

KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI BİRİKTİRME HIZLARI VE KALINLIKLARA SAHİP Co/Cu
ÇOK KATMANLI FİMLERDE MANYETİK KARAKTERİN KRİSTAL YAPI
VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNE BAĞIMLILIĞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Leman Gökçen GERELEGİZ

Fizik Anabilim Dalı
Fen Bilimleri Enstitüsü

HAZİRAN 2024

KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI BİRİKTİRME HIZLARI VE KALINLIKLARA SAHİP Co/Cu
ÇOK KATMANLI FİMLERDE MANYETİK KARAKTERİN KRİSTAL YAPI
VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNE BAĞIMLILIĞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Leman Gökçen GERELEGİZ
(210881101)

Fizik Anabilim Dalı
Fen Bilimleri Enstitüsü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali KARPUZ

HAZİRAN 2024



BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

(Leman Gökçen Gerelegiz)





Eşime ve oğluma,



ÖNSÖZ

Yüksek Lisans çalışmalarım boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana destek olan değerli danışmanım Prof. Dr. Ali KARPUZ'a çok teşekkür ederim.

Filmlerin üretimi sürecinde laboratuvar çalışmalarındaki katkılarından dolayı Balıkesir Üniversitesi (BAÜN), Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Anabilim Dalında görev yapan Prof. Dr. Hakan KÖÇKAR'a teşekkür ederim.

Filmlerin üretimi sürecinde laboratuvar çalışmalarındaki katkılarından dolayı Balıkesir Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Anabilim Dalında Doktora öğrencisi olan Nadir KAPLAN'a ve VSM ölçümlerinin alınmasında ki katkılarından dolayı Prof. Dr. Öznur KARAAĞAÇ'a teşekkür ederim.

Bu tez kapsamında incelenen filmlerin XRD, EDX analizleri, SEM görüntüleri ve AFM görüntüleri için Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne (KMÜ BİLTEM) teşekkür ederim.

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

HAZİRAN 2024

Leman Gökçen Gerelegiz
(Öğretmen)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
KISALTMALAR.....	xiii
SEMBOLLER.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxii
ABSTRACT.....	xxiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 İnce Film Kaplama Yöntemleri.....	3
2.1.1 Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi.....	3
2.1.1.1 Püskürtme Tekniği ile Biriktirme Yöntemi.....	3
2.2 Kristal Örgü Sistemleri.....	4
2.3 Manyetizmanın Temel Kavramları.....	5
2.3.1 Manyetik Özelliklerine Göre Malzemeler.....	8
2.3.1.1 Diyamanyetizma.....	8
2.3.1.2 Paramanyetizma.....	9
2.3.1.3 Ferromanyetizma.....	9
2.3.2 Mıknatıslanma (Histeresiz) Eğrisi.....	10
3. MATERYAL ve METOT.....	12
3.1 Püskürtme Sistemi.....	12
3.2 Püskürtme Sistemi ile Üretim.....	18
3.2.1 Toplam Kalınlıkları Farklı Olan Filmlerin Üretimi.....	22
3.2.2 Ferromanyetik Co Katmanın Farklı Biriktirme Hızları Dikkate Alınarak Yapılan Filmlerin Üretimi.....	22
3.3 Enerji Ayrımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX) Tekniği.....	23
3.4 X-ışınları Kırınımı (XRD) Tekniği.....	23
3.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	25
3.6 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	26
3.7 Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM).....	27
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	28
4.1 Co/Cu Çok Katmanlı Manyetik İnce Filmlerde Toplam Film Kalınlığının Etkisinin İncelenmesi.....	29
4.1.1 Elementel Analiz.....	29
4.1.2 Kristal Yapı Analizi.....	30
4.1.3 Yüzey Morfolojik Analizi.....	31
4.1.4 Atomik Kuvvet Mikroskobu Analizi.....	33
4.1.5 Manyetik Analiz.....	36

4.2 Co/Cu Çok Katmanlı Manyetik İnce Filmlerde Ferromanyetik Katmanın Farklı Biriktirme Hızlarının Etkisinin İncelenmesi.....	38
4.2.1 Elementel Analiz.....	39
4.2.2 Kristal Yapı Analizi.....	39
4.2.3 Yüzey Morfolojik Analizi.....	41
4.2.4 Atomik Kuvvet Mikroskobu Analizi.....	43
4.2.5 Manyetik Analiz.....	45
5. SONUÇ.....	49
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	55



KISALTMALAR

AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
XRD	: X-ışınları Kırınımı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
VSM	: Titreşimli Numune Manyetometresi
EDX	: Enerji Ayırmalı X-ışını Spektroskopisi
FBB	: Fiziksel Buhar Biriktirme
fcc	: Yüz Merkezli Kübik
sc	: Basit Kübik
bcc	: Cisim Merkezli Kübik
sccm	: Dakikadaki Standart Santimetre-küp



SEMBOLLER

Co	: Kobalt
Cu	: Bakır
DC	: Doğru akım
M	: Mıknatıslanma vektörü
v	: Elektronun hızı
H	: Manyetik alan
K	: Kelvin
m_{spin}	: Elektronun spinin manyetik momenti
m	: Manyetik moment
B	: Manyetik akı yoğunluğu
B_0	: Uygulanan dış alan
B_m	: Maddenin mıknatıslanması
χ	: Manyetik alınganlık
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
T_c	: Curie sıcaklığı
T	: Periyot
T	: Sıcaklık
i	: Akım
q_e	: Elektronun yükü
ω	: Açısal hız
L	: Açısal momentum
h	: Planck sabiti
M_s	: Doyum manyetizasyonu
M_r	: Kalıcı mıknatıslanma
H_c	: Koersivite
Å	: Angstrom



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Farklı kalınlıklara sahip ince filmlerin üretiminde kullanılan parametreleri.....	29
Çizelge 4.2 : Co katmanının farklı biriktirme hızlarında üretimde kullanılan parametreleri.....	29
Çizelge 4.3 : Toplam kalınlık etkisinin incelendiği Co/Cu filmlerinin elemental analiz sonuçları.....	30
Çizelge 4.4 : Toplam kalınlık etkisinin incelendiği Co/Cu filmlerinin manyetik analiz sonuçları.....	38
Çizelge 4.5 : Co/Cu manyetik ince filmlerinde Co katmanının farklı biriktirme hızlarındaki etkisinin incelendiği elementel analiz sonuçları.....	39
Çizelge 4.6 : Co/Cu manyetik filmlerinde Co katmanının farklı biriktirme hızlarının etkisinin incelendiği manyetik analiz ölçüm sonuçları.....	48



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 2.1** : Kübik sistemde bazı örgü türleri (Çölmekçi, 2016).....5
- Şekil 2.2** : Çekirdek etrafında çembersel yörüngede dolanan elektronun açısall momentleri (L) ve manyetik momentleri (m). (Her ikisi de sayfa düzlemine diktir).....7
- Şekil 2.3** : Tipik bir ferromanyetik malzemenin histeresiz eğrisi (Çölmekçi, 2016)..11
- Şekil 3.1** : Film üretiminde kullanılan püskürtme sisteminin kontrol paneli.....13
- Şekil 3.2** : Vakum odasının basıncını düşürmeye yardımcı olan rotary pompa.....14
- Şekil 3.3** : Su soğutmalı ve vakum odasına doğrudan bağlı olan turbo moleküler pompanın resmi.....15
- Şekil 3.4** : Vakum odasının dış görünümü (a) ve vakum odasının kapağı(b).....16
- Şekil 3.5** : Vakum odası ve vakum odasında bulunan magnetronlar (Magnetronun üst kapağı açık (kaldırılmış) haldedir).....17
- Şekil 3.6** : BAÜN Fen Edebiyat Fakültesinde bulunan püskürtme sistemi.....18
- Şekil 3.7** : Zımpara makinesi RotoPol-35 (Struers) (solda) ve alt tabakanın sterilizasyonu için kullanılan ultrasonik banyo (ISOLAB) (sağda).....19
- Şekil 3.8** : Üretim için hazırlanmış olan alt tabakanın numune tutucuya yerleştirilmiş hali.....19
- Şekil 3.9** : Püskürtme tekniği ile asetat alt tabaka üzerine üretilen ince film.....21
- Şekil 3.10**: KMÜ BİLTEM'de bulunan XRD cihazı (Bruker, D8 Advance with Davinci Design for XRD) (a) X-ışını kaynağı ve detektörün bulunduğu iç kabinin yakından görünümü, (b) Cihazın dıştan görünümü.....24
- Şekil 3.11** : KMÜ BİLTEM'de bulunan SEM cihazı (HITACHI SU5000).....25
- Şekil 3.12** : KMÜ BİLTEM'de bulunan AFM cihazı (NANOMAGNETIC INS., hpAFM).....26
- Şekil 3.13** : BAÜN Fen Edebiyat Fakültesinde bulunan VSM cihazı (ADE TECHNOLOGIES, DMSEV9).....27
- Şekil 4.1** : Toplam kalınlık etkisinin incelendiği Co/Cu filmlerinin ve kullanılan alt tabakanın XRD desenleri.....31
- Şekil 4.2** : Co/Cu çok katmanlı manyetik ince filmlerin farklı toplam film kalınlıklarının incelendiği SEM görüntüleri a) 120 nm, b) 140 nm ve c) 160 nm.....33
- Şekil 4.3** : Kullanılan alt tabakanın AFM ile elde edilen görüntüsü.....34
- Şekil 4.4** : Toplam kalınlıkları (a) 120 nm, (b) 140 nm ve (c) 160 nm olan filmlerin yüzeylerinin AFM kullanılarak elde edilen üç boyutlu ve iki boyutlu görüntüleri.....36
- Şekil 4.5** : Toplam kalınlık etkisinin incelendiği Co/Cu filmlerin histeresiz eğrileri. a) ± 5 kOe arasında ki manyetik alan şiddetinde çizdirilen b) ± 200 Oe arasında çizdirilen.....37
- Şekil 4.6** : Co/Cu filmlerinde H_C ve M_S değerlerinin toplam film kalınlığına göre değişimi.....38

- Şekil 4.7** : Alt tabakanın ve ferromanyetik Co katmanının farklı biriktirme hızlarının etkisinin incelendiği Co/Cu filmlerinin XRD desenleri.....41
- Şekil 4.8** : Ferromanyetik Co katmanının farklı biriktirme hızlarının etkisinin incelendiği Co/Cu filmlerin SEM görüntüleri a) 0.02 nm/s, b) 0.05 nm/s, c) 0.08 nm/s.....43
- Şekil 4.9** : Farklı biriktirme hızlarında, (a) 0.02, (b) 0.05 ve (c) 0.08 nm/s, üretilen Co/Cu filmlerin AFM kullanılarak elde edilen yüzey görüntüleri.....45
- Şekil 4.10** : Co/Cu manyetik Co katmanının farklı biriktirme hızının etkisinin incelendiği histeresiz eğrileri. a) ± 5 kOe arasında ki manyetik alan şiddetinde çizdirilen b) ± 200 Oe arasında çizdirilen.....46
- Şekil 4.11** : Co katmanının farklı biriktirme hızı dikkate alınarak üretilen Co/Cu filmlerinde fcc yapının (111) düzlemine ait kristalit boyutu ile H_c değerlerinin değişim grafiği.....47
- Şekil 4.12** : Co katmanının farklı biriktirme hızı dikkate alınarak üretilen Co/Cu filmlerinde M_s ve H_c değerlerinin değişimi.....48





ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI BİRİKTİRME HIZLARI VE KALINLIKLARA SAHİP Co/Cu ÇOK KATMANLI FİLMLERDE MANYETİK KARAKTERİN KRİSTAL YAPI VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNE BAĞIMLILIĞI

Leman Gökçen Gerelegiz

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali KARPUZ

Haziran, 2024, 55 sayfa

Co/Cu çok katmanlı manyetik ince filmler asetat alt tabaka üzerine doğru akım püskürtme tekniği ile iki ayrı seri olarak üretildi. İlk seride, ikili katman sayısı düzenli olarak arttırılarak toplam film kalınlığı, ikinci seride ise Co katmanının biriktirme hızı düzenli olarak değiştirildi. Sistematik olarak değiştirilen bu parametrelerin filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri üzerine etkisi araştırıldı. Filmlerin karakterizasyonunda enerji ayırmalı X-ışını spektroskopisi, X-ışını kırınımı tekniği, taramalı elektron mikroskobu, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve titreşimli numune manyetometresi kullanıldı. İlk seride, toplam kalınlığı 120, 140 ve 160 nm olan filmler üretildi. Toplam film kalınlığı arttıkça Co ve Cu atomik içeriğinin hemen hemen aynı değerlerde kaldığı tespit edildi. AFM görüntüleri incelendiğinde, film kalınlığının artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüş, koersivite (H_C) değerindeki artış, yüzey pürüzlülüğünün artması ile ilişkilendirilmiştir. Toplam film kalınlığı arttıkça atomik Co içeriğinin belirgin miktarda değişmemesine bağlı olarak doyum manyetizasyonunun (M_S) yaklaşık olarak aynı kaldığı görüldü. İkinci seride, Co katmanının biriktirme hızı arttıkça yüz merkezli kübik yapının (111) düzlemine ait piklerin şiddetinin ve kristalit boyutlarının azaldığı tespit edilmiştir. Co katmanının biriktirme hızının arttırılmasıyla birlikte Co atomik içeriğinin kademeli olarak arttığı, Co miktarının artması ile M_S değerinin de arttığı tespit edildi. Diğer taraftan, Cu içeriğinin azalması ile H_C değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Co katmanının biriktirme hızındaki artış ile filmlerin yüzeyindeki taneciklerin boyutlarında az da olsa küçülme gözlenmiştir. Ayrıca, biriktirme hızı arttıkça film yüzeylerinin daha pürüzsüz olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, Co/Cu filmlerin yapısal ve manyetik özelliklerinin, filmlerin farklı toplam kalınlığından ve Co katmanının biriktirme hızının değişiminden etkilendiği bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Co/Cu ince filmler, çok katmanlı yapılar, püskürtme tekniği, yapısal ve manyetik özellikler



ABSTRACT

Ms. Thesis

DEPENDENCE OF MAGNETIC CHARACTER ON CRYSTAL STRUCTURE AND SURFACE PROPERTIES IN Co/Cu MULTILAYER FILMS WITH DIFFERENT DEPOSITION RATES AND THICKNESSES

Leman Gökçen Gerelegiz

Karamanoğlu Mehmetbey University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ali KARPUZ

June, 2024, 55 pages

Co/Cu multilayer magnetic thin films were produced in two separate series by Direct Current sputtering technique on acetate substrate. In the first series, the total film thickness was increased regularly by increasing the number of bilayers. In the second series, the deposition rate of the Co layer was regularly changed. The effect of these systematically changed parameters on the structural and magnetic properties of the films was investigated. An energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX), an X-ray diffraction technique, a scanning electron microscope, an atomic force microscope (AFM) and a vibrating sample magnetometer were used to characterize the films. In the first series, films with total thickness of 120, 140 and 160 nm were produced. As the total film thickness increased, the atomic contents of Co and Cu remained at almost the same values. When AFM images were examined, it was seen that surface roughness increased with increasing film thickness, and the increase in coercivity (H_C) value was associated with the increase in surface roughness. It was observed that as the total film thickness increased, the saturation magnetization (M_S) remained approximately the same because the atomic Co content did not change significantly. In the second series, it was detected that as the deposition rate of the Co layer increased, the intensity of the peaks belonging to the (111) plane of the face-centered cubic structure and crystallite sizes of (111) plane decreased. It was found that as the deposition rate of the Co layer increased, the Co atomic content gradually increased, and the M_S value also increased with the increase in the content of Co. On the other hand, the H_C value decreased when the Cu content decreased. With the increase in the deposition rate of the Co layer, a slight decrease was observed in the size of the particles on the surface of the films. Additionally, it was observed that the film surfaces became smoother as the deposition rate increased. It was found that the structural and magnetic properties of Co/Cu films were affected by the different total thicknesses of the films and the change in the deposition rate of the Co layer.

Keywords: Co/Cu thin films, multilayer structures, sputtering technique, structural and magnetic properties



1. GİRİŞ

Son yıllarda, bilişim sektörünün hızla gelişmesi yüksek kapasiteli kaliteli belleklere, kayıt araçlarına ve bununla ilgili donanımların üretimine olan ilgi ve ihtiyaç arttırmıştır (Çöktüren, 2008). Bilişim teknolojisi alandaki arayışlar nano teknolojinin gelişmesiyle bu ihtiyaçları karşılayabilir hale gelmiştir. Hacimli malzemelerde gözlemlenmeyen elektronik, optik ve manyetik bazı üstün fiziksel özellikler ince film malzemelerde ortaya çıktığından günümüzde sıklıkla tercih edilmektedir (Kaya, 2017). Çünkü, bir malzemenin nano boyutta sahip olduğu üstün özellikleri aynı malzemenin makroskobik boyutlarındakinden oldukça farklıdır (Karaağaç, 2011), (Enönlü, 2017). Manyetik malzemeler nano boyuta indirildiğinde ise sıra dışı özgün manyetik özellikler sergilemektedir. Manyetik nano malzemelerin kullanıldığı teknolojilerde, yüksek kapasite, yüksek verim ve düşük boyut arzu edildiğinden nano manyetik malzemelere ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır (Özkaya, 2015), (Çoşkun, 2011), (Özdemir, 2022). Bu ihtiyaçlar doğrultusunda, yapılan çalışmalar nano manyetik malzemelerin okuma-yazma kafaları, manyetik kayıt cihazları ve manyetik sensör uygulamalarında oldukça başarılı olduğunu göstermiş ve anahtar rol oynamıştır (Vavassori ve diğerleri, 2001), (Karpuz, 2011). (Ağırseven, 2011). Bunların yanı sıra, Tekgül ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada, özellikle, Co/Cu çok katmanlı ince filmlerin manyetik sensör uygulamaları için anahtar öneme sahip olduğu, ferromanyetik ve diyamanyetik katmanların bir araya getirilerek elde edilen çok katmanlı filmlerde anti ferromanyetik özelliklerin ortaya çıkabileceği vurgulanmıştır (Tekgül ve diğerleri, 2017).

İnce film üretim yöntemleri için genellikle elektrokimyasal depolama, sol-jel yöntemi, spin kaplama, kimyasal buhar depolama, manyetik alanda püskürtme gibi teknikler tercih edilmektedir (Özdemir, 2019). Bu teknikler arasında magnetron püskürtme yöntemi, yüksek biriktirme hızlarına ulaşabilmesi ve kaliteli filmlerin elde edilebilmesi nedeniyle oldukça avantajlıdır (Das ve diğerleri, 2021), (Duru, 2011). DC magnetron püskürtme tekniği, değiştirilebilir biriktirme hızı, filmlerin alt tabaka yüzeyine güçlü tutunması ve üretim aşamasındaki değişkenlerin kontrol edilebilir

olması ile ön plana çıkan bir tekniktir (Şentürk, 2019). Püskürtme tekniği ile üretilen çok katmanlı filmlerin fiziksel özellikleri, üretim koşullarına ve parametrelerine sıkıca bağlıdır. Katman kalınlığı, alt tabakanın cinsi, sıcaklık, filmin toplam kalınlığı, katmanların biriktirme hızları gibi parametreler değiştirilerek üretilen manyetik ince filmlerin, yapısal ve manyetik özellikleri birçok deneysel çalışmada incelenmiştir (Boeglin ve diğerleri, 2009), (Rajasekaran ve diğerleri, 2015), (Liu ve diğerleri, 2023). Bu durum, teknolojik uygulamalarında arzu edilen ince film özelliklerinin geliştirilmesine olanak sağlar (Kaplan, 2019).

Önceki yıllarda, Co/Cu çok katmanlı filmlerinin elektrodepozisyon tekniğiyle sentez ve karakterizasyonu üzerine çok fazla çalışma yapılmıştır (Pattanaik ve diğerleri, 2003), (Qunxian ve diğerleri, 2005), (Şafak, 2005). Gerekli literatür taraması yapıldığında, Co/Cu çok katmanlı ince filmlerin püskürtme tekniğiyle üretildiği bilimsel çalışmaların sayısındaki azlık dikkat çekmektedir. Bu sebeple, Co/Cu çok katmanlı ince filmleri DC magnetron püskürtme tekniğiyle sentezlenmesi ve karakterizasyonu bu tez çalışmasının konusu olmuştur.

Bu çalışmada, DC magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak toplam kalınlıkları farklı olan Co/Cu ince filmleri ile Co katmanının farklı biriktirme hızları dikkate alınarak Co/Cu çok katmanlı filmleri üretildi ve bu filmlerin elementel, yapısal ve manyetik analizleri yapıldı. Ayrıca, üretilen Co/Cu ince filmlerin, manyetik film teknolojisindeki uygulama alanlarına uygunluğu araştırıldı. Çalışma beş ana bölüme oluşmaktadır. Birinci bölüm çalışma hakkındaki genel bilgilerin verildiği “Giriş” bölümüdür. İkinci bölüm, yapılan çalışmanın bilimsel temelini oluşturan teorik bilgilerin verildiği “Kuramsal Temeller ve Kaynak Araştırması” bölümüdür. Üçüncü bölüm, üretim öncesi ve sonrası aşamalar, kullanılan püskürtme sistemi ile malzemelerin karakterizasyonunda başvurulan analiz tekniklerinin anlatıldığı “Materyal ve Metot” bölümüdür. Dördüncü bölüm, yapılan analiz verilerinin açıklandığı ve grafik ve çizelgeler yardımıyla tartışıldığı “Bulgular ve Tartışma” bölümüdür. Beşinci bölüm ise, çalışma sonuçlarının vurgulandığı “Sonuç” bölümüdür.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde film kaplama yöntemleri, kristal yapı ve manyetizma hakkında bazı temel bilgiler verilmiştir.

