



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ANTİREFLEKTİF KAPLAMALARIN FOTOVOLTAİK
UYGULAMALARDAKİ PERFORMANS VE DAYANIKLILIĞI**

SEDA SANCAKLI ATUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ SİBEL YILMAZ EKİNCİ**

DÜZCE, 2022

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ANTİREFLEKTİF KAPLAMALARIN FOTOVOLTAİK
UYGULAMALARDAKİ PERFORMANS VE DAYANIKLILIĞI

Seda SANCAKLI ATUN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Sibel YILMAZ EKİNCİ

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Sibel YILMAZ EKİNCİ

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Cenk YAVUZ

Sakarya Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 26/01/2022

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

26 Ocak 2022

Seda SANCAKLI ATUN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Sibel YILMAZ EKİNCİ'ye en içten dileklerle teşekkür ederim. Loughborough Üniversitesi'ne hazırladıkları kaplamalar için teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili eşime ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

26 Ocak 2022

Seda SANCAKLI ATUN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR.....	viii
SİMGELER	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. FOTOVOLTAİK (PV) SİSTEMLER	1
1.2. PV KAPLAMA UYGULAMALARI.....	1
1.3. PV KAPLAMALARDA PERFORMANS VE DURABİLİTENİN ÖNEMİ....	3
1.4. TEZİN AMACI	4
2. ANTİREFLEKTİF KAPLAMALAR.....	5
2.1. GİRİŞ.....	5
2.2. ÇEŞİTLERİ.....	6
2.3. PERFORMANS PARAMETRELERİ.....	9
2.3.1. Yüzey Temas Açısı (Water Contact Angle-WCA)	9
2.3.2. Yuvarlanma Açısı (Roll of Angle-RoA).....	9
2.3.3. Transmittans, Reflektans ve Spektrofotometre.....	10
2.4. YAPILAN ÇALIŞMADA KULLANILAN CİHAZLAR	11
2.4.1. Darbeli DC Manyetron Püskürtme (Pulsed DC Magnetron Sputtering)11	
2.4.2. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM: Scanning Electron Microscope)	
.....	11
2.4.3. Temas Açısı Ölçüm Cihazı	12
2.4.4. Spektrofotometre.....	13
3. DENEYSEL ÇALIŞMA 1 - AŞINMA DİRENCİ TESTİ.....	14
3.1. GİRİŞ.....	14
3.2. DENEY	15
3.3. DENEY SONUÇLARI.....	17
3.4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	25
4. DENEYSEL ÇALIŞMA 2 - DIŞ ORTAM DENEYİ.....	27
4.1. GİRİŞ.....	27
4.2. DIŞ ORTAM DENEY SONUÇLARI DEĞERLENDİRMESİ	28
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	33
6. KAYNAKLAR	35
ÖZGEÇMİŞ.....	39

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 a) Çok katmanlı kaplama, b) Gradyen indeksli kaplama ve c) Tek katmanlı kaplama örnekleri [19].	6
Şekil 2.2. Yüzeye damlatılan suyun oluşturduğu θ açısı.	9
Şekil 2.3. Yuvarlanma açısı.	10
Şekil 2.4. Deney Sonuçlarında Kullanılan SEM Cihazı [50].	12
Şekil 2.5. Deney Sonuçlarında Kullanılan Temas Açısı Ölçüm Cihazı [51].	12
Şekil 2.6. Deneylerde Kullanılan Spektrofotometre [52].	13
Şekil 3.1. Taber Abrader Aşındırıcı Test Cihazı.	15
Şekil 3.2. a) Keçe ped, b) CS-10 ve c) CS-8.	16
Şekil 3.3. CS-10 Malzemesinin 1 N ve 2 N Yükler Altındaki WAR Değişimi.	18
Şekil 3.4. 1 N Yük Altında a) Keçe Ped, b) CS-10 ve c) CS-8 ile Aşındırılan Kaplama C'nin Optik Mikroskop Görüntüleri.	18
Şekil 3.5. 1 N Yük Altında a) Keçe Ped, b) CS-10 ve c) CS-8 ile Aşındırılan Kaplama B'nin Optik Mikroskop Görüntüleri.	19
Şekil 3.6. Kaplama B'nin Optik Mikroskop görüntüleri (a) 10 N yük altında Keçe ped ile aşındıktan sonra, (b) DI su ile temizlendikten sonra.	19
Şekil 3.7. Kaplama B için CS-10 aşındırıcı ile 1 N yük altında yapılan testten sonra WAR değerleri.	20
Şekil 3.8. Kaplama B üzerinde aşınmadan sonra kusurları gösteren SEM görüntüleri (a) Keçe ped 1 N yük altında, (b) Keçe ped 10 N yük altında, (c) CS-8 1 N yük altında.	21
Şekil 3.9. Kaplama C üzerinde aşınma testinden sonraki SEM görüntüleri (a) Keçe ped 1 N yük altında, (b) Keçe ped 10 N yük altında, (c) CS-8 1 N yük altında.	21
Şekil 3.10. CS-10 ile aşınmadan sonra (a) Kaplama A, (b) Kaplama B ve (c) Kaplama C üzerindeki kusurları gösteren SEM görüntüleri (1 N kuvvet uygulaması).	22
Şekil 3.11. (a) Kaplama B 1 N yük altında, (b) Kaplama C 1 N yük altında, (c) Kaplama B 10 N yük altında ve (d) Kaplama C ile 10 N yük altında Aşınma sonrası çizikleri gösteren SWLI 3D görüntüleri.	22
Şekil 3.12. Aşınma testinde uygulanan farklı yük değerlerine göre oluşan çiziklerin maksimum derinlik profili.	23
Şekil 3.13. 1 N yük altında CS-8 ile aşındırıldıktan sonra (a) Kaplama B ve (b) Kaplama C üzerindeki çizikleri gösteren SWLI görüntüleri.	23
Şekil 3.14. Kaplama B ve C için uygulanan yüklerin bir fonksiyonu olarak (a) Maksimum derinlik ve (b) Pt profili.	24
Şekil 3.15. 1 N yük altında CS-10 ile aşınma sonrası (a) Kaplama A, (b) Kaplama B ve (c) Kaplama C'nin çiziklerini gösteren SWLI görüntüleri.	24
Şekil 4.1. Dış ortam deneyi için kullanılan kaplamaların iskeledeki yerleşimi.	27
Şekil 4.2. Dış ortam deneyinde kullanılan iskele.	28
Şekil 4.3. Kaplamaların temizlendikten sonraki fotoğrafları.	29
Şekil 4.4. Tüm Kaplamaların 1.ay sonunda SEM Analiz Sonuçları.	30
Şekil 4.5. Tüm Kaplamaların 2.ay sonunda SEM Analiz Sonuçları.	30
Şekil 4.6. Tüm Kaplamaların 3.ay sonunda SEM Analiz Sonuçları.	30
Şekil 4.7. Tüm Kaplamaların 4.ay sonunda SEM Analiz Sonuçları.	31

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 3.1 Çok Katmanlı AR Kaplamalar ve Tanımlamaları.	14
Çizelge 3.2. Aşınma Deneylerinin Listesi	16
Çizelge 3.3. Aşındırma Direnç Testleri Sonrası Kaplama A, B ve C için WAR Ölçümleri.....	17
Çizelge 3.4. SWLI cihazı ile çiziklerin profil parametreler ölçümleri.	25
Çizelge 4.1. Kaplamaların dış ortamdan toplandıktan sonraki RoA değerleri.	29
Çizelge 4.2. WCA ölçümleri.....	31
Çizelge 4.3. Spektrofotometre ile Reflektans ölçüm sonuçları.	32

KISALTMALAR

AR	Antireflektif
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu/American Society for Testing and Material
BS	İngiliz Standartları/British Standards
CdTe	Kadmiyum Tellür
CO ₂	Karbondioksit
CIGS	Bakır İndiyum Galyum Di-selenid
CSP	Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Sistemleri
c-Si	Kristal Silikon
DC	Doğru Akım
DI	Deiyonize
EN	Avrupa Normu/European Norm
FEG	Saha Emisyon Tabancası/Field Emission Gun
IR	Kızıl Ötesi/Infrared
ITO	İndiyum Kalay Oksit
LCOE	Seviyelendirilmiş Elektrik Üretimi/Levelized Cost of Energy
MgF ₂	Magnezyum Florür
mm	Milimetre
N	Newton
nm	Nanometre
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı/National Renewable Energy Laboratory
PV	Fotovoltaik/Photovoltaic
Pt	Toplam Yükseklik
R	Reflektans/Yansıma
RH	Bağıl Nem
RoA	Yuvarlanma Açısı/Roll of Angle
Rq	Ortalama Karekök Sapması
rms	Ortalama Karekök
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu/ Scanning Electron Microscope
Si	Silikon
SiO ₂	Silikon dioksit
Sol-jel	Solüsyon Jelasyon
SWLI	Taramalı Beyaz Işık İnterferometrisi/Scanning White Light Interferometre
T	Transmitans
TiO ₂	Titanyum dioksit
UV	Ultraviyole
WAR	Ağırlıklı Ortalama Reflektans/Weighted Average Reflectance
WAT	Ağırlıklı Ortalama Transmitans/Weighted Average Transmittance
WCA	Yüzey Temas Açısı/ Water Contact Angl
ZrO ₂	Zirkonyum dioksit
µl	Mikrolitre
µm	Mikrometre
3D	3 Boyutlu

SİMGELER

eV	Electronvolt
kWh	Kilowattsaat
n_{air}	Havanın kırılma indisi
n_s	İkinci ortamın kırılma indisi
α	Alfa
θ	Theta
λ	Lamda/dalga boyu
$d\lambda$	Dalga boyunun türevi
ϕ	Foton akısı
n_o	Birinci ortamın kırılma indisi



ÖZET

ANTİREFLEKTİF KAPLAMALARIN FOTOVOLTAİK UYGULAMALARDAKİ PERFORMANS VE DAYANIKLILIĞI

Seda SANCAKLI ATUN

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sibel YILMAZ EKİNCİ

Ocak 2022, 38 sayfa

Güneş modüllerinin ön camından yansıma, modül verimliliğinde %4'ün üzerinde bir düşüşe yol açan optik kayba neden olur. Tek katmanlı solüsyon jelasyon (sol-jel) antirefleksif (AR) kaplamalar, dar bir dalga boyu aralığında etkilidir, oysa çok katmanlı geniş bant AR kaplamalar uygulandığında daha geniş bir dalga boyunda yansıma kayıpları azaltılabilir. Bu çalışmada, magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak 4 katmanlı silikon dioksit (SiO_2)/zirkonyum dioksit (ZrO_2), 4 katmanlı SiO_2 / indiyum kalay oksit (ITO) ve 6 katmanlı $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ olmak üzere üç farklı çok katmanlı AR kaplama test edilmiştir. Aşınma direnci önemlidir, çünkü kaplamalar düzenli temizleme döngülerine tabi olacaktır. Farklı yükler altında keçe ped, CS-10 ve CS-8 gibi çeşitli aşındırıcılar kullanılmaktadır. Bu kaplamaların optik performansı ve dayanıklılığı Spektrofotometre, Optik Mikroskop, Taramalı Elektron Mikroskobu ve Taramalı Beyaz Işık İnterferometresi kullanılarak analiz edildi. Kaplamaların 1 N ve 2 N yükler altında keçe ped ile aşındırılmasından sonra herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Ancak Ağırlıklı Ortalama Yansıma (WAR) değerinde hafif bir artış görülmüştür. Kaplamalar CS-10 ve CS-8 aşındırıcılarla test edildiğinde, ZrO_2 ile yapılan kaplamalar, ITO ile yapılan kaplamaya kıyasla daha yüksek çizilme direnci ile sonuçlanmıştır. Daha sonra bu kaplamalar 5 ay boyunca dış ortam koşullarına maruz bırakılmıştır. Bu çalışmada optik performans ve dayanıklılık testleri yapılmış ve sonuçları verilmiştir.

Anahtar sözcükler: Antirefleksif (AR) kaplama, Aşınma direnci, Dış ortam testi, Fotovoltaik (PV).

ABSTRACT

PERFORMANCE AND DURABILITY OF ANTIREFLECTIVE COATINGS ON PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

Seda SANCAKLI ATUN

Düzce University

Institute of Graduate Studies, Department of Electrical-Electronics Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Sibel YILMAZ EKİNCİ

January 2022, 38 pages

Reflection from the front glass of solar modules causes over 4% optical loss leading to a significant decrease in module efficiency. Single layer solution gelation (sol-gel) antireflective (AR) coatings are effective over a narrow range of wavelengths, whereas reflection losses can be reduced over a broader wavelength when multilayer broadband AR coatings are applied. In this work, three different multilayer AR coatings including 4-layer silicon dioxide (SiO_2)/ zirconium dioxide (ZrO_2), 4-layer SiO_2 /indium tin oxide (ITO), and 6-layer $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ were deposited using magnetron sputtering. Abrasion resistance is important because the coatings will be subject to regular cleaning cycles. A variety of abrasers including Felt pad, CS-10 and CS-8 under different loads are used. The optical performance and durability of these coatings were analysed using a Spectrophotometer, Optical Microscope, Scanning Electron Microscope, and Scanning White Light Interferometer. No damage was observed after abrasion of the coatings with a Felt pad under 1 and 2 N loads. However, there was a slight increase in Weighted Average Reflection. When coatings were tested with CS-10 and CS-8 abrasers, coatings with ZrO_2 resulted in higher scratch resistance in comparison to coating with ITO. Then, these coatings were exposed to outdoor conditions for 5 months. The optical performance and durability tests were conducted on and the results were given in this study.

Keywords: Abrasion resistance, Antireflection (AR) coating, Outdoor testing, Photovoltaic (PV).

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji ihtiyacı günden güne artmaktadır. Enerji ihtiyacı büyük oranda fosil yakıtlardan sağlansa da yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında da yıldan yıla artış gözlenmektedir. Fosil yakıtların kullanılması sonucunda ortaya çıkan gazlardan en tehlikeli olanı karbondioksit (CO_2) gazıdır. CO_2 gazına ilişkin salınımında azalma olması fosil yakıtlardan sağlanan enerjideki azalmayı göstermektedir.

