**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# ALÜMİNA SİLİKAT VE SODA KİREÇ SİLİKAT CAMLARIN KİMYASAL TEMPERLENMESİNDE KALINLIK VE KESME ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**BERKEL KAYACAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN**

**DOÇ. DR. MİRAY ÇELİKBİLEK ERSUNDU**

**İSTANBUL, 2018**

**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# ALÜMİNA SİLİKAT VE SODA KİREÇ SİLİKAT CAMLARIN KİMYASAL TEMPERLENMESİNDE KALINLIK VE KESME ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Berkel KAYACAN tarafından hazırlanan tez çalışması 16.10.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Miray ÇELİKBİLEK ERSUNDU

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Miray ÇELİKBİLEK ERSUNDU

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR YORUÇ

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Oğuzhan GÜNDÜZ

Marmara Üniversitesi _____

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün FYL-2018-3302 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

# ÖNSÖZ

Öncelikle lisans ve yüksek lisans boyunca değerli bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, her anlamda en iyi ve doğruyu bulmama yardımcı olan, kendime inancımı yitirdiğim anlarda bile bana inanmaktan ve güvenmekten bir an bile vazgeçmeyen, en önemlisi kendimi geliştirmem için aldığım her kararda beni koşulsuz destekleyen ve öğrencisi olmaktan her an gurur duyduğum değerli hocam Doç. Dr. Miray Çelikbilek Ersundu'ya,

Bana destek olup hayat görüşümün gelişmesine yardımcı olan, geniş bilgi birikimi ve hayat tecrübesini her zaman paylaşan, fikir ve önerilerini beni geliştirmek adına söylemekten çekinmeyen, duruşu ve olaylara yaklaşımıyla her zaman örnek aldığım Doç. Dr. Ali Erçin Ersundu'ya,

Deneysel çalışmalarımın tümünü gerçekleştirdiğim ve bunun gerçekleşebilmesi için tüm olanakları sağlayan, bu süreçte değerli bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyerek fikirleriyle olaylara farklı açılardan bakmama yardımcı olan, bilimsel çalışmalarım dışında güler yüzü ve yardımsever tavrı ile hayatı daha anlamlı kılan başta Şişecam Yüzey Teknolojileri Müdürü Dr. İlkay Sökmen olmak üzere Dr. Burcu Öğüt'e, Ezgi Deniz Biçer'e, Lukas Simurka'ya, Emel Mercan'a

Yüksek lisans öğrenimim boyunca en fazla zaman geçirdiğim ve bu zorlu süreçte bana sürekli destek olan, her konuda rahatlıkla konuşabildiğim ve fikirlerine saygı duyduğum Caner Kayaalp ve Nahide Özben'e, aynı zamanda lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca her anlamda fikir danışabildiğim ve bilgi birikimleriyle beni aydınlatan, kaliteli sohbetleriyle keyifli bir çalışma ortamı yaratan Yük. Met. Müh. Orhan Kıbrıslı'ya, Yük. Met. Müh. Nuşik Gedikoğlu'na, Yük. Met. Müh. Eren Doğan'a, Yük. Met Müh. Berkay Güven'e, Yük. Met. Müh. İpek Tunç'a,

Lisans ve lisansüstü öğrenimim boyunca engin bilgilerinden yararlandığım Yıldız Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği öğretim üyelerine,

Hayatımın çok büyük bir kısmında var olan ve her daim var olacağına inandığım, mutlu geçirdiğim zamanların çoğunda rol alan ve hayatı benim için daha anlamlı kılan SJ'11'e,

Bugünlere gelebilmemde en büyük pay sahibi olan, beni desteklemekten asla bıkmayan, her konuda fikirlerine güvendiğim, tüm kalbimle sevdiğim, oğulları olmaktan her zaman gurur duyduğum ve örnek aldığım sevgili anne ve babam Seda ve Oğuz Kayacan'a teşekkürü borç bilirim.

Ekim 2018

Berkel Kayacan

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....vii

KISALTMA LİSTESİ.....viii

ŞEKİL LİSTESİ.....ix

ÇİZELGE LİSTESİ.....xii

ÖZET.....xiii

ABSTRACT.....xv

BÖLÜM 1

GİRİŞ.....1

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

BÖLÜM 2

TEORİK BİLGİ.....4

2.1 Cam Yapısı.....4
2.2 Cam Üretimi.....7
2.3 Camın Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi.....8
2.4. Kimyasal Temperleme.....11
2.4.1 Kimyasal Temperleme İşleminde Cam Kalınlık Etkisi.....16
2.4.2 Kimyasal Temperleme İşleminde Cam Kesme Tipinin Etkisi.....18

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....21

3.1 Numunelerin Hazırlanması (Yıkama ve Tartım).....22
3.2 Kimyasal Temperleme İşlemi.....23

3.3 Vickers Mikrosertlik Analizi ..... 24
3.4 Çizilme Derinliği Analizi ..... 25
3.5 Dört Noktadan Eğme Deneyi ..... 26
3.6 Halka üstü Halka Deneyi ile Kırılma Yükü Analizi ..... 27
3.7 Optik Geçirgenlik Analizi ..... 28
3.8 Kırılma İndisi Ölçümü ..... 29
3.9 Yüzey Gerilimi Ölçümü ..... 29
3.10 Bağ Yapısı Analizi ..... 30
3.11 Beyaz Işık İnterferometresi ile Yüzey Topografisi Analizi ..... 31

BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLAR ..... 33

4.1 Kimyasal Temperleme Davranışına Kalınık Etkisi ..... 34
4.1.1 Soda Kireç Silikat Camların Sonuçları ..... 34
4.1.2 Alümina Silikat Camların Sonuçları ..... 45
4.2 Kimyasal Temperleme Davranışına Kesme Tipinin Etkisi ..... 55
4.2.1 Dört Noktadan Eğme Deneyi Sonuçları ..... 55
4.2.2 Yüzey Gerilimi Sonuçları ..... 56
4.2.3 Gerilim Derinliği Sonuçları ..... 56
4.2.4 Kenar Pürüzlülüğü Sonuçları ..... 57

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLARIN YORUMLANMASI ..... 59

5.1 Kalınlık Etkisinin Değerlendirilmesi ..... 59
5.1.1 Ağırlık Değişimi Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... 60
5.1.2 Yüzey Gerilimi Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... 62
5.1.3 Gerilim Derinliği Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... 64
5.1.4 Merkezi Gerilim Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... 66
5.1.5 Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... 68
5.1.6 Çizilme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... 70
5.1.7 Halka Üstü Halka Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... 71
5.1.8 Optik Geçirgenlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... 72
5.1.9 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... 74
5.1.10 Bağ Yapısı Analizi Sonuçlarının Yorumlanması ..... 75
5.2 Kesme Etkisinin Değerlendirilmesi ..... 75
5.2.1 Dört Noktadan Eğme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... 75
5.2.2 Yüzey Gerilimi Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... 76
5.2.3 Gerilim Derinliği Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... 76
5.2.4 Kenar Pürüzlülüğü Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... 76

SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 78

KAYNAKLAR ..... 81

ÖZGEÇMİŞ ..... 84

## SİMGE LİSTESİ

| | |
|---|---|
| cm | Santimetre |
| g | Gram |
| GPa | Gigapascal |
| kN | Kilonewton |
| mm | Milimetre |
| mN | Milinewton |
| MPa | Megapascal |
| µm | Mikrometre |
| $\mu m^3$ | Mikrometre küp |
| N | Newton |
| nm | Nanometre |

## KISALTMA LİSTESİ

| | |
|---|---|
| ATR | FTIR'nin "Attenuated total reflectance" modu |
| AS | Schott Xensation® markalı alümina silikat ticari camı |
| AS07 | 0,7 mm kalınlığında alümina silikat cam |
| AS11 | 1,1 mm kalınlığında alümina silikat cam |
| CSLS | Triumph Glass® markalı soda kireç silikat ticari camı |
| CSLS07 | 0,7 mm kalınlığında soda kireç silikat camı |
| CSLS11 | 1,1 mm kalınlığında soda kireç silikat camı |
| FTIR | Fourier transform kızılötesi spektroskopisi |
| IR | Kızılötesi |
| REF | FTIR'nin "Reflection" modu |
| $r_a$ | Metal katyonun iyonik yarıçapı |
| $r_o$ | Oksitin iyonik yarıçapı |
| TSLS | Trakya Cam® markalı soda kireç silikat ticari camı |
| TSLS11 | 1,1 mm kalınlığında soda kireç silikat camı |
| TSLS11$CO_2$ | $CO_2$ kesim yöntemiyle kesilen 1,1 mm kalınlığında soda kireç silikat camı |
| TSLS11GL | Yeşil lazer kesim yöntemiyle kesilen 1,1 mm kalınlığında soda kireç silikatcamı |
| TSLS11W | Elmas kesim yöntemiyle kesilen 1,1 mm kalınlığında soda kireç silikat camı |
| $T_e$ | Ergime sıcaklığı |
| $T_g$ | Cam geçiş sıcaklığı |
| UV | Mor ötesi |
| VSI | Mikrometre mertebesinde detaylı topografik analiz modu |
| VXI | Nanometre mertebesinde detaylı topografik analiz modu |
| ΔV | Hacim değişimi |

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa


Şekil 2. 1 Cam malzemeler için özgül hacim sıcaklık eğrisi ..... 6

Şekil 2. 2 İyon değişimi işleminin şematik gösterimi ..... 12

Şekil 2. 3 Isıl ve kimyasal temperleme işlemine tabi tutumuş camların gerilim profili ..... 16

Şekil 3. 1 Sepete yerleştirilmiş numuneler ..... 23

Şekil 3. 2 Kimyasal temperleme işlemi sonrası numuneler ..... 23

Şekil 3. 3 Schimadzu Model-M Vickers mikrosertlik cihazı ..... 24

Şekil 3. 4 Oluşturulan izin beyaz ışık interferometresindeki görüntüsü ..... 24

Şekil 3. 5 Nanovea M1 nanosertlik ve nanoçizik cihazı ..... 25

Şekil 3. 6 Oluşturulan çiziğin beyaz ışık interferometresindeki görüntüsü ..... 26

Şekil 3. 7 Instron 3366 cihazı ..... 27

Şekil 3. 8 Halka üstü halka deney düzeneği ..... 28

Şekil 3. 9 Lambda 950 model UV/VIS/NIR spektrofotometresi ..... 28

Şekil 3. 10 Schmidt + Haensch marka refraktometre ..... 29

Şekil 3. 11 FSM 6000LE yüzey gerilim ölçüm cihazı ..... 30

Şekil 3. 12 Hyperion 3000 Fourier dönüşümlü infrared spektrofotometresi ..... 31

Şekil 3. 13 Bruker marka ContourGT – X model beyaz ışık interferometresi ..... 32

Şekil 4. 1 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C ve c) 450 $^{o}$C'de ağırlık değişimi sonuçları ..... 35

Şekil 4. 2 CSLS11 numunesinin atmosfer ve kalay yüzeylerinin yüzey gerilimi sonuçları ..... 36

Şekil 4. 3 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C ve c) 450 $^{o}$C'de yüzey gerilimi sonuçları ..... 37

Şekil 4. 4 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C b) 425 $^{o}$C c)450 $^{o}$C'de gerilim derinliği sonuçları ..... 38

Şekil 4. 5 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C b) 425 $^{o}$C c) 450 $^{o}$C'de erkezi gerilim sonuçları ..... 39
Şekil 4. 6 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C b) 425 $^{o}$C c) 450 $^{o}$C'de sertlik sonuçları ..... 40
Şekil 4. 7 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin 425 $^{o}$C'de çizilme derinliği sonuçları . 41
Şekil 4. 8 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin 425 $^{o}$C'de tahrip edilen hacim sonuçları ..... 41
Şekil 4. 9 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C, c) 450 $^{o}$C'de kırılma yükü sonuçları ..... 42
Şekil 4. 10 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş CSLS11 ve CSLS07'nin optik geçirgenlik grafikleri ..... 43
Şekil 4. 11 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 36 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş CSLS11 için yüzey pürüzlülüğü görüntüleri ..... 44
Şekil 4. 12 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 36 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş CSLS07 için yüzey pürüzlülüğü görüntüleri ..... 44
Şekil 4. 13 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş CSLS11 ve CSLS07 camların FTIR görüntüleri ..... 45
Şekil 4. 14 AS11 ve AS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C ve c) 450 $^{o}$C'de ağırlık değişimi sonuçları ..... 46
Şekil 4. 15 AS07 ve AS11 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C ve c) 450 $^{o}$C'de yüzey gerilimi sonuçları ..... 47
Şekil 4. 16 AS07 ve AS11 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C ve c) 450 $^{o}$C'de gerilim derinliği sonuçları ..... 48
Şekil 4. 17 AS07 ve AS11 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C ve c) 450 $^{o}$C'de merkezi gerilim sonuçları ..... 49
Şekil 4. 18 AS11 ve AS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C b) 425 $^{o}$C c) 450 $^{o}$C'de sertlik sonuçları ..... 50
Şekil 4. 19 AS11 ve AS07 numunelerinin 425 $^{o}$C'de çizilme derinliği sonuçları ..... 51
Şekil 4. 20 AS11 ve AS07 numunelerinin 425 $^{o}$C'de 20 geçişli çizilme deneyi sonuçları ..... 51
Şekil 4. 21 AS11 ve AS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C, c) 450 $^{o}$C'de kırılma yükü sonuçları ..... 52
Şekil 4. 22 Orijinal ve 425 $^{o}$C – 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş camların optik geçirgenlik grafikleri ..... 53
Şekil 4. 23 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 12 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş AS11 için yüzey pürüzlülüğü görüntüleri ..... 54
Şekil 4. 24 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 12 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş AS07 için yüzey pürüzlülüğü görüntüleri ..... 54

Şekil 4. 25 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş AS11 ve AS07 camların FTIR görüntüleri ..... 55
Şekil 4. 26 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$, TSLS11W, TSLS11GL için eğme mukavemeti grafiği ..... 56
Şekil 4. 27 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin yüzey gerilimi grafiği ..... 56
Şekil 4. 28 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin gerilim derinliği grafiği ..... 57
Şekil 4. 29 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL için yüzey pürüzlülüğü görüntüleri . 58
Şekil 4. 30 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$ ve TSLS11W için yüzey pürüzlülüğü görüntüleri ..... 58
Şekil 5. 1 400 $^{o}$C, 425 $^{o}$C ve 450 $^{o}$C'de CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin yüzde ağırlık değişimi grafiği ..... 60
Şekil 5. 2 400 $^{o}$C, 425 $^{o}$C ve 450 $^{o}$C'de AS07 ve AS11 numunelerinin yüzde ağırlık değişimi grafiği ..... 61
Şekil 5. 3 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin yüzey gerilimi grafiği ..... 63
Şekil 5. 4 AS11 ve AS07 numunelerinin yüzey gerilimi grafiği ..... 64
Şekil 5. 5 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin gerilim derinliği grafiği ..... 65
Şekil 5. 6 AS11 ve AS07 numunelerinin gerilim derinliği grafiği ..... 66
Şekil 5. 7 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin merkezi gerilim grafiği ..... 67
Şekil 5. 8 AS11 ve AS07 numunelerinin merkezi gerilim grafiği ..... 68
Şekil 5. 9 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin optik geçirgenlik grafiği ..... 73
Şekil 5. 10 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş AS07 ve AS11 numunelerinin optik geçirgenlik grafiği ..... 74

# ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa


Çizelge 4. 1 Birinci grup deneysel çalışmalar numune tablosu ..... 33
Çizelge 4.2 İkinci grup deneysel çalışmalar numune tablosu ..... 34
Çizelge 5. 1 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin yüzde ağırlık değişimi tablosu ..... 60
Çizelge 5. 2 AS07 ve AS11 numunelerinin yüzde ağırlık değişimi tablosu..... 61
Çizelge 5. 3 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin yüzey gerilimi tablosu ..... 62
Çizelge 5. 4 AS07 ve AS11 numunelerinin yüzey gerilimi tablosu ..... 63
Çizelge 5. 5 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin gerilim derinliği tablosu ..... 65
Çizelge 5. 6 AS07 ve AS11 numunelerinin gerilim derinliği tablosu ..... 66
Çizelge 5. 7 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin merkezi gerilim tablosu..... 67
Çizelge 5. 8 AS07 ve AS11 numunelerinin merkezi gerilim tablosu ..... 68
Çizelge 5. 9 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin Vickers mikrosertlik tablosu..... 69
Çizelge 5. 10 AS07 ve AS11 numunelerinin Vickers mikrosertlik tablosu ..... 69
Çizelge 5. 11 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin çizilme testi tablosu ..... 70
Çizelge 5. 12 AS07 ve AS11 numunelerinin çizilme testi tablosu..... 70
Çizelge 5. 13 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin kırılma yükü tablosu ..... 71
Çizelge 5. 14 AS07 ve AS11 numunelerinin kırılma yükü tablosu ..... 72
Çizelge 5. 15 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü tablosu ..... 74
Çizelge 5. 16 AS07 ve AS11 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü tablosu ..... 74
Çizelge 5. 17 TSLS11CO2, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin dört noktadan eğme deneyi sonuçları ..... 75
Çizelge 5. 18 TSLS11CO2, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin yüzey gerilimi sonuçları ..... 76
Çizelge 5. 19 TSLS11CO2, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin gerilim derinliği sonuçları ..... 76
Çizelge 5. 20 TSLS11CO2, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin kenarlarının pürüzlülük sonuçları ..... 77

# ÖZET

## ALÜMİNA SİLİKAT VE SODA KİREÇ SİLİKAT CAMLARIN KİMYASAL TEMPERLENMESİNDE KALINLIK VE KESME ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Berkel KAYACAN

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Miray ÇELİKBİLEK ERSUNDU

Günümüzde estetik ve fonksiyonel taleplerin artması ve gelişen teknoloji ile üretilen cam kalınlıkları giderek incelmiştir. Camlar inceldikçe ağırlıkları azalmakta ve daha estetik bir görünüme sahip olmaktadır. Ancak bu noktada, incelen camlardan da kalın camlarda ulaşılan mekanik dayanım değerlerini sağlaması beklenmektedir. Mekanik dayanım değerlerini artırmanın yolu üretim sonrası uygulanan ikincil işlemlerdir. Bu işlemlerden en yaygını kimyasal ve ısıl olmak üzere iki çeşidi olan temperleme işlemidir. Bundan yaklaşık 100 sene önce, tarihte ilk defa seramik malzemelerde dekorasyon amaçlı kullanılan kimyasal temperleme işlemi herhangi bir kalınlık kısıtlaması olmaksızın uygulanabilir bir işlemken; ısıl temperleme 2 mm altındaki cam kalınlıklarına uygulanamamaktadır. İyon değişimi esaslı bir işlem olan kimyasal temperleme prosesinde, mukavemetlendirilmek istenen cam malzeme kendi cam geçiş sıcaklığının altında ve içine daldırılacağı tuz banyosu bileşiminin ergime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılmış tuz banyosunun içine daldırılıp belirli bir süre bekletilir. Bu esnada, cam yapısında bulunan boyutça küçük alkali iyonlarla tuz banyosu içinde bulunan boyutça büyük aynı değerlik elektron sayısına sahip iyonlar yer değiştirir. Kimyasal bağ oluşturmaksızın cam yüzeyinden belirli bir derinliğe nüfuz ederek cam yapısına katılan boyutça büyük iyonlar cam yapısında artık gerilmeler oluşturur. Merkezi gerilim ile dengelenen bu artık gerilmeler ise camın mekanik dayanımını artırır.

Difüzyon mekanizması ile ilerleyen kimyasal temperleme prosesinde, proses verimine etki eden çok sayıda faktör vardır. Bunlar kimyasal temperleme prosesi süresi, sıcaklığı,

tuz safiyeti ve bileşimi, cam kompozisyonu, proses kademesi, ön / son işlemler ve fırın tipidir. Literatürde daha önce kimyasal temperleme konusunda yapılan çalışmalarda proses sıcaklığı ve süresinin, tuz safiyeti ve kompozisyonu, cam kompozisyonu, ilk ve son işlemlerin proses verimine etkisi incelenmiş ancak diğer faktörlerin etkisi konusunda sistematik ve kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. İnce cam kullanımının giderek arttığı günümüzde, kimyasal temperleme işlemi ticari olarak taşıdıkları büyük önem nedeniyle inceltilmeleri ve hafifletilmeleri konusunda yoğun çalışmalar yapılan elektronik ekran camlarına, otomobil camlarına ve cam ev eşyalarına da uygulanmaktadır. Dolayısıyla kimyasal temperleme prosesine kalınlığın etkisini bilmek ince camların uygulama alanlarını belirlemek açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca incelen cam kalınlıkları ile yeni cam kesim teknikleri gelişmiş, ince camların kesiminde temassız kesim yöntemleri ön plana çıkmıştır. Bu anlamda, kesim tipi sonucu meydana gelen farklı kenar kalitelerinin kimyasal temperleme proses verimine etkisinin bilinmesi de önem kazanmıştır.

Bu tez çalışmasının amacı, alümina silikat ve soda kireç silikat esaslı camların farklı süre ve sıcaklıklarda kimyasal temperleme işlemi ile güçlendirilmesi ve kimyasal temperleme işlemine cam kalınlığının ve cam kesme tipinin etkisinin incelenmesidir. İki grup halinde yapılan deneysel çalışmaların ilk bölümünde 1,1 ve 0,7 mm olmak üzere iki farklı kalınlığa sahip iki farklı cam kompozisyonu için farklı kimyasal temperleme sıcaklık ve sürelerinde çalışılmış; yapılan mekanik, optik ve yapısal analizlerle kimyasal temperleme prosesine cam kalınlığının etkisi araştırılmıştır. İkinci grup çalışmalarda ise, $CO_2$ lazer, elmas ve yeşil lazer kesme tipleri ile kesilmiş tek bir kalınlık ve kompoziyona sahip camlar, ilk grup çalışmadan yola çıkılarak seçilen tek bir sıcaklık ve sürede kimyasal temperleme prosesine tabi tutulmuş ve yapılan mekanik analizler ile kesme tipinin kimyasal temperleme proses verimine etkisi araştırılmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda, cam kalınlığının kimyasal temperleme proses verimine etkisinin neredeyse olmadığı, kesme tipinin ise kimyasal temperleme proses veriminde etkili olduğu ve en pozitif sonuçların sağladığı yüksek kenar kalitesi sayesinde $CO_2$ lazer kesim tipi ile kesilen camlarda elde edildiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kimyasal temperleme, soda kireç silikat, alümina silikat, cam kalınlığı, kesme tipi

## ABSTRACT

# INVESTIGATION THE EFFECT OF THICKNESS AND CUTTING ON CHEMICAL TEMPERING OF ALUMINOSILICATE AND SODA LIME SILICATE GLASSES

Berkel KAYACAN

Metallurgical and Materials Engineering

M.Sc. Thesis

Adviser: Asst. Prof. Dr. Miray ÇELİKBİLEK ERSUNDU

Nowadays, the thickness of glasses has gradually decreased with developing technology and increasing aesthetic and functional demands. As the glass gets thinner, its weight decreases and it has a better aesthetic appearance. At this point, it is expected to reach similar mechanical strength values in both thicknesses. Increasing the mechanical strength of glasses is possible through different methods secondary treatments. Thermal and chemical tempering processes are the most common techniques used for this purpose. The chemical tempering process, which is initially used in ceramic materials for decoration purposes about 100 years ago, is an applicable mechanical strengthening process in glasses without any thickness restrictions. This makes chemical tempering much preferable over thermal thempering since thermal tempering process can not be applied to glasses having thicknesses of 2 mm and less. Chemical tempering is basically based on an ion exchange process in which the glass material, which is desired to be mechanically strengthened, immersed in a molten salt bath at a temperature below the glass transition temperature of that glass and above the melting temperature of the used salt. During the ion exchange prosess, small sized alkali ions in the glass structure are replaced by large sized alkali ions present in the molten salt bath. Accordingly, the large sized ions penetrate to a certain depth through the glass surface without forming a chemical bond and form residual stresses. These residual stresses which are compensated by the central tension consequently increase the mechanical strength of the glass.

There are several factors that might affect the efficiency of chemical tempering process which is based on a simple diffusion mechanism. These factors are chemical tempering process temperature and time, salt purity and composition, glass composition, process stages such as preheating / postcooling and type of furnace. In the literature, chemical tempering studies are generally concentrated on the effect of process temperature and time, salt purity and composition on chemical tempering process efficiency. However, to the best of our knowledge, there is no study on the effect of glass thickness and cutting type on chemical tempering process. The increase in use of chemical tempering process for thin glasses has a significant commercial role for different applications of glass such as electronic display glasses, automobile glasses and glassware.. Therefore, it is important to know the effect of glass thickness on chemical tempering process to ultimately determine the applicability of thin glass for different usage areas. In addition, new contactless glass cutting techniques are developed as with decreasing glass thicknesses. In this sense, it becomes important to know the effect of the edge quality on the efficiency of chemical tempering process originated from different cutting types. The aim of this thesis is to mechanically strengthen alumina silicate and soda lime silicate glasses using chemical tempering process at different process temperatures and times and to investigate the effect of glass thickness and cutting type on chemical tempering process. In the first part of the experimental studies two different glass compositions as soda lime and aluminosilicate with different thicknesses of 1.1 and 0.7 mm were studied at different temperature and times; the effect of thickness on chemical tempering process was investigated by mechanical, optical and structural analyses. In the second group of studies, soda lime silicate glasses with 1.1 mm of thickness were cutted with $CO_2$ laser, diamond and green laser cutting techniques and were subjected to chemical tempering process at selected temperatureand the effect of cutting type on chemical tempering process was investigated by mechanical analyses. As a result of the experimental studies, it has been determined that the glass thickness has not an effect on chemical tempering efficiency, while the cutting type substantially affectes the efficiency and the samples cutted with $CO_2$ laser show the better performance due to their supeior edge quality.

**Keywords:** Chemical tempering, soda lime silicate, aluminosilicate, glass thickness, cutting type

# BÖLÜM 1

# GİRİŞ

## 1.1 Literatür Özeti

Cam günümüzde birçok alanda kullanılan ve keşfi milattan önce 4000'lere dayanan seramik esaslı bir malzemedir. Cam tarihte ilk defa üretildiğinde, büyük ölçüdeki hammaddesi kum yani $SiO_2$'dir. Günümüzde ise gelişen teknoloji sayesinde birçok farklı bileşen cam yapısına katkılandırılmış ve bu sayede istenilen özellikler elde edilmiştir. Cam, mekanik açıdan sert ve gevrek, optik açıdan ise saydam bir malzeme oluşu dolayısıyla çok geniş kullanım alanı olan bir malzemedir. Günümüzde cam üretiminin %53'ü cam ambalaj, %29'u düzcam, %5'i cam ev eyşası, %2'si cam lifi ve %11'i de diğer ürünlere aittir. Dünya yıllık cam üretim kapasitesinin miktar olarak 180 milyon ton, değer olarak da 130-140 milyon dolar düzeyinde olduğu tahmin edilmektedir. Bu denli büyük bir pazar payına sahip bir malzemeden beklenen özellikler gün geçtikçe artmaktadır. Bu beklentilerin başında ise, kırılgan bir malzeme olan camın mekanik özelliklerin geliştirilmesi gelmektedir. Mekanik özelliklerde yapılan iyileştirmeler ise, malzemeye uygulanan ikincil işlemlerle sağlanmaktadır. Bu işlemlerden en yaygın olanları laminasyon, kaplama, alev ve asit uygulamaları, ısıl ve kimyasal temperleme işlemleridir. Bu işlemler sonucunda cam malzemenin, uygulanan yüklere karşı direnci artar. Bu da malzemenin mukavemetini artırır ve sonuç olarak camın mekanik özellikleri iyileşir.

Düzcam üretim prosesi ilk olarak 1959 yılında İngiliz Pilkington şirketi tarafından bulunmuş bir metottur. Bu sayede, zımparalama ve parlatma işlemine gerek duymaksızın düzcam eldesi ilk defa gerçekleştirilmiştir. O yıldan bu yana cam endüstrisindeki gelişmeler doğrultusunda, üretilen düzcam kalınlıkları giderek

azalmıştır. Bu da ince camlarda mukavemet artırmak için uygulanacak ikincil işlemleri sınırlamıştır. Mekanik özellikleri iyileştirmek adına, 2 mm ve üzerinde kalınlığa sahip camlara ısıl temperleme işlemi uygulanabilirken; bu kalınlığın altındaki camlara ısıl temperleme uygulanamamaktadır. Bu durum, günümüzde çok ince olarak üretilebilen düz camın mekanik özelliklerini arttırmak amacıyla yeni bir yöntemin uygulanmasını gerekli kılmış ve kimyasal temperleme işlemi uygulanmaya başlanmıştır.

Kalınlık ve geometri farketmeksizin uygulanabilen kimyasal temperleme işlemi; camın ergimiş tuz banyosuna daldırılıp bekletilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Cam yüzeyinden belirli bir derinliğe kadarki bölümde, cam yapısındaki alkali iyonlarla tuz bileşimi içindeki aynı değerlik elektron sayısına sahip iyonların yer değiştirmesiyle temperleme gerçekleşir. Cam yapısından ayrılan iyon yerine gelen ve iyonik yarıçapı daha büyük olan iyonun cam yapısına katılmasıyla yüzeyde bir gerilim oluşur. Oluşan bu gerilim merkezdeki çekme gerilmesi (merkezi gerilim) ile dengelenir ve işlem sonunda camın mukavemeti 2-3 kat artar. Dizfüzyon temelli bir işlem olan kimyasal temperleme prosesinin verimine etki eden pek çok değişken vardır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, cam bileşimi, tuz bileşimi ve safiyeti, ön ısıtma ve son soğutma sıcaklıkları ve süresi, fırın tipi, işlem kademesi, süresi ve sıcaklığı paramatrelerinin kimyasal temperleme verimine etkisi incelenmiş ancak bu değişkenlerden çok azı üzerine sistematik ve kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Bunun yanında kimyasal temperleme işlemine cam kalınlığının ve cam kesme tipinin etkisi literatürde daha önce incelenmemiştir.

### 1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, alümina silikat ve soda kireç silikat esaslı, 0,7 ve 1,1 mm kalınlıklarda, $CO_2$ lazer, elmas ve yeşil lazer kesme tipleri ile kesilmiş camların farklı süre ve sıcaklıklarda kimyasal temperleme işlemi ile güçlendirilmesi ve kimyasal temperleme işlemine cam kalınlığının ve cam kesme tipinin etkisinin incelenmesidir.

### 1.3 Orijinal Katkı

Her geçen gün gelişen cam üretim teknolojisi ve artan tüketim daha ince camların günlük hayatımıza girmesini sağlamıştır. Televizyon ve cep telefonu gibi elektronik cihazların

ekranları, otomobil camları ve cam ev eşyaları gibi birçok alanda kullanılan ince camların mekanik özelliklerinin de gelişmiş olması beklenmektedir. Isıl ve kimyasal temperleme, mekanik özelliklerin geliştirilmesi için en çok tercih edilen ikincil işlemlerdir. Ancak 2 mm kalınlığın altındaki camlarda ısıl temperleme işlemi uygulanabilirliğini yitirmektedir. Her kalınlıkta ve geometride cama uygulanabilir bir işlem olan kimyasal temperleme, bu avantajının yanı sıra, işlem sonucu ulaşılan mekanik mukavemet değerleri açısından ısıl temperlemeye oranla daha verimli bir işlemdir. Literatürde son yıllarda kimyasal temperleme prosesinin verimi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda özellikle proses sıcaklığı ve süresinin kimyasal temperleme verimi incelenmiştir. Bununla beraber, kimyasal temperleme prosesinde kullanılan tuzun safiyeti, cam bileşimi, ön/son işlemler ve fırın tipi değiştirilerek araştırmalar yapılmıştır.

İnce camların kullanımı sağlayacağı gerek estetik gerekse hafiflik özellikleri ile günümüzde özellikle elektronik, otomotiv ve cam ev eşyası sektörlerinin odağı olmuştur. Ancak incelen cam kalınlıklarının beraberinde mekanik özelliklerde bir kötüleşme göstermeyerek; mekanik açıdan da beklentileri karşılaması gerekmektedir. Bu durum daha hafif camlarla yüksek mukavemet değerlerine ulaşılabilmesi anlamına gelirken; ince camın kullanım alanını genişlemesine de ortam hazırlamaktadır. İnce cam kullanımının giderek arttığı günümüzde, kimyasal temperleme prosesine kalınlığın etkisini bilmek ince camların kullanılabileceği uygulama alanlarını belirlemek açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, bu tez çalışmasında ultra ince olarak nitelendirilebilecek 0,7 ve 1,1 mm kalınlıkta camlar kimyasal temperlenerek, kimyasal temperleme verimine kalınlık etkisi literatürde ilk kez incelenmiştir. Bunun yanı sıra, gelişen teknoloji ve incelen cam kalınlıkları ile yeni cam kesim teknikleri gelişmiş, elmas kesim yerini temassız kesim yöntemleri olan yeşil lazer ve $CO_2$ lazer kesim tipine bırakmıştır. Bu anlamda, cam kesim tipinin kimyasal temperleme proses verimine etkisinin bilinmesi gerekli olmuştur. Bu tez çalışmasında ayrıca, ince camların kesilmesinde kullanılan $CO_2$ lazer, elmas ve yeşil lazer kesme tipleri ile kesilen camlar kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş ve kesme tipinin proses verimine etkisi literatürde ilk kez incelenmiştir.

