

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK YAYINIMLI KAPLAMALI CAMLARIN ÇİZİLME DİRENÇLERİNİN
BELİRLENMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cansu TEBER

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK YAYINIMLI KAPLAMALI CAMLARIN ÇİZİLME DİRENÇLERİNİN
BELİRLENMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Cansu TEBER
(506161408)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN

HAZİRAN 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506161408 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Cansu TEBER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DÜŞÜK YAYINIMLI KAPLAMALI CAMLARIN ÇİZİLME DİRENÇLERİNİN BELİRLENMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Kürşat KAZMANLI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gökhan ORHAN
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : 4 Mayıs 2018
Savunma Tarihi : 31 Mayıs 2018





Aileme ve Arkadaşılarım,



ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım süresince değerli fikirleri ve yönlendirmeleriyle her zaman yanımda olan, genç bir mühendis olan bana en başta sorgulamayı ve düşünmeyi öğreten saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN' e,

Yüksek lisans tez çalışmalarım süresince, Şişecam Bilim ve Teknoloji Merkezi'nde sağladığı çalışma imkânı ve destekleri için Dr. Seniz TÜRKÜZ ve Dr. İlkey SÖKMEN' e,

Tez çalışmalarımın her aşamasında bana destek veren, hep daha iyisi olma yolunda bana çok şey kattığını düşündüğüm Dr. Tuncay TURUTOĞLU' na, çalışmalarım süresince fikirleriyle her zaman beni yönlendiren Dr. Sinem ERASLAN AVCIOĞLU' na, her daim sorularıma cevap bulduğum tecrübelerini ve bilgilerini esirgemeyen ve bana çok şey katan Dr. Erdem ARPAT, Alperen SEZGİN ve Dr. Öcal TUNA' ya

Karakterizasyon çalışmalarım süresince, yardım ve desteklerini esirgemeyen Lukas SİMURKA ve Ezgi Deniz BİÇER' e

Beni yetiştirip bu günlere getiren, bana hep güvenen ve her koşulda yanımda olan aileme, hep beraber güldüğümüz aynı zamanda da zorluklarla hep beraber yüzleştiğimiz tüm yol arkadaşlarıma,

Sonsuz teşekkürlerimle...

Mayıs 2018

Cansu TEBER
Metalurji ve Malzeme Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. DÜŞÜK YAYINIMLI KAPLAMALAR.....	3
2.1 Low-E Kaplama Üretim Yöntemleri.....	5
2.1.1 Piroolitik yöntemle üretilen Low-E kaplamalar- sert kaplamalar.....	5
2.1.2 Manyetik alan destekli sıçratma yöntemiyle üretilen Low-E kaplamalar- yumuşak kaplamalar	5
2.2 Metalik Esaslı Çok Katmanlı Kaplamaların Yapısı ve Özellikleri	6
3. VAKUM ALTINDA SIÇRATMA ile KAPLAMA YÖNTEMİ.....	11
3.1 Diode Sıçratma Tekniği	15
3.2 Triyod Sıçratma Tekniği	16
3.3 Manyetik Alan Destekli Sıçratma Tekniği.....	17
4. LOW-E KAPLAMALI CAMLARIN ÇİZİLME DİRENÇLERİNİN BELİRLENMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR..	21
4.1 Çizilme Dirençlerinin Belirlenmesi	22
4.1.1 Nanoçizik testi.....	23
4.2 Meydana Gelen Çizik Hasarları Ve Çizilme Direncinin Geliştirilmesi İçin Yapılan Çalışmalar.....	26
4.2.1 Meydana gelen çizik hasarları.....	26
4.2.2 Çizilme direncinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar.....	27
5. ISI YALITIM ÜNİTELERİ.....	29
5.1 Standart Isı Yalıtım Camı Ünitesi	29
5.2 Isı Kontrollü Isı Yalıtım Ünitesi	30
5.2 Güneş ve Isı Kontrollü Isı Yalıtım Ünitesi	31
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	33
6.1 Nanomekanik Test Ölçüm Metodu Geliştirme	33
6.1.1 Deneylerin yapılışı	34
6.1.2 Deney sonuçları ve tartışılması	37
6.2 Son Katman Kaplama Geliştirme.....	47
6.2.1 Deneylerin yapılışı	47
6.2.2 Deney sonuçları ve tartışılması	49
7. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	59
KAYNAKLAR	61
EKLER.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	79



KISALTMALAR

LOW-E	: Düşük Yayınlı
FBB	: Fiziksel Buhar Biriktirme
KBB	: Kimyasal Buhar Biriktirme
EMS	: Elektromanyetik Spektrum
U değeri	: Isı İletim Katsayısı
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
IGU	: Isı Yalıtım Ünitesi
H	: Sertlik
E	: Elastik Modül



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Yaygın olarak kullanılan malzemelere ait yayılım değerleri (Ding & Clavero, 2017).....	4
Çizelge 4.1 : Kaplamaların yapışma kuvveti ölçüm yöntemleri (Bull S. , 2015).....	22
Çizelge 5.1 : Ara boşluk mesafesinin ve argon kullanımının U değerine etkisi (Casini, 2016).	30
Çizelge 5.2 : Isı kontrollü kaplamalı ısı yalıtım camında ara boşluk mesafesi ve hava veya gaz kullanımına göre ısı iletim katsayısının değişimi (Casini, 2016). 31	
Çizelge 5.3 : Isı ve güneş kontrollü kaplamalı ısı yalıtım camında ara boşluk mesafesi ve hava veya gaz kullanımına göre ısı iletim katsayısının değişimi (Casini, 2016).	32
Çizelge 6.1 : Kullanılan batıcı uç tipleri ve çizik testi parametreleri.	34
Çizelge 6.2 : Kritik çizik testi koşulları.	42
Çizelge 6.3 : 1.test sonrası oluşan çiziklerin derinlik ve genişlik ölçümlerinin ortalama değerleri.	45
Çizelge 6.4 : 2.test sonrası oluşan çiziklerin derinlik ve genişlik ölçümlerinin ortalama değerleri.	45
Çizelge 6.5 : Son katman kaplama parametreleri	48
Çizelge 6.6 : 5-10-20nm SiN son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlik ve genişlik ortalama değerleri.	51
Çizelge 6.7 : 5-10-20nm ZnSnO _x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlik ve genişlik ortalama değerleri.	52
Çizelge 6.8 : 5-10-20nm TiO _x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlik ve genişlik ortalama değerleri.	52
Çizelge 6.9 : 5-10-20nm SiO _x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlik ve genişlik ortalama değerleri.	53
Çizelge A.1 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 1. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin derinlik ölçümü.....	66
Çizelge A.2 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 2. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin derinlik ölçümü.....	66
Çizelge A.3 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 1. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin genişlik ölçümü.....	67
Çizelge A.4 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 2. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin genişlik ölçümü.....	68
Çizelge A.5 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 1. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin derinlik ölçümü.....	69
Çizelge A.6 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 2. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin derinlik ölçümü.....	69
Çizelge A.7 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 1. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin genişlik ölçümü.	70

Çizelge A.8 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 2. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin genişlik ölçümü.	71
Çizelge B.1 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm SiN son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlikleri.	72
Çizelge B.2 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm ZnSnO _x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlikleri.....	72
Çizelge B.3 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm TiO _x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlikleri.....	73
Çizelge B.4 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm SiO _x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlikleri.	73
Çizelge B.5 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm SiN son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin genişlikleri.	74
Çizelge B.6 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm ZnSnO _x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin genişlikleri. ...	75
Çizelge B.7 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm TiO _x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin genişlikleri.....	76
Çizelge B.8 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm SiO _x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin genişlikleri.....	77

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Elektromanyetik spektrum (Özkarayel, 2013).	3
Şekil 2.2 : Low-E kaplamalı camlarda gerçekleşen ısı akışı (Karakurt, 2008).	4
Şekil 2.3 : Hat üstü/Pirolitik kaplama hattı (Ding & Minh).	5
Şekil 2.4 : Hat dışı/Manyetik alan destekli sıçratma hattı (Ding & Minh).	6
Şekil 2.5 : Tek gümüşlü düşük yayımlı kaplama sisteminin şematik görüntüsü (Ding & Clavero, 2017).	7
Şekil 2.6 : ZnO üzerinde Ag (111) büyümesi (Ding & Clavero, 2017).	8
Şekil 2.7 : Bariyer katman kalınlığının düşük yayımlı kaplamalı sistemin direncine etkisi (Ding & Clavero, 2017).	8
Şekil 2.8 : Düz cam ve tek-iki-üç gümüşlü Low-E sistemlerinin yansıma değerleri (Ding & Minh).	9
Şekil 2.9 : Farklı optik özelliklere sahip Low-E kaplamalı camların şematik görüntüsü (Theiss, 2018).	10
Şekil 3.1 : FBB yöntemleri.	11
Şekil 3.2 : Plazma oluşumu (Ardenna, 2018).	12
Şekil 3.3 : Işıltılı deşarj(glow discharge) oluşturma koşulları (Kazmanlı, 2017).	13
Şekil 3.4 : Sıçratma işleminde hedef malzemenin zamana bağlı olarak değişimi (Güler, 2018).	13
Şekil 3.5 : Sıçratma ile kaplama yönteminin şematik görüntüsü (Kazmanlı, 2017).	14
Şekil 3.6 : İyon-yüzey etkileşimi (Kazmanlı, 2017).	14
Şekil 3.7 : Sıçratma veriminin hızlandırılmış iyonun geliş açısına bağlı olarak değişimi (Kazmanlı, 2017).	15
Şekil 3.8 : Diode sıçratma ile kaplama yönteminin şematik görüntüsü (Güler, 2018).	16
Şekil 3.9 : Triyod sıçratma ile kaplama yönteminin şematik görüntüsü (Güler, 2018).	17
Şekil 3.10 : Manyetik alan çizgilerinin şematik görüntüsü (Güler, 2018).	18
Şekil 3.11 : Manyetik alan çizgilerinin yönlendirilmesine bağlı olarak akım yoğunluğunun değişimi (Kelly & Arnell, 2000).	18
Şekil 3.12 : Sıçratma prosesinde kullanılan farklı geometrilere sahip katot(hedef) malzemeleri a)dikdörtgen katot, b)silindirik katot, c)oyuklu katot, d)rotasyonel katot (Rockett, 2008).	19
Şekil 4.1 : Çizik testinin şematik gösterimi (Jesse, 2010).	23
Şekil 4.2 : Nanomekanik test cihazında kullanılan batıcı uçların şematik görüntüleri, a)vickers, b)berkoviç, c)knoop, d)konik e) konik küresel (rockwell) f)küresel (Kim, 2007).	24
Şekil 4.3 : Kohezif hasar ve adhesif hasar oluşumu (Li, 2013).	24
Şekil 4.4 : Çizik testi sonrası oluşan hasarların karakteristik şekilleri a)kohezif hasar oluşumları b)adhezif hasar oluşumları (Li, 2013).	25
Şekil 4.5 : Low-E kaplamalı camlarda taşıma esnasında oluşan çizik hasarları.	26

Şekil 4.6 : Low-E kaplamalı camlarda ısı yalıtım ünitesi üretimi esnasında oluşan çizik hasarları.....	27
Şekil 5.1 : Standart yalıtım camı kesit görüntüsü (İzoder, 2018).	29
Şekil 5.2 : Isı kontrollü kaplamalı cam kullanılarak üretilen ısı yalıtım ünitesi (İzoder, 2018).	31
Şekil 5.3 : Isı ve güneş kontrollü kaplamalı cam kullanılarak üretilen ısı yalıtım ünitesi (İzoder, 2018).....	32
Şekil 6.1 : Nanovea model nanomekanik test cihazı.	34
Şekil 6.2 : Atomik kuvvet mikroskobu(AFM).....	35
Şekil 6.3 : AFM ile çizik derinlik ölçümünün gösterimi.	35
Şekil 6.4 : Çizik kenarları boyunca ‘pile-up’ oluşumu.	36
Şekil 6.5 : AFM ile a) yüzey çizgisi referans alınarak yapılan genişlik ölçümünün gösterimi b)pile-up referans alınarak yapılan genişlik ölçümünün gösterimi.....	36
Şekil 6.6 : Leica marka stereo mikroskop.....	37
Şekil 6.7 : Berkoviç uç kullanılarak 2 ve 5 mN sabit yüklerle, yüksek çizilme direncine sahip Low-E üzerinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.....	37
Şekil 6.8 : Berkoviç uç kullanılarak 2 ve 5 mN sabit yüklerle, düşük çizilme direncine sahip Low-E üzerinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.....	38
Şekil 6.9 : 5 mikron yarıçaplı uç kullanılarak 30-80mN arası sabit yüklerle, yüksek çizilme direncine sahip Low-E üzerinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.....	38
Şekil 6.10 : 5 mikron yarıçaplı uç kullanılarak 30-80mN arası sabit yüklerle, düşük çizilme direncine sahip Low-E üzerinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.....	39
Şekil 6.11 : 25 mikron yarıçaplı uç kullanılarak 300mN-350mN-390mN sabit yüklerle, yüksek çizilme direncine sahip Low-E üzerinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.	40
Şekil 6.12 : 25 mikron yarıçaplı uç kullanılarak 300mN-350mN-390mN sabit yüklerle, düşük çizilme direncine sahip Low-E üzerinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.	41
Şekil 6.13 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı camda 1.test sonucu oluşturulan 3.çiziğin derinlik ölçümleri.	42
Şekil 6.14 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı camda 1.test sonucu oluşturulan 3.çiziğin genişlik ölçümleri a)line ölçümü b)pile-up ölçümü ...	43
Şekil 6.15 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı camda 1.test sonucu oluşturulan 3.çiziğin derinlik ölçümleri.	43
Şekil 6.16 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı camda 1.test sonucu oluşturulan 3.çiziğin genişlik ölçümleri a)line b)pile-up	44
Şekil 6.17 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerinde 300mN-350mN-390mN sabit yüklerle oluşturulmuş çiziklerin stereo mikroskop görüntüleri.....	46
Şekil 6.18 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerinde 300mN-350mN-390mN sabit yüklerle oluşturulmuş çiziklerin stereo mikroskop görüntüleri.....	46
Şekil 6.19 : Von Ardenne marka manyetik sıçratma hattı.....	48
Şekil 6.20 : 5nm-10nm-20nm kalınlıkta SiN son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.	49

Şekil 6.21 : 5nm-10nm-20nm kalınlıkta $ZnSnO_x$ son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.....	50
Şekil 6.22 : 5nm-10nm-20nm kalınlıkta TiO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.	50
Şekil 6.23 : 5nm-10nm-20nm kalınlıkta SiO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.....	51
Şekil 6.24 : SiN son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik derinliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.	53
Şekil 6.25 : SiN son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik genişliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.	54
Şekil 6.26 : $ZnSnO_x$ son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik derinliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.	54
Şekil 6.27 : $ZnSnO_x$ son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik genişliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.	55
Şekil 6.28 : TiO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik derinliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.	55
Şekil 6.29 : TiO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik genişliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.	56
Şekil 6.30 : SiO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik derinliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.	56
Şekil 6.31 : SiO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik genişliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.	57



DÜŞÜK YAYINIMLI KAPLAMALI CAMLARIN ÇİZİLME DİRENÇLERİNİN BELİRLENMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Son yıllarda, mimarı yapılarda enerji verimliliğini artırmak ve tasarruf sağlamak amaçlı ısı ve güneş kontrolü sağlayan kaplamalı camlar kullanılmaya başlanmıştır. Low-E kaplamalı camlar olarak da adlandırılan düşük yayınlı kaplamalı camlar, sahip olduğu yüksek gün ışığı geçirgenlik ve güneş ısı yansıtıcılık değerleriyle ısı ve güneş kontrolü sağlamaktadır. Low-E kaplamalar, pirolitik yöntem ve manyetik alan destekli sıçratma yöntemi olmak üzere iki farklı şekilde üretilmektedir ve üretim yöntemlerine bağlı olarak farklı optik ve mekanik özellikler göstermektedir. Pirolitik yöntemle Low-E kaplama üretimi, üretim hattındaki düz camın katkılı metal oksit malzeme ile kaplanmasına dayanmaktadır. KBB yöntemlerinden biri olan pirolitik yöntemle Low-E kaplama üretimi, yüksek sıcaklık koşullarında belirli kimyasal reaksiyonlar sonucu gerçekleştiğinden dolayı kaplama ile cam arasında kovalent bağlar oluşmakta, bu sayede yüksek yapışma derecesine ve dolayısıyla yüksek çizilme direncine sahip kaplamalar üretilmektedir. Diğer bir Low-E kaplama yöntemi ise FBB yöntemlerinden biri olan manyetik alan destekli sıçratma yöntemidir. Bu yöntemle Low-E kaplama üretimi, hedef malzeme yüzey atomlarının hızlandırılmış iyonlarla kopartılarak cam üzerinde biriktirilmesi esasına dayanmaktadır. Manyetik alan destekli sıçratma yöntemi ile üretilen Low-E kaplamalar, fiziksel bağlarla bağlı çok katmanlı yapıya sahiptir. Çok katmanlı Low-E kaplamalar, sahip olduğu fiziksel bağlar sebebiyle ve buna ek olarak katman malzemelerinin özelliklerine, katmanların dizilimine ve biriktirme parametrelerine bağlı olarak oluşabilecek iç gerilmeler sonucu düşük çizilme direnci göstermektedir. Ancak düşük çizilme direnci göstermesine karşın, pirolitik yöntemle üretilen sert Low-E kaplamalara göre daha düşük yayınlı değerine ve daha yüksek optik seçiciliğe sahiptir. Buna ek olarak, manyetik alan destekli sıçratma yöntemi, yüksek biriktirme hızında kaplama imkânı sağlaması ve geniş ölçekli endüstriyel üretime uygun olması bakımından avantaj sağlamaktadır. Bu sebeplerle, Low-E kaplamaların üretiminde yaygın olarak manyetik alan destekli sıçratma yöntemi kullanılmaktadır. Çok katmanlı Low-E kaplamalar, gösterdikleri düşük çizilme direnci sebebiyle ısı yalıtım ünitesi haline getirilerek atmosferle temas etmeyecek şekilde kullanılmaktadır. Bu doğrultuda üretim hattından çıkan Low-E kaplamalı cam, taşıma, kesme, işleme, yıkama gibi aşamalardan geçirilerek ısı yalıtım ünitesi haline getirilmektedir. Ancak bu aşamalarda, sahip oldukları düşük çizilme direnci sebebiyle, kaplama yüzeyinde görülebilir çizik hasarları meydana gelebilmektedir. Görülebilir çizik hasarları, üretim maliyetini artırmakta ve çözülmesi gereken bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Konu ile ilgili literatür çalışmaları ve patentler incelendiğinde, düşük çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı camların çizilme dirençlerinin iki temel yaklaşımla geliştirildiği sonucuna varılmıştır. Birinci yaklaşımda, Low-E kaplamanın üzerine son katman olarak çizilme direnci yüksek bir malzeme geliştirilerek kaplama sisteminin çizilme direncini artırmak

amaçlanmaktadır. İkinci yaklaşımda ise, katman tasarımlarının değiştirilmesi ve biriktirme parametrelerinin optimize edilmesi ile minimum iç gerilmelere sahip kaplamalar üretilerek çizilme direncini artırmak amaçlanmaktadır. Bu çalışmada birinci yaklaşım üzerinden gidilerek, düşük çizilme direnci gösteren bir Low-E kaplamalı cam üzerine son katman kaplama geliştirilerek, görülebilir çizik oluşumuna karşı direncin artırılması amaçlanmıştır. Ancak, Low-E kaplamalı camların görülebilir çizik oluşumuna karşı dirençlerini belirlemek için standart bir ölçüm metodu bulunmamaktadır. Bu doğrultuda, deneysel çalışmaların ilk aşamasında, Low-E kaplamalı camların görülebilir çizik oluşumuna karşı direncini ölçmek ve bir kalite kriteri belirlemek amacıyla test metodu geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, test metodu geliştirme aşamasında yüksek çizilme direnci gösterdiği bilinen çok katmanlı Low-E kaplamalı bir cam referans alınarak, minimum görülebilir çiziklerin olduğu test koşullarını bulmak amaçlanmıştır. Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında ise, düşük çizilme direnci gösterdiği bilinen çok katmanlı Low-E kaplamalı bir cam seçilmiş ve bu cam üzerine farklı malzemeler kullanılarak üç ayrı kalınlıkta son katman kaplamalar yapılmış ve çizilme direncinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Son katman kaplama sonrası çizilme direnci, deneysel çalışmaların ilk aşamasında belirlenen test metodu kullanılarak ölçülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar süresince, test metodu geliştirmek için yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam, çizilme direncinin geliştirilmesi için ise düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam kullanılmıştır. Her iki Low-E kaplamalı cam, manyetik alan destekli sıçratma yöntemiyle üretilen ancak farklı optik ve mekanik özelliklere sahip kaplamalı camlardır. Deneysel çalışmaların ilk aşamasında, kalite kriteri belirlemek amacıyla Nanovea model nanomekanik test cihazı kullanılarak, farklı yarıçap ve geometrilere sahip batıcı uçlar kullanılarak çizik testleri yapılmış ve yüksek çizilme direnci gösteren referans Low-E kaplamalı cam yüzeyinde gözle görülebilir minimum çiziklerin olduğu test koşulları aranmıştır. Çizik testleri sonrası, 25 mikron yarıçaplı, 90° açığa sahip küresel konik elmas uç kullanılarak, 300mN sabit yük altında yapılan çizik testlerinde, referans Low-E kaplamalı cam yüzeyinde oluşturulan çiziklerin gözle görülebilir minimum çizikler olduğu saptanmış ve bu koşullar kalite kriteri olarak belirlenmiştir. Aynı koşullarda çizik testi, düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulandığında, oluşan çiziklerin belirgin bir şekilde gözle görülebilir olduğu saptanmıştır. Gözle muayenenin yanı sıra, her iki cam yüzeyinde oluşturulan çiziklerin boyutları AFM ile ölçülmüş ve çiziklerin boyutları karşılaştırılmıştır. AFM sonuçlarına göre, yüksek çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cam üzerindeki çiziklerin beklenildiği gibi daha dar ve daha sık olduğu sonucuna varılmıştır. Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında, düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine manyetik alan destekli sıçratma yöntemi kullanılarak 5nm, 10nm ve 20nm kalınlıklarda SiN_x, ZnSnO_x, TiO_x ve SiO_x kaplamalar yapılmıştır. Son katman kaplama sonrası, deneysel çalışmanın ilk aşamasında belirlenen çizik testi koşullarında testler uygulanmış ve çizik testi sonrası oluşan çiziklerin boyutları AFM ile ölçülmüştür. AFM ölçümlerine göre, son katman kaplama sonrası en yüksek çizilme direncine 10nm TiO_x son katman kaplama sonrası ulaşılmıştır. Yüksek çizilme direnci gösteren referans Low-E kaplamalı cam üzerinde ve düşük çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cam üzerine 10nm TiO_x son katman kaplama sonrası elde edilen cam üzerinde, kritik koşullarda yapılan çizik testi sonrası oluşan çiziklerin boyutlarının neredeyse aynı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda her iki camın çizilme dirençlerinin aynı olduğu söylenebilmektedir. Ancak çiziklerin görülebilirlik dereceleri karşılaştırıldığında, referans Low-E kaplamalı cam üzerindeki çizikler gözle minimum derecede görülebilirken, 10nm TiO_x kaplanmış Low-E üzerindeki çiziklerin

belirgin olarak görülebildiği saptanmıştır. Bu durumun sebebi olarak, her iki camın sahip olduğu farklı optik performansın sonucu olarak, aynı boyutlardaki çiziklerin, kaplamanın rengine, yansımasına bağlı olarak görülebilirliği üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.





