



ENERJİ VERİMLİ YÜZEYLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Ali Emre GÜMRÜKÇÜ

DOKTORA TEZİ

İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....

Ali Emre GÜMRÜKÇÜ

16/08/2021

ENERJİ VERİMLİ YÜZEYLERİN GELİŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Ali Emre GÜMRÜKÇÜ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2021

ÖZET

Düşük yayıcı kaplamalar binaların ısınma ve soğutma giderlerini azaltmak amacı ile kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Bu sayede binalarda kullanılan enerji daha verimli hale gelmekte ve tasarruf sağlanmaktadır. Bu tez çalışmasında cam alttaş üzerine dielektrik/metal/dielektrik yapısı geliştirilerek enerji verimli yüzey elde edilmeye çalışıldı. Bu yapının haricinde cam alttaş ile yapı arasına yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ve yapıyı korumak adına bir bariyer katmanı da kaplandı. İlk olarak kaplanacak malzemeleri belirlemek amacı ile optik tasarım programı kullanılarak tasarımlar yapıldı. Tasarım çalışmaları sonucunda bariyer katmanı olarak Al_2O_3 malzemesi tercih edilirken dielektrik katmanı olarak AZO ve metal katmanı olarak da Ag tercih edildi. En uygun kaplama koşullarının belirlenebilmesi için her katman farklı basınç, farklı güç ve farklı kalınlıklarda hazırlandı. Elde edilen sonuçlar analiz edilerek en uygun parametreler belirlendi. A_2O_3 için uygun kalınlık daha önce yapılan çalışmalar ışığında 25 nm olarak belirlenirken kaplama gaz akışı 5 sccm ve kaplama gücü 150 W RF olarak belirlendi. AZO katmanı için kalınlıklar alt AZO katmanı için 10 nm ve üst AZO katmanı için ise 20 nm olarak belirlenirken kaplama gaz akışı 5 sccm ve kaplama gücü 100 W RF olarak belirlendi. Ag katmanı için ilk olarak 10 nm kalınlıklı, farklı gaz akış değerlerinde kaplamalar yapıldı. Görünür bölgede en yüksek geçirgenlik değerini veren 5 sccm ve kızılötesi bölgede en düşük geçirgenlik değerini veren 50 sccm Argon gaz akışı değerlerinde optimizasyon çalışmalarına devam edildi. Belirlenen Argon gaz akışlarında farklı güç değerleri için kaplamalar yapıldı ve her iki gaz akışı değeri için de 25 W DC güç değerinin en uygun sonucu verdiği görüldü. Sonrasında her iki gaz akışı değeri için de 25 W DC güçte farklı kalınlıklarda kaplamalar yapıldı. Farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag filmlerde, 50 sccm gaz akışında 5 nm kalınlıklı sürekli filmler elde edilebilirken, 5 sccm gaz akışında üretilen en ince sürekli filmin 7 nm kalınlıklı olduğu görüldü. Hazırlanan filmler analiz edilerek 50 sccm gaz akışında Ag atomlarının enerjilerinin azaldığını, atomların bir araya gelerek adacıklı büyümeyi tercih etmek yerine yüzeye daha homojen yayılarak, daha az boşluğa sahip ince filmler haline geldiği görüldü. Hazırlanan AZO/Ag/AZO/ Al_2O_3 /Cam yapısının 500 nm’de yaklaşık %85 optik geçirgenlik sağladığı, 2,5 μm ve 8 μm ’de sırası ile %79 ve %84 yansıtma değerine sahip olduğu yapılan optik analizler sonucunda belirlendi. Hazırlanan bu yapının, yüzey direnci değeri kullanılarak yayma oranı 0,055 olarak hesaplandı. Bu değer düşük yayıcı özelliğe sahip ticari ürünler ile rekabet edebilecek seviyede olduğu görüldü. Ayrıca belirtilen sonuçlara 5 nm kalınlığında Ag ince filmler ile ulaşılabilmesi çalışmanın değerini daha da arttırmaktadır.

Bilim Kodu : 20227
Anahtar Kelimeler : Düşük yayıcı, gümüş, ince film, magnetron kopartma, kaplama
Sayfa Adedi : 103
Danışman : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

DEVELOPMENT OF ENERGY EFFICIENT SURFACES

(Ph. D. Thesis)

Ali Emre GÜMRÜKÇÜ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2021

ABSTRACT

Low emissivity coatings are one of the techniques used to reduce the heating and cooling costs of buildings. In this way, the energy used in buildings becomes more efficient and savings are achieved. In this thesis, it was tried to obtain an energy efficient surface by developing a dielectric/metal/dielectric structure on glass substrate. In addition to this structure, a barrier layer was also coated between the glass substrate and the structure to reduce the surface roughness and protect the structure. Firstly, designs were made using optical design program to determine the materials to be used. As a result of the design studies, Al_2O_3 material was preferred as the barrier layer, AZO was preferred as the dielectric layer and Ag was preferred as the metal layer. In order to determine the most suitable coating conditions, each layer was prepared at different pressures, different sputtering power and different thicknesses. The obtained results were analyzed and the most suitable parameters were determined. The appropriate thickness for Al_2O_3 was determined as 25 nm in the result of our previous studies, while the argon gas flow was determined as 5 sccm and the sputtering power was 150 W RF. The thicknesses for the AZO layer were determined as 10 nm for the lower AZO layer and 20 nm for the upper AZO layer, while the Argon gas flow was determined as 5 sccm and the sputtering power was determined as 100 W RF. For the Ag layer, firstly, 10 nm thick coatings with different gas flow values were made. Optimization studies continued for Argon gas flow values of 5 sccm, which gives the highest transmittance value in the visible region, and 50 sccm, which gives the lowest transmittance value in the infrared region. Coatings were made for different power values in the determined Argon gas flows and it was seen that 25 W DC power value gave the best result for both gas flow values. Afterwards, coatings of different thicknesses were made at 25 W DC power for both gas flow values. In Ag films prepared in different thicknesses, 5 nm thick continuous films could be obtained at 50 sccm gas flow, while the thinnest continuous film produced at 5 sccm gas flow was 7 nm thick. The prepared films were analyzed and it was seen that the energies of Ag atoms decreased in 50 sccm gas flow, and instead of preferring to grow with islands structure, the atoms spread more homogeneously on the surface and became thin films with less pores. As a result of the optical analysis, it was determined that the prepared AZO/Ag/AZO/ Al_2O_3 /Glass structure provided approximately 85% optical transmittance at 500 nm, and 79% and 84% reflectance values at 2.5 μm and 8 μm , respectively. The emissivity of this prepared structure was calculated as 0.055 by using the surface resistance value. This value was found to be competitive with commercial products. In addition, the fact that the stated results can be achieved with 5 nm thick Ag thin films further increases the value of the study.

Science Code : 20227

Key Words : Low emmisivity, silver, thin film, magnetron sputtering, coating

Page Number : 103

Supervisor : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesini sağlayan, büyük bilgi birikimi ile beni yönlendiren ve yetiştiren, tez danışmanım ve değerli hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e,

Tez çalışmalarım boyunca yardımları ve destekleri ile benim yanımda olan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde görev olan değerli hocalarım ve çalışma arkadaşlarıma,

Doktora dönemim boyunca hem akademik çalışmalarımda hem de sosyal hayatımda her zaman destekçim olan, birlikte çalışma fırsatına da sahip olduğum değerli arkadaşlarım Halil İbrahim EFKERE ve Alp Deniz YAMAN'a,

Uzun yıllardır hayatımın her noktasında, her daim yanımda olan Ahmet Ertuğrul BİLKAN, Gökhan MEHMETOĞLU, Alperen AKARSLAN, Muhammed Ali YİĞİT ve Melih TOKER'e ve diğer bütün dostlarıma,

Beni yetiştiren ve bu noktaya gelebilmem için her türlü fedakârlığı yapan, başta annem, babam ve kardeşlerim olmak üzere bütün aileme,

Her zaman yanımda olan, bana olan desteğini ve sevgisini her gün hissettiğim, hayatımın anlamı canım eşim Gülsüm Sarı GÜMRÜKÇÜ'ye

Tüm kalbimle ve en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Bu tez 2011K120290 no'lu "Fotonik Araştırma Merkezi" isimli ve 2016K121220 no'lu "Fotonik Uygulama ve Araştırma Altyapısının Geliştirilmesi" isimli T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı projeleri ile desteklenmiştir. Ayrıca bu çalışma 117F363 no'lu "Fonksiyonel Yüzeyler İçin Çok İnce Gümüş Filmlerin Elektro-Optik Özelliklerinin Geliştirilmesi" isimli Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) projesinin bir çıktısıdır.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Enerji	5
2.1.1. Enerji verimli yüzeyler	6
2.2. Isı Transferi	8
2.2.1. İletim	8
2.2.2. Yayınım.....	11
2.2.3. Işınım	13
2.3. Elektromanyetik Spektrum.....	15
2.4. Yayıcılık.....	17
3. DÜŞÜK YAYICILIĞA SAHİP YAPILAR	21
3.1. Dielektrik/Metal/Dielektrik Yapılar.....	22
3.2. Dielektrik Katmanı ve Özellikleri.....	23
3.3. Metal Katmanı ve Özellikleri.....	25

	Sayfa
3.4. Bariyer Katmanı ve Özellikleri	30
4. D/M/D YAPILARIN GELİŞTİRİLMESİ.....	33
4.1. İnce Filmler ve Üretim Yöntemleri.....	33
4.1.1. Magnetron kopartma tekniği.....	34
4.2. Al ₂ O ₃ İnce Filmlerin Özellikleri ve Geliştirilmesi.....	37
4.3. AZO İnce Filmlerin Özellikleri ve Geliştirilmesi	41
4.4. Ag İnce Filmlerin Özellikleri ve Geliştirilmesi	44
4.5. İnce Filmlerin Analiz Teknikleri	46
4.5.1. UV-VIS spektroskopisi	46
4.5.2. Van Der Pauw tekniği.....	47
4.5.3. İkincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS).....	48
4.5.4. Atomik kuvvet mikroskopu (AFM)	49
4.5.5. Taramalı elektron mikroskopu (SEM)	50
4.5.6. X-Işını fotoelektron spektroskopisi (XPS).....	51
4.5.7. Kontak açısı analizi	52
4.5.8. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi.....	53
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	55
5.1. Al ₂ O ₃ İnce Filmlerin Karakterizasyonu	55
5.2. AZO İnce Filmlerin Karakterizasyonu.....	60
5.3. Ag İnce Filmlerin Karakterizasyonu	66
5.4. D/M/D Yapısının Oluşturulması ve Karakterizasyonu	87
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	102

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bazı malzemelerin oda sıcaklığındaki termal iletkenlik değerleri	10
Çizelge 2.2. Yayılım ısı transferi katsayısının genel değerleri	13
Çizelge 2.3. Bazı malzemelerin 300 K sıcaklıktaki yayıcılık katsayıları	15
Çizelge 4.1. Farklı Argon gazı akışlarında hazırlanan Al_2O_3 ince filmlerin kaplama koşulları.....	41
Çizelge 4.2. Farklı RF güç değerlerinde hazırlanan Al_2O_3 ince filmlerin kaplama koşulları.....	41
Çizelge 4.3. Farklı Argon gazı akışlarında hazırlanan AZO ince filmlerin kaplama koşulları.....	43
Çizelge 4.4. Farklı RF güç değerlerinde hazırlanan AZO ince filmlerin kaplama koşulları.....	43
Çizelge 4.5. Farklı Argon gazı akışlarında hazırlanan Ag ince filmlerin kaplama koşulları.....	45
Çizelge 4.6. Farklı DC güç değerlerinde hazırlanan Ag ince filmlerin kaplama koşulları.....	45
Çizelge 4.7. Farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin kaplama koşulları.....	46
Çizelge 5.1. Farklı Argon gaz akışlarında hazırlanan Al_2O_3 ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	58
Çizelge 5.2. Farklı Argon gaz akışlarında hazırlanan AZO ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	63
Çizelge 5.3. Farklı Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü, yüzey direnci ve kontak açısı değerleri	69
Çizelge 5.4. 5 sccm Argon gaz akışında ve farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey direnci değerleri	76
Çizelge 5.5. 50 sccm Argon gaz akışında ve farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey direnci değerleri	82

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Düşük yayıcı camların çalışma mekanizması	7
Şekil 2.2. Yüzey alanı A ve kalınlığı Δx olan düz bir duvardaki ısı iletimi.....	9
Şekil 2.3. Yayılım ile sıcak bir yüzeyden havaya ısı transferi	11
Şekil 2.4. Zorlamalı yayılım ve doğal yayıma bir örnek	12
Şekil 2.5. Elektromanyetik spektrum	16
Şekil 2.6. Gelen bir ışının yüzeye etkileşimi sonucu oluşan geçen, yansıyan ve soğurulan ışınlar	19
Şekil 4.1. Tez çalışması kapsamında hazırlanacak olan hedef yapı	37
Şekil 4.2. Farklı kalınlıklardaki Al_2O_3 ince filmlerin optik tasarım programı yardımı ile elde edilen geçirgenlik ve yansıtma grafikleri	38
Şekil 4.3. Farklı kalınlıklardaki Si_3N_4 ince filmlerin optik tasarım programı yardımı ile elde edilen geçirgenlik ve yansıtma grafikleri	39
Şekil 4.4. Farklı kalınlıklardaki AZO ince filmlerin optik tasarım programı yardımı ile elde edilen geçirgenlik ve yansıtma grafikleri	42
Şekil 4.5. Yüzey ile damlacık arasındaki kontak açısı	53
Şekil 5.1. Farklı Argon gaz akışlarında hazırlanan Al_2O_3 ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları.....	55
Şekil 5.2. Farklı RF güç değerlerinde hazırlanan Al_2O_3 ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları.....	59
Şekil 5.3. 5 sccm Argon gaz akışında ve 150 W RF gücünde kaplanan Al_2O_3 ince filmin genel tarama ve Al_{2p} çekirdek seviyesinin dar tarama XPS spektrumu	60
Şekil 5.4. Farklı Argon gaz akışlarında hazırlanan AZO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları.....	61
Şekil 5.5. Farklı RF güç değerlerinde hazırlanan AZO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları.....	64
Şekil 5.6. 5 sccm Argon gaz akışında ve 100 W RF gücünde kaplanan AZO ince filmin genel tarama, Al_{2p} çekirdek seviyesinin dar tarama, Zn_{2p} çekirdek seviyesinin dar tarama ve Zn LMM Auger elektron pikinin dar tarama XPS spektrumu.....	65

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Farklı Argon gaz akışlarında hazırlan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları	67
Şekil 5.8. Farklı DC güç değerlerinde ve 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları.....	72
Şekil 5.9. Farklı DC güç değerlerinde ve 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları.....	73
Şekil 5.10. 5 sccm Argon gaz akışında ve farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumu	74
Şekil 5.11. A) 5 nm, B) 7 nm ve C) 10 nm Ag ince film kalınlıklı 5 sccm Argon gaz akışında ve D) 5 nm, E) 7 nm ve F) 10 nm Ag ince film kalınlıklı 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan örneklerin SIMS analizleri.....	77
Şekil 5.12. 50 sccm Argon gaz akışında ve farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumu	80
Şekil 5.13. Farklı kalınlıklarda hazırlanan üst AZO katmanlarının bulunduğu yapıların optik geçirgenlik spektrumları	87
Şekil 5.14. AZO/Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam yapısının optik yansıtma spektrumu.....	89

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Magnetron kopartma sistemi (BesTec).....	36
Resim 4.2. UV-Vis spektrometresi (Perkin Elmer Lambda 2S).....	47
Resim 4.3. Van Der Pauw elektriksel ölçüm sistemi (Lake Shore).....	48
Resim 4.4. İkincil iyon kütle spektroskopisi (Hiden Analytical)	49
Resim 4.5. Atomik kuvvet mikroskopu (Nanomagnetics)	50
Resim 4.6. Taramalı elektron mikroskopu (Hitachi SU5000)	51
Resim 4.7. X ışını Fotoelektron spektroskopisi (Omicron)	52
Resim 4.8. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi (Bruker Vertex 80)	53
Resim 5.1. a)5 sccm b)10 sccm c)20 sccm d)30 sccm e)40 sccm f)50 sccm Argon gaz akışlarında hazırlanan Al ₂ O ₃ ince filmlerin AFM görüntüleri.....	57
Resim 5.2. a)5 sccm b)10 sccm c)20 sccm d)30 sccm e)40 sccm f)50 sccm Argon gaz akışlarında hazırlanan AZO ince filmlerin AFM görüntüleri	62
Resim 5.3. a)5 sccm b)10 sccm c)20 sccm d)30 sccm e)40 sccm f)50 sccm Argon gaz akışlarında hazırlanan Ag ince filmlerin AFM görüntüleri.....	68
Resim 5.4. a)5 sccm b)10 sccm c)20 sccm d)30 sccm e)40 sccm f)50 sccm Argon gaz akışlarında hazırlanan Ag ince filmlerin SEM görüntüleri	70
Resim 5.5. a)5 sccm ve b)50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan örneklerin kontak açısı ölçümlerinin yapıldığı resimler	71
Resim 5.6. a)5 nm b)6 nm c)7 nm d)8 nm e)9 nm f)10 nm kalınlıklarında hazırlanan Ag ince filmlerin AFM görüntüleri.....	75
Resim 5.7. a)5 nm b)6 nm c)7 nm d)8 nm e)9 nm f)10 nm kalınlıklarında hazırlanan Ag ince filmlerin SEM görüntüleri	79
Resim 5.8. a)5 nm b)6 nm c)7 nm d)8 nm e)9 nm f)10 nm kalınlıklarında hazırlanan Ag ince filmlerin AFM görüntüleri.....	81
Resim 5.9. a)5 nm b)6 nm c)7 nm d)8 nm e)9 nm f)10 nm kalınlıklarında hazırlanan Ag ince filmlerin SEM görüntüleri	83
Resim 5.10. 20 nm kalınlıklı üst AZO katmanına sahip AZO/Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam yapısının AFM görüntüsü	88

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamalar ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
Al	Alüminyum
As	Isı transferinin gerçekleştiği yüzey alanı
$A_{(\omega)}$	Soğurma katsayısı
Ag	Gümüş
Al_2O_3	Alüminyum oksit
Ar	Argon
AZO	Alüminyum katkılı çinko oksit
Cs	Sezyum
d	Dielektrik katsayısı
D/M/D	Dielektrik/Metal/Dielektrik
DC	Doğru Akım
E_b	Siyah cisim yayıcılık gücü
eV	Elektron volt
FTO	Flor katkılı kalay oksit
h	Yayınım ısı transfer katsayısı
ITO	İndium katkılı kalay oksit
K	Kelvin
keV	Kilo elektron volt
Mg	Magnezyum
mbar	milibar
mm	milimetre
n_f	Kırılma indisi
nm	nanometre
O	Oksijen
°C	Santigrat derece
Si	Silikon
SiO_2	Silikon dioksit

Simgeler**Açıklamalar****Si₃N₄**

Silisyum nitrür

sccm

Dakika başına akan standart santimetre-küp

T

Sıcaklık

Ta

Tantalyum

T_s

Yüzeyin sıcaklığı

TiO₂

Titanyum dioksit

W

Watt

Zn

Çinko

ZnO

Çinko oksit

ZnS

Çinko sülfür

ε

Yüzeyin yayıcılık katsayısı

ω

Frekans

ω_p

Plazma frekansı

γ

Saçılma frekansı

σ

Stefan-Boltzman sabiti

α

Yüzeyin soğurma katsayısı

λ

Dalgaboyu

μm

Mikrometre

Kısaltmalar**Açıklamalar****AFM**

Atomik kuvvet mikroskobu

NIR

Yakın kızılötesi bölge

RF

Radyo frekans

SEM

Taramalı elektron mikroskobu

SIMS

İkincil iyon kütle spektrometresi

SLG

Soda-kireç camı

UV

Morötesi

UV-VIS

Morötesi ve görünür

XPS

X ışını Fotoelektron spektroskopisi

XRD

X ışınları kırınımı

1. GİRİŞ

Enerji, insanoğlunun yaşamını devam ettirebilmesi için ihtiyaç duyduğu unsurlardan bir tanesidir. İnsanlığın başlangıcında daha çok ısınma amacıyla kullanılan enerji, özellikle sanayi devrimi ile makinaların hayatımıza girişı ve sonrasında elektriğın keşı ile yaşamın temel ihtiyaçlarından biri haline gelmiştir. Günümüz dünyasında insanların ve toplumun refahı sahip oldukları enerji miktarı ile ölçülebilmektedir. Enerji hayatımızın her noktasında ihtiyaç duyduğumuz temel unsur haline gelmiştir. Teknolojinin gelişmesi ve artan nüfus ile insanoğlunun enerji tüketimi her geçen gün artmakta ve bizim için vazgeçilmez hale gelmektedir.

Artan talep ile enerjiye harcanan para her geçen gün artmaktadır. Ülkelerin gider kalemlerinde en üst sıralarda yer alan enerji harcamaları maddi anlamda refahımızı doğrudan etkilemektedir. Özellikle Türkiye gibi enerji kaynakları sınırlı olan ve enerjide dışa bağımlı olan ülkelerde enerjinin verimli kullanılması son derece önem arz etmektedir.

Enerji kaynakları genel anlamda iki ayrı sınıfta değerlendirilebilir. Yenilenemeyen enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynakları. Yenilenemeyen enerji kaynakları fosil yakıtlar olarak da bildiğimiz kömür, petrol ve doğalgaz gibi kaynaklardır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise hidrolik, güneş, rüzgâr, biokütle ve jeotermal kaynaklar olarak söylenebilir [1,2]. Dünya genelinde en çok fosil yakıtlar enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bunun sonucu olarak da karbon salınımı artmakta ve bu durum doğamıza zarar vermektedir [3]. Bu sebepten dolayı son dönemde yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımlar artmaktadır. Ancak sürekli artan enerji ihtiyacının hızına yetişilemediğı için fosil yakıtlar halen birinci enerji kaynağımız durumundadır [4].

Enerji ihtiyacının her geçen gün artması ileriye dönük olarak bir enerji krizi ile karşılaşmamıza sebep olabilir. Bunun sebebi en büyük enerji kaynağımız olan yenilenemeyen enerji kaynaklarımız kömür, petrol ve doğalgaz rezervlerinin sınırlı olmasıdır [1]. Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarının ve enerjiyi verimli olarak kullanmanın önemi her geçen gün artmaktadır. Türkiye açısından da durum bu noktada pek parlak değildir. Yenilenemeyen enerji kaynakları rezervi açısından, özellikle petrol ve doğalgaz, ülkemiz çok zengin değildir. Bu durum bizi enerjide dışa bağımlı olmaya

zorlamakta ve ekonomik olarak da negatif etkilemektedir [5]. Kömür olarak rezerv miktarımız daha iyi durumda olmasına karşın sahip olduğumuz kömürün kalitesi çok yüksek olmadığından elde edilen enerji verimi açısından olumlu sonuçlar vermemektedir. Ayrıca kömürün karbon salınımı sonucu çevreye verdiği zarar ve oluşturduğu hava kirliliği nedeni ile de doğaya da zarar vermektedir [6]. Ülkemizde en yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı hidroelektrik enerjidir. Bunun haricinde rüzgâr ve güneş enerjisi olarak yapılan yatırımlar her geçen gün artmaya devam etmektedir. Yenilenebilir temiz enerji kaynaklarına yapılan yatırımın artması ülkemiz açısından hem ekonomik hem de çevresel anlamda büyük önem arz etmektedir [7].

Enerjiyi verimli kullanmak tüm dünya için kritik bir önemdedir. Dünyamızın sahip olduğu enerji kaynaklarının sınırlı olması, her geçen gün artan enerji ihtiyacı ve enerji üretirken çevreye verdiğimiz zarar enerji tasarrufunu zorunlu kılmaktadır. Ülkemizdeki enerji tüketiminin yaklaşık olarak %36'lık kısmı konut ve hizmet sektöründen kaynaklıdır [8]. Mevcut binalardaki enerji kayıpları %20 ile %70 arasında değişmektedir. Binalardaki enerji kaybının yaklaşık %60'lık bir kısmı pencere ve camlardan kaynaklıdır [9]. Kış aylarında ısıtma ve yaz aylarında serinletme amacı ile kullandığımız enerjiyi daha verimli olarak kullanmak için pencere ve camlardan kaynaklı olan ısı kayıplarını en aza indirmek son derece önemlidir [10]. Böylece hem kişisel olarak ısınma ve soğutma için daha az ücret ödeyebilir hem de ülkemizdeki kısıtlı olan enerji kaynaklarını daha verimli kullanabiliriz.

Pencereler ve camlardan kaynaklı enerji kayıplarını en aza indirmek için düşük yayımlı (low-E) camlar geliştirilmektedir. Güneş ışınları geniş bir spektruma sahiptir. Bu spektrumun yaklaşık olarak yarısı kızılötesi ışınlardan oluşurken küçük bir kısmı ultraviyole ışıktan ve kalanı da görünür ışıktan oluşmaktadır [11]. Termal radyasyon kızılötesi ışıma ile yayılmaktadır. Yani camlardan kaynaklı ısı kaybının sebebi kızılötesi bölgedeki ışımalardır. Düşük yayımlı camların temel amacı kızılötesi bölgedeki ışımaları engellerken görünür bölgedeki ışığın geçişine izin vermektir [12]. Görünür bölgedeki ışık insan konforu için çok önemlidir. Binalarda pencere kullanılmasının temel sebebi görünür ışıktan faydalanmaktır. Düşük yayımlı camlar iklim koşullarına göre ikiye ayrılmaktadır. Sıcak bölgelerde kullanılan camlar güneş ışınlarından sadece görünür ışığın içeri girmesine izin verirler. Böylece kızılötesi bölgede yayılan ısı bina içerisine giremeyecek ve soğutma için kullanılan enerji miktarını düşürecektir. Soğuk bölgelerde ise ultraviyole bölge hariç bütün güneş spektrumunun bina içerisine girmesi amaçlanmakta ve içerideki termal radyasyonun dışarı

çıkması engellenmek istenmektedir [13]. Bu ışınların geçişinin engellenmesi optik ince film kaplamalar ile mümkün olmaktadır. Bu yapılar genel olarak Dielektrik/Metal/Dielektrik (D/M/D) katmanlardan oluşacak şekilde hazırlanmaktadır. Alt dielektrik katmanı, metal katmanın yüzeye olan tutunmasını arttırmakta ve metal filmin daha düzgün olmasını sağlamaktadır. Metaller hem görünür bölgede hem de kızılötesi bölgede yüksek yansıtma özelliğine sahiptir. Ancak yeteri kadar ince olursa görünür bölgede yayılan ışınları geçirir ve sadece kızılötesi bölgede yansıtıcı özellik gösterir. Üst dielektrik katmanı ise hem metal katmanını korumakta hem de görünür bölge için yansıma önleyici görevini üstlenmektedir [14].

Düşük yayımlı camlarda en çok kullanılan metal katmanı gümüşdür (Ag). Ag sahip olduğu yüksek yansıtıcılığı, düşük maliyeti ve uygun rengi ile bu uygulamalar için en iyi malzemelerden biridir [15]. Dielektrik katman olarak görünür bölgede geçirgen olan metal oksitler tercih edilmektedir. Bu özelliklere sahip metal oksitlerden biri olan Alüminyum katkılı çinko oksit (AZO), uygun maliyeti, toksik olmayan yapısı ve Ag ile uyumlu olmasından dolayı bu yapılarda kullanılan metal oksit katmanlarından biridir [16]. AZO ve Ag ince filmler birçok kaplama yöntemi ile üretilebilir. Kopartma, fiziksel buhar biriktirme, lazer biriktirme, kimyasal buhar biriktirme bunlardan bazılarıdır. Bu teknikler içerisinde en çok kullanılanlardan biri kopartma tekniğidir. Uygun maliyetli oluşu, kolay ve hızlı sonuç alınabilmesi ayrıca düzgün ve kaliteli filmler elde etmeye olanak sağlaması bu tekniğin tercih edilmesini sağlar [17].

Sonuç olarak tez çalışmasında düşük yayımlı ince filmler belirlenen uygun kaplama koşullarında hazırlanacak ve elde edilen sonuçların uygunluğu belirlenecektir. Tezin ikinci bölümünde enerji verimi ve ısı yayılımı hakkında temel bilgiler verilirken, üçüncü bölümde düşük yayıcılık özelliğine sahip yapılar hakkında detaylı bilgiler verilecektir. Dördüncü bölümde D/M/D yapıların geliştirilmesi ve karakterizasyonlarının yapılması hakkında olurken beşinci bölümde elde edilen sonuçlar paylaşılacaktır. Son olarak da altıncı bölümde sonuçlar tartışılacak ve yapılan çalışmaların düşük yayıcılık özelliğine sahip yapılara olan katkısı belirlenecektir.



2. GENEL BİLGİLER

2.1. Enerji

Enerji insanoğlunun varlığını sürdürebilmesi için hayati öneme sahiptir. Artan nüfus ve sanayileşmenin gelişmesi ile enerjiye olan bağımlılık her geçen gün artmaktadır. Enerji tüketimi ülkelerin refah düzeyi ile paralel bir şekilde artmakta ve tüketilen enerji aynı zamanda ülkelerdeki refah düzeyini de yansıtmaktadır [3,18].

Her alanda ihtiyaç duyduğumuz enerji farklı şekillerde bulunabilmekte ve birbirlerine dönüştürülebilmektedir. Genel anlamda yenilenebilir ve yenilenemez olarak ikiye ayrılabilen enerji kaynakları tükenir ve tükenmez olarak da isimlendirilebilir. Yenilenemez yani tükenir enerji kaynakları temel olarak kömür, petrol, doğalgaz ve nükleer enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir yani tükenmez enerji kaynakları ise hidroelektrik, güneş, rüzgâr, biokütle ve jeotermal enerji kaynaklarıdır. Yenilenemez enerji kaynakları dünya üzerinde rezervleri sınırlı olan ve bir noktada tükenecek olan enerji kaynaklarıdır [2]. Ayrıca bu enerji kaynakları karbon salınımı nedeni ile doğaya zarar vermektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise sınırsız bir rezerve sahip olmakla birlikte aynı zamanda temiz enerji olarak adlandırılmakta ve doğaya verdiği zarar sınırlı olan enerji kaynaklarıdır.

Enerji tüketimi ülkelerin bütçelerindeki en büyük gider kalemlerinden birisidir. Bu giderleri en aza indirmek için yenilenebilir enerji kaynakları en büyük fırsatlardan biridir. Çünkü bu kaynaklar doğanın her yerinde sınırsız olarak bulunmakta ve fosil yakıtlar gibi hammadde maliyeti bulunmamaktadır [19].

Türkiye’de tüketilen enerjinin yaklaşık olarak %80’den fazlası fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Bu fosil yakıtlar arasındaki tüketim sıralaması ise petrol, kömür ve doğal gaz şeklindedir. Özellikle petrol ve doğalgaz rezervlerimizin tüketim oranlarına kıyasla çok az olması bizi enerjide dışa bağımlı bir ülke haline getirmektedir [20]. Bu dışa bağımlılık ülkemiz için siyasi anlamda sorun olduğu gibi ekonomik anlamda da ülkemize büyük bir yük getirmektedir. Bunun yanında fosil yakıtlardan enerji elde edilirken karbon emisyonunun yüksek olması ülkemizin doğasına da geri döndürülemeyecek şekilde zarar vermektedir. Genel anlamda artan nüfus ve sanayileşme etkisi ile ülkemizdeki karbon

emisyonu miktarı her geçen yıl artmaktadır. Türkiye, Almanya ve Birleşik Krallık 'tan sonra 2019 yılında Avrupa'da en yüksek karbon emisyonuna sahip üçüncü ülke konumundadır [20]. Bu durumun artmaya devam etmesi gelecekte tüm dünya ve ülkemiz için büyük bir sorun teşkil etmektedir. Küresel ısınmanın en büyük sebeplerinden biri karbon emisyonudur. Küresel ısınma dünya üzerindeki ekolojik dengeyi bozmakta ve insanoğlunun yaşamını tehdit etmektedir. Bu sebepten dolayı bütün ülkeler karbon emisyonu miktarlarını azaltmaya çalışmakta ve enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir.

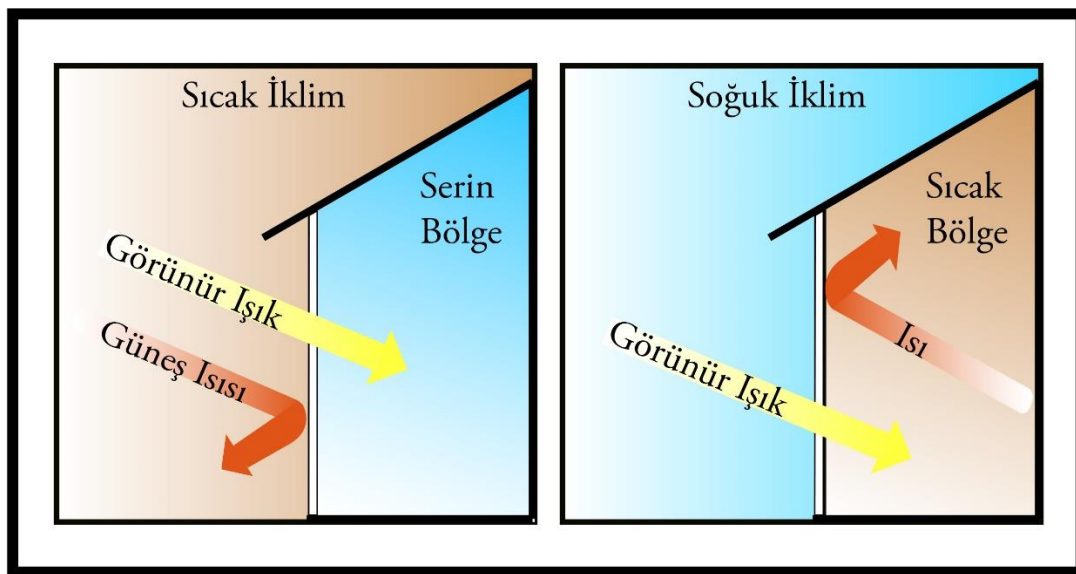
Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynakları arasında en büyük pay hidroelektrik enerjisidir. Avrupa'da Norveç'ten sonra en yüksek hidroelektrik üretimi Türkiye'de olmaktadır. Bunun yanında son yıllarda ülkemizde rüzgâr ve güneş enerjisi yatırımları artış göstermektedir. 2009 yılından bu zamana kadar rüzgâr ve güneş enerjisinden elde edilen enerji yaklaşık olarak 20 kat artmıştır [20]. Ülkemiz için bu yatırımların artarak devam etmesi gerekmektedir. Çünkü halen enerji üretimimizin küçük bir kısmı yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artması hem ekonomik olarak hem de doğaya verilen zararı azaltmak için son derece önemlidir.

Bütün bunların yanında bir diğer önemli nokta üretilen enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasıdır. Enerjinin verimli kullanılması hem karbon emisyonu miktarını azaltacak hem de ekonomik açıdan avantaj sağlayacaktır. Özellikle ülkemiz gibi enerji noktasında dışa bağımlı bir ülkenin enerjisini verimli kullanabilmesi son derece önemlidir. Ülkemizde enerjinin %35'i binalarda tüketilmektedir. Bu tüketimin %65'i ise ısıtma, soğutma ve havalandırma amacı ile kullanılmaktadır [21]. Binalarda ısıtma ve soğutma için kullanılan enerjinin miktarı ısı yalıtımı ile azaltılabilir. Bunun için enerji verimli binalar yapılmalı ve kullanılmalıdır. İyi bir şekilde yapılmış ısı yalıtımı ile binalarda %30 ile %60 arasında enerji tasarrufu yapılabilir [22]. Bunun içinde binalardaki bütün yüzeyler enerji verimli hale getirilmelidir. Enerji verimli yüzeylerin kullanılması ülkemiz için ekonomi ve doğa açısından çok önemlidir.

2.1.1. Enerji verimli yüzeyler

Enerjinin verimli bir şekilde kullanılması ekonomik ve çevresel açıdan çok önemlidir. Enerji verimliliğindeki amaç kullanılan enerji miktarının azalırken elde edilen kazanımlarda herhangi bir azalma olmamasıdır [23]. Binalarda ısıtma ve soğutma amacı ile kullanılan

enerjinin verimli hale gelmesi için konfor açısından bir kaybın olmaması ve aynı zamanda kullanılan enerji miktarının azalması gerekmektedir [24]. Dünya üzerinde enerji tüketiminin yaklaşık olarak %18'i binalardan kaynaklanmaktadır [8]. Binaların karbon salınımindaki oranı ise dünya genelinde %8'den fazladır [8]. Artan nüfus ve bina sayısı ile bu oran her geçen gün artmaya devam etmektedir. Türkiye'de üretilen enerjinin yaklaşık olarak %36'lık kısmı binalarda aydınlatma, ısıtma ve soğutma olarak kullanılmaktadır [8]. Binalarda kullanılan enerjide en büyük payı ısıtma almaktadır. Bu sebepten dolayı da binalarda uygulanması gereken ısı yalıtımı çok önemlidir. Isı yalıtımları sayesinde kullanılan enerji miktarı ciddi oranlarda azaltılabilir. Enerji verimli yüzeyler kavramı bina açısından bakıldığında ısı kayıplarının meydana geldiği yüzeylerin enerji açısından verimli hale getirilmesidir. Binalardaki enerji kaybına neden olan yüzeyler duvarlar, çatı ve pencerelerdir. Bunların arasında enerji kaybının en çok olduğu yüzeyler ise yaklaşık %60 oranında kayıp verilmesine neden olan pencere ve camlardır [9]. Pencere ve camlardan kaynaklı kayıp miktarının daha fazla olmasına rağmen Türkiye ve dünyada ısı yalıtımı denince akla ilk olarak dış duvarlara yapılan yalıtım gelmektedir. Bunun sonucu olarak da duvar yalıtımları devlet eliyle zorunlu kılınmakta ve ısı verimliliği sağlanmaya çalışılmaktadır. Pencere ve camlar için yaygın olarak kullanılan hava boşluklu çift katlı camlardır. Bunun haricinde pencere ve cam yüzeylerin enerji verimliliğini arttırmak için çift katlı camlar ile birlikte düşük yayımlı camların kullanılması çok daha olumlu sonuç verecektir.



