T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KULLANILAN DESENLİ İNCE CAMLARIN KİMYASAL TEMPERLENMESİ

Gülcan TERZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üretim Programı

Danışman

Doç. Dr. Miray ÇELİKBİLEK ERSUNDU

Ağustos, 2020

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KULLANILAN DESENLİ İNCE CAMLARIN KİMYASAL TEMPERLENMESİ

Gülcan TERZİ tarafından hazırlanan tez çalışması 12.08.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Miray ÇELİKBİLEK ERSUNDU
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Miray ÇELİKBİLEK ERSUNDU, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Metin GENÇTEN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Aziz GENÇ, Üye
İzmir Yüksek Teknoloji Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Miray ÇELİKBİLEK ERSUNDU sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Fotovoltaik Sistemlerde Kullanılan Desenli İnce Camların Kimyasal Temperlenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Gülcan TERZİ

İmza

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FYL-2019-3536 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim ve yüksek lisans çalışmalarım boyunca bilimsel ve kişisel her konuda kıymetli bilgi birikim, tecrübe ve desteğini yanımda hissettiğim, birçok kıymetli serüvene başlamam için bana yol gösteren, düştüğümde kalkmam için çabalayan, akademik hayatındaki duruşuna sonsuz saygı duyduğum, çalışma bilinci ve motivasyonuna hayran olduğum, öğrencisi olmaktan gurur duyduğum, çok değerli ve saygıdeğer hocam, Doç. Dr. Miray ÇELİKBİLEK ERSUNDU'ya,

Dersine girdiğim ilk günden beri hayat bakışımı geliştiren, akademik ve sosyal alanlarda değerli tecrübe ve desteğini her zaman paylaşan, olumlu ve yapıcı eleştirileriyle beni geliştirmek için desteğini esirgemeyen, duruşuna saygı duyduğum ve her zaman örnek alacağım, öğrencisi olmaktan gurur duyduğum, çok değerli ve saygıdeğer hocam, Doç. Dr. Ali Erçin ERSUNDU'ya,

Yüksek lisans öğrenimim boyunca birlikte çalışmaktan büyük keyif aldığım, fikir ve önerilerine değer verdiğim, her an birbirimize destek olup çalışmalarımızın keyifli ve verimli hale gelmesinde katkısı olan can arkadaşlarım Yük. Müh. Bengü GÜLDALI ve Yük. Müh. Yekta Ateş GÖSTERİŞLİOĞLU'na,

Bünyesinde deneysel çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Şişecam Bilim Teknoloji ve Tasarım Merkezinin çok değerli çalışanlarına, çalışmalarıma başladığım ilk günden beri pozitif ve içten yaklaşımı ile beni motive eden, kıymetli bilgi birikim ve deneyimi ile her zaman yoluma ışık tutan, çalışmaktan gurur duyduğum, çok kıymetli ve saygıdeğer Dr. İlkay SÖKMEN'e, bu süreçte tecrübe ve desteklerini esirgemeyen, Yüzey Teknolojileri Grubu'nun güler yüzlü, yardımsever ve kıymetli çalışanları Dr. Burcu ÖĞÜT'e, Yük. Müh. Ezgi Deniz BİÇER'e, Yük. Müh. Nahide ÖZBEN'e, Dr. Lukas SİMURKA'ya ve Emel MERCAN'a,

Lisans ve yüksek lisans öğrenimimde yardımlarını esirgemeyen, bilimsel ve sosyal tecrübelerini paylaşan, değerli arkadaşlarım Büşra KADİROĞLU'na, Batuhan KARA'ya, Mustafa Rasin ACAR'a, Yük. Müh. Orhan KIBRISLI'ya, Büşra DEMİR'e ve YTÜ Glass Research grubunun kıymetli üyelerine, bana inanan, güvenen, elimden tutan ve her zaman destek olan, sevgili Yük. Müh. Ahmet Caner KAYAALP'e,

Bugünlere gelebilmemde büyük pay sahibi olan, bana verdikleri emeği, koşulsuz güveni, desteği her zaman hissettiğim ve her zaman arkamda duran, tüm kalbimle sevdiğim, sevgili annem Vasfiye TERZİ'ye, babam Hilmi TERZİ'ye, biricik ablam Gülay TERZİ KARAALİOĞLU'na ve abim Alper KARAALİOĞLU'na,

Teşekkürü bir borç bilirim.

Gülcan TERZİ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ ix

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xiv

ÖZET xvii

ABSTRACT xix

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 2
1.3 Orijinal Katkı 2

2 TEORİK BİLGİ 4

2.1 Fotovoltaik Sistemler 4
2.2 Fotovoltaik Sistemlerde Kullanılan Camların Özellikleri 7
2.2.1 Yansıma Kayıpları Azaltılmış Camlar 9
2.2.2 Düşük Demirli Camlar 14
2.2.3 İnce Camlar 16
2.3 Kimyasal Temperleme Yöntemi ile Cam Yüzeylerinin Güçlendirilmesi 18

3 DENEYSEL ÇALIŞAMALAR 28

3.1 Numune Hazırlama 29
3.2 Kimyasal Temperleme 30
3.3 Atmosferik Koşullara Dayanım Testi 31
3.4 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı 31
3.5 SEM/EDX Analizi 33
3.6 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi 33
3.7 Yüzey Pürüzlülük Analizi 34
3.8 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi 34
3.9 Yüzey Gerilimi ve Gerilim Derinliği Analizi 36

3.10 Bağ Yapısı Analizi 36
4 DENEYSEL SONUÇLAR **38**
4.1 Kimyasal Temperlemeye Sıcaklık ve Süre Etkisi 38
4.1.1 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı 39
4.1.2 SEM/EDS Analizi Sonuçları 40
4.1.3 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi 41
4.1.4 Yüzey Pürüzlülük Analizi 42
4.1.5 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi 43
4.1.6 Bağ Yapısı Analizi 45
4.2 Kimyasal Temperlemeye Desen Etkisi 46
4.2.1 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı 46
4.2.2 SEM/EDS Analizi Sonuçları 47
4.2.3 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi 48
4.2.4 Yüzey Pürüzlülük Analizi 49
4.2.5 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi 50
4.2.6 Bağ Yapısı Analizi 52
4.3 Kimyasal Temperlemeye Kalınlığın Etkisi 53
4.3.1 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı 53
4.3.2 SEM/EDS Analizi Sonuçları 54
4.3.3 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi 55
4.3.4 Yüzey Pürüzlülük Analizi 56
4.3.5 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi 57
4.3.6 Bağ Yapısı Analizi 59
4.4 Kimyasal Temperlemenin Atmosferik Dayanıma Etkisi 60
4.4.1 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi 60
4.4.2 Yüzey Pürüzlülük Analizi 62
4.4.3 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi 62

4.4.4 Bağ Yapısı Analizi 64
4.4.5 Makro İnceleme 66
5 DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 73
5.1 Kimyasal Temperlemeye Sıcaklık ve Süre Etkisi 73
5.1.1 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı 73
5.1.2 SEM/EDS Analizi Sonuçları 75
5.1.3 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi 76
5.1.4 Yüzey Pürüzlülük Analizi 78
5.1.5 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi 79
5.1.6 Bağ Yapısı Analizi 82
5.2 Kimyasal Temperlemeye Desen Etkisi 83
5.2.1 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı 83
5.2.2 SEM/EDS Analizi Sonuçları 84
5.2.3 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi 85
5.2.4 Yüzey Pürüzlülük Analizi 86
5.2.5 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi 87
5.2.6 Bağ Yapısı Analizi 88
5.3 Kimyasal Temperlemeye Kalınlığın Etkisi 89
5.3.1 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı 89
5.3.2 SEM/EDS Analizi Sonuçları 90
5.3.3 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi 91
5.3.4 Yüzey Pürüzlülük Analizi 92
5.3.5 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi 92
5.3.6 Bağ Yapısı Analizi 94
5.4 Kimyasal Temperlemenin Atmosferik Dayanıma Etkisi 95
5.4.1 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi 95
5.4.2 Yüzey Pürüzlülük Analizi 98

5.4.3 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi 98
5.4.4 Bağ Yapısı Analizi 102
5.4.5 Makro İnceleme 103
6 SONUÇ VE ÖNERİLER **107**
KAYNAKÇA **111**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **115**

SİMGE LİSTESİ

a	Absorbsiyon katsayısı
ν_{as}	Asimetrik gerilme titreşimi
a	Çatlak derinliği
dk	Dakika
I	Geçen ışığın şiddeti
T	Geçirgenlik
I_0	Gelen ışığın şiddeti
g	Gram
$\overline{D}$	İnterdifüzyon katsayısı
d	Kalınlık
t	Kimyasal temperleme süresi
F	Kuvvet
MPa	Megapascal
m	Metre
µm	Mikrometre
mm	Milimetre
nm	Nanometre
N	Newton
C	Renklendirme konsantrasyonu
sn	Saniye
°C	Santigrat derece
cm	Santimetre
TWh	Teta watt saat

KISALTMA LİSTESİ

CS	Basma gerilimi
FTIR	Fourier dönüşümlü infrared spektrofotometresi
DoL	Gerilim derinliği
SLS	Soda-kireç-silikat

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 Fovoltaik a) modül, b) panel uygulamaları 5
Şekil 2. 2 Fotovoltaik sistemde elektrik üretim çalışma prensibi 6
Şekil 2. 3 Enerji kaynakları açısından dünya enerji üretimi [11] 7
Şekil 2. 4 Fotovoltaik sistem 8
Şekil 2. 5 Şematik olarak SLS camın geçirgenlik davranışı 9
Şekil 2. 6 Desenli cam üretiminin şematik diyagramı [20] 11
Şekil 2. 7 Desenli camda ışığın yansıma davranışı 12
Şekil 2. 8 Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. Prizma ve Sandy desenli camları 12
Şekil 2. 9 Cam üzerine kaplanmış tek katmanlı antireflektif kaplama [15] 13
Şekil 2. 10 Fe^{+3} ve Fe^{+2} iyonlarının absorpsiyon davranışı [29] 15
Şekil 2. 11 Camın mukavemet ve çatlak derinliği ilişkisi [40] 19
Şekil 2. 12 Cam yüzeyindeki çatlağın ilerlemesi [37], [43] 19
Şekil 2. 13 Isıl tempeleme işlemi sonrası camın soğutulması için harcanan enerji [50] 21
Şekil 2. 14 Soda-kireç-silikat cam ağ yapısı 22
Şekil 2. 15 SLS cam ve KNO_3 tuz banyosu arasındaki iyon değişimi 23
Şekil 2. 16 Temperleme sonrası oluşan kalınlık - gerilim profili [63] 24
Şekil 2. 17 Derinlik boyunca gerilim - potasyum profili değişimi [65] 25
Şekil 2. 18 Camın gevşeme davranışı 25
Şekil 2. 19 Cam yüzeyinde meydana gelen korozyon 26

Şekil 3. 1 Boyutları 60x60x2 mm olan cam numune örneği 30
Şekil 3. 2 LEMA TC 804A kimyasal temperleme fırını ve numunelerin sepetteki dizilimi 30
Şekil 3. 3 Mettler AB204 hassas terazi 32
Şekil 3. 4 JEOL JSM 6010 LV taramalı elektron mikroskobu 33
Şekil 3. 5 BYK Haze-Gard Plus optik geçirgenlik ve pusluluk cihazı 34
Şekil 3. 6 Bruker Contour GT- X beyaz ışık interferometresi 34
Şekil 3. 7 Instron 3366 cihazı 35
Şekil 3. 8 Halka üstü halka testi 36
Şekil 3. 9 FSM 6000LE yüzey gerilim ölçüm cihazı 36

Şekil 3. 10 Hyperion 3000 FTIR cihazı 37

Şekil 4. 1 Desenli cam numunenin a) artan sıcaklık b) artan süre ile ağırlık değişimi sonuçları 39
Şekil 4. 2 Desenli cam numunenin a) artan sıcaklık b) artan süre ile difüzyon katsayısı sonuçları 40
Şekil 4. 3 Desenli cam numunenin a) artan sıcaklık b)artan süre ile SEM/EDS analizi 41
Şekil 4. 4 Desenli cam numunenin a)artan sıcaklık b)artan süreye göre optik geçirgenlik sonuçları 42
Şekil 4. 5 Desenli cam numunenin a)artan sıcaklık b)artan süreye göre pusluluk sonuçları 42
Şekil 4. 6 Desenli cam numunenin a) artan sıcaklık b) artan süre ile kırılma yükü sonuçları 44
Şekil 4. 7 Desenli cam numunenin a)artan sıcaklık b)artan süre ile esneme sonuçları 44
Şekil 4. 8 Desenli cam numunenin a)artan sıcaklık b)artan süre ile Weibull dağılım sonuçları 45
Şekil 4. 9 Desenli cam numunenin a)artan sıcaklık b)artan süre ile FTIR analiz sonuçları 46
Şekil 4. 10 Desenli ve float cam numunelerin ağırlık değişimi sonuçları 47
Şekil 4. 11 Desenli ve float cam numunelerin difüzyon katsayısı sonuçları 47
Şekil 4. 12 Desenli ve float cam numunelerin difüzyon derinliği sonuçları 48
Şekil 4. 13 Desenli ve float cam numunelerin optik geçirgenlik sonuçları 49
Şekil 4. 14 Desenli ve float cam numunelerin pusluluk sonuçları 49
Şekil 4. 15 Desenli ve float cam numunelerin kırılma anında yük sonuçları 51
Şekil 4. 16 Desenli ve float cam numunelerin esneme sonuçları 51
Şekil 4. 17 Desenli ve float cam numunelerin Weibull dağılım sonuçları 52
Şekil 4. 18 Desenli ve float cam numunelerinin FTIR analiz sonuçları 53
Şekil 4. 19 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları 54
Şekil 4. 20 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin difüzyon katsayısı sonuçları 54
Şekil 4. 21 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin SEM/EDS analizi 55
Şekil 4. 22 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin optik geçirgenlik sonuçları 56

Şekil 4. 23 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin pusluluk sonuçları..... 56
Şekil 4. 24 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin kırılma yükü sonuçları 58
Şekil 4. 25 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin esneme sonuçları..... 58
Şekil 4. 26 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin Weibull dağılım sonuçları 59
Şekil 4. 27 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin bağ yapısı sonuçları..... 60
Şekil 4. 28 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası optik geçirgenlik sonuçları..... 61
Şekil 4. 29 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası pusluluk sonuçları 61
Şekil 4. 30 4 saat ve 450 °C'de temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük sonuçları..... 62
Şekil 4. 31 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası kırılma yükü sonuçları 63
Şekil 4. 32 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası esneme sonuçları 63
Şekil 4. 33 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası Weibull sonuçları 64
Şekil 4. 34 Orijinal ve temperlenmiş numunenin a)nem testi b) tuz testi c)asit testi d)aşındırma testi sonrası FTIR analiz sonuçları 66
Şekil 4. 35 Kimyasal temperlenmiş cam numuneye ait nem testi öncesi ve sonrası makro görüntü 67
Şekil 4. 36 Farklı yıkama koşullarına tabi tutulmuş numunelerin nem testi sonrası makro görüntüleri 68
Şekil 4. 37 Farklı tuzlarda kimyasal temperlenmiş numunelerin nem testi sonrası makro görüntüleri 69
Şekil 4. 38 Kimyasal temperlenmiş cam numuneye ait tuz testi öncesi ve sonrası makro görüntü 69
Şekil 4. 39 Farklı yıkama koşullarına tabi tutulmuş numunelerin tuz testi sonrası makro görüntüleri 70
Şekil 4. 40 Farklı alkali oranlarına sahip tuzlarda temperlenmiş numunelerin tuz etkisinin tuz testi sonrası makro görüntüleri 71
Şekil 4. 41 Kimyasal temperlenmiş cam numuneye ait asit testi öncesi ve sonrası makro görüntüsü..... 72
Şekil 4. 42 Kimyasal temperlenmiş cam numuneye ait aşındırma testi öncesi ve sonrası makro görüntüsü..... 72

TABLO LİSTESİ

Tablo 2. 1 Cam türüne göre uygulanan işlemler 8

Tablo 3. 1 Camların kimyasal bileşimleri 29

Tablo 3. 2 Nem testi, tuz testi, asit testi ve aşındırma testinin uygulama koşulları 31

Tablo 4. 1 Deneysel çalışmalar tablosu 38

Tablo 4. 2 Desenli cam numunenin a)artan sıcaklık b)artan süreye göre optik geçirgenlik sonuçları 43

Tablo 4. 3 Desenli ve float cam numunelerin yüzey pürüzlülük sonuçları 50

Tablo 4. 4 Orijinal ve temperlenmiş 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerin yüzey pürüzlülük sonuçları 57

Tablo 4. 5 Farklı yıkama koşullarına tabi tutulmuş numunelerin nem testi sonrası optik geçirgenlik ve pusluluk değerleri 67

Tablo 4. 6 Kullanılan tuzların kimyasal analiz karşılaştırmaları 68

Tablo 4. 7 2 mm kalınlığındaki desenli kimyasal temperlenmiş yıkama etkisinin tuz testi sonrası optik geçirgenlik ve pusluluk değerleri 70

Tablo 5. 1 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile ağırlık değişimi sonuçları 74

Tablo 5. 2 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile difüzyon katsayısı sonuçları 75

Tablo 5. 3 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile SEM/EDS analizi 76

Tablo 5. 4 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süreye göre optik geçirgenlik sonuçları 77

Tablo 5. 5 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süreye göre pusluluk sonuçları 78

Tablo 5. 6 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süreye göre yüzey pürüzlülük sonuçları 79

Tablo 5. 7 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile kırılma yükü sonuçları 80

Tablo 5. 8 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile esneme sonuçları 81

Tablo 5. 9 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile Weibull dağılım sonuçları 81
Tablo 5. 10 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile FTIR analiz sonuçları 82
Tablo 5. 11 Desenli ve float cam numunelerin ağırlık değişimi sonuçları 83
Tablo 5. 12 Desenli ve float cam numunelerin difüzyon katsayısı sonuçları 84
Tablo 5. 13 Desenli ve float cam numunelerin difüzyon derinliği sonuçları 85
Tablo 5. 14 Desenli ve float cam numunelerin optik geçirgenlik sonuçları 85
Tablo 5. 15 Desenli ve float cam numunelerin pusluluk sonuçları 86
Tablo 5. 16 Desenli ve float cam numunelerin yüzey pürüzlülük sonuçları 86
Tablo 5. 17 Desenli ve float cam numunelerin kırılma anında yük sonuçları 87
Tablo 5. 18 Desenli ve float cam numunelerin esneme sonuçları 87
Tablo 5. 19 Desenli ve float cam numunelerin Weibull dağılım sonuçları 88
Tablo 5. 20 Desenli ve float cam numunelerinin FTIR analiz sonuçları 89
Tablo 5. 21 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları 90
Tablo 5. 22 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin difüzyon katsayısı sonuçları 90
Tablo 5. 23 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin SEM/EDS analizi 91
Tablo 5. 24 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin optik geçirgenlik sonuçları 91
Tablo 5. 25 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin pusluluk sonuçları 92
Tablo 5. 26 Orijinal ve temperlenmiş 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerin yüzey pürüzlülük sonuçları 92
Tablo 5. 27 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin kırılma yükü sonuçları 93
Tablo 5. 28 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin esneme sonuçları 93
Tablo 5. 29 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin Weibull dağılım sonuçları 94
Tablo 5. 30 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin bağ yapısı sonuçları 94
Tablo 5. 31 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası optik geçirgenlik sonuçları 95
Tablo 5. 32 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası pusluluk sonuçları 97

Tablo 5. 33 Kimyasal temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası yüzey pürüzlülük sonuçları 98

Tablo 5. 34 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası kırılma yükü sonuçları 99

Tablo 5. 35 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası esneme sonuçları 100

Tablo 5. 36 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası Weibull sonuçları 101

Tablo 5. 37 Orijinal ve temperlenmiş numunenin nem testi, tuz testi, asit testi ve aşındırma testi sonrası FTIR analiz sonuçları 102

Tablo 5. 38 Atmosferik koşullara dayanım test sonuçlarının makro incelemesi 103

Tablo 5. 39 Atmosferik koşullara dayanım test sonuçlarının makro incelemesi (devamı) 104

Tablo 5. 40 Yıkama etkisinin korozyon üzerindeki etkisi 105

Tablo 5. 41 Kimyasal temperlemede kullanılan tuzun kirliliğinin korozyon üzerindeki etkisi 106

ÖZET

Fotovoltaik Sistemlerde Kullanılan Desenli İnce Camların Kimyasal Temperlenmesi

Gülcan TERZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Doç. Dr. Miray ÇELİKBİLEK ERSUNDU

Yenilenebilir enerji kaynaklarından fotovoltaik sistemlerin modül verimini arttırmak amacıyla, sistemin kapak camlarının ışık geçirgenliği yükseltilir. Böylelikle güneş ışığının elektrik akımının oluşturulduğu tabakaya en az kayıpla ulaşması hedeflenir. Bu amaçla cam harmanındaki demir oksit miktarının azaltılması, cam yüzeyinin kırılma indisi camdan daha düşük bir malzemeyle kaplanması, cam yüzeyine çok katmanlı kaplamalar uygulanması, cam yüzeyine desen verilmesi ve cam kalınlığının inceltilmesi çalışmaları yapılmaktadır. Cam inceldikçe mekanik dayanım değerlerinin korunması beklenmektedir. Bu doğrultuda, ince camların mekanik mukavemetini geliştirmek amacıyla uygulanan kimyasal temperleme işlemi, camın cam geçiş sıcaklığının altında belirlenen sıcaklıkta ergimiş tuz banyosu içerisine daldırması sonucu meydana gelen iyon yer değişimi reaksiyonuyla gerçekleşir.

Bu tez çalışmasının amacı; fotovoltaik sistemlerde verim artışına yönelik düşük demir içeriğine sahip desenli ince camların kimyasal temperleme yöntemiyle mukavemetlendirilmesi, gerçekleştirilecek mekanik ve optik analizlerle desen, kalınlık, atmosferik koşullara dayanım, sıcaklık ve süre parametrelerinin kimyasal temperleme işlemine etkilerinin incelenmesi ve geliştirilen camların panel kapak

camı olarak kullanım potansiyelinin incelenmesidir. Bu amaçla, farklı süre ve sıcaklıklarda kimyasal temperlenen 2 mm kalınlığa sahip desenli camların, temperleme işleminden önce ve sonra ağırlık ölçümleri alınarak yüzdeağırlık değişimleri ve difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. İyon değişimi işlemi sonucu oluşan potasyum ve sodyum iyonlarının konsantrasyon derinlik profilleri SEM/EDX tekniği kullanılarak analiz edilmiş ve numunelerin mekanik mukavemeti halka üstü halka testiyle incelenerek Weibull diagramları oluşturulmuştur. Desenli camların kimyasal temperleme sonrasında elde edilen yüzey basma derinliği, aynı şartlarda temperlenmiş ve float teknolojisi ile üretilen eş kalınlıktaki desensiz ince düz camların yüzey basma gerilim derinliği değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kimyasal temperleme işleminin camın optik özelliklerine etkisinin incelenmesi amacıyla görünür bölgedeki geçirgenlik ve pusluluk değerleri ölçülmüş ve atmosferik koşullara karşı dayanımlarını tespit etmek amacıyla nem, tuz, asit ve aşındırma testleri uygulanmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda, desenli ince camların mekanik mukavemetinin kimyasal temperleme yoluyla yaklaşık 3 kat arttırıldığı, optik özelliklerinin değişmediği ve güçlendirilen camların aşınma ve atmosferik etkilere karşı mukavemetlerini koruduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kimyasal temperleme, iyon yer değiştirme, desenli cam, fotovoltaik, güneş paneli

ABSTRACT

Chemical Tempering of Patterned Thin Glasses Used in Photovoltaic Systems

Gülcan TERZİ

Metallurgical and Materials Engineering

M.Sc. Thesis

Assoc. Dr. Miray ÇELİKBİLEK ERSUNDU

The light transmittance of the cover glasses used in photovoltaic systems are increased to increase the module efficiency of photovoltaic systems which is one of the renewable energy sources. To reduce the amount of iron oxide in the glass composition, reduce glass thickness, give pattern to surface, cover surface with a material having lower refractive index, apply multi-layer coatings to surface are carried out to increase the module efficiency.

The aim of preserving the glass mechanical strength value, chemical tempering which is an ion exchange reaction that is occurred by immersing the glass in a molten salt bath at under the glass transition temperature, is applied to improve the mechanical strength of thin glasses. The aim of this thesis is; Strengthening the patterned low iron thin glasses by chemical tempering process in order to increase efficiency in photovoltaic systems, examining the effects of pattern, thickness, temperature and time parameters on chemical tempering process with mechanical and optical analyzes and evaluating the use potential of developed glasses as a cover glass for solar panels. For this purpose, weight measurements of 2 mm patterned glasses, which were chemically tempered at different temperature and for different durations, were taken before and after the tempering process. After

that, weight changes and diffusion coefficients of the glasses were calculated. The concentration depth profiles of potassium and sodium ions, as a result of ion exchange process, were analyzed by using the SEM / EDX technique. Weibull diagrams were created by examining the mechanical strength of the samples with the ring-on-ring test. Surface compression depth obtained after chemical tempering were calculated.. In order to examine the effect of chemical tempering on the optical properties of the glass, the light transmittance and haze values in the visible region were measured. In addition, moisture, salt, acid and abrasion tests were applied to determine their resistance to atmospheric conditions. As a result of the studies conducted within the scope of the thesis, it was determined that the mechanical strength of patterned thin glasses was increased around 3 times by chemical tempering. Optical properties and the resistance against mechanical abrasion and atmospheric effects of glasses were preserved as before tempering process.

Keywords: Chemical tempering, ion exchange, patterned glass, photovoltaic, solar cells

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Cam, yıllardır günlük yaşamda çok yaygın olarak kullanılan bir malzeme olmasının yanında, günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte otomotiv, mimari, inşaat, optik, uçak ve uzay sanayindeki kullanımı artmıştır. Cam üretimi gerektirdiği enerji miktarı bakımından enerjinin en çok tüketildiği sektörler arasındadır. Dolayısıyla camın temiz gelecekteki rollerinden biri de camı enerjiye dönüştürmede kullanmaktır. Bunun en önemli örneği fotovoltaik sistemler, yani güneş pilleri ve güneş kolektörleridir. Fotovoltaik sistemlerin yaygınlaşması için gerekli şartlardan biri cam panellerin ucuzlaması, bir diğeri ise modül veriminin arttırılmasıdır. Fotovoltaik sistemlerde maliyet düşürme çalışmaları, fotovoltaik modüllerde kullanılan cam kalınlığının azaltılmasını gündeme getirmiştir. Modül verim artışı ise düz camlar yerine desenli camlar kullanılarak yansıma kayıplarının azaltılması ve ince camlar kullanılarak optik geçirgenliğin arttırılması ile mümkündür. Dolayısıyla fotovoltaik sistemlerde desenli ince camların kullanılması gündeme gelmiş ve bu camların üretimi konusunda yapılan çalışmalar artmıştır.

Fotovoltaik sistemlerde kullanılan camların inceltilmesi ile camın mekanik özelliklerinin geliştirilmesi önem kazanmıştır. Cam malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri cam yüzeyine uygulanan çeşitli uygulamalar ile değiştirilebilir ve geliştirilebilir. Camın mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde uygulanan en yaygın yöntemler; kaplama, laminasyon, asit ve alev uygulama, ısıl ve kimyasal temperleme işlemleridir. Diğer güçlendirme yöntemlerine göre oldukça yeni bir teknik olan kimyasal temperleme yöntemi, yüzeyde basma gerilmesi oluşturup çatlağın ilerlemesini engelleyerek camın güçlenmesini sağlamaktadır. Kimyasal temperleme işlemi, 2 mm ve altındaki camlara uygulanabilirliği ve sağladığı yüksek mukavemet değerleri ile camın mekanik özelliklerinin güçlendirilmesinde ön plana çıkmaktadır. Kimyasal temperleme konusunda çok sayıda yayın, patent bulunmasına rağmen; difüzyon temelli olan bu işlemin verimliliği çok sayıda farklı

parametreye bağlı olarak değiştiği için konu üzerine yapılan çalışmalar yoğun olarak devam etmektedir.

Literatürde, kimyasal temperleme verimini arttırmaya yönelik yapılan çalışmalarda; cam bileşimi, tuz bileşimi, pH'ı ve safiyeti, ön ısıtma ve son soğutma sıcaklıkları ve süresi, fırın tipi, işlem süresi ve sıcaklığı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Kimyasal temperleme verimini arttırmak üzere çok sayıda çalışma yapılmasına rağmen; kimyasal temperleme işlemine cam yüzeyindeki desenin ve desenli camların kalınlığının etkisi henüz çalışılmamıştır. Bu tez çalışmasında, fotovoltaik sistemlerde modül verim artışına yönelik geliştirilecek olan kimyasal temperli düşük demir içeriğine sahip desenli ince camların temperlenmesinde desen, kalınlık, atmosferik koşullara dayanım, sıcaklık ve süre parametrelerinin etkisi incelenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı; fotovoltaik sistemlerde verim artışına yönelik düşük demir içeriğine sahip desenli ince camların kimyasal temperleme yöntemi ile mukavemetlendirilmesi, yapılacak mekanik ve optik analizlerle desen, kalınlık, atmosferik koşullara dayanım, sıcaklık ve süre parametrelerinin kimyasal temperleme işlemine etkilerinin değerlendirilmesi ve geliştirilen camların panel kapak camı olarak kullanım potansiyelinin incelenmesidir.

1.3 Orijinal Katkı

Günümüzde gelişen teknoloji ve estetik beklentiler doğrultusunda cam malzemelerde hafiflik, incelik, iyi mekanik ve optik özellikler beklentisi artmış, dolayısıyla cam malzemeler için ağırlık azaltma, mukavemetlendirme ve maliyet düşürme çalışmaları hız kazanmıştır. Camın yüksek katma değere sahip başlıca uygulama alanları olan elektronik cihazlar, otomobiller ve fotovoltaik modüllerde kullanılan camların da inceltilmesi gündeme gelmiş ve inceltme sonucu azalan mukavemetin arttırılması amacıyla kimyasal temperleme yöntemi kullanılmaya başlanmıştır.

Literatürde kimyasal temperleme konusunda çok sayıda çalışma yer almaktadır. Ancak desenli camların kimyasal temperlenmesi konusunda bir çalışma daha önce

gerçekleşmemiştir. Bu tez çalışması kapsamında, fotovoltaik sistemlerde kapak camı olarak kullanılan ve sisteme hafiflik ve modül verimliliği kazandırma potansiyeline sahip düşük demir içerikli desenli ince camların kimyasal temperlenmesi ve kimyasal temperleme işlemine desen etkisinin incelenmesi çalışmaları literatürde ilk kez gerçekleştirilmiştir.

2
TEORİK BİLGİ

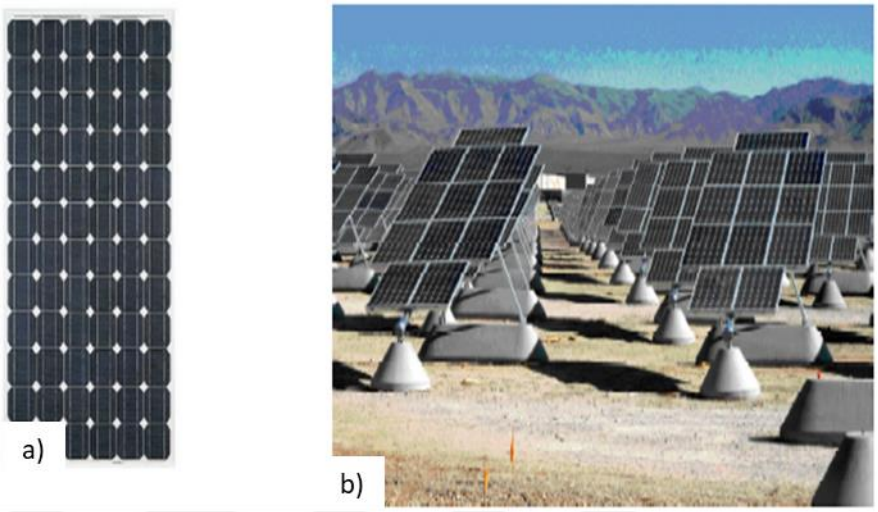
2.1 Fotovoltaik Sistemler

Günümüzde yenilenebilir ve temiz enerji sistemlerine olan rağbet büyük oranda artış göstermiştir. Enerji elde etmek için fosil madde esaslı yakıtların kullanımı sonucu, küresel ısınma ve çevre kirlilik sorunlarının dünyadaki yaşamsal faaliyetleri tehdit edecek bir boyuta ulaşmasının bu artıştaki payı yüksektir. Bu nedenle, sanayi kuruluşlarında ve günlük faaliyetlerde kullanılan elektrik enerjisinin, çevreye minimum zarar verecek şekilde üretilmesi, iletilmesi ve tüketilmesinin dünya ekosistemi için önemi büyüktür. Fosil esaslı yakıtların kullanılması ile ortaya çıkan çevresel sorunların güneş enerjisini kullanarak üretilen elektrik enerjisinde görülmemesi nedeniyle, temiz ve çevre dostu bir enerji olan güneş enerjisine olan ilgi son yıllarda giderek artmıştır. Güneş enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üretilmesini sağlayan fotovoltaik sistemlerin yenilenebilir ve temiz enerji teknolojileri arasında önemli bir yere sahiptir [1],[2].

Fotovoltaik etki, ışığın ve elektriğin etkileşimi ilk olarak 1839 yılında Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel tarafından fark edilmiştir [3],[4]. 1883 yılında Charles Fritts, ince film selenyum kaplama ile ilk modern güneş pil hücresi olan selenyum modülünü oluşturmayı başarmıştır. Güneş enerjisinden % 1-2 verim elde ederek elektrik enerjisi elde eden selenyum modülünden sürekli ve kuvvetli bir akım üretilmiştir [5]. Güneş enerjisi teknolojisinin modern çağına 1954 yılında Bell laboratuvarlarında, %5 verimle çalışan silikon yarı iletken malzemeler üzerinde yapılan çalışmalarla ulaşılmıştır [6]. Fotovoltaik teknolojinin, uzay mekiği ve uydularda kullanılması ise 1958 yılında Rus uydusu Sputnik-3 ile başlamıştır [7]. Hafif solar paneller uzay mekiğinin ihtiyacı olan hafifliği ve elektrik enerjisini karşılamak için kullanılmaktadır. Günümüzde GaAs (Galyum Arsenit) esaslı güneş pilleri uzay çalışmaları için kullanılmaktadır.

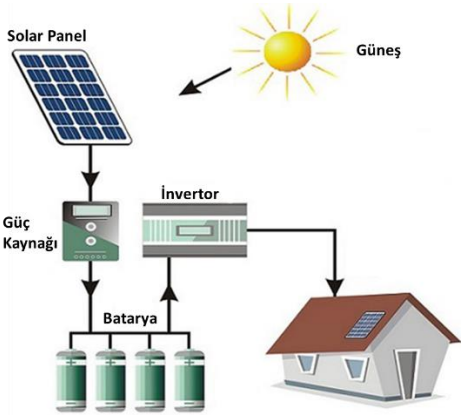
Fotovoltaik modüller yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken sistemlerdir. Fotovoltaik modüllerin paralel veya seri

olarak bağlanması ile solar paneller oluşturulur. Fotovoltaik sistemlerin modülleri genel olarak 1-1,5 m^2'lik paneller halinde üretilmekte ve sistemler kullanım alanlarına göre farklı uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. Şekil 2.1'de fotovoltaik modül ve panellerin uygulama örnekleri görülmektedir.