DETERMINATION AND DEVELOPMENT OF SCRATCH RESISTANCE OF LOW-E COATED GLASSES

SUMMARY

Glass is one of the popular and versatile building materials used today. In recent years, with an increase in energy demand, both to increase energy efficiency and save money in architectural buildings, heat and solar controlled glasses become vital. These glasses, which are called Low-E coated glass has spectral selectivity that transmit daylight while are reflecting solar heat. When heat or light energy is absorbed by glass, it is either shifted away by moving air or re-radiated by the glass surface. The ability of a material to radiate energy is known as emissivity. The lower emissivity value enables higher insulating properties. There are two different types of Low-E coatings according to production method. Pyrolytic method is a Low-E production method that is a kind of CVD coating technology. In this method, flat glass is coated with doped metal oxide under high temperature condition. The Low-E coatings that are produced by pyrolytic method are called as hard coat because of having covalent bonding between glass and coating layers. Because the coating is covalently bonded to the glass, it has high scratch resistance. Magnetron sputtering is the other Low-E coating production method. In magnetron sputtering technique, the inert atoms under vacuum are ionized by applying voltage to the system and plasma is generated. Under electric field, the accelerated ions are directed through the target material. The directed ions hit the target material surface and depending on acceleration voltage, surface atoms are ejected and deposited on the substrate. Sputtered Low-E coatings are metallic based multilayer coatings that bonded with physical bond. Contrary to pyrolytic Low-E coatings, sputtered Low-E coatings do not contain covalent bonds so they have low adhesion strength causing low scratch resistance. Even though, sputtered Low-E coatings has lower scratch resistance than hard coatings, they have higher spectral selectivity and lower emissivity value. Also, sputtering technique enables higher deposition rate and large area product deposition. For these reasons, sputtering is common deposition method in Low-E glass production industry. Sputtered Low-E glasses are typically only used with insulated glazing units, which provide protection to the coating. Insulating glass (IG), more commonly known as double glazing consists of two or three glass window panes separated by a vacuum or gas filled space to reduce heat transfer across a part of the building envelope. Firstly, after production of Low-E coated glasses, polymer based powders are sprayed onto the glass surface to prevent the glass from contacting each other during storage and transportation. After transportation of Low-E glasses to first user, the Low-E glasses are converted into IGU. Depending on user requirements, a thermal insulation units are designed. There are several stages to convert Low-E coated glasses into IGU such as cutting, processing, washing. During all these processes, because of having low scratch resistance, there can be visible scratch formation on glass. This a huge problem that cause high production cost. Literature studies and patents have shown that there are two different approaches to increase the scratch resistance of soft Low-E glasses. One of these approaches is based on top layer coating. For increasing scratch resistance of

Low-E glasses, the materials which has high hardness are coated as top layer. Also, the materials which have low friction coefficient are used to increasing scratch resistance thanks to lubricating effect. It is stated that in literature and patent studies, depending on deposition parameters, substrate properties and material properties, internal stress can form. As a result of internal stress, scratch resistance of coating decrease. Under high internal stress condition, even if there are not external stress, the coating can fail. Because of this, the other approach is based on decreasing internal stress formation by optimizing deposition parameters and changing coating design. In multilayer coatings, internal stress formation mostly depends on sputtering pressure, deposition rate and bias voltage usage. On the other hand, the neighbour layer which has different hardness, expansion coefficient values can cause internal stress formation through interlayer. To prevent this, buffer layer can be used or stack design can be changed. In this way, scratch resistance of coating is developed. In this study, top layer coating was developed on sputtered Low-E coating to prevent visible scratch formation. But, there is no standard test method for measurement visible scratch resistance of Low-E glasses. Because of this, the experimental studies composed of two steps. In the first step, the measurement method for Low-E glasses against visible scratch formation was developed and then the scratch resistance was increased by depositing top layer coating. In the first step, a test method was developed to measure the resistance of the soft Low-E glass to visible scratch formation. For this purpose, two different sputtered Low-E glasses were used in experimental studies. Each Low-E glass were produced by magnetron sputtering method and has double silver layer but they have different mechanical and optical properties. One of them has lower scratch resistance while the other has relatively high scratch resistance. The high scratch resistant Low-E glass was used as a reference Low-E for development measurement method. The low scratch resistant one was coated different materials to develop scratch resistance. In the first step of experimental studies, it was objected to form minimum visible scratch on high resistant reference Low-E coated glass without delamination to determine quality criterion. For this purpose, different kind of indenters were used. According to results of scratch tests, the minimum visible scratch without delamination on coating was formed by using 25micron radius 90° conic spherical diamond tip under 300mN constant load condition. End of the first steps of experimental studies, the critical test condition was determined as scratching by using 25micron radius tip under 300mN constant load. This test was applied also low scratch resistant Low-E coated glass. For each scratch test, five scratches were formed and the test was repeated twice to analyse reproducibility. After scratch test, size of all marks were measured by AFM in terms of depth and width and the visibility of marks were analysed by eyes. When the visibility of scratch was compared, visibility of the scratches on low scratch resistant Low-E coated glass is more visible than high scratch resistant one. When the dimensions of the first test resultant scratches on both glass surfaces were measured by AFM, the average depth and width values of the scratches formed on the glass with low scratch resistance was measured as 86nanometers and 6,52micron respectively. The depth and width values of the scratches formed on the Low-E glass with high scratch resistance under the same conditions are 68nanometers and 5,71microns, respectively. According to AFM measurement, it is stated that, the size of scratches formed on Low-E with high scratch resistance are narrower and shallower than the other one as expected. The scratch test which was determined as a critical condition was repeated to analyse reproducibility of the test and the results were compared. As a result of the sizes of the scratches that were formed second test, the results were reproducible. As a result of the first experimental studies the critical

test condition was determined and the quality criterion of Low-E coated glasses against visible scratch formation were determined by using high resistant Low-E coated glasses. In the second step of experimental studies, different materials are coated as top layer on Low-E coated glass with low scratch resistance. According to literature and patent studies that mostly oxide, nitride based materials were coated as a top layer to develop scratch resistance. The coating materials were selected taking into account the suitability of the material, chemical resistance and mechanical resistance in addition to the patent and the literature studies. As a top layer, SiN_x , ZnSnO_x , SiO_x , TiO_x materials were coated by magnetron sputtering method. These top layer materials were coated individually on low scratch resistant Low-E glass to compare scratch resistance change. In order to influence the coating thickness as well as the coating material on scratch resistance, coatings were deposited at thicknesses of 5 10 and 20nanometers. After top layer coating, the scratch test that were in the first experimental studies was applied. After scratch test, the scratch resistance against visible scratch formation was evaluated in two steps. Firstly, the resulting scratches were examined by the naked eyes and the scratches sizes were measured by using AFM. As a result of examination by naked eyes, it is observed that all the formed scratches were visible. After that, the sizes of scratches in terms of depth and width were measured in different three point and the average scratch sizes were calculated. The AFM measurement showed that all top layer coatings developed scratch resistance. The shallowest and the narrowest scratch sizes were measured as a result of 10nanometers TiO_x coating. When the average scratches size formed on reference Low-E coated glass and the average scratches size were formed on low scratch resistant Low-E coated glass with 10nanometers TiO_x top layer coated in same test condition were compared, it can be said that they were nearly the same. But, when the visibility of these scratches were compared, the scratches on reference Low-E are less visible. This result has shown us that different colour reflections due to differences in optical properties affect the visibility of the scratches even if the scratch size is nearly the same.

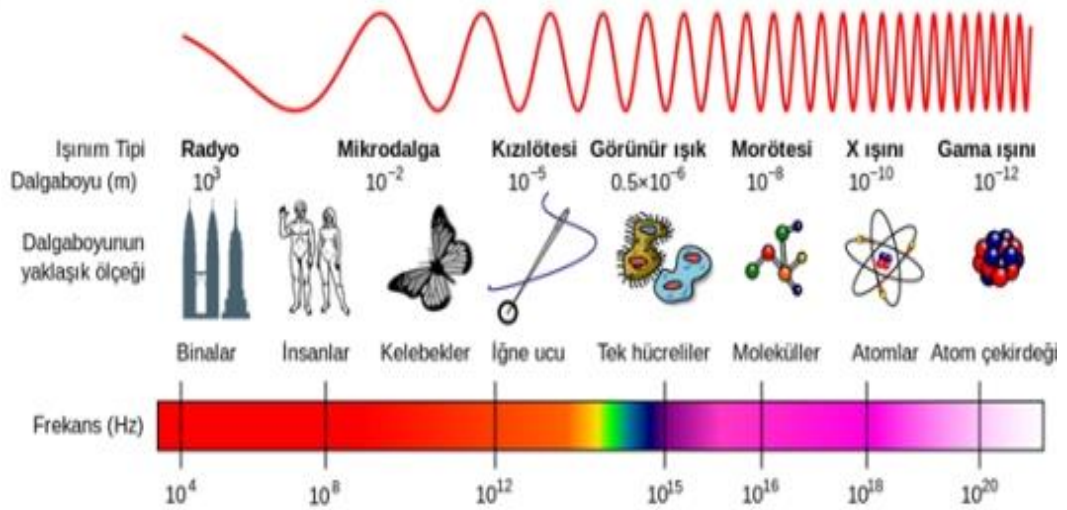
1. GİRİŞ VE AMAÇ

Küresel ısınmaya karşı farkındalığın artışıyla birlikte enerji tasarrufunu artırmaya yönelik birçok adım atılmaya başlanmıştır. 2013 yılında yapılan bir araştırmada, Amerika’da binaların ısıtılması ve soğutulması amaçlı harcanan enerjinin toplam enerji tüketiminin %14’üne tekabül ettiği sonucuna varılmıştır (Ding & Clavero, 2017). Binalarda harcanan yüksek enerjinin sebebi olarak ise cam kısımlardan gerçekleşen yüksek ısı geçişinin olduğu düşünülmektedir. Özellikle standart camlarda radyasyonla gerçekleşen ısı kaybı toplam ısı kaybının %60’ını oluşturmaktadır. Toplamda ise, ticari binalarda, tüketilen toplam enerjinin %30’u ısı kaybı sonucu harcanmaktadır (Ding & Clavero, 2017). Bu doğrultuda, özellikle cam alanında enerji tasarrufunu artırmak amaçlı çalışmalar önem kazanmaya başlamıştır ve camlarda ısı geçişini kontrol etmek amaçlı modern kaplama teknikleri ön plana çıkmıştır. Enerji tasarrufunu artırmak amaçlı uygulanan etkin ve verimli çalışmalardan bir tanesi de düşük yayınlı kaplamalardır. Low-E olarak adlandırılan düşük yayınlı kaplamalar, gün ışık geçirgenliği yüksek, güneş ısı geçirgenliği düşük olan spektral seçiciliğe sahip kaplamalardır ve bu sayede enerji tasarrufu sağlamaktadır (Meng, Zeng, Dai, Li, & Li, 2014). Gün ışığı geçirgenliği ile güneş ısı geçirgenliğinin orantısı olarak tanımlanabilecek olan seçicilik indeksi ise yüksek optik performansın ölçüsüdür. Üretim yöntemine bağlı olarak, sert Low-E kaplamalar ve yumuşak Low-E kaplamalar üretilmektedir. Sert Low-E kaplamalar, KBB yöntemlerinden biri olan pirolitik yöntemle üretilen yüksek çizilme direncine sahip kaplamalardır. Yumuşak Low-E kaplamalar ise, FBB yöntemlerinden biri olan manyetik alanda sıçratma yöntemiyle üretilmektedir. Manyetik alanda sıçratma yöntemiyle üretilen çok katmanlı Low-E kaplamalar, katmanların özellikleri, tasarımı ve biriktirme parametrelerine bağlı olarak oluşabilecek yüksek iç gerilmelerin sonucu düşük ara yüzey yapışma derecesine ve buna bağlı olarak düşük çizilme direncine sahip kaplamalardır (Suzuki, 1999), (Poirie, Schmit, Bousser, & Martinu, 2017). Yumuşak Low-E kaplamalar düşük çizilme direncine sahip olmasına rağmen, sert Low-E kaplamalara göre daha düşük yayılım değerine ve daha yüksek spektral seçiciliğe sahip olduğundan dolayı

yaygın olarak kullanılmaktadır (Schaefer, Brauer, & Szczyrbowski, 1997). Yumuşak Low-E kaplama sistemleri, istenen optik performansa göre, tek gümüşlü, iki gümüşlü ve üç gümüşlü olacak şekilde tasarlanmakta ve farklı optik ve mekanik özelliklere sahip Low-E kaplamalar üretilmektedir. Manyetik alanda sıçratma yöntemi ile üretilen Low-E kaplamalar, sahip oldukları düşük çizilme direncinden dolayı, ısıcam ünitesi haline getirilerek atmosferle temas etmeyecek şekilde kullanılmaktadır (İzoder, 2018), (Özer, 2017). Ancak, üretim sürecinden ısı yalıtım ünitesi haline getirilene kadar, taşıma, işleme ve yıkama aşamalarında cam yüzeyinde gözün görebildiği çizik hasarları meydana gelebilmekte ve bu durum üretim maliyetini artırdığından dolayı, çözülmesi gereken bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, düşük çizilme direncine sahip yumuşak Low-E kaplamalı cam üzerine son katman kaplama geliştirilerek çizilme direncinin artırılması amaçlanmıştır. Ancak, Low- E kaplamalı camlarda görülebilir çizik oluşumuna karşı direnci belirlemek amaçlı standart bir ölçüm metodu bulunmamaktadır. Bu nedenle, deneysel çalışmaların ilk aşamasında manyetik alanda sıçratma yöntemi ile üretilen, genel yumuşak Low-E kaplamaların aksine, yüksek çizilme direnci gösteren bir Low-E kaplamalı cam referans olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar süresince kullanılan, geliştirilmek üzere seçilen düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam ve referans olarak seçilen yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı camların, her ikisi de manyetik alanda sıçratma yöntemi ile üretilen iki gümüşlü ancak farklı optik ve mekanik özelliklere sahip kaplamalı camlardır. Test metodu geliştirme aşamasında, Referans Low-E kaplamalı cam yüzeyinde görülebilir minimum çiziklerin olduğu test koşulları aranmış ve bir kalite kriteri belirlenmiştir. Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında ise, düşük çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cam üzerine 5nm, 10nm ve 20nm kalınlıkta SiN, ZnSnO_x, TiO_x ve SiO_x kaplamalar yapılmıştır. Son katman kaplama sonrası çizilme dirençleri kritik olarak belirlenen test koşullarında analiz edilmiştir. Aynı koşullarda uygulanan test koşulları sonrası oluşturulan çiziklerin boyutları AFM ile ölçülmüş ve son katman kaplama sonrası çizilme direncindeki değişim hem kaplama öncesi durum ile hem de referans Low-E kaplamalı camın çizilme direnci ile karşılaştırılmıştır.

2. DÜŞÜK YAYINIMLI KAPLAMALAR

Düşük yayınlı kaplamalı camlar, elektromanyetik spektrumda dalga boyuna bağlı olarak optik seçiciliğe sahip olan, güneş ve ısı kontrolü sağlayan kaplamalı camlardır. Low-E olarak da adlandırılan düşük yayınlı kaplamalı camlar, elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde yüksek gün ışığı geçirgenlik, kızıl ötesi bölgesinde ise yüksek güneş ısı yansıtıcılık özelliklerine sahiptir (Meng, Zeng, Dai, Li, & Li, 2014), (R.J. Martin-Palma, 1998). Elektromanyetik spektrum Şekil 2.1’de yer almaktadır.



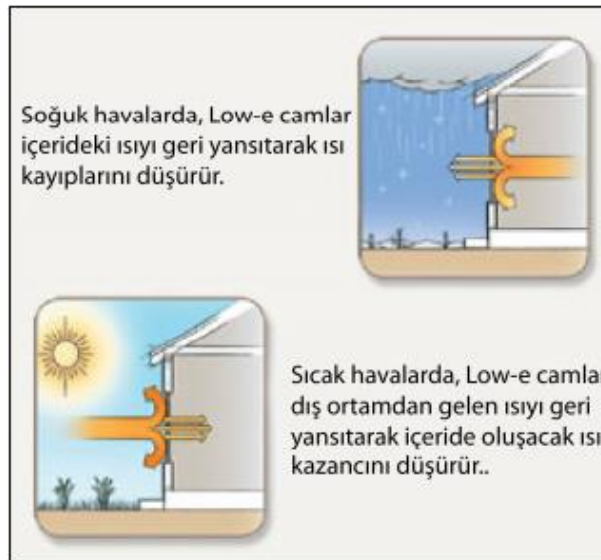
Şekil 2.1 : Elektromanyetik spektrum (Özkarayel, 2013).

Yayınlı kavramı, bir malzemenin yaydığı ısının aynı şartlar altında siyah bir cisim tarafından yayılan ısıya oranı olarak tanımlanmaktadır. Siyah cismin yayınlı değeri ise 100 olarak kabul edilmektedir (Ding & Minh, Low emissivity (low-E) coating technologies for Energy saving window applications), (Schaefer, Brauer, & Szczyrbowski, 1997). Düşük yayınlı değeri sayesinde, ısı yüzeyden yüksek oranda yansıtılarak korunmakta ve ısı kaybı önlenmektedir. Kaplamasız düz camın yayınlı değeri yaklaşık olarak 0,84 iken, Low-E kaplamalı camların yayınlı değeri 0,01-0,3 arasında değişim göstermektedir. Çizelge 2.1’de yaygın olarak kullanılan malzemelere ait yayınlı değerleri yer almaktadır.

Çizelge 2.1 : Yaygın olarak kullanılan malzemelere ait yayınım değerleri (Ding & Clavero, 2017).

Malzeme Yüzeyi	Yayınım
Alüminyum Folyo	0,03
Asfalt	0,88
Tuğla	0,9
Beton	0,91
Kireç Taşı	0,92
Alçı	0,89
Parlatılmış gümüş	0,02

Low-E kaplamalı camlar sahip oldukları düşük ısı iletim katsayısı ve yüksek gün ışığı geçirgenlik yüzdesi sayesinde, sıcak havalarda ışıktan ödün vermeden, güneş ısısı düşük oranda içeri alınarak soğutma giderlerinden tasarruf sağlamaktadır. Soğuk havalarda ise içerideki sıcak havanın yüzeyden geri içeriye yansıtılmasını ve iç ortam sıcaklığının korunarak ısı kaybının azalmasını ve ısıtma giderlerinden tasarruf edilmesini sağlar. Şekil 2.2’de Low-E kaplamalı camlarda gerçekleşen ısı akışı yer almaktadır.



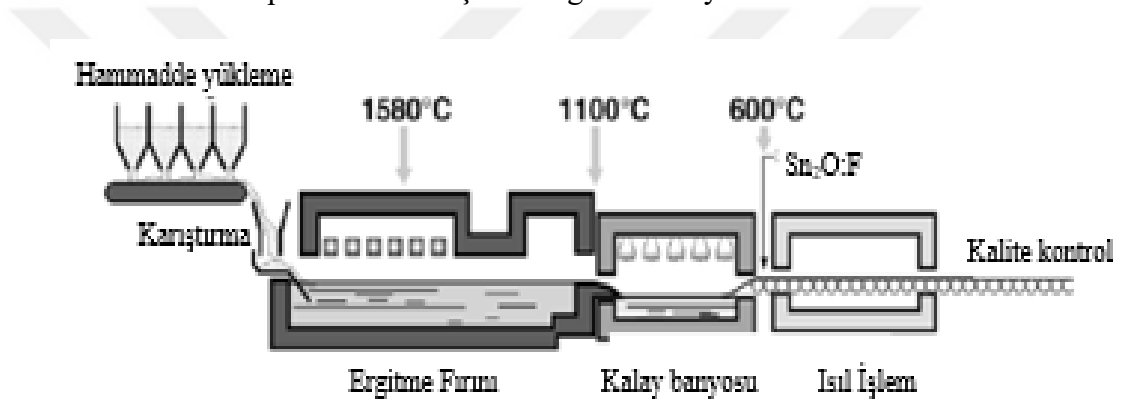
Şekil 2.2 : Low-E kaplamalı camlarda gerçekleşen ısı akışı (Karakurt, 2008).

2.1 Low-E Kaplama Üretim Yöntemleri

Düşük yayınlımlı kaplamalı camlar, vakum ortamında manyetik alan destekli sıçratma yöntemi ve pirolitik yöntem olmak üzere iki şekilde üretilmektedir.

2.1.1 Pirolitik yöntemle üretilen Low-E kaplamalar- sert kaplamalar

Pirolitik yöntem, bir çeşit kimyasal buhar biriktirme yöntemidir. Pirolitik yöntemle, üretim hattındaki düz cam kalay banyosundan çıktıktan sonra yaklaşık 600°C sıcaklıkla katkılanmış metal oksit ile kaplanmaktadır (McCurdy, 2000). Bu yöntemle üretilen Low-E kaplamalar, düz cam üretim hattındaki cam üzerine yüksek sıcaklık koşullarında yapıldığından dolayı hat üstü kaplama olarak da adlandırılmaktadır. Şekil 2.3’de hat üstü kaplama hattının şematik görüntüsü yer almaktadır.

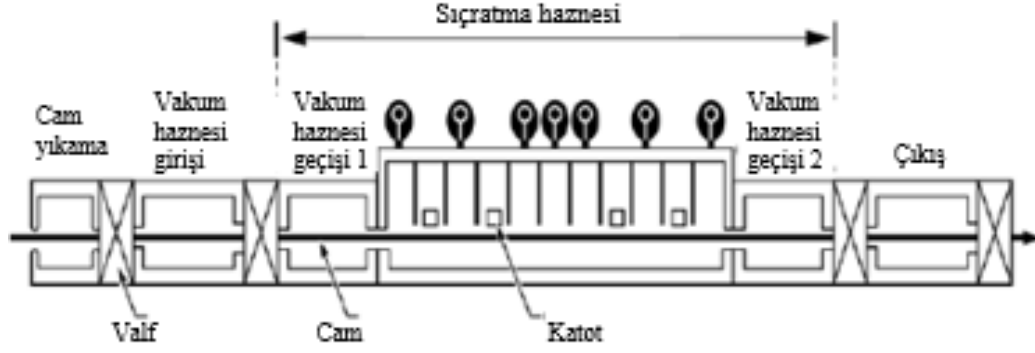


Şekil 2.3 : Hat üstü/Pirolitik kaplama hattı (Ding & Minh).

Kaplama, yüksek sıcaklık koşullarında ve kimyasal reaksiyonlar sonucu üretildiğinden dolayı cam ile kaplama ara yüzeyinde güçlü kovalent bağları oluşmakta ve bunun sonucunda yüksek yapışma derecesine sahip Low-E kaplamalar elde edilmektedir. Sahip olduğu yüksek yapışma derecesi sayesinde pirolitik yöntemle yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalar üretilmektedir (Ding & Clavero, 2017).

2.1.2 Manyetik alan destekli sıçratma yöntemiyle üretilen Low-E kaplamalar-yumuşak kaplamalar

Diğer bir Low-E kaplamalı cam üretim metodu ise FBB yöntemlerinden biri olan manyetik alan destekli sıçratma yöntemidir. Manyetik alan destekli sıçratma yöntemi ile Low-E kaplama üretimi, düz camın üretim hattından çıkıp soğutulmasından sonra yapılmakta ve bu sebeple hat dışı kaplama olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.4’de hat dışı kaplama hattının şematik görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2.4 : Hat dışı/Manyetik alan destekli sıçratma hattı (Ding & Minh).

Bu yöntemle üretilen Low-E kaplamalar, fiziksel bağlarla bağlı metalik esaslı çok katmanlı yapıya sahiptir (Jelle, Kalnes, & Gao, 2015). Sadece fiziksel bağlarla bağlı olan çok katmanlı yapısı sebebiyle, katman malzemelerinin özelliklerine, katmanların tasarımına ve biriktirme parametrelerine bağlı olarak oluşabilecek iç gerilmeler sonucu katmanlar arası yapışma derecesi çok iyi olmamakta ve bu durum çizilme direncini düşürmektedir. Manyetik alan destekli sıçratma yöntemi ile üretilen Low-E kaplamalar, pirolitik yöntemle üretilen Low-E kaplamalara göre her ne kadar daha düşük çizilme direncine sahip olsalar da, sahip olduğu düşük yayılım değeri ve yüksek optik seçicilik özellikleriyle avantaj sağlamaktadır (Jelle, Kalnes, & Gao, 2015). Buna ek olarak, manyetik alan destekli sıçratma yöntemi ile daha yüksek biriktirme hızlarında kaplama yapma imkânı, geniş alanda endüstriyel üretim açısından oldukça önemlidir. Bu nedenlerle, manyetik alan destekli sıçratma yöntemi Low-E kaplama teknolojileri pazarının %90'ını oluşturmaktadır (Ding & Clavero, 2017).

2.2 Metalik Esaslı Çok Katmanlı Kaplamaların Yapısı ve Özellikleri

Manyetik alan destekli sıçratma yöntemi ile üretilen Low-E kaplamalar, metalik esaslı çok katmanlı yapıya sahiptir. Bir Low-E kaplama sistemi temel olarak, metalik katman, dielektrik katman, bariyer katman, çekirdeklendirici katman ve üst katmandan oluşmaktadır. Her bir katmanın, Low-E kaplamanın özelliklerine etki eden farklı bir görevi vardır. Çok katmanlı Low-E kaplamalarda, metal katman sayısı değiştirilerek, daha gelişmiş optik özelliklere sahip kaplamalar elde edilebilmektedir. Günümüzde tekli, ikili ve üçlü metalik katman yapısına sahip düşük yayınlımlı kaplamalar kullanılmakta ve bu konuda araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

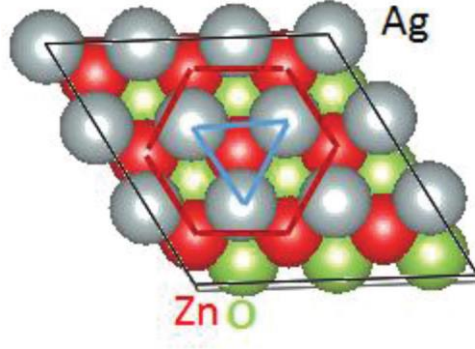
Şekil 2.5’de tek metalik katman içeren düşük yayınlı kaplama sisteminin katman yapısı şematik olarak yer almaktadır.

Üst Katman
Dielektrik Katman
Bariyer Katman-2
Metalik Katman-Gümüş
Çekirdeklendirici Katman
Bariyer Katman-1
Dielektrik Katman
Cam

Şekil 2.5 : Tek gümüşlü düşük yayınlı kaplama sisteminin şematik görüntüsü (Ding & Clavero, 2017).

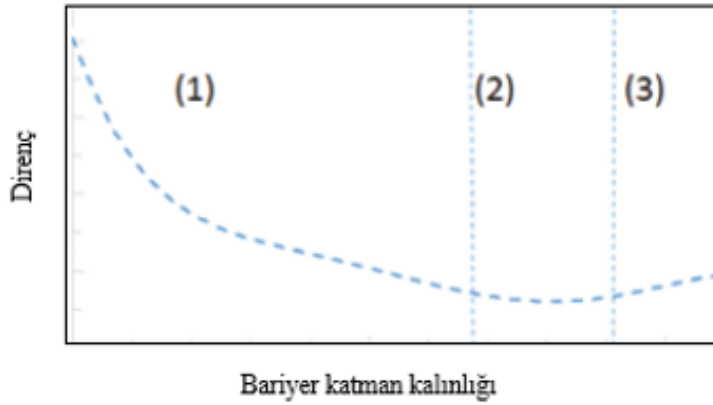
Çok katmanlı Low-E sistemlerde temel katman metalik katmandır ve görevi kızıl ötesi bölgede yansıma sağlamaktır (Jelle, Kalnes, & Gao, 2015). Gümüş, sahip olduğu yüksek iletkenlik değerinin ($6,7 \cdot 10^5 \Omega^{-1}$) yanı sıra, yüksek geçirgenlik ve düşük absorpsiyon özellikleri nedeniyle metalik katman olarak tercih edilmektedir (Meng, Zeng, Dai, Li, & Li, 2014), (Ding & Clavero, 2017), (Ferrara, Castaldo, Esposito, & D'Angelo, 2015). Yüksek optik ve mekanik performansa sahip bir Low-E kaplama elde edebilmenin en kritik aşamaları yüksek kalitede bir gümüş filmi biriktirmek ve elde edilen gümüş filmini kaplama süresince korumaktır (R.J. Martin-Palma, 1998). Gümüş filmin kristal boyutu, tane boyutu, tane sınırları, yüzey pürüzlülüğü gibi mikro yapısal özellikleri filmin elektriksel ve optik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Buna ek olarak, gümüş filminin altında yer alan katmanın mikro yapısı, üzerinde biriktirilen gümüşün elektriksel ve optik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenlerle, gümüş filminden önce çekirdeklendirici katman kullanılmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, çekirdeklendirici katman olarak çoğunlukla ZnO tercih edilmektedir. Kristal ZnO tabakası ile Ag arasında latıs uyumsuzluğu yaklaşık %2,6 gibi düşük bir değerde olup, gümüş ZnO üzerinde (111) yönünde büyümektedir ve bu sayede minimum dirence sahip gümüş

filmi üretilmektedir. (Ding & Clavero, 2017). Gümüşün, ZnO tabakası üzerinde büyüme yönünün şematik görüntüsü Şekil 2.6’da yer almaktadır.



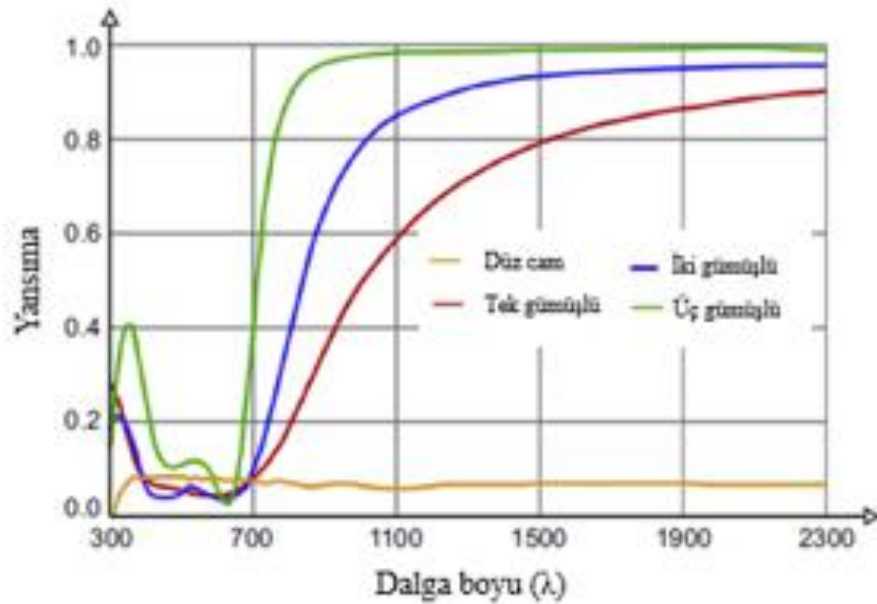
Şekil 2.6 : ZnO üzerinde Ag (111) büyümesi (Ding & Clavero, 2017).