# BÖLÜM 2

# TEORİK BİLGİ

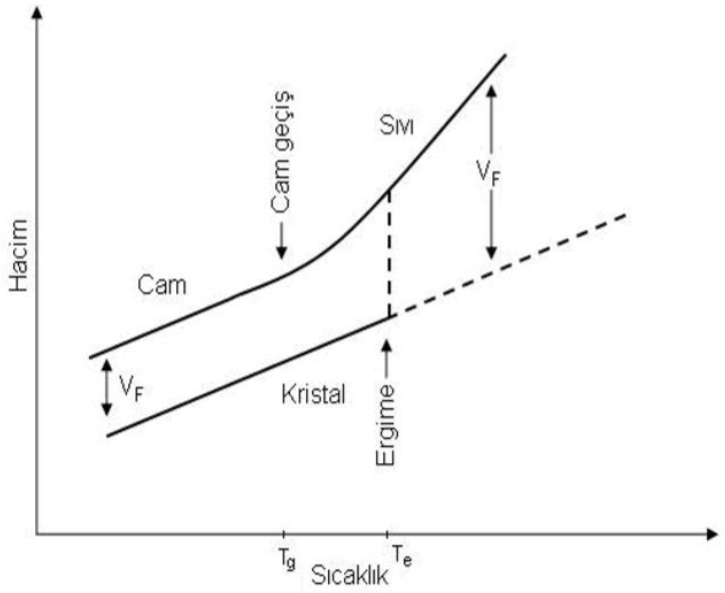
## 2.1 Cam Yapısı

Cam günümüzde birçok alanda kullanılan ve keşfi milattan önce 4000'lere dayanan seramik esaslı bir malzemedir. İnsanlar ilk olarak, hammaddesinin büyük bir kısmını oluşturan kumu ergitip dökerek düşük kalite camın üretimini gerçekleştirmiştir. Ardından gelişen teknoloji ve artan ihtiyaçlar doğrultusunda, geçen yıllarla üretilen cam kalitesinde artış görülmüştür. Gelişen teknoloji ile beraber camın geçirgenlik özelliği ve mekanik özellikleri iyileştirilmiştir. Kullanılan çeşitli üretim yöntemleri sayesinde istenen boyut ve şekillerde cam üretimi gerçekleştirilmiş; bu da camın kullanım alanını genişletmiştir [1]. Cam, mekanik açıdan sert ve gevrek, optik açıdan ise saydam bir malzemedir [2].

Cam, kısa mesafede sıralı bir düzene sahip olan amorf bir katıdır. Kristal malzemelerde görülen tekrarlı düzen amorf yapılı camda görülmez; aksine kısa mesafeli bir düzen vardır. Camı diğer malzemelerden ayıran bir diğer özellik ise, termodinamik olarak kararsız yapısı nedeniyle belirli bir ergime sıcaklığına sahip olmamasıdır. Tıpkı ergime reaksiyonu gibi camlara özgü karakteristik bir davranış olan cam geçiş reaksiyonu da belirli bir sıcaklık aralığı boyunca gerçekleşir. Cam malzemeler, ergiyik halden soğuma esnasında kristalizasyon gerçekleşmeden elde edilir. Bu yüzden cam hızlı soğutulmuş bir sıvı olarak da tarif edilebilir. Camın sıvı fazdan katı faza geçişi esnasında özgül haciminde kristal malzemelerdeki kadar büyük bir değişiklik meydana gelmez. Özgül hacim değeri, malzemenin kristal haldeki özkütlesi ile sıvı haldeki özkütlesinin farkı kullanılarak hesaplanır. Pratikte amorf ya da kristalin malzemenin oluşumu, o malzemenin sıvı fazdan

katı faza dönüşümü esnasındaki soğutma hızına bağlıdır. Teorik olarak yeterince hızlı soğutulan her malzeme kristalleşmeden amorf bir yapı oluşturabilirken; pratikte bu soğutma koşullarına ulaşabilmek her sıvı için mümkün değildir. Soğutma işlemiyle beraber sıcaklık düşer ve viskozite sürekli olarak artar. Artan viskozite ile atom hareketliliği en aza iner ve atom hareketliliğinin sona ermesiyle atomlar bulundukları yerde hareketsiz kalarak cam yapısını oluşturur [1], [3].

Cam ergiyiğin soğutma hızına bağlı olarak kristal ya da amorf yapıda katılaşma davranışı Şekil 2.1'de görülen özgül hacim sıcaklık eğrisi ile açıklanabilir. Bir sıvı ergiyik, ergime sıcaklığının üzerindeki bir noktadan itibaren soğutulmaya başlandığında eğri boyunca ergime sıcaklığına ($T_e$) kadar hacminde azalma meydana gelir. $T_e$ noktasına gelindiğinde malzemenin amorf ya da kristalin yapıda katılaşması soğutma hızına bağlıdır. Soğutma işlemi yeterince hızlı ise, ergiyik cam geçiş sıcaklığını takiben kristalleşme işlemi gerçekleşmeksizin sıvı fazdan katı faza geçer ve amorf yapı oluşur. Cam yapının oluştuğu bu ilk durumda, Şekil 2.1'deki sıvı eğrisi $T_e$ sonrası üstteki yolu takip eder. Eğer soğutma işlemi yavaş olursa, yapıda ilk olarak çekirdekler oluşur ve hemen sonrasında oluşan çekirdekler büyüyerek kristalizasyon gerçekleşir, yapı kristalin hale dönüşür. Bu durumda ise, sıvı eğrisi $T_e$ sıcaklığına geldiğinde hacmindeki keskin ve büyük değişiklik sonucu cam geçiş sıcaklığına gelmeksizin alttaki eğriyi takip eder ve kristal oluşur. Kristalizasyon reaksiyonu sonucunda sıvı ve kristalin yapı arasındaki hacim değişimi, $\Delta V$, değeri amorf yapıya göre daha büyük olur. Bu nedenle kristal yapıdaki malzemenin yoğunluğu, aynı bileşimdeki amorf malzemeye göre daha yüksek olacaktır [2]. Şekil 2.1'deki $T_e$ değeri soğutma hızının yavaş olması sonucu malzemenin kristallendiği kristalizasyon sıcaklığıdır. Eğer uygulanan soğutma şartlarında kristalleşme işlemi gerçekleşmezse $T_g$ ile gösterilen cam geçiş sıcaklığında ergiyik amorf yapıdaki cam malzemeyi oluşturur. Cam geçiş sıcaklığı soğutma hızına bağlı olarak değişiklik gösterir [1].




Şekil 2. 1 Cam malzemeler için özgül hacim sıcaklık eğrisi

Cam tarihte ilk defa üretildiğinde, büyük ölçüdeki hammaddesi kum yani $SiO_2$'dir. Günümüzde ise gelişen teknoloji sayesinde birçok farklı bileşen cam yapısına katkılandırılmış ve bu sayede üstün özellikler elde edilmiştir. Cam yapıcı ana bileşen haricinde kompozisyonunda pek çok farklı bileşen barındıran camın yapısını açıklayan birçok cam teorisi ortaya konulmuştur. Bunlardan başlıcaları Goldschmidt, Zachariasen ve Sun teorileridir.

Modern kristal kimyanın kurucusu Goldschmidt, cam yapısında bulunan anyon ve katyonların iyonik yarıçapları arasında bir oran olduğunu öne sürmüştür. Buna göre cam yapıcı oksitlerde metal katyonun iyonik yarıçapının ($r_a$) cam yapıcı oksitin iyonik yarıçapına ($r_o$) oranı ($r_a/r_o$) 0,2-0,4 arasındadır. Bu oran içersinde kalan katyonlar 4 oksiyen atomuyla bağlanarak bir tetrahedral oluşturur. Goldschmidt bu şekilde bağlı olarak tetrahedral oluşturan katyonların soğutma esnasında cam oluşturacağını savunmuştur [2]. Bu oran genellikle cam yapısında bulunan oksitlerden $SiO_2$, $B_2O_3$ ve $P_2O_5$ için geçerlidir [1].

Zachariasen'in 1928 yılında ortaya attığı teorisine göre cam yapısı birbirine temas eden silikat tetrahedrallerinden oluşur. Buna göre:

1) Camın ağ yapısını oluşturan birincil cam yapıcıların koordinasyon sayıları düşük, yani 4 ya da daha az sayıda olmalıdır. Yani merkezi katyonların koordinasyon sayısı en fazla 4 olmalıdır (genellikle $Si^{+4}$).
2) Cam yapısında bulunan anyonların koordinasyon sayıları düşük olmalıdır. Buna göre cam yapısındaki bir oksijen atomu en fazla iki katyona bağlı olmalıdır.
3) Tedrahedraller birbirleri ile kenar veya yüzeylerden değil köşelerden bağlı olmalı ve yüksek valansa sahip katyonları biribirinden uzak tutarak aralarındaki itme kuvvetini en aza indirmelidir.
4) Tetrahedrallerin en az üç köşesi diğer tetrahedraller tarafından paylaşılmalıdır [1].

Sun ise teorisinde atomlar arasındaki bağ enerjisinin cam oluşumuna direkt etkisi olduğunu savunmuştur. Buna göre atomlararası güçlü bağlar, cam ergiyiğin katılaşırken hareketleri kısıtlamaktadır. Bu da cam oluşumunu iyileştiren etmenlerden biridir [3].

### 2.2 Cam Üretimi

Cam çok geniş kullanım alanı olanı bir malzemedir. Cam bazen bir ambalaj malzemesi olarak kullanılırken; bazen de düz cam olarak üretilerek binalarda ve otomobillerde kullanılır. Düz cam üretim yöntemi, 1959 yılında İngiliz Pilkington Şirketi tarafından bulunmuş bir metottur. Pilkington bu methodla sıvı cam ergiyiği sıvı kalay banyosu üzerinde yüzdürme yöntemiyle ilk defa üreterek; zımparalama ve parlatma işlemine gerek duymaksızın düzcam eldesi ilk defa gerçekleştirilmiştir [4]. Düz cam üretim prosesinde 4 temel adım vardır. Bunlar hammaddenin temini ve stoklanması, hammaddenin belirli oranlarla karıştırılıp harmanlanarak fırına verilmesi, cam harmanının fırında ergitilmesi ve son olarak şekillendirme ile nihai şeklinin verilmesidir [5].

Cam üretiminin ilk adımı olarak, belirlenen cam kompozisyonuna göre kullanılacak hammaddeler temin edilip stoklanır. Cam üretimi 24 saat devam eden bir proses olduğu için yeterli hammaddenin üretim alanının yakınında bulunması önemlidir. Ardından belirlenen oranlarda hammadde, stoklandığı silodan alınarak karıştırılır ve bir harman oluşturulur. En yaygın üretilen cam tipi olan soda kireç silikat camların kompozisyonu genellikle kum, soda, feldspat, dolomit, kalker, sodyum sülfat, antrasit, renklendiriciler

ve cam kırığından oluşur. Bu bileşenlerden kum cam ağ yapısını oluştururken; soda, camın ergime sıcaklığını ve viskozitesini azaltır. Feldspat, camı sertleştirerek kırılmaya karşı direnci artırır ve aynı zamanda kimyasal dayanıklılığını artırır. Dolomit ise, camın katılaşma hızını artırarak ısıl şok direncini artırır, kimyasal dayanıklılığı artırır ve cama parlaklık kazandırır. Kalker, camın mekanik mukavemetini ve kimyasal dayanıklılığını artırır, kristalizasyon sıcaklığını düşürür. Cam kırıkları ise yapıya camın şekillendirilebilme kabiliyetini arttırmak için eklenir [6].

Hazırlanan cam harmanı bantlar yardımıyla fırına taşınır. Ergime sıcaklığı soda kireç silikat camlar için yaklaşık 1600˚C olmakla birlikte, kompozisyona bağlı olarak değişir. Gerçekleşen ergitme işlemi sonrasında sıvı ergiyik cam dinlendirme havuzuna alınır. Burada ergimiş cam bir cam hamuru formunu alır ve bir sonraki adım olan kalay banyosuna bantlar yardımıyla taşınır. Cam hamuru yaklaşık 1100˚C'deki kalay banyosunda altlı üstlü iki çark tarafından çekilir. Bu esnada çarkların dönme hızı ve buna bağlı olarak cam hamurun çekilme hızı, cam kalınlığını doğrudan etkileyen bir parametredir. Oluşabilecek reaksiyonları engellemek için içerisine azot ve hidrojen gazları beslenen kalay banyosunun yoğunluğu cam hamurunun yoğunluğundan daha fazladır. Bu sayede, cam kalay banyosu üzerinde kalır ve yüzdürme ile şekillendirme işlemi gerçekleşir. Kalay banyosu etabında, camın kalay tarafına temas eden yüzeyinde az da olsa kalay difüzyonu gerçekleşir, dolayısıyla düz camın iki yüzeyi arasında bir bileşim farkı oluşur. İstenilen kalınlık ve genişliğe getirilen cam şerit, şekil stabilitesini kazandıktan sonra tavlama işlemi için tavlama fırınına aktarılır. Cam geçiş sıcaklığı altında, yaklaşık 500˚C'de, yapılan tavlama işleminin amacı, camda oluşan iç gerilmeleri azaltarak camı kesim işlemine hazırlamaktır. İç gerilimleri giderilen cam, kesme hattı için uygun sıcaklığa soğutulur. Soğutulan cam son olarak istenen ebatlarda seçilen kesme tipine göre kesilerek kullanıma hazır hale getirilir ve stoklanır [6].

### 2.3 Camın Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi

Camın belirli bir yük karşısında gösterdiği direnç, camın mekanik dayanıklılığı olarak tanımlanır. Camın maruz kaldığı darbeler bazen ani bir yük olurken; bazen de uzun süreli sabit bir yük olabilir. Bu gibi durumlar karşısında camın deformasyona uğramadan gelen yüklere karşı koyması beklenir [6]. Camın yüklere karşı gösterdiği dirence o camın

mukavameti denir ve bu değeri etkileyen parametrelerden bazıları cam kompozisyonu, kalınlığı, camın yüzey ve kenar kalitesidir. Teorik olarak hatasız bir camın mukavemeti 17000 MPa'yı bulurken; pratikte bu değerlere ulaşmak mümkün değildir. Bunun nedeni de üretim esnasında camın yüzeyinden belirli bir derinliğe kadarki bölümde oluşan mikro ya da daha küçük boyutlu çatlaklardır. Bu gibi çatlakları bünyesinde bulunduran camlara belirli bir yük uygulandığında deformasyona uğrarlar [4]. Cam kırılgan bir malzeme olması dolayısıyla plastik deformasyona uğramaz. Camın yüzey gerilimi ve eğme mukavemeti, merkezi gerilmeye göre 10 kat daha büyüktür [7].

Bir önceki bölümde anlatıldığı şekilde, üretim sonrası oluşan artık gerilmeleri gidermek amacıyla camlar tavlama işlemine tabi tutulur. Bu işlem sonrasında artık gerilmeleri giderilen camın yüzey gerilimi artar. Tavlama işlemi sırasında cam, cam geçiş sıcaklığı altında belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılır ve sonrasında hızlı bir şekilde oda sıcaklığına soğutulur. Tavlama işlemi görmemiş camda iç gerilmeler çok yüksek olur. Bu yüzden iç gerilmenin fazla ya da az olmasına göre kırılma davranışı farklılık gösterir. İç gerilmesi fazla olan camda "hackle marks" tipi kırılma davranışı gözlenirken; iç gerilmesi az olan ve tavlama işlemine tabi tutulmuş camda "rib marks" tipi kırılma davranışı gözlenir. Bu kırılma oluşumunun açısı kırılma davranışının yönüyle aynı yönlüdür. Tavlama işlemine tabi tutulmuş camların mukavemeti tavlama işlemi görmemiş cama göre yüzeydeki çatlak ya da çiziklerden daha çok etkilenir. İç gerilmeler haricinde camın mukavemetini düşüren diğer etkenler olan çatlak ya da çizikler ise her zaman cam yüzeyden başlar ve mukavemet değerlerini önemli ölçüde düşürür [4].

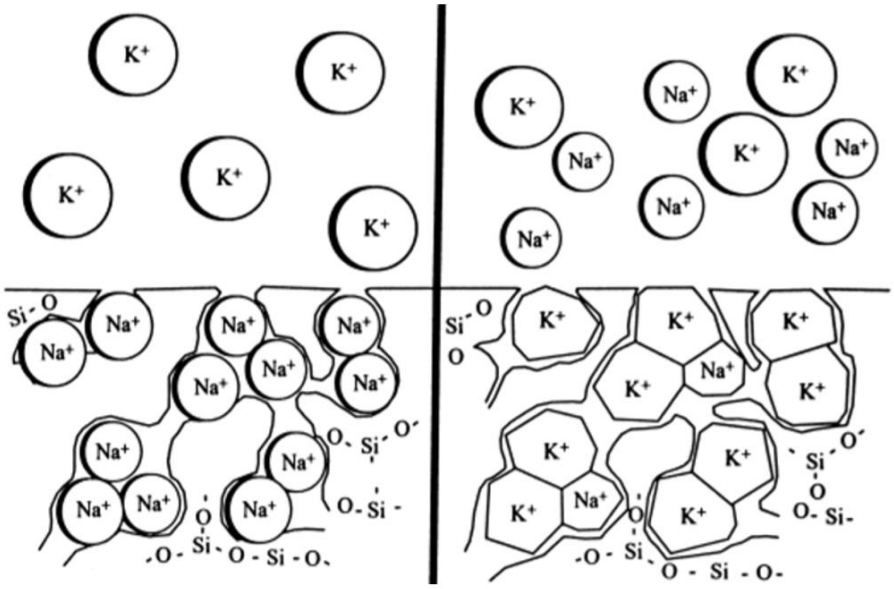
Teorik olarak hatasız bir camın gerilim dayanımı yaklaşık 35 GPa'dır. Ancak hiçbir cam pratikte bu dayanıma sahip değildir. Bunun nedeni üretim kaynaklı yüzey hatalarıdır. Bu hataları barındıran kırılgan soda kireç camları yaklaşık 7 MPa, cam ambalaj ve pencere camları ise 35 ila 50 MPa arasında bir gerilim dayanımına sahiptir. Daha küçük yarıçapa sahip optik fiberler ise yaklaşık 700 MPa gerilim dayanımına sahiptir. Cam yüzeyinde üretim kaynaklı oluşan çatlaklar birkaç mikrometredir. Yüzeydeki bu çatlaklar tok malzemelerde dayanımı çok etkilemezken; kırılgan malzemelerin dayanımını önemli ölçüde düşürmektedir [8]. Yüzeyinde üretim kaynaklı çatlaklar bulunan camın mukavemetini üretim sonrası çeşitli ikincil işlemlerle arttırmak mümkündür. Laminasyon, kaplama, alev ve asit uygulamaları, ısıl ve kimyasal temperleme bu ikincil

işlemlerden en çok kullanılanlarıdır. Bu yöntemler arasında en yaygın kullanılan yöntem temperlemedir [6].

Isıl temperleme işleminde, cam yumuşama sıcaklığı altında (~710 $^{o}$C) ve cam geçiş sıcaklığı üzerinde (~567 $^{o}$C) bir sıcaklığa ısıtılır ve bu sıcaklıkta bir süre bekletilir. Isıl temperleme sıcaklığı cam geçiş sıcaklığı üzerinde olduğu için; cam fırın içerisinde düz şekilde tutulmalıdır, aksi takdirde camda şekil değişikliği meydana gelebilir. Isıl temperleme işlemi sırasında camın sıcaklığının her noktada eşit olduğundan emin olunur ve ardından hızlı şekilde oda sıcaklığına soğutulur. Soğutma esnasında camın alt ve üst yüzeylerinin sıcaklıklarının birbirine eşit olması dikkat edilmelidir. Önceden ısıtılmış ısıl temper fırınına giren oda sıcaklığındaki cam, fırın ile malzeme arasında bir sıcaklık farkı oluşmasına neden olur. Camın ısınma hızı bu sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır. Başlangıçta cam oda sıcaklığındayken ısı transferi hızlıdır; ancak cam ısınmaya başladıkça sıcaklık farkı azaldığından ısı transferi hızı da azalır. Camın ısıl iletkenliği ve farklı kalınlıktaki camlar hesaba katıldığında yapılan işlemler sonucu her 1 mm için ~40 saniye ısıtılması gerektiği hesaplanmıştır. Bu işlem düz ve kaplamasız şeffaf camlar için geçerlidir [6]. Isıl temperleme esnasında camın iç bölgesinin soğuma hızı yüzeydeki soğuma hızına oranla daha düşük olduğu için camın iç ve dış yüzeyi arasındaki molar hacimler farklılık gösterir. İç bölgenin özgül hacmi dış yüzeye oranla daha küçük olur. Cam yüzeyinde belirli bir derinliğe kadar oluşan yüzey gerilimi bu ısınma ve soğuma farkları dolayısıyla ortaya çıkar. Isıl temperleme işlemi 2 ila 12 mm arasında kalınlıktaki camlara uygulanan bir işlemdir. Pratikte 3 mm olarak belirlenen bu alt limit gelişen teknoloji ile 2 mm kalınlığa kadar düşürülmüştür. 2 mm kalınlıktaki camlara ısıl temperleme işlemini kullanılabilir kılan; camın ısıtılması esnasında artırılan ısı transferi katsayısıdır. Ancak yüksek ısı transferi ile ısıtılan camlarda yüzey ile iç bölgeler arasında bir sıcaklık farkı oluşturulabilir. Bu işlem sonucunda camların yüzeylerinde oluşan yüzey gerilimi sayesinde camın mukavemetinde artış görülür. Isıl temperleme işlemine tabi tutulmuş cam daha küçük parçalı olarak kırılır, bu nedenle ısıl temperleme işlemine tabi tutulmuş camlara “güvenlikli cam” da denilir [9], [10].

## 2.4. Kimyasal Temperleme

Kimyasal temperleme işlemi yaklaşık 100 sene önce keşfedilmiş olup; o dönemde daha çok dekorasyon amaçlı çanak çömlek renklendirmede kullanılmıştır. İyon değişimi temelli bir işlem olan kimyasal temperleme, Schulze tarafından ilk defa 1913 yılında camın yüzey özelliklerini değiştirirmek amaçlı kullanılmış ve ergiyik $AgNO_3$ tuz banyosuna soda kireç silikat camı daldırılmıştır [11]. Kimyasal temperleme prosesine tabi tutulacak camın ergimiş tuz banyosuna daldırılmasıyla gerçekleştirilen bu proseste camın yüzeyinden belirli bir derinliğe kadarki bölümde cam bileşimindeki alkali iyonlarla tuz bileşimindeki alkali iyonların yer değiştirmesi amaçlanır. Bu iyonlar cam kompozisyonuna bağlı olarak değişmekle birlikte genellikle $Li^+$ ve $K^+$ iyonlarıdır. Cam yapısından çıkan iyon yerine ergimiş tuzdan gelen iyonik yarıçapı daha büyük bir iyon yerleşir ve yüzeyde bir gerilim oluşur. Bu durum cam yüzeyinde gerilimin artmasına neden olur ve sonuç olarak camın mukavemeti yaklaşık 2-3 kat artar [12], [13], [14]. Kimyasal temperleme prosesine tabi tutulmuş camlar uçak kokpitlerinde, rüzgar koruma panellerinde, şeffaf zırh yapımında, güneş panellerinde, gözlük camlarında, cam ambalajlarda, fotokopi makinesi camlarında ve elektronik cihazların ekranlarında kullanılır [15], [16]. Şekil 2.2'de kimyasal temperleme işlemi öncesi ve sonrası cam yapısındaki ve ergimiş tuz banyosu içerisindeki $K^+$ ve $Na^+$ iyonları gösterilmektedir [17]. Şeklin alt kısmı cam yapısını gösterirken üst tarafı ise ergimiş tuz banyosu içerisindeki iyonları simgelemektedir. Şeklin sol tarafında iyon değişimi öncesinde $K^+$ iyonları yalnızca ergimiş tuz banyosu içerisinde bulunurken; sağ tarafta iyon değişimi sonrasında $K^+$ iyonları cam yapısına katılarak yapıda bulunan $Na^+$ iyonlarıyla yer değiştirmiştir.




Şekil 2. 2 İyon değişimi işleminin şematik gösterimi

Kimyasal temperleme işleminde, yüzeyden belirli bir derinliğe kadar olan bölümde cam yapısındaki iyonik yarıçapı küçük katyonlarla ergimiş tuz banyosu içerisindeki iyonik yarıçapı daha büyük katyonların yer değiştirmesi sonucu oluşan yüzeydeki artık gerilmeler; merkezdeki çekme gerilmesi ile dengelenir (Şekil 2.3). Bu sayede kararlı bir yapı oluşur. Bu yapı oluşurken esas cam yapısını oluşturan silisyum oksijen bağları herhangi bir zarar görmez. İyonik yarıçapı büyük olan tuz bileşimindeki katyonlar cam yapısına fiziksel olarak katıldığından yapıda yeni bir kimyasal bağ oluşmaz [18]. Kimyasal temperleme prosesinde kullanılan cam bileşimine bağlı olarak ulaşılan mukavemet değerleri 100 ile 800 MPa arasında değişiklilik gösterir [19].

Ana mekanizması difüzyona bağlı iyon değişimi olan kimyasal temperleme işleminde, proses verimini etkileyen çok sayıda faktör vardır. Sıcaklık, süre, cam bileşimindeki alkali oranı, cam kalınlığı, cam yüzey ve kenar kalitesi, tuz banyosu bileşimi, banyo kirliliği, ön ve son ısıtma işlemi bunların başlıcalarıdır. Proses süresi olarak literatürde 30 dakika ve 120 saat aralığında birçok süre denenmiş, farklı temperleme sıcaklıkları için farklı temperleme sürelerinin optium mukavemet değerini sağladığı görülmüştür. Geniş bir zaman dilimi çalışılmış olsa da; elde edilen yüzey gerilmi, gerilim derinliği ve merkezi gerilim değerlerinin ortak değerlendirilmesi sonucu literatürde en çok çalışılan ve ticarileşen camlar için seçilen proses zaman aralığının 2 ila 6 saat olduğu görülmüştür. [11]. Proses sıcaklığı tuzun ergime sıcaklığı üzerinde ve camın cam geçiş sıcaklığının

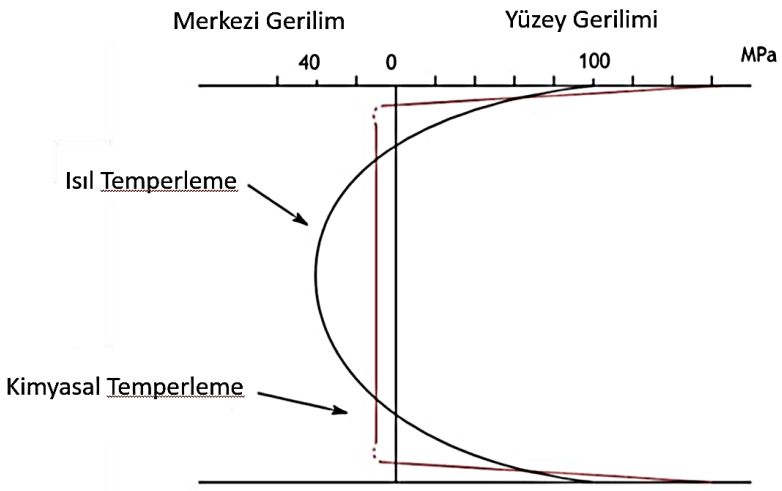
altında olmalıdır. Literatürde kullanılan cam tipine bağlı olarak 375˚C ile 500˚C arasındaki birçok proses sıcaklığı kullanılmıştır. Aynı şekilde literatürde en çok çalışılan ve ticarileşen camlar için seçilen proses süresi 400 ila 425 $^{o}$C arasında sınırlandırılmıştır. [7], [11], [15], [20], [21], [22].

Bunun yanında literatürde cam kompozisyonu olarak lityum alümina silikat, alümina silikat ve en yaygın olarak da soda kireç silikat camlar kimyasal temperleme işlemine tabi tutularak, mukavemet özellikleri geliştirilmiştir [19], [15], [20]. Yapılan çalışmalar, cam bileşimdeki alkali çeşitliliği ve oranı arttıkça yüksek mukavemet değerleri için gereken kimyasal temperleme sıcaklığı ve süresinin düştüğünü göstermektedir. Ayrıca cam düşük ısıl iletkenliğe sahip olduğu için kimyasal temperleme işlemi öncesi ve sonrasında camın ısıtılması proses verimini olumlu yönde etkileyerek cam içerisinde sıcaklık farklarının oluşmasını engeller [11], [19]. Literatürde tuz banyosunda en çok kullanılan tuz bileşimi $KNO_3$ olmasına karşın; farklı tuzlar da kimyasal temperleme prosesinde denenmiştir. Bunlar nitrat, sitrat ve sülfat bazlı tuzlardır. Ayrıca tuz banyosu tek tuz bileşenli olduğu gibi birden fazla tuz bileşenli olabilmektedir. Birden fazla tuzdan oluşan tuz banyolarında yapılan kimyasal temperlem işleminin, özellikle benzer iyonların difüzyonu hızlandırmasından ötürü, kimyasal temperleme verimini arttırdığı görülmüştür [20]. Yapılan bir literatür çalışmasında, $Na_2O$ oksitini içeren bir cam numunesi $KNO_3$ ve $NaNO_3$ tuzlarını içeren ergimiş tuz banyosunda kimyasal temperleme işlemine tabi tutulduğunda elde edilen mukavemet değeri yalnızca $KNO_3$ içeren bir tuz banyosunda kimyasal temperleme işlemine tabi tutulduğundaki mukavemet değerinden daha yüksek olmuştur [20], [23], [24]. Farklı tuzlardan oluşan banyoda temperlemenin yanı sıra, kimyasal temperleme işlemi farklı tuz bileşenleri içeren iki farklı banyoda iki aşamada gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemde, iki aşamanın kimyasal temperleme süre ve sıcaklıkları birbirinden farklı seçilebilir. İkincil işlemin fiziksel özellikler üzerinde çok büyük bir etkisi olmasa da, artık gerilme gradyantını arttırarak gerilim derinliğinin artmasına olanak sağlamaktadır [12]. Tuz banyosunda kullanılan tuzların safiyetinin ve banyo temizliğinin de kimyasal temperleme verimine etkisi oldukça önemli ölçüdedir. Farklı safiyetlerdeki $KNO_3$ tuzları ile eşit temperleme süreleri ve sıcaklıklarında yapılan temperleme işleminde en yüksek mukavemet değeri daha önce içinde en az 1000 saat kimyasal temperleme işlemi yapılmış olan ve diğerlerine göre düşük safiyetteki tuz

banyosunda işlem gören cam numunesinde elde edilmiştir. Bu durum, cam yapısından ayrılan alkali iyonların banyo bileşimine katılmasının, benzer iyonların dfüzyonu hızlandırmasından ötürü, iyon değişimini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir [11]. Kimyasal temperleme verimini etkileyen bir diğer faktör ise, temperlemenin yapıldığı fırın ve fırının çalışma mekanizmasıdır. Kimyasal temperleme işlemi için tasarlanan farklı fırınlar mevcuttur. Bu fırınların tümünde ana mekanizma tuzun ergitilip camların içerisine daldırılması olsa da ergimiş tuzun uyarılma biçimleri farklılık gösterebilir. Difüzyonu hızlandırmak amacıyla fırın içerisindeki ergimiş tuz elektrik ya da ultrasonik dalga ile ile uyarılabilir ya da ergimiş tuz mekanik olarak karıştırılabilir [25][26]. Bir diğer etken ise, camdaki üretim kaynaklı olan mikro çatlaklardır. Yüzeyden belirli bir derinliğe kadar giden bu çatlaklar kimyasal temperleme prosesinin verimini olumlu yönde etkiler. Kimyasal temperleme prosesinde gerçekleşen iyon değişimi ile cam yapısına katılan iyonlar bu çatlaklar boyunca ilerleyerek daha derine nüfuz eder. Derine nüfuz eden iyonlar çatlak hareketlerini kısıtlayarak mukavemeti artırır. Burada gerçekleşen olay çatlakların yok edilmesi değil, çatlakların bloke edilerek hareketsiz bırakılması ve daha derine ilerlemesinin engellenmesidir [10], [23], [24]. Bu tez çalışmasında ise, kimyasal temperleme işlemine cam kalığınlığın ve cam kesme tipinin etkisi incelenmiştir. Bu etkenler konusunda literatürde daha önce yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Farklı kalınlıktaki camlara uygulanan kimyasal temperleme çalışamları ve kesme tipinin camın yüzey özelliklerine dolayısıyla kimyasal temperleme verimine olası etkileri detaylı şekilde 2.4.1 ve 2.4.2 numaralı bölümlerde açıklanmıştır.

