

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SODA KİREÇ SİLİKAT CAMLARINDA ISIL TEMPERLEME
SONUCU OLUŞAN ARTIK GERİLMELERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİLERİ**

TÜRKER ŞEBER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
CAM BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ PROGRAMI

GEBZE
2022

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SODA KİREÇ SİLİKAT CAMLARINDA
ISIL TEMPERLEME SONUCU OLUŞAN
ARTIK GERİLMELERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİLERİ

TÜRKER ŞEBER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
CAM BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ PROGRAMI

DANIŞMANI
PROF. DR. YAHYA KEMAL TÜR

GEBZE
2022

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**THE EFFECTS OF RESIDUAL STRESSES
RESULTING FROM THERMAL TEMPERING
IN SODA LIME SILICATE GLASSES ON
MECHANICAL PROPERTIES**

TÜRKER ŞEBER

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING
GLASS SCIENCE AND TECHNOLOGY PROGRAM**

**THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. YAHYA KEMAL TÜR**

GEBZE

2022

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 07/02/2022 tarih ve 2022/08 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04/03/2022 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Türker ŞEBER'in tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı Cam Bilimi ve Teknolojisi Yüksek Lisans Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Prof. Dr. Yahya Kemal TÜR

ÜYE

: Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Betül KAFKASLIOĞLU YILDIZ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Cam ürünlerinin yüzeylerinde oluşan mikro boyuttaki kusurların ilerlemesini engellemek için mekanik mukavemeti artırma yöntemlerinden birisi ısı temperleme işlemidir. Ergiyik haldeki cam ürününün soğuması esnasında camsı geçiş bölgesinde ısı genleşme, kristal ve camsı fazlar arasındaki elastik uyumsuzluk nedeni ile artık gerilmeler oluşmaktadır. Düz cam ürününün kalınlığı boyunca yüzeyde basma gerilmesi ve merkezdeki çekirdekte çekme gerilmelerinin belirlenmesi özellikle tavlama ve ısı temperleme gibi ısı işlem koşullarının cam üzerindeki etkilerini analiz etmemizi ve uyguladığımız bu ısı işlemlerin cam ürünün mukavemetine nasıl etki ettiğini bilmemizi sağlaması açısından ve cam endüstrisi kalite kontrol parametreleri açısından oldukça önemli bir kriterdir.

Bu tez kapsamında, Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. Şişecam Düzcamlar Mersin Fabrikası ortam koşullarında tavllanmış ve ısı temperli olarak üretilen soda kireç silikat camlarının bünyelerinde oluşan artık gerilmelerin deneysel yöntem ile ölçülmesi ve ölçülen artık gerilmelerin mekanik özelliklere etkilerinin irdelenmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda saçılan ışık fotoelastisite yöntemi kullanılarak cam bünyesinde oluşan artık gerilme profilleri ölçülmüştür. Vickers indentasyon yöntemi ile sertlik, kusur boyutu ve tokluk belirlenmiştir. 9,81 N ve 29,42 N Vickers indentasyon yüklerinin uygulandığı belirli sayıdaki tavllanmış ve ısı temperli soda kireç silikat cam numuneleri ile birlikte üretildiği ortamın koşulları korunmuş olan tavllanmış ve ısı temperli soda kireç silikat cam numunelerinin yük altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla halka üstü halka testi uygulanmıştır. Uygulanan halka üstü halka testi sonucu yük altında kırılan cam numunelerinin kırılma mukavemeti hesapları yapılmış, kırık analizleri incelenmiş ve elde edilen kırık merkezi görüntüleri ile camların hangi yük altında kırıldıkları tahmini olarak hesaplanmıştır. Christiansen-Shelyubskii homojenite yöntemi ile belirlenen artık gerilme bölgelerine homojenite tayini yapılmış dolayısıyla kırılma mukavemeti ve cam homojenitesi arasındaki ilişki incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Artık Gerilme, Isı Temperleme, Tavlama, Saçılan Işık Fotoelastisitesi, Vickers İndentasyon, Kırılma Tokluğu, Kırılma Mukavemeti, Kırık Analizi, Cam Homojenitesi, Christiansen-Shelyubskii Yöntemi.

SUMMARY

One of the methods to increase the mechanical strength to prevent the propagation of micro-sized defects on the surfaces of glass products is thermal tempering. During the cooling of the molten glass product, residual stresses occur in the glass transition region due to elastic incompatibility between thermal expansion, crystalline and glassy phases. Determination of compressive stress on the surface along with the thickness of the flat glass product and tensile stresses in the core at the center enables us to analyze the effects of heat treatment conditions on glass, especially annealing and thermal tempering. In addition, it is an important criterion in terms of quality control parameters to enable us to know how it affects the strength of the glass product.

In this study, it was aimed to measure the residual stresses in the soda lime silicate glass, which was annealed and thermally tempered in the ambient conditions of Şişecam Flat Glass Mersin Plant, by experimental method and to examine the effects of the measured residual stresses on the mechanical properties. In line with this target, the residual stress profiles formed in the glass were measured by using the scattered light photoelasticity method. Hardness, defect size, and toughness were determined by the Vickers indentation method. To determine the behavior of the annealed and thermally tempered soda lime silicate glass samples with the conditions of the environment in which they were produced together with a certain number of annealed and thermally tempered soda lime silicate glass samples where 9,81 N and 29,42 N Vickers indentation loads were applied. The ring-on-ring test was applied to determine the behavior under load. As a result of the ring-on-ring test applied, the fracture strength calculations of the glass samples broken under load were made. In addition, fracture center images and fracture analysis were examined. Homogeneity determination was made on residual stress regions using the Christiansen-Shelyubskii homogeneity method. Hence, the relationship between breaking strength and glass homogeneity was investigated.

Keywords: Residual Stress, Thermal Tempering, Annealing, Scattered Light Photoelasticity, Vickers Indentation, Fracture Toughness, Fracture Strength, Fracture Analysis, Glass Homogeneity, The Christiansen-Shelyubskii Method.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım kapsamında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösteren, destek olan ve gelişimime katkı sunan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Yahya Kemal TÜR'e,

Gebze Teknik Üniversitesi ve Şişecam Topluluğu arasında, üniversite-sanayi işbirliğinin ülkemizdeki en önemli örneklerinden birisi olan “Cam Bilimi ve Teknolojisi Yüksek Lisans Programı” kapsamında bana değer katan, geliştiren, sorgulama, araştırma ve planlama yeteneğimi ön plana çıkartan çok kıymetli hocalarıma,

Yüksek lisans eğitimimin ve tez kapsamındaki deneysel çalışma aşamalarımın önemli bir kısmını bünyesinde gerçekleştirdiğim Şişecam Bilim, Teknoloji ve Tasarım Merkezi'nin kıymetli çalışanlarına, deneysel çalışmalarda yardımları bulunan ve bana destek olan, bilgi, birikim ve tecrübelerini aktaran Cam Özellikleri Müdürü Arca İYİEL'e, Baş Uzman Araştırmacı Dadal ARIBURNU'na, Uzman Araştırmacı Türkay YILDIZ'a ve Uzman Araştırmacı Cevher TOL'e,

Bu tez çalışması “Cam Bilimi ve Teknolojisi Yüksek Lisans Programı” kapsamında hazırlanmış olup finansal desteğinden dolayı Şişecam Topluluğu'na,

Son olarak bu günlere gelebilmemde büyük emekleri olan, koşulsuz sevgi ve desteklerini her daim hissettiren sevgili aileme,

İçten teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvi
TABLolar DİZİNİ	xxiii
1. GİRİŞ, AMAÇ, KATKI VE İÇERİK	1
2. TEORİK BİLGİ	3
2.1. Camın Tanımı ve Yapısı	3
2.1.1. Giriş	3
2.1.2. Sıcaklık-Hacim İlişkisi	3
2.2. Ticari Soda Kireç Silikat Camları	5
2.2.1. Giriş	5
2.2.2. Ticari Cam Kompozisyonu Bileşenleri	7
2.2.3. Yüzdürme Cam Teknolojisi Kullanımı ve Ticari Düz Cam Üretim Prosesi	11
2.3. Camların Mekanik Mukavemeti	13
2.3.1. Giriş	13
2.3.2. Kusursuz Camın Teorik Mukavemeti	14
2.3.3. Kusurlu Camın Teorik Mukavemeti	14
2.3.4. Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği	17
2.3.4.1. Üniform Yük Altında Çatlak Davranışı	19
2.3.4.2. İçsel Yükleme Altında Çatlak Davranışı	19
2.3.4.3. Kırılma Tokluğu	20
2.3.4.3.1. Vickers İndentasyon Yöntemi Kullanılarak Tokluğun ve Mikro Sertliğin Belirlenmesi	21
2.3.4.4. Mukavemet	25

2.3.4.4.1. Üniform Yük Altında Artık Gerilmesiz Durum İçin Camın Mukavemeti	25
2.3.4.4.2. Üniform Yük Altında Artık Gerilmeli Durum İçin Camın Mukavemeti	26
2.3.4.4.3. Halka Üstü Halka Testi Kullanılarak Mukavemetin Belirlenmesi	27
2.3.4.5. Weibull İstatistik Analizi	30
2.3.4.6. Kırık Yüzey Analizi	32
2.3.4.6.1. Kırık Yüzey Analizi Belirleyici Araçlar	35
2.4. Camlara Uygulanan Isıl İşlemlerin Artık Gerilme Üzerindeki Etkileri	36
2.4.1. Giriş	36
2.4.2. Isıl Genleşme	36
2.4.3. Sıcaklık-Viskozite	38
2.4.4. Homojenlik	41
2.4.4.1. Christiansen – Shelyubskii Yöntemi Kullanılarak Ticari Cam Ürünün Homojenliğinin Belirlenmesi	41
2.4.5. Tavlama Prosesi ve Artık Gerilme İlişkisi	42
2.4.6. Isıl Temperleme Prosesi ve Artık Gerilme İlişkisi	45
2.4.7. Artık Gerilme Profillerinin Modern Fotoelastiste Yöntemleri Kullanılarak Belirlenmesi	49
2.4.7.1. Saçılan Işık Yöntemi	50
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	53
3.1. Çalışmanın Kapsamı ve Uygulanışı	53
3.2. Numune Özellikleri	54
3.3. Artık Gerilme Profillerinin Belirlenmesi	55
3.3.1. Numune Hazırlama	55
3.3.2. Deneysel Ölçüm	57
3.4. Vickers İndentasyon Yöntemi ile Sertlik ve Tokluk Değerlerinin Belirlenmesi	59
3.4.1. Numune Hazırlama	59
3.4.2. Deneysel Ölçüm	61

3.5. Halka Üstü Halka Testi Yöntemi ile Kırılma Mukavemeti	63
Değerlerinin ve Radyal Çatlak Adetlerinin Belirlenmesi	
3.5.1. Numune Hazırlama	63
3.5.2. Deneysel Ölçüm	64
3.6. Christiansen-Shelyubskii Yöntemi Kullanılarak Homojenite Faktörü	69
Değerlerinin Belirlenmesi	
3.6.1. Numune Hazırlama	69
3.6.2. Deneysel Ölçüm	71
4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	72
4.1. Artık Gerilme Profillerinin Belirlenmesi	72
4.1.1. Tavlanmış Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin	72
Deneysel Ölçüm Sonuçları	
4.1.2. Isıl Temperli Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin	74
Deneysel Ölçüm Sonuçları	
4.1.3. Tavlanmış Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin	76
Deneysel Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirmesi	
4.1.4. Isıl Temperli Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin	79
Deneysel Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirmesi	
4.2. Vickers İndentasyon Yöntemi ile Sertlik ve Tokluk Değerlerinin	85
Belirlenmesi	
4.2.1. Tavlanmış Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin	85
Deneysel Ölçüm Sonuçları	
4.2.2. Isıl Temperli Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin	90
Deneysel Ölçüm Sonuçları	
4.2.3. Vickers İndentasyon İzi Diyagonal Uzunlukları ve Vickers	95
İndentasyon Sertliği Sonuçlarının Değerlendirmesi	
4.2.4. Vickers İndentasyon İzinin Yol Açtığı Çatlak Uzunluklarının	97
Değerlendirilmesi	
4.2.5. Vickers İndentasyon Kırılma Tokluğu Sonuçlarının	100
Değerlendirilmesi	
4.3. Halka Üstü Halka Testi Yöntemi ile Kırılma Mukavemeti	106
Değerlerinin ve Radyal Çatlak Adetlerinin Belirlenmesi	

4.3.1. Tavlanmış Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin Deneysel Ölçüm Sonuçları	106
4.3.1.1. Standart Boyutlara Sahip Test Numunelerinin Deneysel Ölçüm Sonuçları	106
4.3.1.2. Ticari Boyutlara Sahip Test Numunelerinin Deneysel Ölçüm Sonuçları	110
4.3.2. Isıl Temperli Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin Deneysel Ölçüm Sonuçları	113
4.3.3. Kırılma Mukavemeti Değerlerinin ve Radyal Çatlak Adetlerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi	116
4.3.4. Kırılma Mukavemeti Değerlerinin Weibull İstatistik Analizi Yöntemi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi	120
4.3.5. Farklı Vickers İndentasyon Yüğü Uygulanmış Standart Boyutlardaki Tavlanmış Numunelerden Nikon® SMZ1500 Stereo Mikroskop Vasıtası ile Belirlenmiş Ayna Yarıçapı r_m Değerlerinin Değerlendirilmesi	125
4.3.6. Halka Üstü Halka Test Sonuçlarının Pearson Korelasyon İstatistik Analizi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi	126
4.3.6.1. Radyal Çatlak Adedi-Mukavemet İlişkisinin Pearson Korelasyon İstatistik Analiz Yöntemi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi	127
4.3.6.2. Yüzey Basma Gerilmesi-Mukavemet İlişkisinin Pearson Korelasyon İstatistik Analiz Yöntemi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi	132
4.3.6.3. Yüzey Basma Gerilmesi-Radyal Çatlak Adedi İlişkisinin Pearson Korelasyon İstatistik Analiz Yöntemi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi	133
4.3.6.4. Ayna Yarıçapı r_m -Mukavemet İlişkisinin Pearson Korelasyon İstatistik Analiz Yöntemi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi	134
4.3.6.5. Ayna Yarıçapı r_m -Radyal Çatlak Adedi İlişkisinin Pearson Korelasyon İstatistik Analiz Yöntemi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi	136

4.4. Christiansen-Shelyubskii Yöntemi Kullanılarak Homojenite Faktörü	137
Değerlerinin Belirlenmesi	
4.4.1. Tavlanmış ve Isıl Temperli Soda Kireç Silikat Düz Cam	137
Numunelerinin Deneysel Ölçüm Sonuçları	
4.4.2. Gauss Eğrisi Üzerinde Geçirgenlik-Sıcaklık İlişkisiyle	142
Homojenite Faktörü Değerlerinin Değerlendirilmesi	
4.4.2.1. Tavlanmış Test Numunelerinin Deneysel Ölçüm	142
Sonuçlarının Değerlendirilmesi	
4.4.2.2. Isıl Temperlenmiş Test Numunelerinin Deneysel Ölçüm	143
Sonuçlarının Değerlendirilmesi	
4.4.2.3. Isıl İşlem Farkının Deneysel Ölçüm Sonuçlarına Etkisinin	144
Değerlendirilmesi	
4.4.2.4. Homojenite Faktörü Dereceleri-Yüzey Basma Gerilmesi	146
İlişkisinin Pearson Korelasyon İstatistik Analiz Yöntemi	
Vasıtasıyla Değerlendirilmesi	
5. GENEL SONUÇLAR VE YORUM	148
KAYNAKLAR	152
ÖZGEÇMİŞ	162

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar Kisaltmalar

V	: Hacim
T	: Sıcaklık
$\bar{T}$	: Ortalama sıcaklık
T _g	: Cam dönüşüm aralığı
σ	: Çekme gerilmesi, Homojenite faktörü derecesi
$-\sigma$	: Basma gerilmesi
σ_R	: Artık gerilme
σ_{th}	: Kusursuz bir katının teorik mukavemeti
E	: Elastik modülüs
γ_s	: Yüzey enerjisi
γ_{sc}	: Kritik yüzey enerjisi
d_0	: Atomlar arası mesafe
2b	: Eliptik kusurun minör eksen
ρ	: Eğrilik yarıçapı
G	: Enerji salınım hızı
G_{Ic}	: Kritik enerji salınım hızı
K	: Gerilme şiddet faktörü
K_I	: Açma modu gerilme şiddet faktörü
K_{II}	: Kayma modu gerilme şiddet faktörü
K_{III}	: Yırtılma modu gerilme şiddet faktörü
Y	: Kusur geometrik faktörü
K_{Ic}	: Kritik gerilme şiddet faktörü veya kırılma tokluğu
H_V	: Vickers mikro sertlik
P	: Vickers indentasyon yükü
d	: Vickers İndentasyon izi köşegen uzunluğu, karakteristik boyut
a	: Vickers İndentasyon izi köşegen uzunluğunun yarısı
c ve l	: Çatlak uzunlukları
c_i	: İndentasyon kusur uzunluğu

S	: Mukavemet
σ_f	: ASTM C1499-03 standardına uygun olarak kullanılan halka üstü halka testi denkleminde kırılma mukavemeti
F	: Kırılma yükü
θ	: Poisson oranı
D_S	: Destek halkası
D_L	: Yük halkası
D	: ASTM C1499-03 standardına uygun olarak kullanılan halka üstü halka testi denkleminde test numunesi çapı
p_f	: Hasarlanmama olasılığı
p_s	: Hayatta kalma olasılığı
σ_0	: Weibull mukavemeti
m	: Weibull modülüsü, metre
r_m	: Ayna-sis yarıçapı
r_h	: Sis-parça yarıçapı
r_{cb}	: Çatlak dallanması yarıçapı
A_m	: Ayna sabiti
A_h	: Parça sabiti
A_{cb}	: Çatlak dallanma sabiti
h	: ASTM C1499-03 standardına uygun olarak kullanılan halka üstü halka testi denkleminde test numunesi kalınlığı, Christiansen-Shelyubskii homojenite yöntemi denkleminde yarı genişlik, soğutma hızı
τ_m	: Maksimum geçirgenlik
b	: Şekil faktörü
C_R	: Soğutma hızı
C_P	: Özgül ısı
k	: Isıl iletkenlik
α_s	: Isıl genleşme katsayısı
r	: Pearson korelasyon katsayısı
R^2	: Determinasyon katsayısı
Pa	: Paskal
MPa	: Megapaskal
GPa	: Gigapaskal

mm	: Milimetre
nm	: Nanometre
μm	: Mikrometre
N	: Newton
kN	: Kilonewton
J	: Joule
dk	: Dakika
s	: Saniye
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
K	: Kelvin
CN	: V şekilli (Şevron) çentik yöntemi
DCB	: Çift ankastre kiriş yöntemi
DCDC	: Çift ankastre delikli sıkıştırma yöntemi
DT	: Çift burma yöntemi
SCF	: Eğilme yüzey çatlağı yöntemi
SEPB	: Tek kenarlı önceden çatlatılmış kiriş yöntemi
SNB	: Düz çentiklenmiş kiriş yöntemi
UV	: Ultraviyole
VIF	: Vickers indentasyon yöntemi
XRD	: X ışını kırınım analizi

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: a) Kristalin, b) Amorf yapının atomsal dizilimi.	3
2.2: Spesifik hacim-sıcaklık ilişkisi.	4
2.3: Ticari soda kireç silikat camlarının kullanıldığı üç büyük sektöre ilişkin a) Toplam endüstriyel cam üretim fırını adedi, b) Toplam endüstriyel cam üretim miktarı, ton/yıl bilgileri 22.02.2022 tarihi itibari ile güncel olarak verilmektedir.	6
2.4: Ticari cam kompozisyonu bileşenleri.	7
2.5: a) Silika tetrahedronu, b) Soda kireç silikat cam yapısı.	8
2.6: Ana bileşenlerin cam özelliklerine etkileri.	10
2.7: Yüzdürme teknolojisi kullanımı ile ticari düz cam üretim prosesi.	12
2.8: Üniform çekme yükü σ , altındaki sonsuz bir plakadaki uzunluğu $2c$ minör eksen $2b$ olan eliptik bir kusur.	15
2.9: Griffith'in enerji dengesi yaklaşımı.	16
2.10: Üç kırılma modu sırasıyla Mod I-Açma, Mod II-Kayma ve Mod III-Yırtılma.	18
2.11: İdealleştirilmiş çatlak ucu.	18
2.12: Yarı sonsuz bir plakada a) çizgisel F yükleri altındaki giriş açıklığı yüklemeli düz kenar çatlağı, b) noktasal P yükleri altındaki merkez yüklemeli yüzey Half-Penny çatlağı.	20
2.13: Vickers piramit elmas indenterının cam yüzeyine teması sonucu oluşan çatlak geometrileri.	22
2.14: Yüzey kusur boyutu mukavemet ilişkisi.	27
2.15: Eş iki eksenli mukavemet test yöntemi için test numunesi ve temel fiktürün kesit görünümü.	29
2.16: Doğrusal regresyon yöntemi ve Weibull parametreleri arasındaki ilişki.	31
2.17: Cam kırık yüzeyinde gözlemlenmiş olan pürüzsüz ayna bölgesi, sis bölgesi ve parça bölgesi.	33
2.18: Kırık yüzeyindeki karakteristik bölgelerin terminal çatlak hız değerleri ve gerilme şiddet faktörü K_I diyagramı.	33

2.19:	Dallanma açısı ve çift eksenli gerilme ilişkisi.	34
2.20:	(a) Kimyasal kompozisyonun bir fonksiyonu olarak $R_2O \cdot SiO_2$ ($R = Li, Na, K$) sistemine sahip camların ısı genleşme katsayıları. (b) Kimyasal kompozisyonun bir fonksiyonu olarak $R_2O \cdot B_2O_3$ ($R=Li, Na, K$) sistemine sahip alkali borat camların ısı genleşme katsayıları.	37
2.21:	Birbirlerinden farklı kimyasal kompozisyonlara sahip endüstriyel cam türlerine ait viskozite sıcaklık değişimi.	40
2.22:	(a) İnce tavlama döngüsü, (b) Isıtma esnasında temsili zamanlarda sıcaklık dağılımının fonksiyonu olarak camda oluşan gerilmenin şematik gösterimi (c) Soğutma esnasında temsili zamanlarda sıcaklık dağılımının fonksiyonu olarak camda oluşan gerilmenin şematik gösterimi.	44
2.23	Düz cam ısı temperleme prosesinin şematik gösterimi.	46
2.24:	Isı temperleme prosesine tabi tutulmuş bir camda artık gerilme oluşumunun şematik gösterimi.	47
2.25:	Ticari cam ürününde ısı temperleme sonucu oluşan parabolik basma ve çekme artık gerilme profili.	48
2.26	Optik ölçümün şematik gösterimi.	52
3.1:	Tez kapsamında kullanılan düz cam numune özellikleri.	54
3.2:	(a) UV lamba kalay dedektörü, (b) ASTM C1048-12 standardına uygun olarak belirlenen fotoelastik ölçüm bölgeleri.	56
3.3:	SCALP-05 cihazı, fotoelastik ölçüm bölgeleri ve düz cam numunesi, fotoelastik ölçüm anı ve sonucu.	58
3.4:	Mikro sertlik ölçüm cihazı, düz cam numunesi ve Vickers indentasyon yüklerinin uygulanacağı ölçüm bölgeleri, Vickers indentasyon yüklerinin uygulanma anı.	60
3.5:	Vickers indentasyon izi diyagonal uzunlukları, çatlak uzunluğu l'nin ölçüm yönü, 9,81 N ve 29,42 N Vickers indentasyon yükleri etkisiyle tavllanmış ve ısı temperlenmiş numunelerin kalay yüzeylerinde oluşan mikro boyutta çatlak örnekleri.	62

3.6:	Halka üstü halka test yöntemi için kullanılan test numune özellikleri ve Vickers indentasyon yükünün test numune merkezine uygulanma anı	65
3.7:	Halka üstü halka test yöntemi için kullanılmış olan düzenek ve yükün test numunesinin merkezine uygulanma anı.	66
3.8:	Boyut, ısıtma işlem ve Vickers indentasyon yükü parametrelerine bağıntılı olarak test numunelerinin kırılma davranışı ve ImageJ programı vasıtası ile 100 mm x 100 mm yüzey alanı üzerinden belirlenen radyal çatlak adetleri.	67
3.9:	Nikon® SMZ1500 Stereo Mikroskop vasıtası ile karakteristik kırık yüzeylerinin belirlenmesi.	68
3.10:	Homojenite faktörü belirlenecek test numunelerinin özellikleri ve homojenite faktörü ölçüm bölgeleri.	70
3.11:	Homojenite faktörü belirlenecek test numunelerinin hazırlanması.	70
3.12:	Homojenite test düzeneği ve ölçüm anı.	71
4.1:	Tavlınmış numunelerin merkez ölçüm bölgesi (C)'den SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma artık gerilmelerinin ölçüm değeri aralığı.	76
4.2:	Tavlınmış numunelerin merkez ölçüm bölgesi (C)'den SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş merkez çekme artık gerilmelerinin ölçüm değeri aralığı.	77
4.3:	Homojenite faktörü belirlenecek tavlınmış numunelerin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma artık gerilmelerinin ölçüm değeri aralıkları.	78
4.4:	Homojenite faktörü belirlenecek tavlınmış numunelerin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş merkez çekme artık gerilmelerinin ölçüm değeri aralıkları.	78
4.5:	Isıl temperlenmiş numunelerin merkez ölçüm bölgesi (C)'den SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma artık gerilmelerinin ölçüm değeri aralığı.	80
4.6:	Isıl temperlenmiş numunelerin merkez ölçüm bölgesi (C)'den SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş merkez çekme artık gerilmelerinin ölçüm değeri aralığı.	80

4.7:	Isıl temperlenmiş numunelerin merkez ölçüm bölgesi (C)'den SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma artık gerilmelerinin merkez çekme artık gerilmelerine oranının sonuç değer aralığı.	81
4.8:	Homojenite faktörü belirlenecek ısı temperlenmiş numunelerin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma artık gerilmelerinin ölçüm değer aralıkları.	82
4.9:	Homojenite faktörü belirlenecek ısı temperlenmiş numunelerin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş merkez çekme artık gerilmelerinin ölçüm değer aralıkları.	83
4.10:	Homojenite faktörü belirlenecek ısı temperlenmiş numunelerinin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma artık gerilmelerinin merkez çekme artık gerilmelerine oranının sonuç değer aralığı.	83
4.11:	Tavlanmış ve ısı temperlenmiş numunelerin yüzeylerinde 9,81 N ve 29,42 N yükleri uygulanarak oluşturulan Vickers indentasyon izi diyagonal uzunluk değer aralıkları.	95
4.12:	Tavlanmış ve ısı temperlenmiş numunelerin yüzeylerinde 9,81 N ve 29,42 N yükleri uygulanması neticesinde elde edilen Vickers indentasyon sertlik değer aralıkları.	96
4.13:	Tavlanmış ve ısı temperlenmiş numunelerin yüzeylerinde 9,81 N ve 29,42 N yükleri uygulanması neticesinde oluşan ve 1 dk sonrasında ölçülen Vickers indentasyon çatlak uzunluk (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4) değer aralıkları.	98
4.14:	Tavlanmış ve ısı temperlenmiş numunelerin yüzeylerinde 9,81 N ve 29,42 N yükleri uygulanması neticesinde oluşan ve 1 hafta sonrasında ölçülen Vickers indentasyon çatlak uzunluk (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4) değer aralıkları.	99
4.15:	Tavlanmış ve ısı temperlenmiş numunelerin yüzeylerinde 9,81 N ve 29,42 N yükleri uygulanması neticesinde elde edilen çatlak uzunluklarının (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4) konumlarına göre Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına (a_x ; a_y) oranları.	101

- 4.16: Tavlanmış ve ısıt temperlenmiş numunelerde literatürde artık 102
gerilmesiz durumda Half-Penny geometrisi için kullanılan denkleme
ait kırılma tokluğu sonuç değeri aralıkları.
- 4.17: Tavlanmış ve ısıt temperlenmiş numunelerde literatürde Palmqvist 103
geometrisi için kullanılan denkleme ait kırılma tokluğu sonuç değeri
aralıkları.
- 4.18: Tavlanmış ve ısıt temperlenmiş numunelerde literatürde artık gerilmeli 105
durumda Half-Penny geometrisi için kullanılan denkleme ait kırılma
tokluğu sonuç değeri aralıkları.
- 4.19: Farklı parametrelere sahip test numunelerinin halka üstü halka testine 117
tabi tutulması sonucunda denklem 2.16 vasıtası ile elde edilmiş kırılma
mukavemeti σ_f sonuç değeri aralıkları.
- 4.20: Farklı parametrelere sahip test numunelerinin halka üstü halka testine 118
tabi tutulması sonucunda ImageJ programı vasıtası ile belirlenmiş
radyal çatlak adedi sonuç değeri aralıkları.
- 4.21: a) İndentasyon yükü uygulanmamış, b) 9,81 N indentasyon yükü 121
uygulanmış, c) 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış standart
boyutlara sahip tavlanmış numuneler için Origin® programı vasıtası
ile belirlenmiş olan Weibull parametreleri.
- 4.22: a) İndentasyon yükü uygulanmamış, b) 9,81 N indentasyon yükü 122
uygulanmış, c) 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış ticari boyutlara
sahip tavlanmış numuneler için Origin® programı vasıtası ile
belirlenmiş olan Weibull parametreleri.
- 4.23: a) İndentasyon yükü uygulanmamış, b) 9,81 N indentasyon yükü 123
uygulanmış, c) 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış ısıt
temperlenmiş numuneler için Origin® programı vasıtası ile
belirlenmiş olan Weibull parametreleri.
- 4.24: Farklı Vickers indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlardaki 125
tavlanmış numunelerden Nikon® SMZ1500 Stereo Mikroskop vasıtası
ile belirlenmiş ayna yarıçapı r_m değeri.

- 4.25: a) İndentasyon yükü uygulanmamış, b) 9,81 N indentasyon yükü 128 uygulanmış, c) 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan radyal çatlak adedi-mukavemet ilişkisi.
- 4.26: a) İndentasyon yükü uygulanmamış, b) 9,81 N indentasyon yükü 129 uygulanmış, c) 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış ticari boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan radyal çatlak adedi-mukavemet ilişkisi.
- 4.27: a) İndentasyon yükü uygulanmamış, b) 9,81 N indentasyon yükü 130 uygulanmış, c) 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış ısı temperlenmiş numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan radyal çatlak adedi-mukavemet ilişkisi.
- 4.28: a) İndentasyon yükü uygulanmamış ticari boyutlara sahip tavllanmış 132 numuneler ve b) indentasyon yükü uygulanmamış ısı temperlenmiş numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan yüzey basma gerilmesi-mukavemet ilişkisi.
- 4.29: a) İndentasyon yükü uygulanmamış ticari boyutlara sahip tavllanmış 134 numuneler ve b) indentasyon yükü uygulanmamış ısı temperlenmiş numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan yüzey basma gerilmesi-radyal çatlak adedi ilişkisi.
- 4.30: a) 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip 135 tavllanmış numuneler için b) 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan ayna yarıçapı r_m -mukavemet ilişkisi.
- 4.31: a) 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip 136 tavllanmış numuneler için b) 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan ayna yarıçapı r_m -radyal çatlak adedi ilişkisi.

- 4.32: Numune 76* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃, K₄ bölgelerinden 138
homojenite test düzeneği vasıtasıyla elde edilmiş maksimum
geçirgenlik yüzdesi τ_m , yarı genişlik mesafesi h parametrelerine ait
değerler.
- 4.33: Numune 78* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃, K₄ bölgelerinden 139
homojenite test düzeneği vasıtasıyla elde edilmiş maksimum
geçirgenlik yüzdesi τ_m , yarı genişlik mesafesi h parametrelerine ait
değerler.
- 4.34: Numune 2* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃, K₄ bölgelerinden 140
homojenite test düzeneği vasıtasıyla elde edilmiş maksimum geçirgenlik yüzdesi
 τ_m , yarı genişlik mesafesi h parametrelerine ait değerler.
- 4.35: Numune 55* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃, K₄ bölgelerinden 141
homojenite test düzeneği vasıtasıyla elde edilmiş maksimum
geçirgenlik yüzdesi τ_m , yarı genişlik mesafesi h parametrelerine ait
değerler.
- 4.36: Numune 76* ve Numune 78* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ 142
ölçüm bölgelerinden elde edilmiş homojenite faktörü sonuç değer
aralıkları.
- 4.37: Numune 2* ve Numune 55* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ ölçüm 143
bölgelerinden elde edilmiş homojenite faktörü sonuç değer aralıkları.
- 4.38: Tavlanmış ve ısıt temperlenmiş test numuneleri için A, B, C, D, E, K₁, 145
K₂, K₃ ve K₄ ölçüm bölgelerinden elde edilmiş homojenite faktörü
sonuç değer aralıkları.
- 4.39: Tavlanmış (Numune 76*, Numune 78*) numuneleri için Pearson 146
korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan
homojenite faktörü dereceleri-yüzey basma gerilmesi ilişkisi.
- 4.40: Isıt temperlenmiş (Numune 2*, Numune 55*) numuneleri için Pearson 147
korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan
homojenite faktörü dereceleri-yüzey basma gerilmesi ilişkisi.

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Ticari soda kireç silikat camı kompozisyonları.	13
2.2: Kusur geometrik faktörü Y, değerleri.	19
2.3: Ticari soda kireç silikat camları için kırılma tokluğu değerleri.	21
2.4: Farklı cam türlerine ait Vickers mikro sertlik değerleri.	23
3.1: Tez kapsamında kullanılan düz cam numunelerinin kompozisyonu.	54
4.1: Tavlanmış numunelerin kalay yüzeylerinde merkez ölçüm bölgesi C üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş artık gerilme değerleri.	73
4.2: Homojenite faktörü belirlenecek numunelerin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş artık gerilme değerleri.	73
4.3: Isıl temperlenmiş numunelerin kalay yüzeylerinde merkez ölçüm bölgesi C üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş artık gerilme değerleri.	75
4.4: Homojenite faktörü belirlenecek numunelerin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş artık gerilme değerleri.	75
4.5: 9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan çatlağın Vickers indentasyon izi diyagonal uzunlukları ve Vickers indentasyon sertlik değerleri.	86
4.6: 29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan çatlağın Vickers indentasyon izi diyagonal uzunlukları ve Vickers indentasyon sertlik değerleri.	86
4.7: 9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan l ₁ , l ₂ , l ₃ ve l ₄ olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının test uygulandıktan 1 dakika ve 1 hafta sonra ölçülen değerleri.	87
4.8: 29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan l ₁ , l ₂ , l ₃ ve l ₄ olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının test uygulandıktan 1 dakika ve 1 hafta sonra ölçülen değerleri.	87

4.9:	9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan dikey konumda (c_1 ; c_3) ve yatay konumda (c_2 ; c_4) olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının konumlarına göre dikey konumda (a_y) yatay konumda (a_x) olarak isimlendirilen Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına oranları.	88
4.10:	29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan dikey konumda (c_1 ; c_3) ve yatay konumda (c_2 ; c_4) olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının konumlarına göre dikey konumda (a_y) yatay konumda (a_x) olarak isimlendirilen Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına oranları.	88
4.11:	9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşabilecek Half-Penny ve Palmqvist çatlak geometrileri için kullanılan kırılma tokluğu denklemlerine ait hesaplanan kırılma tokluğu değerleri.	89
4.12:	29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşabilecek Half-Penny ve Palmqvist çatlak geometrileri için kullanılan kırılma tokluğu denklemlerine ait hesaplanan kırılma tokluğu değerleri.	89
4.13:	9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan çatlağın Vickers indentasyon izi diyagonal uzunlukları ve Vickers indentasyon sertlik değerleri.	91
4.14:	29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan çatlağın Vickers indentasyon izi diyagonal uzunlukları ve Vickers indentasyon sertlik değerleri.	91
4.15:	9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan l_1 , l_2 , l_3 ve l_4 olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının test uygulandıktan 1 dakika ve 1 hafta sonra ölçülen değerleri.	92
4.16:	29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan l_1 , l_2 , l_3 ve l_4 olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının test uygulandıktan 1 dakika ve 1 hafta sonra ölçülen değerleri.	92
4.17:	9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan dikey konumda (c_1 ; c_3) ve yatay konumda (c_2 ; c_4) olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının konumlarına göre dikey konumda (a_y) yatay konumda (a_x) olarak isimlendirilen Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına oranları.	93

4.18:	29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan dikey konumda (c_1 ; c_3) ve yatay konumda (c_2 ; c_4) olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının konumlarına göre dikey konumda (a_y) yatay konumda (a_x) olarak isimlendirilen Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına oranları.	93
4.19:	9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşabilecek Half-Penny ve Palmqvist çatlak geometrileri için kullanılan kırılma tokluğu denklemlerine ait hesaplanan kırılma tokluğu değerleri.	94
4.20:	29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşabilecek Half-Penny ve Palmqvist çatlak geometrileri için kullanılan kırılma tokluğu denklemlerine ait hesaplanan kırılma tokluğu değerleri.	94
4.21:	9,81 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.	108
4.22:	29,42 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.	108
4.23:	Vickers indentasyon yükü uygulanmamış standart boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.	109
4.24:	9,81 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış ticari boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.	111
4.25:	29,42 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış ticari boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.	111
4.26:	Vickers indentasyon yükü uygulanmamış ticari boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.	112
4.27:	9,81 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış ticari boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.	114

- 4.28: 29,42 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış ticari boyutlardaki 114
numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde
edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.
- 4.29: Vickers indentasyon yükü uygulanmamış ticari boyutlardaki 115
numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde
edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.



1. GİRİŞ, AMAÇ, KATKI VE İÇERİK

Günümüz dünyasındaki teknolojik gelişmeler doğrultusunda artan rekabet koşulları endüstriyel cam üretimine kalite, sürdürülebilirlik, ekonomi, döngüsel ekonomi, verimlilik, zaman ve enerji tasarrufu kavramlarını kazandırmıştır. Bu kavramlar doğrultusunda ise endüstriyel cam üretiminde üretilen cam kompozisyonunun seçimini ürün beklentileri, proses beklentileri ve ekonomik beklentilere ait hususlar oluşturmaktadır. Günümüzde büyük ölçekli endüstriyel cam üretim prosesleri için en yaygın olarak tercih edilen kompozisyonlar soda kireç silikat cam türüne aittir. Soda kireç silikat cam türünün yaygın olarak kullanılmasında büyük ölçekli seri üretime uygunluğunun yanı sıra ürün, proses ve ekonomik beklentileri karşılaması gibi özellikleri ön plana çıkmaktadır. Soda kireç silikat camları büyük ölçekli üretim yapılan düz cam, cam ev eşyası ve cam ambalaj malzemeleri gibi dünya cam endüstrisinin üç büyük sektöründe kompozisyonel avantajları nedeniyle tercih edilip kullanılmaktadır.

Camlar amorf yapıda, şeffaf, kimyasal olarak kararlı, sürdürülebilirlik ve enerji tasarrufu açısından geri dönüştürülebilir olmalarının yanı sıra üretim ve kullanım kaynaklı yüzey kusurlarının da etkisiyle kırılabilir malzemelerdir. Bu durum cam malzemelerin kullanım alanlarının sınırlandırılmasına yol açmaktadır. Bu nedenle günlük hayatımızda ve farklı teknolojik alanlarda cam malzemelerin kullanımını arttırmak için mekanik özelliklerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda endüstriyel cam üreticileri camların mukavemetlerini arttırabilmek için zaman içerisinde çok çeşitli teknikler geliştirdiler. Günümüzde camların endüstriyel olarak üretimi esnasında yüzeylerinde meydana gelen kusurların oluşmasını ve ilerlemesini engellemek açısından mekanik mukavemeti artırma tekniklerinden yaygın olarak kullanılanlardan birisi ısı temperleme tekniğidir. Isıl temperleme tekniğinde endüstriyel cam ürünü, camsı geçiş sıcaklığının üzerinde ve yumuşama sıcaklığının altındaki homojen bir sıcaklıktan kontrollü bir hız ile gerilme noktasının altındaki bir sıcaklığa homojen olarak soğutulmaktadır. Soğutma esnasında camın yüzeyi ve merkezi arasında sıcaklık farkları oluşmaktadır. Bu sıcaklık farklarının etkisiyle oda sıcaklığında camın yüzeyinde basma ve merkezinde ise çekme artık gerilmeleri oluşmaktadır. Oluşan artık gerilmelerin de etkisiyle ısıl temperleme tekniği kullanılmış camlar kırıldıklarında küçük kör parçalara ayrılmaktadır. Dolayısıyla ısıl

temperleme tekniği kullanılan camlar güvenlik camı olarak da adlandırılmakta olup mimari, otomotiv, cam ev eşyası ve cam ambalaj malzemeleri gibi büyük sektörlerde kullanılmaktadır. Ürün ve proses beklentileri kapsamında hedeflenen kalitede bir ısı temperleme prosesi için kullanılacak cam ürününün iyi bir tavlama ısı işleminden geçirilerek artık gerilmelerin istenilen optimum seviyede tutulması, kabarcık, kapanım, nikel sülfür gibi safsızlıkların giderilmesi, homojen olmayan sıcaklık farklarının önüne geçilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla cam üretim prosesi birçok parametreyle birbirine bağlı zincir basamaklardan oluşmakta olup her bir parametrenin optimize edilmesi ürün, proses ve ekonomik beklentiler açısından oldukça önemlidir.

Tez kapsamında, Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. Şişecam Düzcamlar Mersin Fabrikası ortam koşullarında tavllanmış ve ısı temperli olarak üretilen 500 mm uzunluğunda 400 mm genişliğinde ve 4 mm kalınlığında ticari ürün boyutlarına sahip soda kireç silikat camlarının bünyelerinde oluşan artık gerilmelerin modern tahribatsız fotoelastisite yöntemi ile ölçülmesi ve ölçülen artık gerilmelerin mekanik özelliklere etkilerinin irdelenmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda tezin deneysel içeriği; “tavlanmış ve ısı temperlenmiş numunelerde üretim&proses kaynaklı oluşan artık gerilmelerin profillerinin belirlenmesi”, “numunelere uygulanan Vickers indentasyon yüküne ve niceliğine bağıntılı olarak sertlik, kusur boyutu ve tokluk değerlerinin belirlenmesi”, “numunelerdeki boyut, ısı işlem ve indentasyon yükü farkı gibi parametrelerin yük altındaki davranışlara etkilerinin halka üstü halka eş iki eksenli eğme testi vasıtasıyla belirlenmesi”, “tahribatlı olarak halka üstü halka eğme testi vasıtasıyla yük altında kırılan farklı parametrelere sahip numunelerin mukavemet, radyal çatlak adedi ve Weibull parametrelerinin belirlenmesi”, “kesilerek yüzey alanı küçültülen ve farklı indentasyon yükleri uygulanan tavllanmış numunelerin yük altında kırıldıktan sonra kırık analizlerinin incelenmesi ve ayna yarıçapı değerlerinin belirlenmesi”, “Christiansen-Shelyubskii homojenite yöntemi kullanılarak numunelerin homojenite faktörü derecelerinin belirlenmesi” ve “tez kapsamında deneysel çalışmalar sonucu elde edilmiş değişkenlerin Pearson korelasyon ilişkilerinin belirlenmesi” aşamalarından oluşmaktadır.

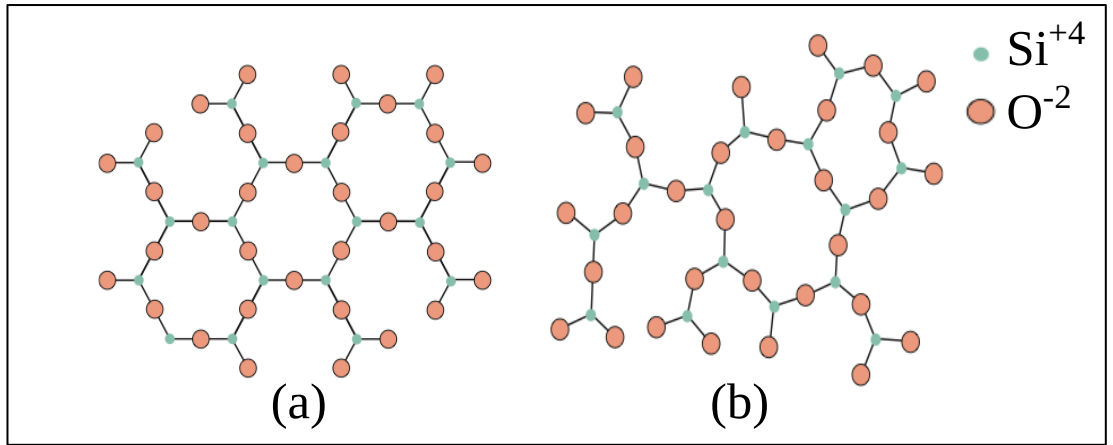
2. TEORİK BİLGİ

2.1. Camın Tanımı ve Yapısı

2.1.1. Giriş

Amorf yapıya sahip oldukları bilinen cam malzemeler, ergimiş durumda olan bir sıvının kristal olmayan bir katıya dönüşmesini sağlayacak şekilde soğuyabilen, termodinamik açıdan kararsız, kimyasal açıdan kararlı, yüksek viskoziteli, şeffaf, sert ve dayanıklı aynı zamanda kırılğan ve geri dönüştürülebilir malzemeler olarak tanımlanmaktadır [1]-[6].

X ışını kırınım analizi XRD, vasıtasıyla cam malzemelerin uzun mesafeli düzensiz bir yapıya sahip oldukları sergilenmiştir. Dolayısıyla cam malzemeler, kristalin yapıli malzemelerin aksine periyodik olarak sürekli tekrar eden düzenli yapıları olmayan malzemelerdir [1], [2], [5], [6]. Silisyum ve oksijen atomlarının oluşturduğu kristalin ve amorf yapının atomsal dizilimi Şekil 2.1 ile verilmektedir [7].

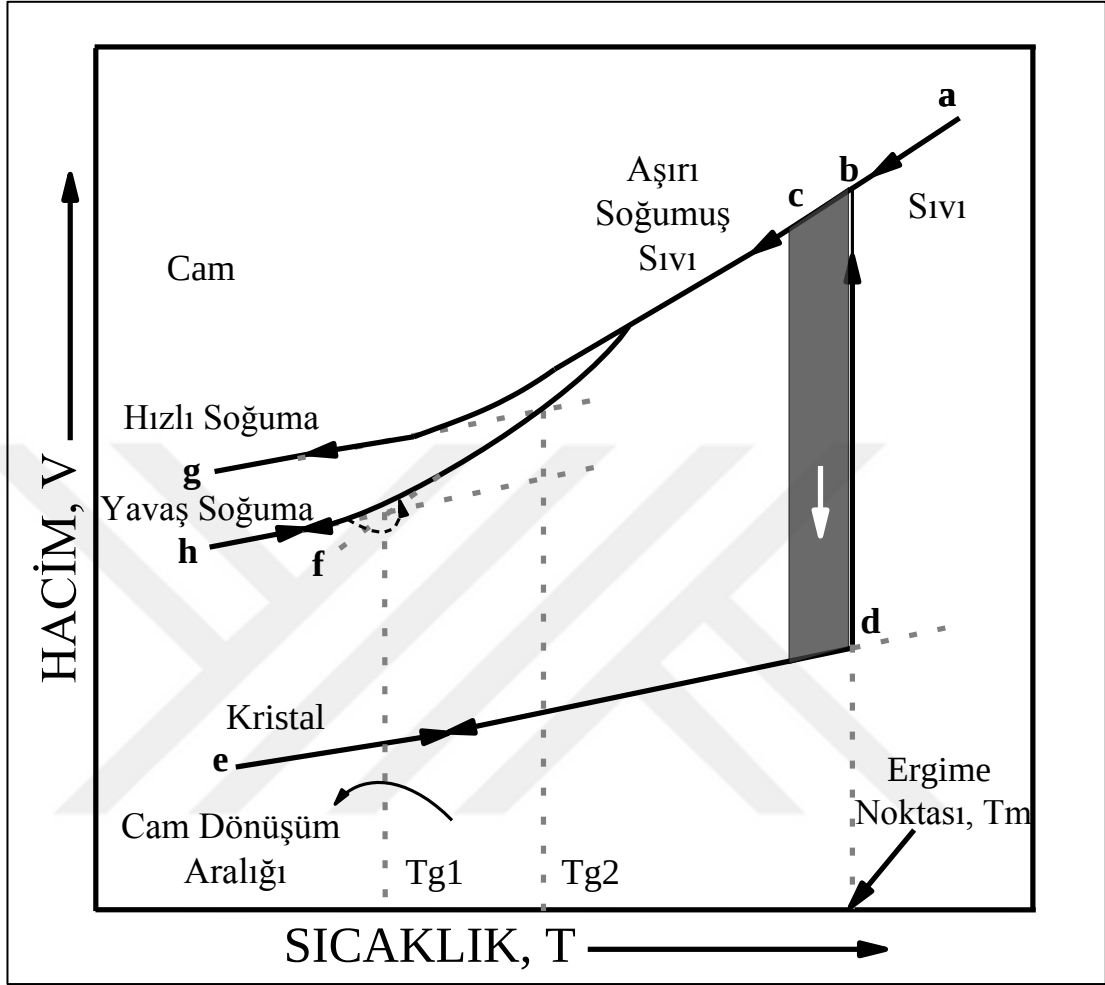


Şekil 2.1: a) Kristalin, b) Amorf yapının atomsal dizilimi.

2.1.2. Sıcaklık-Hacim İlişkisi

Amorf yapıya sahip cam malzemeler, kristalin yapıli malzemeler gibi kesin bir ergime noktasına sahip değildirler [2]. Ticari cam malzemelerin kullanım alanlarının belirlenmesinde önemli bir yer tutan ve yüksek sıcaklıkta ticari olarak oluşturulan sıvı

cam çözeltilerinin kompozisyonlarına göre değişebilen sıcaklık-hacim ilişkisi Şekil 2.2 ile verilmektedir [2].



Şekil 2.2: Spesifik hacim-sıcaklık ilişkisi.

Yüksek sıcaklıktaki “a” konumunda bulunan sıvı kütlesi soğutma hızının yeterince yüksek olduğu durumda “abc” çizgisinin devamı niteliğinde olan “bcf” çizgisi boyunca aşırı soğutulmuş sıvı durumuna geçmektedir. Sıvının hacmi, daha düşük sıcaklık ve daha düşük enerjinin etkisiyle “bcf” çizgisi boyunca sürekli küçülme eğilimi göstermektedir. Soğutma devam ettikçe moleküllerin hareketlerinin kısıtlanmasıyla birlikte sistemin viskozitesi artmaktadır. Aşırı soğutulmuş sıvı konumundan ayrılmanın başlangıcı ile hızlı soğutulduğunda “g” noktasında, yavaş soğutulduğunda “h” noktasında biten ve dolayısıyla görünüşte katı bir koşulun tamamlanması ile sonuçlanan kısmın arasındaki düzgün eğri, cam geçiş bölgesi veya cam dönüşüm aralığı olarak adlandırılmaktadır ve basitçe “Tg” aralığı olarak

kısıtlanmaktadır. Aşırı soğutulmuş sıvı konumundan ayrılma soğutma hızı ile orantılıdır. Aşırı soğutulmuş sıvı konumunda nispeten daha yavaş soğutma hızı uygulandığında, yapı “bcf” çizgisi boyunca daha uzun süre kalmaktadır ve bu durum yapının kendisini düzenlemesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenin etkisiyle “g” konumundaki hızlı soğutulan cama göre nispeten daha yavaş soğutma hızı ile soğutulan “h” konumundaki cam daha düşük bir hacime ve daha yüksek bir yoğunluğa sahip olmaktadır [2], [6].

2.2. Ticari Soda Kireç Silikat Camları

2.2.1. Giriş

Günümüz dünyasındaki teknolojik gelişmeler doğrultusunda artan rekabet koşulları endüstriyel cam üretimine kalite, sürdürülebilirlik, ekonomi, döngüsel ekonomi, verimlilik, zaman ve enerji tasarrufu kavramlarını kazandırmıştır. Bu kavramlar doğrultusunda endüstriyel cam üretiminde üretilecek cam kompozisyonunun seçimini üç ana husus oluşturmaktadır;

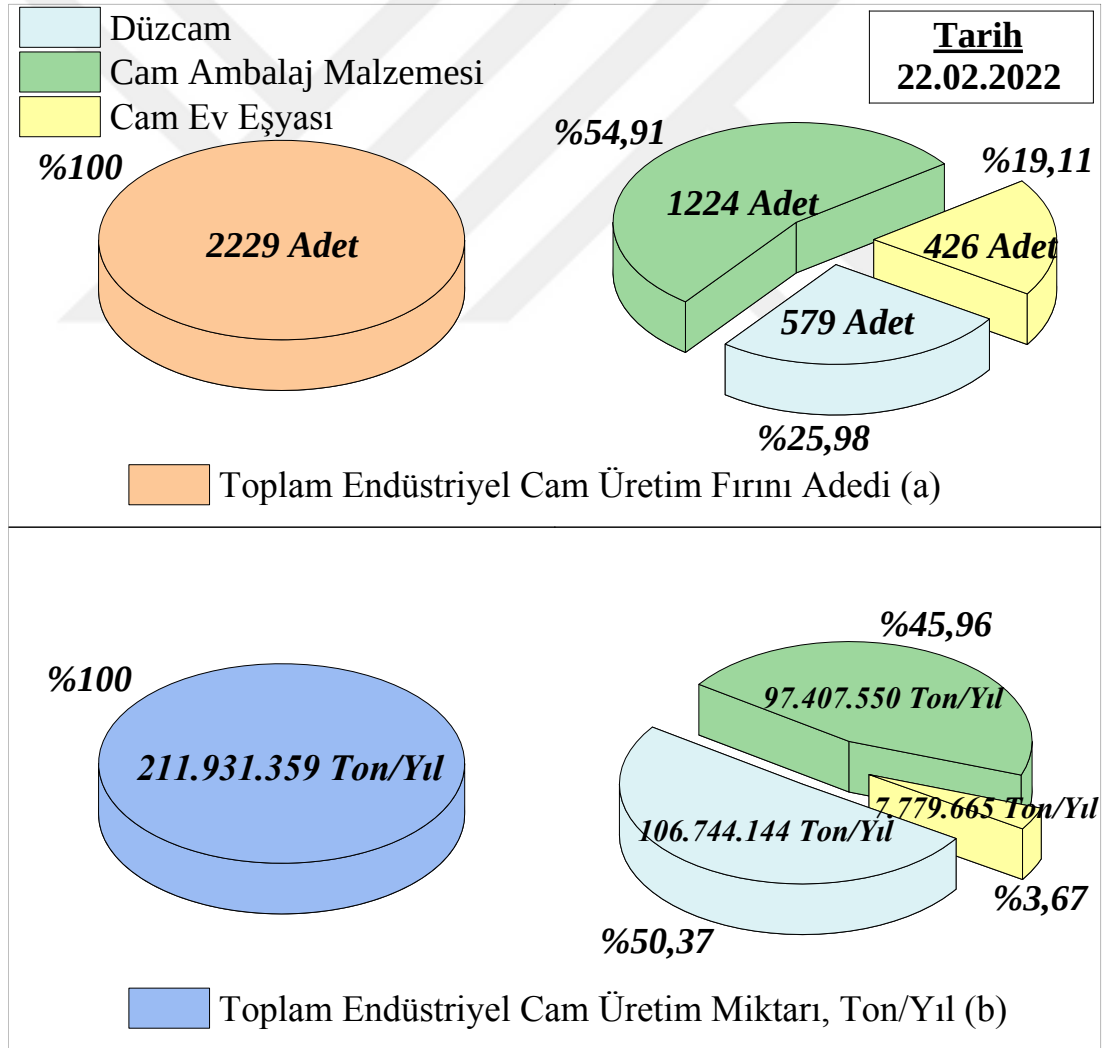
- Ürün Beklentileri: Üretilecek olan cam malzemesinin nihai ürünün bütün özelliklerini hedeflendiği şekilde karşılayabilmesi dolayısıyla kullanım koşullarına ve tüketici taleplerine göre optimize edilebilmesi,
- Proses Beklentileri: Prosesteeki zorlukları gidermek, zamanı ve enerjiyi tasarruflu kullanarak yüksek seri üretim hızlarına çıkabilmek, cam özellikleri ve standartları kapsamında kompozisyona bazı elementlerin eklenebilmesi,
- Ekonomik Beklentiler: Üretilecek olan cam malzemesinin kendi pazar koşullarına uygun maliyetler içinde kalması dolayısıyla ürün beklentileri ve proses beklentilerini optimize edebilmek açısından uygun hammadde ve ergitme koşullarının oluşturulabilmesi gerekmektedir.

Hedeflenen nihai kompozisyon bu hususları sağlamalıdır [8], [9].

Günümüzde büyük ölçekli endüstriyel cam üretim prosesleri için en yaygın olarak tercih edilen kompozisyonlar soda kireç silikat cam türüne aittir. Bu kompozisyonlar tipik bir şekilde ağırlıkça %70-75 SiO₂, %12-16 Na₂O ve %10-15

CaO ana bileşenlerini ve proses beklentileri ve istenilen nihai ürün özelliklerine göre ilave yardımcı bileşenleri içermektedir. Soda kireç silikat cam türünün yaygın olarak kullanılmasında büyük ölçekli seri üretime uygunluğunun yanı sıra ürün, proses ve ekonomik beklentileri karşılaması gibi özellikleri ön plana çıkmaktadır. Soda kireç silikat camları büyük ölçekli üretim yapılan düz cam, cam ev eşyası ve cam ambalaj malzemeleri gibi dünya cam endüstrisinin üç büyük sektöründe kompozisyonel avantajları nedeniyle tercih edilip kullanılmaktadır [1], [10]-[15].

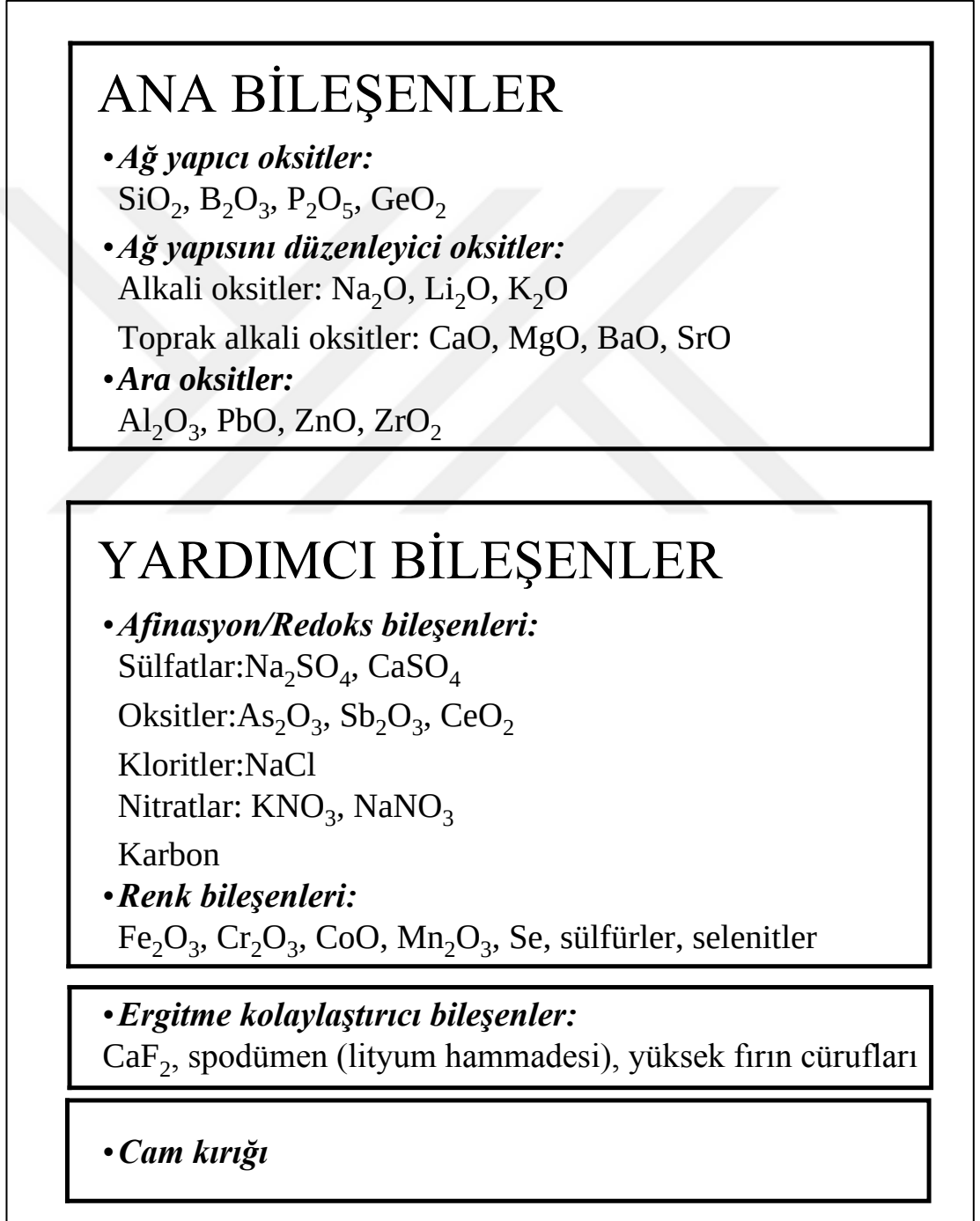
Dünya genelinde, 93 ülke sınırı içerisinde 1161 lokasyonda büyük ölçekli üretimi yapılan soda kireç silikat cam türüne ait üç büyük sektöre ilişkin toplam endüstriyel üretim firmı adedi ve yıllık cam üretim miktarlarına ait güncel veriler Şekil 2.3 ile verilmektedir [16].



Şekil 2.3: Ticari soda kireç silikat camlarının kullanıldığı üç büyük sektöre ilişkin a) Toplam endüstriyel cam üretim firmı adedi, b) Toplam endüstriyel cam üretim miktarı, ton/yıl bilgileri 22.02.2022 tarihi itibarı ile güncel olarak verilmektedir.

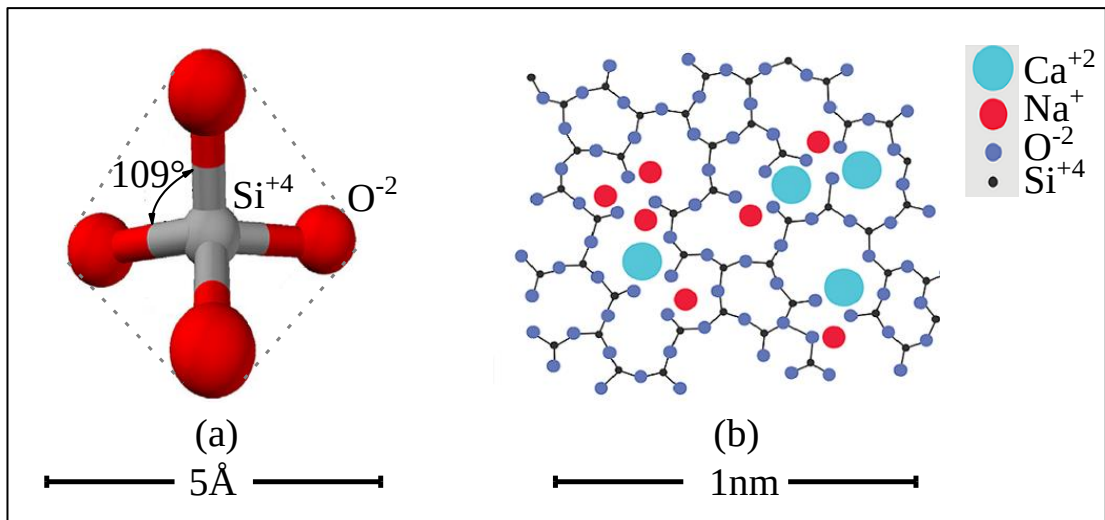
2.2.2. Ticari Cam Kompozisyonu Bileşenleri

Endüstriyel cam üretiminde oksitlerden oluşturulmuş cam kompozisyonlarına ilave edilen her bir element camın ergitilmesinden nihai ürün haline gelmesine kadar olan süreç içerisinde üstlendikleri fonksiyonlara göre sınıflandırılmaktadır ve bu sınıflandırma Şekil 2.4 ile verilmektedir [17].



Şekil 2.4: Ticari cam kompozisyonu bileşenleri.

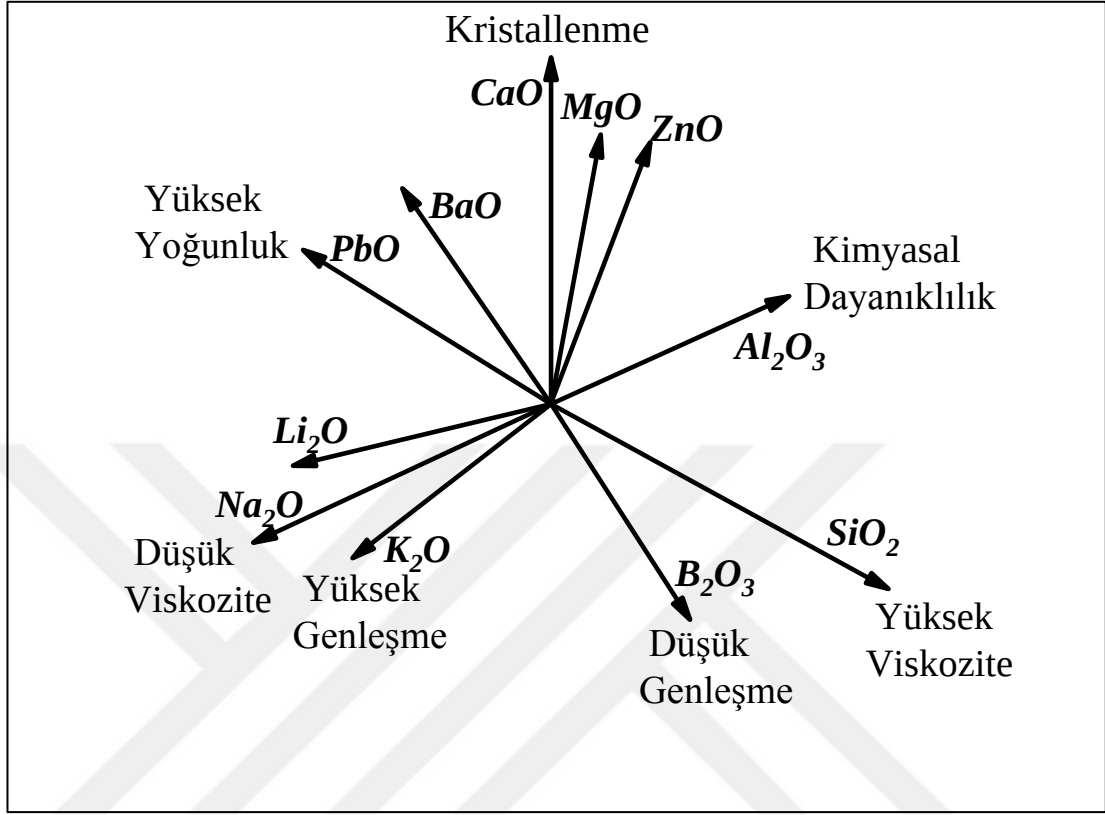
Herhangi bir bileşen eklenmesine gereksinim duymayarak cam oluşturabilen dolayısıyla ağ yapıcı oksit sınıflandırmasına giren SiO_2 , aynı sınıflandırmaya giren diğer oksitlerden endüstriyel ve teknolojik açıdan açık ara üstün durumdadır. SiO_2 , merkezinde Si^{+4} iyonu ve köşelerinde O^{-2} iyonları ile birlikte silika tetrahedronunu oluşturmaktadır. Üç boyutlu ağ yapısı, komşu tetrahedronların merkezlerinde bulunan iki adet Si^{+4} iyonunun bir adet O^{-2} iyonu vasıtası ile birleşmesiyle oluşmaktadır. Birleşmeyi sağlayan oksijenlere köprü kuran oksijenler adı verilmektedir. Tetrahedronların birleşmesiyle oluşan bağlanma açılarının çeşitliliği düzensiz amorf cam yapısını oluşturmaktadır. Kuvvetli Si-O-Si kovalent bağı ile bağıntılı olarak 1710°C gibi oldukça yüksek ergime sıcaklığına sahiptir. Ergime sıcaklığının yüksek olması nedeniyle ticari soda kireç silikat camlarında ağırlıkça %70-75 SiO_2 kullanılmaktadır. Ticari soda kireç silikat cam kompozisyonu içerisinde ağ yapısını düzenleyici oksitler olarak görev alan alkali oksitler ve toprak alkali oksitler SiO_2 yapısındaki güçlü kovalent bağları kırarak yerlerine iyonik bağ oluşturlar. İyonik bağın oluşumunu sağlayan oksijenlere köprü kurmayan oksijenler adı verilmektedir. Köprü kurmayan oksijen iyonları yapı içerisinde serbest bir şekilde hareket ederek yapı içerisinde en düşük enerji seviyesini sağlayacak bir biçimde konumlanırlar. Bu konumlanma yüksek sıcaklık aşamalarında viskozitenin düşmesini sağlamakta ve aynı zamanda 1710°C 'gibi çok yüksek ergime sıcaklığına sahip olan SiO_2 'nin nispeten daha düşük ergime sıcaklığında ergimesini sağlamaktadır [1], [10]-[12]. Silika tetrahedronu ve ticari soda kireç silikat cam yapısı Şekil 2.5 ile verilmektedir [18], [19].