Bariyer katman-1, camın içerisinde bulunan Na, K gibi aktif elementlerin kaplama koşullarında oluşabilecek yüksek sıcaklık ve basınç ortamında gümüşe difüze olmasını engelleyerek Na/K bariyeri görevi görmektedir. Bariyer katman-2 ise, sıçratma prosesi boyunca gümüş tabakasını koruyarak, yüksek kararlılık sağlamaktadır (Yang, Zhao, Zhao, & Li, 2013). Literatür çalışmalarına bakıldığında, bariyer katman olarak genellikle SiO_x , SiO_xN_y , ve SiN_x kullanılmaktadır (Malecka J. K., 2012), (Malecka, Kelly, West, & Ridealgh, 2014). Kullanılan bariyer katmanın kalınlığı, Low-E kaplamanın direncini önemli ölçüde etkilemektedir. Bariyer katmanın çok ince olması, yayınım/direnç oranının yüksek olmasına sebep olurken, belirli bir kritik kalınlık üzerinde bu oran minimum olarak elde edilebilmektedir (Ding & Clavero, 2017). Şekil 2.7’de bariyer katman kalınlığının değişime bağlı olarak Low-E kaplamalı camın direnç değişim eğrisi yer almaktadır.



Şekil 2.7 : Bariyer katman kalınlığının düşük yayınlı kaplamalı sistemin direncine etkisi (Ding & Clavero, 2017).

Gün ışığı geçirgenlik kaybını en aza indirmek ve IR bölgede yüksek yansıtıcılık elde etmek amaçlı, metalik katman iki dielektrik katman arasında olacak şekilde tasarım yapılmaktadır. Kullanılan dielektrik katman, yüksek ışık geçirgenliği sağlamasının yanı sıra kimyasal ve mekanik kararlılık sağlamakta ve bir sonraki katman için çekirdeklendirici tabaka görevi görmektedir. Dielektrik katman olarak, genellikle SnO_2 , TiO_2 , ZnO , ZnSnO_3 , Si_3N_4 , SiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , Nb_2O_3 katmanları kullanılmaktadır (Wegener, 2015). Kaplama sisteminde en üste yer alan üst katman ise koruyucu katman görevi görmekte ve genel yapıyı kimyasal ve mekanik etkilerden korumaktadır (Yang, Zhao, Zhao, & Li, 2013). Görünür ve IR bölgede, daha yüksek optik seçicilik elde etmek amaçlı iki ve üç gümüşlü Low-E kaplamalı sistemler geliştirilmiştir. Tek gümüşlü, iki gümüşlü ve üç gümüşlü Low-E kaplama sistemlerinin kalınlığı sırasıyla yaklaşık olarak 100nm, 200nm ve 300nm'dir. Low-E sistemleri, gümüş film kalınlığını artırmak yerine çok sayıda ince film gümüş katmanı içerecek şekilde tasarlanmakta ve gün ışığı geçirgenlik değerinin düşmesi engellenerek optik seçiciliği yüksek kaplamalar elde edilmektedir. Şekil 2.8'de kaplamasız düz cam, tek gümüşlü, iki gümüşlü ve üç gümüşlü kaplamalara ait yansıma eğrileri yer almaktadır. Buna göre, gümüş sayısı arttıkça, yansıma değerleri görünür bölgede düşmekte, IR bölgede ise artmaktadır (Meng, Zeng, Dai, Li, & Li, 2014), (Wegener, 2015).



Şekil 2.8 : Düz cam ve tek-iki-üç gümüşlü Low-E sistemlerinin yansıma değerleri (Ding & Minh).

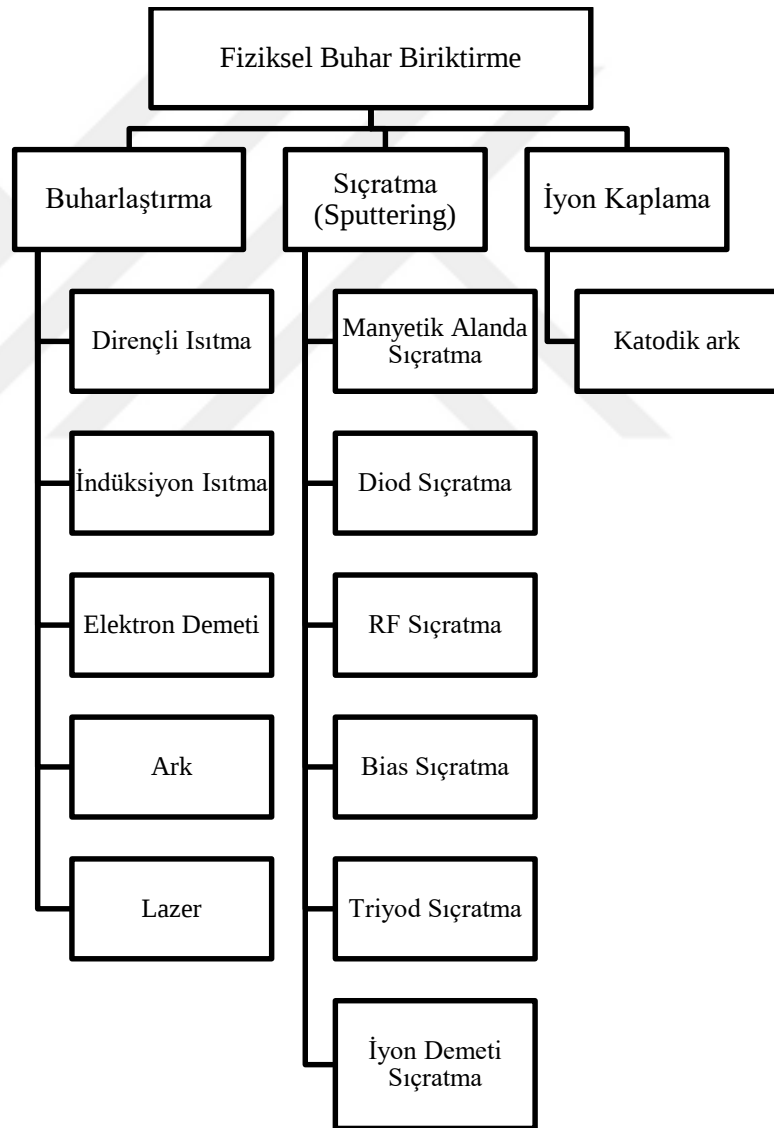
Farklı Low-E kaplama tasarımları yapılarak farklı optik ve mekanik özelliklere sahip Low-E kaplamalar üretilmektedir. Şekil 2.9’da farklı kaplama tasarımlara sahip olmanın sonucu olarak farklı optik özellikler gösteren Low-E kaplamalı camların şematik görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2.9 : Farklı optik özelliklere sahip Low-E kaplamalı camların şematik görüntüsü (Theiss, 2018).

3. VAKUM ALTINDA SIÇRATMA İLE KAPLAMA YÖNTEMİ

Fiziksel buhar biriktirme ile kaplama, vakum altında katı hedef malzemesinin buharlaştırılarak ya da sıçratma ile hedef malzeme yüzeyinden atom kopartılarak altlık malzeme üzerinde biriktirilmesidir. Sıçratma yöntemi bir FBB yöntemi olup, sınıflandırma tablosundaki yeri ve çeşitleri Şekil 3.1’de yer almaktadır.



Şekil 3.1 : FBB yöntemleri.

Sıçratma yöntemi, buharlaştırma yöntemine göre daha yaygın tercih edilen bir biriktirme yöntemidir. Sıçratma yöntemi ile,

- Yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemeler veya dielektrik malzemeler biriktirilebilmektedir.
- Hedef malzemenin sitokiyometrisine yakın kaplamalar üretmek mümkündür.
- Çok geniş alanların kaplanması ve endüstriyel kaplamalar üretilmektedir.
- Biriktirme işleminin yanı sıra, kaplama öncesi iyon bombardımanı yapılarak altlık malzeme temizlenebilmekte ve kaplamanın yapışma, mukavemet ve yapı özellikleri değiştirilebilmektedir (Frey, Cathode Sputtering, 2015).
- XPS, AES gibi yüzey analizi tekniklerinde kullanılmaktadır (Kazmanlı, 2017).

Sıçratma ile kaplama yönteminde gerekli koşullar aşağıdaki gibidir.

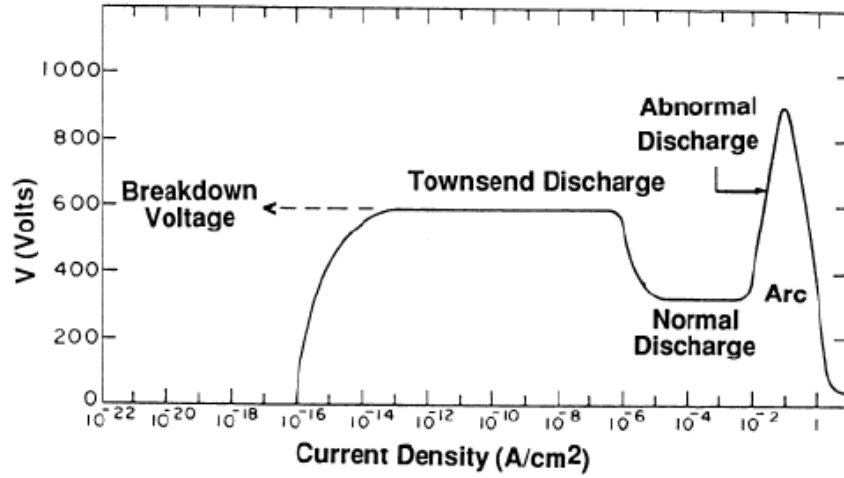
1. 10^{-5} Torr ve altı vakum koşulları sağlanmalıdır.
2. Sıçratılan hedef malzeme atomlarının altlık üzerine transferi süresince gaz atom veya molekülleri ile çarparak enerjisini kaybetmemesi için ortam basıncının düşük olması gerekmektedir (Mattox, 2010).

Sıçratma ile kaplamada ilk adım vakum haznesindeki nem ve kirlilik oluşumunu önlemek için yeterli vakum seviyesine ulaşmaktır. Sistem yeterli vakum seviyesine getirildikten sonra genellikle Ar olacak şekilde belirli basınçta inert gaz sisteme gönderilmekte ve sonrasında sisteme güç uygulanmaktadır. Sisteme uygulanan güç sonrası, ortamda bulunan Ar gazı iyonlaşarak Ar^+ iyonlarını oluşturmakta ve sistemde plazma oluşturulmaktadır. Plazma oluşumu sırasında ışık yayıldığı için ışıltılı deşarj olarak da adlandırılmaktadır. Oluşan plazmanın rengi kullanılan sıçratma gazına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 3.2’de farklı sıçratma gazlarının kullanımı sonucu oluşan plazmalar yer almaktadır.



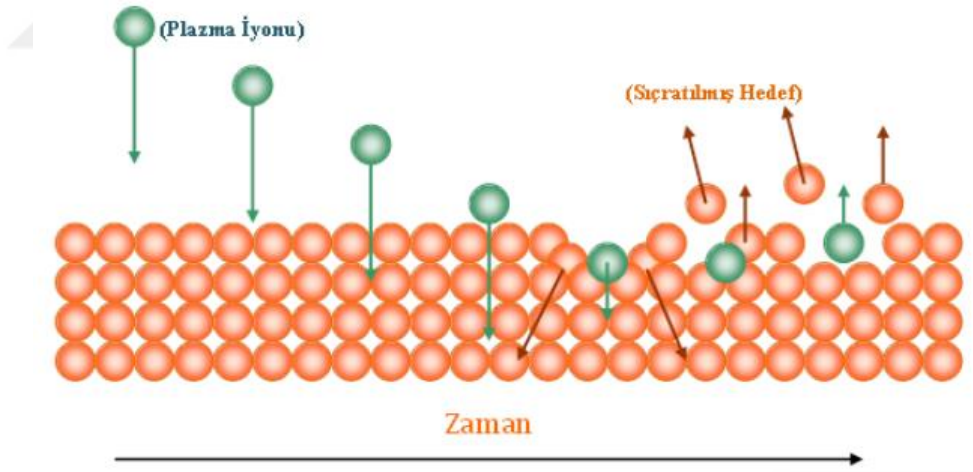
Şekil 3.2 : Plazma oluşumu (Ardenna, 2018).

Sıçratma prosesi, Şekil 3.3’de yer alan abnormal discharge bölgesinde yapılmaktadır.



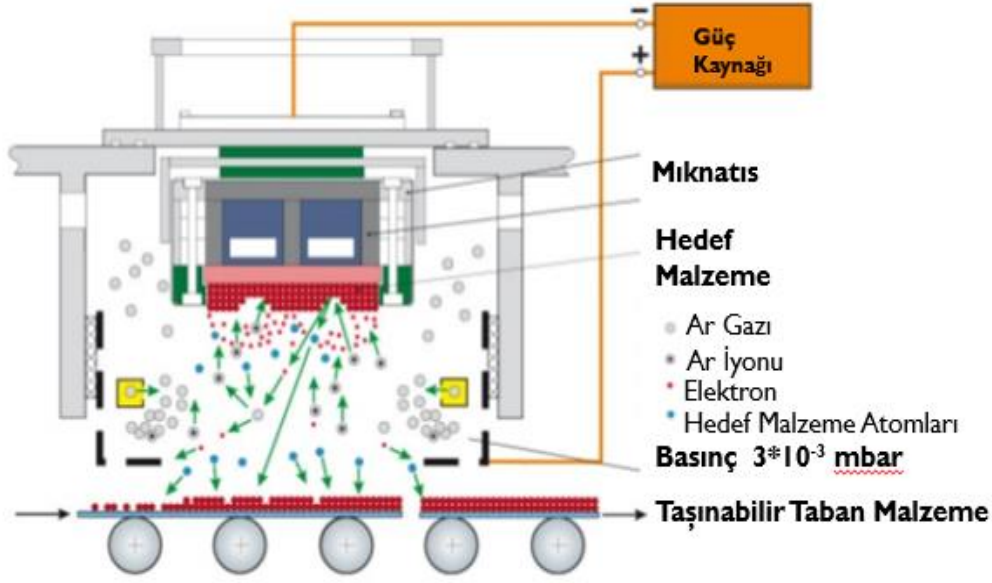
Şekil 3.3 : Işıltılı deşarj(glow discharge) oluşturma koşulları (Kazmanlı, 2017).

Elektrik alan etkisi altında hızlandırılmış Ar^+ iyonları hedef malzeme yüzeyine çarparak momentum transferi sonucunda yüzeyden atomları sıçratmaktadır. Sıçratma ile kaplama süresince, zamana bağlı olarak hedef malzeme(katot) yüzeyindeki değişim şematik olarak Şekil 3.4’de gösterilmektedir.



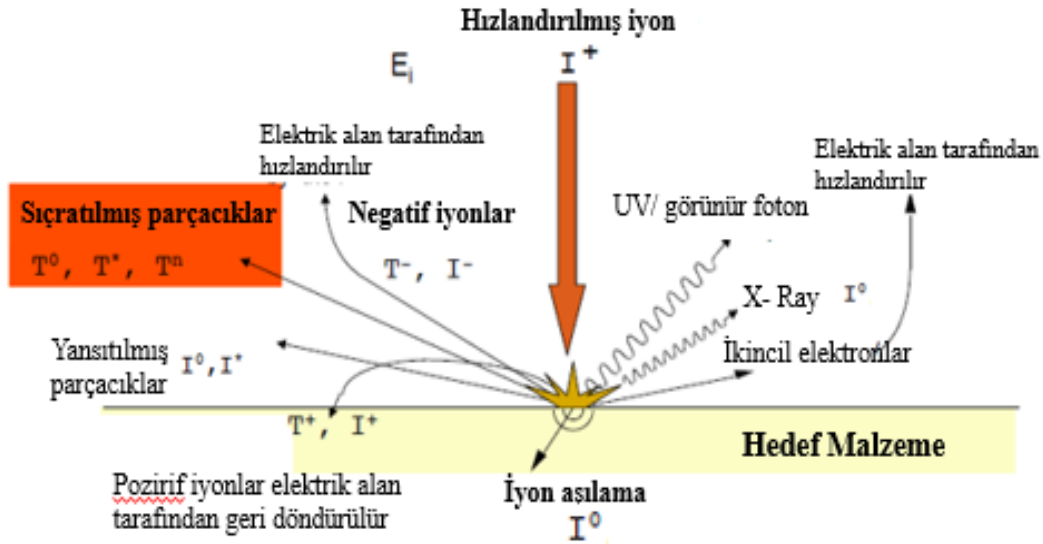
Şekil 3.4 : Sıçratma işleminde hedef malzemenin zamana bağlı olarak değişimi (Güler, 2018).

Sıçratılan hedef malzeme atomlarının altlık üzerinde birikmesi ile kaplama başlamaktadır (Kazmanlı, 2017). Sıçratma prosesinin şematik görüntüsü Şekil 3.5’de yer almaktadır.



Şekil 3.5 : Sıçratma ile kaplama yönteminin şematik görüntüsü (Kazmanlı, 2017).

Ar^+ iyonları ile hedef malzeme yüzeyi arasındaki etkileşim sonucu elastik ve elastik olmayan çarpışmalar gerçekleşmektedir. İyon-yüzey etkileşimi Şekil 3.6'da yer almaktadır.



Şekil 3.6 : İyon-yüzey etkileşimi (Kazmanlı, 2017).

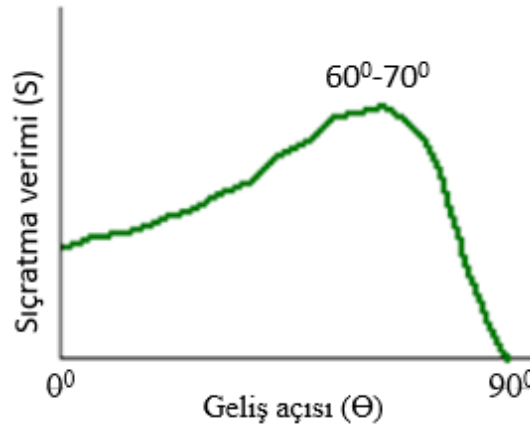
İyon, hedef malzeme yüzeyine çarptığında iyonun sahip olduğu hızlandırma voltajına bağlı olarak, yansıma, adsorbsiyon, sıçratma, iyon aşılama, elektron yayını, foton yayını ve kimyasal reaksiyonlar oluşabilmektedir.

- Hızlandırma voltajı 5eV ‘den küçük → adsorbsiyon veya yansıma
- 5 – 10eV arasında → Yüzey hasarı ve migrasyon
- 10eV ‘den büyük → İyon aşılama meydana gelmektedir (Majeed, 2013).

Sıçratma ile kaplama yönteminin önemli kavramlardan bir tanesi sıçratma verimi (S)’dir. Sıçratma verimi, hedef malzemedan sıçratılan atom sayısının hedef malzemeye çarpan iyon sayısına oranı olarak ifade edilmektedir. Sıçratma verimi,

- Hedef malzeme atomlarının bağlanma enerjisine ve atomik kütlesine,
- Sıçratma gazının atomik kütlesine ve uyarıcı voltajına
- Hızlandırılmış iyonun, hedef malzemeye geliş açısına bağlıdır (Kazmanlı, 2017), (Mattox, 2010).

Sıçratma veriminin, hızlandırılmış iyonun geliş açısına bağlı değişimi Şekil 3.7’de yer almaktadır. Buna göre en yüksek sıçratma verimi yaklaşık olarak 70^0 gelme açısı ile elde edilmektedir.

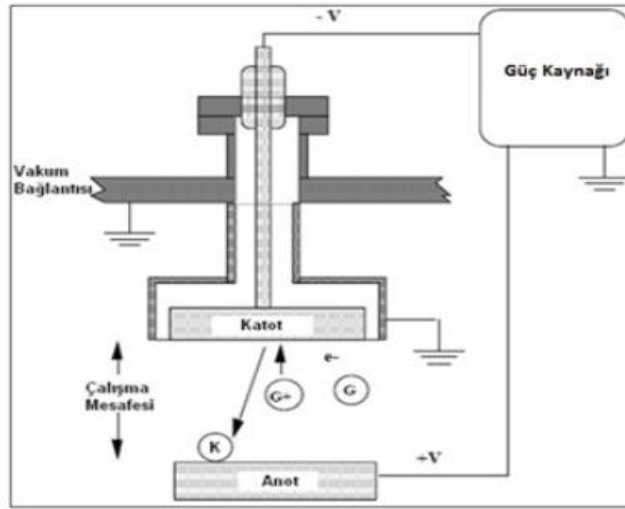


Şekil 3.7 : Sıçratma veriminin hızlandırılmış iyonun geliş açısına bağlı olarak değişimi (Kazmanlı, 2017).

Sıçratma ile kaplama yöntemi temelde diode sıçratma, triod sıçratma ve manyetik alan destekli sıçratma yöntemi olarak sınıflandırılmaktadır.

3.1 Diode Sıçratma Tekniği

DC diode tekniği en temel sıçratma ile kaplama tekniğidir. Şekil 3.8’de, diode sıçratma tekniği ile kaplamanın şematik görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3.8 : Diode sıçratma ile kaplama yönteminin şematik görüntüsü (Güler, 2018).

Vakum altında, hedef malzemesi katot, kaplanacak olan altlık malzeme ise anot olacak şekilde, hedef malzemeden çıkan ikincil elektronlar ortamda bulunan gaz atomlarını iyonize ederek plazma oluşturulmakta ve elektrik alan altında belirli bir kinetik enerjiye sahip olan iyonların hedef malzeme yüzeyi ile etkileşimi sonucu yüzeyden atomlar sıçratılmaktadır. Sıçratılmış olan atomlar, anot üzerinde yoğunlaşarak kaplanmaktadır (Mattox, 2010). Altlık malzeme topraklanması durumunda, tüm vakum haznesi anot olmakta ve kaplanmaktadır. Altlık malzemeye bias voltaj uygulandığında ise, sıçratılmış atomlar altlık üzerine yoğunlaştırılarak kaplama yapılmaktadır (Waite, Shah, & Glocker, 2007). Bu yöntem, hedef malzeme yüzeyinde homojen bir plazma üretebilme imkânı sağlaması yönünden avantajlıdır. (Mattox, 2010). Ancak, DC diode sıçratma tekniği, ikincil elektronların düşük iyonizasyonu ve iyonizasyon için gerekli olan yüksek basınç oranının biriktirme hızını düşürmesi nedenleriyle düşük sıçratma hızına sahiptir ve bu yöntemle yalnızca iletken malzemeler kaplanabilmektedir. Bu nedenlerle, yaygın olarak kullanılan bir sıçratma tekniği değildir (Mattox, 2009).

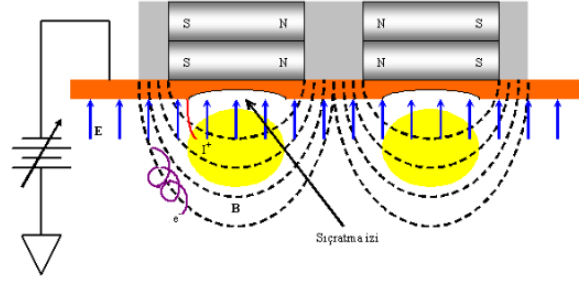
3.2 Triyod Sıçratma Tekniği

Triyod sıçratma tekniği, filaman, bias voltaj ve manyetik alanın kullanıldığı bir sıçratma tekniğidir. Sıcak tungsten filaman katot kullanılarak ya da oyuklu katot kullanılarak üretilen elektronlar yardımıyla iyonlaşma seviyesi artırılmakta, anot elektroda bias voltaj uygulanarak ise elektrik alan kuvveti artırılmaktadır. Elektrik

alana ek olarak manyetik alan kullanılarak plazma yoğunlaştırılmaktadır (Frey, 2015). Filaman, bias voltaj ve mıknatıs üçlüsü kullanılarak yapılan triyod sıçratma tekniğinin şematik yapısı Şekil 3.9'da gösterilmektedir.

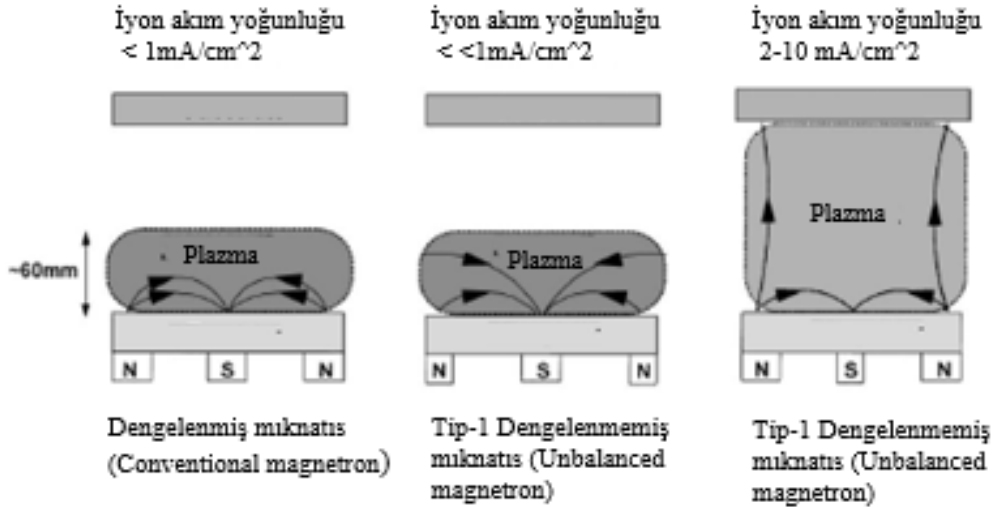
Şekil 3.9 : Triyod sıçratma ile kaplama yönteminin şematik görüntüsü (Güler, 2018).

3.3 Manyetik Alan Destekli Sıçratma Tekniği



Şekil 3.10 : Manyetik alan çizgilerinin şematik görüntüsü (Güler, 2018).