Yenilenebilir enerji, çevredeki sürdürülebilir ve doğal kaynaklardan elde edilir. Güneş veya rüzgar enerjisi gibi doğada bulunan kaynaklardan elde edilmektedir. 2009 ile 2019 yılları arasında dünyadaki yenilenebilir enerji tüketimi % 13,4' lık paya sahiptir [1]. Bu veriye göre enerji tüketiminde yenilenebilir enerji kullanımı ciddi bir orana sahiptir.

1.1. FOTOVOLTAİK (PV) SİSTEMLER

Güneş enerjisi en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Güneşten enerji elde edilmesinde üç farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler; ısıtma/soğutma sistemleri, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri (CSP) ve Fotovoltaik (PV) sistemlerdir [2].

“Fotovoltaik” kelimesinin anlamı ışık “foto” ve elektrik “voltaik” sözcüklerinin birleşimi ile oluşmaktadır. PV sistemler, doğru akımı (DC) elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken malzemelerden meydana gelen sistemlerdir.

1.2. PV KAPLAMA UYGULAMALARI

Güneş enerjisinden fotovoltaik yöntemle elektrik enerjisi üretiminin son 20 yıl içerisinde giderek yaygınlaşmış olduğu bilinmektedir. PV enerji sistemleri, güneş piline ulaşan güneş ışığının miktarına bağlı olarak elektrik üretmektedirler. Bir güneş panelinde güneş hücrelerine gelen güneş ışığı miktarı toprak ve organik kir gibi etkenlerden dolayı azalabilir. Aynı zamanda, PV panelin yüzeyi temiz olsa bile, cam yüzeyin yansıtıcı etkisi sebebiyle güneş ışığı kırılır ve yansıtılır. Kalan güneş ışınları ise kırılarak güneş hücrelerine ulaşmaktadır. Bu tarz sorunların üstesinden gelebilmek amacıyla PV güneş pilleri ve kapak camları, yansıma önleyici ve kendi kendini temizleyen kaplamalarla

kaplanılmaktadırlar [3].

Dünya çapında PV teknolojisinde en çok kullanılan güneş pilleri Silikon (Si) PV'dir. Silikon yüzey, gelen ışığın %35'inden fazlasını yansıtabilmektedir [4]. Silikon PV'ler, mono ve çok kristalli silikon PV sistemler olarak bilinmektedirler. Yaygın olarak kullanılan diğer bir uygulama ise ince film teknolojisi olan kadmiyum tellür (CdTe)'dür. Si, yeryüzünde bol miktarda bulunmaktadır ve bilgisayar içerisinde kullanılan çiplerdeki gibi bir çok cihaz üretiminde kullanıldığı bilinmektedir. Fakat üretilmesinin ve maksimum verimliliğe ulaşmasının pahalı olması sebebiyle, watt başına düşen maliyeti daha da azaltmak için alternatif PV teknolojilerini araştırmak önemlidir. Örneğin; CdTe ince film güneş pilleri silikon güneş hücrelerinin aksine hızlı bir şekilde üretilbilirler [5].

Tek katmanlı antireflektif (AR) kaplamalar PV endüstrisinde kullanılmaktadır ve yansıma kayıplarını azaltmak için önemli bir pazar payı kazanmıştır [6], [7]. AR kaplamanın uygulanması optik kayıpları azaltabilmekte ve güç çıkışını arttırabilmektedir. PV modüllerinin ömrü ortalama 25 ila 30 yıl arasında garanti edildiğinden, dış ortam koşullarına maruz kalan AR kaplamaların dayanıklılığı incelenmesi gereken çok önemli bir konudur [8], [9]. Tek katmanlı gözenekli silika kaplamalar, düşük bir kırılma indisi elde etmek için kaplamada gözenekli bir yapı olması gerekmektedir. Fakat bu gözenekler, su girişine karşı kırılma getiren ve ayrıca aşınma direncini azaltır. Bu tarz durumların önüne geçebilmek amacı ile çok katmanlı, tamamen dielektrik AR kaplamalar geliştirilmiştir [10].

AR kaplamaları elde edebilmek için solüsyon jelasyonu (sol-jel) [11], [12]-[13], termal buharlaştırma [12], [14], [15], püskürtme [7], [12] gibi çeşitli teknikler bulunmaktadır. Tek katmanlı sol-jel AR kaplamaları, düşük maliyetleri ve hızlı imalatları nedeniyle PV endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar [14]; fakat tek bir dalga boyunda yansımayı en aza indirebilirler [14]. Sol-jel biriktirme yöntemleri, daha düşük çizilme direncine neden olan düşük kırılma indisli bir malzemeye ihtiyaç duymaktadırlar [16]. Sol-jel AR kaplamaların çizilme direncinin iyileştirilmesi, kırılma indisini artırabilir ve AR etkisini azaltabilmektedir [16].

Sol-jel ile ilgili mekanik problemler, çok katmanlı AR kaplamaları kullanılarak önlenabilir. Ayrıca düşük ve yüksek kırılma indisli malzemeler kullanılarak gerekli dalga boyu aralıkları için optimize edilebilirler [17]. PV piyasası kristal silikon (c-Si), bakır indiyum galyum di-selenid (CIGS) ve CdTe ince filmler tarafından domine edilmektedir

[9]. Çok katmanlı AR kaplamalar hepsine uygun dalga boylarına göre hazırlanabilir. Kaplamanın yüksek indisli optik özelliklere sahip olması ve dayanıklılık açısından uygun malzemenin seçilmesi önemli bir adımdır. Çok katmanlı AR kaplamaları yansımayı azaltmak için oftalmik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar [18], ancak bu kaplamaların PV modüllerinde kullanılabilmesi için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

1.3. PV KAPLAMALARDA PERFORMANS VE DURABİLİTENİN ÖNEMİ

Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (LCOE), yatırımcılar ve bankalar gibi paydaşların, güneş enerjisi sistemlerinin inşası ve işletimine ilişkin finansal uygulanabilirliği değerlendirmek için kullanacakları önemli bir parametredir. Genel olarak üretilen enerjinin toplam maliyeti (\$/kWh) olarak ifade edilir. Bir PV sistemi inşa etmek için yapılan sermaye harcamasının akabinde LCOE, işletme-bakım maliyeti ile PV modülleri ile bileşenlerinin performansı ve ömrü (dayanıklılığı) dikkate alınarak belirlenmektedir [19]. PV modüllerinin performansını azaltan çevresel faktörler, LCOE'yi önemli ölçüde artırabilir.

LCOE'yi azaltmaya yardımcı olmanın bir yolu, modülün ön yüzeyinden hücrelere mümkün olan maksimum ışık iletimini sağlamaktır. Ön yüzey iletim kayıplarına iki faktör katkıda bulunmaktadır. Bunlar yansıma ve kirlenmedir. PV modüllerinin ön kapak camındaki yansımayı azaltmak, artan bir enerji çıkışı sağlamanın ve dolayısıyla LCOE'yi azaltmanın bir yoludur. Kirlenme, özellikle modüllerin yüzeyinde kum ve toz parçacıklarının oldukça hızlı bir şekilde biriktiği bilinen bir durumdur [19].

1.4. TEZİN AMACI

Yenilenebilir enerji kaynakları, dünyadaki enerji talebini karşılamak, maliyeti minimuma indirmek ve çevreyi korumak için en uygun çözümlerden biridir. PV sistemlerin kullanımının artması ile birlikte bu sistemler açık hava koşullarına maruz kaldığı için PV modülünün yüzeyindeki camda görülen reflektans (R) kayıplarının verimlilik kayıplarına neden olduğu bilinmektedir. PV modüllerde AR kaplamaların kullanımı ile R kayıpları %80'lere kadar düşürülmüştür. R değerinin düşmesi, transmitans (T) değerinin yükselmesine neden olur ve bu durum kısa devre akımını arttırarak PV modülünün verimini arttırır. Maalesef AR kaplamaların ömrü PV modüllerinin ömrü kadar uzun değildir.

Geliştirilmekte olan AR kaplamaların laboratuvar ortamında performans ve dayanıklılığının incelenecektir. Ayrıca açık havaya maruz bırakılarak performans testleri yapıp kaplamaların durabilitesi incelenecektir. 3 farklı kaplama darbeli DC magnetron saçırma yöntemi ile cam üzerine kaplanacaktır. R değerleri ölçümleri spektrofotometre ile yapılacaktır. Ek olarak yüzey temas açısı (Water Contact Angle-WCA) ve yuvarlanma açısı (Roll of Angle-RoA) ölçümleri yapılacaktır. Kaplamaların hidrofobik özellik göstermesi avantajdır. Hidrofobik özellik yüzeyin enerjisini azaltır ve böylece kirlenmeye yapışmayı en aza indirmeyi sağlamaktadır [19]. Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM) ile kaplamaların yüzey analizleri gerçekleştirilecektir. Kaplamalar açık hava koşullarına maruz bırakılarak, her ay bir kaplama alınıp temizlenecektir. Gerekli analizler yapılarak kaplamaların performansları incelenecek ve 3 kaplamanın sonuçları karşılaştırılacaktır. Performansların incelenmesi sonucunda PV modüllerinin verimlerindeki artışlar ile PV teknolojisine büyük yarar sağlanması amaçlanmaktadır.

2. ANTİREFLEKTİF KAPLAMALAR

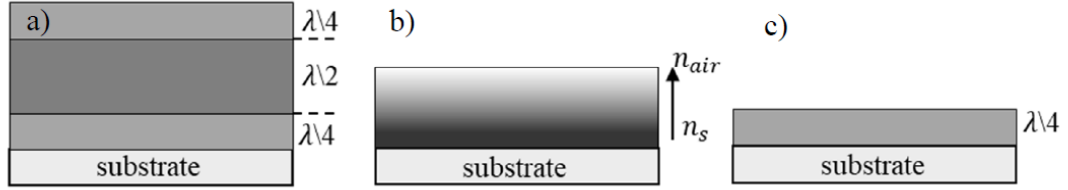
2.1. GİRİŞ

Güneş pili verimleri, yansıma ve absorpsiyon gibi optik kayıpların azaltılmasıyla arttırılabilmektedir. Herhangi bir PV sisteminde yansıma kaybının en belirgin kaynağı, PV modülünün önündeki hava-cam arayüzüdür. Yansıma problemi ile ışığın akışında kayıplara sebep olmaktadır. AR kaplamalar sayesinde bu kayıpların bir kısmının ortadan kalkması sağlanabilir [5]. AR kaplamalar, güneş PV hücrelerinin performansının artmasına yardımcı olmaktadır [20].

AR kaplamalar, ağırlıklı olarak ışık bir ortamdan başka bir ortama yayıldığında Fresnel yansıma kayıplarını bastırmak için kullanılmaktadırlar. Halihazırda, AR etkiyi elde etmek için iki ana strateji vardır: birincisi, alt tabaka üzerine tek, çift ve çok katmanlı filmler gibi ince filmler yerleştirmektir. Diğer strateji ise, güve gözü yapıları gibi gözenekli ve nano yapıli diziler [21],[22] yerleştirmektir. İnce film kaplama, yıkıcı girişim ilkesi sayesinde farklı filmlerde oluşan yansımayı azaltmaktadır. Farklı malzemelerle çeşitli AR ince film kaplama konfigürasyonlarının optik özelliklerini ve mekanik stabilitesini analiz etmek, geçerli ve yüksek performanslı bir AR kaplama elde etmek için oldukça önemlidir. İndeks eşleştirmenin ikinci yaklaşımı, filmin kırılma indeksini havanın kırılma indeksinden substratın kırılma indeksine kademeli olarak azaltarak yansımayı azaltır ve maksimum ışık iletimini sağlar. Ayrıca yansıma önleyici özellik, dokulaştırma gibi yüzey modifikasyonu ile elde edilir [23],[24]. Bu metodolojilerle, PV dönüşümü için mevcut olan ışık miktarı önemli ölçüde arttırılabılır ve bunun sonucunda güneş pillerinin performansı arttırılabilmektedir.

2.2. ÇEŞİTLERİ

AR kaplamalar 3 farklı şekilde kullanılmaktadırlar. Şekil 2.1’de gösterildiği üzere bunlar; tek katmanlı, gradyen indeksli ve çok katmanlı kaplama yapılarıdır [25].



Şekil 2.1 a) Çok katmanlı kaplama, b) Gradyen indeksli kaplama ve c) Tek katmanlı kaplama örnekleri [19].

Tek katmanlı AR kaplamalarda, giriş ortamının kırılma indisi ile çıkış ortamının kırılma indisinin çarpımlarının karekökü hesap yönteminin kullanıldığı bilinmektedir [26]. Genel olarak tek katmanlı AR kaplamalardan, giriş ortamı hava ise (n_{air} 'in 1'e eşit olduğu durum) ideal kırılma indisi $\sqrt{n_s}$ olan homojen bir katman olarak ta bahsedilebilir. İdeal kırılma indisi ilk olarak Lord Rayleigh [27] tarafından türetilmiştir. Burada n_s , alt katmanın kırılma indisidir. Katmanın kalınlığı çeyrek dalga boyu (λ)/4 olmalıdır ve kaplamanın kırılma indisi camdan daha düşük olmalıdır. Tek katmanlı bir kaplama içindeki gözeneklerin sayısı, kaplamaların kırılma indisini belirler. Malzemenin gözenekliliği ayarlanarak kaplamaların kırılma indisi optimize edilebilmektedir [28].

Tek katmanlı yansıma önleyicinin ikinci biçimi, cam kaplama arayüzü ile kaplama havası arayüzü arasında yıkıcı girişim oluşturmak için farklı yansımaların manipülasyonu yoluyla elde edilir [29]. Herhangi bir katının en düşük kırılma indisi, elektromanyetik spektrumda 550 nm'de 1,32 kırılma indisi ile magnezyum florürdür (MgF_2) [30]. Çeyrek dalga boyu kalınlığında MgF_2 tabakasının kullanılması, cam üzerinde etkili bir AR kaplama sağlamaktadır.