Şekil 2.5: a) Silika tetrahedronu, b) Soda kireç silikat cam yapısı.

Na_2O , ticari soda kireç silikat cam kompozisyonu içerisinde ergime sıcaklığını ve viskoziteyi düşürmekle birlikte camın kimyasal dayanıklılığını önemli ölçüde azaltmakta ve suya karşı dayanıksız hale getirmektedir. Aynı zamanda ısı genleşme katsayısını artırmakta dolayısıyla ısı şok dayanımını azaltmaktadır. K_2O , ticari soda kireç silikat cam kompozisyonu içerisinde Na_2O 'e benzer bir şekilde yüksek sıcaklık ve nispeten daha düşük sıcaklıklarda viskoziteyi azaltmaktadır. Ticari soda kireç silikat cam kompozisyonlarında Na_2O 'nun K_2O ile kısmen değiştirilmesi durumunda, iki veya daha fazla alkali türünün varlığından kaynaklı olarak karışık alkali etkisi gözlenmektedir. Bu etkinin neticesi olarak ısı genleşme bir miktar azalırken kimyasal dayanıklılık önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir. Li_2O , ticari soda kireç silikat camları için çok güçlü ergitme hızlandırıcı akışkandır dolayısıyla kompozisyona çok az miktarda ilave edilse dahi yüksek sıcaklık ergime viskozitesini önemli ölçüde düşürmektedir. Ticari soda kireç silikat cam kompozisyonlarında Li_2O ilavesi kimyasal dayanıklılığı iyileştirmektedir. Aynı zamanda ilave ile düşen fırın sıcaklıklarına bağımlı olarak refrakterlerin korozyon oranlarında düşüşler görülmektedir. Li_2O ilavesi yoğunluğu ve ısı genleşme katsayısını düşürmektedir. Ticari soda kireç silikat cam kompozisyonu içerisinde ağırlıkça %10-15 CaO içermektedir. CaO yüksek sıcaklıklarda ergime viskozitesini düşürmektedir. CaO ilavesi kimyasal dayanıklılığı iyileştirmekte, ısı genleşme katsayısını artırmakta ve yine sertliği arttırmaktadır. Ancak ticari soda kireç silikat cam kompozisyonu içerisine ilave edilen CaO kolayca kristallenmeye neden olmaktadır dolayısıyla kompozisyon içerisindeki miktarı sınırlandırılmalıdır. Ticari soda kireç silikat cam kompozisyonunda SiO_2 'nin MgO ile kısmen değiştirilmesi durumunda yüksek sıcaklık viskozitesini kısmen düşürmektedir. Bu durumda yüzey gerilimi artarken kimyasal dayanıklılık çok az düşmektedir. Aynı kompozisyonda CaO ile MgO 'in kısmen değiştirilmesi durumunda ise yüksek sıcaklık viskozitesi artmaktadır. Ticari soda kireç silikat cam kompozisyonu içerisine ilave edilen MgO mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Ticari soda kireç silikat cam kompozisyonu içerisinde ara oksit olarak görev alan Al_2O_3 viskoziteyi önemli ölçüde arttırmaktadır. 2072 °C gibi çok yüksek ergime sıcaklığına sahip olan Al_2O_3 ticari soda kireç silikat camlarında ergime ve afınasyon aşamalarını zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte Al_2O_3 ilavesi kristallenme davranışının meydana gelmesini engellemekte ve kimyasal dayanıklılığı önemli ölçüde geliştirmektedir. Aynı zamanda Al_2O_3 ilavesi yoğunluk ve ısı genleşme üzerine küçük etkilere sahip iken yüzey gerilimini önemli ölçüde arttırmakta ve

mekanik özellikleri iyileştirmektedir [1], [9]-[12], [17], [20]. Ana bileşenlerin cam özelliklerine etkileri Şekil 2.6 ile verilmektedir [17].



Şekil 2.6: Ana bileşenlerin cam özelliklerine etkileri.

Endüstriyel cam üretimi prosesi yüksek sıcaklık uygulamaları açısından enerji yoğun bir prosestir. Endüstriyel olarak nihai ürünün istenilen özelliklerini sağlaması açısından cam kompozisyonuna ana bileşenlere ilave olarak kullanılan yardımcı bileşenler; enerji tasarrufu sağlamak, ergimeyi kolaylaştırmak, doğal hammadde kaynaklarının korunmasını sağlamak, tasarımsal ve görsellik açısından renklendirmek veya renksizleştirmek ve yine kalite standartları açısından kompozisyondaki diğer hammaddelerin kirliliklerini yapı içerisinden uzaklaştırılmasını sağlamak gibi günümüz teknolojik gelişmelerinin etkisiyle kısıtlanan çevresel, ekonomik ve kalite standartlarına bağıntılı olarak endüstriyel cam üretim proseslerinde kompozisyon tasarımı için olmazsa olmaz fonksiyonlar üstlenmektedirler [8], [9].

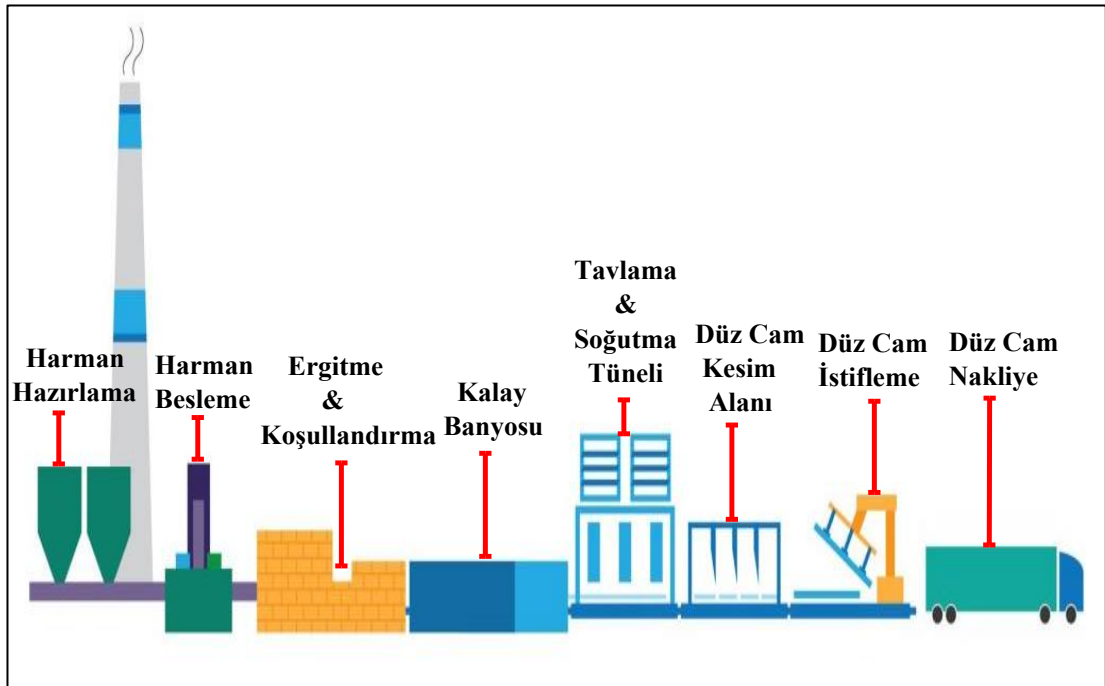
Ergitme kolaylaştırıcı bileşen olarak kullanılan yüksek fırın cürufu yüksek sıcaklıklarda viskoziteyi düşürmekte, daha hızlı homojenizasyon ve daha düşük yüzey gerilimi sağlamaktadır. İndirgenlik özelliği nedeniyle enerji tasarrufu sağlamakta dolayısıyla ekonomik beklentileri karşılamaktadır [8], [9].

1970 yılında Dünya gününe ithafen “azalt, yeniden kullan, geri dönüştür” şeklinde oluşturulan teori günümüzde geliştirilmeye devam ederek sürdürülebilirlik, kalite, geri dönüşüm ve döngüsel ekonomi kavramlarını endüstriyel üretime kazandırmıştır. Nihai ürün beklentilerinin karşılanabildiği uygulamalarda cam kırığı kullanımı hammadde kullanımının azaltılması, kullanılmış ürünün yeniden kullanılabilmesi ve geri dönüşüm açısından oldukça önemlidir. Cam kırıkları önceden ergitme işlemine tabi tutulması nedeniyle harman içerisinde amorf malzeme olarak kullanılan tek hammadde girdisini oluşturmaktadır. Dolayısıyla hammaddeler arasındaki reaksiyonları harekete geçirmek için enerji gereksinimi duymamakta ve tekrar ergitilmesi durumunda enerji gereksinimi daha düşük olmaktadır. Yine artan cam kırığı kullanımı nedeni ile ağırlıkça azalan karbonat içerikli hammadde miktarına bağıntılı olarak CO₂ gaz salınımı azaltılmaktadır. Ticari soda kireç silikat düz cam üretimi için kullanılan cam kırığı %25’i geçmemektedir [3], [4], [8], [9], [17], [21].

2.2.3. Yüzdürme Cam Teknolojisi Kullanımı ve Ticari Düz Cam Üretim Prosesi

Endüstriyel cam üreticileri talep edilen nihai cam ürün özelliklerini karşılarken üretim proseslerini iyileştirmeyi dolayısıyla ekonomik beklentileri karşılamayı hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda Alastair Pilkington 1952 yılında yüksek sıcaklıkta ergiyik durumdaki ticari cam hammaddelerinin, ergiyik kalay banyosu üzerinde yüzdürerek düz cam oluşturma fikrini tasarladı. Bu fikrin tasarlanmasındaki amaç üretim esnasında oluşan %20 cam israfını ve cam yüzeyine uygulanan haddeleme, zımparalama, cilalama gibi ikincil işlemlerinin uygulanmasını ortadan kaldırmaktı. 1952 yılında tasarlamış olduğu fikrini 1959 yılında başarılı bir şekilde gerçeğe dönüştüren Alastair Pilkington, 20. yüzyılın en büyük icadı olan yüzdürme cam üretim teknolojisini cam endüstrisine kazandırdı. Yüzdürme cam üretim teknolojisi prosesinde ilk olarak, nihai düz cam ürün özelliklerini karşılayacak kompozisyon tasarımına sahip hammadde bileşenlerinden oluşturulan harman 2000 ton kapasiteye sahip ergitme, afine etme ve koşullandırma proseslerinin gerçekleştirildiği dolayısıyla iki hazneye sahip fırınlarda 1500°C’yi aşan sıcaklıklarda ergitilmekte ve afınasyona tabi tutulmaktadır. Ergitme ve afınasyon haznesi bel olarak adlandırılan dar bir bölüm ile koşullandırma haznesine bağlanmaktadır. Ergitme ve afınasyon haznesine nazaran koşullandırma haznesinde nispeten daha düşük

sıcaklıklar olması nedeni ile bel vasıtası ile koşullandırma haznesine gelen camda kabarcık ve inklüzyon miktarlarının düşük seviyelerde olması yüksek kalite açısından oldukça önemlidir. Bel için tasarlanmış olan su soğutmalı karıştırıcılar yüksek derecede cam homojenizasyonu sağlamaktadır. Koşullandırma haznesine gelen ergiyik cam soğutma fanlarının kullanılması ile birlikte şekillendirme aşaması için yüzdürme kalay banyosuna götürülmeden önce kanal adı verilen bölmede yaklaşık 1100°C'ye soğutulmaktadır. Yüzdürme kalay banyosuna 1100°C'ye soğutulmuş olarak gelen cam 60 m uzunluğundaki banyodan ilerlerken soğutularak 600°C'de neredeyse katı bir şerit olarak ayrılmaktadır. Başlangıçta yalnızca 6 mm kalınlığında üretilen ticari soda kireç silikat düz camlar günümüz teknolojiyle çekiş hızına bağıntılı olarak 0,4 mm kadar bir incelikten 25 mm kadar bir kalınlığa ve 3 m'ye kadar bir genişliğe sahip olabilmektedir. Yüzdürme kalay banyosundan ayrılarak cam tavlama&soğutma tüneline gelen düz camda soğutma hızı kontrol altında tutularak sıcaklık farklarını azaltmak dolayısıyla bağıntılı olarak gerilmelerin minimuma indirilmesi ve oda sıcaklıklarında camın çatlamasının önüne geçilmesi hedeflenmektedir [22]-[24]. Yüzdürme teknolojisi üretim prosesi ile büyük ölçekli üretimi yapılan ticari soda kireç silikat düz camı ve farklı sektörlere ilişkin ticari soda kireç silikat cam türüne ait kompozisyon bilgileri Tablo 2.1 [1], [25] ile ve endüstriyel yüzdürme teknolojisi üretim prosesi aşamaları ise Şekil 2.7 [26] ile verilmektedir.



Şekil 2.7: Yüzdürme teknolojisi kullanımı ile ticari düz cam üretim prosesi.

Tablo 2.1: Ticari soda kireç silikat camı kompozisyonları.

% Ağırlık	Düz Cam	Cam Ambalaj	Cam Ev Eşyası	A- Camı
SiO ₂	70-74	70-73	70-74	71-73
Na ₂ O	12-14	12-15	12-14	12-15
K ₂ O	0-0,5	0-1	0-2,5	0-1,5
CaO	7-10	10-12	7-9	9-11
MgO	2-4	0,5-2	1-2	1-4
Al ₂ O ₃	0-1	1-2	1-2	0,5-2,5
B ₂ O ₃	0	0	0	0-0,5
Fe ₂ O ₃	0-1	0-1	0-0,05	0-0,5
Cr ₂ O ₃	0-0,3	0-0,3	0	0
TiO ₂	0-0,1	0-0,1	0-0,05	0-0,1
SO ₃	0-0,5	0-0,5	0-0,5	0-0,5

2.3. Camların Mekanik Mukavemeti

2.3.1. Giriş

Mukavemet, cam ürününde hasar oluşturan noktadaki gerilmedir. Camların mukavemeti kırılma mekaniği ile bağıntılıdır. Cam ürünlerinde mukavemet ölçümü kırılma meydana gelene kadar artan büyüklüklerde uygulanmakta olan çekme gerilmesinden oluşmaktadır. Numuneye uygulanmakta olan normal gerilmelerden çekme gerilmeleri $+\sigma$ ya da yalnızca σ ile gösterilirken basma gerilmeleri $-\sigma$ ile gösterilmektedir. Mukavemet birimi uygulanan gerilmenin birimiyle aynı olarak, SI birimler cinsinden MPa'dır. Camların mekanik mukavemeti yapısına, genellikle yüzeylerinde bulunmakta olan kusurların üretim kaynaklı olarak mı yoksa kullanım esnasında temas kaynaklı mı oluştuğuna yani kusurun boyutuna, kullanım ve üretim ortamı koşullarına ve cam ürünlerine uygulanan mukavemet arttırıcı yöntemlere bağıntılı olarak farklı değerler almaktadır [27]-[30].

2.3.2. Kusursuz Camın Teorik Mukavemeti

Atomik düzeyde atomlar arasındaki bağların birbirinden koparılması ve her bağın kopması ile iki yeni yüzey oluşumu ile sonuçlanması için yapılmakta olan iş kusursuz kırılğan bir katının teorik mukavemetidir. Cam üretim prosesi kaynaklı oluşabilen kirlilik, kabarcık, yüzey kusuru ve sonrasında kullanım kaynaklı temasa bağıntılı olarak oluşan mikro ve makro kusurların dolayısıyla çevresel kusurların bulunmadığı duruma sahip olan kusursuz bir katının mekanik mukavemeti Orawan tarafından denklem 2.1 ile ifade edilmektedir [27], [28], [30].

$$\sigma_{th} = \left(\frac{E\gamma_s}{d_0} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

Orawan tarafından ifade edilen denklemde kusursuz bir katının teorik mukavemeti σ_{th} , elastik modülüsü E, yüzey enerjisi γ_s ve atomlar arası mesafe d_0 ile bağıntılıdır [27], [28], [30].

Teorik mukavemet malzeme özelliği olup malzemenin elastik modülüsü ne kadar büyükse, yani atomlar arası bağ kuvvetleri ne kadar büyükse teorik mukavemet o kadar büyük olmaktadır yine malzemenin yüzey enerjisi ne kadar büyükse yeni yüzeyler oluşturmak o kadar zor, teorik mukavemet o kadar büyük olmaktadır. Ticari bir soda kireç silikat camı için $E = 70 \text{ GPa}$, $\gamma_s = 0,6 \text{ J/m}^{-2}$, $d_0 = 0,15 \text{ nm}$ değerleri teorik mukavemet denkleminde kullanıldığında teorik mukavemet 16 GPa gibi oldukça yüksek bir değere sahip olmaktadır. Ne yazık ki teorik mukavemet değeri üretilen ticari düz camın gerçek mukavemet değerlerinin oldukça üzerindedir [30].

2.3.3. Kusurlu Camın Teorik Mukavemeti

1913 yılında Inglis, kırılğan bir katının kusursuz olmadığını dolayısıyla mikro boyutta kusurların var olduğunu ve bu kusurların gerilme yükü altındaki bir katıda gerilmeyi yoğunlaştırıcı bir şekilde hareket ettiğini göstermiştir. Kusurdan uzak durumda ise ortalama gerilme kusurun ilerlemesi için gereken gerilmenin çok daha aşağısındadır. Çekme yükü altındaki sonsuz bir plakadaki uzunluğu $2c$ minör eksenini $2b$ olan eliptik bir kusurun ucunda geometrik faktör ve dolayısıyla eğrilik yarıçapına

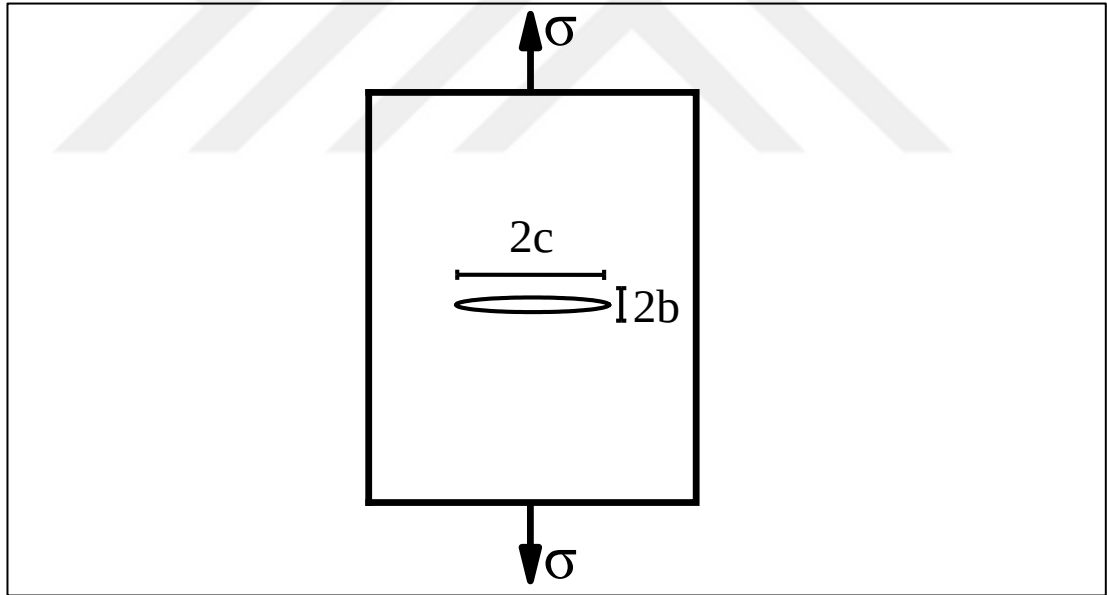
ρ , bağıntılı olarak oluşan gerilme yoğunlaşması Inglis tarafından denklem 2.2 ile ifade edilmektedir [27], [28], [30]-[33].

$$\sigma_m = \sigma \left(1 + 2 \frac{c}{b} \right) = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} \right) \quad (2.2)$$

Inglis tarafından ifade edilen denklemde eliptik kusurun ana ekseninin uçlarındaki eğrilik yarıçapı ρ , denklem 2.3 ile ifade edilmektedir [27], [28], [33].

$$\rho = \frac{b^2}{c}, (b < c) \quad (2.3)$$

Üniform çekme yükü σ , altındaki sonsuz bir plakadaki uzunluğu $2c$ minör eksenini $2b$ olan eliptik bir kusur Şekil 2.8 ile verilmektedir [30].



Şekil 2.8: Üniform çekme yükü σ , altındaki sonsuz bir plakadaki uzunluğu $2c$ minör eksenini $2b$ olan eliptik bir kusur.

Inglis tarafından ifade edilen denkleme göre kusurun geometrik faktörü (c/b) oranı arttıkça kusur ucu keskinleşmekte bağıntılı olarak gerilme yoğunlaşması çok yüksek değerleri göstermektedir. Bu durum teorik olarak uygulanması gereken gerilme değerlerinin çok daha altındaki gerilme değerinde çatlakların yayılacağı

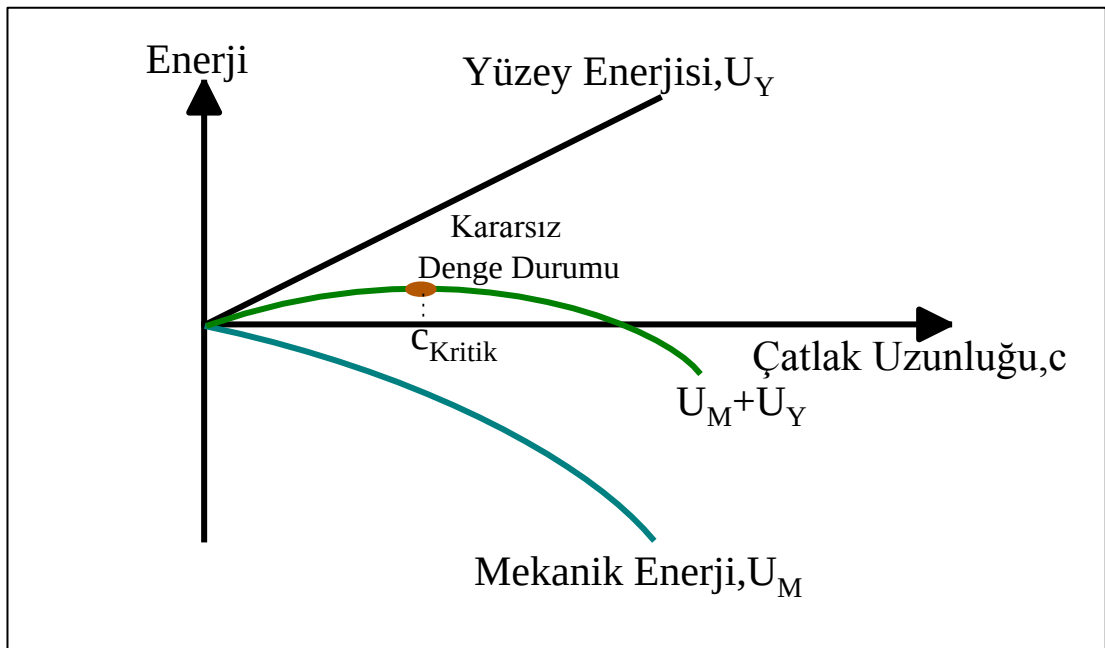
anlamına gelmektedir. Inglis'in çalışması ideal keskin çatlak yani $b = 0$, durumunda çözümsüzlük oluşturmaktadır [28].

Inglis'in çatlak ilerlemesi davranışı için gerilme yoğunlaşması yaklaşımına ek olarak Griffith, kusurların oluşturduğu çatlakların ilerlemesi davranışına enerji dengesi yaklaşımını getirmiştir. Griffith'e göre çatlağın ilerlemesi ve dolayısıyla yeni yüzeylerin oluşması için enerji tüketilmektedir [27], [28], [30], [33]. Kusur uzunluğu $2c$ olan eliptik geometrideki bir kusur için Griffith'in enerji dengesi yaklaşımı denklem 2.4 ile ifade edilmektedir.

$$U_{\text{Toplam}} = U_{\text{Mekanik}} + U_{\text{Yüzey}} \quad (2.4)$$

$$U_{\text{Toplam}} = -\frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} + 4c\gamma_s$$

Griffith'in enerji dengesi yaklaşımını ifade eden denklemde toplam potansiyel enerji U_{Toplam} , mekanik enerji U_{Mekanik} 'te oluşan kayıp ve yüzey enerjisi $U_{\text{Yüzey}}$ 'de yaklaşık kazanç ile bağıntılıdır [27]. Denklem 2.4 ile kusur uzunluğu c , uygulanan üniform gerilme σ , elastik modülüs E ve birim alan başına serbest yüzey enerjisi γ_s olarak ifade edilmiştir. Kusur uzunluğu c ile bağıntılı olarak Griffith'in enerji dengesi yaklaşımı Şekil 2.9 ile verilmektedir [28].



Şekil 2.9: Griffith'in enerji dengesi yaklaşımı.

Doğrusal olarak artan yüzey enerjisi, başlangıç çatlak uzunluğunun artarak kritik çatlak uzunluğuna ulaşmasına kadar toplam enerjiyi arttırmaktadır. Kritik c değerine, c 'ye göre türev alınarak ifadenin sıfıra eşitlenmesi ile ulaşılmaktadır [27], [30]. Ulaşılan kritik c değeri ise kritik σ değerini vermektedir. Kritik σ ifadesi denklem 2.5 ile verilmektedir.

$$\sigma_{\text{Kritik}} = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi C_{\text{Kritik}}}} \quad (2.5)$$

Gevrek kırılma durumunda plastik ve viskoelastik enerji nedeniyle enerji kaybı oluşmamaktadır. Çatlak ilerlemesi için iki yeni yüzeyin oluşma şartı bulunmaktadır. G , (J/m^2) birimine sahip olup enerji salınım hızı olarak verilmektedir ve birim çatlak alanı için enerjiyi temsil etmektedir. G için üç durum ele alınmaktadır;

- $G < 2\gamma_s$ ise çatlağın ilerlemesi için gereken enerjinin altında yani yeterli olmayan miktarda enerji bulunmaktadır.
- $G = G_{\text{Kritik}} = 2\gamma_s$ ise yeni yüzeylerin oluşturulması için yeterli miktarda enerjiye sahip ve çatlak ilerlemesinin kararlı ve kararsız olma durumu ise;

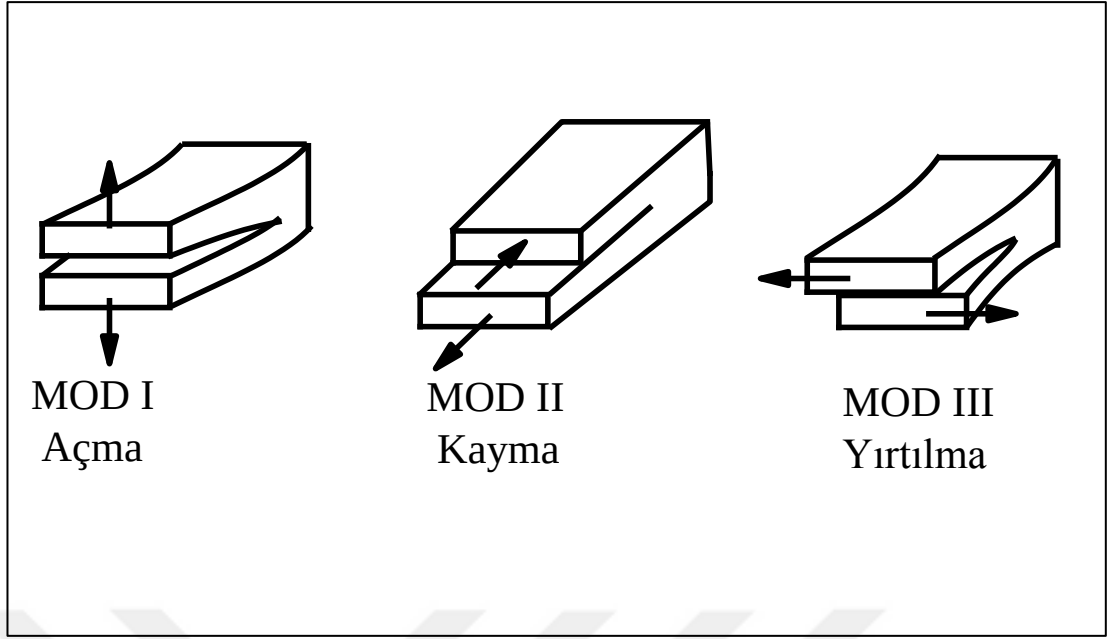
$$\frac{\partial G}{\partial c} > 0 \text{ Kararsız}, \frac{\partial G}{\partial c} < 0 \text{ Kararlı}$$

olarak belirlenmektedir.

- $G > 2\gamma_s$ durumunda ise çatlak ilerlemesi kararsızdır [28].

2.3.4. Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği

Kusurların çoğunun atomik olarak keskin olması nedeniyle Irwin tarafından 1950 yıllarında geliştirilmiş olan kırılma mekanikliği analizleri kullanılmıştır. Irwin'e göre çatlağın ilerlemesi açısından çatlak yüzey hareketlerinin birbirinden bağımsız olarak Mod I-Açma, Mod II-Kayma ve Mod III-Yırtılma olmak üzere üç farklı modu bulunmaktadır [27], [28], [30], [34]-[36]. Açma, kayma ve yırtılma moduna ait görsel Şekil 2.10 ile verilmektedir [30], [34], [35].

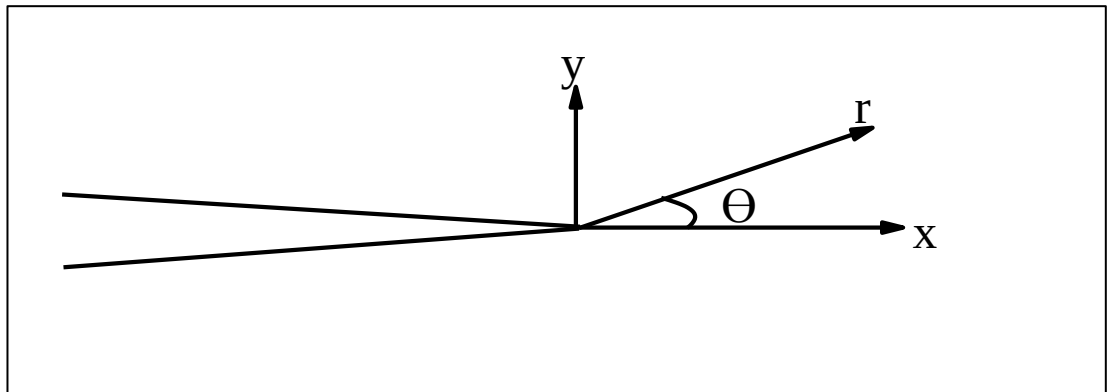


Şekil 2.10: Üç kırılma modu sırasıyla Mod I-Açma, Mod II-Kayma ve Mod III-Yırtılma.

1958 yılında Irwin, uygulanan gerilmenin çatlakın varlığı nedeniyle yoğunlaşmasının bir ölçüsü olarak gerilme şiddet faktörü K 'yı tanımlamıştır [27], [28], [30], [34]. Keskin bir çatlak ucundan r uzaklığında ve θ kutup açısındaki gerilme alanlarına ait genelleştirilmiş ifade denklem 2.6 ile verilmektedir.

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{(2\pi r)^{1/2}} f_{ij}(\theta) \quad (2.6)$$

Mod I-Açma için kartezyen ve silindirik koordinat sistemleri kullanılarak oluşturulan idealleştirilmiş çatlak ucu Şekil 2.11 ile verilmektedir [28].



Şekil 2.11: İdealleştirilmiş çatlak ucu.

Denklem 2.6 ile verilmekte olan K ; K_I , K_{II} , K_{III} , olmak üzere üç farklı moda karşılık gelen gerilme şiddet faktörünü temsil etmektedir. Çatlak ilerlemesi gerilme şiddet faktörü ile kontrol edilmekte olup kırılma gerilme şiddet faktörünün kritik değerlere ulaşması ile gerçekleşmektedir. Kırılgan katılar yani cam ve seramik malzemeler için genellikle kırılma düzlemine ve asal gerilmeye dik olarak ilerleyen K_I gerilme şiddet faktörü hakimdir [27].

2.3.4.1. Üniform Yük Altında Çatlak Davranışı

2c uzunluğunda bir kusuru barındıran sonsuz büyüklükteki bir plakaya üniform çekme gerilimi σ , uygulandığında gerilme şiddet faktörü K_I , denklem 2.7 ile verilmektedir [27], [34].

$$K_I = Y\sigma\sqrt{c} \quad (2.7)$$

Y kusurun geometrisine bağıntılı faktör olarak adlandırılmakta olup 1972 Sih ve 1981 Schmalzger'in çalışmalarında mevcut olarak bulunmaktadır [30]. Literatürde yaygın olan Griffith ve Penny çatlakları için kullanılmakta olan kusur geometrik faktör değerleri Tablo 2.2 ile verilmektedir [30].

Tablo 2.2: Kusur geometrik faktörü Y, değerleri.

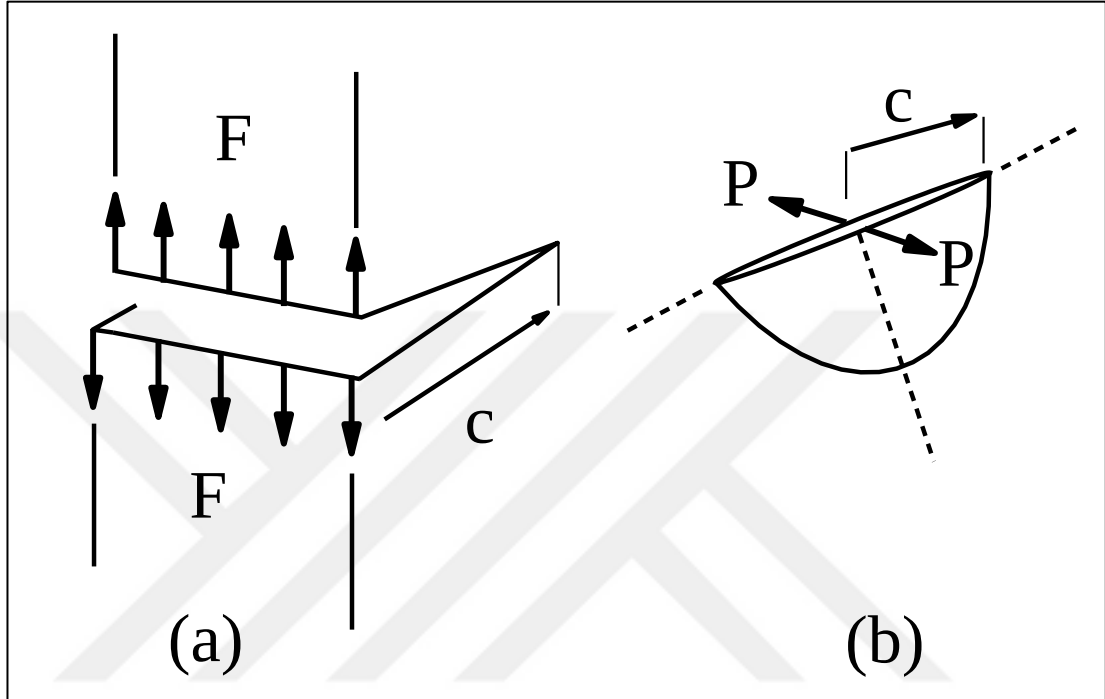
Y	Çatlak Geometrisi
$\sqrt{\pi}$	Sonsuz numunede düz çatlak
$1,12\sqrt{\pi}$	Yarı sonsuz numunede kenar çatlağı
$2/\sqrt{\pi}$	Sonsuz numunede Penny çatlağı

2.3.4.2. İçsel Yükleme Altında Çatlak Davranışı

Çizgisel F yükleri altındaki giriş açıklığı yüklemeli düz çatlaklar ve noktasal P yükleri altındaki merkez yüklemeli Penny çatlaklarına ait gerilme şiddet faktörü denklemleri denklem 2.8a ve denklem 2.8b olarak ve görseli ise Şekil 2.12 ile verilmektedir [34].

$$K = \frac{F}{(\pi c)^{1/2}}, \text{ (Düz kenar çatlak)} \quad (2.8a)$$

$$K = \frac{P}{(\pi c)^{3/2}}, \text{ (Half Penny çatlak)} \quad (2.8b)$$



Şekil 2.12: Yarı sonsuz bir plakada a) çizgisel F yükleri altındaki giriş açıklığı yüklemeli düz kenar çatlak, b) noktasal P yükleri altındaki merkez yüklemeli yüzey Half-Penny çatlak.

2.3.4.3. Kırılma Tokluğu

Kırılma mekaniği açısından kritik gerilme şiddet faktörü olarak da bilinen kırılma tokluğu malzemenin çatlak ilerlemesine karşı gösterdiği dirençtir. Basit olarak ifade etmek gerekirse kırılma bir katı için K_{Ic} değeri ne kadar yüksek ise çatlak ilerlemesi o kadar zor olmaktadır [28]. Gerilme şiddet faktörü K_I , denkleminde kusur geometrik faktörü Y , gerilme σ ya da kusur boyutu c değerleri kritik değerlere ulaştığında kırılma meydana gelmektedir. Kırılma tokluğu, denklem 2.9 ile verilmektedir.

$$K_{Ic} = Y\sigma_f\sqrt{c} \quad (2.9)$$

Kırılma tokluğu K_{Ic} , kritik enerji salınım hızı G_{Ic} ve kritik yüzey enerjisi γ_{Sc} ile bağıntılı olup denklem 2.10 ile verilmektedir [27], [28], [37]. Kırılma tokluğunun birimi $\text{MPa(m)}^{1/2}$ 'dir.

$$K_{Ic} = \sqrt{G_{Ic}E} = \sqrt{2E\gamma_{Sc}} \quad (2.10)$$

Literatürde ticari soda kireç silikat camları için farklı yazarlar tarafından deneysel çalışmalar neticesinde belirlenen bazı kırılma tokluğu değerleri Tablo 2.3 ile verilmektedir [38].

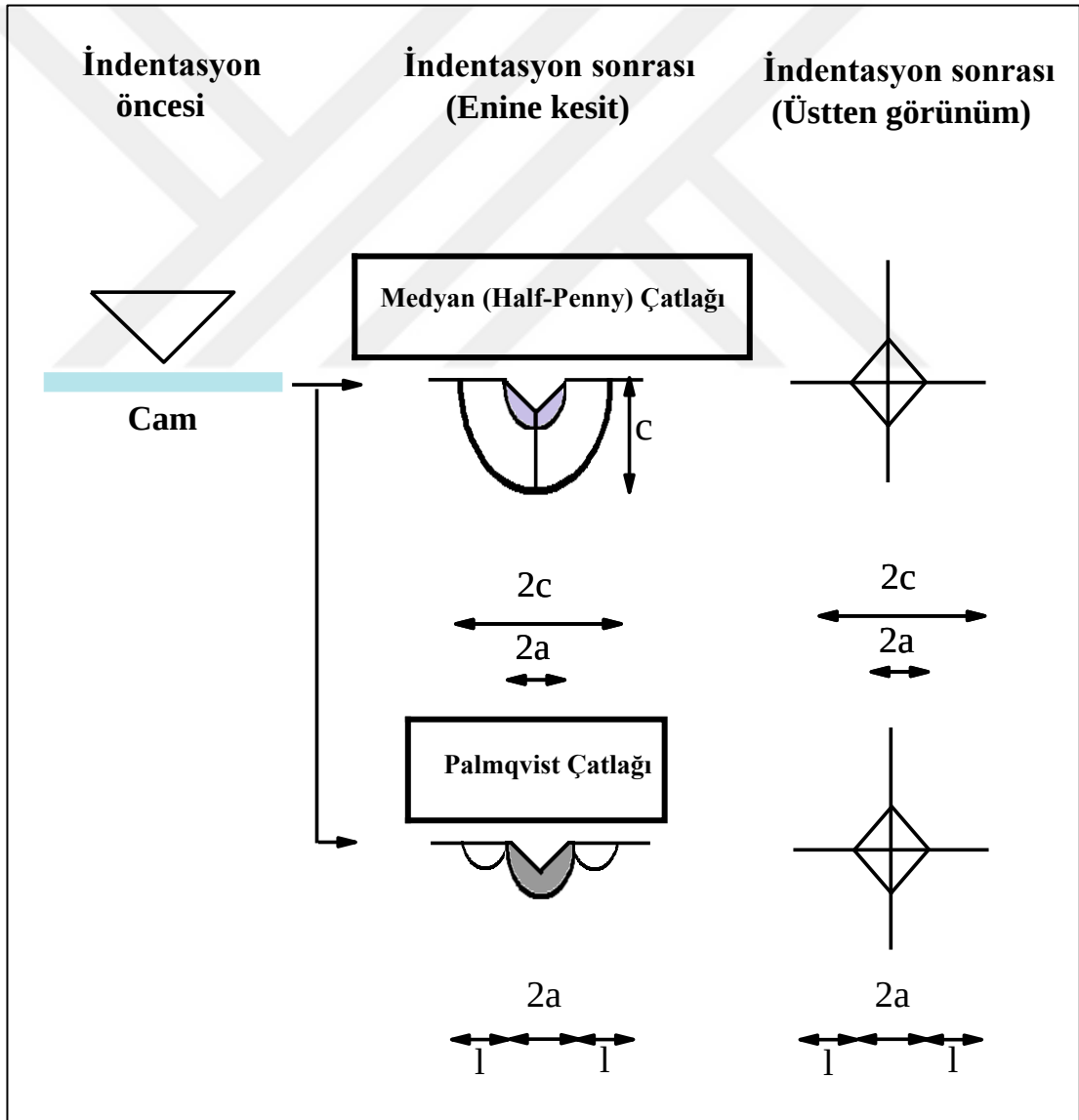
Tablo 2.3: Ticari soda kireç silikat camları için kırılma tokluğu değerleri.

Yazar	Yıl	K_{Ic} , $\text{MPa(m)}^{1/2}$
WIEDERHORN	1967	0,82
GEHRKE et al.	1987	0,78
MENÇİK	1992	0,72-0,82
ULLNER	1993	0,76
LAWN	1993	0,75

2.3.4.3.1. Vickers İndentasyon Yöntemi Kullanılarak Tokluğun ve Mikro Sertliğin Belirlenmesi

Günümüz dünyasında hızla gelişen teknoloji, kırılğan cam ürünlerinin hayatımıza farklı kullanım alanlarıyla girmesine neden olmakla birlikte genellikle yüzeylerinde bulunan üretim kaynaklı veya kullanım esnasında temas kaynaklı kusurların varlığı sebebiyle kırılan cam ürünlerinin kırılma davranışlarının incelenmesini de kolaylaştırmaktadır. Camların kırılma tokluğunu belirlemek için Çift Ankastre Kiriş Yöntemi (DCB), Çift Ankastre Delikli Sıkıştırma Yöntemi (DCDC), Çift Burma Yöntemi (DT), Düz Çentiklenmiş Kiriş Yöntemi (SNB), Eğilme Yüzey Çatlağı Yöntemi (SCF), Tek Kenarlı Önceden Çatlatılmış Kiriş Yöntemi (SEPB), V Şekli (Şevron) Çentik Yöntemi (CN), Vickers İndentasyon Yöntemi (VIF) olmak üzere geçmişten günümüze çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [27], [28], [39]-[41]. Bu tez kapsamında ticari soda kireç silikat cam numunelerinin kırılma tokluk ölçüm değerleri Vickers İndentasyon Yöntemi (VIF) kullanılarak belirlenmiştir.

Yüzey üzerinde temas kaynaklı kusur oluşturma fikri 1880 yıllarında başlayıp 1896 yılında Hertz'in kör indenterla oluşturduğu Hertzian koni çatlaklarına dayanmaktadır. Elastik ve elastik-plastik temas sağlayan indenterlar kör ve keskin olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sertlik testi için kullanılmakta olan keskin Vickers piramit elmas indenterı temas ettiği yüzeyde radyal-medyan (Half-Penny) çatlağı ve Palmqvist çatlağı ve yanal çatlaklar oluşturmaktadır. Oluşturulan Half-Penny çatlağı ve Palmqvist çatlağı yüzeye dik olarak ilerlemesinden dolayı mukavemete etkileri yanal çatlaklara nazaran daha önemlidir [39], [40], [42]. Dolayısıyla bu tez kapsamında yanal çatlaklar ihmal edilmiştir. Vickers piramit elmas indenterının cam yüzeyine teması sonucu oluşan çatlak geometrileri Şekil 2.13 ile verilmektedir [39].



Şekil 2.13: Vickers piramit elmas indenterının cam yüzeyine teması sonucu oluşan çatlak geometrileri.

Kırılma tokluğunun belirlenmesinde çatlak geometrisinin belirlenmesi önemlidir. İndentasyon yükü çatlak geometrisi ile bağıntılıdır örneğin bazı malzemeler küçük yüklerde Palmqvist çatlağı sergilerken diğer malzemeler Half-Penny çatlağı sergilemektedir. Sert malzemeler genel olarak Palmqvist çatlağı sergileseler de cam ve cam-seramik malzemeler indantasyon yükünden bağımsız olarak genellikle Half-Penny çatlağı sergilemektedir. Geleneksel silikat camlardan çok daha yüksek sertlik değerine sahip > 8 GPa, oksinitrür camları Half-Penny çatlağı sergilemektedir. Yine Pyrex, silika vb. cam türleri ise Vickers indantasyon yükü altında Heartzian Koni türü çatlak sergilemektedir ancak genellikle bu çatlak türü kırılma tokluğu hesaplamalarında kullanılmamaktadır [39]. Literatürde ticari soda kireç silikat camları ve farklı cam türleri için deneysel çalışmalar neticesinde belirlenen Vickers mikro sertlik değerleri Tablo 2.4 ile verilmektedir [43], [44].

Tablo 2.4: Farklı cam türlerine ait Vickers mikro sertlik değerleri.

Cam türü	Vickers mikrosertlik, Hv
Silika	~710-765
Alüminasilikat	~550-600
Borosilikat	~580-675
Soda kireç silikat	~540-675
Kurşun silikat	~450-460
Alüminafosfat	~315-330
As ₂ Se ₅	105
Selenyum	30

Farklı cam türlerinin mikro sertlik değerleri incelendiğinde, mikro sertlik değerlerinin bileşime bağıntılı olarak çokça değişim göstermediği gözlenirse de farklı cam türlerinin indantasyona farklı davranışlar sergilediği bilinmektedir. İndantasyon sonucu deformasyon ve çatlama durumuna bağıntılı olarak cam türleri normal, ara, anormal olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır. Ticari soda kireç silikat camları yapısında bulunan alkali ve toprak alkali iyonlar ile birlikte kesme mekanizması ile büyük ölçüde deforme olmakta ve indantasyon sonucu radyal-medyan (Half-Penny) ve yanal çatlaklar oluşturmaktadır. Ticari soda kireç silikat camları normal sınıfında

yer almakta olup indentasyon sonucunda yüksek artık gerilmeler oluşturmaktadır [43], [45].

Bu tez kapsamında farklı ısıtma işlem uygulanmış ticari soda kireç silikat camları için Vickers mikro sertlik değerleri denklem 2.11 kullanılarak hesaplanmıştır [46]-[48].

$$H_V = \frac{(1,8544) \times (0,102) \times P}{d^2} \quad (2.11)$$

H_V sertlik denkleminde P; Newton biriminde uygulanan indentasyon yükü, d ise mm biriminde uygulanan indentasyon yükü sonucunda farklı ısıtma işlem uygulanmış düz cam numunelerinin kalay yüzeylerinde oluşan Vickers indentasyon izinin köşegen uzunlukları toplamının ortalamasıdır.

Çatlak geometrisini belirlemek için kullanılan yöntemler, Vickers indentasyon yükü uygulanan numunenin enine kesitini incelemek, Vickers indentasyon yükü uygulanan numunenin yüzeyini parlatmaktır. Bu yöntemlerin doğrudan gözleminin zorluğu nedeniyle Niihara arkadaşları ve Lankford çalışmalarında çatlak uzunluğu c'nin Vickers iz köşegen uzunluğunun yarısı olan a'ya oranının çatlak geometrisini belirleyebileceğini öne sürdüler. Niihara arkadaşları ve Lankford'un çalışmalarında c/a oranı 2,5 değerinden düşük olduğunda genel olarak sert malzemelerde gözlemlenmekte olan ve çatlakların yüzeye daha yakın konumlandığı Palmqvist geometrisini oluşturduğu, oranın 2,5 değerinden büyük olduğunda ise Half-Penny çatlak geometrisini oluşturduğu belirtilmiştir [39], [40]. Bu tez kapsamında farklı ısıtma işlem uygulanmış ticari soda kireç silikat düz cam numunelerinin kırılma tokluk değerlerini belirlemek amacıyla c/a oranına bağımlı olarak Half-Penny çatlak geometrisi için denklem 2.12a, Palmqvist çatlak geometrisi için denklem 2.12b kullanılmıştır [39], [40], [47]-[51].

$$K_{Ic} = 0,0016 \left(\frac{E}{H_V} \right)^{1/2} \frac{P}{c^{3/2}} \quad (2.12a)$$

$$K_{Ic} = 0,018a^{1/2} H_V \left(\frac{E}{H_V} \right)^{0,4} \left(\frac{l}{a} \right)^{-1/2} \quad (2.12b)$$

Aynı zamanda literatürden cam malzemelerin genellikle Half-Penny çatlak geometrisine sahip olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla tez kapsamında artık gerilme durumunda kullanılan Half-Penny tokluk denklemi kırılma tokluk değerlerini belirlemek amacıyla kullanılmış olup denklem 2.12c ile verilmektedir [47], [50], [51].

$$K_{Ic} = 0,0016 \left(\frac{E}{H_V} \right)^{1/2} \frac{P}{c^{3/2}} + Y\sigma_R\sqrt{c} \quad (2.12c)$$

Kırılma tokluk değerlerini belirlemek amacıyla kullanılan denklemlerde elastik modülüs E, Vickers mikro sertlik değeri H_V , Şekil 2.13 ile gösterilmekte olan çatlak uzunlukları c ve l, Vickers iz köşegen uzunluğunun yarısı olan a, Vickers indentasyon yükü P, kusur geometrik faktörü Y, artık gerilme değeri σ_R olarak verilmiştir.

2.3.4.4. Mukavemet

Cam ürünlerinin kırılmasında genellikle cam üretim merkezlerinde üretim kaynaklı oluşan yüzey kusurları veya üretim sonrası kullanım esnasında yüzeyde temas kaynaklı oluşan kusurlar rol almaktadır. Camın mukavemetini en yüksek çekme gerilimini sağlayabilen kusur boyutu ve geometrisi belirlemektedir [29], [52], [53].

2.3.4.4.1. Üniform Yük Altında Artık Gerilmesiz Durum İçin Camın Mukavemeti

Endüstriyel cam üreticilerinin cam üretim merkezlerinde üretilmiş ve üretim prosesi gereği tavlansız olarak artık gerilmeleri minimum seviyeye indirgenmiş ticari cam ürünlerinin mukavemeti denklem 2.13 ile verilmektedir [54].

$$S = \frac{K_{Ic}}{Y\sqrt{c}} \quad (2.13)$$

Yüzeyinde yalnızca üretim kaynaklı kusurları barındıran ticari cam ürününün mukavemet denklemi kırılma tokluğuna ait denklem 2.9'da kritik sigma değeri yalnız bırakılarak elde edilmiş olup mukavemet S, MOD I kırılma tokluğu K_{Ic} , kusur geometrik faktörü Y ve kusur uzunluğu c ile bağıntılı olarak değişmektedir.

2.3.4.4.2. Üniform Yük Altında Artık Gerilmeli Durum İçin Camın Mukavemeti

Endüstriyel cam üreticilerinin cam üretim merkezlerinde ticari cam ürünün üretimi esnasında veya kullanıcıların ticari cam ürünlerini kullanmaları esnasında yüzey temas kaynaklı oluşturulan kusurların uçlarında temas eden cismin sivri noktası ve kenarlarını kapsayan deformasyon bölgesinde elastik ve plastik uyumsuzlukla bağıntılı olarak artık gerilmeler oluşmaktadır. Kusur uçlarında oluşan artık gerilmeler ise ticari camın mukavemetini oldukça düşürmektedir. İndentasyon yöntemi ile temas kaynaklı doğal kusurlara benzer bir biçimde yapay kusurlar elde edilmektedir. Yüzeyinde temas kaynaklı artık gerilme bulunan ticari cama dışarıdan üniform yük uygulandığında ticari camın mukavemeti denklem 2.14 ile verilmektedir [55], [56].

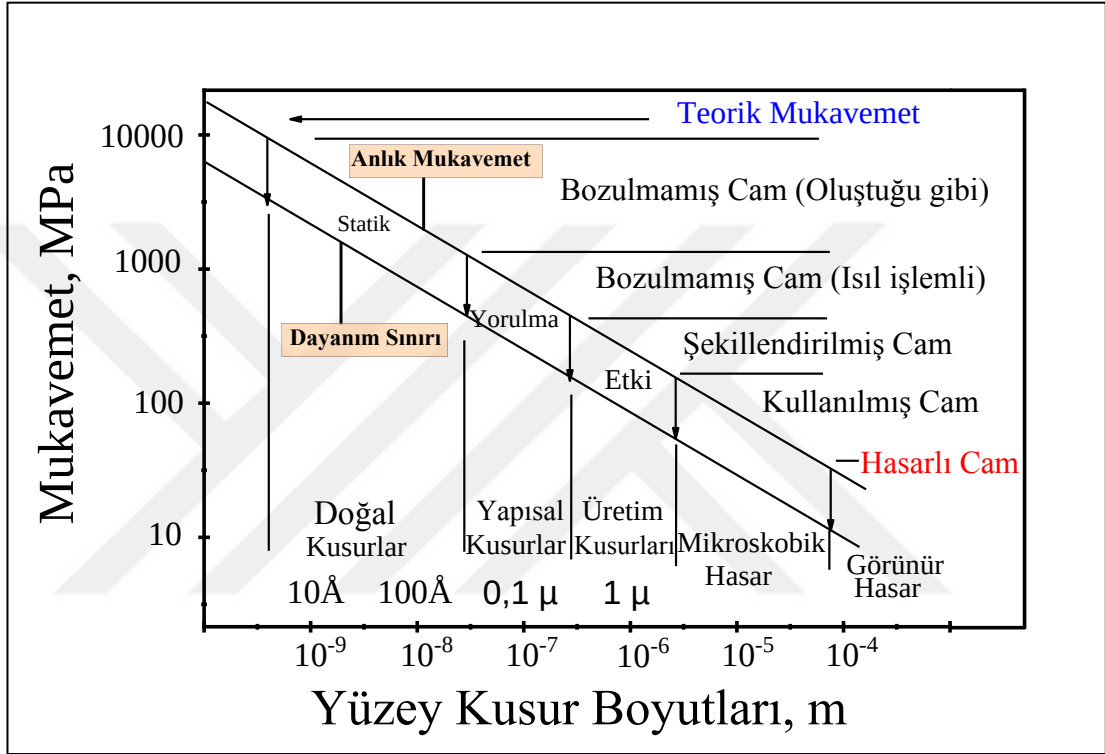
$$S = \frac{rK_{Ic}}{(r + 1)Y\sqrt{c}} \quad (2.14)$$

Artık gerilmeli durumdaki mukavemet denkleminde r değeri iki farklı kusur geometrisinde noktasal kusurlar için 3 çizgisel kusurlar için 1 olarak verilmektedir. İlk bakışta noktasal kusurların mukavemeti %25, çizgisel kusurların ise %50 olarak düşürdüğü görülmektedir. Denklem dikkatlice irdelendiğinde ise aslında c değerinin kritik çatlak uzunluğu yani kırılmanın gerçekleştiği çatlak uzunluğu olduğu görülmektedir. Cam uzmanları ise oluşturdukları yapay kusurun uzunluğunu bilmektedir. Dolayısıyla oluşturulan yapay kusurun uzunluğundan yola çıkarak mukavemet değerinin bulunabilmesini istemektedirler. Kritik çatlak uzunluğu ve indentasyon kusur uzunluğu arasındaki bağıntı denklem 2.15 ile verilmektedir [55], [56].

$$\frac{c}{c_i} = (r + 1)^{2/r} \quad (2.15)$$

Artık gerilme durumundaki mukavemet denkleminde kritik çatlak uzunluğu yerine indentasyon kusur uzunluğu denklemde kullanıldığında ise ticari cam ürününün mukavemet değeri ilk durumdan daha da kötüleşerek noktasal kusurlarda %53 çizgisel kusurlarda ise %75 olarak azalmaktadır [55].

Cam ürünlerinin yüzeylerinde üretim kaynaklı veya kullanım kaynaklı oluşan yüzey kusurlarının boyutları büyüdükçe bağıntılı olarak mukavemet değerleri azalmaktadır. Cam ürünlerinde yüzey kusur boyutu ve mukavemet ilişkisi Şekil 2.14 ile verilmektedir [28], [52]. Şekil 2.14'te anlık mukavemet herhangi yaşlanma etkisi olmayan cam ürünlerini temsil ederken dayanım sınırı ise mekanik testlerin öncesinde ve esnasında yaşlanma mevcut olmuş cam ürünlerini temsil etmektedir [52].



Şekil 2.14: Yüzey kusur boyutu mukavemet ilişkisi.

2.3.4.4.3. Halka Üstü Halka Testi Kullanılarak Mukavemetin Belirlenmesi

Endüstriyel cam üretiminde kullanım alanlarına göre cam ürünlerinin geometrisi ve boyutu değişmektedir. Bozulmamış camın mukavemet testi için cam fiberlerin çekilmesi yöntemi kullanılmaktadır. Bunun nedeni ise cam fiberlerin boyutlarına bağıntılı olarak yüzey alanlarının küçük olması yani yüzey kusur etkisinin en aza indirilmesidir. Bu yöntemin zorluğu cam fiberlerin uç noktalarından kenetlenmesidir. Günümüz teknolojisinin getirdiği modern teknikler nano ölçekli cam fiberlerin mukavemet ölçümlerinin başarı ile belirlenmesini sağlamaktadır. Cam fiberlerin yüzey alanları küçüldükçe mukavemet değerleri artmaktadır [28], [57].

Endüstriyel cam ürünlerinde mukavemet belirlenirken ürünün kullanım alanına uygun olarak beklentileri karşılaması istenmektedir. Örneğin cam ambalaj malzemeleri için ASTM C-149 ısı şok testi ve ASTM C-147 patlama basıncı testi yöntemleri kullanılmaktadır. Mimari, otomotiv, teknoloji vb alanlar kapsamında kullanılacak ürünlerde ise uygun ölçek faktörlerinin belirlenebilmesi açısından numunenin büyük bir kısmının çekme gerilmesi altında olması istenmektedir. Üç nokta eğme testinde gerilme bir alanda değil çizgide gerçekleştiğinden yöntem çok kullanışlı değildir. Üç nokta eğme testine nazaran daha fazla kullanılmakta olan dört nokta eğme testinde ise yüzeyde bulunan kusurlar kırış eksenine dik olarak yönlendirilmediği durum için maksimum gerilmenin kırış eksen boyunca tek yönlü olarak meydana gelmesinden dolayı mukavemet değerleri abartılı olmaktadır. Aynı zamanda gerilme yüzey alanların tamamında yani bağıntılı olarak kenar alanlarında da meydana gelmektedir. Kenarların iyi hazırlanmadığı durumlarda kırılma kenarlarda olduğundan mukavemet değerlerini saptırmaktadır [27], [58].

Halka üstü halka testi yönteminde, yük halkasının kapsadığı bölgede numunenin alt yüzeyinde gerilmeye neden olacak şekilde eş iki eksenli gerilim durumu oluşmaktadır. Bu durumda yönelimden bağımsız olarak kusurun merkezinde hasar oluşmaktadır. Gerilmeyi homojen ve yönelimden bağımsız olarak büyük bir yüzey alanına yayabilen halka üstü halka testi yöntemi ASTM C158-02'ye göre mukavemet değerinin ölçülmesi için kullanılan en iyi yöntemdir [27], [28], [58]. Bu tez çalışması kapsamında ısı temperli ve tavlanmış (kenarlarına işlem uygulanmaması nedeni ile kenar etkilerini en aza indirmek açısından) ticari soda kireç silikat cam numunelerine, halka üstü halka testi uygulanmıştır. Ticari soda kireç silikat cam numunelerinin mukavemet değerleri, eş iki eksenli eğme yöntemi olarak kullanılmakta olan halka üstü halka testi ile ASTM C1499-03 standartlarına uygun olarak denklem 2.16 vasıtası ile belirlenmiştir [59].

$$\sigma_f = \frac{3F}{2\pi h^2} \left[(1 - \nu) \frac{D_s^2 - D_L^2}{2D^2} + (1 + \nu) \ln \frac{D_s}{D_L} \right] \quad (2.16)$$

Eş iki eksenli eğme yöntemi için mukavemet denklemi 2.16'da MPa birimine sahip kırılma mukavemeti σ_f , N birimine sahip kırılma yükü F, mm birimine sahip test numune kalınlığı h, Poisson oranı ν , mm birimine sahip destek halkası çapı D_s , mm

birimine sahip yük halkası çapı D_L , mm birimine sahip test numunesi çapı D olarak verilmektedir [59].

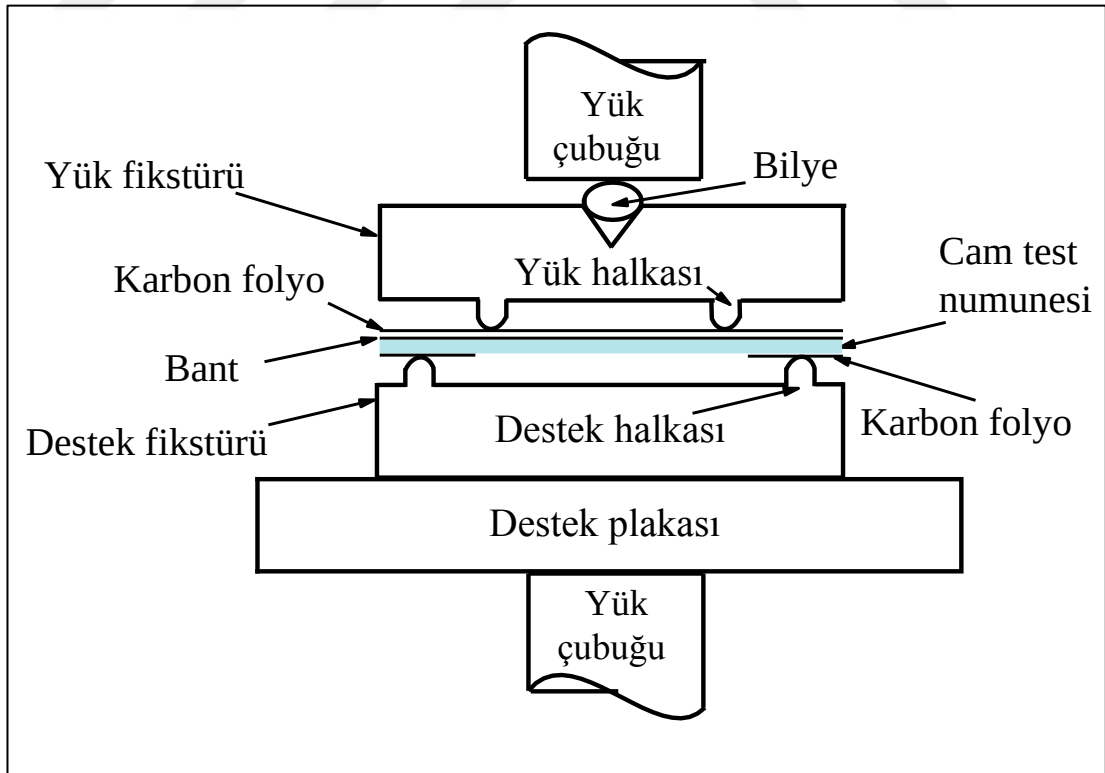
Dikdörtgen test numuneleri için D , ASTM C1499-03 standartlarına uygun olarak denklem 2.17 kullanılarak belirlenmiştir [59].

$$D = \frac{l}{0,90961 + 0,12652 \frac{h}{D_s} + 0,00168 \ln \frac{l-D_s}{h}} \quad (2.17)$$

Denklem 2.17' de verilmekte olan l değeri ise ASTM C1499-03 standartlarına uygun olarak denklem 2.18 kullanılarak belirlenmiştir [59].

$$l = 0,5(l_1 + l_2) \quad (2.18)$$

Denklem 2.18' de dikdörtgen test numunesi kenar uzunlukları l_1 ve l_2 olarak verilmektedir. Eş iki eksenli mukavemet test yöntemi için test numunesi ve temel fikstürün kesit görünümü Şekil 2.15 ile verilmektedir [59].



Şekil 2.15: Eş iki eksenli mukavemet test yöntemi için test numunesi ve temel fikstürün kesit görünümü.

2.3.4.5. Weibull İstatistik Analizi

Mukavemet testine tabi tutulmuş deneysel numunelerde elde edilen mukavemet verilerini açıklayabilmek için çeşitli dağılımlar kullanılabilmektedir. Bu dağılım türlerinden yaygın olarak bilinen ve kullanılanları ise Gaussian-Normal dağılım ve Weibull dağılımıdır. Deneysel numunelerin çok olduğu dolayısıyla çok fazla mukavemet verisinin olduğu durumda her iki dağılım da kullanılabilmektedir. Yüzeyindeki kusurların geometrisinin, konumunun ya da yöneliminin vasıtası ile kırılan cam ürünleri için Weibull dağılımının daha güvenilir sonuçlar verdiği bilinmektedir. Kırılma istatistik analizi, Weibull'un 1939 yılında tanımlamış olduğu en zayıf bağlantı argümanına dayanmaktadır. Bu argümana göre malzemenin herhangi bir kısmındaki herhangi bir kusur hasara uğradığında malzemenin tamamı hasara uğramaktadır. En zayıf bağlantı argümanı dağılımlarına örnek olarak kusur yoğunluğu dağılımları ve uç değer dağılımları da verilmektedir. Ancak Weibull dağılımı matematiksel kolaylıklar sağlaması ve verilere daha uygun olması sebebi ile daha çok tercih edilmektedir [27], [60], [61].

Weibull istatistik analizi ticari ürünler için talep edilmekte olan ürün beklentilerini karşılayacak şekilde istenen tasarımın güvenle kullanılabileceği mukavemet değerlerini, aynı gerilme yüklerinin etkisi altında küçük boyutlu numunenin büyük boyutlu numuneye nazaran hacminde daha büyük boyutlu kusurların bulunma olasılığının daha az olması nedeni ile hasara uğrama olasılığının daha az olması, aynı boyuttaki numuneler için elde edilen mukavemet verileri için ise ölçüm tekniğine bağlı olarak farklı ölçüm tekniklerinde numunenin farklı hacimsel bölgelerini çekme gerilmelerine maruz bırakması gibi etkileri kalite kontrol ve kullanım güvenliği için nicel olarak proses ve tasarım kriterlerine dahil edilebilmesini sağlamaktadır [61].