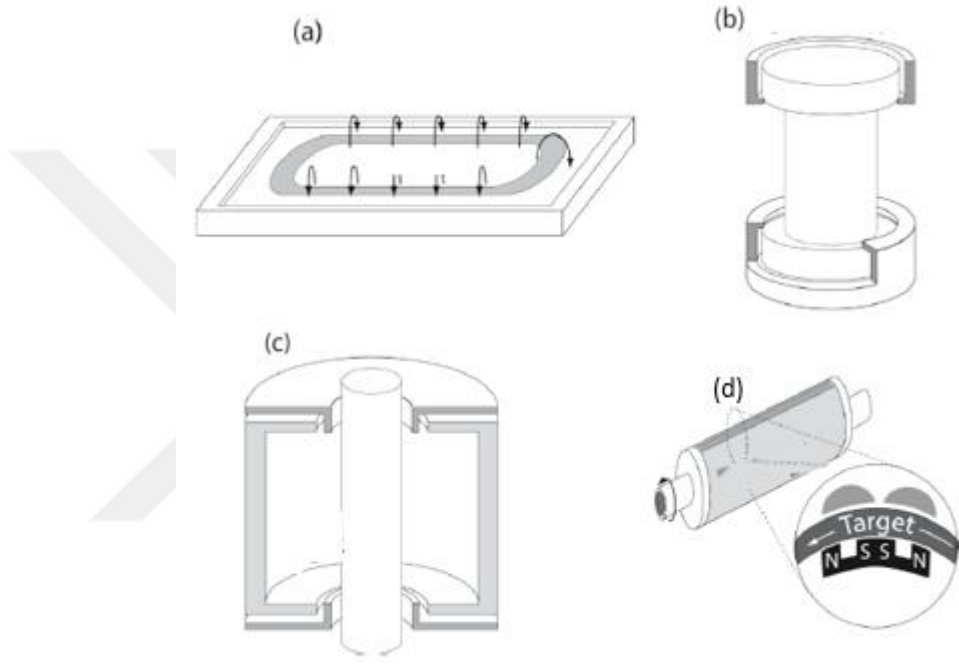
Homojen oluşturulmuş bir manyetik alan sayesinde, hedef malzeme yüzeyinde dolaşan elektronlar sürekli bir akım oluşturmakta ve iyonizasyon derecesini artırmaktadır. Bu sayede, hedef malzeme yakınında yoğun plazma oluşturularak yüksek sıçratma hızı ve dolayısıyla yüksek biriktirme hızı sağlanmaktadır. Farklı mıknatıs tasarımlarına bağlı olarak plazma kontrol edilebilmekte ve akım yoğunlukları değiştirilebilmektedir. Şekil 3.11’de kullanılan 3 tip mıknatıs ve buna bağlı olarak iyon akım yoğunluğundaki değişim yer almaktadır (Kelly & Arnell, 2000).



Şekil 3.11 : Manyetik alan çizgilerinin yönlendirilmesine bağlı olarak akım yoğunluğunun değişimi (Kelly & Arnell, 2000).

Manyetik alan destekli sıçratma yönteminde en önemli değişken kaplama basıncıdır ve 0,5mTorr gibi düşük basınç değerlerinde kaplama yapılabilir. 5mTorr ve altındaki basınç değerlerinde, hızlandırılmış iyonlar hedef malzeme yüzeyine yüksek enerji değerlerinde çarpmakta ve filmin kalınlığı, gerilmesini, yoğunluğunu, kompozisyonunu ve film içerisindeki gerilmenin dağılımını önemli ölçüde

etkilemektedir. Vakum haznesine reaktif bir gaz gönderildiği durumda reaktif sıçratma ile biriktirme yapılabilir ancak yüksek oranda gönderilen reaktif gaz hedef malzeme üzerine kaplanarak katot zehirlenmesi denilen duruma sebep olmaktadır. Katot zehirlenmesi durumunda ise sıçratma hızı düşmekte ve kaplanan filmin özellikleri değişmektedir (Mattox, 2009). Manyetik katot geometrileri dikdörtgen, dairesel, oyuklu ve döner yapıda olacak şekilde farklı geometrilerde bulunmaktadır (Rockett, 2008). Şekil 3.12’de farklı geometrilerde sahip katotların şematik görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3.12 : Sıçratma prosesinde kullanılan farklı geometrilerde sahip katot(hedef) malzemeleri a)dikdörtgen katot, b)silindirik katot, c)oyuklu katot, d)rotasyonel katot (Rockett, 2008).

Manyetik alan destekli sıçratma yöntemi kullanılarak;

- Geniş ölçekli endüstriyel kaplamalar yapılabilmekte,
- Yüksek biriktirme hızlarına ulaşılabilmekte,
- İletken, yalıtkan malzemeler kaplanabilmektedir.



4. LOW-E KAPLAMALI CAMLARIN ÇİZİLME DİRENÇLERİNİN BELİRLENMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR

Çok katmanlı kaplama sistemlerinin çizilme direnci hem altlık malzemenin hem de katmanların mekanik özelliklerinin yanı sıra katman-katman ara yüzey ve altlık-katman ara yüzey özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Metalik esaslı Low-E kaplamalarda, çizilme direncine etki eden parametreler aşağıda belirtilmiştir (Bull S. J., 2005), (Leyland & Matthews, 2000).

- Katmanların ve altlık malzemesinin sertliği
- Katmanların ve altlık malzemesinin elastik modülü
- Katmanların H/E Oranı
- Son katmanın sürtünme katsayısı
- Kaplama sisteminin toplam iç gerilmesi
- Katman-katman ve altlık-katman ara yüzeylerinin yapışma kuvveti
- Toplam film kalınlığı
- Son katman ve ara yüzey pürüzlülüğü
- Katmanların kırılma tokluğu

Kaplama katmanlarının sertliği, çizilme direncini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Her zaman geçerli olmamakla birlikte, kaplamanın sertlik değerinin artışı aşınma direncini artırmaktadır (Svec, Brusilova, & Kozankova, 2009, s. 34). Leyland ve arkadaşları, yaptıkları çalışmalar sonucunda düşük sertliğe sahip malzemelerin daha yüksek çizilme direncine sahip olabileceği sonucuna ulaşmışlardır (Leyland & Matthews, 2000). Bu sebeple, malzemelerinin sertlik değeri tek başına çizilme direnciyle ilgili kesin bilgi vermemekte, sertlik yerine sertlik/elastik modül oranı kullanılarak çizilme dirençleri değerlendirilmektedir. Malzemelerin sertlik/elastik modül oranı, çizilme direncine ek olarak malzemenin sürtünme katsayısı hakkında da bilgi vermektedir. Bu doğrultuda, sertlik/elastik modül oranı yüksek olduğunda, malzeme düşük sürtünme katsayısına sahip olmakta ve buna bağlı olarak yüksek

çizilme direnci göstermektedir (Ni, Cheng, Lukitsch, Weiner, & Lev, 2004), (Leyland & Matthews, 2000). Kaplamaların çizilme dirençlerini etkileyen bir diğer faktör ise iç gerilmelerdir. Kaplamada iç gerilmelerin artışı, tabakalar arasındaki yapışma derecesini düşürmekte ve bunun sonucunda çizilme direncini düşürmektedir. Metalik esaslı Low-E kaplamalar sahip olduğu çok katmanlı yapı sebebiyle iç gerilmelerin yüksek olduğu kaplamalardır ve çekme yönünde oluşan yüksek iç gerilmelerin varlığı herhangi bir dış gerilme olmaksızın kaplamada hasara sebep olabilmektedir (Pulker, 1999). Kaplamaların çizilme direncini etkileyen bir başka faktör ise kaplama kalınlığıdır. Boentoro ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, kaplama kalınlığındaki artış sonucunda kaplamanın çizilmesi için gerekli kritik yük miktarının da arttığı sonucuna ulaşmışlardır (Boentoro, Pflug, & Szyszka, 2008). Kaplama ve ara yüzey pürüzlülüğünün yüksek olması durumunda ise, yük altında yerel olarak gerilim farklılıkları oluşmakta ve kaplama sahip olduğu çizilme direncinden daha düşük değerlerde hasara uğrayabilmektedir (Bull & Berasetegui, 2006). Ara yüzey kırılma tokluğu ise, çatlak oluşumu için veya yapıda bulunan çatlakların ara yüzey boyunca ilerlemesi için gerekli olan enerji olarak tanımlanmaktadır. Ara yüzey kırılma tokluğunun yüksek olması, yapışma derecesinin yüksek olduğunu göstermekte ve bu sayede çizilme direnci yüksek olmaktadır (Zhou, Chen, & Hoh, 2016).

4.1 Çizilme Dirençlerinin Belirlenmesi

İnce film kaplamaların çizilme dirençleri, genellikle katmanlar arası yapışma kuvveti ölçülerek değerlendirilmektedir (Bull S. , 2015). Kaplamaların yapışma kuvvetini ölçmek için kullanılan yöntemler Çizelge 4.1 'de yer almaktadır.

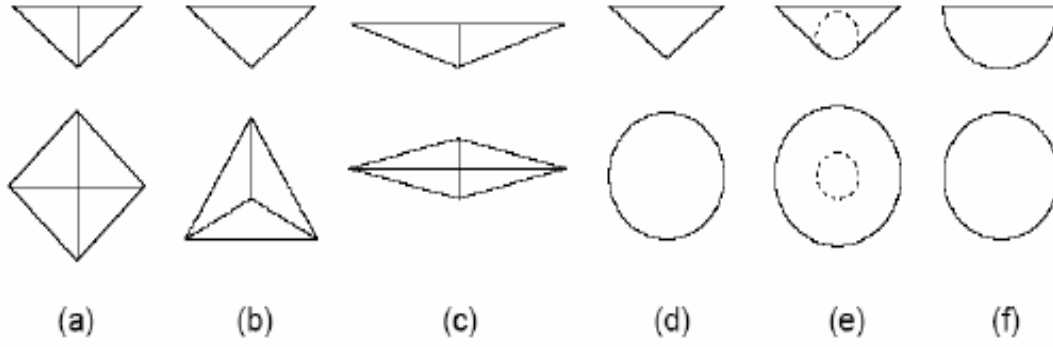
Çizelge 4.1 : Kaplamaların yapışma kuvveti ölçüm yöntemleri (Bull S. , 2015).

Yapışma kuvveti ölçüm yöntemleri	
Bant testi	Eğme testi
Ovalama testi	Superlayer test
Pull-off testi	Çizik testi
Kesme testi	İndentasyon

4.1.1 Nanoçizik testi

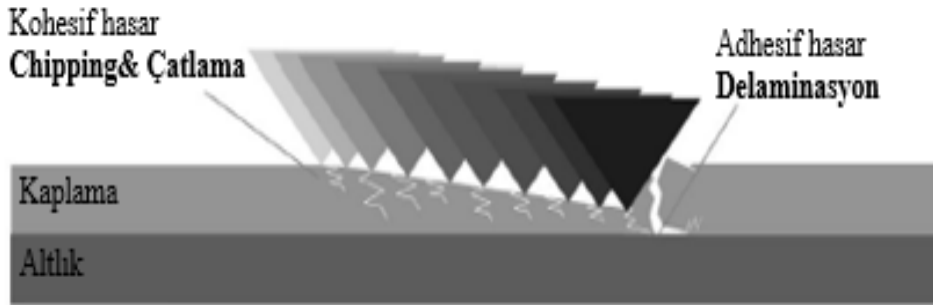
The diagram illustrates a scratch test on a thin film coating. A blue rectangular plate represents the substrate with a thin grey layer on top labeled "İnce film kaplama" (Thin film coating). A grey cylindrical indenter with a conical tip is shown moving from left to right across the surface. A blue arrow labeled "Uygulanan yük" (Applied load) points down on the indenter. A blue arrow labeled "Batici uç" (Indenter tip) points to the tip of the indenter. A blue arrow labeled "Çizik yönü" (Scratch direction) points to the right. A blue line on the surface represents the scratch path. A blue arrow labeled "Artan yük çizik testi" (Increasing load scratch test) points to the scratch path.

Kritik yük değeri; yükleme hızı, çizme hızı, batıcı uç şekli, batıcı uç yarıçapı ve batıcı uç açısı gibi çizik testi parametrelerine göre değişmektedir (Jesse, 2010). Bu sebeple, çizik testi yarı nicel bir karakterizasyon yöntemidir (Bull S. , 2015). Çizik testinde kullanılan farklı batıcı uçların şematik görüntüsü Şekil 4.2’de yer almaktadır.



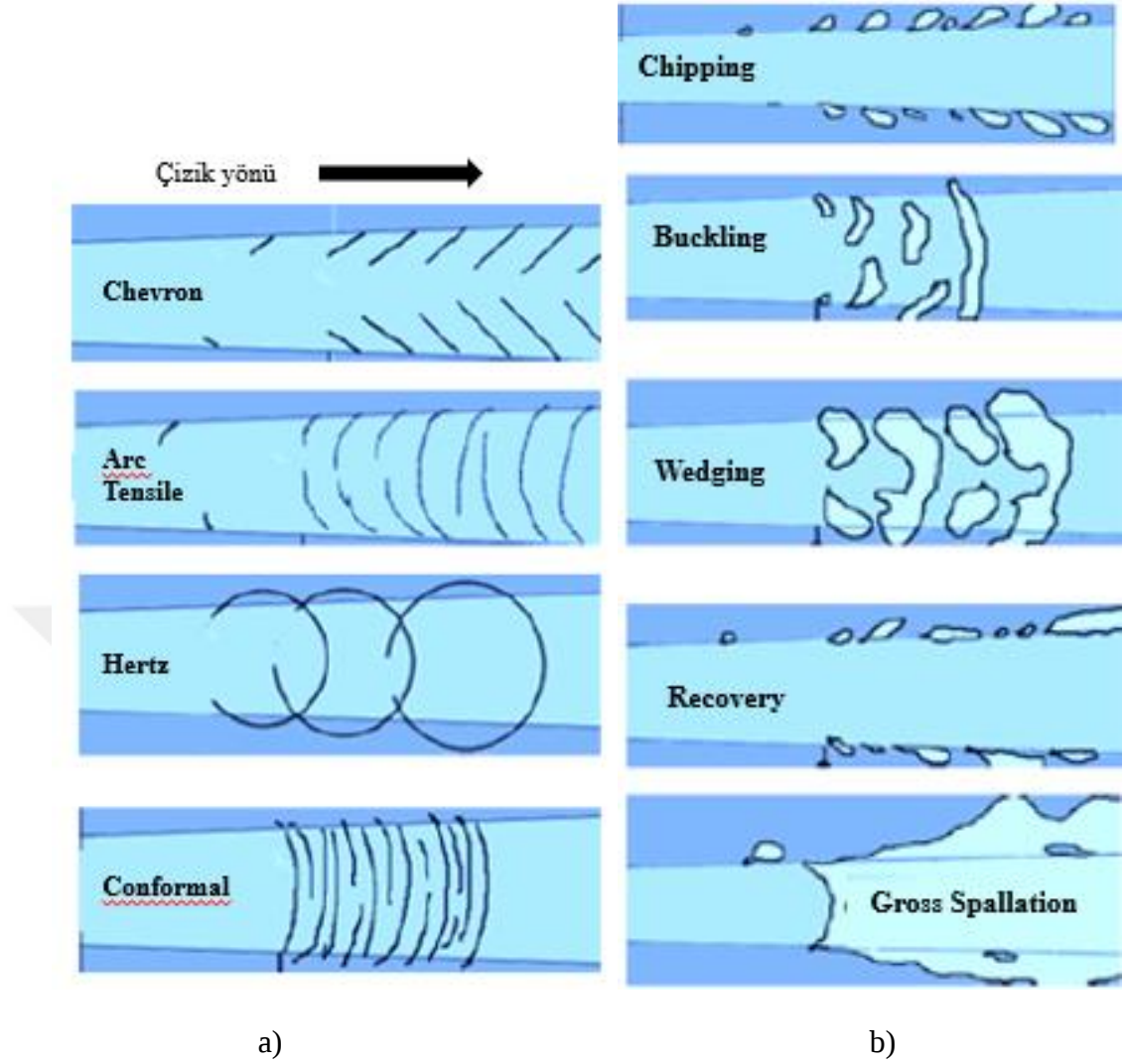
Şekil 4.2 : Nanomekanik test cihazında kullanılan batıcı uçların şematik görüntüleri, a)vickers, b)berkoviç, c)knoop, d)konik e) konik küresel (rockwell) f)küresel (Kim, 2007).

Çizik testi sonucunda, malzeme yüzeyinde oluşan hasarlar karakteristiktir ve hasarın oluşum mekanizmasına dair bilgi vermektedir (Li, 2013). Kaplamalı sistemlerde hasar oluşumu, adhesif hasar ve kohesif hasar olarak iki şekilde meydana gelmektedir. Hasar oluşumu, kaplama kalınlığı içerisinde gerçekleştiğinde kohezif hasar, kaplama ve altlık malzeme ara yüzeyinde gerçekleştiğinde ise adhesif hasar olarak adlandırılmaktadır (Li, 2013). Şekil 4.3’de adhesif ve kohezif hasar türleri şematik olarak yer almaktadır.



Şekil 4.3 : Kohezif hasar ve adhesif hasar oluşumu (Li, 2013).

Kohezif hasar, plastik deformasyon veya çatlama şeklinde meydana gelirken, adhesif hasar kaplama ve altlık ara yüzeyinin ayrılması sonucu meydana gelmektedir. Adhesif ve kohesif hasar oluşumları, çizik şeklinin karakteristiğine bakılarak anlaşılabilmektedir. Şekil 4.4’de adhesif ve kohezif hasar durumunda oluşan çiziklerin karakteristik görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 4.4 : Çizik testi sonrası oluşan hasarların karakteristik şekilleri a)kohezif hasar oluşumları b)adhezif hasar oluşumları (Li, 2013).

Kohezif hasar, batıcı uç aracılığıyla kaplama üzerine çekme gerilmesi oluşturulması sonucu meydana gelmektedir. Kohezif hasarlar, mekanizmasına göre farklı şekillerde çizik oluşumuna yol açmaktadır. Çekme gerilmesi sonucu yarı dairesel oluşumların varlığı (Arc Tensile), batıcı ucun kaplamada mikro çatlak oluşumuna sebep olduğunu göstermektedir. Hertz çatlama (Hertz cracking) ile sonuçlanan hasarlarda, çizik oluşu boyunca ilerleyen mikro çatlakların varlığından bahsedilmektedir. Konformal (Conformal) hasar ise, kaplamanın çizik testi boyunca oluşan iz boyunca büzülerek hasara uğraması sonucu meydana gelmektedir. Adhesif hasar oluşumu ise, basma gerilmesi sonucu meydana gelmektedir. Adhesif hasar, kaplamanın çatlaması, kalkması (buckling) veya yüzeyden tamamen ayrılması şeklinde meydana gelebilmektedir. Çatlayarak atma hasarı (chipping), çizik kenarlarındaki bölgelerin

tamamen altlıktan kalktığını göstermektedir. Kaplama, batıcı uç altında kabarmaya başlaması ile geniş yarı dairesel şekiller oluşturmaları sonucu kaplama yüzeyden kalkarak dökülme (buckling) hasarına uğramaktadır. Recovery denilen çizik hasarı, çizik kenarları boyunca elastik toparlanmanın olduğu çizik hasarlarını göstermektedir. Gross Spallation denilen hasar ise, kaplamanın tamamen altlık üzerinden kalktığını göstermektedir (Roy & Davim, 2014).

4.2 Meydana Gelen Çizik Hasarları Ve Çizilme Direncinin Geliştirilmesi İçin Yapılan Çalışmalar

4.2.1 Meydana gelen çizik hasarları

Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere, yumuşak Low-E kaplamalı camlar, düşük çizilme direncine sahip olması sebebiyle atmosferle temas etmeyecek şekilde ısı yalıtım ünitesi haline getirilerek kullanılmaktadır. Low-E kaplanmış cam, kaplama hattından çıktıktan sonra kaplamalı yüzeye polimer esaslı toz püskürtülerek taşıma esnasında istiflenen camların birbirine temas etmesi engellenmektedir. Ancak, üretim alanından ısı yalıtım ünitesi haline getirilmek amaçlı bayiliklere taşınması süresince çizik oluşumları meydana gelmektedir (Bull S. , 2015). Şekil 4.5’de Low-E kaplamalı camlarda taşıma esnasında, yüzeye püskürtülen polimer esaslı tozlar etkisiyle oluşan çizik hasarlarının makro fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 4.5 : Low-E kaplamalı camlarda taşıma esnasında oluşan çizik hasarları.

Taşınması sonrasında ısı yalıtım ünitesi haline getirilme süresince sırasıyla kenar sıyırma, koparma-istifleme, kenar işleme ve yıkama işlemleri yapılmaktadır (Özer , 2017). Bu aşamalarda da kaplama yüzeyinde görülebilir çizik oluşumları meydana

gelebilmektedir. Şekil 4.6’da ise ısı yalıtım ünitesi üretimi aşamalarında meydana gelen çizik hasarlarının makro fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 4.6 : Low-E kaplamalı camlarda ısı yalıtım ünitesi üretimi esnasında oluşan çizik hasarları.

Kaplamada çizik oluşumu üretim maliyetini artırdığından dolayı istenmeyen bir durumdur. Plastik deformasyonun çok az olduğu küçük çizik oluşumları genellikle gözle görülebilir değildir ve problem oluşturmamaktadır ancak plastik deformasyonun yüksek olması çiziklerin gözle görülebilirlik derecesini artırmakta ve istenmeyen hasar oluşumları meydana gelmektedir (Bull S. , 2015).

4.2.2 Çizilme direncinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar

Çok katmanlı yapılarda, daha önce de bahsedildiği gibi katmanların ve altlık malzemenin mekanik özellikleri, ara yüzey yapışma derecesi, katmanların pürüzlülüğü, iç gerilmeler, ara yüzey kırılma tokluğu kaplamanın çizilme direncini etkileyen faktörlerdendir. Bu konuda yapılmış literatür ve patent çalışmalarına bakıldığında, çizik oluşumunu önlemek için iki farklı yaklaşımın olduğu sonucuna varılmıştır. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, çok katmanlı Low-E kaplamalar, üretim süreçleri sonucu yalnızca fiziksel bağlar içeren yumuşak kaplamalardır. Hem sahip olduğu çok katmanlı yapısı hem de zayıf fiziksel bağların varlığı nedeniyle iç gerilme oluşumları meydana gelmektedir. İç gerilmeler ise, çizilme direncini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Birinci yaklaşımda, temel olarak iç gerilmelerin azaltılması ile katmanların yapışma derecesi artırılmakta ve çizilme direnci geliştirilmektedir. Manyetik alanda sıçratma yönteminde, sıçratma basıncı, biriktirme hızı ve altlık malzemeye bias voltaj uygulaması iç gerilmelerin miktarını etkilemektedir (Hongchao, Gao, Senlin, & Zou, 2016). Bu doğrultuda, sıçratma

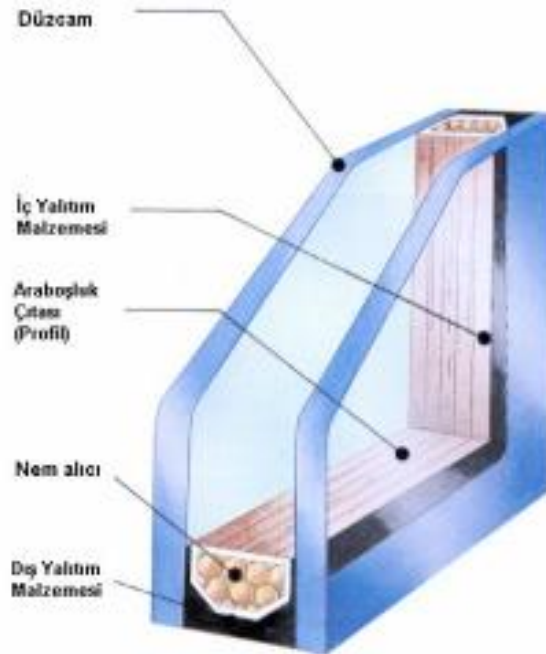
basıncının artırılması ile hedef malzeme yüzeyine çarpan iyonların enerjisi düşürülerek kaplama iç gerilmeleri düşürülmektedir (Hunsche, Vergöhl, Klose, Szyszka, & Matthee, 2001). Buna ek olarak, yüksek sıçratma basıncı ile yoğun, sert ve yüzey pürüzlülüğü düşük kaplamalar elde edilerek çizilme direnci artırılmaktadır. Düşük biriktirme hızlarında üretilen kaplamalarda ise iç gerilme değerleri daha düşük olmaktadır. İç gerilmelerin azaltılmasına yönelik yapılan diğer bir adım ise katman tasarımlarının değiştirilmesi veya ara katman ilaveleri ile iç gerilmelerin oluşumu engellenmektedir. Örneğin, elastik modül değeri arasında yüksek fark olan komşu iki katman arasına, elastik modül değeri her iki katman arasında olan bir ara katman eklenerek iç gerilmelerin değeri düşürülmektedir. (Poirie, Schmit, Bousser, & Martinu, 2017). Çizilme direncinin artırılmasına yönelik diğer bir yaklaşım ise, kaplamalı sistemin en üst yüzeyine çizilme direnci yüksek bir kaplama yapılarak çizik oluşumunun engellenmesidir. Son katman üzerine yapılan çalışmalarda ise, sertliği yüksek bir malzeme ile kaplama sonucu aşınma direnci artırılarak çizilme direnci artırılmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, yalnızca sertlik değeri ile değil sertlik/elastik modül oranı ile birlikte malzemenin çizilme direnci hakkında kesin olarak yorum yapılabilmektedir. Son katman olarak, yüksek çizilme direncine sahip sert malzeme kullanımının yanı sıra sürtünme katsayısı düşük bir malzeme yağlayıcı katman olarak kullanılmaktadır. Patentlere bakıldığında ise, özellikle dünya genelinde Low-E kaplamalı cam endüstrisinde önemli bir yer kaplayan kurumlar çizilme direncini geliştirmek adına genellikle son katman çalışmalar yapmışlardır. Saint-Gobain Firma' sına ait bir patentte, son katman olarak farklı yüzdelerde Ti/Zr, TiZrO_x bileşenlerine sahip kaplamalar uygulanarak çizilme direnci geliştirilmiştir (Fransa Patent No. WO2016097557 A1, 2016). Saint-Goben'e ait başka bir patentte ise TiZr içerisine Nb, Zn, Ta gibi geçiş metalleri ekleyerek çizilme direnci farklı oranlarda artırılmıştır (Fransa Patent No. EP0937013 (A1), 1999). Agc Glass Europe Firma' sına ait bir patentte, TiZrO_x ve TiN son kaplamalar yapılarak çizilme direnci geliştirilmiştir (Belçika Patent No. EP226743 (A1), 2010). Cardinal Firma'sına ait bir patentte SiN koruyucu kaplama ile çizilme direnci yüksek Low-E yapılar üretilmiştir (Amerika Birleşik Devletleri Patent No. US697469B1, 1999).

5. ISI YALITIM ÜNİTELERİ

Isı yalıtım sistemleri, kullanıldığı ortamın iklim koşullarına göre tasarlanıp üretilmektedir. Bu doğrultuda, standart kaplamasız cam, ısı kontrollü Low-E kaplamalı cam ya da ısı ve güneş kontrollü Low-E kaplamalı camlar kullanılarak ısı yalıtım sistemleri üretilmektedir.

5.1 Standart Isı Yalıtım Camı Ünitesi

Standart bir yalıtım camı, iki veya daha fazla sayıda cam plakanın, aralarında hava veya argon, kripton, xenon gibi gazları bulunduracak şekilde birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Ara boşlukta hava veya gazın kullanımı, ara boşluk mesafesi ve ara boşluk sayısı ısı yalıtım ünitesinin performansını değiştirmektedir (Güreren). Şekil 5.1’ de temel bir ısı yalıtım ünitesinin şematik görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 5.1 : Standart yalıtım camı kesit görüntüsü (İzoder, 2018).