Şekil 2.1. Düşük yayıcı camların çalışma mekanizması

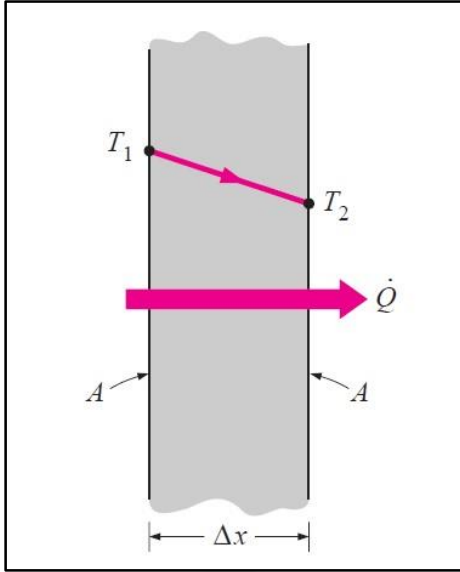
2.2. Isı Transferi

Enerjinin termodinamik olarak birden çok formu bulunmaktadır. Termodinamiğin birinci yasası bize enerjinin korunumlu olduğunu, yoktan var edilemediği gibi var olan enerjinin de yok edilemeyeceğini söyler. Enerji sadece bir şekilde diğerine dönüşerek değişebilir. Mevcut enerji formlarından biri ısı enerjisidir. Isı, sıcaklık farkının bir sonucu olarak bir sistemden diğer sisteme transfer edilebilen bir enerji formudur. Bu enerji transferi her zaman yüksek sıcaklıklı ortamdan düşük sıcaklıklı ortama doğru meydana gelir. İki ortamda aynı sıcaklığa ulaştığı zaman enerji transferi sona erer. Bu ısı enerjisinin değişiminin oranını ısı transferi adı verilir [25].

Isı transferi üç temel mekanizma ile gerçekleşir. Bu mekanizmalar iletim, taşınım ve ışıma olarak adlandırılır. İletim, enerjinin parçacıkların arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak, daha yüksek enerjili parçacıktan daha az enerjili olana transferi olarak tanımlanabilir. Taşınım, katı bir yüzey ile bu yüzeyle temas halinde olan hareketli gaz veya sıvının arasında gerçekleşen ısı transferidir. İletim ve akışkan hareketinin birleşiminden meydana gelir. Işıma ise bir cismin içerisinde yer alan atom ve moleküllerin elektronik konfigürasyonlarındaki değişim sonucu elektromanyetik dalga olarak (veya fotonlarla) yaydığı ısı enerjisidir. Mutlak sıfır sıcaklığında olmayan bütün cisimler ışıma ile ısı yaymaktadır [25].

2.2.1. İletim

İletim, parçacıklar arasındaki etkileşim sonucu enerjinin daha yüksek enerjiye sahip parçacıktan daha düşük enerjiye sahip parçacığa doğru transferi sonucu meydana gelir. İletim katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin hepsinde meydana gelebilir. Sıvı ve gazlarda, yapıdaki moleküllerin rastgele hareketleri esnasındaki çarpışma ve difüzyonlarının sonucunda oluşur. Katılarda ise yapıdaki moleküllerin titreşimi ve serbest elektronlar ile taşınan enerjinin sonucu olarak meydana gelir. Isının iletim yolu ile transfer edilmesinde ısı transferinin gerçekleştiği yüzeyin veya ortamın geometrisinin, kalınlığının, malzemesinin ve sıcaklık farkının direkt olarak etkisi vardır. Bu etkenlerin tamamı ısı iletiminin miktarını da belirlemektedir [25].



Şekil 2.2. Yüzey alanı A ve kalınlığı Δx olan düz bir duvardaki ısı iletimi [25]

Şekil 2.2’de kalınlığı $\Delta x=L$ ve yüzey alanı A olan düzgün bir duvarın ısı iletim mekanizması gösterilmektedir. Duvar boyunca meydana gelen sıcaklık değişimi $\Delta T= T_2-T_1$ olarak verilmektedir. Yapılan deneyler sonucu ısı transferi oranı Q ’nun, sıcaklık farkı ΔT ’nin veya duvarın yüzey alanının A ’nın artırıldığında arttığı ancak duvar kalınlığı L ’nin artması ile azaldığı elde edilmektedir. Bunun sonucunda ısı iletim oranının sıcaklık farkı ve yüzey alanı ile arttığı ancak kalınlık ile azaldığı söylenebilir [25].

$$\text{Isıl İletim Oranı} \propto \frac{(\text{Alan})(\text{Sıcaklık Farkı})}{\text{Kalınlık}} \quad (2.1)$$

veya

$$Q_{\text{iletim}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad (2.2)$$

Burada k sabiti malzemenin ısı iletkenliğidir ve malzemenin ısıyı iletebilme yeteneğinin bir ölçüsüdür. $\Delta x \rightarrow 0$ durumunda, yukarıdaki denklem diferansiyel forma indirgenebilir;

$$Q_{\text{iletim}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (2.3)$$

Bu formül Fourier ısı iletim yasası olarak da bilinir. dT/dx sıcaklık gradyentidir. Bir yönde meydana gelen ısı iletim oranı sıcaklık gradyanı ile orantılıdır. Isı azalan sıcaklık yönünde

iletildiği için artan x ile sıcaklık azaldığında sıcaklık gradyanı negatif olur. Formülün başına konulan eksi işaretinin sebebi ısı transferinin pozitif x yönünde pozitif olması içindir [25].

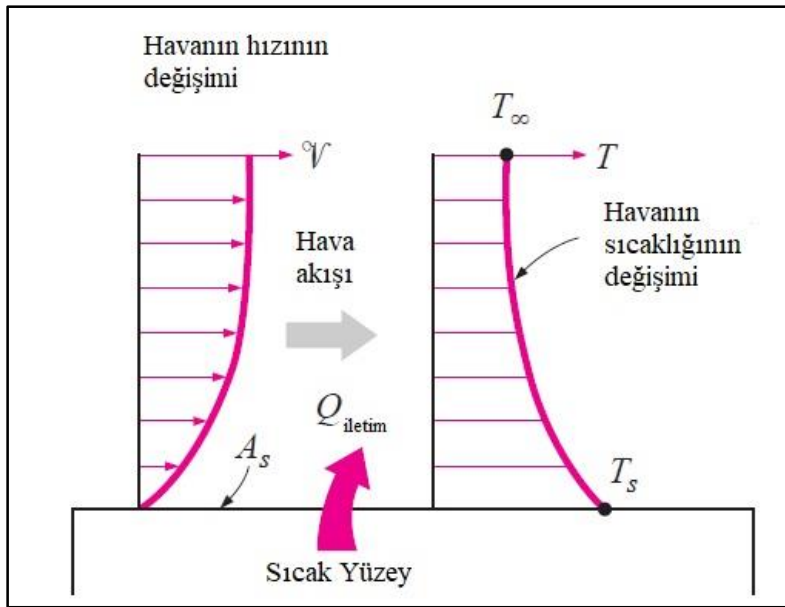
Termal iletkenlik k malzemenin ısı iletebilmesinin bir ölçüsüdür. Örnek olarak oda sıcaklığındaki suyun termal iletkenliği $k=0,608 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ iken demirin termal iletkenliği $k=80,2 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ 'dir. Bu durum demirin suya kıyasla ısıyı 100 kat daha hızlı ilettiğini göstermektedir. Bir malzemenin ısı iletkenliği birim sıcaklık, birim alan başına ve malzemenin birim kalınlığı boyunca ısı transferi oranı olarak tanımlanabilir. Çizelge 2.1'de bazı malzemelerin oda sıcaklığında sahip oldukları termal iletkenlik değerleri verilmektedir [25].

Çizelge 2.1. Bazı malzemelerin oda sıcaklığındaki termal iletkenlik değerleri [25].

Malzeme	$k, \text{ W/m } ^\circ\text{C}$
Elmas	2300
Gümüş	429
Bakır	401
Altın	317
Alüminyum	237
Demir	80,2
Cıva (s)	8,54
Cam	0,78
Tuğla	0,72
Su (s)	0,613
İnsan derisi	0,37
Odun (meşe)	0,17
Helyum (g)	0,152
Yumuşak Lastik	0,13
Cam yünü	0,043
Hava (g)	0,026

2.2.2. Yayınım

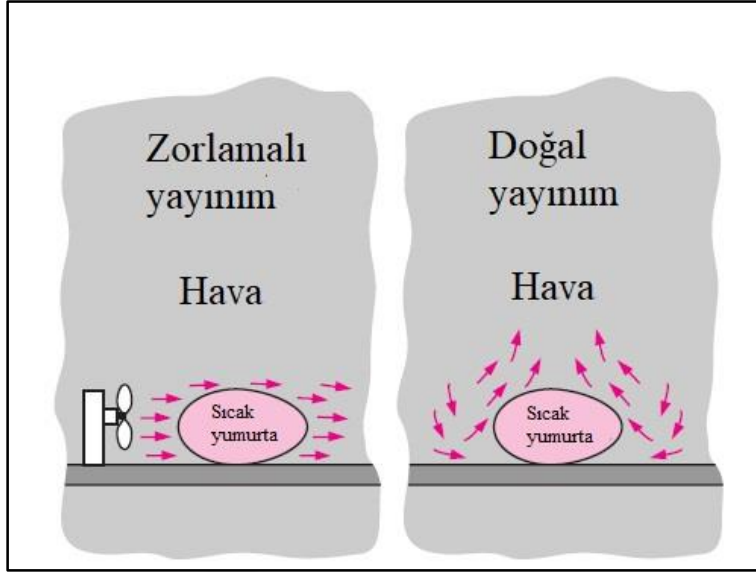
Yayınım, katı bir yüzey ile hareket halindeki sıvı veya gazın arasında gerçekleşen, iletim ve akış hareketinin bir birleşimi sonucu meydana gelen enerji transferidir. Akışkan hareketi ne kadar hızlı olursa yayınım ile ısı transferi o kadar fazla olur. Isı iletimi esnasında akış hareketi yok ise bu durumda sadece iletim ile ısı transferi meydana gelmiş demektir. Akışkan hareketi katı yüzey ile sıvı arasındaki ısı iletimini artırır ancak aynı zamanda ısı iletim oranının hesaplanmasını zorlaştırır.



Şekil 2.3. Yayılım ile sıcak bir yüzeyden havaya ısı transferi [25]

Sıcak bir yüzeyi üzerine soğuk hava üfleyerek soğutulmasını düşünelim. Enerji ilk olarak sıcak yüzey üzerinden iletim yolu ile yüzeyin hemen üzerinde yer alan havaya iletilir. Bu enerji daha sonra yayınım yolu ile, yani hava moleküllerinin kendi içerisinde yaptığı iletim ve havanın toplu hareketi ile yüzeyden uzaklaştırılır. Bu yayınım sonucu yüzeye bitişik olan sıcak hava soğuk hava ile değişir.

Yayınımın iki farklı durumu vardır. İlki zorlamalı yayınım, yani akışkanın yüzey üzerinde hareketinin bir fan veya bir pompa ile zorlayarak yapılması, diğeri ise doğal yayınım, yani akışkanın sıcaklığa bağlı yoğunluk farkı sonucu hareketi ile meydana gelen ısı transferidir.



Şekil 2.4. Zorlamalı yayınım ve doğal yayınımın bir örneği [25]

Akışkan ile yüzey arasındaki sıcaklık farkı, akışkanın harekete karşı direncini aşacak kadar büyük değil ise o zaman ısı transferi iletim yolu ile meydana gelir. Faz değişimi meydana gelen ısı transferleri de indüklenen akışkan hareketi (kaynama sırasında buharın yükselmesi veya yoğunlaşma sırasında sıvı damlacıklarının düşmesi gibi) neden ile yayınım olarak kabul edilir.

Yayınım ile ısı transferi karmaşık olmasına rağmen, yayınım ile ısı transferi sıcaklık farkı ile orantılı olarak değişir. Bu değişim Newton'un soğuma yasası olarak da ifade edilmektedir.

$$Q_{\text{yayınım}} = hA_S(T_S - T_{\infty}) \quad (W) \quad (2.4)$$

Bu formülde h yayınım ısı transfer katsayısı olarak belirtilir ve birimi de $W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 'dur. A_S ısı transferinin gerçekleştiği yüzeyin alanını verirken, T_S yüzeyin sıcaklığını, T_{∞} ise yüzeyin yeteri kadar uzağında bulunan akışkanın sıcaklığını verir.

Yayınım ısı transferi katsayısı h akışkanın bir özelliği değildir. Değeri deneysel olarak tanımlanan ve yüzeyin geometrisine, akışkanın doğal hareketine, akışkanın özelliğine ve akışkanın hızına göre değişen birçok parametreye bağlıdır. Yayınımın tipine göre değişen bazı h değerleri aralıkları Çizelge 2.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. Yayılım ısı transferi katsayısının genel değerleri [25]

Yayınım Tipleri	$h, W/m^2 \cdot ^\circ C$
Gazların Doğal Yayınımı	2-25
Sıvıların Doğal Yayınımı	10-1000
Gazların Zorlamalı Yayınımı	25-250
Sıvıların Zorlamalı Yayınımı	50-20000
Buharlaşma ve Yoğunlaşma	2500-100000

2.2.3. Işınım

Işınım bir cisimden atom veya moleküllerin elektronik konfigürasyonlarının değişimi sonucu elektromanyetik dalga (veya foton) olarak yayılan enerjidir. İletim ve yayınımdan farklı olarak ışıınımda bir ara ortama ihtiyaç duyulmaz. Işınım en hızlı (ışık hızında) enerji transferi şeklidir ve vakum ortamında herhangi bir kayba uğramaz. Güneşin enerjisi de dünyaya ışıınım yolu iletilir.

Isı transferinde bu ışıınıma termal ışıınım (veya termal radyasyon) adı verilir. Bir malzemenin sıcaklığında kaynaklı olarak yüzeyinden yaydığı ısı enerjisidir. Elektromanyetik radyasyonun diğer formlarından bu yönü ile farklılık göstermektedir. Elektromanyetik radyasyon formlarından olan x ışınları, gama ışınları, mikrodalga ve radyo dalgaları gibi ışıınımlar sıcaklık ile ilişkili değildir. Sıcaklığı mutlak sıfırın üzerinde olan her cisim termal ışııma yapmaktadır.

Işınım bütün katı, sıvı ve gazlarda malzemeye göre değişkenlik gösterecek şekilde yayılım, emilim ve geçirim olmak üzere meydana gelen hacimsel bir olaydır. Ancak bununla birlikte özellikle metal, odun ve kaya gibi opak katı malzemelerde ışıınım yüzeysel bir olay olarak kabul edilir. Çünkü bu malzemelerin içerisinde meydana gelen ışııma yüzeye asla ulaşamaz ve yüzeye gelen ışıınlarda yüzeyin birkaç mikron altında emilir.

Stefan-Boltzmann yasası, T_S mutlak sıcaklığında (Kelvin cinsinden) bir yüzeyden meydana gelebilecek maksimum ışıınıımı ifade eder.

$$Q_{\text{maks.ışıınım}} = \sigma A_S T_S^4 \quad (W) \quad (2.5)$$

Bu formülde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ değerine sahip Stefan-Boltzmann sabitidir. Maksimum oranda ışıma yapan ideal yüzey siyah cisim olarak adlandırılır. Bu cismin yaptığı ışıma da siyah cisim ışıması adı verilir. Siyah cisim ile aynı sıcaklığa sahip ve siyah cisimden daha az ışıma yapan gerçek bir yüzeyin yaptığı ışıma;

$$Q_{\text{maks.ışınım}} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W}) \quad (2.6)$$

Formülü ile ifade edilir. Bu formülde ε yüzeyin yayıcılık katsayısıdır. Yayıcılık katsayısı $0 \leq \varepsilon \leq 1$ aralığındadır ve o yüzeyin siyah cismin yayıcılık katsayısına ($\varepsilon = 1$) kadar yakın olduğunu belirtir. Bazı yüzeylerin yayıcılık katsayısı Çizelge 2.3'te verilmektedir.

İşıma ile ilgili bir diğer önemli yüzey özelliği ise soğuruculuk α olarak adlandırılır. Soğuruculuk bir yüzeyin üzerine gelen ışımayı ne kadar soğurduğu ile alakalı bir katsayıdır. Yayıcılık gibi soğurma özelliği de $0 \leq \alpha \leq 1$ arasında değişen bir değerdir. Siyah cisim yüzeyine gelen bütün ışınları soğurur ve kusursuz bir yayıcı olduğu gibi aynı zamanda kusursuz bir soğurucudur ($\alpha = 1$).

Genel olarak yüzeyin sahip olduğu hem ε hem de α değerleri sıcaklığa ve ışıının dalgaboyuna bağlıdır. Kirchhoff'un ışıınım yasası, belirli bir sıcaklık ve dalgaboyunda yayıcılık ve soğuruculuğun eşit olduğunu söyler.

Bir yüzeyin yaydığı ışıınım ile soğurduğu ışıınım arasındaki fark net ışıınım ısı transferini verir. Eğer yüzeyin soğuruculuğu yayıcılığından fazla ise o yüzey ışıma yolu ile enerji kazanırken, yayıcılığı soğuruculuğundan fazla olursa ışıma yolu ile enerji kaybeder. İki yüzey arasındaki net ısı transferini tanımlarken yüzeylerin özellikleri, birbirlerine göre olan pozisyonları ve iki yüzey arasındaki ortam ile ilişkileri önem kazanır [25].

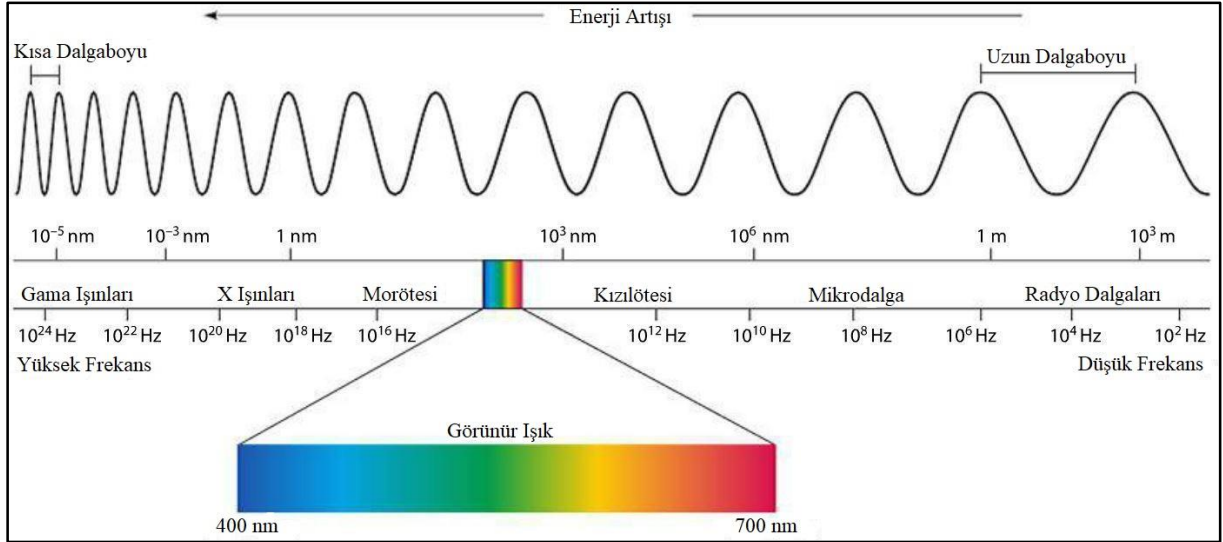
Çizelge 2.3. Bazı malzemelerin 300 K sıcaklıktaki yayıcılık katsayıları [25]

Malzeme	Yayıcılık Katsayısı (ϵ)
Alüminyum Folyo	0,07
Parlatılmış Bakır	0,03
Parlatılmış Altın	0,03
Parlatılmış Gümüş	0,02
Parlatılmış Paslanmaz Çelik	0,17
Siyah Boya	0,98
Beyaz Boya	0,90
Beyaz Kâğıt	0,92-0,97
Asfalt	0,85-0,93
Tuğla	0,93-0,96
İnsan Derisi	0,95
Odun	0,82-0,92
Toprak	0,93-0,96
Su	0,96
Bitki	0,92-0,96

2.3. Elektromanyetik Spektrum

Işık hayatımızın her noktasında yer alan, farkında olmasak dahi hayatımızı etkileyen bir kavramdır. Işık uygulamalarına göre birçok farklı anlamda kullanılmaktadır. Genel olarak ışığı optik radyasyon olarak adlandırebileceğimiz, elektromanyetik spektrumun yaklaşık olarak 10 nm ile 1 mm dalga boyu aralığındaki bölgesinde yer alan ultraviyole, görünür bölge ve kızılötesi bölgeyi tanımlamak için kullanırız. Aslında ışık elektromanyetik radyasyonun tamamını tanımlamak içinde kullanılmaktadır. Elektromanyetik radyasyon dediğimizde bu tanımın içerisine ultraviyole, görünür bölge ve kızılötesi ile birlikte x ışınları, gama ışınları ve radyo dalgaları da dahil olmaktadır. Elektromanyetik radyasyon, enerjinin elektromanyetik dalgalar ve fotonlar aracılığı ile yayılması veya transfer edilmesidir. Elektromanyetik dalgaların tamamı temel olarak aynı davranışı gösteren fenomenler olmakla birlikte birbirlerinden sahip oldukları farklı dalga boyları ve frekanslar ile ayrılmaktadır. Bu farklılıklar elektromanyetik dalgaların ölçülmesinde ve işlevlerinde farklı

sonuçlar vermektedir. Örnek olarak vermek gerekirse görünür bölgenin diğerlerinden ayrılmasının sebebi insan gözünün görebildiği dalgalıboylarının bu aralıkta olmasıdır. Bütün bu elektromanyetik dalgaların, dalgalıboylarına ve frekanslarına göre ayrılarak verildiği spektruma elektromanyetik spektrum adı verilmektedir. Elektromanyetik spektrum genel anlamda, özelliklerine ve dalgalıboylarına göre 6 farklı bölgeye ayrılmaktadır [26].



Şekil 2.5. Elektromanyetik spektrum [27]

- 1- Gama ışınları
- 2- X ışınları
- 3- Ultraviyole bölge
- 4- Görünür bölge
- 5- Kızılötesi bölge
- 6- Mikrodalga
- 7- Radyo dalgaları

Gama ışınları; en kısa dalgalıboyuna sahip olan aynı zaman en yüksek frekansa ve foton enerjisine sahip olan ışınlardır. Gama ışınları kısa dalgalıboylarından dolayı atomlar ve elektronlar ile etkileşime geçebilen ışınlardır. Bu sebepten dolayı iyonize radyasyon olarak da anılmaktadır.

X ışınları; gama ışınlara kıyasla daha uzun dalgalıboyuna, daha düşük frekans ve enerjiye sahip ışınlardır. X ışınları da elektron ve atomlar ile etkileşime geçebilirken gama ışınlara

göre etkinlikleri daha düşüktür. Tıbbi amaçlar ve moleküllerin yapısını tayin etmek için kullanılmaktadır.

Ultraviyole bölge; görünür bölgeden daha düşük dalga boyuna sahip olan ışınların oluşturduğu bölgedir. Yaşayan hücreleri öldürdüğü için canlılar için tehlikeli olabilmektedir. Mikron boyutunda maskeleme yapmaya yarayan litografi sistemlerinde yoğunlukla kullanılmaktadır.

Görünür bölge; insan gözünün algılayabildiği, bilinen bütün renklerin yer aldığı elektromanyetik spektrumun dar bir aralığıdır. Görünür bölgede yer alan ışınlar iyonize değildirler.

Kızılötesi bölge; görünür bölgeden daha uzun dalgaboyuna sahip ışınların yer aldığı bölgedir. Kızılötesi bölge içerisindeki dalgaboyu aralığında yer alan ışınlar elektronların enerjilerini değiştirmek için çok küçüktür. Kızılötesi ışıyım moleküllerin titreşmesine ve böylece de ısınmasına neden olmaktadır. Isı ışıyım olarak bu bölgede yer alan ışınlar ile taşınmaktadır.

Mikrodalga bölgesi radyo dalgalarının bir parçası olarak da kabul edilmekte ve yoğunlukla cep telefonların haberleşmesinde kullanılmaktadır.

Radyo dalgaları; spektrumda en uzun dalgaboyuna sahip ışınlardır. Adından da anlaşılacağı gibi, uzak bölgeler taşınabildiği için haberleşme amacı ile kullanılan ışınlardır [26].

2.4. Yayıcılık

Yayıcılık bir yüzeyin belirli bir sıcaklıkta yaydığı radyasyonun, aynı sıcaklıktaki siyah cismin yaydığı radyasyona oranı olarak tanımlanır. Yayıcılık ε ile gösterilir ve 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir. Yayıcılık bir yüzeyin yaydığı radyasyonun, siyah cismin yayıcılık değeri 1'e ne kadar yakın olduğunun ölçüsüdür [25].

Yayıcılık sabit bir değer değildir. Temel olarak sıcaklığa göre değiştiği gibi dalgaboyuna ve yönelime göre de değişiklik göstermektedir. Ortalama yayıcılık olarak da adlandırılan toplam yarı küresel yayıcılık, belirli bir sıcaklıkta, bütün dalgaboylarında ve bütün yönlerde

yayılan toplam radyasyon enerjisinin aynı sıcaklıktaki siyah cismin yaydığı radyasyon enerjisine oranıdır [28].

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2.7)$$

Siyah cisim kusursuz yayıcı ve kusursuz soğurucu olarak tanımlanmaktadır. Hiçbir yüzey siyah cisimden daha fazla enerji yayamaz. Ayrıca siyah cisim bütün dalgaboylarını soğurma özelliğine sahiptir. Siyah cismin birim yüzey alanı başına yaydığı radyasyon enerjisi Joseph Stefan tarafından deneysel olarak da belirlenmiş ve aşağıdaki formül ile gösterilmiştir;

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (W/m^2) \quad (2.8)$$

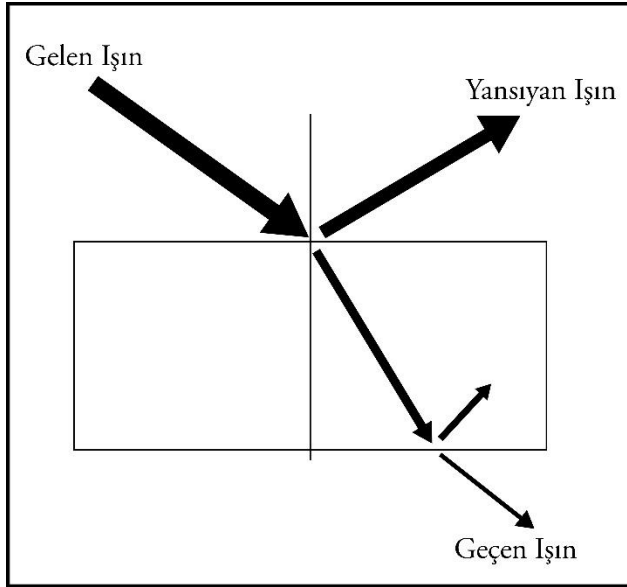
Bu formülde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$ değerine sahip Stefan-Boltzman sabitidir ve T yüzeyin Kelvin birimindeki sıcaklığıdır. Bu formül aynı zamanda Stefan-Boltzman yasası olarak bilinir ve E_b siyah cisim yayıcılık gücü olarak tanımlanır [29].

Etrafımızdaki her nesne radyasyon yayar. Yani bütün yüzeyler çevreden gelen her dalgaboyundaki ışınlar tarafından bombardımana uğrarlar. Bir yüzeye gelen radyasyonun bir kısmı soğurulur (A), bir kısmı yansıtılır (R) ve bir kısmı ise geçirilir (T). Bu değerler malzemenin özelliklerine, gelen ışının dalgaboyuna ve gelme açısına göre değişkenlik göstermektedir. Termodinamiğin birinci yasasına göre soğurulan, yansıtılan ve geçirilen ışınların toplamı gelen radyasyonun tamamına eşit olmak zorundadır [29].

$$A + R + T = 1 \quad (2.9)$$

Bulunduğu ortam ile termodinamik olarak dengede olan bir yüzeyin belirli bir T sıcaklığındaki yayıcılığı o yüzeyin aynı sıcaklıktaki soğuruculuğuna eşittir. Bu Kirchhoff ısı radyasyon yasası olarak da bilinmektedir. Sıcaklığın yanında dalgaboyu ve yöneliminde aynı olması gerekmektedir [25].

$$\varepsilon_{\theta,\lambda}(T) = \alpha_{\theta,\lambda}(T) \quad (2.10)$$



Şekil 2.6. Gelen bir ışının yüzeyle etkileşimi sonucu oluşan geçen, yansıyan ve soğurulan ışınlar

Düşük yayıcı kaplama ile kaplanan camlar görünür bölgede yüksek geçirgenlik ve kızılötesi bölgede yüksek yansıtıcı özelliğine sahip olur. Soğurma özelliği düşük olduğu içinde yayıcılık özelliği de düşük olmaktadır.



3. DÜŞÜK YAYICILIĞA SAHİP YAPILAR

Düşük yayıcı malzemelerin uygulandıkları yüzeylere göre farklı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Opak bir yüzeye uygulanan düşük yayıcı malzemelere ile geçirgen yüzeylere uygulanan düşük yayıcı malzemeler arasında belirli bazı farklılıklar vardır. Binalarda geçirgen cam yüzeylerin kullanılmasının sebebi, mimari özellikler ve görünür bölgedeki ışığı geçirmesidir. Bu sebepten dolayı geçirgen yüzeylere uygulanan düşük yayıcı malzemelerin özel spektral seçiciliği olması gerekir. Görünür bölgedeki ışığın içeri girmesine izin vermesi için yüksek geçirgenliğe sahip olması gerekirken, yakın kızılötesi bölgeyi yüksek oranda yansıtması gerekmektedir [30]. Sıcak mevsimlerde içeri girmesi istenmeyen ısıyı ve soğuk mevsimlerde ise içerideki ısının dışarı çıkmasını engellemesi istenmektedir. Düşük yayıcı yapıların sahip olması gereken 3 temel özelliği vardır;

- Spektrumun görünür bölgesi için yüksek geçirgenliğe sahip olması gerekir.
- İçerideki ısının dışarıya çıkmasını engellemek için düşük yayıcılığa sahip olması gerekir.
- Güneş ışığı altında uzun süreli dayanıma sahip olması gerekir [14].

Standart bir camın yayıcılık değeri, spektrumun uzun dalga boyu bölgesinde 0,84'tür. Yani gelen ışınların %84'ünü soğurur ve yayar [31]. Düşük yayıcı kaplamalar bu yayıcılık değerini oldukça aşağıya çekmektedir. Yaygın olarak iki çeşit düşük yayıcı cam elde etme yöntemi vardır. Her ikisinin de kendine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu yöntemler sert kaplamalar ve yumuşak kaplamalardır.

Sert kaplamalar, camın üretimi esnasında uygulanan düşük yayıcı kaplamalara verilen isimdir. Aynı zamanda pirolitik kaplamalar olarak da adlandırılırlar. Bu yöntemde katkılı metal oksitler cam daha sıcakken yüzeye uygulanırlar. Kimyasal buhar biriktirme yöntemi sert kaplamalar üretilirken kullanılan en yaygın tekniktir. Flor katkılı kalay oksit (FTO), en çok tercih edilen malzemelerden biridir. Uygulanırken vakum ortamına gerek duyulmaması, görünür bölgede yüksek geçirgenlik ve kızılötesi bölgede yüksek yansıtıcılığa sahip olması ve yüksek mekanik dayanımı tercih edilmesinin en önemli sebepleridir [32]. Sert kaplamalar camın üretimi esnasında uygulandığı için camın bir parçası haline gelmektedir. Bu sebepten dolayı da yumuşak kaplamalara kıyasla mekanik ve kimyasal dayanımı daha fazladır.

Dayanıklılığından dolayı sert kaplamalı camlar, tek katlı camlar gibi çevre etkilerine direkt olarak maruz kalan yüzeyler için oldukça kullanışlıdır [12].

Yumuşak kaplamalar cam üretimi tamamlandıktan sonra uygulanmaktadır. Metal bazlı çok katlı kaplamalar olarak da adlandırılmaktadır. Bu işlem genellikle yaklaşık 10 nm kalınlığa sahip en az bir iletken metal katmanın püskürtme yöntemi ile uygulanarak yapılır. Sahip olduğu iyi optik özelliklerinden dolayı genellikle metal katman olarak gümüş tercih edilir. Bakır ve altın da tercih edilen metallerden olsalar da özellikle 0,5 mikron dalgaboyunun altında istenmeyen kısa dalga boylu soğurmalar gerçekleştirdikleri için çok kullanışlı değildir [33]. Metal katmanların, altın hariç, hızlı oksitlenme sorunundan dolayı genellikle iki geçirgen dielektrik katman arasına uygulanması oldukça yaygındır [34]. Bu dielektrik katmanlar genellikle 40 nm kalınlıktan az olmaktadır. Dielektrik katman olarak çinko, kalay, bizmut veya titanyum gibi metaller içeren metal oksit malzemeler tercih edilir. Metal katman termal ve solar yansıtıcılık özelliği gösterirken, metal oksit katmanlarda hem metal katmanı kimyasal ve mekanik etkilerden korur hem de görünür bölgede yansıma önleyici katman görevi görerek geçirgenliği artırır [35]. Yumuşak kaplamalar sert kaplamalara kıyasla daha yüksek maliyetlidir. Ayrıca yumuşak kaplamalar sadece çift camların arasında kalan yüzeylere uygulanabilmektedir. Sonuç olarak yumuşak kaplamalar, sert kaplamalara kıyasla daha düşük yayıcılık değerine sahiptir ve görünür ışığı daha fazla geçirmektedir [12].

3.1. Dielektrik/Metal/Dielektrik Yapılar

Geçirgen bir yüzey üzerine uygulanan düşük yayıcı özelliğe sahip kaplamalar enerji verimliliği açısından son derece önemlidir. Ancak bu kaplamalar uygulanırken tek amaç enerji verimliliği değildir. Aynı zamanda yaşam alanı için gerekli olan konforu da muhafaza etmek gerekmektedir. Düşük yayıcı kaplamaların amacı da hem dışarıdan gelen ısıyı engellemek (sıcak mevsimler için) hem de içerideki ısının dışarıya yayılmasına engel olmaktır (soğuk mevsimler için). Bunun yanında görünür ışığın içeriye girmesine de izin verilmelidir ki konfor anlamında bir kayıp yaşanmasın [36].

Enerji verimini ve konforu en yüksek seviyede elde edebilmek için yumuşak kaplamalar sert kaplamalardan daha avantajlıdır. Yumuşak kaplamalar temel olarak ince metal bir katman kullanılır. Bu metal katman kızılötesi bölgedeki ışınların büyük bir kısmını yansıtma özelliğine sahiptir. Bu özelliği ile dışarıdan içeriye ve içeriden dışarıya ısı transferine engel

olmaktadır. Ayrıca yeteri kadar ince olduklarında da görünür bölgedeki ışığın bir kısmını karşı geçirgen hale gelirler [37]. Yumuşak kaplama olarak adlandırılan düşük yayıcı kaplamalar gelen olarak sadece tek bir metal katmandan oluşmaz. Çünkü bu özelliği ile kullanılan metaller olan gümüş, bakır, altın ve alüminyum çevresel etkilere karşı oldukça savunmasızdır. Hızlı bir şekilde oksitlenebilirler (altın hariç) ve yapıları bozularak düşük yayıcı özelliklerini kaybedebilirler. Bu sebeplerden dolayı bu ince metal katmanlar genellikle iki dielektrik katmanın arasına sandviç şeklinde yerleştirilirler. Bu sayede metal katmanlar hem dış etkilere karşı korunurlar hem de bu filmlerin daha iyi şartlarda kaplanması sağlanır [38]. Dielektrik katmanların katkısı bununla sınırlı değildir. Dielektrik katmanların görünür bölgede geçirgen olmaları son derece önemlidir. Genellikle metal oksit malzemeler dielektrik katman olarak tercih edilirken bu malzemeler aynı zamanda yansıma önleyici özellik göstererek görünür bölgede elde edilen geçirgenliği de artırırlar [39].

Dielektrik/Metal/Dielektrik yapılar sadece bu üç katmandan oluşmak zorunda değildir. Metal katman sayısı artırılarak elde edilen düşük yayıcı kaplamalarda mevcuttur. Bunun yanında metal filmin altına ve üstüne eklenen çok ince katmanlar ile metal oksit katmandan gelebilecek olan ve metal filmin yapısını bozabilecek oksijen atomlarının da engellenebilir. Cam malzemelerin üretim prosesine göre bazı durumlarda düşük yayıcı kaplamalar ısı ile işleme tabi tutulabilmektedir. Bu durumlarda camın yapısı içerisinde yer alan bazı malzemeler dielektrik ve metal filmin içerisine karışabilmektedir. Bunun engellenmesi içinde cam ile dielektrik katman arasına tampon bir malzeme kaplanarak bu geçişleri en aza indirmek amaçlanmaktadır [40,41].