Test numunelerinin mukavemet verilerini tanımlamak için iki ve üç parametrelili Weibull dağılım formları kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında halka üstü halka testi ile mukavemet verileri belirlenmiş olan farklı ısıtma işlem uygulanmış ticari soda kireç silikat cam numuneleri için iki parametrelili Weibull kırılma istatistik analiz dağılımı kullanılmıştır. Uygulanan herhangi bir gerilme σ , değeri için test numunesinin hasarlanmama olasılığı denklem 2.19 ile verilmektedir [60], [61].

$$P_f(\sigma) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (2.19)$$

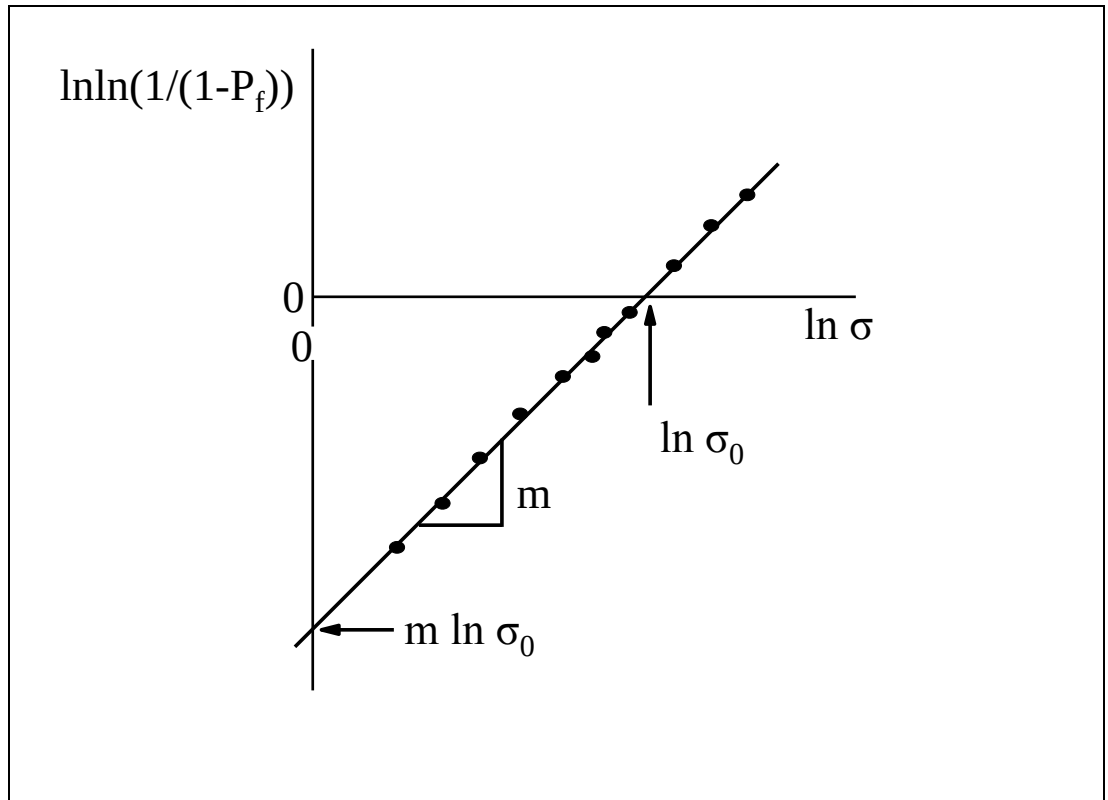
Denklem 2.19’da hasarlanmama olasılığı P_f , uygulanan gerilme değeri σ , Weibull mukavemeti σ_0 ve Weibull modülüsü m olarak verilmektedir.

Denklem 2.19’un iki kez doğal logaritması alınması sonucunda denklem 2.20 elde edilmektedir [61].

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1 - P_f} \right) = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 \quad (2.20)$$

Denklem 2.19’da olduğu gibi denklem 2.20’de de hasarlanmama olasılığı P_f , uygulanan gerilme değeri σ , Weibull mukavemeti σ_0 ve Weibull modülüsü m olarak verilmektedir.

$\ln \ln \left(\frac{1}{1 - P_f} \right)$ ve $\ln \sigma$ ‘nın bir fonksiyonu olarak Weibull parametreleri doğrusal bir çizgi yardımıyla belirlenebilmekte olup Şekil 2.16 ile şematik olarak gösterilmektedir [61].

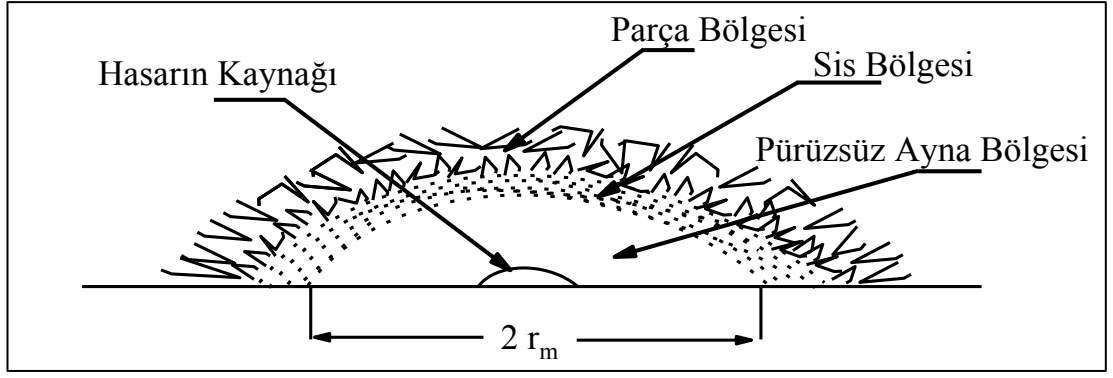


Şekil 2.16: Doğrusal regresyon yöntemi ve Weibull parametreleri arasındaki ilişki.

2.3.4.6. Kırık Yüzey Analizi

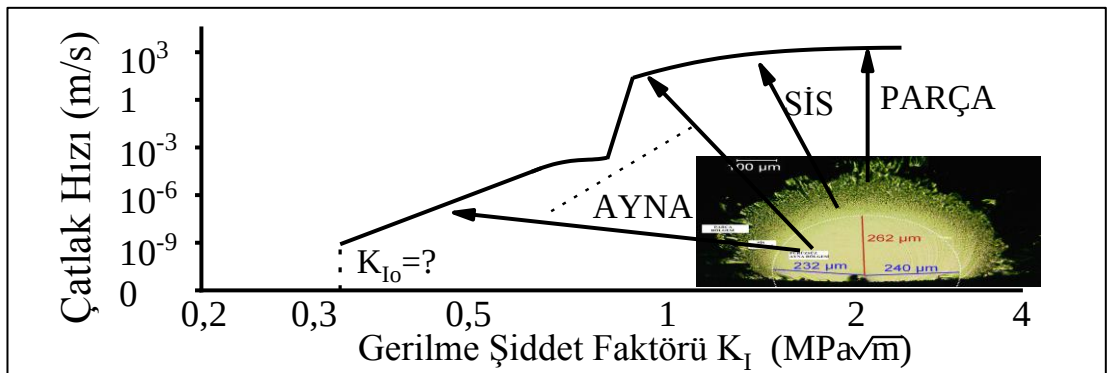
Endüstriyel cam üreticilerinin giderek artan sayısı ile birlikte bağıntılı olarak gelişen rekabet koşulları üretilen ticari cam ürününün kalite standartlarının oldukça yükselmesine neden olmaktadır. Üretilen ticari cam ürününün tasarımını kullanıldığı koşullar belirlemektedir. Cam ürünleri kırılığandır ve genellikle üretim kaynaklı veya kullanımın neden olduğu temas kaynaklı yüzey kusurları ürünün kırılmasına neden olmaktadır. Endüstriyel cam üreticileri için kalite standartlarını belirleyici yöntemlerden birisi kırık yüzey analizidir. Kırık yüzey analizi ticari cam ürününün tasarımı, proses kontrolü ve kullanım koşullarının değerlendirilmesi açısından oldukça yararlıdır. Kırık yüzey analizinin hedefi hasar oluşuktan sonra oluşan parçaların kırık modellerini incelemek ve kırığın merkezine ulaşmaktır. Dolayısıyla kırık yüzey analizi, ticari cam ürününün kırıldığı bir durumda kırılmaya neden olan kırık merkezi üretim kaynaklı bir kusurdan mı yoksa kullanıcı kaynaklı bir temas kusurumu ya da kullanılan durumda ticari cam ürünü tasarım gereği taşıyabileceği yüklerde mi yüklendi yoksa tasarım koşullarının üstünde bir yüklemeye mi maruz bırakıldı sorularına cam üreticileri ve kullanıcıları açısından kesin cevap verebilmesi nedeniyle oldukça değerlidir. Yaygın olarak kullanılmasının bir sonucu olarak adli davalarda çokça karşılaşılan ticari soda kireç silikat cam kompozisyonuna sahip mimari camlar, otomotiv camları, cam ambalaj ve cam ev eşyaları vb. ticari ürünlerde uygulanan tavlama ve ısıt temperleme yöntemlerine göre kırık yüzey analizi incelemesi davayı aydınlatıcı olmaktadır [62]-[68].

1960 yıllarında Johnson ve Holloway, sonrasında ise 1974 yılında Mecholsky ve arkadaşları yüzey kusurları için karakteristik olarak pürüzsüz ayna bölgesi, sis bölgesi ve parçalı bölgeyi göstermiştir. Wallner hatlarına ilave olarak parçalı bölgeye ait işaretler çatlak ilerleme yönünü göstermektedir dolayısıyla kırık yüzey analizi uzmanları kırığın başlangıcını genellikle tek bir kırık kaynağının merkezinde bulunan pürüzsüz ayna bölgesinden tespit edebilmektedir. Üniform gerilme altındaki numunede, Half-Penny yüzey kusuru varlığı nedeniyle oluşan kırık için bu bölgeler yarım daire şeklinde gösterilmektedir. Cam kırık yüzeyinde gözlemlenmiş olan pürüzsüz ayna bölgesi, sis bölgesi ve parça bölgesi şematik olarak Şekil 2.17 ile verilmektedir [62]-[65].



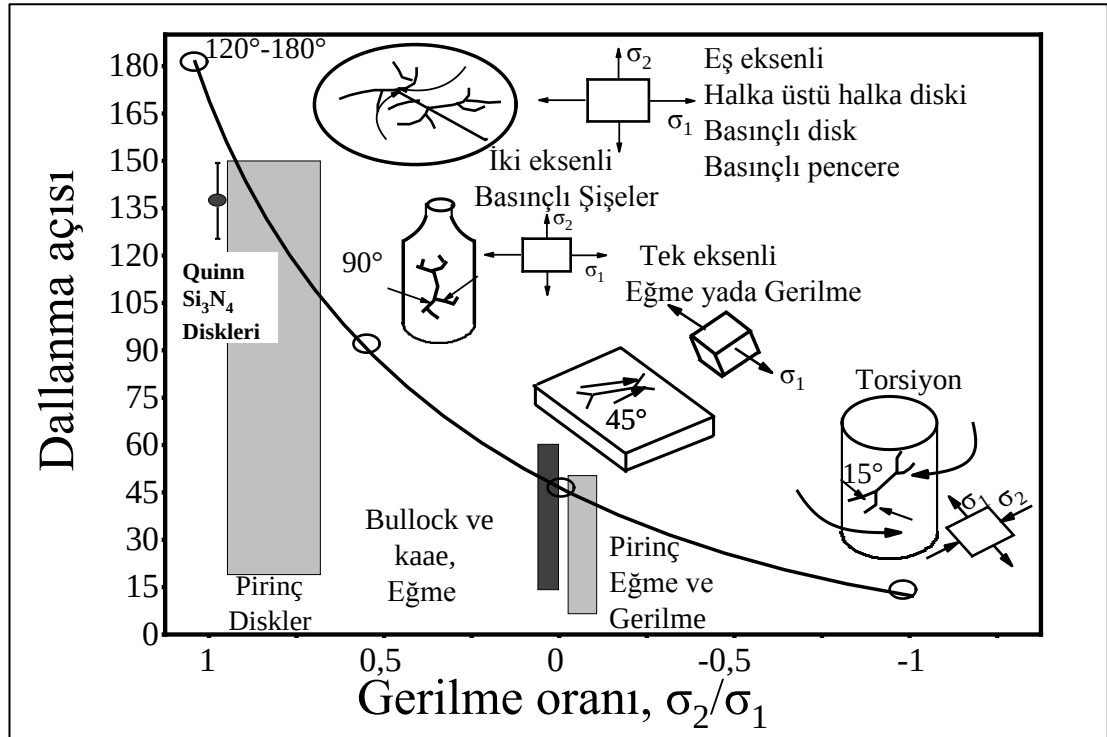
Şekil 2.17: Cam kırık yüzeyinde gözlemlenmiş olan pürüzsüz ayna bölgesi, sis bölgesi ve parça bölgesi.

Çatlak uzunluğunun artışıyla bağıntılı olan kırık yüzeyindeki karakteristik bölgelerin dinamik olarak gerilme şiddet faktörü K_I ile de bağıntılı olduğu düşünülmektedir. Çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörü K_I , kritik gerilme şiddet faktörü yani camın kırılma tokluk değeri K_{Ic} 'ye ulaştığında cam kırılmaktadır. Çatlak ayna bölgesinde sıfıra yakın bir hızdan uç hız değeri olarak adlandırılan terminal hıza doğru hızlanmaktadır. Hızlanma gerilme şiddet faktörü K_I 'nin artan değerleri ve çatlak uzunluğunun artması ile bağıntılı olarak sürekli olarak artan gerilim enerji salınım hızı G 'nin itici gücü ile gerçekleşmektedir. Richter'in notlarına göre soda kireç silikat camlarında sis bölgesi ~ 1000 m/s değerinde terminal çatlak hızı elde edildiğinde oluşmaktadır. Terminal çatlak hız değeri camdaki ses hızıyla bağıntılıdır. Camların terminal çatlak hız değerleri bileşime ve elastik özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermekte olup 700-2500 m/s arasında değişkenlik göstermektedir. Kırık yüzeyindeki karakteristik bölgelerin terminal çatlak hız değerleri ve gerilme şiddet faktörü K_I diyagramı Şekil 2.18 ile verilmektedir [63]-[65], [67].



Şekil 2.18: Kırık yüzeyindeki karakteristik bölgelerin terminal çatlak hız değerleri ve gerilme şiddet faktörü K_I diyagramı.

Diğer bir taraftan kırılma, tek bir çatlakta başlayarak, çatlak uzunluğunun artması ile bağıntılı olarak artan enerji salınım hızı oranının kritik çatlama yüzey enerjisinin iki katına çıktığında dallara ayrılarak devam etmesi ile oluşmaktadır. Mukavemeti daha yüksek cam ürünlerinin hasara uğradıkları esnadaki depolamış oldukları elastik enerji, mukavemeti düşük olan cam ürünlerine nazaran daha yüksektir. Isıl temperli cam ürünler tavlanmış cam ürünlerine nazaran daha yüksek elastik enerji depolamaktadırlar. Depolamış oldukları yüksek elastik enerji dolayısıyla ısıl temperli cam ürünler kırılma davranışları gereği güvenlik camı olarak da isimlendirilmektedirler. Dolayısıyla cam ürünlerinin parçalanma boyutları mukavemetlerinin bir göstergesi olmaktadır. Cam ürünlerinde çatlakların dallanmasına neden olan bir diğer yaklaşım ise cam ürünlerine uygulanan farklı gerilme durumlarıdır. Çatlakların dallanma açısı uygulanan farklı gerilim durumlarına göre farklı değerler almaktadır. Örneğin basit bir tek eksenli yani üç ya da dört noktadan eğme testi uygulanan cam ürününde dallanma açısı 45° iken, halka üstü bilye ile yapılan eş iki eksenli eğme testinde cam ürünündeki dallanma açısı 120° - 160° olmaktadır. Yüzey çatlağına saf kesme gerilmesi uygulandığında yani numune torsiyona uğratıldığında ise dallanma açısı 15° olmaktadır. Dallanma açısı ve çift eksenli gerilme ilişkisi Şekil 2.19 ile verilmektedir [64], [65], [69].



Şekil 2.19: Dallanma açısı ve çift eksenli gerilme ilişkisi.

2.3.4.6.1. Kırık Yüzey Analizi Belirleyici Araçlar

Kırık yüzey analizi kırılğan katı sınıfında bulunmakta olan cam, tek kristal ve çok kristal seramikler için benzerlik göstermektedir. Bazı durumlarda çok basit olarak görsel inceleme ile bile kırılmanın ısı ya da mekanik olduğu belirlenebilmektedir. Örneğin düşük mukavemete sahip cam ürünlerinin kırılması sonrasında kırık yüzey bölgesinde oluşan karakteristik ayna bölgesi yeterince büyük parçalarda kırılma nedeniyle gözle görülebilmektedir. Kırılğan doğaya sahip cam malzemelerde kırılma yüzeyindeki karakteristik bölgeleri belirlemek için çeşitli mikroskoplar kullanılmaktadır. Kırık yüzey analizi uzmanlarının en yaygın olarak kullandıkları mikroskoplar stereo mikroskop ve taramalı elektron mikroskopudur [63], [64], [67], [70], [71].

Stereo mikroskop yüksek alan derinliği, geniş büyütme yeteneği ile kırık yüzeylerinin üç boyutlu olarak doğal bir görünüm sağlamaktadır. Dijital kamera, bilgisayar ve bağıntılı olarak yazılım alanlarındaki teknolojik gelişmeler; görüntüleme teknolojisini iyi bir seviyeye getirerek, optik mikroskopların bu teknoloji ile donatılmalarıyla birlikte günümüz teknolojisine uygun akıllı optik mikroskop tasarımlarına fırsat oluşturmaktadır. Cam ürününün kırılmasına yol açan kusurun net bir görüntüsünü elde etmek için daha yüksek büyütme gerekebilmektedir; bu durumda kimyasal analiz, yüksek büyütme yeteneği ve alan derinliği özelliklerine sahip taramalı elektron mikroskopları kullanılmaktadır [67], [71].

Bu tez kapsamında halka üstü halka testi sonucu kırılmış numunelerin kırık yüzeylerindeki karakteristik bölgeler stereo mikroskop kullanılarak belirlenmiştir. Karakteristik bölge boyutlarının test numune mukavemeti ile ilişkisi literatürden denklem 2.21 ile verilmektedir [65], [72].

$$\sigma_j^{1/2} = A_j \quad (2.21)$$

Denklem 2.21’de kırılma gerilmesi σ , indis değeri j (ayna-sis karakteristik bölgesi için $j = m$, sis-parça karakteristik bölgesi için $j = h$, çatlak dallanması için $j = cb$), ayna-sis yarıçapı r_m için ayna sabiti A_m , sis-parça sınır yarıçapı r_h için parça sabiti A_h , çatlak dallanması yarıçapı r_{cb} için çatlak dallanma sabiti A_{cb} olarak verilmektedir. Ayna sabiti A_m , parça sabiti A_h , ya da dallanma sabiti A_{cb} , bilinen

malzemelerin kırılma gerilmesi denklem 2.21 vasıtası ile tahmin edilebilmektedir. Literatürde soda kireç silikat camı için ayna sabiti $A_m = 1,92 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, parça sabiti $A_h = 2,21 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ olarak verilmiştir [65].

2.4. Camlara Uygulanan Isıl İşlemlerin Artık Gerilme Üzerindeki Etkileri

2.4.1. Giriş

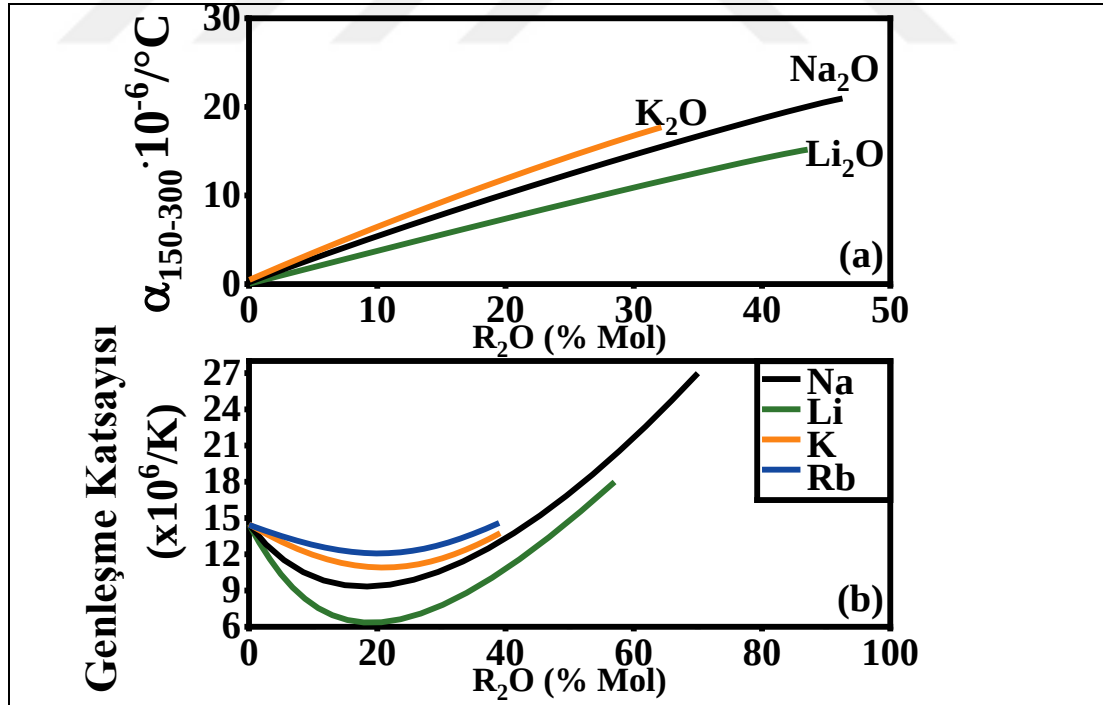
Endüstriyel cam üreticileri için hedefledikleri cam ürün gereksinimlerini karşılayabilmeleri açısından gelişen teknolojinin de etkisiyle kalite kontrol proseslerindeki temel faktörlerden birisi kırılğan doğaya sahip cam ürünlerinde oluşan artık gerilmeler ve yüzeyde bulunan kusurlar hesaba katılarak artık gerilmelerin mekanik mukavemete etkileri olmuştur. Cam ürünlerinde artık gerilmelere; camın yapısına bağıntılı olarak indentasyon ve radyasyon, camda bulunan heterojenlikler, cama uygulanan ısıl işlemler “tavlama” ve “ısıl temperleme”, kimyasal temperleme ve camın kullanım esnasında farklı bir malzeme ile bağlanması etki etmektedir [43].

2.4.2. Isıl Genleşme

Endüstriyel bir cam ürünü ısıtılması ile birlikte genleşmektedir. Üretilen ürünün tasarımına göre cam ürününün üzerindeki her bir bölge için homojen sıcaklık söz konusu ise cam ürünü içerisinde gerilme oluşmaz. Cam ürünü üzerinde homojen olmayan bir ısıtma uygulandığında ise cam ürününün üzerindeki farklı bölgeler farklı miktarlarda genleşme göstereceğinden, cam ürününün kırılmasını sağlayan çekme gerilmelerini oluşturmaktadır. Oluşan çekme gerilmelerinin büyüklüğü endüstriyel cam ürünün termal genleşme davranışı ile bağıntılıdır. Termal genleşme davranışı nihai ürün beklentileri, proses beklentileri ve ekonomik beklentiler kapsamında tavlama ve ısıl temperleme prosesleri açısından oldukça önemlidir. Cam ürünleri için genellikle 20-300°C sıcaklık aralığının üzerindeki ortalama termal genleşme katsayıları kullanılmaktadır. Silika camı kuvvetli kovalent bağları nedeniyle 20-1000°C sıcaklık aralığında ortalama olarak $5,5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ değeri ile tek bileşene sahip camlar arasında oldukça düşük termal genleşme katsayısına sahiptir. Bu özelliği

nedeniyle nihai ürün beklentisi olarak yüksek termal şok özelliği gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Endüstriyel soda kireç silikat camlarında kimyasal kompozisyon içerisinde ağ yapıcı fonksiyonu olan SiO_2 yapısında bulunan kuvvetli kovalent bağların etkisini kırarak yapı içerisinde iyonik bağlar yani köprü kurmayan oksijen bağları oluşturan ağ düzenleyici fonksiyonu ile kimyasal kompozisyona dahil edilen alkali oksitler termal genleşme katsayısını arttırmaktadır [73].

Kimyasal kompozisyonun bir fonksiyonu olarak $\text{R}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ($\text{R} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}$) sistemine sahip camların ısı genleşme katsayıları Şekil 2.20 (a) ile verilmektedir [73], [74]. Kimyasal kompozisyonun bir fonksiyonu olarak $\text{R}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ ($\text{R} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}$) sistemine sahip alkali borat camlarında ise kimyasal kompozisyona dahil edilen alkali oksitler belirli bir sınır değerine kadar ısı genleşme katsayısında minimuma neden olurken sınır değer üstünde ise ısı genleşme katsayısını arttırmaktadır bu etkiye bor anomalisi adı verilmekte olup Şekil 2.20 (b) ile gösterilmektedir [73], [74]. SiO_2 yapısına eklenen TiO_2 ısı genleşme katsayısını düşürmekte olup ısı genleşme katsayısının sıfır olduğu özel uygulamalara sahip cam kimyasal kompozisyonlarında kullanılmaktadır [73].



Şekil 2.20: (a) Kimyasal kompozisyonun bir fonksiyonu olarak $\text{R}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ($\text{R} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}$) sistemine sahip camların ısı genleşme katsayıları. (b) Kimyasal kompozisyonun bir fonksiyonu olarak $\text{R}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ ($\text{R}=\text{Li}, \text{Na}, \text{K}$) sistemine sahip alkali borat camların ısı genleşme katsayıları.

2.4.3. Sıcaklık-Viskozite

Sıcaklık değişimine ve cam kompozisyonuna bağıntılı olarak değişen viskozite; endüstriyel cam üretim prosesinde nihai ürün beklentileri, proses beklentileri ve ekonomik beklentileri belirleyen en önemli özelliktir. Cam farklı işlemlere tabi tutularak oluşturulurken homojen sıcaklık değerleri ve bağıntılı viskozite özelliklerinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Endüstriyel cam üretim süreci açısından viskozite, yüksek sıcaklık aşamalarında (tasarlanan endüstriyel cam kompozisyonları için kullanılan hammaddelerin ergitilme aşamasında, yapıda kompozisyona bağlı hammaddelerin içerisinde bulunan gazların etkisiyle oluşan ve kaliteyi olumsuz etkileyen kabarcıkların giderilmesiyle homojenleştirme aşamasında, yine cam yapısında kompozisyonel tasarım gereği oluşması muhtemel olan devitrifikasyon türü kristallenme sıcaklığının belirlenmesinde), koşullandırma aşamasında ve şekillendirme aşamasında yine nihai ürün beklentileri açısından tavlama ve ısı temperleme aşamaları için sıcaklık değerlerinin belirlenmesinde en önemli parametredir [75], [76]. Endüstriyel cam üretim süreci için önemli viskozite-sıcaklık değerleri aşağıda verilmektedir [77]-[79].

- Ergime sıcaklığı: Viskozite değeri 10^1 - 10^2 Poise, P (1 - 10^1 Pa.s)
 - Tasarlanmış endüstriyel cam kompozisyonunu oluşturan hammaddelerin tamamının ergitildiği, homojenizasyon ve afinasyon aşamalarından geçirildiği sıcaklık değeri.
- Çalışma aralığı: Viskozite değeri aralığı 10^4 - $10^{7,65}$ Poise, P (10^3 - $10^{6,65}$ Pa.s)
 - Endüstriyel cam üretim sürecinde şekillendirme aşamasının yapıldığı sıcaklık değeri aralığıdır. Endüstriyel cam ürününün proses farklılığına göre preslendiği, üflendiği, veya damla şekillendirilebildiği sıcaklık değeri olan çalışma sıcaklığından başlayarak, şekillendirme işleminin son bulacağı yumuşama sıcaklık değerine kadar devam etmektedir.
 - Kısa Cam: Çalışma aralığı içerisinde viskozitenin dik bir eğim sergilemesi ile birlikte şekillendirme aşamasında cam daha dar bir sıcaklık aralığında şekillendirilmektedir. Otomatik endüstriyel üretim için bu tür kimyasal cam kompozisyonu kullanılmaktadır.

–Uzun Cam: Çalışma aralığı içerisinde viskozitenin eğimi kısa cama nazaran daha az bir eğim sergilemektedir. Eğimin daha az olması ile birlikte şekillendirme aşamasında cam daha geniş bir sıcaklık aralığında şekillendirilmektedir. El sanatının kullanıldığı üretim için bu tür kimyasal cam kompozisyonu kullanılmaktadır.

–Yumuşak Cam: Soda kireç silikat camlarından daha düşük sıcaklıklarda çalışma aralığına sahip, düşük viskoziteli kimyasal cam kompozisyonlarına sahip cam türleridir. Soda kireç silikat ve kurşun-silikat ticari cam türleri yumuşak cam sınıfına girmektedir.

–Sert Cam: Soda kireç silikat camlarından daha yüksek sıcaklıklarda çalışma aralığına sahip, yüksek viskoziteli kimyasal cam kompozisyonlarına sahip cam türleridir. Borosilikat, alümina silikat ve silikat vb. ticari cam türleri sert cam sınıfına girmektedir.

- Yumuşama sıcaklığı: Viskozite değeri $10^{7,65}$ Poise, P ($10^{6,65}$ Pa.s)

–ASTM 338, ve ISO 7884-3 standartlarına göre endüstriyel cam ürününün kendi ağırlığı altında deformasyona uğradığı sıcaklık değeridir.

- Cam dönüşüm aralığı, Tg: Viskozite değeri aralığı 10^{12} - $10^{13,3}$ Poise, P (10^{11} - $10^{12,3}$ Pa.s)

–Endüstriyel cam ürünün sıvı hal özellikleri gösterdiği sıcaklık değerinden, hızlı soğutulmasıyla birlikte görünüşte katı bir koşulun tamamlanması ve dolayısıyla katı hal özellikleri gösterdiği sıcaklık değerine kadar devam eden değer aralığıdır.

- Tavlama sıcaklığı: Viskozite değeri 10^{13} Poise, P (10^{12} Pa.s)

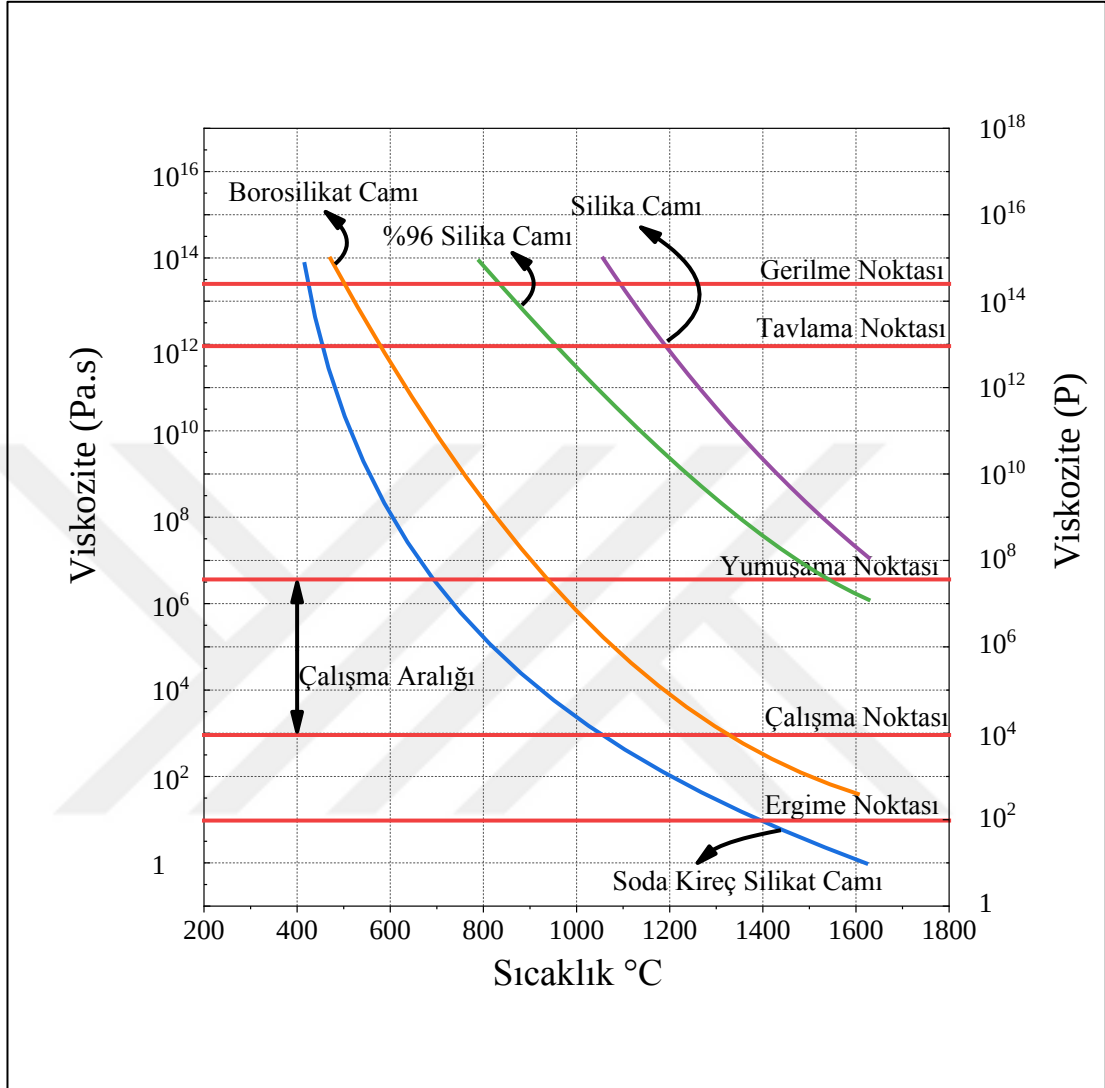
–Endüstriyel cam ürününün üretim prosesi esnasında içerisinde oluşan gerilmelerin 15 dakika içerisinde ortadan kalktığı sıcaklık değeridir.

- Gerilme sıcaklığı: Viskozite değeri $10^{14,5}$ Poise, P ($10^{13,5}$ Pa.s)

–Endüstriyel cam ürününün üretim prosesi esnasında içerisinde oluşan gerilmelerin birkaç saat içerisinde yok olduğu sıcaklık.

–Viskozite değeri ve değeri aralıkları bütün endüstriyel cam kompozisyonları için aynı anlamı ifade etmesine karşın, viskozite değeri ve değeri aralıklarına karşılık gelen sıcaklık değerleri endüstriyel camların tasarlanan kimyasal kompozisyonlarına göre farklılık göstermektedir.

Birbirlerinden farklı kimyasal kompozisyonlara sahip endüstriyel cam türlerine ait viskozite sıcaklık değişimi Şekil 2.21 ile verilmektedir [79].



Şekil 2.21: Birbirlerinden farklı kimyasal kompozisyonlara sahip endüstriyel cam türlerine ait viskozite sıcaklık değişimi.

Endüstriyel soda kireç silikat camlarında kimyasal kompozisyon içerisinde ağ yapıcı fonksiyonu olan SiO_2 yapısında bulunan kuvvetli kovalent bağların etkisi ile viskoziteyi tüm sıcaklık aralıklarında arttırmaktadır. Ağ düzenleyici fonksiyonu ile kimyasal kompozisyona dahil edilen alkali oksit Na_2O ise kuvvetli kovalent bağlarını kırarak yapı içerisinde iyonik bağlar yani köprü kurmayan oksijen bağları oluşturarak viskoziteyi düşürmektedir. Yine ağ düzenleyici fonksiyonu ile kimyasal kompozisyona dahil edilen toprak alkali oksit CaO ise yüksek sıcaklıklarda Na_2O ile

benzer şekilde viskoziteyi düşürürken, düşük sıcaklıklarda ise Na_2O 'dan farklı olarak viskoziteyi önemli ölçüde arttırmaktadır [75].

2.4.4. Homojenlik

Yüzdürme tekniği vasıtası ile endüstriyel soda kireç silikat düz cam üretim prosesi uygun hammadde seçimi ile başlayarak, hammaddelerin sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak sırasıyla ergitme, koşullandırma, şekillendirme, tavlama ve kesme aşamalarından geçmesi ve hedeflenen nihai ürünün üretilmesine dayanmaktadır. Dolayısıyla endüstriyel düz cam üretimi zincire benzer bir şekilde birbirlerinden doğrudan veya dolaylı ilişkili prosesler gerektirmektedir. Nihai ürünün kimyasal, fiziksel, ısı ve mekanik özelliklerini olumsuz etkileyen inhomojenlik durumu üretim prosesi içerisindeki zincirlerin optimum olmadığı gerçeğinin göstergesi olmaktadır. Üretilen ticari düz cam ürününün kullanım koşullarında homojen olması bağıntılı olarak cam özelliklerine olumlu etkiler sergilemesi endüstriyel cam üreticilerinin ürünlerinin kalite kontrol aşaması açısından en temel beklentilerinin başında gelmektedir. Homojen bir ticari düz cam; harmanın hazırlanması aşaması için uygun tane boyut dağılımına sahip kolay ergiyebilen hammaddelerin seçilmesi, bu hammaddelerin tasarlanan şekilde karıştırılarak harmanın ergitme aşamasına beslenmesi, beslenen harmanın çekiş hızına bağıntılı olarak analiz edilen optimum ergitme sıcaklığında ve süresinde yeterince tutulması ve ergiyik hale geçen camın konveksiyon akışlarıyla yeterince karıştırılması, ergitme aşamasından nispeten daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşen koşullandırma aşamasına gelen camda kristallenme, gaz kabarcığı, inklüzyon miktarının en aza indirgenmesi, refrakterlerde korozyon olmaması şeklindeki parametreleri sağlayarak şekillendirme aşamasına gelmesi ile oluşmaktadır [43], [80], [81].

2.4.4.1. Christiansen – Shelyubskii Yöntemi Kullanılarak Ticari Cam Ürünün Homojenliğinin Belirlenmesi

1960 yılında Shelyubskii, Raman'ın teorisindeki çok ince tanelerin optik olarak homojen davranışını kullanarak ve kırılma indisinde Gauss-Normal dağılımın varsayımını sürece entegre ederek camların homojenliğinin nicel olarak ölçülmesini sağlayan yeni bir yöntem tanımlamıştır. Bu yöntemde endüstriyel cam üretiminde

üretileen nihai ürünün istenilen kalite standartlarında süreklilik ve tekdüzelik sağlaması açısından Christiansen filtresi kullanılmaktadır. Endüstride renkli, renksiz düz cam, cam ambalaj, cam ev eşyası gibi büyük cam sektörlerinin ürünlerinde homojenlik derecesini belirlemesi açısından kırılma indisinin standart sapmasına dayanan yöntem endüstriyel cam üretiminde kalite kontrol açısından güvenilir olarak kullanılmaktadır [80]-[83].

Bu tez çalışması kapsamında farklı ısıt işlemler uygulanmış ticari soda kireç silikat cam numunelerinin homojenlik dereceleri Christiansen-Shelyubskii yöntemi vasıtası ile denklem 2.22 kullanılarak belirlenmiştir [81].

$$\sigma = \frac{h(d_n/d_T)}{2} \sqrt{-\frac{\ln(\tau_m)}{\ln 4}} \quad (2.22)$$

Denklem 2.22’de cam parçacıklarının kırılma indisi değerlerinin standart sapması yani homojenlik derecesi σ , sıcaklık-geçirgenlik eğrisinden maksimum geçirgenlik τ_m ve yarı genişlik h , cam parçacıklarıyla birlikte kullanılan sıvının kırılma indisinin sıcaklık katsayısı ise d_n/d_T olarak verilmektedir.

2.4.5. Tavlama Prosesi ve Artık Gerilme İlişkisi

Tavlama ısıt işleminin endüstriyel cam üretimi için bir proses zorunluluğu haline gelmesinde yani yüzdürme düz cam üretiminde sürekli tavlama ısıt işlemleri yapılmasındaki amaç nihai ticari cam ürününde ergitme aşamasında devitrifikasyon türü kristallenmeden kaçınmak için ergiyik camın hızlı soğutulmasının bir sonucu olarak oluşan artık gerilmelerin neden olduğu kolay kırılmalardan ve nihai camın kesimini zorlaştıran yüksek artık gerilmelerden kaçınmaktır. Dolayısıyla sürekli tavlama ısıt işlemleri yüzdürme teknolojisine ticari düz camın kullanım alanına göre ısıt şok direncini artırması, kolay kırılmalığının önüne geçilmesi ve kesimi kolaylaştırması açısından artık gerilmelerin minimuma indirgenerek homojen ve optimize edilmiş bir artık gerilme dağılımı oluşturması nedeniyle entegre edilmiştir. Tavlama ısıt işlemleri kontrollü yavaş soğutma ile gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla yüzdürme teknolojisi ile üretilen düz camın genişliği ve uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımı homojen olmalıdır. Kimyasal olarak camın inhomojenliğide artık gerilmelere

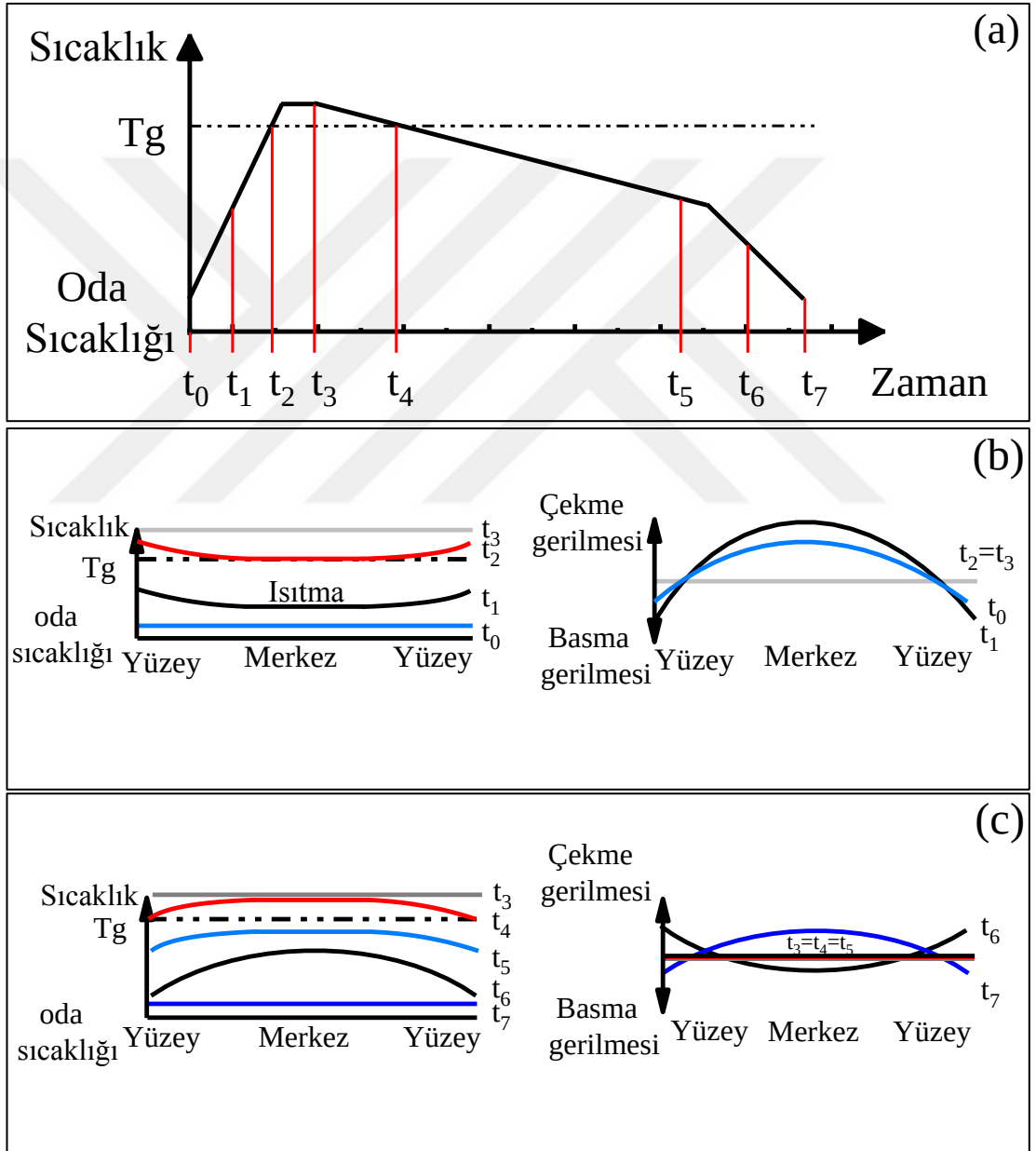
neden olmaktadır. Dolayısıyla ticari cam ürünü tavlama&soğutma ünitesine gelmeden önce kimyasal homojenliği kontrol edilmelidir. Tavlama ısı işlemi sıcaklık ve zamana bağıntılıdır. Üretilen ticari camın boyutuna ve kullanım alanına bağlı olarak bazı ürünlerin tavlama ısı işlemi saatler alırken, homojen bir kırılma indisi ve yaklaşık sıfır artık gerilme beklentisi nedeniyle optik camların tavlama haftaları hatta ayları almaktadır [43], [84]-[87].

Endüstriyel cam üretiminde tavlama ısı işleminin optimize edilmesi ve süreklilik elde edilmesi açısından camların viskozite-sıcaklık ilişkisi oldukça önemlidir. Ticari bir cam üretim prosesinde iyi bir tavlama ısı işlemi için artık gerilmelerin kaldırılamayacağı yüksek viskozite değerlerinden ve üretilecek ürünün tasarımı gereği şeklini koruyamayacağı düşük viskozite değerlerinden kaçınmak gerekmektedir. Dolayısıyla iyi bir tavlama ısı işlemi camın kimyasal bileşimine bağıntılı olan viskozite-sıcaklık ilişkisinden tavlama sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklık değerinden üretilen ticari cam ürün geometrisinde homojen kontrollü ve yavaş bir şekilde gerilme sıcaklığına soğutulması ile sağlanmaktadır. Endüstriyel cam üretiminde hedeflenen nihai ürün beklentilerini karşılamak için kullanılan üretim prosesi ekonomik beklentilerin içinde kalacak şekilde optimize edilmelidir. Dolayısıyla bir tavlama fırını artık gerilmeleri istenilen minimum seviyeye en kısa sürede ve en az ısıtma enerjisi harcayacak şekilde tasarlanmaktadır. Nihai endüstriyel cam ürünlerinde kullanım alanını hesaba katarak uygun görülebilecek maksimum gerilmeye karşılık gelen optimum soğutma hızı hesaplanabilmekte olup denklem 2.23 ile verilmektedir [84], [85].

$$h = \frac{\sigma}{Md^2b} \quad (2.23)$$

Denklem 2.23'te soğutma hızı h , ve birimi K/s, artık gerilme σ , ve birimi MPa, içerisinde malzemenin ısı iletkenliği, yoğunluğu, özgül ısı, ısı genleşme katsayısı, elastik modülüsü ve poisson oranı gibi malzeme özelliklerinin bulunduğu ve Mathieu Hubert'in denklemde kolaylık sağlaması amacı ile kısaltma olarak kullandığı bir malzeme sabiti M , ve birimi $\text{MPa} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 'dir. (Soda kireç silikat camı için $M=1,2 \times 10^6 \text{ MPa} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$). iki tarafıda soğutulacak bir cam plaka için kalınlığın yarısına eşit olan karakteristik boyut d ve birimi m, düz plakalar için 0,336 sabit değerindeki şekil faktörü ise b 'dir [85].

Artık gerilmelerin neredeyse sıfır olmasının beklendiği ticari cam ürünleri için farklı zamanlarda oda sıcaklığından camsı dönüşüm sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara ısıtılması, bekletilmesi ve tekrardan kontrollü bir soğutma ile oda sıcaklığına döndürülmesine ait ince tavlama döngüsü Şekil 2.22(a) ile verilmektedir [87]. Oda sıcaklığında basma gerilmesi altında olduğu varsayılan cam ürününün ince tavlama döngüsüne göre ısıtma ve soğutma aşamaları ise sırasıyla Şekil 2.22(b) ve Şekil 2.22(c) ile verilmektedir [87].



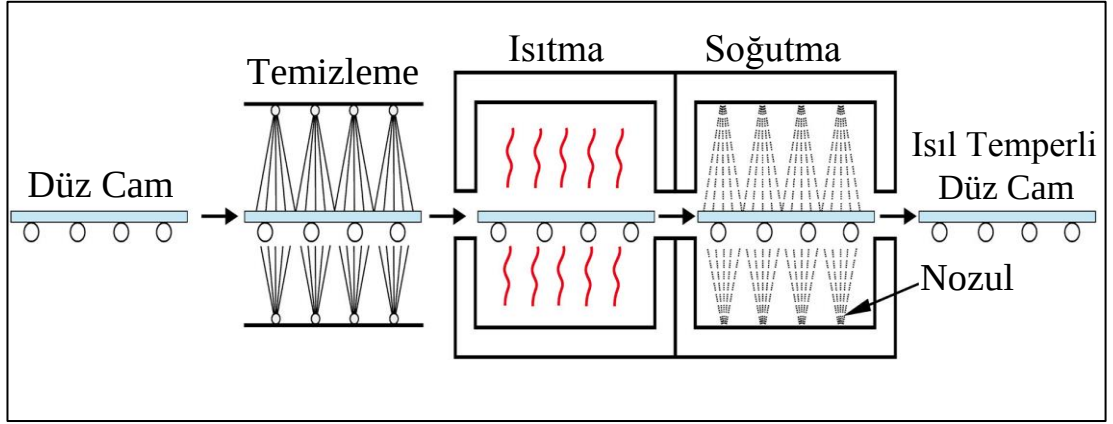
Şekil 2.22: (a) İnce tavlama döngüsü, (b) Isıtma esnasında temsili zamanlarda sıcaklık dağılımının fonksiyonu olarak camda oluşan gerilmenin şematik gösterimi (c) Soğutma esnasında temsili zamanlarda sıcaklık dağılımının fonksiyonu olarak camda oluşan gerilmenin şematik gösterimi.

2.4.6. Isıl Temperleme Prosesi ve Artık Gerilme İlişkisi

Genellikle cam ürünlerinin yüzeylerinde üretim kaynaklı ya da kullanım esnasında temas kaynaklı oluşan kusurlar mukavemetin oldukça düşmesine neden olmaktadır. Endüstriyel cam üreticileri camların mukavemetlerini arttırabilmek için zaman içerisinde çok çeşitli teknikler kullandılar. Günümüzde en yaygın mukavemet arttırma teknikleri yüzeyde basma artık gerilmeleri oluşturmaya dayanmakta olan ısı temperleme ve kimyasal temperleme yöntemleridir. Ticari bir cam ürününün kullanım alanı ve hedeflenen nihai ticari cam ürün özellikleri uygulanacak olan mukavemet arttırma yöntemi için belirleyici olmaktadır [88], [89]. Bu tez çalışması kapsamında ısı temperleme mukavemet arttırma tekniği uygulanmış ticari boyutlarda soda kireç silikat cam numuneleri kullanılmıştır.

1600'lü yılların başında tesadüfi olarak ergiyik camın soğuk suya düşürülmesi ile zayıf noktası olan kuyruk bölgesinden kırılıncaya kadar kırılmayan bir cam üretildi. Tesadüfi üretilen camların yöntemi uzunca bir süre sır olarak saklandı. 1660 yılına gelindiğinde Prens Rupert tarafından araştırılması için kraliyet cemiyetine verilen bu cam ürünlerin sırrı çözülerek ergiyik camın soğuk su ile temas etmesi nedeniyle oluştuğu bulundu. Daha sonrasında bu camlar Prens Rupert damlası olarak adlandırıldı. Bilinçli olarak ilk cam ısı temperleme işlemi 1874 yılında Francois Royer de la Bastie tarafından patentlendi. Isıl temperli cam üretim prosesi için ilk patentin 1935 yılında Rudolf Seiden'e ait olduğu varsayılmaktadır. 1929 yılında otomobil camları olarak kullanılmaya başlayan ısı temperli camlar tavllanmış camlara nazaran kırıldığında küçük kör parçalara ayrılması dolayısıyla güvenlik camı olarak adlandırılmaları ve yine 4-5 kat yüksek mukavemete sahip olmaları gibi avantajları nedeniyle kullanımları ve kullanım alanları genişlemiştir. Günümüzün teknolojisi ile gelişen ısı temperleme prosesi endüstriyel cam üretim merkezlerinde mimari, otomotiv, cam ev eşyası, cam ambalaj malzemeleri gibi büyük sektörlerde kullanılmaktadır. Hedeflenen kalitede bir ısı temperleme prosesi öncesinde kullanılacak cam ürününün iyi bir tavlama ısı işleminden geçirilerek artık gerilmelerin istenilen optimum seviyede tutulması, kabarcık, kapanım, nikel sülfür gibi safsızlıkların giderilmesi ve kalınlık farklarının azaltılarak homojen olmayan sıcaklık farklarının önüne geçilmesi, kesme işleminin sonrasında kenar işleme işlemlerinin son derece titiz yapılması gerekmektedir [43], [85], [90]. Yüzdürme teknolojisi prosesi ile

hedeflenen kalitede üretilen, tavlanan ve kesilen düz camın ısı temperleme prosesi Şekil 2.23 ile verilmektedir [38].



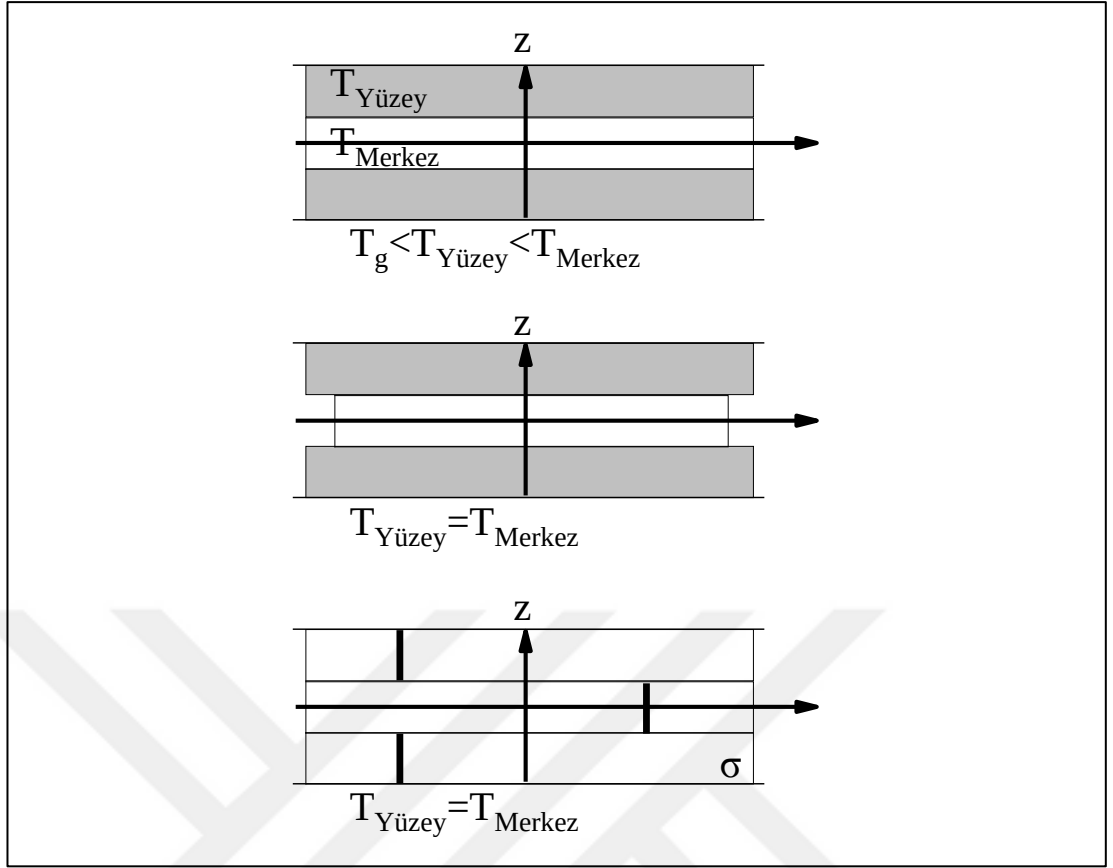
Şekil 2.23: Düz cam ısı temperleme prosesinin şematik gösterimi.

İyi kalitede ısı temperli bir ticari düz cam elde etmek için ısıtma fırınından çıktığı ve soğutma kısmına girdiği esnada, cam geçiş sıcaklığının üzerinde ve yumuşama sıcaklığının altında homojen bir sıcaklık ve soğutma hızının gerinim noktasının oldukça altına kadar sabit olması gerekmektedir [84], [88].

Camın ısı temperleme prosesi; ısıtma fırınında ısı aktarımına yani camın merkezinden yüzeyine doğru kızılötesi radyasyon, seramik merdaneler ile temas etkisine dayanarak temas eden yüzeyde konveksiyon, fırında mevcut olan hava ile temas eden yüzeylerde konveksiyon şeklinde enerjiyi absorbe etmesine, sıcaklık-viskozite ilişkisine, soğutma esnasında yoğunluk değişimine ve tabiki ticari ürünlerde kalınlık faktörünün etkisiyle üç boyutlu kompleks bir yapı olmasına bağıntılı olarak kompleks bir problemdir. Cam sabit bir hız ile soğutulursa sıcaklık profili paraboliktir ve cam levhanın yüzey ve merkez arasındaki sıcaklık değişimleri denklem 2.24 ile verilmektedir [75].

$$\Delta T = \frac{t^2 \times C_R \times C_P}{8k} \quad (2.24)$$

Denklem 2.24'te cam kalınlığı t , soğutma hızı C_R , özgül ısı C_P , ısıl iletkenlik k , olarak verilmektedir. Isıl olarak temperlenmiş bir camın yüzeyinde basma artık gerilmesi ve merkezinde çekme artık gerilmesi oluşumu Şekil 2.24 ile verilmektedir [75].



Şekil 2.24: Isıl temperleme prosesine tabi tutulmuş bir camda artık gerilme oluşumunun şematik gösterimi.

Eş eksenli gerilmeler denklem 2. 25 ile verilmektedir [75].

$$\sigma_z = \frac{E\alpha_s}{1 - \vartheta} (\bar{T} - T_{(z)}) \quad (2.25)$$

Denklem 2.25'te z noktasındaki gerilme değeri σ_z , elastik modülüs E , ısı genleşme katsayısı α_s , poisson oranı ϑ , ortalama sıcaklık $\bar{T}$ ve z konumundaki sıcaklık $T_{(z)}$ olarak verilmektedir [75].

Hızla soğutulan düz cam plakada kalınlık boyunca parabolik bir sıcaklık dağılımı oluştuğunda plakanın merkezinde maksimum çekme artık gerilmesi elde edilmektedir. $z = 0$ durumu için plakanın merkezinde oluşan maksimum çekme artık gerilmesi denklem 2.26 ile verilmektedir [75].

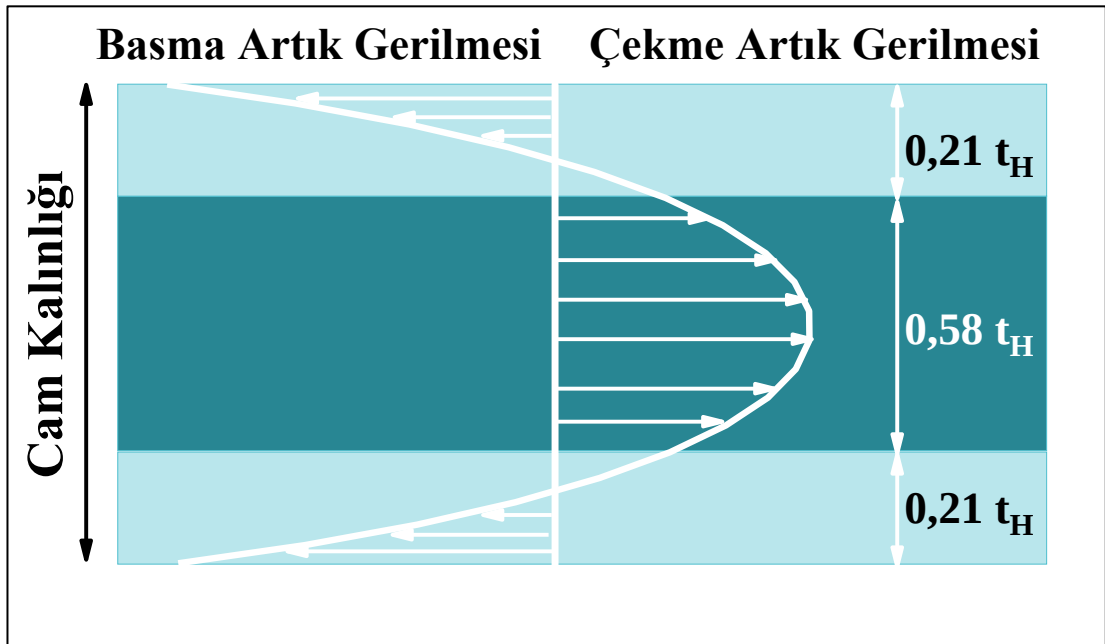
$$\sigma_{Merkez} = \alpha_s E/3(1 - \vartheta)\Delta T = At_H^2 C_R \quad (2.26)$$

Denklem 2.26 da' malzeme sabiti A olarak verilmektedir. Endüstriyel cam üretim uzmanları iyi kalitede bir ısıl temperleme prosesinde merkezdeki çekme gerilmesinin mümkün olan en yüksek değeri almasını istemektedir. Endüstriyel açıdan farklı kalınlıklarda üretilen ticari düz cam ürünlerde kalınlık arttıkça yüksek değerde artık gerilmeler elde edilebilmektedir. Aynı şekilde geliştirilen soğutma teknolojileri ile daha yüksek hızda soğutulan ticari düz camların merkezinde artık gerilme miktarı arttırılabilmektedir [75], [90].

Parabolik basma ve çekme artık gerilme profillerinin elde edilmesini sağlayan sürekli bir model denklem 2.27 ile verilmektedir [75].

$$\sigma_x = \sigma_y = 3\sigma_{\text{Merkez}} \left[\frac{1}{3} - \left(2 \frac{z}{t_H} \right)^2 \right] \quad (2.27)$$

Denklem 2.27'de $z = 0$ durumunda, cam plakanın merkezindeki çekme gerilmesi σ_{Merkez} 'dir. Merkezin yüzeylere olan kalınlık mesafeleri $t_H/2$ olacağından; basma gerilmelerinin etkisi ile yüzeylerde oluşan artık gerilmeler çekme gerilmelerinin etkisi ile oluşan merkezdeki gerilmenin eksi iki katına eşit olmaktadır [75]. Ticari cam ürününde ısıl temperleme sonucu oluşan parabolik basma ve çekme artık gerilme profili Şekil 2.25 ile verilmektedir [85].



Şekil 2.25: Ticari cam ürününde ısıl temperleme sonucu oluşan parabolik basma ve çekme artık gerilme profili.

2.4.7. Artık Gerilme Profillerinin Modern Fotoelastikte Yöntemleri Kullanılarak Belirlenmesi

Günümüzde gelişmekte olan teknoloji, endüstriyel olarak üretilen her bir malzemede olduğu gibi cam malzemesinin de ürün çeşitliliğini arttırmaktadır. Artan ürün çeşitliliğinin bir sonucu olarak çok çeşitli geometrik boyutlarda simetrik eksenli veya simetrik eksenli olmayan tasarımlara sahip cam ürünleri üretilebilmekte yine üretilen bu ürünlere tavlama ve ısıt temperleme gibi ısıt işlemler uygulanabilmektedir. Diğer bir taraftan teknolojik gelişmelerin bir sonucu ise endüstriyel olarak cam üretimi yapan şirketler için rekabet koşullarının en üst seviyeye çıkmasıdır. Artan rekabet koşullarının da etkisiyle endüstriyel olarak cam üreten şirketler için hammadde seçiminden başlayarak üretim süreçlerine ve son ürüne etkisi olacak her bir parametrenin dikkatli bir şekilde incelenmesi ve üretim kalite kontrol aşamalarının geliştirilmesi önem arz etmektedir [91]-[96].

Cam ürünlerinde; uygulanan ısıt işlemlerin etkisiyle oluşmakta olan artık gerilmelerin ölçülmesi, üretim parametrelerinin ve kalite kontrol aşamalarının belirlenmesi açısından oldukça önemlidir [91]-[97].

Artık gerilme ölçüm yöntemleri üretilen cam ürününün geometrisine ya da kullanılan ısıt işlem yöntemine göre farklılıklar gösterebilmektedir. Aynı zamanda artık gerilim ölçümleri tahribatlı ve tahribatsız olabilmektedir [92]-[94], [96]-[100].

Bütün cam ürünleri bünyesinde üretim esnasında meydana gelen artık gerilme oluşumu söz konusudur. Bu tür artık gerilmeler üretim özellikleri olarak cam bünyesine kasıtlı olarak yerleştirildiğinde mukavemet üzerinde pozitif etki sergilerken istemsiz olarak üretimden kaynaklı yüzeyde oluşan mikron boyutundaki kusurlar nedeniyle meydana geldiğinde cam ürününde mukavemet üzerinde negatif etki olarak karşımıza çıkmaktadır [94], [98], [99], [101].

Fotoelastisite yöntemi, transparan ve çift kırılım gösteren malzemelere ihtiyaç duyduğu için ışığın cam ile etkileşiminin bir sonucu olarak cam ürünlerinin bünyelerinde oluşan artık gerilme analizlerini incelememizi sağlamaktadır. Cam üretimi sürekli bir proses olduğu için cam ürünleri bünyesinde bulunan artık gerilim profillerini belirlemek oldukça önemlidir. Fotoelastik yöntemlerin kullanımın basit olması, üretimden gelen istenmeyen artık gerilmeler hakkında kolayca bilgi toplayabilmesi fotoelastik yöntemlerin kalite kontrol aşamalarında tercih edilmesine neden olmaktadır [92]-[94], [102].

Günümüzde düz cam ve karmaşık geometrilerde üretilen cam ürünlerinin bünyelerinde oluşan artık gerilmelerin analiz edilmesi amacıyla güncel olarak kullanılan modern fotoelastisite gerilme ölçüm yöntemleri sırasıyla karmaşık geometrideki cam ürünlerinde; simetrik eksenli farklı geometrilere sahip cam ürünleri için “Entegre Fotoelastisite Yöntemi”, simetrik eksenli olmayan farklı geometrilere sahip cam ürünleri için “Fotoelastik Tomografi Yöntemi” iken düz cam ürünlerinde; düz cam ürünlerinin yüzeylerinde oluşan artık membran (alan) gerilme analizi için “Mirage Yöntemi” ve düz cam ürünlerinin kalınlığı boyunca oluşan artık gerilme analizi için “Saçılan Işık Yöntemi” dir [94]. Tez çalışması kapsamında düz cam ürünlerinin kalınlığı boyunca oluşan artık gerilme analizi için “Saçılan Işık Yöntemi” kullanılmıştır.

2.4.7.1. Saçılan Işık Yöntemi

Bir düz cam ürününün, cam dönüşüm sıcaklık bölgesi aralığında soğutulması esnasında yüzeylerinde ve kalınlığı boyunca meydana gelen sıcaklık farkı nedeniyle iki farklı kategoride artık gerilme oluşmaktadır. Yüzeylerde oluşan artık gerilmeler yüzeylere paralel sıcaklık farkı ile oluşurken kalınlık boyunca oluşan artık gerilmeler yüzeylere dik sıcaklık farkından oluşmaktadır. Düz cam ürününün tavlama veya ısı olarak temperlenmesi esnasında ısı transferi daha çok yüzeylerde gerçekleşmektedir. Diğer bir taraftan en yüksek sıcaklık farkları cam ürününün kalınlığı boyunca cam ürününün yüzeyi ve merkezinde bulunan çekirdeği arasında olmaktadır. Düz cam ürününün kalınlığı boyunca yüzeyde basma gerilmesi ve merkezdeki çekirdekte çekme gerilmelerinin belirlenmesi özellikle tavlama ve ısı temperleme gibi ısı işlem koşullarının cam üzerindeki etkilerini analiz etmemizi ve uyguladığımız bu ısı işlemlerin cam ürününün mukavemetine nasıl etki ettiğini bilmemizi sağlaması açısından ve dolayısıyla cam endüstrisi kalite kontrol parametreleri açısından oldukça önemli bir kriterdir [94], [99], [103]-[105].

