eğrisinin dik histeresis eğrisine göre daha yüksek bir kalıcı mıknatıslanma ( $M_{r \text{ paralel}} = 234 \text{ emu/cm}^3$ ,  $M_{r \text{ dik}} = 6 \text{ emu/cm}^3$ ) değerine sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, manyetizasyonun kolay eksen yönünün film yüzeyine paralel olduğu ve bu durumun manyetik şekil anizotropisinden kaynaklandığı söylenebilir. Sonuç olarak, Ni tabaka kalınlığında ve dolayısıyla Ni içeriğindeki değişimin manyetik özellikler üzerinde, yapısal özelliklerdeki değişime bağlı olarak bir etki oluşturduğu söylenebilir.

**Tablo 4.13:** Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerinin paralel ölçüm sonuçları.

Film adı Değişken parametre		NiCu 17	NiCu 18	NiCu 19	NiCu 20
		Ni tabaka kalınlığı (nm)	92.5	42.5	32.5
Atomik Ni içeriği (at. %)		76	64	59	44
Paralel	$M_s$ ( $\text{emu/cm}^3$ )	617	558	550	387
	$H_c$ (Oe)	144	129	114	111
	$M_r$ ( $\text{emu/cm}^3$ )	234	492	235	105



**Şekil 4.14:** Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerin histeresis eğrileri (// : Paralel,  $\perp$  : Dik).



**Şekil 4.15:** Ni tabakasının farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği Ni/Cu filmlerinde,  $M_s$  ve  $H_c$  değerlerinin filmlerdeki Ni içeriğine göre değişimi.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, doğru akım (DC) püskürtme tekniği kullanılarak, Cu tabaka kalınlığı, toplam film kalınlığı, Ni depozisyon hızı ve Ni tabaka kalınlığı farklı olan Ni/Cu çok katmanlı manyetik ince filmleri üretildi. Üretim esnasında sadece inceleme konusu olan parametre değiştirilirken diğer parametre değerleri sabit tutuldu ve değişken parametrenin filmlerin elementel, yapısal ve manyetik özellikleri üzerine etkileri incelendi.

İncelenen birinci seride, Cu tabaka kalınlığı azaldıkça elementel analiz sonuçlarına bağlı olarak, XRD desenlerinde görülen Cu fcc (111) pik şiddetinin azaldığı ve Cu tabaka kalınlığının 15 nm ve altında olduğu filmlerde görülmediği, Ni fcc (111) pik şiddetinin ise arttığı bulundu. Bunun yanında Cu tabaka kalınlığının 15 nm ve altında olduğu filmlerde Ni fcc (200) pikinin ortaya çıktığı ve şiddetinin arttığı görüldü. Cu tabaka kalınlığı azaldıkça yaklaşık 50 nm civarında olan ortalama tane büyüklüğü değerlerinin 25 nm civarına düştüğü tespit edildi. Ayrıca, bir diğer önemli sonuç, incelenen dört ayrı serinin tamamında olduğu gibi filmlerin fcc yapıda olduğudur. Film yüzey morfolojileri incelendiğinde, Cu tabaka kalınlığının azalması ile küresel tanecikli grain yapılar yerini siyah noktasal yapılara bırakmış, sonrasında ise film yüzeyi çizgisel formda izlenmiştir. Manyetik analiz sonuçlarına göre, Cu tabaka kalınlığı azaldıkça, dolayısıyla atomik Ni içeriğindeki artışa bağlı olarak doyum manyetizasyonu değerinin arttığı bulundu. Elde edilen doyum manyetizasyonu değerlerinin, ikinci ve dördüncü seride olduğu gibi, hacimli (bulk) Ni doyum manyetizasyonu ( $480 \text{ emu/cm}^3$ ) değerinden büyük olduğu tespit edildi. Bunun nedeni, üretilen filmlerin ince film yapısında olmasına atfedildi. İncelenen dört ayrı seride de manyetizasyonun kolay eksen yönünün film yüzeyine paralel olduğu bulundu.