Tek katmanlı AR kaplamalar için MgF_2 'ye alternatif bir malzeme, sol-jel ile işlenmiş gözenekli silika kaplamalardır. Gözenekli kaplamalarda, kaplamanın kırılma indisini yapay olarak azaltmak için, genellikle hava olmak üzere daha düşük kırılma indisine sahip malzemeler kaplamaya dahil edilir. Sol-jel AR kaplamaların kırılma indisi 1,08 kadar düşük olabilir [31]. Bununla birlikte, sol-jel kaplamalar çok yüksek düzeyde ayarlanabildiğinden, sol-jel kaplamaların kırılma indisi, arayüzdeki giriş ve çıkış

ortamına dayalı gereksinimlere uyacak şekilde seçilebilir. Bu, kırılma indisini ideal olan 1,22 indisine yaklaştırır. SiO₂ düşük bir kırılma indisine sahiptir. Daha düşük kırılma indisi olan malzemeler mevcut olmasına rağmen (daha önce bahsedilen MgF₂ gibi), SiO₂ daha düşük kırılma indeksli rakip malzemelere göre boşluk yüzdesi arttıkça daha fazla mekanik mukavemeti korur.

Sol-jel kaplamalar birçok nedenden dolayı daha çok tercih edilmektedirler. Sol-jel kaplamalar yüksek üretim hızına ve düşük üretim maliyetlerine sahiptirler. Ayrıca birçok farklı öncü malzeme [32]-[33] kullanmak da mümkündür. Bu özelliklerinden dolayı sol-jel seri üretime uygundur. Sol-jel kaplamaların bir diğer özelliği, hidrofobiklik ve çizilme direnci gibi çeşitli fonksiyonlara aynı anda sahip olabilmeleridir [34].

Gözenekli silika (SiO₂), sol-jel yöntemiyle biriktirilen tek katmanlı AR kaplamalarda en yaygın olarak kullanılan malzemedir. Sol-jel yüzeylerindeki mikro yapıların boyutları üzerinde daha fazla kontrol sağlayarak sol-jel birikiminin birçok yönünü kontrol etmek de mümkündür. Buna yüzey alanı, boşluk yarıçapı ve hacim dahildir [35].

Çok katmanlı AR kaplama ilkesi, farklı katman arayüzlerinde yansıyan ışığın yıkıcı girişimine dayanmaktadır. Kaplama içerisindeki katmanlar, yüksek ve düşük kırılma indeksleri arasında değişmektedir. Çok katmanlı AR kaplama, her biri çeyrek dalga boyunda optik kalınlığa sahip iki katmandan oluşmaktadır [36].

Tasarımdaki katmanların kalınlıkları, yakalanan ışığın dalga boyu aralığına benzer bir ölçekte yıkıcı girişime neden olacak şekilde manipüle edilir. Sonuç olarak, tabakaların kalınlıkları ufak boyutlarda bile değiştirildiğinde, çok katmanlı AR kaplamanın etkinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Bu nedenle, biriken malzemenin düz, pürüzsüz yüzeylerini güvenilir bir şekilde üretebilen biriktirme yöntemleri (iyon ışını püskürtme [37], iyon destekli elektron ışını buharlaştırma [37] ve magnetron püskürtme [38]) çok katmanlı AR kaplamaları üretilirken gereklidir.

Bir çok katmanlı AR tasarımıdaki katman sayısı ne kadar fazlaysa, yansımadaki azalma da o kadar büyük olur. Bununla birlikte, daha katmanlı bir tasarım, biriktirme sürecinde daha fazla aşama (bu, daha fazla maliyet ve üretim süresi anlamına gelir) ve daha kalın, ve daha az kararlı bir kaplama anlamına gelir [5].

Gradyan indeksli kaplamaların kırılma indeksi, havanın kırılma indeksinden (~1.0) alt katmandaki malzemenin kırılma indeksine (~1.5) doğru artış gösterir ve kırılma indeksindeki belirgin değişiklikleri kaldırarak yansımayı önlemeyi sağlamaktadır [19].

Gradyan indeksli kaplama, yalnızca dar bir dalga boyu aralığında ve normal insidansta AR etkinliği gibi sınırlamaları ortadan kaldıran yeni nesil tek katmanlı AR kaplamaları olarak değerlendirilebilir. Her adımda kademeli olarak değişen bir kırılma indisine sahip bir katman dizisi, gradyan kırılma indisi kaplamasını oluşturur. Alternatif olarak, monoton olarak değişen kırılma indisine sahip homojen olmayan bir film tercih edilir ve ayrıca bir geniş bant yansıma önleyici kaplama görevi görür. Doğrusal, parabolik, kübik, gauss, beşli, üstel, üstel sinüs ve Klopfenstein'ı içeren çok yönlü ve geniş bant AR kaplamaları için farklı gradyan kırılma indisi katmanları profilleri önerilmiştir [39], [40]-[41]. Lineer indeks profilleri silikon veya kuvars yüzeylerde kolaylıkla elde edilebilir. Bir çalışma, geniş bir insidans açısı için yakın kızıl ötesi ve görünür bölgelerde düşük yansımaya sahip bir yansıma önleyici kaplama olarak lineer indeks profiline sahip SiNx filmlerini bildirmiştir [42]. Doğrusal, kübik ve kuintik profilli gradyan indeks kaplamalar için tipik ifadeler [39],[43] aşağıdaki gibidir:

Doğrusal profil:

$$n = n_0 + (n_s - n_0)t, 0 \leq t \leq 1 \quad (2.1) [14]$$

Kübik profil:

$$n = n_0 + (n_s - n_0)(3t^2 - 2t^3) \quad (2.2) [14]$$

Kuintik profil:

$$n = n_0 + (n_s - n_0)t(10t^3 - 15t^4 + 6t^5) \quad (2.3) [14]$$

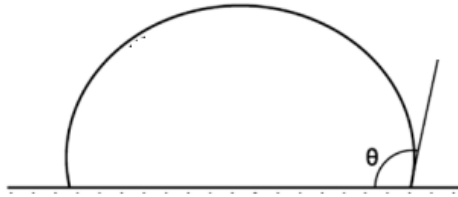
Dokulu AR kaplamalardaki yüzeyler, yansıma önleyici etki [44] üretmek için 3 boyutlu piramidal yapılar, oluklar veya diğer yapılar üretmek için aşındırma veya biriktirme yoluyla değiştirilebilir. Daha büyük, daha küçük veya yüzey yapılarına eşdeğer boyutta dalga boylarının ışığı düşünüldüğünde, yansıma azalması farklı mekanizmalarla açıklanır. Büyük dalga boyları, sanki bir kırılma indisi gradyanı gibi yüzeyle etkileşime girer. Bu nedenle yansıma, geniş bir geliş açısı aralığında önemli ölçüde azalır. Yapı boyutundan daha küçük olan ışığın dalga boyları, yapılar üzerindeki yüzeylere çarparken birçok yönde yansıtılır [45]. Çoğu yol istenen ortama gider ve kaynağa geri giden izler pürüzsüz ve kaplama olmayan camla karşılaştırıldığında nispeten nadirdir. Sistem bu

koşullarda basit optik geometriyi kullandığından, daha küçük dalga boylarında yansıma ışın izleme kullanılarak hesaplanabilir [46].

2.3. PERFORMANS PARAMETRELERİ

2.3.1. Yüzey Temas Açısı (Water Contact Angle-WCA)

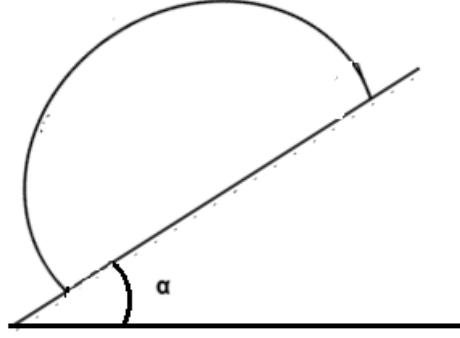
Yüzey Temas Açısı (WCA), bir kaplamanın performansını belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Katı bir yüzeyin sıvı damla ile ıslatılabilirliğinin niceliksel ölçüsüdür. Boyama, baskı, yapıştırıcı bağlama, polimer işleme ve imalat gibi bir çok uygulamada tercih edilmektedir. Şekil 2.2’de θ ile gösterilen açı, yüzey temas açısıdır.



Şekil 2.2. Yüzeye damlatılan suyun oluşturduğu θ açısı.

2.3.2. Yuvarlanma Açısı (Roll of Angle-RoA)

Yuvarlanma açısı (RoA), bir su veya sıvı damlası yüzeyden yuvarlanmaya başladığı andaki kaplanmış bir alt tabakanın eğim açısıdır. RoA ölçümü, ortam sıcaklığı, bağıl nem (RH), su damlası hacmi ve eğim hızı gibi ölçüm koşullarına bağlıdır. Şekil 2.3’te α ile gösterilen açı, yuvarlanma açısıdır. Bu çalışmada dijital bir gonyometre hareket edebilir bir yüzeye monte edilerek RoA ölçüm cihazı tasarlandı. Bu yüzeye kaplama sabitlendi. Daha sonra yere paralel olarak monte edilmiş kaplamanın üzerine 10 μ l su damlatıldı ve hareket edebilir aparat yavaş yavaş yukarı doğru kaldırıldı. Damlanın yuvarlanmaya başladığı açı gonyometrede okundu ve her bir kaplama için bu işlem tekrar edilerek RoA değerleri not edildi.



Şekil 2.3. Yuvarlanma açısı.

2.3.3. Transmittans, Reflektans ve Spektrofotometre

Bir ışık ışını bir ortamdan diğerine geçerken, ışığın bir kısmı iki ortam arasındaki arayüzden yansıtılır. Yansımanın gücü, iki ortamın kırılma indekslerinin oranına ve yüzeyin ışık huzmesine olan açısına bağlıdır. Değerler, Fresnel denklemleri kullanılarak hesaplanabilmektedir [47].

Işık, yüzeye dik olarak gelirken arayüzle karşılaştığında, yansıyan ışığın yoğunluğu, yansıma katsayısı veya yansıtıcılık, R olarak gösterilir:

$$R = \left(\frac{n_0 - n_s}{n_0 + n_s} \right)^2 \quad (2.4)$$

n_0 birinci ortamın kırılma indisi ve n_s ikinci ortamın kırılma indisidir. R değeri 0 (yansıma yokken) ile 1 (tüm ışık yansıtılırken) değeri arasında değişir ve genellikle yüzde olarak belirtilmektedir [47].

R 'nin tamamlayıcısı, iletim katsayısı veya geçirgenlik, T olarak gösterilir [47].

Görünür ışığın havadan ($n_0 \approx 1.0$) cama ($n_s \approx 1.5$) geçiş yaptığı durum için R 'nin değeri 0,04 veya %4'tür. Yani ışığın en fazla %96'sı ($T = 1 - R = 0.96$) cama geçiş yapmış olur ve geri kalanı ise yüzeyden yansır.

Spektrofotometri, kaplanmış camın geçirgenliğini ve yansımasını ölçmek için kullanılan optik bir ölçüm tekniğidir. AR kaplamalar için bu parametreler, stres testlerinden öncesi ve sonrasında ölçümü yapılan performans kriterleridir [19]. Spektrofotometre verileri, Ağırlıklı Ortalama Reflektans (WAR) veya Ağırlıklı Ortalama Transmittans (WAT) hesaplamaları için kullanılmaktadır.

$$WAR(\lambda_{min}, \lambda_{max}) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{\phi \cdot R}{R} d\lambda \quad (2.5)$$

λ_{min} minimum dalga boyu, λ_{max} maksimum dalga boyu, ϕ foton akısı, R reflektans ve $d\lambda$ dalga boyunun türevidir [48].

2.4. YAPILAN ÇALIŞMADA KULLANILAN CİHAZLAR

2.4.1. Darbeli DC Manyetron Püskürtme (Pulsed DC Magnetron Sputtering)

Darbeli DC, DC gücü ile imkansız olan dielektrik ve yalıtım bileşiklerinin püskürtülmesini sağlamaktadır. Bu sistemin temel avantajı, gerilimin tersine çevrilmesi ile arkları önlemesidir [49]. Darbeli DC magnetron püskürtme, mükemmel homojenliğe sahip sert ve yoğun ince filmler meydana getirmektedir. Her katmanın kalınlığını bilgisayar kontrolü kullanarak kontrol etmek mümkündür.

2.4.2. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM: Scanning Electron Microscope)

Taramalı Elektron Mikroskopu, kaplamayı tarayarak odaklanmış elektron hüzmesiyle görüntü oluşturan bir elektron mikroskopu türüdür. SEM analizi kaplamanın yüzeyindeki aşınma testinden sonra ve dış ortamda bekletildikten sonra zamanla oluşabilecek soyulma, veya aşınmaları yani kaplamanın performansını gösterecektir. SEM analizinde kullanılan cihaz Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Cihaz markası FEI ve modeli ise Quanta FEG 250'dir [50].



Şekil 2.4. Deney Sonuçlarında Kullanılan SEM Cihazı [50].

2.4.3. Temas Açısı Ölçüm Cihazı

Temas Açısı ölçüm cihazı, damla görüntülerini kullanarak damla şeklini analiz eder. Temas açısı, yüzey gerilimi, ara yüzey gerilimi, sıvıyı yüzeyde tutma, yüzey temizliği ve yüzey heterojenliği gibi kaplama özellikleri hakkında bilgi verir.

Kullanılan cihaz Biolin Scientific Attension – Theta Lite cihazıdır. Cihazın görseli Şekil 2.5’te yer almaktadır.

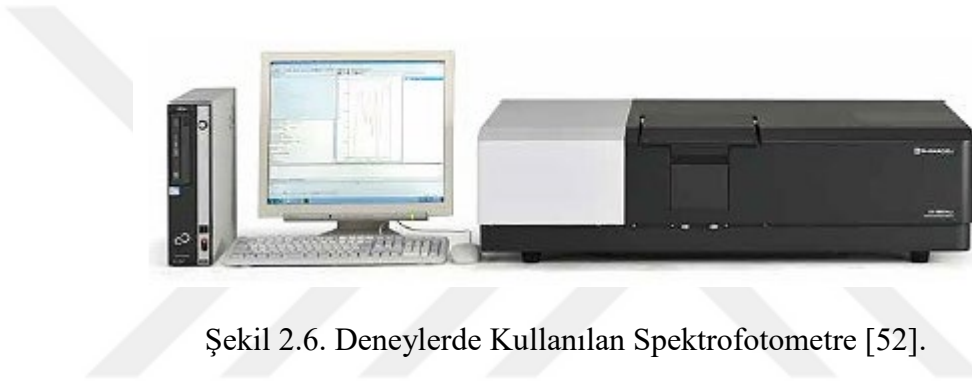


Şekil 2.5. Deney Sonuçlarında Kullanılan Temas Açısı Ölçüm Cihazı [51].