2.1 İnce Film Kaplama Yöntemleri

Kullanım amaçları ve araştırmaya konu olan özelliklerine göre teknolojiye birçok ince film üretme yöntemleri vardır. Manyetik ince film üretme yöntemleri içerisinde en çok tercih edilenler arasında buhar fazda yapılan, fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme yer almaktadır (Çoşkun, 2013), (Şentürk, 2019).

2.1.1 Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi

Bu yöntem, buharlaştırma ve püskürtme teknikleri olarak ikiye ayrılır (Bayraktaroğlu, 2007). Bilimsel ve teknolojik çalışmalara konu olan birçok teknolojik malzeme çeşidinin üretiminde püskürtme ve buharlaştırma tekniği yaygın olarak kullanılan tekniklerdir (Pasa ve diğerleri, 2001). Bu yöntemler arasında sanayi alanında uygulanabilirliği ve ekonomik olması nedeniyle püskürtme tekniği ön plana çıkmıştır (Satılmış, 2014). Püskürtme yönteminin bazı avantajları şu şekilde sıralanabilir; yüksek biriktirme hızlarında film oluşumuna imkân sağlaması, kaplamanın yüzeye çok iyi yapışması, vakum ortamında üretilerek yüksek oranda kalite ve saflığa sahip olması, istenilen kalınlıkta ince film üretilmesi gibi özellikler sayılabilir (Dırbalı, 2011).

2.1.1.1 Püskürtme Tekniği ile Biriktirme Yöntemi

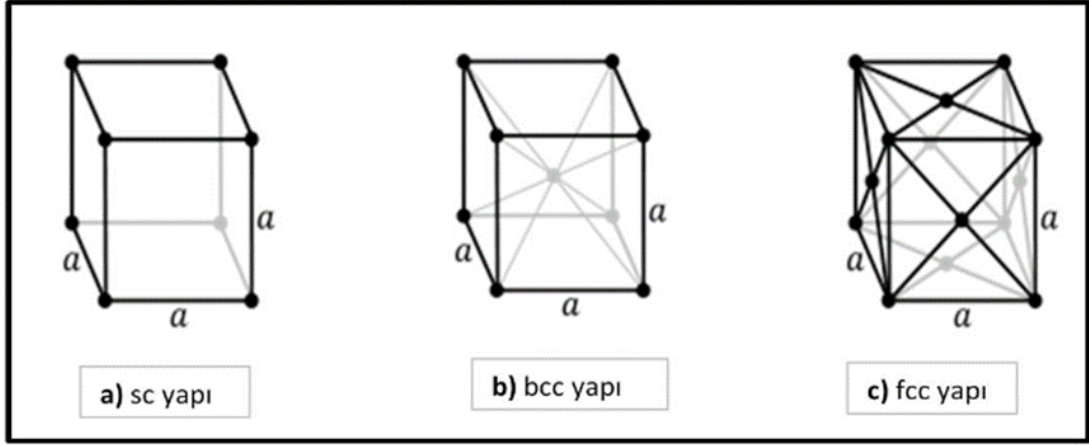
Püskürtme tekniğinde, vakum ortamında bulunan katı haldeki hedef malzemenin üzerine DC güç kaynağı ile yeterli enerji seviyesinde iyon demeti veya iyonize olmuş Ar gazının hızlandırılarak bombardıman edilmesiyle hedef malzemeye momentum aktarılır ve hedef malzemedeki atomlar alt tabakadan püskürtülür (Tavşanoğlu, 2001), (Kaplan, 2019). Püskürtülen atomlar buhar fazında alt tabakanın üzerine çarpar ve ince film oluşur (Kaya, 2005), (Coşkun, 2011). Hedef malzemeye yakın olacak şekilde

hedef malzemenin alt kısmına yerleştirilen kalıcı mıknatıslar manyetik alan oluşturur. Manyetik alanın etkisiyle ikincil elektronlar sürekli plazma ortamı oluşturur ve hedef malzemeye tekrar çarparak atom koparır (Tok, 2019). Hedef malzemedan sökülen atomlar nötr olduğu için kalıcı mıknatısın etkisiyle sapmazlar (Diken, 2013).

2.2 Kristal Örgü Sistemleri

X-ışınlarının kırınım olayının keşfi ile katı hâl fiziği ortaya çıktı ve böylece katıların kristal özelliklerini açıklayan basit modeller ortaya kondu. İdeal bir kristalin özdeş yapı birimleri, uzayda sonsuz tekrarı ile elde edilir. Bir katı malzemenin atom gruplarının periyodik yapı içinde olmasına kristal, rastgele olmasına amorf katı denir (Dikici, 2013).

Hücre türlerine göre tüm kristallerin sınıflandırılabilceği triklinik, monoklinik, ortorombik, tetragonal, kübik, trigonal ve hegzagonal olmak üzere yedi farklı kristal sistemi vardır (Cullity, 1956). Gerçek kristal yapıların, her noktanın aynı çevreye sahip olacak şekilde geometrik ve tekrarlayan bir şekilde uzayda dağılmış üç boyutlu bir nokta dizisinden ortaya çıktığı kabul edilir (Ohring, 2002). Bu noktaları, üç boyutlu uzayda düzenlemenin örgü öteleme vektörlerinin öteleme simetrisi ve kristal yapının dönme simetrisiyle birlikte on dört yolu vardır (Ohring, 2002). Basit kübik (sc), birim hücrenin köşelerindeki örgü noktası bu köşelere komşu sekiz hücre tarafından ortaklaşa kullanılarak birim hücre başına düşen örgü noktası 1 tanedir. Cisim merkezli örgü (bcc), birim hücrenin köşelerine ek olarak merkezinde de bir örgü noktasına sahip olduğu için hücre başına toplam 2 örgü noktası vardır. Yüz merkezli kübik (fcc) yapı, birim hücrenin köşelerine ek olarak yüzeylerinin merkezinde de 1 tane örgü noktasına sahiptir. Yüzeylerindeki örgü noktaları iki birim hücre tarafında ortaklaşa kullanıldığından 4 örgü noktasına sahiptir (Dikici, 2013). Şekil 2.1' de kübik sistemlerdeki bu yapılar temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Kübik sistemde bazı örgü türleri (Çölmekçi, 2016).

2.3 Manyetizmanın Temel Kavramları

Bir elektron hem yörünge hareketi hem de spin hareketinden kaynaklanan manyetik momente sahiptir (Cullity ve Graham, 2009). Klasik fiziğe göre bir elektronun çekirdek etrafındaki yörünge hareketi direnci olmayan bir tel örgüdeki akım hareketine benzetilir (Cullity ve Graham, 2009). Bir atomun manyetik özelliğini, elektron çiftlerinin yörünge hareketi belirler. Elektron çiftlerinin biri kapalı yörüngede saat yönünde dönerken, diğer elektron saat yönünün tersi yönde hareket eder. Aynı yörüngede zıt yönde dönen elektron çiftlerinin manyetik momentleri birbirini sıfırlar. Fakat çiftlenmemiş tek kalan bir elektronun sahip olduğu manyetik moment, atomun manyetik momentini oluşturur.

Çekirdek etrafında sabit v hızıyla r yarıçaplı çembersel yörüngede dolanan elektron Şekil 2.2' de gösterilmiştir. Elektron, $2\pi r$ (çembersel çemberin uzunluğu) bir uzunluğu T sürede aldığı için çizgisel sürati:

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

Hareket eden bu elektronun oluşturduğu i akımı; (q_e) elektronun yükünün çemberin çevresindeki bir turu dolanması için geçen süreye bölümüne eşittir.

$$i = q_e / T \quad (2.2)$$

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

$$W = \frac{V}{r} \quad (2.4)$$

bağlantıları kullanılarak i akımı:

$$i = q_e / T = q_e v / 2\pi r \quad (2.5)$$

ifadesi elde edilir (Yalçın, 2007).

Yörüngede dolanan elektronun oluşturduğu akım ilmeğinin manyetik momenti:

$$m_{\text{yörünge}} = iA \quad (2.6)$$

A ile ifade edilen yörünge bölgesinin alanıdır ($A = \pi r^2$). Manyetik moment:

$$m_{\text{yörünge}} = (\pi r^2) q_e v / 2\pi r = \frac{1}{2} q_e v r \quad (2.7)$$

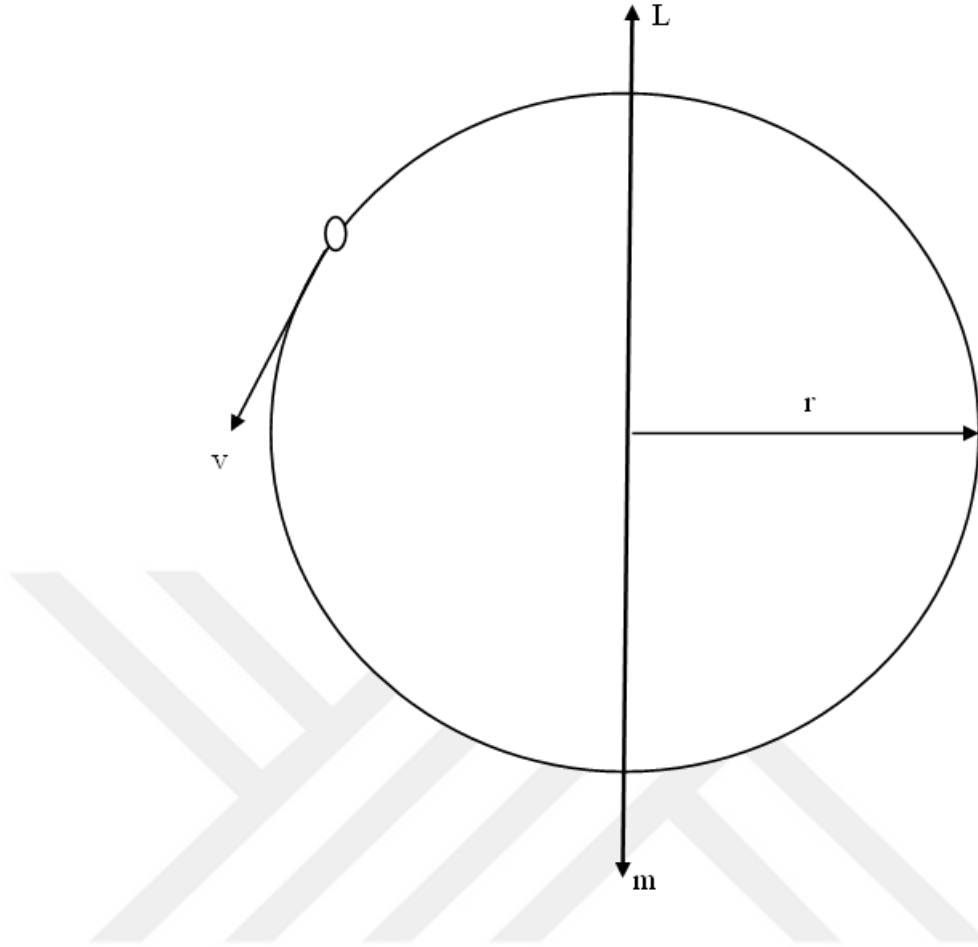
çembersel yörüngede dolanan elektronun açısal momentum büyüklüğü:

$$L = m_e v r \quad (2.8)$$

denklemleri ile ifade edilir. Elektronun, çekirdek etrafında çembersel yörüngede dolanmasından kaynaklanan manyetik momenti:

$$m_{\text{yörünge}} = L q_e / 2m_e \quad (2.9)$$

elektronun kütlesi m_e ile gösterilmiştir. Elektronun manyetik momenti, elektronun yörüngesel açısal momenti ile doğru orantılıdır. Elektron negatif yüklü olduğu için m ve L vektörleri zıt yönlüdür. Her iki vektör de yörünge düzlemine diktir.



Şekil 2.2 : Çekirdek etrafında çembersel yörüngede dolanan elektronun açısal momentini (L) ve manyetik momentini (m). (Her ikisi de sayfa düzlemine diktir).

Kuantum fiziğinin temel sonucu, Bohr atom modeline göre yörüngesel açısal momentumun kesikli olması ve $\frac{h}{2\pi}$ ' nin tam katı olması gerektiğidir. Elektronun yörüngesel manyetik momentinin dışında, elektronun spin özelliğinden kaynaklanan manyetik momentini vardır. Kuantum teorisinin öngördüğü spin açısal momentumun büyüklüğü S ile gösterilir.

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

Planck sabiti h ile gösterilmiştir. Elektronun yükü q_e ile gösterilir. Elektronun spinin oluşturduğu manyetik moment:

$$m_{\text{spin}} = q_e h / 4\pi m_e \quad (2.11)$$

şeklinde ifade edilir. Bir maddenin manyetik momenti, elektronların yörünge ve spin manyetik momentin toplamından kaynaklanır.

Bir malzemenin manyetik özellikleri mıknatıslanma vektörü (M) ile belirlenir. M' nin şiddeti, net manyetik momentinin (m) maddenin hacmine (V) oranına eşittir.

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

Bir maddedeki toplam manyetik akı yoğunluğu B, hem uygulanan dış alana (B_o) ve hem de maddenin mıknatıslanmasına (B_m) bağlıdır.

$$B = B_o + B_m \quad (2.13)$$

Dış bir manyetik alana bırakılan paramanyetik ve ferromanyetik maddelerin mıknatıslanma vektörü; manyetik alan şiddeti (H), manyetik alınganlık (χ)' a bağlıdır. Paramanyetik maddelerde, χ pozitif olup M, H ile aynı yönlüdür. Diyamanyetik maddelerde, χ negatif olup M, H ile ters yönlüdür.

$$M = \chi H \quad (2.14)$$

Bu denklem ferromanyetik maddeler için geçerli değildir (Jiles, 1991). Boşluğun manyetik geçirgenliği μ_o ile gösterilirken manyetik geçirgenlik μ ile ifade edilir. Dış alanda bulunan bir maddenin toplam manyetik indüksiyonu:

$$B = \mu_o(H+M) = \mu_o(H+\chi H) = \mu_o(1+\chi) H \quad (2.15)$$

şeklinde gösterilir (Aydoğan, 2011).

2.3.1 Manyetik Özelliklerine Göre Malzemeler

Bu bölümde, manyetik özelliklerine göre diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik maddelerden bahsedilecektir.

2.3.1.1 Diyamanyetizma

Her çeşit element diyamanyetik özelliğe sahiptir (Dikici, 2013), (Cullity ve Graham, 2009). Molekül oluşum sürecinde diyamanyetik maddelerin elektron kabukları doludur ve elektronların spin yönleri zıt olduğu için net manyetik moment sıfırdır (Jiles, 1991), (Cullity ve Graham, 2009). Diyamanyetik malzemelerdeki elektronlar, sadece dışarıdan bir manyetik alan uygulandığında, dış manyetik alanla ters yönde bir manyetik alan meydana getirir. Lenz kanunu göre, bir yüzeyden geçen manyetik akı değiştiğinde cisim bu değişime karşı olacak şekilde manyetik akı meydana getirir. Bu

durum, diyamanyetik maddelerin mıknatıs tarafından zayıfça itilmesine neden olur. Diyamanyetik maddelerin alınganlıkları negatif olup, sıcaklıktan bağımsızdır.

2.3.1.2 Paramanyetizma

Dışarıdan bir manyetik alan uygulanmadığı zaman atomların manyetik momentleri gelişigüzel yönelmiş ve birbirlerinin etkisini yok etmiş durumdadır. Böyle bir durumda numunenin mıknatıslanması sıfırdır (Cullity ve Graham, 2009). Dış manyetik alan uygulandığında, atomların manyetik momentleri dışarıdan uygulanan manyetik alan yönüne doğru döner ve alan yönünde büyük bir moment kazanır (Aydoğan, 2011).

Pierre Curie tarafından yapılan çalışmaya göre, diyamanyetik maddelerin alınganlıklarının sıcaklıktan bağımsız olduğu, ancak paramanyetik maddelerin alınganlıklarının mutlak sıcaklıkla ters orantılı olduğu Cruie-Weiss yasası ile açıklanmıştır (Cullity ve Graham, 2009). Paramanyetik maddelerin mıknatıslanması, dış manyetik alan ile doğru orantılıdır (Aydoğan, 2011). Uygulanan yüksek manyetik alanda ve düşük sıcaklık değerlerinde paramanyetik maddelerin mıknatıslanması maksimum olur (Çölmekçi, 2016).

Paramanyetik bir maddenin sıcaklığı, T_c (Cruie sıcaklığı) olan kritik sıcaklığın altında iken kalıcı mıknatıslanma özelliğini kazanır ve ferromanyetik olur (Jiles, 1991), (Cullity ve Graham, 2009). Cruie sıcaklığı üstünde ısı enerjisi, dipol momentlerin gelişigüzel yönelmelerine neden olur (Yalçın, 2007).

2.3.1.3 Ferromanyetizma

Ferromanyetik maddeler, zayıf dış alanda bile birbirine paralel olarak yönelen atomik dipol manyetik momentler içerir. Dipol manyetik momentler dış alan kaldırılrsa bile paralellik durumunu bozmaz ve madde mıknatıslanmış olur. Bu sürekli yönelimi elde etmesinin nedeni komşu manyetik momentler arasındaki kuvvetli etkileşimdir (Serway ve Beichner, 2000). Ferromanyetikler genel olarak çok yüksek bağıl geçirgenlik ve duyarlılığa sahiptir (Jiles, 1991).

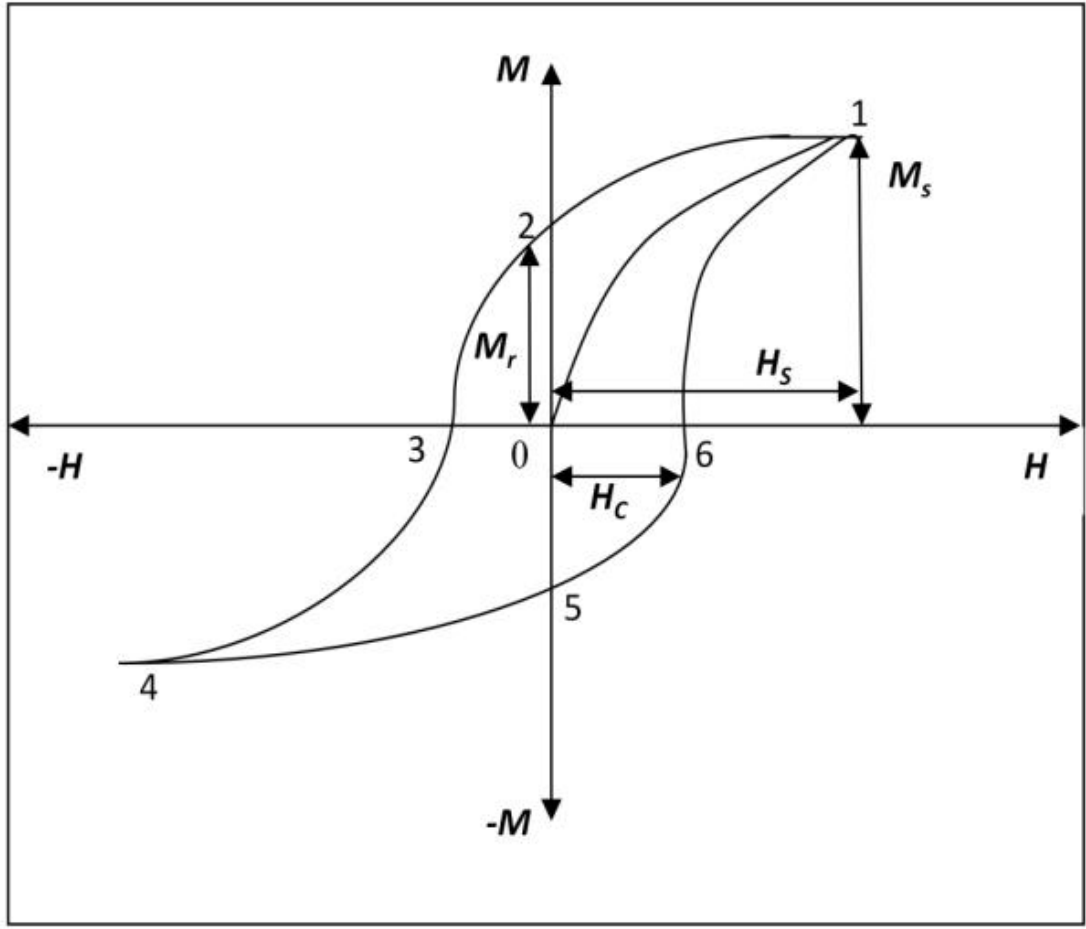
Ferromanyetik maddeler $10^{-12} - 10^{-8} \text{ m}^3$ hacmine sahip domain bölgelerinden oluşur. Bu bölgeler yaklaşık $10^{17} - 10^{21}$ atom içerir (Çölmekçi, 2016). Farklı yönelimlere sahip domain bölgeleri arasındaki sınırlara bölge duvarları denir. Numune dış manyetik alana maruz bırakıldığında domain bölgeler dış manyetik alanla aynı yöne

yönelirler. Manyetik alan kaldırıldığında dış manyetik alan yönündeki mıknatıslanmayı koruyabilir (Yalçın, 2007).

2.3.2 Mıknatıslanma (Histeresiz) Eğrisi

Ferromanyetik maddelerde çizilen histeresiz eğrisi, ferromanyetik malzemenin özelliklerini karakterize etmek için gerekir (Jiles, 1991), (Yalçın, 2007).

Ferromanyetik bir madde şiddeti değişen bir manyetik alan içine bırakıldığında manyetizasyonu Şekil 2.3' deki gibi bir histeresiz eğrisi oluşturur. Ferromanyetik malzemelerin uygulama alanlarına uygunluğu, histeresiz döngülerinin özelliklerine göre belirlenir (Jiles, 1991). Şekil 2.3' de çizilen histeresiz eğrisinde de görüldüğü gibi manyetik malzemeye dış manyetik alan uygulandığında malzeme M_S değerine ulaşır. Malzemeye dışarıdan uygulanan dış manyetik alan sıfıra indirilirse ferromanyetik malzemede kalıcı mıknatıslanma (M_r) oluşur (Jiles,1991). Mevcut M_r ortadan kaldırarak net manyetik momenti tekrar sıfır yapabilmek için gerekli manyetik alan şiddetine H_C denir (Kaplan, 2019). H_C , ferromanyetik malzemenin kalıcı manyetizasyonunu sıfıra zorlamak için gerekli olan ters alandır (Cullity ve Graham, 2009). Ferromanyetikler, H_C değerlerine göre sert ve yumuşak manyetik malzeme olarak sınıflandırılır ve H_C değerleri 12.6 Oe' den küçük olan malzemelere yumuşak manyetik malzeme, 126 Oe' den büyük olan malzemelere sert manyetik malzeme denir (Jiles, 1991).