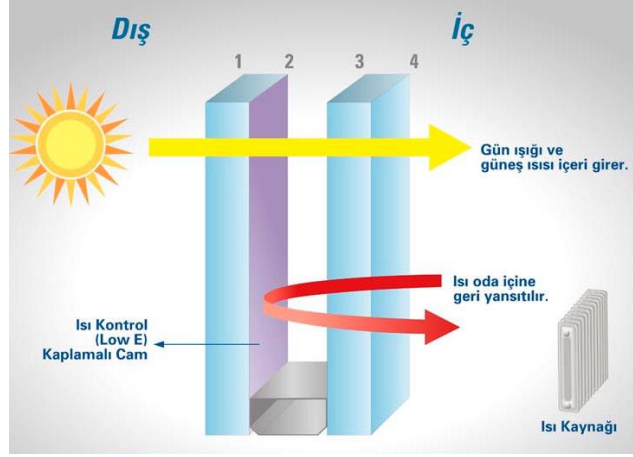
Ara boşlukta hava yerine gaz kullanımı, ara boşluk mesafesinin belirli bir kritik değerin altında olacak şekilde artırılması ve ara boşluk sayısını artırılması ısı yalıtım katsayısını düşürmektedir. Kullanılan gaz türüne göre değerlendirildiğinde ise, Ksenon ve kripton kullanılarak oluşturulan sistemlerin ısı iletim katsayısı, argon kullanılan sistemlerin ısı iletim katsayısından daha düşük bir değere sahip olmaktadır. Ancak ekonomik koşullar göz önüne alındığında, en yaygın kullanılan gaz argondur. Isı iletim katsayısını belirleyen bir diğer faktör ara boşluk mesafesidir. Ara boşluk mesafesi 15 mm değerine ulaşana kadar, mesafe artışı ısı iletim katsayısını düşürmekte, 20 mm üzerinde ise artırmaya başlamaktadır (Casini, 2016). Isı iletim katsayısını değiştiren bir diğer faktör de ara boşluk sayısıdır. Ara boşluk sayısının artışı, ısı iletim katsayısını düşürmektedir. Değişen ara boşluk mesafesi ve hava veya argon gazının kullanımına göre ısı iletim katsayısı(U) değişimi Çizelge 5.1 'de verilmektedir. Buna göre, ara boşluk mesafesinin artışı ve hava yerine argon gazı kullanımı ısı iletim katsayısını düşürmektedir.

Çizelge 5.1 : Ara boşluk mesafesinin ve argon kullanımının U değerine etkisi (Casini, 2016).

9 mm ara boşluk		12 mm ara boşluk		16 mm ara boşluk	
Hava dolgulu	Argon dolgulu	Hava dolgulu	Argon dolgulu	Hava dolgulu	Argon dolgulu
U=3,0 W/m ² K	U=2,8 W/m ² K	U=2,8 W/m ² K	U=2,7 W/m ² K	U=2,7 W/m ² K	U=2,6 W/m ² K

5.2 Isı Kontrollü Isı Yalıtım Ünitesi

Enerji tasarrufunun önem kazandığı son yıllarda, ısı yalıtım sistemlerinde, düşük yayınlımlı kaplamalı camlar yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 5.2' de ısı kontrollü Low-E kaplamalı cam kullanılarak yapılmış bir ısı yalıtım ünitesinin şematik görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 5.2 : Isı kontrollü kaplamalı cam kullanılarak üretilen ısı yalıtım ünitesi (İzoder, 2018).

Low-E kaplamalı ısı yalıtım ünitesi, kaplama içte olacak şekilde tasarlanmaktadır. Ara boşluk mesafesi, hava veya Argon kullanımına göre ısı iletim katsayısındaki değişim Çizelge 5.2’de yer almaktadır.

Çizelge 5.2 : Isı kontrollü kaplamalı ısı yalıtım camında ara boşluk mesafesi ve hava veya gaz kullanımına göre ısı iletim katsayısının değişimi (Casini, 2016).

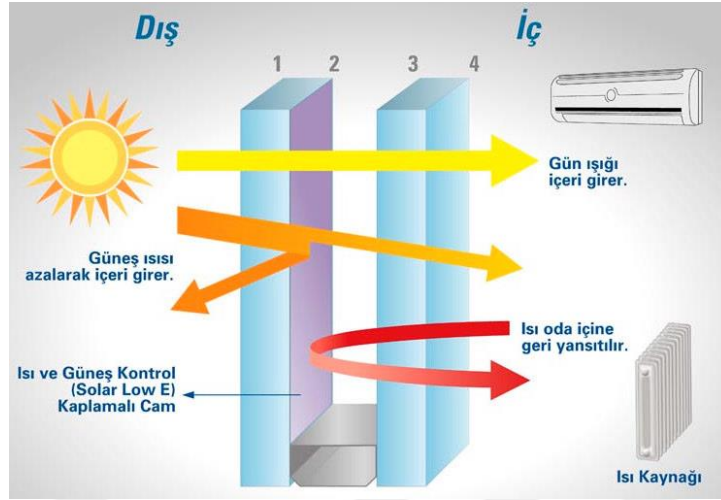
9 mm ara boşluk		12 mm ara boşluk		16 mm ara boşluk	
Hava dolgulu	Argon dolgulu	Hava dolgulu	Argon dolgulu	Hava dolgulu	Argon dolgulu
U=2,1 W/m ² K	U=1,7 W/m ² K	U=1,8 W/m ² K	U=1,4 W/m ² K	U=1,5 W/m ² K	U=1,3 W/m ² K

Isı kontrollü Low-E kaplama ile oluşturulan ısı yalıtım ünitesine ait U değerlerinin, standart ısı yalıtım ünitesi ile karşılaştırıldığında daha düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir.

5.2 Güneş ve Isı Kontrollü Isı Yalıtım Ünitesi

Isı kontrolünün yanı sıra güneş kontrolü de sağlayan ısı ve güneş kontrollü kaplamalı camlar kullanılarak daha yüksek ısı yalıtım katsayısına sahip ısı yalıtım camları

üretilebilmektedir. Isı ve güneş kontrollü kaplamalı camların şematik görüntüsü Şekil 5.3’de yer almaktadır.



Şekil 5.3 : Isı ve güneş kontrollü kaplamalı cam kullanılarak üretilen ısı yalıtım ünitesi (İzoder, 2018).

Isı ve güneş kontrollü kaplamalar ile oluşturulan ısı yalıtım üniteleri en düşük U değerlerine sahip olup, ara boşluk mesafesi ve hava veya Argon kullanımına bağlı olarak değişimi Çizelge 5.3’de yer almaktadır.

Çizelge 5.3 : Isı ve güneş kontrollü kaplamalı ısı yalıtım camında ara boşluk mesafesi ve hava veya gaz kullanımına göre ısı iletim katsayısının değişimi (Casini, 2016).

9 mm ara boşluk		12 mm ara boşluk		16 mm ara boşluk	
Hava dolgulu	Argon dolgulu	Hava dolgulu	Argon dolgulu	Hava dolgulu	Argon dolgulu
U=2,0 W/m ² K	U=1,6 W/m ² K	U=1,7 W/m ² K	U=1,4 W/m ² K	U=1,4 W/m ² K	U=1,2 W/m ² K

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

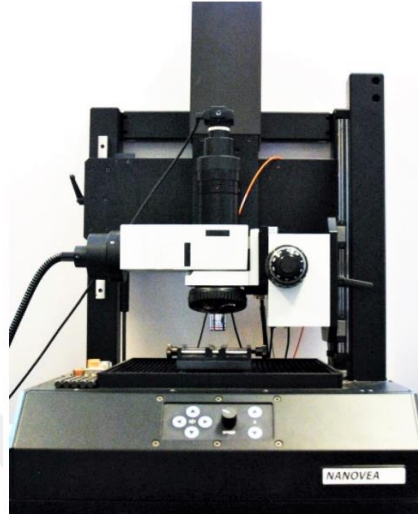
Deneysel çalışmalar iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, yumuşak Low-E kaplamalı camların görülebilir çizik oluşumuna karşı direncini ölçmek amaçlı test yöntemi geliştirilmiştir. İkinci aşamada ise yumuşak Low-E kaplamalı cam üzerine son katman kaplama yapılarak çizilme direnci artırılmıştır. Deneysel çalışmalar süresince, iki farklı yumuşak Low-E kaplamalı cam kullanılmıştır. Her iki Low-E kaplamalı cam, manyetik alan destekli sıçratma yöntemiyle üretilen ancak farklı optik ve mekanik özelliklere sahip iki gümüşlü düşük yayınlı kaplamalı camlardır. Kullanılan Low-E kaplamalı camlardan bir tanesi yüksek çizilme direncine sahip olup, deneysel çalışmanın ilk aşaması olan test geliştirme çalışmalarında kullanılmıştır. Bu noktada, yüksek çizilme direncine sahip olduğu bilinen bir Low-E kaplamalı cam referans seçilerek, çalışmalar sonucunda ulaşılması hedeflenen çizilme direnci belirlenmiş ve yumuşak Low-E kaplamalı camlarda görülebilir çizik oluşmama koşulunu sağlayan bir kalite kriteri ortaya konmuştur. Diğer Low-E kaplamalı cam ise düşük çizilme direncine sahip olup, deneysel çalışmaların ikinci aşamasında çizilme direncini geliştirmek amaçlı üzerine son katman kaplama yapılmıştır. Bu doğrultuda, manyetik alan destekli sıçratma yöntemi kullanılarak 5nm, 10nm ve 20nm kalınlıklarda SiN, ZnSnO_x, TiO_x ve SiO_x son katman kaplamalar yapılmıştır. Son katman kaplama sonrası çizilme dirençleri belirlenmiş olan kritik çizik testi koşullarında ölçülmüştür.

6.1 Nanomekanik Test Ölçüm Metodu Geliştirme

Deneysel çalışmanın ilk aşamasında, farklı yarıçap ve açılara sahip batıcı uç kullanılarak referans Low-E kaplamalı cam üzerine çizik testleri yapılmıştır. Bu doğrultuda, kaplamada hasar oluşturmada minimum görülebilir çiziklerin oluştuğu test koşullarını belirlemek amaçlanmıştır. Bu aşamada, referans Low-E kaplamalı cam üzerine uygulanan tüm çizik testleri düşük çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cama da uygulanmış ve çizilme dirençleri ve karakteristikleri karşılaştırılmıştır.

6.1.1 Deneylerin yapılışı

Çizik testi öncesi, numuneler izopropil alkol kullanılarak ultrasonik banyoda 5 dakika boyunca yıkanmış ve azot ile kurutulmuştur. Çizik testi çalışmaları, Şekil 6.1’de yer alan Nanovea model nanomekanik test cihazı kullanılarak tamamlanmıştır.



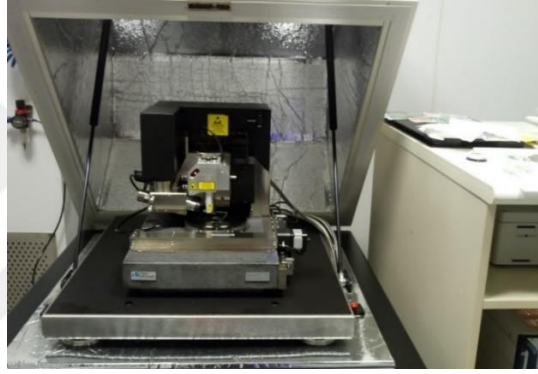
Şekil 6.1 : Nanovea model nanomekanik test cihazı.

Kullanılan batıcı uçların yarıçaplarına ve açılarına bağlı olarak malzeme yüzeyinde oluşan temas basıncı değişmektedir. Bu nedenle, çizik testlerinde kaplamada hasar oluşturmadan görülebilir minimum çizikler elde etmek amaçlı farklı batıcı uçlar denenmiştir. Kullanılan batıcı uçlar ve çizik testi parametreleri Çizelge 6.1’de yer almaktadır.

Çizelge 6.1 : Kullanılan batıcı uç tipleri ve çizik testi parametreleri.

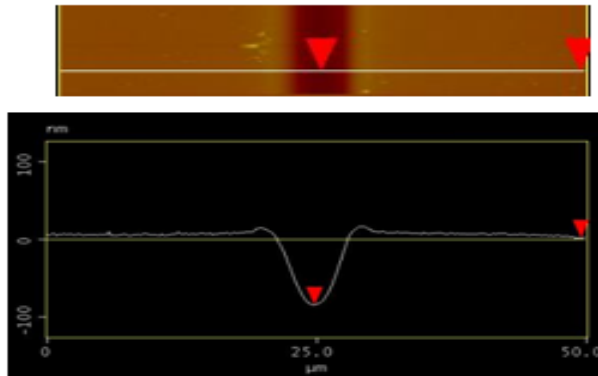
Kullanılan batıcı uç	Yükün uygulanma şekli	Uygulanan yük(mN)	Çizik testi hızı	Çizik uzunluğu	Çizik Sayısı
Berkoviç	Sabit	2, 5	1mm/dak	1mm	5
5µm yarıçap 120°küresel konik uç	Sabit	30-80	2mm/dak	1mm	5
25µm yarıçap 90° küresel konik uç	Sabit	300,350,390	1mm/dak	1mm	5

Sırasıyla berkovic, 5 mikron yarıçaplı 120^0 açılı küresel konik uç ve 25 mikron yarıçaplı 90^0 açılı küresel konik uç kullanılmıştır. Her bir test için 1mm/dak çizik hızı altında, 1 mm uzunluğunda ve aralarında 0,1 mm boşluk olacak şekilde yan yana 5 tane çizik oluşturulmuştur. Çizelge 6.1’de yer alan parametreler altında çizik testleri her iki kaplamalı cama da uygulanmış ve test ölçüm metodundan istenen koşulları sağlayıp sağlamadığı belirlenmiştir. Çizik testleri sonucunda, test yöntemi olarak belirlenen koşullardaki çizik testi her iki kaplamalı cama da uygulanmış ve sonuçların tekrarlanabilir olduğunu görmek amaçlı testler tekrarlanmıştır. Çizik testi sonrası oluşturulan çiziklerin derinlikleri ve genişlikleri AFM ile ölçülmüştür. Ölçümler, Veeco Dimension 3100 marka ve model AFM kullanılarak ölçülmüştür. Kullanılan AFM’nin görüntüsü Şekil 6.2’de yer almaktadır.



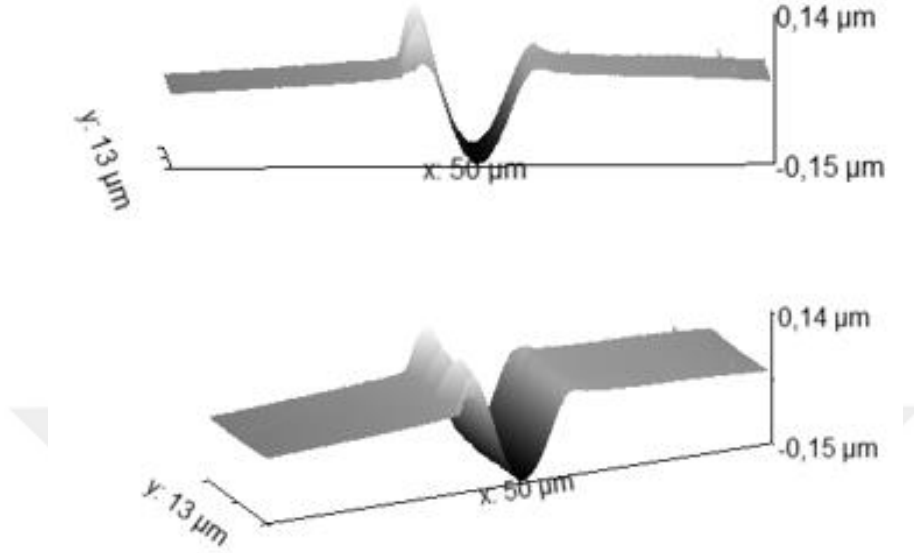
Şekil 6.2 : Atomik kuvvet mikroskobu(AFM).

Çizelge 6.1’de belirtildiği üzere, her bir çizik testi için 5 tane çizik atılmıştır. AFM ile çiziklerin boyut analizi yapılırken, her 5 çizik için başlangıç, orta ve bitiş bölgesi olacak şekilde ölçüm alınmıştır. AFM tarama hızı, tüm ölçümler için 0,5Hz olarak belirlenmiştir. Şekil 6.3’de AFM ile derinlik ölçümünün yapılışı yer almaktadır.



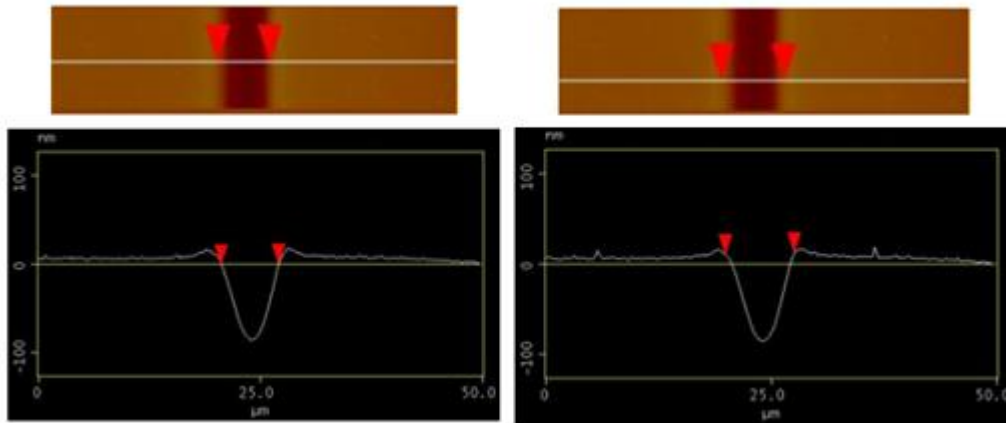
Şekil 6.3 : AFM ile çizik derinlik ölçümünün gösterimi.

Şekil 6.4'teki AFM görüntülerine bakıldığında kritik test koşullarında çizikler boyunca yüzeyden aşınan filmin çizik kenarları boyunca birikerek 'pile-up' denilen oluşumları meydana getirdiği görülmektedir.



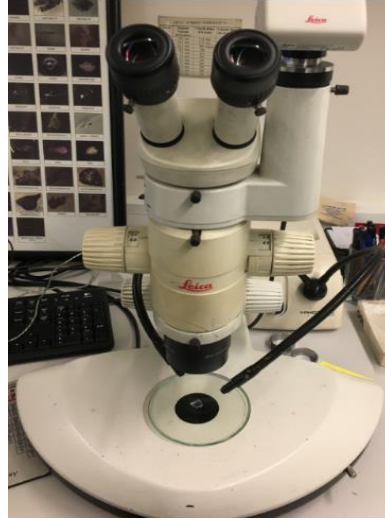
Şekil 6.4 : Çizik kenarları boyunca 'pile-up' oluşumu.

Pile-up oluşumları sebebiyle, genişlik ölçümü alınırken hem yüzey referans çizgisi hem de pile-up oluşumunun bittiği bölge olacak şekilde iki farklı genişlik ölçümü alınmıştır. AFM ile genişlik ölçümü Şekil 6.5'de gösterildiği gibi alınmıştır.



Şekil 6.5 : AFM ile a) yüzey çizgisi referans alınarak yapılan genişlik ölçümünün gösterimi b) pile-up referans alınarak yapılan genişlik ölçümünün gösterimi.

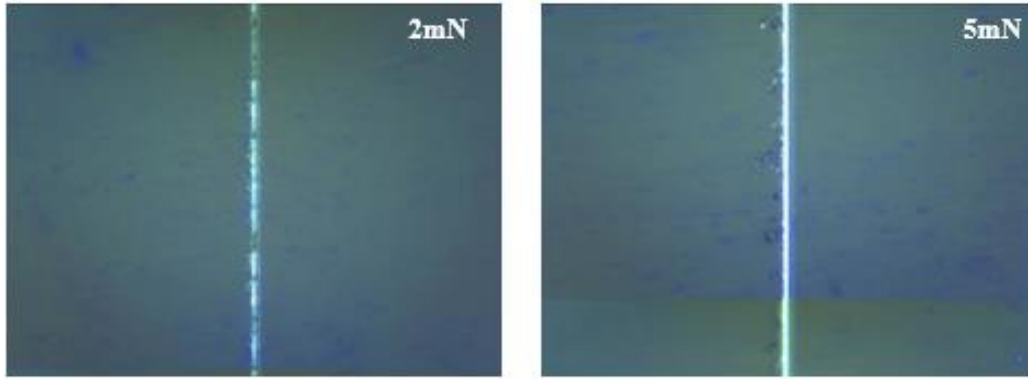
Çiziklerin karakteristikleri, leica marka stereo mikroskop kullanılarak 6X büyütmede incelenmiştir. Kullanılan stereo mikroskopun görüntüsü Şekil 6.6'da yer almaktadır.



Şekil 6.6 : Leica marka stereo mikroskop

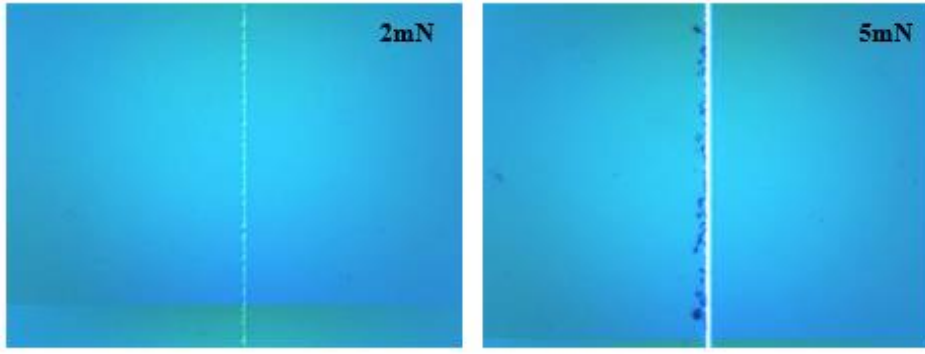
6.1.2 Deney sonuçları ve tartışılması

Berkoviç uç kullanıldığında yüksek çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cam yüzeyinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.7’de yer almaktadır. Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, berkoviç ucun çok keskin olması sebebiyle 2mN ve 5mN gibi düşük yükler altında malzeme yüzeyinde oluşturduğu yüksek temas basıncı sebebiyle çizik boyunca hasar oluşumuna sebep olmuştur. Bu nedenle berkoviç uç beklenen kritik koşulları sağlamamıştır.



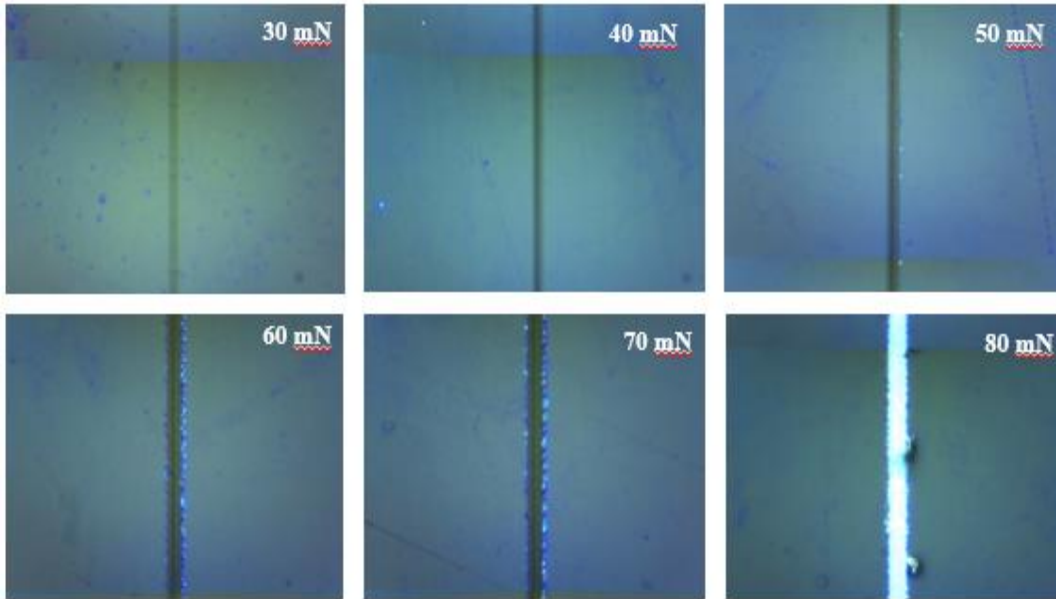
Şekil 6.7 : Berkoviç uç kullanılarak 2 ve 5 mN sabit yüklerle, yüksek çizilme direncine sahip Low-E üzerinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.

Aynı koşullarda çizik testi düşük çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cama uygulanmıştır. Çizik testi sonrası optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.8’de yer almaktadır.



Şekil 6.8 : Berkoviç uç kullanılarak 2 ve 5 mN sabit yüklerle, düşük çizilme direncine sahip Low-E üzerinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.

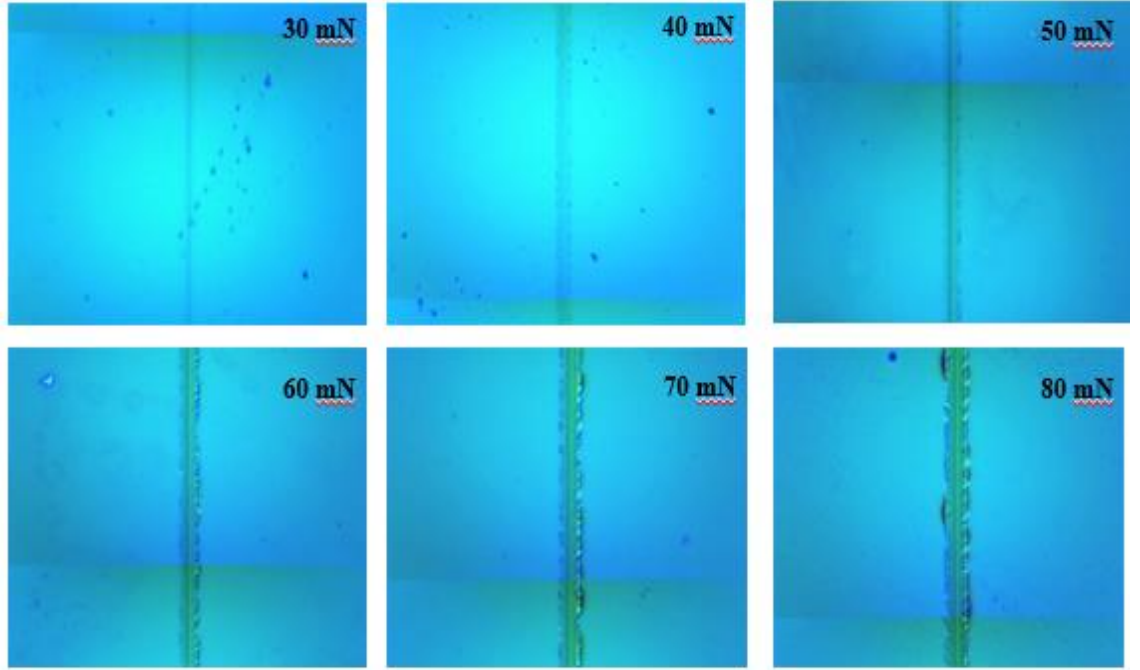
Şekil 6.8'e bakıldığında, referans Low-E kaplamalı camda olduğu gibi 2mN ve 5mN gibi düşük yüklerde kaplama çizik boyunca hasara uğramıştır. Berkoviç uç sonrası 5 mikron yarıçaplı 120° açığa sahip batıcı uç kullanılmıştır. Referans Low-E kaplamalı cam üzerinde ilk olarak 30mN sabit yükte çizik testleri yapılmış ve yük 10mN aralıklarla artırılmıştır. Referans Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.9'da yer almaktadır.