Toplam film kalınlığındaki değişimin etkilerinin incelendiği ikinci seride, manyetik ince filmlerin kalınlığı arttıkça atomik Ni ve Cu içeriklerinin yaklaşık olarak aynı kaldığı bulunmuştur. XRD desenleri incelendiğinde, toplam kalınlığı en az olan filmin tek kristal yapıda büyüdüğü ve sadece Ni fcc (111) pikinin oluştuğu görüldü. Toplam film kalınlığı arttıkça Ni (111), Ni (200) ve Cu (111) düzlemlerine



ait pik şiddetleri artarken, ortalama tane büyüklüğü değerlerinin azaldığı bulundu. Kristal yapı analizine göre, toplam film kalınlığındaki değişimin bir etki oluşturduğu açıkça görülmektedir. Film yüzeylerinde görülen küresel tanecikli yapıları ise, toplam film kalınlığı en fazla olan filmde diğer filmlerin aksine boyut olarak küçülmüş fakat miktar olarak artış göstermiştir. Bu sonuç, XRD analizinde bulunan, ortalama tane büyüklüğünün küçülmesi ile uyum içindedir.  $M_s$  değerlerinin  $630 \text{ emu/cm}^3$  ile  $528 \text{ emu/cm}^3$  arasında değişmesi ve başlıca film bileşimine olan bağımlılığından sapması, yüzeydeki taneciklerin boyutu başta olma üzere, yapısal özelliklerdeki farklılıklardan dolayı olduğu düşünülmektedir.

İncelenen üçüncü seride, Ni depozisyon hızı artırılırken film içeriği en düşük depozisyon hızında üretilen film hariç sabit kalmıştır. En düşük depozisyon hızında üretilen filmin içinde Ni atomları safsızlık mertebesinde bulunmuştur. Ni depozisyon hızının artması ile XRD piklerinin şiddetlerinin, düzlemler arası uzaklıkların ve ağırlıklı ortalama tane büyüklüklerinin aynı kaldığı tespit edildi. Bulunan bu sonuçlara göre, kristal yapının Ni depozisyon hızından etkilenmediği anlaşıldı. Manyetik tabakanın yüksek depozisyon hızlarında büyütülen filmlerin yüzey morfolojilerinde, tanecikli yapıların daha az olduğu, daha sade yüzeyler karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, ferromanyetik tabakanın depozisyon hızı arttıkça,  $M_s$  ve  $H_c$  değerinin de arttığı gözlenmiştir.

Ferromanyetik Ni tabakanın farklı kalınlıklarının etkisinin incelendiği dördüncü seride, Ni tabaka kalınlığı azaldıkça atomik Ni içeriği de azalmaktadır. Yapılan XRD analizinde, Ni tabaka kalınlığı azaldıkça Ni fcc (111) pik şiddeti azalırken, Cu fcc (111) pik şiddeti, düzlemler arası uzaklık ve örgü sabiti değerlerinin arttığı görüldü. Film yüzeyindeki tanecikli yapılar, Ni tabaka kalınlığındaki azalmaya bağlı olarak önce azalmış ve yüzey daha sade bir yapıya bürünmüş, sonrasında ise tekrar belirgin olarak görülmüştür. Ayrıca, Ni tabaka kalınlığı azaldıkça, film yüzeyinde görülen çatlaklar azalarak kaybolmuştur. Bunun yanında, Ni tabaka kalınlığı azaldıkça  $M_s$  ve  $H_c$  değerlerinin de azaldığı bulundu. Ferromanyetik tabaka kalınlığı azaldıkça, film yüzeylerinde tespit edilen çatlakların azalması, yüzeydeki stres ve deformasyondan önemli ölçüde etkilenen  $H_c$  değerlerinin de azalmasına neden olmuştur.