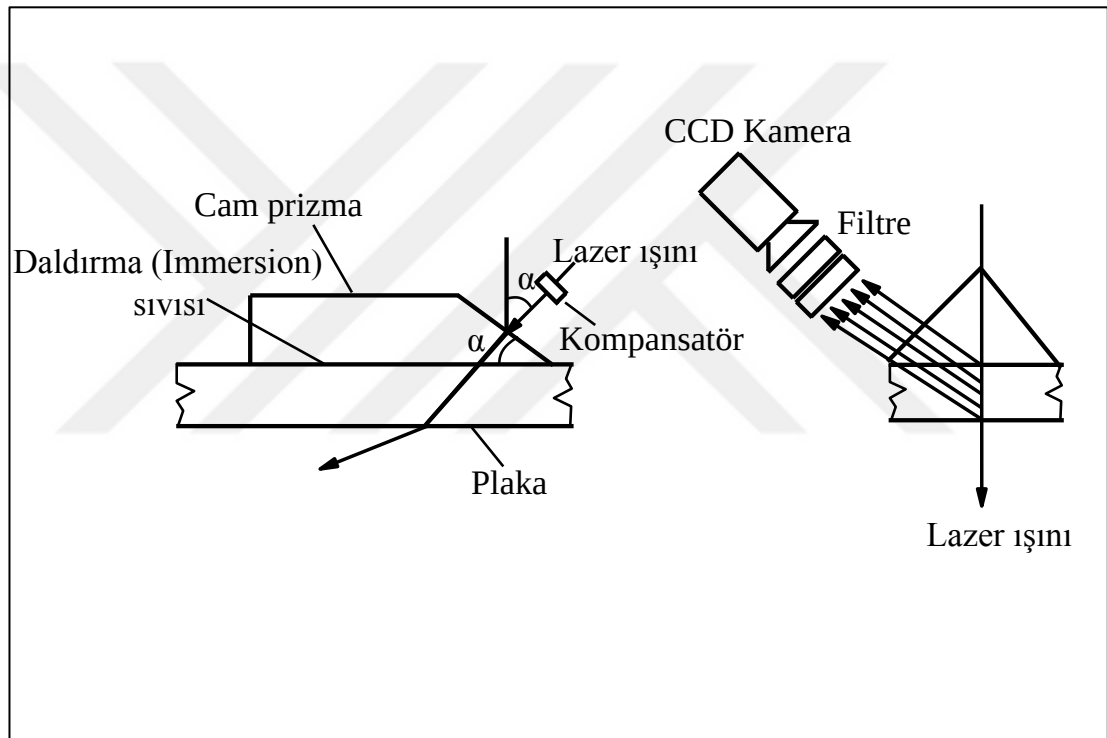
Isıl temperleme prosesinden geçirilmiş bir düz cam ürününde kalay ve atmosferik yüzeyleri, merkezinde bulunan çekirdek kısmına oranla çok daha hızlı soğutulduğundan yüzeylerinde ürünün mukavemetine olumlu etki eden basma gerilmeleri meydana gelmektedir. Yüzeyine kasıtlı olarak yerleştirilen basma gerilmeleri nedeniyle ısı temperli camlar kesilememektedir ve kırıldıklarında küçük

kör parçalara ayrılmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle güvenlik camı olarak da isimlendirilen ısıl temperli düz cam ürünleri için kalınlık boyunca artık gerilim ölçümlerini analiz etmek açısından yaygın olarak saçılan ışık yöntemi kullanılmaktadır [91], [96], [100], [105], [106].

Saçılan ışık yöntemi, ışığın şeffaf bir ortamda küçük parçacıklar üzerine saçılması özelliklerine dayanır. Bu ışığın çift kırılımlı bir ortamdan geçerken polarizasyonundaki değişiklikleri takip etmesini sağlar. Saçılan ışık yönteminde polarize olan ve polarize olmayan şeklinde iki farklı versiyon kullanılmaktadır. Polarize olmayan ışık versiyonunda, modelin içerisinde doğrusal sıradan bir ışık kaynağı oluşturulur. Bu versiyonda geleneksel fotoelastikte açısından saçılma ortamı polarize görevi görürken saçılan ışık harici bir analizör vasıtasıyla gözlemlenmektedir. Polarize gelen ışık kaynağı ile saçılan ışık yöntemi kullanıldığında ise saçılma ortamı analizör görevi görmektedir ve iki farklı tür ölçüm tekniği söz konusu olmaktadır. Bu ölçüm teknikleri sırasıyla uzaysal üç boyutlu modülasyon yöntemi ve faz modülasyon yöntemidir. Uzaysal üç boyutlu modülasyon yönteminde ısıl temperli cam ürünleri yüzeyine paralel olarak 45 derece yönelim ile lazer ışını yayılmaktadır. Saçılan ışığın yoğunluğu ışının yolu boyunca modüle edilir. Modüle işleminden sonra saçak oluşumu ile oluşan saçaklar arası mesafe ölçümü ile saçılan ışık saçaklarının dağılımı kalınlık boyunca artık gerilim dağılımını vermektedir. Diğer bir taraftan saçılan ışık yönteminin uzaysal üç boyutlu modülasyon tekniği kavisli ve büyük boyutlu düz cam ürünleri için ve gerilim alanlarının ve gradyanının yüksek olduğu durumlarda uygun olmamaktadır. Faz modülasyon yönteminin, saçılan ışık yoğunluğu küçük olduğundan modern optoelektronik cihazlar kullanılarak kaydedilen ışık titreşimleri elektriksel sinyallere dönüştürülerek fotoelastisitede doğruluğunun çok daha iyi olduğu tespit edilmiştir [94], [101], [104], [107]-[110].

Bu tez çalışmasında tavllanmış ticari soda kireç silikat düz cam test numunelerinin ve ısıl temperli ticari soda kireç silikat düz cam test numunelerinin bünyesinde üretim&proses kaynaklı oluşan artık gerilim profillerinin belirlenmesi amacıyla saçılan ışık yöntemini kullanan ve GlassStressLtd. tarafından geliştirilen SCALP -05 cihazı kullanılmıştır. SCALP-05 cihazı tavllanmış ve ısıl olarak temperlenmiş düz cam ürünlerinde kalınlık boyunca uzanan artık gerilmelerin ölçümünü sağlamaktadır. SCALP-05 cihazı düz cam ürünün üzerine eğik olarak 45°'lik bir lazer ışınını yayar. Işığın kırılmasını önlemek için üzerinde camın yüzeyine temas halinde olacak hassas bir prizma kullanır. Ölçümün hassasiyeti açısından prizma

yüzeyinde çizik gibi oluşumlar ile birlikte toz partikülleri, parmak izi vs. bulunmamalıdır. Aynı zamanda prizma yüzeyi ile düz cam yüzeyinin temas ettiği bölgeye immersion yağı uygulanmalıdır. Ölçüm esnasında polarize lazer ışını ve düz cam bünyesindeki artık gerilim ile ve aynı zamanda fotoelastik sabit ile de orantılı olan çift kırılma SCALP-05 cihazı tarafından modüle edilmektedir. SCALP-05 cihazı polarize lazer ışık ışını boyunca saçılmakta olan ışık yoğunluğunu kamera ile kaydederek cihazın özel yazılımı vasıtası ile optik gecikmenin eğimi ile artık gerilme profili analizini hesaplamaktadır [98], [99], [106], [111]. Optik ölçümün şematik gösterimi Şekil 2.26 ile verilmektedir [99].



Şekil 2.26: Optik ölçümün şematik gösterimi.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Çalışmanın Kapsamı ve Uygulanışı

Bu tez kapsamında, Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. Şişecam Düzcamlar Mersin Fabrikası ortam koşullarında tavllanmış ve ısıt temperlenmiş olarak üretilen ticari soda kireç silikat camlarında üretim&proses kaynaklı olarak kasıtlı ya da kasıtsız olarak oluşan artık gerilmelerin deneysel yöntem ile ölçülmesi ve ölçülen artık gerilmelerin mekanik özelliklere etkilerinin irdelenmesi hedeflenmiştir.

Bu hedef doğrultusunda deneysel çalışma içeriği belirlenmiş olup uygulanış sırasına göre aşağıda verilmektedir.

- Tavllanmış ve ısıt temperlenmiş numunelerin bünyelerinde üretim&proses kaynaklı oluşan artık gerilmelerin profillerinin belirlenmesi.
- Uygulanan Vickers indentasyon yüküne ve niceliğine bağıntılı olarak tavllanmış ve ısıt temperlenmiş numunelerin sertlik, kusur boyutu ve tokluk değerlerinin belirlenmesi.
- Numune boyutu, ısıt işlem farkı ve uygulanan indentasyon yükü ve niceliğinin farkı gibi parametrelerin yük altındaki davranışlara etkilerinin halka üstü halka eş iki eksenli eğme testi vasıtasıyla belirlenmesi.
- Tahribatlı olarak halka üstü halka eğme testi vasıtasıyla yük altında kırılan farklı parametrelere sahip numunelerin radyal çatlak adetlerinin hesaplanarak numune sınıflarının belirlenmesi.
- Halka üstü halka eğme testi vasıtasıyla yük altında kırılan farklı parametrelere sahip numunelerin Weibull parametrelerinin belirlenmesi.
- Kesilerek yüzey alanı küçültülen ve farklı indentasyon yükleri uygulanan tavllanmış numunelerin, halka üstü halka testi sonucu yük altında kırıldıktan sonra kırık analizlerinin incelenmesi ve ayna yarıçapı değerlerinin belirlenmesi.
- Christiansen-Shelyubskii homojenite yöntemi kullanılarak numunelerin homojenite faktörü derecelerinin belirlenmesi.
- Tez kapsamında deneysel çalışmalar sonucu elde edilmiş değişkenlerin Pearson korelasyon ilişkilerinin belirlenmesi.

3.2. Numune Özellikleri

Tez kapsamında, 2020 yılının Ekim ayında Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. Şişecam Düzcam Mersin Fabrikası ortam koşullarında farklı ısıtım yöntemleri kullanılarak üretilmiş olan 500 mm uzunluğunda 400 mm genişliğinde ve 4 mm kalınlığında toplam 160 adet ticari soda kireç silikat düz cam numunesi kullanılmıştır. Kullanılan numunelerin özellikleri Şekil 3.1 ile ve kompozisyonu ise Tablo 3.1 ile verilmektedir.



Şekil 3.1: Tez kapsamında kullanılan düz cam numune özellikleri.

Tablo 3.1: Tez kapsamında kullanılan düz cam numunelerinin kompozisyonu.

% Ağırlık	Düz Cam
SiO ₂	70,80
Na ₂ O	13,20
K ₂ O	0,85
CaO	8,95
MgO	4,59
Al ₂ O ₃	1,22
B ₂ O ₃	-
Fe ₂ O ₃	0,125
Cr ₂ O ₃	-
TiO ₂	0,056
SO ₃	0,21

3.3. Artık Gerilme Profillerinin Belirlenmesi

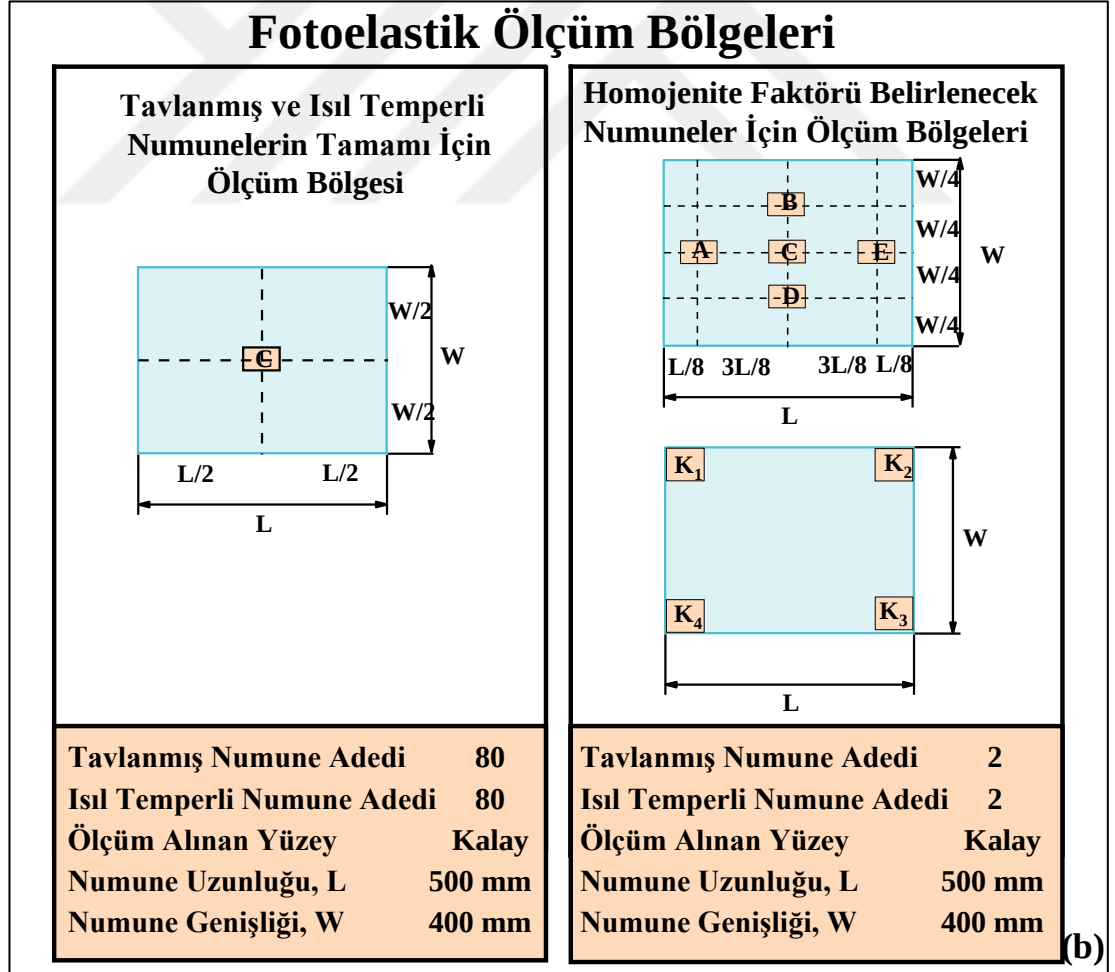
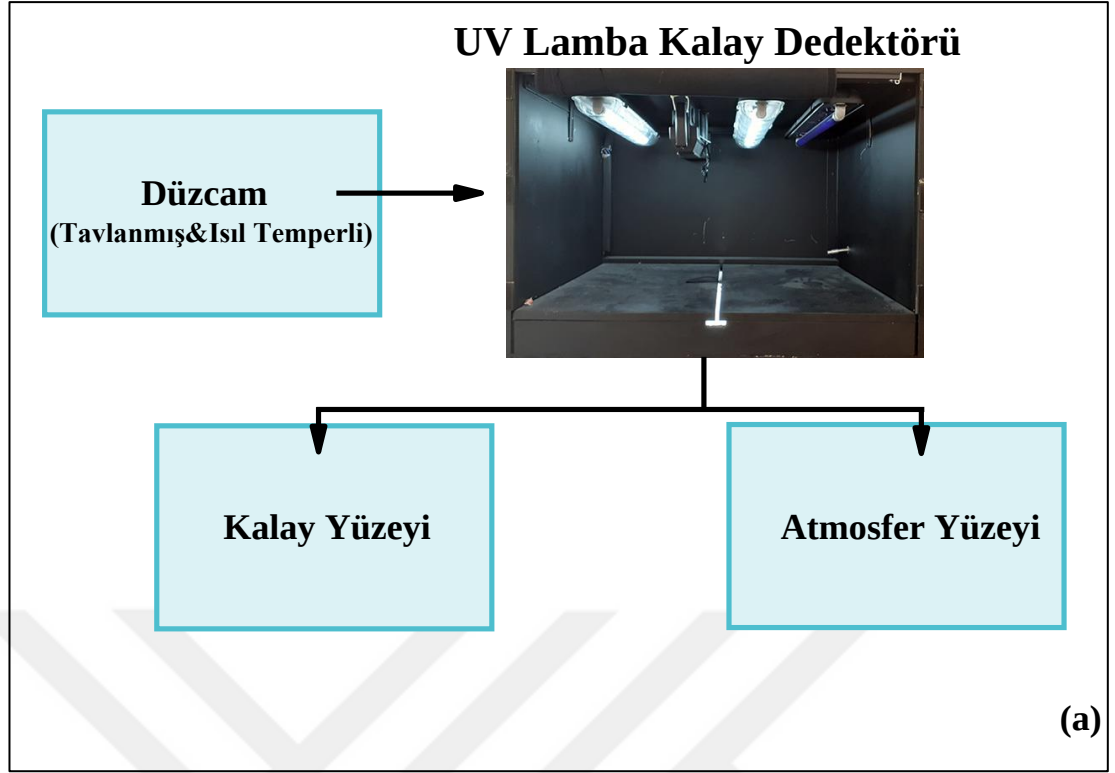
Deneyisel yöntem olarak, tavlanmış ve ısıtıl temperlenmiş numunelerin üretim&proses kaynaklı oluşan artık gerilme profillerinin belirlenmesi amacıyla saçılan ışık yöntemini kullanan taşınabilir saçılan ışık polarizasyonu olan ve GlassStressLtd. tarafından geliştirilen SCALP-05 cihazı kullanılmıştır.

SCALP-05 cihazı ile minimum 1 mm kalınlığında, maksimum 6 mm derinlikte, yüzdürme teknolojisi ile üretilen düz camlar için kalay ve atmosfer yüzeylerinde % ± 5 hassasiyet ile ölçüm yapılabilmektedir [111], [112].

3.3.1. Numune Hazırlama

Yüzdürme teknolojisi ile üretilmiş düz cam ürünlerinin kalay banyosunda yüzdürülen yüzeylerinde gözle görülemeyen bir pus tabakası oluşmaktadır. Düz cam ürünlerinin atmosfer ve kalay yüzeylerini belirlemek kalite kontrol parametreleri açısından oldukça önemlidir. UV testi, su damlası testi, ateşleme testi, bazı uzmanlar için ise dokunma testi ile düz cam ürünlerinin atmosfer ve kalay yüzeyleri belirlenebilmektedir [113].

Bu tez kapsamında deneyisel ölçüm öncesinde tavlanmış ve ısıtıl temperlenmiş numunelerin tamamının bir UV lamba kalay dedektörü vasıtası ile atmosfer ve kalay yüzeyleri belirlenmiştir. UV testinin hassasiyeti nedeniyle karanlık ortam sağlanmış ve numuneler ters çevrilerek test tekrarlanmıştır. Artık gerilme profil ölçümleri, numunelerin UV kalay dedektörü vasıtasıyla belirlenmiş olan kalay yüzeylerinden alınmıştır. Dolayısıyla atmosfer ve kalay yüzeyi belirlenen her bir numunenin kalay yüzeyi üzerindeki merkez ölçüm bölgesi C, eş boyutlarda olacak şekilde numune boyutunda hazırlanmış bir karton vasıtası ile belirlenmiştir. Christiansen-Shelyubskii yöntemi ile homojenite faktörü belirlenecek numunelerde merkez ölçüm bölgesi C'ye ilave olarak eş boyutlarda olacak şekilde sekiz farklı ölçüm bölgesi ($K_1, K_2, K_3, K_4, A, B, D, E$) daha numune boyutunda hazırlanmış bir karton vasıtası ile belirlenmiştir. UV lamba kalay dedektörü Şekil 3.2a ile ve ASTM C1048-12 standardına uygun olarak belirlenen fotoelastik ölçüm bölgeleri Şekil 3.2b ile verilmektedir [105], [114].



Şekil 3.2: (a) UV lamba kalay dedektörü, (b) ASTM C1048-12 standardına uygun olarak belirlenen fotoelastik ölçüm bölgeleri.

3.3.2. Deneysel Ölçüm

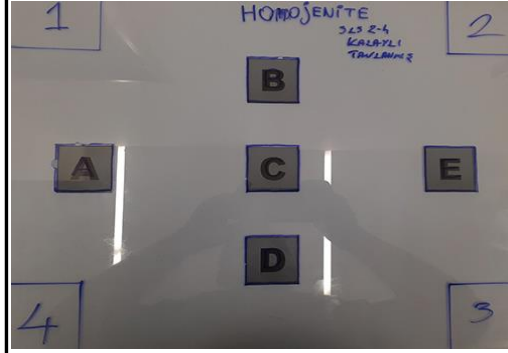
Deneysel ölçüm parametreleri, SCALP-05 cihazına ait kullanım kılavuzu vasıtası ile belirlenmiştir [111]. Belirlenen ölçüm parametreleri aşağıda verilmektedir.

- Cam kalınlığı, mm: Numunelerin kalınlık ölçümleri kenar bölgelerinden bir elektronik kumpas vasıtasıyla ölçülmüştür. Numunelerin 500 mm uzunluğunda ve 400 mm genişliğinde ticari boyutlara sahip olmaları nedeniyle merkez bölgelerinden kalınlık ölçümleri alınamamıştır.
- Ölçüm derinliği, mm: Numunelerin kalınlık ölçümleri belirlendikten sonra belirlenen ölçümlere göre maksimum ölçüm derinliği değerleri verilmiştir.
- Fotoelastik sabiti C , Tpa^{-1} : Numunelerde fotoelastik sabiti için $C=2,72 \text{ Tpa}^{-1}$ değeri kullanılmıştır.
- Kırılma indisi: Numunelerde kırılma indisi için $n=1,52$ değeri kullanılmıştır.
- Fit yöntemi: Numunelerde fit yöntemi olarak global-tek bir polinom regresyon yöntemi kullanılmıştır.
- Fit yakınlık: Numunelerde fit yakınlığı için 1,0 değeri kullanılmıştır.
- Polinom: Numunelerin ısı kaynaklı artık gerilmelere sahip olmaları nedeniyle polinom için 3 değeri kullanılmıştır.
- Arka plan: Numunelerde arka plan için günlük ölçümlerde tercih edilen normal seçeneği kullanılmıştır.

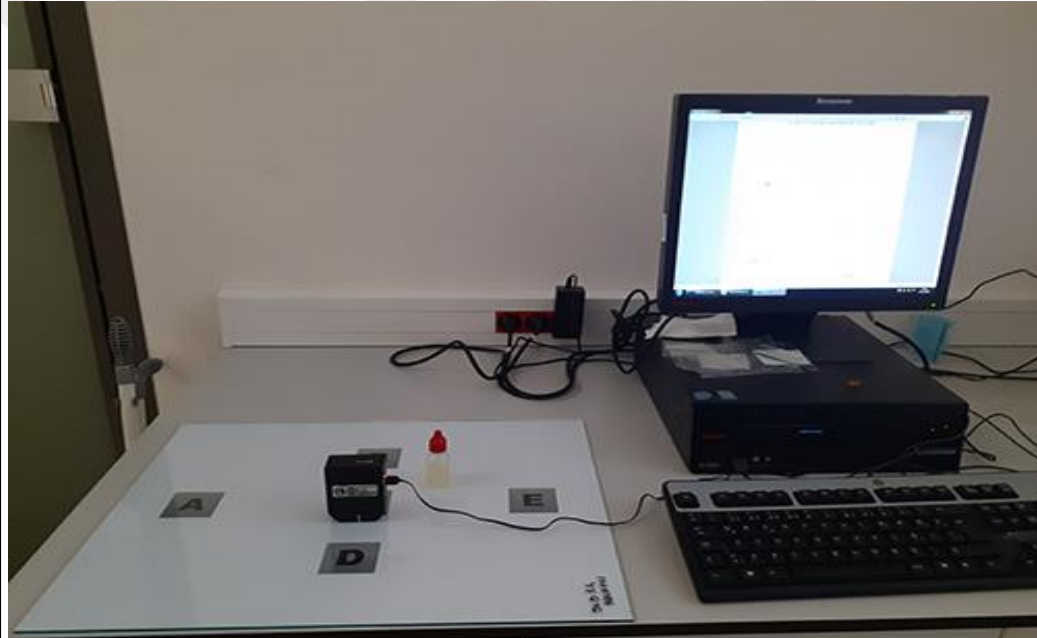
Deneysel ölçümün hassasiyeti nedeniyle her bir ölçüm öncesinde numunelerin tamamının atmosfer ve kalay yüzeyleri ve SCALP-05 cihazının prizma yüzeyi metil alkol ile temizlenmiş olup toz partikülleri ve parmak izi vb. olumsuzlukların numune yüzeylerinden ve SCALP-05 prizma yüzeyinden giderilmesine özen gösterilmiştir. Her bir numunenin belirlenmiş ölçüm bölgesinde yani numune yüzeyi ile prizma yüzeyinin temas ettiği bölgede immersiyon sıvısı kullanılmıştır. SCALP-05 cihazı, 500 mm uzunluğunda 400 mm genişliğinde, 4 mm kalınlığında ticari düz cam numunesi ve üzerinde ASTM C1048-12 standardına uygun olarak belirlenmiş ölçüm bölgeleri, fotoelastik ölçüm anı ve sonucu Şekil 3.3 ile verilmektedir.



SCALP-05



**Düz Cam
Ölçüm Numunesi**



Fotoelastik Ölçüm

Şekil 3.3: SCALP-05 cihazı, fotoelastik ölçüm bölgeleri ve düz cam numunesi, fotoelastik ölçüm anı ve sonucu.

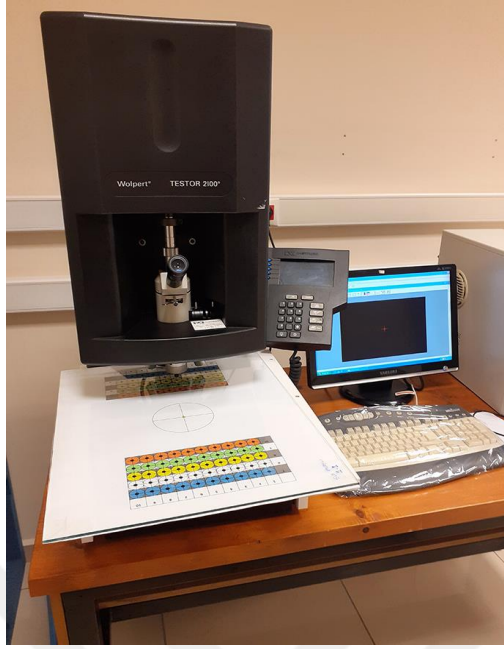
3.4. Vickers İndentasyon Yöntemi ile Sertlik ve Tokluk Değerlerinin Belirlenmesi

Deneyisel yöntem olarak, tavllanmış ve ısıt temperlenmiş numunelerin sertlik ve tokluk ölçümleri Instron® markasına ait Wolpert Testor 2100 Model mikro sertlik ölçüm cihazında Vickers elmas piramit uç kullanılarak yapılmıştır.

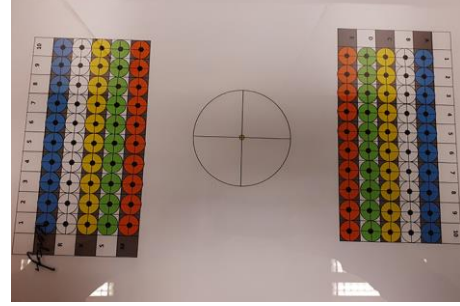
3.4.1. Numune Hazırlama

Vickers indentasyon yöntemi, sertlik ve kırılma tokluğunun belirlenmesinde numune hazırlama ve ölçüm kolaylığı nedeniyle oldukça kullanışlıdır. İndentasyon testinin en önemli avantajlarından bir tanesi küçük boyutlu numunelerden ölçüm yapılabilmesidir [39], [40].

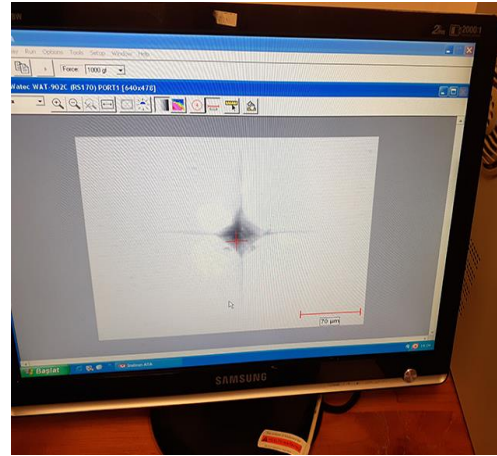
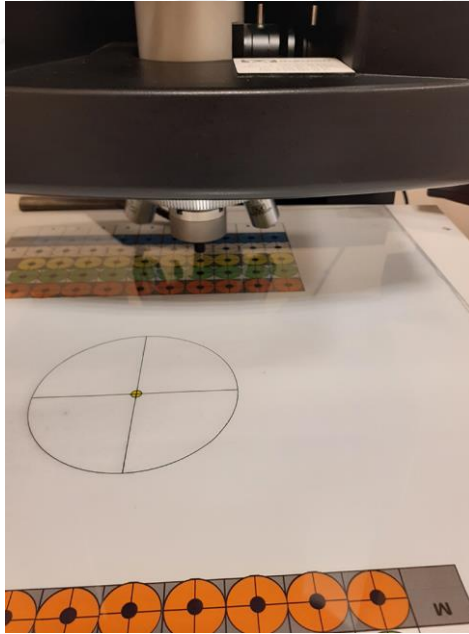
Isıl temperlenmiş numuneler, yüzeylerinde üretim&proses kaynaklı olarak kasıtlı oluşturulan artık gerilmeler ve yüksek enerji depolanması nedeniyle kesilememektedir. Isıl temperlenmiş numunelerin bu özelliği nedeniyle bu tez kapsamında sertlik ve tokluk ölçümleri için üretildiği ticari ürün boyutları korunmuş 500 mm uzunluğunda 400 mm genişliğinde ve 4 mm kalınlığında bir adet tavllanmış ve bir adet ısıt temperlenmiş olmak üzere toplam iki adet düz cam numunesi kullanılmıştır. Laboratuvar boyutlarından ziyade ticari ürün boyutlarında numunelerin kullanılmasının bir sonucu olarak Instron® markasına ait Wolpert Testor 2100 Model mikro sertlik ölçüm cihazında Vickers elmas piramit uç kullanılarak uygulanacak indentasyon yükleri numunelerin merkezlerine uygulanamamıştır. Numune yüzeyinde mikro sertlik ölçüm cihazının kısıtlamadığı bölgeleri yani Vickers elmas piramit ucun temas ettiği indent bölgelerini belirlemeyi kolaylaştırması ve indentasyon testi sonrası Vickers elmas pramit uç tarafından oluşturulan çatlağın tespitini kolaylaştırması açısından numune boyutuna sahip bir karton kullanılmıştır. Instron® markasına ait Wolpert Testor 2100 Model mikro sertlik ölçüm cihazı, 500 mm uzunluğunda 400 mm genişliğinde, 4 mm kalınlığında ticari düz cam numunesi ve Vickers indentasyon yüklerinin uygulanacağı ölçüm bölgeleri, Vickers indentasyon yüklerinin uygulanma anı Şekil 3.4 ile verilmektedir.



**Instron® Wolpert Testor
2100 Model
Mikro Sertlik Ölçüm Cihazı**



**Düz Cam Ölçüm Numunesi
ve İndentasyon Yüğü
Uygulanacak Bölgeler**



Vickers İndentasyon Yüğü Uygulanması

Şekil 3.4: Mikro sertlik ölçüm cihazı, düz cam numunesi ve Vickers indentasyon yüklerinin uygulanacağı ölçüm bölgeleri, Vickers indentasyon yüklerinin uygulanma anı.

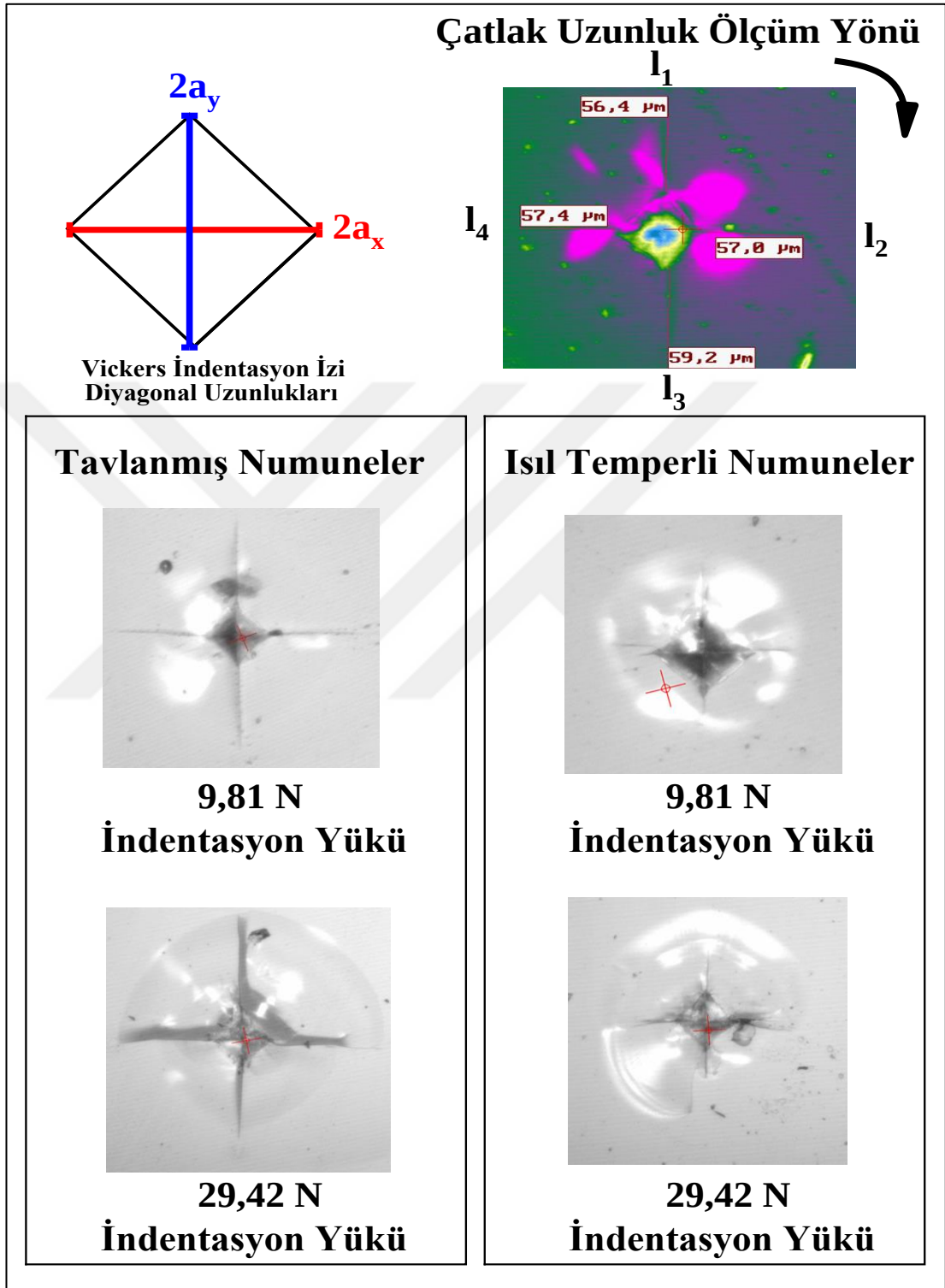
3.4.2. Deneysel Ölçüm

Vickers indentasyon testi, oda sıcaklığında Vickers elmas piramit uç vasıtası ile 9,81 N ve 29,42 N indentasyon yüklerinin 10 saniye boyunca tavllanmış ve ısıtılmış numunelerin kalay yüzeylerine uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. 9,81 N ve 29,42 N indentasyon yüklerinin uygulandığı Vickers indentasyon testi için ölçüm hızları sırasıyla 0,1 mm/dk ve 0,3 mm/dk olarak belirlenmiştir. Uygulanan farklı indentasyon yüklerinin her biri için farklı ısıtma işlemi uygulanmış ticari düz cam numunelerinden 10 adet sertlik ölçümü alınmış olup toplam 40 adet H_V sertlik değeri Instron® markasına ait Wolpert Testor 2100 Model mikro sertlik ölçüm cihazı tarafından denklem 2.11 vasıtası ile otomatik olarak belirlenmiştir.

Farklı ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin ölçüm bölgelerinde, uygulanan farklı indentasyon yüklerinin etkisi altında mikro boyutta oluşan çatlak uzunlukları yük uygulandıktan 1 dk sonra ölçülmüştür. Ölçülen çatlak uzunluklarının ortam koşullarına ve zamana bağımlı değişiminin gözlemlenmesi açısından aynı ölçüm bölgelerinden 1 hafta sonra yeniden çatlak uzunluk ölçümü alınmıştır. Teorik bilgi kısmında Şekil 2.13 ile verilen Vickers indentasyon izi diyagonal uzunlukları $2a_x$ ve $2a_y$, l uzunlukları ise saat yönünde l_1 , l_2 , l_3 ve l_4 olarak adlandırılarak ölçülmüştür. Farklı Vickers indentasyon yükleri altında farklı ısıtma işlemi uygulanmış numunelerde oluşan mikro boyuttaki çatlaklar ve ölçüm yönleri Şekil 3.5 ile verilmektedir.

Vickers indentasyon yöntemi kırılma tokluğu hesaplamaları için denklem 2.12a, denklem 2.12b ve denklem 2.12c kullanılmıştır. Vickers indentasyon kırılma tokluğu denklemlerinde, Elastik modülüs 70 GPa, Vickers indentasyon yükü 9,81 N ve 29,42 N, Vickers indentasyon sertlik değeri bu indentasyon yükleri altında mikro sertlik ölçüm cihazı tarafından denklem 2.11 vasıtası ile otomatik olarak hesaplanan 40 adet H_V sertlik ölçüm değerinin ortalama değeri (Şekil 4.12), çatlak uzunluğu l yük uygulandıktan 1 dk sonra ölçülen l_1 , l_2 , l_3 ve l_4 değerleri, Vickers iz köşegen uzunluğu 2a yük uygulandıktan 1 dk sonra ölçülen dikey yönde $2a_y$ yatay yönde $2a_x$ değerleri, çatlak uzunluğu c Vickers iz köşegen uzunluğunun yarısı (a_x ; a_y) ile l (l_1 ; l_2 ; l_3 ; l_4) çatlak uzunluğunun toplamı dikey ölçüm yönünde c_1 ve c_3 ($c_1 = l_1 + a_y$; $c_3 = l_3 + a_y$), yatay ölçüm yönünde c_2 ve c_4 ($c_2 = l_2 + a_x$; $c_4 = l_4 + a_x$), geometrik faktörü $Y=1,26$ birimsiz, artık gerilme σ_R SCALP-05 cihazı vasıtası ile tavllanmış ve ısıtılmış

numunelerin merkez ölçüm bölgesi (C)'den ölçülen yüzey basma gerilmelerinin ortalama değerleri olarak kullanılmıştır. (Sırası ile Şekil 4.1 ve Şekil 4.5)



Şekil 3.5: Vickers indantasyon izi diyagonal uzunlukları, çatlak uzunluğu l 'nin ölçüm yönü, 9,81 N ve 29,42 N Vickers indantasyon yükleri etkisiyle tavlanmış ve ısıtıl temperlenmiş numunelerin kalay yüzeylerinde oluşan mikro boyutta çatlak örnekleri.

3.5. Halka Üstü Halka Testi Yöntemi ile Kırılma Mukavemeti Değerlerinin ve Radyal Çatlak Adetlerinin Belirlenmesi

Deneyisel yöntem olarak, tavllanmış ve ısıtılarak temperlenmiş düz cam numunelerinin yük altındaki davranışlarını belirlemek amacıyla Instron® markasına ait 5569 Model mekanik test cihazı kullanılmıştır. Instron® markasına ait 5569 Model mekanik test cihazı ile numune malzemesine uygun aparat ve uygun statik yük hücresi seçilerek basma, çekme ve eğme testleri yapılabilmektedir.

3.5.1. Numune Hazırlama

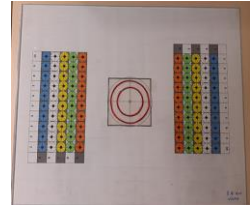
Daha önce belirtildiği üzere ısıtılarak temperlenmiş numuneler son ürün olarak üretilmekte olup kesilemez, delinemez, biçimlendirilemezler. Bu özellikleri nedeniyle ısıtılarak temperlenmiş numunelerimiz standart halka üstü halka eş iki eksenli eğme test numunelerinin boyut olarak dışında kalmaktadır. Dolayısıyla bu tez kapsamında halka üstü halka eğme testi için ticari ürün boyutları korunmuş 500 mm uzunluğunda 400 mm genişliğinde ve 4 mm kalınlığında ısıtılarak temperlenmiş düz cam numuneleri kullanılmıştır. Numune boyut etkisinden bağımsız olarak uygulanan farklı ısıtılma işlemlerin yük altındaki davranışlarını gözlemleyebilmek açısından ısıtılarak temperlenmiş numunelerle eşit boyutlara sahip tavllanmış düz cam numuneleri kullanılmıştır. İlave olarak üretim prosesi gereği artık gerilmelerin optimum seviyeye azaltılmasına dayalı kesim kalitesi yükseltilecek tavllanmış düz cam numunelerinde boyut etkisini gözlemlemek amacıyla tavllanmış ticari cam numunelerimizden halka üstü halka eğme testi için kullanılan standart 100 mm uzunluğunda 100 mm genişliğinde ve 4 mm kalınlığında örnekler kesilmiş olup ticari ürün boyutları ile standart boyutların yük altındaki davranışları kıyaslanmıştır. Ayrıca farklı ısıtılma işlemlerin etkisi ve numune boyutlarının etkisine ilave olarak numune merkezlerine Vickers elmas piramit ucu vasıtası ile 9,81 N ve 29,42 N uygulanmakta olan farklı indentasyon yükleri sonucu oluşturulan kusurların, üretim koşulları korunmuş yani Vickers indentasyon yükü uygulanmamış numuneler ile ve kendi içlerinde kıyaslanması amaçlanmıştır. Daha önce bahsedildiği üzere test için kullanılacak olan düz cam numunelerinin nihai boyutları nedeniyle merkez bölgelerine uygulanacak farklı indentasyon yükleri için Instron® markasına ait Wolpert Testor 2100 Model mikro sertlik ölçüm cihazı

kullanılamamıştır. Dolayısıyla farklı Vickers indentasyon yüklerini numunelerin merkezine uygulamak için Instron® 5569 Model mekanik test cihazında Vickers elmas piramit uç aparatı ve 100 N statik yük hücresi kullanılmıştır. Vickers indentasyon testi, 9,81 N ve 29,42 N indentasyon yüklerinin oda sıcaklığında 10 saniye boyunca farklı ısıtılma işlemi görmüş ticari boyutlardaki numunelerin ve standart boyutlardaki tavllanmış numunelerin kalay yüzeyleri üzerinde merkez bölgesine uygulanmıştır. 9,81 N ve 29,42 N indentasyon yüklerinin uygulandığı Vickers indentasyon testi için ölçüm hızları sırasıyla 0,1 mm/dk ve 0,3 mm/dk olarak belirlenmiştir. Merkez bölgesine uygulanan halka üstü halka testi sonucu yük altında kırılan numunelerin radyal çatlak adedini belirlemeyi kolaylaştırması açısından numunelerle eş boyutlarda karton kullanılmıştır. Yine radyal çatlak adedinin belirlenebilmesi açısından bütün numunelerin atmosfer yüzeylerinde bant kullanılmıştır. Halka üstü halka test yöntemi için standart boyutlarda kesilerek hazırlanmış tavllanmış test numuneleri ve standart boyutların dışında bulunan ticari ürün boyutlarındaki tavllanmış ve ısıtılma işlemi görmüş numunelere ait bilgiler ile birlikte test numunelerinin merkezlerine Vickers indentasyon yüklerinin uygulanma anı Şekil 3.6 ile verilmektedir.

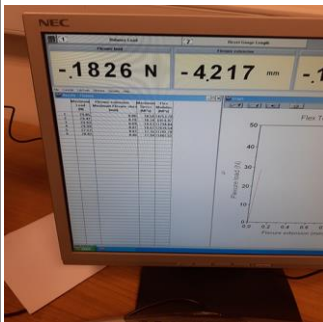
3.5.2. Deneysel Ölçüm

Bu tez kapsamında farklı ısıtılma işlemi uygulanmış düz cam numunelerinin mukavemet değerleri, eş iki eksenli eğme yöntemi olarak kullanılmakta olan halka üstü halka testi ile ASTM C1499-03 standartlarına uygun olarak denklem 2.16 vasıtası ile belirlenmiştir. Halka üstü halka yönteminde test kurulumu için mekanik test cihazı aparatı olarak 90 mm çapına sahip olan destek halkası, 60 mm çapına sahip olan yük halkası ile 50 kN statik yük hücresi kullanılmıştır. Yük halkası ile düz cam numunelerinin temas ettiği bölgede uygulanan yüklerin homojen dağılılabilmesi için bilye kullanılmıştır. Halka üstü halka eş iki eksenli eğme testi için ölçüm hızı 0,3 mm/dk olarak belirlenmiştir. Halka üstü halka test düzeneği Şekil 3.7 ile verilmektedir. Numuneler, kalay yüzeyleri çekme gerilmesinin etkisi altında kalacak şekilde konumlandırılmıştır. Farklı Vickers indentasyon yüklerine maruz bırakılan belirli sayıda (numune sayısı Şekil 3.6 ile verilmiştir) düz cam numunesi uygulanan indentasyon işleminden yaklaşık 24 saat sonra mukavemet testine tabi tutulmuştur.

HALKA ÜSTÜ HALKA TESTİ NUMUNE ÖZELLİKLERİ



Uygulanan Isıl İşlem	Tavlama	Tavlama	Isıl Temperleme
Numune Uzunluğu, L	100 mm	500 mm	500 mm
Numune Genişliği, W	100 mm	400 mm	400 mm
İndentsiz Numune Adedi	21	32	32
9,81 N İndentli Numune Adedi	9	10	10
29,42 N İndentli Numune Adedi	9	10	10



**Test Numunelerinin Merkez Bölgelerine
Vickers İndentasyon Yükü Uygulanması**

Şekil 3.6:Halka üstü halka test yöntemi için kullanılan test numune özellikleri ve Vickers indentasyon yükünün test numune merkezine uygulanma anı.

HALKA ÜSTÜ HALKA TEST DÜZENEGİ



**Instron® 5569 Model Mekanik Test Cihazı
Vasıtasıyla Mukavemet Testi Uygulanması**



50 kN Statik Yük Hücresi



**Bilye ve 60 mm Çapında
Yükleme Halkası**

Şekil 3.7: Halka üstü halka test yöntemi için kullanılmış olan düzenek ve yükün test numunesinin merkezine uygulanma anı.

Uygulanan halka üstü halka testi sonucu yük altında kırılan tavllanmış ve ısıt temperlenmiş numunelerin tamamında kırılma sonrası artık gerilme seviyesinin etkisi ile oluşan radyal çatlak adetleri, java tabanlı açık kaynaklı yazılım olarak üretilen ve bilimsel görüntüleri işleyerek analiz etmeyi sağlayan ImageJ® programı vasıtası ile belirlenmiştir [115]. Radyal çatlak adetleri numunelerin boyutlarından bağımsız olarak her numune için 100 mm x 100 mm yüzey alanı üzerinden belirlenmiştir. Standart boyutlara sahip tavllanmış numunelerde ve ticari boyutlardaki tavllanmış ve ısıt temperlenmiş numunelerde boyut ve farklı ısıt işlem yöntemine ilave olarak Vickers

indentasyon yükü uygulanmaması ya da uygulanması durumunda oluşan kırılma davranışı, radyal çatlak oluşumları ve adetleri Şekil 3.8 ile gösterilmektedir.



Şekil 3.8: Boyut, ısıtma işlemi ve Vickers indention yükü parametrelerine bağımlı olarak test numunelerinin kırılma davranışı ve ImageJ programı vasıtasıyla 100 mm x 100 mm yüzey alanı üzerinden belirlenen radyal çatlak adetleri.

Test numunelerinin bilinen yüzey basma artık gerilme değerlerinin ve mukavemet testi sonucunda belirlenmiş olan mukavemet değerleri ile radyal çatlak adetlerinin her biri arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek açısından Pearson korelasyon katsayı değeri r , ve determinasyon katsayı değeri R^2 belirlenmiştir. Belirlenmiş olan mukavemet verilerini açıklayabilmek için Weibull kırılma istatistik analiz dağılımı kullanılmış olup Weibull mukavemeti σ_0 ve Weibull modülü m değerleri, bilimsel grafikler oluşturmak ve veri bilimini kolaylaştırmak için tasarlanmış olan Origin®

programı vasıtası ile belirlenmiştir [116]. İlave olarak mukavemet testi sonucunda kırılan standart boyutlarda ve Vickers indentasyon yükü uygulanmış tavlanmış test numunelerinin kırık yüzeylerindeki karakteristik bölgeler Nikon® SMZ1500 Stereo Mikroskop vasıtası ile belirlenmiş olup Şekil 3.9 ile verilmektedir.



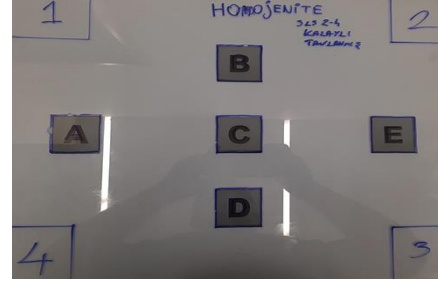
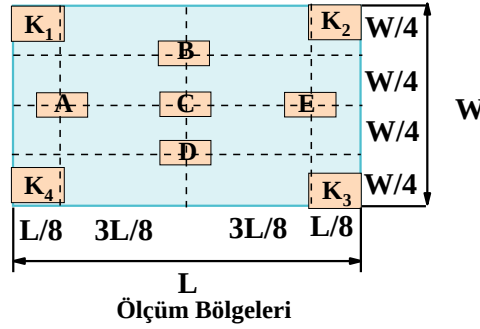
Şekil 3.9:Nikon® SMZ1500 Stereo Mikroskop vasıtası ile karakteristik kırık yüzeylerinin belirlenmesi.

3.6. Christiansen-Shelyubskii Yöntemi Kullanılarak Homojenite Faktörü Değerlerinin Belirlenmesi

3.6.1. Numune Hazırlama

Daha önce artık gerilme profillerinin belirlenmesi kısmında da bahsedildiği üzere Christiansen-Shelyubskii yöntemi ile homojenite faktörü belirlenecek 500 mm uzunluğunda, 400 mm genişliğinde ve 4 mm kalınlığında iki adet tavlanmış ve iki adet ısıtıl temperlenmiş test numunesi kullanılmıştır. Yine bahsedildiği üzere her bir test numunesi için homojenite faktörü değerlerinin belirleneceği 9 farklı ölçüm bölgesi (A, B, C, D, E, K₁ K₂ K₃ K₄) üzerinden artık gerilme profilleri belirlenmiştir. Homojenite test numunelerine Vickers indentasyon yükü uygulanmamış olup numuneler doğrudan fabrika üretim koşulları korunmuş bir şekilde halka üstü halka testine tabi tutulmuştur. Christiansen-Shelyubskii test yönteminin hassasiyeti açısından halka üstü halka testine tabi tutulmadan önce numune yüzeyleri bantlanmış olup eğme testi sonrasında ölçüm bölgelerinin olası kontaminasyona uğrama olasılıkları azaltılmıştır. Halka üstü halka testi sonucunda kırılan her bir homojenite numunesi üzerindeki bant vasıtasıyla korunmuş 9 farklı ölçüm bölgesinden kırık parçaları toplanmıştır. Deneysel ölçümün hassasiyeti nedeniyle toplanan kırık parçaları metil alkol ile temizlenmiş olup olası bir kontaminasyon olasılığının azaltılması sağlanmıştır. Daha sonrasında kırık parçaların yüzey alanları küçültülerek öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Öğütme işleminin sonunda kırık parçalar farklı boyutlarda toz partikülleri haline getirilmiş olup bu toz kapsamında elek analizi yöntemi vasıtasıyla 45-60 mesh aralığındaki toz partikülleri kullanılmıştır. Yine deneysel ölçümün hassasiyeti açısından kullanılacak toz partikülleri aseton ile temizlenmiştir. Aseton ile ıslatılan toz partikülleri bir etüv fırınının yardımıyla kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonrasında cam tozu partikülleri ile kırılma indisi değeri cama çok yakın olan kloro benzen sıvısı (1,5241) 0,5'er hacim fraksiyonuna sahip olacak şekilde Christiansen hücresi içerisine konularak homojen olacak bir karışım elde edinceye kadar karıştırma işlemi uygulanmıştır. Homojen karışımın eldesiyle birlikte homojenite faktörü belirlenecek numunelerin hazırlama işlemleri sona ermiştir. Homojenite faktörü belirlenecek ölçüm bölgeleri ve kullanılacak test numunesi özellikleri Şekil 3.10 ile ve homojenite faktörü belirlenecek numunelerin hazırlanma aşamaları ise Şekil 3.11 ile verilmektedir.

HOMOJENİTE FAKTÖRÜ ÖLÇÜM BÖLGELERİ VE NUMUNE ÖZELLİKLERİ



Düz Cam
Ölçüm Numunesi

Tavlanmış Numune Adedi	2
Isıl Temperli Numune Adedi	2
Numune Uzunluğu, L	500 mm
Numune Genişliği, W	400 mm
Numune Kalınlığı, t	4 mm

Şekil 3.10: Homojenite faktörü belirlenecek test numunelerinin özellikleri ve homojenite faktörü ölçüm bölgeleri.

HOMOJENİTE FAKTÖRÜ ANALİZİ İÇİN NUMUNE HAZIRLIĞI



Kırılan Numuneneye Ait
Homojenite Ölçüm Bölgelerinden
Kırık Parçalarının Alınması İşlemi



Kırık Parçalarını
Öğütme İşlemi



Elek Analizi



Aseton ile Toz Partiküllerinin
Temizlenme İşlemi



Etüv Fırını ile Toz Partiküllerinin
Kurutulması İşlemi

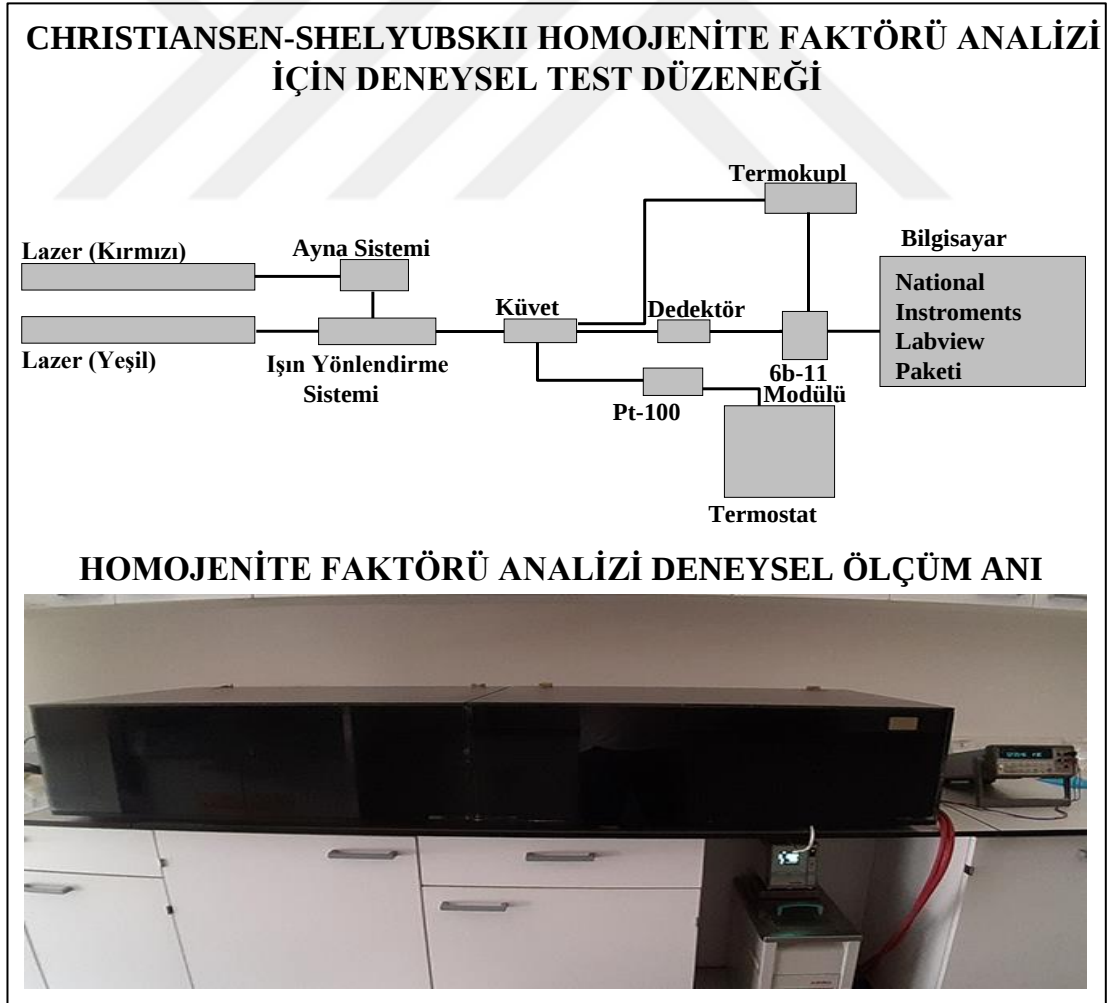


Temizlenmiş ve Kurutulmuş
Cam Toz Partikülleri

Şekil 3.11: Homojenite faktörü belirlenecek test numunelerinin hazırlanması.

3.6.2. Deneysel Ölçüm

Bu tez kapsamında farklı ısıtma işlemi uygulanmış düz cam test numunelerinin ölçüm bölgelerindeki homojenlik dereceleri Christiansen-Shelyubskii yöntemi kullanılarak denklem 2.22 vasıtasıyla belirlenmiştir. Christiansen-Shelyubskii yönteminde test kurulumu için 543 nm dalga boyuna ve 0,5 mW güce sahip lazer kaynağı, ayna sistemi, ışın yönlendirme ve genişletme sistemi, 5 mm uzunluğa sahip Christiansen filtresi (küvet), dedektör, Pt-100 sıcaklık kontrol sensörü, termokupl, termostat ve Christiansen filtresinden dedektöre geçen hücre sıcaklığı ve voltaj değerleri için 6B11 modülü ve National Instruments Labview paketi kullanılmıştır. Tekrar edilebilir sonuçlar almak açısından 0,5°C/dk ısıtma-soğutma hızları ve 45-60 mesh aralığında cam toz boyutları kullanılmıştır. Test düzeneği ve ölçüm anı Şekil 3.12 ile verilmektedir [81].



Şekil 3.12: Homojenite test düzeneği ve ölçüm anı.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

4.1. Artık Gerilme Profillerinin Belirlenmesi

4.1.1. Tavlanmış Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin DeneySEL Ölçüm Sonuçları

Numunelerin kalay yüzeylerinde ASTM C1048-12 standardına uygun olarak merkez ölçüm bölgesi C üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş artık gerilme değerleri Tablo 4.1 ile verilmektedir. Tablo 4.1’de 80 adet tavlanmış düz cam numunesi, C ölçüm bölgesinde mevcut bulunan basma gerilmelerinin miktarı en yüksekten en düşük seviyeye kadar olacak şekilde sıralanmıştır. Eşit miktarda yüzey basma gerilmesi bulunduran numunelerde merkez çekme gerilmesi fazla olan numune sıralamada önde yazılmıştır. Benzer şekilde eşit miktarlarda yüzey basma gerilmesi ve merkez çekme gerilmesi bulunduran numunelerde ise elektronik kumpas vasıtası ile ölçülmüş numune kenar kalınlığı fazla olan numune sıralamada önde yazılmıştır. Tez kapsamında homojenite faktörü belirlenecek 2 adet numune, Tablo 4.1’de sıra numarasının bitişiğine “*” işareti kullanılarak gösterilmiştir. Homojenite faktörü belirlenecek numunelerin kalay yüzeylerinden C bölgesine ilave olarak ASTM C1048-12 standardına göre A, B, D, E bölgelerinden ve numunelerin kenarlarında bulunan K₁, K₂, K₃, K₄ bölgelerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçüm alınmış olup ölçüm bölgelerine karşılık gelen artık gerilme değerleri Tablo 4.2 ile verilmektedir. Homojenite faktörü belirlenecek numunelerin C ölçüm bölgesinden elde edilen sonuçları hem Tablo 4.1 hem de Tablo 4.2’de kullanılmıştır.

Tablo 4.1: Tavlanmış numunelerin kalay yüzeylerinde merkez ölçüm bölgesi C üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş artık gerilme değerleri.

Numune Sırası	Basma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Kalınlık Ölçümü (mm)	Numune Sırası	Basma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Kalınlık Ölçümü (mm)	Numune Sırası	Basma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Kalınlık Ölçümü (mm)
1	-2,8	0,8	3,85	28	-2,0	1,2	3,80	55	-1,7	0,7	3,85
2	-2,7	0,9	3,85	29	-2,0	1,1	3,81	56	-1,7	0,7	3,81
3	-2,6	0,9	3,85	30	-2,0	1,1	3,78	57	-1,6	0,9	3,84
4	-2,4	1,0	3,81	31	-2,0	1,1	3,77	58	-1,6	0,8	3,80
5	-2,3	0,9	3,86	32	-2,0	1,0	3,89	59	-1,6	0,8	3,76
6	-2,3	0,9	3,80	33	-2,0	1,0	3,77	60	-1,6	0,8	3,76
7	-2,3	0,8	3,82	34	-2,0	0,9	3,85	61	-1,6	0,7	3,83
8	-2,3	0,5	3,80	35	-2,0	0,9	3,80	62	-1,6	0,7	3,81
9	-2,2	1,1	3,82	36	-2,0	0,9	3,80	63	-1,6	0,7	3,80
10	-2,2	1,1	3,78	37	-2,0	0,9	3,78	64	-1,5	0,8	3,85
11	-2,2	1,0	3,88	38	-2,0	0,8	3,78	65	-1,5	0,8	3,80
12	-2,2	1,0	3,77	39	-2,0	0,7	3,83	66	-1,5	0,7	3,85
13	-2,2	0,9	3,80	40	-1,9	1,2	3,80	67	-1,4	0,7	3,88
14	-2,2	0,9	3,77	41	-1,9	1,1	3,83	68	-1,4	0,7	3,81
15	-2,1	1,1	3,79	42	-1,9	1,0	3,76	69	-1,4	0,7	3,81
16	-2,1	1,1	3,77	43	-1,9	0,9	3,83	70	-1,4	0,7	3,75
17	-2,1	1,0	3,86	44	-1,9	0,8	3,81	71	-1,4	0,7	3,71
18	-2,1	1,0	3,84	45	-1,9	0,5	3,77	72	-1,4	0,6	3,81
19	-2,1	1,0	3,83	46	-1,8	0,9	3,83	73	-1,3	0,7	3,80
20	-2,1	1,0	3,82	47	-1,8	0,9	3,80	74	-1,3	0,6	3,80
21	-2,1	1,0	3,81	48	-1,8	0,9	3,74	75	-1,2	0,6	3,82
22	-2,1	1,0	3,80	49	-1,8	0,8	3,81	76*	-1,2	0,5	3,82
23	-2,1	0,9	3,80	50	-1,8	0,7	3,85	77	-1,1	0,6	3,83
24	-2,1	0,7	3,83	51	-1,7	0,9	3,85	78*	-1,1	0,4	3,84
25	-2,1	0,7	3,82	52	-1,7	0,9	3,81	79	-1,0	0,4	3,80
26	-2,1	0,6	3,81	53	-1,7	0,9	3,81	80	-1,0	0,4	3,78
27	-2,0	1,2	3,81	54	-1,7	0,9	3,80				

Tablo 4.2: Homojenite faktörü belirlenecek numunelerin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş artık gerilme değerleri.

Fotoelastik Ölçüm Bölgeleri	Numune Sırası 76*		Numune Sırası 78*	
	Basma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Basma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)
A	-2,1	0,4	-1,1	0,5
B	-2,2	0,6	-2,1	0,8
C	-1,2	0,5	-1,1	0,4
D	-1,4	0,5	-1,4	0,7
E	-1,0	0,5	-1,4	0,6
K ₁	-2,3	0,7	-1,6	0,8
K ₂	-1,5	0,7	-2,0	0,6
K ₃	-1,9	0,6	-2,1	0,6
K ₄	-2,2	0,8	-2,1	0,6

4.1.2. Isıl Temperli Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin Deneysel Ölçüm Sonuçları

Numunelerin kalay yüzeylerinde ASTM C1048-12 standardına uygun olarak merkez ölçüm bölgesi C üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş artık gerilme değerleri Tablo 4.3 ile verilmektedir. Tablo 4.3’de 80 adet ısıtıl temperlenmiş düz cam numunesi, merkez ölçüm bölgesi C üzerinde mevcut bulunan basma gerilmelerinin miktarı en yüksekten en düşük seviyeye kadar olacak şekilde sıralanmıştır. Eşit miktarda yüzey basma gerilmesi bulunduran numunelerde merkez çekme gerilmesi fazla olan numune sıralamada önde yazılmıştır. Benzer şekilde eşit miktarlarda yüzey basma gerilmesi ve merkez çekme gerilmesi bulunduran numunelerde ise elektronik kumpas vasıtası ile ölçülmüş numune kenar kalınlığı fazla olan numune sıralamada önde yazılmıştır. Tez kapsamında homojenite faktörü belirlenecek 2 adet numune, Tablo 4.3’de sıra numarasının bitişiğine “*” işareti kullanılarak gösterilmiştir. Homojenite faktörü belirlenecek numunelerin kalay yüzeylerinden C bölgesine ilave olarak ASTM C1048-12 standardına göre A, B, D, E bölgelerinden ve numunelerin kenarlarında bulunan K₁, K₂, K₃, K₄ bölgelerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçüm alınmış olup ölçüm bölgelerine karşılık gelen artık gerilme değerleri Tablo 4.4 ile verilmektedir. Homojenite faktörü belirlenecek numunelerin C ölçüm bölgesinden elde edilen sonuçları hem Tablo 4.3 hem de Tablo 4.4’de kullanılmıştır.

Tablo 4.3: Isıl temperlenmiş numunelerin kalay yüzeylerinde merkez ölçüm bölgesi C üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş artık gerilme değerleri.

Numune Sırası	Basma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Kalınlık Ölçümü (mm)	Numune Sırası	Basma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Kalınlık Ölçümü (mm)	Numune Sırası	Basma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Kalınlık Ölçümü (mm)
1	-99,8	46,9	3,73	28	-95,6	50,8	3,80	55*	-92,8	50,9	3,75
2*	-99,3	52,9	3,85	29	-95,5	52,7	3,77	56	-92,8	50,4	3,75
3	-98,7	52,1	3,70	30	-95,5	48,9	3,76	57	-92,8	48,9	3,85
4	-98,7	49,7	3,78	31	-95,3	49,8	3,83	58	-92,6	47,0	3,75
5	-98,6	50,6	3,75	32	-95,3	48,8	3,74	59	-92,5	47,4	3,73
6	-98,1	51,4	3,71	33	-95,2	50,1	3,80	60	-92,5	46,9	3,70
7	-98,1	48,7	3,66	34	-95,1	49,1	3,76	61	-92,3	50,0	3,70
8	-98,0	51,8	3,80	35	-95,0	48,1	3,72	62	-92,3	49,1	3,77
9	-97,9	53,1	3,75	36	-94,9	51,4	3,75	63	-92,3	46,9	3,70
10	-97,8	54,8	3,80	37	-94,9	47,1	3,80	64	-92,1	49,1	3,85
11	-97,7	51,7	3,70	38	-94,7	46,9	3,70	65	-92,0	49,5	3,75
12	-97,5	51,9	3,79	39	-94,4	50,7	3,81	66	-92,0	47,1	3,70
13	-97,4	45,7	3,73	40	-94,3	50,6	3,73	67	-91,8	50,5	3,71
14	-97,1	51,5	3,82	41	-94,2	50,5	3,69	68	-91,8	48,5	3,73
15	-96,9	51,8	3,72	42	-94,2	48,6	3,70	69	-91,7	49,0	3,69
16	-96,9	44,5	3,73	43	-94,1	47,7	3,71	70	-91,6	52,6	3,75
17	-96,7	52,7	3,66	44	-93,9	49,1	3,75	71	-91,6	51,1	3,77
18	-96,7	51,8	3,82	45	-93,8	49,6	3,70	72	-91,6	50,6	3,70
19	-96,7	51,4	3,70	46	-93,6	50,2	3,75	73	-91,2	50,3	3,70
20	-96,6	52,7	3,70	47	-93,6	49,7	3,71	74	-91,2	48,9	3,78
21	-96,5	49,8	3,83	48	-93,6	49,5	3,85	75	-91,1	49,1	3,73
22	-96,5	48,3	3,72	49	-93,6	49,2	3,79	76	-90,9	47,4	3,73
23	-96,2	49,5	3,74	50	-93,6	48,9	3,80	77	-90,5	47,6	3,66
24	-96,2	45,5	3,70	51	-93,5	43,8	3,64	78	-90,2	50,5	3,80
25	-96,0	48,7	3,78	52	-93,2	50,8	3,75	79	-89,8	48,3	3,73
26	-95,9	49,9	3,78	53	-93,1	50,3	3,77	80	-89,5	46,8	3,70
27	-95,9	48,5	3,74	54	-93,0	47,4	3,62				

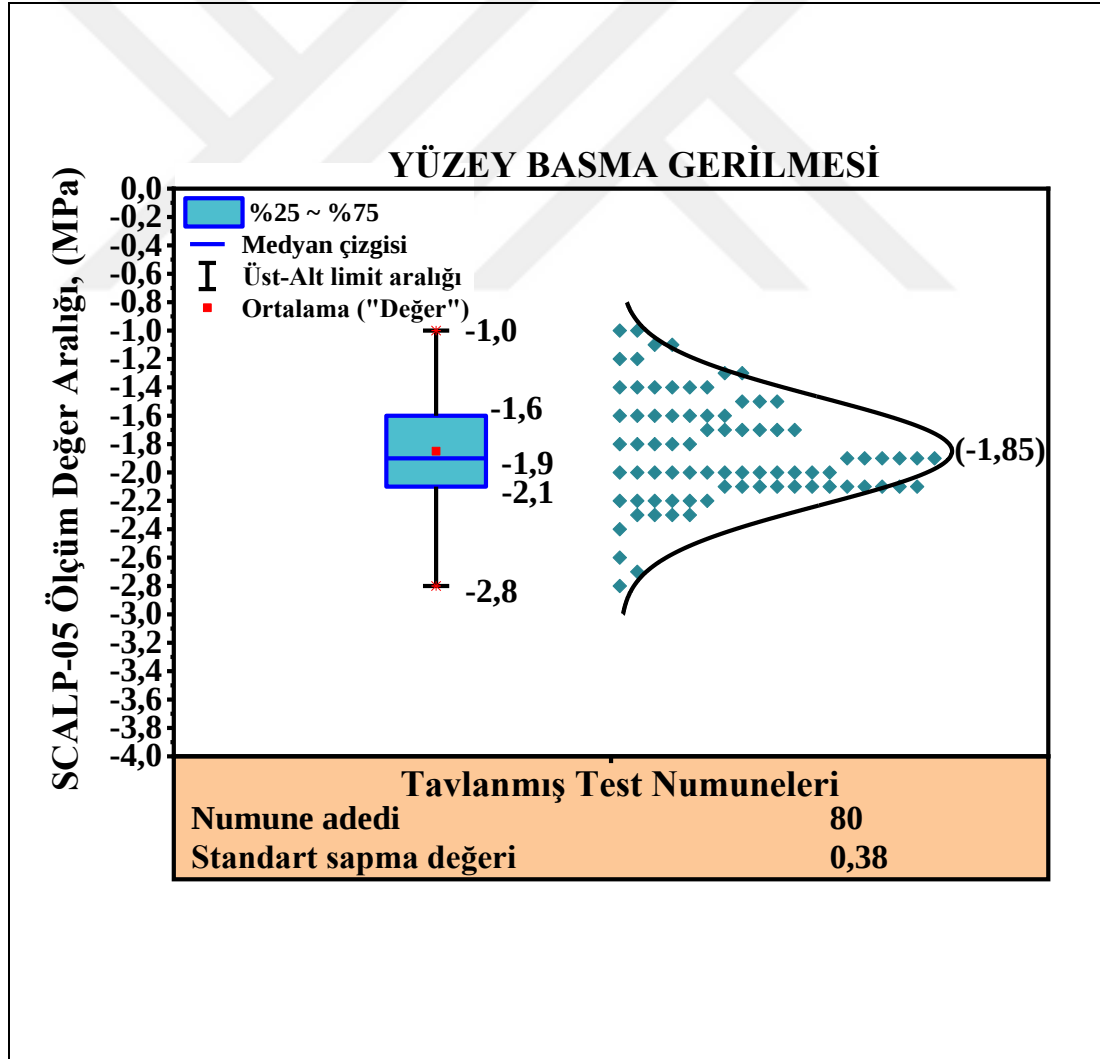
Tablo 4.4: Homojenite faktörü belirlenecek numunelerin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş artık gerilme değerleri.

