

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNDENTASYON TEKNİĞİ İLE TEMPERLİ VE TEMPERSİZ SODA-SİLİKA
CAM KIRILMA TOKLUĞUNUN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil Kemal KÜLCÜ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

ARALIK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNDENTASYON TEKNİĞİ İLE TEMPERLİ VE TEMPERSİZ SODA-SİLİKA
CAM KIRILMA TOKLUĞUNUN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Halil Kemal KÜLCÜ
(506101413)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU

ARALIK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506101413 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi HALİL KEMAL KÜLCÜ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “İNDENTASYON TEKNİĞİ İLE TEMPERLİ VE TEMPERSİZ SODA-SİLİKA CAM KIRILMA TOKLUĞUNUN BELİRLENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erdem ATAR
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **27 Kasım 2015**

Savunma Tarihi : **25 Aralık 2015**

Desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca tez danışmanlığımı üstlenmiş olan sayın hocam Prof.Dr. Hüseyin Çimenoglu'na teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tezin deneysel çalışmaları boyunca her zaman bana yardımcı olan ve yol gösteren Araş. Gör. Faiz Muhaffel'e teşekkür ederim.

Şişecam-Trakya Cam Sanayii A.Ş. Otocam Fabrikası üretim müdürü olan Özgür Pişirici'ye tez sürecinde üniversiteye devam etmemde beni desteklediği ve yardımcı olduğu için teşekkür ederim.

Son olarak her zaman yanımda yer almış ve attığım her adımda beni desteklemiş olan sevgili aileme şükranlarımı sunarım.

Kasım 2015

H.Kemal KÜLCÜ
(Metalurji ve Malzeme Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
2. CAM YAPI VE ÖZELLİKLERİ.....	3
2.1 Camların Yapısı	3
2.2 Camlaşma	5
2.3 Camların Moleküler Yapısı	6
2.4 Camların Sınıflandırılması	6
2.4.1 Oksit camlar.....	6
2.4.2 Oksit olmayan camlar	7
2.4.2.1 Halojen camlar.....	7
2.4.2.2 Kalkojen Camlar.....	7
2.4.2.3 Yaygın kullanılan camlar	7
2.5 Camların Özellikleri	9
2.5.1 Kimyasal özellikler.....	9
2.5.2 Fiziksel özellikler	9
2.5.2.1 Viskozite.....	9
2.5.2.2 Yoğunluk	10
2.5.2.3 Sertlik	10
2.5.3 Mekanik özellikler.....	11
2.5.4 Isıl özellikler	12
3. KIRILMA.....	13
3.1 Kırılma Çeşitleri	13
3.1.1 Sünek kırılma.....	13
3.1.2 Gevrek kırılma.....	14
3.2 Kırılma Mekanikliği.....	14
3.2.1 Lineer elastik kırılma mekanikliği.....	15
3.2.1.1 Griffith Teoremi	17
3.2.1.2 Irwin Teoremi	18
3.2.1.3 Kırılma Modelleri.....	19
3.2.2 Elastik plastik kırılma mekanikliği.....	20
3.3 Kırılma Tokluğu Deneyleri.....	21
3.3.1 Tek çentik kenarlı eğme testi (SENB).....	22
3.3.2 Kompakt çekme testi (CT)	22

3.3.3 Çift ankastre kiriş testi (DCB)	23
3.3.4 İndentasyon tekniği.....	23
3.3.4.1 Palmqvist model	24
3.3.4.2 Half-Penny model.....	25
3.3.4.3 Curve fitting teknik.....	25
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	29
4.1 Malzemeler	29
4.2 Deneysel Uygulama	29
5. DENEYSEL SONUÇLAR	31
5.1 Yük - Çatlak Boyu Değişimi	31
5.2 Yük-Vickers Sertlik Değişimi	34
5.3 Cam Türü-Elastisite Modülü Değişimi	36
5.4 Kırılma Tokluğu Hesaplamaları	37
5.4.1 Tempersiz camlar kırılma tokluğu hesaplamaları.....	40
5.4.1.1 Half-penny modele göre kırılma tokluğu hesaplamaları	41
5.4.1.2 Curve Fitting modele göre kırılma tokluğu hesaplamaları	45
5.4.2 Temperli camlar kırılma tokluğu hesaplamaları	50
5.4.2.1 Palmqvist modele göre kırılma tokluğu hesaplamaları	50
5.4.2.2 Curve fitting tekniğe göre kırılma tokluğu hesaplamaları	54
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR.....	63
EKLER.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	71

KISALTMALAR

LEKM	: Lineer Elastik Kırılma Mekaniği
EPKM	: Elastik Plastik Kırılma Mekaniği
SENB	: Tek Çentik Kenarlı Eğme Testi (Single Edge Notched Beam Test)
DCB	: Çift Ankastre Kiriş Testi (Double Cantilever Beam Test)
CT	: Kompakt Çekme Testi (Compact Torsion Test)
DIN	: Deutsches Institut Für Normung
ISO	: International Organization for Standardization
ASTM	: American Society for Testing and Materials
EN	: European Standards

SEMBOLLER

T_m	: Ergime Sıcaklığı
T_g	: Cam Geçiş Sıcaklığı
U_e	: Dış Enerji
U_s	: Genleme Enerjisi
U_k	: Kinetik Enerji
U_d	: Kırılma Enerjisi
G	: Çatlak İlerleme Enerjisi
F	: Kuvvet
k	: Rijitlik
v	: Deplasman
σ	: Gerilme
t	: Tabaka Kalınlığı
$2a$	: İç Çatlağın Boyutu
γ	: Yüzey Gerilmesi
E	: Elastisite Modülü
K	: Gerilme Yoğunluk Faktörü
K_c	: Kırılma Tokluğu
H_v	: Vickers Sertlik
a	: Vickers indentasyon izinin köşe uzunluğunun yarısı
l	: Palmqvist Çatlak Boyu
P	: Yük
c	: Radyal Çatlak Boyu
ϕ	: Malzeme Sabiti
L	: Diagonal Uzunluğun Ortalaması

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Camlaşabilen inorganik malzemeler.	5
Çizelge 2.2 : Cam üretiminde kullanılan oksitler.	7
Çizelge 2.3 : Yaygın kullanılan camların kimyasal kompozisyon aralıkları.....	8
Çizelge 2.4 : Standart Viskozite Noktaları	10
Çizelge 2.5 : Tipik camların yoğunlukları.....	10
Çizelge 2.6 : Cam ve cam seramikler için tipik Knoop sertlikleri.....	11
Çizelge 2.7 : Bazı camların doğrusal ısı genleşme katsayıları	12
Çizelge 3.1 : Hesaplama Kullanan formüller	26
Çizelge 5.1 : Cam türü-sertlik değerleri değişimi.....	36
Çizelge 5.2 : Cam türü-elastisite modülü ve sertlik değişimi.....	37
Çizelge 5.3 : 0,01kg yük altında E ve Hv değerlerinin ortlaması	37
Çizelge 5.4 : $Kc = 0.0752 \frac{P}{c^{3/2}}$ formülüne göre yapılmış olan kırılma tokluğu hesaplamaları.....	41
Çizelge 5.5 : $Kc=0.129 \left(\frac{c}{a}\right)^{-3/2} \left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülüne göre yapılmış olan kırılma tokluğu hesaplamaları	42
Çizelge 5.6 : $Kc=0.0139 \left(\frac{E}{Hv}\right)^{1/2} \left(\frac{P}{c^{3/2}}\right)$ formülüne göre yapılmış olan kırılma tokluğu hesaplamaları.....	43
Çizelge 5.7 : $Kc=0.0782Hv\alpha^{1/2} \left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5} \left(\frac{c}{a}\right)^{-1.56}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.....	44
Çizelge 5.8 : $Kc=0.142 \left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right) \left(\frac{c}{a}\right)^{-1.56}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.....	45
Çizelge 5.9 : $Kc=0.4636 \left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5} \left(\frac{P}{a^{3/2}}\right) 10^F$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	46
Çizelge 5.10 : $Kc=Hv\alpha^{1/2} \left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5} 10^y$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	47
Çizelge 5.11 : $Kc=0.055 \log\left(8.4 \frac{a}{c}\right) \left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.....	48
Çizelge 5.12 : Tempersiz camlar için yapılmış olan hesaplamaların özet tablosu	49
Çizelge 5.13 : $Kc=0.0913((Hva)(E/Hv)^{2/5}(l^{-1/2}))$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.....	50
Çizelge 5.14 : $Kc=0.079 \frac{P}{a^{3/2}} \log(4.5 \frac{a}{c})$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.....	51
Çizelge 5.15 : $Kc=0,015(l/a)^{-1/2}(E/H)^{2/3} \left(P/c^{3/2}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.....	52
Çizelge 5.16 : $Kc=0.048 \left(\frac{l}{a}\right)^{-1/2} \left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.....	53

Çizelge 5.17 : $K_C=0.142\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)\left(\frac{c}{a}\right)^{-1.56}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	55
Çizelge 5.18 : $K_C=0.4636\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{P}{a^{3/2}}\right)10^F$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	56
Çizelge 5.19 : $K_C=H_v\alpha^{1/2}\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}10^y$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	57
Çizelge 5.20 : $K_C=0.055\log\left(8.4\frac{a}{c}\right)\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	58
Çizelge 5.21 : Temperli camlar için yapılmış olan hesaplamaların özet tablosu	59
Çizelge A.1 : Tempersiz cam Vickers iz köşegen uzunluğu sonuçları.....	67
Çizelge A.2 : Tempersiz cam çatlak uzunluğu sonuçları.....	67
Çizelge B.1 : Tempersiz cam Vickers iz köşegen uzunluğu sonuçları.....	68
Çizelge B.2 : Tempersiz cam çatlak uzunluğu sonuçları.....	68
Çizelge C.1 : Tempersiz cam Vickers iz köşegen uzunluğu sonuçları.....	69
Çizelge C.2 : Tempersiz cam çatlak uzunluğu sonuçları.....	69
Çizelge D.1 : Tempersiz cam Vickers iz köşegen uzunluğu sonuçları.....	70
Çizelge D.2 : Tempersiz cam çatlak uzunluğu sonuçları.....	70

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Sıvı-katı hal arasındaki ilişki ve cam dönüşümü.....	4
Şekil 2.2: Bazı ticari camlar için viskozitenin sıcaklıkla değişimi.....	4
Şekil 2.3: Camsı yapı ile kristal yapı düzeni.	6
Şekil 2.4 : Viskozite-sıcaklık grafikleri.	9
Şekil 3.1 : Kırılma Türleri	13
Şekil 3.2 : Sünek kırılma	13
Şekil 3.3 : Gevrek kırılma.....	14
Şekil 3.4 : Kırık boyu-enerji ilişkisi	17
Şekil 3.5 : Temel çatlak ilerleme modları.....	20
Şekil 3.6 : Tek Çentik Kenarlı Eğme Test Numunesi	22
Şekil 3.7 : Kompakt Çekme Test Numunesi	23
Şekil 3.8 : Çift Ankastre Kiriş Testi Numunesi.....	23
Şekil 3.9 : Palmqvist model çatlak izi	24
Şekil 3.10 : Half-penny model çatlak izi	25
Şekil 5.1 : 1kg yük altında 3,2mm tempersiz yeşil cam optik mikroskop görüntüsü	31
Şekil 5.2a : Tempersiz cam yük vickers izi değişimi	32
Şekil 5.2b : Tempersiz cam yük çatlak boyu değişimi.....	32
Şekil 5.3a : Temperli cam yük vickers izi değişimi	33
Şekil 5.3b : Temperli cam yük çatlak boyu değişimi	33
Şekil 5.4 : Vickers elmas piramit indentasyonu	34
Şekil 5.5 : Tempersiz cam yük-sertlik değişimi	35
Şekil 5.6 : Temperli cam yük-sertlik değişimi	35
Şekil 5.7a : Tempersiz cam yük-c/a değişimi.....	38
Şekil 5.7b : Temperli cam yük-c/a değişimi.....	38
Şekil 5.8a : Tempersiz cam yük-p/c ^{3/2} değişimi	39
Şekil 5.8b : Temperli cam yük p/c ^{3/2} değişimi	40
Şekil 5.9 : $Kc=0.0752\frac{P}{c^{3/2}}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	41
Şekil 5.10 : $Kc=0.129\left(\frac{c}{a}\right)^{-3/2}\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	42
Şekil 5.11 : $Kc=0.0139\left(\frac{E}{Hv}\right)^{1/2}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	43
Şekil 5.12 : $Kc=0.0782Hva^{1/2}\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{c}{a}\right)^{-1.56}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	44
Şekil 5.13 : $Kc=0.142\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)\left(\frac{c}{a}\right)^{-1.56}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	46
Şekil 5.14 : $Kc=0.4636\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{P}{a^{3/2}}\right)10^F$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	47
Şekil 5.15 : $Kc=Hva^{1/2}\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}10^y$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	48

Şekil 5.16 : $K_C=0.055\log\left(8.4\frac{a}{c}\right)\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	49
Şekil 5.17 : $K_C=0.0913((Hva)(E/Hv)^{2/5}(l^{-1/2})$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	51
Şekil 5.18 : $K_C=0.079\frac{P}{a^{3/2}}\log(4.5\frac{a}{c})$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	52
Şekil 5.19 : $K_C=0,015(l/a)^{-1/2}(E/H)^{2/3}\left(P/c^{3/2}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	53
Şekil 5.20 : $K_C=0.048\left(\frac{l}{a}\right)^{-1/2}\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	54
Şekil 5.21 : $K_C=0.142\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)\left(\frac{c}{a}\right)^{-1.56}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	55
Şekil 5.22 : $K_C=0.4636\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{P}{a^{3/2}}\right)10^F$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	56
Şekil 5.23 : $K_C=H_v\alpha^{1/2}\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}10^y$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	57
Şekil 5.24 : $K_C=0.055\log\left(8.4\frac{a}{c}\right)\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar	58

İNDENTASYON TEKNİĞİ İLE TEMPERLİ VE TEMPERSİZ SODA-SİLİKA CAMLARIN KIRILMA TOKLUĞUNUN BELİRLENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında vickers indentasyon tekniği kullanılarak temperli ve tempersiz beyaz ve yeşil renkte düz camlar için kırılma tokluğu hesaplamaları yapılmış ve vickers indentasyon tekniğinde kullanılan formüllerden hangisinin temperli ve tempersiz camlar için en uygun olduğu araştırılmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde tezin amacı hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde camlar hakkında genel literatür bilgileri verilmiştir. Üçüncü bölümde kırılma mekaniği hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde deneysel çalışmaların nasıl yapıldığı, hangi prosedürlerin izlendiği hakkında bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde ilgili formüller için hesaplamalar yapılmıştır. Altıncı ve son bölümde sonuçlar karşılaştırılmış, hangi formül veya formüllerin temperli ve tempersiz beyaz ve yeşil düz camlar için uygun olduğu belirtilmiştir.

Tezin ilk bölümünde indantasyon tekniğinin avantajlarından bahsedilmiş ve tezin amacı belirtilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde camların molekül yapısı ve özellikleri hakkında temel bilgiler verilmiştir. Camların sınıflandırılmasının yapılmış ve fiziksel, kimyasal, mekanik ve ısı özellikleri hakkında literatür bilgileri verilmiştir. Tez kapsamınca incelenmiş olan silika camlar oksit camlar sınıfına dahil olan ve en yaygın olarak kullanılan cam türüdür. Silika camlarının kompozisyonları Na_2O - CaO - SiO_2 faz diyagramının ötektik pozisyonuna göre ayarlanmaktadır. Genel olarak soda kireç camları %22 Na_2O , %5 CaO ve %73 SiO_2 içermektedir. Camın ergitme koşulları, tavlama sıcaklığı, işlenmesi, rafinasyonu, kristallenme hızı gibi bir çok özelliği viskozite tarafından oluşturulduğu için camın en temel fiziksel özelliği viskozitedir. Kimyasal özellik açısından genel olarak inerttirler ve su ve benzeri nötr çözeltilerden çok yüksek sıcaklıklarda bulunmamaları kaydıyla etkilenmezler. Cam molekül yapısından ötürü kalıcı deformasyona izin vermez. Cam basma gerilimine karşı direnci yüksek olmakla birlikte çekme gerilimine karşı direnci oldukça düşük bir malzemedir ve camın mekanik dayanımını yüzey özellikleri belirler. Günlük yaşamda kullandığımız camların dayanımları 30-100MPa arasında değişmektedir. Cam ısı iletkenliği düşük bir mazemedir. Camların ısı genleşmesi cam türüne bağlı olarak değişmektedir. Cam yapıcı oksit oranı ne kadar artarsa camın titreşimi o kadar azalmakta ve camın genleşme katsayısı da aynı oranda düşmektedir.

Tezin üçüncü bölümünde kırılma mekaniği hakkında bilgiler verilmiştir. Öncelikle kırılma türleri hakkında bilgi verilmiş daha sonra kırılma mekaniği yaklaşımları olan LEKM (Lineer Elastik Kırılma Mekaniği) ve EPKM (Elastik Plastik Kırılma Mekaniği) hakkında bilgiler verilmiştir. LEKM yaklaşımı camlar gibi gevrek malzemelerde geçerli olduğu için tez kapsamında LEKM için daha ayrıntılı bilgi aktarımında bulunulmuştur. Üçüncü bölümde son olarak malzemelerin kırılma tokluklarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan kırılma tokluğu deneyleri

hakkında özet bilgiler verilmiş ve tezin kapsamı olan indentasyon tekniği hakkında bilgiler verilmiştir. Katı bir cismin yük altında iki veya daha çok parçaya ayrılmasına kırılma denir. Kırılma çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesi olarak iki aşamadan oluşur. Sünek ve gevrek kırılma olmak üzere iki temel kırılma türü vardır. Kırılma mekaniği kırılmayı makro ve mikro açıdan inceleyen bir bilim dalıdır. Kırılma Mekaniği, gerilme analizine bağlı olarak kırılma direncini, uygulanan yüke ve hata içeren komponentlerin yapısal geometrisine bağlı olarak ortaya koyan kalitatif bir yaklaşımdır. Kırılma mekaniği ile ilgili ilk çalışma Griffith'in 1920'de yayınlanmış olduğu çalışma kabul edilir. Kırılma mekaniğinde Lineer Elastik Kırılma Mekaniği ve Elastik Plastik Kırılma Mekaniği olmak üzere iki türlü yaklaşım kullanılmaktadır. Lineer elastik kırılma mekaniği tamamen elastik şartlar altında çatlak boyutu ve kırılmayı tanımlamak için geliştirilmiştir. LEKM çoğunlukla seramikler ve camlar gibi gevrek malzemelerin kırılmasını açıklamakta kullanılır. Sünek malzemelerde LEKM yaklaşımı geçerliliğini kaybeder ve bunun yerine Elasto plastik kırılma mekaniği (EPKM) yaklaşımı kullanılmaktadır. Kırılma tokluğu deneylerinde yaygın olarak SENB, CT ve DCB yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda indentasyon tekniği kırılma tokluğu belirlenmesinde çok hızlı ve basit bir şekilde sonuç alınabildiği için alternatif bir yöntem olarak görülmeye başlanmıştır.

Tezin dördüncü bölümünde deneysel çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. 1,6-2,2-3,2-4,00 mm kalınlığında temperli ve tempersiz beyaz ve yeşil camlar ŞİŞECAM Trakya Cam Sanayii A.Ş. Trakya Fabrikasında üretilmiştir. Konu düz camlara 0,2-0,3-0,5-1,00-2,00-3,00-5,00kg arasında yükler uygulanmış ve izlerin ölçüleri optik mikroskop ile alınmıştır.

Tezin beşinci bölümünde deneysel sonuçlara yönelik bilgiler verilmiştir. Yük-çatlak boyu değişimi, yük-vickers sertlik değişimi, yük-elastisite modülü değişimi incelenmiş ve son olarak kırılma tokluğu formüllerine yönelik hesaplamalar yapılmıştır. Formüller Palmqvist yöntem, Half-Penny yöntem ve Cuve Fitting yöntem olmak üzere 3 temel kategoriye ayrılmış ve bu yöntemlerde bulunan seçilmiş olan formüllerde hesaplamalar yapılmıştır. Hangi modelin uygun olacağının belirlenmesinde c/a değeri referans değer olarak kabul edilmiş ve yöntem bu oran doğrultusunda belirlenmiştir. c/a oranına doğrultusunda tempersiz camlarda Half-Penny modeline ait formüller kullanılabilecekken temperli camlarda Palmqvist yöntemine ait formüller kullanılabilecektir. Curve Fitting yöntemine ait olan formüllerin iki cam türü için olan uygunlukları da araştırılmıştır. Formüllere yönelik istatistiksel analiz için MINITAB programı kullanılmıştır.

Tezin altıncı ve son bölümünde deneysel sonuçların karşılaştırılmaları yapılmıştır. Sonuçlara yönelik istatistiksel analiz çalışması yapılarak temperli ve tempersiz beyaz ve yeşil camlar için hangi yöntemin uygun olduğu belirlenmiş ve belirlenmiş olan yönteme ait hangi formülün literatürdeki kırılma tokluğuna en yakın sonucu verdiği belirtilmiştir.

IDENTIFICATION OF FRACTURE TOUGHNESS FOR FLAT AND TEMPERED FLAT SODA-LIME GLASS BY MEANS OF INDENTATION TECHNIQUE

SUMMARY

In this thesis, green coloured flat glass, green coloured tempered flat glass, white coloured tempered flat glass and white coloured flat glass fracture toughness calculations are performed and suitable formulas of Vickers indentation method are searched for tempered flat glass and flat glass.

Purpose of the thesis is explained and brief information about literature survey is given in the first part of this thesis. General information about literature review of glass is given in the second part of the thesis. Fracture mechanics is defined in the third part of the thesis. In the fourth part of this study, experimental studies, progression of experimental studies and procedure used during experimental studies are defined. Besides, calculations for fracture toughness of glasses are explained in the fourth stage of the thesis. In the fifth and last part of this thesis, experimental test results are compared and it's determined that which formula is appropriate for white coloured tempered flat glass, which one is suitable for white colored flat glass, which formula is proper for green coloured tempered flat glass and which one is fitting with green coloured flat glass.

It is mentioned about advantages of indentation method and purpose of the thesis are given in the first part of the thesis. Fracture toughness of soda-lime and tempered soda-lime glasses have been calculated according to formulas of Vickers indentation methods which are Palmqvist, Half-Penny and Curve Fitting Technique and suitable Vickers indentation method with formulas has been defined for the purpose of the thesis.

Basic information about molecular structure and characteristics of glass are indicated in the second stage of the thesis. Classification of glasses literature research about physical, mechanical, chemical and thermal properties of glasses are given in this thesis. Silica glasses which are investigated within the scope of this thesis are type of oxide glasses and most commonly used glasses type. The composition of silica glasses are depend on eutectic position in the phase diagram of $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$.

Generally, soda-lime glasses contain %22 Na_2O , %5 CaO and %73 SiO_2 . The main physical characteristics of glass is viscosity because viscosity creates the glass melting temperature condition; influence the annealing temperature, processing, refining of glasses and rate of crystallization. From the chemical properties side, soda-lime glasses are inert as a general rule and soda-lime glasses don't decompose in water and water-based neutral solutions provided that temperature of solution is not high. Glasses don't let permanent deformation due to its molecular structure. Resistivity of glass against compressive stress is very high while resistivity of glass against tensile stress is very low and surface properties of glass determine the mechanical strength of glasses. Strength of glasses has been using in daily life is changing between 30 Mpa to

100 Mpa. Glasses are material type which thermal conductivity is low. Thermal expansion of glasses are varying according to glass kind. Vibration of glasses and thermal expansion coefficient decrease as well as percentage of glass forming oxide increases in glasses.

In the third section of this thesis, general information about fracture mechanics is given. Firstly, fracture types are described and then, two fracture mechanics approaches LEFM (Elastic Fracture Mechanics) and EPFM (Elastic Plastic Fracture Mechanics) are explained. Linear elastic fracture mechanics approach is usually used for brittle materials like glasses that's why, linear elastic fracture mechanics is stated in detail in this thesis. Lastly, materials' fracture toughness experiments which has been commonly used to determine materials' fracture toughness are described as a summary and indentation method is expressed in the scope of thesis.