Kimyasal temperleme işleminin ısıl temperleme işlemine göre tercih edilmesinin en önemli nedeni oldukça ince camlara uygulanabiliyor oluşudur. Kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş camlarda ulaşılan yüzey gerilimi değerleri, ısıl olarak temperlenmiş camlara kıyasla 4-5 kat daha yüksektir. Ancak tam tersi olarak, kimyasal temperleme işlemiyle ulaşılan merkezi gerilim değerleri ısıl temperlemeye oranla düşüktür. Şekil 2.3'te gösterilen grafik ısıl temperleme ve kimyasal temperleme sonucunda ölçülen merkezi gerilim ve yüzey gerilimi değerlerini göstermektedir. Isıl temperleme işlemi sonunda ulaşılan gerilim derinliği değeri, kimyasal temperleme işlemi sonunda elde edilen gerilim derinliği değerine göre yüksektir. Isıl temperleme işleminde, oluşan sıcaklık gradyanı farkı dolayısıyla cam kalınlığının %20si kadarki bir bölümde

yüzeyde oluşan artık gerilmeler yüzey gerilimini arttırır. Ancak kimyasal temperleme prosesinde iyon değişimi esnasında ergimiş tuz banyosunda bulunarak cam yapısına katılan iyonlar 100 mikrondan daha derine nüfuz edemez. İyon değişiminin gerçekleşebilmesi için cam yapısındaki iyonların da banyo bileşimindeki iyonlar gibi hareketli olması gerekir. Aynı değerlik elektron sayısına sahip bu iyonların aralarındaki elektropotansiyel farktan dolayı iyon değişimi gerçekleşir. Yer değiştiren iyonlar +1 değerlikli iyonlardır. Bu esnada cam yüzeyinde molar hacimde bir artış meydana gelir. Bunu takiben iyonlar arasındaki konsantrasyon farkına bağlı olarak molar konsantraston değişir ve artık gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler değeri 50MPa'dan düşük olacak bir merkezi gerilim ile dengelenerek mukavemetin artışını sağlar. Sonuç olarak, düşük merkezi gerilim değeri ve yüksek yüzey gerilimi, cam malzemenin mukavemetini artırır. Ayrıca, kimyasal temperlemenin işlem maliyeti ısıl temperlemeye oranla daha yüksektir. Bunun nedeni her ne kadar daha düşük bir işlem sıcaklığına ihtiyaç duyulsa da, tuzu ergitmek için gereken enerji miktarının ısıl temperleme işleminin maliyetine oranla daha yüksek olmasıdır. Temperlenecek camların geometrisi açısından değerlendirildiğinde ise, ısıl temperleme işlemi yalnızca düzcamlara uygulanabilen bir işlemdir, dolayısıyla cam ev eşyaları gibi karmaşık şekilli camların ısıl temperlemeyle güçlendirilmesi mümkün değildir. Bunun nedeni fırın dizaynına bağlı olarak cam yüzeyindeki her noktaya eşit oranda işlem uygulanamaması ve cam yüzeyinde sıcaklık farkları oluşmasıdır. Kimyasal temperleme işlemi ergimiş tuz banyosuna daldırma prensibiyle gerçekleştirildiği için; cam yüzeyindeki her noktaya aynı standarttaki tuz temas eder, artan yüzey gerilimi cam yüzeyinin her noktasında eşit olur ve mukavemet açısından homojen bir yapı elde edilmiş olunur. Bileşim açısından bakıldığında ise, kimyasal temperleme işleminin uygulanacak camın yapısında mutlaka alkali iyon içermesi gerekmektedir. Bu durum, kimyasal temperlenebilecek camları sınırlandırır. Ayrıca kimyasal temperleme, ısıl temperlemeden farklı olarak, camın optik özelliklerinde bir kötüleşmeye neden olmaz [12], [14], [15], [17].




Şekil 2. 3 Isıl ve kimyasal temperleme işlemine tabi tutumuş camların gerilim profilil

### 2.4.1 Kimyasal Temperleme İşleminde Cam Kalınlık Etkisi

Kimyasal temperlemenin yaygın uygulamaları göz önünde bulundurularak, ısıl temperleme güçlüğü çekilen ince camların kimyasal temperleme prosesine tabi tutulduğu söylense de; kimyasal temperleme ile mukavemetlendirilen camlar yalnızca ince camlar değildir. Farklı kalınlıklarda kimyasal temperli camlar birçok farklı uygulama alanında kullanım bulmaktadır. Kullanım yerlerine göre 0,3- 10 mm gibi çok geniş bir kalınlık aralığında cam malzeme kimyasal temperlemeye tabi tutulmaktadır. Örneğin, Saxon Technologies firmasına ait kimyasal temperli Ion Armor camı 9,9 mm kalınlığa sahiptir ve bu cam lamine camlarda saydam bir zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır [16]. Bunun dışında kimyasal temperlemenin yaygın olarak kullanıldığı mairn camlar incelendiğinde, BCE Glass firmasına ait yat camlarının 3-8 mm arası kalınlıkta olduğu görülmektedir [27]. Uçak ve helikopter camları da yat camları gibi yüksek hızla seyir halinde kontrolsüz yüklere maruz kaldığı için kimyasal temperleme işlemine tabi tutularak kullanılmaktadır. Bu camların kalınlıkları da 2,5 mm civarındadır [28]. En yaygın olarak kullanılan kimyasal temperli camlar ise ekran camlarıdır. Bu alandaki en büyük üretici olan Corning firması tarafından üretilen kimyasal temperli camların kalınlığı 0,4 ila 2 mm arasında değişmektedir. Gorilla Glass® markası altında piyasaya sürülen kimyasal temperli camlar ekran camlarında ve otomobil camlarında kullanılmaktadır. Aynı firmaya ait kimyasal temeperleme işlemine tabi tutulmuş akıllı telefonların ön ekran camları 0,4 ile 1,3 mm kalınlık arasında değişirken; otomobil camlarında kullanılan

kimyasal temperli camların kalınlıkları 0,4 ile 0,7 mm arasında değişiklik göstermektedir [29]. Asahi firmasına ait kalınlığı 0,3 ila 2 mm arasında değişen camları kimyasal temperleme işlemi ile güçlendirerek ekran teknolojileri alanında kullanılmaktadır [22]. Ekran camları teknolojisi alanında aktif olan bir diğer firma ise AGC'dir. 0,5 ila 5 mm arasında değişen kalınlıklarda camlar kimyasal temperleme işlemi uygulanarak mukavemetlendirilmekte ve elektronik cihaz ekranlarında kullanılmaktadır [30]. Toyo Sasaki firması ise kimyasal temperleme işlemini kristal camlara uygulayarak daha dayanıklı cam ev eşyası üretimini gerçekleştirmektedir. Bu cam ev eşyası ürünler, 1 mm altı inceliklerine ve karmaşık şekillerine rağmen kimyasal olarak temperlenerek normal kristal camlara göre 1,5 kat daha dayanıklı hale gelmektedir [31], [32], [33]. Gelişen teknoloji sayesinde, üretilen düz cam kalınlıkları da giderek düşmektedir. Literatürde yapılan kimyasal temperleme işlemlerinde çalışılan cam kalınlıkları genel olarak bahsedilen aralıkta gerçekleştirilmekte olup; kimyasal temperleme işlemi ısıl temperlemenin yapılamadığı çok ince ya da çok kalın camlar için ya da karmaşık şekilli camlar için tercih edilen bir proses durumundadır.

Daha önceki bölümde açıklandığı gibi, temperleme işleminde yüzeyde oluşturulan yüzey gerilimi tabakasının merkezi gerilim tarafından dengelenmesi gerekir. Bu sayede cam mukavemeti yüksek bir hal alır ve kararlı bir yapıya sahip olur. Bu nedenle ısıl temperlemeye tabi tutulacak camın kalınlığı en az 2,0 mm olmalıdır [7]. Kimyasal temperleme işleminde böyle bir üst ve alt limit olmamasına karşın; kimyasal temperleme işleminin uygulandığı ticari camlardaki alt limit kalınlık değerleri 0,3-1,3 mm'dir. Bu camlar elektronik cihazların ön camları ve otomobil camlarıdır. 1,3 mm'nin üzerinde kimyasal temperleme işlemine tabi tutulan ticari camlar ise genellikle özel uygulamalarda kullanım için tasarlanmış çok yüksek mukavemet değerleri gerektiren çok kalın camlardır (8-10 mm). Özel bir gereksinim olmadığı sürece, bu kalınlık üzerindeki camlara kimyasal temperleme işlemi uygulanmamasının nedeni oluşturulacak yüzey gerilim derinliğinin cam kalınlığına oranla düşük kalıyor olmasıdır. Isıl temperleme prosesi sonunda ulaşılan gerilim derinliği kimyasal temperleme prosesine göre daha az olup; edilen gerilim derinliği cam kalınlığının 1/5'idir. Buna karşılık kimyasal temperleme prosesinde elde edilen yüzey gerilimi ısıl temperlemeye göre daha yüksek olup; gerilim derinliği 100 μm'yi geçmektedir [34].

### 2.4.2 Kimyasal Temperleme İşleminde Cam Kesme Tipinin Etkisi

Cam mukavemetini etkileyen parametrelerden biri de kesim tipine bağlı olan kenar kalitesidir. Ancak kenar kalitesinin kimyasal temperleme proses verimine etkisi literatürde daha önce incelenmemiştir. Camın kenar kalitesini geliştirmek amacıyla çeşitli kesim yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde amaç, cam kenarlarında kesim kaynaklı oluşan çatlakları en aza indirerek kenar mukavemetini arttırmaktır. Önceki dönemlerde elmas uç kullanılarak yapılan mekanik kesim yöntemleri, gelişen teknoloji ile yerini lazer kesim yöntemlerine bırakmıştır. Lazer kesim yönteminin mekanik kesim yönteminden farkı cama temas edilmeden kesim işleminin gerçekleştirilmesidir [35].

1869 yılında bir mekanik kesim yöntemi olan elmas uç ile cam kesme yöntemi ilk olarak Bristol'lü Samuel Monce tarafından gerçekleştirilmiştir. Samuel Monce'nin kullandığı elmas uç günümüzde kullanılanlar ile benzer şekle ve standartlara sahiptir. Bu işlemde ilk olarak cam yüzeyinde istenen doğrultuda bir çizik oluşturulur. Bunun nedeni, camın üzerinde bir iz oluşturulmadan istenen yerden kesilmesinin mümkün olmamasıdır. Yüzeyinde hata bulunmayan bir cam 500MPa ve üzerindeki yüklere dayanır. Bu yükün devamlı olarak cama uygulanması camı bir noktada kırar; ancak kırılma yerleri ve kırılan parça sayısını tahmin etmek imkansız olur ve istenen şekil verilemez. Bunun aksine, önceden yüzeyinde bir çizik oluşturulan cam, istenilen yerden çizildikten sonra aynı bölgeden rahatlıkla kontrollü olarak ayrılabilir. Bu ayrılmayı sağlayan, bölgede kontrollü olarak oluşturulan çatlaktır. Çizilerek işaretlenen bölge yüksek bir gerilimle yüklü olur ve dışarıdan yapılacak ufak bir dış kuvvet ile çizilen izi takip ederek kırılır. Bu yöntemde tungsten karbür ve polikristalin elmas uç kullanılır [36].

Gelişen teknoloji ile, elmas uç ile cam kesme yönteminde kesim esnasında elmasın ucun daha derine inerek kesim işlemini gerçekleştirmesine uygun malzemeler üretilmiştir. Kenar kalitesini arttırmak amacıyla geliştirilen bu malzemelerden MDI firmasına ait olan Pennet marka elmas uç, cam kalınlığının %90 derinliğinde çatlak oluşturarak kesim bölgesinde oluşan mikro çatlakları en aza indirmeyi sağlamaktadır. Elmas uçla kesim ucuz, kolay ve kontrol edilebilir bir yöntem olsa da, bu kesim yönteminde kırılma esnasında bir parçalanma meydana gelmekte ve kenar kalitesini artırmak amacıyla zımpara ve parlatma gibi ikincil bir işleme ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum zaman kaybına neden olurken; maliyetin de artmasına sebep olur. Bahsedilen dezavantajlara

sahip olsa da, 4 mm'den kalın camların kesilmesinde düşük maliyeti dolayısıyla elmas uçla kesim halen kullanılan bir yöntemdir [36].

Gelişen teknoloji ile pek çok farklı uygulamada kullanılan camların kalınlıklarının giderek incelmesi ile, günümüzde elmas uç ile kesim daha az tercih edilir bir yöntem olmuş ve yerini cama temas edilmeden kesim yapılan lazer ile kesim yöntemine bırakmıştır. Lazer ile kesim teknolojisinde, atomların enerji absorbe etmeleri sonucu daha yüksek enerji düzeyine çıkma özelliğinden yararlanılmaktadır. Bu enerji transferinde oluşan fotonlar, aynı enerji düzeyine ve frekansa ulaşıp; aynı yönde hareket ederler. Lazer ışınları tek frekanslı oldukları için kayıpları az ve aynı fazda ışık dalgalarından oluştukları için şiddetleri büyüktür. Lazer ile kesim yöntemlerinde kenar kalitesini etkileyen parametreler: seçilen lazer ışınının dalgaboyu, geliş açısı, atım uzunluğu ve enerjisi, tarama hızı ve odaklanma süresidir. Lazer ile kesim yönteminde ışının temas ettiği noktalarda ve bölgelerde ısınma meydana gelir. Bu ısı, ısıl hasar oluşturacağı için, işlemin ısı malzemeye yayılmadan sonlandırılması önemlidir. Lazer ile kesim yönteminde, kullanılan ışının dalgaboyu kesim tipinin farklılaşmasına yol açar. 532 nm dalgaboyunda bir ışınla yapılan kesme yeşil lazer kesim yöntemi olarak isimlendirilirken; 9,35-10,6 µm dalgaboyundaki ışınla yapılan kesim yöntemi $CO_2$ lazer kesim adını alır [35].

$CO_2$ lazer ile kesme yöntemi 2000'li yılların başında geliştirilen bir kesim yöntemi olup; lazer ışın cama temas ettirilmeden gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde, ısıtılan lazer ışını istenen bölgeye odaklanır ve istenen doğrultuda düz bir çizik oluşturur. Bu işlem sonunda çizilen bölge ısındığı için bu bölgeye soğutucu yardımıyla hava üflenir. Çizilen bölgede, uygulanan ışın dolayısıyla bir sıcaklık artışı meydana gelir ve oluşan sıcaklık farkından dolayı çizilen çizgi boyunca bir çatlama gerçekleşir. Böylece kesme işlemi tamamlanmış olur. Bu yöntemle yüksek kenar kalitesi ve mukavemetine ulaşılır. Bu sayede malzemede zımpara ve parlatma gibi ikincil bir işleme gerek duyulmaz. Kesim esnasında herhangi bir mikro çatlak oluşmaz. Bu yöntem esnek ekran camları, OLED televizyon camları, yarı iletken camlar ve dekorasyon amaçlı camlar başta olmak üzere birçok ince cama uygulanabilir. Bu yöntemle yüksek kenar kalitesine ulaşılsa da istenilen biçimde kesim yapmak mümkün olmamaktadır, dolayısıyla yeşil lazer ile kesme yöntemi geliştirilmiştir [36].

Yeşil lazer ile kesme yönteminde, 532 nm dalgaboyunda bir lazer ışını camın alt yüzeyine odaklanarak alt yüzeyden başlayan bir kesme işlemi gerçekleştirmektedir. Bu işlem, düşük kenar kalitesi oluşturmasına karşın; istenilen şekilde cam kesmeye olanak sağladığı için tercih edilen bir yöntem olmuştur. Bu kesim yönteminin bir diğer özelliği ise, cam yüzeyinde bir bölgede camın bütününe zarar vermeden kesim yapma olanağı sunmasıdır. Dolayısıyla cama delik açma işlemlerinde yeşil lazer ile kesme yöntemi kullanılmaktadır. Yeşil lazer ile kesim yöntemi; aydınlatmalarda, duş başlıklarında, araba kokpiti ve OLED uygulamalarında kullanılmaktadır [35].

Camın kenar mukavemetini belirlemenin yolu, cama 4 noktadan eğme deneyinin uygulanmasıdır. Bu yöntemde, camın kırıldığı yük belirlenerek dayanım hesaplanır ve kullanılan numune sayısına göre Weibull Dağılımı kullanılarak camların farklı kesim tipine göre kenar kaliteleri karşılaştırılabilir. Bu tez çalışmasında, elmas uç, $CO_2$ ve yeşil lazer olmak üzere 3 farklı kesim yöntemi ile kesilmiş, farklı kenar kalitesine sahip camların kimyasal temperlemesi gerçekleştirilmiş ve camlara uygulanan 4 nokta eğme testi sonuçları ve Weibull dağılımlarından faydalanılarak kesim tipinin kimyasal temperleme verimine etkisi incelenmiştir.

# BÖLÜM 3

## DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında alümina silikat (AS) ve soda kireç silikat (SLS) camların kimyasal temperlenmesinde kalınlık ve kesme etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar iki grupta gerçekleştirilmiştir. İlk grup çalışmalarda, $CO_2$ lazer olmak üzere tek bir kesim tipiyle kesilerek hazırlanmış iki farklı kalınlıktaki AS ve CSLS camlar, farklı süre ve sıcaklıklarda kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu camlar 1,1 mm ve 0,7 mm olmak üzere iki farklı kalınlıkta Schott Xensation® Alümina Silikat camı ve China Triumph International Engineering firmasına ait Triumph Glass® Soda Kireç Silikat camıdır. İkinci grup çalışmalarda ise, farklı kesme tipleri ile kesilmiş ve CSLS camlardan farklı alümina oranına sahip bir soda kireç silikat camı (TSLS) kullanılmıştır. Bu cam Şişecam bünyesindeki Trakya Cam firmasına ait 1,1 mm kalınlığındaki düzcamdır. Bu camlar $CO_2$ lazer, yeşil lazer ve elmas kesim ile kesilerek hazırlanmıştır. Her iki grup çalışmada da, kimyasal temperleme öncesi ve sonrası yapılan yıkama işlemleri ile camlar analizlere hazır hale getirilmiştir. Kimyasal temperleme işlemi öncesinde ve sonrasında, camların Vickers sertliğini ve çizilme direncini hesaplamak amacıyla nano çizilme ve mikro sertlik testleri yapılmıştır. Camın eğme mukavemetini belirlemek için 4 nokta eğme analizleri gerçekleştirilmiştir. Camın kırılma yükünü belirlemek için halka üstü halka testi yapılmıştır. Camın kimyasal temperleme öncesinde ve sonrasında kırılma indisi ve geçirgenliklerinin değişimini hesaplamak için spektrofotometrede geçirgenlik analizi ve refraktometrede kırılma indisi analizi yapılmıştır. Basma gerilmesini ve iyon değişim derinliğini hesaplamak için camın çift kırınım özelliğinden faydalanılmıştır. Ayrıca, cam yapısındaki değişimleri incelemek amacıyla FTIR ile bağ yapısı analizleri gerçekleştirilmiştir. Kimyasal temperleme işleminin yüzey özelliklerinde meydana

getirdiği değişimi görmek için beyaz ışık interferometresinde yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür.

### 3.1 Numunelerin Hazırlanması (Yıkama ve Tartım)

Kalınlık etkisini incelemek amacıyla, 1,1 mm ve 0,7 mm kalınlığa sahip CSLS ve AS olmak üzere iki farklı cam kompozisyounu kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuştur. Soda kireç silikat cam numuneleri için 3 farklı sıcaklık ve 6 farklı süre; alümina silikat camlarda ise aynı 3 sıcaklık sıcaklık ve 4 farklı sürede kimyasal temperleme işlemi yapılmıştır. Bu işlem için 10x5 cm boyutlarında, $CO_2$ kesim yöntemiyle önceden kesilerek hazırlanmış 20'şer adet cam numune kullanılmıştır. Yalnızca halka üstü halka deneyi için 6x6 cm cam numuneler atmosfer ve kalay olmak üzere iki yüzeyden elmas uç ile kesilerek hazırlanmıştır (EN 1288-5). Halka üstü halka testinde soda kireç silikat camlarda atmosfer ve kalay yüzeyleri dikkate alınarak; her iki yüzeyden kesilmiş 20 adet cam numune hazırlanmıştır.

Kesme etkisini incelemek amacıyla, 1,1 mm kalınlığa sahip alümina oranı daha düşük olan bir soda kireç silikat camı kullanılmıştır. Bu camlar $CO_2$ lazer, elmas ve yeşil lazer olmak üzere 3 farklı kesim tipiyle 10x5 cm boyutlarında önceden kesilerek hazırlanmıştır. 40 adet cam numune, kalınlık etkisi çalışmaları kapsamında verimli olduğu düşünülerek seçilen tek bir sıcaklık ve sürede kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuştur.

Bu camlar sırasıyla demineralize saf su ve isopropanol alkol ile 5'er dakika ultrasonik banyoda yıkanmıştır. Ardından basınçlı azot gazı ile elde kurutulmuş ve Şekil 3.1'de görüldüğü gibi kimyasal temperleme fırını sepetine dizilmiştir.

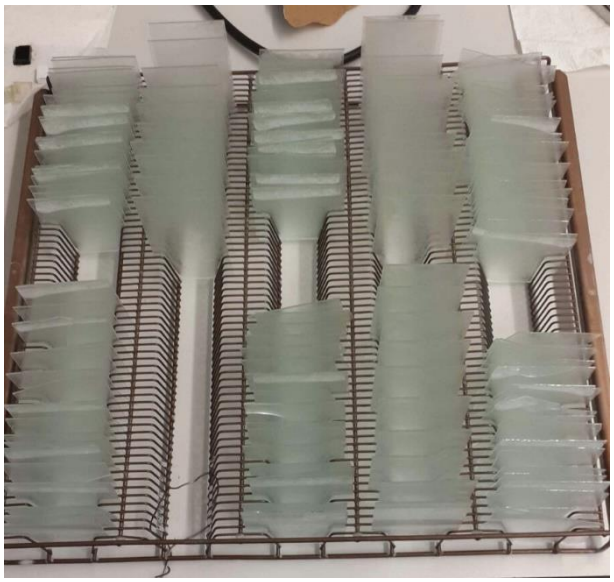
Yıkanıp kurutulan camlar kimyasal temperleme işlemi öncesi 0,0001 g hassasiyette olan Mettler marka AB204 model tartıda tartılmış ve not edilmiştir. Aynı işlem kimyasal temperleme sonrası da yapılmış ve ağırlık değişimi değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3. 1 Sepete yerleştirilmiş numuneler

### 3.2 Kimyasal Temperleme İşlemi

Yıkanıp tartılan numuneler LEMA TC 804A kimyasal temperleme fırınına yerleştirilerek prosesin yapılacağı sıcaklık ve süreler ayarlanmıştır. Temperleme sıcaklığı olarak 400, 425 ve 450 $^{o}$C, temperleme süresi olarak da alümina silikat camlar için 1, 2, 4, 8 saat, soda kireç silikat camlar için ise 2, 4, 8, 12, 24 ve 36 saat belirlenmiştir. Bu sıcaklıklar belirlenirken kullanılan tuzun ergime noktası ve camların yumuşama sıcaklıkları dikkate alınmıştır. Kimyasal temperleme prosesi için fırında yüksek safiyette $KNO_3$ tuzu (%99 saflıkta LEMA marka) kullanılmıştır. Kimyasal temperleme işleminden sonra fırından alınan Şekil 3.2'deki numuneler, demineralize saf su ile 5 dakika ultrasonik banyoda yıkanmıştır.



Şekil 3. 2 Kimyasal temperleme işlemi sonrası numuneler

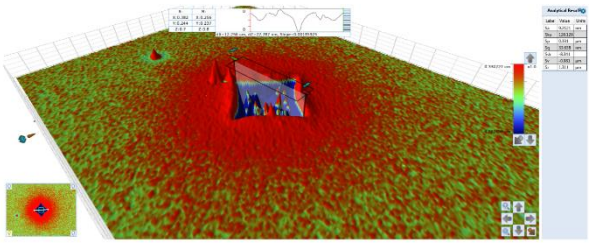
### 3.3 Vickers Mikrosertlik Analizi

Farklı kompozisyon ve kalınlıklardaki cam numunelerinin kimyasal temperleme sonucunda sertlik değişimini incelemek adına mikrosertlik deneyi yapılmıştır. Bu deney 25–1000 g yük aralığında 5 ile 30 saniye yükleme yapabilme kapasitesine sahip Şekil 3.3'teki Schimadzu Model-M Vickers mikrosertlik cihazı ile yapılmıştır.

Amaç, çatlak oluşmaksızın cam yüzeyinde yalnızca iz bırakmak olduğu için, çatlağın oluşmadığı en yüksek yük miktarı seçilmiştir. 50 g olarak belirlenen yük cam yüzeyine 15 saniye boyunca uygulanmıştır. Bu işlem cam yüzeyinde farklı yerlerde 10 kere tekrarlanmıştır. Şekil 3.4'te görülen, oluşturulan izlerin boyutları beyaz ışık interferometresinde ölçülerek sertlik değerleri hesaplanmıştır.



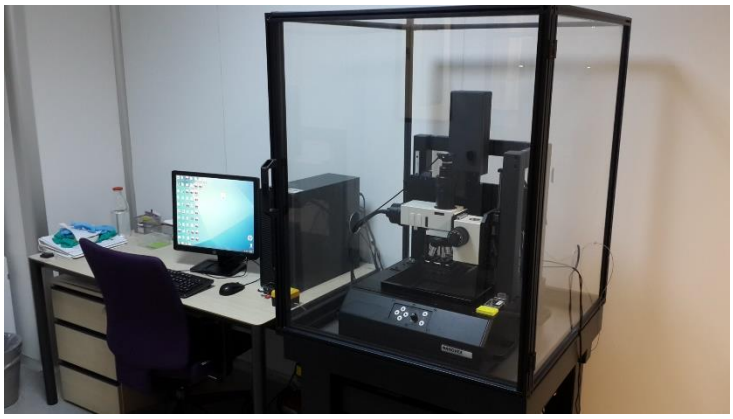
Şekil 3. 3 Schimadzu Model-M Vickers mikrosertlik cihazı



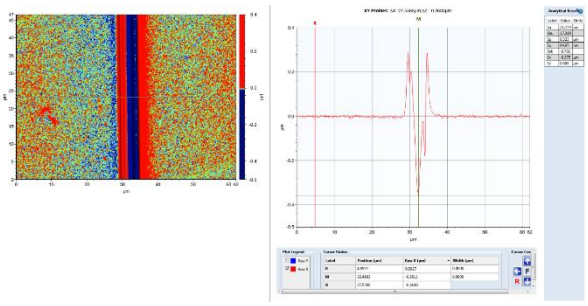
Şekil 3. 4 Oluşturulan izin beyaz ışık interferometresindeki görüntüsü

### 3.4 Çizilme Derinliği Analizi

Kimyasal temperleme işlemiyle mekanik olarak mukavemetlendirilen camların çizilme dayancına bağlı, çizilme derinliklerindeki değişim hesaplanmıştır. Bu değerleri bulmak için kimyasal temperlenmiş ve tempersiz (orijinal) numunelere Nanovea M1 Nanosertlik cihazıyla çizik deneyi yapılmıştır (Şekil 3.5). Nanosertlik cihazında 5 µm çapında 90 $^{o}$ sferokonik elmas uç kullanılmıştır. Elmas uç ile iki farklı çizme deneyi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak sabit yük ile 100 mN yük 0.5 mm boyunca uygulanmıştır. Elmas uç cam yüzeyinden bir kere geçerek bu çiziği oluşturmuş olup; çizme hızı 1 mm/dakika olarak belirlenmiştir. Her bir çizik 5 kere tekrarlanmış; çizikler arasında 0.1 mm mesafe bırakılmıştır. İkinci olarak 50 mN yükte 0.5 mm boyutta tekrarlı çizik oluşturulmuştur. Bu deneyde elmas uç cam yüzeyinden sabit yükte 20 kez geçerek çiziği oluşturmuştur. Bu çizik de 5 kere tekrarlanmış olup çizikler arasında 0.1 mm mesafe bırakılmıştır. Çizme deneyi sonrası numuneler 10'ar dakika desikatörde bekletilmiştir. Ardından beyaz ışık interferometresinde çiziklerin derinlikleri ölçülmüştür (Şekil 3.6). Her çiziğin farklı bölgelerinden 3'er ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalaması hesaplanmıştır. Buna göre kimyasal temperlenmemiş ve değişik saatlerde kimyasal temperlenmiş numunelerin çizik derinlikleri kıyaslanmış ve kimyasal temperlemenin çizik derinliğine etkisi belirlenmiştir.



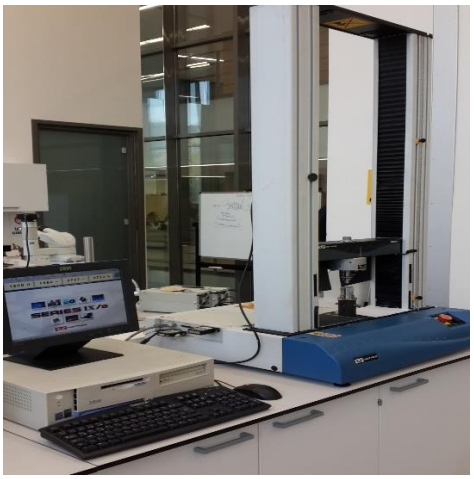
Şekil 3. 5 Nanovea M1 nanosertlik ve nanoçizik cihazı



Şekil 3. 6 Oluşturulan çiziğin beyaz ışık interferometresindeki görüntüsü

### 3.5 Dört Noktadan Eğme Deneyi

Camların eğme mukavemetini ölçmek için en çok tercih edilen yöntem 4 noktadan eğme deneyidir. Kesme tipinin kimyasal temperleme ve kenar kalitesine etkisini araştırmak amacıyla 4 noktadan eğme deneyi yapılması kararlaştırılmıştır. Bu amaçla Şekil 3.7'de gösterilen Instron 3366 cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 0 - 10 kN yük aralığında çalışabilmektedir. Yükleme hızı 11 mm/dakika olarak belirlenmiş olup numune boyutları 100x50 mm olarak belirlenmiştir. Cihazda kullanılan alt mesnet açıklığı EN 1288 standardına uygun olarak 70 mm, üst mesnet açıklığı da 10mm olarak belirlenmiştir. Ortam sıcaklığı 25 $^{o}$C, nemi ise %25 ila %50 arasında ölçülmüştür. Buna göre kimyasal temperlenmemiş ve kimyasal temperlenmiş 40 adet numunenin eğme mukavemeti 4 noktadan eğme deneyi ile belirlenmiştir.