Fotoelastik Ölçüm Bölgeleri	Numune Sırası 2*		Numune Sırası 55*	
	Basma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Basma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)
A	-103,3	49,3	-95,8	46,0
B	-98,1	50,4	-93,5	49,5
C	-99,3	52,9	-92,8	50,9
D	-101,0	54,3	-91,0	48,2
E	-105,6	51,2	-98,3	43,2
K ₁	-101,0	49,4	-100,2	47,1
K ₂	-96,5	48,9	-97,2	46,1
K ₃	-104,0	52,7	-95,5	45,3
K ₄	-103,3	52,1	-97,3	46,8

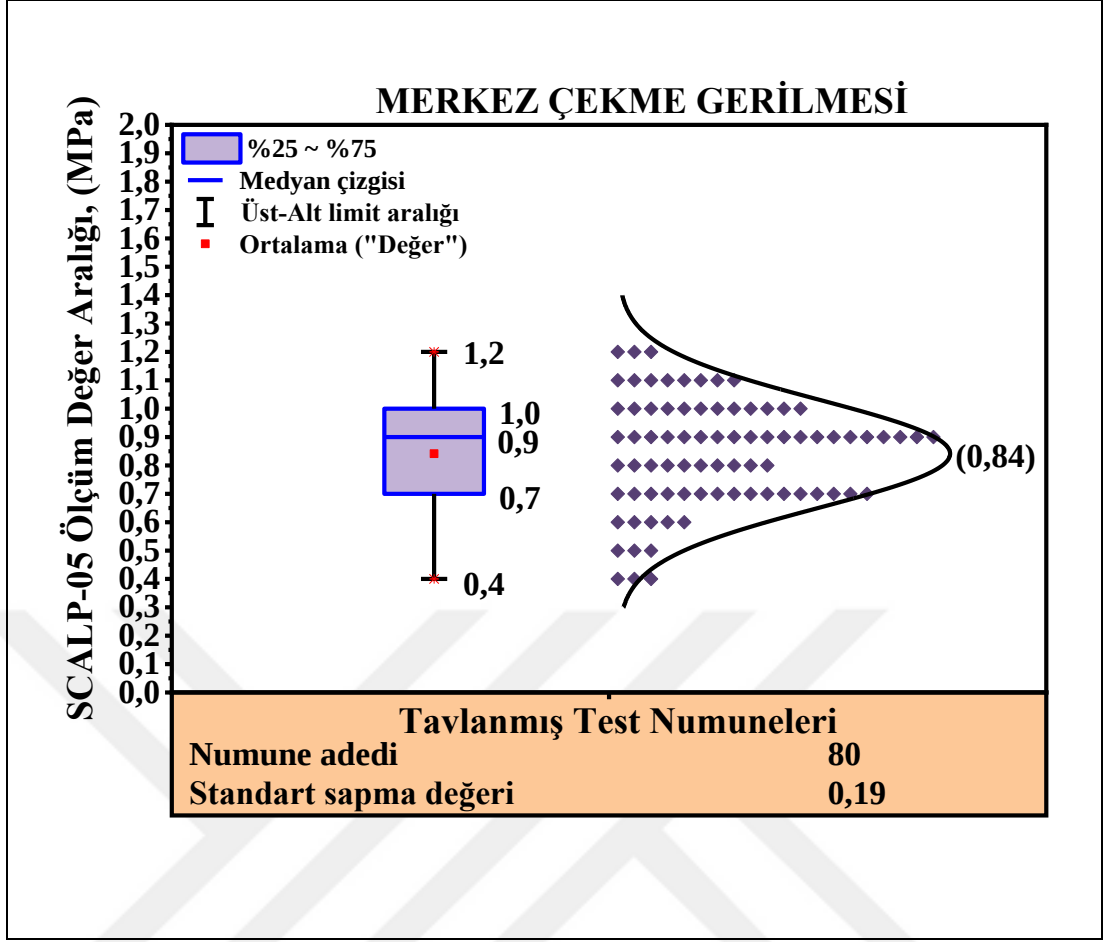
4.1.3. Tavlanmış Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin DeneySEL Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirmesi

Tavlama prosesi, düz cam ürünlerine kontrollü bir soğutma işlemi uygulanarak optimum seviyede artık gerilme miktarı tasarlanmasına dayanmaktadır. Ürün beklentisi gereği sıfıra yakın artık gerilme tasarımı istenen özel camların veya laboratuvar ortamında sıfıra yakın artık gerilme ile tasarlanan camların aksine yüzdürme teknolojisi kullanarak düz cam üretimi yapan fabrikaların ürünlerinde 4 ila 11 MPa değerleri arasında artık gerilme miktarları ölçülmüştür [117].

Tavlanmış numunelerin merkez ölçüm bölgesi C üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma ve merkez çekme artık gerilme değerlerinin ölçüm değer aralıkları sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 ile verilmektedir.



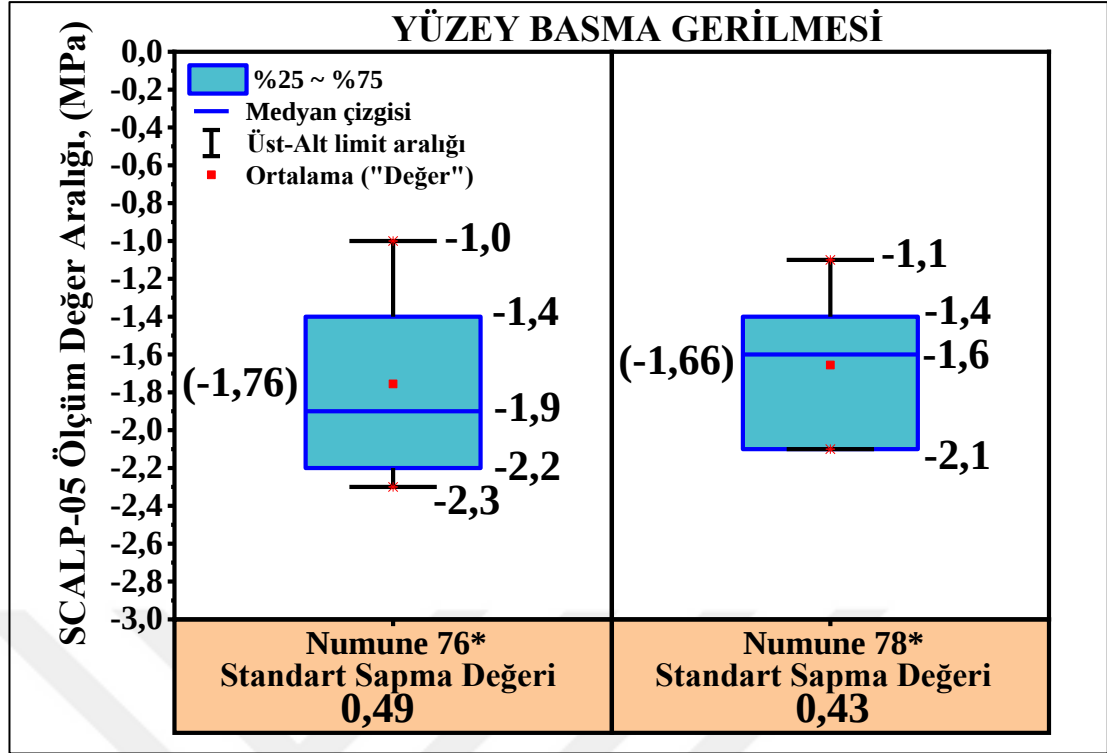
Şekil 4.1:Tavlanmış numunelerin merkez ölçüm bölgesi C üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma artık gerilmelerinin ölçüm değer aralığı.



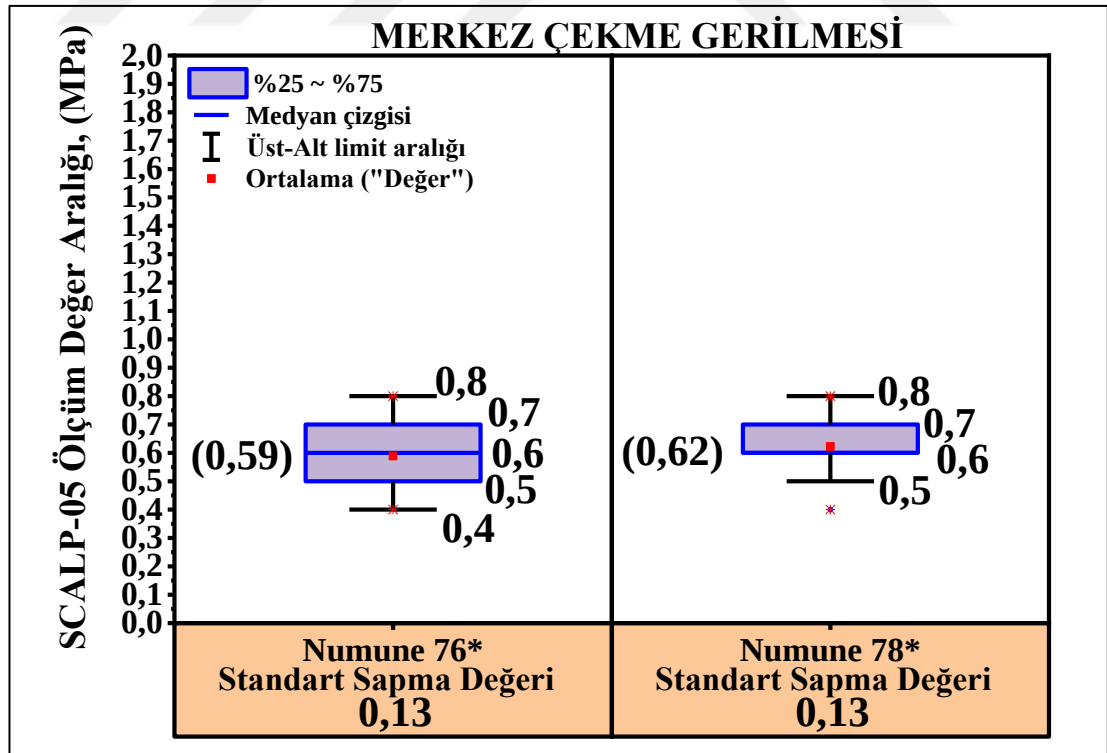
Şekil 4.2: Tavlanmış numunelerin merkez ölçüm bölgesi C üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş merkez çekme artık gerilmelerinin ölçüm değer aralığı.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 sırasıyla, Tablo 4.1 ile verilmiş olan yüzey basma ve merkez çekme artık gerilme değerlerinin üst ve alt limit değerlerini, birinci ve üçüncü çeyreklikteki değerlerini, medyan değerini, ortalama değerini ve standart sapma değerini göstermektedir. Şekil 4.1’de tavlanmış numunelerin C ölçüm bölgesi üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma gerilmesi değerlerinin 1,0 ila 2,8 MPa aralığında oldukları gösterilmiştir. Benzer olarak Şekil 4.2’de numunelerin C ölçüm bölgesi üzerinden ölçülmüş merkez çekme gerilmesi değerlerinin 0,4 ila 1,2 MPa aralığında oldukları gösterilmiştir. Dolayısıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’den artık gerilme ortalama değerlerinin ve hatta üst limit değerlerinin 4 ila 11 MPa artık gerilme değerlerinin yeterince aşağısında olduğu görülmektedir.

Homojenite faktörü belirlenecek 2 adet tavlanmış numunenin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma ve merkez çekme artık gerilme değerlerinin ölçüm değer aralıkları sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 ile verilmektedir.



Şekil 4.3: Homojenite faktörü belirlenecek tavllanmış numunelerin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma artık gerilmelerinin ölçüm değer aralıkları.



Şekil 4.4: Homojenite faktörü belirlenecek tavllanmış numunelerin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş merkez çekme artık gerilmelerinin ölçüm değer aralıkları.

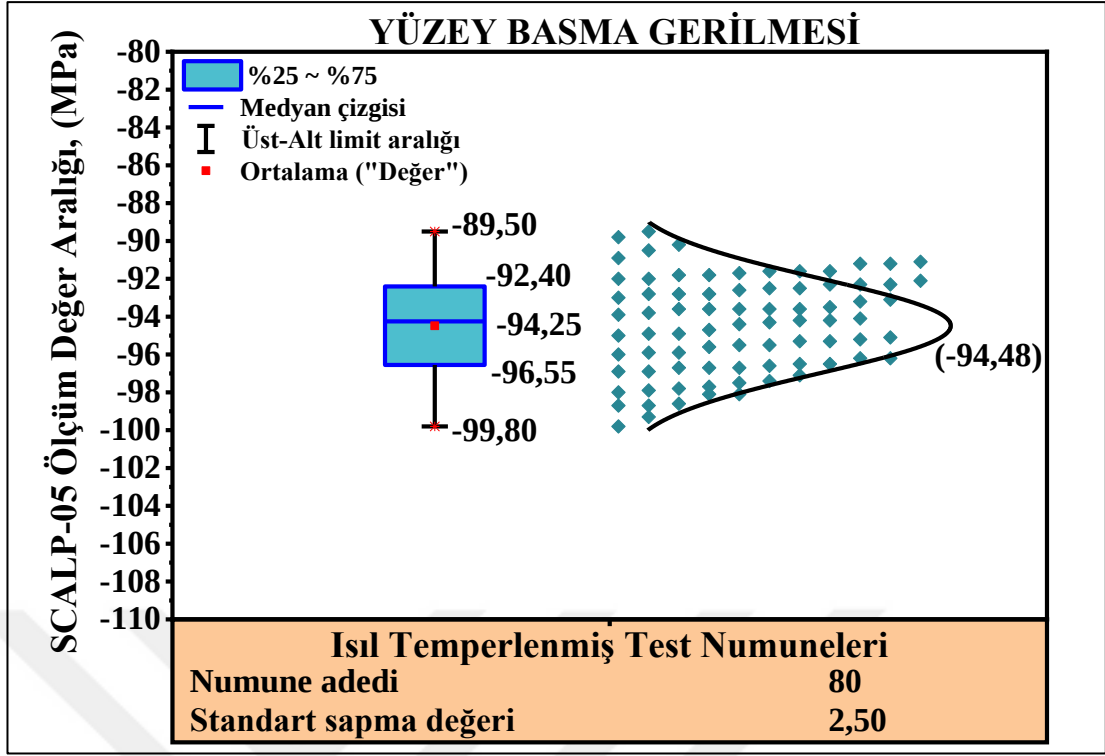
Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 sırasıyla, Tablo 4.2 ile verilmiş olan yüzey basma ve merkez çekme artık gerilme değerlerinin üst ve alt limit değerlerini, birinci ve üçüncü çeyreklikteki değerlerini, medyan değerini, ortalama değerini ve standart sapma değerini göstermektedir. Şekil 4.3'te ASTM C1048-12 standardına göre 1 adet numunenin 9 farklı fotoelastik ölçüm bölgesinden alınan ölçümlerde Numune 76* ve Numune 78*'in yüzey basma gerilmesi değerlerinin 1,0 ila 2,3 MPa aralığında oldukları gösterilmiştir. Benzer olarak Şekil 4.4'te numunenin 9 farklı fotoelastik ölçüm bölgesinden alınan ölçümlerde Numune 76* ve Numune 78*'in merkez çekme gerilmesi değerlerinin 0,4 ila 0,8 aralığında oldukları gösterilmiştir. Dolayısıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'ten Numune 76* ve Numune 78*'in yüzey basma ve merkez çekme artık gerilme ortalama değerlerinin ve üst limit değerlerinin 4 ila 11 MPa artık gerilme değerlerinin yeterince aşağısında olduğu görülmektedir.

Belirlenmiş olan artık gerilme değer aralıklarına göre bu tez kapsamında kullanılan tavllanmış numunelerin, kimyasal bileşimlerine bağıntılı olan viskozite sıcaklık ilişkisinden tavlama sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklık değerinden homojen kontrollü bir şekilde gerilme sıcaklığının altına soğutulduğu ve istenilen minimum seviyede yüzey basma ve merkez çekme artık gerilmeleri elde edildiği görülmektedir.

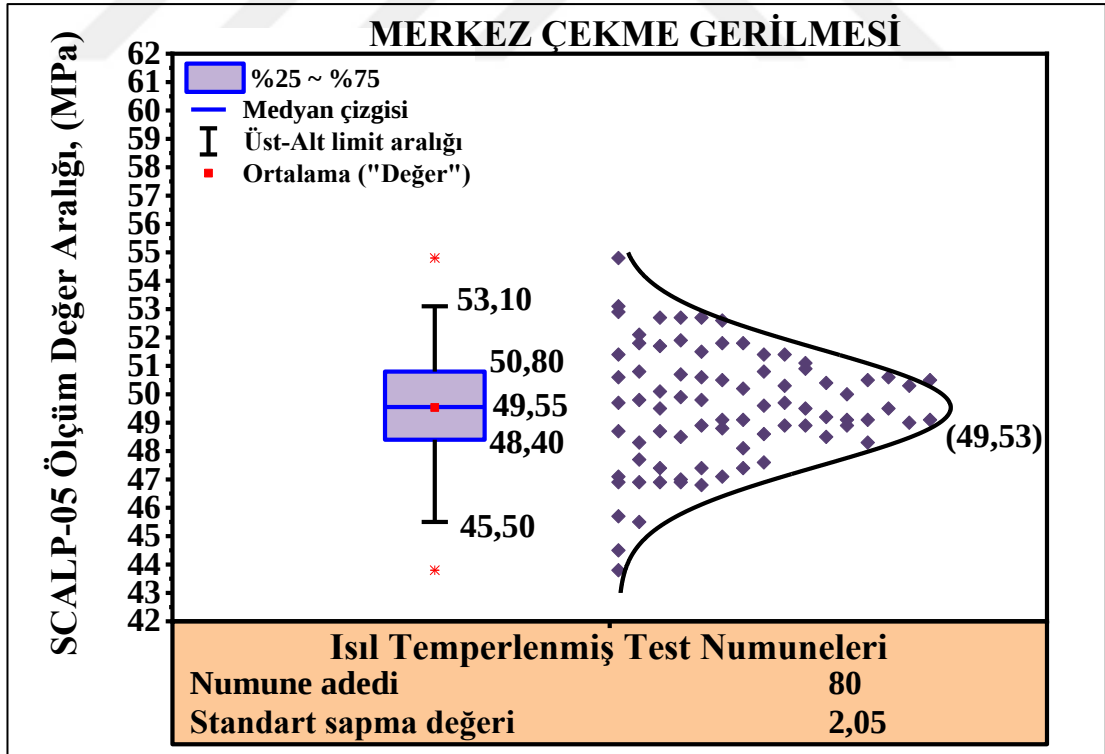
4.1.4. Isıl Temperli Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin DeneySEL Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirmesi

Ticari cam ürünleri yüzeylerinde tasarlanan artık gerilme seviyelerine göre farklı sınıflara ayrılmaktadırlar. ASTM C1048-18 standardına göre tamamen ısıtılabilir sınıfına giren bir düz cam yüzeyinde minimum 69 MPa ve kenarlarında ise minimum 67 MPa basma gerilmesi koşulunu sağlamalıdır [118]. Ayrıca her bir ısıtılabilir düz cam numunesinde denklem 2.27 ile bahsedildiği üzere basma gerilmelerinin etkisi ile yüzeylerde oluşan artık gerilmeler çekme gerilmelerinin etkisi ile oluşan merkezdeki gerilmelerin eksi iki katına eşit olmalıdır [75].

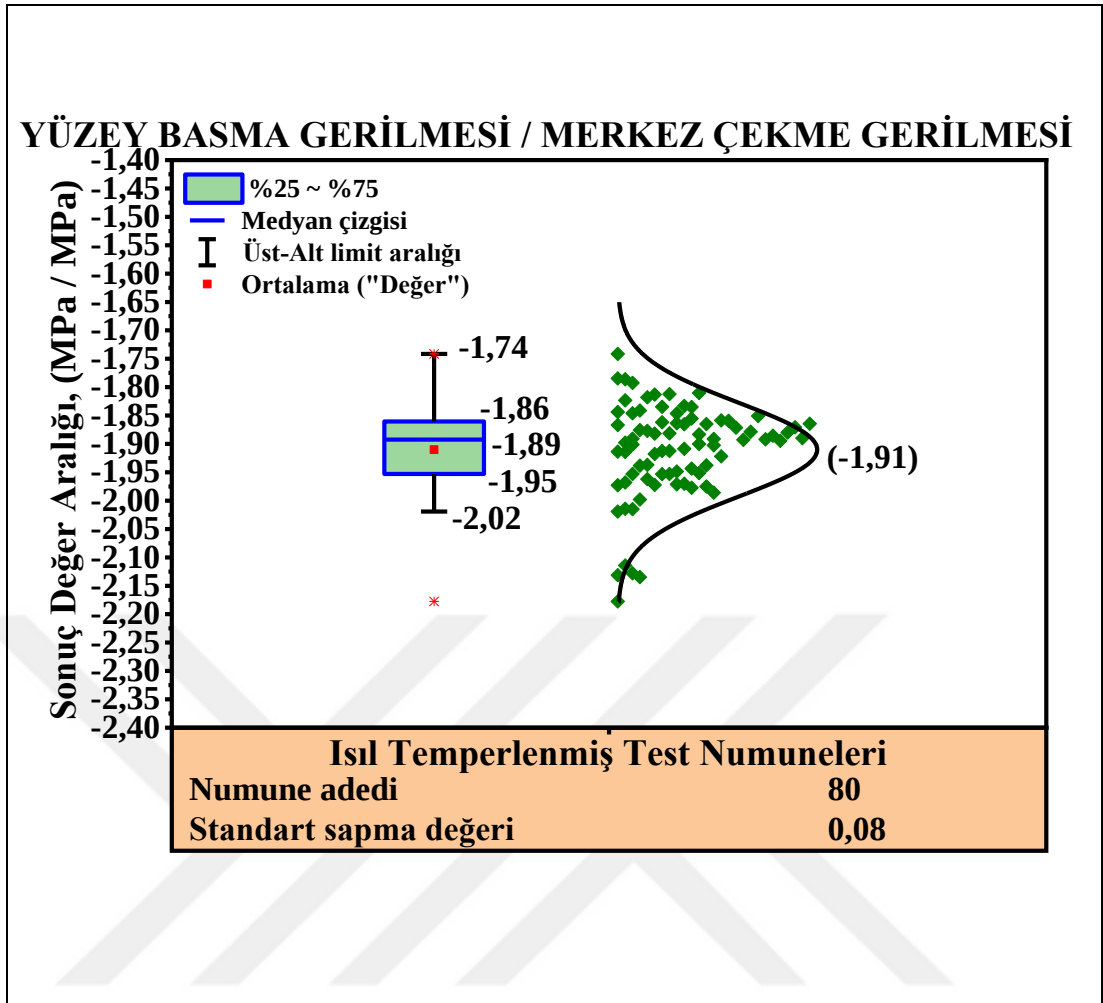
Isıl temperlenmiş numunelerin merkez ölçüm bölgesi C üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma ve merkez çekme artık gerilme değerlerinin ölçüm değer aralıkları sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 ile verilmektedir. Merkez ölçüm bölgesi C üzerinden elde edilen yüzey basma gerilmelerinin merkez çekme gerilmelerine oranı ise Şekil 4.7 ile verilmektedir.



Şekil 4.5: Isıl temperlenmiş numunelerin merkez ölçüm bölgesi C üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma artık gerilmelerinin ölçüm değer aralığı.



Şekil 4.6: Isıl temperlenmiş numunelerin merkez ölçüm bölgesi C üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş merkez çekme artık gerilmelerinin ölçüm değer aralığı.

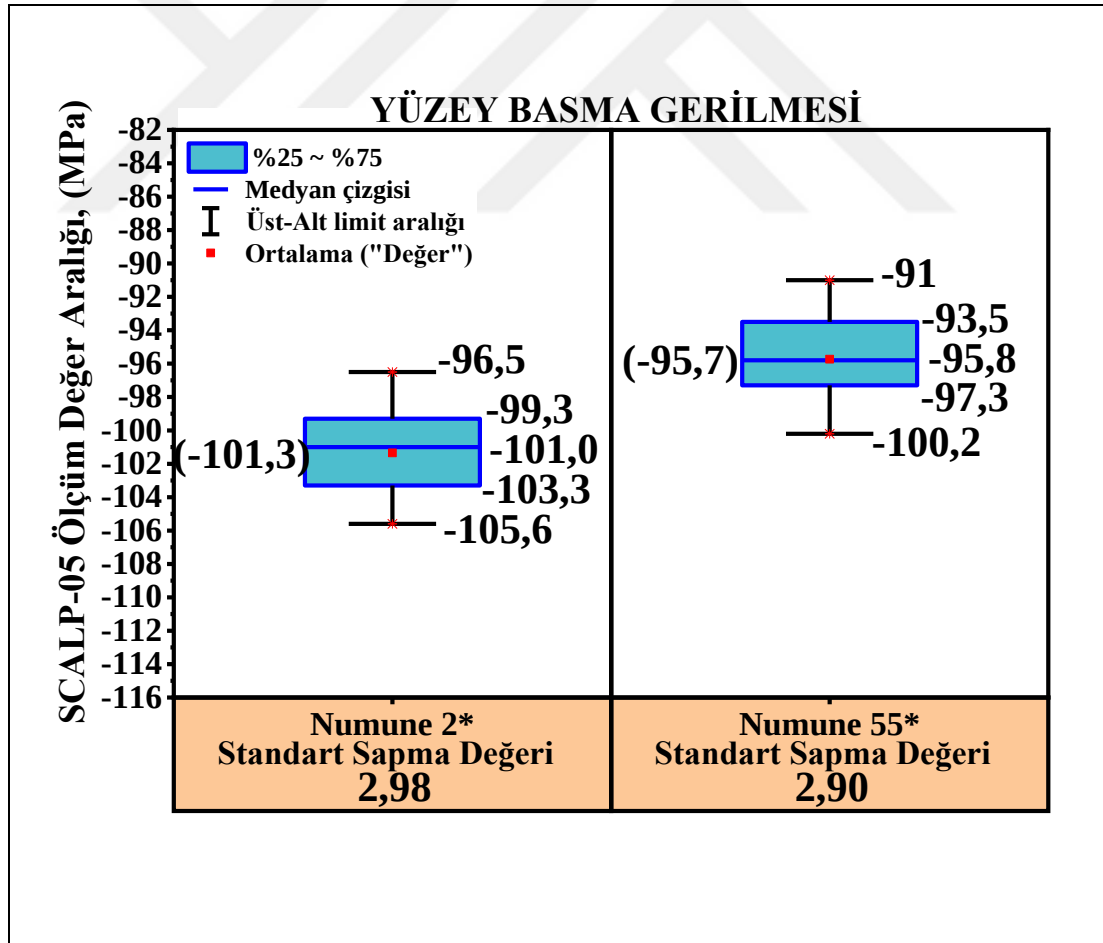


Şekil 4.7: Isıl temperlenmiş numunelerin merkez ölçüm bölgesi C üzerinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma artık gerilmelerinin merkez çekme artık gerilmelerine oranının sonuç değer aralığı.

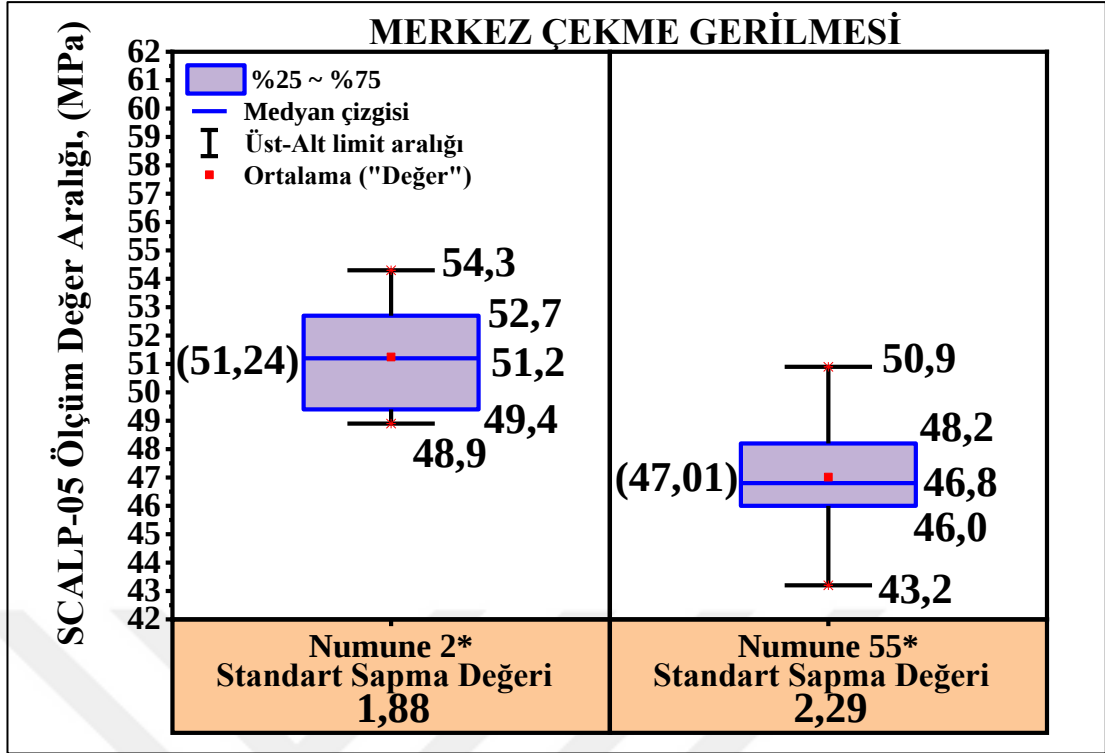
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 sırasıyla Tablo 4.3 ile verilmiş olan yüzey basma ve merkez çekme artık gerilme değerlerinin üst ve alt limit değerlerini, birinci ve üçüncü çeyreklikteki değerlerini, medyan değerini, ortalama değerini ve standart sapma değerini göstermektedir. Benzer şekilde Şekil 4.7’de her bir ısı temperlenmiş numune için C bölgesinden ölçülen yüzey basma gerilmesinin merkez çekme gerilmesine oranına ait değerlerin üst ve alt limit değerlerini, birinci ve üçüncü çeyreklikteki değerlerini, medyan değerini, ortalama değerini ve standart sapma değerini göstermektedir. Şekil 4.5’te ısı temperlenmiş numunelerin C bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma artık gerilme değerlerinin 89,50 ila 99,80 aralıklarında oldukları gösterilmiştir. Dolayısıyla yüzey basma gerilmelerinin ortalama değerinin ve hatta alt limit değerinin 69 MPa artık gerilme değerinin yeterince yukarısında olduğu açıkça görülmektedir. Isıl temperleme prosesinde ticari

düz cam ürününün soğutma hızının değişimine bağıntılı olarak ürünün yüzey basma gerilmesinin merkez çekme gerilmesine oranı değişebilmektedir. Dolayısıyla Şekil 4.7'den her bir ısı temperlenmiş numune için yüzey basma gerilmesi değerlerinin merkez çekme gerilmesi değerlerine oranının ortalama değerleri literatürde verilmekte olan -2 değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yani bağıntılı olarak, ısı temperlenmiş numunelerin C bölgesinden ölçülen değerlerinden ısı temperleme prosesi için kullanılan soğutma hızının genel olarak optimum seviyeye yakın olduğu görülmektedir.

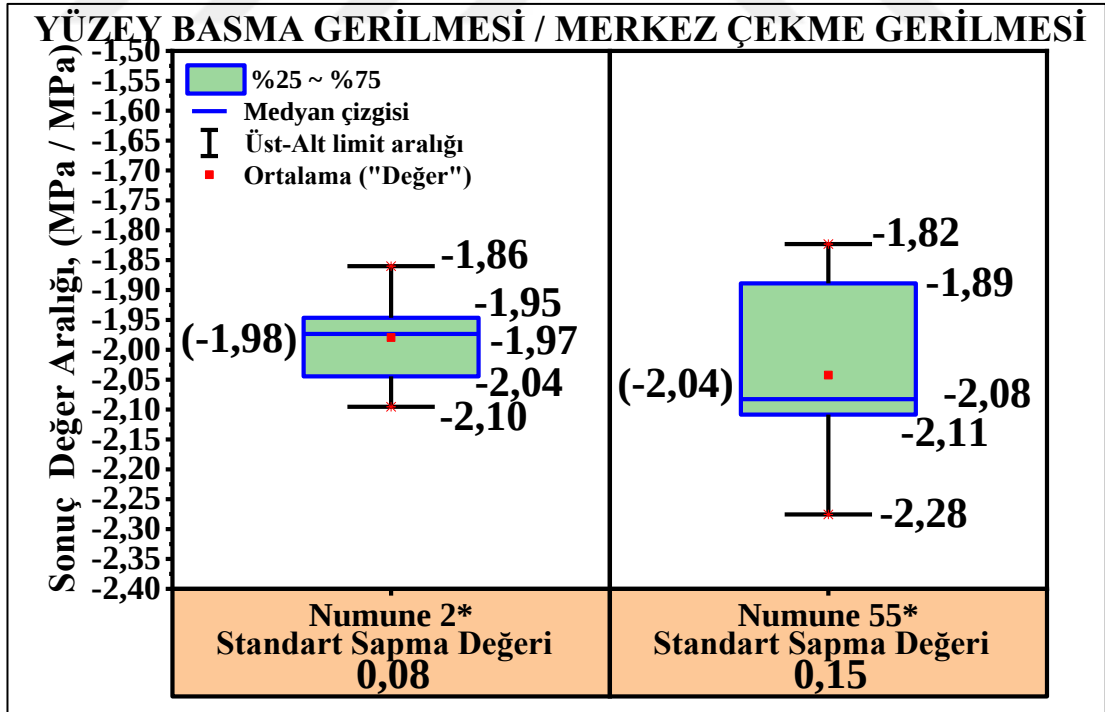
Homojenite faktörü belirlenecek 2 adet ısı temperlenmiş numunenin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma ve merkez çekme artık gerilme değerinin ölçüm değer aralıkları sırasıyla Şekil 4.8 ve 4.9 ile verilmektedir. 9 farklı ölçüm bölgesinden elde edilen yüzey basma gerilmelerinin merkez çekme gerilmelerine oranı ise Şekil 4.10 ile verilmektedir.



Şekil 4.8: Homojenite faktörü belirlenecek ısı temperlenmiş numunelerin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma artık gerilmelerinin ölçüm değer aralıkları.



Şekil 4.9: Homojenite faktörü belirlenecek ısı temperlenmiş numunelerin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş merkez çekme artık gerilmelerinin ölçüm değer aralıkları.



Şekil 4.10: Homojenite faktörü belirlenecek ısı temperlenmiş numunelerinin kalay yüzeylerinde 9 farklı ölçüm bölgesinden SCALP-05 cihazı vasıtası ile ölçülmüş yüzey basma artık gerilmelerinin merkez çekme artık gerilmelerine oranının sonuç değer aralığı.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 sırasıyla Tablo 4.4'deki verilmiş olan yüzey basma ve merkez çekme artık gerilme değerlerinin üst ve alt limit değerlerini, birinci ve üçüncü çeyreklikteki değerlerini, medyan değerini, ortalama değerini ve standart sapma değerini göstermektedir. Benzer şekilde Şekil 4.10'da ısı temperlenmiş Numune 2* ve Numune 55*'ın kalay yüzeylerinin 9 farklı bölgesinden alınan yüzey basma gerilmesi ve merkez çekme gerilmesi oranına ait değerlerinin üst ve alt limit değerlerini, birinci ve üçüncü çeyreklikteki değerlerini, medyan değerini, ortalama değerini ve standart sapma değerini göstermektedir.

Isıl temperleme prosesinde soğutma hızı ve ortam koşullarına bağıntılı olarak numunelerin yüzeylerinde farklı basma gerilmeleri oluşabilmektedir. Dolayısıyla bu proseste merkez çekme gerilmesinin mümkün olduğunca yüksek seviyede olması arzu edilmektedir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'dan, Numune 2* ve Numune 55*'ın yüzeylerindeki artık gerilme ortalama değerleri ve alt limit değerleri 69 MPa artık gerilme değerinin yeterince yukarısında olduğu görülmektedir. Ayrıca Numune 2*'a ait 9 farklı bölgeden ölçülen yüzey basma gerilmesi ve merkez çekme gerilmesi ortalama değerlerinin Numune 55*'dan daha yüksek olduğu ve dolayısıyla Numune 2*'ın Numune 55*'a nazaran daha hızlı soğutulduğu belirlenmektedir.

Şekil 4.10'dan ise Numune 2*'ın ve Numune 55*'ın yüzey basma gerilmesi değerlerinin merkez çekme gerilmesi değerlerine oranının ortalama değerleri literatürde verilmekte olan -2 değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yani bağıntılı olarak, ısı temperlenmiş Numune 2*'ın ve Numune 55*'ın 9 farklı bölgesinden ölçülen değerlerinden, ısı temperleme prosesi için kullanılan soğutma hızının genel olarak optimum seviyeye yakın olduğu görülmektedir.

Dolayısıyla bu tez kapsamında kullanılan ısı temperlenmiş numunelerin tamamının, ASTM C1048-18 standardına göre tamamen ısı temperli sınıfına giren bir düz cam yüzeyinde minimum 69 MPa ve kenarlarında ise minimum 67 MPa basma gerilmesi koşulunu sağladıkları görülmektedir.

4.2. Vickers İndentasyon Yöntemi ile Sertlik ve Tokluk Değerlerinin Belirlenmesi

4.2.1. Tavlanmış Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin DeneySEL Ölçüm Sonuçları

Tavlanmış numunenin kalay yüzeyinde belirlenen ölçüm bölgelerinde oda sıcaklığında Vickers elmas piramit uç vasıtası ile 9,81 N ve 29,42 N indentasyon yüklerinin 10 saniye boyunca uygulanması sonucunda, numunede kasıtlı olarak yapay çatlaklar oluşturulmuştur. Bu çatlaklardan, Vickers indentasyon izinin diyagonal uzunlukları ve bağıntılı olarak Vickers indentasyon sertliği mikro sertlik ölçüm cihazı tarafından otomatik olarak belirlenmiştir. Otomatik olarak belirlenen bu değerler uygulanan 9,81 N ve 29,42 N indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.5 ve Tablo 4.6 ile verilmektedir.

Farklı indentasyon yükleri altında oluşan çatlağın, Vickers indentasyon izinin diyagonal uzunlukları ile aynı yönde oluşan ve bu tez kapsamında saat yönüyle bağıntılı olarak l_1 , l_2 , l_3 ve l_4 olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının test uygulandıktan 1 dakika ve 1 hafta sonrasında ölçülen değerleri 9,81 N ve 29,42 N indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.7 ve Tablo 4.8 ile verilmektedir.

Farklı indentasyon yükleri altında oluşan, dikey konumda (c_1 ; c_3) ve yatay konumda (c_2 ; c_4) olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının konumlarına göre dikey konumda (a_y) yatay konumda (a_x) olarak isimlendirilen Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına oranları sırasıyla Tabla 4.9 ve Tablo 4.10 ile verilmektedir.

Denklem 2.12a, denklem 2.12b ve denklem 2.12c kullanılarak hesaplanan Vickers indentasyon yöntemi kırılma tokluğu değerleri 9,81 N ve 29,42 N Vickers indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.11 ve Tablo 4.12 ile verilmektedir.

İndentasyon ölçüm bölgeleri en yüksek Vickers indentasyon sertliğine sahip ölçüm bölgesinden en düşük sertliğe sahip ölçüm bölgesine olacak şekilde sıralandırılmıştır.

Tablo 4.5: 9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan çatlakın Vickers indentasyon izi diyagonal uzunlukları ve Vickers indentasyon sertlik değerleri.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Vickers İndentasyon İzi Diyagonal Uzunlukları		Vickers İndentasyon Sertliği
	$2a_x$ (μm)	$2a_y$ (μm)	(H_V)
1	53,7	48,6	709
2	53,7	53,6	644
3	51,9	57,3	622
4	53,7	56,4	612
5	53,7	56,4	612
6	54,2	57,3	596
7	57,4	56,0	577
8	57,9	56,9	563
9	60,6	55,5	550
10	59,7	60,1	516

Tablo 4.6: 29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan çatlakın Vickers indentasyon izi diyagonal uzunlukları ve Vickers indentasyon sertlik değerleri.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Vickers İndentasyon İzi Diyagonal Uzunlukları		Vickers İndentasyon Sertliği
	$2a_x$ (μm)	$2a_y$ (μm)	(H_V)
1	102,8	91,4	591
2	97,2	100,8	567
3	96,2	102,7	561
4	99,1	110,3	507
5	110,4	103,7	504
6	104,7	106,5	498
7	105,7	109,3	480
8	117,0	104,6	453
9	116,0	106,5	450
10	116,0	115,9	414

Tablo 4.7: 9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan l_1 , l_2 , l_3 ve l_4 olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının test uygulandıktan 1 dakika ve 1 hafta sonra ölçülen değerleri.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Vickers İndentasyon İzinin Yol Açtığı Çatlak Uzunlukları							
	1 dk sonrası ölçüm değerleri				1 hafta sonrası ölçüm değerleri			
	l_1 (μm)	l_2 (μm)	l_3 (μm)	l_4 (μm)	l_1 (μm)	l_2 (μm)	l_3 (μm)	l_4 (μm)
1	61,5	60,2	62,1	67,2	55,8	59,8	63,0	80,5
2	67,1	44,4	52,3	56,5	77,7	57,6	61,1	65,8
3	60,7	58,8	64,4	59,7	57,6	74,1	68,9	63,4
4	62,0	55,1	57,3	56,1	67,0	68,9	71,1	71,2
5	55,0	58,9	56,9	54,2	65,0	60,0	58,5	65,4
6	64,3	45,9	58,8	54,2				
7	50,9	54,6	47,2	65,5				
8	51,8	58,3	52,9	61,6	56,5	57,0	23,3	47,8
9	55,5	51,0	59,8	50,9				
10	56,4	57,0	59,2	57,4	76,3	77,8	77,3	64,1

Tablo 4.8: 29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan l_1 , l_2 , l_3 ve l_4 olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının test uygulandıktan 1 dakika ve 1 hafta sonra ölçülen değerleri.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Vickers İndentasyon İzinin Yol Açtığı Çatlak Uzunlukları							
	1 dk sonrası ölçüm değerleri				1 hafta sonrası ölçüm değerleri			
	l_1 (μm)	l_2 (μm)	l_3 (μm)	l_4 (μm)	l_1 (μm)	l_2 (μm)	l_3 (μm)	l_4 (μm)
1	139,2	123,7	112,9	126,0	136,1	148,1	116,9	128,3
2	166,1	175,6	95,2	110,3				
3	142,5	129,7	117,8	152,0	188,4	155,9	146,1	188,0
4	118,9	103,9	95,2	125,1	158,5	138,9	129,4	146,0
5	137,7	141,6	106,3	122,2	131,0	180,3	110,6	147,6
6	136,7	128,5	104,1	112,4	172,9	159,6	134,7	153,7
7	100,9	129,3	117,9	118,0	134,3	145,5	147,6	129,5
8	159,3	156,7	113,1	166,6				
9	119,7	122,1	96,1	128,5	147,7	116,7	115,7	149,4
10	119,7	115,7	87,8	108,8	164,0	98,3	119,7	165,7

Tablo 4.9: 9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan dikey konumda (c_1 ; c_3) ve yatay konumda (c_2 ; c_4) olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının konumlarına göre dikey konumda (a_y) yatay konumda (a_x) olarak isimlendirilen Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına oranları.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Çatlak Uzunluğu, c / Vickers İndentasyon İzi Yarı Uzunluğu, a			
	(c_1/a_y) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	(c_2/a_x) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	(c_3/a_y) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	(c_4/a_x) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)
1	3,53	3,24	3,56	3,50
2	3,50	2,65	2,95	3,10
3	3,12	3,27	3,25	3,30
4	3,20	3,05	3,03	3,09
5	2,95	3,19	3,02	3,02
6	3,24	2,69	3,05	3,00
7	2,82	2,90	2,69	3,28
8	2,82	3,01	2,86	3,13
9	3,00	2,68	3,15	2,68
10	2,88	2,91	2,97	2,92

Tablo 4.10: 29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan dikey konumda (c_1 ; c_3) ve yatay konumda (c_2 ; c_4) olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının konumlarına göre dikey konumda (a_y) yatay konumda (a_x) olarak isimlendirilen Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına oranları.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Çatlak Uzunluğu, c / Vickers İndentasyon İzi Yarı Uzunluğu, a			
	(c_1/a_y) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	(c_2/a_x) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	(c_3/a_y) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	(c_4/a_x) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)
1	4,05	3,41	3,47	3,45
2	4,30	4,61	2,89	3,27
3	3,78	3,70	3,29	4,16
4	3,16	3,10	2,73	3,52
5	3,66	3,57	3,05	3,21
6	3,57	3,45	2,95	3,15
7	2,85	3,45	3,16	3,23
8	4,05	3,68	3,16	3,85
9	3,25	3,11	2,80	3,22
10	3,07	2,99	2,52	2,88

Tablo 4.11: 9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşabilecek Half-Penny ve Palmqvist çatlak geometrileri için kullanılan kırılma tokluğu denklemlerine ait hesaplanan kırılma tokluğu değerleri.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Vickers İndentasyon Kırılma Tokluğu Denklem Sonuçları											
	Denklem 2.12a MPa(m) ^(1/2)				Denklem 2.12b MPa(m) ^(1/2)				Denklem 2.12c MPa(m) ^(1/2)			
	İndentasyon I ₁	Ölçüm I ₂	Yönleri I ₃	Yönleri I ₄	İndentasyon I ₁	Ölçüm I ₂	Yönleri I ₃	Yönleri I ₄	İndentasyon I ₁	Ölçüm I ₂	Yönleri I ₃	Yönleri I ₄
1	0,71	0,69	0,70	0,61	0,85	0,95	0,84	0,90	0,68	0,67	0,68	0,59
2	0,62	0,93	0,80	0,74	0,89	1,10	1,01	0,98	0,59	0,91	0,78	0,72
3	0,66	0,72	0,62	0,71	1,01	0,93	0,98	0,92	0,64	0,70	0,60	0,69
4	0,65	0,76	0,71	0,74	0,98	0,99	1,02	0,98	0,63	0,73	0,69	0,72
5	0,74	0,71	0,71	0,77	1,04	0,96	1,02	1,00	0,72	0,68	0,69	0,75
6	0,63	0,90	0,69	0,76	0,98	1,09	1,02	1,01	0,60	0,88	0,66	0,74
7	0,80	0,74	0,86	0,61	1,07	1,06	1,11	0,97	0,78	0,72	0,84	0,59
8	0,78	0,69	0,76	0,65	1,08	1,04	1,07	1,01	0,76	0,67	0,74	0,63
9	0,74	0,76	0,68	0,77	1,02	1,16	0,98	1,16	0,72	0,74	0,66	0,74
10	0,70	0,69	0,66	0,69	1,09	1,08	1,07	1,08	0,68	0,67	0,64	0,67

Tablo 4.12: 29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşabilecek Half-Penny ve Palmqvist çatlak geometrileri için kullanılan kırılma tokluğu denklemlerine ait hesaplanan kırılma tokluğu değerleri.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Vickers İndentasyon Kırılma Tokluğu Denklem Sonuçları											
	Denklem 2.12a MPa(m) ^(1/2)				Denklem 2.12b MPa(m) ^(1/2)				Denklem 2.12c MPa(m) ^(1/2)			
	İndentasyon I ₁	Ölçüm I ₂	Yönleri I ₃	Yönleri I ₄	İndentasyon I ₁	Ölçüm I ₂	Yönleri I ₃	Yönleri I ₄	İndentasyon I ₁	Ölçüm I ₂	Yönleri I ₃	Yönleri I ₄
1	0,67	0,73	0,84	0,71	1,06	1,26	1,18	1,25	0,64	0,69	0,81	0,68
2	0,53	0,50	0,96	0,84	1,07	1,00	1,41	1,27	0,49	0,47	0,93	0,81
3	0,62	0,71	0,76	0,59	1,18	1,16	1,29	1,07	0,59	0,68	0,73	0,56
4	0,73	0,88	0,91	0,73	1,38	1,33	1,55	1,21	0,70	0,86	0,88	0,70
5	0,64	0,61	0,85	0,71	1,21	1,27	1,38	1,37	0,61	0,58	0,82	0,68
6	0,64	0,69	0,85	0,80	1,25	1,26	1,43	1,35	0,61	0,66	0,82	0,77
7	0,87	0,68	0,74	0,75	1,49	1,27	1,38	1,33	0,84	0,65	0,71	0,72
8	0,55	0,53	0,79	0,50	1,13	1,28	1,34	1,24	0,51	0,50	0,76	0,46
9	0,74	0,70	0,92	0,66	1,33	1,44	1,49	1,40	0,71	0,66	0,89	0,63
10	0,71	0,73	0,96	0,78	1,45	1,47	1,69	1,52	0,68	0,70	0,93	0,75

4.2.2. Isıl Temperli Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin DeneySEL Ölçüm Sonuçları

Isıl temperlenmiş numunenin kalay yüzeyinde belirlenen ölçüm bölgelerinde oda sıcaklığında Vickers elmas piramit uç vasıtası ile 9,81 N ve 29,42 N indentasyon yüklerinin 10 saniye boyunca uygulanması sonucunda, numunede kasıtlı olarak yapay çatlaklar oluşturulmuştur. Bu çatlaklardan, Vickers indentasyon izinin diyagonal uzunlukları ve bağıntılı olarak Vickers indentasyon sertliği mikro sertlik ölçüm cihazı tarafından otomatik olarak belirlenmiştir. Otomatik olarak belirlenen bu değerler uygulanan 9,81 N ve 29,42 N Vickers indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.13 ve Tablo 4.14 ile verilmektedir.

Farklı indentasyon yükleri altında oluşan çatlağın, Vickers indentasyon izinin diyagonal uzunlukları ile aynı yönde oluşan ve bu tez kapsamında saat yönüyle bağıntılı olarak l_1 , l_2 , l_3 ve l_4 olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının test uygulandıktan 1 dakika ve 1 hafta sonrasında ölçülen değerleri 9,81 N ve 29,42 N Vickers indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.15 ve Tablo 4.16 ile verilmektedir.

Farklı indentasyon yükleri altında oluşan dikey konumda (c_1 ; c_3) ve yatay konumda (c_2 ; c_4) olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının konumlarına göre dikey konumda (a_y) yatay konumda (a_x) olarak isimlendirilen Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına oranları sırasıyla Tabla 4.17 ve Tablo 4.18 ile verilmektedir.

Denklem 2.12a, denklem 2.12b ve denklem 2.12c kullanılarak hesaplanan Vickers indentasyon yöntemi kırılma tokluğu değerleri 9,81 N ve 29,42 N Vickers indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.19 ve Tablo 4.20 ile verilmektedir.

İndentasyon ölçüm bölgeleri en yüksek Vickers indentasyon sertliğine sahip ölçüm bölgesinden en düşük sertliğe sahip ölçüm bölgesine olacak şekilde sıralandırılmıştır.

Tablo 4.13: 9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan çatlağın Vickers indentasyon izi diyagonal uzunlukları ve Vickers indentasyon sertlik değerleri.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Vickers İndentasyon İzi Diyagonal Uzunlukları		Vickers İndentasyon Sertliği
	2a _x (µm)	2a _y (µm)	(H _V)
1	54,7	50,9	665
2	50,9	55,6	653
3	59,4	49,9	620
4	56,6	54,7	599
5	58,5	53,7	589
6	60,4	51,8	589
7	54,7	60,3	561
8	59,4	56,5	551
9	57,9	58,3	550
10	60,4	64,1	479

Tablo 4.14: 29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan çatlağın Vickers indentasyon izi diyagonal uzunlukları ve Vickers indentasyon sertlik değerleri.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Vickers İndentasyon İzi Diyagonal Uzunlukları		Vickers İndentasyon Sertliği
	2a _x (µm)	2a _y (µm)	(H _V)
1	88,7	96,1	651
2	92,5	97,1	621
3	99,1	99,3	600
4	111,3	86,7	567
5	106,6	95,2	546
6	98,1	103,7	546
7	100,9	104,6	528
8	110,4	100,8	498
9	105,7	106,5	495
10	121,7	101,8	447

Tablo 4.15: 9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan l_1 , l_2 , l_3 ve l_4 olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının test uygulandıktan 1 dakika ve 1 hafta sonra ölçülen değerleri.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Vickers İndentasyon İzinin Yol Açtığı Çatlak Uzunlukları							
	1 dk sonrası ölçüm değerleri				1 hafta sonrası ölçüm değerleri			
	l_1 (μm)	l_2 (μm)	l_3 (μm)	l_4 (μm)	l_1 (μm)	l_2 (μm)	l_3 (μm)	l_4 (μm)
1	28,3	19,8	19,8	18,9	29,8	21,2	17,0	23,6
2	19,8	16,0	12,3	30,2				
3	26,4	28,4	8,5	34,0				
4	26,4	16,0	13,2	30,2	35,2	27,9	16,3	34,6
5	25,9	18,1	11,3	37,1				
6	19,8	20,8	14,3	18,9				
7	21,7	23,6	17,1	35,8	40,5	31,0	18,0	45,4
8	26,5	33,2	14,6	20,4	29,5	44,2	16,6	25,3
9	32,9	26,5	12,9	37,8	36,1	39,2	17,7	47,3
10	21,7	20,0	17,0	27,4				

Tablo 4.16: 29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan l_1 , l_2 , l_3 ve l_4 olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının test uygulandıktan 1 dakika ve 1 hafta sonra ölçülen değerleri.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Vickers İndentasyon İzinin Yol Açtığı Çatlak Uzunlukları							
	1 dk sonrası ölçüm değerleri				1 hafta sonrası ölçüm değerleri			
	l_1 (μm)	l_2 (μm)	l_3 (μm)	l_4 (μm)	l_1 (μm)	l_2 (μm)	l_3 (μm)	l_4 (μm)
1	66,9	67,9	42,5	55,7	63,2	67,9	46,6	69,0
2	34,9	34,0	31,1	52,6	53,8	60,0	39,6	46,6
3	44,3	37,8	49,9	60,5	62,2	76,6	49,2	73,0
4	41,5	50,9	34,0	50,0	61,3	61,2	47,1	55,5
5	52,8	49,1	32,0	50,0	71,7	43,1	30,2	73,7
6	40,5	40,6	36,8	63,4	44,3	66,0	37,1	70,8
7	54,7	50,3	40,5	57,5	50,7	58,3	34,0	81,3
8	67,9	37,9	37,7	50,0				
9	45,3	49,4	33,9	64,2				
10	69,8	47,0	20,7	66,6				

Tablo 4.17: 9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan dikey konumda (c_1 ; c_3) ve yatay konumda (c_2 ; c_4) olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının konumlarına göre dikey konumda (a_y) yatay konumda (a_x) olarak isimlendirilen Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına oranları.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Çatlak Uzunluğu, c / Vickers İndentasyon İzi Yarı Uzunluğu, a			
	(c_1/a_y) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	(c_2/a_x) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	(c_3/a_y) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	(c_4/a_x) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)
1	2,11	1,72	1,78	1,69
2	1,71	1,63	1,44	2,19
3	2,06	1,96	1,34	2,14
4	1,97	1,57	1,48	2,07
5	1,96	1,62	1,42	2,27
6	1,76	1,69	1,55	1,63
7	1,72	1,86	1,57	2,31
8	1,94	2,12	1,52	1,69
9	2,13	1,92	1,44	2,31
10	1,68	1,66	1,53	1,91

Tablo 4.18: 29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşan dikey konumda (c_1 ; c_3) ve yatay konumda (c_2 ; c_4) olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının konumlarına göre dikey konumda (a_y) yatay konumda (a_x) olarak isimlendirilen Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına oranları.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Çatlak Uzunluğu, c / Vickers İndentasyon İzi Yarı Uzunluğu, a			
	(c_1/a_y) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	(c_2/a_x) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	(c_3/a_y) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	(c_4/a_x) ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)
1	2,39	2,53	1,88	2,26
2	1,72	1,74	1,64	2,14
3	1,89	1,76	2,01	2,22
4	1,96	1,91	1,78	1,90
5	2,11	1,92	1,67	1,94
6	1,78	1,83	1,71	2,29
7	2,05	2,00	1,77	2,14
8	2,35	1,69	1,75	1,91
9	1,85	1,93	1,64	2,21
10	2,37	1,77	1,41	2,09

Tablo 4.19: 9,81 N Vickers indentasyon yükü altında oluşabilecek Half-Penny ve Palmqvist çatlak geometrileri için kullanılan kırılma tokluğu denklemlerine ait hesaplanan kırılma tokluğu değerleri.

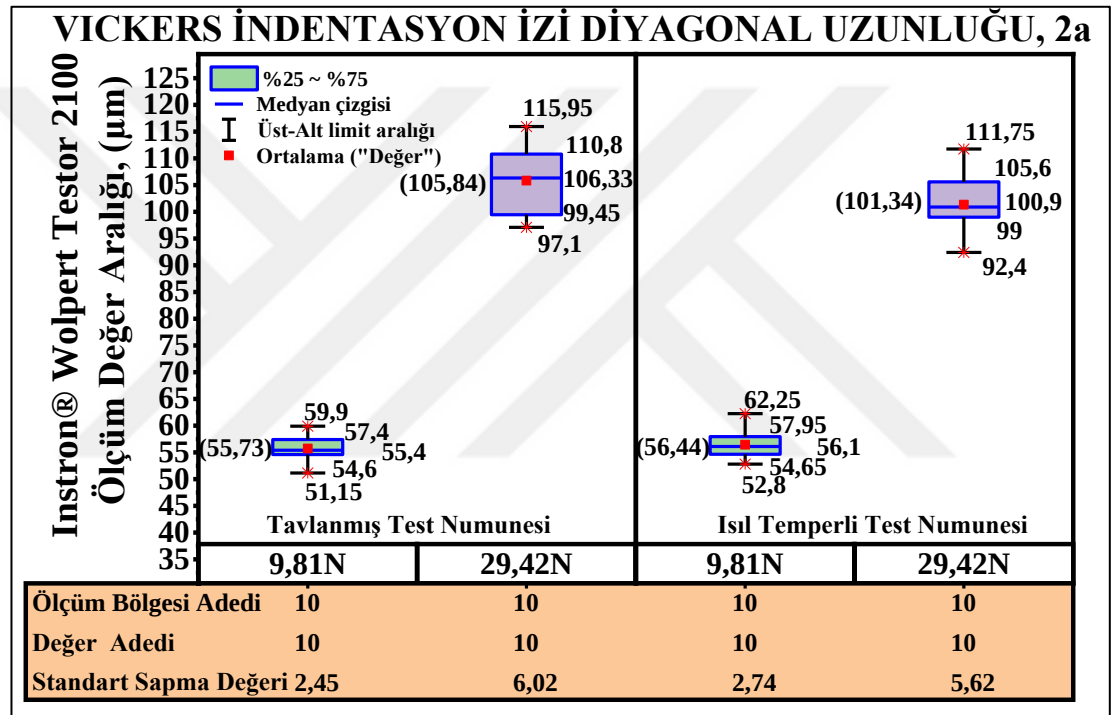
İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Vickers İndentasyon Kırılma Tokluğu Denklem Sonuçları											
	Denklem 2.12a MPa(m) ^(1/2)				Denklem 2.12b MPa(m) ^(1/2)				Denklem 2.12c MPa(m) ^(1/2)			
	İndentasyon I ₁	Ölçüm I ₂	Yönleri I ₃	Yönleri I ₄	İndentasyon I ₁	Ölçüm I ₂	Yönleri I ₃	Yönleri I ₄	İndentasyon I ₁	Ölçüm I ₂	Yönleri I ₃	Yönleri I ₄
1	1,42	1,73	1,84	1,78	1,31	1,68	1,56	1,72	0,55	0,91	1,04	0,97
2	1,71	2,10	2,21	1,35	1,71	1,74	2,17	1,27	0,89	1,33	1,45	0,46
3	1,52	1,27	2,90	1,10	1,33	1,52	2,34	1,39	0,67	0,36	2,21	0,15
4	1,42	1,90	2,17	1,25	1,46	1,93	2,06	1,41	0,55	1,11	1,41	0,34
5	1,46	1,72	2,38	1,04	1,44	1,88	2,18	1,31	0,60	0,90	1,64	0,07
6	1,81	1,54	2,20	1,63	1,59	1,81	1,87	1,90	1,01	0,69	1,44	0,79
7	1,50	1,54	1,73	1,12	1,77	1,54	1,99	1,25	0,64	0,69	0,91	0,17
8	1,38	1,12	2,00	1,58	1,50	1,41	2,02	1,80	0,50	0,18	1,22	0,74
9	1,15	1,36	2,06	1,03	1,39	1,54	2,22	1,29	0,21	0,47	1,28	0,06
10	1,42	1,58	1,63	1,28	1,88	1,85	2,13	1,58	0,55	0,73	0,80	0,38

Tablo 4.20: 29,42 N Vickers indentasyon yükü altında oluşabilecek Half-Penny ve Palmqvist çatlak geometrileri için kullanılan kırılma tokluğu denklemlerine ait hesaplanan kırılma tokluğu değerleri.

İndentasyon Ölçüm Bölgeleri	Vickers İndentasyon Kırılma Tokluğu Denklem Sonuçları											
	Denklem 2.12a MPa(m) ^(1/2)				Denklem 2.12b MPa(m) ^(1/2)				Denklem 2.12c MPa(m) ^(1/2)			
	İndentasyon I ₁	Ölçüm I ₂	Yönleri I ₃	Yönleri I ₄	İndentasyon I ₁	Ölçüm I ₂	Yönleri I ₃	Yönleri I ₄	İndentasyon I ₁	Ölçüm I ₂	Yönleri I ₃	Yönleri I ₄
1	1,36	1,41	1,95	1,68	1,61	1,47	2,02	1,63	0,09	0,15	0,82	0,49
2	2,21	2,34	2,37	1,71	2,25	2,17	2,38	1,74	1,12	1,27	1,30	0,53
3	1,85	2,06	1,69	1,46	2,04	2,20	1,92	1,74	0,69	0,95	0,50	0,21
4	2,15	1,53	2,47	1,55	1,84	2,13	2,03	2,15	1,05	0,30	1,42	0,32
5	1,67	1,62	2,37	1,60	1,79	2,08	2,30	2,06	0,48	0,42	1,31	0,39
6	1,89	1,98	2,01	1,41	2,23	2,11	2,34	1,68	0,75	0,85	0,89	0,15
7	1,52	1,66	1,88	1,50	1,93	1,95	2,25	1,82	0,29	0,47	0,73	0,26
8	1,31	1,87	2,03	1,56	1,67	2,45	2,24	2,13	0,01	0,72	0,92	0,34
9	1,72	1,63	2,07	1,33	2,16	2,06	2,50	1,80	0,54	0,42	0,96	0,04
10	1,27	1,50	2,78	1,17	1,67	2,43	3,06	2,04	-0,04	0,26	1,77	-0,18

4.2.3. Vickers İndentasyon İzi Diyagonal Uzunlukları ve Vickers İndentasyon Sertliği Sonuçlarının Değerlendirmesi

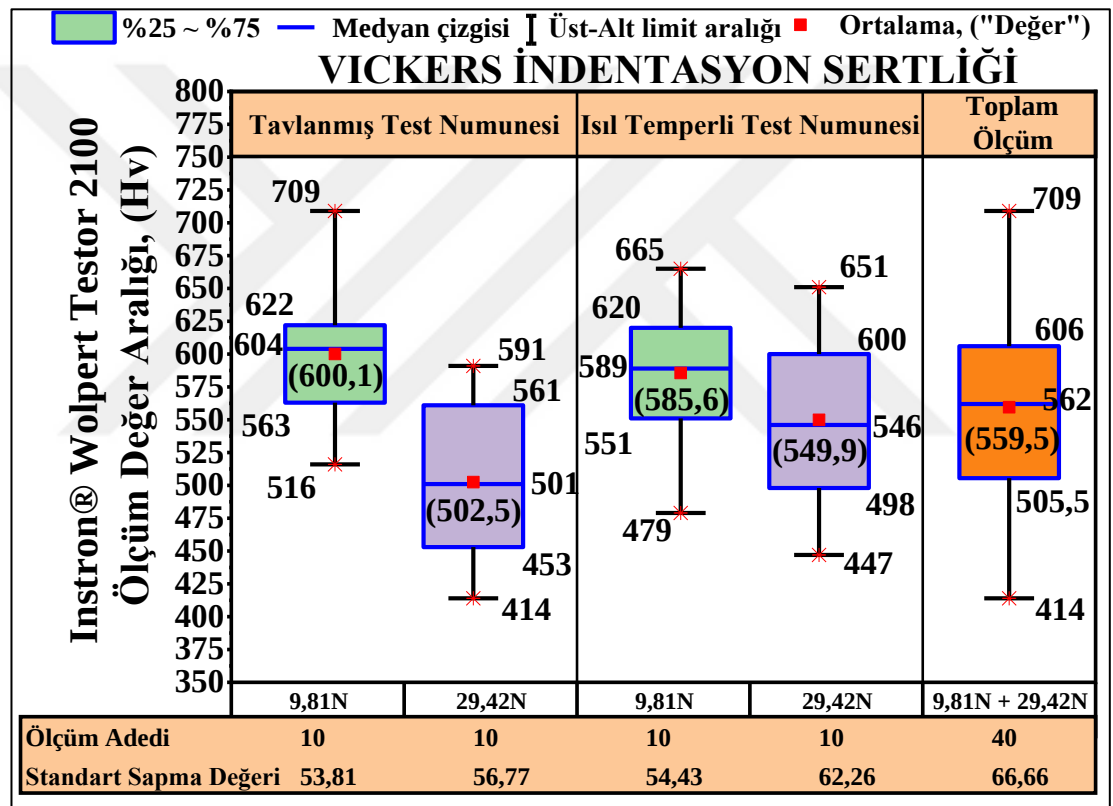
Sertlik, malzemelerin yüzeylerine temas eden herhangi bir yükleme etkisi altında kalıcı deformasyona karşı gösterilen direnç olarak ifade edilmektedir [119]. Bu tez kapsamında keskin Vickers piramit elmas indenterı 9,81 N ve 29,42 N yüklerinin tavllanmış ve ısı temperlenmiş numunelerin yüzeylerine teması neticesinde oluşan Vickers indentasyon izi diyagonal uzunlukları Şekil 4.11 ve Vickers indentasyon sertliği değerleri Şekil 4.12 ile verilmektedir.