Fracture means breaking into two or more pieces of a solid body under the load. Fracture composes of two phases: Crack generation and crack progression. There are two main type of cracks: Brittle and ductile fracture. Fracture mechanics is a type of science examining cracking in terms of micro and macro. Fracture mechanics is a qualitative approach which defines fracture strength depending on the stress analysis, applied load and structural geometry of defected components. First study about fracture mechanics has come up from Griffith in 1920. There are two different methodologies which are Linear Elastic Fracture Mechanics and Elastic-Plastic Fracture Mechanics. Linear elastic fracture is developed to describe crack dimension and fracture under elastic conditions. Linear elastic fracture mechanics has been generally using to define fracture of for the brittle materials like ceramics and glasses. Linear elastic fracture mechanics does not work for the ductile materials and elasto-plasto fracture mechanics approach has been using instead. SENB, CT and DCB methods are commonly used for fracture toughness tests. Indentation method has been using for determination of fracture toughness as an alternative way because of its being quick and simple way.

In the fourth stage of this thesis, experimental studies are described. Green coloured tempered flat glass samples, white coloured tempered flat glass samples, green coloured flat glass samples and white coloured flat glass samples were produced in ŞİŞECAM Trakya Cam Sanayi A.Ş., Trakya plant. Glass samples were exposed to loads which weights are 0,2 kg, 0,3 kg, 0,5 kg, 1 kg, 2 kg, 3 kg, 5 kg and dimension of the marks are measured via optical microscope.

It is mentioned about experimental test results in the fifth stage of this thesis. Load to crack length change, load to Vickers hardness change, load to elasticity modulus change investigated and calculations are made for fracture toughness formulas. Formulas are classified into three main categories: Palmqvist technique, Half-Penny technique and Cuve Fitting technique. Calculations were made by using selected formula between these 3 techniques. c/a is accepted as a reference value in order to specify the proper model and correct model is decided by using c/a rate. c/a rate can be used for flat glasses together with formulas of Half-Penny model while c/a rate can be used for tempered flat glasses together with formulas of Palmqvist model. Usability of Curve Fitting method formulas are investigated for both tempered flat glasses and flat glasses. MINITAB programme was used for statistical analysis of formulas.

Lastly, comparisons of experimental test results are executed in the sixth stage of this thesis. Statistical analysis is done according to experimental test results and it's tried

to find out suitable technique for tempered white flat glasses, white flat glasses, green flat glasses and green tempered flat glasses.

At the end of this thesis, it's indicated that calculated fracture toughness of the glass samples are too close to the fracture toughness of glasses given in the literature if fracture toughness of glass samples are computed by using determined formula which is selected from determined fracture.

1. GİRİŞ

İndentasyon tekniği ile kırılma tokluğu hesaplamalarında yaygın olarak SENB, DCB, CT teknikleri kullanılmaktadır. Bununla birlikte test edilecek numunenin hazırlanmasının zorluğu ve yüksek maliyeti bu yöntemlerin kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu zorlukları ortadan kaldırmak adına indentasyon tekniği ile kırılma tokluğu hesaplanması son zamanlarda yaygın olarak kullanılan bir yöntem durumuna gelmiştir. Daha az ekipmana ihtiyaç duyulması, numune hazırlanmasının ve test prosedürünün kolaylığı yöntem üzerine yapılan araştırmaları yoğunlaştırmış ve kırılma tokluğu hesaplanmasında alternatif bir yöntem konumuna getirmiştir.

1.1 Tezin Amacı

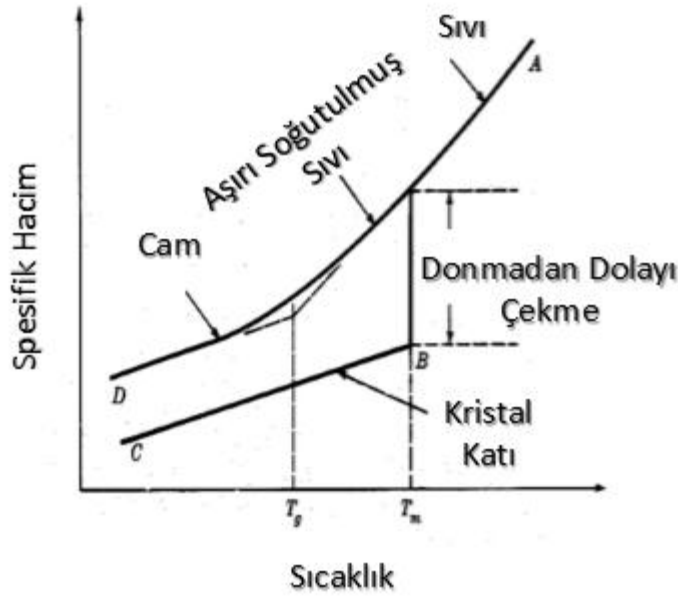
Tez kapsamında farklı kalınlıklarda temperli ve tempersiz yeşil ve beyaz camlar seçilerek indentasyon tekniği ile kırılma tokluğu hesaplamaları yapılmıştır. İndentasyon tekniği ile kırılma tokluğu hesaplamalarında Palmqvist, Half-Penny ve Curve Fitting yöntemleri kullanılmaktadır. Her bir yöneme yönelik olarak bir çok ampirik formül kullanılmakla birlikte tez kapsamında her bir yöneme ait 4'er formül hesaplamalar için belirlenmiş ve hangi formülün temperli ve tempersiz düz camlar için en uygun sonucu verdiği araştırılmıştır.

2. CAM YAPI VE ÖZELLİKLERİ

Cam doğal hammedelerin karıştırılmasından elde edilir. Cam ani soğutulmuş alkali ve toprak alkali metal oksitleri ile diğer metal oksitlerin çözünmesinde oluşan akışkan bir malzeme olup en önemli hammaddesi SiO_2 'dir. Diğer önemli hammaddeler soda (NaCO_3) ve kireç taşı (CaCO_3) olarak sıralanabilir. Camın ne zaman keşfedildiği tam olarak bilinmemekle beraber 4000 yıl önce ilk olarak üretildiği tahmin edilmektedir. Bilinen en eski cam kalıntıları genel olarak Mısır'da bulunmuştur [1].

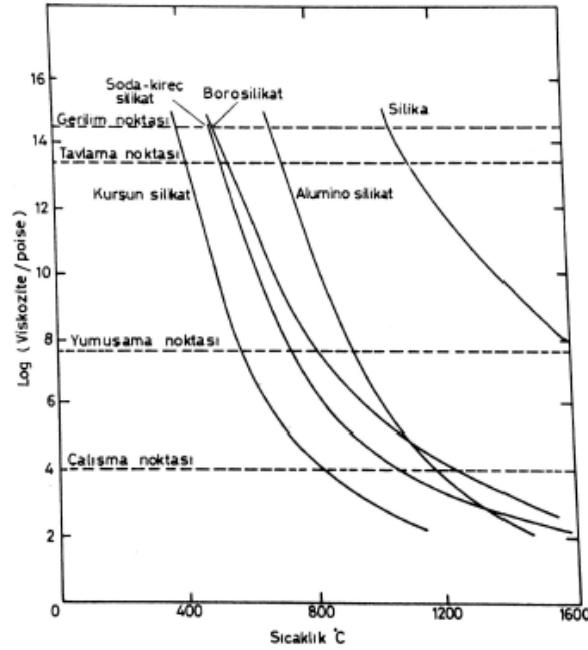
2.1 Camların Yapısı

Camlar inorganik esaslı silikat sistemidir ve yüksek viskoziteye sahip sıvılar olarak kabul edilirler. Normal sıcaklıkta kristalleşmeden katılaştıkları için katı cisimlerin mekanik özelliklerini gösterdikleri gibi sıvı cisimlerin de özelliklerini gösterirler [2]. Şekil 2.1'de belirtildiği gibi A noktasındaki sıvının soğuması sırasında ergime noktası(T_m) özgül haciminde önemli bir düşüş bunun yanında yoğunluğunda artış görülür. Eğer sıvı kristalleşmeden soğumaya devam ederse hacimde ani bir düşüş görülmez ve hacim azalmaya devam eder. Maddenin bu haline aşırı soğutulmuş sıvı adı verilir. Cam eritme sıcaklığında yüksek viskoziteye sahip bir sıvıdır ($\sim 10^2$ poise). Ergime noktasında viskozitesi yüksek olan sıvılar cam oluşturabilirler. Sıcaklığın düşmesi ile viskozite daha da artar ve bir noktada viskozite artık yapısal değişime izin vermeyecek kadar yüksek olur ve hacim sıcaklık eğrisinin eğimi azalarak ergime noktasında kristallenen maddenin hacim sıcaklık eğrisine paralel hale gelir.



Şekil 2.1: Sıvı-katı hal arasındaki ilişki ve cam dönüşümü [3].

Eğimin değiştiği T_g sıcaklığı cam geçiş sıcaklığı olarak adlandırılır. Sadece T_g 'nin altındaki sıcaklıklarda malzeme cam olarak adlandırılabilir [1]. Bazı ticari camların sıcaklık-viskozite değişimi Şekil 2.2'de belirtilmiştir.



Şekil 2.2: Bazı ticari camlar için viskozitenin sıcaklıkla değişimi [1].

2.2 Camlaşma

Gaz halindeki malzeme soğutulduğunda hacmi giderek azalır. Kaynama sıcaklığına gelindiğinde hacim azalmasıyla birlikte malzeme sıvıya dönecek soğuma devam ettirilirse erime sıcaklığında malzeme katı hale dönecektir. Soğuma sürdükçe moleküllerin titreşimleri azalmaya devam edecek ve ısın genleşme katsayıları oranında hacim azalmaya devam edecektir [4].

Soğutma hızının çok yüksek olduğu düşünüldüğünde sıvı molekülleri katılaşma sırasında düzenli bir kristal yapı oluşturamadan ısı enerjilerini yitirmelerinden ötürü düzensiz bir yapı halinde hareketsizleşeceklerdir. Oluşan bu malzeme fiziksel ve kimyasal yönden kristal malzemelere benzerlik gösterecektir. Eğer bir sıvı kristalleşmesine izin verilmeyecek kadar hızlı soğutulursa camsı faz oluşur. Bazı sıvılar camlaşabilmek için çok yüksek soğutma hızlarına ihtiyaç duyarken SiO_2 gibi sıvılar çok daha düşük soğutma hızlarında camlaşma özelliği gösterirler [4].

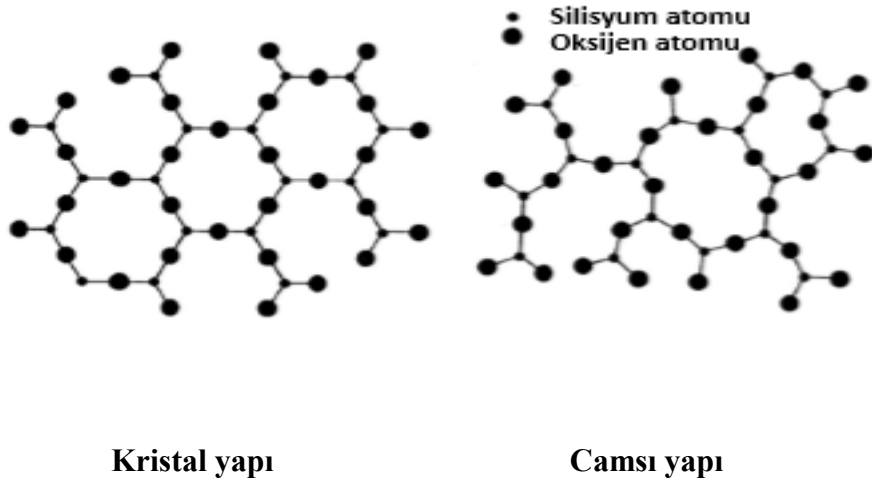
Çizelge 2.1 : Camlaşabilen inorganik malzemeler [4].

Kalkojenürler	S, Se, Bi, Ge
Oksitler	
Cam yapıcılar	B, Si, P, Ge, As, Sb, Te, V
Ara cam yapıcılar	Be, Al, Ti, Zr, Sn, Pb
Ağ düzenleyiciler	Li, Na, K, Rb, Cs, Mg, Ca
Tuzlar	BeF, ZnCl
Karbonatlar	K, Mg

Bir sıvının camlaşabilmesi erime sıcaklığına yakın sıcaklıklardaki kristallerin büyüme hızıyla ilişkilidir. SiO_2 ve GeO_2 gibi kolaylıkla camlaşan sıvılarda kristal büyüme hızı azdır. Kristal büyüme hızı yaklaşık 10^{-4} ten büyük olan malzemelerin kolaylıkla cam yapamayacağı söylenebilir. Camlaşmayı kontrol eden bir diğer özellik de kristal çekirdeklenme hızıdır. Molekül hareketini sınırlayan viskozitesi ise her iki faktör için de belirleyici olan bir parametredir [4].

2.3 Camların Moleküler Yapısı

Kristal yapı ile camsı yapı arasındaki temel fark tetrahedral birim kafeslerin bir biriyle olan etkileşimleridir [2]. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi kristal yapı uzun düzen dizilimi gösterirken camsı yapı kısa düzen dizilimi gösterir [5].



Şekil 2.3: Camsı yapı ile kristal yapı düzeni [2].

2.4 Camların Sınıflandırılması

2.4.1 Oksit camlar

En yaygın kullanılan cam sınıfıdır. En önemlileri SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 ve GeO_2 ' dir. Bu oksitler tek başlarına cam oluşturabildikleri gibi alkali ve toprak alkali oksitlerin ilavesi ile de cam oluşturabilirler. Oksit camların bileşimine giren oksitler; cam yapıcılar, aradakiler ve düzenleyiciler olmak üzere 3 gruba ayrılır [1]. Çizelge 2.2'te ilgili oksitler gösterilmiştir.

Cam yapıcılar cam oluşumu için zorunlu olup camın ağ yapısını oluştururlar. Düzenleyiciler ağ yapısını bozarlarken aradakiler ağ yapı içerisinde yer alabildikleri gibi ağ yapıyı bozucu etkide de bulunabilirler. Cam formu oluşturulurken camdan beklenen özelliğe göre hangi oksitten ne kadar kullanılacağına karar verilir [1].

Çizelge 2.2 : Cam üretiminde kullanılan oksitler.

Cam Yapıcılar	Aradakiler	Düzenleyiciler
B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO
SiO ₂	Sb ₂ O ₃	Li ₂ O
GeO ₂	ZrO ₂	BaO
P ₂ O ₅	TiO ₂	CaO
V ₂ O ₅	PbO	SrO
As ₂ O ₃	BeO	Na ₂ O
	ZnO	K ₂ O

Günlük hayatta en çok karşımıza çıkan ve pencere, şişe yapımında kullanılan soda-kireç camları bu sınıfa girer. Soda-kireç camlarının kompozisyonları Na₂O-CaO-SiO₂ faz diyagramının ötektik pozisyonuna göre ayarlanmaktadır. Genel olarak soda kireç camları %22 Na₂O, %5 CaO ve %73 SiO₂ içerir [6].

2.4.2 Oksit olmayan camlar

2.4.2.1 Halojen camlar

BeF₂, ZnCl₂, ZrF₄, HfF₄ gibi halojen bileşikleri içeren camlara halojen camlar denmektedir. Halojenlerin elektronegatifliklerinin yüksek olmaları nedeniyle, halojen camlar kristallenmeye yatkındır ve neme karşı hassastırlar [1].

2.4.2.2 Kalkojen Camlar

Yapılarında kalkojen elementler olan S, Te, Se bir veya daha fazlası ile Ge, Si, As, Sb gibi elementleri bulunduran camlardır. Optik ve elektrik özellikleri önemli olan camlardır. Selenyum camları yaygın olarak fotokopi makinalarında kullanılmaktadır. Ayrıca, fiber optik kablo ve termal sistemlerde kullanılmaktadırlar [1].

2.4.2.3 Yaygın kullanılan camlar

En çok kullanılan camlar SiO₂ ve B₂O₃ esaslı camlardır.

- SiO₂ Silika camı
- Na₂O-SiO₂ Su camı
- Na₂O-SiO₂-CaO düz cam, şişe, züccaciye
- K₂O-CaO-SiO₂ Kristal cam
- Na₂O-B₂O₃-SiO₂ Isıya dayanıklı cam
- CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ alkalisi düşük camlar

Çizelge 2.3'te yaygın kullanılan camların kompozisyon aralıkları gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 : Yaygın kullanılan camların kimyasal kompozisyon aralıkları [1].

No	Cam Tipi	Ticari İsim	Bileşim %Ağırlık							
			SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
1	Düzcamlar		72,2		1	1	3,6	7,1	14,8	0,2
2	Düzcamlar		72,5		1	0,07	3,9	8,1	13,7	0,3
3	Renksiz şişe camı		72,4		1,7	0,05	1,7	9,6	13,8	0,6
4	Amber şişe camı		73,4		2	0,22	3	8	13	0,4
5	Yeşil şişe camı		72		1,9	0,15	1,4	9,2	14,4	0,6
6	Nötr cam		70,2	7	7,5			1,8	9,5	1
7	Teknik cam		80,8	12	2,2		0,3	0,3	4,2	0,6
8	Teknik cam		80	12,8	2,3				3,5	1,2
9	Yüksek silika camı		94	5					0,5	
10	Termometre camı		67,5	2	2,5			7	14	
11	Yüm enstruman camı		68,9		3,9		2,9	5,5	17,8	1,3
12	Elektrik ampül camı		72,4		0,8		3,7	5,3	17,4	
13	Bağlantı camı		57,1	1,5					4,9	7
14	Bağlantı camı		67,7	18,9	3,6				0,4	8,4
15	Bağlantı camı		75	11,6	4			1,5	5,9	1,6
16	Düşük kayıplı cam		71	24,8	0,9			0,3	1,5	1,2
17	Yüksek alüminalı cam		53	10	21		10	5		
18	Optik billur camı		45,1						3,2	6
19	Optik göbek camı		66	12,4					8	12
20	Kurşun Kristal camı		59						2	12
21	Sod-Pot Kristal camı		75	0,4				6,7	6,1	11,4
22	Pres züccaciye camı		75,6		0,4	0,02	2,6	3,7	13,5	4,1
23	Cam elyaf (E camı)		52,9	9,2	14,5	0,3	4,4	17,4		1
24	Cam elyaf		59		7	0,3	3,5	6,5		20
25	Opal cam		66,9		6,9	0,08	0,4	4,8	13,3	2,2
26	TV tüpü		67		5	0,08			7	8,3
27	Selenyum		69,8		0,5			3,2	10,7	8,3
28	Sinyal yeşili		74,3					4,2	10,7	7,3
29	Opal mücevher camı		57,7	1,1				5,2	8,7	12,5

2.5 Camların Özellikleri

2.5.1 Kimyasal özellikler

Silika camları en çok kullanılan camlar olması sebebiyle kimyasal dayanımı özel olarak araştırılmıştır. Silika camı su ve benzeri nötr çözeltilerden yüksek sıcaklıklarda olmamaları kaydıyla etkilenmez. Amorf silikanın 25°C'deki sudaki çözünürlüğü %0,012'dir ve sıcaklıkla birlikte çözünürlük artarak Si(OH)_4 oluşur. Çözünürlük pH 8.5'in altındaki koşullara sabiti iken pH'ın artmasıyla birlikte artar.

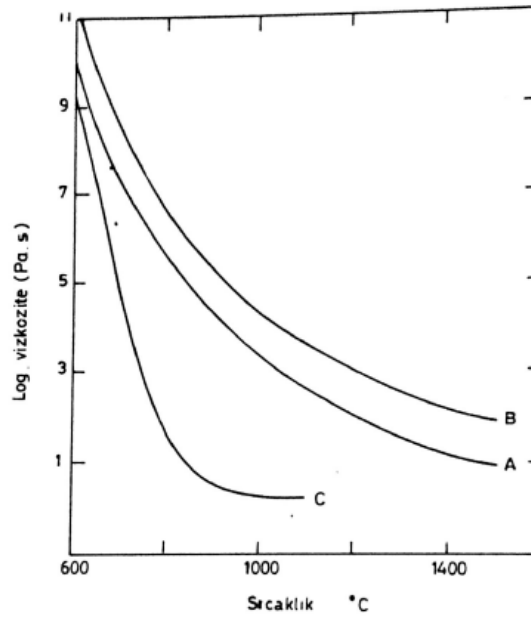
Hidroflorik asit ve yüksek sıcaklıkta (200°C) fosforik asit hariç silika camı asitlere karşı dirençlidir.

Laboratuvarında kullanılan cam kaplar ve güçlü asidik ortamda kullanılacak olan camlar genellikle %12 oranında Ba_2O_3 içeren borosilikat camı kullanılmaktadır [1].

2.5.2 Fiziksel özellikler

2.5.2.1 Viskozite

Camın en temel özelliği viskozitedir. Camın ergitme koşulları, tavlama sıcaklığı, işlenmesi, rafinasyonu, kristallenme hızı gibi bir çok özelliği viskozite tarafından oluşturulur. 1500°C deki fırında cam viskozitesi oda sıcaklığında şerbetin viskozitesine eşitken sıcaklığın 500°C 'e düşmesiyle birlikte viskozite artış gösterir ve elastik katılar gibi davranır [1]. Bazı camların viskozite sıcaklık ilişkisi şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Viskozite-sıcaklık grafikleri. A) düzcam, B) borosilikat cam, C) SiO_2 %35, B_2O_3 %40, Na_2O %25 [1].

Camın çeşitli t-referans noktalarındaki viskozite değerleri çizelge 2.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 : Standart Viskozite Noktaları [4].

	η (Poise)	Log η
Afinasyon sıcaklığı	102	2.0
Damla oluşum aralığı	103-104	3.0-4.0
Şekillendirme aralığı	103-108	3.0-8.0
Littleton yumuşama noktası	107.65	7.65
Tavlama noktası	1013	13.0
Gerilme noktası	1014.5	14.5

2.5.2.2 Yoğunluk

Yoğunluk birim hacimdeki kütle olarak tanımlanır ve birimi g/cm^3 'tür. Camın yoğunluğu kimyasal kompozisyonuna göre değişmekle birlikte $2.2\text{-}8.0 \text{ g/cm}^3$ aralığında değişmektedir. Silika camının oda sıcaklığındaki yoğunluğu 2.203 g/cm^3 'tür ve başka oksitlerin ilavesiyle yoğunluk artmaktadır [1]. Bazı camların yoğunlukları çizelge 2.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.5 : Tipik camların yoğunlukları [1].

Cam Türü	Yoğunluk (g/cm^3)
Silikat Camı	2,20
Borosilikat Camı	2,23
Şişe Camı	2,46
Düz Cam	2,50
Ağır Kurşun Camı	3,20
Yoğun Flint	4,80
Radyasyon Kalkanı	6,22

2.5.2.3 Sertlik

Sertlik bir malzemenin çizilmeye karşı direncidir ve diğer fiziksel özelliklerin bileşimi sonucunda oluşur. Brinell yöntemiyle cam malzemenin sertliğinin ölçülmesi mümkün değildir. Vickers ve Knoop sertlik yöntemleri kullanılmaktadır [1]. Çizelge 2.6'da çeşitli camların Knoop sertlikleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.6 : Cam ve cam seramikler için tipik Knoop sertlikleri [1].

Cam Türü	Batma sertliği kg/mm ²
Silika Camı	489
%96 silika	463
Soda-kireç camı	465
Aluminosilikat camı	363
Cam seramik	657
Soda kireç camı (float)	443
Kurşun silikat camı	388

2.5.3 Mekanik özellikler

Cam molekül yapısından ötürü kalıcı deformasyona izin vermez. Bu özellik, camın kırılma tokluğu düşük, kütsel mekanik dayanımı yüksek olmakla birlikte yüzey hatalarına aşırı derece bağı, kırılğan, kırıldığında yaralanmalara neden olan malzeme olmasına neden oluşturur [4].

Cam basma gerilimine karşı direnci yüksek olmakla birlikte çekme gerilimine karşı direnci oldukça düşüktür [4].

Camın mekanik dayanımını yüzey özellikleri belirler. Camın yüzeyinde her zaman mikro çatlaklar bulunur. Bu çatlaklar gerilim uygulandığında plastik deformasyon engeliyle karşılaşmadan hızla ilerler. Cam içerisindeki çatlaklar esnek deformasyonlar neticesinde ilerler. Cam içindeki kırılma deformasyonla birlikte artan potansiyel enerjinin birden bire kırık yüzeyi oluşturması şeklinde açığa çıkar. Camdaki çatlak ilerlemesi o çatlağı oluşturacak olan enerjiden daha az enerjiye gerek duyduğu için kırılma genellikle orta yerde durmaz ve cismin sınırı boyunca ilerler [4].

Camın mekanik dayanımı teorik olarak hesaplandığında yaklaşık olarak 3000MPa değerindedir. Gerçekte elde edilen değerler ise bu değerin çok altındadır. Bu da cam yüzeyinin dayanımı ne ölçüde belirlediğinin göstergesidir. Günlük yaşantıda kullandığımız camların dayanımları 30-100MPa arasında değişmektedir [4].