Şekil 3. 7 Instron 3366 cihazı

### 3.6 Halka üstü Halka Deneyi ile Kırılma Yükü Analizi

Kimyasal temperleme işlemi ile mekanik olarak mukavemetlendirilmiş numunelerin kırılma yükünü bulmak için numunelere halka üstü halka testi ile kırma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem için 6x6 cm boyutlarında numuneler kullanılmıştır. Bu deneyde 0 - 10 kN yükler arasında çalışabilen, Şekil 3.8'de gösterilen Instron 3366 cihazı ile çalışılmış ve yükleme hızı 1,3 mm/dakika olarak belirlenmiştir. Ortam sıcaklığı 25 $^{o}$C, nemi ise %25 ila %50 arasında ölçülmüştür. EN 1288-5 standartlarına uygun olarak alt destek halkasının çapı 30 mm, üst yükleme halkasının çapı 10 mm olarak belirlenmiştir. Sonuçların güvenilirliği açısından kimyasal tempersiz ve kimyasal temperli numunelerin atmosfer ve kalay yüzeylerinden 20'şer adet numune ile çalışılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3. 8 Halka üstü halka deney düzeneği

### 3.7 Optik Geçirgenlik Analizi

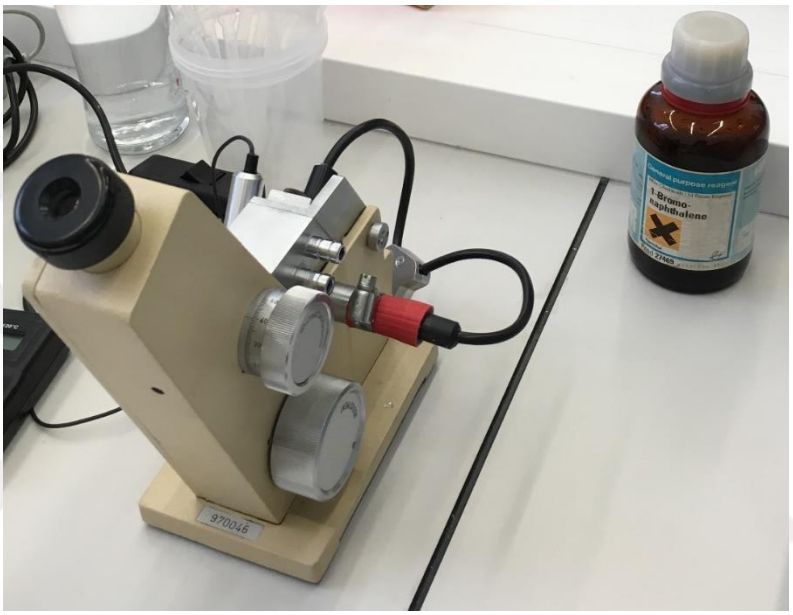
Kimyasal temperleme işleminden sonra yapılan optik geçirgenlik analizi ile camın optik özelliklerinin kimyasal temperleme prosesi ile değişimi incelenmiştir. Bu amaçla Şekil 3.9'da gösterilen Perkin Elmer marka Lambda 950 model UV/VIS/IR Spektrofotometre cihazı ile 250 - 2500 nm arasında görünür bölge geçirgenliği analizi yapılmıştır. Görünür bölge geçirgenlik analizi EN 410 standardına göre yapılmış ve kimyasal temperlemenin görünür bölgedeki optik geçirgenliğe etkisi incelenmiştir.



Şekil 3. 9 Lambda 950 model UV/VIS/NIR spektrofotometresi

### 3.8 Kırılma İndisi Ölçümü

Temperlenmiş camlardaki kırılma indisi değişimini görmek için Şekil 3.10'da gösterilen Schmidt + Haensch marka refraktometre kullanılmıştır. Ölçülecek numune deminarilize su ve isopropanol alkol ile yıkanıp kurulandıktan sonra refraktometrenin ölçüm yapan yüzeyine bir damla BDH Chemicals firmasından alınan sıvı 1-Bromo naftalin damlatılmıştır. Ardından görüntü cihaz ölçeğinde ayarlandıktan sonra değer belirlenmiştir.

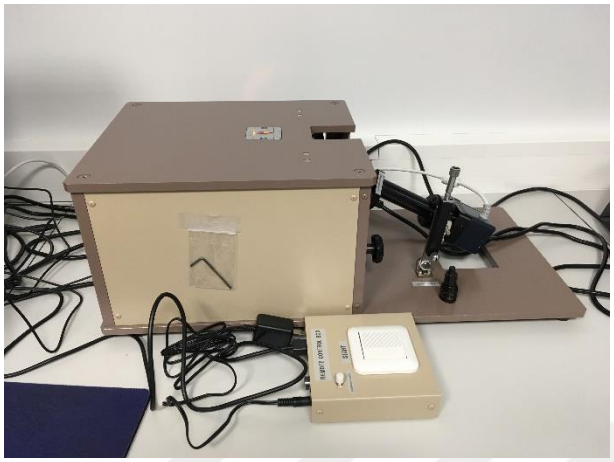



Şekil 3. 10 Schmidt + Haensch marka refraktometre

### 3.9 Yüzey Gerilimi Ölçümü

Kimyasal temperleme işlemi sonrasında camların yüzey basma gerilimi ve iyon değişim derinliği Şekil 3.11'de gösterilen FSM 6000LE cihazında incelenmiştir. Bu cihaz ışığın çift kırınım davranışını algılayarak; ulaşılan değerleri vermektedir. Cam kompozisyonuna bağlı olarak değişen fotoelastik sabiti ve kırılma indisi değerleri cihazın ölçüm parametreleri olarak ayarlanmıştır. Ardından ölçüm öncesi cihazın ölçümü aldığı alana 1 damla BDH Chemicals firmasından alınan sıvı 1-Bromo naftalin damlatılmış ve cihaz üzerine yerleştirilen numuneden canlı görüntüleme yardımıyla görüntü alınmıştır. Alınan görüntüler üzerinden otomatik hesaplama yapan bilgisayar programı yardımıyla yüzey gerilimi, gerilim derinliği ve merkezi gerilim değerlerine ulaşılmıştır. Bu cihazda, kimyasal temperli camlar için alınan görüntülerde bulunan saçakların sayıları ve netlikleri

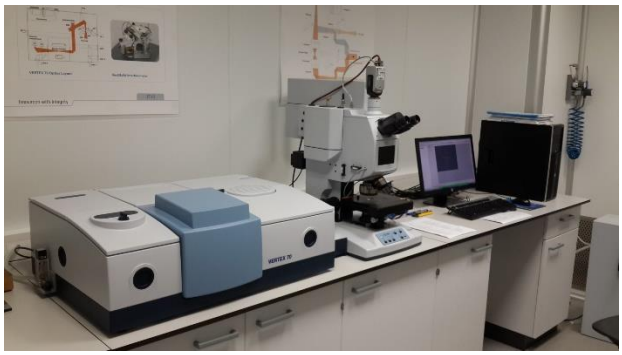
yardımıyla hesaplamalar yapılmıştır. İkinci grup deneysel çalışmalarda, kenar kalitesinin kimyasal temperleme verimine etkisinin araştırılması amacıyla, numunelerin orta ve kenar bölgelerinden ayrı ayrı ölçümler yapılarak yüzey gerilimleri hesaplanmıştır.



Şekil 3. 11 FSM 6000LE yüzey gerilim ölçüm cihazı

### 3.10 Bağ Yapısı Analizi

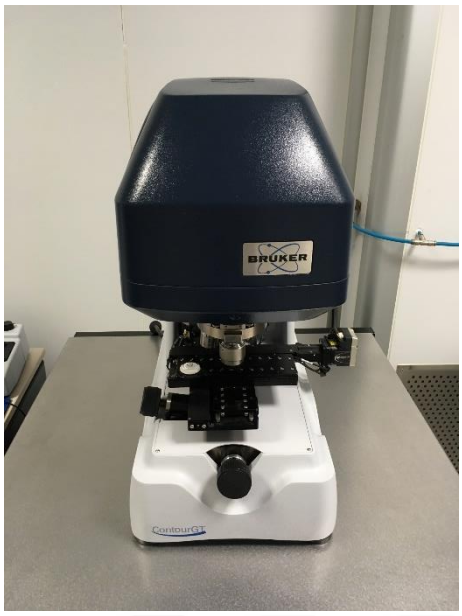
Kimyasal temperleme iyon değişimi esasına dayanan bir işlemdir. Bu işlem sırasında camda bulunan Si – O – Si ve Na – O bağlarının yapısındaki değişimi incelemek için Brunker marka Hyperion 3000 Fourier dönüşümlü infrared spektrofotometresi (FTIR) kullanılmıştır (Şekil 3.12). ATR ve REF olmak üzere iki modda ölçüm yapabilen bu cihazda kimyasal temperlenmemiş ve çeşitli saatlerde kimyasal temperlenmiş numunelerin atmosfer yüzeylerinde ölçüm yapılmış ve sonuçlar birbirirleriyle kıyaslanarak yorumlanmıştır.



Şekil 3. 12 Hyperion 3000 Fourier dönüşümlü infrared spektrofotometresi

### 3.11 Beyaz Işık İnterferometresi ile Yüzey Topografisi Analizi

Kimyasal temperleme işlemi ile yüzey mukavemetlendirme işleminin yüzey topografisine etkisini incelemek için Şekil 3.13'te gösterilen Bruker marka ContourGT – X model beyaz ışık interferometresinde yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Cihaz x2 ile x100 büyütme aralığında çalışılmaktadır. Bu çalışmada x100 büyütmede çalışılmasına karar verilmiştir. Cihaz yapılan analizi iki ve üç boyutlu olarak görüntülü olarak vermekte ve yüzey pürüzlülüğünü nanometre mertebesinde analizleyebilmektedir. Cihazda yüzey pürüzlülük miktarına göre seçilen; VIS/VXI olmak üzere iki farklı ölçüm modu mevcuttur. Bu cihazda yüzey pürüzlülüğü ölçümü dışında sertlik deneyinde oluşturulan izin köşeleri arasındaki mesafeler ve çizik derinliği ölçümü yapılmıştır. Ayrıca farklı kesim tipiyle kesilerek hazırlanmış camlara uygulanan kesim tipinin kenar kalitesini görmek amacıyla, kenar kısımların pürüzlülüğü ölçülmüştür.




Şekil 3. 13 Bruker marka ContourGT – X model beyaz ışık interferometresi

# BÖLÜM 4

## DENEYSEL SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında alümina silikat (AS) ve soda kireç silikat (SLS) camların kimyasal temperlenmesinde kalınlık ve kesme etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar iki grupta gerçekleştirilmiştir. İlk grup çalışmalarda, $CO_2$ lazer olmak üzere tek bir kesim tipiyle hazırlanan ve farklı sıcaklık ve sürelerde kimyasal temperleme işlemine tabi tutulan iki farklı kalınlıktaki AS ve CSLS camların; yüzde ağırlık değişimi, yüzey gerilimi, gerilim derinliği, merkezi gerilim, sertlik, çizilme derinliği, kırılma yükü, optik geçirgenlik, yüzey pürüzlülüğü sonuçları verilmiştir. Numunelerin bileşim ve kalınlık parametleri dikkate alınarak belirlenen isimleri ve kimyasal temperleme koşulları Tablo 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4. 1Birinci grup deneysel çalışmalar numune tablosu

| Numune İsmi | Bileşim | Kalınlık (mm) | Kimyasal Temperleme Sıcaklığı (°C) | Kimyasal Temperleme Süresi (saat) |
|---|---|---|---|---|
| CSLS07 | Soda kireç silikat | 0,7 | 400 - 425 - 450 | 2 - 4 - 8 - 12 - 24 - 36 |
| CSLS11 | Soda kireç silikat | 1,1 | 400 - 425 - 450 | 2 - 4 - 8 - 12 - 24 - 36 |
| AS07 | Alümina silikat | 0,7 | 400 - 425 - 450 | 1 - 2 - 4 - 8 |
| AS11 | Alümina silikat | 1,1 | 400 - 425 - 450 | 1 - 2 - 4 - 8 |

İkinci grup çalışmalarda, $CO_2$ lazer, elmas ve yeşil lazer kesim olmak üzere 3 farklı kesim tipiyle kesilerek hazırlanan ve belirlenen tek bir sıcaklık ve sürede kimyasal temperleme işlemine tabi tutulan 1,1 mm olmak üzere tek bir kalınlığa sahip TSLS camların; dört noktadan eğme deneyi sonucu kırılma yükü ve eğme mukavemeti, yüzey gerilimi, gerilim derinliği, merkezi gerilim ve kenar pürüzlülüğü sonuçları verilmiştir. Numunelerin kesim

tipi parametresi dikkate alınarak belirlenen kısaltmaları ve kimyasal temperleme koşulları Tablo 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4. 2 İkinci grup deneysel çalışmalar numune tablosu

| Numune İsimleri | Bileşim | Kesim Tipi | Kalınlık (mm) | Kimyasal Temperleme Sıcaklığı (°C) | Kimyasal Temperleme Süresi (saat) |
|---|---|---|---|---|---|
| TSLS11$CO_2$ | Soda kireç silikat | $CO_2$ Lazer | 1,1 | 425 | 4 |
| TSLS11W | Soda kireç silikat | Elmas Kesim | 1,1 | 425 | 4 |
| TSLS11GL | Soda kireç silikat | Yeşil Lazer | 1,1 | 425 | 4 |

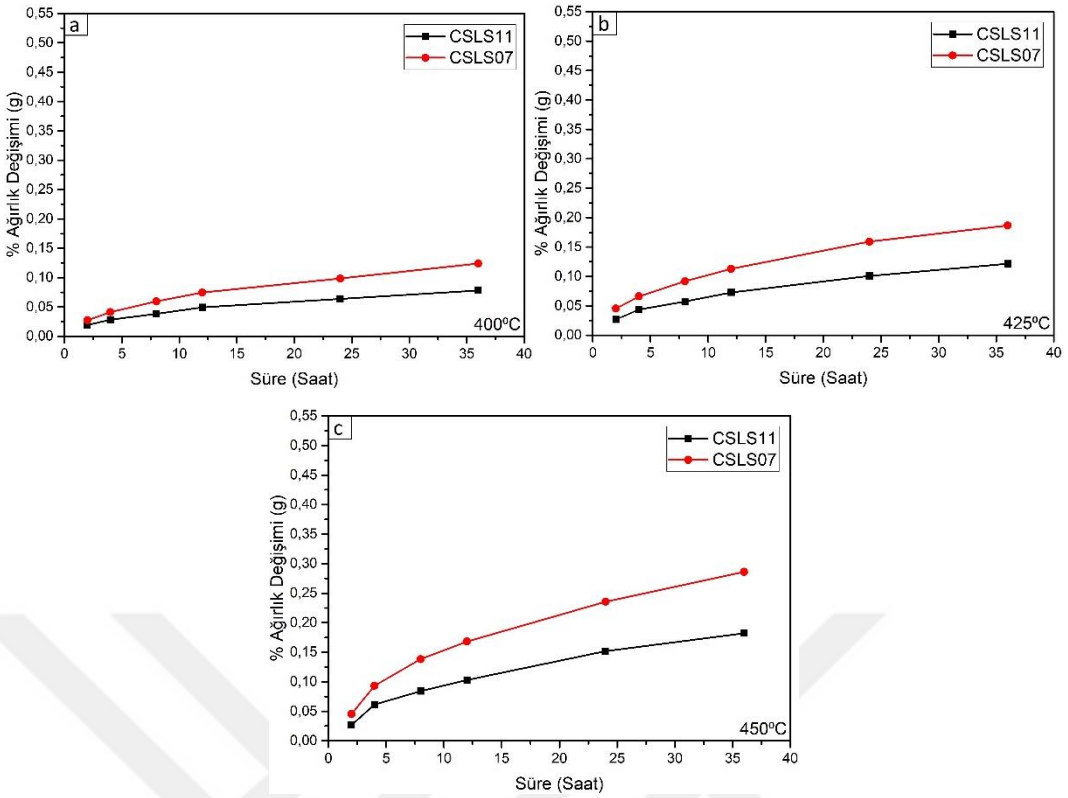
## 4.1 Kimyasal Temperleme Davranışına Kalınık Etkisi

### 4.1.1 Soda Kireç Silikat Camların Sonuçları

#### 4.1.1.1 Yüzde Ağırlık Değişimi Sonuçları

1,1 mm ve 0,7 mm olmak üzere iki farklı kalınlığa sahip soda kireç silikat camlar; 400 $^{o}$C, 425 $^{o}$C ve 450 $^{o}$C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta ve 2, 4, 8, 12, 24 ve 36 saat olmak üzere 6 farklı sürede kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu hesaplamalar yapılırken her kalınlık ve kompozisyon için 20 numune kullanılmış ve ortalaması alınmıştır.

Bu işlem sonrası yüzeyden belirli bir derinliğe kadar olan bölümde gerçekleşen iyon değişimi sonucu ağırlık değişimi meydana gelmiştir. Bu değişimden yola çıkılarak yüzde ağırlık değişimi değeri hesaplanmıştır. Buna göre elde edilen en yüksek yüzde ağırlık değişimi değeri CSLS11 için 400 $^{o}$C'de ve 36 saatte 0,0782, 425 $^{o}$C ve 36 saatte 0,1215, 450 $^{o}$C'de ve 36 saatte 0,1823 olarak hesaplanmıştır. CSLS07 için ise, 400 $^{o}$C ve 36 saatte 0,1240, 425 $^{o}$C 'de ve 36 saatte 0,1866, 450 $^{o}$C'de ve 36 saatte 0,2862 olarak hesaplanmıştır. Yüzde ağırlık değişimleri Şekil 4.1'de verilmiştir.

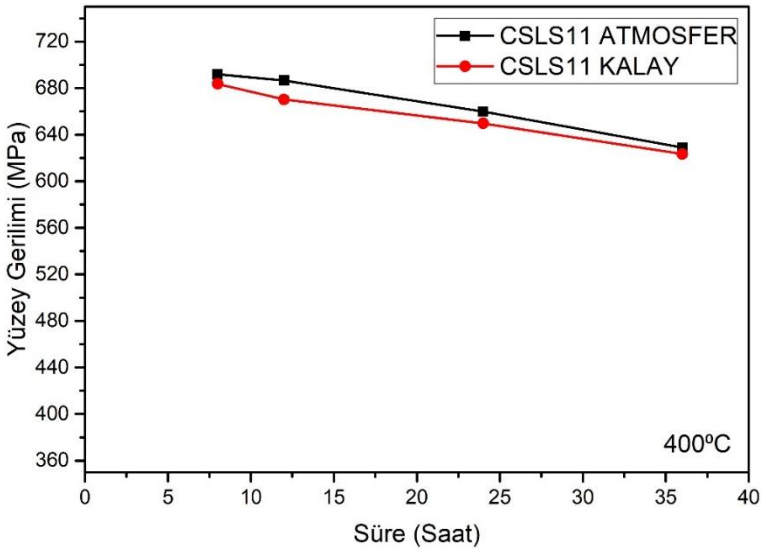



Şekil 4. 1 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C ve c) 450 $^{o}$C'de ağırlık değişimi sonuçları

#### 4.1.1.2 Yüzey Gerilimi Sonuçları

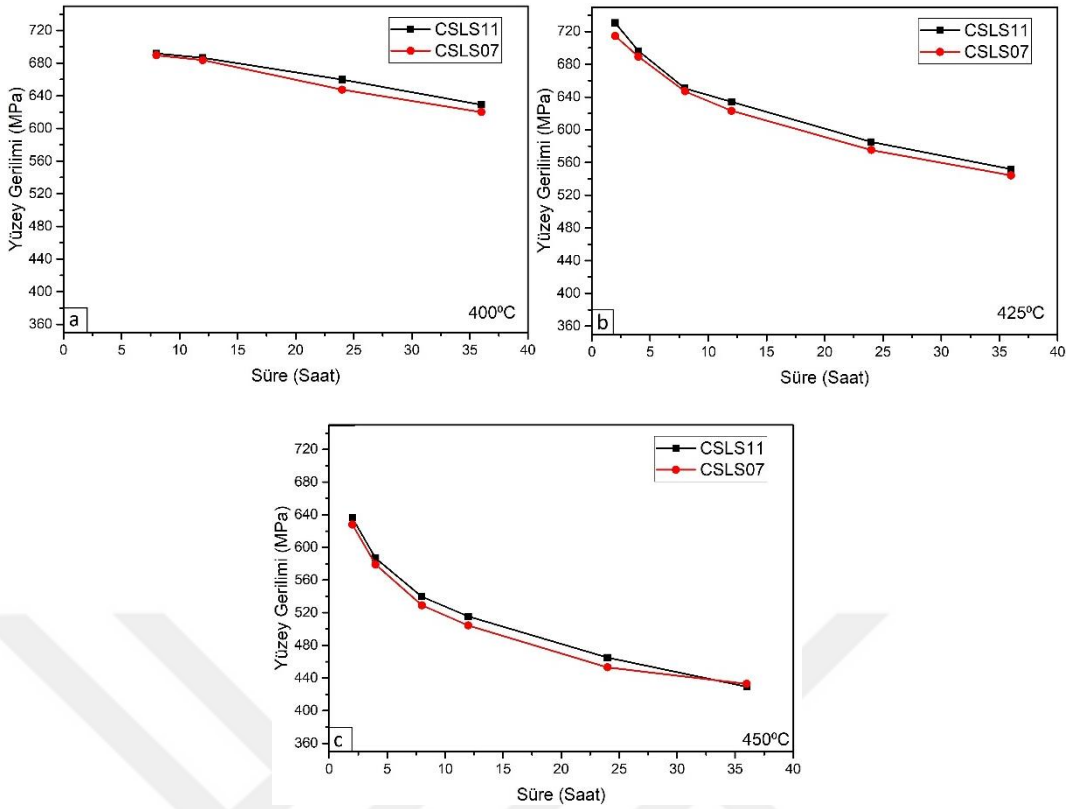
Kimyasal temperleme işleminin camın atmosfer ve kalay yüzeylerinde oluşturduğu etkileri karşılaştırmak amacıyla, 400 $^{o}$C'de kimyasal temperleme işlemine tabi tutulan 1,1 mm kalınlıktaki soda kireç silikat cam numunesin atmosfer ve kalay yüzeylerinin yüzey gerilimi ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 4.2'de verilmiştir. Ölçüm 4 farklı numunenin 5 farklı yerinden yapılmış olup, sonuçlar bu 20 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır.

Yapılan yüzey gerilimi ölçümünde, camın atmosfer yüzeyinin yüzey gerilimi sonucu kalay yüzeyine göre tüm kimyasal temperleme süreleri için daha yüksek elde edilmiştir. Benzer sonuç tüm sıcaklık ve bileşim değerleri için bütün deneylerde saptanmıştır. Bu nedenle, bundan sonraki bölümlerde deneysel sonuçlar numunelerin yalnızca atmosfer yüzeyleri için verilecektir.




Şekil 4. 2 CSLS11 numunesinin atmosfer ve kalay yüzeylerinin yüzey gerilimi sonuçları

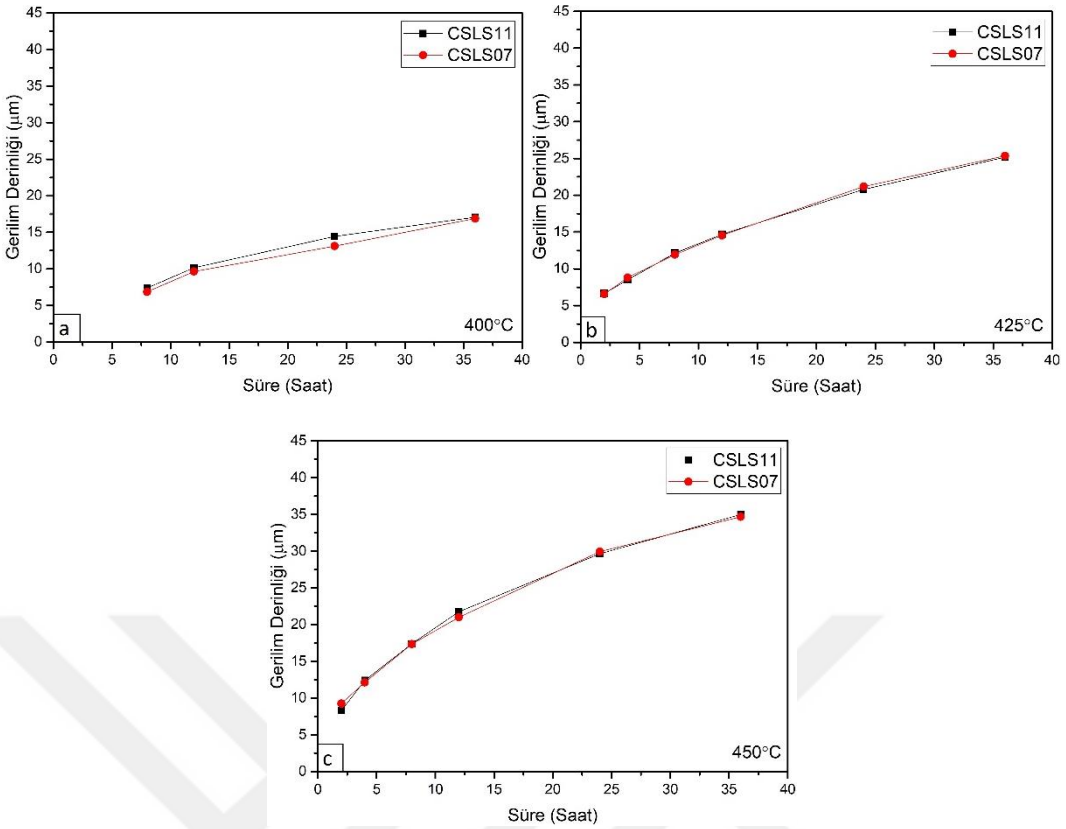
CSLS11 ve CSLS07 numunelerin üç farklı sıcaklık için yüzey gerilimi sonuçları Şekil 4.3'te verilmiştir. En yüksek yüzey gerilim değerleri, CSLS11 için 400 $^{o}$C ve 8 saatte 692 MPa, 425 $^{o}$C ve 2 saatte 731 MPa, 450 $^{o}$C ve 2 saatte 636 MPa olarak ölçülmüştür. CSLS07 için ise 400 $^{o}$C ve 8 saatte 690 MPa, 425 $^{o}$C ve 2 saatte 715 MPa, 450 $^{o}$C ve 2 saatte 628 MPa olarak ölçülmüştür.




Şekil 4. 3 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C ve c) 450 $^{o}$C'de yüzey gerilimi sonuçları

#### 4.1.1.3 Gerilim Derinliği Sonuçları

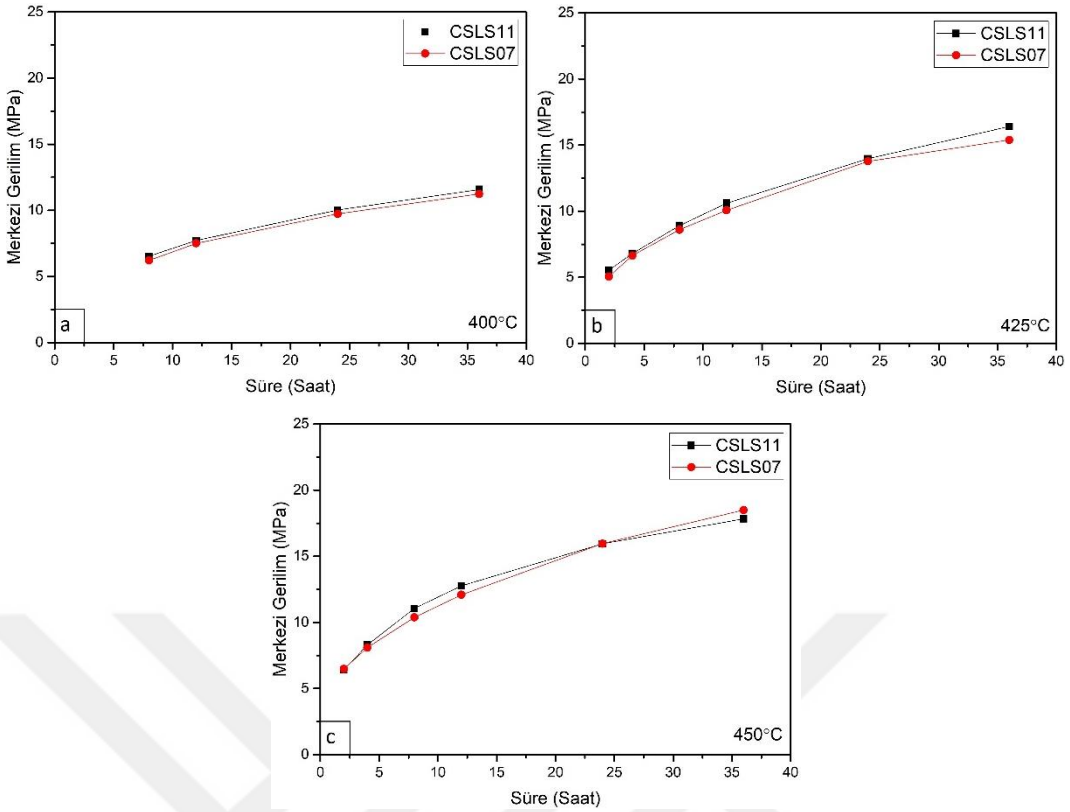
CSLS11 ve CSLS07 numunelerin üç farklı sıcaklık için gerilim derinliği sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir. En yüksek gerilim derinliği değerleri, CSLS11 için 400 $^{o}$C ve 36 saatte 17,1 µm, 425 $^{o}$C ve 36 saatte 25,5 µm, 450 $^{o}$C ve 36 saatte 35 µm olarak ölçülmüştür. CSLS07 için ise 400 $^{o}$C ve 36 saatte 16,9 µm, 425 $^{o}$C ve 36 saatte 25,3 µm, 450 $^{o}$C ve 36 saatte 34,7 µm olarak ölçülmüştür. Ölçüm 4 farklı numunenin 5 farklı yerinden yapılmış olup, sonuçlar bu 20 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır.




Şekil 4. 4 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C b) 425 $^{o}$C c)450 $^{o}$C'de gerilim derinliği sonuçları

#### 4.1.1.4 Merkezi Gerilim Sonuçları

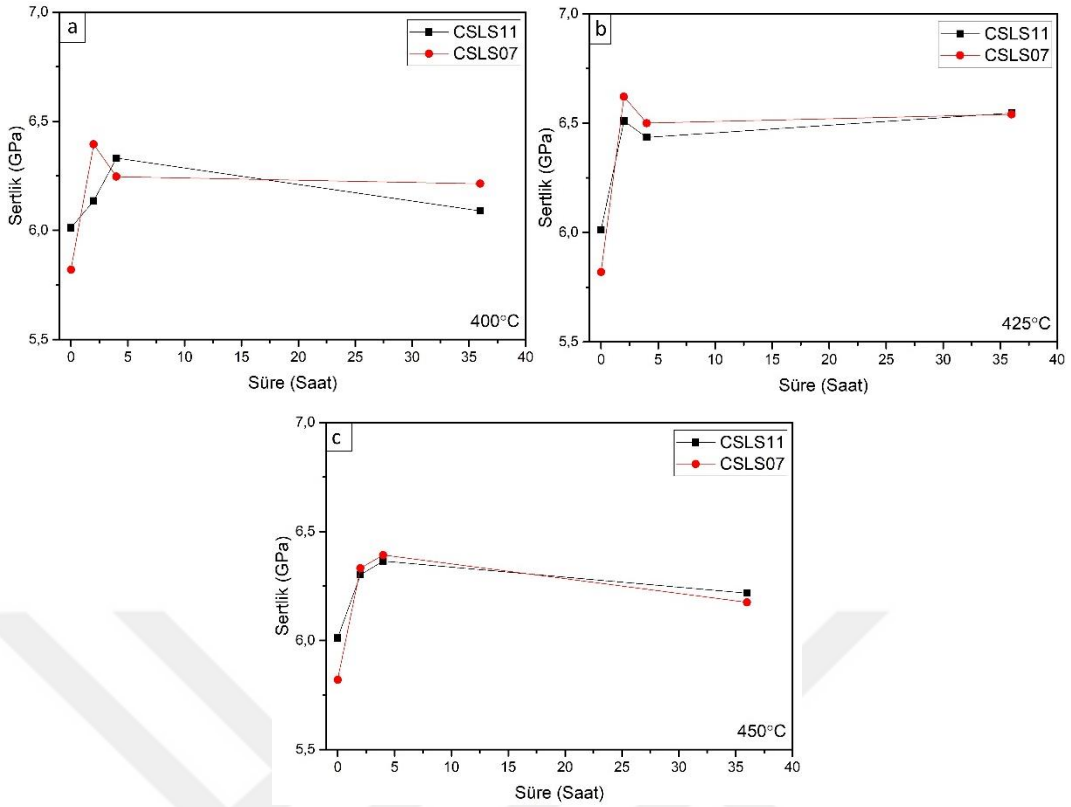
CSLS11 ve CSLS07 numunelerin üç farklı sıcaklık için merkezi gerilim sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir. En yüksek merkezi gerilim değerleri, CSLS11 için 400 $^{o}$C ve 36 saatte 11,6 MPa, 425 $^{o}$C ve 36 saatte 16,4 MPa, 450 $^{o}$C ve 36 saatte 17,8 MPa olarak ölçülmüştür. CSLS07 için ise 400 $^{o}$C ve 36 saatte 11,2 MPa, 425 $^{o}$C ve 36 saatte 15,4 MPa, 450 $^{o}$C ve 36 saatte 18,5 MPa olarak ölçülmüştür. Ölçüm 4 farklı numunenin 5 farklı yerinden yapılmış olup, sonuçlar bu 20 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır.