3.2. Dielektrik Katmanı ve Özellikleri

Düşük yayıcı çok katmanlı yapılarda kullanılan dielektrik katmanların sahip olması gereken bazı özellikleri vardır. Bu katmanların kullanılmasının en önemli amacı aralarındaki metal katmanı dış etkilerden korumaktır. Bu sebepten dolayı sahip olması gereken ilk özellik görünür bölgede geçirgen olmasıdır. Bir malzemenin geçirgen olması gelen ışın ile malzemenin içerisinde bulunan elektronların etkileşimi ile alakalıdır. Eğer gelen bir fotonun sahip olduğu enerji, yapıdaki elektronun izin verilen daha yüksek bir duruma geçmesi için gerekli olan enerjiye eşit veya daha büyük olur ise gelen foton soğurulur. Yapıdaki elektron belirli bir pozisyonda veya serbest olarak yapının içerisinde bulunabilir. Gelen fotonun enerjisi, elektronu uyarmak için yeteri kadar yüksek olmaz ise foton herhangi bir etkileşime

girmeden yapının içerisinde geçebilir. Metal olmayan yapılarda gerekli olan bu enerji valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki enerji yani yasak enerji aralığıdır. Valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki elektron geçişi soğurmanın en güçlü sebebidir. Dielektrik malzemeler olan cam, kuartz, elmas, metal oksitlerin büyük bir kısmı ve çoğu plastikte görünür bölgede bu etkileşim gerçekleşmez. Çünkü bu malzemelerdeki valans elektronları çok sıkı bir şekilde bağlıdır ve bu bağı kopartmak için morötesi bölgedeki fotonların enerjisine ihtiyaç vardır [42]. Düşük yayıcı kaplamalarda kullanılan dielektrik malzemelerin 400nm'nin üzerinde %80 oranında geçirgen olabilmesi için yasak enerji aralıklarının yaklaşık olarak 3.1 eV'un üzerinde olması beklenmektedir [43]. Ancak bu değer net olarak belirtilemeyebilir. Çünkü soğurmaya sebep olabilecek kusurlar yapının içerisinde yer alabilir. Bu kusurların oluşmasının sebebi ince filmlerin hazırlanma şartları ile alakalıdır [44]. Düşük yayıcı yapılar için dielektrik katmanlar hazırlanırken bu şartlar dikkate alınmalıdır.

Düşük yayıcı katmanlarda kullanılan dielektrik katmanların bir diğer özelliği de yansıma önleyici özelliklere sahip olmasıdır. Yansıma önleyici kaplamalar temel olarak bir ince film katmanından yansıyan ışınlar ile bu katmanı geçerek alttaş üzerinden yansıyan ışınların arasındaki faz farkının yıkıcı girişim oluşturarak yansıyan ışığın azalması prensibine dayanmaktadır. Bu yıkıcı girişim durumu, çeyrek dalgaboyu olarak da bilinmektedir. Çeyrek dalgaboyu formülü kullanılarak yansımanın teorik olarak sıfır olması için gereken katman kalınlığı belirlenebilir [45].

$$\lambda = 4dn_f \quad (3.1)$$

Yukarıda verilen formülde λ yansımanın sıfır olmasının hedeflendiği dalgaboyunu, d yansıma önleyici filmin kalınlığını ve n_f 'de yansıma önleyici filmin kırılma indisidir. Bu formül yardımı ile hedeflenen dalgaboyunda yansıtıcılığın sıfır olması için uygulanması gereken yansıma önleyici katmanın kalınlığı bulunabilir. Yansıma önleyici ince filmlerin optik performansı kırılma indislerine ve kalınlıklarına bağlıdır. Bir alttaş üzerine kaplanan çeyrek dalgaboylu ince filmin yansıtıcılığı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir [46].

$$R = \left| \frac{n_0 - \frac{n_f^2}{n_a}}{n_0 + \frac{n_f^2}{n_a}} \right|^2 \quad (3.2)$$

Burada n_0 ortamın kırılma indisini verirken n_a ise alttaşın kırılma indisini vermektedir. Yansımanın sıfıra eşit olabilmesi için;

$$n_f = \sqrt{n_0 n_a} \quad (3.3)$$

Şartının sağlanması gerekir [46]. Bu sayede uygulanması gereken yansıma önleyici filmin kırılma indisi belirlenebilir. Sonrasında uygulanacak olan bu yansıma önleyici filmin kalınlığı hedeflenen dalgaboyu belirlenerek Eş. 3.1. ile hesaplanır.

Dielektrik katmanların düşük yayıcı yapılara bir diğer katkısı da metal filmin kaplanacağı yüzeyi daha uygun hale getirmesidir. Metal filmlerin alttaşın üzerine direkt olarak kaplandığı durumlarda, alttaşın yüzey morfolojisi metal filmin iletkenliğini etkileyebilmektedir. Yüzey morfolojisinin bozuk olduğu durumlarda metal filmin iletken hale gelebilmesi için daha kalın olması gerekmekte ve bu durumda görünür bölge geçirgenliğinin azalmasına neden olmaktadır. Dielektrik katman yardımı ile alttaşa kıyasla daha düzgün bir morfoloji oluşturularak metal ince filmin çok daha ince ve düzgün olması sağlanabilir [47].

Literatürde düşük yayıcı yapılarda kullanılan birçok farklı dielektrik katman bulunmaktadır. Kullanılan dielektrik katmanların büyük bir çoğunluğunu metal oksit malzemeler oluştururken bunların haricinde sülfür içerikli malzemelerde kullanılmaktadır. En çok tercih edilen malzemelerden bazıları TiO_2 [48], ZnO [49], ITO [50], AZO [51] ve ZnS [14] şeklinde sıralanabilir. Kullanılan dielektrik katmanlarının hepsi ile birbirine yakın ve iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Dielektrik katmanlar belirlenirken daha çok maliyetleri, uygulanabilme kolaylığı ve metal katman ile olan uyumlulukları ön plana çıkmaktadır. Düşük yayıcı yapıların performansını asıl olarak etkileyen katmanın metal katmanı olduğu söylenebilir.

3.3. Metal Katmanı ve Özellikleri

Düşük yayıcı kaplamaların katmanlarından biri olan metal katmanı yapının en önemli katmanıdır. Metal katmanı sayesinde kızılötesi bölgede yansıtıcılık elde edilir ve bu sayede ısı geçişinin kontrolü sağlanır. Bununla birlikte metal katmanın görünür bölgede geçirgen olması da beklenmektedir. Düşük yayıcı kaplamaların özelliği görünür bölgede geçirgen ve

kızılötesi bölgede yansıtıcı olmasıdır. Ayrıca soğurmanın en düşük seviye tutulması gerekir çünkü soğurma miktarı artarsa yayıcılık da artar [25].

Hacimli metaller görünür bölgede geçirgen değildir. Bunun sebebi metallerin içerisinde yer alan serbest elektronların konsantrasyonunun yüksek olmasıdır. Bunların birlikte ince filmlerde metaller farklı özellikler göstermektedir. Metal ince filmlerin elektriksel ve optik özellikleri gelen elektromanyetik dalganın frekansına göre değişim göstermeye başlar [52]. Drude-Sommerfeld modeline göre bir metalin DC iletkenliği;

$$\sigma_{dc} = \frac{1}{4\pi} \omega_p^2 \tau \quad (3.4)$$

ile verilmektedir [53]. Bu eşitlik frekansa bağlı olarak tekrar yazılırsa

$$\sigma(\omega) = \frac{\omega_p^2}{4\pi} \frac{1}{1/\tau - i\omega} \quad (3.5)$$

Bu eşitlik komponentlerine ayrılırsa

$$\sigma_1(\omega) = \frac{\omega_p^2 \tau}{4\pi} \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \text{ ve } \sigma_2(\omega) = \frac{\omega_p^2 \tau}{4\pi} \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3.6)$$

Şeklinde yazılır. Drude modeli kompleks bir eşitliktir ve uygulanan elektrik alanının açısal frekansına bağlıdır. Bir metalin optik özellikleri plazma frekansı ω_p ve saçılma frekansı $\gamma = 1/\tau$ değerlerine bağlıdır [53]. Bu durum farklı frekans aralıklarına bağlı olarak üç bölge ile incelenmektedir.

Metalin kompleks iletkenliği ile kompleks dielektrik fonksiyonu arasında Eşitlik 3.7 ile gösterilen bir bağıntı bulunmaktadır

$$\epsilon(\omega) = 1 + \frac{4\pi i}{\omega} \sigma(\omega) \quad (3.7)$$

Frekansa bağlı olan iletkenlik formülü ile birleştirilerek gerçekte ve sanal kısımlarına ayrıldığında eşitlik

$$\epsilon_1(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \tau^{-2}} \text{ ve } \epsilon_2(\omega) = \frac{1}{\omega\tau} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \tau^{-2}} \quad (3.8)$$

bağıntıları ile verilmektedir [53].

Frekans aralığına bağımlı olarak belirtilen üç bölgeden ilki düşük frekans ya da Hagen-Rubens bölgesidir. Bu bölgenin belirlenme koşulu $\omega\tau \ll 1$ olarak verilir. Bu bölgede optik özellikler DC iletkenlik ile belirlenir ve iletkenlik formülünün gerçek kısmı frekanstan bağımsızdır. Dielektrik fonksiyonun gerçek kısmı sabit, negatif ve büyüktür [53].

$$\epsilon_1(\omega) = \epsilon_1(0) \approx 1 - \omega_p^2 \tau^2 \quad (3.9)$$

Dielektrik fonksiyonun sanal kısmı ise frekansa bağımlıdır.

$$\epsilon_2(\omega) \approx \frac{\omega_p^2 \tau}{\omega} \quad (3.10)$$

Elde edilen sonuç kırılma indisinin kompleks formülünde yerine yazıldığında

$$N = n + ik \approx (i\epsilon_2)^{1/2} \quad (3.11)$$

şeklinde verilir. Gerçek kısım ile sanal kısım birbirine eşittir ve Eşitlik 3.12 ile ifade edilebilir.

$$n(\omega) = k(\omega) = \left(\frac{2\pi\sigma_{dc}}{\omega}\right)^{1/2} \gg 1 \quad (3.12)$$

Belirtilen durumda yansıtma katsayısı R şu şekilde yazılabilir

$$\begin{aligned} R(\omega) &\approx \frac{k(\omega) - 1}{k(\omega) + 1} \\ &\approx 1 - \left(\frac{2\omega}{\pi\sigma_{dc}}\right)^{1/2} = 1 - \left(\frac{8\epsilon_0\omega}{\sigma_{dc}}\right)^{1/2} = 1 - A(\omega) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Bu eşitlikte verilen $A(\omega)$ soğurma katsayısıdır. Bir malzemenin soğuruculuğu arttıkça yayıcılığı da artmaktadır. Hagen-Rubens bölgesinde yüzey empedansının gerçek kısmı ve sanal kısmı birbirine eşittir.

$$R_{\square}(\omega) = -X_{\square}(\omega) = \left(\frac{\mu_0 \omega}{2\sigma_{dc}}\right)^{1/2} \quad (3.14)$$

Bu formülde μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğidir. Eşitlik 3.13 ve 3.14 kullanılarak malzemenin yansıtma katsayısı yüzey direnci cinsinden

$$R = 1 - 4\varepsilon_0 c R_{\square} \quad (3.15)$$

şeklinde yazılır. Yüzey direnci ile yayıcılık arasındaki bağlantı yazılacak olursa

$$\epsilon = A = 1 - R = 4\varepsilon_0 c R_{\square} = 0,0106 R_{\square} \quad (3.16)$$

olarak bulunur. Bu sonuçla metal ince filmin iletkenliği arttıkça yani direnci azaldıkça yansıtıcılığı artar ve soğuruculuğu azalır. Bu bölgedeki elektromanyetik dalgaların metal filmdeki yansıtıcılığı oldukça yüksektir [53,54]

Bir diğer frekans bölgesi durulma bölgesi olarak adlandırılır. Saçılma frekansı ile plazma frekansı arasında kalan frekans aralığı bu bölgeyi göstermektedir. Bu aralıkta kırılma indisini gerçek ve sanal kısımları birbirine eşit değildir ve frekansa bağlıdır.

$$n(\omega) \approx \frac{\omega_p}{2\tau\omega^2} \text{ ve } k(\omega) \approx \frac{\omega_p}{\omega} \quad (3.17)$$

Bu bölgedeki soğurma katsayısı

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) \approx \frac{1}{(\pi\sigma_{dc}\tau)^{1/2}} \quad (3.18)$$

şeklinde verilebilir [53]. Durulma bölgesinde soğurma katsayısı ve yansıtma katsayısı frekanstan bağımsızdır. Metal ince filmin iletkenliği arttıkça soğurma azalmakta ve yansıtıcılık özelliği aynı düşük frekans bölgesindeki gibi yüksek olmaktadır.

Son frekans bölgesi saydam bölge olarak adlandırılmaktadır. Gelen elektromanyetik dalganın frekansı iletken metalin plazma frekansına eşit olduğunda yansıtma katsayısı ciddi miktarda düşer ve gelen elektromanyetik dalganın frekansı daha büyük olduğunda metal geçirgen hale gelir. Bu durumda metal ince filmin geçirgen olma koşulu $\omega > \omega_p$ şeklinde verilebilir [53].

Metal ince filmlerin kalınlığı arttıkça geçirgenlik azalmaya başlar ve film hacimli bir metalin özelliklerini göstermeye başlar. Yine aynı şekilde kalınlık arttıkça iletkenlik de aynı şekilde artar ve metal filmin kızılötesi bölgedeki yansıtıcılığı artar [55]. Düşük yayıcı kaplamalar için metal filmin kalınlığı çok kritiktir. Filmin kalınlığı hem görünür bölgedeki geçirgenlik şartını sağlamalı hem de kızılötesi bölgedeki yansıtıcılık özelliğini yerine getirmelidir.

İnce filmlerin genel olarak üç farklı büyüme modu vardır. Bu modların oluşma sebebi alttaşın sahip olduğu atomlar ile kaplanan filmin atomlarının arasındaki etkileşimdir. Bu etkileşimin temeli alttaş yüzeyindeki atomlar ile kaplanan filmin atomlarının sahip oldukları bağlanma enerjisidir. Bu enerji değerleri büyüme modlarını belirler [56].

Bu büyüme modlarından ilki Frank-van der Merwe olarak adlandırılır. Bu modda atomlar katman katman kaplanır ve iki boyutlu bir büyüme olur. İdeal büyüme modu olarak da adlandırılabilir. Bu büyümenin oluşması için alttaş ile film atomlarının arasındaki etkileşimin film atomlarının kendi arasındaki etkileşimden daha yüksek olması gerekir. Alttaşın yüzey enerjisinin, filmin yüzey enerjisi ile film-alttaş arasındaki arayüzey enerjisinin toplamından büyük olması gerekmektedir [56].

Diğer büyüme modu adacıklı büyüme olarak da adlandırılan Volmer-Weber büyüme modudur. Bu modda film atomları üç boyutlu olarak birbirleri üzerine büyümeyi tercih eder. Film atomları arasındaki etkileşim, film ile yüzey atomları arasındaki etkileşimden daha fazladır. Bu büyümenin oluşması için film atomlarının yüzey enerjisinin alttaşın yüzey enerjisinden daha fazla olması gerekir [56].

Son büyüme modu Stranski-Krastanov olarak isimlendirilen hem katman hem adacıklı büyümenin görüldüğü moddur. Genellikle ilk başta katman katman büyüme gözlenirken sonrasında film atomlarının arasındaki etkileşimin artması ile adacıklı büyümeye dönüşmesi olarak görülür [56].

Metal ince filmlerde büyüme ilk olarak Volmer-Weber büyüme modu ile başlar. Adacıklı filmler hem görünür bölgede hem de kızılötesi bölgede geçirgen bir özellik gösterir. Perkolasyon eşiği olarak adlandırılan kritik bir kalınlık aşıldığında film sürekli hale gelmeye başlar ve metal ince film kızılötesi bölgede yansıtıcı özellik gösterir. Film kalınlığı arttırılmaya devam edilirse görünür bölgedeki geçirgenlik kaybedilir ve film bütün ışınları yansıtmaya başlar. Metal adacıklı filmlerde birbirleri ile bağlantısı olmayan metal adacıkları, yüzey plazmonu olarak adlandırılan bir durum sonucu gelen ışık ile etkileşime girer. Yüzey plazmonu adacıkların içerisindeki elektronların gelen ışık ile aynı fazda güçlü salınımlar yapması ile oluşur. Rezonans frekansı genel anlamda üç faktöre dayanmaktadır. Metalin elektriksel özellikleri, adacıkların boyutu ve şekli ve adacıkların olduğu yüzeyin özellikleri. Bu sebepten dolayı farklı frekanslarda yüzey plazmonları soğurma özelliğine sahip olmaktadır [56].

Metal filmin kalınlığı perkolasyon eşiğini aştığında adacıklar birleşmeye ve film yüzeyi iletken hale gelmeye başlamaktadır. Bunun sonucunda metal film kızılötesi bölgede yansıtıcı özellik göstermeye başlamaktadır. Perkolasyon eşiğinin kalınlığı ne kadar az olursa soğurma da o kadar az olacaktır. Perkolasyon eşiği kalınlığı metaller arasında farklılık göstermektedir. Bunun yanında kaplama koşulları ve alttaş yüzeyinin enerjisi değiştirilerek bu kalınlık azaltılabilmektedir [56].

Düşük yayıcı kaplamalarda en çok tercih edilen metaller gümüş [57], bakır [58], altın [59] ve alüminyumdur [60]. Bu metallerin tercih edilmelerinin en büyük sebebi düşük direnç değerlerine sahip olmalarıdır. Birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlara sahiptirler ve bu durum tercih edilme sebeplerindendir. En çok kullanılan metal gümüştür. Gümüş en düşük iletkenliğe sahip metal olmakla birlikte görünür bölge geçirgenliği en yüksek metaldir. Ayrıca diğer tercih edilen metallerden bakır ve altının 500 nm dalgaboyu civarında ve alüminyumun yaklaşık olarak 800 nm dalgaboyunda kısa dalgaboylu soğurma yapmaları diğer olumsuz özelliklerindendir [33].

3.4. Bariyer Katmanı ve Özellikleri

Düşük yayıcı çok katmanlı yapılarda kullanılabilen katmanlardan bir diğeri de bariyer katmanıdır. Bariyer katmanı düşük yayıcı yapılarda her zaman kullanılmayabilir. Bu katmanın kullanım amacı dielektrik/metal/dielektrik yapısının korunması içindir. Düşük

yayıcı yapılar büyük oranda cam alttaşlar üzerine hazırlanır. Yapılarda ve otomotiv sektöründe kullanılan camların sağlamlığını arttırmak için ısıtılma tabi tutulmaları son derece yaygın olmakla birlikte gereklidir de. Termal sertleştirme olarak da adlandırılan bu ısıtılma işlemi sonucunda camların darbeye bağlı sağlamlıkları arttırılırken, kırılma esnasında büyük ve keskin parçaların oluşmasına da engel olunur. Camın bu özellikleri kazanabilmesi için yaklaşık olarak 700°C sıcaklıklarda ısıtılma maruz kalması gerekir. Bu işlemler düşük yayıcı çok katmanlı kaplamalar hazırlandıktan sonra uygulanabildiği gibi bu kaplamalar gerçekleştirilmeden önce de uygulanabilir [61,62]. Bu durum üretim tekniğine bağlıdır ve düşük yayıcı çok katmanlı kaplamalar hazırlandıktan sonra uygulandığında bariyer katmanının kullanılması gerekli hale gelir.

Cam malzemesinin üzerine uygulanan 500°C'nin üzerindeki ısıtılma işlemlerinde, camın yapısında bulunan sodyum ve potasyum gibi alkali metaller, camın üzerinde bulunan ince film katmanlarının içerisine difüz edebilirler. Bu durum ince filmlerin elektrik [63,64], mekanik [65,66] ve optik özelliklerini [67] etkiler. Cam ile düşük yayıcı yapıların arasına kaplanan bir bariyer katmanı, yapıyı bu difüzyonlara karşı koruyabilir. Düşük yayıcı yapılarda kullanılan bariyer katmanının sahip olması gereken ilk özellik görünür bölgede geçirgen olmasıdır. Yüksek sıcaklıklarda kararlı olması, mekanik olarak sert ve dayanıklı olması sahip olması gereken diğer özellikleridir.

Bariyer katmanı camdan ince filme doğru gerçekleşebilecek olan difüzyonu engelleyebildiği gibi aynı zamanda alttaşın yüzeyindeki bozuklukların ince filmlere olan etkisini de engelleyebilir. Çok ince metal filmlerde kaplanan yüzeyin bozukluğu film kalitesini etkileyebilmektedir [47]. Düşük yayıcı yapılarda dielektrik katmanı ile bu durum bir miktar azaltılmakla birlikte bariyer katmanının varlığı filmin kalitesini daha iyi hale getirebilir. Bariyer katmanı olarak en çok tercih edilen malzemeler SiO₂ [68], Si₃N₄ [69] ve Al₂O₃ [70] olarak ön plana çıkmaktadır. Bu malzemelerin tamamı yüksek sıcaklıklarda kararlı olan, mekanik olarak sert ve yüksek dielektrik sabitine sahiptir. Bu özellikleri ile de düşük yayıcı yapılarda bariyer katmanı olarak kullanılmaya uygundur.



4. D/M/D YAPILARIN GELİŞTİRİLMESİ

Düşüş yayıcı yapıların üretilmesi için çoğunlukla tercih edilen iki farklı üretim yöntemi vardır. Sert kaplama ve yumuşak kaplama olarak adlandırılan bu tekniklerden sert kaplamalar camın üretimi esnasında uygulanırken, yumuşak kaplamalar camın üretimi tamamlandıktan sonra uygulanır. Yumuşak kaplamalar çoğunlukla aktif bir metal katmanın iki dielektrik katman arasında kaplanması ile elde edilir. Dielektrik ve metal katmanlar nanometre mertebesindeki kalınlıklarda ince film olarak üretilirler. Elde edilen bu yapının farklı analiz teknikleri ile özellikleri analiz edilerek istenilen özelliklere uygun olup olmadıkları belirlenir. Tezin bu bölümünde dielektrik/metal/dielektrik yapıların üretim yöntemleri, kaplama koşulları ve analiz teknikleri anlatılacaktır.

4.1. İnce Filmler ve Üretim Yöntemleri

İnce filmler, bir malzemenin ince bir katman halinde hacimli bir alttaş üzerine kaplanması ile elde edilir. İnce filmler genel anlamda nanometre mertebesinde birkaç mikron kalınlıktaki katmanlara verilen isimdir. İnce filmlerin kullanılmasının en önemli nedeni kaplanan malzemenin yığın halinden daha farklı özellikler göstermesidir. Elektriksel, mekanik, optik, yüzey morfolojisi ve daha birçok noktada yığın halinden farklı özellikler görülebilir. Bir kaplamanın ince film olarak adlandırılabilmesi için kalınlığından ziyade istenilen özelliklerinde farklılıklar göstermesi daha önemlidir. İnce filmler nanoteknolojinin en önemli uygulamalarının başında gelmektedir. Bilgisayar teknolojilerinden medikal alanına, savunma sanayisinden kimyaya kadar çok geniş bir yelpazede ürün geliştirilebilmektedir. Her geçen gün artan kullanım alanı, malzeme miktarı yeni kaplama yöntemleri ile ince film alanında yapılan çalışmalar artmakta, elde edilen özellikler sürekli gelişmektedir. İnce filmler temel olarak hedef malzemenin atom ve molekül boyutunda parçacıklara ayrılarak bir alttaş üzerine tutunması sağlanarak üretilir. Hedef malzemeyi atom ve molekül boyutuna indirebilmek için kullanılan birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin uygulama kolaylığı, malzeme kalitesi ve maliyeti gibi birbirlerinden farklı birçok parametresi bulunmaktadır. Yöntem tercihi yapılırken bu parametrelerin hepsinin dikkate alınarak yapılan iş için en uygun yöntem tercih edilmelidir. En yaygın olarak kullanılan ince film kaplama yöntemleri genel özellikleri anlamında ikiye ayrılabilir. Buhar biriktirme ve sıvı biriktirme olarak adlandırılacak olan bu teknikler kendi içerisinde alt

kollara ayrılmaktadır. Yüksek kalitede filmler üretmeye imkân tanıyan buhar biriktirme yöntemleri çok yaygın olarak tercih edilmekte ve kendi içerisinde yine ikiye ayrılmaktadır. Fiziksel buhar biriktirme ve kimyasal buhar biriktirme olarak adlandırılan bu yöntemlerden fiziksel buhar biriktirme uygulama maliyetinin kimyasal buhar biriktirmeye göre daha düşük olması ve daha fazla malzemenin kaplanmasına olanak vermesinden dolayı tüm dünyada çok yaygın olarak tercih edilmektedir. Buharlaştırma ve kopartma olarak iki genel başlığa ayrılabilen fiziksel buhar biriktirme yönteminde, rezistans, ark veya elektron demeti bombardımanı gibi yöntemler ile malzemenin buharlaştırılarak alttaş üzerine kaplanması sağlanabildiği gibi hedef malzemenin belirli gazlar ile bombardıman edilerek ve elektriksel güç uygulanarak kopartılıp alttaş üzerine kaplanması mümkün olabilmektedir. Kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile çok daha kaliteli kaplamalar yapılabilmesine rağmen ekipmanların ve cihazların yüksek maliyeti nedeni ile çoğunlukla daha kritik özelliklere ihtiyaç duyulduğunda kullanılmaktadır. Bu yöntemde hedef malzeme buharlaştırılarak taşıyıcı gazlar yardımı ile alttaş üzerine kimyasal özellikler kullanılarak kaplanması sağlanır. Sıvı biriktirme olarak adlandırılan tekniklerde ise sıvı formda bulunan malzeme alttaş üzerine döndürme veya daldırma gibi yöntemler ile kaplanarak ince filmler elde edilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında metal ve metal oksit katmanları Magnetron kopartma tekniği kullanılarak elde edildi. Bu teknik yardımı ile iyi kalitede ve düzgün yüzey morfolojisine sahip ince filmlerin üretildi.

4.1.1. Magnetron kopartma tekniği

Fiziksel buharlaştırma tekniklerinden biri olan kopartma tekniği akademik ve endüstriyel çalışmalarda yoğunlukla kullanılan tekniklerden biridir. Kopartma tekniği ile iyi kalitede ince filmler elde edilebilir. Bu tekniğin yaygın bir şekilde kullanılmasının en önemli sebepleri kaplama sürecinin iyi bir şekilde kontrol edilebilmesi ve yüksek tekrarlanabilirliğe sahip olunmasıdır.

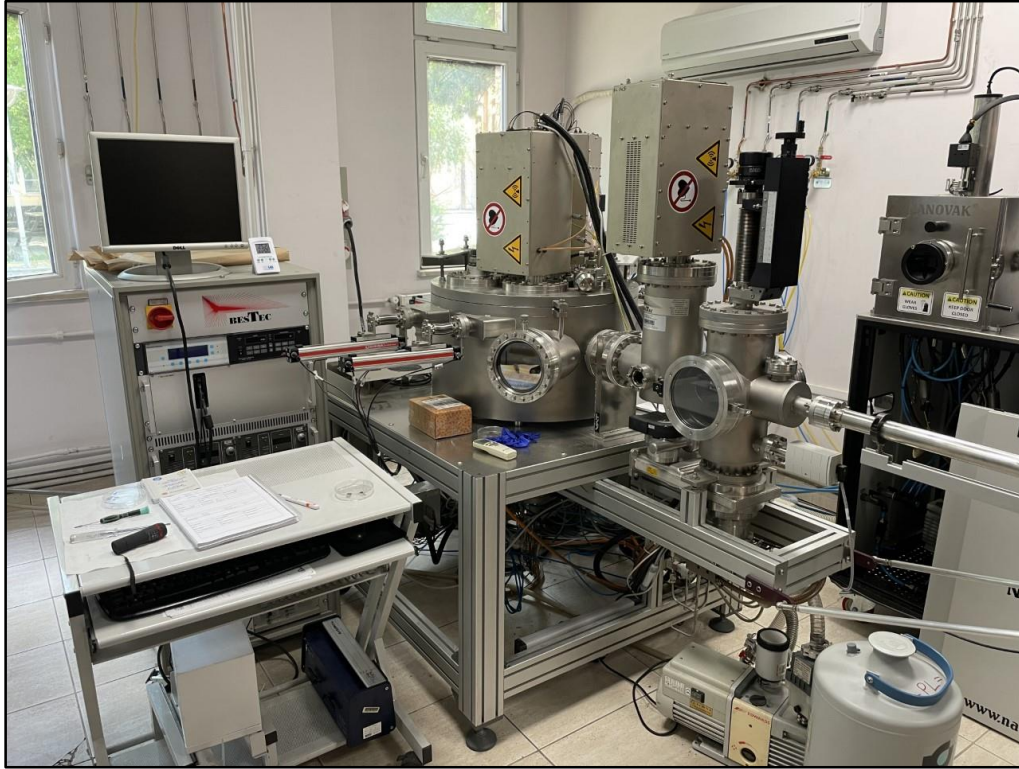
Bu yöntem temel olarak iyonlaştırılmış atomların hedef malzemeye çarptırılarak malzeme yüzeyinden kopartılan atom veya moleküllerin alttaş üzerine biriktirilmesi olarak açıklanabilir. Kopartma tekniğinin uygulanması için yüksek vakum ortamına ihtiyaç vardır. Bu sayede atmosferde bulunan istenmeyen gazlar sistemden temizlenmiş olmakta ve

iyonlaşma için daha düşük elektriksel güç yeterli olmaktadır. Kopartma malzemesi olarak genellikle Argon gazı tercih edilmektedir. Bunun sebebi argon atomlarının boyutlarının büyük olması ve asal gaz olduğu için hedef malzeme ile reaksiyona girmemesidir. Ortama verilen argon gazının iyonlaştırılması için, hedef ile alttaş arasına yüksek gerilim uygulanır. Uygulanan yüksek gerilim sonucu hedef yakınında oluşan serbest elektronlar hızlanarak argon atomları ile çarpışır ve argon atomlarının pozitif iyonlaşmasına (Ar^+) neden olur. İyonlaşan argon atomları ve serbest elektronlar birlikte bir plazma ortamı oluştururlar. İyonlaşan argon atomları katot olarak belirlenen ve negatif olarak yüklenen hedef yüzeyine doğru hızlanarak çarpar ve hedef malzemedeki atomları kopartır. Hedef malzemedan kopan atomlar anot olarak belirlenen ve pozitif yüklenen alttaş üzerine birikerek ince film katmanını oluşturur.

Kopartma tekniği ile ince filmin kaplama hızı ve özellikleri kontrol edilebilmektedir. Vakum ortamına verilen Argon gazı miktarı, anot ile katot arasında oluşturulan gerilim miktarı, hedef ile alttaş arasındaki mesafe gibi birçok etken değiştirilerek ince film kaplama sürecinin kontrolü istenildiği şekilde sağlanabilir. Bunun haricinde vakum ortamına Argon gazı ile birlikte oksijen ve azot gibi gazlarda verilerek hazırlanan ince filmin oksit veya nitrürlü bir yapıya sahip olması sağlanabilir. Bu gazlara reaktif gaz adı verilir ve bu şekilde yapılan kaplamalara reaktif kaplamalar adı verilir.

Kopartma yöntemi uygulanan gerilimin güç kaynağına göre ikiye ayrılır. Bunlardan ilki doğru akım (DC) güç kaynağı kullanılarak uygulanan DC kopartma yöntemidir. Bu yöntemde hedef ile alttaş arasına DC gerilim uygulanarak argon atomlarının iyonlaşması ve plazma ortamı oluşturularak bu atomların hedef yüzeyine çarptırılması sağlanır. DC kopartma yöntemi sadece iletken malzemeler için uygulanabilen bir tekniktir. Hedefin iletken olması yüzeye gelen argon iyonlarının hedef yüzeyinin pozitif olarak yüklenmesine engel olur. Bunun tersi olarak eğer iletken olmayan bir hedef kullanılırsa argon iyonları yüzeyi pozitif olarak yükler ve plazmanın ortamının oluşmasına engel olur. Diğer kullanılabilen güç kaynağı ise radyo frekans (RF) güç kaynağıdır. RF kopartma tekniğinde, anot ile katot arasına uygulanan alternatif gerilimin her değişiminde anot ve katodun polariteleri değişmektedir. Böylece iletken olmayan bir hedef yüzeyinin pozitif olarak yüklenmesi engellenmiş olur. RF kopartma yöntemi ile iletken malzemeler kaplanabildiği gibi, iletken olmayan malzemelerde kaplanabilmektedir.

İyonlaşmış argon atomları hedef yüzeyine çarptığında burada ikincil elektronlar oluşturmaktadır. Oluşan bu ikincil elektronlar argon atomları ile çarpışarak iyonlaşan argon atom sayısını arttırabilir. Bu sayede daha yoğun bir plazma ortamı elde edilerek kopartılan malzeme miktarı arttırılabilir. Ancak RF ve DC kopartma tekniklerinde oluşan ikincil elektronlar aynı zamanda alttaş yüzeyine ulaşarak alttaşın ısınmasına ve film kalitesini düşmesine neden olmaktadır. Bunu engellemek adına hedef malzemenin arkasına mıknatıslar yerleştirilerek bir manyetik alan oluşur. Oluşan bu manyetik alan oluşan ikincil elektronların dağılmasına ve alttaş yüzeyine ulaşmasına engel olur. Aynı zamanda bu elektronları hedefe yakın bir şekilde tutarak argon atomları ile çarpışmasını sağlayarak daha fazla argon atomunun iyonlaşmasına sebep olur. İyonlaşan argon atomu sayısının artması plazma yoğunluğunu arttırarak ince filmin daha hızlı büyümesini sağlar.



Resim 4.1. Magnetron kopartma sistemi (BesTec)

Bu tez çalışmasında hazırlanan ince filmler Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yer alan BesTec Magnetron Kopartma Sistemi kullanılarak üretildi. Metal oksit ince filmlerin üretiminde RF güç kaynağı kullanılırken, metal ince filmlerin üretiminde DC güç kaynağı kullanıldı.

AZO
Ag
AZO
Al₂O₃
Cam

Şekil 4.1. Tez çalışması kapsamında hazırlanacak olan hedef yapı

Tez çalışmasında Şekil 4.1’de verilen yapı oluşturulmaya çalışıldı. İlk olarak cam altta ile dielektrik/metal/dielektrik katmanları arasına bariyer katmanı geliştirildi. Bariyer katmanı için ideal kaplama koşulları belirlendikten sonra Al₂O₃/cam katmanı üzerine alt dielektrik katmanı için geliştirilerek ideal kaplama koşulları belirlendi. Metal katmanın, yapının içerisinde bulunduğu etkisinin inceleyebilmek için metal katmanı AZO/Al₂O₃/cam katmanları üzerine hazırlanarak ideal kaplama koşulları belirlendi. Son olarak da üst dielektrik katmanı, alt dielektrik katmanı ile aynı koşullarda ve farklı kalınlıklarda hazırlanarak uygun kalınlık değeri belirlendi ve tam yapı oluşturuldu.

4.2. Al₂O₃ İnce Filmlerin Özellikleri ve Geliştirilmesi

Düşük yayıcı yapılarda kullanılabilen katmanlardan bir tanesi olan bariyer katmanı, dielektrik/metal/dielektrik yapısını korumak amacı ile kullanılan katmandır. Bariyer katmanı, düşük yayıcı özelliğe sahip yapıları kaplama sonrası gerçekleştirilecek ısı işlem sonucu meydana gelecek bozulmalardan koruduğu gibi aynı zamanda alttaşın yüzeyindeki kusurların düşük yayıcı yapının performansını azaltmasına da engel olur. Görünür bölgedeki geçirgenlik düşük yayıcı yapılar için kritik öneme sahiptir. Bu sebepten dolayı bariyer katmanı tercih edilirken görünür bölgede yüksek geçirgenlik sağlayan bir malzeme tercih edilmelidir.