Şekil 2.3 : Tipik bir ferromanyetik malzemenin histeresiz eğrisi (Çölmekçi, 2016).

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, manyetik ince film üretmek için kullanılan DC magnetron püskürtme sistemi, filmlerin üretim aşamalarının yanı sıra, üretilen Co/Cu filmlerinin özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan teknikler hakkında bilgiler sunulacaktır. Elementel analiz için Enerji Ayırmalı X-ışını Spektroskopisi (EDX) Tekniği, yapısal karakterizasyon için X-ışınları Kırınımı (XRD) Tekniği, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), manyetik analiz için ise Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM) teknikleriyle ilgili genel bilgiler verilecektir.

3.1 Püskürtme Sistemi

Co/Cu çok katmanlı manyetik ince filmleri, BAÜN Fen Edebiyat Fakültesinde bulunan Şekil 3.6' da gösterilen püskürtme sistemi ile üretilmiştir. Püskürtme sistemini oluşturan bileşenler hakkında ayrıntılı bilgiler ve ilgili resimleri aşağıda verilmiştir.

Kontrol paneli: Üretim cihazının kontrol edildiği ve üretim sırasında kullanılan parametrelerin ayarlandığı panel Şekil 3.1’ de gösterilmiştir.



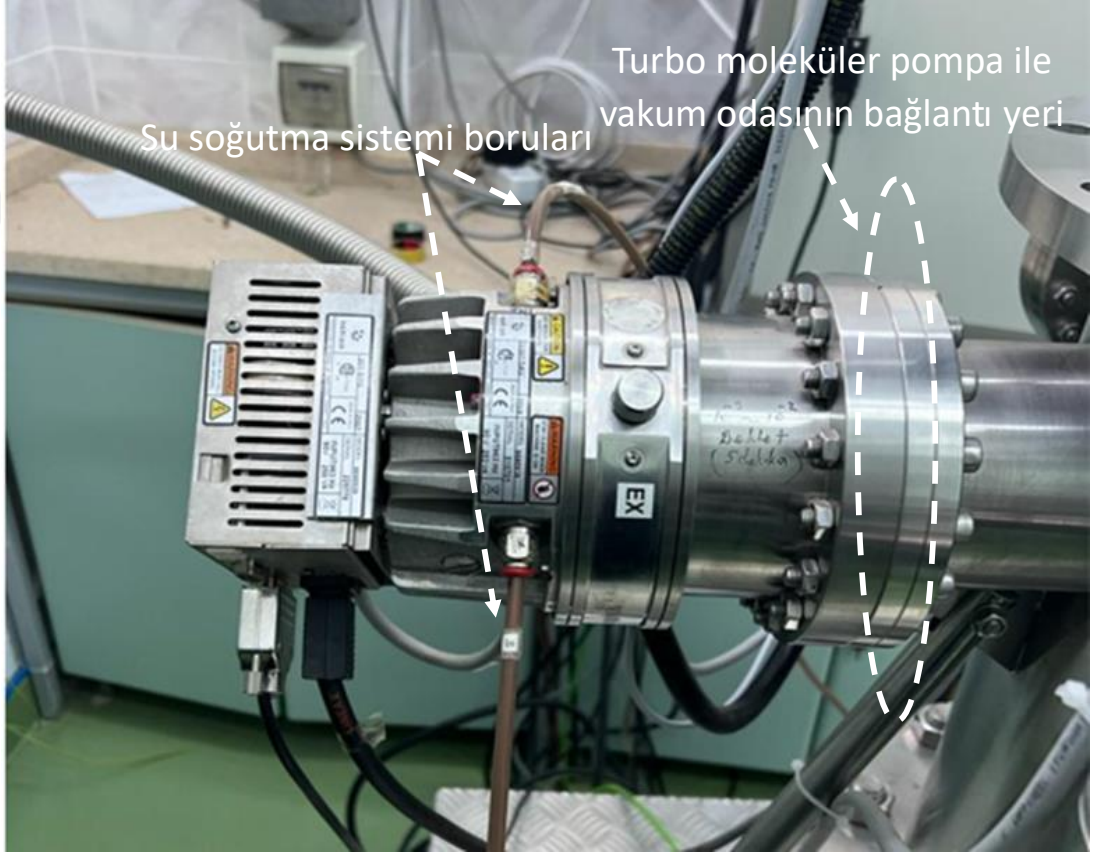
Şekil 3.1 : Film üretiminde kullanılan püskürtme sisteminin kontrol paneli.

Rotary pompa: Üretimin gerçekleştirildiği vakum odasının basıncını 5.10^{-2} mBar değerine kadar düşürebilen pompa Şekil 3.2’ de gösterilmiştir. Bu pompa, üretim için uygun olan basınç koşullarının elde edilmesinde kullanılan turbo moleküler pompa çalıştırılmadan önce çalıştırılır ve ortam basıncının belirli bir seviyeye kadar düşürülmesine yardımcı olur.



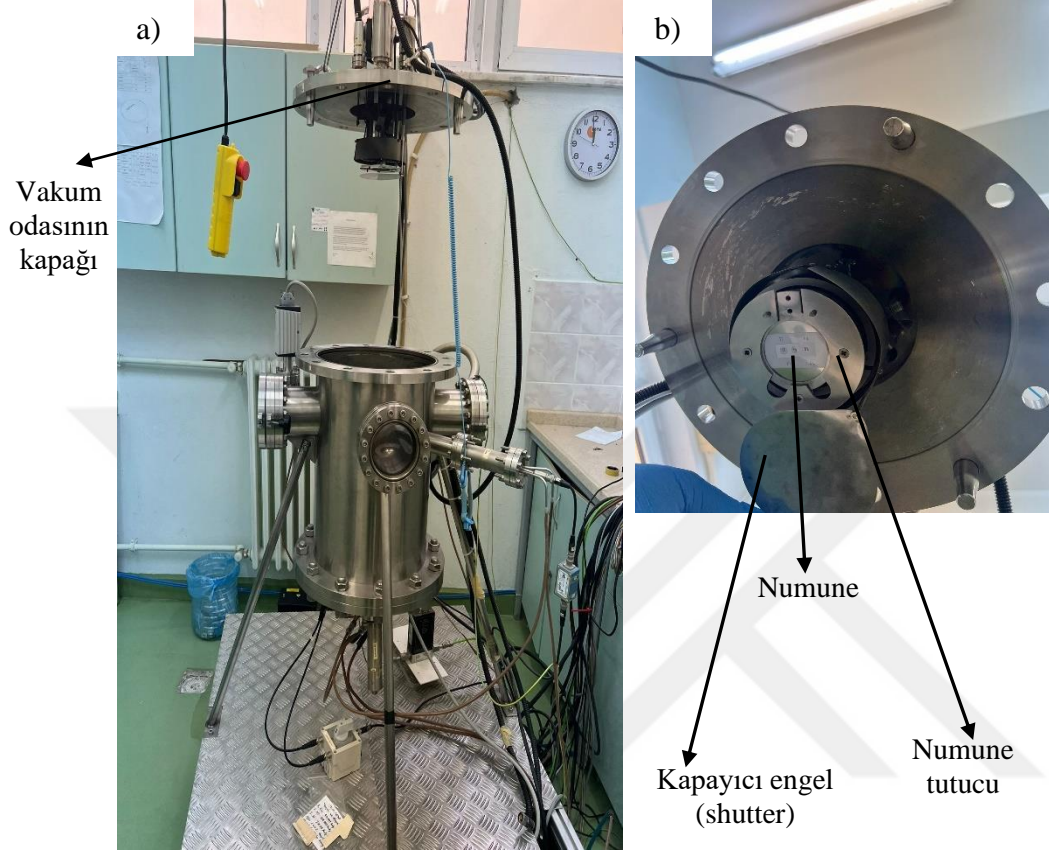
Şekil 3.2 : Vakum odasının basıncını düşürmeye yardımcı olan rotary pompa.

Turbo moleküler pompa: Rotary pompanın vakum odasının basıncını $5 \cdot 10^{-2}$ mBar değerine kadar düşürdükten sonra çalışmaya başlayan ve yüksek gücü ile basıncı 10^{-6} mBar' a kadar indirebilen turbo moleküler pompa Şekil 3.3' de gösterilmiştir. Çalıştığı esnada oluşacak aşırı ısınmayı engellemek için su soğutma sistemine bağlı olarak faaliyet gösteren bu cihaz, şekilden de anlaşılacağı üzere, üretimin gerçekleşeceği vakum odası ile arasında herhangi bir boru bağlantısı olmadan vakum odasına doğrudan bağlanmıştır.



Şekil 3.3 : Su soğutmalı ve vakum odasına doğrudan bağlı olan turbo moleküler pompanın resmi.

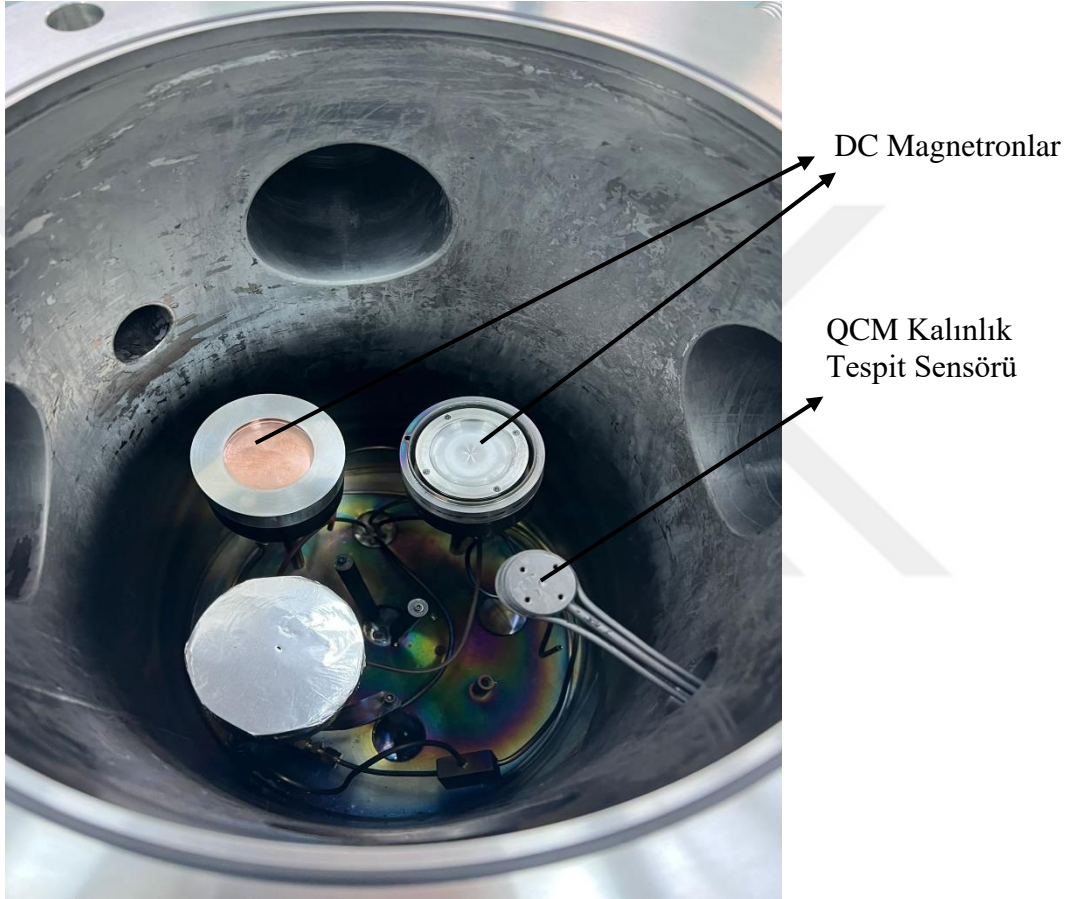
Vakum odası: Düşük basınç altında üretimin yapıldığı püskürtme ortamının (vakum odası) dış görünümü Şekil 3.4 (a)' da ve numunenin yerleştirildiği vakum odasının kapağı Şekil 3.4 (b)' de gösterilmiştir.



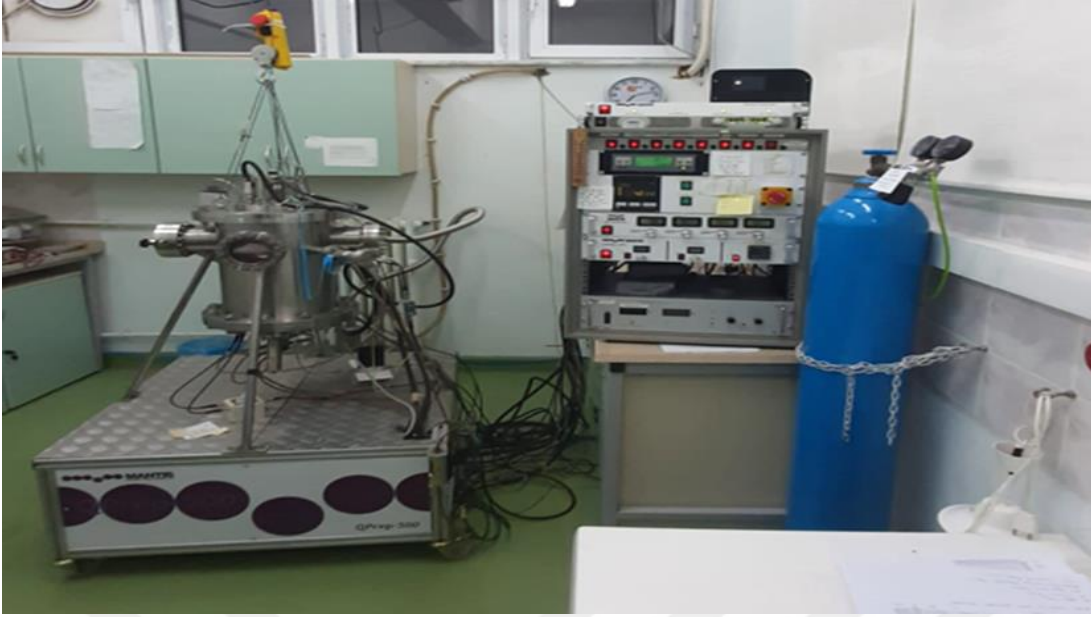
Şekil 3.4 : Vakum odasının dış görünümü (a) ve vakum odasının kapağı (b)

Magnetronlar: Vakum odasının iç kısmında gösterilen ve Co ve Cu metallerin monte edildiği yapıdır (bakınız Şekil 3.5).

Kalınlık Tespit Sensörü: Üretilen filmin kalınlığını tespit etmek için kullanılan bileşendir (bakınız Şekil 3.5). Biriktirme sırasında sensör yüzeyine tutunan kütlenin sebep olduğu tınlama frekansındaki değişim hesaplanarak biriktirilen kütle hesaplanır (Kaplan, 2019).



Şekil 3.5 : Vakum odası ve vakum odasında bulunan magnetronlar (Magnetronun üst kapağı açık (kaldırılmış) haldedir).



Şekil 3.6 : BAÜN Fen Edebiyat Fakültesinde Bulunan Püskürtme Sistemi.

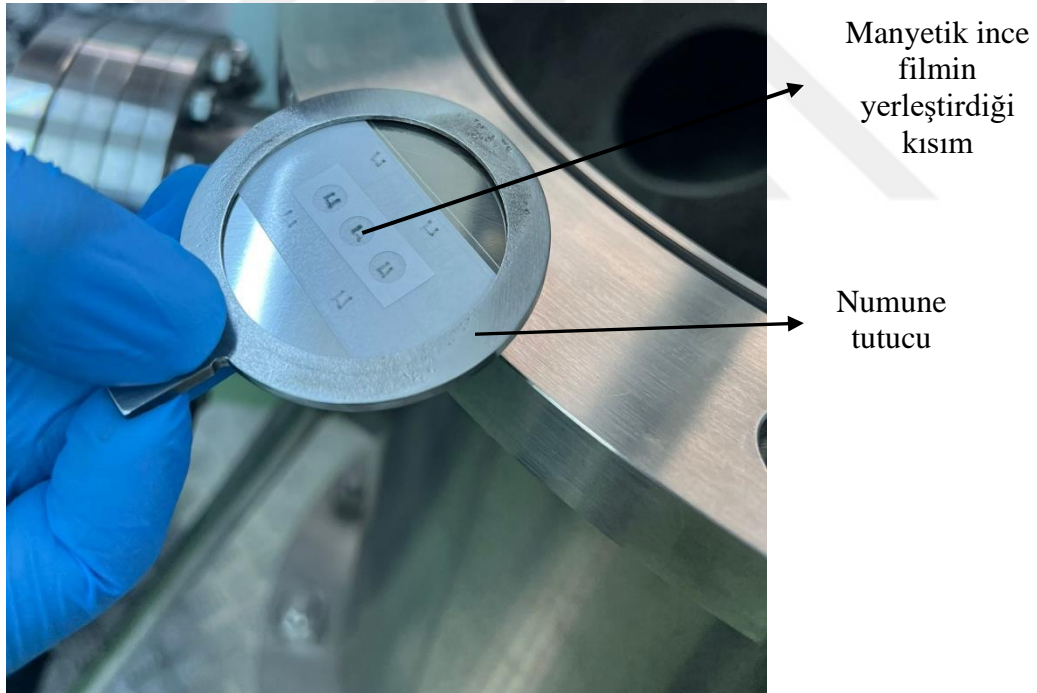
3.2 Püskürtme Sistemi ile Üretim

Manyetik filmlerin üretiminde %99.99 saflıkta 2.0 mm kalınlığında Cu, 1.2 mm kalınlığında Co metalleri kullanıldı. Üretim için kullanılmak üzere magnetrona yerleştirilen hedef malzemelerin çapı ise 5.8 mm idi. Co ve Cu hedef malzemeleri, yüzeylerindeki pürüzlerin temizlenmesi için Şekil 3.7' de gösterilen Struers RotoPol-35 markalı zımpara makinesi ile üretimden önce zımparalandı. Filmlerin üretimine başlamadan önce, vakum odasının iç kısmı, magnetronlar ve vakum odasının üst kapağında bulunan numune tutucu izopropil alkol ile temizlendi ve daha sonra zımparalanmış Co ve Cu hedef metalleri magnetronlara yerleştirilerek vakum odasının kapağı kapatıldı. Tüm bu işlemler yapılırken filmlerdeki istenmeyen kirlenmenin önüne geçmek için eldiven kullanımına dikkat edildi.

Filmin üretilmesinde kullanılan; 0.12 mm kalınlığında manyetik olmayan, ticari, esnek, polimer asetat alt tabaka istenilen boyutlarda kesildikten sonra Şekil 3.7' de gösterilen ISOLAB ultrasonik banyoda 10 dakika süre ile izopropil alkol içerisinde sterilizasyon için bekletildi. Sterilizasyon banyosundan çıkarılan alt tabaka mikro fiber bezle kurutuldu. Daha sonra vakum odası açılarak, Şekil 3.8' de gösterilen hazırlanmış alt tabaka, vakum odasının üst kapağında bulunan numune tutucuya yerleştirildi.



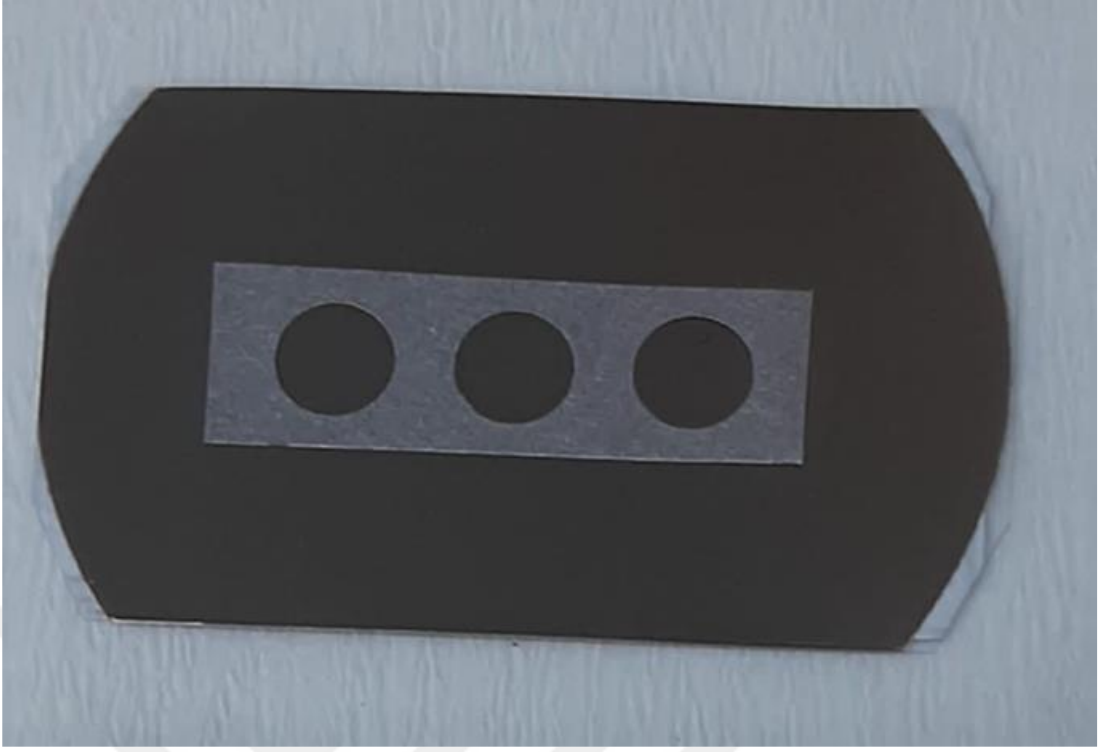
Şekil 3.7 : Zımpara makinesi RotoPol-35 (Struers) (solda) ve alt tabakanın sterilizasyonu için kullanılan ultrasonik banyo (ISOLAB) (sağda).