Camlarda mekanik dayanımı arttırmak için temperleme ısı işlem yapılmaktadır. Cam dönüşüm sıcaklığının üzerine (600°C) ısıtılan cam ani olarak hava ile soğutulur. Böylelikle camın yüzeyinde basma gerilmeleri oluşturulurken içte çekme gerilmesi oluşur. Temperli cam tavlanmış camdan 4 kat daha dayanıklıdır [4].

2.5.4 Isıl özellikler

Normal soda-kireç camlarının günlük hayatta kendiliğinden kırılmalarıyla karşılaşırız. Bunun nedeni camın ısı iletkenliğinin düşük olmasıdır. Bazı camların ısı iletkenlik katsayıları çizelge 2.7’de gösterilmiştir.

Camın yüzeyi aniden soğutulur veya ısıtılırsa düşük ısı iletkenlik nedeniyle camda sıcaklık farklılığı oluşur. Soğuk yüzey sıcak yüzeyin genişlemesine izin vermez ve gerilimin artması sonucu camda çatlama görülebilir [1].

Camların termal iletkenliği kristalin malzemelere göre daha düşüktür. Silikat camları için bu değer 0,002-0,003 gr.Kal/cm²/sn/cm arasındadır. Termal iletkenlik sıcaklıkla birlikte artar ve 250°C’de %25 artabilir [1].

Isı enerjisiyle malzeme içindeki atom ve moleküller titreşirler. Verilen enerji ve kimyasal bağa göre titreşim az ya da çok olmaktadır. Sıcaklığa bağlı olarak titreşimin artması malzemede genişmeye sebep olur. Camların ısı iletkenliği cam türüne bağlı olarak değişmektedir. Cam yapıcı oksit oranı ne kadar artarsa camın titreşimi o kadar azalmakta ve camın genişleme katsayısı da aynı oranda düşmektedir [4].

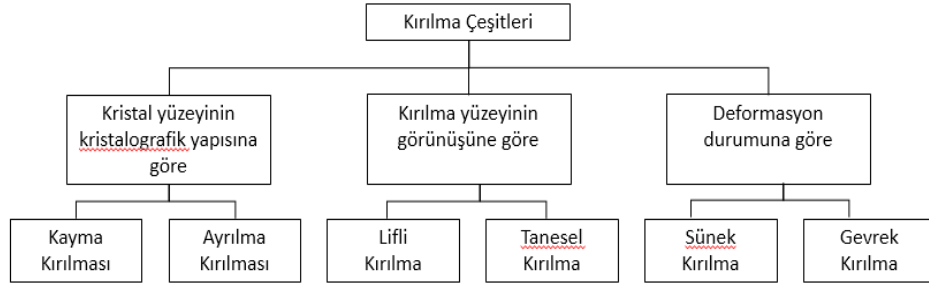
Çizelge 2.7 : Bazı camların doğrusal ısı iletkenlik katsayıları [4].

Cam türü	Doğrusal ısı iletkenlik katsayısı (x10-71/°C)	Cam türü	Doğrusal ısı iletkenlik katsayısı (x10-71/°C)
Silika	5.5	Borosiliklat	32
%96 silika	8.0	Soda-Kireç	90-92
Alüminasilikat	3.3	Yüksek kurşun-silika	100

3. KIRILMA

Katı bir cismin yük altında iki veya daha çok parçaya ayrılmasına kırılma denir. Kırılma çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesi olarak iki aşamadan oluşur. Kırılma malzmeden malzemeye göre değişmekle birlikte, uygulanan gerilime, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır [7].

Kırılma şekil 3.1’de gösterildiği gibi kırılma yüzeyinin kristalografik yapısı, kırılma yüzeyinin görünüşü ve deformasyon durumuna göre 3 ana başlıkta incelenebilir [8].

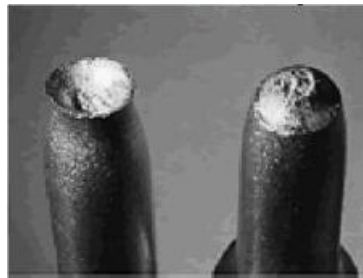


Şekil 3.1 : Kırılma Türleri [8].

3.1 Kırılma Çeşitleri

3.1.1 Sünek kırılma

Sünek kırılmada yüksek deformasyon görülür. Yüksek enerji gerektirir ve düşük deformasyon hızında görülür [9]. Sünek kırılma; uygulanan yükün hızı, parçanın boyutu ve geometrisi ile malzeme özelliği ve çevresel koşullar ile kontrol edilir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi kırılma öncesinde malzeme yüzeyinde uzama görülür [9].



Şekil 3.2 : Sünek kırılma [8].

3.1.2 Gevrek kırılma

Gevrek kırılma çok az plastik deformasyon ile oluşur. Gevrek kırılma; düşük enerji gerektirir ve çoğu kez düşük sıcaklıklarda görülür. Kırılma anında nominal gerilme çoğu kez akma gerilmesinden daha düşüktür. Gevrek kırılma çoğu kez düşük kırılma tokluğunu sahip yüksek dayanımlı malzemelerde görülür [9]. Şekil 3.3'te gevrek kırılma örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Gevrek kırılma [8].

3.2 Kırılma Mekanikği

Kırılma mekanikği kırılmayı makro ve mikro açıdan inceleyen bir bilim dalıdır. Kırılma mekanikği ile ilgili ilk çalışma Griffith'in 1920'de yayınlanmış olduğu çalışma kabul edilir ve Irwin'in 1958'deki çalışması ile kırılma mekanikği ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. 1983'te Irwin kırılma mekanikği şu şekilde tanımlamıştır: “ Kırılma Mekanikği, gerilme analizine bağlı olarak kırılma direncini, uygulanan yüke ve hata içeren komponentlerin yapısal geometrisine bağlı olarak ortaya koyan kalitatif bir yaklaşımdır.” [10].

Kırılma mekanikğiyle ilgili ilk başarılı analizin 1920 yılında camdaki çatlağın ilerlemesiyle ilgili olarak Griffith tarafından yapıldığı kabul edilmektedir. Griffith sistemin toplam enerjisinin düşmesi durumunda var olan çatlak boyutunun büyüyeceği yaklaşımını sunarak formüle etmiş ve enerji dengesinin olduğunu öne sürmüştür. Griffith'in teorisi gevrek malzemelerin teorik mukevemetinin tahminini sağlamış ve kırılma dayanımı ile çatlak boyutu arasındaki ilişkiyi açıklamıştır. Irwin, Griffith tipi enerji dengesinin depolanmış gerinim enerjisi ile yüzey enerjisi artı plastik deformasyon için harcanan enerjinin toplamının arasında olması gerektiğini belirtmiştir [11].

Kırılma mekaniği aşağıdaki temel sorulara cevap arar:

Çatlak ilerleyecek mi?

Kritik çatlak uzunluğu nedir?

Çatlağı ilerletmek için minimum enerji nedir?

Çatlak kritik boyuta ne zaman ulaşır?

Çatlak kararsız bir şekilde hızlı mı yoksa yavaş bir şekilde mi ilerleyecektir?

Çatlak yavaş ve kararlı bir şekilde ilerleyecekse hangi hızda ilerler? [10]

Kırılma mekaniği malzemelerindeki çatlak, boşluk gibi yapısal hataların yük altındaki davranışlarını ve kırılma ile sonuçlanan hasarları inceler. Kırılma mekaniğinde Lineer Elastik Kırılma Mekaniği ve Elastik Plastik Kırılma Mekaniği olmak üzere iki türlü yaklaşım kullanılmaktadır [12].

3.2.1 Lineer elastik kırılma mekaniği

Lineer elastik kırılma mekaniği tamamen elastik şartlar altında çatlak boyutu ve kırılmayı tanımlamak için geliştirilmiştir. Bu durumda plastiklik çatlak ucunun çevrelediği çok küçük bir alanda görülür. LEKM çoğunlukla seramikler ve camlar gibi gevrek malzemelerin kırılmasını açıklamakta kullanılır [11].

LEKM'nin temel prensibi çatlak ucundaki gerilmenin parçaya uygulanan yüke, çatlak uzunluğu ve yönü doğrultusunda ifade edilmesidir. Çatlak ilerlemesi iki şekilde hesaplanabilir;

- 1- Parçadaki enerji limit değeri aşmış ise
- 2- Çatlak ucundaki gerilme değeri limit değere ulaşmış ise

Hesabın yapılmasında

- 1- Enerji dengesi yaklaşımı
- 2- Gerilme şiddet faktörü yaklaşımı kullanılmaktadır [10].

Kırılma; çatlaklar, dislokasyon mekanizması, kayma bantları ve malzeme geometrisi gibi konuların değerlendirilmesiyle anlaşılabilinen kompleks bir konudur. Bu konuyla ilgili genel bir teori olmamakla birlikte enerji teorisi kullanılan yaklaşımlardan biridir [10].

İçinde çatlak olan bir sisteme kuvvet uygulanması durumunda sistemin enerji dengesi açısından enerji türleri arasında

$$U_e = U_s + U_k + U_d \quad (3.1)$$

bağıntısı vardır.

Ue = Dış enerji

Us = Genleme enerjisi

Uk = Kinetik enerji

Ud = Kaybolan enerji (kırılma enerjisi)

Statik ve yarı statik durumda $U_k = 0$ alınabileceğinden çatlak ilerlemesi durumunda:

$$\frac{\partial}{\partial a} (U_e - U_s) = \frac{dU_d}{da} = G \quad (3.2)$$

yazılabilir. G değerine enerji salı verme diğer bir adla çatlak ilerleme enerjisi denir.

G değeri çatlak birim alanı kadar ilerlemesi sonucunda harcanan enerji olarak $2\gamma = G$ yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial a} (U_e - U_s) = \gamma \frac{\partial A}{\partial a} \quad (3.3)$$

∂A , çatlak ∂a kadar ilerlemesi sonucunda oluşan yüzeylerin alanıdır.

Genişliği b olan levhaya F kuvveti uygulanırsa kuvvetin uygulama noktası v kadar yer değiştirir. Çatlak da kadar uzama gösterirken kuvvetin uygulama noktası ise dv kadar yer değiştirir. Bu durumda dış kuvvetlerce yapılacak olan iş $U_e = Fdv$ olur.

B genişliğinde bir levhada çatlak ilerlemesi durumunda:

$$G = \frac{\partial}{\partial a} (U_e - U_s) = \frac{1}{B} \left(F \frac{\partial v}{\partial a} - \frac{\partial U_s}{\partial a} \right) \quad (3.4)$$

yazılabilir. Yük altında bulunan sistemde çatlak ilerlemediği sürece v uzaması uygulanan kuvvetle doğru orantılıdır. Bu ilişki komplians olarak adlandırılırken aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$F = kv = \frac{1}{C} v \quad (3.5)$$

F= kuvvet

k= rijitlik

v= deplasman

Burada C levhanın kompliansıdır.

Elastik plakanın şekil değişim enerjisi

$$U_s = \frac{1}{2} Fv = \frac{1}{2} CF^2 \quad (3.6)$$

şeklinde yazılır.

$$G = \frac{1}{B} \left(F^2 \frac{\partial C}{\partial a} + CF \frac{\partial F}{\partial a} - \frac{1}{2} F^2 \frac{\partial C}{\partial a} - CF \frac{\partial F}{\partial a} \right) = \frac{F^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (3.7)$$

Burada verilen G “enerji boşalma miktarı” G kritik değeri ulaştığı zaman çatlak hareket etmeye başlar.

Kuvvet altında çatlağın davranışı şu şekilde ifade edilebilir:

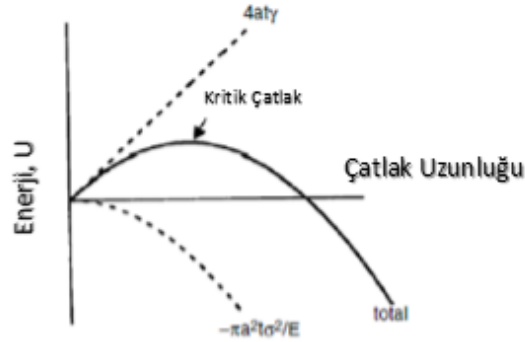
$G=R$ ise kararlı çatlak ilerlemesi var.

$G<R$ ise çatlak ilerlemesi yok.

$G>R$ ise kararsız çatlak ilerlemesi vardır [10].

3.2.1.1 Griffith Teoremi

Griffith’in kırılmaya yaklaşımı malzemelerin her zaman daha önceden çatlak içereceği yönündedir. Griffith merkezinde çatlak bulunduran geniş plakanın gerilme altında (σ) enerji değişimini (ΔU) çatlak boyutuyla olan ilişkisi yönünden hesaplamıştır [13].



Şekil 3.4 : Kırık boyu-enerji ilişkisi [13].

Griffith’in teoreminde 2 temel terim söz konusudur;

Birincisi, yüzey enerjisi ile çatlakla ilişkilidir;

$$\Delta U_{\text{surf}} = 4a\gamma \quad (3.8)$$

Burada t tabaka kalınlığını, $2a$ iç çatlağın boyunu ve γ yüzey gerilmesini göstermektedir.

İkinci terim ise; depolanmış elastik enerjinin azalışı çatlak varlığı nedeniyle.

$$\Delta U_{\text{elast}} = -\pi a^2 t \sigma^2 / E \quad (3.9)$$

E : Elastisite modülü σ : Kırılma gerilmesi

İki denklemin birleştirilmesi durumunda

$$\Delta U_{\text{total}} = 4a\gamma - \pi a^2 t (\sigma^2 / E) \quad (3.10)$$

denkliği elde edilir.

Bu denklik çatlak boyutuyla beraber önce sistem enerjisinin artacağını fakat daha sonra düşeceğini öngörmektedir. Sabit gerilme altında kritik çatlak boyutu üzerinde çatlak oluşumu enerjiyi düşürür [13].

Bu kritik çatlak boyutu iki denkleğin birleştirilmesiyle elde edilen denkleğin diferansiyelinin alınmasıyla;

$$d\Delta U_{total}/da = 4at\gamma - \pi \alpha^2 t (\sigma^2/E) = 0 \quad (3.11)$$

$$\sigma = \sqrt{2E\gamma/\pi\alpha} \quad (3.12)$$

elde edilen denklik ile bulunur.

Bu denklik Griffith kriteri olarak değerlendirilmektedir. Griffith teorisini cam ile yapmış olduğu deneylerdeki uyum neticesinde oluşturmuştur. Bunun yanında, tahmin edilen gerilme değeri metaller için çok düşüktür [13].

Teoride çatlak boyutuna bağlı olarak malzeme kalınlığının yeterli olduğu kabul edilmiş olduğundan kalınlık yönünde gerilme boşalması olmamaktadır. Düzlem-gerilme koşulları geçerli olmaktadır [13].

Griffith denkleminde yüzey enerjisi terimi yerine, genellikle kırılma işini gösteren bir parametre G kullanılır. Bu durumda denklem;

$$\sigma = \sqrt{EG_c/\pi\alpha} \quad (3.13)$$

Burada $G_c=2\gamma$ olup kırılma için gerekli olan işi gösterir.

Griffith, analizinde deformasyon enerjisinin çatlak ilerlemesi sırasında, ara yüzey enerjisine dönüşümünü esas almıştır. Dolayısıyla G, aynı zamanda çatlakın birim yüzeyde ilerlemesi için gerekli olan enerji miktarıdır, birimi N/m' dir. Kırılma, G' nin kritik değeri olan G_c ' de meydana gelir [12].

3.2.1.2 Irwin Teoremi

Griffith bağıntısı elastik davranış gösteren gevrek malzemelerde kullanılabilmektedir. Metal malzemelerde şekil değişimi görüldüğü için Griffith yaklaşımı yetersiz kalmaktadır.

Griffith'in belirttiği serbest kalan enerji şekil değişimi için de harcanacaktır. Irwin metal malzemeler gibi plastik davranış gösteren malzemelerde kırılma mekaniğinin esaslarını Griffith kriterlerinden yola çıkarak oluşturmuştur [14].

Griffith'in çalışması mühendisler tarafından 1950'lerin ilk yıllarına kadar görmezden gelinmiştir. Nedenleri, yapısal malzemeler için kırılmaya yol açacak olan enerji yüzey enerjisi ile karşılaştırıldığında daha yüksektir ve yapısal malzemelerin her zaman

çatlak ucunda inelastik deformasyona uğramasıdır ki bu da lineer elastik varsayımın çatlak ucunda sınırsız stres gerilmesi varsayımını gerçek dışı yapar [15].

1950'lerin başında enerji dengesi teorisi metalik yapılardaki büyük boyutlu kırılmaları inceleyen bilim insanları tarafından yeniden yorumlandı. Orowan tarafından yapılan X-Ray çalışmaları; gevrek kırılma gösteren malzemelerin bile kırık yüzeyi üzerinde geniş plastik deformasyon oluştuğuna dair kanıtlar olduğunu göstermiştir. Irwin ve Orowan birbirinden bağımsız olarak çatlak ucundaki plastik iş γ_p 'nin enerji tüketici olarak ve Griffith modelindeki yüzey enerjisi γ 'nin $\gamma + \gamma_p$ olarak düşünülmesi gerektiği sonucuna ulaşmışlardır. Orowan tipik metaller için $\gamma_p = 103 \gamma$ olarak öngörmüştür. Buından sonraki birkaç yıl içerisinde önemli katkıların çoğu Irwin ve onun çalışma arkadaşları tarafından yapılmıştır. Irwin ilk olarak elastik katıların kırılmasını gözlemlemiştir. Eğer çatlak ucundaki plastik bölge çatlak ile karşılaştırıldığında çok küçük ise çatlak ucuna doğru enerji akışı katının elastik hacminden geldiği varsayılabilir ve çatlak ucuna oldukça yakın bölgedeki gerilme durumuna kritik olarak bağlı olmayacaktır. Sonuç olarak, elastik yığındaki gerilme durumu elastik kırık çözümünden önemli ölçüde farklı olmayacaktır [15].

Irwin'in ikinci önemli katkısı çatlak bulunduran malzemede mevcut enerji oranının evrensel hesaplama metodunun geliştirilmesidir. Bunun için, her bir kırık geometrisi ve yükleme koşullarında sürekli elastisite çözümü gereklidir. Irwin asimtotik stresin evrensel doğasını ve lineer elastik katıda çatlak ucunda yer değiştirmeyi tanımlamıştır. Irwin, Sneddon ve Westergaard'ın simetrik çatlak çözümünü asimtotik yaklaşımı da ekleyerek tüm çatlak problemleri için genelleştirmiştir [15].

Gerilme;

$$\sigma_{ij} \approx \left(\frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right) f_{ij}(\theta) \quad (3.14)$$

şeklinde açıklanmıştır.

Irwin K'yı gerilme yoğunluk faktörü olarak tanımlamıştır. K asimtotik gerilme ve çatlak önündeki yer değiştirme olarak karakterize edilir [15].

3.2.1.3 Kırılma Modelleri

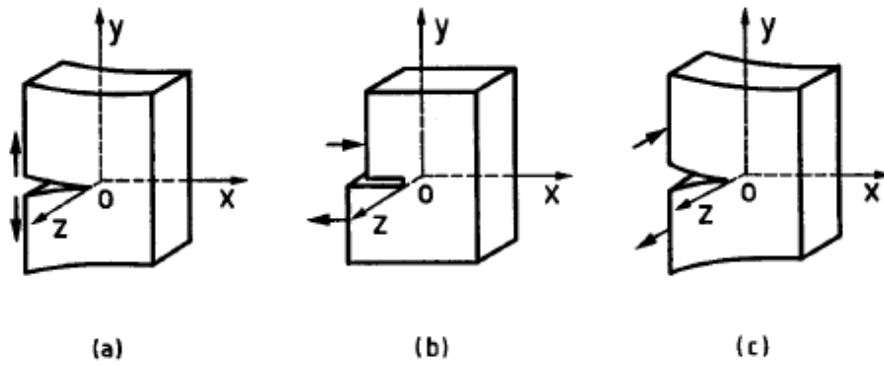
Malzemede bulunan çatlaklar şekil 3.5'te gösterildiği gibi yükün durumuna göre Mod I veya açılma modu, Mod II veya düzlem içi kayma modu ve Mod III veya yırtılma modu olmak üzere 3 şekilde ilerleyebilmektedir [10].

Açılma modu deformasyon tipinde, Mod I, gerilmenin normal bileşeni, çatlak yüzeyine dik olarak y eksenini doğrultusunda etki etmektedir. Mod I ile ilgili gerilme şiddeti faktörü K_I 'dir [10].

Düzlem içi kayma modu Mod II deformasyon tipinde, gerilmenin kayma bileşeni çatlakla x eksenini doğrultusunda etki etmektedir. Mod II ile ilgili gerilme şiddeti faktörü K_{II} 'dir [10].

Yırtılma modu Mod III deformasyon tipinde, gerilmenin kayma bileşeni, çatlakla z eksenini doğrultusunda, çatlakla dip kenarına paralel olarak etki etmektedir. Mod III ile ilgili gerilme şiddeti faktörün K_{III} 'dür [10].

Çatlak ilerlemesi sadece bir modu takip edebileceği gibi diğer modların birleşimi şeklinde de olabilir. Bunlardan Mod I, çekme gerilmesiyle oluştuğundan en sık rastlanan ve en fazla hasara neden olan çatlak ilerlemesi modu olduğu için en fazla incelenen bu kırılma modu olmuştur [10].



Şekil 3.5 : Temel çatlak ilerleme modları a) Mod I, b) Mod II, c) Mod III [9].

3.2.2 Elastik plastik kırılma mekaniği

Operasyon sıcaklığı ve yüksek yük altında bir çok mühendislik malzemesi inelastik özellik gösterir. Bu tip malzemelerde kırılma sürecinin temel özelliği enerji dağıtımının gerçekleştiği çatlak önündeki inelastik bölgenin uzunluğudur. Elastik plastik malzemelerde plastik bölgenin boyutu çatlak önündeki koşullara bağlıdır. Oldukça kalın numunelerde iç bölge düzlem gerilme şartları altındayken yakınında daha büyük plastik bölge ve kırılmaya karşı yüksek direnç eşliğinde düzlem gerilme koşullarına geçiş olacaktır. Birincisi iç kırılmada düşük enerji, kesme dudağı oluşumu ve yüzeyde yüksek enerjili sünek kırılma gözlemlenir. Pratikte kırılma tokluğu için G_c , kritik gerilme salınım hızı yerine, G_{Ic} terimi kullanılır. İkincisi, numune sınırına

özellikle kalınlığa oldukça bağlıdır. Çatlak önündeki plastik bölgenin boyutu çatlağın büyümesi ile değişir. Genellikle çatlak büyüdükçe plastik bölgenin boyutu da büyür. Malzemenin kırılmaya karşı direncinin kırık boyutunun artması ile artacaktır [15].

Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) yaklaşımı daha çok gevrek malzemelerde görülen elastik koşullar için geliştirilmiştir. Sünek malzemelerde LEKM yaklaşımı geçerliliğini kaybeder ve bunun yerine Elasto plastik kırılma mekaniği (EPKM) yaklaşımı kullanılmaktadır. EPKM yaklaşımında çatlak ilerlemesini karakterize etmek için J integrali, çatlak ucu açılması (CTOD) kavramları kullanılmaktadır [12].

J integrali ve gerilme yoğunluk faktörü arasında,

$$J = K_2^2 / E^* \quad (3.15)$$

ilişkisi vardır.

Düzlem gerilme durumunda;

$$E^* = E$$

Düzlem deformasyon durumunda ise;

$$E^* = E / (1 - \nu^2) \quad (3.16)$$

olmaktadır.

Çatlak ucundaki yer değiştirme miktarının ölçüsü elastik plastik kırılma mekaniğinde plastik şekil değiştirme miktarı ile bağlantılı olduğu için kırılma kriteri olarak kullanılmaktadır [16].