Şekil 4.11: Tavllanmış ve ısı temperlenmiş numunelerin yüzeylerinde 9,81 N ve 29,42 N yükleri uygulanarak oluşturulan Vickers indentasyon izi diyagonal uzunluk değer aralıkları.

Şekil 4.11, tavllanmış numunelerde uygulanan farklı indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.5 ve Tablo 4.6, ısı temperlenmiş numunelerde uygulanan farklı indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.13 ve Tablo 4.14'te 10 adet ölçüm bölgesinden elde edilen dikey yönde $2a_y$ ve yatay yönde $2a_x$ olarak isimlendirilen 20 adet Vickers indentasyon izi diyagonal uzunluğunun her bir ölçüm bölgesinde ortalama değer olarak hesaplanan $2a$ değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Farklı ısı işlem görmüş düz cam numunelerinin yüzeylerine uygulanan farklı indentasyon

yüklerinde oluşan indentasyon izi diyagonal uzunluk değerlerinin üst ve alt limit değerleri, birinci ve üçüncü çeyreklikteki değerleri, medyan değerleri, ortalama değerleri ve standart sapma değerleri kategorize edilerek Şekil 4.11 ile gösterilmektedir. Şekil 4.11'den 9,81 N Vickers indentasyon yükü 29,42 N indentasyon yüküne arttırıldığında hem tavlanmış hem de ısı temperlenmiş numunelerin Vickers indentasyon izi diyagonal uzunluk ölçüm değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Buna karşın ticari düz cam numunelerine uygulanan farklı ısı işlemlerin Vickers indentasyon izi diyagonal uzunluk ölçüm değerleri üzerinde bariz bir farklılık göstermediği görülmektedir.



Şekil 4.12:Tavlanmış ve ısı temperlenmiş numunelerin yüzeylerinde 9,81 N ve 29,42 N yükleri uygulanması neticesinde elde edilen Vickers indentasyon sertlik değer aralıkları.

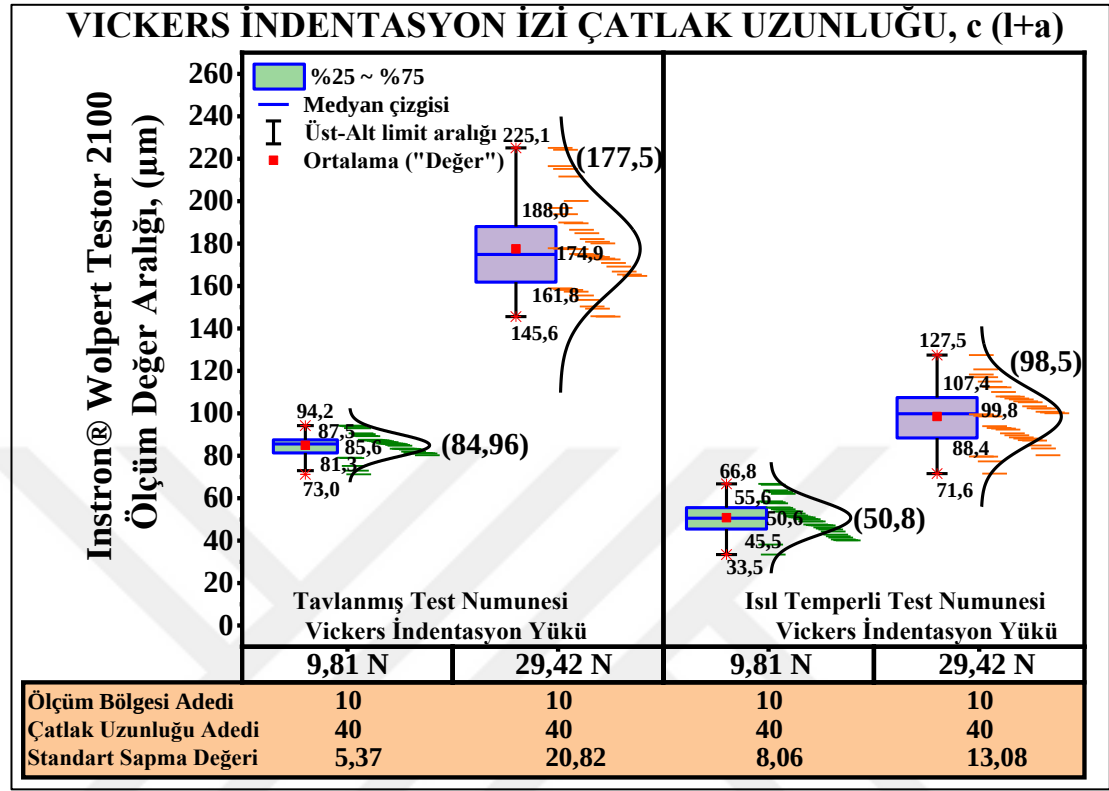
Şekil 4.12'de tavlanmış numunelere uygulanan farklı indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.5 ve Tablo 4.6, ısı temperlenmiş numunelere uygulanan farklı indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.13 ve Tablo 4.14'te 10 adet ölçüm bölgesinden elde edilen Hv sertlik değerlerinin üst ve alt limit değerleri, birinci ve üçüncü çeyreklikteki değerleri, medyan değerleri, ortalama değerleri ve standart

sapma değerleri kategorize edilerek gösterilmektedir. Şekil 4.12'den 9,81 N Vickers indentasyon yükü 29,42 N indentasyon yüküne arttırıldığında hem tavlanmış hem de ısıtılmış temperlenmiş numunelerin Vickers indentasyon sertlik ölçüm değerlerinin azaldığı görülmektedir. Literatürde indentasyon boyut etkisi olarak isimlendirilen bu durumda sertliğin yüke bağımlı olduğu ve uygulanan yükün arttırılması ile sertlik değerlerinin azaldığı bilinmektedir [44], [48]. Farklı ısıtılmış işlem görmüş numunelerde farklı indentasyon yüklerinin uygulanması ile elde edilmiş Vickers indentasyon sertlik değerlerinin, soda kireç silikat camları için yazarların (Aben ve Guillemet, 1993; Barton ve Guillemet, 2005) deneysel çalışmalar sonucunda elde etmiş oldukları 540-673 H_V (Tablo 2.4) değerlerine yaklaşık değerler aldıkları görülmektedir. Dolayısıyla numuneye uygulanan farklı ısıtılmış işlem ve uygulanan farklı indentasyon yüklerinden bağımsız olarak toplam ölçümden elde edilmiş mikro sertlik ortalama değeri (559,5 H_V) belirlenmiştir. Bu değer tokluk denklemlerinde (denklem 2.12a, denklem 2.12b ve denklem 2.12c) yükten bağımsız tokluk değerleri elde etmek amacıyla kullanılmıştır.

4.2.4. Vickers İndentasyon İzinin Yol Açtığı Çatlak Uzunluklarının Değerlendirilmesi

Vickers elmas piramit indenterinin normal cam sınıfına giren ve farklı ısıtılmış işlem kullanılmış ticari soda kireç silikat düz cam numunelerinin yüzeyine uyguladığı 9,81 N ve 29,42 N yüklerin etkisiyle büyük ölçüde kesme mekanizmasının etkisiyle oluşan çatlak uzunlukları Vickers indentasyon yükleri uygulandıktan 1 dk sonra ve 1 hafta sonra ölçülmüştür. 1 dk sonrasında ölçülen indentasyon kaynaklı çatlak uzunluk değerleri Şekil 4.13 ile 1 hafta sonra ölçülen indentasyon kaynaklı çatlak uzunluk değerleri ise Şekil 4.14 ile verilmektedir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 ile verilmekte olan çatlak uzunluk değer aralıkları Şekil 3.4 ile verilmekte olan dikey ölçüm yönünde c_1 ve c_3 ($c_1 = l_1 + a_y$; $c_3 = l_3 + a_y$) yatay ölçüm yönünde ise c_2 ve c_4 ($c_2 = l_2 + a_x$; $c_4 = l_4 + a_x$) olarak verilmektedir. Tavlanmış numunelerde çatlak uzunluk değer aralıklarını belirlemek için, Vickers indentasyon izi diyagonal yarı uzunluk değerleri (a_x ; a_y) farklı indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'dan, l uzunluk değerleri (l_1 ; l_2 ; l_3 ; l_4) ise farklı indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.7 ve Tablo 4.8'den alınmıştır. Benzer şekilde ısıtılmış temperlenmiş numunelerde çatlak uzunluk değer aralıklarını belirlemek için, Vickers indentasyon izi diyagonal yarı uzunluk değerleri (a_x ; a_y) farklı indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.13 ve Tablo 4.14'ten, l uzunluk

değerleri (l_1 ; l_2 ; l_3 ; l_4) ise farklı indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.15 ve Tablo 4.16'dan alınmıştır.

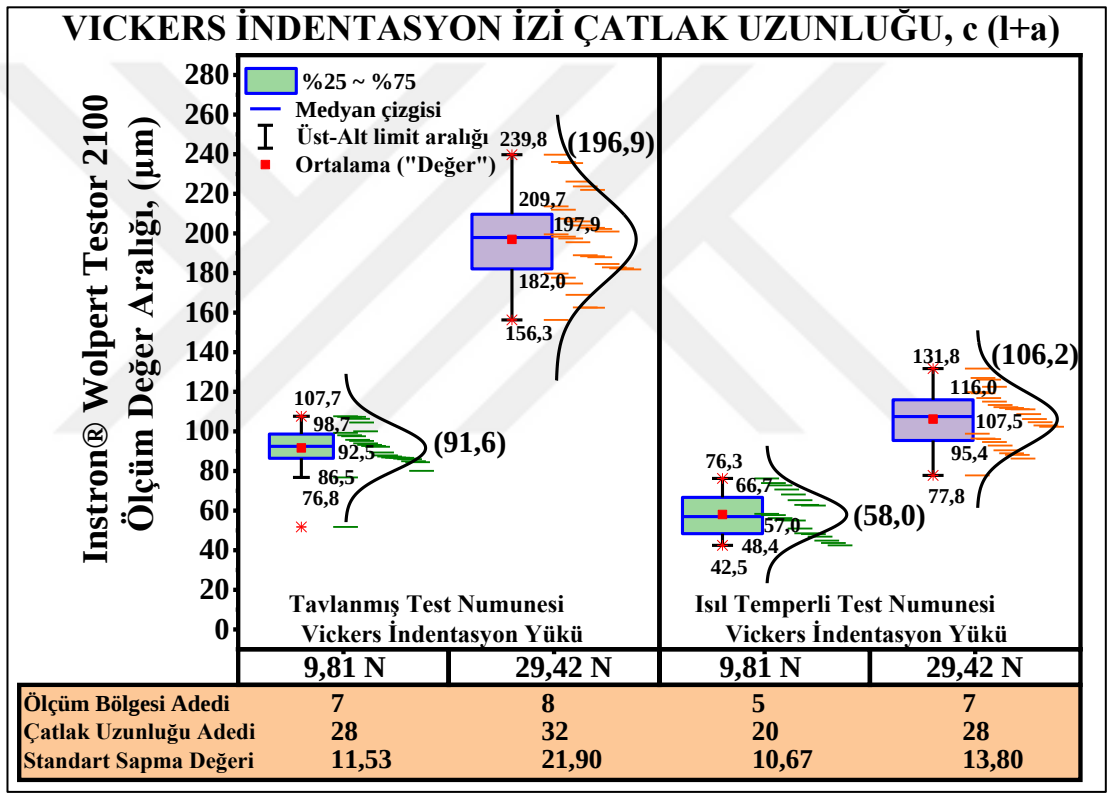


Şekil 4.13: Tavlanmış ve ısıtılmış numunelerin yüzeylerinde 9,81 N ve 29,42 N yükleri uygulanması neticesinde oluşan ve 1 dk sonrasında ölçülen Vickers indentasyon çatlak uzunluk (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4) değer aralıkları.

Şekil 4.13'te her bir kategori için 10 adet ölçüm bölgesinden toplam 40 adet çatlak uzunluk değerinin (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4 10'ar adet) üst ve alt limit değerleri, birinci ve üçüncü çeyreklikteki değerleri, medyan değerleri, normal dağılım eğrisi üzerinde parantez içinde ortalama değerleri verilmektedir. Şekil 4.13'ten 9,81 N Vickers indentasyon yükü 29,42 N indentasyon yüküne arttırıldığında hem tavlanmış hem de ısıtılmış numunelerin Vickers indentasyon çatlak uzunluk değerleri (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4)'ün yükseldiği görülmektedir. Ticari düz cam numunelere uygulanan farklı ısıtma işlemlerin çatlak uzunluk (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4) değerlerine etkisine bakıldığında ise farklı indentasyon yükleri altında ısıtılmış numunelerin ortalama ve üst limit çatlak uzunluk değerlerinin muadil yüklerde tavlanmış numunelerin ortalama ve alt limit değerlerinden daha düşük değerler aldıkları görülmektedir.

Sglavo ve Green deneysel çalışmaları sonucunda soda kireç silikat camlarında indentasyon sonucu oluşan radyal çatlakların ilerleme sürecinin iki aşamada

gerçekleştiğini öne sürdüler. İlk aşamada radyal çatlaklar, çatlakların büyümesini engelleyen yani çatlak büyümesini stabilize eden yanal çatlaklarla güçlü bir etkileşim gösterir. Bu güçlü etkileşime çivileme etkisi adı verilmiştir. Çivileme etkisi, çatlak ilerlemesi sürecini karmaşıktırıştırır. İkinci aşamada ise radyal çatlaklar yanal çatlakların etkileşimlerinden kurtularak nihai Half-Penny çatlak geometrisini oluşturma eğilimi göstermektedir. Dolayısıyla ısı temperli numunelerde Vickers indentasyon sonucu oluşan radyal çatlakların tavlanmış numunelere nazaran yanal çatlaklarla daha güçlü bir etkileşim gösterdiği ve çivileme etkisine daha çok maruz kaldığı açıkça görülmektedir [51].



Şekil 4.14: Tavlanmış ve ısı temperlenmiş numunelerin yüzeylerinde 9,81 N ve 29,42 N yükleri uygulanması neticesinde oluşan ve 1 hafta sonrasında ölçülen Vickers indentasyon çatlak uzunluk (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4) değer aralıkları.

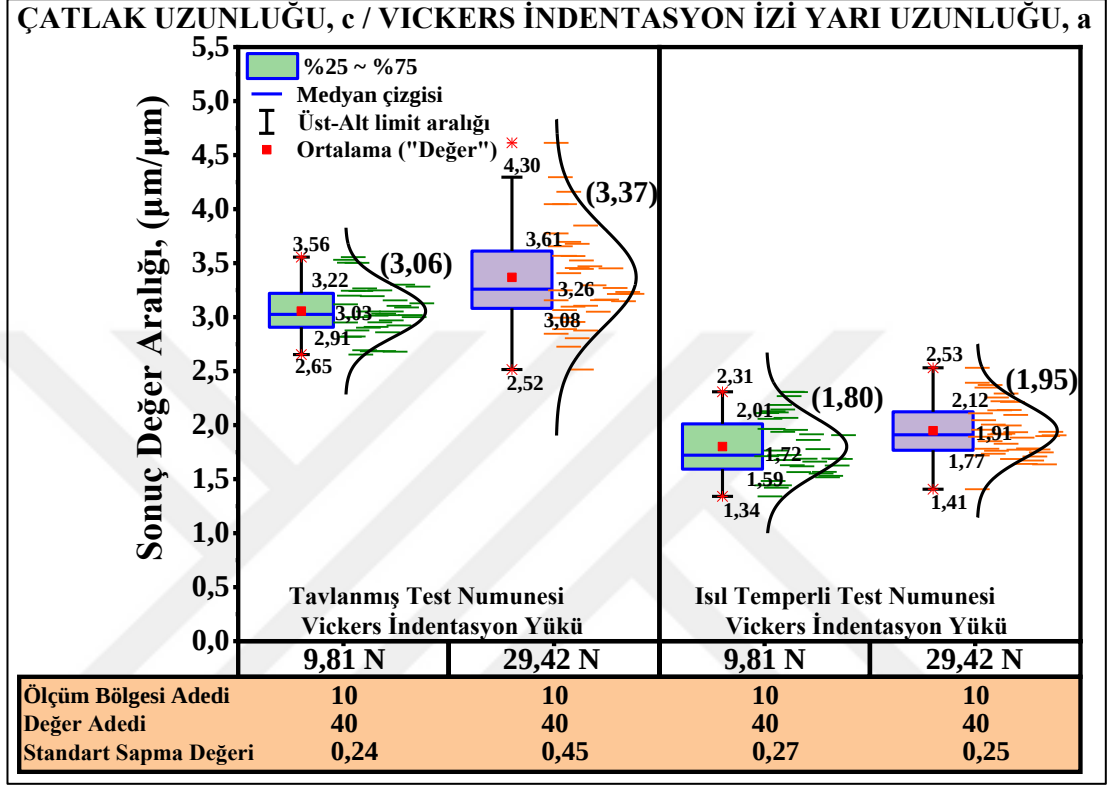
Şekil 4.14'te her bir kategori için 10 adet ölçüm bölgesi bulunmasına rağmen 1 hafta sonra yapılan çatlak uzunluk ölçümleri için ölçüm bölgelerinin tamamından ölçüm alınamamıştır. Dolayısıyla ölçümlerde yaşanan zorluklar nedeni ile tavlanmış numunelerde 9,81 N indentasyon yükü altında 7 ölçüm bölgesinden toplam 28 adet çatlak uzunluk değeri (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4 7'ser adet), 29,42 N indentasyon yükü altında 8 ölçüm bölgesinden toplam 32 adet çatlak uzunluk değeri (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4 8'er adet)

belirlenmiştir. Benzer şekilde ısı temperlenmiş numunelerde 9,81 N indentasyon yükü altında 5 ölçüm bölgesinden toplam 20 adet çatlak uzunluk değeri (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4 5'er adet), 29,42 N indentasyon yükü altında 7 ölçüm bölgesinden toplam 28 adet çatlak uzunluk değeri (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4 7'şer adet) belirlenmiştir. Belirlenen bu değerlerin üst ve alt limit değerleri, birinci ve üçüncü çeyreklikteki değerleri, medyan değerleri, normal dağılım eğrisi üzerinde parantez içinde ortalama değerleri verilmektedir. Yine ölçümdeki zorlukların bir etkisi olarak ölçüm bölgelerinden ölçülen çatlak uzunluk değerlerinin bazılarının neredeyse sabit kaldığı ya da azaldığı (tavlanmış numunelerde farklı indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.7 ve Tablo 4.8'den benzer şekilde ısı temperlenmiş numunelerde farklı indentasyon yükleri için sırasıyla Tablo 4.15 ve Tablo 4.16'dan) görülmüştür. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'ten tavlanmış numunelerden 1 hafta sonra alınan ortalama çatlak uzunluk değerlerinin uzama yüzdeleri 9,81 N indentasyon yükü altında oluşan çatlak uzunluk değerlerinin ortalaması için %7,8 iken 29,42 N indentasyon yükü altında oluşan çatlak uzunluk değerlerinin ortalaması için %10,9'dur. Benzer şekilde ısı temperlenmiş numunelerden 1 hafta sonra alınan ortalama çatlak uzunluk değerlerinin uzama yüzdeleri 9,81 N indentasyon yükü altında oluşan çatlak uzunluk değerlerinin ortalaması için %14,2 iken 29,42 N indentasyon yükü altında oluşan çatlak uzunluk değerlerinin ortalaması için ise %7,8'dir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 mukayese edildiğinde zamanın ve ortam koşullarının etkisi ile ortalama çatlak uzunluklarının ~%10 büyüdüğü görülmüştür.

4.2.5. Vickers İndentasyon Kırılma Tokluğu Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu tez kapsamında farklı indentasyon yükleri etkisiyle oluşan çatlakların geometrilerini belirleyebilmek açısından teorik bilgi kısmında detaylı bir şekilde bahsedildiği üzere Niihara arkadaşları ve Lankford çalışmalarında kullandıkları çatlak uzunluğu c değerlerinin Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına oranları kullanılmış olup oranlara ait sonuç değer aralıkları Şekil 4.15 ile verilmektedir. Şekil 4.15'te tavlanmış numunelerde farklı indentasyon yükleri altında oluşan dikey konumda (c_1 ; c_3) ve yatay konumda (c_2 ; c_4) olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının konumlarına göre dikey konumda (a_y) yatay konumda (a_x) olarak isimlendirilen Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına oranları sırasıyla Tablo 4.9 ve Tablo 4.10'dan, ısı temperlenmiş numunelerde farklı indentasyon yükleri altında oluşan

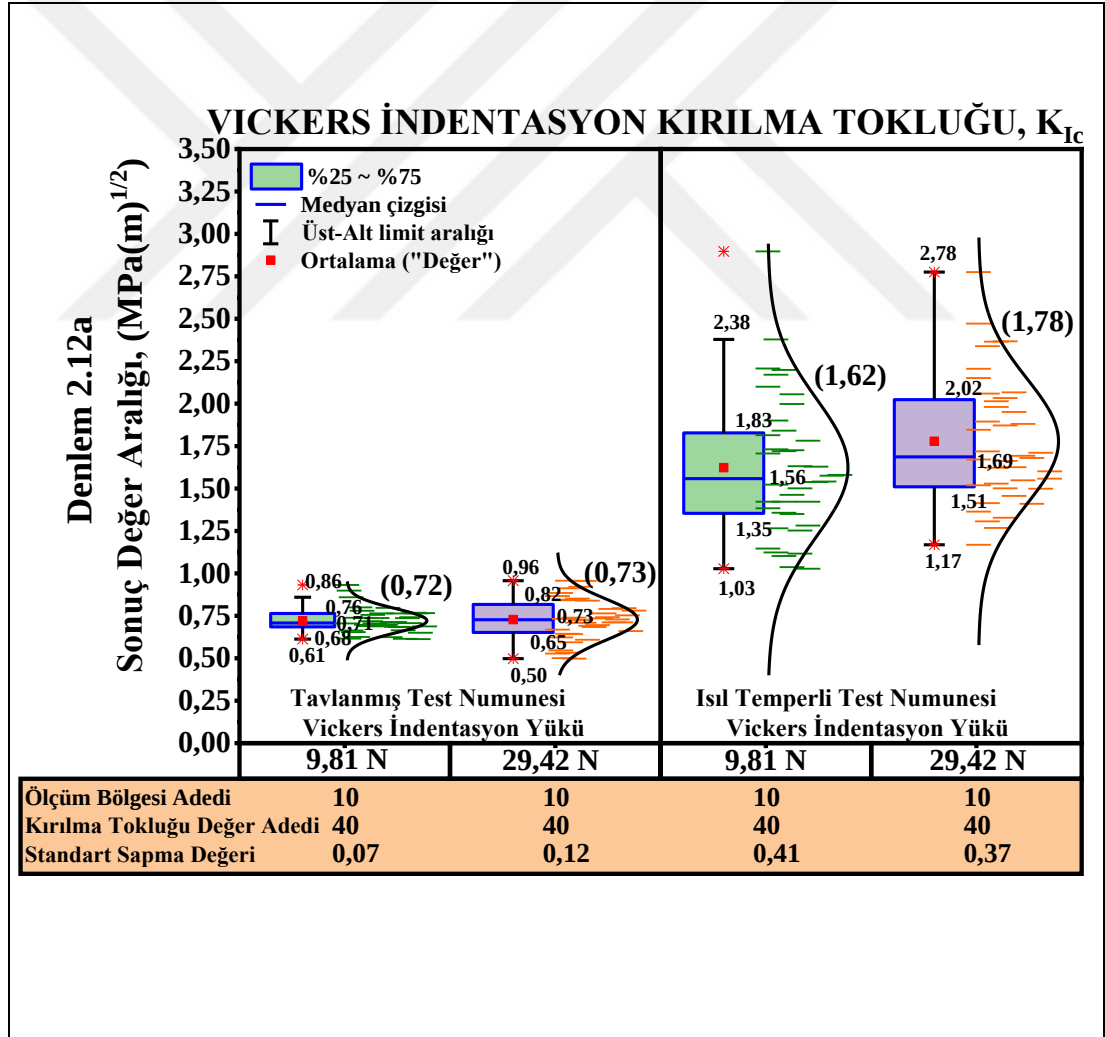
dikey konumda (c_1 ; c_3) ve yatay konumda (c_2 ; c_4) olarak isimlendirilen çatlak uzunluklarının konumlarına göre dikey konumda (a_y) yatay konumda (a_x) olarak isimlendirilen Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına oranları ise sırasıyla Tablo 4.17 ve Tablo 4.18'den alınmıştır.



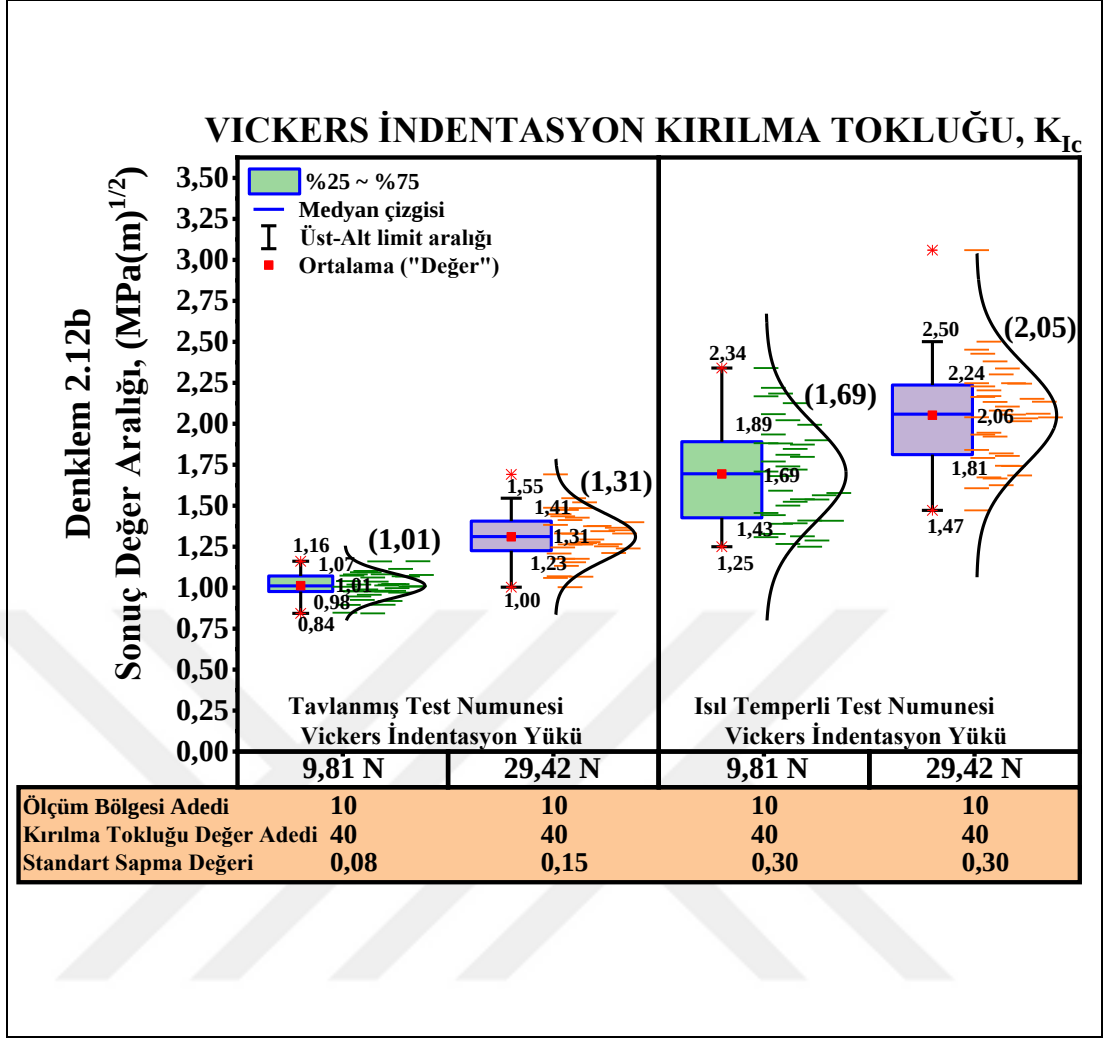
Şekil 4.15: Tavlanmış ve ısı temperlenmiş numunelerin yüzeylerinde 9,81 N ve 29,42 N yükleri uygulanması neticesinde elde edilen çatlak uzunluklarının (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4) konumlarına göre Vickers indentasyon izi yarı uzunluklarına (a_x ; a_y) oranları.

Şekil 4.15, numunelere uygulanan farklı ısı işlem ve farklı Vickers indentasyon yüklerine bağlı olarak kategorize edilmiştir. Her bir durum için 10 adet ölçüm bölgesi bulunmaktadır. Bu ölçüm bölgelerinden ölçüm yönüne bağlı olarak dikey ve yatay 40'ar adet çatlak uzunluk c , Vickers indentasyon izi yarı uzunluğu a , oranları ($\frac{c_1}{a_y}$; $\frac{c_2}{a_x}$; $\frac{c_3}{a_y}$; $\frac{c_4}{a_x}$; 10'ar adet) elde edilmiştir. Şekil 4.15'ten tavlanmış numunelerin farklı indentasyon yükleri için belirlenen ortalama ve hatta alt limit değerlerinin Nihara arkadaşları ve Lankford'un çalışmalarında belirlemiş oldukları 2,5 değerinden büyük oldukları dolayısıyla Half-Penny çatlak geometrisi oluşturdukları varsayılmıştır. Yine Şekil 4.15'ten ısı temperli numunelerin farklı indentasyon yükleri için belirlenen ortalama ve hatta üst limit değerlerinin (29,42 N Vickers indentasyon yükleri altındaki

bir değer hariç) Niihara arkadaşları ve Lankford'un çalışmalarında belirlemiş oldukları 2,5 değerinden küçük oldukları dolayısıyla Palmqvist çatlak geometrisi oluşturdukları varsayılmıştır. Literatürde artık gerilmesiz durumda Half-Penny çatlak geometrisi için kullanılmakta olan kırılma tokluk denklemi denklem 2.12a ve Palmqvist çatlak geometrisi için kullanılmakta olan kırılma tokluk denklemi denklem 2.12b ye ait hesaplanan kırılma tokluk sonuç değer aralıkları sırası ile Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 ile verilmektedir. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de tavllanmış numunelerde farklı indentasyon yükleri için elde edilen kırılma tokluk değer aralıkları sırasıyla Tablo 4.11 ve Tablo 4.12'den alınmıştır. Benzer şekilde ısı temperlenmiş numunelerde farklı indentasyon yükleri için elde edilen kırılma tokluk değer aralıkları ise sırasıyla Tablo 4.19 ve Tablo 4.20'den alınmıştır.



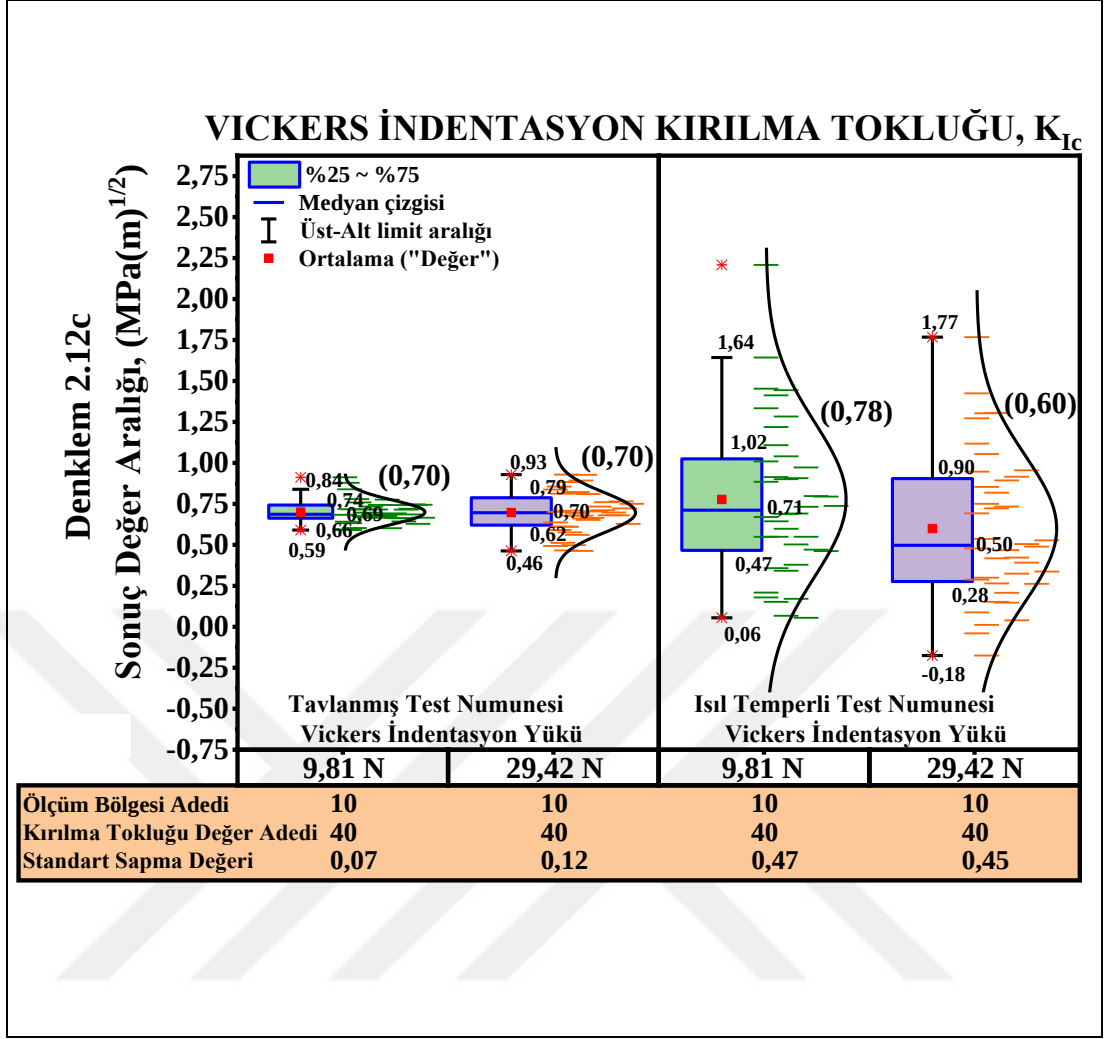
Şekil 4.16: Tavllanmış ve ısı temperlenmiş numunelerde literatürde artık gerilmesiz durumda Half-Penny geometrisi için kullanılan denkleme ait kırılma tokluğu sonuç değer aralıkları.



Şekil 4.17: Tavlanmış ve ısıl temperlenmiş numunelerde literatürde Palmqvist geometrisi için kullanılan denkleme ait kırılma tokluğu sonuç değer aralıkları.

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17, numunelere uygulanan farklı ısıl işlem ve uygulanan farklı Vickers indentasyon yüklerine bağıntılı olarak kategorize edilmiştir. Her bir durum için 10 adet ölçüm bölgesi bulunmaktadır ve bu ölçüm bölgelerinden ölçüm yönüne bağlı olarak dikey ve yatay 40'ar adet çatlak uzunluk değeri (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4 10'ar adet) bulunmaktadır. Dolayısıyla bu değerlerle bağıntılı olarak 40'ar adet kırılma tokluk değeri elde edilmiştir. Elde edilen kırılma tokluk değerlerinin alt ve üst limit değerleri, birinci ve üçüncü çeyreklikteki değerleri, medyan değerleri ve normal dağılım eğrisi üzerinde parantez içerisinde ortalama değerleri verilmektedir. Literatürden ticari soda kireç silikat camlarına ait kırılma tokluk değerlerinin 0,72-0,82 $\text{MPa(m)}^{1/2}$ (Tablo2.3) olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla tavlanmış numuneler için Şekil 4.16'dan artık gerilmesiz durum için kullanılmakta olan Half-Penny denkleminin (denklem 2.12a) uygulanan farklı indentasyon yükleri için sırasıyla 0,72 ve 0,73

MPa(m)^{1/2} ortalama değerler aldıkları ve uygulanan Vickers indentasyon yükünden bağımsız olarak literatürde ticari soda kireç silikat camları için verilen kırılma tokluğu değerlerini sağladıkları görölmüştür. Isıl temperlenmiş numuneler için Şekil 4.16 dikkatli bir şekilde analiz edildiğinde ise çatlak uzunluklarının değerlendirildiği bir önceki başlıkta da belirtildiği üzere radyal çatlakların yanal çatlaklar ile olan güçlü etkileşimi neticesinde (çivileme etkisi) tavlanmış numunelere nazaran daha küçük çatlak uzunlukları ölçölmüştür. Dolayısıyla çatlak uzunluklarının denklem 2.12a için belirleyici olması nedeniyle ortalama tokluk değerlerinin olması gereken değerlerin oldukça yukarısında olduğu görölmüştür. Şekil 4.17’de ise hem tavlanmış hem de ısı temperlenmiş numuneler için 9,81 N Vickers indentasyon yükü 29,42 N’a arttırıldığında ortalama tokluk değerlerinin arttığı görölmüştür. Aynı zamanda ticari düz cam ürünlerine uygulanan ısı işleme bağıntılı olarak ısı temperlenmiş numunelerin ortalama tokluk değerlerinin tavlanmış numunelere nazaran daha büyük değerler aldıkları görölmüştür. Şekil 4.17’den her bir kategori için hesaplanan ortalama kırılma tokluk değerlerinin literatürde bulunan değerlerden oldukça uzak oldukları açıkça görölmüştür. Dolayısıyla Şekil 4.17’den numunelerin üzerlerine uygulanan ısı işlem fark etmeksizin, Vickers indentasyon indenterının teması sonrasında Palmqvist çatlak geometrisi oluşturmadıkları açıkça belirlenmiştir. Cam ve cam-seramik ürünlerinin genellikle Vickers indentasyon yükleri altında Half- Penny çatlağı sergiledikleri teorik bilgi kısmında daha önce belirtilmişti. Literatürden, artık gerilmemiş durum için kullanılmakta olan Half-Penny denklemi (denklem 2.12a) cam ürünleri bünyesinde oluşan artık gerilmeler hesaba katılarak modifiye edildiğinde ise artık gerilmeli durum için kullanılmakta olan Half-Penny kırılma tokluk denklemi (denklem 2.12c) bulunmuştur. Dolayısıyla literatürde artık gerilmeli durumda Half-Penny çatlak geometrisi için kullanılmakta olan kırılma tokluk denklemi denklem 2.12c’ye ait hesaplanan kırılma tokluk sonuç değer aralıkları Şekil 4.18 ile verilmektedir. Şekil 4.18’de tavlanmış numunelerde farklı indentasyon yükleri için elde edilen kırılma tokluk değer aralıkları sırasıyla Tablo 4.11 ve Tablo 4.12’den, ısı temperlenmiş numunelerde farklı indentasyon yükleri için elde edilen kırılma tokluk değer aralıkları ise sırasıyla Tablo 4.19 ve Tablo 4.20’den alınmıştır. Denklem 2.12c’de artık gerilme değeri σ_R tavlanmış ve ısı temperlenmiş numuneler için bu tez çalışması kapsamında merkez ölçüm bölgesi C üzerinden belirlenmiş yüzey basma ortalama artık gerilme değerleri olup sırasıyla -1,85 ve -94,48 MPa’dır.



Şekil 4.18: Tavllanmış ve ısıt temperlenmiş numunelerde literatürde artık gerilmeli durumda Half-Penny geometrisi için kullanılan denkleme ait kırılma tokluğu sonuç değer aralıkları.

Şekil 4.18, numunelere uygulanan farklı ısıt işlem ve uygulanan farklı Vickers indantasyon yüklerine bağıntılı olarak kategorize edilmiştir. Her bir durum için 10 adet ölçüm bölgesi bulunmaktadır ve bu ölçüm bölgelerinden ölçüm yönüne bağıntılı olarak dikey ve yatay 40'ar adet çatlak uzunluk değeri (c_1 ; c_2 ; c_3 ; c_4 10'ar adet) bulunmaktadır. Dolayısıyla bu değerlerle bağıntılı olarak 40'ar adet kırılma tokluk değeri elde edilmiştir. Elde edilen kırılma tokluk değerlerinin alt ve üst limit değerleri, birinci ve üçüncü çeyreklikteki değerleri, medyan değerleri ve normal dağılım eğrisi üzerinde parantez içerisinde ortalama değerleri verilmektedir.

Denklemler 2.12a'ya ait sonuçların gösterildiği Şekil 4.16 ile denklemler 2.12c'ye ait sonuçların gösterildiği Şekil 4.18 kıyaslandığında, Şekil 4.18'den tavllanmış camlar açısından artık gerilme değerlerinin de hesaba katıldığı çok daha hassas sonuçlar elde

edildiği görülmüştür. Isıl temperlenmiş numunelerde Vickers indentasyon yükleri neticesinde elde edilen çatlak geometri karmaşası açıkça kaldırılmıştır. Şekil 4.16'da ısı temperlenmiş numunelerin yüzeyleri üzerinde tasarlanan artık gerilme değerleri hesaba katılmadığında literatürde elde edilen Vickers indentasyon kırılma tokluğu değerlerinden oldukça yüksek ortalama Vickers indentasyon kırılma tokluğu değerleri elde edildiği belirlenmiştir. Dolayısıyla Şekil 4.18'de ısı temperlenmiş numunelerin bu tez kapsamında merkez ölçüm bölgesi C üzerinden belirlenmiş olan yüzey basma ortalama artık gerilme değeri -94,48 MPa hesaba katıldığında ise literatürde yazarların deneysel çalışmaları sonucu belirledikleri ticari soda kireç silikat düz cam kırılma tokluğu değerlerine oldukça yakın ortalama değerler aldıkları görülmüştür. Yine Şekil 4.18'den ısı temperlenmiş numunelerin tavlanmış numunelere nazaran çok daha yüksek bir dağılıma sahip oldukları açıkça görülmüştür. Ayrıca ısı temperlenmiş numunelerde 9,81 N Vickers indentasyon yükünün 29,42 N Vickers indentasyon yüküne arttırılması ile radyal çatlakların çivileme etkisine yükün artmasına bağıntılı olarak daha çok maruz kaldığı açıkça görülmüştür.

Bu tez kapsamında yanal çatlakların radyal-medyan çatlaklara nazaran mukavemete etkisinin az olması nedeni ile ihmal edildiği belirtilmişti. Özellikle ısı temperli camlarda yanal çatlakların radyal çatlaklar üzerindeki çivileme etkisinin kırılma tokluğu değerleri üzerindeki etkilerinin ihmal edilmemesi gerektiği açıkça görülmüştür.

4.3. Halka Üstü Halka Testi Yöntemi ile Kırılma Mukavemeti Değerlerinin ve Radyal Çatlak Adetlerinin Belirlenmesi

4.3.1. Tavlanmış Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin Deneysel Ölçüm Sonuçları

4.3.1.1. Standart Boyutlara Sahip Test Numunelerinin Deneysel Ölçüm Sonuçları

Daha önce belirtildiği üzere test numunelerinde uygulanan ısı işlem yönteminden bağımsız olarak farklı boyutlardaki tavlanmış test numunelerinin yük altındaki davranışlarını gözlemleyebilmek açısından ticari boyutlara sahip tavlanmış numunelerden standart test numune boyutlarına uygun olarak 100 mm uzunluğunda

100 mm genişliğinde ve 4 mm kalınlığında toplam 39 adet numune kesilmiştir. Kesilen test numunelerinin 9 adedine 9,81 N Vickers indentasyon yükü, 9 adedine 29,42 N Vickers indentasyon yükü uygulanırken geriye kalan 21 adet test numunesine ise herhangi bir indentasyon yükü uygulanmamıştır. Halka üstü halka testine tabi tutulan her bir test numunesinin kırılma yükü F , maksimum kırılma yükü değerine bilye ve 60 mm çapındaki yükleme halkasının 11 N toplam ağırlığı ilave edilerek belirlenmiştir. ASTM C1499-03 standartlarına uygun olarak her bir test numunesine ait test numune çapı D denklem 2.17 vasıtası ile belirlenmiştir. Yine daha önce de bahsedildiği üzere ASTM C1499-03 standartlarına uygun olarak her bir test numunesinin kırılma mukavemeti σ_f denklem 2.16 vasıtası ile belirlenmiştir. Radyal çatlak adetleri standart boyutlardaki numunelerin yüzeyinin tamamını kapsayacak bir şekilde 100 mm x 100 mm yüzey alanı üzerinden belirlenmiştir. Bu tez kapsamında yalnızca standart boyutlara sahip ve Vickers indentasyon yükü uygulanmış numunelerde kırık yüzey analizi incelemesi yapılmıştır. Dolayısıyla 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış numunelere ait deneysel ölçüm sonuçları Tablo 4.21 ile 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış numunelere ait deneysel ölçüm sonuçları Tablo 4.22 ile ve geriye kalan 21 adet indentasyon yükü uygulanmamış ve kırık yüzey analizi incelemesi yapılmamış numunelere ait deneysel ölçüm sonuçları ise Tablo 4.23 ile verilmektedir. Tablolardaki test numunelerine ait sıralamalar, mukavemet değeri en düşük seviyeden en yüksek seviyeye olacak şekilde belirlenmiştir. İstatistiki olarak uç mukavemet değerleri ortalamaya dahil edilmemiş olup bu değerler tablolarda sıra numarasının bitişiğine “*” işareti kullanılarak gösterilmiştir.

Tablo 4.21: 9,81 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.

Numune Sırası	Kalınlık Ölçümü, h (mm)	Test Numunesi Çapı, D (mm)	Kırılma Yüğü, F (N)	Kırılma Mukavemeti, σ_f (MPa)	Radyal Çatlak Adedi	Ayna Yarıçapı, r_m (μ m)
1	3,88	109,09	1849,80	37,69	13	3482,13
2	3,88	109,09	1860,03	37,90	11	2001,85
3	3,83	109,10	1864,50	38,99	14	2689,09
4	3,88	109,09	2017,79	41,11	16	3482,13
5	3,83	109,10	2211,05	46,24	22	995,70
6	3,88	109,09	2357,33	48,03	21	
7	3,83	109,10	2453,24	51,30	22	1619,50
8	3,83	109,10	2843,30	59,46	25	944,40
9*	3,83	109,10	6462,01	135,13	80	

Tablo 4.22: 29,42 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.

Numune Sırası	Kalınlık Ölçümü, h (mm)	Test Numunesi Çapı, D (mm)	Kırılma Yüğü, F (N)	Kırılma Mukavemeti, σ_f (MPa)	Radyal Çatlak Adedi	Ayna Yarıçapı, r_m (μ m)
1	3,88	109,09	1696,57	34,57	10	4189,23
2	3,88	109,09	1803,25	36,74	15	3552,41
3	3,83	109,10	1774,22	37,10	14	2364,55
4	3,88	109,09	1830,05	37,29	15	2548,43
5	3,88	109,09	1865,82	38,02	15	3583,20
6	3,83	109,10	1849,00	38,66	15	2911,80
7	3,83	109,10	1863,25	38,96	14	3865,53
8	3,83	109,10	1867,24	39,05	16	2311,11
9	3,88	109,09	1976,57	40,27	17	3883,11

Tablo 4.23: Vickers indentasyon yükü uygulanmamış standart boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.

Numune Sırası	Kalınlık Ölçümü, h (mm)	Test Numunesi Çapı, D (mm)	Kırılma Yüğü, F (N)	Kırılma Mukavemeti, σ_f (MPa)	Radyal Çatlak Adedi
1	3,88	109,09	1689,22	34,42	8
2	3,88	109,09	2009,52	40,95	17
3	3,88	109,09	2089,82	42,58	15
4	3,88	109,09	2313,65	47,14	18
5	3,83	109,10	2353,77	49,22	17
6	3,88	109,09	2803,05	57,12	26
7	3,80	109,10	2759,04	58,61	24
8	3,88	109,09	2940,04	59,91	28
9	3,83	109,10	2996,98	62,67	25
10	3,83	109,10	3062,61	64,04	23
11	3,88	109,09	3237,11	65,96	32
12	3,83	109,10	3220,60	67,35	30
13	3,83	109,10	3229,20	67,53	31
14	3,88	109,09	3391,03	69,10	36
15	3,83	109,10	3326,42	69,56	26
16	3,88	109,09	3602,37	73,40	26
17	3,83	109,10	4002,05	83,69	34
18	3,83	109,10	4132,15	86,41	40
19	3,83	109,10	4166,63	87,13	39
20	3,83	109,10	4427,83	92,59	43
21*	3,80	109,10	4641,97	98,61	48

4.3.1.2. Ticari Boyutlara Sahip Test Numunelerinin Deneysel Ölçüm Sonuçları

Bu tez kapsamında eş iki eksenli halka üstü halka eğme testi için 500 mm uzunluğunda 400 mm genişliğinde ve 4 mm kalınlığında yani ticari ürün boyutları korunmuş toplam 52 adet tavlanmış numune kullanılmıştır. Bu test numunelerinin 10 adedine 9,81 N Vickers indentasyon yükü, 10 adedine 29,42 N Vickers indentasyon yükü uygulanırken geriye kalan 32 adet test numunesine ise herhangi bir indentasyon yükü uygulanmamış olup fabrika üretim koşulları muhafaza edilmiştir. Halka üstü halka testine tabi tutulan her bir test numunesinin kırılma yükü F , maksimum kırılma yükü değerine bilye ve 60 mm çapındaki yükleme halkasının 11 N toplam ağırlığı ilave edilerek belirlenmiştir. ASTM C1499-03 standartlarına uygun olarak her bir test numunesine ait test numune çapı D denklem 2.17 vasıtası ile belirlenmiştir. Yine daha önce de bahsedildiği üzere ASTM C1499-03 standartlarına uygun olarak her bir test numunesinin kırılma mukavemeti σ_f denklem 2.16 vasıtası ile belirlenmiştir. Radyal çatlak adetleri standart boyutlardaki numunelere benzer şekilde test yükünün uygulandığı merkez bölgesi yüzeyinin tamamını kapsayacak şekilde 100 mm x 100 mm yüzey alanı üzerinden belirlenmiştir. 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış, 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış ve fabrika üretim koşulları korunmuş test numunelerinin eş iki eksenli halka üstü halka testine tabi tutulmaları sonucu elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları sırasıyla Tablo 4.24, Tablo 4.25 ve Tablo 4.26 ile verilmektedir. Homojenite faktörü belirlenecek 2 adet numuneye Vickers indentasyon yükü uygulanmamış olup sıra numarasının bitişiğine “**” işareti kullanılarak Tablo 4.26 ile verilmektedir. Ticari ürün boyutlarında ve Vickers indentasyon yüküne tabi tutularak mukavemet testi sonucunda kırılan test numuneleri için kırık yüzey analizi incelemesi yapılmamıştır. Tablolardaki test numunelerine ait sıralamalar, mukavemet değeri en düşük seviyeden en yüksek seviyeye olacak şekilde belirlenmiştir. İstatistiki olarak uç mukavemet değerleri bulunmamakta olup bütün değerler ortalamaya dahil edilmiştir.

Tablo 4.24: 9,81 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış ticari boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.

Numune Sırası	Kalınlık Ölçümü, h (mm)	Test Numunesi Çapı, D (mm)	Kırılma Yüğü, F (N)	Kırılma Mukavemeti, σ_f (MPa)	Basma Gerilmesi (MPa)	Radyal Çatlak Adedi
1	3,81	487,75	2900,00	47,91	-1,4	13
2	3,80	487,75	2937,46	48,79	-1,8	10
3	3,81	487,75	3022,89	49,94	-1,7	14
4	3,77	487,77	2986,93	50,40	-2,2	14
5	3,82	487,74	3076,43	50,56	-2,2	11
6	3,77	487,77	2999,32	50,61	-2,1	12
7	3,80	487,75	3186,46	52,92	-1,6	15
8	3,84	487,73	3276,58	53,29	-1,6	14
9	3,81	487,75	3262,82	53,91	-2,4	14
10	3,80	487,75	3372,50	56,01	-2,1	17

Tablo 4.25: 29,42 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış ticari boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.

Numune Sırası	Kalınlık Ölçümü, h (mm)	Test Numunesi Çapı, D (mm)	Kırılma Yüğü, F (N)	Kırılma Mukavemeti, σ_f (MPa)	Basma Gerilmesi (MPa)	Radyal Çatlak Adedi
1	3,76	487,77	2051,25	34,80	-1,6	9
2	3,89	487,71	2324,24	36,84	-2,0	9
3	3,80	487,75	2218,76	36,85	-2,0	12
4	3,76	487,77	2184,35	37,06	-1,9	7
5	3,81	487,75	2279,95	37,67	-2,0	8
6	3,77	487,77	2304,05	38,88	-2,0	9
7	3,81	487,75	2365,39	39,08	-2,1	7
8	3,77	487,77	2337,66	39,45	-2,0	9
9	3,80	487,75	2387,73	39,66	-2,3	11
10	3,77	487,77	2406,78	40,61	-1,9	10

Tablo 4.26: Vickers indentasyon yükü uygulanmamış ticari boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.

Numune Sırası	Kalınlık Ölçümü, h (mm)	Test Numunesi Çapı, D (mm)	Kırılma Yüğü, F (N)	Kırılma Mukavemeti, σ_f (MPa)	Basma Gerilmesi (MPa)	Radyal Çatlak Adedi
1	3,81	487,75	4534,53	74,92	-1,6	19
2	3,78	487,76	5878,14	98,66	-2,0	25
3**	3,82	487,74	6232,99	102,44	-1,2	26
4	3,81	487,75	7107,25	117,42	-2,1	29
5	3,76	487,77	7579,51	128,58	-1,6	35
6	3,85	487,73	8715,57	141,02	-1,5	43
7	3,80	487,75	8938,19	148,45	-1,7	36
8**	3,84	487,73	10977,82	178,55	-1,1	55
9	3,80	487,75	11676,93	193,94	-1,6	55
10	3,83	487,74	12208,49	199,60	-1,6	52
11	3,80	487,75	13259,05	220,22	-2,1	49
12	3,85	487,73	13659,51	221,01	-2,8	57
13	3,77	487,77	13123,77	221,45	-2,2	52
14	3,82	487,74	13517,93	222,17	-2,1	51
15	3,85	487,73	13815,92	223,54	-2,7	62
16	3,79	487,76	13615,06	227,32	-2,1	53
17	3,83	487,74	14295,65	233,73	-1,9	60
18	3,85	487,73	14488,03	234,42	-2,6	53
19	3,81	487,75	14261,62	235,63	-1,4	67
20	3,83	487,74	14481,28	236,76	-2,0	62
21	3,80	487,75	14987,15	248,92	-1,3	60
22	3,84	487,73	15519,92	252,42	-2,1	55
23	3,83	487,74	15533,33	253,96	-1,8	68
24	3,83	487,74	16492,01	269,64	-1,1	51
25	3,85	487,73	17324,59	280,31	-2,0	69
26	3,78	487,76	17763,04	298,15	-2,0	75
27	3,81	487,75	19384,38	320,26	-1,7	66
28	3,82	487,74	19505,91	320,59	-2,1	91
29	3,81	487,75	19411,01	320,70	-2,0	68
30	3,83	487,74	21016,14	343,61	-2,1	70
31	3,81	487,75	21067,28	348,07	-1,8	78
32	3,82	487,74	22403,00	368,20	-2,3	72

4.3.2. Isıl Temperli Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin Deneyisel Ölçüm Sonuçları

Bu tez kapsamında eş iki eksenli halka üstü halka eğme testi için 500 mm uzunluğunda 400 mm genişliğinde ve 4 mm kalınlığında ticari ürün boyutlarına sahip toplam 52 adet ısıtıl temperlenmiş numune kullanılmıştır. Bu test numunelerinin 10 adedine 9,81 N Vickers indentasyon yükü, 10 adedine 29,42 N Vickers indentasyon yükü uygulanırken geriye kalan 32 adet test numunesine ise herhangi bir indentasyon yükü uygulanmamış olup fabrika üretim koşulları muhafaza edilmiştir. Halka üstü halka testine tabi tutulan her bir test numunesinin kırılma yükü F , maksimum kırılma yükü değerine bilye ve 60 mm çapındaki yükleme halkasının 11 N toplam ağırlığı ilave edilerek belirlenmiştir. ASTM C1499-03 standartlarına uygun olarak her bir test numunesine ait test numune çapı D denklem 2.17 vasıtası ile belirlenmiştir. Yine daha önce de bahsedildiği üzere ASTM C1499-03 standartlarına uygun olarak her bir test numunesinin kırılma mukavemeti σ_f denklem 2.16 vasıtası ile belirlenmiştir. Radyal çatlak adetleri standart ve ticari boyutlara sahip tavlanmış numunelere benzer şekilde test yükünün uygulandığı merkez bölgesi yüzeyinin tamamını kapsayacak şekilde 100 mm x 100 mm yüzey alanı üzerinden belirlenmiştir. 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış, 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış ve fabrika üretim koşulları korunmuş test numunelerinin eş iki eksenli halka üstü halka testine tabi tutulmaları sonucu elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları sırasıyla Tablo 4.27, Tablo 4.28 ve Tablo 4.29 ile verilmektedir. Homojenite faktörü belirlenecek 2 adet numuneye Vickers indentasyon yükü uygulanmamış olup sıra numarasının bitişiğine “**” işareti kullanılarak Tablo 4.29 ile verilmektedir. Vickers indentasyon yüküne tabi tutularak mukavemet testi sonucunda kırılan test numuneleri için kırık yüzey analizi incelemesi yapılmamıştır. Tablolardaki test numunelerine ait sıralamalar, mukavemet değeri en düşük seviyeden en yüksek seviyeye olacak şekilde belirlenmiştir. İstatistiki olarak uç mukavemet değerleri ortalamaya dahil edilmemiş olup bu değerler tablolarda sıra numarasının bitişiğine “*” işareti kullanılarak gösterilmiştir.

Tablo 4.27: 9,81 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış ticari boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.

Numune Sırası	Kalınlık Ölçümü, h (mm)	Test Numunesi Çapı, D (mm)	Kırılma Yüğü, F (N)	Kırılma Mukavemeti, σ_f (MPa)	Basma Gerilmesi (MPa)	Radyal Çatlak Adedi
1*	3,62	487,84	8294,63	151,80	-93,0	155
2	3,80	487,75	9578,02	159,08	-94,9	172
3	3,78	487,76	9823,59	164,89	-91,2	170
4	3,70	487,80	9415,25	164,94	-92,0	169
5	3,71	487,80	9573,80	166,82	-93,6	174
6	3,70	487,80	9807,00	171,80	-92,5	174
7	3,73	487,79	9986,71	172,15	-90,9	172
8	3,85	487,73	10908,05	176,49	-92,1	183
9	3,73	487,79	10407,51	179,40	-91,1	177
10*	3,75	487,78	15839,85	270,14	-92,0	216

Tablo 4.28: 29,42 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış ticari boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.

Numune Sırası	Kalınlık Ölçümü, h (mm)	Test Numunesi Çapı, D (mm)	Kırılma Yüğü, F (N)	Kırılma Mukavemeti, σ_f (MPa)	Basma Gerilmesi (MPa)	Radyal Çatlak Adedi
1	3,70	487,80	7874,13	137,94	-89,5	152
2	3,78	487,76	8760,77	147,05	-96,0	164
3	3,75	487,78	8742,73	149,10	-93,9	171
4	3,75	487,78	8787,98	149,88	-92,6	167
5	3,74	487,78	8957,49	153,58	-95,3	167
6	3,73	487,79	8928,25	153,90	-89,8	168
7	3,75	487,78	9282,90	158,32	-93,2	173
8	3,69	487,81	9120,15	160,64	-91,7	172
9	3,75	487,78	9453,20	161,22	-98,6	187
10	3,75	487,78	9620,15	164,07	-94,9	184

Tablo 4.29: Vickers indentasyon yükü uygulanmamış ticari boyutlardaki numunelerin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda elde edilmiş deneysel ölçüm sonuçları.

Numune Sırası	Kalınlık Ölçümü, h (mm)	Test Numunesi Çapı, D (mm)	Kırılma Yüğü, F (N)	Kırılma Mukavemeti, σ_f (MPa)	Basma Gerilmesi (MPa)	Radyal Çatlak Adedi
1*	3,70	487,80	7681,23	134,56	-96,6	190
2	3,73	487,79	10056,23	173,35	-91,8	189
3	3,78	487,76	11681,30	196,07	-98,7	202
4	3,79	487,76	11789,60	196,84	-93,6	203
5	3,66	487,82	11149,48	199,62	-96,7	199
6**	3,75	487,78	12050,87	205,52	-92,8	171
7	3,77	487,77	12252,93	206,76	-91,6	194
8	3,74	487,78	12136,27	208,09	-96,2	202
9	3,80	487,75	12550,32	208,44	-98,0	236
10	3,79	487,76	12606,59	210,49	-97,5	223
11	3,78	487,76	12680,21	212,84	-95,9	191
12	3,85	487,73	13274,25	214,78	-93,6	199
13	3,82	487,74	13102,79	215,35	-97,1	219
14	3,72	487,79	12543,01	217,38	-95,0	202
15	3,77	487,77	12961,89	218,72	-95,5	211
16	3,77	487,77	13124,97	221,47	-92,3	199
17	3,83	487,74	13617,75	222,64	-96,5	205
18	3,77	487,77	13473,25	227,35	-93,1	218
19	3,80	487,75	14043,58	233,25	-90,2	208
20	3,73	487,79	13897,93	239,57	-92,5	208
21	3,70	487,80	13723,58	240,42	-91,2	208
22	3,80	487,75	14759,15	245,13	-95,2	242
23	3,74	487,78	14356,75	246,16	-95,9	225
24	3,75	487,78	14894,59	254,02	-91,6	223
25	3,75	487,78	14905,16	254,20	-93,6	228
26	3,70	487,80	14596,99	255,72	-91,6	222
27**	3,85	487,73	16200,00	262,12	-99,3	232
28	3,80	487,75	15814,59	262,66	-97,8	246
29	3,71	487,80	15157,68	264,11	-98,1	222
30	3,70	487,80	15547,16	272,36	-97,7	234
31	3,70	487,80	17050,73	298,70	-93,8	237
32	3,70	487,80	17215,14	301,58	-98,7	246

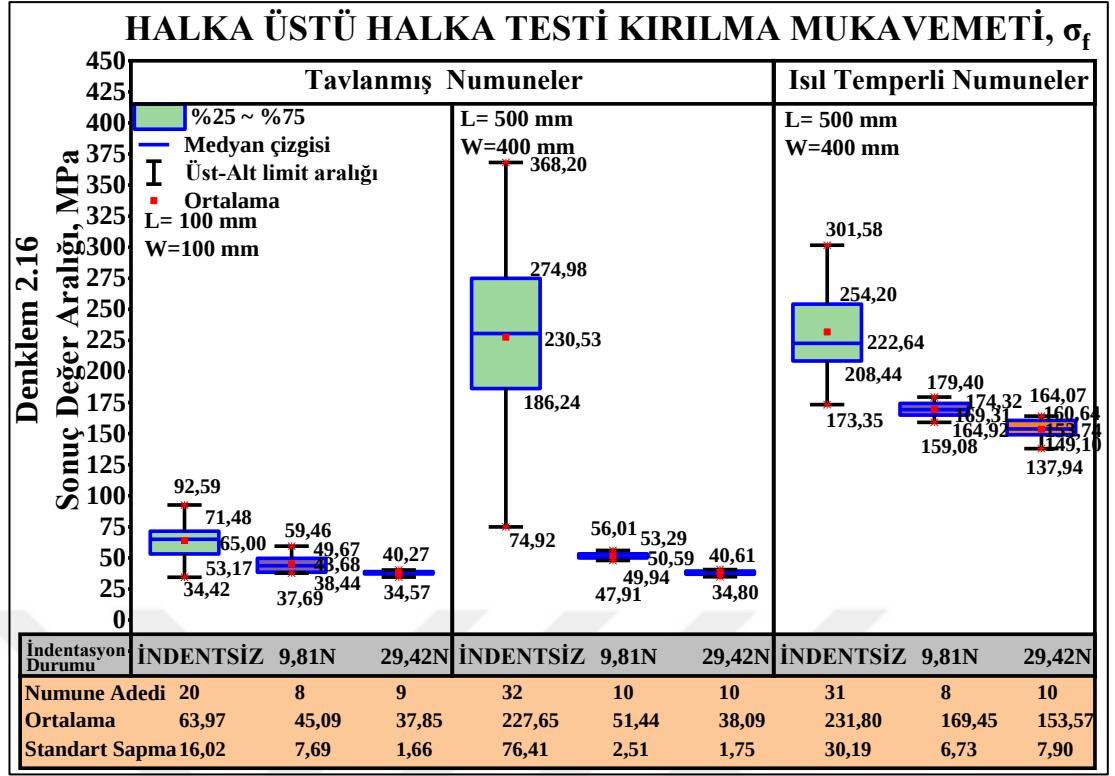
4.3.3. Kırılma Mukavemeti Değerlerinin ve Radyal Çatlak Adetlerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu tez kapsamında halka üstü halka testi uygulanması sonucunda test numunelerinde boyut farkının, ısıtılma işlem farkının, uygulanan Vickers indentasyon yükü ve niceliği farkının kırılma mukavemeti değerleri üzerindeki etkisi Şekil 4.19 ile ve radyal çatlak adetleri üzerindeki etkisi ise Şekil 4.20 ile verilmektedir. Şekil 4.19'daki kırılma mukavemeti değerleri ve Şekil 4.20'deki radyal çatlak adetleri

- Standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için;
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Tablo 4.21'den,
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Tablo 4.22'den,
 - İndentasyon yükü uygulanmamış numuneler için Tablo 4.23'ten
- Ticari ürün boyutlarına sahip tavllanmış numuneler için;
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Tablo 4.24'den,
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Tablo 4.25'den,
 - Fabrika üretim koşulları korunmuş (kesim işlemi uygulanmamış ve indentasyon yükü uygulanmamış) numuneler için Tablo 4.26'dan,
- Ticari ürün boyutlarına sahip ısıtılma işlemli numuneler için;
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Tablo 4.27'den,
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Tablo 4.28'den,
 - Fabrika üretim koşulları korunmuş (indentasyon yükü uygulanmamış) numuneler için Tablo 4.29'dan

alınmıştır.

Daha önce de bahsedildiği üzere ilgili tablolarda numune sırasının bitişiğinde “*” işareti bulunan kırılma mukavemeti değerleri ve bağıntılı olarak karşılık gelen radyal çatlak adetleri istatistiki olarak değerlendirmelerin dışında tutulmuştur.



Şekil 4.19: Farklı parametrelere sahip test numunelerinin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda denklem 2.16 vasıtası ile elde edilmiş kırılma mukavemeti σ_f sonuç değer aralıkları.