Şekil 3.8 : Üretim için hazırlanmış olan alt tabakanın numune tutucuya yerleştirilmiş hali.

Üretime başlamadan hemen önce, elektriksel iletim bakımından, püskürtme sistemindeki olası temassızlığın farkına varmak ve varsa müdahale etmek açısından avometre ile iletkenlik kontrolü yapıldı. Bu işlem için avometrenin bir elektrodu magnetrona, diğeri ise vakum odasına dokundurularak elektriksel iletim kontrol edildi. Üretim için şartların uygun olduğu tespit edildikten sonra püskürtme sisteminin kapağı

kapatıldı ve sistem vakumlama için hazır hale getirildi. Bu işlem her üretim aşamasında tekrar edildi. İlk olarak rotary pompa çalıştırıldı ve vakum odasının basıncı $5 \cdot 10^{-2}$ mbar değerine kadar düştüğünde turbo moleküler pompa vakumlama işlemine başladı. Rotary pompasının çalıştırılmaya başlamasından yaklaşık 1 saat sonra vakum odasının basıncı $3 \cdot 10^{-6}$ mbar değerine düştü. Üretim için yeterli düşük basınç değerine ulaşılmaya vakum odası püskürtme işlemi için hazır hale geldi. Daha sonra, kalınlık monitörüne, bakır ve kobalt metallerinin özkütle ve 'Z Faktörü' değerleri tanımlandı. Püskürtme işlemine başlanmadan önce alt tabakanın engel kapağının (shutter) kapalı durumda olduğu onaylandı ve argon gazı vakum odasına verildi. Argon gazının vakum odasına verilmesiyle, film birikmeye başlamadan hemen önce, vakum odasının basıncının $4.5 \cdot 10^{-3}$ mbar değerine yükseldiği gözlemlendi. İlk olarak, plazmanın kolay oluşabilmesi için nispeten yüksek değerlerde verilen argon gazı, plazma oluştuktan sonra üretim için ideal değer olan 30 sccm (dakikadaki standart santimetreküp) değerine kontrollü şekilde azaltıldı. Daha sonra DC güç kaynağı yardımıyla katot ile anot arasına uygun değerlerde potansiyel fark uygulandı ve bu voltaj değeri üretimde kullanılacak değerlerde sabitlendi. Oluşan plazma ile ilk olarak hedef Co ve Cu metallerinin yüzeyi kısa bir süre temizlendi. Üretime başlamak için alt tabaka önündeki engel kapak açıldığı anda kalınlık sensörü devreye sokuldu ve püskürtme süreci başladı. İstenilen kalınlığa ulaşıldıktan sonra engel kapak kapatılarak film üretimi sonlandırıldı ve Şekil 3.9' da gösterilen ince film asetat alt tabaka üzerine üretilmiş oldu.



Şekil 3.9 : Püskürtme tekniği ile asetat alt tabaka üzerine üretilen ince film.

Üretim tamamlandıktan sonra, turbo moleküler pompanın durması beklendi ve vakum kaldırma işlemi uygulandı. Vakum odasının basıncı atmosfer basıncına ulaştığında sistemin üst kapağı açıldı. Daha sonra elde edilen film uygun koşullarda muhafaza edildi.

3.2.1 Toplam Kalınlıkları Farklı Olan Filmlerin Üretimi

Bu seride, Co kalınlığı 8 nm olarak, Cu kalınlığı ise 12 nm olarak sabit tutuldu. Üretilen ince filmin ikili katman sayısı değiştirilerek toplam film kalınlığı farklı 3 ince film üretildi.

1- Üretilen 6 [Cu (12 nm) /Co (8 nm)] manyetik ince filmin, ikili katman sayısı 6 olup, filmin toplam kalınlığı 120 nm' dir.

2- Üretilen 7 [Cu (12 nm) /Co (8 nm)] manyetik ince filmin, ikili katman sayısı 7 olup, filmin toplam kalınlığı 140 nm' dir.

3- İkili katman sayısı 8 olan film ise 8 [Cu (12 nm) /Co (8 nm)] olarak gösterildi ve toplam kalınlığı 160 nm olacak şekilde üretildi.

Bu serideki tüm filmler için biriktirme hızı, Co ve Cu katmanları için 0.04 nm/s olarak sabit tutuldu.

Doğru akım değeri, Co üzerinde plazma oluşturulabilmek için önce arttırıldı, plazma oluşturulduktan sonra 80 mA değerinde sabit tutuldu. Bu değer, Cu üzerinde plazma oluşturabilmek için ise 210- 206 mA olarak uygulandı. Üretilen filmlerde argon gazı akış değeri 30 sccm değerinde sabit tutuldu.

3.2.2 Ferromanyetik Co Katmanın Farklı Biriktirme Hızları Dikkate Alınarak Üretilen Filmler

Bu seride, Cu katmanının biriktirme hızı 0.04 nm/s olarak sabit tutuldu. Ferromanyetik malzeme olan Co katmanının biriktirme hızı sırası ile 0.02, 0.05 ve 0.08 nm/s olarak ayarlanarak Co/Cu filmler üretildi. Co katmanının biriktirme hızını arttırmak için DC değeri kontrollü bir şekilde arttırıldı ve Co üzerinde plazma oluşturabilmek için 50, 90 ve 140 mA değerlerine ayarlandı. DC değeri Cu'nun takılı olduğu magnetron üzerinde plazma meydana getirebilmek için ise 210 mA olarak uygulandı. Bu serideki her film için, Cu katmanının kalınlığı 8 nm, Co katmanının kalınlığı 10 nm olarak belirlendi. Bu seride incelenen filmlerin ikili katman sayısı ise 5 olarak belirlenip, manyetik ince

filmlerin toplam kalınlığı 90 nm olarak üretildi. Tüm bu parametreler dikkate alındığında filmler, 5[Cu (8 nm) /Co (10 nm)] ifadesi ile temsil edilmiş oldu.

3.3 Enerji Ayırımı X-ışını Spektroskopisi (EDX) Tekniği

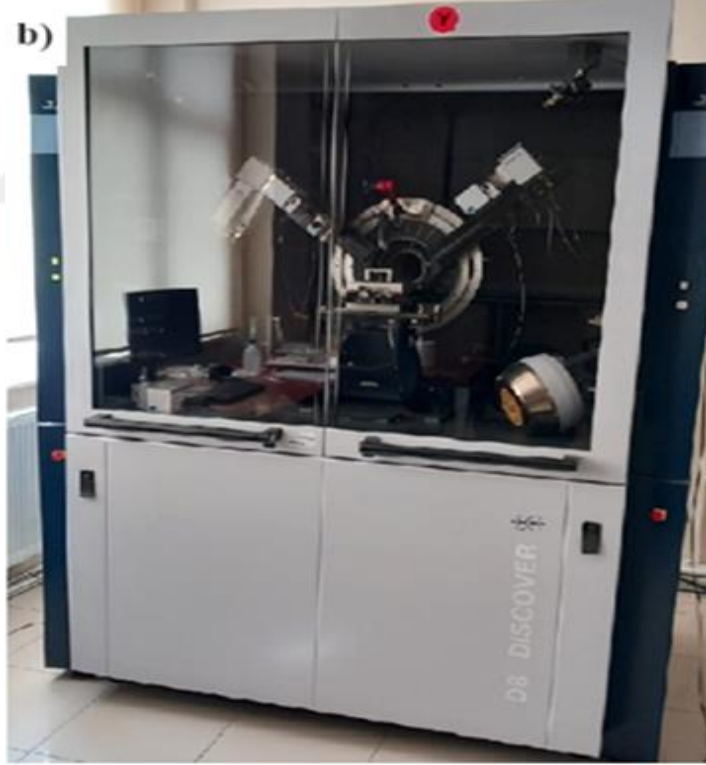
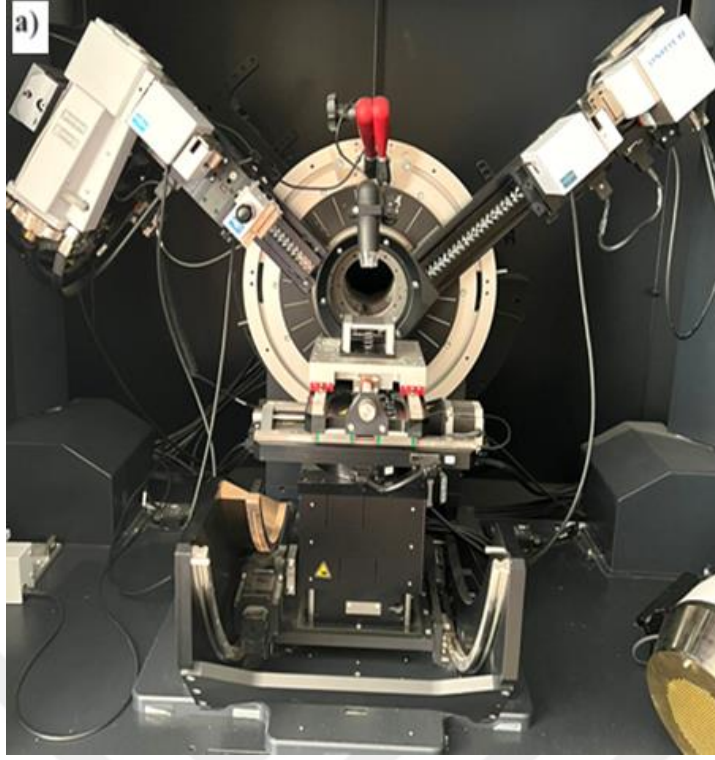
Enerji Ayırımı X-ışını Spektroskopisi (EDX), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile birlikte kullanılır. Numunenin elementel bileşeni hakkında analiz yapabilen bir spektroskopi tekniğidir. Bu teknikte, numune üzerine gönderilen yüksek hızlı elektronlar ile numune atomları etkileşime girer ve numuneden X-ışınları yayınlanır (Walzak ve diğerleri, 1998). Bu ışınlar enerji ayırımı bir spektrometre ile tespit edilir ve bilgisayar ekranında enerji yoğunluk grafiği çizilerek elementel analizi tespit edilir (Gültekin, 2019).

3.4 X-ışınları Kırınımı (XRD) Tekniği

Filmin kristal yapısı hakkında bilgi edinmek için kullanılan en etkili yöntemlerdendir (Çınar, 2010). X-ışını dalga boyunun kristal yapıdaki atomlar arasındaki uzaklık ile aynı mertebesinde olması kristal yapı analizinde XRD yöntemini ön plana çıkarmıştır (Özergin, 2008). Bu çalışmada, Şekil 3.10' da gösterilen XRD (Bruker, D8 Advance with Davinci Design for XRD) cihazı kullanılmıştır. Bu cihaza yerleştirilen kristal numune üzerine düşürülen tek dalga boyuna sahip X-ışını demeti, kristalin örgü noktalarındaki atomların oluşturduğu paralel düzlemler tarafından kırınıma uğrar. Bu düzlemler, X-ışınının küçük bir oranını yansıtır ve yansıma olayı sadece gelme açısı uygun değerler aldığıında meydana gelir. Bir kristalden kırınıma uğrayan bir X-ışını demetinin davranışı Bragg kırınım yasası ile açıklanır. Eşitlik (3.1) ile verilen Bragg yasası ile ilgi ayrıntılı bilgiye (Dikici, 2013) ve (Aydoğdu, 2011) kaynaklarından ulaşılabilir.

$$2d\sin\Theta = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (3.1)$$

Bu denklemde, d düzlemler arası mesafe, Θ gelen ışınlarla kristal düzlemleri arasında açı, n yansımanın hangi düzlemler arasında olduğunu belirten yansıma mertebesi ve λ ise X-ışınının dalga boyudur.



Şekil 3.10 : KMÜ BİLTEM'de bulunan XRD cihazı (Bruker, D8 Advance with Davinci Design for XRD) (a) X-ışını kaynağı ve detektörün bulunduğu iç kabinin yakından görünümü, (b) Cihazın dıştan görünümü.

3.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

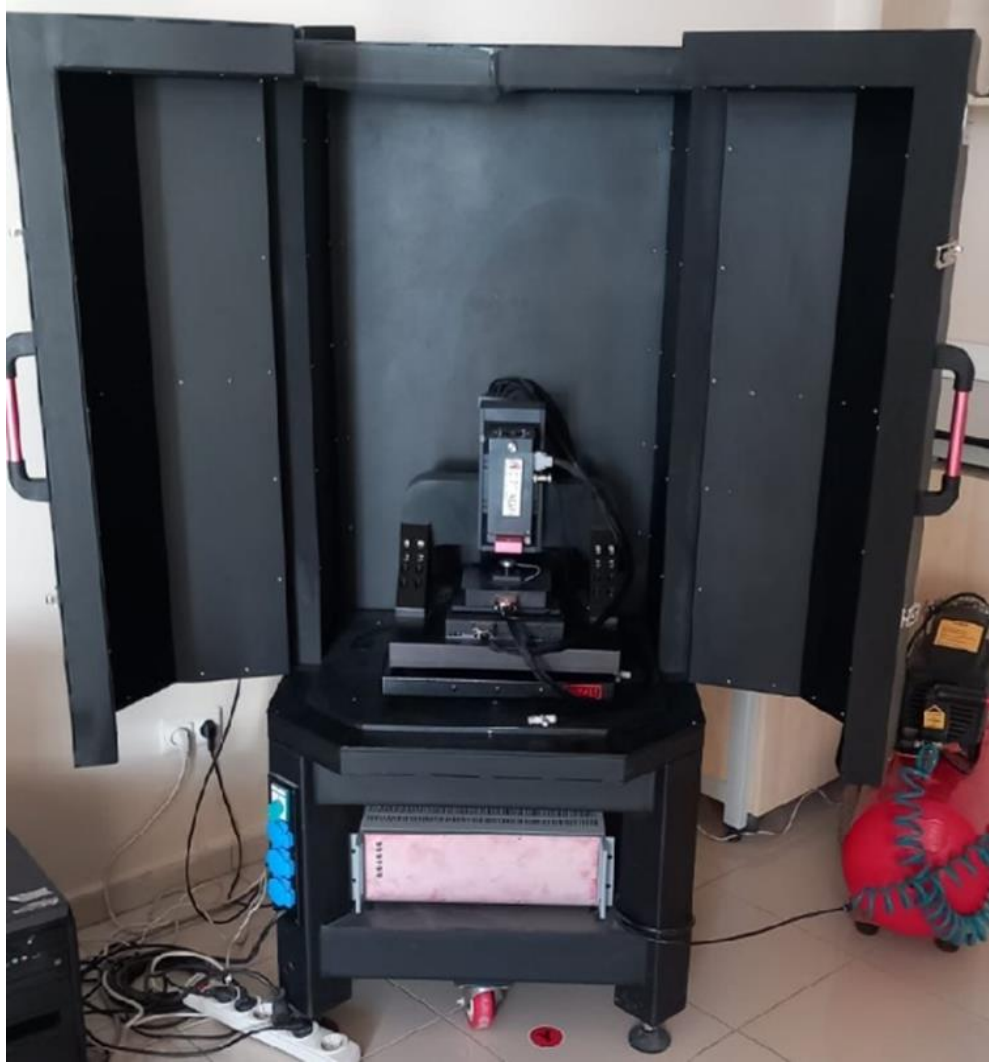
Bu çalışmada kullanılan SEM (HITACHI SU5000) cihazının resmi Şekil 3.11’ de gösterilmiştir. Taramalı elektron mikroskobunda, yüksek gerilim ile ivmelenmiş elektron demeti kullanılarak katı haldeki numunenin yüzeyi taranır. Tarama işlemi başlangıç noktasına geri gelecek şekilde numune yüzeyi tamamen taranmaya kadar belirli aralıkta devam eder. Tarama sırasında odaklanmış elektron demetinin numunenin yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşim sonucu numunenin yüzeyinden gelen elektronlardan çeşitli sinyaller alınır. Bu sinyallerden bazıları ikincil elektronlar ve geri saçılma elektronlarıdır (Kuru, 2009). Bu sinyaller farklı yüzey özelliklerine göre yüksek çözünürlükte görüntülerin üretilmesine imkân verir. Bu bilgiler EDX ile birleştirildiğinde morfolojik ve elementel bilgiler aynı anda toplanabilir (Ellingham ve diğerleri, 2017)



Şekil 3.11 : KMÜ BİLTEM'de bulunan SEM cihazı (HITACHI SU5000).

3.6 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

AFM ile numunenin yüzey topografyasını iki boyutlu tarayarak atomik boyutlarına kadar yüksek çözünürlükte analiz yapan bir tekniktir. Atomik kuvvet mikroskobunun yapısına bakıldığında, iğne uçlarının elektron bulutu ile numune atomları arasındaki elektrostatik kuvvetinin etkisi ile itme çekme kuvveti oluşur (Oliver, 2008). Bu teknik ile SEM den farklı olarak yüzeyin ortalama pürüzlülük verileri ve yükseklik histogramları hakkında bilgi edinilebilir (Walzak ve diğerleri, 1998). Bu çalışmada kullanılan Atomik Kuvvet Mikroskobu (NANOMAGNETİC INS., hpAFM, Türkiye) cihazı Şekil 3.12’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 : KMÜ BİLTEM’de bulunan AFM cihazı (NANOMAGNETİC INS., hpAFM).

3.7 Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM)

Malzemelerin manyetik özelliklerini belirlemek için Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM) kullanılır. Özellikle bir ferromanyetik malzemenin H_c , M_r gibi birçok özelliği VSM kullanılarak ölçülebilir. Bu çalışmada kullanılan ve BAÜN Fen Edebiyat Fakültesinde bulunan VSM (ADE TECHNOLOGIES, DMS-EV9) cihazının resmi Şekil 3.13' de verilmiştir.

VSM Cihazı, Faraday Elektromanyetik İndüksiyon Yasası prensibi ile çalışmaktadır. Bu manyetometre ile ölçüm yaparken, elektromıknatıs çekirdekleri arasına yüksek frekansla titreştirilen bir numune yerleştirilir. Titreşen numunedeki manyetik akının zamanla değişimi sonucu bir emk indüklenir ve bu emk değeri numunenin manyetizasyonu hakkında bilgi verir (Adam, 2019). Bu manyetizasyonun doğru elde edilebilmesi için bir numunenin bilinen değeri referans alınarak kalibrasyon yapılmalıdır.



Şekil 3.13 : BAÜN Fen Edebiyat Fakültesinde bulunan VSM cihazı (ADE TECHNOLOGIES, DMS-EV9).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, üretilen Co/Cu filmlerinin elementel ve manyeto-yapısal karakterizasyonundan elde edilen bulgular verilip tartışılacaktır. Çalışmada iki farklı seriye ait üretim parametreleri Çizelge 4.1' de ve Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Birinci seri; Co/Cu çok katmanlı yapılarında, ikili katman sayısı 6, 7 ve 8 olarak değiştirilerek üretilen manyetik ince filmlerin toplam kalınlığı 120, 140 ve 160 nm olarak belirlendi. Bu filmlerin toplam kalınlığının, filmlerin özellikleri üzerindeki etkisi araştırıldı. Birinci film serisi üretilirken, Çizelge 4.1' de Co ve Cu katmanlarının biriktirme hızı 0.04 nm/s olarak sabit tutuldu. Co katmanının kalınlığı 8 nm, Cu katmanının kalınlığı 12 nm sabit tutuldu. İkinci seride; manyetik film serisi üretilirken, Çizelge 4.2' de ikinci seri için verilen, ikili katman sayısı 5, Co katmanının kalınlığı 10 nm, Cu katmanının kalınlığı 8 nm olacak şekilde toplam kalınlığı 90 nm ve Cu biriktirme hızı 0.04 nm/s olarak sabit tutuldu. Co katmanının biriktirme hızı 0.02, 0.05 ve 0.08 nm/s olarak değiştirildi. Co/Cu çok katmanlı yapılarında Co katmanının farklı biriktirme hızının filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri üzerinde etkisi incelendi.

Çizelge 4.1 : Farklı kalınlıklara sahip ince filmlerin üretimlerinde kullanılan parametreleri.

Cu Katman Kalınlığı (nm)	Co Katman Kalınlığı (nm)	İkili Katman Sayısı	Toplam Kalınlık (nm)	Biriktirme Hızı (nm/s)		Doğru Akım (mA)		Argon Gazı Akış Hızı (sccm)	
				Cu	Co	Cu	Co	Cu	Co
12	8	6	120	0.04	0.04	206	80	30	30
12	8	7	140	0.04	0.04	206	80	30	30
12	8	8	160	0.04	0.04	206	80	30	30

Çizelge 4.2 : Co katmanının farklı biriktirme hızlarında üretiminde kullanılan parametreleri.

Cu Katman Kalınlığı (nm)	Co Katman Kalınlığı (nm)	İkili Katman Sayısı	Toplam Kalınlık (nm)	Biriktirme Hızı (nm/s)		Doğru Akım (mA)		Argon Gazı Akış Hızı (sccm)	
				Cu	Co	Cu	Co	Cu	Co
8	10	5	90	0.04	0.02	210	50	40	40
8	10	5	90	0.04	0.05	210	90	40	40
8	10	5	90	0.04	0.08	210	140	40	40

4.1 Co/Cu Çok Katmanlı Manyetik İnce Filmlerde Toplam Film Kalınlığının Etkisinin İncelenmesi

Bu seride, Cu katmanı 12 nm kalınlığında, Co katmanı 8 nm kalınlığında olmak üzere oluşturulan ikili katman sayısı sırasıyla 6, 7 ve 8 şeklinde değiştirilerek toplam film kalınlığı 120, 140 ve 160 nm'ye kademeli olarak arttırıldı. Bu işlemler yapılırken diğer film parametreleri sabit tutuldu. Üretilen filmlerin elementel, kristal yapı, yüzey morfolojisi ve manyetik analizleri yapıldı.