3.3 Kırılma Tokluğu Deneyleri

Kırılma tokluğunun belirlenebilmesi için öncelikle numune yüzeyinde çentik oluşturulması gerekmektedir. Daha sonra yorulma deneyi ile çatlak oluşturulur. Çatlak oluşumu kırılma tokluğu deneylerinde temel karakteristiğidir ve yorulma deneyi ile düzgün oluşumu sağlanmalıdır. Çatlak oluşturulmasında kullanılacak olan yorulma yükünün çatlağı ne çok kısa ne de çok uzun bir zamanda oluşturmayacak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Çok küçük yorulma yükü boşa zaman kaybına neden olacakken çok yüksek olması çatlağın hemen oluşmasını sağlar ve bu bölgede oluşan plastik deformasyonun fazlalığı deney sonuçlarını önemli derecede etkiler. Gevrek malzemeler için yorulma çatlağı oluşturulmasına gerek yoktur. Çentik oluşumunun ardından numune düşük deformasyon hızında çekme cihazında çekilir. Uygulanan yüke göre çatlaktaki ilerleme kaydedilir. Yük arttıkça malzeme öncelikle elastik olarak deformasyona uğrar ki burada yük ile doğrusal olarak çatlağın boyu artar. Yük

arttırıldıkça elastik sınır aşılar ve malzemenin kırılma özelliğine bağlı olarak farklı durumlar oluşur. Malzeme gevrek ise yük elastik sınırı aştığında numune kırılır ve yük aniden düşer. Bu durumda K_{Ic} hesaplamasında maksimum yük alınır. Malzeme daha sünek bir yapıda ise yük elastik sınırı aştığında düşer ve sabit bir değerde kalır fakat sonra tekrardan artar. Bu durum malzeme kırılncaya kadar birkaç kez tekrar edebilir. Bu duruma kademeli çatlak teşekkülü denir ve K_{Ic} hesaplamalarında ilk çatlağın teşekkül ettiği yük alınır. Sünek malzemeler için uygulanan yük elastik sınırı aştığında çatlağın boyu yük arttıkça artar ve malzeme kırılncaya kadar devam eder. K_{Ic} hesaplamalarında oluşan eğrinin incelenmesi gerekmektedir [16].

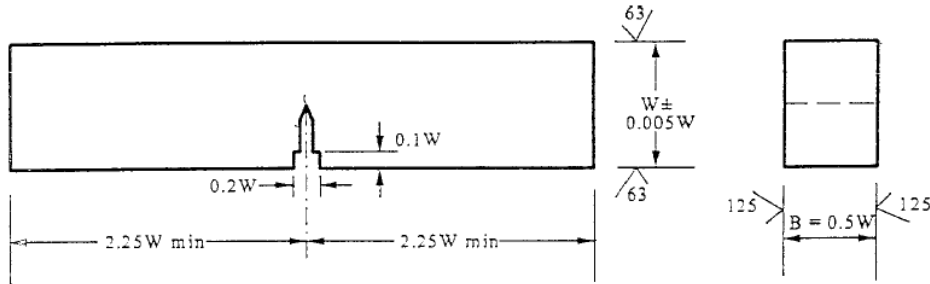
3.3.1 Tek çentik kenarlı eğme testi (SENB)

Tek çentik kenarlı eğme test numunesi (şekil 3.6'da gösterilen) ile K_{Ic} E 1820-01 standardına göre aşağıdaki formül ile hesaplanır:

Test parçasında $0.4 \leq a/W \leq 0.6$ şartı sağlanmalıdır.

$$K_{(i)} = \left[\frac{P_i S}{(BB_N)^{\frac{1}{2}} W^{3/2}} \right] f(a_i/W) \quad (3.17)$$

$$f(a_i/W) = \frac{3(a_i/W)^{\frac{1}{2}} \left[1,99 - (a_i/w) (1 - a_i/w) \times (2,15 - 3,93 \left(\frac{a_i}{w} \right) + 2,7 \left(\frac{a_i}{w} \right)^2) \right]}{2 \left(1 + \frac{2a_i}{w} \right) (1 - a_i/w)^{3/2}} \quad (3.18)$$



Şekil 3.6 : Tek Çentik Kenarlı Eğme Test Numunesi [17].

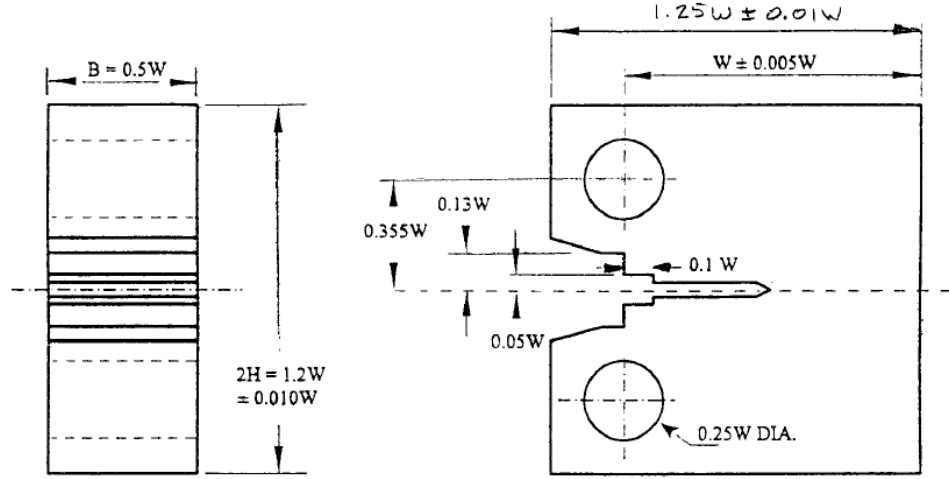
3.3.2 Kompakt çekme testi (CT)

Kompakt çekme testi yöntemine göre K_{Ic} ASTM E 1820-01 standardına göre aşağıdaki formülle hesaplanır.

Test parçasında $0.3 \leq a/W \leq 0.8$ şartı sağlanmalıdır.

$$K_{(i)} = \left[\frac{P_i}{(BB_N W)^{\frac{1}{2}}} \right] f(a_i/W) \quad (3.19)$$

$$f(a_i/W) = \frac{\left[\left(2 + \frac{a_i}{W}\right) \left(0,886 + 4,64 \left(\frac{a_i}{W}\right) - 13,32 \left(\frac{a_i}{W}\right)^2 + 14,72 \left(\frac{a_i}{W}\right)^3 - 5,6 \left(\frac{a_i}{W}\right)^4 \right) \right]}{(1 - a_i/W)^{3/2}} \quad (3.20)$$

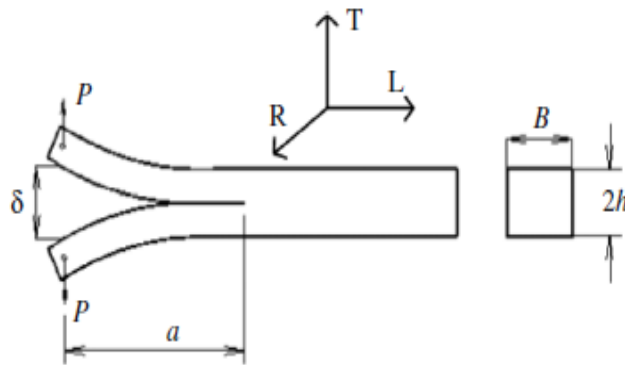


Şekil 3.7 : Kompakt Çekme Test Numunesi [17].

3.3.3 Çift ankastre kiriş testi (DCB)

Çift ankastre kiriş test yöntemine göre kırılma tokluğu aşağıdaki formülde belirtildiği şekilde hesaplanır.

$$G = 12 \frac{P^2 a^2}{B^2 h^3 E} (1 + 0,64h/a)^2 \quad [18] \quad (3.21)$$



Şekil 3.8 : Çift Ankastre Kiriş Testi Numunesi [19].

3.3.4 İndentasyon tekniği

Seramiklerin kırılma tokluğunun belirlenmesinde SENB, CT ve DCB gibi bir çok yöntem kullanılmaktadır. Bu metodların test numunelerinin hazırlanışlarının zor

olması, özel numune geometrisi gerektirmesi ve pahalı olması kullanımlarını sınırlandırmaktadır. Bu durumu ortadan kaldırmak için son yıllarda indentasyon tekniği geliştirilmiştir. İndentasyon tekniği ile çok daha hızlı ve basit bir şekilde sonuç alınabilmektedir [20].

Gevrek malzemelerde indentasyon tekniği ile kırılma tokluğunun belirlenmesi fikrini ilk defa ortaya atan ve kullanan kişi Palmqvist olmuştur. Vickers sertlik testini metal karbitlerde kullanarak Palmqvist kırılma süreci ile sertlik gibi diğer önemli parametreler arasında ilişki oluşturabilmiştir. Daha sonrasında bir çok araştırmacı Palmqvist'i takip etmiş ve mekanik özelliklerin belirlenmesi için denklemler oluşturmuştur [20].

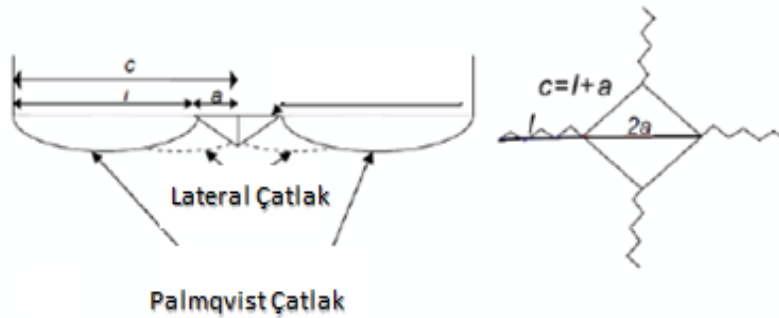
İndentasyon tekniği kullanılarak kırılma tokluğu hesaplamaları 3 teknik temelindedir. Birinci model yarı eliptik kırığa sahip palmqvist model, ikinci model half-penny ya da median model, üçüncü ise eğri uydurma curve fitting tekniktir. İki model arasındaki temel fark yapılarındaki farklılıktır [20].

Indentasyon tekniği ile kırılma tokluğu hesaplanmasında bir çok formül kullanılmaktadır. Kullanılan formüller yarı amprik olarak oluşturulmuştur. Tez çalışması kapsamında her bir teknik için 4'er formül olmak üzere toplam 12 formül üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Seçilen formüller çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

3.3.4.1 Palmqvist model

Palmqvist modelinde oluşan çatlağın boyu vickers izinin ucundan ölçülmektedir ve vickers izinin uzunluğu dahil edilmemektedir.

Genel yaklaşım ile $c/a < 2,5$ ise kırık modeli palmqvist tipi olarak düşünülmektedir ve ilgili formüller kırılma tokluğu hesabı için kullanılmaktadır [20]. Şekil 3.9'da Palmqvist çatlak izi görülmektedir.

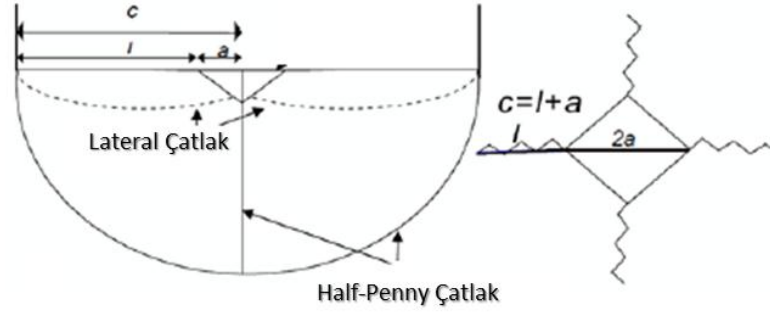


Şekil 3.9 : Palmqvist model çatlak izi [20].

3.3.4.2 Half-Penny model

Half-penny modelinde Palmqvist modelinin tersine oluşan çatlağın boyu vickers izinin ucundan ölçülmektedir ve vickers izinin uzunluğu dahil edilmektedir [20].

Genel yaklaşım ile $c/a \geq 2,5$ ise kırık modeli half-penny olarak düşünülmektedir ve ilgili formüller kırılma tokluğu hesabı için kullanılmaktadır [20]. Şekil 3.10’da Half-penny model çatlak izi görülmektedir.



Şekil 3.10 : Half-penny model çatlak izi [20].

3.3.4.3 Curve fitting teknik

Curve fitting modeli, yaygın modellerin denklem sonuçlarının karşılaştırılması sonucunda oluşturulmuştur [20].

Çizelge 3.1 : Hesaplama da Kullanılan formüller.

	Formül	Referans	Teknik
1	$K_C=0.0913((H\nu a)(E/H\nu)^{2/5}(l^{-1/2})$ (3.22)	[21]	Palmqvist Model
2	$K_C=0.079\frac{P}{a^{3/2}}\log(4.5\frac{a}{c})$ (3.23)	[22]	
3	$K_C=0.015(l/a)^{-1/2}(E/H)^{2/3}\left(P/c^{3/2}\right)$ (3.24)	[21]	
4	$K_C=0.048\left(\frac{l}{a}\right)^{-1/2}\left(\frac{H\nu}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{H\nu a^{1/2}}{\Phi}\right)$ (3.25)	[23]	
1	$K_C=0.0752\frac{P}{c^{3/2}}$ (3.26)	[24]	Half- penny Model
2	$K_C=0.129\left(\frac{c}{a}\right)^{-3/2}\left(\frac{H\nu}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{H\nu a^{1/2}}{\Phi}\right)$ (3.27)	[25]	
3	$K_C=0.014\left(\frac{E}{H\nu}\right)^{1/2}\left(\frac{P}{c^{3/2}}\right)$ (3.28)	[26]	
4	$K_C=0.0782H\nu a^{1/2}\left(\frac{E}{H\nu}\right)^{2/5}\left(\frac{c}{a}\right)^{-1.56}$ (3.29)	[21]	
1	$K_C=0.142\left(\frac{H\nu}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{H\nu a^{1/2}}{\Phi}\right)\left(\frac{c}{a}\right)^{-1.56}$ (3.30)	[27]	Curve Fitting Teknik
2	$K_C=0.4636\left(\frac{E}{H\nu}\right)^{2/5}\left(\frac{P}{a^{3/2}}\right)10^F$ (3.31)	[28]	
3	$K_C=H\nu a^{1/2}\left(\frac{E}{H\nu}\right)^{2/5}10^y$ (3.32)	[28]	
4	$K_C=0.055\log\left(8.4\frac{a}{c}\right)\left(\frac{H\nu}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{H\nu a^{1/2}}{\Phi}\right)$ (3.33)	[29]	

$$F=-1.59-0.34B-2.02B^2+11.23B^3-24.97B^4+16.32B^5 \quad (3.34)$$

$$y=-1.59-0.34X-2.02X^2+11.23X^3-24.97X^4+15.32X^5 \quad (3.35)$$

$$X=B=\log\left(\frac{c}{a}\right) \quad (3.36)$$

Kc: Kırılma Tokluğu (Mpam^{1/2})

P: Yük (kg)

a: İndentasyon izinin köşe uzunluğunun yarısı (m)

c: Radyal çatlak boyu (m)

E: Elastisite modülü (GPa)

H_v: Vickers sertliği (GPa)

l: Palmqvist çatlak boyu (m)

Φ: 2,7 sabit

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Malzemeler

Tez konusu kapsamında Trakya Cam Sanayii A.Ş. Trakya Fabrikasının ürettiği tempersiz beyaz ve yeşil renkli düz camlar (soda-silika camı) ile konu camların temperlenmiş halleri kullanılmıştır. Kullanılan camların kalınlıkları;1,6mm, 2,2mm, 3,2mm ve 4mm'dir. Numuneler herhangi bir özel boyutta kesilmemiş ve numunelere parlatma işlemi yapılmamıştır.

4.2 Deneysel Uygulama

Numunelere yönelik herhangi bir özel kesim yapılmamış ve numuneler parlatma işlemine tabii tutulmamıştır. Numunelere Vickers izi oluşturabilmek için Zwick ZHU 2,5 cihazı kullanılmıştır. Cihazdaki parametreler aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

Yük uygulama hızı: 0,05mm/dk

Yük uygulama süresi: 20sn

Yük boşaltma hızı: 0,05mm/dk

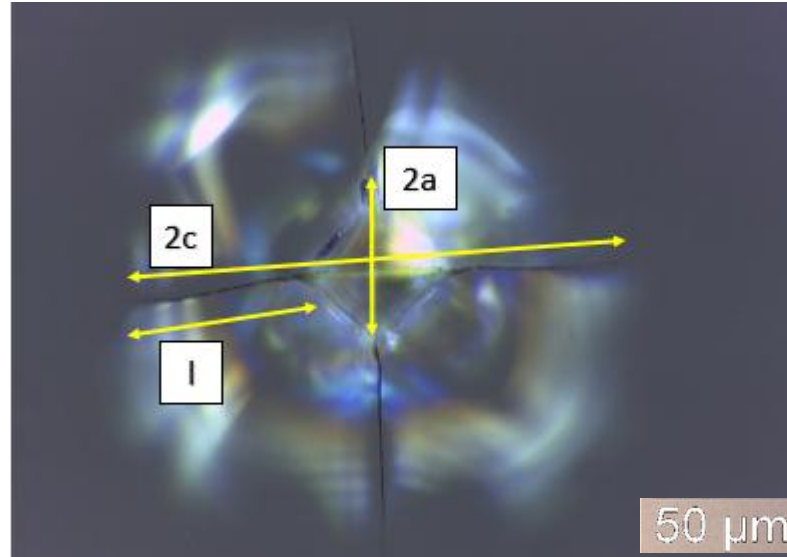
Uygulanan yükler: 0,2kg; 0,3kg; 0,5kg; 1kg; 2kg; 3kg ve 5kg

Her bir yük için 3 adet deneme yapılmış ve ortalamaları alınmıştır. Oluşturulan izlerin ölçümleri 24 saat sonra Leica ICC50 HD optik mikroskobu kullanılarak alınmıştır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

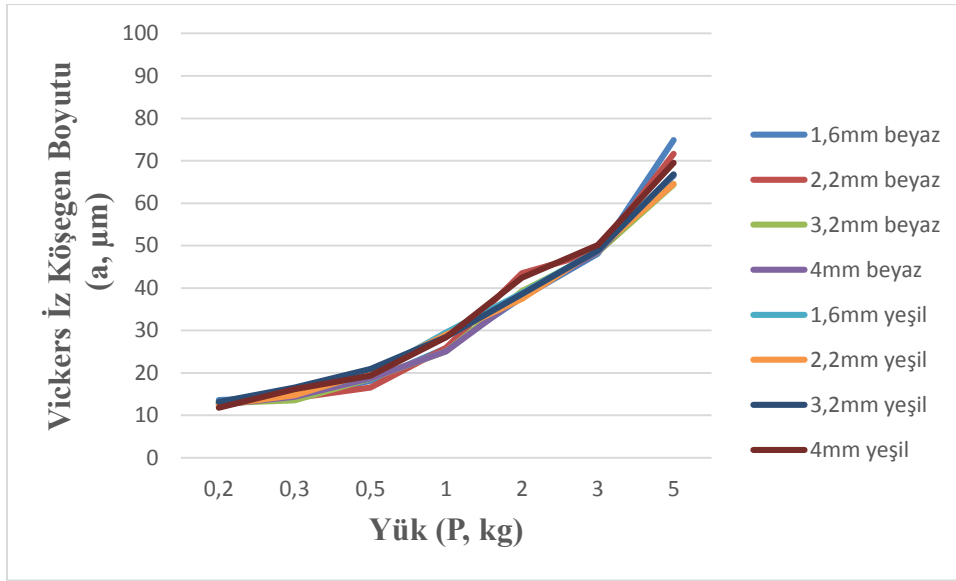
5.1 Yük - atlak Boyu Değişimi

İlgili camlarda farklı yükler altında Zwick indentasyon cihazında indentasyon izleri oluşturulmuş ve Leica optik mikroskobu altında çatlak boyutunun ve Vickers iz köşegen uzunluğunun ölçümleri alınmıştır. şekil 5.1’de ölçümü alınmış olan 3,2mm kalınlıkta tempersiz yeşil camın 1kg yük altında mikroskop görüntüsü görünmektedir.

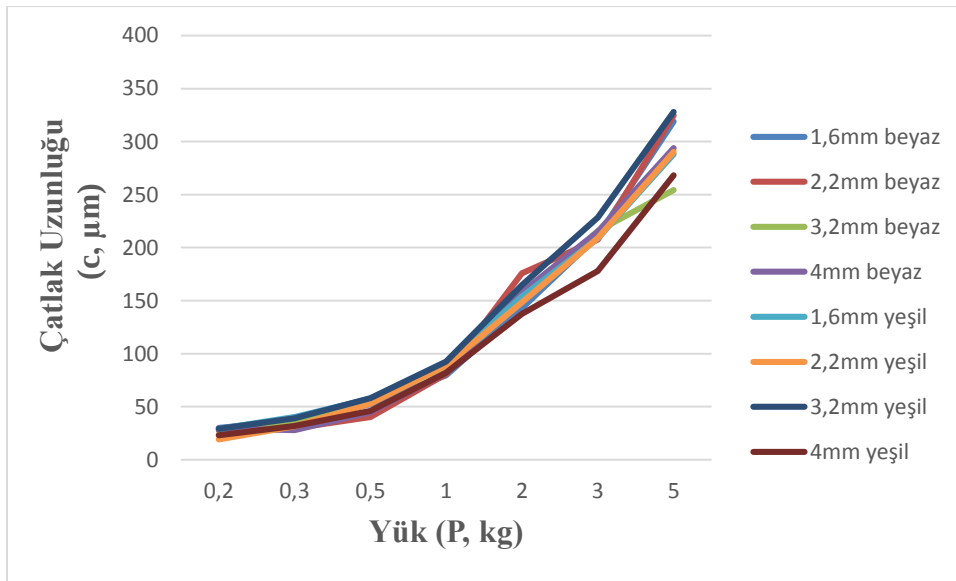


şekil 5.1 : 1kg yük altında 3,2mm tempersiz yeşil cam optik mikroskop görüntüsü.

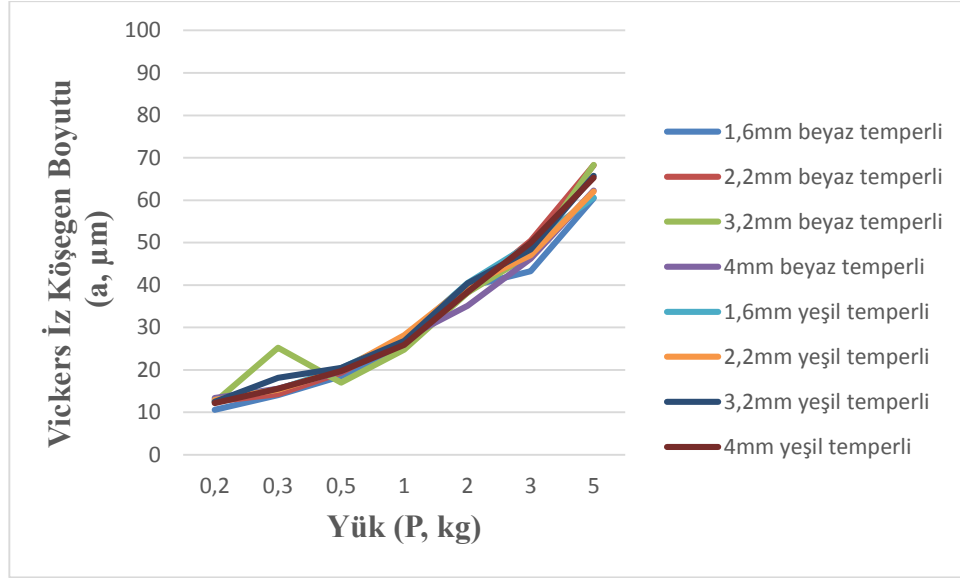
Yük arttıķķa vickers izi (a) ve çatlak boyu (c) değerleri artmaktadır. Beyaz-yeşil tempersiz camlarda ve temperli camlarda farklı yüklerde yapılan Vickers iz köşegen uzunluğu ve çatlak uzunluğu sonuçları sırasıyla Ek A ve Ek B’deki çizelgelere verilmiştir. Bu çizelgelere göre çatlak uzunluğunun ve iz köşegen boyutunun indentasyon yüküne bağlı olarak değişimi tempersiz yeşil ve beyaz camlar için şekil 5.2’de temperli camlar için ise şekil 5.3’te görülmektedir.