Bu tez çalışmasında bariyer katmanı olarak kullanılması planlanan iki farklı malzeme belirlendi. Bu malzemeler Al₂O₃ ve Si₃N₄ ince filmlerdir. Bu malzemeler arasında görünür

bölge geçirgenliğinin hangisinde daha iyi olduğunu belirlemek amacı ile optik tasarım programı Essential Macleod kullanıldı. Essential Macleod programı geçirgenlik ve yansıtma verilerini aşağıdaki formülleri kullanarak elde etmektedir:

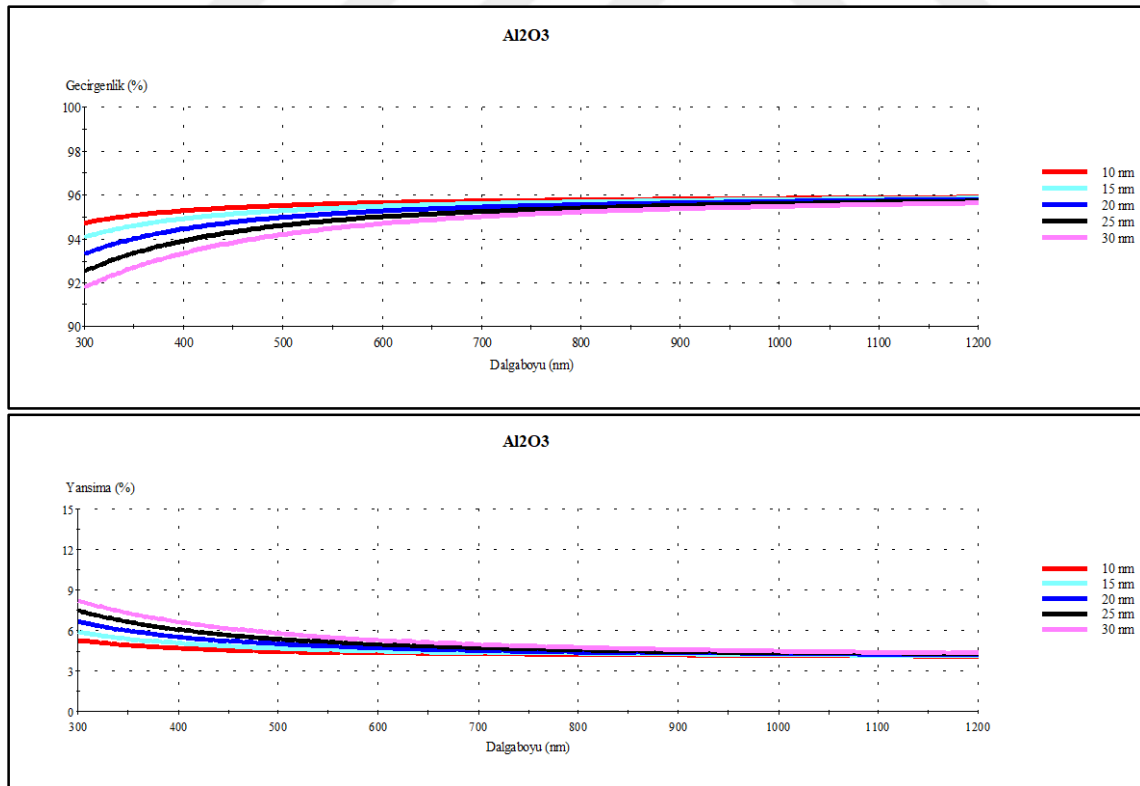
Toplam yansıtma değeri için;

$$R_{\text{eff}} = \frac{P^2 + Q^2 + 2PQ \cos R}{1 + P^2 Q^2 + 2PQ \cos R} \quad (4.1)$$

Toplam geçirgenlik değeri için;

$$T_{\text{eff}} = \frac{16n_0^2 n_f^2 n_s}{1 + P^2 Q^2 + 2PQ \cos R} \quad (4.2)$$

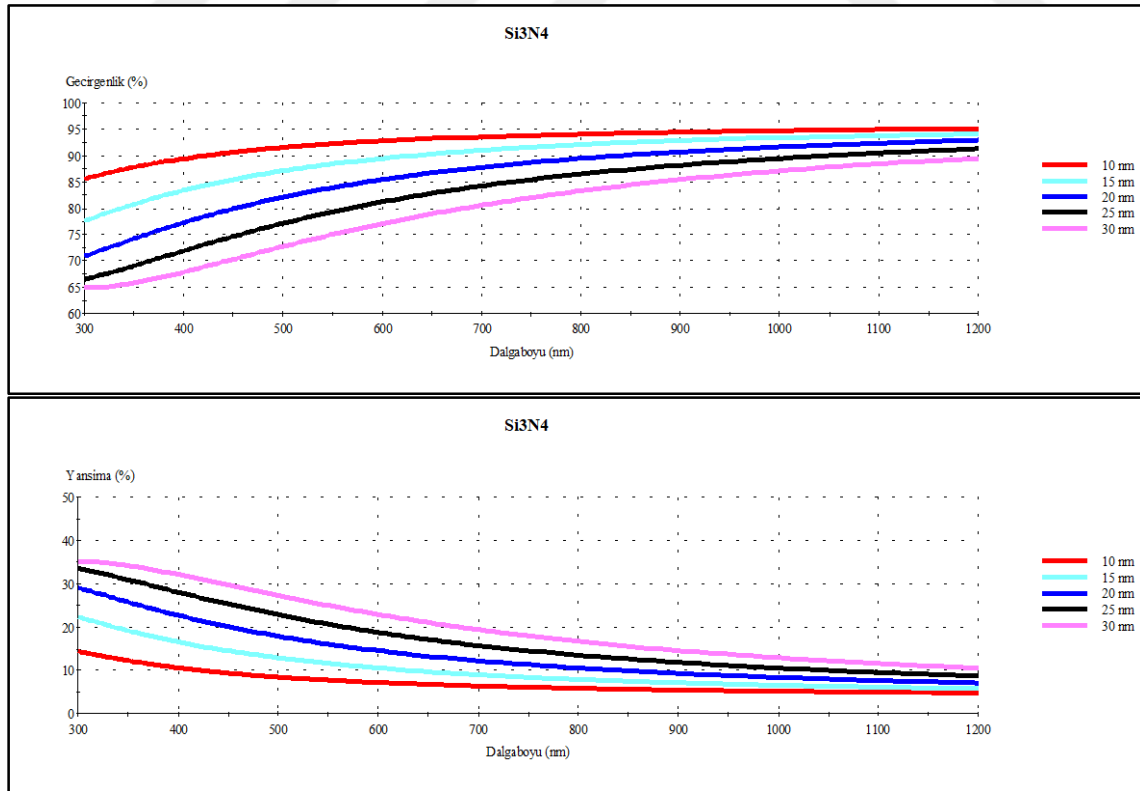
eşitlikleri kullanılır. n_0, n_f, n_s sırasıyla havanın, filmin ve alttaşın kırılma indisleridir. d_f değeri filmin kalınlığı ve λ elektromanyetik spektrumun dalga boyudur.



Şekil 4.2. Farklı kalınlıklardaki Al_2O_3 ince filmlerin optik tasarım programı yardımı ile elde edilen geçirgenlik ve yansıtma grafikleri

Şekil 4.2’de farklı kalınlıklardaki Al_2O_3 ince filmlerin optik tasarım programı kullanılarak elde edilen optik geçirgenlik ve yansıtma grafikleri görülmektedir. İnce film kalınlığı arttıkça görünür bölgenin maviye kayan kısmında geçirgenliğin azaldığı, kırmızıya kayan kısım ve kızılötesi bölgede ise bir değişim olmadığı görülmektedir. Bu grafiklerden yola çıkılarak en yüksek görünür bölge geçirgenliğine sahip 10 nm kalınlıklı filmin uygun olduğu söylenebilir. Ancak daha önce laboratuvarımızda yapılan çalışmalarda Al_2O_3 ince filmlerden bariyer tabakası olarak iyi performans alınabilmesi için kalınlığının en az 25 nm olması gerektiği bilinmektedir. Optik tasarım sonuçlarında 25 nm kalınlıklı filmin 550 nm dalgaboyundaki geçirgenliği yaklaşık olarak %95 civarlarındadır. Bu geçirgenlik değeri düşük yayıcı kaplamalar yapılması için uygun bir değerdir.

Şekil 4.3’de farklı kalınlıklardaki Si_3N_4 ince filmlerin optik tasarım programı kullanılarak elde edilen optik geçirgenlik ve yansıtma grafikleri görülmektedir. İnce film kalınlığı arttıkça maviye kayan kısımda daha yüksek olmak üzere görünür bölge ve kızılötesi bölgede geçirgenliğin azaldığı görülmektedir. Si_3N_4 ince filmin kalınlığı minimum seviyede tutulsa bile görünür bölge geçirgenliği Al_2O_3 ince filmlere göre daha düşük kalmaktadır.



Şekil 4.3. Farklı kalınlıklardaki Si_3N_4 ince filmlerin optik tasarım programı yardımı ile elde edilen geçirgenlik ve yansıtma grafikleri

Bu tez çalışmasında istenilen özellikleri sağladığından dolayı bariyer katmanı olarak Al_2O_3 ince filmler tercih edildi. Görünür bölgede sağladığı yüksek geçirgenlik özelliği Al_2O_3 ince filmlerin tercih edilmesinin en önemli sebebidir.

Düşük yayıcı yapılar için alttaş olarak soda-kireç camı (SLG) ve Silikon (Si) kullanıldı. İyi ve kaliteli ince filmler elde edilebilmesi için gerekli olan ilk şart temiz alttaşlara sahip olmaktır. Bu alttaşlara bütün kaplama proseslerinden önce temizlik işlemi uygulandı. Si alttaşlara, alkol ve aseton kullanılarak 10 dakika süre ile ultrasonik banyo uygulandı ve sonrasında yüksek saflıktaki azot gazı ile kurulandı. SLG alttaşlar ise ilk olarak sabun ile temizlendi. Sonrasında deiyonize su ile durulandı ve aynı Si alttaşlar da olduğu gibi alkol ve aseton ile 10 dakika süre ile ultrasonik banyo uygulandı. Son olarak da yüksek saflıktaki azot gazı ile kurulandı.

Al_2O_3 ince filmler RF Magnetron kopartma tekniği kullanılarak oda sıcaklığında kaplandı. Hedef malzeme olarak 4 inç çapında %99,99 saflıkta Al_2O_3 kullanıldı. Hedef ile alttaş arasındaki mesafe 90 mm olarak belirlendi ve bütün kaplamalar süresince bu mesafe sabit tutuldu. Kaplamalar öncesinde sistem 10^{-8} mbar basınca ulaşana kadar vakuma alındı. Kaplama proseslerinde kopartma gazı olarak yüksek saflıkta Argon gazı kullanıldı.

Al_2O_3 ince filmlerden düşük yayıcı yapılar için en uygun kaplama şartlarını belirlemek amacı ile bazı parametreler değiştirilerek optik özellikleri incelendi. İlk olarak farklı Argon gazı akışlarında 25 nm kalınlıklı ince filmler oluşturuldu. Sonrasında görünür bölgede optik geçirgenlik olarak en iyi sonucu veren Argon gaz akışı belirlenerek, farklı RF güçlerinde ince filmler hazırlandı. Bu değişiklikler sonucu en uygun kaplama koşulları belirlenerek Al_2O_3 ince filmler hazırlandı. Hazırlanan Al_2O_3 ince filmlerin kaplama koşulları Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Farklı Argon gazı akışlarında hazırlanan Al₂O₃ ince filmlerin kaplama koşulları

Kaplanan Malzemeler	Argon Gaz Akışı (sccm)	Argon Gaz Basıncı (mTorr)	Al ₂ O ₃ RF Güç (W)	Kalınlık (nm)
Al ₂ O ₃ /Cam	5	1,35	100	25
Al ₂ O ₃ /Cam	10	2,63	100	25
Al ₂ O ₃ /Cam	20	4,58	100	25
Al ₂ O ₃ /Cam	30	5,78	100	25
Al ₂ O ₃ /Cam	40	6,98	100	25
Al ₂ O ₃ /Cam	50	7,50	100	25

Çizelge 4.2. Farklı RF güç değerlerinde hazırlanan Al₂O₃ ince filmlerin kaplama koşulları

Kaplanan Malzemeler	Argon Gaz Akışı (sccm)	Al ₂ O ₃ RF Güç (W)	Kalınlık (nm)
Al ₂ O ₃ /Cam	5	100	25
Al ₂ O ₃ /Cam	5	125	25
Al ₂ O ₃ /Cam	5	150	25

4.3. AZO İnce Filmlerin Özellikleri ve Geliştirilmesi

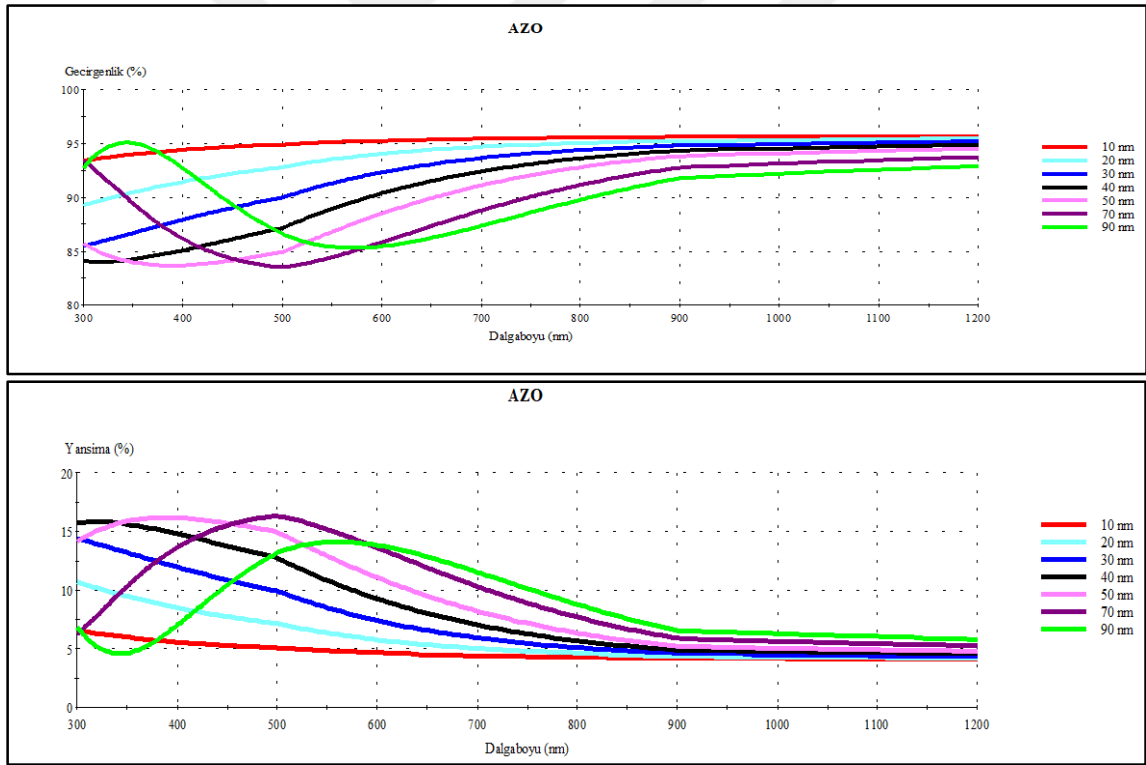
Düşük yayıcı yapılarda kullanılan dielektrik katmanının birçok önemli özelliği vardır. Dielektrik katmanı metal ince filmin korunması amacı ile kaplanmaktadır. Bunun yanında sahip olması gereken düşük yüzey pürüzlülüğü ile metal ince filmin kalitesini arttırması beklenmektedir. Üst dielektrik katmanı ise metal filmi korumasının yanında, yansıma önleyici yüzey olarak da kullanılmakta ve optik geçirgenliği arttırmaktadır. Düşük yayıcı yapılarda kullanılacak olan dielektrik katmanın ilk olarak sahip olması gerek özelliği görünür bölgedeki yüksek geçirgenliğidir. Bununla birlikte metal katmanı ile uyumlu olması son derece kritik olabilmektedir.

Bu tez çalışmasında düşük yayıcı yapılarda kullanılmak üzere tercih edilen dielektrik ince film malzemesi AZO'dur. AZO ince filmler, düşük yayıcı yapılarda kullanılmaya uygun yaklaşık olarak 3,3 eV yasak enerji aralığına sahip bir malzemedir [71]. Uygun yasak enerji aralığı sayesinde görünür bölgede yüksek geçirgenlik sağlamaktadır. Bunun yanında AZO ince filmlerin Ag metal ince filmler ile olan uyumluluğu Ag ince filmlerin kalitesini

arttırmaktadır [72]. Uygun maliyeti AZO ince filmlerin tercih edilme sebeplerinden biridir [73].

Düşük yayıcı kaplamalarda kullanılacak olan AZO ince filmlerin kalınlıklarını belirlemek amacı ile optik tasarım programı Essential Macleod kullanılarak farklı kalınlıklardaki AZO ince filmlerin optik geçirgenlik ve yansıtma özellikleri incelendi.

Şekil 4.4’de farklı kalınlıklardaki AZO ince filmlerin optik tasarım programı kullanılarak elde edilen optik geçirgenlik ve yansıtma grafikleri görülmektedir. Film kalınlığı arttıkça maviye kayan bölgede daha fazla olmak üzere görünür bölge ve kızılötesi bölgede geçirgenliğin azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlardan yola çıkılarak alt dielektrik katmanı olarak kullanılacak olan AZO ince filmlerin kalınlığı 10 nm olarak belirlendi.



Şekil 4.4. Farklı kalınlıklardaki AZO ince filmlerin optik tasarım programı yardımı ile elde edilen geçirgenlik ve yansıtma grafikleri

Üst AZO katmanı kalınlığı ise bütün yapı oluşturulduktan sonra farklı kalınlıklardaki üst AZO katmanları hazırlanarak optik geçirgenlik değerleri incelenerek belirlendi.

AZO ince filmler RF Magnetron kopartma tekniği kullanılarak oda sıcaklığında kaplandı. Hedef malzeme olarak 4 inç çapında %99,99 saflıkta ve kütlece %97,5 ZnO ve %2,5 Al₂O₃ oranlarında malzemelere sahip AZO hedef kullanıldı. Hedef ile alttaş arasındaki mesafe 90 mm olarak belirlendi ve bütün kaplamalar süresince bu mesafe sabit tutuldu. Kaplamalar öncesinde sistem 10⁻⁸ mbar basınca ulaşana kadar vakuma alındı. Kaplama proseslerinde kopartma gazı olarak yüksek saflıkta Argon gazı kullanıldı.

AZO ince filmlerin düşük yayıcı yapılar için en uygun kaplama şartlarını belirlemek amacı ile bazı parametreler değiştirilerek optik özellikleri incelendi. Yapı içerisindeki etkinin anlaşılabilmesi için AZO ince filmleri Al₂O₃/cam katmanı üzerine hazırlandı. İlk olarak farklı Argon gazı akışlarında 10 nm kalınlıklı ince filmler oluşturuldu. Sonrasında görünür bölgede optik geçirgenlik olarak en iyi sonucu veren Argon gaz akışı belirlenerek, farklı RF güçlerinde ince filmler hazırlandı. Bu değişiklikler sonucu en uygun kaplama koşulları belirlenerek AZO ince filmler hazırlandı. Hazırlanan AZO ince filmlerin kaplama koşulları Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmektedir.

Çizelge 4.3. Farklı Argon gazı akışlarında hazırlanan AZO ince filmlerin kaplama koşulları

Kaplanan Malzemeler	Argon Gaz Akışı (sccm)	Argon Gaz Basıncı (mTorr)	AZO RF Güç (W)	Kalınlık (nm)
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	1,35	100	10
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	10	2,63	100	10
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	20	4,58	100	10
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	30	5,78	100	10
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	40	6,98	100	10
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	50	7,50	100	10

Çizelge 4.4. Farklı RF güç değerlerinde hazırlanan AZO ince filmlerin kaplama koşulları

Kaplanan Malzemeler	Argon Gaz Akışı (sccm)	AZO RF Güç (W)	Kalınlık (nm)
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	100	10
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	125	10
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	150	10

4.4. Ag İnce Filmlerin Özellikleri ve Geliştirilmesi

Düşük yayıcı yapılardaki en önemli katman metal katmanıdır. Metal katmanı kızılötesi bölgede yansıtıcı özellik göstererek yapının düşük yayıcı özellik göstermesini sağlar. Metal katmanının sahip olması gereken en önemli özelliği yüksek iletkenliktir. Bunun haricinde uygun maliyetli olması da uygulama açısından son derece önemlidir. Uygun maliyetli olması için malzeme seçiminin yanında metal filmin kalınlığı da oldukça kritiktir.

Bu tez çalışmasında metal katman olarak Ag ince filmler tercih edildi. Bunun sebebi Ag'nin sahip olduğu yüksek iletkenlik ve görünür bölgedeki sahip olduğu doğal rengin düşük yayıcı kaplamalar için uygun olmasıdır [74,75]. Ayrıca düşük maliyeti de yine bu yapılarda kullanılması için uygundur.

Ag ince filmler DC Magnetron kopartma tekniği kullanılarak oda sıcaklığında kaplandı. Hedef malzeme olarak 4 inç çapında %99,99 saflıkta Ag kullanıldı. Hedef ile alttaş arasındaki mesafe 90 mm olarak belirlendi ve bütün kaplamalar süresince bu mesafe sabit tutuldu. Kaplamalar öncesinde sistem 10^{-8} mbar basınca ulaşana kadar vakuma alındı. Kaplama proseslerinde kopartma gazı olarak yüksek saflıkta Argon gazı kullanıldı.

Ag ince filmlerin düşük yayıcı kaplamalar için en uygun kaplama koşullarını belirlemek için bazı parametreler değiştirildi. Ag ince filmler Al_2O_3 ve AZO ince filmlerden farklı olarak, kaplama koşullarını belirlemek için alttaşlar üzerine tek katman olarak hazırlanmadı. Ag ince filmlerin düşük kalınlıklarda yüzeye tutunma probleminden dolayı daha sağlıklı sonuçlar elde edebilmek adına alt Al_2O_3 ve AZO katmanları hazırlandıktan sonra Ag ince filmlerin kaplama koşulları belirlendi. İlk olarak farklı Argon gaz akışlarında filmler hazırlandı. Bu hazırlanan filmlerin optik özellikleri incelenerek düşük yayıcı kaplamalar için en önemli iki özelliği sağlayan, yüksek görünür bölge geçirgenliği ve düşük kızılötesi bölge geçirgenliğine sahip iki farklı gaz akış değeri belirlendi. Bu iki değer içinde farklı DC güçlerde kaplamalar yapıldı ve en uygun DC güç değerleri belirlendi. Sonrasında en uygun değerler kullanılarak farklı kalınlıklarda Ag ince filmler hazırlandı ve analizleri yapılarak düşük yayıcı kaplamalar için en uygun ince film kaplama koşulları belirlendi. Hazırlanan Ag ince filmlerin kaplama koşulları Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de verilmektedir.

Çizelge 4.5. Farklı Argon gazı akışlarında hazırlanan Ag ince filmlerin kaplama koşulları

Kaplanan Malzemeler	Argon Gaz Akışı (sccm)	Argon Gaz Basıncı (mTorr)	Ag DC Güç (W)	Ag Kalınlık (nm)
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	1,35	50	10
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	10	2,63	50	10
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	20	4,58	50	10
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	30	5,78	50	10
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	40	6,98	50	10
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	50	7,50	50	10

Çizelge 4.6. Farklı DC güç değerlerinde hazırlanan Ag ince filmlerin kaplama koşulları

Kaplanan Malzemeler	Argon Gaz Akışı (sccm)	Ag DC Güç (W)	Kalınlık (nm)
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	25	10
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	50	10
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	75	10
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	100	10
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	50	25	10
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	50	50	10
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	50	75	10
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	50	100	10

Çizelge 4.7. Farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin kaplama koşulları

Kaplanan Malzemeler	Argon Gaz Akışı (sccm)	Ag DC Güç (W)	Kalınlık (nm)
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	25	5
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	25	6
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	25	7
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	25	8
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	25	9
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	25	10
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	50	25	5
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	50	25	6
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	50	25	7
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	50	25	8
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	50	25	9
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	50	25	10

4.5. İnce Filmlerin Analiz Teknikleri

Üretilen bir ince filmin karakterizasyonu için farklı analizler uygulanmalıdır. Bu analiz sonuçları ile üretilen ince filmlerin istenilen özelliklere sahip olup olmadıkları anlaşılabilir. Bu tez kapsamında üretilen Al₂O₃, AZO ve Ag ince filmlerin hem tek katman olarak hem de çok katmanlı yığın yapılar halinde analizleri yapıldı. İnce filmlerin özelliklerinin karakterize edilmesi için uygulanan analiz teknikleri, UV-VIS spektroskopisi, Van Der Pauw, İkincil iyon kütle spektrometresi (SIMS), Atomik Kuvvet Mikroskopi (AFM), Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM) ve X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) şeklindedir.

4.5.1. UV-VIS spektroskopisi

UV-VIS spektroskopisi çok yaygın olarak kullanılan spektroskopi tekniklerinden biridir. Bu teknikte temel olarak belirli bir dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgaların madde ile olan etkileşimi incelenmektedir. UV-VIS spektroskopisinde ultraviyole (UV) bölgede, görünür bölgede ve yakın kızılötesi bölgede (NIR) yayılan elektromanyetik dalgalar kullanılır. Farklı dalga boylarına sahip elektromanyetik dalgaların malzemenin içerisinde

ne kadarının geçtiği (T), ne kadarının yansıdığı (R) ve ne kadarının soğurulduğu (A) örnek malzemenin arkasında yer alan bir dedektör yardımı ile tespit edilir.

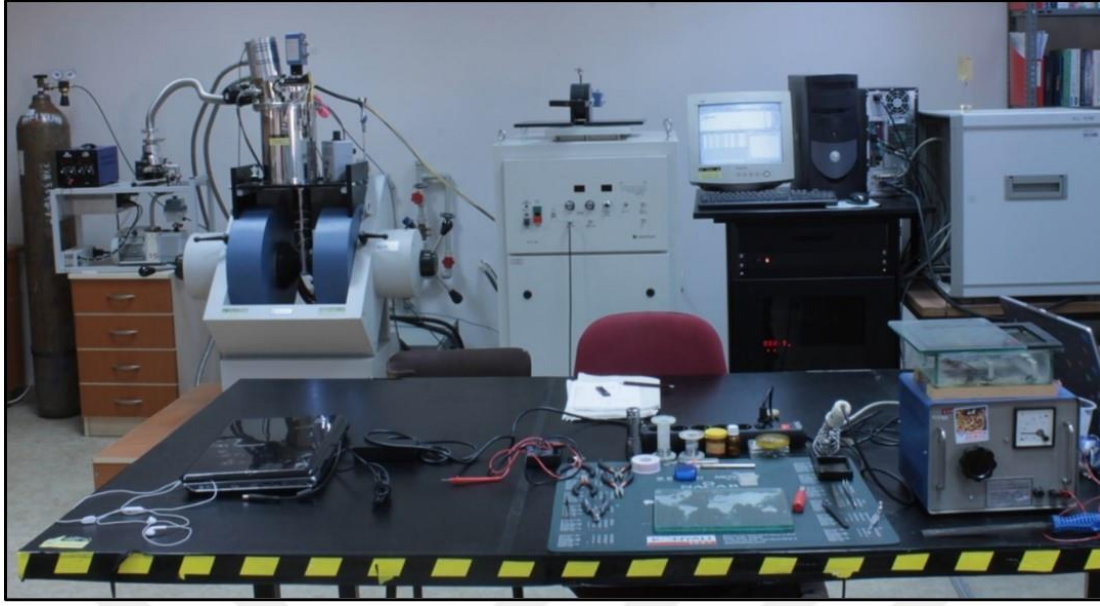


Resim 4.2. UV-Vis spektrometresi (Perkin Elmer Lambda 2S)

Bu tez çalışmasında üretilen ince filmlerin optik özellikleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Perkin Elmer Lambda 2S markalı UV-VIS spektroskopisi cihazı ile analiz edildi. Bu ölçümlerde analiz edilen dalgaboyu aralığı 200 nm ile 1100 nm arasındır.

4.5.2. Van Der Pauw tekniği

Van Der Pauw tekniği ince filmlerin yüzey direncini ölçmek için kullanılan bir tekniktir. İlk olarak 1958 yılında Leo J. Van Der Pauw tarafından geliştirilmiştir. Bu teknikte dört tane uç kullanılır. Farklı geometriler kullanılarak yerleştirilen bu uçlar genellikle ince film yüzeyinin dört köşesine yerleştirilerek kullanılır. Dört köşeye yerleştirilen bu uçlardan sadece yan yana olan iki tanesi arasında akım uygulanırken diğer iki uçtan gerilim ölçümü yapılır. Bu şekilde sırasıyla bütün uçlar arasına akım uygulanarak gerilim değerleri elde edilir ve ortalaması alınarak ince filmin yüzey direnci değeri hesaplanır.



Resim 4.3. Van Der Pauw elektriksel ölçüm sistemi (Lake Shore)

Bu tez çalışmasında üretilen ince filmlerin yüzey dirençleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yer alan Lake Shore marka Van Der Pauw elektriksel ölçüm sistemi kullanılarak ölçüldü.

4.5.3. İkincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS)

İkincil iyon kütle spektroskopisi, örnek yüzeyine odaklanmış keV mertebesindeki birincil iyonların, yüzeyden koparttığı ikincil iyonları kütle spektroskopisi yardımı ile analiz edildiği bir tekniktir. Bu teknik uygulanarak örnek yüzeyinin elementel ve moleküler özellikleri tespit edilebilmektedir. Birincil iyon kaynağı olarak pozitif iyonlar kullanmak için Sezyum (Cs) ve negatif iyonlar kullanmak için ise Oksijen (O) kullanılmaktadır. Özellikle çok katmanlı yapıların her bir katmanının elementel analizini belirlemek için oldukça kullanışlı tekniklerden bir tanesidir.

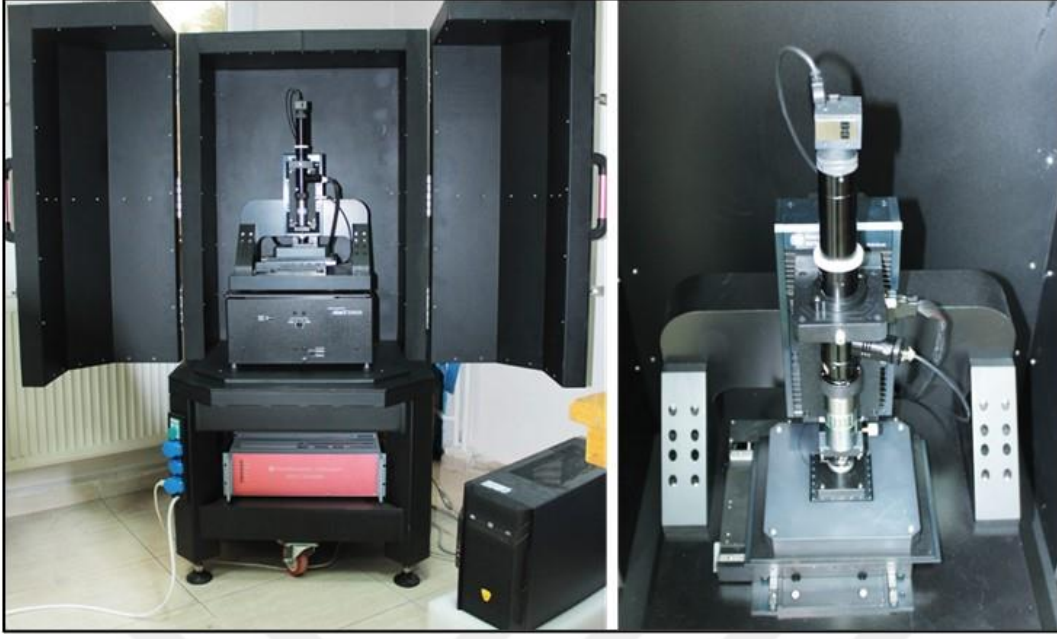


Resim 4.4. İkincil iyon kütle spektroskopisi (Hiden Analytical)

Bu tez çalışmasında üretilen çok katmanlı ince filmlerin elementel analizlerini yapmak için Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yer alan Hiden Analytical markalı SIMS sistemi kullanıldı.

4.5.4. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

Atomik kuvvet mikroskobu, bir malzemenin yüzey morfolojisinin analiz etmek amacıyla yaygın olarak kullanılan tekniklerden biridir. Bu teknikte birkaç nanometre mertebesindeki iğne ucu, yüzey ile arasında atomik kuvvetler meydana gelecek kadar yaklaştırılır. İğnenin bağlı olduğu kantilever olarak adlandırılan yay benzeri bir yapı yüzeydeki çukurlar ve tepeler arasında hareket edilirken bu atomik kuvvetler yardımı ile eğilmeye başlar. Kantilever yüzeyinden yansıtılan lazer ışını bir fotodiyot ile algılanır ve kantileverın hareketi sonucu lazer ışınının fotodiyot yüzeyine düştüğü yer değişmeye başlar. Lazer ışınının fotodiyot üzerine düştüğü noktalar kaydedilir ve bu sayede yüzeyin topografisi nanometre mertebesinde çıkartılabilir.



Resim 4.5. Atomik kuvvet mikroskobu (Nanomagnetics)

Bu tez çalışmasında üretilen ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Nanomagnetics markalı AFM sistemi kullanılarak elde edildi.

4.5.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu bir örneğin yüzeyinin görüntüsünü elde etmemize yarayan bir tekniktir. Yaygın olarak kullanılan yüzey görüntüleme tekniklerinden olan SEM biyolojik numunelerden ince filmlere kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu teknikte yüksek vakum ortamında üretilen yüksek enerjili elektron demeti örnek yüzeyine gönderilerek malzeme ile etkileşime girmesi sağlanır. Bu etkileşim sonucu malzemeden çıkan ikincil elektronlar bir detektör yardımı ile toplanarak yüzeyin görüntüsü elde edilir. Yüksek enerjili elektronlar ile örneğin etkileşimi sonucu sadece ikincil elektronlar oluşmaz. Bunun yanında yüzeydeki atomlar ile esnek çarpışma yaparak geri saçılan elektronlarda yüzeyin kimyasal kompozisyonu hakkında bilgi verebilmektedir. Büyük atom numarasına sahip atomlar ile düşük atom numarasına sahip atomlardan geri saçılan elektronlar arasında bir kontrast farkı oluşmaktadır. Bu fark kullanılarak yüzeyin kimyasal kompozisyon dağılımı hakkında bilgi sahibi olabilir. Elektron yüzey etkileşimi sonucu malzeme yüzeyinde karakteristik x ışınları

da oluşur. Bu x ışınları detektör yardımı ile analiz edilerek malzemenin elementel analizi de yapılabilmektedir.



Resim 4.6. Taramalı elektron mikroskopu (Hitachi SU5000)

Bu tez çalışmasında üretilen ince filmlerin SEM görüntüleri Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda bulunan Hitachi SU5000 SEM sistemi ile elde edildi.

4.5.6. X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS)

X-ışını Fotoelektron spektroskopisi, örnek malzemenin elementel analizinin yapmamıza yarayan tekniklerden biridir. Bu teknikte örnek yüzeyinden kopartılan fotoelektronlar analiz edilerek örnek yüzeyindeki atomların elementel analizi yapılabilmektedir. Yüksek vakum ortamında yapılan bu analiz tekniğinde, yüzey X-ışınlarına maruz bırakılır ve örnek yüzeyindeki atomların farklı enerji seviyelerindeki elektronları uyarılır. Kopan fotoelektronlar analiz edilerek bağlanma enerjileri bulunur ve bu bağlanma enerjileri her element için özel olduğundan örneğin elementel analizi yapılabilir. X ışını kaynağı olarak Mg K α ve Al K α kaynakları kullanılır. XPS tekniğinde sadece yüzeyin yaklaşık olarak 5 nm derinliğine kadar analiz yapılabilmektedir. Bunun sebebi sadece bu seviyelerde kopan fotoelektronların detektöre ulaşabilmesinden kaynaklanmaktadır. Elementel analizin

yanında örneğin kimyasal kompozisyonu ve kimyasal bağları da bu teknik ile analiz edilebilmektedir.

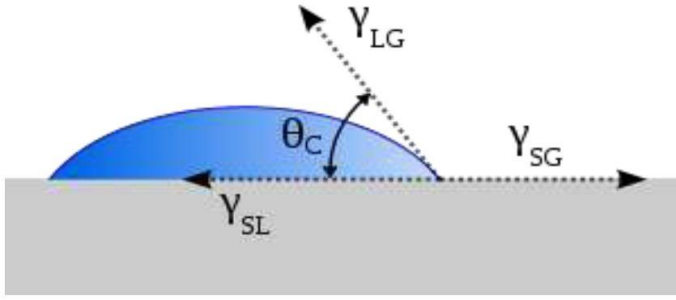


Resim 4.7. X-ışını fotoelektron spektroskopisi (Omicron)

Bu tez çalışması kapsamında üretilen ince filmlerin XPS analizleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Omicron markalı XPS sistemi kullanılarak elde edildi.

4.5.7. Kontak açısı analizi

Kontak açısı analizi, malzemelerin yüzeylerinin kimyasal ve fiziksel analizinin yapmak için kullanılan ilgi çekici yöntemlerden bir tanesidir. Bu yöntemde yüzeye su veya başka belirli özellikleri olan farklı sıvılar tek bir damla olacak şekilde damlatılmakta ve yüzey ile damlacık arasındaki açının ölçülerek yüzeyin ıslanabilirliği hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Islanabilirlik genel olarak yüzeyin morfolojisi ve kompozisyonuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yüzeyin ıslanabilirliği analiz edilerek yüzeyin hidrofobik veya hidrofilik olduğu ve yüzey enerjisi hakkında yorum yapılabilmektedir.



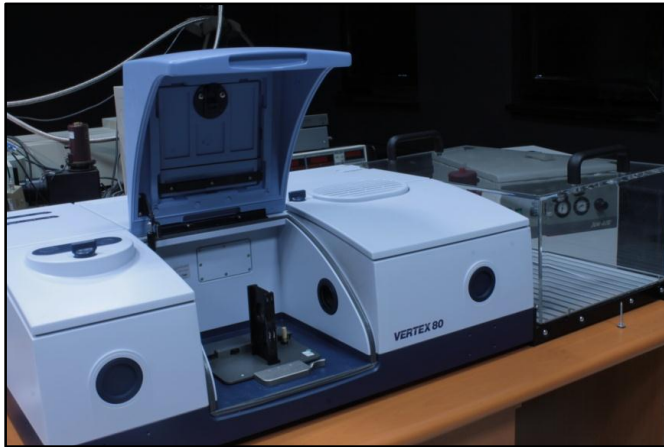
Şekil 4.5. Yüzey ile damlacık arasındaki kontak açısı [76]

Bu tez çalışması kapsamında üretilen ince filmlerin kontak açısı analizleri Gazi Üniversitesi Fotonik Araştırma Merkez’inde Hamilton marka şırınga ve cep telefonu kamerası kullanılarak gerçekleştirildi.