Şekil 4. 5 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C b) 425 $^{o}$C c) 450 $^{o}$C'de merkezi gerilim sonuçları

#### 4.1.1.5 Sertlik Sonuçları

Kimyasal temperleme işlemi sonrası CSLS11 ve CSLS07 numuneleri için yapılan sertlik analizi sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu ölçüm sonucunda elde edilen en yüksek sertlik değerleri CSLS11 için 400 $^{o}$C ve 4 saatte 6,331 GPa, 425 $^{o}$C ve 8 saatte 6,546 GPa, 450 $^{o}$C ve 4 saatte 6,364 GPa olarak ölçülmüştür. CSLS07 için ise bu değer 400$^{o}$ C ve 2 saatte 6,394 GPa, 425 $^{o}$C ve 2 saatte 6,621 GPa, 450$^{o}$C ve 4 saatte 6,392 GPa olarak ölçülmüştür. Ölçüm bir numunenin 10 farklı yerinden alınmış olup, sonuçlar bu 10 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır.



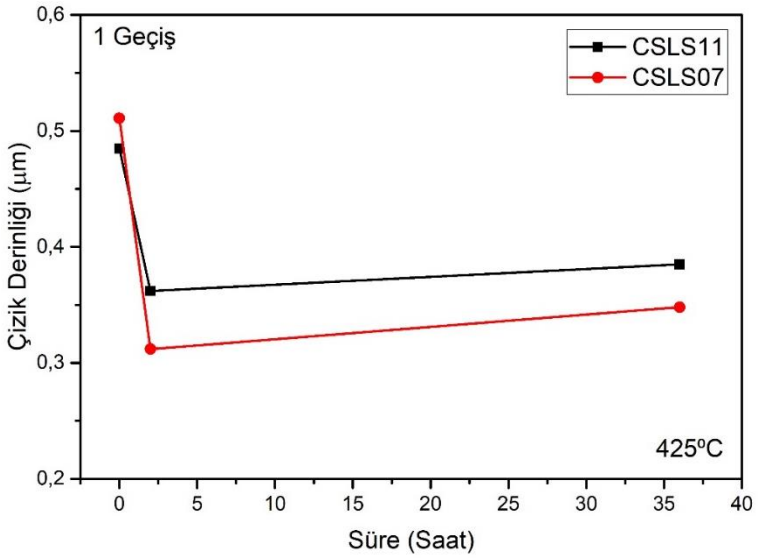

Şekil 4. 6 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C b) 425 $^{o}$C c) 450 $^{o}$C'de sertlik sonuçları

#### 4.1.1.6 Çizilme Testi Sonuçları

425 $^{o}$C'de yapılan kimyasal temperleme işlemi sonrası CSLS11 ve CSLS07 numuneleri için iki farklı çizilme deneyi yapılmıştır. Çizme işlemini yapan ucun tek geçişi sonrasında çizilme derinliği, 20 geçişi sonrasında yüzeyde tahrip edilen hacim ölçülmüştür. İki deney de 5'er kez tekrarlanmış olup, sonuçlar bu 5 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır.

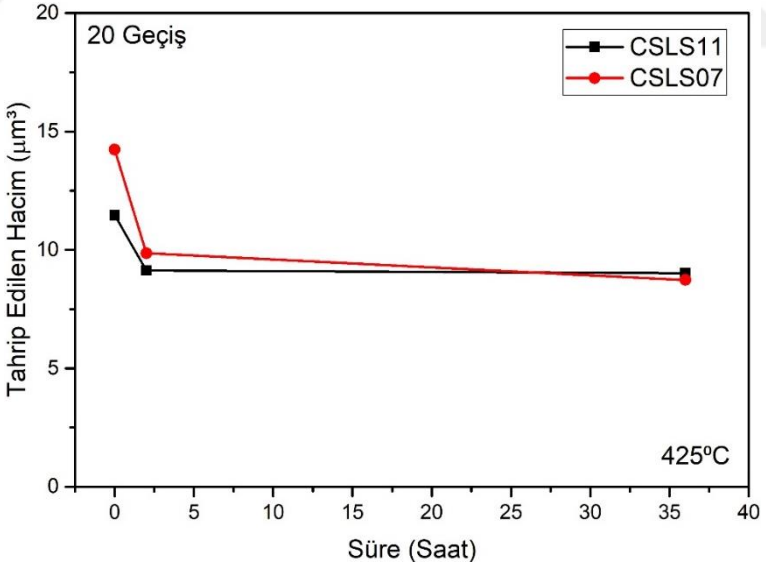
Buna göre tek geçişte yapılan çizilme deneyinde CSLS11 için en düşük çizilme derinliği değeri 2 saat kimyasal temperleme işlemi sonrasında 0,3620 µm olarak ölçülmüştür. CSLS07 için ise en düşük değer 2 saat kimyasal temperleme işlemi sonunda 0,3119 µm olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucu elde edilen değerlerin süreye bağlı değişimi Şekil 4.7'de verilmiştir.

İki testte de bu işlem, orijinal ve en uzun kimyasal temperleme süresi olan 36 saat numunelerine uygulanmıştır.




Şekil 4. 7 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin 425 $^{o}$C'de çizilme derinliği sonuçları

20 geçişte yapılan çizilme deneyinde CSLS11 için tahrip edilen en küçük hacim 36 saat kimyasal temperleme işlemi sonrasında 9,02 µm³ olarak ölçülmüştür. CSLS07 için tahrip edilen en küçük hacim ise, 36 saat kimyasal temperleme işlemi sonrasında 8,73 µm³ olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler Şekil 4. 8'de verilmiştir.

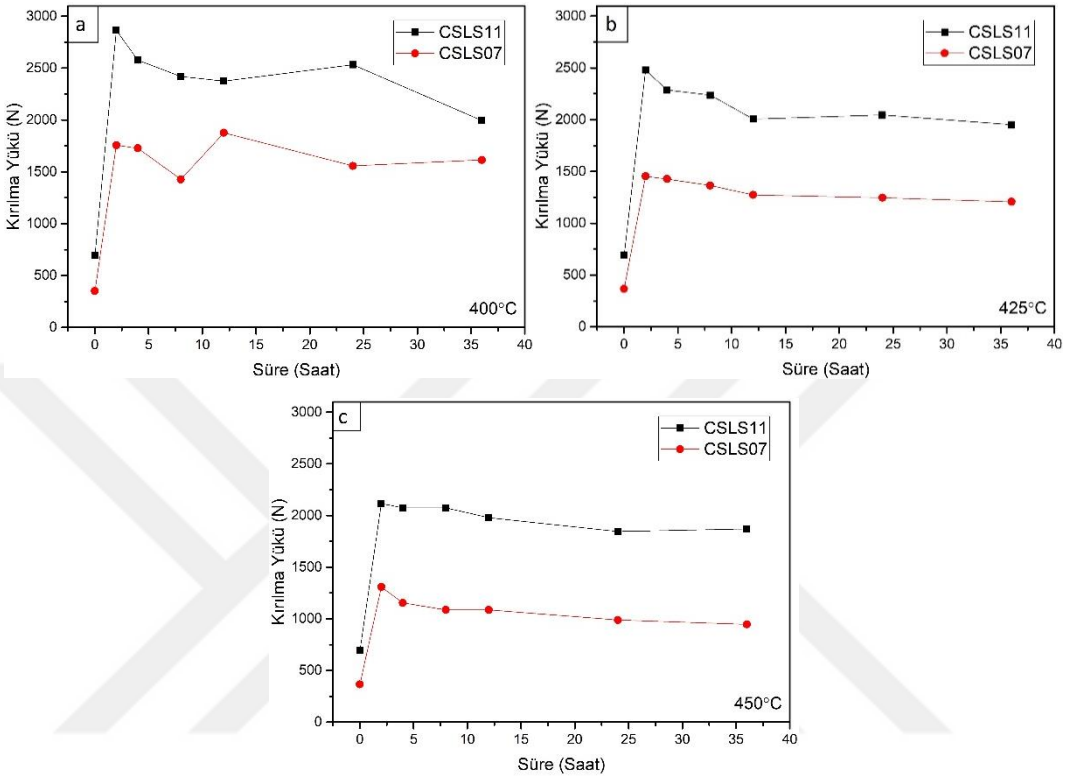



Şekil 4. 8 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin 425 $^{o}$C'de tahrip edilen hacim sonuçları

#### 4.1.1.7 Halka Üstü Halka Deneyi Sonuçları

3 farklı sıcaklıkta yapılan kimyasal temperleme işlemi sonrasında yapılan halka üstü halka testi sonucu bulunan CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin kırılma yükü sonuçları Şekil 4.9'da verilmiştir. Buna göre en yüksek kırılma yükü CSLS11 için 400 $^{o}$C ve 2 saatte 2865 N, 425

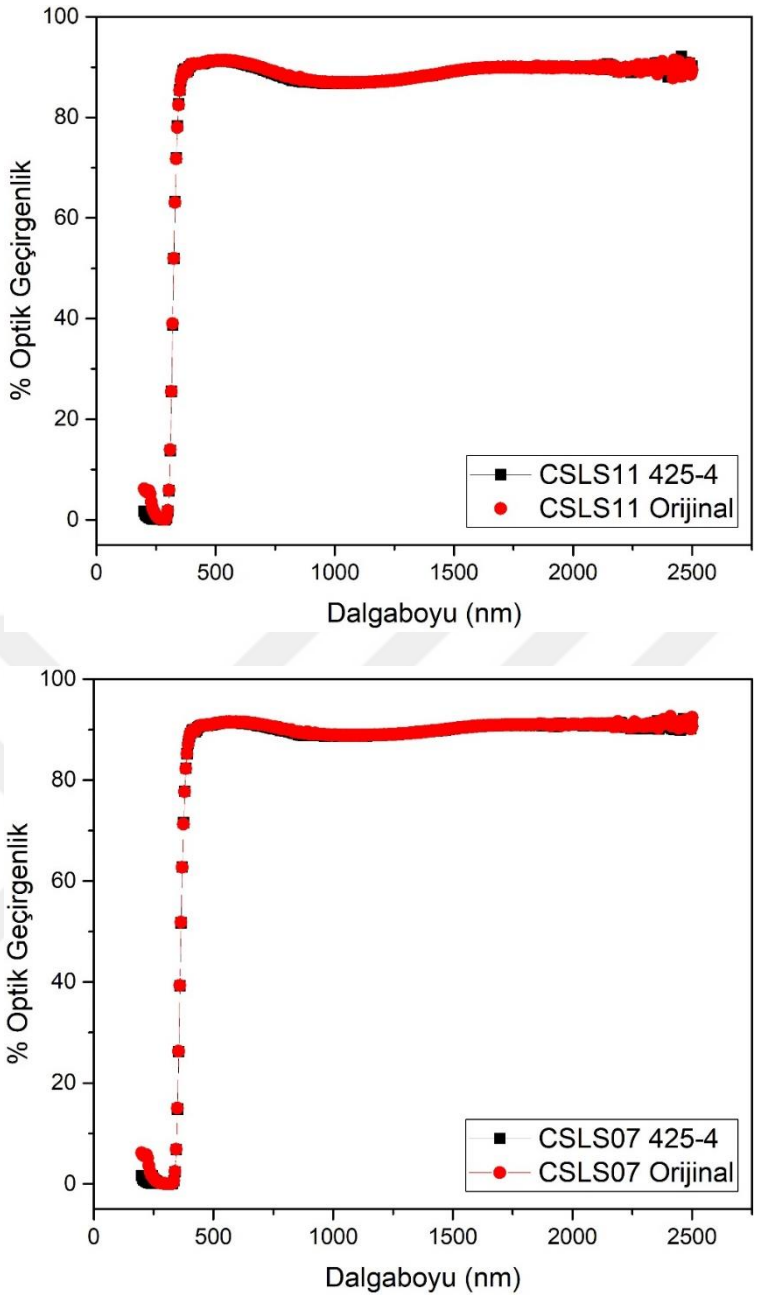
$^{o}$C ve 2 saatte 2479 N, 450 $^{o}$C ve 2 saatte 2116 N ölçülmüştür. CSLS07 için en yüksek kırılma yükü 400 $^{o}$C ve 12 saatte 1876 N, 425 $^{o}$C ve 2 saatte 1454 N, 450 $^{o}$C ve 1 saatte 1308 N olarak ölçülmüştür. Ölçüm 20 numuneye yapılmış olup, sonuçlar bu 20 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır.




Şekil 4. 9 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C, c) 450 $^{o}$C'de kırılma yükü sonuçları

#### 4.1.1.8 Optik Geçirgenlik Analizi ve Kırılma İndisi Sonuçları

Kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş ve tutulmamış camların optik geçirgenlikleri 200 - 2500 nm arasındaki dalgaboyları için ölçülmüştür. Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş CSLS11 ve CSLS07 camların optik geçirgenlikleri Şekil 4.10'da verilmiştir. Kırılma indisi ise 1,1 mm kalınlığa sahip camlarda orijinal ve SLS camlar için 425 $^{o}$C'de 36 saat temperleme işlemine tabi tutulmuş camlar için ölçülmüştür. Ölçüm 633 nm dalgaboyunda yapılmıştır. Sonuç olarak TSLS için 1,5180 ve CSLS için 1,5165 olarak bulunmuştur.

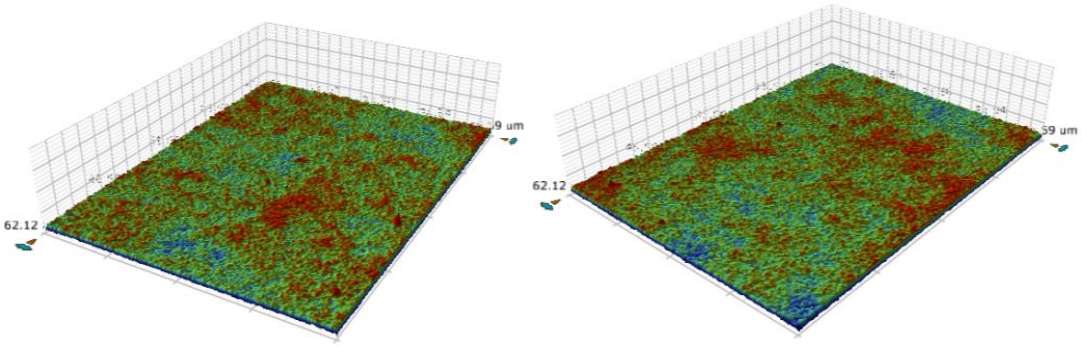



Şekil 4. 10 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş CSLS11 ve CSLS07'nin optik geçirgenlik grafikleri

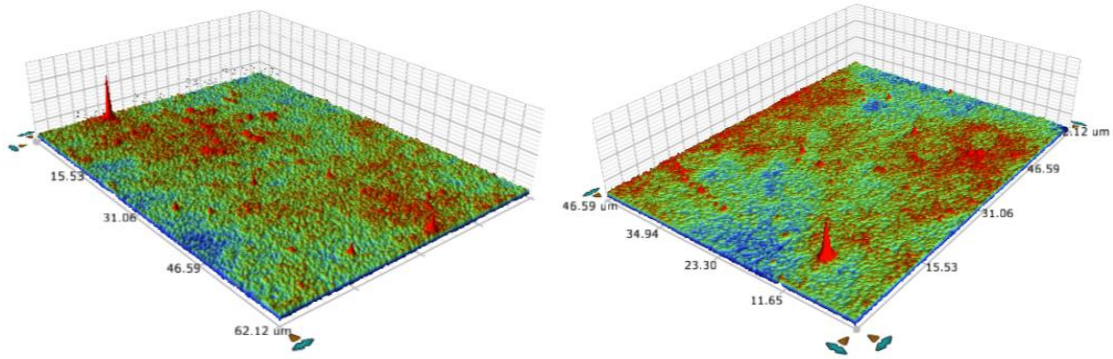
#### 4.1.1.9 Beyaz Işık İnterferometresi ile Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü Sonuçları

Kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş ve tutulmamış camların yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Kimyasal temperlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek için 425 $^{o}$C'de 36 saat temperlenen soda kireç silikat numunelere bu test yapılmıştır. 36 saat soda kireç silikatlar için en uzun kimyasal temperleme işlemi süresidir. CSLS11 için yüzey pürüzlülüğü orijinal camlarda 0,2690 nm iken; 425 $^{o}$C'de 36 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş camlarda yüzey pürüzlülüğü değeri

0,2174 nm'dir. CSLS07 için yüzey pürüzlülüğü değeri orijinal camlarda 0,2832 nm iken; 425 $^{o}$C'de 36 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş camlarda yüzey pürüzlülüğü değeri 0,3037 nm bulunmuştur. Numunelerin beyaz ışık interferometresindeki görüntüleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir. Ölçüm bir numunenin 3 farklı yerinden yapılmış olup, sonuçlar bu ölçümlerin ortalaması olarak hesaplanmıştır.



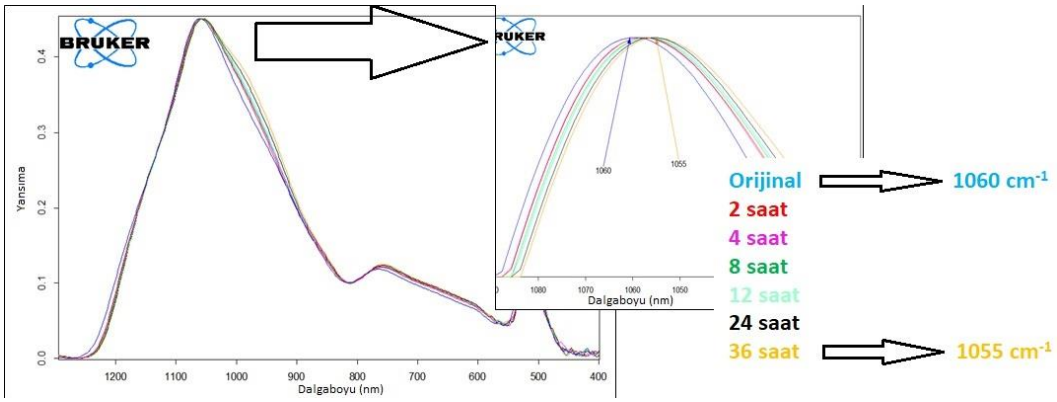

Şekil 4. 11 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 36 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş CSLS11 için yüzey pürüzlülüğü görüntüleri




Şekil 4. 12 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 36 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş CSLS07 için yüzey pürüzlülüğü görüntüleri

**4.1.1.10 Bağ Yapısı Analizi Sonuçları**

Kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş ve tutulmamış camların bağ yapıları ölçülmüştür. Kimyasal temperlemenin Si – O bağlarına etkisini incelemek için orijinal ve 425 $^{o}$C'de temperlenen soda kireç silikat numunelerine bu test yapılmıştır. Si – O bağına ait olduğu bilinen eğrinin tepe noktasının CSLS11 ve CSLS07 için 1060 cm$^{-1}$ 'den 1055 cm$^{-1}$ 'e ötelendiği görülmüştür. Bu ötelenmeyi gösteren grafik Şekil 4.13'te verilmiştir.




Şekil 4. 13 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş CSLS11 ve CSLS07 camların FTIR görüntüleri

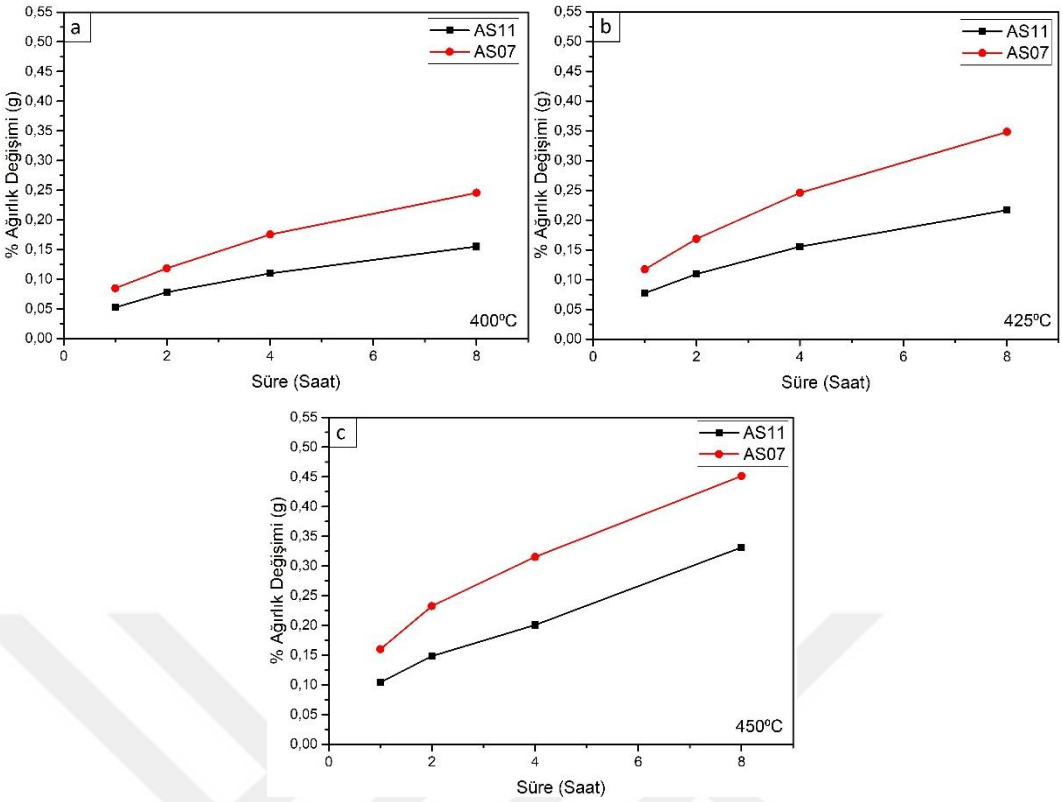
### 4.1.2 Alümina Silikat Camların Sonuçları

#### 4.1.2.1 Yüzde Ağırlık Değişimi Sonuçları

1,1 mm ve 0,7 mm olmak üzere iki farklı kalınlığa sahip alümina silikat camlar; 400 $^{o}$C, 425 $^{o}$C ve 450 $^{o}$C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta ve 1, 2, 4, 8 saat olmak üzere 4 farklı sürede kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuştur.

Bu işlem sonrası yüzeyden belirli bir derinliğe kadar olan bölümde gerçekleşen iyon değişimi sonucu ağırlık değişimi meydana gelmiştir. Bu değişimden yola çıkılarak yüzde ağırlık değişimi değeri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken her kalınlık ve kompozisyon için 20 numune kullanılmış ve ortalaması alınmıştır.

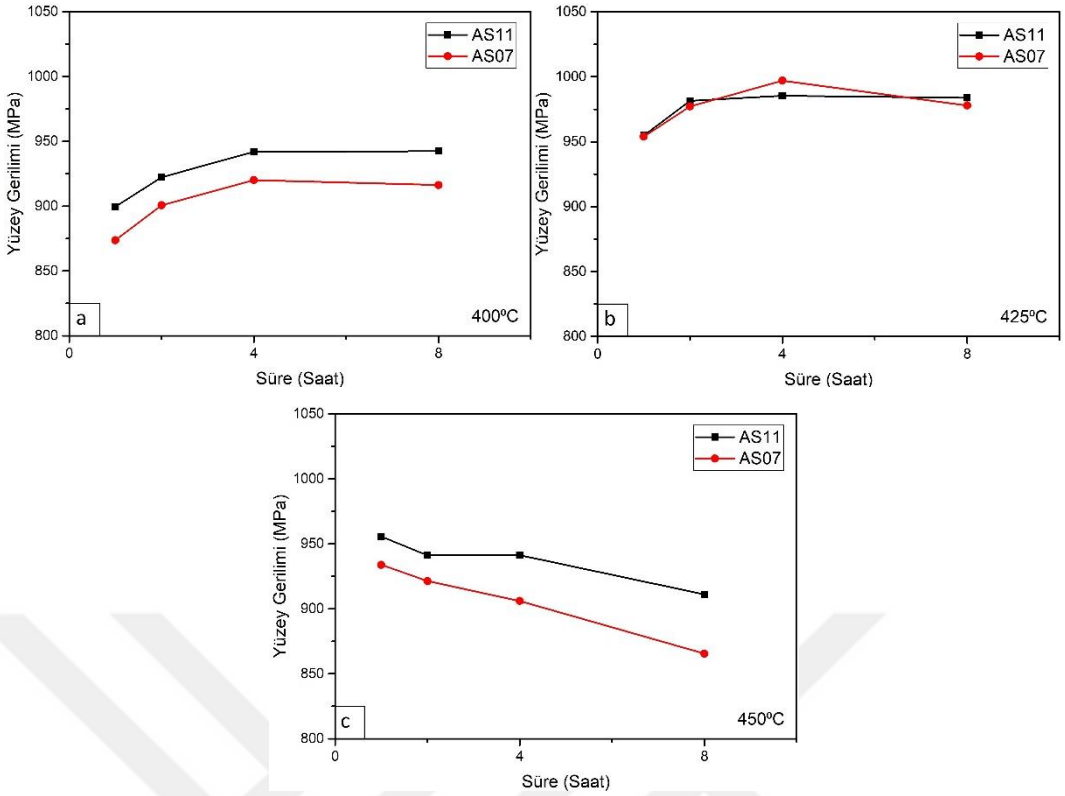
Buna göre yüzde ağırlık değişimi değeri AS11 için 400 $^{o}$C'de ve 36 saatte 0,1550, 425 $^{o}$C ve 36 saatte 0,2168, 450 $^{o}$C'de ve 36 saatte 0,3312 olarak hesaplanmıştır. AS07 için ise 400 $^{o}$C ve 36 saatte bu değer 0,2455, 425 $^{o}$C'de ve 36 saatte 0,3480, 450 $^{o}$C'de ve 36 saatte 0,4513 olarak hesaplanmıştır. Bu değişim Şekil 4.14'te verilmiştir.




Şekil 4. 14 AS11 ve AS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C ve c) 450 $^{o}$C'de ağırlık değişimi sonuçları

#### 4.1.2.2 Yüzey Gerilimi Sonuçları

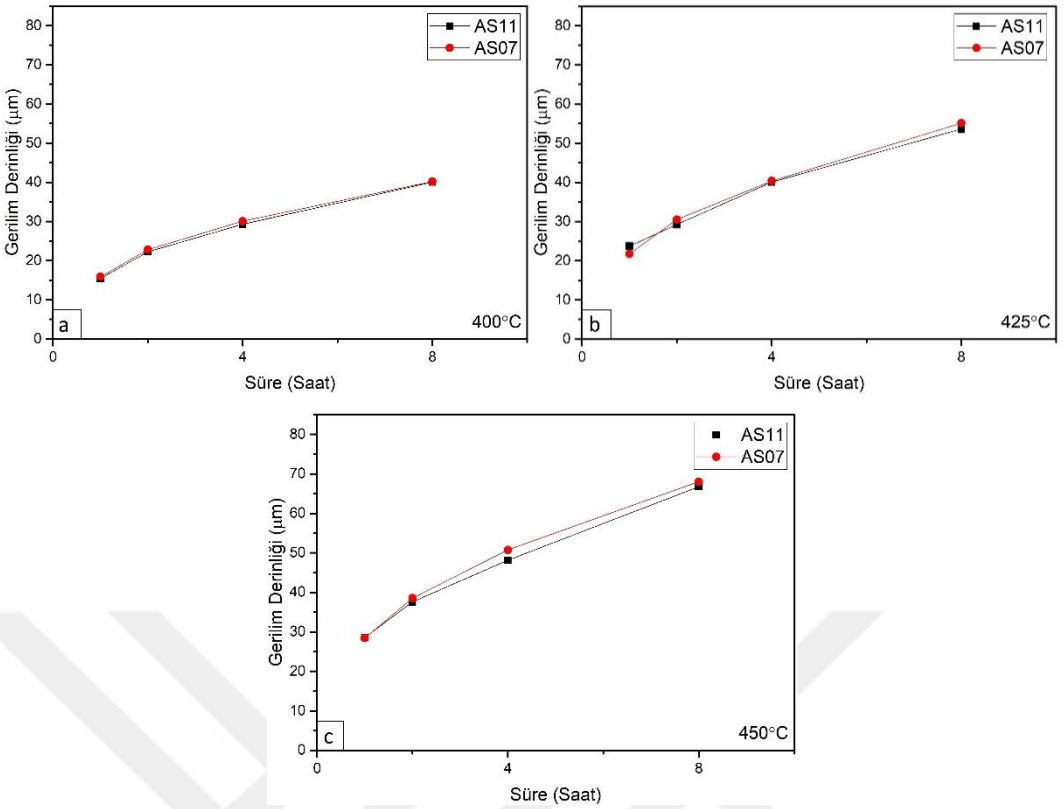
AS11 ve AS07 numunelerin üç farklı sıcaklık için yüzey gerilimi sonuçları Şekil 4.15'te verilmiştir. En yüksek yüzey gerilim değerleri, AS11 için 400 $^{o}$C'de 4 ve 8 saatte 942 MPa, 425 $^{o}$C ve 4 saatte 985 MPa, 450 $^{o}$C ve 1 saatte 956 MPa olarak ölçülmüştür. AS07 için ise 400 $^{o}$C ve 4 saatte 920 MPa, 425 $^{o}$C ve 4 saatte 997 MPa, 450 $^{o}$C ve 1 saatte 934 MPa olarak ölçülmüştür. Ölçüm 4 farklı numunenin 5 farklı yerinden yapılmış olup, sonuçlar bu 20 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır.




Şekil 4. 15 AS07 ve AS11 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C ve c) 450 $^{o}$C'de yüzey gerilimi sonuçları

#### 4.1.2.3 Gerilim Derinliği Sonuçları

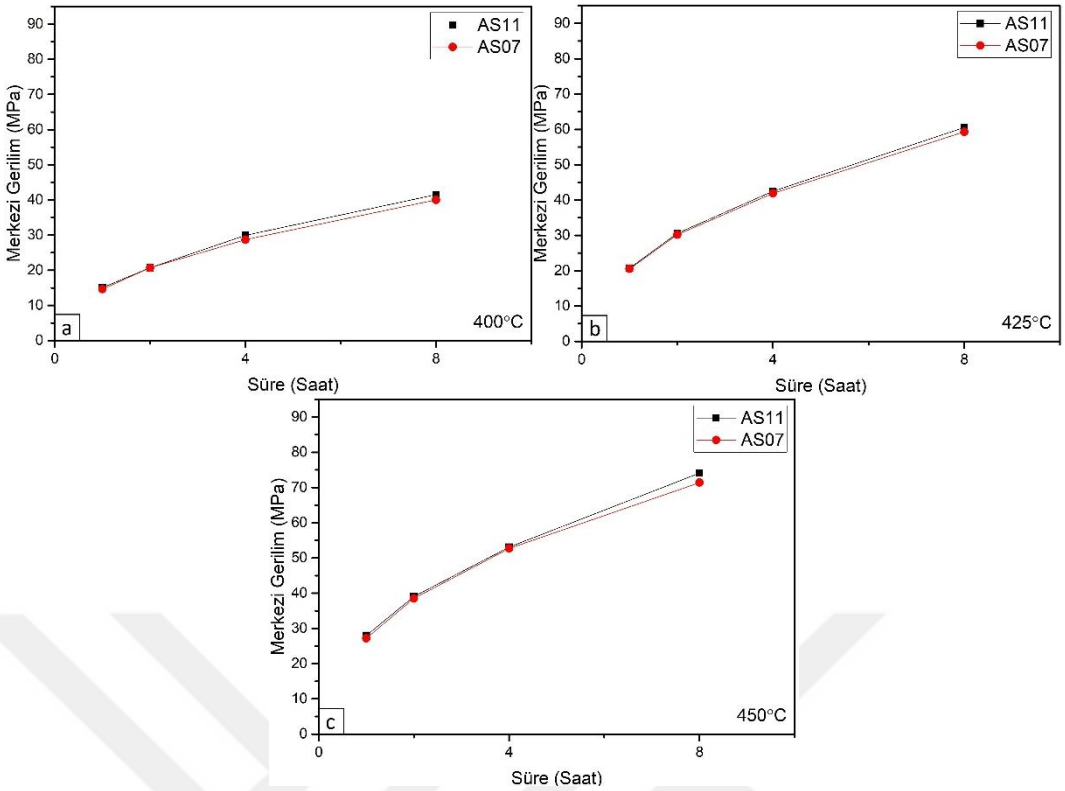
AS11 ve AS07 numunelerin üç farklı sıcaklık için gerilim derinliği sonuçları Şekil 4. 16'da verilmiştir. En yüksek gerilim derinliği değerleri, AS11 için 400 $^{o}$C ve 8 saatte 40,0 µm, 425 $^{o}$C ve 8 saatte 53,6 µm, 450 $^{o}$C ve 8 saatte 66,7 µm olarak ölçülmüştür. CSLS07 için ise 400 $^{o}$C ve 8 saatte 40,2 µm, 425 $^{o}$C ve 8 saatte 55,1 µm, 450 $^{o}$C ve 8 saatte 68,0 µm olarak ölçülmüştür. Ölçüm 4 farklı numunenin 5 farklı yerinden yapılmış olup, sonuçlar bu 20 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır.