Yapılan çalışmanın sonucunda, incelenen depozisyon parametrelerinin Ni/Cu ince filmlerin yapısal özellikleri ve bunun sonucunda manyetik özellikleri üzerinde kontrol edilebilir değişiklikler oluşturduğu anlaşılmıştır. Bu sonuç, manyetik kayıt cihazları ve sensörler üzerine yoğunlaşan bilimsel araştırmalara katkı sağlamakla birlikte, Ni temelli çok katmanlı manyetik ince filmlerin teknolojik uygulamalardaki potansiyel kullanımını arttırabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Karaagac, O., “Optimum Doyum Manyetizasyonlu Süperparamanyetik Nanoparçacıkların Sentezi, Karakterizasyonu ve Enzim İmmobilizasyon Uygulaması”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2011).
- [2] Can, M.M., “Manyetik Nanoparçacıkların Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Ankara, (2005).
- [3] Lu, A. H., Salabas, E.L. and Schuth, F., “Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Protection, Functionalization and Application”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 46, 1222-1244, (2007).
- [4] Solin, S.A., Hines, D.R., Tsai, J.S., Pashkin, Yu. A., Chung, S.J., Goel, N., Santos, M.B., “Room temperature extraordinary magnetoresistance of nonmagnetic narrow-gap semiconductor/metal composites: application to read-head sensors for ultrahigh-density magnetic recording”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 38, no:1, 89, (2002).
- [5] Holz, M., Kronentwerth, O., Grundler, D., “Optimization of the extraordinary magnetoresistance in semiconductor-metal hybrid structures for magnetic-field sensor applications”, *Physica E*, 21, 2-4, 897, (2004).
- [6] Tanaka, T., Kobayashi, I., Takahashi, M., Wakiyama, T., “Anisotropic magnetoresistance and Hall effects for Ni-Fe-M alloy thin films”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 26, 5, 2418-2420, (1990).
- [7] Prinz G. A., “Magnetoelectronics”, *Science*, 282, 5394, 1660-1663, (1998).
- [8] Nabiyouni, G., Schwarzacher, W., Rolik, Z. and Bakonyi, I., “Giant magnetoresistance and magnetic properties of electrodeposited Ni-Co-Cu/Cu multilayers”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 253, 77-85, (2002).

- [9] Poudyal, N., “Synthesis and characterization of magnetic nanoparticles”, Master of Science in Physics, *The University of Texas at Arlington*, (2005).
- [10] Jartych E., Zurawicz J.K., Maczka E., Borc J., “Preparation of Thin Iron Films by Electrodeposition and Characterization of Their Local Magnetic Properties” *Materials Chemistry and Physics*, 72, 3, 356–359, (2001).
- [11] Jyoko Y., Kashiwabara S., Hayashi Y., Schwarzacher W., “Characterization of Electrodeposited Magnetic Multilayers”, *IEEE Transactions On Magnetics*, Volume: 34, Issue: 6, 3910–3912, (1998).
- [12] Shi, D., Aktaş, L., Pust, B. And Mikailov, F., *Nanostructured magnetic materials and their applications*, LNP 593, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 111-128, (2002).
- [13] Tracton, A. A., *Coatings Technology, Fundamentals, Testing and Processing Techniques*, USA: CRC Press Taylor & Francis Group, (2006).
- [14] Bakkaloğlu, Ö. F., “A magnetic study of sputtered Fe/Cu multilayer films,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*”, 182, 3, 324-328, (1998).
- [15] Schwarzacher, W., Attenborough, K., Michel, A., Nabiyouni, G. and Meier, J. P., “Electrodeposited nanostructures”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 165, 1-3, 23-29, (1997).
- [16] Holmberg, K., Matthews, A. “Coatings Tribology: a concept, critical aspects and future directions”, *Thin Solid Films*, 253, 1-2, 173-178, (1994).
- [17] Yılmaz, T., “Saçtırma Tekniğiyle Hazırlanan Kobalt İnce Filmlerinin Manyetik Karakterizasyonu” Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze, (2008).
- [18] Meydan, T., Kockar, H. And Williams, P. I., “Magnetic characterization of silicon -iron magnetic material produced by a novel rotating cryostat”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254-255, 91- 93, (2003).