Şekil 2. 1 Fovoltaik a) modül, b) panel uygulamaları

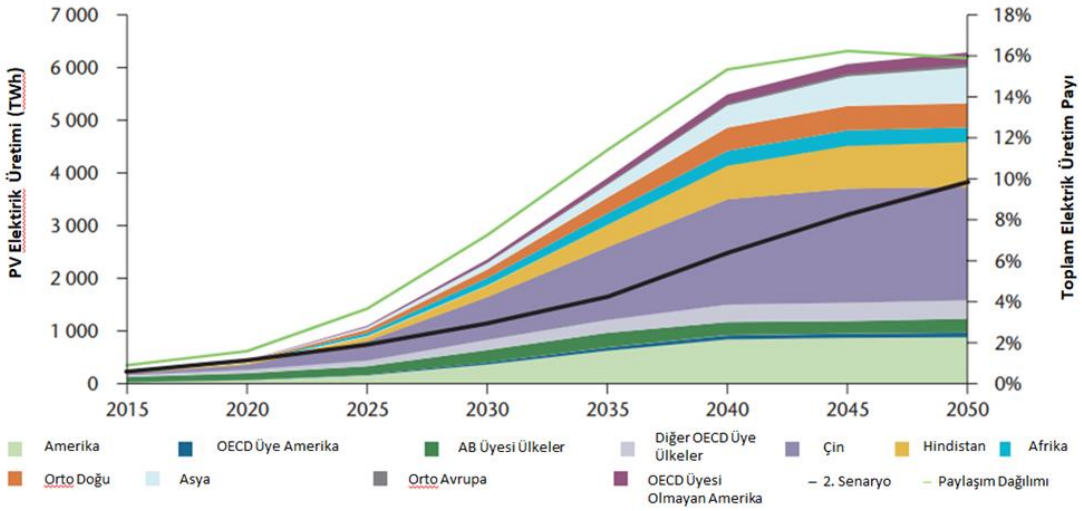
Fotovoltaik modül ve panellerde üretilen doğru akım enerjisi kanallarla güç kaynağına iletilir ve dağınık durumdaki enerji bataryalarda toplanır ve depolanır. Bataryalarda depolanan doğru akım enerjisi inverterler ile alternatif akıma çevrilerek elektrik enerjisi olarak kullanılabilir. Şekil 2.2'de bir solar panel sisteminin elektrik enerjisi üretimi çalışma prensibi görülmektedir. İki güneş pili paralel bağlandığında, voltaj sabit kalırken akım iki katına çıkar. Seri bağlandığında ise, akım sabit kalırken; voltaj iki katına çıkar. Bu şekilde 12-600 V arasında gerilim elde etmek mümkün olabilmektedir [3].



Şekil 2. 2 Fotovoltaik sistemde elektrik üretim çalışma prensibi

Fotovoltaik sistem, serbest ve doğal güneş ışınlarından yararlanarak enerji üretir. Fotovoltaik sistemin bakımı zahmetsiz olduğu ve sistem çalışırken gürültü, zararlı emisyonlar ve kirletici gazlar açığa çıkarmadığı için en umut verici temiz enerji sistemi ve en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji teknolojisi haline gelmiştir [8]. Bunun yanında fotovoltaik sistemlerin enerji kaynağının dağınık durumda ve sabit olmaması, batarya kurulum maliyetlerinin yüksek olması ve geleneksel yakıtlara göre enerji maliyetinin yüksek olması fotovoltaik sistemlerin negatif özellikleridir.

Uluslararası enerji ajansı IEA'nın dünya çapında yapmış olduğu fotovoltaik sistemlerin enerji üretimi araştırmalarına göre, Şekil 2.3'te görüldüğü gibi fotovoltaik sistemlerden 2015 yılında elde edilen nominal elektrik enerjisi 4,8 TWh iken 2050 yılında elde edilecek elektrik enerjisinin 6300 TWh olacağını öngörülmektedir [9],[11].

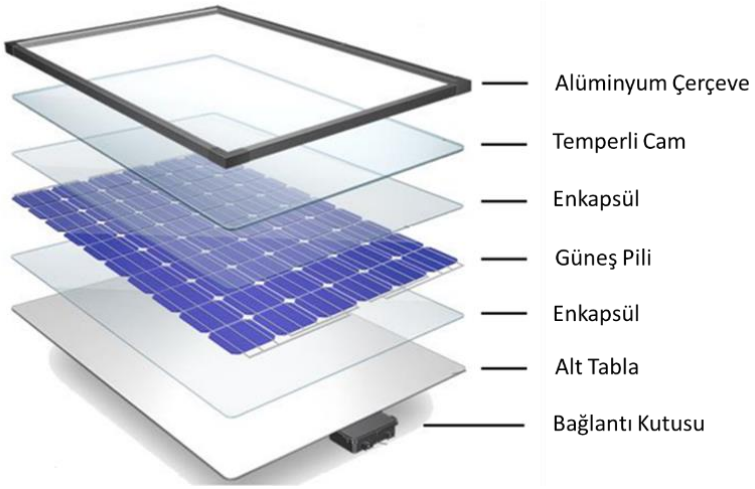


Şekil 2. 3 Enerji kaynakları açısından dünya enerji üretimi [11]

Fotovoltaik sistemlerden üretilen elektrik enerjisi, enerji, yapı, tarım, uzay, havacılık ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan fotovoltaik sistemler karşımıza şebekeye bağlı olarak enerji santrallerinde, şebeke dışı olarak ise bina çatıları ve dış cephelerinde, taşıtlarda, yol aydınlatmalarında, elektriğin ulaşamadığı köy, tarla, dağ ve yayın istasyonlarında çıkmaktadır.

2.2 Fotovoltaik Sistemlerde Kullanılan Camların Özellikleri

Ülkemizde ve dünyada kullanım potansiyeli yüksek fotovoltaik sistemlerin kullanım alanlarının artması ile sistemlerin kullanım alanlarına uygun tasarlanması ve üretilmesi de gündeme gelmiştir. Fotovoltaik modüllerde güneş pili sistemin ortasında yer alırken; enkapsül ve cam tabaka güneş pilinin altında ve üstünde sıralanarak sandviç yapıyı oluşturmaktadır. Yüksek ışık geçirgenliği sağladığı ve mekanik ve atmosferik dış etkilere karşı fotovoltaik modülü koruduğu için üst tabakada kapak görevi gören cam malzeme yer alır. Şekil 2.4'te fotovoltaik sistemin sandviç benzeri yapısı görülmektedir.



Şekil 2. 4 Fotovoltaik sistem

Fotovoltaik sistemlerde kullanılan kapak camı mevcut sistemin en önemli elemanlarından biridir. Fotovoltaik sistemlerde kullanılan cam malzemeden beklenen başlıca özellikler; yüksek ışık geçirgenliği, düşük yansıma kaybı ve yüksek mekanik dayanım sağlaması şeklinde özetlenebilir. Bu özellikler, fotovoltaik sistemde kullanılan cam kompozisyonundaki demir oranı düşürülerek, cam yüzeyinde desen veya kaplamalar oluşturarak ya da cam kalınlığını incelterek sağlanabilmektedir [15, 16]. Bu sayede ışık geçirgenliği ve yansıma kaybı azaltılan cam malzeme sistemin verimi artmasında etkili olurken; mekanik dayanımı arttırılarak dış ortam şartlarına dayanıklı olur. Bu uygulamaların hangi tür camlara yapıldığını Tablo 2.1'de özetlenmektedir.

Tablo 2. 1 Cam türüne göre uygulanan işlemler

Cam Türü	Fe_2O_3 Azaltma	Yüzeye Desen Uygulaması	Yüzeyde Yansıtmayı Azaltıcı Katman Biriktirilmesi
Düz (Float)	+	-	+
Desenli	+	+	+

2.2.1 Yansıma Kayıpları Azaltılmış Camlar

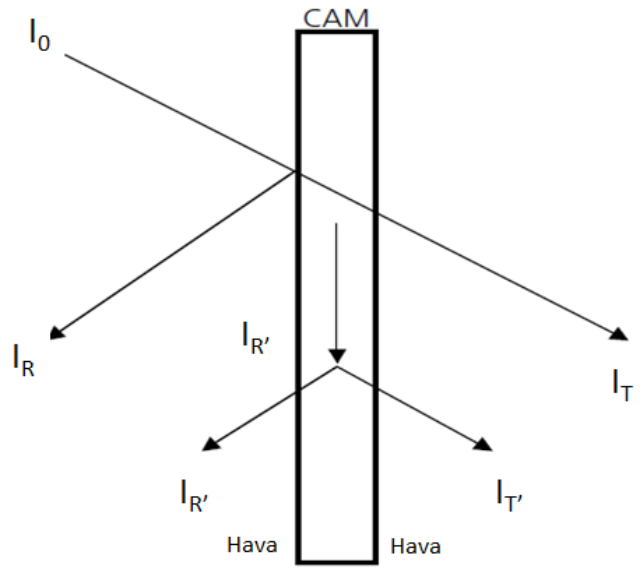
Fotovoltaik sistemlerin yüksek verime sahip olması için, sistemde kullanılan cam malzemelerin optik özellikleri büyük önem taşımaktadır. Cam malzemeden beklenen optik özellikler, yansıma kayıplarının düşük olması ve yüksek geçirgenliğe sahip olmasıdır.

Camın optik özelliklerinin belirlenmesinde kırılma indisi önemli bir parametredir. Boşlukta sabit hızla ilerleyen ışığın hızı daha yoğun bir maddeye girdiğinde azalır. Işığın cam ortamına girdiğinde hızı azalırken, ışığın cam içerisindeki yönü de değişir. Buna ışığın kırılması denir. Camın kırılma indisi, onun ışığı kırma gücünün bir ölçüsüdür [10].

Gelen ışığın cam içerisinden geçmesine camın geçirgenliği denir. Camın geçirgenliği, özellikle otomotiv ve mimari alanda aranan önemli temel bir özelliktir. Cam malzeme ile karşılaşan ışığın bir kısmı kırılarak cam içinden geçer, bir kısmı absorplanır, bir kısmı da geri yansır (Şekil 2.5). Işık geçirgenliği, absorpsiyon ve yansıma arasındaki bağıntı aşağıda ifade edilmiştir:

$$R+A+T= 1 \qquad (2.1)$$

Burada R, gelen ışığın yansıtılma, A, absorbsiyon ve T geçirilme oranlardır [12].



Şekil 2. 5 Şematik olarak SLS camın geçirgenlik davranışı

Işığın cam üzerindeki optik özellikleri sonucu cam yüzeyine gelen ışık %100 oranında cam yüzeyinden geçemez [15]. Yansıma camın ön ve arka yüzeylerin her ikisinde de meydana geldiğinden, dik açıyla gelen ışık demetinin toplam yansıması %8'dir. Buna göre, düz yüzeyli bir cam için camda absorpsiyon olmasa dahi, yansıma kayıplarından dolayı maksimum ışık geçirgenlik yaklaşık %92'dir [13],[14],[15].

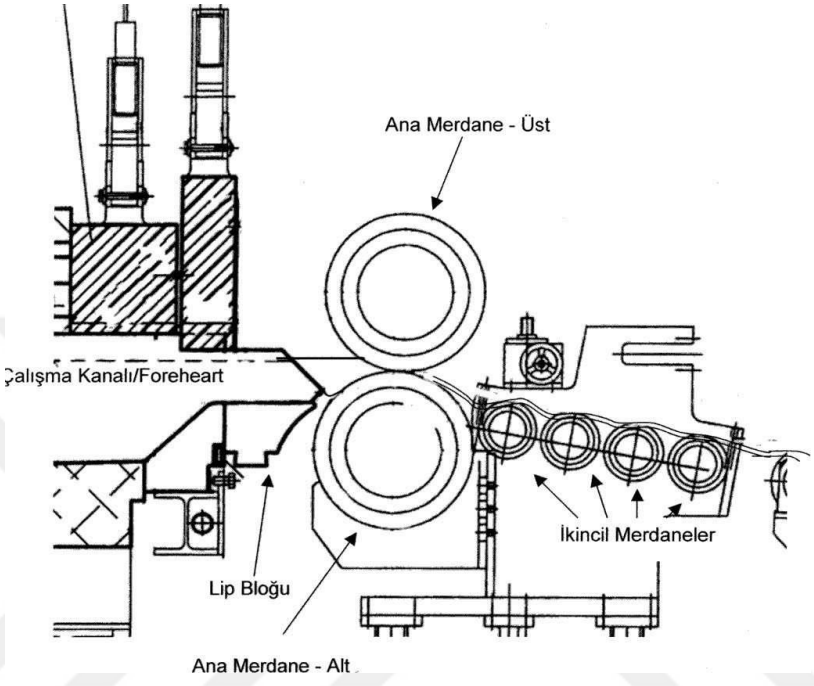
Cam yüzeyinde yansıma kayıplarının azaltılması ile camın geçirgenlik değeri arttırılır. Cam yüzeyinde oluşan yansıma, kırılma ve soğurma camın tasarımına bağlı olup; cam yüzeyinin kırılma indisi camdan daha düşük bir malzeme ile kaplanarak veya cam yüzeyine çoklu tabakalar uygulayarak ve cam yüzeyinde desen oluşturarak cam yüzeyinde yansıma düşürülür.

2.2.1.1 Desenli Camlar

Dünya genelinde yıllık cam malzeme üretiminin %29'unu düz cam malzemeler oluşturmaktadır. Üretilen düz cam malzemelerin %90'ı Pilkongton şirketinin 1959 yılında geliştirdiği camın kalay banyosunda yüzdürme işlemi ile üretilmektedir [16]. Bu yöntemde, cam ergitme fırınından çıkan ergimiş camın kalay banyosu üzerine aktarılması ve oluşan öz kütle farkından camın kalay banyosu üzerinde yüzdürülürken kademeli olarak azaltılan sıcaklık ile şekillendirilmesi sonucu düz cam üretimi gerçekleştirilir [17]. Cam bir sıvı üzerinde şekillendirildiğinden cam yüzeyi son derece düz ve birbirine paralel olarak üretilir. Her iki malzemenin yüzey gerilim özellikleri ve öz kütleleri nedeniyle cam kalay üzerinde kendi haline bırakılırsa yaklaşık 7 mm bir kalınlığa ulaşır. Bu nedenle yüzdürme işlemi sırasında kalay banyosu içerisine alınan top-roller yardımı ile, cam ergiyiği kenarlarından tutularak istenen kalınlık ve boyut özelliklerine ulaştırılır. Camın şekillendirme işlemini, tavlama, kesme ve paketleme adımları izler.

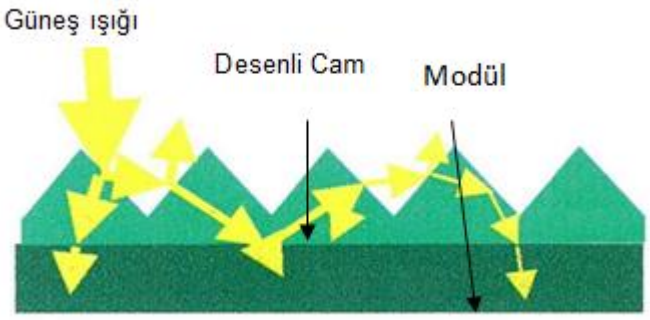
Cam yüzeyine desen verilme yöntemi ile camın üretimi, ergimiş camın merdaneler arasından geçirilerek şekillendirilmesidir. Çoğu endüstrileşmiş ülkede, desenli ve telli camların büyük çoğunluğu merdane kullanılarak üretilmektedir. Desenli cam üretiminde forehart/çalışma kanalından gelen cam, lip bloğun üzerinden akarak iki ana merdanenin arasından geçmektedir. Bu sırada merdane açıklığı ayarlanarak cam istenilen kalınlığa getirilirken; alt veya hem alt hem üst

merdaneye uygulanan negatif yönlü desen ile cam yüzeyinde desen oluşturulur (Şekil 2.6). İstenen desen çeşidine göre desenli cam üretiminde merdaneler değiştirilebilir. Ana merdaneden geçen cam ikincil merdaneler üzerinden soğutmaya doğru iletilmektedir [18],[20]. Yüzdürme işleminde olduğu gibi, şekillendirilen cam, tavlama, kesme ve paketleme işlemlerinin ardından depolanır.



Şekil 2. 6 Desenli cam üretiminin şematik diyagramı [20]

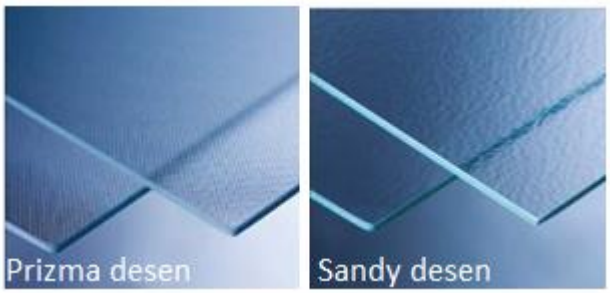
Günümüzde fotovoltaik uygulamalarda kullanılan camların %10'unu float camlar oluştururken; %90'nını desenli camlar oluşturmaktadır. Bunun nedeni, desenli cam yüzeyin float cam yüzeyden daha fazla ışık geçirgenliğine izin vermesidir [19]. Üretim sırasında camın yüzeyine yansıyan ışığı yeniden yönlendirerek içeriye dönmesini sağlayacak şekilde yüzeye desen verilmiş camlar yansıma kayıplarının azaltılmasını sağlar (Şekil 2.7).



Şekil 2. 7 Desenli camda ışığın yansıma davranışı

Desenli cam, yüzeye gelen ışığın iç yansıma yapmasını sağlar. İç yansıma, desenli yüzeye gelen ışığın yansıma açısının ışığın kritik açısından daha büyük olması sonucu meydana gelen yansıma olarak tanımlanır. İç yansıma yapan ışık cam ortamında kalarak en az bir kez daha yansıma yapar ve optik yol uzunluğunu arttırır. Cam yüzeyine gelen ışığın iç yansıma yaparak optik yolunun uzamasına ışık yakalama adı verilmektedir [15],[21]. Fotovoltaik sistemlerde kullanılan desenli yüzeye sahip cam, ışığın yakalanmasını arttırmak ve yakalanan ışınların sistem içindeki yolunu uzatarak enerji üretimine fayda sağlar. Desenin camın her iki yüzeyinde birden oluşturulması ile ışığın daha fazla dağılarak sistem içinde izlediği yol arttırılır ve yansıma kayıpları azaltılır [21].

Yüzeye desen verilme yöntemiyle üretilen camların genelinde oluşturulan desenler her cam üreticisinde benzerdir. Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş.'deki merdane yöntemi ile üretilen desenli camlar Şekil 2.8'de görüldüğü gibi aldıkları farklı desenlere göre "Prizma" ve "Sandy" olarak adlandırılmıştır.

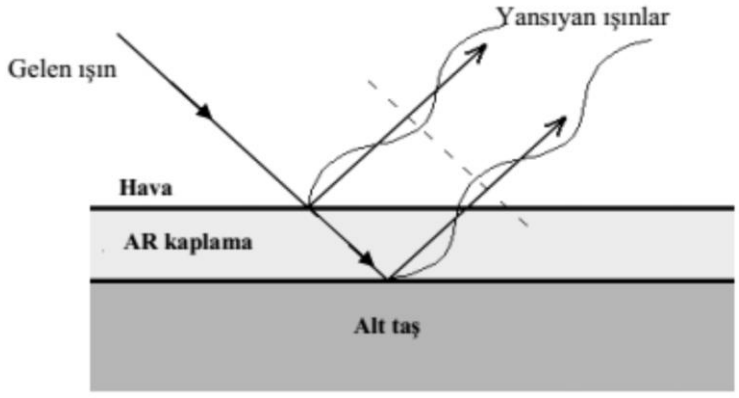


Şekil 2. 8 Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. Prizma ve Sandy desenli camları

2.2.1.2 Antireflektif Kaplamalı Camlar

Fotovoltaik sistemlerin büyük bir bölümünde ışığın sistemin ön yüzeyinden yansımasını azaltmak için yüzeye ince bir yansıma önleyici kaplama uygulanır. Yüzeyine yansımayı önleyen kaplama uygulanan cama antireflektif (AR) cam adı verilir. Antireflektif cam uygulamaları ile ışığın iletimini artması ve yansıma kayıplarının iyileşmesi sonucu fotovoltaik modül verimliliklerinde %3-6 arasında artış sağlanabilmektedir. AR kaplamalar tek veya çok katmanlı ince film uygulamalarıyla yapılır. Tek katmanlı cam numunelerin geçirgenliği %94 iken; çok katmanlı AR kaplamalı numunelerin geçirgenliği %95 olduğu görülmektedir [15].

Kırılma indisi 1,5 olan camın gelen ışığı yansıtma oranı %4 ile %9,5 arasında değişir [23]. Kırılma indisi artan camın, ışığı yansıtma oranı da artar [24]. Buna bağlı olarak cam yüzeyinin kırılma indisi 1,37-1,38 olan ince film ile kaplanması sonucu yansıyan iki ışık arasında yıkıcı girişim oluşturarak yansıma azaltılır. Yıkıcı girişimde, iki dalga boyu arasında yarım dalga boyu faz farkı oluşturularak bir dalganın çukuru ile diğer dalganın tepe noktasının üst üste gelmesiyle dalganın nötrlenmesi sağlanır [23],[24]. Bir kaplamanın kalınlığı referans dalga boyunun dörtte biri kadar olursa iki dalga arasında yarım dalga boyu faz farkı olur. Böylece bu dalgalardan birinin çukuru diğerinin tepesine rastlar ve yıkıcı girişimle birbirini yok eder (Şekil 2.9). Bu iki dalganın amplitüdleri aynı olursa tam yok olma sağlanır ve böylece yansıma engellenmiş olur [24].



Şekil 2. 9 Cam üzerine kaplanmış tek katmanlı antireflektif kaplama [15]

Camlardaki ışık geçirgenliğinin artırılması için dalga boyları arasındaki faz farkının birbirini nötrlemesi ve kaplama kalınlığının kırılma indisinin karesinin camın

kırılma indisine eşit olması beklenir. Pratikte bu kırılma indisine sahip malzeme olmadığı için, bu indise en yakın malzemeler tercih edilir [26]. Antireflektif kaplama çok katmanlı olarak uygulandığında, görünür bölgede ışık geçirgenliğini tek katmanlı antireflektif kaplamalara göre daha geniş bir bölgeye yayar [27].

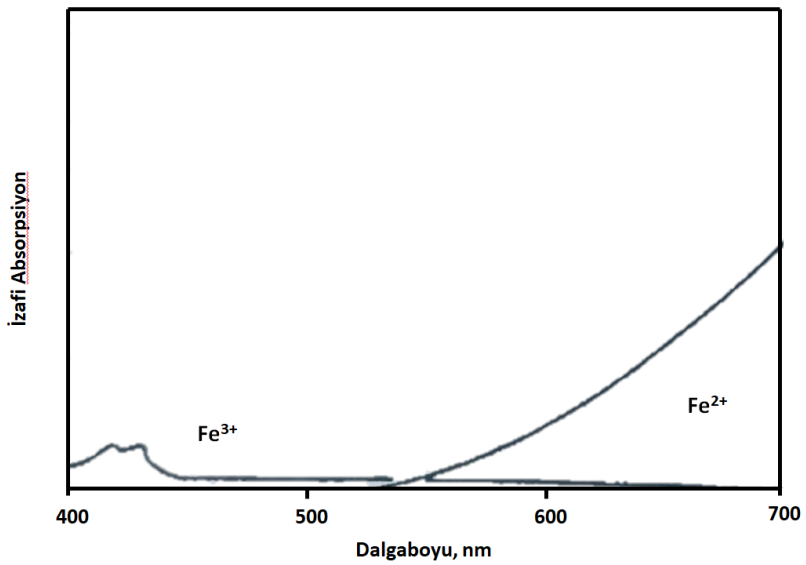
Antireflektif kaplamalı camlar optik cam yüzeyleri, saatler, araba camları, cep telefonları, makine objektifleri, televizyon ekranları gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

2.2.2 Düşük Demirli Camlar

Dünya genelinde fotovoltaik sistemlerde kullanılan camların büyük bir bölümünü, yüksek güneş ışığı geçirgenlikleri nedeniyle düşük demir içerikli camlar oluşturmaktadır. Cam ağ yapı oluşumunda etkisi olmayan, camda renklendirme amacı ile kullanılan demir, cam bileşimi içerisinde Fe^{+3} veya Fe^{+2} değerlikli ara oksit olarak bulunabilir [28],[31].

Cisimler, üzerlerine düşen ve belli bir spektral dağılıma sahip ışığı, kendi maddesel özelliklerine bağlı olarak, daha farklı bir spektral dağılımla yansıtırlar veya geçirirler. Herhangi bir malzemeyle karşılaşan ışığın bir bölümü kırılarak malzeme içinden geçer, bir bölümü absorplanır, bir bölümü de geri yansır [17]. Camın ışık geçirgenliği, görünür bölgede cam yüzeyinden geçen ışık akısının gelen ışık akısına oranıdır. Herhangi bir dalga boyundaki ışığın cam tarafından absorplanması, Lambert-Beer kanununa göre, camda renk verici iyonların miktarlarına, o dalga boyundaki absorpsiyon katsayılarına ve camın kalınlığına bağlıdır [11],[17]. Canım bileşimindeki atomların farklı düzenlenmesi ile özgün absorpsiyon spektrumu oluşur ve absorplanan ışık camın renginin belirlenmesini sağlar [12],[29].

Soda-kireç-silikat (SLS) camı içerisinde bulunan Fe^{+3} ve Fe^{+2} iyonlarının Şekil 2.10'da görüldüğü gibi absorpsiyon spektrumları birbirinden farklıdır. Fe^{+2} iyonunun absorpsiyon bandı 1050 nm dayga boyunda olup; cama mavimsi yeşil rengi verir, Fe^{+3} iyonunun absorpsiyon bandı ise 380, 420 ve 435 nm dalga boylarında olup; cama sarımsı yeşil rengi verir [17],[32].



Şekil 2. 10 Fe^{+3} ve Fe^{+2} iyonlarının absorpsiyon davranışı [29]

Renk, herhangi bir madde üzerinden yansıyan veya bu maddeden geçen elektromanyetik dalgaların 380-780 nm dalga boyu aralığına düşen kısmının insan gözü tarafından, gözün hassasiyetine bağlı olarak seçimli şiddette algılanması sonunda beyinde oluşan bir etkilemedir. Cam içinde arzu edilmeyen demirden kaynaklanan rengin giderilmesine renksizleştirme denir. Bunun için cam kompozisyonunu oluşturan kum, kalker, dolomit gibi doğal hammaddelerin içinde safsızlık olarak yer alan demir oksit ve cama renk vermek için cam harmanına eklenen demirin kompozisyondaki oranı düşürülür. Yine de cam içinde bulunabilecek demirin sebep olacağı renk, kimyasal ve fiziksel yöntemler ile giderilir [32]. Böylece cam kompozisyonundaki Fe_2O_3 düşürülerek camın ışık geçirgenliği arttırılır.

Renksizleştirme işleminde cam harmanına sodyum nitrat, arsenik oksit gibi oksidan ajanlar katılarak camdaki demirin görünür bölgede yüksek absorbsiyona sahip olan Fe^{+2}'den Fe^{+3}'e oksitlemesi sağlanır. Bu işlem kimyasal renksizleştirme olarak tanımlanır [15],[33]. Tamamen renksiz bir cam elde etmek için Fe^{+3} oksidin cama verdiği yeşilimsi sarı rengi dengelemesi için kompozisyona çok az miktarda kobalt oksit ve selenyum ilave eklenir. Absorpsiyon görünür bölgede dengeli hale gelerek cam nötr bir renk elde eder ve renksiz görünür. Bu işlem fiziksel renksizleştirme olarak tanımlanır [15].

Aynı kalınlığa sahip SLS camların kompozisyonları karşılaştırıldığında, demir oksit oranı yüksek olan camların, görünür bölgedeki yüzde ışık geçirgenlik değerleri daha yüksektir. Ticari soda-kireç-silikat camlarda demir oksit oranı %0,102 ağırlığında iken güneş ışığı geçirgenliği %89 ölçülürken; camın demir oksit oranı %0,025 ağırlığına düşürüldüğünde güneş ışığı geçirgenliği %91 değerine ulaşır [30],[32]. Bu özellikleri nedeniyle düşük demirli camlar genellikle fotovoltaik sistemlerde, mimaride, optik, telefon ve televizyon ekranlarında kullanılır. Ticari olarak Şişecam UltraClear™, Saint Gobain DIAMANT®, AGC Clearvision™, Pilkington OptiView™ gibi örnekleri bulunan düşük demirli camların, yüksek güneş ışığı geçirgenliği nedeniyle fotovoltaik sistemlerde Şişecam Sandy ve Plizma Glass ve Pilkington Sunplus gibi örnekleri mevcuttur.

2.2.3 İnce Camlar

Keşfi M.Ö. 3500 yılına dayanan camın, günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte uygulama alanı genişlemektedir. İnce camın sunduğu hafiflik, şeffaflık, çizilmelere karşı dayanım gibi özellikleri ile ince düz cam üretimi ve kullanımı giderek artmaktadır. TechNavio'nun "Global Flexible Glass Market 2014-2018" raporu uyarınca 2014 yılı itibariyle 94,8 milyon Dolar olan Asya Pasifik ince düz cam pazarının 2020 yılı itibariyle 612,7 milyon Dolar seviyesine çıkması beklenmektedir [33].

Dünya genelinde ince düz cam trendi elektronik aletlerde, ekran camı uygulamalarında, otomotiv sektöründe, mimari yapılarda, enerji depolama, uzay ve astronomi alanlarında, optik alanlarda ve fotovoltaik sektöründe giderek büyümektedir. 2016 yılında gerçekleştirilen kamu düzenlemeleriyle inşaat sektöründe sıfır emisyon konusundaki çevreye yönelik yapılan çalışmalar da ince düz camın benimsenmesinde önemli rol oynamıştır. İnce cam hafifliği ile solar panelin maliyetini düşürürken, camın incelmesi ile artan ışık geçirgenliği fotovoltaik sistemin verimini arttırmakta ve böylece nihai maliyet azalmaktadır.

Hava cam ara yüzündeki yansımanın yanı sıra, camdan geçen ışık absorpsiyon ve saçılmaya uğrayabilir. Herhangi bir dalga boyundaki ışığın cam tarafından absorplanması, Lambert-Beer kanununa göre, o dalga boyundaki soğurma katsayılarına ve camın kalınlığına bağlıdır [32]. Buna göre,

$$I = I_0 e^{-(aCd)} \quad (2.2)$$

Burada geçen ışığın şiddeti I, gelen ışığın şiddeti I_0, cam kalınlığı d (cm), absorpsiyon katsayısı a (cm^{-1}), renklendirme konsantrasyonu C olarak tanımlanır. Buna göre camın geçirgenliği (T);

$$T = I/I_o \quad (2.3)$$

Camın ışık geçirgenliği camın kalınlığı ile ters orantılıdır ve kalınlık azaldıkça geçirgenlik artar [34].

Fotovoltaik sistemlerde güneş enerjisini elektrik enerjine dönüştürmesi için cam, ışığı geçiren ve modülü dış ortamlardan koruyan kapak malzemesi olarak kullanılmaktadır. Camın dolu, asit yağmuru, rüzgâr gibi hava olaylarına nem, sıcaklık gibi ortam koşullarına karşı dayanıklı olması beklenir.

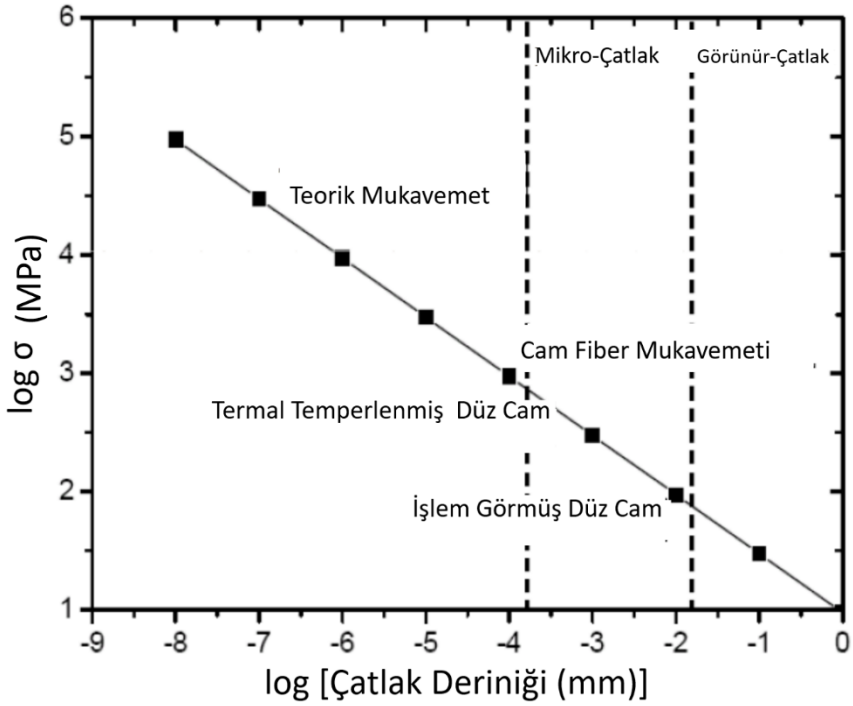
Gelişen teknoloji beraberinde birçok uygulama alanında yer alan ince düz camların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi cam endüstrisinin gündeminde önemli bir noktaya gelmiştir. Cam malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için kullanılan en yaygın yöntemler ısıl ve kimyasal temperleme işlemleridir. Isıl temperleme yapılmış bir cama temperleme sonrası herhangi bir yüzey işlemi (kesme, şekil verme gibi) yapılamaması, dünyadaki öncü cam firmalarının kimyasal temperleme prosesini geliştirme çalışmalarına ağırlık vermesine neden olmuştur. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan ısıl temperleme yönteminin yanı sıra, 2 mm kalınlığın altındaki ve kompleks şekilli camlara uygulanabilmesi ve temperleme işleminden sonra camın işlenebilir olması gibi önemli avantajları sayesinde, kimyasal temperleme işlemi son dönemde çalışmaların odak noktası olmuştur [35]. Kimyasal temperleme teknolojisi ile cam yüzeyi modifiye edilerek mekanik mukavemeti artırılan cam, ekran teknolojileri, güneş hücresi panelinde kullanılan kapak camı, otomotiv camı, uçak camı ve daha birçok endüstriyel düzcam uygulamalarında giderek artan oranlarda kullanılmaktadır.

2.3 Kimyasal Temperleme Yöntemi ile Cam Yüzeylerinin Güçlendirilmesi

Günümüzde gelişen teknoloji beraberinde yüksek performans gösteren malzeme ihtiyacını da getirmiştir. Cam malzeme şeffaflığı, sertliği, kimyasal kararlılığı, rijit yapısı sayesinde oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Bunun yanında camın kırılgan olması nedeniyle mekanik performansını geliştirmek adına çalışmalar yapılmaktadır. Cam malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için yapılan çalışmalar laminasyon, kaplama, alev ve asit uygulamaları, ısıl temperleme ve kimyasal temperleme işlemleridir. Camın güçlendirme işlemlerinden ısıl temperleme ve kimyasal temperleme en yaygın kullanıma sahip olan işlemlerdir [36].

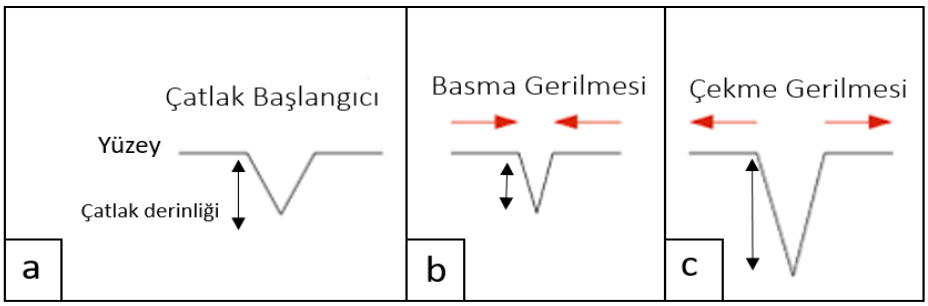
Cam, mekanik olarak sert ve kırılgan, amorf yapılı bir malzemedir. Amorf yapısı nedeniyle cam plastik şekil değiştirmeye izin vermeyen molekül yapısına sahiptir. Silikat camların ağ yapıları yüksek enerjili Si—O kovelent bağlarından oluşur. Darbe anında cam ağ yapısında bulunan kuvvetli kovelent bağlar darbeyi absorbe edemez, malzeme plastik şekil değiştirerek deformasyona uğrar ve kırılır [37],[38]. Cam malzemenin belirli bir yük karşısında gösterdiği dirence, camın mukavemeti denir. Yüksek mukavemetli bir camdan, maruz kaldığı darbelere karşı camın deforme olmadan durabilmesi istenir [36]. Camın mukavemetini belirleyen parametreler cam kompozisyonu, yapısal hatalar, yüzey ve kenarda bulunan çatlakların miktarı, boyutu ve derinliğidir.