2.4.4. Spektrofotometre

UV-Vis-NIR absorbsiyon spektroskopisi bir ışın demetinin bir malzemeden geçtikten veya o malzeme tarafından yansıtıldıktan sonra ışının ne kadar azaldığının ölçülmesidir. Işın şiddetinin artması absorbsiyonun azaldığını gösterir. Bu çalışmada kullanılan spektrofotometre 185-3300 nm dalga boyları arasında ölçüm yapar. Spektrofotometre ile yapacağımız R ölçümleri, kaplamamızın reflektans ve transmitans değerlerinde zamanla bir değişime uğrayıp uğramadığını gösterecektir.

Deneylerde kullanılan cihaz Shimadzu UV-3600 Plus Ultraviyole, Görünür Bölge ve Yakın Kızılötesi Spektrometresi (UV-Vis-NIR)'dir [52]. Cihazın görseli Şekil 2.6'da yer almaktadır.



Şekil 2.6. Deneylerde Kullanılan Spektrofotometre [52].

3. DENEYSEL ÇALIŞMA 1 - AŞINMA DİRENCİ TESTİ

3.1. GİRİŞ

Bu çalışmada “A”, “B” ve “C” olarak adlandırılan üç farklı kaplama kullanılmıştır. Kaplamalara ilişkin tanımlamalar Çizelge 3.1’de belirtilmektedir.

Çizelge 3.1 Çok Katmanlı AR Kaplamalar ve Tanımlamaları.

Kaplama	Tanımlama	Uygulama
A	AR 4-katmanlı $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$	İnce film CdTe güneş pili
B	AR/IR 4-katmanlı SiO_2/ITO	Si güneş pili
C	AR 6-katmanlı $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$	Si güneş pili

Kaplama A, yansıma kayıplarını azaltmak için ince film CdTe güneş pillerinin üst tabakasına yerleştirilmek üzere tasarlanmıştır. Silikon dioksit (SiO_2) ve zirkonyum dioksit (ZrO_2)’ten oluşan 4 katmanlı bir AR kaplamadır. A kaplamasının modellenmiş kalınlığı 277 nm’dir [16].

Kaplama B, Si güneş pilleri için gerekli dalga boyu aralığında optimize edilmiştir ve bu kaplama, kızılötesi (IR) radyasyonu yansıtarak modül sıcaklığındaki artışı da sınırlamaktadır. Kaplama, düşük kırılma indisli malzeme olarak SiO_2 ve yüksek indeksli malzeme olarak indiyum kalay oksit (ITO) kullanan 4 katmanlı bir yapıya sahiptir. Modellenen kalınlık 274 nm’dir [53].

Kaplama C, Si güneş pillerinde kullanım için hazırlanmış 6 katmanlı bir AR kaplamadır. Toplam hassas modellenmiş kalınlığı 344 nm olan SiO_2 ve ZrO_2 malzemelerinden oluşmaktadır [54].

Bu çalışmada kaplamaların hazırlanması için darbeli DC magnetron püskürtme kullanılmıştır. Bu kaplamaların dayanıklılığını değerlendirmek için aşınma direnci testleri Abrader cihazı kullanılarak yapılmıştır. Temizleme işlemlerinin etkilerini simüle etmek amacı ile endüstrideki standart testler olan Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM) ve İngiliz Standartları (BS EN) baz alınmıştır. Keçe ped, CS-10 ve CS-8 aşındırıcı malzemeleri kullanılmıştır. Keçe ped aşındırıcı, bu çalışmada kullanılan en az agresif olan malzemedir. CS-10 aşındırıcı malzeme, hafif ila orta düzeyde aşınma

uygulayan bir lastik peddir. CS-8 aşındırıcı malzeme ise orta düzeyde bir aşınma sağlar [55]. Kaplamaların optik ve mekanik performansını araştırmak amacıyla Spektrofotometre, Optik Mikroskop, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Taramalı Beyaz Işık İnterferometrisi (SWLI) kullanılmıştır.

3.2. DENEY

Çok katmanlı AR kaplamaları, darbeli DC magnetron püskürtme kullanılarak hazırlanmıştır. AR kaplamalar 5x5 cm soda kireci cam üzerine bir “PV Solar” sistemi (PowerVision, Ltd.’den) kullanılarak yapılmıştır [56]. Cam malzeme dönen bir taşıyıcı üzerine yerleştirilmiştir ve vakum altında kaplamalar elde edilmiştir. Bu çalışmada incelenen çok katmanlı geniş bant AR kaplamaları Çizelge 3.1’de belirtilmektedir.

Yukarıda bahsedildiği üzere kaplama A, düşük indisli malzeme olarak SiO_2 ve yüksek indisli malzeme olarak ZrO_2 kullanılarak 4 katmanlı olarak kaplanmıştır. Kaplama B, SiO_2 düşük indisli malzeme ve yüksek indisli malzeme olarak ITO ile kaplanmıştır. Kaplama C, 6 katmanlı SiO_2 ve ZrO_2 ’den oluşmaktadır.

Şekil 3.1’de gösterilen Taber aşındırıcı (5900 Pistonlu aşındırıcı), çok katmanlı AR kaplamalarının lineer aşınma direncini test etmek için kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Taber Abrader Aşındırıcı Test Cihazı.

Temizleme işlemini simüle etmek için aşındırıcı malzeme olarak Şekil 3.2’de gösterilen keçe ped, CS-10 ve CS-8 kullanılmıştır.



Şekil 3.2. a) Keçe ped, b) CS-10 ve c) CS-8.

Darbe uzunluğu 30 mm ve hız dakikada 60 devir olarak ayarlanmıştır. Çizelge 3.2’de gösterildiği şekilde 50 döngü için 1 N’den 10 N’ye kadar bir yük aralığı uygulanmıştır. CS-10 ve CS-8 aşındırıcılar daha agresif malzemeler oldukları için daha düşük maksimum yükler kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Aşınma Deneylerinin Listesi

Kaplama	Aşındırıcı	Uygulanan Yükler
A, B, C	Keçe ped	1 N, 2 N, 5 N ve 10 N
A, B, C	CS-10	1 N, 2 N
A, B, C	CS-8	1 N, 2 N

Aşınma direnci testlerinin akabinde, kaplamalar deiyonize (DI) su ve bir fırça yardımı ile temizlenmiştir. Aşınma direnci testlerinden önce ve testlerden sonra kaplamaların yansımalarını ölçmek için bir Varian Cary 5000 UV-Vis-NIR spektrofotometresi kullanılmıştır. Dalga boyu aralığı 200 ila 1200 nm arası için ölçüm alınmıştır.

Kaplamaların yüzey bozulmasını gözlemlemek için bir Olympus CX41 optik mikroskop (x10) kullanılmıştır. Görüntüleri elde etmek için Infinity 2 kamera ve Infinity Analyze yazılımı kullanılmıştır. Kaplamaların neden olduğu yüzey hasarını analiz etmek için bir Jeol 7100 F ve Leo 1530 VP Saha Emisyon Tabancası (FEG)- SEM kullanılmıştır. Numuneler metal aparat üzerine gümüş ile yapıştırılmıştır ve ardından SEM ölçümlerinden önce kaplamalar püskürtmeli kaplayıcı kullanılarak paladyum-altın alaşımı ile kaplanmıştır. Aşınma direnci testlerinden önce ve sonra kaplamaların yüzey pürüzlülüğünü karakterize etmek için bir Bruker NPFlex SWLI cihazı kullanılmıştır. Üç boyutlu (3D) görüntüler oluşturulmuş ve ortalama karekök (rms) sapması (Rq) ve toplam yükseklik (Pt) dahil olmak üzere pürüzlülük profili parametreleri hesaplanmıştır.

3.3. DENEY SONUÇLARI

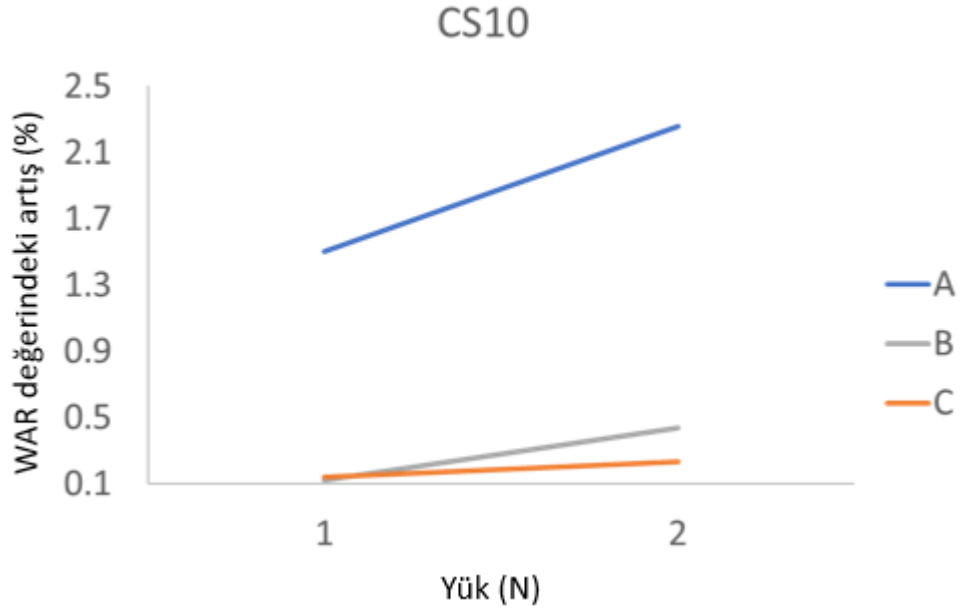
Bu çalışmada üç tip kaplama incelenmiştir. Kaplamalara, dakikada 60 devir hız ile 50 darbe 1 N yük altında uygulanmıştır. Keçe ped aşındırıcı malzeme uygulandığında, görünür olarak bir hasar tespit edilmemiştir. WAR ölçümleri, Çizelge 3.3'te gösterilmiş olup, kaplamaların R değerlerine bakıldığında ciddi bir düşüş olmadığı söylenebilmektedir.

Çizelge 3.3. Aşındırma Direnç Testleri Sonrası Kaplama A, B ve C için WAR Ölçümleri

Aşındırıcı	Yük	Kaplama A için WAR Artışı (%)	Kaplama B için WAR Artışı (%)	Kaplama C için WAR Artışı (%)
Keçe pedi	1 N	0.07	0	0
CS-10	1 N	1.5	0.12	0.14
CS-8	2 N	2.26	0.44	0.23
CS-8	1 N	3.2	0.7	0.61

CS-10 aşındırıcı malzeme, hafif ila orta düzeyde bir aşınmayı simüle etmektedir. Bu malzeme 1 N ve 2 N yükler altında aşınma direnci testi için kullanılmıştır. WAR'daki artış, çok katmanlı AR kaplamanın performansında hasarlar oluşmaya başladığını göstermektedir. CS-8 orta aşındırıcı ise WAR ölçümlerinde daha ciddi bir R artışı göstermiştir.

Şekil 3.3'te, 1 N ve 2 N yükler altında CS-10 ile aşınma testinden sonra üç kaplamanın WAR verilerinin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 3.3. CS-10 Malzemesinin 1 N ve 2 N Yükler Altındaki WAR Değişimi.

Daha fazla yük uygulandığı durumda tüm kaplamalarda WAR değerinde artış gözlemlenmiştir. Şekil 3.4'te, Kaplama C yüzeyinin optik mikroskop görüntüleri verilmektedir. 1 N yük altında kaplama C sırasıyla keçe ped, CS-10 ve CS-8 ile aşındırılmıştır.



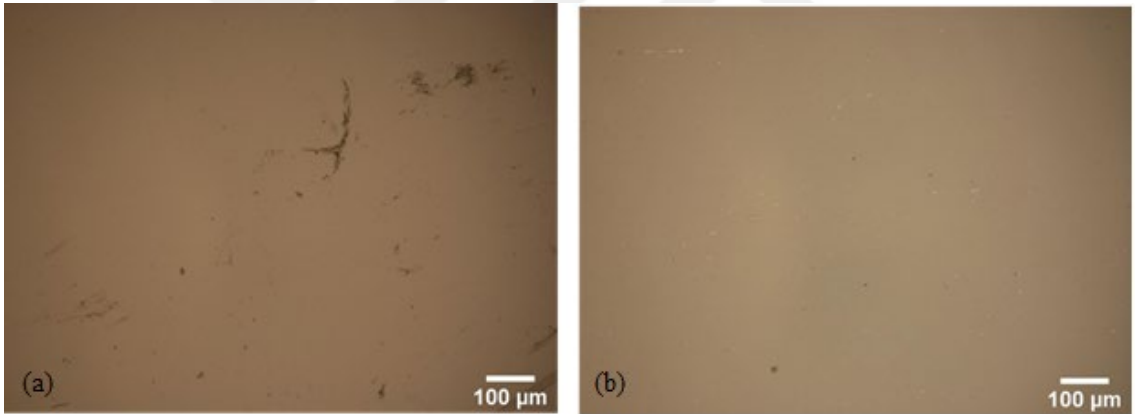
Şekil 3.4. 1 N Yük Altında a) Keçe Ped, b) CS-10 ve c) CS-8 ile Aşındırılan Kaplama C'nin Optik Mikroskop Görüntüleri.