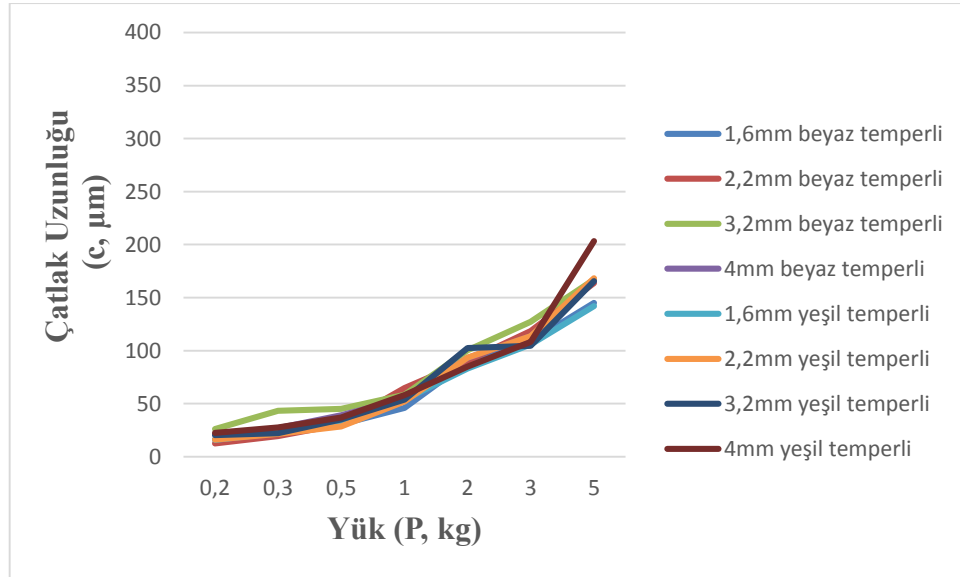
Şekil 5.2a : Tempersiz cam yük vickers izi değişimi.



Şekil 5.2b: Tempersiz cam yük çatlak boyu değişimi.



Şekil 5.3a : Temperli cam yük vickers izi değişimi.



Şekil 5.3b : Temperli cam yük çatlak boyu değişimi.

Beyaz ve yeşil tempersiz ve temperli camlar arasında a ve c değerleri yönünden bir farklılık görülmemektedir. Renk farklılığının a ve c değerlerine etkisi yoktur. Bununla birlikte tempersiz camların a ve c değerlerinin temperli camlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Temperleme işlemi vickers izini ve çatlak boyutunu azaltmaktadır.

5.2 Yük-Vickers Sertlik Değişimi

Vickers mikro sertlik testinde kare piramit elmas u kullanılmaktadır. Piramidin kaşılıklı yüzeyleri arası 136°’dir (şekil5.4). Vickers sertlik numarası yükün indentasyonun yüzey alanına bölünmesi ile belirlenir. Pratikte indentasyon alan diagonellerin boyunun mikroskopik ölçülmesi ile hesaplanmaktadır. Vickers sertlik numarası aşağıdaki formül uyarınca hesaplanmaktadır [30]:

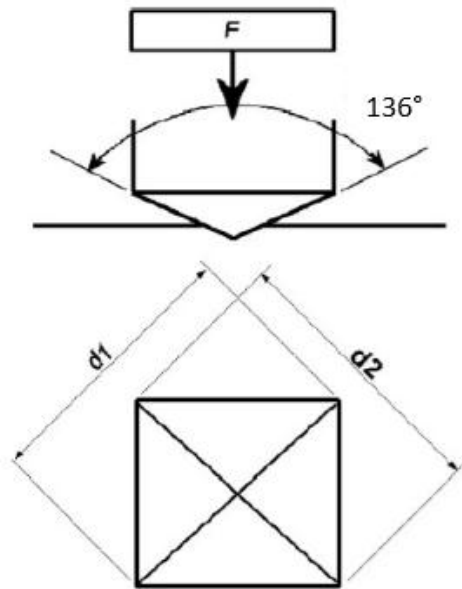
$$VHN = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{L^2} = 1.854p/L^2 \quad (5.1)$$

P: Uygulanan yük (kg)

L: Diagonal uzunluğunun ortalaması (mm)

: Piramidin karşılıklı yüzeyleri arasındaki açı 136°

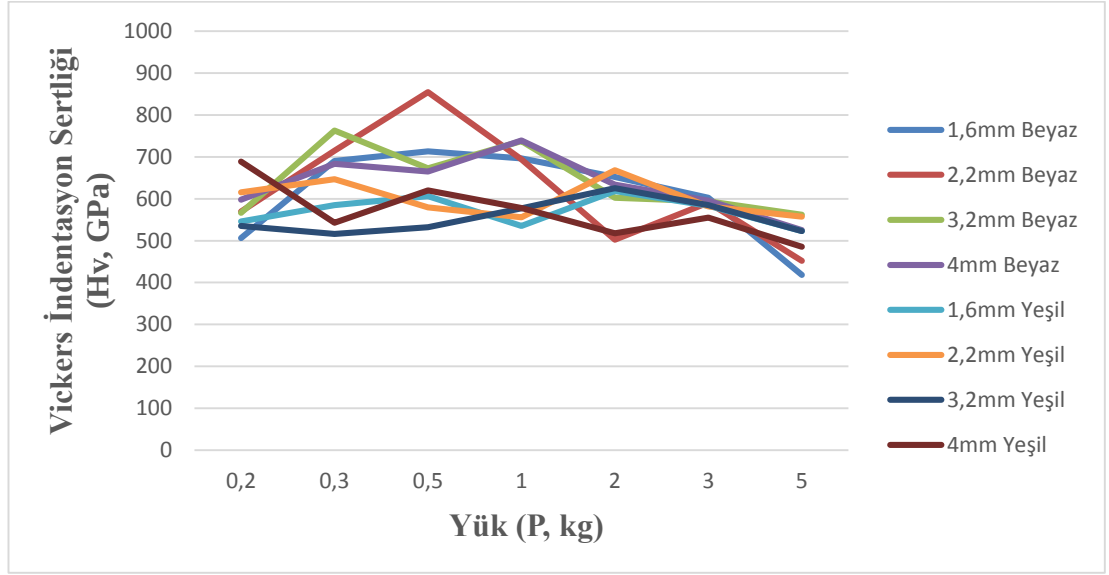
Bir çok mikrosertlik testinde uygulanan yükte malzeme yüzeyine penetre edecek şekilde küçük simetrik u kullanılır. Mikrosertlik testinde 3 ana standart kullanılır: DIN, ISO, and ASTM. DIN standartında Vickers mikrosertlik için 50133, Knoop mikrosertlik için 52333 numaralı standartlar kullanılır. ISO standartında ise R81, R192, and R399.14 numaralı standartlar kullanılır [30].



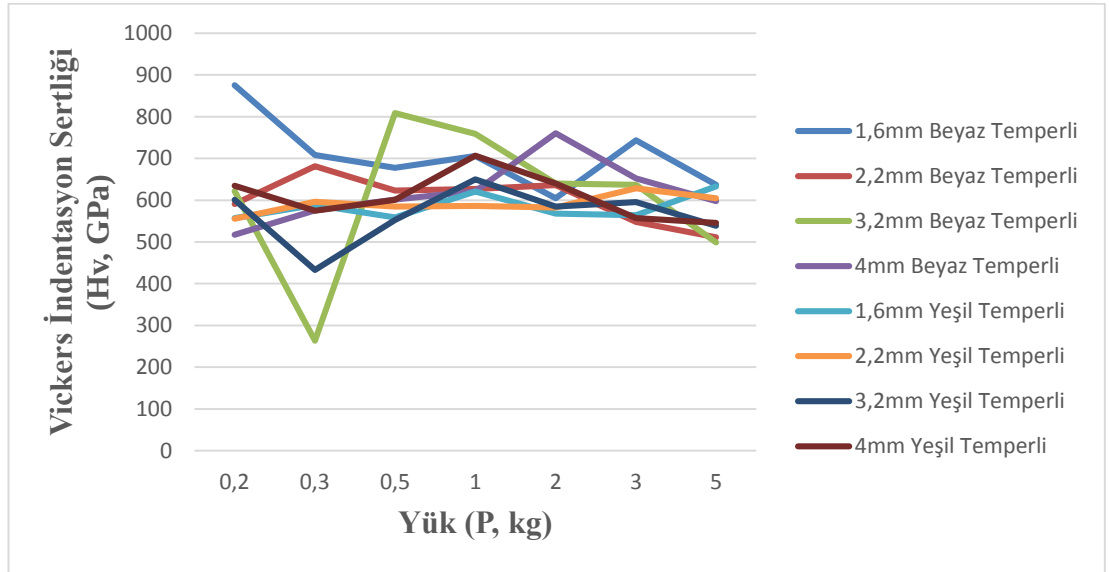
şekil 5.4 : Vickers elmas piramit indentasyonu [30].

Beyaz-yeşil temperli ve tempersiz camlarda farklı yüklerde yapılan Vickers sertlik lmleri Ek C’de verilmiştir. Bu çizelgelere göre Vickers sertlik değerlerinin yüke

bağlı olarak değişimi tempersiz yeşil ve beyaz camlar için şekil 5.5’de temperli camlar için ise şekil 5.6’da görülmektedir.



Şekil 5.5 : Tempersiz cam yük-sertlik değişimi.



Şekil 5.6 : Temperli cam yük-sertlik değişimi.

Temperli ve tempersiz yeşil ve beyaz camlar için yapılmış olan tüm hesaplamaların istatistiksel analizi yapıldığında çizelge 5.1’de verilmiş olan sertlik değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 5.1 : Cam türü-sertlik değerleri değişimi.

Cam Türü	Sertlik (GPa)
Tempersiz	5,89±0,80
Temperli	5,98±0,87

Yapılan hesaplamalar uyarınca temperli, tempersiz yeşil ve beyaz camlar için sertlik değerleri yönünden bir farklılık görülmemektedir. Camdaki renk değişiminin ve temperleme işleminin sertlik yönünden ciddi bir etkisi görülmemiştir. Literatürde soda-silika cam için sertlik değeri 5,5GPa [31] gösterilmektedir. Bu durumda temperli ve tempersiz camlar için sertlik değerinin literatürde belirtilmiş olan değere uyumlu sonuç verdiği görülmüştür.

5.3 Cam Türü-Elastisite Modülü Değişimi

Tez kapsamında incelenen camların elastisite modülü ve sertlik değerleri Oliver ve Pharr metodu ile belirlenmiştir. Bu metoda göre elastisite modülü ve sertlik belirlenmesi yükün uygulanması ve kaldırılmasını içeren tek çevrimden elde edilen indentasyon yük-yer değiştirme datasına dayanmaktadır. İndenter olarak Berkovich üçgen piramidi gibi keskin ve geometrik olarak özdeş piramitler kullanılmaktadır. [32] Tez kapsamında uygulanan yüklerin hepsinde çatlak oluşumu gözlemediği için kırılma tokluğu hesaplamalarında kullanılmak üzere çatlak oluşumunun gözlenmediği 0,01kg yük altında E ve Hv değerleri Oliver ve Pharr metodu ile belirlenmiştir. Her bir cam için 5'er deneme yapılmış ve ölçümlerin ortalamaları alınmıştır. Çizelge 5.2'de seçilmiş olan camların ilgili metod ile belirlenmiş olan sertlik ve elastisite modülü değerleri görülmektedir.

Çizelge 5.2 : Cam türü-elastisite modülü ve sertlik değişimi.

Cam Türü	E (GPa)	Sertlik Hv _{0,01} (GPa)
1,6mm yeşil	80,36±2,32	7,45±0,48
2,2mm yeşil	78,68±2,30	7,88±0,34
3,2mm yeşil	77,13±1,22	7,88±0,31
4mm yeşil	80,34±3,65	7,08±0,60
4mm beyaz	81,64±5,3	7,88±0,25
4mm yeşil temperli	87,78±4,16	6,17±0,23
4mm beyaz temperli	77,67±3,04	8,5±0,98

E ve Hv değerine yönelik ortalama ölçümler çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 : 0,01kg yük altında E ve Hv değerlerinin ortlaması.

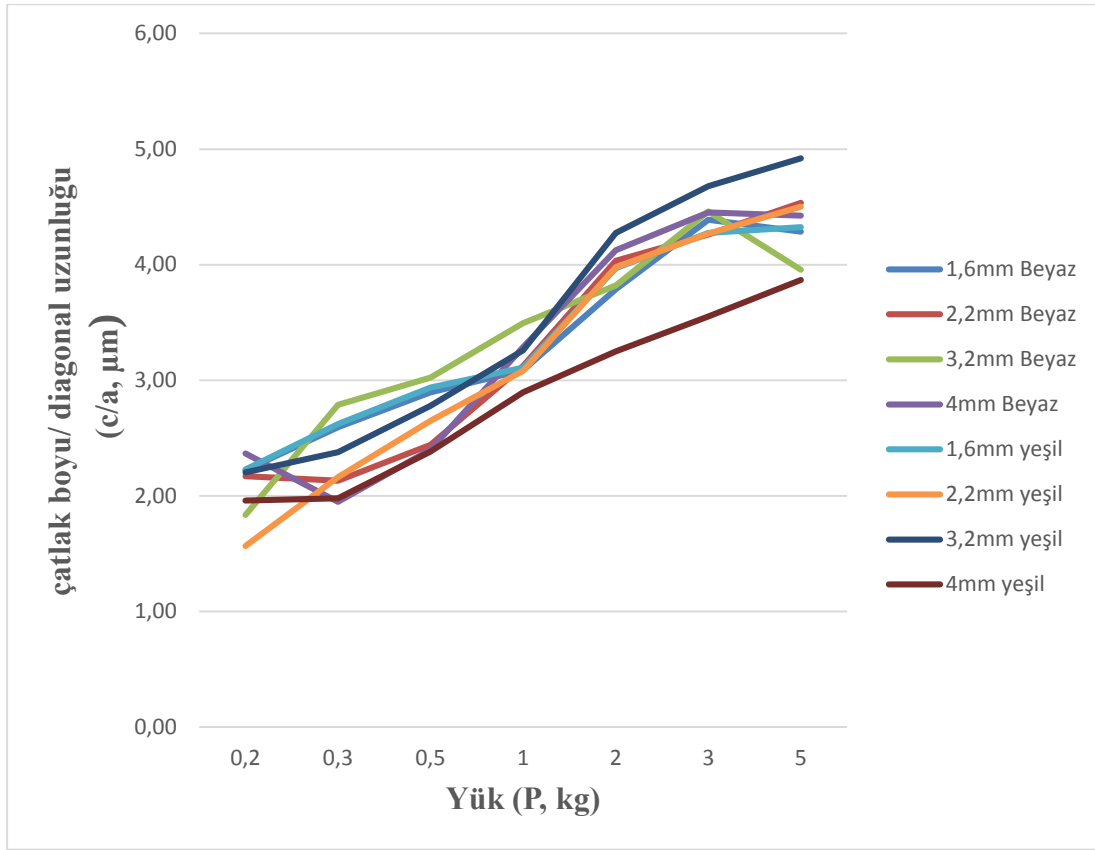
E (GPa)	Hv (GPa)
80,08	7,66

Ölçümler sonucunda cam rengi ve kalınlığı ile temperleme işleminin elastisite modülü ve sertlik üzerinde ciddi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

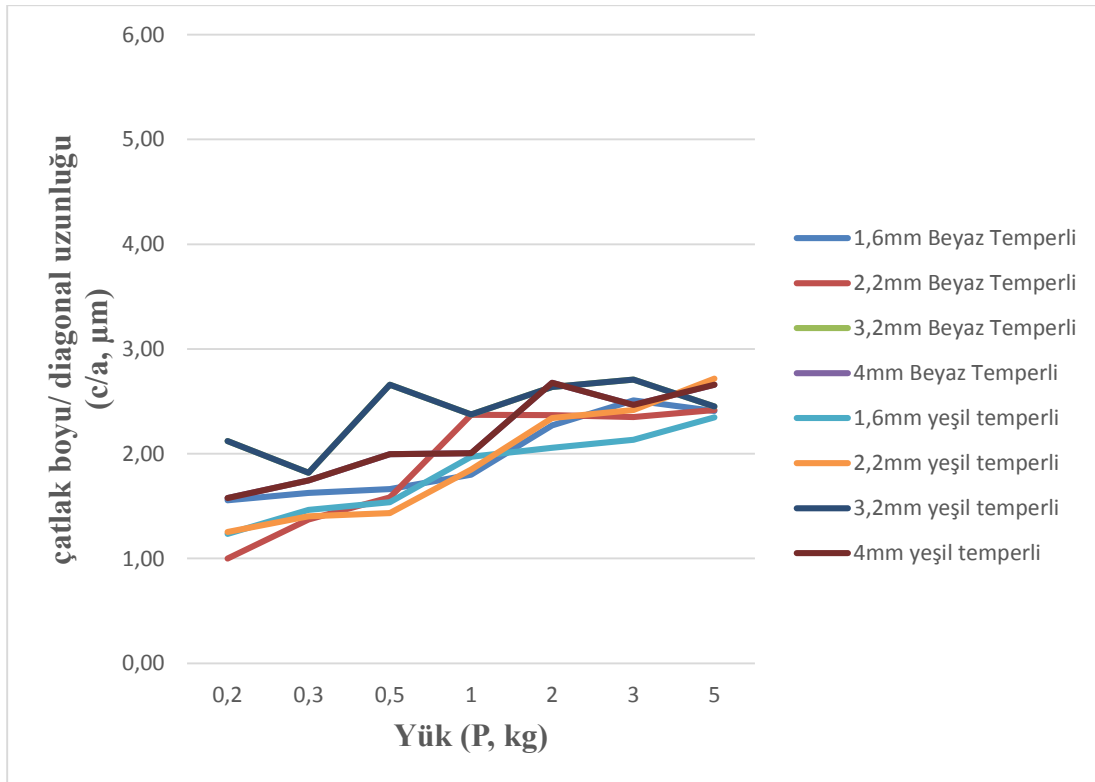
Bununla birlikte indentasyon izi etrafında çatlak oluşturmayan yük değerlerine göre belirlenen sertlik değerlerinin ve elastisite modülünün çizelge 5.3'te ortalamaları verilen indentasyon etrafında çatlak oluşturan yük değerlerine göre belirlenen sertlik ve elastisite modülü değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.

5.4 Kırılma Tokluğu Hesaplamaları

Vickers indentasyon tekniği ile kırılma tokluğu hesaplamalarında oluşan çatlağın hangi modele uygun olduğunu belirlemede c/a oranı referans olarak kullanılmaktadır. Ek D'de bulunmakta olan çizelgelerde temperli ve tempesiz camların c/a oranları belirtilmiştir. Bu çizelgeler doğrultusunda c/a oranları tempersiz camlar için şekil 5.7a'da temperli camlar için ise şekil 5.7b 'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7a : Tempersiz cam yük-c/a değişimi.

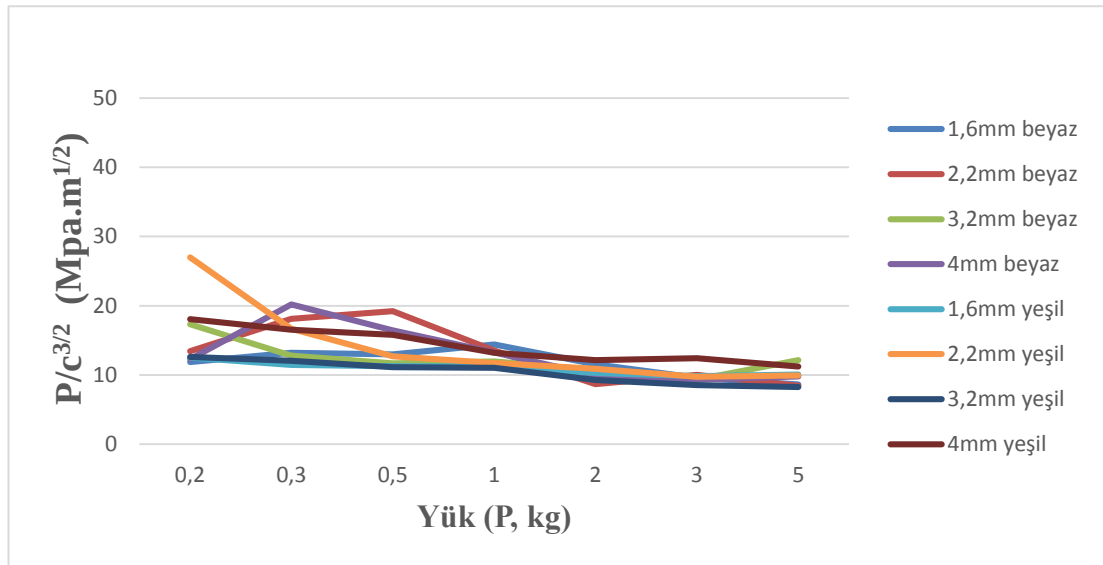


Şekil 5.7b : Temperli cam yük-c/a değişimi.

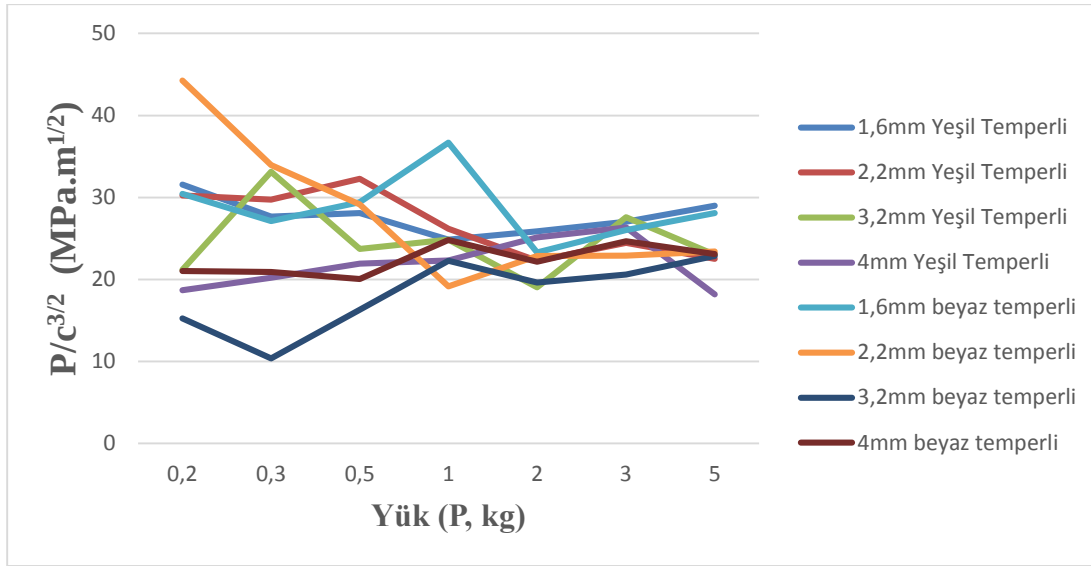
Ek D'deki çizelgelerde görüleceği üzere genel olarak c/a değeri temperli ve tempersiz camlar için yük arttıkça artmakla birlikte tempersiz camların c/a değerleri temperli camlardan yüksektir.

Tempersiz camlarda c/a değerinin 0,2kg-0,3kg'de 2,5'ten küçük; 0,5kg-5kg arasında 2,5'den büyük olduğu görülmektedir. Temperli camlar da ise genel olarak 0,2kg-5kg arasında c/a oranının 2,5'den küçük olduğu görülmektedir.

Konu formüllerin kırılma tokluğu hesaplamalarında kullanılabilmesi için Kc değerinin yükten bağımsız olması gerekmektedir. Bu durumda $P/c^{3/2}$ ilişkisinin incelenmesi gereklidir. 1-5kg değerleri arasında temperli ve tempersiz camlarda yük arttıkça $P/c^{3/2}$ değerinin 5.8a ve 5.8b şekillerinde gösterildiği gibi sabite gittiği görülmektedir.



Şekil 5.8a : Tempersiz cam yük- $p/c^{3/2}$ ilişkisi.



Şekil 5.8b : Temperli cam yük-p/c^{3/2} ilişkisi.

Tempersiz camlarda 1-5kg arasında a/c değeri 2,5'ten büyük olduğu için half-penny model; temperli camlarda 1-5kg arasında 2,5'ten küçük olduğu için plamqvist model formülleri kırılma tokluğu hesaplamalarında kullanılacaktır.

Bu bilgiler doğrultusunda kırılma tokluğu hesaplamalarında kullanılmakta olan formüllerin birbirinden olan farklılıkları araştırılmış, hangi formülün temperli ve tempersiz soda-silika camına en uygun olacağı belirlenmeye çalışılmıştır.

Formüllerde kullanılan H_v ve E değeri için çatlak oluşumu gözlenmemiş olan 0,01kg'lık yüklerde yapılan denemelerin ortalaması alınmıştır. H_v ve E değerlerinin ortalaması çizelge 5.3'te belirtilmiştir.

5.4.1 Tempersiz camlar kırılma tokluğu hesaplamaları

Ek D'deki çizelgelerde belirtildiği gibi tempersiz camların c/a oranı 1-5kg arasında 2,5'den daha büyük değerler aldığı için Half-penny modele uyum gösterecektir. Tempersiz camların kırılma tokluğu hesaplanırken Half-penny model ile birlikte Curve Fitting modele ait olan formüller de kullanılmış ve hangi formülün en uygun değeri verdiği araştırılmıştır.