Teorik olarak hatasız kabul edilen camın, fiziksel ve yapısal hatalardan arındırılmış olduğu varsayılır. Buna göre teorik olarak hatasız kabul edilen camın ağ yapısındaki yüksek enerjili kovelent bağları nedeniyle darbelere karşı mukavemet değeri 17000 MPa olarak hesaplanır. Fakat pratikte bu özelliklere sahip olmayan camın mukavemeti 35-100 MPa arasındadır. Cam yüzeyinde üretim veya dış faktör kaynaklı makro ve mikro yapıdaki çatlaklar vardır. Bu çatlakların cam yüzeyinden merkezine doğru ilerlemesi camın kırılmasına neden olur. Yüzeyde bulunan makro ve mikro çatlakların hareketi engellenemediğinde camın mekanik dayanımı düşer ve kullanımını kısıtlanır. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi camın yüzeyinde oluşan çatlaklar cam mukavemetini ters oranda etkilemektedir [39].



Şekil 2. 11 Camın mukavemet ve çatlak derinliği ilişkisi [40]

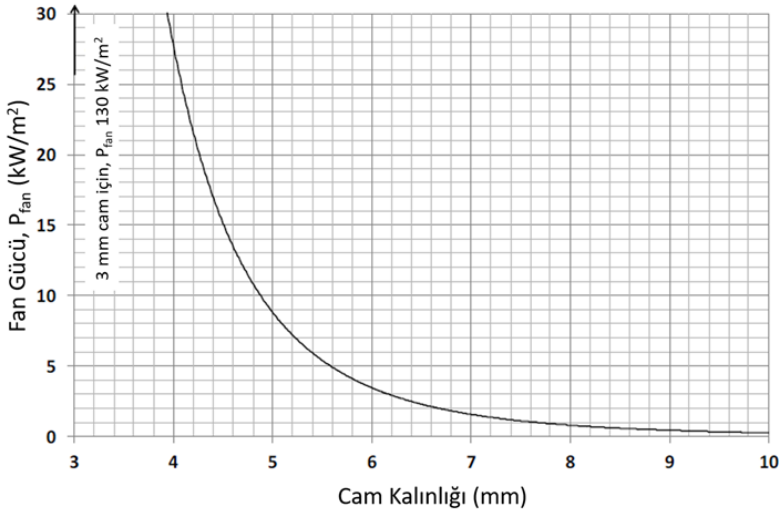
Camın mukavemetini arttırmaya yönelik yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkan teoriler; çatlak çevre ve bölgesinin kontrol altına alınması, camın yüzeyinde hata olmadan üretilmesi, camın yüzeyinde bulunan hata miktarının ve boyutunun kontrollü olarak üretilmesi, çatlakların ilerlemesinin engellenmesi olarak sıralanabilir. Bartholomew ve Varshneya'nın yapmış olduğu çalışmaların ortak çıkarımı; camın yüzeyinde oluşturulacak basma gerilmesi ile yüzeyde bulunan makro veya mikro çatlakların camın merkezine ilerlemesinin engellenebileceğidir [40], [41]. Şekil 2.12.b'de camın yüzeyinde oluşturulan basma gerilmesi ile çatlağın ilerlemesi engellenirken Şekil 2.12.c'de çekme gerilmesi ile çatlağın camın merkezine ilerleyişi görülmektedir [43].



Şekil 2. 12 Cam yüzeyindeki çatlağın ilerlemesi [37], [43]

Günümüzde yaygın olarak kullanılan ısıl temperleme ve kimyasal temperleme işlemleri, cam yüzeyinde basma gerilmesi oluşturularak cam güçlendirilmesini sağlamaktadır. Isıl temperleme işlemi, cam ergime sıcaklığının altında ve cam geçiş sıcaklığının üzerinde belirlenen sıcaklıkta camın homojen olarak ısıtılıp ardından hızlı bir şekilde soğutulması esasına dayanmaktadır. Hızlı soğutma, camın yüzeyinin camın merkezine göre daha çabuk soğumasına neden olur. Camın yüzeyi elastik katı davranışı gösterirken, camın merkezi termoelastik stres altındadır. Camın yüzeyi ile merkezi arasındaki ısıl genleşme katsayı farkından cam yüzeyinde basma gerilmesi ve cam merkezinde çekme gerilmesi oluşur [45], [46], [47]. Camın yüzeyinde oluşan basma gerilmesi, camın yüzeyinden cam kalınlığının beşte biri kadar derinliğe kadar oluşur. İşlem sonunda tüm gerilmelerin dengelenmesi ile cam mekanik olarak güçlenir. Isıl temperli camların yüzey ve merkezindeki gerilmeler dengeli olduğu için kırıldığında keskin olmayan küçük parçalar şeklinde kırılma davranışı gösterir. Bu özelliği nedeniyle ısıl temperli camlar güvenlik camı olarak bilinir [48], [48].

Gelişen teknoloji ile ısıl temperlemenin daha ince camlara da uygulanması üzerine çalışılmaktadır. Cam kalınlığı azaldıkça, camın yüzeyi ve merkezi arasındaki mesafe de azalacağı için camın yüzeyi ile merkezi arasında istenen genleşme katsayı farkının elde edilmesi güçleşir ve istenen basma gerilimi oluşturulamaz. Bunun yanında cam kalınlığı azaldıkça, Şekil 2.13'te görüldüğü gibi camın ani soğuması için kullanılan enerji ve buna bağlı olarak işlem maliyeti artar. Isıl temperlenmiş camda kesim ve şekillendirme işlemi yapılamadığı, optik kalitesinin düşük olduğu ve karmaşık geometrik şekilli ve ince camlara uygulanamadığı için camın güçlendirilmesi için kimyasal temperleme işlemi tercih edilmektedir.

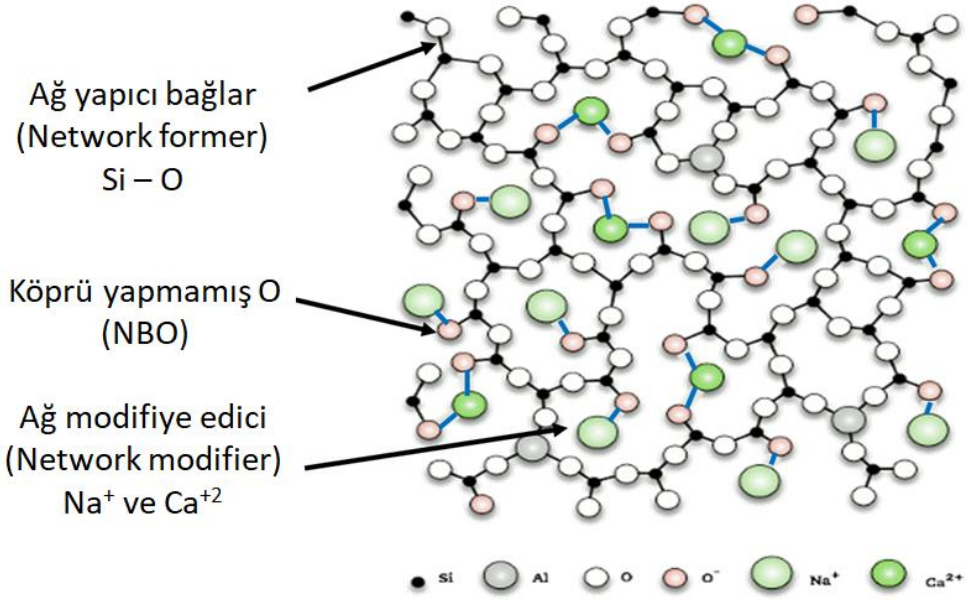


Şekil 2. 13 Isıl tempeleme işlemi sonrası camın soğutulması için harcanan enerji [50]

Kimyasal temperleme işleminin tarihi yaklaşık 100 sene öncesine dayanmaktadır. Schulze ilk kez 1913 yılında soda-kireç-silikat camı, ergiyik $AgNO_3$ tuz banyosuna daldırarak camın yüzey özelliklerini değiştirmeyi hedeflemiştir [51]. Kistler 1949 yılında, kimyasal temperleme işleminde en yaygın kullanıma sahip K^+ - Na^+ iyon çiftinin iyon yer değiştirme işlemi ile cam yüzeyinde basma gerilmesi oluşturarak camın mekanik güçlendirilmesinden bahsetmiştir [52], [53], [54].

Kimyasal temperleme, camın yüzeyinde çekme gerilimlerinin üstünde oluşturulacak basma gerilmesi ile çatlağın camın merkezine ilerlemesinin engellenmesi prensibine dayanan bir güçlendirme yöntemidir [55]. Kimyasal temperleme işlemi bir iyon değişim işlemidir. Camın yüzeyinde bulunan serbest iyonlardan daha büyük yarıçapa sahip iyonların difüzyon mekanizması ile yer değiştirerek cam yüzeyine katkılandırılması sonucu cam yüzeyinde basma gerilmesi oluşturulur. İyon değiştirme işlemi ile ilgili literatürde çoğunlukla silika esaslı camlarda çalışılmıştır. Silika esaslı camlarda SiO_2 cam kompozisyonunda cam yapıcı rolünde yer almaktadır. SiO_2 camın ergime sıcaklığını, ısıl şok direncini, viskozitesini ve kimyasal direncini arttırmakta, ısıl genleşme katsayını ve yoğunluğunu ise düşürmektedir. Cam yapısına camda istenilen kimyasal ve fiziksel özellikleri sağlamak için çeşitli alkali ya da toprak alkali grubu oksitler modifiye ediciler olarak ilave edilir. Genellikle kullanılan Na_2O, CaO, K_2O, MgO gibi modifiye edici oksitler Si—O bağlarını kırarak; köprü yapmayan oksijenler oluşturur ve

yapının sürekliliğini bozar. Silikat camın boşluklu ağ yapısı sayesinde pozitif alkali iyonları yapıda rahatça hareket eder. Şekil 2.14'te görüldüğü gibi camın ağ yapısı içerisindeki negatif yüklü köprü yapmayan oksijen iyonlarına bağlı küçük iyonik yarıçaplı alkali iyonlarının yapıda ağ modifiye edici olmaları sayesinde difüzyonları kolay gerçekleşir ve iyon değişimi daha verimli sonuçlanır [56].

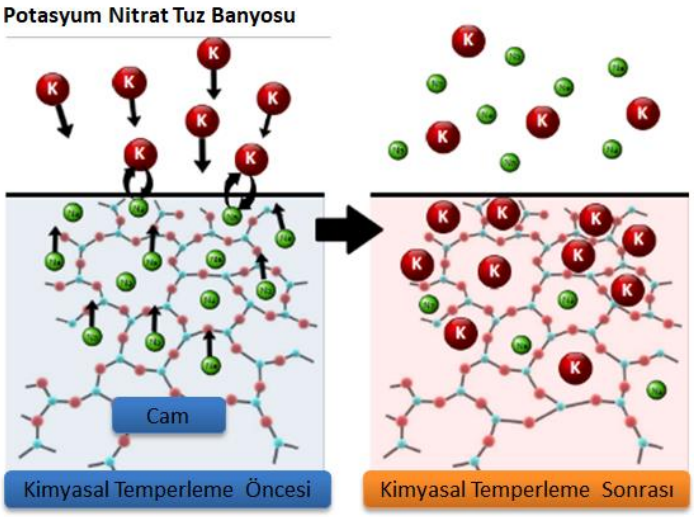


Şekil 2. 14 Soda-kireç-silikat cam ağ yapısı

Kimyasal temperleme yöntemi, %10'un üzerinde alkali oksit içeren camın, cam ergime sıcaklığının altında ve tuz ergime sıcaklığının üzerinde belirlenen sıcaklıkta ergiyik alkali tuz banyosu içerisine daldırılmasıyla uygulanır. Kimyasal temperleme işleminde, cam kompozisyonu içerisindeki serbest alkali iyonları ile tuz bileşimindeki alkali iyonlarının difüzyon mekanizması ile iyon değişimi hedeflenir. Bir yüzey modifikayson yöntemi olan iyon değişimi işlemi, difüzyon aktivasyonu için gerekli ortam koşulları sağlandığında gerçekleşebilir [57], [58], [59], [60], [61].

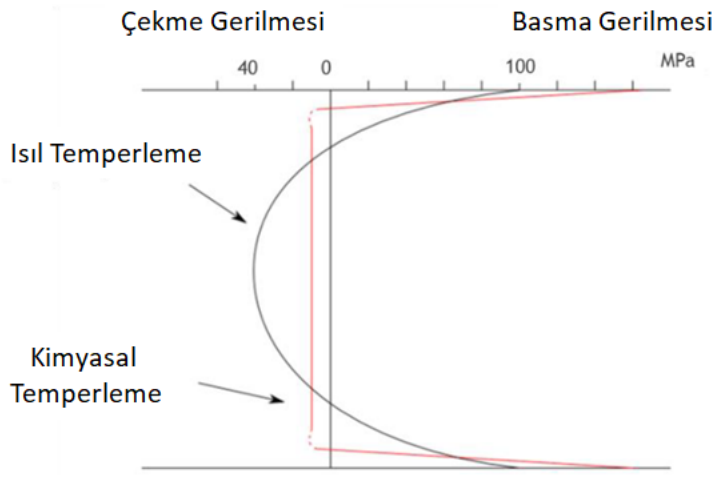
Kimyasal temperleme işlemi ile camın güçlendirilebilmesi, cam ağ yapısında bulunan Na^+ iyonunun kendinden daha büyük iyonik yarıçapa sahip bir alkali iyonu ile iyon değiştirmesi ile mümkündür. Literatürde silikat camları için Li^+ ve K^+ iyonları yoğun olarak çalışılmıştır. Şekil 2.15'te görüldüğü gibi, interdifüzyon prosesi ile cam yapıdan ayrılan Na^+ iyonunun yerine K^+ iyonu istiflenmeye başlar

ve bu bölgede basma gerilimi oluşur. Oluşan basma gerilimi 200 – 1000 MPa iken cam merkezinde 50 MPa'a kadar çekme gerilimi oluşur [62].



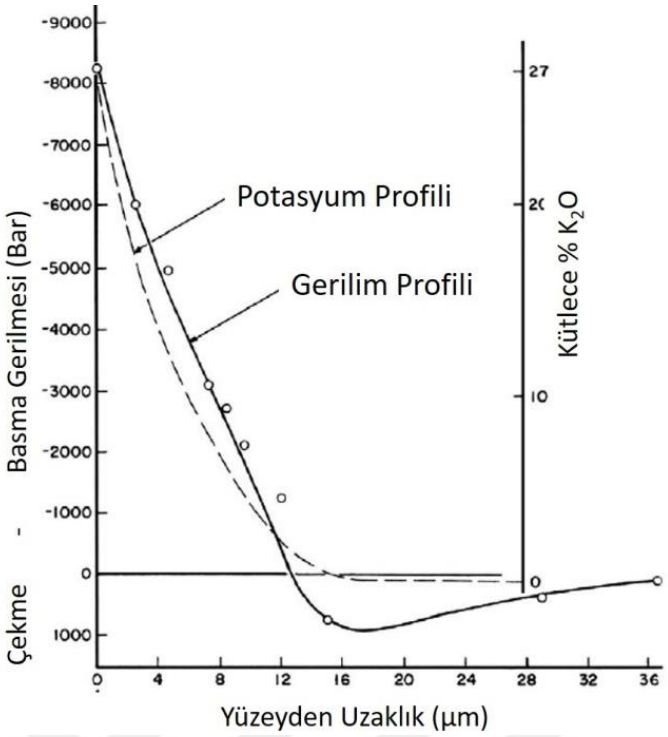
Şekil 2. 15 SLS cam ve KNO_3 tuz banyosu arasındaki iyon değişimi

Isıl ve kimyasal temperleme işlemleri sonrası cam kesit boyunca oluşan gerilim dağılım karşılaştırması Şekil 2.16'da verilmiştir. Camın ısıl ve kimyasal temperleme ile güçlendirilmesi, iyon difüzyon derinliğine, yüzeyde meydana gelen basma gerilmesine ve merkezde meydana gelen çekme gerilmesine bağlıdır. Isıl temperleme işleminde sıcaklık hızla azalırken camın merkezi büzülmek ister, fakat rijit katı cam yüzeyi buna izin vermez ve cam yüzeyinde basma, merkezinde çekme gerilmesi oluşur. Kimyasal temperleme işlemi sonrası cam yüzeyinde yüksek basma gerilmesi elde edilirken, ısıl temperleme işlemi sonrasında cam yüzeyinde elde edilen basma gerilmesi değeri 150 MPa'yı geçmez. Kimyasal tempeleme işleminde yüzeyde gerçekleşen hacim değişimi yani yer değiştiren iyonların yarıçapları oranı arttıkça yüzeyde oluşacak basma gerilim oranı da artar. Kimyasal temperleme işlemi sonrasında, difüzyon derinliğine bağlı olarak cam yüzeyinden camın 100 mikron derinliğine kadar homojen dağılıma sahip bir çekme gerilmesi oluşur. Isıl temperleme işlemi sonrasında camın merkezinde oluşan çekme gerilimi sıcaklık farkından dolayı cam yüzeyinden camın 1/5 derinliğine kadar parabolik bir eğri çizer. Cam mukavemeti düşük çekme gerilimi ve yüksek basma gerilmesi ile arttırılmaktadır [63].



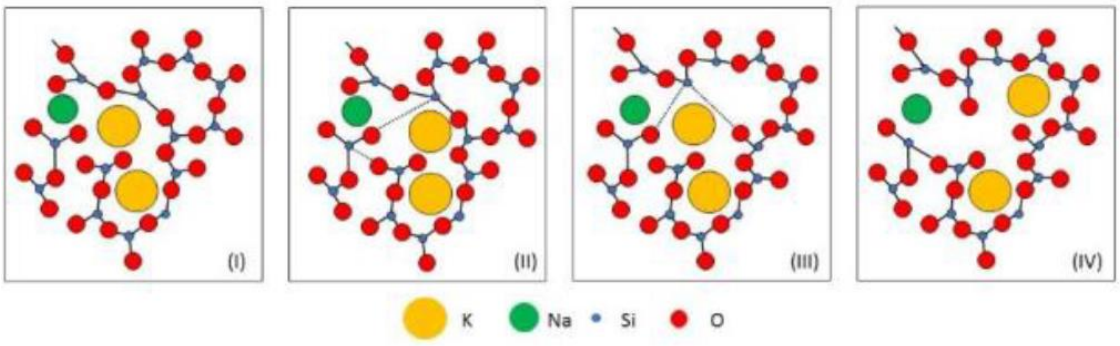
Şekil 2. 16 Temperleme sonrası oluşan kalınlık - gerilim profili [63]

Kimyasal temperleme işleminde camın yüzeyinde bulunan serbest iyonlardan daha büyük yarıçapa sahip K^+ iyonların difüzyon mekanizması ile yer değiştirerek cam yüzeyine istiflenirler. İstiflenme işleminin cam merkezinden sıfırlandığı derinlik difüzyon derinliği olarak tanımlanır [63]. Difüzyon derinliği boyunca gerçekleşen interdifüzyon prosesinde konsantrasyon farkı prosesin itici gücüdür. Konsantrasyon farkı azaldıkça difüzyon hızı azalır ve sıfırlandığı noktada difüzyon derinliğine ulaşılır. Buna göre cam yapıda bulunan K^+ iyonunun kimyasal temperleme işlemi sırasında konsantrasyonunun cam yüzeyinden cam merkezine doğru azalan bir eğri çizmesi beklenir. Şekil 2.17'de olduğu gibi K^+ konsantrasyonu ile doğru orantılı oluşan basma gerilmesi cam merkezine doğru azalan bir eğri çizmektedir. Oluşan bu profil derinliği ile camın yüzeyinde bulunan makro ve mikro çatlakların cam merkezine ilerlemesi engellenerek camın güçlendirilmesi sağlanır [64].



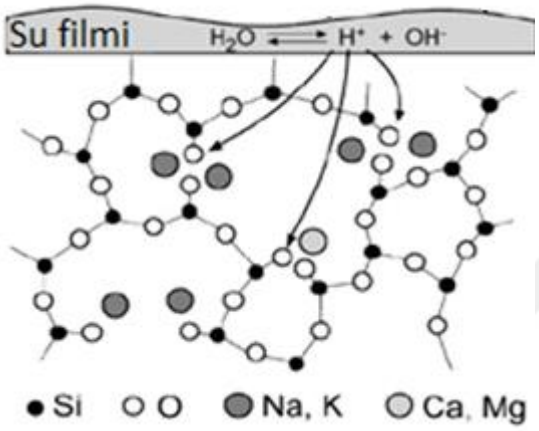
Şekil 2. 17 Derinlik boyunca gerilim - potasyum profili değişimi [65]

Kimyasal temperleme işlemi, cam geçiş sıcaklığının altında ve tuz ergime sıcaklığının üzerinde uygulanmaktadır. İşlem sıcaklığı ve süresi cam bağ yapısını etkilemektedir. İşlem sıcaklığı cam geçiş sıcaklığına yakın veya çok uzun sürede olması durumunda cam malzemenin yapısında viskoelastik gevşeme davranışı görülebilir. Şekil 2.18'de I. durumdan IV. duruma yüksek sıcaklık veya yüksek süre uygulaması sonucu cam ağ yapısının genişleyerek bozulduğu ve o bölgedeki istiflenmenin azaldığı görülmektedir. Cam yüzeyine yakın bölgelerde görülen bu davranış kimyasal temperleme işlemi sırasında camın kazanması gereken mukavemeti kazanamamasına sebebiyet verir.



Şekil 2. 18 Camın gevşeme davranışı

Kimyasal tempelemenin gerçekleştiği ara yüzeyin difüzyon verimliliği üzerinde etkisi vardır. Şekil 2.19'da görüldüğü gibi cam yüzeyi ile hava arasında geçiş bölgeleri ve su tabakası olduğu görülmektedir. Cam yapısında bulunan alkali ve toprak alkali iyonları ile suyun H^+ iyonları arasında iyon yer değişimi gerçekleşir ve Si—OH grupları oluşarak cam ağ yapı düzenleyiciler cam yapısının dışına çıkmaktadır. Bu durum cam korozyonu olarak tanımlanır [68].



Şekil 2. 19 Cam yüzeyinde meydana gelen korozyon

Kimyasal temperleme difüzyon esaslı bir işlem olduğu için, işlem verimini etkileyen faktörler ile difüzyonu etkileyen faktörler aynıdır. Sıcaklık, süre, cam bileşimi, cam yüzey kalitesi ve kalınlığı, kullanılan tuz banyosu ve tuzun bileşimi, banyo safiyeti, proses öncesi ön ısıtma ve sonrası son ısıtma işlemleri kimyasal temperlemeye etki eden faktörlerdir.

Kimyasal temperleme işlem süresi için literatürde 30 dakika ile 120 saat aralığındaki süreler denenmiştir. Uygun kimyasal temperleme süre aralığının cam ve tuz bileşimine ve sıcaklığa göre değişebilmekle birlikte, ticari camlarda en çok kullanılan süreler 2 ile 8 saat aralığındadır.

Kimyasal temperleme sıcaklığı da, cam ve tuz kompozisyonuna bağlıdır. Teknik olarak tuzun ergime sıcaklığının üzerinde ve camın cam geçiş sıcaklığının altında sıcaklıklar temperleme sıcaklığı olarak kullanılmaktadır. Literatürde 375 ile 500 °C aralığında farklı sıcaklıklarda uygulamalar yapılmış ve uygun sıcaklık aralığının 400 ile 475 °C aralığında değiştiği gözlemlenmiştir.

Bölüm 2.2'de bahsedildiği gibi, fotovoltaik sistemlerde kullanılan camlarının kompozisyondaki demir oranı, yüzey yapısı ve cam kalınlığı sistemin performansını etkilemektedir. Demir oranı azaltılmış, yüzeyi desenli ve ince camın ışık geçirgenliği artacağı için sistem verimliliğinin arttırılması hedeflenmektedir. Bunun yanında sistem hafiflerken maliyet azalmakta fakat kalınlığı azaltılan camın mukavemet değerleri düşmektedir. Kimyasal temperleme yöntemi ile hedeflenen mukavemet değerlerine ulaşılabilmektedir. Kimyasal olarak güçlendirilmiş camların iyileştirilmiş performans ile fotovoltaik sistemlerin çalışma ömrünü uzatması ve çalışma verimliliğini artırması beklenmektedir. Kimyasal olarak güçlendirilmiş camlar, yüksek performanslı uzay güneş pillerinin uygulamaları için büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak literatürde bugüne kadar yapılan çalışmalarda, fotovoltaik sistemlerde kullanılan düşük demirli desenli camların inceltilmesinin getireceği mukavemet kaybının kimyasal temperleme işlemi ile güçlendirilmesi konusu incelenmemiştir. Bu tez çalışmasında fotovoltaik sistemlerin iç aksamını çevre koşullardan koruyan ve desenli yapısı ile fotovoltaik sistemlerin performansında maksimum verimlilik sağlayan düşük demirli desenli ince camların kimyasal temperleme ile güçlendirilmesi ve kimyasal temperleme davranışı yapısal, mekanik ve optik açıdan incelenmiştir.

3
DENEYSEL ÇALIŞAMALAR

Bu tez çalışması kapsamında yürütülen deneysel çalışmalarda, fotovoltaik sistemlerde kullanılan desenli/desensiz ince camların mekanik özelliklerinin arttırılması amacıyla farklı süre ve sıcaklıklarda kimyasal temperlenmesi, temperleme öncesi ve sonrası camların mekanik ve optik özelliklerinin ve atmosferik dayanımlarının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda yapılan deneysel çalışmalar, kimyasal temperlemeye sıcaklık ve sürenin, cam yüzeyindeki desenin ve cam kalınlığının etkisinin incelendiği ve temperlemenin camların atmosferik dayanımlarına etkisinin incelendiği 4 ayrı grupta gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan soda-kireç-silikat kompozisyonuna sahip desenli ve desensiz camlar, sırasıyla Şişecam Trakya Düzcam Mersin Fabrikası'nda yüzeye desen verilerek üretilen Sandy Desenli Cam ve Trakya Düzcam Kırklareli Fabrikası'nda float sistemle üretilen düz camlardır.

Kimyasal temperlemeye sıcaklık ve sürenin etkisinin incelendiği ilk grup deneysel çalışmalarda, 2 mm kalınlığa sahip desenli cam numuneler 400, 425 ve 450 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklık ve 2, 4, 8 ve 16 saat olmak üzere 4 farklı sürede kimyasal temperlemeye tabi tutulmuştur.

İkinci grup deneysel çalışmalarda, kimyasal temperlemeye cam yüzeyindeki desen etkisini incelemek için yürütülen deneysel çalışmalarda ise, 2 mm kalınlığındaki desenli ve desensiz (float/düz) SLS camlar kimyasal temperlenmiştir.

Kimyasal temperlemeye cam kalınlığının etkisinin incelenmesi amacıyla yürütülen üçüncü grup deneysel çalışmalarda, 2 mm ile 3,2 mm desenli cam numuneler kimyasal olarak temperlenmiştir.

Dördüncü grup çalışmalarda ise, kimyasal temperlemenin camların kullanım alanları doğrultusunda maruz kalabilecekleri koşullardaki atmosferik dayanımlarına etkisinin incelenmesi amacıyla, camlar temperleme önce ve sonrası nem testi, tuz testi, asit testi ve aşındırma testine tabi tutulmuştur.

Deneysel çalışmalar kapsamında, kimyasal temperleme işlemi öncesi ve sonrası alınan ağırlık ölçümleri sonucu iyon değişim oranı hesaplanmış ve numunelerin kesit yüzeylerinden yapılan taramalı elektron mikroskobu analizleriyle, numune yüzeyinden cam kütlesine doğru potasyum iyon değişimi incelenmiştir. Kimyasal temperleme işleminin camın optik ve morfolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi amacıyla, kimyasal temperleme işlemi öncesi ve sonrası numunelerin görünür bölgedeki geçirgenlik ve pusluluk değerleri belirlenmiş ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Halka üstü halka testi ile kimyasal temperleme öncesi ve sonrası numunelerin mekanik davranışları, kırılma anındaki yük ve eğme mukavemeti değerleri ölçülmüş ve Weibull dağılımları yapılmıştır. Ayrıca temperlenen desensiz düz camların temperleme sonrası yüzeyinde oluşan basma gerilimi ve gerilim derinliği değerleri ölçülmüştür.

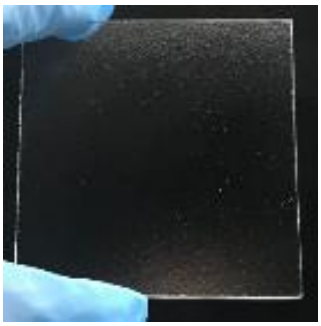
3.1 Numune Hazırlama

Yapılan dört grup deneysel çalışma kapsamında da kullanılan soda-kireç-silikat kompozisyonuna sahip cam numuneler 60x60 mm^2 boyutlarında olup; desenli cam numuneler desen yüzeyinden, düz cam numuneler ise kalay yüzeyinden elmas kalemle kesilmiştir. Her deneysel çalışma grubu için 35'er adet numune kullanılmış olup; numunelerin kimyasal bileşimleri Tablo 3.1'de ve örnek bir numunenin görüntüsü Şekil 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3. 1 Camların kimyasal bileşimleri

Kompozisyon	**Bileşim (% ağırlık)**
Desenli Cam	72,3 SiO_2 - 13,4 Na_2O - 8,4 CaO - 4,4 MgO - 1 Al_2O_3 - 0,07 Fe_2O_3 - 0,4 Diğer
Float Cam	71,7 SiO_2 - 13,8 Na_2O - 8,1 CaO - 4,4 MgO - 1 Al_2O_3 - 0,6 Fe_2O_3 - 0,4 Diğer

Kimyasal temperleme öncesi numuneler sırasıyla demineralize saf su ve izoproponal alkol ile elde ovularak yıkanmış ve ardından basınçlı azot gazı ile kurutulup temizlenmiştir.



Şekil 3. 1 Boyutları 60x60x2 mm olan cam numune örneği

3.2 Kimyasal Temperleme

Kimyasal temperleme işlemi, Şekil 3.2'de görülen Lema TC 804A kimyasal temperleme fırınında MERCK marka %99,0 safiyette KNO_3 tuzu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Temperleme işlemi, KNO_3, tuzunun ergime sıcaklığının üstünde ve kullanılan SLS camın cam geçiş sıcaklığının altında seçilen 3 farklı sıcaklık olan 400, 425 ve 450 °C'de farklı sürelerde gerçekleştirilmiştir. Numuneler, Şekil 3.2'de görülen fırın içerisindeki paslanmaz çelik sepetlere dizilerek fırın içerisine yerleştirilmiştir. Numuneler ergiyik tuz banyosuna daldırılmadan önce ve temperleme işleminin sonunda 1'er saat süreyle fırın içinde tuz banyosuna temas ettirilmeden ön ısıtma ve son ısıtmaya tabi tutulmuş böylece ani sıcaklık değişimiyle camda stres oluşması engellenmiştir. Kimyasal temperleme işleminin ardından numuneler demineralize saf su ile elde ovularak yıkanıp ardından basınçlı azot gazı ile kurutulmuştur.

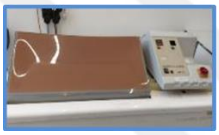


Şekil 3. 2 LEMA TC 804A kimyasal temperleme fırını ve numunelerin sepetteki dizilimi

3.3 Atmosferik Koşullara Dayanım Testi

Fotovoltaik sistemlerde kullanılması hedeflenen desenli soda-kireç-silikat cam numunelerin atmosferik koşullara dayanım testleri, TS EN 1096-2 Cam – Yapılarda kullanılan – Kaplanmış Cam – Bölüm 2: A, B ve S Kaplamalarının dayanıklılığı için deney metotları standardına uygun olarak orijinal ve kimyasal temperli numunelere uygulanmıştır. Atmosferik koşullara dayanım testleri kapsamında, orijinal ve 450 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle kimyasal temperlenmiş cam numunelerin tabi tutulduğu nem, tuz, asit ve aşındırma testlerinin koşulları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3. 2 Nem testi, tuz testi, asit testi ve aşındırma testinin uygulama koşulları

			
Nem Testi	**Tuz Testi**	**Asit Testi**	**Aşındırma Testi**
40 °C ve %100 nem	%5 tuz, 35°C ve %100 nem	40 °C ve %40 nem ve %50 asit çözeltisi	500 çevrim
21 gün	21 gün	5 gün	-
35 Orijinal	35 Orijinal	35 Orijinal	35 Orijinal
35 Kimyasal temperli numune	35 Kimyasal temperli numune	35 Kimyasal temperli numune	35 Kimyasal temperli numune
450 °C / 4 saat	450 °C / 4 saat	450 °C / 4 saat	450 °C / 4 saat

3.4 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı

Kimyasal temperleme işlemi öncesi ve sonrası numunelerin ağırlıkları 10^{-4} g hassasiyete sahip Mettler marka AB204 model hassas terazi ile ölçülerek, temperleme ile meydana gelen ağırlık değişimleri hesaplanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3. 3 Mettler AB204 hassas terazi

Kimyasal temperleme işlemi süresince banyodaki K^+ iyonları ve camdaki Na^+ iyonlarının difüzyon mekanizmasıyla yer değiştirmesi sonucunda numunelerde oluşan ağırlık değişimi Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%\Delta W \left[{(W_{son} - W_{ilk})}/{W_{ilk}}\right] x100 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'de W_{son} kimyasal temperleme sonrası ağırlığı, W_{ilk} kimyasal temperleme öncesi ağırlığıdır. Kimyasal temperleme sonucunda numunenin yapısına katılan K^+ iyonlarının ağırlığı, W_K ise Denklem 3.2 ile hesaplanmıştır. Denklem 3.2'ye göre, MW_K, potasyum iyonun molar ağırlığı ve MW_{Na} sodyum iyonun molar ağırlığı olarak ifade edilir (Nunzio vd, 2004).

$$W_K = \left[{(W_{son} - W_{ilk})}/{MW_K - MW_{Na}}\right] \times MW_K \quad (3.2)$$

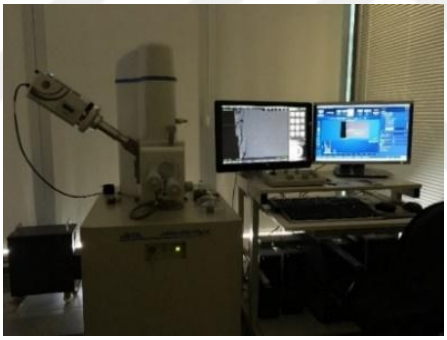
Difüzyon katsayısının hesaplaması için iyon değişimi sonucu oluşan ağırlık değişimi değerlerinden yola çıkılarak Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 kullanılmıştır (Varshneya vd, 1974). Denklem 3.3 ve Denklem 3.4'e göre, D_m difüzyon katsayısı, ΔW kimyasal temperlemeden sonraki ağırlık değişimi, S_{ex} iyon değişimine maruz kalan yüzey alanı, t kimyasal temperleme süresi, ρ camın yoğunluğu, $\omega(Na_2O)$ cam bileşiminde ağırlıkça sodyum oksit fraksiyonu, MW_{Na2O} sodyum oksit molar ağırlığı ve $C_0(Na)$ iyon değişim oranıdır. Teorik olarak yüzeydeki tüm sodyum iyonlarının difüze olduğu kabul edilerek r=1 olarak kullanılmıştır.

$$D_m = \frac{\pi}{t} \times \left[\frac{\Delta W}{2 \times C_0 \times S_{ex} \times (MW_K - MW_{Na})}\right]^2 \quad (3.3)$$

$$C_0(Na) = \frac{2 \times \rho \times \omega(Na_2O)}{MW(Na_2O)} X\ r \quad (3.4)$$

3.5 SEM/EDX Analizi

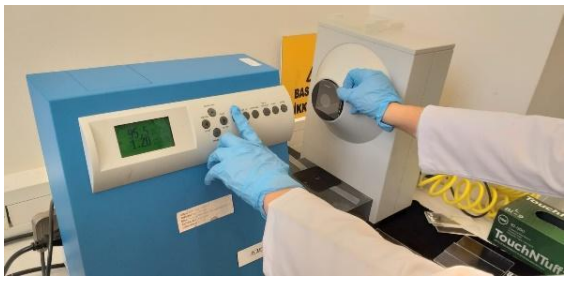
Kimyasal temperleme işlemi sonrası cam numunelere kesit yüzeyden belirlenmiş bir çizgi üzerinde yaklaşık 1 μm aralıklarla linescan modunda taramalı elektron mikroskobu ve enerji yayılımlı x-ışını spektroskopi (SEM/EDS) analizi yapılmıştır. Şekil 3.4'te görülen JEOL marka JSM 6010 LV model tarama elektron mikroskobu ile yapılan ölçümler için 1x1 cm^2 boyutunda elmas kalem ile kesilmiş numuneler polyester reçine içine gömülerek hazırlanmıştır. Her numunenin alt kesit yüzeyinden cam kütlesine doğru ve üst kesit yüzeyinden cam kütlesine doğru olmak üzere iki doğrultuda ölçümler alınmıştır. Ölçümler sonucunda cam yüzeyinden cam kütle merkezine doğru kimyasal temperleme sonrası değişen Na^+ ve K^+ iyonları yüzde oksit cinsinden kaydedilmiş ve elde edilen veriler kullanılarak potasyum (K^+) difüzyon derinliği grafiği çizilmiştir.