4.1.1 Elementel Analiz

Yapılan elementel analiz sonucuna göre, filmlerin içeriklerindeki Co ve Cu'nun atomik yüzdeleri Çizelge 4.3' te görülmektedir. İkili katman sayısı 6, toplam film kalınlığı 120 nm olan manyetik ince filmin atomik içeriğinin %11'i Co atomlarını, %89' u Cu atomlarını içermektedir. İkili katman sayısı 7 (toplam film 140 nm) olan manyetik ince filmin atomik içeriğinin %12'si Co atomlarını, %88'i Cu atomlarından içermektedir. İkili katman sayısı 8, toplam film kalınlığı 160 nm olan manyetik ince filmin atomik

içeriğinin %15'i Co atomlarını %85'i Cu atomlarını içermektedir. Bu sonuçlar dikkate alındığında toplam film kalınlığı 120' den 160 nm' ye arttırıldığında filmlerin Co içerikleri 13 ± 2 olarak bulundu. Bu sonuca göre, manyetik ince filmlerin toplam kalınlığı arttıkça atomik içeriklerinde dikkate değer bir değişme olmadığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.3 : Toplam kalınlık etkisinin incelendiği Co/Cu filmlerinin elementel analiz sonuçları.

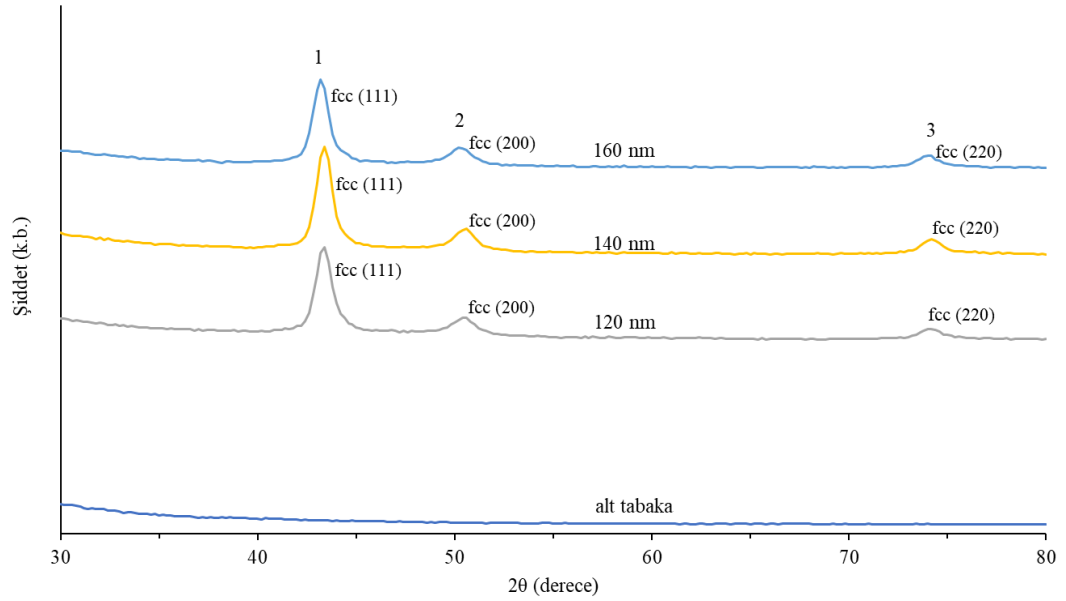
Temsili Gösterim	Film Kalınlığı (nm)	Film İçeriği (at. %)	
		Cu	Co
6[Cu (12 nm) /Co (8 nm)]	120	89	11
7[Cu (12 nm) /Co (8 nm)]	140	88	12
8[Cu (12 nm) /Co (8 nm)]	160	85	15

4.1.2 Kristal Yapı Analizi

Co/Cu ince filmlerin farklı toplam film kalınlığının etkisinin incelendiği kristal yapı analizi XRD tekniği ile yapıldı. Biriktirme işlemi yapılmadan önce alt tabakanın kristal yapısı da XRD tekniği ile tespit edildi. Alt tabaka ve filmlerin kırınım desenleri Şekil 4.1' de gösterilmiştir. Alt tabakanın kırınım deseni incelendiğinde alt tabakaya ait herhangi bir pik gözlenmemiştir. XRD cihazında kullanılan X-ışınlarının dalga boyu 1.54056 \AA dır. Ölçümler 2θ aralığı 30° ile 80° arasında değiştirilerek 0.2° adım aralıklarıyla alındı.

Toplam kalınlığı 120 nm olan filmimizde $2\theta = 43.40^\circ$ konumunda bir ana pik, $2\theta = 50.60^\circ$ ve $2\theta = 74.40^\circ$ de diğer pikler gözlenmektedir. Toplam film kalınlığı 140 nm ve 160 nm olan filmlerde de hemen hemen aynı 2θ konumlarında aynı pikler gözlenmektedir. Toplam film kalınlığı 160 nm olan filmde $2\theta = 43.40^\circ$ değerinde bir pik, $2\theta = 50.40^\circ$ ve $2\theta = 74.20^\circ$ da pikler gözlenmektedir. Şekil 4.1' de verilen grafikteki kırınım desenine göre, tüm filmler fcc yapısına sahiptir. Kırınım deseni incelendiğinde, 43° civarındaki pikin fcc yapının (111) düzlemine ait olduğu görülmüştür. Buna benzer olarak, kırınım deseninde 50° civarındaki piklerin ise fcc yapının (200) düzlemine ait olduğu tespit edilmiştir. Bu piklere ek olarak, kırınım deseninde 74° de fcc yapının (220) düzlemine ait pikler belirmiştir. Katman sayısının arttırılarak toplam film kalınlığının arttırılması fcc yapının belirlenen düzlemlerinin piklerinde dikkate değer bir değişime sebep olmamıştır. Elde edilen sonuçlar Co atomu için 15-0806, Cu atomları için 03-1018 pdf cardları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Toplam kalınlık değiştirilerek üretilen manyetik ince filmlerin XRD desenlerinde gözlemlenen fcc yapının (111) düzleminin kristalit boyutu Scherrer denklemi ile hesaplandı (Dikici, 2013). Fcc yapının (111) düzleminin kristalit boyutları 120 nm, 140 nm ve 160 nm kalınlığına sahip filmler için 10 nm olarak tespit edilmiştir. Bu verilere göre, üretilen filmin kalınlığı arttıkça fcc yapının (111) düzlemine ait kristalit boyutlarının aynı kaldığı bulunmuştur. Sonuç olarak, incelenen çok katmanlı yapıların aynı kristal yapıya sahip olduğu tespit edildi.

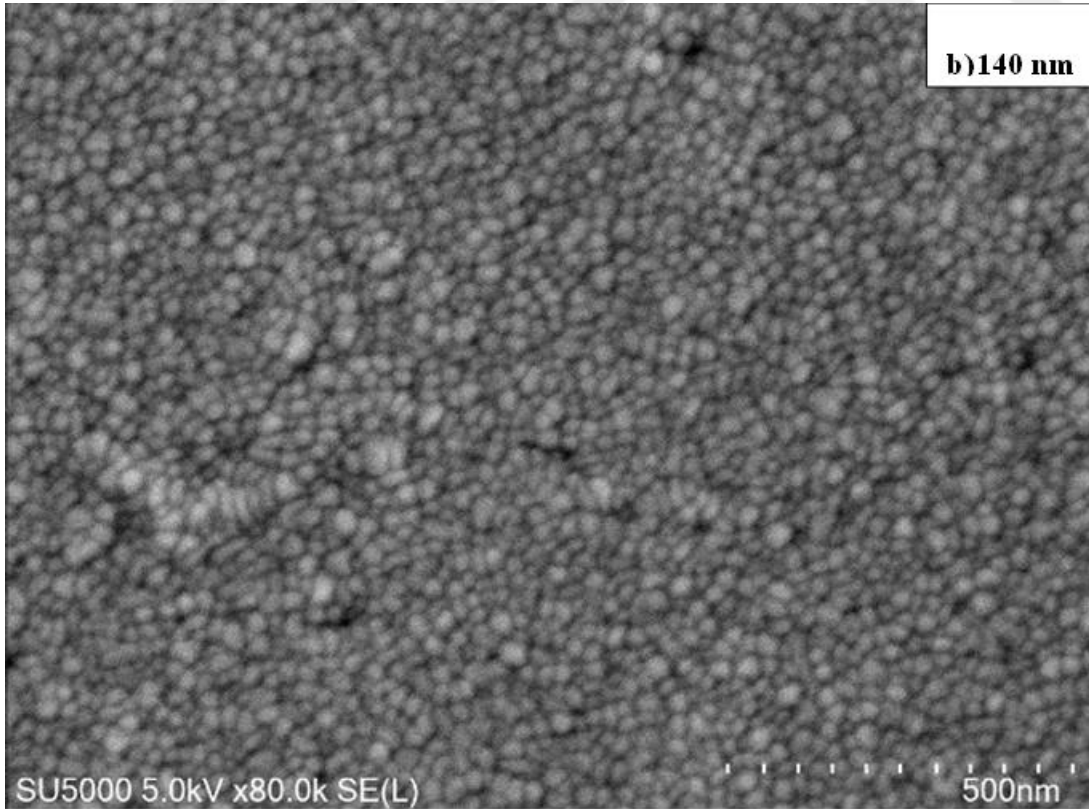
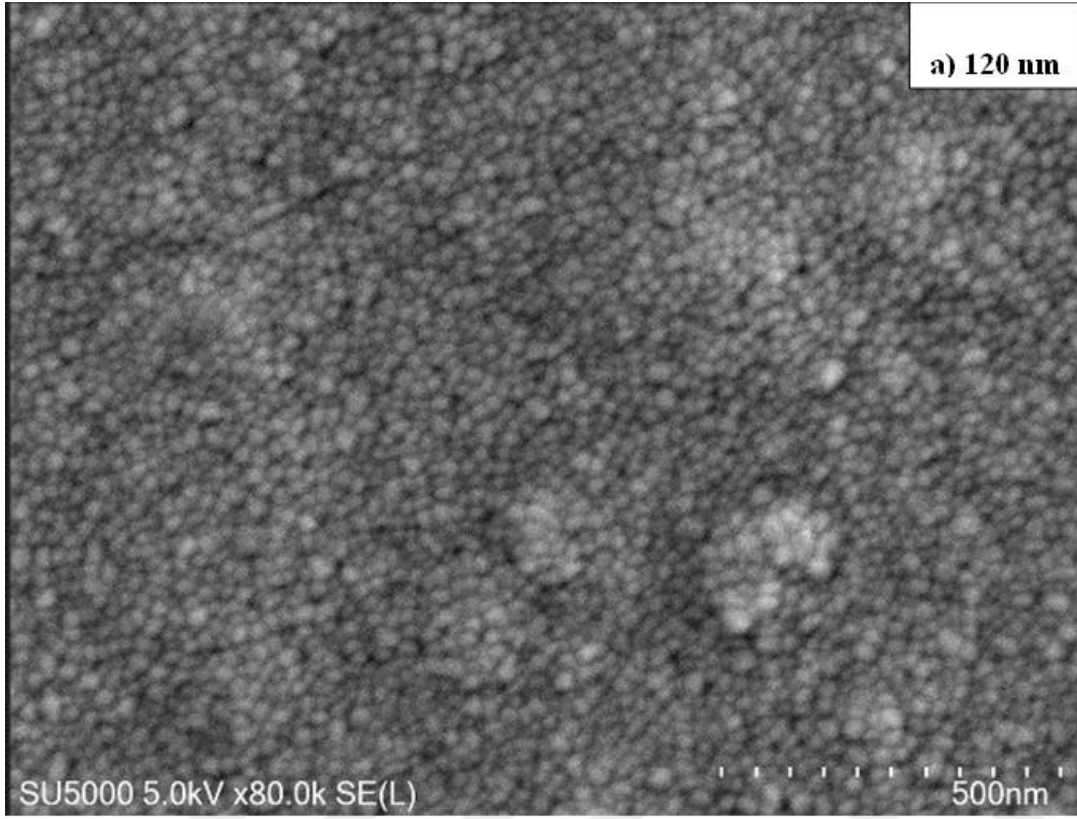


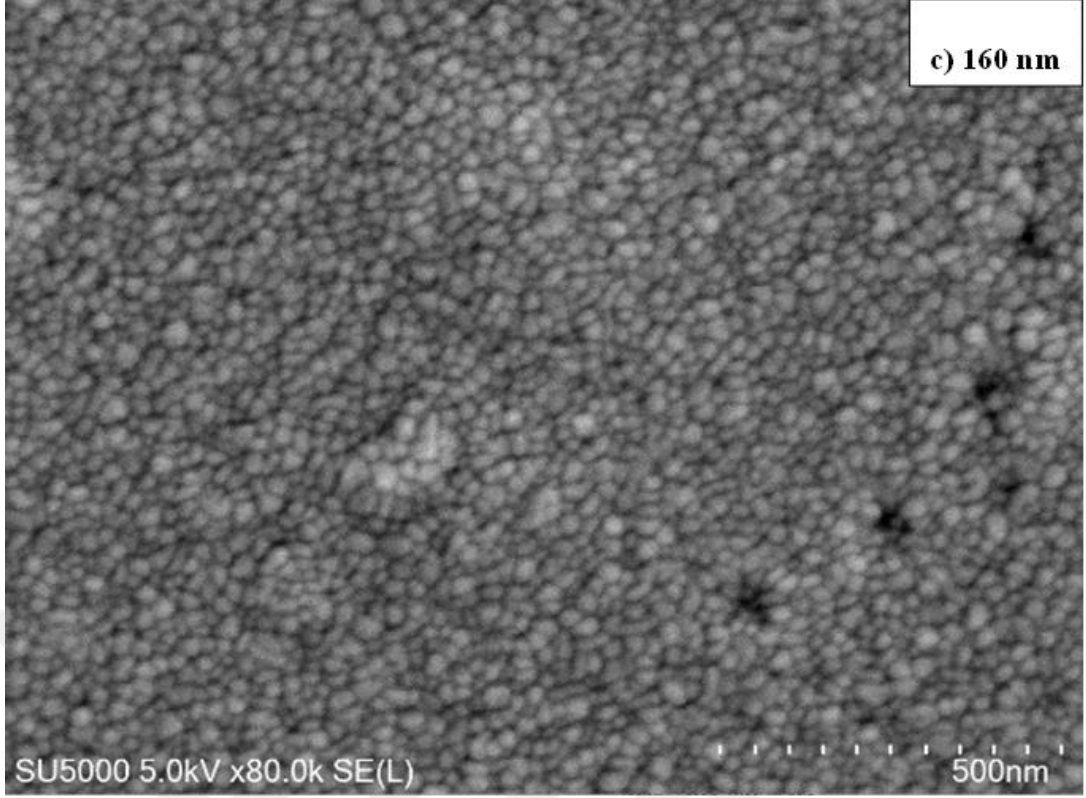
Şekil 4.1 : Toplam kalınlık etkisinin incelendiği Co/Cu filmlerinin ve kullanılan alt tabakanın XRD desenleri.

4.1.3 Yüzey Morfolojik Analizi

Manyetik ince filmlerin ikili katman sayısı değiştirilerek toplam film kalınlığının artırılmasının yüzey yapısını nasıl değiştirdiğini incelemek için yüzey morfolojik analizi yapılmıştır. Şekil 4.2' de toplam film kalınlığı 120, 140 ve 160 nm olan Co/Cu filmlerin yüzeylerinin 80000 kat büyütülmesi ile elde edilen SEM görüntüleri sırasıyla gösterilmiştir. Bu film serisinde SEM görüntüleri incelendiğinde yüzeydeki taneciklerin çapının 25 nm civarında olduğu ve toplam kalınlığın artmasının yüzey morfolojisinde dikkate değer bir değişime neden olmadığı sonucuna varılabilir. Bu durum elementel analizde tespit edilen atomik film içeriklerindeki sonuçlarla uyum

içindedir. Toplam film kalınlığı ile yüzey morfolojisi arasındaki aynı ilişki (Karpuz, 2011) çalışmasında da tespit edilmiştir.

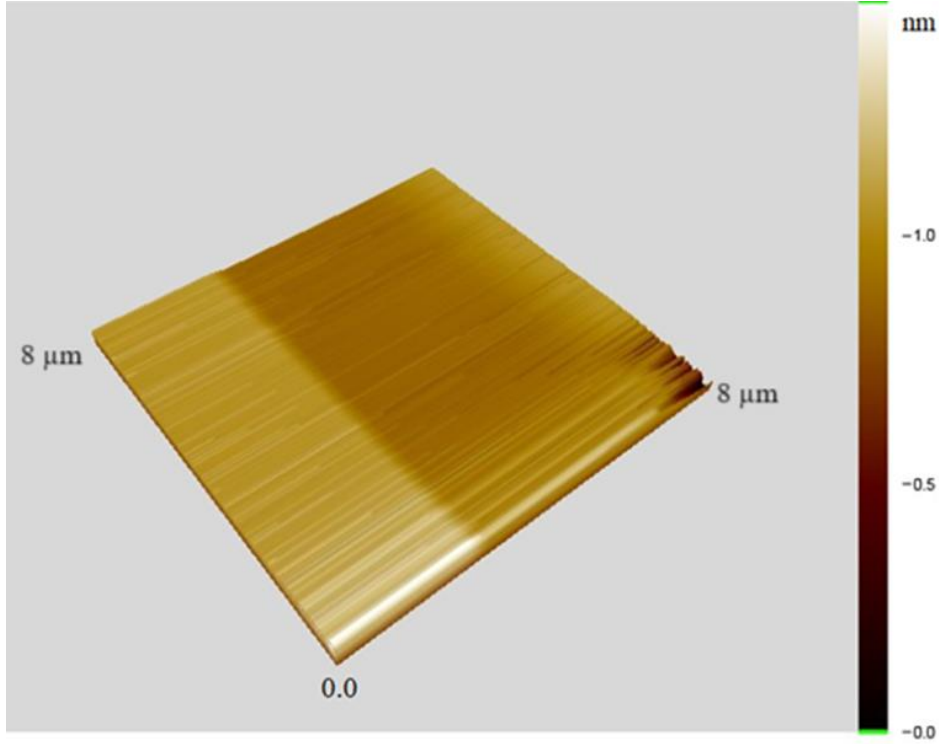




Şekil 4.2 : Co/Cu çok katmanlı manyetik ince filmlerin farklı toplam film kalınlıklarının incelendiği SEM görüntüleri a) 120 nm, b) 140 nm ve c) 160 nm.

4.1.4 Atomik Kuvvet Mikroskobu Analizi

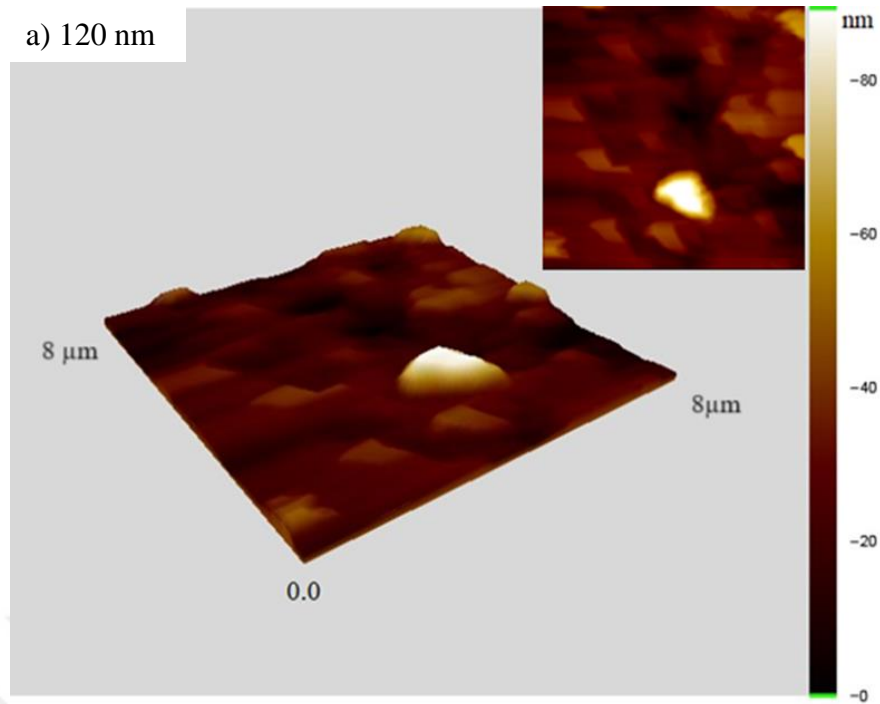
Toplam film kalınlıklarının etkilerinin araştırıldığı bu seride, film yüzeylerinin daha detaylı incelenmesi için AFM görüntüleri alındı. Co/Cu manyetik ince filmlerin üretimlerinde kullanılan alt tabakanın $64 \mu\text{m}^2$ 'lik yüzey alanının AFM ile elde edilen görüntüsü Şekil 4.3' de gösterilmiştir. Bu AFM görüntüsüne göre altı tabakalar pürüzlülük açısından üzerlerinde film biriktirmeye uygun yapılar olarak tespit edilmiştir.