4.5.8. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, ışığın kızılötesi (IR) yoğunluğuna karşı dalga sayısını analiz eden kimyasal analitik bir tekniktir. Numuneye gönderilen IR ışınları molekülün titreşim hareketleri tarafından soğurulur. FTIR spektrometresinde, temel olarak bir malzeme üzerine gönderilen kızılötesi bölgedeki fotonların malzeme tarafından soğurulması, dalga boyunun bir fonksiyonu olarak ölçülmektedir.

Hazırlanan örnekler Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkez’inde bulunan Bruker markalı FTIR sistemi kullanılarak analiz edildi.



Resim 4.8. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi (Bruker Vertex 80)

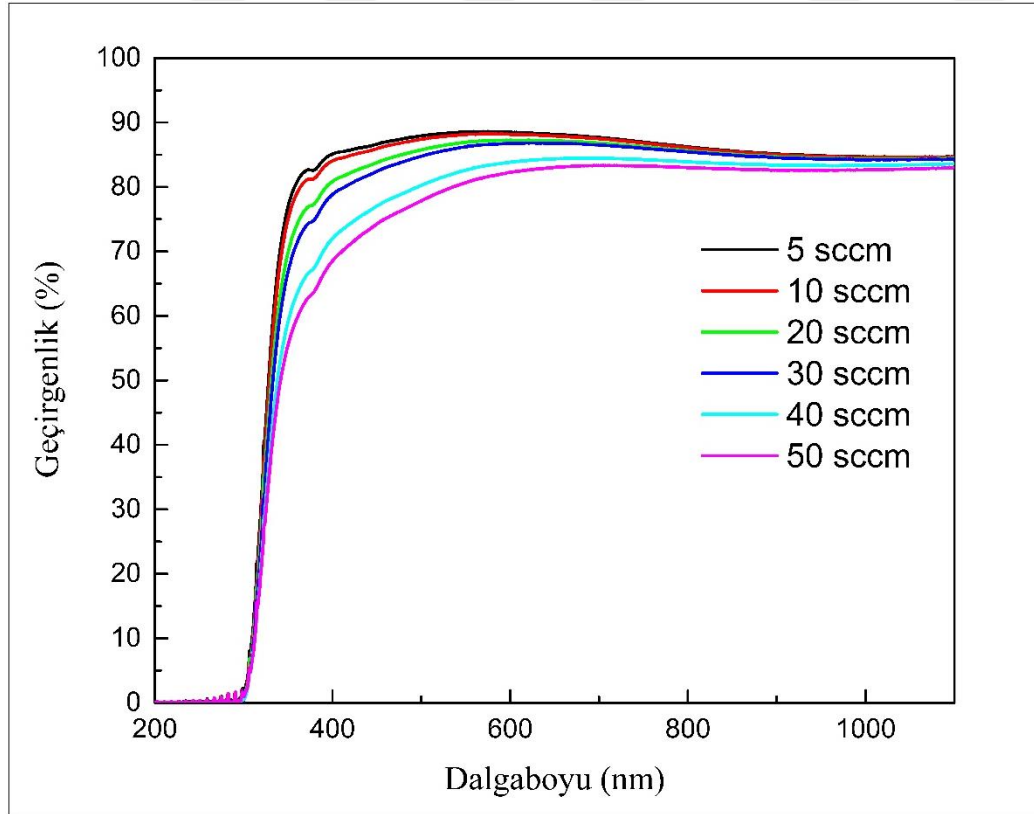


5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, koşulları daha önceki bölümlerde belirtilmiş olan ince film katmanlarına yapılan analizler sonucu elde edilen sonuçlara yer verildi. Katmanlar ayrı ayrı analiz edildikten sonra düşük yayıcı yapının tam hali analiz edilerek elde edilen yapının özellikleri belirlendi.

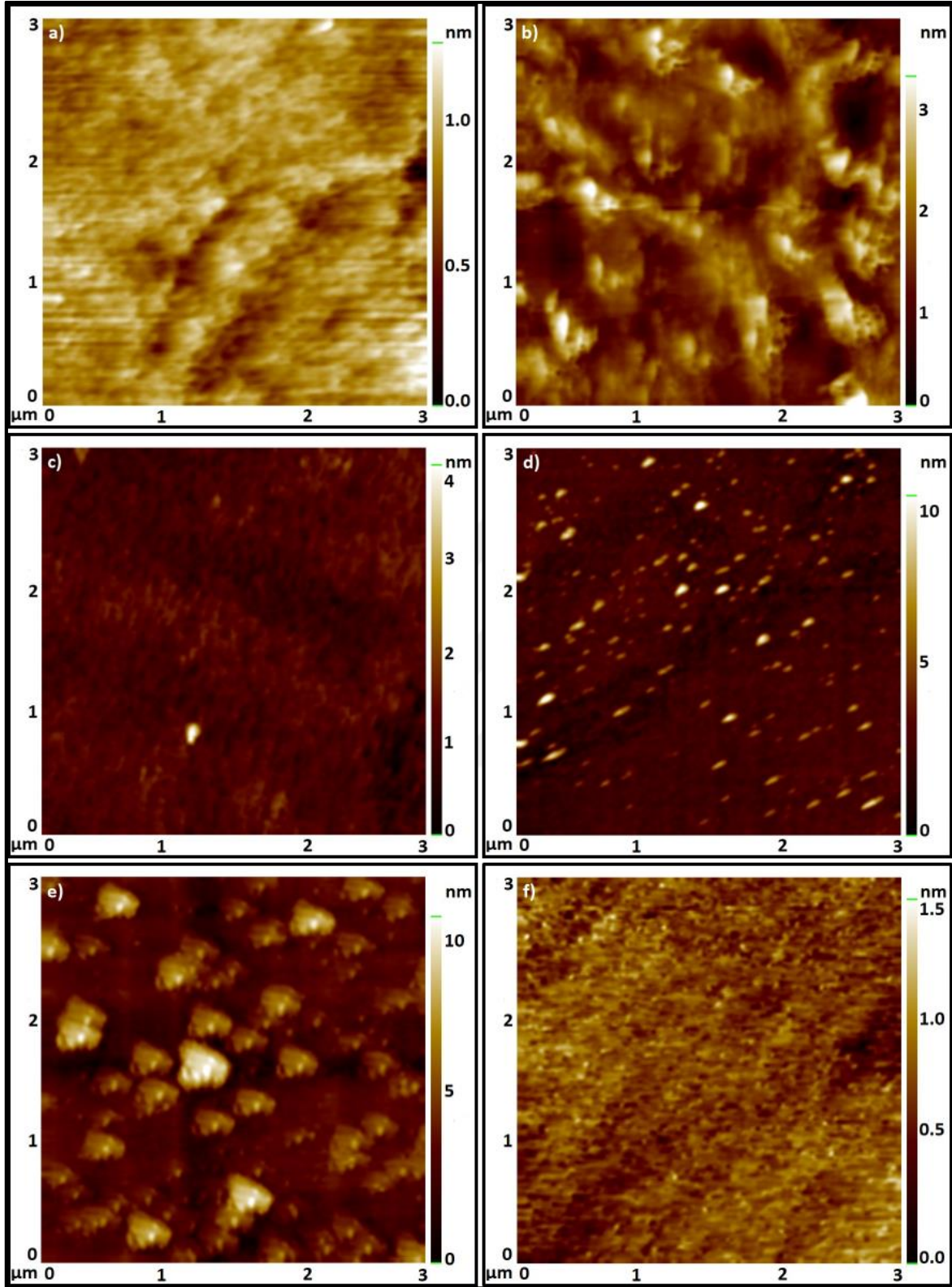
5.1. Al₂O₃ İnce Filmlerin Karakterizasyonu

Tez çalışması kapsamında bariyer katmanı olarak geliştirilen Al₂O₃ ince filmlerin, düşük yayıcı yapılar için en uygun olan kaplama koşullarını belirlemek amacı ile ilk olarak farklı Argon gaz akışı değerlerinde, sabit güç ve sabit kalınlıkta filmler hazırlandı. Kaplama basıncının film kalitesi üzerine olan etkisi optik geçirgenlik ve yüzey pürüzlülüğü açısından incelendi. Hazırlanan Al₂O₃ ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları Şekil 5.1’de verilmektedir.



Şekil 5.1. Farklı Argon gaz akışlarında hazırlanan Al₂O₃ ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları

Sekil 5.1’de 200 nm – 1100 nm aralığındaki optik geçirgenlik spektrumu incelendiğinde görünür bölgedeki (400-700 nm) optik geçirgenliğin Argon gaz akışı arttıkça azaldığı görülmektedir. 5 sccm Argon gaz akışında görünür bölgedeki ortalama geçirgenlik %87’nin üzerinde iken, 50 sccm Argon gaz akışında görünür bölgedeki ortalama geçirgenlik yaklaşık olarak %79’a düşmektedir. Kaplama basıncı arttıkça vakum ortamına verilen Argon atomları artmaktadır. Bunun sonucunda hedef malzemeye çarpan Argon iyonları sayısı artmakta ve hedeften daha fazla molekül kopartılmasına sebep olunmaktadır. Bu durum kaplama hızını azalıp alttaş üzerine biriken molekül sayısının artmasını sağlar. Böylece kaplanan filmin yoğunluğu artmakta ve görünür bölge geçirgenliği azalmaktadır [77]. Düşük yayıcı yapılar için bariyer katmanının görünür bölge geçirgenliğinin yüksek olması son derece önemlidir. Bu durum göz önüne alındığında 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Al_2O_3 ince filmlerin düşük yayıcı yapılarda bariyer katmanı olarak kullanılması uygun görülmektedir. Resim 5.1’de farklı Argon gazı akışında hazırlanan Al_2O_3 ince filmlerin $3 \times 3 \mu m^2$ tarama alanında elde edilen AFM görüntüleri görülmektedir. Bu AFM görüntüleri analiz edilerek elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 5.1’de verilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü en düşük olan ince film 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan örnektir. Yüzey pürüzlülüğünün az olması üzerine kaplanacak olan katmanların kalitesini olumlu yönde etkilemektedir. Bu sayede daha düzgün ince film elde edilmesi kolaylaşmaktadır. Bu sonuçlar ışığında 5 sccm Argon gaz akışının Al_2O_3 ince filmler için düşük yayıcı yapılarda kullanılmak amacı ile uygun olduğu görülmektedir.



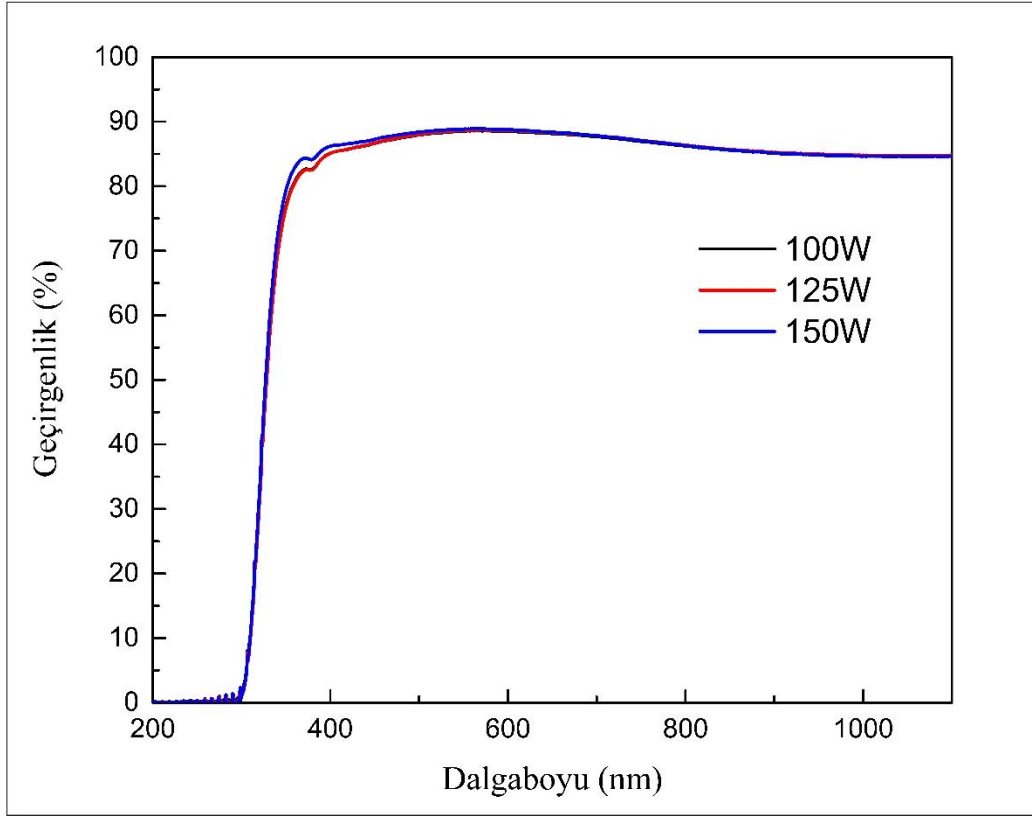
Resim 5.1. a) 5sccm b) 10sccm c) 20sccm d) 30sccm e) 40sccm f) 50sccm Argon gaz akışlarında hazırlanan Al₂O₃ ince filmlerin AFM görüntüleri

Çizelge 5.1. Farklı Argon gaz akışlarında hazırlanan Al_2O_3 ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerleri

Kaplanan Malzemeler	Argon Gaz Akışı (sccm)	Yüzey Pürüzlülüğü (nm)
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cam}$	5	0,14
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cam}$	10	0,4
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cam}$	20	0,27
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cam}$	30	0,98
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cam}$	40	1,82
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cam}$	50	0,17

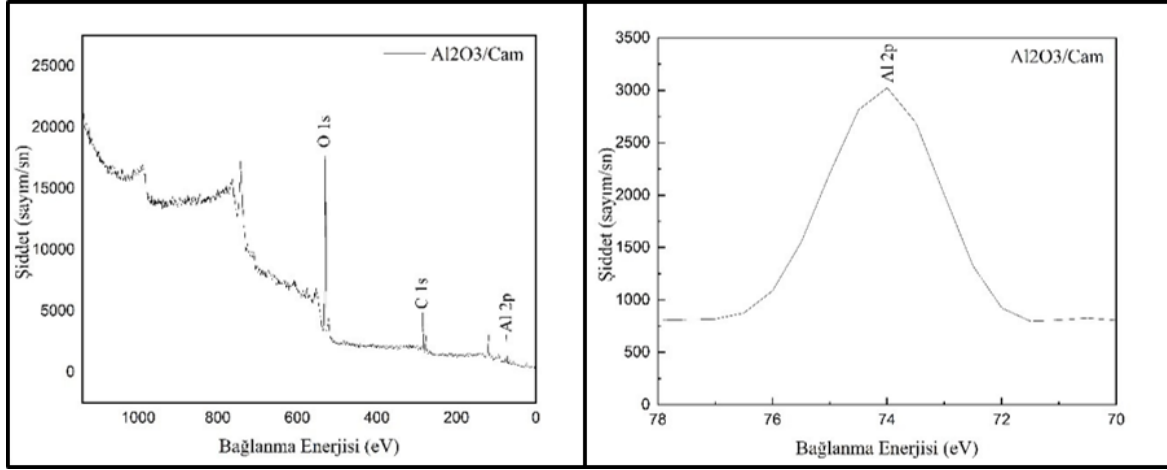
Düşük yayıcı yapılarda kullanılacak olan Al_2O_3 ince filmlerin uygun Argon gaz akışı değeri 5 sccm olarak belirlendikten sonra farklı RF güç değerlerinde ince filmler hazırlanarak en uygun RF güç değeri belirlenmeye çalışıldı. Şekil 5.2’de farklı RF güç değerlerinde hazırlanan Al_2O_3 ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları görülmektedir.

200 nm – 1100 nm aralığındaki optik geçirgenlik spektrumları incelendiğinde en yüksek görünür bölge (400-700 nm) geçirgenliğinin 150 W RF gücünde elde edildiği görülmektedir. Meydana gelen artış %1’den az olsa da en yüksek görünür bölge geçirgenliği 150 W RF gücünde elde edildiği için düşük yayıcı yapılarda kullanılacak olan Al_2O_3 ince filmlerin 5 sccm Argon gaz akışında ve 150 W RF gücünde kaplanması uygun görüldü.



Şekil 5.2. Farklı RF güç değerlerinde hazırlanan Al_2O_3 ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları

Düşük yayıcı yapılarda kullanılacak olan Al_2O_3 ince filmlerin kaplama koşulları belirlendikten sonra elde edilen filmin yapısal karakterizasyonunu incelemek için XRD analizi yapıldı. Ancak herhangi bir pik görülmedi. Altaş sıcaklığı uygulanmayan veya sonrasında ısıtıl işlem uygulanmayan metal oksit ince filmlerde çoğunlukla kristal yapının oluşmadığı ve amorf bir yapıya sahip olduğu bilinmektedir [78]. Bu sebepten dolayı yapısal karakterizasyonu belirlemek amacı ile XPS analizi yapıldı. Şekil 5.3'te 5 sccm Argon gaz akışında ve 150 W RF gücünde hazırlanan Al_2O_3 ince filmin genel tarama ve $\text{Al}2p$ çekirdek seviyesinin dar tarama XPS analizi görülmektedir. $\text{Al}2p$ çekirdek seviyesinin dar tarama XPS spektrumu incelendiğinde $\text{Al}2p$ çekirdek seviyesine karşılık gelen pikin 73.9 eV bağlanma enerjisine sahip olduğu görülmektedir. Literatürde $\text{Al}2p$ çekirdek seviyesine karşılık gelen pikin pozisyonun 74.08 eV olduğu ve bu bağlanma enerjisine sahip olan Al'un metalik Al değil, Al_2O_3 bağ yapısına sahip Al olduğu belirtilmektedir [79]. $\text{Al}2p$ çekirdek seviyesinin bulunduğu bağlanma enerjisi elde edilen yapının Al_2O_3 olduğunu göstermektedir.

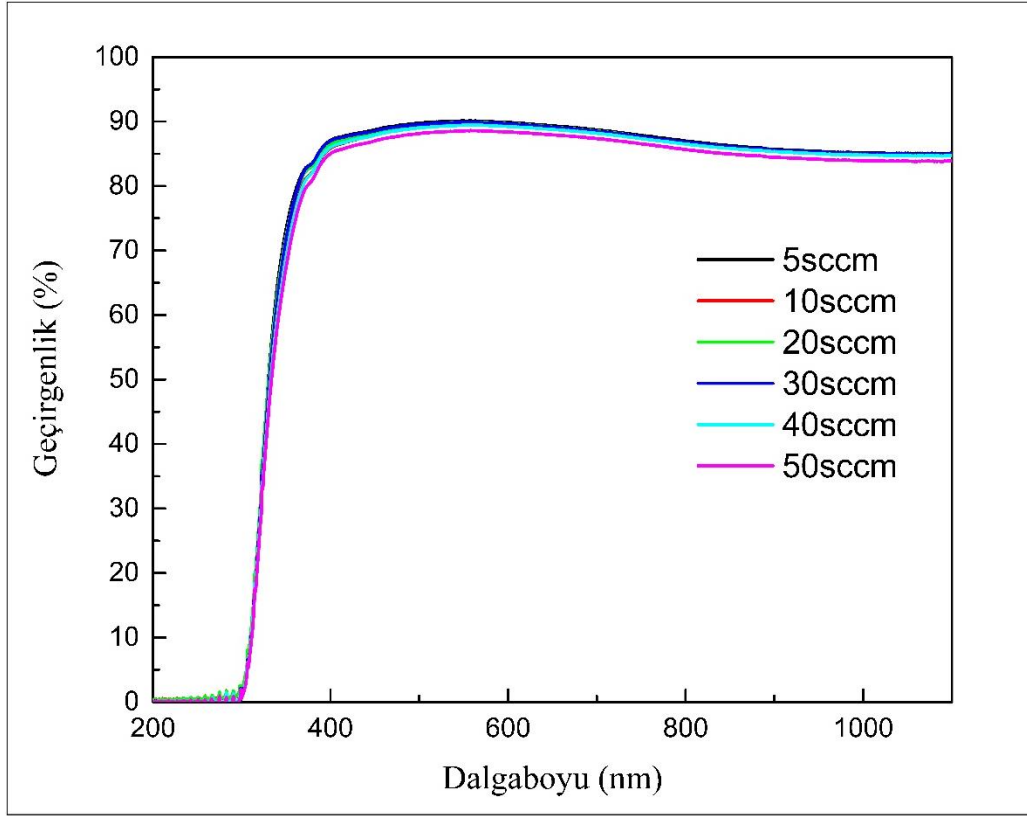


Şekil 5.3. 5 sccm Argon gaz akışında ve 150 W RF gücünde kaplanan Al₂O₃ ince filmin genel tarama ve Al2p çekirdek seviyesinin dar tarama XPS spektrumu

Bu sonuca ek olarak Al₂O₃ ince filmin Al2p ve O1s çekirdek seviyelerinin altında kalan alanlar hesaplanarak atomik konsantrasyonları CasaXPS programı yardımı ile hesaplandı. Metal oksit yapısının içerisinde yer alan oksijen atomlarının atomik konsantrasyonu %55.40, alüminyum atomlarının atomik konsantrasyonu ise %38.05 olarak bulundu. O/Al oranı yaklaşık olarak 1.46 olarak hesaplandı ve elde edilen bu değer hem ideal değer olan 1.50'ye oldukça yakın hem de literatür ile uyumlu olduğu görüldü [80]. Elde edilen bu sonuç hazırlanan Al₂O₃ ince filmin stokiyo metrisinin de uygun olduğunu göstermektedir.

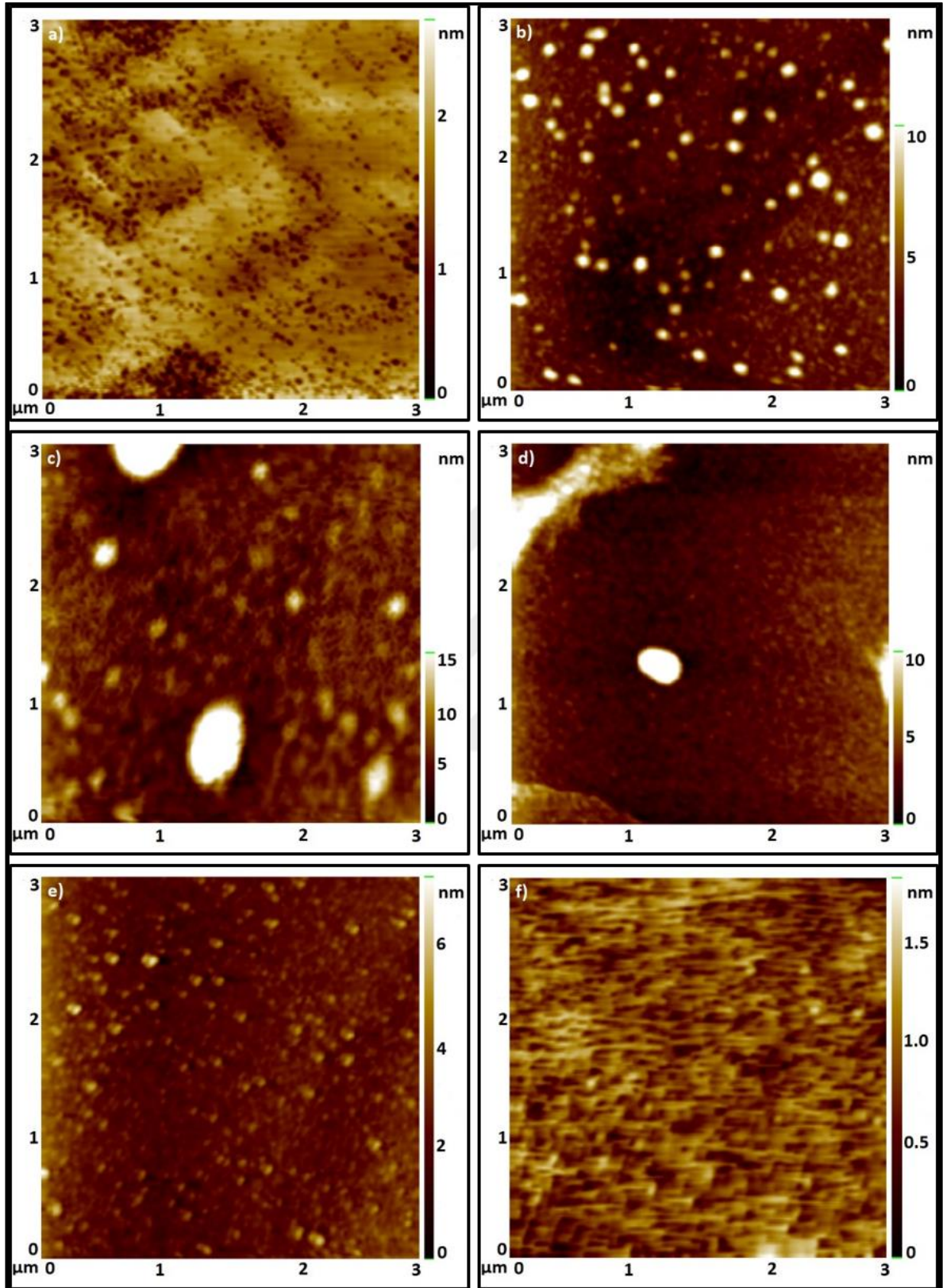
5.2. AZO İnce Filmlerin Karakterizasyonu

Tez çalışması kapsamında dielektrik katman olarak geliştirilen AZO katmanının düşük yayıcı yapılar için en uygun kaplama koşullarını belirlemek amacı ile ilk olarak farklı Argon gaz akışlarında, sabit güç ve sabit kalınlıkta ince filmler hazırlandı. Kaplama basıncının film üzerindeki etkisi optik geçirgenlik ve yüzey pürüzlülüğü açısından incelendi. Farklı Argon gaz akışında hazırlanan AZO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları Şekil 5.4'te verilmektedir.



Şekil 5.4. Farklı Argon gaz akışlarında hazırlanan AZO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları

Şekil 5.4'te verilen 200 nm – 1100 nm dalgaboyu aralığındaki optik geçirgenlik spektrumunda görünür bölgede (400-700 nm) en yüksek geçirgenlik sağlayan ince filmin az bir farkla da olsa 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan filmin olduğu görülmektedir. 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan AZO ince filmin görünür bölgedeki ortalama geçirgenliği %89'un üzerinde iken, 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan AZO ince filmin görünür bölgedeki ortalama geçirgenliği %87'nin üzerindedir. Düşük yayıcı yapılarda kullanılan dielektrik katmanların optik geçirgenliğinin fazla olması son derece önemlidir. Bu sebepten dolayı 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan AZO ince filmin düşük yayıcı yapılarda dielektrik katman olarak kullanılması uygun görülmektedir. Hazırlanan AZO ince filmlerin yüzey pürüzlülüklerini belirlemek amacı ile analiz edilen AFM görüntüleri Resim 5.2'de verilmektedir.



Resim 5.2. a) 5sccm b) 10sccm c) 20sccm d) 30sccm e) 40sccm f) 50sccm Argon gaz akışlarında hazırlanan AZO ince filmlerin AFM görüntüleri

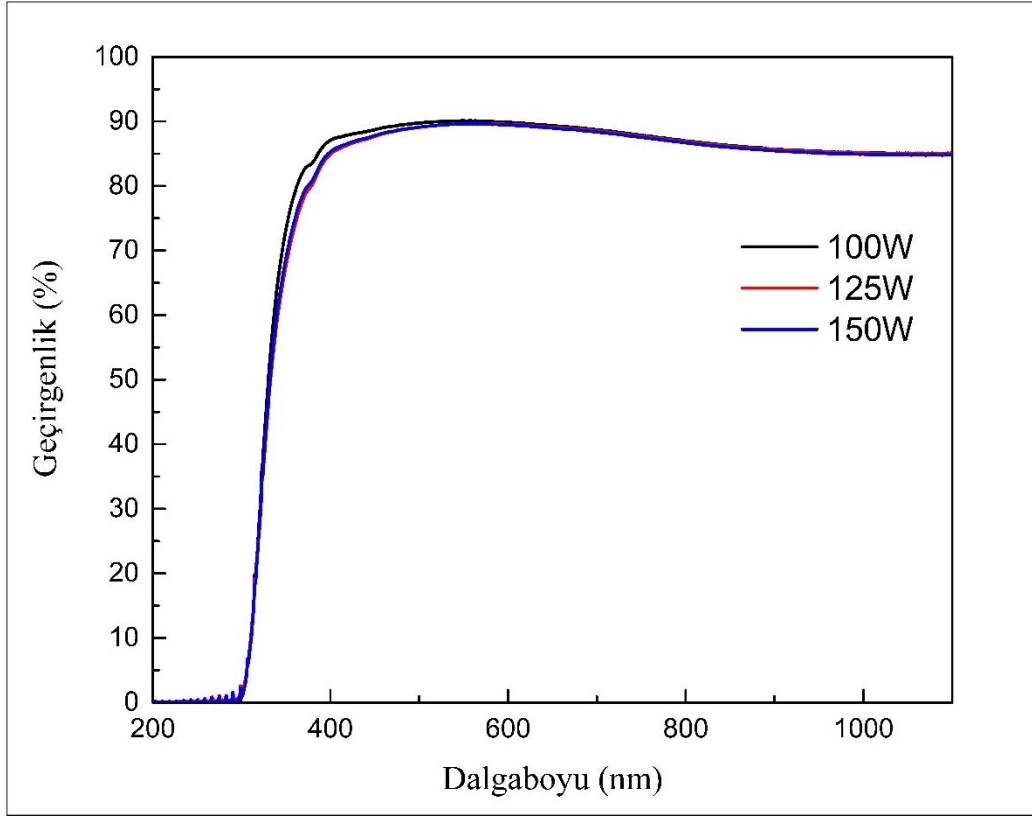
Resim 5.2’de farklı Argon gazı akışında hazırlanan AZO ince filmlerin $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ tarama alanında elde edilen AFM görüntüleri görünmektedir. Bu AFM görüntüleri analiz edilerek elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 5.2’de verilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri hazırlanan bütün filmler için oldukça düşüktür. Bu durum alt AZO katmanının üzerine kaplanacak olan Ag ince filmlerin kalitesini arttırmak için oldukça önemlidir. 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan AZO ince filmin yüzey pürüzlülüğü değeri daha az olsa da aradaki farkın çok az olmasından ve 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan AZO ince filmin görünür bölge geçirgenliği daha iyi olmasından dolayı düşük yayıcı yapılarda dielektrik katmanı olarak kullanılacak olan AZO ince filmlerin 5 sccm Argon gaz akışında kaplanması uygun görülmektedir.

Çizelge 5.2. Farklı Argon gaz akışlarında hazırlanan AZO ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerleri

Kaplanan Malzemeler	Argon Gaz Akışı (sccm)	Yüzey Pürüzlülüğü (nm)
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	0,3
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	10	1,63
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	20	1,73
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	30	1,25
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	40	0,68
AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	50	0,2

Düşük yayıcı yapılarda dielektrik katmanı olarak kullanılacak olan AZO ince filmlerin Argon gaz akışı 5 sccm olarak belirlendikten sonra farklı RF güçlerinde AZO ince filmler hazırlanarak en uygun RF güç değeri belirlenmeye çalışıldı. Şekil 5.5’te farklı RF güç değerlerinde hazırlanan AZO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları görülmektedir.

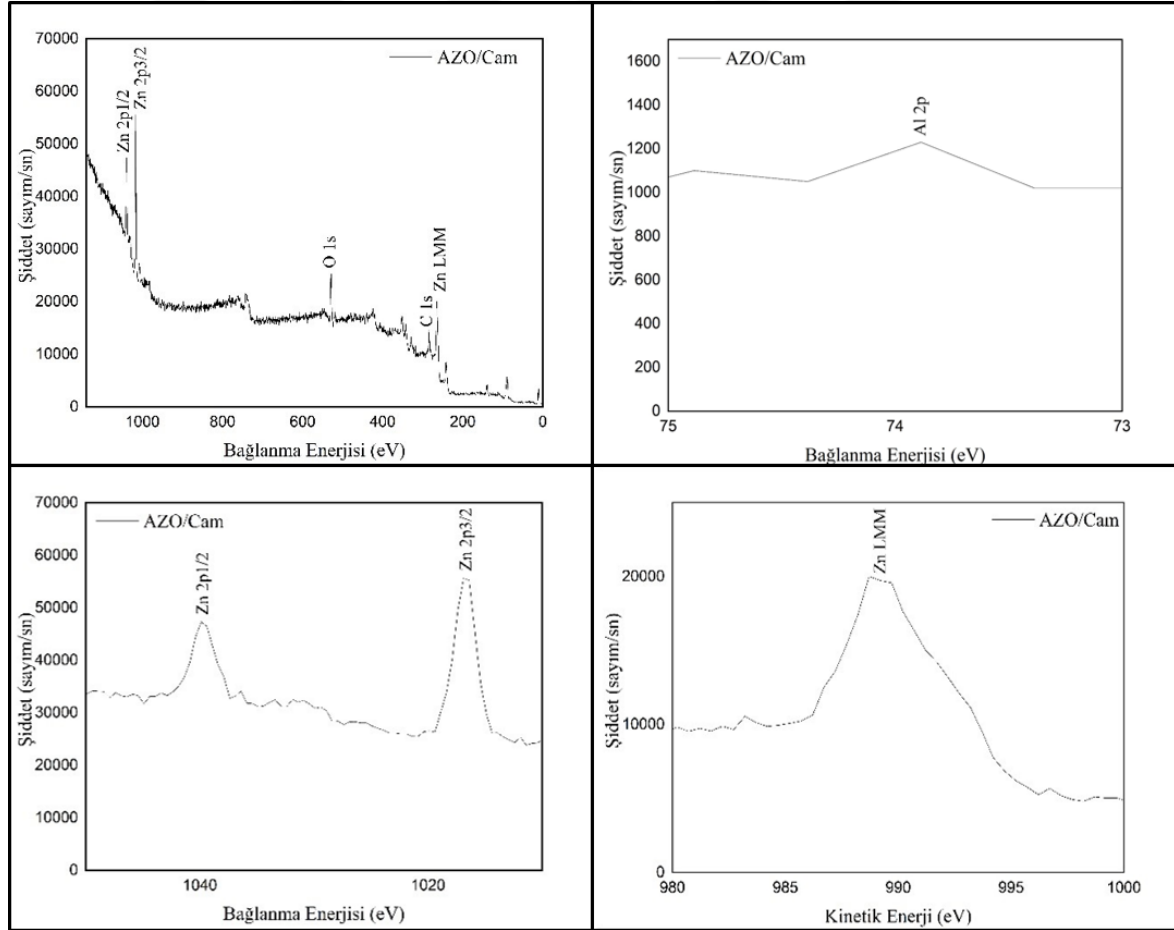
Şekil 5.5’te verilen 200 nm – 1100 nm aralığındaki optik geçirgenlik spektrumunda görünür bölgede (400-700 nm) en yüksek ortalama geçirgenlik değerinin yaklaşık olarak %1 daha fazla, 100 W RF gücünde hazırlanan AZO ince filme ait olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında düşük yayıcı yapılarda dielektrik katmanı olarak kullanılacak olan AZO ince filmlerin 5 sccm Argon gaz akışında ve 100 W RF güç değerinde kaplanması uygun görüldü.



Şekil 5.5. Farklı RF güç değerlerinde hazırlanan AZO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları

Düşük yayıcı yapılarda dielektrik katmanı olarak kullanılacak olan AZO ince filmlerin kaplama koşulları belirlendikten sonra hazırlanan filmin yapısal karakterizasyonunu belirlemek amacı ile XRD analizi yapıldı. Ancak aynı Al_2O_3 katmanında olduğu gibi kaplama esnasında ve sonrasında herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmadığı için hazırlanan ince filmin kristal yapıya sahip olmadığı ve amorf bir yapıda olduğu görüldü. Bu sebepten dolayı 5 sccm Argon gaz akışında ve 100 W RF güç değerinde hazırlanan AZO ince filmin yapısal karakterizasyonu XPS analizi ile belirlendi. Şekil 5.6'da 5 sccm Argon gaz akışında ve 100 W RF gücünde kaplanan AZO ince filmin genel tarama, $\text{Al}2p$ çekirdek seviyesinin dar tarama, $\text{Zn}2p$ çekirdek seviyesinin dar tarama ve Zn LMM Auger elektron pikinin dar tarama XPS spektrumu verilmektedir. $\text{Al}2p$ çekirdek seviyesinin pik pozisyonu incelendiğinde 73.9 eV bağlanma enerjisine sahip olduğu görülmektedir. Aynı Al_2O_3 ince filmde olduğu gibi $\text{Al}2p$ pozisyonu Al atomlarının Al_2O_3 yapısı içerisinde yer aldığını göstermektedir [79]. $\text{Zn}2p$ çekirdek seviyesinin dar tarama XPS analizi incelendiğinde $\text{Zn}2p$ pikinin bölünmüş dönüş-yörünge (spin-orbit) bileşenine sahip olduğu görülmektedir. $\text{Zn}2p$ 3/2 pikinin pozisyonu yapının içerisinde yer alan Zn atomlarının metalik mi yoksa oksit mi olduğunu göstermektedir. Literatürde metalik Zn atomunun $\text{Zn}2p$ 3/2 pikinin pozisyonu 1021.8 eV,

oksit bağı Zn atomunun Zn2p 3/2 pikinin pozisyonu ise 1022.5 eV olarak verilmektedir [81]. Bu iki pik pozisyonunun arasındaki bağlanma enerjisinin farkının çok az olmasından dolayı analiz yapmak hem zor hem de doğru değildir. Çünkü aradaki fark analiz yapılan cihazın hata payı içerisinde yer almakta ve yanlış bilgi verebilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelinebilmesi için Zn atomunun Auger pikinin (Zn LMM) pozisyonuna bakılması ve elde edilen bu sonuca göre Zn atomunun metalik mi yoksa oksit bağı mı yaptığı belirlenmelidir [82]. Literatürde Zn LMM pikinin metalik Zn için kinetik enerjisi 992.1 eV, oksit Zn için kinetik enerjisi ise 987.7 eV olarak verilmektedir [81]. Zn LMM Auger pikinin dar tarama XPS spektrumu incelendiğinde, Zn LMM pikinin pozisyonunun 988.6 eV olduğu görülmektedir. Bu sonuç ince filmin içerisinde yer alan Zn atomlarının oksit bağı yaptığını göstermektedir.