Şekil 3. 4 JEOL JSM 6010 LV taramalı elektron mikroskobu

3.6 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi

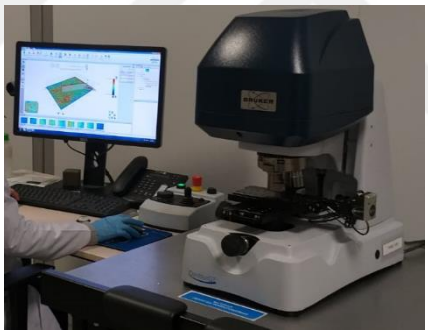
Kimyasal temperleme işleminin numunenin optik özelliklerine olan etkisini belirlemek amacıyla, kimyasal temperleme öncesi ve sonrası numunelerin optik geçirgenlik ve pusluluk değerleri, ASTM D 1003, D 1044 standartlarına göre, Şekil 3.5'te görülen BYK marka Haze-Gard Plus model cihaz ile ölçülmüştür. Ölçümlerde 10'ar adet numune ile çalışılmıştır.



Şekil 3. 5 BYK Haze-Gard Plus optik geçirgenlik ve pusluluk cihazı

3.7 Yüzey Pürüzlülük Analizi

Kimyasal temperleme işleminin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisini incelemek amacıyla, cam numunelerin temperleme önce ve sonrası yüzey pürüzlülük analizleri Şekil 3.6'da görülen Bruker marka Contour GT-X model beyaz ışık interferometresi ile gerçekleştirilmiştir. VIS modunda 2X büyütmeyle alınan ölçümlerde yüzey pürüzlülük değerleri nanometre olarak kaydedilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri, 2'şer adet numunenin 5 ayrı bölgesinden yapılan taramalar sonucunda ortalama hesaplanarak belirlenmiştir.



Şekil 3. 6 Bruker Contour GT- X beyaz ışık interferometresi

3.8 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi

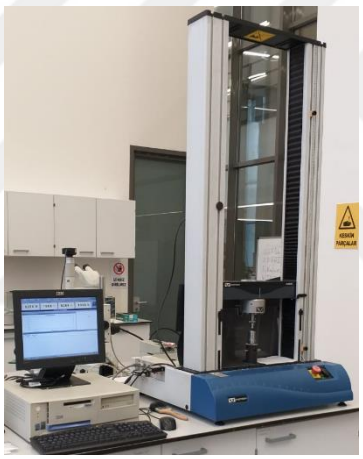
Kimyasal temperleme işlemi öncesi ve sonrası numunelerin kırılma anındaki yük ve esneme değerleri halka üstü halka testi ile saptanmıştır. Halka üstü halka testi numunelerin köşe ve kenar hatalarından minimum etkilenen bir test olduğu için tercih edilmiştir. Testler, Şekil 3.7'de görülen, 0-10 kN yükler arasında çalışabilen Instron 3366 model cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8'de görülen halka üstü halka testi EN 1288-5 standartlarına uygun şekilde, 25 °C ortam sıcaklığı ve %25-50 bağıl nem koşullarında yükleme hızı 1,3 mm/dakika, alt sabit tutucu halkasının çapı 30 mm, üst yükleme halkasının çapı 10 mm olarak gerçekleştirilmiştir. Elmas

uçlu kalemle kesilen numunelerin kesim yüzeyleri üste gelecek şekilde cihaza yerleştirip testleri gerçekleştirilmiştir. Bütün deneysel çalışmalarda 30'ar adet numune ile çalışılmıştır.

Weibull dağılımı mühendislik disiplininde yaygın olarak kullanılan güvenilirlik ve olasılık dağılımıdır. Gerçekleştirilen mekanik dayanım testlerin ardından, Weibull dağılımı grafikleri ile değerlerin istatistiksel yorumlaması yapılır. Weibull lineer regresyon analizi ile Denklem 3.5 ile elde edilir:

$$\ln(\ln(1/(1-F)))=m\ln F-m\ln F_0 \qquad (3.5)$$

F, kırılma olasılığı olup Weibull grafiği ln (ln (1/(1-F)))'nin ln F'e çizilmesiyle oluşturulur. Bu grafiğin eğimi m, korelasyon katsayısı, R olan weibull modülünü diğer bir değişle verilerin güvenilirliğini verir.



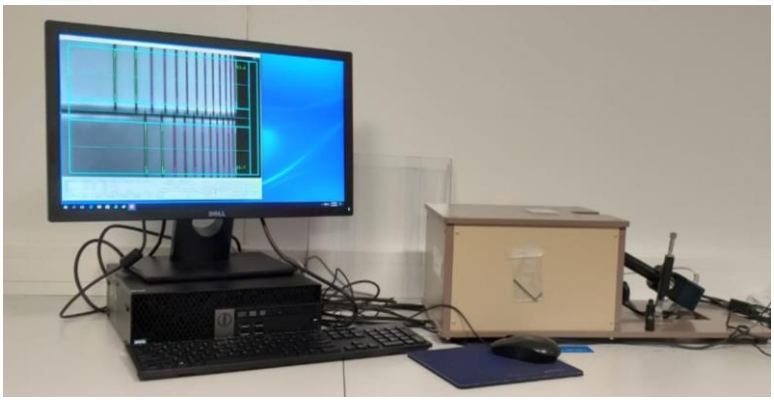
Şekil 3. 7 Instron 3366 cihazı



Şekil 3. 8 Halka üstü halka testi

3.9 Yüzey Gerilimi ve Gerilim Derinliği Analizi

2 mm kalınlığındaki düz cam numunelerin kimyasal temperleme işleminden sonra cam yüzeyinde oluşan basma gerilimi (CS) ve gerilim derinliği (DoL) değerleri, Şekil 3.9'da görülen FSM 6000LE cihazı kullanılarak ışığın çift kırınım özelliğinden yola çıkılarak yapılan hesaplamalarla bulunmuştur. Analizlerde 5'er adet numune kullanılmış ve her numuneden 5'er adet ölçüm alınarak ortalaması hesaplanmıştır.



Şekil 3. 9 FSM 6000LE yüzey gerilim ölçüm cihazı

3.10 Bağ Yapısı Analizi

Kimyasal temperleme işleminden sonra iyon değişimin cam ağ yapısına etkilerini incelemek için, kimyasal temperleme öncesi ve sonrası numunelerin bağ analizleri Şekil 3.10'da görülen Bruker marka Hyperion 3000 model Fourier Transform

Infrared Spektrometre (FTIR) cihazı kullanılarak refleksiyon/yansıma tekniği ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 10 Hyperion 3000 FTIR cihazı

4
DENEYSEL SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında yürütülen deneysel çalışmalar, fotovoltaik sistemlerde kullanılan desenli ve desensiz ince camların kimyasal temperleme davranışlarının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiş ve elde edilen deneysel sonuçlar bu bölümde verilmiştir. Bu doğrultuda deneysel sonuçlar, kimyasal temperlemeye sıcaklık ve sürenin, cam yüzeyindeki desenin ve cam kalınlığının etkisinin incelendiği ve temperlemenin camların atmosferik dayanımlarına etkisinin incelendiği 4 ayrı grupta verilmiştir. Birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü grup olarak adlandırılan deneysel çalışmaların detayları Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4. 1 Deneysel çalışmalar tablosu

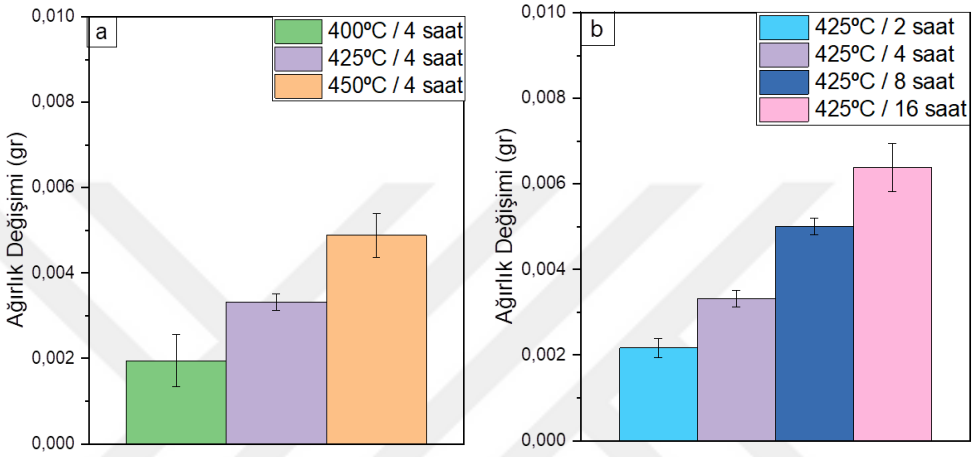
Deneysel Çalışma		Kalınlık (mm)	Cam Türü	Kimyasal Temperleme Sıcaklığı (°C)	Kimyasal Temperleme Süresi (saat)
1. Grup	**Sıcaklık ve Süre Etkisi**	2	Desenli	400 - 425 - 450	2 - 4 - 8 – 16
2. Grup	**Desen Etkisi**	2	Desenli – Düz	450	4
3. Grup	**Kalınlık Etkisi**	2 - 3,2	Desenli	450	4
4. Grup	**Atmosferik Koşullara Dayanım**	2	Desenli	450	4

4.1 Kimyasal Temperlemeye Sıcaklık ve Süre Etkisi

1. grup deneysel çalışmalarda, 2 mm desenli soda-kireç-silikat camların kimyasal temperleme davranışına sıcaklık ve süre etkisini incelemek amacıyla, numuneler 4 saat sabit sürede 400, 425 ve 450 °C sıcaklıklarda ve 425°C sabit sıcaklıkta 2, 4, 8 ve 16 saat süreyle kimyasal temperlenmiştir.

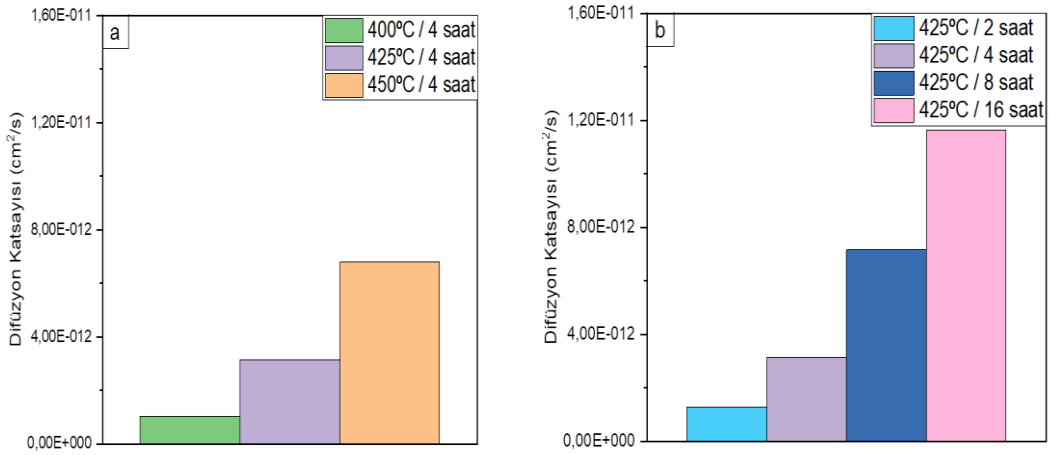
4.1.1 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı

Farklı süre ve sıcaklıklarda kimyasal temperlemeye maruz bırakılan camlarda işlem sırasında meydana gelen ağırlık değişimleri 35'er adet 2 mm desenli cam numuneyle yapılan deneyler sonucu belirlenmiş ve sıcaklık ve süre etkisi sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir. Buna göre elde edilen en yüksek ağırlık değişim değeri artan sıcaklık için 450 °C'de ve 4 saatte, artan süre için 425 °C'de ve 16 saatte hesaplanmıştır.



Şekil 4. 1 Desenli cam numunenin a) artan sıcaklık b) artan süre ile ağırlık değişimi sonuçları

Elde edilen ağırlık değişimi sonuçlarından hareketle hesaplanan kütle ortalama difüzyon katsayısı değerlerinin sıcaklık ve süre etkisine bağlı sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir. Buna göre kimyasal temperlenmiş cam numunelerin en yüksek difüzyon katsayısı değerleri sıcaklık etkisi için 450 °C'de ve 4 saatte, süre etkisi için 425 °C'de ve 16 saatte hesaplanmıştır.

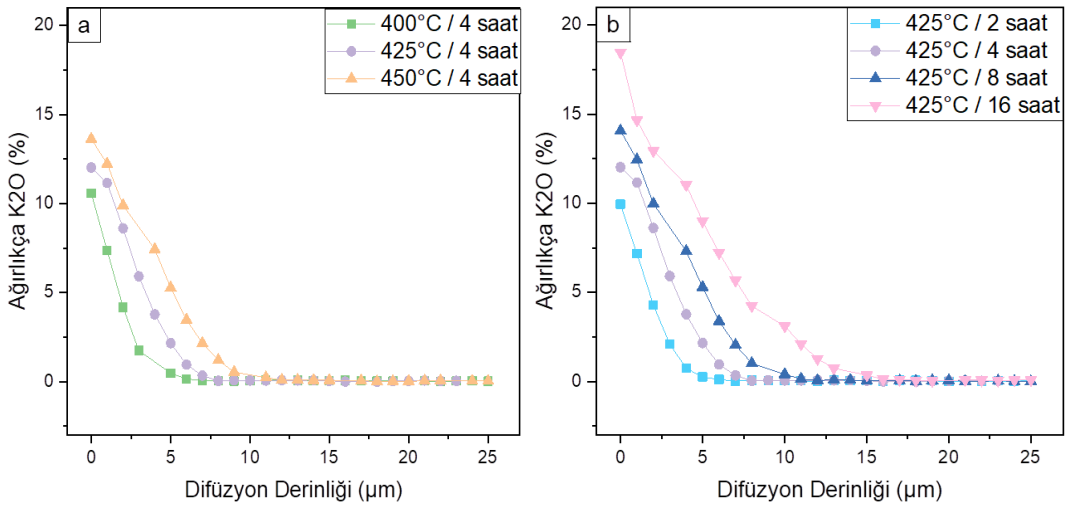


Şekil 4. 2 Desenli cam numunenin a) artan sıcaklık b) artan süre ile difüzyon katsayısı sonuçları

4.1.2 SEM/EDS Analizi Sonuçları

Kimyasal temperleme işlemi sonrası cam numunelere kesit yüzeyden belirlenmiş bir çizgi üzerinde yaklaşık 1 µm aralıklarla linescan modunda SEM/EDS analizi ölçümleri 1'er adet 2 mm desenli cam numune ile yapılmış ve cam yüzeyinden cam kütle merkezine doğru kimyasal temperleme sonrası potasyum (K^+) difüzyon derinliği grafikleri çizilmiştir.

4 saat sabit sürede, artan sıcaklık ile birlikte difüzyon derinliği değişimi ve 425 °C sabit sıcaklıkta, artan süre ile birlikte potasyum difüzyon derinliğinin değişimi Şekil 4.3'te verilmiştir. Potasyum iyonu için difüzyon derinliği artan kimyasal temperleme sıcaklığıyla ve süresiyle arttığı görülmüştür.

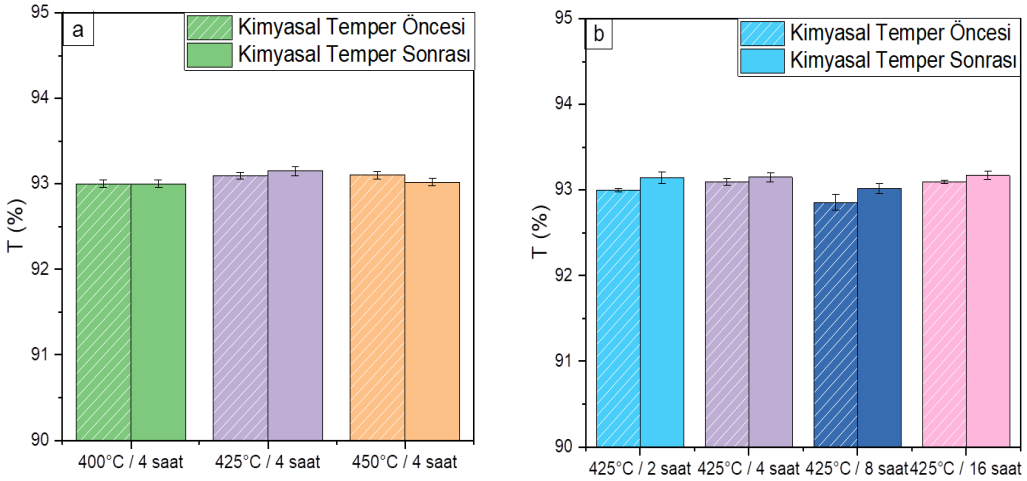


Şekil 4. 3 Desenli cam numunenin a) artan sıcaklık b)artan süre ile SEM/EDS analizi

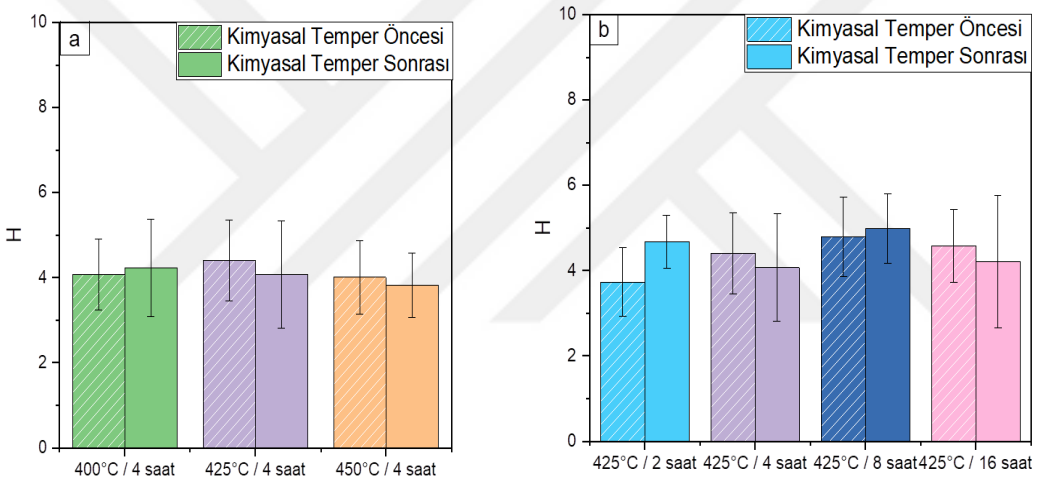
4.1.3 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi

Kimyasal temperleme işleminin camın optik özelliklerine olan etkisini belirlemek amacıyla, kimyasal temperleme öncesi ve sonrası 10'ar adet 2 mm kalınlığındaki desenli cam numunelerin görünür bölgede optik geçirgenlik ve pusluluk değerleri ölçülmüş, geçirgenlik ölçüm sonuçları Şekil 4.4'te, pusluluk değerleri ise Şekil 4.5'te verilmiştir.

Kimyasal temperlemenin ardından 2 mm kalınlığındaki desenli cam numunelerin optik geçirgenlik ve pusluluk değerlerinin artan sıcaklık ve süre ile belirgin bir değişim göstermediği görülmüştür.



Şekil 4. 4 Desenli cam numunenin a)artan sıcaklık b)artan süreye göre optik geçirgenlik sonuçları

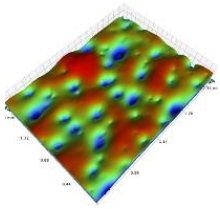
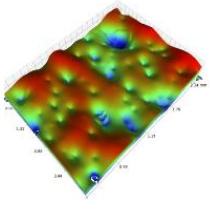
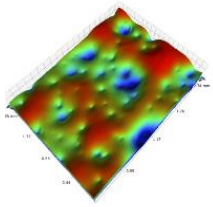
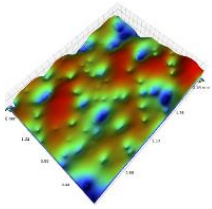
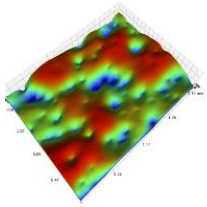
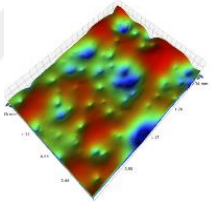
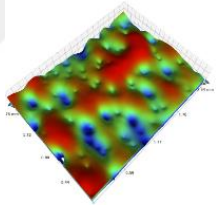
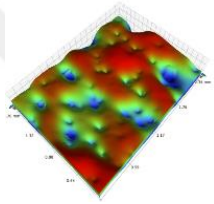


Şekil 4. 5 Desenli cam numunenin a)artan sıcaklık b)artan süreye göre pusluluk sonuçları

4.1.4 Yüzey Pürüzlülük Analizi

Kimyasal temperleme işleminin cam numunelerin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisini incelemek amacıyla, kimyasal temperleme işlemi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük analizleri beyaz ışık interferometresi ile ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü değerleri, 2'şer adet numunenin 5 ayrı bölgesinden yapılan taramalar sonucunda ortalama hesaplanarak belirlenmiş olup sonuçlar Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4. 2 Desenli cam numunenin a)artan sıcaklık b)artan süreye göre optik geçirgenlik sonuçları

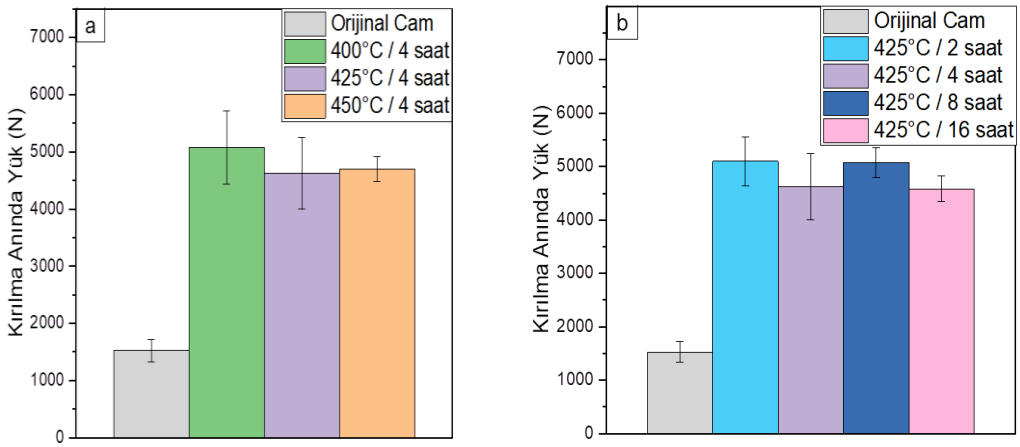
Orijinal Cam	**4 saat**		
	400 °C	**425 °C**	**450 °C**
Ra:1,2 µm	Ra:1,3 µm	Ra:1,3 µm	Ra:1,2 µm
			
425 °C			
2 saat	**4 saat**	**8 saat**	**16 saat**
Ra:1,4 µm	Ra:1,3 µm	Ra:1,4 µm	Ra:1,4 µm
			

4.1.5 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi

Kimyasal temperleme işlemi öncesi ve sonrası numunelerin kırılma anındaki yük ve esneme değerleri 30'ar adet 2 mm kalınlığında desenli cam numunlere uygulanan halka üstü halka testi ile saptanmıştır.

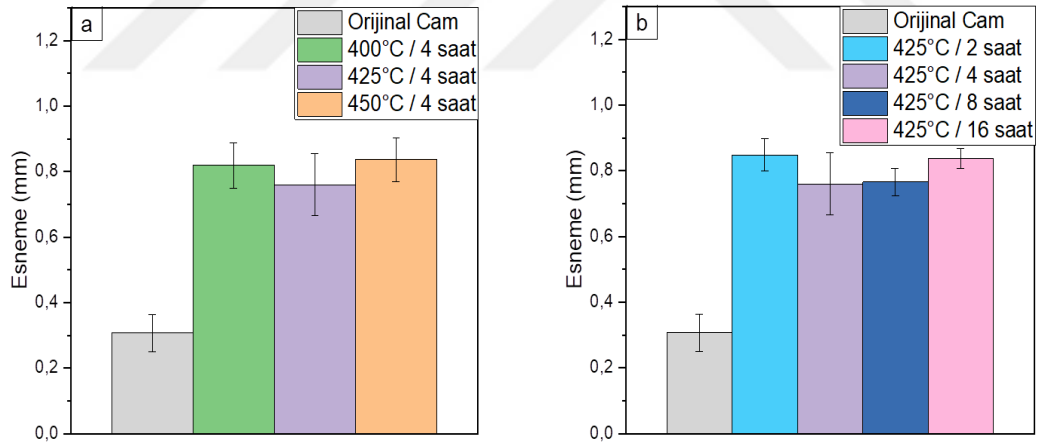
4 saat sabit sürede artan sıcaklık ile ve 425 °C sabit sıcaklıkta artan süre ile birlikte kimyasal temperlenmiş numunelerin halka üstü halka testi sonucu sıcaklık ve süre etkisi ile değişen kırılma yükü sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir.

Buna göre, kimyasal temperleme işlemi sonrası numunelerin kırılma anındaki yük değerlerinin arttığı, artan sıcaklık ve süre ile kırılma anındaki yük değerlerinde önemli bir değişim gerçekleşmediği gözlemlenmemiştir.



Şekil 4. 6 Desenli cam numunenin a) artan sıcaklık b) artan süre ile kırılma yükü sonuçları

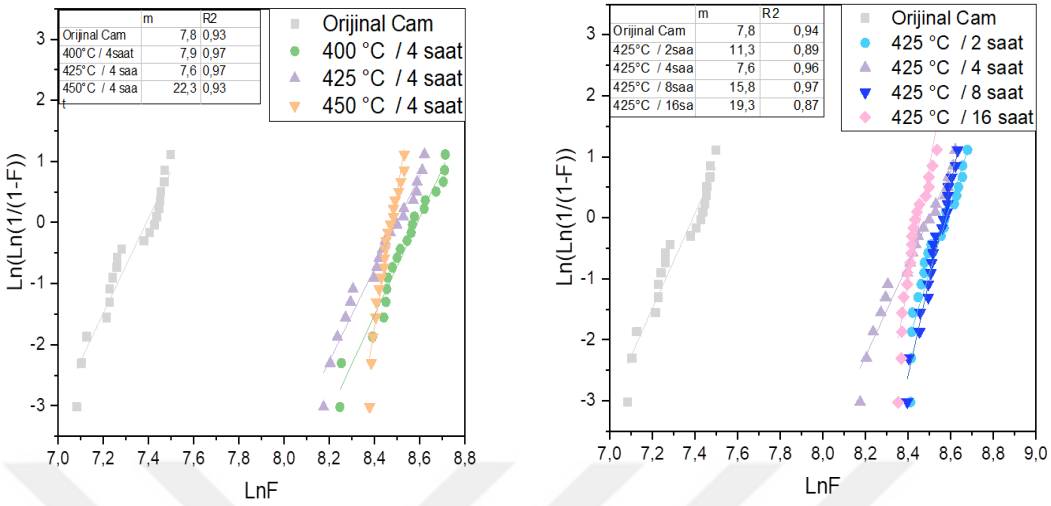
Kimyasal temperleme işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin halka üstü halka testi sonucu sıcaklık ve süre etkisine göre hesaplanan esneme değerleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Kimyasal temperleme işlemi sonrası orijinal numenin esneme değerlerinin 2,5 kata kadar arttığı ancak artan süre ya da sıcaklıkla esneme değerlerinin önemli bir değişim göstermediği tespit edilmiştir.



Şekil 4. 7 Desenli cam numunenin a)artan sıcaklık b)artan süre ile esneme sonuçları

Kimyasal temperlemeye sıcaklık ve sürenin etkisini incelemek için gerçekleştirilen testlerin ardından, cam numunelerin kırıldığı yük belirlenerek, kırılma yükü istatistiksel grafikleri Weibull dağılım grafikleri Şekil 4.8'de görüldüğü gibi çizilmiştir. Weibull dağılımlarına göre en güvenilir kimyasal temperleme sıcaklık ve süre koşulunun 450 °C sıcaklıkta ve 4 saat sürede olduğu görülmüştür. Bu

sonuçlar dikkate alınarak bundan sonraki deney gruplarında kimyasal temperleme 450 °C ve 4 saatte gerçekleştirileceği belirlenmiştir.

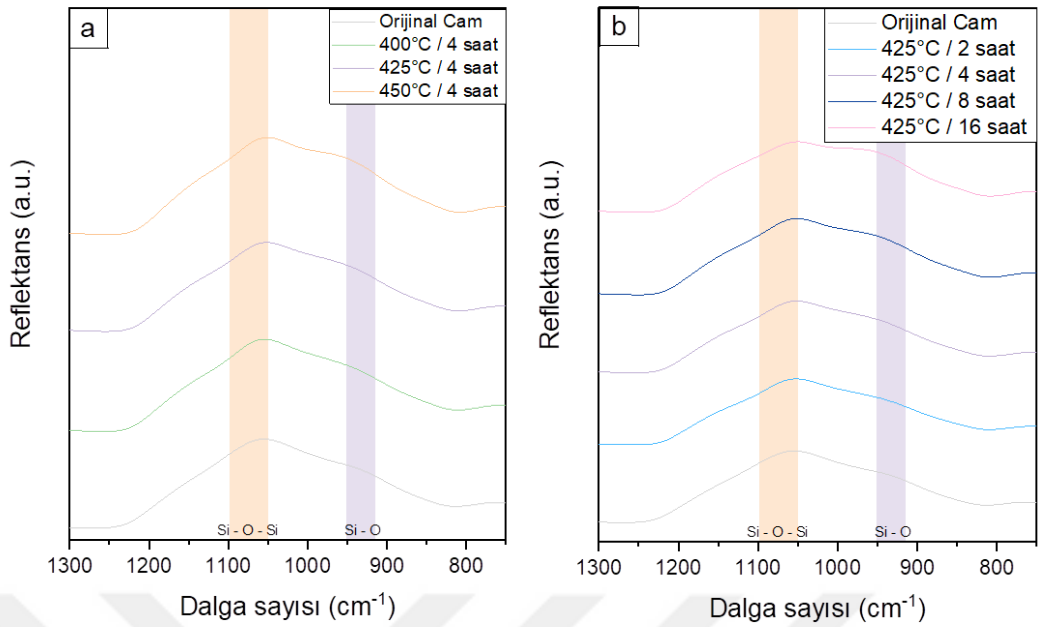


Şekil 4. 8 Desenli cam numunenin a)artan sıcaklık b)artan süre ile Weibull dağılım sonuçları

4.1.6 Bağ Yapısı Analizi

Kimyasal temperleme işleminden sonra iyon değişiminin cam ağ yapısına etkilerini incelemek için, kimyasal temperleme öncesi ve sonrası numunelerin FTIR bağ analizleri gerçekleştirilerek cam yapısı içerisinde bulunan bağların IR spektrumlarındaki değişimleri incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.9'da verilmiştir.

Orijinal numunelerde, Si—O—Si bağlarının asimetrik gerilme titreşimlerine (v_{as}(Si—O—Si)) ait dalga sayısı değerleri 1053 cm^{-1} olarak tespit edilirken; kimyasal temperleme sonrası v_{as}(Si—O—Si) titreşimleri benzer dalga sayılarında görülmüştür. Kimyasal temperleme işlemi ile sodyum ve potasyum iyon değişimi sonrasında cam yüzeyi alkali iyonunca zenginleşir [69]-[70]. Bunun sonucunda, 450°C'de 4 saat, 425°C'de 8 ve 16 saat yapılan kimyasal tempeleme işlemi sonrası, 950 cm^{-1}'de köprü yapmamış oksijen bağlarını temsil eden Si—O asimetrik gerilme titreşimlerinin (v_{as}(Si—O)) varlığı da tespit edilmiştir.



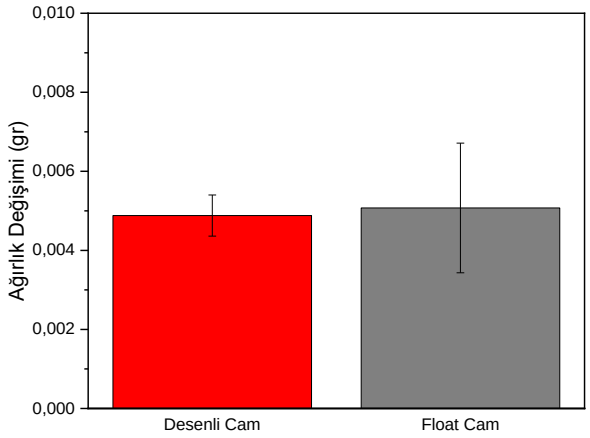
Şekil 4. 9 Desenli cam numunenin a)artan sıcaklık b)artan süre ile FTIR analiz sonuçları

4.2 Kimyasal Temperlemeye Desen Etkisi

Desen etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan 2. grup deneysel çalışmalarda, 2 mm desenli ve desensiz (float/düz) soda-kireç-silikat camları 4 saat süre ile 450 °C sıcaklıkta kimyasal temperlenmiştir.

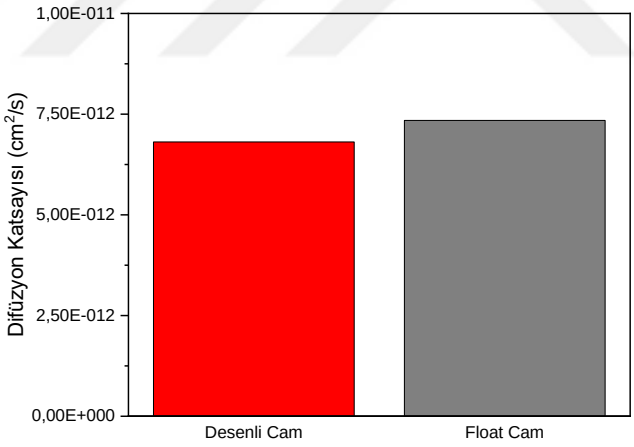
4.2.1 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı

2 mm desenli ve float camların, 4 saat sürede ve 450 °C sıcaklıkta kimyasal temperleme işlemini sırasında meydana gelen ağırlık değişimleri 35'er adet numuneyle yapılan deneyler sonucu belirlenmiştir. Ağırlık değişim sonuçlar Şekil 4.10'da verilmiştir. Buna göre elde edilen en yüksek ağırlık değişim değerinin kimyasal temperleme sonrası 2 mm float cam numunede meydana gelen ağırlık değişimi olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 10 Desenli ve float cam numunelerin ağırlık değişimi sonuçları

Elde edilen ağırlık değişimi sonuçlarından hareketle hesaplanan kütle ortalama difüzyon katsayısı hesabı sonuçları Şekil 4.11'de verilmiştir. En yüksek difüzyon katsayısı değerlerinin kimyasal temperleme sonrası 2 mm float cam numunede elde edildiği görülmektedir.