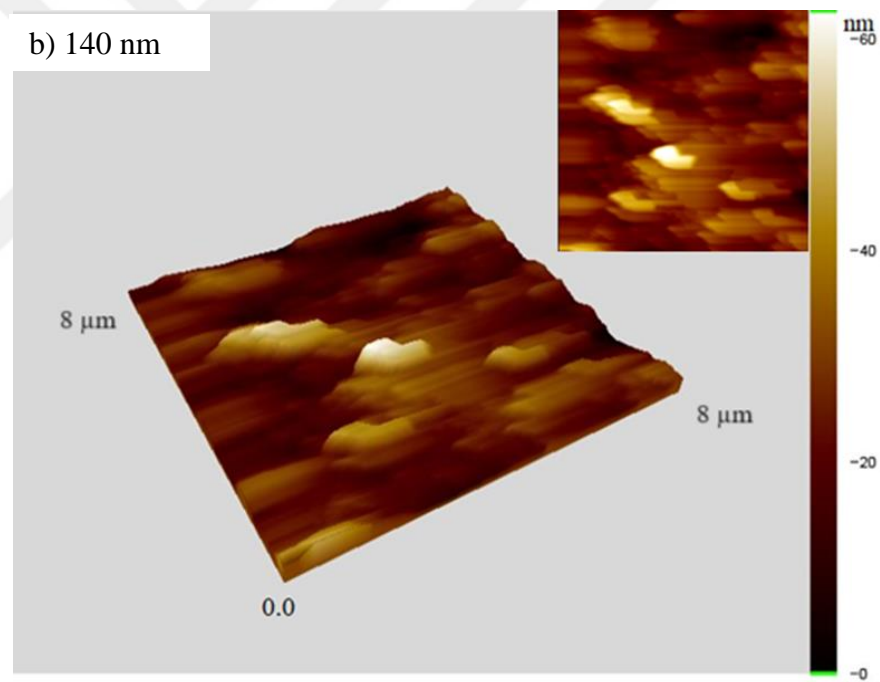
Şekil 4.3 : Kullanılan alt tabakanın AFM ile elde edilen görüntüsü.

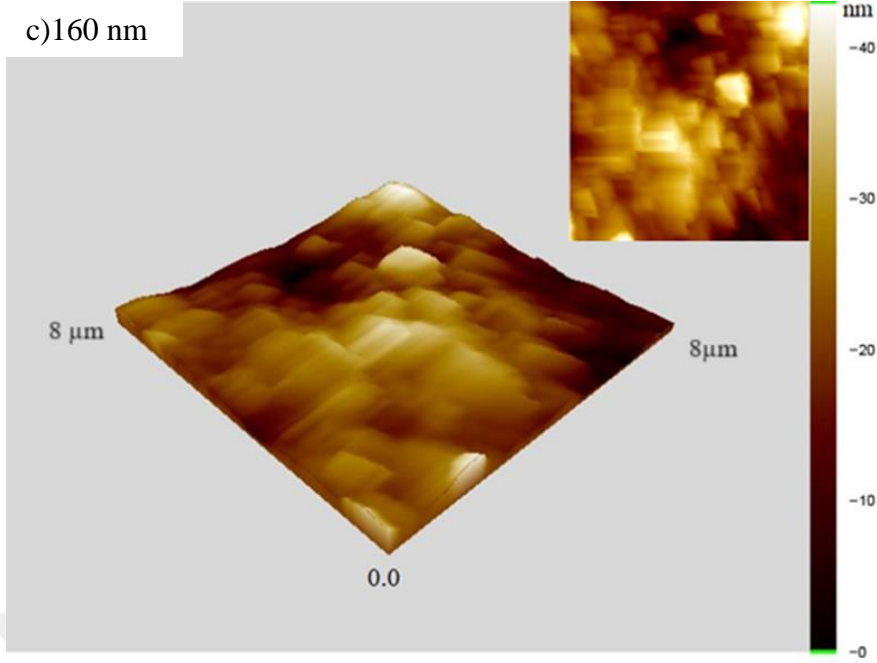
Şekil 4.4 (a) – (c)' de toplam kalınlıkları (a) 120 nm, (b) 140 nm ve (c)160 nm olan Co/Cu ince filmlerin AFM ile elde edilen üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey görüntüleri gösterilmiştir. Kalınlığı 120 nm olan film yüzeyinde farklı boyutlarda ada şeklinde çıkıntılar/yükseklikler mevcuttur. Bu çıkıntılar AFM resminde nispeten daha açık renkler ile belirtilmiştir. Film kalınlığı 140 nm olduğunda AFM resmindeki açık renkli bölgelerin sayısı bir miktar artmakta ve kalınlık 160 nm olduğu zaman ise resimdeki açık renkli bölgelerin kapladığı alan en fazla olmaktadır. Diğer bir ifadeyle, film kalınlığının düzenli bir şekilde artması yüzey pürüzlülüğünün de kademeli olarak artmasına neden olmaktadır. Ayrıca şekilden de açıkça görüldüğü üzere filmlerin yüzey görüntüleri alt tabakadan tamamen farklıdır. Buna göre, ince filmlerde bulunan yükseltelerin alt tabakadan kaynaklanmadığı görülmektedir. Sonuç olarak, toplam kalınlığı kademeli olarak 120 nm' den 160 nm' ye arttırıldığı zaman filmlerin yüzey pürüzlülüğünün de arttığı görülmüştür.

a) 120 nm



b) 140 nm





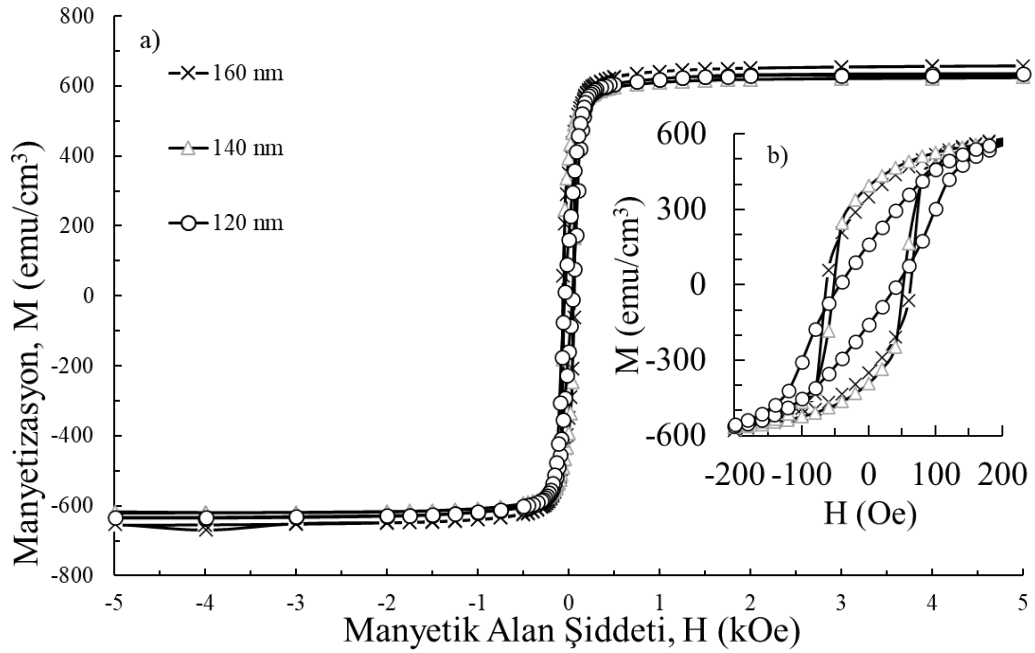
Şekil 4.4 : Toplam kalınlıkları (a) 120 nm, (b) 140 nm ve (c) 160 nm olan filmlerin yüzeylerinin AFM kullanılarak elde edilen üç boyutlu ve iki boyutlu görüntüleri.

4.1.5 Manyetik Analiz

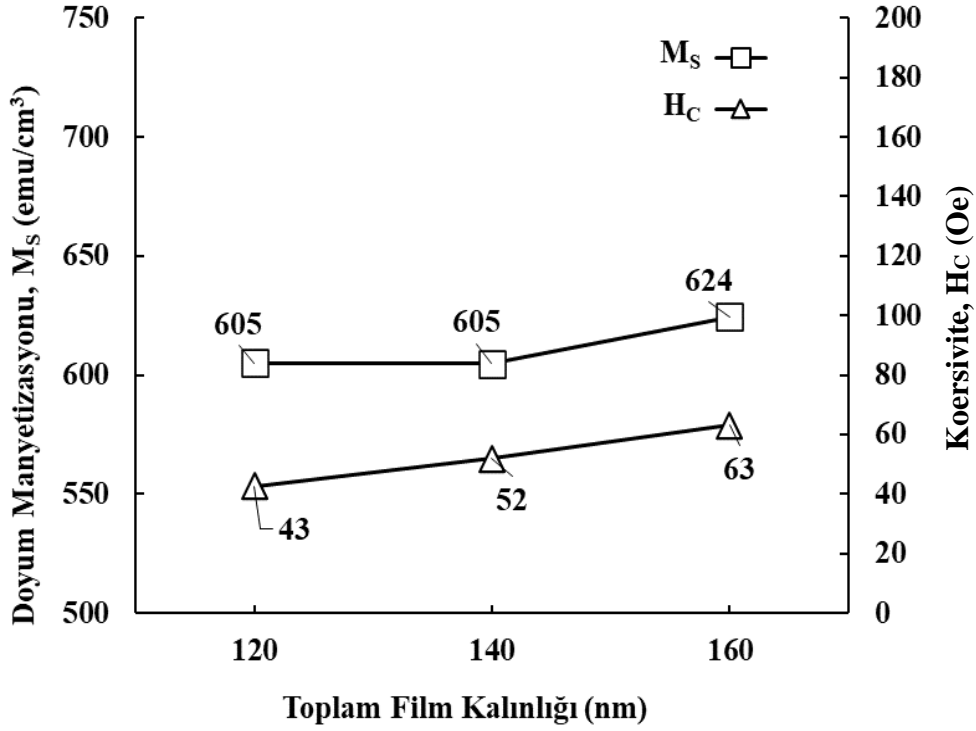
Co/Cu ince filmlerin manyetik özellikler üzerinde farklı toplam film kalınlıklarının etkisini incelemek için paralel histeresiz eğrileri edinildi ve bu eğriler Şekil 4.5’ de gösterildi. Histeresiz eğrileri yardımı ile M_S , H_C , M_r ve M_r/M_S değerleri tespit edildi ve bu değerler Çizelge 4.4’ te verildi. M_S ve H_C değerlerinin toplam film kalınlığına göre değişimi Şekil 4.6’ da verilmiştir. M_S değerleri, manyetik doyuma ulaşmış birim hacimdeki manyetik moment sayısına göre hesaplandı. Co/Cu manyetik ince filmlerin toplam film kalınlığını 120 nm, 140 nm ve 160 nm olarak arttırılması ile elde edilen M_S değerleri sırası ile 605 emu/cm^3 , 605 emu/cm^3 ve 624 emu/cm^3 olarak bulundu. Toplam film kalınlığının 120 nm’den 160 nm’ye arttırılması M_S değerlerinin yaklaşık olarak aynı kalması ile sonuçlanmıştır. Bu durumun nedeni film içeriğindeki ferromanyetik bileşen olan Co atomlarının içeriğinin az miktardaki değişimi olabilir. Diğer taraftan, manyetik madde olan Co atom içeriğinde belirgin bir değişim olmadığı için doyum manyetizasyonun dikkate değer biçimde değişmemesi beklenen bir sonuçtur. Filmlerin M_S değerleri başlıca, manyetik malzemeyi oluşturan elementlerin içerik oranlarından etkilenmektedir (Karpuz, 2011).

Toplam kalınlığının 120 nm, 140 nm, 160 nm olduğu filmler için H_C değerleri sırası ile 43 Oe, 52 Oe ve 63 Oe olarak bulunmuştur. Toplam film kalınlığı arttıkça H_C

değerlerinin de kademeli olarak artması, kalınlık arttıkça yüzey pürüzlülüğünün artmasına atfedilebilir. Daha önce (Karpuz ve diğerleri, 2020) tarafından yapılan çalışmada yüzey pürüzlülüğü ve H_C arasındaki bu ilişkiyi desteklemektedir. Bununla birlikte, H_C değerleri dikkate alındığında filmlerin genel olarak yumuşak manyetik malzeme özelliğine daha yakın olduğu anlaşılmaktadır (Jiles, 1991). Co/Cu manyetik ince filmlerin toplam kalınlığı kademeli olarak 120 nm, 140 nm ve 160 nm olarak arttırıldığında M_r değerleri sırasıyla 160 emu/cm³, 393 emu/cm³ ve 350 emu/cm³ olduğu tespit edilmiştir Aynı zamanda M_r/M_S değerleri ise toplam kalınlık kademeli olarak 120 nm, 140 nm ve 160 nm olarak arttırıldığında sırasıyla 0.3, 0.7 ve 0.6 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, film kalınlığı arttıkça M_r ve M_r/M_S değerlerinde de genel olarak bir artış olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.5 : Toplam kalınlık etkisinin incelendiği Co/Cu filmlerin histeresiz eğrileri.
a) ± 5 kOe arasında ki manyetik alan şiddetinde çizdirilen b) ± 200 Oe arasında çizdirilen.



Şekil 4.6 : Co/Cu filmlerinde H_c ve M_s değerlerinin toplam film kalınlığına göre değişimi.

Çizelge 4.4 : Toplam kalınlık etkisinin incelendiği Co/Cu filmlerinin manyetik analiz sonuçları.

	Co/Cu Manyetik İnce Filmlerin Analiz Sonuçları		
	120	140	160
Toplam film kalınlığı			
Film Co içeriği (at. %)	11	12	15
M_s (emu/cm ³)	605	605	624
H_c (Oe)	43	52	63
M_r (emu/cm ³)	160	393	350
M_r/M_s	0.3	0.7	0.6

4.2 Co/Cu Çok Katmanlı Manyetik İnce Filmlerde Ferromanyetik Katmanın Farklı Biriktirme Hızlarının Etkisinin İncelenmesi

Bu seride, Cu 8 nm kalınlığında, Co 10 nm kalınlığında ikili katman sayısı 5 olacak şekilde 90 nm toplam film kalınlığına sahip manyetik ince filmler üretildi. Cu atomlarının biriktirme hızı 0.04 nm/s de sabit tutulurken, ferromanyetik Co katmanın

biriktirme hızları sırasıyla 0.02 nm/s, 0.05 nm/s ve 0.08 nm/s olacak şekilde değiştirildi ve üretilen filmlerinin yapısal ve manyetik özellikleri incelendi.

4.2.1 Elementel Analiz

Elementel analiz sonuçlarında, filmlerin içeriklerinin Co ve Cu atomlarından oluştuğu Çizelge 4.5’ te gösterilmiştir. Co katmanının biriktirme hızı 0.02 nm/s iken ince filmdeki Co atomlarının yüzdesi %19 olduğu, Cu atomlarının yüzdesinin %81 olduğu görülmüştür. Co katmanının biriktirme hızı 0.05 nm/s’ ye artırıldığında filmdeki Co atomlarının içeriğinin %22 olduğu, Cu atomlarının %78 olduğu tespit edilmiştir. Co katmanının biriktirme hızı kademeli olarak 0.08 nm/s’ ye artırıldığında ince filmdeki Co atomlarının içeriğinin %26 olduğu, Cu atomlarının ise %74 olduğu tespit edilmiştir. Co katmanının biriktirme hızı 0.02 nm/s’den 0.08 nm/s’ye artırıldığında filmlerin Co içeriklerinin %19’ dan %26’ya kademeli olarak arttığı açıkça görülmektedir.

Çizelge 4.5 : Co/Cu manyetik ince filmlerinde Co katmanının farklı biriktirme hızlarındaki etkisinin incelendiği elementel analiz sonuçları.

Temsili Gösterim	Co Katmanının Biriktirme Hızı (nm/s)	Cu Katmanının Biriktirme Hızı (nm/s)	Film İçeriği (at. %)	
			Co	Cu
5[Cu (10 nm) /Co (8 nm)]	0.02	0.04	19	81
5[Cu (10 nm) /Co (8 nm)]	0.05	0.04	22	78
5[Cu (10 nm) /Co (8 nm)]	0.08	0.04	26	74

4.2.2 Kristal Yapı Analizi

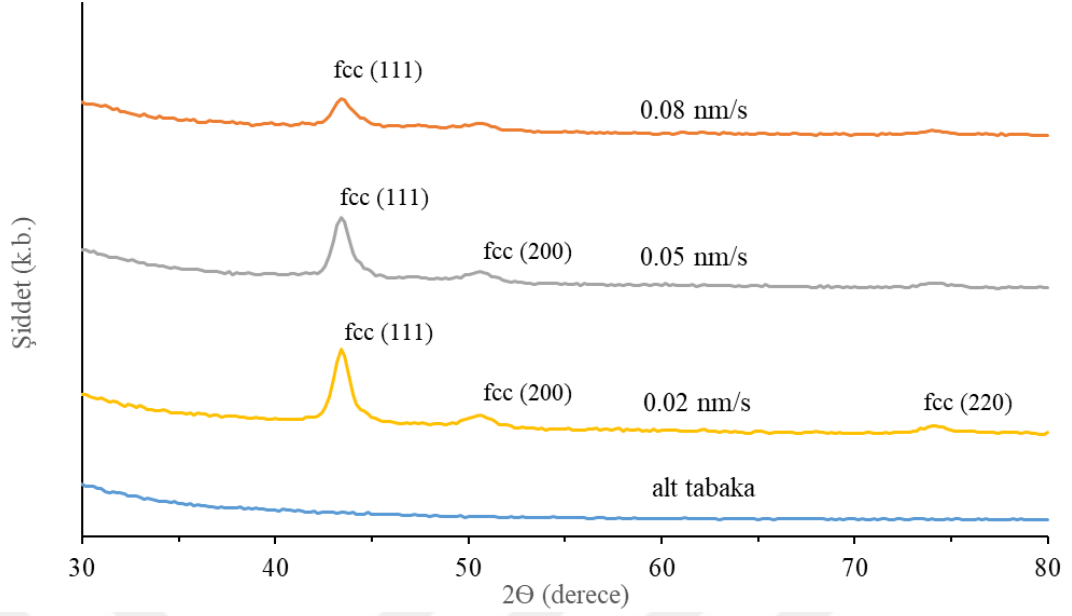
Co’ın farklı biriktirme hızının etkisinin incelendiği Co/Cu ince filmlerin XRD desenleri Şekil 4.7’ de verilmiştir. Alt tabakanın kristal yapı analizi ise üretim yapılmadan önce yapıldı ve Şekil 4.7’ de ki kırınım deseninde gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre alt tabakanın herhangi bir kristal yapıya sahip olmadığı görülmüştür.

Kırınım deseni incelendiğinde, Co katmanının biriktirme hızı 0.02 nm/s iken $2\theta = 43.60^\circ$ konumunda bir ana pikin belirdiği görülür. Aynı desende $2\theta = 50.80^\circ$ ve $2\theta = 74.40^\circ$ konumunda da pikler ortaya çıkmıştır. Manyetik ince filmlerin Co katmanının

biriktirme hızı 0.05 nm/s olan ikinci filmde benzer bir şekilde $2\Theta = 43.60^\circ$ konumunda güçlü bir pik, $2\Theta = 50.80^\circ$ konumunda belirgin bir pik vardır.

Manyetik ince filmin Co katmanının biriktirme hızı 0.08 nm/s olan üçüncü filmde $2\Theta=43.60^\circ$ değerinde bir pik oluşmuştur. Bu sonuçlara göre, Şekil 4.7' de çizilen grafikteki kırınım deseni incelendiğinde, her üç film için $2\Theta = 43.40^\circ$ de oluşan pikin fcc yapının (111) düzlemine ait bir pik olduğu anlaşılmıştır. Bu pikin şiddeti biriktirme hızı arttıkça azalmıştır. Kırınım deseninde $2\Theta = 50.60^\circ$ de 0.02 nm/s ve 0.05 nm/s biriktirme hızına sahip filmlerde fcc yapının karakteristik (200) düzlemine ait pik belirmiştir. $2\Theta= 74.40^\circ$ de biriktirme hızı 0.02 nm/s olan filme ait fcc yapının (220) düzlemine ait pik vardır. Fakat aynı açı konumunda Co biriktirme hızı 0.05 nm/s ve 0.08 nm/s olan filmlerde bu pikin kaybolduğu görülmüştür. Bir başka ifadeyle, Co katmanının biriktirme hızı arttıkça fcc yapıya ait olan piklerin kaybolduğu görülmüştür. Elementel analiz sonuçları incelendiğinde (bakınız Çizelge 4.5) biriktirme hızı arttıkça Cu atomlarının yüzdesi azalarak ince film tek kristal yapıya dönmüştür. Sonuç olarak Co katmanının biriktirme hızının değişmesi kristal yapıyı etkilemiştir. Elde edilen sonuçlar Co atomu için pdf card 15-0806, Cu atomları için pdf card 03-1018 ile uyumlu olduğu görülmüştür.