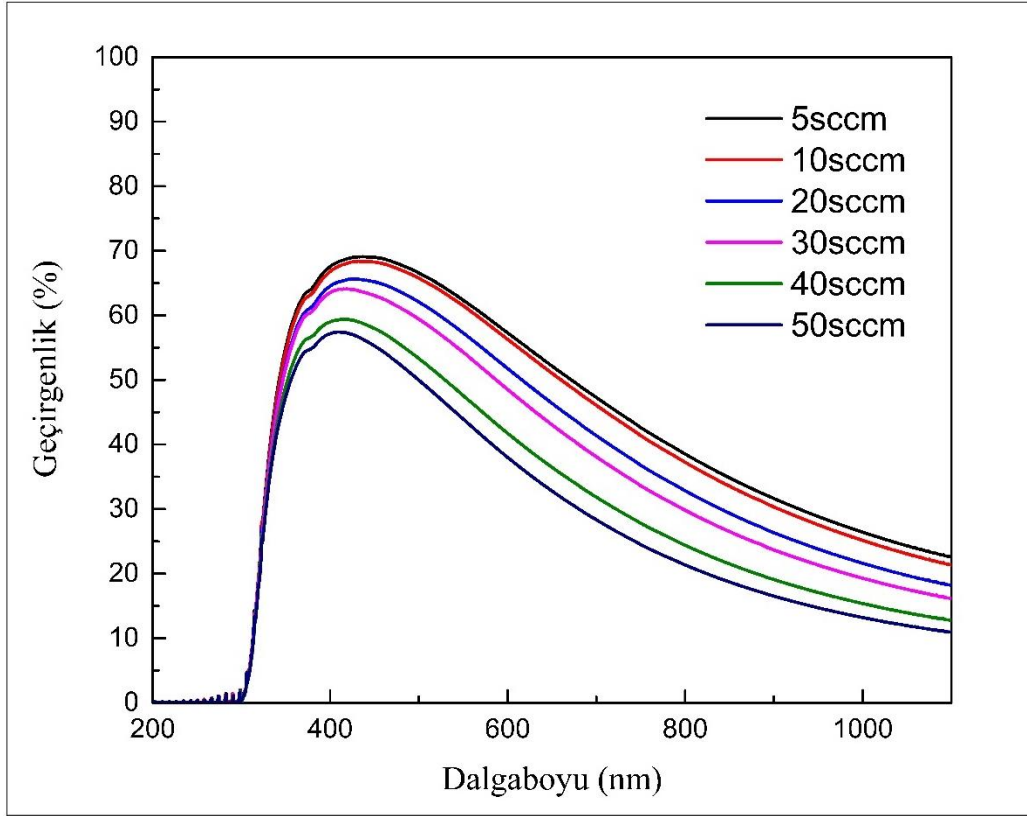


Şekil 5.6. 5 sccm Argon gaz akışında ve 100 W RF gücünde kaplanan AZO ince filmin genel tarama, Al2p çekirdek seviyesinin dar tarama, Zn2p çekirdek seviyesinin dar tarama ve Zn LMM Auger elektron pikinin dar tarama XPS spektrumu

AZO ince filmin Zn2p, Al2p ve O1s çekirdek seviyelerinin altında kalan alanlar hesaplanarak atomik konsantrasyonları CasaXPS programı yardımı ile hesaplandı. Metal oksit yapısının içerisinde yer alan oksijen atomlarının atomik konsantrasyonu %51.85, çinko atomlarının atomik konsantrasyonu %40.34 ve alüminyum atomlarının atomik konsantrasyonu ise %3.49 olarak bulundu.

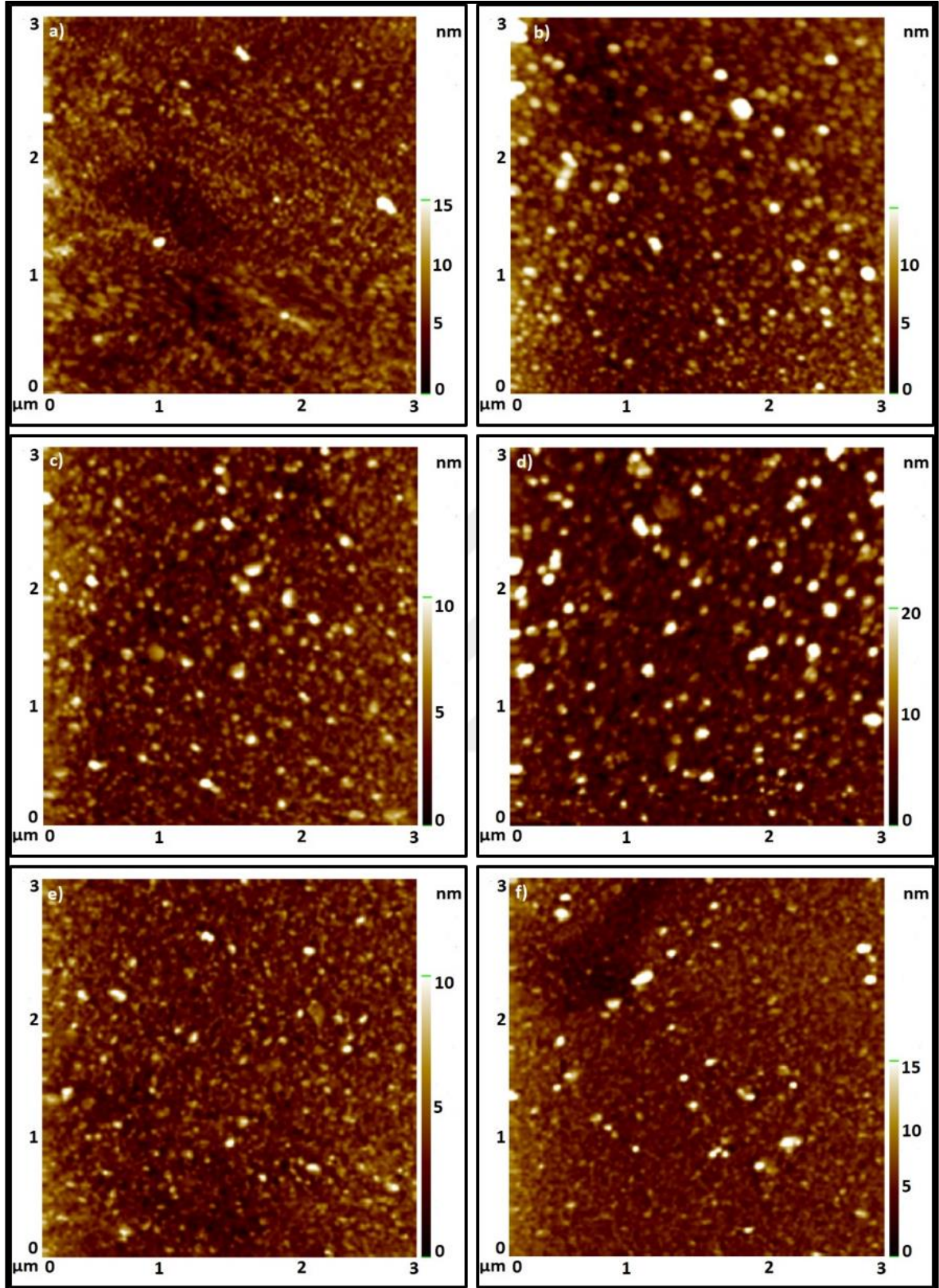
5.3. Ag İnce Filmlerin Karakterizasyonu

Tez çalışması kapsamında düşük yayıcı yapılarda metal katmanı olarak kullanılacak olan Ag ince filmin en uygun olan kaplama koşullarını belirlemek adına ilk olarak farklı Argon gaz akışlarında, sabit güç ve sabit kalınlıkta ince filmler hazırlandı. Ag ince filmlerin performansı alttaşa olan tutunmaları ile değişmektedir. Bu sebepten dolayı Ag ince filmlerin performansını tam anlamı ile inceleyebilmek adına Ag ince filmler önceki bölümlerde belirlenen kaplama koşulları kullanılarak hazırlanan AZO/Al₂O₃/Cam yapısı üzerine büyütüldü. Kaplama basıncının Ag ince filmler üzerine olan etkisi optik geçirgenlik, yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi, elektriksel iletkenlik ve kontak açısı analizleri ile incelendi. Şekil 5.7’de farklı Argon gaz akışlarında hazırlanan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları görülmektedir.



Şekil 5.7. Farklı Argon gaz akışlarında hazırlan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları

Şekil 5.7’de verilen optik geçirgenlik spektrumları incelendiğinde aynı Al_2O_3 ve AZO ince filmlerde olduğu gibi kaplama basıncı arttıkça geçirgenliğin azaldığı görülmektedir. Bu durumun film yoğunluğu ile alakalı olduğu literatürde yer alan çalışmadan örnek gösterilerek belirtildi [77]. Farklı Argon gaz akışlarında hazırlanan Ag ince filmlerin kaplama basıncı arttıkça hem görünür bölgede hem de kızılötesi bölgede geçirgenliğinin azaldığı görülmektedir. Düşük yayıcı yapılar geliştirilirken iki ana hedef bulunmaktadır. İlki görünür bölge geçirgenliğinin yüksek olması diğeri ise kızılötesi bölge geçirgenliğinin düşük olmasıdır. Bu sebepten dolayı en uygun kaplama koşuluna sahip Ag ince filmin geliştirilmesi amacı ile yapılacak olan kaplamalarda hem 5 sccm Argon gaz akışı hem de 50 sccm Argon gaz akışının kullanılması uygun görülmektedir. Hazırlanan Ag ince filmlerin yüzey pürüzlülüklerini belirlemek amacı ile analiz edilen AFM görüntüleri Resim 5.3’te verilmektedir.



Resim 5.3. a) 5sccm b) 10sccm c) 20sccm d) 30sccm e) 40sccm f) 50sccm Argon gaz akışlarında hazırlanan Ag ince filmlerin AFM görüntüleri

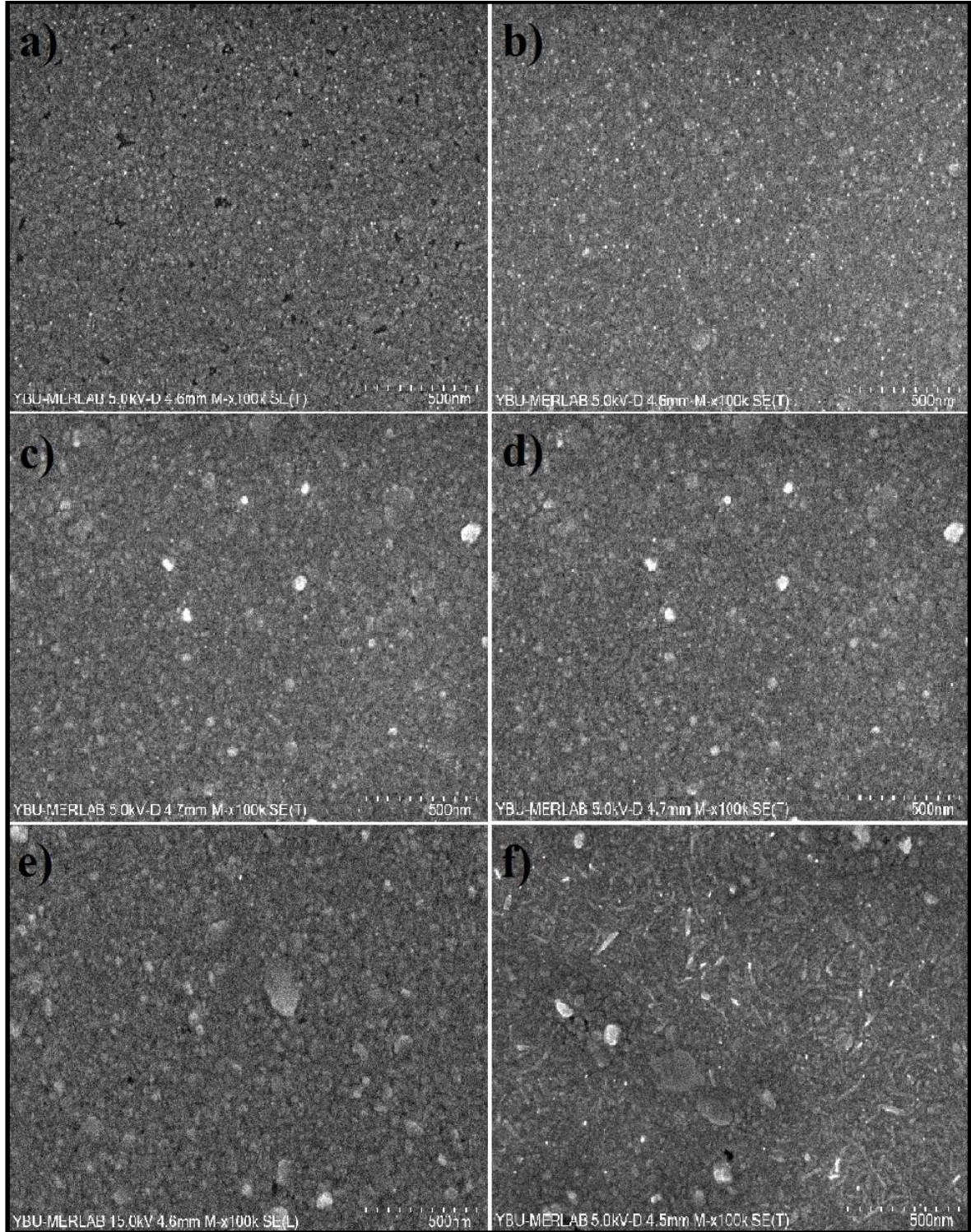
Resim 5.3'te farklı Argon gazı akışında hazırlanan Ag ince filmlerin $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ tarama alanında elde edilen AFM görüntüleri görünmektedir. Bu AFM görüntüleri analiz edilerek elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 5.3'te verilmektedir. Ag ince filmlerin yüzey pürüzlülük değerleri elde edilen ince filmlerin düzgün ve iyi kalite olduklarını göstermektedir. Bu durum optik geçirgenlik sonuçları göz önüne alınarak belirlenen 5 sccm ve 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanacak olan Ag ince filmlerin düşük yayıcı yapılar için uygun olduğunu göstermektedir. Farklı Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin elektriksel iletkenlik sonuçları Çizelge 5.3'te verilmektedir.

Çizelge 5.3. Farklı Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey direnci değerleri

Kaplanan Malzemeler	Argon Gaz Akışı (sccm)	Yüzey Pürüzlülüğü (nm)	Yüzey Direnci (Ω/kare)	Kontak Açısı (derece)
Ag/AZO/ Al_2O_3 /Cam	5	0,14	3,866	72,4
Ag/AZO/ Al_2O_3 /Cam	10	0,4	3,865	72,9
Ag/AZO/ Al_2O_3 /Cam	20	0,27	3,242	77,4
Ag/AZO/ Al_2O_3 /Cam	30	0,98	3,383	82,9
Ag/AZO/ Al_2O_3 /Cam	40	1,82	3,008	85,4
Ag/AZO/ Al_2O_3 /Cam	50	0,17	2,448	90,3

Elde edilen sonuçlara göre Argon gaz akışı arttıkça Ag filmlerin yüzey direnci değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç Argon gaz akışının artmasının filmin yoğunluğunu arttırdığını ve filmin iletkenliğinin arttığını göstermektedir. Metal ince filmlerin kızılötesi bölgedeki yansıtıcı özelliğinin artması filmin iletken olması ile ilişkilidir [83]. Elde edilen sonuçta Argon gaz akışının artması kızılötesi bölgede geçirgenliği azaltmakta ve aynı zamanda yansıtıcı özelliğini arttırmaktadır. Bu durumda beklenen iletkenliğin artması da elektriksel iletkenlik sonuçları ile uyumludur. Resim 5.4'te farklı Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin SEM görüntüleri görülmektedir.

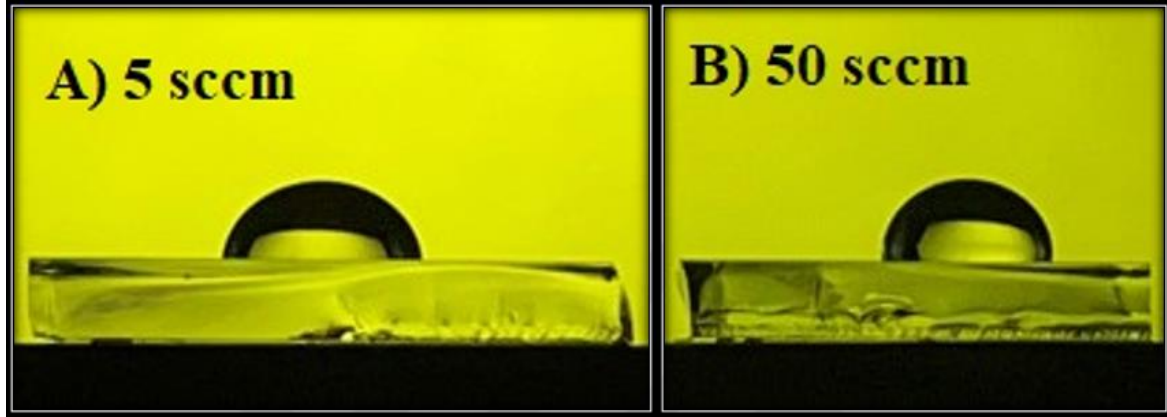
Resim 5.4'teki SEM görüntüleri incelendiğinde Argon gaz akışı arttıkça filmlerin daha yoğun olduğu görülmektedir. 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan örnekte yüzeyde boşlukların olduğu görülmektedir. 50 sccm Argon gaz akışında hazırlana örnekte ise neredeyse hiç boşluk bulunmamakta ve yüzeyin tamamen Ag ince film ile kaplı olduğu görülmektedir. İnce film yapısında bulunan boşluklar hem filmin optik geçirgenliğini arttırmakta hem de yüzey direncinin artmasına neden olmaktadır.



Resim 5.4. a) 5 sccm b) 10 sccm c) 20 sccm d) 30 sccm e) 40 sccm ve f) 50 sccm Argon gaz akışlarında hazırlanan Ag ince filmlerin SEM görüntüleri

Farklı Argon gaz akış değerlerinde hazırlanan Ag ince filmlerin yüzey enerjileri hakkında yorum yapabilmek için kontak açısı analizleri yapıldı. Çizelge 5.3'te farklı Argon gaz akışı değerlerinde hazırlanan Ag ince filmlerin kontak açısı değerleri verilmektedir.

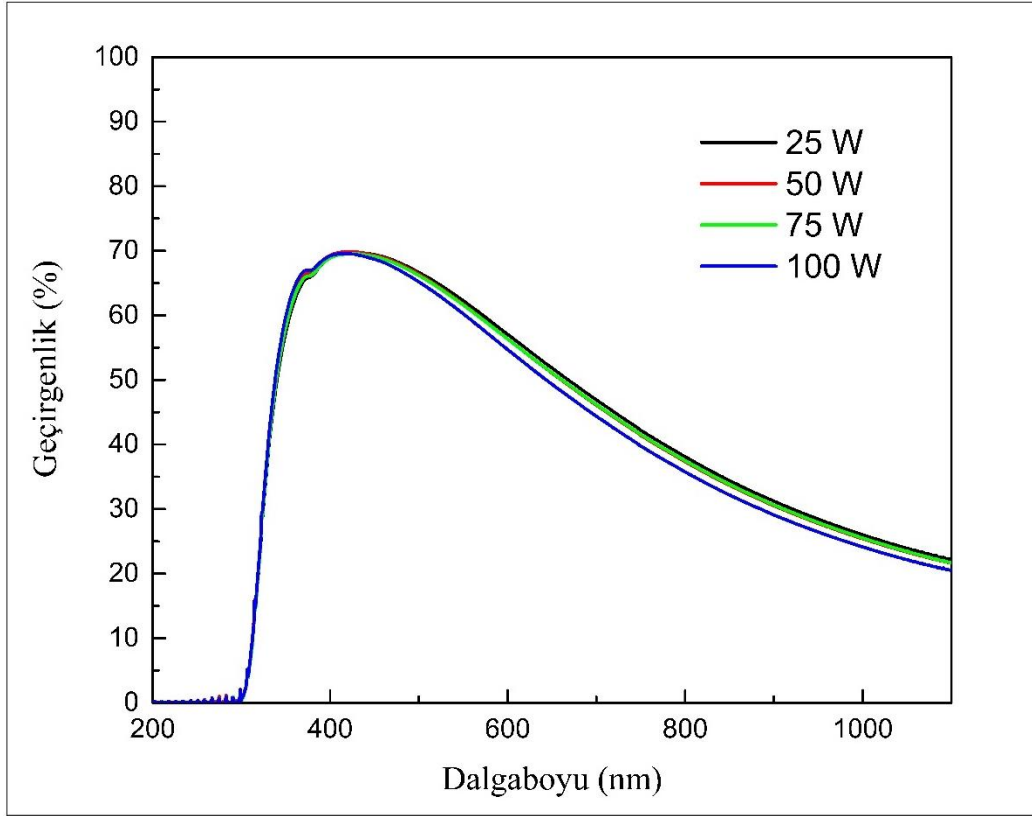
Ag ince filmlerin kontak açılarının ölçümleri Image J adlı ücretsiz bir program kullanılarak yapıldı. Yapılan ölçümlerin doğruluğunu arttırabilmek adına her örnek üzerine 5 farklı deiyonize su damlatılarak fotoğrafları çekildi. Su damlacıklarının hem sol tarafından hem de sağ tarafından açılar her fotoğraf için 5 kez ölçülerek aritmetik ortalamaları alındı. Böylece ölçüm sırasında yapılabilecek hatalar en aza indirilmeye çalışıldı.



Resim 5.5. a) 5 sccm ve b) 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan örneklerin kontak açısı ölçümlerinin yapıldığı resimler

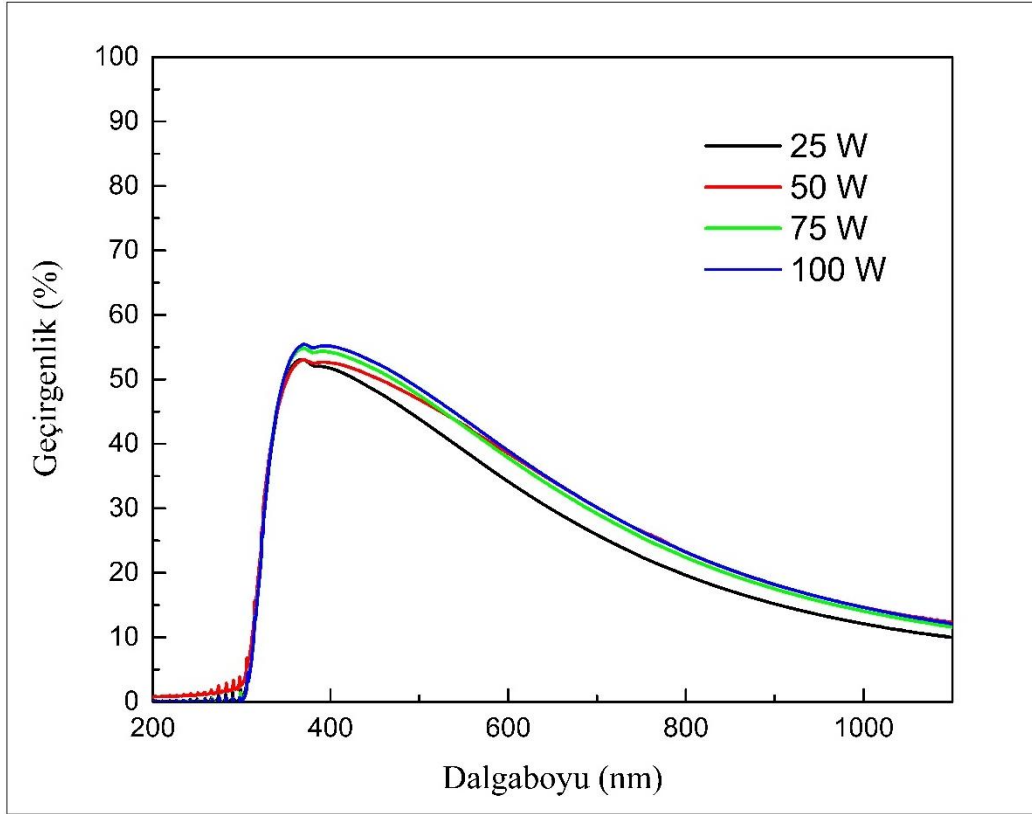
Çizelge 5.3'te verilen açı değerleri incelendiğinde Argon gaz akışı miktarı arttıkça kontak açısının arttığı görülmektedir. Kontak açısındaki artış film yüzeyinin gaz akış miktarı arttıkça hidrofobik özelliğinin arttığını göstermektedir. Filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düşük ve birbirine yakın değerlerde olması kontak açılarındaki farklılıkların Ag ince filmlerin yüzey enerjileri ile ilgili olduğu göstermektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda kontak açısının artmasının yüzey enerjisinin azalması ile ilişkili olduğu belirtilmektedir [76, 84-87]. Elde edilen sonuçlar Argon gaz akışı miktarının artmasının Ag ince filmlerin yüzey enerjilerini azalttığını göstermektedir.

Düşük yayıcı yapılarda metal katmanı olarak kullanılacak olan Ag ince filmlerin Argon gaz akışı olarak 5 sccm ve 50 sccm değerleri belirlendikten sonra farklı DC güçlerinde Ag ince filmler hazırlanarak en uygun DC güç değeri belirlenmeye çalışıldı. Şekil 5.8'de farklı DC güç değerlerinde ve 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları görülmektedir.



Şekil 5.8. Farklı DC güç değerlerinde ve 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları

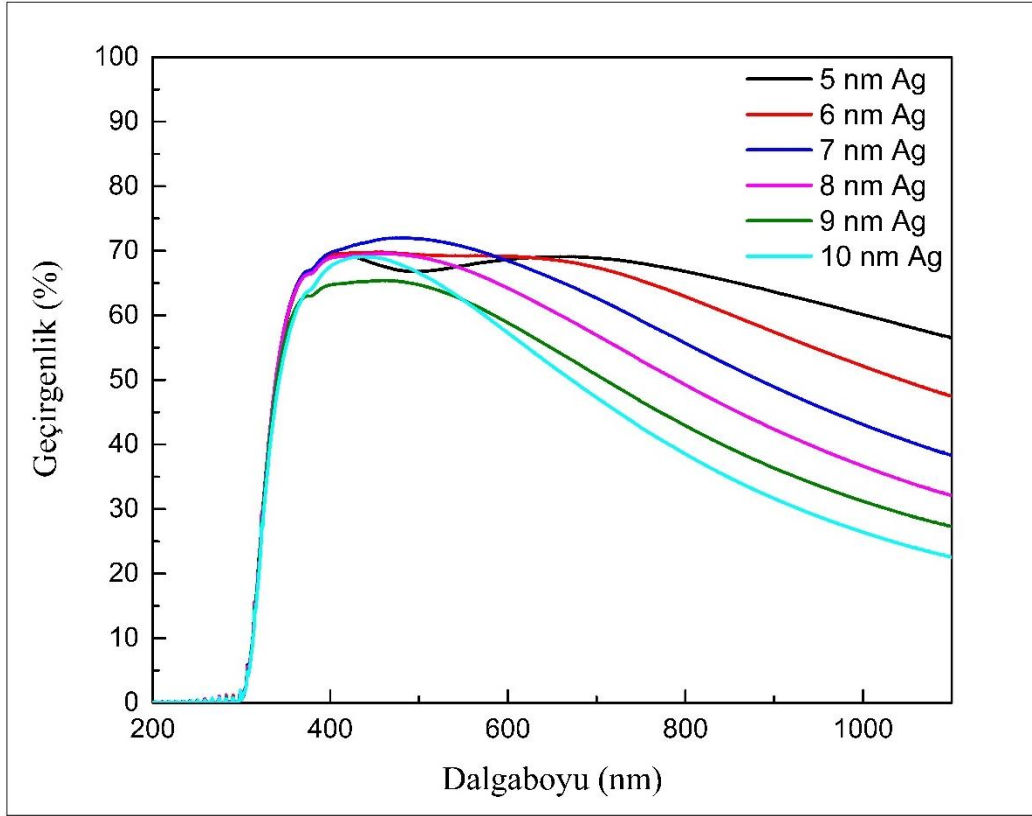
5 sccm Argon gaz akışının uygun adaylardan biri olarak belirlenmesinin sebebi görünür bölgede sağladığı yüksek geçirgenlik özelliğidir. Şekil 5.8’de verilen optik geçirgenlik spektrumu bu açıdan incelendiğinde en yüksek görünür bölge geçirgenliğinin az bir fark ile de olsa 25 W DC güç değerinde elde edildiği görüldü. Bu sebepten dolayı ileride 5 sccm Argon gaz akışında yapılacak olan kaplamalarda DC güç değeri olarak 25 W kullanılması uygun görüldü. Şekil 5.9’da farklı DC güç değerlerinde ve 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları görülmektedir.



Şekil 5.9. Farklı DC güç değerlerinde ve 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları

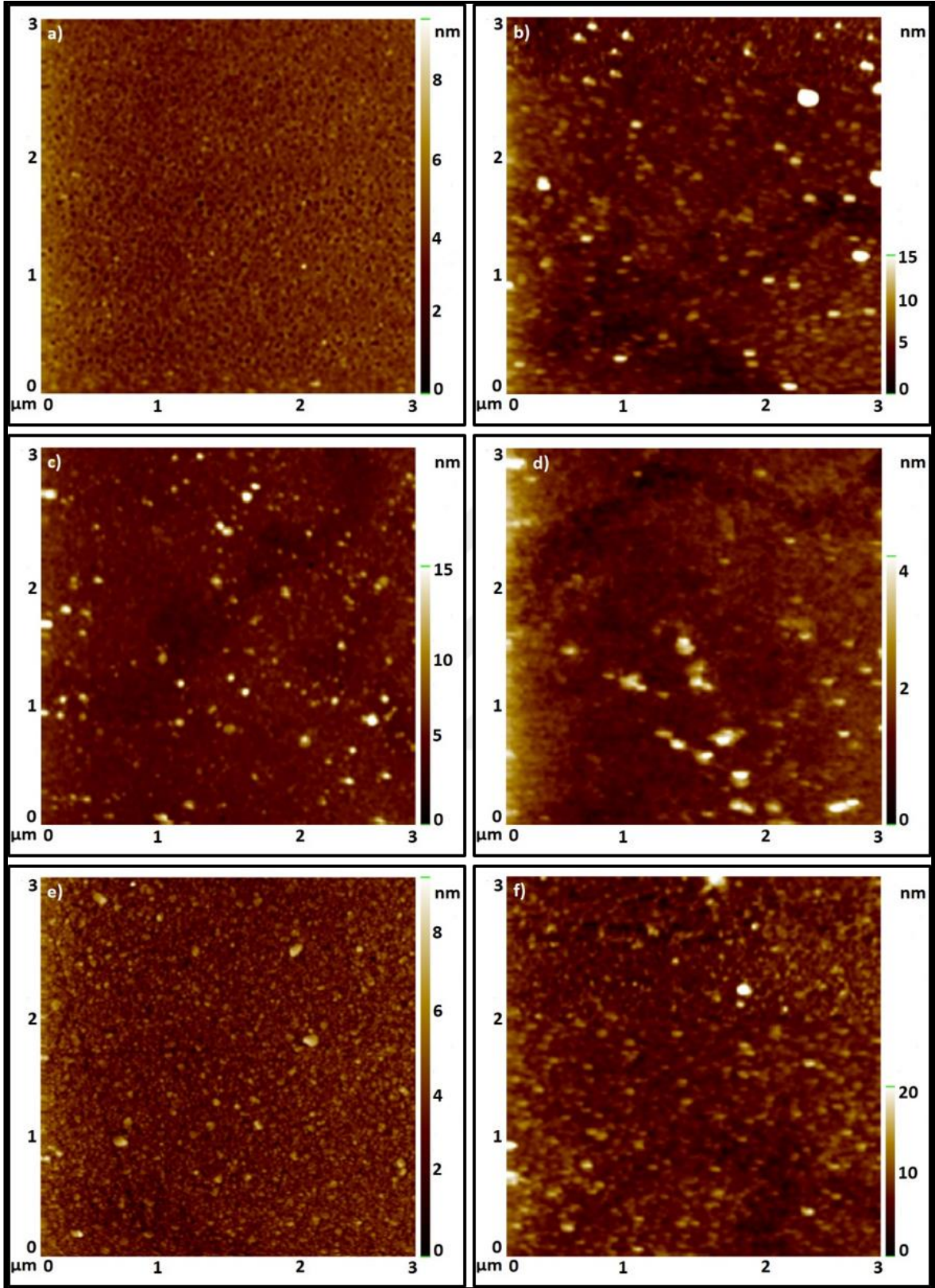
50 sccm Argon gaz akışının uygun adaylardan biri olarak belirlenmesinin sebebi kızılötesi bölgede sağladığı düşük geçirgenlik özelliğidir. Şekil 5.9'da verilen optik geçirgenlik spektrumu bu açıdan incelendiğinde en düşük kızılötesi bölge geçirgenliğinin 25 W DC güç değerinde elde edildiği görüldü. Bu sebepten dolayı ileride 50 sccm Argon gaz akışında yapılacak olan kaplamalarda DC güç değeri olarak 25 W kullanılması uygun görüldü.

Düşük yayıcı yapılarda metal katmanı olarak kullanılacak olan Ag ince filmler için Argon gaz akışı ve DC güç değerleri belirlendikten sonra farklı kalınlıklarda Ag ince filmler hazırlandı. Metal katmanının kalınlığının olabildiğince az olması kritik öneme sahiptir. Kalınlık azalması görünür bölge geçirgenliğini artırmanın yanında üretilecek olan düşük yayıcı yapının maliyetinin azalmasını da sağlamaktadır. Bu sebepten dolayı sürekli film özelliği gösteren en ince Ag film elde edilmek istenmektedir. Şekil 5.10'da 5 sccm Argon gaz akışında, 25 W DC gücünde ve farklı kalınlıklarda üretilen Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları görülmektedir.



Şekil 5.10. 5 sccm Argon gaz akışında ve farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumu

Şekil 5.10'da verilen optik geçirgenlik spektrumu incelendiğinde 5 nm ve 6 nm kalınlık Ag ince filmlerin görünür bölgede geçirgenliklerinin belli dalga boyu aralığında azalıp sonra tekrar arttığı görülmektedir. Bunun sebebi Ag ince filmlerin bu dalgaboyu aralığında soğurma yaptığını göstermektedir. Ag ince filmlerin görünür bölgede soğurma yapmasının sebebi filmlerin sürekli olmaması ile ilişkilidir. Film sürekliliği sağlanmadığında film yüzeyine gelen fotonların iletimi sağlanamamaktadır [88]. Bu durumda gelen fotonların soğurulmasına neden olmakta ve geçirgenliğin düşmesine sebep olmaktadır. 5 sccm Argon gaz akışında en ince sürekli Ag ince filmin 7 nm kalınlığında elde edildiği görülmektedir. Resim 5.6'da 5 sccm Argon gaz akışı ve 25 W DC güç değerinde hazırlanan farklı kalınlıklı Ag ince filmlerin AFM görüntüleri verilmektedir.