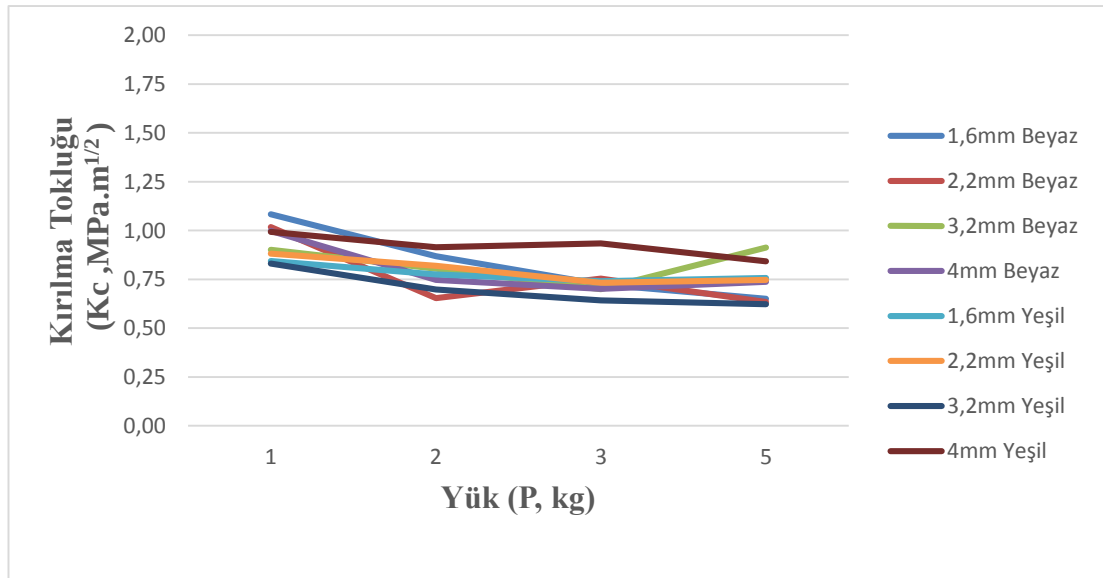
5.4.1.1 Half-penny modele göre kırılma tokluğu hesaplamaları

Bölüm 3’te açıklanan Half-penny yöntemine ait 4 formül belirlenmiş ve her bir formül için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmıştır.

Öncelikle Half-penny modeline ait $Kc=0.0752\frac{P}{c^{3/2}}$ formülü göz önüne alınarak kırılma tokluğu hesaplamaları yapılmıştır. $Kc=0.0752\frac{P}{c^{3/2}}$ formülüne göre yapılan hesaplamalar şekil 5.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 : $Kc=0.0752\frac{P}{c^{3/2}}$ formülüne göre yapılmış olan kırılma tokluğu hesaplamaları.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz	1	1,08	1,02	0,9	1,00
	2	0,87	0,65	0,8	0,75
	3	0,72	0,75	0,7	0,7
	5	0,65	0,63	0,91	0,74
Yeşil	1	0,84	0,88	0,83	0,99
	2	0,77	0,82	0,7	0,92
	3	0,74	0,73	0,64	0,93
	5	0,76	0,75	0,62	0,84



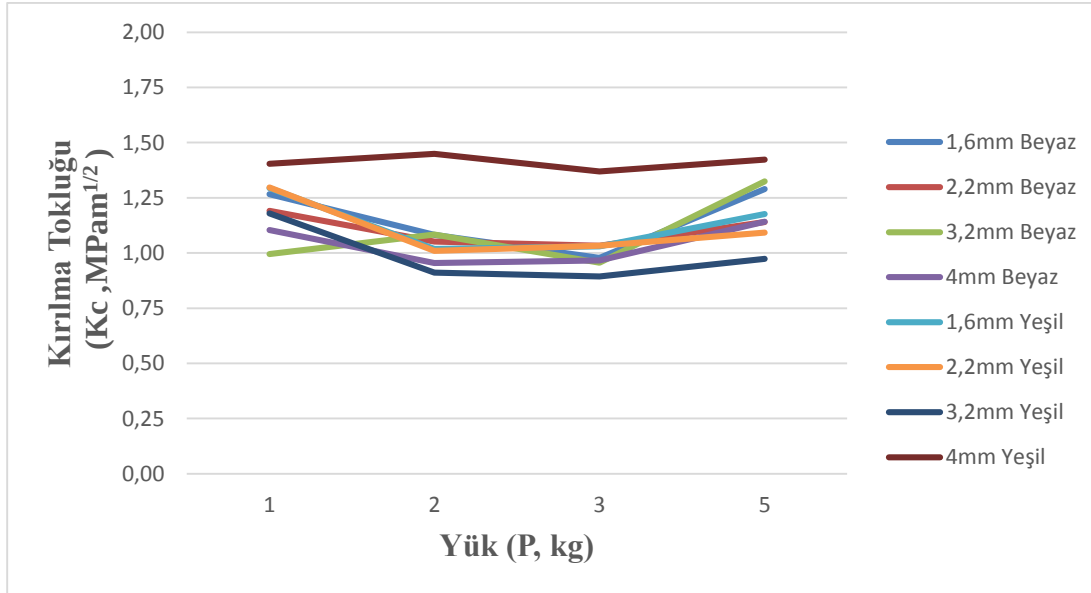
Şekil 5.9 : $Kc=0.0752\frac{P}{c^{3/2}}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Hesaplamalar uyarınca $P-c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama olarak $0,80 \pm 0,12 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

Kırılma tokluğu hesaplamalarında ikinci olarak $Kc=0.129\left(\frac{c}{a}\right)^{-3/2}\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülü kullanılmıştır. $Kc=0.129\left(\frac{c}{a}\right)^{-3/2}\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülüne göre yapılan hesaplamalar şekil 5.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 : $Kc=0.129\left(\frac{c}{a}\right)^{-3/2}\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülüne göre yapılmış olan kırılma tokluğu hesaplamaları.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz	1	1,27	1,19	0,99	1,10
	2	1,08	1,05	1,08	0,96
	3	0,98	1,03	0,96	0,97
	5	1,29	1,14	1,32	1,14
Yeşil	1	1,29	1,30	1,18	1,40
	2	1,02	1,01	0,91	1,45
	3	1,03	1,03	0,89	1,37
	5	1,18	1,09	0,97	1,42



Şekil 5.10 : $Kc=0.129\left(\frac{c}{a}\right)^{-3/2}\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

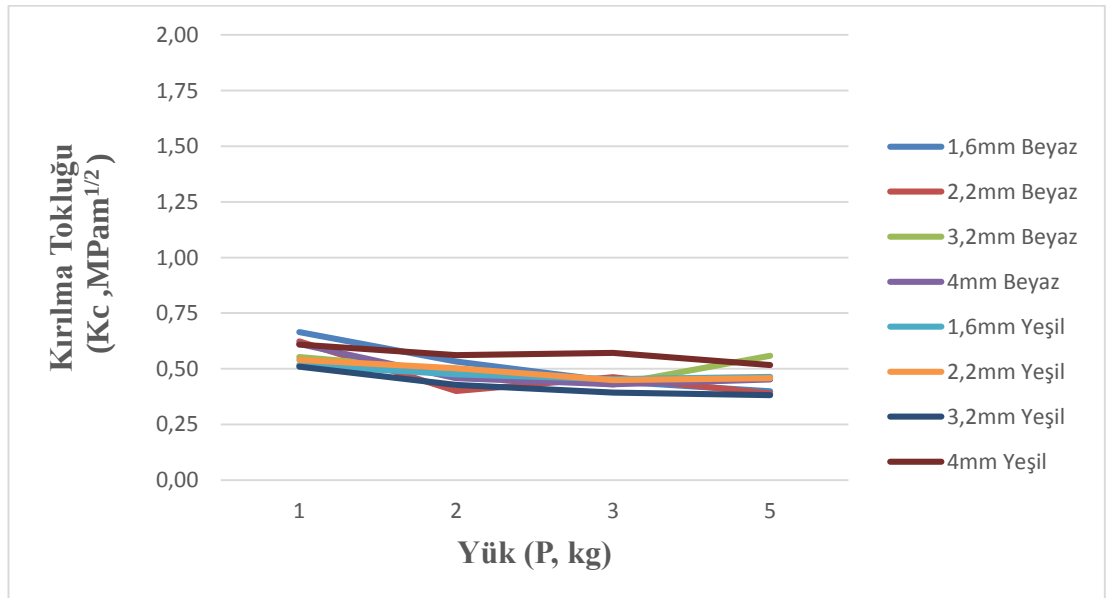
Hesaplamalar uyarınca $P \cdot c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama $1,12 \pm 0,15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

Kırılma tokluğu hesapları üçüncü olarak $Kc = 0.0139 \left(\frac{E}{Hv} \right)^{1/2}$ formülü kullanılmıştır.

$Kc = 0.0139 \left(\frac{E}{Hv} \right)^{1/2} \left(\frac{P}{c^{3/2}} \right)$ formülüne göre yapılan hesaplamalar şekil 5.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.6 : $Kc = 0.0139 \left(\frac{E}{Hv} \right)^{1/2} \left(\frac{P}{c^{3/2}} \right)$ formülüne göre yapılmış olan kırılma tokluğu hesaplamaları.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz	1	0,66	0,62	0,55	0,61
	2	0,53	0,40	0,49	0,46
	3	0,44	0,46	0,43	0,43
	5	0,40	0,39	0,56	0,45
Yeşil	1	0,52	0,54	0,51	0,61
	2	0,47	0,50	0,43	0,56
	3	0,45	0,45	0,39	0,57
	5	0,46	0,46	0,38	0,52



Şekil 5.11 : $Kc = 0.0139 \left(\frac{E}{Hv} \right)^{1/2} \left(\frac{P}{c^{3/2}} \right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

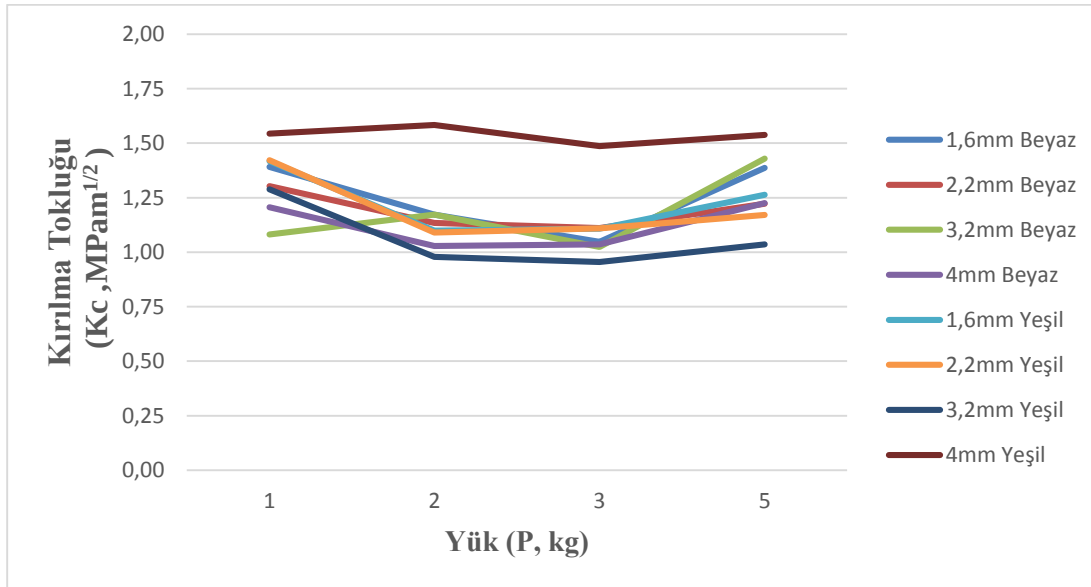
Hesaplamalar uyarınca $P\text{-}c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama $0,49\pm0,07 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

Kırılma tokluğu hesaplamalarında dördüncü olarak Half-Penny modele ait son formül olan $Kc=0.0782Hv\alpha^{1/2}\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{c}{a}\right)^{-1,56}$ formülü kullanılmıştır.

$Kc=0.0782Hv\alpha^{1/2}\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{c}{a}\right)^{-1,56}$ formülüne göre yapılan hesaplamalar şekil 5.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 : $Kc=0.0782Hv\alpha^{1/2}\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{c}{a}\right)^{-1,56}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz	1	1,39	1,30	1,08	1,21
	2	1,17	1,13	1,17	1,03
	3	1,05	1,11	1,02	1,04
	5	1,39	1,22	1,43	1,22
Yeşil	1	1,42	1,42	1,29	1,54
	2	1,10	1,09	0,98	1,58
	3	1,11	1,11	0,95	1,49
	5	1,26	1,17	1,04	1,54



Şekil 5.12 : $Kc=0.0782Hv\alpha^{1/2}\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{c}{a}\right)^{-1,56}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Hesaplamalar uyarınca $P-c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama $1,22 \pm 0,18 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

5.4.1.2 Curve Fitting modele göre kırılma tokluğu hesaplamaları

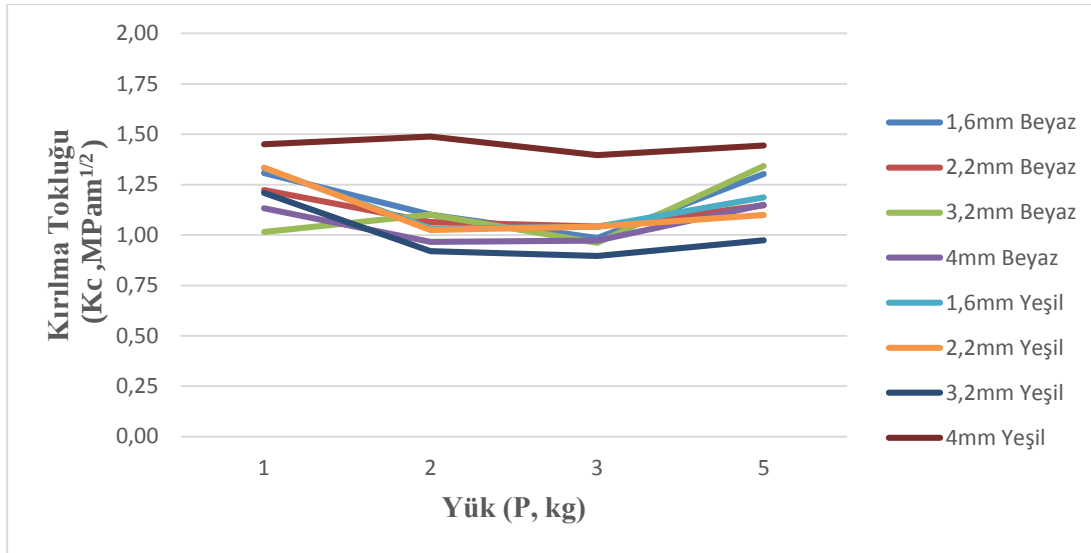
Tempersiz camların kırılma tokluğu hesaplamalarında ikinci yöntem olarak Curve Fitting yöntemi kullanılmıştır. Curve Fitting tekniğine göre kırılma tokluğu hesaplamalarında kullanılan formüller Bölüm 3'te gösterilmiş ve her bir formül için ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır.

İlk olarak $Kc = 0.142 \left(\frac{Hv}{E\Phi} \right)^{-2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi} \right) \left(\frac{c}{a} \right)^{-1.56}$ bağıntısı ile hesaplamalar yapılmıştır.

$Kc = 0.142 \left(\frac{Hv}{E\Phi} \right)^{-2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi} \right) \left(\frac{c}{a} \right)^{-1.56}$ formülüne göre yapılan hesaplamalar şekil 5.13'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8 : $Kc = 0.142 \left(\frac{Hv}{E\Phi} \right)^{-2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi} \right) \left(\frac{c}{a} \right)^{-1.56}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz	1	1,31	1,22	1,02	1,13
	2	1,10	1,07	1,10	0,97
	3	0,98	1,04	0,96	0,97
	5	1,30	1,15	1,34	1,15
Yeşil	1	1,33	1,34	1,21	1,45
	2	1,03	1,02	0,92	1,49
	3	1,04	1,04	0,90	1,40
	5	1,19	1,10	0,97	1,44



Şekil 5.13 : $Kc=0.142\left(\frac{Hv}{E\phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\phi}\right)\left(\frac{c}{a}\right)^{-1.56}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Hesaplamalar uyarınca $P-c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama $1,14\pm 0,16 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

İkinci olarak $Kc=0.4636\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{P}{a^{3/2}}\right)10^F$ bağıntısı ile hesaplamalar yapılmıştır.

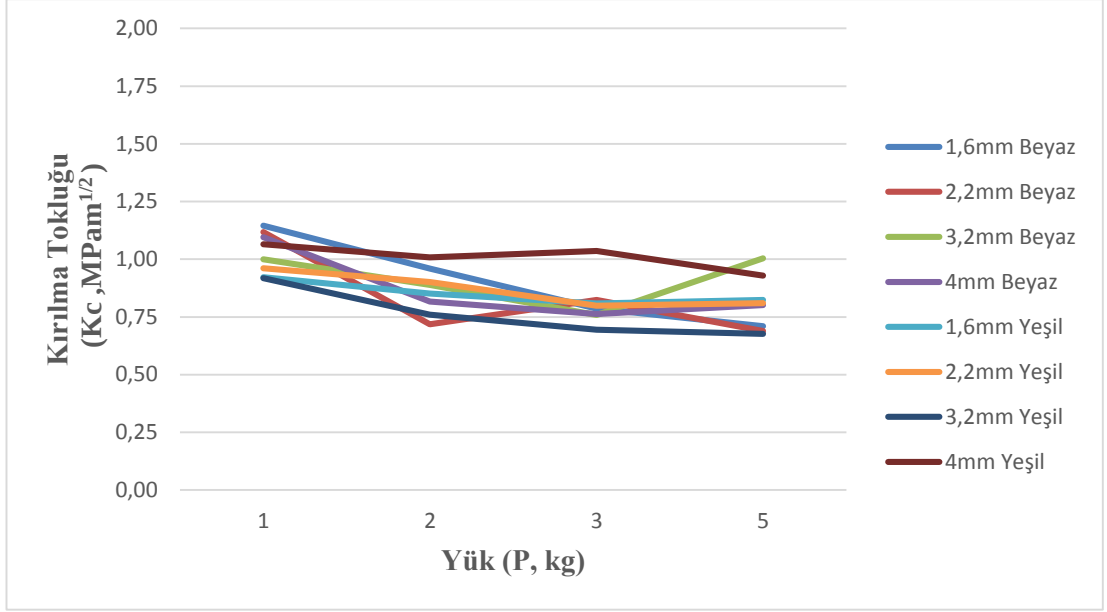
$$F=-1.59-0.34B-2.02B^2+11.23B^3-24.97B^4+16.32B^5 \quad (3.34)$$

$$B=\log\left(\frac{c}{a}\right) \quad (3.36)$$

$Kc=0.4636\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{P}{a^{3/2}}\right)10^F$ formülüne göre yapılan hesaplamalar şekil 5.14’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.9 : $Kc=0.4636\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{P}{a^{3/2}}\right)10^F$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz	1	1,15	1,12	1,00	1,10
	2	0,96	0,72	0,89	0,82
	3	0,79	0,82	0,76	0,76
	5	0,71	0,69	1,00	0,80
Yeşil	1	0,92	0,96	0,92	1,07
	2	0,85	0,90	0,76	1,01
	3	0,81	0,80	0,69	1,04
	5	0,82	0,81	0,68	0,93



Şekil 5.14 : $Kc=0.4636\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{P}{a^{3/2}}\right)10^F$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar. Hesaplamalar uyarınca $P-c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama $0,87\pm0,13 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

Üçüncü olarak $Kc=H_v a^{1/2}\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}10^y$ bağıntısı ile hesaplamalar yapılmıştır.

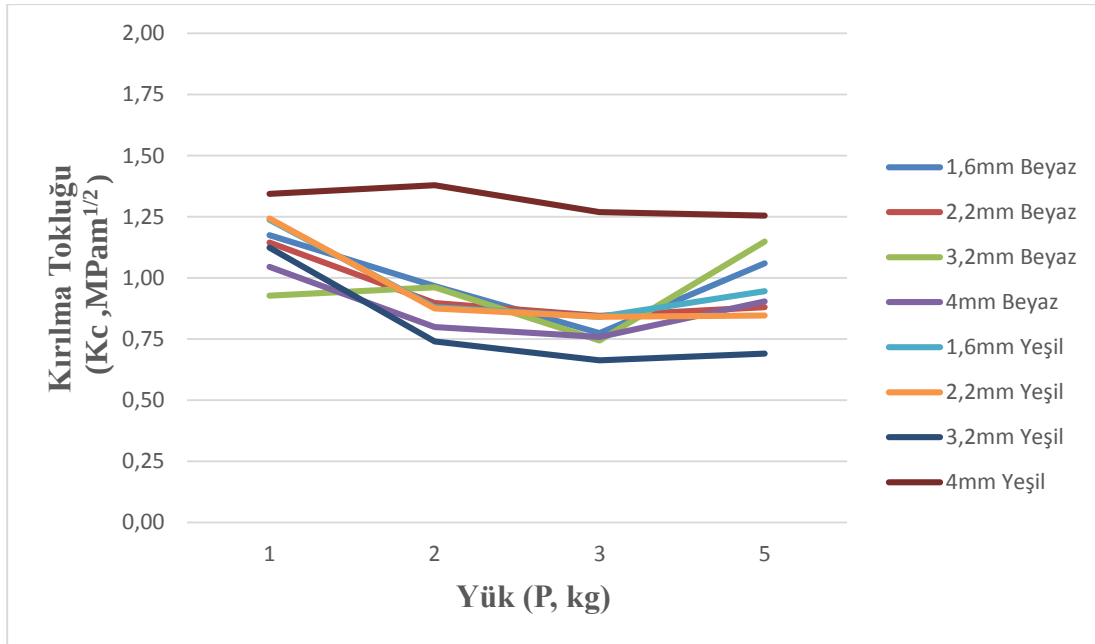
$$y=-1.59-0.34X-2.02X^2+11.23X^3-24.97X^4+15.32X^5 \quad (3.35)$$

$$X=\log\left(\frac{c}{a}\right) \quad (3.36)$$

$Kc=H_v a^{1/2}\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}10^y$ formülüne göre yapılan hesaplamalar şekil 5.15’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.10 : $Kc=H_v a^{1/2}\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}10^y$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz	1	1,17	1,14	0,93	1,05
	2	0,97	0,90	0,96	0,80
	3	0,77	0,85	0,74	0,76
	5	1,06	0,88	1,15	0,90
Yeşil	1	1,24	1,24	1,12	1,34
	2	0,88	0,88	0,74	1,38
	3	0,84	0,84	0,66	1,27
	5	0,95	0,85	0,69	1,26



Şekil 5.15 : $Kc = H_v a^{1/2} \left(\frac{E}{Hv} \right)^{2/5} 10^y$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Hesaplamalar uyarınca $P-c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama $0,97 \pm 0,20 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

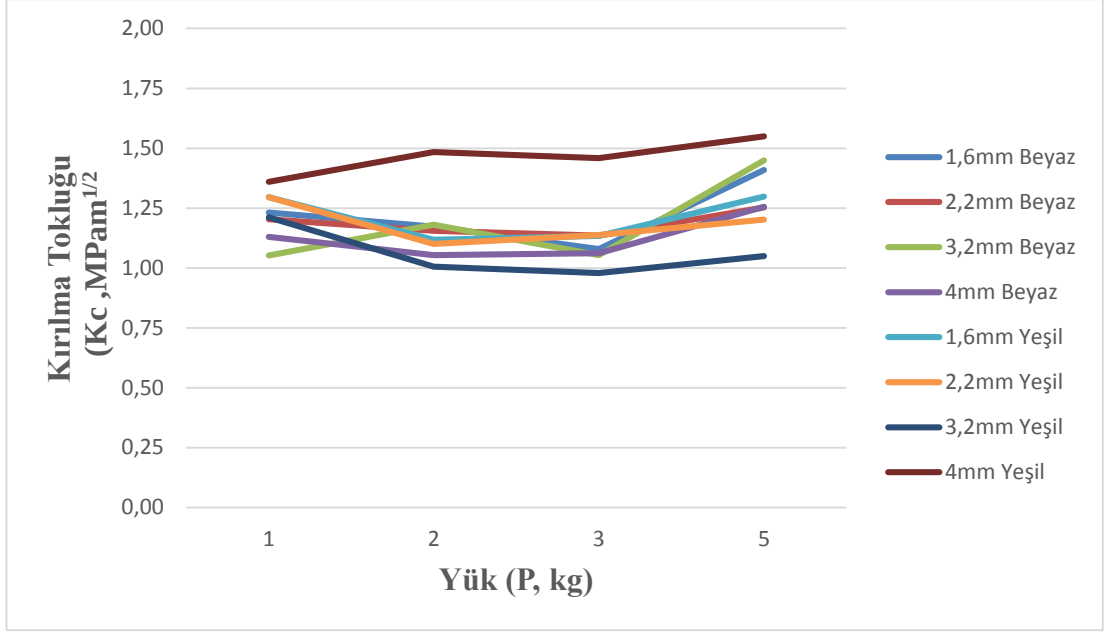
Curve Fitting yöntemine ait dördüncü ve son formül olarak

$Kc = 0.055 \log \left(8.4 \frac{a}{c} \right) \left(\frac{Hv}{E\Phi} \right)^{2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi} \right)$ formülü ile hesaplamalar yapılmıştır.