- [19] Yi, J. B., Zhou, Y. Z., Ding, J., Chow, G. M., Dong, Z. L., White, T., Gao, X. Y., Wee, A. T. S. and Yu, X. J., “An investigation of structure, magnetic properties and Magnetoresistance of Ni films prepared by sputtering”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 284, 303-311, (2004).
- [20] Mattox, D. M., *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, Second Edition*, USA: Typeset by MPS Limited, (2010).
- [21] Kuru, H., Kockar, H., Alper, M., “Characterizations of NiCu/Cu Multilayers: Dependence of Nonmagnetic Layer Thickness”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 26, 4, 779-784, (2013).
- [22] Akkera, H. S., Singh, I., Kaur, D., “Martensitic phase transformation of magnetron sputtered nanostructured Ni-Mn-In ferromagnetic shape memory alloy thin films”, *Journal of Alloys and Compounds*, 642, 53-62, (2015).
- [23] Tong, L., Du, J., Pan, M., Lu, M., Feng, D., Chen, L., Jin, X. and Zhai, H., “Magneto-optical, optical and GMR effect in Ni-Co/Cu multilayers”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 198–199, 273–275, (1999).
- [24] Gu, Y., Zhang, D., Zhan, X., Ji, Z., Zhang, Y., “Structural and magnetic properties of RF sputtered FePt/Fe multilayers”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 297, 1, 7-16, (2006).
- [25] Çalışkan, H., “SiO<sub>2</sub> ve ZrO<sub>2</sub> İnce Filmlerin Hazırlanması ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı*, Ankara, (2009).
- [26] Wasa, K., Hayakawa, S., *Handbook Of Sputter Deposition Technology*, Osaka: Noyes Publications, (1992).
- [27] Begüm, C., “D.A. Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemi İle Tungsten Karbür İnce Filmlerin Üretimi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, İstanbul, (2012).

- [28] Bunshah, R.F., *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, Science, Technology and Applications*, New Jersey, USA: Noyes Publications, (1994).
- [29] Başkurt, E., “Silisyum Karbür İnce Filmlerin Reaktif Doğru Akım Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemi İle Üretimi ve Karakterizasyonu” Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2010).
- [30] Aghdam, H. A., “Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemi İle Kaplanmış VN Filmlerin Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, (2014).
- [31] Çayan, E., “Tungsten Karbonitrür İnce Filmlerin Reaktif Doğru Akım Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu” Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2013).
- [32] Diken S., “Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> İnce Filmlerin Manyetik ve Yapısal Özelliklerine Altın Alt Tabaka Etkisi” Yüksek Lisans Tezi, *Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Kilis, (2013).
- [33] Danışman, M., “Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemiyle Üretilen Ni-Cr Alaşımlarının Gerinim Ölçerlerde Kullanımı ve Uygulaması”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2011).
- [34] Ağırseven, O., “Silisyum Karbonitrür İnce Filmlerin Reaktif Doğru Akım Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu” Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2011).
- [35] Coşkun, İ., “DC Manyetik Alan Sıçratma Tekniği İle Üretilen Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> Nano Filmlerin Yapısal ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Kilis, (2011).

- [36] Yüzüak E., “Çok Tabakalı İnce Filmlerin Yapısal, Elektriksel, Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi ve Spintronığe Uygulanması”, Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, (2013).
- [37] Eşiyok, M., “FeCl/Cu Süperörgülerin DC Püskürtme Metoduyla Hazırlanması, Manyetik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi”, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2014).
- [38] Kittel C., *Katıhal Fiziğine Giriş*, İngilizce 6. Baskıdan çeviri, (Türkçesi: Karaoğlu B.), İstanbul: Güven Kitap Yayın Dağıtım Ltd. Şti., (1996).
- [39] Hook, J. R., Hall, H. E., *Katıhal Fiziği*, Manchester Üniversitesi Fizik Bölümü, İkinci Baskıdan Çeviri, İstanbul: Literatür Yayıncılık, Dağıtım, Pazarlama, Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., (1999).
- [40] Serway, R. A., Beichner, R. J., *Fen ve Mühendislik İçin Fizik 2, (Elektrik ve Manyetizma-Işık ve Optik)*, North Carolina State Üniversitesi, (Çeviri: Prof. Dr. Kemal Çolakoğlu), Ankara: Palme Yayıncılık, (2009).
- [41] Jiles D., *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, USA: Chapman & Hall, (1996).
- [42] Griffiths, D. J., *Elektromagnetik Teori*, (Üçüncü Baskıdan Çeviri: Prof. Dr. Basri Ünal), Ankara: Gazi Kitabevi Tic. Ltd. Şti., (2005).
- [43] Karaagaç Ö., CoCu Alaşım Filmlerin Elektrodepozisyonu, Yapısal ve Manyetik Özellikleri Üzerine Depozisyon Parametrelerinin Etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2007).
- [44] Atkinson D., “Physical Principles of Magnetic Materials, Short Course Notes”, Wolfson Centre for Magnetics Technology, *Cardiff School of Engineering University of Wales*, Cardiff, (1996).