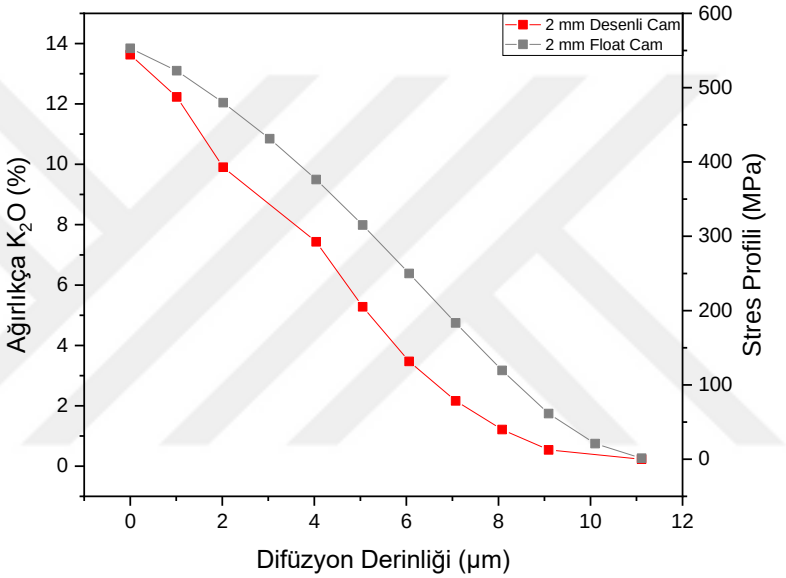


Şekil 4. 11 Desenli ve float cam numunelerin difüzyon katsayısı sonuçları

4.2.2 SEM/EDS Analizi Sonuçları

Desenli cam numuneler için, kimyasal temperleme işlemi sonrası cam kesit yüzeyden belirlenmiş bir çizgi üzerinde yaklaşık 1 µm aralıklarla linescan modunda SEM/EDS analizi ölçümleri yapılmış ve cam yüzeyinden cam kütle

merkezine doğru kimyasal temperleme sonrası potasyum (K^+) difüzyon derinliği değerleri hesaplanmıştır. Float cam numuneler için ise, kimyasal temperleme işlemi sonrasında cam yüzeyinde oluşan basma gerilimi (CS) ve gerilim derinliği (DoL) değerleri FSM cihazı kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonucu float cam numunelerin potasyum stres profilleri hesaplanmıştır. Desenli ve float cam numunelerin potasyum difüzyon derinliği sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.12'de verilmiştir. Buna göre düz cam numunenin potasyum difüzyon derinliği değerlerinin daha fazla olduğu görülmektedir.

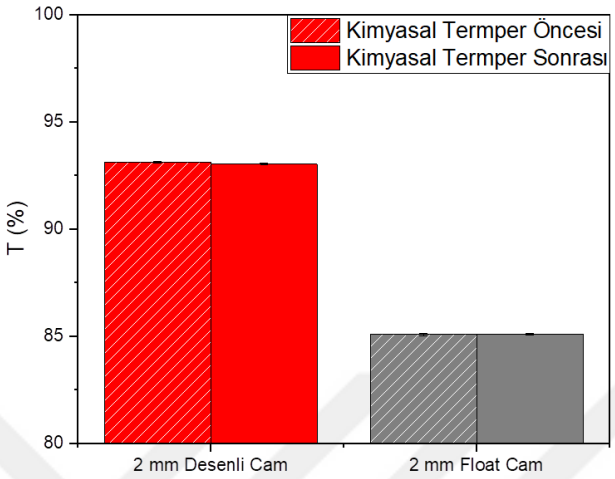


Şekil 4. 12 Desenli ve float cam numunelerin difüzyon derinliği sonuçları

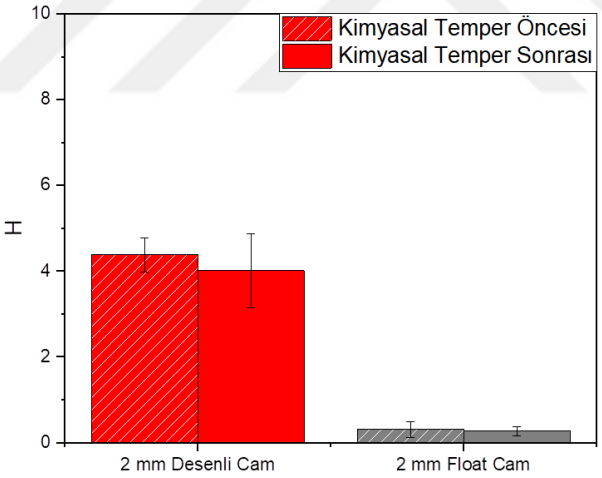
4.2.3 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi

Kimyasal temperlemeye desen etkisinin incelendiği çalışmada, temperleme işleminin camın optik özelliklerine olan etkisini belirlemek amacıyla, kimyasal temperleme öncesi ve sonrası 10'ar adet 2 mm kalınlığındaki desenli ve float cam numunenin görünür bölgede optik geçirgenlik ve pusluluk değerleri ölçülmüştür. Optik geçirgenlik sonuçları Şekil 4.13'te, pusluluk sonuçları ise Şekil 4.14'te verilmiştir.

Kimyasal temperlemenin ardından 2 mm kalınlığındaki desenli ve float cam numunelerin optik geçirgenlik ve pusluluk değerlerinin değişen desen ile belirgin bir değişim göstermediği görülmüştür.



Şekil 4. 13 Desenli ve float cam numunelerin optik geçirgenlik sonuçları



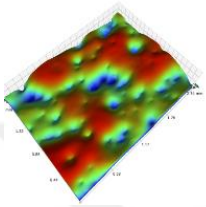
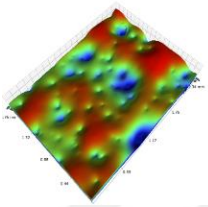
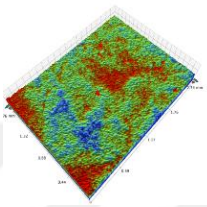
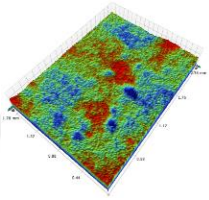
Şekil 4. 14 Desenli ve float cam numunelerin pusluluk sonuçları

4.2.4 Yüzey Pürüzlülük Analizi

Kimyasal temperleme işlemi sonrası desenli ve desensiz cam numunelerin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisini incelemek amacıyla, 2'şer adet 2 mm kalınlığında desenli ve float camların kimyasal temperleme işlemi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülükleri beyaz ışık interferometresi ile ölçülmüş ve numunelerin 5 ayrı

bölgesinden yapılan taramalar sonucunda hesaplanan ortalama değerler Tablo4.3'de verilmiştir.

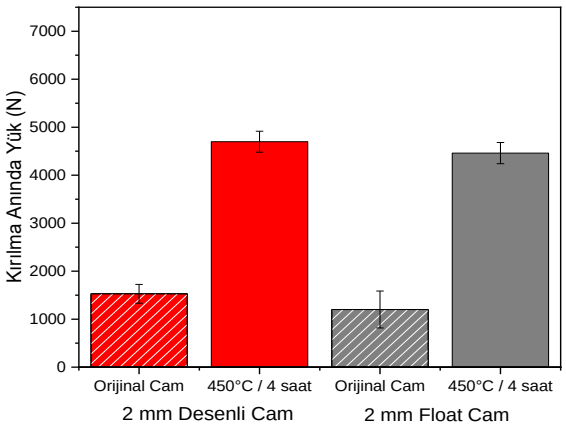
Tablo 4. 3 Desenli ve float cam numunelerin yüzey pürüzlülük sonuçları

Desenli Cam		**Float Cam**	
Orijinal	**Kimyasal Temperli**	**Orijinal**	**Kimyasal Temperli**
Ra:1,2 µm	Ra:1,2 µm	Ra:0,3 µm	Ra:0,3 µm
			

4.2.5 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi

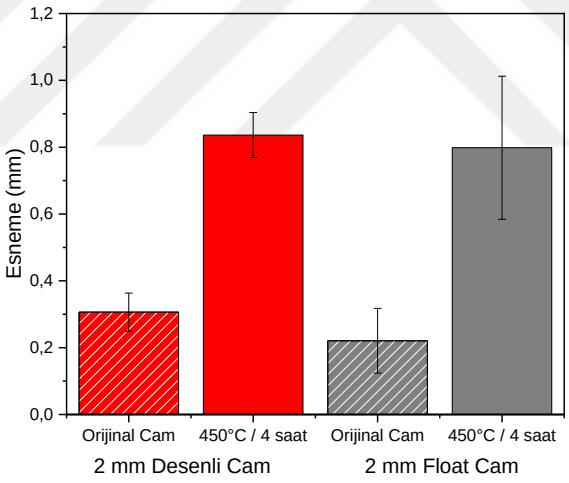
Desen etkisinin kimyasal temperleme işlemi öncesi ve sonrası numunelerin kırılma anındaki yük ve esneme değerlerine etkisi 30'ar adet 2 mm kalınlığında desenli ve float cam numunlere uygulanan halka üstü halka testi ile saptanmış ve sonuçlar sırasıyla Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.

Float camın kimyasal temperleme sonrası kırılma anında yük değerlerinin desenli cama kıyasla daha yüksek artışa sahip olduğu belirlenmiştir.



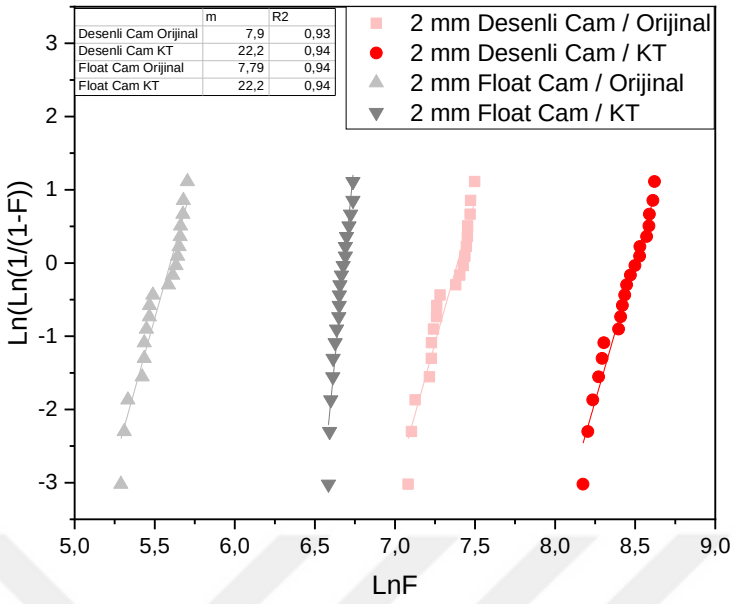
Şekil 4. 15 Desenli ve float cam numunelerin kırılma anında yük sonuçları

Kimyasal temperleme uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin halka üstü halka testi sonucu hesaplanan esneme değerleri Şekil 4.16'da verilmiştir. Desenli ve float camların esneme değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 16 Desenli ve float cam numunelerin esneme sonuçları

Kimyasal temperlemeye desen etkisini incelemek için gerçekleştirilen testlerin ardından, cam numunelerin kırıldığı yük belirlenerek, kırılma yükünün Weibull dağılım grafikleri çizilmiş ve sonuçlar Şekil 4.17'de verilmiştir. Buna göre, kimyasal temperleme işlemi sonrası desenli ve float camlarının Weibull modülünün 3 kata kadar artmıştır. Desen etkisi incelendiğinde desenli ve float camların Weibull modül değerlerinin benzer olduğu tespit edilmiştir.

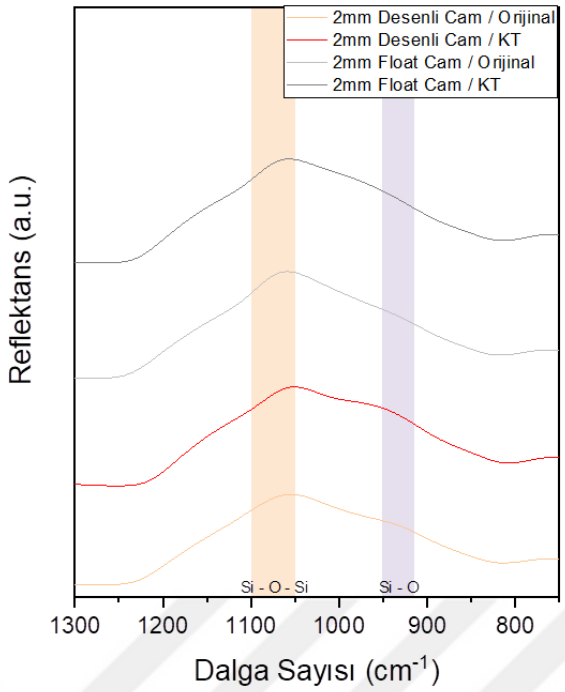


Şekil 4. 17 Desenli ve float cam numunelerin Weibull dağılım sonuçları

4.2.6 Bağ Yapısı Analizi

Kimyasal temperleme işleminden sonra iyon değişiminin cam ağ yapısına etkilerini incelemek için, orijinal ve kimyasal temperli desenli ve float cam numunelerin FTIR analizleri gerçekleştirilerek cam yapısı içerisinde bulunan bağların IR spektrumlarındaki değişimleri incelenmiştir.

Orijinal desenli ve float cam numunelerde, v_{as}(Si—O—Si) titreşimlerine ait dalga sayısı değerleri 1053 cm^{-1} olarak tespit edilirken; kimyasal temperleme sonrası v_{as}(Si—O—Si) titreşimleri benzer dalga sayılarında görülmüştür. Desenli ve float cam numuneleri kimyasal tempeleme işlemi sonrası incelendiğinde, desenli numunede, ayrıca 950 cm^{-1}'de köprü yapmamış oksijen bağlarını temsil eden v_{as}(Si—O) titreşimlerinin varlığı tespit edilmiştir.



Şekil 4. 18 Desenli ve float cam numunelerinin FTIR analiz sonuçları

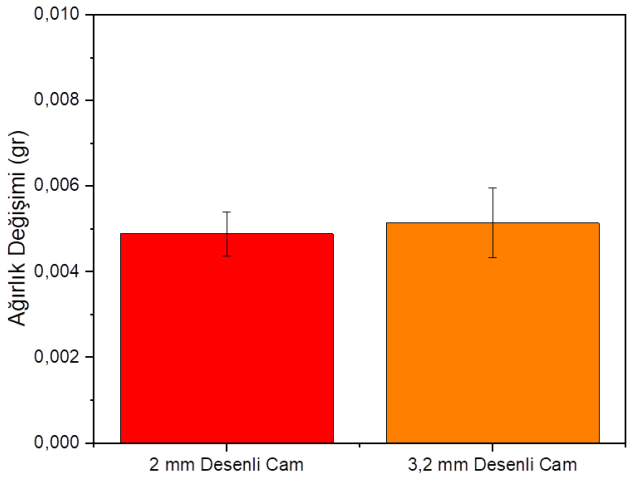
4.3 Kimyasal Temperlemeye Kalınlığın Etkisi

Cam kalınlığının kimyasal temperlemeye etkisinin incelendiği 3. grup deneysel çalışmalarda, 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki desenli soda-kireç-silikat camlar 4 saat süre ile 450 °C sıcaklıkta kimyasal temperlenmiştir.

4.3.1 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı

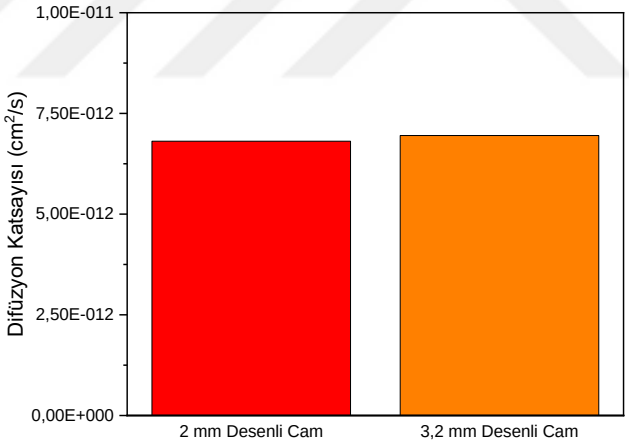
2 mm ve 3,2 mm desenli camların 4 saat süre ile ve 450 °C sıcaklıkta kimyasal temperleme işlemini sırasında meydana gelen ağırlık değişimleri 35'er adet numuneye yapılan ağırlık değişimi analizleri ile belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 4.19'da verilmiştir.

3,2 mm desenli cam numunenin kimyasal temperleme sonrası ağırlık değişimi değerlerinin 2 mm desenli cam numuneye göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. 19 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Elde edilen ağırlık değişimi sonuçlarından hareketle hesaplanan kütle ortalama difüzyon katsayısı hesabı sonuçları Şekil 4.20'de verilmiş ve difüzyon katsayısı değerlerinde önemli bir değişim olmadığı görülmüştür.



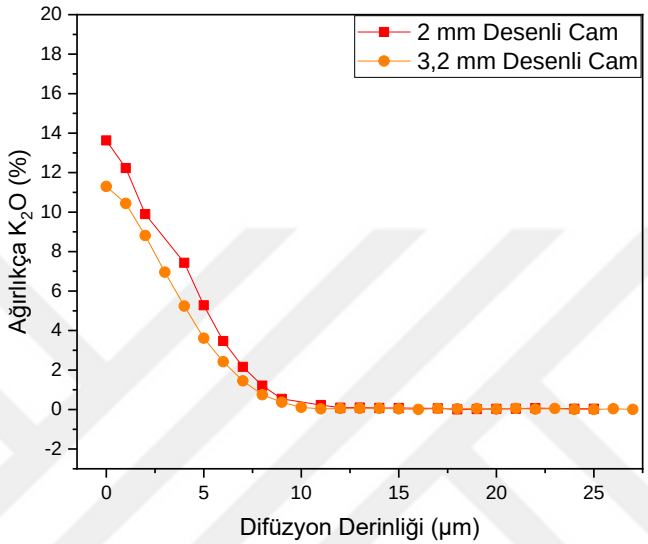
Şekil 4. 20 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin difüzyon katsayısı sonuçları

4.3.2 SEM/EDS Analizi Sonuçları

Kimyasal temperleme işlemi sonrası cam kesit yüzeyden belirlenmiş bir çizgi üzerinde yaklaşık 1 µm aralıklarla linescan modunda SEM/EDS analizi ölçümleri 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki desenli cam numuneler ile ölçülmüş ve cam

yüzeyinden cam kütle merkezine doğru kimyasal temperleme sonrası potasyum (K^+) difüzyon derinliği değerleri hesaplanmıştır. 2 mm ve 3,2 mm desenli cam numunelerin potasyum difüzyon derinliği sonuçları Şekil 4.21'de verilmiştir.

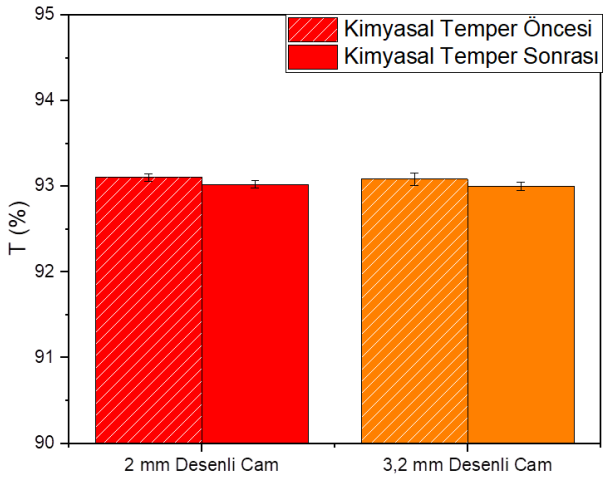
3,2 mm kalınlığındaki desenli camdaki K^+ difüzyon derinliğinin 2 mm kalınlığındaki desenli camdan az farkla da olsa yüksek olduğu tespit edilmiştir.



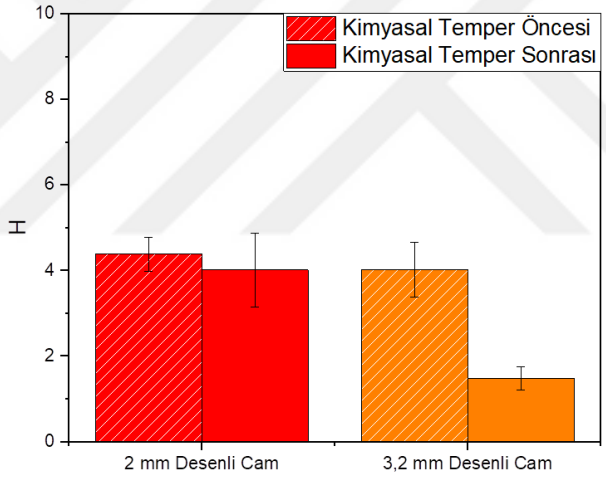
Şekil 4. 21 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin SEM/EDS analizi

4.3.3 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi

Kimyasal temperlemeye cam kalınlığının etkisinin incelendiği çalışmada, temperleme işleminin camın optik özelliklerine olan etkisini belirlemek amacıyla, kimyasal temperleme öncesi ve sonrası 10'ar adet 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki desenli cam numunenin görünür bölgede optik geçirgenlik ve pusluluk değerleri ölçülmüş. Optik geçirgenlik sonuçları Şekil 4.22'de, pusluluk sonuçları ise Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4. 22 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin optik geçirgenlik sonuçları

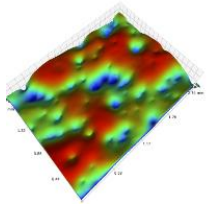
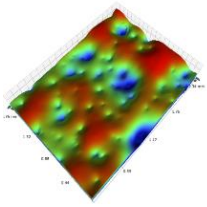
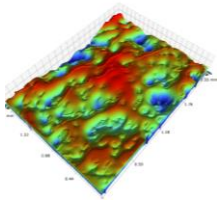
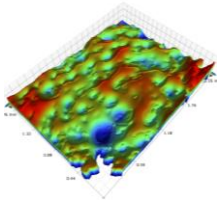


Şekil 4. 23 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin pusluluk sonuçları

4.3.4 Yüzey Pürüzlülük Analizi

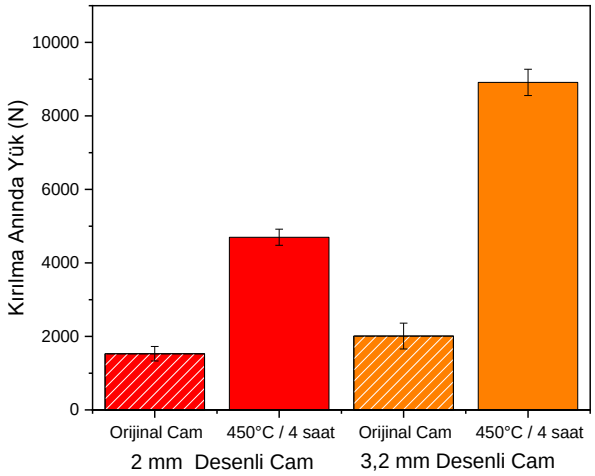
Kimyasal temperleme işlemi sonrası farklı kalınlıktaki cam numunelerin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisini incelemek amacıyla, 2'şer adet 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki desenli cam numunenin kimyasal temperleme işlemi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük analizleri beyaz ışık interferometresi ile ölçülmüş ve numunenin 5 ayrı bölgesinden yapılan taramalar sonucunda hesaplanan ortalama değerler Tablo 4.4'de verilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülük değerleri 3,2 mm kalınlığındaki desenli cam numuneler için hesaplanmıştır.

Tablo 4. 4 Orijinal ve temperlenmiş 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerin yüzey pürüzlülük sonuçları

2 mm Desenli Cam		**3,2 mm Desenli Cam**	
Orijinal	**Kimyasal Temperli**	**Orijinal**	**Kimyasal Temperli**
Ra:1,2 µm	Ra:1,2 µm	Ra:1,9 µm	Ra:1,8 µm
			

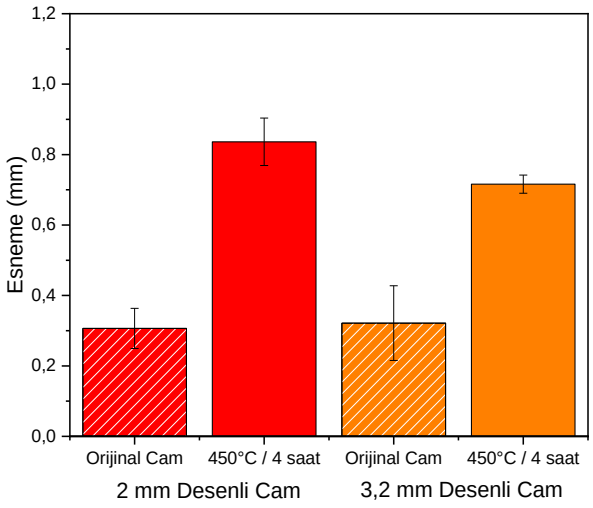
4.3.5 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi

Kimyasal temperleme işlemi öncesi ve sonrası numunelerin kırılma anındaki yük ve esneme değerleri 30'ar adet 2 mm ve 3,2 mm kalınlığında desenli cam numuneye uygulanan halka üstü halka testi ile saptanmıştır. Halka üstü halka testi sonucu kalınlık etkisinin kırılma anında yük değerleri Şekil 4.24'te verilmiştir. Numunelerin kalınlığının artmasıyla kırılma anındaki yük değerlerinin de arttığı görülmüştür. 3,2 mm camın kimyasal temperleme sonrası kırılma anında yük değerlerinin 2 mm cama kıyasla daha yüksek artışa sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kimyasal temperleme sonucu 2 mm desenli camın 3,2 mm orijinal cama göre 2 kat yüksek kırılma anındaki yük değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 4. 24 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin kırılma yükü sonuçları

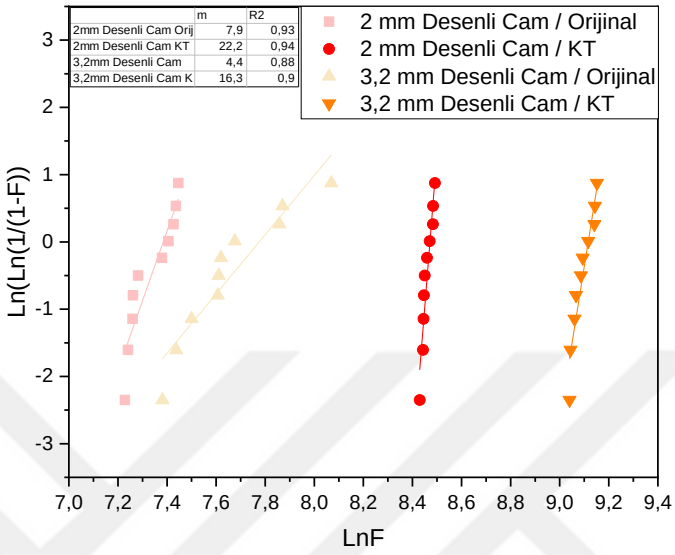
Halka üstü halka testi ile hesaplanan esneme değerleri Şekil 4.5'te verilmiş ve 2 mm desenli camın esneme değerlerinin 3,2 mm kalınlığındaki numuneden daha yüksek olduğu saptanmıştır. 2 mm camın kimyasal temperleme sonrası esneme değerlerinin 3,2 mm cama kıyasla daha yüksek artışa sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. 25 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin esneme sonuçları

Kimyasal temperlemeye desen etkisini incelemek için gerçekleştirilen testlerin ardından, cam numunelerin kırıldığı yük belirlenerek, kırılma yükü Weibull dağılım grafikleri Şekil 4.26'da verilmiştir. Buna göre kimyasal temperleme işlemi

sonrası 2 mm desenli camın Weibull modülü 3 kata kadar, 3,2 mm desenli camın Weibull modülü 4 kata kadar artmıştır. Kalınlık etkisi incelendiğinde 2 mm desenli camın Weibull modül değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir.

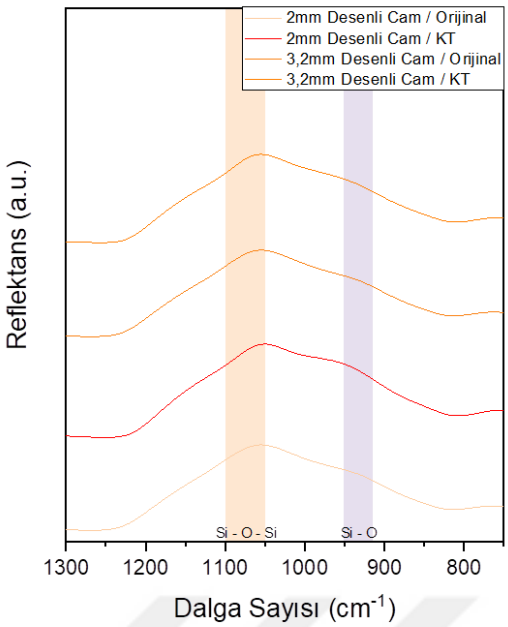


Şekil 4. 26 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin Weibull dağılım sonuçları

4.3.6 Bağ Yapısı Analizi

Kimyasal temperleme işleminden sonra iyon değişiminin cam ağ yapısına etkilerini incelemek için, orijinal ve kimyasal temperli 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki desenli cam numunelerin FTIR analizleri gerçekleştirilerek cam yapısı içerisinde bulunan bağların IR spektrumlarındaki değişimleri incelenmiştir.

2 mm ve 3,2 mm desenli orijinal cam numunelerde, v_{as}(Si—O—Si) titreşimlerine ait dalga sayısı değerleri 1053 cm^{-1} olarak tespit edilirken; kimyasal temperleme sonrası v_{as}(Si—O—Si) titreşimleri benzer dalga numaralarında görülmüştür. 2 mm ve 3,2 mm kalınlığa sahip desenli numuneleri kimyasal tempeleme işlemi sonrası incelendiğinde, 2 mm desenli numunede, 942 cm^{-1}'de ve 3,2 mm desenli numunede, 946 cm^{-1}'de v_{as}(Si—O) titreşimlerinin varlığı tespit edilmiştir.



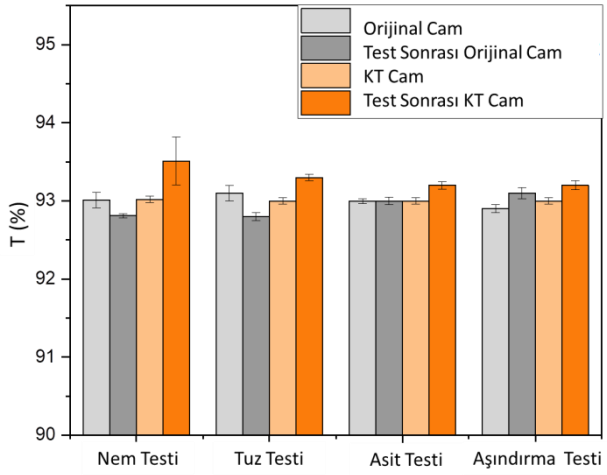
Şekil 4. 27 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin bağ yapısı sonuçları

4.4 Kimyasal Temperlemenin Atmosferik Dayanıma Etkisi

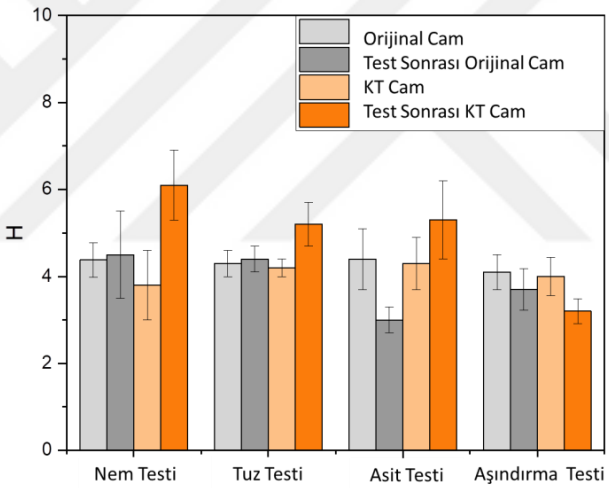
Son grup deneysel çalışmalarda, 2 mm desenli soda-kireç-silikat camların atmosferik koşullara dayanımını incelemek amacıyla, orijinal ve 4 saat süre ile 450 °C sıcaklıkta kimyasal temperlenmiş numunelere, nem, asit, tuz ve aşındırma testleri uygulanmıştır.

4.4.1 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi

Atmosferik koşullara dayanım testlerinin camın optik özelliklerine olan etkisini belirlemek amacıyla, orijinal ve kimyasal temperli 10'ar adet desenli cam numunelerin görünür bölgede optik geçirgenlik ve pusluluk değerleri ölçülmüştür. Atmosferik koşullara dayanım testleri; nem, tuz, asit ve aşındırma testleri öncesi ve sonrasında elde edilen optik geçirgenlik sonuçları Şekil 4.28'de, pusluluk değerleri sonuçları ise Şekil 4.29'da verilmiştir.



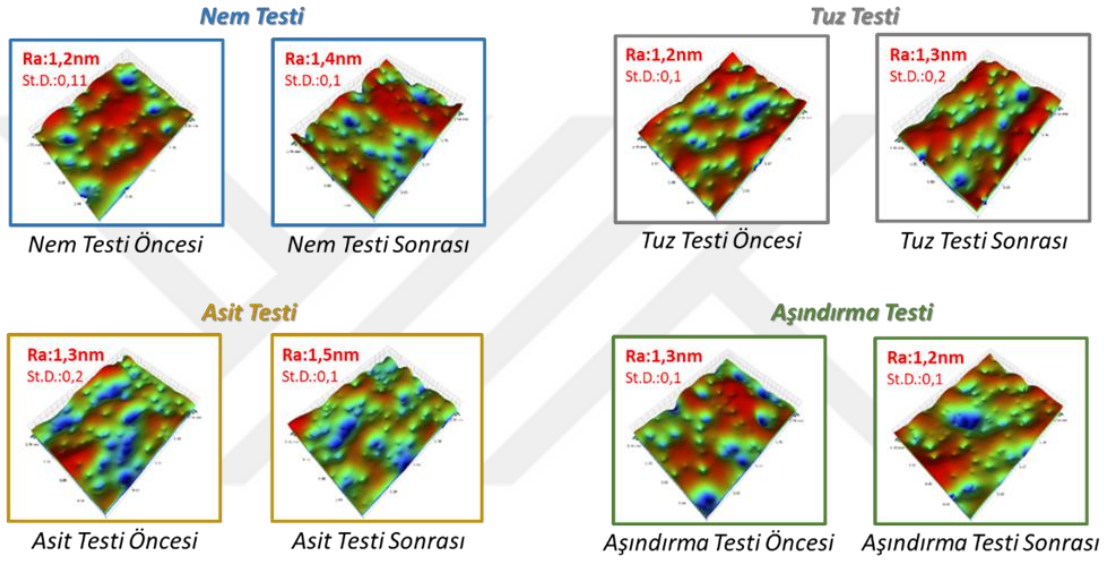
Şekil 4. 28 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası optik geçirgenlik sonuçları



Şekil 4. 29 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası pusluluk sonuçları

4.4.2 Yüzey Pürüzlülük Analizi

Nem, tuz, asit ve aşındırma testlerinin cam numunelerin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisini incelemek amacıyla, 2'şer adet test öncesi kimyasal temperli ve test sonrası kimyasal temperli numunelerin 5 ayrı bölgesinden yüzey pürüzlülük analizleri beyaz ışık interferometresi ile ölçülmüştür. Yapılan taramalar sonucunda ortalama değerler hesaplanarak Şekil 4.30'da verilmiştir. Atmosferik koşullara dayanım testleriyle birlikte kimyasal temperlenmiş numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin değişmediği görülmektedir.