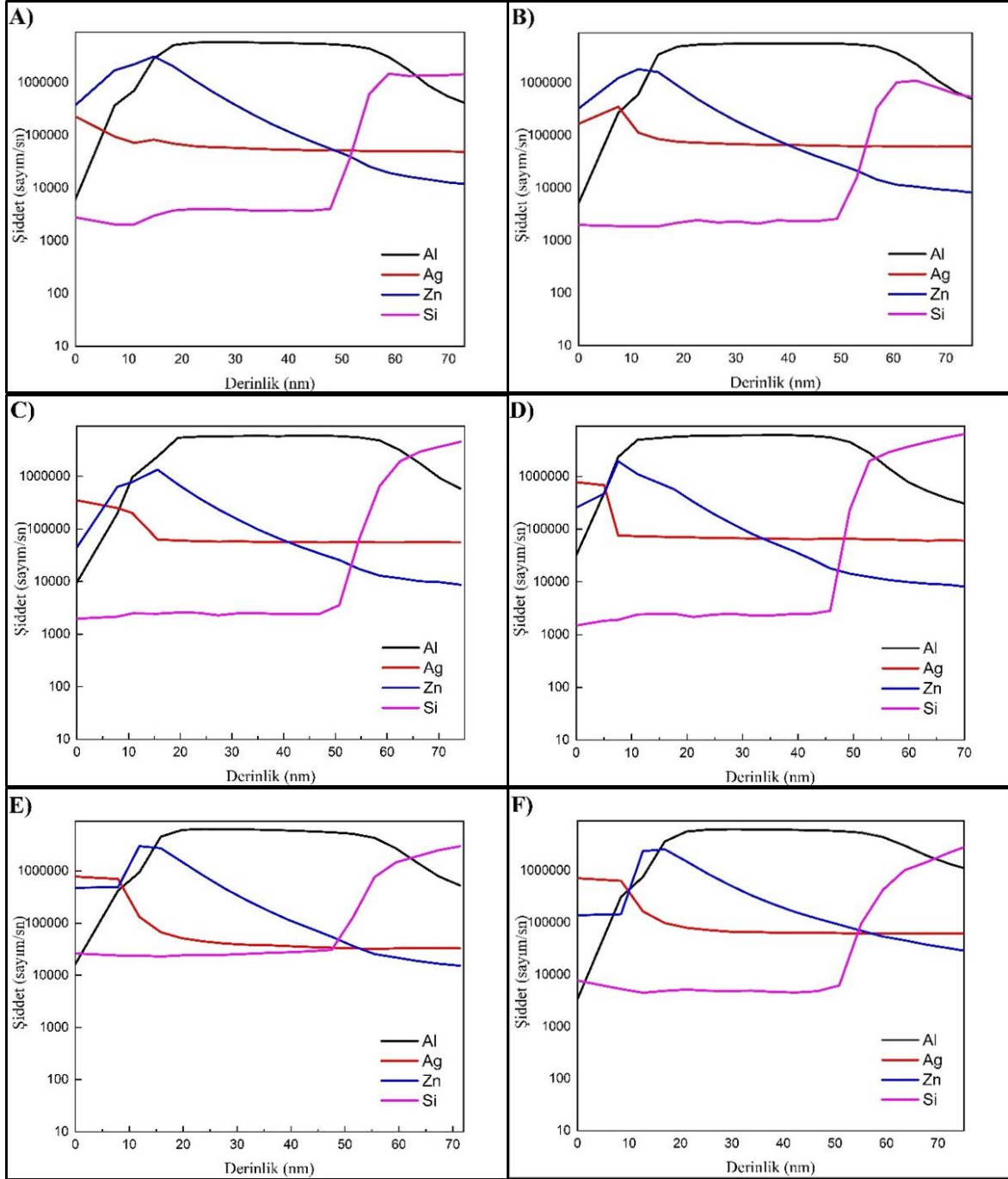
Resim 5.6. a) 5 nm b) 6 nm c) 7 nm d) 8 nm e) 9 nm f) 10 nm kalınlıklarında hazırlanan Ag ince filmlerin AFM görüntüleri

Resim 5.6’da 5 sccm Argon gaz akışında, 25 W DC güçte ve farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ tarama alanında elde edilen AFM görüntüleri görünmektedir. Bu AFM görüntüleri analiz edilerek elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 5.4’te verilmektedir. Hazırlanan Ag ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerleri incelendiğinde elde edilen sonuçların film kalitesini etkileyecek şekilde kötü olmadığı görülmektedir. Farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin elektriksel iletkenlik sonuçları Çizelge 5.4’te verilmektedir. 5 nm ve 6 nm kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin yüzey direnci değerlerinin farklı bir şekilde fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuç optik geçirgenlik spektrumu sonuçlarından çıkardığımız bu kalınlıklardaki filmlerin sürekli olmadığını doğrular niteliktedir.

Çizelge 5.4. 5 sccm Argon gaz akışında ve farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey direnci değerleri

Kaplanan Malzemeler	Ag Film Kalınlığı (nm)	Yüzey Pürüzlülüğü (nm)	Yüzey Direnci (Ω /kare)
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	5	0,67	14,223
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	6	1,07	8,899
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	7	1,18	6,488
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	8	0,54	5,289
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	9	0,92	4,653
Ag/AZO/Al ₂ O ₃ /Cam	10	1,11	4,379

5 sccm Argon gaz akışında, 25 W DC güç değerinde ve farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin bulunduğu Ag/AZO/Al₂O₃/Si yapılarının hem katman kalınlıklarını belirlemek hem de katmanların ayrımını görmek adına SIMS analizleri yapıldı. Diğer analizlerin tamamı cam altta üzerine hazırlanan yapılardan yapılırken SIMS analizi Si altta üzerine hazırlanan yapılardan yapıldı. Şekil 5.11’de 5 nm, 7 nm ve 10 nm kalınlıklı Ag ince filmlerin olduğu yapıların SIMS sonuçları görülmektedir.



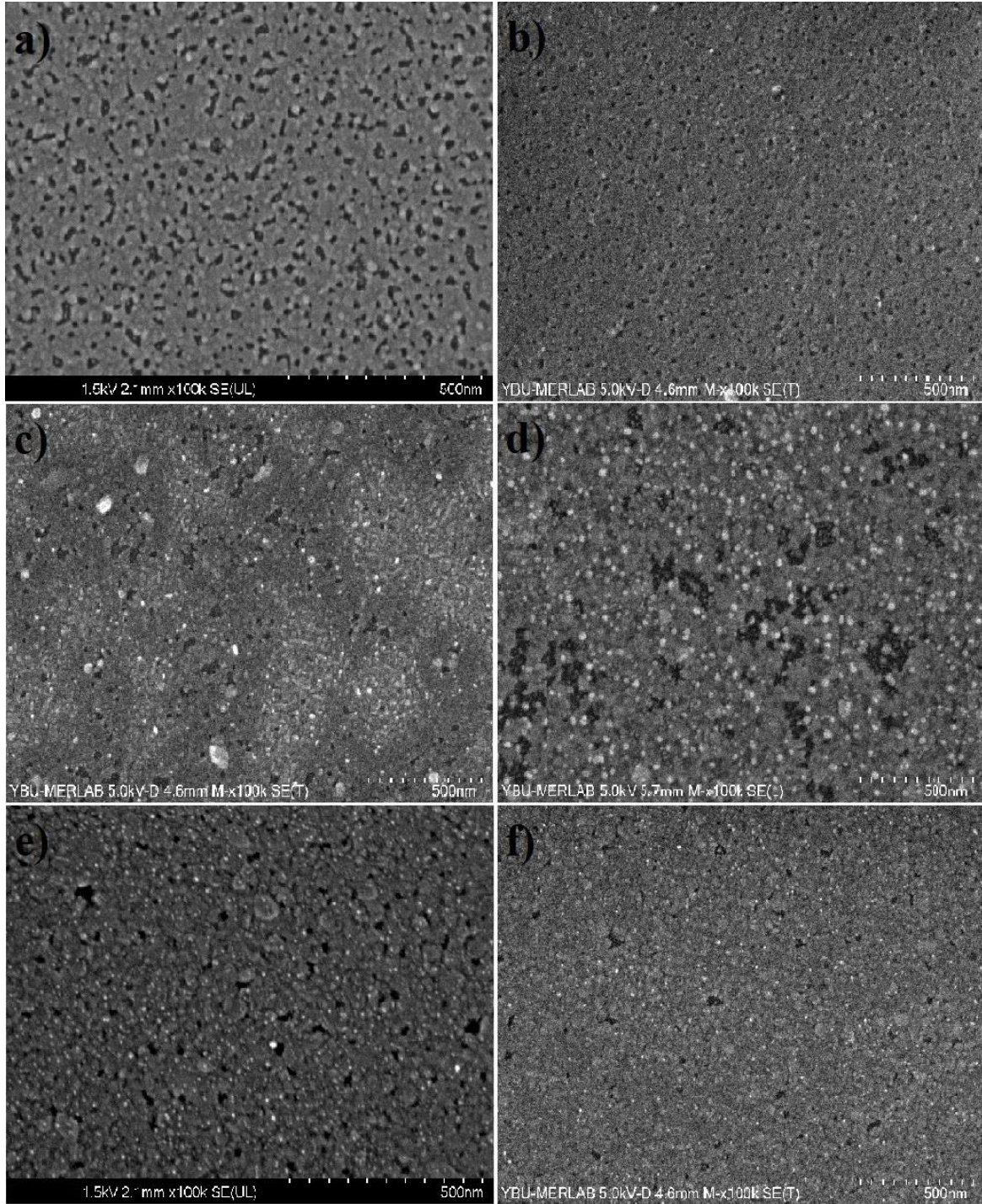
Şekil 5.11. a) 5 nm, b) 7 nm ve c) 10 nm Ag ince film kalınlıklı 5 sccm Argon gaz akışında ve d) 5 nm, e) 7 nm ve f) 10 nm Ag ince film kalınlıklı 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan örneklerin SIMS analizleri

Şekil 5.11’de verilen 5 nm, 7 nm ve 10 nm kalınlıklı Ag ince filmlerin SIMS sonuçları incelendiğinde hedeflenen film kalınlıklarına ulaşıldığı görülmektedir. Bunun yanında 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan 5 nm ve 7 nm kalınlıklı Ag ince filmlerin olduğu yapılarda Ag katmanının bulunduğu kalınlıklarda detektör tarafından Zn atomlarının Ag atomlarından daha şiddetli olması bu yapılardaki Ag katmanlarının boşluklu bir yapıya sahip

olduğunu ve detektörün bu sebepten dolayı Zn atomlarını daha şiddetli ölçebilmesine sebep olmaktadır. 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerinin SIMS sonuçları incelendiğinde bütün kalınlıklarında Ag atomlarının şiddetinin Zn atomlarından daha fazla olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlere kıyasla daha boşluklu bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Resim 5.7’de 5 sccm Argon gaz akışında, 25 W DC güçte ve farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin SEM görüntüleri görülmektedir.

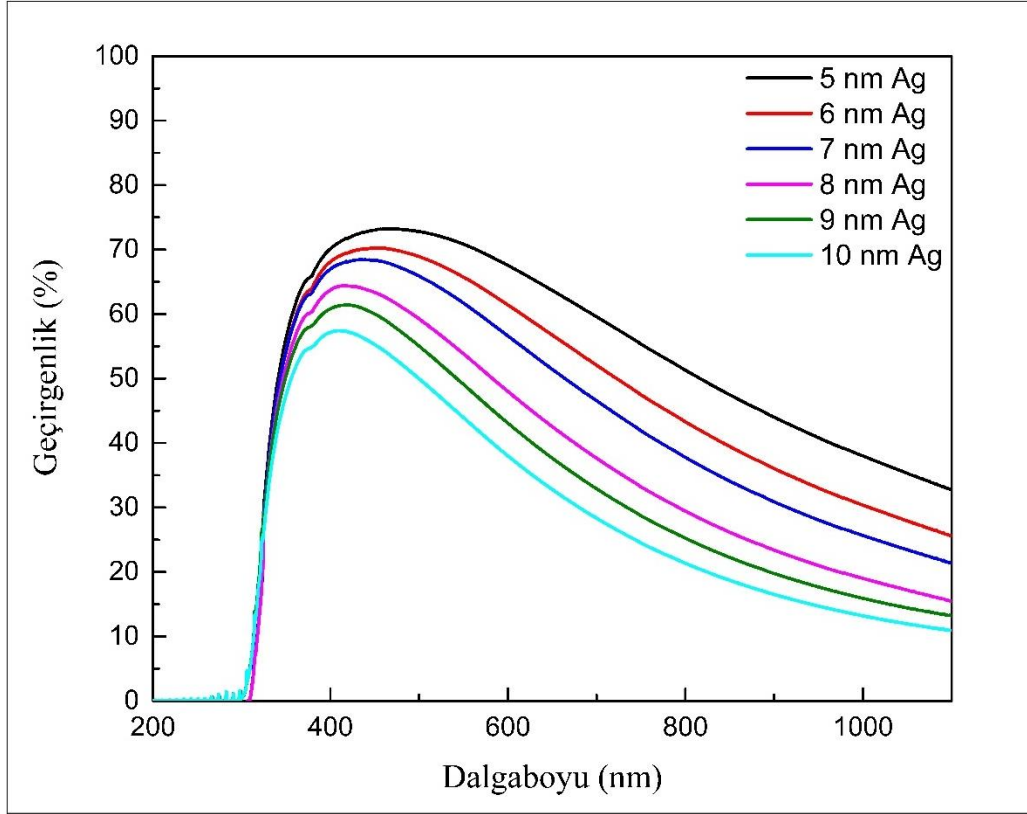
Resim 5.7’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde film kalınlığı azaldıkça Ag ince filmin yapısı içerisinde yer alan boşlukların yoğunluğunun arttığı görülmektedir. 5 nm ve 6 nm kalınlığa sahip filmlerdeki boşluklar bu kalınlıklardaki Ag ince filmlerin sürekli olmasını engellemektedir. Bu kalınlıklarda Ag atomları yüzeyin tamamına yayılamamakta ve Ag atomları adacıklı yapılar oluşturmaktadır. Bu adacıklı yapılar arasındaki bağlantı belirli bir seviyenin üzerine çıktığında Ag ince filmin yüzey direnci azalmakta ve sürekli hale gelmektedir. Ag atomlarının oluşturduğu adacıkların arasındaki bağlantının belirtilen bu seviyenin üzerine çıkması için en az 7 nm kalınlıklı film oluşması gerektiği görülmektedir.

Elde edilen sonuçlar ışığında 5 sccm Argon gaz akışı ve 25 W DC güç değerinde elde edilebilen en ince sürekli Ag filmin 7 nm kalınlığında olduğu yorumu yapılabilir.



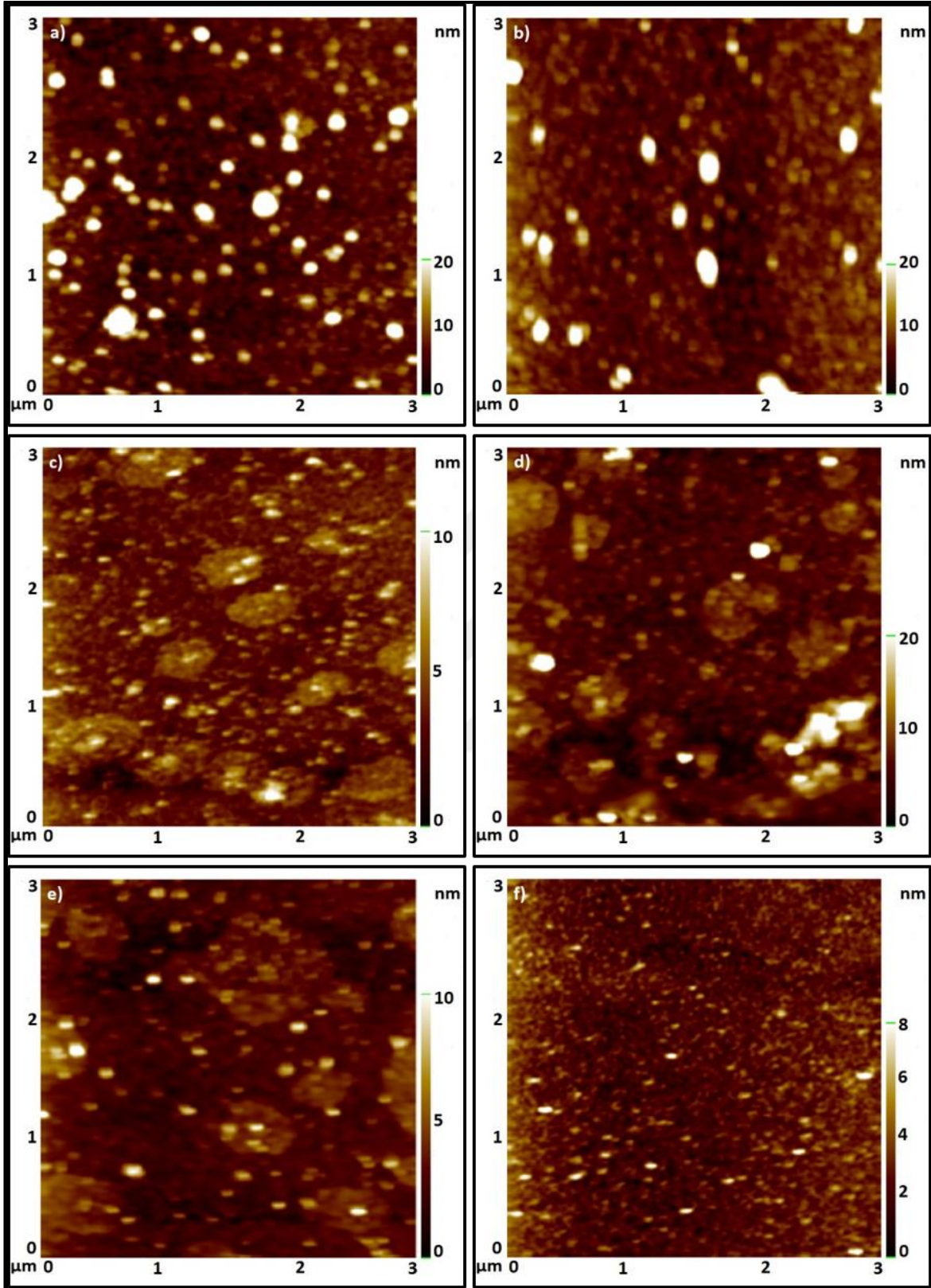
Resim 5.7. a) 5 nm b) 6 nm c) 7 nm d) 8 nm e) 9 nm f) 10 nm kalınlıklarında hazırlanan Ag ince filmlerin SEM görüntüleri

Düşük yayıcı yapılarda metal katmanı olarak kullanılacak olan Ag ince filmler için uygun bulunan diğer Argon gaz akışı 50 sccm olarak belirlendi. Şekil 5.12’de 50 sccm Argon gaz akışında ve 25 W DC güç değerinde hazırlanan farklı kalınlıklardaki Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları görülmektedir.



Şekil 5.12. 50 sccm Argon gaz akışında ve farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumu

Şekil 5.12’de verilen optik geçirgenlik spektrumu incelendiğinde farklı kalınlıklarda hazırlanan bütün Ag ince filmlerin sürekli bir film yapısına sahip olduğu görülmektedir. 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan 5 nm ve 6 nm kalınlık filmlerde görülen görünür bölge soğurmaları 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan filmlerde görülmemektedir. Bunun yanında 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin kızılötesi geçirgenliklerinin 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan filmlere kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca görünür bölge geçirgenliğinin kalınlığın azalması ile düşük yayıcı yapılar için uygun bir seviyeye yükseldiği söylenebilir. Resim 5.8’de 50 sccm Argon gaz akışı, 25 W DC güç değeri ve farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin AFM görüntüleri görülmektedir.



Resim 5.8. a) 5 nm b) 6 nm c) 7 nm d) 8 nm e) 9 nm f) 10 nm kalınlıklarında hazırlanan Ag ince filmlerin AFM görüntüleri

Resim 5.8’de 50 sccm Argon gaz akışında, 25 W DC güçte ve farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ tarama alanında elde edilen AFM görüntüleri görünmektedir. Bu AFM görüntüleri analiz edilerek elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 5.5’te verilmektedir. Hazırlanan Ag ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerleri incelendiğinde elde edilen sonuçların film kalitesini etkileyecek şekilde kötü olmadığı görülmektedir. Farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin elektriksel iletkenlik sonuçları Çizelge 5.5’te verilmektedir.

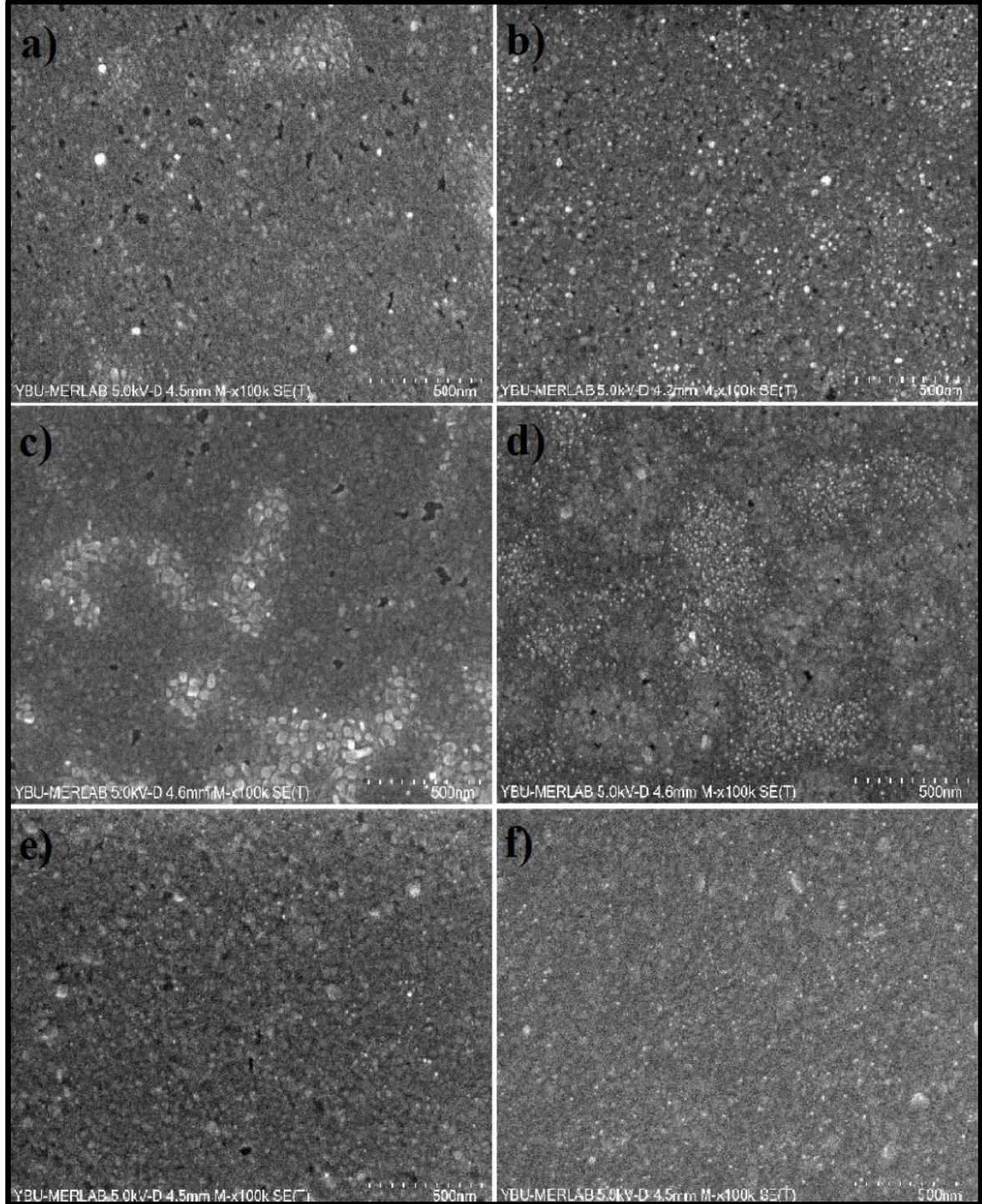
Çizelge 5.5. 50 sccm Argon gaz akışında ve farklı kalınlıklarda hazırlanan Ag ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey direnci değerleri

Kaplanan Malzemeler	Ag Film Kalınlığı (nm)	Yüzey Pürüzlülüğü (nm)	Yüzey Direnci (Ω /kare)
Ag/AZO/ Al_2O_3 /Cam	5	1,81	6,365
Ag/AZO/ Al_2O_3 /Cam	6	1,32	4,734
Ag/AZO/ Al_2O_3 /Cam	7	1,11	3,948
Ag/AZO/ Al_2O_3 /Cam	8	1,88	3,182
Ag/AZO/ Al_2O_3 /Cam	9	1,11	2,711
Ag/AZO/ Al_2O_3 /Cam	10	0,69	2,231

50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan farklı kalınlıktaki Ag ince filmlerin yüzey direnci değerleri bütün filmlerin film sürekliliğine sahip olduğunu göstermektedir. 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmler ile kıyaslandığında, 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan 5 nm kalınlı Ag ince filmin sürekliliğinin, 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan 7 nm kalınlı Ag ince filmde daha iyi olduğu yorumu yapılabilir. Şekil 5.11’de 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan 5 nm, 7 nm ve 10 nm kalınlık Ag ince filmlerin olduğu yapıların SIMS analizleri görülmektedir.

Şekil 5.11’de verilen 5 nm, 7 nm ve 10 nm kalınlıklı Ag ince filmlerin SIMS sonuçları incelendiğinde hedeflenen film kalınlıklarına ulaşıldığı görülmektedir. Bunun yanında elde edilen sonuçlar 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmler ile karşılaştırıldığında Zn atomlarının detektör tarafından daha düşük seviyede algılandığı görülmektedir. Bu sonuç 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin, 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlere kıyasla daha az boşluklu olduğu yorumunu yapmamızı sağlamaktadır. Ayrıca Ag katmanlarının altında bulunan AZO katmanı ile daha net olarak

ayrılabilmesi film kalitesinin de daha yüksek olduğunu göstermektedir. Resim 5.9'da 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin SEM görüntüleri görülmektedir.



Resim 5.9. a) 5 nm b) 6 nm c) 7 nm d) 8 nm e) 9 nm f) 10 nm kalınlıklarında hazırlanan Ag ince filmlerin SEM görüntüleri

Resim 5.9’da verilen SEM görüntüleri incelendiğinde film kalınlığı azaldıkça Ag ince film yapısı içerisinde yer alan boşlukların arttığı görülmektedir. 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin SEM görüntüleri 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin SEM görüntüleri ile kıyaslandığında boşlukların çok daha az olduğu görülmektedir. Bu durum 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin sürekliliğinin daha iyi olduğunu kanıtlayan bir sonuçtur. Bütün kalınlıklar için adacıklı yapılar arasındaki bağlantıların film sürekliliğini sağlayacak kadar yüksek olduğu yorumu yapılabilir.

Ag ince filmlerin belli bir kalınlıktan sonra sürekli olmasının sebebi tercih ettiği büyüme modlarıdır. 3 farklı büyüme modu mevcuttur. Bunlardan ilki 3D büyüme modu olarak bilinen adacıklı ince filmler elde edilmesine sebep olan Volmer-Weber büyüme modu. Diğer 2D büyüme modu olarak bilinen katman katman büyüme olarak da adlandırılan ve sürekli filmler elde etmemizi sağlayan Frank-van der Merwe büyüme modudur. Sonuncu mod ise bu iki büyüme modunu da barındıran (2D ile başlayıp 3D ile devam eden) Stanski-Krastanov büyüme modudur. Bu üç modun oluşması için en genel anlamda iki farklı yaklaşım vardır. İlki termodinamik yaklaşım diğeri ise kinetik yaklaşımdır. Termodinamik yaklaşımda serbest enerjiler üzerinden geliştirilen bir formül kullanılmaktadır. γ_s , γ_i ve γ_f sırası ile alttaşın serbest enerjisini, alttaş ve film arasındaki serbest enerjiyi ve filmdeki atomların sahip olduğu serbest enerjiyi göstermektedir.

$$\gamma_s \gg \gamma_i + \gamma_f \quad (5.1)$$

Bu formül homoepitaksi kaplamalar için 2D büyüme modunu veren durumdur. Alttaşın sahip olduğu serbest enerji filmde ne kadar fazla olursa 2D büyüme modunun oluşması o kadar kolay olur.

$$\gamma_s \gg \gamma_f \quad (5.2)$$

Bu formül ise heteroepitaksi kaplamalar için 2D büyüme modu durumudur. Bu büyümenin olması için de yine alttaşın sahip olduğu serbest enerjini filmin serbest enerjisinden büyük olması gerekir. Düşük kaplama hızı da 2D büyümeyi teşvik eden durumlardan biridir. Diğer yaklaşım olan kinetik yaklaşımda ise atomların kinetik etkileri büyüme modunu belirler. Yani örnek olarak atomların mobilitesinin arttırılması 2D büyümeyi teşvik etmektedir.

Bunun olması içinde filme ısıtma işlem uygulanması örnek verilebilir. Bu sayede atomların mobiliteleri artırılır ve böylece atomların birleşme olmadan alt basamağa inmeleri sağlanabilir [89].

Tez çalışması kapsamında hazırlanan Ag ince filmlerde herhangi bir Ag atomlarının mobilitelerini artırıcı yani kinetik yaklaşımın gerçekleşmesine sebep olabilecek bir durum bulunmamaktadır. Bu sebepten dolayı termodinamik yaklaşım üzerine düşünmek daha doğru bir yaklaşım olmaktadır. Elde ettiğimiz filmin büyüme modunu etkileyen durumlar alttaşın sahip olduğu serbest enerjisi ve filmi oluşturan atomların serbest enerjisidir. Bu iki durumu değiştirmek sureti ile istenilen büyüme modunda filmler elde etmek mümkündür.

Literatürde bulunan bir çalışmada çok ince kalınlığa sahip Ag ince film elde edebilmek için alttaşın serbest enerjisi değiştirilmiştir. Bu çalışmada alttaşın serbest enerjisini yükseltmek için kaplama öncesinde alttaş farklı kimyasallar ile işleme tabi tutulmuştur. Bu işlem sonucunda farklı serbest enerjilere sahip alttaşlar elde edilmiş ve en yüksek enerjiye sahip alttaş üzerine 4,5 nm kalınlığında sürekli Ag film büyütmeyi başarmışlardır [90].

Literatürde yer alan bir diğer çalışmada ise kaplama basıncının Ta ince filmlerinin fazlarının oluşmasına etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmadaki kritik nokta ise kaplama basıncı arttıkça Ta atomlarının ve aynı zamanda ince filmin serbest enerjisinin azaldığını göstermeleridir [91].

Bu iki çalışma göz önüne alındığında tez çalışması kapsamında hazırlanan Ag ince filmlerde de bu çalışmalara benzer sonuçlar olduğu söylenebilir. Daha ince kalınlıklı Ag ince filmler elde edebilmek için alttaşın serbest enerjisinin artırılması veya Ag atomlarının serbest enerjilerinin azaltılması gerekmektedir. Çünkü Ag atomlarının sahip oldukları yüksek serbest enerjiler bu atomların alttaşa tutunmak yerine birbiri üzerine büyümeyi tercih etmesine neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı eğer Ag atomlarının enerjileri azaltılabilirse yüzeye daha homojen kaplanmaları sağlanabilir. Bu tez çalışmasında sadece kaplama basıncını arttırarak daha ince sürekli Ag filmler elde edildi. Yukarıdaki veriler ışığında Ag atomlarının serbest enerjilerinin azaltıldığı yorumu yapılabilir. Kaplama basıncı arttıkça ortamdaki Ar gazı atomlarının sayısının arttığını ve hedeften koparılan Ag atomlarının daha fazla Ar atomu ile çarpıştığı ve enerjilerinin bir kısmını kaybettiği yapılan çalışmalarda gösterilmektedir [91-93]. Ag atomlarının enerjilerinin bir kısmını kaybetmesi 2D büyüme

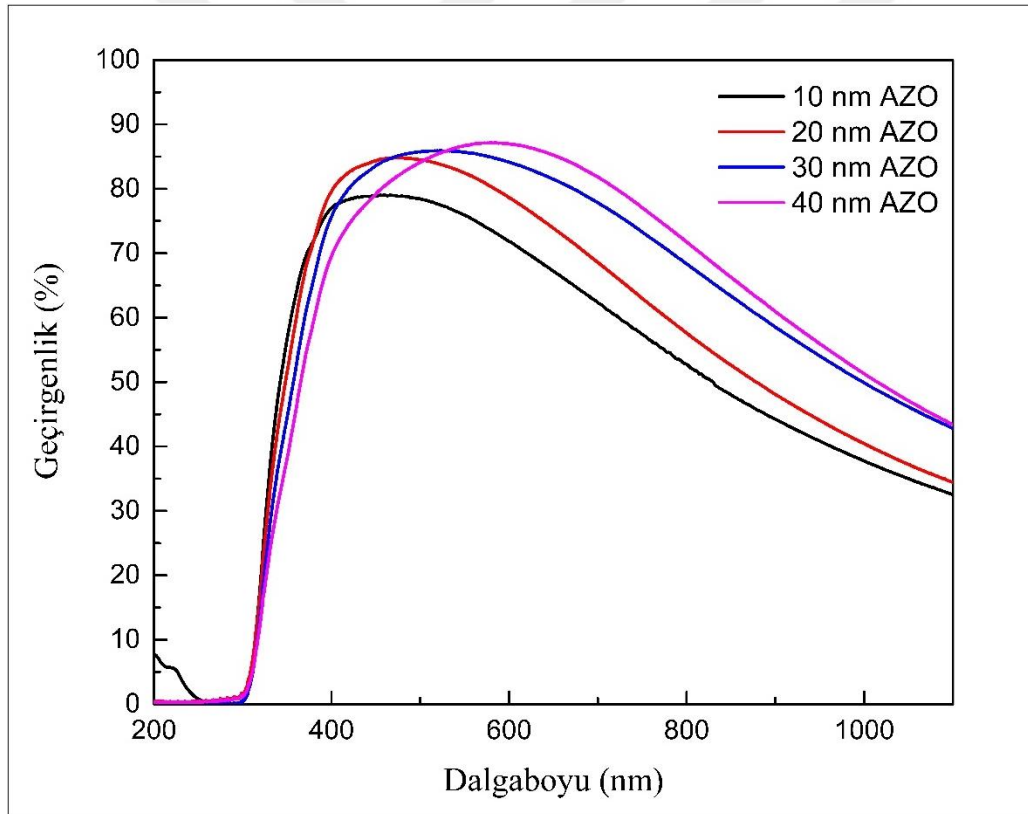
modunda Ag ince filmler oluşmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte kaplama basıncı arttıkça kaplama hızı azalmaktadır. Kaplama hızının azalmasının 2D büyümeyi arttırdığı literatürde de belirtilmektedir. Ayrıca kaplama hızının arttırılmasının yığın büyümeyi ve sürekli film için gereken kritik kalınlığı arttırdığı yapılan çalışmalarda belirtilmektedir [92].

Tez çalışması kapsamında hazırlanan Ag ince filmlerin kaplama basıncı arttıkça yüzey direnci değerlerinin azaldığı görülmektedir. Literatürdeki çalışmalara baktığımızda, kaplama basıncının artmasının parçacık boyutlarının azalmasına neden olduğu görülmektedir. Parçacık boyutlarının azalması, parçacıklar arasındaki sınır sayısının artmasına neden olmaktadır. Sınır sayısı arttıkça, elektronlar iletilirken daha fazla sınıra takılacağı için ince filmlerin yüzey direnci değerleri artmaktadır. Bu tez çalışmasında ise bu durumun tam tersi görülmektedir. Kaplama basıncı arttıkça yüzey direnci değerleri literatürün aksine azalmaktadır. Bu tez çalışmasında diğer çalışmalar ile bir farklılık olduğuna dikkat etmek gerekir. Literatürdeki çalışmalarda hazırlanan Ag ince filmlerin kalınlıkları tez çalışmasında hazırlanan Ag ince filmler ile kıyaslandığında çok daha kalın olduğu görülmektedir. Bu durum yüzey direnci değerlerindeki soruna farklı bir bakış açısı ile yaklaşılmasını gerektirir. Yapılan bir çalışmada Ag ince filmlerin kalınlıklarının yüzey direnci üzerine olan etkisi incelenmektedir. Bu çalışmada Ag ince filmlerin en ince kalınlıktan başlayarak sürekli film haline gelene kadar ki aşamaları ayrı ayrı incelenmekte ve bu aşamaların direnç üzerine olan etkisi gözlenmektedir. Buradaki temel nokta belirli bir kalınlığa kadar Ag ince film gerçek anlamda bir süreklilik göstermiyor. Adacıklı yapı ilk nanometrelerde çok belirginken kalınlık arttıkça adacıklar büyüyor ve aralarındaki boşluklar azalıyor. Belirli bir kalınlıktan sonra (30-40 nm) ise film artık metalik özellik göstermeye başlıyor. Bu kalınlıkların öncesinde filmin iletkenliğine etki eden durumun sınır sayıları değil adacıkların yüzeyde kapladıkları alan ve aralarındaki boşluklar olduğu, sınır sayılarının etkisinin ancak film metalik özellik kazandıktan sonra etkili olduğu belirtilmektedir [94].

Tez çalışması kapsamında hazırlanan Ag ince filmlerde de bu durum görülmektedir. Hazırlanan Ag ince filmlerin kalınlıkları çok az olduğu için metalik bir özellik göstermemekte ve film yapısının içerisindeki boşluklar yüzey direnci için kritik öneme sahip olmaktadır.

5.4. D/M/D Yapısının Oluşturulması ve Karakterizasyonu

Tez çalışması kapsamında kullanılacak olan katmanların özellikleri ve kaplama koşulları belirlendikten üst AZO katmanı da oluşturularak düşük yayıcı yapıya son hali verildi. Üst AZO katmanını hazırlamak için elde edilen sonuçlar ışığında belirlenen kalınlıklarda ve kaplama koşullarında Ag/AZO/Al₂O₃/Cam yapısı oluşturuldu. Üst AZO katmanının kaplama koşulları olarak alt AZO katmanı oluşturulurken belirlenen kaplama koşulları kullanıldı. Üst AZO katmanı için uygun olan katman kalınlığını belirlemek amacı ile 5 sccm Argon gaz akışında ve 100 W RF gücünde ince filmler hazırlandı. Farklı kalınlıklarda hazırlanan üst AZO katmanlarının kullanıldığı yapıların optik geçirgenlik spektrumları Şekil 5.13'te verilmektedir.