Şekil 6.9 : 5 mikron yarıçaplı uç kullanılarak 30-80mN arası sabit yüklerle, yüksek çizilme direncine sahip Low-E üzerinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 6.9'da yer alan 30mN ve 40mN sabit yükler altında oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntülerine bakıldığında, kaplamada hasar oluşumu gözlemlenmemiştir.

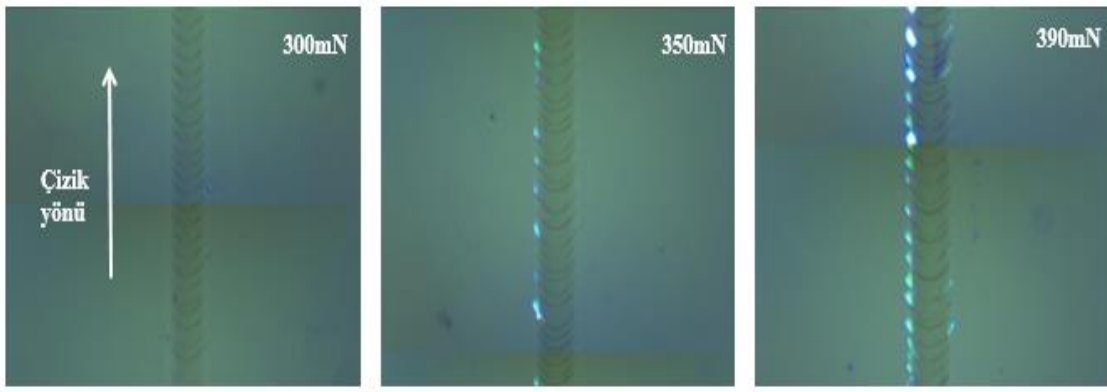
Ancak bu çizikler gözle incelendiğinde, görülebilir olmadığından dolayı istenen kalite kriteri koşullarını sağlamamıştır. Yük değeri, 50mN'a çıkarıldığında, çizik kenarları boyunca parlak noktasal oluşumlar meydana gelmiştir ve bu da kaplamada hasarın oluşmaya başladığını göstermektedir. Yük 60mN ve 70mN değerlerine çıkarıldığında ise kaplamanın çizik kenarları boyunca atması ve altlık malzemeden ayrılması şeklinde oluşan chipping hasarı meydana gelmiştir. Yük değeri, 80mN'a çıkarıldığında ise kaplamanın çizik boyunca altlık malzemeden ayrılması şeklinde kendini gösteren dökülme (gross spallation) hasarı meydana gelmiştir. Sonuç olarak, 5 mikron yarıçaplı uç kullanılarak yapılmış çizik testleri, istenen kritik koşulları sağlamamıştır. Aynı koşullarda çizik testi düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanmıştır. Çizik testi sonrası optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.10'da yer almaktadır.



Şekil 6.10 : 5 mikron yarıçaplı uç kullanılarak 30-80mN arası sabit yüklerle, düşük çizilme direncine sahip Low-E üzerinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 6.10'a bakıldığında, referans Low-E kaplamalı cam da olduğu gibi, 30mN ve 40mN sabit yükler altında kaplamada hasar oluşumu meydana gelmemiştir. Yük değeri, 50mN'a artırıldığında çizik kenarları boyunca küçük parlak noktasal oluşumlar başlamıştır. Uygulanan kuvvetin artışıyla birlikte parlak nokta oluşumlarının

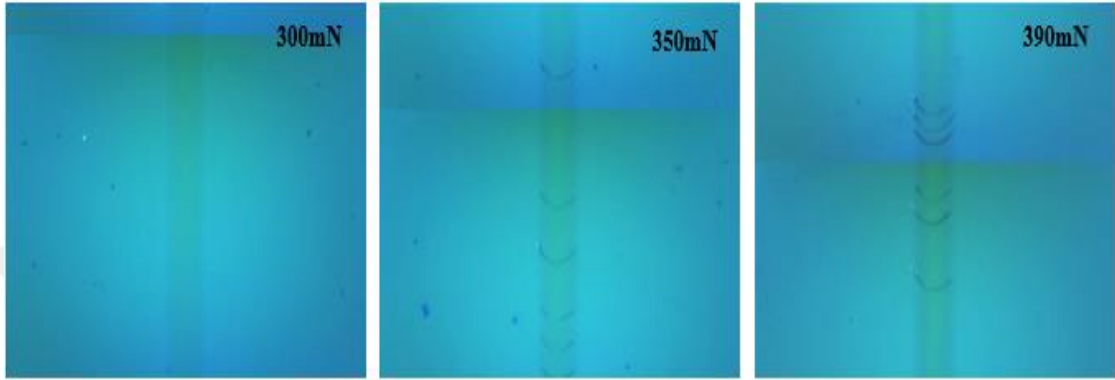
yoğunluğu da artmıştır. Ancak, referans Low-E kaplamalı camda olduğu gibi 80mN yük altında kaplama tamamen hasara uğramamıştır. Bu doğrultuda, referans Low-E kaplamalı camın yüksek çizilme direncine sahip olmasına karşın, daha düşük yüklerde kaplamanın tamamen hasara uğramasının sebebi olarak daha yüksek sertliğe sahip olması gösterilmiştir. Bir sonraki çizik testi, 25 mikron yarıçaplı 90° açılıya sahip batıcı uç kullanılarak 300, 350 ve 390mN sabit yüklerde uygulanmıştır. Referans Low-E kaplamalı camda oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.11’de yer almaktadır.



Şekil 6.11 : 25 mikron yarıçaplı uç kullanılarak 300mN-350mN-390mN sabit yüklerle, yüksek çizilme direncine sahip Low-E üzerinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.

300mN sabit yük altında uygulan çizik testi sonrası oluşturulmuş çizikğin optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde, kaplamada herhangi bir hasar oluşumuna rastlanılmamıştır. Çizik boyunca oluşan yarım daire şeklindeki oluşumlar, kaplama yüzeyine uygulanan çekme gerilmesi sonucu yapıda mikro çatlakların oluşumunu göstermektedir. Mikro çatlak oluşumu, düşük oranda plastik deformasyon sonucu olduğundan kaplamada hasara sebep olmamıştır. 350mN sabit yük ile oluşturulan çizik görüntüsüne bakıldığında, çizik kenarları boyunca, kaplama atmaya başlamış ve parlak olarak görülen bölgelerde ise kaplama altlık malzemeden kalkmıştır. 390mN sabit yük ile yapılmış çizikğin optik mikroskop görüntüsüne bakıldığında ise, kaplamanın çizik kenarları boyunca yoğun olarak hasara uğradığı görülmüştür. Oluşturulan çizikler gözle muayene edildiğinde, 300mN sabit yük altında oluşturulan çiziklerin belirli olmamakla birlikte görülebilir olduğu saptanmıştır. 350mN ve 390mN sabit yük altında oluşturulan çizikler ise belirli bir şekilde gözle görülebilmektedir. Sonuç olarak, yüksek çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı

cam üzerinde 25 mikron yarıçaplı uç kullanılarak 300mN sabit yük altında yapılmış çizik testi ile kaplamanın hasara uğramadığı ve oluşturulan çiziklerin gözle görülebilir minimum çizikler olduğu saptanmıştır ve bu koşullar kalite kriteri olarak belirlenmiştir. Aynı koşullarda çizik testi, düşük çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cama da uygulanmıştır. Çizik testi sonrası optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.12’de yer almaktadır.



Şekil 6.12 : 25 mikron yarıçaplı uç kullanılarak 300mN-350mN-390mN sabit yüklerle, düşük çizilme direncine sahip Low-E üzerinde oluşturulmuş çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.

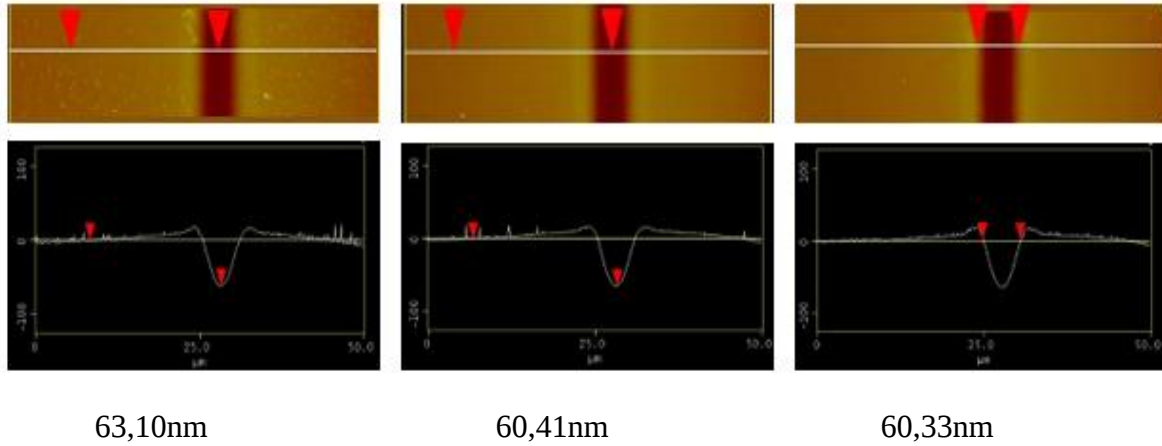
Şekil 6.12’ye bakıldığında, 300mN sabit yük sonrası oluşturulmuş çizikler kaplamada herhangi bir hasar oluşumuna sebep olmamıştır. 350mN sabit yük altında uygulanan çizik testi sonrası oluşturulmuş çizik boyunca yarım daire şeklinde oluşumlar yer almaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, bu oluşumlar çekme gerilmesi sonucu malzemede oluşan mikro çatlakların varlığını göstermektedir. Yük değeri, 390mN’a çıkarıldığında ise, plastik deformasyonun artışına bağlı olarak ay şeklinde oluşumların yoğunlaştığı ancak kaplamanın hasara uğraması ile sonuçlanmadığı görülmektedir. Aynı koşullarda, referans kaplamalı camda oluşturulan çiziklerle karşılaştırıldığında, düşük çizilme direnci gösteren kaplamalı camın daha yüksek plastik deformasyon kabiliyetine sahip olduğu, referans kaplamalı camın ise daha yüksek sertliğe sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizikler gözle incelendiğinde, 300,350 ve 390mN yük altında oluşturulan tüm çiziklerin gözle belirgin bir şekilde görülebilir olduğu saptanmıştır. Buradan, düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı camın yüksek tokluk özelliği sayesinde daha yüksek oranda plastik deformasyona uğradığı sonucuna varılmıştır.

Aynı koşullarda referans Low-E kaplamalı camda oluşturulan çizik boyutlarından daha geniş boyutlarda çiziklerin oluşması, çiziklerin görülebilirlik derecesini artırmaktadır. Çizelge 6.2’de belirtilmiş olan kritik çizik testi koşulları, yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam ile düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam arasında kesin bir ayırım ortaya çıkardığı için ve test metodundan beklenen koşulları sağladığından dolayı kritik test koşulları olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.2 : Kritik çizik testi koşulları.

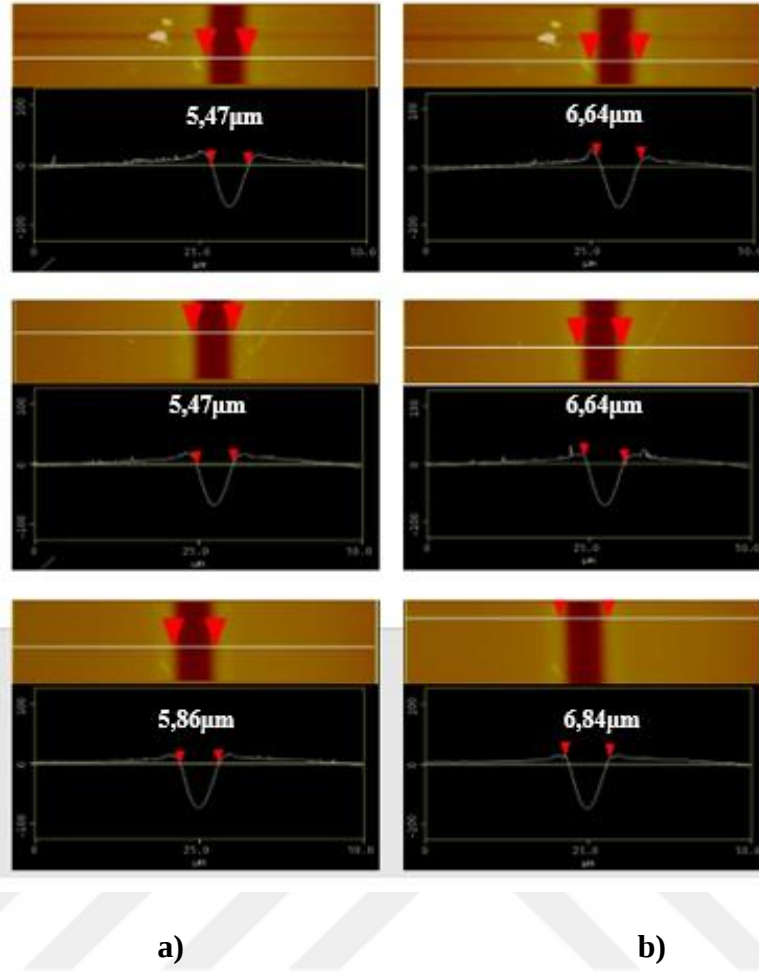
Kullanılan batıcı uç	Yükün uygulanma şekli	Uygulanan yük(mN)	Çizik testi hızı	Çizik uzunluğu	Çizik Sayısı	Test tekrarı
25µm yarıçap 90° açılı	Sabit	300	1mm/dak	1mm	5	2

Çizelge 6.2’de belirtilmiş olan kritik test koşulları altında oluşturulan çiziklerin derinlikleri ve genişlikleri AFM ile ölçülmüş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Şekil 6.13’de yüksek çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı camda 1.test sonucu oluşturulan 3.çiziğin sırasıyla başlangıç, orta ve bitiş bölgesinden alınan derinlik ölçümleri yer almaktadır.



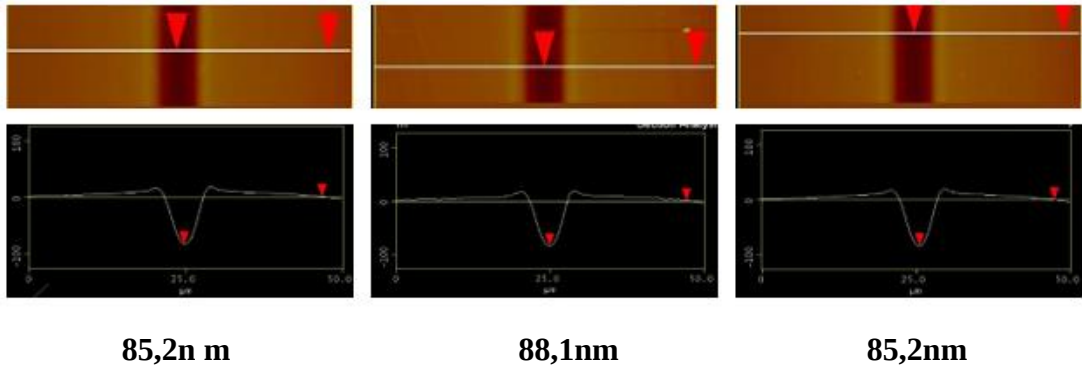
Şekil 6.13 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı camda 1.test sonucu oluşturulan 3.çiziğin derinlik ölçümleri.

Şekil 6.13’de derinlik ölçümleri alınan çiziklerin genişlik ölçümleri, yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla başlangıç orta ve bitiş bölgesi olacak şekilde Şekil 6.14’de yer almaktadır.



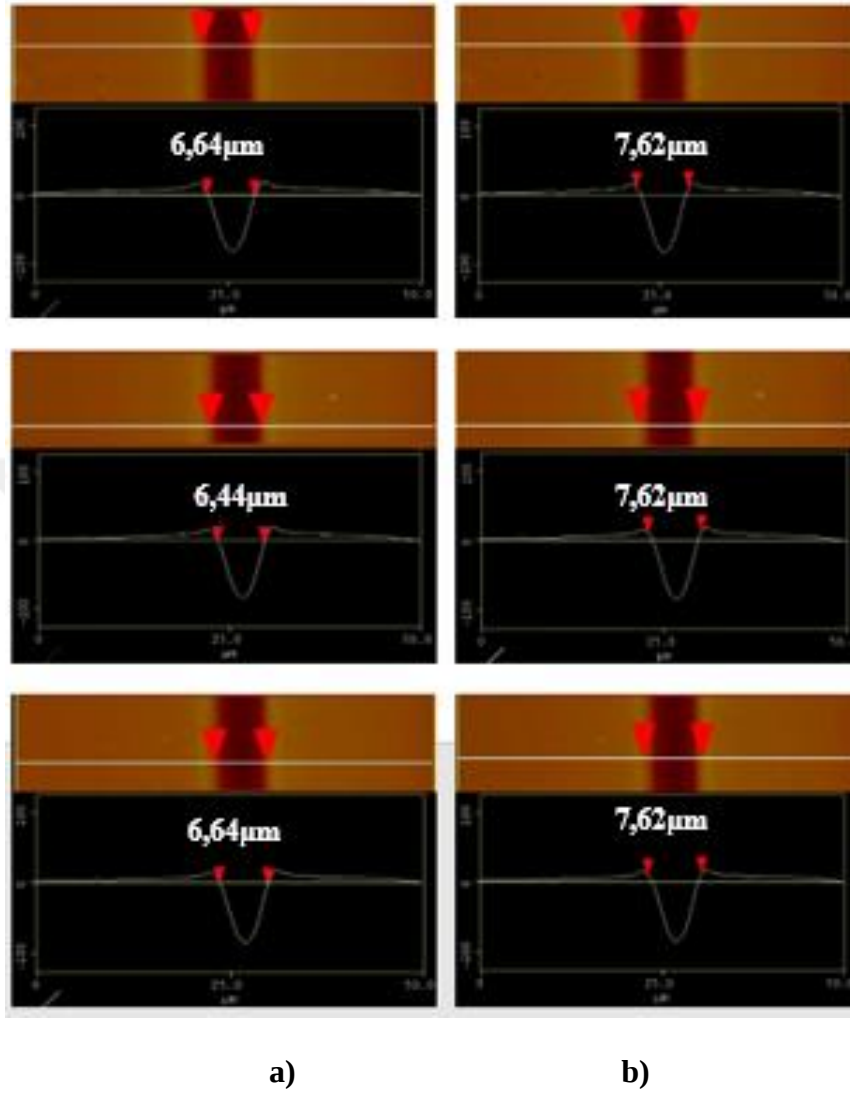
Şekil 6.14 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı camda 1.test sonucu oluşturulan 3.çiziğin genişlik ölçümleri a)line ölçümü b)pile-up ölçümü

Şekil 6.15’de ise düşük çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı camda 1.test sonucu oluşturulan 3.çiziğin sırasıyla başlangıç, orta ve bitiş bölgesinden alınan derinlik ölçümleri yer almaktadır.



Şekil 6.15 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı camda 1.test sonucu oluşturulan 3.çiziğin derinlik ölçümleri.

Şekil 6.15’de derinlik ölçümleri alınan çiziklerin genişlik ölçümleri yukarıdan aşağı sırasıyla başlangıç, orta ve bitiş bölgesi olacak şekilde Şekil 6.16’da yer almaktadır.



Şekil 6.16 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı camda 1.test sonucu oluşturulan 3.çiziğin genişlik ölçümleri a)line b)pile-up

AFM ölçümleri sonucunda, beklendiği gibi yüksek çizilme direnci gösteren referans Low-E kaplamalı camda kritik koşullarda oluşturulan çiziklerin daha sık ve daha dar olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Her iki Low-E kaplamalı cam üzerinde kritik koşullarda oluşturulan çiziklerin derinlik ve genişliklerinin ortalama değerleri Çizelge 6.3’de yer almaktadır. Sonuçların tutarlılığını kontrol etmek amacıyla, çizik testi aynı koşullarda olacak şekilde tekrarlanmış ve Çizelge 6.4’de yer alan ortalama değerler elde edilmiştir.

Çizelge 6.3 : 1.test sonrası oluşan çiziklerin derinlik ve genişlik ölçümlerinin ortalama değerleri¹.

300mN sabit yük-1.test	Derinlik Ortalama (nm)	Genişlik Ortalama (μm)	
Çizik derinlik karşılaştırma		Pile-up	Line
Yüksek çizilme direnci gösteren Low-E cam	68,95±3,28	6,81±0,18	5,71±0,13
Düşük çizilme direnci gösteren Low-E cam	86,19±0,27	7,62±0,06	6,52±0,07

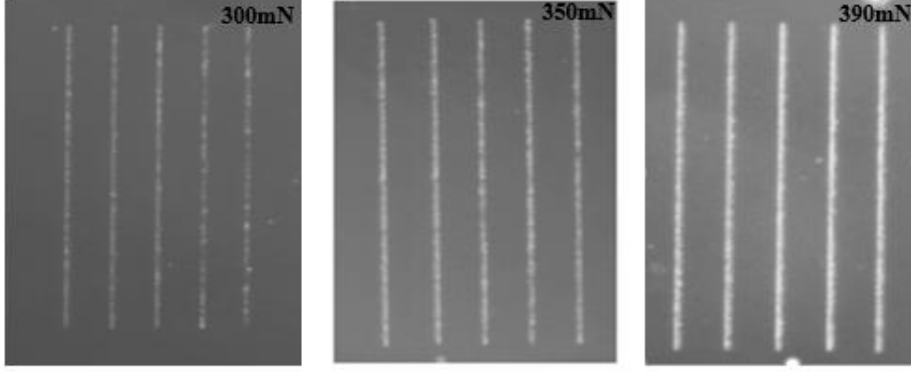
Çizelge 6.4 : 2.test sonrası oluşan çiziklerin derinlik ve genişlik ölçümlerinin ortalama değerleri.

300mN sabit yük-2.test	Derinlik Ortalama (nm)	Genişlik Ortalama (μm)	
Çizik derinlik karşılaştırma		Pile-up	Line
Yüksek çizilme direnci gösteren Low-E cam	65,03±3,67	6,71±0,059	5,68±0,016
Düşük çizilme direnci gösteren Low-E cam	82,18±1,81	7,25±0,09	6,06±0,07

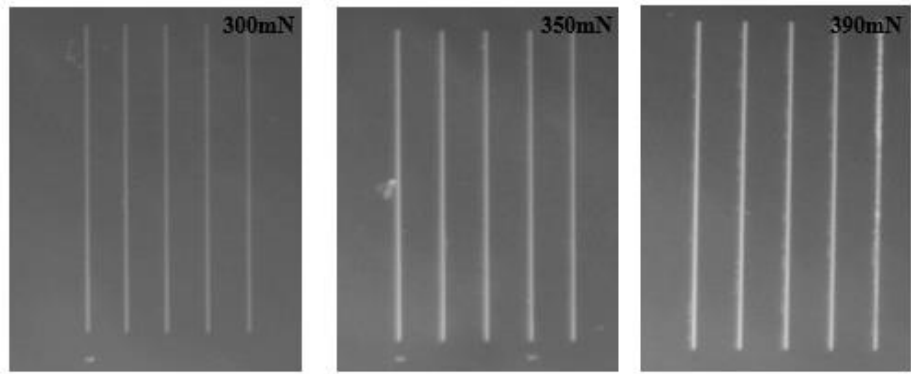
Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4 incelendiğinde, her iki test sonucunda da, yüksek çizilme direncine sahip referans seçilen Low-E kaplamalı camda oluşturulan çiziklerin daha dar ve daha sığ olduğu sonucuna ulaşılmıştır. 1.ve 2.test sonuçları karşılaştırıldığında ise, her iki kaplamalı cam için de çiziklerin derinliklerinin ve genişliklerinin hem kendi içerisinde hem de birbiriyle tutarlı olduğu ve test sonuçlarının tekrarlanabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuçlar arasındaki küçük farkların ise, malzeme yüzeyindeki

¹ Çiziklerin tüm ölçüm sonuçları Ek-A'da yer almaktadır.

mikro yapısal yerel farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam ve referans Low-E kaplamalı cam üzerinde 25 mikron uç kullanılarak 300mN, 350mN ve 390mN sabit yükler altında oluşturulan çiziklerin 6X yaklaştırılmış stereo mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 6.17 ve Şekil 6.18 'de yer almaktadır.



Şekil 6.17 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerinde 300mN-350mN-390mN sabit yüklerle oluşturulmuş çiziklerin stereo mikroskop görüntüleri.



Şekil 6.18 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerinde 300mN-350mN-390mN sabit yüklerle oluşturulmuş çiziklerin stereo mikroskop görüntüleri.

Bu doğrultuda, her üç yük altında oluşturulan çiziklerin çizilme karakteristikleri değerlendirildiğinde, Şekil 6.17'de yer alan çiziklerin süreksiz olması sebebiyle, yüzeyin çizik oluşumuna karşı direnç gösterdiği ve bu sebeple kaplamanın sert olduğu sonucuna bir kez daha varılmıştır. Şekil 6.18'e bakıldığında ise çiziklerin sürekli olması, yüzeyin çizik oluşuma karşı düşük direnç gösterdiği ve kolaylıkla çizilebildiği şeklinde yorumlanmıştır. Sonuç olarak, optik mikroskop, AFM ve stereo mikroskop kullanılarak yapılan karakterizasyonlar sonucunda, yüksek çizilme direnci

gösteren Low-E kaplamalı cam ile düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam karşılaştırıldığında, yüksek çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı camın daha düşük yüklerde tamamen hasara uğraması daha yüksek sertliğe sahip olmasının bir sonucu olarak açıklanmaktadır. AFM ölçümlerine bakıldığında, yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı camda kritik test koşullarında oluşturulan çiziklerin daha sığ ve daha dar olduğu belirlenmiştir. Stereo mikroskop görüntüleri incelendiğinde ise referans Low-E kaplamalı camda oluşturulan çiziklerin kesikli kesikli olması, sahip olduğu yüksek sertlik değerinin göstergesidir. Düşük çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cam ise, sahip olduğu yüksek tokluk değeri nedeniyle yüksek plastik deformasyon kabiliyetine sahip olmakta ve bu nedenle referans Low-E kaplamalı cama göre daha derin ve daha geniş çizik oluşumları meydana gelmekte ve bu durum çiziklerin görülebilirlik derecesini artırmaktadır.

6.2 Son Katman Kaplama Geliştirme

Deneyisel çalışmaların ikinci aşamasında, düşük çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cam üzerine, sahip olduğu yüksek çizilme dirençleri ve kimyasal dirençleri sebebiyle, SiN, ZnSnO_x, SiO_x, TiO_x malzemeleri son katman olarak kaplanmış ve çizilme direncinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Farklı son katman kalınlıklarının çizilme direncine etkisini görmek için 5nm, 10nm ve 20nm olacak şekilde 3 ayrı kalınlıkta kaplamalar yapılmıştır. Kaplamalar, manyetik alan destekli sıçratma yöntemiyle yapılmıştır.

6.2.1 Deneylerin yapılışı

Kaplanacak numuneler, 10cmx10cm boyutlarında olacak şekilde kesildikten sonra, aşağıda yer alan adımlar takip edilerek yıkanmıştır.

Numune yıkama adımları aşağıdaki gibidir.