Aşınma direnci testlerinden sonra kaplamaların ciddi bir hasar görmediğini görülmektedir. Kaplama B, 1 N yük altında keçe ped, CS-10 ve CS-8 ile aşındırılmıştır ve optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



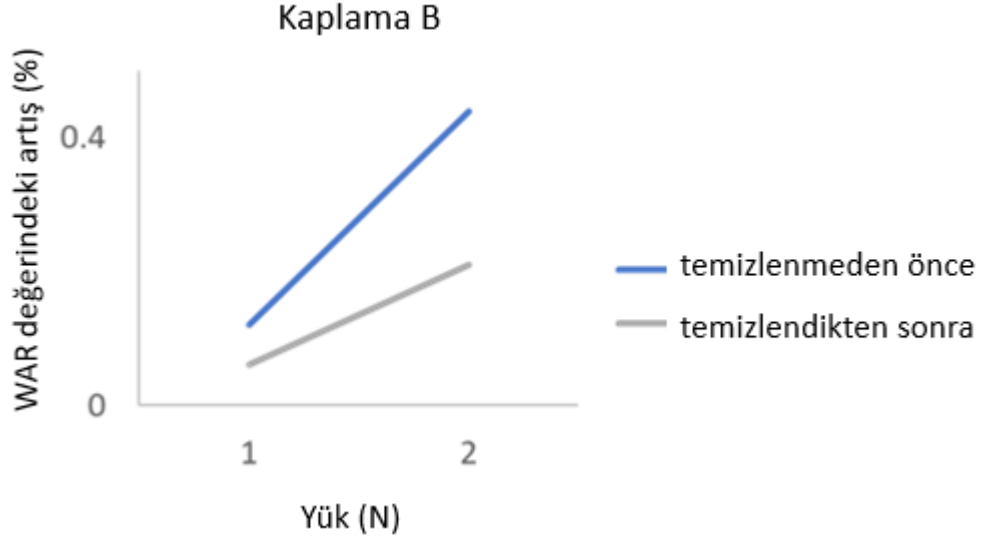
Şekil 3.5. 1 N Yük Altında a) Keçe Ped, b) CS-10 ve c) CS-8 ile Aşındırılan Kaplama B'nin Optik Mikroskop Görüntüleri.

ITO katmanı kullanılan Kaplama B'de daha fazla hasar gözlemlenmesi beklenmektedir. Bunun nedeni, ZrO_2 'ye göre daha düşük sertliğe sahip olmasıdır. Başka bir şekilde ifade etmek gerekirse ITO, ZrO_2 kadar çizilmeye karşı dayanıklı değildir. Aşınma testini takiben kaplamalar hem temizlenmeden önce hem de DI su ve fırça ile temizlendikten sonra optik mikroskop ile incelenmiştir. Şekil 3.6 (a), Kaplama B'nin 10 N yük altında keçe ped ile aşındırılmasından sonra elde edilmiştir. Şekil 3.6 (b)'de gösterildiği gibi, aşındırıcı malzemeden kalan artıklar temizlenmiştir ve hiçbir kusur görülmemiştir.



Şekil 3.6. Kaplama B'nin Optik Mikroskop görüntüleri (a) 10 N yük altında Keçe ped ile aşındıktan sonra, (b) DI su ile temizlendikten sonra.

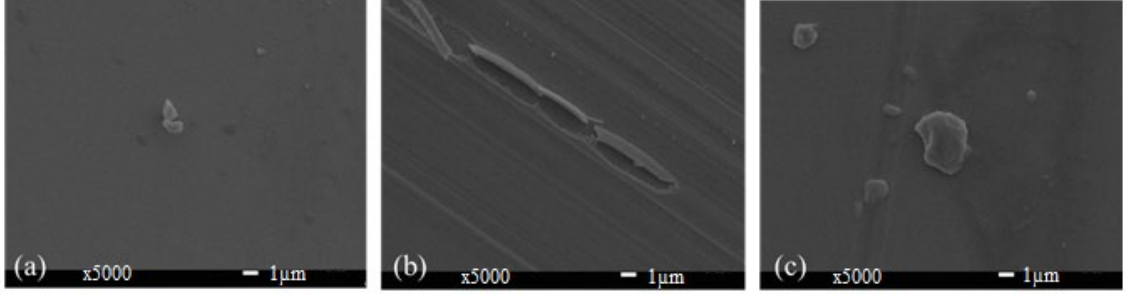
Temizleme, aşınmadan kalan tozu veya partikülleri temizleyerek kaplamanın performansını iyileştirmiştir. Ancak aşınma direnci testlerinden kaynaklanan çizikler kalıcı kusurlar olacaktır ve bunların su veya fırça ile temizlenmesi mümkün değildir. Şekil 3.7'de, CS-10 ile aşındırmadan sonra hem temizlenmeden önceki hem de sonraki WAR ölçümlerindeki artışı göstermektedir.



Şekil 3.7. Kaplama B için CS-10 aşındırıcı ile 1 N yük altında yapılan testten sonra WAR değerleri.

B kaplamasına 1 N ve 2 N'luk kuvvetler uygulanmıştır. Aşınma testinin hemen ardından WAR ölçülmüştür ve DI su ve bir fırça yardımı ile temizlenmiştir. Daha büyük yükler uygulandığında WAR'ın arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca numunelerin temizlenmesi, kalıntılardan arındırılması nedeniyle WAR'ın da azaldığı yani iyileştiği elde edilen sonuçlar arasındadır.

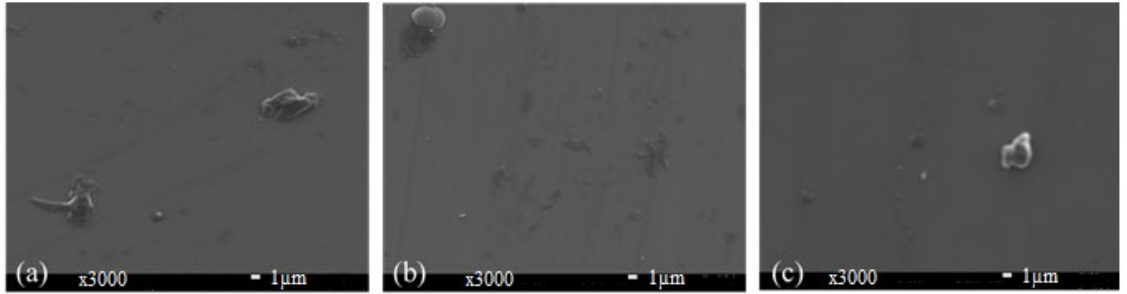
Kaplama B, 1 N ile 10 N yükler altında bir keçe ped ve ayrıca 1 N yük altında CS-8 ile aşındırılmıştır. Aşındırılan yüzeylerin SEM görüntüleri Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Keçe ped yumuşak bir malzemedir ve PV temizleme işlemi için en uygun aşındırıcıdır. Fakat, bu kaplamaların performansını ve dayanıklılığını karşılaştırmak ve test etmek için bir dizi daha aşındırıcı malzeme gereklidir. C-10 ve C-8, endüstride kullanılan daha agresif aşındırıcı malzemelerdir. Bu tipler kaplamalara ciddi zararlar verir. 1 N ve 2 N yükler uygulandığında kaplamalarda hasarlar oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple testler 2 N'den yüksek yüklerle yapılmamıştır.



Şekil 3.8. Kaplama B üzerinde aşınmadan sonra kusurları gösteren SEM görüntüleri (a) Keçe ped 1 N yük altında, (b) Keçe ped 10 N yük altında, (c) CS-8 1 N yük altında.

Keçe ped aşındırıcı 1 N yük altında uygulandığında Kaplama B’de herhangi bir kusur gözlemlenmemiştir. Ancak 10 N yük uygulandığında kaplama hasar görmüş ve soyulma görülmüştür. 1 N yük altındaki CS-8 aşındırıcı ile yapılan testte ise kaplamada çizikler oluşmuştur.

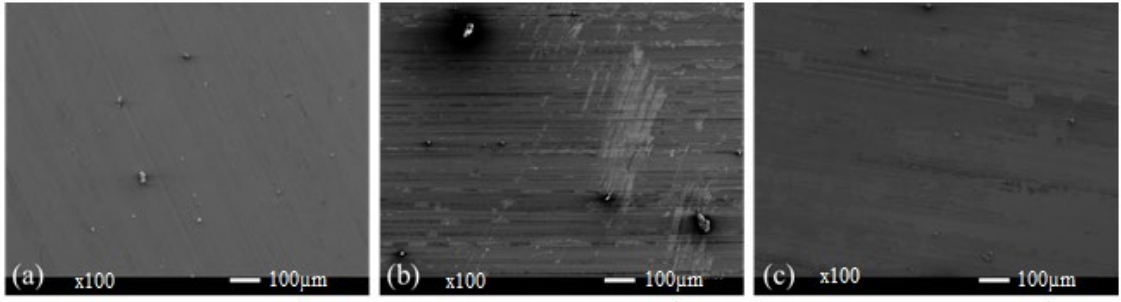
Kaplama C üzerindeki temizleme etkisini simüle etmek için lineer aşınma test cihazı ile keçe ped ve CS-8 aşındırıcı malzemeleri kullanılmıştır. Keçe ped aşındırıcı 1 N ve 10 N yükler altında uygulanmıştır ve CS-8 1 N yük altında test edilmiştir. SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 3.9 (a), (b) ve (c)’de gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Kaplama C üzerinde aşınma testinden sonraki SEM görüntüleri (a) Keçe ped 1 N yük altında, (b) Keçe ped 10 N yük altında, (c) CS-8 1 N yük altında.

Kaplama B’de ciddi çizikler görülürken, Kaplama C’nin daha yüksek aşınma direncine sahip olması nedeniyle aşınma testlerinden sonra daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir.

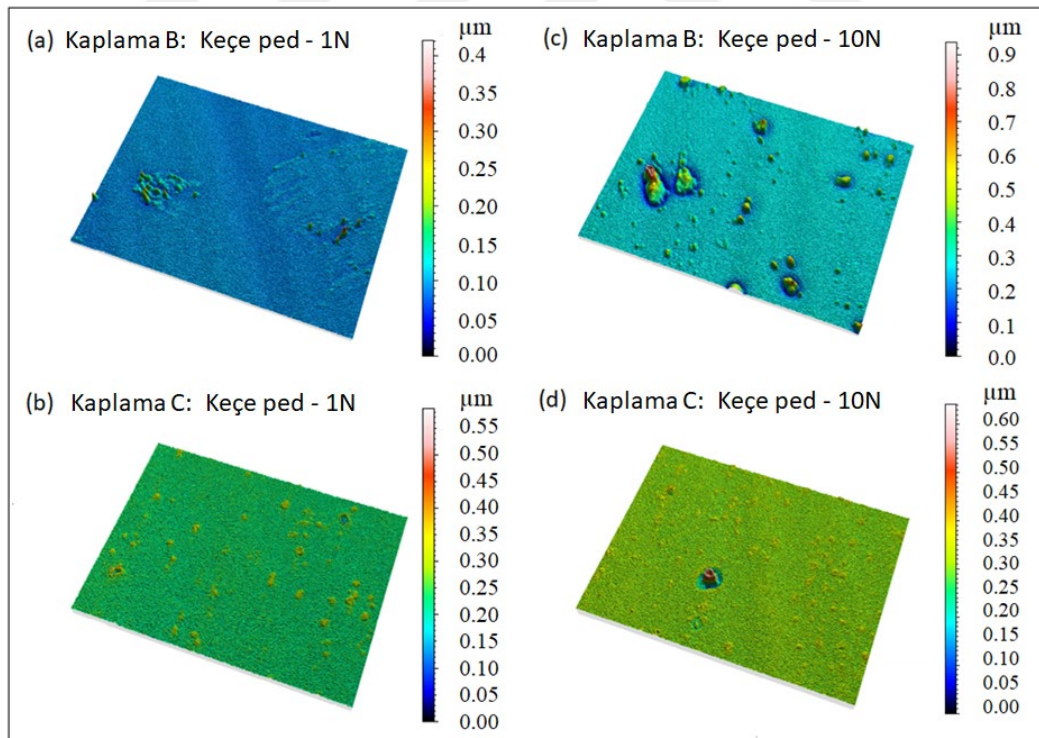
Şekil 3.10, 1 N yük altında CS-10 ile aşındırıldıktan sonra üç kaplamanın SEM görüntülerini göstermektedir.



Şekil 3.10. CS-10 ile aşınmadan sonra (a) Kaplama A, (b) Kaplama B ve (c) Kaplama C üzerindeki kusurları gösteren SEM görüntüleri (1 N kuvvet uygulaması).

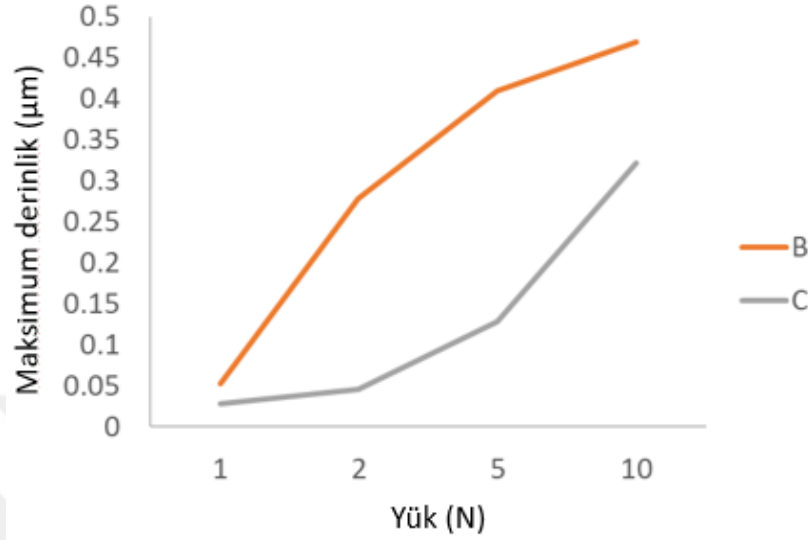
Kaplama B’de birkaç çizik olduğu gözlemlenmiştir. A ve C kaplamalarında daha küçük kusurlar ve çizikler görülmüştür. Ancak bu kaplamalar B kaplamasındaki bozunmalara göre daha tutarlıdır bunun nedeni ITO'dan daha sert bir malzeme olan ZrO_2 içermeleridir.

SWLI cihazı, aşınmadan sonra Kaplama A, B ve C’nin yüzey pürüzlülüğünü analiz etmek için kullanılmıştır. Kaplamalardaki çizikleri gözlemlemek için 3D görüntüler elde edilmiştir. Şekil 3.11, uygulanan 1 N ve 10 N yükler altında keçe ped ile aşınmadan sonra Kaplama B ve C’nin pürüzlülüğünü göstermektedir.



Şekil 3.11. (a) Kaplama B 1 N yük altında, (b) Kaplama C 1 N yük altında, (c) Kaplama B 10 N yük altında ve (d) Kaplama C ile 10 N yük altında Aşınma sonrası çizikleri gösteren SWLI 3D görüntüleri.