Şekil 4. 16 AS07 ve AS11 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C ve c) 450 $^{o}$C'de gerilim derinliği sonuçları

#### 4.1.2.4 Merkezi Gerilim Sonuçları

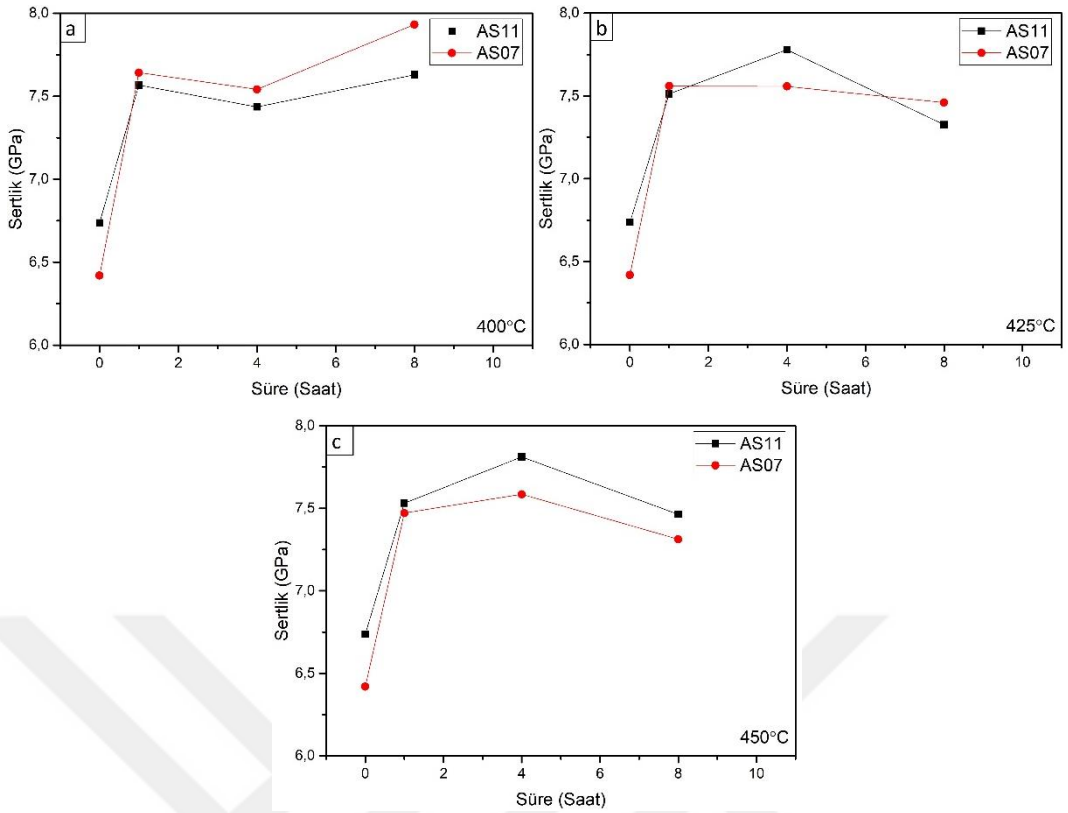
AS11 ve AS07 numunelerin üç farklı sıcaklık için merkezi gerilim sonuçları Şekil 4. 17'de verilmiştir. En yüksek merkezi gerilim değerleri, AS11 için 400 $^{o}$C ve 8 saatte 41,5 MPa, 425 $^{o}$C ve 8 saatte 60,5 MPa, 450 $^{o}$C ve 8 saatte 74,1 MPa olarak ölçülmüştür. CSLS07 için ise 400 $^{o}$C ve 8 saatte 40,0 MPa, 425 $^{o}$C ve 8 saatte 59,3 MPa, 450 $^{o}$C ve 8 saatte 71,4 MPa olarak ölçülmüştür. Ölçüm 4 farklı numunenin 5 farklı yerinden yapılmış olup, sonuçlar bu 20 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır.




Şekil 4. 17 AS07 ve AS11 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C ve c) 450 $^{o}$C'de merkezi gerilim sonuçları

#### 4.1.2.5 Sertlik Sonuçları

Kimyasal temperleme işlemi sonrası AS11 ve AS07 numuneleri için yapılan sertlik sonuçları Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu ölçüm sonucunda elde edilen en yüksek değer AS11 için 400 $^{o}$C ve 8 saatte 7,63 GPa, 425 $^{o}$C ve 8 saatte 7,779 GPa, 450 $^{o}$C ve 8 saatte 7,812 GPa olarak ölçülmüştür. CSLS07 için ise bu değer 400 $^{o}$C ve 8 saatte 7,932 GPa, 425 $^{o}$C ve 2 saatte 7,560 GPa, 450 $^{o}$C ve 8 saatte 7,585 GPa olarak ölçülmüştür. Ölçüm bir numunenin 10 farklı yerinden alınmış olup, sonuçlar bu 10 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır.



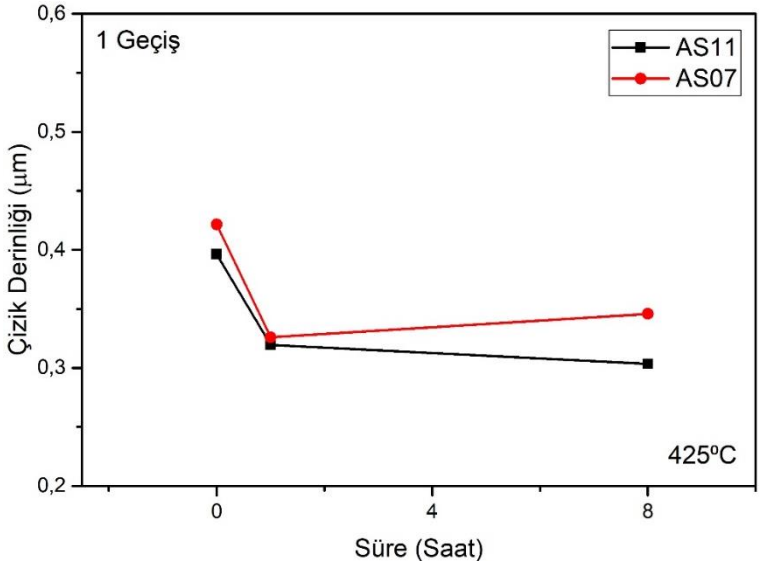

Şekil 4. 18 AS11 ve AS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C b) 425 $^{o}$C c) 450 $^{o}$C'de sertlik sonuçları

#### 4.1.2.6 Çizilme Testi Sonuçları

425 $^{o}$C'de yapılan kimyasal temperleme işlemi sonrası AS11 ve AS07 numuneleri için iki farklı çizilme deneyi yapılmıştır. Çizme işlemini yapan ucun tek geçişi sonrasında çizilme derinliği, 20 geçişi sonrasında yüzeyde tahrip edilen hacim ölçülmüştür. İki deney de 5'er kez tekrarlanmış olup, sonuçlar bu 5 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır.

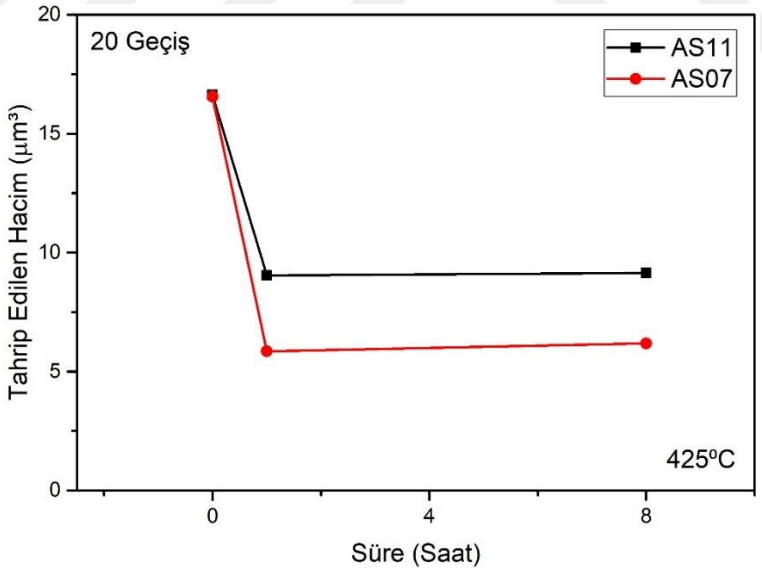
Buna göre tek geçişte yapılan çizilme deneyinde AS11 için en düşük çizilme derinliği değeri 8 saat kimyasal temperleme işlemi sonrasında 0,3034 µm olarak ölçülmüştür. AS07 için ise en düşük değer 8 saat kimyasal temperleme işlemi sonunda 0,3458 µm olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler Şekil 4.19'da verilmiştir.

İki testte de bu işlem orijinal ve en uzun kimyasal temperleme süresi olan 8 saat numunelerine uygulanmıştır.




Şekil 4. 19 AS11 ve AS07 numunelerinin 425 $^{o}$C'de çizilme derinliği sonuçları

20 geçişte yapılan çizilme deneyinde AS11 için tahrip edilen en küçük hacim 1 saat kimyasal temperleme işlemi sonrasında 9,04 µm³ olarak ölçülmüştür. A07 için tahrip edilen en küçük hacim 1 saat kimyasal temperleme işlemi sonrasında 5,85 µm³ olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler Şekil 4.20'de verilmiştir.

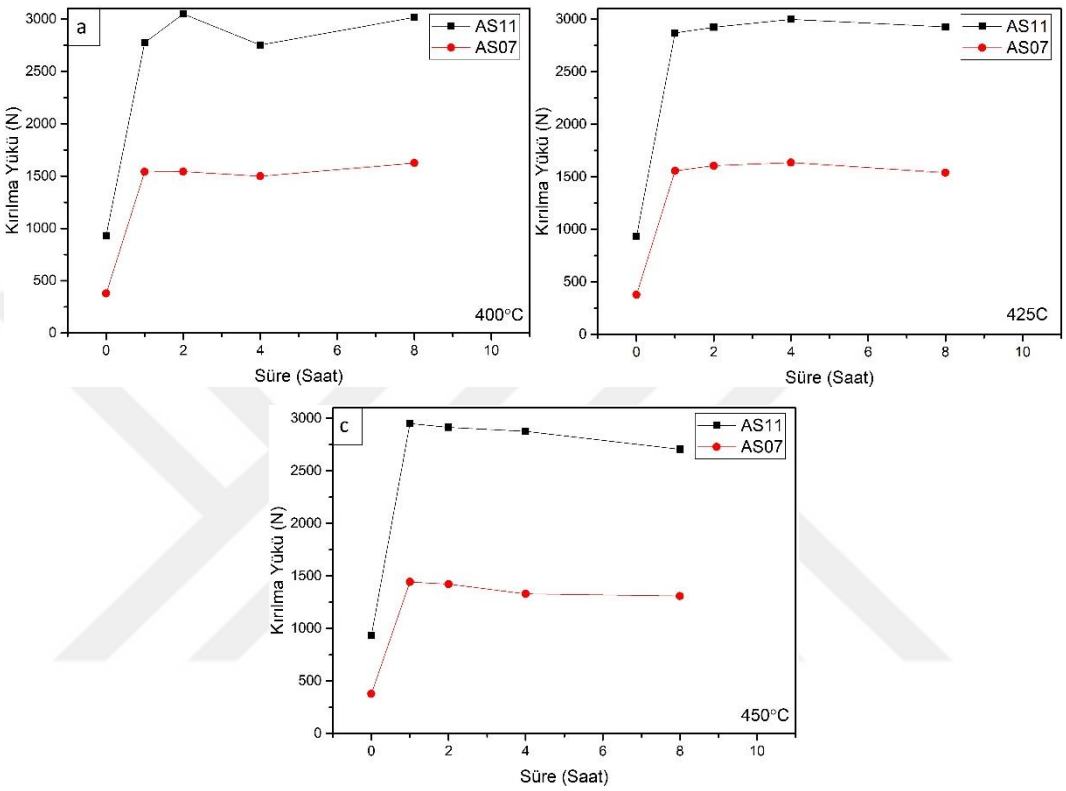



Şekil 4. 20 AS11 ve AS07 numunelerinin 425 $^{o}$C'de 20 geçişli çizilme deneyi sonuçları

**4.1.2.7 Halka Üstü Halka Deneyi Sonuçları**

3 farklı sıcaklıkta yapılan kimyasal temperleme işlemi sonrasında yapılan halka üstü halka testi sonucu bulunan AS11 ve AS07 numunelerinin kırılma yükü sonuçları Şekil 4.21'de verilmiştir. Buna göre en yüksek kırılma yükü AS11 için 400 $^{o}$C ve 2 saatte 3050 N, 425

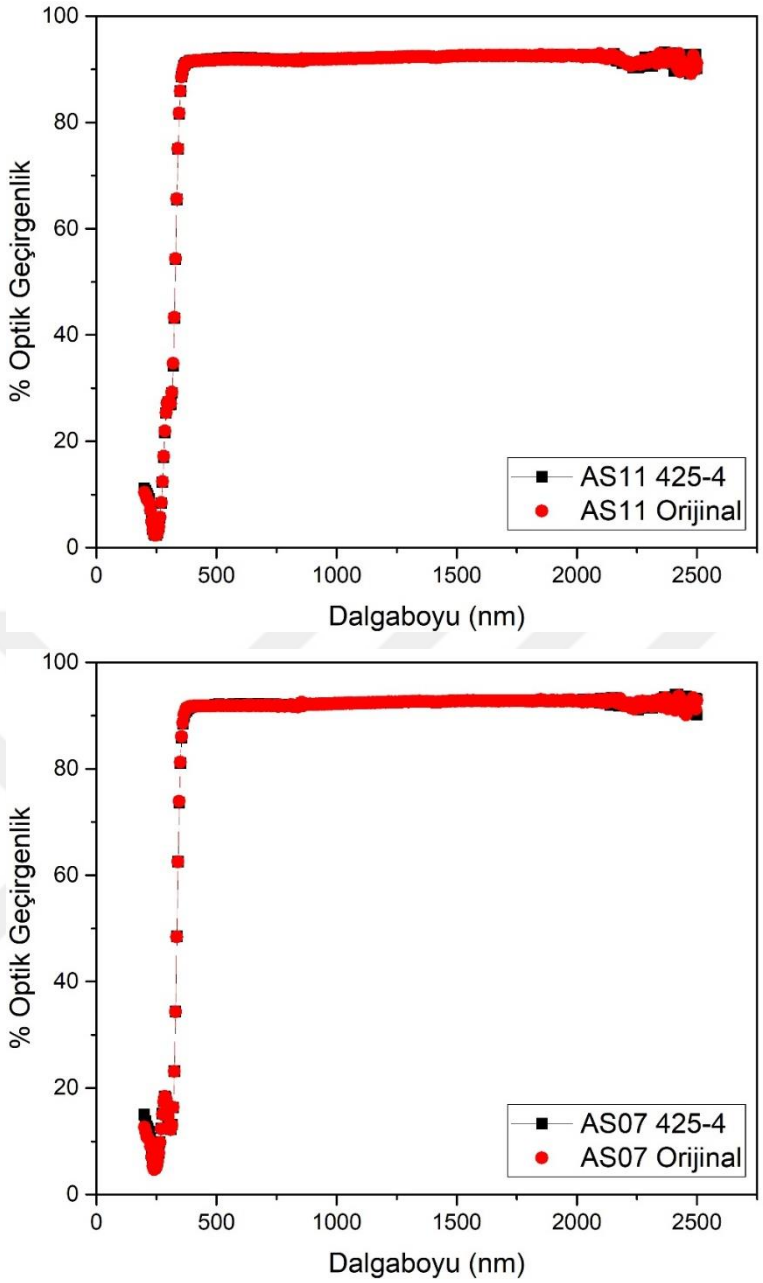
$^{o}$C ve 4 saatte 2999 N, 450 $^{o}$C ve 1 saatte 2950 N ölçülmüştür. AS07 için en yüksek kırılma yükü 400 $^{o}$C ve 8 saatte 1625 N, 425 $^{o}$C ve 4 saatte 1636 N, 450 $^{o}$C ve 1 saatte 1443 N olarak ölçülmüştür. Ölçüm 20 numuneye yapılmış olup, sonuçlar bu 20 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır.




Şekil 4. 21 AS11 ve AS07 numunelerinin a) 400 $^{o}$C, b) 425 $^{o}$C, c) 450 $^{o}$C'de kırılma yükü sonuçları

#### 4.1.2.8 Optik Geçirgenlik Analizi ve Kırılma İndisi Sonuçları

Kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş ve tutulmamış camların optik geçirgenlikleri 200-2500 nm arasındaki dalgaboyları için ölçülmüştür. Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş AS11 ve AS07 camların optik geçirgenlikleri Şekil 4.22'de verilmiştir. Kırılma indisi ise 1,1 mm kalınlığa sahip camlarda orijinal 425 $^{o}$C'de 12 saat temperleme işlemine tabi tutulmuş camlar için ölçülmüştür. Ölçüm 633 nm dalgaboyunda yapılmıştır. Sonuç olarak AS için 1,506 olarak bulunmuştur.

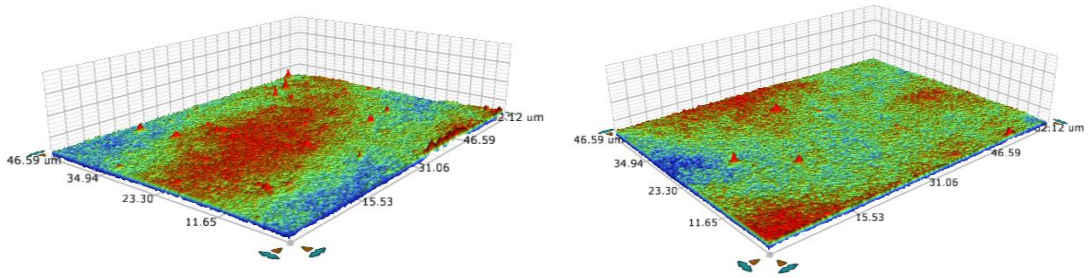



Şekil 4. 22 Orijinal ve 425 $^{o}$C – 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş camların optik geçirgenlik grafikleri

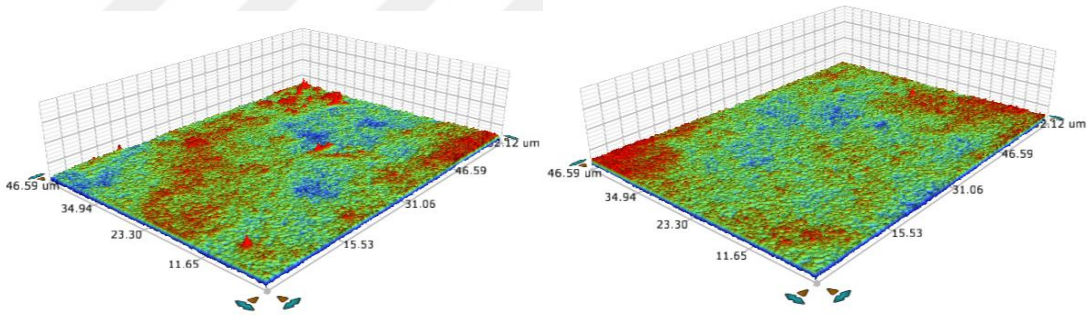
#### 4.1.2.9 Beyaz Işık İnterferometresi ile Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü Sonuçları

Kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş ve tutulmamış camların yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Kimyasal temperlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek için 425 $^{o}$C'de 12 saat temperlenen alümina silikat cam numunelere bu test yapılmıştır. 12 saat alümina silikat camlar için en uzun kimyasal temperleme işlemi süresidir. AS11 için yüzey pürüzlülüğü orijinal camlarda 0,3023 nm iken; 425 $^{o}$C'de 12 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş camlarda yüzey pürüzlülüğü değeri

0,2997 nm'dir. AS07 için yüzey pürüzlülüğü değeri orijinal camlarda 0,3159 nm iken; 425 $^{o}$C'de 12 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş camlarda yüzey pürüzlülüğü değeri 0,3003 nm bulunmuştur. Numunelerin beyaz ışık interferometresindeki görüntüleri Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te verilmiştir. Ölçüm bir numunenin 3 farklı yerinden yapılmış olup, sonuçlar bu ölçümlerin ortalaması olarak hesaplanmıştır.



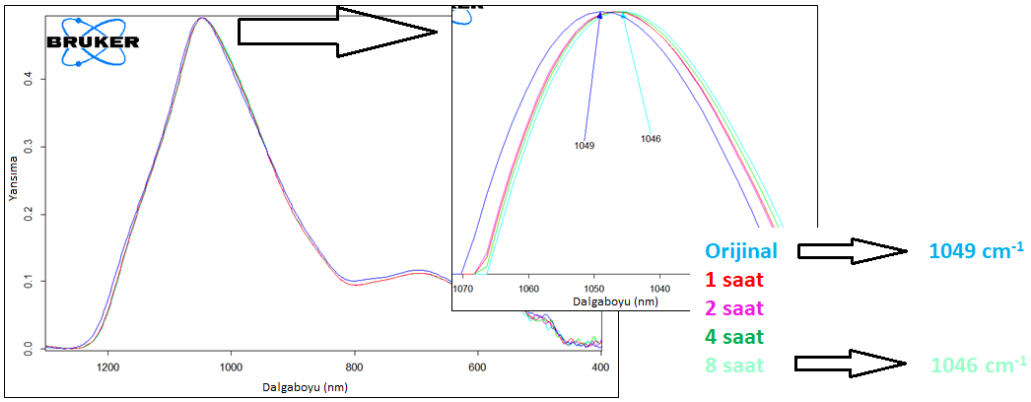

Şekil 4. 23 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 12 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş AS11 için yüzey pürüzlülüğü görüntüleri




Şekil 4. 24 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 12 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş AS07 için yüzey pürüzlülüğü görüntüleri

#### 4.1.2.10 Bağ Yapısı Analizi Sonuçları

Kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş ve tutulmamış camların bağ yapıları ölçülmüştür. Kimyasal temperlemenin Si – O bağlarına etkisini incelemek için orijinal ve 425 $^{o}$C'de temperlenen alümina silikat numunelerine bu test yapılmıştır. Si – O bağına ait olduğu bilinen eğrinin tepe noktasının AS11 ve AS07 için 1049 cm$^{-1}$ 'dan 1046 cm$^{-1}$ 'ya ötelendiği görülmüştür. Bu ötelenmeyi gösteren grafik Şekil 4.25'te verilmiştir.

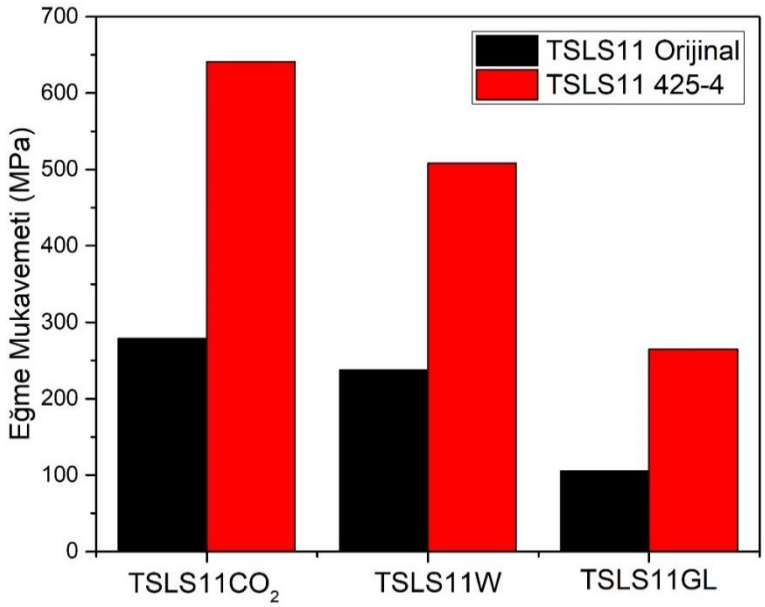



Şekil 4. 25 Orijinal ve 425°C'de kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş AS11 ve AS07 camların FTIR görüntüleri

## 4.2 Kimyasal Temperleme Davranışına Kesme Tipinin Etkisi

### 4.2.1 Dört Noktadan Eğme Deneyi Sonuçları

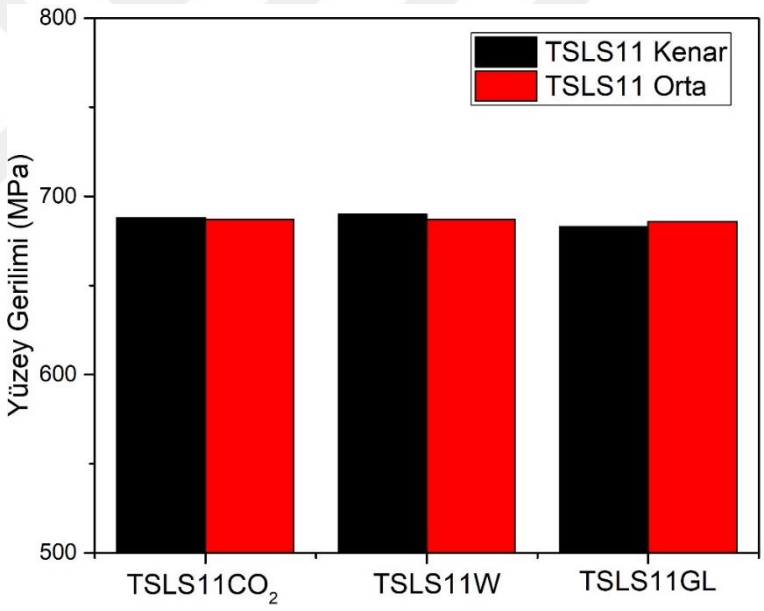
Belirlenen süre ve sıcaklıkta kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş numunelere yapılan dört noktadan eğme deneyi sonucu, camların kırılma yüklerinden yola çıkılarak eğme mukavemetleri hesapanmıştır. Buna göre orijinal camlarda en yüksek eğme mukavemeti 279,26 MPa ile TSLS11$CO_2$ için ölçülmüştür. Eğme mukavemeti, TSLS11W için 260,01 MPa ölçülürken; en düşük değer TSLS11GL için 113,97 MPa olarak hesaplanmıştır. Kimyasal temperleme işlemi sonrasında ise eğme mukavemeti değerleri, TSLS11$CO_2$ için 641,2MPa, TSLS11W için 524,7 MPa ve TSLS11GL için 230,4 MPa olarakölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4. 26 Orijinal ve 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$, TSLS11W, TSLS11GL için eğme mukavemeti grafiği

### 4.2.2 Yüzey Gerilimi Sonuçları

Farklı kesim tipleri ile kesilen numunelerin yüzey gerilim analiz sonuçlarına göre, TSLS11$CO_2$ numunesinin orta bölgesinden alınan ölçüm sonucu yüzey gerilimi 688 MPa, kenardan alınan ölçüm sonucu yüzey gerilimi 687 MPa bulunmuştur. TSLS11W numunesinin orta bölgesinden alınan ölçüm sonucu yüzey gerilimi 690 MPa, kenardan alınan ölçüm sonucu yüzey gerilimi 687 MPa bulunmuştur. TSLS11GL numunesinin orta bölgesinden alınan ölçüm sonucu yüzey gerilimi 683 MPa, kenardan alınan ölçüm sonucu yüzey gerilimi 686 MPa bulunmuştur. Cam numunelerinin yüzey gerilimi grafiği Şekil 4.27'de verilmiştir.

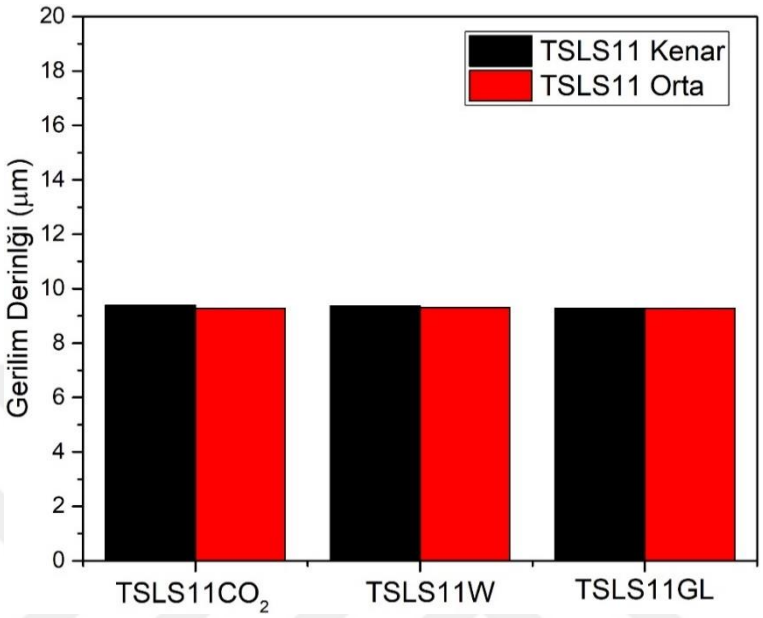



**Şekil 4. 27** 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin yüzey gerilimi grafiği

### 4.2.3 Gerilim Derinliği Sonuçları

Farklı kesim tipleri ile kesilmiş cam numunelerin kenar ve orta bölgelerinden alınmış gerilim derinliği sonuçlarına ait grafik Şekil 4.28'de verilmiştir. TSLS11$CO_2$ numunesinin orta bölgesinden alınan ölçüm sonucu gerilim derinliği 9,39 µm, kenardan alınan ölçüm sonucu gerilim derinliği 9,29 µm bulunmuştur. TSLS11W numunesinin orta bölgesinden

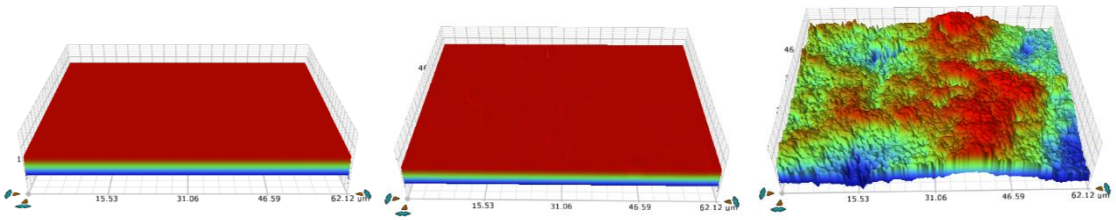
alınan ölçüm sonucu gerilim derinliği 9,36 µm, kenardan alınan ölçüm sonucu gerilim derinliği 9,3 µm bulunmuştur. TSLS11GL numunesinin orta bölgesinden alınan ölçüm sonucu gerilim derinliği 9,27 µm, kenardan alınan ölçüm sonucu gerilim derinliği 9,28 µm bulunmuştur.



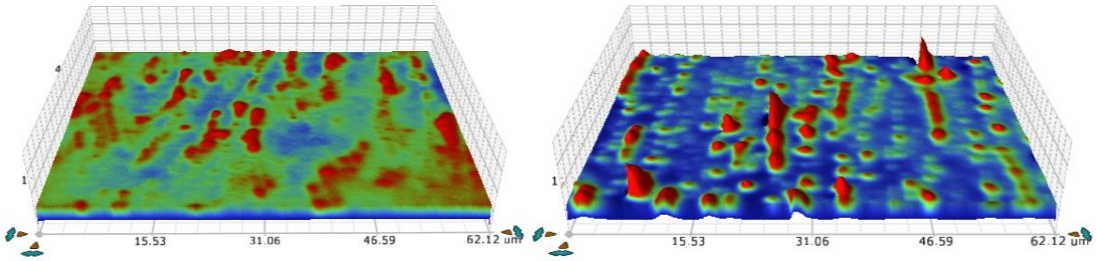

Şekil 4. 28 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin gerilim derinliği grafiği

### 4.2.4 Kenar Pürüzlülüğü Sonuçları

Beyaz ışık interferometresi ile kenar bölgelerinin pürüzlülüğü hesaplanmış ve en yüksek pürüzlülüğe sahip cam 2,16 µm ile TSLS11GL bulunmuştur. TSLS11W numunesinin kenar pürüzlülüğü 8,21 nm bulunurken; en az kenar pürüzlülüğüne sahip cam 2,07 nm ile TSLS11$CO_2$ olmuştur. Tüm cam numunelerinin beyaz ışık interferometresinde alınmış eşit ölçekteki (+9 µm; -15 µm) yüzey pürüzlülüğü görüntüleri Şekil 4.29'da verilmiştir. TSLS11$CO_2$ ve TSLS11W numunelerinin eşit ölçekteki (+0,4 µm; -0,2 µm) görüntüleri ise Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4. 29 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL için yüzey pürüzlülüğü görüntüleri




Şekil 4. 30 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$ ve TSLS11W için yüzey pürüzlülüğü görüntüleri

# BÖLÜM 5

# DENEYSEL SONUÇLARIN YORUMLANMASI

Bu tez çalışması kapsamında alümina silikat (AS) ve soda kireç silikat (SLS) camların kimyasal temperlenmesinde kalınlık ve kesme etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar iki grupta gerçekleştirilmiştir. İlk grup çalışmalarda, $CO_2$ lazer olmak üzere tek bir kesim tipiyle hazırlanan ve farklı sıcaklık ve sürelerde kimyasal temperleme işlemine tabi tutulan iki farklı kalınlıktaki AS ve CSLS camların; mekanik, optik, yapısal ve topografik özellikleri incelenmiş ve değerlendirilmesi bu bölümde gerçekleştirilmiştir. İkinci grup çalışmalarda, $CO_2$ lazer, elmas ve yeşil lazer kesim olmak üzere 3 farklı kesim tipiyle kesilerek hazırlanan ve belirlenen tek bir sıcaklık ve sürede kimyasal temperleme işlemine tabi tutulan; 1,1 mm olmak üzere tek bir kalınlığa sahip TSLS camların; mekanik, optik, yapısal ve topografik özellikleri incelenmiş ve değerlendirilmesi aynı şekilde bu bölümde gerçekleştirilmiştir.