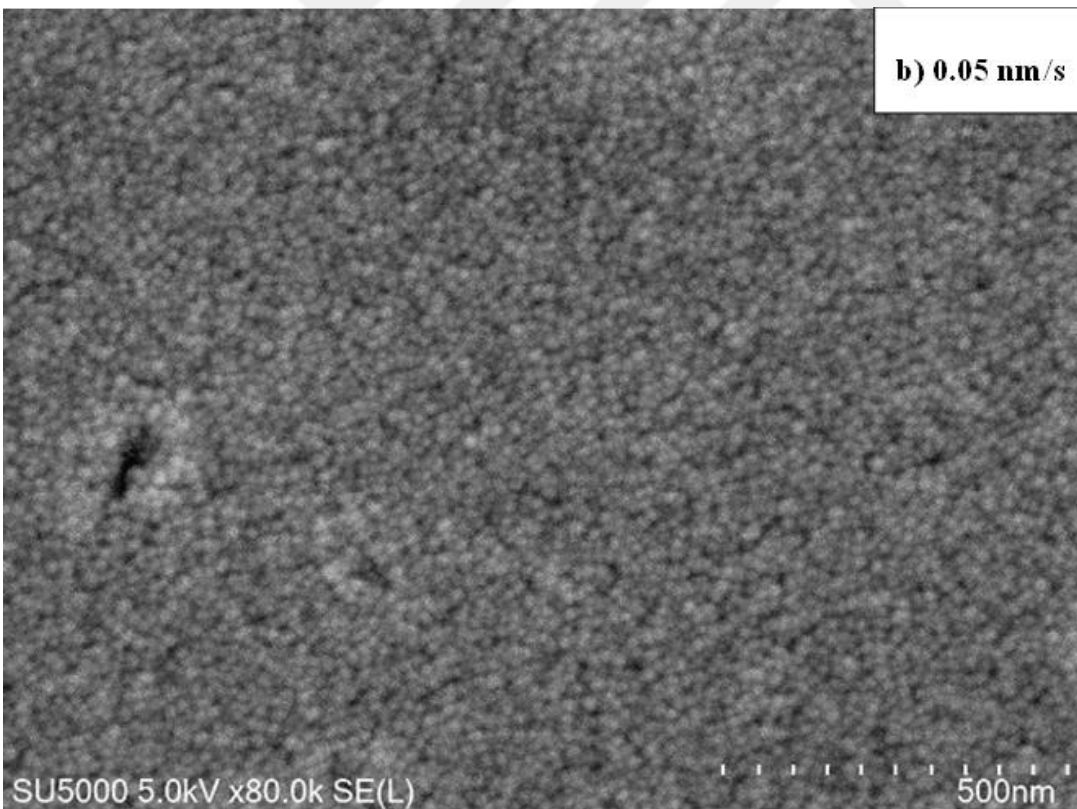
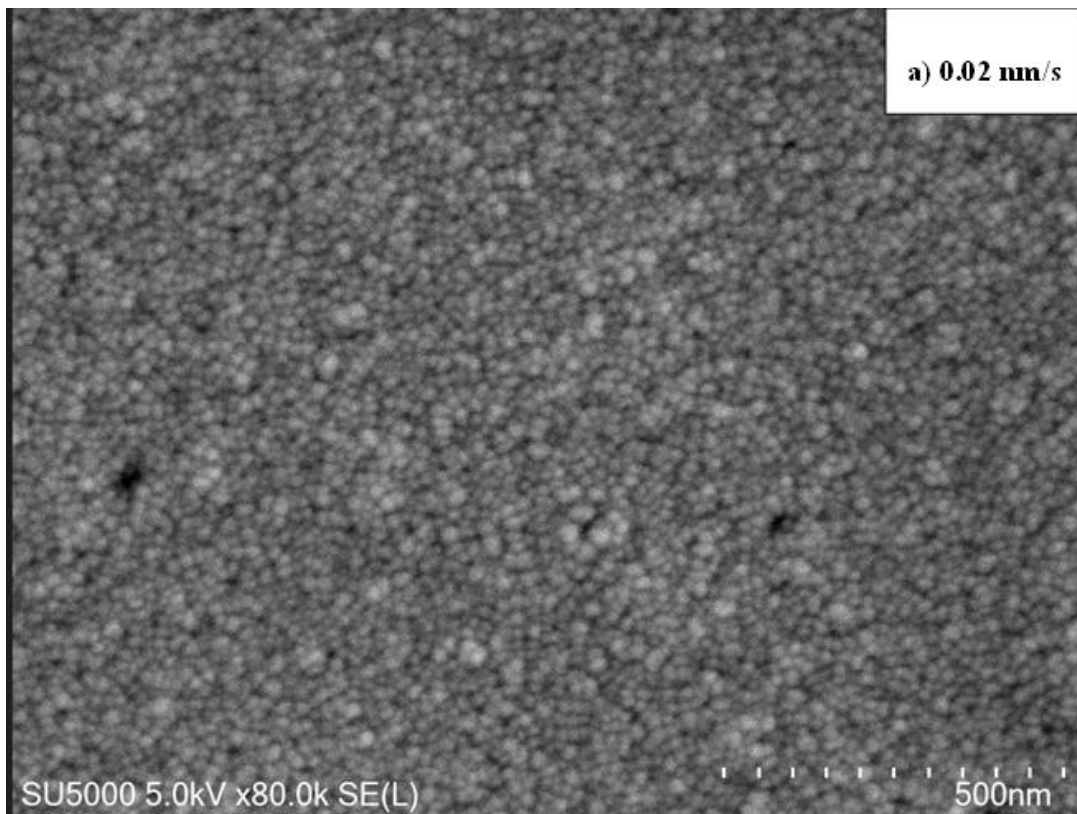
Co atomlarının biriktirme hızları 0.02 nm/s, 0.05 nm/s ve 0.08 nm/s şeklinde arttırıldığında, fcc yapının (111) düzleminin kristalit boyutları sırasıyla 10 nm, 10 nm ve 9 nm olarak hesaplanmıştır. Çok katmanlı yapıların içeriğindeki ferromanyetik malzemenin atomik yüzdesinin artması ile fcc (111) düzleminin kristalit boyutunun azalması, daha önce yapılan püskürtme tekniği ile üretilen Ni/Al çok katmanlı filmlerin Ni katman kalınlığının etkisinin incelendiği çalışma ile (Karpuz ve diğerleri, 2018) uyumlu olduğu görülmüştür.

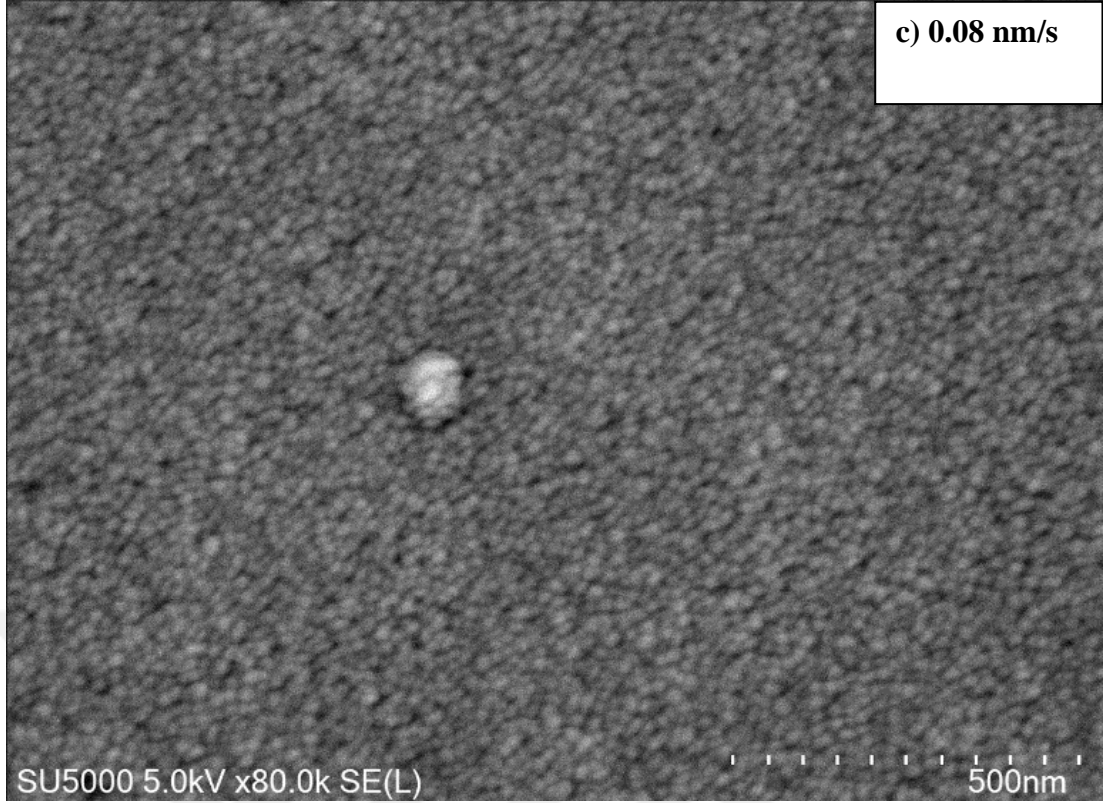


Şekil 4.7 : Alt tabakanın ve ferromanyetik Co katmanının farklı biriktirme hızlarının etkisinin incelendiği Co/Cu filmlerinin XRD desenleri.

4.2.3 Yüzey Morfolojik Analiz

Co katmanının farklı biriktirme hızlarına bağlı olarak gerçekleştirilen yüzey morfolojik analizinde alınan SEM resimleri Şekil 4.8’ de sırasıyla gösterilmiştir. Şekil 4.8 (a)’ da Co katmanının biriktirme hızı 0.02 nm/s olduğu SEM görüntüsü gösterilmiştir. Bu görüntüde küresel tanecikler görülmektedir. Bu taneciklerin çapları 20 nm civarında tespit edilmiştir. Şekil 4.8 (b) ve Şekil 4.8 (c), sırasıyla biriktirme hızı 0.05 nm/s ve 0.08 nm/s olan filmlerin yüzeylerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Görüldüğü üzere tanecikli yapı varlığını devam ettirmiş ancak yüzeydeki tane büyüklüklerinde az da olsa bir küçülme meydana gelmiştir. Bu sonuç, biriktirme hızı arttıkça yüzeydeki tanecik boyutunun azalması açısından daha önce yapılan çalışma ile (Kaplan, 2019) uyumludur. Sonuç olarak, SEM görüntüsünde tespit edilen bu değişim, filmlerin içeriğindeki Cu atom yüzdesinin azalmasıyla birlikte XRD deseninde tespit edilen pik şiddetlerindeki değişim ile ilgili olabilir.





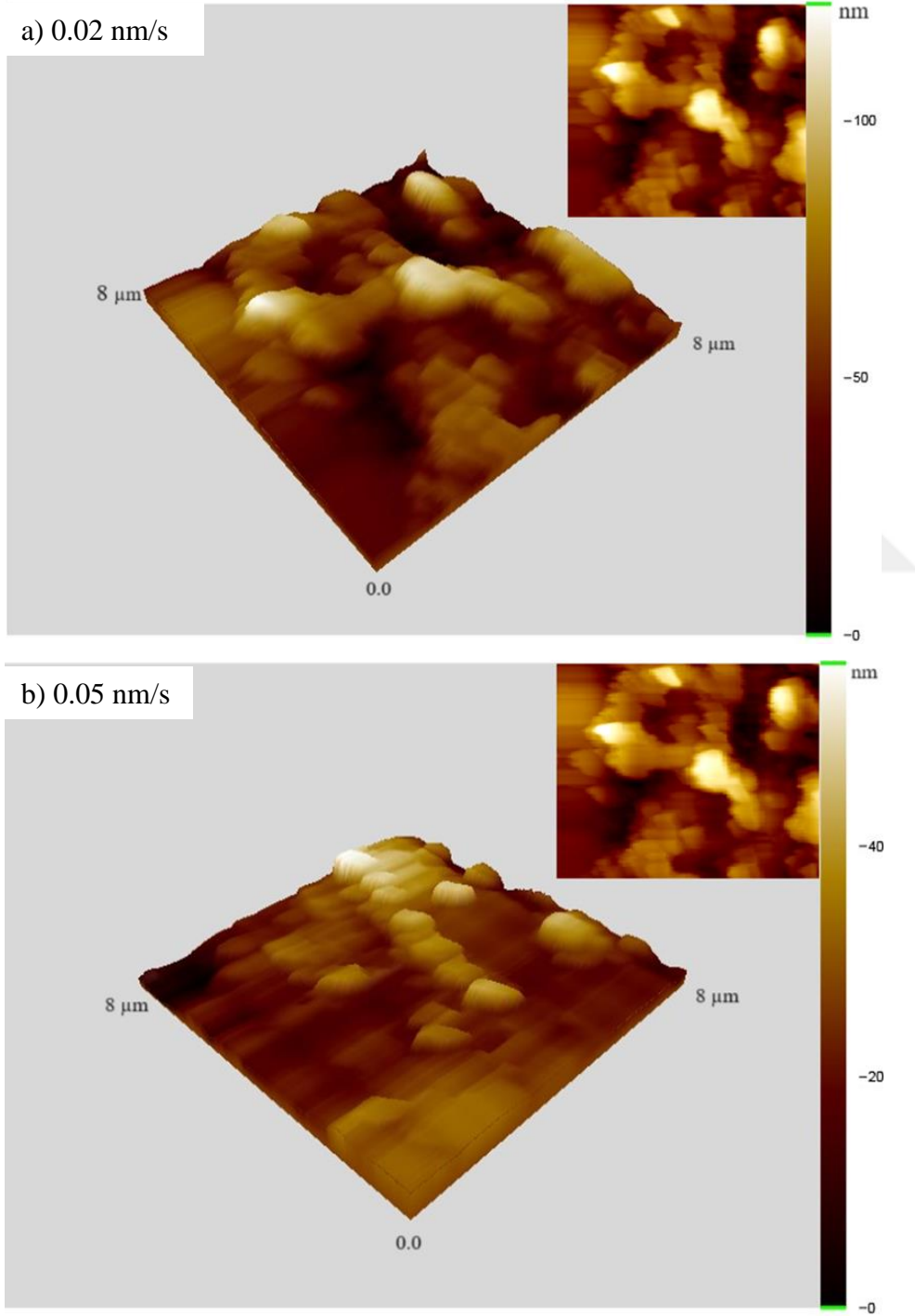
Şekil 4.8 : Ferromanyetik Co katmanının farklı biriktirme hızlarının etkisinin incelendiği Co/Cu filmlerin SEM görüntüleri a) 0.02 nm/s, b) 0.05 nm/s, c) 0.08 nm/s.

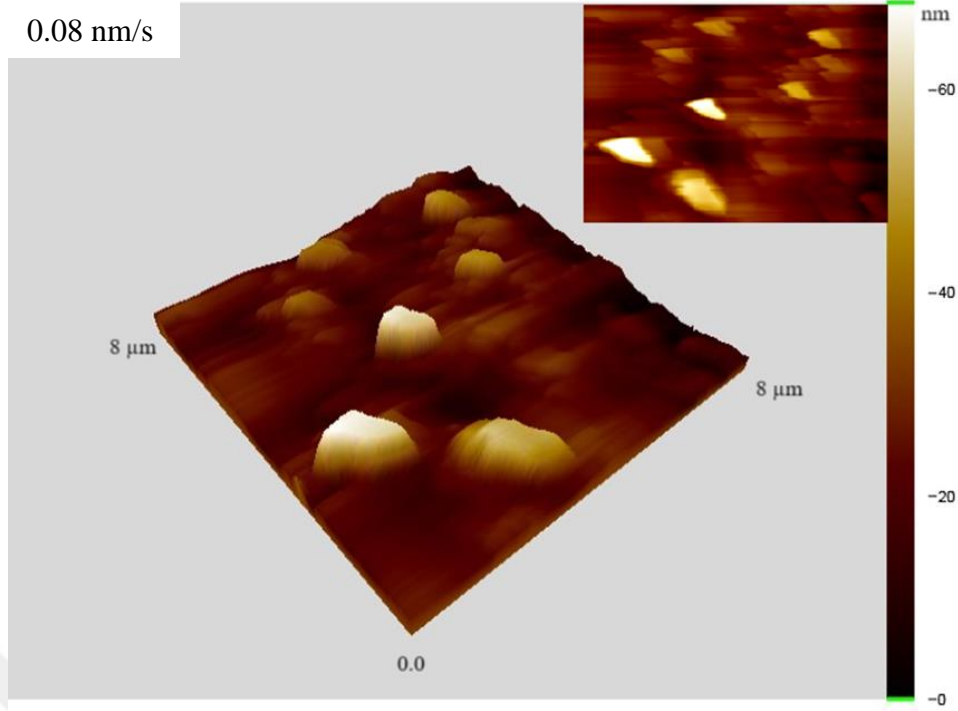
4.2.4 Atomik Kuvvet Mikroskobu Analizi

Farklı biriktirme hızlarının etkilerinin araştırıldığı bu seride, film yüzeylerinin daha iyi incelenmesi için $64 \mu\text{m}^2$ ' lik kesit alanı taranarak AFM görüntüleri alındı. Ayrıca Co/Cu manyetik ince filmlerin üretimlerinde kullanılan alt tabakanın da $64 \mu\text{m}^2$ 'lik yüzey alanı için AFM ile elde edilen görüntüsü Şekil 4.3' de daha önce verilmişti.

Bu çalışmada, biriktirme hızları (a) 0.02, (b) 0.05 ve (c) 0.08 nm/s olan Co/Cu ince filmlerin AFM ile elde edilen yüzey görüntüleri Şekil 4.9' da gösterilmiştir. Şekil 4.9 incelendiğinde renk ölçeğinde de görüldüğü gibi yüzeylerde çeşitli pürüzlülükler görülmüştür. Şekil 4.9 (a) incelendiğinde, biriktirme hızı 0.02 nm/s olan filmin yüzeyinde farklı büyüklükte ada şeklindeki yükseltiler dikkat çekmektedir. Şekil 4.9 (b) ve (c) incelendiği zaman biriktirme hızı 0.05 nm/s ve 0.08 nm/s olan iki filmin yüzeyindeki ada şeklindeki yükseltilerin sayısında bir miktar azalma mevcuttur ve bu azalma biriktirme hızı arttıkça daha da belirginleşmektedir. Bu durum şekillerdeki renk ölçeğinden açıkça görülmektedir. Biriktirme hızı arttıkça film yüzeyi nispeten daha pürüzsüz ve daha az engebeli yapıya sahip olmuştur. Ayrıca, daha önce yapılan bir çalışmada (Karpuz ve diğerler, 2020), farklı biriktirme hızlarının film yüzeyini

etkilediği ve nispeten yüksek biriktirme hızları uygulandığı zaman daha pürüzsüz film yüzeylerinin elde edilebileceği vurgulanmıştır. Bunlara ek olarak, bu seride üretilen filmlerin AFM görüntülerinin aynı seri için daha önce verilen SEM resimleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Yapılan yüzey analizi sonucunda, nispeten yüksek biriktirme hızlarında üretilen Co/Cu filmlerin yüzeylerinin daha pürüzsüz ve daha uygun yapıda olduğu sonucuna varılabilir.





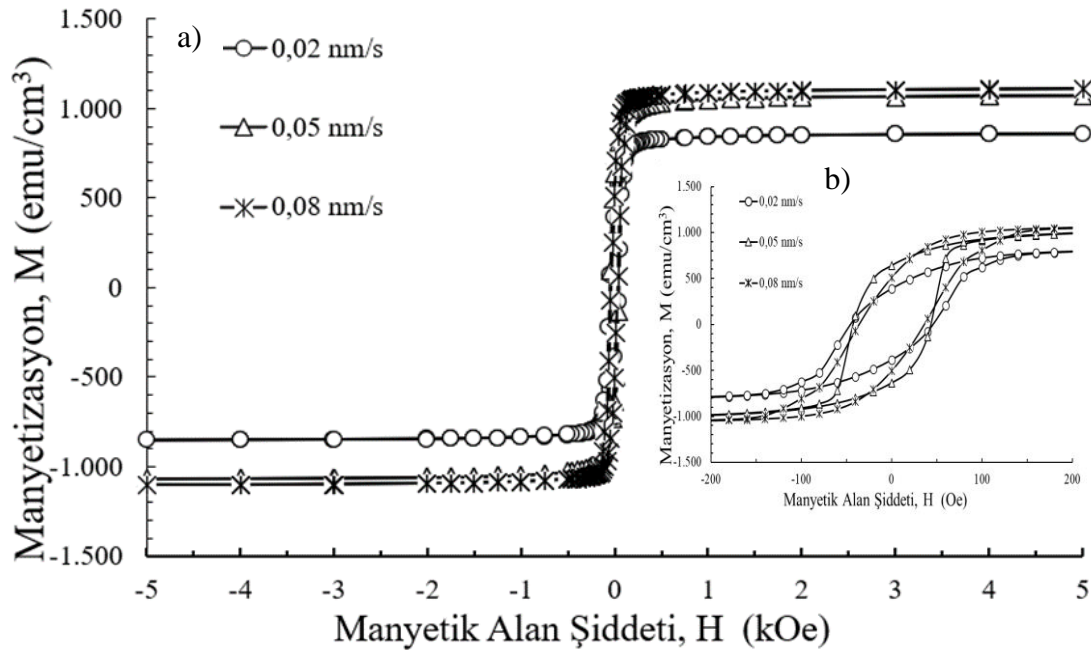
Şekil 4.9 : Farklı biriktirme hızlarında, (a) 0.02, (b) 0.05 ve (c) 0.08 nm/s, üretilen Co/Cu filmlerin AFM kullanılarak elde edilen yüzey görüntüleri.