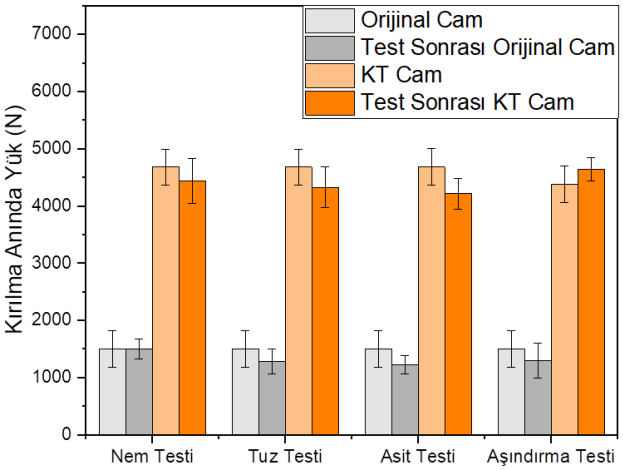


Şekil 4. 30 4 saat ve 450 °C'de temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük sonuçları

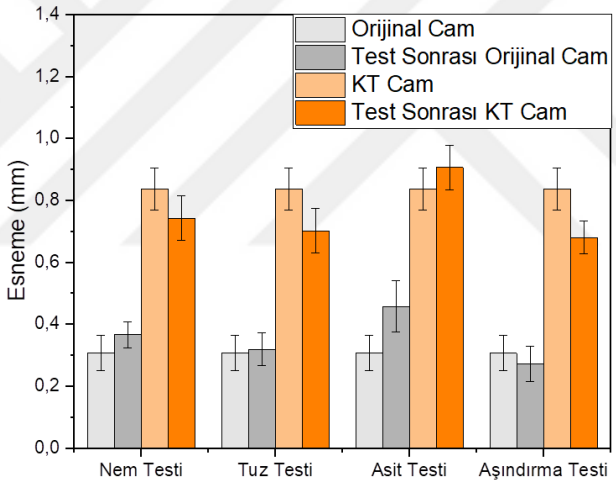
4.4.3 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi

Nem, tuz, asit ve aşındırma testleri ile birlikte orijinal ve kimyasal temperli camların kırılma anında yük değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 4.31'de esneme değerleri Şekil 4.32'de verilmiştir.

Atmosferik dayanım testleri sonrası kırılma anındaki yük ve esneme değerlerinde bir miktar azalma gözlemlense de, bu değerler standart sapma değerlerinin içinde yer aldığı için anlamlı bir değişim gözlemlenmediği belirlenmiştir.



Şekil 4. 31 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası kırılma yükü sonuçları

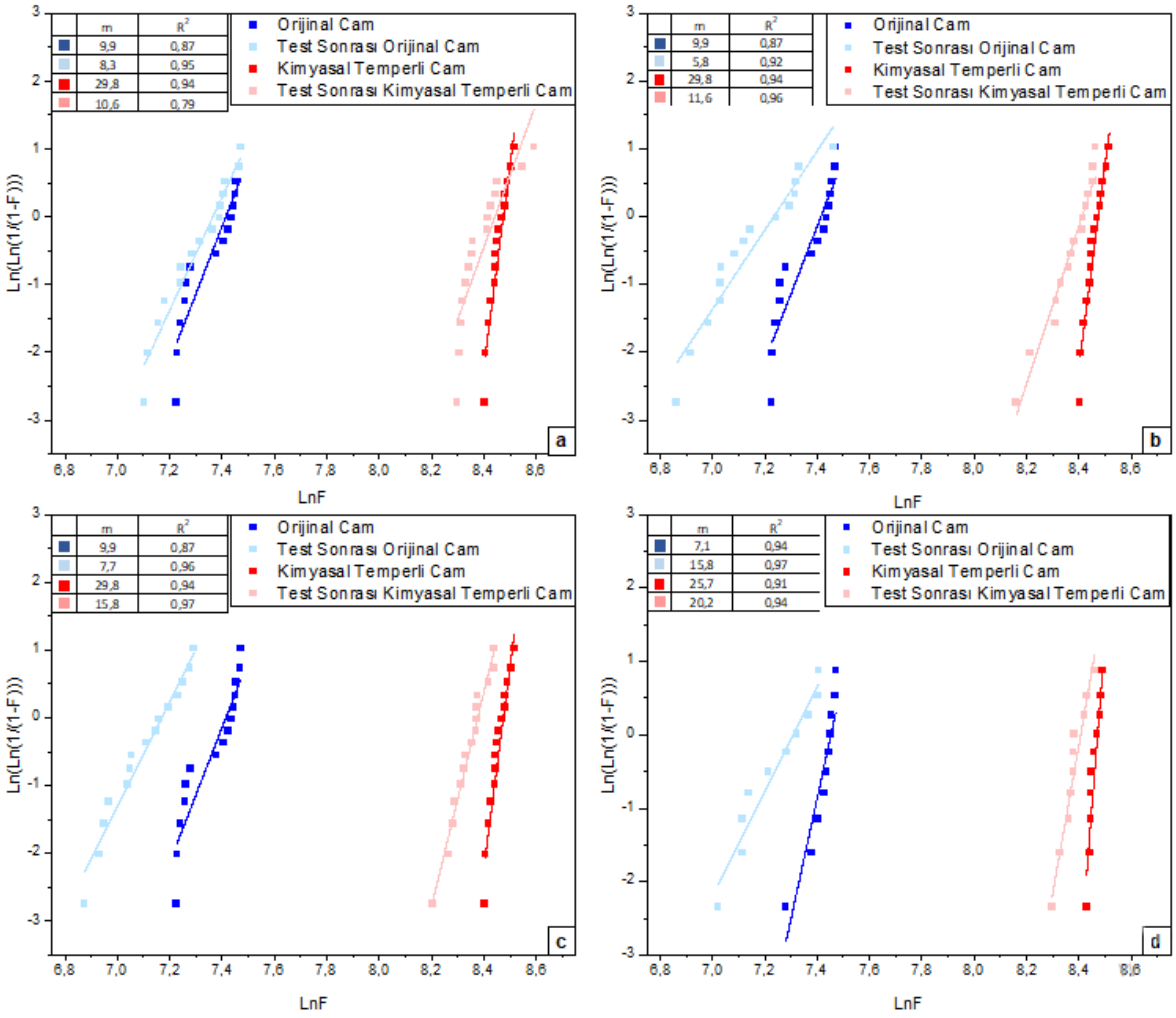


Şekil 4. 32 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası esneme sonuçları

Kimyasal temperli camların atmosferik dayanımını incelemek için gerçekleştirilen testlerin ardından, cam numunelerin kırıldığı yük belirlenerek, kırılma yükü istatistiksel sonuçları içeren Weibull dağılım grafikleri Şekil 4.33'te verilmiştir.

Kimyasal temperleme işlemi sonrası Weilbull modülü değerleri en yüksek değerine ulaşmıştır. Nem testi sonrası weibull modülü 10,6, tuz testi sonrası Weilbull modülü 11,6, asit testi sonrası weibull modülü 15,8 ve aşındırma esti sonrası weibull modülü 20,2 olarak tespit edilmiştir. Buna göre orijinal numunelerin

kimyasal temperleme işleminin ardından Weibull modülü en yüksek değere sahip olurken, aşındırma testi sonrası uygulanan kimyasal temperleme işlemi ikinci en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 33 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası Weibull sonuçları

4.4.4 Bağ Yapısı Analizi

Kimyasal temperleme işleminden sonra iyon değişiminin cam ağ yapısına etkilerini incelemek için, orijinal ve kimyasal temperli numunelerin atmosferik dayanım testleri öncesi ve sonrasında numunelerin FTIR analizleri gerçekleştirilerek cam yapısı içerisinde bulunan bağların IR spektrumlarındaki değişimleri incelenmiştir.

Orijinal ve nem, tuz, asit ve aşındırma testi sonrası orijinal numunelerde, Si—O—Si bağlarının asimetrik gerilme titreşimlerine ait dalga sayısı değerleri 1053 cm^{-1}

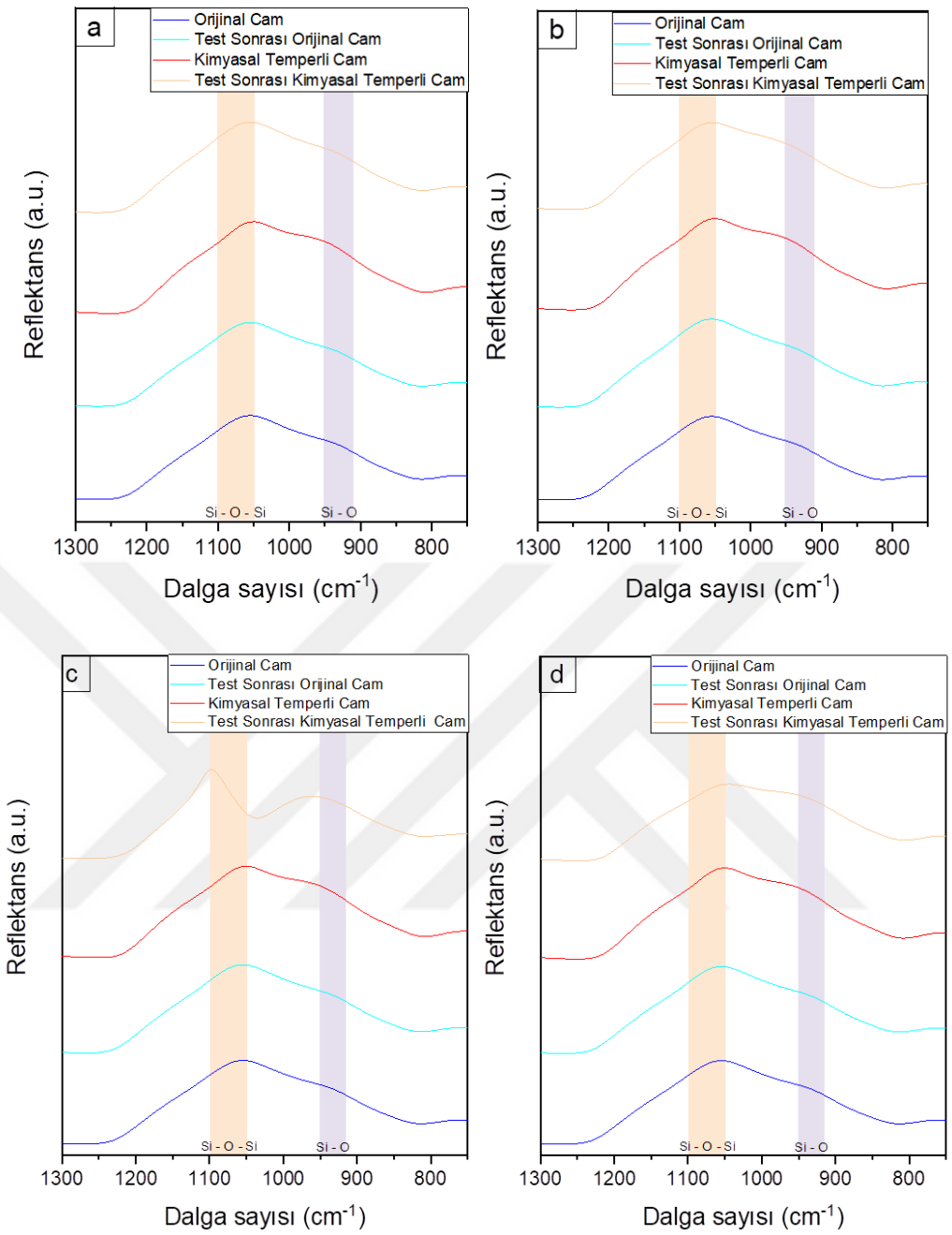
olarak tespit edilirken; kimyasal temperleme sonrası v_{as}(Si—O—Si) titreşimleri benzer dalga numaralarında görülmüştür. Kimyasal tempeleme işlemi sonrası numunede ayrıca, 950 cm^{-1}'de köprü yapmamış oksijen bağlarını temsil eden Si—O asimetrik gerilme titreşimlerinin varlığı tespit edilmiştir.

Nem testi sonrasında cam yüzeyinde Si—O—Si bağlarının kırılıp Si—OH bağlarının oluşmasıyla cam yüzeyinde korozyon meydana gelir [69]-[70]. Buna bağlı olarak, nem testi sonrası uygulanan kimyasal temperleme işleminin ardından numunelerde v_{as}(Si—O—Si) titreşimlerine ait dalga sayısı değerleri 1049 cm^{-1} olarak tespit edilirken, 940 cm^{-1}'de köprü yapmamış oksijen bağlarını temsil eden v_{as}(Si—O) titreşimlerinin varlığı tespit edilmiştir.

Tuz testi sonrası cam yüzeyinde alkali iyonunca meydana gelen zenginleşmeye bağlı olarak, kimyasal temperlemeye tabi tutulmuş numunelerde Si—O—Si bağlarının asimetrik gerilme titreşimlerine ait dalga sayısı değerleri 1057 cm^{-1} olarak tespit edilirken, köprü yapmamış oksijen bağlarını temsil eden Si—O asimetrik gerilme titreşimleri 933 cm^{-1}'de tespit edilmiştir.

Asit testi sonrası uygulanan kimyasal temperleme işleminin ardından numunelerde v_{as}(Si—O—Si) 1099 cm^{-1} olarak tespit edilirken, 960 cm^{-1}'de v_{as}(Si—O) titreşimlerinin varlığı tespit edilmiştir.

Aşındırma testi sonrası uygulanan kimyasal temperleme işleminin ardından numunelerde v_{as}(Si—O—Si) titreşimleri 1046 cm^{-1}'de tespit edilirken, 939 cm^{-1}'de v_{as}(Si—O) titreşimlerinin varlığı tespit edilmiştir.



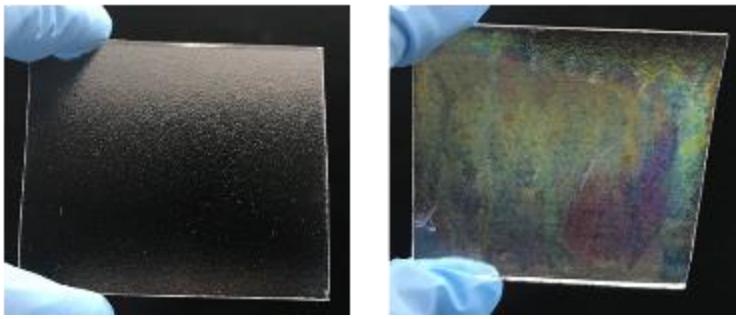
Şekil 4. 34 Orijinal ve temperlenmiş numunenin a)nem testi b) tuz testi c)asit testi d)aşındırma testi sonrası FTIR analiz sonuçları

4.4.5 Makro İnceleme

Kimyasal temperli numunelerin atmosferik koşullara dayanım testlerinden sonrası yüzeylerinde gözle görülür bir değişim olup olmadığı incelenmiş ve makro görüntüleri alınmıştır.

4.4.5.1 Nem Testi Makro İncelemesi

Numunelerin nem testi öncesi ve sonrası makro görüntüleri Şekil 4.35'te verilmiştir. Test sonucunda cam yüzeyinde gözle görülür bir optik bozulma olduğu görülmüştür.



Nem Testi Öncesi
2 mm Desenli Cam

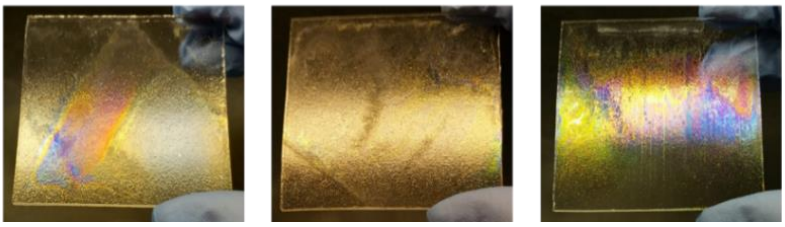
Nem Testi Sonrası
2 mm Desenli Cam

Şekil 4. 35 Kimyasal temperlenmiş cam numuneye ait nem testi öncesi ve sonrası makro görüntü

Elde edilen sonuç ışığında, numunelerin kimyasal temperleme sonrası elde ovularak yıkanmasının yetersiz olduğu düşünülerek; 450 °C sıcaklıkta 4 saatte kimyasal temperlemenin ardından farklı yıkama teknikleri uygulanmıştır. Bunlar; elde yıkama, ultrasonik banyoda 25°C sıcaklıkta yıkama ve ultrasonik banyoda 50 °C sıcaklıkta yıkama uygulanarak yıkamanın etkisi incelenmiştir. Tablo 4.5'de yıkama koşulları özetlenmiş olup; yıkama sonrası numunelere yapılan nem testi sonrası numunelerin makro görüntüleri Şekil 4.36'da, nem testi sonrası yapılan geçirgenlik ve pusluluk analiz sonuçları Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4. 5 Farklı yıkama koşullarına tabi tutulmuş numunelerin nem testi sonrası optik geçirgenlik ve pusluluk değerleri

Kimyasal Temperleme	Temizleme	Geçirgenlik (%)	Pusluluk
450°C - 4saat	Elde Yıkama	93,1	3,8
450°C - 4saat	5dk Ultrasonik Banyo	93,6	4,4
450°C - 4saat	5dk 50°C Ultrasonik Banyo	93,7	10,2



Elde Yıkama | 5dk Ultrasonik Banyoda | 5dk 50°C Ultrasonik Banyoda

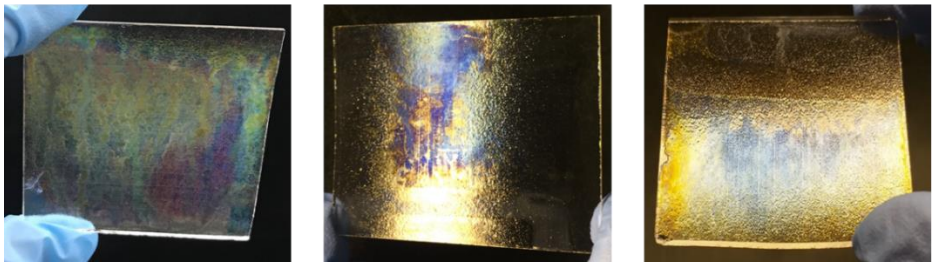
Şekil 4. 36 Farklı yıkama koşullarına tabi tutulmuş numunelerin nem testi sonrası makro görüntüleri

Şekil 4.36'da görüldüğü gibi, farklı yıkama koşulları sonrası yapılan nem testi sonucu yüzeydeki bozulmaların değişmediği görülmüştür. Kimyasal temperleme işleminde kullanılan tuzun safsızlığının ve pH seviyesinin temperleme sırasında cam yüzeyinde istenmeyen etkiler yaratabileceği bu çalışma kapsamında görülmüştür. Optik bozulmanın kimyasal temperleme tuzundan kaynaklanabileceği düşünülerek, farklı safiyete sahip potasyum tuzları kullanılarak kimyasal temperlenen numunelerin nem testleri tekrarlanmıştır. Kimyasal temperlemede kullanılan tuzların kimyasal analizleri Tablo 4.6 'da görülmektedir.

Tablo 4. 6 Kullanılan tuzların kimyasal analiz karşılaştırmaları

Analiz	**Kirlenmiş Tuz (KNO3)**	**Temiz Tuz (KNO3)**	**Haifa Tuzu (KNO3)**
Na, ppm	3582	151	1472
Ca, ppm	-*	< 5,00	-*
Mg, ppm	-*	-*	-*
Cr, ppm	< 5,00	-*	< 5,00
Si, ppm	< 5,00	< 5,00	< 5,00
S, ppm	< 5,00	-*	< 5,00
Cl-, ppm	-**	0,0015	-**
pH (%5 çözelti)	10,23	5,73	8,21

Kullanılmış Lema tuzu, temiz Lema tuzu ve Haifa tuzu kullanılarak kimyasal temperlenen numunelere temperleme sonrası nem testi uygulanmıştır. Farklı tuzlarla gerçekleştirilen kimyasal temperlemenin ardından uygulanan nem testinin sonucunda elde edilen makro görüntüler Şekil 4.37'de görülmektedir. Test sonucunda cam yüzeyinde gözle görülür bir optik bozulma olduğu belirlenmiştir.

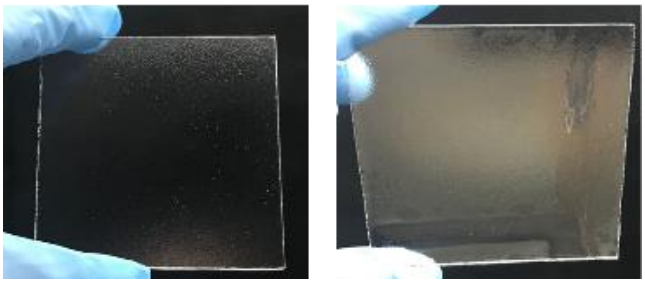


Kullanılmış Lema Tuzu | Temiz Lema Tuzu | Haifa Tuzu

Şekil 4. 37 Farklı tuzlarda kimyasal temperlenmiş numunelerin nem testi sonrası makro görüntüleri

4.4.5.2 Tuz Testi Makro İncelemesi

Numunelerin tuz testi öncesi ve sonrası makro görüntüleri Şekil 4.38'de verilmiştir. Tuz testi sonrası yapılan incelemede cam yüzeyinde bir bozulma olduğu saptanmıştır



Tuz Testi Öncesi 2 mm Desenli Cam | Tuz Testi Sonrası 2 mm Desenli Cam

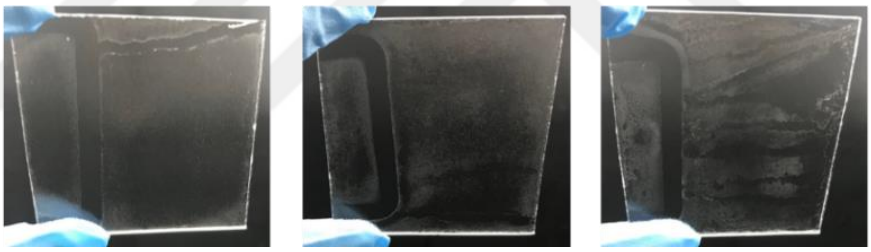
Şekil 4. 38 Kimyasal temperlenmiş cam numuneye ait tuz testi öncesi ve sonrası makro görüntü

Elde edilen sonuçlar ışığında, numunelerin kimyasal temperleme sonrası elde ovularak yıkamanın yetersiz olduğu düşünülerek; 450 °C sıcaklıkta 4 saatte kimyasal temperlemenin ardından farklı yıkama teknikleri uygulanmıştır. Bunlar;

elde yıkama, ultrasonik banyoda 25 °C sıcaklıkta yıkama ve ultrasonik banyoda 50 °C sıcaklıkta yıkama uygulanarak yıkamanın etkisi incelenmiştir. Tablo 4.7'de yıkama koşulları özetlenmiş olup; yıkama sonrası numunelere yapılan tuz testi sonrası numunelerin makro görüntüleri Şekil 4.39'da, tuz testi sonrası yapılan geçirgenlik ve pusluluk analiz sonuçları Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4. 7 2 mm kalınlığındaki desenli kimyasal temperlenmiş yıkama etkisinin tuz testi sonrası optik geçirgenlik ve pusluluk değerleri

Kimyasal Temperleme	Temizleme	Geçirgenlik (%)	Pusluluk
450°C - 4 saat	Elde Yıkama	93,1	3,8
450°C - 4saat	5dk Ultrasonik Banyo	93,0	6,1
450°C - 4saat	5dk 50°C Ultrasonik Banyo	93,1	6,5



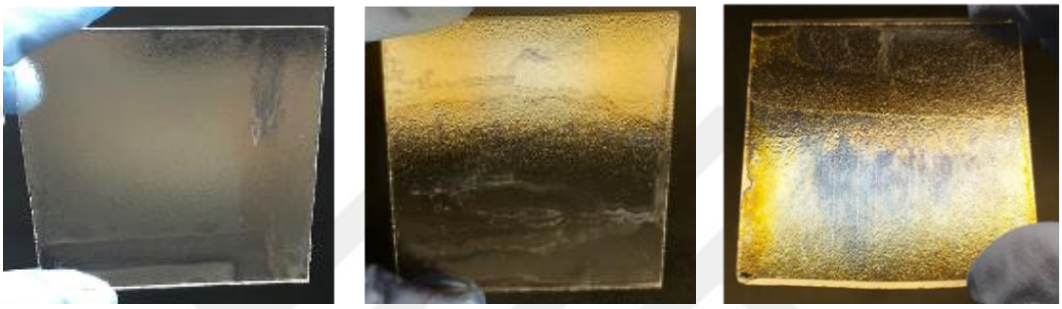
Elde Yıkama | 5dk Ultrasonik Banyoda | 5dk 50°C Ultrasonik Banyoda

Şekil 4. 39 Farklı yıkama koşullarına tabi tutulmuş numunelerin tuz testi sonrası makro görüntüleri

Şekil 4.39'da görüldüğü, farklı yıkama koşulları sonrası yapılan tuz testi sonucu yüzeydeki bozulmaların değişmediği görülmüştür. Kimyasal temperleme işleminde kullanılan tuzun safsızlığının ve pH seviyesinin temperleme sırasında cam yüzeyinde istenmeyen etkiler yaratabileceği bu çalışma kapsamında görülmüştür. Optik bozulmanın kimyasal temperleme tuzundan kaynaklanabileceği düşünülerek, farklı safiyete sahip potasyum tuzları kullanılarak kimyasal

temperlenen numunelerin tuz testleri tekrarlanmıştır. Kimyasal temperlemede kullanılan tuzların kimyasal analizleri Tablo 4.6'da verilmişti.

Kullanılmış Lema tuzu, temiz Lema tuzu ve Haifa tuzu kullanılarak kimyasal temperlenen numunelere temperleme sonrası tuz testi uygulanmıştır. Farklı tuzlarla gerçekleştirilen kimyasal temperlemenin ardından uygulanan tuz testinin sonucunda elde edilen makro görüntüler Şekil 4.40'ta görülmektedir. Test sonrası yapılan incelemede cam yüzeyinde gözle görülür bir optik bozulma olduğu saptanmıştır.

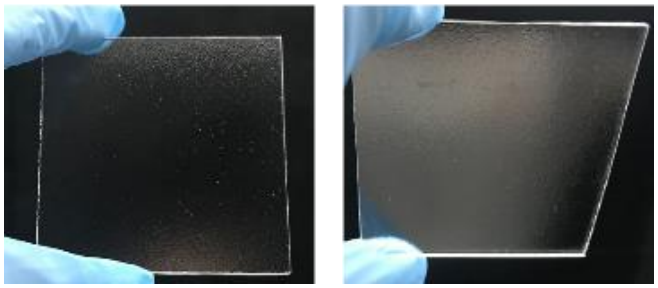


Kullanılmış Lema Tuzu Temiz Lema Tuzu Haifa Tuzu

Şekil 4. 40 Farklı alkali oranlarına sahip tuzlarda temperlenmiş numunelerin tuz etkisinin tuz testi sonrası makro görüntüleri

4.4.5.3 Asit Testi Makro İncelemesi

Numunelerin asit testi öncesi ve sonrası makro görüntüleri Şekil 4.41'de verilmiştir. Asit testi sonrası yapılan incelemede cam yüzeyinde gözle görülür bir bozulma olmadığı tespit edilmiştir.



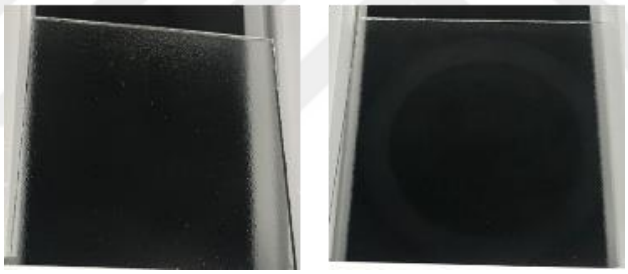
Asit Testi Öncesi 2 mm Desenli Cam

Asit Testi Sonrası 2 mm Desenli Cam

Şekil 4. 41 Kimyasal temperlenmiş cam numuneye ait asit testi öncesi ve sonrası makro görüntüsü

4.4.5.4 Aşındırma Testi Makro İncelemesi

Numunelerin aşındırma testi öncesi ve sonrası makro görüntüleri Şekil 4.42'de verilmiştir. Aşındırma testi sonrası yapılan incelemede cam yüzeyinde gözle görülür bir bozulma olmadığı saptanmıştır.



Aşındırma Testi Öncesi 2 mm Desenli Cam

Aşındırma Testi Sonrası 2 mm Desenli Cam

Şekil 4. 42 Kimyasal temperlenmiş cam numuneye ait aşındırma testi öncesi ve sonrası makro görüntüsü

5
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu tez çalışması kapsamında, fotovoltaik sistemlerde kullanılan desenli ince camların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla farklı süre ve sıcaklıklarda kimyasal temperlenen camların mekanik ve optik özelliklerinin ve atmosferik dayanımlarının incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarının yorumlanması bu bölümde verilmiştir. Kimyasal temperlemeye sıcaklık ve sürenin, cam yüzeyindeki desenin ve cam kalınlığının etkisinin ve kimyasal tempeleme işleminin ardından camların atmosferik koşullara dayanımlarının incelendiği çalışmaların sonuçları 4 ayrı grupta sunulmuştur.

5.1 Kimyasal Temperlemeye Sıcaklık ve Süre Etkisi

1. grup deneysel çalışmalar sonucunda 2 mm desenli soda-kireç-silikat camların kimyasal temperleme davranışına sıcaklık ve süre etkisini incelenmiştir. Bu doğrultuda, kimyasal temperleme işleminin ardından ağırlık değişimi, kütle ortalama difüzyon katsayısı, difüzyon derinliği, optik geçirgenlik ve pusluluk, yüzey pürüzlük değerleri, kırılma yükü, esneme değeri, weibull dağılımı ve bağ yapısı sonuçları analiz edilmiştir.

5.1.1 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı

2 mm desenli ince soda-kireç-silikat cam numunelerine ağırlık değişiminin sıcaklığa ve süreye bağlı sonuçları Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5. 1 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile ağırlık değişimi sonuçları

	4 saat		
Ağırlık Değişimi (g)	**400 °C**	**425 °C**	**450 °C**
Ortalama	0,0019	0,0033	0,0049
Standart Sapma	0,0006	0,0002	0,0005

	425 °C			
Ağırlık Değişimi (g)	**2 saat**	**4 saat**	**8 saat**	**16 saat**
Ortalama	0,0022	0,0033	0,0050	0,0064
Standart Sapma	0,0002	0,0002	0,0002	0,0006

Sonuçlar göz önüne alındığında, difüzyonu hızlandırıcı etkiye sahip olan süre ve sıcaklık arttıkça iyon değişimi işleminin verimi ve yapıya katılan potasyum iyonlarının miktarı artmıştır. 4 saat sabit sürede gerçekleştirilen kimyasal temperleme işleminin ardından ağırlık değişim değerlerinin 400 °C'de 0,0019 g, 425 °C'de 0,0033 g ve 450 °C'de 0,0049 g olduğu hesaplanmış ve artan sıcaklık ile birlikte arttığı görülmüştür. Benzer şekilde 425 °C'de artan süreyle numunelerin ağırlık değişimin arttığı ve en yüksek ağırlık değişiminin 425 °C sıcaklıkta ve 16 saatte gerçekleşen kimyasal temperleme işleminden sonra 0,0064 g olduğu görülmüştür. Bu durum iyon değişimi miktarının artan süre ile daha fazla oranda arttığını göstermektedir.

Elde edilen ağırlık değişimi sonuçlarından hareketle hesaplanan kütle ortalama difüzyon katsayısı değerlerinin sonuçları Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo 5. 2 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile difüzyon katsayısı sonuçları

	4 saat			
Difüzyon Katsayısı (cm^2/s)	**400 °C**	**425 °C**		**450 °C**
Ortalama	1,02E-12	3,15E-12		6,81E-12
	425 °C			
Difüzyon Katsayısı (cm^2/s)	**2 saat**	**4 saat**	**8 saat**	**16 saat**
Ortalama	1,29E-12	3,15E-12	7,16E-12	1,16E-11

Sonuçlara göre artan kimyasal temperleme sıcaklığı ve süresi ile birlikte difüzyon katsayısı değerlerinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Artan kimyasal temperleme sıcaklığı ile difüzyon katsayısı değeri 400 °C'de 1,02E-12 cm^2/s'den, 450 °C'de 6,81E-12 cm^2/s'ye arttığı hesaplanmıştır. Benzer şekilde artan kimyasal temperleme süresi ile difüzyon katsayısı değeri 2 saatte 1,29E-12 cm^2/s'den, 16 saatte en yüksek değere ulaşıp 1,16E-11 cm^2/s olarak hesaplanmıştır.

Artan sıcaklık ve süre ile beraber difüzyon katsayısının yaklaşık 2 kat artış göstermiştir. Sonuç olarak, sıcaklığın ve sürenin iyon difüzyonu üzerinde hızlandırıcı etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

5.1.2 SEM/EDS Analizi Sonuçları

Kimyasal temperleme işlemi sonrası cam numunelere kesit yüzeyden belirlenmiş bir çizgi üzerinde yaklaşık 1 µm aralıklarla linescan modunda SEM/EDS analizi ölçümleri 1'er adet 2 mm desenli cam numune ile yapılmış ve cam yüzeyinden cam kütle merkezine doğru kimyasal temperleme sonrası potasyum (K^+) difüzyon derinliği grafikleri çizilmiştir. Farklı süre ve sıcaklıkta temperlenmiş numunelerin SEM/EDS analizi sonuçları Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5. 3 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile SEM/EDS analizi

	4 saat			
	400 °C	**425 °C**		**450 °C**
K^+ Difüzyon Derinliği (µm)	6	8		11
	425 °C			
	2 saat	**4 saat**	**8 saat**	**16 saat**
K^+ Difüzyon Derinliği (µm)	7	8	11	16

4 saat sabit sürede, artan sıcaklık ile birlikte ve 425 °C sabit sıcaklıkta, artan süre ile birlikte difüzyon derinliği artmaktadır. Potasyum iyonu için difüzyon derinliği artan sıcaklıkla artmış, 400 °C'de 6 µm, 425 °C'de 8 µm ve 450 °C'de 11 µm olarak ölçülmüştür. Artan kimyasal temperleme süresiyle birlikte K^+ difüzyon derinliği artmış ve en yüksek potasyum difüzyon derinliği 16 saat sürede 16 µm olarak ölçülmüştür. Sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda sıcaklık ve sürenin iyon difüzyonu derinliğini arttırdığı belirlenmiştir.

5.1.3 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi

Kimyasal temperlemenin ardından 2 mm kalınlığındaki desenli cam numunelerin artan sıcaklık ve süre ile birlikte optik geçirgenlik analizleri sonuçları Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5. 4 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süreye göre optik geçirgenlik sonuçları

			Optik Geçirgenlik (%)	
			Kimyasal Temperleme Öncesi	**Kimyasal Temperleme Sonrası**
4 saat	**400 °C**	**Ortalama**	93,0	93,0
		Standart Sapma	0,03	0,02
	425 °C	**Ortalama**	93,1	93,1
		Standart Sapma	0,04	0,06
	450 °C	**Ortalama**	93,1	93,1
		Standart Sapma	0,04	0,04
425 °C	**2 saat**	**Ortalama**	93,0	93,1
		Standart Sapma	0,02	0,06
	4 saat	**Ortalama**	93,1	93,1
		Standart Sapma	0,04	0,06
	8 saat	**Ortalama**	92,9	93,0
		Standart Sapma	0,09	0,06
	16 saat	**Ortalama**	93,1	93,2
		Standart Sapma	0,02	0,05

Kimyasal temperleme öncesi ve sonrası optik geçirgenlik değerleri incelendiğinde, cam numunelerin geçirgenlik değerlerinde artan sıcaklık ve süreyle birlikte belirgin farklılıklar görülmemiştir.

Kimyasal temperlemenin ardından 2 mm kalınlığındaki desenli cam numunelerin artan sıcaklık ve süre ile birlikte pusluluk analizleri sonuçları Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5. 5 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süreye göre pusluluk sonuçları

			Pusluluk	
			Kimyasal Temperleme Öncesi	**Kimyasal Temperleme Sonrası**
4 saat	**400 °C**	**Ortalama**	4,1	4,2
		Standart Sapma	0,83	1,15
	425 °C	**Ortalama**	4,4	4,1
		Standart Sapma	0,95	1,25
	450 °C	**Ortalama**	4,0	3,8
		Standart Sapma	0,87	0,75
425 °C	**2 saat**	**Ortalama**	3,7	4,7
		Standart Sapma	0,81	0,62
	4 saat	**Ortalama**	4,4	4,1
		Standart Sapma	0,95	1,25
	8 saat	**Ortalama**	4,8	5,0
		Standart Sapma	0,93	0,52
	16 saat	**Ortalama**	4,6	4,2
		Standart Sapma	0,86	1,55

Kimyasal temperleme öncesi ve sonrası pusluluk değerleri incelendiğinde, cam numunelerin pusluluk değerlerinde artan sıcaklık ve süreyle birlikte belirgin farklılıklar görülmemiştir.