- [45] Topçu H., “NiFe İnce Filmlerin Elektrodepozisyonu ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2003).
- [46] Karpuz, A., “Elektrodepozisyonla Büyütülen Ni-Co Filmlerinin Karakterizasyonu ve Manyetorezistans Davranışının İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2011).
- [47] Karpuz, A., “Fe-Cu Alaşım Filmlerin Büyütülmesi, Yapısal ve Manyetik Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2006).
- [48] Şahin, T., “Co ve CoFe Elektrodepozisyon Tekniği İle Büyütülmesi, Kimyasal, Yapısal ve Manyetorezistans Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2014).
- [49] Şafak Hacismailoğlu, M., “Co/Cu Süperörgülerin Elektrokimyasal Olarak Üretilmesi ve Yapısal ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Bursa, (2010).
- [50] Özel, F., “Solvotermal Yöntemle Elde Edilen Demir Oleat Kullanarak Süperparamanyetik Demir Oksit Nanoparçacıklarının Sentezi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2009).
- [51] Cullity B. D., Stock S. R., *Elements of X-Ray Diffraction (Third Edition)*, New Jersey: Pearson Prentice Hall, (2001).
- [52] Alper M., “Electrodeposited Magnetic Superlattices”, Ph. D. Thesis, University of Bristol, Bristol, (1995).
- [53] Özergin E., “Elektrodepozisyon Tekniği İle Büyütülen CoFeCu Filmlerin Yapısal, Manyetik ve Manyetodirenç Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2008).



- [54] Tekgöl, A., “Co/Cu Çok Katmanlı Nanoyapılar Üzerine Fe İçeriğinin Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Bursa, (2010).
- [55] Kuru, H., “Elektrodepozisyonla Sentezlenen NiFe Alaşım ve NiFeCu/Cu Süperörgülerin Yapısal, Manyetik ve Magnetotransport Karakterizasyonu”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2009).
- [56] Alper M., “ Electrodeposition of Multilayered Nanostructures ”, *Nanostructured Magnetic Materials and Their Applications*, 593, 111-128, (2002).
- [57] Vincenzo A., Cavallotti P.L., “Growth modes of electrodeposited cobalt”, *Electrochimica Acta*, 49, 24, 4079-4089, (2004).
- [58] Karpuz, A., Kockar, H., Esiyok, M., “Sputtered FeCl/Cu multilayer thin films: effect of different thicknesses of Cu layer”, *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 8, 11-12, 1100-1103, (2014).
- [59] Karpuz, A., Kockar, H., Alper, M., Karaagac, O. ve Hacıismailoğlu, M., “Electrdeposited Ni-Co films from electrolytes with different Co contents”, *Applied Surface Science*, 258, 8, 4005-4010, (2012).
- [60] Karpuz, A., Kockar, H., Alper, M., “Effect of film thickness on properties of electrodeposited Ni-Co films”, *Applied Surface Science*, 258, 12, 5046,5051, (2012).
- [61] Karpuz, A., Kockar, H., Uckun, M., Esiyok, M., “Characterizations of FeCl/Cu superlattices sputtered at low and high deposition rates of ferromagnetic layer”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 373, 124-127, (2015).
- [62] Kuru, H., Kockar, H., Alper M., Hacıismailoğlu, M., “Relation between ferromagnetic layer thickness (NiCu) and properties of NiCu/Cu multilayers”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26, 7, 5014-5021, (2015).
- [63] Köçkar, H., “Magnetic Material Production Using A Novel Rotating Crystot and Their Magnetic And Structural Analysis” , Degree of Doctor of Philosophy, *University of Wales Cardiff* , Cardiff-UK, (1998).