4.2.5 Manyetik Analiz

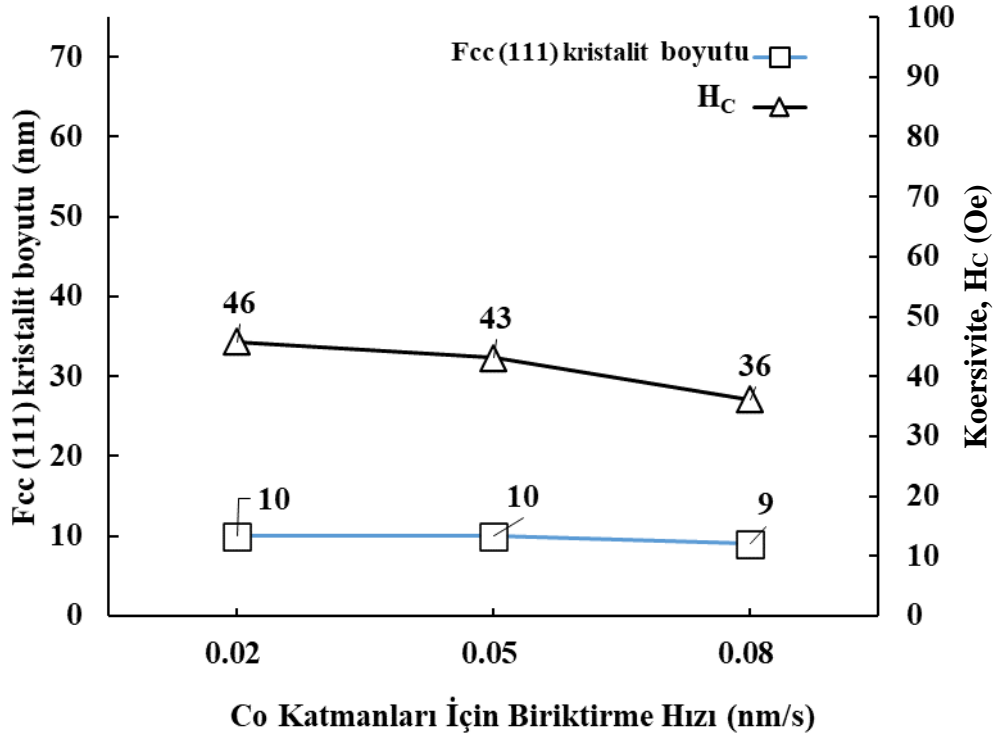
Co katmanının farklı biriktirme hızlarının, Co/Cu ince filmlerin manyetik özellikleri üzerine etkisini araştırmak için paralel histeresiz eğrileri çizdirildi ve Şekil 4.10' da gösterildi. Histeresiz eğrilerinden M_s , M_r , M_s/M_r ve H_c değerleri tespit edildi. Elde edilen sonuçlara göre, Co katmanının biriktirme hızı 0.02 nm/s, 0.05 nm/s ve 0.08 nm/s olarak kademeli arttırıldığında elde edilen M_s değerleri sırası ile 824 emu/cm³, 1029 emu/cm³ ve 1072 emu/cm³ olarak tespit edildi. Buna göre, biriktirme hızındaki artış Co atomik içeriğindeki artış ile lineer olarak (bakınız Çizelge 4.6) M_s değerlerinde de artışa neden olmuştur. Bir başka ifadeyle, Co oranı arttıkça manyetik malzemenin mıknatıslanma özelliği artmıştır. Aynı zamanda Co biriktirme hızının düzenli bir şekilde 0.02 nm/s, 0.05 nm/s ve 0.08 nm/s olarak arttırılması ile elde edilen H_c değerleri sırasıyla 46 Oe, 43 Oe ve 36 Oe olarak bulunmuştur. Buna göre biriktirme hızındaki artış H_c değerlerinde kademeli bir azalmaya neden olmuştur. Bir manyetik malzeme manyetik olmayan bileşenlerin miktarındaki artış o malzemenin H_c değerinde bir artışa sebep olduğu ifade edilmiştir (Jiles, 1991), (Karaağaç, 2007). Dolayısıyla, üretilen ince filmlerin biriktirme hızı arttıkça Cu atom içeriği azalması, H_c değerlerinin azalmasına neden olmuş olabilir. Bununla birlikte, fcc yapının (111) düzleminin kristalit boyutlarında tespit edilen bir miktar küçülme H_c değerlerinin bu

azalmasına katkı sağlamış olabilir. Üretilen Co/Cu filmleri için fcc yapının (111) düzlemine ait kristalit boyutları ile H_C değerleri arasındaki ilişkinin gösterildiği grafik Şekil 4.11’ de verilmiştir. Diğer taraftan, yüzey morfolojisindeki değişimlerin filmlerin H_C değerleri üzerinde önemli etkilere neden olduğu (Köçkar ve diğerleri, 2019), (Karpuz ve diğerleri, 2018) çalışmalarında açıkça belirtilmiştir. Filmlerin tespit edilen H_C değerleri dikkate alındığında, H_C değerlerindeki değişime SEM görüntülerindeki taneli yapıların küçülmesi ile de bağdaştırılan yüzey pürüzlülüğündeki değişimin de katkıda bulunduğu sonunca varılabilir. Co katmanının farklı biriktirme hızı dikkate alınarak üretilen Co/Cu filmlerinde M_S ve H_C değerlerinin değişimi Şekil 4.12’ de verilmiştir.

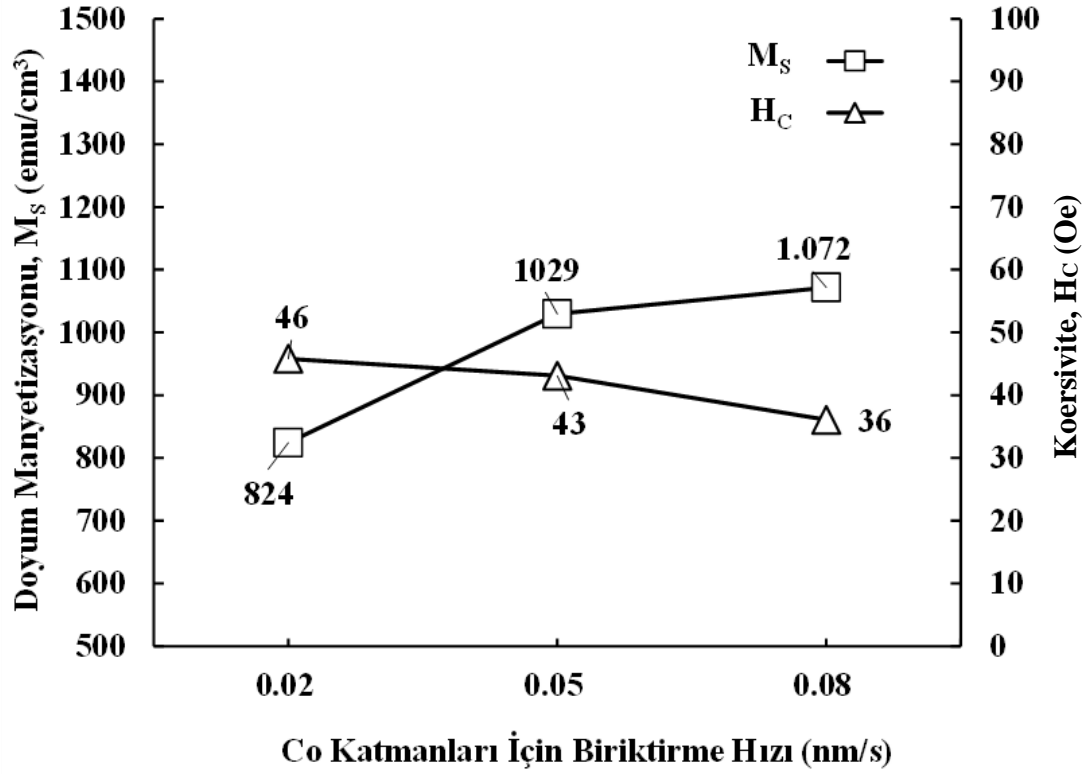
Co/Cu manyetik ince filmlerin Co katmanının biriktirme hızı 0.02 nm/s’den 0.08 nm/s’ye düzenli olarak artırıldığında filmlerin M_r değerleri sırasıyla 388 emu/cm³, 638 emu/cm³ ve 507 emu/cm³ olarak tespit edilmiştir. İnce filmlerin M_r/M_S oranları ise 0.5, 0.6 ve 0.5 bulunmuştur. Manyetik analiz sonuçlarına göre bulunan değerler Çizelge 4.6’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.10: Co/Cu manyetik Co katmanının farklı biriktirme hızının etkisinin incelendiği histeresiz eğrileri. a) ± 5 kOe arasında ki manyetik alan şiddetinde çizdirilen b) ± 200 Oe arasında çizdirilen.



Şekil 4.11 : Co katmanının farklı biriktirme hızı dikkate alınarak üretilen Co/Cu filmlerinde fcc yapının (111) düzlemine ait kristalit boyutu ile H_c değerlerinin değişim grafiği.



Şekil 4.12 : Co katmanının farklı biriktirme hızı dikkate alınarak üretilen Co/Cu filmlerinde M_s ve H_c değerlerinin değişimi.

Çizelge 4.6 : Co/Cu manyetik filmlerinde Co katmanının farklı biriktirme hızlarının etkisinin incelendiği manyetik analiz sonuçları.

Co katmanının biriktirme hızı (nm/s)	Co/Cu Manyetik İnce Filmlerin Analiz Sonuçları		
	0.02	0.05	0.08
Atomik Co içeriği (at. %)	19	22	26
Atomik Cu içeriği (at. %)	81	78	74
M_s (emu/cm ³)	824	1029	1072
H_c (Oe)	46	43	36
M_r (emu/cm ³)	388	638	507
M_r/M_s	0.5	0.6	0.5

5. SONUÇ

Bu çalışmada, toplam film kalınlığı ve Co katmanının biriktirme hızları farklı olan manyetik ince filmler üretildi. Üretim esnasında araştırılan parametreler sistematik olarak değiştirilirken diğer parametreler sabit tutuldu. Değişen parametrenin filmlerin özellikleri üzerine etkileri araştırıldı.

Filmlerin toplam kalınlığı arttıkça atomik Co ve Cu içeriklerinin hemen hemen aynı kaldığı bulunmuştur. Ayrıca, filmlerin fcc yapıda kristalleştiği ve tüm kalınlıklar için en şiddetli pikin (111) düzlemine ait olduğu görülmüştür. Katman sayısı artırılarak toplam film kalınlığı artırılan manyetik ince filmlerin piklerinde ve fcc (111) düzleminin kristalit boyutlarında dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir. XRD sonuçlarının, filmlerin içeriğiyle uyumlu olduğu görülmüştür. SEM görüntülerinde ise tanecikli yapının boyutlarında önemli bir değişiklik saptanmamıştır. Diğer taraftan, yüzey analizi sonuçlarına göre film kalınlığı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmış, buna paralel olarak H_c değerlerinde de kademeli olarak bir artış tespit edilmiştir. Bu durumdan ayrı olarak, M_s değerlerinde önemli değişikliklerin oluşmamasının başlıca nedeni film bileşiminin yaklaşık olarak aynı kalması ile açıklanabilir. Ayrıca, toplam kalınlık 120 nm'den 160 nm'ye kademeli olarak arttırıldığında M_r/M_s değerinin de iki katı civarına çıktığı tespit edilmiştir.

Co katmanının biriktirme hızının etkisinin incelendiği ikinci seride, Co katmanının biriktirme hızı arttırıldıkça Co atomlarının yüzdesi artmıştır. Co katmanının biriktirme hızının artması ile XRD deseninde fcc yapının (111) düzlemindeki pik şiddetinin azaldığı ve fcc yapının (200) ve (220) düzleminin piklerinin kaybolduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, Co katmanının biriktirme hızı arttıkça kırınım deseninde belirlenen fcc yapının (111) düzlemine ait piklerin kristalit boyutlarında küçülme görülmüştür. Buna göre, XRD sonuçları Co atomlarının yüzdesinin artması ile uyumludur ve kristal yapının Co katmanının biriktirme hızlarından etkilendiği görülmüştür. SEM analizine göre, yüksek biriktirme hızlarında büyütülen film yüzeylerinde, tanecikli yapıların boyutunun küçüldüğü ve AFM görüntülerine göre ise pürüzlülüğün azalarak daha sade yüzeylerin oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ferromanyetik katmanın biriktirme hızı

arttıkça, M_S değeri de atomik içerik analizi ile uyumlu olacak şekilde artmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün, dolayısıyla yüzeydeki stres ve deformasyonun büyük oranda azalması H_C değerlerinin de azalmasına neden olmuş olabilir. M_r/M_S değerleri incelediğinde ise biriktirme hızı arttıkça bu oranın hemen hemen aynı değerde sabit kaldığı bulunmuştur.

Yapılan çalışmanın sonucunda, toplam film kalınlığının değişmesinin, yüzey morfolojisindeki değişimden kaynaklı özellikle H_C değerleri üzerinde önemli etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, manyetik malzemenin biriktirme hızının artmasının yine mikro-yapısal özelliklerin değişiminden kaynaklı, manyetik özellikleri etkilediği tespit edilmiştir. Bu durum, Co/Cu çok katmanlı filmlerin kullanıldığı uygulamalarda, arzu edilen manyetik özelliklerin elde edilmesine imkân vermektedir.

KAYNAKLAR

- Adam, A. (2019). Co-tabanlı ($\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05}$) $_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0-1$) camsı alaşımların manyetokalorik ve manyetodirenç özelliklerinin incelenmesi. Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Ağırseven, O. (2011). Silisyum karbonitrür ince filmlerin reaktif doğru akım manyetik alanda sıçratma yöntemiyle üretimi ve karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Aydoğan, Ş. (2011). *Katıhal Fiziği*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım Tic. LTD: ŞTİ.
- Bayraktaroğlu, D. (2007). Manyetik alanda sıçratma yöntemiyle polimer malzemelerin SiC ile kaplanması. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Boeglin, C., Ersen, O., Pilard, M., Speisser, V. ve Kronast, F. (2009). Temperature dependence of magnetic coupling in ultrathin NiO/Fe₃O₄(001) films. *Physical Review B* içinde. cilt 80, no 3, p. 035409.
- Cullity, B. D. (1956). *Elements of X-Ray Diffraction*. United States of America: Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- Cullity, B. D. Ve Graham, C.D. (2009). *Introduction To Magnetic Materials*. Canada: John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.
- Çınar, H. (2010). MgO temelli metal oksit nano-filmlerin püskürtme tekniği ile geliştirilmesi ve manyetik spin vanası sistemlerine entegrasyonu. Anadolu Üniversitesi.
- Coşkun, İ. (2011). DC manyetik alan sıçratma tekniği ile üretilen Co₉₀ Fe₁₀ Nano filmlerin yapısal ve manyetik özelliklerinin incelenmesi. Kilis 7 Aralık Üniversitesi.
- Çoşkun, B. (2013). Sıçratma tekniği ile büyütülen zirkonyum dioksit ince filmlerin mikro yapılarının incelenmesi. Fırat Üniversitesi.
- Çöktüren E. (2008). Ferromanyetik filmlerde oluşan yüzey manyetik anizotropinin nümerik çözümlenmesi. Trakya Üniversitesi.
- Çölmekçi, S. (2016). Ni/Cu Çok katmanlı ince filmlerin püskürtme tekniğiyle üretilmesi ve karakterizasyonu. Balıkesir Üniversitesi.
- Das, H. S., Roymahapatara, G., Nandi, P. K. ve Das, R. (2021). Study the effect of ZnO/Cu/ZnO multilayer structure by radio frequency magnetron sputtering for flexible display applications. *ES Energy Environ*, 13, 50-56. doi: <https://dx.doi.org/10.30919/eseec8c441>
- Dırbalı, B. (2011). Nikel filmlerin grafen üretiminde kullanılmak üzere manyetik alanda sıçratma yöntemi ile üretilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Diken, S. (2013). Co₉₀Fe₁₀ ince filmlerin manyetik ve yapısal özelliklerine altın alt tabakanın etkisi. 7 Aralık Üniversitesi.

- Dikici, M. (2013). *Katı hâl Fiziği*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Duru, İ. P. (2011). XY türü ince film oluşumunun Monte Carlo Metodu ile simülasyonu. Marmara Üniversitesi.
- Enönlü, E. (2017). Mikro manyetik soğutucularda kullanılacak Ni- Mn tabanlı manyetik ince filmlerin üretimi ve bunların yapısal, manyetik ve manyetik soğutma özelliklerinin incelenmesi. Ankara Üniversitesi.
- Gültekin, Z. (2019). NiCr ince filmlerin elektrokimyasal yöntemle üretilmesi ve özelliklerin araştırılması. Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Jiles, D. (1991). *Introduction To Magnetism And Magnetic Materials*. London: Chapman and Hall Press.
- Kaplan, N. (2019). Püskürtme yöntemiyle AISI 202 ve AISI 304 östenitik paslanmaz çelik kaynaklardan esnek alt tabakalar üzerinde büyütülen FeCrMn ve FeCrNi martensitik filmlerin yapısal ve manyetik karakterizasyonları. Balıkesir Üniversitesi.
- Karaağaç, Ö. (2007). CoCu alaşım filmlerin elektrodepozisyonu, yapısal ve manyetik özellikleri üzerine depozisyon parametrelerinin etkisinin incelenmesi. Balıkesir Üniversitesi.
- Karaağaç, Ö. (2011). Optimum doyum manyetizasyonlu süper paramanyetik nanoparçacıkların sentezi, karakterizasyonu ve enzim immobilizasyon uygulaması. Balıkesir Üniversitesi.
- Karpuz, A. (2011). Elektrodepozisyonla büyütülen Ni-Co filmlerinin karakterizasyonu ve manyetorezistans davranışının incelenmesi. Balıkesir Üniversitesi.
- Karpuz, A., Köçkar H. ve Çölmekçi, S. (2018). Structural and corresponding magnetic properties of sputtered Ni/Al multilayer films effect of Ni layer thickness. *Acta Physica Polonica A*, Vol. 134, 1180-1186. doi: 10.12693/ AphysPolA.134.1180
- Karpuz, A., Köçkar, H., Çölmekçi ve Uçkun, M. (2020). Parametric characterizations of sputtered Fe/Al multilayer thin films. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 33:463–472.
- Kaya, H. (2005). CoNiFe ince film alaşımlarının elektrokimyasal olarak elde edilmesi ve özelliklerinin incelenmesi. İnönü Üniversitesi.
- Kaya, B. (2017). Püskürtme metoduyla üretilen FeCr alaşım ince filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri üzerine biriktirme oranı ve döner alt tabaka hızının etkilerinin incelenmesi. Balıkesir Üniversitesi.
- Köçkar, H., Kaplan, N., Karpuz, A., Kuru, H. ve Kaya, B. (2019). Characterizations of binary FeCr AISI 430 thin films deposited from a single magnetron sputtering under easy controllable deposition parameters. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32:2457-2465. <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4968-1>
- Kuru, H. (2009). Elektrodepozisyonla sentezlenen NiFe alaşım ve NiFeCu/Cu süperörgülerin yapısal, manyetik ve magnetotransport karakterizasyonu. Balıkesir Üniversitesi.
- Liu, K., Zhang, R., Lu, L., Li, J. and Zhang, S. (2023). Effect of film thickness on microstructural and magnetic properties of Lithium ferrite films prepared on SrTiO₃ (001) substrates. doi: 10.20944/preprints202309.1631.v2

- Pasa, A. A., Sartorelli, M.L.E., Seligman, L. ve Munford, L. (2001). Electrodeposition of Co thin films and Co/Cu spin-valves on silicon. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 226:752-753. doi: 10.1016/S0304-8853(00)00888-X.
- Pattanaik, G. R., Pandya, D. K. ve Kashyap, S. C. (2003). Effect of process parameters on GMR in electrodeposited Cu-Co nanogranular thin films. *Thin Solid Films*, 433, 247.
- Qunxian, L., Ji Hyun, M., Ji Ung, C. ve Young Keun, K. (2005). The pH dependence of CoCu alloy thin films fabricated on amorphous substrate by DC electrodeposition. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41, No.2, 930.
- Rajasekaran, N., Mâni, J., Toth B. G., Molnâr, G., Mohan, S., Peter, L. and Bakonyia, I. (2015). Giant Magnetoresistance and structure of electrodeposited Co/Cu Multilayers: the influence of layer thicknesses and Cu deposition potential. *Journal of The Electrochemical Society*, DOI: 10.1149/2.0451506jes
- Ohring, M. (2002). *Materials science of thin films deposition and structure*. Academic Pres.
- Oliver, R.A. (2008). Advances in AFM for the electrical characterization of semiconductors. *Reports On Progress In Physics*: doi:10.1088/0034-4885/71/7/076501.
- Özdemir, R. (2019). Elektrodopolama ile üretilen CoNi alaşım ince film kaplamaların yapısal ve manyetik özellikleri üzerine ek katkı maddelerinin etkisi. *Fen Bilimleri Dergisi: Tasarım ve Teknoloji*. Part C, 7(3): 661-675.
- Özdemir, S. (2022). Manyetik kayıt ortamları için ferromanyetik malzemelerin elektrodpozisyonu, yapısal ve manyetik özellikleri. Uludağ Üniversitesi.
- Özergin, E. (2008). Elektrodpozisyon tekniği ile büyütülen CoFeCu filmlerin yapısal, manyetik ve manyetodirenç özelliklerinin incelenmesi. Balıkesir Üniversitesi.
- Özkaya, Ö. (2015). NiFeCe ince film alaşımlarının magnetik ve yapısal özelliklerinin incelenmesi. Kilis 7 aralık Üniversitesi.
- Satılmış, H. (2014). AIN katmanların fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle üretimi ve karakterizasyonu. Afyon Kocatepe Üniversitesi
- Serway, R.A. ve Beicher, R.J. (2000). *Physics For Scientists and Engineers with Modern Physics-2*. Palme Yayıncılık.
- Şafak M. (2005). Co-Cu alaşım filmlerinin elektrodpozisyonu ve özelliklerinin incelenmesi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şentürk, Ö. (2019). Biriktirme oranı ve döner alt tabaka hızının, püskürtme metoduyla üretilen FeCrNiCd alaşım ince filmlerinin yapısal ve manyetik özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi. Balıkesir Üniversitesi.
- Tavşanoğlu, T. (2001). Reaktif DC magnetron sıçratma / PECVD hibrit tekniğiyle biriktirilen Ti/Ti_xC_y/DLC ince film kaplamaların üretim koşullarının belirlenmesi ve karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Tekgül, A., Köçkar, H. Kuru, H. ve Alper, M. (2017). Electrochemical deposition of CoCu/Cu multilayers: structural and magnetic properties as a function of non-magnetic layer thickness. DOI: 10.1515/zna-2017-0332.

- Tok, Ç. (2019). SiO₂ üzerine büyütülen NiMnCoSn ince filmlerine krom ara tabaka katkısının manyetik ve termoelektriksel özelliklerinin incelenmesi. Ankara Üniversitesi.
- Vavassori, P., Angeli, E., Bisero, D., Spizzo, D. ve Ronconi, F. (2001). Particle size distribution and temperature dependence of coercivity and remanence in sputtered Co/Cu granular films. *Phys. stat. sol. (a)* 189, No. 2, 423–427(2002).
- Yalçın, C. (2007). *Temel Fizik*. Ankara: Arkadaş yayınevi.
- Walzak, M.J., Davidson R. ve Biesinger, M. (1998). The use of XPS, FTIR, SEM/EDX, contact angle, and AFM in the characterization of coatings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, JMEPEG (1998) 7:3.