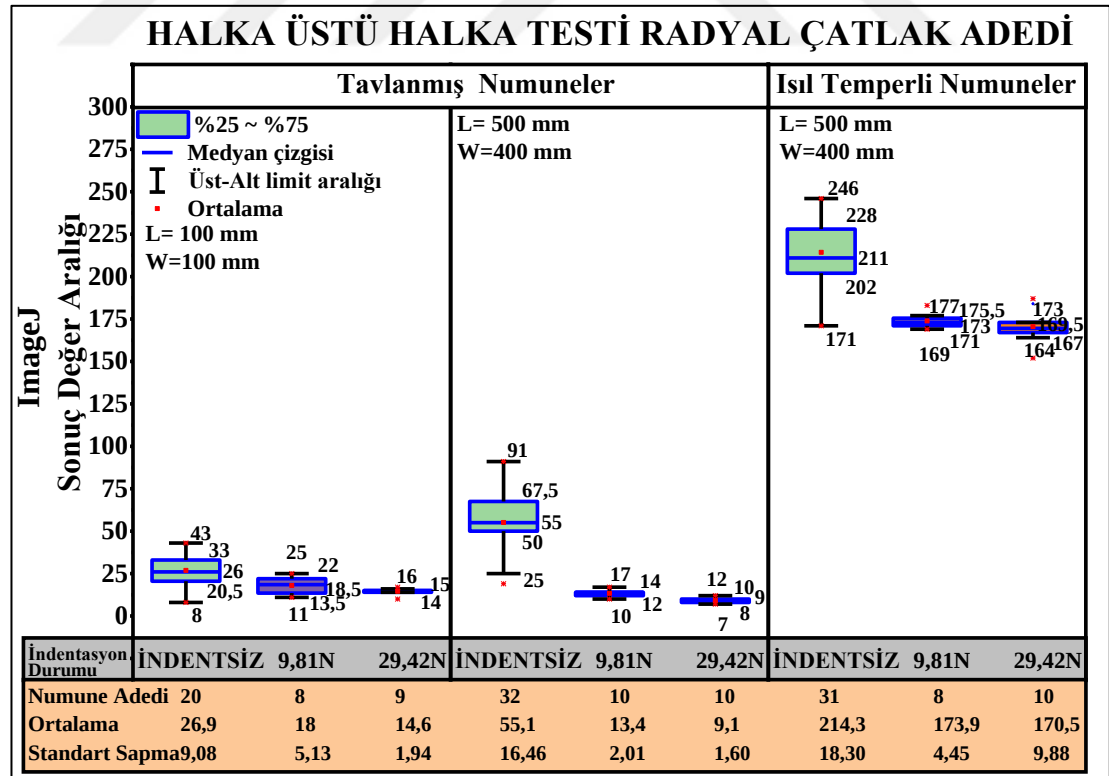
Şekil 4.19’da test numuneleri uygulanan ısıtılma işlem türüne göre iki kategoriye ayrılmıştır. Benzer şekilde tavlanmış test numuneleri kendi içerisinde standart boyutlara sahip numuneler (numune uzunluğu L=100 mm, numune genişliği W=100 mm) ve ticari ürün boyutlarına sahip (numune uzunluğu L=500 mm, numune genişliği W=400 mm) numuneler olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Yani boyut ve ısıtılma işleminin yük altındaki numuneler üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek açısından toplamda üç farklı kategori oluşturulmuştur. İlave olarak oluşturulan üç farklı kategorinin tamamı Vickers indantasyon yükü uygulanmama durumu ile uygulanan Vickers indantasyon yükünün niceliğine bağıntılı olarak kendi içerisinde üç farklı kategoriye ayrılmıştır.

Şekil 4.19’da tavlanmış test numuneleri arasındaki boyut farkının yük altındaki etkisi karşılaştırıldığında ticari ürün boyutlarına sahip test numunelerinin mukavemet değerlerinin indantasyon yükü uygulanmamış durum için standart boyutlara sahip test numunelerine nazaran daha yüksek değerler aldıkları görülmüştür. Vickers indantasyon yükü uygulanarak yapay kusurların oluşturulduğu durumda ise indantasyon yükü ve niceliğine bağıntılı olarak kusur geometrileri ve boyutlarının

sınırlandırılması ile birlikte benzer mukavemet değer aralıklarına sahip oldukları belirlenmiştir.

Diğer bir taraftan boyut etkisinden bağımsız olarak ticari boyutlara sahip ısıt temperlenmiş ve tavlanmış numuneler indentasyon yükü uygulanmamış durum için karşılaştırıldığında ise mukavemet değerlerinin benzer çıkmasının nedeni belirlenememiştir. Dolayısıyla indentasyon yükü uygulanmamış ticari boyutlara sahip tavlanmış ve ısıt temperlenmiş numuneler için daha fazla çalışma yapılması gerektiği görülmektedir. Isıt temperlenmiş test numunelerinin indentasyon yüküne karşı direncinin tavlanmış test numunelerine nazaran daha yüksek olduğu ve indentasyon sonucu oluşan çatlak uzunluklarının daha kısa olması nedeni ile indentasyon yükü ve niceliğine bağıntılı olarak ısıt temperlenmiş numunelerin mukavemet değerlerinin tavlanmış numunelere nazaran daha yüksek değer aralıklarında oldukları belirlenmiştir.

Uygulanan Vickers indentasyon yüküne ve niceliğine bağıntılı olarak ise hem tavlanmış numunelerde (standart ve ticari boyutlara sahip) hem de ısıt temperlenmiş numunelerde mukavemet değerlerinde azalma olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.20: Farklı parametrelere sahip test numunelerinin halka üstü halka testine tabi tutulması sonucunda ImageJ programı vasıtası ile belirlenmiş radyal çatlak adedi sonuç değer aralıkları.

Şekil 4.20’de de Şekil 4.19 gibi test numuneleri uygulanan ısıtım işlem türüne göre iki kategoriye ayrılmıştır. Benzer şekilde tavlınmış test numuneleri kendi içerisinde standart boyutlara sahip numuneler (numune uzunluğu $L=100$ mm, numune genişliği $W=100$ mm) ve ticari ürün boyutlarına sahip (numune uzunluğu $L=500$ mm, numune genişliği $W=400$ mm) numuneler olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Yani boyut ve ısıtım işlemin yük altındaki numuneler üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek açısından toplamda üç farklı kategori oluşturulmuştur. İlave olarak oluşturulan üç farklı kategorinin tamamı Vickers indentasyon yükü uygulanmama durumu ile uygulanan Vickers indentasyon yükünün niceliğine bağıntılı olarak kendi içerisinde üç farklı kategoriye ayrılmıştır.

Şekil 4.20’de tavlınmış test numuneleri arasındaki boyut farkının yük altındaki etkisi karşılaştırıldığında ticari ürün boyutlarına sahip test numunelerinin radyal çatlak adedi değerlerinin indentasyon yükü uygulanmamış durum için standart boyutlara sahip test numunelerine nazaran daha yüksek değerler aldıkları görülmüştür. Diğer bir taraftan Vickers indentasyon yükü uygulanarak yapay kusurların oluşturulduğu durumda ise indentasyon yükü ve niceliğine bağıntılı olarak kusur geometrileri ve boyutlarının sınırlandırılması ile birlikte standart ürün boyutlarına sahip test numunelerinin ve ticari boyutlara sahip test numunelerinin radyal çatlak adedi değerlerinin benzer değer aralıklarında oldukları görülmüştür.

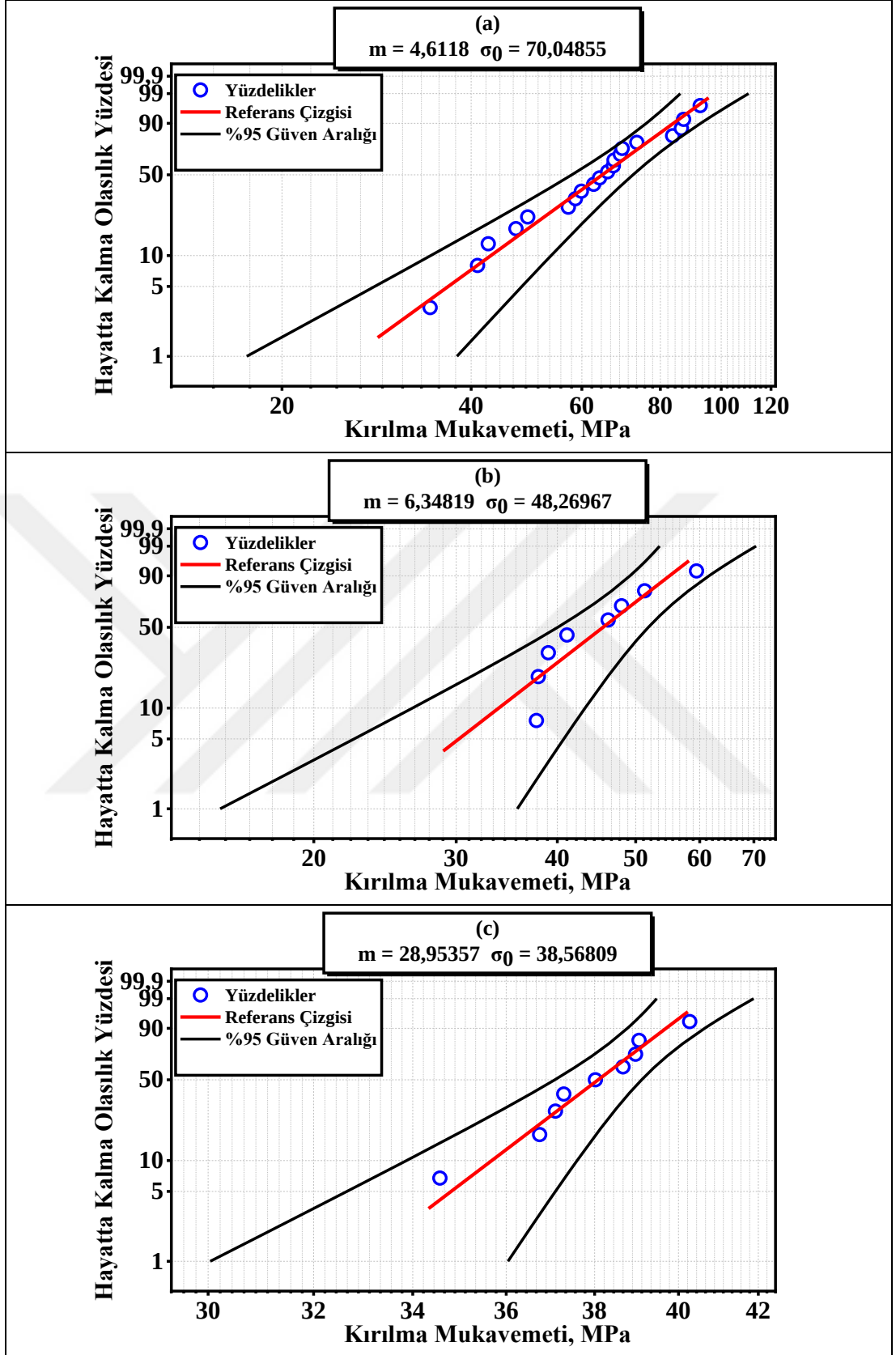
Boyut etkisinden bağımsız olarak ticari boyutlara sahip ısıtım temperlenmiş ve tavlınmış numuneler karşılaştırıldığında ise ısıtım temperlenmiş test numunelerinin homojen boyutta küçük parçalar oluşturmak için yeterince elastik gerilme enerjisi depoladıkları dolayısıyla tavlınmış test numunelerine nazaran daha çok parçaya ayrıldıkları görülmüştür.

Vickers indentasyon yüküne ve niceliğine bağıntılı olarak ise hem tavlınmış numunelerde (standart ve ticari boyutlara sahip) hem de ısıtım temperlenmiş numunelerde radyal çatlak adedi değerlerinde azalma olduğu belirlenmiştir. Radyal çatlak adedi değerlerindeki bu azalma durumunun indentasyon yüküne maruz kalan. numunelerin daha düşük yüklerde kırılması ve bağıntılı olarak daha az elastik enerji depolaması neticesinde olduğu düşünülmektedir.

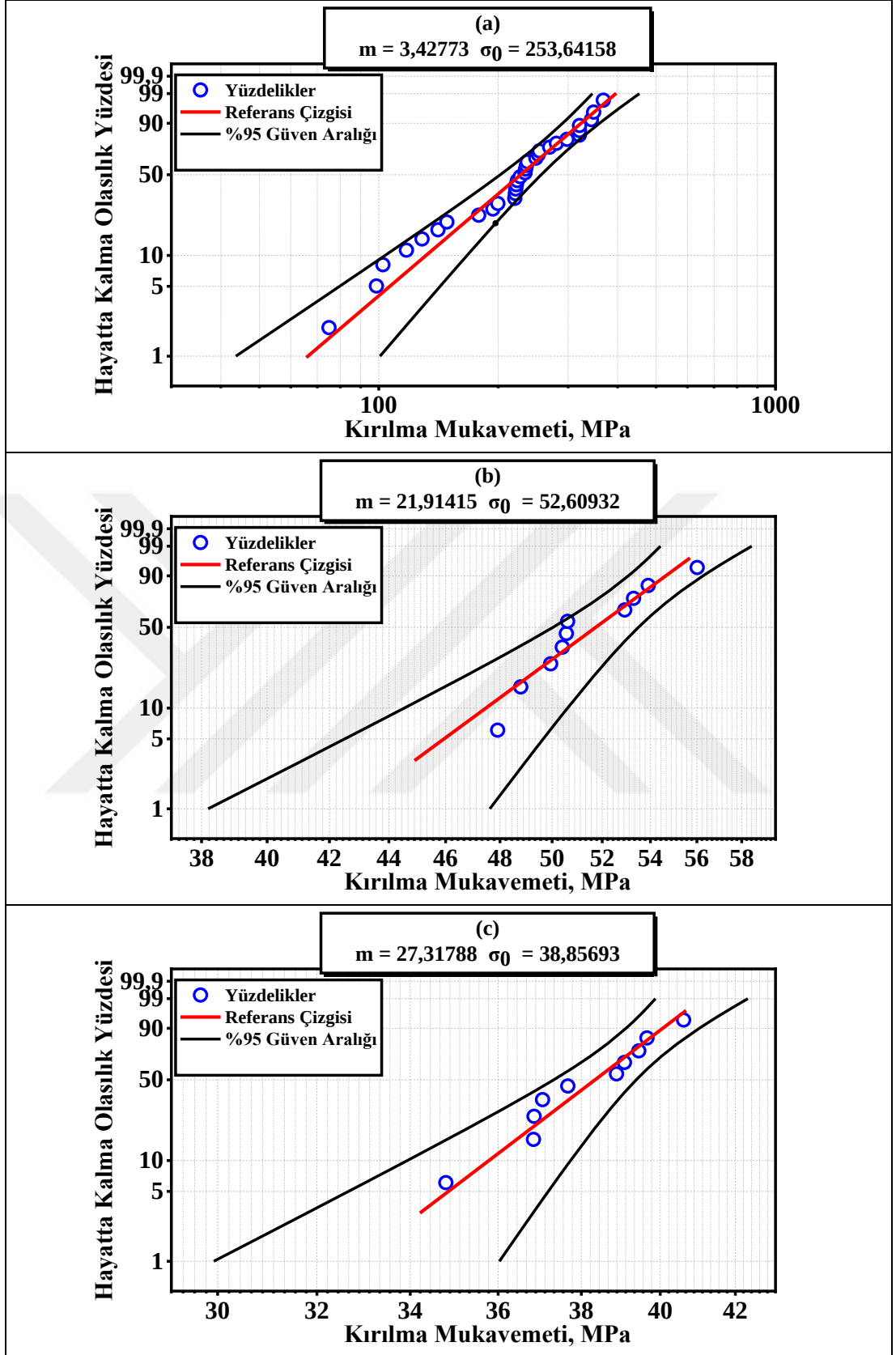
4.3.4. Kırılma Mukavemeti Değerlerinin Weibull İstatistik Analizi Yöntemi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi

Halka üstü halka testi sonucunda birbirinden farklı parametrelere sahip test numuneleri için elde edilmiş olan mukavemet verilerinin Origin® programı vasıtası ile Weibull mukavemeti σ_0 ve Weibull modülüsü m değerleri belirlenmiştir. Belirlenmiş olan Weibull parametreleri

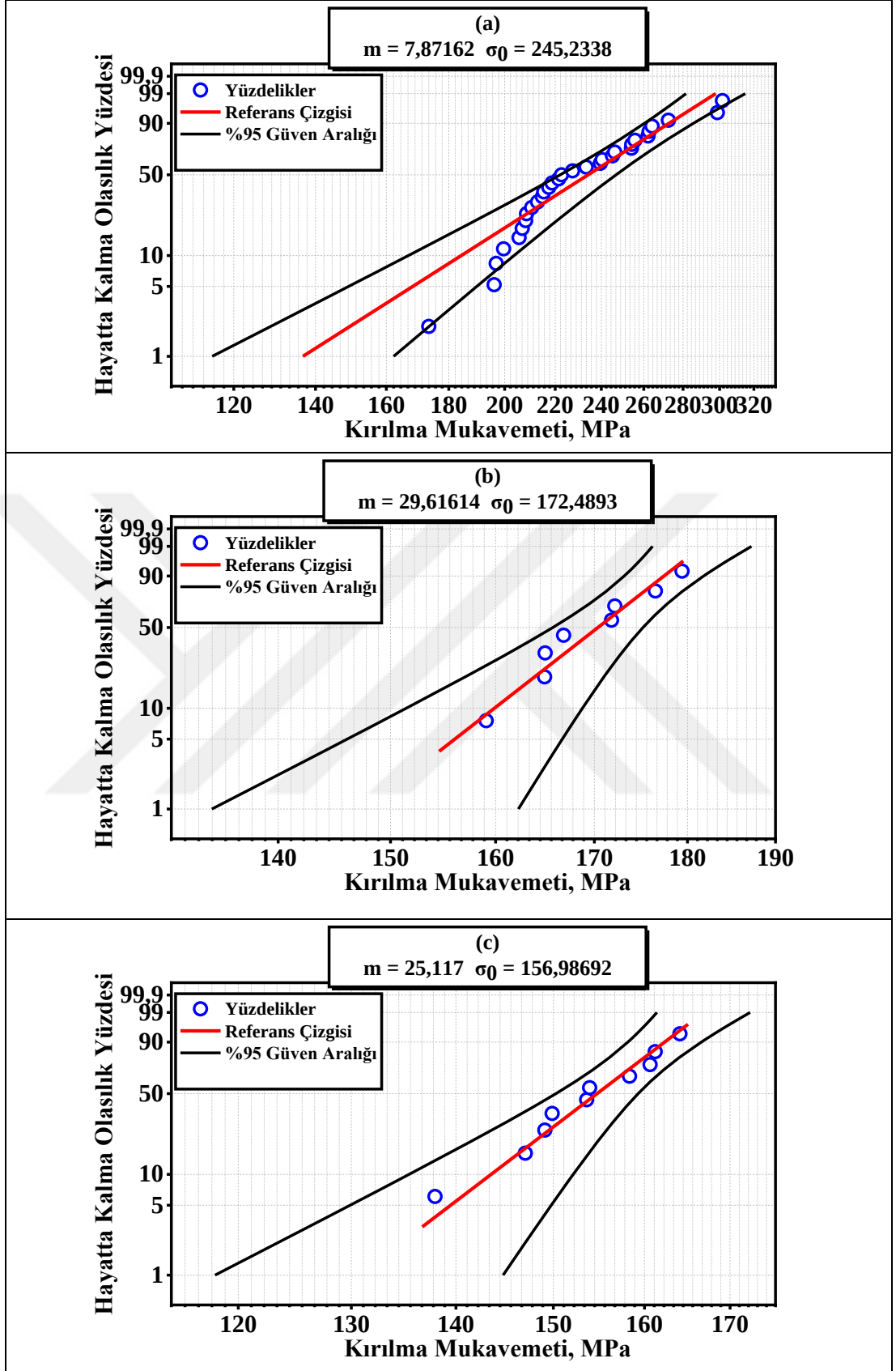
- Standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için;
 - İndentasyon yükü uygulanmamış numuneler için Şekil 4.21a’da
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Şekil 4.21b’de,
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Şekil 4.21c’de,
- Ticari ürün boyutlarına sahip tavllanmış numuneler için;
 - Fabrika üretim koşulları korunmuş (kesim işlemi uygulanmamış ve indentasyon yükü uygulanmamış) numuneler için Şekil 4.22a’da,
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Şekil 4.22b’de,
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Şekil 4.22c’de,
- Ticari ürün boyutlarına sahip ısıt temperli numuneler için;
 - Fabrika üretim koşulları korunmuş (indentasyon yükü uygulanmamış) numuneler için Şekil 4.23a’da,
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Şekil 4.23b’de,
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Şekil 4.23c’de verilmektedir.



Şekil 4.21: a) İndentasyon yükü uygulanmamış, b) 9,81 N indetasyon yükü uygulanmış, c) 29,42 N indetasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Origin® programı vasıtası ile belirlenmiş olan Weibull parametreleri.



Şekil 4.22: a) İndentasyon yükü uygulanmamış, b) 9,81 N indetasyon yükü uygulanmış, c) 29,42 N indetasyon yükü uygulanmış ticari boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Origin® programı vasıtası ile belirlenmiş olan Weibull parametreleri.



Şekil 4.23: a) İndentasyon yükü uygulanmamış, b) 9,81 N indetasyon yükü uygulanmış, c) 29,42 N indetasyon yükü uygulanmış ısıt temperlenmiş numuneler için Origin® programı vasıtası ile belirlenmiş olan Weibull parametreleri.

Daha önce de bahsedildiği üzere cam ürünlerinin mukavemetini büyük ölçüde endüstriyel cam üretim merkezleri koşulları altında üretim esnasında cam yüzeyinde oluşan kusurlar ve kullanım koşulları altında cam yüzeyinde temas kaynaklı oluşan kusurlar belirlemektedir. Weibull istatistik analiz grafiklerinden,

- Standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için;
 - indentasyon yükü uygulanmamış durum için σ_0 değeri 70,05
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış durum için σ_0 değeri 48,27
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış durum için σ_0 değeri 38,57
 - Ticari ürün boyutlarına sahip tavllanmış numuneler için;
 - indentasyon yükü uygulanmamış durum için σ_0 değeri 253,64
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış durum için σ_0 değeri 52,61
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış durum için σ_0 değeri 38,86
 - Ticari ürün boyutlarına sahip ısıt temperli numuneler için;
 - indentasyon yükü uygulanmamış durum için σ_0 değeri 245,23
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış durum için σ_0 değeri 172,49
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış durum için σ_0 değeri 156,99
- olarak belirlenmiştir.

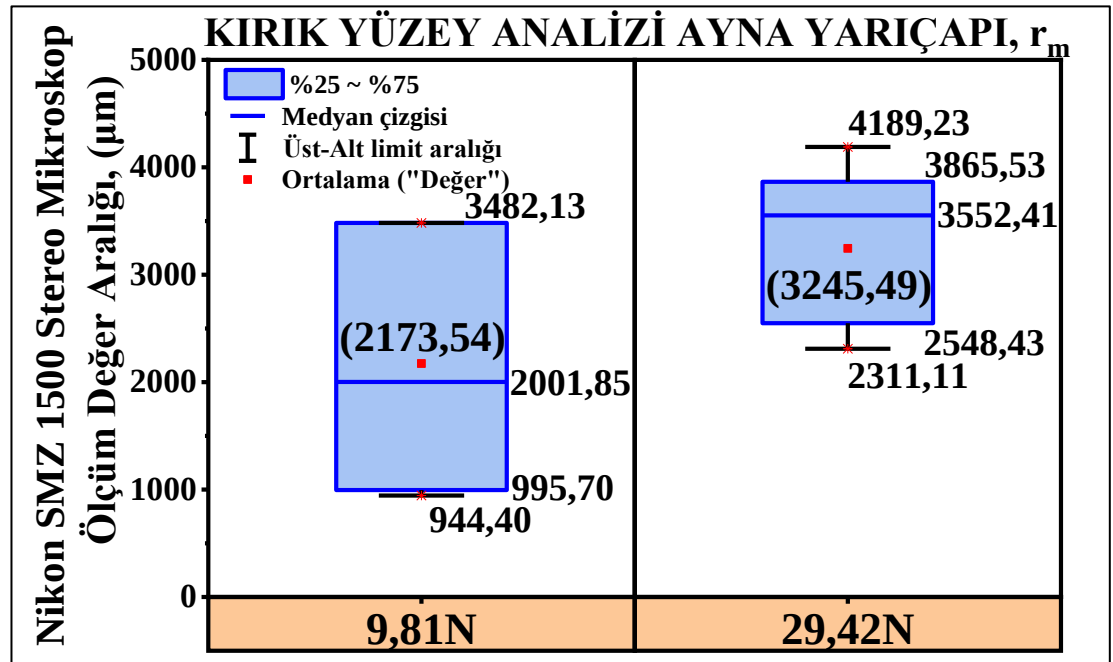
Dolayısıyla hem tavllanmış numunelerde (standart ve ticari boyutlara sahip) hem de ısıt temperlenmiş numunelerde Weibull mukavemeti σ_0 değerlerinin uygulanan Vickers indentasyon yüküne ve niceliğine bağıntılı olarak azaldığı yani üretim kaynaklı oluşan kusurlara nazaran temas kaynaklı kusurların Weibull mukavemeti σ_0 değerlerini oldukça azalttığı görülmüştür.

Ayrıca Weibull modülüsü m değerlerinin büyük olması en az Weibull mukavemeti σ_0 değerlerinin büyük olması kadar değerlidir. Literatürde soda kireç silikat düz cam ürünleri için Weibull modülüsü m değer aralığı 3-7 olarak verilmiştir [30]. Bu tez kapsamında, "standart ürün boyutlarına sahip ve indentasyon yükü uygulanmamış tavllanmış numuneler için m değeri 4,61", "indentasyon yükü uygulanmamış ticari ürün boyutlarına sahip tavllanmış numuneler için m değeri 3,43" ve yine benzer şekilde "fabrika üretim koşulları muhafaza edilmiş yani indentasyon yükü uygulanmamış ısıt temperlenmiş numuneler için ise bu değer 7,87" olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla tavllanmış numunelerde literatürde verilmiş olan değer

aralığının içerisinde ısıt temperlenmiş numunelerde ise bu değer aralığından daha iyi bir Weibull modülüsü m değeri elde edilmiştir. Farklı parametrelere sahip test numunelerine Vickers indentasyon yükü uygulanarak yapay kusurların oluşturulduğu durumda ise kusur geometrileri ve boyutlarının sınırlandırılmasının bir sonucu olarak Weibull modülüsü m değerlerinin büyüdüğü belirlenmiştir.

4.3.5. Farklı Vickers İndentasyon Yükü Uygulanmış Standart Boyutlardaki Tavlanmış Numunelerden Nikon® SMZ1500 Stereo Mikroskop Vasıtası ile Belirlenmiş Ayna Yarıçapı r_m Değerlerinin Değerlendirilmesi

Standart boyuttaki numunelerde halka üstü halka testi sonucunda, Vickers elmas piramit indenterının numunelerin yüzeylerine uyguladığı 9,81 N ve 29,42 N yüklerinin etkisi altında oluşturulan kusurlardan kırılmış test numunelerinin Nikon® SMZ1500 Stereo Mikroskop vasıtası ile belirlenmiş olan ayna yarıçapı r_m değer aralıkları Şekil 4.24 ile verilmektedir. Standart boyutlara sahip tavlanmış test numuneleri için belirlenmiş olan ayna yarıçapı r_m değerleri 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Tablo 4.21'den, 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için ise Tablo 4.22'den alınmıştır.



Şekil 4.24: Farklı Vickers indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlardaki tavlanmış numunelerden Nikon® SMZ1500 Stereo Mikroskop vasıtası ile belirlenmiş ayna yarıçapı r_m değerleri.

Literatürden yüzeyleri üzerinde nispeten daha büyük kusurlara sahip numunelerin daha düşük yüklerin etkisi altında kırıldığı dolayısıyla daha büyük ayna yarıçapı r_m değerlerine sahip olduğu bilinmektedir [63]. Bu tez kapsamında da uygulanan Vickers indentasyon yüküne ve niceliğine bağıntılı olarak numune yüzeyinde oluşan kusurların boyutlarının değiştiği dolayısıyla üretim kaynaklı kusurlara nazaran temas kaynaklı oluşan kusurlara sahip olan numunelerin daha düşük yüklerde kırıldıkları görülmüştür. Şekil 4.24'den de 29,42 N indentasyon yükü uygulanan numunelerin ayna yarıçapı değerlerinin 9,81 N indentasyon yükü uygulanan numunelere nazaran daha büyük oldukları görülmüş olup daha düşük yüklerin etkisiyle kırıldıkları tahmin edilebilmektedir.

Yine literatürden bazı durumlarda nispeten düşük yükler altında kırılan numunelerin ayna yarıçapı değerlerinin numunelerin kesitinden daha büyük değerler alabildikleri ve karakteristik bölge işaretlerinin tam olarak gözlenemediği bilinmektedir [63]. Dolayısıyla tez kapsamında uygulanan indentasyon yüküne ve niceliğine bağıntılı olarak ayna yarıçapı değerlerinin boyutlarındaki değişimlerin bu bilginin doğruluğunu ispatlar nitelikte olduğu düşünülmektedir.

4.3.6. Halka Üstü Halka Test Sonuçlarının Pearson Korelasyon İstatistik Analizi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi

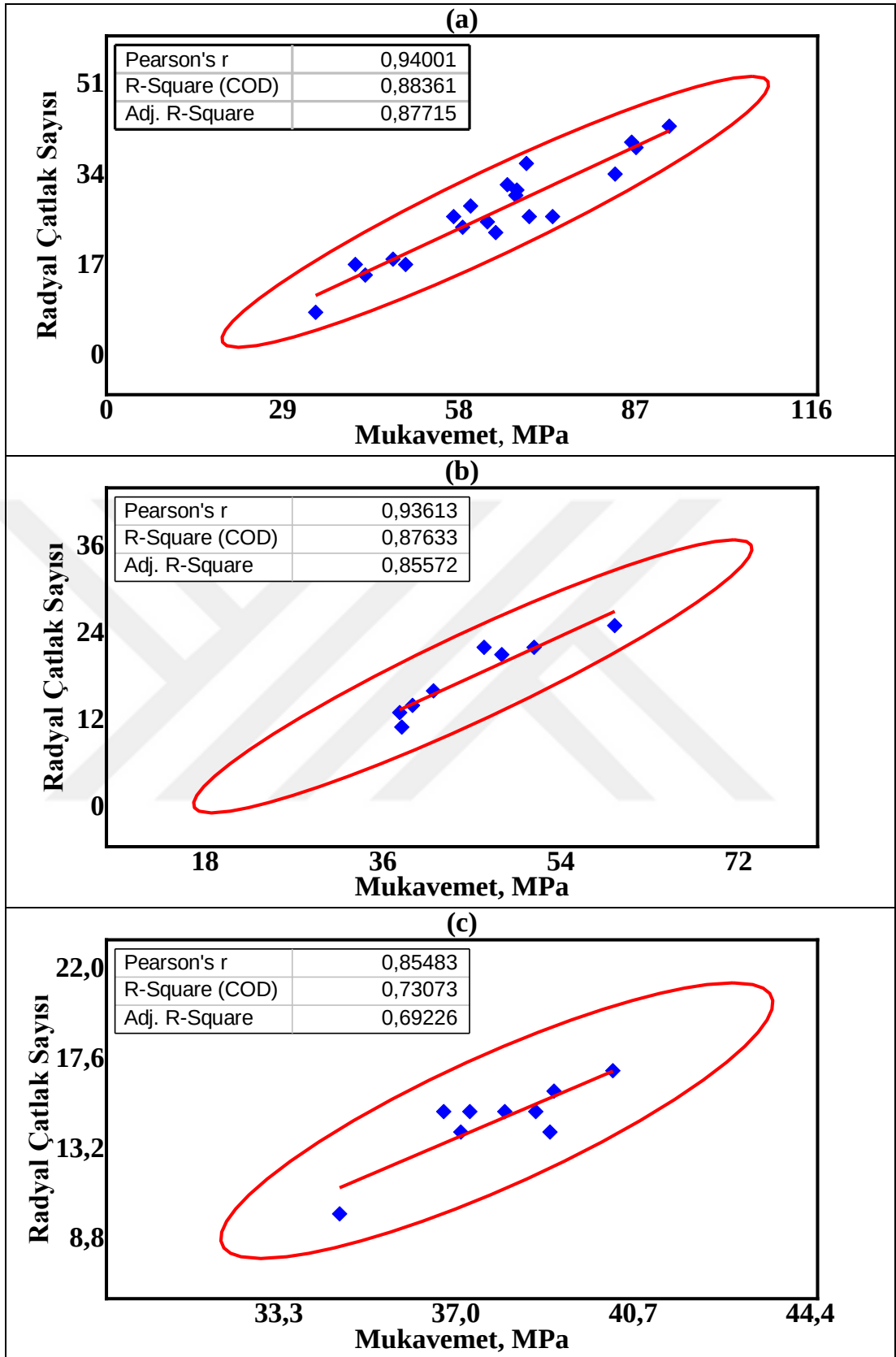
Pearson korelasyonu iki değişken arasında neden-sonuç ilişkisine dayalı olmadan ilişkinin doğrusal olup olmadığına, yönüne ve ilişkinin gücüne bağlı bir istatistik analiz yöntemidir. Pearson korelasyon katsayısı r , doğrusal ilişki olması durumunda ilişkinin yönünü ve gücünü göstermektedir. Pearson korelasyon katsayısı +1 ila -1 değer aralığında olup “+ ve -“ korelasyonun yönünü, mutlak değer içerisinde değer artması ise gücünü göstermektedir. Mutlak değer olarak 0,1-0,3 aralığında zayıf ilişki, 0,3-0,5 aralığında orta düzey ilişki ve 0,5-1,0 aralığında ise güçlü bir korelasyon ilişkisi mevcuttur. Determinasyon katsayısı r^2 , Pearson korelasyon katsayısının karesine eşit olup değişkenlerin bir tanesine ait olan değişimin yüzde kaçının diğer değişkenle ilişkili olduğunun açıklanabilmesini sağlamaktadır [120]. Bu tez kapsamında halka üstü halka testi sonucu elde edilmiş (radyal çatlak adedi-mukavemet, yüzey basma artık gerilmesi-mukavemet, yüzey basma artık gerilmesi-radyal çatlak adedi, mukavemet-ayna yarıçapı, radyal çatlak adedi-ayna yarıçapı)

değişkenler arasındaki ilişki Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtası ile belirlenmiştir.

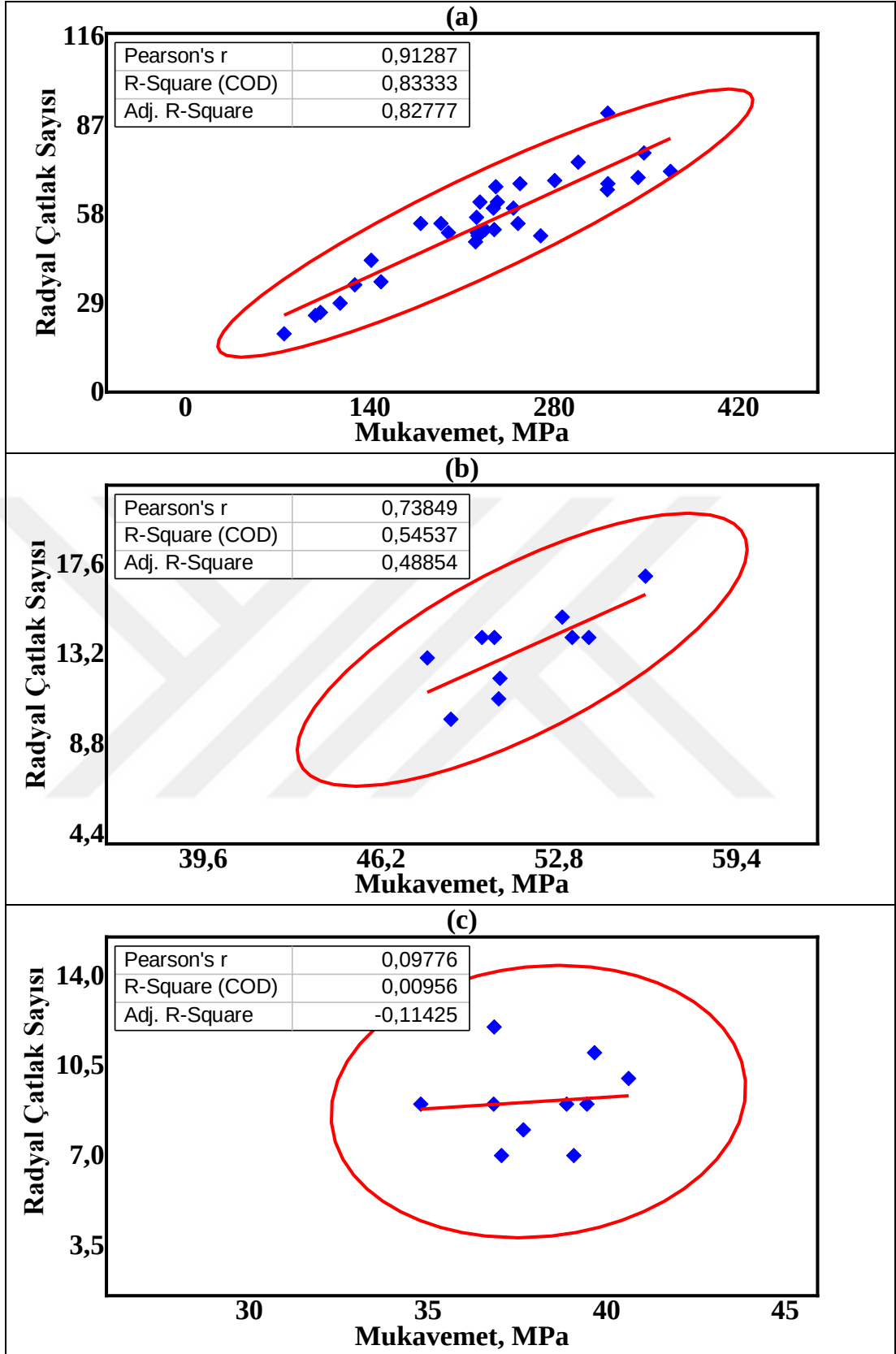
4.3.6.1. Radyal Çatlak Adedi-Mukavemet İlişkisinin Pearson Korelasyon İstatistik Analiz Yöntemi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi

Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan radyal çatlak adedi-mukavemet ilişkisi,

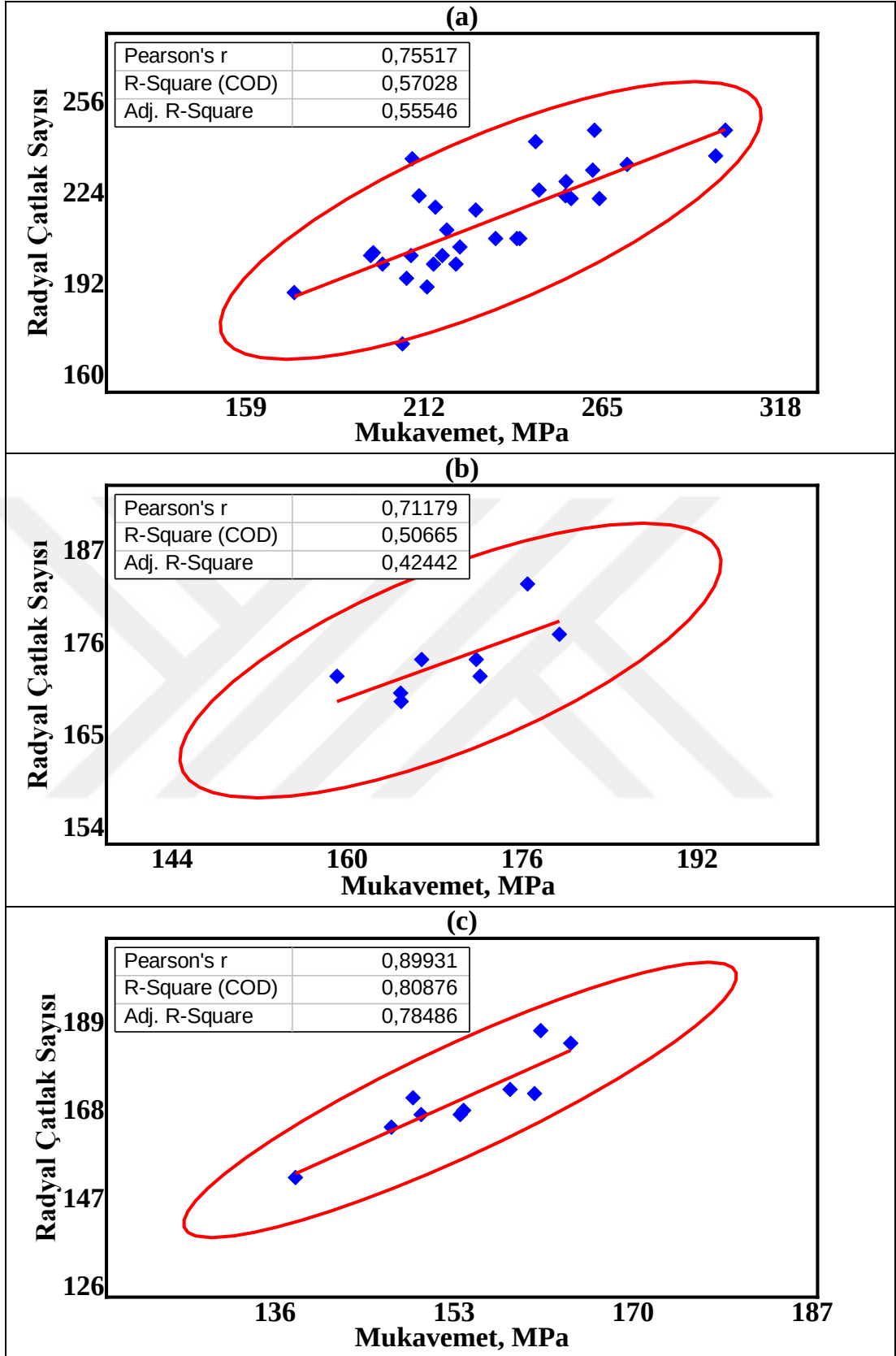
- Standart boyutlara sahip tavlanmış numuneler için;
 - İndentasyon yükü uygulanmamış numuneler için Şekil 4.25a’da
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Şekil 4.25b’de,
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Şekil 4.25c’de,
 - Ticari ürün boyutlarına sahip tavlanmış numuneler için;
 - Fabrika üretim koşulları korunmuş (kesim işlemi uygulanmamış ve indentasyon yükü uygulanmamış) numuneler için Şekil 4.26a’da,
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Şekil 4.26b’de,
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Şekil 4.26c’de,
 - Ticari ürün boyutlarına sahip ısı temperli numuneler için;
 - Fabrika üretim koşulları korunmuş (indentasyon yükü uygulanmamış) numuneler için Şekil 4.27a’da,
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Şekil 4.27b’de,
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış numuneler için Şekil 4.27c’de
- verilmektedir.



Şekil 4.25: a) İndentasyon yükü uygulanmamış b) 9,81 N indetasyon yükü uygulanmış, c) 29,42 N indetasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan radyal çatlak adedi-mukavemet ilişkisi.



Şekil 4.26: a) İndentasyon yükü uygulanmamış b) 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış, c) 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış ticari boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan radyal çatlak adedi-mukavemet ilişkisi.



Şekil 4.27: a) İndentasyon yükü uygulanmamış b) 9,81 N indetasyon yükü uygulanmış, c) 29,42 N indetasyon yükü uygulanmış ısıt temperlenmiş numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan radyal çatlak adedi-mukavemet ilişkisi.

Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan radyal çatlak adedi-mukavemet ilişkisi grafiklerinden;

- Standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için;
 - indentasyon yükü uygulanmamış durum için r değeri 0,94
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış durum için r değeri 0,94
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış durum için r değeri 0,85
 - Ticari ürün boyutlarına sahip tavllanmış numuneler için;
 - indentasyon yükü uygulanmamış durum için r değeri 0,91
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış durum için r değeri 0,74
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış durum için r değeri 0,10
 - Ticari ürün boyutlarına sahip ısı temperli numuneler için;
 - indentasyon yükü uygulanmamış durum için r değeri 0,76
 - 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış durum için r değeri 0,71
 - 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış durum için r değeri 0,90
- olarak belirlenmiştir.

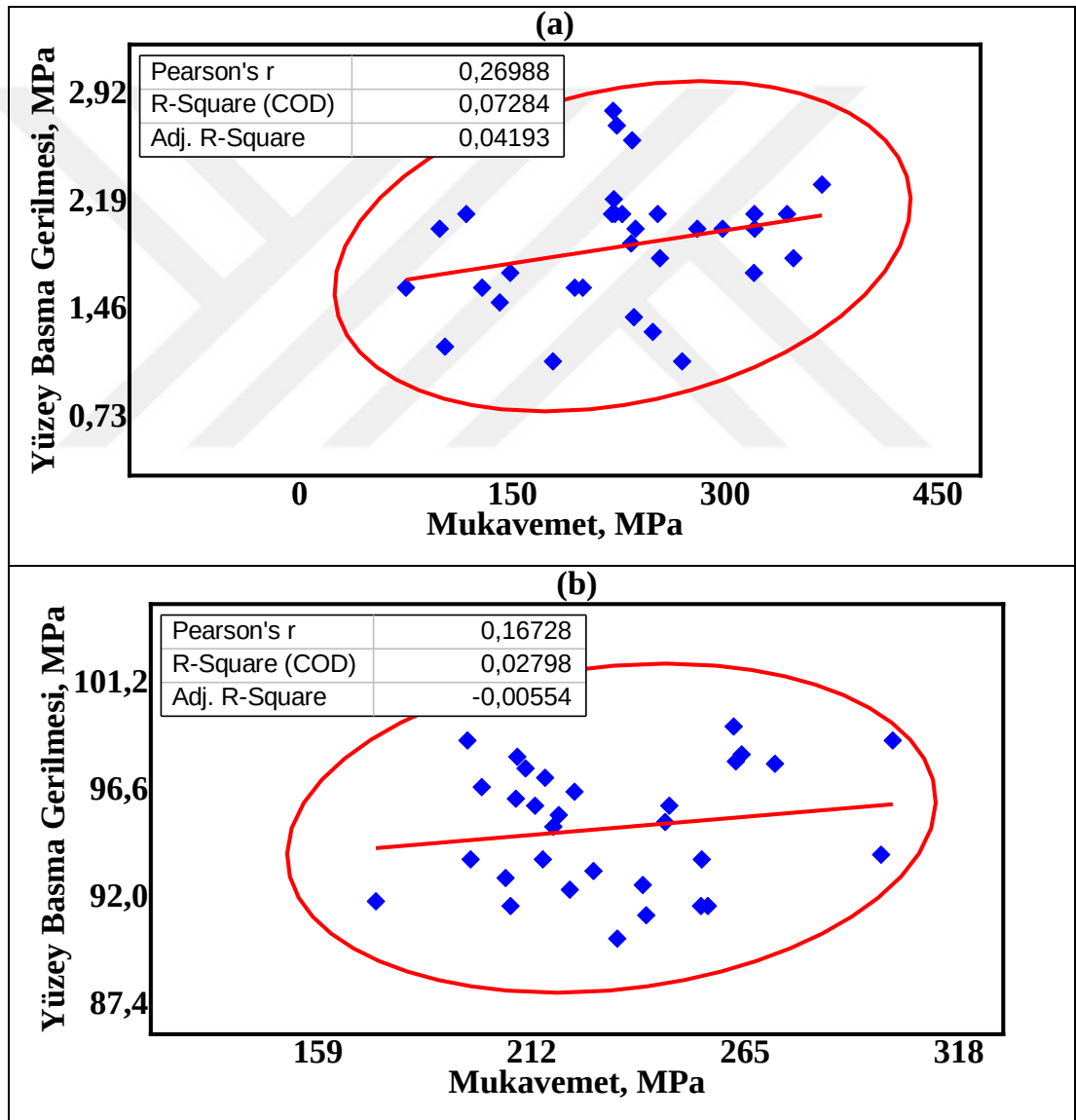
Dolayısıyla farklı parametrelere sahip test numuneleri için radyal çatlak adedi-mukavemet ilişkisini gösteren şekillerde doğrusal, pozitif yönde ve güçlü bir Pearson korelasyon ilişkisi görülmüştür. (29,42 N indentasyon yükü uygulanmış ticari boyutlara sahip tavllanmış numuneler haricinde).

29,42 N indentasyon yükü uygulanmış ticari boyutlara sahip tavllanmış test numunelerinde oluşan bu durumun kusur geometrileri ve boyutlarının sınırlandırılmasının bir sonucu olarak mukavemet ve radyal çatlak adedi değerlerinin dar bir aralıkta konumlanması ve ilave olarak deneysel ölçümlerdeki bir miktar sapma olasılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

İndentasyon yükü uygulanmamış tavllanmış test numunelerine (standart + ticari boyutlara sahip) nazaran indentasyon yükü uygulanmamış ısı temperlenmiş numunelerde Pearson korelasyon katsayısı değerlerindeki bir miktar azalmanın ise ısı temperlenmiş numunelerde depolanmış elastik gerilme enerjisinin tavllanmış camlara nazaran yüksek olması neticesinde çok fazla sayıda radyal çatlak oluşturmaları ve dolayısıyla deneysel olarak sayılan radyal çatlak değerlerinin tavllanmış camlara nazaran daha yüksek sapma olasılığı göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.3.6.2. Yüzey Basma Gerilmesi-Mukavemet İlişkisinin Pearson Korelasyon İstatistik Analiz Yöntemi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi

Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan yüzey basma gerilmesi-mukavemet ilişkisi, fabrika üretim koşulları korunmuş (kesim işlemi uygulanmamış ve indentasyon yükü uygulanmamış) ticari boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Şekil 4,28a'da ve benzer olarak fabrika üretim koşulları korunmuş (indentasyon yükü uygulanmamış) ısı temperlenmiş numuneler için ise Şekil 4.28b'de verilmektedir.



Şekil 4.28: a) İndentasyon yükü uygulanmamış ticari boyutlara sahip tavllanmış numuneler ve b) İndentasyon yükü uygulanmamış ısı temperlenmiş numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan yüzey basma gerilmesi-mukavemet ilişkisi.

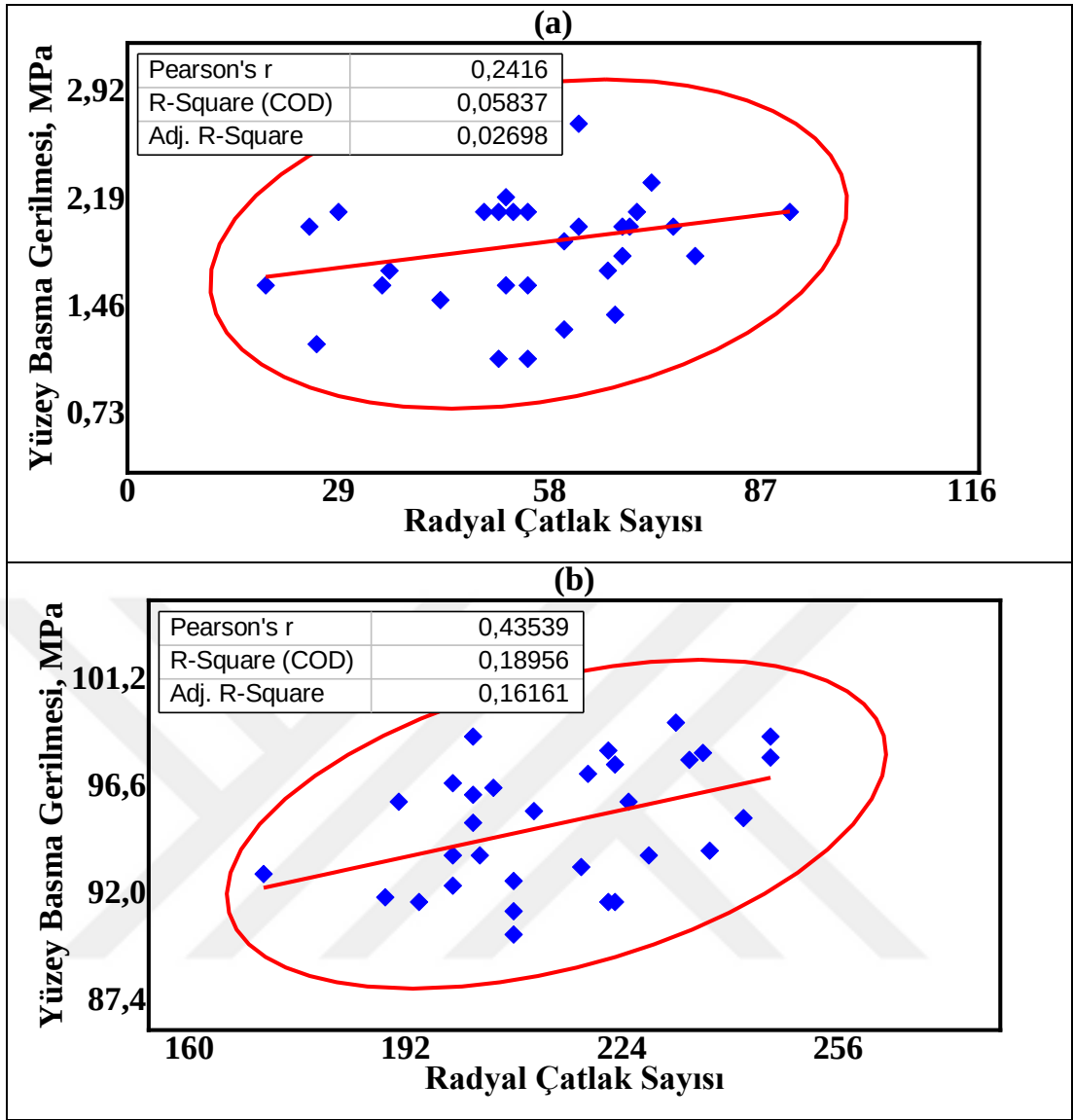
Farklı ısıtım işlem uygulanmış ve üretim koşulları muhafaza edilmiş test numuneleri için yüzey basma gerilmesi-mukavemet ilişkisini gösteren şekillerde doğrusal, pozitif yönde ve zayıf bir Pearson korelasyon ilişkisi görölmüştür. Hem tavlannmış hem de ısıtım temperlenmiş test numuneleri için Pearson korelasyon katsayısı değerlerinin 01-03 arasında konumlanması üretim ve ürün beklentileri kapsamında artık gerilmelerin dar bir aralıkta tasarlanması ve ilave olarak deneysel ölçümlerdeki bir miktar sapma olasılığından kaynaklandığı düşünölmektedir.

4.3.6.3. Yüzey Basma Gerilmesi-Radyal Çatlak Adedi İlişkisinin Pearson Korelasyon İstatistik Analiz Yöntemi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi

Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan yüzey basma gerilmesi-radyal çatlak adedi ilişkisi, fabrika üretim koşulları korunmuş (kesim işlemi uygulanmamış ve indentasyon yükü uygulanmamış) ticari boyutlara sahip tavlannmış numuneler için şekil 4,29a'da ve benzer olarak fabrika üretim koşulları korunmuş (indentasyon yükü uygulanmamış) ısıtım temperlenmiş numuneler için ise şekil 4.29b'de verilmektedir.

Farklı ısıtım işlem uygulanmış ve üretim koşulları muhafaza edilmiş test numuneleri için yüzey basma gerilmesi-radyal çatlak adedi ilişkisini gösteren şekillerde doğrusal, pozitif yönde ve tavlannmış numuneler için zayıf, ısıtım temperlenmiş numuneler için ise orta düzey bir Pearson korelasyon ilişkisi görölmüştür.

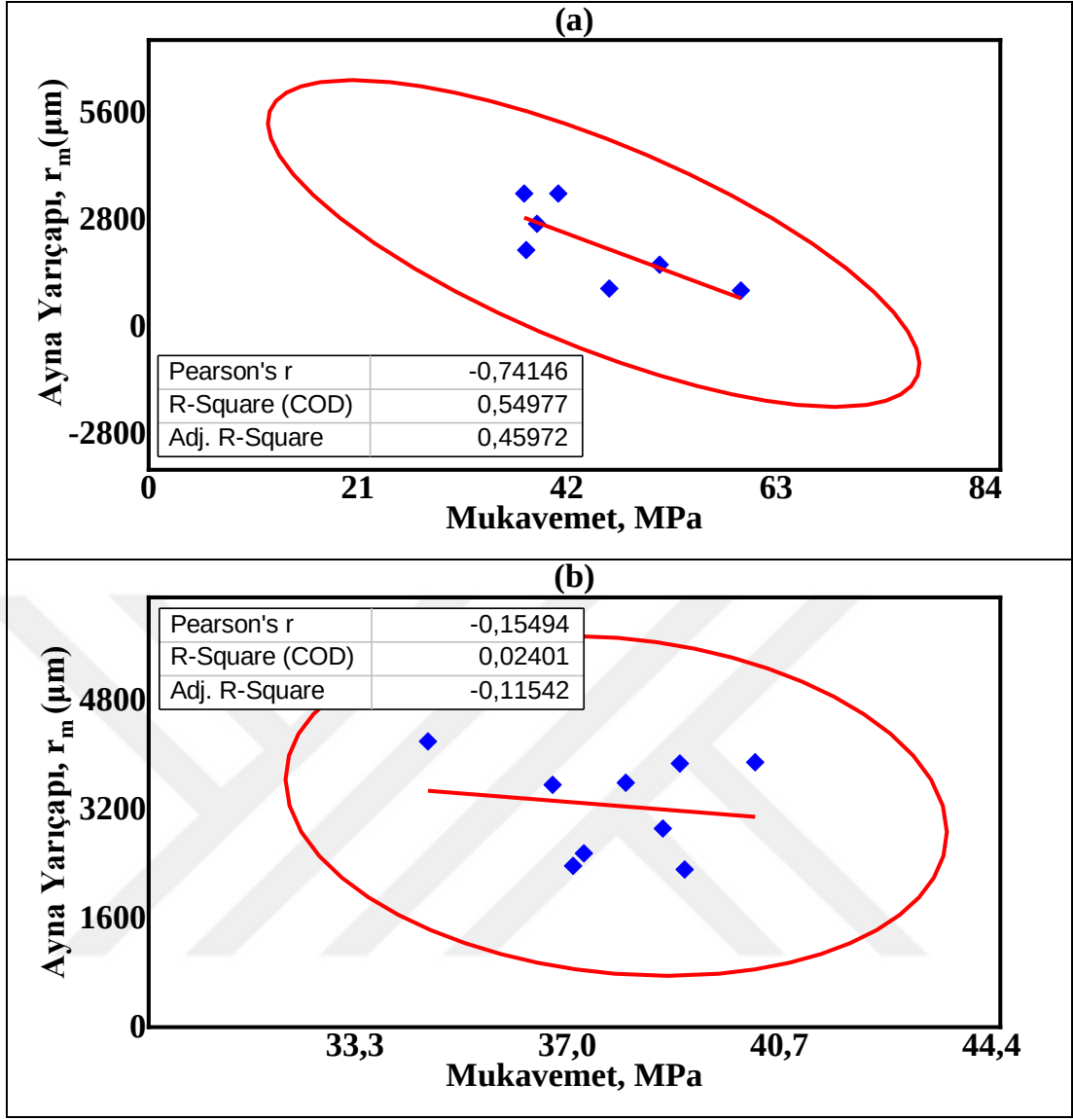
Tavlannmış test numuneleri ve ısıtım temperlenmiş test numuneleri arasındaki Pearson korelasyon katsayısı değerlerindeki küçük farklılığın üretim ve ürün beklentileri kapsamında artık gerilmelerin dar bir aralıkta tasarlanması ve ilave olarak deneysel ölçümlerdeki bir miktar sapma olasılığından kaynaklandığı düşünölmektedir. Yine tez kapsamında hasarsız olarak güvenlik camı beklentilerini sağlaması açısından yüzey basma artık gerilmelerinin önemi vurgulanmıştır.



Şekil 4.29: a) İndentasyon yükü uygulanmamış ticari boyutlara sahip tavllanmış numuneler ve b) İndentasyon yükü uygulanmamış ısıt temperlenmiş numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan yüzey basma gerilmesi-radyal çatlak adedi ilişkisi.

4.3.6.4. Ayna Yarıçapı r_m -Mukavemet İlişkisinin Pearson Korelasyon İstatistik Analiz Yöntemi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi

Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan ayna yarıçapı r_m -mukavemet ilişkisi, 9,81 N Vickers indantasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Şekil 4,30a'da ve benzer olarak 29,42 N Vickers indantasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Şekil 4,30b'de verilmektedir.



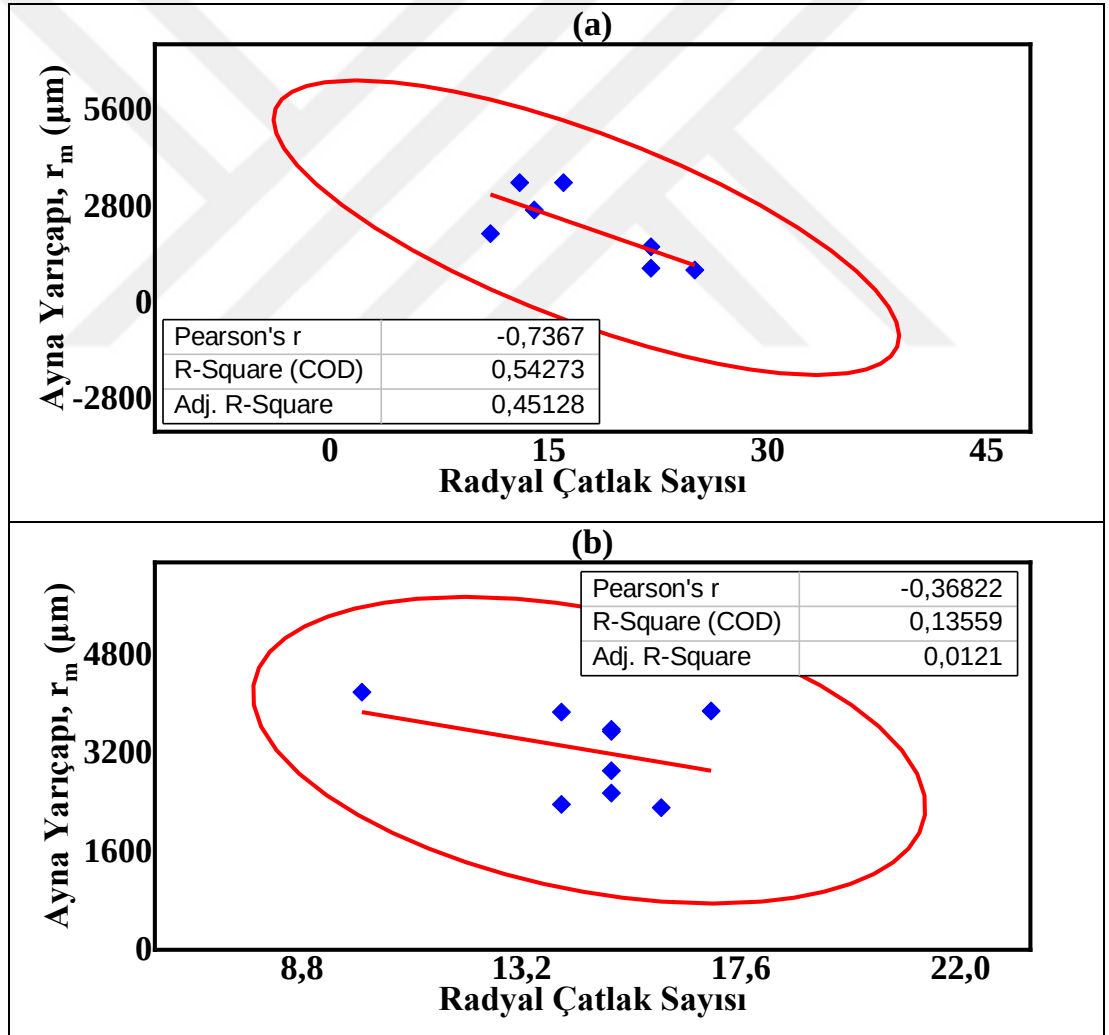
Şekil 4.30: a) 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için b) 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan ayna yarıçapı r_m -mukavemet ilişkisi.

Farklı indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış test numuneleri için ayna yarıçapı r_m -mukavemet ilişkisini gösteren şekillerin tamamında doğrusal, negatif yönde ve 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için güçlü, 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için ise zayıf düzeyde bir Pearson korelasyon ilişkisi görülmüştür. Bu durumun ayna yarıçapı değerlerinin mikron boyutlarında olması ve deneysel ölçüm sapma olasılığının yüksek olmasından ve 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış numunelerde 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış numunelere nazaran daha büyük bir kusur boyutuna sahip olma olasılığının etkisiyle

daha düşük yük aralığında kırılma meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.3.6.5. Ayna Yarıçapı r_m -Radyal Çatlak Adedi İlişkisinin Pearson Korelasyon İstatistik Analiz Yöntemi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi

Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan ayna yarıçapı r_m -radyal çatlak adedi ilişkisi, 9,81 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Şekil 4,31a'da ve benzer olarak 29,42 N Vickers indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için ise Şekil 4,31b'de verilmektedir.



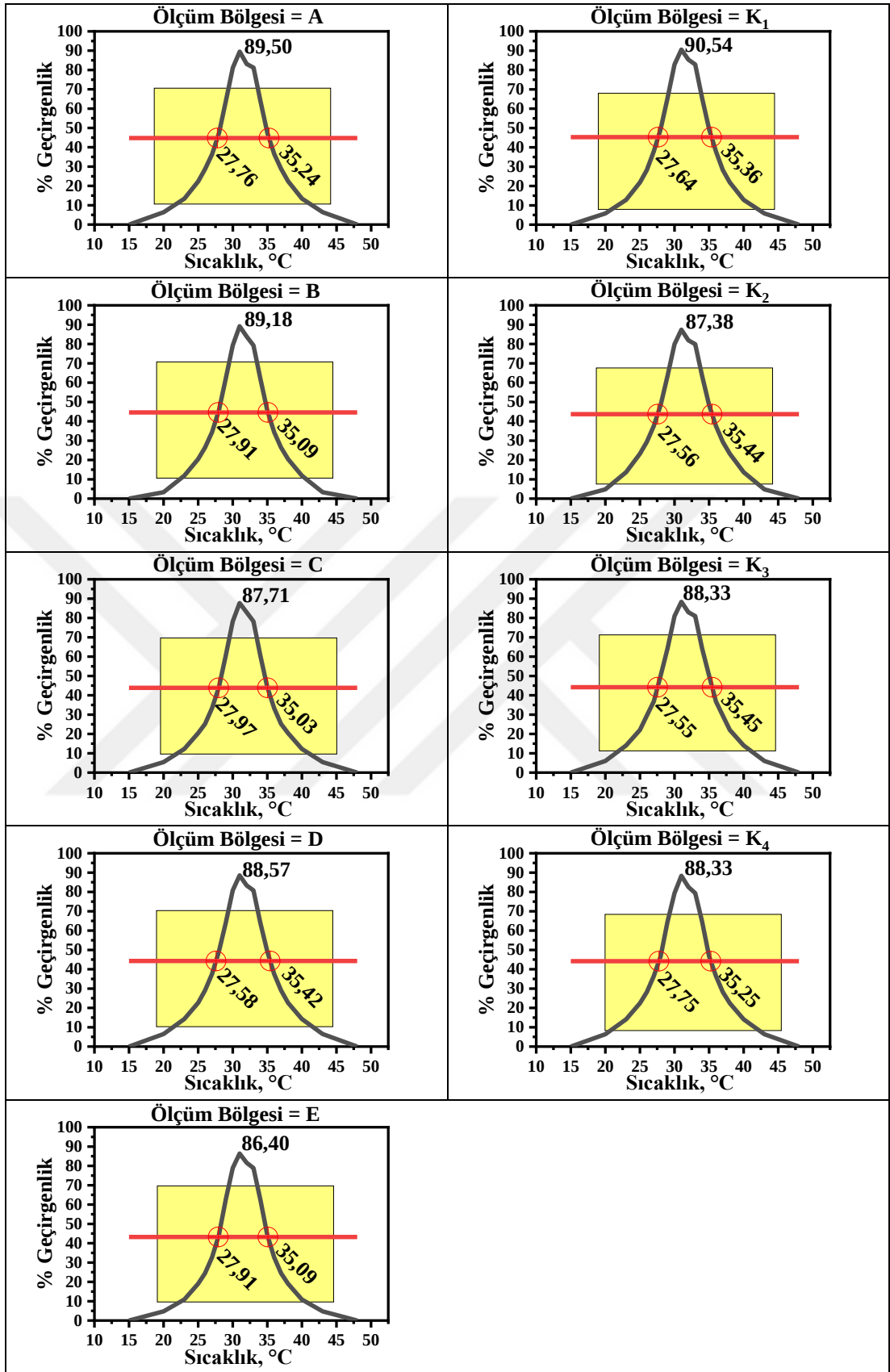
Şekil 4.31: a) 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için b) 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan ayna yarıçapı r_m -radyal çatlak adedi ilişkisi.