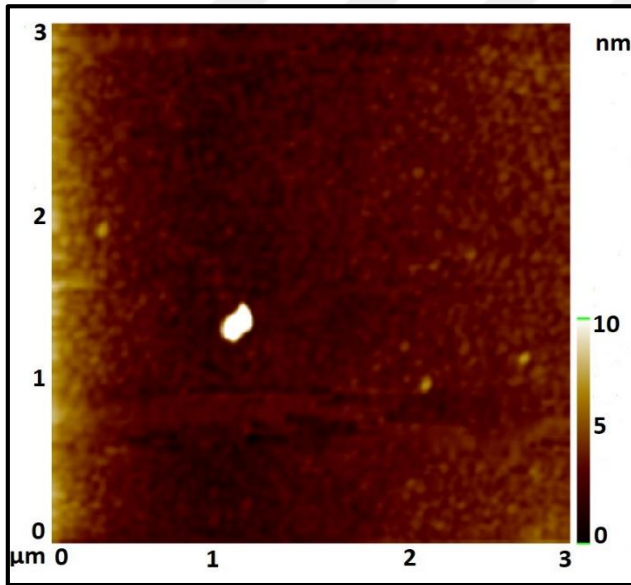


Şekil 5.13. Farklı kalınlıklarda hazırlanan üst AZO katmanlarının bulundugu yapıların optik geçirgenlik spektrumları

Şekil 5.13'te verilen optik geçirgenlik spektrumu incelendiğinde üst AZO katman kalınlığının artması ile geçirgenliğin en yüksek değere ulaştığı noktanın görünür bölgenin kırmızı tarafına doğru kaydığı görülmektedir. Ayrıca geçirgenlik değerinin ulaştığı en yüksek değerinde arttığı yine kalınlık arttıkça görülmektedir. Görünür bölge geçirgenliğinin

olabildiğince yüksek olması düşük yayıcı yapılar için büyük bir öneme sahip olmakla birlikte kızılötesi bölgedeki geçirgenliğinde olabildiğince düşük olması daha büyük öneme sahiptir. Çünkü bu düşük yayıcı yapının ilk amacı kızılötesi geçirgenliği azaltarak ısı geçişini kontrol altında tutmaktır. Görünür bölgede geçirgen olması ise kullanılacak olan bu camların insanların konforunu bozmaması ve güneş ışığından en yüksek verimin alınabilmesi için önemlidir. Optik geçirgenlik sonuçlarında 30 nm ve 40 nm kalınlığa sahip üst AZO katmanları kullanılan yapılarda görünür bölge geçirgenlikleri daha yüksek olmakla birlikte, kızılötesi geçirgenlikte yükselmektedir.

Bu düşük yayıcı yapılar için uygun bir sonuç olmadığından dolayı 20 nm kalınlığa sahip üst AZO katmanının hem %85 civarındaki görünür bölge geçirgenliğine sahip olması hem de kızılötesi geçirgenliğinin daha düşük seviyelerde kalması bu çalışmada üst AZO katman kalınlığı olarak 20 nm'nin tercih edilmesini sağlamaktadır. Resim 5.10'da 20 nm kalınlığında üst AZO katmanına sahip AZO/Ag/AZO/Al₂O₃/Cam yapısının AFM görüntüsü görülmektedir.



Resim 5.10. 20 nm kalınlıklı üst AZO katmanına sahip AZO/Ag/AZO/Al₂O₃/Cam yapısının AFM görüntüsü

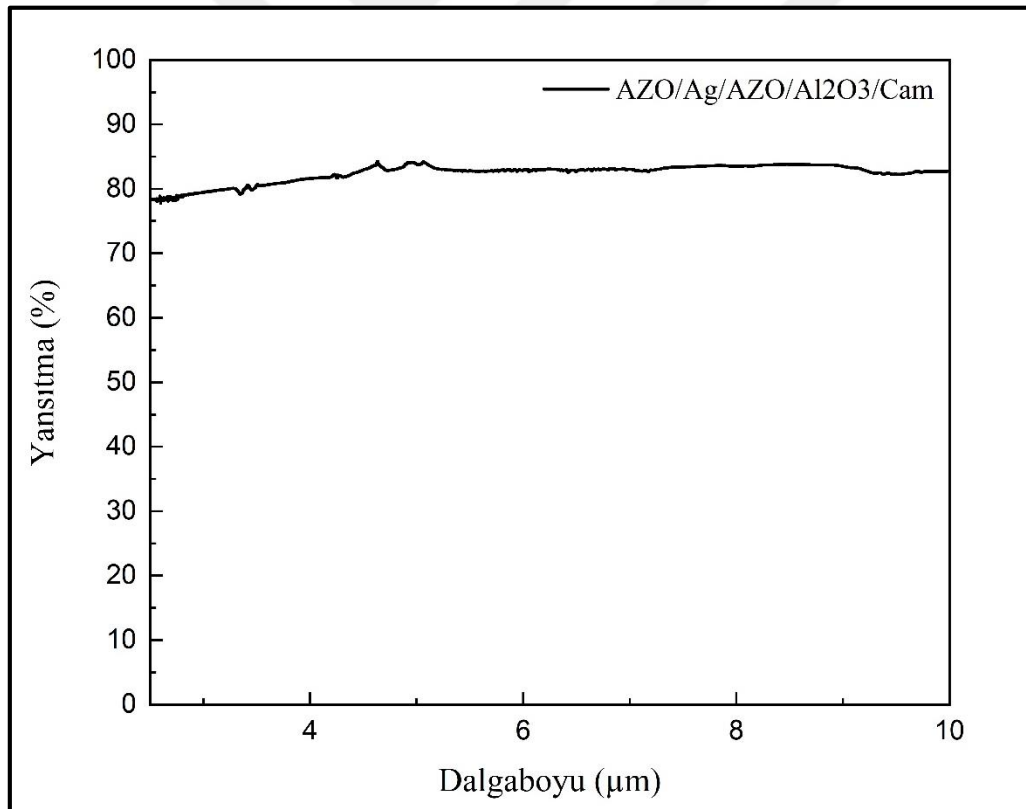
Şekil 5.10'da 20 nm kalınlığında üst AZO katmanına sahip ince filmlerin 3×3 μm² tarama alanında elde edilen AFM görüntüleri görünmektedir. Bu AFM görüntüleri analiz edilerek elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri 0,69 nm'dir. 20 nm kalınlığında üst AZO katmanına sahip AZO/Ag/AZO/Al₂O₃/Cam yapısının elektriksel iletkenlik ölçümü Van Der Pauw

yöntemi ile gerçekleştirildi. Düşük yayıcı yapının yüzey direnci değeri $5,236 \Omega / \text{kare}$ olarak bulundu. Eşitlik 3.16 kullanılarak elde edilen yapının yayma oranı hesaplandı.

$$\epsilon = A = 1 - R = 4\epsilon_0 c R_{\square} = 0,0106 R_{\square} = 0,055$$

Elde edilen sonucun ticari olarak kullanılan düşük yayıcı camlar için önerilen yayma oranı olan 0,05 oldukça yakın olduğu görülmektedir [95].

Şekil 5.14'te AZO/Ag/AZO/Al₂O₃/Cam yapısının kızılötesi bölgedeki optik yansıtma grafiği görülmektedir. Grafik incelendiğinde 2,5 μm dalga boyunda optik yansıtmanın yaklaşık olarak %79 seviyelerinde olduğu ve 8 μm dalgaboyunda bu değerin %84 seviyelerine yükseldiği görülmektedir.



Şekil 5.14. AZO/Ag/AZO/Al₂O₃/Cam yapısının optik yansıtma spektrumu

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde hazırlanan düşük yayıcı AZO/Ag/AZO/Al₂O₃/Cam yapısının hedeflenen özelliklere sahip olduğu görülmektedir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında dielektrik/metal/dielektrik yapısına sahip düşük yayıcı kaplamalar geliştirildi. Düşük yayıcı kaplamaları oluşturan her bir katmanın kaplama parametreleri tek tek belirlenerek optik, morfolojik, yapısal ve elektriksel özellikleri analiz edildi. Üretilen ince filmler magnetron kopartma sisteminde bulunan DC ve RF güç kaynakları kullanılarak üretildi.

İlk olarak üretilecek olan filmlerin tasarım ve modelleme çalışmaları Essential Macleod optik yazılım programının deneme sürümü kullanılarak gerçekleştirildi. Yapılan bu tasarım ve modelleme çalışmaları ile kullanılacak olan malzemeler ve kalınlıkları belirlenmeye çalışıldı. Tasarım çalışmaları ışığında elde edilen sonuçlar kullanılarak bariyer katmanı olarak Al_2O_3 , dielektrik katmanı olarak AZO ve metal katmanı olarak da Ag kullanılmasına karar verildi.

Düşük yayıcı yapının katmanlarını malzemeleri belirlendikten sonra en uygun kaplama koşullarını belirlemek adına kaplama parametreleri değiştirilerek örnekler hazırlandı ve analiz edildi. Bariyer katmanı olarak kullanılmasına karar verilen Al_2O_3 ince filmlerin kalınlığının daha önceki tecrübelerimiz göz önüne alınarak 25 nm olmasına karar verildi. Sonrasında farklı Argon gaz akış değerlerinde 25 nm kalınlıklı Al_2O_3 ince filmler hazırlandı. Hazırlanan ince filmlerin optik geçirgenlik ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları analiz edilerek düşük yayıcı yapılar için en uygun Argon gaz akış değerinin 5 sccm olduğu belirlendi. 5 sccm Argon gaz akışında ve 25 nm kalınlığında farklı RF güç değerlerinde ince filmler oluşturuldu. Yine hazırlanan filmlerin optik geçirgenlik ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları analiz edilerek düşük yayıcı yapılar için en uygun RF güç değerinin 150 W olduğu belirlendi. Tez çalışması kapsamında hazırlanan yapıların tamamında belirlenen kaplama koşullarında hazırlanan Al_2O_3 ince filmler kullanıldı.

Dielektrik katmanı olarak kullanılmasına karar verilen AZO ince filmlerden alt AZO ince filmin kalınlığı elde edilen tasarım sonuçları değerlendirilerek 10 nm olarak belirlendi. Sonrasında farklı Argon gaz akış değerlerinde 10 nm kalınlıklı AZO ince filmler hazırlandı. Hazırlanan ince filmlerin optik geçirgenlik ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları analiz edilerek düşük yayıcı yapılar için en uygun Argon gaz akış değerinin 5 sccm olduğu belirlendi. 5

sccm Argon gaz akışında ve 10 nm kalınlığında farklı RF güç değerlerinde ince filmler oluşturuldu. Yine hazırlanan filmlerin optik geçirgenlik ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları analiz edilerek düşük yayıcı yapılar için en uygun RF güç değerinin 100 W olduğu belirlendi. Üst AZO katmanın kalınlığının belirlemek adına farklı üst AZO kalınlığına sahip yapılar oluşturuldu. Alt AZO katmanının kaplama koşulları kullanılarak 10 nm, 20 nm, 30 nm ve 40 nm kalınlıklı üst AZO katmanları oluşturularak optik geçirgenlik sonuçları incelendi. Görünür bölge geçirgenliği 30 nm ve 40 nm kalınlıklarında daha yüksek çıksa da yakın kızılötesi bölgedeki geçirgenlik değerleri de göz önüne alınarak üst AZO katman kalınlığı 20 nm olarak belirlendi. Tez çalışması kapsamında hazırlanan yapıların tamamında belirlenen kaplama koşullarında hazırlanan AZO ince filmler kullanıldı.

Metal katmanı olarak kullanılmasına karar verilen Ag ince filmlerin gaz akışı, kopartma gücü ve kalınlıkların belirlenmesi adına optimizasyonları yapıldı. İlk olarak 10 nm kalınlığında 100 W DC güç değerinde farklı Argon gaz akışlarında Ag ince filmler hazırlandı. Hazırlanan ince filmlerin optik geçirgenlik, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey direnci analizleri yapılarak sonuçlar değerlendirildi. Argon gaz akışı miktarı arttıkça Ag ince filmlerin geçirgenliklerinin hem görünür bölgede hem de yakın kızılötesi bölgede azaldığı görüldü. Buna paralel olarak yüzey direnci değerlerinin de yine gaz akış değeri arttıkça azaldığı görüldü. Düşük yayıcı yapılar için istenilen iki durum yüksek görünür bölge geçirgenliği ve düşük kızılötesi bölge geçirgenliğidir. Bu durum göz önüne alınarak devam eden optimizasyon çalışmaları hem 5 sccm hem de 50 sccm Argon gaz akışı değerleri için gerçekleştirildi. Her iki gaz akışı değeri için 10 nm kalınlıklı ve farklı güç değerlerinde Ag ince filmler hazırlandı. 5 sccm Argon gaz akışında en yüksek görünür bölge geçirgenliğinin 25 W DC güç değerinde ve 50 sccm Argon gaz akışında en düşük kızılötesi bölge geçirgenliğin yine 25 W DC güç değerinde elde edildiği görüldü. Kaplama koşulları belirlendikten sonra farklı kalınlıklarda Ag ince filmler oluşturuldu. İki farklı Argon gaz akışı değerinde hazırlanan bu ince filmlerin optik geçirgenlik sonuçları incelendiğinde aralarında ciddi bir fark olduğu görüldü. 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan ince filmlerde, film sürekliliğine sahip en ince filmin 7 nm kalınlığında olduğu görülürken, 50 sccm Argon gaz akışında hazırlanan ince filmlerde ise film sürekliliğine sahip en ince filmin 5 nm kalınlığında olduğu görüldü. Ag atomlarının sahip oldukları yüksek enerji nedeni ile adacıklı büyüme modu olan Volmer-Weber'i tercih ettiği bilinmektedir. Ancak bu büyüme modunda çok ince Ag filmlerin üretilmesi mümkün olmamaktadır. Ag filmlerin istenilen özellikleri göstermesi için sürekli film yapısı göstermesi gerekir. Adacıklı olarak

büyüdüğünde sürekli film yapısının yakalanması için kalınlığın daha fazla olması gerekir. Bu sebepten dolayı Ag ince filmlerinin istenilen büyüme modu katman katman büyüme modu olan Frank-van der Merwe'dir. Ag ince filmlerin katman katman büyümesi için Ag atomlarının enerjisinin azaltılması veya film kaplanacağı alttaşın enerjisinin arttırılması uygulanabilecek yöntemlerden bir tanesidir. Literatürdeki çalışmalarda vakum odasındaki Argon gaz miktarının artmasının, Argon atomları ile kopartılan Ag atomlarının çarpışma sayısını arttırdığı ve bu çarpışmalar sonucunda Ag atomlarının enerjisinin azaldığı söylenmektedir. Bu durumun değerlendirilebilmesi adına hazırlanan Ag ince filmlerin SEM teknik ile yüzey görüntüleri alındı. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğin 5 sccm Argon gaz akışında hazırlanan Ag ince filmlerin adacıklı bir büyümeyi tercih ettiğini ve adacıklar arasındaki boşlukların daha fazla olduğu görüldü. Bu durumun sebebinin literatürde belirtildiği gibi Ag atomlarının enerjisi ile ilişkili olup olmadığını anlayabilmek adına farklı Argon gaz akışı değerlerinde hazırlanan Ag ince filmlerin kontak açıları ölçülerek analiz edildi. Elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçları doğrular nitelikte olup Argon gaz miktarı arttıkça kontak açısının arttığını, yani yüzey enerjisi değerinin azaldığını göstermektedir. Bütün sonuçlar bir arada değerlendirilerek düşük yayıcı yapılarda kullanılacak olan Ag ince filmlerin kaplama koşulları 50 sccm Argon gaz akışı ve 25 W DC güç olarak belirlendi. Ag ince filmin kalınlığının ise 5 nm olmasına karar verildi.

Bütün katmanların kalınlığı ve kaplama koşulları belirlendikten sonra AZO/Ag/AZO/Al₂O₃/Cam yapısı oluşturuldu. Hazırlanan yapının optik geçirgenlik, yüzey pürüzlülüğü, yüzey direnci ve kızılötesi bölgedeki optik yansıtma özellikleri analiz edildi. Elde edilen sonuçlar yapının 0,055 gibi düşük yayma oranına sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonucun özellikle 5 nm kalınlığında Ag ince filmin kullanıldığı düşük yayıcı bir yapı için çok iyi olduğu düşünülmektedir.

Sonuç olarak, tez kapsamında yapılan Ar-Ge çalışmaları cam üzerine uygulanabilen düşük yayıcı katmanların başarılı bir şekilde geliştirildiğini göstermektedir. Özellikle 5 nm kalınlığında sürekli film yapısı özelliği gösteren Ag ince filmlerin elde edilebilmesinin gelecekte yapılabilecek olan çalışmalar için aydınlatıcı ve faydalı olacağı düşünülmektedir. Elde edilen çok ince Ag ince filmlerin sadece düşük yayıcı camlar için değil, Ag ince filmlerin kullanıldığı başka uygulamalar için de ülkemize önemli katkılar sağlayabileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

1. Koç, E. ve Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu–Genel Değerlendirme. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 54 (639), 32-44.
2. Şenel, M. C. (2012). *Rüzgâr Türbinlerinde Güç İletim Mekanizmalarının Tasarım Esasları–Dinamik Davranış*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 202.
3. Koç, E. ve Kaplan, E. (2008). Dünyada ve Türkiye’de genel enerji durumu-II Türkiye Değerlendirilmesi. *Termodinamik Dergisi*, 188, 106-188.
4. British Petroleum. (2015). *BP Statistical Review of World Energy*. London: British Petroleum, 1-48.
5. Oğulata, R. (2007). Potential of Renewable Energies in Turkey. *Energy Engineering*, 133 (1), 63-68.
6. Tamzok, N. (2020). *Dünyada ve Türkiye’de Kömür – 2019*. Ankara: TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 217-235.
7. Çanka, K. F. (2011). Türkiye’deki Yenilenebilir Enerjilerde Mevcut Durum ve Teşviklerdeki Son Gelişmeler. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 52 (614), 103-115.
8. Soğukoğlu, M. ve Vatan, M. (2014). Mevcut Betonarme Konut Binalarında Enerji Verimliliğinin Artırılması İçin Mimari Çözüm Önerileri. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 6 (21) 13-22.
9. Gago, E. J., Muneer, T., Knez, M. and Köster, H. (2015). Natural light controls and guides in buildings. Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1–13.
10. Cuce, E. (2014). *Development of innovative window and fabric technologies for low-carbon buildings*, Ph.D. Thesis, The University of Nottingham, Nottingham.
11. Rezaei, S. D., Shannigrahi, S. and Ramakrishna, S. (2017). A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, 26–51.
12. Jelle, B. P., Kalnæs, S. E. and Gao, T. (2015). Low-emissivity materials for building applications: A state-of-the-artreview and future research perspectives. *Energy and Buildings*, 96, 329–356.
13. Long, L. and Ye, H. (2014). How to be smart and energy efficient: A general discussion on thermochromic Windows. *Scientific Reports*, 4 (6427), 1-10.

14. Leftheriotis, G. and Yianoulis, P. (1999). Characterisation and stability of low-emittance multiple coatings for glazing applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 58, 185–197.
15. Byon, E. and Anders, A. (2003). *Effect of underlayer on coalescence of silver islands grown by filtered cathodic arc deposition*. The International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, San Diego, United States of America.
16. Miao, D., Jiang, S., Zhao, H., Shang, S. and Chen, Z. (2014). Infrared reflective properties of AZO/Ag/AZO trilayers prepared by RF magnetron Sputtering. *Ceramics International*, 40 (8), 12847–12853.
17. Del Re, M., Gouttebaron, R., Dauchot, J. P., Leclere, P., Lazzaroni, R., Wautelet, M. and Hecq M. (2002). Growth and morphology of magnetron sputter deposited silver films. *Surface and Coatings Technology*, 151–152, 86–90.
18. Koç, E. ve Kaplan, E. (2008). Dünyada ve Türkiye’de genel enerji durumu-I Türkiye Değerlendirilmesi. *Termodinamik Dergisi*, 187, 70-80.
19. Özyurt, G. ve Karabalık, K. (2009). Enerji verimliliği, binaların enerji performansı ve Türkiye’deki durum. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Türkiye Mühendislik Haberleri*, 457(54), 32-34.
20. British Petroleum. (2020). *BP Statistical Review of World Energy*. London: British Petroleum, 1-68.
21. Yaman, Ö., Şengül, Ö., Selçuk, H., Çalikuş, O., Kara, İ., Erdem, Ş. ve Özgür, D. (2015). *Binalarda Isı Yalıtımı ve Isı Yalıtım Malzemeleri*. İstanbul: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Türkiye Mühendislik Haberleri, 487, 62-75.
22. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2015). *Isı Yalıtım Uygulama Kılavuzu*. Ankara: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 1-48.
23. Isı Su Ses ve Yangın Yalıtımcıları Derneği (İZODER). (2010). *Dünyada Binalarda Enerji Verimliliği Stratejileri ve Türkiye’de Yapılması Gerekenler 2010-2023 Isı Yalıtımı Planlama Raporu*. İstanbul: İZODER, 14-19.
24. Onaygil, S. (2011). *Enerji Verimliliği Çalışmalarında Aydınlatmanın Yeri*. Aydınlatma Türk Milli Komitesi, 3.
25. Cengel, Y. A. (2003). *Heat Transfer: A Practical Approach* (Second Edition). Boston: McGraw-Hill, 1-840.
26. İnternet: Elektromanyetik Spektrum. Web: <https://www.mgm.gov.tr/FILES/arastirma/ozonuv/gunesspectrumu.pdf>, adresinden 03 Ağustos 2021’de alınmıştır.
27. İnternet: The Electromagnetic Spectrum. Web: https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html, adresinden 03 Ağustos 2021’de alınmıştır.

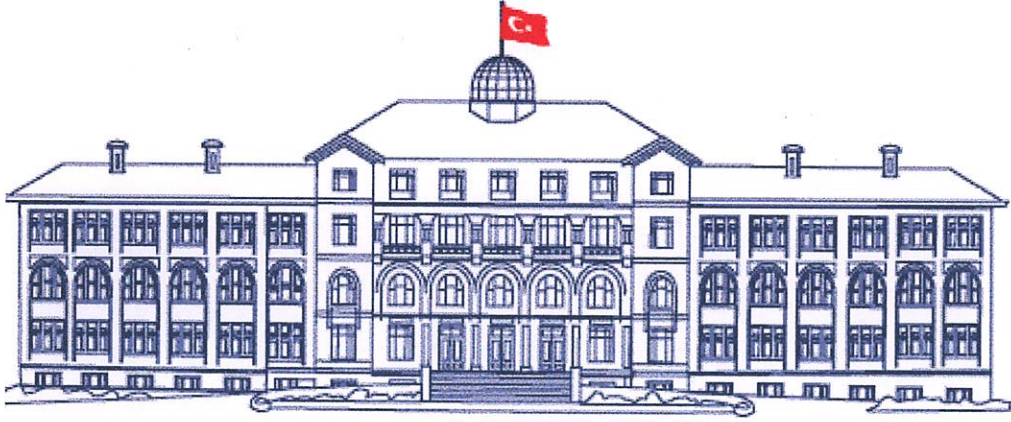
28. Surface Optics Corporation (2009). *SOC-100 User's Manual*. San Diego:Surface Optics Corporation, 1-117.
29. Jelle, B. P. (2013). Solar radiation glazing factors for window panes, glass structures and electrochromic windows in buildings—measurement and calculation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 116, 291–323.
30. Park, S. H., Lee, K. S. and Reddy, A. S. (2011). Low emissivity Ag/Si/glass thin films deposited by sputtering. *Solid State Sciences*, 13 (11), 1984–1988.
31. Karlsson, J. and Roos, A. (2001). Annual energy window performance vs. glazing thermal emittance—the relevance of very low emittance values. *Thin Solid Films*, 392 (2), 345–348.
32. van Mol, A. M. B., Chae, Y., McDaniel, A. H. and Allendorf, M. D. (2006). Chemical vapor deposition of tin oxide: fundamentals and applications. *Thin Solid Films*, 502 (1-2), 72–78.
33. Granqvist, C. G. (2007). Transparent conductors as solar energy materials: a panoramic review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91 (17), 1529–1598.
34. Mohelnikova, J. (2009). Materials for reflective coatings of window glass applications. *Construction Building Materials*, 23 (5), 1993–1998.
35. Meszaros, R., Merle, B., Wild, M., Durst, K., Göken, M. and Wondraczek, L. (2012). Effect of thermal annealing on the mechanical properties of low-emissivity physical vapor deposited multilayer coatings for architectural applications. *Thin Solid Films*, 520 (24), 7130–7135.
36. Leftheriotis, G., Papaefthimiou, S. and Yianoulis, P. (2000). Development of multilayer transparent conductive coatings. *Solid State Ionics*, 136–137, 655–661.
37. Granqvist, C. G. (1981). Radiative heating and cooling with spectrally selective surfaces. *Applied Optics*, 20 (15), 2606–2615.
38. Smith, G.B. and Maarroof, A.I. (2004). Optical response in nanostructured thin metal films with dielectric over-layers. *Optical Communication*, 242, 383–392.
39. Guillén, C. and Herrero, J. (2011). TCO/metal/TCO structures for energy and flexible electronics. *Thin Solid Films*, 520, 1–17.
40. Sharma, S.K. and Spitz, J. (1980). Hillock formation, hole growth and agglomeration in thin silver films. *Thin Solid Films*, 65 (3), 339–350.
41. Asoro, M., Kovar, D., Damiano, J. and Ferreira, P. (2010). Scale Effects on the Melting Behavior of Silver Nanoparticles. *Microscopy and Microanalysis*, 16 (Supplement S2) 1802-1803.
42. Chambouleyron, I. and Martínez, J. M. (2001). *Handbook of Thin Films Materials*, San Diego: Academic Press, 3, 593–622.

43. Minami, T. (2005). Transparent conducting oxide semiconductors for transparent electrodes. *Semiconductor Science and Technology*, 20 (4), 35-44.
44. Ellmer, K. and Mientus, R. (2008). Carrier transport in polycrystalline transparent conductive oxides: A comparative study of zinc oxide and indium oxide. *Thin Solid Films*, 516 (14), 4620-4627.
45. Sertel, T. (2020). *III-V Grubu Uzay Kalifiye Güneş Hücrelerinin Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-195.
46. Macleod, A. (2005). Fundamentals of Optical Coatings. *News Bulletin*, Winter, 28-42.
47. Beister, G., Dietrich, E., Schaefer, C., Scherer, M. and Szczyrbowski, J. (1995). Progress in large-area glass coatings by high-rate Sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 76-77, 776-785.
48. Granqvist, C.G. (1991). Energy efficient windows: present and forthcoming technology, *Materials Science for Solar Energy Conversion Systems*, 1, 106–167.
49. Sahu, D.R. and Huang, J.L. (2006). High quality transparent conductive ZnO/Ag/ZnO multilayer films. *Thin Solid Films*, 515 (3), 876–879.
50. Guillén, C. and Herrero, J. (2009). Transparent conductive ITO/Ag/ITO multilayer electrodes deposited by sputtering at room temperature. *Optics Communications*, 282 (4), 574-578.
51. Miao, D., Jiang, S., Shang, S. and Chen, Z. (2014). Infrared reflective properties of AZO/Ag/AZO trilayers prepared by RF magnetron Sputtering. *Ceramics International*, 40 (8), 12847–12853.
52. Bliokh, Yu.P. (2006). Plasmon mechanism of light transmission through a metal film or a plasma layer. *Optics Communications*, 259 (2), 436-444.
53. Dressel, M. and Grüner, G. (2002). *Electrodynamics of solids: optical properties of electrons in matter* (First edition). Cambridge: Cambridge University Press, 1-488.
54. Babayigit Cinali, M. (2019). *Düşük Yayıcı Kaplama Tasarımı, Hazırlanması ve Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-182.
55. Axelevitch, A., Gorenstein, B. and Golan, G. (2012). Investigation of Optical Transmission in Thin Metal Films. *Physics Procedia*, 32, 1–13.
56. Kaiser, N. (2002). Review of the fundamentals of thin-film growth. *Applied Optics*, 41 (16), 3053–3060.
57. Valkonen, E., Karlsson, B. and Ribbing, C. G. (1984). Solar optical properties of thin films of Cu, Ag, Au, Cr, Fe, Co, Ni, and Al. *Solar Energy*, 32 (2), 211–222.

58. Valkonen, E. and Karlsson, B. (1987). Optimization of metal-based multilayers for transparent heat mirrors. *Energy Research*, 11 (3), 397–403.
59. Smith, G.B., Niklasson, G.A., Svensson, J.S.E.M. and Granqvist, C.G. (1986). Noble-metal-based transparent infrared reflectors: experiments and theoretical analyses for very thin gold films. *Journal of Applied Physics*, 59 (2), 571–581.
60. Kunz, M., Niklasson, G.A. and Granqvist, C.G. (1988). Optical and electrical properties of sputter-deposited Al films close to the percolation threshold. *Journal Applied Physics*, 64 (7), 3740–3742.
61. Finley, J.J. (1999). Heat treatment and bending of low-E glass. *Thin Solid Films*, 351 (1–2), 264–273.
62. Meszaros, R., Merle, B., Wild, M., Durst, K., Göken, M. and Wondraczek, L. (2012). Effect of thermal annealing on the mechanical properties of low-emissivity physical vapor deposited multilayer-coatings for architectural applications. *Thin Solid Films*, 520 (24), 7130–7135.
63. Emziane, M., Durose, K., Halliday, DP., Romeo, N. and Bosio, A. (2005). The distribution of impurities in the interfaces and window layers of thin-film solar cells. *Journal of Applied Physics*, 97 (11), 114910.
64. Janke, N., Graßme, O. and Weißmann, R. (2000). Alkali ion migration control from flat glass substrates. *Glass Science and Technology*, 73 (5), 143–155.
65. Lee, J.M., Choi, B.H., Ji, M.J., An, Y.T., Park, J.H., Kwon, J.H. and Ju, B.K. (2009). Effect of barrier layers on the properties of indium tin oxide thin films on soda lime glass substrates. *Thin Solid Films*, 517 (14), 4074–4077.
66. Kulczyk-Malecka, J., Kelly, P.J., West, G., Clarke, G.C.B. and Ridealgh, J.A. (2011). Investigations of diffusion behaviour in Al-doped zinc oxide and zinc stannate coatings. *Thin Solid Films*, 520 (5), 1368–1374.
67. Gan, X., Wang, T., Wu, H. and Liu, C. (2014). ZnO deposited on Si (111) with Al₂O₃ buffer layer by atomic layer deposition. *Vacuum*, 107, 120–123.
68. Fonné, J.T., Burov, E., Gouillart, E., Grachev, S., Montigaud, H. and Vandembroucq, D. (2018). Aluminum-enhanced alkali diffusion from float glass to PVD-sputtered silica thin films. *Journal of the American Ceramic Society*, 101 (4), 1516–1525.
69. Ghazzal, M. N., Aubry, E., Chaoui, N. and Robert, D. (2015). Effect of SiN diffusion barrier thickness on the structural properties and photocatalytic activity of TiO₂ films obtained by sol-gel dip coating and reactive magnetron sputtering. *Beilstein J Nanotechnology*, 6, 2039–2045.
70. Fehlner, F. P., Binkowski, N.J., Salisbury, K.R. and Button, L. (1996). Alumina barrier layers on LCD glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 195 (1-2), 89–94.

71. Park, J., Jung, K., Lee, A., Bae, H., Mun, D., Ha, J., Mun, Y., Han, E. M. and Ko, J. (2012). Effects of controlling the AZO thin film's optical band gap on AZO/ MEH-PPV devices with buffer layer. *International Journal of Photoenergy*, 1-4.
72. Niu, Y., Ma, X., Liu, X., Wang, W., Zhen, Y. and Gao, Y. (2017). Spreadability of Ag layer on oxides and high performance of AZO/Ag/AZO sandwiched transparent conductive film. *Journal of Nanoscience*, 1-9.
73. Sahu, D. R., Lin, S. Y. and Huang, J. L. (2008). Investigation of conductive and transparent Al-doped ZnO/Ag/Al-doped ZnO multilayer coatings by electron beam evaporation. *Thin Solid Films*, 516 (15), 4728-4732.
74. Guillen, C. and Herrero, J. (2008). ITO/metal/ITO multilayer structures based on Ag and Cu metal films for high-performance transparent electrodes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92 (8), 938-941.
75. Lee, J. H., Lee, S. H., Yoo, K. L., Kim, N. Y. and Hwangbo, C. K. (2002). Deposition of multi-period low-emissivity filters for display application by RF magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 158-159, 477-481.
76. Salunkhe, S. R. (2018). Study of Contact Angle and Surface Energy of CuS Thin Film. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5 (6), 1930-1933.
77. Koski K., Holsa J. and Juliet P. (1999). Deposition of aluminium oxide thin films by reactive Magnetron Sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 339 (1-2), 716-720.
78. Garcia-Valenzuela, J. A., Rivera, R., Morales-Vilches, A. B., Gerling, L.G., Caballero, A., Asensi, J. M., Voz, C., Bertomeu, J. and Andreu, J. (2016). Main properties of Al₂O₃ thin films deposited by magnetron sputtering of an Al₂O₃ ceramic target at different radio-frequency power and argon pressure and their passivation effect on p-type c-Si wafers. *Thin Solid Film*, 619, 288-296.
79. Prasanna, S., Krishnendu, G., Shalini, S., Biji, P., Mohan Rao, G., Jayakumar, S. and Balasundaraprabhu, R. (2013). Composition, structure and electrical properties of DC reactive Magnetron Sputtered Al₂O₃ thin films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16 (3), 705-711.
80. Prasanna, S., Mohan Rao, G., Jayakumar, S., Kannan, M. D. and Ganesan, V. (2012). Dielectric properties of DC Magnetron sputtered Al₂O₃ thin films. *Thin Solid Film*, 520 (7), 2689-2694.
81. Moulder, J. F., Stickle, W. F., Sobol, P. E. and Bomben, K.D. (1992). *Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy* (Second Edition). Minnesota: Perkin-Elmer Corporation, 204.
82. Bera, S., Dhara, S., Velmurugan, S. and Tyagi, A. K. (2012). Analysis on binding energy and Auger parameter for estimating size and stoichiometry of ZnO nanorods. *International Journal of Spectroscopy*, 1-4.

83. Szczyrbowski, J., Brauer, G., Ruske, M., Schilling, H. and Zmelty, A. (1999). New low emissivity coating based on TwinMag (R) sputtered TiO₂ and Si₃N₄ layers. *Thin Solid Films*, 351 (1-2), 254-259.
84. Mirzaeian, M., Ogwu, A. A., Jirandehi, H. F., Aidarova, S., Ospanova, Z. and Tsendzughul, N. (2017). Surface characteristics of silver oxide thin film electrodes for supercapacitor application. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 519, 223-230.
85. Cioarec, C., Melpignano, P., Gherardi, N., Clergereaux, R. and Villeneuve, C. (2011). Ultrasoother Silver Thin Film Electrodes with High Polar Liquid Wettability for OLED Microcavity Application. *Langmuir*, 27 (7), 3611-3617
86. Wang, S. K., Chen, Y. and Jian, S. R. (2011). Determining Contact Angle and Surface Energy of Co₆₀Fe₂₀B₂₀ Thin Films by Magnetron Sputtering. *Journal of Nanomaterials*, 1-4.
87. Siabi-Garjan, A., Fakhri-Mirzanagh, Sh. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2019). Correlation Between Wettability and Optical Properties of Silver-Based Thin Films Prepared by Sputtering Method with Inclined Substrate and Shadowing Effect. *Surface Review and Letters*, 26 (5), 1-20.
88. Charton, C. and Fahland, M. (2003). Optical properties of thin Ag films deposited by Magnetron Sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 174, 181-186.
89. Brune, H. (2001). *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (First edition). Oxford: Pergamon Press, 3683–3693.
90. Yang, X., Gao, P., Yang, Z., Zhu, J., Huang, F. and Ye, J. (2017). Optimizing ultrathin Ag films for high performance oxide-metal-oxide flexible transparent electrodes through surface energy modulation and template-stripping procedures. *Scientific Reports*, 7, 44576.
91. Ellis, E. A. I., Chmielus, M. and Baker, S. P. (2018). Effect of sputter pressure on Ta thin films: Beta phase formation, texture, and stresses. *Acta Materialia*, 150, 317-326.
92. Chopra, K. L. (1969). *Thin Film Phenomena* (First edition). New York: McGraw-Hill Book Company, 1-844.
93. Kusaka, K., Taniguchi, D., Hanabusa, T. and Tominaga, K. (2002). Effect of sputtering gas pressure and nitrogen concentration on crystal orientation and residual stress in sputtered AlN films. *Vacuum*, 66 (3-4), 441–446.
94. Wei, H. and Eilers H. (2009). From silver nanoparticles to thin films: Evolution of microstructure and electrical conduction on glass substrates. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 70 (2), 459–465.
95. İnternet: 8 Advantages and 2 Disadvantages of Low E Glass. Web: <https://claytonglass.co.uk/the-advantages-and-disadvantages-of-low-e-glass>, adresinden 03 Ağustos 2021’de alınmıştır.



GAZİ GELECEKTİR..