1. 4,5 dakika boyunca 60°C’de bazik çözeltide bekletme
2. Ön durulama suyunda birkaç defa durulama
3. Deiyonize su-1’de durulama
4. Deiyonize su-2’de durulama
5. 100°C’de fırında 20 dakika boyunca kurutma

Kaplamalar, Şekil 6.19’da yer alan Von Ardenne model manyetik alan destekli sıçratma hattında yapılmıştır.



Şekil 6.19 : Von Ardenne marka manyetik sıçratma hattı.

Kaplama parametreleri Çizelge 6.5’de belirtilmiştir. Kullanılan parametreler, Low-E kaplamalı camların üretilmesinde kullanılan katmanlar için optimize edilmiş parametrelerdir.

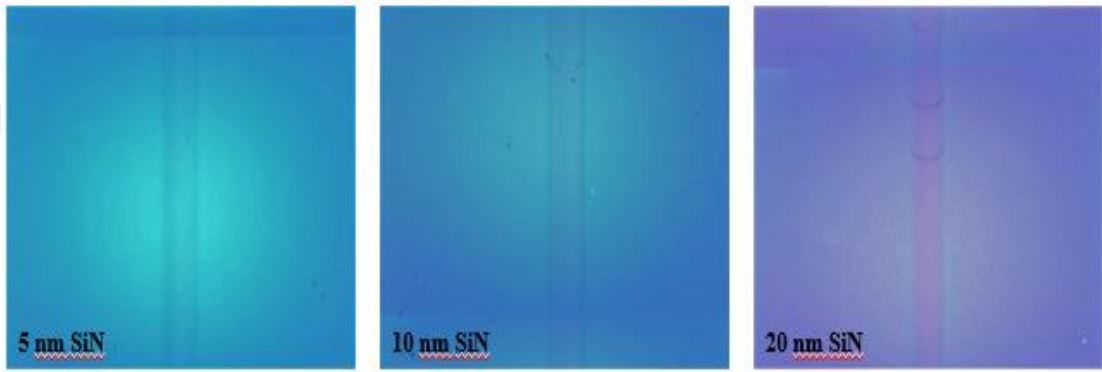
Çizelge 6.5 : Son katman kaplama parametreleri

Hedef Malzeme	Basınç (mbar)	Güç (kW)	Voltaj(V)	Akım (A)	Argon	Oksijen	Azot
SiAl	3,2E-03	10	560	17,8	105	0	249
ZnSn	2,23E-03	3	529	5,7	150	174	0
TiO _x	2,67E-03	3	544	5,51	270	11	0
SiO _x	3E-03	5	702	7,1	250	72	0

Son katman kaplama sonrası çizilme dirençleri kritik olarak belirlenmiş çizik test koşulları kullanılarak ölçülmüştür. Oluşturulan çizikler optik mikroskopta incelenmiş, çizik karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Kritik koşullar altında oluşturulan çiziklerin derinlik ve genişlikleri ölçümleri AFM ile yapılmıştır.

6.2.2 Deney sonuçları ve tartışılması

5nm, 10nm ve 20nm son katman SiN kaplanmış düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerinde, kritik çizik testi koşulları kullanılarak oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.20’de yer almaktadır.



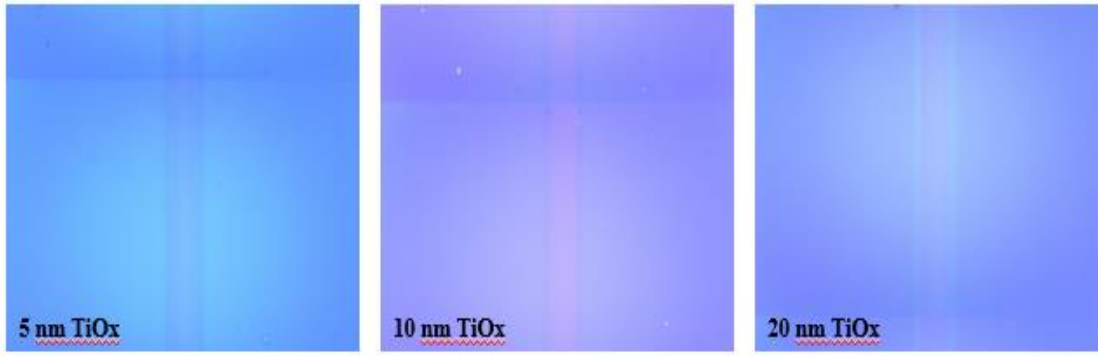
Şekil 6.20 : 5nm-10nm-20nm kalınlıkta SiN son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 6.20’ye bakıldığında, 3 farklı kalınlıktaki son katman kaplanmış numuneler için de herhangi bir hasar oluşumu meydana gelmemiştir. 10nm son katman kaplanmış numunede çizik boyunca bir kaç tane mikro çatlak varlığını gösteren yarım daire şeklinde oluşumların meydana geldiği görülmüştür. 20nm SiN son katman kaplanmış numune üzerinde ise yarım daire şeklinde oluşumların yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, SiN katman kalınlığının artışıyla birlikte sertlik değerinin artmasının bir sonucu olarak yorumlanmıştır. 5nm, 10nm ve 20nm son katman ZnSnO_x kaplanmış düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerinde kritik çizik testi koşullarında oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.21’de yer almaktadır. Şekil 6.21’deki optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, her üç kalınlıktaki son katman kaplanmış numune için de hasar oluşumunu ve mikro çatlak varlığını gösteren yarım daire şeklindeki oluşumlar gözlemlenmemiştir.



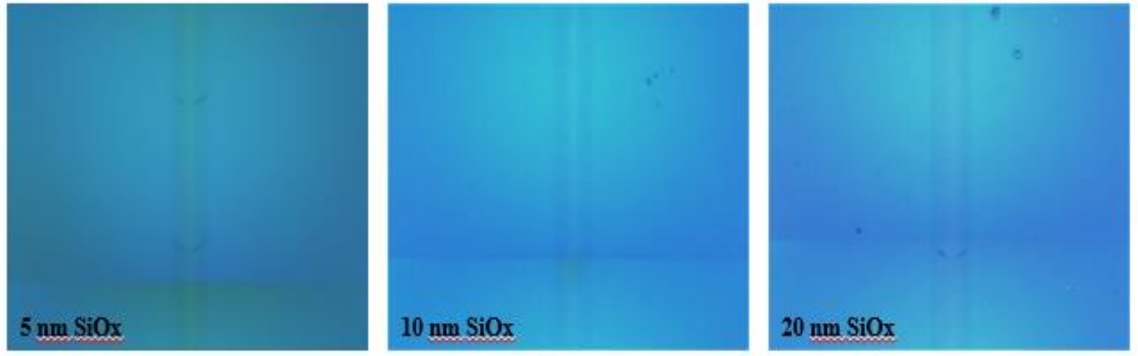
Şekil 6.21 : 5nm-10nm-20nm kalınlıkta ZnSnO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.

5nm, 10nm ve 20nm son katman TiO_x kaplanmış düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerinde kritik çizik testi koşullarında oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.22’de yer almaktadır.



Şekil 6.22 : 5nm-10nm-20nm kalınlıkta TiO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.

Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, her üç kalınlıktaki son katman kaplanmış numuneler için de hasar başlangıcı veya mikro çatlak varlığını gösteren yarım daire şeklindeki oluşumlar gözlemlenmemiştir. 5nm, 10nm ve 20nm son katman SiO_x kaplanmış düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerinde kritik çizik testi koşullarında oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.23’de yer almaktadır. Şekil 6.23’deki optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, 20nm SiO_x kaplama sonrası 1, 5nm SiO_x kaplama sonrası 2 tane olacak şekilde yarım daire oluşumları görülmektedir. 10nm SiO_x kaplanmış numunede ise çizik boyunca herhangi bir hasar oluşumu meydana gelmemiştir.



Şekil 6.23 : 5nm-10nm-20nm kalınlıkta SiO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri.

Optik mikroskop görüntülerine göre, 5nm SiO_x kaplanmış numunenin sertlik değeri en yüksektir. Sonuç olarak, son katman kaplanmış düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı camlarda kritik test koşullarında oluşturulan çiziklerin optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, herhangi bir hasar oluşumu gözlemlenmemiştir. Oluşturulan çiziklere gözle bakıldığında ise çiziklerin son katman kaplama öncesi Low-E kaplamada oluşturulan çiziklerde olduğu gibi gözle görülebilir olduğu saptanmıştır. Çizilme direncindeki değişimi sayısal olarak karşılaştırmak amacıyla, kritik test koşullarında oluşturulan çiziklerin derinlik ve genişlikleri AFM ile ölçülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine SiN son katman kaplama sonrası kritik koşullar altında oluşturulan çiziklerin derinlikleri ve genişlikleri Çizelge 6.6’da yer almaktadır.

Çizelge 6.6 : 5-10-20nm SiN son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlik ve genişlik ortalama değerleri.

Kalınlık	SiN kaplama sonrası derinlik ortalaması (nm)	SiN kaplama sonrası genişlik ortalaması (µm)	
		Pile-up	Line
5 nm	72,51±0,608	7,02±0,05	5,88±0,07
10 nm	74,96±1,26	7,15±0,07	5,98±0,07
20 nm	74,68±0,605	7,08±0,08	6,07±0,05

SiN son katman kaplama sonucu en iyi çizilme direnci 5 nm SiN son katman kaplama sonrası elde edilmiştir. 5nm, 10nm ve 20nm kalınlıktaki ZnSnO_x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlikleri ve genişlikleri Çizelge 6.7’de yer almaktadır.

Çizelge 6.7 : 5-10-20nm ZnSnO_x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlik ve genişlik ortalama değerleri.

Kalınlık	ZnSnO _x kaplama sonrası derinlik ortalaması (nm)	ZnSnO _x kaplama sonrası genişlik ortalaması (μm)	
		Pile-up	Line
5 nm	76,29±1,09	7,00±0,12	5,95±0,09
10 nm	71,72±1,88	6,98±0,07	5,92±0,06
20 nm	74,29±1,13	7,00±0,09	5,97±0,07

ZnSnO_x kaplama sonrası en yüksek çizilme direnci 10nm ZnSnO_x son katman kaplama sonrası elde edilmiştir. TiO_x son katman kaplama sonrası kritik koşullar altında oluşturulan çiziklerin derinlikleri ve genişlikleri Çizelge 6.8’de yer almaktadır.

Çizelge 6.8 : 5-10-20nm TiO_x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlik ve genişlik ortalama değerleri.

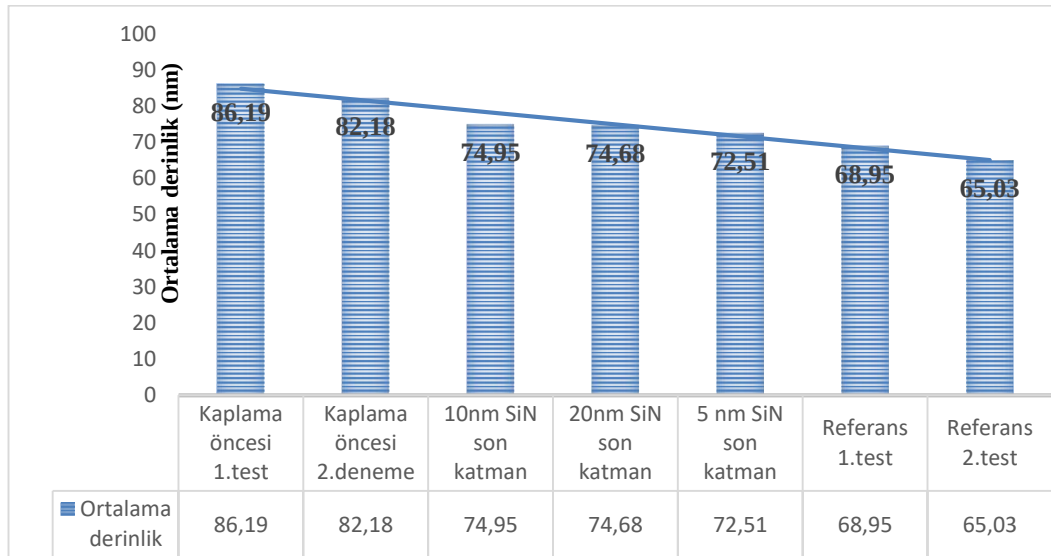
Kalınlık	TiO _x kaplama sonrası derinlik ortalaması (nm)	TiO _x kaplama sonrası genişlik ortalaması (μm)	
		Pile-up	Line
5 nm	76,09±1,12	7,11±0,71	6,01±0,09
10 nm	69,47±2,48	6,95±0,07	5,88±0,07
20 nm	79,95±1,09	7,34±0,16	6,11±0,05

TiO_x son katman kaplama sonrası en yüksek çizilme direnci 10nm TiO_x kaplama sonrası elde edilmiştir. SiO_x son katman kaplama sonrası kritik koşullar altında oluşturulan çiziklerin derinlikleri ve genişlikleri Çizelge 6.9’da yer almaktadır.

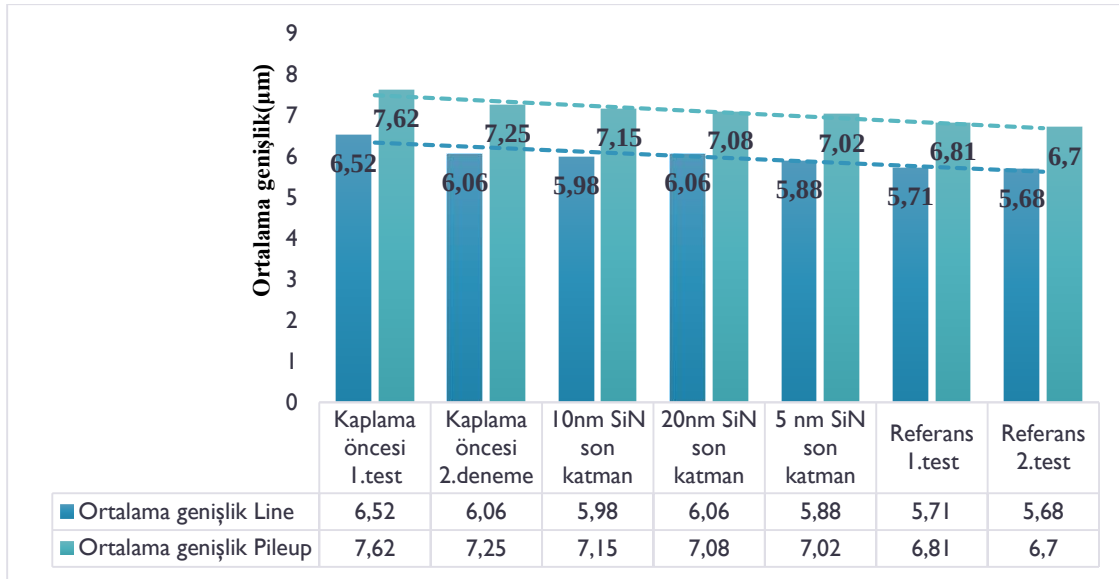
Çizelge 6.9 : 5-10-20nm SiO_x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlik ve genişlik ortalama değerleri.

Kalınlık	SiO _x kaplama sonrası derinlik ortalaması (nm)	SiO _x kaplama sonrası genişlik ortalaması (μm)	
		Pile-up	Line
5 nm	78,51±1,42	7,29±0,06	6,01±0,03
10 nm	79,75±0,73	7,17±0,07	6,18±0,06
20 nm	77,13±0,47	7,26±0,11	6,13±0,07

SiO_x kaplama sonrası en yüksek çizilme direnci 5nm SiO_x kaplama sonrasında elde edilmiştir. Düşük çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cam üzerine SiN son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin SiN katman kalınlığına bağlı olarak derinliklerinin değişimi Şekil 6.24’de, genişliklerinin değişimi Şekil 6.25’de yer almaktadır. Kaplama öncesi test değerleri, düşük çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cama, referans test değerleri ise yüksek çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cama aittir. 1. ve 2. Testler ise belirlenmiş olan kritik koşullar altında uygulanan aynı koşullarda tekrarlanmış testlerdir.

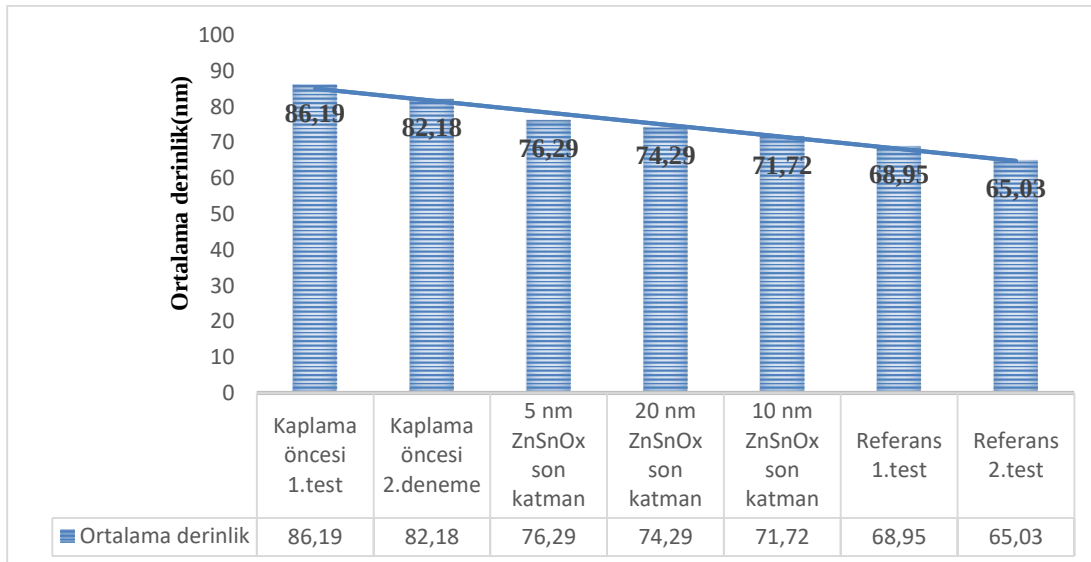


Şekil 6.24 : SiN son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik derinliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.

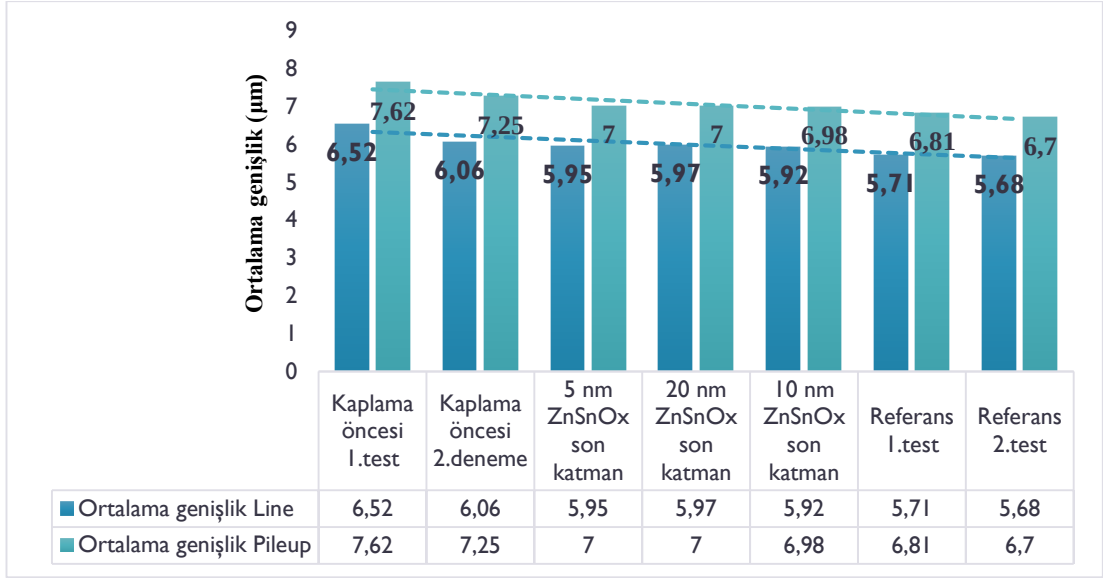


Şekil 6.25 : SiN son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik genişliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.

SiN son katman kaplama sonrası en yüksek çizilme direnci, 5 nm SiN kaplama sonrası elde edilmiştir. Çiziklerin boyutları incelendiğinde, 5 nm SiN kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin boyutunun en dar ve en sığ olduğu ancak SiN kaplama sonrası referans Low-E kaplamalı camın sahip olduğu kadar yüksek çizilme direnci elde edilemediği sonucuna varılmıştır. ZnSnO_x kaplama sonrası katman kalınlığına bağlı olarak oluşturulan çiziklerin derinliklerinin değişimi Şekil 6.26’de, genişliklerinin değişimi Şekil 6.27’de yer almaktadır.

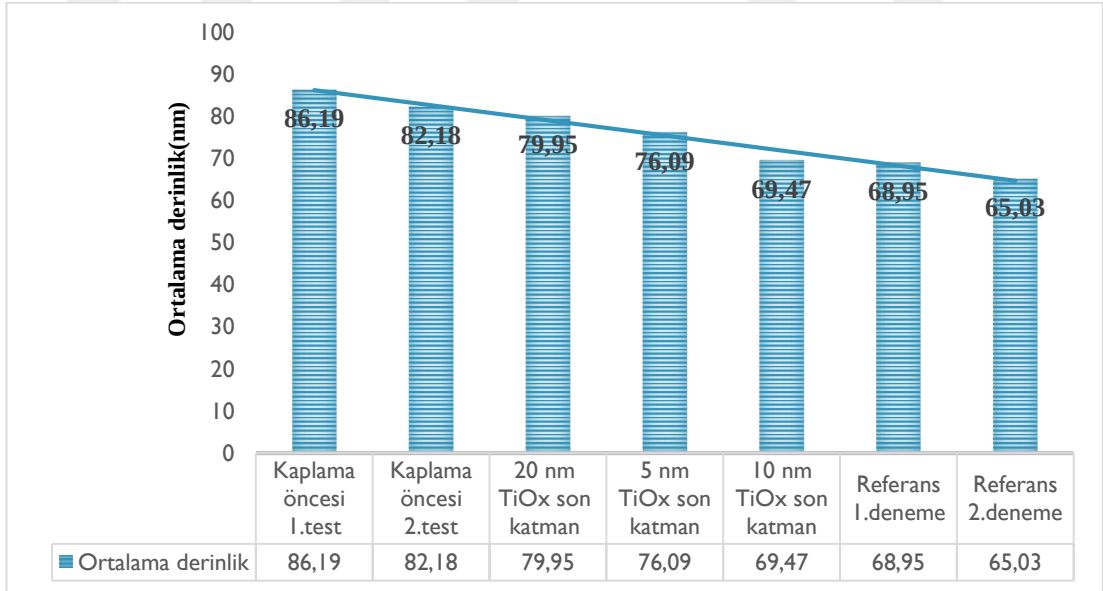


Şekil 6.26 : ZnSnO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik derinliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.

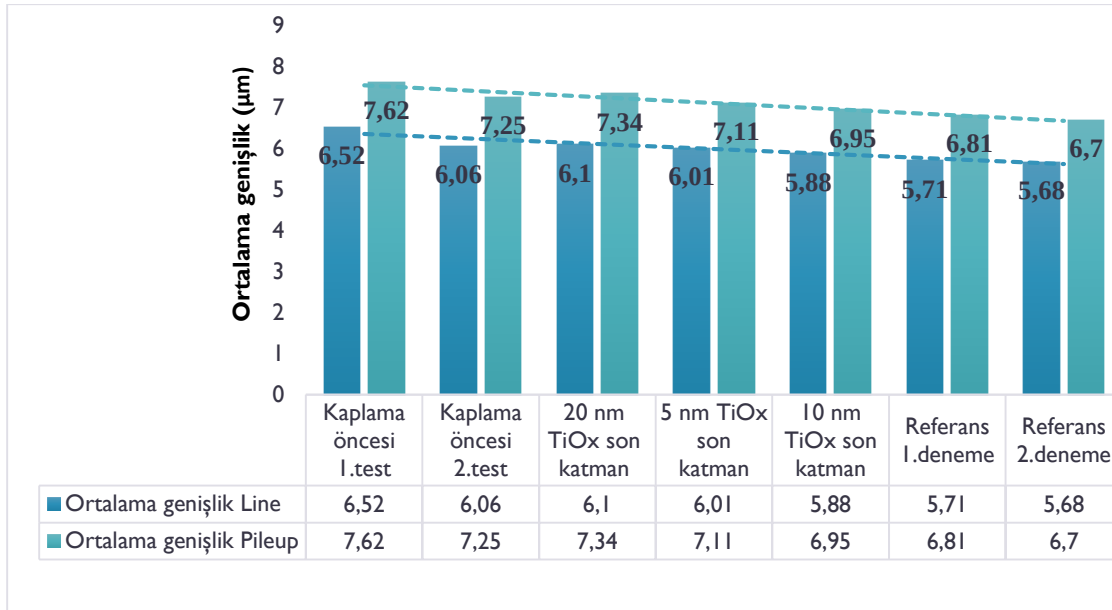


Şekil 6.27 : ZnSnO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik genişliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.

ZnSnO_x son katman kaplama sonrası en yüksek çizilme direnci 10nm ZnSnO_x kaplamadan elde edilmiştir. TiO_x kaplama sonrası katman kalınlığına bağlı çizik derinliklerinin değişimi Şekil 6.28’de, çizik genişliklerinin değişimi Şekil 6.29’da yer almaktadır.

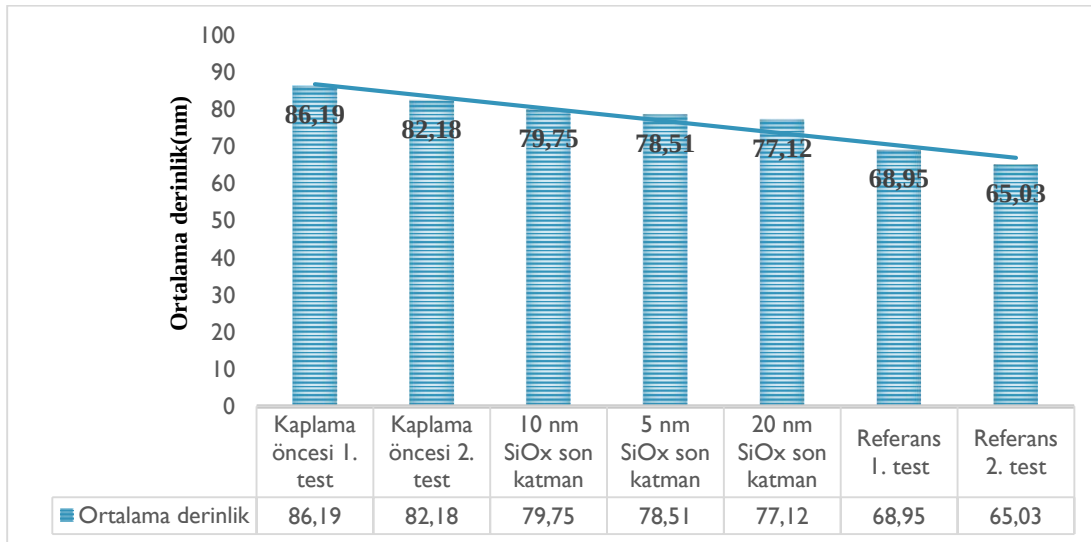


Şekil 6.28 : TiO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik derinliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.