Farklı indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış test numuneleri için ayna yarıçapı r_m -radyal çatlak adedi ilişkisini gösteren şekillerin tamamında doğrusal, negatif yönde ve 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için güçlü, 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış standart boyutlara sahip tavllanmış numuneler için ise orta düzeyde bir Pearson korelasyon ilişkisi görülmüştür. Bu durumun ayna yarıçapı değerlerinin mikron boyutlarında olması ve deneysel ölçüm sapma olasılığının yüksek olmasından ve 29,42 N indentasyon yükü uygulanmış numunelerde 9,81 N indentasyon yükü uygulanmış numunelere nazaran daha az elastik enerjisi depolama olasılığının etkisiyle daha düşük yük aralığında kırılma meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

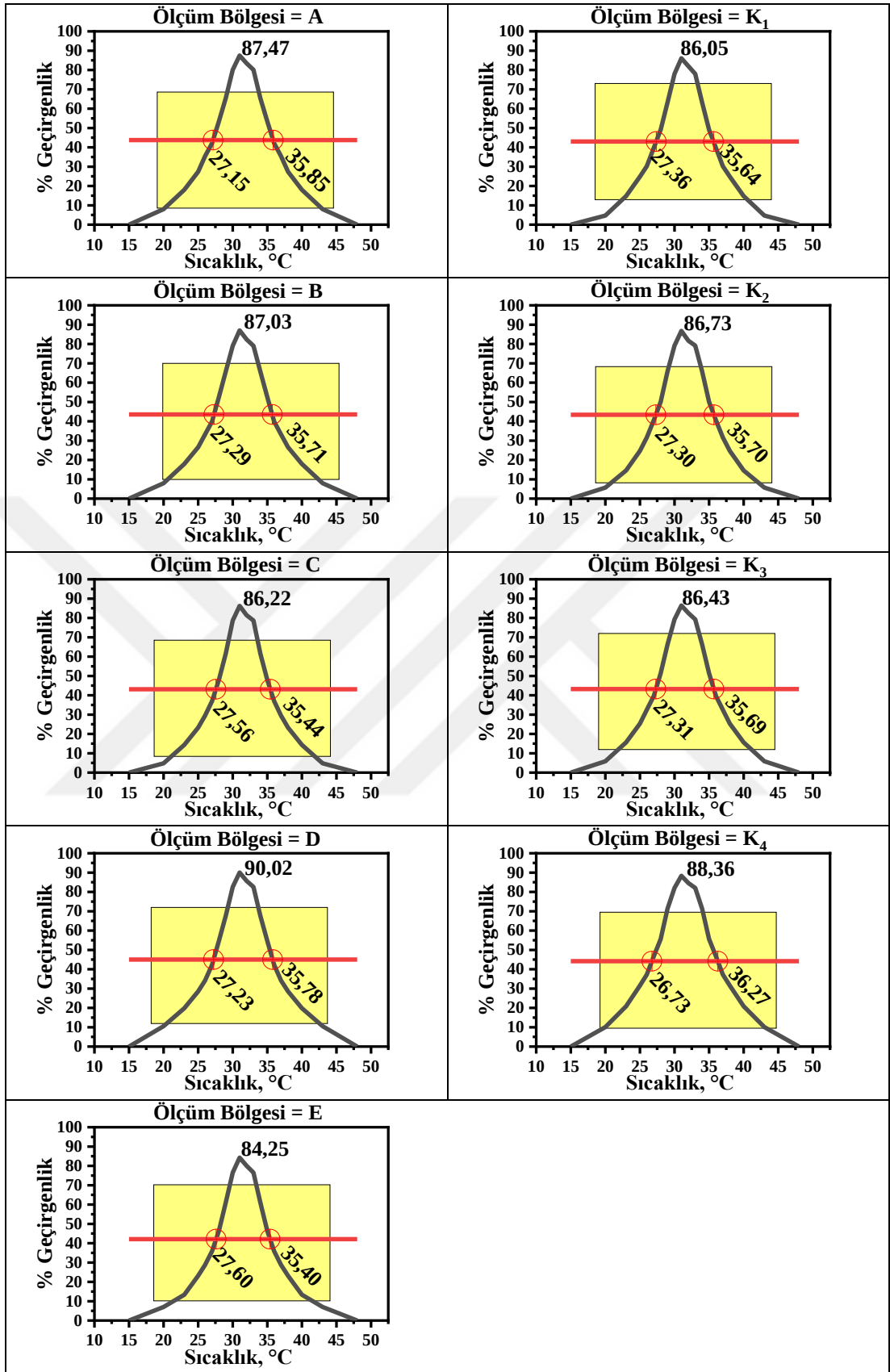
4.4. Christiansen-Shelyubskii Yöntemi Kullanılarak Homojenite Faktörü Değerlerinin Belirlenmesi

4.4.1. Tavllanmış ve Isıl Temperli Soda Kireç Silikat Düz Cam Numunelerinin Deneysel Ölçüm Sonuçları

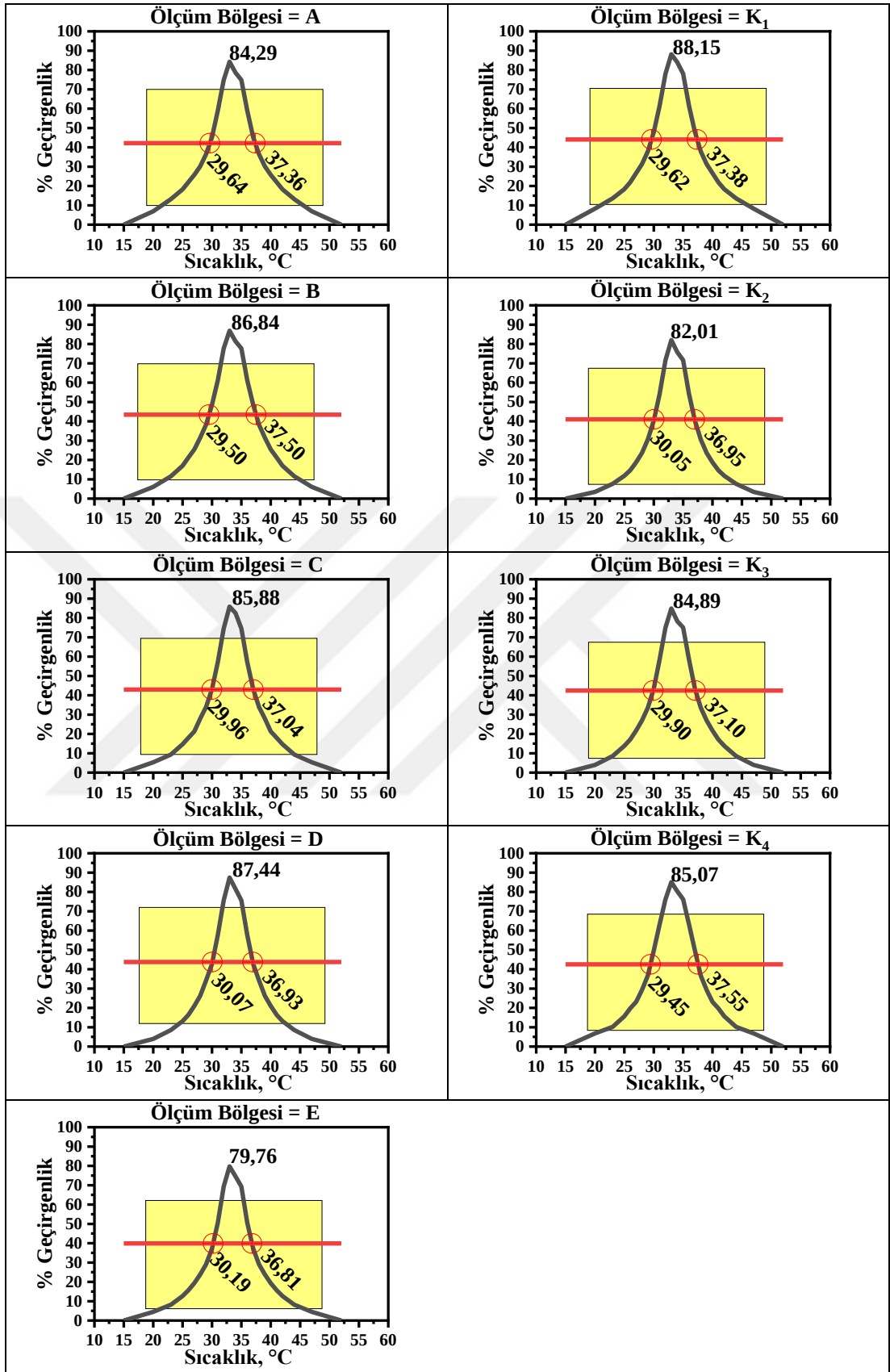
Artık gerilme profillerini belirlemek açısından ASTM C1048-12 standardına uygun olarak belirlenmiş olan 9 farklı bölge üzerinden test numunelerinin kırılması sonucunda alınan kırık parçalarının çeşitli numune hazırlama işlemlerinden geçirilerek homojenite test düzeneğinden elde edilmiş maksimum geçirgenlik yüzdesi τ_m ve yarı genişlik mesafesi h parametreleri tavllanmış test numunelerinden Numune 76* için Şekil 4.32 ile Numune 78* için ise Şekil 4.33 ile verilmekte olup benzer bir biçimde ısıtıl temperlenmiş test numunelerinden Numune 2* için Şekil 4.34 ile Numune 55* için ise Şekil 4.35 ile verilmektedir. Homojenite test numuneleri için verilmiş isimler daha önce bahsedildiği üzere merkez ölçüm bölgesi C üzerinden elde edilmiş yüzey basma artık gerilmesi değerlerinin ısıtıl işlem türüne göre kendi kategorilerindeki numuneler arasındaki sıralamalar baz alınarak belirlenmiştir. Yine hatırlatma olması açısından tavllanmış test numunelerine ait homojenite ölçüm bölgeleri üzerinden alınmış olan yüzey basma gerilmesi ve merkez çekme gerilmesi ölçümleri Tablo 4.2’de ve ısıtıl temperlenmiş test numunelerine ait olan yüzey basma gerilmesi ve merkez çekme gerilmesi ölçümleri ise Tablo 4.4 ile verilmiştir.



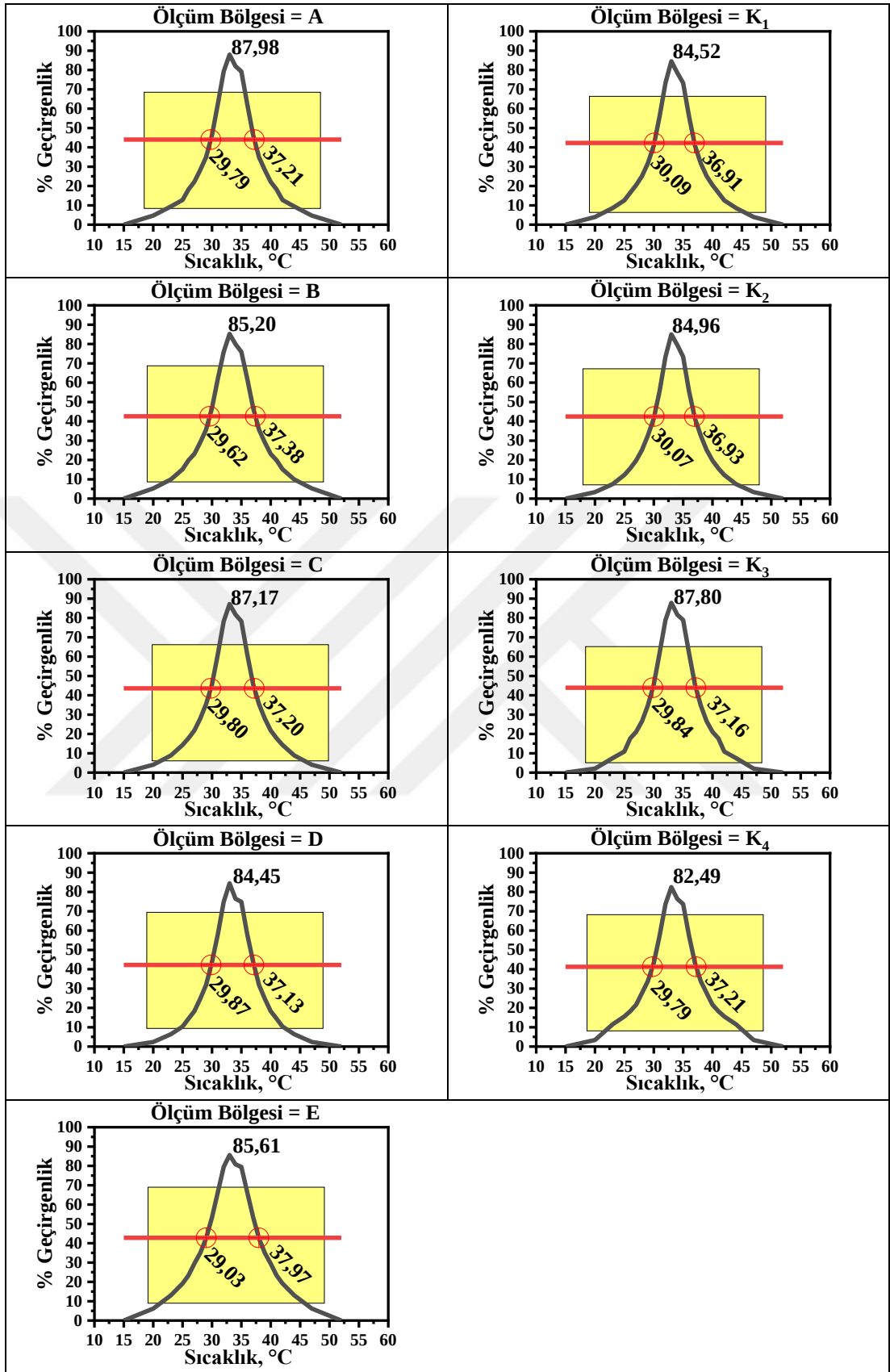
Şekil 4.32: Numune 76* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ bölgelerinden homojenite test düzeneği vasıtasıyla elde edilmiş maksimum geçirgenlik yüzdesi τ_m ve yarı genişlik mesafesi h parametrelerine ait değerler.



Şekil 4.33: Numune 78* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ bölgelerinden homojenite test düzeneği vasıtasıyla elde edilmiş maksimum geçirgenlik yüzdesi τ_m ve yarı genişlik mesafesi h parametrelerine ait değerler.



Şekil 4.34: Numune 2* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ bölgelerinden homojenite test düzeneği vasıtasıyla elde edilmiş maksimum geçirgenlik yüzdesi τ_m ve yarı genişlik mesafesi h parametrelerine ait değerler.

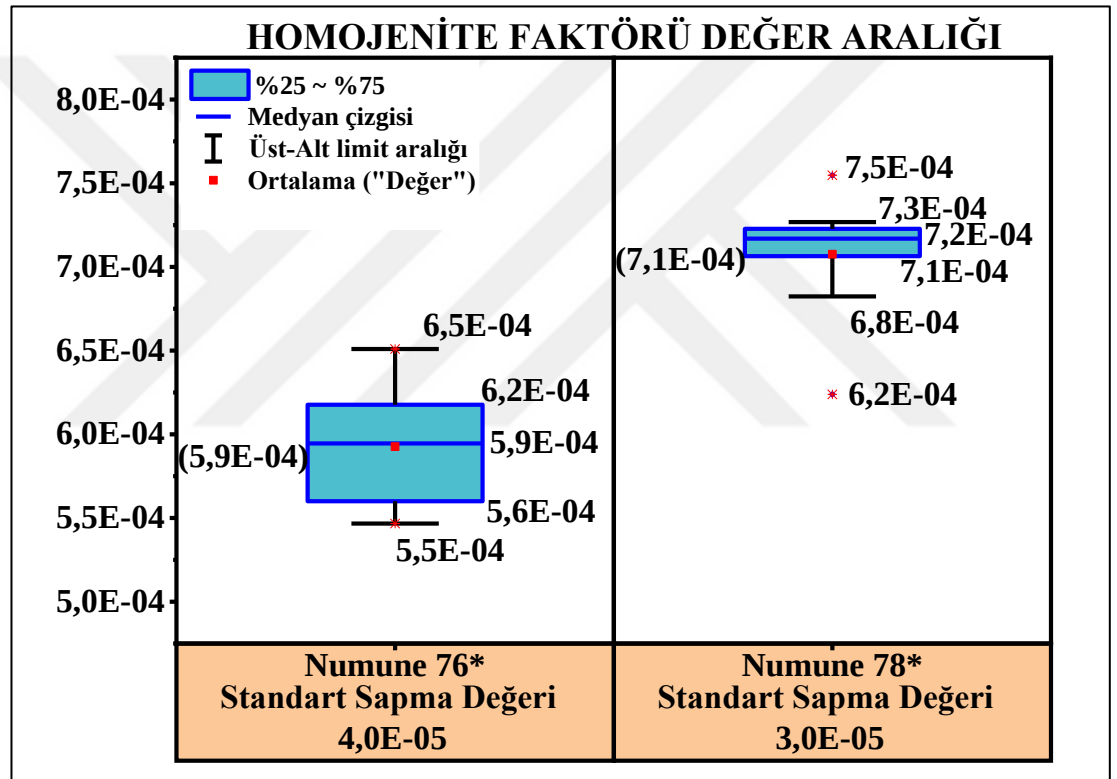


Şekil 4.35: Numune 55* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ bölgelerinden homojenite test düzeneği vasıtasıyla elde edilmiş maksimum geçirgenlik yüzdesi τ_m ve yarı genişlik mesafesi h parametrelerine ait değerler.

4.4.2. Gauss Eğrisi Üzerinde Geçirgenlik-Sıcaklık İlişkisiyle Homojenite Faktörü Değerlerinin Değerlendirilmesi

4.4.2.1. Tavlanmış Test Numunelerinin Deneysel Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yüzde geçirgenlik sıcaklık ilişkisini tanımlayan Gauss eğrilerinden homojenite faktörü dereceleri belirlenebilmektedir [81]. Dolayısıyla Numune 76* ve Numune 78* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ bölgelerinden denklem 2.22 vasıtası ile elde edilmiş homojenite faktörü sonuç değer aralıkları Şekil 4.36 ile verilmektedir.



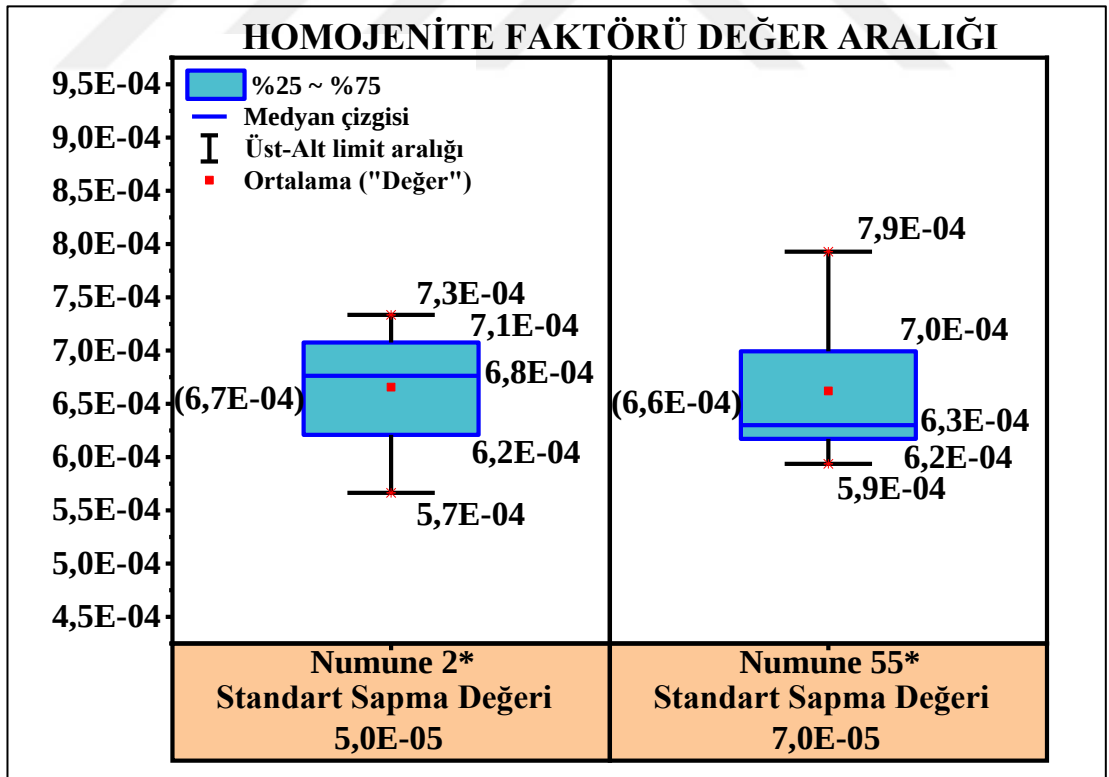
Şekil 4.36: Numune 76* ve Numune 78* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ ölçüm bölgelerinden elde edilmiş homojenite faktörü sonuç değer aralıkları.

Yüzde geçirgenlik sıcaklık ilişkisini tanımlayan Gauss eğrilerinden, Numune 76*'ın A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ ölçüm bölgelerinden elde edilmiş maksimum yüzde geçirgenlik τ_m değerlerinin %90,54-%86,40 aralığında ve yarı genişlik mesafesi h değerlerinin 7,90-7,06 °C aralığında olduğu görülmüştür. Benzer şekilde Numune 78*'ın ölçüm bölgelerinden elde edilmiş maksimum yüzde geçirgenlik τ_m değerlerinin %90,02-%84,25 aralığında ve yarı genişlik mesafesi h değerlerinin 9,53-7,80 °C

aralığında olduğu görülmüştür. Bu parametrelere bağıntılı olarak Şekil 4.36'dan denklem 2.22 vasıtasıyla elde edilmiş homojenlik derecelerinin Numune 76* için $5,5E-04$ ila $6,5E-04$ aralığında iken Numune 78* için ise istatistiki olarak tespit edilen uç değerler dahilinde $6,2E-04$ ila $7,5E-04$ aralığında olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Numune 78*'in Numune 76* 'ya nazaran nispeten daha yüksek maksimum yüzde geçirgenlik τ_m aralığına sahip olması ve yarı genişlik mesafesi değerlerinin genel olarak daha büyük değerler almasına bağıntılı olarak homojenlik derecelerinin daha yüksek olduğu (D ölçüm bölgesinden ölçülmüş ve istatistiki olarak uç değer olarak tespit edilen $6,2E-04$ hariç).görülmüştür. Literatürden homojenlik derecesinin yüksek olmasının daha inhomojen durum oluşturduğu bilinmektedir [81].

4.4.2.2. Isıl Temperlenmiş Test Numunelerinin Deneysel Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Numune 2* ve Numune 55* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ bölgelerinden elde edilmiş homojenite faktörü sonuç değer aralıkları Şekil 4.37 ile verilmektedir.

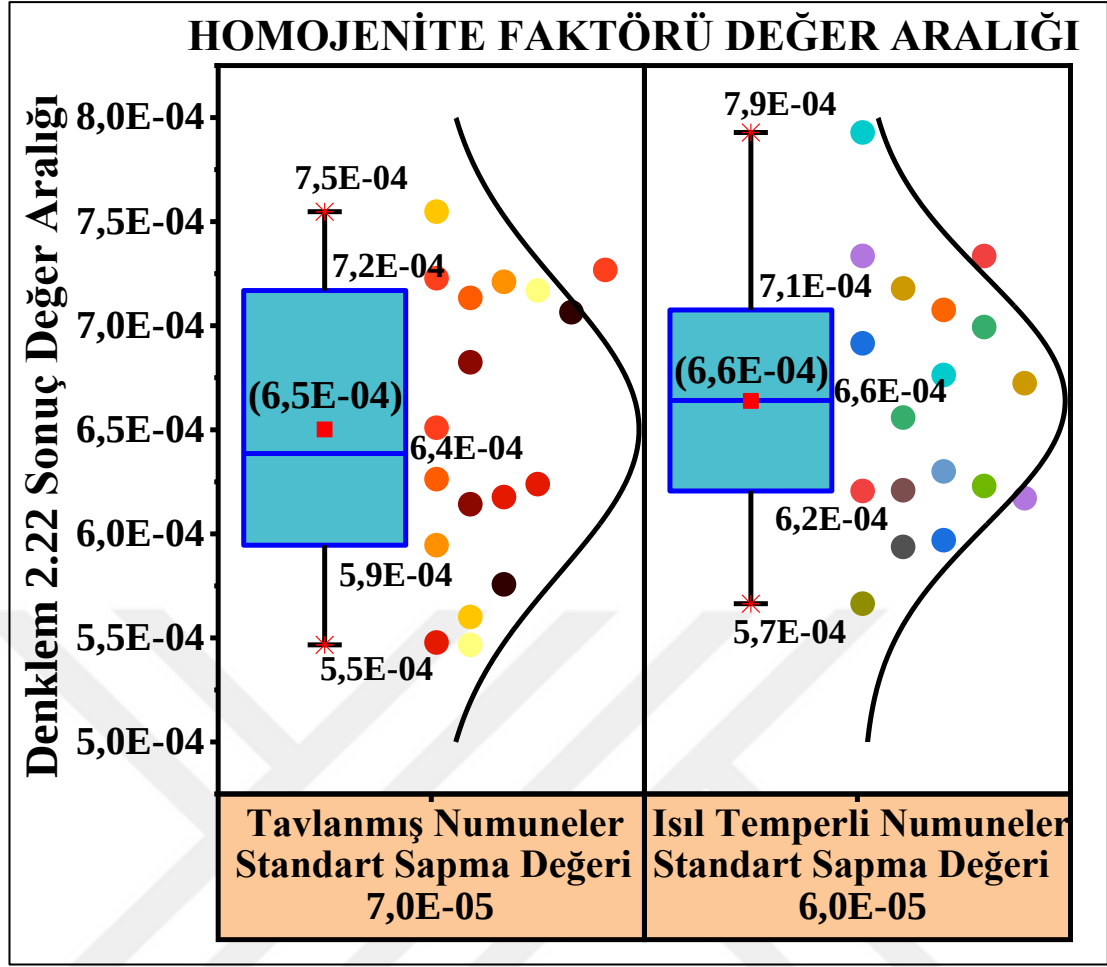


Şekil 4.37: Numune 2* ve Numune 55* için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ ölçüm bölgelerinden elde edilmiş homojenite faktörü sonuç değer aralıkları.

Yüzde geçirgenlik sıcaklık ilişkisini tanımlayan Gauss eğrilerinden, Numune 2*'ın A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ ölçüm bölgelerinden elde edilmiş maksimum yüzde geçirgenlik τ_m değerlerinin %88,15-%79,76 aralığında ve yarı genişlik mesafesi h değerlerinin 8,11-6,61 °C aralığında olduğu görülmüştür. Benzer şekilde Numune 55*'ın ölçüm bölgelerinden elde edilmiş maksimum yüzde geçirgenlik τ_m değerlerinin %87,98-%82,49 aralığında ve yarı genişlik mesafesi h değerlerinin 8,94-6,83 °C aralığında olduğu görülmüştür. Bu parametrelere bağıntılı olarak Şekil 4.37'den denklem 2.22 vasıtasıyla elde edilmiş homojenlik derecelerinin Numune 2* için 5,7E-04 ila 7,3E-04 aralığında iken Numune 55* için ise 5,9E-04 ila 7,9E-04 aralığında olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Numune 2*'ın ve Numune 55*'ın maksimum yüzde geçirgenlik τ_m aralık değerleri ile yarı genişlik mesafesi aralık değerlerinin genel olarak yakın değerler almasına bağıntılı olarak homojenlik derecelerinin de genel olarak benzer aralıklara sahip oldukları görülmüştür.

4.4.2.3. Isıl İşlem Farkının Deneysel Ölçüm Sonuçlarına Etkisinin Değerlendirilmesi

Daha önce de bahsedildiği üzere yüzdürme tekniği kullanılarak üretilen bir düz cam ürünü, proses ve ürün beklentileri kapsamında hammadde seçiminden şekillendirme ve sonrası aşamalara kadar her bir parametrenin optimizasyonunun bir sonucudur. Dolayısıyla kimyasal, fiziksel, ısı ve mekanik özellikleri etkileyen homojenlik durumu bu optimizasyon işleminin en önemli parçalarından bir tanesini oluşturmaktadır. Kimyasal olarak inhomejenlik durumu cam ürünlerinde artık gerilmeler oluşturmaktadır. Dolayısıyla tavlama işlemi için kimyasal ve ısı homojenlik en önemli parametrelerin başında gelmektedir. Yine benzer şekilde ısı temperleme işlemi içinde tavlama işlemi vasıtasıyla artık gerilmelerin giderilmesi kimyasal açıdan ve ısı homojenlik yüzeye beklenti kapsamında oluşturulan artık gerilmeler açısından oldukça önemlidir. Tavlanmış (Numune 76*, Numune 78*) numuneler ve ısı temperlenmiş (Numune 2*, Numune 55*) numunelere ait Christiansen-Shelyubskii homojenite yöntemi vasıtasıyla ölçülen homojenite faktörü derece aralıkları Şekil 4.38 ile verilmektedir.



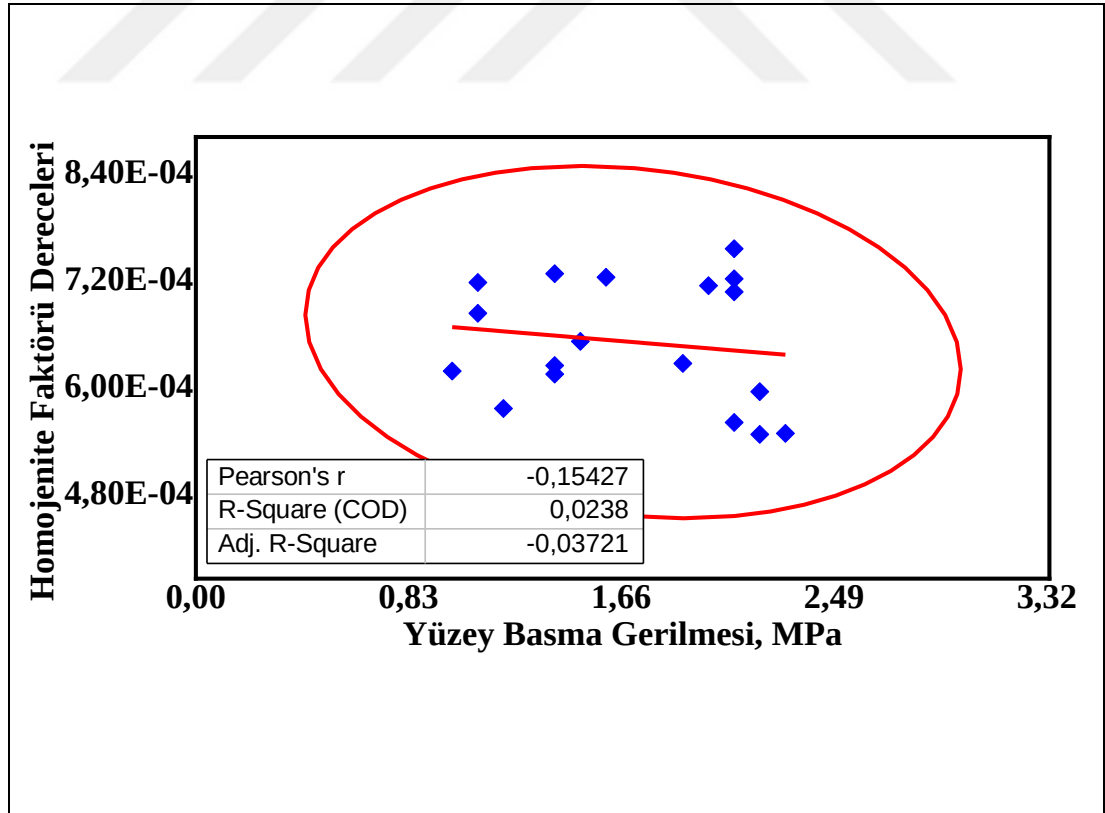
Şekil 4.38: Tavlanmış ve Isıl temperlenmiş test numuneri için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ ölçüm bölgelerinden elde edilmiş homojenite faktörü sonuç değer aralıkları.

Yüzde geçirgenlik sıcaklık ilişkisini tanımlayan Gauss eğrilerinden, Tavlanmış (Numune 76*, Numune 78*) numuneler için A, B, C, D, E, K₁, K₂, K₃ ve K₄ ölçüm bölgelerinden elde edilmiş maksimum yüzde geçirgenlik τ_m değerlerinin %90,54-%84,25 aralığında ve yarı genişlik mesafesi h değerlerinin 9,53-7,06 °C aralığında olduğu görülmüştür. Benzer şekilde ısı temperlenmiş (Numune 2*, Numune 55*) numuneler için ölçüm bölgelerinden elde edilmiş maksimum yüzde geçirgenlik τ_m değerlerinin %88,15-%79,76 aralığında ve yarı genişlik mesafesi h değerlerinin 8,94-6,61 °C aralığında olduğu görülmüştür. Bu parametrelere bağıntılı olarak Şekil 4.38'den denklem 2.22 vasıtasıyla elde edilmiş homojenlik derecelerinin Tavlanmış (Numune 76*, Numune 78*) numuneleri için 5,5E-04 ila 7,5E-04 aralığında iken ısı temperlenmiş (Numune 2*, Numune 55*) numuneler için ise 5,7E-04 ila 7,9E-04 aralığında olduğu görülmüştür. Isıl temperlenmiş (Numune 2*, Numune 55*) numuneleri için maksimum yüzde geçirgenlik τ_m aralık değerleri ile yarı genişlik

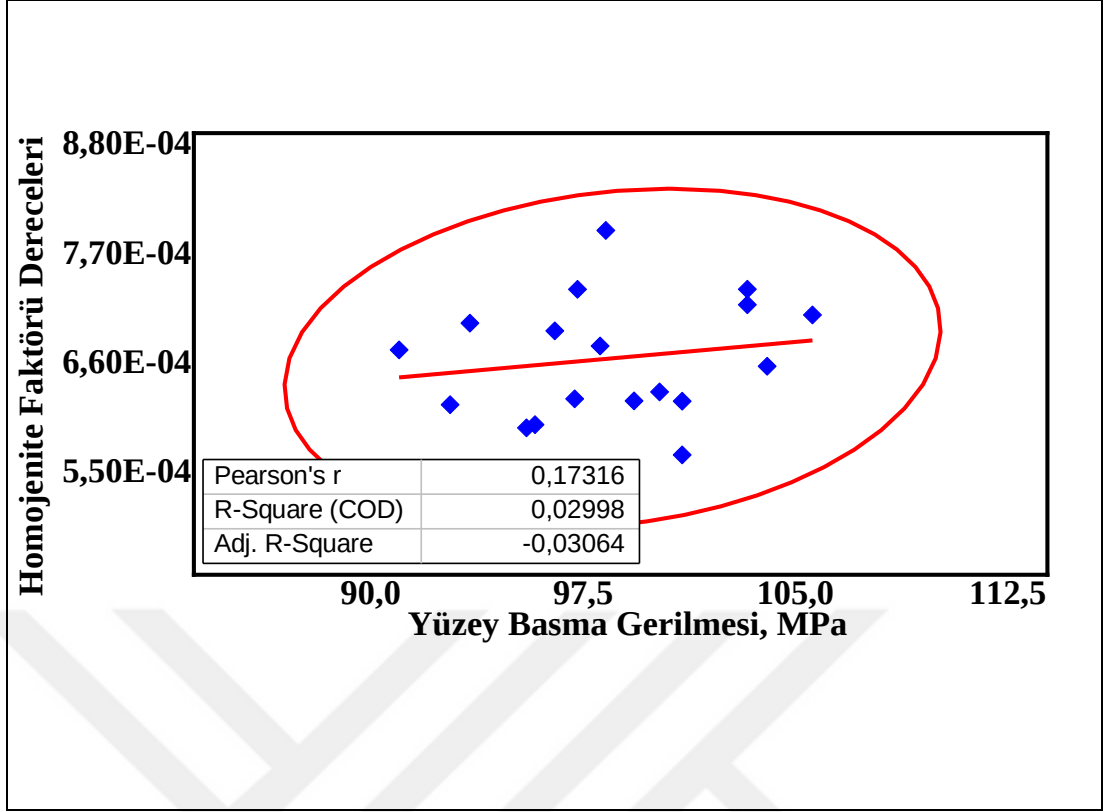
mesafesi aralık değerlerinin tavllanmış (Numune 76*, Numune 78*) numunelerine nazaran belirli bir oranda daha küçük değerler aldıkları görülmüştür. Dolayısıyla bu parametrelerin belirli bir oranda küçülmesine bağıntılı olarak homojenlik derecelerinin de genel olarak benzer aralıklara sahip oldukları görülmüştür.

4.4.2.4. Homojenite Faktörü Dereceleri-Yüzey Basma Gerilmesi İlişkisinin Pearson Korelasyon İstatistik Analiz Yöntemi Vasıtasıyla Değerlendirilmesi

Tez kapsamında Pearson korelasyon istatistik analizi vasıtasıyla belirlenmiş olan homojenite faktörü dereceleri-yüzey basma gerilmesi ilişkisi tavllanmış (Numune 76*, Numune 78*) numuneleri için Şekil 4.39 ile ısıt temperlenmiş (Numune 2*, Numune 55*) numuneleri için ise Şekil 4.40 ile verilmektedir. Tavllanmış (Numune 76*, Numune 78*) numuneleri için tez kapsamında belirlenmiş olan artık gerilme değerleri Tablo 4.2'den alınmıştır. Benzer olarak ısıt temperlenmiş (Numune 2*, Numune 55*) numuneleri için ise Tablo 4.4'ten alınmıştır.



Şekil 4.39: Tavllanmış (Numune 76*, Numune 78*) numuneleri için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan homojenite faktörü dereceleri-yüzey basma gerilmesi ilişkisi.



Şekil 4.40: Isıl temperlenmiş (Numune 2*, Numune 55*) numuneleri için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan homojenite faktörü dereceleri-yüzey basma gerilmesi ilişkisi.

Tavlanmış (Numune 76*, Numune 78*) numuneleri için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan homojenite faktörü dereceleri-yüzey basma gerilmesi ilişkisini gösteren Şekil 4.39'da doğrusal, negatif yönde ve zayıf bir Pearson korelasyon ilişkisi görülmüştür. Isıl temperlenmiş (Numune 2*, Numune 55*) numuneleri için Pearson korelasyon istatistik analiz yöntemi vasıtasıyla belirlenmiş olan homojenite faktörü dereceleri-yüzey basma gerilmesi ilişkisini gösteren Şekil 4.40'ta ise doğrusal, pozitif yönde ve zayıf bir Pearson korelasyon ilişkisi görülmüştür. Dolayısıyla deneysel çalışmaların hassasiyetine de bağımlı olarak yüzey basma gerilmesi aralıkları daha geniş olan tavlanmış ve ısı temperlenmiş numuneler üzerinde daha çok çalışma gerektirdiği düşünülmektedir.

5. GENEL SONUÇLAR VE YORUM

Tez kapsamında, Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. Şişecam Düzcamlar Mersin Fabrikası ortam koşullarında tavllanmış ve ısıt temperli olarak üretilen 500 mm uzunluğunda 400 mm genişliğinde ve 4 mm kalınlığında ticari ürün boyutlarına sahip soda kireç silikat camlarının bünyelerinde oluşan artık gerilmelerin deneysel yöntem ile ölçülmesi ve ölçülen artık gerilmelerin mekanik özelliklere etkilerinin irdelenmesi hedeflenmiştir.

Bu hedef doğrultusunda saçılan ışık fotoelastisite yöntemi kullanılarak cam bünyesinde oluşan artık gerilme profilleri ölçülmüştür. Vickers indentasyon yöntemi ile sertlik, kusur boyutu ve tokluk belirlenmiştir. 9,81 N ve 29,42 N Vickers indentasyon yüklerinin uygulandığı belirli sayıdaki tavllanmış ve ısıt temperli soda kireç silikat cam numuneleri ile birlikte üretildiği ortamın koşulları korunmuş olan tavllanmış ve ısıt temperli soda kireç silikat cam numunelerinin yük altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla halka üstü halka testi uygulanmıştır. Uygulanan halka üstü halka testi sonucu yük altında kırılan cam numunelerinin kırılma mukavemeti hesapları yapılmış, kırık analizleri incelenmiştir. Christiansen-Shelyubskii homojenite yöntemi ile belirlenen artık gerilme bölgelerine homojenite tayini yapılmış dolayısıyla artık gerilmeler ile cam homojenitesi arasındaki ilişki incelenmiştir.

Yapılan deneysel sonuçlara ait incelemeler neticesinde elde edilen genel sonuçlar uygulanan yöntemlere göre sıralı bir şekilde aşağıda verilmiştir.

- Ölçülen artık gerilme profillerinin genel sonuçları;

ASTM C1048-12 standardına göre tahribatsız bir yaklaşım olan saçılan ışık fotoelastisite yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen deneysel ölçümler neticesinde,

- Tez kapsamında kullanılan ısıt temperlenmiş numunelerin ölçülen yüzey basma gerilmesi değer aralıklarından emniyet cam sınıfı standartlarına sahip oldukları belirlenmiştir.

- Benzer şekilde tez kapsamında kullanılan tavllanmış numunelerin yüzey basma gerilmesi değer aralıklarından, tavlama sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklık değerinden homojen kontrollü bir şekilde gerilme sıcaklığının altına

soğutulduğu dolayısıyla istenilen optimum seviyede artık gerilme profilleri elde edildiği belirlenmiştir.

- Vickers indentasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiş sertlik, kusur boyutu ve kırılma tokluğuna ait genel sonuçlar;

–Numunelere uygulanan indentasyon yükünün niceliğinin arttırılması ile birlikte Vickers indentasyon izi diyagonal uzunluk değer aralıklarının yükseldiği ve dolayısıyla bağıntılı olarak sertlik değerlerinin ise azaldığı görülmüştür. Literatürde bu durum indentasyon boyut etkisi olarak isimlendirilmektedir. Buna karşın numunelerdeki ısıtma işlem farkının Vickers indentasyon izi diyagonal uzunluk ölçüm değerleri ve bağıntılı olarak Vickers indentasyon sertlik değerlerinin üzerinde bariz bir farklılık göstermediği belirlenmiştir.

–Muadil indentasyon yükleri altında, ısıtma temperlenmiş numunelerin indentasyon yüküne karşı göstermiş oldukları direncin tavlama numunelere nazaran daha yüksek olduğu ve indentasyon sonucu oluşan çatlak uzunluk değer aralıklarının daha küçük seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla ısıtma temperlenmiş numunelerde oluşan radyal çatlakların tavlama numunelerde oluşana nazaran yanal çatlaklarla daha güçlü bir etkileşim gösterdiği ve çivileme etkisine daha çok maruz kaldığı belirlenmiştir. Zamana ve ortam koşullarına bağıntılı olarak yapılan ölçümlerin sonucunda ise ortalama çatlak uzunluklarının ~10 büyüdüğü belirlenmiştir.

–Isıtma temperlenmiş numunelerde Vickers indentasyon yükü kaynaklı oluşan çatlak geometri karmaşası kullanılan tokluk denklemlerinde elde edilmiş olan sonuçlara bağıntılı olarak ortadan kaldırılmıştır. Dolayısıyla ısıtma temperlenmiş numunelerinde tavlama numunelere benzer şekilde Half-Penny geometrisi sergilediği belirlenmiştir. Yüzeylerinde bulunan artık gerilmelerin etkisini de hesaba katarak en iyi sonuçlar artık gerilmeli durumda Half-Penny geometrisi için kullanılan denklemden elde edilmiştir. Isıtma temperlenmiş numunelerdeki sapmaların çivileme etkisi nedeniyle daha yüksek oldukları düşünülmektedir.

- Halka üstü halka testi genel sonuçları;

–Uygulanan indentasyon yükünün ve niceliğinin etkisiyle ısıtma temperlenmiş ve tavlama numunelerin mukavemet değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

–Tavlanmış test numuneleri arasındaki boyut farkının yük altındaki etkisi karşılaştırıldığında ticari ürün boyutlarına sahip test numunelerinin mukavemet değerlerinin indentasyon yükü uygulanmamış durum için standart boyutlara sahip test numunelerine nazaran daha yüksek değerler aldıkları görülmüştür. Vickers indentasyon yükü uygulanarak yapay kusurların oluşturulduğu durumda ise indentasyon yükü ve niceliğine bağıntılı olarak kusur geometrileri ve boyutlarının sınırlandırılması ile birlikte benzer mukavemet değer aralıklarına sahip oldukları belirlenmiştir.

–Boyut etkisinden bağımsız olarak ticari boyutlara sahip ısıt temperlenmiş ve tavlanmış numuneler indentasyon yükü uygulanmamış durum için karşılaştırıldığında ise mukavemet değerlerinin benzer çıkmasının nedeni belirlenememiştir. Dolayısıyla bu geometrilere sahip ve indentasyon yükü uygulanmamış tavlanmış ve ısıt temperlenmiş numuneler için daha fazla çalışma yapılması gerektiği düşünülmektedir. Isıt temperlenmiş test numunelerinin indentasyon yüküne karşı direncinin tavlanmış test numunelerine nazaran daha yüksek olması ve indentasyon sonucu oluşan çatlak uzunluklarının daha kısa olmasının neticesinde indentasyon yükü ve niceliğine bağıntılı olarak ısıt temperlenmiş numunelerin mukavemet değerlerinin tavlanmış numunelere nazaran daha yüksek değer aralıklarında oldukları belirlenmiştir.

–Vickers indentasyon yüküne ve niceliğine bağıntılı olarak hem tavlanmış (standart ve ticari boyutlara sahip) numunelerde hem de ısıt temperlenmiş numunelerde radyal çatlak adedi değerlerinde azalma olduğu belirlenmiştir. Radyal çatlak adedi değerlerindeki bu azalma durumunun indentasyon yüküne maruz kalan numunelerin daha düşük yüklerde kırılması ve bağıntılı olarak daha az elastik enerji depolaması neticesinde oluştuğu düşünülmektedir. İndentasyon yükünden bağımsız olarak ısıt temperlenmiş numunelerin homojen boyutta küçük parçalar oluşturmak için yeterince elastik gerilme enerjisi depoladıkları dolayısıyla tavlanmış numunelere nazaran daha çok parçaya ayrıldıkları belirlenmiştir.

–Weibull mukavemeti σ_0 değerlerinin uygulanan Vickers indentasyon yüküne ve niceliğine bağıntılı olarak azaldığı dolayısıyla üretim kaynaklı oluşan

kusurlara nazaran temas kaynaklı kusurların Weibull mukavemeti σ_0 değerlerini oldukça azalttığı belirlenmiştir.

–Tavlanmış numunelerde literatürde verilmiş olan değer aralığının içerisinde ısıt temperlenmiş numunelerde ise bu değer aralığından daha iyi bir Weibull modülüsü m değeri elde edilmiştir. Farklı parametrelere sahip test numunelerine Vickers indentasyon yükü uygulanarak yapay kusurların oluşturulduğu durumda ise kusur geometrileri ve boyutlarının sınırlandırılmasının bir sonucu olarak Weibull modülüsü m değerlerinin büyüdüğü belirlenmiştir.

- Christiansen-Shelyubskii homojenite faktörü derecelerinin genel sonuçları

–Isıt temperlenmiş numuneler için maksimum yüzde geçirgenlik τ_m aralık değerleri ile yarı genişlik mesafesi aralık değerlerinin tavlanmış numunelere nazaran belirli bir oranda daha küçük değerler aldıkları belirlenmiştir. Dolayısıyla bu parametrelerin belirli bir oranda küçülmesine bağıntılı olarak homojenlik derecelerinin de genel olarak benzer aralıklara sahip oldukları belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Hand R. J., (2021), "Soda-Lime-Silica Glasses". In: M. Pomeroy, Editor-in-Chief, "Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses", Elsevier, 2, 483–495.
- [2] Varshneya A. K., Mauro J. C., (2019), "Fundamentals of the glassy state". In: "Fundamentals of Inorganic Glasses", Third Edition, Elsevier, 19–35.
- [3] Dhir R. K., Brito J. De., Ghataora G. S., Lye C. Q., (2018), "Introduction". In: "Sustainable Construction Materials: Glass Cullet", Elsevier, 1–14.
- [4] Dhir R. K., Brito J. De., Ghataora G. S., Lye C. Q., (2018), "Production and Properties of Glass Cullet". In: "Sustainable Construction Materials: Glass Cullet", Elsevier, 35–96.
- [5] Shelby J. E., (2005), "Introduction". In: "Introduction to Glass Science and Technology", Second Edition, The Royal Society of Chemistry, 1–6.
- [6] Bragg W., (2002), "The Glassy State". In: K. J. Rao, Editor, "Structural Chemistry of Glasses", Elsevier, 13–76.
- [7] Web 1, (2022), <https://www.e-education.psu.edu/matse81/node/2154>, (Erişim Tarihi: 22/02/2022).
- [8] Hubert M., (2019), "Glass Processing: Industrial Glass Processing and Fabrication". In: J. D. Musgraves, J. Hu, L. Calvez, Editors, "Springer Handbook of Glass", Springer, Cham, 1195–1231.
- [9] Smrček A., (2010), "Soda-Lime-Silica Glasses: Compositions of Industrial Glasses". In: F. T. Wallenberger, P. A. Bingham, Editors, "Fiberglass and Glass Technology", Springer US, 229–266.
- [10] Martin J. W., (2006), "Part II: Structure–Property Relationships: Glasses and Ceramics". In: "Materials for Engineering", Third Edition, Elsevier, 133–158.
- [11] Hasanuzzaman M., Rafferty A., Sajjia M., Olabi A.G., (2016), "Properties of Glass Materials". In: "Reference Module in Materials Science and Materials Engineering", Elsevier, 1–12.
- [12] Karazi S. M., Ahad I. U., Benyounis K. Y., (2017), "Laser Micromachining for Transparent Materials". In: "Reference Module in Materials Science and Materials Engineering", Elsevier, 1–22.
- [13] Schott, (2014), "Types of Technical Glasses". In: Technical Glasses Physical and Technical Properties, The Otto Schott Research Center in Mainz, 6–7.

- [14] Ashby M. F., (2013), “Material profiles”. In: “Materials and the Environment Eco-informed Material Choice”, Second Edition, Elsevier, 459–595.
- [15] Scalet B. M., Muñoz M. G., Queirolo A. S., (2010), “General Information”. In: S. Roudier, L. Delgado, Editors, “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass Industrial Emissions Directive 2010/75/EU”, European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB) at the European Commission’s Joint Research Centre – Institute for Prospective Technological Studies (IPTS), 1–38.
- [16] Web 2, (2022), <https://plants.glassglobal.com/login/>, (Erişim Tarihi: 22/02/2022).
- [17] Hubert M., (2015), “Lecture 1 : Commercial glass compositions, properties and technical considerations – Raw materials”, IMI-NFG Course on Processing in Glass, 1–87.
- [18] Maraghechi H., Rajabipour F., Pantano C. G., Burgos W. D., (2016), “Effect of calcium on dissolution and precipitation reactions of amorphous silica at high alkalinity”, In: “Cement and Concrete Research”, Elsevier, 87, 1–13.
- [19] Web 3, (2022), <https://www.koppglass.com/blog/3-common-glass-types-properties-and-applications>, (Erişim Tarihi: 02/02/2022).
- [20] Scalet B. M., Muñoz M. G., Queirolo A. S., (2010), “Applied Processes And Techniques”. In: S. Roudier, L. Delgado, Editors, “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass Industrial Emissions Directive 2010/75/EU”, European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB) at the European Commission’s Joint Research Centre – Institute for Prospective Technological Studies (IPTS), 39–80.
- [21] Lebullenger R., Mear F. O., (2019), “Glass Processing: Glass Recycling”. In: J.D. Musgraves, J. Hu, L. Calvez , Editors, “Springer Handbook of Glass”, 1355–1377.
- [22] Kumar R., Buckett J., (2017), “Float Glass ☆”. In: “Reference Module in Materials Science and Materials Engineering”, Elsevier, 1–8.
- [23] Pilkington L. A. B., (1969), “The Float Glass Process”, Royal Society, 314, 1516, 1-25.
- [24] Nascimento M. L. F., (2014), “Brief history of the flat glass patent – Sixty years of the float process”, In: J. List, Editor-in Chief, “World Patent Information”, Elsevier, 38, 50–56.
- [25] Bingham P. A., (2010), “Soda-Lime-Silica Glasses: Design of New Energy-Friendly Compositions”, In: F. T. Wallenberger, P. A. Bingham, Editors, “Fiberglass and Glass Technology”, Springer US, 267–351.

- [26] Web 4, (2022), <https://shyamglass.com/float-glass/>, (Erişim Tarihi: 19/03/2022).
- [27] Varshneya A. K., Mauro J. C., (2019), “Strength and toughness”. In: “Fundamentals of Inorganic Glasses”, Third Edition, Elsevier, 487–535.
- [28] Guin J. P., Gueguen Y., (2019), “Fundamentals of Glass and the Glassy State: Mechanical Properties of Glass”. In: J.D. Musgraves, J. Hu, L. Calvez, Editors, “Springer Handbook of Glass”, Springer, Cham, 227–271.
- [29] Pepi J. W., (2014), “Front Matter”. In: “Strength Properties of Glass and Ceramics”, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), xi–xii.
- [30] Le Bourhis E., (2014), “Mechanical Strength of Glass”. In: “Glass: Mechanics and Technology”, Second Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 139–161.
- [31] Gdoutos E. E., (2020), “Introduction”. In: G. M. Gladwell, J. R. Barber, A. Klarbring, Editors, “Fracture Mechanics An Introduction”, Third Edition, Springer Nature Switzerland AG 2020, 1–14.
- [32] Carpinteri A., (2021), “Part I From Stress Singularity to Strain Energy Release Rate: Local Versus Global Approach to Fracture Mechanics: Stress Concentration at the Notch Root”. In: A. Gladwell, G. M. L Barber, J. R. Klarbring, Editors, “Fracture and Complexity One Century since Griffith’s Milestone”, Springer Nature B.V. 2021, 3–45.
- [33] Lawn B. R., (1993), “The Griffith concept”. In: E. A. Davis, I. M. Ward, Editors, “Fracture of Brittle Solids”, Second Edition, Cambridge University Press, 1–15.
- [34] Lawn B. R., (1993) “Continuum aspects of crack propagation I: linear elastic crack-tip field”. In: E. A. Davis, I. M. Ward, Editors, “Fracture of Brittle Solids”, Second Edition, Cambridge University Press, 16–50.
- [35] Pepi J. W., (2014), “Crack Basics”. In: “Strength Properties of Glass and Ceramics”, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 1–9.
- [36] Gdoutos E. E., (2020), “Linear Elastic Stress Field in Cracked Bodies”. In: G. M. Gladwell, J. R. Barber, A. Klarbring, Editors, “Fracture Mechanics An Introduction”, Third Edition, Springer Nature Switzerland AG 2020, 15–63.
- [37] Carpinteri A., (2021), “Part I From Stress Singularity to Strain Energy Release Rate: Local Versus Global Approach to Fracture Mechanics: Energy Approach to Fracture Mechanics”. In: A. Gladwell, G. M. L Barber, J. R. Klarbring, Editors, “Fracture and Complexity One Century since Griffith’s Milestone”, Springer Nature B.V. 2021, 143–177.

- [38] Pour-Moghaddam N., (2020), “Glass Properties and Refinement Processes”. In: “On the Fracture Behaviour and the Fracture Pattern Morphology of Tempered Soda-Lime Glass”, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020, 7–15.
- [39] Yoshida S., (2019), “Indentation deformation and cracking in oxide glass – toward understanding of crack nucleation”, *Journal of Non-Crystalline Solids*: X. 1.
- [40] To T., Célarié F., Roux-Langlois C., Bazin A., Gueguen Y., Orain H., Le Fur M., Burgaud V., Rouxel T., (2018), “Fracture toughness, fracture energy and slow crack growth of glass as investigated by the Single-Edge Precracked Beam (SEPB) and Chevron-Notched Beam (CNB) methods”, *Acta Materialia*, 146.
- [41] Januchta K., Smedskjaer M. M., (2019), “Indentation deformation in oxide glasses: Quantification, structural changes, and relation to cracking”, *Journal of Non-Crystalline Solids*: X. 1, 100007, 1–20.
- [42] Lawn B., (1993), “Indentation fracture”. In: E. A. Davis, I. M. Ward, Editors, “Fracture of Brittle Solids”, Cambridge University Press, 249–306.
- [43] Aben H., Guillemet C., (1993), “Residual Stresses in Glass”. In: “Photoelasticity of Glass”, Springer Berlin Heidelberg, 18–50.
- [44] Le Bourhis E., (2014), “Contact Resistance of Glass”. In: “Glass: Mechanics and Technology”, Second Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 165–197.
- [45] Gross T. M., (2012), “Deformation and cracking behavior of glasses indented with diamond tips of various sharpness”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358, 3445–3452.
- [46] Ziemath E., Herrmann P. S., (2000), “Densification and residual stresses induced in glass surfaces by Vickers indentations”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 273, 19–24.
- [47] Sheth N., Howzen A., Campbell A., Spengler S., Liu H., Pantano C. G., Kim S. H., (2019), “Effects of tempering and heat strengthening on hardness, indentation fracture resistance, and wear of soda lime float glass”, *International Journal of Applied Glass Science*, 10, 431–440.
- [48] Gong J., Guan W. Si, Z., (2001), “Effect of load-dependence of hardness on indentation toughness determination for soda-lime glass”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 282, 325–328.
- [49] Gong J., Chen Y., Li C., (2001), “Statistical analysis of fracture toughness of soda-lime glass determined by indentation”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 279, 219–223.

- [50] Anunmana C., Anusavice K. J., Mecholsky Jr J. J., (2009), “Residual stress in glass: Indentation crack and fractography approaches”, *Dental Materials*, 25 1453–1458.
- [51] Sglavo V. M., Green D. J., (1996), “The sub-critical indentation fracture process in soda-lime-silica glass”, *Engineering Fracture Mechanics*, 55, 35–46.
- [52] Li H., (2016), “Strength of Glass and Glass Fibers”. In: S. K. Sundaram, Editor, “76th Conference on Glass Problems”, The American Ceramic Society, 1–15.
- [53] Roach D. H., Cooper A. R., (1985), “Effect of Contact Residual Stress Relaxation on Fracture Strength of Indented Soda-Lime Glass”, *Journal of the American Ceramic Society*, 68, 632–636.
- [54] Pepi J. W., (2014), “Strength Formulation”. In: “Strength Properties of Glass and Ceramics”, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 11–23.
- [55] Pepi J. W., (2014), “Strength with Residual Stress”. In: “Strength Properties of Glass and Ceramics”, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 25–31.
- [56] Fuller E. R., Lawn B. R., Cook R. F., (1983), “Theory of Fatigue for Brittle Flaws Originating from Residual Stress Concentrations”, *Journal of the American Ceramic Society*, 66, 314–321.
- [57] Brambilla G., Payne D. N., (2009), “The Ultimate Strength of Glass Silica Nanowires”, *Nano Letters*, 9, 831–835.
- [58] Pepi J. W., (2014), “Inert Strength Determination”. In: “Strength Properties of Glass and Ceramics”, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 85–92.
- [59] ASTM, (2003), Standard Test Method for Monotonic Equibiaxial Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature, C1499-03, American Society for Testing and Materials, 1–12.
- [60] Pepi J. W., (2014), “Weibull Analysis”. In: “Strength Properties of Glass and Ceramics”, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 71–83.
- [61] John B. Wachtman M. J. M., Roger Cannon W., (2009), “Statistical treatment of strength”. In: “Mechanical Properties of Ceramics”, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 119–149.
- [62] William D. Callister J. D. G. R., (2014), “Structures and Properties of Ceramics”. In: “Materials Science and Engineering An Introduction”, Ninth Edition, Wiley Global Education US, 467–509.

- [63] Quinn G. D., (2020), "Fracture Surface Examination". In: "Fractography of Ceramics and Glasses", Third Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg,.
- [64] Bradt R. C., (2011), "The Fractography and Crack Patterns of Broken Glass", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 11, 79–96.
- [65] John B. Wachtman M. J. M., Roger Cannon W., (2009), "Fractography". In: "Mechanical Properties of Ceramics", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 317–331.
- [66] Lindqvist M., Lebet J. P., (2014), "Strength of glass determined by the relation of the critical flaw to the fracture mirror", *Engineering Fracture Mechanics*, 119 43–52.
- [67] Quinn G. D., Division C., (2008), "Fractography of Brittle Materials : Analysis of Fractures in Ceramics and Glasses", John Wiley & Sons, Ltd., 22, 21–24.
- [68] Coulson S., (2013), "Overview (Glass)". In: "Encyclopedia of Forensic Sciences", Second Edition, Elsevier, 222–226.
- [69] Quinn G. D., (2020), "General Examination and Fracture Patterns". In: "Fractography of Ceramics and Glasses" Third Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- [70] Ma L., Dugnani R., Zednik R., (2018), "Quantifying the Accuracy of Fractographic Strength Estimates in Silicate Glasses", *Journal of the European Ceramic Society*. 38, 3643–3649.
- [71] Quinn G. D., (2020), "Tools and Equipment". In: "Fractography of Ceramics and Glasses", Third Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- [72] Quinn G. D., (2020), "Quantitative Analysis". In: *Fractography of Ceramics and Glasses*, Third Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- [73] Varshneya A. K., Mauro J. C., (2019), "Thermal expansion of glass". In: "Fundamentals of Inorganic Glasses", Third Edition, Elsevier, 253–271.
- [74] Shelby J. E., (2005), "Density and Thermal Expansion". In: "Introduction to Glass Science and Technology", Second Edition, The Royal Society of Chemistry, 138–162
- [75] Le Bourhis E., (2014), "Glass Rheology". In: "Glass: Mechanics and Technology", Second Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 85–137.

- [76] Shelby J. E., (2005), "Viscosity of Glass Forming Melts". In: "Introduction to Glass Science and Technology", Second Edition, The Royal Society of Chemistry, 111–137.
- [77] Brow R. K., (2008), "Physical Properties of Glass", IMI-NFG Course on Processing in Glass, 1–63.
- [78] Varshneya A. K., Mauro J. C., (2019), "The viscosity of glass". In: "Fundamentals of Inorganic Glasses", Third Edition, Elsevier, 215–251.
- [79] William D. Callister J., Rethwisch D. G., (2015), "Synthesis, Fabrication, and Processing of Materials". In: W. Anderson, Editor, "Fundamentals of Materials Science and Engineering An Integrated Approach", Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc., 617–663.
- [80] Braetsch V., Frischat G. H., (1988), "Shelyubskii Method of Studying Phase Separation in the System $\text{Li}_2\text{O-SiO}_2$ ", Journal of the American Ceramic Society, 71, C-376-C–377.
- [81] Yildiz T., Günay V., Ariburnu D., (2015), "Determination of the homogeneity factors of industrial container glasses by the Christiansen - Shelyubskii method", Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 50, 397–403.
- [82] Afghan M., Cable M., (1980), "Estimation of the homogeneity of glass by the christiansen filter method", Journal of Non-Crystalline Solids, 38–39, 3–8.
- [83] Kang S., Day D. E., Stoffer J.O., (1997), "Measurement of the refractive index of glass fibers by the Christiansen-Shelyubskii method", Journal of Non-Crystalline Solids, 220, 299–308.
- [84] Hubert M., Lezzi P. J., (2021), "Glass: Annealing and Tempering". In: M. Pomeroy, Editor-in-Chief, "Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses", Elsevier, 2, 623–631.
- [85] Hubert M., (2015), "Lecture 9: Annealing and Tempering", IMI-NFG Course on Processing in Glass, 1–72.
- [86] Narayanaswamy O. S., (1986), "Annealing of Glass". In: "Glass: Science and Technology: Viscosity and Relaxation", ACADEMIC PRESS, INC., 3, 275–318.
- [87] Schott, (2019), "TIE-27 : Stress in optical glass". In: "Technical Information Advanced Optics", Schott North America, Inc., 1–13.
- [88] Talimian A., Sglavo V. M., (2021), "Glass: Chemical and Thermal Strengthening". In: M. Pomeroy, Editor-in-Chief, "Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses", Elsevier, 2, 632–646.

- [89] Ernsberger F. M., (1980), “Techniques of Strengthening Glasses”. In: “Glass: Science and Technology: Elasticity and Strength in Glasses”, ACADEMIC PRESS, INC., 5, 133–144.
- [90] Barr J., (2015), “The Glass Tempering Handbook–Understanding the Glass Tempering Process”, Self Published, 1–52.
- [91] Öunapuu E., Anton J., Klauson A., (2019), “Modelling residual stresses in glass structures”, AIP Conference Proceedings, 2116, 330007.
- [92] Aben H., Ainola L., Anton J., (2000), “Integrated photoelasticity for nondestructive residual stress measurement in glass”, Optics and Lasers in Engineering, 33, 49–64.
- [93] Aben H., (2005), “Photoelastic tomography for residual stress measurement in glass”, Optical Engineering, 44, 093601.
- [94] Aben H., Anton J., Errapart A., (2008), “Modern Photoelasticity for Residual Stress Measurement in Glass”, Strain, 44, 40–48.
- [95] McKenzie H. M., Hand R. J., (1999), “Introduction”. In: “Basic Optical Stress Measurement In Glass”, Society of Glass Technology, 1–2.
- [96] Le Bourhis E., (2014), “Production Control of Residual Stresses”. In: “Glass: Mechanics and Technology”, Second Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 235–245.
- [97] Majak J., Anton J., Öunapuu E., Auriemma F., Pohlak M., Eerme M., Klauson A., (2019), “Experimental Evaluation and Numerical Modelling Residual Stresses in Glass Panel”, MATEC Web of Conferences, 253, 02003.
- [98] Aben H., Anton J., Errapart A., Hödemann S., Kikas J., Klaassen H., Lamp M., (2010), “On non-destructive residual stress measurement in glass panels”, Estonian Journal of Engineering, 16, 150.
- [99] Anton J., Errapart A., Paemurru M., Lochegnies D., Hödemann S., Aben H., (2012), “On the inhomogeneity of residual stresses in tempered glass panels”, Estonian Journal of Engineering, 18, 3.
- [100] Web 5, (2022), <https://www.glassonweb.com/article/surface-compression-comparative-measurements-tempered-glass-with-different-instruments>, (Erişim Tarihi: 02/02/2022).
- [101] Aben H., Guillemet C., (1993), “Determination of the Total Stresses”. In: “Photoelasticity of Glass”, Springer Berlin Heidelberg, 139–161.
- [102] Aben H., Guillemet C., (1993), “Photoelastic Properties of Glass”. In: “Photoelasticity of Glass”, Springer Berlin Heidelberg, 102–119.

- [103] Aben H., Guillemet C., (1993), “Thickness Stresses”. In: “Photoelasticity of Glass”, Springer Berlin Heidelberg, 123–129.
- [104] Hödemann S., Möls P., Kikas J., Anton J., (2014), “Scattered laser light fringe patterns for stress profile measurement in tempered glass plates”, *Glass Technology: European Journal of Glass Science and Technology Part A*, 55, 90–95.
- [105] Zaccaria M., Overend M., (2020), “Nondestructive Safety Evaluation of Thermally Tempered Glass”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32 04020043.
- [106] Soulié F., Siedow N., Anton J., Lochegnies D., (2008), “Numerical and Experimental Investigations on the Residual Stresses at the Centre of Flat Glass Disks After Thermal Tempering”, *Advanced Materials Research*, 39–40, 553–558.
- [107] Hödemann S., Kikas J., Aben H., Anton J., Errapart A., (2011), “Effects of ray bending in scattered light photoelasticity for tempered and annealed glass plates”, *Applied Mechanics and Materials*, 70, 440–445.
- [108] Aben H., Guillemet C., (1993), “The Scattered Light Method”. In: “Photoelasticity of Glass”, Springer Berlin Heidelberg, 79–85.
- [109] McKenzie H. M., Hand R.J., (1999), “Background theory”, In: “Basic Optical Stress Measurement In Glass”, *Society of Glass Technology*, 3–24.
- [110] McKenzie H. M., Hand R. J., (1999), “Flat glass”, In: “Basic Optical Stress Measurement In Glass”, *Society of Glass Technology*, 46–68.
- [111] GlasStress (y.y.), *Scattered Light Polariscope SCALP INSTRUCTION MANUAL Ver. 5.8.2*, GlasStress Ltd.
- [112] Web 6, (2022), <https://www.glasstress.com/web/scalp-05/>, (Erişim Tarihi: 19/03/2022).
- [113] Web 7, (2022), <https://www.glasscampus.com/>, (Erişim Tarihi: 19/03/2022).
- [114] ASTM, (2012) *Standard Specification for Heat-Strengthened and Fully Tempered Flat Glass, C1048-12*, American Society for Testing and Materials, 7.
- [115] Web 8, (2022), <https://imagej.nih.gov/ij/>, (Erişim Tarihi: 19/03/2022).
- [116] Web 9, (2022), <https://www.originlab.com/>, (Erişim Tarihi: 19/03/2022).
- [117] Zaccaria M., Overend M., (2016), “Thermal Healing of Realistic Flaws in Glass”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28, 04015127.

- [118] ASTM, (2018), “Standard Specification for Heat-Strengthened and Fully Tempered Flat Glass”, C1048-18, American Society for Testing and Materials, 8.
- [119] Koike A., Akiba S., Sakagami T., Hayashi K., Ito S., (2012), “Difference of cracking behavior due to Vickers indentation between physically and chemically tempered glasses”, Journal of Non-Crystalline Solids, 358, 3438–3444.
- [120] Web 10, (2022), <https://statistics.laerd.com/statistical-guides/pearson-correlation-coefficient-statistical-guide.php>, (Erişim Tarihi: 19/03/2022).



ÖZGEÇMİŞ

Türker ŞEBER, 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimini tamamladı. 2019 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı bünyesinde bulunmakta olan Cam Bilimi ve Teknolojisi Programı ile başladı. 2019-2020 yıllarında Şişecam Bilim, Teknoloji ve Tasarım Merkezi bünyesinde proje stajyer mühendis olarak çalıştı.