$Kc = 0.055 \log \left(8.4 \frac{a}{c} \right) \left(\frac{Hv}{E\Phi} \right)^{-2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi} \right)$ formülüne göre yapılan hesaplamalar şekil 5.16’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.11 : $Kc = 0.055 \log \left(8.4 \frac{a}{c} \right) \left(\frac{Hv}{E\Phi} \right)^{-2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi} \right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz	1	1,23	1,20	1,05	1,13
	2	1,17	1,15	1,18	1,05
	3	1,08	1,13	1,05	1,06
	5	1,41	1,25	1,45	1,26
Yeşil	1	1,30	1,29	1,21	1,36
	2	1,12	1,10	1,01	1,48
	3	1,13	1,14	0,98	1,46
	5	1,30	1,20	1,05	1,55



Şekil 5.16 : $Kc=0.055\log\left(8.4\frac{a}{c}\right)\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Hesaplamalar uyarınca $P\text{-}c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formünl ortalama $1,20\pm0,14 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

Tempersiz camlar için yapılmış olan tüm kırılma tokluğu hesaplamaları çizelge 5.12’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.12 : Tempersiz camlar için yapılmış olan hesaplamaların özet tablosu.

Teknik	Formül No	Kc (Mpa.m ^{1/2})
Half-Penny Model	1	0,80±0,12
	2	1,12±0,15
	3	0,49±0,07
	4	1,22±0,18
Curve Fitting Model	1	1,14±0,16
	2	0,87±0,13
	3	0,97±0,20
	4	1,20±0,14

Literatürde soda-silika camlar için kırılma tokluğu değerleri 0,6-0,9MPa m^{1/2} [33] olarak gösterilmektedir. Sonuç olarak Half-penny modele ait olan $Kc=0.0752\frac{P}{c^{3/2}}$

formülü ile Curve Fitting tekniğine ait $K_c = H_v \alpha^{1/2} \left(\frac{E}{H_v} \right)^{2/5} 10^y$ formüllerinin literatürde belirtilmiş olan değerlerine en yakınsak sonuçları vermiş olduğu görülmektedir.

5.4.2 Temperli camlar kırılma tokluğu hesaplamaları

Ek D'deki çizelgelerde belirtildiği gibi temperli camların c/a oranı 1-5kg arasında 2,5'den daha küçük değerler aldığı için Palmqvist modele uyum göstermektedir. Tempersiz camların kırılma tokluğu hesaplanırken Palmqvist model ile birlikte Curve Fitting modele ait olan formüller de kullanılmış ve hangi formülün en uygun değeri verdiği araştırılmıştır.

5.4.2.1 Palmqvist modele göre kırılma tokluğu hesaplamaları

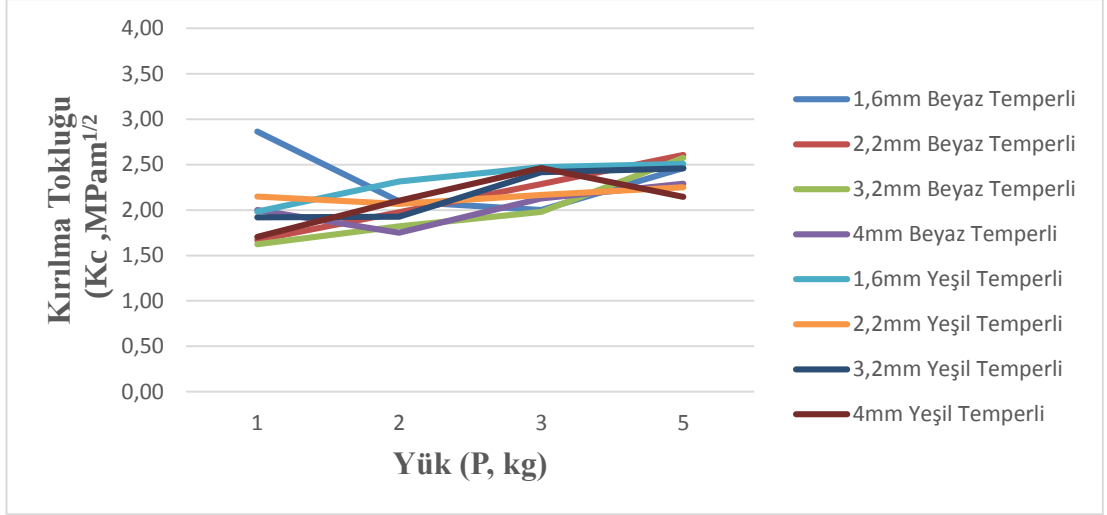
Bölüm 3'te açıklanan Palmqvist yöntemine ait 4 formül belirlenmiş ve her bir formül için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmıştır.

İlk formül olarak $K_c = 0.0913((Hva)(E/Hv)^{2/5}(l^{-1/2}))$ formülü ile hesaplamalar yapılmıştır.

$K_c = 0.0913((Hva)(E/Hv)^{2/5}(l^{-1/2}))$ formülü ile yapılmış olan hesaplamaların sonuçları şekil 5.17'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.13 : $K_c = 0.0913((Hva)(E/Hv)^{2/5}(l^{-1/2}))$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz Temperli	1	2,87	1,67	1,62	2,00
	2	2,10	1,98	1,82	1,75
	3	2,00	2,29	1,98	2,13
	5	2,46	2,61	2,58	2,29
Yeşil Temperli	1	1,98	2,15	1,92	1,70
	2	2,31	2,07	1,93	2,10
	3	2,48	2,17	2,42	2,46
	5	2,51	2,25	2,46	2,14



Şekil 5.17 : $Kc=0.0913((Hva)(E/Hv)^{2/5}(l^{-1/2})$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

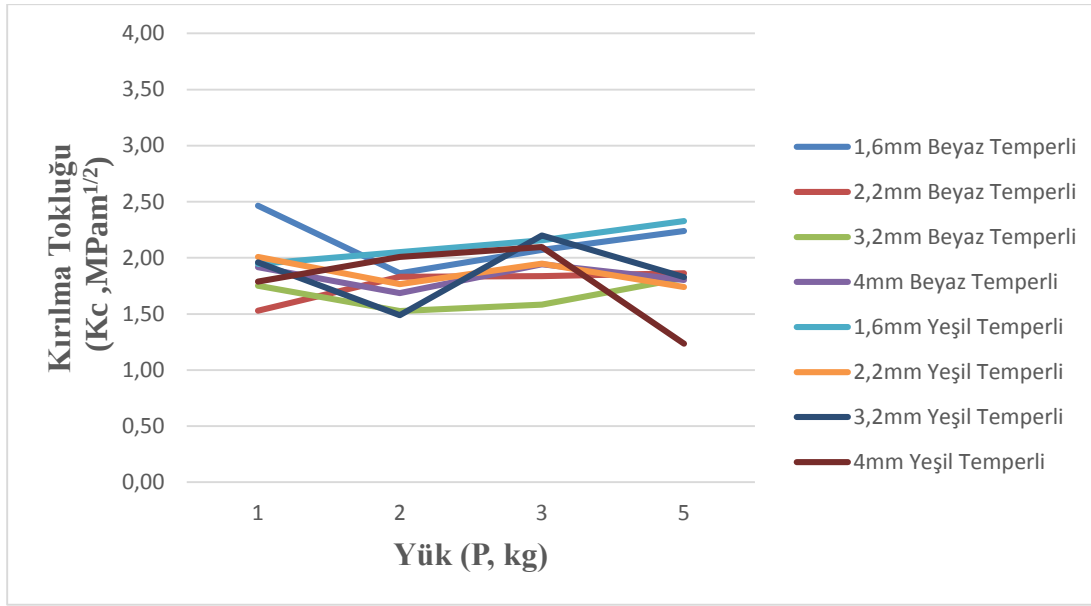
Hesaplamalar uyarınca $P-c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama $2,16 \pm 0,30 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

İkinci formül olarak $Kc=0.079 \frac{P}{a^{3/2}} \log(4.5 \frac{a}{c})$ formülü ile hesaplamalar yapılmıştır.

$Kc=0.079 \frac{P}{a^{3/2}} \log(4.5 \frac{a}{c})$ formülü ile yapılmış olan hesaplamaların sonuçları şekil 5.18’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.14 : $Kc=0.079 \frac{P}{a^{3/2}} \log(4.5 \frac{a}{c})$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz Temperli	1	2,47	1,53	1,75	1,92
	2	1,86	1,83	1,53	1,69
	3	2,07	1,84	1,58	1,94
	5	2,24	1,86	1,82	1,80
Yeşil Temperli	1	1,95	2,01	1,96	1,79
	2	2,05	1,77	1,49	2,01
	3	2,16	1,95	2,20	2,10
	5	2,33	1,74	1,83	1,23



Şekil 5.18 : $Kc=0,079\frac{P}{a^{3/2}}\log(4,5\frac{a}{c})$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

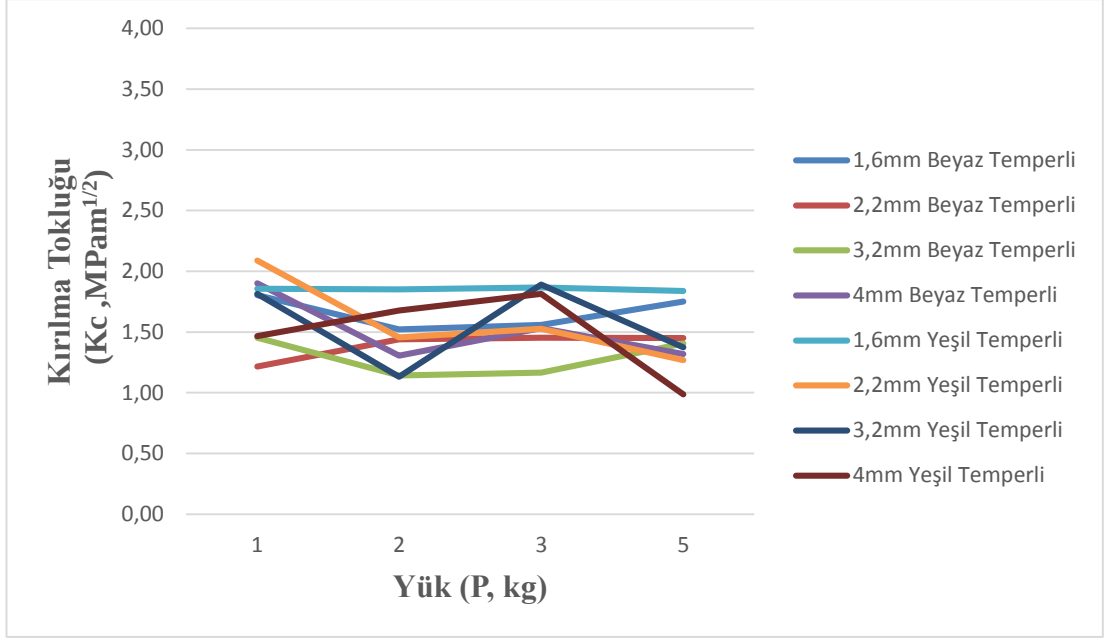
Hesaplamalar uyarınca $P-c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında formül ortalama $1,88\pm0,25 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

Üçüncü formül olarak $Kc=0,015(l/a)^{-1/2}(E/H)^{2/3}\left(\frac{P}{c^{3/2}}\right)$ formülü ile hesaplamalar yapılmıştır.

$Kc=0,015(l/a)^{-1/2}(E/H)^{2/3}\left(\frac{P}{c^{3/2}}\right)$ formülü ile yapılmış olan hesaplamaların sonuçları şekil 5.19’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.15 : $Kc=0,015(l/a)^{-1/2}(E/H)^{2/3}\left(\frac{P}{c^{3/2}}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz Temperli	1	1,80	1,21	1,45	1,90
	2	1,52	1,44	1,14	1,30
	3	1,56	1,45	1,17	1,53
	5	1,75	1,45	1,41	1,32
Yeşil Temperli	1	1,86	2,09	1,81	1,47
	2	1,85	1,46	1,13	1,68
	3	1,87	1,53	1,89	1,81
	5	1,84	1,27	1,37	0,99



Şekil 5.19 : $Kc=0,015(l/a)^{-1/2}(E/H)^{2/3} \left(P/c^{3/2} \right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Hesaplamalar uyarınca $P-c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama $1,54 \pm 0,27 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

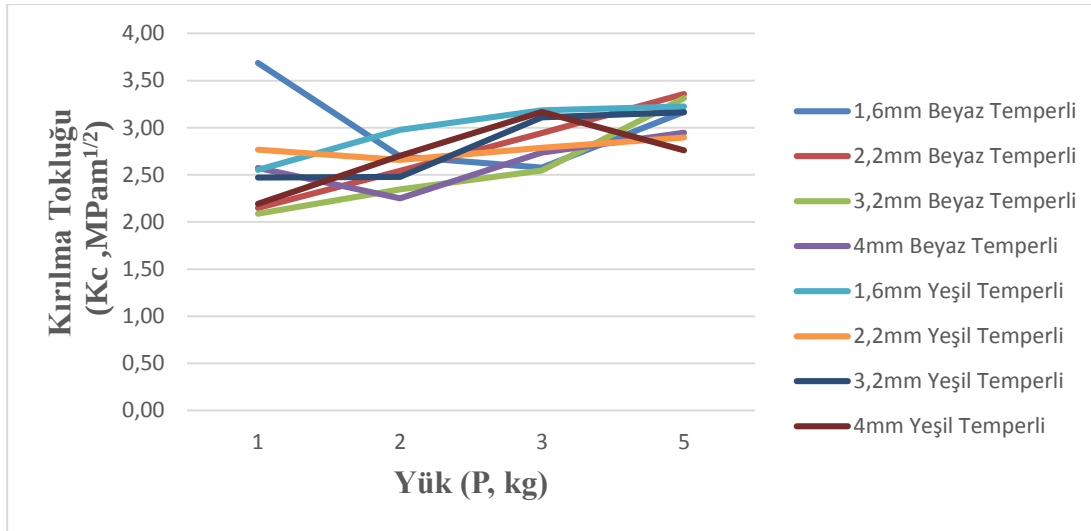
Palmqvist yöntemine ait dördüncü ve son formül olarak

$Kc=0.048 \left(\frac{l}{a} \right)^{-1/2} \left(\frac{Hv}{E\Phi} \right)^{-2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi} \right)$ formülü ile hesaplamalar yapılmıştır.

$Kc=0.048 \left(\frac{l}{a} \right)^{-1/2} \left(\frac{Hv}{E\Phi} \right)^{-2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi} \right)$ formülü ile yapılmış olan hesaplamaların sonuçları şekil 5.20’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.16 : $Kc=0.048 \left(\frac{l}{a} \right)^{-1/2} \left(\frac{Hv}{E\Phi} \right)^{-2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi} \right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz Temperli	1	3,69	2,15	2,09	2,57
	2	2,70	2,54	2,35	2,25
	3	2,58	2,94	2,55	2,74
	5	3,17	3,36	3,31	2,95
Yeşil Temperli	1	2,55	2,77	2,47	2,19
	2	2,98	2,66	2,48	2,70
	3	3,18	2,79	3,11	3,17
	5	3,23	2,90	3,16	2,76



Şekil 5.20 : $K_C=0.048\left(\frac{l}{a}\right)^{-1/2}\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar

Hesaplamalar uyarınca $P-c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama $2,78\pm0,38 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

5.4.2.2 Curve fitting tekniğe göre kırılma tokluğu hesaplamaları

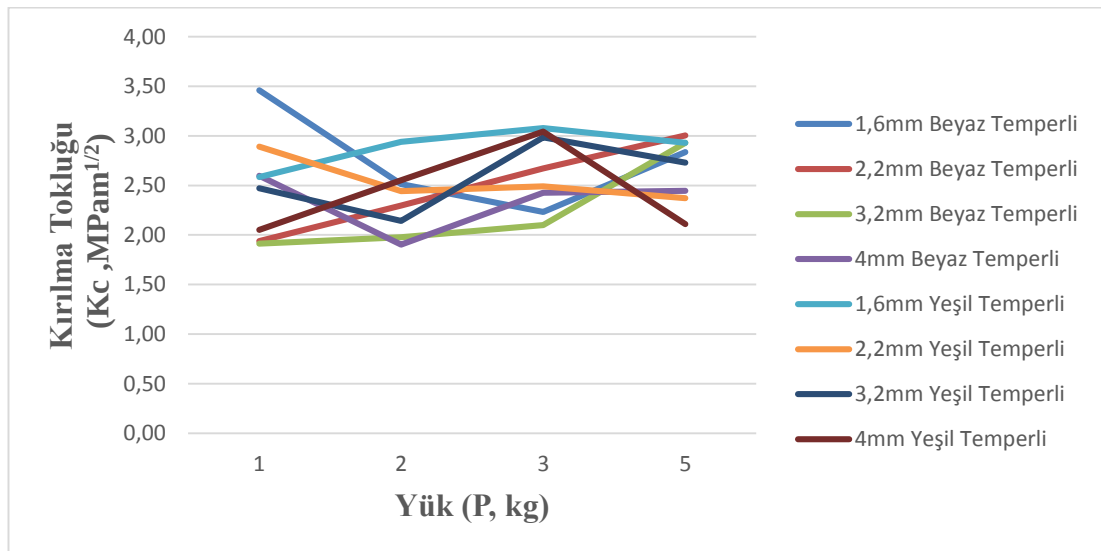
Temperli camların kırılma tokluğu hesaplamalarında ikinci yöntem olarak Curve Fitting yöntemi kullanılmıştır. Curve Fitting tekniğine göre kırılma tokluğu hesaplamalarında kullanılan formüller Bölüm 3'te gösterilmiş ve her bir formül için ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır.

İlk olarak $K_C=0.142\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)\left(\frac{c}{a}\right)^{-1.56}$ bağıntısı ile hesaplamalar yapılmıştır.

$K_C=0.142\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)\left(\frac{c}{a}\right)^{-1.56}$ formülüne göre yapılan hesaplamalar şekil 5.21'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.17 : $Kc=0.142\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)\left(\frac{c}{a}\right)^{-1.56}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz Temperli	1	3,46	1,94	1,91	2,60
	2	2,51	2,30	1,98	1,90
	3	2,23	2,67	2,10	2,43
	5	2,84	3,00	2,93	2,45
Yeşil Temperli	1	2,58	2,89	2,47	2,05
	2	2,94	2,44	2,14	2,55
	3	3,08	2,49	2,98	3,04
	5	2,93	2,37	2,73	2,11



Şekil 5.21 : $Kc=0.142\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)\left(\frac{c}{a}\right)^{-1.56}$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Hesaplamalar uyarınca $P-c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama $2,53\pm0,40 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

İkinci olarak $Kc=0.4636\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{P}{a^{3/2}}\right)10^F$ bağıntısı ile hesaplamalar yapılmıştır.

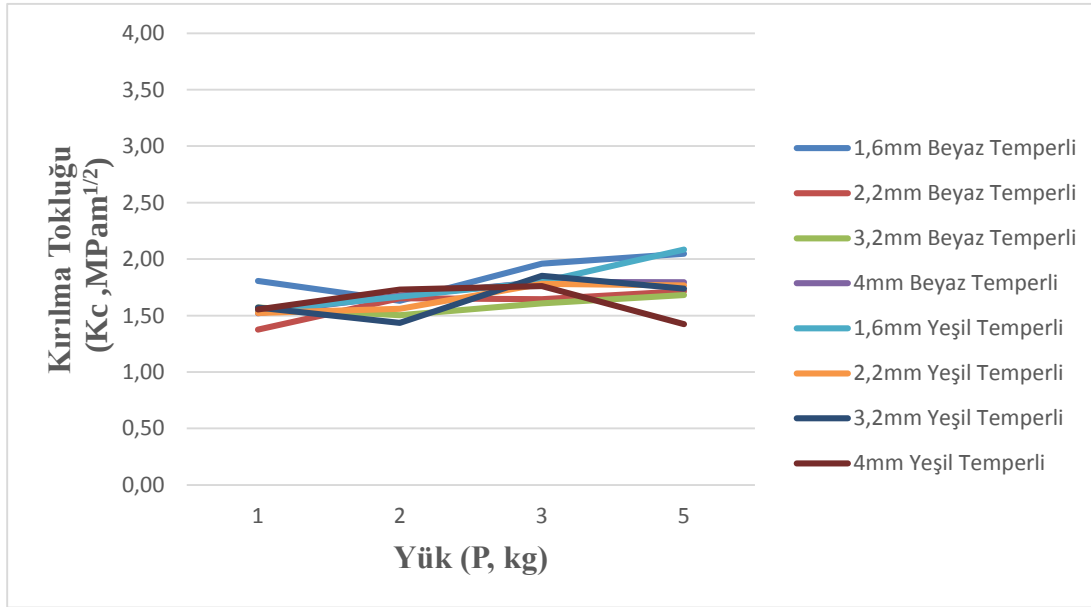
$$F=-1.59-0.34B-2.02B^2+11.23B^3-24.97B^4+16.32B^5 \quad (3.34)$$

$$B=\log\left(\frac{c}{a}\right) \quad (3.36)$$

$Kc=0.4636\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{P}{a^{3/2}}\right)10^F$ formülüne göre yapılan hesaplamalar şekil 5.22’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.18 : $Kc=0.4636\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{P}{a^{3/2}}\right)10^F$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz Temperli	1	1,81	1,38	1,57	1,52
	2	1,63	1,65	1,50	1,68
	3	1,96	1,65	1,61	1,80
	5	2,05	1,72	1,68	1,79
Yeşil Temperli	1	1,54	1,52	1,57	1,55
	2	1,67	1,56	1,43	1,73
	3	1,80	1,78	1,85	1,76
	5	2,09	1,77	1,74	1,42



Şekil 5.22 : $Kc=0.4636\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}\left(\frac{P}{a^{3/2}}\right)10^F$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Hesaplamalar uyarınca $P-c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama $1,68\pm 0,16 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

Üçüncü olarak $Kc=H_v a^{1/2}\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}10^y$ bağıntısı ile hesaplamalar yapılmıştır.