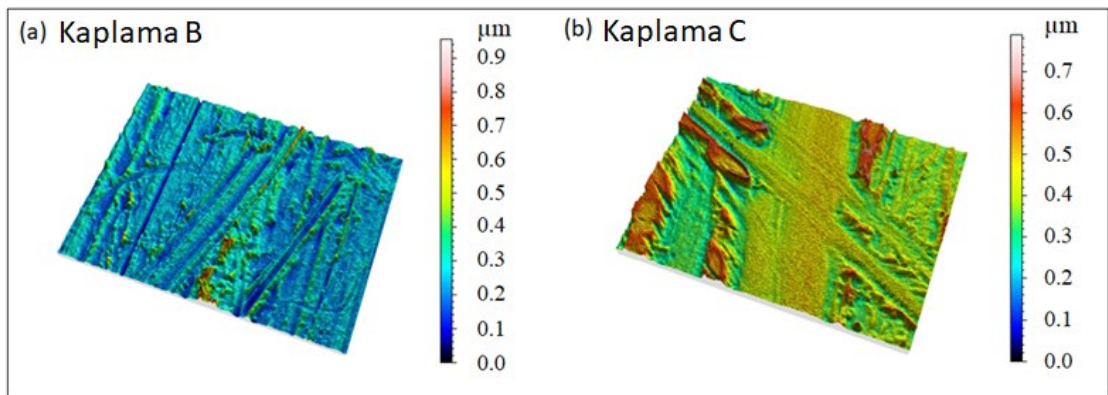
Kaplamalarda 1 N yük altında bozulma yada pürüz görülmemiştir, ancak daha yüksek bir yük altında pürüzlülük artmıştır. Farklı yükler altında aşınma sonrası Kaplama B ve C üzerinde oluşan çiziklerin maksimum derinliği Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Aşınma testinde uygulanan farklı yük değerlerine göre oluşan çiziklerin maksimum derinlik profili.

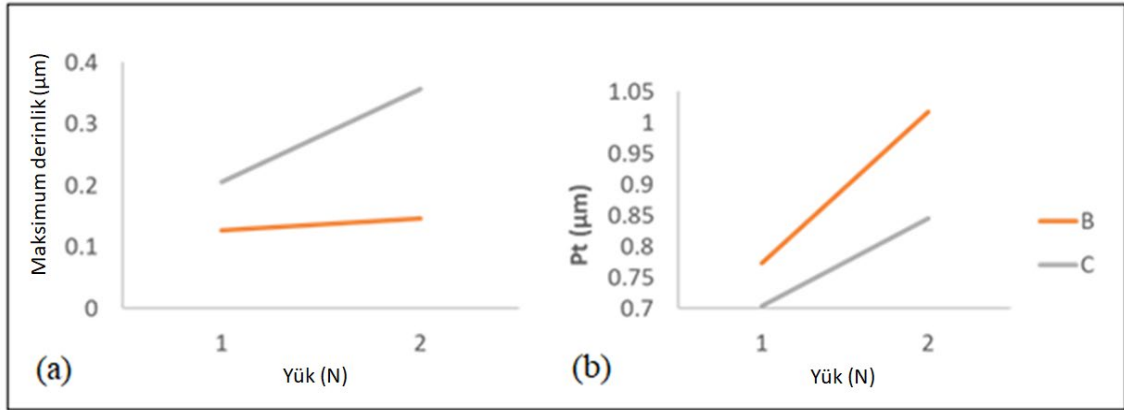
Daha büyük yükler uygulandığında çiziklerin derinliğinin de arttığı gözlemlenmiştir.

1 N yük altında CS-8 ile aşınmadan sonra kaplama B ve kaplama C’nin pürüzlülüğünü karşılaştırmak için SWLI görüntüleri Şekil 3.13’te gösterilmiştir. CS-8 agresif bir malzeme olması sebebiyle, her iki kaplamada da çizikler görülmektedir.



Şekil 3.13. 1 N yük altında CS-8 ile aşındırıldıktan sonra (a) Kaplama B ve (b) Kaplama C üzerindeki çizikleri gösteren SWLI görüntüleri.

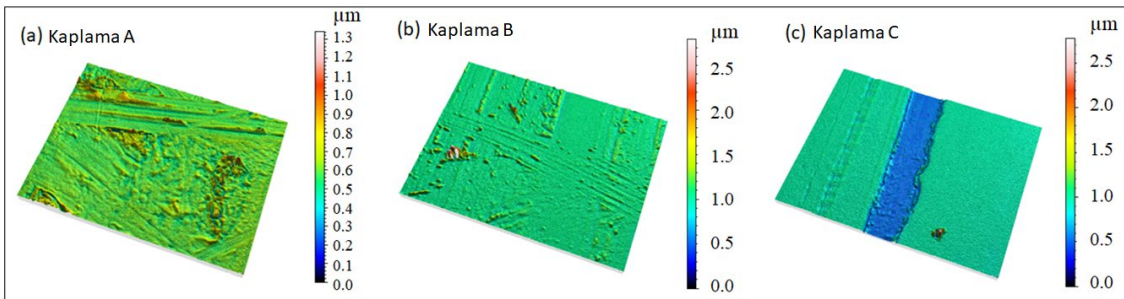
1 N ve 2 N yükler altında CS-8 ile aşındırılan Kaplama B ve C'nin çiziklerinin maksimum derinliği ve toplam yüksekliği Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Kaplama B ve C için uygulanan yüklerin bir fonksiyonu olarak (a) Maksimum derinlik ve (b) Pt profili.

Daha büyük yükler uygulandığında çiziklerin derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum derinlik kaplama C ve A için kaplama B'ye kıyasla daha yüksektir. Ayrıca, Pt değeri aşınma testi sırasında daha yüksek yükler uygulandığında bir artış göstermiştir. Kaplama B'nin Pt değeri kaplama C'den daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Sadece kaplamadaki çizikler değil; kaplama soyulup yukarı doğru kıvrılmamıştır, aşındırıcı malzemeden kalabilecek parçacıklar veya toz gibi kalıntılar da Pt'yi etkileyebilecek durumlardır.

Her üç kaplamanın da SWLI görüntüleri Şekil 3.15'te karşılaştırılmıştır ve şaşırtıcı bir şekilde kaplama A ve C'de daha derin çizikler varken, kaplama B'de daha fazla çizik olmasına rağmen çiziklerin o kadar derin olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 3.15. 1 N yük altında CS-10 ile aşınma sonrası (a) Kaplama A, (b) Kaplama B ve (c) Kaplama C'nin çiziklerini gösteren SWLI görüntüleri.

1 N yük altında CS-10 ile aşındırılan her üç kaplamanın da üzerindeki çizikler için genişlik, maksimum derinlik ve ortalama derinlik parametreleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. SWLI cihazı ile çiziklerin profil parametreler ölçümleri.

Parametreler	Kaplama A	Kaplama B	Kaplama C
En (μm)	5.364	0.612	5.324
Maksimum derinlik (μm)	0.323	0.075	0.445
Ortalama derinlik (μm)	0.265	0.071	0.423

Kaplama A ve C'deki çiziklerin genişliği 5 μm 'nin üzerindeyken, Kaplama B'de sadece 0,612 μm 'dir. Daha agresif aşındırıcı malzemeler kullanıldığında veya daha yüksek yükler uygulandığında pürüzlülüğün arttığı tespit edilmiştir.

3.4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bir magnezyum florür (MgF_2) AR kaplaması NREL (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı/National Renewable Energy Laboratory) tarafından tasarlanmıştır, ancak daha geniş bir dalga boyunda etkili değildir [57]. Ayrıca MgF_2 kaplama dış ortamda kullanım için dayanıklı değildir. ZrO_2 ve SiO_2 kaplamalar daha dayanıklıdır ve halihazırda oftalmik endüstrisinde kullanılmaktadır [58]. Döndürerek kaplamalı ZrO_2 ve spreyle biriktirilmiş titanyum dioksit (TiO_2) çok katmanlı AR kaplamaları, c-Si güneş pilleri için elde edilmiştir [59]. Bununla birlikte, darbeli DC magnetron püskürtme, daha önce tek tip ve yoğun çok katmanlı AR kaplamaları biriktirmek için kullanılmamıştı. Newkirk ve arkadaşları 4 katmanlı bir $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ olan kaplama A'nın dayanıklılığına ilişkin bulgularla benzer sonuçlar gözlemlemiştir [60]. Biz bu çalışmaya, 4 katmanlı SiO_2/ITO 'dan oluşan kaplama B ve 6 katmanlı $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ olan kaplama C'yi de ekleyerek sonuçları analiz etmek ve karşılaştırmak istedik. 1 N yük altında keçe ped ile aşındırılan kaplamaların WAR değerinde kayda değer bir değişiklik gözlenmedi. Bununla birlikte, testler sırasında uygulanan kuvvetin artırılması, tüm kaplamalar için WAR'ı arttırdı. CS-10 ve CS-8 aşındırıcıların kullanılması, çok katmanlı AR kaplamaların WAR değerlerini arttırmıştır. Optik mikroskop görüntüleri, kaplama C'de küçük çizikler meydana geldiğini gösterirken, kaplama B'de daha ciddi hasarlar gözlemlemiştir. Kaplama B ve C'nin yüzey pürüzlülüğü, 1 N yük altında keçe ped ile aşındırıldıktan sonra pürüzsüzdü, ancak bir CS-8 aşındırıcı kullanıldığında pürüzlülük ve çiziklerin derinliği arttı. Kaplama A ve C üzerindeki çiziklerin maksimum derinliğinin kaplama B'ye kıyasla daha yüksek olması

beklenmiyordu. Ancak kaplama B’de daha fazla sayıda çizik gözlemlendi. Bu çalışmaya göre, kaplama B’ye kıyasla aşınma direnci testinde kaplama A ve C’nin daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, daha önce de bahsettiğimiz üzere çok katmanlı AR kaplamalar, tek katmanlı sol-gel AR kaplamalardan daha esnek ve çizilmeye karşı dayanıklıdır.



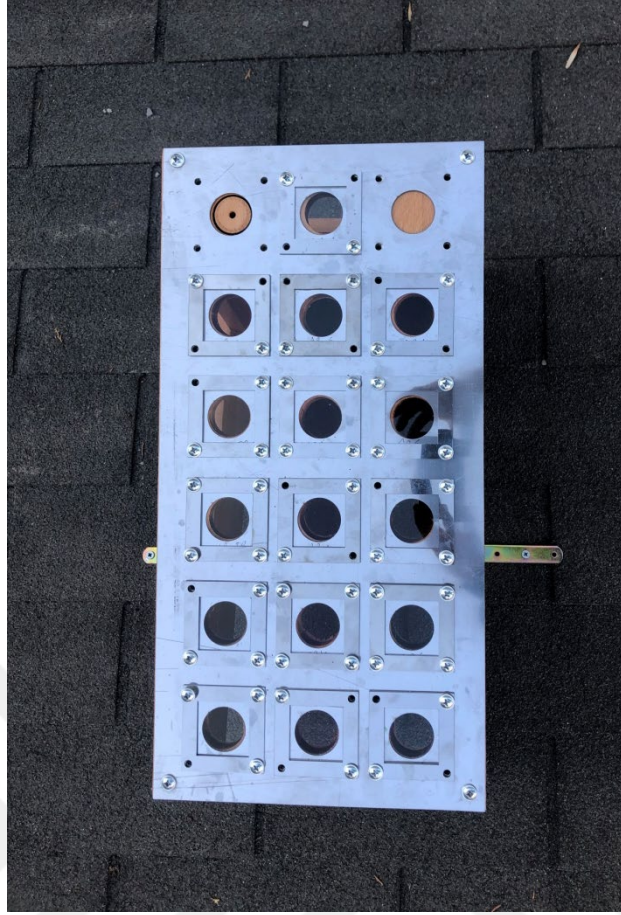
4. DENEYSEL ÇALIŞMA 2 - DIŞ ORTAM DENEYİ

4.1. GİRİŞ

Bir önceki bölümde yapılan çalışmalardan sonra dış ortamda çalışmaların yapılması planlanmıştır. Dış ortamda 30derecelik açıyla kurulan iskele üzerine yerleştirilen kaplamalar Ankara’da bir evin çatısına konularak açık hava koşullarına maruz bırakılarak 5 ay boyunca bekletilmiştir. İlgili iskele Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Dış ortam deneyi için kullanılan kaplamaların iskeledeki yerleşimi.

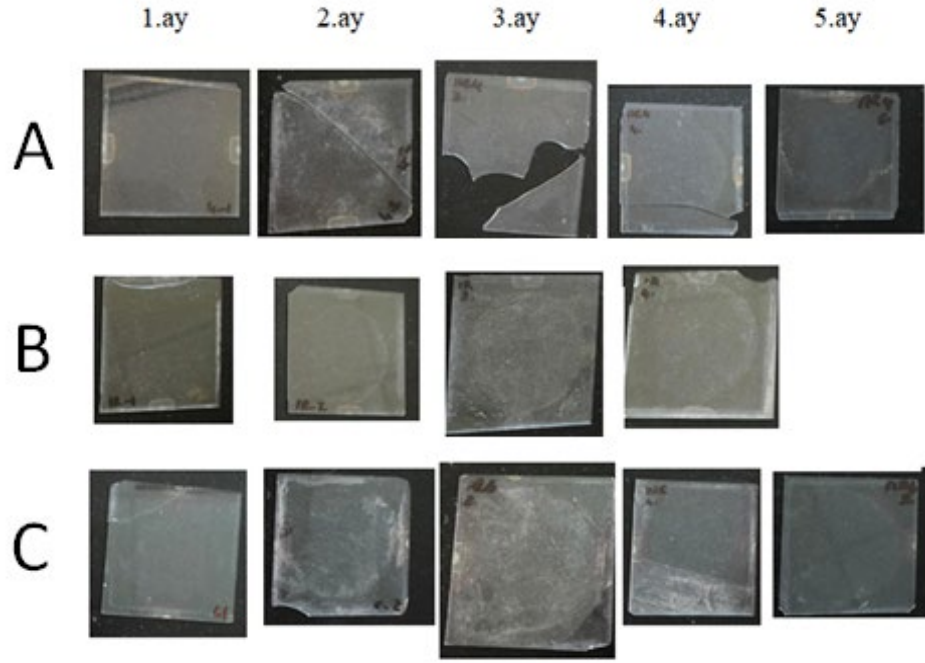


Şekil 4.2. Dış ortam deneyinde kullanılan iskele.