## 5.1 Kalınlık Etkisinin Değerlendirilmesi

Tez çalışması kapsamında hazırlanan CSLS07, CSLS11, AS07 ve AS11 numunelerinin kimyasal temperleme işlemi sonucu ölçülen ağırlık değişimi, yüzey gerilimi, gerilim derinliği, merkezi gerilim, sertlik, çizilme, kırılma yükü, optik geçirgenlik ve yüzey pürüzlülüğü analiz sonuçları kanlınlık etkisi açısından değerlendirilmiştir.

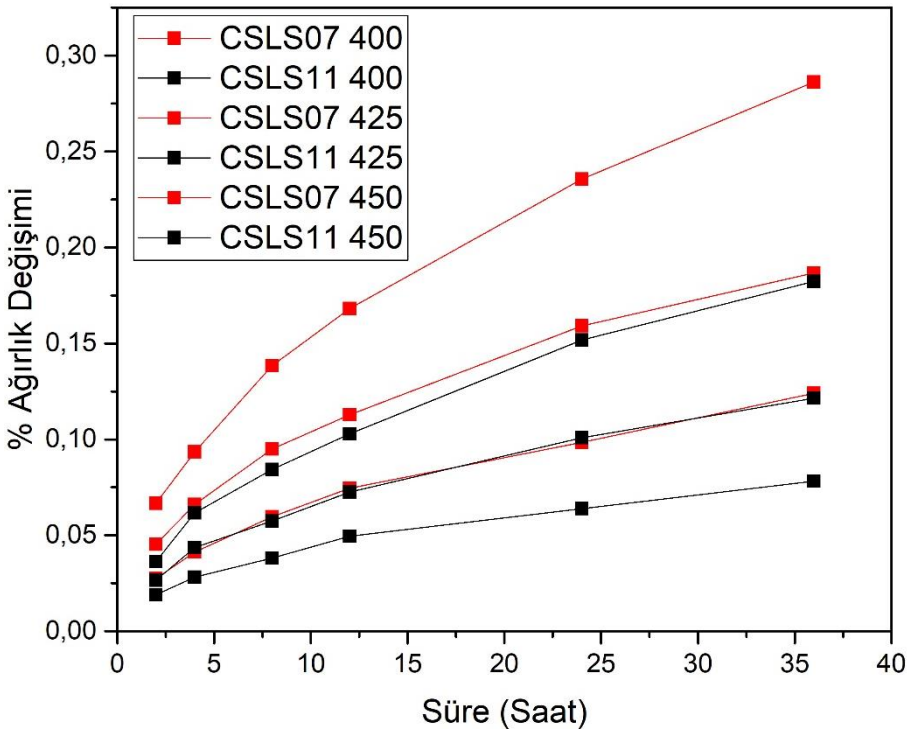
### 5.1.1 Ağırlık Değişimi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin yüzde ağırlık değişimi sonuçları Çizelge 5.1 ve Şekil 5.1'de; AS07 ve AS11 numunelerinin yüzde ağırlık değişimi sonuçları ise Çizelge 5.2 ve Şekil 5.2'de verilmektedir.

Çizelge 5. 1 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin yüzde ağırlık değişimi tablosu

| **Birim: %** | **400 °C** | | **425 °C** | | **450 °C** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **CSLS07** | **CSLS11** | **CSLS07** | **CSLS11** | **CSLS07** | **CSLS11** |
| **2 Saat** | 0,0275 | 0,0190 | 0,0453 | 0,0266 | 0,0667 | 0,0362 |
| **4 Saat** | 0,0412 | 0,0282 | 0,0661 | 0,0436 | 0,0934 | 0,0616 |
| **8 Saat** | 0,0596 | 0,0382 | 0,0949 | 0,0575 | 0,1384 | 0,0843 |
| **12 Saat** | 0,0745 | 0,0495 | 0,1128 | 0,0726 | 0,1682 | 0,1029 |
| **24 Saat** | 0,0985 | 0,0638 | 0,1592 | 0,1008 | 0,2356 | 0,1518 |
| **36 Saat** | 0,1240 | 0,0782 | 0,1867 | 0,1215 | 0,2862 | 0,1823 |

CSLS07 ve CSLS11 numuneleri için, kimyasal temperleme işlemi süresinin artmasıyla yüzde ağırlık değişimi miktarı artmıştır. Benzer şekilde, kimyasal temperleme sıcaklığının artmasıyla da yüzde ağırlık değişimi miktarı artmaktadır.

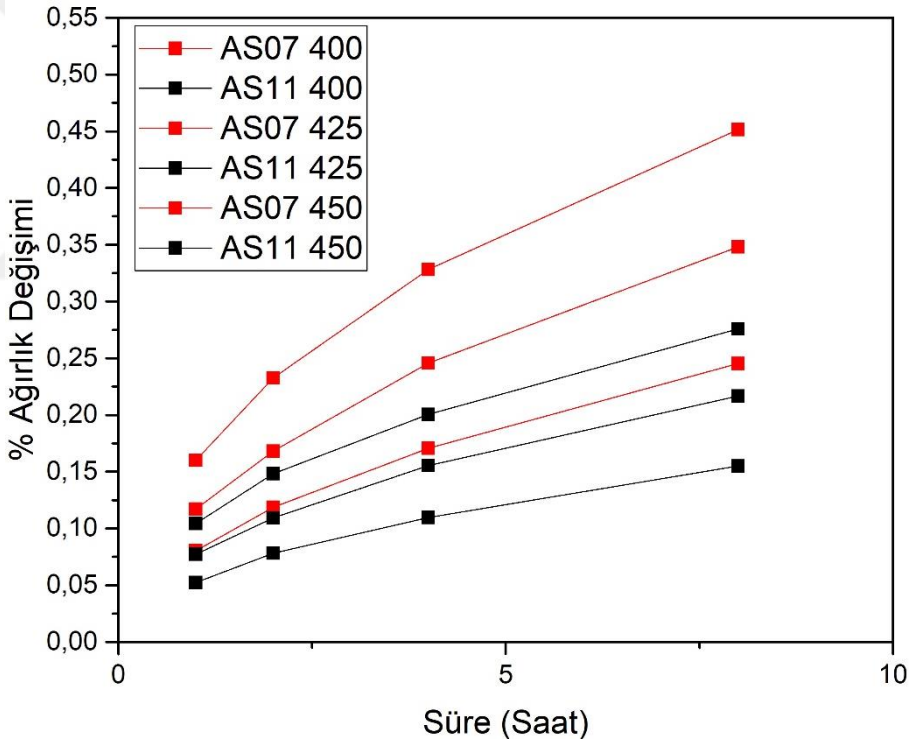



Şekil 5. 1 400 °C, 425 °C ve 450 °C'de CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin yüzde ağırlık değişimi grafiği

Çizelge 5. 2 AS07 ve AS11 numunelerinin yüzde ağırlık değişimi tablosu

| Birim: % | 400 °C | | 425 °C | | 450 °C | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | AS07 | AS11 | AS07 | AS11 | AS07 | AS11 |
| 1 Saat | 0,0804 | 0,0524 | 0,1171 | 0,0772 | 0,1600 | 0,1043 |
| 2 Saat | 0,1186 | 0,0782 | 0,1682 | 0,1094 | 0,2326 | 0,1482 |
| 4 Saat | 0,1706 | 0,1097 | 0,2458 | 0,1554 | 0,3280 | 0,2006 |
| 8 Saat | 0,2455 | 0,1550 | 0,3480 | 0,2168 | 0,4513 | 0,2758 |

Elde edilen ağırlık değişimi sonuçlarına göre, AS07 ve AS11 numuneleri için, kimyasal temperleme işlemi süresinin ve sıcaklığının artmasıyla; yüzde ağırlık değişimi miktarı artmıştır.




Şekil 5. 2 400 °C, 425 °C ve 450 °C'de AS07 ve AS11 numunelerinin yüzde ağırlık değişimi grafiği

Sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, iyon değişim miktarının artan kimyasal temperleme sıcaklığı ve süresi ile arttığı ve 0,7 mm kalınlığa sahip camların (CSLS07 ve AS07) yüzde ağırlık değişim miktarının her sıcaklık ve sürede 1,1 mm kalınlığa sahip

camlardan (CSLS11 ve AS11) daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, kalınlığın azalmasıyla yüzde ağırlık değişimi miktarı yani iyon değişim miktarı artmaktadır.

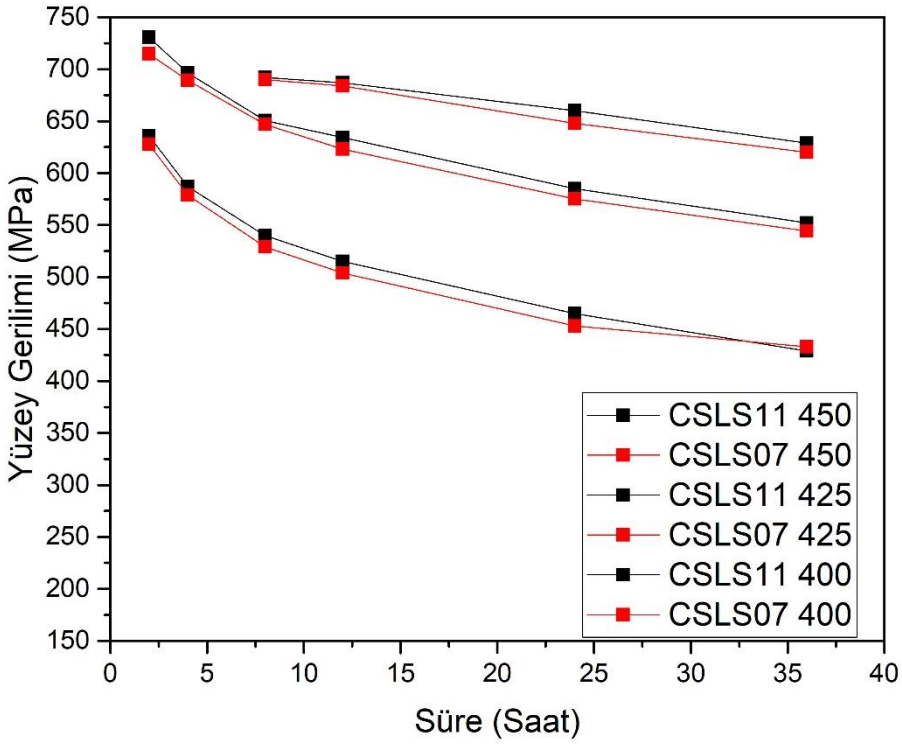
### 5.1.2 Yüzey Gerilimi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin yüzey gerilimi sonuçları Çizelge 5.3 ve Şekil 5.3'te, AS07 ve AS11 numunelerinin yüzey gerilimi sonuçları Çizelge 5.4 ve Şekil 5.4'te verilmektedir.

Çizelge 5. 3 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin yüzey gerilimi tablosu

| **Birim:** | **400 $^{o}$C** | | **425 $^{o}$C** | | **450 $^{o}$C** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **MPa** | **CSLS07** | **CSLS11** | **CSLS07** | **CSLS11** | **CSLS07** | **CSLS11** |
| **2 Saat** | | | 715 | 731 | 628 | 636 |
| **4 Saat** | | | 689 | 696 | 579 | 587 |
| **8 Saat** | 690 | 692 | 647 | 651 | 529 | 540 |
| **12 Saat** | 684 | 687 | 623 | 634 | 504 | 515 |
| **24 Saat** | 648 | 660 | 575 | 585 | 453 | 465 |
| **36 Saat** | 620 | 629 | 544 | 552 | 433 | 429 |

Sonuçlara göre, CSLS07 ve CSLS11 numuneleri için, kimyasal temperleme işlemi süresinin artmasıyla yüzey gerilimi azalmıştır. Aynı şekilde kimyasal temperleme sıcaklığının artmasıyla yüzey gerilimi değerleri azalır. CSLS07 ve CSLS11 numuneleri için en yüksek yüzey gerilimi değerine 425 $^{o}$C ve 2saatte ulaşılmıştır. 400 $^{o}$C'de 2. ve 4. saatlerde FSM 6000LE cihazıyla ölçüm alınabilecek netlikete saçaklar görülemedğinden ölçüm sonucu alınamamıştır.

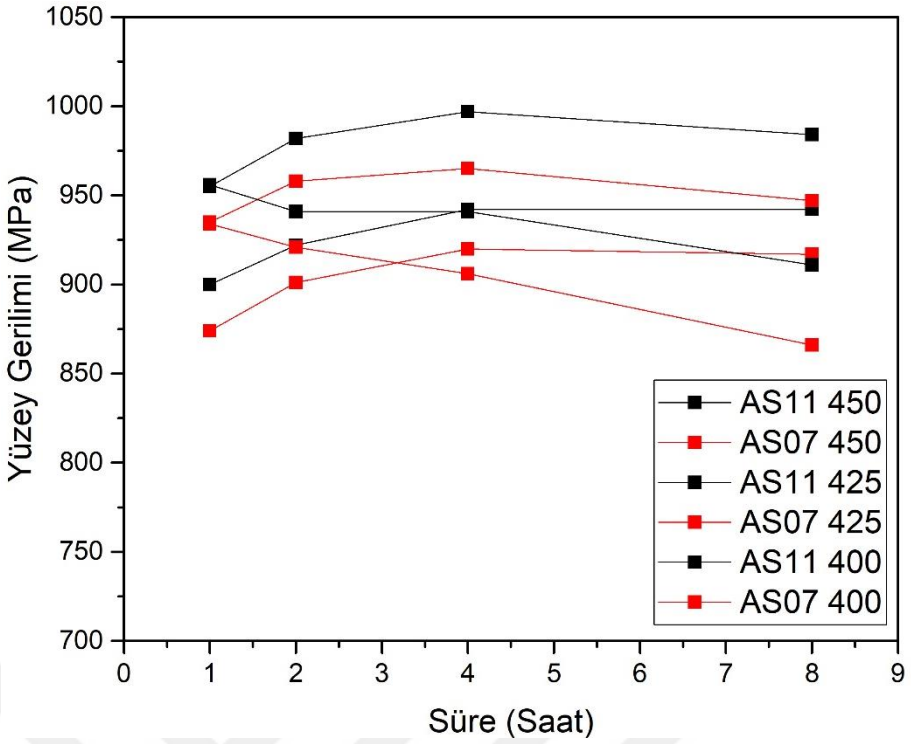



Şekil 5. 3 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin yüzey gerilimi grafiği

Çizelge 5. 4 AS07 ve AS11 numunelerinin yüzey gerilimi tablosu

| **Birim: MPa** | **400 $^{o}$C** | | **425 $^{o}$C** | | **450 $^{o}$C** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **AS07** | **AS11** | **AS07** | **AS11** | **AS07** | **AS11** |
| **1 Saat** | 874 | 900 | 958 | 982 | 934 | 956 |
| **2 Saat** | 901 | 922 | 965 | 997 | 921 | 941 |
| **4 Saat** | 920 | 942 | 947 | 984 | 906 | 941 |
| **8 Saat** | 917 | 942 | 924 | 967 | 866 | 911 |

AS07 ve AS11 numuneleri için, kimyasal temperleme işlemi süresinin artması ile yüzey gerilimi değeri 400 $^{o}$C'de 4 saate kadar artmış, daha sonra AS11 için değişiklik gözlenmezken AS07 için düşmüştür. 425 $^{o}$C'de ise, yüzey gerilimi değerleri 2 saate kadar artıp; ardından düşmüştür. 450 $^{o}$C'de en yüksek yüzey gerilimi değeri 1. saatte elde edilmiş, artan süre ile yüzey gerilimi değerleri düşmüştür. Aynı şekilde kimyasal temperleme sıcaklığının artmasıyla, yüzey gerilimi değerleri önce armış ardından düşmüştür. AS07 ve AS11 için en yüksek yüzey gerilimi değerine 425 $^{o}$C ve 2 saatte ulaşılmıştır.




Şekil 5. 4 AS11 ve AS07 numunelerinin yüzey gerilimi grafiği

Elde edilen sonuçlara göre, 1,1 mm kalınlığa sahip CSLS11 ve AS11 numunelerinin yüzey gerilimi değerleri, 0,7 mm kalınlığa sahip CSLS07 ve AS07 numunelerinin yüzey gerilimi değerlerinden daha büyüktür.

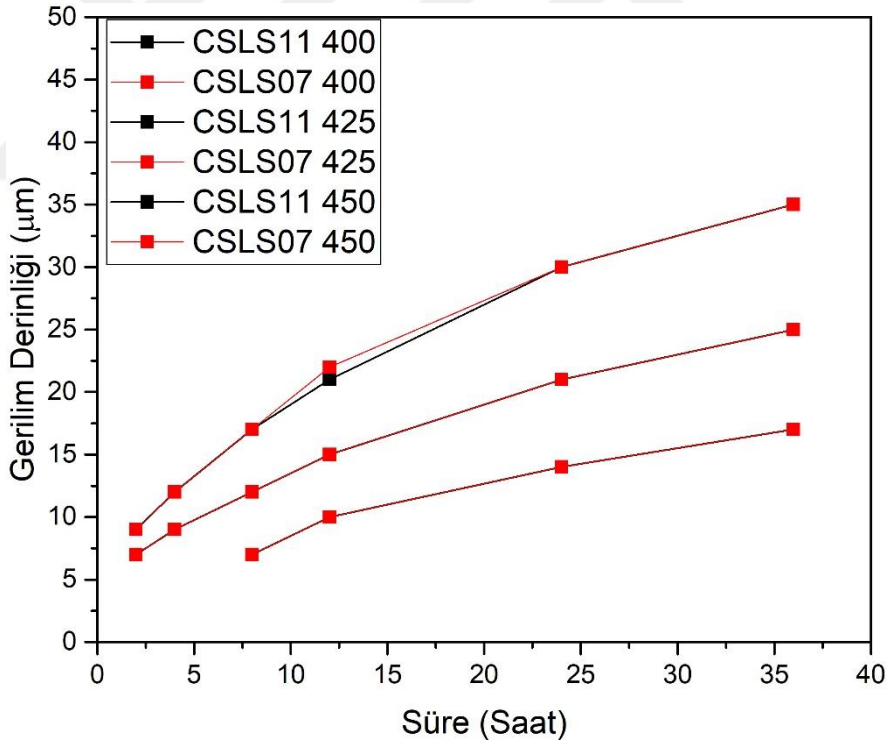
### 5.1.3 Gerilim Derinliği Sonuçlarının Değerlendirilmesi

CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin gerilim derinliği sonuçları Çizelge 5.5 ve Şekil 5.5'te, AS07 ve AS11 numunelerinin gerilim derinliği sonuçları Çizelge 5.6 ve Şekil 5.6'da verilmektedir.

Çizelge 5. 5 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin gerilim derinliği tablosu

| Birim: µm | 400 °C | | 425 °C | | 450 °C | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CSLS07 | CSLS11 | CSLS07 | CSLS11 | CSLS07 | CSLS11 |
| 2 Saat | | | 7 | 7 | 9 | 9 |
| 4 Saat | | | 9 | 9 | 12 | 12 |
| 8 Saat | 7 | 7 | 12 | 12 | 17 | 17 |
| 12 Saat | 10 | 10 | 15 | 15 | 21 | 22 |
| 24 Saat | 14 | 14 | 21 | 21 | 30 | 30 |
| 36 Saat | 17 | 17 | 25 | 25 | 35 | 35 |

Çizelge 5.5 ve Şekil 5.5'e göre, CSLS07 ve CSLS11 numuneleri için, kimyasal temperleme işlemi süresinin artmasıyla gerilim derinliği miktarı artmış, benzer şekilde kimyasal temperleme sıcaklığının artmasıyla, gerilim derinliği miktarı artış göstermiştir.

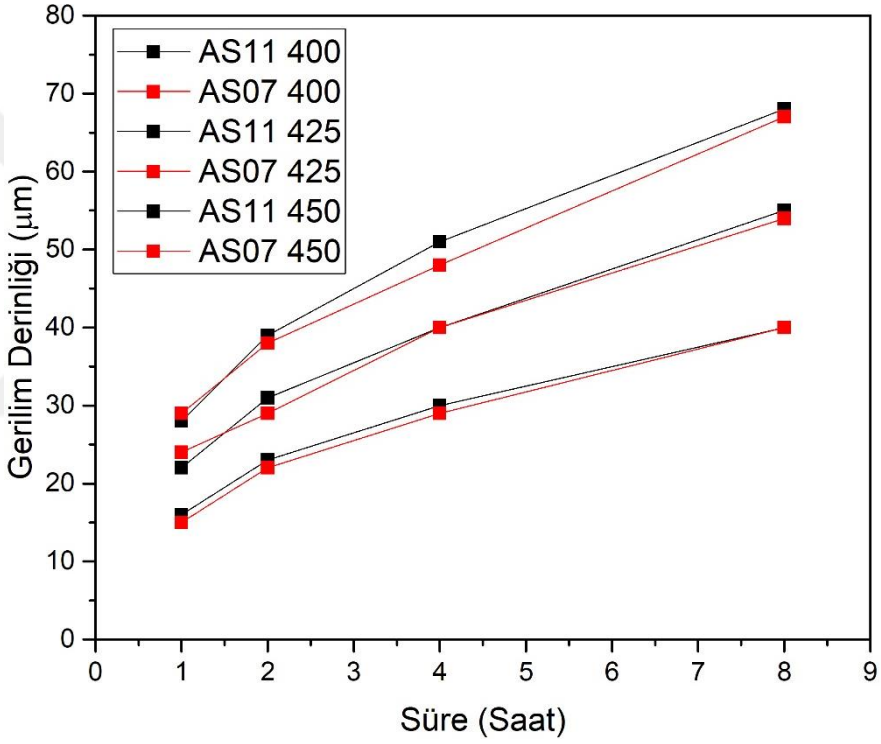



Şekil 5. 5 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin gerilim derinliği grafiği

Çizelge 5. 6 AS07 ve AS11 numunelerinin gerilim derinliği tablosu

| Birim: µm | 425 °C | | 425 °C | | 450 °C | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | AS07 | AS11 | AS07 | AS11 | AS07 | AS11 |
| 1 Saat | 16 | 15 | 22 | 24 | 28 | 29 |
| 2 Saat | 23 | 22 | 31 | 29 | 39 | 38 |
| 4 Saat | 30 | 29 | 40 | 40 | 51 | 48 |
| 8 Saat | 40 | 40 | 55 | 54 | 68 | 67 |

AS07 ve AS11 numuneleri için de, kimyasal temperleme işlemi süresinin ve sıcaklığının artmasıyla gerilim derinliği miktarı artmıştır.




Şekil 5. 6 AS11 ve AS07 numunelerinin gerilim derinliği grafiği

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, gerilim derinliği değerlerinin iki cam bileşimi için de kalınlık artışı ile belirgin bir şekilde değişmediği saptanmıştır.

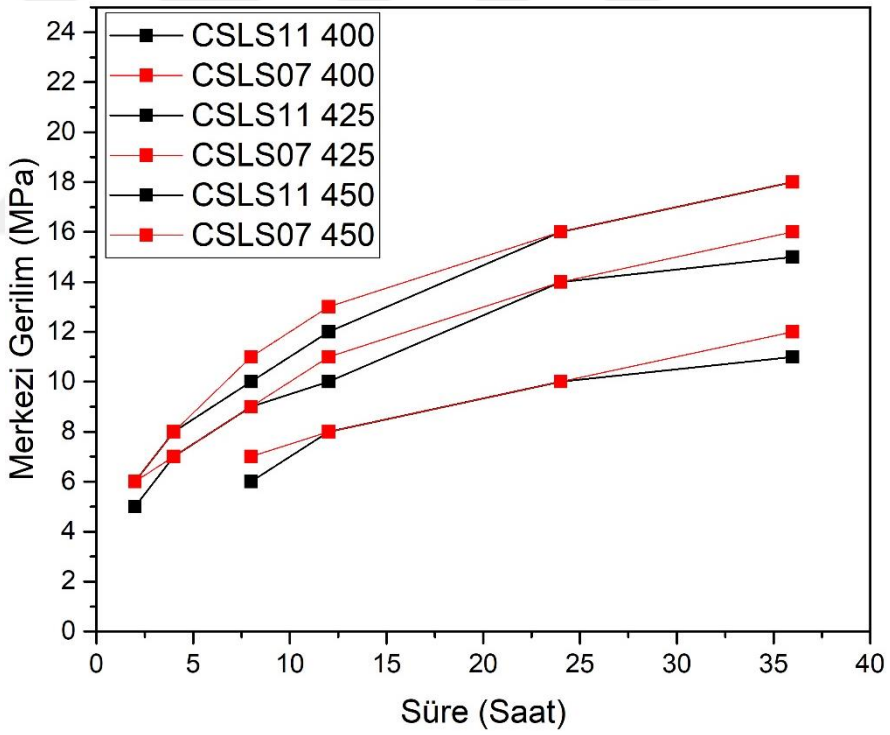
### 5.1.4 Merkezi Gerilim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin merkezi gerilim derinliği sonuçları Çizelge 5.7'de; AS07 ve Şekil 5.7'de ve AS11 numunelerinin gerilim derinliği sonuçları Çizelge 5.8 ve Şekil 5.8'de verilmektedir.

Çizelge 5. 7 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin merkezi gerilim tablosu

| Birim: | 400 °C | | 425 °C | | 450 °C | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MPa | CSLS07 | CSLS11 | CSLS07 | CSLS11 | CSLS07 | CSLS11 |
| 2 Saat | | | 5 | 6 | 6 | 6 |
| 4 Saat | | | 7 | 7 | 8 | 8 |
| 8 Saat | 6 | 7 | 9 | 9 | 10 | 11 |
| 12 Saat | 8 | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 24 Saat | 10 | 10 | 14 | 14 | 16 | 16 |
| 36 Saat | 11 | 12 | 15 | 16 | 18 | 18 |

Sonuçlara göre, CSLS07 ve CSLS11 numuneleri için, kimyasal temperleme işlemi süresinin artmasıyla gerilim derinliği miktarı arttığı, benzer şekilde kimyasal temperleme sıcaklığının artmasıyla, gerilim derinliği miktarı arttığı görülmüştür.

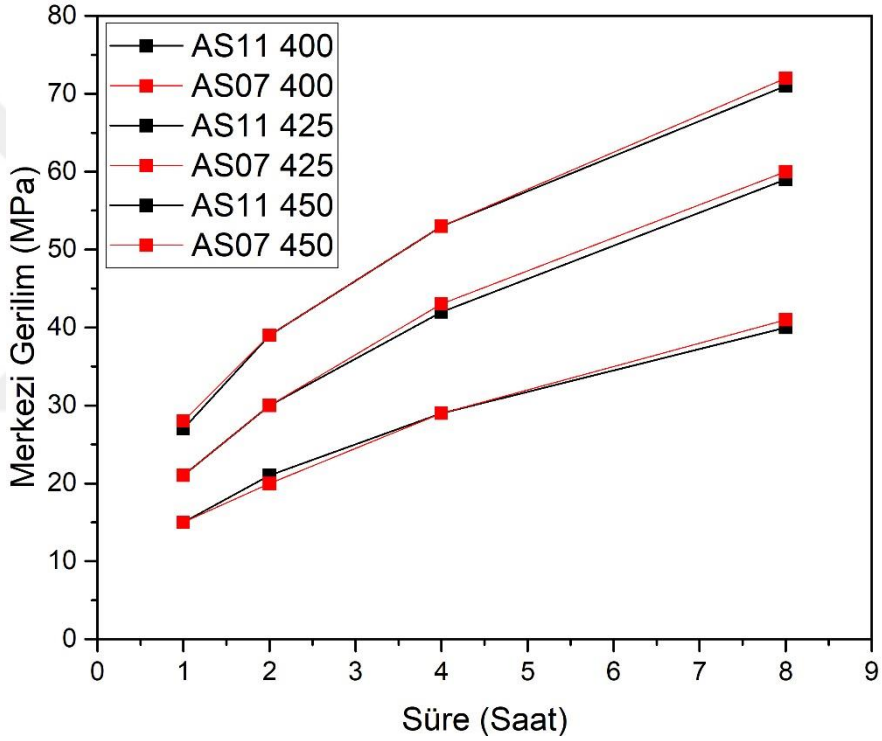



Şekil 5. 7 CSLS11 ve CSLS07 numunelerinin merkezi gerilim grafiği

Çizelge 5. 8 AS07 ve AS11 numunelerinin merkezi gerilim tablosu

| Birim: MPa | 425 °C | | 425 °C | | 450 °C | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | AS07 | AS11 | AS07 | AS11 | AS07 | AS11 |
| 1 Saat | 15 | 15 | 21 | 21 | 27 | 28 |
| 2 Saat | 21 | 20 | 30 | 30 | 39 | 39 |
| 4 Saat | 29 | 29 | 42 | 43 | 53 | 53 |
| 8 Saat | 40 | 41 | 59 | 60 | 71 | 72 |

AS07 ve AS11 numuneleri için ise, kimyasal temperleme işlemi süresinin ve sıcaklığının artmasıyla gerilim derinliği miktarları artmıştır.




Şekil 5. 8 AS11 ve AS07 numunelerinin merkezi gerilim grafiği

Genel olarak sonuçlar değerlendirildiğinde, farklı cam kalınlıkları için gerilim derinliği değerlerinin belirgin bir şekilde değişmediği gözlemlenmiştir.

### 5.1.5 Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi

CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin Vickers mikrosertlik sonuçları Çizelge 5.9'da, AS07 ve AS11 numunelerinin Vickers mikrosertlik sonuçları ise Çizelge 5.10'da verilmektedir.

Çizelge 5. 9 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin Vickers mikrosertlik tablosu

| Birim: | 400°C | | 425°C | | 450°C | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| GPa | CSLS07 | CSLS11 | CSLS07 | CSLS11 | CSLS07 | CSLS11 |
| **Orijinal** | 5,820 | 6,012 | 5,820 | 6,012 | 5,820 | 6,012 |
| **2 Saat** | 6,390 | 6,130 | 6,643 | 6,531 | 6,332 | 6,302 |
| **4 Saat** | 6,246 | 6,330 | 6,500 | 6,435 | 6,392 | 6,364 |
| **36 Saat** | 6,213 | 6,080 | 6,530 | 6,639 | 6,174 | 6,217 |

Kimyasal temperleme işlemi ile sertlik değerleri iki farklı kalınlık için artmıştır. Kimyasal temperleme işlemi süresinin artmasıyla, CSLS07 için sertlik değerlerinin önce artıp daha sonra azaldığı, CSLS11 için ise, artan işlemi süresi ile artış gösterdiği belirlenmiştir.

Çizelge 5. 10 AS07 ve AS11 numunelerinin Vickers mikrosertlik Tablosu

| Birim: | 400°C | | 425°C | | 450°C | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| GPa | AS07 | AS11 | AS07 | AS11 | AS07 | AS11 |
| **Orijinal** | 6,414 | 6,758 | 6,414 | 6,758 | 6,414 | 6,758 |
| **1 Saat** | 7,640 | 7,560 | 8,091 | 7,515 | 7,515 | 7,531 |
| **4 Saat** | 7,540 | 7,430 | 7,942 | 7,787 | 7,653 | 7,812 |
| **8 Saat** | 7,930 | 7,630 | 7,653 | 7,653 | 7,312 | 7,462 |

AS07 ve AS11 numuneleri için sertlik değeri kimyasal temperleme işlemiyle beraber artış göstermiştir. Kimyasal temperleme işlem süresinin artmasıyla ile de sertlik değerleri önce artmış; ardından azalmıştır. AS07 için en yüksek sertlik değerine 1. saatte ulaşılırken; AS11 için en yüksek sertlik değerine 4. saatte ulaşılmıştır.