5.1.4 Yüzey Pürüzlülük Analizi

Orijinal ve kimyasal temperlenmiş 2 mm desenli cam numunelerin yüzey pürüzlülüğü analizi sonuçları Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5. 6 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süreye göre yüzey pürüzlülük sonuçları

		4 saat		
Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	**Orijinal Cam**	**400 °C**	**425 °C**	**450 °C**
Ortalama	1,2	1,3	1,3	1,2
Standart Sapma	0,05	0,09	0,07	0,12

		425 °C			
Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	**Orijinal Cam**	**2 saat**	**4 saat**	**8 saat**	**16 saat**
Ortalama	1,2	1,4	1,3	1,4	1,4
Standart Sapma	0,05	0,12	0,07	0,13	0,09

1,2 µm yüzey pürüzlülüğüne sahip orijinal cam numune, 4 saat sabit sürede artan sıcaklıkla birlikte ortalama 1,3 µm ve artan süre ile birlikte ortalama 1,35 µm yüzey pürüzlüğü ölçülmüştür. Buna göre, kimyasal temperlemenin camlarda herhangi bir yüzey pürüzlülüğü değişim meydana getirmediği belirlenmiştir.

5.1.5 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi

2 mm desenli cam numunelerine ait kırılma anındaki yük değerlerinin sıcaklığa ve süreye bağlı sonuçları Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5. 7 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile kırılma yükü sonuçları

		4 saat		
Kırılma Anında Yük (N)	**Orijinal Cam**	**400 °C**	**425 °C**	**450 °C**
Ortalama	1528	5077	4625	4699
Standart Sapma	196,8	645,6	621,3	218,4

		425 °C			
Kırılma Anında Yük (N)	**Orijinal Cam**	**2 saat**	**4 saat**	**8 saat**	**16 saat**
Ortalama	1528	5099	4625	5075	4580
Standart Sapma	196,8	455,3	621,3	332,8	238,8

Sonuçlara göre, kimyasal temperleme işlemi sonrası, orijinal numunenin kırılma anındaki yük değeri 1528 N'dan yaklaşık 3 kata kadar artmıştır. Kırılma yük değerlerinin 400 °C'de 5077 N iken 425 °C'de 4625 N ile azaldığı ardından 450 °C'de 4699 N ile arttığı gözlemlenmemiştir. Sabit sıcaklıkta artan süreyle birlikte kimyasal temperlenmiş numunelerin kırılma anında yük değerlerinin benzer şekilde 3 kat arttığı, 2 saatte 5099 N, 4 saatte 4625 N, 8 saatte 5075 N ve 16 saatte 4580 N olduğu görülmüştür.

Halka üstü halka testi sonucu sıcaklık ve süre etkisinin hesaplanan esneme değerleri Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5. 8 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile esneme sonuçları

		4 saat		
Esneme (mm)	**Orijinal Cam**	**400 °C**	**425 °C**	**450 °C**
Ortalama	0,3	0,8	0,8	0,8
Standart Sapma	0,06	0,07	0,09	0,07

		425 °C			
Esneme (mm)	**Orijinal Cam**	**2 saat**	**4 saat**	**8 saat**	**16 saat**
Ortalama	0,3	0,8	0,8	0,8	0,8
Standart Sapma	0,06	0,05	0,09	0,04	0,05

Kimyasal temperleme işlemi sonrası orijinal numunenin esneme değerlerinin 0,3 mm'den yaklaşık 2,5 kata kadar artarak 0,8 mm'ye ulaştığı görülmektedir. Artan süre ya da sıcaklıkla esneme değerlerinin önemli bir değişim göstermediği tespit edilmiştir.

Kimyasal temperlenmiş numunelerin mekanik testlerinin ardından cam numunelerin kırıldığı yük belirlenerek Weibull dağılım grafikleri çizilmiştir. Weibull grafiklerinden elde edilen weibull modülü ve R^2 sonuçları Tablo 5.9'da görülmektedir.

Tablo 5. 9 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile Weibull dağılım sonuçları

		4 saat		
Orijinal Cam		**400 °C**	**425 °C**	**450 °C**
m	7,8	7,9	7,6	
R^2	0,94	0,97	0,97	

	Orijinal Cam	**2 saat**	**4 saat**	**8 saat**	**16 saat**
m	7,8	11,3	7,6	15,8	19,3
R^2	0,94	0,89	0,96	0,97	0,87

Orijinal cam numunenin weibull modünün 7,8'den artan sıcaklık ile birlikte 4 saat sürede ve 450 °C sıcaklıkta 22,3'e, artan süre ile birlikte 425 °C sıcaklıkta ve 4 saat sürede ve 19,3'e ulaştığı belirlenmiştir. Buna göre en güvenilir veriler 450 °C 4 saatte elde edilmiştir.

5.1.6 Bağ Yapısı Analizi

Kimyasal temperleme sonrası cam bağ yapısını incelemek için temperleme öncesi ve sonrası FTIR bağ analizleri sonuçları Tablo 5.10'da verilmiştir.

Tablo 5. 10 Desenli cam numunenin artan sıcaklık ve artan süre ile FTIR analiz sonuçları

		ν_{as} (Si—O—Si)	ν_{as} (Si—O)
Orijinal Cam		1053	-
4 saat	**400 °C**	1050	-
	425 °C	1052	-
	450 °C	1052	942
425°C	**2 saat**	1052	-
	4 saat	1052	-
	8 saat	1052	948
	16 saat	1050	964

Orijinal numunelerde, ν_{as}(Si—O—Si) titreşimlerinin varlığı tespit edilirken, kimyasal temperleme sonrası numunelerde ν_{as}(Si—O—Si) ve ν_{as}(Si—O) titreşimleri tespit edilmiştir. Kimyasal temperleme sonrası cam yüzeyi alkali iyonunca zenginleşmektedir [68]. Bunun sonucunda da köprü yapmamış oksijen bağlarının temsil ettiği ν_{as}(Si—O) pikinin genleştiği görülmektedir. Dolayısıyla kimyasal temperleme işlem sıcaklığı ve süresinde meydana gelen değişikliklerin cam bağ yapısını değiştirdiği görülmüştür. Düşük sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilen kimyasal temperleme çalışmasının cam ağ yapısını değiştirmediği

ancak kimyasal temperlemede artan sıcaklık ve süre etkisi ile yapıda bağlanmamış oksijen bölgelerinin arttığı görülmüştür. Süre ile yapıda köprü yapmamış oksijen bağlarının sıcaklık etkisine göre daha fazla genleştiği görülmüştür. Buna göre, bağlanmamış oksijen bölgelerinin oranın değişiminde, kimyasal temperlemeye sürenin etkisinin, sıcaklığın etkisinden daha çok olduğu sonucuna varılmıştır.

5.2 Kimyasal Temperlemeye Desen Etkisi

Kimyasal temperlemeye desen etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan 2. grup deneysel çalışmalarda, 2 mm desenli ve desensiz (float) soda-kireç-silikat camları 4 saat süre ile 450 °C sıcaklıkta kimyasal temperlenmiştir.

5.2.1 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı

2 mm desenli ve float camların kimyasal temperleme işlemi sırasında meydana gelen ağırlık değişim sonuçlar Tablo 5.11'de verilmiştir.

Tablo 5. 11 Desenli ve float cam numunelerin ağırlık değişimi sonuçları

Ağırlık Değişimi (g)	Desenli Cam	Float Cam
Ortalama	0,0049	0,051
Standart Sapma	0,0005	0,0015

Yüzey alanının difüzyonu etkilediği göz önüne alınarak desenli cam numunenin ağırlık değişiminin daha çok olması beklenirken, 2 mm float cam numunede kimyasal temperleme sonucu meydana gelen ağırlık değişimi 0,0051 g olarak 2 mm desenli cam numunenin ağırlık değişimi ise 0,0049 g olarak hesaplanmıştır. Literatürde, bu durumu kimyasal temperlemenin difüzyon esaslı bir işlem olması nedeniyle difüzyonu etkileyen faktörlerin, cam kompozisyonu, cam yüzeyi, vb. kimyasal temperlemeyi etkilemesiyle açıklanmaktadır. Soda-kireç-silika camların ağ yapısı içerisinde bulunan boşluklar nedeniyle ağ yapısı içerisinde ve yüzeyinde iyon hareketine izin verirler. Alkali oksit içerikli silikat camlar, düşük iyonik yarıçaplı alkali iyonların cam ağ yapısını modifiye edici rol oynuyor olması nedeniyle iyon hareketini gerçekleşmesi için ideal camlardır. Deneysel çalışmalarda kullanılan desenli ve float cam malzemelerin cam kompozisyonları

incelendiğinde, float cam içerisinde bulunan daha yüksek alkali iyonların miktarıyla serbest molar hacim ve iyon hareketliliği artmakta, difüzyon desenli cama göre daha kolay olmaktadır.

Kimyasal temperleme sonrası desenli ve float camda ağırlık değişimi gözlenmiştir. Ancak farklı kompozisyonlara sahip camlarda difüzyon hareketi farklı olacağı için değişen desenin kimyasal temperlemeye etkisi yorumlanmamıştır.

Elde edilen ağırlık değişimi sonuçlarından hareketle hesaplanan kütle ortalama difüzyon katsayısı değerlerinin sonuçları Tablo 5.12'de gösterilmiştir.

Tablo 5. 12 Desenli ve float cam numunelerin difüzyon katsayısı sonuçları

Difüzyon Katsayısı (cm^2/s)	**Desenli Cam**	**Float Cam**
Ortalama	6,81E-12	7,34E-12

2 mm float cam numunede kimyasal temperleme sonucu kütle ortalama difüzyon katsayısı değeri 6,81E-12 cm^2/s hesaplanırken 2 mm desenli cam numunenin difüzyon katsayısı 7,34E-12 cm^2/s hesaplanmıştır.

5.2.2 SEM/EDS Analizi Sonuçları

Kimyasal temperleme işlemi sonrası cam numunelere kesit yüzeyden belirlenmiş bir çizgi üzerinde yaklaşık 1 µm aralıklarla linescan modunda SEM/EDS analizi ölçümleri 1'er adet 2 mm desenli cam numune ile yapılmış ve cam yüzeyinden cam kütle merkezine doğru kimyasal temperleme sonrası potasyum (K^+) difüzyon derinlikleri belirlenmiştir. Kimyasal temperli desenli ve float camların SEM/EDS analizi sonuçları Tablo 5.13'te verilmiştir.

Tablo 5. 13 Desenli ve float cam numunelerin difüzyon derinliği sonuçları

Difüzyon Derinliği	Desenli Cam Ağırlıkça K2O (%)	Float Cam Stres Profili (MPa)
0	13,6	553,0
1	12,2	522,8
2	9,9	479,8
3	8,7	431,3
4	7,4	376,3
5	5,3	315,2
6	3,5	249,9
7	2,2	183,4
8	1,2	119,4
9	0,5	61,4
10	0,4	21,0
11	0,2	1,2

Desenli ve float camın potasyum iyonu için difüzyon derinliği değerleri karşılaştırıldığında, desenli camın potasyum difüzyon derinliğinin az da olsa float cama göre daha az olduğu belirlenmiştir.

5.2.3 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi

Kimyasal temperlenmiş 2 mm kalınlığındaki desenli ve float cam numunelerin optik geçirgenlik analizleri sonuçları Tablo 5.14'te verilmiştir.

Tablo 5. 14 Desenli ve float cam numunelerin optik geçirgenlik sonuçları

Optik Geçirgenlik (%)	Desenli Cam		Float Cam	
	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası
Ortalama	93,1	93,0	85,1	84,8
Standart Sapma	0,04	0,04	0,05	0,050

Kimyasal temperleme öncesi ve sonrası optik geçirgenlik değerleri incelendiğinde, cam numunelerin geçirgenlik değerlerinde desenli ve düz camlar için belirgin bir

farklılık görülmemiştir. Cam kompozisyonunda demir oranının azalması ve cam yüzeyine desen uygulanmasıyla birlikte, optik geçirgenlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Kimyasal temperlenmiş 2 mm kalınlığındaki desenli ve float cam numunelerin pusluluk analizleri sonuçları Tablo 5.15'te verilmiştir.

Tablo 5. 15 Desenli ve float cam numunelerin pusluluk sonuçları

Pusluluk	**Desenli Cam**		**Float Cam**	
	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası
Ortalama	4,0	3,8	0,3	0,3
Standart Sapma	0,87	0,75	0,12	0,11

Kimyasal temperleme öncesi ve sonrası pusluluk değerleri incelendiğinde, cam numunelerin pusluluk değerlerinde desenli ve düz camlar için belirgin bir farklılıklar görülmemiştir. Cam kompozisyonunda demir oranının azalması ve cam yüzeyine desen uygulanmasıyla birlikte, pusluluk değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

5.2.4 Yüzey Pürüzlülük Analizi

Orijinal ve kimyasal temperlenmiş 2 mm desenli ve float cam numunelerin yüzey pürüzlülüğü analizi sonuçları Tablo 5.16'da verilmiştir.

Tablo 5. 16 Desenli ve float cam numunelerin yüzey pürüzlülük sonuçları

Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	**Desenli Cam**		**Float Cam**	
	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası
Ortalama	1,19	1,20	0,33	0,30
Standart Sapma	0,05	0,02	0,05	0,02

Desenli ve float camın yüzey pürüzlülük değerlerine göre cam yüzeyine desen uygulanmasıyla birlikte, numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Desenli ve float camlara uygulanan kimyasal temperleme işlemi ile birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinde anlamlı bir değişim görülmemiştir.

5.2.5 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi

450 °C ve 4 saat kimyasal temperlemenin ardından, 2 mm kalınlığındaki desenli ve float cam numunelerine ait kırılma anındaki yük değerlerinin sonuçları Tablo 5.17'de verilmiştir.

Tablo 5. 17 Desenli ve float cam numunelerin kırılma anında yük sonuçları

Kırılma Anında Yük (N)	**Desenli Cam**		**Float Cam**	
	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası
Ortalama	1528	4699	1201	4460
Standart Sapma	196,8	218,4	384,7	220,3

Sonuçlara göre, kimyasal temperleme işlemi sonrası, orijinal desenli numunenin kırılma anındaki yük değeri 1528 N'dan yaklaşık 3 kata kadar artmıştır. Float cam numunelerin kırılma anındaki yük değerleri 1201 N'dan yaklaşık 3,7 kata kadar artmıştır. Float camın kırılma anındaki yük değerlerinin desenli cama göre daha fazla artış göstermesinin nedeni, cam kompozisyonuna bağlı olarak yapıya alınan K^+ iyon derinliğinin daha fazla olması ve ağırlık değişiminin daha fazla olmasıyla açıklanabilir.

Kimyasal temperli desenli ve float camların halka üstü halka testi sonucu hesaplanan esneme değerleri Tablo 5.18'de verilmiştir.

Tablo 5. 18 Desenli ve float cam numunelerin esneme sonuçları

Esneme (mm)	**Desenli Cam**		**Float Cam**	
	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası
Ortalama	0,3	0,8	0,2	0,8
Standart Sapma	0,06	0,07	0,15	0,21

Kimyasal temperleme işlemi sonrası orijinal desenli numunenin esneme değerlerinin 0,3 mm'den yaklaşık 2,5 kata kadar artarak 0,8 mm'ye ve orijinal float numenin esneme değerlerinin 0,2 mm'den yaklaşık 4 kata kadar artarak 0,8 mm'ye

ulaştığı görülmektedir. Desenli camın esneme değerlerindeki artışın float cama kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Kimyasal temperlenmiş numunelerin mekanik testlerinin ardından cam numunelerin kırıldığı yük belirlenerek, Weibull dağılım grafikleri çizilmiştir. Weibull grafiklerinden elde edilen weibull modülü ve R^2 sonuçları Tablo 5.19'da görülmektedir.

Tablo 5. 19 Desenli ve float cam numunelerin Weibull dağılım sonuçları

	Desenli Cam		**Float Cam**	
	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası
m	7,8	22,3	7,8	22,2
R^2	0,94	0,93	0,94	0,94

Orijinal desenli ve float cam numunelerin weibull modülü 7,8'den, 4 saat sürede ve 450 °C sıcaklıkta uygulanan kimyasal temperlemenin ardından, 22 mertebelerine ulaşmıştır. Sonuç olarak desenli ve float cama kimyasal temperleme işlemi uygulandığında, orijinal cama göre kırılma yük değerlerinin daha güvenilir olduğu tespit edilmiştir.

5.2.6 Bağ Yapısı Analizi

Kimyasal temperleme sonrası desenli ve float camların bağ yapısını incelemek için temperleme öncesi ve sonrası gerçekleştirilen FTIR bağ analizleri sonuçları Tablo 5.20'de verilmiştir.

Tablo 5. 20 Desenli ve float cam numunelerinin FTIR analiz sonuçları

		ν_{as} (Si—O—Si)	ν_{as} (Si—O)
Desenli Cam	Kimyasal Teperleme Öncesi	1053	-
	Kimyasal Teperleme Sonrası	1052	942
Float Cam	Kimyasal Teperleme Öncesi	1053	-
	Kimyasal Teperleme Sonrası	1057	-

Orijinal numunelerde, ν_{as}(Si—O—Si) titreşimlerinin varlığı tespit edilirken, kimyasal temperleme sonrası float cam numunelerde ν_{as}(Si—O—Si) titreşimlerinin, desenli camlarda ise ν_{as}(Si—O) titreşimlerinin varlığı tespit edilmiştir. Elde edilen piklerin tepe noktasında gerçekleşen değişiklik, cam yapısında gerçekleşen bir değişikliği temsil etmektedir. Sonuç olarak, işlem sıcaklığı ve süresinin cam bağ yapısını etkilediği, desenli camlarda float camlara göre kimyasal temperlemenin ardından köprü yapmamış oksijen bağların oluşma eğilimlerinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

5.3 Kimyasal Temperlemeye Kalınlığın Etkisi

Kimyasal temperlemeye cam kalınlığı etkisinin incelendiği 3. grup deneysel çalışmalarda, 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki desenli soda-kireç-silikat camlar 4 saat süre ile 450 °C sıcaklıkta kimyasal temperlenmiştir.

5.3.1 Ağırlık Değişimi ve Kütle Ortalama Difüzyon Katsayısı Hesabı

2 mm ve 3,2 mm desenli cam numuneler 4 saat süre ve 450 °C sıcaklıkta kimyasal temperleme işlemi sırasında meydana gelen ağırlık değişim sonuçlar Tablo 5.21'de verilmiştir.

Tablo 5. 21 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Ağırlık Değişimi (g)	2 mm Desenli Cam	3,2 mm Desenli Cam
Ortalama	0,0049	0,0051
Standart Sapma	0,0005	0,0008

Kimyasal temperleme işleminin ardından 3,2 mm kalınlığındaki desenli cam numunenin ağırlık değişimi 0,0051 g hesaplanırken 2 mm kalınlığındaki desenli cam numunenin ağırlık değişimi 0,0049 g olarak hesaplanmıştır. Yüzey alanının difüzyonu etkilediği göz önüne alınarak kalınlık arttıkça ağırlık değişiminin daha çok olması beklenmektedir. Sonuç olarak artan kalınlık ile birlikte kimyasal temperleme sonrası ağırlık değişiminin arttığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen ağırlık değişimi sonuçlarından hareketle hesaplanan kütle ortalama difüzyon katsayısı değerlerinin sonuçları Tablo 5.22'de gösterilmiştir.

Tablo 5. 22 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin difüzyon katsayısı sonuçları

Difüzyon Katsayısı (cm^2/s)	2 mm Desenli Cam	3,2 mm Desenli Cam
Ortalama	6,81E-12	6,95E-12

2 mm desenli cam numunede kimyasal temperleme sonucu kütle ortalama difüzyon katsayısı değeri 6,81E-12 cm^2/s olarak hesaplanırken; 3,2 mm desenli cam numunenin difüzyon katsayısı 6,95E-12 cm^2/s hesaplanmıştır. Sonuç olarak artan cam kalınlığıyla birlikte difüzyon katsayısı değenlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

5.3.2 SEM/EDS Analizi Sonuçları

Kimyasal temperleme sonrası cam numunelere kesit yüzeyden SEM/EDS analizi ölçümleri yapılmıştır. 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerin cam yüzeyinden cam kütle merkezine doğru kimyasal temperleme sonrası çizilen potasyum (K^+) difüzyon derinliği grafiği Tablo 5.23'te verilmiştir.

Tablo 5. 23 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin SEM/EDS analizi

	2 mm Desenli Cam	**3,2 mm Desenli Cam**
Difüzyon Derinliği (µm)	16	18

2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki desenli camların potasyum iyonu için difüzyon derinliği değerleri karşılaştırıldığında, 3,2 mm desenli camın potasyum difüzyon derinliğinin az da olsa 2 mm desenli cama göre daha fazla olduğu belirlenmiştir.

5.3.3 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi

Kimyasal temperlenmiş 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki desenli cam numunelerin optik geçirgenlik analizleri sonuçları Tablo 5.24'te verilmiştir.

Tablo 5. 24 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin optik geçirgenlik sonuçları

Optik Geçirgenlik (%)	**2 mm Desenli Cam**		**3,2 mm Desenli Cam**	
	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası
Ortalama	93,1	93,0	93,1	93,0
Standart Sapma	0,04	0,04	0,01	0,05

Kimyasal temperleme öncesi ve sonrası optik geçirgenlik değerleri incelendiğinde, cam numunelerin geçirgenliklerinde anlamlı bir değişim görülmemiştir. Cam kalınlığının incelmesiyle az da olsa geçirgenliğin arttığı gözlemlenmiştir.

Kimyasal temperlenmiş 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki desenli cam numunelerin pusluluk analizleri sonuçları Tablo 5.25'te verilmiştir.

Tablo 5. 25 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin pusluluk sonuçları

Pusluluk	2 mm Desenli Cam		3,2 mm Desenli Cam	
	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası
Ortalama	4,0	3,8	4,0	1,5
Standart Sapma	0,87	0,75	0,18	0,27

Kimyasal temperleme öncesi ve sonrası pusluluk değerleri incelendiğinde, 2 mm cam numunelerin pusluluk değerleri 3,8 olarak ölçülürken; 3,2 mm cam numunelerin pusluluk değerleri 1,5 olarak ölçülmüştür. Buna göre, kimyasal temperleme ile birlikte 3,2 mm desenli camın kimyasal temperleme sonrası, 2mm kalınlığındaki cama göre pusluluk değerlerinin azaldığı görülmektedir.

5.3.4 Yüzey Pürüzlülük Analizi

Orijinal ve kimyasal temperlenmiş 2 mm ve 3,2 mm desenli cam numunelerin yüzey pürüzlülüğü analizi sonuçları Tablo 5.26'da verilmiştir.

Tablo 5. 26 Orijinal ve temperlenmiş 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerin yüzey pürüzlülük sonuçları

Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	2 mm Desenli Cam		3,2 mm Desenli Cam	
	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası
Ortalama	1,19	1,20	1,93	1,83
Standart Sapma	0,05	0,02	0,05	0,02

Tablo 5.32'e göre, yüzey pürüzlülüğü değerleri kimyasal temperleme işlemi ile değişmezken; alınlığın artmasıyla birlikte artış göstermiştir.

5.3.5 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi

450 °C ve 4 saat kimyasal temperlemenin ardından, 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki desenli cam numunelerine ait kırılma anındaki yük değerlerinin sonuçları Tablo 5.27'de verilmiştir.

Tablo 5. 27 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin kırılma yükü sonuçları

Kırılma Anında Yük (N)	2 mm Desenli Cam		3,2 mm Desenli Cam	
	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası
Ortalama	1528	4699	2010	8912
Standart Sapma	196,8	218,4	351,4	356,4

Sonuçlara göre, kimyasal temperleme işlemi sonrası, orijinal 2mm desenli numunenin kırılma anındaki yük değeri 1528 N'dan yaklaşık 3 kata kadar artmıştır. 3,2 mm desenli cam numunelerin kırılma anındaki yük değerleri ise 2010 N'dan yaklaşık 4,4 kata kadar artmıştır. 3,2 mm desenli camın difüzyon katsayısı ve derinliğinin 2 mm desenli cama göre daha yüksek oluşuna bağlı olarak kalınlık arttıkça kırılma anındaki yük değerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Kimyasal temperli 2 mm ve 3,2 mm desenli camların halka üstü halka testi sonucu hesaplanan esneme değerleri Tablo 5.28'de verilmiştir.

Tablo 5. 28 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin esneme sonuçları

Esneme (mm)	2 mm Desenli Cam		3,2 mm Desenli Cam	
	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası
Ortalama	0,3	0,8	0,3	0,7
Standart Sapma	0,06	0,07	0,09	0,21

Kimyasal temperleme işlemi sonrası orijinal desenli numunenin esneme değerlerinin 0,3 mm'den yaklaşık 2,5 kata kadar arttığı görülmektedir. Desenli camın esneme değerlerindeki artışın float cama kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Kimyasal temperlenmiş numunelerin mekanik testlerinin ardından cam numunelerin kırıldığı yük değerleri belirlenerek, Weibull dağılım grafikleri

çizilmiştir. Weibull grafiklerinden elde edilen weibull modülü ve R^2 sonuçları Tablo 5.29'da görülmektedir.

Tablo 5. 29 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin Weibull dağılım sonuçları

	2 mm Desenli Cam		**3,2 mm Desenli Cam**	
	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası	Kimyasal Temperleme Öncesi	Kimyasal Temperleme Sonrası
m	7,8	22,3	4,4	22,8
R^2	0,94	0,93	0,88	0,91

4 saat sürede ve 450 °C sıcaklıkta uygulanan kimyasal temperlemenin ardından, orijinal desenli ve float cam numunelerin weibull modülü 7,8'den her iki 22 mertebesine ulaşmıştır. Sonuç olarak farklı kalınlıktaki camlara kimyasal temperleme işlemi uygulandığında kırılma yük değerlerinin daha güvenilir olduğu tespit edilmiştir.

5.3.6 Bağ Yapısı Analizi

Kimyasal temperleme sonrası 2 mm ve 3,2 mm kalınlığa sahip camların bağ yapısını incelemek için temperleme öncesi ve sonrası FTIR bağ analizleri sonuçları Tablo 5.30'da verilmiştir.

Tablo 5. 30 2 mm ve 3,2 mm kalınlığındaki cam numunelerinin bağ yapısı sonuçları

		ν_{as}(Si—O—Si)	**ν_{as}(Si—O)**
2mm Desenli Cam	Kimyasal Teperleme Öncesi	1053	-
	Kimyasal Teperleme Sonrası	1052	942
3,2mm Desenli Cam	Kimyasal Teperleme Öncesi	1053	-
	Kimyasal Teperleme Sonrası	1053	946

Orijinal numunelerde, ν_{as}(Si—O—Si) titreşimlerinin varlığı tespit edilirken, kimyasal temperleme sonrası numunelerde ν_{as}(Si—O—Si) ve ν_{as}(Si—O) titreşimleri tespit edilmiştir. Farklı kalınlığa sahip camların bağ yapılarında temperleme öncesi ve sonrası anlamlı bir değişim görülmemiştir.

5.4 Kimyasal Temperlemenin Atmosferik Dayanıma Etkisi

4. grup deneysel çalışmalarda kimyasal temperli 2 mm desenli soda-kireç-silikat camların atmosferik koşullara dayanım davranışlarının nem, tuz, asit ve aşındırma testlerinin etkisi incelenmiştir. Bu doğrultuda, kimyasal temperleme işleminin ardından optik geçirgenlik ve pusluluk, yüzey pürüzlük, kırılma yükü ve bağ yapısı analiz edilmiştir.

5.4.1 Optik Geçirgenlik ve Pusluluk Analizi

Kimyasal temperlemenin ardından atmosferik koşullara dayanım testleri yapılmış desenli camların optik geçirgenlik analizleri sonuçları Tablo 5.31'de verilmiştir.

Tablo 5. 31 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası optik geçirgenlik sonuçları

		Nem Testi		
Optik Geçirgenlik (%)	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	93,0	92,8	93,0	93,5
Standart Sapma	0,10	0,03	0,04	0,30
		Tuz Testi		
Optik Geçirgenlik (%)	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	93,1	92,8	93,0	93,3
Standart Sapma	0,10	0,05	0,02	0,04
		Asit Testi		
Optik Geçirgenlik (%)	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	93,0	93,0	93,0	93,2
Standart Sapma	0,03	0,05	0,02	0,05

Tablo 5. 31 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası optik geçirgenlik sonuçları (devamı)

	Aşındırma Testi			
Optik Geçirgenlik (%)	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	92,9	93,1	93,0	93,2
Standart Sapma	0,05	0,07	0,02	0,06

Kimyasal temperleme öncesi ve sonrası optik geçirgenlik değerleri incelendiğinde, cam numunelerin geçirgenlik değerlerinde belirgin farklılıklar görülmemiştir. Numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testlerinin ardından optik geçirgenlik değerleri incelendiğinde, nem ve tuz testlerinin ardından orijinal numunelerin optik geçirgenliği yaklaşık %0,2 azalırken; kimyasal temperli numunelerin optik geçirgenlik değerlerinin yaklaşık %0,4 arttığı görülmüştür. Asit testi sonrası orijinal ve kimyasal temperli numunelerin optik geçirgenliğinde belirgin bir değişim görülmezken; aşındırma testinin ardından numunelerin optik geçirgenlik değerlerinin yaklaşık %2,5 arttığı gözlemlenmiştir.

İkincil uygulamalardan sonra optik özelliklerin değişmesi, esas olarak ışık-yüzey etkileşimi tarafından yönetilir. Bu nedenle, atmosferik koşullar sonrası numunelerin geçirgenliğinin artması, camın yüzey özelliklerinin değişmesiyle bağlantılıdır. Camın yüzey özelliklerinin değiştiği tabakanın, antireflektif özellik gösterdiği ve camdan daha düşük kırılma indisine sahip olduğu bilinmektedir. Böylece cam yüzeylerin ışık geçirgenliği artıp parlaklığının azaldığı ve makro ölçekte renk değişimine neden olduğu tespit edilmiştir [68]. Kimyasal tepeleme sonrası uygulanan atmosferik koşullara dayanım testinin artından optik geçirgenlik değerlerinin artması, cam yüzeyinde korozyonun artmasıyla, düşük kırılma indisine sahip bir tabakanın cam yüzeyinde oluşması ve ışık geçirgenliğinin azalmaması açıklanabilir.

Kimyasal temperlemenin ardından atmosferik koşullara dayanım testleri yapılmış desenli camların pusluluk analizleri sonuçları Tablo 5.32'de verilmiştir.

Tablo 5. 32 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası pusluluk sonuçları

Nem Testi				
Pusluluk	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	4,4	4,5	3,8	7,1
Standart Sapma	0,4	1,0	0,8	1,2
Tuz Testi				
Pusluluk	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	4,3	4,4	4,2	5,2
Standart Sapma	0,3	0,3	0,2	0,5
Asit Testi				
Pusluluk	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	4,4	3,0	4,3	5,3
Standart Sapma	0,7	0,3	0,6	1,0
Aşındırma Testi				
Pusluluk	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	4,1	3,7	4,0	3,2
Standart Sapma	0,4	0,5	0,4	0,3

Kimyasal temperleme öncesi ve sonrası pusluluk değerleri incelendiğinde, cam numunelerin pusluluk değerlerinde belirgin farklılıklar görülmemiştir. Numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testlerinin ardından pusluluk değerleri incelendiğinde ise, nem ve tuz testlerinin ardından orijinal numunenin pusluluk değerleri 0,1 değerinde artarken, kimyasal temperli numunenin pusluluk değerleri nem testi için 3,8'den 7,1'e; tuz testi için 4,2'den 5,2'ye arttığı görülmüştür. Asit testi sonrası orijinal ve kimyasal temperli numunelerin pusluluk değerlerinin orijinal camda 4,4'ten 3'e azaldığı, temperleme işlemi sonrası ise 4,3'ten 5,3'e arttığı görülmüştür. Son olarak aşındırma testinin ardından camın pusluluk değerlerini azaldığı gözlemlenmiştir. İkincil uygulamalardan sonra optik

özelliklerin değişmesi sonucu, cam numunelerde yüzey kırılma indislerinin düşerek pusluluk değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Aşındırma testi sonucu pusluluk değerlerinin azalmasının ise, aşındırma sonrası yüzey pürüzlülüğün azalmasından kaynaklandığı belirlenmiştir.

5.4.2 Yüzey Pürüzlülük Analizi

Kimyasal temperlenmiş cam numunelerin atmosferik koşullara dayanım testi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülüğü analizi sonuçları Tablo 5.33'te verilmiştir.

Tablo 5. 33 Kimyasal temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası yüzey pürüzlülük sonuçları

	Nem Testi		**Tuz Testi**	
Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Test Öncesi	Test Sonrası	Test Öncesi	Test Sonrası
Ortalama	1,2	1,4	1,2	1,3
Standart Sapma	0,1	0,1	0,1	0,2
	Asit Testi		**Aşındırma Testi**	
Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Test Öncesi	Test Sonrası	Test Öncesi	Test Sonrası
Ortalama	1,3	1,5	1,3	1,2
Standart Sapma	0,2	0,1	0,1	0,1

Nem testinden sonra numunelerin yüzey pürüzlülük değerinin 0,2 µm, tuz testinden sonra 0,1 µm, asit testinden sonra 0,2 µm arttığı ve aşındırma testinden sonra numunelerin yüzey pürüzlülük değerinin 0,1 µm azaldığı hesaplanmıştır. Böylece atmosferik koşullara dayanım testlerinin kimyasal temperli numunelerin yüzey pürüzlülüğünü önemli oranda değiştirmediği gözlemlenmiştir.

5.4.3 Halka Üstü Halka Testi ile Kırılma Yükü ve Esneme Analizi

Orijinal ve kimyasal temperlenmiş cam numunelerin atmosferik koşullara dayanım testlerinden sonra kırılma anındaki yük değerleri incelenmiş, sonuçları Tablo 5.34'te verilmiştir.

Tablo 5. 34 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası kırılma yükü sonuçları

Nem Testi				
Kırılma Anında Yük (N)	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	1502	1497	4678	4439
Standart Sapma	319	174	316	394
Tuz Testi				
Kırılma Anında Yük (N)	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	1502	1287	4678	4323
Standart Sapma	319	219	316	355
Asit Testi				
Kırılma Anında Yük (N)	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	1502	1226	4678	4214
Standart Sapma	319	157	319	266
Aşındırma Testi				
Kırılma Anında Yük (N)	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	1502	1299	4374	4640
Standart Sapma	319	306	316	199

Sonuçlara göre, kimyasal temperleme işlemi sonrası, orijinal desenli numunenin kırılma anındaki yük değeri 1502 N'dan yaklaşık 3,1 kata kadar artmıştır. Kimyasal temperleme işlemi sonrası numunelerin kırılma anındaki yük değerleri, nem, tuz ve asit testlerinin ardından azalırken ve aşındırma testi sonrası yaklaşık 250 N artmıştır. Orijinal camlara uygulanan tuz, asit ve aşındırma testlerinden sonra kırılma anındaki yük değerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bunun yanında kimyasal temperlemenin ardından uygulanan nem, tuz, asit testlerin kırılma anındaki yük değerlerinin, aşındırma testine kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeninin ikincil işlemin ardından cam bağ yapısında gözlemlenen değişimler ve

cam yüzeyinde gözlemlenen yapısal değişimler sonucu kırılma anındaki yük değerlerinin azalması olduğu düşünülmektedir.

Orijinal ve kimyasal temperlenmiş cam numunelerin atmosferik koşullara dayanım testlerinden sonra esneme değerleri incelenmiş, sonuçları Tablo 5.35'te verilmiştir.