Her ay bir kaplama aparat üzerinden alınarak temizlenmiştir. 1.ay sonu 28 Mayıs 2021 tarihinde birer kaplama alınmıştır. 2. ay sonunda 28 Haziran 2021 tarihinde her kaplamadan birer tane toplanmıştır. 3. ay sonu yani 28 Temmuz tarihinde birer kaplama daha alınmıştır. 28 Ağustos tarihinde kaplamalardan birer adet daha toplanmıştır. Son olarak ta 28 Eylül tarihinde 5. set kaplamalar toplanmıştır.

4.2. DIŞ ORTAM DENEY SONUÇLARI DEĞERLENDİRMESİ

Dış ortamda bekletilen kaplamalardan her ay sonunda alınan numunelere ilişkin birtakım ölçümler ve analizler yapılmıştır. RoA, WCA, ve R ölçümleri ve ayrıca SEM analizleri yapılmıştır. Kaplamaların temizlendikten sonraki fotoğrafları Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Kaplamalardaki lekeler ve hava koşullarının bıraktığı etkiler fotoğraflarda net şekilde görülmektedir. Daha ayrıntılı analizler de ilerleyen kısımlarda mevcuttur.



Şekil 4.3. Kaplamaların temizlendikten sonraki fotoğrafları.

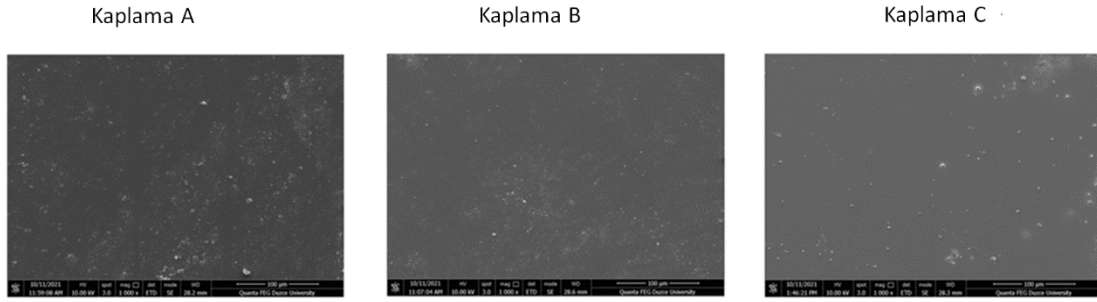
RoA ölçümleri kaplamanın hidrofobikliğini yitirmediğini görmemiz için gereklidir. Bunun için kaplamaların üzerine 10 µl su damlatılarak RoA açıları ölçülmüştür. Çizelge 4.1’de gösterildiği üzere kaplamalar dış ortam koşullarına maruz kaldıkça hidrofobiklikleri değişmektedir. 6 katmanlı AR kaplama en dayanıklı olandır. Fakat genele baktığımızda hızlı bir düşüş gözlemlenmektedir.

Çizelge 4.1. Kaplamaların dış ortamdan toplandıktan sonraki RoA değerleri.

AY	4 KATMANLI AR KAPLAMA A	6 KATMANLI AR KAPLAMA C	AR IR KAPLAMA B
1	32.1°	72°	56.7°
2	25.9°	47°	25.4°
3	19.6°	42.1°	29.1°
4	18.3°	25.8°	17.6°
5	14.8°	19.6°	-

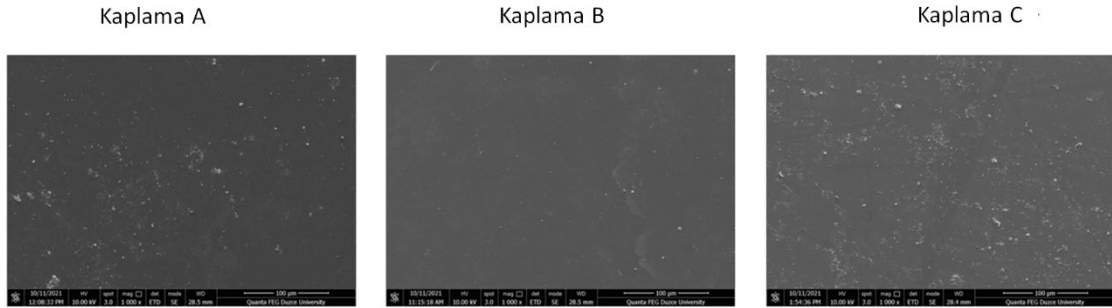
SEM analizi kaplamanın yüzeyindeki zamanla oluşabilecek soyulma veya aşınmaları göstermektedir. 1.ay sonunda yapılan SEM analiz sonuçları Şekil 4.4’te gösterilmektedir.

SEM analizine göre 1.ay sonunda kaplamaların iyi durumda olduğu görülmektedir.



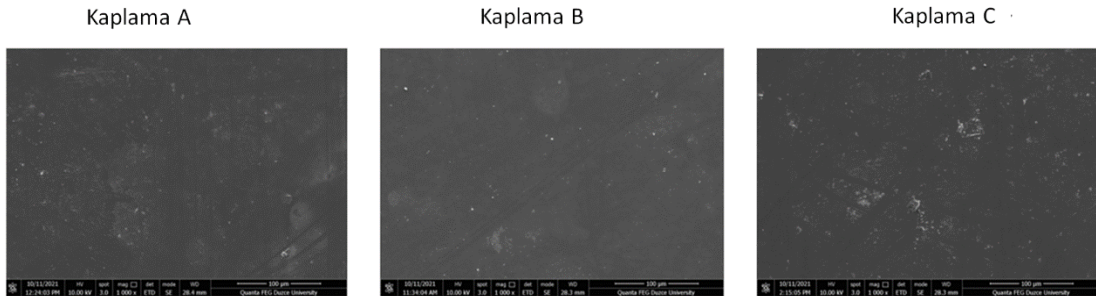
Şekil 4.4. Tüm Kaplamaların 1.ay sonunda SEM Analiz Sonuçları.

2.ay sonunda yapılan SEM Analiz sonuçları Şekil 4.5'te gösterilmektedir. SEM analizine (x1000) göre 2.ay sonunda alınan kaplamalarda 1.ay sonunda yapılan analize göre az da olsa aşınma veya bozunma olduğu ancak AR IR kaplamanın diğer kaplamalara göre daha iyi durumda olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5. Tüm Kaplamaların 2.ay sonunda SEM Analiz Sonuçları.

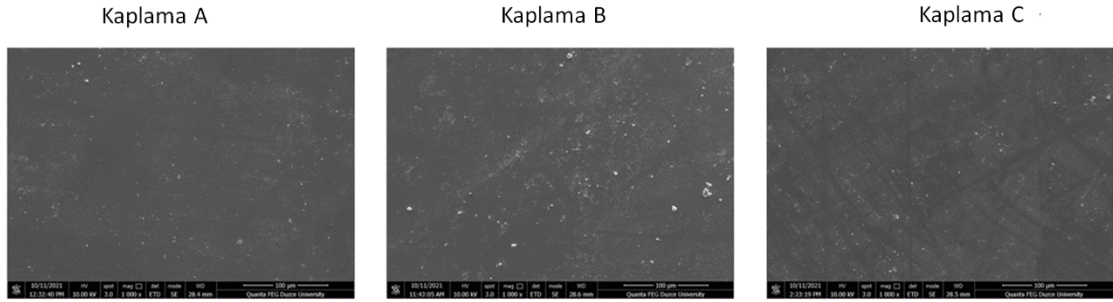
3.ay sonunda toplanan kaplamalara yapılan SEM Analiz sonuçları (x1000) Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Analize göre 3.ay sonunda aşınmaların arttığı görülmektedir.



Şekil 4.6. Tüm Kaplamaların 3.ay sonunda SEM Analiz Sonuçları.

4.ay sonunda alınan kaplamalara yapılan SEM Analiz sonuçları Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Analize göre 4.ay sonunda aşınmaların daha da arttığı ve en çok aşınma

görünen kaplamanın AR/IR olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise IR malzemesinin yumuşak olmasıdır.



Şekil 4.7. Tüm Kaplamaların 4.ay sonunda SEM Analiz Sonuçları.

Çizelge 4.2 incelendiğinde bütün kaplamalar için WCA değerinde düşüş olduğu gözlenmektedir. 4 katmanlı kaplama A ilk aylarda büyük bir değişim göstermese de 4. ayda büyük bir düşüş göstermiştir. 6 katmanlı kaplama C ilk aylarda da büyük bir düşüş göstermiştir. 4 ve 6 katmanlı kaplamalarda kullanılan malzemeler aynıdır, fakat katman sayısı ve kalınlığı değişiklik göstermiştir. İçerisinde ITO bulunan kaplama B şaşırtıcı şekilde WCA değerinde ilk aylarda büyük bir düşüş göstermemiştir. 4. ayda ise WCA değeri diğer aylara göre daha azdır.

Çizelge 4.2. WCA ölçümleri.

AY	4 KATMANLI AR KAPLAMA A	6 KATMANLI AR KAPLAMA C	AR IR KAPLAMA B
1	49.5°	42.6°	45.9°
2	44.1°	35.3°	41.4°
3	48.1°	34.4°	40.6°
4	28.7°	30.6°	29.7°

Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere R değerlerinde büyük bir değişiklik meydana gelmemiştir. 6 katmanlı kaplama C'nin R değeri diğer kaplamalara göre daha az değişiklik göstermiştir. Deneylerin tekrarlanması ve daha uzun süreli dış ortam koşullarına maruz bırakılması elde edilen değerlerin doğruluğunu onaylayacaktır. Sonraki aylarda daha dramatik bir değişim gösterip göstermeyeceği incelenmelidir.

Çizelge 4.3. Spektrofotometre ile Reflektans ölçüm sonuçları.

Açık Havada Kaldığı Süre	WAR Değerindeki Yükselme (%)		
	KAPLAMA A	KAPLAMA B	KAPLAMA C
1 ay	0.1	0.1	0
2 ay	0.19	0.38	0.02
3 ay	-0.09	-0.1	0.1
4 ay	0.21	0	0

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çok katmanlı AR kaplamaların performansını ve dayanıklılığını geliştirmek, PV endüstrisi için önemlidir. Bu kaplamalar yansıma kayıplarını azaltabilir ve modül verimliliğini artırabilir. Bu kaplamaların çevresel streslere dayanması ve bakımı sırasında uygulanan temizleme işlemlerine dayanacak şekilde dayanıklı olması önemlidir. Bu çalışmada, temizleme işlemlerinin çok katmanlı AR kaplamalar üzerindeki etkisini araştırmak için farklı yükler altında çeşitli aşındırıcılar ile lineer aşınma test cihazı kullanılarak üç farklı kaplama incelenmiştir. Darbeli DC ile hazırlanan bu kaplamalar, 4 katmanlı $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ (Kaplama A), 4 katmanlı SiO_2/ITO (Kaplama B) ve 6 katmanlı $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ 'dir (Kaplama C). Kaplama A ve C'nin, Kaplama B'ye kıyasla daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar, daha agresif aşındırıcıların veya daha yüksek yüklerin kullanılmasının daha fazla yüzey hasarına ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olduğunu göstermiştir. Lineer aşınma direnci testinden sonra tüm kaplamalar için WAR değerinin arttığı bildirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, Kaplama A ve C'nin, ITO'dan daha fazla çizilmeye dayanıklı olan ZrO_2 içerdikleri için Kaplama B'ye kıyasla daha yüksek aşınma direncine sahip oldukları test ve analizler ile doğrulanmıştır. Bununla birlikte çok katmanlı AR kaplamalarının tümü, aşınma hasarına karşı savunmasız olan tek katmanlı sol-jel AR kaplamalarından daha esnek ve çizilmeye karşı daha dayanıklıdır. Bunda darbeli DC magnetron püskürtme yöntemi ile kaplamaların hazırlanmasının da etkisi büyüktür. Bu cihazın en önemli artıları sağlam ve pürüzsüz kaplamalar meydana getirebilmesidir.

Tezin sonraki deney aşamasında sadece aşınma testi değil dış ortamda tüm hava koşullarına (rüzgar, UV ışınları, toz, yağmur, vb. gibi) 7/24 maruz bırakılan kaplamaların incelenmesiydi. Elimizdeki kısıtlı sayıda kaplama ile yapılan analizler kaplamaların hava koşullarına 5 ay boyunca iyi bir direnç gösterdiği görülmektedir. PV panellerinin ömrünün 20-25 sene civarı olduğu düşünüldüğünde bu kaplamaların da uzun ömürlü olması gerekmektedir. Bu çalışmada 5 ay süre ile ciddi bir aşınma görülmemesi pozitif bir sonuçtur, fakat dış ortam koşullarına daha uzun süreler bırakılıp uzun vadede kaplamanın üzerindeki etkileri incelenmelidir.

PV panellerinin performansının ve ömrünün iyileşmesi cam ve modül üreticileri tarafından bu kaplamaların benimsenmeleri ile daha yaygın kullanımını sağlayacaktır.

Ayrıca bu sistemler panellerin üzerinde oluşabilecek kirleri de engelleyeceği için panellerin temizlik maliyetini de düşürecek ve temizlemek için kullanılan su miktarında da azalma sağlayacaktır.