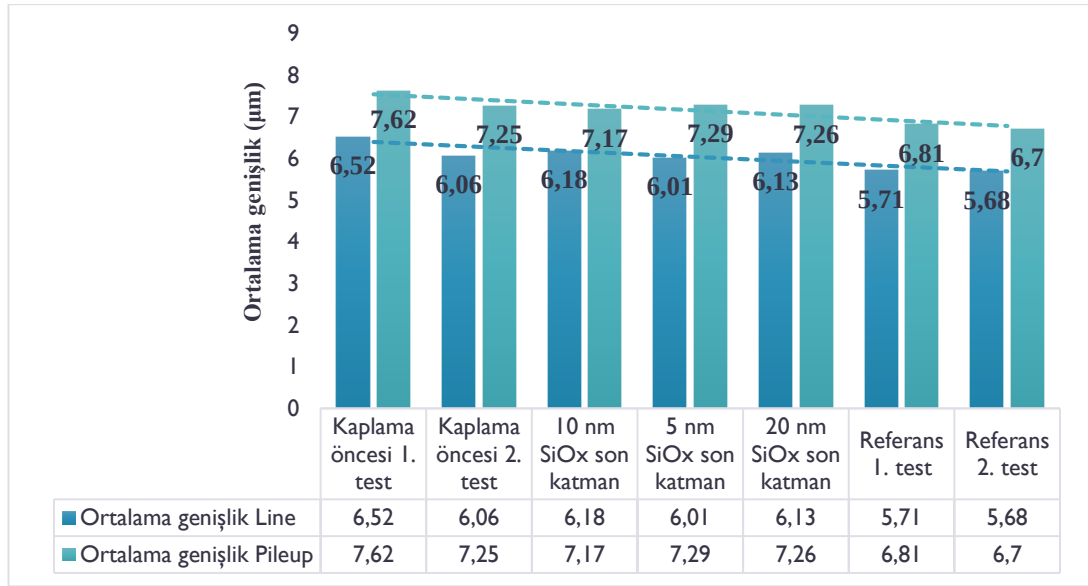


Şekil 6.29 : TiO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik genişliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.

TiO_x kaplama sonrası en yüksek çizilme direncine 10nm TiO_x kaplama kalınlığında ulaşılmıştır ve referans Low-E kaplamalı camın çizilme değerine yakın bir değer elde edilmiştir. SiO_x kaplama sonrası katman kalınlığına bağlı çizik derinliklerinin değişimi Şekil 6.30’de, çizik genişliklerinin değişimi Şekil 6.31’de yer almaktadır.



Şekil 6.30 : SiO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik derinliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.



Şekil 6.31 : SiO_x son katman kaplanmış Low-E kaplamalı cam üzerinde oluşturulan çizik genişliklerinin son katman kaplama kalınlığına göre değişimi.

SiO_x kaplama sonrası en yüksek çizilme direncine 10nm kalınlıkta son katman kaplama sonrası ulaşılmıştır.



7. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

- Deneysel çalışmaların ilk aşamasında, yumuşak Low-E kaplamalı camların görülebilir çizik oluşumuna karşı dirençlerini belirlemek amacıyla çizik test metodu geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, yüksek çizilme direncine sahip olduğu bilinen Low-E kaplamalı bir cam referans olarak belirlenmiş ve çizik testleri sonucunda ortaya bir kalite kriteri konulmuştur.
- Test metodu belirlemek amacıyla, farklı yarıçaplarda ve açılarda batıcı uçlar kullanılarak çizik testleri yapılmıştır. 25 mikron yarıçaplı 90^0 açığa sahip küresel konik elmas uç kullanılarak, 300mN sabit yük altında yapılan çizik testi sonrasında, referans Low-E kaplamalı cam üzerinde görülebilir minimum çiziklerin oluştuğu saptanmıştır. Bu doğrultuda, Low-E kaplamalı camların görülebilir çizik oluşumuna karşı yüksek dirence sahip olma koşulu olarak yukarıda belirtilen koşullarda yapılan çizik testleri sonucunda oluşan çiziklerin minimum görülebilir olması belirlenmiştir.
- Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında çizilme direnci geliştirilmek üzere, düşük çizilme direncine sahip olduğu bilinen bir Low-E kaplamalı cam seçilmiştir. İlk olarak, belirlenmiş kritik çizik testi koşullarında çizik testleri yapılmış ve sonuçlar referans Low-E kaplamalı camın çizik testi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerindeki çiziklerin gözle rahat bir şekilde görülebildiği saptanmıştır.
- Hem düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam hem de referans Low-E kaplamalı cam üzerinde aynı koşullarda oluşturulan çiziklerin boyutları AFM ile derinlik ve genişlik olacak şekilde ölçülmüştür. AFM ölçümlerine göre, beklendiği gibi referans Low-E kaplamalı cam üzerindeki çiziklerin daha dar ve daha sık olduğu sonucuna varılmıştır.
- Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında, düşük çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cam üzerine, manyetik alan destekli sıçratma yöntemi kullanılarak 5nm, 10nm ve 20nm kalınlıklarda SiN, ZnSnO_x, TiO_x, SiO_x son katman kaplamalar yapılmıştır.

- Son katman kaplamalar sonrası çizilme dirençleri belirlenen kritik koşullarda ölçülmüştür. Çizik testleri sonrasında oluşan çiziklerin boyutları AFM ile ölçülmüştür. AFM ölçümlerine göre, her dört malzeme ile farklı kalınlıklarda yapılan son katman kaplamalar sonrası, son katman kaplama öncesine göre çiziklerin daha dar ve daha sık olduğu belirlenmiş ve buna göre tümünde çizilme dirençlerinin arttığı sonucuna varılmıştır. Son katman kaplama sonrası en iyi sonuç, 10nm TiO_x kaplanmış Low-E kaplamalı camda elde edilmiştir.
- Son katman kaplama sonrası kritik test koşullarında oluşturulan çizikler gözle incelendiğinde, tamamının gözle rahat bir şekilde görülebilir olduğu tespit edilmiştir. Özellikle, son katman TiO_x kaplanmış Low-E kaplamalı cam ve referans Low-E kaplamalı cam üzerindeki çiziklerin boyutlarının çok yakın ve neredeyse aynı olduğu belirlenmiş olmasına rağmen çiziklerin görülebilirlik derecelerinin farklı olduğu saptanmıştır.
- 10nm TiO_x son katman kaplanmış cam ile referans Low-E kaplamada aynı koşullarda oluşturulan çiziklerin boyutlarının çok yakın olması, başlangıçta hedeflenen çizilme direncine ulaşıldığını göstermektedir. Ancak deneysel çalışmalarda kullanılan referans Low-E kaplamalı cam ile düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam farklı mekanik özelliklerinin yanı sıra farklı optik özelliklere sahiptir. Her ne kadar mekanik özellikler anlamında istenen çizilme direncine ulaşılmış olsa da camların sahip olduğu farklı optik özelliklerin çiziklerin görülebilirlik derecesinin yüksek oranda etkilediği sonucuna varılmıştır.
- Bu çalışmanın sonucunda, düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 10nm TiO_x kaplanarak hedeflenen çizilme direnç değerine ulaşılmıştır. Katman tasarımlarının değiştirilmesiyle optik özellikler optimize edildiğinde ise, çiziklerin görülebilirlik derecesinin düşürülebileceği ve istenen yüksek mekanik ve optik özelliklere sahip Low-E kaplamalı cam elde edilebileceği öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

- Ardenna, V.** (2018, Mayıs 15). *slideshare*. Slideshare: <https://www.slideshare.net/laboratoridalbasso/obst-salento-1st> adresinden alındı
- Boentoro, W., Pflug, A., & Szyszka, B.** (2008). Scratch resistance analysis of coatings on glass and polycarbonate. *Elsevier*.
- Bull, S.** (2015). Scratch Damage in Coated Glass. R. Wood içinde, *Multifunctional Materials for Tribological Applications* (s. 89-116). USA: Pan Stanford.
- Bull, S. J.** (2005). Nanoindentation of coatings. *Journal of Physics*.
- Bull, S. J., & Berasetegui, E. G.** (2006). An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing. M. Fillon, W. M. Liu, & H. Liang içinde, *Tribology International* (s. 147). Elsevier.
- Casini, M.** (2016). Advanced insulation glazing. M. Casini içinde, *Advanced Materials and Nanotechnology to improve Energy-Efficiency and Environmental Performance* (s. 249-260).
- Ding, G., & Clavero, C.** (2017). Silver based low emissivity coating technology for saving window applications. *Modern Technologies for creating the thin film systems and coatings* (s. 409-431). içinde USA: Intech.
- Ding, G., & Minh, L.** (tarih yok). Low emissivity (low-E) coating technologies for Energy saving window applications. doi:10.5772/67085
- Ferrara, M., Castaldo, A., Esposito, S., & D'Angelo, A.** (2015). Low emission coatings deposited by sputtering on glasses for energy efficient buildings. *Surface and Coatings*, 3.
- Frey, H.** (2015). Cathode Sputtering. H. Frey, & H. Khan içinde, *Handbook of Thin-Film Technology* (s. 133, 145-146).
- Gaetan, D. S.** (2010). *Belçika Patent No. EP226743 (A1)*.
- Güler, M. O.** (2018, Nisan 22). *Kaplama Teknolojileri*. slideplayer: <http://slideplayer.biz.tr/slide/10751722/> adresinden alındı
- Güreren, H.** (tarih yok). *Isı yalıtımı ve Düz cam*. Trakya Cam Sanayii A.Ş.

- Hongchao, L., Gao, D., Senlin, X., & Zou, J.** (2016). Effect of magnetron sputtering parameters and stress state of W film precursors on WS₂ layer texture by rapid selenization. *Scientific Reports*, 2-5. doi:10.1038/srep36451
- Hunsche, B., Vergöhl, M., Klose, F., Szyszka, B., & Matthee, T.** (2001). Effect of deposition parameters on optical and mechanical properties of MF and DC sputtered Nb₂O₃ films. *Elsevier*, 187-189.
- İzoder.** (2018, Şubat 15). www.izoder.org.tr:www.izoder.org.tr/dosyalar/yalitim_cami_uniteleri.pdf, adresinden alındı
- Jelle, B. B., Kalnes, S. E., & Gao, T.** (2015). Low-emissivity materials for building applications: A state of the art review and future research perspectives. *Elsevier*, 8.
- Jesse, A.** (2010). *Nanoscrath testing of thin film on glass substrate*. Nanovea.
- Karakurt, H. S.** (2008). Pencere Sistemlerinin Isıl Performansının Doğrama Seçeneklerine Bağlı Olarak Değerlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kazmanlı, K.** (2017). Sputter coating. *Modern Yüzey Kaplama Teknikleri Ders Notları*.
- Kelly, P. J., & Arnell, R. D.** (2000). Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Pergamon*, 160-162.
- Kim, D. K.** (2007). Nanoindentation- Lecture 1 Basic Principle. Department of Materials Science and Engineering, KAIST.
- Kristo, A., Bond, B., Stanek, R., & Harting, K.** (1999). *Amerika Birleşik Devletleri Patent No. US697469B1*.
- Kuiri, S.** (2012). *Advanced Scratch Testing for Evaluation of Coatings*. USA: Bruker.
- Leyland, A., & Matthews, A.** (2000). On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour. *Elsevier*.
- Li, D.** (2013). *Understanding Coating Failures Using Scratch Testing*. Nanovea.
- Maillet, A., & Singh, L. J.** (2016). *Fransa Patent No. WO2016097557 A1*.
- Majeed, H.** (2013). *Sputtering of Thin Films*.
- Malecka, J. K.** (2012). *Diffusion Studies in Toughenable Low-E Coatings*. Manchester Metropolitan University.

- Malecka, j. K., Kelly, P. J., West, G., & Ridealgh, J. A.** (2014). Diffusion studies in magnetron sputter deposited silicon nitride films. *Elsevier*, 39-40.
- Malzbender, J., Toonder, J. M., Balkenende, A., & With, G.** (2001). Measuring mechanical properties of coatings: a methodology applied to nano particle filled sol-gel coatings on glass. *Materials Science and Engineering*, 48-49, 54-63.
- Mattox, D. M.** (2009). Sputter Deposition: DC Magnetron Sputter Deposition. D. M. Mattox içinde, *Education Guides to Vacuum Coating Processing* (s. 143). Society of Vacuum Coaters.
- Mattox, D. M.** (2010). Physical Sputtering and Sputter Deposition (Sputter). D. M. Mattox içinde, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD)* (s. 237-242). Elsevier.
- McCurdy, R.** (2000). Fla Glass, In: Coating on Glass Technology . California.
- Meng, D., Zeng, M., Dai, R., Li, B., & Li, C..** (2014). Study on Optical and Thermal Properties of Low-E Glass. *Advanced Materials Research*, 459-460.
- Michel, G. J., & Frederic, B.** (1999). *Fransa Patent No. EP0937013 (A1)*.
- Ni, W., Cheng, Y. T., Lukitsch, M. J., Weiner, A. M., & Lev, L. C.** (2004). Effects of the ratio of hardness to Young's modulus on the friction and wear behaviour of bilayer coatings. *Applied Physics Letters*.
- Özer , O.** (2017). *Kaplamalı Camın Taşınması, Depolanması ve İşlenmesi*. Şişecam Düzcamları.
- Özkarayel, L.** (2013, Kasım 4). Açık Bilim Web sitesi: <http://www.acikbilim.com/2013/11/dosyalar/elektromanyetik-spektrum-bizim-ne-anlatiyor.html> adresinden alındı
- Poirie, T., Schmit, T., Bousser, E., & Martinu, L.** (2017). Influence of internal stress in optical thin films on their failure modes assessed by in situ real-time scratch analysis. *Elsevier*.
- Pulker, H. K.** (1999). Glass and Thin Films. H. K. Pulker içinde, *Coatings on Glass* (s. 78). Elsevier.
- R.J. Martin-Palma, L. V.-D.-R.** (1998). Silver-based low emissivity coatings for architectural windows: Optical and structural properties. *Elsevier*.
- Rockett, A.** (2008). Physical Vapor Deposition. A. Rockett içinde, *The Materials Science of Semiconductors* (s. 542). Springer.

- Roy, M., & Davim, P. J.** (2014). *Thermal Sprayed Coating and their Tribological Performances*. Engineering Science Reference.
- Schaefer, C., Brauer, G., & Szczyrbowski, J.** (1997). Low emisivity coatings on architectural glass. *Elsevier*.
- Suzuki, S.** (1999). Internal stress and adhesion of thin films sputtered onto glass by an in-line sputtering system. *Elsevier*, 196-197.
- Svec, P., Brusilova, A., & Kozankova, J.** (2009). Effect of Microstructure and Mechanical Properties on Wear Resistance of Silicon Nitride Ceramics. *Materials Engineering*.
- Theiss, W.** (2018, Nisan 29). [www.mtheiss.com](http://www.mtheiss.com/?c=2&content=design_low_e).
http://www.mtheiss.com/?c=2&content=design_low_e adresinden alındı
- Waite, M. M., Shah, S. I., & Glocker, D. A.** (2007). Sputtering Sources. D. M. Mattox, & V. H. Mattox içinde, *50 Years of Vacuum Coating Technology* (s. 42). Society of Vacuum Coaters.
- Wegener, I.** (2015). *Leybold Optics Low-E series- Heat treatable Low-E coatings for architectural applications*. Bühler.
- Yang, J.-K., Zhao, H.-L., Zhao, L.-P., & Li, J.** (2013). Optical and micro-mechanical properties of Ag-based Low-E glass by magnetron sputtering. *Advanced Mechanics and Materials*.
- Zhou, K., Chen, Z., & Hoh, H. J.** (2016). Characterization of Coating Adhesion Strength. S. Zhang içinde, *Thin Films and Coatings* (s. 471). CRC Press.

EKLER

Ek A: Deneysel çalışmanın 1. Aşamasında yüksek çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cam ve düşük çizilme direnci gösteren Low-E kaplamalı cama 300mN sabit yükü uygulanan 1. Ve 2. çizik testleri sonrası oluşan çiziklerin başlangıç orta ve bitiş noktası olmak üzere derinlik ve genişlik değerleri

Ek B: Son katman kaplanmış düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 300mN yükü uygulanan çizik testi sonrası oluşturulan çiziklerin derinlik ve genişlik değerleri



Çizelge A.1 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 1. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin derinlik ölçümü.²

	1.çizik	2.çizik	3.çizik	4.çizik	5.çizik
1. ölçüm (başlangıç)	54,63	61,37	69,18	69,54	70,87
2.ölçüm (orta)	55,98	64,6	68,36	72	70,96
3.ölçüm (bitiş)	56,12	66,15	73,61	71,57	69,156
Ortalama	55,57	64,04	70,38	71,04	70,33
Çiziklerin derinlik ortalaması: 68,95±3,28 nm					

Çizelge A.2 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 2. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin derinlik ölçümü.

	1.çizik	2.çizik	3.çizik	4.çizik	5.çizik
1.ölçüm (başlangıç)	56,13	57,01	63,10	65,26	67,79
2.ölçüm (orta)	58,31	57,35	60,41	66,27	70,44
3.ölçüm (bitiş)	58,12	56,22	60,33	63,98	67,64
Ortalama	57,52	56,86	61,28	65,17	68,63
Çiziklerin derinlik ortalaması: 65,03±3,675nm					

² Çizelgelerde sarı ile belirtilen değerler ortalama hesabında dikkate alınmamıştır.

Çizelge A.3 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 1. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin genişlik ölçümü.

	1.çizik		2.çizik		3.çizik		4.çizik		5.çizik	
	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line
1.ölçüm (başlangıç)	6,64	5,66	6,64	5,66	6,64	5,47	6,84	5,66	7,03	5,86
2.ölçüm (orta)	6,44	5,47	6,64	5,47	6,64	5,47	6,44	5,66	7,03	5,86
3.ölçüm (bitiş)	6,84	5,66	6,64	5,66	6,84	5,86	6,84	5,66	7,03	5,86
Ortalama	6,64	5,60	6,64	5,60	6,70	5,60	6,70	5,66	7,03	5,86
Pile-up genişlik ortalaması: $6,81 \pm 0,187 \mu\text{m}$					Line genişlik ortalaması: $5,71 \pm 0,135 \mu\text{m}$					

Çizelge A.4 : Yüksek çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 2. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin genişlik ölçümü.

	1.çizik		2.çizik		3.çizik		4.çizik		5.çizik	
	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line
1. ölçüm (başlangıç)	6,84	5,37	6,35	5,56	6,83	5,56	6,64	5,66	6,738	5,762
2.ölçüm (orta)	6,64	5,47	6,83	5,76	6,25	5,66	6,74	5,76	6,738	5,762
3.ölçüm (bitiş)	7,03	5,27	6,84	5,66	6,83	5,86	6,93	5,66	6,738	5,566
Ortalama	6,836	5,37	6,67	5,66	6,64	5,696333	6,771	5,696667	6,738	5,696667
Pile-up genişlik ortalaması: $6,71 \pm 0,059 \mu\text{m}$					Line genişlik ortalaması: $5,68 \pm 0,016 \mu\text{m}$					

Çizelge A.5 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 1. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin derinlik ölçümü.

	1.çizik	2.çizik	3.çizik	4.çizik	5.çizik
1. ölçüm (başlangıç)	85,2	85,1	86,7	86,4	86,9
2.ölçüm (orta)	88,1	85,4	86,7	84,6	86,9
3.ölçüm (bitiş)	85,2	85,5	86,7	86,6	86,8
Ortalama	86,16	85,33	86,7	85,86	86,9
Çiziklerin derinlik ortalaması: 86,19±0,27nm					

Çizelge A.6 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 2. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin derinlik ölçümü.

	1.çizik	2.çizik	3.çizik	4.çizik	5.çizik
1. ölçüm (başlangıç)	77,33	83,31	81,70	83,52	80,10
2.ölçüm (orta)	79,94	83,78	84,59	82,12	84,65
3.ölçüm (bitiş)	80,82	83,96	85,08	81,72	80,18
Ortalama	79,36	83,68	83,79	82,45	81,64
Derinlik ortalaması: 82,18±1,81nm					

Çizelge A.7 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 1. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin genişlik ölçümü.

	1.çizik		2.çizik		3.çizik		4.çizik		5.çizik	
	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line
1. ölçüm (başlangıç)	7,42	6,44	7,62	6,44	7,62	6,64	7,62	6,44	7,81	6,64
2.ölçüm (orta)	7,62	6,64	7,62	6,44	7,62	6,44	7,8	6,25	7,62	6,44
3.ölçüm (bitiş)	7,62	6,64	7,42	6,44	7,62	6,64	7,62	6,64	7,62	6,64
Ortalama	7,55	6,57	7,55	6,44	7,62	6,57	7,68	6,44	7,68	6,57
Pile-up genişlik ortalaması: $7,62 \pm 0,064 \mu\text{m}$					Line genişlik ortalaması: $6,52 \pm 0,072 \mu\text{m}$					

Çizelge A.8 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cama uygulanan 2. çizik testi sonrası oluşan çiziklerin genişlik ölçümü.

	1.çizik		2.çizik		3.çizik		4.çizik		5.çizik	
	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line
1. ölçüm (başlangıç)	7,23	5,86	7,23	6,05	7,23	6,05	7,03	6,05	7,23	5,86
2.ölçüm (orta)	7,42	6,05	7,23	6,05	7,42	6,05	7,03	6,25	7,23	6,05
3.ölçüm (bitiş)	7,23	6,05	7,23	6,25	7,42	6,25	7,23	6,05	7,42	6,05
Ortalama	7,29	5,99	7,23	6,12	7,36	6,12	7,09	6,12	7,29	5,99
Pile-up genişlik ortalaması: $7,25 \pm 0,098 \mu\text{m}$					Line genişlik ortalaması: $6,06 \pm 0,071 \mu\text{m}$					

Çizelge B.1 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm SiN son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlikleri.

SiN son katman kaplama	Çiziklerin derinlik ortalamaları (nm)					
	1.çizik	2.çizik	3.çizik	4.çizik	5.çizik	Genel Ortalama
5 nm SiN	72,47	72,83	71,55	73,18	72,52	72,51±0,608
10 nm SiN	73,94	76,68	75,91	73,97	74,27	74,96±1,26
20 nm SiN	73,97	74,28	75,16	75,55	74,47	74,68±0,605

Çizelge B.2 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm ZnSnO_x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlikleri.

ZnSnO _x son katman kaplama	Çiziklerin derinlik ortalamaları (nm)					Genel Ortalama
	1.çizik	2.çizik	3.çizik	4.çizik	5.çizik	
5 nm ZnSnO _x	74,58	77,41	76,48	75,99	76,99	76,29±1,09
10 nm ZnSnO _x	68,5	72,24	71,77	73,11	72,97	71,72±1,88
20 nm ZnSnO _x	75,35	74,68	74,97	72,46	74,02	74,29±1,13

Çizelge B.3 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm TiO_x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlikleri.

TiO _x son katman kaplama	Çiziklerin derinlik ortalamaları (nm)					Genel ortalama
	1.çizik	2.çizik	3.çizik	4.çizik	5.çizik	
5 nm TiO _x	74,83	77,67	76,73	75,45	75,76	76,09±1,12
10 nm TiO _x	72,28	71,55	69,01	68,35	66,16	69,47±2,48
20 nm TiO _x	78,17	81,10	80,26	80,43	79,81	79,95±1,09

Çizelge B.4 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm SiO_x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin derinlikleri.

SiO _x son katman kaplama	Çiziklerin derinlik ortalamaları (nm)					Genel ortalama
	1.çizik	2.çizik	3.çizik	4.çizik	5.çizik	
5 nm SiO _x	76,37	78,39	80,04	78,23	79,52	78,51±1,42
10 nm SiO _x	78,72	80,15	80,56	80,00	79,31	79,75±0,73
20 nm SiO _x	76,94	77,68	77,16	77,41	76,44	77,13±0,47

Çizelge B.5 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm SiN son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin genişlikleri.

SiN son katman kaplama	Çiziklerin genişlik ortalamaları (μm)											
	1.çizik		2.çizik		3.çizik		4.çizik		5.çizik		Genel ortalama	
	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line
5 nm SiN	6,96	5,92	7,03	5,87	6,96	5,86	7,09	5,98	7,03	5,79	7,02±0,05	5,88±0,07
10 nm SiN	7,23	5,86	7,16	6,05	7,03	5,98	7,16	6,05	7,16	5,98	7,15±0,07	5,98±0,07
20 nm SiN	7,09	5,99	7,03	6,05	7,03	6,05	7,23	6,12	7,03	6,12	7,08±0,08	6,07±0,05

Çizelge B.6 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm ZnSnO_x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin genişlikleri.

ZnSnO _x son katman kaplama	Çiziklerin genişlik ortalamaları (μm)										Genel ortalama	
	1.çizik		2.çizik		3.çizik		4.çizik		5.çizik			
	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line
5 nm ZnSnO _x	7,03	5,79	7,23	6,05	7,09	5,99	6,90	5,92	7,09	5,99	7,00±0,12	5,95±0,09
10 nm ZnSnO _x	6,96	5,86	6,90	5,86	6,96	5,92	6,96	5,98	7,09	5,98	6,98±0,07	5,92±0,06
20 nm ZnSnO _x	7,03	5,92	6,96	5,92	7,16	6,05	6,90	5,92	6,96	6,05	7,00±0,09	5,97±0,07

Çizelge B.7 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm TiO_x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin genişlikleri.

TiOx son katman kaplama	Çiziklerin genişlik ortalamaları (µm)										Genel ortalama	
	1.çizik		2.çizik		3.çizik		4.çizik		5.çizik			
	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line
5 nm TiOx	7,09	5,92	7,09	5,92	7,09	5,98	7,03	6,12	7,23	6,12	7,11±0,71	6,01±0,09
10 nm TiOx	6,96	5,86	6,96	5,98	6,96	5,86	7,03	5,92	6,84	5,79	6,95±0,07	5,88±0,07
20 nm TiOx	7,36	6,05	7,62	6,12	7,23	6,12	7,23	6,05	7,29	6,18	7,34±0,16	6,11±0,05

Çizelge B.8 : Düşük çizilme direncine sahip Low-E kaplamalı cam üzerine 5-10-20nm SiO_x son katman kaplama sonrası oluşturulan çiziklerin genişlikleri.

SiOx son katman kaplama	Çiziklerin genişlik ortalamaları (µm)										Genel ortalama	
	1.çizik		2.çizik		3.çizik		4.çizik		5.çizik			
	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line	Pile-up	Line
5 nm SiOx	7,29	5,99	7,23	5,99	7,36	6,05	7,35	5,99	7,22	6,05	7,29±0,06	6,01±0,03
10 nm SiOx	7,16	6,12	7,09	6,25	7,29	6,25	7,16	6,18	7,16	6,12	7,17±0,07	6,18±0,06
20 nm SiOx	7,29	6,12	7,16	6,25	7,42	6,12	7,16	6,05	7,29	6,12	7,26±0,11	6,13±0,07



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Cansu Teber
Doğum Tarihi ve Yeri : 13.04.1993- Üsküdar
E-posta : cansuteber1@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yüksek lisans**: 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

03.2017 – 02.2018 : Şişecam Bilim ve Teknoloji Merkezi, Vakum Kaplama Teknolojileri Müdürlüğü, Proje Asistanı