Tablo 5. 35 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası esneme sonuçları

Nem Testi				
Esneme (mm)	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	0,3	0,7	0,8	0,7
Standart Sapma	0,06	0,04	0,07	0,07
Tuz Testi				
Esneme (mm)	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	0,3	0,3	0,8	0,7
Standart Sapma	0,06	0,05	0,07	0,07
Asit Testi				
Esneme (mm)	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	0,3	0,5	0,8	0,9
Standart Sapma	0,06	0,08	0,07	0,07
Aşındırma Testi				
Esneme (mm)	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
Ortalama	0,3	0,3	0,8	0,7
Standart Sapma	0,06	0,06	0,07	0,05

Sonuçlara göre, kimyasal temperleme işlemi sonrası, orijinal desenli numunenin esneme değeri 0,3 mm'den yaklaşık 2,5 kata kadar artmıştır. Kimyasal temperleme işlemi sonrası numunelerin kırılma anındaki yük değerleri, nem, tuz ve asit testlerinin ardından artarken ve aşındırma testi sonrası 1 mm azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, kimyasal temperleme işlemi ile esneme değerleri artmıştır. Kimyasal temperli camlara uygulanan nem, tuz ve asit testlerinden sonra esneme değerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bunun yanında kimyasal

temperlemenin ardından uygulanan aşındırma testinden sonra esneme değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Orijinal ve kimyasal temperlenmiş numunelerin test öncesi ve sonrası mekanik testlerinin ardından cam numunelerin kırıldığı yük belirlenerek, Weibull dağılım grafikleri çizilmiştir. Weibull grafiklerinden elde edilen Weibull modülü ve R^2 sonuçları Tablo 5.36'da görülmektedir.

Tablo 5. 36 Orijinal ve temperlenmiş desenli cam numunelerin nem, tuz, asit ve aşındırma testleri sonrası Weibull sonuçları

	Nem Testi			
	Orijinal Cam	**Test Sonrası Orijinal Cam**	**Kimyasal Temperli Cam**	**Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam**
m	9,9	8,3	29,8	10,6
R^2	0,87	0,95	0,94	0,79
	Tuz Testi			
	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
m	9,9	5,8	29,8	11,6
R^2	0,87	0,92	0,94	0,96
	Asit Testi			
	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
m	9,9	7,7	29,8	15,8
R^2	0,87	0,96	0,94	0,97
	Aşındırma Testi			
	Orijinal Cam	Test Sonrası Orijinal Cam	Kimyasal Temperli Cam	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam
m	7,1	15,8	25,7	20,2
R^2	0,94	0,97	0,91	0,94

Kimyasal temperlemenin ardından weibull modülünün arttığı gözlemlenmiştir. Atmosferik koşulların uygulanmasıyla kimyasal temperlenmiş cam numunelerin weibull modülünün azaldığı görülmektedir. Sonuç olarak kimyasal temperleme işlemi uygulanmış camın, orijinal ve atmosferik koşullara dayanım testi

uygulanmış cama göre kırılma yük değerleri daha güvenilir olduğu tespit edilmiştir.

5.4.4 Bağ Yapısı Analizi

Kimyasal temperleme sonrası cama uygulanan atmosferik koşullara dayanım testlerinin bağ yapısını incelemek için temperleme öncesi ve sonrası FTIR bağ analizleri sonuçları Tablo 5.37'de verilmiştir.

Tablo 5. 37 Orijinal ve temperlenmiş numunenin nem testi, tuz testi, asit testi ve aşındırma testi sonrası FTIR analiz sonuçları

		ν_{as}(Si—O—Si)	**ν_{as}(Si—O)**
Nem Testi	Orijinal Cam	1053	-
	Test Sonrası Orijinal Cam	1054	-
	Kimyasal Temperli Cam	1052	942
	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam	1049	940
		ν_{as}(Si—O—Si)	**ν_{as}(Si—O)**
Tuz Testi	Orijinal Cam	1053	-
	Test Sonrası Orijinal Cam	1056	-
	Kimyasal Temperli Cam	1052	942
	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam	1057	933
		ν_{as}(Si—O—Si)	**ν_{as}(Si—O)**
Asit Testi	Orijinal Cam	1053	-
	Test Sonrası Orijinal Cam	1054	-
	Kimyasal Temperli Cam	1052	942
	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam	1099	960
		ν_{as}(Si—O—Si)	**ν_{as}(Si—O)**
Aşındırma Testi	Orijinal Cam	1053	-
	Test Sonrası Orijinal Cam	1054	-
	Kimyasal Temperli Cam	1052	942
	Test Sonrası Kimyasal Temperli Cam	1046	939

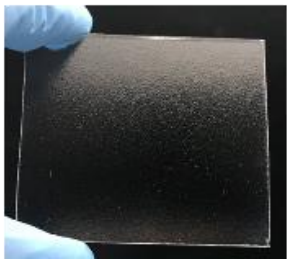
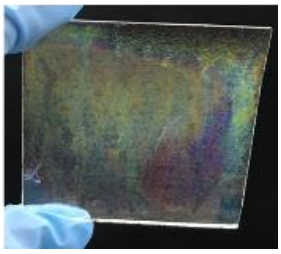
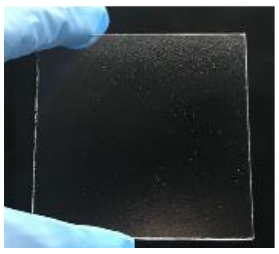
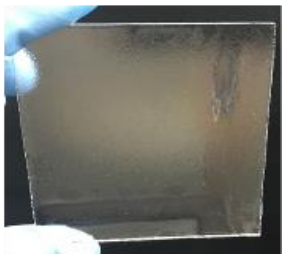
Orijinal numunelerde, ν_{as}(Si—O—Si) titreşimlerinin varlığı tespit edilirken, kimyasal temperleme sonrası numunelerde ν_{as}(Si—O—Si) ve ν_{as}(Si—O) titreşimleri tespit edilmiştir. Atmosferik koşullara dayanım testleri sonrası orijinal numunelerde, ν_{as}(Si—O—Si) titreşimlerinin varlığı tespit edilmiştir.

Kimyasal temperleme sonrası nem testi uygulanan numunelerin yüzeyindeki oksijen bağlarının kırılması sonucu cam yüzeyi korozyona uğrayan numunelerde ν_{as}(Si—O—Si) titreşimlerine ait pikin sola kaydığı ve ν_{as}(Si—O) titreşimlerinin varlığı tespit edilmiştir. Kimyasal temperleme sonrası tuz ve aşındırma testi uygulanan numunelerde ν_{as}(Si—O—Si) ve ν_{as}(Si—O) titreşimleri tespit edilmiştir. Kimyasal temperleme sonrası asit testi uygulanan numunelerde ν_{as}(Si—O—Si) ve ν_{as}(Si—O) titreşimlerine ait pikler belirgin bir şekilde görülmüştür. Sonuç olarak kimyasal temperlemenin ve atmosferik koşullara dayanım testlerinin desenli camların bağ yapısında köprü yapmamış oksijen bağ sayısını etkilediği tespit edilmiştir.

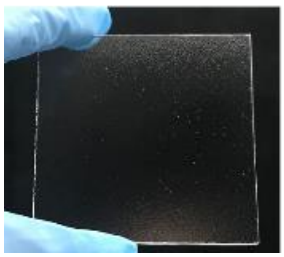
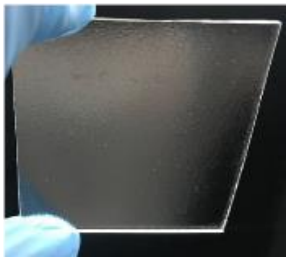
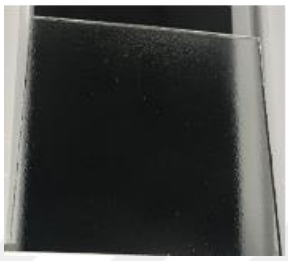
5.4.5 Makro İnceleme

Atmosferik koşullara dayanım testlerinin ardından, temperlenen numunelerin, test öncesi ve sonrası makro görüntüleri Tablo 5. 38'de verilmiştir.

Tablo 5. 38 Atmosferik koşullara dayanım test sonuçlarının makro incelemesi

Atmosferik Koşullara Dayanım Testi	Kimyasal Temperli Cam	Kimyasal Temperli ve Test Uygulanmış Cam
Nem Testi		
Tuz Testi		

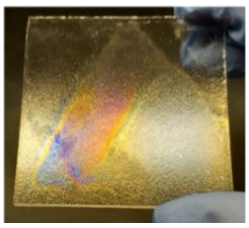
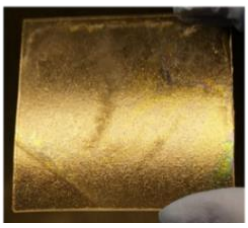
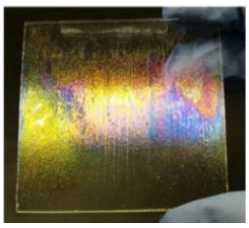
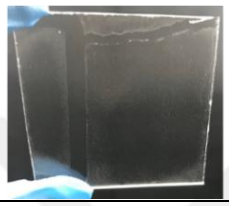
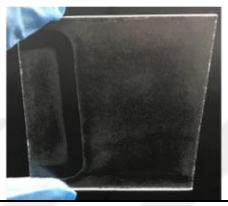
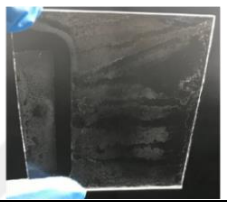
Tablo 5. 39 Atmosferik koşullara dayanım test sonuçlarının makro incelemesi (devamı)

Asit Testi		
Aşındırma Testi		

Kimyasal temperli numunelerin makro görüntüleri incelendiğinde belirgin bir farklılık görülmemiştir. Atmosferik koşullara dayanım testlerinin ardından numunelerin nem ve tuz testinin makro görüntülerinde bozulmalar görülürken asit ve aşındırma testinin makro görüntülerinde bozumalar görülmemiştir. Soda-kireç-silikat camlarının su buharına maruz kalması durumunda sodyum iyonları ve cam matris içinde bulunan bazı düşük miktarda kalsiyum ve magnezyum iyonlarının yüzeyden yayıldığı ve H^+ veya H_3O^+ iyonlarının yüzeye yayıldığı bilinmektedir. İyon değişim reaksiyonlarının bir sonucu olarak, yüzey pH'ı artmakta ve bunu yüzey morfolojisinin bozulmasına ve optik kalitenin düşmesine neden olan çözünme reaksiyonları izlemektedir [68].

Yüzeyde oluşan korozyona camın yıkama yönteminin etkisini incelemek adına, kimyasal temperli ve atmosferik koşullara dayanım testi uygulanmış camların makro görüntüleri Tablo 5.39'da verilmiştir.

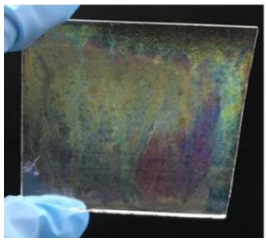
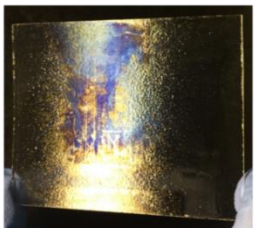
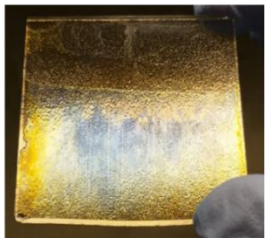
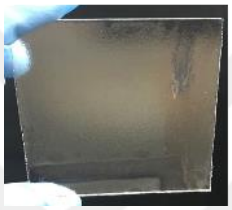
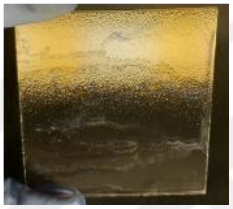
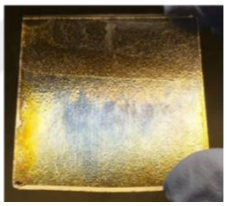
Tablo 5. 40 Yıkama etkisinin korozyon üzerindeki etkisi

	Yıkama Etkisi		
	Elde Yıkama	**5dk Ultrasonik Banyo**	**5dk 50°C Ultrasonik Banyo**
Nem Testi			
Tuz Testi			

Kimyasal temperleme sonrası yapılan yıkamamanın uygun olmaması durumunda cam yüzeyinde tuz kalması durumunda nem ve tuz testlerine ortam pH değerini yükselttiği için korozyon şiddetini arttırdığı görülmüştür.

Yüzeyde oluşan korozyona kimyasal temperlemede kullanılan tuzun kirliliğinin etkisini incelemek adına, kimyasal temperli ve atmosferik koşullara dayanım testi uygulanmış camların makro görüntüleri Tablo 5.40'ta verilmiştir.

Tablo 5. 41 Kimyasal temperlemede kullanılan tuzun kirliliğinin korozyon üzerindeki etkisi

	Tuz Etkisi		
	Kullanılmış Lema Tuzu	**Temiz Lema Tuzu**	**Haifa Tuzu**
Nem Testi			
Tuz Testi			

Kimyasal temperleme tuz banyosunun içerisinde Na_2O kirliliğinin varlığı, banyonun pH değerini yükselttiği için korozyon şiddetini arttırmıştır. Bu durum, yaşlandırma öncesi ve sonrası numune yüzeylerinde belirgin bozulmalar meydana getirmiştir. pH değeri arttıkça korozyon şiddeti daha da artmış ve yüzey bozulmaları fazlalaşmıştır.

6
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında fotovoltaik sistemlerde kullanılan düşük demirli desenli ince camların kimyasal temperlemeye sıcaklık, süre, desen ve kalınlık etkisinin ve kimyasal temperleme sonrası atmosferik koşullara dayanımın etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların ardından difüzyon, mekanik, optik ve yüzey pürüzlülük özelliklerindeki değişimler analiz edilip değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, analiz sonuçlarına göre, düşük demirli desenli ince camların kimyasal temperleme prosesine etkisi aşağıdaki şekilde değerlendirilmiştir.

1) Yüzde ağırlık değişimi analizlerine göre, işlem sıcaklığı ve süresinin artması ile yapıya katılan potasyum iyon miktarının arttığı saptanmıştır. Desenli ve float cam numunelerin karşılaştırılmasında cam kompozisyonundaki fark göz önünde bulundurulduğunda yapıya katılan potasyum iyon miktarının benzer olduğu saptanmıştır. Kimyasal temperlemeye kalınlığın etkisinin incelendiği çalışmaların sonucunda, artan kalınlıkla yapıya katılan potasyum iyon miktarının arttığı saptanmıştır.
2) Hesaplanan difüzyon katsayıları ve SEM/EDS analizlerine göre, difüzyon derinliği artan işlem sıcaklığı ve süresiyle artmaktadır. Difüzyon prosesinde hızlandırıcı etkiye sahip sıcaklık ve sürenin kimyasal temperleme işleminde de iyon hareketini kolaylaştırdığı tespit edilmiştir. Desenli ve float cam numunelerinde kompozisyon farkı göz ardı edildiğinde, difüzyon derinliğinin benzer olduğu tespit edilmiştir. Artan cam kalınlığıyla birlikte, yüzey alanının da artmasıyla iyon hareketinin kolaylaşması sonucu difüzyon derinliğinin de arttığı tespit edilmiştir.
3) Optik geçirgenlik analizi sonuçları değerlendirildiğinde, kimyasal temperlemeye sıcaklık ve sürenin etkisiyle belirgin bir değişim tespit edilmemiştir. Desenli ve float camın optik geçirgenlik analizleri karşılaştırıldığında aynı kalınlıktaki desenli camın geçirgenlik değerlerinin float cama göre yüksek olduğu tespit edilmiştir. Cam numunelerde kalınlığın azalmasıyla optik geçirgenlik değerlerinin az da olsa arttığı tespit

edilmiştir. Kimyasal temperlemenin ardından uygulanan atmosferik koşullara dayanım testlerinin optik geçirgenliğe etkisi incelendiğinde, numunelerin geçirgenlik değerlerinin korozyon nedeniyle cam yüzeyinde oluşan ve camdan daha düşük kırılma indisine sahip olan bir tabaka nedeniyle arttığı tespit edilmiştir.

4) Pusluluk analizi sonuçları değerlendirildiğinde, sıcaklık ve sürenin etkisiyle kimyasal temperli camların pusluluk değerlerinde belirgin bir değişim tespit edilmemiştir. Desenli ve float camın pusluluk analizleri karşılaştırıldığında aynı kalınlıkta desenli camın float cama göre pusluluk değerlerinin yüksek olduğu ve desenin pusluluğun arttırmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal temperli cam numunelerde kalınlığın azalmasıyla pusluluk değerlerinin az da olsa arttığı tespit edilmiştir. Kimyasal temperlemenin ardından uygulanan atmosferik koşullara dayanım testinin pusluluk değerlerine etkisi incelendiğinde, nem, tuz ve asit testlerinin ardından numunelerin pusluluk değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin, ikincil uygulamalardan sonra cam numunelerde yüzey kırılma indisinin düşmesi sonucu pusluluk değerlerinde meydana gelen artış olduğu tespit edilmiştir. Aşındırma testi sonrası ise, yüzey pürüzlülüğün azalması sonucu, pusluluk değerleri azalmıştır.
5) Yüzey pürüzlülüğü değerlerinde, sıcaklık, süre, desen, kalınlık, atmosferik koşulların etkisi ile kimyasal temperleme işleminden sonra belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Desenli camın float cama göre, kalın camın ince cama göre pürüzlülük değerlerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Desenin ve kalınlığın yüzey pürüzlülüğünde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
6) Kimyasal temperlemenin ardından numunelerin mekanik mukavemet değerlerinin analizi sonucunda; kimyasal temperlemeye sıcaklık ve sürenin etkisi incelendiğinde, kimyasal temperleme işlemi ile mekanik özelliklerin 3 kata kadar arttığı tespit edilmiştir. Desenli ve float camın mekanik özellikleri incelendiğinde, desenli camın mekanik özelliklerinin float cama kıyasla daha iyi olduğu belirlenmiştir. Bunu yanında float camın mekanik özelliklerinin desenli cama göre daha fazla geliştiği belirlenmiştir. Bunun

nedeni, float cam kompozisyonuna bağlı olarak yapıya katılan K^+ iyon derinliğinin daha fazla olması ve ağırlık değişiminin daha fazla olmasıdır. Cam kalınlığının artmasıyla mekanik özellikleri iyileştiği tespit edilmiştir. Kimyasal temperleme sonrası uygulanan nem, tuz, asit testlerinin mekanik özellikleri aşındırma testine kıyasla daha az etkilediği belirlenmiştir.

7) Kimyasal temperlemenin ardından numunelerin esneme değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Kimyasal temperleme sonrası desenli ve float camın esneme değerlerinin benzer olduğu tespit edilmiştir. Cam kalınlığının artmasıyla esneme değerlerinin değişmediği tespit edilmiştir. Kimyasal temperleme sonrası uygulanan nem, tuz, asit testlerinin esneme değerlerinde anlamlı bir değişime neden olmadığı tespit edilmiştir.
8) Kimyasal temperli cam numunelere, atmosferik koşullara dayanım testlerinden nem ve tuz testleri uygulanması cam numunelerin yüzeyinde renk değişimine neden olmuştur. Cam yüzeyinde oluşan renklenmede, cam yıkama yöntemlerinin ve tuz banyosu safiyetinin etkisi incelendiğinde, farklı yıkama yöntemi ve tuz banyosu safiyeti ile renklenmenin giderilmediği görülmüştür. Nem ve tuz ortamına maruz kalan cam yüzeyinin iyon değişimi tabakasında korozif bir yapı meydana gelmesiyle cam yüzeyinde renk değişimi görülmektedir. Deneysel çalışmalar sonucunda cam yüzeyinde oluşan renklendirmeyi öncelemek numunelerin kullanım alanlarında yüksek nem ve tuz ortamına maruz bırakılmamalıdır.
9) Bağ yapısı analizi sonuçlarına göre, kimyasal temperleme işleminde değişen sıcaklık ve sürenin cam yüzeyindeki Si—O—Si bağları deforme etmediği ancak yüksek çalışma sıcaklıkları ve sürenin, cam yüzeyinde alkali zenginleşmesi sonucunda, köprü yapmamış oksijen bağların sayısını arttırdığı tespit edilmiştir. Kimyasal temperlemeye desen etkisi incelendiğinde, kimyasal temperleme sonrası desenli camlarda float camlara göre köprü yapmamış Si—0 bağlarının sayılarının daha çok arttığı belirlenmiştir. Bu durum desenli cam yüzey alanının float cama göre daha fazla olması nedeniyle cam yüzeyi alkali iyonunca daha fazla zenginleşerek, köprü yapmamış oksijen bağlarının sayısını arttırmasıyla yorumlanabilir. Cam kalınlığının artmasının cam yüzeyinin bağ yapısında belirgin bir

değişiklik gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Nem testi ile cam yüzeyinde korozyon oluşması ve tuz testi ile cam yüzeyinde alkali zenginleşmesi sonucunda, köprü yapmamış oksijen bağların sayısını arttığı tespit edilmiştir. Asit testinin cam yüzeyinin bağ yapısını etkileyerek Si—O—Si bağlarının sola ötelenmesine ve köprü yapmamış oksijen bağlarına ait piklerin belirginleşmesine neden olduğu tespit edilmiştir. Aşındırma testinin cam yüzeyinin bağ yapısında belirgin bir değişikliğe neden olmadığı tespit edilmiştir.

Genel olarak sonuçlar değerlendirildiğinde, kimyasal temperlemeye sıcaklık ve süre, desen ve kalınlık etkisi ile kimyasal temperli camın atmosferik koşullara dayanımını incelendiğinde, sıcaklık, süre ve kalınlık artışı ile difüzyonun hızlandığı ve difüzyon derinliğinin arttığı saptanmıştır. Fotovoltaik sistemlerde kullanım potansiyeline sahip 2 mm kalınlığa sahip desenli camların uygulanan kimyasal temperleme işlemi sonucu mekanik özelliklerinin 3 kata kadar arttığı ve 3,2 mm kalınlığa sahip float camların mukavemet değerlerini sağladığı saptanmıştır. Kimyasal temperleme sonrası camın optik özelliklerinin korunduğu ve yüzey pürüzlülüğünün değişmediği saptanmıştır. Kimyasal temperlemenin ardından atmosferik koşullara dayanımın incelendiği nem, tuz, asit ve aşındırma testlerinin sonucunda, düşük demirli desenli ince camların optik özellikleri korunurken; yüzeylerinde makro ölçekte renk değişimleri olduğu saptanmıştır.

Fotovoltaik sistemlerde verim artışına yönelik düşük demir içeriğine sahip desenli ince camların kimyasal temperleme yöntemi ile mukavemetlendirilmesi için yapılan mekanik ve optik analizlerle desen, kalınlık, atmosferik koşullara dayanım, sıcaklık ve süre parametrelerinin kimyasal temperleme işlemine etkileri incelendiğinde, düşük demirli desenli ince camların, düşük süre ve sıcaklıklarda uygulanan kimyasal temperleme işlemi sonucu optik ve mekanik olarak fotovoltaik sistemlerde panel kapak camı olarak kullanımına uygun hale geldiği ve bu sistemlerde kullanım potansiyellerinin olduğu saptanmıştır.

KAYNAKÇA

[1] Green, M. A., “Photovoltaics: technology overview” Energy Policy, Cilt 28, No. 14, 989-998, 2000.

[2] Graf, R.F., "Modern dictionary of electronics", Butterworth-Heinemann, A.B.D, 1999.

[3] Kalogirou, S., "Solar Energy Engineering: Processes and Systems", Academic Pres, ISBN-13: 978-0-12-374501-9, 2009.

[4] A.E. Becquerel, C. R. Acad. Sci. 9, 145, 1839; A.E. Becquerel, C. R. Acad. Sci. 9, 561, 1839.

[5] C.E. Fritts, Proc. Am. Assoc. Adv. Sci. 33, 97, 1883; C.E. Fritts, Am. J. Sci. 26, 465, 1883.

[6] R.S. Ohl, "Light-sensitive electric device", US Patent No. 2,402,622, 1941; R.S. Ohl, "Light-sensitive device including silicon" , US Patent No. 2,443,542, 1941.

[7] Spence, W.P. ve Kultermann, E., "Construction Materials, Methods and Techniques", Cengage Learning, Washington, 2016.

[8] Messenger, R.A. ve Ventre, J., "Photovoltaic systems engineering", Taylor & Francis, Florida. 33, 2004. Goetzberger A. ve Hoffmann V.U., 2005, "Photovoltaic Solar Energy Generation", Springer–Verlag, 34. Patel M.R., "Wind and solar power systems", CRC Press LLC, 1999.

[9] J. Dziedzica and M. Inglotb, "Ultrathin Glass for the Photovoltaic Applications", Poland, 2017.

[10] Rawson, H., "Glasses and Their Applications", Institute of Metals, Michigan, 1991.

[11] IEA, “Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy”, 2014 edition, 2014.

[12] Iyiel A., “Trakya Cam Mersin Fabrikası 3 no’lu Fırında Düşük Demirli Deneme Üretimi Değerlendirmesi”, Araştırma ve Mühendislik Müdürlüğü, No.787, 2008.

[13] Cengiz, S., Karaca, A.C., Çakır, İ., Üner, H.B., Sevindik, A., “SEM-EDS analysis and discrimination of forensic soil”, For. Science Int., 141: 33-37, 2003.

[14] Almirall, J.R., “Elementel analysis of small glass fragements in forensic science”, Anal. Chim. Acta, 288: 17-24, 1994.

[15] Aykut, E., “RF saçtırma yöntemiyle üretilmiş mgf2 ince filmlerin optik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, 2019.

[16] Olgun, A., Sağlam, Z., “Trakya Cam Mersin Fabrikası 3 no’lu Fırında Düşük Demirli Deneme Üretimi Değerlendirmesi”, Araştırma ve Mühendislik Müdürlüğü, No.787, 2008.

[17] Persson, R., “Flat Glass Technology”, Butterworth & Co, New York, 1969.

[18]Dr. Karadağ, A., "Buzlu Cam Üretiminde Merdane Sıcaklık Dağılımının Hesaplanması", Araştırma ve Mühendislik Müdürlüğü,

[19]Şişecam., "Cam Teknolojisine Giriş Eğitim Notları", Şişecam Eğitim Müdürlüğü, No. 6, İstanbul, 1993.

[20]Trier, W., "Camın şekillendirme yöntemleri", Teknik bülten, C. 18, No.6, 1989.

[21]R. Brendel, H.J. Queisser, "On the thickness dependence of open circuit voltages of p-n junction solar cells", Sol. Energy Mater. Sol. Cells 29 (1993) 397.

[22]Arıburnu, D., Yıldız, T., "Fotovoltaik(PV) Sistemlerde Kullanılan Kapak Camlarının İnceltilebilmesi, Bükülebilir Hale Getirilmesi ve Sistemin Hafifletilmesi Amacıyla İnce Camlara Mukavemet ve Esneklik Kazandırılması" Şişecam Raporu, No. 983, 2016.

[23]Çakıcı, F., 2010. Gözlük Camı Materyalleri, Kaplamalar, Güneş Gözlükleri. Optik Refraksiyon Rehabilitasyon Temel Bilgiler, Türk Oftalmoloji Derneği Eğitim Yayınları No: 12(25), 292-304.

[24]Büyükyıldız, H.Z., 2011b. Coatings and Tints of Spectacle Lenses. TOD 45. Ulusal Oftalmoloji Kongresi, Girne, Kıbrıs.

[25]Thelen A., 1988. Design of the Optical Interference Coatings. McGraw Hill Company, Chapter 7, New York, USA.

[26]Aksak E., Küçüker T., 2005. Gözlük Lenslerinde Yansımalar. Gözlükçülük, Nadir Kitap Yayınevi, 452-454, Eskişehir.

[27]MEB, "Cam Üretimi Ve Şekillendirme Yöntemleri", Seramik Ve Cam Teknolojisi, 2013.

[28]Olgun, A., Sağlam, Z., Senge, H., Akmoran, E., "Çayırova Cam Sanayi A.Ş. Çayırova Fabrikası 3 No'lu Buzlucam Fırınında Düşük Demirli Oksit İçeren Kollektör Camı Üretimi" 17. Cam Problemleri Sempozyumu, 2002.

[29]Kocadağ, D., "Cam Kimyası, Özellikleri, Uygulaması", Birsen yayınevi, ISBN. 975-511-294-4, No. Y.0029, 2002.

[30]Banu ARSLAN GÜVEL "Refrakter Kaynaklı Cam Hatalarının Fırın İçerisindeki Oluşum Yerlerinin Tespiti", Yüksek lisans tezi, 2011.

[31] Şişecam., "Cam Teknolojisine Giriş Eğitim Notları", Şişecam Eğitim Müdürlüğü, İstanbul, 1993.

[32]Olgun, A., Sağlam, Z., Senge, H., Akmoran, E., " ÇAYIROVA CAM SANAYi A.ş. ÇAYIROVA FABRİKASI

[33] TechNavio, "Global Flexible Glass Market 2014-2018", rapor, 2014.

[34]Bach, H., Neuroth, H., "The properties of optical glass", Springer Verlag 1998.

[35] Gy, R., (2008). " Review Ion Exchange for Glass Strengthening ", Materials Science and Engineering B 149 , 159–165.

[36]Gardon, R., (1980). Thermal Tempering of Glass. D. R. Kreidl içinde, Glass: Sience and Technology (s. 146-213). Academic Press, New York.

[37]Karlsson, S., (2012). Modification of Float Glass Surfaces by Ion Exchange, Doktora Tezi, Linnaeus University, Vaxjö.

[38] Doremus, R.H., (1964). "Exchange and Diffusion of Ions in Glass", The Journal of Physical Chemistry, 68(8): 2212-2218.

[39]Macrelli, G., (2017). "Chemical Strengthening of Glass by Ion-Exchange, " ICG Annual Meeting 2017, 24 October 2017, İstanbul.

[40]Macrelli, G. ve Spa, I., (2015). "Glass Chemical strengthening by Ion Exchange", GPD Finland 2015, 23 June 2015, Tampere.

[41]Bogart, B.S. ve Dilliard, P.D., (1968). "Chemical strengthening of glass articles produced with flame treatment" US Patent No. US3615322A, Ohio.

[42]Bartholomew, R.F. ve Garfinkel, H. M., (1980). "Chemical strengthening of glass In Glass Science and Technology", Elsevier, 5: 217-270.

[43]Varshneya, A.K., (2010). "Chemical Strengthening of Glass: Lesson and Yet To Be Learned", International Journal of Applied Glass Science, 1: 131-142.

[44] Sglavo, V.M., (2012). "Influence of KNO3 Bath Composition on Ion Exchange Proceaa of Commercial Soda Lime Silicate Float Glass", Ion Exchange Technologies, 1: 305-314.

[45]Shelby, J. E., (2005). Introduction to Glass Science and Technology, 2nd Edition, The Royal Society of Chemistry, Cambridge.

[46]Şişecam., (1993). Cam Teknolojisine Giriş Eğitim Notları, Şişecam Eğitim Müdürlüğü, İstanbul.

[47]Macrelli, G., (2017). "Chemical Strengthening of Glass by Ion-Exchange, " ICG Annual Meeting 2017, 24 October 2017, İstanbul.

[48]Gardon, R., (1980). Thermal Tempering of Glass. D. R. Kreidl içinde, Glass: Sience and Technology (s. 146-213). Academic Press, New York.

[49]Macrelli, G., (2017, 10 24). Chemical Strengthening of Glass by Ion-Exchange. İstanbul, Istanbul, Türkiye: Guglielmo Macrelli Lecture Notes.

[50]Yorsan Glass Cam Merkezi, “Temperleme el kitabı”, İstanbul.

[51]Sglavo, V. M., (2012). Influence of KNO3 Bath Composition on Ion Exchange Proceaa of Commercial Soda Lime Silicate Float Glass. A. Kilislioğlu, Ion Exchange Technologies (s. 305-314).

[52] Karlsson, S., (2012). Modification of Float Glass Surfaces by Ion Exchange, Doktora Tezi, Linnaeus University, Vaxjö.

[53]Jannotti, P. ve Subhash, G., (2012). "Influence of Ultra-High Residual Compressive Stress on The Static and Dynamic Indentation Response of Chemically Strengthened Glass", Journal of the European Ceramic Society, 32: 1551-1559.

[54]Sglavo, V. M., Quaranta, A., Allodi, V. ve Mariotto, G., (2014). "Analysis of The Surface Structure of Soda Lime Silicate Glass After Chemical Strengthening In Different KNO3 Salt Baths", Journal of Non-Crystalline Solids, 401: 105-109.

[55] Varshneya, A.K., (2010). "The Physics of Chemical Strengthening of gGass: Room for A New View", Journal of Non-Crystalline Solids, 356: 2089-2294.

[56]Gy, R., (2008). "Ion Exchange for Glass Strengthening". Materials Science and Engineering, 149: 159-165.

[57] Varshneya, A.K., (2010). "Chemical Strengthening of Glass: Lesson and Yet To Be Learned", International Journal of Applied Glass Science, 1: 131-142.

[58]Jannotti, P. ve Subhash, G., (2012). "Influence of Ultra-High Residual Compressive Stress on The Static and Dynamic Indentation Response of Chemically Strengthened Glass", Journal of the European Ceramic Society, 32: 1551-1559.

[59]Sglavo, V. M., (2001). "Flaw-Insensitive Ion-Exchanged Glass: II, Production and Mechanical Performance", Journal of American Ceramic Society, 84: 1832-1838.

[60]Phillip Jannotti, G. S., (2012). "Influence of ultra-high residual compressive stress on the static and dynamic indentation response of chemically strengthened glass". Journal of the European Ceramic Society, 32: 1551-1559.

[61]Karlsson, S., (2012). Modification of Float Glass Surfaces by Ion Exchange, Doctoral Dissertation, Linnaeus University, Vaxjö, Sweeden.

[62]Jannottii, P., Subhash, G. ve Ifju, P., (2011). "Photoelastic Measurement of High Stress Profiles in Ion-Exchanged Glass", International of Applied Glass Science, 4: 275-281.

[63]Rawson, H., (1991). Glasses and Their Applications, Institute of Metals, Michigan.

[64]Varshneya, A.K., (2010). "Chemical Strengthening of Glass: Lesson and Yet To Be Learned", International Journal of Applied Glass Science, 1: 131-142.

[65]Varshneya, A.K., (2010). "The Physics of Chemical Strengthening of gGass: Room for A New View", Journal of Non-Crystalline Solids, 356: 2089-2294

[66]Sglavo, V.M., (2012). "Influence of KNO3 Bath Composition on Ion Exchange Proceaa of Commercial Soda Lime Silicate Float Glass", Ion Exchange Technologies, 1: 305-314.

[67]Jannotti, P., Subhash, G. ve Varshneya, A.K., (2014). "Ball Impact Response of Unstrengthened and Chemically Strengthened Glass Bars", Journal of American Ceramic Society, 97: 189-197.

[68]A. Gosterislioglu, A. E. Ersundu, M. Celikbilek Ersundu, I. Sokmen, Investigation the Effect of Weathering on Chemically Strengthened Flat Glasses, Journal of Non-Crystalline Solids, cilt.544, 2020.

[69] R.D. Husung, R.H. Doremus, J. Mater. Res., (1996). The infrared transmission spectra of four silicate glasses before and after exposure to water, Cambridge University Press, vol. 5, pp. 2209-2217.

[70] E.J. Kamitsos, (1996). Comment on `Infrared-reflectance spectra of heat-treated, sol-gel-derived silica, Phys. Rev. B, vol 53.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: terzigulcan@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. Terzi G., Öğüt B., Yıldız T., Gökçen E., Ersundu A. E., Çelikbilek Ersundu M., Sökmen İ., "Desenli Camların Kimyasal Temperleme Yolu İle Güçlendirilmesi", 33. Cam Sempozyumu, 2 Kasım2018, İstanbu, Türkiye.
2. Akıllı V., Terzi G., Kıbrıslı O., Çelikbilek Ersundu M., Ersundu A. E., "Comparative Radiation Shielding Study of WO3/Bi2O3-PbCl2-TeO2 Glass Systems As Transparent Shielding Materials", 34th Turkish Physical Society International Physical Congress, 5-9 Şubat 2018, Muğla, Türkiye.
3. Terzi G., Öğüt B., Yıldız T., Gökçen E., Ersundu A. E., Çelikbilek Ersundu M., Sökmen İ., "Patterned Glass Strengthening With Chemical Tempering Via Bath Technology", IGC 2019, 9-14 Haziran 2019, Boston, ABD.

Projeler

1. Fotovoltaik Sistemlerde Kullanılan Desenli İnce Camların Kimyasal Temperlenmesi, YÜLAP, 2018-2020 FYL