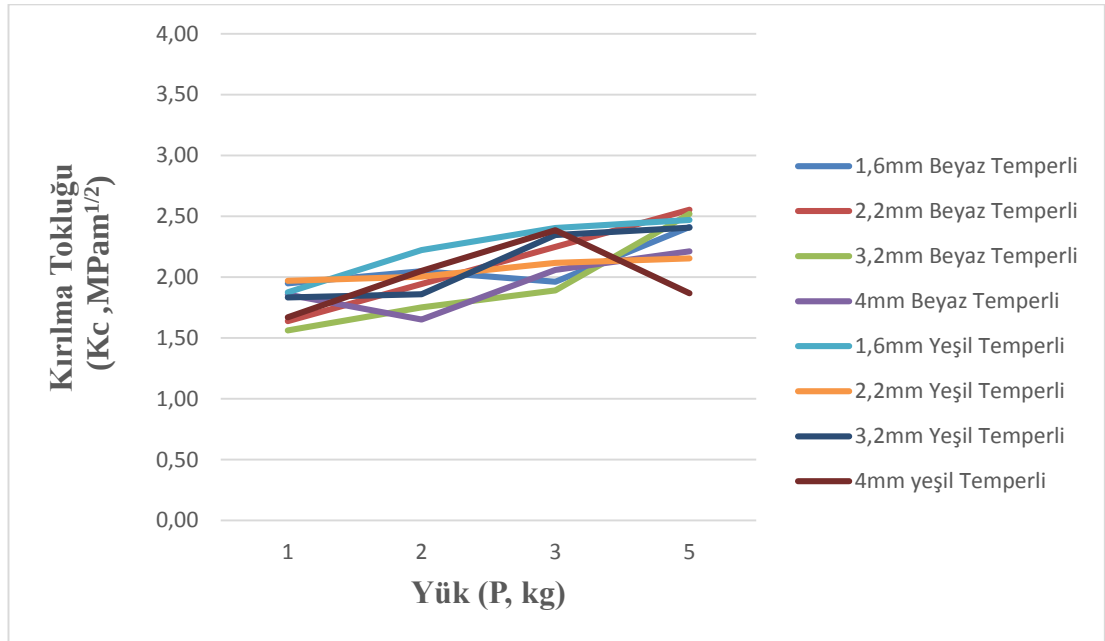
$$y=-1.59-0.34X-2.02X^2+11.23X^3-24.97X^4+15.32X^5 \quad (3.35)$$

$$X=\log\left(\frac{c}{a}\right) \quad (3.36)$$

$K_C = H_v \alpha^{1/2} \left(\frac{E}{H_v} \right)^{2/5} 10^y$ formülüne göre yapılan hesaplamalar şekil 5.23’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.19 : $K_C = H_v \alpha^{1/2} \left(\frac{E}{H_v} \right)^{2/5} 10^y$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz Temperli	1	1,95	1,64	1,56	1,85
	2	2,05	1,94	1,75	1,65
	3	1,96	2,25	1,89	2,06
	5	2,41	2,55	2,52	2,21
Yeşil Temperli	1	1,87	1,97	1,83	1,67
	2	2,22	2,00	1,86	2,05
	3	2,40	2,12	2,35	2,38
	5	2,47	2,15	2,40	1,87



Şekil 5.23 : $K_C = H_v \alpha^{1/2} \left(\frac{E}{H_v} \right)^{2/5} 10^y$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar

Hesaplamalar uyarınca $P \cdot c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama $2,05 \pm 0,27 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

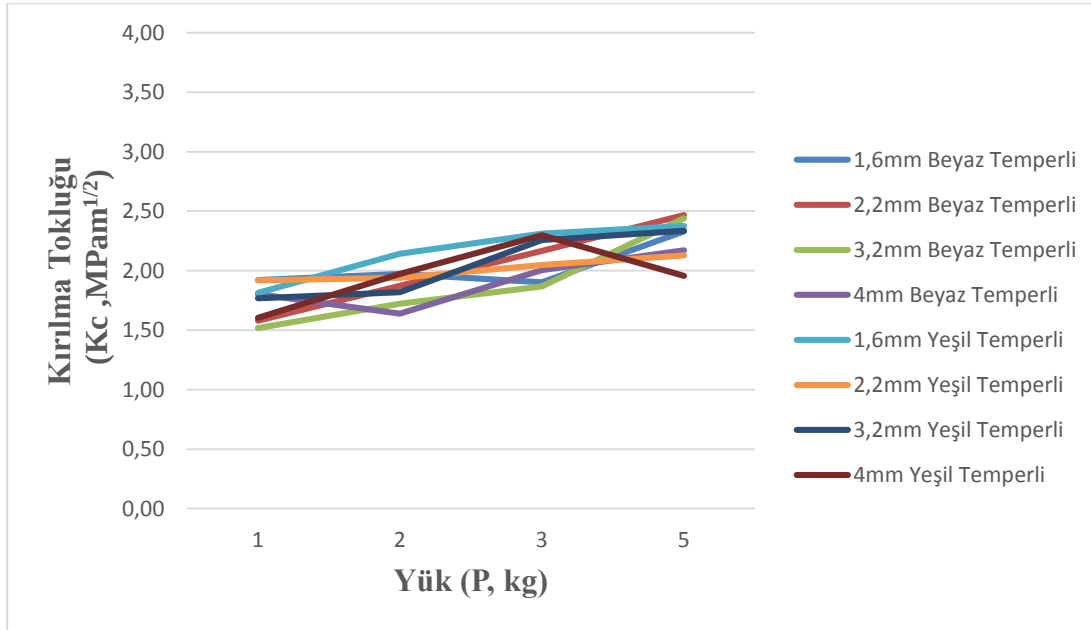
Curve Fitting yöntemine ait dördüncü ve son formül olarak

$K_C = 0.055 \log \left(8.4 \frac{a}{c} \right) \left(\frac{H_v}{E\Phi} \right)^{2/5} \left(\frac{H_v a^{1/2}}{\Phi} \right)$ formülü ile hesaplamalar yapılmıştır.

$Kc=0.055\log\left(8.4\frac{a}{c}\right)\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülüne göre yapılan hesaplamalar şekil 5.24'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.20 : $Kc=0.055\log\left(8.4\frac{a}{c}\right)\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz Temperli	1	1,92	1,58	1,52	1,80
	2	1,97	1,87	1,72	1,64
	3	1,90	2,17	1,87	2,00
	5	2,33	2,47	2,44	2,17
Yeşil Temperli	1	1,81	1,92	1,77	1,60
	2	2,14	1,94	1,82	1,97
	3	2,31	2,05	2,26	2,30
	5	2,38	2,13	2,33	1,96



Şekil 5.24 : $Kc=0.055\log\left(8.4\frac{a}{c}\right)\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formülü için yapılmış olan hesaplamalar.

Hesaplamalar uyarınca $P-c^{3/2}$ sabit olduğu 1-5kg aralığında konu formülün ortalama $2,00\pm 0,26 \text{ MPa.m}^{1/2}$ değerini verdiği görülmektedir.

Temperli camlar için yapılmış olan tüm kırılma tokluğu hesaplamaları çizelge 5.21’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.21 : Temperli camlar için yapılmış olan hesaplamaların özet tablosu.

Teknik	Formül	Kc (Mpa.m ^{1/2})
Palmqvist Model	1	2,16±0,30
	2	1,88±0,25
	3	1,54±0,27
	4	2,78±0,38
Curve Fitting Model	1	2,53±0,40
	2	1,68±0,16
	3	2,05±0,27
	4	2,00±0,26

Genel olarak değerlendirildiğinde temperli camlar için kırılma tokluğu değerleri literatürde temperli camlar için belirlenen kırılma tokluğu değeri olan 1,8-2,3MPam^{1/2} [34] değeri ile karşılaştırıldığında Palmqvist yöntemine ait $Kc=0.0913((Hva)(E/Hv)^{2/5}(l^{-1/2})$ ve $Kc=0.079\frac{P}{a^{3/2}}\log(4.5\frac{a}{c})$ formüller ile Curve Fitting yöntemine ait $Kc=H_v a^{1/2} \left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5} 10^y$ ve $Kc=0.055\log\left(8.4\frac{a}{c}\right) \left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5} \left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formüllerinin en yakınsak sonuçlar verdiği görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu projede temperli ve tempersiz camlarda indentasyon tekniği ile farklı formüllere göre kırılma tokluğu hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalarda elastisite modülü olarak Grindo-Sonic ultrasonik yöntemle belirlenen elastisite modülü değerlerinin ortalaması ile iz etrafında çatlak oluşturmayan yük altında belirlenen sertlik değerlerinin $Hv_{0,01}$ ortalaması kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- I. Tüm camlar için yük arttıkça vickers izi a ve çatlak boyutu c değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Beyaz ve yeşil camların uygulanan yüklere göre vickers izi ve çatlak boyutları açısından bir farklılıkları yoktur. Aynı şekilde beyaz temperli cam ve yeşil temperli camlarında uygulana yük karşısında yaklaşık aynı vickers izi a ve çatlak boyutu c değerine sahip oldukları görülmüştür. Bununla birlikte temperli camların a ve c değerleri tempersiz camların a ve c değerlerine göre daha küçük değerler aldığı görülmüştür.
- II. Yük arttıkça tüm camlarda c/a değeri artmaktadır. Yeşil ve beyaz camların c/a değerleri yaklaşık aynı değerleri verdiği gibi beyaz ve yeşil temperli camların c/a değerleri de aynı değerleri vermektedir. Rengin ve kalınlığın c/a değeri üzerinde etkisi yoktur. Bununla birlikte temperli camların c/a değeri tempersiz camların c/a değerinden daha düşük olduğu görülmüştür.
- III. Tempersiz camlarda c/a değerinin 0,2kg-0,3kg'de 2,5'ten küçük; 0,5kg-5kg arasında 2,5'den büyük olduğu görülmektedir. Hesaplamalarda c/a değeri baz olarak alındığından tempersiz camların $p/c^{3/2}$ değerinin sabit olduğu 1-5kg arasında 2,5 değerinden büyük olması sebebiyle half-penny modele uymaktadır. Literatürde soda-silika camlar için kırılma tokluğu değerleri 0,6-0,9MPa $m^{1/2}$ [31] olarak gösterilmektedir. Sonuç olarak Half-penny modele ait olan olan $Kc=0.0752\frac{P}{c^{3/2}}$ formülü ile Curve Fitting tekniğine ait $Kc=H_v\alpha^{1/2}\left(\frac{E}{H_v}\right)^{2/5}10^y$ formüllerinin literatürde belirtilmiş olan değerlere en yakınsak sonucu vermiş olduğu görülmektedir.

- IV. Temperli camların ise c/a değeri $p/c^{3/2}$ değerinin sabit olduğu 1-5kg arasında 2,5 değerinden küçük olması sebebiyle palmqvist modele uymaktadır. Palmqvist yöntemine ait olan $K_c=0.0913((Hva)(E/Hv)^{2/5}(l^{-1/2}))$ ve $K_c=0.079\frac{P}{a^{3/2}}\log(4.5\frac{a}{c})$ formülleri ile Curve Fitting yöntemine ait olan $K_c=H_v\alpha^{1/2}\left(\frac{E}{Hv}\right)^{2/5}10^y$ ve $K_c=0.055\log\left(8.4\frac{a}{c}\right)\left(\frac{Hv}{E\Phi}\right)^{-2/5}\left(\frac{Hva^{1/2}}{\Phi}\right)$ formüllerinin literatürde kırılma tokluğu değeri olarak belirtilmekte olan 1,8-2,3MPam^{1/2} [32] değerlerine en yakınsak sonuçları verdiği görülmüştür.
- V. Tez çalışması kapsamında incelenmiş olan camların elatisite modülü temperli ve tempersiz camlar için yaklaşık aynı değerleri verdiği görülmüştür. Camdaki renk değişimi, kalınlık ve temperleme işleminin soda silika cam elatisite modülünün üzerine belirgin etkisinin olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte tez kapsamında hesaplanmış olan elatisite modülünün 80,08GPa literatürde belirtilmekte olan elatisite modülünden 70GPa [31] daha büyük sonuç verdiği görülmüştür.
- VI. Sertlik değerleri temperli ve tempersiz beyaz ve yeşil camlar için ortalamada yaklaşık aynı değerleri verdiği görülmektedir. Sertlik değerleri 2kg yüke kadar genellikle artmış fakat daha sonra uygulanan yükle birlikte sertlik değeri düşmüştür. Kalınlığın, renk değişiminin ve temperleme işleminin sertlik değeri üzerine belirgin etkisi görülmemiştir. Bununla birlikte tez kapsamında incelenmiş olan camlar için hesaplanmış olan sertlik değerinin 5,93GPa literatürde soda-silika cam için belirtilen değer olan 5,5GPa'a yakınsak sonuç verdiği görülmüştür. İndentasyon etrafında çatlak oluşumunun gözlenmediği 0,01kg yükle yapılan sertlik ölçümlerinde ise sertlik değerinin 7,66GPa literatürde belirtilen değer olan 5,5GPa [31] değerinden yükek olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **Kocabağ D.**, 2002. Cam Kimyası, Özellikleri, Uygulaması, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [2] <http://kisi.deu.edu.tr/kamile.tosun/13._Camlar.pdf>, erişim tarihi 15.11.2015.
- [3] <<http://www.benbest.com/cryonics/cooling.html>>, erişim tarihi 15.11.2015.
- [4] **Akçakaya R.**, 1992, Camın Mekanik Özellikleri, Teknik Bülten (Temel Cam Bilimi eki)
- [5] **Bourhis E., L.**, 2007, Glass Mechanics and Technology, Wiley VCH,
- [6] **Harper C., A.**, 2001, Handbook of Ceramics, Glasses and Diamonds, sayfa 6.9, McGraw-Hill
- [7] **Dieter G., E.**, Mechanical Metallurgy, McGraw- Hill, sayfa 241-242
- [8] <http://www2.cbu.edu.tr/salim.sahin/makine/malzeme_secimi/dersnotlari/4_ders.pdf>, erişim tarihi 12.01.2015.
- [9] **Gdoutos E., E.**, 2005, Fracture Mechanisc and Introduction, Second Edition, Springer, Xanthi
- [10] **Yayla P.**, 2007, Kırılma Mekaniği, Çağlayan Kitabevi, İstanbul
- [11] **Janssen M., Zuidema J., Wanhill R.**, 2002, Fracture Mechanics, Second Edition, Spon Press
- [12] **Sorucu A.**, 2007, Orthotropic Malzemelerde Çatlak İlerlemesi ve Kırılma Tokluğu Tayini, İzmir
- [13] **Hosford W., F.**, 2005, Mechanical Behavior of Materials, Cambridge University Press, New York
- [14] **Aran A.**, 1981, Kırılma Mekaniğine Giriş Seminer Notları, TÜBİTAK, Gebze
- [15] **Erdoğan F.**, 2000, Fracture Mechanics, International Journal of Solids and Structures, Pergamon
- [16] **Özdemir A.**, 2006, Seramik Malzemelerin Kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Teorik Olarak Belirlenmesi, İzmir
- [17] **ASTM**, 2003, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, E-1820-01, USA
- [18] <http://dauskardt.stanford.edu/robert_hohlfelder/Techniques.html>, erişim tarihi 01.04.2015.

- [19] **Moraisa, J.J.L., De Mourab M.F.S.F., Pereira F.A.M., Xavier J., Dourado N., Dias M.I.R., Azevedo J.M.T.,** 2010, The Double Cantilever Beam Test Applied to Mode I Fracture Characterization of Cortical Bone Tissue, Elsevier
- [20] **Moradkhani A., Baharvandi H., Tajdari M., Latifi H., Martikainen J.,** 2012, Determination of Fracture Toughness Using the Area of Micro-crack Tracks Left in Brittle Materials by Vickers Indentation Test, Journal of Advanced Ceramic
- [21] **Ponton C.,B., Rawlings R., D.,** 1989, Vickers Indentation Fracture Toughness Test Part 1 Review of Literature and Formulation of Standardised Indentation Toughness Equations, Materials Science of Technology, vol.5
- [22] **Evans A.G., Wilshaw T., R.,** 1976, Quasi-static Solid Particle Damage in Brittle Solids – I. Observations, Analysis and Implications, Acta Metall
- [23] **Niihara K.,** 1983, A Fracture Mechanics Analysis of Indentation Induced Palmqvist Crack in Ceramics, J. Mater. Sci. Lett.
- [24] **Evans A., G., Charles E., A.,** 1976, Fracture Toughness Determinations by Indentation, J. Am. Ceram. Soc.
- [25] **Niihara K., Morena R., Hasselman D., P., H.,** 1982, Evaluation of K_{Ic} of Brittle Solids by the Indentation Method with Low Crack to Indent Ratios, J. Mater. Sci. Lett.
- [26] **Lawn B., R., Evans A., G., Marshall D., B.,** 1980, Elastic/plastic Indentation Damage in Ceramics: the Median-radial Crack System, J. Am. Ceram. Soc.
- [27] **Lankford J.,** 1982, Indentation Microfracture in Palmqvist Crack Regime: Implications for Fracture Toughness Evaluation by the Indentation Method, J. Mater. Sci. Lett.
- [28] **Evans A., G.,** 1979, Fracture Toughness: the Role of Indentation Techniques. In Fracture Mechanics Applied to Brittle Materials, ASTM STP 678, West Conshohocken
- [29] **Blendell J., E.,** 1979, The Origins of Internal Stresses in Polycrystalline Alumina and Their Effects on Mechanical Properties, PhD Thesis, MTI Press, Cambridge
- [30] **Deliormanlı A., Ş., Güden M.,** 2005, Microhardness and Fracture Toughness of Dental Materials by Indentation Method, Wiley, İzmir
- [31] **Anstis, G.,R., Chanticul, P., Lawn, B.,R., Marshall, D.,B.,** 1981, A critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I, Direct Crack Measurement, Journal of American Ceramic Society, Vol. 64, No.9
- [32] **Oliver, W.,C., Pharr, G.,M.,** 2004, Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology, J. Mater. Res., Vol. 19, No. 1,

- [33] **Petit F., Sartieaux A., C., Gonon M., Cambier F.**, 2007, Fracture Toughness and Residual Stress Measurements in Tempered Glass by Hertzian Indentation, *Acta Materialia*, p2770
- [34] **Roberts, S.G., Lawrence, C.W., Bistrat, Y., and Warren, P.D.**, 1999, Determination of Surface Residual Stresses in Brittle Materials by Hertzian Indentation: Theory and Experiment, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 82, no. 7, pp. 1809–1818.

EKLER

Ek A

Çizelge A.1 : Tempersiz cam Vickers iz köşegen uzunluğu sonuçları

Cam Kalınlığı (mm)	1,60		2,20		3,20		4,00	
Yük (kg)	a (µm) beyaz	a (µm) yeşil	a (µm) beyaz	a (µm) yeşil	a (µm) beyaz	a (µm) yeşil	a (µm) beyaz	a (µm) yeşil
0,2	13,59	13,10	12,84	12,35	12,80	13,17	12,46	11,80
0,3	14,20	15,45	14,04	14,69	13,53	16,51	14,31	16,12
0,5	18,08	19,58	16,50	20,04	18,63	20,88	18,69	19,35
1	25,80	29,51	25,85	28,96	25,09	28,43	25,07	28,39
2	37,73	38,77	43,47	37,42	39,24	38,60	38,29	42,44
3	48,08	48,83	48,61	49,10	48,37	48,80	48,46	50,13
5	74,88	66,66	71,65	64,56	64,41	66,76	66,50	69,52

Çizelge A.2 : Tempersiz cam çatlak uzunluğu sonuçları

Cam Kalınlığı (mm)	1,60		2,20		3,20		4,00	
Yük (kg)	c (µm) beyaz	c (µm) yeşil	c (µm) beyaz	c (µm) yeşil	c (µm) beyaz	c (µm) yeşil	c (µm) beyaz	c (µm) yeşil
0,2	30,16	29,11	27,72	19,21	23,46	29,00	29,48	23,13
0,3	36,81	40,44	29,87	31,65	37,65	39,16	27,91	31,89
0,5	52,36	57,43	40,26	53,01	56,12	57,99	44,75	46,12
1	79,55	91,47	80,72	89,01	87,53	92,39	82,14	82,07
2	142,82	153,77	175,95	148,25	149,96	164,76	157,98	137,55
3	210,79	208,62	207,52	209,11	215,74	228,28	215,20	177,85
5	318,95	288,16	324,74	290,31	254,45	327,96	293,95	268,32

Ek B

Çizelge B.1 : Temperli cam Vickers iz köşegen uzunluğu sonuçları

Cam kalınlığı (mm)	1,60		2,20		3,20		4,00	
Yük (kg)	a (μm) beyaz	a (μm) yeşil	a (μm) beyaz	a (μm) yeşil	a (μm) beyaz	a (μm) yeşil	a (μm) beyaz	a (μm) yeşil
0,2	10,58	12,94	12,53	12,94	12,39	12,42	13,39	12,13
0,3	14,02	15,38	14,29	15,29	25,23	18,08	15,56	15,56
0,5	18,52	20,38	19,30	19,91	17,00	20,49	19,64	19,68
1	25,68	27,33	27,24	28,12	24,78	26,77	27,33	25,87
2	39,56	40,47	38,19	39,94	38,19	40,34	35,10	38,33
3	43,28	49,64	50,44	47,05	47,23	48,35	46,20	49,98
5	60,45	60,58	68,20	62,00	68,27	65,75	62,26	65,26

Çizelge B.2 : Temperli cam çatlak uzunluğu sonuçları

Cam Kalınlığı (mm)	1,60		2,20		3,20		4,00	
Yük (kg)	c (μm) beyaz	c (μm) yeşil	c (μm) beyaz	c (μm) yeşil	c (μm) beyaz	c (μm) yeşil	c (μm) beyaz	c (μm) yeşil
0,2	16,48	15,89	12,53	16,20	26,08	20,49	21,08	22,58
0,3	22,77	22,52	19,60	21,46	43,30	22,15	27,12	27,73
0,5	30,68	31,32	30,53	28,53	45,26	35,13	39,19	36,96
1	45,94	53,86	64,78	52,03	58,53	53,86	54,66	58,01
2	89,45	83,17	90,39	93,58	100,23	102,33	93,26	84,99
3	108,53	105,85	118,50	113,62	127,20	104,57	113,72	108,09
5	145,19	142,06	163,92	168,21	167,08	165,71	165,54	203,18

Ek C

Çizelge C.1 : Tempersiz cam Vickers sertlik değerleri (kgf/mm²)

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz	0,2	506,46	569,74	566,63	597,86
	0,3	690,56	714,92	762,79	683,28
	0,5	713,42	854,60	672,65	665,12
	1	696,20	694,06	737,67	739,47
	2	652,14	502,54	602,19	633,84
	3	602,25	590,90	594,30	595,17
	5	418,64	452,04	561,67	525,20
Yeşil	0,2	546,20	615,38	535,20	688,88
	0,3	584,65	646,42	516,00	542,89
	0,5	606,29	579,58	532,34	620,01
	1	535,49	555,61	577,42	578,30
	2	618,34	668,38	625,34	517,74
	3	583,30	582,15	584,78	555,04
	5	522,71	557,26	523,16	485,58

Çizelge C.2 : Temperli cam Vickers sertlik değerleri (kgf/mm²)

Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00
Cam Türü	Yük (kg)				
Beyaz Temperli	0,2	875,48	591,12	621,54	517,50
	0,3	708,00	681,67	263,50	575,54
	0,5	677,21	623,10	808,42	601,81
	1	706,04	626,64	759,15	621,44
	2	604,93	636,08	640,09	760,06
	3	743,70	548,11	636,64	652,48
	5	636,60	511,18	498,94	597,96
Yeşil Temperli	0,2	556,96	555,95	601,05	634,92
	0,3	588,50	595,95	433,01	574,81
	0,5	558,34	585,03	552,24	600,47
	1	620,92	586,37	650,02	707,03
	2	567,69	582,10	584,49	639,77
	3	564,42	628,69	595,77	557,03
	5	632,97	604,39	538,91	545,25

Ek D**Çizelge D.1 : Tempersiz cam c/a oranları**

Cam Türü		Beyaz Cam c/a				Yeşil Cam c/a			
Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00	1,60	2,20	3,20	4,00
Yük (kg)	0,2	2,22	2,17	1,84	2,37	2,23	1,56	2,20	1,96
	0,3	2,59	2,13	2,79	1,95	2,62	2,16	2,38	1,98
	0,5	2,90	2,44	3,02	2,40	2,94	2,65	2,78	2,38
	1	3,09	3,12	3,49	3,29	3,11	3,08	3,26	2,90
	2	3,79	4,03	3,82	4,12	3,97	3,98	4,27	3,25
	3	4,39	4,26	4,46	4,45	4,27	4,27	4,68	3,55
	5	4,29	4,53	3,95	4,42	4,32	4,50	4,92	3,87

Çizelge D.2 : Temperli cam c/a oranları

Cam Türü		Beyaz Temperli Cam c/a				Yeşil Temperli Cam c/a			
Cam Kalınlığı (mm)		1,60	2,20	3,20	4,00	1,60	2,20	3,20	4,00
Yük (kg)	0,2	1,56	1,00	2,12	1,58	1,23	1,25	1,65	1,86
	0,3	1,62	1,37	1,82	1,75	1,47	1,40	1,20	1,78
	0,5	1,66	1,58	2,66	2,00	1,54	1,43	1,71	1,88
	1	1,80	2,37	2,38	2,00	1,97	1,85	2,01	2,25
	2	2,27	2,37	2,64	2,68	2,06	2,34	2,56	2,22
	3	2,51	2,35	2,71	2,47	2,13	2,42	2,17	2,16
	5	2,41	2,42	2,45	2,66	2,35	2,72	2,52	3,12

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Halil Kemal KÜLCÜ
Doğum Tarihi ve Yeri : 20-07-1985 Giresun
E-posta : kemalkulcu@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012- İşletme Mühendisi- Şişecam Trakya Cam Sanayii A.Ş. Otocam Fabrikası