6. KAYNAKLAR

- [1] BP, “Statistical review of world energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy,” *BP Energy Outlook 2021*, c. 70, ss. 8–20, 2021.
- [2] E. Fenerci, “Fotovoltaik sistemlerin karşılaştırılmalı yaşam döngüsü değerlendirmesi ve maliyet analizi,” Yüksek Lisans tezi, Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2019.
- [3] A. S. Sarkın, N. Ekren, ve Ş. Sağlam, “A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels”, *Solar Energy*, c. 199, sayı Haziran, ss. 63–73, 2020.
- [4] Z.-J. Dong, C. Lu, H. Yu, K. Shen, K.-S. Zhang, J. Xia, S.-Q. Xiong, Z.-G. Liu, X.-Y. Zhang, ve B. Wang, “Low emissivity double sides antireflection coatings for silicon wafer at infrared region,” *Journal of Alloys and Compounds*, ss. 729–735, 2018.
- [5] G. Womack, “Anti-reflection coatings and optical interference in photovoltaics,” Doktora tezi, Mekanik, Elektrik ve İmalat Mühendisliği, Loughborough Üniversitesi, Loughborough, Birleşik Krallık, 2017.
- [6] A. Vincent, S. Babu, E. Brinley, A. Karakoti, S. Deshpande, ve S. Seal, “Role of catalyst on refractive index tunability of porous silica antireflective coatings by sol-gel technique,” *Journal of Physical Chemistry C*, c. 111, sayı 23, ss. 8291–8298, 2007.
- [7] S. Chhajed, M. F. Schubert, J. K. Kim, ve E. F. Schubert, “Nanostructured multilayer graded-index antireflection coating for Si solar cells with broadband and omnidirectional characteristics,” *Applied Physics Letters*, c. 93, sayı 25, 2008.
- [8] F. Prieto-Castrillo, N. Núñez, ve M. Vázquez, “Warranty assessment of photovoltaic modules based on a degradation probabilistic model,” *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, c. 28, sayı 12, ss. 1308–1321, 2020.
- [9] P. C. Sevinç, F. S. Albayrak, M. Bağrıyanık, ve A. Batman, “Lifetime and efficiency concerns of a photovoltaic power,” *ECRES 2015 3. European Conference on Renewable Energy Systems*, ss. 1–6, 2015.
- [10] B. M. Phillips ve P. Jiang, “Biomimetic antireflection surfaces,” *Engineered Biomimicry, Florida, USA Elsevier*, ss. 305–331, 2013.
- [11] S. -Y. Lien, D. -S. Wu, W. -C. Yeh, ve J. C. Liu, “Tri-layer antireflection coatings (SiO₂/SiO₂-TiO₂/TiO₂) for silicon solar cells using a sol-gel technique,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, c. 90, sayı 16, ss. 2710–2719, 2006.
- [12] U. Mehmood, F. A. Al-Sulaiman, B. S. Yilbas, B. Salhi, S. H. A. Ahmed, ve M. K. Hossain, “Superhydrophobic surfaces with antireflection properties for solar applications: A critical review,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, c. 157, ss. 604–623, 2016.
- [13] G. San Vicente, R. Bayón, N. Germán, ve A. Morales, “Long-term durability of sol-gel porous coatings for solar glass covers,” *Thin Solid Films*, c. 517, sayı 10, ss. 3157–3160, 2009.
- [14] N. Shanmugam, R. Pugazhendhi, R. M. Elavarasan, P. Kasiviswanathan, ve N. Das, “Anti-reflective coating materials: A holistic review from PV perspective,” *Energies*, c. 13, sayı 10, 2020.

- [15] D. Bouhafs, "Design and simulation of antireflection coating systems for optoelectronic devices: Application to silicon solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, c. 52, ss. 79–93, 1998.
- [16] G. Womack, P. M. Kaminski, A. Abbas, K. Isbilir, R. Gottschalg, ve J. M. Walls, "Performance and durability of broadband antireflection coatings for thin film CdTe solar cells," *Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces and Films*, c. 35, sayı 2, ss. 021201, 2017.
- [17] S. B. Khan, S. Irfan, Z. Zhuanghao, ve S. L. Lee, "Influence of refractive index on antireflectance efficiency of thin films," *Materials (Basel)*, c. 12, sayı 9, 2019.
- [18] J. M. Walls, "Optical coatings for ophthalmic lenses by reactive magnetron sputtering," *Optical Interference Coatings*, Banff, Kanada, 2001.
- [19] K. İşbilir, "The performance and durability of anti-reflective and anti-soiling coatings," Doktora tezi, Mekanik, Elektrik ve İmalat Mühendisliği, Loughborough Üniversitesi, Loughborough, Birleşik Krallık, 2019.
- [20] J. D. Leon, J. J. D. Hiszpanski, A. M. Bond, ve T. C. Kuntz, "Design rules for tailoring antireflection properties of hierarchical optical structures," *Advanced Optical Materials*, c. 5, sayı 13, 2017.
- [21] J. S. Leem ve J. W. Yu, "Artificial inverted compound eye structured polymer films with light-harvesting and self-cleaning functions for encapsulated III–V solar cell applications," *The Royal Society of Chemistry*, c. 5, ss. 60804–60813, 2015.
- [22] M. Y. Kim, S. Jung, U. T. Kim, S. -K. Lee, J. -H. Choi, H. S. Kim, ve C. -S. Jeong, "Nanostructured multifunctional surface with antireflective and antimicrobial Characteristics," *ACS Applied Materials & Interfaces*, c. 7, ss. 326–331, 2015.
- [23] H. Peng, Y. -J. Huang, ve H. -X. Xie, "Rapid fabrication of antireflective pyramid structure on polystyrene film used as protective layer of solar cell," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, ss. 98–105, 2017.
- [24] H. -C. Kuo, S. -Y. Hsieh, M. -Y. Han, H. -V. Lai, F. -I. Chuang, T. -Y. Yu, P. Lin, ve C. -C. Kuo, "Flexible-textured polydimethylsiloxane antireflection structure for enhancing omnidirectional photovoltaic performance of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells," *Optics Express*, c. 22, sayı 3, ss. 1-8, 2014.
- [25] Z. V. P. Buskens, M. Burghoorn, ve M. C. D. Mourad, "Antireflective coatings for glass and transparent polymers," *Langmuir*, c. 32, ss. 6781–6793, 2016.
- [26] M. Françon, *Optical Interferometry*, 1. baskı. New York, Amerika Birleşik Devletleri: Academic Press, 1966.
- [27] A. E. Conrady, "Fundamental equations," *Applied Optics and Optical Design Part One*, 1. baskı. Londra, Birleşik Krallık: Oxford University Press, 1929, böl. 1, ss. 12-27.
- [28] S. R. H. K. Raut, V. A. Ganesh, ve A. S. Nair, "Anti-reflective coatings: A critical, in depth review," *Energy & Environmental Science*, c. 4, sayı 10, ss. 3779-3804, 2011.
- [29] G. Womack, K. Isbilir, F. Lisco, G. Durand, A. Taylor, ve J. M. Walls, "The performance and durability of single-layer sol-gel anti-reflection coatings applied to solar module cover glass," *Surface & Coatings Technology*, c. 358, sayı Kasım, ss. 76–83, 2019.
- [30] C. K. H. S. Woo ve S. Kim, "Optical and structural properties of TiO₂ and MgF₂ thin films by plasma Ion-assisted deposition," *Journal of the Korean Physical Society*, c. 45, sayı 1, ss. 99-107, 2004.
- [31] L. Z. C. Tao, H. Yan, X. Yuan, Q. Yin, J. Zhu, W. Ni, ve L. Yan, "Sol-gel based antireflective coatings with superhydrophobicity and exceptionally low refractive indices built from trimethylsilanized hollow silica nanoparticles," *Colloids and*

- Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, c. 509, ss. 307–313, 2016.
- [32] D. R. U. B. Fabes ve B. J. J. Zelinski, “Sol-gel derived ceramic coatings,” *Ceramic Films Coatings*, ss. 224–284, 1993.
- [33] H. T. H. Z. Guo, T. Pereira, O. Choi, ve Y. Wang, “Surface functionalized alumina nanoparticle filled polymeric nanocomposites with enhanced mechanical properties,” *Journals of Materials Chemistry*, c. 16, sayı 27, ss. 2800-2808, 2006.
- [34] G. P. M. Pagliaro ve R. Ciriminna, “Silica-based hybrid coatings,” *Journals of Materials Chemistry*, c. 19, sayı 20, ss. 3116-3126, 2009.
- [35] C. J. Brinker ve G. W. Scherer, *Sol-Gel Science*, 1. baskı. New York, Amerika Birleşik Devletleri: Academic Press, 1990.
- [36] H. A. Macleod, “Multilayer antireflection coatings,” *Thin-Film Optical Filters*, 3.baskı. Bristol, Birleşik Krallık: Institute of Physics Publishing, 2001, böl. 3.2.3, ss. 118-135.
- [37] A. T. D. Ristau, S. Günster, S. Bosch, A. Duparré, E. Masetti, J. Ferré-Borrull, G. Kiriakidis, F. Peiró, ve E. Quesnel, “Ultraviolet optical and microstructural properties of MgF₂ and LaF₃ coatings deposited by ion-beam sputtering and boat and electron-beam evaporation,” *Applied Optics*, c. 41, ss. 3196–3204, 2002.
- [38] P. M. Kaminski, F. Lisco, ve J. M. Walls, “Multilayer broadband antireflective coatings for more efficient thin film CdTe solar cells,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, c. 4, sayı 1, ss. 452–456, 2014.
- [39] L. C. Chattopadhyay, S. Huang, Y. F. Jen, Y. J. Ganguly, A. Chen, ve K. H. Chen, “Anti-reflecting and photonic nanostructures,” *Materials Science and Engineering Reports*, c. 69, ss. 1–35, 2010.
- [40] R. Jacobsson, “Light reflection from films of continuously varying refractive index,” *Progress in Optics*, 5. baskı. Amsterdam, Hollanda: North-Holland Publishing Company, 1966, böl. 5, ss. 247-286.
- [41] D. A. Grann, E. B. Moharam, ve M. G. Pommet, “Optimal design for antireflective tapered two-dimensional subwavelength grating structures,” *Journal of Optical Society of America A*, c. 12, sayı 2, ss. 333-339, 1995.
- [42] H. Zhou, W. Tao, M. Chen, ve L. Yang, “Microstructured surface design for omnidirectional antireflection coatings on solar cells,” *Journal of Applied Physics*, c. 102, sayı 10, ss. 9, 2007.
- [43] W. H. Southwell, “Gradient-index antireflection coatings,” *Optics Letters*, c. 8, sayı 11, ss. 584-586, 1983.
- [44] Y. L. A. Deinega, I. Valuev, ve B. Potapkin, “Minimizing light reflection from dielectric textured surfaces,” *Journal of Optical Society America A*, c. 28, sayı 5, ss. 770-777, 2011.
- [45] D. H. Raguin ve G. M. Morris, “Analysis of antireflection-structured surfaces with continuous one-dimensional surface profiles,” *Applied Optics*, c. 32, sayı 14, ss. 2582–2598, 1993.
- [46] B. L. Sopori ve R. A. Pryor, “Design of antireflection coatings for textured silicon solar cells,” *Solar Cells*, c. 8, sayı 3, ss. 249–261, 1983.
- [47] J. Krepelka, “Maximally flat antireflection coatings,” *Jemna Mechanika A Optika*, c. 37, ss. 53–56, 1992.
- [48] P. Gupta, A. Pandey, K. Vairagi, ve S. K. Mondal, “Solving Fresnel equation for refractive index using reflected optical power obtained from Bessel beam interferometry,” *Review of Scientific Instruments*, c. 90, sayı 1, 2019.
- [49] S. Yılmaz, “Thin film Cdte solar cells deposited by pulsed dc magnetron sputtering,” Doktora tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Loughborough Üniversitesi, Loughborough, Birleşik Krallık, 2017.

- [50] Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi. *Taramalı Elektron Mikroskobu*. [Online]. Erişim: <http://dubit.duzce.edu.tr/2929-sayfa-taramali-elektron-mikroskobu>.
- [51] Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi. *Temas Açısı Ölçüm Cihazı*. [Online]. Erişim: <https://www.erbakan.edu.tr/bitam/sayfa/3301>.
- [52] Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi. *Ultraviyole, Görünür Bölge ve Yakın Kızılötesi Spektrometresi*. [Online]. Erişim: <https://www.erbakan.edu.tr/bitam/sayfa/8629>.
- [53] A. M. Law, P. M. Kaminski, P. J. M. Isherwood, ve J. M. Walls, “An infra-red reflecting optical coating for solar cover glass,” *IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference*, ss. 1-6, 2019.
- [54] A. Law, L. D. Wright, A. Smith, P. J. M. Isherwood, ve J. M. Walls, “2.3% Efficiency gains for silicon solar modules using a durable broadband anti-reflection coating,” *IEEE 47th Photovoltaic Specialists Conference*, ss. 1-3, 2020.
- [55] *Standard test method for abrasion resistance of organic coatings by the taber abraser*, American Society for Testing and Materials International, ASTM-D4060, 2014.
- [56] F. Lisco, “High rate deposition of thin film cadmium sulphide by pulsed direct current magnetron sputtering,” *Thin Solid Films*, c. 574, ss. 43–51, 2015.
- [57] X. Wu, R. G. Dhere, D. S. Albin, T. A. Gessert, C. DeHart, J. C. Keane, A. Duda, T. J. Coutts, S. Asher, D. H. Levi, H. R. Moutinho, Y. Yan, T. Moriarty, ve S. Johnston, “High-efficiency Cd,SnOJZn,SnOJZn,Cd,,S/CdS/CdTe polycrystalline thin-film solar cells,” *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, ss. 1-4, 2000.
- [58] J. M. Walls ve A. G. Spencer, “Hard coating and the durability of anti-reflection coatings,” *Optics World*, ss. 29-40, 2000.
- [59] A. Üzümlü, M. Kuriyama, H. Kanda, Y. Kimura, K. Tanimoto, H. Fukui, T. Izumi, T. Harada, ve S. Ito, “Sprayed and spin-coated multilayer antireflection coating films for nonvacuum processed crystalline silicon solar cells,” *International Journal of Photoenergy*, ss. 1-5, 2017.
- [60] J. M. Newkirk, “Artificial linear brush abrasion of coatings for photovoltaic module first-surfaces,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, c. 219, 2021.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Seda SANCAKLI ATUN

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Müh.	Kocaeli Üniversitesi	2009
Lise		Hasan Polatkan Lisesi	2002

YAYINLAR

S. Yılmaz Ekinci, S. Sancaklı Atun, A. Law, ve M. Walls, “Performance and durability of thin film solar cells via tesing the abrasion resistance of broadband anti-reflection coatings,” *Journal of Energy Systems*, c. 6, sayı 1, ss. 33-45, 2022.

İŞ DENEYİMİ

04/2012- Devam TÜRKSAT UYDU HABERLEŞME KABLO TV ve İŞLETME A.Ş. – Teknik Uzman

01/2011 - 04/2012 İSTANBUL ELEKTRİK MÜHENDİSLİK İNŞAAT LTD.ŞTİ. – Elektrik Mühendisi (Şirket Ortağı)

09/2008 - 12/2010 PROTA ELEKTRİK MÜHENDİSLİK LTD.ŞTİ. – Elektrik Mühendisi