CSLS11 numunesinin sertlik değeri 2. saatte CSLS07'den daha yüksek iken; 36. saatte CSLS07 numunesinin sertlik değeri CSLS11 numunesine oranla daha yüksektir. AS07 numunesinin sertlik değeri 1. ve 2. saatin sonunda AS11'den yüksek iken; 8. saatin sonunda iki numune için sertlik değeri ayndır.

Sonuç olarak, elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde; kimyasal temperleme işlemi sonucu sertlik değerlerinde meydana gelen değişimin kalınlığın artışına bağlı olarak değişmediği tespit edilmiştir.

### 5.1.6 Çizilme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin tek geçişte oluşturulan çizilme derinliği ve 20 geçişte tahrip edilen alan üzerinden hesaplanan çizilme testi sonuçları Çizelge 5.11'de, benzer sonuçlar AS07 ve AS11 numuneleri için ise Çizelge 5.12'de verilmektedir.

Çizelge 5. 11 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin çizilme testi tablosu

| **Tek Geçiş** | **425°C** | | **20 Geçiş** | **425°C** | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Birim: µm** | **CSLS07** | **CSLS11** | **Birim: µm³** | **CSLS07** | **CSLS11** |
| **Orijinal** | 0,5110 | 0,4848 | **Orijinal** | 14,23 | 11,46 |
| **2 Saat** | 0,3119 | 0,3620 | **2 Saat** | 9,86 | 9,13 |
| **36 Saat** | 0,3480 | 0,3849 | **36 Saat** | 8,73 | 9,02 |

CSLS07 ve CSLS11 numuneleri için tek seferde oluşturulan çizik testinde kimyasal temperleme işlemiyle beraber çizik derinliğinde azalma gözlemlenmiştir. Kimyasal temperleme işlemi süresinin artmasıyla, çizilme derinliğinin önce azalıp ardından arttığı tespit edilmiştir. 20 geçişte tahrip edilen alan kimyasal temperleme işlemi ile beraber azalmıştır. Kimyasal temperleme işlemi süresindeki artışla beraber ise azalmıştır

Çizelge 5. 12 AS07 ve AS11 numunelerinin çizilme testi tablosu

| **Tek Geçiş** | **425°C** | | **20 Geçiş** | **425°C** | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Birim: µm** | **AS07** | **AS11** | **Birim: µm³** | **AS07** | **AS11** |
| **Orijinal** | 0,4261 | 0,3964 | **Orijinal** | 16,55 | 16,63 |
| **2 Saat** | 0,3259 | 0,3194 | **2 Saat** | 5,85 | 9,04 |
| **36 Saat** | 0,3458 | 0,3034 | **36 Saat** | 6,18 | 9,14 |

AS07 ve AS11 numuneleri için ise, kimyasal temperleme işlemi süresinin artmasıyla tek seferde oluşturulan çizilme derinliği AS07 için önce artmış ardından azalmış, AS11 için artmıştır. 20 seferde tahrip edilen alan ise, artan kimyasal süresiyle önce azalmış sonra artmıştır. Tek geçişte oluşturulan çizilme derinliği CSLS07'de CSLS11'e oranla daha düşüktür. Bunun aksine, AS11'in çizilme derinliği ise AS07'ye oranla daha düşüktür. 20 geçişte tahrip edilen alan, 2 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş camlarda CSLS11 için CSLS07'ye oranla daha düşük iken; 36 saat kimyasal temperleme işlemine

tabi tutulmuş camlarda CSLS07'de CSLS11'e oranla daha düşüktür. 20 geçişte tahrip edilen alan AS07 için AS11'ye oranla daha düşüktür.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, çizilme derinliği değerlerine kalınlık etkisinin cam bileşimine göre değiştiği, CSLS için kanlıklık artışıyla beraber tek geçişte oluşan çizik derinliğinin arttığı; AS için azaldığı gözlemlenmiştir. 20 geçişte tahrip edilen alan değerinin CSLS camlarda kalınlıktan bağımsız olduğu görülmüştür. Ancak AS camlarda tahrip edilen alan kalınlık artışıyla beraber azaldığı görülmüştür.

### 5.1.7 Halka Üstü Halka Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Halka üstü halka deneyi sonrası kırılma yükleri sonuçları CSLS07 ve CSLS11 numuneler için Çizelge 5.13'te ve AS07 ve AS11 numuneler için Çizelge 5.14'te karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Çizelge 5. 13 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin kırılma yükü tablosu

| **Birim: N** | **400$^{o}$C** | | **425$^{o}$C** | | **450$^{o}$C** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **CSLS07** | **CSLS11** | **CSLS07** | **CSLS11** | **CSLS07** | **CSLS11** |
| **Orijinal** | **CSLS07** = 351N / **CSLS11** = 718N | | | | | |
| **2 Saat** | 1802 | 2830 | 1454 | 2975 | 1308 | 2116 |
| **4 Saat** | 1748 | 2582 | 1427 | 2832 | 1154 | 2074 |
| **8 Saat** | 1456 | 2469 | 1365 | 2539 | 1087 | 2074 |
| **12 Saat** | 1853 | 2421 | 1274 | 2167 | 1086 | 1979 |
| **24 Saat** | 1580 | 2539 | 1247 | 2131 | 989 | 1845 |
| **36 Saat** | 1696 | 2024 | 1207 | 2045 | 946 | 1871 |

CSLS07 ve CSLS11 numuneleri için kırılma yükü değeri kimyasal temperleme işlemiyle beraber artmıştır. Kimyasal temperleme işlemi süresinin artmasıyla kırılma yükünün önce arttığı sonra azaldığı, sıcaklığın artmasıyla ise kırılma yük değerinin azaldığı belirlenmiştir.

Çizelge 5. 14 AS07 ve AS11 numunelerinin kırılma yükü tablosu

| **Birim: N** | **425 $^{o}$C** | | **425 $^{o}$C** | | **450 $^{o}$C** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **AS07** | **AS11** | **AS07** | **AS11** | **AS07** | **AS11** |
| **Orijinal** | **AS07** = 378N / **AS11** = 931N | | | | | |
| **1 Saat** | 1540 | 2774 | 1558 | 2869 | 1443 | 2950 |
| **2 Saat** | 1543 | 3050 | 1606 | 2924 | 1422 | 2914 |
| **4 Saat** | 1499 | 2752 | 1636 | 2999 | 1330 | 2877 |
| **8 Saat** | 1625 | 3016 | 1540 | 2926 | 1309 | 2705 |

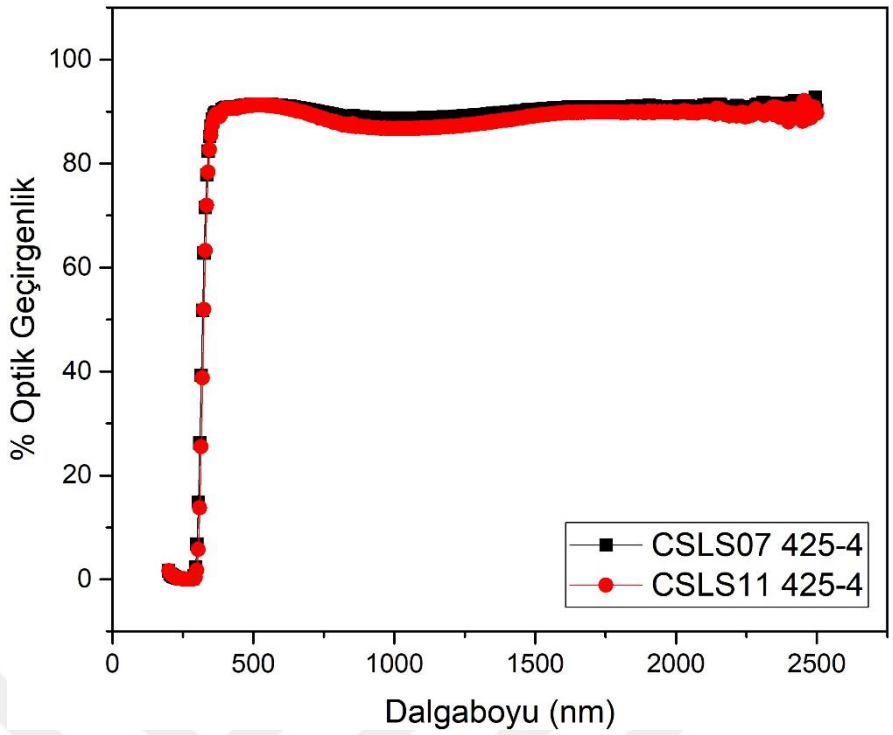
AS07 ve AS11 numuneleri için de kimyasal temperleme işlemiyle beraber bir artış söz konusudur. Kimyasal temperleme işlemi süresinin artmasıyla kırılma yükü 400 $^{o}$C ve 425 $^{o}$C için önce artıp ardından azalırken; 450 $^{o}$C'de temperlenen numunelerde artan süreyle beraber azalmıştır. Kırılma yükü 1,1 mm kalınlığa sahip CSLS11 ve AS11 camlarında, 0,7 mm kalınlığa sahip CSLS07 ve AS07 camlara oranla daha yüksektir. Bundan yola çıkarak kırılma yükü değerlerinin artan kalınlık ile arttığı belirlenmiştir.

### 5.1.8 Optik Geçirgenlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi

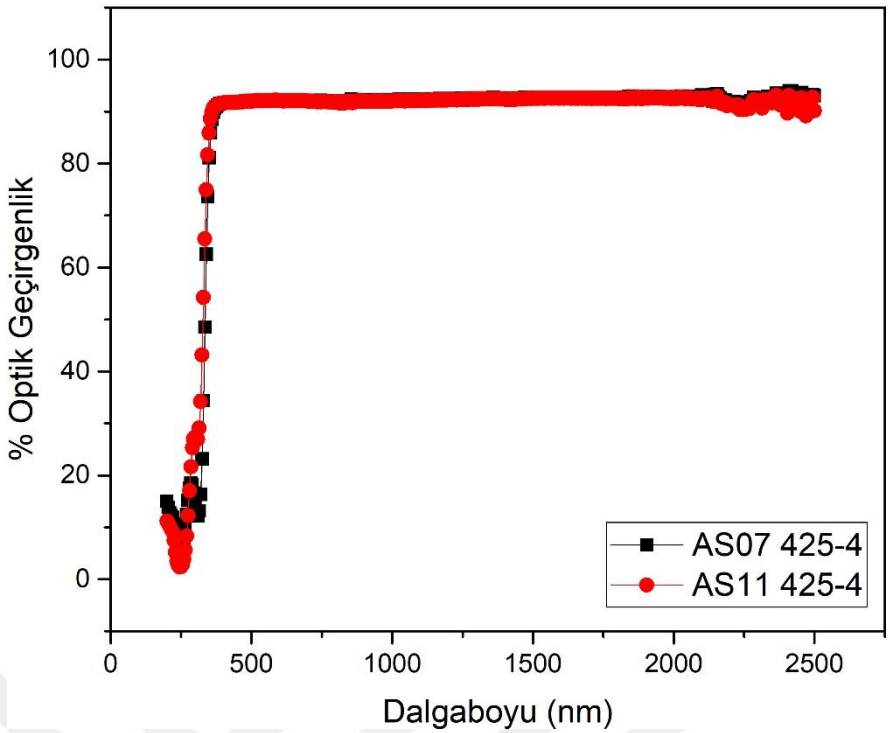
CSLS11 ve CSLS07 kimyasal temperleme işlemi öncesi ve 425 $^{o}$C'de 4 saat işleme tabi tutulması sonrasında optik geçirgenlikleri ölçülmüştür. Şekil 4.10'da verilen karşılaştırmalı grafikten yola çıkılarak, kimyasal temperleme işleminin optik geçirgenliğe olumsuz bir etkisi olmadığı görülmüştür. Aynı işlem aynı parametrelerde AS11 ve AS07 camlara uygulanmıştır. Şekil 4.21'de verilen karşılaştırmalı grafikten yola çıkarak, kimyasal temperleme işleminin optik geçirgenliğe olumsuz bir etkisi olmadığı görülmüştür.

425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin 200-2500 nm dalgaboyları arasındaki optik geçirgenlikleri Şekil 5.9'da; AS07 ve AS11 numunelerinin aynı parametrelerdeki optik geçirgenlikleri Şekil 5.10'de gösterilmiştir.

Sonuç olarak, optik geçirgenlikte kalınlığa bağlı bir değişim olmadığı görülmüştür.




Şekil 5. 9 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin optik geçirgenlik grafiği




Şekil 5. 10 425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş AS07 ve AS11 numunelerinin optik geçirgenlik grafiği

### 5.1.9 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçlarının Değerlendirilmesi

CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 5.15'te, AS07 ve AS11 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü değerleri ise Çizelge 5.16'da verilmiştir.

Çizelge 5. 15 CSLS07 ve CSLS11 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü tablosu

| **Birim: nm** | **425$^{o}$C** | |
|---|---|---|
| | **CSLS07** | **CSLS11** |
| **Orijinal** | 0,2832 | 0,2690 |
| **36 Saat** | 0,3037 | 0,2359 |

Çizelge 5. 16 AS07 ve AS11 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü tablosu

| **Birim: nm** | **425$^{o}$C** | |
|---|---|---|
| | **AS07** | **AS11** |
| **Orijinal** | 0,2364 | 0,3023 |
| **12 Saat** | 0,2478 | 0,2701 |

Sonuç olarak, 0,5 nm altındaki yüzey pürüzlülüğü değerleri ihmal edildiğinden; yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sıcaklık, süre ve kalınlığa bağlı olarak değişmediği görülmüştür.

### 5.1.10 Bağ Yapısı Analizi Sonuçlarının Yorumlanması

Kimyasal temperleme işlemi öncesi ve 425 $^{o}$C'de işleme tabi tutulan süreler sonrasında bağ yapısı analizinde Si – O bağlarının artan süreyle beraber daha küçük dalgaboylarına ötelendiği görülmüştür. Bunun nedeninin cam yapısına katılan boyutça büyük iyonlar olduğu saptanmıştır.

Sonuç olarak ötelenmenin iki cam kalınlığı için de aynı olduğu ve kalınlık değişiminden etkilenmediği belirlenmiştir.

## 5.2 Kesme Etkisinin Değerlendirilmesi

Tez çalışması kapsamında hazırlanan TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin 425 $^{o}$C'de 4 saat süreyle kimyasal temperlenmesi sonrası gerçekleştirilen dört nokta eğme, yüzey gerilimi, gerilim derinliği ve kenar pürüzlülüğü testi sonuçları kesme tipi etkisi açısından değerlendirilmiştir.

### 5.2.1 Dört Noktadan Eğme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin dört noktadan eğme testi sonucu bulunan kırılma yükü ve eğme mukavemeti değerleri Çizelge 5.17'de verilmektedir.

Çizelge 5. 17 TSLS11CO2, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin dört noktadan eğme deneyi sonuçları

| | **TSLS11$CO_2$** | | **TSLS11W** | | **TSLS11GL** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Kırılma Yükü** | **Mukavemet (MPa)** | **Kırılma Yükü** | **Mukavemet (MPa)** | **Kırılma Yükü** | **Mukavemet (MPa)** |
| **Orijinal** | 187,7 | 279,2 | 174,8 | 260 | 76,6 | 113,9 |
| **425$^{o}$C / 4** | 431 | 641,2 | 352,7 | 524,7 | 154,9 | 230,4 |

425 $^{o}$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin eğme mukavemetleri ve kırılma yükleri orijinal camlara göre artış göstermiştir. En çok artış, 2,3 kat ile TSLS11$CO_2$'de gerçekleşmiştir. TSLS11W'de 2,018 ve TSLS11GL'de 2,022'lik bir artış saptanmıştır.

### 5.2.2 Yüzey Gerilimi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin yüzey gerilimleri ölçülmüştür. Test sonucu bulunan yüzey gerilimi değerleri Çizelge 5.18'de verilmektedir.

Çizelge 5. 18 TSLS11CO2, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin yüzey gerilimi sonuçları

| **Birim: MPa** | **TSLS11$CO_2$** | | **TSLS11W** | | **TSLS11GL** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Orta** | **Kenar** | **Orta** | **Kenar** | **Orta** | **Kenar** |
| **425$^o$C/4saat** | 688 | 687 | 690 | 687 | 683 | 686 |

Sonuçlar incelendiğinde, 425 $^o$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL numuneleri arasında orta ve kenar bölgelerinden alınan yüzey gerilimi ölçümleri arasında belirgin bir fark görülmemiştir.

### 5.2.3 Gerilim Derinliği Sonuçlarının Değerlendirilmesi

TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin gerilim derinlikleri sonuçları, Çizelge 5.19'da verilmektedir.

Çizelge 5. 19 TSLS11CO2, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin gerilim derinliği sonuçları

| **Birim: µm** | **TSLS11$CO_2$** | | **TSLS11W** | | **TSLS11GL** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Orta** | **Kenar** | **Orta** | **Kenar** | **Orta** | **Kenar** |
| **425$^o$C/4saat** | 9,39 | 9,29 | 9,36 | 9,3 | 9,27 | 9,28 |

Sonuçlar değerlendirildiğinde, 425 $^o$C'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL numuneleri arasında, orta ve kenar bölgelerinden alınan gerilim derinliği sonuçları açısından belirgin bir fark görülmemiştir.

### 5.2.4 Kenar Pürüzlülüğü Sonuçlarının Değerlendirilmesi

TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin kenar bölgelerinin pürüzlülüksonuçları, karşılaştırılmalı olarak Çizelge 5.20'de verilmektedir.

Çizelge 5. 20 TSLS11CO2, TSLS11W ve TSLS11GL numunelerinin kenarlarının pürüzlülük sonuçları

| **Birim: nm** | **TSLS11$CO_2$** | **TSLS11W** | **TSLS11GL** |
|---|---|---|---|
| **425 $^oC$ / 4 saat** | 2,07 | 8,21 | 2164,4 |

Son olarak, 425 $^oC$'de 4 saat kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş TSLS11$CO_2$, TSLS11W ve TSLS11GL numuneleri arasında kenar pürüzlülüğü en fazla olan TSLS11GL numunesidir. Ardından TSLS11W ve en az kenar pürüzlülüğüne sahip olan numune TSLS11$CO_2$'dir. Buna göre, eğme mukavemetleri arasındaki farkın kenar kalitesinden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

# BÖLÜM 6

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, alümina silikat (AS) ve soda kireç silikat (SLS) camların kimyasal temperlenmesinde kalınlık ve kesme etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar iki grupta gerçekleştirilmiştir. İlk grup çalışmalarda, $CO_2$ lazer ile kesilmiş ve farklı sıcaklık ve sürelerde kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş 0,7 ve 1,1 mm olmak üzere iki farklı kalınlıktaki alümina silikat ve soda kireç silikat camlar mekanik, optik ve yapısal olarak incelenmiştir. İkinci grup çalışmalarda ise, $CO_2$ lazer, elmas ve yeşil lazer olmak üzere 3 farklı kesim tipiyle kesilerek hazırlanmış ve belirlenen tek bir sıcaklık ve sürede kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş 1,1 mm kalınlığa sahip soda kireç silikat camlar mekanik, optik ve yapısal açıdan incelenmiştir. Analiz sonuçları değerlerilerek cam kalınlığı ve kesme tipinin kimyasal temperleme prosesine etkisi değerlendirilmiştir. Buna göre,

1) % ağırlık değişimi miktarının, artan kimyasal temperleme prosesi süresi ve sıcaklığıyla arttığı tespit edilmiştir. % ağırlık değişimi miktarının artan kalınlıkla beraber ise azaldığı saptanmıştır.
2) Yüzey gerilimi değerlerinin artan kimyasal temperleme proses süresi ve sıcaklığı ile, merkezi gerilim değerindeki artış sonucu cam yapısında meydana gelen gevşemeden ötürü azaldığı saptanmıştır. Yüzey gerilimi değerinde artan kalınlıkla beraber belirgin bir artış gözlemlenmemiş, cam kalınlığının yüzey gerilimine etki etmediği tespit edilmiştir.

3) Gerilim derinliği değerlerinin artan kimyasal temperleme prosesi süresi ve sıcaklığı ile arttığı tespit edilmiştir. Gerilim derinliği değerlerinde artan kalınlıkla beraber bir değişim gözlemlenmemiştir.
4) Merkezi gerilim değerlerinin artan kimyasal temperleme prosesi süresiyle arttığı tespit edilmiştir. Merkezi gerilim değerlerinin artan kimyasal temperleme prosesi sıcaklığıyla beraber arttığı belirlenmiştir. Merkezi gerilim değerinde artan kalınlıkla beraber bir değişim saptanmamış, cam kalınlığının merkezi gerilime etki etmediği tespit edilmiştir.
5) Sertlik değerinin artan kimyasal temperleme prosesi sıcaklığı ve süresi ile, merkezi gerilim değerindeki artış sonucu cam yapısında meydana gelen gevşemeden ötürü, belirli bir maksimum değere ulaştıktan sonra düşme eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Sertlik değeri iki kalınlık için de standart sampa değerleri içinde kalacak şekilde benzer değerler verdiğinden dolayı değişen kalınlıkla beraber sertlikte bir değişim olmadığı saptanmıştır.
6) Tek geçiş ve 20 geçişle oluşturulan çizme testi sonucunda kimyasal temperleme prosesiyle beraber çizik derinliğinin ve yok edilen hacim miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Çizilme testi sonucunda, çizik derinliği ve yok edilen hacim miktarının değişen kalınlığa bağlı bir değişim göstermediği saptanmıştır.
7) Kırılma yükü değerinin artan kimyasal temperleme prosesi sıcaklığı ve süresi ile, merkezi gerilim değerindeki artış sonucu cam yapısında meydana gelen gevşemeden ötürü, belirli bir maksimum değere ulaştıktan sonra düşme eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Kırılma yükü değerlerinin artan kalınlıkla beraber ise artmakta olduğu belirlenmiştir.
8) Optik geçirgenlik değerlerinin kimyasal temperleme prosesi süresi ve sıcaklığından etkilenmediği ve herhangi bir değişiklik göstermediği saptanmıştır. Değişen cam kalınlığın da optik geçirgenlik üzerinde bir değişikliğe neden olmadığı tespit edilmiştir.
9) Yüzey pürüzlülüğü değerleri, farklı kalınlıktaki camlara yapılan çalışmalarda tüm kimyasal temperleme prosesi sıcak ve sürelerinde 0,5 nm'nin altında kalmıştır. Literatürden yola çıkılarak bu değer altındaki pürüzlülük değerleri ihmal edildiğinden; kimyasal temperleme süresi, sıcaklığı ve cam kalınlığının yüzey pürüzlülüğü üzerinde bir etki yaratmadığı sonucuna varılmıştır.

10) Bağ yapısı analizinde Si–O bağlarının artan kimyasal temperleme prosesi süresiyle beraber daha düşük dalganumaralarına ötelendiği ancak değişen kalınlıkla Si–O bağlarının dalga numaralarının değişmediği belirlenmiştir.
11) Eğme mukavemeti sonuçlarından yola çıkarak $CO_2$ lazer kesim ile kesilen camlardaki mukavemet artışının yeşil lazer ve elmas kesime göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Kenar pürüzlülüğü sonuçlarından yola çıkarak en az pürüzlü kenarın $CO_2$ lazer ile kesilmiş numuneler olduğu saptanmıştır. Buna göre kenar kalitesinin kimyasal temperleme işlemini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir.
12) Farklı kesim tipleri ile kesilmiş camların yüzey gerilimi ve gerilim derinliği sonuçları arasında bir fark görülmemiştir. Ancak cihaz ölçüm şartları tam anlamıyla kenar bölgeden veri almaya uygun olmadığı için, kenar kalitesinin yüzey gerilimi ve gerim derinliğine olan etkisi saptanamamıştır. Yüzey gerilimi, sertlik, çizilme ve halka üstü halka deneylerinin sonuçları göz önüne alındığında AS07 ve AS11 camların mukavemet değerlerinin tüm sıcaklık ve sürelerde CSLS07 ve CSLS11 camların mukavemet değerlerinden yüksek olduğu saptanmıştır.

Genel olarak sonuçlar değerlendirildiğinde, hem soda kireç silikat hem alümina silikat camlarda, 0,7 ve 1,1 mm kalınlıktaki camlarda benzer mukavemet ve sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Buna göre mekanik özellikler göz önünde bulundurulduğunda, kalınlığın kimyasal temperleme verimi üzerinde çok az etkisi olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde, optik ve yapısal özelliklerin de değişen kalınlıkla değişmediği saptanmıştır. Yüksek kenar kalitesine sahip, $CO_2$ lazer ile kesilerek hazırlanmış camların kimyasal temperleme verimlerinin, elmas ve yeşil lazer kesim ile hazırlanmış camların kimyasal temperleme veriminden yüksek olduğu, dolayısıyla kenar kalitesinin kimyasal temperleme verimini direkt olarak etkilediğini göstermektedir.

Işığın çift kırınım özelliğinden yararlanılarak ölçüm yapılan FSM 6000LE cihazı düşük sıcaklık ve sürelerde kimyasal temperleme işlemine tabi tutulmuş camların yüzey gerilimi, gerilim derinliği ve merkezi gerilim değerlerini ölçmede yetersiz kalmıştır. Düşük sıcaklık ve sürelerde elde edilebilecek yüksek dayanım değerlerini gözardı etmemek için kimyasal olarak yüzey aşındırma yöntemine başvurarak ölçüm yapılmasının uygun olabileceği düşünülmüştür.

## KAYNAKLAR


[1] Vogel, W., (1985). Glass Chemistry, 2nd Edition, Springer-Verlag, Jena.

[2] Doremus, R. H., (1994). Glass Science. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.

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

[4] Persson, R., (1969). Flat Glass Technology. Butterworth & Co, New York.

[5] TOBB, (2012). Türkiye Cam ve Cam Ürünleri Sanayi Meclisi Sektör Raporu. Ankara: Mattek Matbaacılık Basım ve Yayın Tan. Tic. San. Ltd. Şti.

[6] Şişecam, (1993, 04). Cam Teknolojisine Giriş Eğitim Notları. Istanbul, Türkiye: Şişecam Eğitim Müdürlüğü.

[7] Akiba, S., Sawamura, S., Murayama, S., Ohkawa, H., Kobayashi, Y., Ono, K., & Nakashima, T. (2014). Japonya Patent No. US2014/022609A1.

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

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

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

[11] 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).

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

[13] 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.

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

[15] Sglavo, V. M., Quaranta, A., Allodi, V., 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

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

[17] Varshneya, A. K., (2010). "The physics of chemical strengthening of glass: Room for a new view", Journal of Non-Crystalline Solids, 356: 2089-2294.

[18] Gy, R., (2008). "Ion exchange for glass strengthening", Materials Science and Engineering, 149: 159-165.

[19] Tyagi, V., Varshneya, A. K., (1998). "Measurement of progressive stress buildup during ion exchange in alkali aluminosilicate glass", Journal of Non-Crystalline Solids, 238: 186-192.

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

[21] Tandon, R., Glass S. J., (2014). "Fracture initiation and fragmentation in chemically tempered glass", Journal of the European Ceramic Society, 35: 285-295.

[22] Ono, K., Akiba, S., (2013). Japonya Patent No. US2013/0269392A1.

[23] Karlsson, S., Jonson, B., (2010). "Surface analysis of float glass using surface ablation cell (SAC). Part 2. Determination of the diffusion characteristics of K-Na ion exchange", Glass Technology: European Journal of Glass Science and Technology , 51: 55-62.

[24] Di Nunzio, S., Brovarone, C. V., Spriano, S., Milanese, D., Verne, E., Bergo, V., Maina, G., Spinelli, P., (2014). "Silver containing bioactive glasses prepared by molten salt ion-exchange", Journal of the European Ceramic Society, 24: 2935-2942.

[25] *MSE Furnace Web sitesi*. (2018, 03 22). MSE Furnace Web sitesi: http://www.msefurnace.com adresinden alındı

[26] *LEMA Parma Web sitesi*. (2018, 03 22). LEMA Parma Web sitesi: http://www.lemaparma.it/old/english_oven_glass_chemical_tempering_3300.php adresinden alındı

[27] BCE Glass Web sitesi. (2018, 03 26). BCE Glass Web sitesi:

http://www.bceglass.com/tr/ adresinden alındı

[28] Leil, M. M. A. E., Camaratta, F. A., Digenova, R. R., (1986). "Impact Fracture of Chemically Tempered Glass Helicopter Windshields", Journal of American Ceramic Society, 69: 713-716.

[29] Ehemann, K. D., Gaylo, K. R., Mattingly, W. B., O'Malley, C. T., Ukrainezyk, L., Wasson, K. L. (2016). New York Patent No. US9,512,029B2.

[30] AGC Dragontrail Web sitesi. (2018, 04 07). AGC Dragontrail Web sitesi: ttp://dragontrail.agc.com/en/ adresinden alındı

[31] Noriaki, S., & Toyoda, H. (2007). Japonya Patent No. EP2022767B1.

[32] Shibata, N., Toyoda, H., & Tamamaki, K. (2008). Japonya Patent No. EP2284132A1.

[33] *Toyo Sasaki Glass Web sitesi*. (2018, 04 06). Toyo Sasaki Glass Web sitesi: https://www.toyo.sasaki.co.jp/e/products/ adresinden alındı

[34] Macrelli, G. (2015, 06 23). Glass Chemical Strengthening by Ion Exchange. Tampere, Finlandiya: Guglielmo Macrelli Lecture Notes.

[35] FiberLAST Sunum (2017, 02 23). Lazer ile Cam Kesme. Istanbul, Türkiye: FiberLAST Firması.

[36] Hermenns, C. (2015). Cutting of Glass. Mainz, Almanya: MDI Advanced Process GmbH.

# ÖZGEÇMİŞ

**KİŞİSEL BİLGİLER**

**Adı Soyadı** : Berkel KAYACAN

**Doğum Tarihi ve Yeri** : 18/05/1992 – Kadıköy

**Yabancı Dili** : Fransızca, İngilizce

**E-posta** : bkayacan@katsankimya.com.tr

**ÖĞRENİM DURUMU**

| **Derece** | **Alan** | **Okul/Üniversite** | **Mezuniyet Yılı** |
|---|---|---|---|
| Lisans | Metalurji ve Malzeme Mühendisliği | Yıldız Teknik Üniversitesi | 2016 |
| Lise | Fen Bilimleri | Saint Joseph Fransız Lisesi | 2011 |

**İŞ TECRÜBESİ**

| **Yıl** | **Firma/Kurum** | **Görevi** |
|---|---|---|
| 2018-Günümüz | Katsan Kimya A.Ş. | Ar-Ge Sorumlusu |
| 2018-2018 | Şişecam BTM | Proje Stajyeri |

**YAYINLARI**

**Bildiri**

1. Kayacan, B., Kayaalp, A. C., Özben, N., Akkaya, P., Tol, C., Okan, B., Güldiren, D., Atılgan, S., Öğüt, B., Simurka, L., Atar, E., Çelikbilek Ersundu, M., Sökmen, İ., "Ion Exchange Strengthening of Glasses: Influence of Glass Composition and Thickness", Glass and Optical Materials Division 2018 Annual Meeting, (2018 05 20) San Antonio, Texas, Amerika Birleşik Devletleri.
2. Kayaalp, A. C., Kayacan, B., Özben, N., Atılgan, S., Öğüt, B., Simurka, L., Güldiren, D., Okan, B., Kaçar, E. D., Çelikbilek Ersundu, M., Sökmen, İ., "Ion Exchange Strengthening of Silicate Glasses", ICG Annual Meeting, (2017 10 22) İstanbul Türkiye.
3. Kayacan, B., Kayaalp, A. C., Özben, N., Sökmen, İ., Ersundu, A. E., Çelikbilek Ersundu, M., "The Effect of Glass Thickness on Chemical Tempering Efficiency", 15$^{th}$ International Conference on the Physics Non-Crystalline Solids & 14$^{th}$ ESG Conference, (2018 07 09) Saint-Malo, Fransa.
4. Kayaalp, A. C., Kayacan, B., Özben, N., Sökmen, İ., Ersundu, A. E., Çelikbilek Ersundu, M., "Comparaison on Chemical Tempering Behavior of Commercial Aluminosilicate and Soda Lime Silicate Glasses", 15$^{th}$ International Conference on the Physics Non-Crystalline Solids & 14$^{th}$ ESG Conference, (2018 07 09) Saint-Malo, Fransa.

**Proje**

1. Alümina Silikat ve Soda Kireç Silikat Camların Kimyasal Temperlenmesinde Kalınlık ve Kesme Etkisinin İncelenmesi, YÜLAP, 2016-2018